

# Science City Hamburg Bahrenfeld

## Erschütterungsuntersuchung S32



## Prognose der Einwirkungen einer S-Bahn auf den Forschungscampus Bahrenfeld (Hauptgutachten)

Bericht-Nr.: 40-10714-01-D6 (Rev.A)

Datum: 25.01.2022

Projektbezeichnung	Science City HH Erschütterungsuntersuchung S32				
Projekt-Nr.	40-10714-01				
Bericht-Nr.	40-10714-01-D6 (Rev.A)				
Inhalt	Erschütterungs- und Magnetfeldimmissionen durch die S-Bahn auf den Forschungscampus Bahrenfeld				
Seitenzahl	439 Seiten				
Berichtsdatum	25.01.2022				
Auftraggeber	Science City Hamburg Bahrenfeld GmbH c/o HafenCity Hamburg GmbH Osakaallee 11 20457 Hamburg				
Auftragnehmer	Baudynamik Heiland & Mistler GmbH, Bergstraße 174, 44807 Bochum Tel: +49-234-95020-6, Fax: +49-234-95020-77 Amtsgericht Bochum, HRB 14773 Geschäftsführer: Prof. Dr.-Ing. Dieter Heiland, Dr.-Ing. Michael Mistler <a href="http://www.baudynamik.de">www.baudynamik.de</a>				
Verfasser	[REDACTED] [REDACTED]		[REDACTED]		
Mitverfasser	[REDACTED] [REDACTED]				
geprüft	[REDACTED] [REDACTED]				
Datum der Messungen	25.05. - 28.05.2021				
Messpersonal	[REDACTED]				
Dateiname	40-10714-01-D6 RevA Hauptgutachten.docx				
Bearbeitungsstand		in Bearbeitung			
		vorgelegt			
	X	fertig gestellt			
Änderungen	Revision	Datum	ersetzt Bericht	Geänderte Kapitel	Beschreibung
	-	26.11.2021	-	alle	Ersterstellung als Entwurf
	A	25.01.2022	Entwurf 26.11.21	alle	Einarbeitung Rückmeldung

Fachlich Verantwortlicher im Sinne der 41. BImSchV: [REDACTED]

Stellvertreter: [REDACTED]

Dieser Bericht ist nur für den Gebrauch des Auftraggebers bestimmt. Eine darüber hinausgehende Verwendung, vor allem durch Dritte, unterliegt dem Schutz des Urheberrechts gemäß UrhG.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1	Anlass und Aufgabenstellung	6
1.2	Vorgehensweise und Dokumentengliederung	7
1.3	Verwendete Unterlagen	9
<b>2</b>	<b>Übersicht der durchgeführten Messungen</b>	<b>11</b>
2.1	Zielsetzung und dafür erforderliche Messungen	11
2.2	Übersicht der Messungen entlang der Luruper Chaussee	11
2.3	Übersicht der Lage der Messquerschnitte und Messpunkte	12
2.4	Bohrlöcher	13
2.5	Verwendete Anregungsquellen	14
2.6	GNSS Vermessung	15
2.7	Schwingungsmessungen	16
2.8	Magnetfeldmessung	16
<b>3</b>	<b>Prognose der Schwingungen durch die geplante S-Bahn</b>	<b>17</b>
3.1	Beschreibung des Prognoseverfahrens	17
3.2	Ermittlung der diskreten Übertragungsadmittanzen mit VibroTruck	18
3.3	Spektrale Abnahmebeziehung	19
3.4	Umrechnung Einzelpunkt-Mehrpunkt-Übertragungsadmittanz	21
3.5	Tunnellage	23
3.6	Gebäudeübertragung	23
3.7	Validierung der Prognose mit DYNPACT®	25
3.8	Ergebnisse der Erschütterungsprognose	25
3.9	Bewertung der Erschütterungseinwirkung der S-Bahn	31
<b>4</b>	<b>Zielführende Schutzmaßnahmen zur Minderung der Erschütterungen</b>	<b>39</b>
4.1	Auslegungsziel	39
4.2	Zielführende Erschütterungsschutz-Maßnahmen	39
4.3	Schweres Masse-Feder-System	40
4.4	6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion	42
4.5	Verlegung der Trasse	47
4.6	Abschätzung der Mehrkosten durch den Erschütterungsschutz	51
4.7	Zusatzuntersuchung zur Einhaltung der Nachtwerte	52
4.8	Prognose der tieffrequenten Erschütterungen mit $f < 4$ Hz	53
<b>5</b>	<b>Prognose und Beurteilung der Magnetfeldimmissionen (Near-DC-Shifts)</b>	<b>55</b>

<b>5.1</b>	<b>Einführung</b>	<b>55</b>
<b>5.2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>57</b>
<b>5.3</b>	<b>Beurteilungswerte für magnetische Felder</b>	<b>60</b>
<b>5.4</b>	<b>Ergebnisse der Messung an der Referenzstrecke Königstraße</b>	<b>70</b>
<b>5.5</b>	<b>Prognose der Magnetfeldänderungen bei für geplante S32 in der Luruper Chaussee</b>	<b>76</b>
<b>5.6</b>	<b>Mögliche Maßnahmen zur Reduktion des Magnetfelder aus der S32</b>	<b>79</b>
<b>5.7</b>	<b>Maßnahmen zur Reduktion der Magnetfelder am Einwirkungsort (Immissionsort)</b>	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>Auswirkungen des zukünftigen KFZ-Verkehrs in der Luruper Chaussee</b>	<b>90</b>
<b>6.1</b>	<b>Theoretische Grundlagen und Anregungsmechanismen</b>	<b>91</b>
<b>6.2</b>	<b>Maßgebende Schwingungsereignisse im Zeitbereich</b>	<b>92</b>
<b>6.3</b>	<b>Spektrale Auswertung der Schwinggeschwindigkeit</b>	<b>95</b>
<b>6.4</b>	<b>Statistische Auswertung der Schwingungen</b>	<b>95</b>
<b>6.5</b>	<b>Vergleich der Messquerschnitte untereinander</b>	<b>99</b>
<b>6.6</b>	<b>Bewertung der Straßen-Unebenheiten</b>	<b>102</b>
<b>6.7</b>	<b>Abnahme der Schwingungen über die Entfernung</b>	<b>105</b>
<b>6.8</b>	<b>Einfluss der Verkehrsstärke auf die Erschütterungen</b>	<b>109</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse und Handlungsempfehlungen</b>	<b>112</b>
<b>7.1</b>	<b>Erschütterungen</b>	<b>113</b>
<b>7.2</b>	<b>Elektromagnetische Feldveränderungen (Near-DC)</b>	<b>114</b>
<b>7.3</b>	<b>Bewertung des Erschütterungen aus Straßenverkehr</b>	<b>115</b>
<b>8</b>	<b>Anlage I: Dokumentation der gemessenen Schwingungen aus Verkehr</b>	<b>118</b>
<b>8.1</b>	<b>Allgemeines</b>	<b>118</b>
<b>8.2</b>	<b>Schwingungsmessung des Straßenverkehrs</b>	<b>118</b>
<b>8.3</b>	<b>Dokumentation der vorhandenen Straßenschäden</b>	<b>121</b>
<b>9</b>	<b>Anlage II: Dokumentation der VibroTruck Messungen</b>	<b>128</b>
<b>9.1</b>	<b>Allgemeine Angaben der Messungen</b>	<b>128</b>
<b>9.2</b>	<b>VibroTruck am Messquerschnitt MQ1</b>	<b>129</b>
<b>9.3</b>	<b>VibroTruck am Messquerschnitt MQ2</b>	<b>149</b>
<b>9.4</b>	<b>VibroTruck am Messquerschnitt MQ3</b>	<b>168</b>
<b>9.5</b>	<b>VibroTruck am Messquerschnitt MQ4</b>	<b>186</b>
<b>9.6</b>	<b>VibroTruck am Messquerschnitt MQ5</b>	<b>216</b>
<b>9.7</b>	<b>Gebäudemesspunkte</b>	<b>226</b>
<b>9.8</b>	<b>Ergebnisse der Bohrlochadmittanzen MP30</b>	<b>336</b>
<b>9.9</b>	<b>Zusammenfassung der angesetzten Übertragungsfunktionen von GOK zum Messpunkt</b>	<b>343</b>
<b>10</b>	<b>Anlage III: Dokumentation der DYNPACT® Messungen</b>	<b>344</b>

<b>10.1</b>	<b>Allgemeine Angaben der Messungen</b>	<b>344</b>
<b>10.2</b>	<b>DYNPACT® am MQ1</b>	<b>345</b>
<b>10.3</b>	<b>DYNPACT® am MQ2</b>	<b>358</b>
<b>10.4</b>	<b>DYNPACT® am MQ3</b>	<b>369</b>
<b>10.5</b>	<b>DYNPACT® am MQ4</b>	<b>379</b>
<b>11</b>	<b>Anlage IV: Dokumentation der MASW-Baugrundmessung</b>	<b>391</b>
<b>11.1</b>	<b>Übersicht</b>	<b>391</b>
<b>11.2</b>	<b>Baugrundmessung am MQ1</b>	<b>395</b>
<b>11.3</b>	<b>Baugrundmessung am MQ2</b>	<b>400</b>
<b>11.4</b>	<b>Baugrundmessung am MQ3</b>	<b>405</b>
<b>11.5</b>	<b>Baugrundmessung am MQ4</b>	<b>410</b>
<b>11.6</b>	<b>Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse</b>	<b>414</b>
<b>12</b>	<b>Anlage V: Ergebnisse der Gebäude-Erschütterungsprognose</b>	<b>416</b>
<b>12.1</b>	<b>MP1</b>	<b>417</b>
<b>12.2</b>	<b>MP2</b>	<b>418</b>
<b>12.3</b>	<b>MP3</b>	<b>419</b>
<b>12.4</b>	<b>MP4</b>	<b>420</b>
<b>12.5</b>	<b>MP5</b>	<b>421</b>
<b>12.6</b>	<b>MP6</b>	<b>422</b>
<b>12.7</b>	<b>MP8</b>	<b>423</b>
<b>12.8</b>	<b>MP9</b>	<b>424</b>
<b>12.9</b>	<b>MP12</b>	<b>425</b>
<b>12.10</b>	<b>MP17</b>	<b>426</b>
<b>12.11</b>	<b>MP18</b>	<b>427</b>
<b>12.12</b>	<b>MP19</b>	<b>428</b>
<b>12.13</b>	<b>MP20</b>	<b>429</b>
<b>12.14</b>	<b>MP21</b>	<b>430</b>
<b>12.15</b>	<b>MP22</b>	<b>431</b>
<b>12.16</b>	<b>MP23</b>	<b>432</b>
<b>12.17</b>	<b>MP24</b>	<b>433</b>
<b>12.18</b>	<b>MP25</b>	<b>434</b>
<b>12.19</b>	<b>MP26</b>	<b>435</b>
<b>12.20</b>	<b>MP30</b>	<b>436</b>
<b>12.21</b>	<b>MP32</b>	<b>437</b>
<b>12.22</b>	<b>MP33</b>	<b>438</b>

## 1 Einleitung

### 1.1 Anlass und Aufgabenstellung

In Hamburg wird der Bau einer neuen S-Bahn-Strecke geplant, die für die zukünftige Standortentwicklung der Science City Bahrenfeld eine wichtige Rolle spielt. Die Science City Bahrenfeld vereint u.a. die Forschungszentren von DESY, XFEL, EMBL, CSSB das Max-Planck-Institut, die Universität Hamburg mit den geplanten Innovationspark Altona und weiteren Bauvorhaben.



Abbildung 1-1: Geplante Science City Bahrenfeld; zentral die Luruper Chaussee [12]

Der Trassenverlauf der geplanten S-Bahn soll unterhalb der Luruper Chaussee und somit in unmittelbarer Nähe zu Gebäuden der genannten Forschungseinrichtungen und Institute. Diese Forschungseinrichtungen betreiben viele technische Geräte, Anlagen und Messinstrumente, die hochempfindlich in Bezug auf Schwingungseinwirkungen und Magnetfeldveränderungen reagieren. Aus diesem Grund ist zu klären, ob der geplante zukünftige Betrieb einer S-Bahn einen negativen Einfluss auf die empfindlichen Geräte hat.

Das Ziel der Untersuchungen ist, die durch die geplante S-Bahn emittierten Erschütterungen und niederfrequenten Magnetfelder durch Messungen und Prognoseberechnungen zu quantifizieren und den derzeitigen Standortbedingungen in Bezug auf die Erschütterungseinwirkungen und die niederfrequenten Magnetfeldveränderungen in den unterschiedlichen Forschungsgebäuden gegenüber zu stellen.



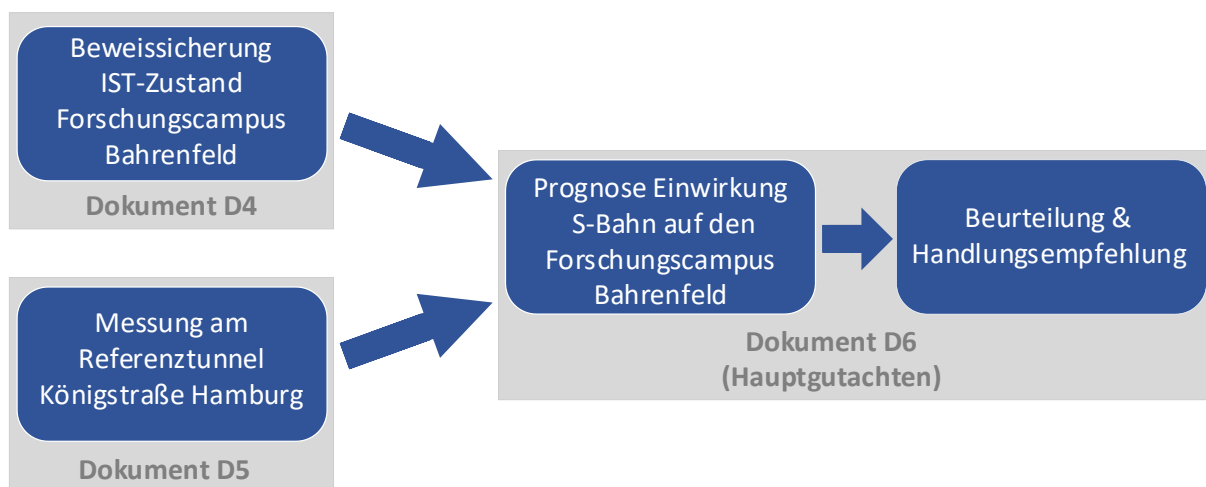
## 1.2 Vorgehensweise und Dokumentengliederung

Um die zukünftigen Erschütterungs- und Magnetfeldeinwirkungen durch die geplante S-Bahn prognostizieren und bewerten zu können, erfolgte zunächst eine Evaluierung der derzeitigen Standortbedingungen in Form von Beweissicherungsmessungen an mehreren Messorten auf dem Forschungscampus Bahrenfeld. An 23 Messorten wurden die Erschütterungseinwirkungen und an drei Messorten die niederfrequenten Magnetfeldveränderungen gemessen. Die Auswahl der Messpunkte war durch den Auftraggeber in Abstimmung mit den Nutzern vorgegeben. Bei einer gemeinsamen Vor-Ort-Begehung am 05.03.2021 wurde die genaue Position der Messpunkte mit allen Beteiligten festgelegt.

In einem zweiten Schritt erfolgten Messungen der Erschütterungsemissionen und der niederfrequenten Magnetfeldveränderungen an einem Referenzunnel entlang der Königstraße in Hamburg.

Um diese auf den Standort Bahrenfeld übertragen zu können, um die durch eine S-Bahn-Vorbeifahrt verursachten Baugrund- und Gebäudeschwingungen sowie die Magnetfeldveränderungen zu prognostizieren, werden in einem dritten Schritt am Forschungscampus Bahrenfeld entlang der Luruper Chaussee Admittanz- und Ausbreitungsmessungen mit Hilfe künstlicher Anregung durchgeführt. Die Beurteilung, in wie weit die zukünftigen Immissionen durch den Betrieb der geplanten S-Bahn den Forschungsbetrieb auf dem Campus beeinflussen bzw. stören, erfolgt mit Hilfe der Ergebnisse der Beweissicherungsmessungen.

Aufgrund der Umfänglichkeit der Untersuchungen wurde deren Dokumentationen und Auswertungen in drei separate Dokumente (D4, D5 und D6) aufgeteilt.



**Abbildung 1-2: Untersuchungsschritte und Dokumentengliederung**

- Dokument „**Beweissicherungsmessungen Forschungscampus Bahrenfeld**“ mit der Berichtsnummer 40-10714-01-D4

In dem Dokument D4 sind die Ergebnisse der Beweissicherungsmessungen, die an mehreren Messorten auf dem Forschungscampus Bahrenfeld durchgeführt worden sind, dokumentiert und ausgewertet.

- Dokument „**Messungen am Referenztunnel entlang der Königstraße**“, Berichtsnummer 40-10714-01-D5

In dem Dokument D5 sind die Erschütterungs- und Magnetfeldmessungen während S-Bahn-Vorbeifahrten sowie die Auswertungen der Messdaten dokumentiert, die an drei repräsentativen Referenzquerschnitten an der Königstraße in Hamburg durchgeführt worden sind.

- Dokument „**Einwirkungen auf den Forschungscampus Bahrenfeld (Hauptgutachten)**“, Berichtsnummer 40-10714-01-D6

In dem vorliegenden Dokument D6 werden die Erschütterungs- und Magnetfeldeinwirkungen infolge der geplanten S-Bahn auf Basis der Messungen am Referenzstandort (Dokument D5) und den am Forschungscampus Bahrenfeld durchgeführten Ausbreitungsmessungen prognostiziert. Die Prognoseergebnisse werden den derzeitigen Standortbedingungen gemäß Dokument D4 gegenübergestellt und bewertet, um Handlungsempfehlungen daraus ableiten zu können.

Gegenstand des vorliegenden Dokument D6 ist somit die Dokumentation der entlang der Luruper Chaussee durchgeführten Messungen, deren Auswertung sowie die Prognose der **Erschütterungseinwirkungen** aus zukünftigem S-Bahn-Verkehr auf den Forschungscampus Bahrenfeld in Hamburg. Zusätzlich zu den Erschütterungen werden ebenfalls die Immissionen durch **niederfrequente Magnetfeldveränderungen** prognostiziert und bewertet.

Für beide Immissionsarten werden mögliche Schutzmaßnahmen untersucht und beurteilt, um schließlich Handlungsempfehlungen für den Bau der S32 daraus ableiten zu können.

Darüber hinaus werden die Veränderungen durch den steigenden Straßenverkehr gutachterlich bewertet.

### 1.3 Verwendete Unterlagen

- [1] [REDACTED]: Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32, Beweissicherungsmessungen Forschungscampus Bahrenfeld. Baudynamik Heiland & Mistler GmbH. Bericht-Nr.: 40-10714-01-D4, 26.11.2021
- [2] [REDACTED]: Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32, Dokumentation und Auswertung der Erschütterungs- und Magnetfeldmessungen am Referenzunnel entlang der Königstraße. Baudynamik Heiland & Mistler GmbH. Bericht-Nr.: 40-10714-01-D5, 26.11.2021
- [3] Baudynamik Heiland & Mistler GmbH, Ergebnispräsentation 40-10714-01-D7, präsentiert in der Videokonferenz am 09.11.2021
- [4] DIN 45669-1 (03/2019): Messung von Schwingungsimmissionen, Teil 1, Schwingungsmesser; Anforderungen und Prüfungen.
- [5] DIN 45669-2 (02/2005): Messung von Schwingungsimmissionen. Teil 2: Messverfahren
- [6] DIN 45672-1 (02/2018): Schwingungsmessungen an Schienenverkehrswegen - Teil 1: Messverfahren für Schwingungen.
- [7] DIN 45672-2 (11/2020): Schwingungsmessungen an Schienenverkehrswegen - Teil 2: Auswertverfahren.
- [8] VDI 2038 (01/2013): Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen. Blatt 2: Schwingungen und Erschütterungen – Prognose, Messungen, Beurteilung und Minderung
- [9] Ril 820.2050 (11/2017): Erschütterungen und sekundärer Luftschall. Richtlinie der DB Netz AG mit 6 Anhängen A01 bis A06
- [10] ©OpenStreetMap and contributors, Creative Commons Share Alike License (CC-BY-SA)
- [11] HafenCity Hamburg GmbH: Anlage VIII zu den Vergabeunterlagen. Dateiname: „Anlage VIII\_Lageplan Schnitte.pdf“. 17.11.2020
- [12] Science City Bahrenfeld-Broschüre: Wissenschaft lebt im Stadtteil <https://fiona.uni-hamburg.de/a0e139bf/broschueresciencecitybahrenfeld.pdf> ; Abrufdatum: 09.09.2021
- [13] BImSchG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2771) geändert.

- [14] Bild Lichtraumprofil aus Website: [https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/nutzungsbedingungen/technischer\\_netzzugang/lichtraum/grundsatzlichtraum-1369000?contentId=1368994](https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/nutzungsbedingungen/technischer_netzzugang/lichtraum/grundsatzlichtraum-1369000?contentId=1368994); Abrufdatum: 05.11.2021
- [15] Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer, Geschäftsbereich Straßen: Informationen zum Straßenaufbau der Luruper Chaussee. Freie Hansestadt Hamburg. Per Email [REDACTED] am 26.10.2021
- [16] [REDACTED] TU Dresden, Lehrstuhl für Verkehrsplanung
- [17] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz sowie Bundesamt für Justiz: Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV), Ausfertigungsdatum: 16.12.1996, Neugefasst durch Bek. v. 14.08.2013 | 3266
- [18] Herbert Schmolke: EMV-gerechte Errichtung von Niederspannungsanlagen, VDE Schriftenreihe Band 126
- [19] Bayrisches Landesamt für Umwelt, LUBW: Elektromagnetische Felder im Alltag, Aktuelle Informationen über Quellen, Einsatz und Wirkung, Stand: Dezember 2017
- [20] DIN EN 50121-2 (VDE 0115-121-2) Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit – Teil 2: Störaussendungen des gesamten Bahnsystems in die Außenwelt; Deutsche Fassung EN 50121-2:2017 (Stand November 2017)



## 2 Übersicht der durchgeführten Messungen

### 2.1 Zielsetzung und dafür erforderliche Messungen

Das Ziel der Erschütterungsuntersuchung ist, die durch eine S-Bahn-Vorbeifahrt verursachten und auf den Forschungscampus Bahrenfeld einwirkenden Erschütterungsimmissionen zu prognostizieren. Dazu wurden Messungen der Erschütterungsemissionen an einem Referenzunnel entlang der Königstraße in Hamburg durchgeführt [2]. Da die emittierten Erschütterungen einer S-Bahn im Allgemeinen sehr stark vom Untergrund abhängen, können die dort gemessenen Erschütterungen nicht 1:1 auf den Untersuchungsraum Bahrenfeld übertragen werden, sondern es sind die unterschiedlichen Untergrundeigenschaften bestmöglich durch ein geeignetes Prognoseverfahren zu berücksichtigen. Deshalb wird für die vorliegende Untersuchung ein kraftbasiertes Prognoseverfahren angewendet. In dem Dokument D5 [2] wurde bereits die messtechnische und rechnerische Herleitung des S-Bahn-spezifischen Kraftspektrums beschrieben und dokumentiert. Um die Erschütterungsemissionen nun entlang der Luruper Chaussee am Forschungscampus Bahrenfeld zu prognostizieren, müssen die lokalen Baugrund-Admittanzen und Ausbreitungsbedingungen in diesem Untersuchungsraum noch messtechnisch ermittelt werden und mit dem bereits ermittelten Kraftspektrum multipliziert werden. Darüber hinaus sind die erschütterungstechnischen Gebäude- bzw. Fundamentübertragungseigenschaften noch zu bestimmen, um schließlich die Schwingungen in den Forschungsgebäuden prognostizieren zu können, die durch eine S-Bahn-Vorbeifahrt hervorgerufen werden.

### 2.2 Übersicht der Messungen entlang der Luruper Chaussee

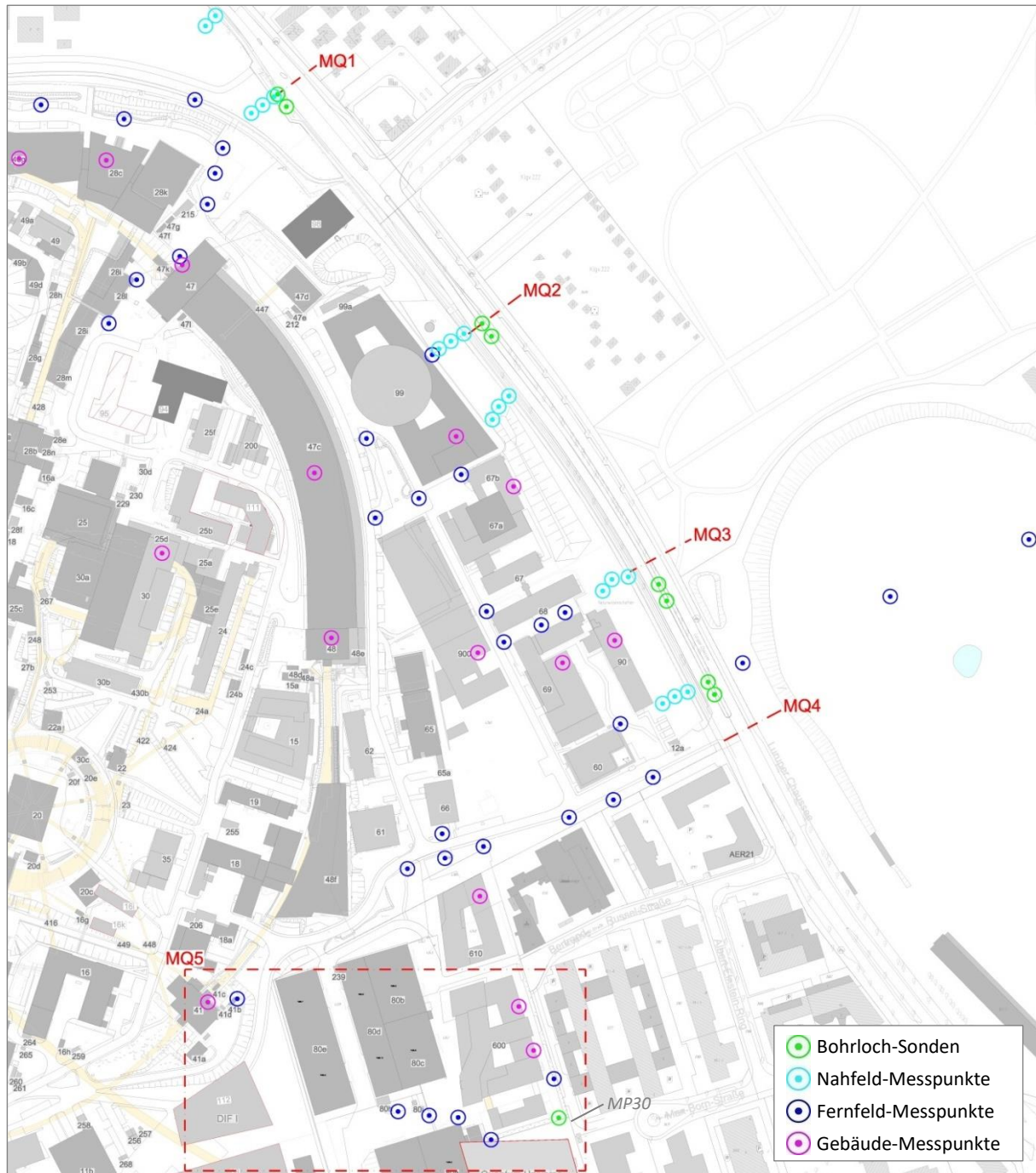
Für die in Abschnitt 2.1 beschriebene Aufgabenstellung war es notwendig, Schwingungsmessungen mit künstlicher Anregung durchzuführen. Es kamen zwecks Validierung des Verfahrens unterschiedlichen Anregungsquellen zum Einsatz. Die nachfolgende Tabelle 2-1 zeigt eine Übersicht der am Forschungscampus Bahrenfeld durchgeführten messtechnischen Untersuchungen sowie die genutzten Anregungsquellen. Die dafür genutzten Geräte werden im Abschnitt 2.5 beschrieben.

Art der Anregung Art der Messung	Straßenverkehr	DYNPACT®	VibroTruck	Schwerer Impuls- hammer
Schwingungen im Gelände (Bohrloch und GOK)	✓	✓	✓	×
Schwingungen im Gebäude	×	×	✓	×
MASW Ausbreitungsmessung	✓	✓	✓	✓
✓ = Anregungsquelle wurde gemessen;    × = Anregungsquelle wurde nicht verwendet				

**Tabelle 2-1: Tabellarische Übersicht der durchgeführten Messungen und der genutzten Anregungsquellen**

### 2.3 Übersicht der Lage der Messquerschnitte und Messpunkte

Für die in Abschnitt 2.1 beschriebene Aufgabenstellung ist es notwendig, den Untersuchungsraum am Forschungscampus Bahrenfeld in mehrere Messquerschnitte aufzuteilen. Diese Einteilung in Messquerschnitte erlaubt eine standortpräzise Prognose der zu erwartenden Schwingungen, da auf diese Weise die unterschiedlichen lokalen Admittanz- und Transmissionseigenschaften erfasst werden können. Abbildung 2-1 zeigt die Lage der einzelnen Messquerschnitte.



**Abbildung 2-1: Definition der 4 Messquerschnitte entlang der Luruper Chaussee sowie des 5. Messquerschnitts auf dem DESY-Gelände**

An den Messquerschnitten MQ1 – MQ4 entlang der Luruper Chaussee wurden

- jeweils 2 Bohrlochsonden in einer Tiefe des geplanten S-Bahn-Tunnels installiert ( $\Sigma = 8$  Bohrloch-Messpunkte), vgl. hierzu Abschnitt 2.4,
- mindestens 3 Nahfeld-Messpunkte (MP) auf dem Gelände (GOK) installiert ( $\Sigma = 17$  MP's, diese wurden in einem Abstand von 10 m, 20 m und 30 m bis zur Mitte der nächstgelegenen Fahrspur angeordnet),
- mehrere Fernfeld-MP's auf GOK bis 250 m Entfernung installiert ( $\Sigma = 29$  Fernfeld-MP's),
- mehrere Sensoren in Gebäuden, und zwar an 13 der insgesamt 22 Beweissicherungs-Messorten [1]) bis zu einer Entfernung von 284 m.

Darüber hinaus wurde ein 5. Messquerschnitt (MQ5) auf dem DESY-Gelände mit weiteren GOK-, Bohrloch- und Gebäude-Messpunkten instrumentiert.

Die Wahl aller Messpunkte wurde entsprechend der jeweiligen Aufgabe und der Topologie gewählt. Größtenteils wurden dieselben Messpunkte für mehrere Messungen genutzt und somit für mehrere Auswertezwecke gedient.

Die Messquerschnitte werden bei der Prognoseberechnung teilweise weiter unterteilt, um eine noch schärfere standortspezifische Prognose durchführen zu können:

- Der Messquerschnitt MQ1 setzt sich aus dem MQ1a und MQ1b zusammen. Dabei beschreibt MQ1a die Ausbreitung in nordwestlicher Richtung, MQ1b beschreibt die Ausbreitung eher orthogonal zur Luruper Chaussee.
- Beim Messquerschnitt MQ4 wird unterschieden zwischen der West- und Ost-Seite. Für die östliche Seite der Luruper Chaussee wurden weitere Messpunkte auf der dort gelegenen Trabrennbahn installiert.

## 2.4 Bohrlöcher

Um in der Prognose die geplante Tunnellage der S-Bahn entlang der Luruper Chaussee bestmöglich zu berücksichtigen, wurden zum einen die Referenzmessungen der Emissionen an einer vergleichbaren Tunnelstrecke mit Rechteckquerschnitt durchgeführt. Allerdings unterscheidet sich die Tiefe des Tunnels an der Königstrake (UK Tunnelsohle bei ca. -7,5 m unter GOK) zu der geplanten Tiefe entlang der Luruper Chaussee (UK Tunnelsohle bei ca. -14 m bis -11 m unter GOK [11]). Aus diesem Grund wurden an den Messquerschnitten MQ1 bis MQ4 jeweils zwei Bohrlöcher bis auf Gründungstiefe des geplanten Tunnels erstellt. Die Löcher wurden im mittigen Grünstreifen der Luruper Chaussee gebohrt. Eine Ausnahme musste am Messquerschnitt MQ1 gemacht werden, wo kein mittiger Trennstreifen vorhanden ist. Deshalb wurden hier die Bohrlöcher im seitlichen Grünstreifen angeordnet.

Ein weiteres Bohrloch (MP30) wurde am südöstlichen Rand des DESY-Geländes erstellt. Dieses erfüllt im Rahmen der Prognose allerdings einen anderen Zweck. Wie in [1] beschrieben wurde in dem Bohrloch MP30 eine Dauermessung durchgeführt. Hintergrund ist, dass im Nahbereich zu diesem Messpunkt das „Quantum Universe“ entstehen soll. Die Tiefe des Bohrlochs von -11m entspricht der ungefähren Gründungstiefe des geplanten Gebäudes. Im Rahmen der hier beschriebenen Messkampagne wurde der Messpunkt als Prognosepunkt benutzt, um eine für das Gebäude individuelle Aussage treffen zu können.

## 2.5 Verwendete Anregungsquellen

Zur messtechnischen Untersuchung der lokalen Admittanz- (Anregbarkeit) und Übertragungseigenschaften am Forschungscampus Bahrenfeld wurden dieselben Geräte als Anregungsquellen genutzt wie auch am Referenzstandort, vgl. [2]:

- **VibroTruck:** Der VibroTruck ist ein mobiler, kraftgesteuerter Erschütterungsgenerator mit bis zu 70 kN dynamischer Anregungskraft im Frequenzbereich 1 – 400 Hz. Das Gewicht der schwingenden Reaktionsmasse beträgt 1000 kg. Die Kraftanregung durchfährt einen 60 s langen, logarithmischen Frequenzsweep im Bereich von 3 bis 120 Hz, der 4 Mal wiederholt wird. Neben der eingeleiteten Kraft wird gleichzeitig die Schwingungsantwort an den Messpunkten sowohl an der Oberfläche als auch in den Bohrlöchern des jeweiligen Messquerschnitts gemessen. Wegen der großen Erregerkraft eignet sich der VibroTruck vor allem für Ausbreitungsmessungen über lange Distanzen. Insgesamt wurden entlang der Luruper Chaussee an 25 Positionen angeregt.



Abbildung 2-2: VibroTruck im Einsatz an der Luruper Chaussee

- **DYNPACT®:** Der Impulsgenerator DYNPACT® erlaubt eine künstliche impulsförmige Anregung des Untergrunds. Der Impuls wird durch eine Fallmasse von 50 kg aus einer Fallhöhe von 1,0 m erzeugt. Die eingeleitete Kraft wird mittels einer Kraftmessdose gemessen, parallel da-



zu die Schwingungsantwort im Bohrloch. Die Anregung mit DYNPACT erfolgte insgesamt an 34 Positionen entlang der Luruper Chaussee.



Abbildung 2-3: DYNPACT® im Einsatz an der Luruper Chaussee

## 2.6 GNSS Vermessung

Eine wichtige Eingangsgröße bei der Auswertung der Übertragungsadmittanzen ist die Entfernung zwischen Anregungsquelle und Messpunkt. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden sämtliche Messpunkte mit einem GNSS Gerät (Global Navigation Satellite System) eingemessen. Technische Angaben zum verwendeten Gerät befinden sich im Anhang, Abschnitt 9.2.2. Das Satellitenpositionierungssystem ermöglicht eine präzise und verlässliche Vermessung der Messpunkte im Außenbereich. Insbesondere bei unübersichtlichen Gelände und großen Messentfernungen ist eine Einmessung der Punkte von großem Vorteil.



Tabelle 2-2: Einmessen der Mess- und Anregungspunkte mittels eines GNSS-Geräts

Projekt: Science City HH Erschütterungsuntersuchung S32 Bericht-Nr.: 40-10714-01-D6 (Rev.A)	Erschütterungs- und Magnetfeldimmissionen durch die S-Bahn auf den Forschungscampus Bahrenfeld	Seite 15/439
--	---	--------------

Neben den Messpunkten wurden ebenfalls die Anregungspunkte des VibroTrucks und des DYNPACTS® eingemessen, um anhand der Positionen die entsprechenden Entfernungen zu den Messpunkten zu bestimmen.

## **2.7 Schwingungsmessungen**

Es wurden folgende unterschiedliche Schwingungsmessungen an jedem der Messquerschnitte MQ1 bis MQ4 durchgeführt.

1. Schwingungsmessung in Bohrlöchern, im Gelände auf GOK und im Gebäude während Anregung mit VibroTruck
2. Schwingungsmessung in Bohrlöchern bei DYNPACT®-Anregung
3. Schwingungsmessung auf GOK bei Anregung durch Straßenverkehr auf der Luruper Chaussee
4. Baugrunduntersuchung mittels Ausbreitungsmessung auf GOK mit Anregung durch einen großen Impulshammer

Kernbestandteile der Schwingungsprognose bildet die VibroTruck-Messung (1). Die DYNPACT®-Messungen (2) dienen zur Validierung der Prognose, vgl. Abschnitt 3.7. Die Messungen unter (3) wurden durchgeführt, um den Einfluss durch den steigenden Straßenverkehr gutachterlich bewerten zu können, vgl. Abschnitt 6.

Die Baugrunduntersuchung (4) mittels der MASW-Methode dient als Backup-Information zwecks Vergleich der Baugründe an den unterschiedlichen Messquerschnitten und dem Referenzort. Sie wurde an allen 4 Messquerschnitten durchgeführt und ist in der Anlage IV, Abschnitt 11, dokumentiert.

Am MQ5 wurden ausschließlich VibroTruck-Messungen durchgeführt.

Sämtliche Schwingungsmessungen wurden mit Messsensoren nach DIN 45669 [4], [5] durchgeführt.

## **2.8 Magnetfeldmessung**

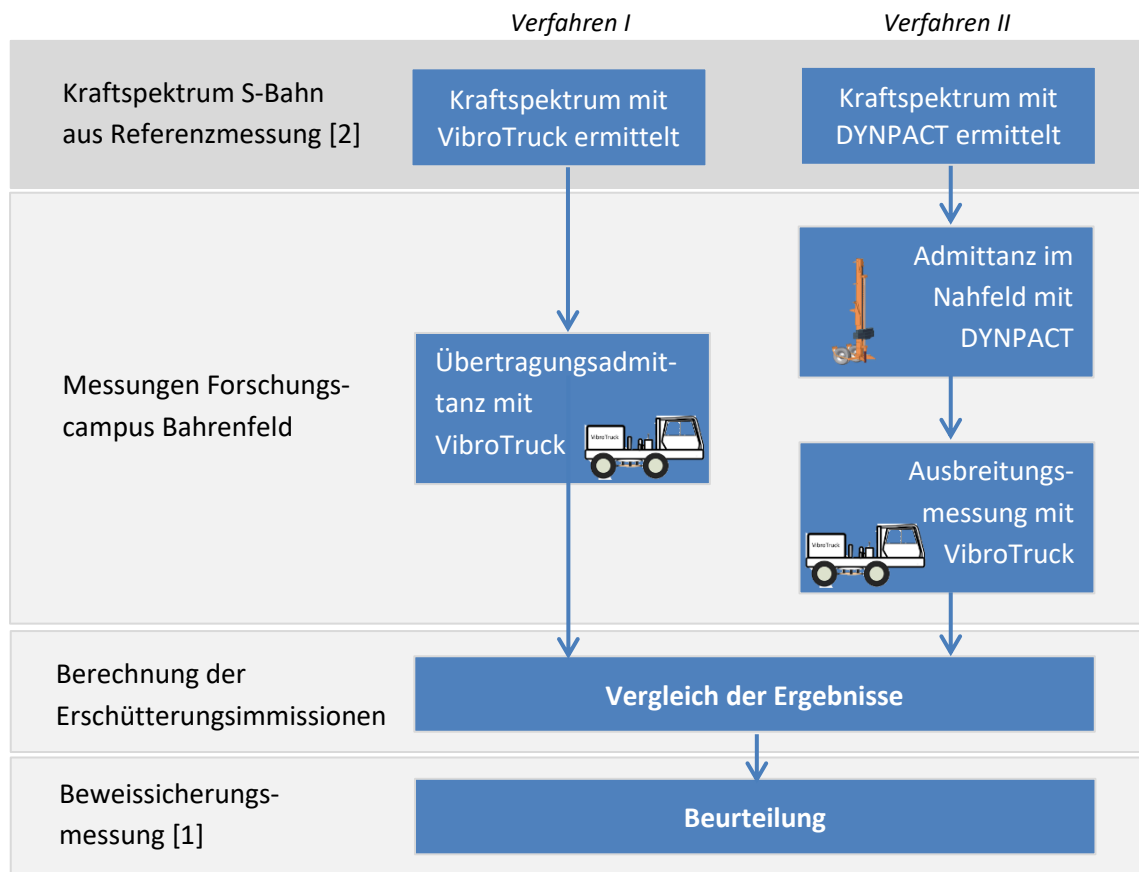
Messungen der niederfrequenten Magnetfelder haben im Zuge der Beweissicherungsmessung an 3 Standorten (Gebäude 15, Gebäude 69 und Gebäude 90) über 7 Tage stattgefunden [1]. Ferner wurden Messungen der Magnetfeldveränderungen während S-Bahn-Vorbeifahrten am Referenzmessort an der Königstraße in Hamburg durchgeführt [2].

Im Rahmen diesen Hauptgutachtens werden die niederfrequenten Magnetfeldveränderungen infolge S-Bahn-Vorbeifahrten am Forschungscampus Bahrenfeld auf Basis der Daten von [2] prognostiziert, vgl. Kapitel 5.

### 3 Prognose der Schwingungen durch die geplante S-Bahn

#### 3.1 Beschreibung des Prognoseverfahrens

Der Prognose der Erschütterungseinwirkungen aus S-Bahn-Vorbeifahrten und deren Beurteilung erfolgt nach dem Ablauf gemäß Abbildung 3-1.



**Abbildung 3-1: Ablauf der Erschütterungsprognose**

Abbildung 3-1 zeigt, dass die Prognose mit zwei messtechnisch unterschiedlichen Verfahren zwecks Validierung der Ergebnisse erfolgt. Beide Wege sind in diesem Kapitel ausführlich beschrieben. Für die anschließende Beurteilung fließen die in [1] ermittelten Ergebnisse der Beweissicherungsmessung ein. Der Übersicht halber werden die Einzelschritte des Verfahrens I nachfolgend nochmal aufgelistet. Die gesamte Auswertung findet im Frequenzbereich statt.

1. Ermittlung der (Punkt-) Admittanzen  $A_{\text{Punkt}}(f)$  mit VibroTruck zu den Oberflächenpunkten und zu ausgewählten Gebäudepunkten (Abschnitt 3.2)
2. Bestimmung der spektralen Abnahmebeziehung der Admittanzen über die Entfernung (Abschnitt 3.3)
3. Umrechnung der Punkt- zu Mehrpunktadmittanzen zur Berücksichtigung der S-Bahn:  
 $A_{\text{Punkt}}(f) \rightarrow A_{\text{Zug}}(f)$  (Abschnitt 3.4)

4. Berücksichtigung der Tunnellage der S-Bahn (Abschnitt 3.5)
5. Ermittlung der Gebäudeübertragungsfunktionen (Abschnitt 3.6)
6. Prognose der Schwingungen auf den Forschungscampus Bahrenfeld auf Basis des S-Bahn-Kraftspektrums und der Ergebnisse aus Punkten 1.-5 und Beurteilung in Hinblick auf die vorhandene IST-Erschütterungssituation [1] (Abschnitt 3.7).

### 3.2 Ermittlung der diskreten Übertragungsadmittanzen mit VibroTruck

Die Übertragungsadmittanz ist eine frequenzabhängige Größe und beschreibt die Anregbarkeit eines Messortes infolge einer dynamisch einwirkenden Kraft. Sie kann gerade bei Baugrundmessungen lokal sehr unterschiedlich sein. Um die Genauigkeit einer Schwingungsprognose zu steigern, ist die messtechnische Ermittlung der Übertragungsadmittanz absolut notwendig, um das tatsächliche baugrund- oder auch gebäudespezifische Übertragungsverhalten zu berücksichtigen. Bei weiten Distanzen ist dazu eine starke Anregungsquelle wie der VibroTruck erforderlich.

Die Anregung mit VibroTruck erfolgte entlang der Luruper Chaussee auf dem westlichen Fahrstreifen. Dabei wurden die Schwingungsantworten an Messpunkten in Bohrlöchern, auf der Geländeoberfläche sowie in einzelnen Gebäuden gemessen. Folgende Abbildung zeigt das Prinzip des Messaufbaus.

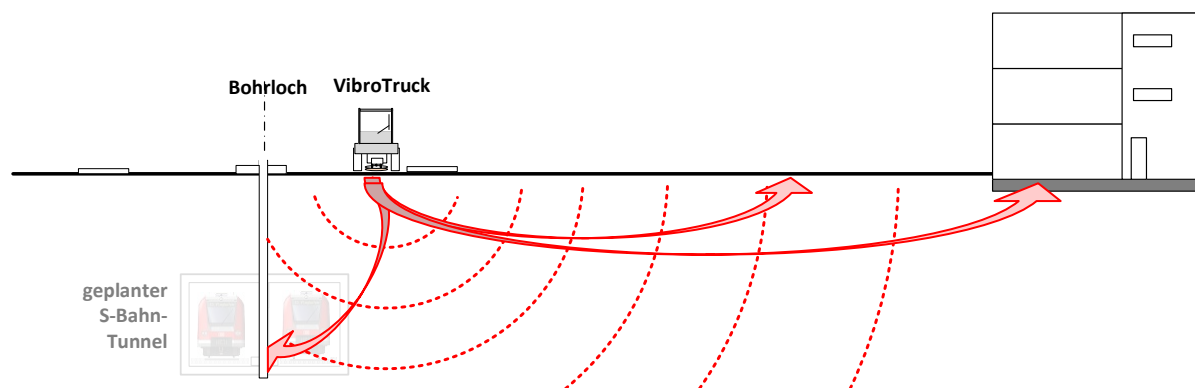


Abbildung 3-2: Prinzip des Messaufbaus für die Admittanzermittlung

Das Auswerteverfahren der Übertragungsadmittanzen erfolgt analog zu der Vorgehensweise wie bei der Referenzmessung an der Königstraße. Auf die Beschreibung in [1], Abschnitt 4.3, wird an dieser Stelle verwiesen. Es sei angemerkt, dass auch der gleiche Frequenzsweep der Kraftanregung wie am Referenzort gemäß Tabelle 3-1 verwendet wurde.

Parameter des VibroTruck-Sweeps	
Frequenzbereich	3 - 120 Hz
Art des Sweeps	logarithmisch
Dauer eines Sweeps	60 s
Auf- und Abblendzeit (Taper)	500 ms
Anzahl der Sweeps je Anregungspunkt	4

Tabelle 3-1: Parameter der VibroTruck-Sweeps



### 3.3 Spektrale Abnahmebeziehung

Um die frequenzabhängige Abnahme der Schwingung über die Entfernung (Distanz) zu ermitteln, wird eine Regressionsanalyse der Punkt-Übertragungsadmittanzen in Abhängigkeit der Übertragungsdistanz durchgeführt. Dies erfolgt für jede einzelne Terzmittenfrequenz. Dabei werden alle Übertragungsadmittanzen von allen Anregungspunkten zu allen Oberflächenmesspunkten berücksichtigt, die an einem Messquerschnitt gemessen worden sind. Zugrunde gelegt wird eine exponentielle Abnahmefunktion in der Form

$$A(f, R) = k(f) \cdot R^{-n(f)},$$

wobei der Faktor  $k$  und der Exponent  $n$  frequenzabhängig sind und daher für jede Terzmittenfrequenz individuell bestimmt werden. Der Exponent gibt das Maß für die Stärke der Abnahme an (Beispiel:  $n = 1$  bedeutet, dass bei doppelter Entfernung die Anregbarkeit halb so groß ist). Die angegebene Regressionsfunktion stellt eine Gerade im doppellogarithmischen Maßstab dar. Die Ergebnisse dieser Regressionsanalysen finden sich in der Anlage II (Kapitel 9).

Beispielhaft wird nachfolgend die Abnahmebeziehung vom Messquerschnitt MQ1 für die Terzmittenfrequenzen dargestellt. Jeder Punkt entspricht einer gemessenen Übertragungsadmittanz. In diesem Fall wurden 5 Anregungspunkte (VT1 - VT5) und 10 Messpunkte (MP1 – MP10) am Messquerschnitt MQ1 berücksichtigt, so dass die Regressionskurve aus insgesamt  $5 \times 10 = 50$  diskreten Einzelwerten ermittelt wurde. Mit dieser Vorgehensweise wird die statistische Zuverlässigkeit des Abnahmeverhaltens erhöht, da sämtliche Übertragungsadmittanzen mit in die Auswertung einbezogen werden und nicht nur die einzelnen Stützstellen ausgewertet werden.

Die oben genannte Regressionsanalyse der Punkte ist mit der roten Kurve dargestellt. Rein informativ und nicht weiter berücksichtigt ist in blau ein weiteres Abnahmegesetz hinterlegt in der Form von:

$$A(f, R) = k(f) \cdot R^{-0,5} \cdot e^{-a(f) \cdot R}$$

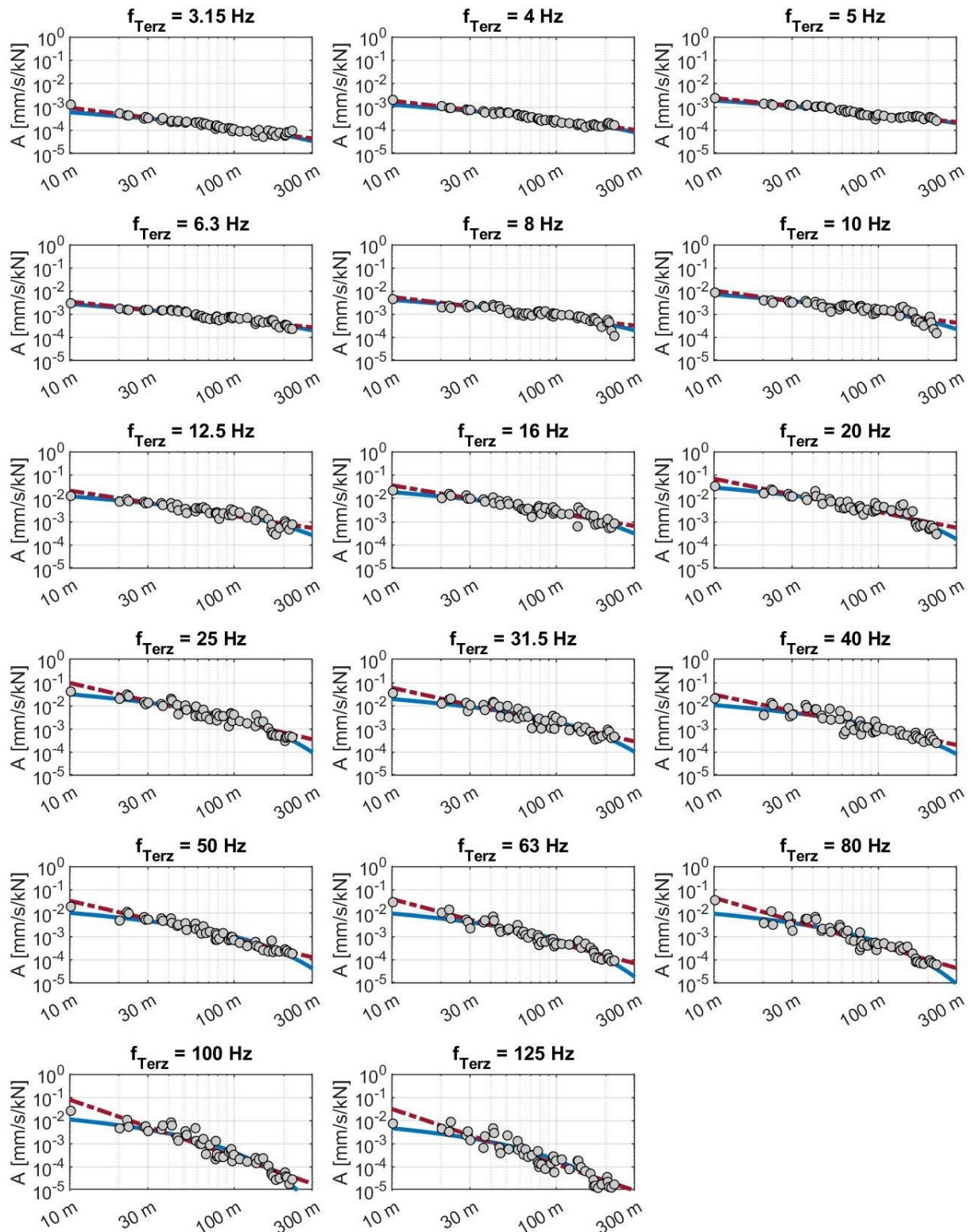
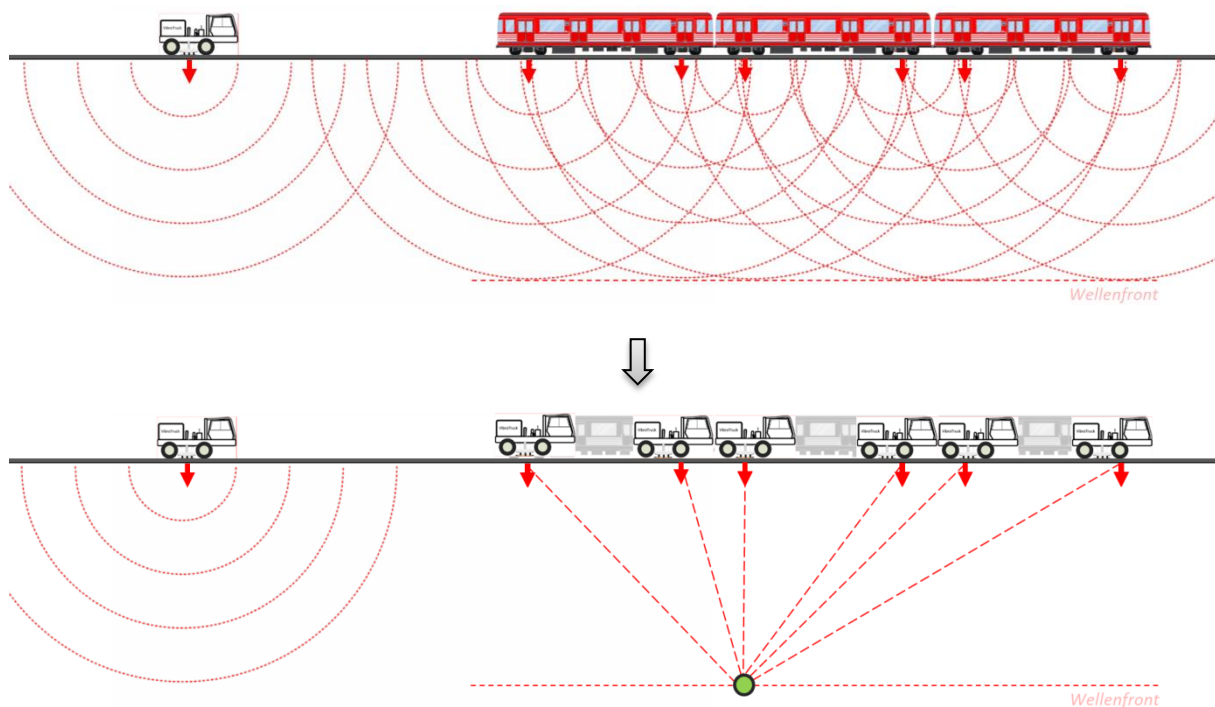


Abbildung 3-3: Exemplarische Regressionsanalyse der Abnahmebeziehung für MQ1b bei VibroTruck-Anregung

### 3.4 Umrechnung Einzelpunkt-Mehrpunkt-Übertragungsadmittanz

Ein Zug - im vorliegenden Fall die S-Bahn - entspricht nicht einer Punktquelle so wie VibroTruck, sondern er ist eine Zusammensetzung aus vielen Anregungsmechanismen. Um diesem Effekt Rechnung zu tragen, werden die messtechnisch ermittelten Einzelpunktadmittenzen  $A_{Punkt}(f)$  in Mehrpunktadmittenzen  $A_{Zug}(f)$  umgerechnet. Dabei wird vereinfacht angenommen, dass jedes Drehgestell der S-Bahn, welches über die Gleise fährt, eine Punktquelle darstellt. In Abbildung 3-4 ist dies schematisch dargestellt. Die Umrechnung von  $A_{Punkt}(f)$  zu  $A_{Zug}(f)$  sowie das angesetzte Fahrzeug ist in [2] beschrieben.



**Abbildung 3-4:** Schematische Darstellung der Umrechnung der Punktadmittanz zur Mehrpunkt-Anregung

Bei einer Mehrpunktquelle ist die Abnahme der Schwingungen aufgrund der geringeren geometrischen Dämpfung im Vergleich zu einer Punktquelle kleiner. Außerdem weisen die ermittelten Übertragungsadmittenzen für die Messquerschnitte MQ1-MQ4 wie erwartet deutliche Unterschiede auf. Abbildung 3-5 verdeutlicht die Unterschiede der Übertragungsadmittenzen zwischen den Messquerschnitten beispielhaft für eine Übertragungsadmittanz bezogen auf die Entfernung von 200m. Im Frequenzbereich von 80 Hz sind Unterschiede bis Faktor 13 (22 dB) möglich.

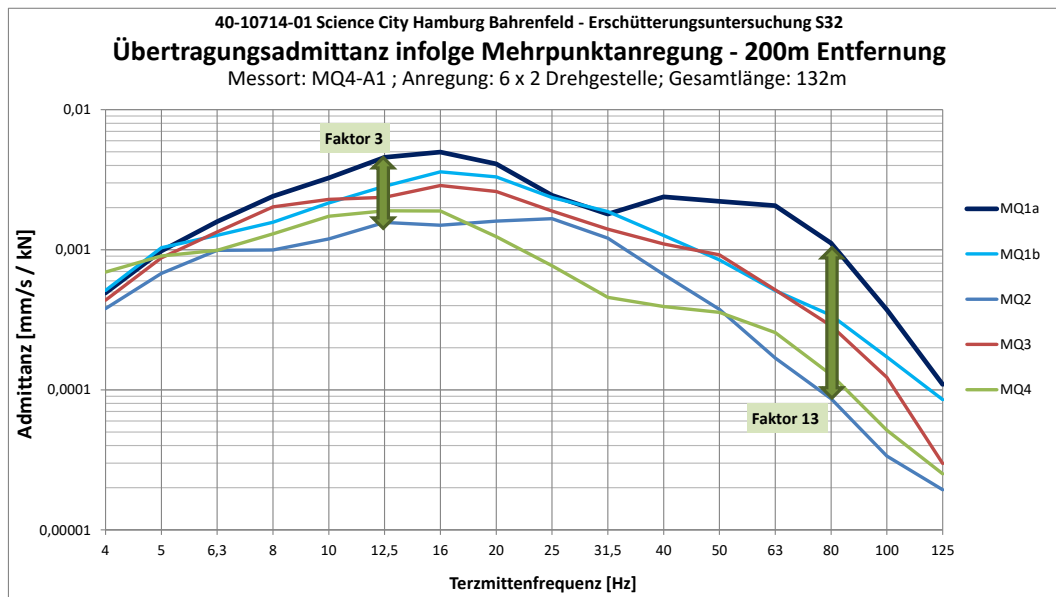


Abbildung 3-5: Übertragungsadmittanzen infolge Mehrpunktanregung in 200m Entfernung für die Messquerschnitte MQ1 bis MQ4

Werden die Übertragungsadmittanzen über die Entfernung betrachtet, zeigen sich auch hierbei deutlich die frequenzabhängigen Unterschiede in der Admittanz. Abbildung 3-6 verdeutlicht dies.

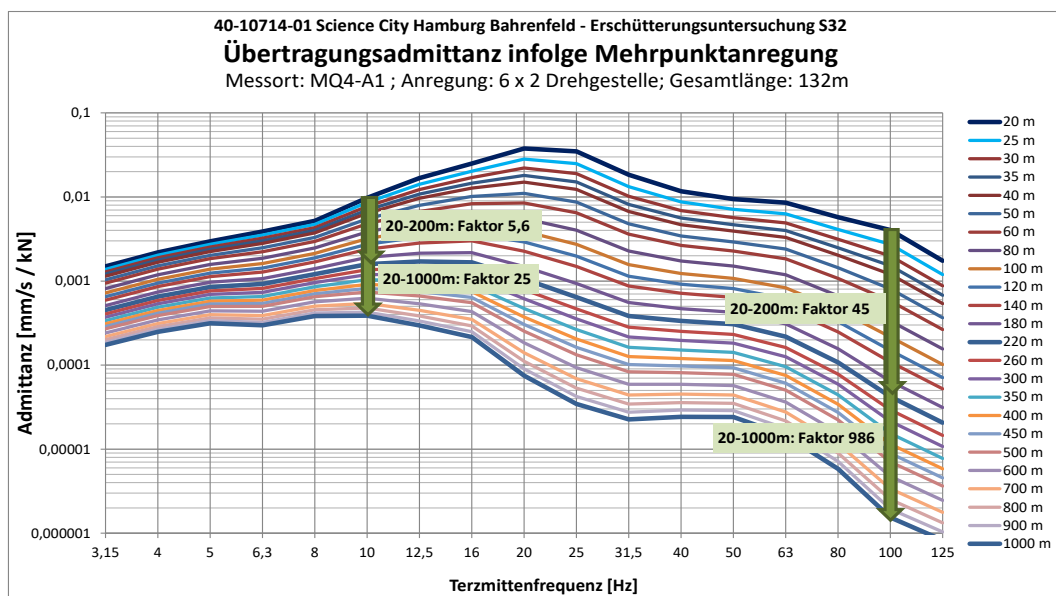


Abbildung 3-6: Übertragungsadmittanzen infolge Mehrpunktanregung über die Entfernung am Messquerschnitt MQ4

Insgesamt bestätigt sich, dass bei der Prognose die Lage des jeweiligen Prognosepunkts differenziert betrachtet werden muss.

### 3.5 Tunnellage

Die Einleitung der dynamischen Anregung durch die S-Bahn erfolgt nicht auf GOK, sondern in Tiefen- bzw. in Tunnellage. Um die Übertragung von UK Tunnel (Bohrlochtiefe) zu GOK zu ermitteln, ist im Bohrloch künstlich anzuregen und auf der GOK zu messen oder, gemäß dem Reziprozitätssatz von Maxwell und Betti, auf GOK künstlich anzuregen und die Schwingungen im Bohrloch zu messen.

Mit VibroTruck wurde auf GOK an mehreren Anregungspunkten angeregt. Zusätzlich zur Schwingungsmessung im Bohrloch wurde auch auf GOK neben dem Bohrloch die Oberflächenschwingung gemessen, um aus dem Verhältnis der Übertragungsadmittanzen von Oberflächensensor (OF) auf GOK zur Bohrlochsonde die spektrale Tiefenabnahme zu ermitteln.

Die Tiefenabnahme wurde für jeden Messquerschnitt MQ1 - MQ4 individuell ermittelt, um so den lokalen Baugrundbedingungen Rechnung zu tragen. Abbildung 3-7 fasst die ermittelte Minderungswirkung je Messquerschnitt zusammen. Es sei angemerkt, dass die Messdaten von MQ4 zu unrealistisch großen Abnahmewerten führt, so dass bei diesem Messquerschnitt der Mittelwert aus MQ1 bis MQ3 der Prognose zu Grunde gelegt wurde. Die spätere Validierung mit dem DYNPACT-Verfahren bestätigt, dass diese Vorgehensweise zu realistischeren Prognoseergebnissen führt.

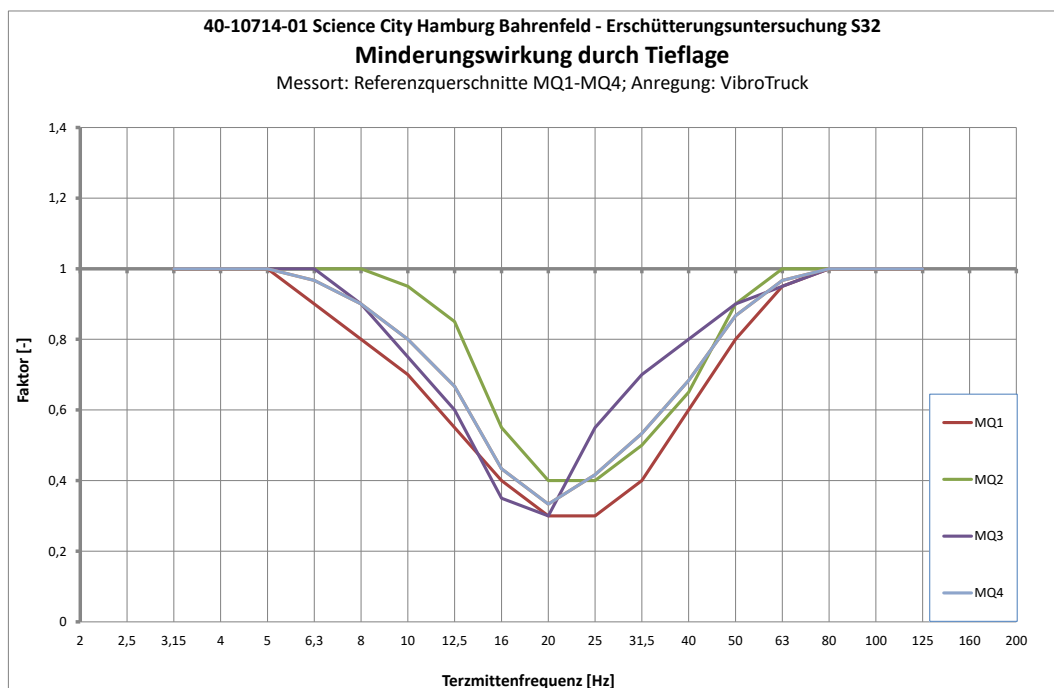
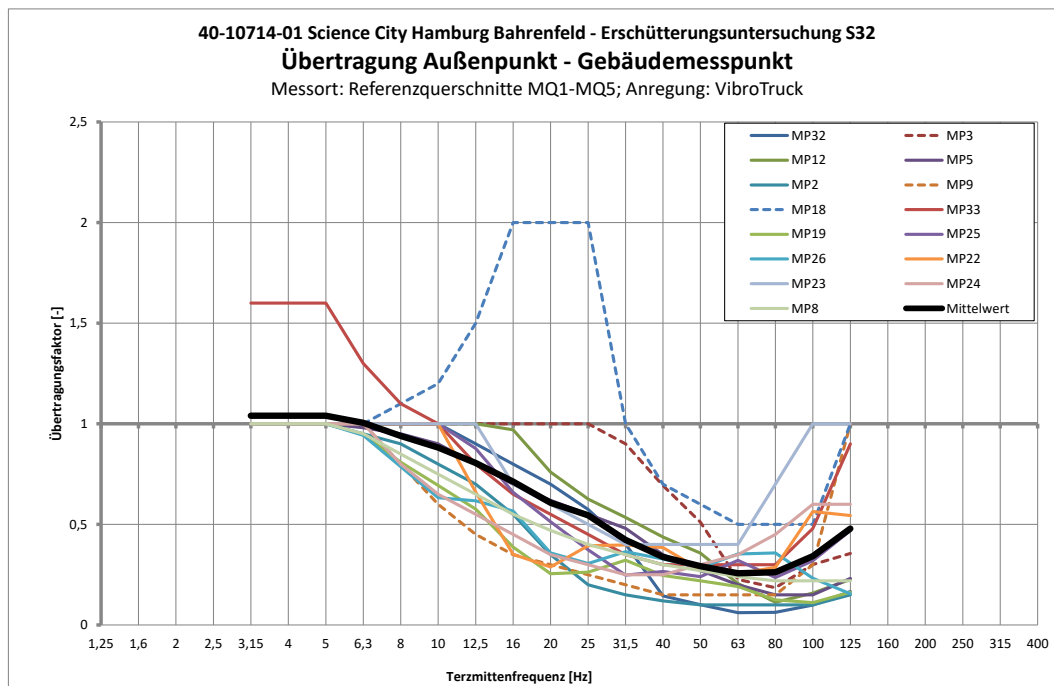


Abbildung 3-7: Minderungswirkung durch Tiefenlage für MQ1 bis MQ4

### 3.6 Gebäudeübertragung

Mit den Informationen aus den vorangegangenen Abschnitten 3.2 bis 3.5 können nun, zusammen mit dem S-Bahn-Kraftspektrums aus [1], die Freifeld-Schwingungen auf GOK für jeden Abstand prognostiziert werden.

Um die Schwingungen auch im Gebäude zu prognostizieren, ist die Gebäude- bzw. Fundament-Übertragungsfunktion zu berücksichtigen. Sie wird anhand der Messungen in den Gebäuden während den VibroTruck-Anregungen ermittelt. Die Abbildung 3-8 zeigt die ermittelten Gebäudeübertragungsfunktionen von einem gedachten Außenmesspunkt zu dem jeweiligen Gebäudemesspunkt, der gleichzeitig einem Beweissicherungsmesspunkt aus [1] entspricht.



**Abbildung 3-8: Messtechnisch ermittelte Gebäude-/Fundamentübertragungsfunktionen und deren Mittelwert**

Abbildung 3-8 zeigt, dass die meisten Gebäudeübertragungsfunktionen sich tendenziell gleich verhalten. Der Grund hierfür liegt darin, dass fast alle Messpunkte auf der nichtunterkellerten Bodenplatte installiert waren. MP18 bildet eine Ausnahme. Dieser Messpunkt weist eine stark gedämpfte Resonanz im Bereich 16 – 25 Hz auf.

Um die Prognose für weitere Gebäude auf dem Forschungscampus Bahrenfeld durchzuführen, wird die schwarze Linie in Abbildung 3-8 zu Grunde gelegt, die dem Mittelwert aller durchgezogenen Linien entspricht. Ausreißer wie die Übertragungsfunktionen von MP18, MP3 und MP9 bleiben unberücksichtigt.

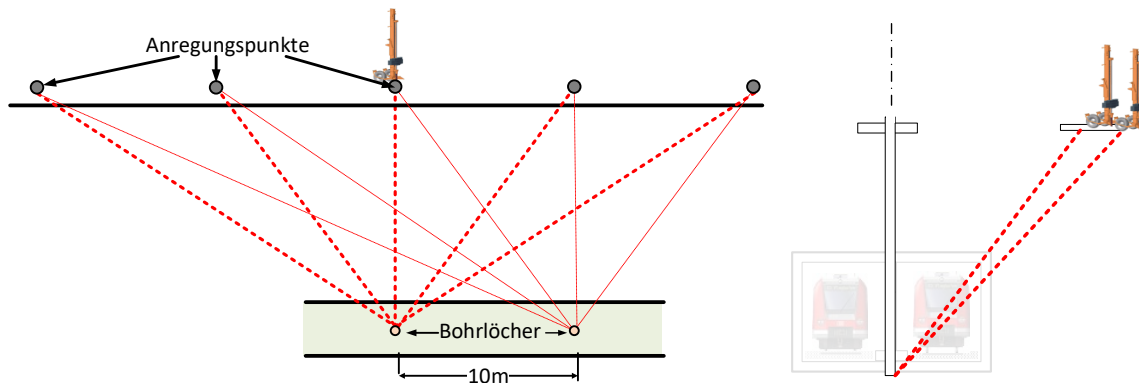
Mit dieser gemittelten Gebäude- bzw. Fundamentübertragungsfunktion lassen sich nun - näherungsweise - die Fundamentalschwingungen anderer Gebäude prognostizieren. Sie wird angesetzt für die Beweissicherungsmesspunkte MP1, MP6, MP20 und MP21. Bei MP8, MP17 und MP30 wurde zusätzlich zu den Messungen bei künstlicher Anregung durch VibroTruck (MQ5) auch die ambienten Messungen ausgewertet, um die spektralen Übertragungsfunktionen des GOK-Außenmesspunktes zum Beweissicherungsmesspunkt zu erhalten, vgl. Abbildung 9-321 im Anhang. Bei MP4 (Gebäude



45) wurde die gleiche Übertragung wie bei MP8 (Gebäudes 41, gleicher Gebäude-/Hallentyp) angesetzt.

### 3.7 Validierung der Prognose mit DYNPACT®

Das bisher beschriebene Prognoseverfahren wurde ausschließlich auf Grundlage der aus VibroTruck-Anregung gewonnen Messdaten durchgeführt. Um die Prognose zu validieren, wurde die messtechnischen Untersuchungen redundant, aber mit einer impulsförmigen Erschütterungsquelle (DYNPACT®) durchgeführt. Das Messverfahren ist in Abbildung 3-9 illustriert.



**Abbildung 3-9: Draufsicht (links) und Querschnitt (rechts) des Messaufbaus bei der DYNPACT® Anregung und Messung in Bohrlöchern**

Entlang der Luruper Chaussee wird an mehreren Stellen (insgesamt an 34 Positionen) auf GOK angeregt, die eingeleitete Kraft und die Schwingungsantwort in den Bohrlöchern gemessen wird. Als Transferfunktion des Kraftimpulses zu der Schwingungsantwort ergibt sich die Admittanz  $A(f)$ . Die genaue Auswertung ist in [2], Abschnitt 4.4, beschrieben. In Anlage III, Kapitel 10, sind die Messungen detailliert dokumentiert. Zusammen mit dem entsprechenden Kraftspektrum aus [2] kann die Erschütterungsemission im Nahfeld zur Luruper Chaussee ermittelt werden. Das Verfahren berücksichtigt direkt die Tieflage der S-Bahn.

Die Ausbreitung der Schwingungen ins Fernfeld erfolgt dann auf Basis der VibroTruck-Messungen. Die hier verwendeten Gebäudeübertragungsfunktionen entsprechen denen aus Abschnitt 3.6.

### 3.8 Ergebnisse der Erschütterungsprognose

Bei der Schwingungsprognose wird vorausgesetzt, dass die zukünftige S-Bahn-Trasse mittig unter der Luruper Chaussee in einem Rechteckunnel (offene Bauweise) verläuft. Des Weiteren wird bei der Schwingungsprognose vorausgesetzt, dass keine Weichen vorhanden sind, da diese eine zusätzliche punktförmige Erschütterungsquelle darstellen und die Erschütterungsimmissionen, zumindest im

Bereich bis zu einer Entfernung von 150m, erhöhen werden. Abbildung 3-10 zeigt den angenommenen Verlauf der S-Bahn-Trasse.



**Abbildung 3-10: Trassenverlauf der S-Bahn unter der Luruper Chaussee**

Die Erschütterungsprognose für eine S-Bahn-Vorbeifahrt erfolgt für folgende Prognoseorte:

- Alle Standorte, wo eine erschütterungstechnische Beweissicherung [1] durchgeführt wurde, unter Berücksichtigung der individuellen Gebäudeübertragungsfunktion
- Flächendeckende Prognose für das Freifeld (GOK) – Darstellung mittels Isolinen
- Flächendeckende Prognose unter Berücksichtigung einer mittleren Fundamentabnahme gemäß Abbildung 3-8.

Abbildung 3-11 zeigt die Prognosespektren einer S-Bahn-Vorbeifahrt beispielhaft für

- MP26 mit einer Entfernung von 45 m
- MP25 mit einer Entfernung von 85 m
- MP19 mit einer Entfernung von 135 m
- MP32 mit einer Entfernung von 180 m

zur nächstgelegenen Gleisachse der Trasse. Zusätzlich sind die VC-Kriterien [8] eingezeichnet.

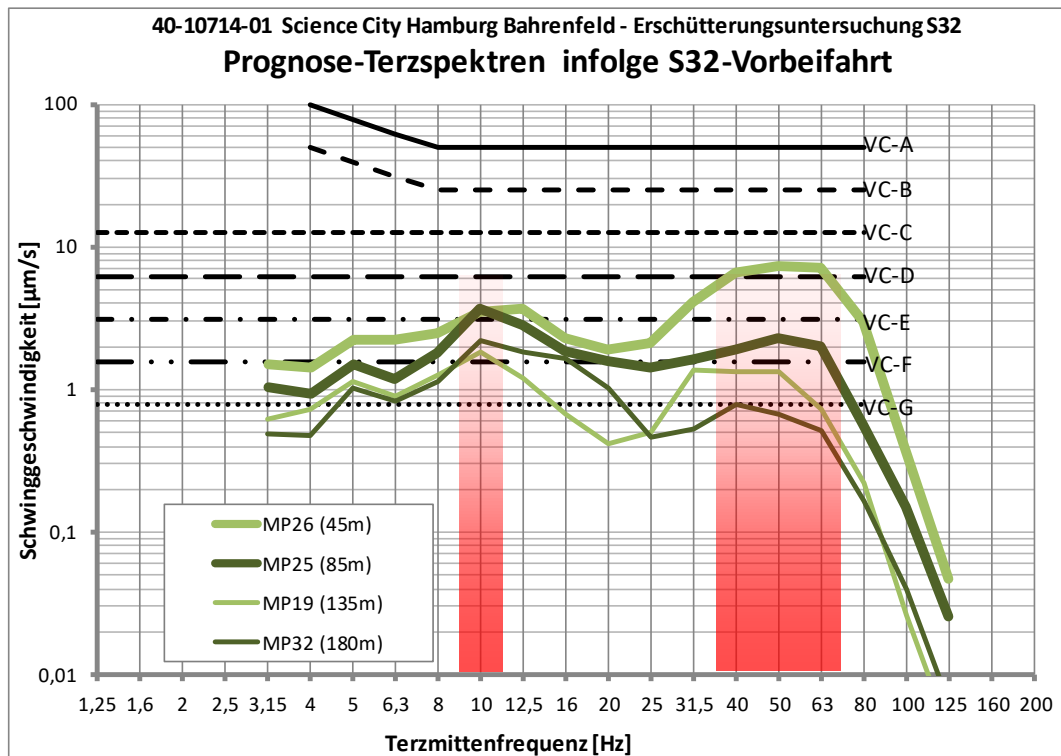


Abbildung 3-11: Prognose der Erschütterungen infolge einer S-Bahn-Vorbeifahrt an drei Messpunkten mit unterschiedlichen Entfernungen zur Trasse

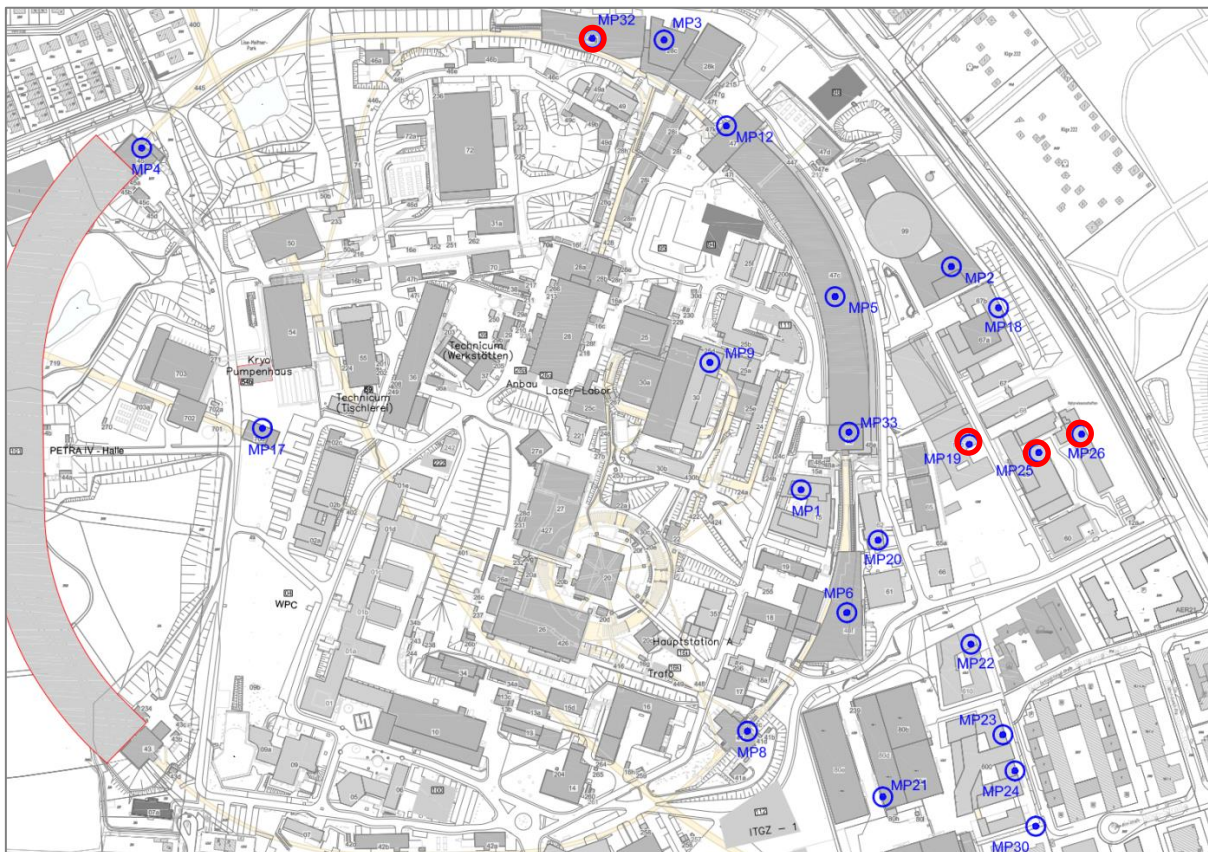


Abbildung 3-12: Beweissicherungsmesspunkte der Schwingungsmessungen auf dem Forschungscampus Bahrenfeld

Im Hinblick auf die Beurteilung anhand der VC-Kriterien sind die Maximalwerte der Prognosespektren. Abbildung 3-11 zeigt, dass die Frequenzen 40 - 63 Hz im Nahbereich bis ca. 80 m maßgebend sind; ab ca. 80 m dominieren die tiefen Frequenzen bei 10 Hz.

Die Prognoseergebnisse für das Freifeld sind in Abbildung 3-13 dargestellt. In dieser Abbildung wird anhand von Isolinien dargestellt, welches VC-Kriterium in welchen Bereichen eingehalten wird. Ersichtlich sind die unterschiedlichen Erschütterungsintensitäten je Messquerschnitt in gleicher Entfernung zum geplanten Tunnel. Die Prognose für den Bereich östlich der Luruper Chaussee am MQ4 wurde anhand der Messergebnisse aus den Sensoren auf der Trabrennbahn abgeleitet.



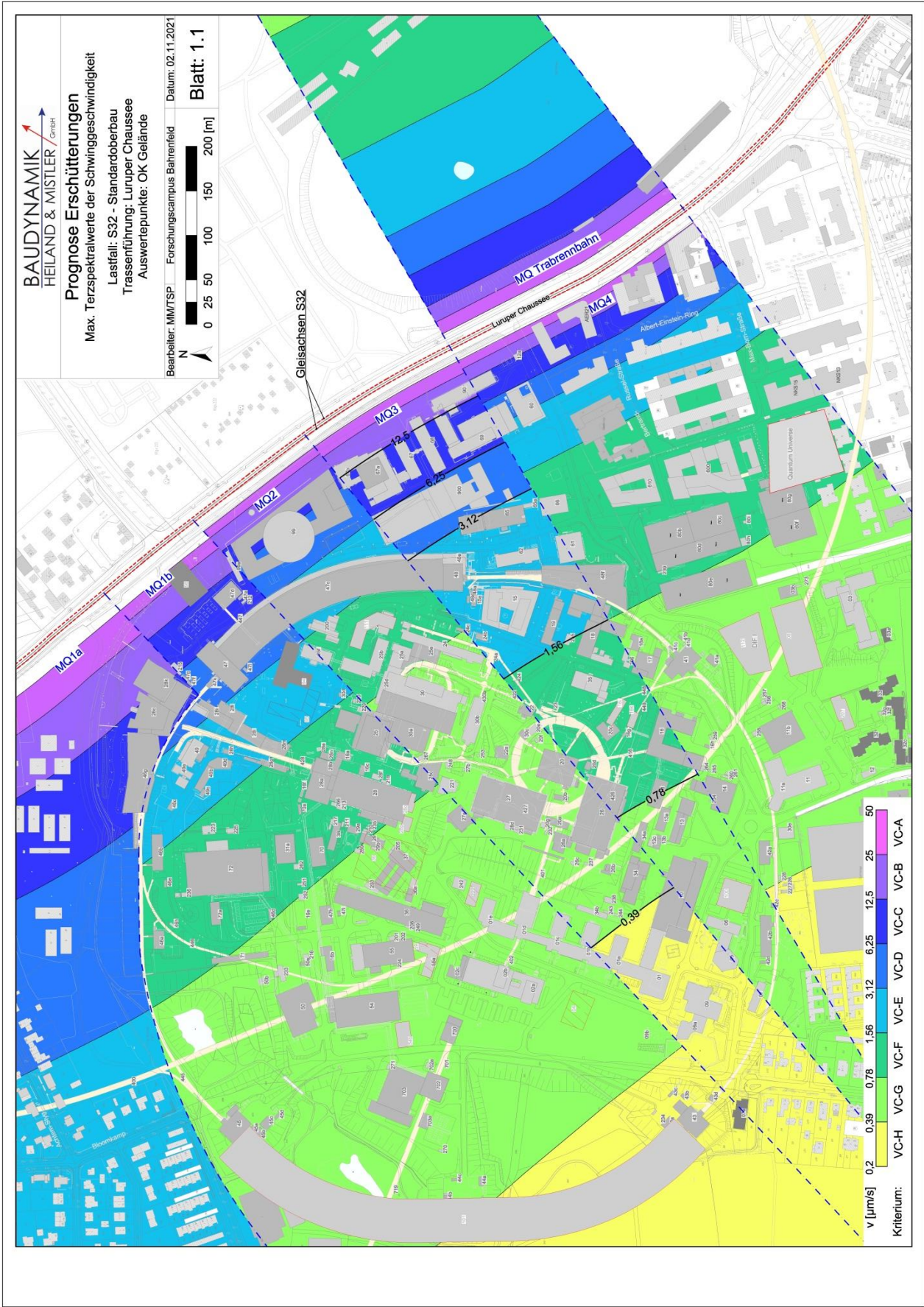


Abbildung 3-13: Prognose der S-Bahn-Erschütterungen auf den Forschungscampus Bahrenfeld – Auswertepunkt: Freifeld



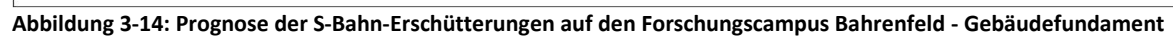




Abbildung 3-14 zeigt die Prognoseergebnisse unter Berücksichtigung der Fundamentabnahmen. Auch bei dieser Abbildung wird anhand der Isolinien gezeigt, in welchen Bereichen welches VC-Kriterium eingehalten ist. Unterstellt wird eine mittlere Fundamentabnahme gemäß Abbildung 3-8. Zusätzlich ist mit Einzelmarkierungen das Prognoseergebnis der in [1] messtechnisch beweisgesicherten Gebäuden eingezeichnet. Bei diesen Ergebnissen ist die individuelle Gebäude- bzw. Fundamentübertragungsfunktion für das jeweilige Gebäude berücksichtigt.



Abbildung 3-15: Auswertepunkte: Freifeld GOK (links) und Fundament (rechts)

### 3.9 Bewertung der Erschütterungseinwirkung der S-Bahn

#### 3.9.1 Charakteristisches Terzspektrum zur Beschreibung der IST-Situation

Um die Erschütterungseinwirkung durch die S-Bahn auf das jeweilige Gebäude bewerten zu können, ist ein Vergleich mit der Erschütterungseinwirkung ohne S-Bahn, also der derzeitigen IST-Situation, notwendig.

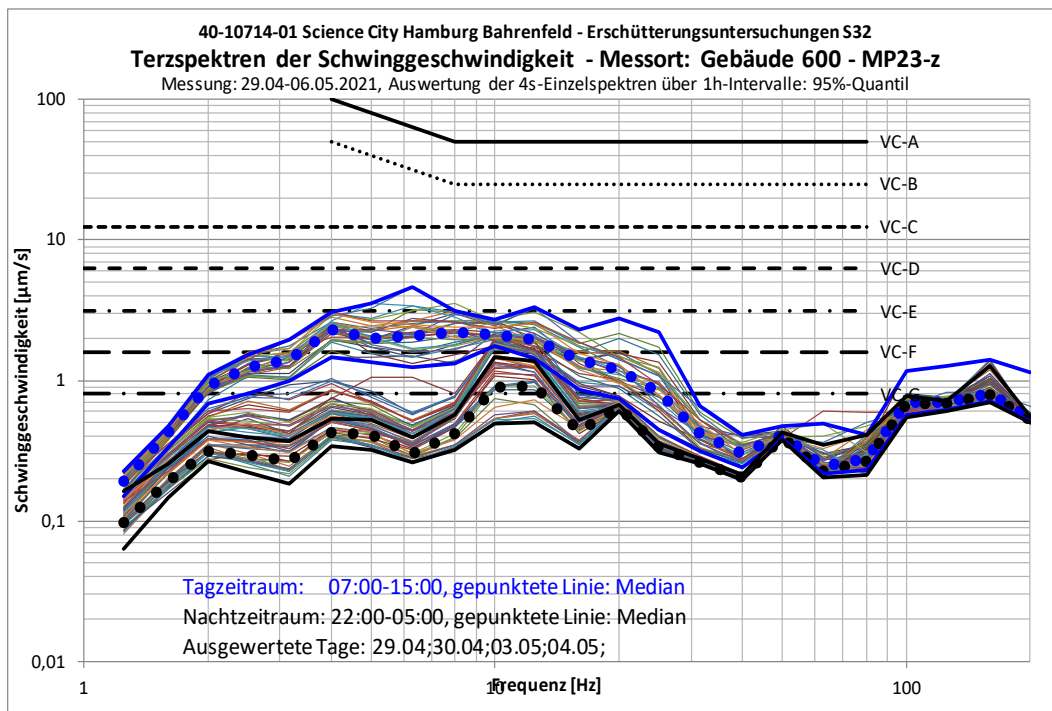
Die Messergebnisse in [1] haben gezeigt, dass die einwirkenden Erschütterungen sehr stark streuen können. Schon innerhalb einer Stunde können die Erschütterungen durch selbstverursachte Einwirkungen und auch durch ambiente Schwingungen große Unterschiede aufweisen. Auch über den Tagesverlauf gesehen verändert sich der Schwingungspegel.

Um einen stabilen Referenzwert zur Charakterisierung der IST-Situation zu ermitteln, ist es aufgrund der beschriebenen großen Streuung notwendig, eine statistische Auswertung der Schwingungspegel vorzunehmen, aber auch die Erschütterungen über einen längeren, repräsentativen Zeitraum vorzunehmen. Die Häufigkeit der späteren S-Bahn-Einwirkungen sollte ebenfalls berücksichtigt werden, um zu entscheiden, welcher statistisch ausgewerteter Quantilwert der Terzspektralwerte für einen Vergleich mit dem Prognosespektrum sinnvoll zugrunde gelegt werden kann.

Für die vorliegende Untersuchung wird der 95%-Quantilwert, und zwar unterschieden für den repräsentativen Tages- und Nachzeitraum, herangezogen. Der Grund liegt darin, dass unterstellt wird, dass eine Vorbeifahrt in 4 bis 7 % der Zeit eine Vorbeifahrt erfolgt. Hierbei wird angenommen, dass je

Richtung alle 5 min ein Zug mit einer Vorbeifahrts- bzw. Einwirkungsdauer von 5 - 10 s (je nach Anzahl Traktionen) vorbeifährt.

In Abbildung 3-16 sind die gemessenen 1h-Terzspektren, ausgewertet als 95%-Quantilwert, beispielhaft für den Messpunkt MP23 dargestellt. Das Diagramm wurde bereits in [1], Abschnitt 4, als Beispiel verwendet.



**Abbildung 3-16: 1h-95%-Quantilwerte beim Messpunkt MP23**

- Blau markiert sind alle Terzspektren zwischen 7 und 15 Uhr, die repräsentativ für den Tageszeitraum sind.
- Schwarz markiert sind alle Terzspektren im Nachtzeitraum 22 bis 5 Uhr.

Angemerkt sei, dass bei dieser Auswertung bewusst die Werkstage (vgl. Zeile: „Ausgewertete Tage“) berücksichtigt sind.

### 3.9.2 Vergleich des S-Bahn-Prognosespektrums mit der IST-Situation

In der nachfolgenden Abbildung 3-17 wird nun das Prognosespektrum dieses Gebäudes dem IST-Wert in Form des Tageszeitraum-Medians (blau punktierte Linie in Abbildung 3-16) bzw. des Nachtzeitraum-Medians (schwarz punktierte Linie) gegenübergestellt. Eine Kombination oder Überlagerung der Terzspektren erfolgt nicht, da es sich jeweils um voneinander unabhängige Einzelereignisse handelt (95%-Quantile). Der Information halber wird in Abbildung 3-18 die Lage der Beweissicherungs-Messpunkte sowie die Lage der S-Bahn-Trasse dargestellt.

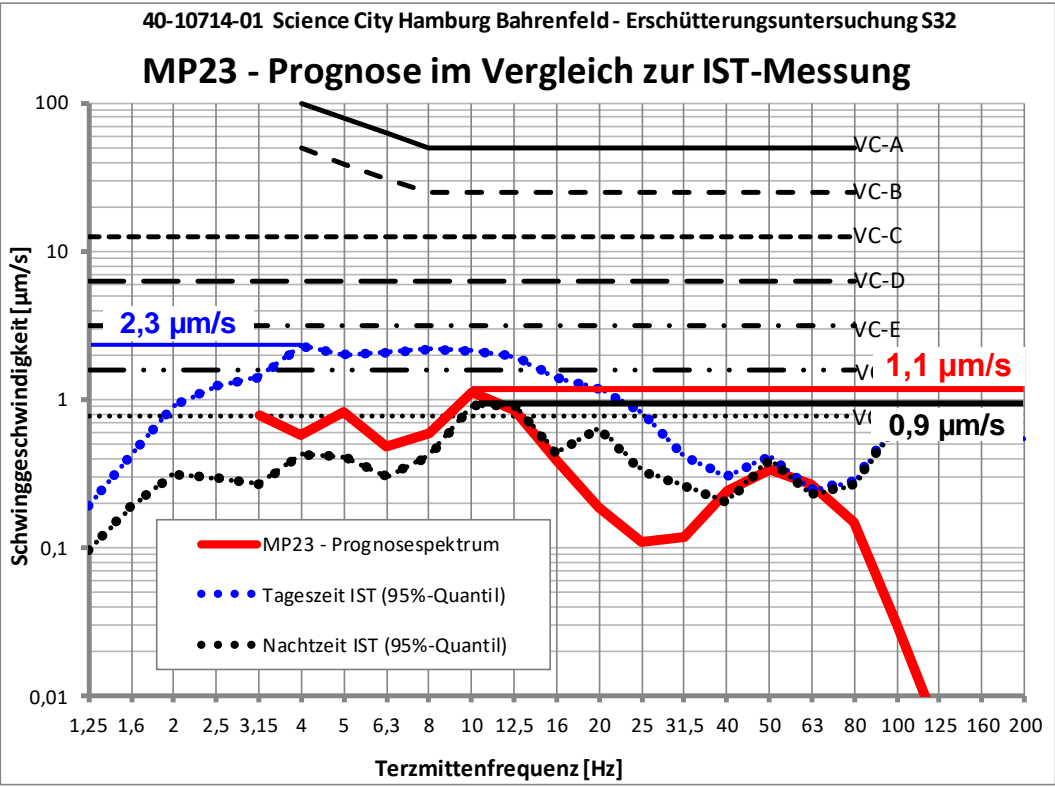


Abbildung 3-17: S-Bahn-Prognosespektrum am MP23 im Vergleich zum IST-Zustand

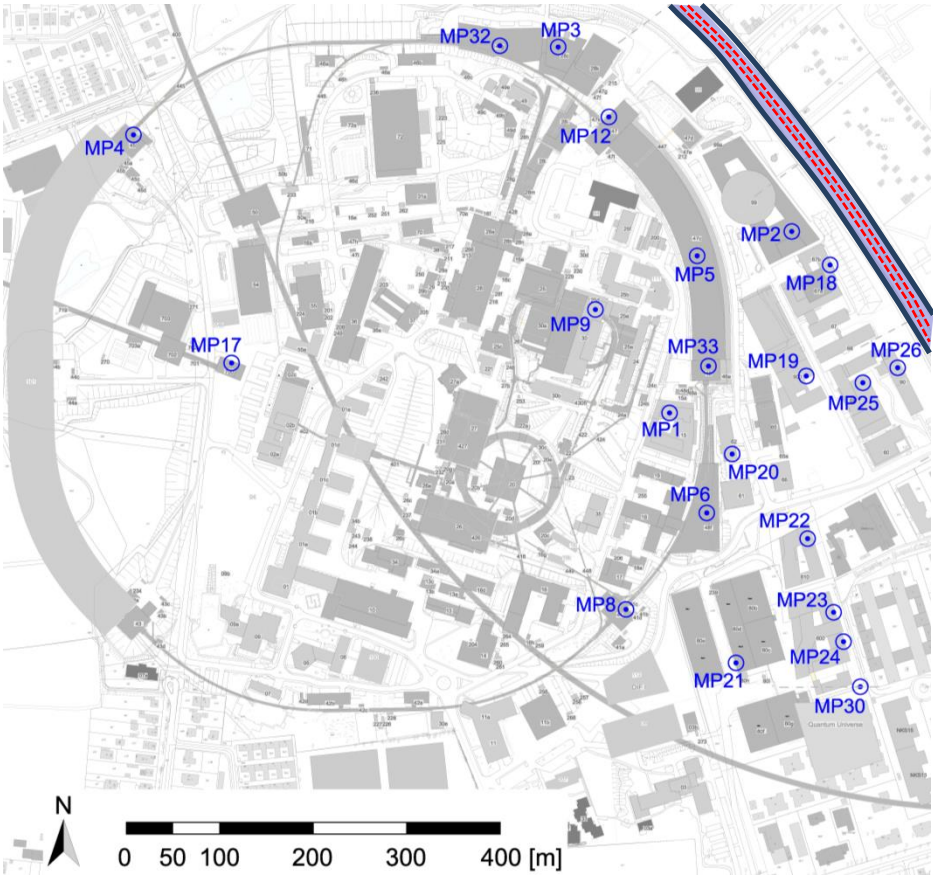


Abbildung 3-18: Lage der Messpunkte in Bezug zur S-Bahn-Trasse

Abbildung 3-17 zeigt, dass das S-Bahn-Prognosespektrum kleiner ist als das Spektrum des IST-Zustands im Tageszeitraum. Das bedeutet, dass die Schwingungen durch die S-Bahn den Zustand am MP23 aus erschütterungstechnischer Sicht nicht verschlechtern. Der Quotient aus dem Maximalwert des Prognosespektrums zum Maximalwert des IST-Zustands  $1,1 / 2,3 = 0,8$  ist somit kleiner 1. Im Nachtzeitraum verschlechtert sich die Situation geringfügig. Der Quotient der Maximalwerte beträgt  $1,1 / 0,9 = 1,2$ .

Abbildung 3-19 ist beispielhaft die Prognose für MP26 dargestellt. Dieser Messpunkt befindet sich im Vergleich zu MP23 deutlich näher an der zukünftigen S-Bahn-Trasse (MP23 hat einen Abstand zur S-Bahn-Trasse von 224 m, MP25 nur 45 m). Dementsprechend ist der Maximalwert des S-Bahn-Prognosespektrums mit  $7,3 \mu\text{m/s}$  deutlich größer als bei MP23, und es verschlechtert sich nicht nur nachts, sondern auch tagsüber die Erschütterungssituation.

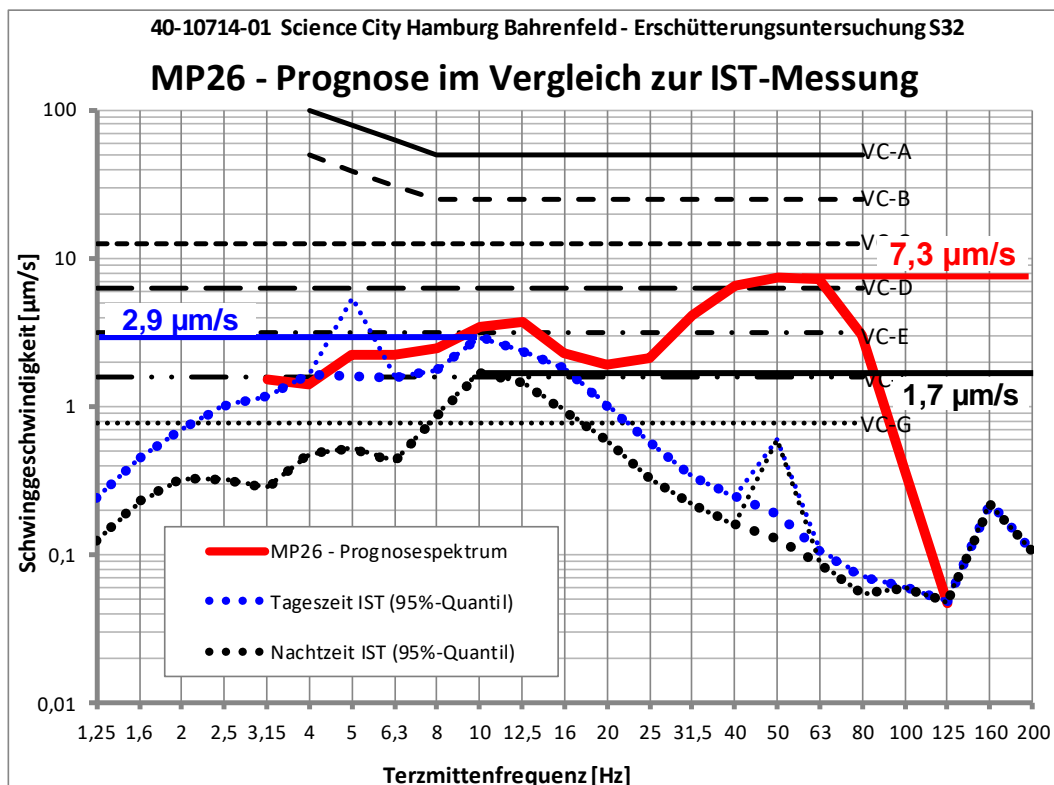


Abbildung 3-19: S-Bahn-Prognosespektrum am MP26 im Vergleich zum IST-Zustand

Wie in [1], Abschnitt 3.3, bereits angemerkt sei hier nochmal darauf hingewiesen, dass die Störungen durch hausinterne, selbsterzeugte Schwingungen (z.B. durch Pumpen, Kompressoren o.ä.) oder auch Netzeinstreuungen bewusst unberücksichtigt bleiben, da es sich hierbei um „selbstgemachte“ Störungen handelt, die mit Hilfe einer (besseren) schwingungs isolierten Lagerung des Emittenten behoben bzw. deutlich reduziert werden.

In Abbildung 3-20 und Abbildung 3-21 wird nun das Verhältnis der spektralen Maximalwerte für alle Beweissicherungsmesspunkte ausgewertet und in Abhängigkeit der Entfernung zur S-Bahn-Trasse dargestellt, getrennt für den Tages- und für den Nachtzeitraum.

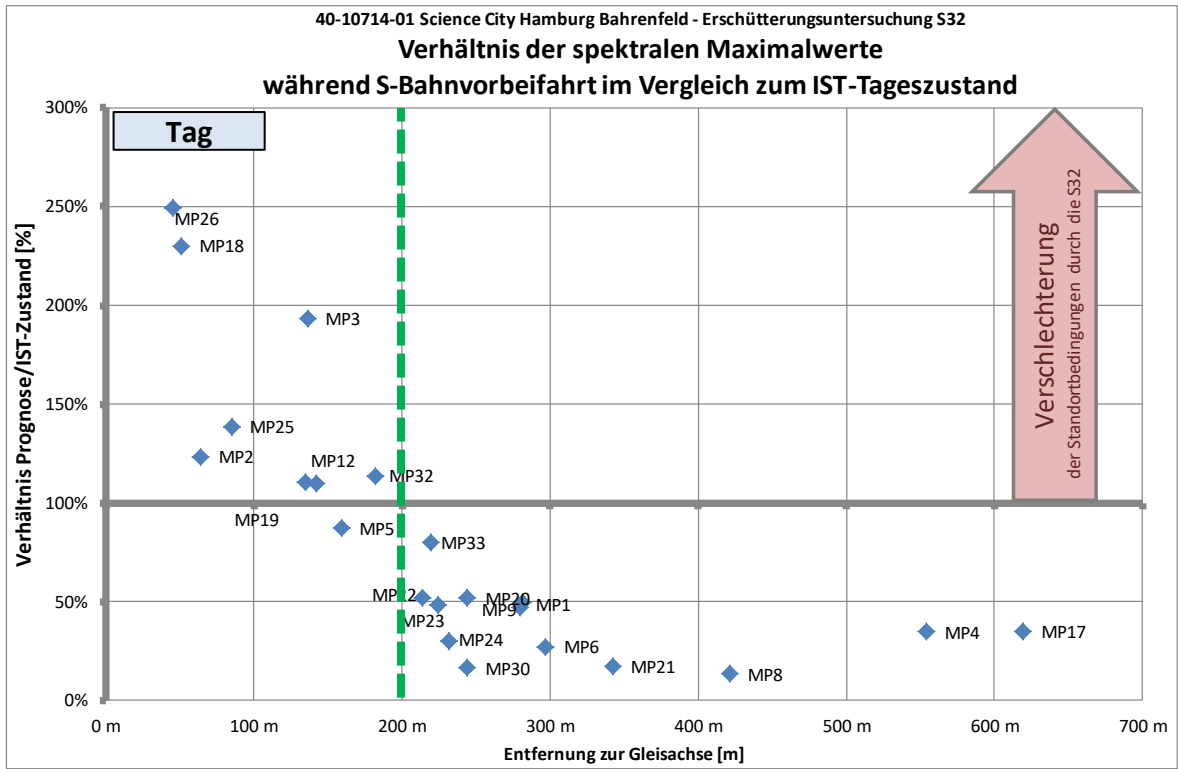


Abbildung 3-20: Verhältnis der spektralen Maximalwerte während S-Bahnvorbeifahrt im Vergleich zum IST-Tageszustand

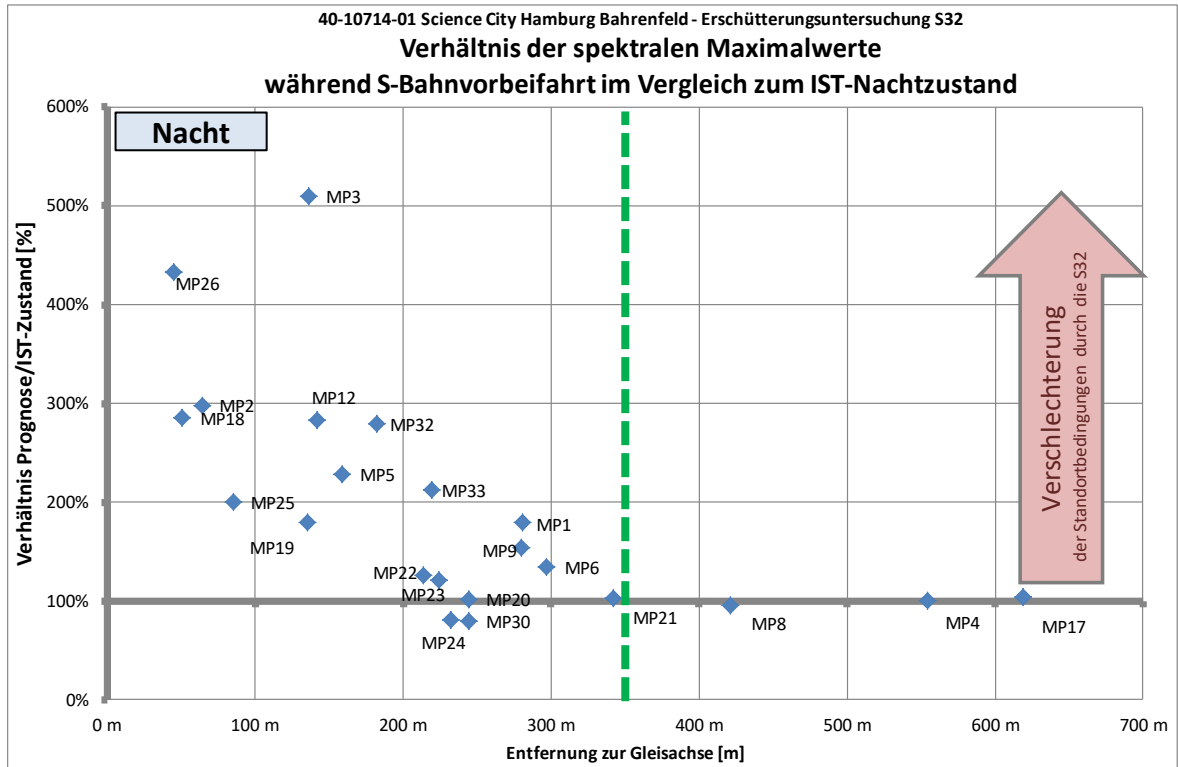


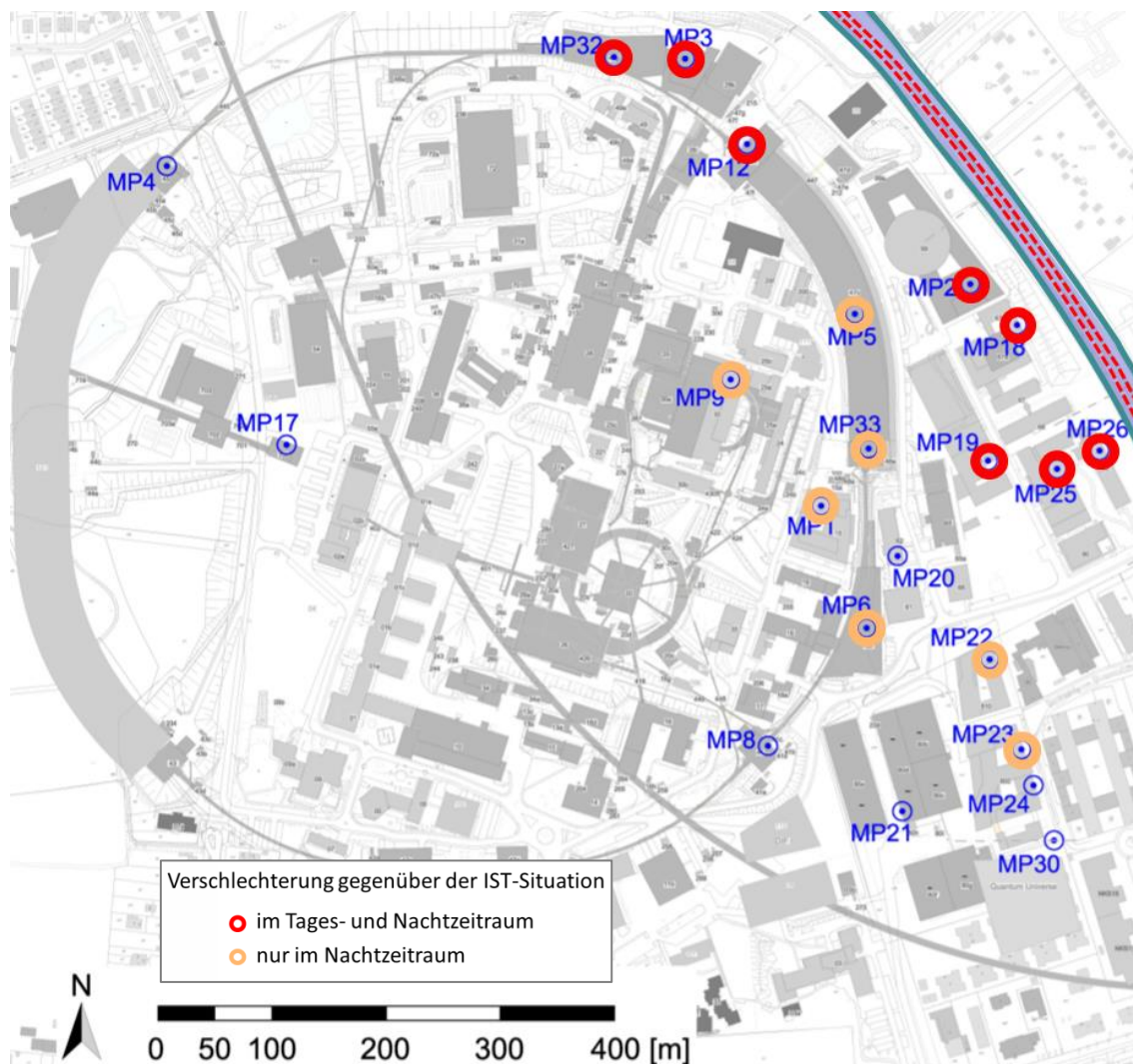
Abbildung 3-21: Verhältnis der spektralen Maximalwerte während S-Bahnvorbeifahrt im Vergleich zum IST-Nachtzustand



Abbildung 3-20 zeigt, dass bis zu einer Entfernung von 200 m zur S-Bahn-Trasse (genauer gesagt: bis Achse des nächstgelegenen Gleises) der Quotient der Messpunkte größer 1 (= 100 %) ist und sich somit die erschütterungstechnischen Standortbedingungen im Tageszeitraum verschlechtern. Die Verschlechterung beträgt am MP26 um Faktor 2,5 (= 250 %). Bei größeren Entfernungen gehen die Erschütterungen im ambienten Rauschen unter.

Im Nachtzeitraum ist dieser „Betroffenheitskorridor“ größer. In Abbildung 3-21 ist zu sehen, dass sich die Erschütterungssituation bei S-Bahn-Vorbeifahrt bis zu einer Entfernung von 350m verschlechtern wird. Hier beträgt die Verschlechterung bis Faktor 5 (= 500 %).

In Abbildung 3-22 ist dargestellt, an welchen Beweissicherungsmesspunkten eine Verschlechterung im Tages- und Nachtzeitraum und wo eine Verschlechterung nur im Nachtzeitraum prognostiziert wird. Wie erwartet werden tritt die Verschlechterung im Tages- und Nachtzeitraum in Nahbereich zur Trasse auf.



**Abbildung 3-22: Lage der Messpunkte mit Verschlechterung der zukünftigen Erschütterungssituation gegenüber der IST-Situation**



### 3.9.3 Zusatzinformation: Vergleich anhand der Bodenbewegungen

Ergänzend zum vorhergehenden Abschnitt erfolgt in diesem Unterabschnitt ein sehr spezieller Vergleich der IST-Situation mit der Prognosesituation, wenn die S-Bahn vorbeifährt. Und zwar erfolgt der Vergleich anhand der Bodenbewegung.

Die hier prognostizierten Bodenbewegungen werden durch Integration des Prognose-Schwinggeschwindigkeitsspektrums und der energetischen Aufaddition der Terzspektralwerte ermittelt. Der Frequenzbereich, der hierbei berücksichtigt werden kann, ist auf 4 bis 100 Hz begrenzt. Beispielsweise wird in Abbildung 3-23 das qualitative Ergebnis für den Standort am MP33 dargestellt.

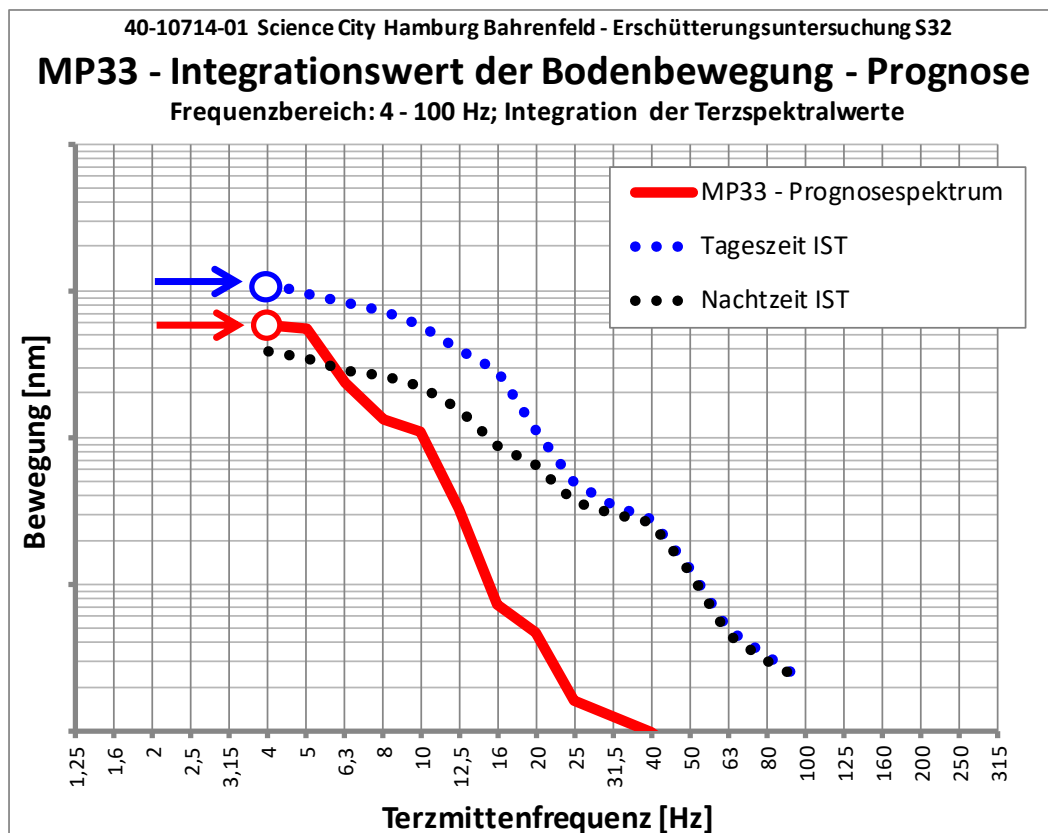
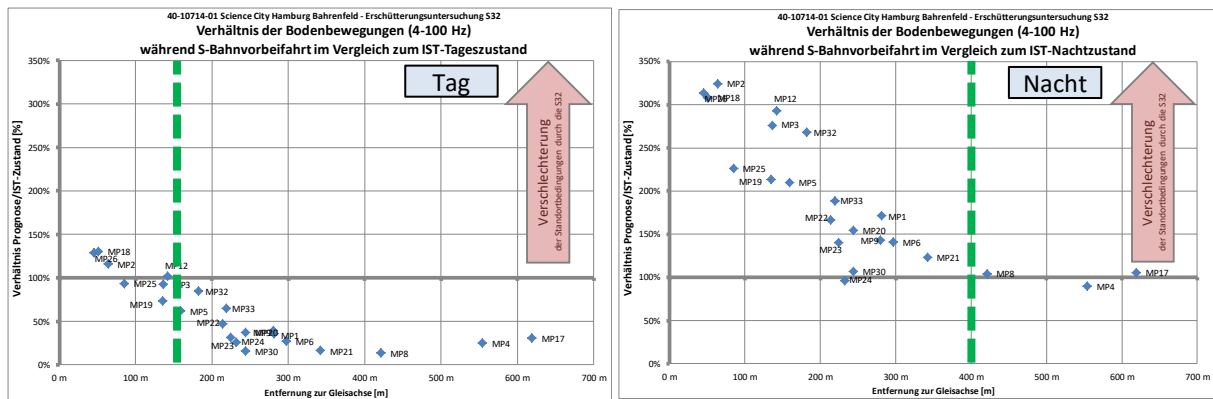


Abbildung 3-23: Baugrundbewegung am Standort MP33 während S-Bahn-Vorbeifahrt und IST-Zustand, ausgewertet bis 100 Hz

Auch bei dieser speziellen Form der Auswertung kann nun der Quotient der Baugrundbewegung (Frequenzbereich 4 – 100 Hz) infolge S-Bahn-Vorbeifahrt (rot markierter Wert) und IST-Zustand ausgewertet werden. Der Quotient wird wiederum für alle Messpunkte in Abhängigkeit der Entfernung zur S-Bahn-Trasse nachfolgend dargestellt.



**Abbildung 3-24: Verhältnis der Bodenbewegung (4 – 100 Hz) S-Bahn-Vorbeifahrt zu IST-Zustand: Tagesauswertung (links) und Nachtauswertung (rechts)**

Abbildung 3-24 zeigt, dass sich ähnlich große „Betroffenheitskorridore“ ergeben wie in Abbildung 3-20 und Abbildung 3-21. Tagsüber werden die Bodenbewegungen im Vergleich zum IST-Zustand bis zu einer Entfernung von 150 m Abstand zur Trasse größer. Im Nachtzeitraum beträgt die Korridorbreite ca. 400 m.

## 4 Zielführende Schutzmaßnahmen zur Minderung der Erschütterungen

### 4.1 Auslegungsziel

In diesem Kapitel wird untersucht, welche Schutzmaßnahmen möglich und zielführend sind, um das Erschütterungsniveau so zu mindern, dass im Tageszeitbereich keine Verschlechterung gegenüber der beweisgesicherten IST-Situation auftritt. Im Nachtzeitraum wird damit weiterhin eine gewisse Verschlechterung in Kauf genommen.

In Abschnitt 4.6 wird ergänzend darauf eingegangen, welche Maßnahmen für die Einhaltung der Nachtzeitraumwerte notwendig wären.

### 4.2 Zielführende Erschütterungsschutz-Maßnahmen

Die Maßnahmen zur Reduzierung von Erschütterungen sind begrenzt. Es kommen nur in der Praxis erprobte, dauerhaft wirksame und praxisbewährte Maßnahmen in Frage.

Die nachfolgende Abbildung 4-1 zeigt zwei alternative zielführende Maßnahmen auf, mit denen es möglich ist, dass das Erschütterungsniveau an den beweisgesicherten Standorten sich im Tageszeitraum nicht verschlechtert.

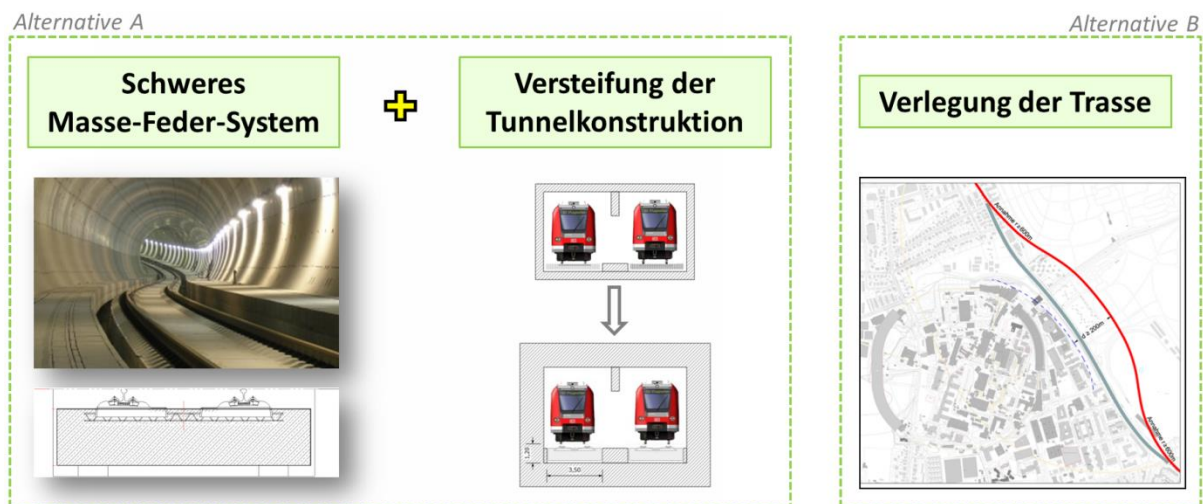


Abbildung 4-1: Zwei alternative Maßnahmen

- Alternative A besteht aus einem schweren Masse-Feder-System und einer deutlich versteiften Tunnelkonstruktion. Diese Alternative A wird in den Abschnitten 4.3 und 4.4 beschrieben.
- Alternative B sieht eine Verlegung der Trasse vor. Dies wird in Abschnitt 4.5 beschrieben.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass es viele weitere Maßnahmen gibt, um die Erschütterungen infolge Schienenverkehr zu reduzieren. Drei Beispiele sind in Abbildung 4-2 dargestellt. Der Hintergrund ist, dass solche Maßnahmen entweder eine zu geringe Minderungswirkung aufweisen oder nur in einem Frequenzbereich wirken, der im vorliegenden Fall nicht maßgebend ist oder (im ungünstigsten Fall) sich aufgrund Resonanzerhöhungen ungünstig auswirkt.



**Abbildung 4-2: Beispiele nicht zielführender Maßnahmen**

### 4.3 Schweres Masse-Feder-System

Wie erwähnt kommen nur Schutzmaßnahmen in Betracht, die in der Praxis erprobt und dauerhaft wirksam sind. Die Maßnahme, die zur größten Schwingungsminderung führt, ist ein Masse-Feder-System (MFS). Der Oberbau kann als Feste Fahrbahn oder als Schotteroberbau ausgeführt werden.

Wichtigste baudynamische Kenngröße eines MFS ist seine Abstimmfrequenz. Je tiefer die Abstimmfrequenz ist, desto größer ist die frequenzabhängige Minderungswirkung. Schwingungen mit Frequenzen, die größer als die 1,4fache Abstimmfrequenz ist, werden reduziert. Die Minderungswirkung nimmt bei größeren Frequenzen zu. Schwingungen im Bereich der Abstimmfrequenz werden verstärkt.

Sehr tief abgestimmte MFS erfordern

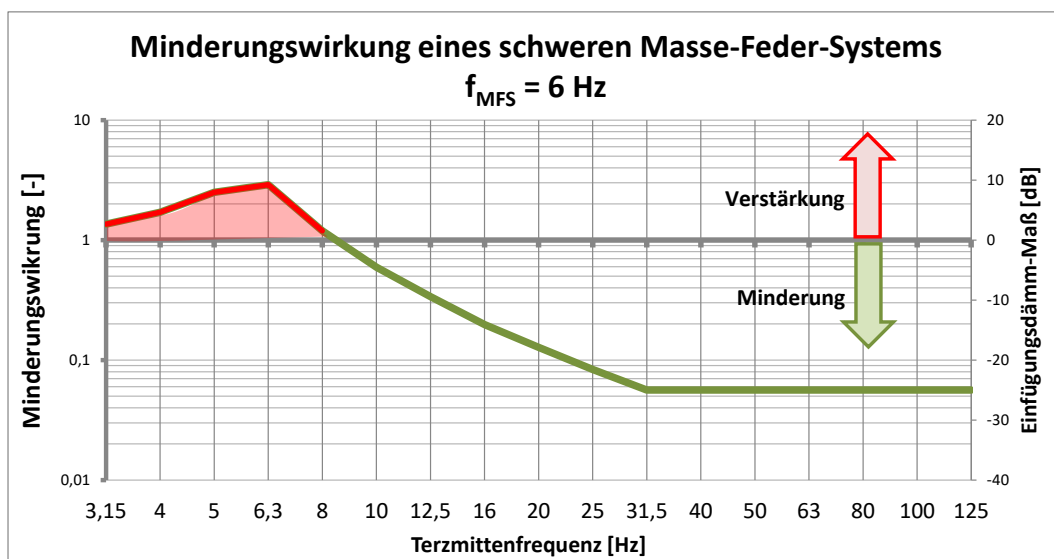
- eine große Masse und
- eine weiche Lagerung,

um dies realisieren zu können, können solche schweren MFS nur durch eine punktgestützte, massive Konstruktion realisiert werden.

Im vorliegenden Fall sind die prognostizierten Erschütterungseinwirkungen am Immissionsort charakterisiert durch einen höherfrequenten Anteil im Bereich 40 – 63 Hz sowie einen tieffrequenten Anteil im Bereich von 10 Hz, vgl. Abbildung 3-11. Um auch die tiefen Frequenzen im Bereich von 10 Hz zu mindern bzw. wenigstens nicht zu verstärken, ist eine deutlich tiefere Abstimmfrequenz als 10 Hz erforderlich. Es wird empfohlen, ein MFS mit einer Abstimmfrequenz von

$$f_{0,MFS} = 6,0 \text{ Hz}$$

hier einzuplanen. Eine noch tiefere Abstimmfrequenz wird nicht empfohlen, um Stabilitätsprobleme aufgrund einer zu weichen Lagerung zu vermeiden. Die zugehörige rechnerisch ermittelte erschütterungsmindernde Wirkung eines 6,0 Hz - MFS ist in der nachfolgenden Abbildung 4-3 dargestellt.



**Abbildung 4-3: Einfügedämmmaß eines 6,0 Hz – MFS**

Abbildung 4-3 zeigt, dass Schwingungen mit Frequenzen ab ca. 9 Hz gemindert, Schwingungen mit Frequenzen unter 8 Hz verstärkt werden. Der „Verstärkungsfaktor“ ist abhängig von der Konstruktion und auch maßgeblich von dem verwendeten Material für die elastische Lagerung. Es wird empfohlen, Elastomer-Punktlager zu verwenden. Ein Beispiel eines solchen Lagers ist in Abbildung 4-4 dargestellt.



**Abbildung 4-4: Beispiel eines Elastomer-Punktlagers (Quelle: Werbebroschüre Firma Getzner)**

Erste Auslegungsberechnungen des MFS wurden zwecks Vordimensionierung bereits durchgeführt. Es konnte bestätigt werden, dass das MFS mit Elastomer-Lagern realisierbar ist und es auch entsprechende Lagertypen gibt, die Einsenkung und die Belastung dauerhaft aufnehmen können. Die Berechnungen ergaben außerdem, dass auf der sicheren Seite ein Platzbedarf von

**3,50 m x 1,20m**

im Rohbau des Tunnels für das MFS vorzuhalten ist, vgl. Abbildung 4-5. Die tatsächlichen Abmessungen der Gleistragplatte sowie Lagerabstände und -dimensionierung sind durch eine baulasttechnische Auslegung in einer späteren Projektphase genau festzulegen.

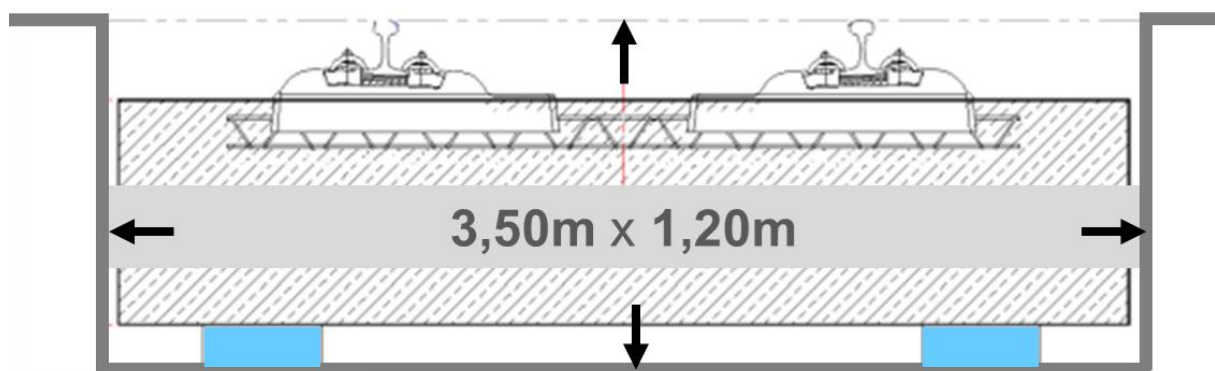


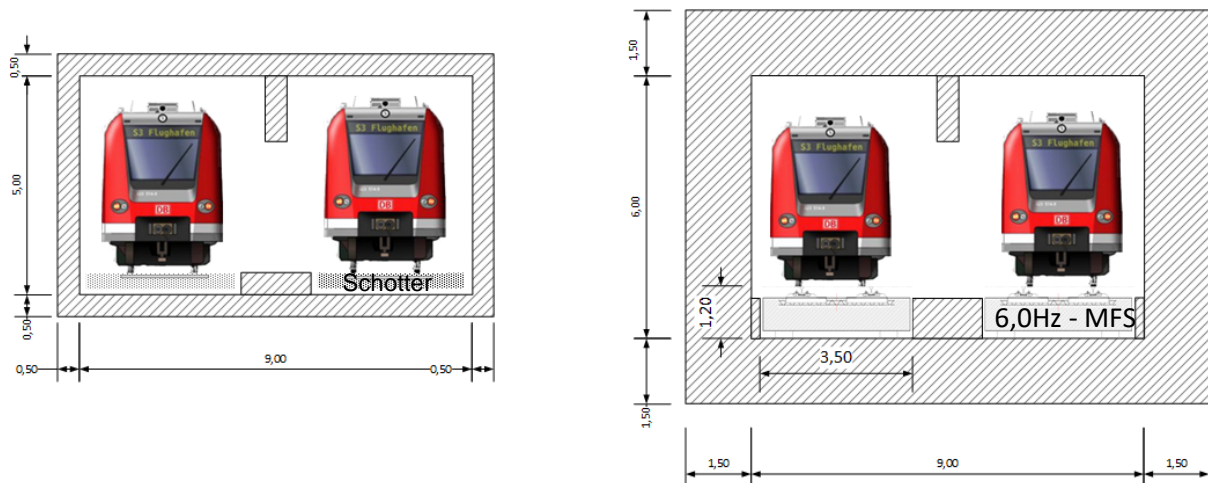
Abbildung 4-5: Platzbedarf des MFS

#### 4.4 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion

Wird eine Prognose unter Berücksichtigung des in Abschnitt 4.3 beschriebenen 6,0 Hz - MFS durchgeführt, so stellt sich heraus, dass die hochfrequenten Schwingungsimmissionen sehr gut gemindert sind. Allerdings verschlechtert sich die Erschütterungssituation in größeren Entfernungen ab ca. 100m aufgrund der Filtercharakteristik und des Übertragungsverhaltens des Baugrunds. Dort dominieren dann tieffrequente Schwingungen im Bereich der Abstimmfrequenz von 6,0 Hz. Aus diesem Grund ist es erforderlich, diese tieffrequenten, nahezu quasi-statischen Erschütterungsemissionen direkt am Emissionsort zu reduzieren.

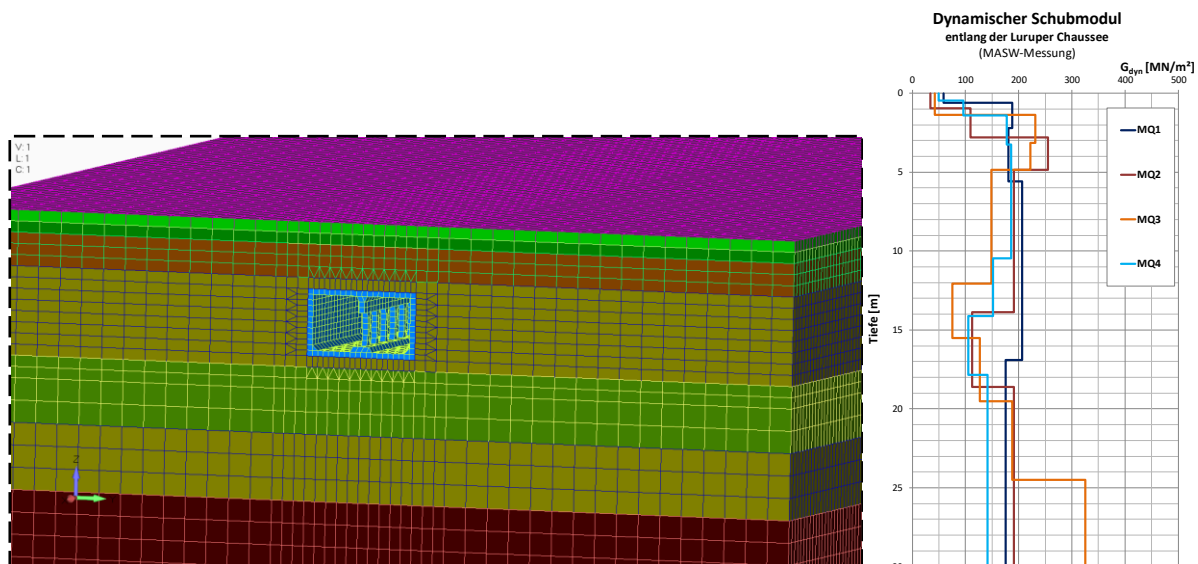
Kompensieren lässt sich der beschriebene tieffrequente Verstärkungseffekt durch eine massive und deutlich versteifte Tunnelkonstruktion. Eine deutlich versteifte Tunnelkonstruktion bewirkt, dass die quasi-statische Einsenkung infolge der S-Bahn reduziert wird und damit die tieffrequente Anregung gemindert wird. In Abbildung 4-6 ist beispielhaft eine versteifte Tunnelkonstruktion dargestellt, die dreifach dickere Tunnelwände, -decken und -sohlen im Vergleich zum Referenz-tunnel an der Königsstraße hat, vgl. [2].





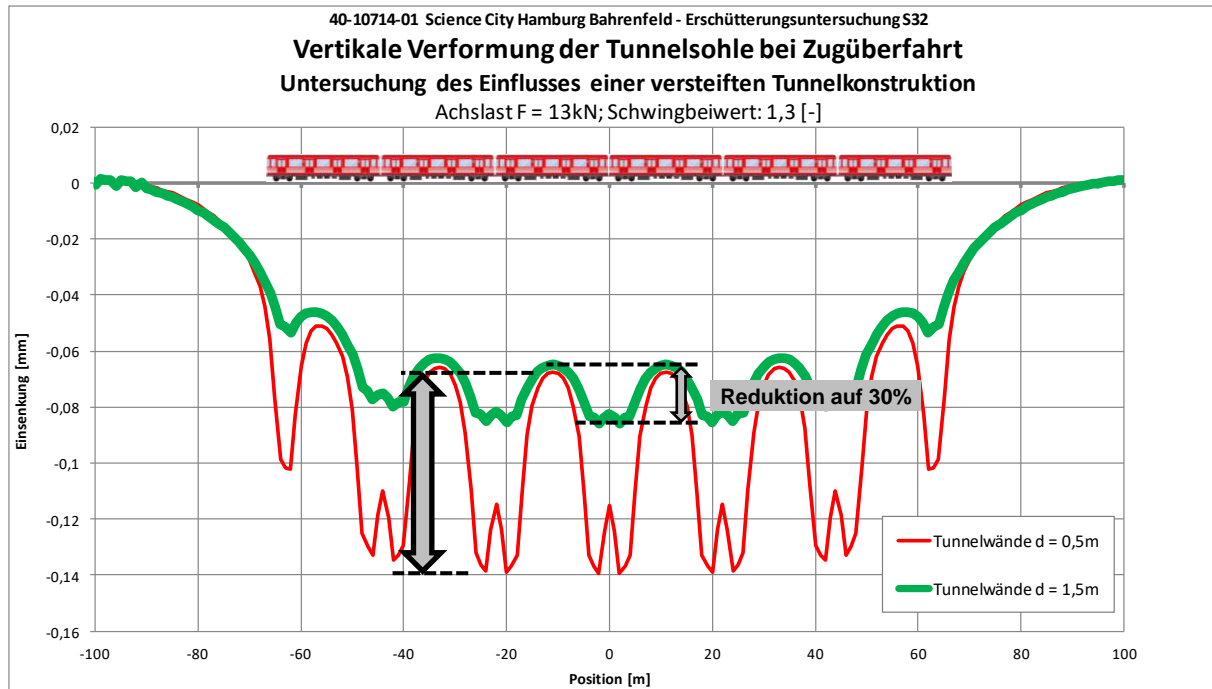
**Abbildung 4-6:** Schematische Querschnittszeichnungen des Tunnels an der Königstraße (links) und des versteiften Tunnels (rechts); S-Bahn-Grafik aus [14]

Die Wirksamkeit der quasi-statischen Minderung dieser Tunnelkonstruktion wird nachfolgend mittels einer FE-Simulation als orientierende Vorabschätzung untersucht. Dazu werden beide in Abbildung 4-6 dargestellten Tunnel mittels eines 3D-FE-Modell nachgebildet, eingebettet in das umgebende Erdreich. Die dabei angesetzten Baugrundeigenschaften entsprechen den gemittelten Ergebnissen der baudynamischen Baugrunduntersuchung aus Anlage IV, Abschnitt 11.



**Abbildung 4-7:** FE-Modellierung des eingebetteten Tunnels (links) und angesetzt dynamischer Schubmodul des Baugrunds als Resultat der Baugrunduntersuchung in Anlage IV (rechts)

Das Ergebnis ist in Abbildung 4-8 dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass der „Fußabdruck“ der S-Bahn infolge der Achslasten bzw. Drehgestelle durch einen versteiften Tunnel wesentlich ausgeglichener ist. Die Differenzbewegung, die in einem Abstand einer Wagenlänge wiederholend in den Baugrund eingepreßt wird und somit zu einer tieffrequenten Anregung führt, wird deutlich reduziert.



**Abbildung 4-8: Vertikale Verformung der Tunnelsohle bei Zugüberfahrt**

Nachfolgend werden nun die Prognoseergebnisse der Schwingungsimmissionen dargestellt, die man erhält, wenn die Maßnahme „Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit einer versteiften Tunnelkonstruktion“ berücksichtigt wird.

Analog zu Abbildung 3-20 und Abbildung 3-21 in Abschnitt 3.9.2 ist in Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 das Verhältnis der Maximalwerte des Prognosespektrums und des beweisgesicherten IST-Zustands dargestellt.

- Abbildung 4-9 zeigt, dass mit der vorgeschlagenen Schutzmaßnahme „Alternative A“ sich die Erschütterungssituation gegenüber dem IST-Zustand nicht verschlechtert. Alle Werte (grüne Markierungen) liegen unterhalb von 100 %.
- Abbildung 4-10 zeigt aber auch, dass im Nachtzeitraum weiterhin eine Verschlechterung gegenüber der IST-Situation auftreten wird und einige „ungelöste Schutzfälle“ verbleiben. Die Verschlechterung beträgt bis maximal Faktor 2,2 und ist damit deutlich weniger „schlimm“ als ohne Schutzmaßnahme (Faktor 5).

Abbildung 4-11 zeigt das Prognoseergebnis für die Schutzmaßnahme „Alternative A“ anhand der Isolinen-Darstellung. Anhand der farblich markierten Flächen wird gezeigt, in welchen Bereichen das entsprechende VC-Kriterium eingehalten wird. Die Prognose setzt eine mittlere Fundamentabnahme gemäß Abbildung 3-8 voraus. Zusätzlich sind die Prognoseergebnisse der beweisgesicherten Gebäude eingezeichnet.

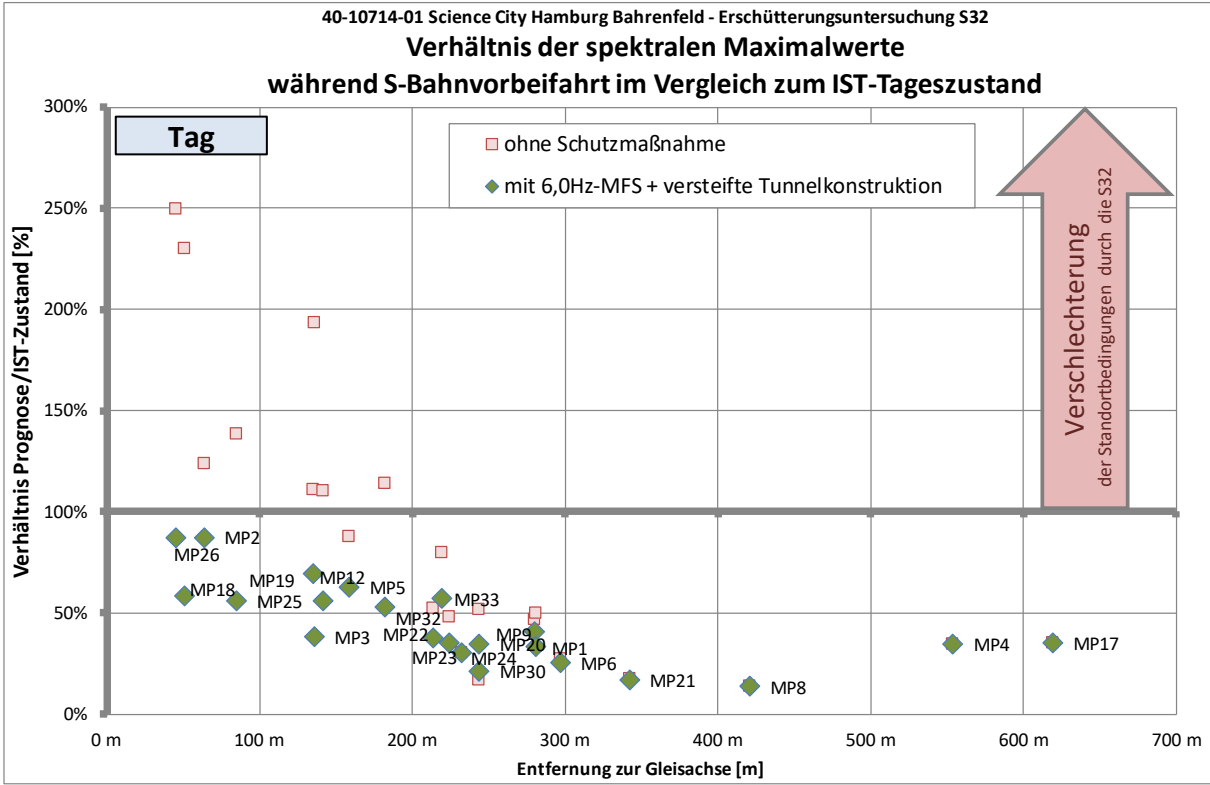


Abbildung 4-9: Verhältnis der spektralen Maximalwerte während S-Bahnvorbeifahrt im Vergleich zum IST-Tageszustand; mit und ohne MFS + versteifte Tunnelkonstruktion

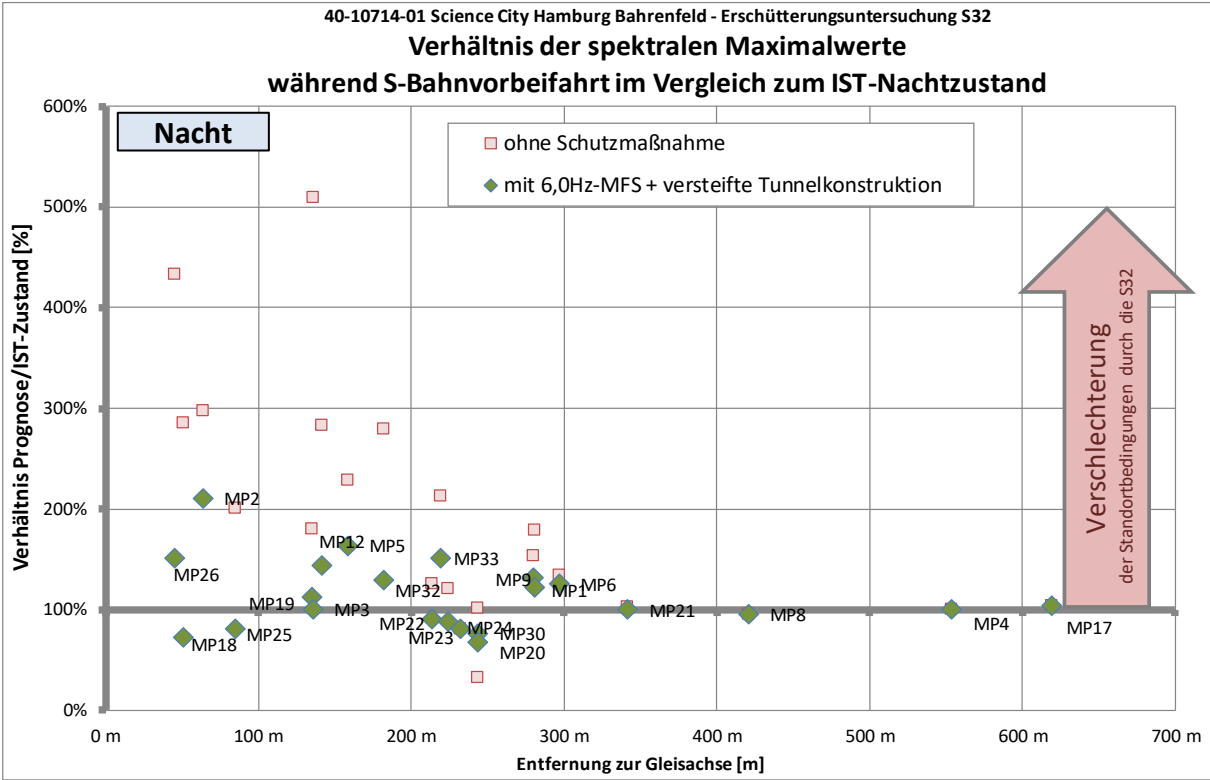


Abbildung 4-10: Verhältnis der spektralen Maximalwerte während S-Bahnvorbeifahrt im Vergleich zum IST-Nachtzustand; mit und ohne MFS + versteifte Tunnelkonstruktion



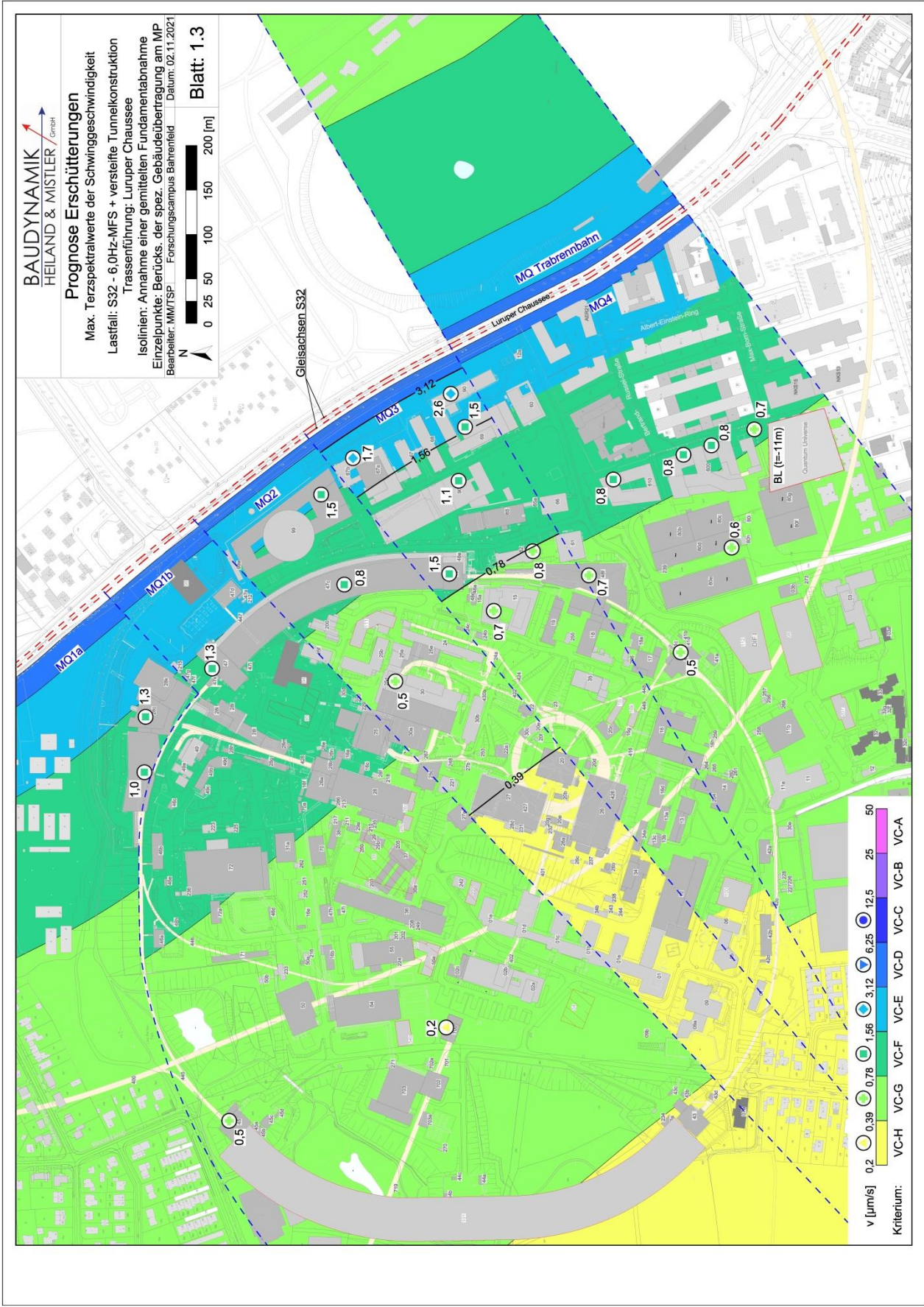


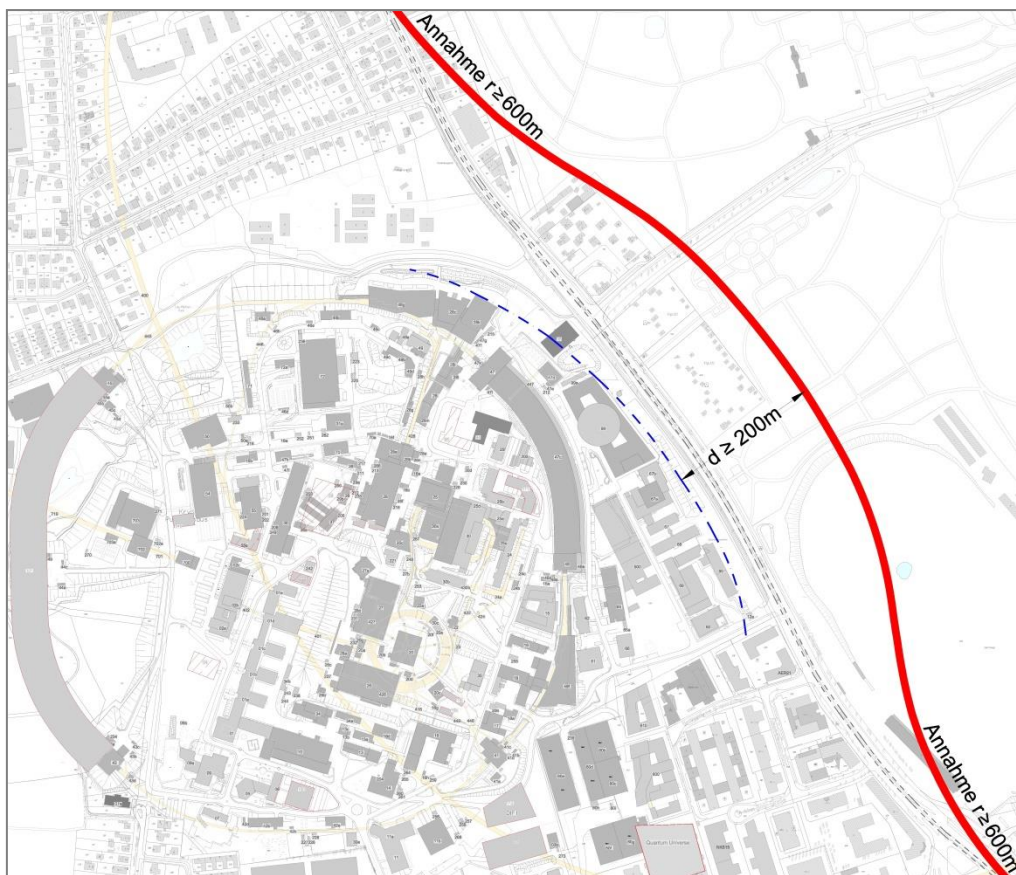
Abbildung 4-11: S-Bahn-Erschütterungen bei Einbau eines schweren MFS und einer versteiften Tunnelkonstruktion

#### 4.5 Verlegung der Trasse

Eine alternative zielführende Maßnahme ist die Verlegung der Trasse („Alternative B“). In Abschnitt 3.9 wurde aufgezeigt, dass der Einflussbereich (Breite des Konfliktkorridors) 200m beträgt. Um das Auslegungsziel unter Abschnitt 4.1 zu erreichen, muss die Trasse so verlegt werden, dass der Abstand zwischen Gleis und dem nächstgelegenen maßgebenden Immissionsort (Forschungsgebäude) mindestens

**$d \geq 200\text{m}$  ( Mindestabstand Gleis – Forschungsgebäude)**

beträgt. Somit muss die Trasse um mindestens 160 m verlegt werden, da bei der Trassenführung entlang der Luruper Chaussee der kleinste Abstand ca. 40 m zur Gebädefassade des ZOQ beträgt.



**Abbildung 4-12: Verlegung der Trasse auf einen Gleisabstand von mind.  $d \geq 200\text{m}$  bis zum nächstgelegenen Forschungsgebäude (gleichbedeutend mit einer Verlegung der Trasse um 160 m)**

Auch für diese Maßnahme „Alternative B“ werden die Schwingungsimmissionen rechnerisch prognostiziert. Dabei wird angenommen, dass im Mittel die Baugrund-Übertragungseigenschaften gleich bleiben. Die Prognoseergebnisse werden wieder anhand des Verhältnisses der Maximalwerte des Prognosespektrums zum IST-Zustand in Abhängigkeit der Entfernung zur Trasse aufgetragen.



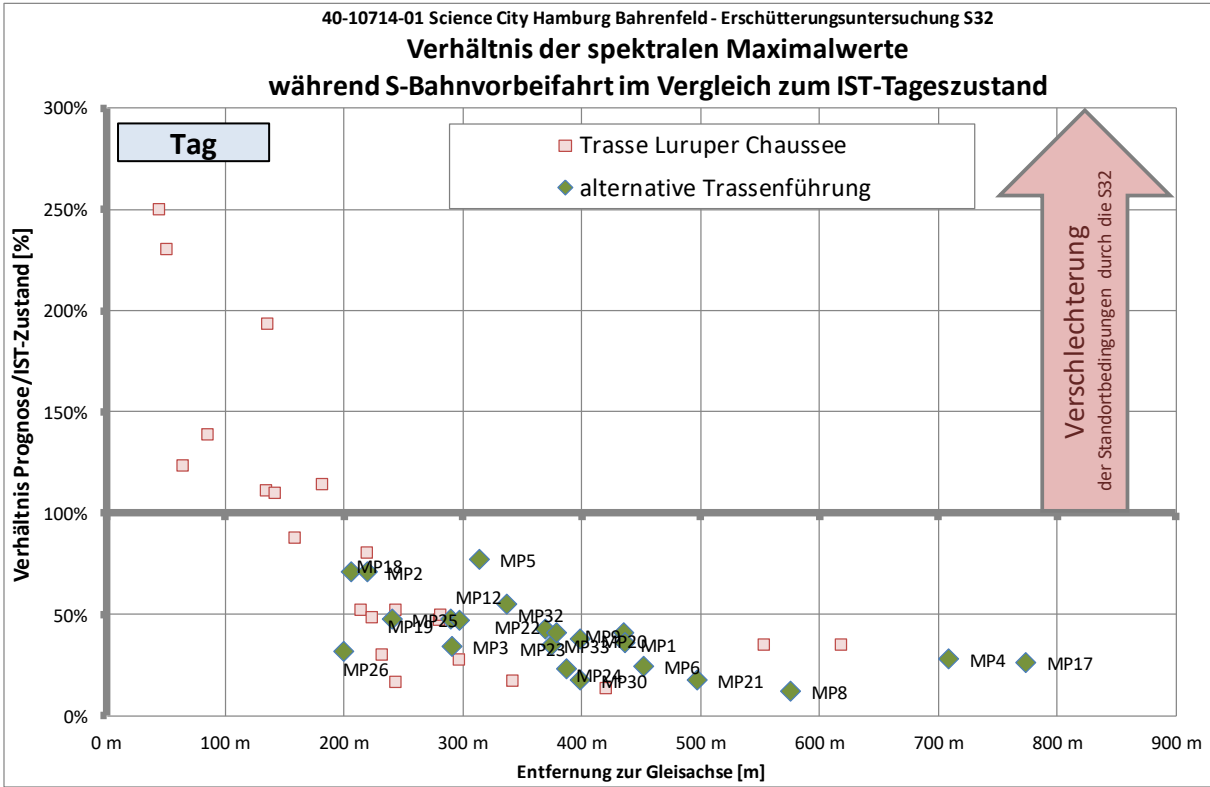


Abbildung 4-13: Verhältnis der spektralen Maximalwerte während S-Bahnvorbeifahrt im Vergleich zum IST-Tageszustand; Trasse entlang der Luruper Chaussee (rote Punkte) und alternative Trassenführung (grüne Punkte)

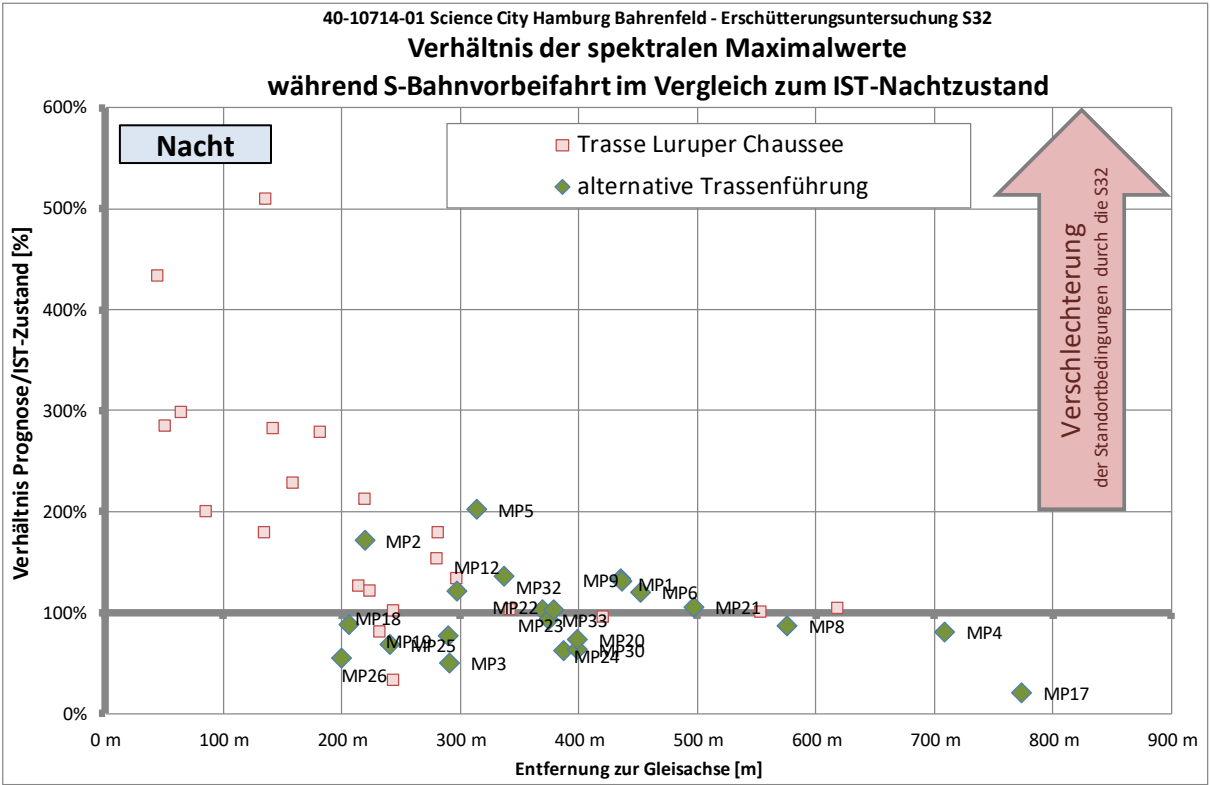


Abbildung 4-14: Verhältnis der spektralen Maximalwerte während S-Bahnvorbeifahrt im Vergleich zum IST-Nachtzustand; Trasse entlang der Luruper Chaussee (rote Punkte) und alternative Trassenführung (grüne Punkte)



Abbildung 4-13 zeigt, dass die Verlegung der Trasse dazu führt, dass am Tag sich die Erschütterungssituation an allen beweisgesicherten Standorten nicht verschlechtert, sondern verbessert. Das Verhältnis der Maximalwerte des Prognosespektrums zum IST-Zustand ist bei allen MPs kleiner 1,0.

Abbildung 4-14 zeigt aber auch, dass im Nachtzeitraum sich die Situation durch den S-Bahn-Verkehr bis zu Faktor 2 verschlechtert.

Abbildung 4-15 zeigt anhand von Isolinien, welches VC-Kriterium in welchen Bereichen eingehalten wird, wenn die alternative Trassenführung zur Ausführung kommt. Die Prognose ist durchgeführt unter Berücksichtigung einer gemittelten Fundamentabnahme gemäß Abbildung 3-8. Zusätzlich sind die Prognoseergebnisse der beweisgesicherten Gebäude eingezeichnet.

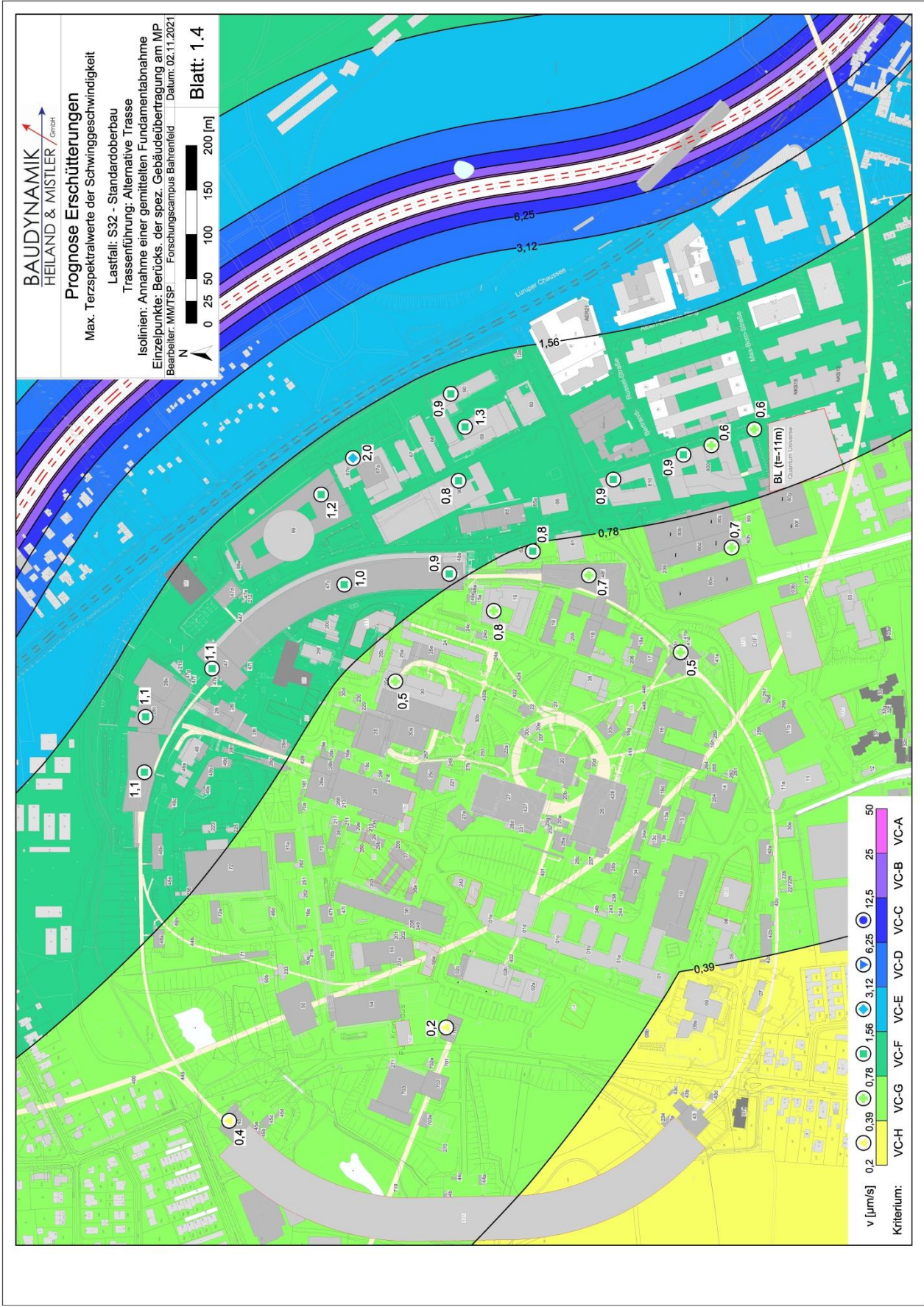


Abbildung 4-15: Prognose der S-Bahn-Erschütterungen bei alternativer Trassenführung

#### 4.6 Abschätzung der Mehrkosten durch den Erschütterungsschutz

Nachfolgend werden die Mehrkosten, die durch die Erschütterungsschutzmaßnahmen entstehen, mittels folgender Kalkulation abgeschätzt.

- Alternative A

Bei der Schutzmaßnahme „Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit einer versteiften Tunnelkonstruktion“ entstehen Mehrkosten durch den Bau des MFS und durch den größeren Tunnel.

Beim MFS werden in der nachfolgenden Tabelle 4-1 die Materialkosten (Stahlbeton und Elastomer-Punktlager) sowie das komplexere Bauverfahren berücksichtigt. Die Mehrkosten werden mittels Einheitspreisen bezogen auf einen Gleismeter berechnet.

Beim Tunnel ergeben sich Mehrkosten durch den zusätzlichen Bodenaushub sowie die zusätzlichen Materialkosten des Stahlbetons.

Als notwendige Länge werden 1490 m hier angenommen. Diese Länge ergibt sich aus der Gesamtlänge der Tunnelstrecke entlang des Forschungscampus Bahrenfeld zzgl. eines Überstands unter 45°, bezogen auf die letzten relevanten Forschungsgebäude, vgl. Abbildung 4-16.

		EP [€/Einheit]		Anzahl		Tunnellänge	Preis [€]
MFS	Beton + Bewehrung	1.680,00 €	je lfd m je Gleis	2	Gleise	1490 m	11.562.400,00 €
	Punktlager	700,00 €					
	Bauverfahren	1.500,00 €					
Tunnelertüchtigung	zusätzl. Bodenaushub	20,00 €	je m³	38	m³ Beton pro lfd. m Tunnel		18.118.400,00 €
	Beton + Bewehrung	300,00 €					
Summe:							29.680.800,00 €

**Tabelle 4-1: Mehrkosten für den Erschütterungsschutz**

- Alternative B

Bei Alternative B ergeben sich primär die Mehrkosten aus dem längeren Tunnel. Bei der hier angenommenen Verlegung auf einen Abstand von 200 m zum nächsten relevanten Forschungsgebäude ergibt sich ein 37m längerer Tunnel. Ein weiterer Erschütterungsschutz ist in Bezug auf den Forschungscampus dann nicht mehr notwendig.

Allerdings sollte beachtet werden, dass der Oberbau in diesem Tunnel planerisch an das Übertragungsverhalten des Tunnels und an die spätere Nutzung im Nahbereich des Tunnels angepasst und baodynamisch dimensioniert werden muss. Je nach Anforderungen der dann nächstgelegenen immissionsschutzrelevanten Bebauung kann bei dieser Alternative auch ein Masse-Feder-System erforderlich sein, was weitere Mehrkosten verursacht.



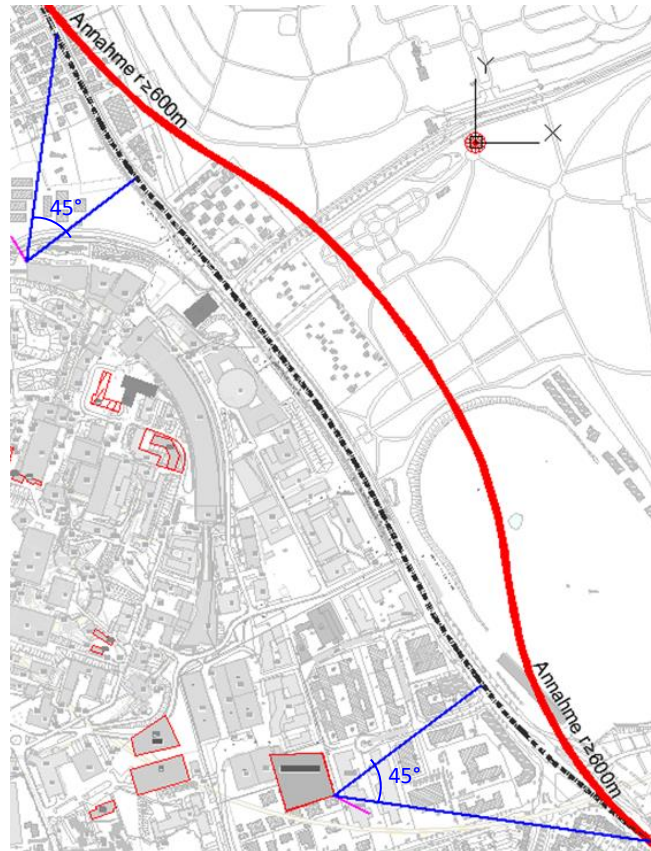


Abbildung 4-16: Längenermittlung

#### 4.7 Zusatzuntersuchung zur Einhaltung der Nachtwerte

Die in den Abschnitten 4.4 und 4.5 beschriebenen Schutzmaßnahmen sind so ausgelegt worden, dass im Tageszeitbereich keine Verschlechterung gegenüber der beweisgesicherten IST-Situation auftritt. Im Nachtzeitraum wird eine Verschlechterung in Kauf genommen. Damit auch im Nachtzeitraum sich die Erschütterungsbedingungen an den beweisgesicherten Standorten nicht verschlechtern, ist eine Verlegung der Trasse unumgänglich. Aber selbst mit Verlegung der Trasse sind noch weitere Maßnahmen erforderlich.

Die in Abschnitt 4.5 untersuchte Trassenverlegung auf einen Mindestabstand von 200m (zwischen Gleis und relevantem Forschungsgebäude) reicht nicht aus, um die Tageswerte einzuhalten. Dies hat die Abbildung 4-14 gezeigt. Das Verhältnis der Maximalwerte des Prognosespektrums zum IST-Zustand liegt für den Nachtzeitraum im Bereich bis Faktor 2 (bei MP5).

Nachfolgend werden mehrere Konstellationen untersucht und iterativ der notwendige Abstand zum nächstgelegenen relevanten Forschungsgebäude ermittelt, so dass an allen beweisgesicherten

Standorten die Nachtbedingungen sich nicht verschlechtern. Es sei angemerkt, dass für diese Auslegung der Messpunkt MP5 (PETRA III) maßgebend ist.

Maßnahme		Notwendiger Trassenabstand [m] zum nächstgelegenen relevanten Forschungsgebäude
Massiv versteifter Tunnel	mit einem 25Hz-MFS	300 m
	mit einem 18Hz-MFS oder USM	450 m
	mit einem 10Hz-MFS	> 1 km
	mit einem 6,0Hz-MFS	400 m
ohne Tunnelversteifung	25Hz-MFS	750 m
	mit einem 18Hz-MFS oder USM	950 m
	mit einem 10Hz-MFS	-
	mit einem 6,0Hz-MFS	> 1 km

**Tabelle 4-2: Notwendige Abstände zur Einhaltung der derzeitigen Nachtzeitraum-Bedingungen**

Tabelle 4-2 macht deutlich, dass die Verlegung des Tunnels auf größere Entfernungen, aber auch die massiv versteifte Tunnelbauweise zwingend erforderlich wird, um die erschütterungsmäßige „Nacht-ruhe“ sicherzustellen.

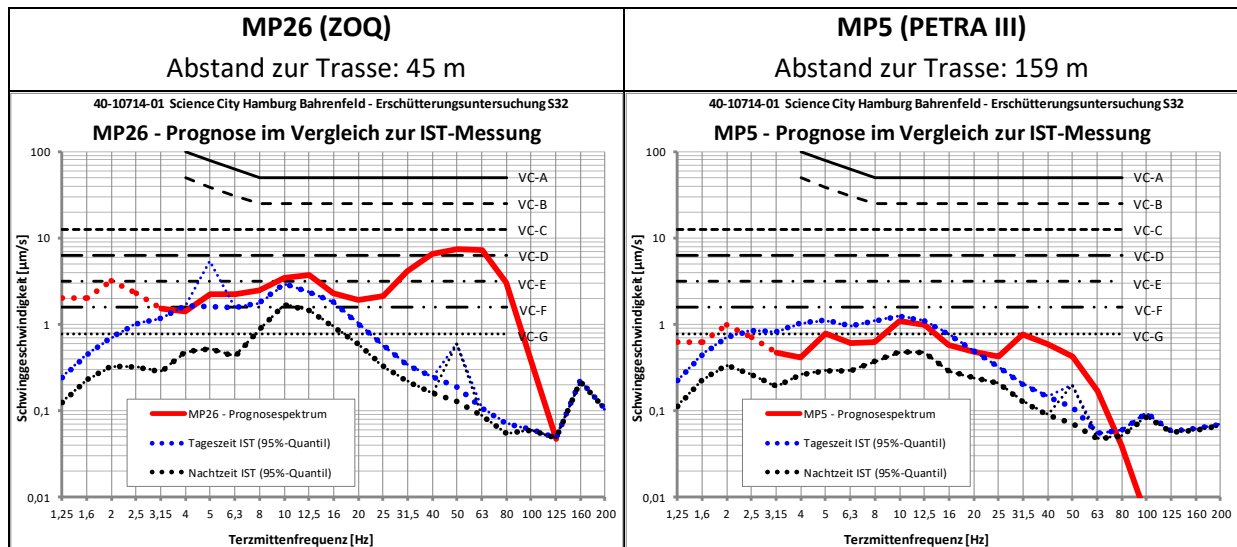
#### **4.8 Prognose der tieffrequenten Erschütterungen mit $f < 4$ Hz**

Bei Messungen an Schienenverkehrswegen wird im Allgemeinen eine untere Terzmittenfrequenz von 4 Hz gewählt, vgl. DIN 45672-2 [7]. Auch bei der Prognose bahninduzierter Erschütterungen bleiben kleinere Terzen in der Regel unberücksichtigt [9].

Grund hierfür ist, dass einerseits solche tiefen Frequenzen für den Immissionsschutz von Menschen nicht relevant sind, andererseits es aber auch sehr schwierig ist, solche tieffrequenten Erschütterungen mit sehr langen Baugrundwellen ( $L > 50$  m) zu prognostizieren. Gerade bei der vorliegenden Untersuchung ist es mit großen Unwägbarkeiten behaftet, wenn man die tieffrequenten Schwingungen, die am Referenzabschnitt Königstraße gemessen worden sind, auf den Bereich des Forschungscampus Bahrenfeld übertragen möchte. Gerade die tieffrequenten Schwingungsemissionen hängen stark von der standortspezifischen Ebenheit der Gleise (Langwelligkeit der Schien) im Tunnel ab. Des Weiteren ist es physikalisch fast nicht möglich, die Admittanzen für diese tiefen Frequenzen messtechnisch zu bestimmen. Dies lässt sich nur rechnerisch durchführen.

Die bisher dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den Frequenzbereich mit einer untersten Terzmittenfrequenz von 3,15 Hz, weil dieser Bereich durch die Admittanzmessung abgedeckt ist. Eine Prognose für tiefere Frequenzen kann quasi nur rechnerisch mit großen Unwägbarkeiten aus den genannten Gründen erfolgen. Diese Prognoseberechnung wurde beispielhaft für die Standorte an

den Messpunkten MP26 (ZOQ) und MP5 (PETRA III) durchgeführt. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt, das Prognosespektrum (rot) ist im tieffrequenten Bereich  $f < 3,15$  Hz punktiert dargestellt, um auf die Unsicherheit aufmerksam zu machen.



**Abbildung 4-17: Prognose der tieffrequenten Erschütterungsimmissionen an den Standorten MP26 und MP5**

Abbildung 4-17 zeigt, dass das Spektrum der IST-Situation (blaue und schwarze Linie) bei den tiefen Frequenzen abnimmt. Das ist beim Prognosespektrum der S-Bahn nicht der Fall. Der tieffrequente (gepunktete) Bereich des Prognosespektrums ist in Bezug auf den Maximalwert des Spektrums zwar nicht maßgebend, aber der „Abstand“, d.h. das Verhältnis zur IST-Situation wird mit kleiner werdenden Frequenzen immer größer.

Der Quotient der Maximalwerte bezogen auf den Tageszeitraum beträgt

- Faktor 2,5 bei MP26,
- Faktor 0,9 bei MP5,

so wie auch in Abbildung 3-20 angegeben. Betrachtet man speziell nur die sehr tieffrequenten Schwingungsimmissionen  $f < 4$  Hz, dann kann das Verhältnis der S-Bahn-Schwingungen zum IST-Zustand noch größer werden. Für die Terzmittenfrequenz von  $f = 2$  Hz beträgt das Verhältnis

- Faktor 4,5 bei MP26,
- Faktor 1,4 bei MP5,

bezogen auf den Tageszeitraum. Dieser Faktor ist sogar noch deutlich größer, wenn der Nachtzeitraum oder noch niedrigere Frequenzen bis 0,5 Hz hinunter betrachtet werden.

Zum Schluss sei angemerkt, dass die Abnahme im Baugrund über die Entfernung für diese tiefen Frequenzen sehr klein ist. Eine Verlegung der Trasse auf eine doppelte Entfernung bewirkt, dass diese tieffrequenten Immissionen lediglich um den Faktor 0,7 – 0,9 [-] kleiner werden.



## 5 Prognose und Beurteilung der Magnetfeldimmissionen (Near-DC-Shifts)

### 5.1 Einführung

Die S-Bahn Hamburg ist Teil des schienengebundenen Personennahverkehrs in Hamburg und Umgebung. Zwischen dem Hamburger Hauptbahnhof und dem Bahnhof Altona verläuft die Trasse über knapp 6 km im so genannten City Tunnel. Als einzige Schnellbahn in Deutschland verwendet die Hamburger S-Bahn sowohl Gleichspannung mit 1200V, die von einer seitlichen Stromschiene abgegriffen wird, als auch Wechselspannung mit 15kV und 16,7Hz, die auf der Außenstrecke nach Stade über das Oberleitungssystem der DB entnommen wird. Abbildung 5-1 zeigt einen Ausschnitt aus dem Netzplan mit der Lage der aktuellen S-Bahn Trassen. Im Lageplan kenntlich gemacht ist auch der Forschungscampus Bahrenfeld (DESY, Universität HH, MPI, EMBL...) in Hamburg Bahrenfeld.

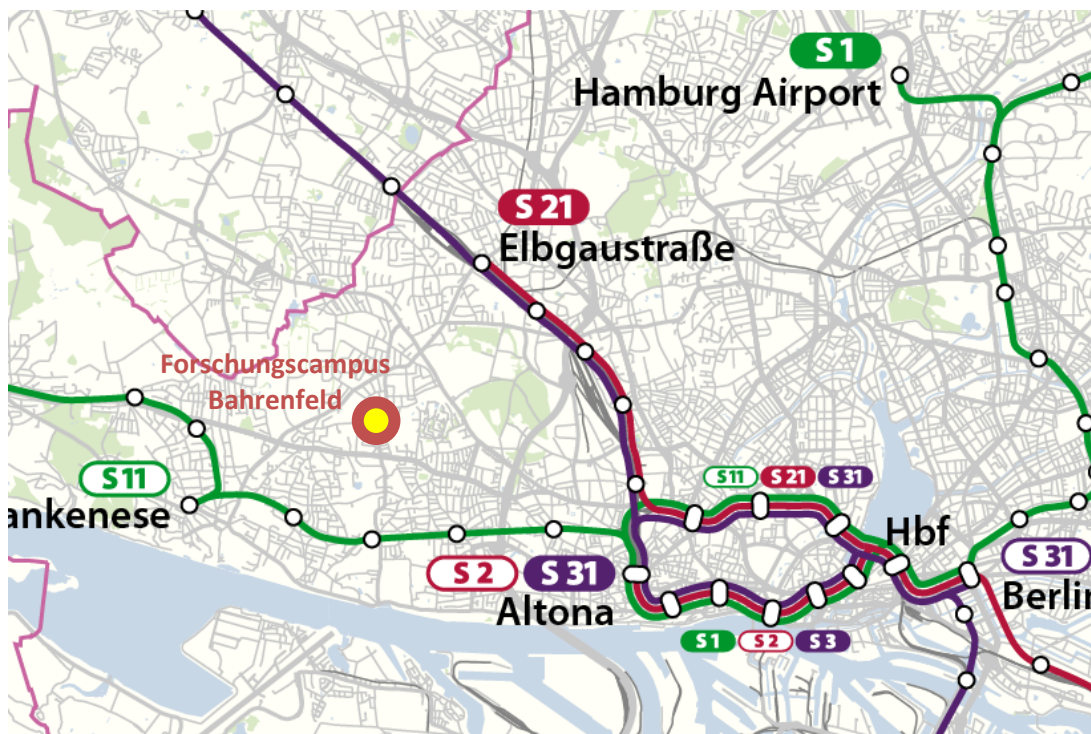


Abbildung 5-1: Ausschnitt aus dem Netzplan der S-Bahn Hamburg [10]

Die Stadt Hamburg plant nun den Bau einer neuen S-Bahn-Strecke in unmittelbarer Nähe zum Forschungscampus Bahrenfeld. Es wird im Rahmen dieses Gutachtens davon ausgegangen, dass die neue S-Bahn in Tunnellage unter der Luruper Chaussee verläuft.

Wie oben erläutert, wird für den Betrieb der Hamburger S-Bahn - und generell für alle elektrisch betriebenen Bahnen – elektrische Energie benötigt. Physikalisch bedingt, treten bei der Nutzung von elektrischer Energie elektrische und magnetische Felder auf.

Wirken diese Felder auf Forschungsgeräte oder Anlagen ein, dann kann dies in Abhängigkeit der Größe des Störfeldes und der Magnetfeldempfindlichkeit des Gerätes zu einer Störung des entsprechenden Gerätes führen.

Mittels der durchgeführten Untersuchungen werden daher die aus dem geplanten S-Bahn Betrieb zu erwartenden Feldgrößen des magnetischen Feldes ermittelt und die Auswirkungen dieser Felder beurteilt. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf den magnetischen Feldern, da diese im Gegensatz zu den elektrischen Feldern die meisten Materialien nahezu unvermindert durchdringen und mit der Entfernung nur langsam abnehmen.

Zur Beurteilung der Magnetfeldbelastung der zukünftigen S-Bahn musste zunächst ein geeigneter, vergleichbarer S-Bahn Tunnelabschnitt gefunden werden, an welchem Referenzmessungen durchgeführt werden konnten. Dabei wurden an den Referenzquerschnitt verschiedene Anforderungen gestellt,

- Strecke in Tunnellage
- Gleiche Stromversorgung wie die geplante S-Bahn (Gleichstrom)
- Möglichst geringe Beeinflussung der messtechnischen Untersuchung durch andere Störquellen innerhalb des Messaufbaus (Industrie, andere Schienenfahrzeuge,...)

Eine solche Situation wurde schließlich auf einem baureifen Grundstück direkt neben dem City-Tunnel, östlich der Haltestelle Königstraße gefunden. Die Referenzmessungen der magnetischen Felder aus dem S-Bahnbetrieb wurden hier durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind detailliert in einem separaten Bericht dokumentiert [2]. Im vorliegenden Bericht werden nur die zum Verständnis der Beurteilung erforderlichen Ergebnisse aus diesen Messungen dargestellt.



**Abbildung 5-2: Übersicht der Örtlichkeit am Referenzquerschnitt „Königstraße“. Blickrichtung: Westen.**

## 5.2 Grundlagen

Elektrische Energie verursacht elektromagnetische Felder. Bei elektromagnetischen Feldern ist zwischen dem Niederfrequenz- und dem Hochfrequenzbereich zu unterscheiden. Die Grenze zwischen diesen beiden Bereichen ist nicht einheitlich definiert, in der Regel spricht man aber unterhalb von 9kHz vom Niederfrequenzbereich. Im niederfrequenten Bereich unterscheidet man noch einmal die quasi-statischen (DC) Felder (Frequenzen  $f < 1$  Hz) von den Wechselfeldern (Frequenzen  $f > 1$  Hz).

Während im Niederfrequenzbereich die elektrischen und die magnetischen Felder getrennt voneinander zu betrachten sind, sind sie im Hochfrequenzbereich untrennbar miteinander verknüpft.

Im Stromnetz der Hamburger S-Bahn treten nur niederfrequente Felder mit Frequenzanteilen bis ca. 600Hz auf. Daher entfällt im Weiteren eine Betrachtung und Beurteilung des Hochfrequenzbereichs.

### 5.2.1 Elektrische Felder

Elektrische Ladungen sind stets von einem Energiefeld umgeben. Befinden sich die Ladungsträger im Ruhezustand, es fließt also noch kein Strom, bildet sich zunächst ein elektrisches Feld aus.

Es können sowohl statische als auch zeitlich veränderliche elektrische Felder auftreten. Statische elektrische Felder („Near-DC“ bzw. 0Hz) kommen bei Gleichstrom und Batterien vor. Häufiger treten im Alltag jedoch Wechselfelder auf, die z. B. durch Wechselstrom mit der Frequenz 50 Hz erzeugt werden.

Die Feldlinien des elektrischen Feldes verlaufen zwischen den beiden Elektroden (von der positiven Ladung zur negativen) und haben somit einen Anfang und ein Ende. Die elektrische Feldstärke  $E$  wird in der Einheit V/m angegeben und ergibt sich aus:

$$E = U/l$$

Mit zunehmender Entfernung nimmt die elektrische Feldstärke sehr schnell ab und wird durch Bauwerke und andere Hindernisse sehr gut geschirmt. Dadurch ist im Inneren von Gebäuden nicht mit einer Beeinflussung durch elektrische Felder zu rechnen, die außerhalb des Gebäudes erzeugt werden. Umgekehrt gilt das gleiche, d.h. Felder die in einem Gebäude, oder wie bei der S-Bahn in einem Tunnel, erzeugt werden, dringen nicht nach außen.

Da die elektrischen Felder der geplanten S32 im Tunnel unter der Luruper Chaussee also doppelt geschirmt werden, einmal durch den Tunnel und einmal durch die Gebäudehülle des jeweiligen Forschungsinstituts, ist auf dem Forschungsgelände DESY mit keiner Beeinflussung durch elektrische Felder zu rechnen. Eine separate Betrachtung dieser Felder erfolgt daher nicht.

### 5.2.2 Magnetische Felder

Magnetfelder entstehen durch Dauermagnete oder durch bewegte Ladung (Strom). Dauermagnete haben ein statisches Magnetfeld (DC bzw. 0Hz). Das bedeutet, diese Magnetfeld variiert kaum in seiner Stärke und ist in seiner Polarität (Richtung) unveränderlich (z.B. das natürliche, statische Erdmagnetfeld).

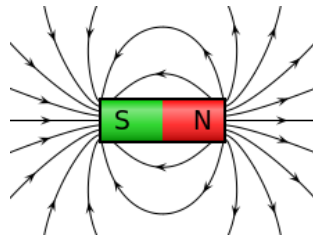


Abbildung 5-3: Magnetfeld eines idealen zylindrischen Magneten (Quelle: Geek3, Lizenz: CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons)

Wird an einen elektrischen Leiter ein Verbraucher angeschlossen, fließt Strom. Dieser Strom verursacht ein Magnetfeld, welches sich zylindrisch um den Leiter ausbreitet. Je nach Stromführung bildet sich ein statisches Magnetfeld ein s.g. Gleichfeld (bei Gleichstrom) oder ein magnetisches Wechselfeld (bei Wechselstrom) aus.

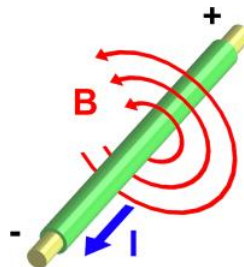
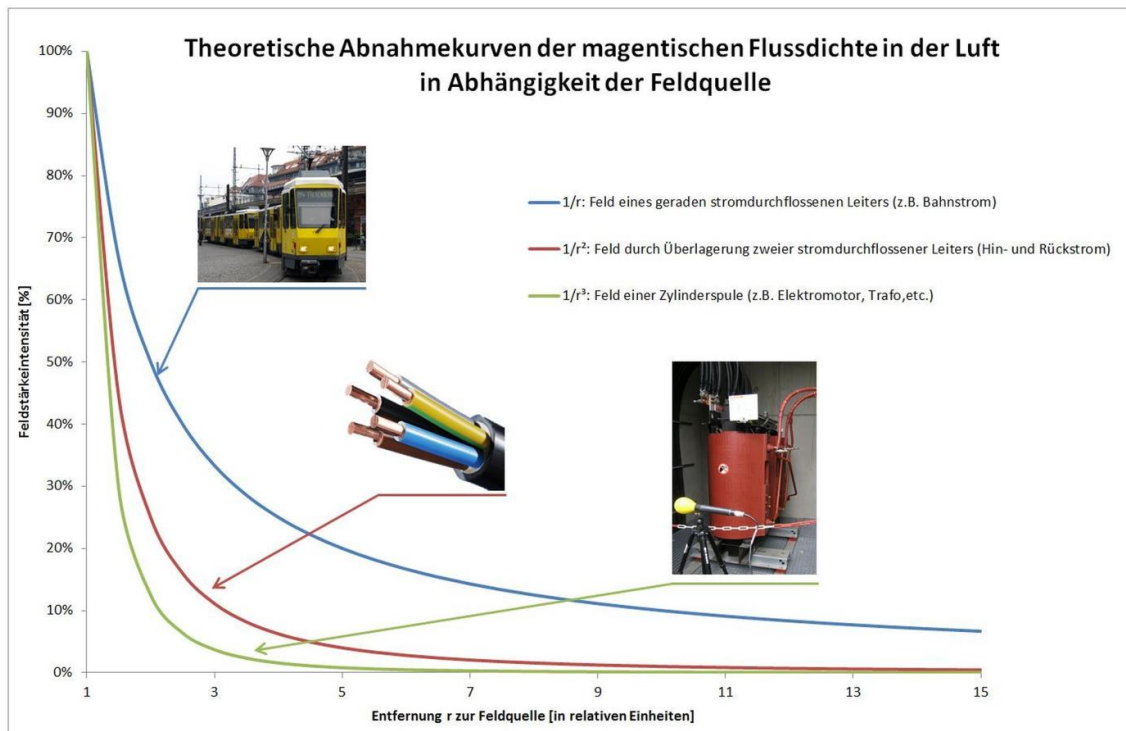


Abbildung 5-4: Magnetisches Feld (B) um einen elektrischen Leiter mit Strom-Fluss (I) (Quelle: Stannered, Lizenz: CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons)

Die Stärke des Magnetfeldes nimmt mit zunehmender Stromstärke zu und mit wachsendem Abstand von der Feldquelle ab. Wie stark die magnetische Feldstärke mit zunehmender Entfernung von der Quelle abnimmt, hängt unter anderem auch von der Art des jeweiligen Stromkreises ab. Während das Feld eines geraden stromdurchflossenen Leiters (z.B. einer Bahnstromleitung) mit doppeltem Abstand nur auf die Hälfte absinkt, reduziert sich das Feld bei Überlagerung zweier Leiter mit hin- und rückfließendem Strom proportional zum Quadrat des Abstands. D.h. bei einer Verdoppelung des Abstands ergibt sich  $\frac{1}{4}$  der magnetischen Flussdichte. Abbildung 5-5 zeigt die theoretischen Abnahmegesetze je nach Art der Feldquelle.



**Abbildung 5-5: theoretische Abnahmegesetze der magnetischen Flussdichte für verschiedene Feldquellen**

Die Stärke des magnetischen Feldes  $H$  wird in der Einheit A/m angegeben und ergibt sich für eine Stromstärke  $I$  in einem Abstand  $r$  zum Leiter aus:

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

Die Kraftwirkung des magnetischen Feldes hängt allerdings nicht nur von der Stromstärke, sondern auch von dem Material, welches das Magnetfeld bei der Ausbreitung durchdringt, ab. Um die Stärke des Magnetfeldes an einem bestimmten Punkt im Raum zu beschreiben, wird daher häufig die magnetische Flussdichte  $B$  mit der Einheit Tesla [T] vereinzelt auch Gauss [G] verwendet. Die magnetische Flussdichte  $B$  hängt über die Materialgleichung der Elektrodynamik wie folgt mit der Feldstärke  $H$  zusammen:

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$$

Dabei ist  $\mu_0$  die magnetische Feldkonstante und  $\mu_r$  die Permeabilitätszahl.

Magnetische Felder üben eine Kraft (Lorentzkraft) auf bewegte geladene Teilchen aus, was zu einer Ablenkung dieser Teilchen führt. Dieses Prinzip findet z.B. Anwendung bei allen rotierenden elektrischen Maschinen (Elektromotor, Generator), wird aber auch bei Ablensystemen zur Fokussierung und Ablenkung geladener Teilchenstrahlung verwendet (Bildröhren, Kathodenstrahlröhren, Kreisbeschleuniger, E-Beams, Elektronenmikroskope, etc.).



### 5.3 Beurteilungswerte für magnetische Felder

#### 5.3.1 Schutz von Personen (Immissionsschutz)

Für den Schutz der Allgemeinheit (Personen) vor der Einwirkung nichtionisierender elektromagnetischer Felder sind in der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, 26. BImSchV) [17] Grenzwerte festgelegt.

Frequenzbereich f [Hz]	Grenzwerte (Effektivwerte)	
	Elektrische Feldstärke [kV/m]	Magnetische Flussdichte [μT]
0	--	500
1 - 8	5	40.000/f <sup>2</sup>
8 - 25	5	5.000/f <sup>2</sup>
25 - 50	5	200
50 - 400	250/f	200
400 – 3.000	250/f	80.000/f
3.000 – 10.000.000	0,083	27

Tabelle 5-1: Grenzwerte für Niederfrequenzanlagen aus der 26.BImSchV [17]

Gemäß 26. BImSchV [17] sind also zum Schutz bzw. zur Vorsorge vor schädlichen Umwelteinwirkungen Gleichstromanlagen so zu errichten und zu betreiben, dass in ihrem Einwirkungsbereich an Orten, die zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung eine Magnetische Flussdichte von  $B=500\mu\text{T}$  nicht überschritten wird.

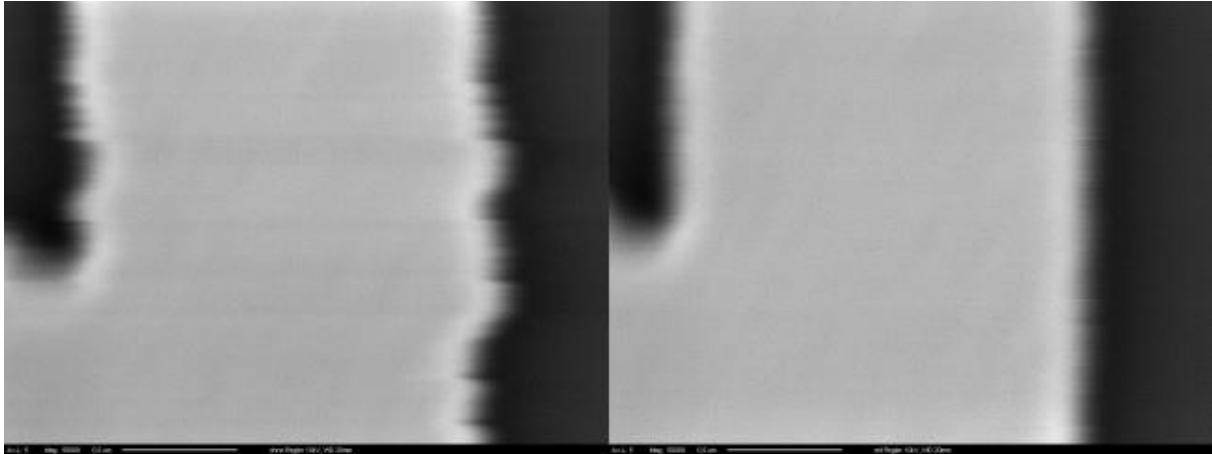
Da die Immissionsgrenzwerte am Bahnhof der S-Bahn bzw. in der Bahn selbst eingehalten werden müssen, also an dem Ort, an dem grundsätzlich die größten Magnetfelder aus der Stromversorgung der Bahn auftreten, ist auch sichergestellt, dass diese Grenzwerte in einem größeren Abstand vom Gleis sicher eingehalten werden. Eine weitere Beurteilung der Magnetfelder in Bezug auf den Immissionsschutz gemäß 26. BImSchV [17] am Forschungscampus Bahrenfeld, erübrigt sich daher.

#### 5.3.2 Schutz von magnetfeldempfindlichen Anlagen

Neben Menschen können auch Anlagen, Forschungsgeräte, Messgeräte, etc. durch magnetische Felder beeinflusst werden. Dabei handelt es sich um Geräte, die mit Elektronenstrahlen arbeiten (z.B. Elektronenmikroskope) oder bei denen selbst erzeugte Magnetfelder zum Funktionsprinzip gehören (z.B. MRTs).



Wirkt auf so ein Gerät von außen ein veränderliches Magnetfeld ein, egal ob ein magnetisches Gleichfeld („Near-DC“) oder ein Wechselfeld (AC), dann wird das geräteigene Magnetfeld gestört. Bei einem Elektronenmikroskop wäre dann beispielsweise eine Fokussierung oder ein „sauberes“ Bild nicht möglich.



**Abbildung 5-6: Blick durch ein Elektronenmikroskop (links mit Störung durch magnetische Wechselfelder, rechts ohne Störung), Quelle: [www.stefan-mayer.com](http://www.stefan-mayer.com)**

Geräte, in denen mit Hilfe der Lorentzkraft Elektronenstrahlen gelenkt werden, reagieren zudem besonders empfindlich auf eine Veränderung des statischen Magnetfeldes am Aufstellort. Solche Geräte werden üblicher Weise bei der Erstinstallation auf das statische Magnetfeld am Aufstellort justiert. Wenn sich dieses Magnetfeld dann verändert, wird der gelenkte Elektronenstrahl im Gerät abgelenkt. Bei einem Lithografiegerät würde so z.B. ein falscher Bereich belichtet, bei einem Elektronenmikroskop würde ein falscher Bereich der Probe vom Elektronenstrahl abgetastet und so weiter. Das statische Magnetfeld am Aufstellort eines solchen Gerätes kann durch das Bewegen ferromagnetischer Massen (Aufzüge, LKW, etc.) oder durch magnetische Gleichfelder einer Gleichstromversorgung mit wechselnden Stromstärken beeinflusst werden. Man spricht dann von einem „DC-Shift“ oder von einer „Near-DC“ Magnetfeldänderung.

Allgemeingültige Grenzwerte für maximale Magnetfeldänderungen, die am Standort solcher magnetfeldempfindlichen Geräte zulässig sind, gibt es nicht. Um beurteilen zu können ob solche Geräte gestört werden oder nicht, sind die Empfindlichkeiten der Geräte den jeweiligen Herstellerhandbüchern zu entnehmen oder Erfahrungswerte anzuwenden, die in einigen Veröffentlichungen niedergelegt sind. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde für den Forschungscampus Bahrenfeld, insbesondere für die Gebäude ILP und ZOQ, die Grenze für eine noch tolerierbare Magnetfeldänderung mit

### B < 200nT (2mG)

angegeben. Dieser Wert gilt sowohl für die „Near-DC“ Feldveränderungen als auch für die magnetischen Wechselfelder (AC). Um ein Gefühl darüber zu bekommen, wie streng oder nicht streng dieser Wert  $B_{\max}$  ist, werden nachfolgend einige allgemeine Herstellergrenzwerte und Erfahrungswerte verschiedener anderer Geräte zu diesem Wert ins Verhältnis gesetzt:

Technische Geräte (Funktionsschutz)	Frequenz [Hz]	B	Auswertung
		[nT]	
Herzschrittmacher (Immissionsschutz)	16,7 und 50/60	500.000	effektiv
MRT (Magnetom Aera) axial radial	DC	1.250 2.500	Peak-Peak
Bruker NMR	DC	628	Peak-Peak
Jeol FT NMR	DC	500	Peak-Peak
Bildschirme mit Kathodenstrahlröhren	16,7 und 50/60	400	effektiv
<b>Forschungscampus Bahrenfeld</b>	<b>DC und AC</b>	<b>200</b>	<b>Peak-Peak</b>
Elektroenzephalographie (EEG)	DC - 1.000	200	effektiv
FEI Helios Nanolab 600i	DC	100	Peak-Peak
ZEISS Crossbeam 550L (SEM)	DC	50	Peak-Peak über 5min
JEM-ARM200CF NEOARM	DC - 500	50	Peak-Peak
Themis Z (3.1) 300-kV X-FEG	DC und 50/60	30	Peak-Peak

**Tabelle 5-2: Grenzwerte niederfrequenter Magnetfelder für verschiedene technische Geräte**

Tabelle 5-2 macht deutlich, dass der Grenzwert  $B_{\max} = 200$  nT für den Forschungscampus Bahrenfeld deutlich (Faktor 2.500!) strenger ist als die Immissionsschutzgrenzwerte gemäß 26. BImSchV. Es wird aber auch deutlich, dass es noch deutlich empfindlichere Forschungsgeräte (REM/TEM, etc.) gibt, auch auf dem Campus. Diesen Geräten würde der Wert  $B_{\max} = 200$  nT bei Weitem nicht gerecht.

### 5.3.3 Projektspezifische Beurteilungswerte

Wie oben erwähnt, wurde für den Forschungscampus Bahrenfeld, insbesondere für die Gebäude ILP und ZOQ ein Grenzwert zulässiger Magnetfeldveränderungen von

$$B_{\max} = 200\text{nT (2mG)}$$

durch den Auftraggeber dieses Gutachtens definiert. Dieser Wert wird im Rahmen dieses Gutachtens als orientierender Grenzwert verstanden.

Mit Langzeit-Magnetfeldmessungen in den Institutsgebäuden

- **Geb. 90** (MP29, Zentrum für Optische Quantentechnologie, ZOQ)
- **Geb. 69** (MP28, Institut für Laserphysik, ILP)
- **Geb. 15** (MP31, Centre for Structural Systems Biology, CSSB)

wurde die aktuelle Situation bezüglich vorhandener Magnetfelder in diesen Laboren ermittelt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in [1] dokumentiert.

Für die Beurteilung wurde der Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte mit einem Low-pass-Filter mit einer Eckfrequenz von  $f=1\text{Hz}$  gefiltert. Das gefilterte Signal zeigt dann den sich langsam verändernden DC-Anteils des gemessenen Signals über die jeweilige Messdauer. Frequenzen größer als 1 Hz bleiben hier unberücksichtigt. Die zeitlichen Veränderungen des so ausgewerteten Kurvenverlaufes sind ein Kriterium für die Stabilität des statischen magnetischen Feldes am gemessenen Ort. Allgemein spricht man dann von einer „Near-DC“ Magnetfeldveränderung.

Diese Veränderungen müssen nun auf ein Zeitfenster bezogen werden, innerhalb dessen man den Wert der maximalen zeitlichen Veränderung auswertet. Im vorliegenden Fall wird zur maßgeblichen Bewertung der Immission ein Zeitfenster von 30 Sekunden verwendet. Eine zukünftige S-Bahn-Vorbeifahrt wird sich innerhalb dieses Zeitfensters bewegen.

Nachfolgend sind die Magnetfeldänderungen innerhalb dieser 30 Sekunden Betrachtungsfenster über die gesamte Messzeit von mehreren Tagen je Messpunkt aufgetragen. Gemessen wurde in den Gebäuden 69, 90 und 15. Die Tagesverläufe zeigen für die verschiedenen Punkte eindeutig

- Tag/Nacht Unterschiede,
- einzelne, kurzzeitige Störungen durch Nutzung des jeweiligen Raumes,
- die temporäre Veränderung des Grundniveaus am MP29.

In Abbildung 5-7 bis Abbildung 5-9 sind die genannten Punkte markiert.

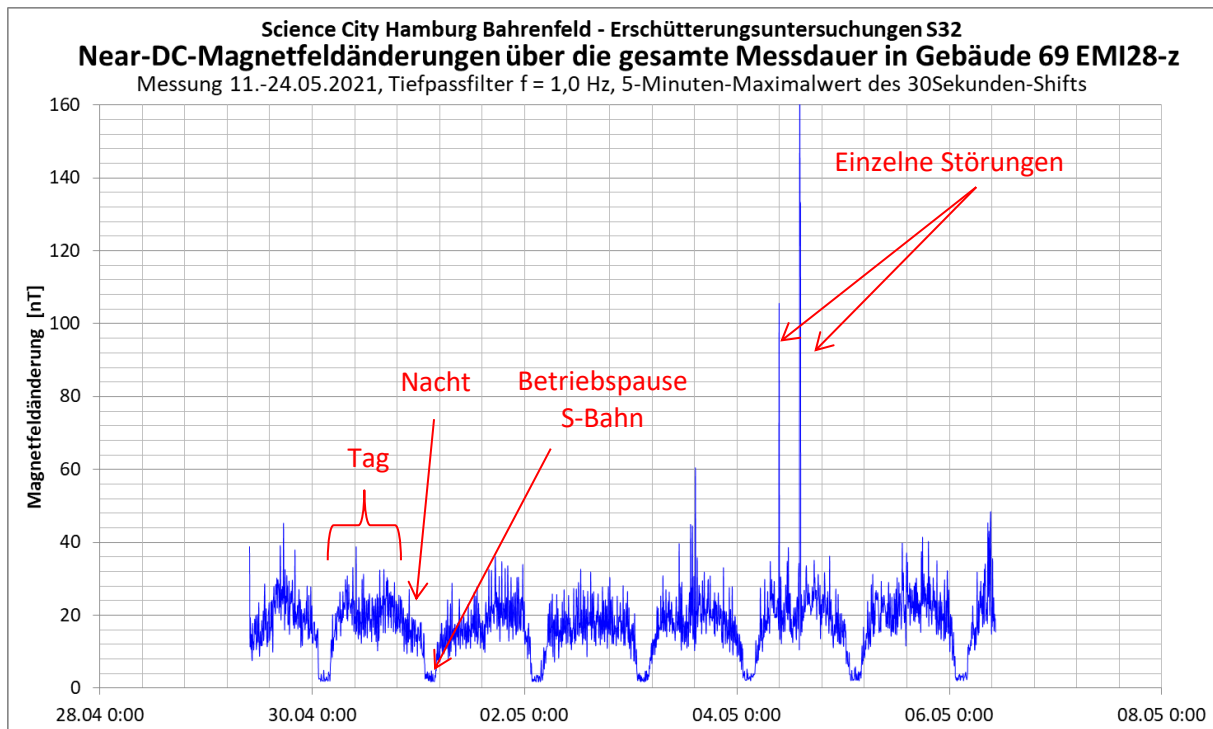


Abbildung 5-7: Near-DC Magnetfeldveränderungen über den Messzeitraum am MP28-z [1]

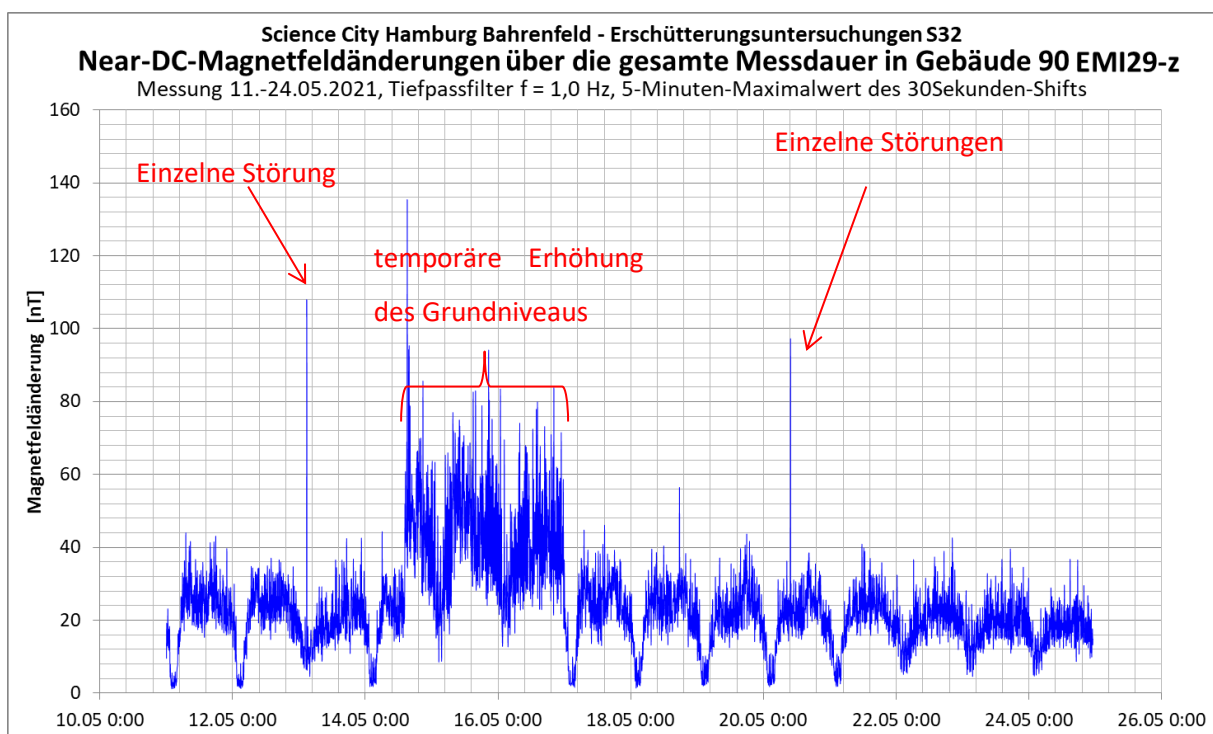


Abbildung 5-8: Near-DC Magnetfeldveränderungen über den Messzeitraum am MP29-z [1]

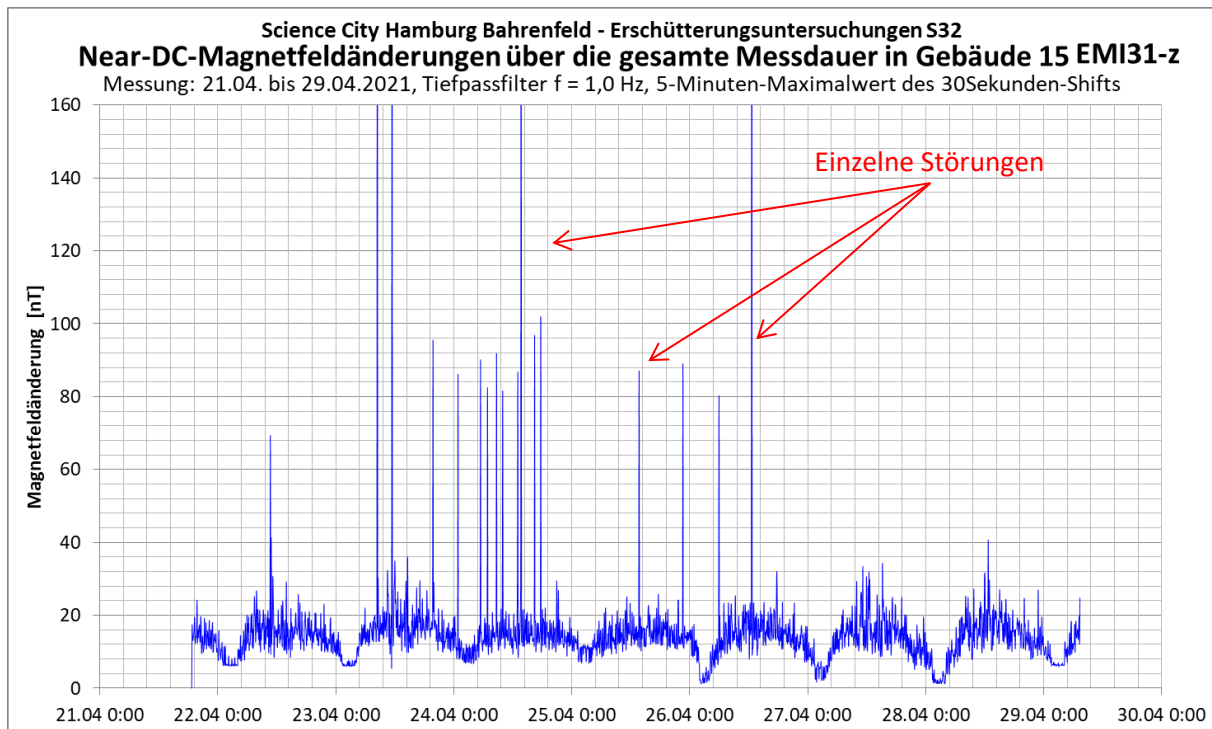


Abbildung 5-9: Near-DC Magnetfeldveränderungen über den Messzeitraum am MP31-z [1]

Die so erhaltenen DC-Feldveränderungen wurden im nächsten Schritt drei deutlich zu unterscheidenden Zeiträumen zugeordnet, wobei die Zeitdefinition ausschließlich aus den beobachteten örtlichen Verhältnissen heraus definiert wurden:

Beschreibung	Zeitdefinition
Tagzeitraum	05:00 – 22:00 Uhr
Nachtzeitraum	22:00 – 01:30 und 03:30 - 05:00 Uhr
Betriebspause der S-Bahn	01:30 – 03:30 Uhr

Tabelle 5-3: Definition der Zeiträume

Eine weitere Verbesserung der Aussagequalität wird dadurch erzeugt, dass die Auswertung der repräsentativen Werte in diesen Zeitbereichen mittels statistischer Bewertung durchgeführt wird. Dazu wird für jeden Zeitbereich an jedem der Messtage der 99,5% Quantilwert des 30-Sekunden-DC-Shifts ermittelt. Auf diese Weise lassen sich selbstverursachte Störungen nachvollziehbar eliminieren.

In Abbildung 5-10 bis Abbildung 5-12 sind die gemessenen Langzeitverläufe in den drei Forschungsgebäuden dargestellt. Ebenfalls mit eingezeichnet sind die repräsentativen Tages/Nacht/Betriebspause-Werte der „Near-DC“-Feldveränderungen.



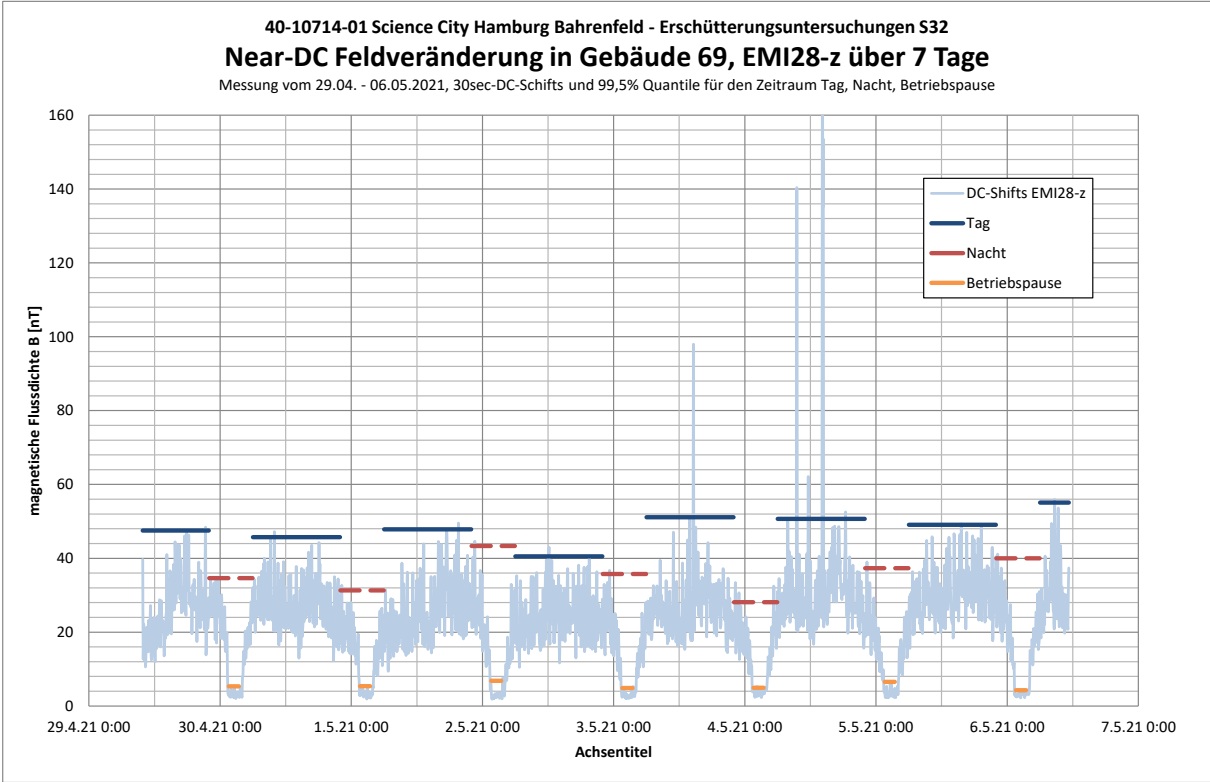


Abbildung 5-10: Langzeitmessung der Near-DC Magnetfeldveränderungen am MP28-z

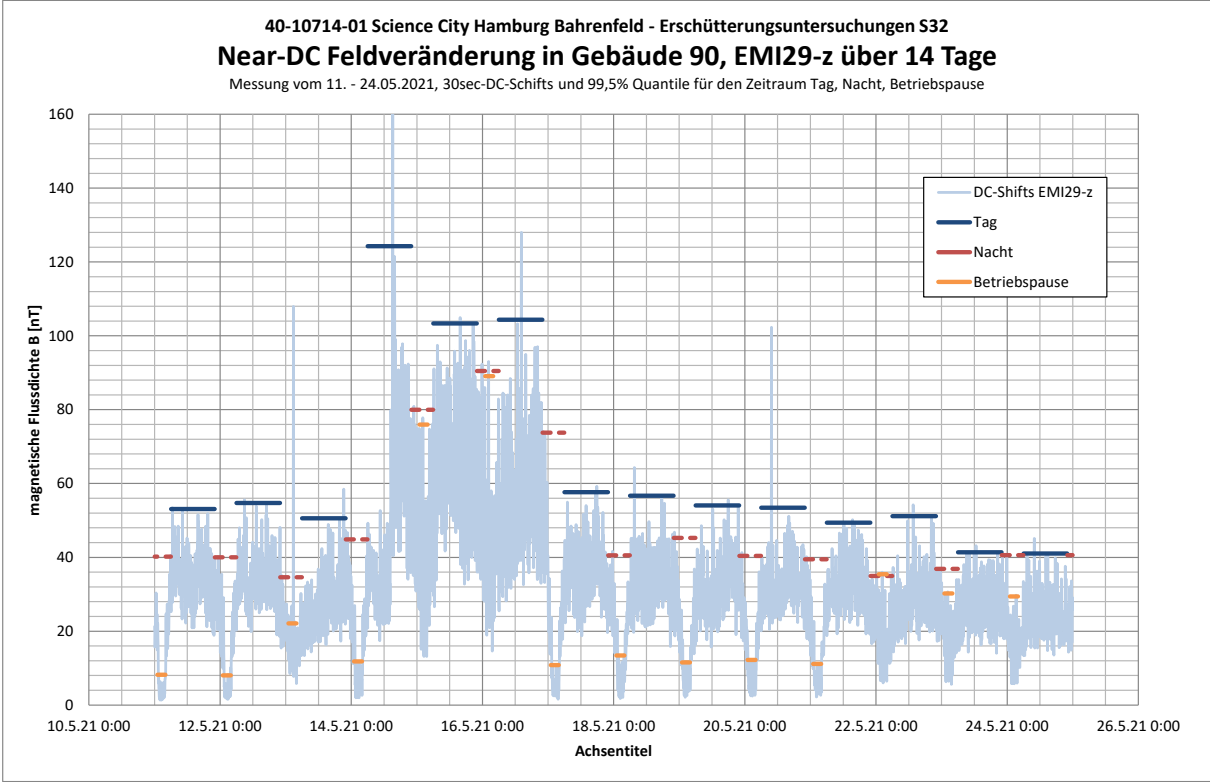
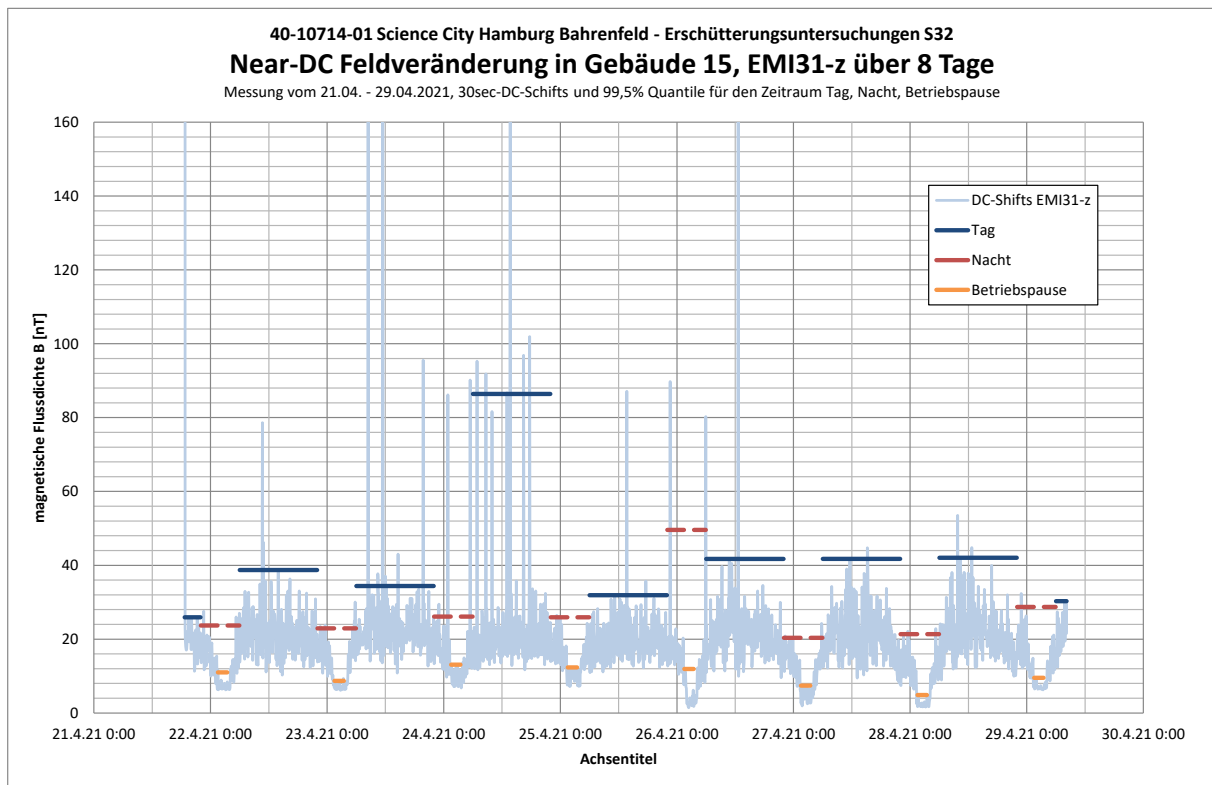


Abbildung 5-11: Langzeitmessung der Near-DC Magnetfeldveränderungen am MP29-z



**Abbildung 5-12: Langzeitmessung der Near-DC Magnetfeldveränderungen am MP31-z**

In der folgenden Tabelle sind für jeden Messpunkt, jeden Messtag und jeden Tageszeitraum die 99,5% Quantil-Werte angegeben.

Um einen über eine Woche repräsentativen Wert anzugeben, werden die Werte der verschiedenen Tage zusätzlich energetisch gemittelt und in Tabelle 5-5 als charakteristische Werte (oder auch Beurteilungswert des IST-Zustandes) des jeweiligen Zeitraumes angegeben. Bei dieser Mittelung werden Tagesausreißer bewusst nicht gewertet, ein Beispiel für solche Ausreißer sind die Tages- und Nachtwerte am 14.5. – 16.5.2021 am MP 29, die nicht in die Mittelung einbezogen wurden.

Die grafische Darstellung dieser charakteristischen Werte (Beurteilungswert des IST-Zustandes) erfolgt in Abbildung 5-13.

Messpunkt	Messdatum	Maximal Werte [nT]		99,5% Quantile [nT]		
		Tag	Nacht	Tag	Nacht	Betriebspause
<b>MP 31 Gebäude 15</b>	21.04.2021	25,94	27,56	25,92	26,08	keine Messung
	22.04.2021	78,61	23,80	38,72	23,58	11,00
	23.04.2021	287,46	29,47	34,39	24,99	8,70
	24.04.2021	271,65	86,16	86,40	25,75	13,09
	25.04.2021	87,12	89,75	31,90	50,28	12,34
	26.04.2021	275,94	20,85	41,73	20,52	11,92
	27.04.2021	44,74	22,13	41,74	21,36	7,42
	28.04.2021	53,52	32,35	42,05	28,72	4,87
	29.04.2021	30,32	18,76	30,29	18,50	9,53
<b>MP 28 Gebäude 69</b>	29.04.2021	48,42	34,67	47,52	34,65	keine Messung
	30.04.2021	47,19	32,69	45,72	31,92	5,33
	01.05.2021	49,55	44,62	47,84	43,34	5,37
	02.05.2021	42,99	36,72	40,53	35,75	6,82
	03.05.2021	97,98	33,43	51,12	32,60	4,86
	04.05.2021	177,09	38,99	50,68	31,85	4,95
	05.05.2021	49,31	41,13	49,08	40,00	6,54
	06.05.2021	55,96	27,43	55,09	26,91	4,27
<b>MP 29 Gebäude 90</b>	11.05.2021	53,42	40,19	53,07	40,02	8,20
	12.05.2021	55,59	35,44	54,68	35,33	8,03
	13.05.2021	58,47	107,96	50,20	44,87	98,23
	14.05.2021	183,79	80,91	121,46	79,97	11,81
	15.05.2021	104,94	92,34	103,23	90,14	75,88
	16.05.2021	128,01	93,04	103,18	82,49	88,90
	17.05.2021	59,23	41,63	57,55	40,55	10,83
	18.05.2021	64,32	46,83	56,32	45,27	13,42
	19.05.2021	55,57	41,29	53,98	40,40	11,54
	20.05.2021	102,31	40,16	51,12	39,48	12,22
	21.05.2021	50,19	34,18	49,35	33,98	11,14
	22.05.2021	54,23	36,99	51,00	36,88	35,41
	23.05.2021	43,17	40,84	41,29	40,60	30,21
	24.05.2021	45,13	33,63	40,84	33,18	29,40

Tabelle 5-4: aus den Messungen abgeleitete Beurteilungswerte der Near-DC Magnetfeldveränderungen

	Tagzeitraum (05:00-22:00Uhr)	Nachtzeitraum (22:00-05:00Uhr)	nächtliche Betriebspause (01:30-03:30Uhr)
MP29	51,12	39,33	10,93
MP28	48,61	34,96	5,51
MP31	44,73	28,08	9,62

Tabelle 5-5: Charakteristische Werte in nT des DC-Shifts (30 Sek-P-P) der jeweiligen Zeiträume aller drei Messpunkte.

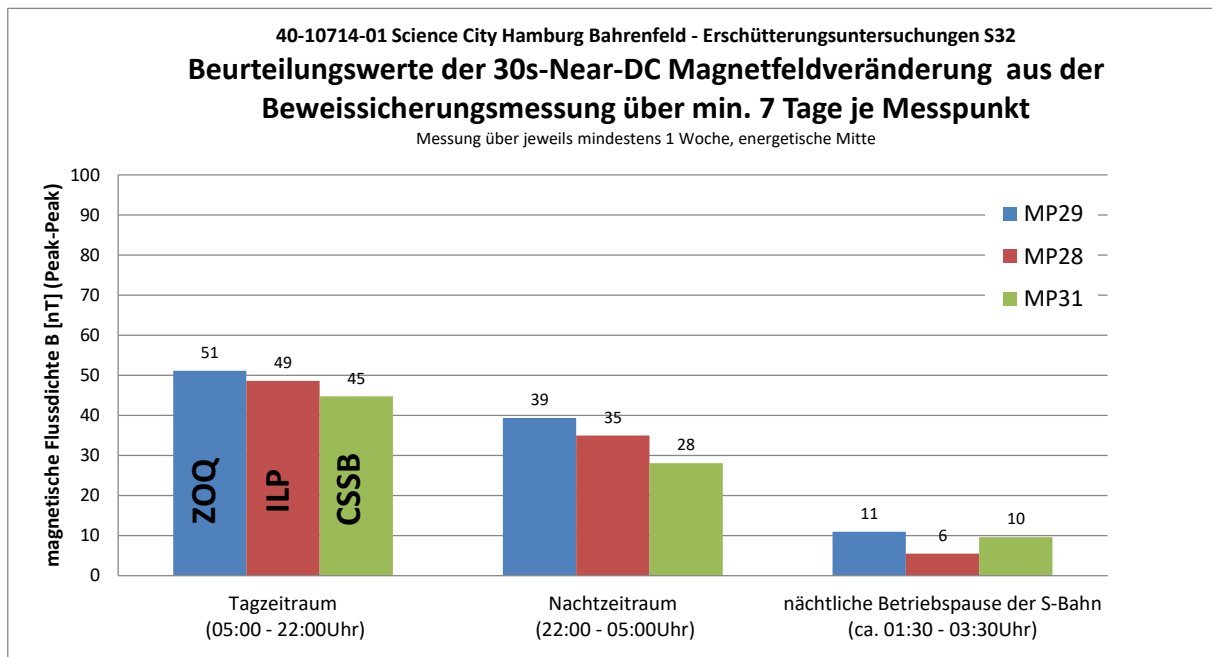


Abbildung 5-13: Charakteristische Werte (IST-Zustand) an den drei Messpunkten auf dem Campus Bahrenfeld

Nachfolgend wird versucht, das Verhalten der charakteristischen Werte zu erklären. Dazu wird beispielhaft das Verhalten am MP29-z gemäß Abbildung 5-14 erläutert. Im Zeitraum 01:30 bis 04:00 ist eine schlagartige Verringerung des DC-Shifts erkennbar. Recherchen haben ergeben, dass dieser Zeitraum mit der Betriebspause der S3 und S21 Richtung Pinneberg, deren Trasse in ca. 2,5km nordöstlich am Forschungsgelände DESY verläuft, zusammen fällt. Nur in diesem Zeitraum liegen wirklich sehr niedrige Near-DC-Werte auf dem Campus vor. Dies macht deutlich, was für einen enormen Einfluss eine selbst 2,5 km entfernte S-Bahn hat. Dieser Zeitraum mit besonders geringen DC-Shift-Werten entspricht den Werten im Zeitraum „nächtliche Betriebspause“.

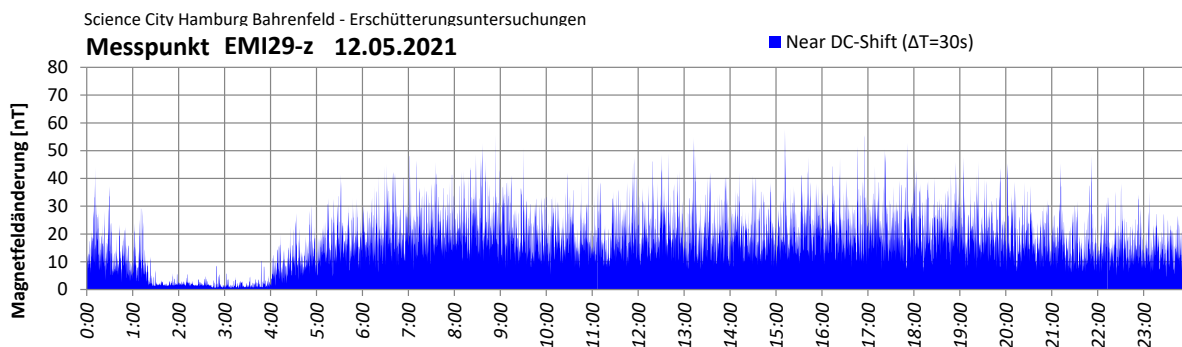


Abbildung 5-14: Tagesschwankungen des DC-Shifts beispielhaft am MP 29-z

Außerhalb dieses Zeitraums steigen die Werte an, wobei tagsüber, wenn der Hauptbetrieb auf dem Campus stattfindet, die Werte am größten sind. Dieser übrige Zeitraum wurde in den Nachtzeitraum (wenig Betrieb auf dem Campus) und den Tagzeitraum (intensiver Forschungsbetrieb) unterschieden.

Zusammenfassend zeigen die Messungen in den drei gemessenen Institutsgebäuden, dass der zur Orientierung für eine verträgliche Maximalbelastung vorgegebene Wert der Near-DC-Feldveränderungen von  $B=200$  nT aktuell, d.h. ohne S-Bahn auf der Luruper Chaussee, sehr deutlich unterschritten wird. Tatsächlich betragen die um Ausreißer bereinigten maximalen „Near-DC“-Felder über eine Woche energetisch gemittelt:

$$B_{99,5\%} \approx 45\text{-}51 \text{ nT (Tag) bzw. } 28\text{-}39 \text{ nT (Nacht)}$$

Darüber hinaus gibt es den Zeitraum der nächtlichen Betriebspausen der S-Bahn, bei dem die Near-DC-Felder mit Werten von 6-11nT nochmals erheblich niedriger sind.

Somit wird festgestellt, dass in den Gebäuden auf dem Forschungscampus Bahrenfeld aktuell relativ niedrige magnetische Flussdichteänderungen im Near-DC Bereich vorliegen.

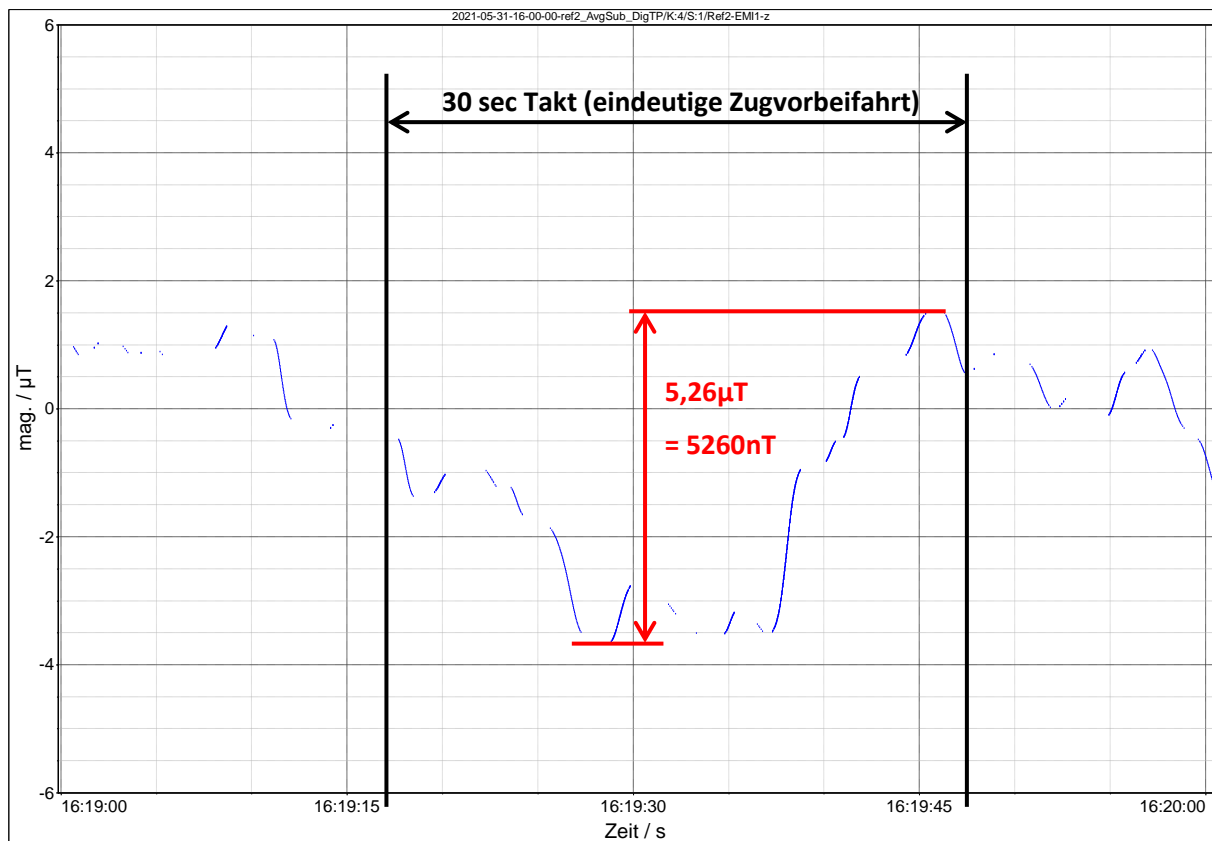
Würde man diesen Wert als Grenzwert einer zukünftigen S-Bahn Immission heranziehen, und würde dieser Grenzwert dann ausgenutzt, würden die aktuellen Werte der Near-DC-Felder erheblich überschritten. Dies hätte auf jeden Fall einen nachteiligen Einfluss auf den Forschungscampus. Daher wird aus sachverständiger Sicht empfohlen, diesen Orientierungswert nicht als Grenzwert heranzuziehen sondern sich an den IST-Werten an den drei Beweissicherungspunkten zu orientieren. Dies wird nachfolgend so gehandhabt.

#### **5.4 Ergebnisse der Messung an der Referenzstrecke Königstraße**

Neben dem bestehenden S-Bahn Tunnel östlich der Haltestelle Königstraße wurden die Referenzmessungen auf einem unbebauten Grundstück durchgeführt. Gemessen wurde die Veränderung der magnetischen Flussdichte  $B$  im Frequenzbereich DC-1kHz mittels Fluxgatesonden über einen mehrstündigen Zeitabschnitt während der Vorbeifahrt zahlreicher S-Bahnen.

Die Messungen wurden an zwei Messquerschnitten auf dem Gelände durchgeführt [2]. Anhand eines zusätzlichen, zeitsynchron erfassten Schwingungsmesspunktes im Tunnel selbst, konnte eindeutig detektiert werden, wann Züge unmittelbar am Messquerschnitt vorbeigefahren sind. Für diese eindeutig identifizierten Zugvorbeifahrten können die magnetischen Flussdichten direkt aus dem aufgezeichneten Zeitverlauf der Messung ausgewertet werden.



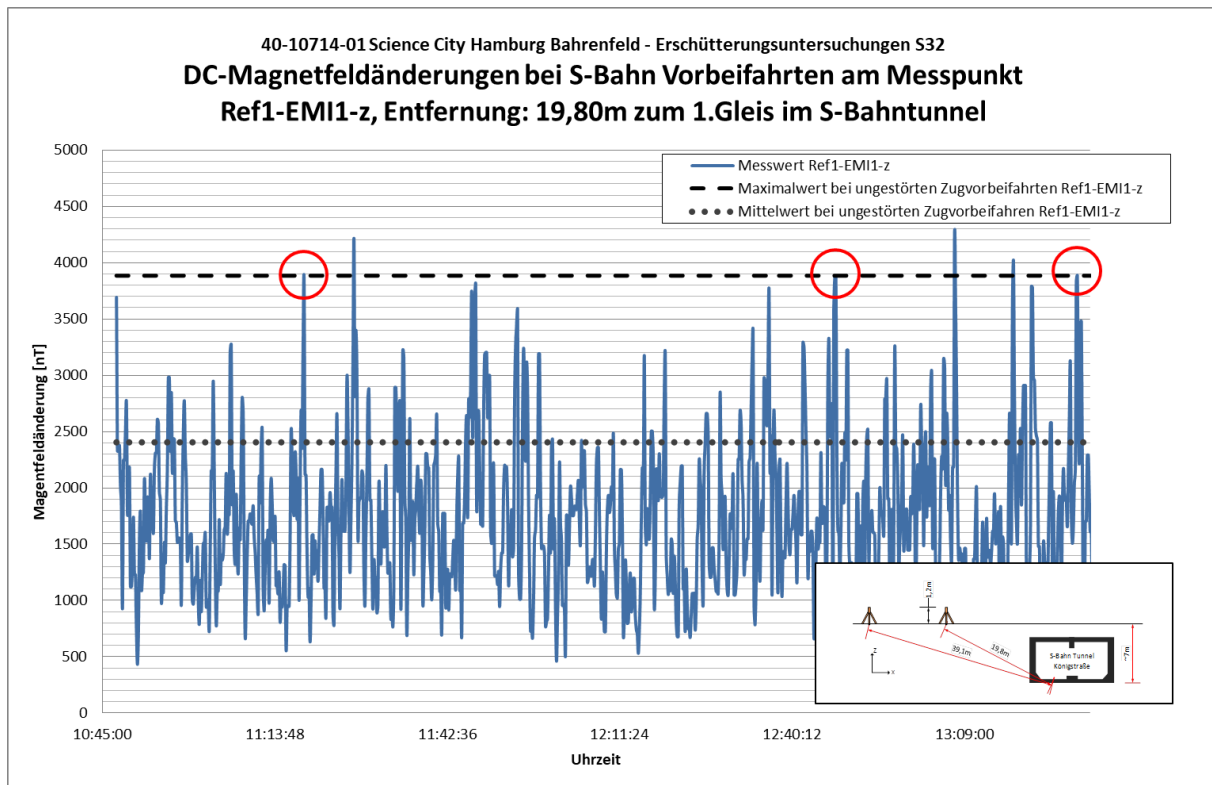


**Abbildung 5-15: Beispiel Auswertung der maximalen Veränderung des statischen Magnetfeldes am Ref1-EMI1-z**

Abbildung 5-16 zeigt exemplarisch die langsame Veränderung der magnetische Flussdichte über 1 Minute. Ebenfalls dargestellt ist ein 30s-Takt, der für die Auswertung der maximalen DC-Veränderung verwendet wurde. Das 30 Sekunden Fenster wird über die gesamte Messzeit „geschoben“ und so untersucht, wie groß die so ausgewertete DC-Feldveränderung bei den jeweiligen Zugvorbeifahrten ist.

Während der Messungen am Referenzquerschnitt 1 wurden 30 Zugvorbeifahrten eindeutig identifiziert und ausgewertet. Aus den Zeitverläufen der Magnetfeldmessung wurde für diese eindeutigen Zugvorbeifahrten je Messpunkt und Messrichtung der Maximalwert und der Mittelwert der Feldveränderung abgelesen.

Auch diese beiden Werte sind in Abbildung 5-16 mit eingetragen. Es zeigt sich, dass 3 der 30 Zugvorbeifahrten zu einer maximalen Feldveränderung mit nahezu gleicher Intensität geführt haben (in Abbildung 5-16 rot markiert).



**Abbildung 5-16: zeitlicher Verlauf der Magnetfeldänderungen (DC) am Messpunkt Ref1-EMI1-z**

Abbildung 5-16 zeigt jedoch auch einige Werte der Magnetfeldänderungen, die höher liegen, als die maximalen Werte bei den eindeutig identifizierten Zugvorbeifahrten. Grundsätzlich ist dies bei Messungen an Bahngleisen nicht ungewöhnlich, da ein magnetfelderzeugender Strom in der Stromschiene oder im Rückleiter auch dann fließt, wenn ein Zug im Versorgungsabschnitt unterwegs ist, bremst oder beschleunigt. Bei einer Messung unter freiem Himmel und im innerstädtischen Bereich, so wie hier am Referenzquerschnitt 1 und 2, können allerdings auch Störungen von anderen Quellen als der S-Bahn, z.B. vom Straßenverkehr, von Witterungseinflüssen, etc. nicht ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund bleiben bei der späteren Prognose diese nicht eindeutig den Zugvorbeifahrten zugeordneten Werte unberücksichtigt. Weitere Erläuterungen dazu werden in Kapitel 5.5 gegeben.

Für die Berechnung des Ausbreitungsverhaltens und für die weitere Prognose, werden im Weiteren folgende Maximalwerte der Magnetfeldveränderungen aus den Zugvorbeifahrten angesetzt.

Messquerschnitt	Abstand zum ersten Gleis [m]	maximale Änderung der magnetischen Flussdichte (DC) [nT]		
		vertikal z	radial x	parallel y
Referenzquerschnitt 1	19,76	3884,90	271370	481,14
	39,12	1956,54	496,86	97,19
	56,83	1301,11	172,86	64,09
	79,06	901,84	123,34	30,52
Referenzquerschnitt 2	15,46	5260,34	4497,68	729,74
	25,00	3346,97	1334,96	245,53
	33,72	2433,19	702,43	115,83
	74,53	107175	74,53	54,77

Tabelle 5-6: Maximalwerte der Magnetfeldveränderungen (DC) während Zugvorbeifahrten an den Referenzquerschnitten

Die Ergebnisse der Ausbreitungsmessung an den beiden Messquerschnitten, sowie das daraus extrapolierte Ausbreitungsverhältnis sind in Abbildung 5-17 dargestellt.

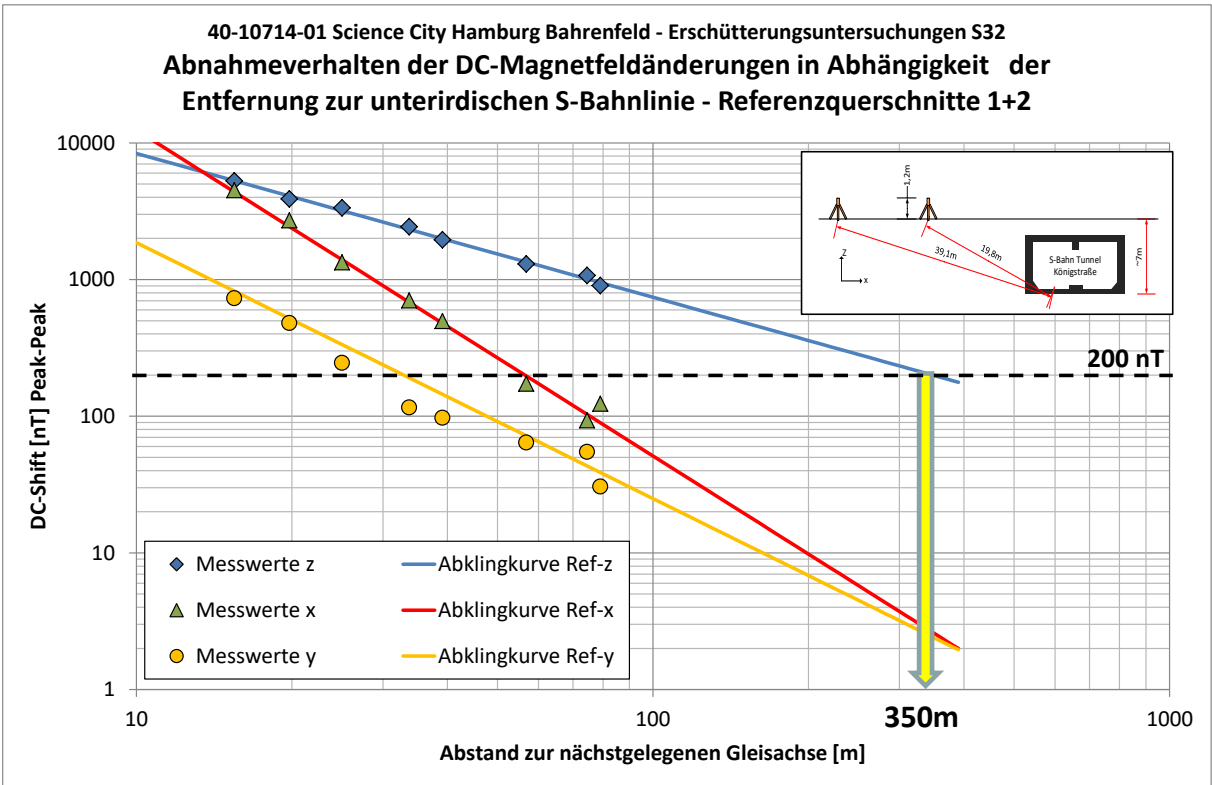
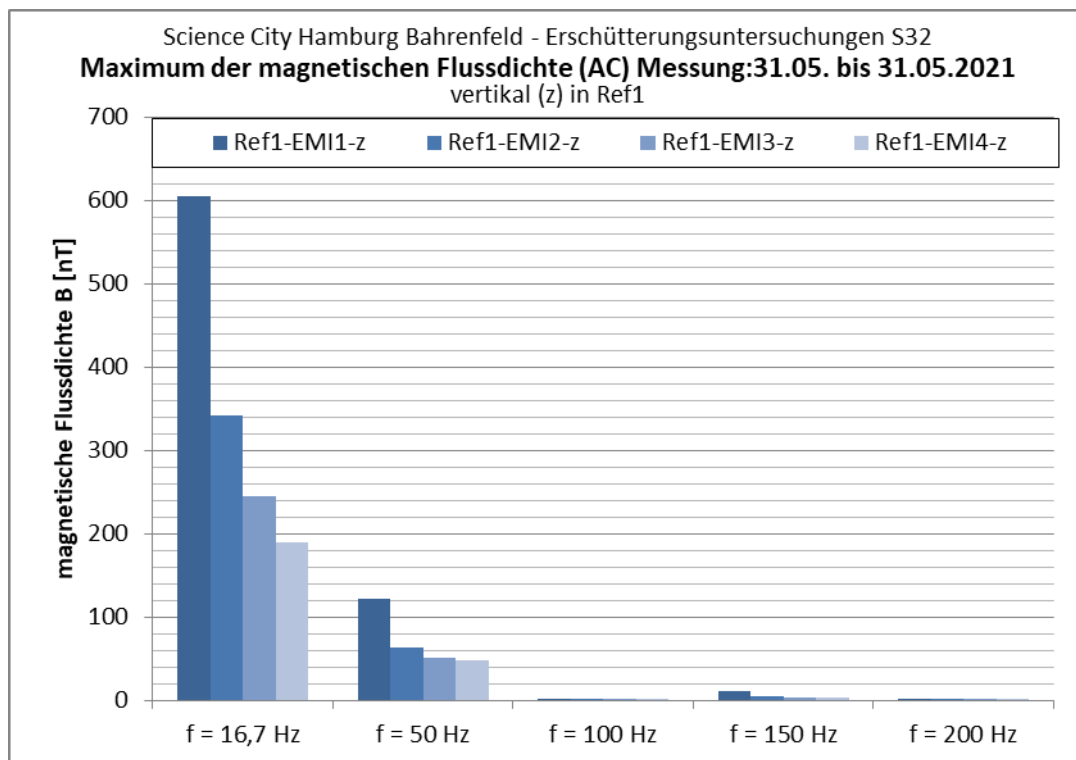


Abbildung 5-17: gemessenes Ausbreitungsverhalten der DC-Flussdichteänderungen an den Referenzquerschnitten

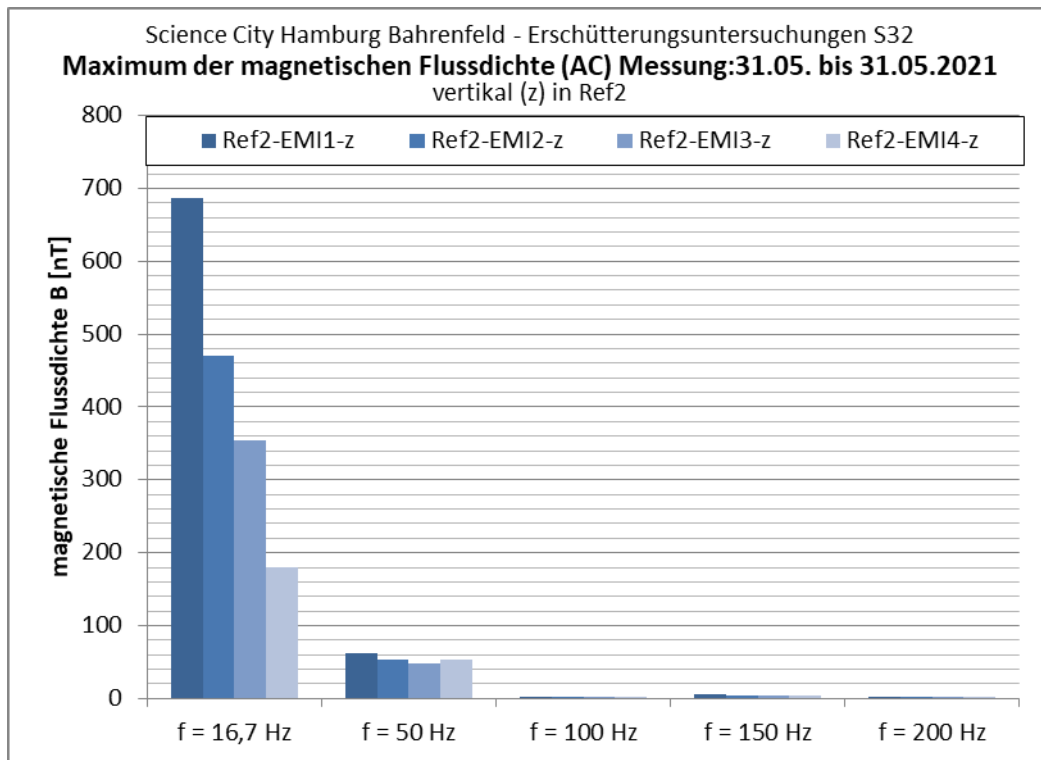
Es ist deutlich zu erkennen, dass die größten Feldveränderungen in vertikaler Messrichtung auftreten und auch mit größer werdendem Abstand nur langsam abnehmen. Der Exponent der Abnahme liegt für diese Messrichtung bei knapp über 1. Das bedeutet, doppelter Abstand von der Quelle führt grob zu einem halbierten Störfeld. Dies entspricht der Theorie der Feldabnahme eines langen, geraden,

stromdurchflossenen Leiters. Der Grund dafür, dass die Felder nicht schneller abnehmen (nämlich mit  $1/r^2$ ) liegt darin, dass der Rückstrom nicht nur über die Schienen der S-Bahn, sondern auch über die Gleise der Vollbahnen sowie das Erdreich zum Unterwerk zurückfließt. Aufgrund der damit einhergehenden unterschiedlichen Stromstärke auf dem Hin und Rückleiter, gibt es einen unkompen- sierten „Reststrom“, dessen Magnetfelder mit der Entfernung nur langsam abnehmen. Wie die Mes- sungen im Bestand gezeigt haben, ist daher der Einfluss des Bahnbetriebs noch in ca. 2,5km messbar (Kapitel 5.3.3).

Neben den betriebsartbedingten und erwarteten DC Magnetfeldern, zeigen die Messungen an den Referenzquerschnitten aber auch deutliche magnetische Wechselfelder bei 16,7 Hz. Die Störquelle für diese Frequenz ist das elektrifizierte Netz der Deutschen Bahn AG (DB), welches mit Wechsel- spannung der Frequenz 16,7 Hz (früher 16 2/3 Hz) betrieben wird. An den Referenzquerschnitten wurden in dieser Frequenz magnetische Wechselfelder bis zu 680nT gemessen (Abbildung 5-18 und Abbildung 5-19). In den anderen Frequenzen des Wechselstroms (50 Hz, 100 Hz, 150 Hz und 200 Hz) wurden am Messquerschnitt keine maßgeblichen Feldstärken gemessen.



**Abbildung 5-18: Flussdichte der magnetischen Wechselfelder (AC) am Referenzquerschnitt 1**



**Abbildung 5-19: Flussdichte der magnetischen Wechselfelder (AC) am Referenzquerschnitt 2**

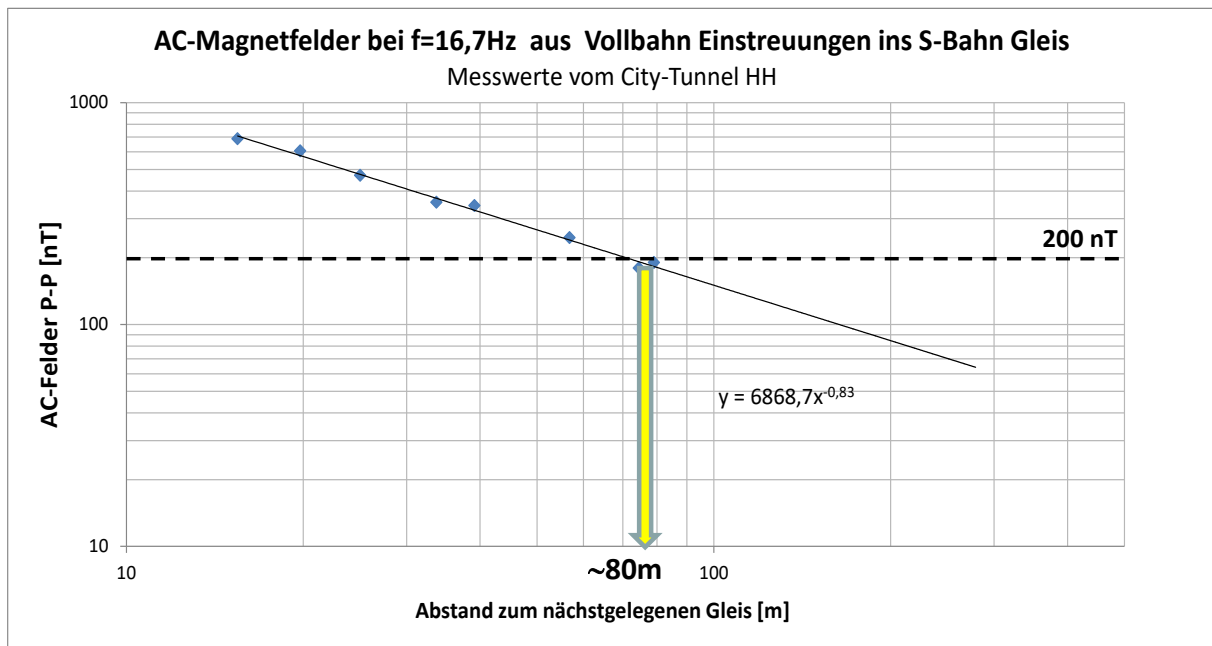
Die nächstgelegene Bahnanlage der DB, von wo die 16,7 Hz emittiert werden könnten, ist der Bahnhof Hamburg Altona in ca. 950 m Entfernung (Luftlinie). Die gemessene Abnahme der Flussdichten über den Referenzquerschnitt zeigt jedoch eindeutig, dass die Quelle nicht die entfernte Bahnanlage des Bahnhof Altona sein kann, sondern dass die Quelle tatsächlich ebenfalls im S-Bahn City-Tunnel zu suchen ist.

Nach Rücksprache mit der DB konnte bestätigt werden, dass aufgrund von Induktionsströmen der Vollbahnanlage auch auf den DC-Stromschienen der S-Bahn ein 16,7 Hz Anteil nachweisbar vorhanden ist. Grund ist die parallel Lage der oberirdischen S-Bahn- und Vollbahngleise im Bereich des Bahnhofs Altona sowie ein nicht getrenntes Erdungssystem zwischen dem City-Tunnel und der S-Bahn- und Vollbahnanlagen.

Grundsätzlich bleibt aber zunächst festzuhalten, dass die Wechselfelder bei 16,7 Hz gegenüber den DC-Magnetfeldern eine untergeordnete Rolle spielen.

Nachfolgend ist die Abnahmebeziehung der 16,7 Hz Wechselfelder dargestellt. Die 200 nT Grenze wird ab einer Entfernung von etwa 80m zum Gleis unterschritten.





**Abbildung 5-20: Flussdichte der magnetischen Wechselfelder bei 16,7 Hz (AC) in Abhängigkeit der Entfernung zum Gleis**

Die vollständige Dokumentation der Messungen enthält der Bericht 40-10714-01-D5 Messungen am Referenzstandort Königstraße vom 26.11.2021 [2].

### 5.5 Prognose der Magnetfeldänderungen bei für geplante S32 in der Luruper Chaussee

Die Schienenfahrzeuge im City-Tunnel sind identisch zu denen, die zukünftig am Forschungscampus fahren sollen. Es handelt sich sowohl um die gleiche Gleichspannungs-Stromversorgung als auch um die gleiche Antriebsleistung.

Basierend auf den Messwerten der DC-Magnetfeldveränderungen am Referenzquerschnitt werden im Folgenden die magnetischen Flussdichten im „Near-DC“- Frequenzbereich prognostiziert.

Im Gegensatz zum elektrischen Feld durchdringt das magnetische Feld die meisten Materialien nahezu unvermindert.

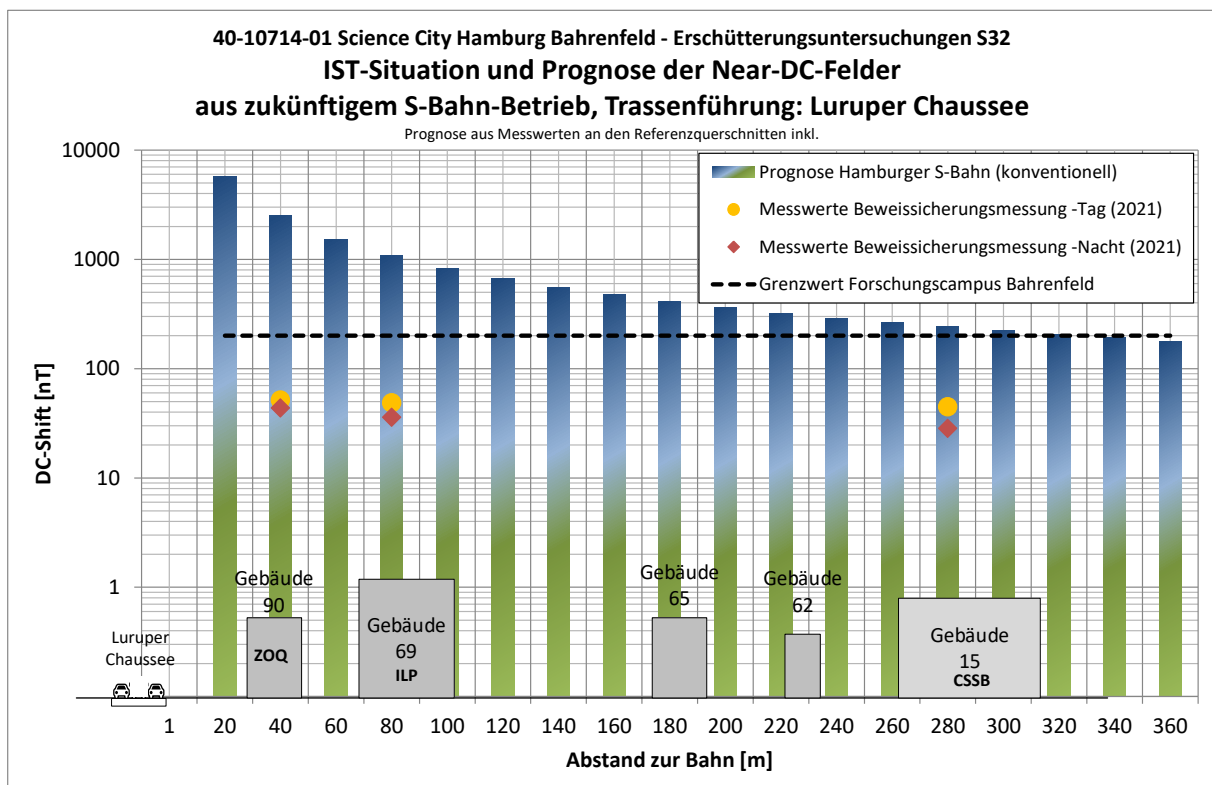
Eine solche Abschirmung könnte an einzelnen Geräten auf dem Campus eine wirksame Minderung gegen DC-Magnetfelder sein (vgl. Abschnitt 5.7). Auf der Emissionsseite, also im Tunnel, können solche Schirmungsmaterialien aus technischen Gründen nicht verwendet werden, hier ist keine Schirmung möglich.

In der Prognose werden daher keine bauteilbedingten Abnahmefaktoren berücksichtigt. Die sich aus der Prognose ergebenden abstandsabhängigen DC-Magnetfelder sind daher relevant für die Beurteilung und sich ergebende Reduktionsmaßnahmen am Gleis oder in Laboren mit einer magnetfeldempfindlichen Nutzung.

Wie oben erläutert, beruht die Prognose auf den durchgeführten Messungen während eindeutig identifizierten Zugvorbeifahrten an den Referenzquerschnitten an der Königstraße. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Messwerte stets Momentaufnahmen sind, auch wenn diese insgesamt über mehrere Stunden aufgenommen wurden. Stromverbräuche der S-Bahn und davon ausgehende Emissionen stellen immer nur eine Ist-Situation dar.

Die aus den Messungen ermittelten Maximalwerte der DC-Feldveränderungen werden für die Prognose mit dem Faktor 1,2 [-] multipliziert. Damit werden selten auftretende und bei den Messungen ggf. nicht erfasste Effekte mit abgedeckt.

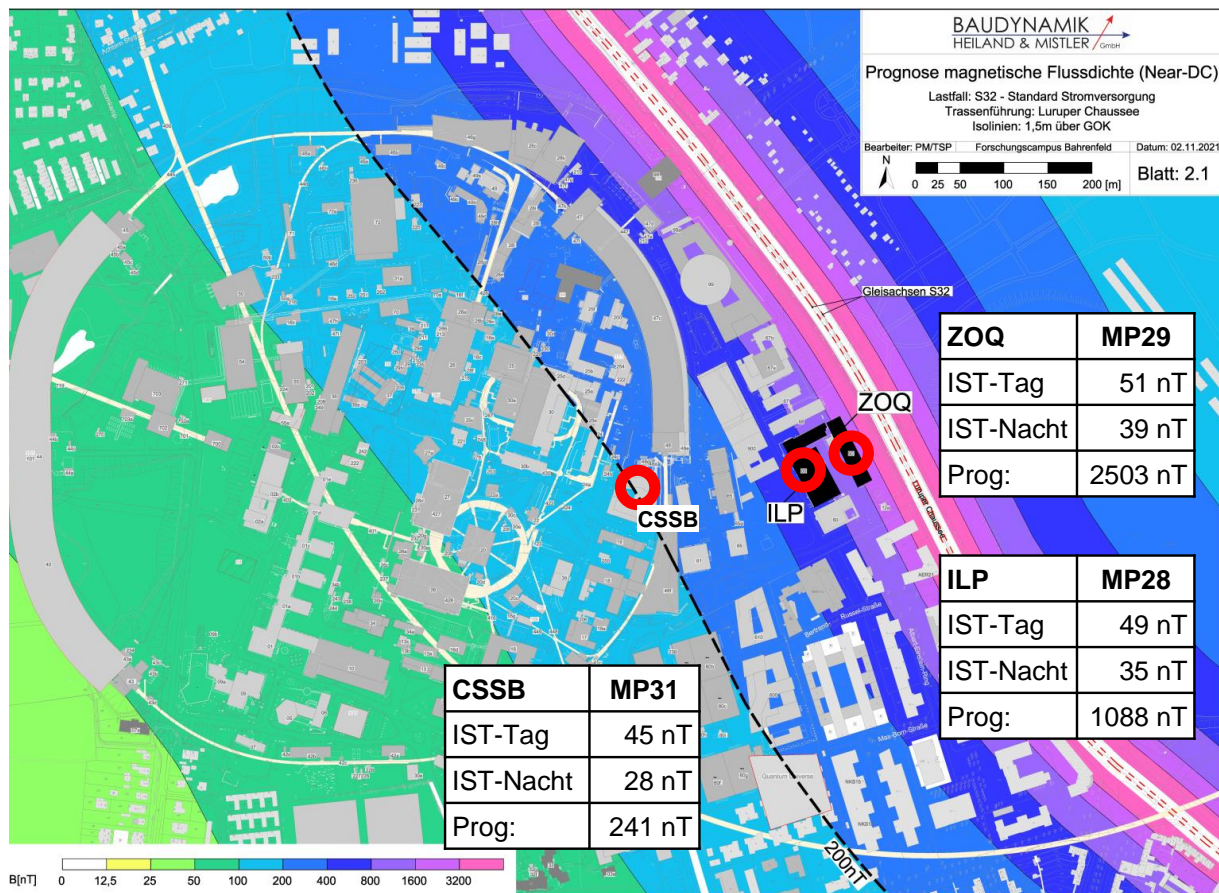
Die Prognosewerte für die neue Trasse in der Luruper Chaussee, zusammen mit dem zur Orientierung definierten Grenzwert für den Forschungscampus Bahrenfeld  $B=200$  nT, sind nachfolgend dargestellt.



**Abbildung 5-21: Prognose der DC Magnetfeldänderungen aus Betrieb der unterirdischen S32, Luruper Chaussee**

Wie bereits erwähnt wird der Grenzwert von 200 nT erst in einem Abstand von etwa 350 m zum Gleis unterschritten.

Aus den Prognosewerten wurden Isolinien-Darstellungen generiert und die IST-Werte im Bestand mit angegeben.



**Abbildung 5-22: magnetische Flussdichte (DC) aus dem Betrieb der S-Bahn ohne weitere Kompensationsmaßnahmen am Gleis/an der Trasse**

Abbildung 5-22 macht deutlich, dass auf ungefähr  $\frac{1}{4}$  der Fläche des Forschungscampus Bahrenfeld Near-DC-Magnetfeldänderungen größer 200 nT durch die geplante S-Bahn zu erwarten sind.

Die beiden Gebäude ZOQ und ILP liegen in einem Abstand von ca. 40 – 100 m zur geplanten Gleisachse der neu geplanten S-Bahn. In diesem Abstand sind DC-Flussdichteänderungen von ca. 2503 nT (Bereich ZOQ) bzw. 1088 nT (Bereich ILP) zu erwarten.

Die sich ergebenden Überschreitungen zu den heutigen Near-DC-Feldern (tagsüber) ergeben sich zu:

- ZOQ: Faktor 49 (34 dB)
- ILP: Faktor 22 (27 dB)
- CSSB: Faktor 6 (15 dB)

Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22 machen auch deutlich, dass die Magnetfeldbelastung auch in den weiter entfernten Gebäuden gegenüber der aktuellen Situation deutlich zunimmt. Im Gebäude 15 (MP31) beispielsweise um den Faktor von etwa 6. Insgesamt zeigt sich also, dass für zahlreiche weitere Gebäude Einschränkungen bei der Aufstellung empfindlicher Geräte wie Mikroskope

(REM/TEM), Elektronenstrahl-Lithografie, etc. zu erwarten sind. Die Aufstellung solcher magnetfeldempfindlichen Geräte ist dann ggf. in dieser Fläche nicht oder nur mit Einschränkungen und zusätzlichen schirmenden Maßnahmen möglich.

Für den Elektronenstrahl des DESY liegen keine Grenzwert-Anforderungen vor. Entsprechend der Prognoseergebnisse sind im Bereich des Beschleunigertunnels Änderungen des statischen Magnetfeldes von bis zu 700 nT zu erwarten. Dieser Wert liegt sehr deutlich über dem Orientierungsgrenzwert von 200 nT. Auch wenn es keine gesicherte Aussage über die Anforderungen des Beschleunigers gibt, wird davon ausgegangen, dass ein Wert von bis 700 nT zu Störungen am Beschleuniger führen wird. Dies muss aber auch mit den Strahlphysikern noch einmal explizit abgestimmt werden.

Neben den DC-Feldern aus der Gleichstromversorgung der S-Bahn, kommt es durch Induktion und Erdströme auch zu einem 16,7 Hz Wechselfeld (Kapitel 5.3.3). Da diese Beeinflussung aufgrund der Übertragungswege völlig unvorhersehbar auftritt, erfolgt hier keine separate Prognose. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Felder aus dem induzierten Bahnstrom an der S-Bahnstrecke deutlich geringer werden, je weiter man sich vom Stadtzentrum und von parallelverlaufenden Vollbahngleisen entfernt.

## **5.6 Mögliche Maßnahmen zur Reduktion des Magnetfelder aus der S32**

### **5.6.1 Maßnahmen zur Reduktion der Magnetfelder am Entstehungsort (Emissionsort)**

Die Prognose der magnetischen Flussdichte (DC) macht deutlich, dass bei einer herkömmlichen Ausbildung der S-Bahntrasse in einer großen Fläche des Forschungscampus Bahrenfeld der definierte Orientierungsgrenzwert überschritten wird und empfindliche technische Geräte, Anlagen und Messinstrumente nicht mehr störungsfrei funktionieren oder genutzt werden können. Um dies zu verhindern, muss die Bahntrasse unter dem Gesichtspunkt einer bestmöglichen Reduktion der Magnetfeldemissionen geplant werden, damit der Einflusskorridor der elektromagnetischen Feldveränderungen so schmal wie möglich ausfällt.

Die Stärke und die Wirkung eines magnetischen Feldes hängen von mehreren Faktoren ab. Für die Optimierung der neuen S-Bahn Trasse, die am Forschungscampus Bahrenfeld entlangführen soll, werden die beiden folgenden Punkte diskutiert:

1. Reduktion des Magnetfeldes (Emissionswert) durch optimierte Anordnung der Stromschiene
2. Verringerung der Streuströme zur Verbesserung des Magnetfeld-Abnahmeverhaltens (Verbesserung auf dem Transmissionsweg)

### Zu 1:

Der erste Faktor, mit dem die Stärke und letztlich auch die Wirkung des Magnetfeldes der S-Bahn beeinflusst werden kann, ist die Fläche, die von der Leiterschleife umschlossen wird. Je größer diese Fläche ist, also je weiter Hin- und Rückleiter voneinander getrennt verlaufen, desto größer ist das Magnetfeld.

Vom Unterwerk fließt der Strom über die seitliche Stromschiene und von dort über den Abnehmer zum Zug. Der Rückstrom fließt dann über die Gleise beider Fahrtrichtungen und zu einem gewissen Teil auch über das Erdreich zum Unterwerk zurück. Nachfolgend ist die Situation skizziert, dass ein Zug auf Gleis 2 fährt. Der Rückstrom fließt in diesem Fall über die vier Schienen der Gleise 1 und 2. Der Abstand zwischen Stromschiene und äußerer Schiene des Gleises 1 kann je nach Trassenquerschnitt relativ groß sein und wird im Mittel bei 6-7m, in Bahnhofsbereichen aber auch schnell bei 15-20m, liegen.

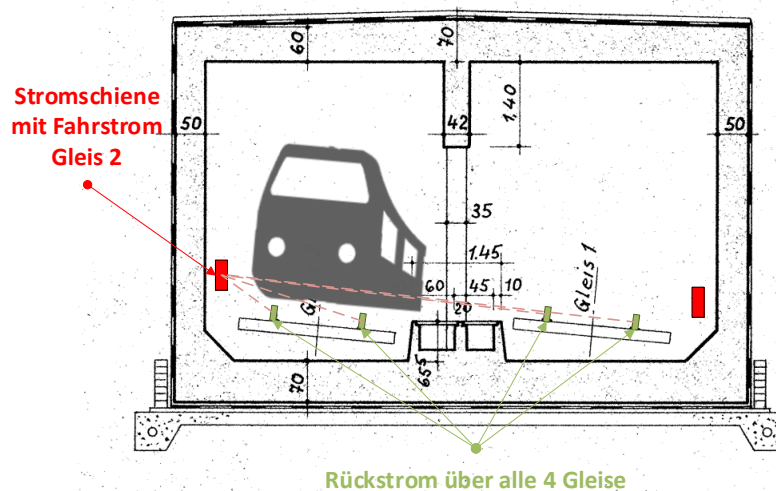


Abbildung 5-23: Skizze Stromkreis der S-Bahn Hamburg (aktuelle Situation)

Die Magnetfelder, die hier zwischen den unsymmetrisch angeordneten Leitern des Stromkreises entstehen, sind sehr hoch. Eine deutliche Verringerung des Magnetfeldes ist bei einer symmetrischen Anordnung der Leiter zu erwarten, wie sie beispielsweise entsteht, wenn die Stromschienen mittig zwischen den beiden Richtungsgleisen angeordnet werden über die dann der Rückstrom fließt.



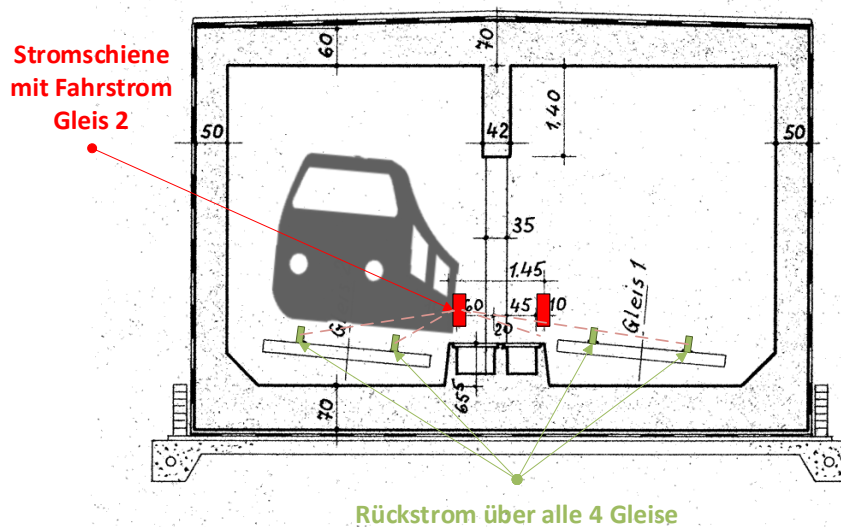


Abbildung 5-24: Skizze Stromkreis der S-Bahn Hamburg (optimierte Situation)

Inwieweit die Lage der Stromschiene mittig zwischen den Gleisen technisch möglich ist, muss in der weiteren Planung der Trasse mit dem Betreiber geklärt werden.

#### Zu2:

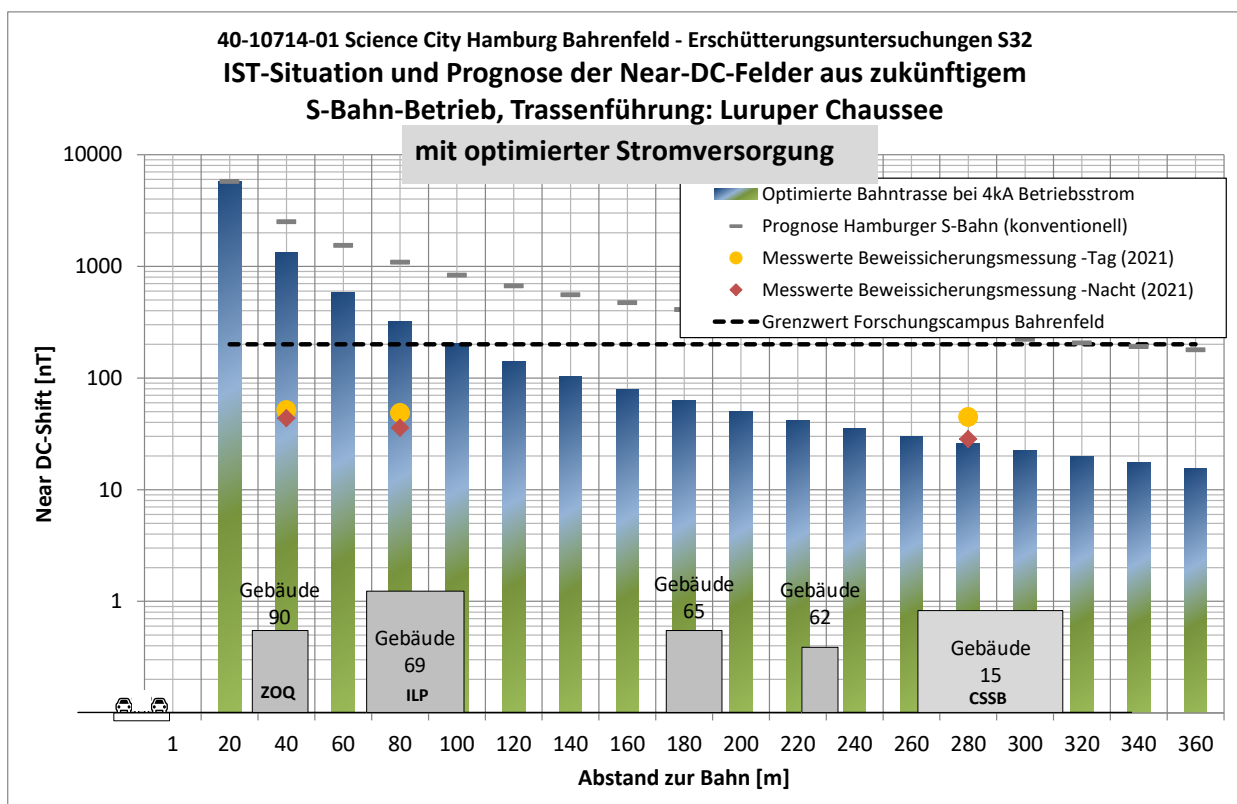
Mit einer Optimierung der S-Bahn Trasse kann nicht nur die Magnetfeldstärke an sich sondern auch das Ausbreitungsverhalten grundsätzlich verbessert werden. Wie in Abbildung 5-5 dargestellt, hängt nämlich auch die Abnahme der magnetischen Flussdichte von der Anordnung der Stromdurchflossenen Leiter ab. Dabei kann auch eine optimierte S-Bahn Trasse (wie unter 1 dargestellt) wie ein Einzel-leiter wirken, nämlich dann wenn die Summe der Ströme in der Stromschiene (Hinleiter) und in den Schienen (Rückleiter) nicht Null ergibt. Dies ist in der Regel bei Bahnanlagen der Fall, da ein nicht unerheblicher Teil des Rückstromes nicht über die Gleise sondern über das Erdreich zum Unterwerk zurückfließt. Gemäß [20] ist bei einer Gleichstrombahn mit Stromschiene dabei sogar mit einem Rückstrom von nur 50% über die Schiene zu rechnen. Der Strom, der dem Stromkreis fehlt und der parallel über andere Wege zur Stromquelle zurück fließt wird auch Summenstrom oder Differenzstrom genannt. Die Wirkung dieses Stromes, sowie die Wirkung des unkompenzierten Stromkreises ist relevant, da die erzeugten Magnetfelder mit zunehmender Entfernung nur langsam, nämlich mit  $1/r$  abnehmen [20].

Die Auswirkungen dieser Ströme wurde an den Referenzquerschnitten und auch bei den Messungen am Forschungsstandort DESY messtechnisch erfasst.

Mit einer optimierten Isolierung der Trasse gegen Erdreich kann dieser Summenstrom, der über das Erdreich fließt, deutlich reduziert werden. Wenn im idealsten Fall der gesamte Rückstrom durch die

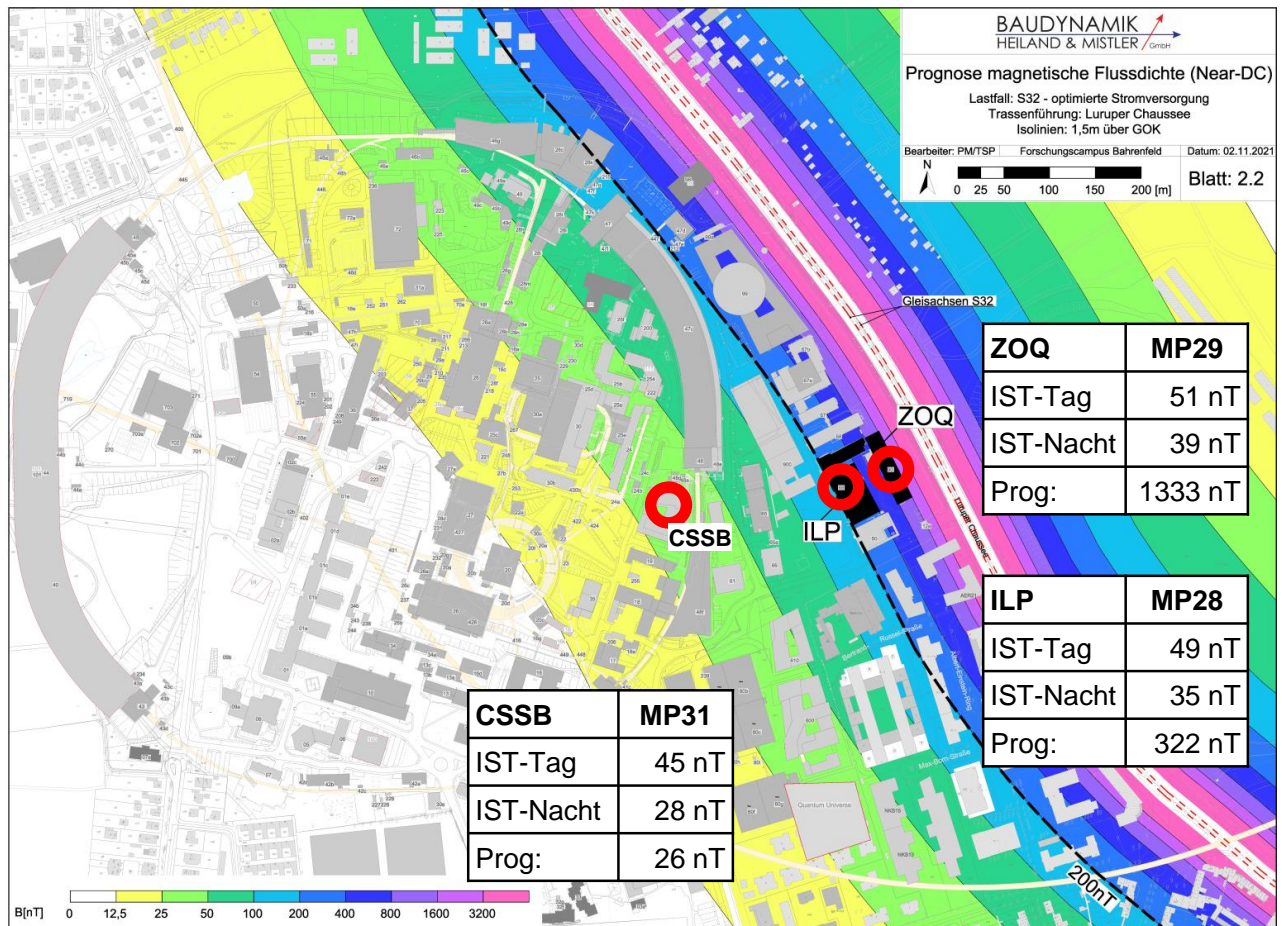
Gleise fließen würde, dann könnte für die Abnahmebeziehung im Fernfeld ein Abnahmeexponent von -2 (d.h.  $1/r^2$ ) erreicht werden, was zu erheblich niedrigeren Prognosewerten der Near-DC-Felder auf dem Forschungscampus führen würde.

Für eine 2 gleisige S-Bahntrasse mit mittig liegenden Stromschienen und einem Stromrückfluss über die symmetrisch angeordneten Gleise (entsprechend Abbildung 5-24) von über 90 % des Stroms im Hinleiter, wird das magnetische Gleichfeld berechnet. Dabei wird mit einem Strom von 4 kA (entspricht zwei S-Bahn im Versorgungsabschnitt) gerechnet. Die Prognoseergebnisse sind vergleichend mit dem Grenzwert, den Messwerten im Bestand und den Prognosewerten bei einer herkömmlichen Trassenplanung in Abbildung 5-25 dargestellt.



**Abbildung 5-25: magnetische Flussdichte (DC) Prognosewerte S-Bahn bei optimierter Stromversorgung**

Analog zu Abbildung 5-22 sind in Abbildung 5-25 die magnetischen Flussdichten entlang der S-Bahntrasse für ein Abnahmeverhalten von  $1/r^2$  aufgetragen. Der Orientierungswert von  $B=200$  nT wird bei dieser als „optimierte Stromversorgung“ genannten Verbesserungsmaßnahme hierbei schon in etwa 100m eingehalten, anstatt – wie bei der Prognose mit nicht optimierter Stromführung - erst in 350m. Die Anzahl der betroffenen Gebäude und Anlagen auf dem Forschungscampus Bahrenfeld sinkt dadurch drastisch



**Abbildung 5-26: magnetische Flussdichte (DC) im Bereich der S-Bahn bei einer optimierten Trassenausbildung und einem Abnahmeverhalten von  $1/r^2$**

Die Prognoseberechnungen machen deutlich, dass es selbst bei der angesetzten optimalen Elektroversorgung der S-Bahn zu einer maßgeblichen Verschlechterung der Near-DC-Felder auf dem Forschungscampus Bahrenfeld gegenüber der IST-Situation kommen wird.

In den beiden Gebäude ZOQ und ILP, die in der ersten Reihe zur Luruper Chaussee liegen, wird auch bei einer optimalen Elektroversorgung der S-Bahntrasse der Orientierungswert von  $B = 200 \text{ nT}$  deutlich überschritten.

Die sich ergebenden Überschreitungen zu den heutigen Near-DC-Feldern ergeben sich zu:

- ZOQ: Faktor 26 (28 dB)
- ILP: Faktor 7 (17 dB)
- CSSB: keine

Die genauen Prognosewerte und IST-Werte (tags / nachts) sind in der Grafik mit enthalten.



### 5.6.2 Verschiebung der Gleistrasse

Die Untersuchung, insbesondere auch die Darstellung der Isolinien, machen deutlich, dass der Abstand zur Gleistrasse der maßgebende und äußerst sensitive Parameter für die Intensität der Near-DC-Felder auf dem Forschungscampus ist.

In diesem Abschnitt wird daher untersucht, mit welcher Minimalverschiebung der Gleistrasse der geplanten S32 die tagsüber gemessenen DC-Felder im Bestand eingehalten würden.

Die folgende Darstellung enthält eine um 160 m nach Osten verschobene Gleistrasse. Der Abstand dieser Trasse zur Fassade der nächstgelegenen Institute auf dem Campus beträgt 200m. Es wird hier vorausgesetzt, dass eine optimierte Stromversorgung mit reduziertem Streustrom und optimierter Lage der Stromschiene zum Einsatz kommt. Die nachfolgende Grafik zeigt die Ergebnisse in Form eine Isolinien-Darstellung.

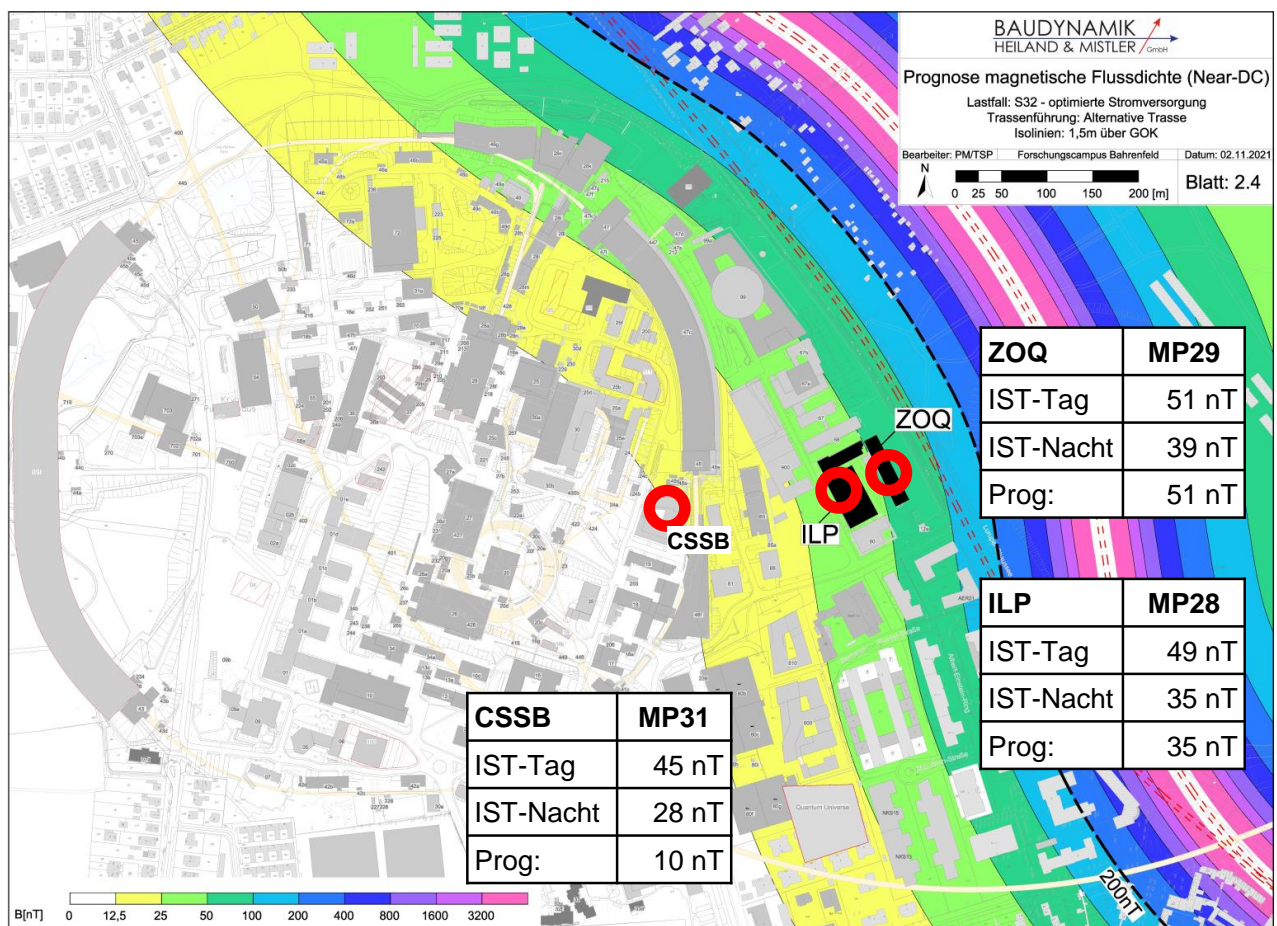


Abbildung 5-27: Isolinien der prognostizierten Near-DC-Felder, Standard Stromversorgung, Trasse: 160m verschoben

Die sich ergebenden Überschreitungen zu den heutigen Near-DC-Feldern (Werte tagsüber) ergeben sich zu:

- ZOQ: keine
- ILP: keine
- CSSB: keine

Der zur Orientierung angegebene Grenzwert  $B = 200 \text{ nT}$  wird ab etwa 100 m Abstand zum Gleis eingehalten. Diese Linie liegt jetzt östlich der Luruper Straße. Die maximal zu erwartenden Near-DC-Felder liegen bei dieser Variante auf dem gesamten Campus bei

$$B < 51 \text{ nT}$$

und damit auf dem Niveau der heute vorhandenen IST Werte (tagsüber). Gegenüber den nächtlichen IST-Werten liegen die Prognosewerte in der ersten Reihe der Universitätsgebäude (ZOQ) noch etwa 25 % höher.

Um auch die nächtlichen IST-Werte auf dem Forschungscampus beim zukünftigen Betrieb der S32 nicht zu überschreiten, ist eine noch größere Verschiebung der Trasse erforderlich.

Letztlich handelt es sich um eine Optimierungsaufgabe für die weitere Planung des S32, die aufgrund der in diesem Gutachten dokumentierten IST-Werte sowie der Prognosewerte durchgeführt werden kann.

Ohne dieser Optimierung vorgreifen zu wollen wird aus sachverständiger Sicht davon ausgegangen, dass eine Verschiebung der Trasse um 250 m nach Osten (von der Luruper Chaussee aus gemessen) erforderlich wird, um die emittierten Near-DC-Felder auf das Niveau der nächtlichen IST-Werte auf dem Campus abzusenken. Bei dieser Verschiebung und der parallel dazu oben beschriebenen optimierten Stromversorgung wird mit einem Niveau der Near-DC-Felder von 10 - 20 nT gerechnet.



### 5.7 Maßnahmen zur Reduktion der Magnetfelder am Einwirkungsort (Immissionsort)

Magnetfelder können am Immissionsort in vielen Fällen mit aktiven oder passiven Maßnahmen reduziert werden. Im Folgenden Schaubild sind die unterschiedlichen Wirkungsarten der aktiven und passiven Schirmung am Immissionsort kurz dargestellt.

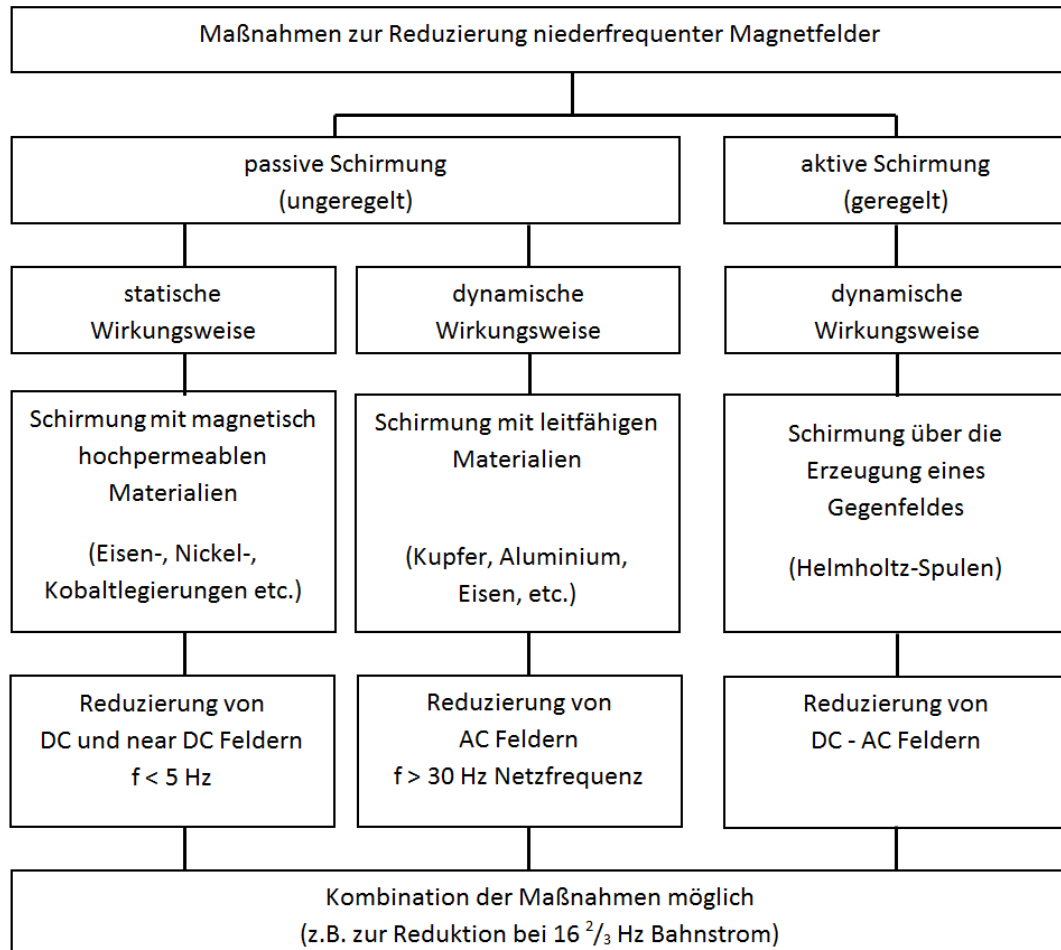


Abbildung 5-28: Schaubild zu den Möglichkeiten der Reduktion niederfrequenter Magnetfelder am Immissionsort

Im Folgenden einige grundsätzliche Erläuterungen:

#### Passive Schirmung am Immissionsort

Zu große magnetische Feldveränderungen am Aufstellort eines empfindlichen Gerätes, können in dem entsprechenden Labor mit passiven Magnetfeldschirmungen reduziert werden. Unter einer passiven Magnetfeldschirmung versteht man die „ungeregelte“ (passive) Schirmung des gesamten Raumes oder des einzelnen Gerätes mit metallischen Werkstoffen hoher magnetischer Permeabilität. Bei der Schirmwirkung kann zwischen einer statischen und einer dynamischen Abschirmung unterschieden werden.

Bei der statischen Abschirmungsmethode wird der magnetische Fluss in der (Flächen-)Schirmung „umgeleitet“. Die Schirmwirkung ist abhängig von der magnetischen Leitfähigkeit des Materials und der Materialdicke. Zur Anwendung kommen spezielle Materialien wie schlussgeglühtes  $\mu$ -Metall (Nickel-Eisen Legierung) und andere spezielle Eisen-, Nickel- oder Kobaltlegierungen. Außerdem ist die Schirmwirkung von der Störfeldfrequenz abhängig. Der häufigste Anwendungsfall einer passiven Magnetfeldschirmung mit den genannten Materialien ist die Reduzierung von DC und near DC - Feldern.

Bei der dynamischen Abschirmungsmethode wird das magnetische Störfeld mittels induzierten Wirbelstroms reduziert. Die Schirmwirkung ist abhängig von der Frequenz des Störfeldes sowie der elektrischen Leitfähigkeit und der Materialdicke des Schirmwerkstoffes. Zur Anwendung kommen handelsübliche Materialien wie Aluminium oder Ni/Fe bzw. Si/Fe Legierungen. Mit diesen, im Vergleich zum schlussgeglühten  $\mu$ -Metall kostengünstigeren Materialien, lassen sich AC-Felder mit 50Hz (Netzfrequenz) reduzieren.

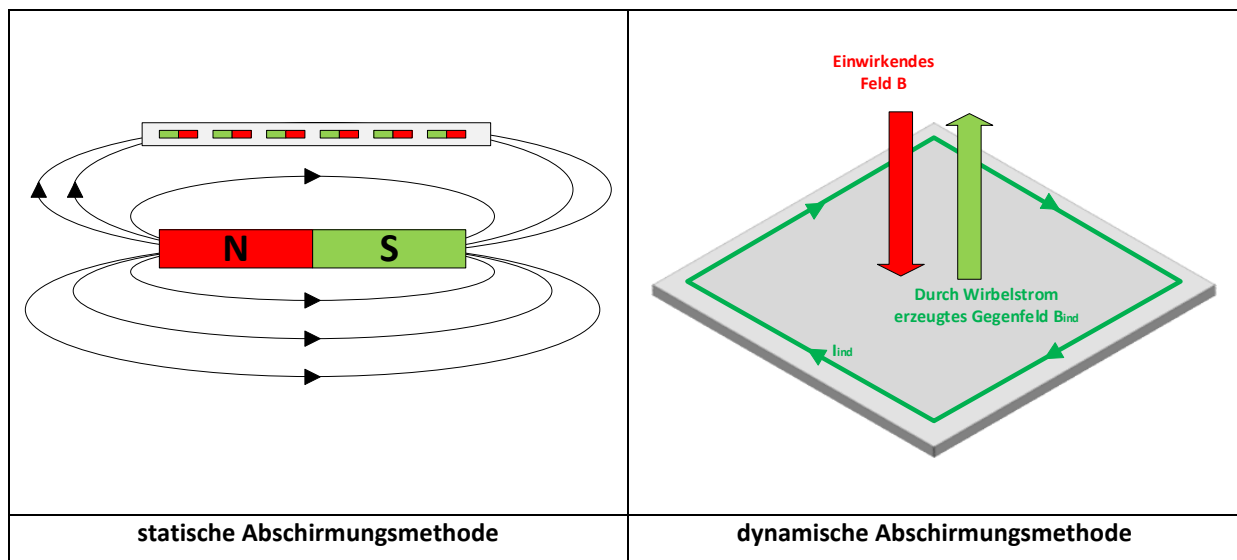


Abbildung 5-29: Wirkungsweisen der passiven Schirmungsmethoden

### Aktive Schirmung am Immissionsort

Neben den passiven (metallischen) Schirmungsmethoden können die Magnetfelder auch aktiv reduziert werden. Als Vektorfelder lassen sich Magnetfelder mit einem gleich großen, entgegengesetzt gerichtetem Feld auslöschen. Das Gegenfeld wird dabei durch stromdurchflossene Spulen die sich im Raum gegenüberliegen (Helmholtz-Spulen) aufgebaut. Zur Regelung des Stromflusses in den Spulen muss das Magnetfeld mit einem Sensor gemessen werden. Der Sensor sollte dabei dort montiert werden, wo die Feldreduktion maximiert werden soll (beim REM beispielsweise im Bereich des freien Elektronenstrahls). An diesem Punkt (Sensorpunkt) wird das Magnetfeld dann optimal reduziert. Die Schirmwirkung einer aktiven Kompensation wird dabei maßgeblich vom Aufbau und der Ausführung

des Reglers sowie von der Homogenität des zu reduzierenden Feldes bestimmt. Je größer die Entfernung zum Emittenten ist, desto homogener ist das Feld, desto besser funktioniert eine aktive Kompensation. Dies gilt sowohl für Störquellen mit Auswirkungen auf das statische Magnetfeld (S-Bahn) als auch für Störquellen mit Auswirkungen auf die magnetischen Wechselfelder (16,7 Hz, 50 Hz, etc.). Große Raumbereiche lassen sich mit einer aktiven Kompensationsanlage oftmals nur eingeschränkt oder nur in Kombination mit einer passiven Schirmung schirmen.

Die Kosten für die genannten Maßnahmen können wie folgt abgeschätzt werden (alle Preise Netto, Stand 02/2021), dabei wird beispielhaft und vereinfachend von einem typischen Laborraum mit einem hochempfindlichen Transmissionselektronenmikroskop als zu schützendes Gerät ausgegangen:

30.000 €	je aktiver Magnetfeldkompensation
7.500 €	für die Verlegung der Spulen
22.500 €	für die Mess- und Steuergeräte
3.900 €/m <sup>2</sup>	für eine 10mm Reineisenschirmung
5.400 €/m <sup>2</sup>	für eine 15mm Reineisenschirmung
2.300 €/m <sup>2</sup>	passive DC-Schirmung (1,5mm $\mu$ -Metall schlussgeglüht)
3.200 €/m <sup>2</sup>	passive DC-Schirmung (1,5mm $\mu$ -Metall schlussgeglüht) <u>inklusive</u> Vorbereiten der Wände in Trockenbau und Fertigstellung des Rauminnen in Trockenbau (Vorsatzschale, Fußboden)

#### **Kostenschätzung für Maßnahmen am Immissionsort:**

Bei der oben beschriebenen optimierten Stromführung liegt die 200nT Linie in etwa 100m Entfernung zur ersten Gleisachse der neuen S-Bahn. Bei einer nicht optimierten Stromführung in etwa 350m. Für diese beiden Abstände sind nachfolgend die Anzahl der betroffenen Labore aufgelistet, in denen eine weitere Kompensation oder Schirmung zur Einhaltung des Grenzwertes 200 nT erforderlich wird.

Die hier angegebenen Schätzungen basieren einerseits auf den Nutzerangaben über relevante Labore mit magnetfeldempfindlichen Geräten als auch auf Schutzmaßnahmen, die aus sachverständiger Sicht als möglich und praktisch umsetzbar angesehen werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die Nutzerangaben zur Anzahl der betroffenen Labore sowie betroffenen Experimente möglicherweise unvollständig sind und die Kostenschätzungen daher möglicherweise zu niedrig sind.

Außerdem muss beachtet werden, dass die Nutzer teilweise bereits heute Ihre Experimente mit Magnetfeldschirmungen ausgerüstet haben, sodass eine weitere Minderung am Immissionsort grundsätzlich ausscheidet. Dies ist beispielsweise beim ZOQ und dem ILP der Fall.

Gebäude		Nutzung	Anforderung		Anzahl Geräte mit Maßnahmen am Immissionsort		
					S32 ohne besondere Maßnahmen	S32 mit opt. Stromversorgung	S32 mit opt. Stromversorgung und alternativer Trassenführung
Geb.90	ZOQ	Universität	<200nT	Nutzerangabe <sup>*1</sup>	<del>*2</del>	<del>*2</del>	0
Geb.69	ILP	Universität	<200nT	Nutzerangabe <sup>*1</sup>	<del>*2</del>	<del>*2</del>	0
Geb. 28	FLASH	Teilchenbeschleuniger	< 100nT	Nutzerangabe	1	1	0
Geb.24	LINACII	Teilchenbeschleuniger	< 100nT	Nutzerangabe	1	0	0
bei Geb.24	LUX	Teilchenbeschleuniger	< 100nT	Nutzerangabe	1	0	0
Geb.30	SINBAD/ARES	Teilchenbeschleuniger	< 100nT	Nutzerangabe	1	0	0
Geb.15	CSSB	Kryo-Mikroskope	< 10-125nT (je nach Gerät)	Nutzerangabe	5	3	0
Geb.99	CFEL	Elektronenmikroskope	< 40-200nT (je nach Gerät)	Nutzerangabe	10	10	0
Geb.94	CXNS	Elektronenmikroskope	< 40-100nT (je nach Gerät)	Nutzerangabe	4	2	0
Geb. 47c	PETRA III Experimentierhalle	Elektronenmikroskope	<280nT	Nutzerangabe	2	0	0
Geb.48	PETRA-Halle/EMBL		<200nT	geschätzt	2	0	0
Geb.900	MPG/MPSD		<200nT	geschätzt	2	0	0
<b>Summe Anzahl der durch den Zubau der S32 zu schützenden Räume/Geräte:</b>					<b>29</b>	<b>16</b>	<b>0</b>
Anzahl Räume/Geräte <b>passive Schirmung</b> (ca. 1.200.000€ pro Laborraum)					geschätzt	7	5
Anzahl Räume/Geräte <b>aktive Schirmung</b> (ca. 30.000€ pro Laborraum)					geschätzt	22	11
<b>Gesamtkosten für erforderliche Schirmungsmaßnahmen (Netto)</b>					<b>9.060.000,00 €</b>	<b>6.330.000,00 €</b>	<b>- €</b>
Nutzerangabe <sup>*1</sup> :		Die hier vorhandenen Experimente sind bereits mit Immissionsschutzmaßnahmen geschützt worden, die 200 nT beziehen sich auf die maximalen Veränderungen der magnetischen Flußdichte, weiterer Schutzmaßnahmen am Experiment sind nicht möglich					
<sup>*2</sup> :		Die hier stattfindenden Experimente werden durch die S-Bahn so gestört, dass sie nicht mehr durchführbar sind					

**Tabelle 5-7: Kostenschätzung für Maßnahmen an den Immissionsorten in Abhängig der Trassenausbildung**

Bei der Kostenermittlung wird des Weiteren davon ausgegangen, dass im Bereich der Teilchenbeschleuniger (Flash) nur Anlagenteile passiv geschirmt werden müssen. Sollte eine komplette Raumschirmung erforderlich werden, so ist diese separat zu rechnen, wobei Raumschirmung mit bis zu 3.200 EUR/m<sup>2</sup> Schirmungsfläche erhebliche Zusatzkosten verursachen.

## 6 Auswirkungen des zukünftigen KFZ-Verkehrs in der Luruper Chaussee

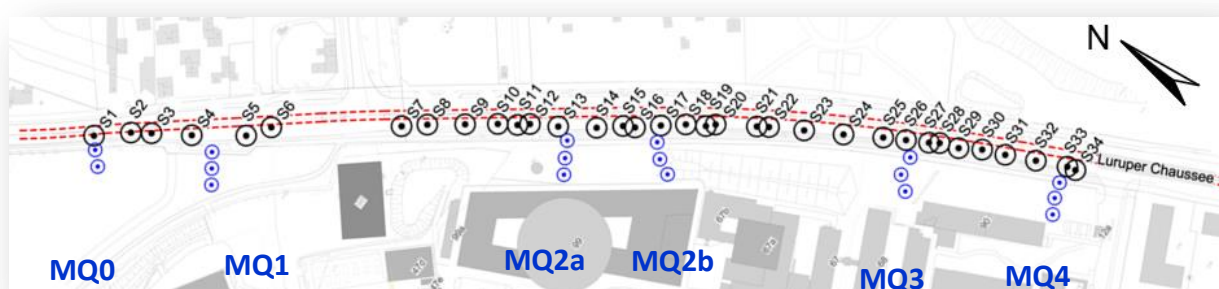
Neben der Hauptuntersuchung über zu erwartende Schwingungen und Magnetfelder durch die geplante S32 sollte auch untersucht werden, wie sich ggf. die Schwingungen auf dem Forschungscampus verändern, wenn zukünftig die Verkehrsstärke zunimmt.

Hierzu wurden die im Rahmen der S32-Prognose durchgeführten Messungen auf die gesonderte Erfassung der Schwingungen des Straßenverkehrs im Nahbereich der Luruper Chaussee erweitert.

Die Beurteilung des zukünftigen Straßenverkehrs enthält verschiedene Zwischenschritte, die aus den nachfolgenden Komponenten besteht:

- Aufnahme und Beurteilung des Straßenzustandes inkl. Dokumentation der Straßenschäden (exemplarisch).
- Schwingungsmessungen der Einwirkungen aus Straßenverkehr an 6 verschiedenen Messquerschnitten entlang des untersuchten Straßenabschnitts im Nahfeld (<30m) zur Straße.
- Analyse der verschiedenen Einflüsse der verkehrsinduzierten Erschütterungen auf das maximale und das statistisch relevante Schwingungsniveau (im Zeit- und Frequenzbereich).
- Bewertung des Straßenzustandes im Hinblick auf die Verkehrserschütterung.
- Prognose der Schwingungen auf dem Campus aufgrund zukünftig gesteigerter Verkehrsstärke.

Zur Erfassung der Schwingungen aus Straßenverkehr wurden im Zeitraum vom 25.05.2021 bis 27.05.2021 Schwingungsmessungen an 6 Messquerschnitten entlang der Luruper Chaussee durchgeführt (vgl. Abbildung 6-1).



**Abbildung 6-1: Übersicht über die für die Straßenverkehrsmessung instrumentierten Messquerschnitte (blaue Punkte)**

Diese Messquerschnitte (MQ0, MQ1, MQ2a, MQ2b, MQ3 und MQ4) wurden im Rahmen der Hauptuntersuchung durchgeführt, jedoch getrennt ausgewertet und in Anlage I, Abschnitt 8, dokumentiert. An jedem Messquerschnitt wurden Messpunkte in 10 m und 20 m Entfernung zur Achse der nächst-



gelegenen Fahrbahn instrumentiert, an fast allen Querschnitten (mit Ausnahme von MQ0) ebenfalls einer in 30m Entfernung. Die Messpunkte wurden so gewählt, dass die dokumentierten Unebenheiten der Straße und deren Auswirkungen auf das Schwingungsniveau erfasst werden konnten. Die nachfolgende Abbildung gibt eine Übersicht über die instrumentierten Messquerschnitte und die relative Lage zu den aufgenommenen Schadstellen der Straße, die mit den Bezeichnungen S1 – S34 gekennzeichnet sind.

### 6.1 Theoretische Grundlagen und Anregungsmechanismen

Als Verkehrserschütterungen werden die Schwingungen bezeichnet, die von der Gesamtheit der auf einem Verkehrsweg fahrenden Fahrzeuge erzeugt werden. Diese gehen zurück auf die von jedem einzelnen Fahrzeug erzeugten Erschütterungen.

Grundsätzlich gilt, dass jedes sich bewegende Fahrzeug aufgrund der vielfältigen Anregungsmechanismen (dynamische Motorkräfte, Beschleunigungs- bzw. Bremskräfte, Rollwiderstand etc.) Schwingungen erzeugt. Im Prinzip würde dies sogar für einen vollständig ebenen Untergrund gelten. Bei Unebenheiten werden bei der Überfahrt zusätzliche dynamische Belastungen erzeugt, die das Fahrzeug zu Schwingungen anregen, und die eine übergeordnete Rolle gegenüber den übrigen Anregungsmechanismen einnehmen.

Die Entstehung der Schwingungen des Einzelfahrzeugs beim Fahren auf unebenem Untergrund (Fahrzeug-Fahrbahn-Interaktion) kann am nachfolgend abgebildeten, idealisierten Modell eines Zweimassenschwingers mit Fußpunktanregung nachvollzogen und berechnet werden.

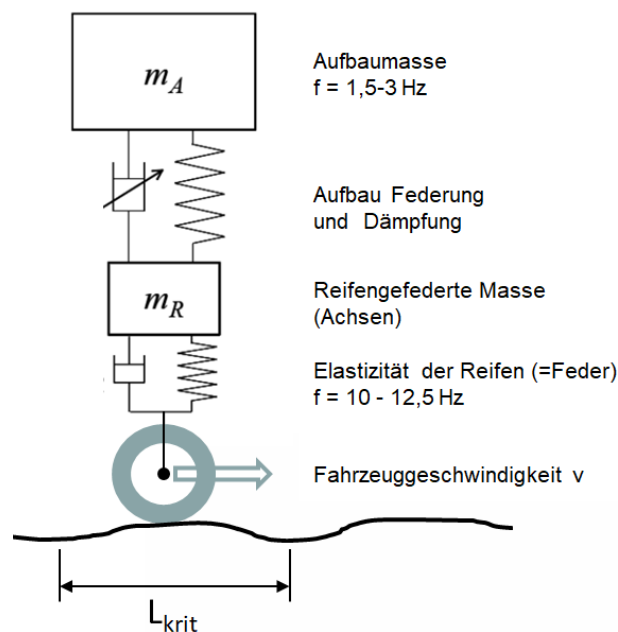


Abbildung 6-2: Zweimassenschwinger-Modell zur Beschreibung der Fahrzeug-Fahrbahn-Interaktion

Wie in Abbildung 6-2 dargestellt, besitzt das idealisierte Modell zwei gefederte Teilsysteme und somit auch zwei verschiedene Resonanzfrequenzen. Diese liegen typischerweise im Bereich 2-3 Hz für die Eigenfrequenz des Fahrzeugaufbaus auf der Federung und bei ca. 10-12,5 Hz für die Eigenfrequenz der Achse auf den Reifen. Die Amplitude der aufgeprägten Fußpunktverschiebung (Anregungsmechanismus) ist abhängig von der Unebenheit der Fahrbahn. Die Anregungsfrequenz wiederum ist abhängig von der Wellenlänge der Unebenheit in Längsrichtung und von der Fahrzeuggeschwindigkeit.

Trifft die Anregungsfrequenz auf eine der beiden Eigenfrequenzen des Systems, entsteht Resonanz und die Schwingungsamplitude wächst in großem Maß an. Das geht mit einer Erhöhung der in den Baugrund eingeleiteten dynamischen Kraft einher.

In der nachfolgenden Tabelle sind die kritischen Wellenlängen der Unebenheiten angeführt, die bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten zu Resonanzeffekten führen.

Frequenzbereich	Fahrgeschwindigkeit		
	40 km/h	50 km/h	60 km/h
2 - 3 Hz	$L_{krit} = 3,7 - 5,6 \text{ m}$	$L_{krit} = 4,6 - 6,9 \text{ m}$	$L_{krit} = 5,6 - 8,3 \text{ m}$
10 - 12,5 Hz	$L_{krit} = 0,9 - 1,1 \text{ m}$	$L_{krit} = 1,1 - 1,4 \text{ m}$	$L_{krit} = 1,3 - 1,7 \text{ m}$

**Tabelle 6-1: Kritische Wellenlängen  $L_{krit}$  der Unebenheiten, die bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten zu Resonanzeffekten führen**

Des Weiteren hängt die in den Untergrund eingeleitete Kraft maßgeblich von der Masse des Fahrzeugs ab. Aufgrund der teilweise 10-20 fachen Masse eines LKW gegenüber einem PKW ist der PKW-Verkehr vernachlässigbar und der schwere LKW- und Busverkehr maßgebend für die Schwingungsemissionen.

## 6.2 Maßgebende Schwingungsereignisse im Zeitbereich

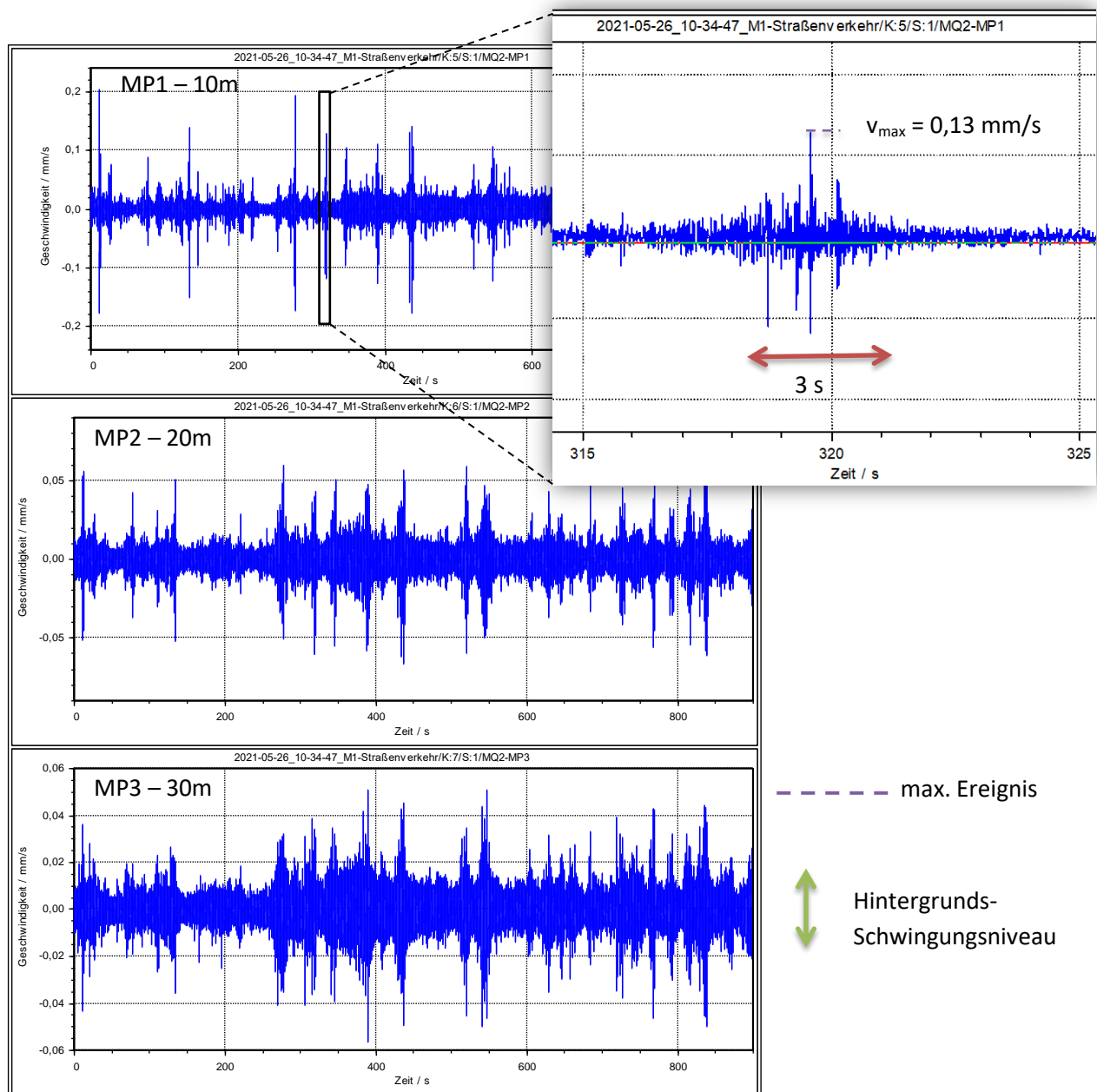
Während der durchgeführten Messungen wurde ein hoher Anteil von LKW und Bussen am Gesamtverkehr festgestellt. Die Verkehrsdichte wurde als sehr hoch wahrgenommen, häufig erreichte sie die absolute Sättigung (Stau). Der Verkehr führte zweiseitig an den Messquerschnitten vorbei.

In den Zeitschrieben der Schwinggeschwindigkeit ist – neben einem ständig vorhandenen Grundschwingungsniveau aus PKW-Verkehr und sonstigen Einwirkungen – der Einfluss von wenigen, starken Erschütterungsereignissen wie LKW- und Busvorbeifahrten deutlich zu erkennen.

Nicht jede LKW- oder Busvorbeifahrt führt zu einem gleich hohen Erschütterungsereignis, da die Fahrzeuge nicht entlang einer präzisen Linie fahren sondern innerhalb der Fahrspur untereinander gering-

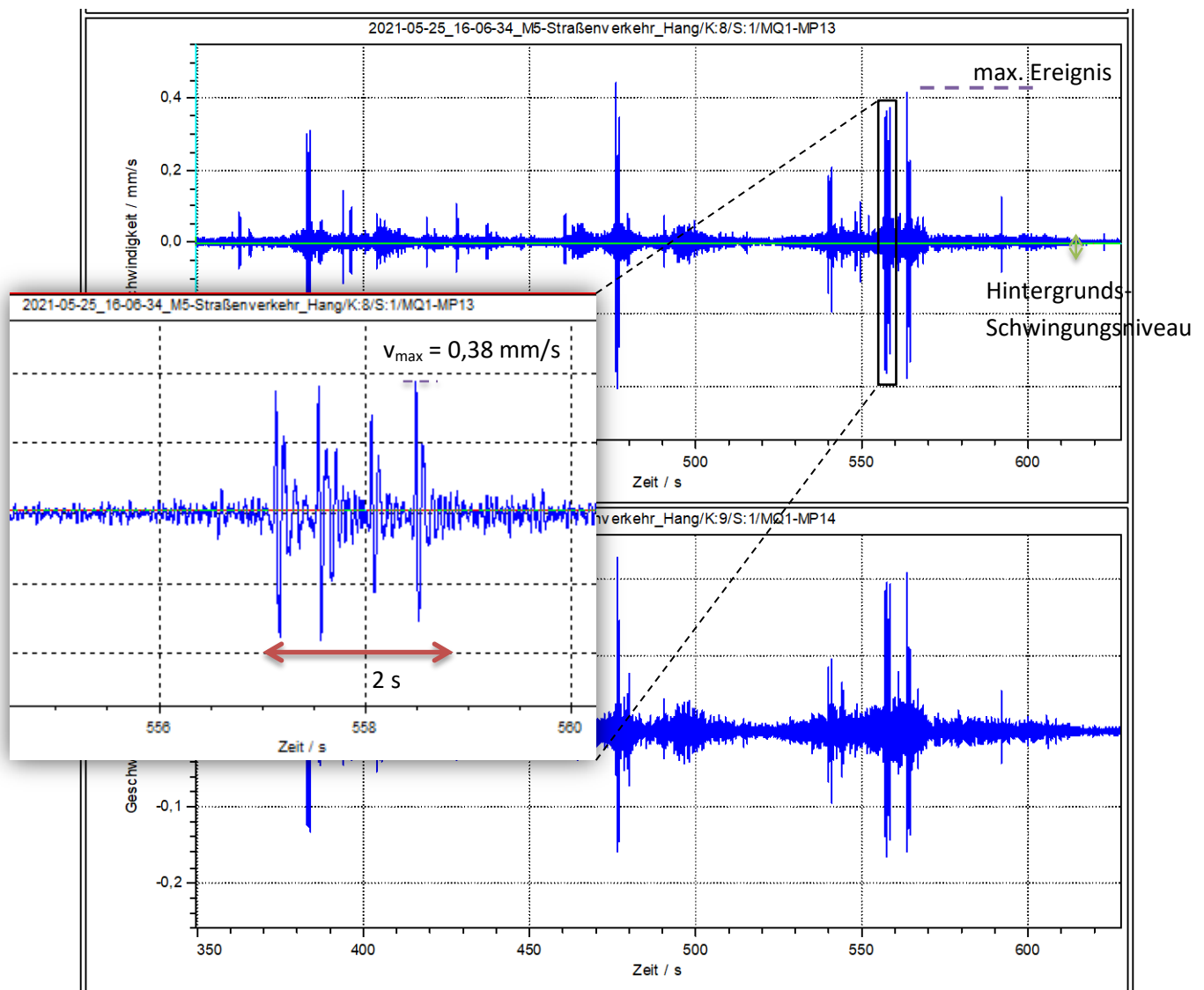
fällig versetzt fahren. Lokale Unebenheiten werden daher nur von einzelnen LKW durchfahren. Damit ist zu erwarten, dass in Bereichen großer Unebenheiten eine größere Streuung der Maximalwerte vorliegt als in Bereichen mit geringen lokalen Unebenheiten. Genau das konnte beobachtet werden.

In der nachfolgenden Abbildung ist ein Zeitschrieb-Ausschnitt mit einem Vorbeifahrereignis aus dem Messquerschnitt MQ2 zu sehen, wo nur kleinere Unebenheiten vorhanden sind. Die sichtbaren Einzelereignisse entsprechend LKW- bzw. Busvorbeifahrten liegen alle auf ähnlich hohem Niveau.



**Abbildung 6-3: 15min-Ausschnitt aus dem Zeitschrieb der Messpunkte MQ2-MP1 bis MP3, ausgesuchtes Vorbeifahrereignis**

In der nachfolgenden Abbildung ist ein Zeitschrieb aus dem Messquerschnitt MQ0 in 10m und 20m Entfernung zur Straßenachse dargestellt. In MQ0 ist die größte festgestellte Unebenheit (Straßenschadstelle S1) verortet. Wie die Abbildung zeigt, tritt die dargestellte Vorbeifahrt eines 4-achsigen Sattelzuges am 10m-Messpunkt sehr deutlich aus dem Hintergrundschwingungsniveau hervor, deutlicher als die Vorbeifahrten am MQ2. Außerdem wird sichtbar, dass einige wenige LKW ebenfalls durch diese Schadstelle fahren, während einige andere diese offenbar nicht durchfahren.



**Abbildung 6-4:** 5min-Ausschnitt aus dem Zeitschrieb der Messpunkte MQ0-MP13 und MP14, ausgesuchtes Vorbeifahrt-Ereignis

### 6.3 Spektrale Auswertung der Schwinggeschwindigkeit

Bei der Messdatenanalyse ist es nicht ausreichend, Maximalwerte im Zeitbereich zu identifizieren sondern ebenfalls die Frequenzinhalte zu betrachten.

Die Analyse wird anhand einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) als Schmalbandspektren durchgeführt, aus denen wiederum Terzspektren gebildet werden. Im vorliegenden Fall werden im Abstand von 2s jeweils Terzspektren über ein 4s langes Zeitfenster gebildet (Overlap = 50%).

Der in dieser Analyse gesuchte Einfluss des Straßenverkehrs ist charakteristisch für den Frequenzbereich 10 Hz bis 16 Hz des Terzspektrums (vgl. Tabelle 6-1). Treten markante Werte in anderen Frequenzbereichen an, wie in Abbildung 6-5 beispielhaft bei 63 Hz, werden diese nicht durch den Straßenverkehr erzeugt. Im Beispiel von Abbildung 6-5 handelt es sich um eine Vibrationswalze, die am Messtag 26.05.2021 in der Nähe des MQ3 betrieben wurde. Diese Unterscheidung der Ursache der Einwirkung ist bei einer Auswertung im Zeitbereich nicht ohne weiteres möglich.

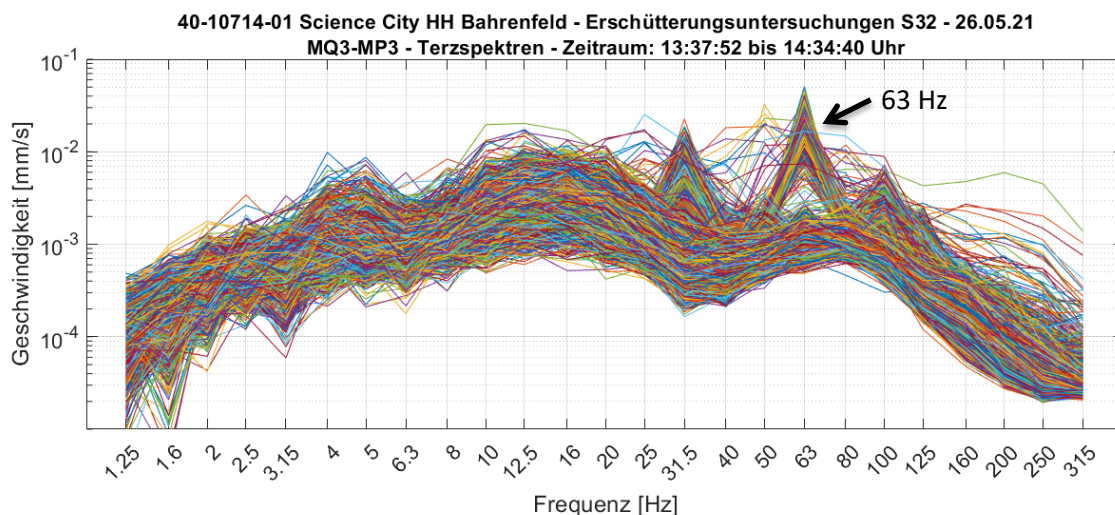


Abbildung 6-5: Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit am MQ3-MP3 (30m Entfernung zur Straße)

### 6.4 Statistische Auswertung der Schwingungen

Schwingungsereignisse und die Höhe einzelner Peaks im Zeitbereich unterliegen einer gewissen Streuung. Wird eine LKW-Vorbeifahrt mehrfach wiederholt – und zwar bei absolut gleich bleibenden Faktoren wie Fahrzeuggewicht, Geschwindigkeit, Straßenzustand, Fahrspur, Entfernung etc. – werden bei jeder Einzelmessung trotzdem unterschiedliche Maximalwerte auftreten.

Um eine Aussage über die Gewichtung der einzelnen Schwingungsereignisse aus dem Straßenverkehr treffen zu können, ist daher eine statistische Bewertung dieser Ereignisse in Vergleich mit dem Hintergrundschwingungsniveau erforderlich. Diese Auswertung liefert statistisch robuste und gut repro-



duzierbare Ergebnisse, die bei einer Auswertung der absoluten Schwingungsmaxima aufgrund der auftretenden Streuung nicht möglich wären.

In den nachfolgenden Unterabschnitten werden die gemessenen Schwinggeschwindigkeits-Terzspektren an zwei Messpunkten untersucht und miteinander verglichen.

#### **6.4.1 Statistische Auswertung im Zeitbereich**

In der Abbildung 6-6 sind die maximalen Schwinggeschwindigkeiten je 4s-Taktes eines sechsminütigen Zeitschriebs für den MQ0 dargestellt. Im Vergleich dazu sind in Abbildung 6-7 die Messwerte einer entsprechenden Messung am MQ2 dargestellt. Der Maximalwert (PH-Wert) sowie die verschiedenen statistisch signifikanten Quantile (95%, 97,75%, Median) der  $v_{\max}$ -Werte sind jeweils am rechten Rand mit dargestellt. Es werden die einzelnen Peaks markiert, die aus kurzen Erschütterungsereignissen (LKW- und Bus-Vorbeifahrten) resultieren. Diese kann man in drei Gruppen mit relativ stabiler Höhe unterteilen:

- wenige hohe Peaks im Bereich der 97-100%-Quantile (gelb markiert)
- zahlreichere mittlere Peaks im Bereich bis zum 97%-Quantil (grün markiert)
- Großteil der Messwerte ohne ausgeprägte Peaks

Insgesamt lässt sich Folgendes feststellen:

- Der PH-Wert am MQ0 liegt bei 0,54 mm/s (insgesamt am höchsten aller Messpunkte), am MQ2a bei 0,22 mm/s (insgesamt am niedrigsten).
- Das Verhältnis zwischen dem PH-Wert und dem 95%-Quantil liegt am MQ0 bei 2,84; am MQ2a liegt das Verhältnis bei 1,93.
- Das Verhältnis zwischen dem PH-Wert und dem Median liegt am MQ0 bei 18,84; am MQ2a liegt das Verhältnis bei 7,47.
- Die Ursache für die sehr hohen PH-Werte gegenüber dem 95%-Quantil bzw. dem Median ist am MQ0 die auffällige Schadstelle S1. Am MQ2a ist keine auffällige Schadstelle vorhanden.

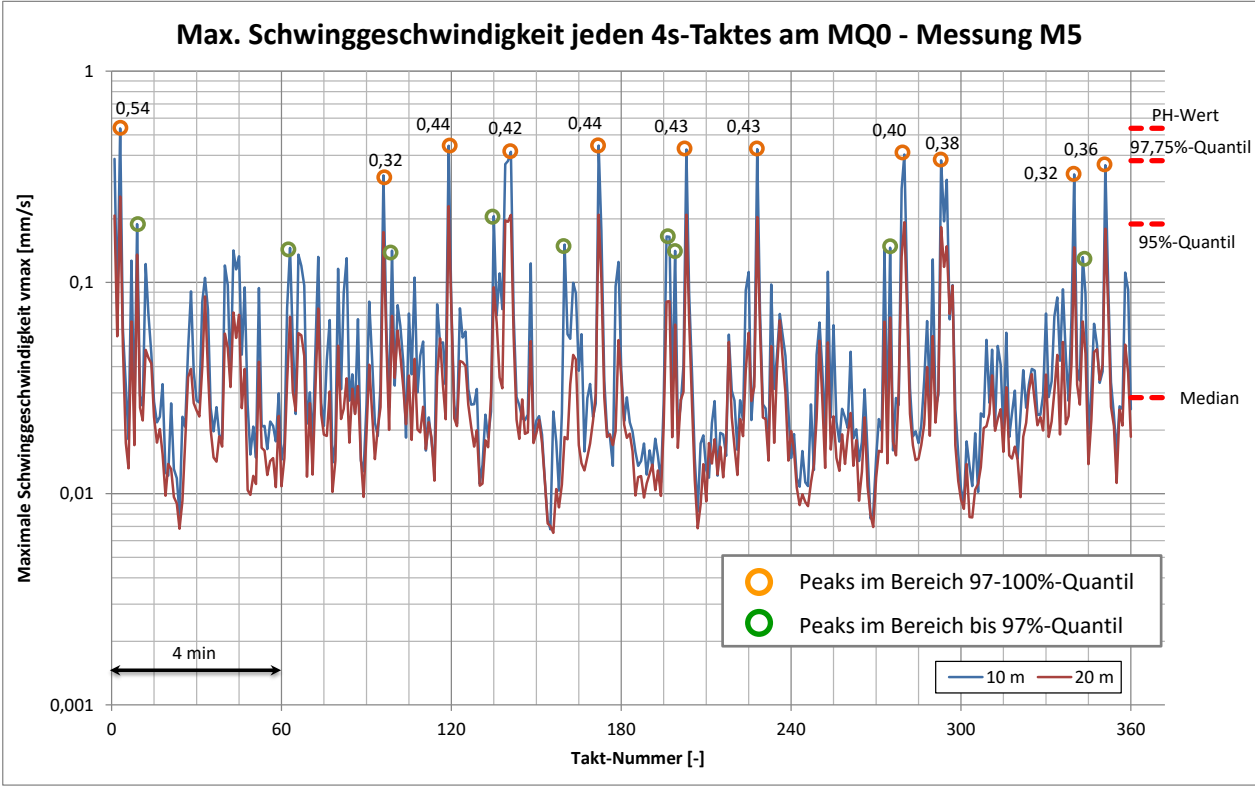


Abbildung 6-6: Max. Schwinggeschwindigkeit je 4s-Takt einer Messung am MQ0

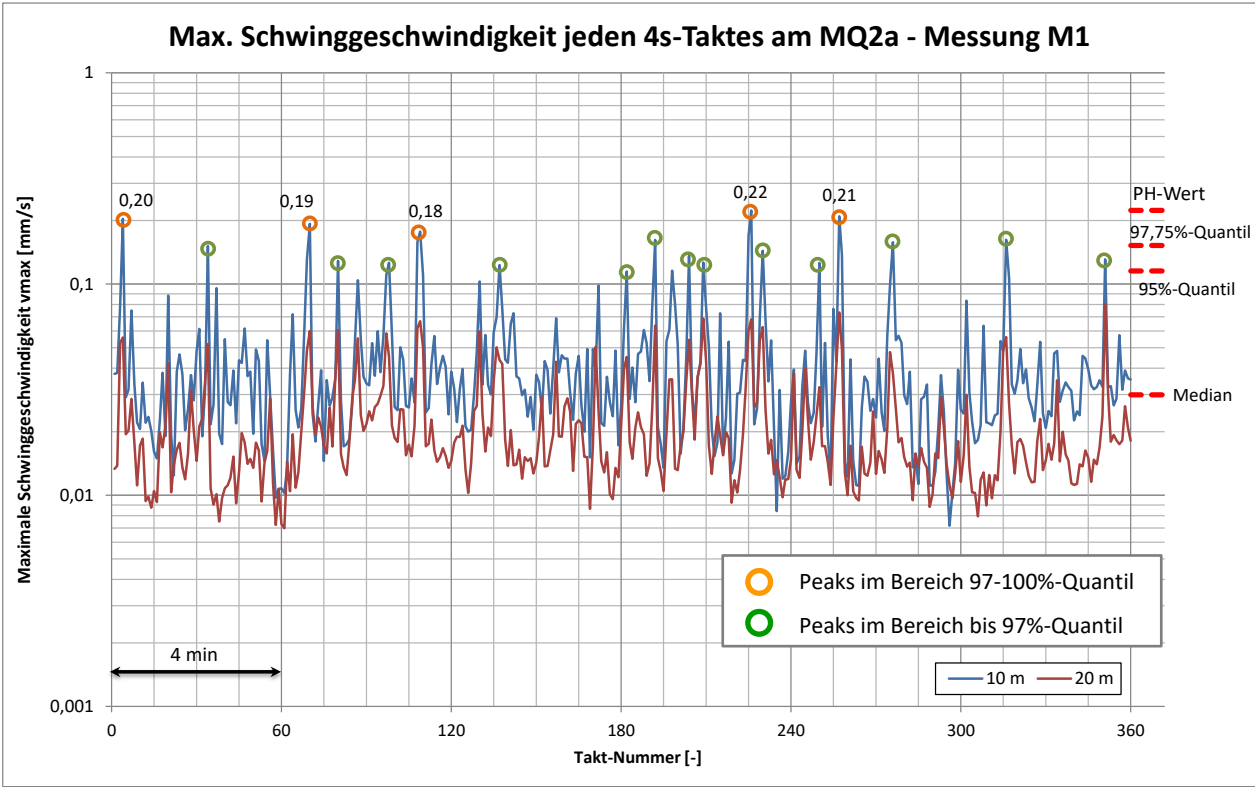


Abbildung 6-7: Max. Schwinggeschwindigkeit je 4s-Takt einer Messung am MQ2a

#### 6.4.2 Statistische Verteilung der Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit für 2 exemplarische Messpunkte

Zunächst werden die 4s-Terzspektren für den Messpunkt MP13 des MQ0 (10m Entfernung zur Straßenachse), wo eine große Schadstelle vorhanden war, dargestellt. Weiterhin wird die Maximalkurve aller Terzspektren dargestellt (grüne Linie). In blau wird anschließend eine weitere Kurve dargestellt, die nur von 5% der erfassten Schwingungsereignissen überschritten wird. Die statistische Verteilung der Messergebnisse wird dann exemplarisch für die 12,5 Hz Terz als Histogramm dargestellt. Es zeigt sich, dass wenige einzelne Peaks (vgl. Abschnitt 6.2) bis zu Faktor 8 höhere Schwingungswerte (im Terzspektrum) verursachen als die 95%-Quantilkurve.

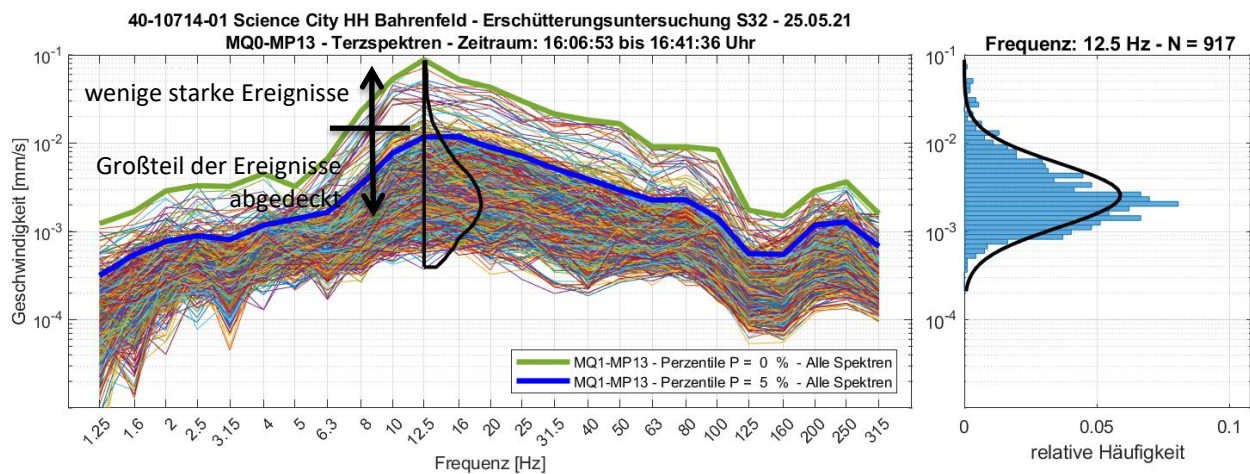


Abbildung 6-8: Terzspektren am MQ0-MP13 mit statistischer Verteilung

Am MQ1 hingegen, wo nur kleinere Unebenheiten vorhanden waren, liegt diese Maximalkurve lediglich ca. Faktor 4 höher als die 95%-Quantilkurve. Der direkte Vergleich der 95%-Quantilkurven an beiden Messquerschnitten zeigt allerdings praktisch identische Werte bei 12,5 Hz (ca. 0,01 mm/s).

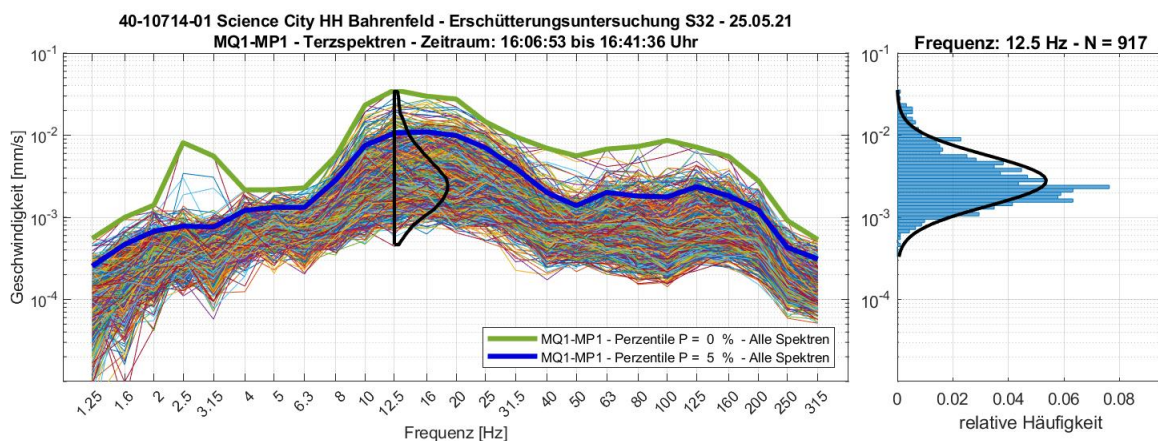


Abbildung 6-9: Terzspektren am MQ1-MP11 mit statistischer Verteilung

Dieser Vergleich zeigt, dass eine Auswertung nach den 95%-Quantilen viel robustere Ergebnisse liefert, als eine reine Auswertung der Maxima. Er zeigt auch, dass die Stellen mit großen Unebenheiten tendenziell viel höhere Peaks liefern, in der 95%-Quantilauswertung jedoch kein großer Unterschied mehr vorhanden ist.

Darauf basierend, werden die einzelnen Auswertekurven wie folgt definiert:

- Kurven mit 5% Überschreitungswahrscheinlichkeit: Beschreibung des üblicherweise vorhandenen Verkehrs in seiner Gesamtheit.
- Maximalkurven (Peak-Hold): Beschreibung des maximalen vorhandenen Schwingungsniveaus bei Einzelereignissen (hier: Überfahrt der Schadensstellen durch große Fahrzeuge LKW/Bus).

Diese Unterscheidung ist wichtig, um die weiteren Ergebnisse dieses Kapitels zu verstehen.

Für die Vergleichbarkeit zwischen den Messquerschnitten ist eine weitere essentielle Komponente die Berücksichtigung der Baugrundeigenschaften untereinander. Dieser Schritt wird im nachfolgenden Abschnitt vorgenommen.

## 6.5 Vergleich der Messquerschnitte untereinander

Mithilfe des Shakers VibroTruck wurden Admittanzmessungen an allen Messquerschnitten durchgeführt. Die Auswertung findet sich im Abschnitt 3.2 und zeigt die Übertragungseigenschaften von auf der Straße erzeugten Erschütterungen im jeweiligen Messquerschnitt in Abhängigkeit der Entfernung zur Straße.

Wird die gemessene Schwinggeschwindigkeit im Terzspektラルbereich mit der Übertragungsadmittanz verrechnet, kann die vorhandene statistische Kraftemission der Fahrzeuge an der jeweiligen Straßenstelle ermittelt werden. Das stellt die Vergleichbarkeit der Messquerschnitte untereinander sicher.

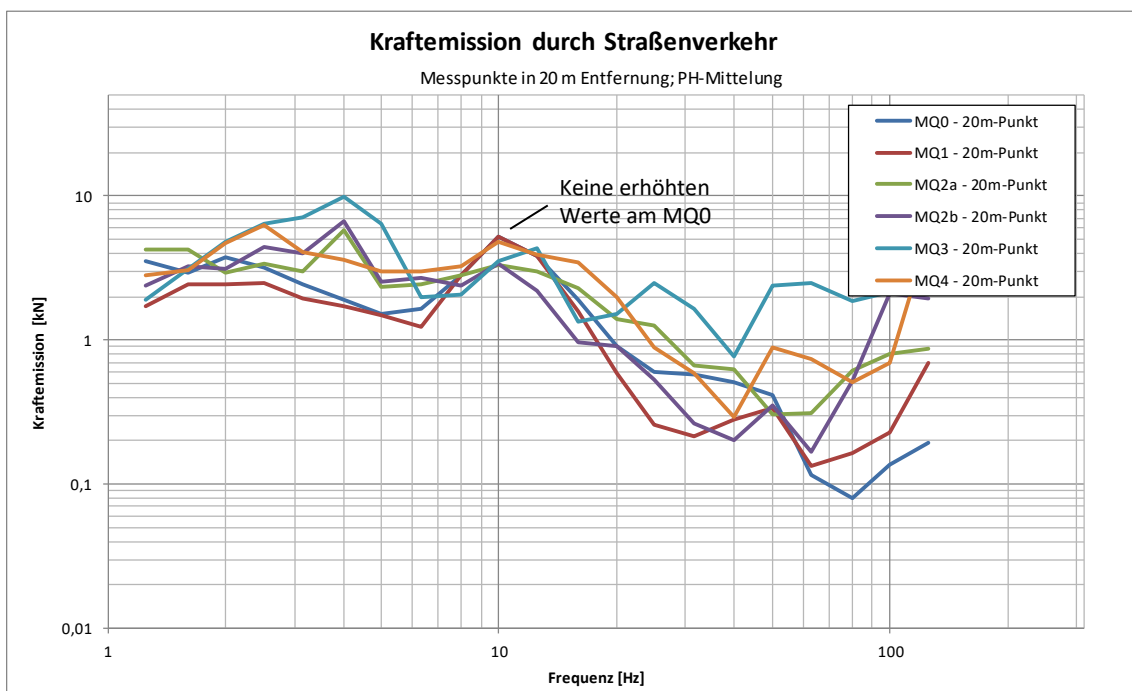
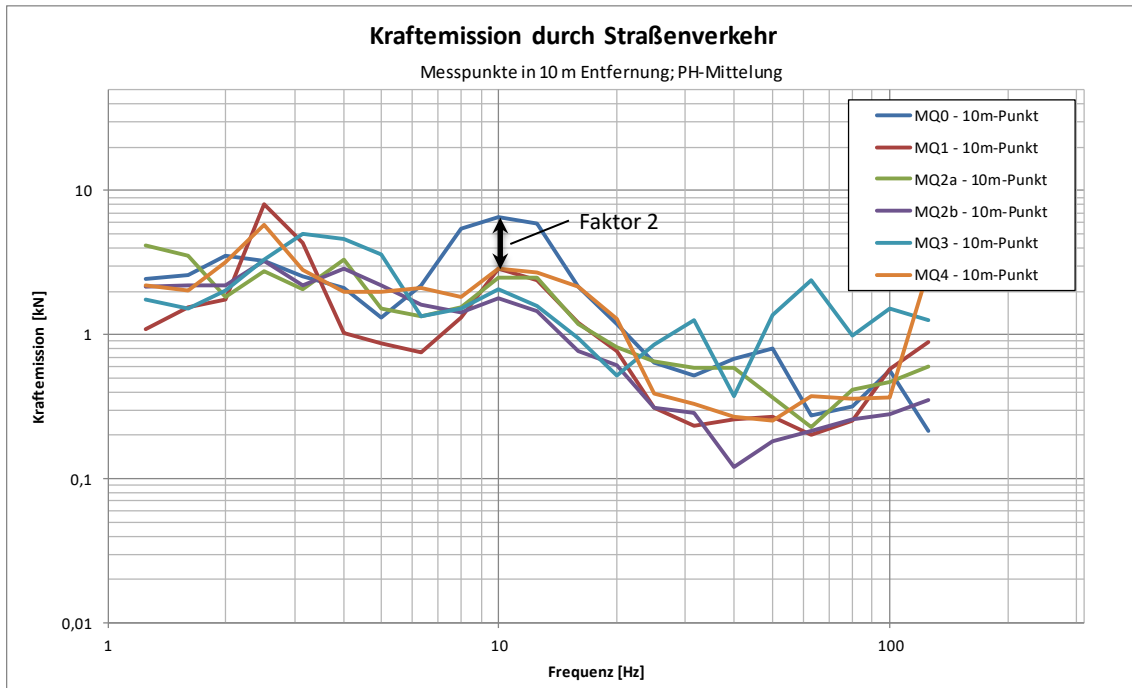
Die folgenden terzspektralen Auswertungen werden an allen Messquerschnitten einander gegenübergestellt.

- PH-Spektrum
- 95%-Quantil

Abbildung 6-10 zeigt, dass die Maximalwerte der Verkehrsemissionen am 10m-Punkt (oberes Bild) des MQ0 (größte Schadstelle) deutlich höher sind als an den übrigen Messquerschnitten (ca. Faktor 2). Die Frequenz mit den maximalen Schwingungswerten wird bei 10 Hz statt bei 12,5 Hz erreicht.

Am 20m-Punkt (Abbildung 6-10, unten) sind die maximalen Werte am MQ0 nicht höher als an den übrigen Messquerschnitten. Das bedeutet, dass die hohen Schwingungswerte aus den großen Unebenheiten lokal eingeschränkt sich auswirken und rasch mit der Entfernung abnehmen. Auf das

entfernungsabhängige Abnahmeverhalten der Verkehrserschütterungen wird im Abschnitt 6.7 eingegangen.

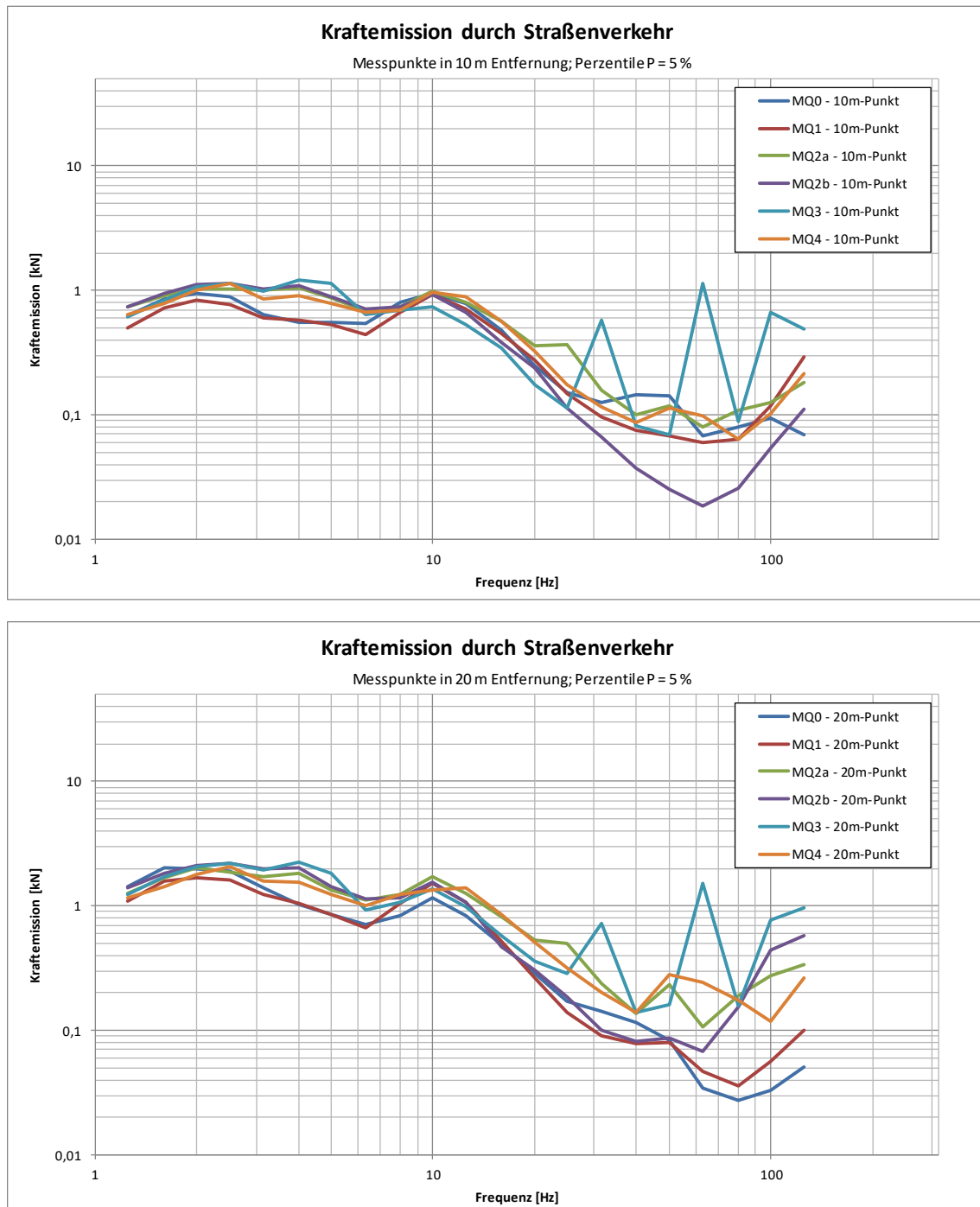


**Abbildung 6-10: Terzspektrale Kraftemissionen aus dem Straßenverkehr an den verschiedenen Messquerschnitten in 10m und 20m Entfernung zur Straße, Maximalwerte (PH-Spektren)**

Die übrigen Messquerschnitte zeigen in beiden Entfernungen keine großen Auffälligkeiten im relevanten Frequenzbereich von 10 – 16 Hz.



In Abbildung 6-11 ist deutlich zu erkennen, dass sich die 95%-Quantile der Kraftermission aus dem Straßenverkehr in den verschiedenen Messquerschnitten kaum unterscheiden. Das gilt sowohl für den 10m-Messpunkt als auch für den 20m-Messpunkt.



**Abbildung 6-11: Terzspektrale Kraftermissionen aus dem Straßenverkehr an den verschiedenen Messquerschnitten in 10m und 20m Entfernung zur Straße, 95%-Quantile**

## 6.6 Bewertung der Straßen-Unebenheiten

### 6.6.1 Tiefe der Unebenheiten und Korrelation mit Schwingungs-Messwerten

Die Unebenheiten mit Ihrer Lage und Amplitude entlang der Straße sind in der Anlage I, Abschnitt 8.3, dokumentiert. In der nachfolgenden Abbildung 6-12 ist eine Übersicht über die maximale Unebenheit (Wellental zwischen zwei Hochpunkten auf 3m Entfernung) der einzelnen Schadstellen und ihre Zuordnung zu den Einflussbereichen der einzelnen Messquerschnitte enthalten:

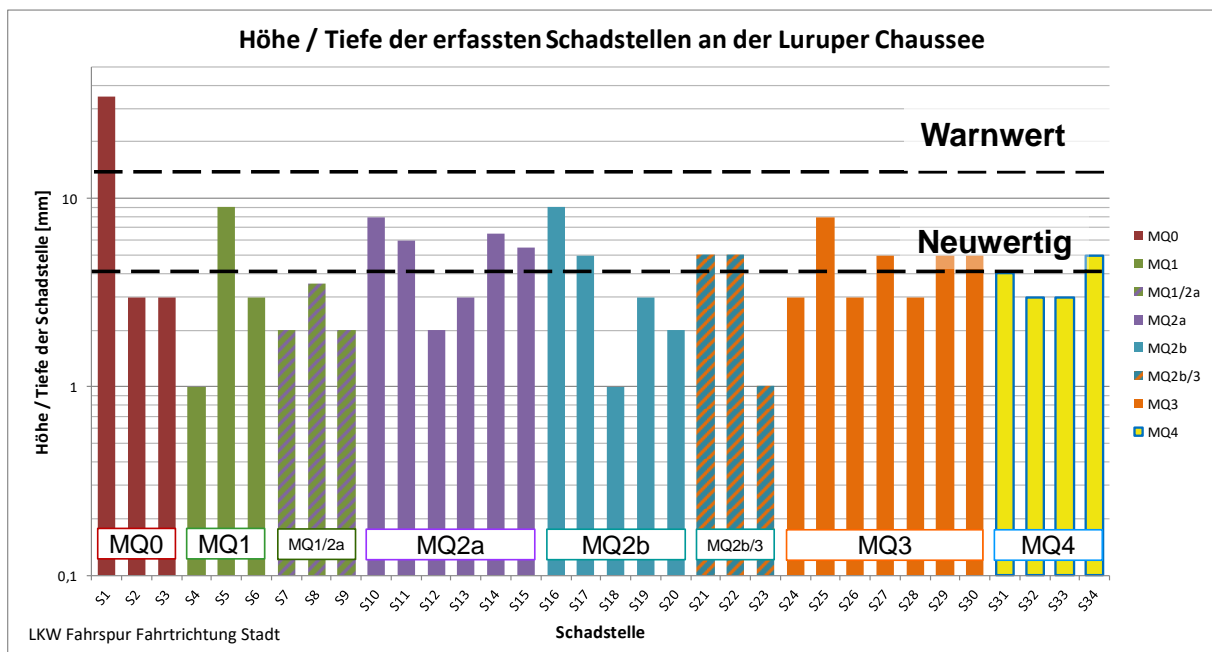
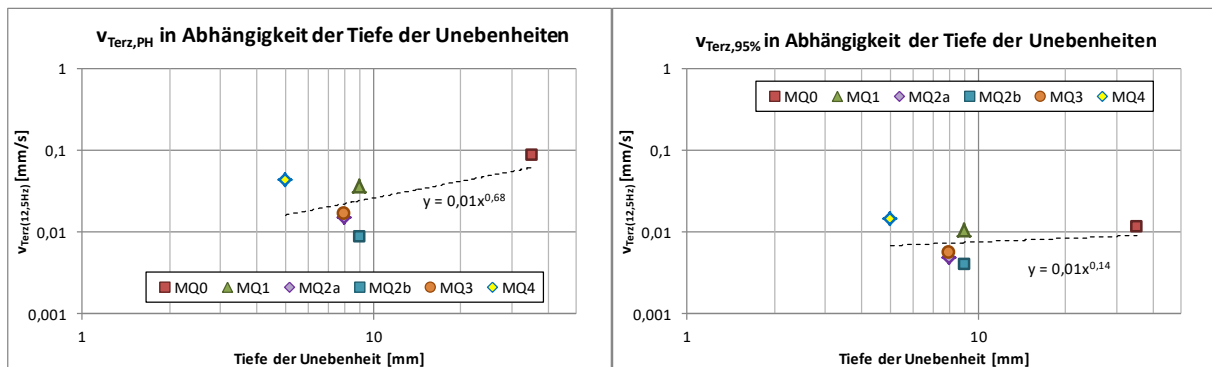


Abbildung 6-12: Übersicht der maximalen Höhe / Tiefe der Schadstellen und ihre Zuordnung zu den Messquerschnitten

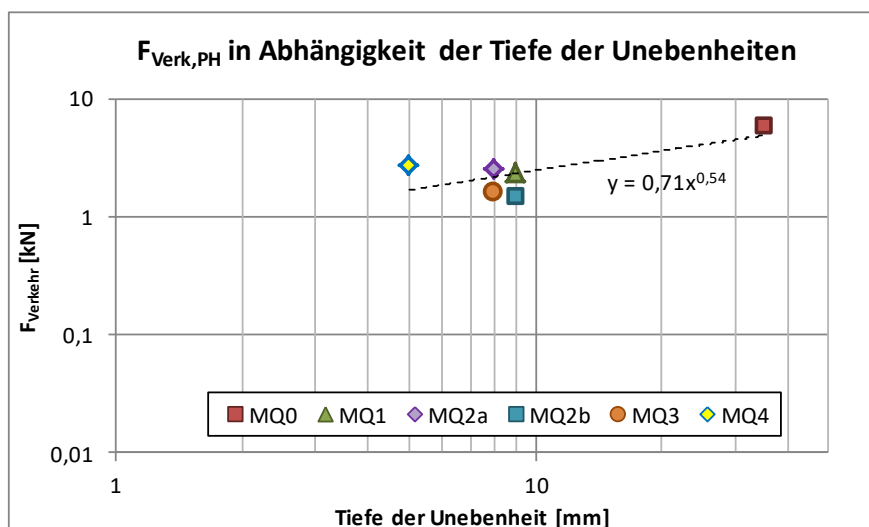
Abbildung 6-12 zeigt, dass die größte Unebenheit (35 mm) im Bereich des MQ0 vorhanden ist, und dass die Unebenheiten in allen anderen Messquerschnitten unter 10 mm liegen. Die Bewertung des Straßenzustandes weicht nicht viel vom neuwertigen Zustand ab. Lediglich die Schadstelle S1 liegt deutlich darüber.

Nachfolgend werden die Terzspektralwerte der Schwinggeschwindigkeit (Maximalwerte und 95%-Quantile) bei der maßgebenden Frequenz von 12,5 Hz für die verschiedenen Messquerschnitte in Abhängigkeit der maximalen Tiefe der Schadstellen pro Messquerschnitt aufgetragen.



**Abbildung 6-13: Korrelation zwischen der maximalen Tiefe der Unebenheit und der terzspektralen Schwingungsgeschwindigkeit (PH und 95%-Quantil) bei 12,5 Hz**

Abbildung 6-13 (links) zeigt die Tendenz einer Korrelation zwischen den terzspektralen Maximalwerten und der Tiefe der Unebenheiten (vgl. Trendlinie). Abbildung 6-13 (rechts) hingegen zeigt für den Fall der 95%-Quantile eine fast konstante Trendlinie, sodass die Korrelation als gering einzustufen ist. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden ebenfalls die Korrelationsdiagramme der terzspektralen Kraftemission des Straßenverkehrs (Maximalwerte und 95%-Quantile bei der maßgebenden Frequenz von 10 Hz, vgl. Abbildung 6-10 und Abbildung 6-11) zur Höhe der Unebenheiten dargestellt (Abbildung 6-14). Darin wird durch die Verrechnung mit der gemessenen Admittanz bereits der Einfluss der Baugrundeigenschaften berücksichtigt. Während die Maximalwerte eine gute Korrelation zwischen der Tiefe der Schadstelle und der Kraftemission aufweisen, ergibt sich für die 95%-Quantile praktisch keine Korrelation, d.h. größere Schadstellen führen nicht zu erhöhten 95%-Quantilwerten in 10m Entfernung zur Straße. Ursache ist, dass nur wenige Fahrzeuge (weniger als 5%) über genau diese Schadstelle fahren.



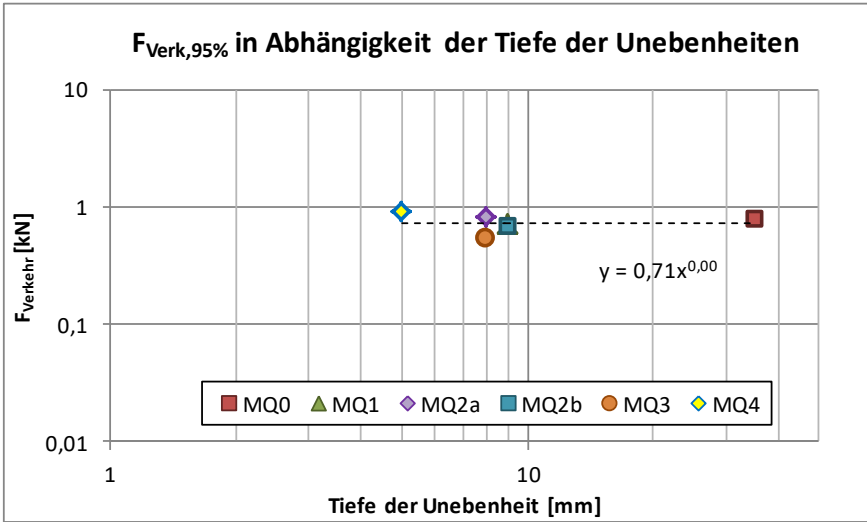
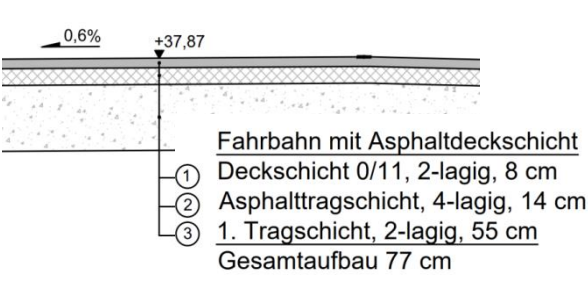


Abbildung 6-14: Korrelation zwischen der maximalen Tiefe der Unebenheit und der terzspektralen Kraftemission (PH und 95%-Quantil) bei 10 Hz

6.6.2 Bewertung des Straßenaufbaus in der Luruper Chaussee

Aus den durch die Behörde für Verkehr und Mobilitätswende Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg zur Verfügung gestellten Unterlagen zum Straßenaufbau ([15], Abbildung 6-15) ist erkennbar, dass eine sehr robuste und dynamisch stabile Tragschicht mit  $d = 55\text{cm}$  vorhanden ist. Die Gesamtstärke des Asphalts wird mit 22cm als etwas gering angesehen, besser wäre eine Stärke von 30cm.



Ermittlung der Belastungsklasse nach RStO aus 2018 nördlich des Forschungscampus:

DTV (durchschnittl. tägl. Verkehrsstärke): 28450 Kfz/24h  
DTV Schwerverkehr: 1560 LKW/24h

Gesamtbewertung: Belastungsklasse BK32

Abbildung 6-15: Darstellung des IST-Straßenaufbaus der Luruper Chaussee [15]

Bezogen auf die gemäß Gutachten vorhandene Belastungsklasse BK32 erscheint der vorhandene Straßenaufbau ausreichend robust zu sein. Im Zusammenhang mit der außerordentlichen Bedeutung des Forschungscampus und der damit verbundenen Anforderung nach einer dauerhaften ebenen Fahrbahn wird empfohlen, bei ggf. anstehenden Erneuerungen auf den stärker werdenden LKW Verkehr mit einem nochmals stärkeren Unterbau zu reagieren, um dauerhaft größeren Unebenheiten entgegen zu wirken.

## 6.7 Abnahme der Schwingungen über die Entfernung

Der Einfluss der Erschütterungen aus Straßenverkehr auf das Forschungscampus Hamburg Bahrenfeld hängt maßgeblich davon ab, wie die Schwingungswerte mit der Entfernung zur Straße abnehmen. In diesem Abschnitt werden diese Daten bei den verschiedenen Messquerschnitten ausgewertet und einander gegenübergestellt.

### 6.7.1 Maximale Schwinggeschwindigkeit $v_{\max}$ (Zeitbereich) über die Entfernung

Für den Messquerschnitt MQ1 werden alle  $v_{\max}$ -Werte (Zeitbereich) pro 30s-Takt ausgewertet und über die Entfernung aufgetragen. Dabei werden diejenigen Ergebnisse aussortiert, die am 10m-Messpunkt MQ1-MP1 unter 0,1 mm/s liegen. Darüber wird der statistisch signifikante 95%-Quantilwert aufgetragen. Eine Trendlinie liefert einen Abnahmeexponenten von  $n = -0,63$ , was eher der Abnahmebeziehung einer Linienquelle entspricht.

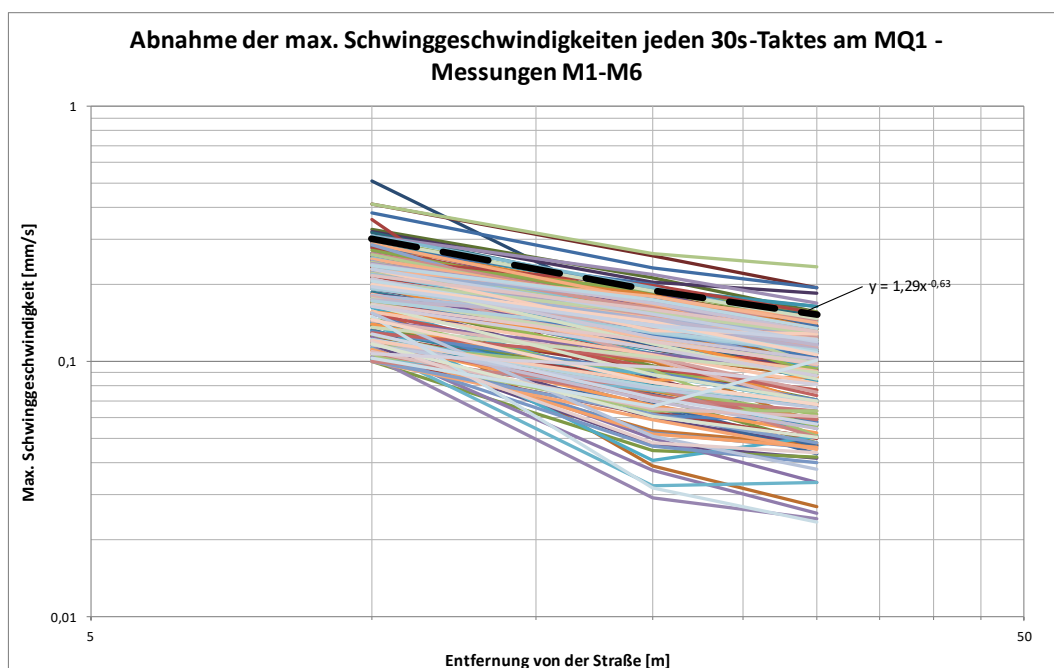


Abbildung 6-16: Abnahmefunktion für die  $v_{\max}$ -Werte jeden 30s-Taktes am MQ1

Diese Vorgehensweise wurde für die übrigen Messquerschnitte durchgeführt, wobei die nachfolgenden Exponenten ermittelt wurden:

Messquerschnitt	Exponent
MQ0	$n = -1,02$
MQ1	$n = -0,63$
MQ2a	$n = -0,59$



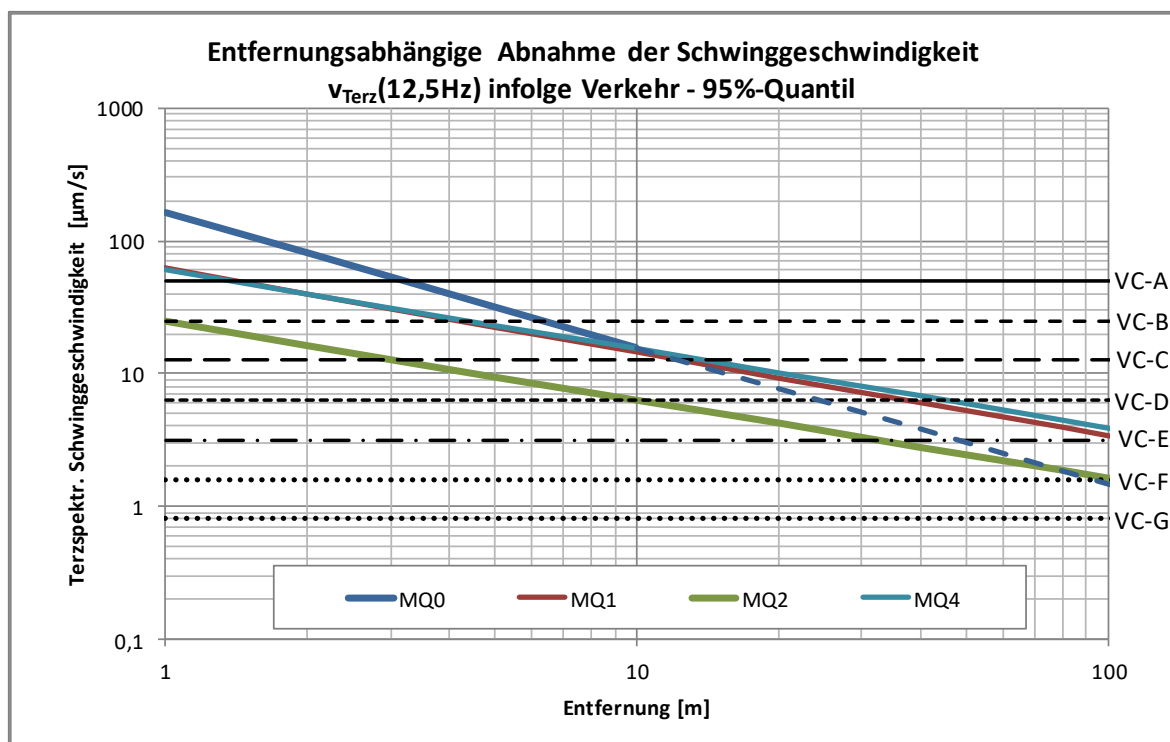
MQ2b	Kann aufgrund von externer Störquellen während der Messung nicht zuverlässig ermittelt werden
MQ3	
MQ4	$n = -0,60$

**Tabelle 6-2: Ermittelte Abnahmeexponenten der  $v_{\max}$ -Werte (95%-Quantile) für die einzelnen Messquerschnitte**

Die Auswertung zeigt, dass die auswertbaren Abnahmeexponenten über die Entfernung bei ca. -0,6 liegen. Das entspricht der Schwindungsabnahme von Oberflächenwellen infolge einer Linienquelle. Einzige Ausnahme bildet hier der Messquerschnitt MQ0. Der Abnahmeexponent von -1,0 ist charakteristisch für die Abnahme von Oberflächenwellen infolge einer Punktquelle. Ursache ist die Einzelschwingung S1, die als Punktequelle anregt.

### 6.7.2 Terzspektrale Schwinggeschwindigkeit $v_{\text{Terz}}(12,5 \text{ Hz})$ über die Entfernung

Für die Auswertung der Abnahmebeziehung der terzspektralen Schwinggeschwindigkeiten (12,5 Hz) in Abhängigkeit der Entfernung wurden die Werte aus der 95%-Quantilauswertung (Abschnitt 6.4) sowie die Exponenten aus dem vorherigen Abschnitt – auch für Entfernungen größer 30m – verwendet. Abweichend davon wurde für den Messquerschnitt MQ0 davon ausgegangen, dass ab einer bestimmten Entfernung der Einfluss der Linienquelle (geringere Abnahme) den der Punktquelle (größere Abnahme) überwiegt. Die so entstehenden Kurven sind in der nachfolgenden Abbildung grafisch dargestellt:



**Abbildung 6-17: Abnahmefunktion für die 95%-Quantile der  $v_{\text{Terz}}$ -Werte bei (12,5 Hz) an den versch. Messquerschnitten**

Dabei beziehen sich die angegebenen Werte stets auf die Auswertung der Messpunkte Oberkante Gelände außerhalb der Gebäude. Um die Wirkung der Straßenerschütterungen im Korridor bis etwa 100m seitlich der Luruper Chaussee zu visualisieren, wird in Abbildung 6-18 der IST-Zustand im Messzeitraum anhand einer Isolinien-Darstellung gezeigt. Besonders markant sticht dort der Bereich von MQ2 hervor, bei dem bereits in ca. 100m Entfernung die Definition des Schwingungskriteriums VC-E ( $1,56 \mu\text{m/s}$ ) eingehalten wird. Bei den übrigen Messquerschnitten wird die Untergrenze von VC-D ( $3,12 \mu\text{m/s}$ ) in 115 bis 150m erreicht. In größeren Entfernungen wird der Einfluss des Straßenverkehrs vernachlässigbar klein und ist daher hier nicht dargestellt. Eine Dokumentation der Schwingungen in den Gebäuden kann den Langzeitmessungen der Hauptuntersuchung entnommen werden.

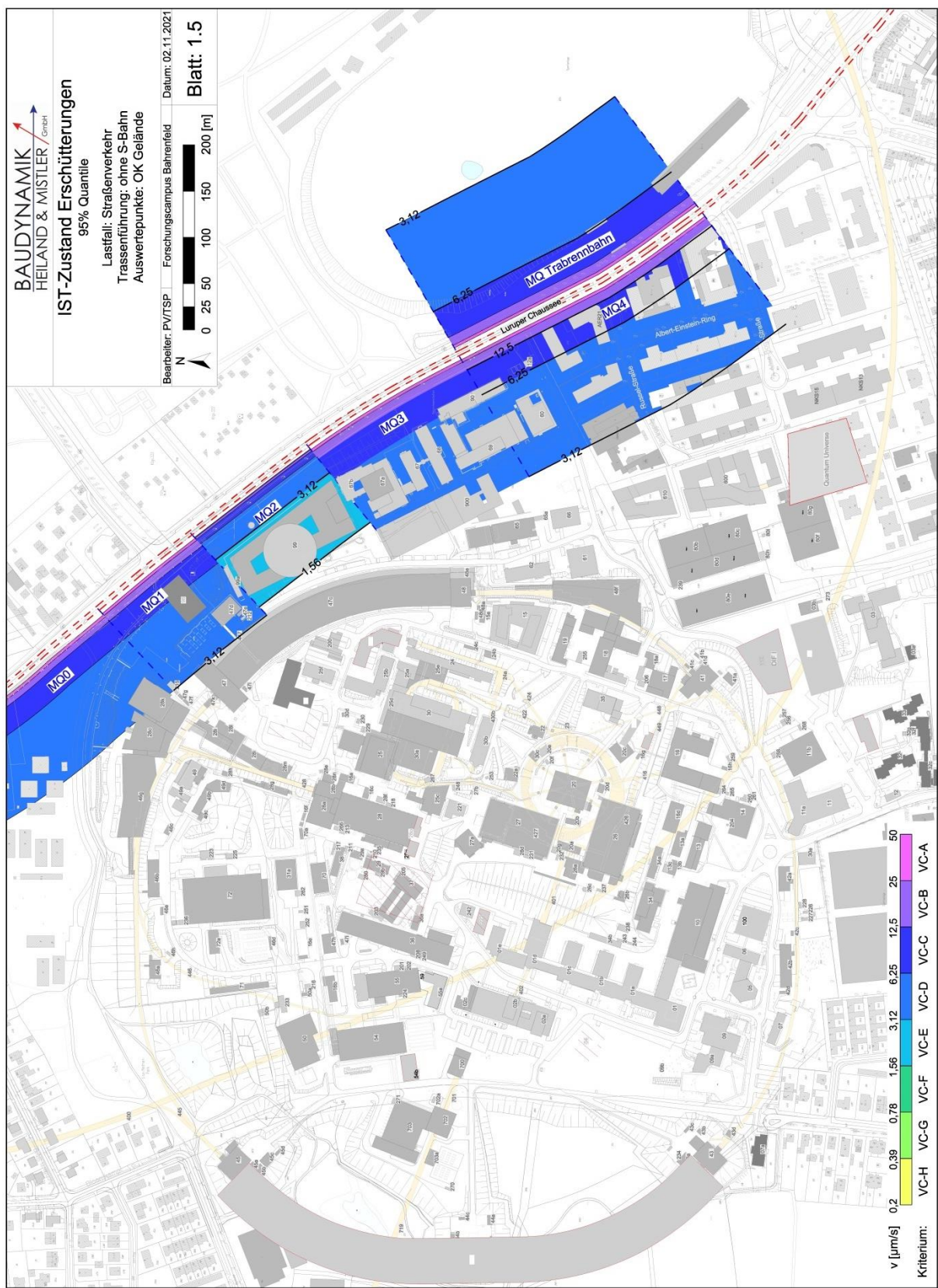


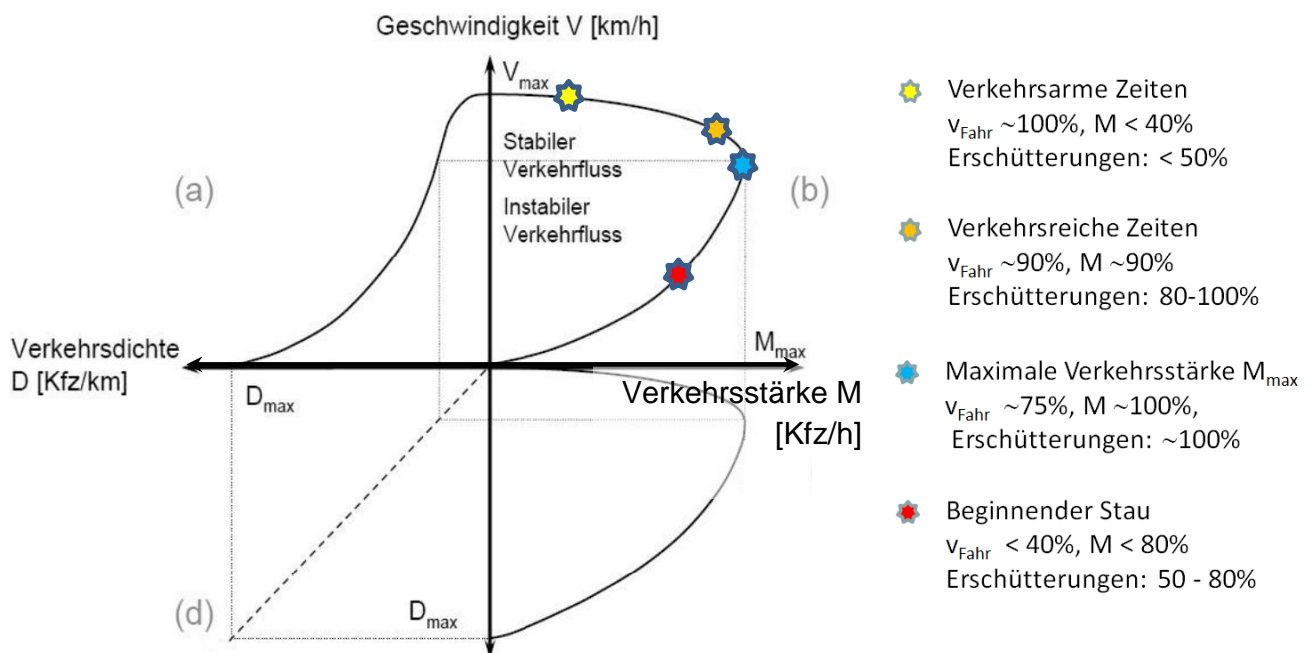
Abbildung 6-18: Isolinien-Darstellung der Erschütterungswerte aus Straßenverkehr (Terzspektralwerte bei 12,5 Hz) an den verschiedenen Messquerschnitten in Abhängigkeit der Entfernung zur Luruper Chaussee (IST-Zustand)

## 6.8 Einfluss der Verkehrsstärke auf die Erschütterungen

Wie bereits dargelegt, hängen die vom Straßenverkehr emittierten Erschütterungen von vielen Faktoren ab. Während die Amplitude der einzelnen maximalen Ereignisse (PH-Werte) eher von der Fahrgeschwindigkeit (des Einzelfahrzeugs), dem Fahrzeugtyp oder den Unebenheiten auf der Straße abhängt, wird der Einfluss der Verkehrsgesamtheit (ausgedrückt mittels statistischer Quantilwerte) eher durch die Kombination aus Verkehrsstärke und Fahrzeugpulk-Fahrgeschwindigkeit definiert.

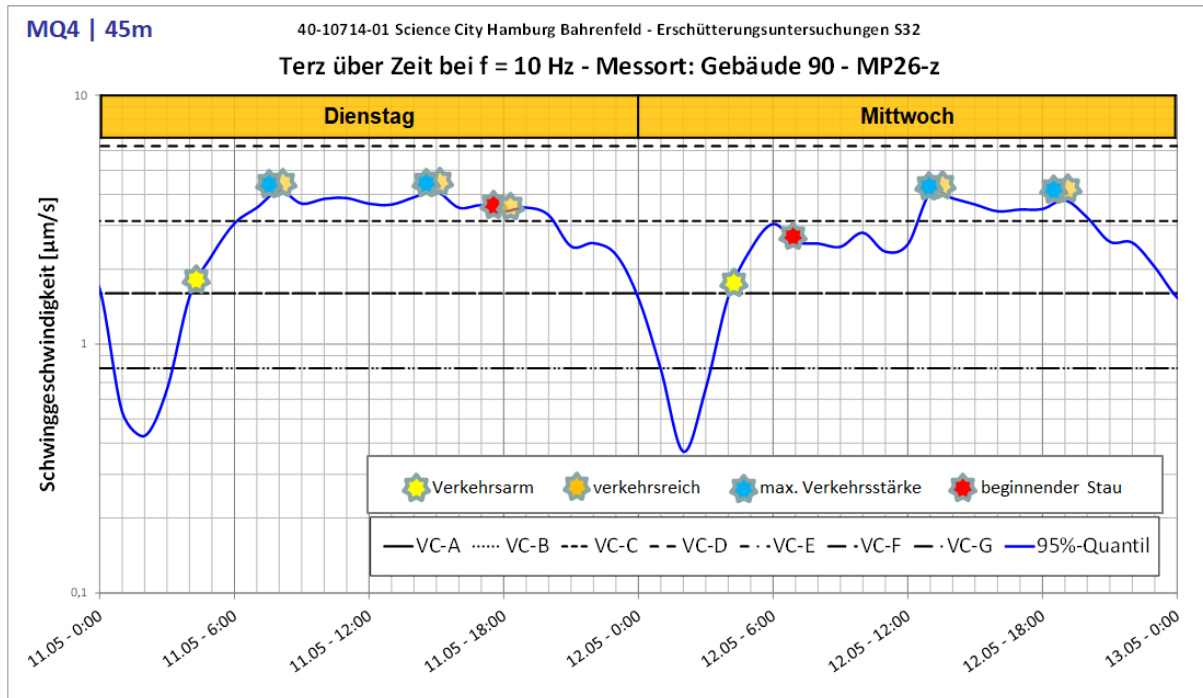
Die Abhängigkeiten dieser Größen werden im so genannten Fundamentaldiagramm (Abbildung 6-19) dargestellt:

- In verkehrsarmen Zeiten können die einzelnen Fahrzeuge mit maximaler Geschwindigkeit fahren, jedoch führen die vielen „Lücken“ zwischen den LKW nur zu geringen Erschütterungen (gelber Stern).
- Steigt die Verkehrsstärke an, so werden die „Lücken“ zwischen den LKW abnehmen, ohne dass sich die Geschwindigkeit des Fahrzeugpulses merklich reduziert. Die Erschütterungen erreichen dabei ein Plateau-Maximum (orangefarbener bis blauer Stern).
- Wenn die Verkehrsstärke weiter zunimmt, ist der Zufluss des Verkehrs nicht mehr ungehindert möglich, sodass sich Stau bildet. Dies führt wiederum zu einer signifikanten Reduktion der Fahrzeuggeschwindigkeit und damit der emittierten Erschütterungen (roter Stern).



**Abbildung 6-19: Allgemeingültiges Fundamentaldiagramm [16] mit 4 Phasen der Verkehrssättigung und Auswirkungen auf die Erschütterungen**

Die festgestellte Verkehrsstärke auf der Luruper Chaussee war zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits sehr hoch. Während der durchgeführten Messkampagne wurde mehrmals beobachtet, dass die maximale Verkehrsstärke erreicht wurde und sich Stau gebildet hat. Diese Phänomene lassen sich am besten anhand einer mehrtägigen Messung wie in der Abbildung 6-20 zeigen:



**Abbildung 6-20: Zweitägiger Zeitverlauf des Terzspektralwertes bei 10 Hz am MP26-z (Geb. 90) mit eingetragenen Phasen der Verkehrssättigung**

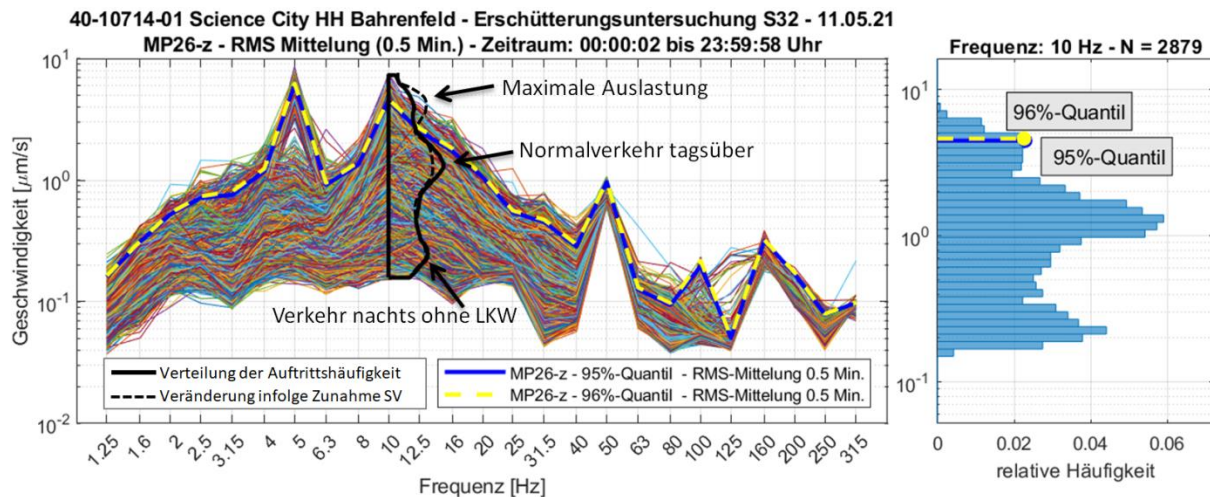
Beim dargestellten zweitägigen Ausschnitt der Dauermessung im Gebäude 90, Messpunkt MP26-z (Bereich MQ4), sind die verschiedenen Phasen der Verkehrsstärke gemäß Abbildung 6-19 eingetragen. Darin kann man Folgendes erkennen:

- Die dargestellten Terzspektralwerte schwanken stark über den Tages- und Nachtzeitraum.
- Die maximalen Tageswerte werden mehrmals pro Tag erreicht und liegen an verschiedenen Tagen auf einem ähnlichen Maximalniveau.
- Der am Mittwochmorgen gebildeter Stau hat für mehrere Stunden zu geringeren Schwingungswerten geführt, als das Maximalniveau.

Eine Erhöhung der Verkehrsstärke und auch insbesondere des LKW-Anteils würde nicht dazu führen, dass sich die tagsüber auftretenden Maximalwerte der Schwingungen auf dem Forschungscampus erhöhen, sondern im Wesentlichen dazu, dass Zeitfenster mit heute noch geringen Verkehrsstärken mehr Verkehr bekommen. Damit treten Phasen der maximalen Erschütterungen ggf. häufiger auf,



was dazu führt, dass der 95%-Quantilwert der Erschütterungen in den Gebäuden sich geringfügig um schätzungsweise etwa 3% erhöhen könnte.



**Abbildung 6-21: Ganztägige Terzspektren am MP26-z (Geb. 90) mit Histogramm bei 10 Hz, eingetragen der 95%-Quantil (blaue Kurve) sowie der 96%-Quantil (gelbe Kurve) als Simulation erhöhter Verkehrsstärke**

Wesentlich dafür, dass sich die Erschütterungswerte zukünftig nicht erhöhen ist die Voraussetzung einer weiterhin guten Ebenheit des Straßenbelages. Dieser sollte regelmäßig auf Unebenheiten hin überprüft und – sofern erforderlich – entsprechend korrigiert werden. Unebenheiten mit Wellenlängen von 1-2m sind besonders kritisch.

Ein Ebenheitsmaß von maximal 15mm innerhalb einer 3m Messbasis wird zur Einhaltung aus baulastdynamischer Sicht empfohlen.

## 7 Zusammenfassung der Ergebnisse und Handlungsempfehlungen

Das vorliegende Gutachten untersucht die möglichen Immissionen, die durch die geplante S-Bahn unter der Luruper Chaussee auf den Forschungscampus Bahrenfeld durch Erschütterungen und tief-frequente elektromagnetische Feldveränderungen einwirken werden. Beide Emissionen können dazu führen, dass empfindliche technische Geräte, Anlagen und Messinstrumenten nicht mehr ordnungs-gemäß funktionieren oder nur eingeschränkt genutzt werden können.

Im Rahmen dieser gutachterlichen Untersuchung erfolgte zunächst eine Standortevaluierung. Es wurde an 25 maßgebenden und repräsentativen Standorten (DEYSY, Universität Hamburg, MPI, EMBL) die aktuelle IST-Situation in Bezug auf die vorhandenen Schwingungspegel und Magnetfelder messtechnisch beweisgesichert und statistisch ausgewertet. Diese Beweissicherungsmessung ist in einem separaten Dokument mit der Nummer 40-10714-01-D4 [1] dokumentiert.

In einem zweiten Schritt wurden umfangreiche Schwingungs- und Magnetfeldmessungen während Vorbeifahrten von S-Bahnen an einem Referenztunnelabschnitt an der Königstraße in Hamburg durchgeführt. Damit die Ergebnisse auf den Standort „Forschungscampus Bahrenfeld“ rechnerisch übertragen werden können, wurden Admittanzmessungen mit künstlicher Anregung durchgeführt. Diese Messungen an dem Referenzabschnitt sind ebenfalls in einem eigenständigen Dokument mit der Nummer 40-10714-01-D5 [2] beschrieben.

Das vorliegende Dokument stellt das Hauptgutachten mit den relevanten Prognosen und Handlungs-empfehlungen dar. Es beschreibt die Prognose der zukünftigen Gebäude-Fundamentalschwingungen sowie der Magnetfeldveränderungen, die durch den Betrieb der S-Bahn hervorgerufen werden. Dazu wurden am Standort Bahrenfeld Admittanz- und Ausbreitungsmessungen mit VibroTruck entlang der geplanten Trasse (Luruper Chaussee) durchgeführt. Validiert wurde es durch ein zweites messtechni-sches Verfahren mit Hilfe von DYNPACT®.

Die Prognose der einwirkenden Immissionen zusammen mit der Beweissicherung des IST-Zustandes bildet die Basis für die Bewertung, in wie weit die Einwirkungen durch die S-Bahn die Standortbedin-gungen am Forschungscampus Bahrenfeld den derzeitigen IST-Zustand in Bezug auf die Schwingungs-ruhe und in Bezug auf Magnetfeldveränderungen beeinträchtigen. Damit kann auch geprüft werden, in wie weit Schutzmaßnahmen zielführend sind, um eine Beeinträchtigung möglichst zu vermeiden.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Untersuchung sowie die daraus abgeleiteten Handlungsemp-fehlungen und Erkenntnisse themenbezogen zusammengefasst.

## 7.1 Erschütterungen

Durch den Betrieb der in Tunnellage geplanten S-Bahn S32 entlang der Luruper Chaussee würden sich die erschütterungstechnischen Standortbedingungen auf dem Forschungscampus Bahrenfeld

- tagsüber bis zu einer Entfernung von **200 m**
- nachts bis zu einer Entfernung von **350 m**

verschlechtern. Aus diesem Grund werden zwei alternative Schutzmaßnahmen empfohlen, die nachfolgend beschrieben werden. Diese Maßnahmen sind so ausgelegt, dass die Erschütterungsbedingungen sich im Tageszeitraum nicht verschlechtern. Damit ist gemeint, dass sich der maximale Terzspekttralwert der Schwinggeschwindigkeit nicht vergrößert. Sehr wohl kann es jedoch zu einer Frequenzverschiebung des Maximalwertes kommen. Im Nachtzeitraum käme es trotz der nachfolgend beschriebenen Maßnahme bei einigen Gebäuden zu verschlechterten Erschütterungsbedingungen durch die S-Bahn.

Die erste mögliche Schutzmaßnahme (Alternative A) besteht aus der Realisierung eines tief abgestimmten Masse-Feder-Systems von 6,0 Hz in Kombination mit einer versteiften Tunnelkonstruktion. Die Versteifungsmaßnahme des Tunnels muss im späteren Planungsprozess baudynamisch ausgelegt und optimiert werden, ggf. in Kombination mit Pfahl-Tiefgründungen. Für das Masse-Feder-System ist ein Platzbedarf von 1,20m x 3,50m je Gleis im Tunnelrohbau vorzuhalten. Reine Mehrkosten für den Erschütterungsschutz betragen ca. 30 Mio Euro.

Die zweite Maßnahme (Alternative B) besteht aus der Verlegung der Trasse, so dass der Mindestabstand zum nächstgelegenen relevanten Forschungsgebäude mindestens **200 m** beträgt. Der hier vorzusehende Oberbau muss planerisch an das Übertragungsverhalten des Tunnels und an die spätere Nutzung im Nahbereich des Tunnels angepasst und baudynamisch dimensioniert werden. Je nach Anforderungen der dann nächstgelegenen immissionsschutzrelevanten Bebauung kann bei dieser Alternative auch ein Masse-Feder-System erforderlich sein.

Ergänzend wird in Abschnitt 4.7 untersucht, welche Trassenabstände einzuhalten wären, um die nächtlichen IST-Bedingungen nicht zu verschlechtern.

Die Prognose von Erschütterungen mit sehr tiefen Frequenzen im Bereich kleiner 4 Hz ist ein gesondert zu betrachtendes Thema. Die Prognose ist mit großen Unsicherheiten behaftet, vgl. Abschnitt 4.8. Es muss davon ausgegangen werden, dass sich die Bedingungen in diesem Frequenzbereich gegenüber dem IST-Zustand deutlich verschlechtern im Tageszeitraum, aber auch besonders im Nachtzeitraum. Eine Verlegung der Trasse alleine reicht nicht aus aufgrund der geringen Abnahme dieser sehr tieffrequenten Schwingungen im Baugrund über die Entfernung. Selbst bei Kombination von

Trassenverlegung und einer massiv versteiften Tunnelbauweise wird eine nächtliche S-Bahn-Vorbeifahrt diese sehr tieffrequenten Immissionen vergrößern.

Weichen stellen eine zusätzliche Punktanregung dar. Bei allen Prognosen wurde davon ausgegangen, dass keine Weichen eingebaut werden. Sollten Weichen zwingend eingebaut werden müssen, dann sind sie so anzuordnen, dass der Abstand zum nächstgelegenen relevanten Gebäude mehr als 150 m beträgt.

## **7.2 Elektromagnetische Feldveränderungen (Near-DC)**

Auf dem Forschungscampus wurden beweissichernde Messungen in drei Gebäuden, nämlich

- Gebäude 90 ZOQ (MP29)
- Gebäude 69 (ILP) (MP28)
- Gebäude 15 CSSB (MP31)

durchgeführt. Die über mindestens eine Woche durchgeführten Messungen wurden hinsichtlich der Near-DC- und AC-Magnetfelder ausführlich ausgewertet. Die im Gutachten ermittelten charakteristischen Werte an diesen Messpunkten liegen tagsüber bei 45 - 51 nT und nachts bei 28 - 39 nT. Somit sind die IST-Magnetfelder im Bestand sehr viel niedriger als der zur Orientierung vorgegebene Wert von  $B=200$  nT.

Die geplante S-Bahn emittiert -wie zu erwarten- starke Near-DC-Felder, sodass auf dem Campus die 200 nT erst in folgenden Abständen zum Gleis erreicht werden können:

- 350 m zum Gleis (bei herkömmlicher Ausführung der Stromversorgung)
- 100 m zum Gleis (bei einer optimierten Stromversorgung)

Diese Prognose beinhaltet auch mögliche Zugänge zu den Haltepunkten und die dadurch bedingten Öffnungen zum Tunnel.

Die Verschlechterung der Near-DC-Magnetfelder im Campus ist sehr erheblich und vermutlich nicht in jedem Fall durch lokalen Geräteschutz kompensierbar. Dies bezieht sich insbesondere auf den Korridor von 350 m neben den Gleisen für das Gleis mit nicht optimierter Stromversorgung. Bei der Realisierung einer optimierten Stromversorgung der S32, mit mindestens der in diesem Gutachten ermittelten Reduktionswirkung der Magnetfeldemission, verringert sich dieser Korridor auf etwa 100 m seitlich der Gleise.

Unabhängig von einer optimierten oder nicht optimierten Stromversorgung sind in jedem Fall die Gebäude der ersten Bebauungsreihe neben der Luruper Chaussee (bis 100 m Abstand zum Gleis) durch erhebliche Magnetfelder im „Near-DC“-Bereich betroffen. Der zur Orientierung angegebene Grenzwert von  $B = 200$  nT wird dort zum Teil erheblich überschritten.

Eine grobe Kostenbewertung möglicher campusseitiger Schutzmaßnahmen gegen niederfrequente Magnetfelder ist im Gutachten enthalten.

Da jedoch gerade die innerhalb dieses 100m Korridors liegenden Gebäude ZOQ und ILP bereits heute mit Immissionsschutzmaßnahmen gegenüber tieffrequenten Magnetfelder ausgerüstet sind und der von den dortigen Nutzern geforderte maximale Wert von  $B=200\text{nT}$  bereits unter Berücksichtigung dieser bereits realisierten Minderungsmaßnahmen angegeben wurde, bedeuten die prognostizierten Überschreitungen des  $200\text{nT}$  Grenzwertes, dass diese Art der Forschung hier zukünftig nicht mehr durchgeführt werden kann.

Aus sachverständiger Sicht muss von der Realisierung der Trasse im Bereich der Luruper Chaussee dringend abgeraten werden. Es wird vorgeschlagen, die Trasse nach Osten zu verschieben.

Prognoseberechnungen haben ergeben, dass die tagsüber vorhandenen IST-Werte der niederfrequenten Magnetfelder auf dem Campus dann weiterhin eingehalten werden, wenn die Trasse um mindestens 160 m nach Osten verlegt wird. Vorausgesetzt ist dabei, dass eine optimierte Stromversorgung realisiert wird.

Es wird allerdings dazu geraten, die Trasse soweit zu verschieben, dass auch die nächtlichen IST-Werte auf dem Campus eingehalten werden können. Das zu ermitteln ist eine planerische Optimierungsaufgabe. Ohne dieser Aufgabe vorgreifen zu wollen wird davon ausgegangen, dass dafür eine Gleisverschiebung von mindestens 250 m erforderlich wird. Das bedeutet, dass der Mindestabstand zum nächstgelegenen relevanten Forschungsgebäude mindestens **300 m** beträgt. Auch dabei wird die Ausführung mit „optimierter Stromversorgung“ als selbstverständlich angesehen. Bei dieser Verschiebung wird mit einem Niveau der niederfrequenten Magnetfelder (Near-DC-Felder) von  $B = 10 - 20 \text{ nT}$  gerechnet.

Batterie-betriebene Züge würden die Emissionen erheblich vermindern. Allerdings stehen nach Aussage des Vorhabenträgers solche Fahrzeuge in absehbarer Zeit nicht zur Verfügung.

### **7.3 Bewertung des Erschütterungen aus Straßenverkehr**

Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss des Straßenzustandes auf die Straßenverkehrserschütterungen entlang der Luruper Chaussee. Die Untersuchungen haben folgendes ergeben:

- Je größer die Unebenheit der Fahrbahn, desto größer werden die emittierten Erschütterungen.
- Erschütterungen im Umfeld der Straße werden maßgeblich von LKW und Bussen erzeugt, was auf deren wesentlich höheres Fahrzeuggewicht zurückzuführen ist.



- Die Luruper Chaussee ist aktuell in einem sehr guten Zustand bezogen auf die Ebenheit der Fahrbahn. Bei der exemplarisch untersuchten Fahrspur wurde lediglich eine zu kritisierende Unebenheitsstelle (Schadstelle) mit einer Tiefe von mehr als 15mm gefunden.
- Die Robustheit des Fahrbahnunterbaus entscheidet über Konstanz der Ebenheit während der Nutzungszeit der Straße und damit über die Konstanz einer geringen Erschütterungsemission.
  - Der eingebaute Unterbau ist bereits gut dimensioniert und robust.
  - Es wird empfohlen, bei ggf. anstehenden Erneuerungen auf den stärker werdenden LKW Verkehr mit einem nochmals stärkeren Unterbau zu reagieren, um Unebenheiten entgegen zu wirken.
- Die Wartung des Straßenbelages ist sehr wichtig, um einen Anstieg der Erschütterungsemission durch Unebenheitsstellen zu vermeiden. Der Belag sollte regelmäßig auf Unebenheiten hin überprüft und – sofern erforderlich – entsprechend korrigiert werden. Unebenheiten mit Wellenlängen von 1-2m sind besonders kritisch. Ein Ebenheitsmaß von maximal 15mm innerhalb einer 3m Messbasis wird zur Einhaltung aus baudynamischer Sicht empfohlen.
- Ein zukünftig höherer Verkehrsanteil von schweren LKW wird die Schwingungssituation im Campus Bahrenfeld im kaum messbaren Bereich beeinflussen, solange die Ebenheit der Straße nicht schlechter wird. Die Maximalwerte der Terzspektren werden praktisch nicht zunehmen, die Auftrittshäufigkeit jedoch schon. Wegen der häufiger auftretenden Phasen der maximalen Erschütterungen wird damit gerechnet, dass sich der 95%-Quantilwert der Erschütterungen in den Gebäuden geringfügig um schätzungsweise etwa 3% erhöhen könnte.

--- Ende des Berichts ---

Es folgen die Anlagen I bis V.

## **Anlagen I - V**

## 8 Anlage I: Dokumentation der gemessenen Schwingungen aus Verkehr

### 8.1 Allgemeines

Es wurden Schwingungsmessungen im Nahfeld von und entlang der Luruper Chaussee durchgeführt, um die derzeitigen Erschütterungsemissionen durch Straßenverkehr an jedem der vier Messquerschnitte festzustellen.

Außerdem wurden die beiden westlichen Fahrspuren der Luruper Chaussee auf Straßenschäden bzw. –unebenheiten untersucht. Dabei wurde jede Schadstelle ausgemessen, dokumentiert und mit einem hochpräzisen GPS Gerät eingemessen.

### 8.2 Schwingungsmessung des Straßenverkehrs

#### 8.2.1 MQ0 und MQ1

Zur Messung der Schwinggeschwindigkeiten wurde folgendes Messequipment verwendet:

<b>Geschwindigkeitssensoren</b>	Geophone (Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer), 4,5 Hz, 375 $\Omega$ , $f_u = 1\text{ Hz}$ , $f_o = 315\text{ Hz}$ gemäß DIN 45669
<b>Messverstärker</b>	MSE, 8 Kanal, SN: 20011103 (V12)
<b>A/D Wandlerkarte</b>	NI USB-6210, 16Bit
<b>Messrechner</b>	Panasonic FZ-55, SN:0ATCA07808
<b>Letzte Kalibrierung der Messkette</b>	03/2020
<b>Messsoftware</b>	Meda_AD Version 2019-1

Tabelle 8-1: Verwendetes Messequipment

Die Parameter für die Schwingungsmessungen waren wie folgt eingestellt:

<b>Anzahl Messkanäle</b>	3 (M1-M4) bzw. 5 (M5-M6)
<b>Bandbreite</b>	400 Hz
<b>Abtastfrequenz</b>	1024 Hz
<b>Antialiasing</b>	315Hz (Geophone)

Tabelle 8-2: Messparameter

Kanal	Messpunkt	Lage	Aufstellbe- dingung	Sensor	Kabel	Messbereich [mm/s]	
						M1-M4	M5+M6
1	MQ1-MP1	10m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G23	159	+/-2	+/-2
2	MQ1-MP2	20m bis Mitte 1. Fahrspur	Dreier-Spitze	G4	159	+/-2	+/-2
3	MQ1-MP3	30m bis Mitte	Dreier-Spitze	G142	159, 38	+/-2	+/-2

		1. Fahrspur					
4	MQ1-MP13	10m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G105	200	-	+/-2
5	MQ1-MP14	20m bis Mitte 1. Fahrspur	Dreier-Spitze	G60	-	-	+/-2

Tabelle 8-3: Messpunkte Straßenmessung am MQ1 (Kanal 1-3) und MQ0 (Kanal 4-5)

### 8.2.2 MQ2

Der Messquerschnitt MQ2 umfasst die für die Straßenmessung ausgewerteten Messquerschnitte MQ2.1 und MQ2.2.

Zur Messung der Schwinggeschwindigkeiten wurden beide Messquerschnitte mit der gleichen Messanlage gemessen, bei der folgendes Messequipment verwendet wurde:

<b>Geschwindigkeitssensoren</b>	Geophone (Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer), 4,5 Hz, 375 $\Omega$ , fu = 1Hz, fo = 315 Hz gemäß DIN 45669
<b>Messverstärker</b>	MSE, 8 Kanal, SN: 20011103 (V12) MSE, 8 Kanal, SN: 20011104 (V14)
<b>A/D Wandlerkarte</b>	NI USB-6210, 16Bit
<b>Messrechner</b>	Panasonic FZ-55, SN:0ATCA07808
<b>Letzte Kalibrierung der Messkette</b>	03/2020
<b>Messsoftware</b>	Meda_AD Version 2019-1

Tabelle 8-4: Verwendetes Messequipment

<b>Anzahl Messkanäle</b>	6
<b>Bandbreite</b>	400 Hz
<b>Abtastfrequenz</b>	1024 Hz
<b>Antialiasing</b>	315Hz (Geophone)

Tabelle 8-5: Messparameter

Kanal	Messpunkt	Lage	Aufstellbe- dingung	Sensor	Kabel	Messbereich [mm/s]
1	MQ2-MP1	10m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G105	38	+/-2
2	MQ2-MP2	20m bis Mitte 1. Fahrspur	Dreier-Spitze	G23	139	+/-2
3	MQ2-MP3	30m bis Mitte 1. Fahrspur	Dreier-Spitze	G60	139	+/-2
4	MQ2-MP5	10m 1. Fahrspur	Spike	G15	87	+/-2

5	MQ2-MP6	20m 1. Fahrspur	Spike	G7	148	+/-2
6	MQ2-MP7	30m 1. Fahrspur	Dreier-Spitze	G103	148	+/-2

Tabelle 8-6: Messpunkte Straßenmessung am MQ2.1 (Kanal 1-3) und MQ2.2 (Kanal 4-6)

### 8.2.3 MQ3

<b>Geschwindigkeitssensoren</b>	Geophone (Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer), 4,5 Hz, 375 $\Omega$ , fu = 1Hz, fo = 315 Hz gemäß DIN 45669
<b>Messverstärker</b>	MSE, 8 Kanal, SN: 20011103 (V12)
<b>A/D Wandlerkarte</b>	NI USB-6210, 16Bit
<b>Messrechner</b>	Panasonic FZ-55, SN:0ATCA07808
<b>Letzte Kalibrierung der Messkette</b>	03/2020
<b>Messsoftware</b>	Meda_AD Version 2019-1

Tabelle 8-7: Verwendetes Messequipment

<b>Anzahl Messkanäle</b>	3
<b>Bandbreite</b>	400 Hz
<b>Abtastfrequenz</b>	1024 Hz
<b>Antialiasing</b>	315Hz (Geophone)

Tabelle 8-8: Messparameter

Kanal	Messpunkt	Lage	Aufstellbe- dingung	Sensor	Kabel	Messbereich [mm/s]
1	MQ3-MP1	10m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G105	140	+/-2
2	MQ3-MP2	20m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G15	140	+/-2
3	MQ3-MP3	30m bis Mitte 1. Fahrspur	Dreier-Spitze	G107	40, 140	+/-2

Tabelle 8-9: Messpunkte Straßenmessung am MQ3

### 8.2.4 MQ4

<b>Geschwindigkeitssensoren</b>	Geophone (Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer), 4,5 Hz, 375 $\Omega$ , fu = 1Hz, fo = 315 Hz gemäß DIN 45669
<b>Messverstärker</b>	MSE, 8 Kanal, SN: 20011103 (V12)
<b>A/D Wandlerkarte</b>	NI USB-6210, 16Bit
<b>Messrechner</b>	Panasonic FZ-55, SN:0ATCA07808



Letzte Kalibrierung der Messkette	03/2020
Messsoftware	Meda_AD Version 2019-1

Tabelle 8-10: Verwendetes Messequipment

Anzahl Messkanäle	15(M1) 7(M2+M3)
Bandbreite	400 Hz
Abtastfrequenz	1024 Hz
Antialiasing	315Hz (Geophone)

Tabelle 8-11: Messparameter

Kanal	Messpunkt	Lage	Aufstellbe- dingung	Sensor	Kabel	Messbereich [mm/s]	
						M1	M2+M3
1	MQ4-MP1	10m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G15	137	+/-2	+/-2
2	MQ4-MP2	20m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G6	137	+/-2	+/-2
3	MQ4-MP3	30m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G94	40, 137	+/-2	+/-2

Tabelle 8-12: Messpunkte Straßenmessung am MQ4

### 8.3 Dokumentation der vorhandenen Straßenschäden

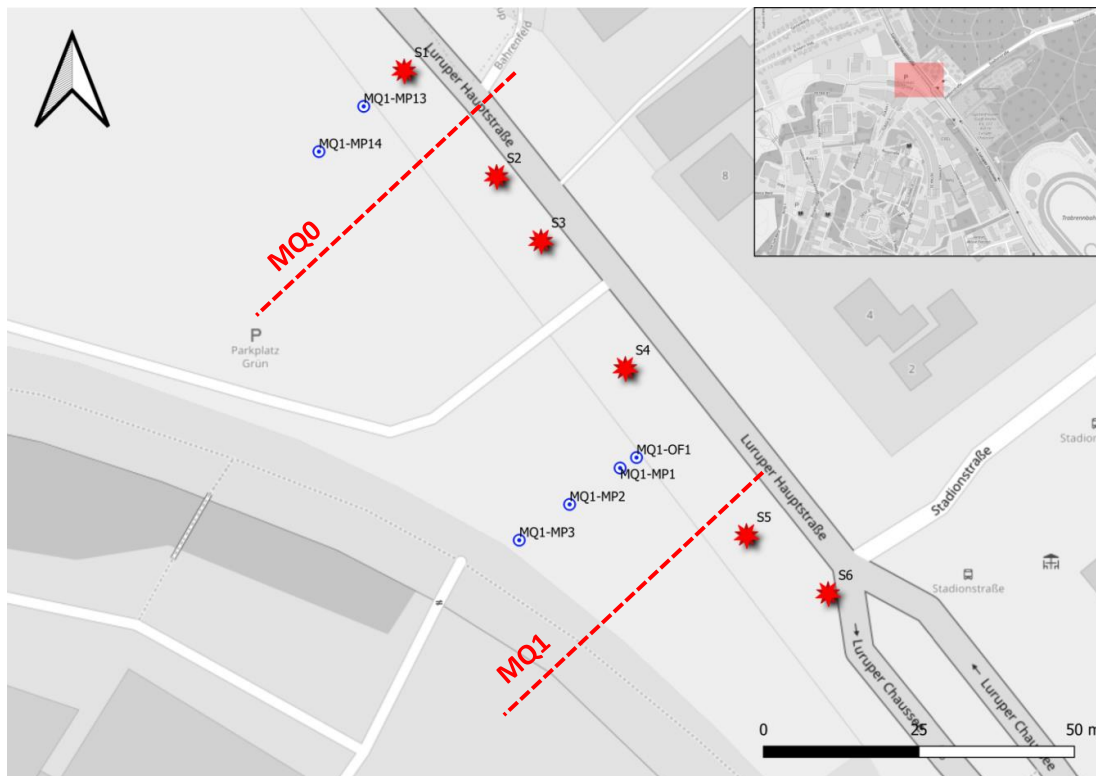


Abbildung 8-1: Lageskizze der Messketten und Schadstellen am MQ0 und MQ1

Projekt: Science City HH Erschütterungsuntersuchung S32 Bericht-Nr.: 40-10714-01-D6 (Rev.A)	Erschütterungs- und Magnetfeldimmissionen durch die S-Bahn auf den Forschungscampus Bahrenfeld	Seite 121/439
--	---	---------------

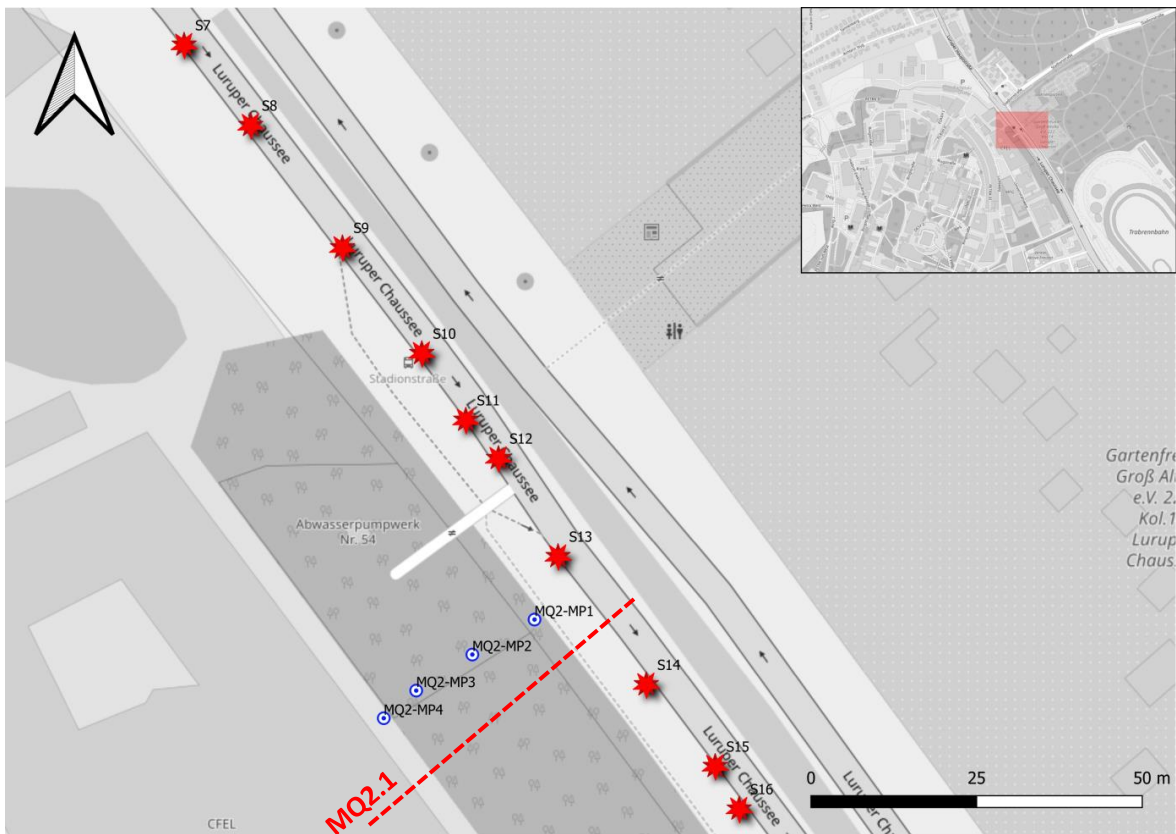


Abbildung 8-2: Lageskizze der Messketten und Schadstellen am MQ2 (MQ2.1)

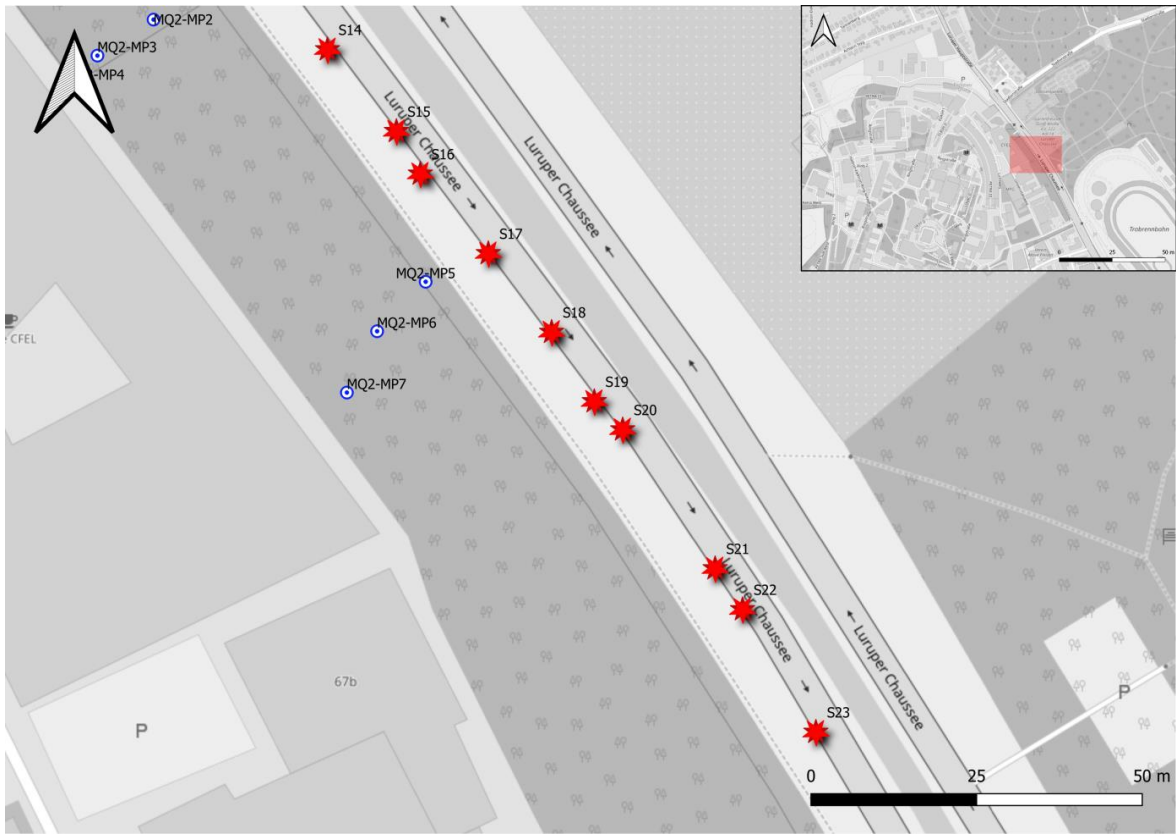


Abbildung 8-3: Lageskizze der Messketten und Schadstellen am MQ2 (MQ2.2)

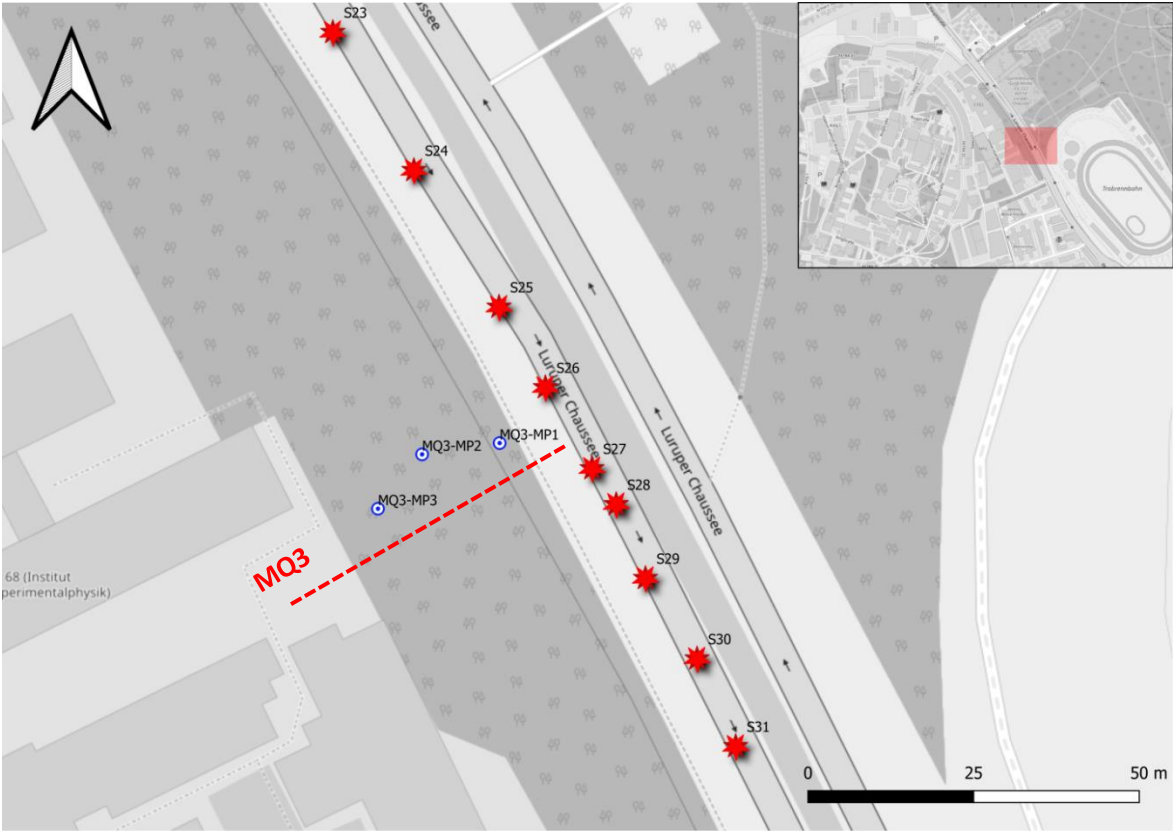


Abbildung 8-4: Lageskizze der Messketten und Schadstellen am MQ3

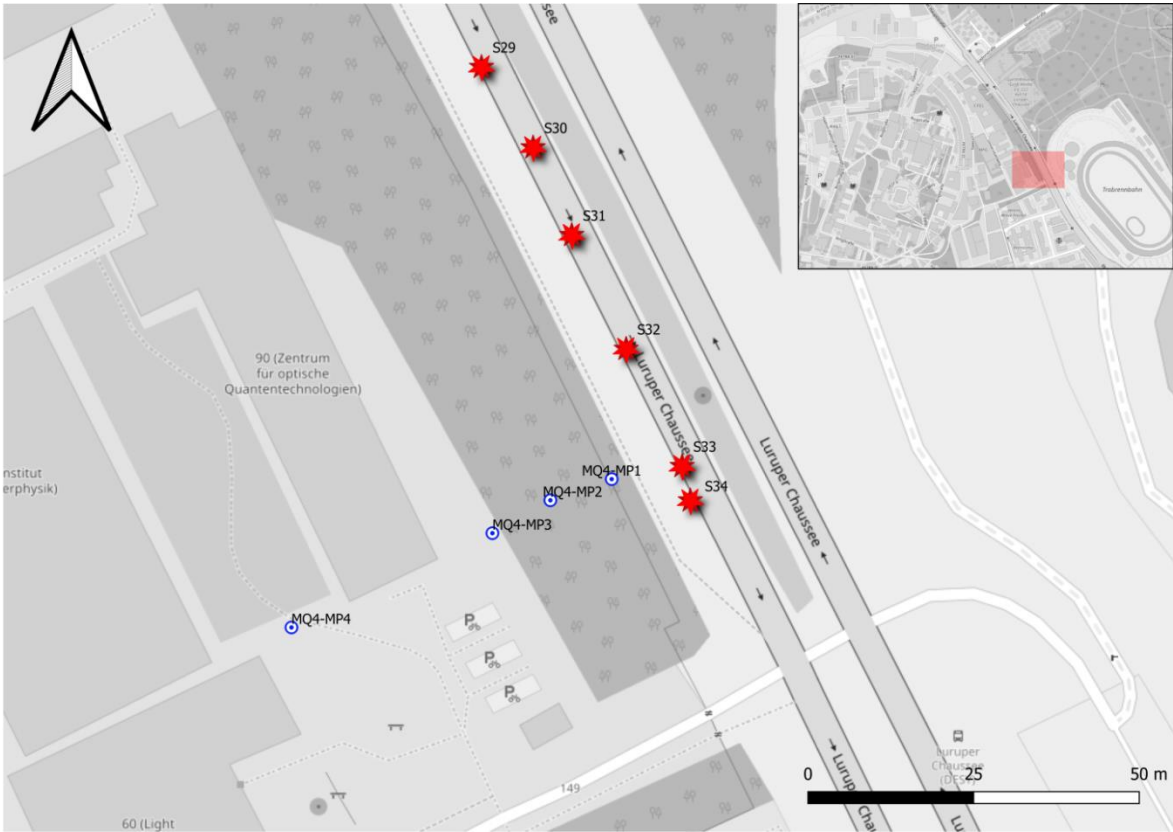


Abbildung 8-5: Lageskizze der Messketten und Schadstellen am MQ4

Schadensstelle	Richtung/ Fahrspur	Tiefe/Höhe	Länge	längs/breit	Bemerkung
S1	Süd/rechts	T 35mm	110cm	110cm	
S2	Süd/rechts	H 3mm	20cm		
S3	Süd/rechts	T 3mm Nahtstelle in Fahrrinne; 7mm mittig	30cm	30cm	Schadstelle mittig
S4	Süd/rechts				mehrere Bohr- punkte
S5	Süd/rechts	T 9mm; Fahrspur	60cm	40cm	Fahrspur
S6	Süd/links	T 3mm	30cm	250cm	2 stück, Abstand 1m
S7	Süd/rechts	H 2mm	30cm	90cm	kein Foto!
S8	Süd/rechts	H 3,5mm	20cm	90cm	
S9	Süd/rechts	2mm	10cm	260cm	gesamte Haltestel- le Beton (hier nur exemplarisch)
S10	Süd/rechts	T4-8 mm		260cm	Ende Bushaltestel- le (Absatz)
S11	Süd/rechts	H+T 6mm (+/-3mm)	150cm	80cm	
S12	Süd/rechts	T 2mm	20cm	150cm	Fahrbahnmitte
S13	Süd/rechts	T 2-3mm	30cm	230cm	gesamte Breite
S14	Süd/rechts	H 6,5mm	150cm	260cm	
S15	Süd/rechts	H 5,5mm	160cm	260cm	
S16	Süd/rechts	T 9mm	10cm	20cm	4mal lokale Vertie- fung
S17	Süd/rechts	T 3mm	150cm	50cm	lange Delle
		T 5mm	10cm	20cm	2mal lokale Vertie- fung
S18	Süd/rechts	T 1mm	50cm	100cm	

S19	Süd/rechts	H 3mm	60cm	100cm	rechte Fahrspur
S20	Süd/rechts	H 2mm	10cm	100cm	Spurmitte
S21	Süd/rechts	T 2-5mm	5cm	30cm	4 lokale Beschädigungen
S22	Süd/rechts	T 5mm	5cm	30cm	2 lokale Beschädigungen
S23	Süd/rechts	T 1mm	60cm	50cm	
S24	Süd/rechts	T 3mm	10cm	30cm	2 lokale Beschädigungen
S25	Süd/rechts	H 8mm	50cm	50cm	
S26	Süd/rechts	H 3mm	5cm	20cm	rechts
S27	Süd/rechts	T 5mm	20cm	20cm	
S28	Süd/mittig	T 3mm	30cm	60cm	
S29	Süd	T 5mm	2300cm	100cm	23m lange Beschädigung infolge Reparaturen; rechts am Gulli
S30		T 5mm	10cm	100cm	gehört zur Reparaturstelle; lokale kurzweilige Schäden
S31	Süd/rechts	T 3-4mm	10cm	30cm	8 lokale Beschädigungen
S32	Süd/rechts	T 3mm	mehrere	mehrere	mehrere Streifen, d.h. Oberflächenschaden durch Bagger o.ä.
S33	Süd/rechts	T 3mm	100cm	280cm	gesamte Breite
S34	Süd/rechts	T 5mm	15cm	100cm	

**Tabelle 8-13: Liste der Schadstellen auf den westlichen Fahrspuren der Luruper Chaussee**





Schadstelle S1



Schadstelle S3

Schadstelle S8



Schadstelle S9

Schadstelle S10



	
Schadstelle S22	Schadstelle S29

Tabelle 8-14: Fotodokumentation einiger Schadstellen auf den westlichen Fahrspuren der Luruper Chausee

## 9 Anlage II: Dokumentation der VibroTruck Messungen

### 9.1 Allgemeine Angaben der Messungen

Die Übertragungsadmittanz-Messungen fanden zwischen 25.05.-28.05.2021 in Hamburg am Forschungscampus Bahrenfeld bzw. an der Luruper Chaussee statt. Dabei wurden Ausbreitungsmessungen in das Gelände des DESY hinein mit künstlicher Sweepanregung durchgeführt.

<b>Messdatum</b>	25.05.-28.05.2021
<b>Messpersonal</b>	
<b>Wetter</b>	wechselhaft mit Regen

Tabelle 9-1: Allgemeine Angaben zur Messung

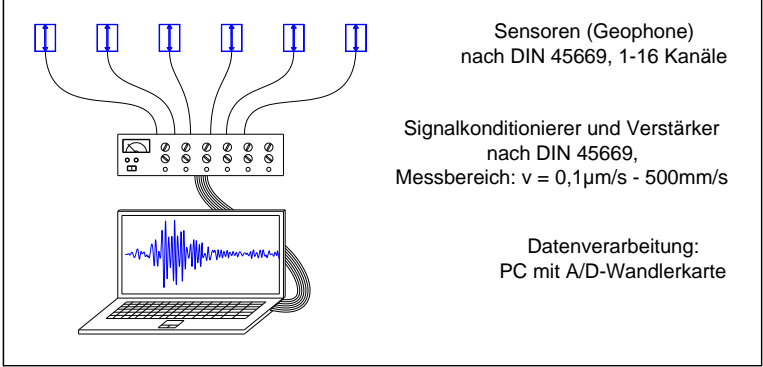
<b>Anzahl Messkanäle</b>	MQ1: 16Kanäle MQ2: 15Kanäle MQ3: 11Kanäle MQ4: 16Kanäle +3 Kanäle (Trabrennbahn)	 <p>Sensoren (Geophone) nach DIN 45669, 1-16 Kanäle</p> <p>Signalkonditionierer und Verstärker nach DIN 45669, Messbereich: <math>v = 0,1 \mu\text{m/s} - 500\text{mm/s}</math></p> <p>Datenverarbeitung: PC mit A/D-Wandlerkarte</p>
<b>Bandbreite</b>	400 Hz	
<b>Abtastfrequenz</b>	1024 Hz	
<b>Antialiasing</b>	315 Hz	

Tabelle 9-2: Messparameter der VibroTruck-Messungen

Zur Messung der Schwinggeschwindigkeiten wurde folgendes Messequipment verwendet:

<b>Geschwindigkeitssensoren</b>	Geophone 1 – 315 Hz gemäß DIN 45669 Sensornummer gemäß Tabelle „Übersicht der Messpunkte“
<b>Messverstärker</b>	MSE, 8 Kanal, SN: 20011103 (V12) MSE, 8 Kanal, SN: 20011104 (V14)
<b>A/D Wandlerkarte</b>	NI USB-6210, 16Bit
<b>Messrechner</b>	Panasonic FZ-55, SN:0ATCA07808
<b>Letzte Kalibrierung der Messkette</b>	03/2020 (Geophone, Verstärker)
<b>Messsoftware</b>	Meda_AD Version 2019-1

Tabelle 9-3: Verwendetes Messequipment

9.2 VibroTruck am Messquerschnitt MQ1

9.2.1 Lageskizze

In der folgenden Grafik ist die Lage der Messpunkte in blau, die Bohrlöcher in Grün und die Anregungspunkte des VibroTruck in Türkis skizziert:

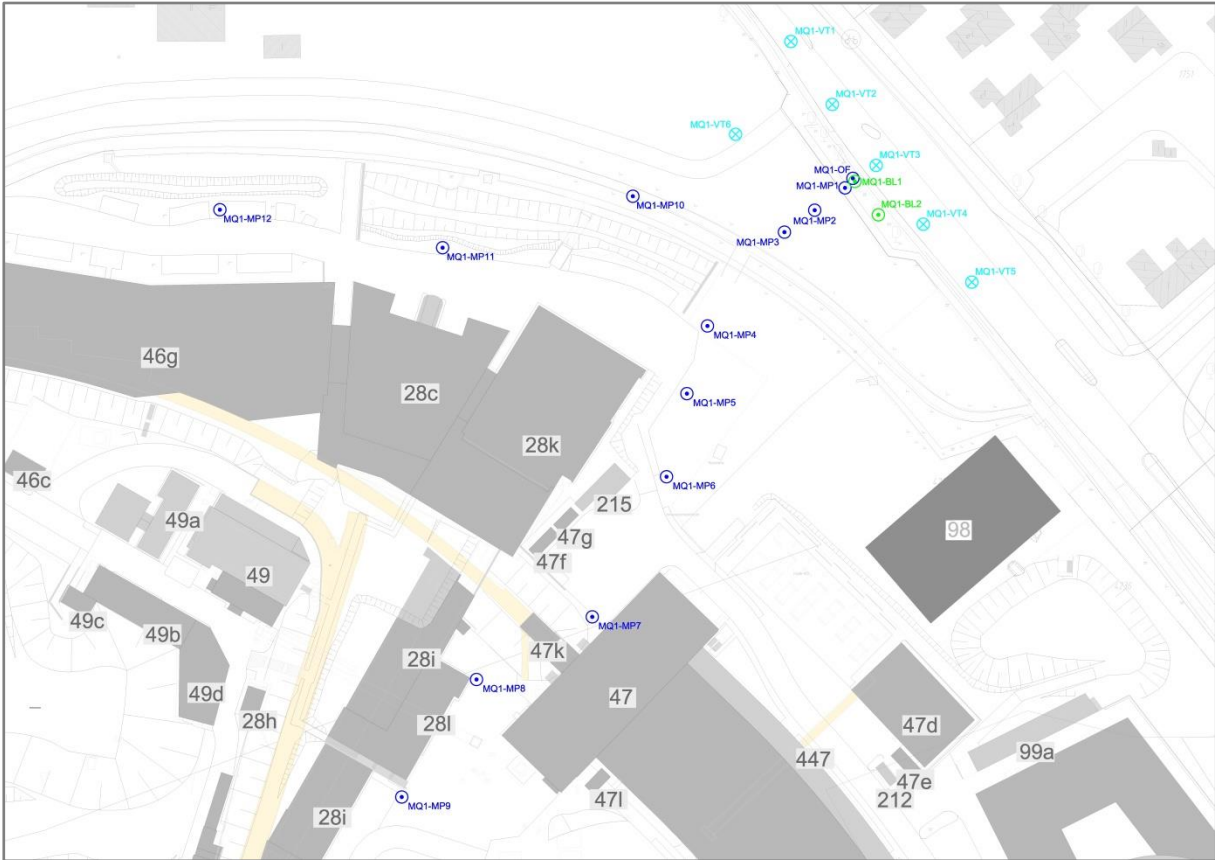


Abbildung 9-1: Lageskizze der Anregungs- und Messpunkte der VibroTruck Messungen am MQ1

9.2.2 Abstände

Sämtliche Mess- und Anregungspunkte wurden mit folgendem GNSS Gerät (Global Navigation Satellite System) eingemessen und daraus die Abstände zwischen Mess- und Anregungspunkt ermittelt.


	Verwendetes Gerät:	EMLID Reach RS2
	Genauigkeit:	<1cm
	Signale bzw. unterstützte Satellitensysteme:	-GPS/QZSS L1C/A, L2C -GLONASS L1OF, L2OF -BeiDou B1I, B2I -Galileo E1-B/C, E5b
	Korrekturdaten:	NTRIP (SAPOS)
	Konnektivität:	Wi-Fi; Bluetooth

Tabelle 9-4: Allgemeine Angaben zum GNSS Gerät

Die folgende Tabelle listet die Entfernungen zwischen den Anregungspunkten mit VibroTruck und Oberflächenmesspunkten in Metern auf.

Anregungspunkt Messpunkt	VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6
MQ1-BL1	40,9	21,3	7,1	21,4	41,0	34,1
MQ1-BL2	51,5	31,8	13,1	12,2	30,6	43,5
MQ1-OF1	40,9	21,3	7,1	21,4	41,0	34,1
MQ1-MP1	41,4	22,4	10,2	22,9	42,0	32,4
MQ1-MP2	45,2	28,5	20,2	29,1	45,9	29,1
MQ1-MP3	50,6	36,2	30,1	36,9	51,5	29,0
MQ1-MP4-	78,7	67,5	61,8	63,4	71,2	51,4
MQ1-MP5	97,5	85,9	78,7	77,2	81,3	70,0
MQ1-MP6	120,2	108,2	99,7	95,6	96,2	92,7
MQ1-MP7	161,6	150,2	141,6	136,4	134,4	133,6
MQ1-MP8	188,8	179,5	172,9	169,4	168,6	160,3
MQ1-MP9	225,6	216,5	209,8	205,7	204,0	197,0
MQ1-MP10	58,7	58,3	65,1	77,5	92,9	31,9
MQ1-MP11	107,5	110,3	117,2	127,8	140,9	83,4
MQ1-MP12	158,1	165,0	174,7	186,9	200,7	138,4

Tabelle 9-5: Entfernungen [m] der Messpunkte zu den VibroTruck-Anregungspunkten am MQ1

### 9.2.3 Kanalbelegung und Fotodokumentation der Messpunkte

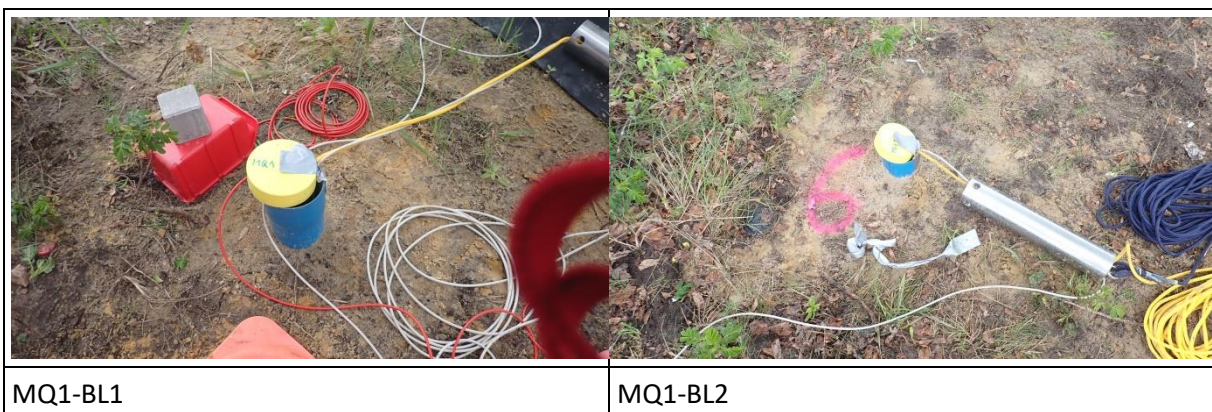
Kanal	Messpunkt	Lage	Aufstell- bedingung	Sensor	Kabel	Messbereich [mm/s]
1	VibroTruck	Anregungspunkte VT1-VT6				0-70 [kN]










2	MQ1-BL1	Bohrloch	Bohrsonde	BS5	120	+/-10
3	MQ1-BL2	Bohrloch	Bohrsonde	BS6	120	+/-10
4	MQ1-OF1	neben BL1	Spike	G138	120	+/-10
5	MQ1-MP1	10m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G23	159	+/-10
6	MQ1-MP2	20m bis Mitte 1. Fahrspur	Dreier-Spitze	G4	159	+/-10
7	MQ1-MP3	30m bis Mitte 1. Fahrspur	Dreier-Spitze	G142	159, 38	+/-10
8	MQ1-MP11		Spike	G54	200	+/-2
9	MQ1-MP12		Spike	G15	200,58	+/-2
10	MQ1-MP4-		Dreier-Spitze	G60	207	+/-5
11	MQ1-MP5		Dreier-Spitze	G107	207, 30	+/-2
12	MQ1-MP6		Spike	G6	207, 47	+/-2
13	MQ1-MP7		Spike	G8	40	+/-2
14	MQ1-MP8		Tripod	G98	48	+/-2
15	MQ1-MP9		Tripod	G103	50	+/-2
16	MQ1-MP10		Spike	G105	52	+/-10

**Tabelle 9-6: Messpunkte am MQ1**

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [5].



	
MQ1-OF1-z	MQ1-MP1-z
	
MQ1-MP2-z	MQ1-MP3-z
Kein Foto vorhanden	
MQ1-MP11-z	MQ1-MP12-z
	
MQ1-MP4-z	MQ1-MP5-z



	
MQ1-MP6-z	MQ1-MP7-z
	
MQ1-MP8-z	MQ1-MP9-z
	
MQ1-MP10-z	

Tabelle 9-7: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ1 bei VibroTruck Anregung

Folgende Messungen wurden mit dem VibroTruck am Referenzquerschnitt MQ1 durchgeführt:

Bezeichnung	Inhalt	GPS Zeitstempel des jeweils 1. Sweeps
Abklopfen	QS-Prüfung	-
MQ1-VT6	log. Sweep 3-120Hz am MQ1-VT6	21/05/25 12:36:41:436000 (1. Sweep) 21/05/25 12:44:29:792000 (2. Sweep)
MQ1-VT1	log. Sweep 3-120Hz am MQ1-VT1	21/05/25 13:00:57:460000
MQ1-VT2	log. Sweep 3-120Hz am MQ1-VT2	21/05/25 13:10:39:816000
MQ1-VT3	log. Sweep 3-120Hz am MQ1-VT3	21/05/25 13:17:17:852000
MQ1-VT4	log. Sweep 3-120Hz am MQ1-VT4	21/05/25 13:23:22:472000
MQ1-VT5	log. Sweep 3-120Hz am MQ1-VT5	21/05/25 13:34:49:732000

Tabelle 9-8: Auflistung der durchgeführten Messungen am MQ1 mit VibroTruck

## 9.2.4 Ergebnisse Baugrundadmittanzen

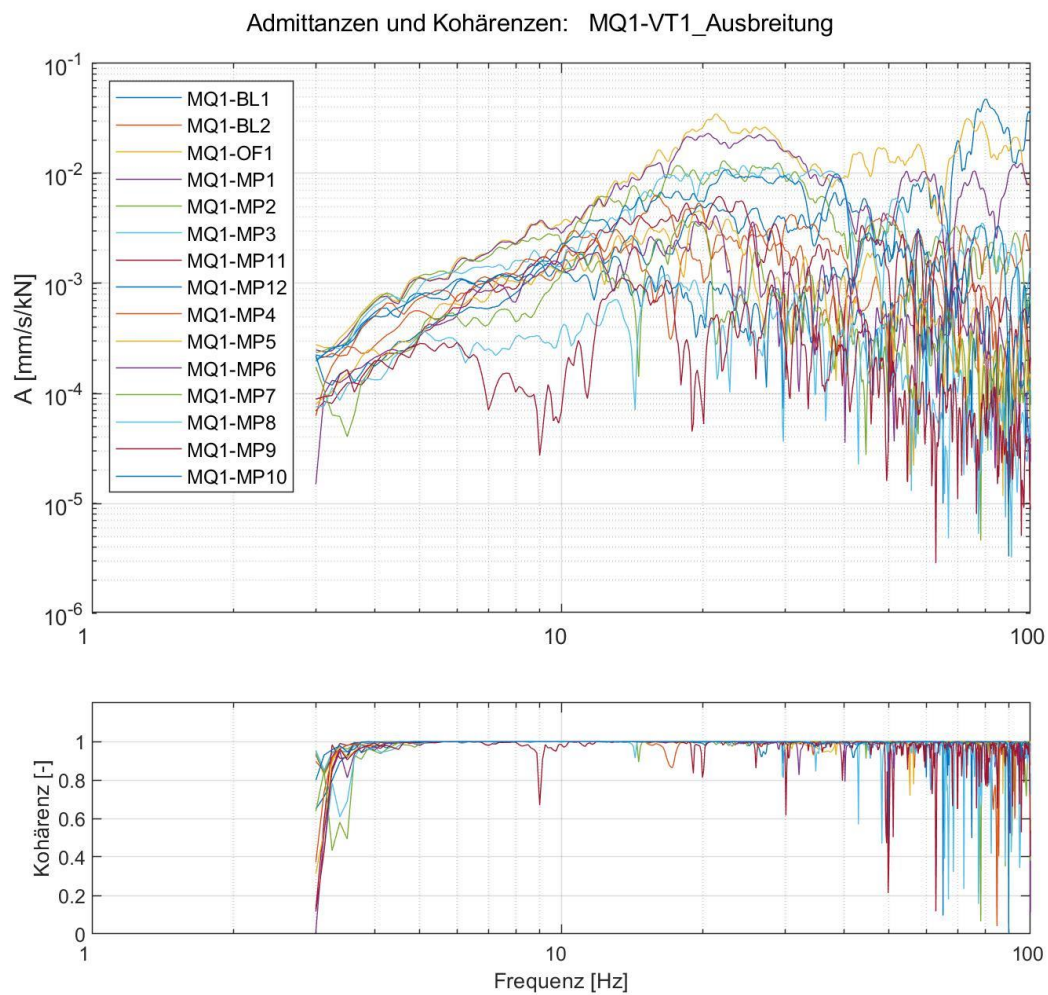


Abbildung 9-2: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

Admittanzen: MQ1-VT1\_Ausbreitung

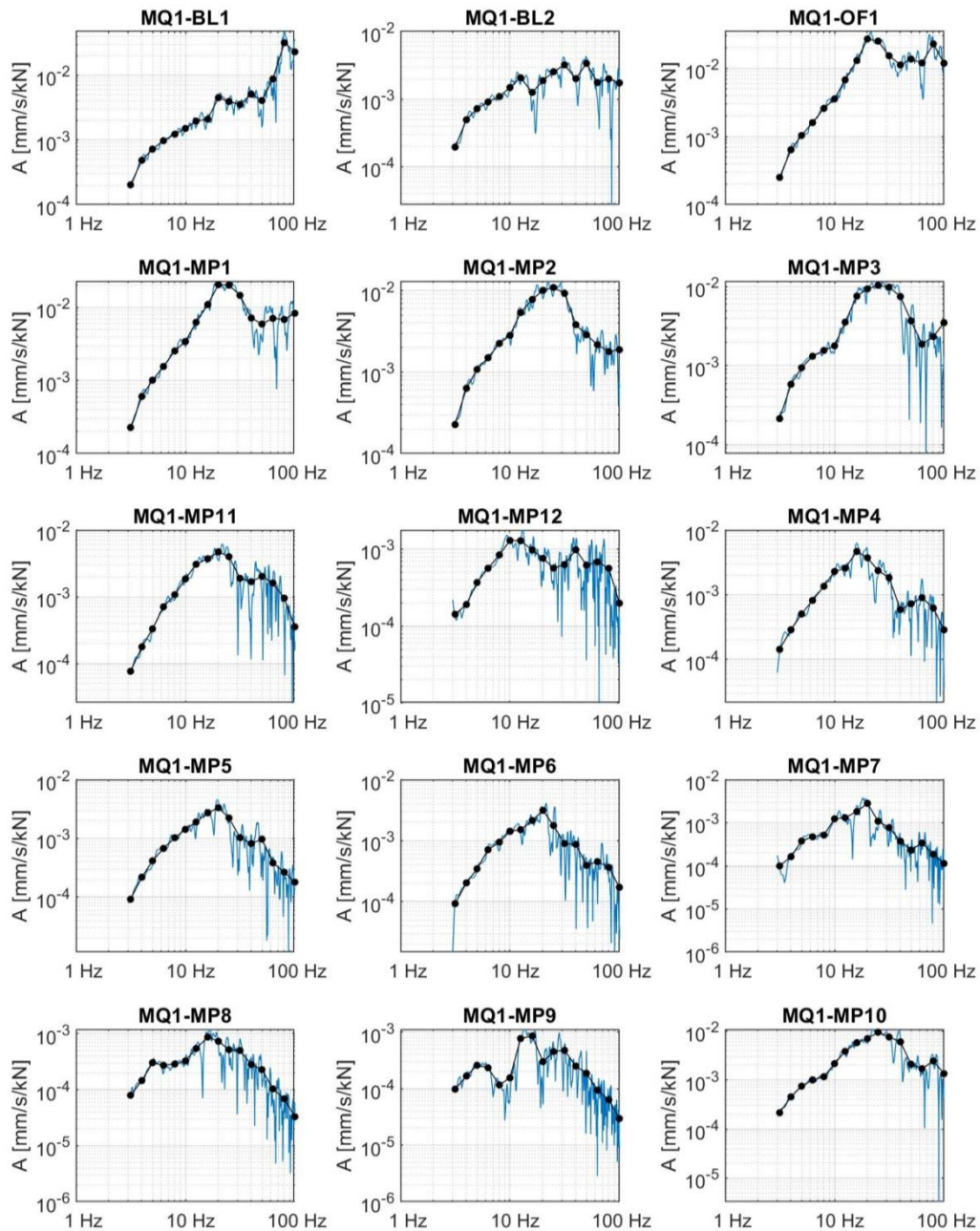


Abbildung 9-3: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)



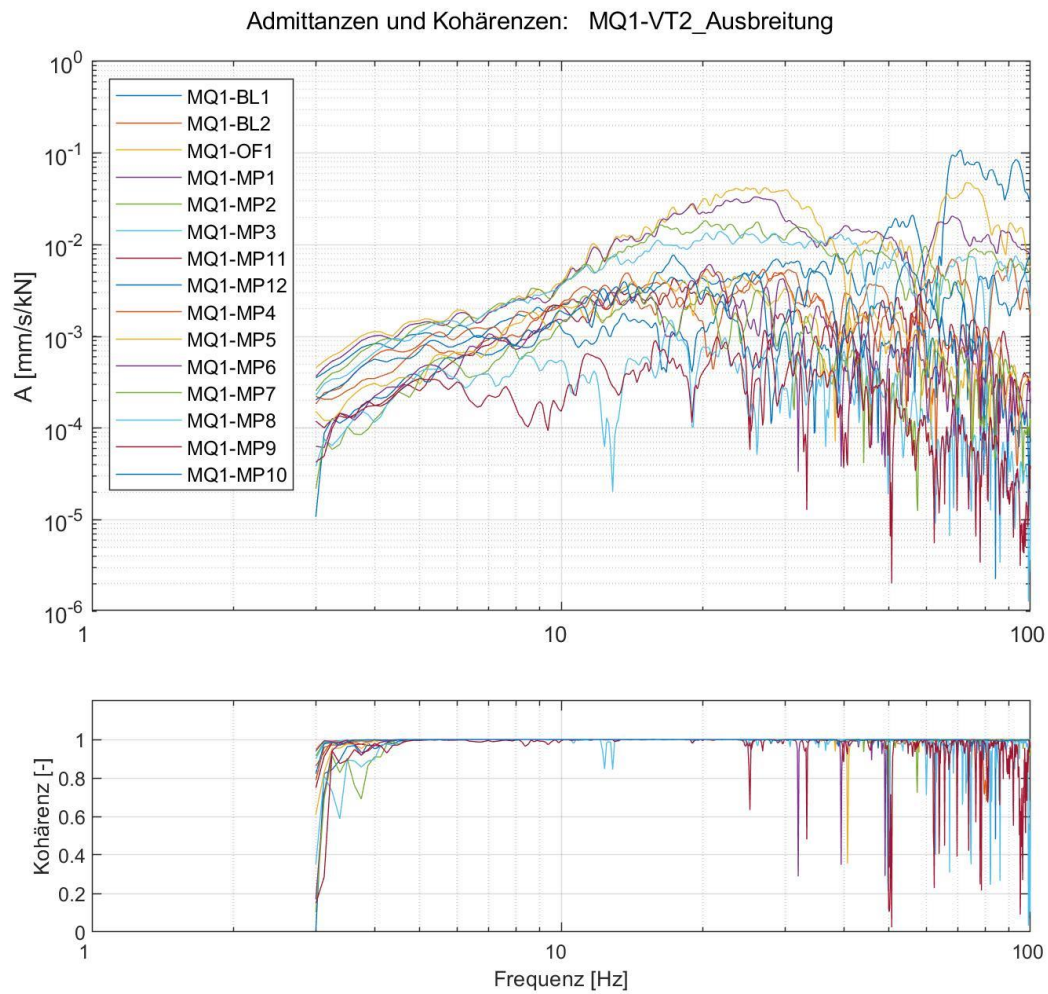


Abbildung 9-4: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

Admittanzen: MQ1-VT2\_Ausbreitung

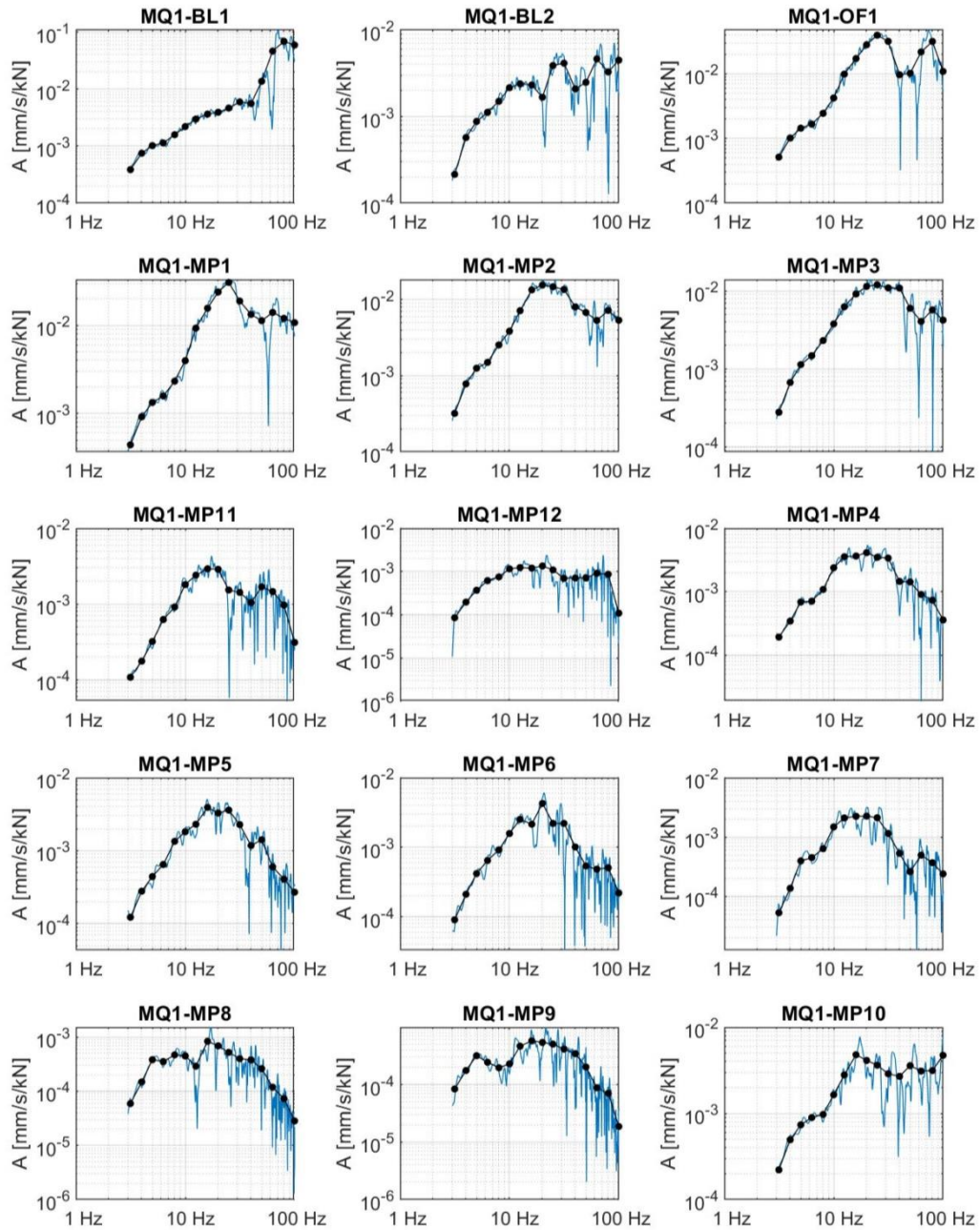
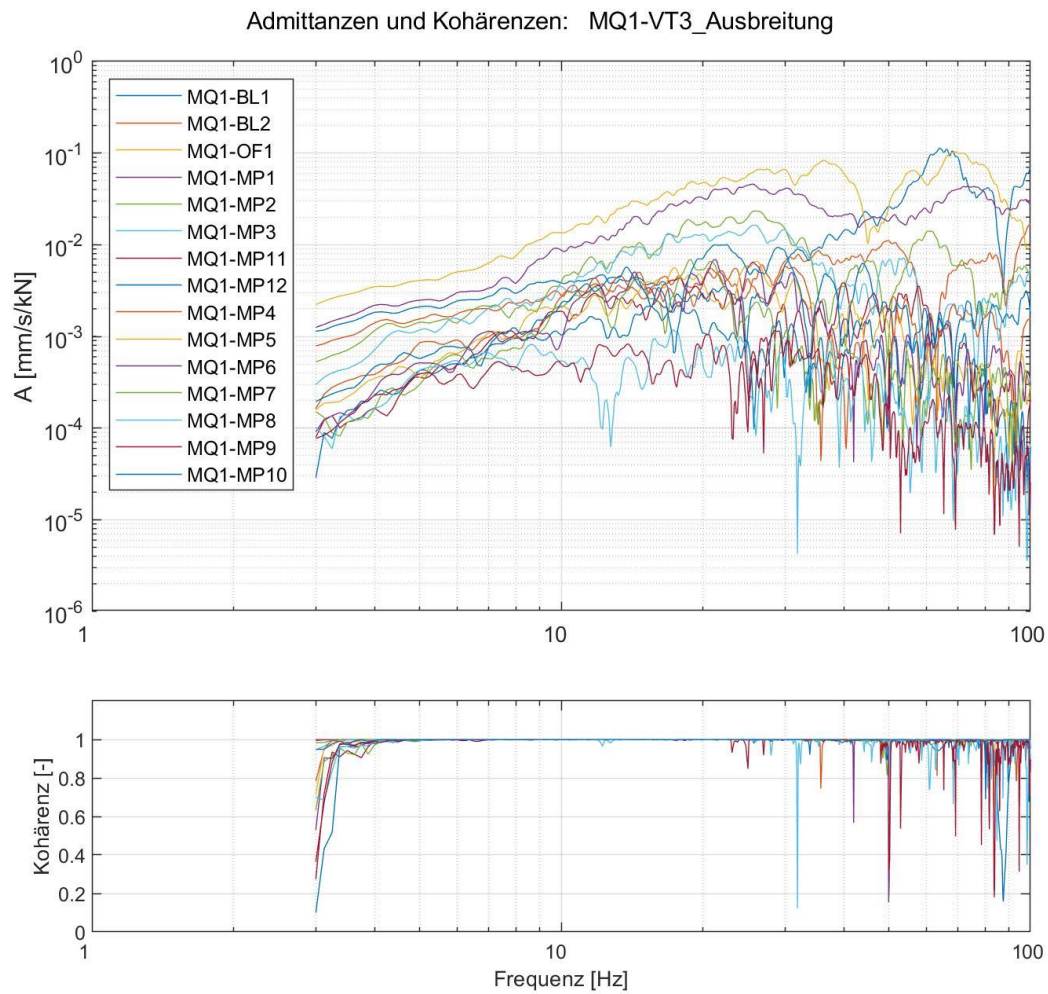


Abbildung 9-5: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)



**Abbildung 9-6: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)**



Admittanzen: MQ1-VT3\_Ausbreitung

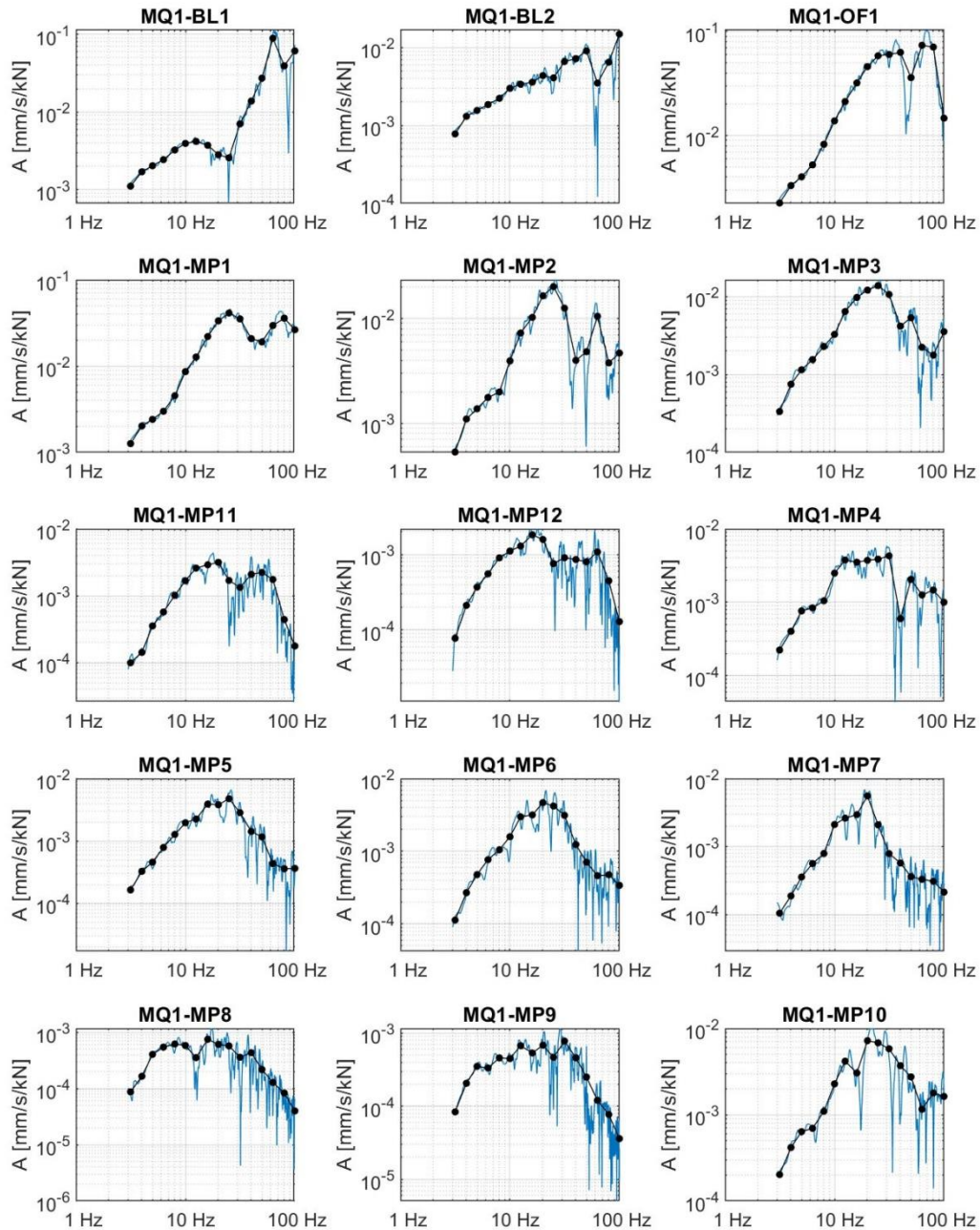
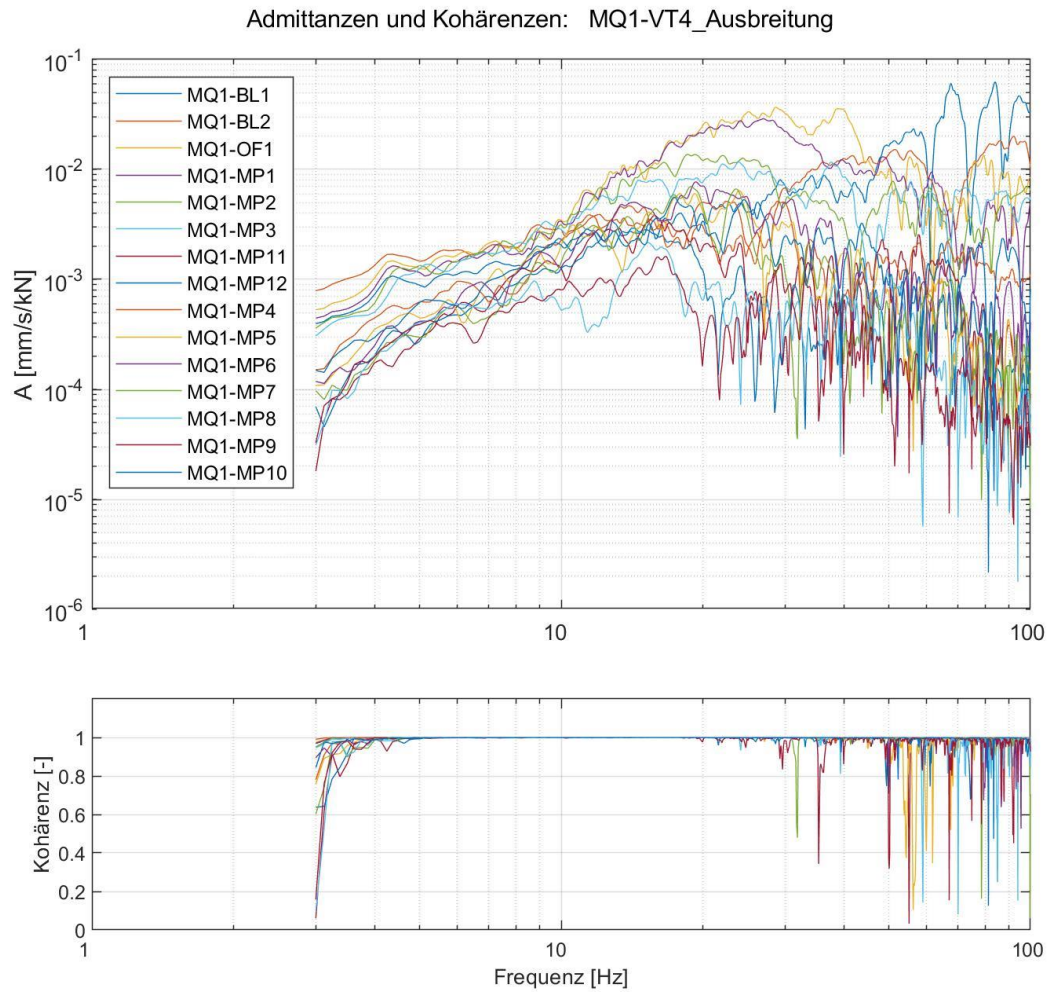


Abbildung 9-7: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)



**Abbildung 9-8: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)**



Admittanzen: MQ1-VT4\_Ausbreitung

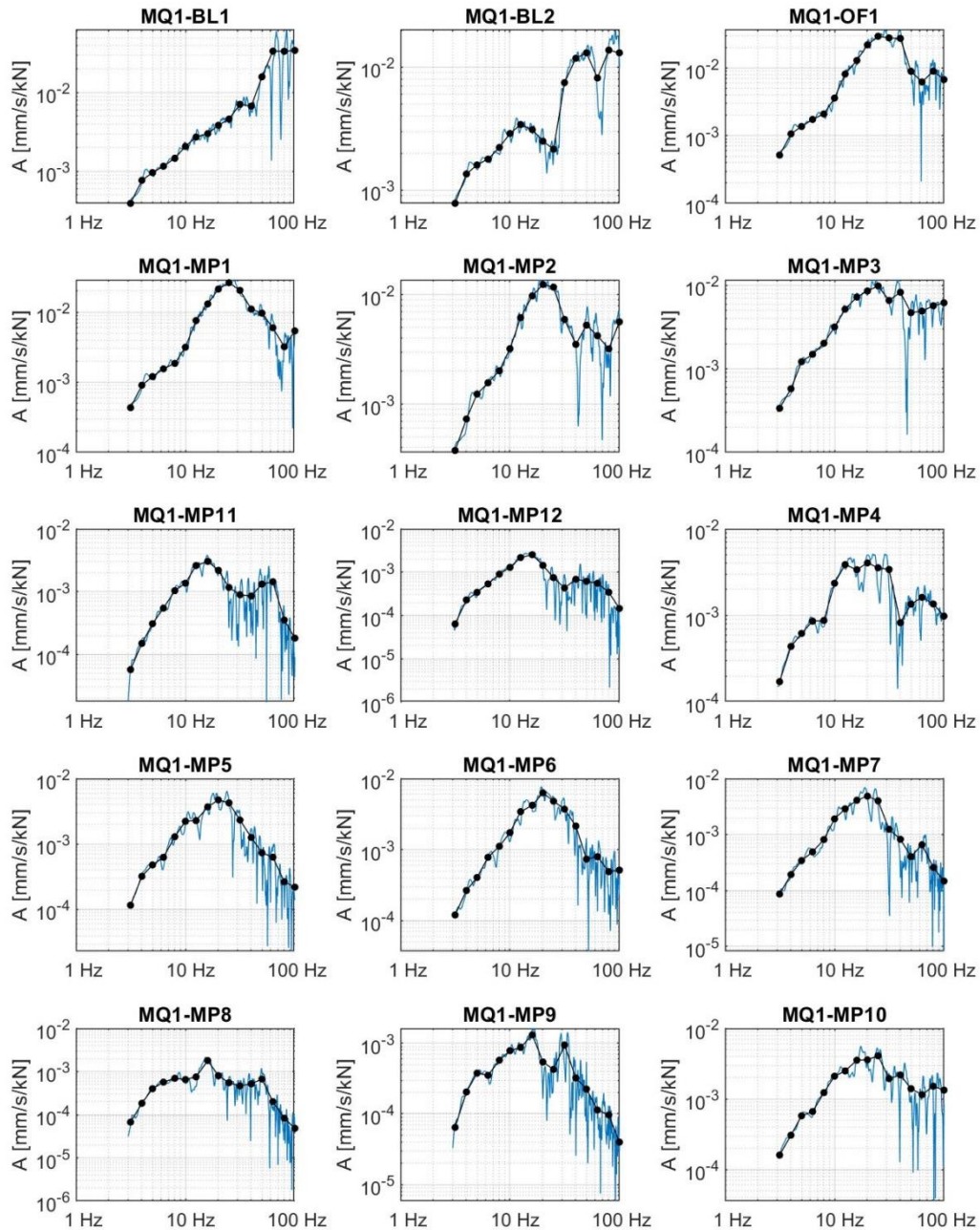
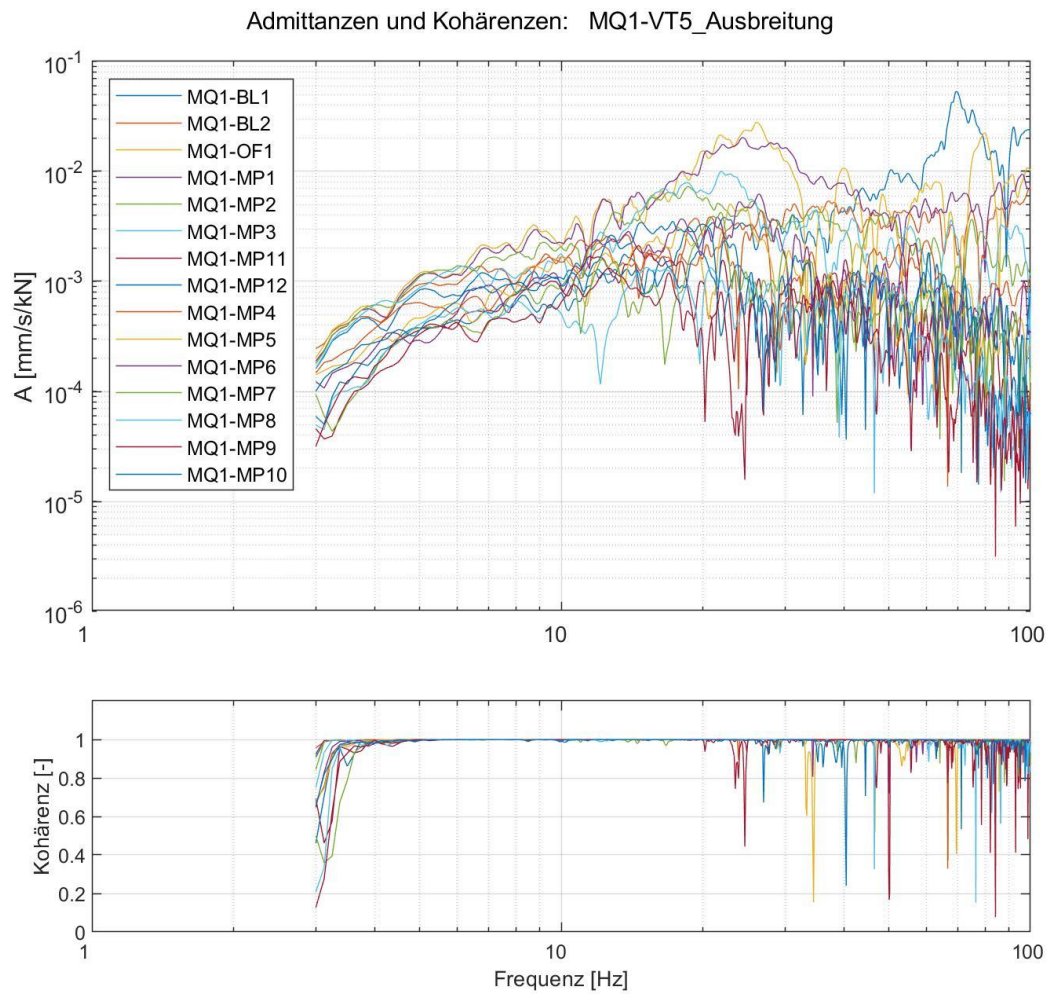


Abbildung 9-9: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)



**Abbildung 9-10: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)**

Admittanzen: MQ1-VT5\_Ausbreitung

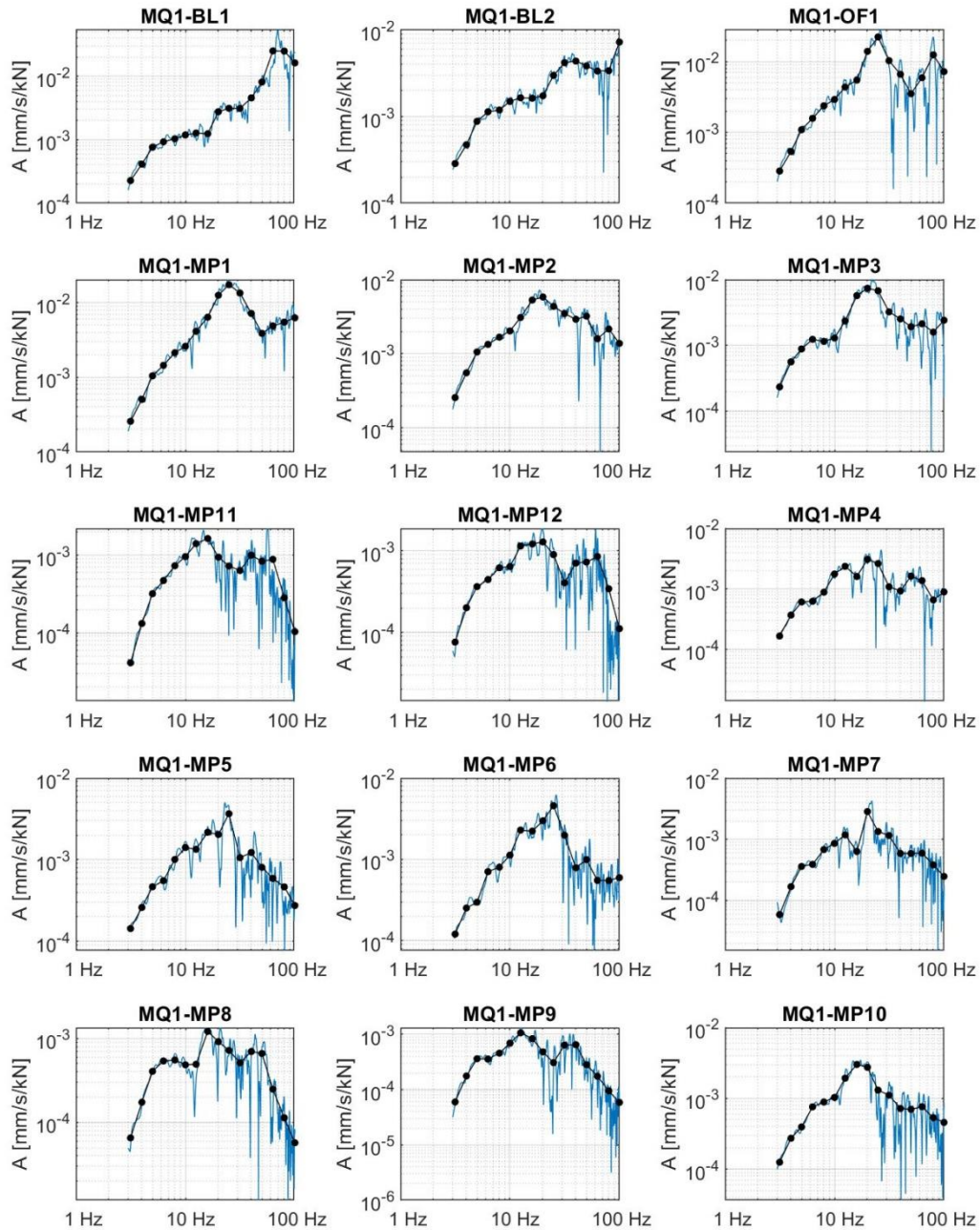
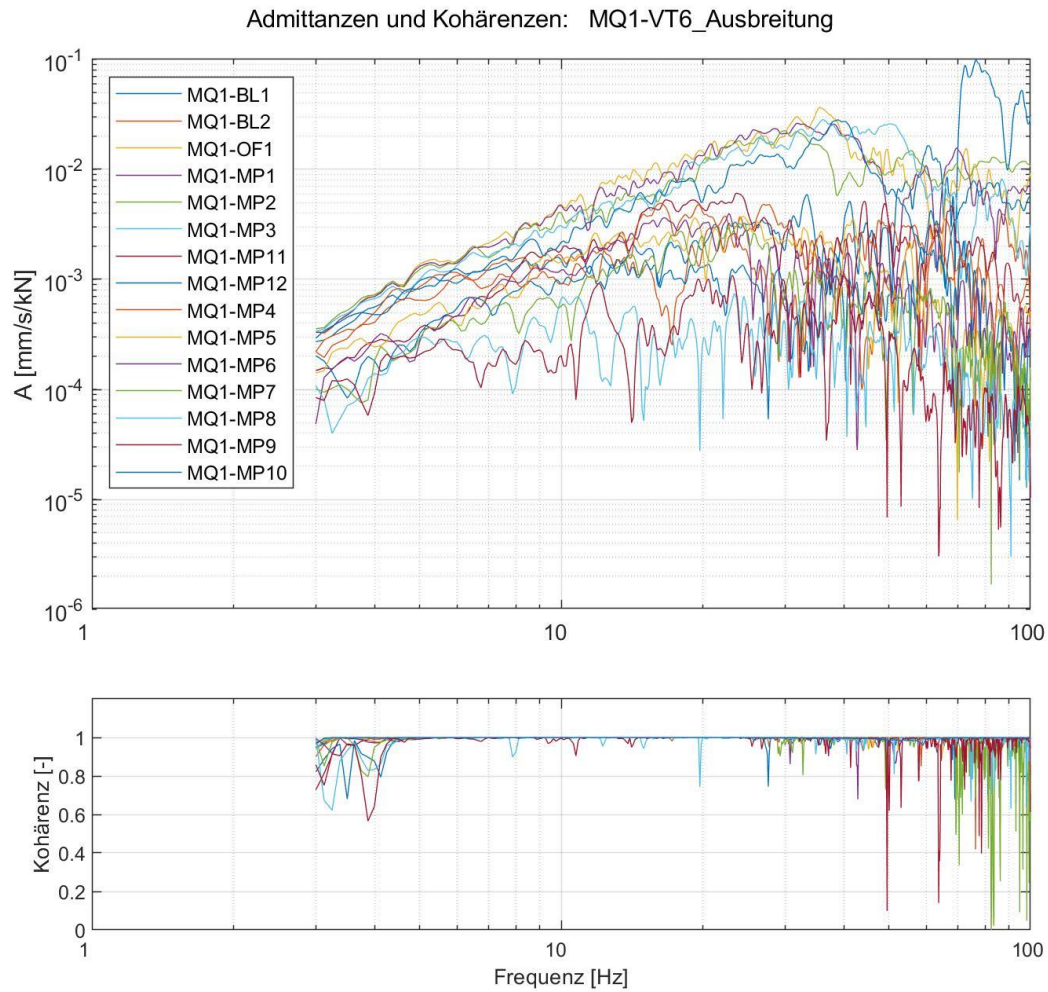


Abbildung 9-11: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)





**Abbildung 9-12: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)**

Admittanzen: MQ1-VT6\_Ausbreitung

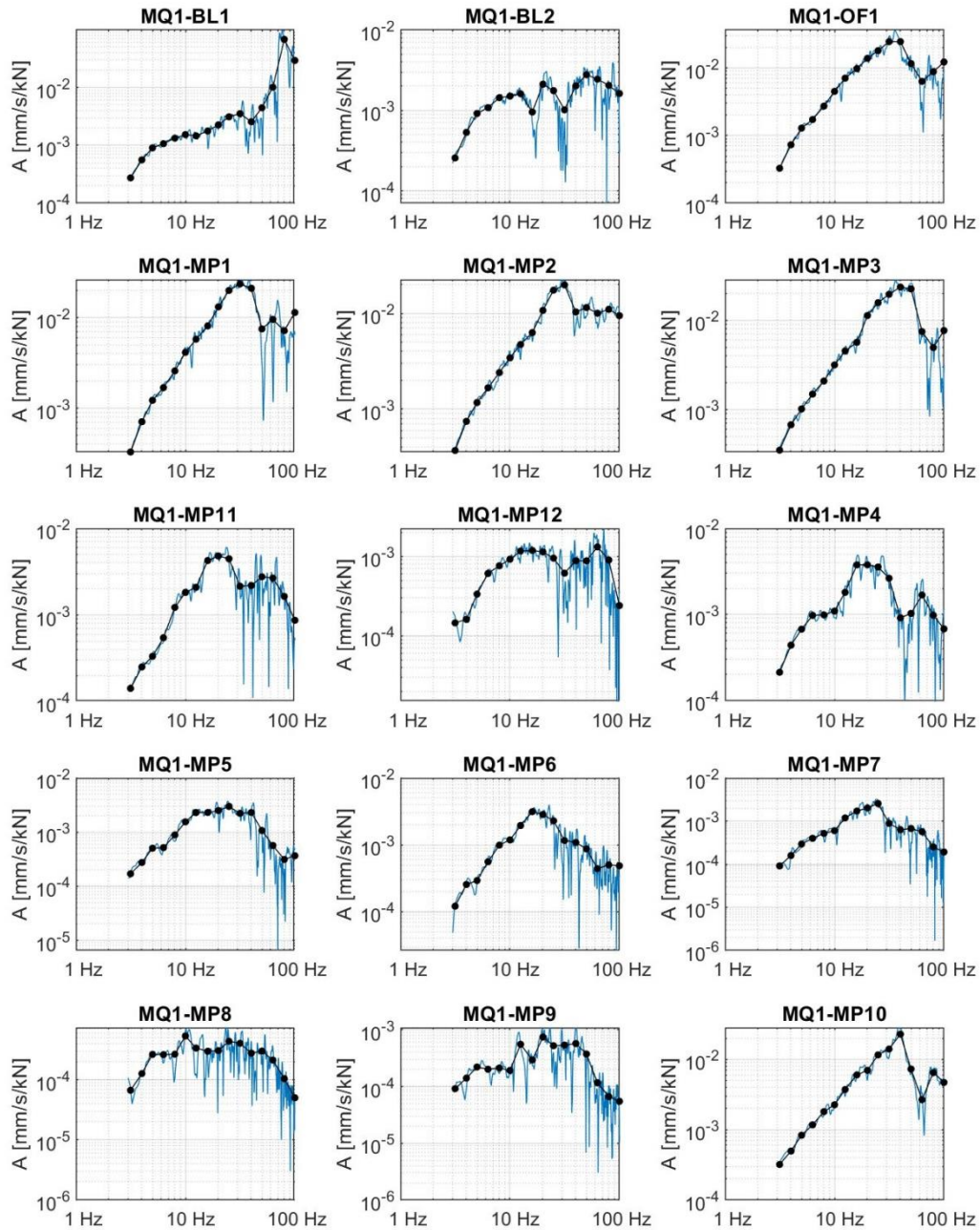


Abbildung 9-13: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)



9.2.5 Ergebnisse der Regressionsanalyse

Für MQ1a:

Der nachfolgenden Regressionsanalyse liegen folgende Mess- und Anregungspunkte zugrunde:

Messpunkte	MP1, MP2, MP3, MP10, MP11, MP12
Anregungspunkte	VT1, VT2, VT3, VT4, VT5

Abnahme Admittanz: Sweep-Anregung VibroTruck

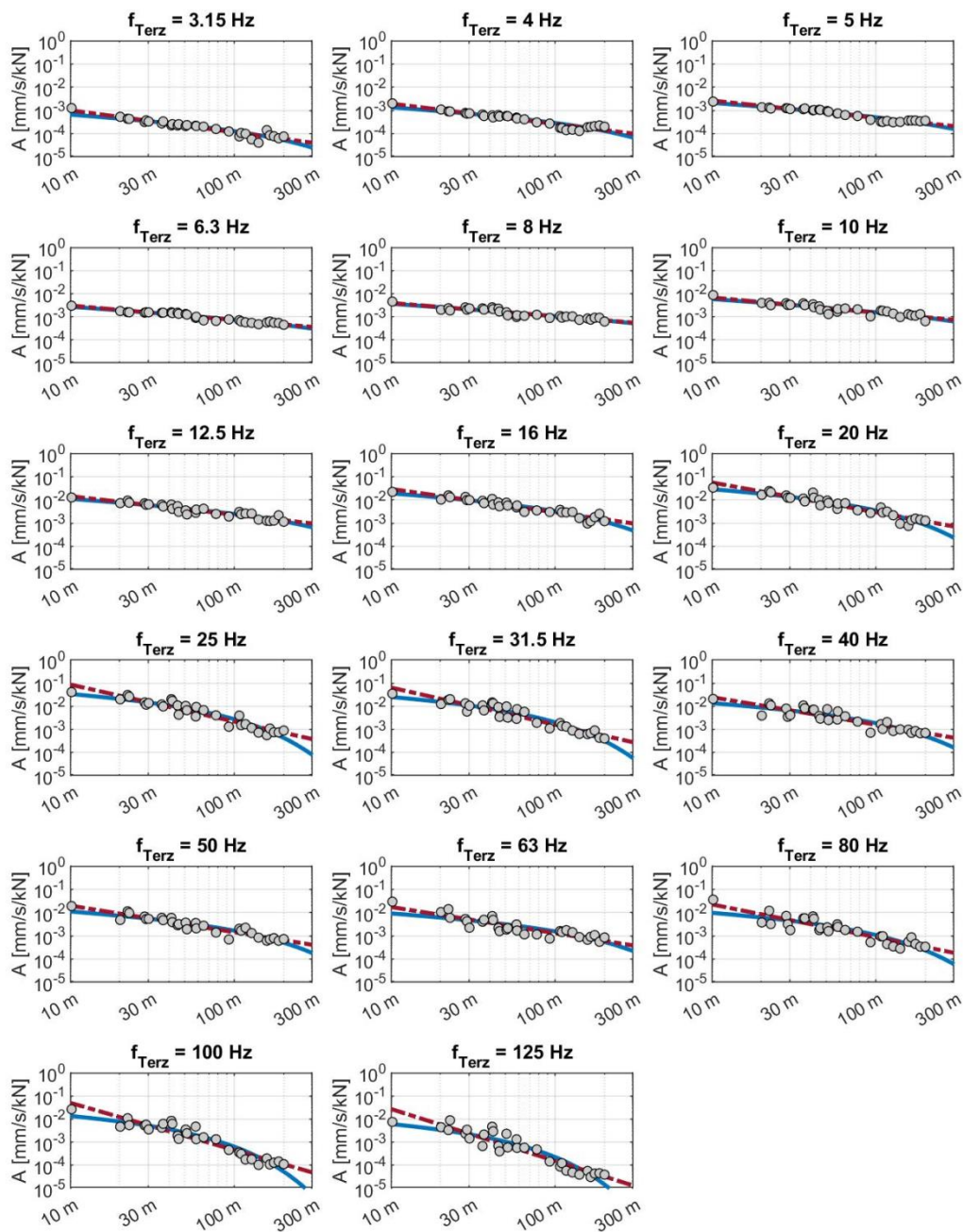


Abbildung 9-14: Ergebnisse der Regressionsanalyse für MQ1a: Abnahme der Admittanzen über die Entfernung (rot=zu Grunde gelegtes Abnahmegesetz)

MQ1b:

Projekt: Science City HH Erschütterungsuntersuchung S32 Bericht-Nr.: 40-10714-01-D6 (Rev.A)	Erschütterungs- und Magnetfeldimmissionen durch die S-Bahn auf den Forschungscampus Bahnenfeld	Seite 146/439
--	---	---------------

Der nachfolgenden Regressionsanalyse liegen folgende Mess- und Anregungspunkte zugrunde:

Messpunkte	MP1, MP2, MP3, MP4, MP5, MP6, MP7, MP8, MP9, MP10
Anregungspunkte	VT1, VT2, VT3, VT4, VT5,

Abnahme Admittanz: Sweep-Anregung VibroTruck

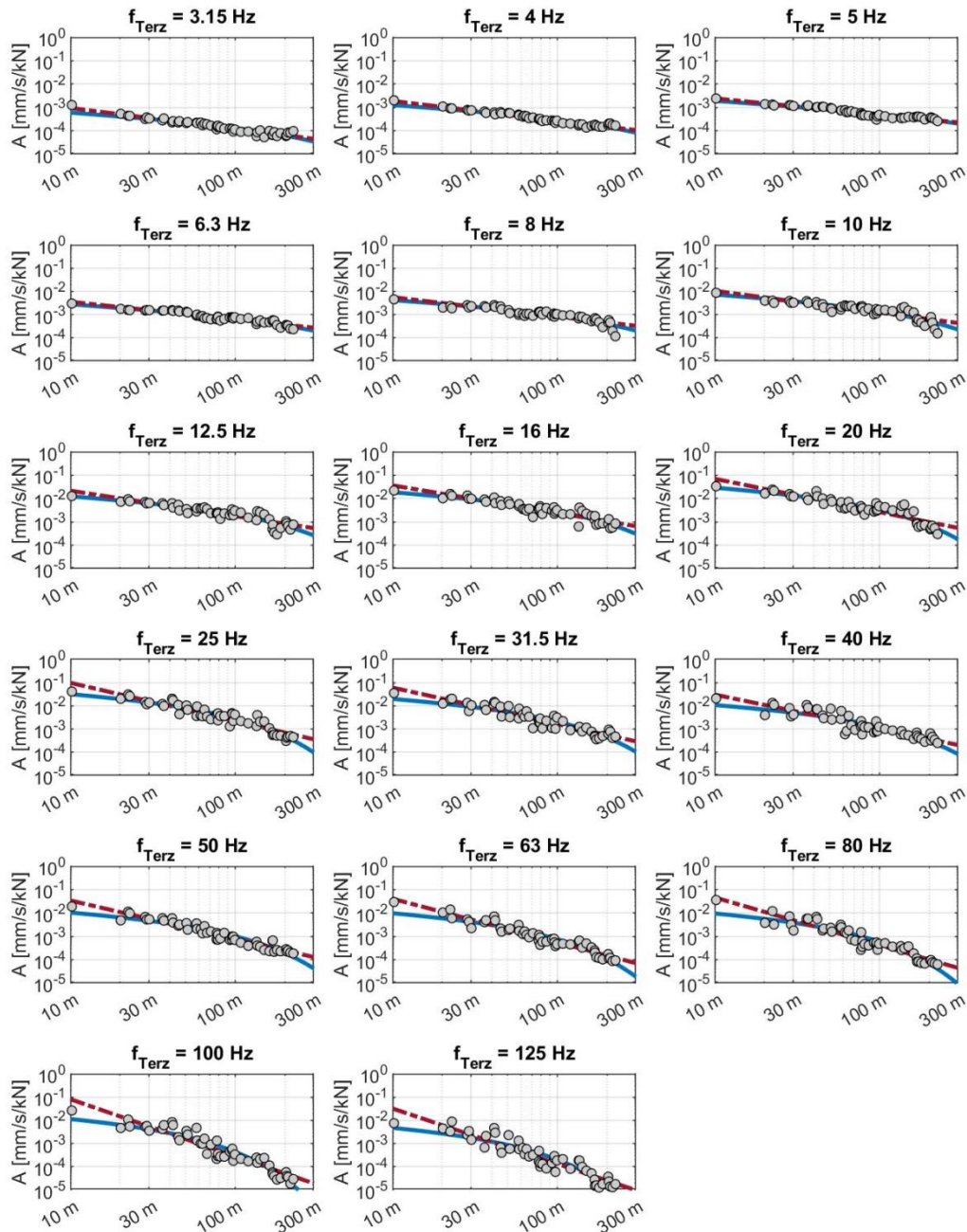


Abbildung 9-15: Ergebnisse der Regressionsanalyse für MQ1b: Abnahme der Admittanzen über die Entfernung (rot=zu Grunde gelegtes Abnahmegezet)

## 9.2.6 Ergebnisse der Übertragungsadmittanz infolge Mehrpunktanregung

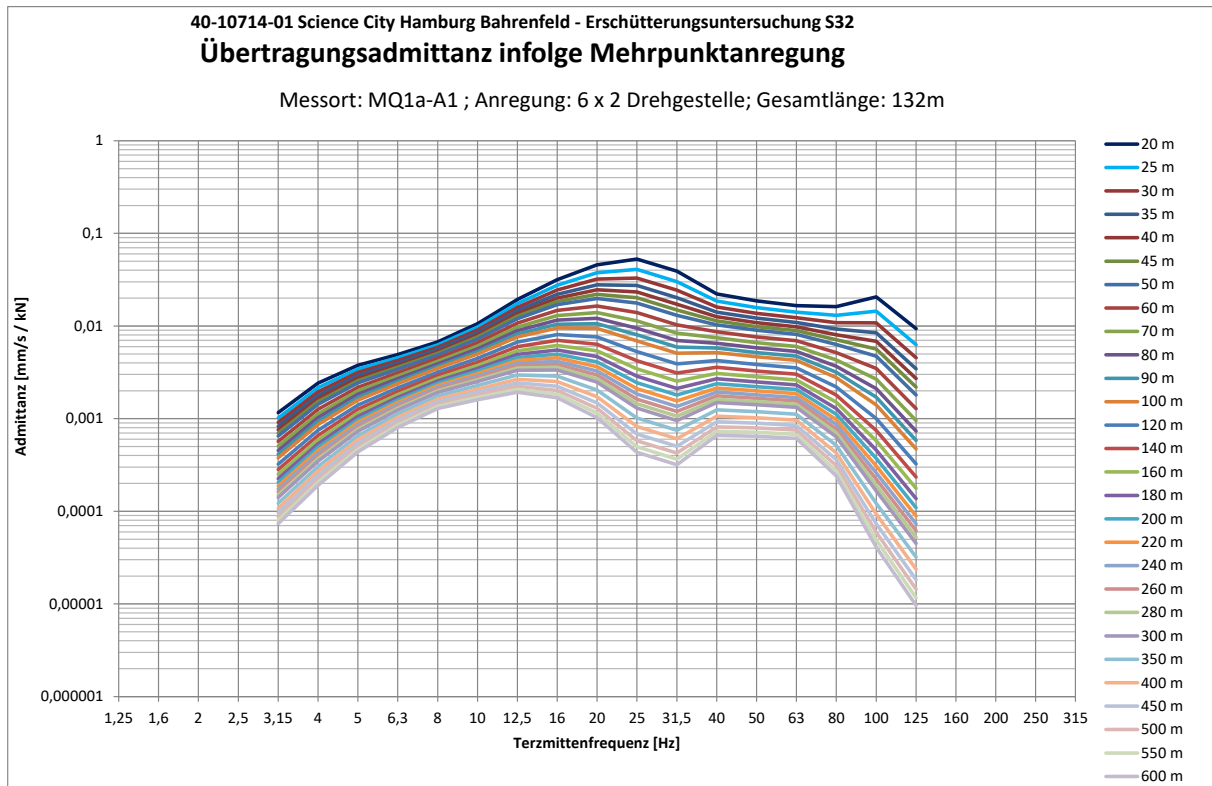


Abbildung 9-16: Ergebnisse der Übertragungsadmittanz infolge Mehrpunktanregung für MQ1a

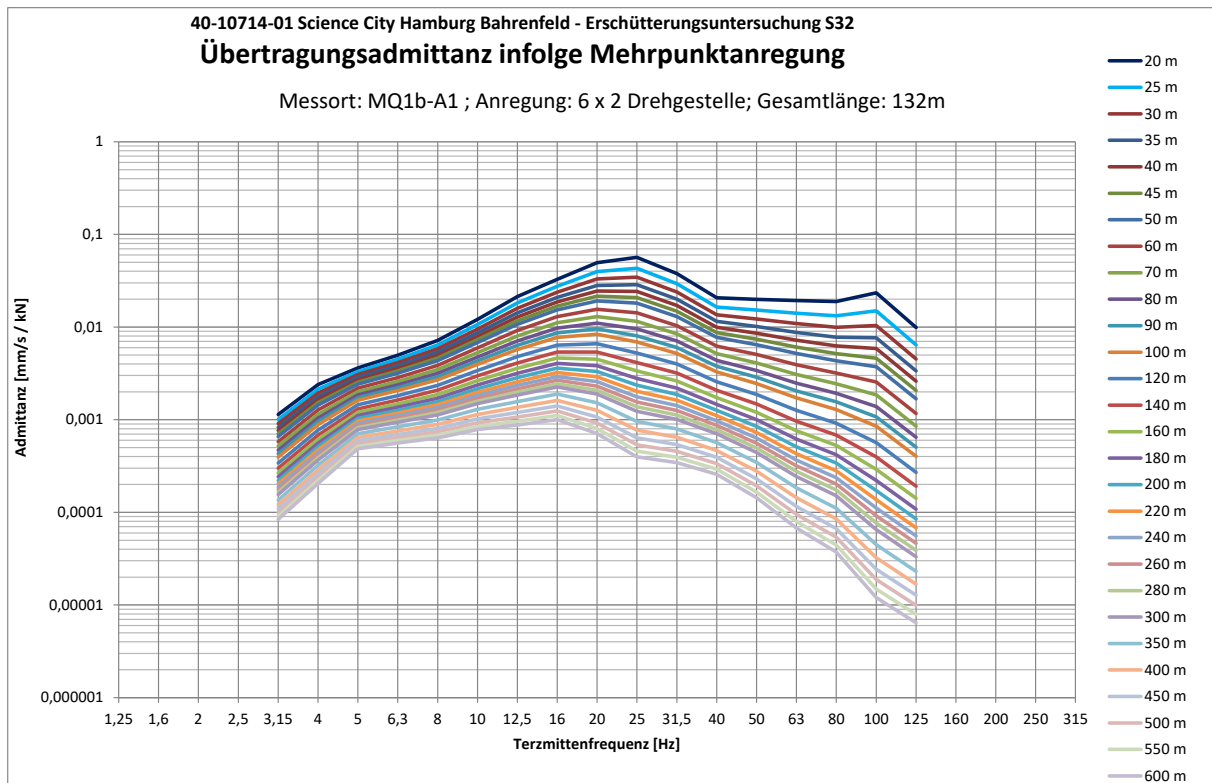


Abbildung 9-17: Ergebnisse der Übertragungsadmittanz infolge Mehrpunktanregung für MQ1b



MQ2-OF1	21,3	6,7	22,0	39,1	54,8	74,5
MQ2-MP1	20,7	9,5	24,8	41,9	57,3	76,9
MQ2-MP2	26,3	19,9	31,3	46,7	61,2	80,2
MQ2-MP3	34,2	29,8	38,8	52,3	65,8	83,9
MQ2-MP4-	40,1	36,0	43,6	55,9	68,6	86,1
MQ2-MP5	74,0	51,4	33,2	17,6	10,6	24,0
MQ2-MP6	77,8	55,8	39,0	26,2	20,7	28,9
MQ2-MP7	85,1	63,8	48,1	36,4	30,2	33,7
MQ2-MP8	120,8	102,6	90,2	81,0	74,7	71,4
MQ2-MP9	140,6	126,0	116,9	111,0	107,0	105,7
MQ2-MP10	162,9	151,4	145,0	141,4	139,1	139,2
MQ2-MP11	115,6	109,7	109,4	112,3	116,3	124,5

**Tabelle 9-9: Entfernungen [m] der Messpunkte zu den VibroTruck-Anregungspunkten am MQ2**



### 9.3.3 Kanalbelegung und Fotodokumentation der Messpunkte

Kanal	Messpunkt	Lage	Aufstell- bedingung	Sensor	Kabel	Messbereich [mm/s]	
						VibroTruck Anregung	
						VT1-VT4	VT5-VT6
<b>1</b>	VibroTruck	Anregungspunkte VT1-VT6				0-70 [kN]	0-70 [kN]
<b>2</b>	MQ2-BL1	Bohrloch	Bohrsonde	BS4	100/ 120	+/-10	+/-2
<b>3</b>	MQ2-BL2	Bohrloch	Bohrsonde	BS7	100/ 120	+/-10	+/-2
<b>4</b>	MQ2-OF1	neben Bohrloch 1	Spike	G138	100/ 120	+/-10	+/-10
<b>5</b>	MQ2-MP1	10m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G105	38	+/-10	+/-2
<b>6</b>	MQ2-MP2	20m bis Mitte 1. Fahrspur	Dreier-Spitze	G23	139	+/-10	+/-2
<b>7</b>	MQ2-MP3	30m bis Mitte 1. Fahrspur	Dreier-Spitze	G60	139	+/-10	+/-2
<b>8</b>	MQ2-MP4	hinter Brüstung	Tripod	G26	37, 139	+/-2	+/-2
<b>9</b>	MQ2-MP5	10m	Spike	G15	87	+/-2	
<b>10</b>	MQ2-MP6	20m	Spike	G7	148	+/-2	+/-10
<b>11</b>	MQ2-MP7	30m	Dreier-Spitze	G103	148	+/-2	+/-2
<b>12</b>	MQ2-MP8			G107	40, 148	+/-2	+/-2
<b>13</b>	MQ2-MP9			G6	30, 208	+/-2	+/-2
<b>14</b>	MQ2-MP10			G8	58, 208	+/-2	+/-2
<b>15</b>	MQ2-MP11			G94	48, 208	+/-2	+/-2

**Tabelle 9-10: Messpunkte am MQ2**

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 [5].

	
MQ2-BL1	MQ2-BL2
	
MQ2-OF1-z	MQ2-MP1-z
	
MQ2-MP2-z	MQ2-MP3-z
	
MQ2-MP4-z	MQ2-MP8-z



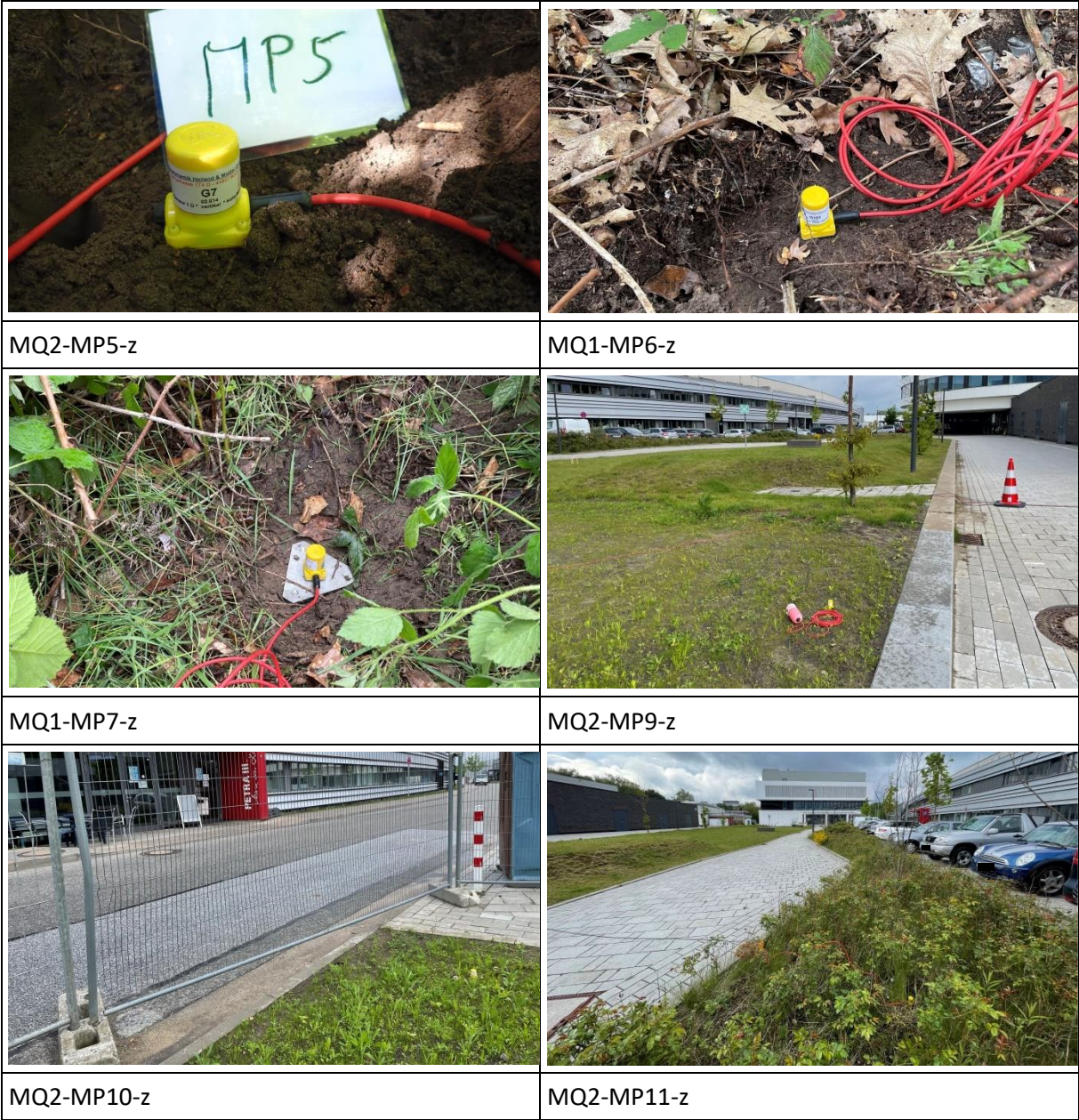


Tabelle 9-11: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ2 bei VibroTruck Anregung

Folgende Messungen wurden mit dem VibroTruck am Referenzquerschnitt MQ2 durchgeführt:

Bezeichnung	Inhalt	GPS Zeitstempel des jeweils 1. Sweeps
Abklopfen	QS-Prüfung	-
MQ2-VT1	log. Sweep 3-120Hz am MQ2-VT1	21/05/26 07:47:42:520000
MQ2-VT2	log. Sweep 3-120Hz am MQ2-VT2	21/05/26 07:54:59:652000
MQ2-VT3	log. Sweep 3-120Hz am MQ2-VT3	21/05/26 08:01:55:624000
MQ2-VT4	log. Sweep 3-120Hz am MQ2-VT4	21/05/26 08:08:54:868000
MQ2-VT5	log. Sweep 3-120Hz am MQ2-VT5	21/05/26 08:17:59:556000
MQ2-VT6	log. Sweep 3-120Hz am MQ2-VT6	21/05/26 08:25:59:236000

Tabelle 9-12: Auflistung der durchgeführten Messungen am MQ2 mit VibroTruck

### 9.3.4 Ergebnisse der Baugrundadmittanzen

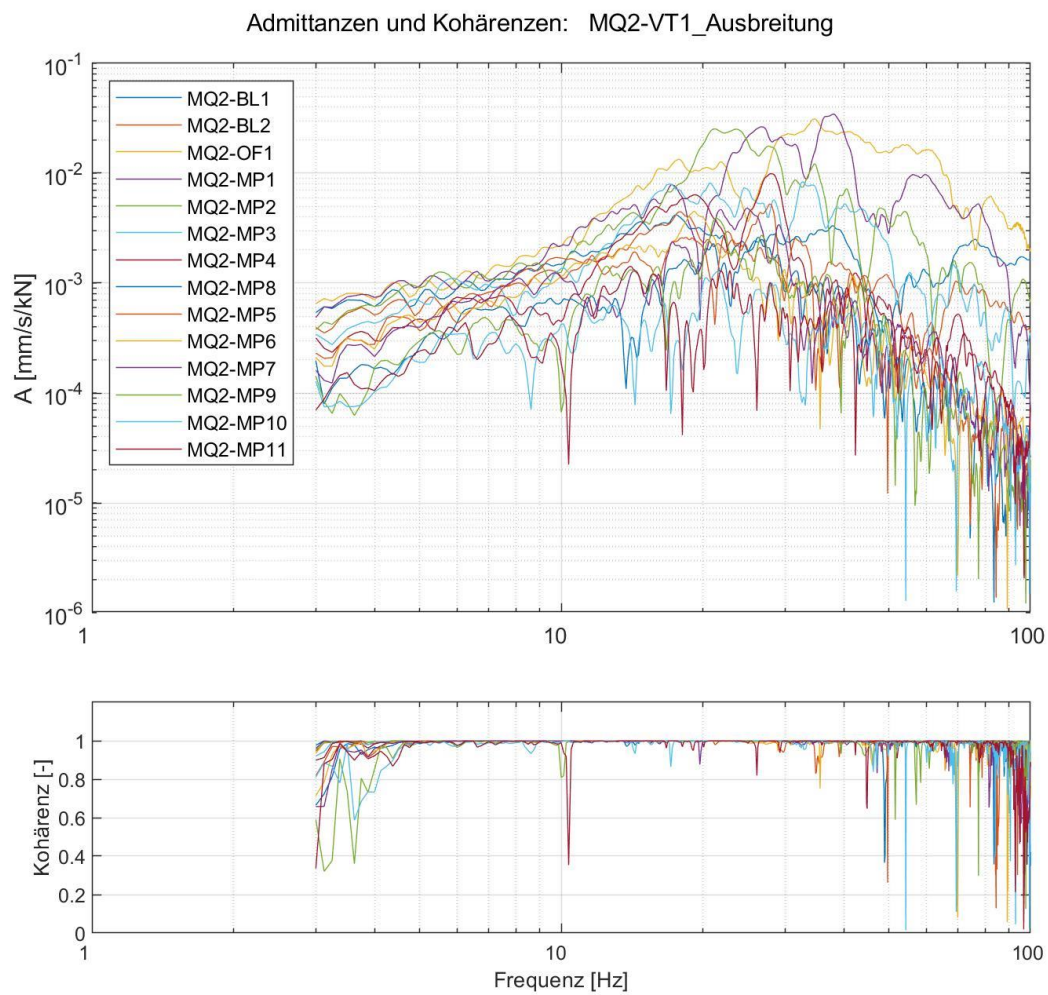


Abbildung 9-19: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)



Admittanzen: MQ2-VT1\_Ausbreitung

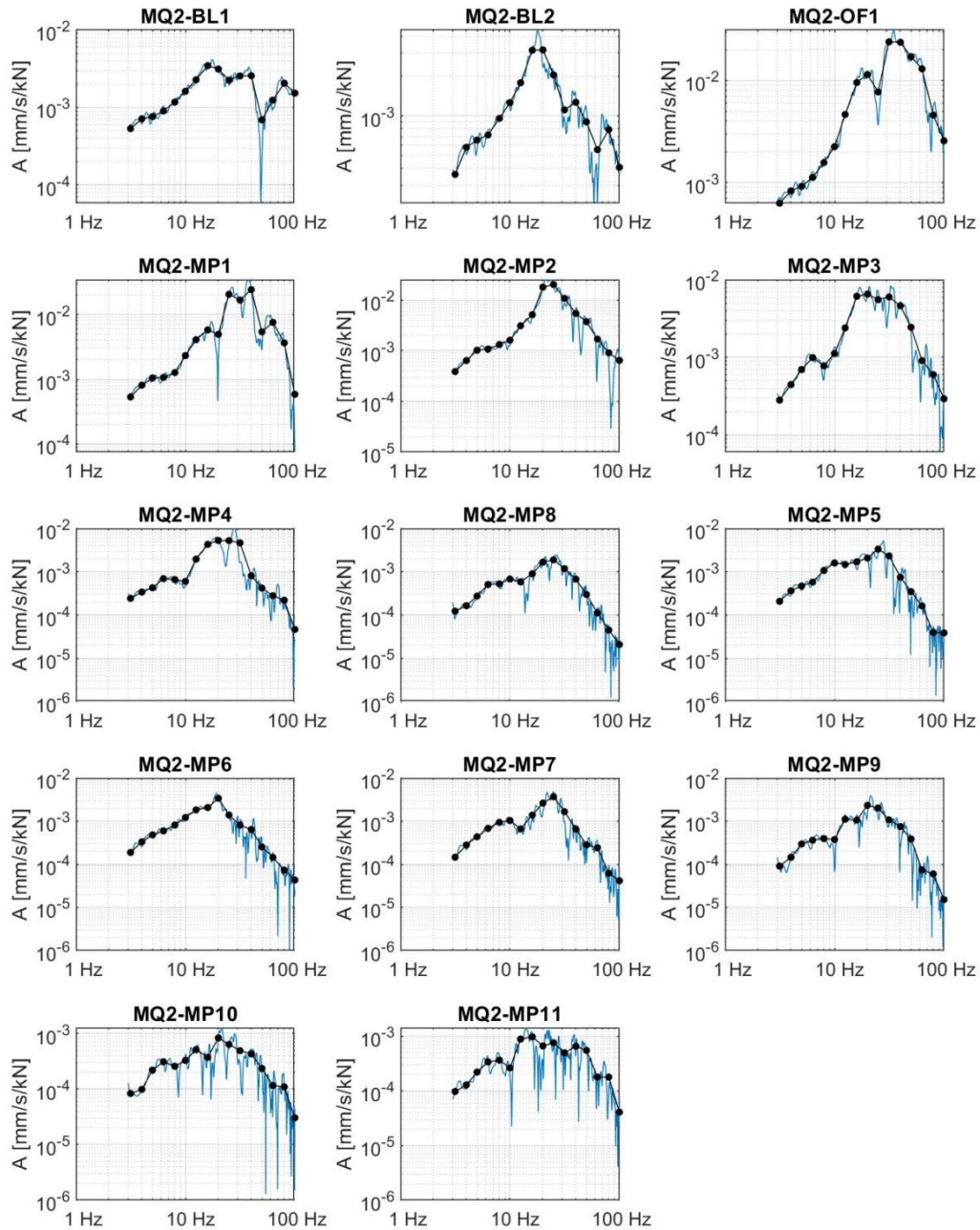


Abbildung 9-20: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)



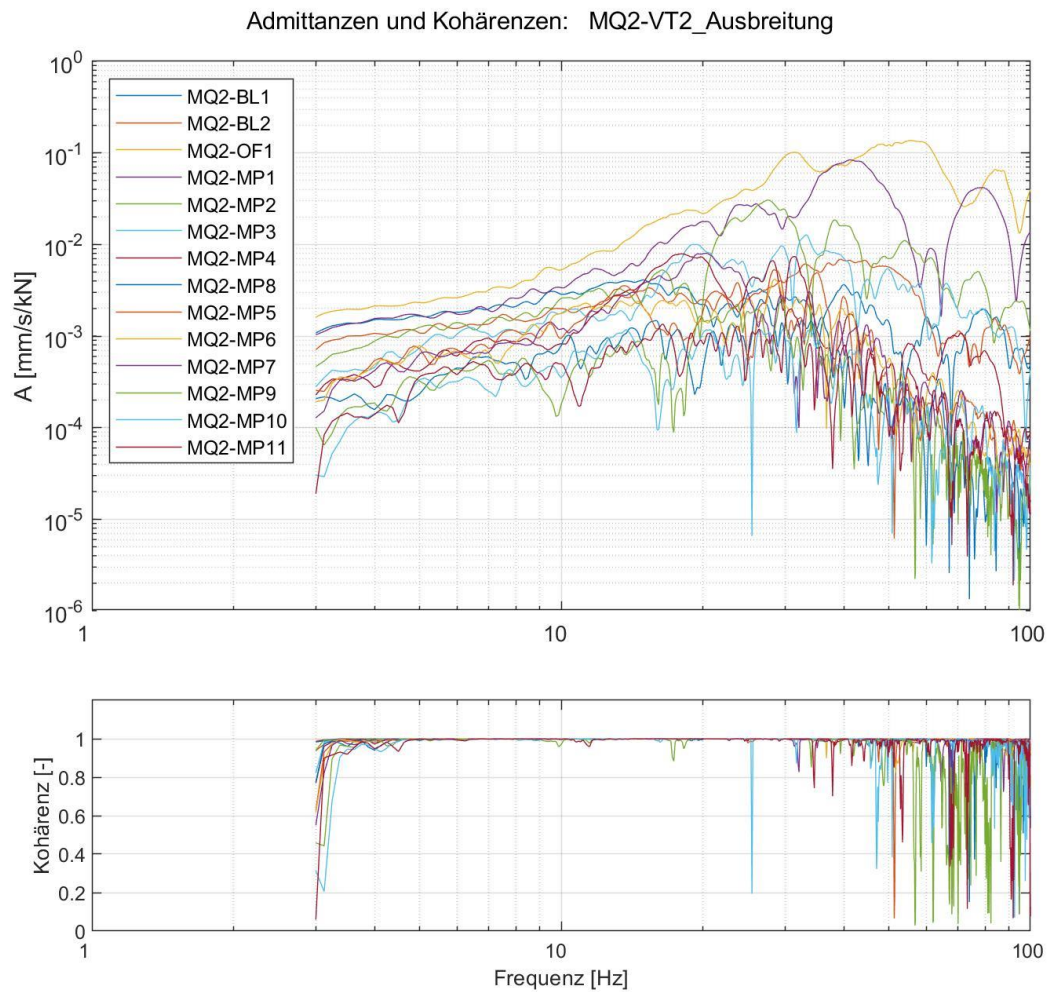


Abbildung 9-21: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

Admittanzen: MQ2-VT2\_Ausbreitung

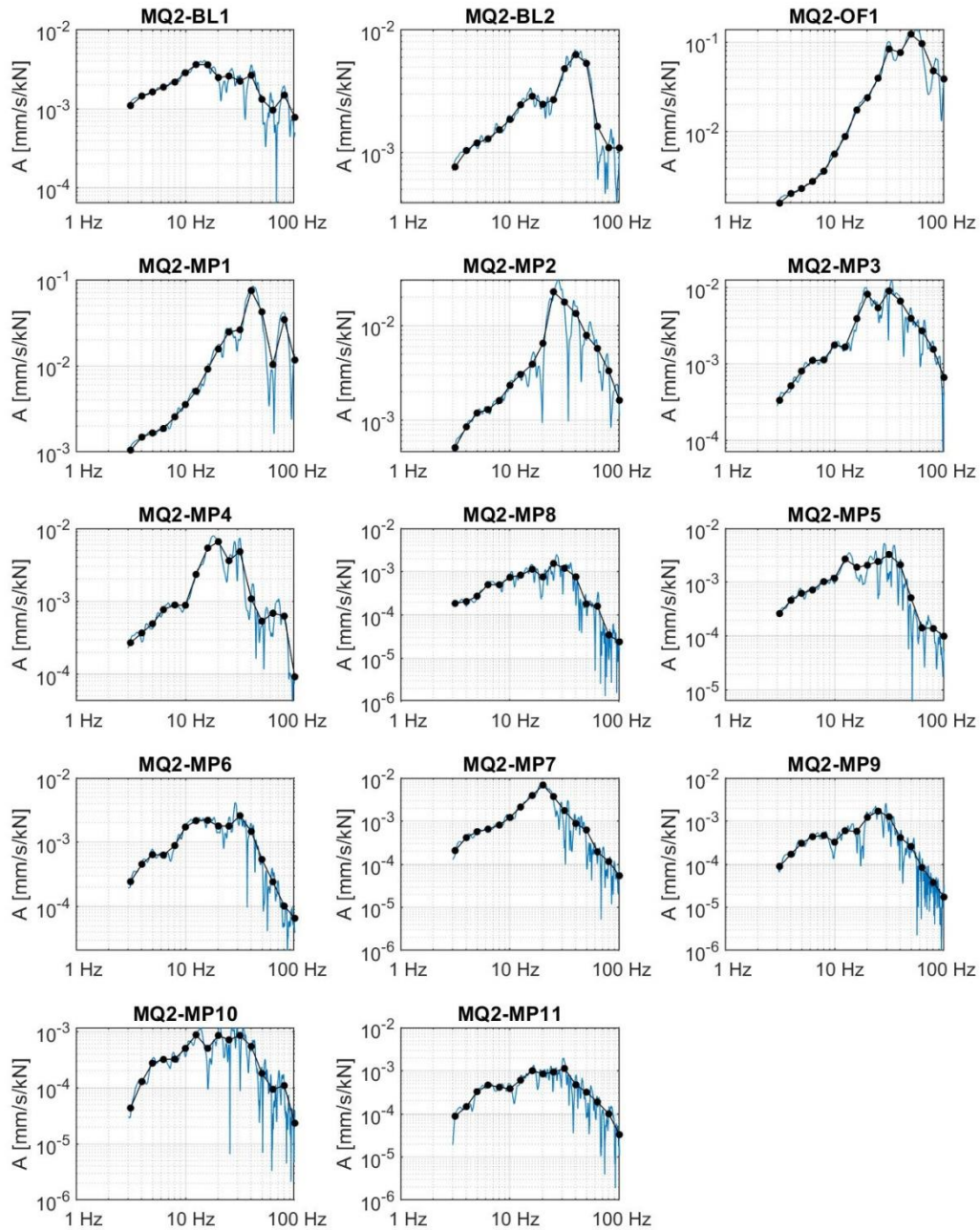


Abbildung 9-22: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

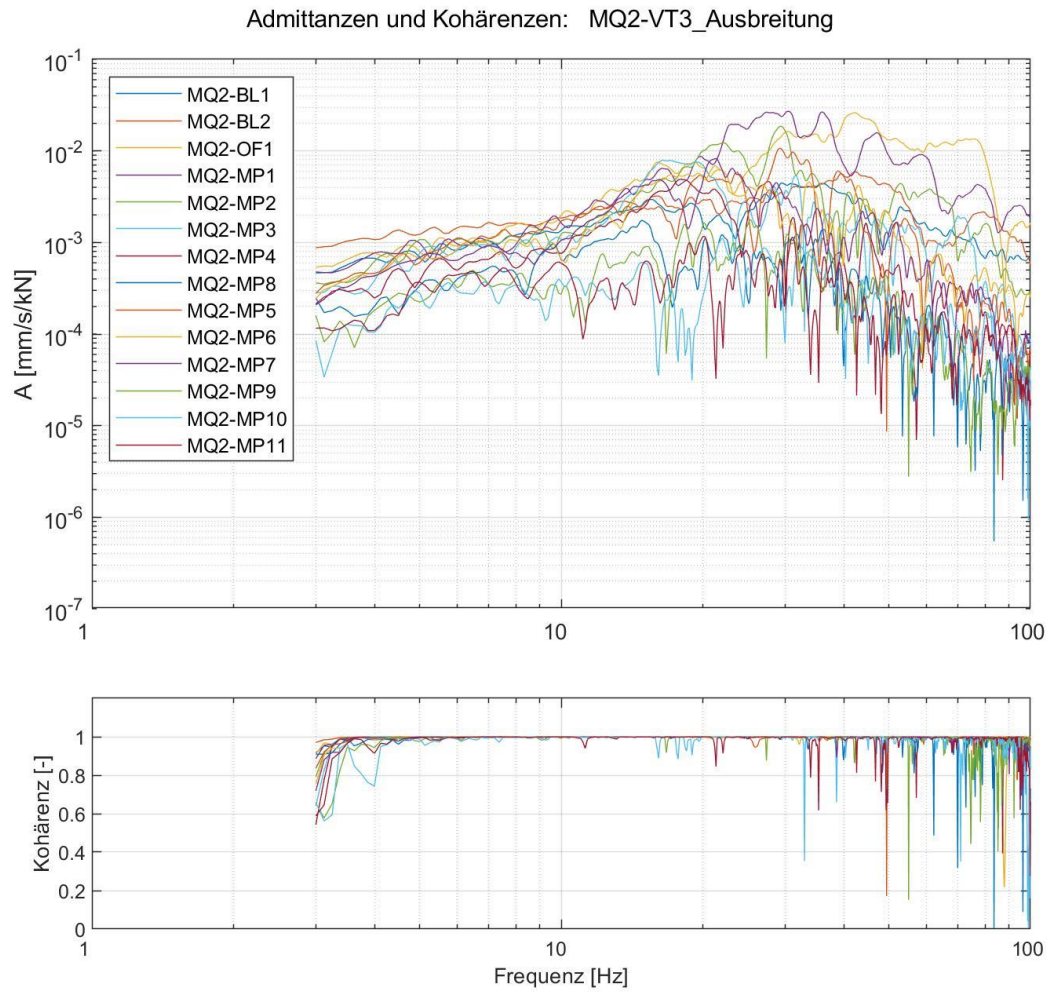


Abbildung 9-23: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

Admittanzen: MQ2-VT3\_Ausbreitung

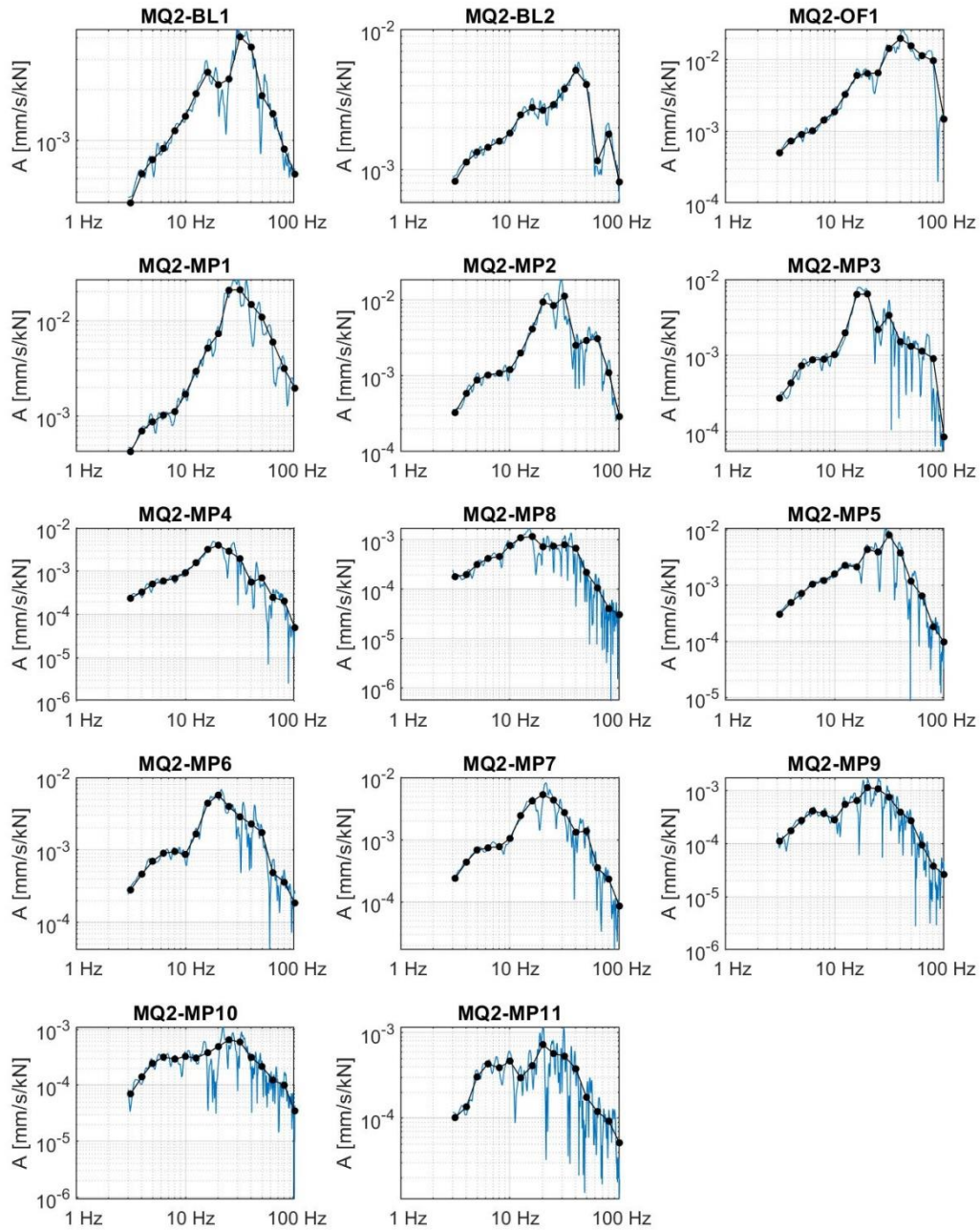


Abbildung 9-24: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)



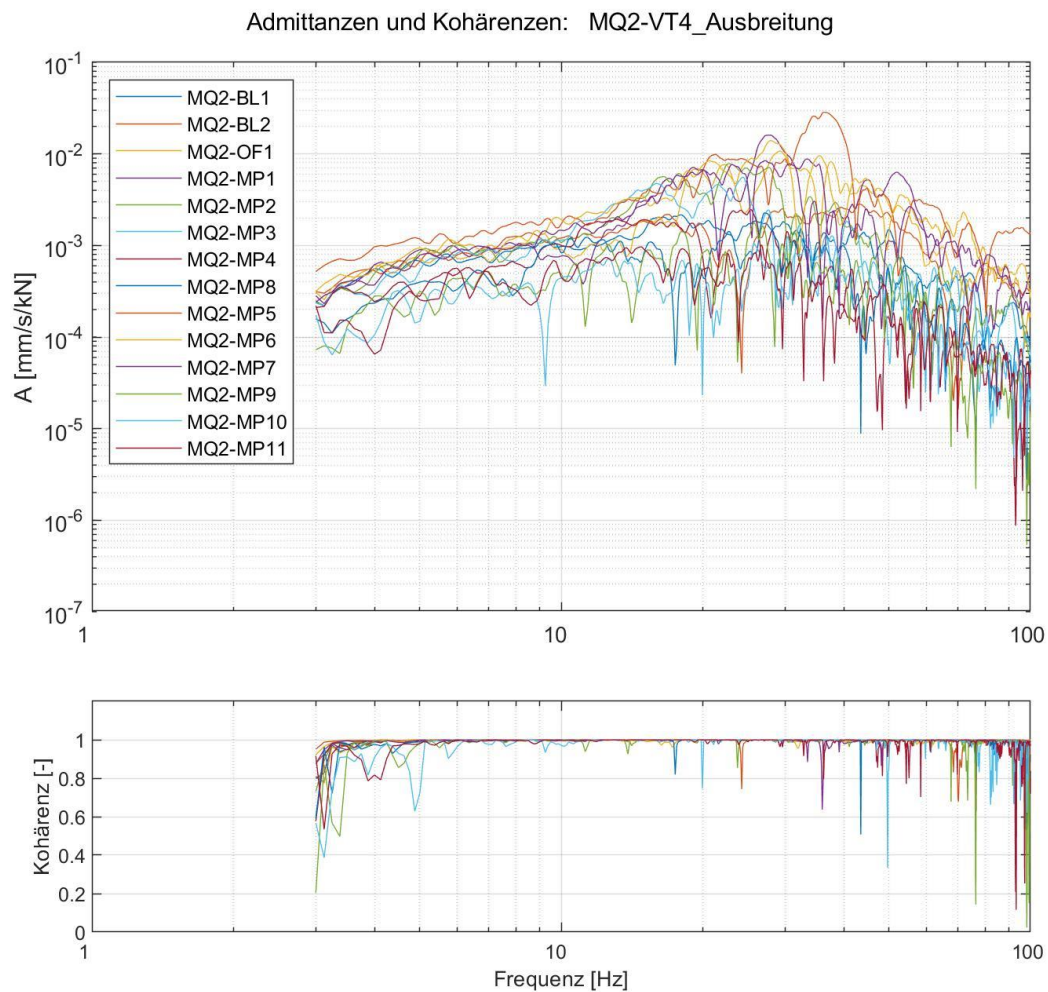


Abbildung 9-25: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)



Admittanzen: MQ2-VT4\_Ausbreitung

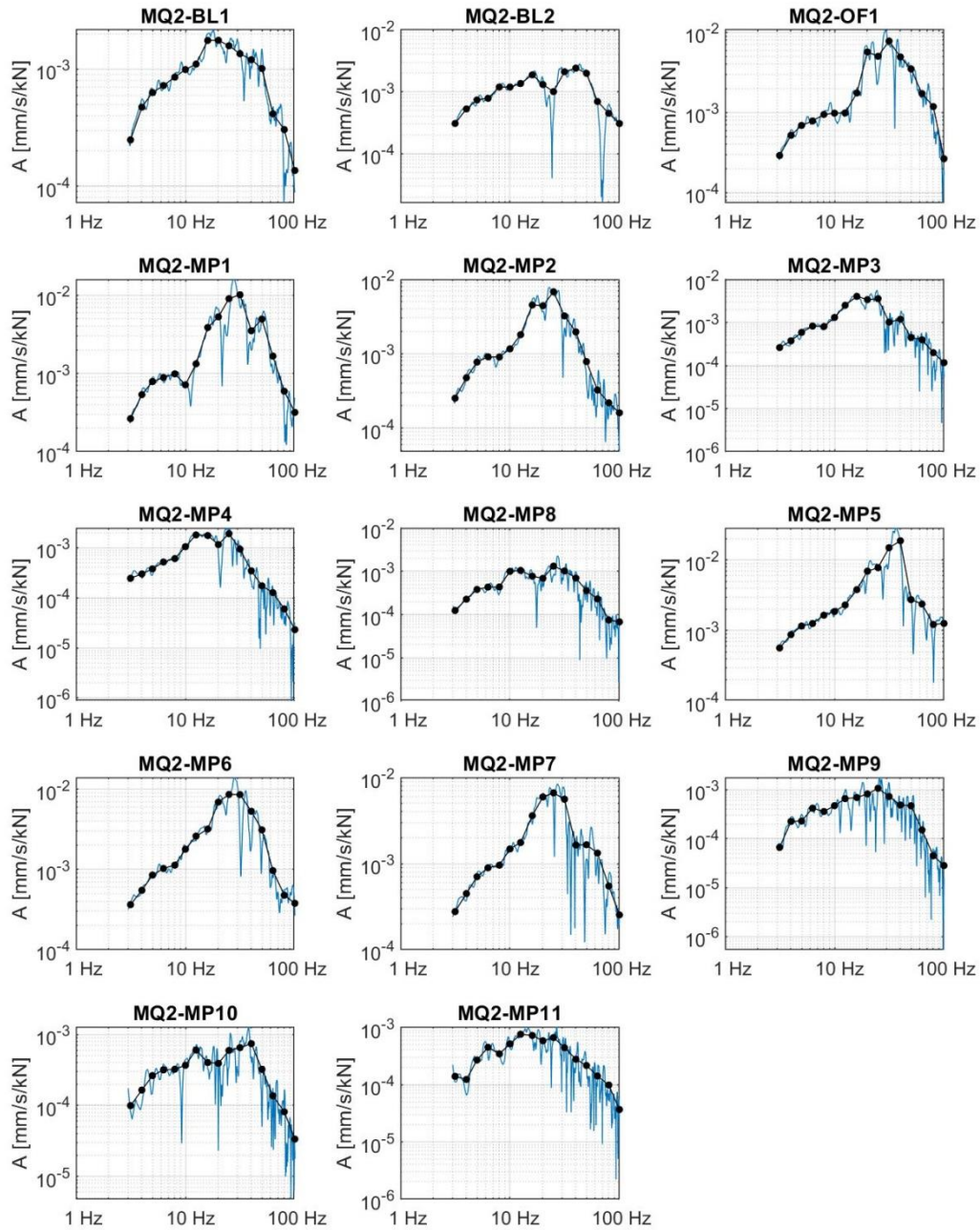
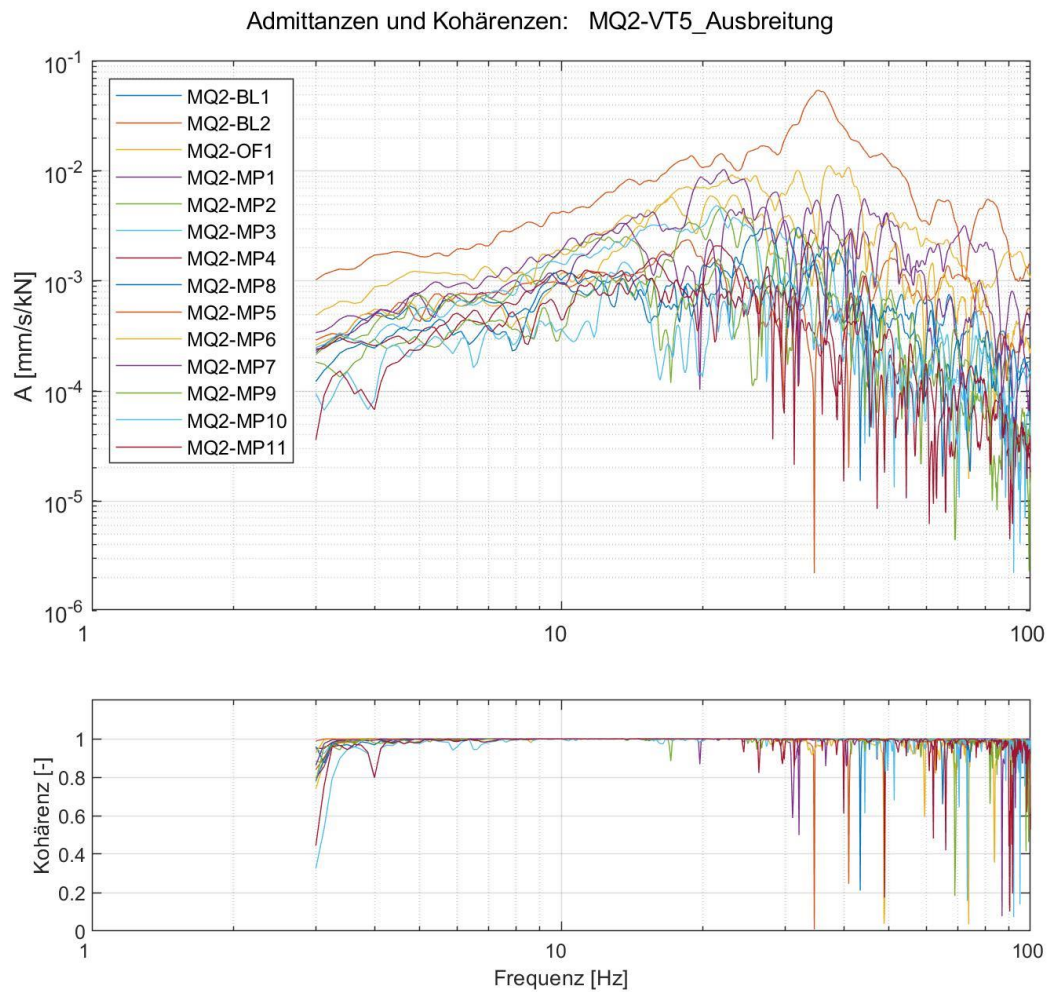


Abbildung 9-26: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)



**Abbildung 9-27: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)**

Admittanzen: MQ2-VT5\_Ausbreitung

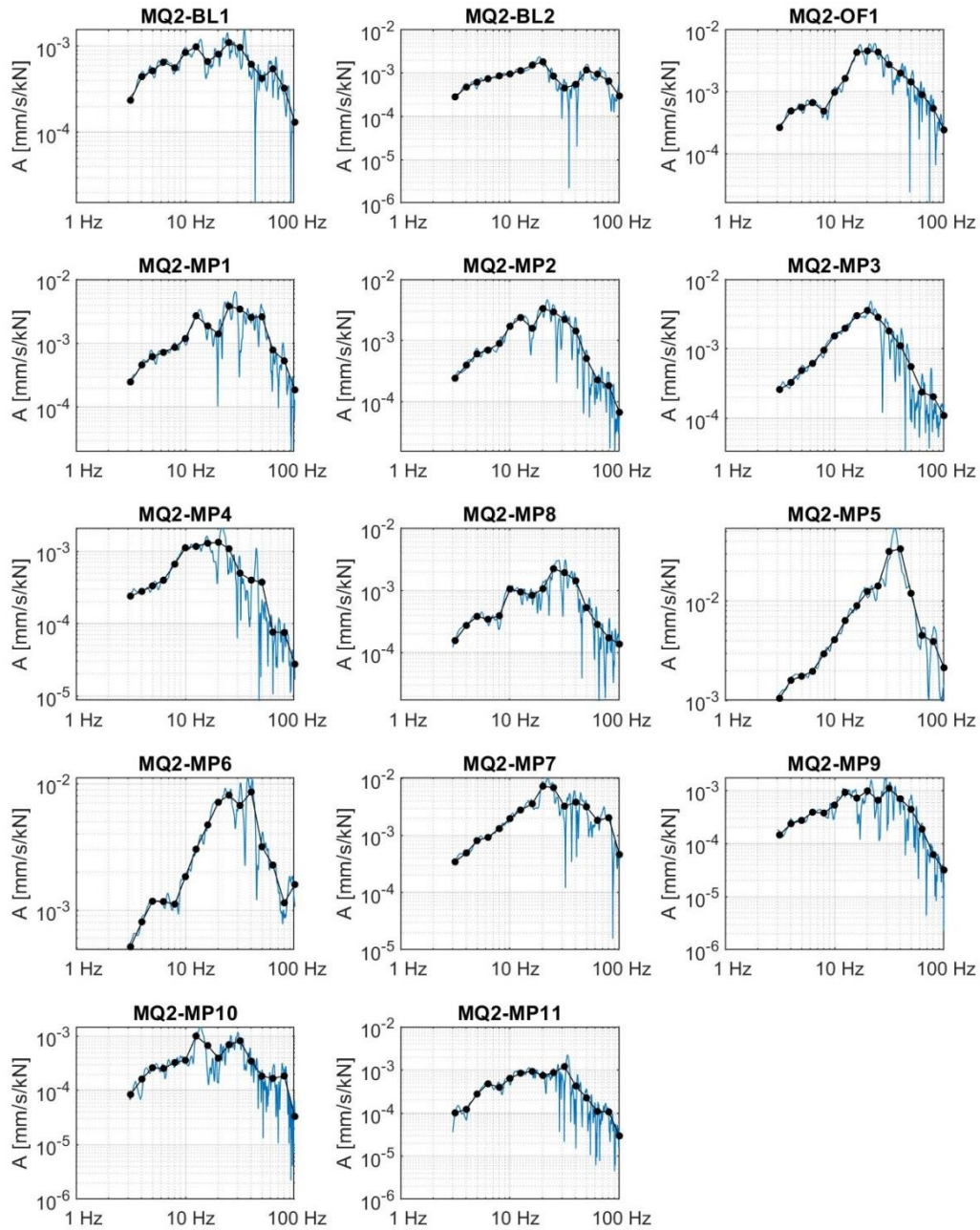


Abbildung 9-28: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

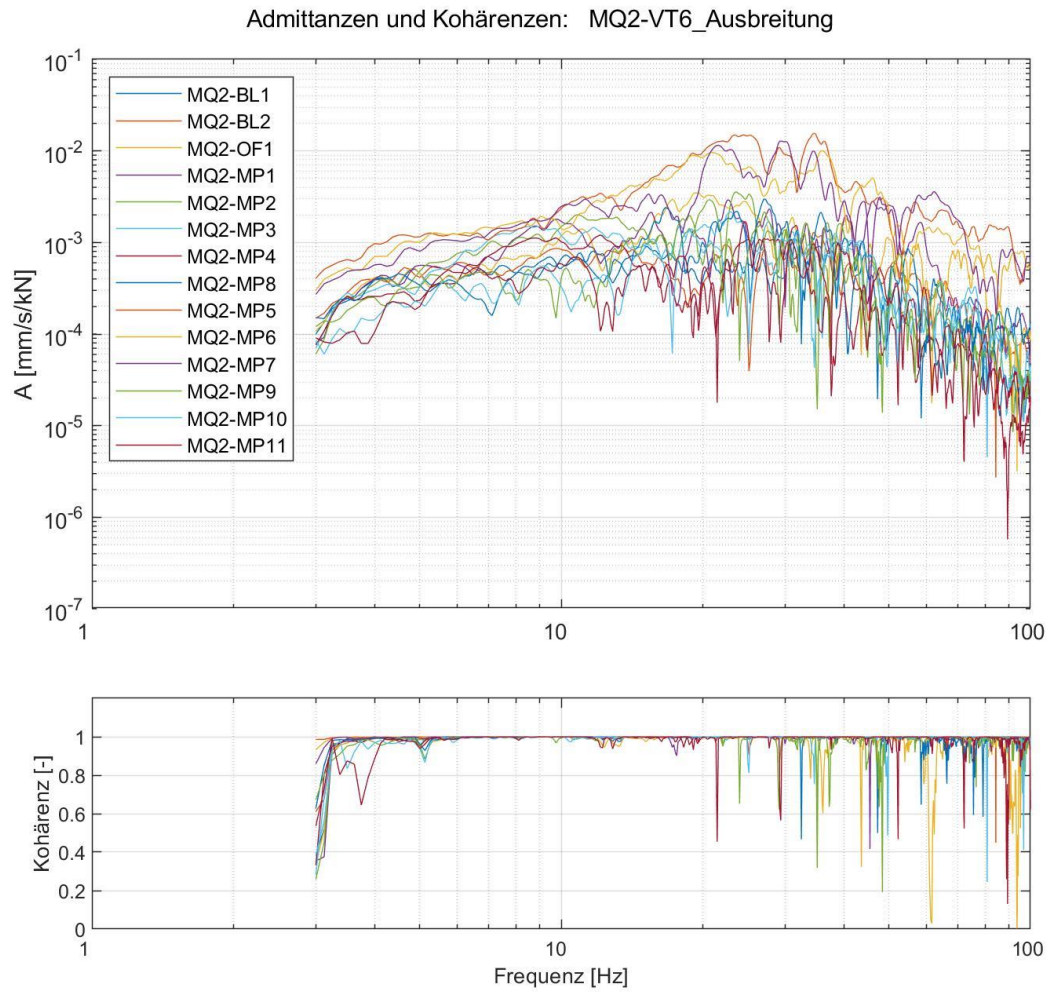


Abbildung 9-29: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)



Admittanzen: MQ2-VT6\_Ausbreitung

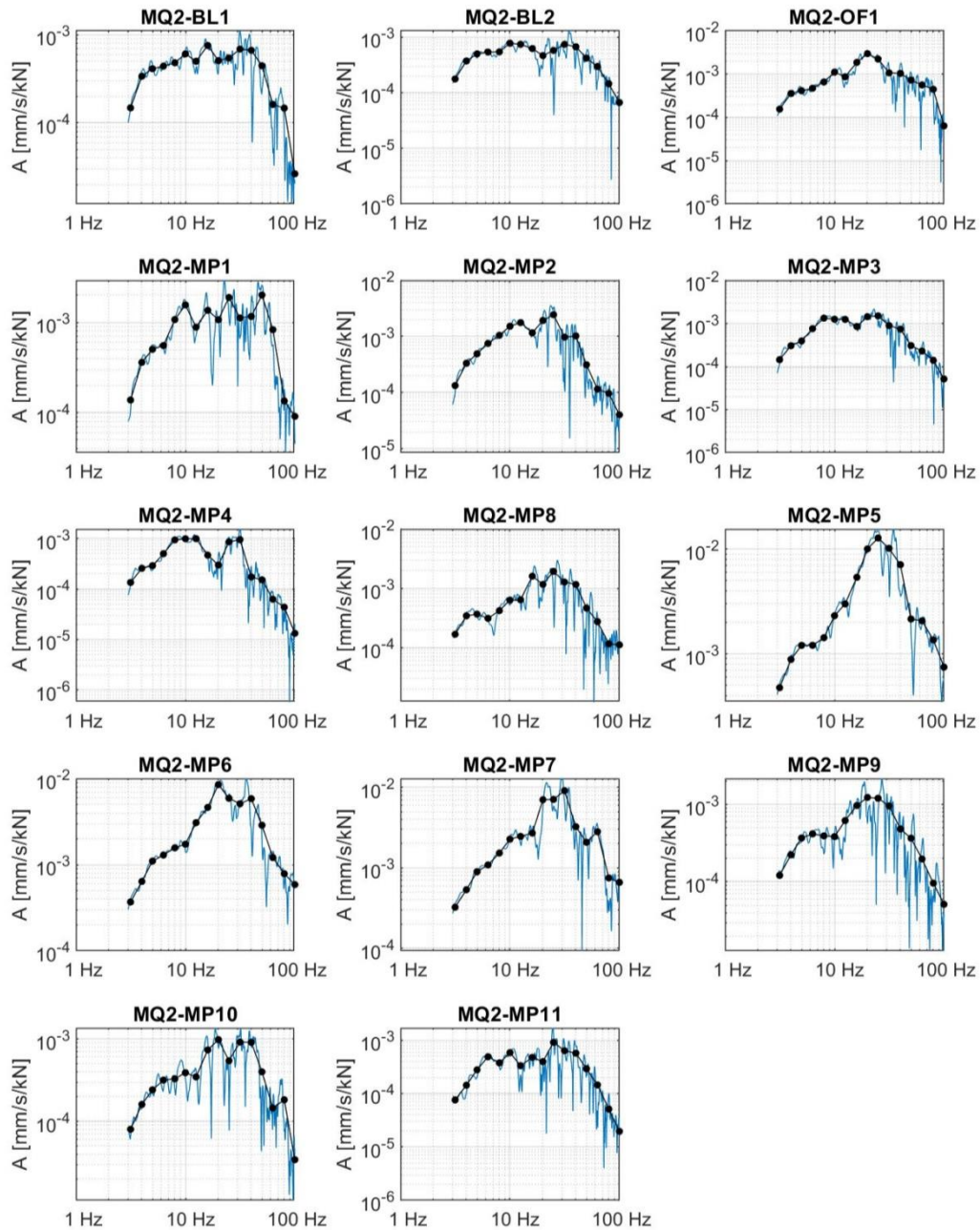


Abbildung 9-30: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

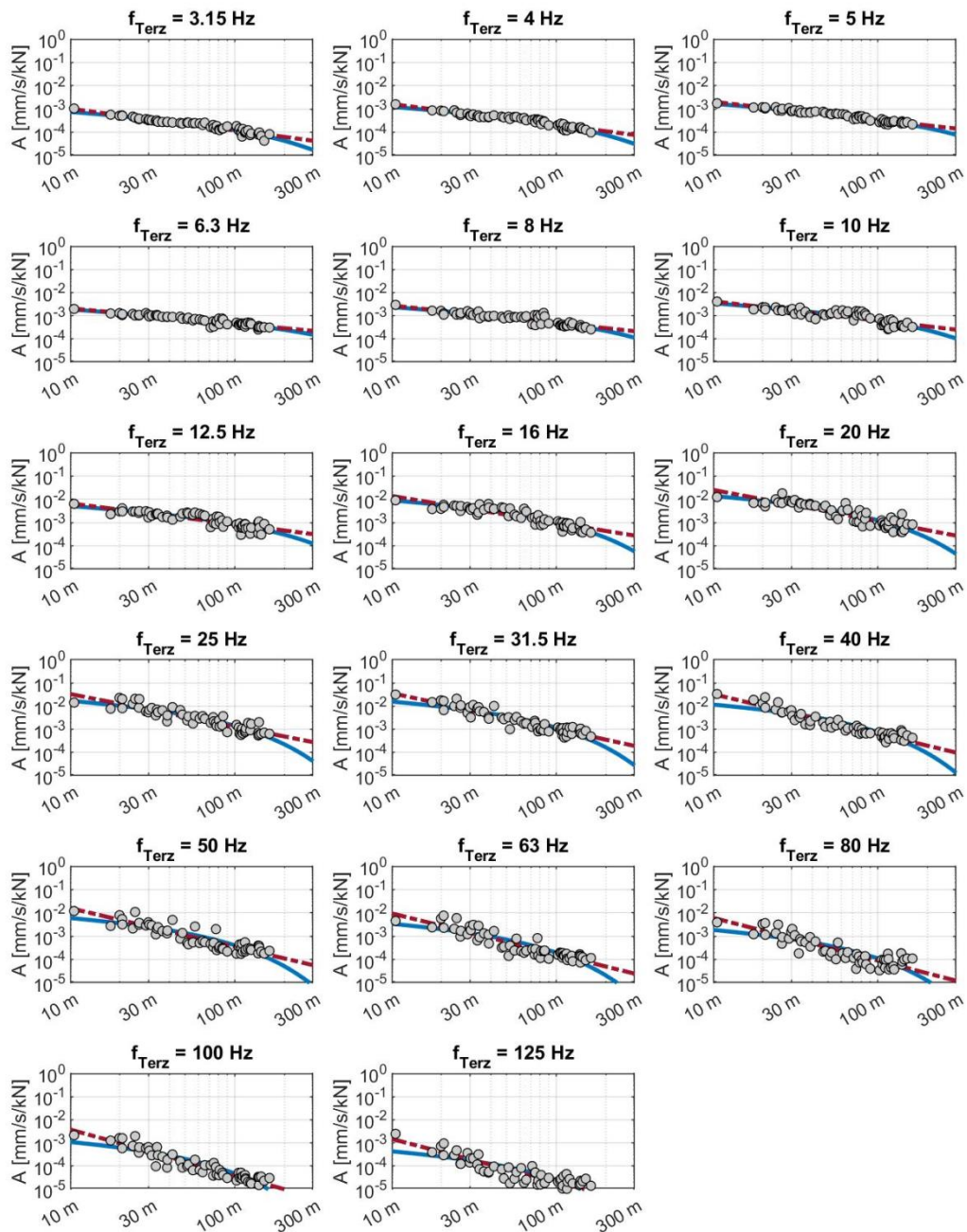


### 9.3.5 Ergebnisse der Regressionsanalyse

Der nachfolgenden Regressionsanalyse liegen folgende Mess- und Anregungspunkte zugrunde:

Messpunkte	MP1, MP2, MP3, MP5, MP6, MP7, MP8, MP9, MP10, MP11
Anregungspunkte	VT1, VT2, VT3, VT4, VT5, VT6

Abnahme Admittanz: Sweep-Anregung VibroTruck



**Abbildung 9-31: Ergebnisse der Regressionsanalyse: Abnahme der Admittanzen über die Entfernung (rot=zu Grunde gelegtes Abnahmegegesetz)**

### 9.3.6 Ergebnisse der Übertragungsadmittanz infolge Mehrpunktanregung

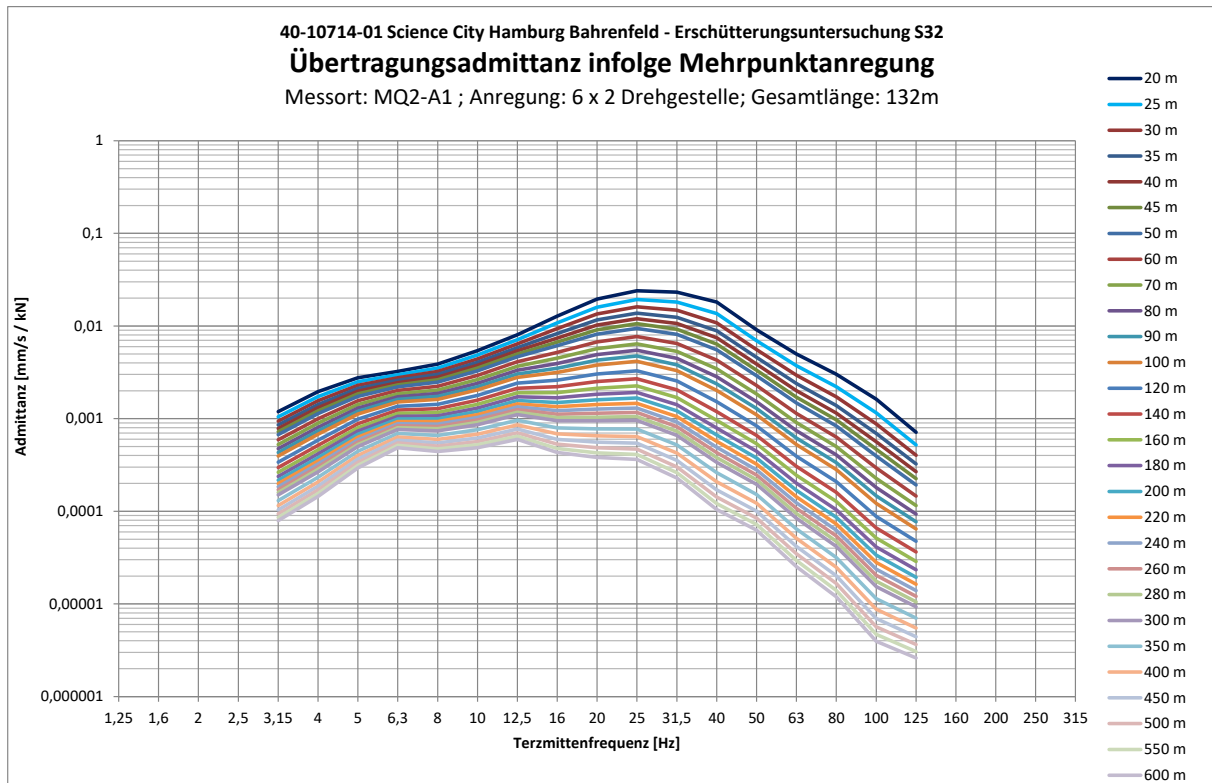


Abbildung 9-32: Ergebnisse der Übertragungsadmittanz infolge Mehrpunktanregung für MQ2

## 9.4 VibroTruck am Messquerschnitt MQ3

### 9.4.1 Lageskizze

In der folgenden Grafik ist die Lage der Messpunkte in blau und die Anregungspunkte des VibroTruck in Türkis skizziert:

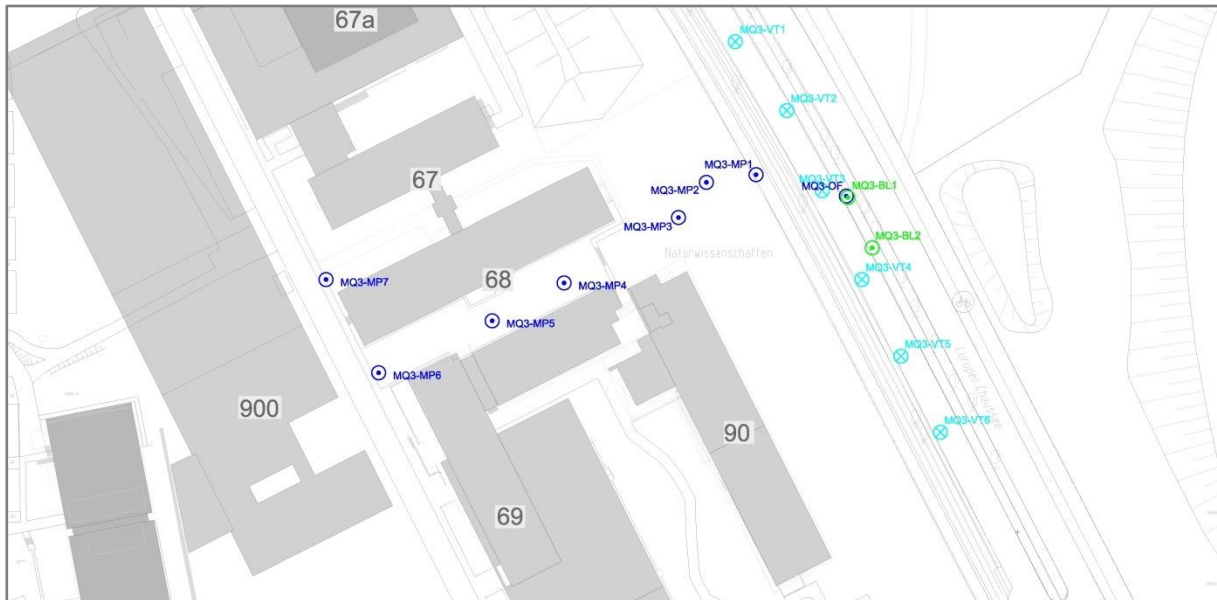


Abbildung 9-33: Lageskizze der Anregungs- und Messpunkte der VibroTruck Messungen am MQ3

### 9.4.2 Abstände

Sämtliche Mess- und Anregungspunkte wurden mit dem GNSS Gerät gemäß Tabelle 9-4 eingemessen und daraus die Abstände zwischen Mess- und Anregungspunkt ermittelt. Die folgende Tabelle listet die Entfernungen zwischen den Anregungspunkten mit VibroTruck und Messpunkten auf.

Anregungspunkt Messpunkt	VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6
MQ3-BL1	45,2	25,0	6,3	19,5	39,3	59,3
MQ3-BL2	58,1	38,0	17,8	7,8	26,3	46,2
MQ3-OF1	45,2	25,0	6,3	19,5	39,3	59,3
MQ1-MP1	31,6	16,7	16,0	35,0	54,6	74,4
MQ1-MP2	33,7	25,3	27,3	43,1	61,3	80,4
MQ1-MP3	43,4	35,8	34,4	45,5	61,6	79,6

MQ1-MP4-	69,5	66,2	64,4	70,0	81,0	95,2
MQ1-MP5	87,0	85,1	83,4	87,4	96,4	108,6
MQ1-MP6	114,4	114,0	112,7	115,7	122,8	132,8
MQ1-MP7	111,2	115,3	118,5	125,9	136,3	148,8

**Tabelle 9-13: Entfernungen [m] der Messpunkte zu den VibroTruck-Anregungspunkten am MQ3**

#### 9.4.3 Kanalbelegung und Fotodokumentation der Messpunkte

Kanal	Messpunkt	Lage	Aufstell- bedingung	Sensor	Kabel	Messbereich [mm/s]
1	VibroTruck	Anregungspunkte VT1-VT6				0-70 [kN]
2	MQ3-BL1	Bohrloch Straßen- mitte Nord	Bohrsonde	BS5	100/ 120	+/-10
3	MQ3-BL2	Bohrloch Straßen- mitte Süd	Bohrsonde	BS6	100/ 120	+/-10
4	MQ3-OF1	neben Bohrloch 1 Straßenmitte Nord	Spike	G23	100/ 120	+/-10
5	MQ3-MP1	10m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G105	140	+/-10
6	MQ3-MP2	20m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G15	140	+/-2
7	MQ3-MP3	30m bis Mitte 1. Fahrspur	Dreier-Spitze	G107	40, 140	+/-2
8	MQ3-MP4	hinter Brüstung	Dreier-Spitze	G6	148	+/-2
9	MQ3-MP5	10m	Dreier-Spitze	G8	30, 148	+/-2
10	MQ3-MP6	20m	Dreier-Spitze	G4	58, 148	+/-2
11	MQ3-MP7	30m	Dreier-Spitze	G103	38, 50	+/-2

**Tabelle 9-14: Messpunkte MQ3**

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 [5].











	
MQ3-BL1	MQ3-BL2
	
MQ3-OF1-z	MQ3-MP1-z
	
MQ3-MP2-z	MQ3-MP3-z
	
MQ3-MP4-z	MQ3-MP5-z





Tabelle 9-15: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ3 bei VibroTruck Anregung

Folgende Messungen wurden mit dem VibroTruck am Referenzquerschnitt MQ1 durchgeführt:

Bezeichnung	Inhalt	GPS Zeitstempel des jeweils 1. Sweeps
Abklopfen	QS-Prüfung	-
MQ3-VT1	log. Sweep 3-120Hz am MQ3-VT1	21/05/26 13:36:42:620000 21/05/26 13:48:35:704000
MQ3-VT2	log. Sweep 3-120Hz am MQ3-VT2	21/05/26 13:54:38:428000
MQ3-VT3	log. Sweep 3-120Hz am MQ3-VT3	21/05/26 14:02:14:596000
MQ3-VT4	log. Sweep 3-120Hz am MQ3-VT4	21/05/26 14:10:12:696000
MQ3-VT5	log. Sweep 3-120Hz am MQ3-VT5	21/05/26 14:19:04:436000
MQ3-VT6	log. Sweep 3-120Hz am MQ3-VT6	21/05/26 14:25:48:260000

Tabelle 9-16: Auflistung der durchgeführten Messungen am MQ3 mit VibroTruck

#### 9.4.4 Ergebnisse der Baugrundadmittanzen

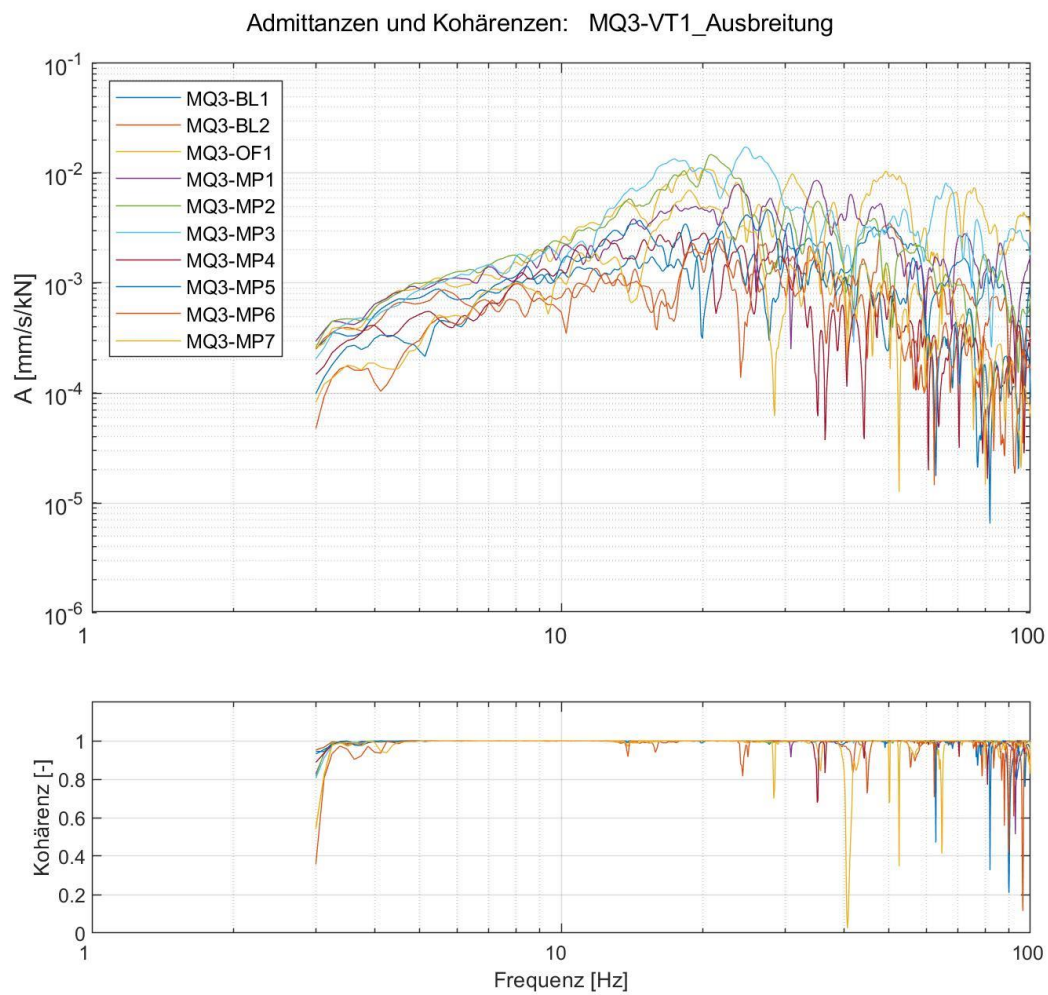


Abbildung 9-34: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

Admittanzen: MQ3-VT1\_Ausbreitung

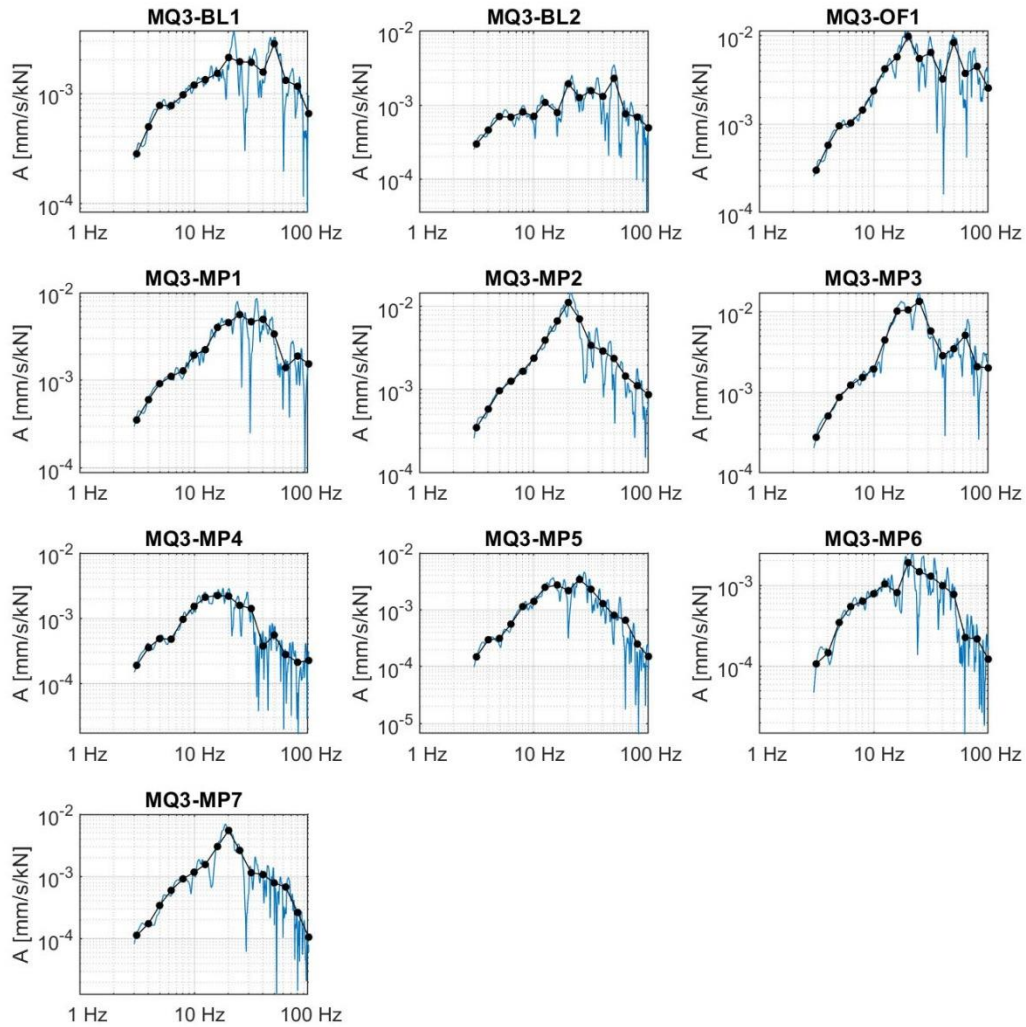


Abbildung 9-35: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

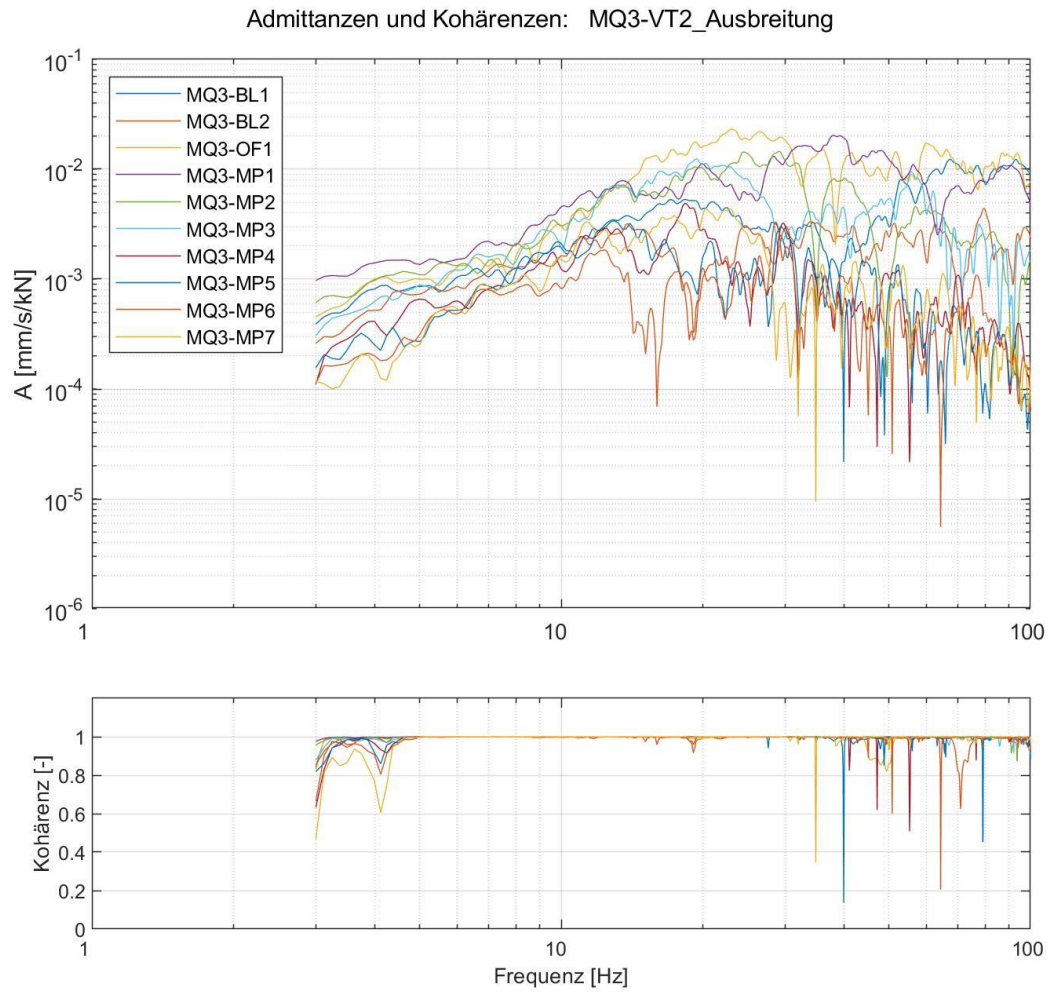


Abbildung 9-36: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)



Admittanzen: MQ3-VT2\_Ausbreitung

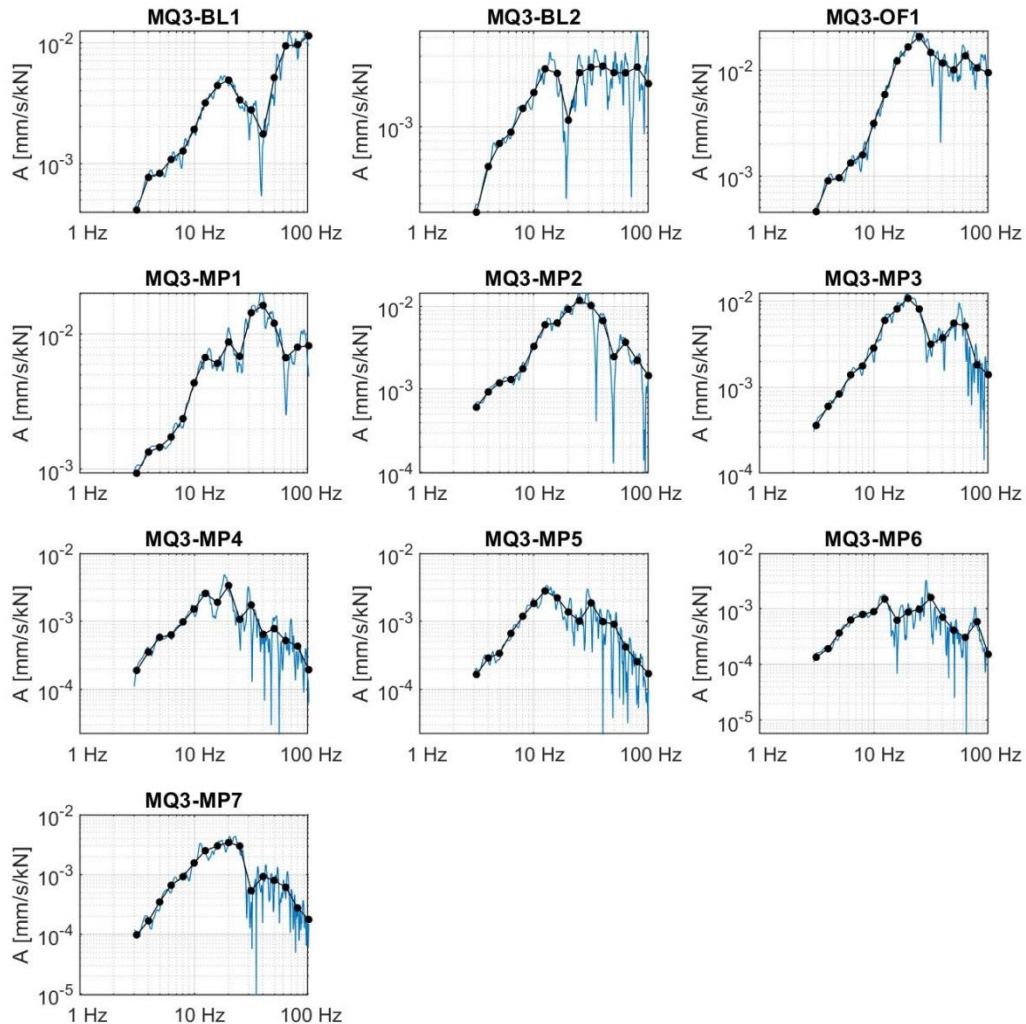


Abbildung 9-37: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)



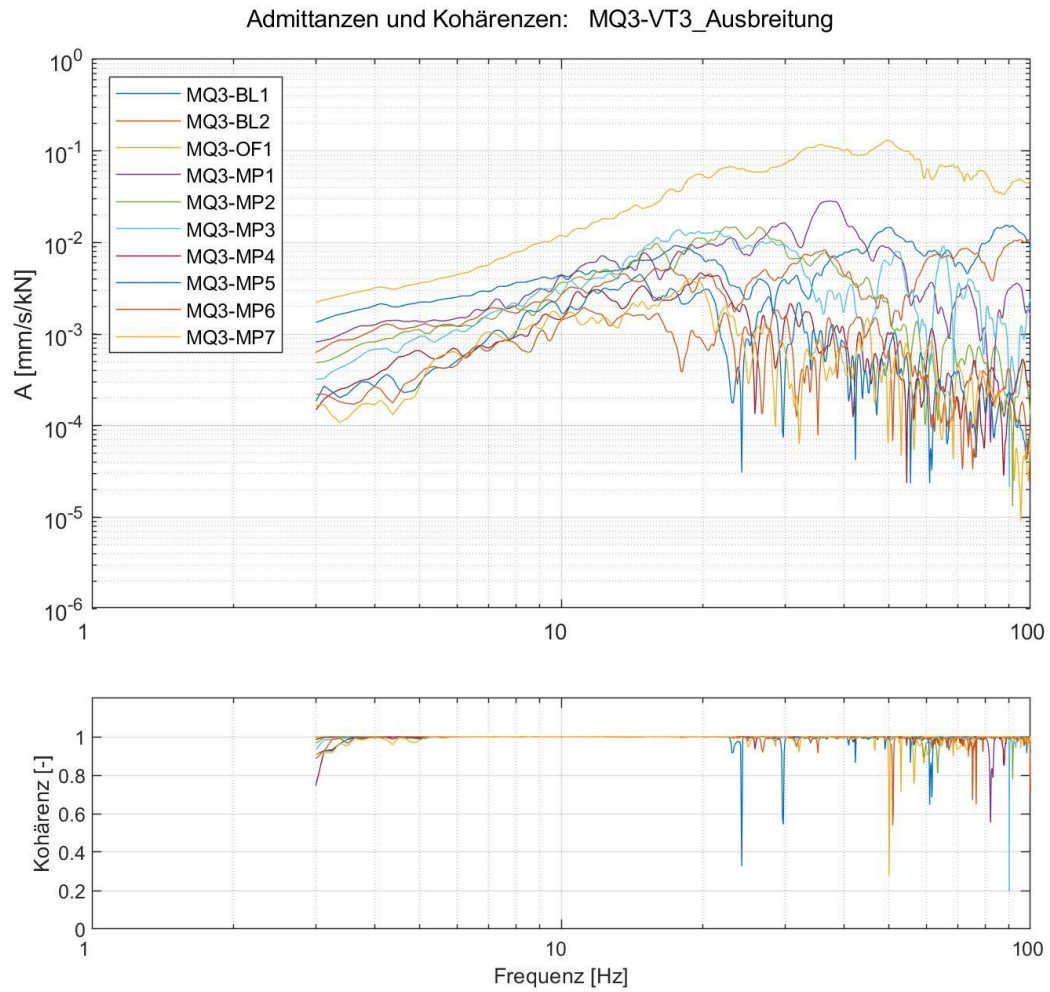


Abbildung 9-38: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

Admittanzen: MQ3-VT3\_Ausbreitung

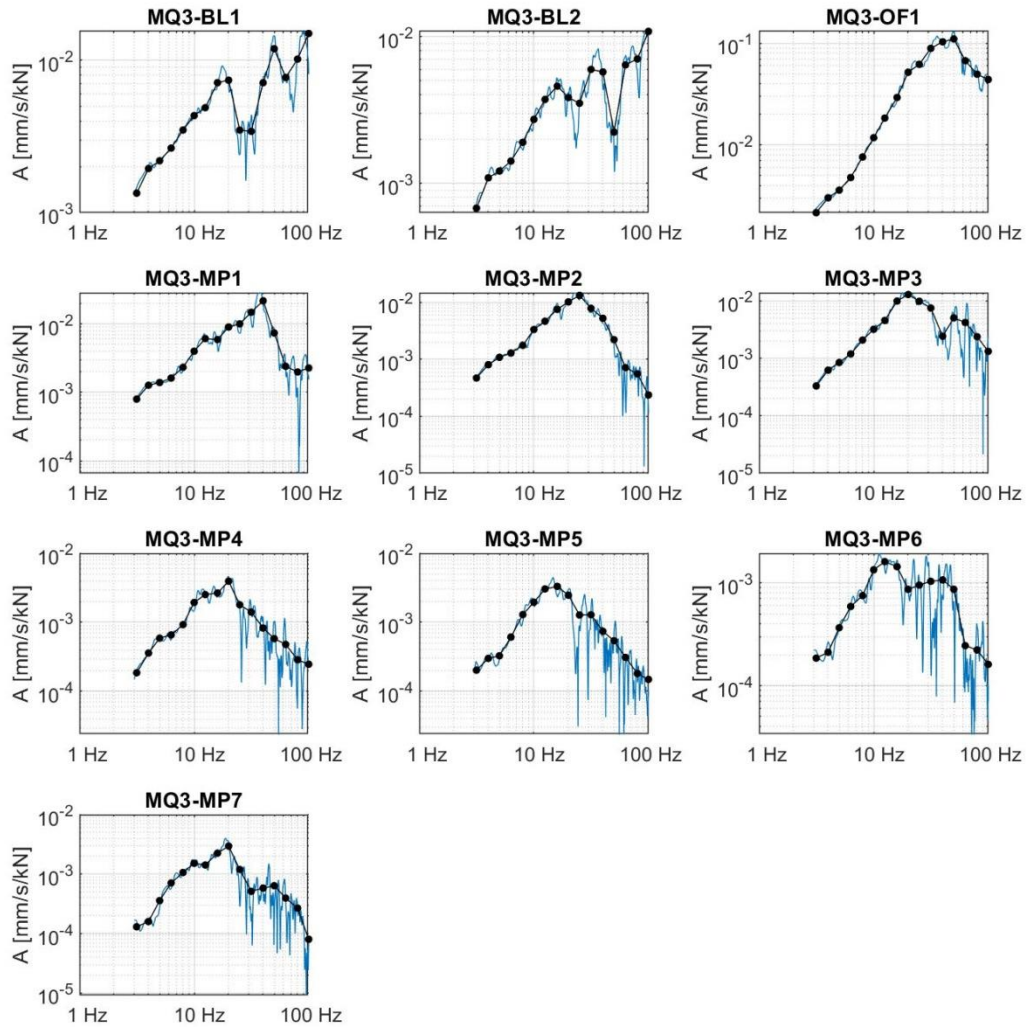


Abbildung 9-39: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

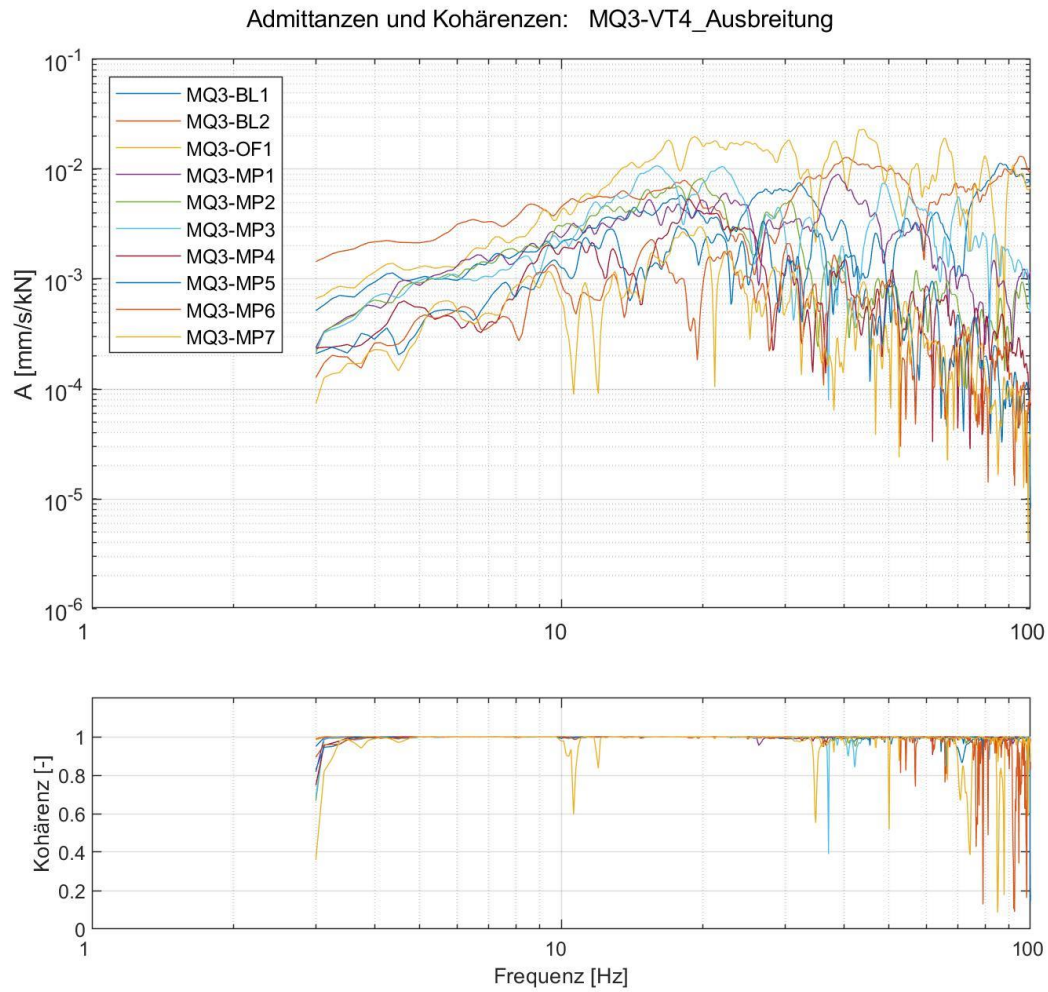


Abbildung 9-40: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

Admittanzen: MQ3-VT4\_Ausbreitung

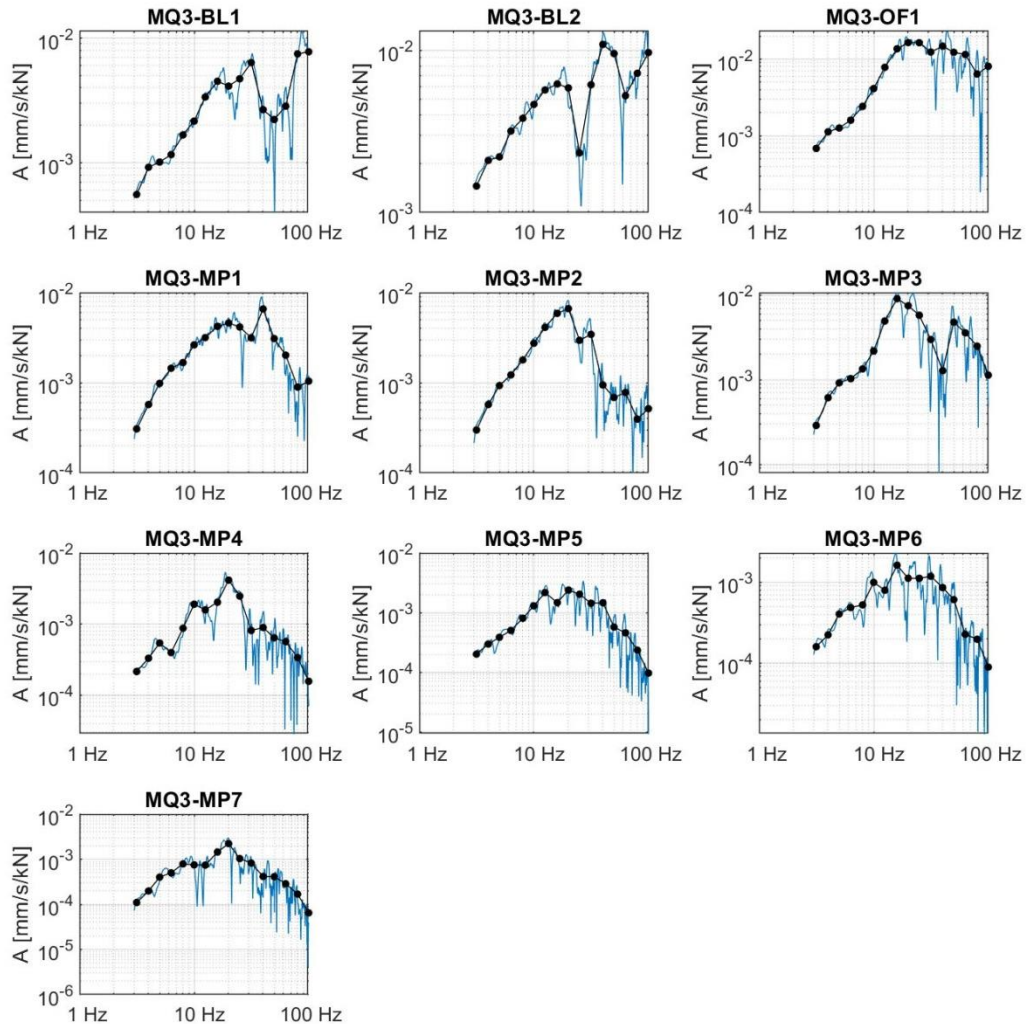
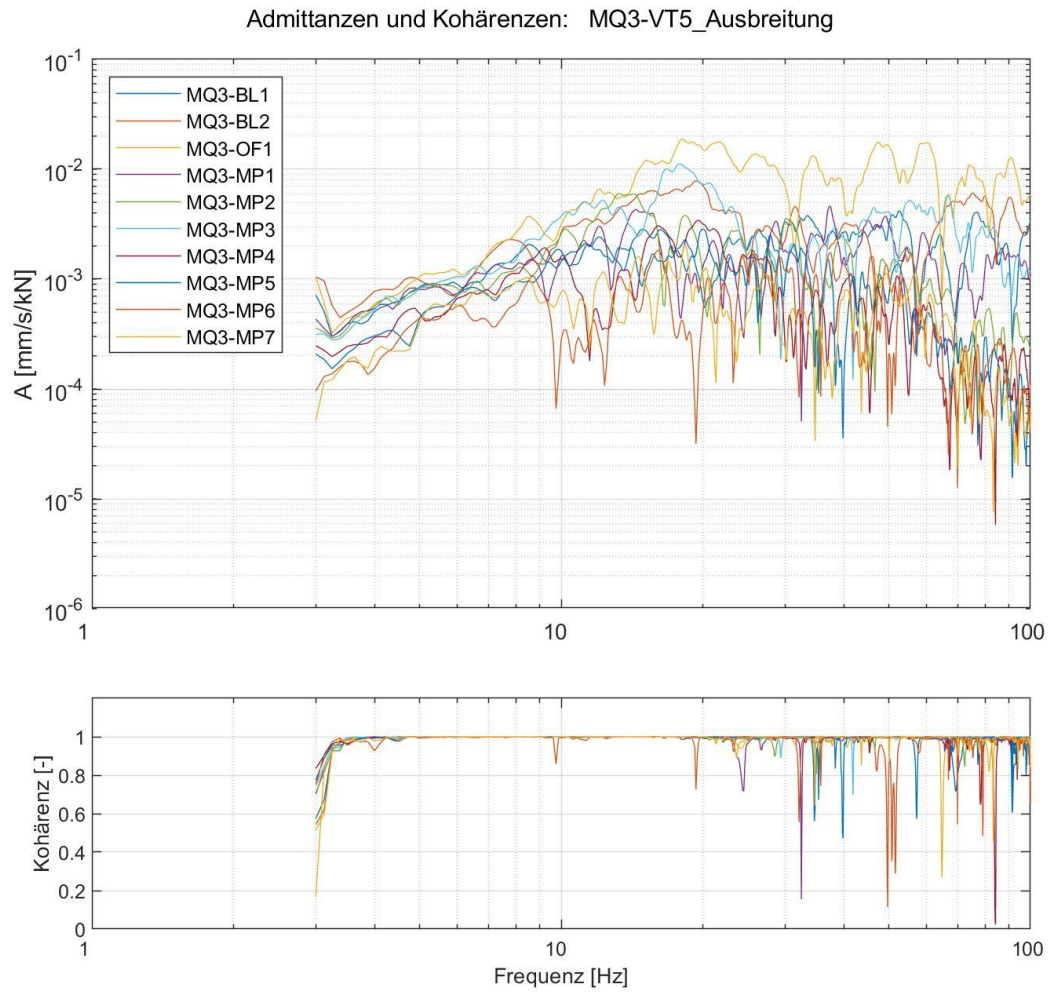


Abbildung 9-41: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)



**Abbildung 9-42: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)**



Admittanzen: MQ3-VT5\_Ausbreitung

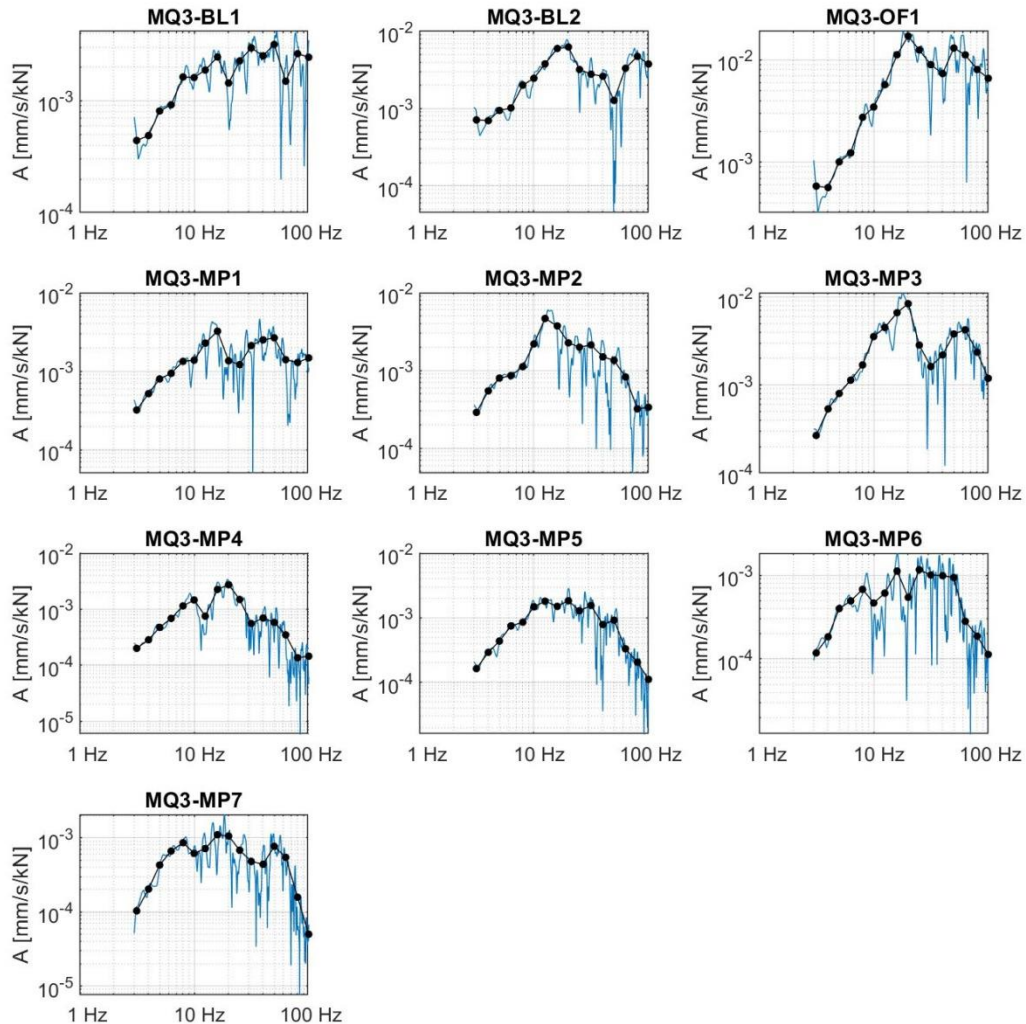


Abbildung 9-43: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

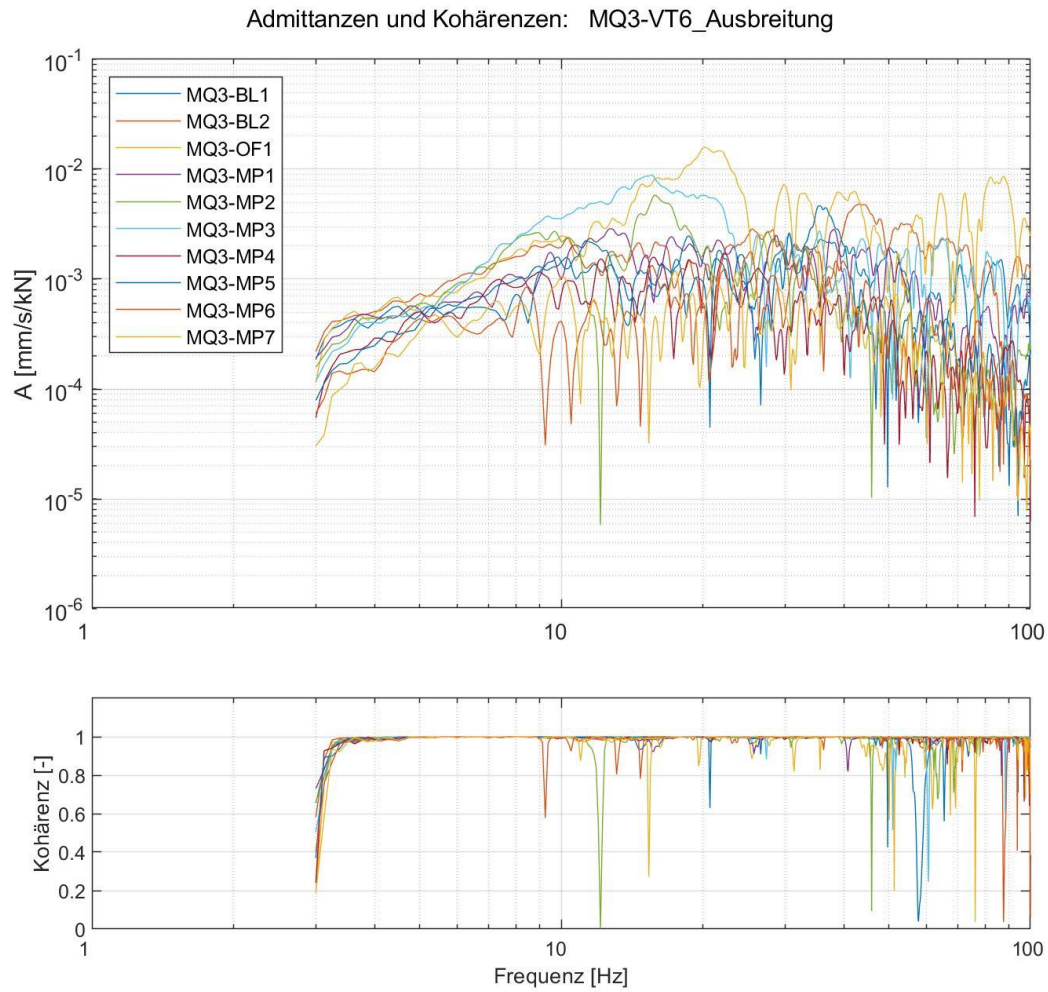


Abbildung 9-44: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

Admittanzen: MQ3-VT6\_Ausbreitung

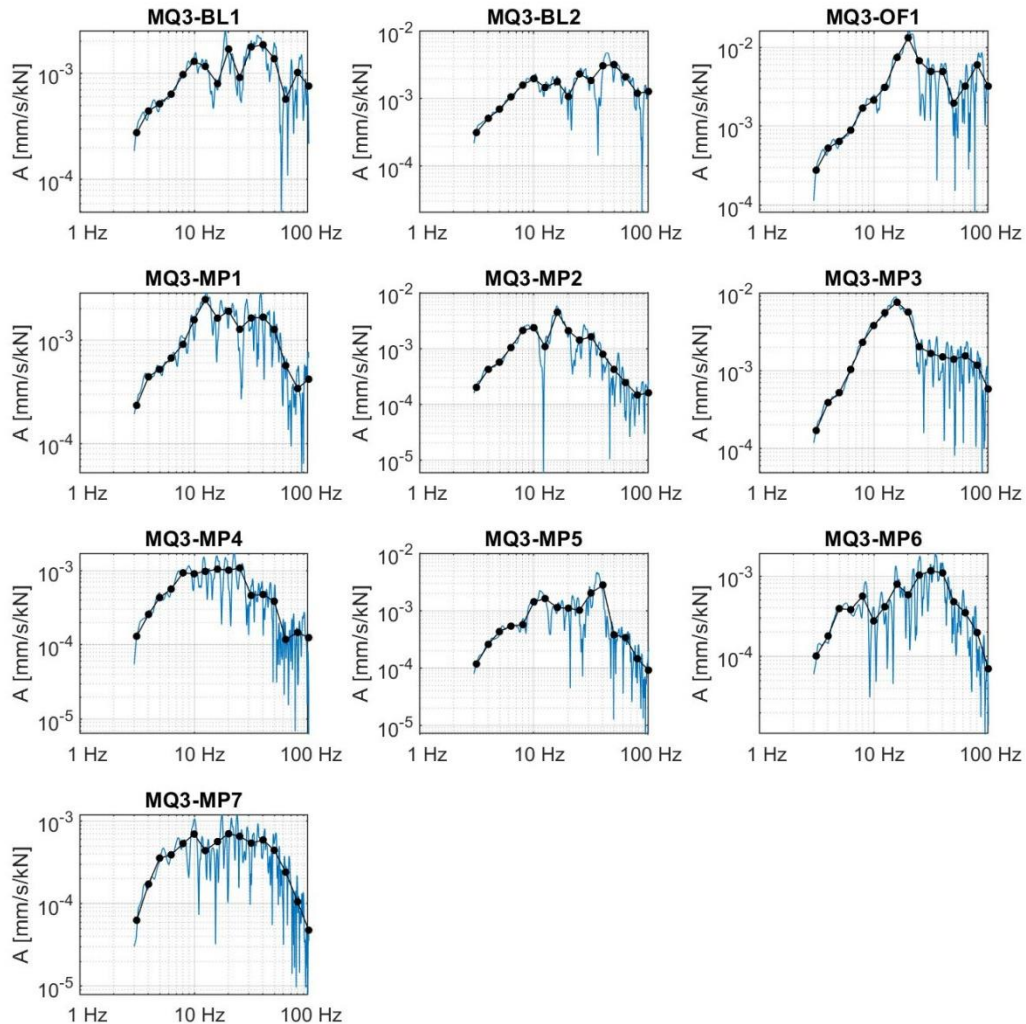


Abbildung 9-45: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

9.4.5 Ergebnisse der Regressionsanalyse

Der nachfolgenden Regressionsanalyse liegen folgende Mess- und Anregungspunkte zugrunde:

Messpunkte	MP1, MP2, MP3, MP4, MP5, MP6, MP7
Anregungspunkte	VT1, VT2, VT3, VT4, VT5, VT6

Abnahme Admittanz: Sweep-Anregung VibroTruck

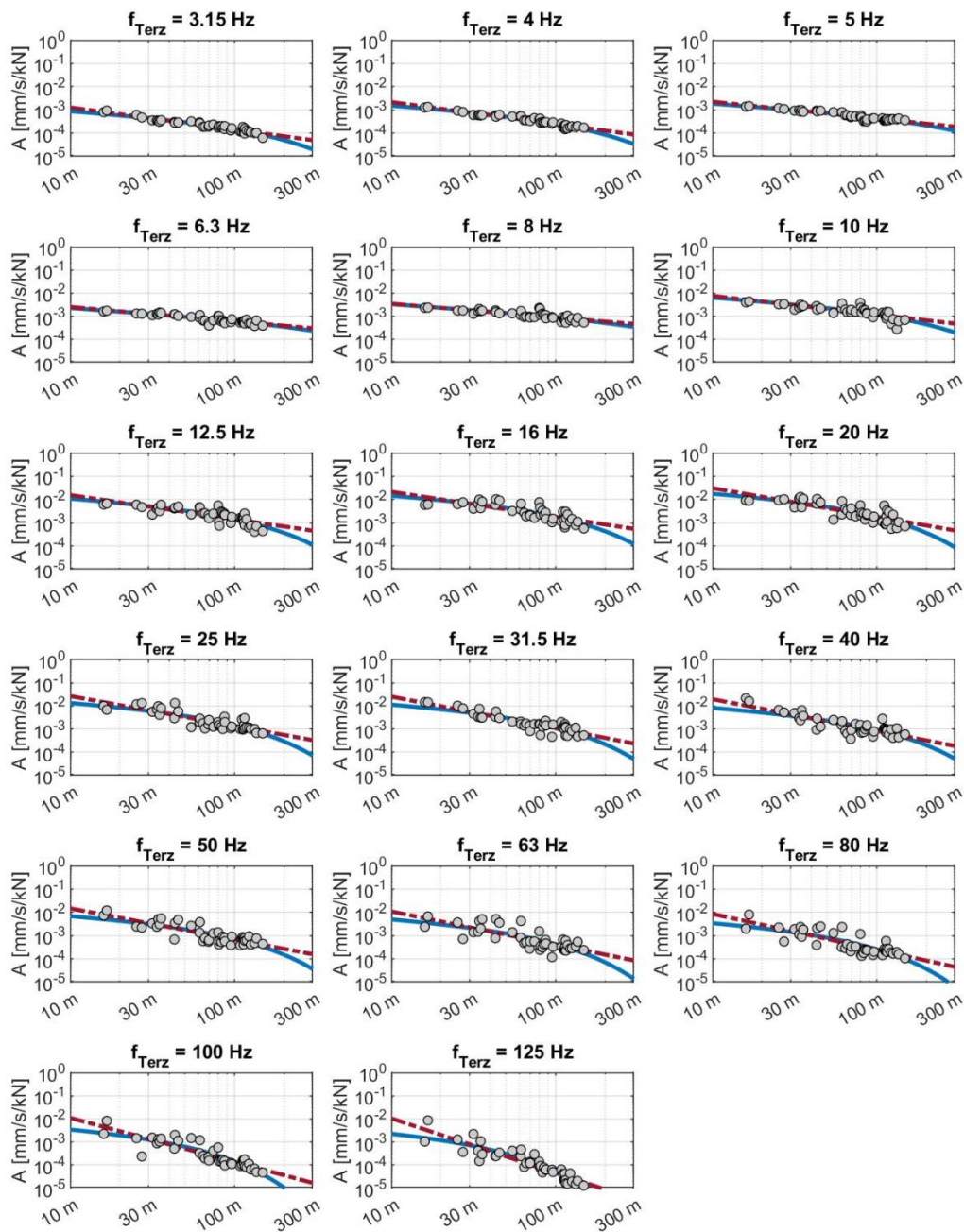


Abbildung 9-46: Ergebnisse der Regressionsanalyse: Abnahme der Admittanzen über die Entfernung (rot=zu Grunde gelegtes Abnahmegesetz)

#### 9.4.6 Ergebnisse der Übertragungsadmittanz infolge Mehrpunktanregung

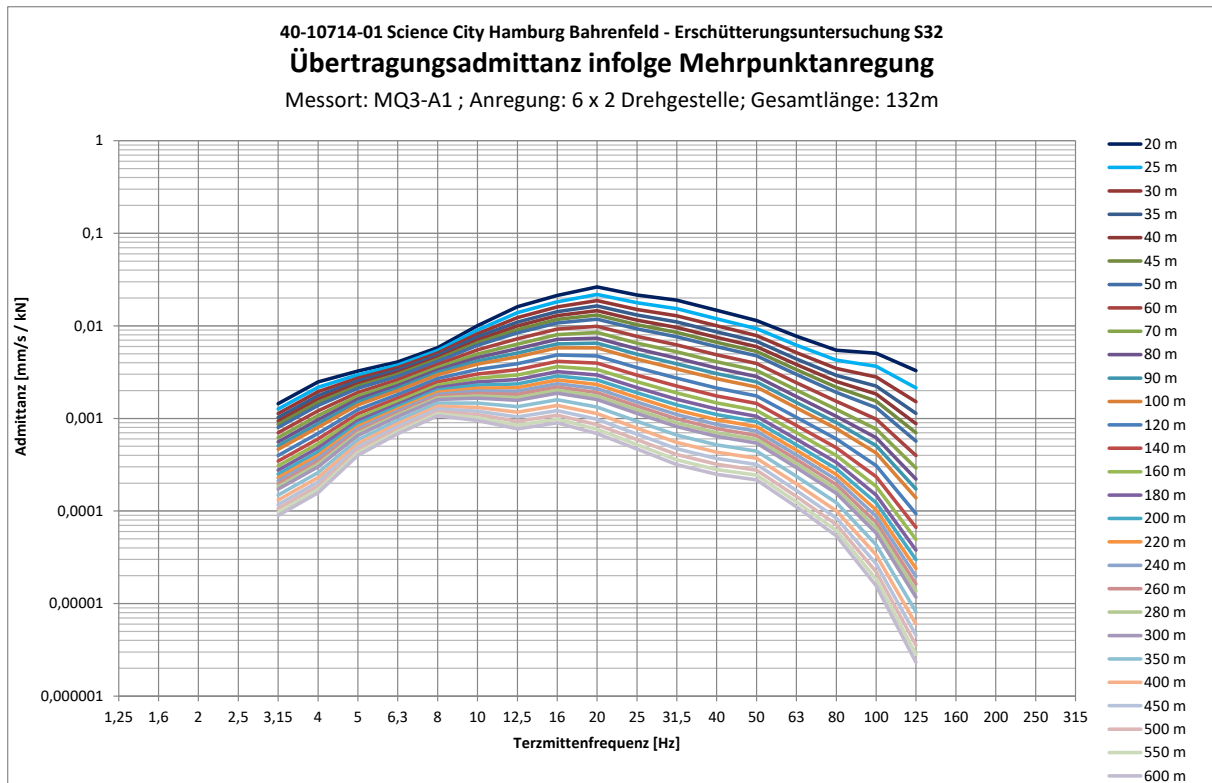


Abbildung 9-47: Ergebnisse der Übertragungsadmittanz infolge Mehrpunktanregung für MQ3



9.5 VibroTruck am Messquerschnitt MQ4

Am Messquerschnitt MQ4 wurden 2 Messanlagen aufgebaut. Die Erste entspricht der Hauptmessanlage, bei der die Sensoren in das Gelände des DESY hinein aufgebaut und verkabelt wurden. Eine Zweite Messanlage umfasst die drei Messpunkte MP12, MP13 und MP14 welche sich allesamt auf dem Gelände der Trabrennbahn befinden.

Zur Messung der Schwinggeschwindigkeiten mit der zweiten Messanlage an der Trabrennbahn wurde folgendes Messequipment verwendet:

Geschwindigkeitssensoren	Geophone 1 – 315 Hz gemäß DIN 45669 Sensornummer gemäß Tabelle „Übersicht der Messpunkte“
Messverstärker	MSE, 8 Kanal, SN: 20011101 (V2)
A/D Wandlerkarte	NI USB-6210, 16Bit
Messrechner	Panasonic FZ-55, SN:0ATCA07771
Letzte Kalibrierung der Messkette	03/2020 (Geophone, Verstärker)
Messsoftware	Meda_AD Version 2019-1

Tabelle 9-17: Verwendetes Messequipment

9.5.1 Lageskizze

In der folgenden Grafik ist die Lage der Messpunkte beider Messanlagen in blau und die Anregungspunkte des VibroTruck in Türkis skizziert:

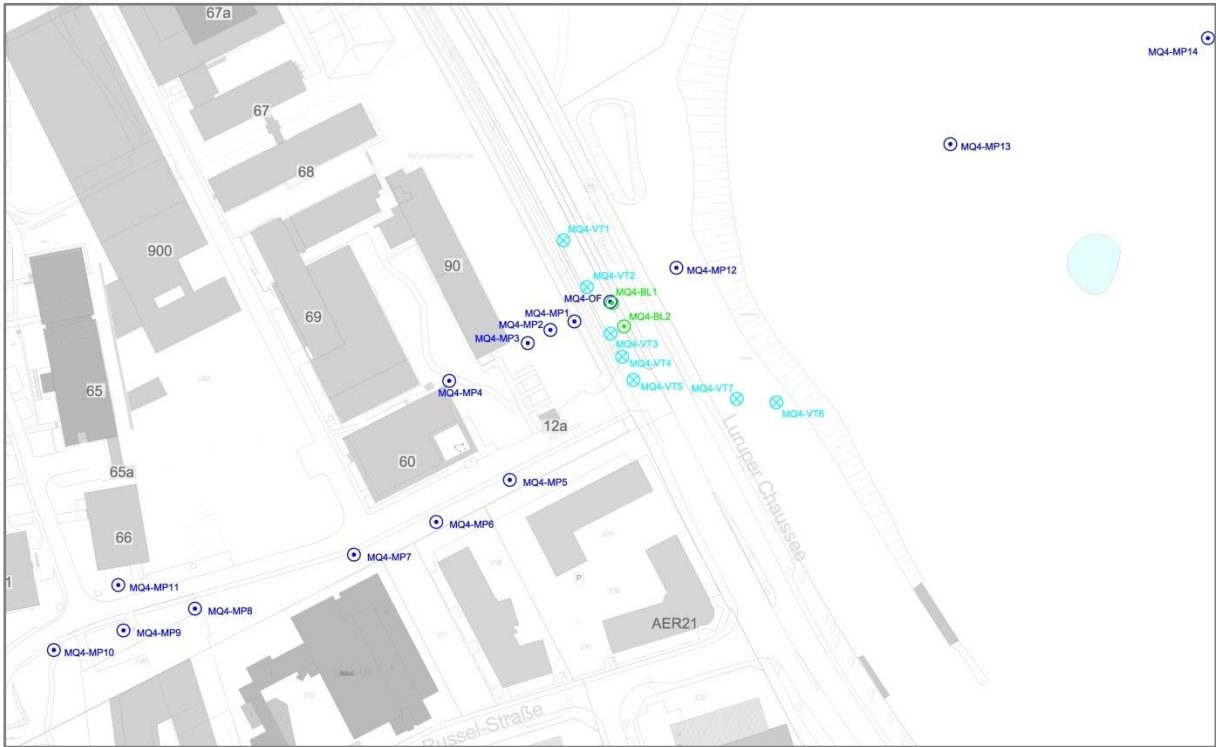


Abbildung 9-48: Lageskizze der Anregungs- und Messpunkte der VibroTruck Messungen am MQ4

### 9.5.2 Abstände

Sämtliche Mess- und Anregungspunkte wurden mit dem GNSS Gerät gemäß Tabelle 9-4 eingemessen und daraus die Abstände zwischen Mess- und Anregungspunkt ermittelt. Die folgende Tabelle listet die Entfernungen zwischen den Anregungspunkten mit VibroTruck und Messpunkten auf.

<b>Anregungspunkt Messpunkt</b>	<b>VT1</b>	<b>VT2</b>	<b>VT3</b>	<b>VT4</b>	<b>VT5</b>	<b>VT6</b>	<b>VT7</b>
MQ4-BL1	30,5	11,5	11,7	20,9	30,6	73,7	60,3
MQ4-BL2	40,4	20,8	5,9	11,7	20,9	65,4	51,4
MQ4-OF1	30,5	11,5	11,7	20,9	30,6	73,7	60,3
MQ4-MP1	31,4	14,0	14,6	22,8	31,9	83,5	69,0
MQ4-MP2	34,8	21,6	23,1	29,4	37,2	91,1	76,2
MQ4-MP3	41,8	31,3	32,0	36,6	43,0	98,1	83,0
MQ4-MP4-	69,5	63,9	64,5	67,1	70,7	125,9	110,6
MQ4-MP5	94,2	79,7	68,2	64,0	61,0	106,6	92,5
MQ4-MP6	118,6	107,1	98,5	95,5	93,3	138,4	124,6
MQ4-MP7	145,0	136,1	130,0	128,0	126,5	172,4	158,6
MQ4-MP8	200,0	194,6	191,3	190,4	189,8	236,8	223,0
MQ4-MP9	225,7	221,4	218,9	218,4	218,1	265,5	251,6
MQ4-MP10	251,0	247,5	245,8	245,5	245,4	293,2	279,3
MQ4-MP11	216,1	213,1	212,1	212,3	212,8	262,2	247,9
MQ4-MP12	44,6	35,1	35,7	40,0	46,1	64,4	55,3
MQ4-MP13	153,0	149,9	149,3	150,1	151,6	119,5	127,6
MQ4-MP14	259,3	256,8	255,8	255,9	256,6	216,7	227,7

**Tabelle 9-18: Entfernungen [m] der Messpunkte zu den VibroTruck-Anregungspunkten am MQ4**









### 9.5.3 Kanalbelegung und Fotodokumentation der Messpunkte

Kanal		Messpunkt	Lage	Aufstell- bedingung	Sensor	Kabel	Messbereich [mm/s]
1		VibroTruck	Anregungspunkte VT1-VT7				0-70 [kN]e
2		MQ4-BL1	Bohrloch	Bohrsonde	BS4	22	+/-10
3		MQ4-BL2	Bohrloch	Bohrsonde	BS7	22	+/-10
4		MQ4-OF1	neben Bohrloch 1	Spike		22	+/-10
5		MQ4-MP1	10m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G15	137	+/-10
6		MQ4-MP2	20m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G6	137	+/-2
7		MQ4-MP3	30m bis Mitte 1. Fahrspur	Spike	G94	40, 137	+/-2
8		MQ4-MP4	Freifeld	Spike	G103	48	+/-2
9		MQ4-MP5	Freifeld	Spike	G60	30, 207	+/-2
10		MQ4-MP6	Freifeld	Spike	G26	207	+/-2
11		MQ4-MP7	Freifeld	Spike	G138	39, 207	+/-2
12		MQ4-MP8	Freifeld	Spike	G93	57, 208	+/-2
13		MQ4-MP9	Freifeld	Spike	G1	208	+/-2
14		MQ4-MP10	Freifeld	Spike	G98	58, 208	+/-2
15		MQ4-MP11	Freifeld	Spike	G8	47, 87	+/-2
16		MQ4-MP12	Geb. Fundament (nicht ausgewertet)	Tripod	G100	52	+/-2
Trab- renn- bahn	1	MQ4-MP12	Freifeld	Spike	G	37	+/-2
	2	MQ4-MP13	Freifeld	Spike	G	-	+/-2
	3	MQ4-MP14	Freifeld	Spike	G105	59	+/-2

**Tabelle 9-19: Messpunkte MQ4**

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 [5].



	
MQ4-BL1	MQ4-BL2
	
MQ4-OF1-z	MQ4-MP1-z
	
MQ4-MP2-z	MQ4-MP3-z
	
MQ4-MP4-z	MQ4-MP5-z



	
MQ4-MP6-z	MQ4-MP7-z
	
MQ4-MP8-z	MQ4-MP9-z
	
MQ4-MP10-z	MQ4-MP11-z
	
MQ4-MP12-z (Kontrollmesspunkt für das Gebäude)	





kein Bild vorhanden	
MQ4-MP12-z (Trabrennbahn)	MQ4-MP13-z(Trabrennbahn)
	
MQ4-MP14-z(Trabrennbahn)	

Tabelle 9-20: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ4 und der Messpunkte an der Trabrennbahn bei VibroTruck Anregung

Folgende Messungen wurden mit dem VibroTruck am Referenzquerschnitt Ref1 durchgeführt:

Bezeichnung	Inhalt	GPS Zeitstempel des jeweils 1. Sweeps
Abklopfen	QS-Prüfung	-.
MQ4-VT1	log. Sweep 3-120Hz am MQ4-VT1	21/05/27 10:37:31:992000
MQ4-VT1 (Wdh)	log. Sweep 3-120Hz am MQ4-VT1	21/05/27 11:11:34:008000
MQ4-VT2	log. Sweep 3-120Hz am MQ4-VT2	21/05/27 11:18:07:840000
MQ4-VT3	log. Sweep 3-120Hz am MQ4-VT3	21/05/27 11:27:47:524000
MQ4-VT4	log. Sweep 3-120Hz am MQ4-VT4	21/05/27 11:34:24:224000
MQ4-VT5	log. Sweep 3-120Hz am MQ4-VT5	21/05/27 11:40:56:312000
MQ4-VT6	log. Sweep 3-120Hz am MQ4-VT6	21/05/27 11:54:59:264000
MQ4-VT7	log. Sweep 3-120Hz am MQ4-VT6	21/05/27 12:04:43:596000

Tabelle 9-21: Auflistung der durchgeführten Messungen am MQ4 mit VibroTruck

40-10714-01-D6 RevA Hauptgutachten.docx

#### 9.5.4 Ergebnisse der Baugrundadmittanzen

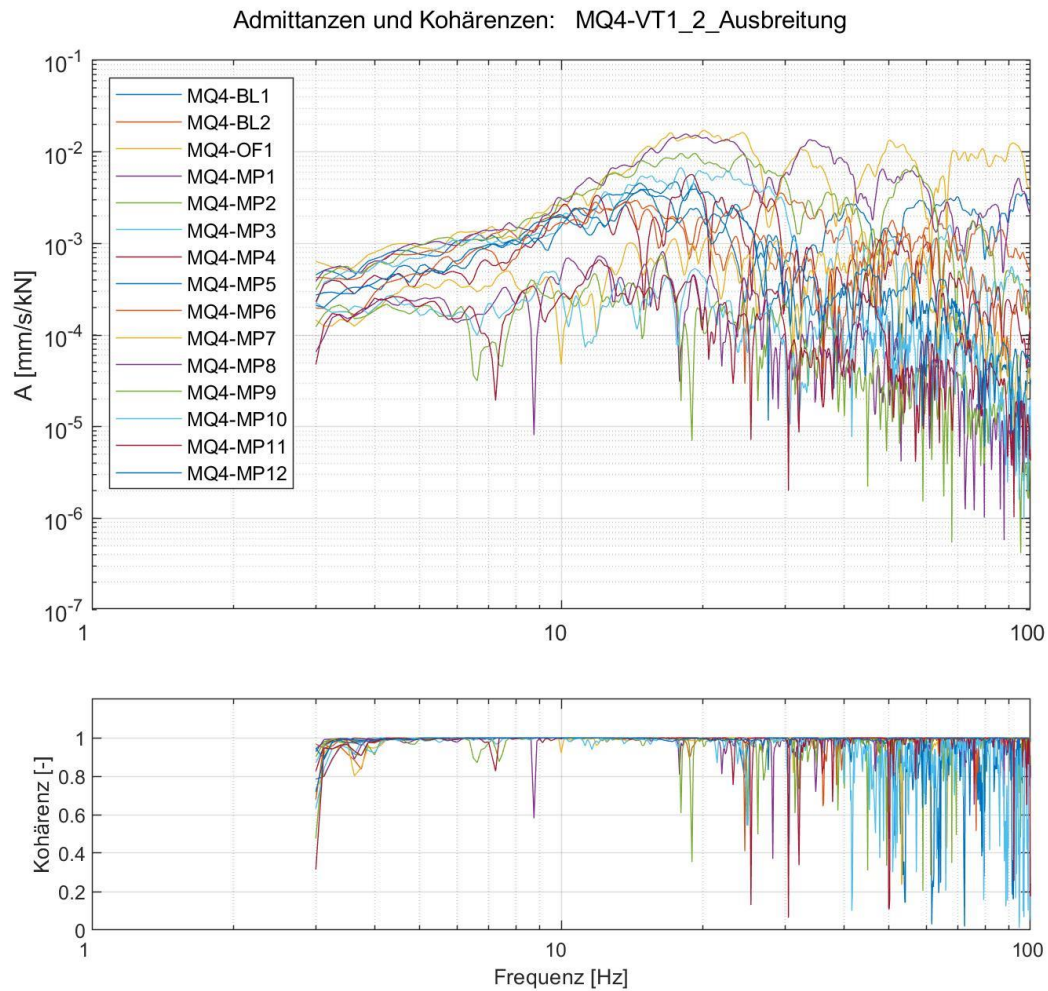


Abbildung 9-49: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

Admittanzen: MQ4-VT1\_2\_Ausbreitung

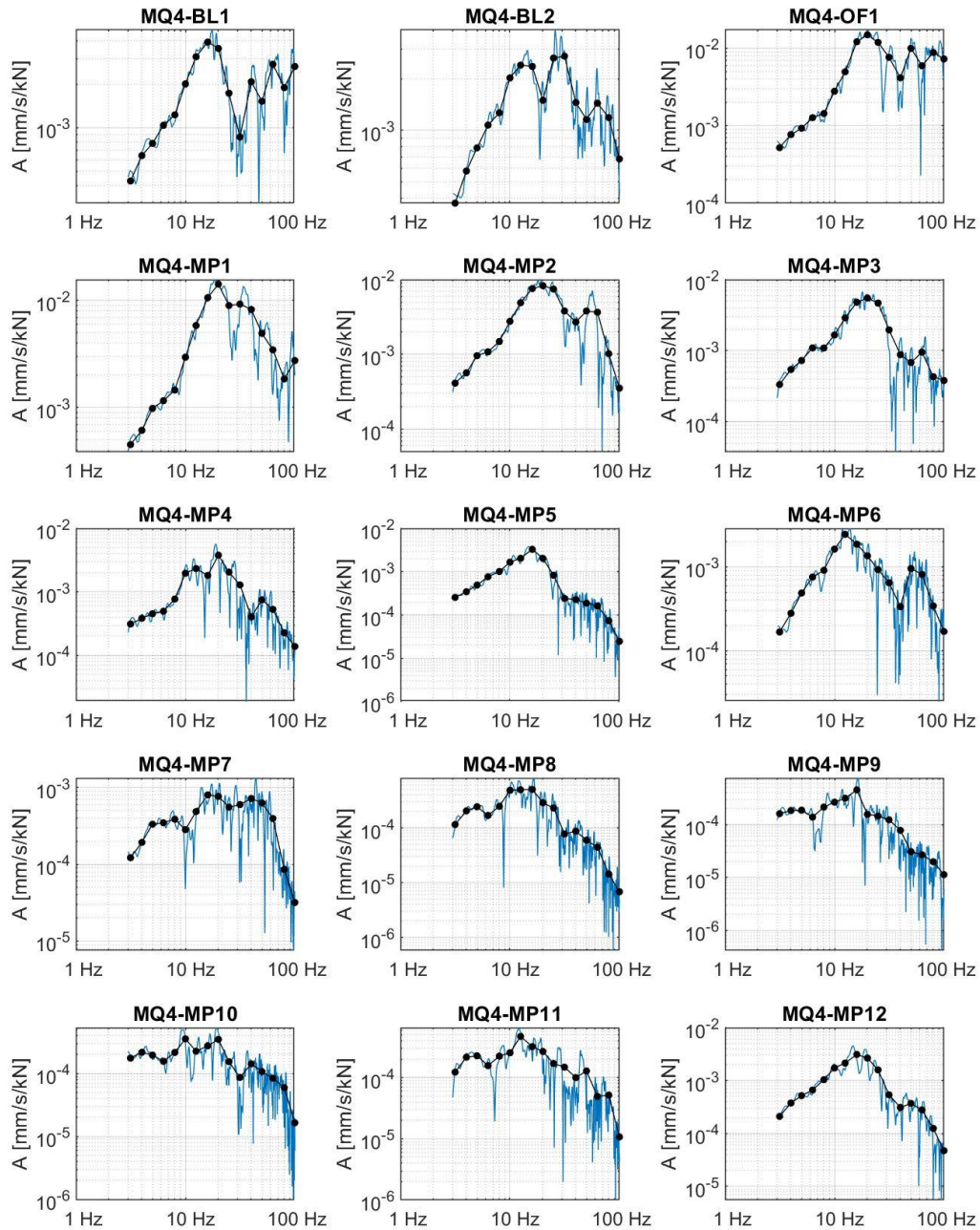
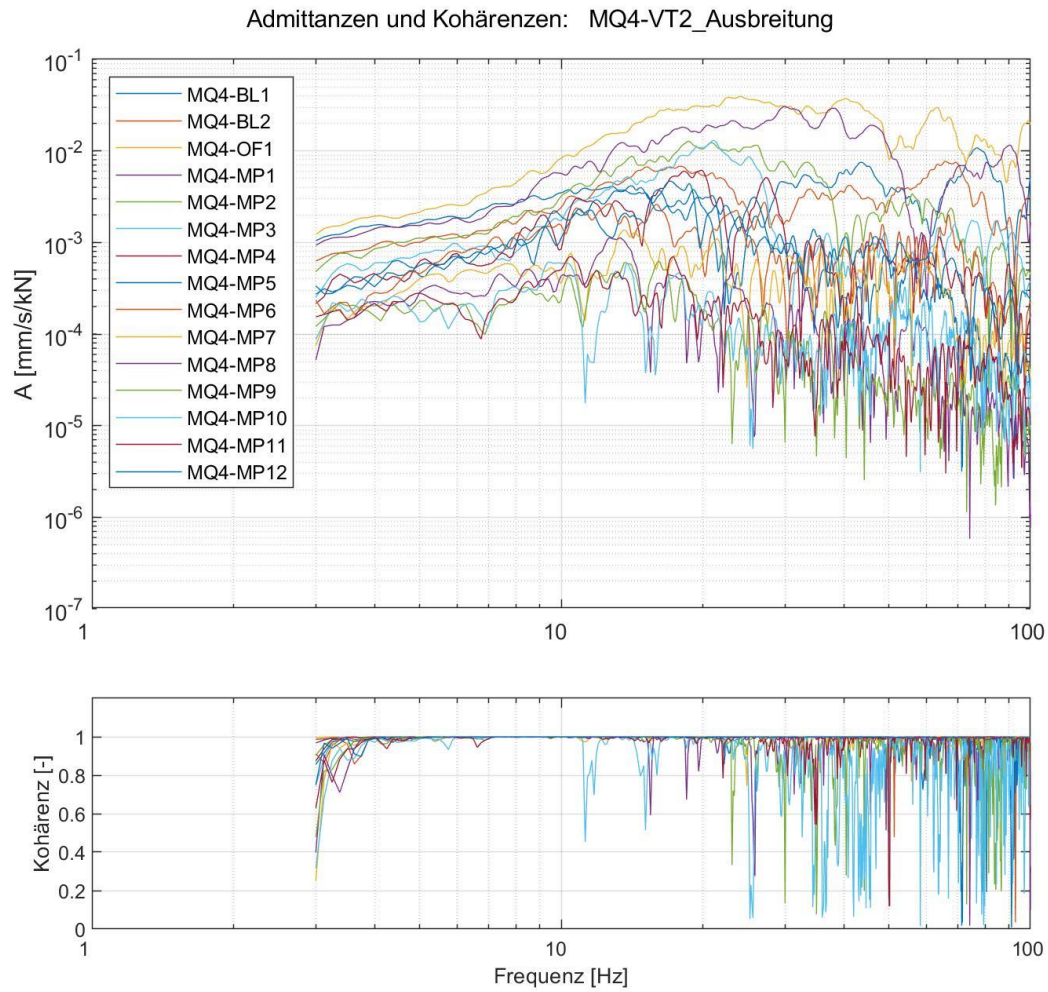


Abbildung 9-50: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)





**Abbildung 9-51: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)**



Admittanzen: MQ4-VT2\_Ausbreitung

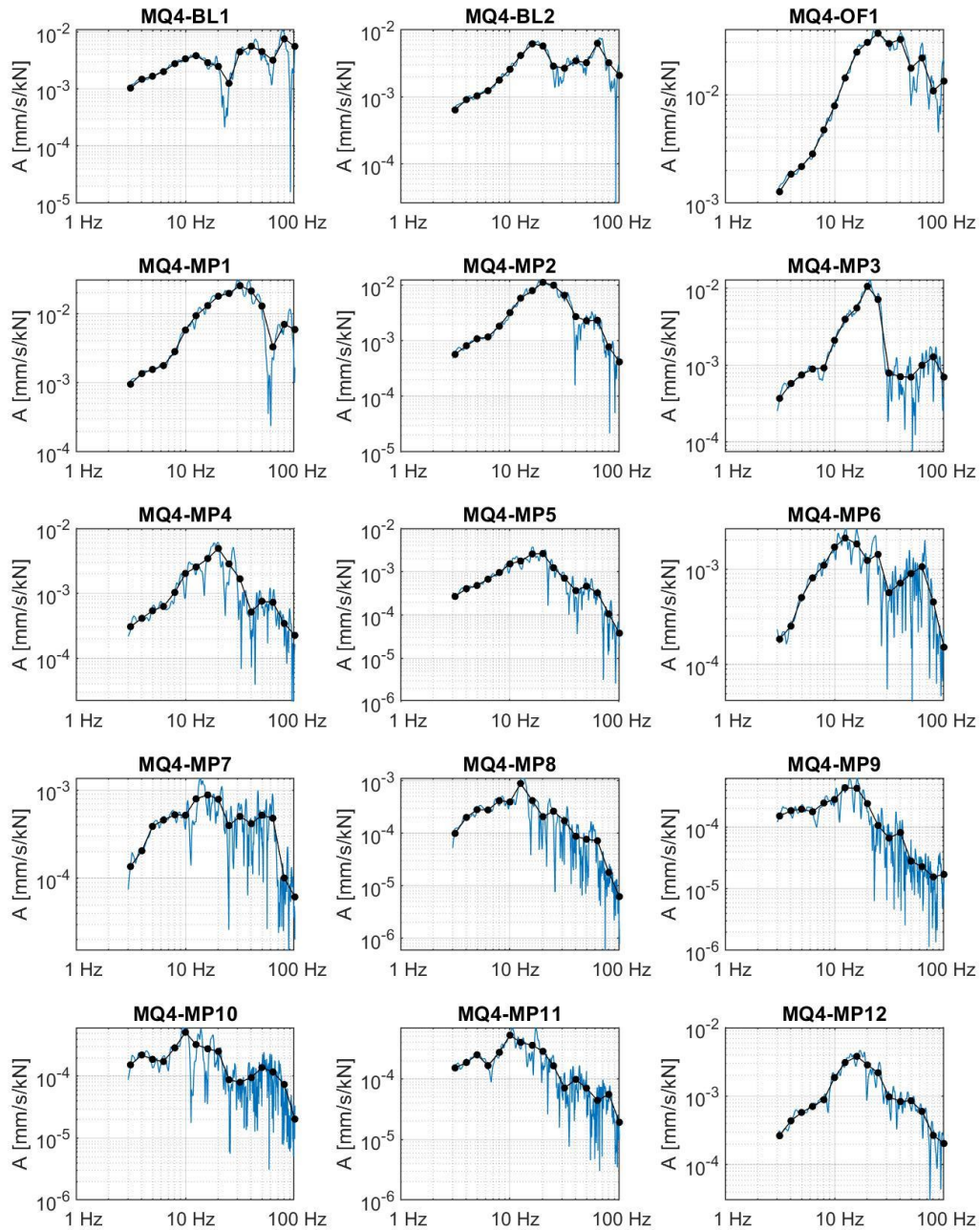


Abbildung 9-52: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

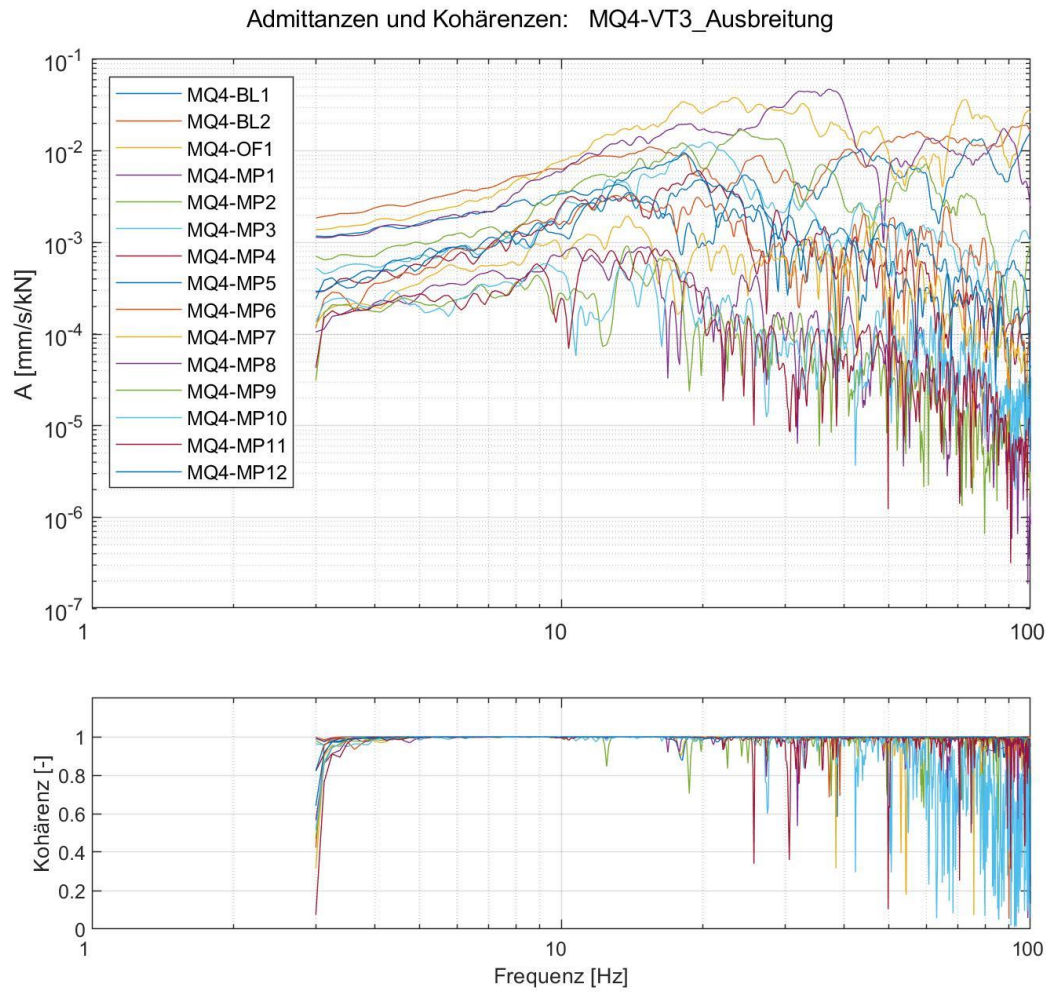


Abbildung 9-53: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

Admittanzen: MQ4-VT3\_Ausbreitung

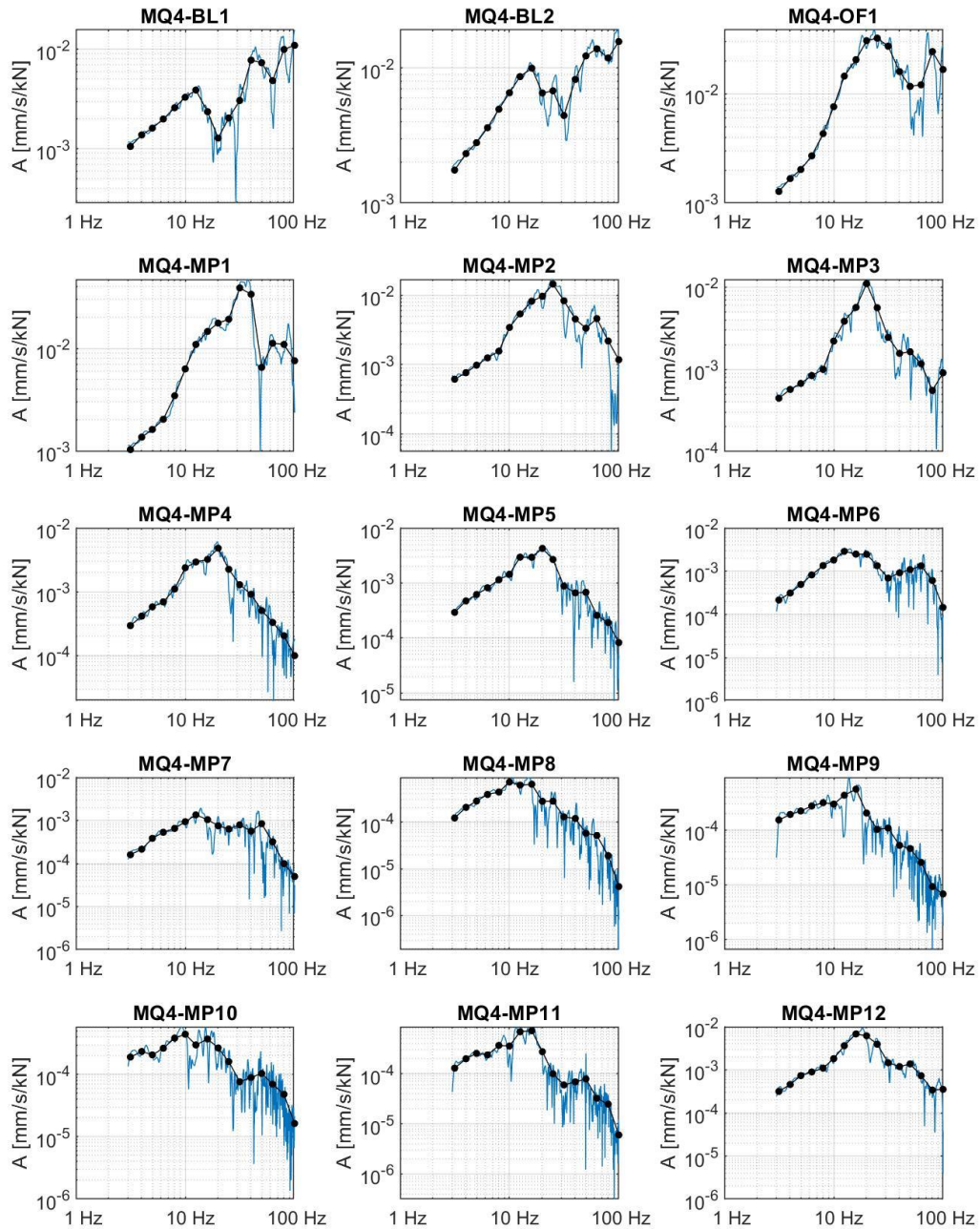


Abbildung 9-54: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)



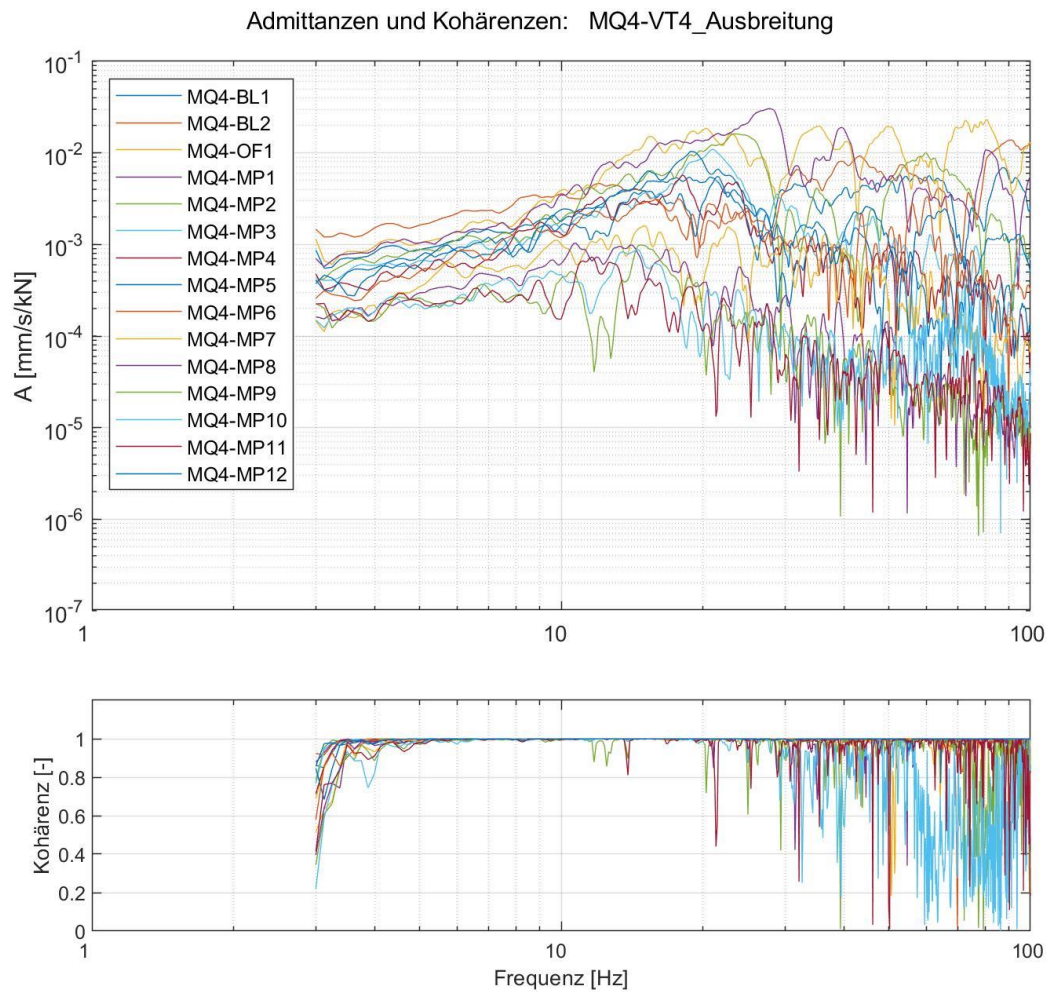


Abbildung 9-55: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)



Admittanzen: MQ4-VT4\_Ausbreitung

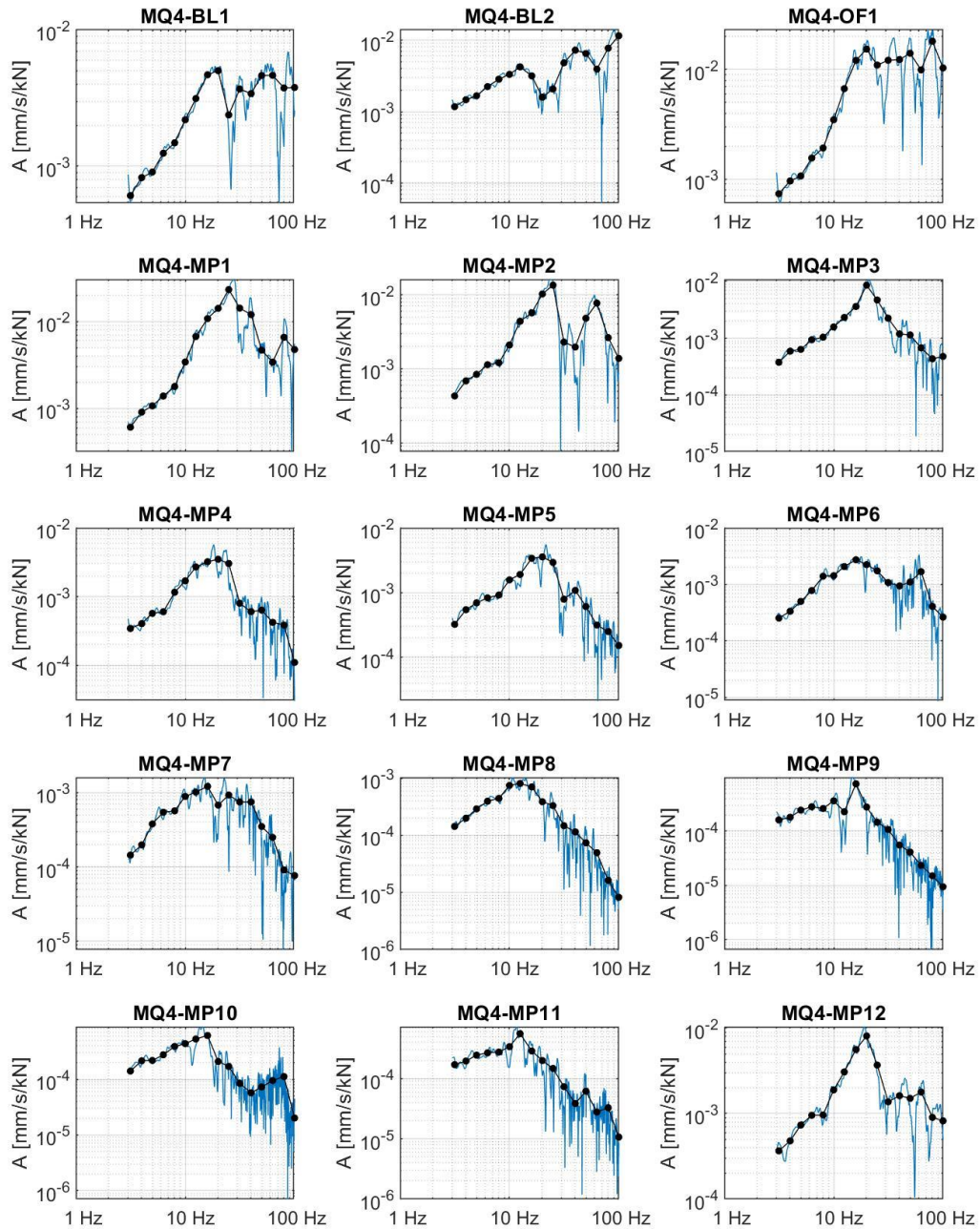
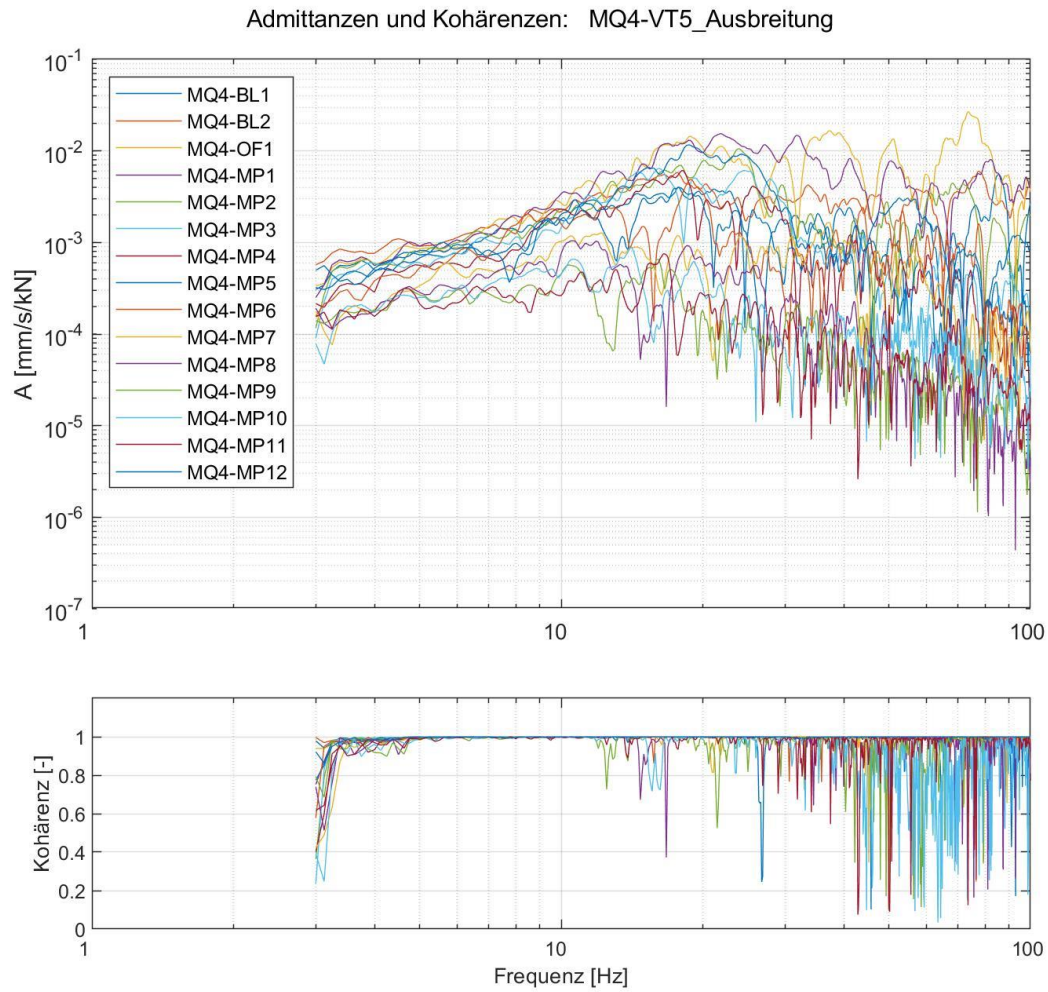


Abbildung 9-56: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)



**Abbildung 9-57: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)**

Admittanzen: MQ4-VT5\_Ausbreitung

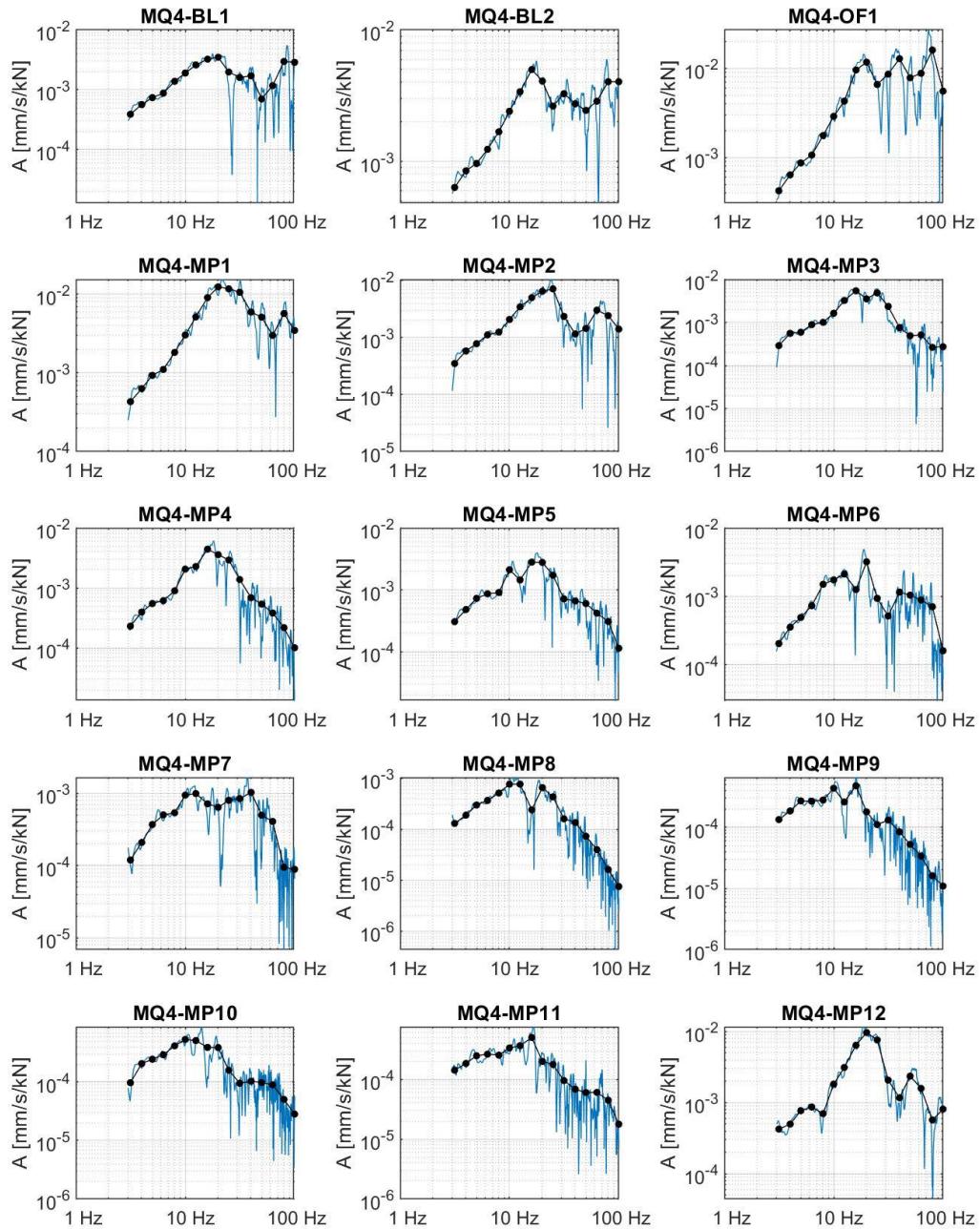


Abbildung 9-58: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)



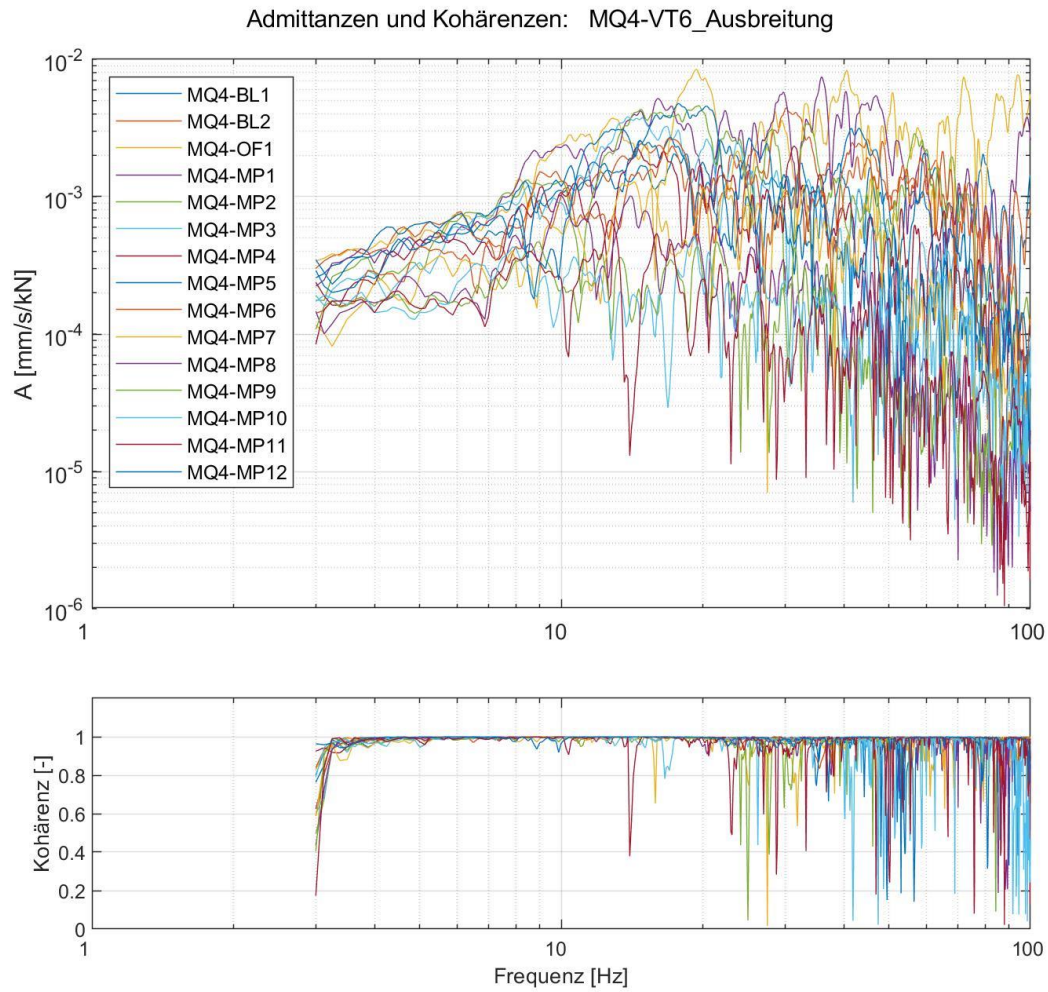


Abbildung 9-59: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)



Admittanzen: MQ4-VT6\_Ausbreitung

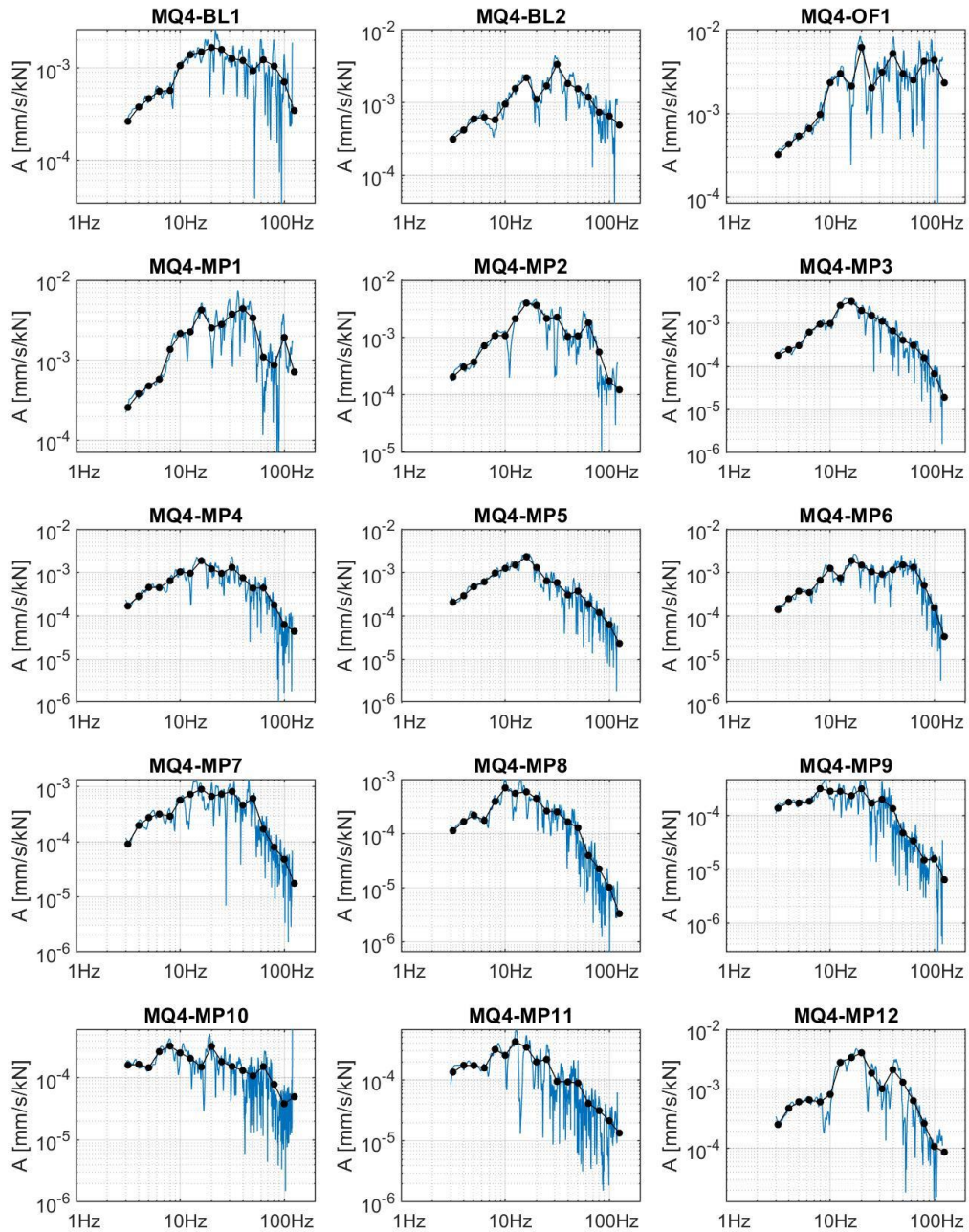
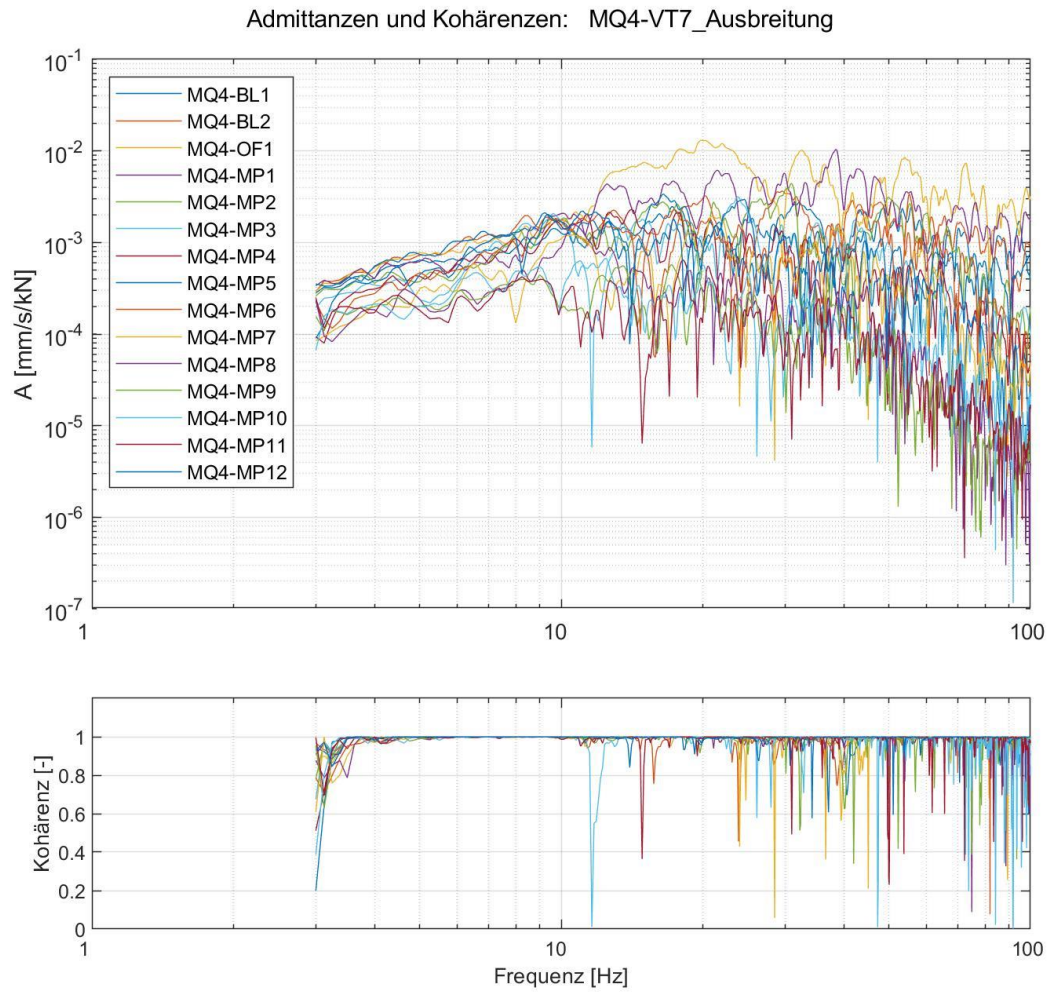


Abbildung 9-60: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)



**Abbildung 9-61: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT7)**

Admittanzen: MQ4-VT7\_Ausbreitung

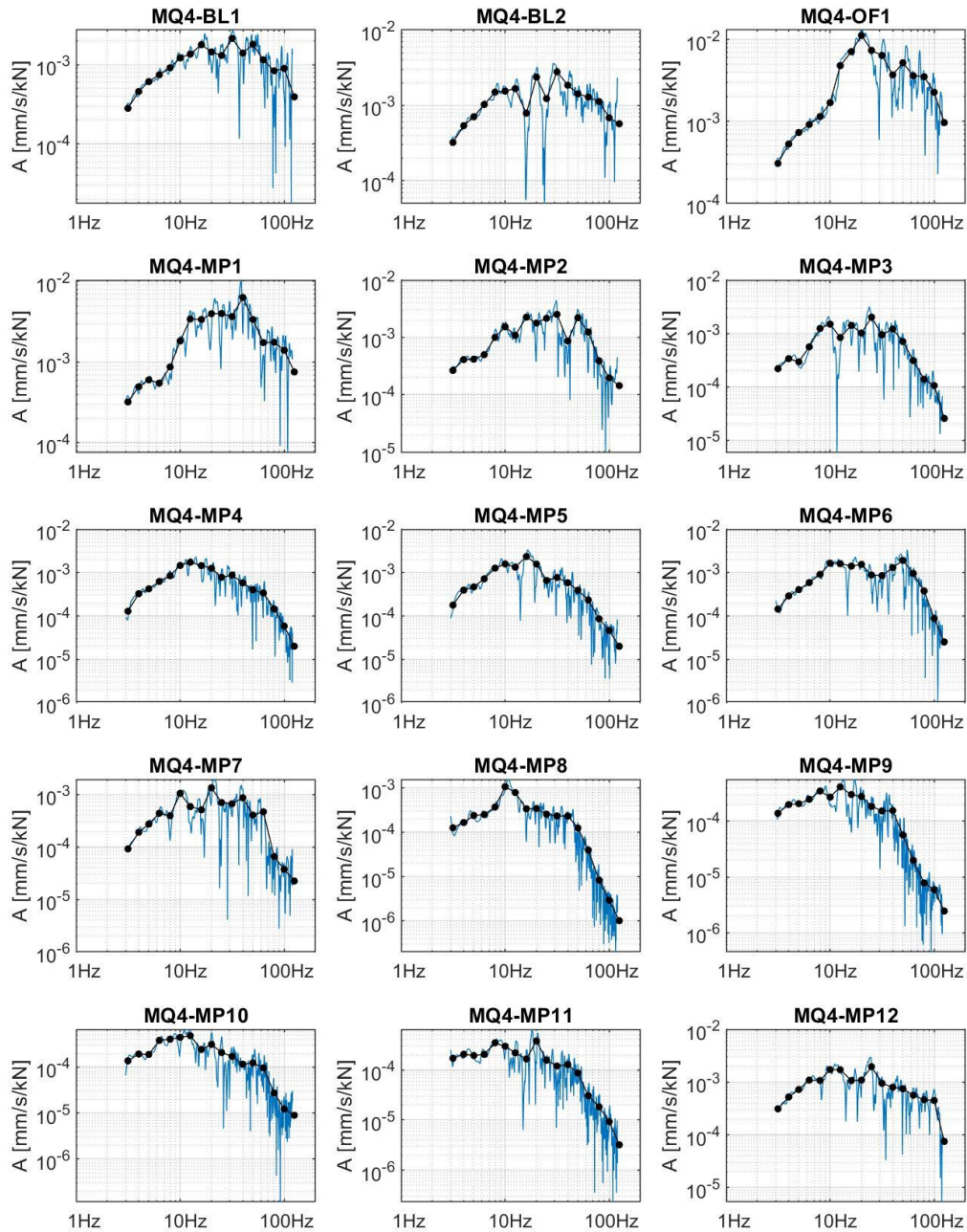


Abbildung 9-62: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT7)

Die folgenden Baugrundadmittanzen berücksichtigen ausschließlich die Messpunkte MP12, MP13 und MP14. Diese liegen auf dem Gelände der Trabrennbahn. Die zugehörige Regressionsanalyse findet sich in Abbildung 9-78.



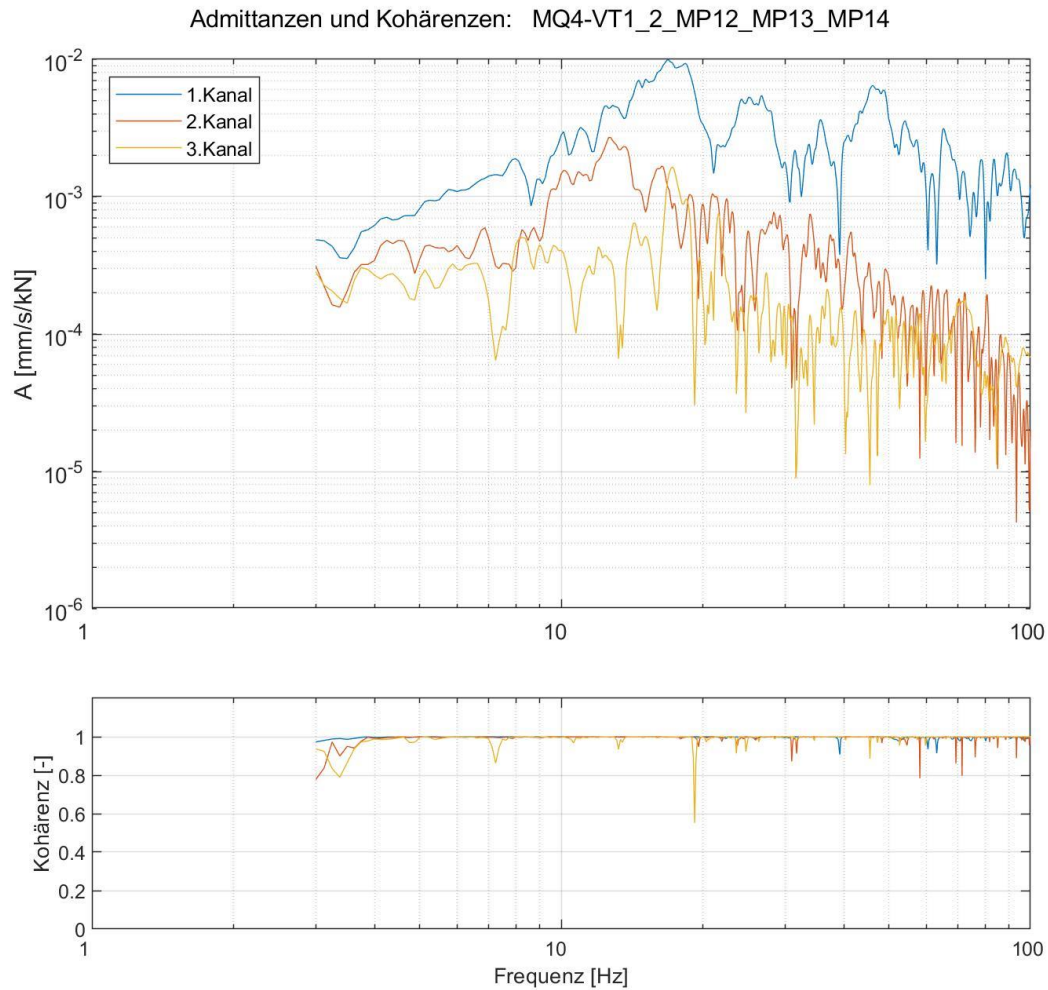


Abbildung 9-63: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

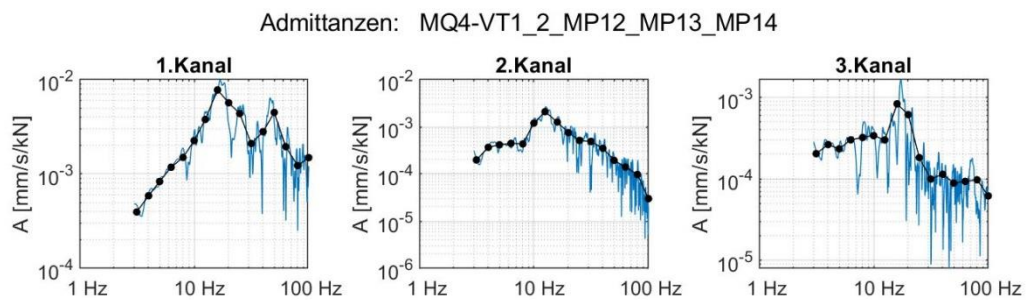


Abbildung 9-64: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)



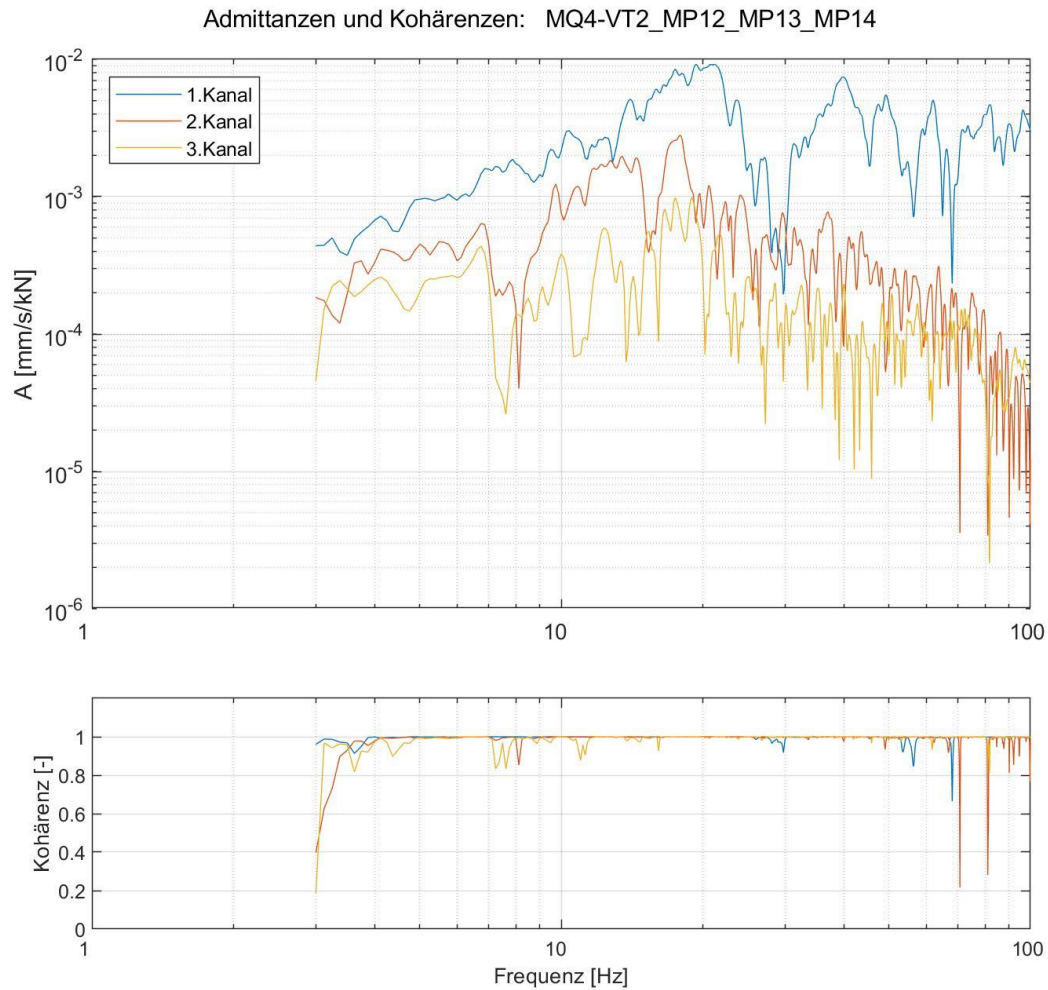


Abbildung 9-65: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

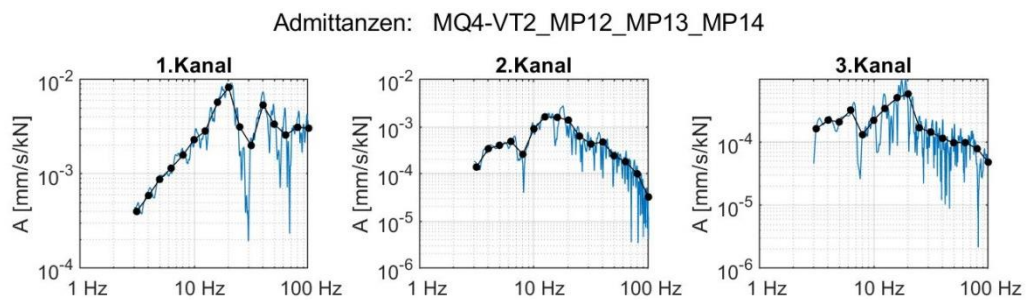


Abbildung 9-66: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

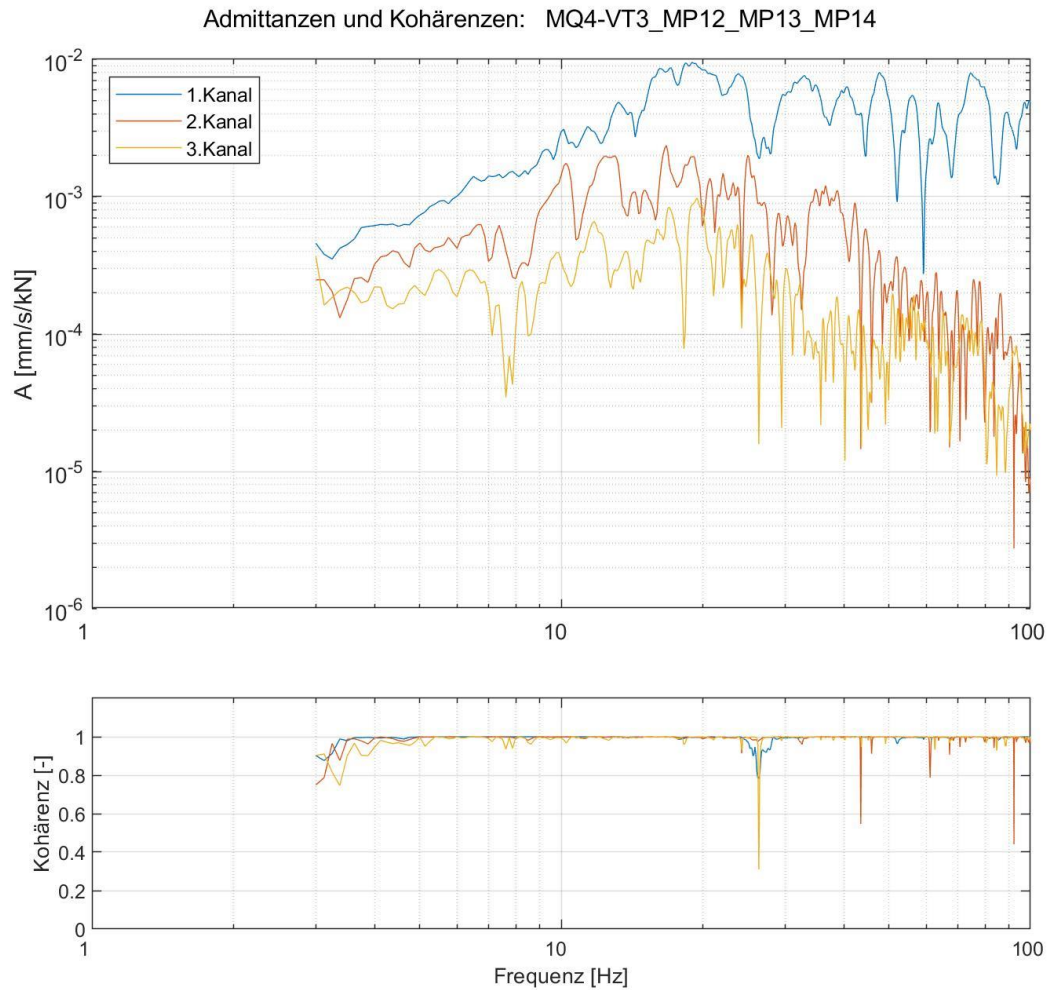


Abbildung 9-67: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

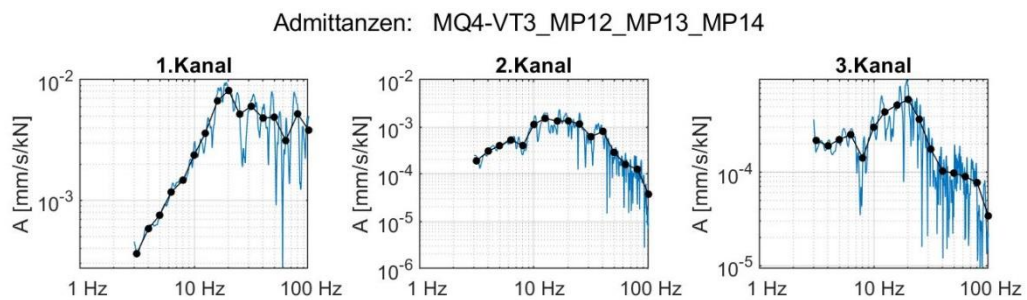


Abbildung 9-68: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

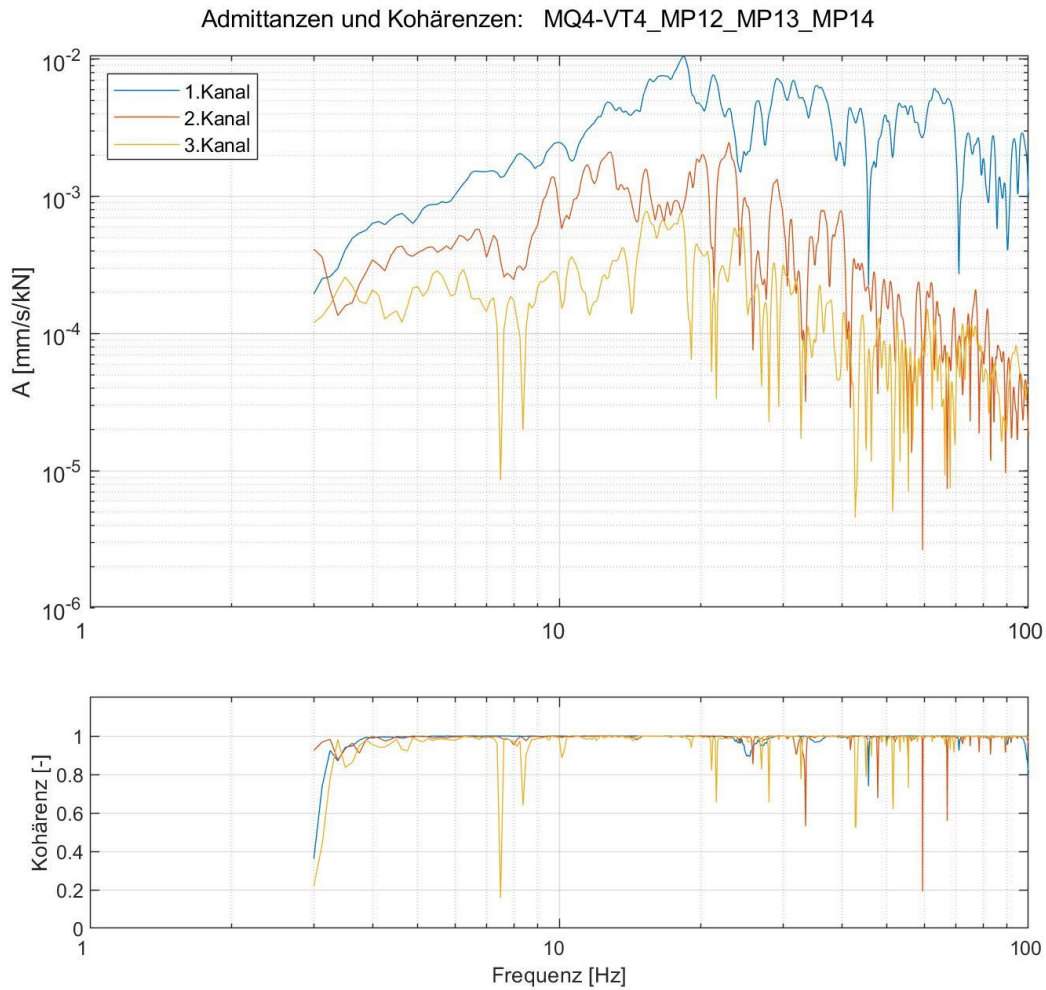


Abbildung 9-69: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

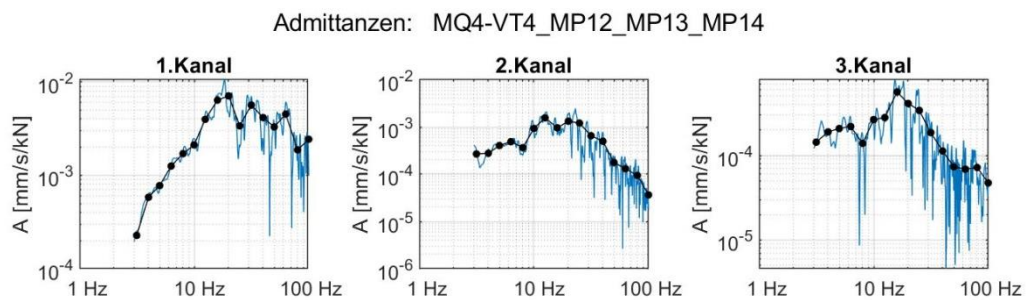


Abbildung 9-70: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittenzen (Anregung VT4)

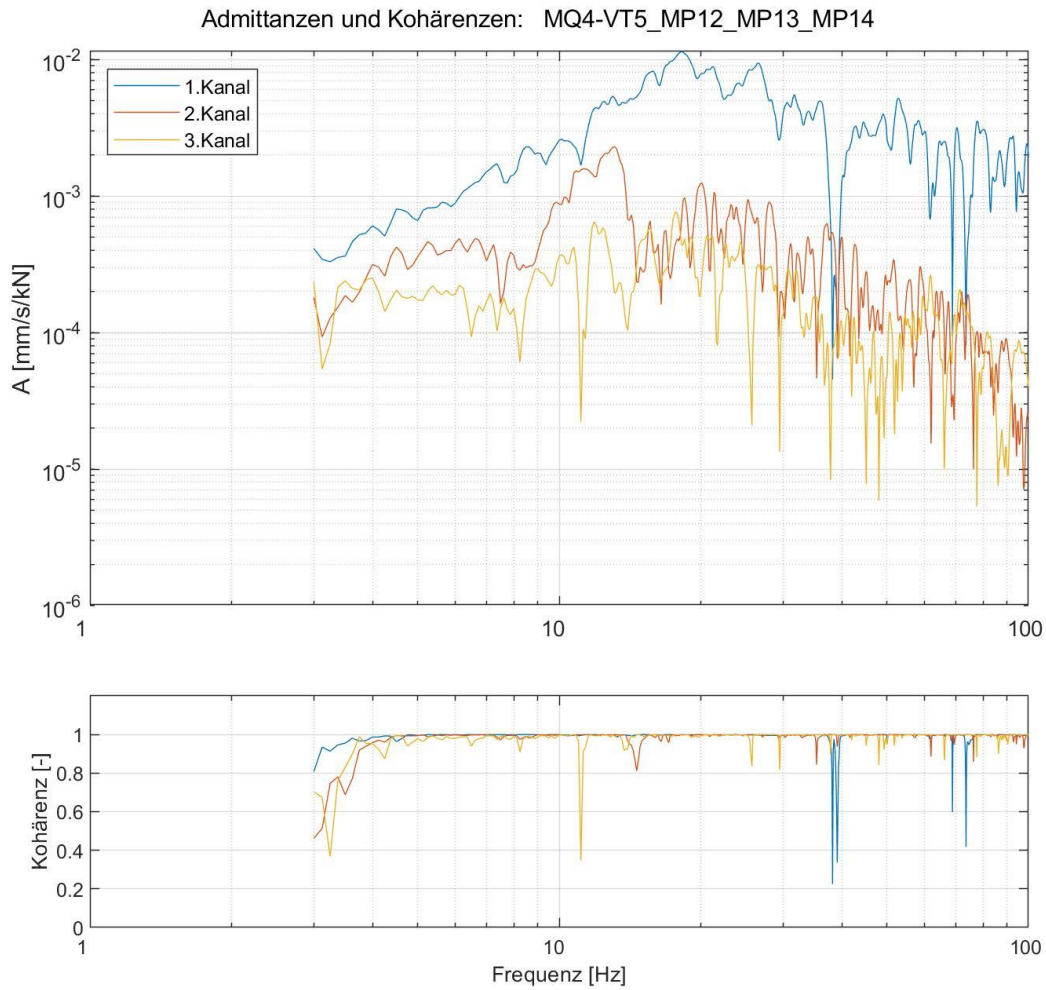


Abbildung 9-71: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

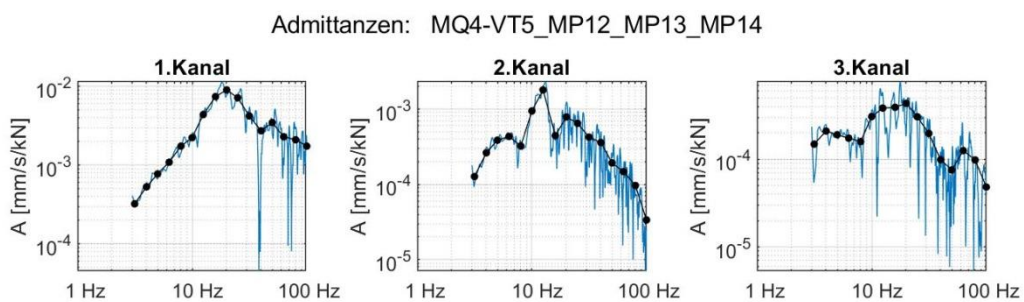


Abbildung 9-72: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)



Admittanzen und Kohärenzen: MQ4-VT6\_MP12\_MP13\_MP14

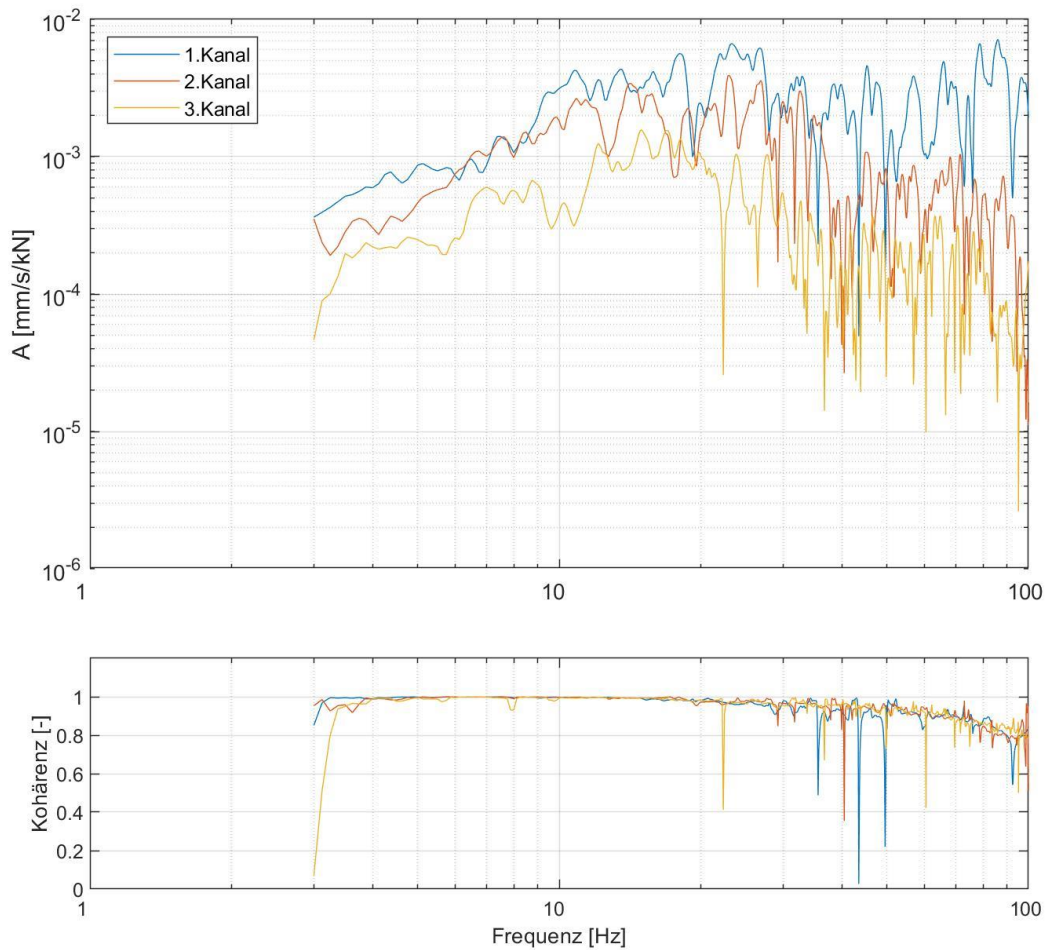


Abbildung 9-73: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

Admittanzen: MQ4-VT6\_MP12\_MP13\_MP14

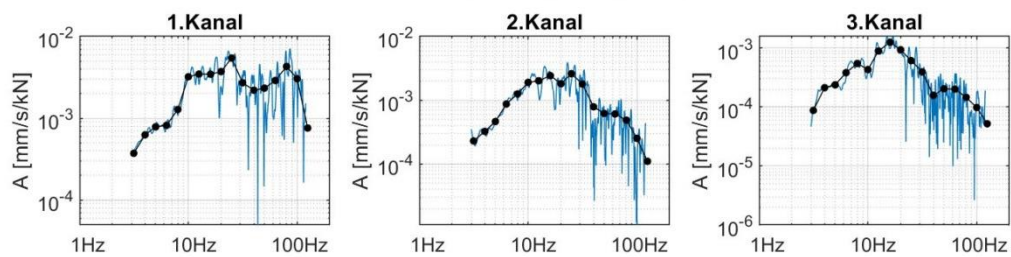


Abbildung 9-74: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

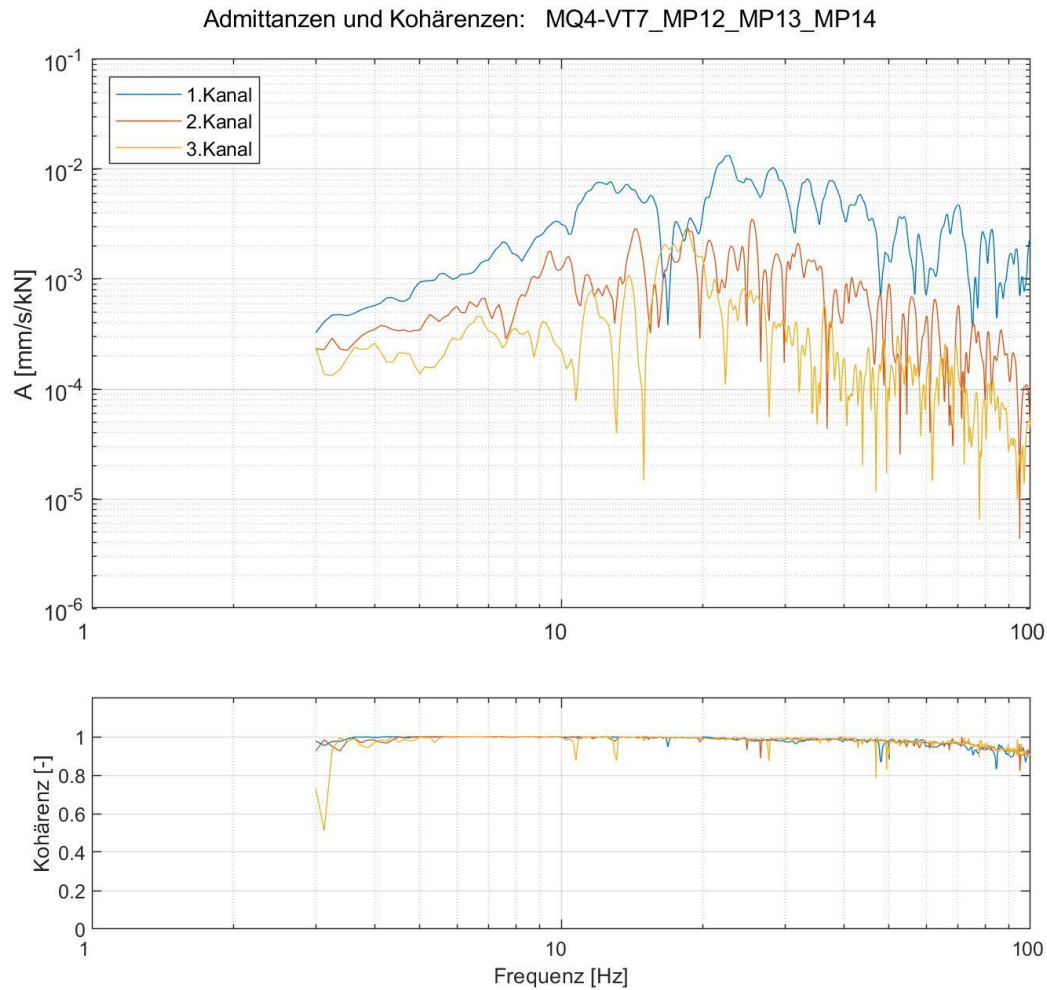


Abbildung 9-75: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT7)

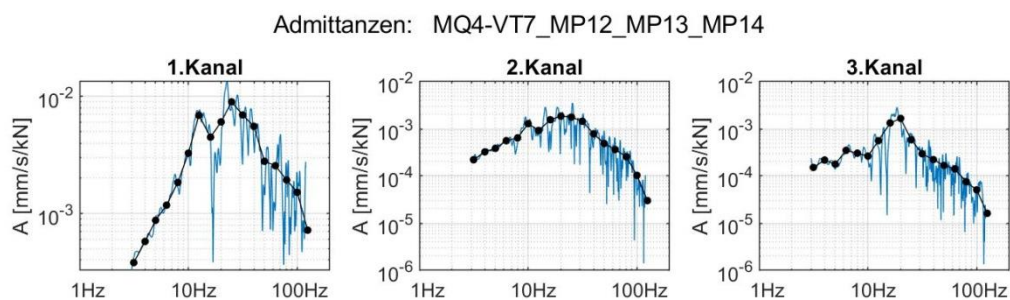


Abbildung 9-76: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT7)

### 9.5.5 Ergebnisse der Regressionsanalyse

Der nachfolgenden Regressionsanalyse liegen folgende Mess- und Anregungspunkte zugrunde:

Projekt: Science City HH Erschütterungsuntersuchung S32 Bericht-Nr.: 40-10714-01-D6 (Rev.A)	Erschütterungs- und Magnetfeldimmissionen durch die S-Bahn auf den Forschungscampus Bahrenfeld	Seite 212/439
--	---	---------------

Messpunkte	MP1, MP2, MP3, MP4, MP5, MP6, MP7, MP8, MP9, MP10, MP11
Anregungspunkte	VT1, VT2, VT3, VT4, VT5, VT6

Abnahme Admittanz: Sweep-Anregung VibroTruck

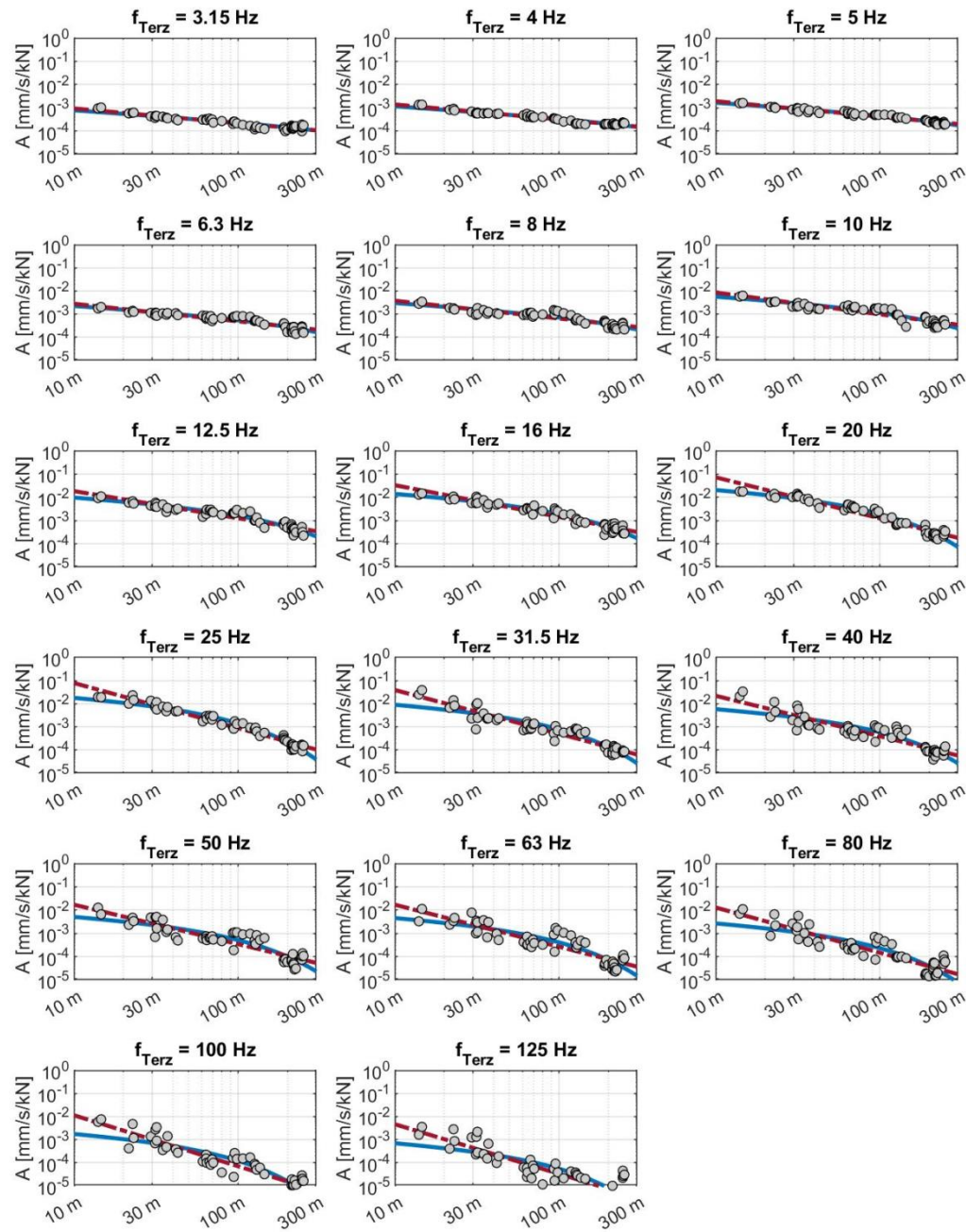


Abbildung 9-77: Ergebnisse der Regressionsanalyse: Abnahme der Admittanzen über die Entfernung (rot=zu Grunde gelegtes Abnahmengesetz)



Der nachfolgenden Regressionsanalyse liegen folgende Mess- und Anregungspunkte zugrunde:

Messpunkte	MP1, MP2, MP3, MP12, MP13, MP14
Anregungspunkte	VT1, VT2, VT3, VT4, VT5, VT6, VT7

Abnahme Admittanz: Sweep-Anregung VibroTruck

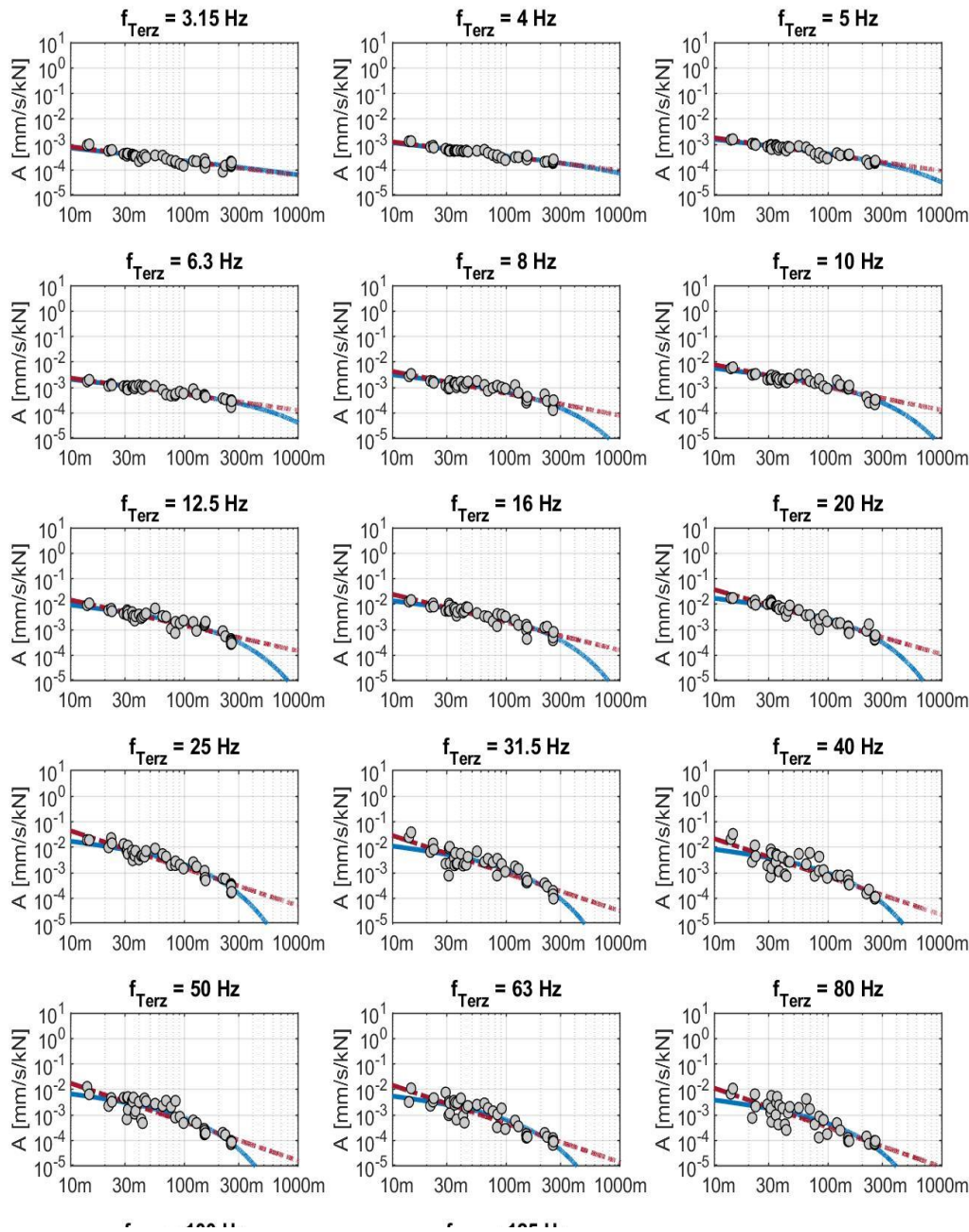


Abbildung 9-78: Ergebnisse der Regressionsanalyse: Abnahme der Admittanzen über die Entfernung (rot=zu Grunde gelegtes Abnahmegeesetz); Messquerschnitt MQ4 (Trabrennbahn)



### 9.5.6 Ergebnisse der Übertragungsadmittanz infolge Mehrpunktanregung

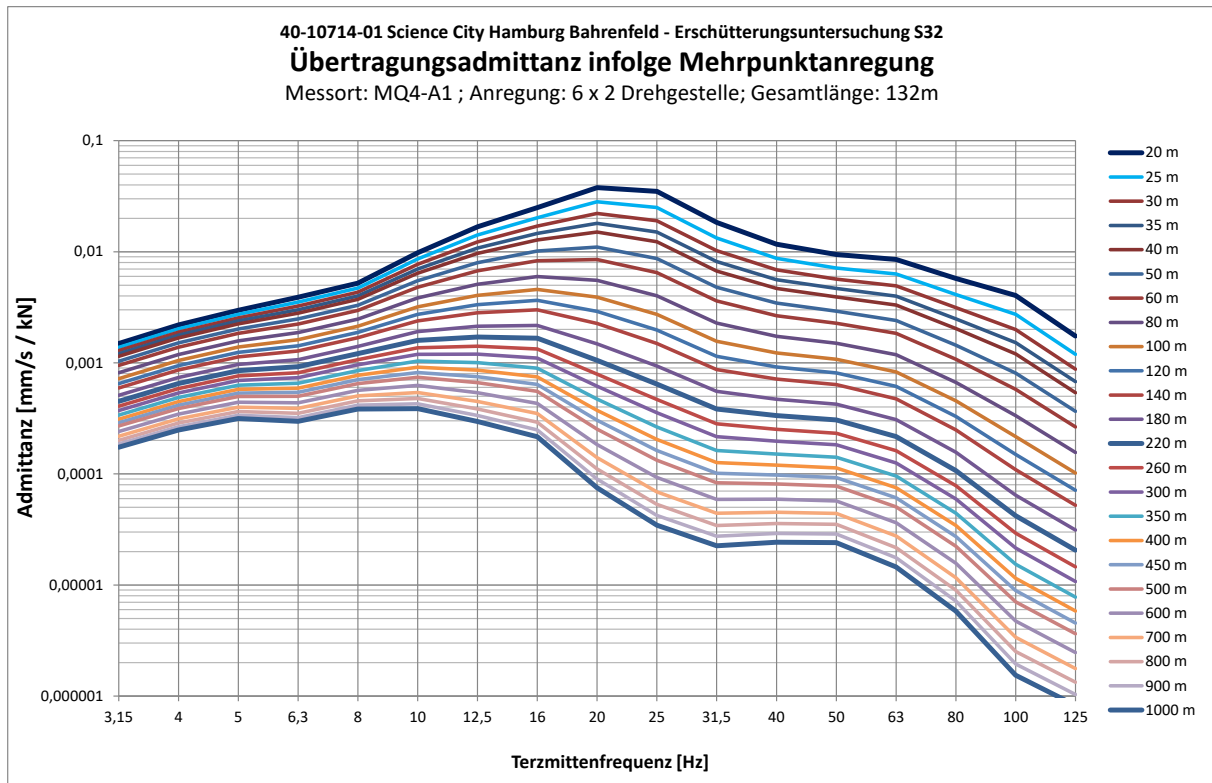


Abbildung 9-79: Ergebnisse der Übertragungsadmittanz infolge Mehrpunktanregung für MQ4

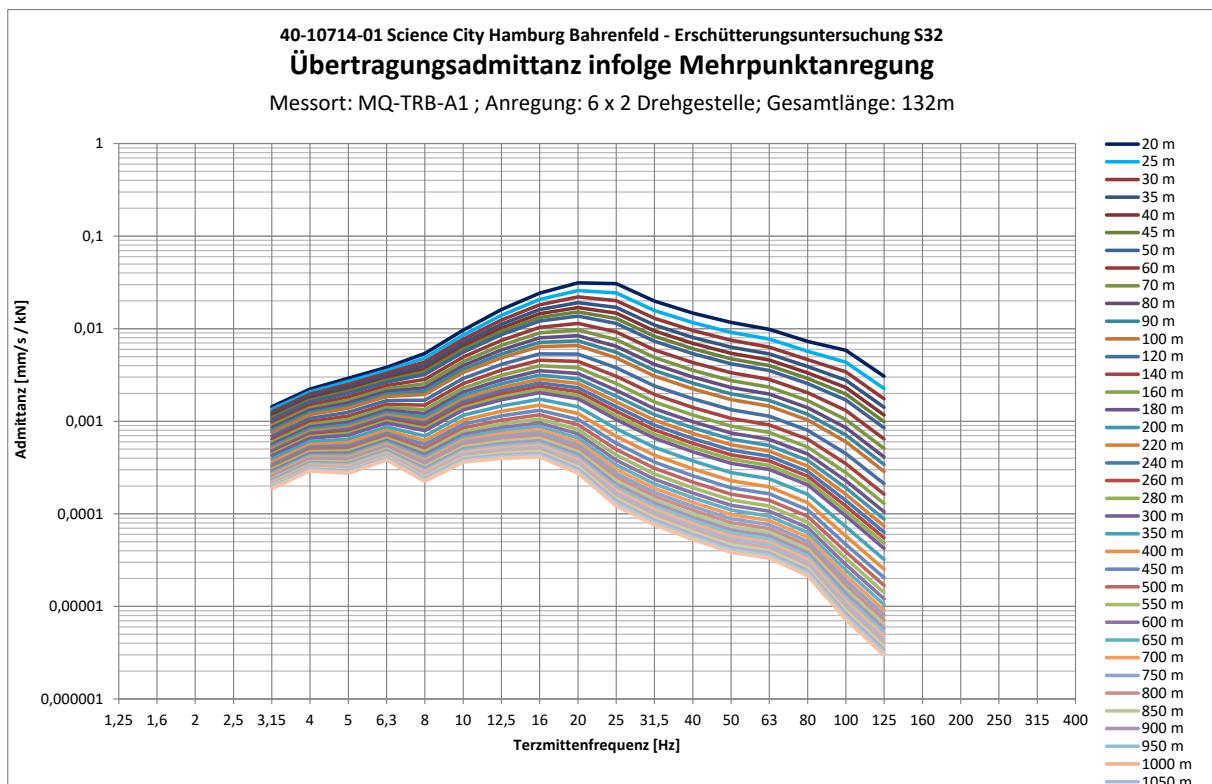


Abbildung 9-80: Ergebnisse der Übertragungsadmittanz infolge Mehrpunktanregung für MQ4 (Trabrennbahn)

9.6 VibroTruck am Messquerschnitt MQ5

9.6.1 Lageskizze

In der folgenden Grafik ist die Lage der Messpunkte beider Messanlagen in blau und die Anregungspunkte des VibroTruck in Türkis skizziert:

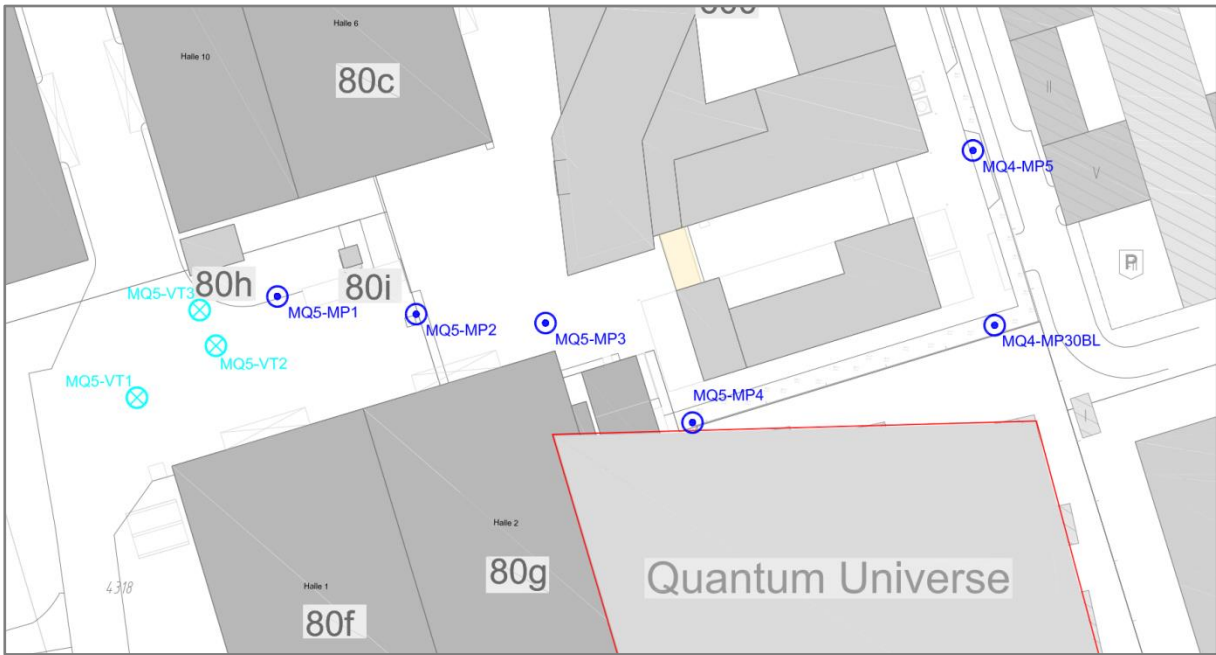


Abbildung 9-81: Lageskizze der Anregungs- und Messpunkte der VibroTruck Messungen am MQ5

9.6.2 Abstände

Sämtliche Mess- und Anregungspunkte wurden mit dem GNSS Gerät gemäß Tabelle 9-4 eingemessen und daraus die Abstände zwischen Mess- und Anregungspunkt ermittelt. Die folgende Tabelle listet die Entfernungen zwischen den Anregungspunkten mit VibroTruck und Messpunkten auf.

Anregungspunkt Messpunkt			
	VT1	VT2	VT3
MP30-Bohrloch	137,5	124,5	127,0
MQ5-MP1	27,6	12,6	12,6
MQ5-MP2	46,6	32,4	34,6
MQ5-MP3	66,4	52,8	55,3
MQ5-MP4	88,8	77,1	80,8
MQ5-MP5	139,3	124,9	126,1

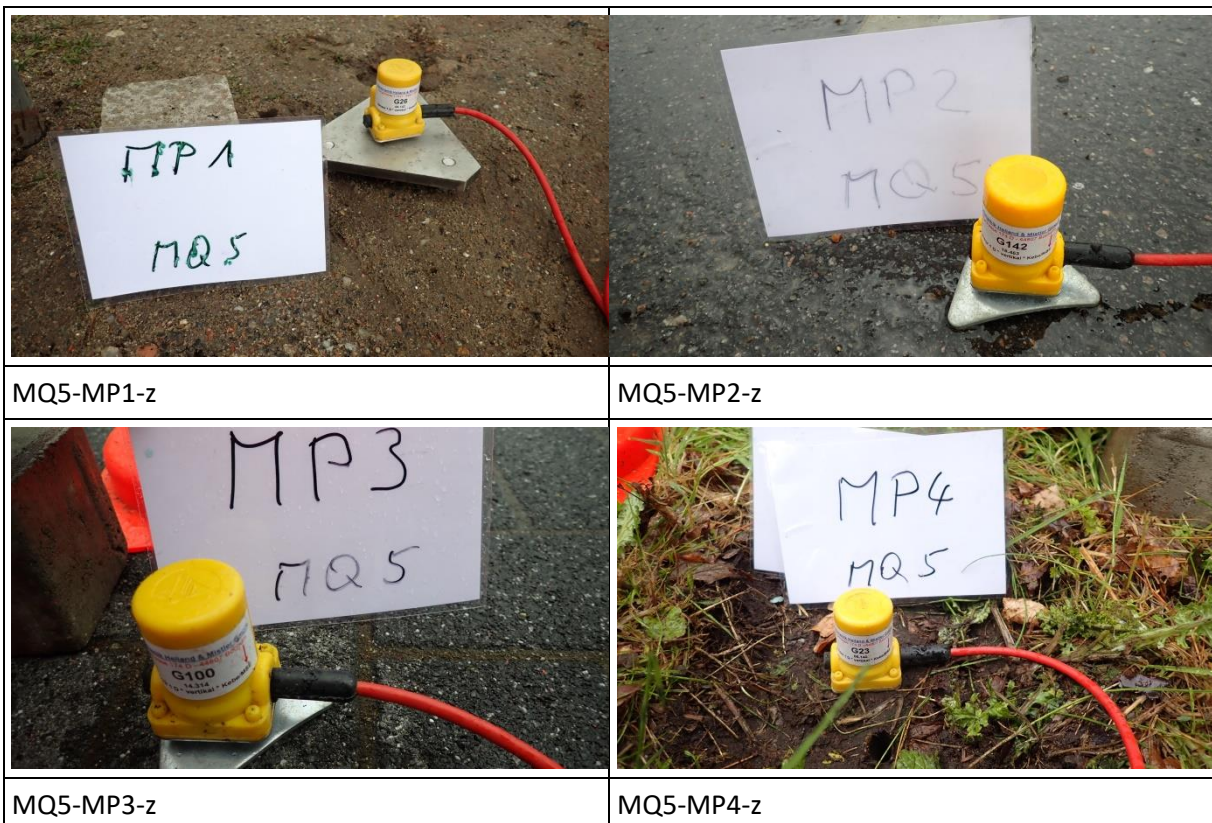
Tabelle 9-22: Entfernungen [m] der Messpunkte zu den VibroTruck-Anregungspunkten am MQ5

### 9.6.3 Kanalbelegung und Fotodokumentation der Messpunkte

Kanal	Messpunkt	Lage	Aufstell- bedingung	Sensor	Kabel	Messbereich [mm/s]
1	VibroTruck	Anregungsort VT1- VT3				0-70 [kN]
2	MQ5-MP1	Schotter	Dreier-Spitze	G26	59	+/-10
3	MQ5-MP2	Asphalt	Tripod	G142	39	+/-2
4	MQ5-MP3	Pflasterstein	Tripod	G100	138	+/-2
5	MQ5-MP4	Wiese	Spike	G23	38, 138	+/-2
6	MQ5-MP5	Wiese	Spike	G4	47, 138	+/-2
7	MQ5-MP30	Bohrsonde	-11m unter GOK	BS3	148	+/-2
8	MQ5-MP30	vergraben	Spike	G139	148	+/-2
9	MQ5-MP30	OF	Spike	G96	148	+/-2

Tabelle 9-23: Messpunkte MQ5

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [5].









	
MQ5-MP5-z	MQ5-MP30-z (Bohrsonde)
	
MQ5-MP30-z	MQ5-MP30-z (OF)

Tabelle 9-24: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ5 bei VibroTruck Anregung

Folgende Messungen wurden mit dem VibroTruck am Referenzquerschnitt Ref1 durchgeführt:

Bezeichnung	Inhalt	GPS Zeitstempel des jeweils 1. Sweeps
Abklopfen	QS-Prüfung	-
MQ5-VT1	log. Sweep 3-120Hz am MQ5-VT1	21/05/27 15:20:30:688000
MQ5-VT2	log. Sweep 3-120Hz am MQ5-VT2	21/05/27 15:30:05:764000
MQ5-VT3	log. Sweep 3-120Hz am MQ5-VT3	21/05/27 15:52:49:988000

Tabelle 9-25: Auflistung der durchgeführten Messungen am MQ4 mit VibroTruck



#### 9.6.4 Ergebnisse der Baugrundadmittanzen

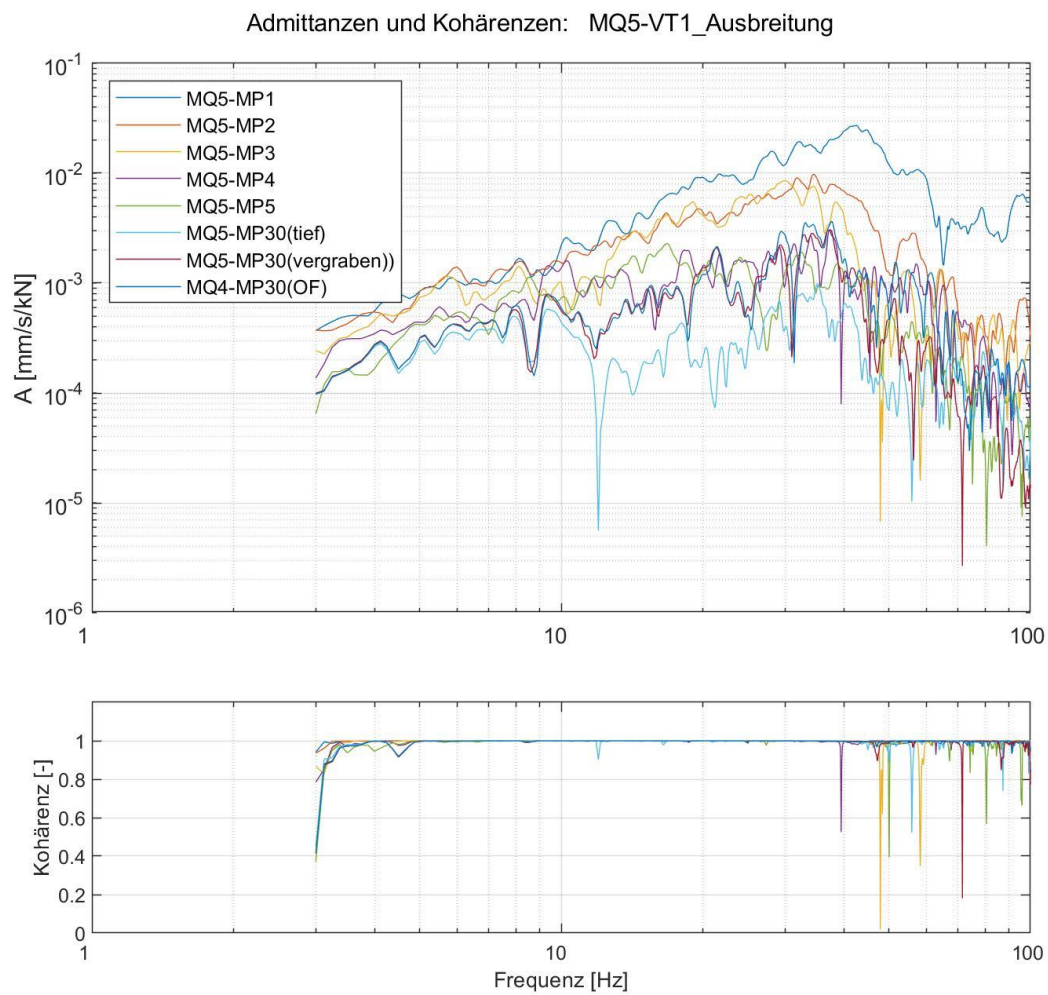


Abbildung 9-82: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

Admittanzen: MQ5-VT1\_Ausbreitung

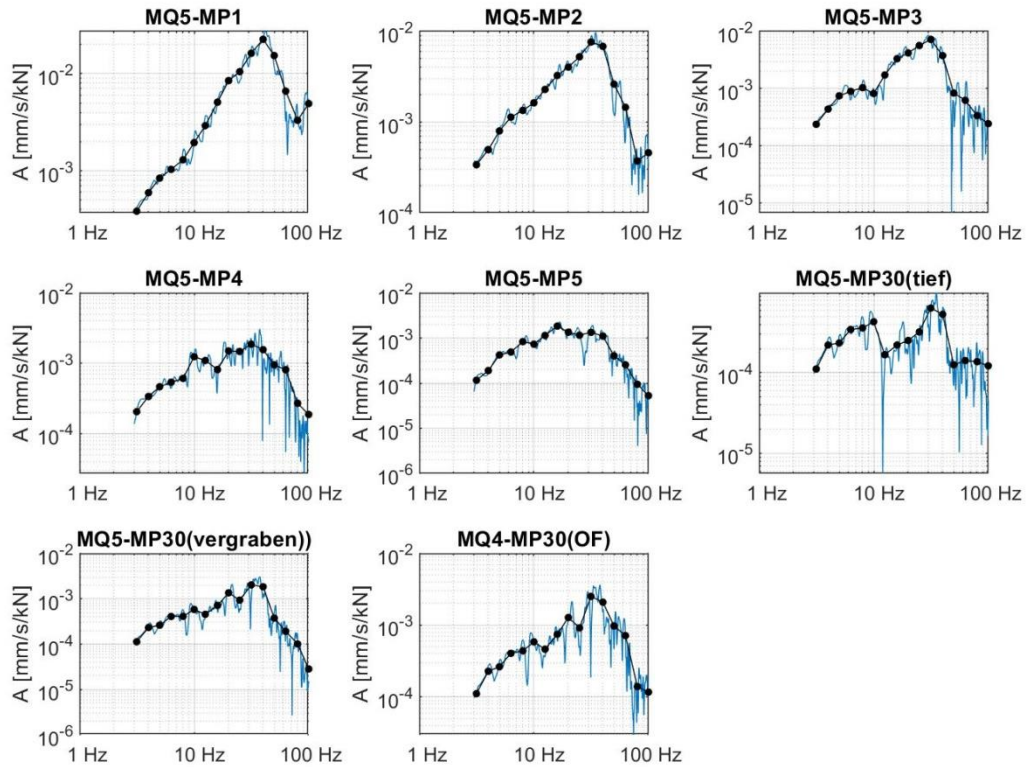


Abbildung 9-83: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

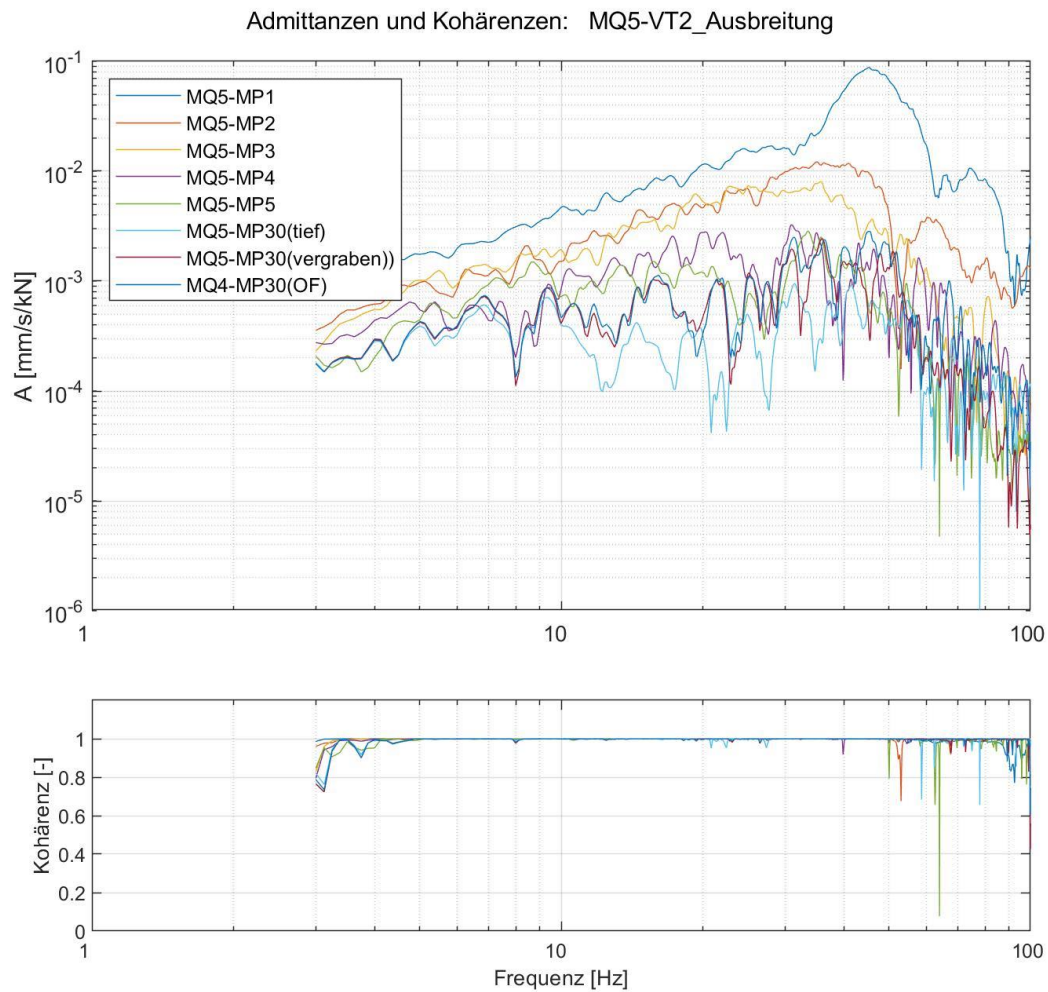


Abbildung 9-84: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

Admittanzen: MQ5-VT2\_Ausbreitung

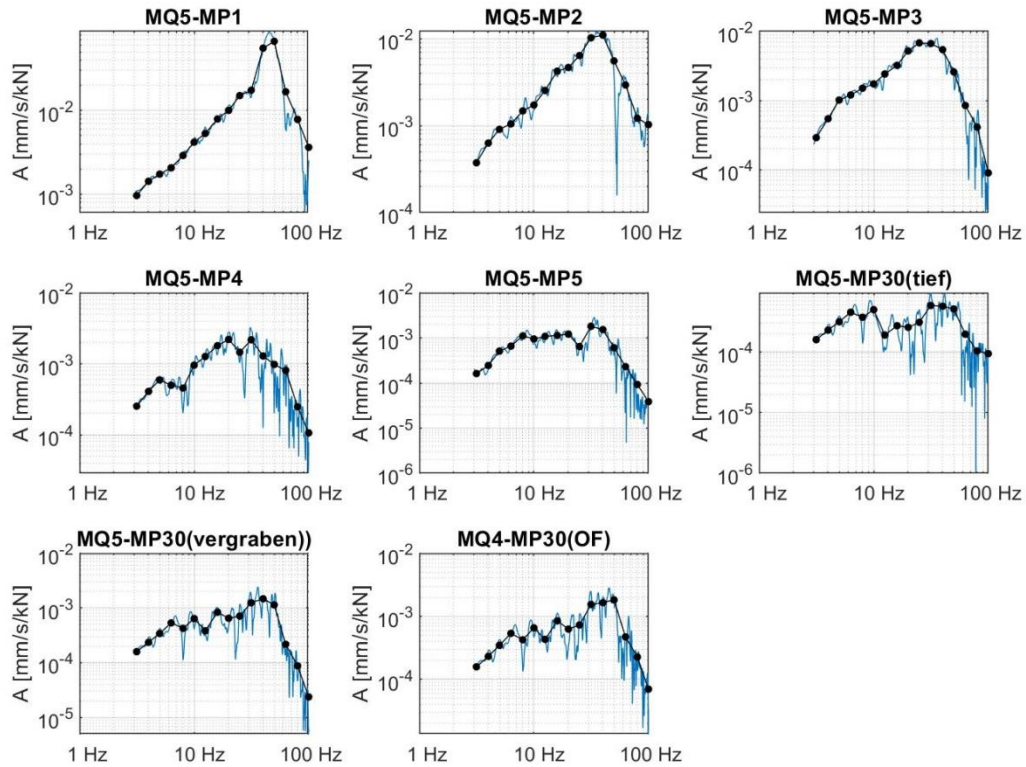


Abbildung 9-85: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)



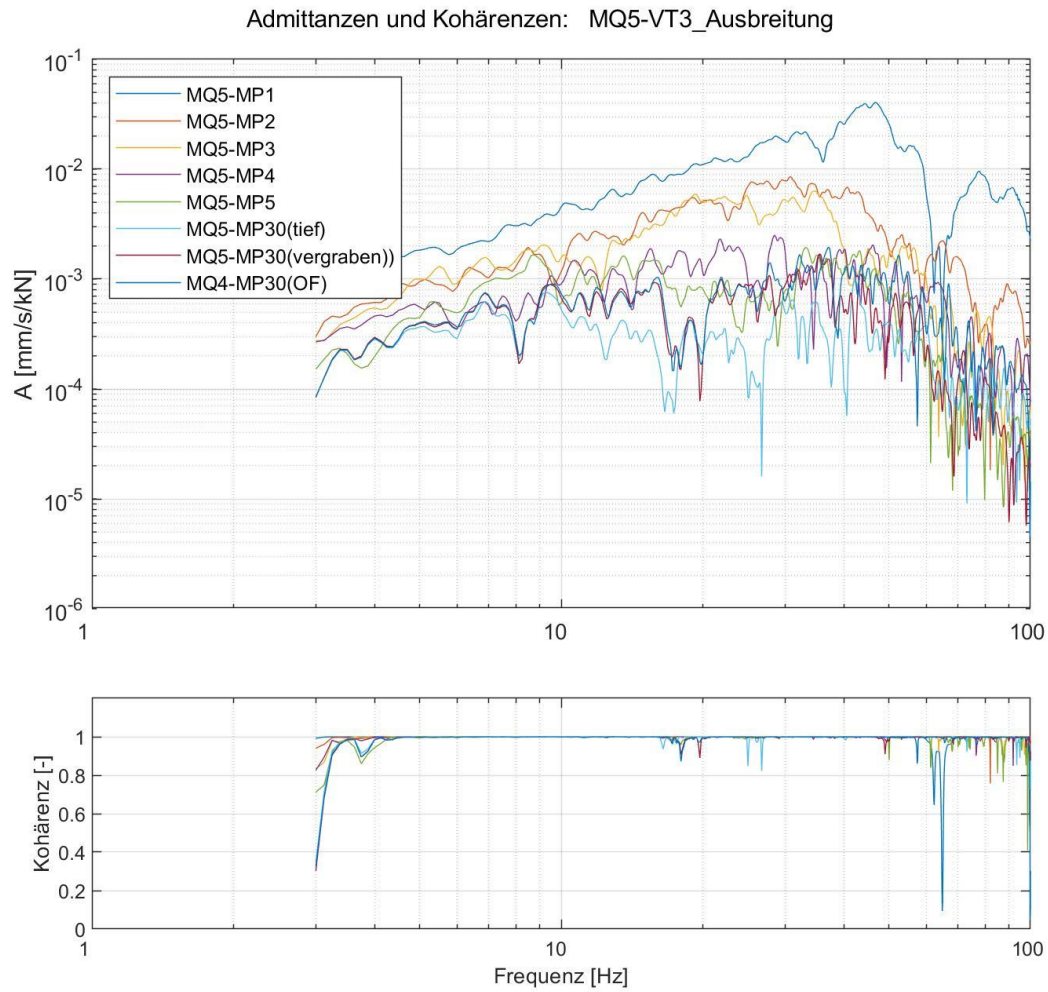


Abbildung 9-86: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

Admittanzen: MQ5-VT3\_Ausbreitung

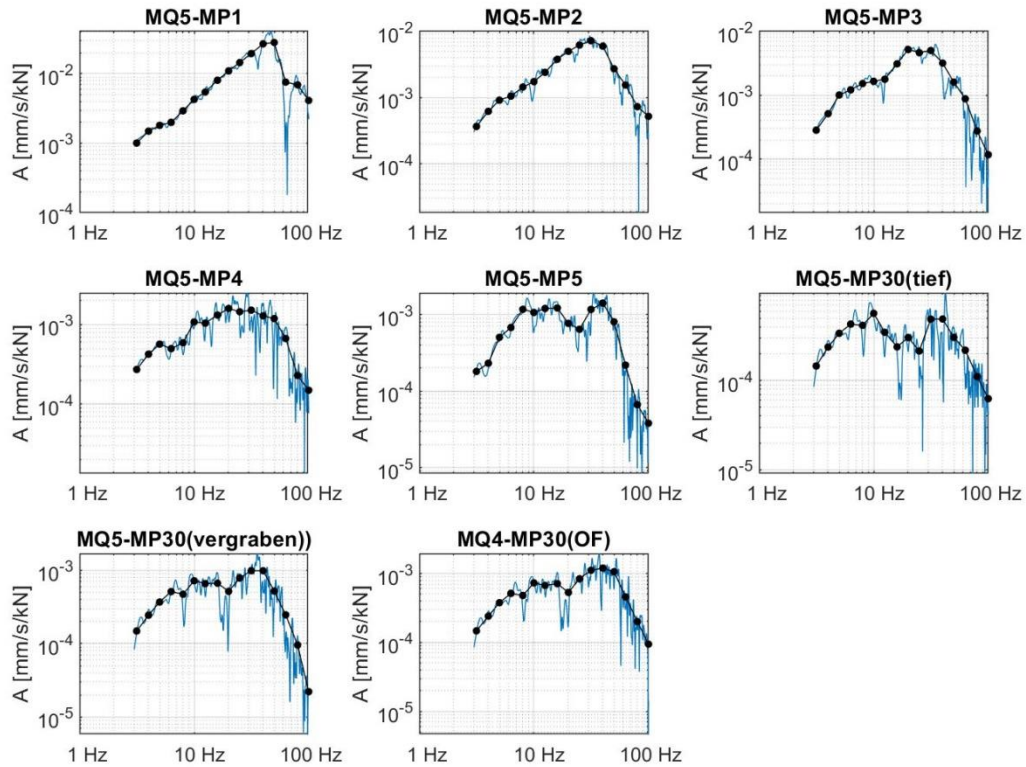
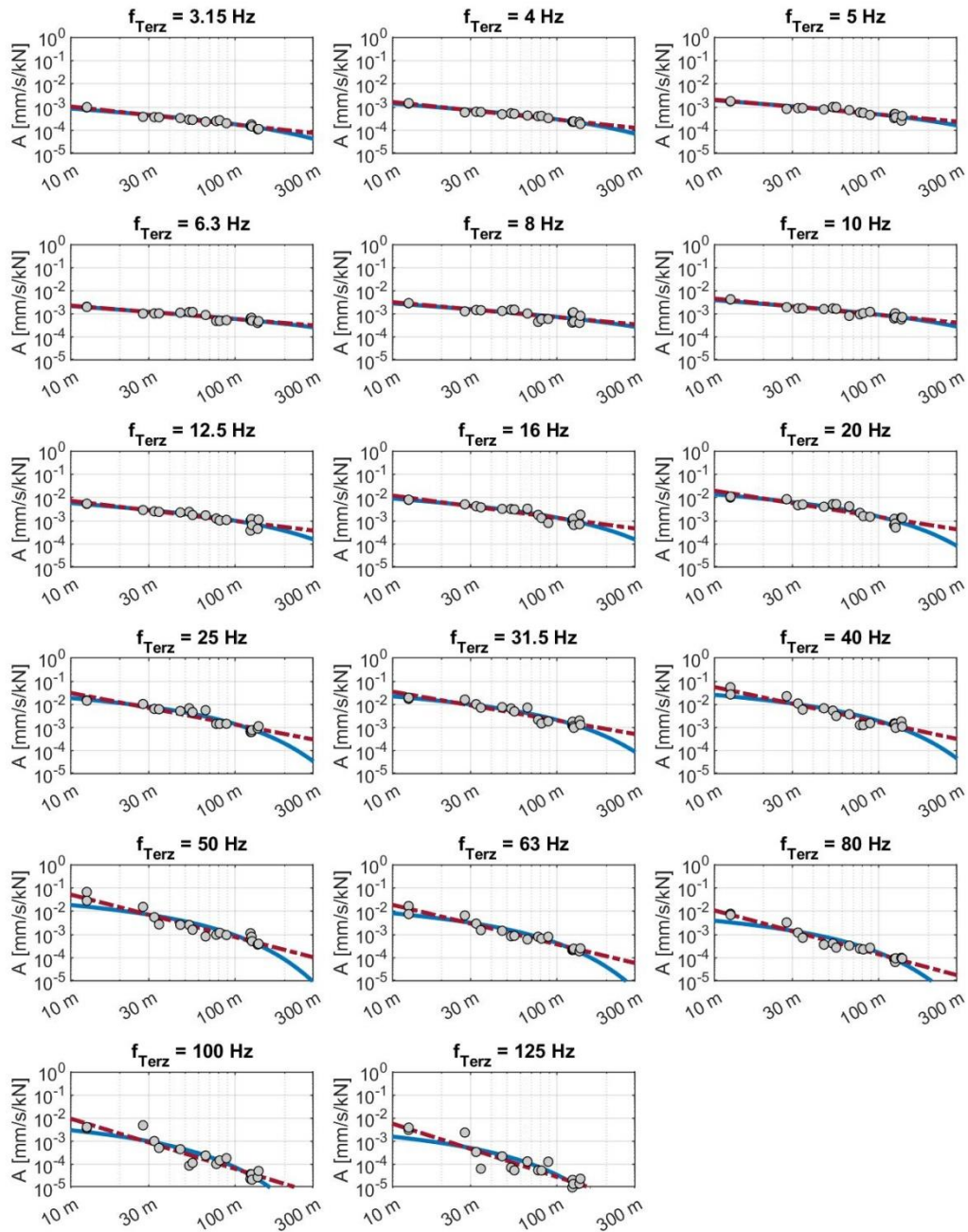


Abbildung 9-87: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

## 9.6.5 Ergebnisse der Regressionsanalyse

Abnahme Admittanz: Sweep-Anregung VibroTruck



**Abbildung 9-88: Ergebnisse der Regressionsanalyse: Abnahme der Admittanzen über die Entfernung (rot=zu Grunde gelegtes Abnahmegezet)**



### 9.7 Gebäudemesspunkte

An 13 von den insgesamt 22 Gebäude-Messpunkten, wo die Beweissicherungsmessungen [1] stattgefunden haben, wurde während der VibroTruck-Anregung an der Luruper Chaussee die ins Gebäude eingetragenen Schwingungen messtechnisch erfasst. Die folgende Abbildung zeigt die Lage der Messpunkte in den Gebäuden. Zusätzlich wurde während der Messung bei MQ5 an 3 weiteren Beweissicherungsmesspunkten (MP23, MP24 und MP8) die Gebäudeübertragungsfunktion bestimmt.

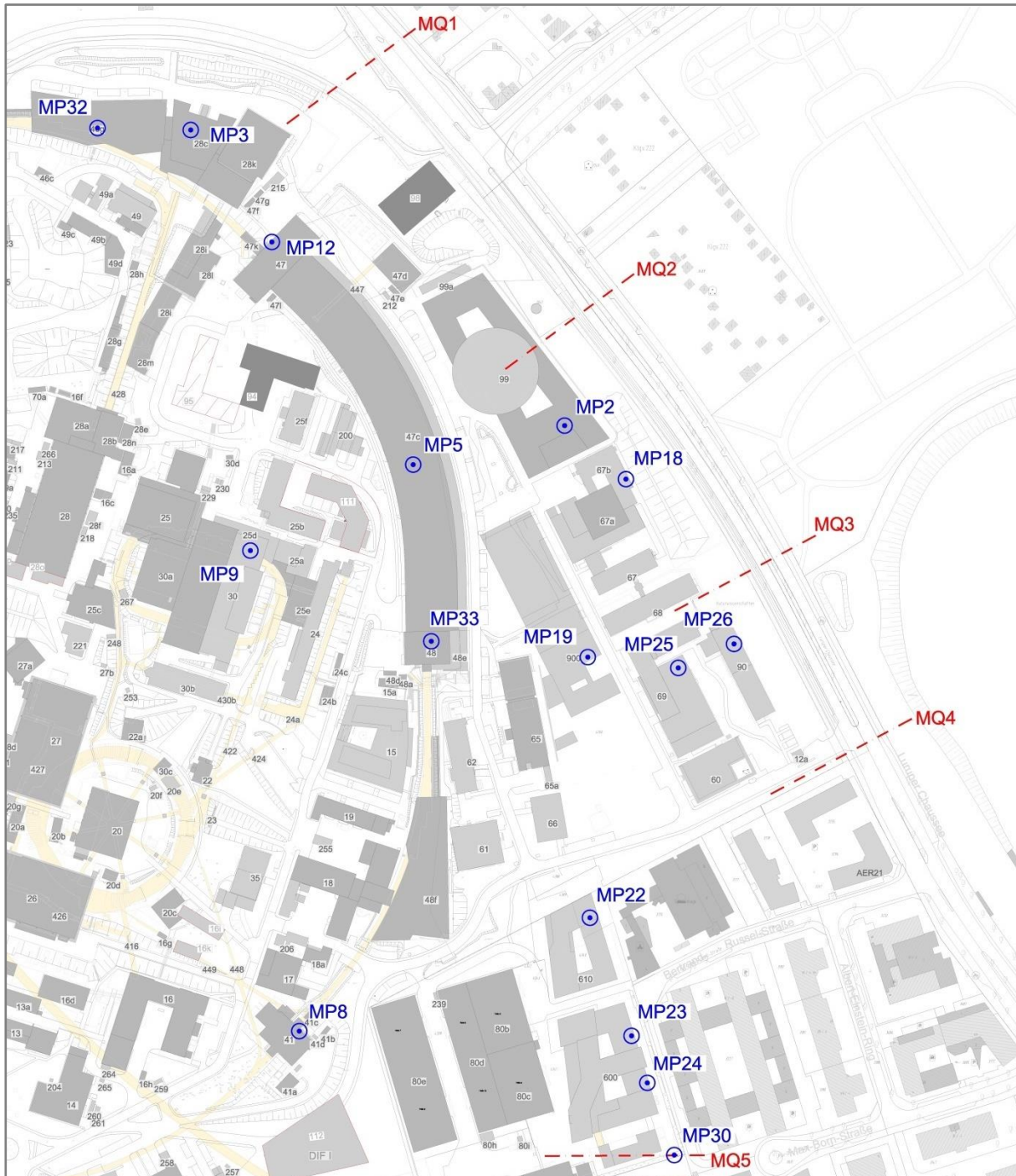


Abbildung 9-89: Gebäudemesspunkte bei Anregung mit VibroTruck



Angemerkt sei, dass MP30 ein Beweissicherungsmesspunkt ist, aber kein Gebäude-MP, sondern ein Bohrloch-MP.

Folgend eine Übersicht der Messpunkte mit den zugehörigen Gebäuden und deren innerhalb des Gebäudes. Die Aufstellung und (Foto-)Dokumentation dieser Messpunkte findet sich in [1], da diese Messpunkte lediglich eine Schnittmenge der Beweissicherungsmesspunkte darstellen.

Messpunkt	Institut / Forschungseinrichtung	Gebäude			
		Bezeichnung	Nr. gemäß Plan	Geschoss	Raum
MP2	Universität Hamburg	CFEL (Center for Free-Electron Laser Science)	99	EG	EG.126 (E1-F-07)
MP3	DESY	FLASH I Experimentierhalle „Albert-Einstein“	28c	EG	Halle
MP5	DESY	PETRA III Experimentierhalle	47c	EG	P5
MP8	DESY	PETRA Halle SO	41	EG	Halle
MP9	DESY	Beschleunigerkontrollraum (BKR Sindbad)	30	UG	SINBAD Lagerbereich
MP12	DESY	PETRA IV Halle NO	47	EG	Halle
MP18	Universität Hamburg	Institut für Experimentalphysik	67a	EG	Raum R8
MP19	Max-Planck-Institut	MPG-MPSD	900	EG	EG.073
MP22	Universität Hamburg	HARBOR (Hamburg Advanced Research Center for Bioorganic Chemistry)	610	EG	0036
MP23	Universität Hamburg	CHyN (Center for Hybrid Nanostructures)	600	EG	RO 69
MP24	Universität Hamburg	CHyN (Center for Hybrid Nanostructures)	600	UG	RU 10 Keller des CHYN
MP25	Universität Hamburg	Institut für Laserphysik	69	„UG“	Kriechkeller unterhalb des Raums 007
MP26	Universität Hamburg	ZOQ (Zentrum für Optische Quantentechnologien)	90	EG	004
MP30	DESY	Grünstreifen hinter Heliumtanks	-	-11m GOK	Bohrloch
MP32	DESY	PETRA III „Paul P. Ewald“	46g	EG	Halle
MP33	EMBL	EMBL (European Molecular Biology Laboratory)	48	EG	Sector 9, P14-EH2 Area 14.3

**Tabelle 9-26: Übersicht der Lage der Gebäudemesspunkte bei VibroTruck-Anregung**

### 9.7.1 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP2

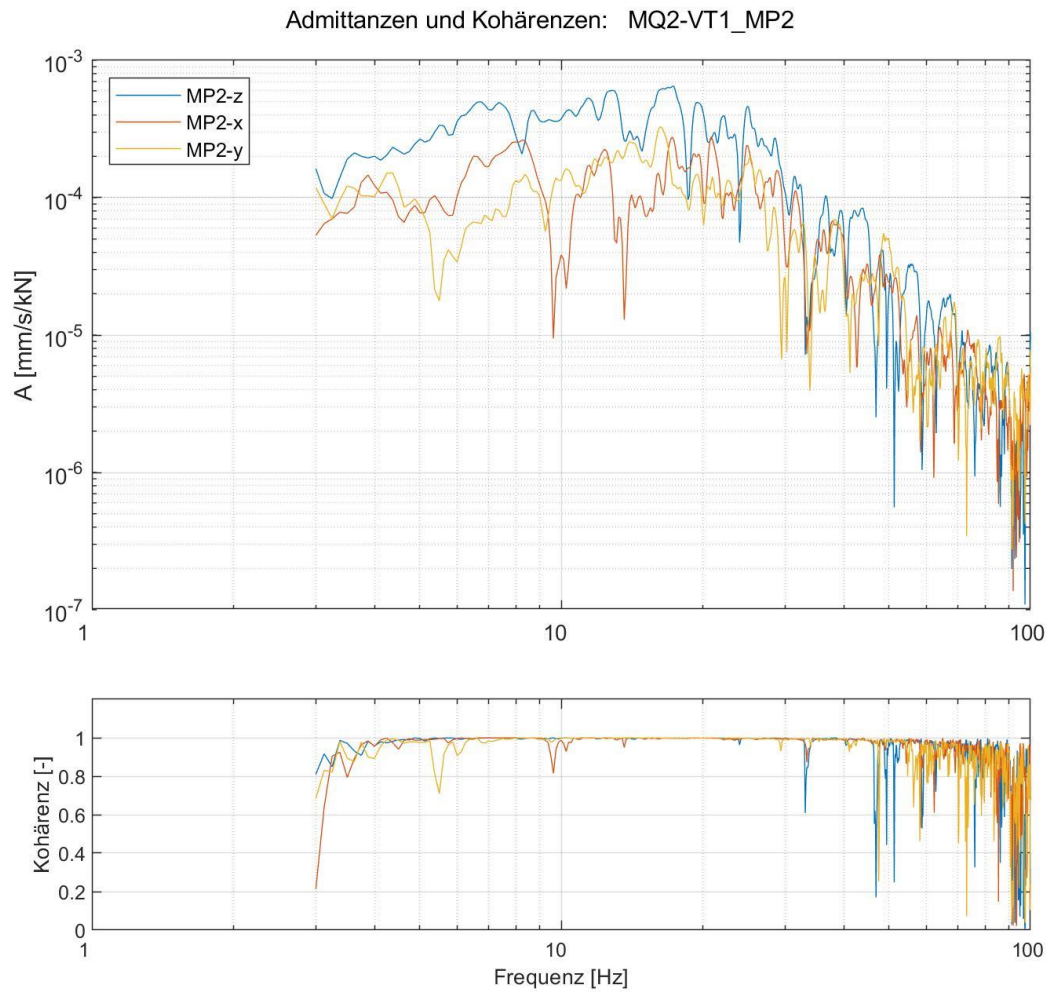


Abbildung 9-90: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

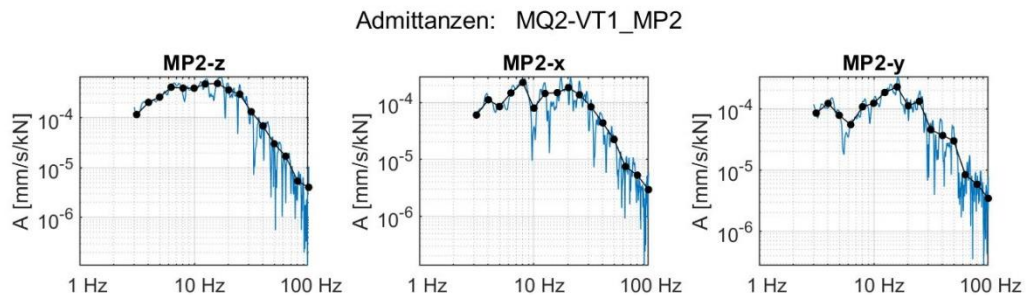


Abbildung 9-91: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

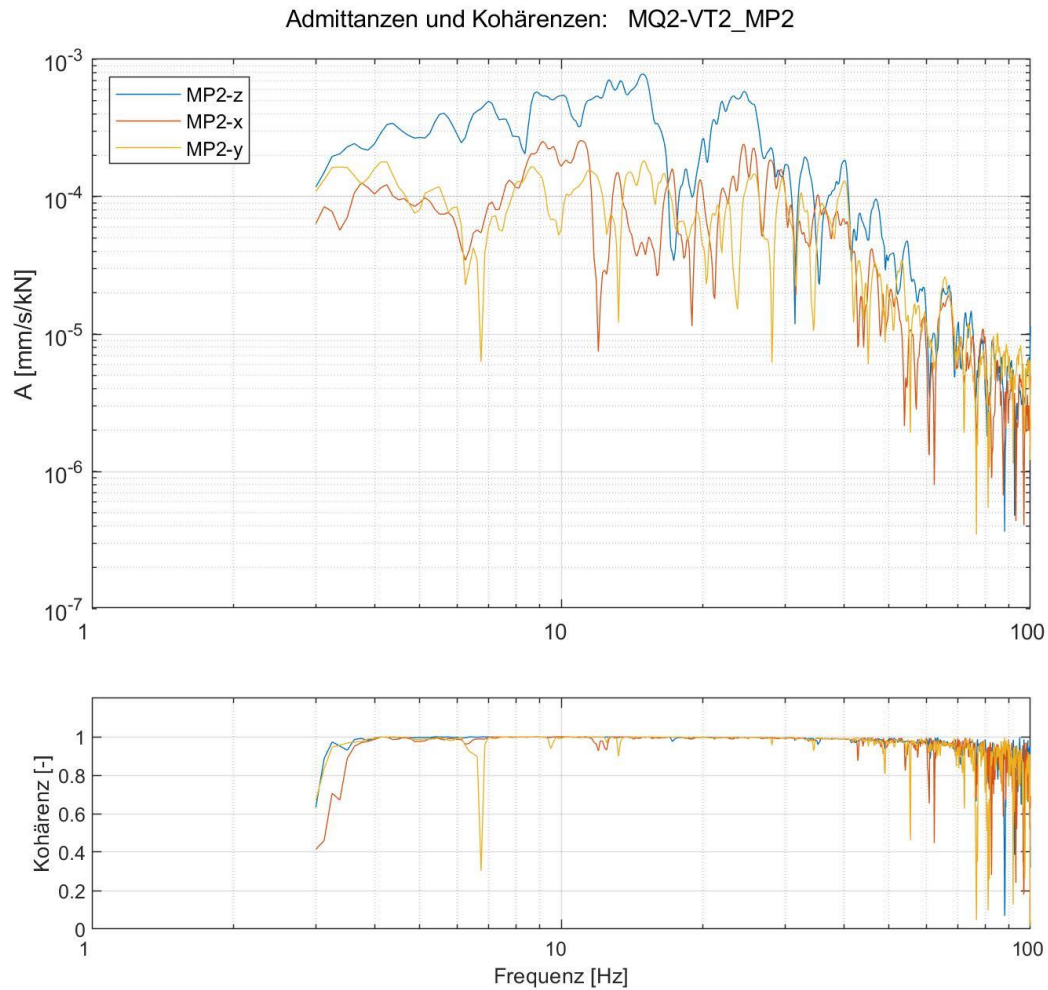


Abbildung 9-92: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

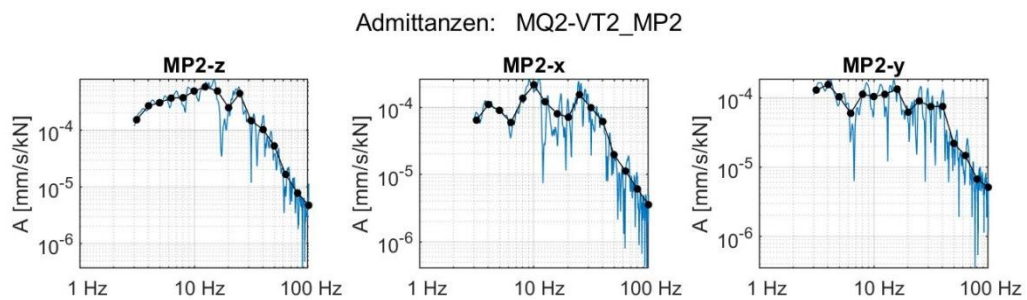


Abbildung 9-93: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittenzen (Anregung VT2)

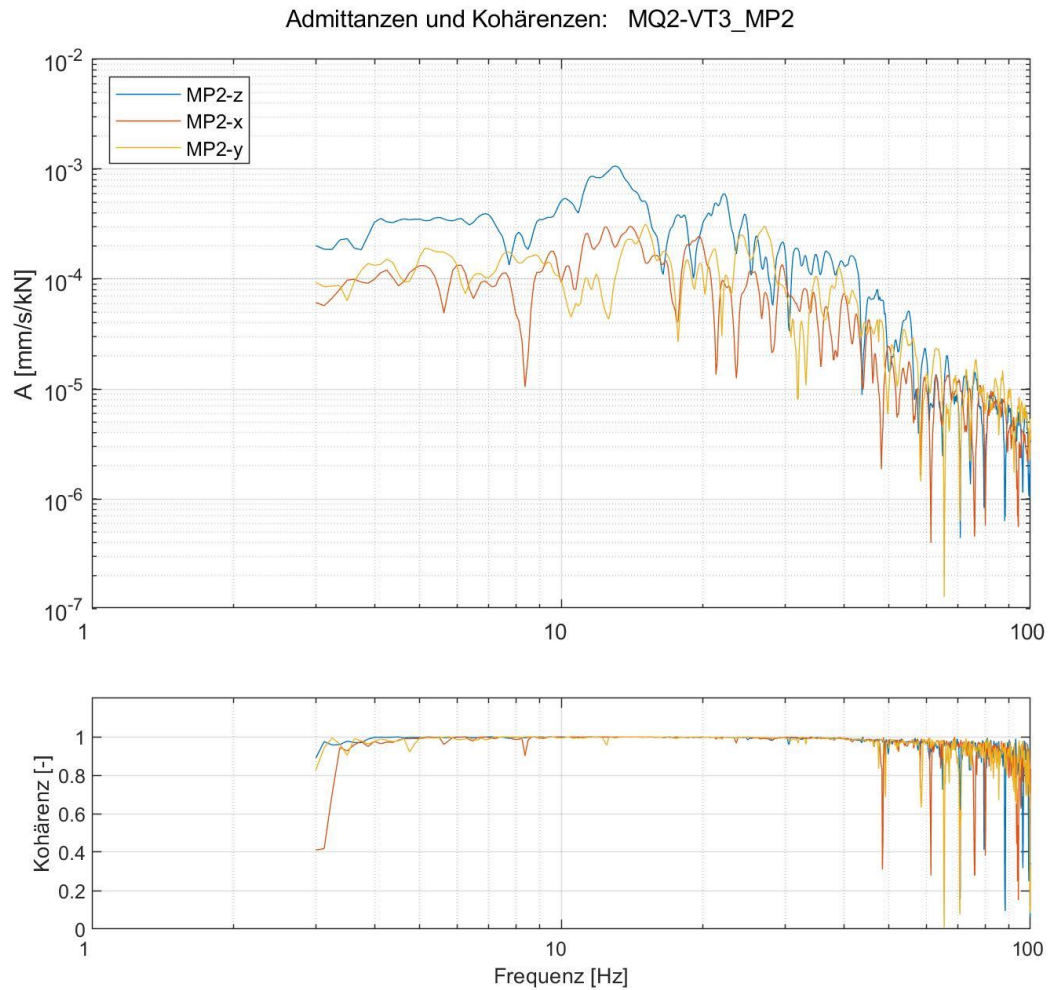


Abbildung 9-94: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

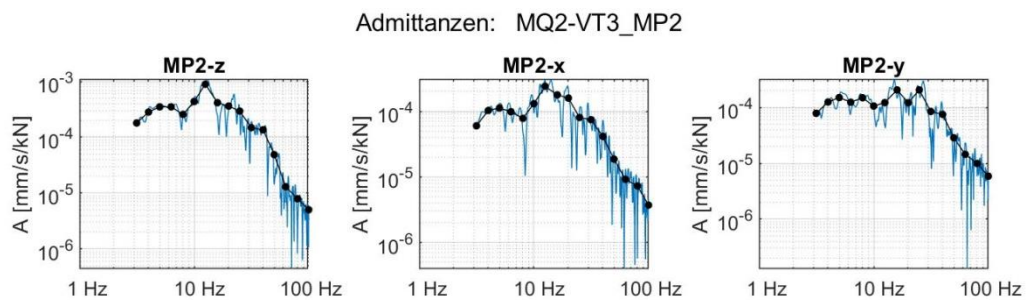


Abbildung 9-95: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)



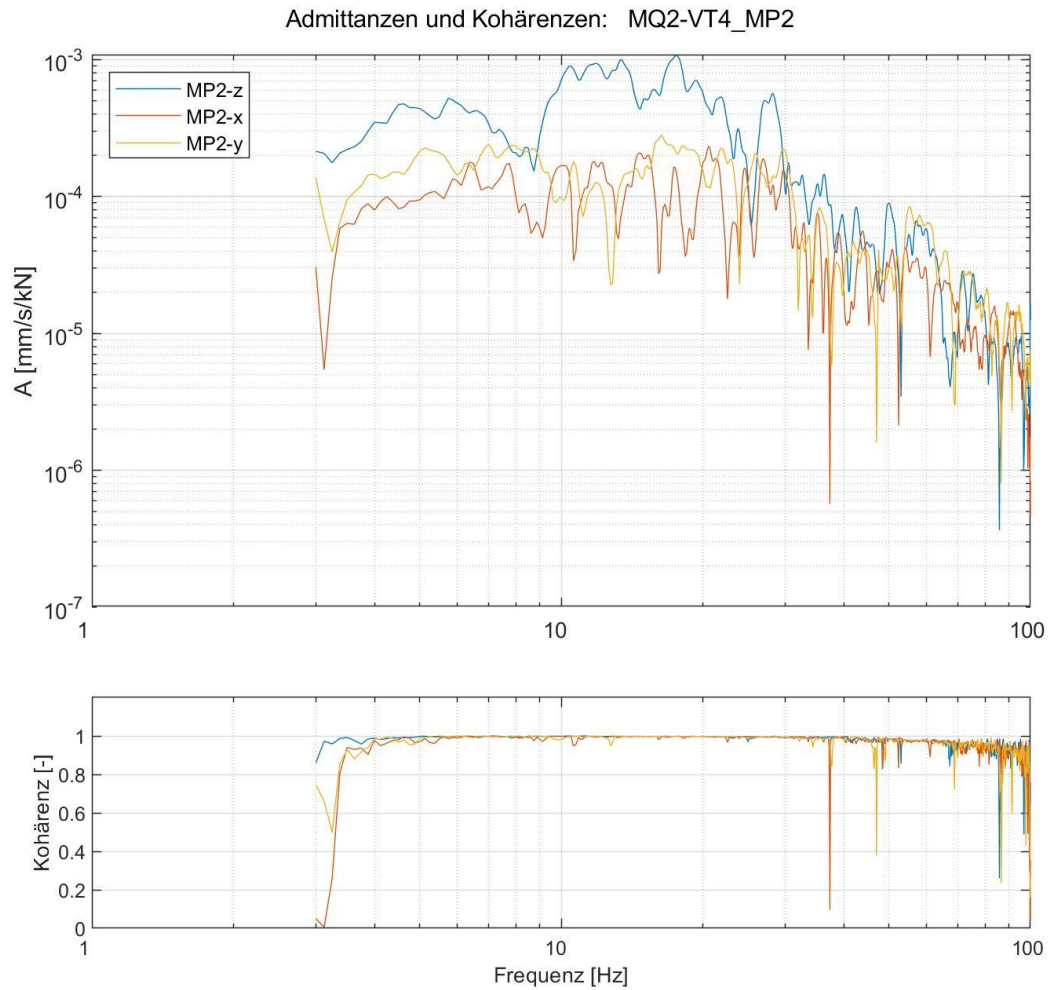


Abbildung 9-96: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

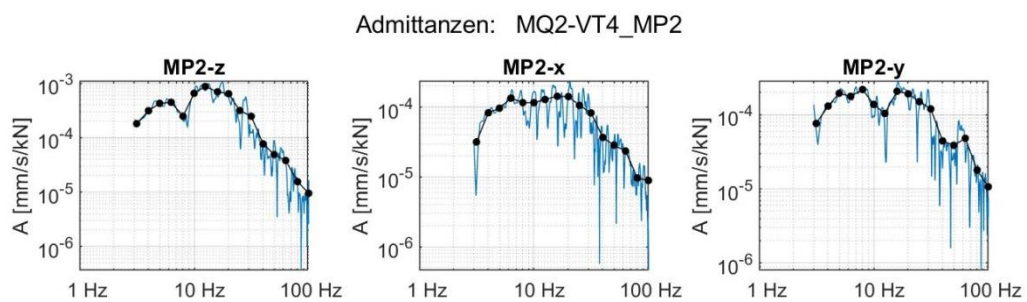


Abbildung 9-97: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)

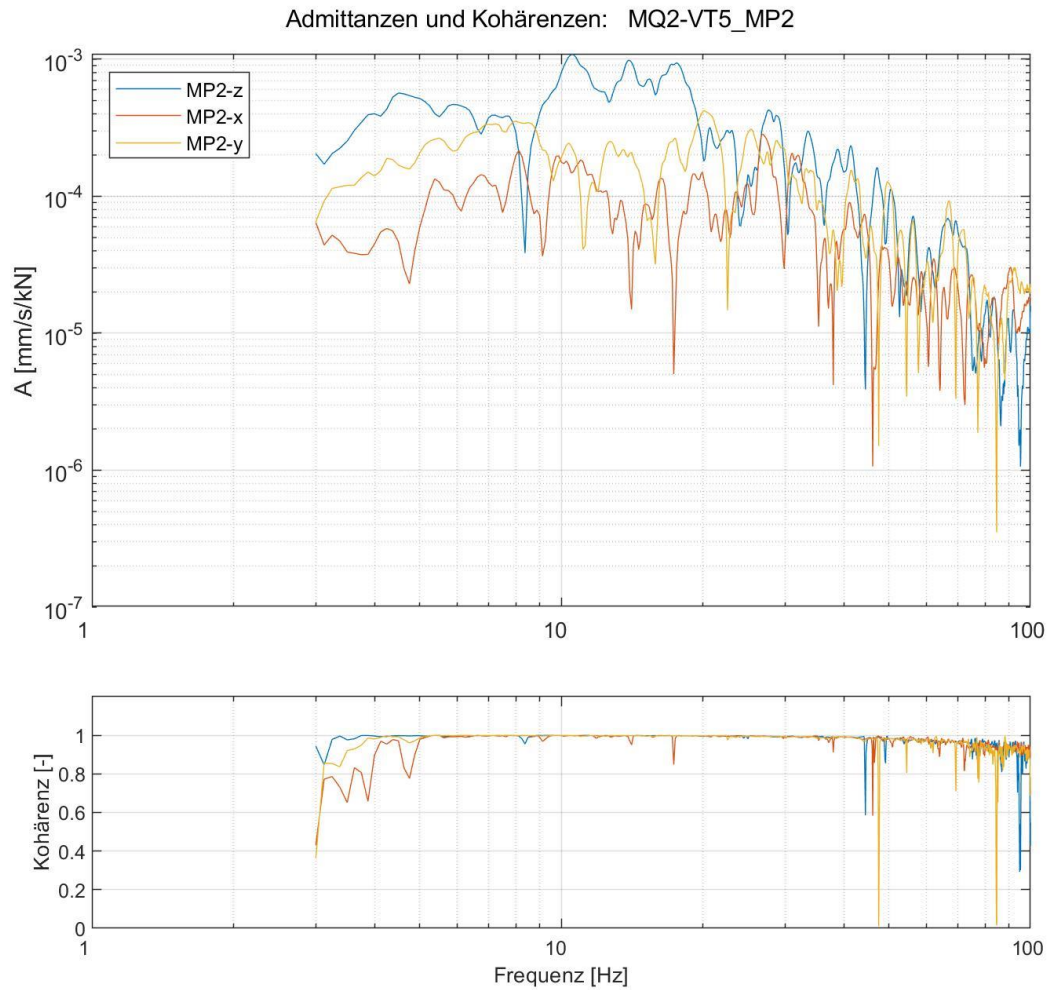


Abbildung 9-98: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

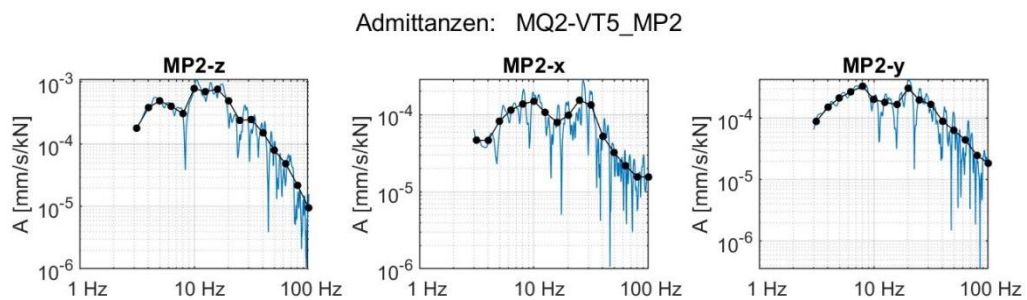


Abbildung 9-99: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

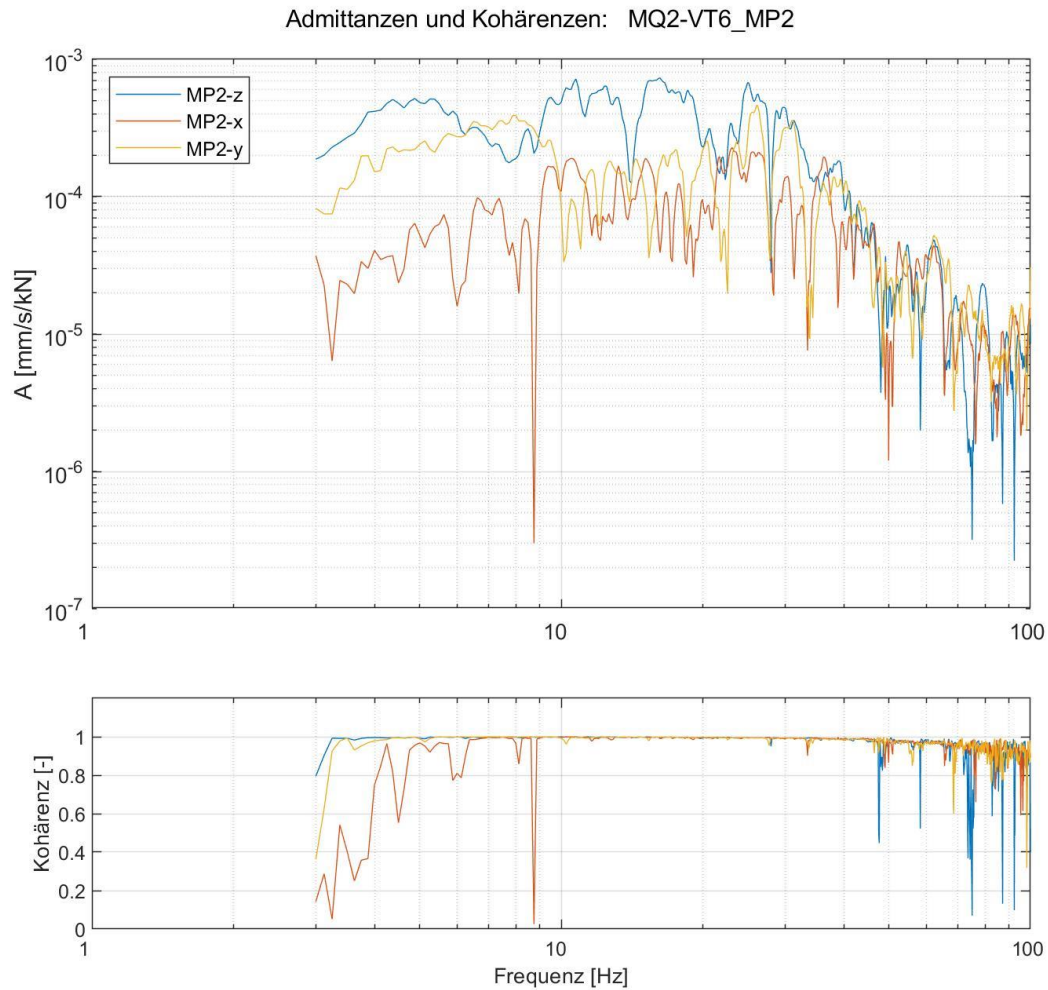


Abbildung 9-100: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

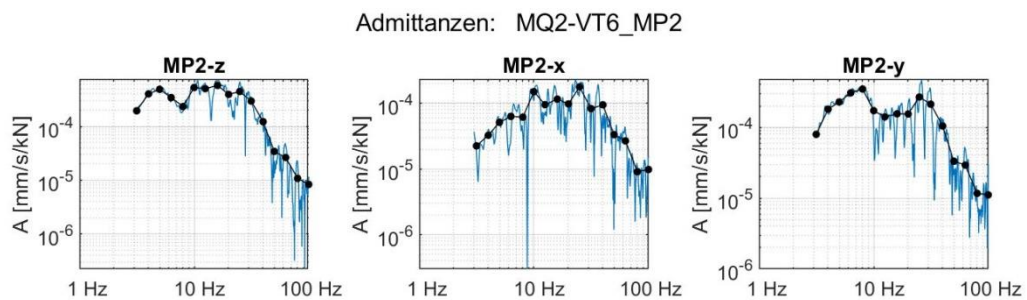


Abbildung 9-101: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

## 9.7.2 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP3

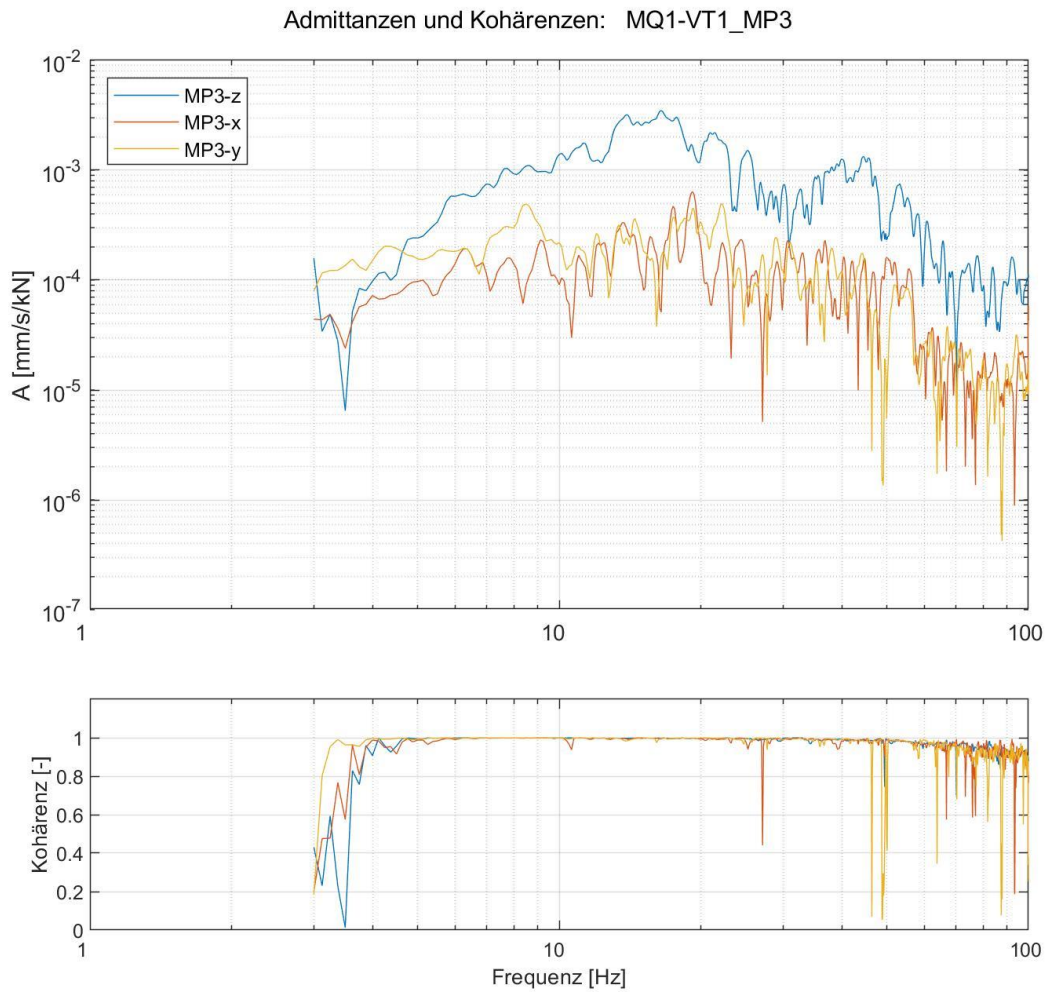


Abbildung 9-102: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

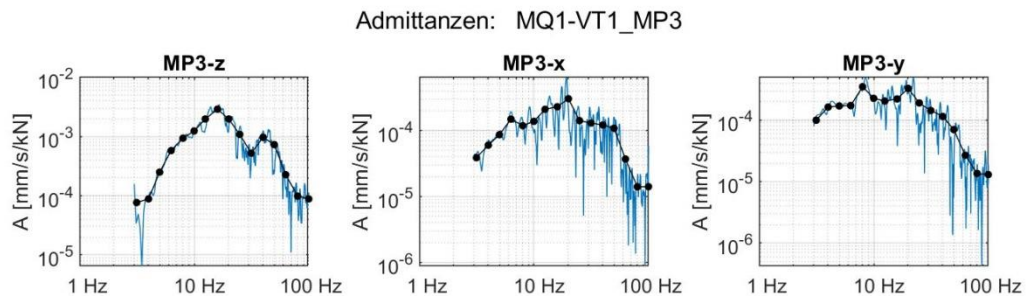


Abbildung 9-103: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)



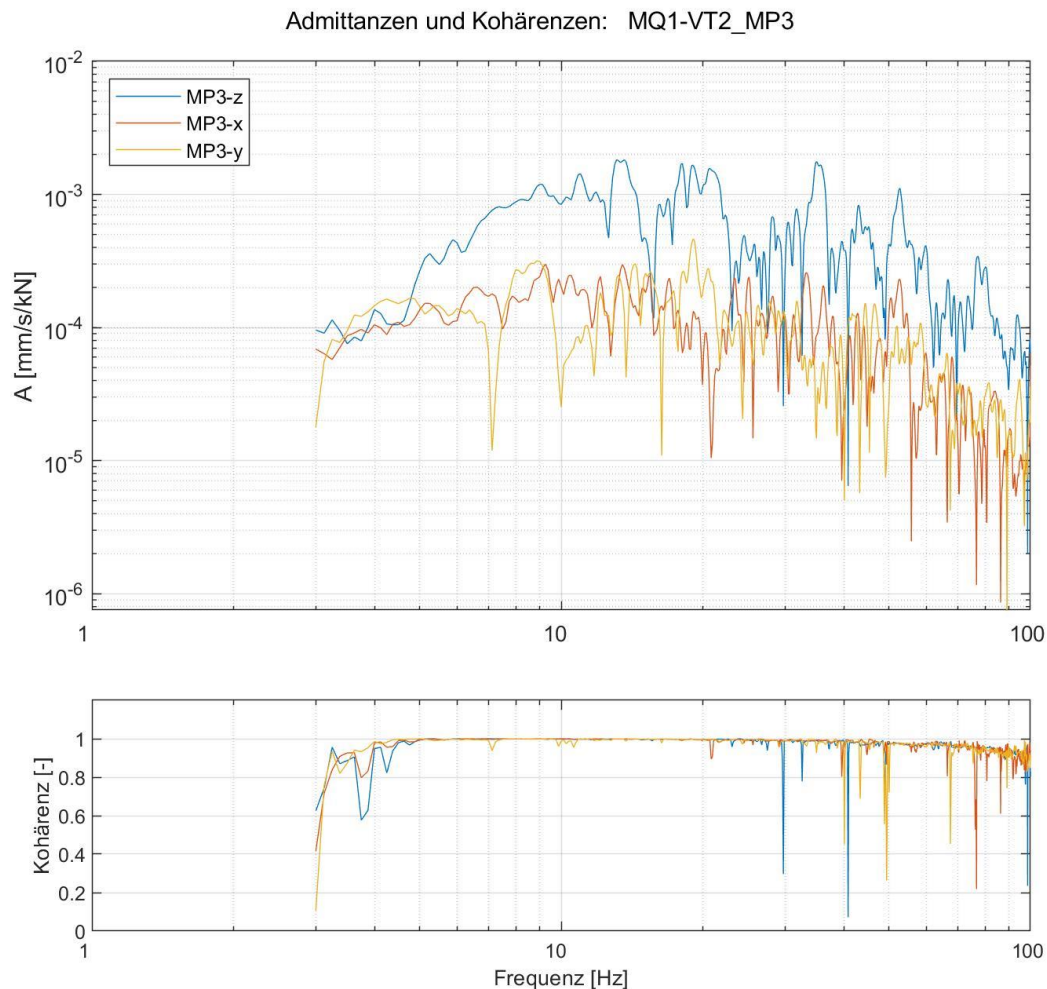


Abbildung 9-104: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

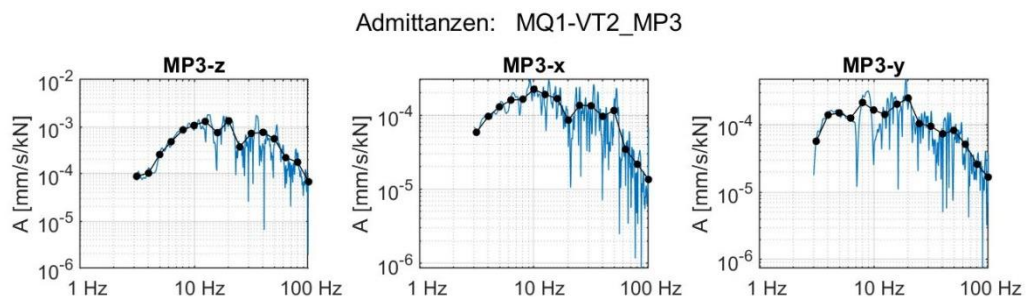


Abbildung 9-105: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

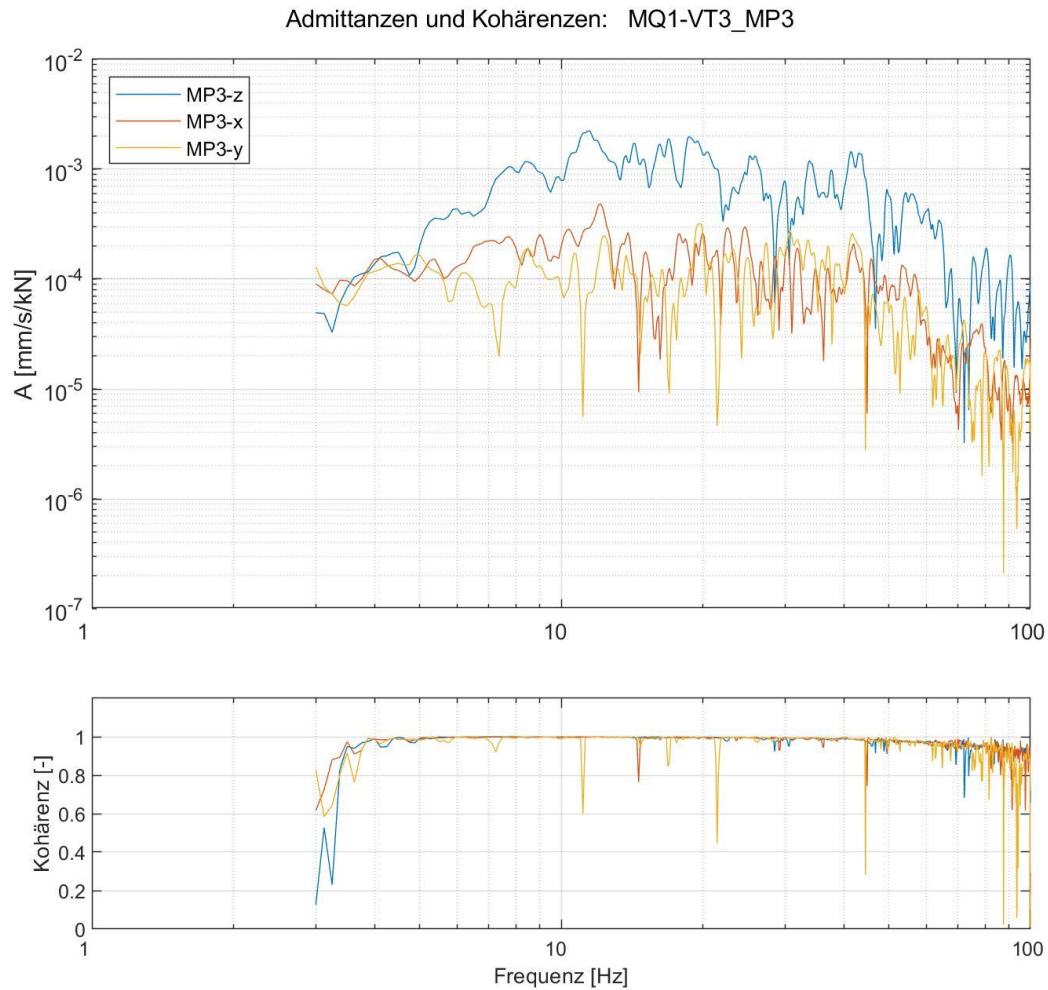


Abbildung 9-106: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

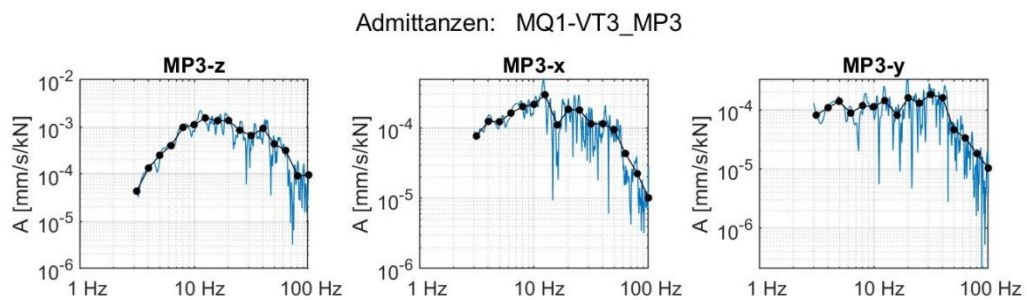


Abbildung 9-107: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

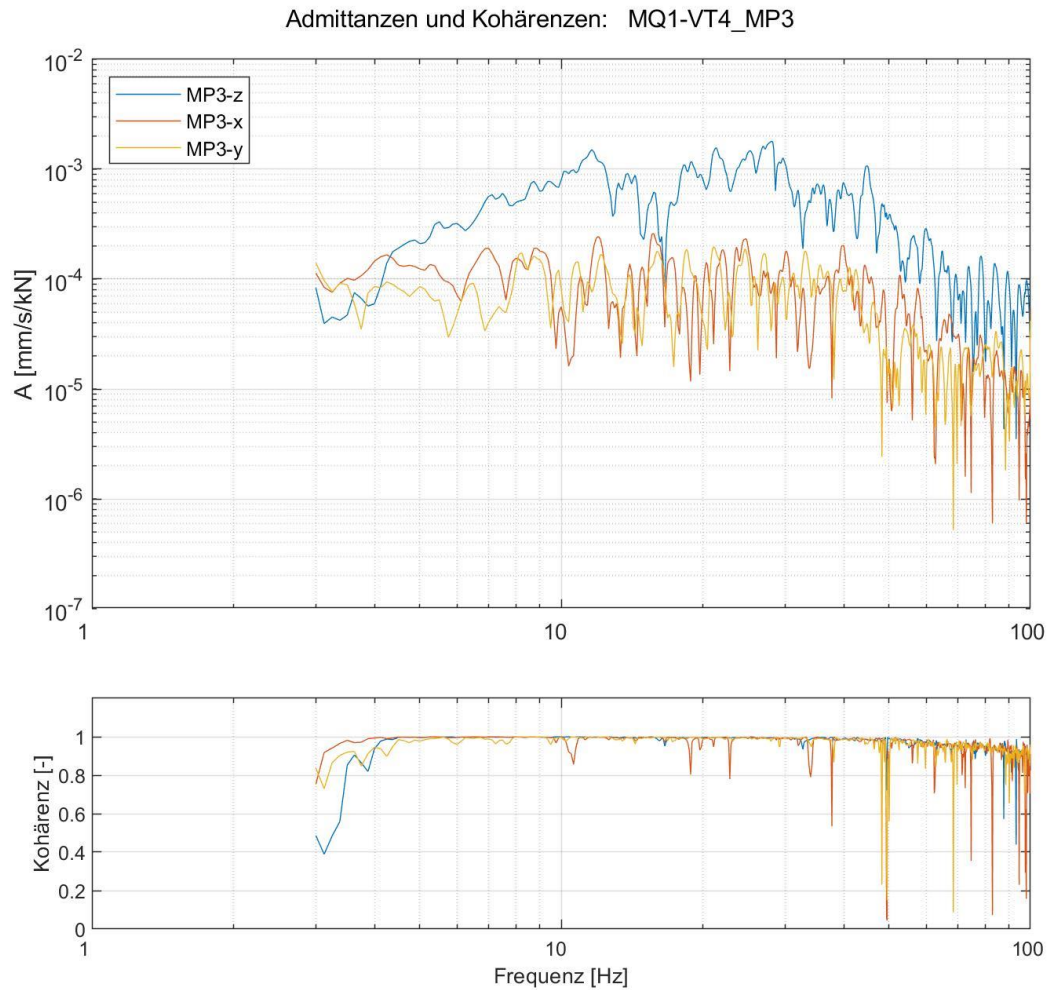


Abbildung 9-108: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

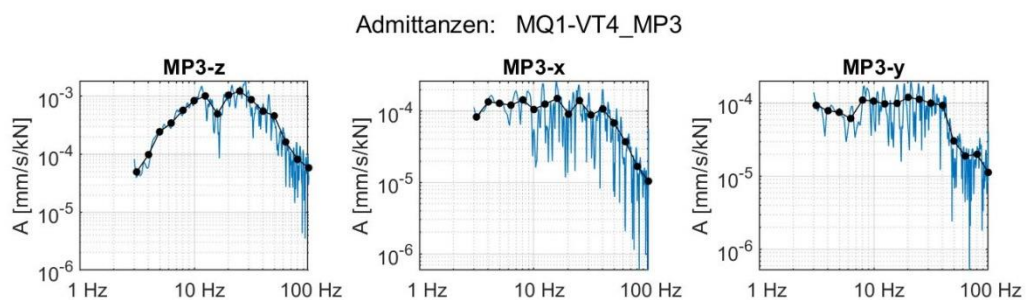


Abbildung 9-109: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)

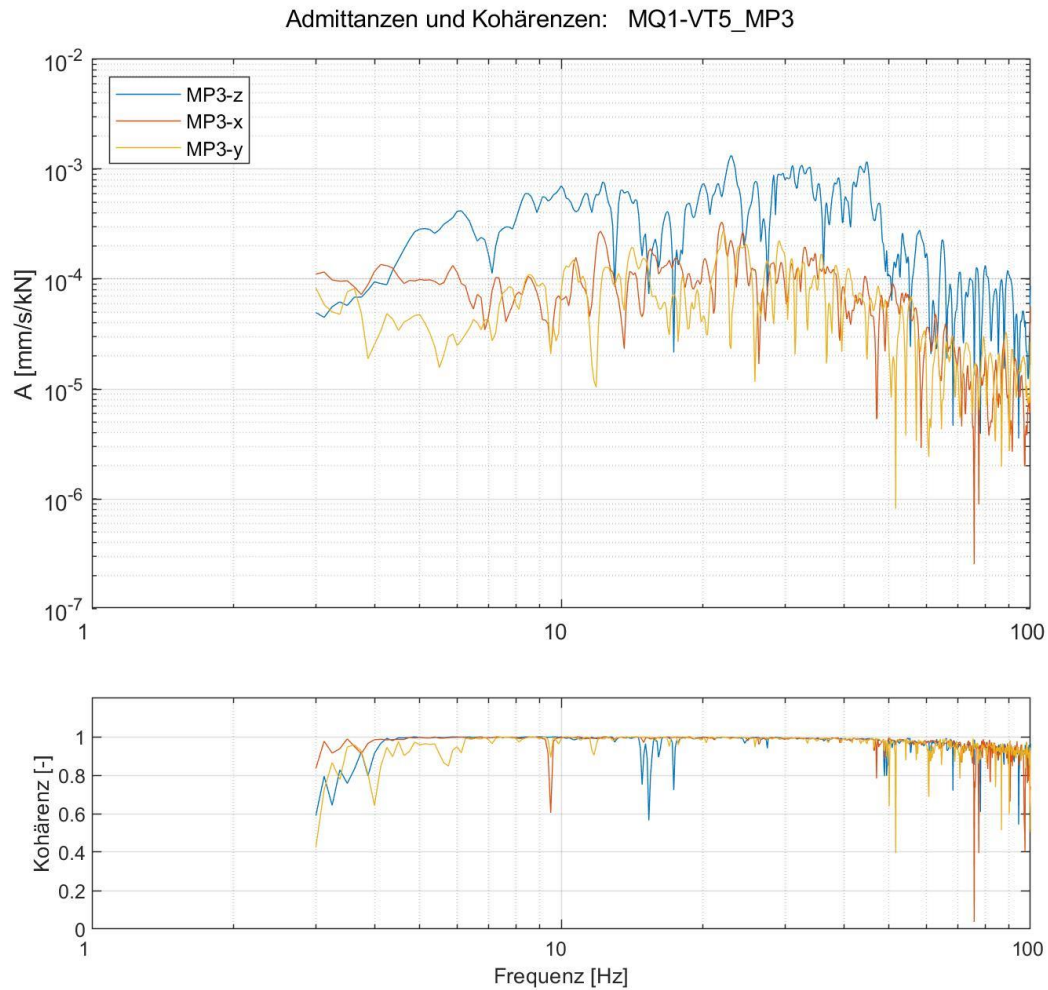


Abbildung 9-110: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

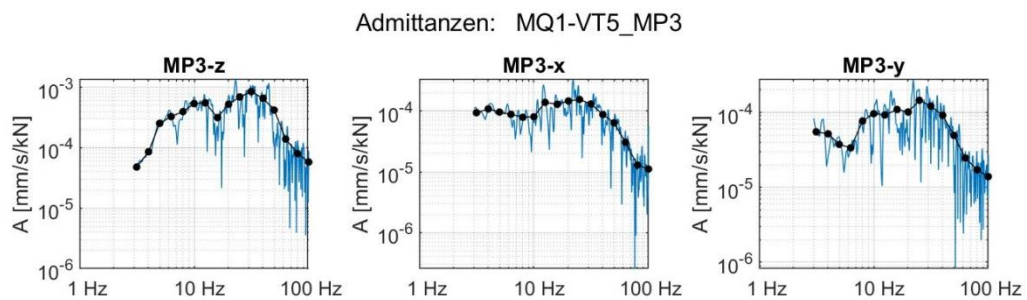


Abbildung 9-111: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)



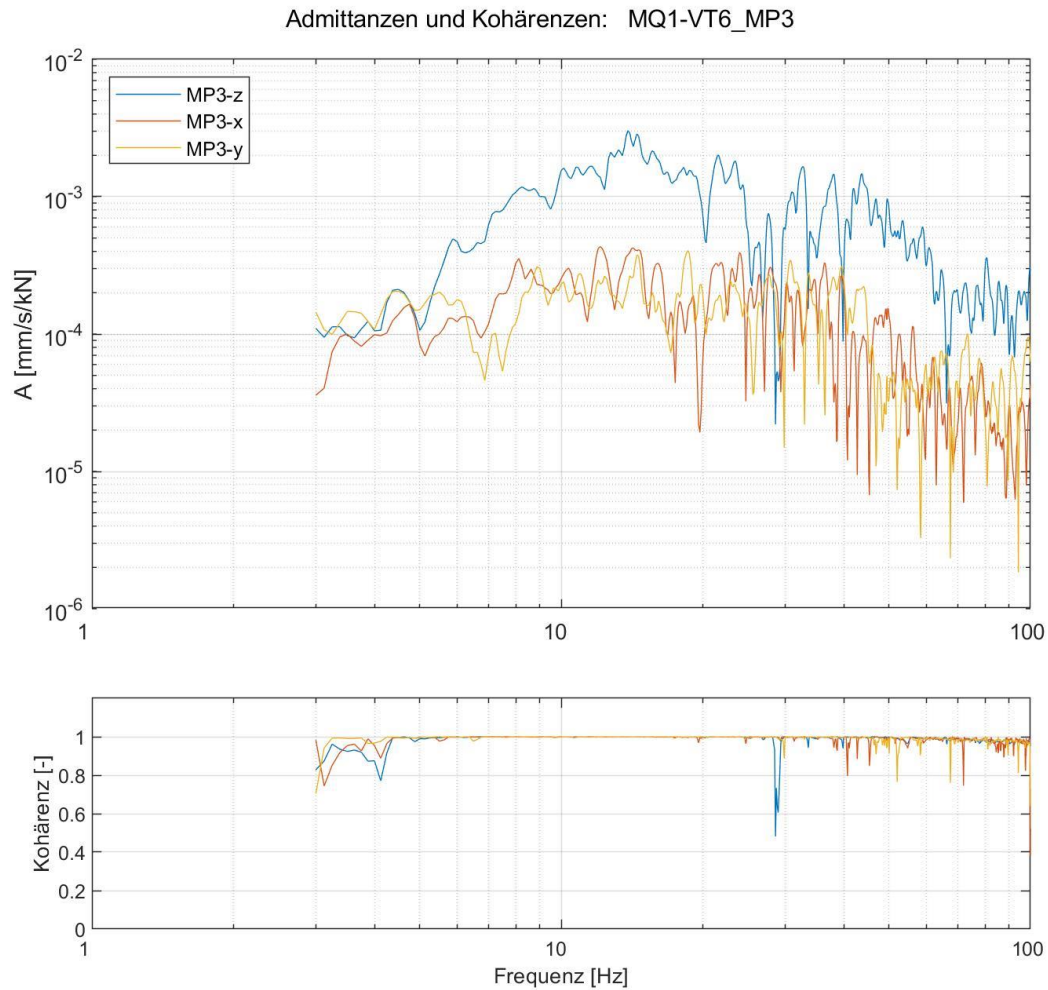


Abbildung 9-112: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

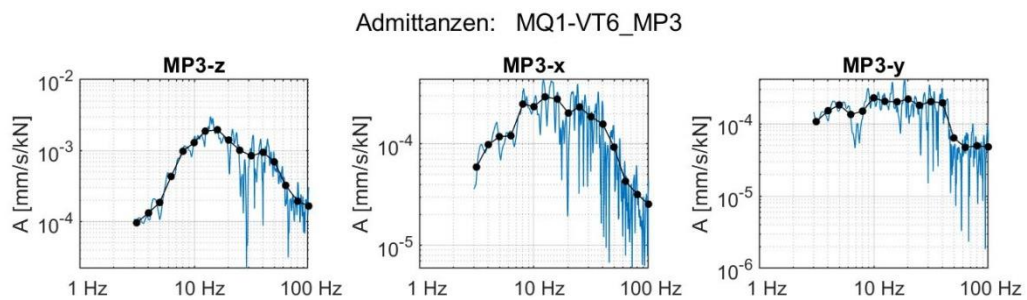


Abbildung 9-113: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

### 9.7.3 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP5

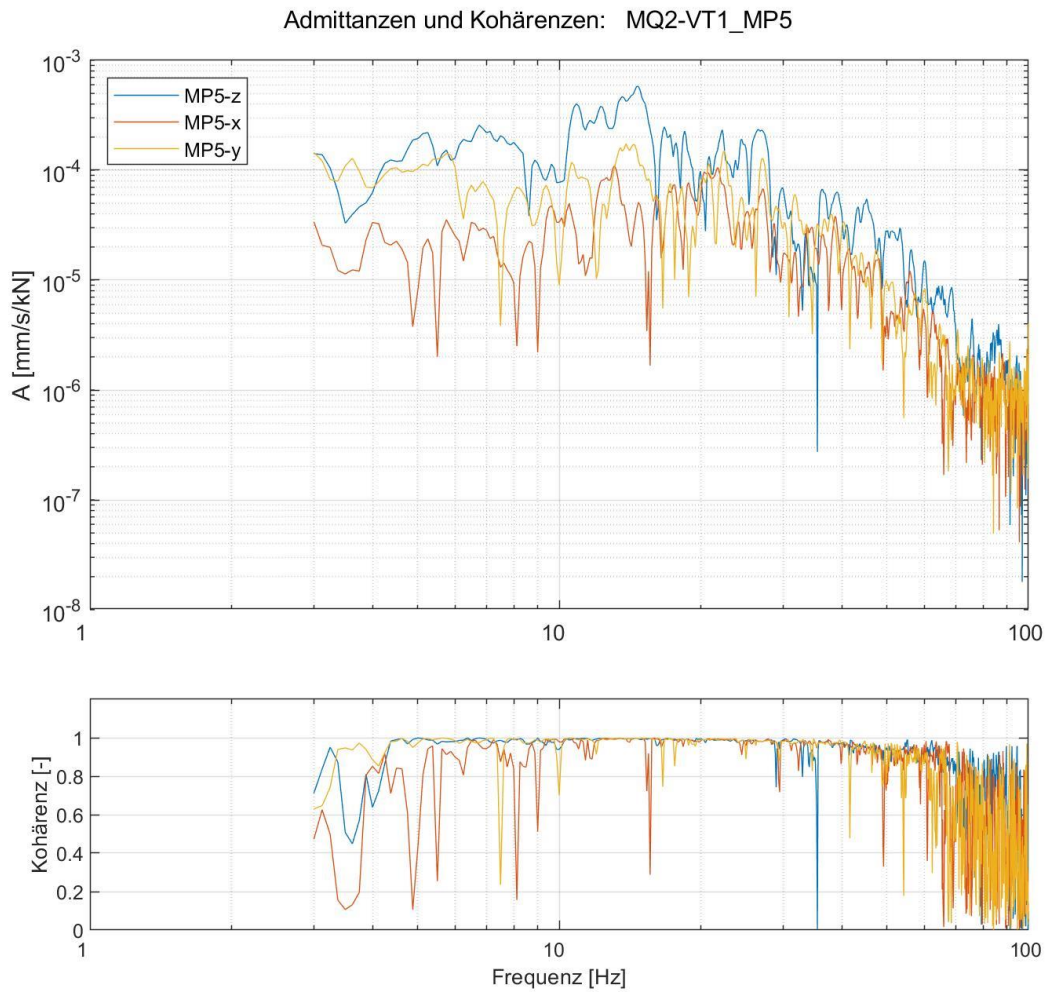


Abbildung 9-114: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

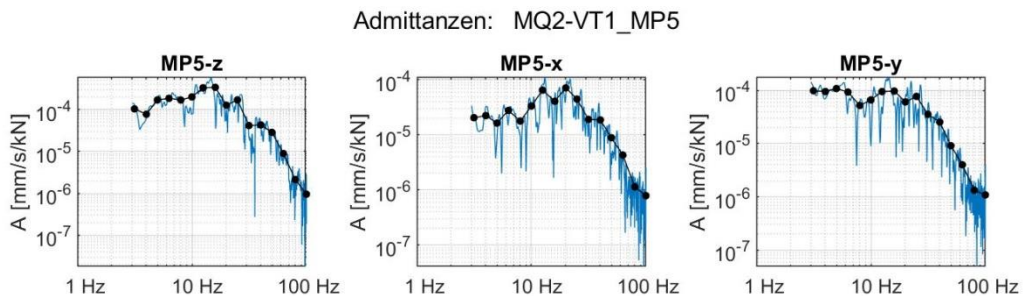


Abbildung 9-115: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

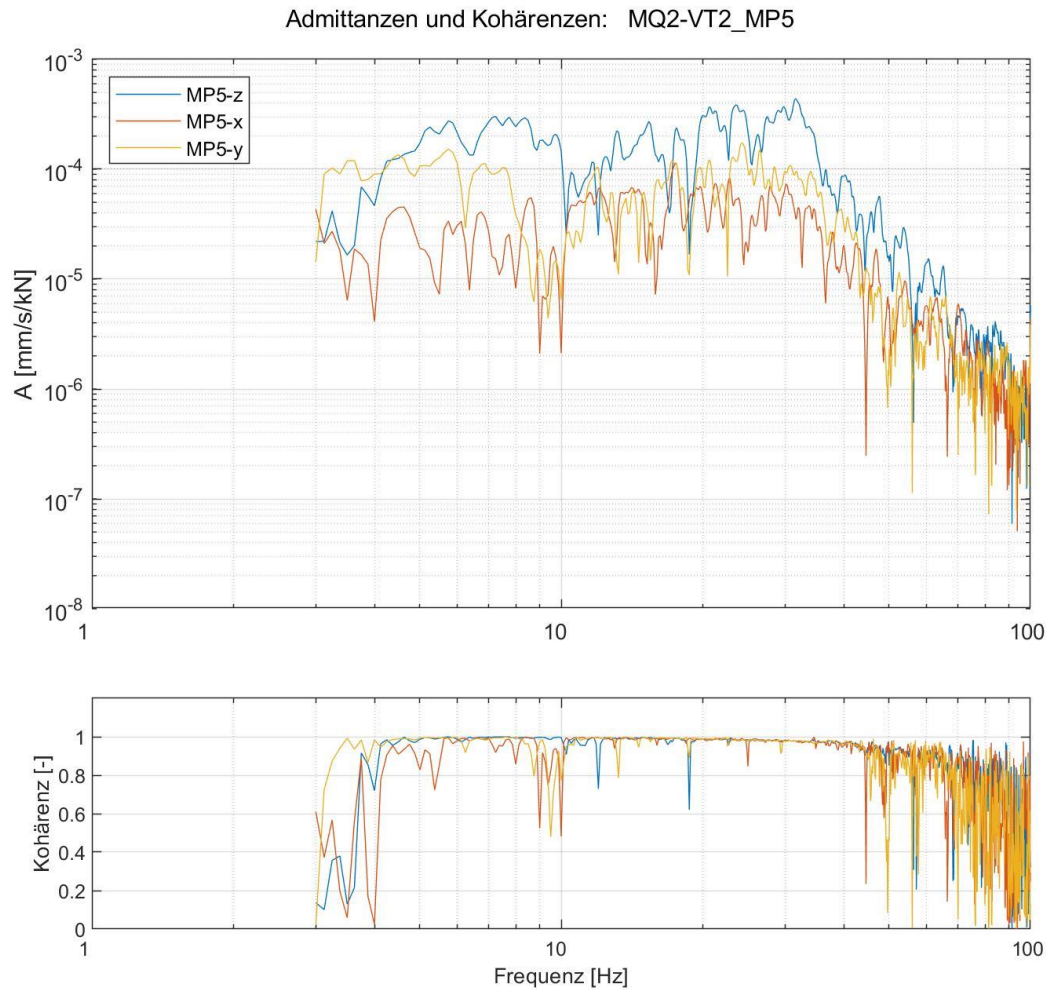


Abbildung 9-116: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

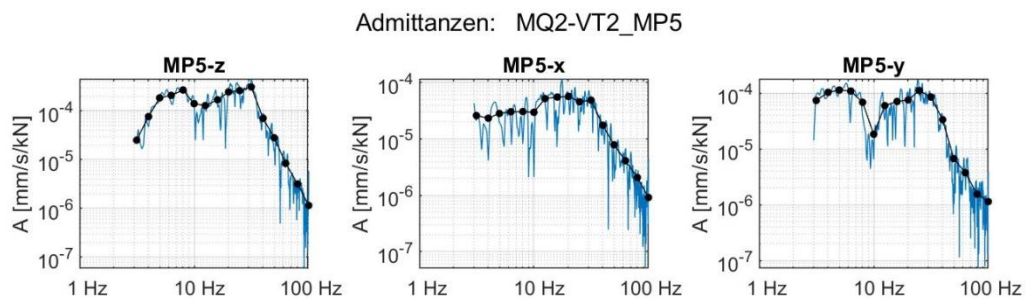


Abbildung 9-117: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

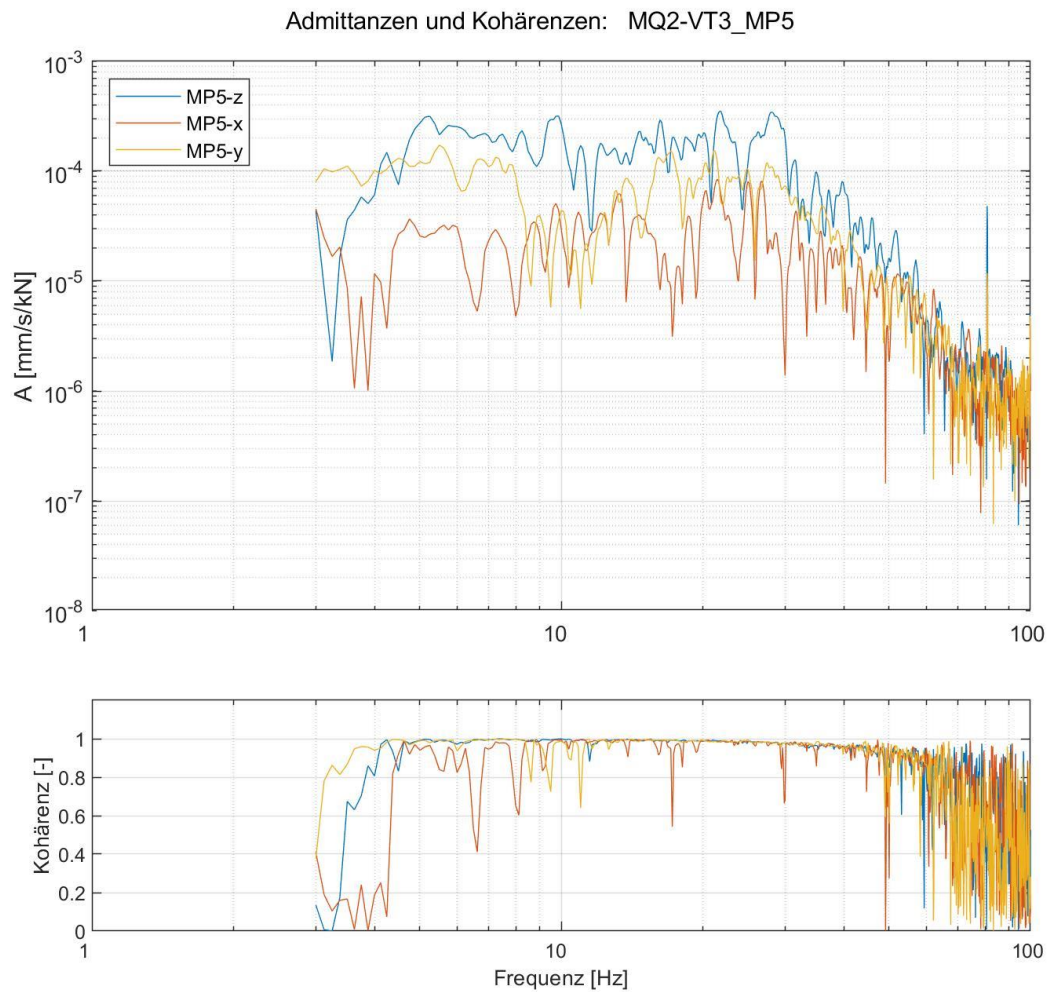


Abbildung 9-118: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

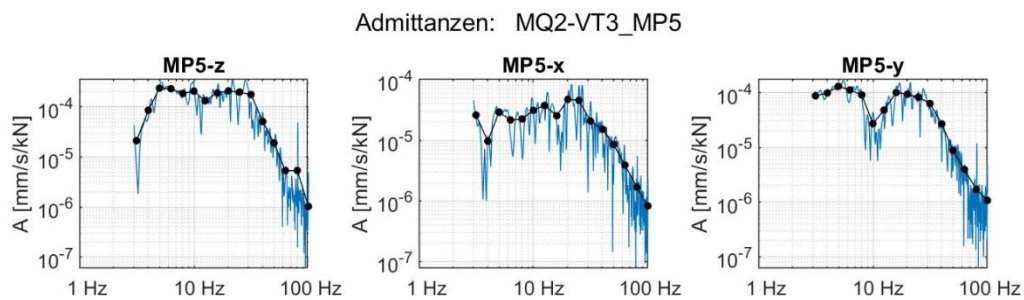


Abbildung 9-119: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)



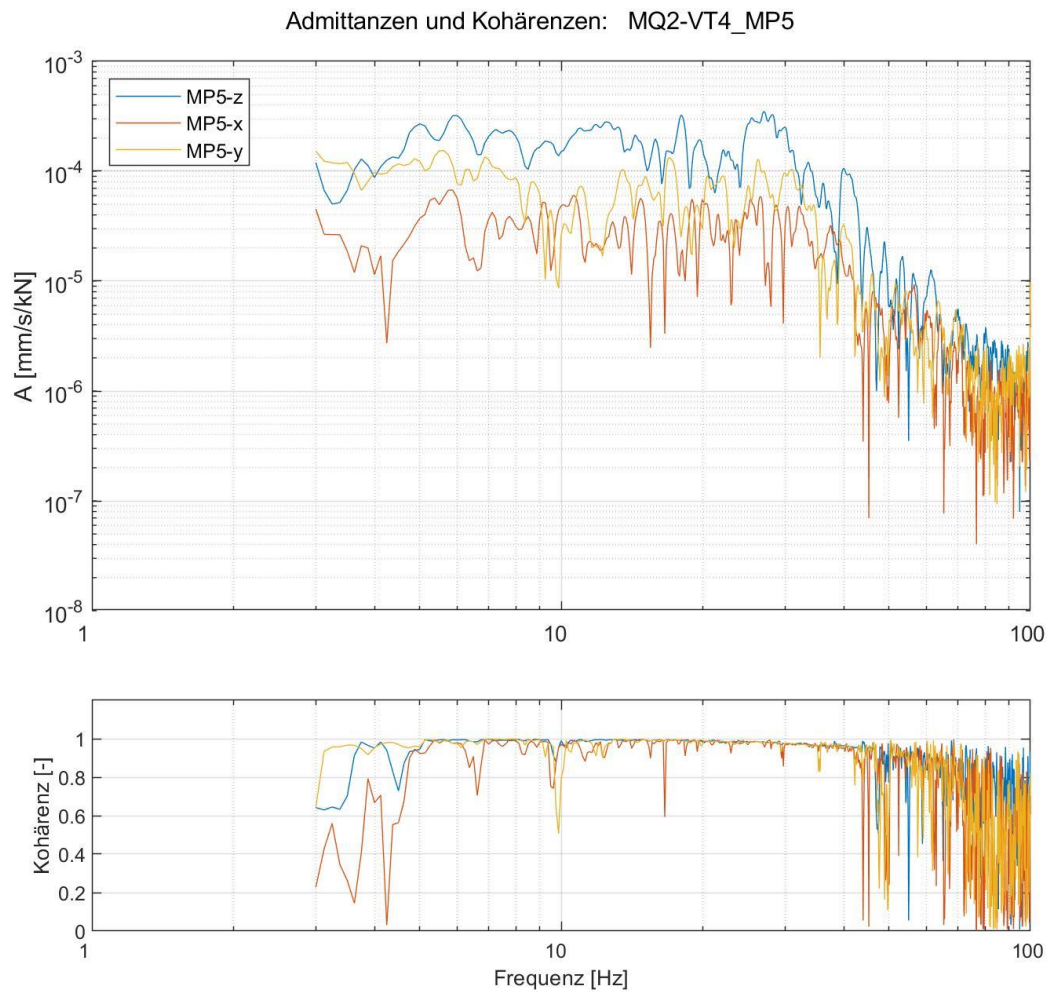


Abbildung 9-120: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

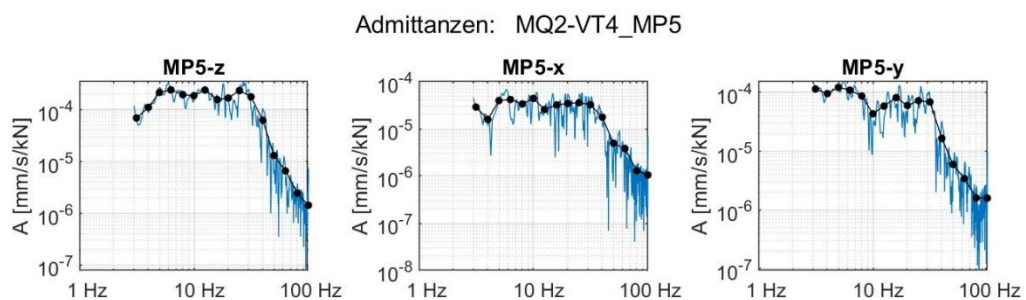


Abbildung 9-121: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)

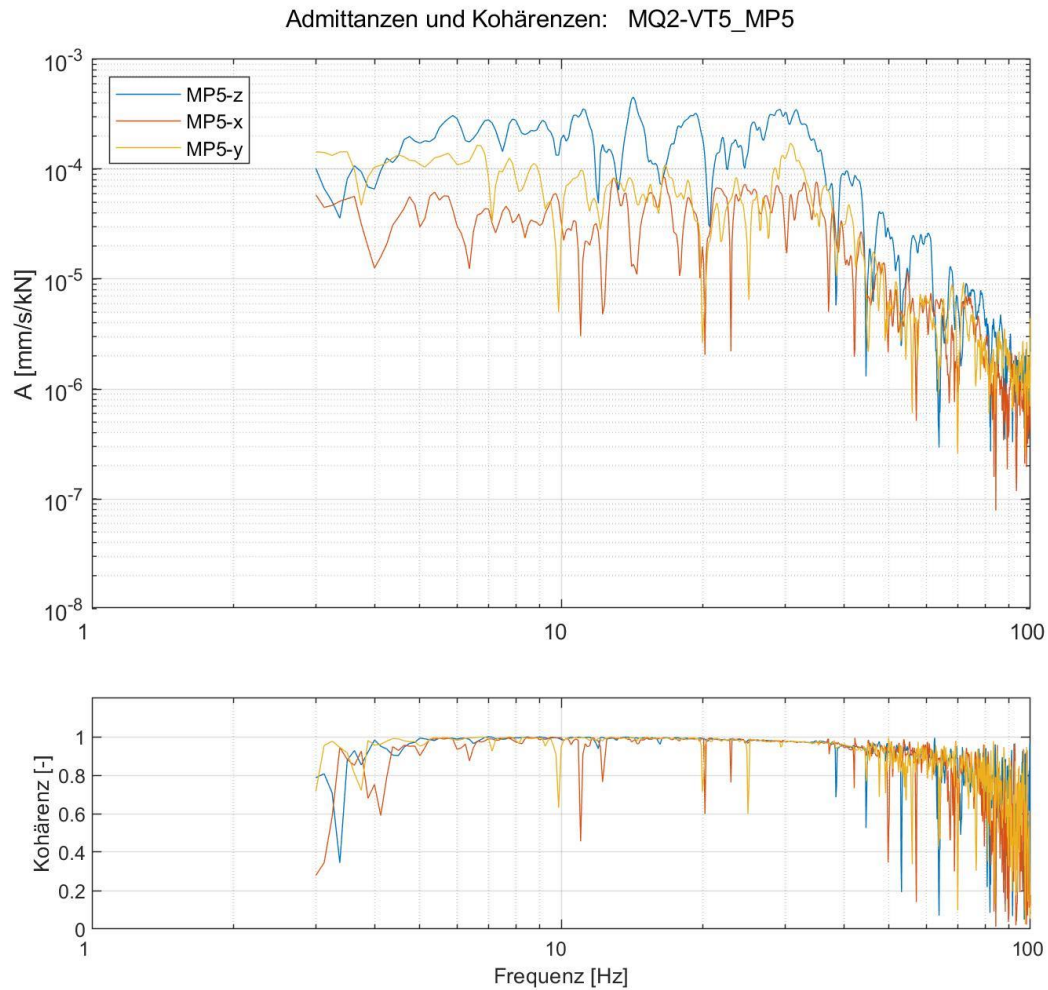


Abbildung 9-122: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

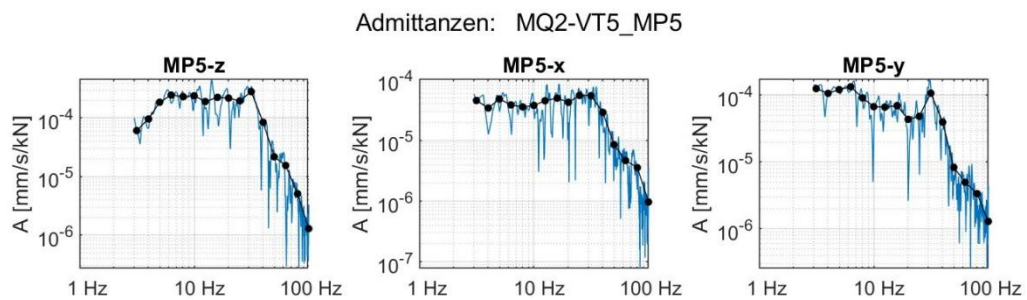


Abbildung 9-123: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

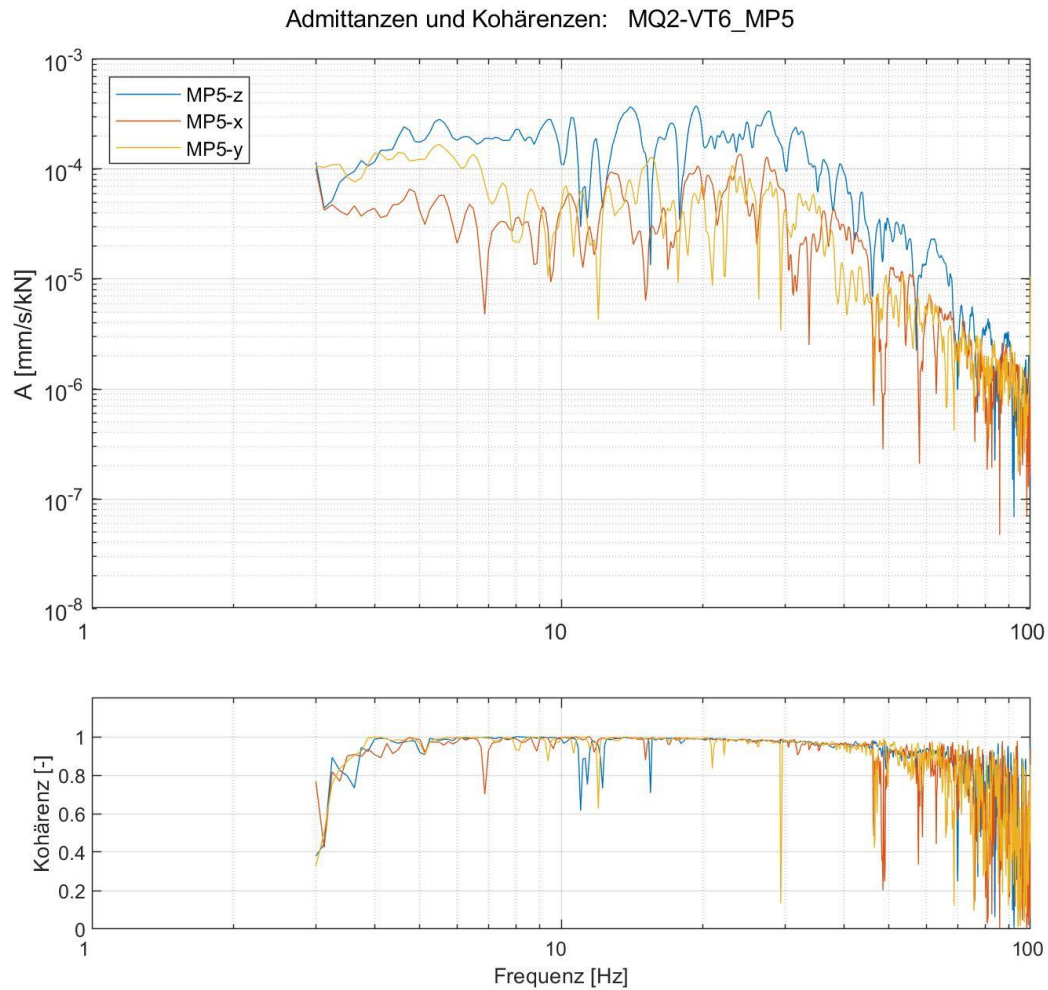


Abbildung 9-124: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

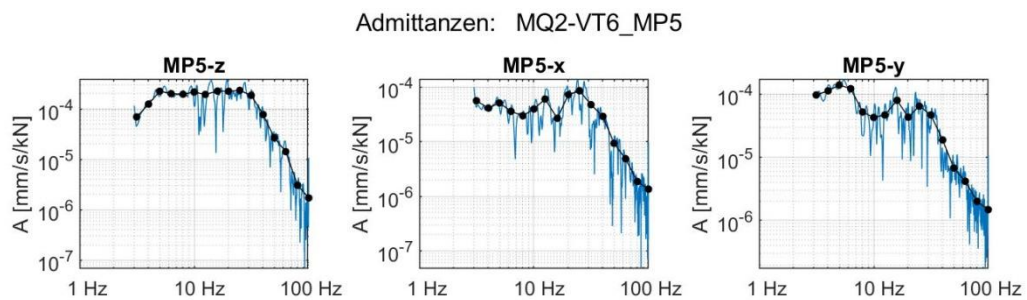


Abbildung 9-125: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

#### 9.7.4 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP8

Der MP8-Außenpunkt ist hier nur rein informativ dargestellt. Dieser fließt nicht in die Berechnungen und in die Prognose ein.

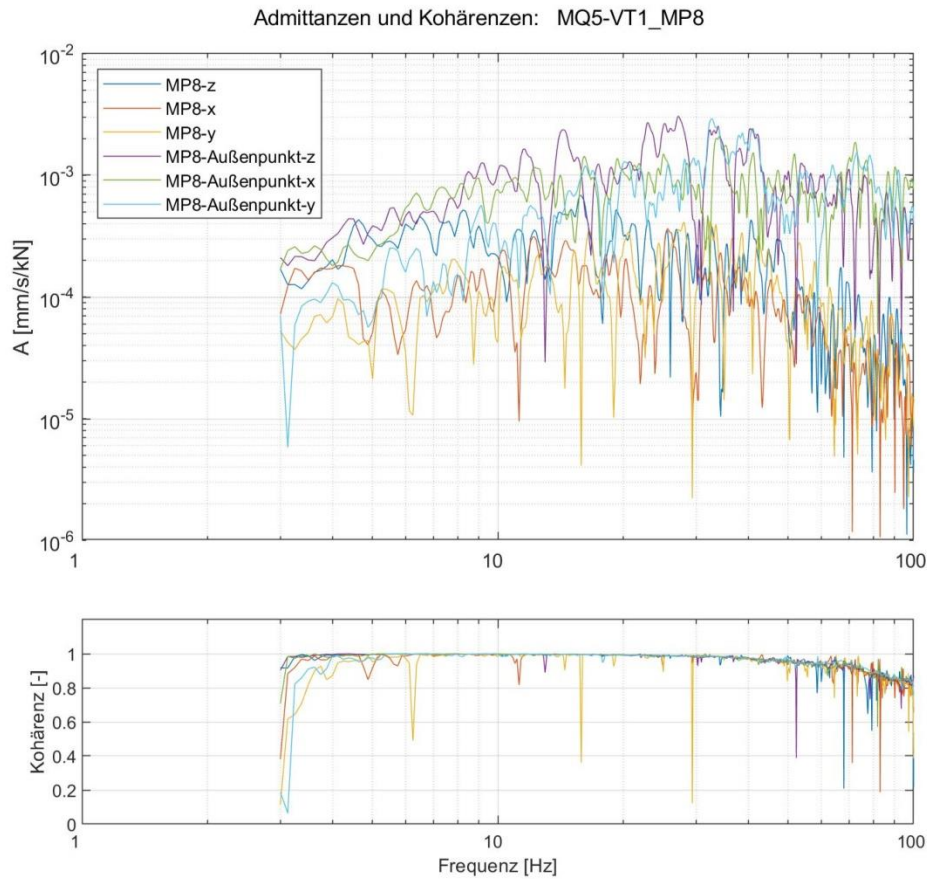


Abbildung 9-126: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

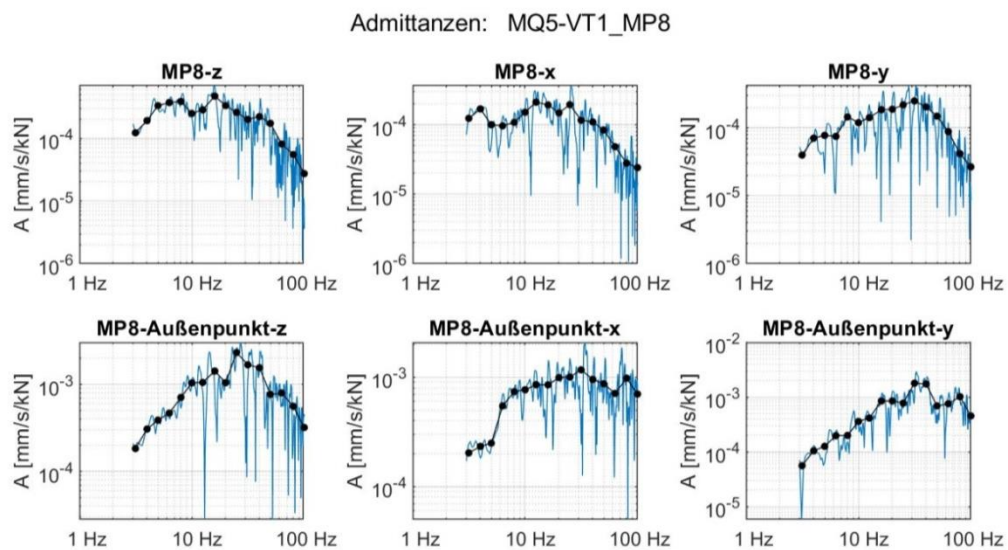


Abbildung 9-127: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)



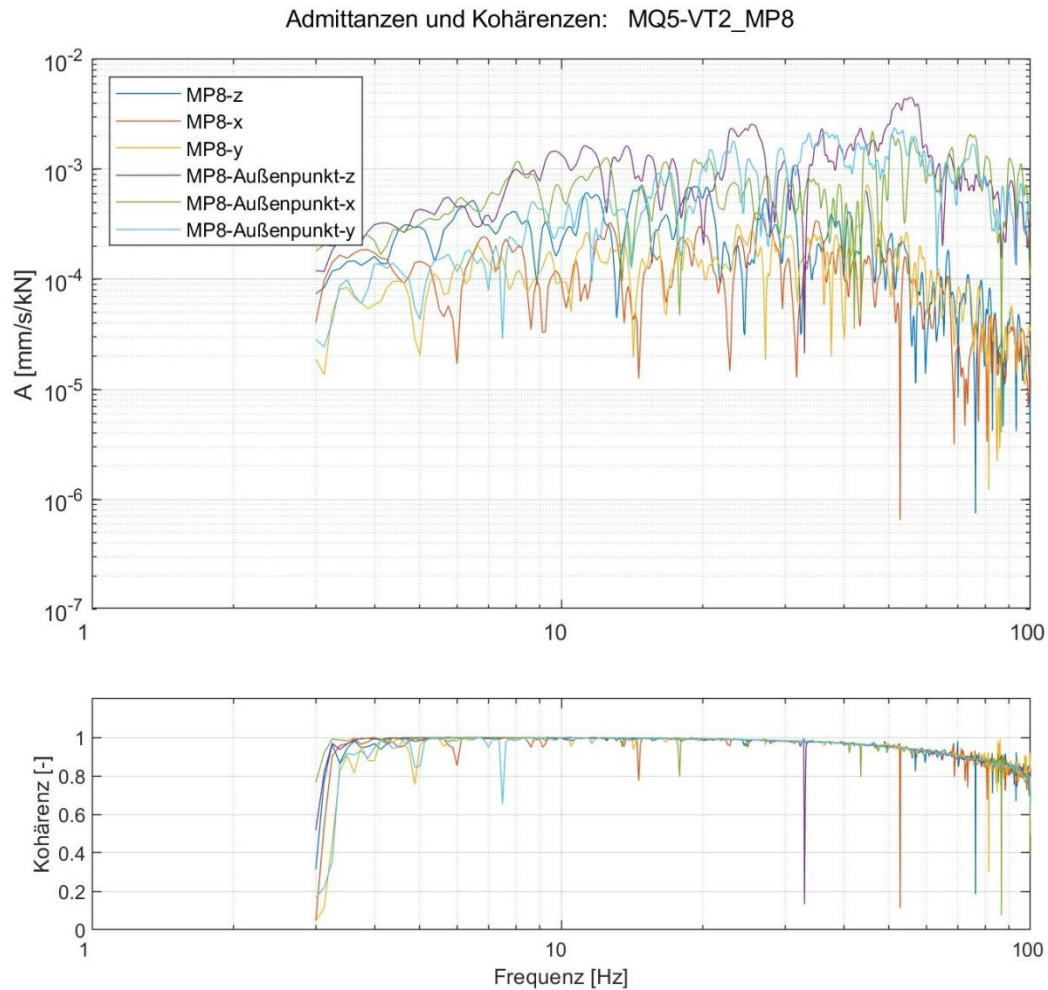


Abbildung 9-128: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

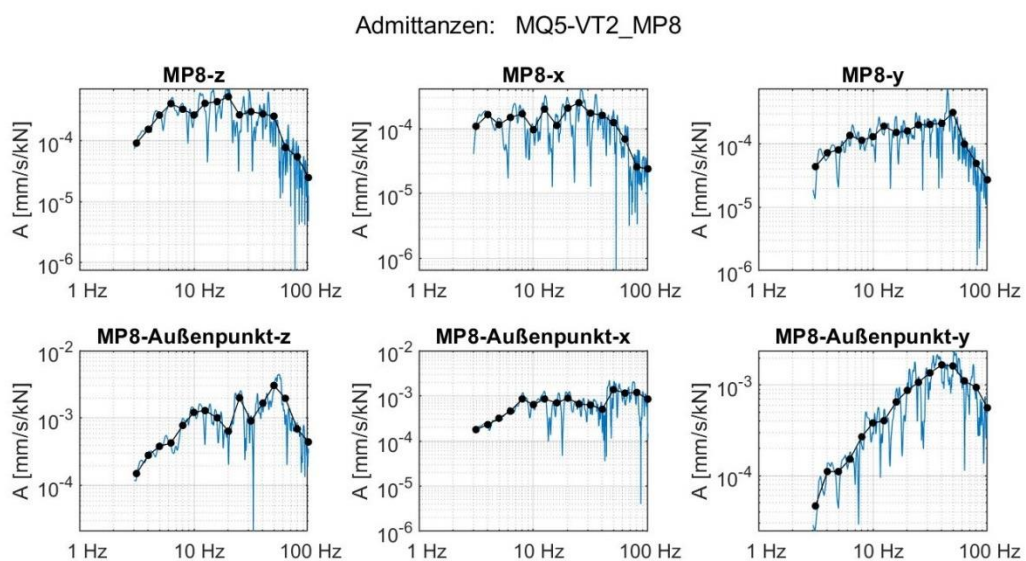


Abbildung 9-129: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

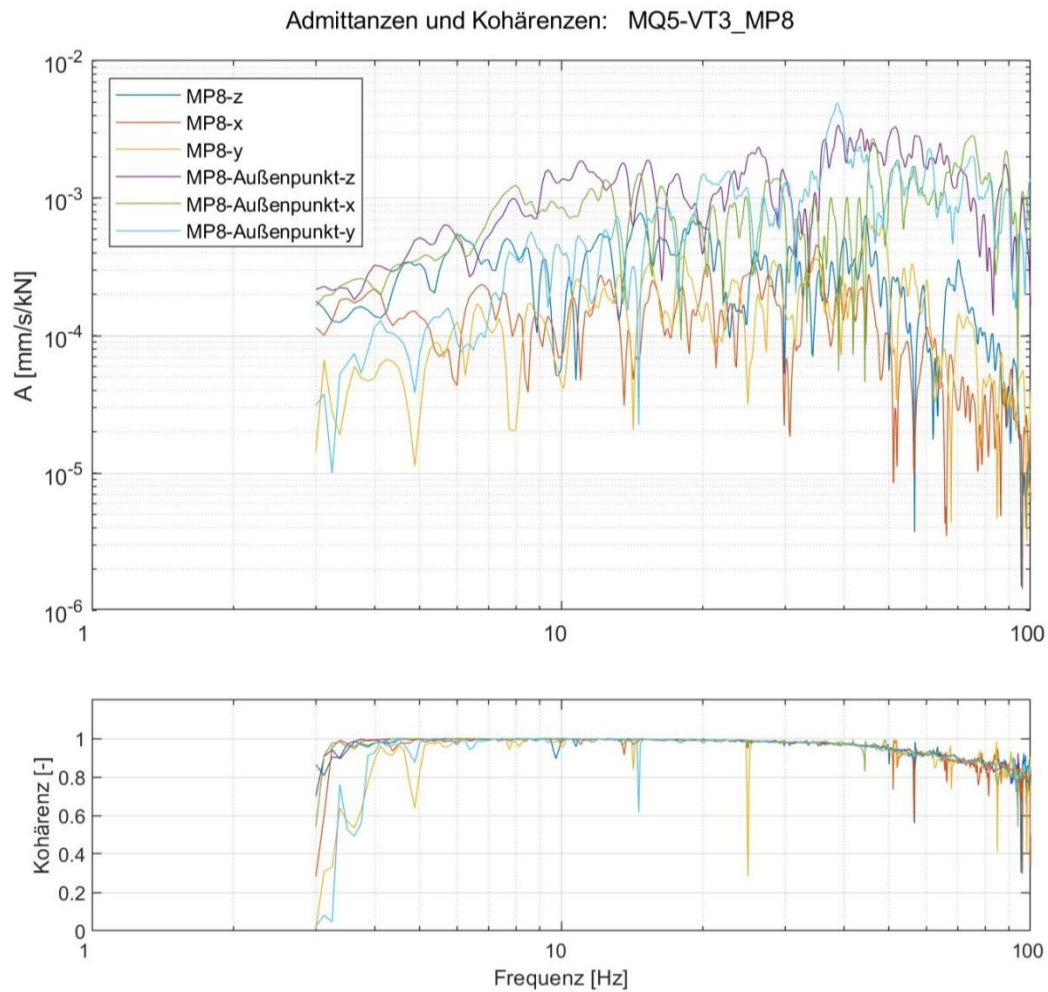


Abbildung 9-130: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

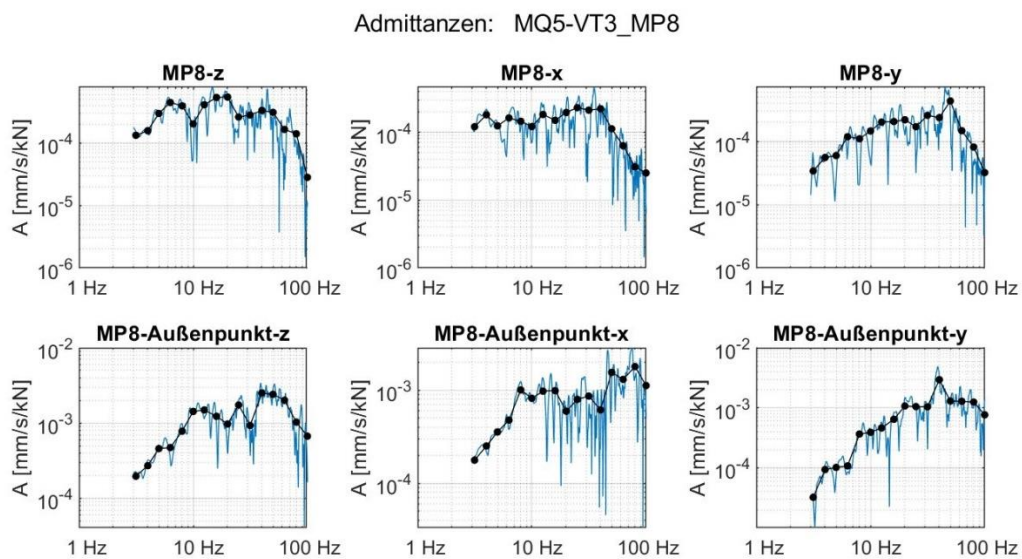


Abbildung 9-131: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

### 9.7.5 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP9

Die Gebäudeadmittanzen bei dem Messpunkt 9 wurden auf Grundlage der Anregungen des VibroTrucks bei Messquerschnitt MQ2 und MQ3 berechnet. Zunächst folgen die Auswertungen auf Grundlage der Anregung bei MQ2.

#### Gebäudeadmittanzen bei Anregung mit VibroTruck am MQ2

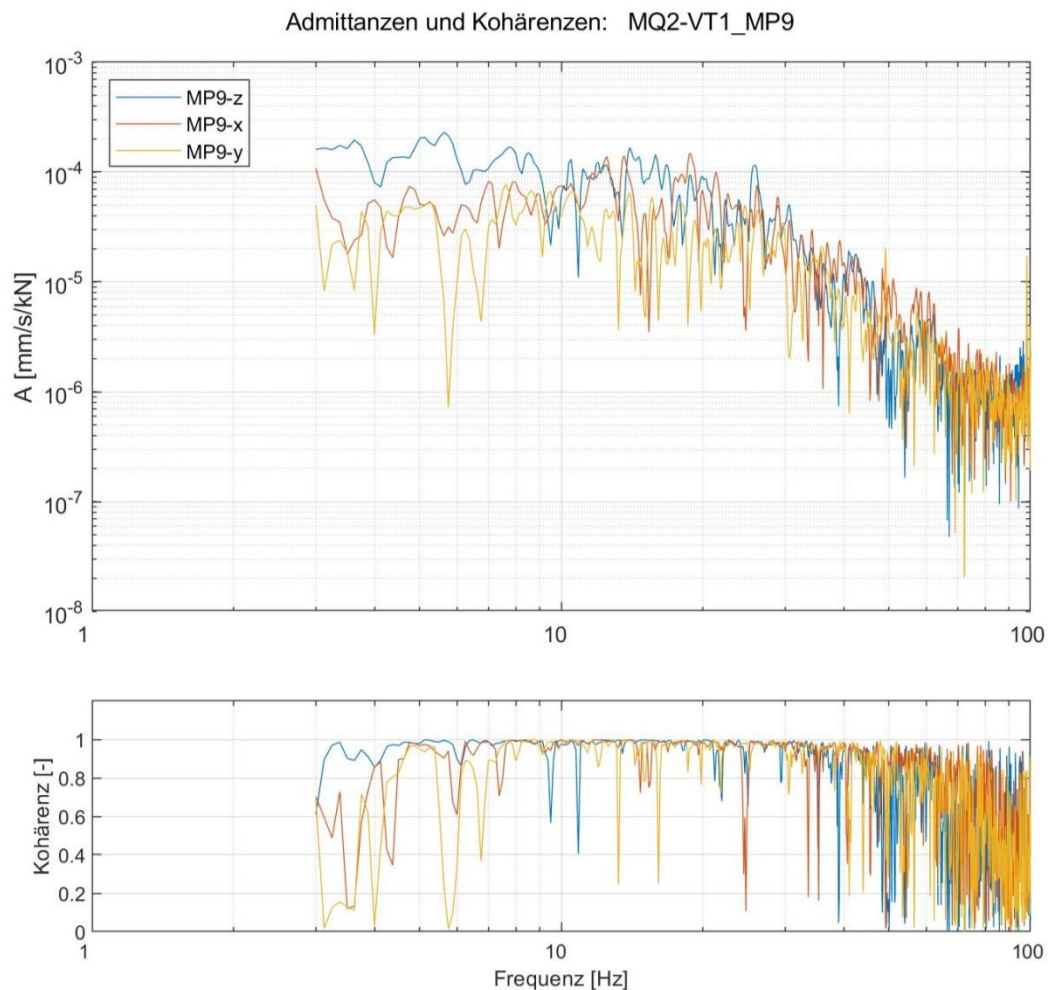


Abbildung 9-132: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

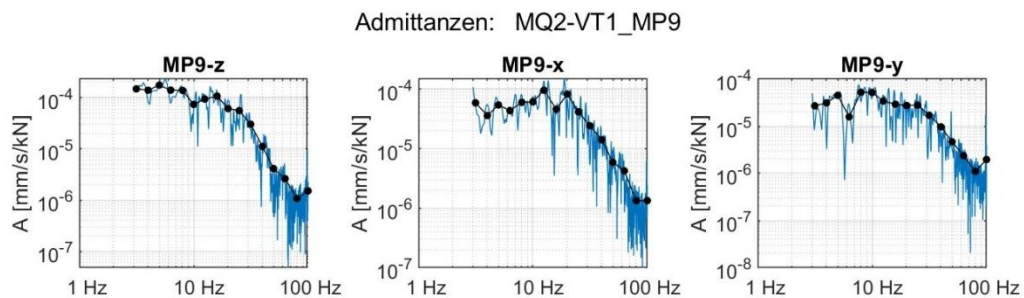


Abbildung 9-133: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)



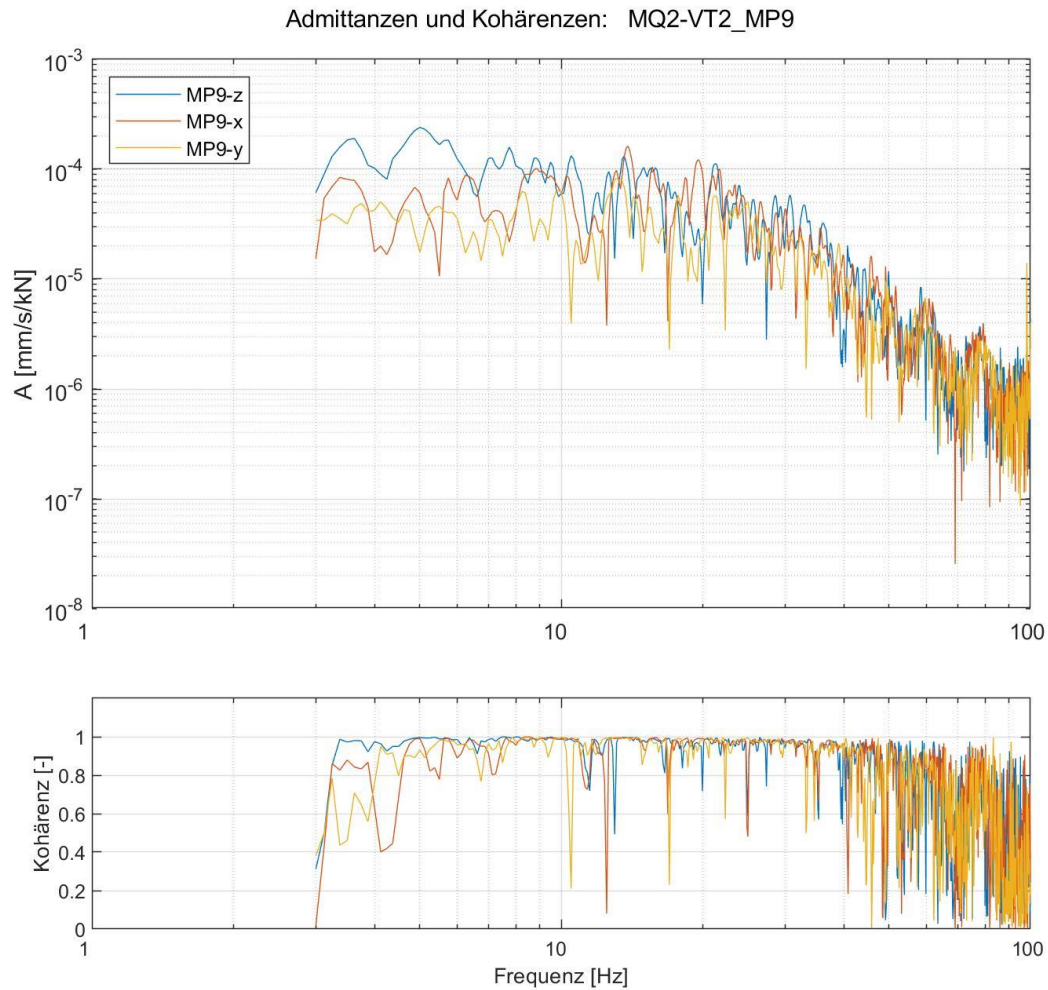


Abbildung 9-134: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

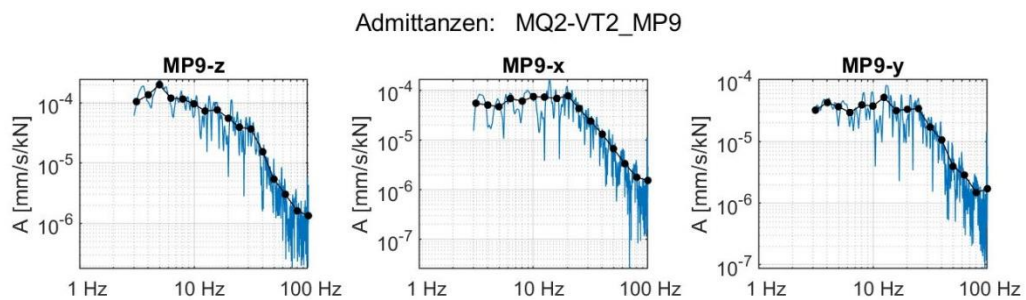


Abbildung 9-135: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)



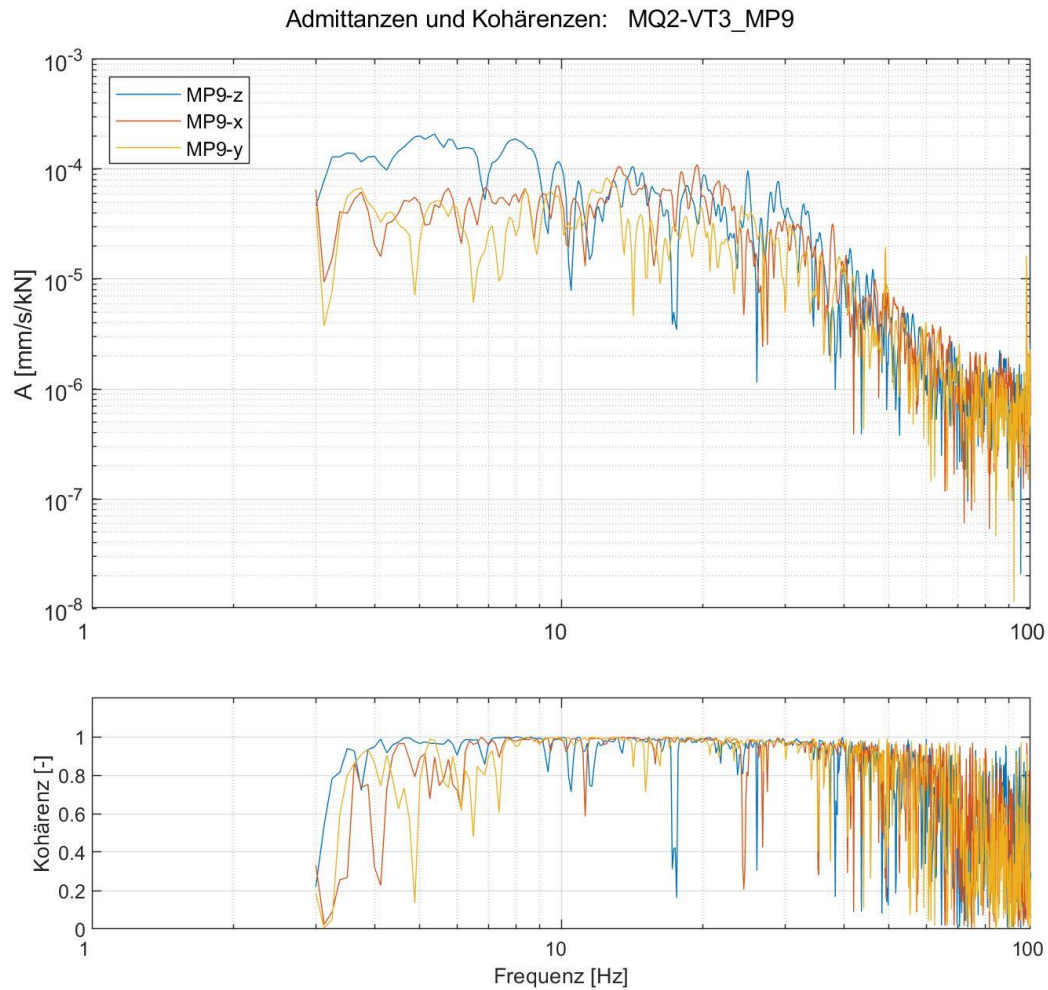


Abbildung 9-136: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

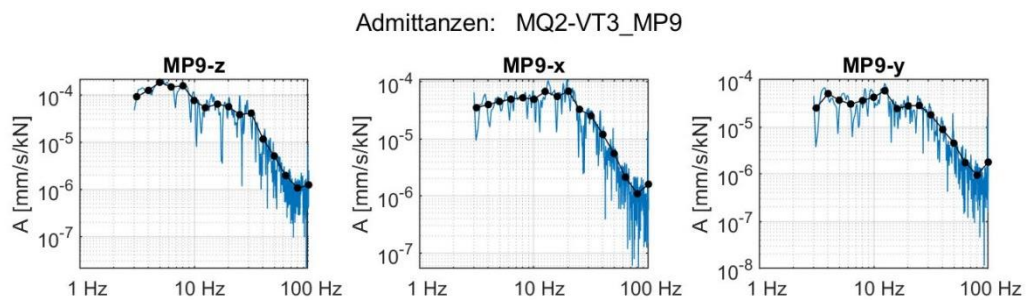


Abbildung 9-137: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

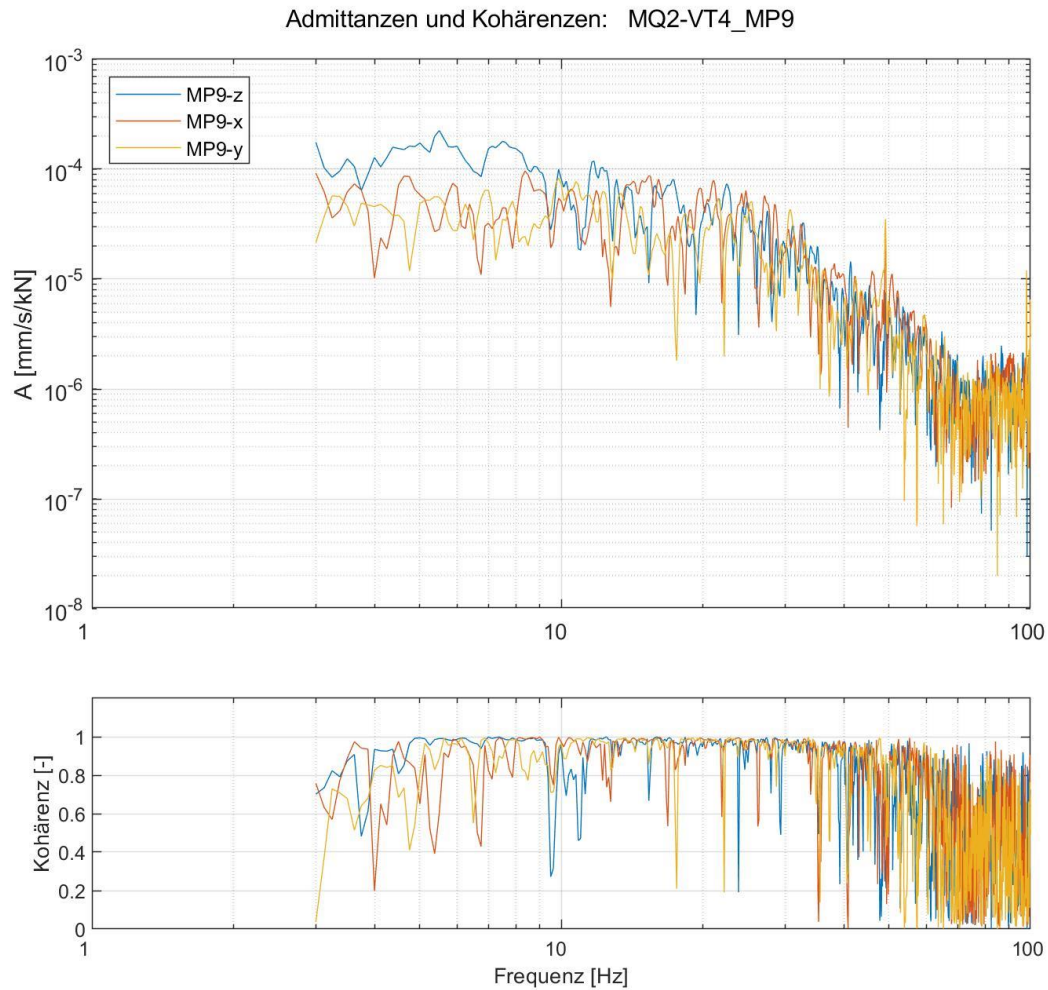


Abbildung 9-138: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

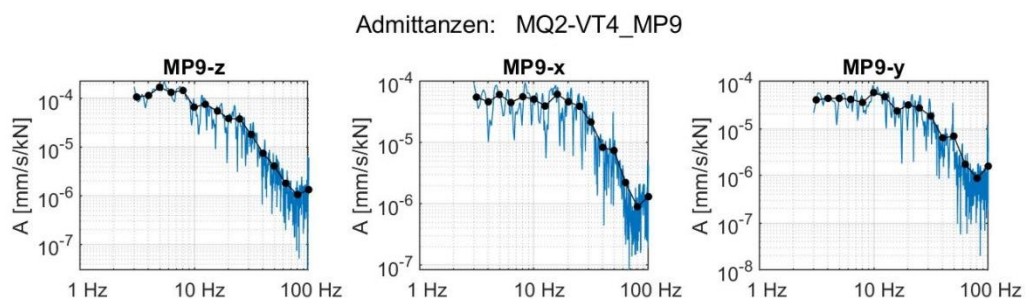


Abbildung 9-139: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)

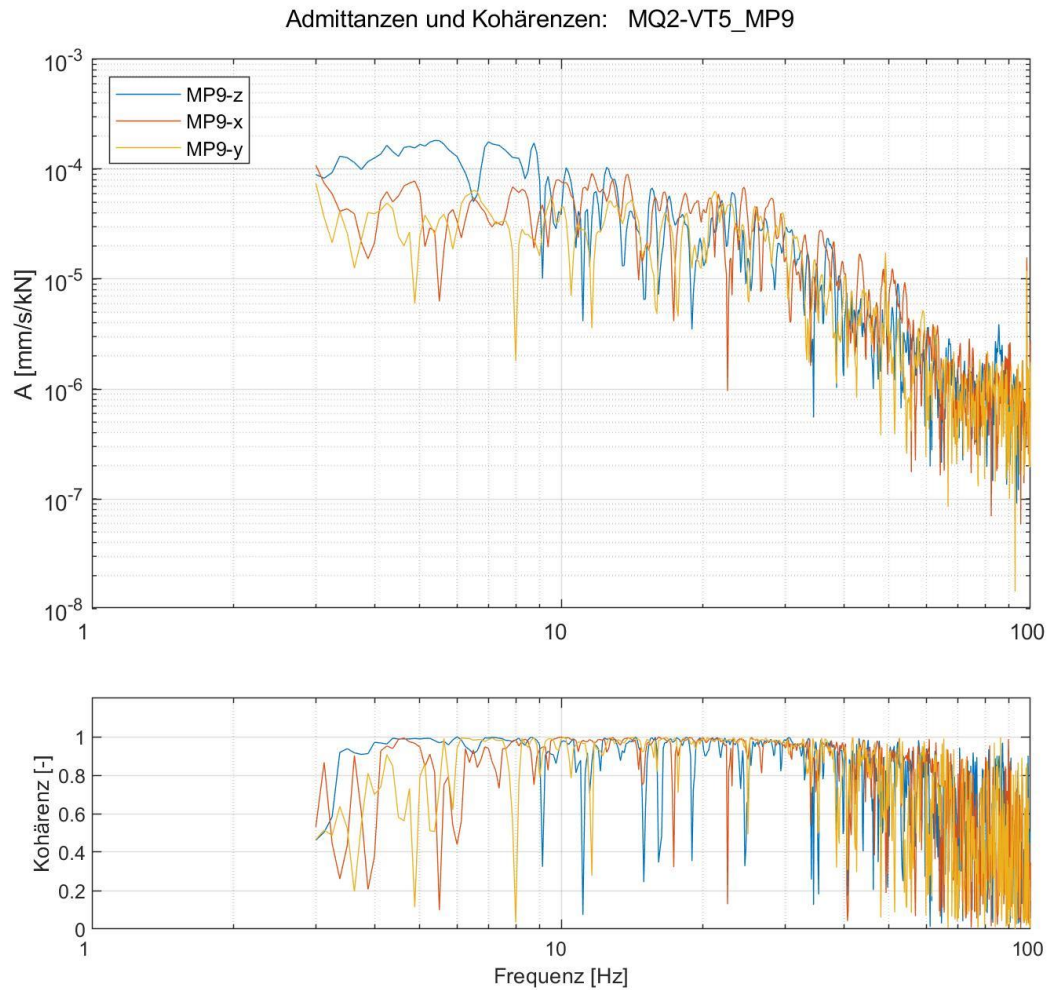


Abbildung 9-140: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

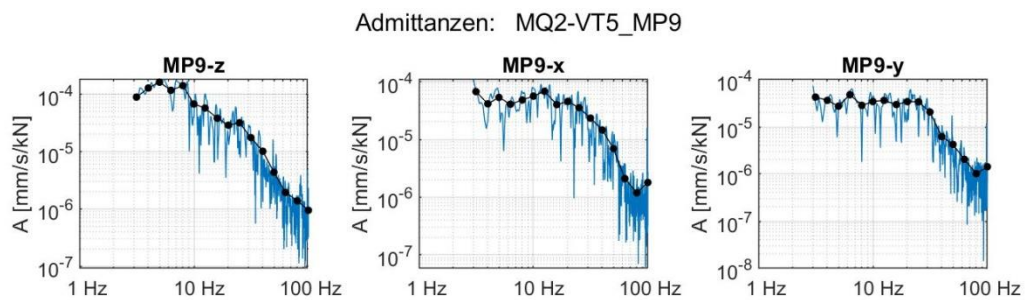


Abbildung 9-141: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)



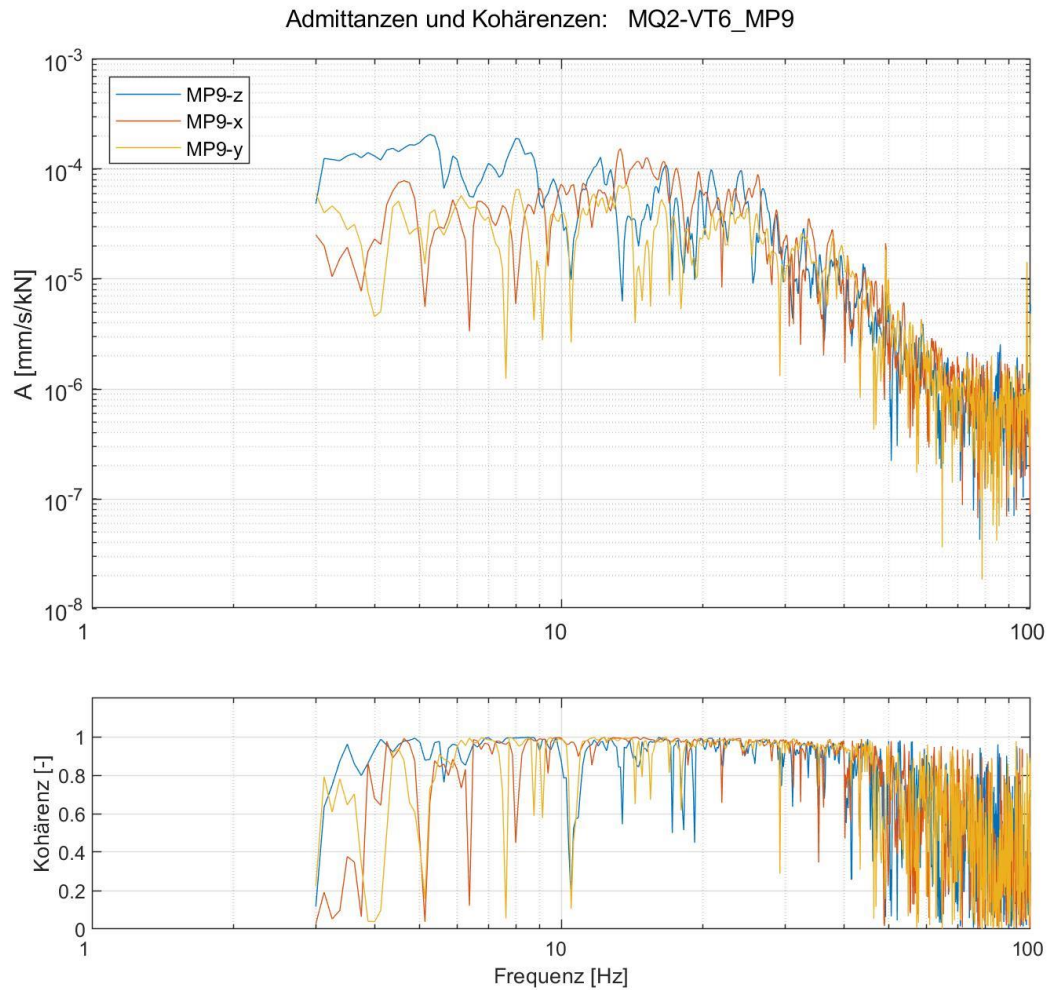


Abbildung 9-142: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

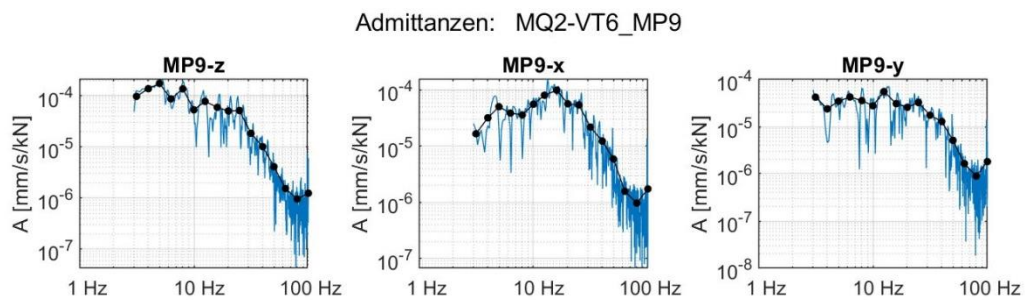
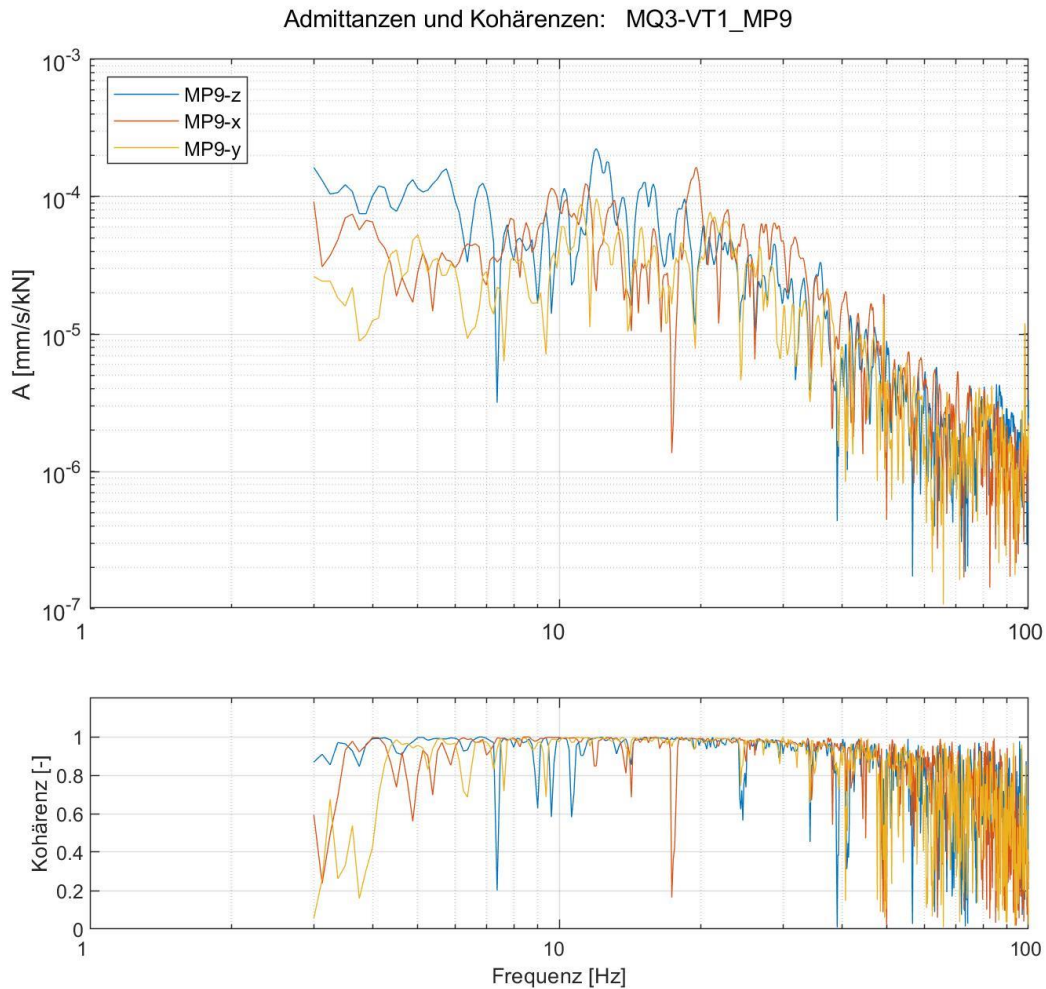


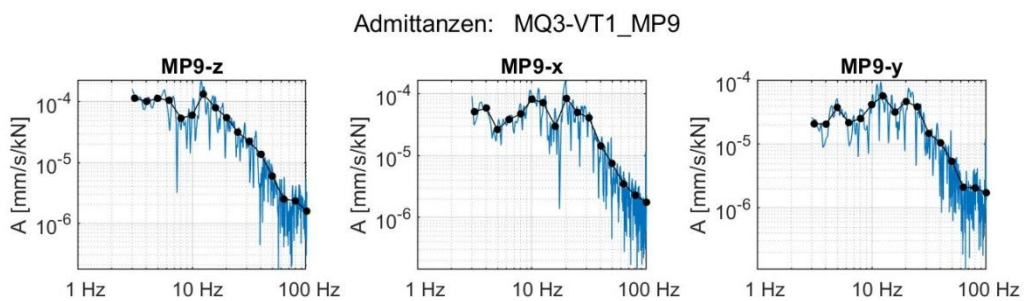
Abbildung 9-143: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)



**Gebäudeadmittanzen bei Anregung mit VibroTruck am MQ3**



**Abbildung 9-144: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)**



**Abbildung 9-145: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)**

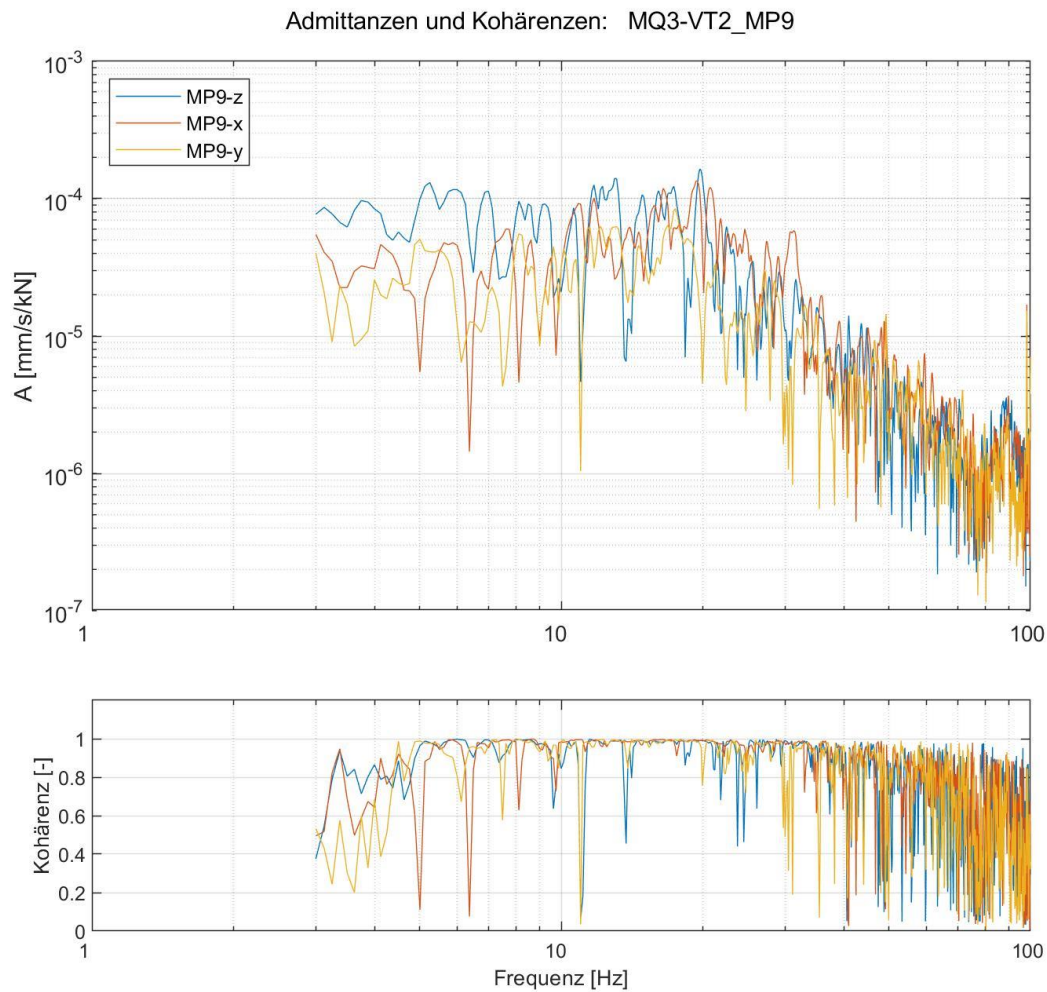


Abbildung 9-146: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

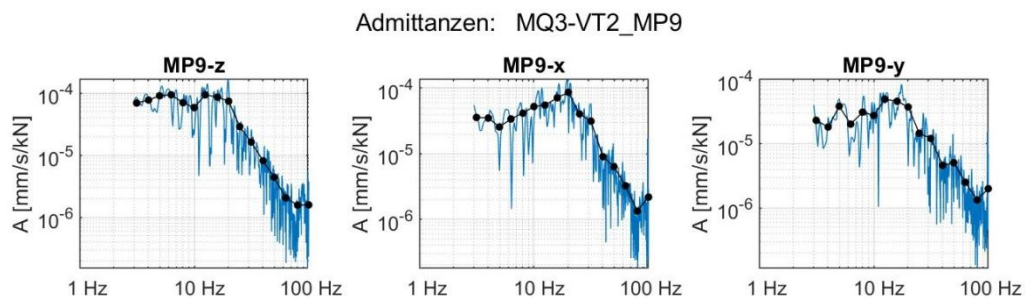


Abbildung 9-147: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

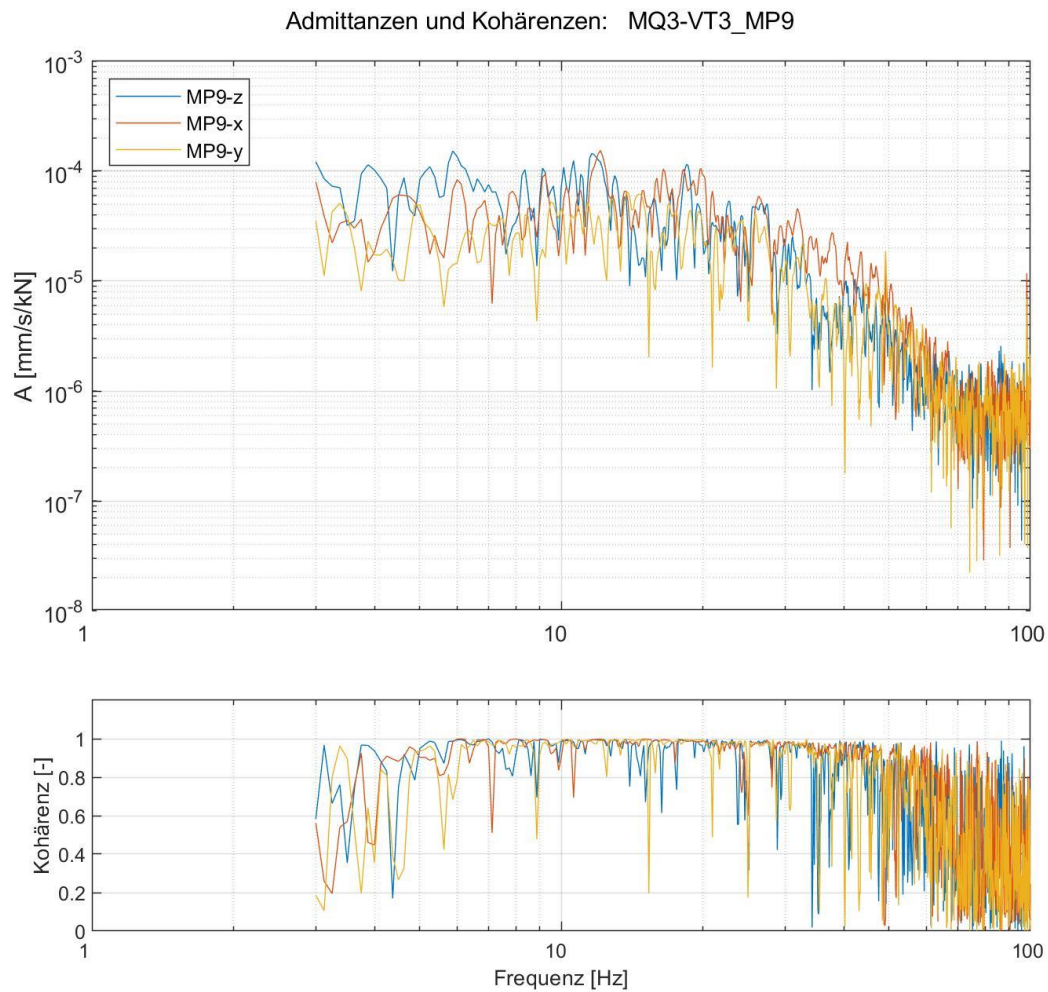


Abbildung 9-148: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

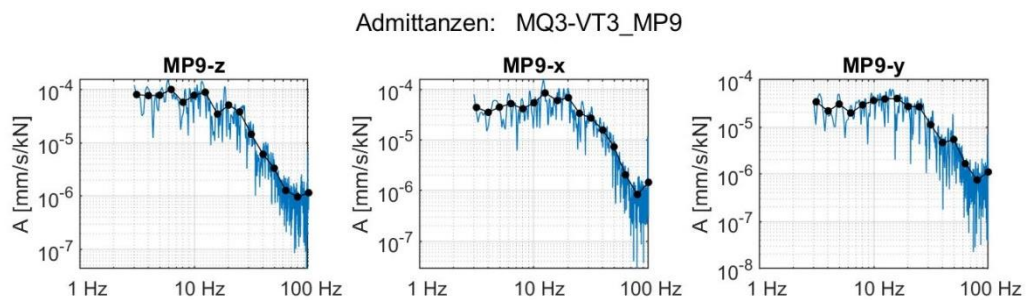


Abbildung 9-149: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)



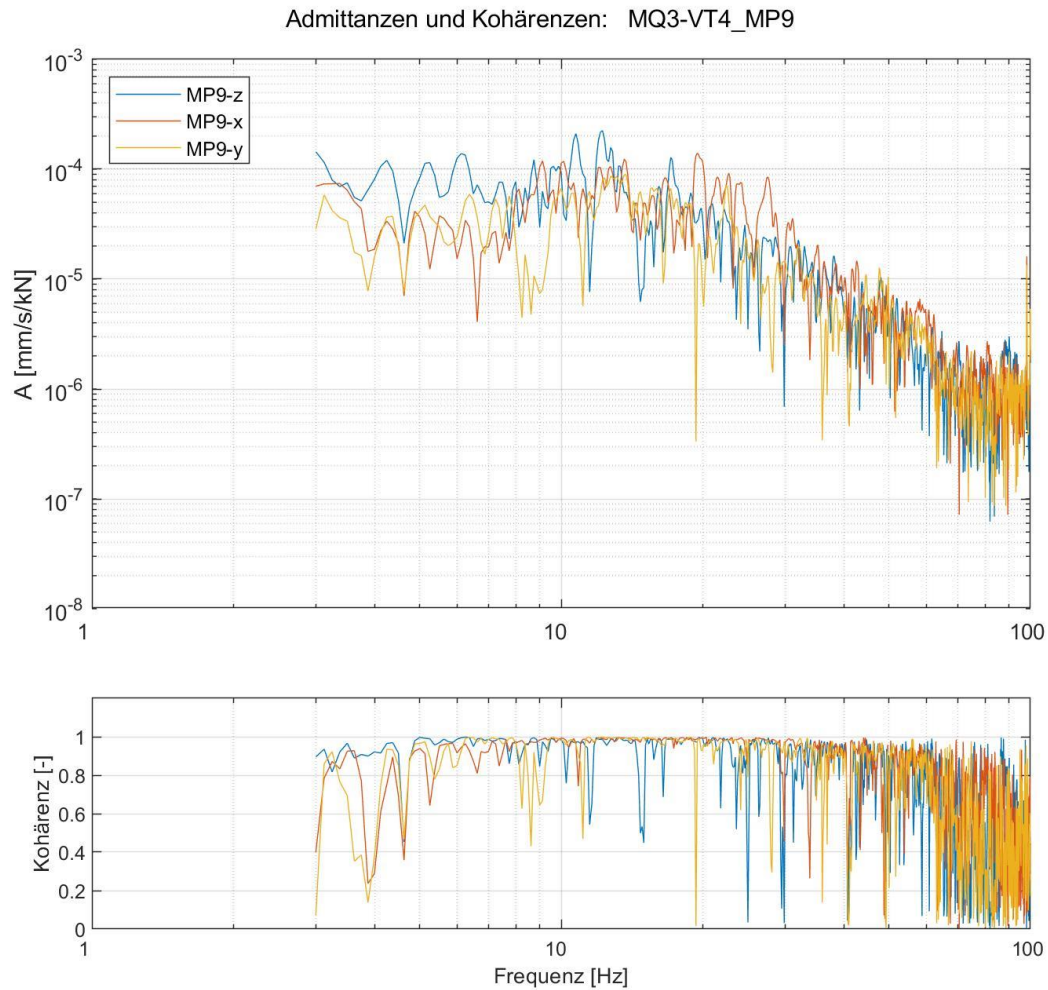


Abbildung 9-150: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

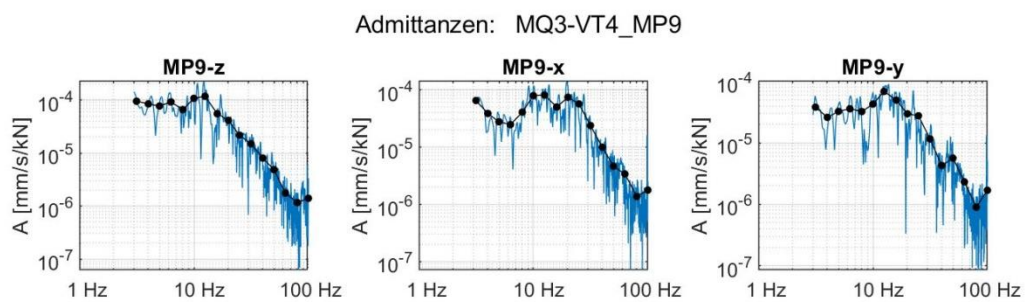


Abbildung 9-151: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)



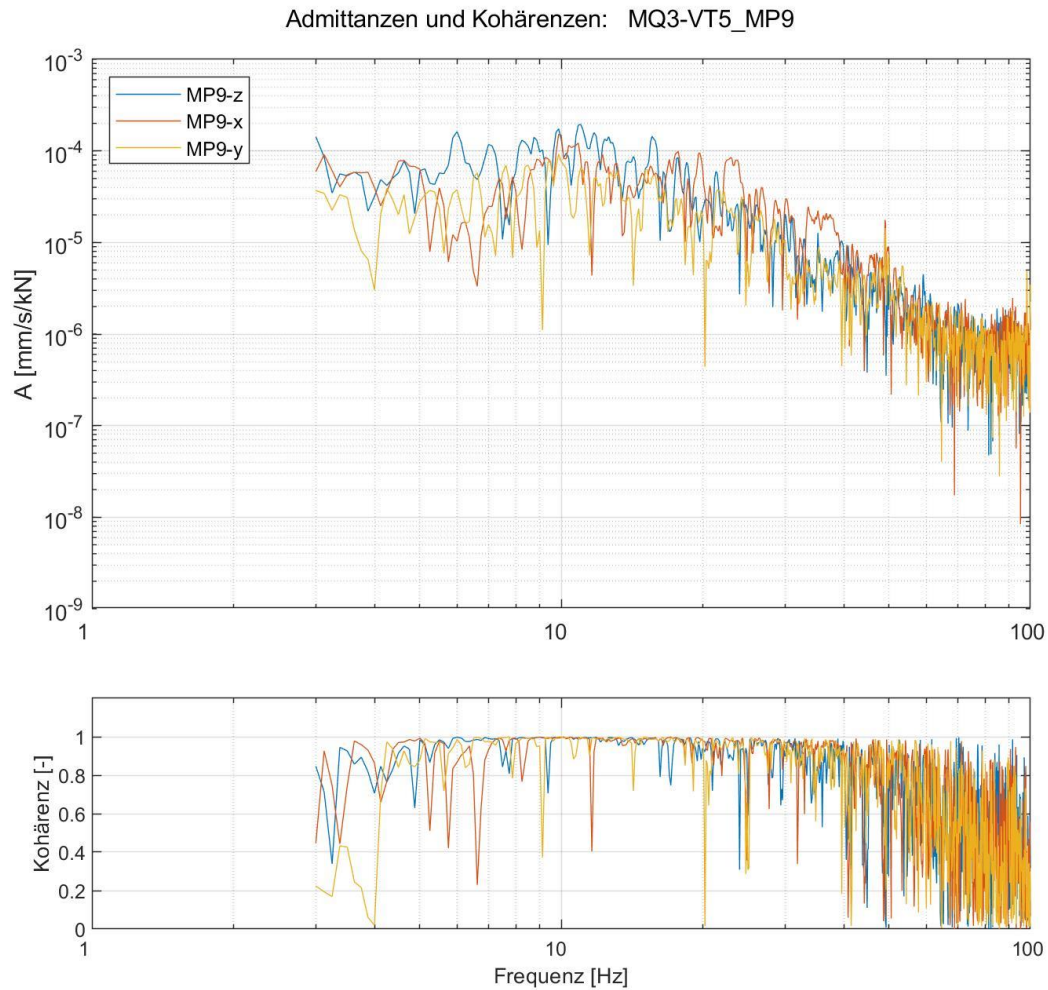


Abbildung 9-152: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

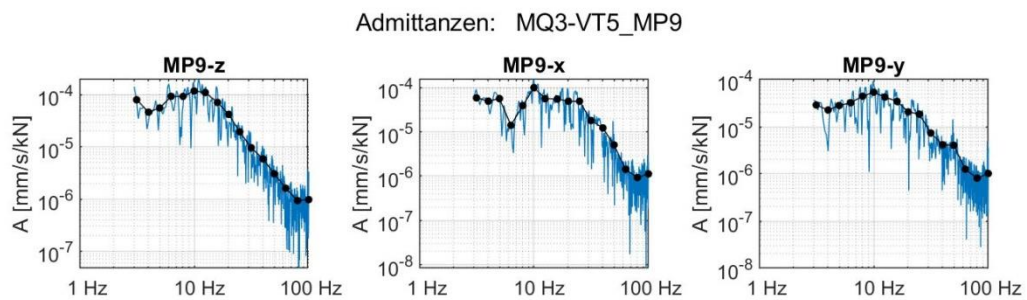


Abbildung 9-153: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

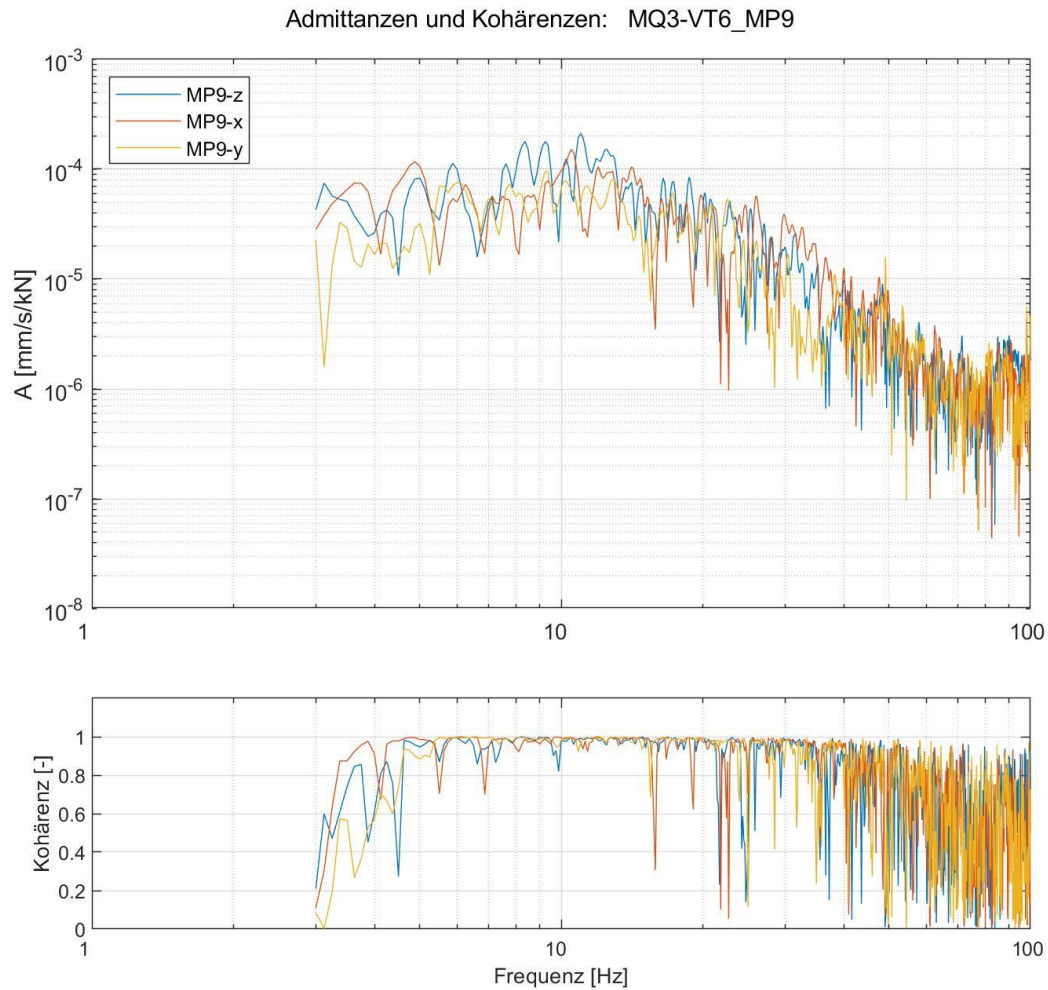


Abbildung 9-154: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

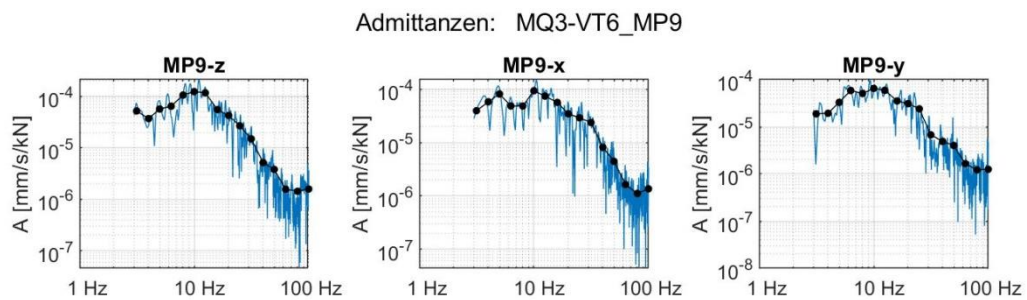


Abbildung 9-155: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

### 9.7.6 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP12

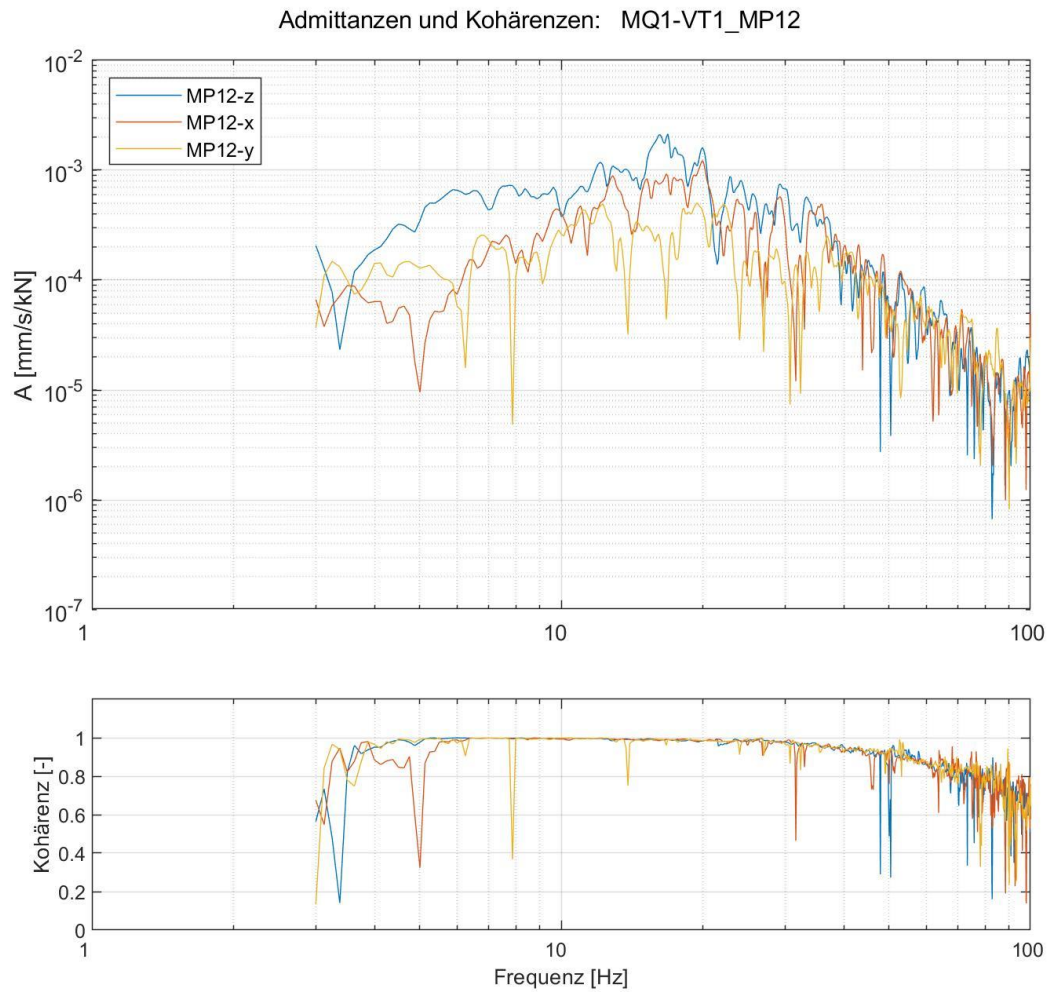


Abbildung 9-156: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

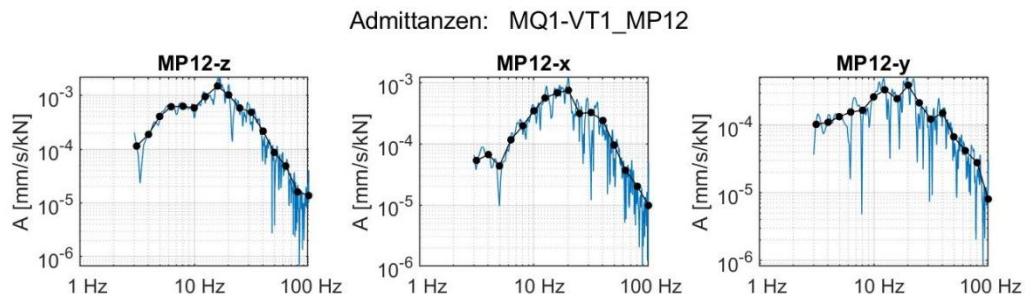


Abbildung 9-157: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

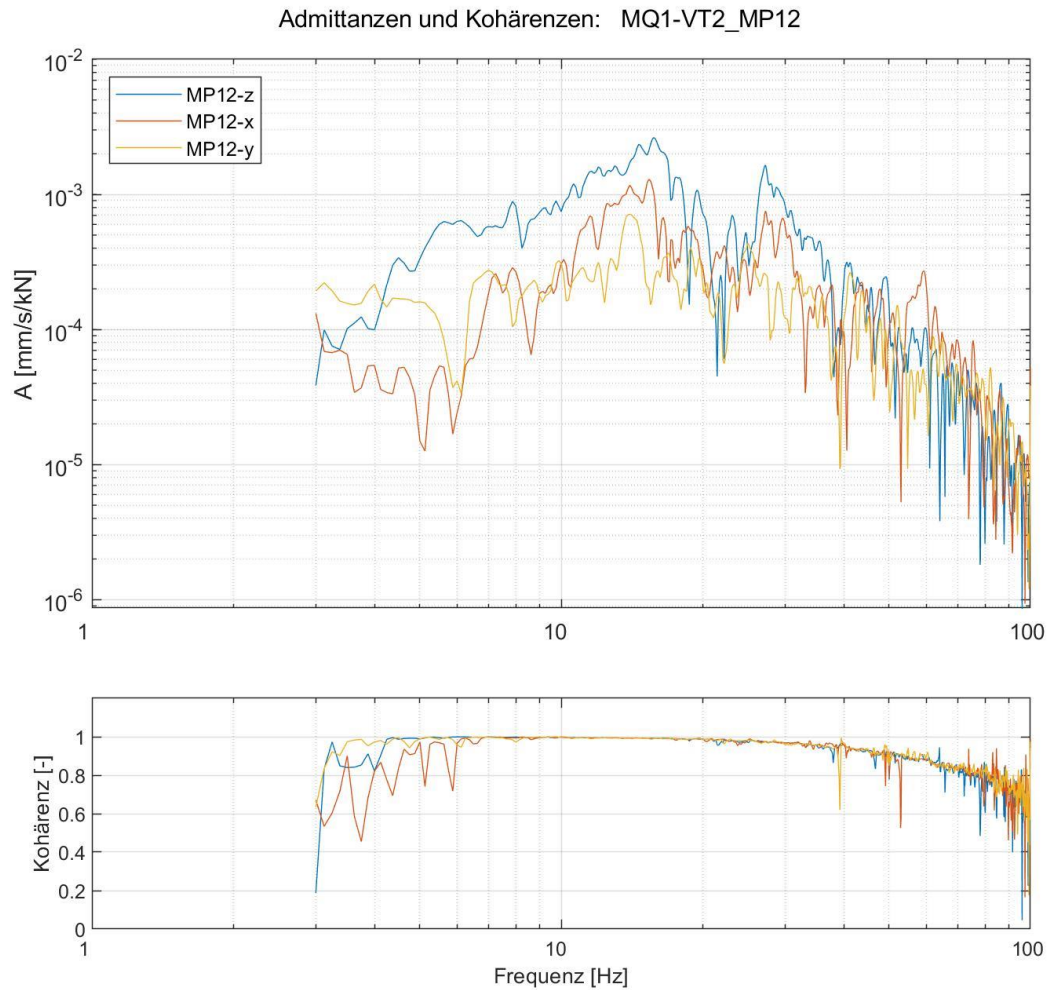


Abbildung 9-158: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

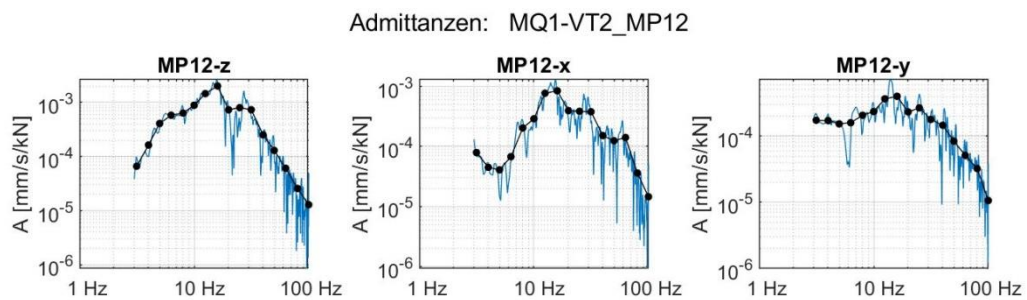


Abbildung 9-159: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)



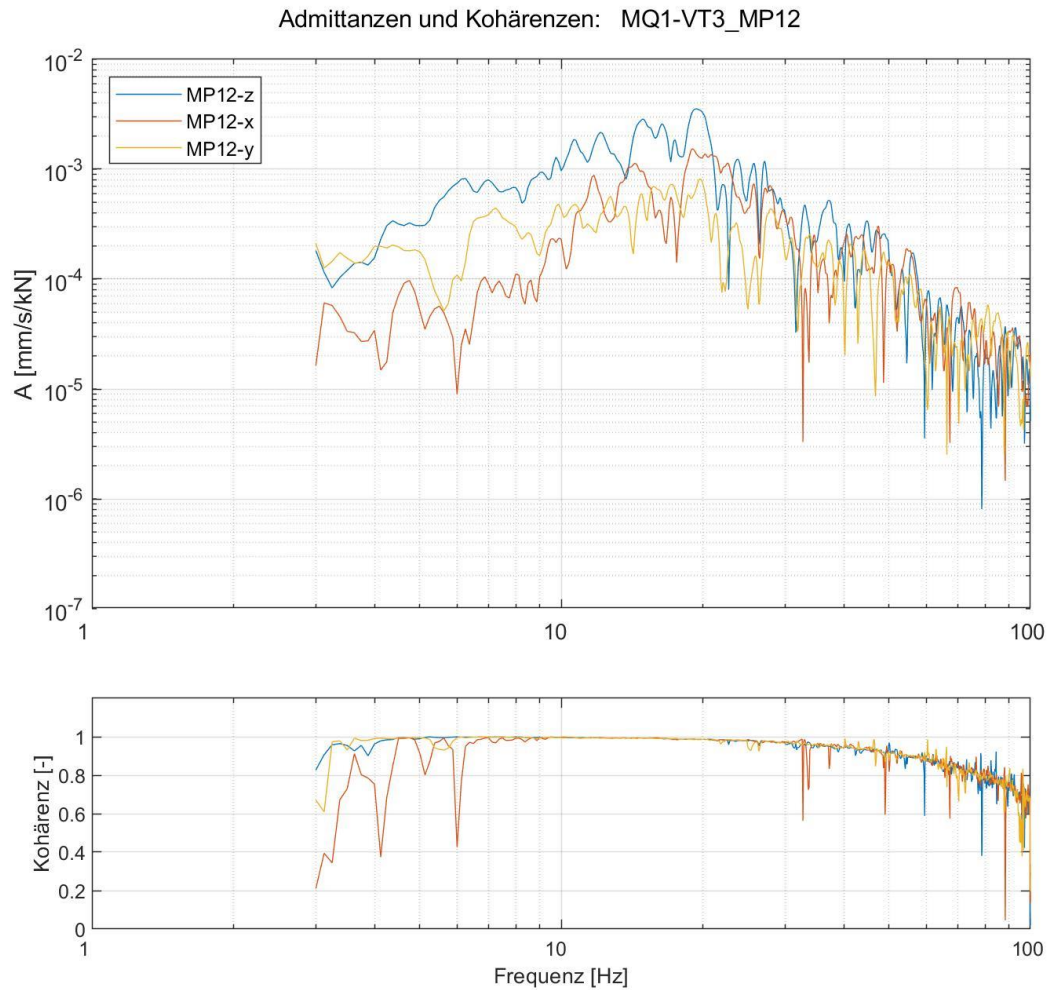


Abbildung 9-160: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

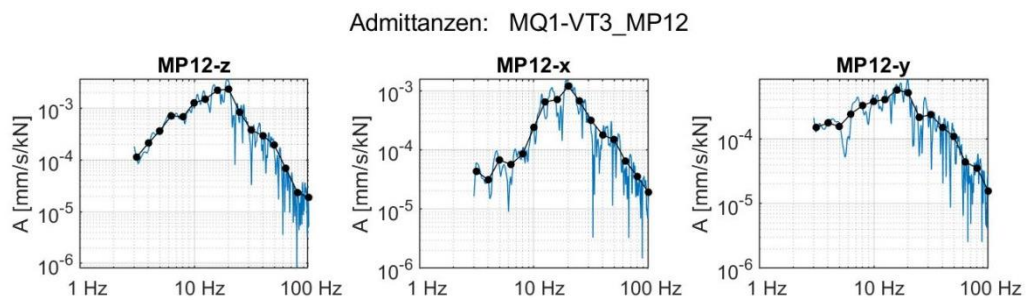


Abbildung 9-161: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

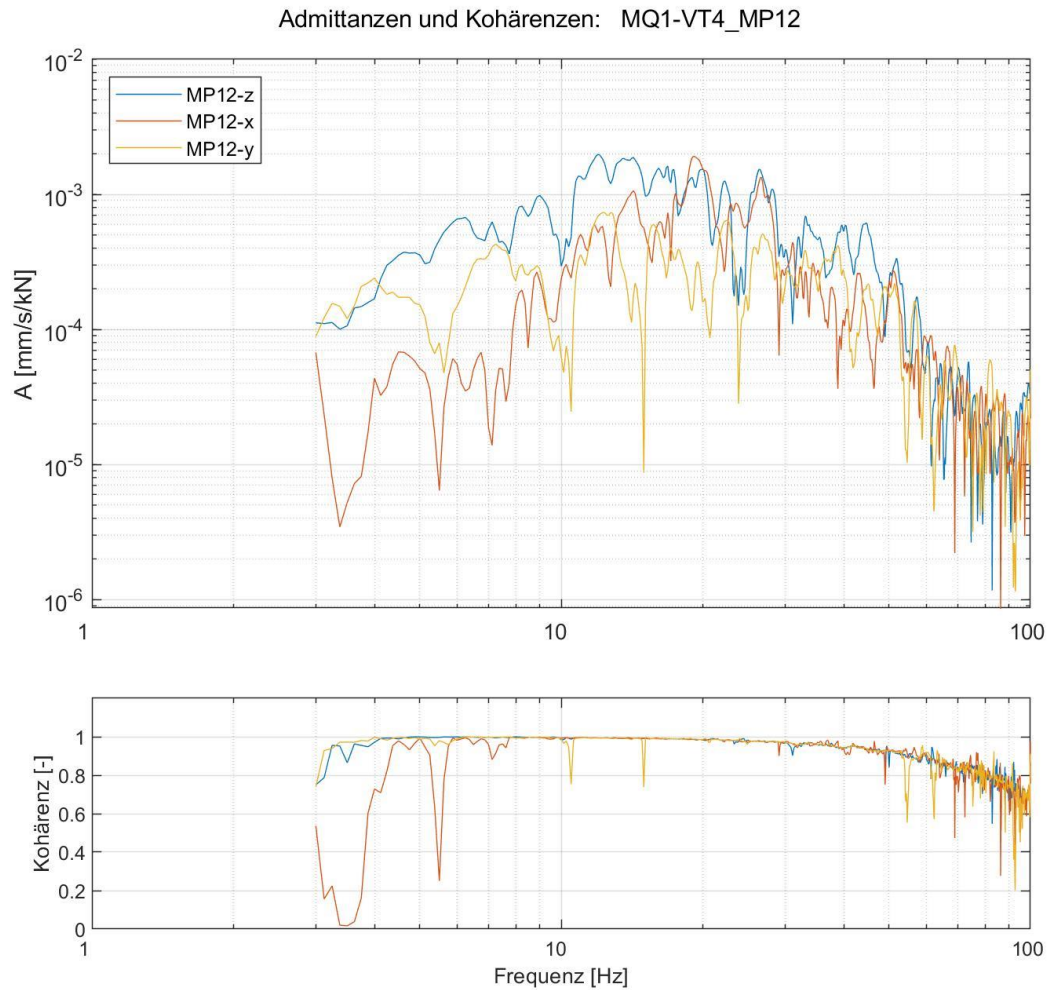


Abbildung 9-162: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

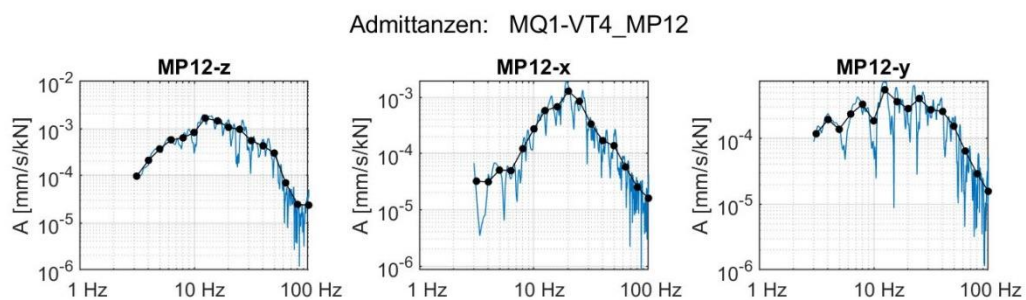


Abbildung 9-163: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ1-VT5\_MP12

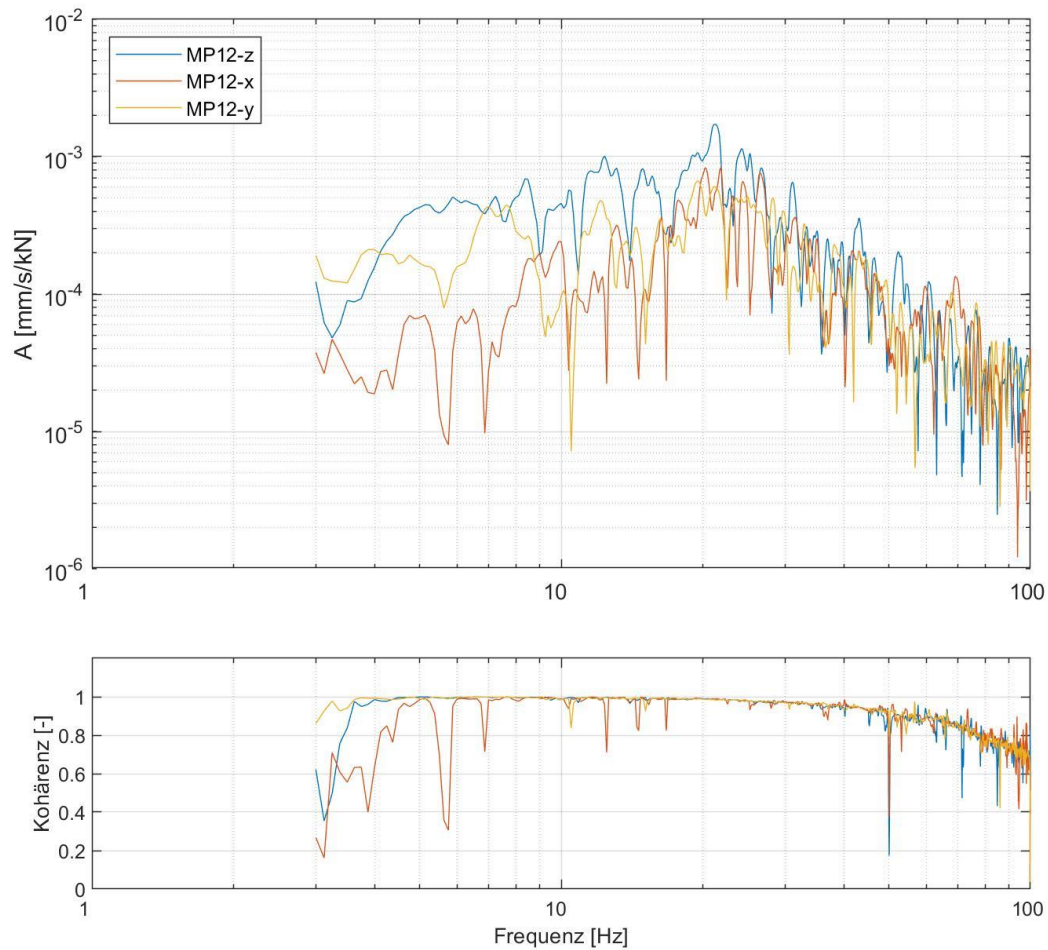


Abbildung 9-164: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

Admittanzen: MQ1-VT5\_MP12

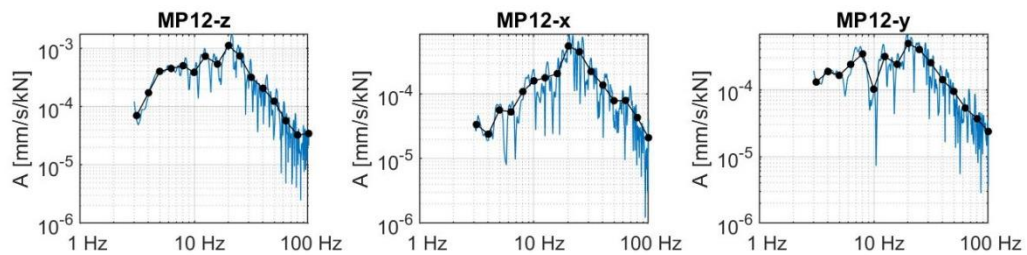


Abbildung 9-165: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

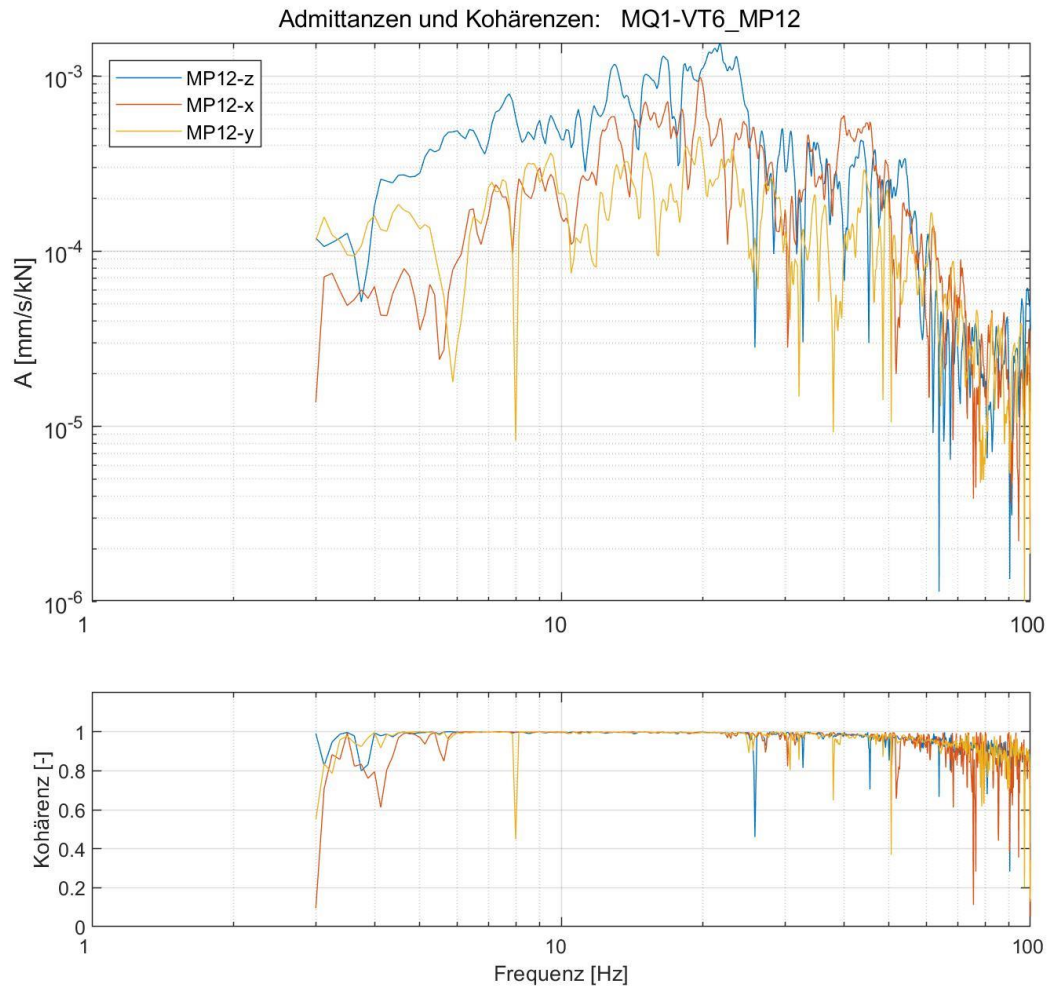


Abbildung 9-166: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

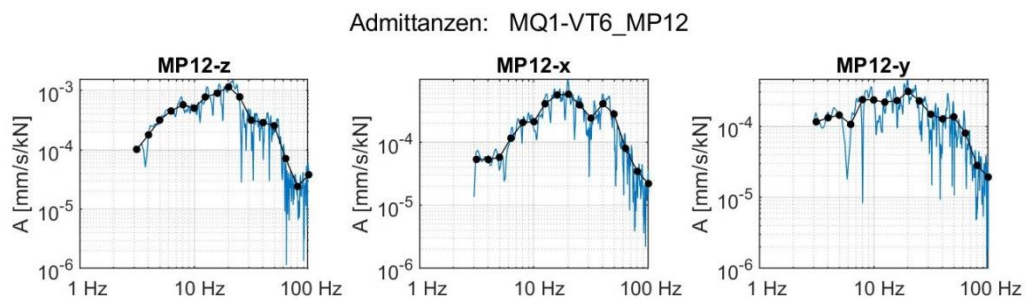


Abbildung 9-167: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)



### 9.7.7 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP18

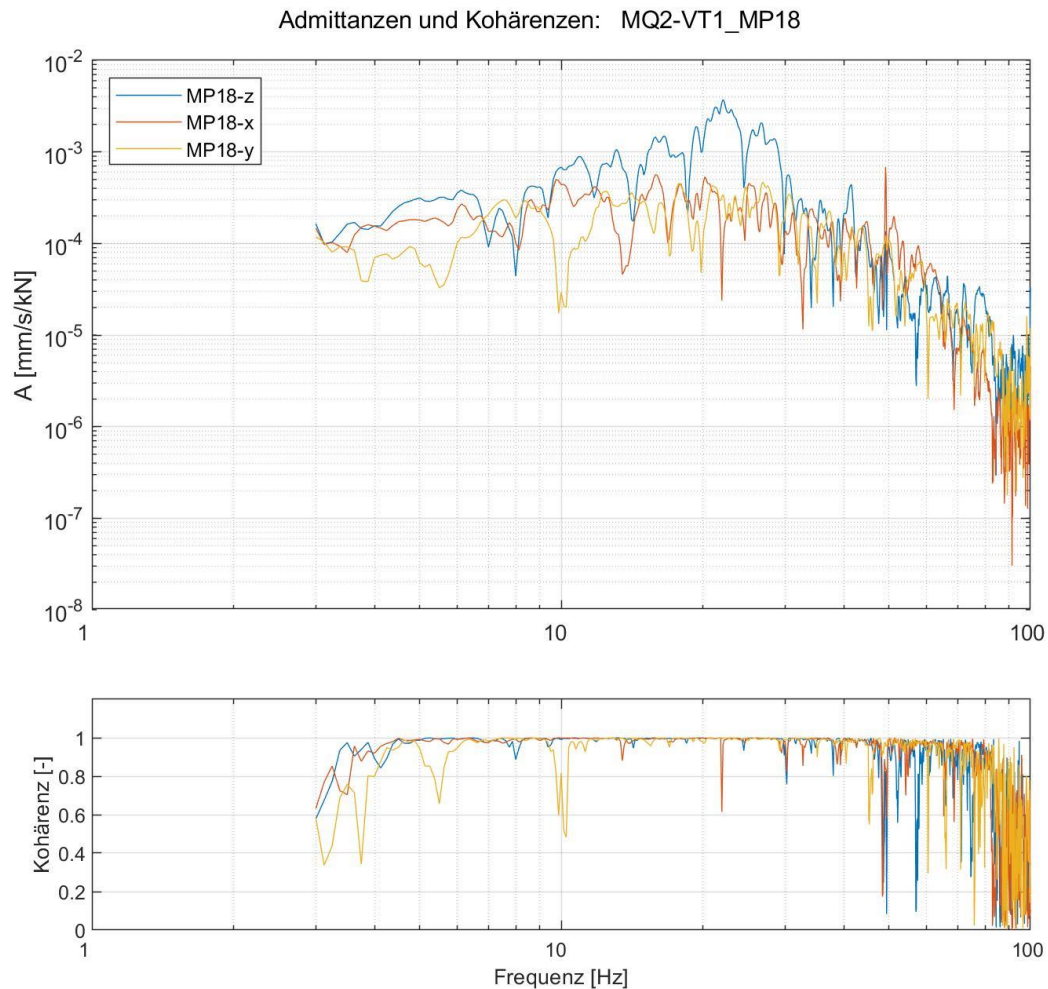


Abbildung 9-168: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

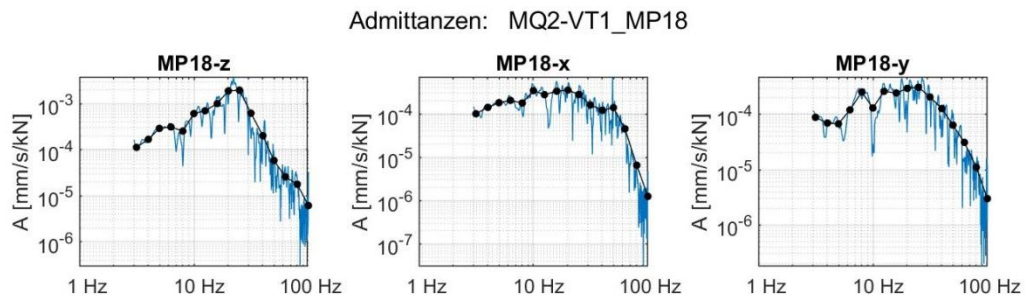


Abbildung 9-169: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

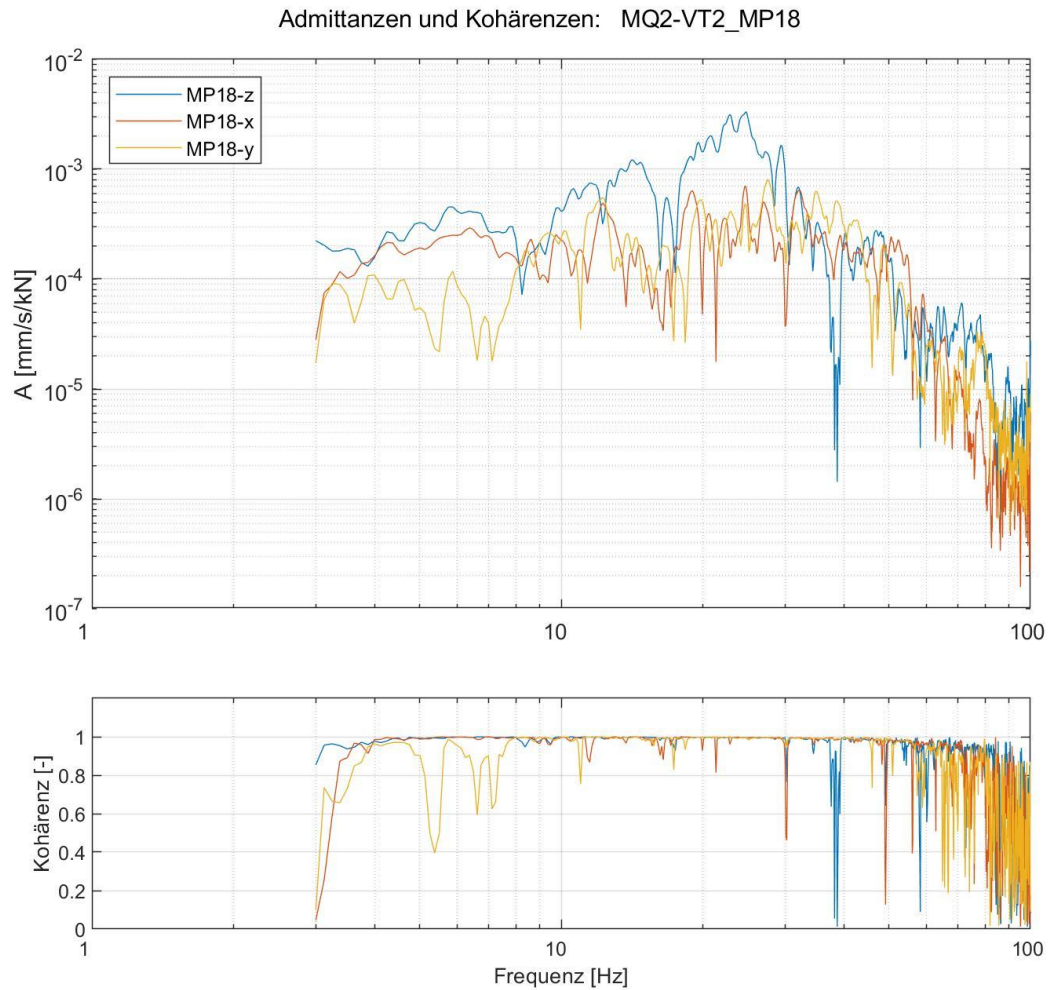


Abbildung 9-170: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

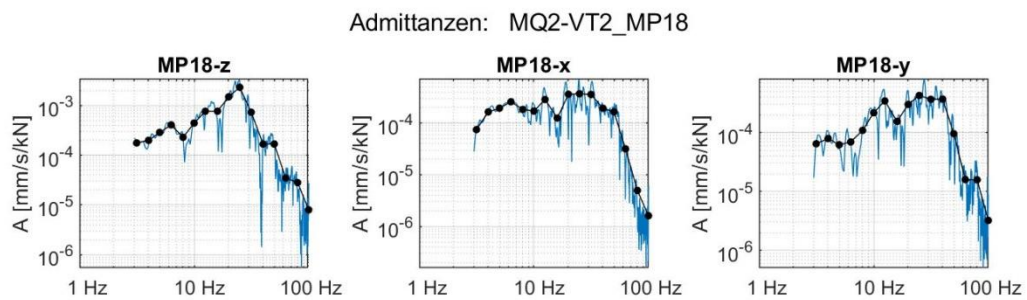


Abbildung 9-171: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

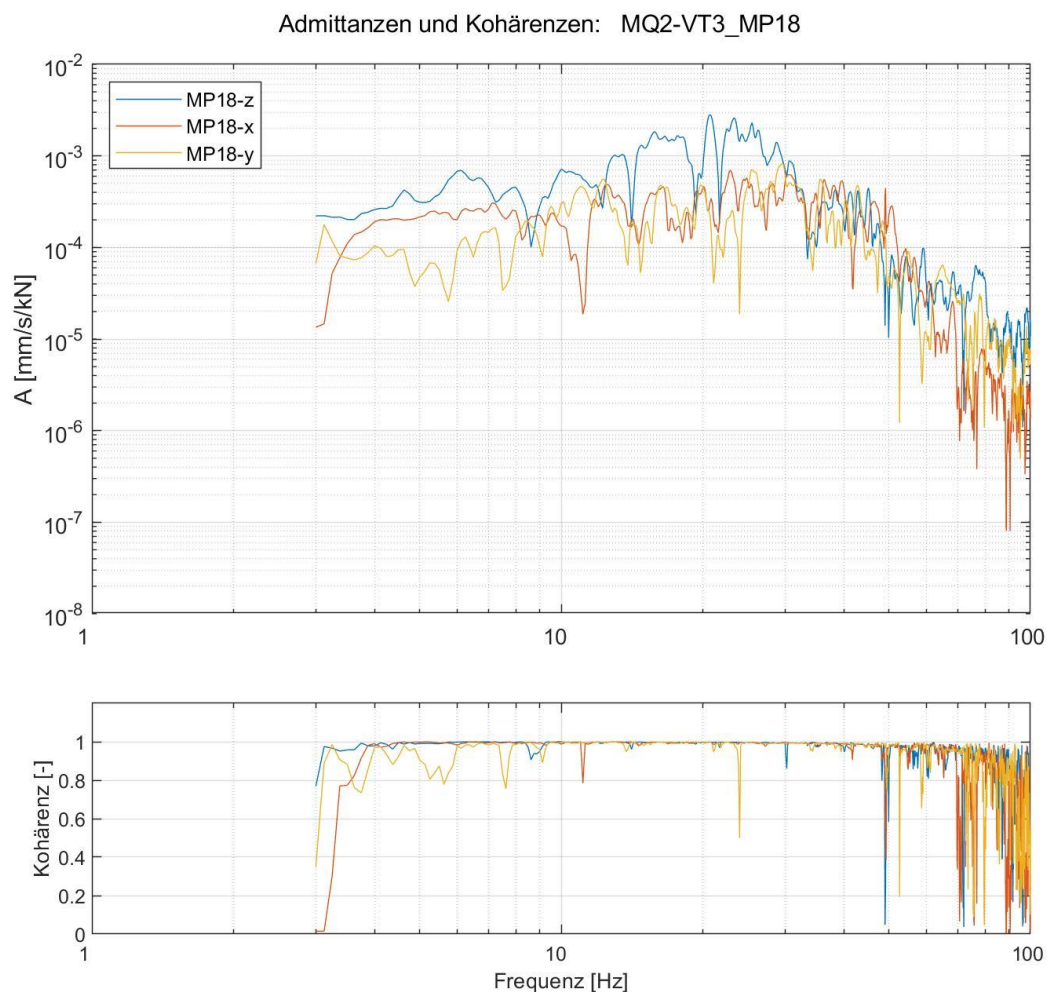


Abbildung 9-172: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

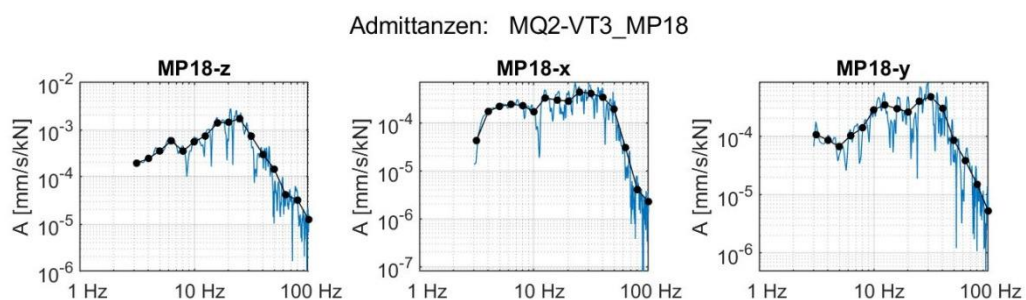


Abbildung 9-173: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

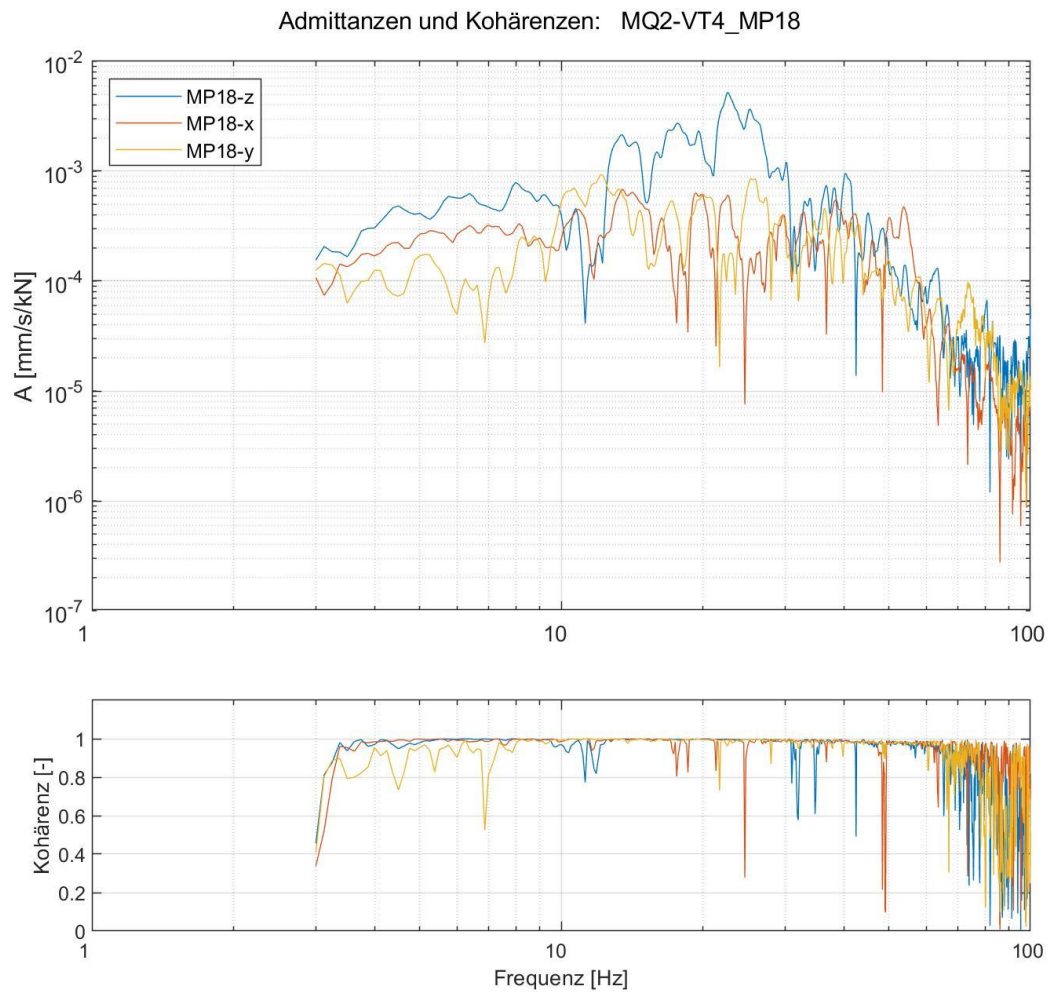


Abbildung 9-174: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

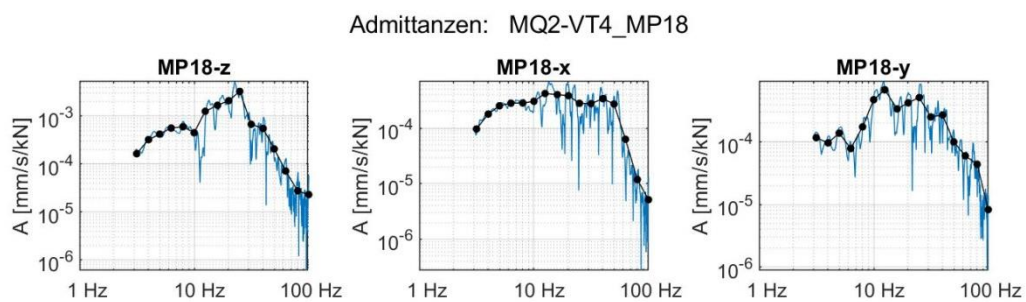


Abbildung 9-175: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)



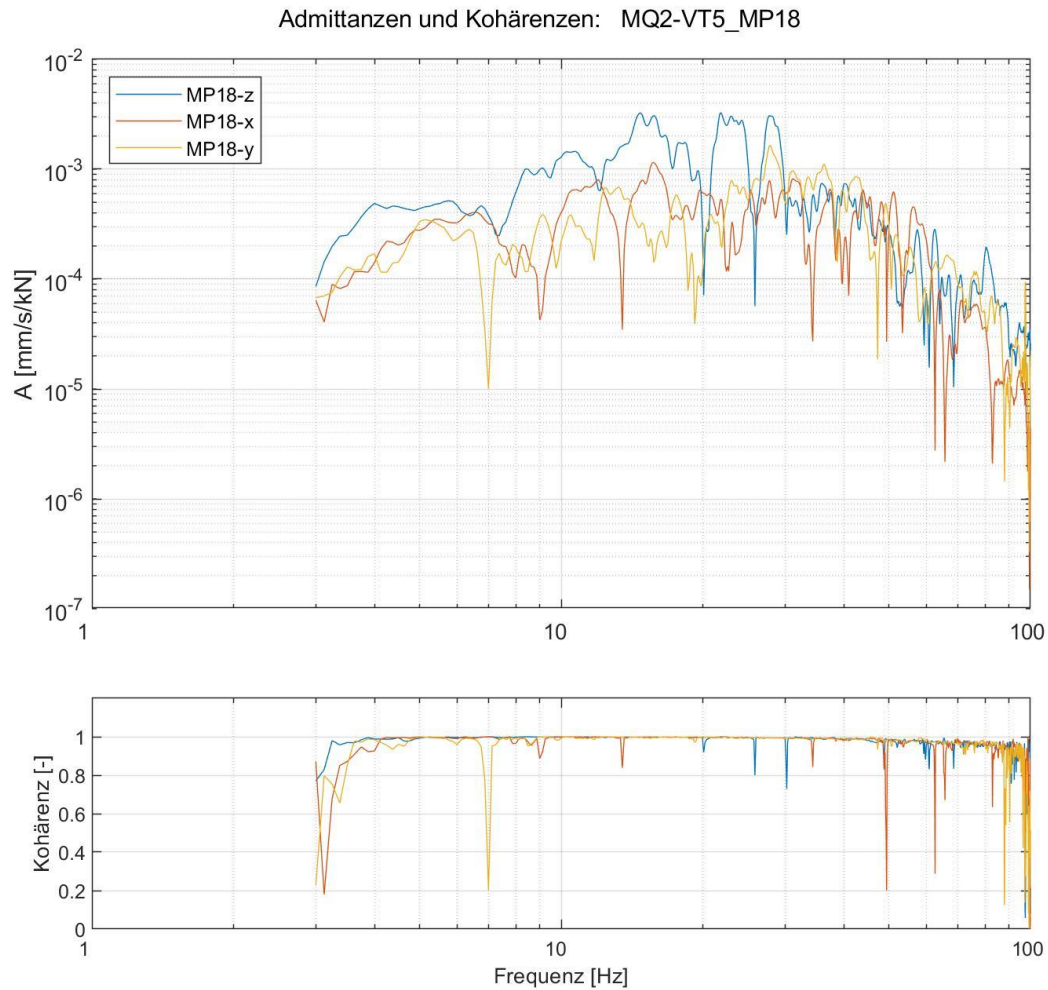


Abbildung 9-176: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

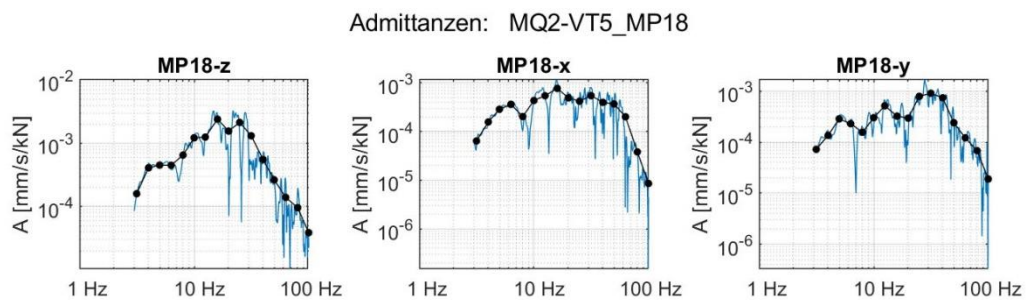


Abbildung 9-177: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ2-VT6\_MP18

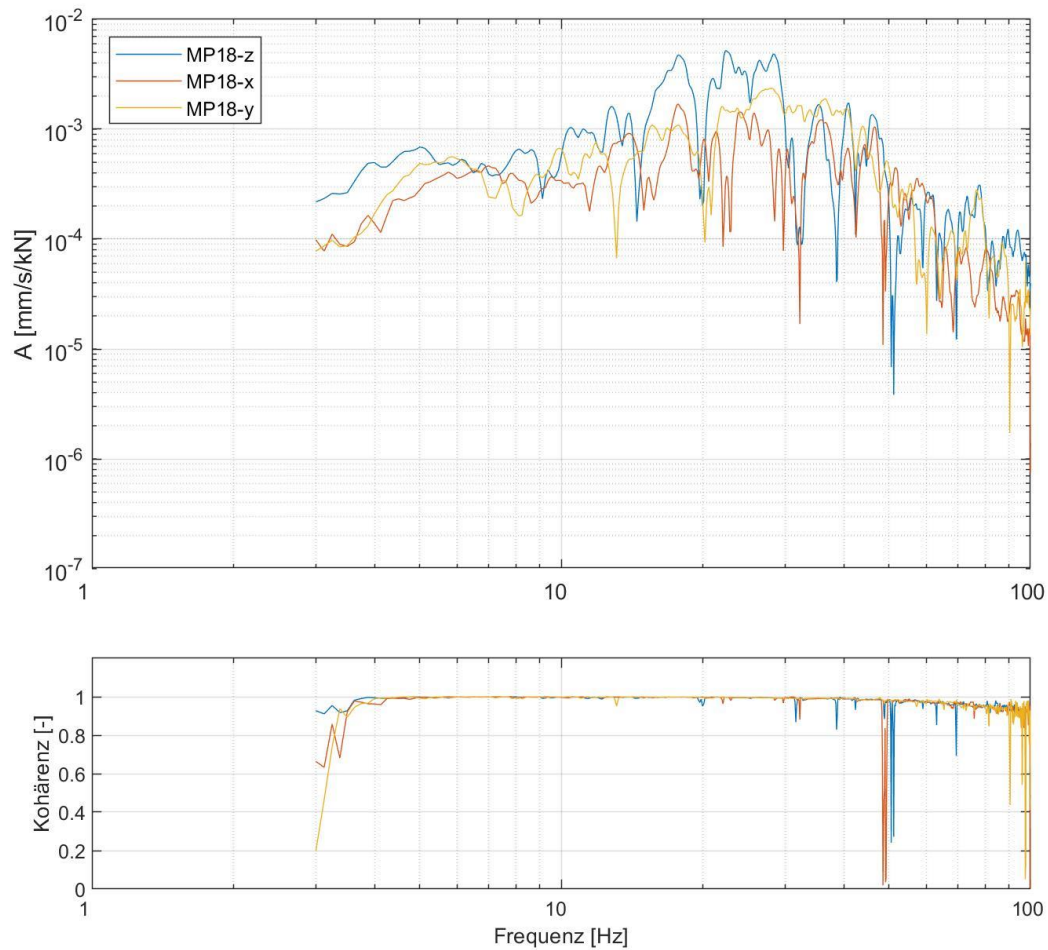


Abbildung 9-178: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

Admittanzen: MQ2-VT6\_MP18

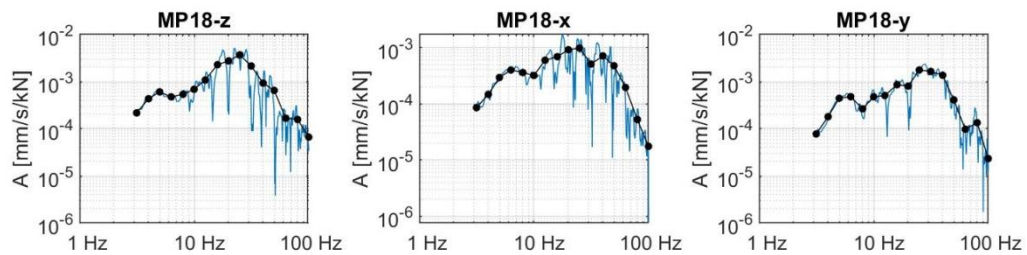


Abbildung 9-179: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

### 9.7.8 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP19

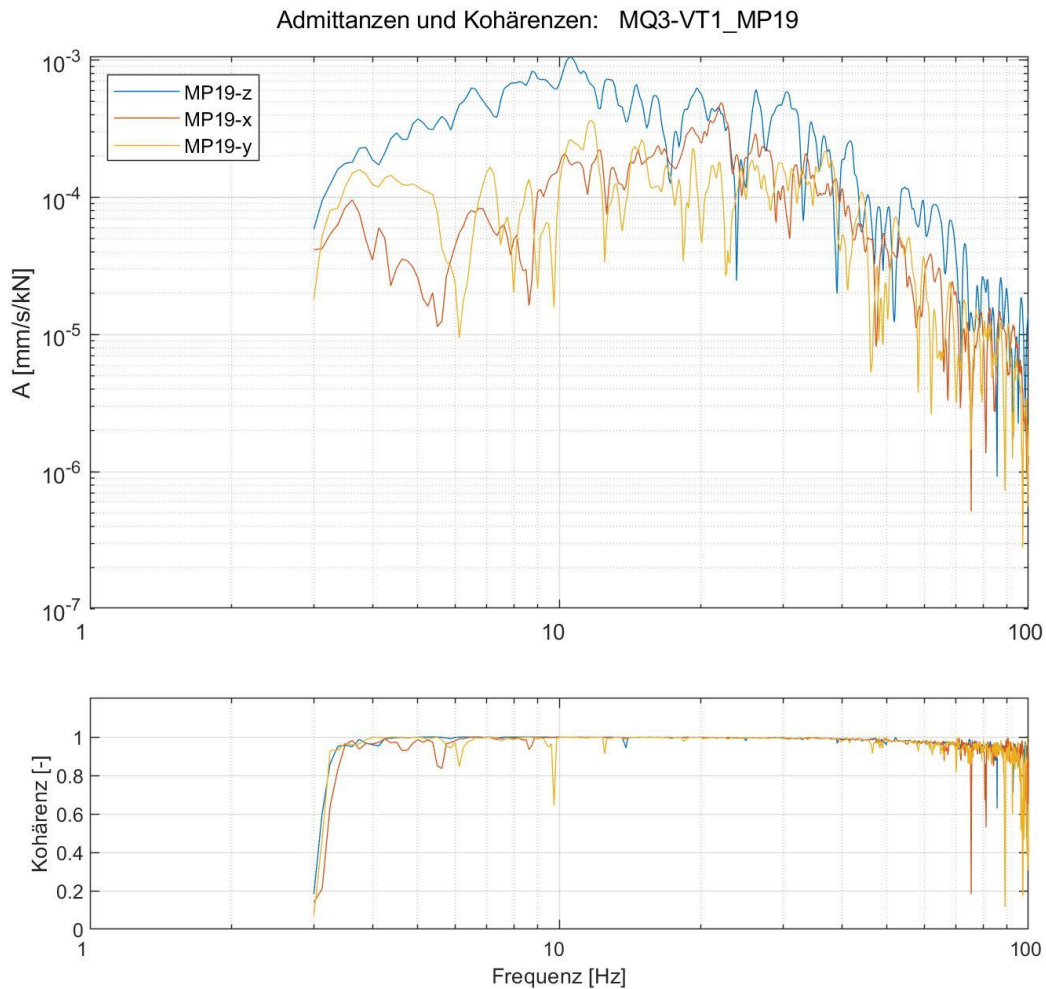


Abbildung 9-180: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

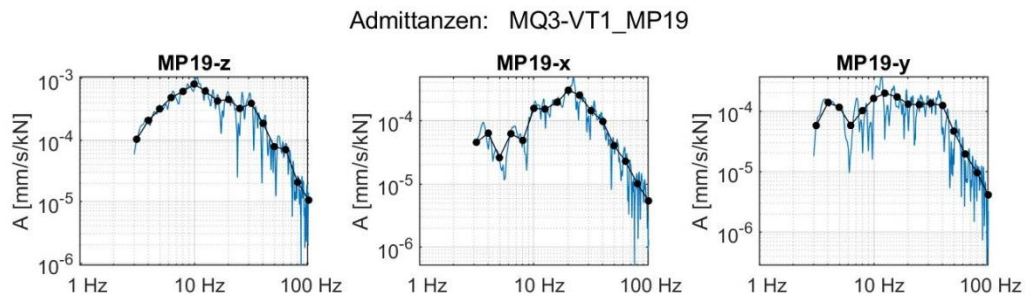


Abbildung 9-181: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

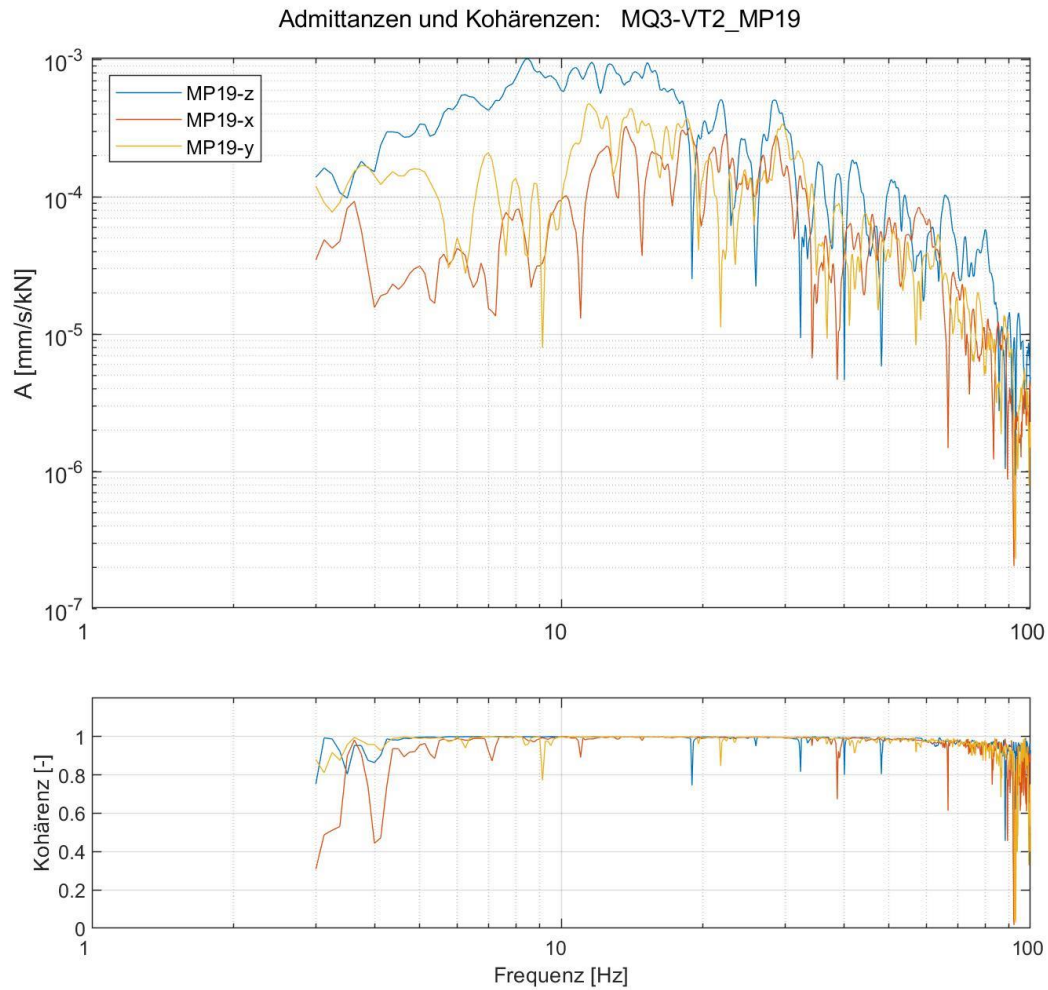


Abbildung 9-182: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

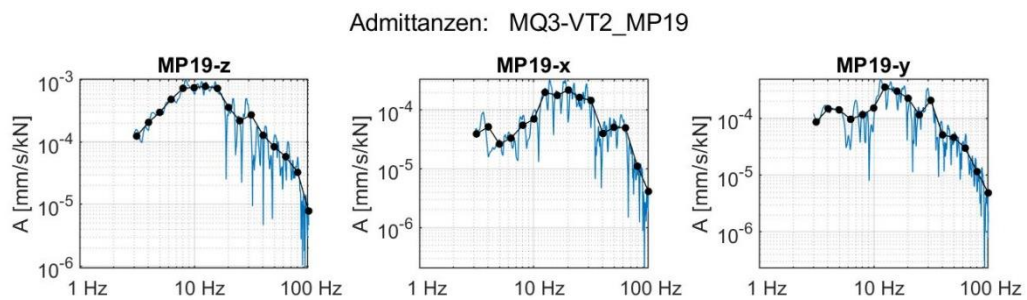


Abbildung 9-183: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)



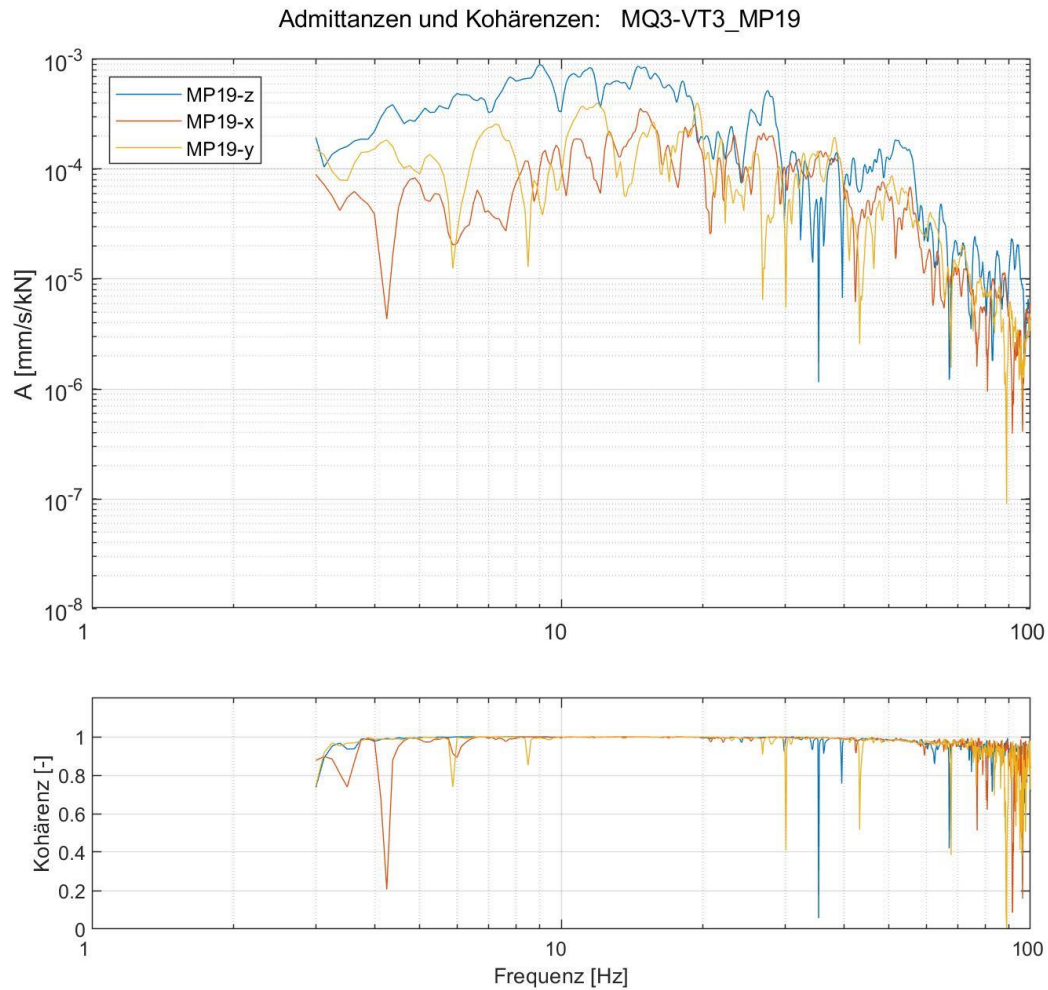


Abbildung 9-184: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

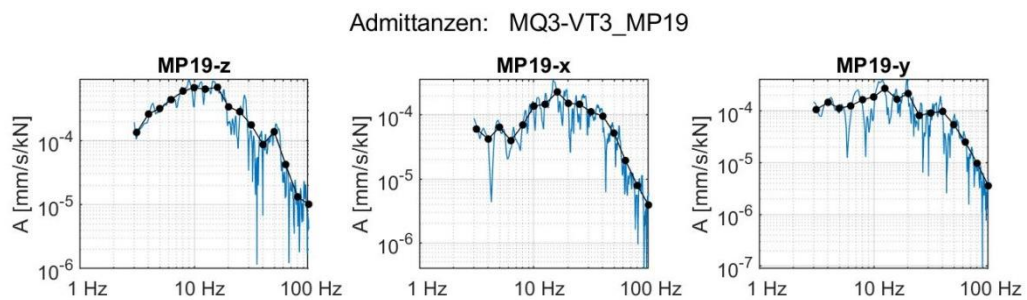


Abbildung 9-185: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

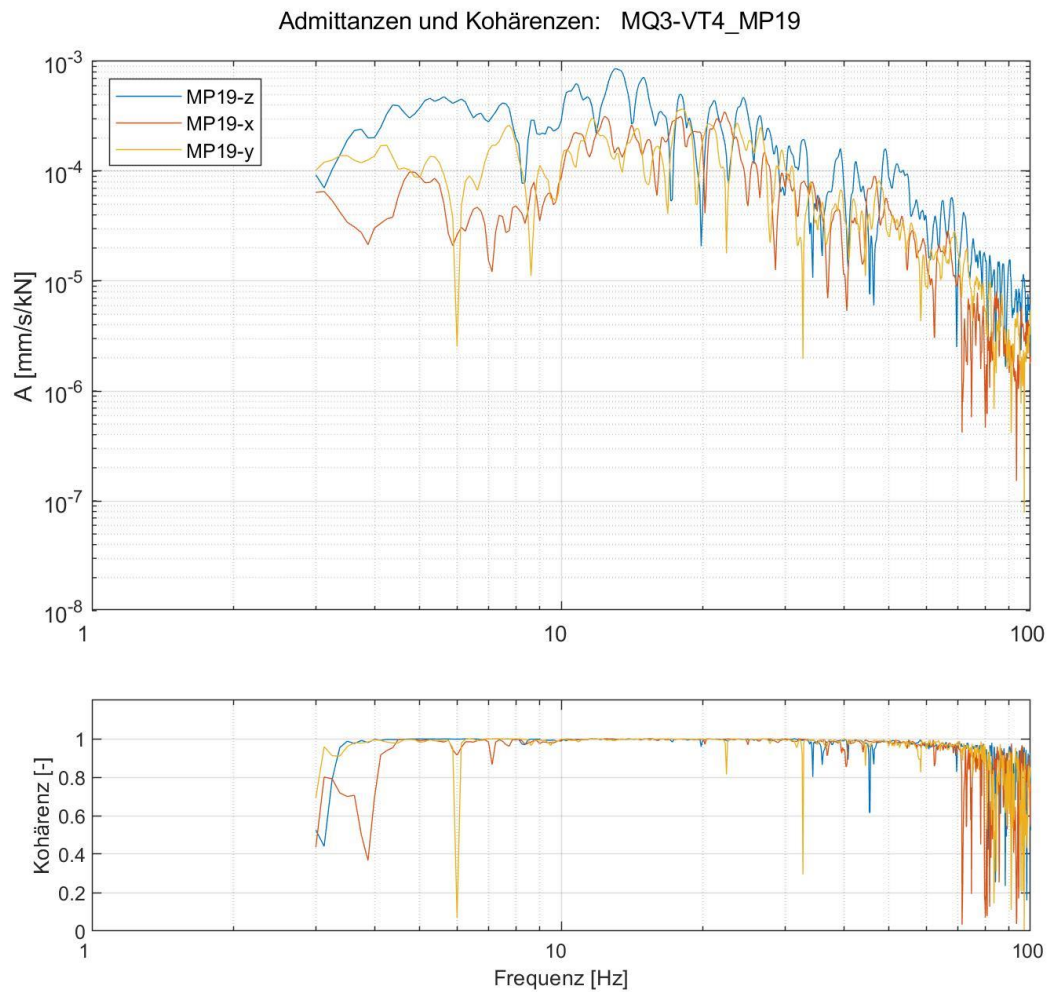


Abbildung 9-186: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

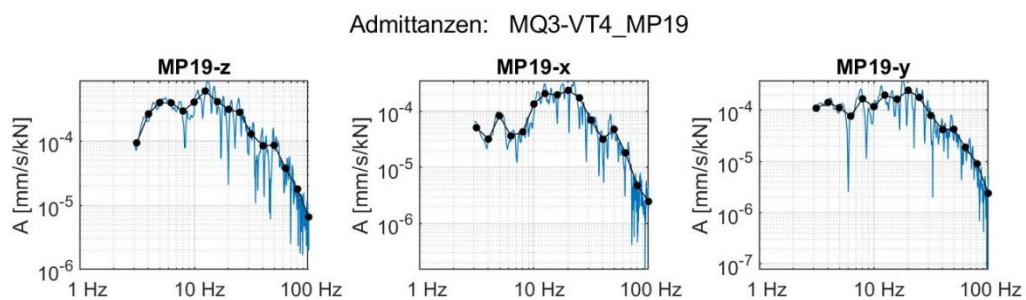


Abbildung 9-187: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)

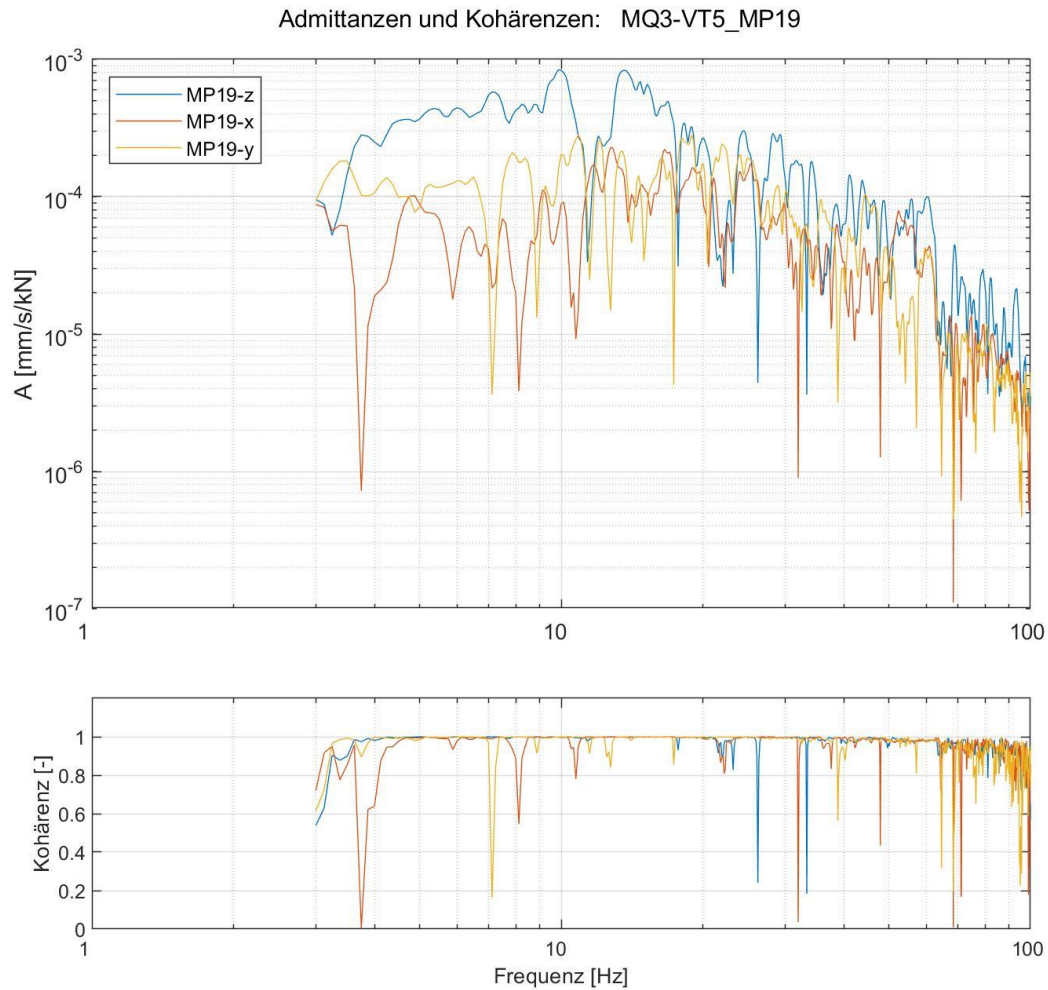


Abbildung 9-188: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

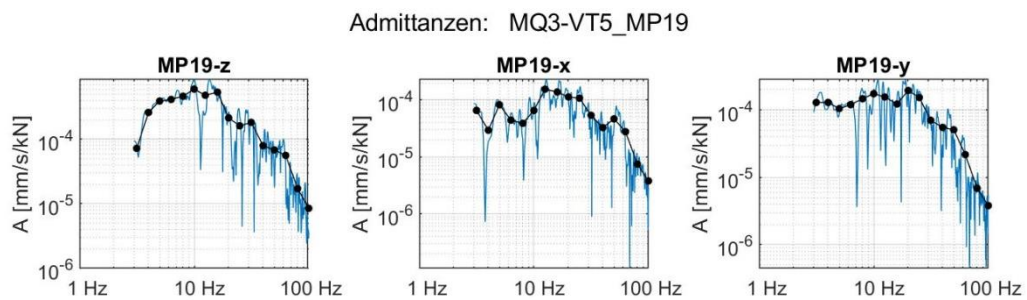


Abbildung 9-189: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

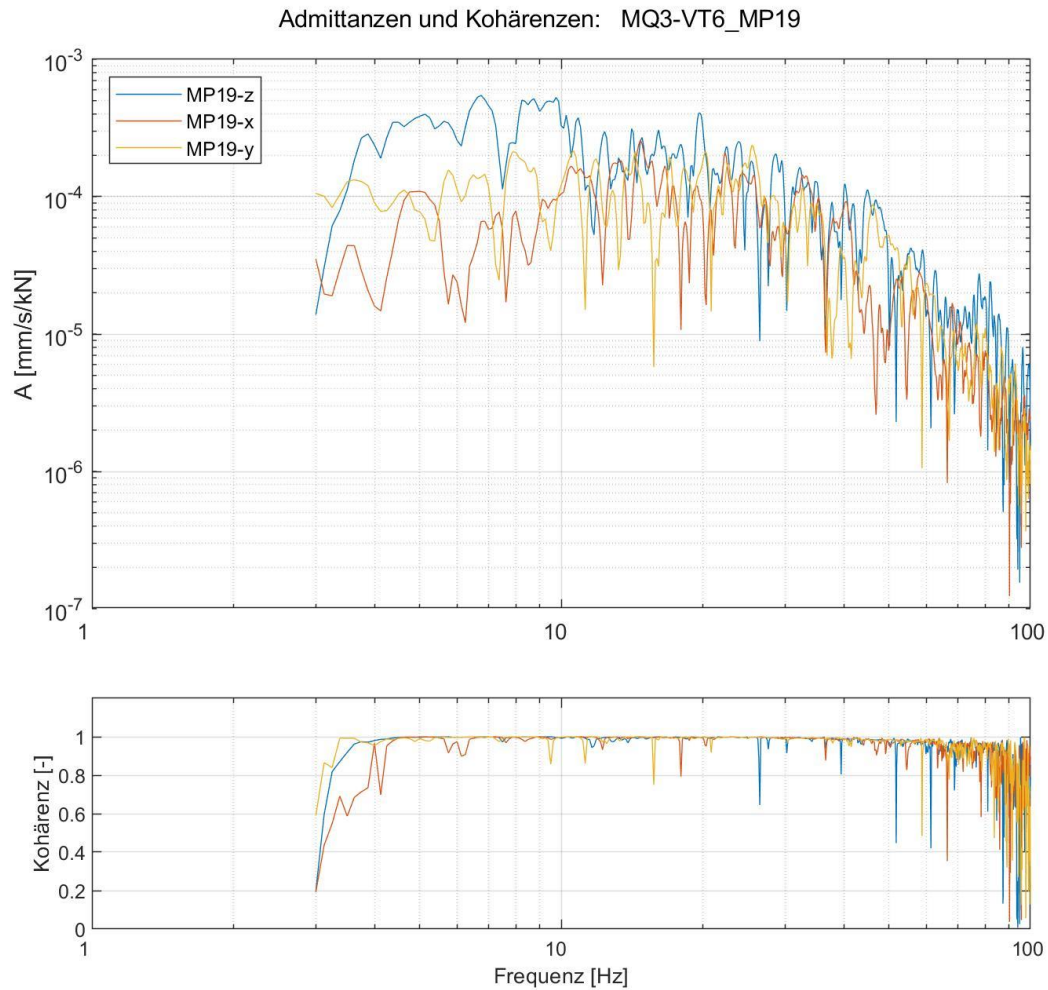


Abbildung 9-190: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

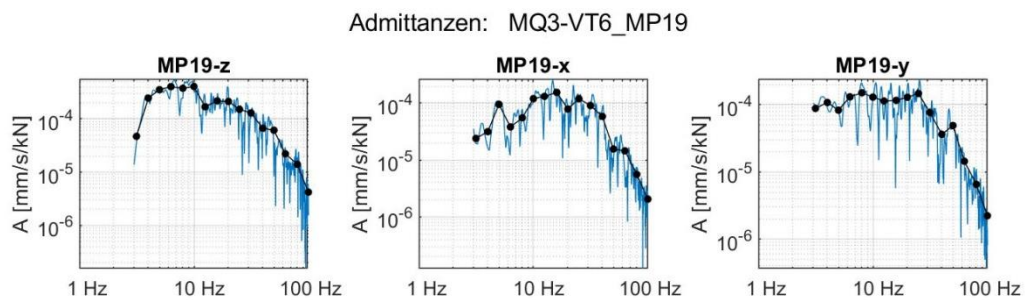


Abbildung 9-191: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)



### 9.7.9 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP22

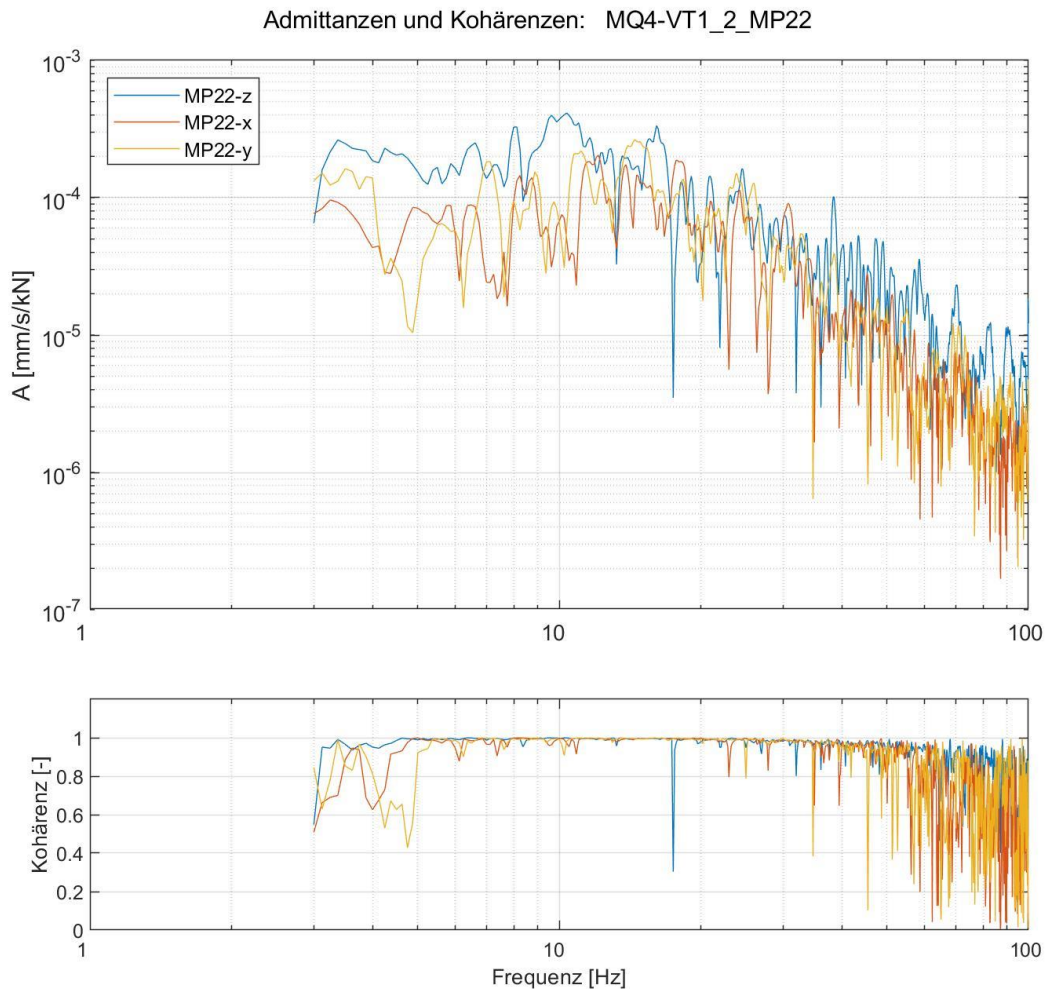


Abbildung 9-192: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

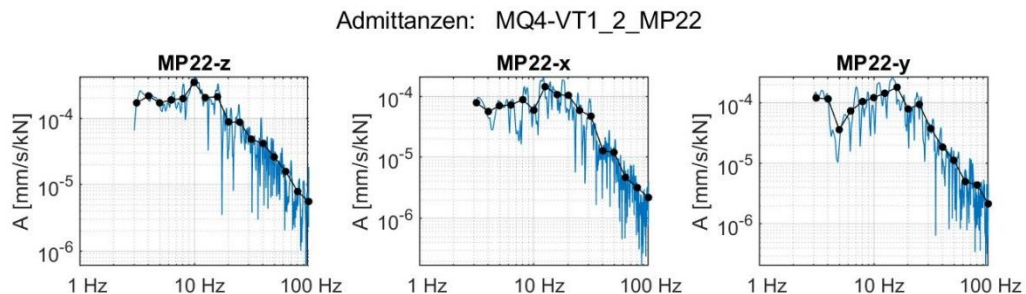


Abbildung 9-193: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

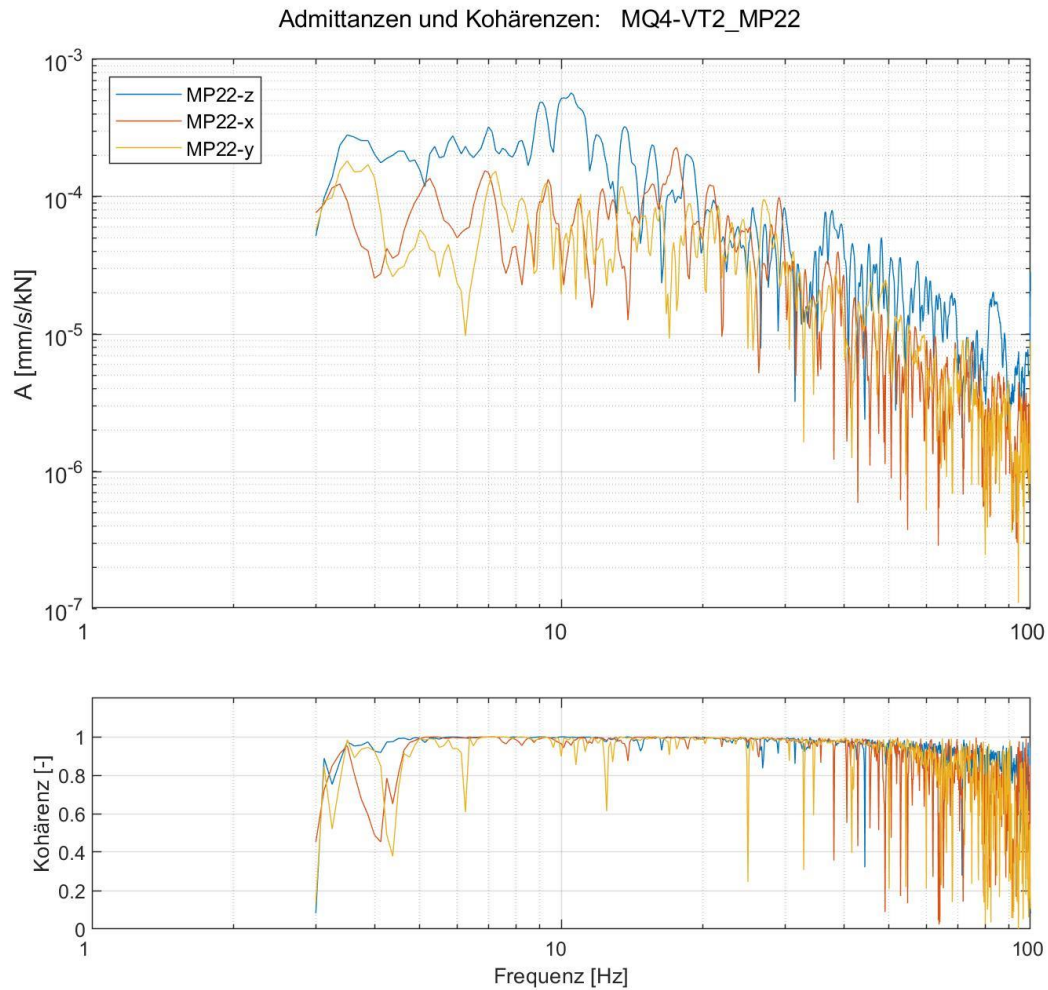


Abbildung 9-194: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

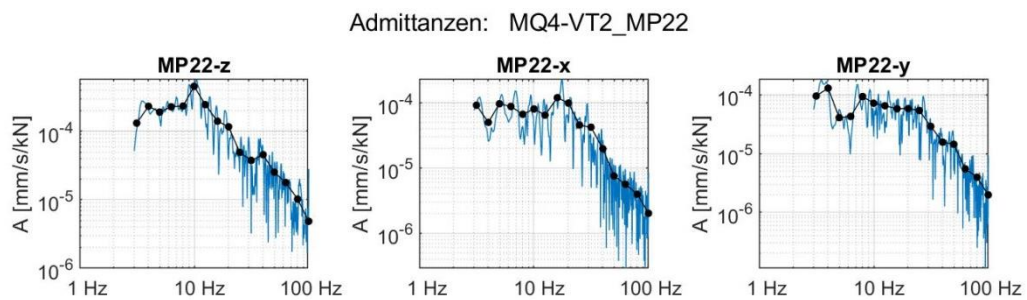


Abbildung 9-195: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

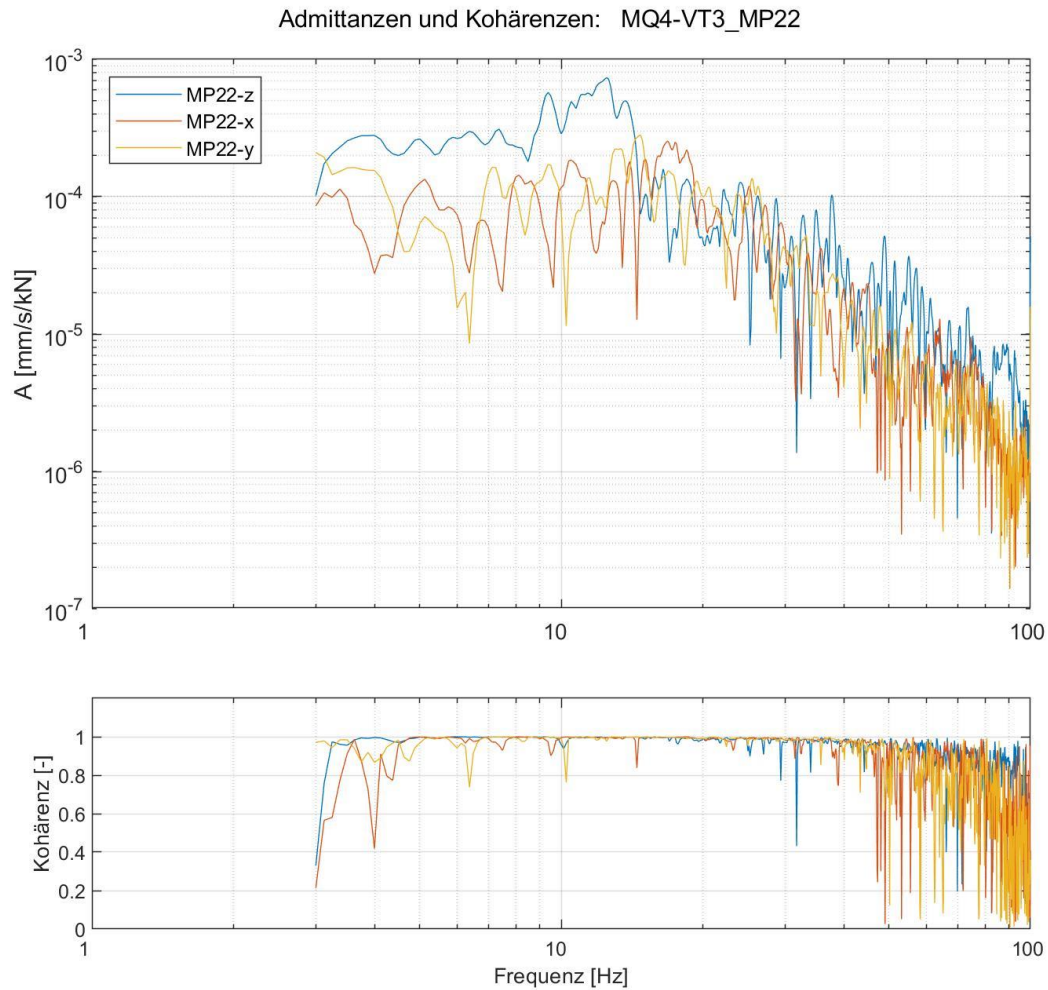


Abbildung 9-196: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

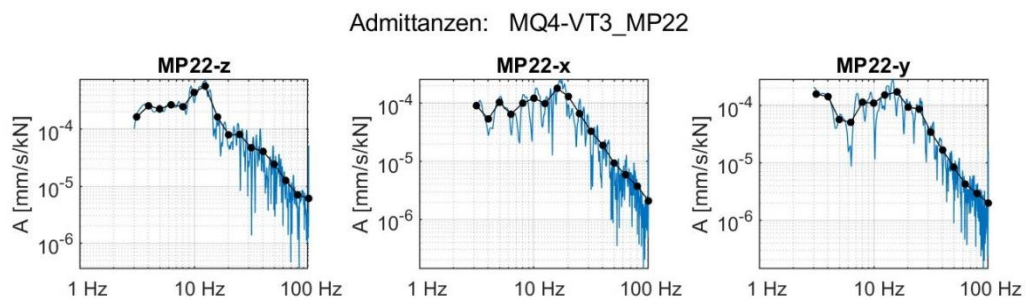


Abbildung 9-197: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

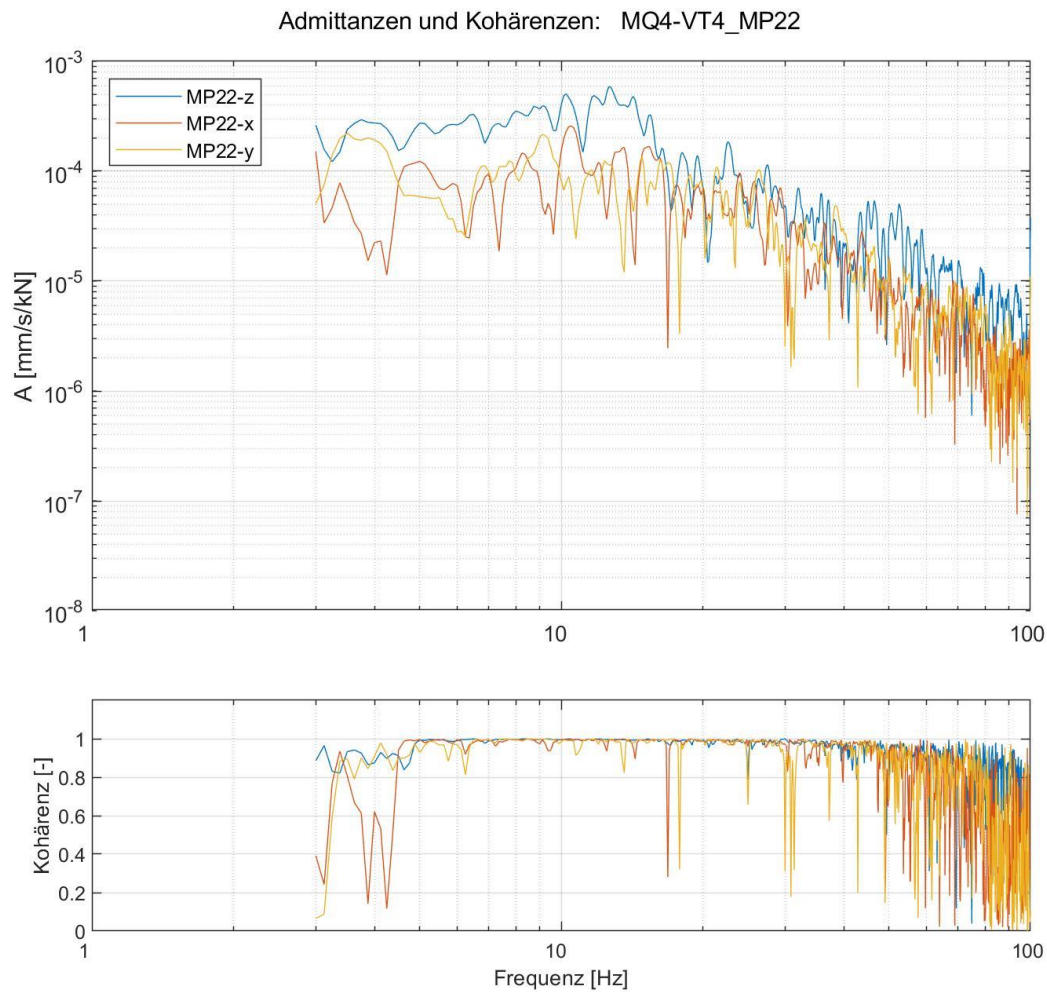


Abbildung 9-198: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

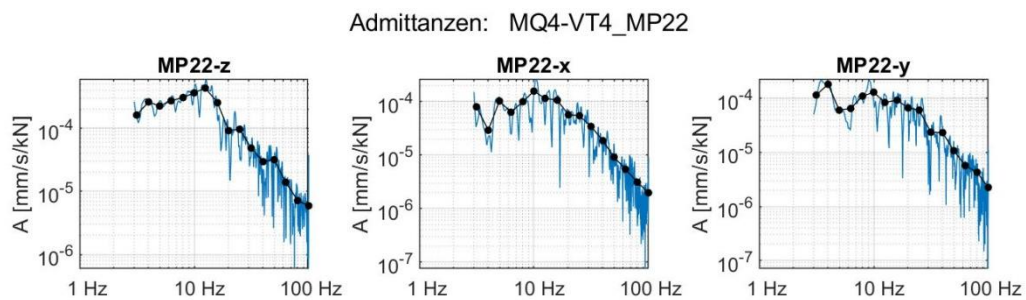


Abbildung 9-199: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)



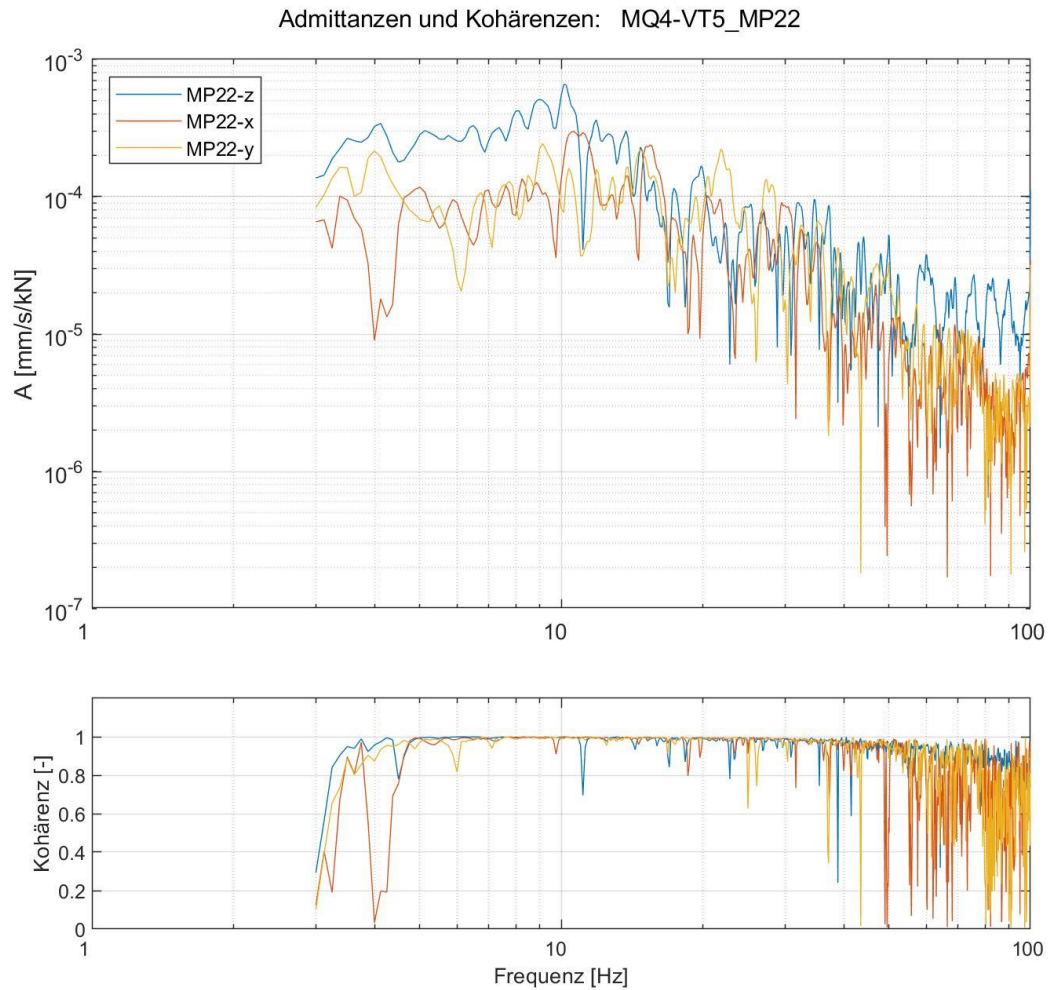


Abbildung 9-200: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

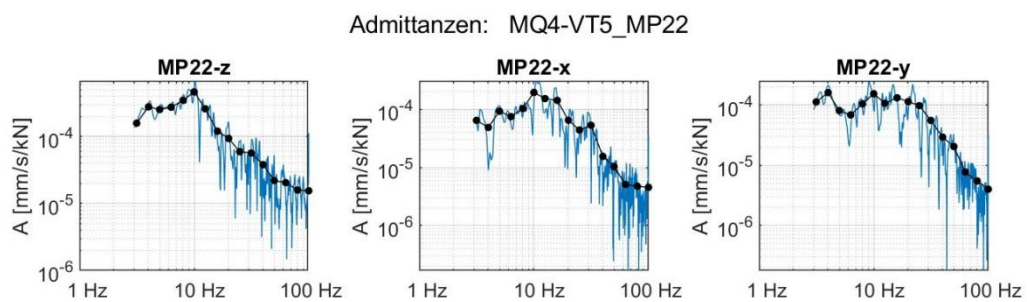


Abbildung 9-201: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

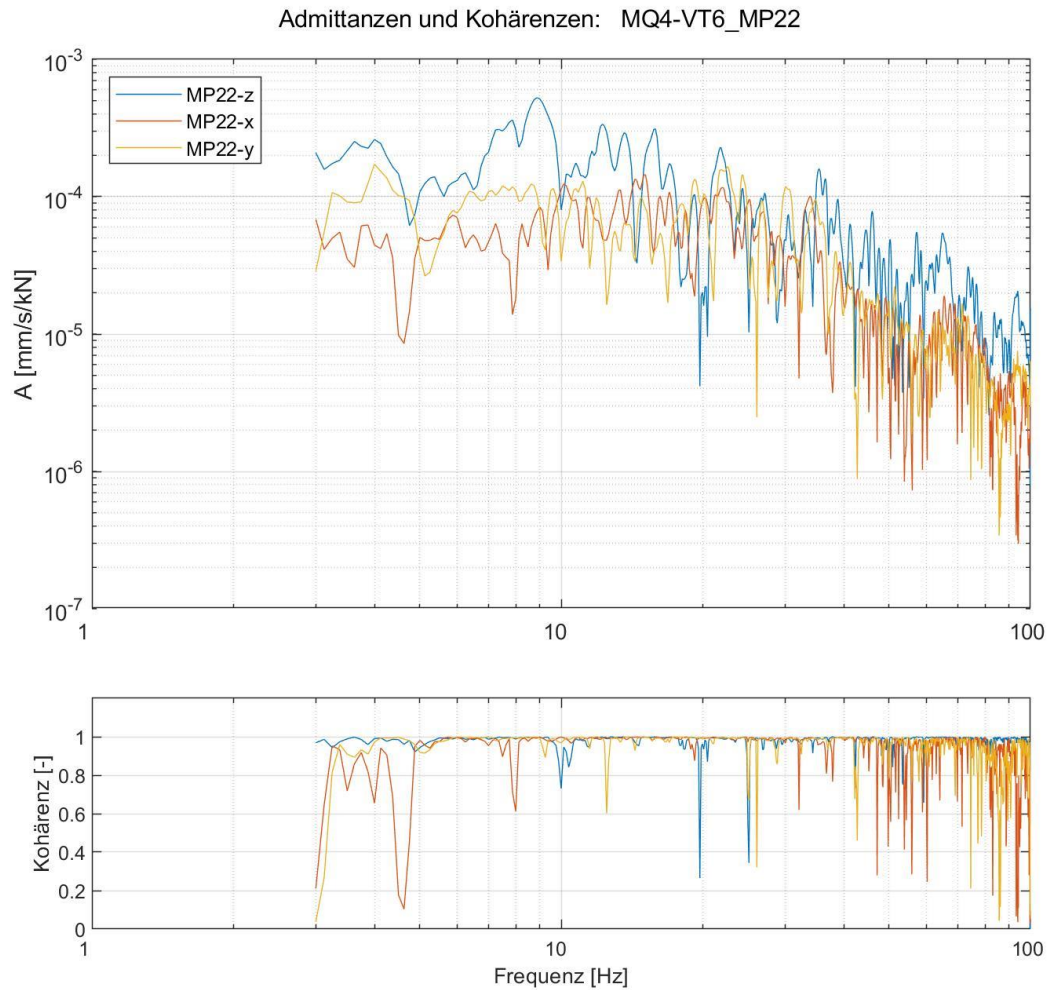


Abbildung 9-202: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

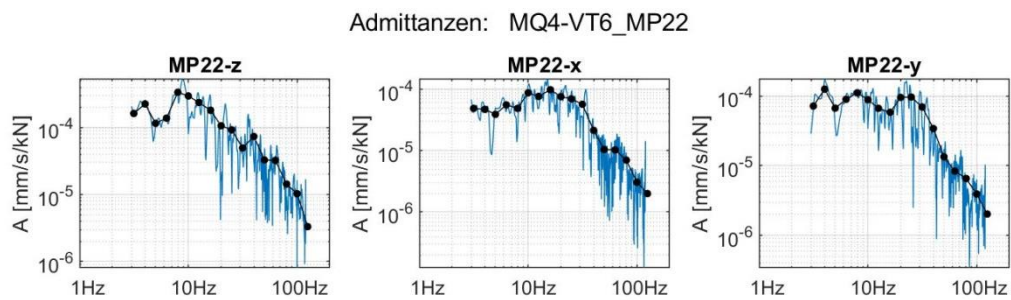


Abbildung 9-203: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

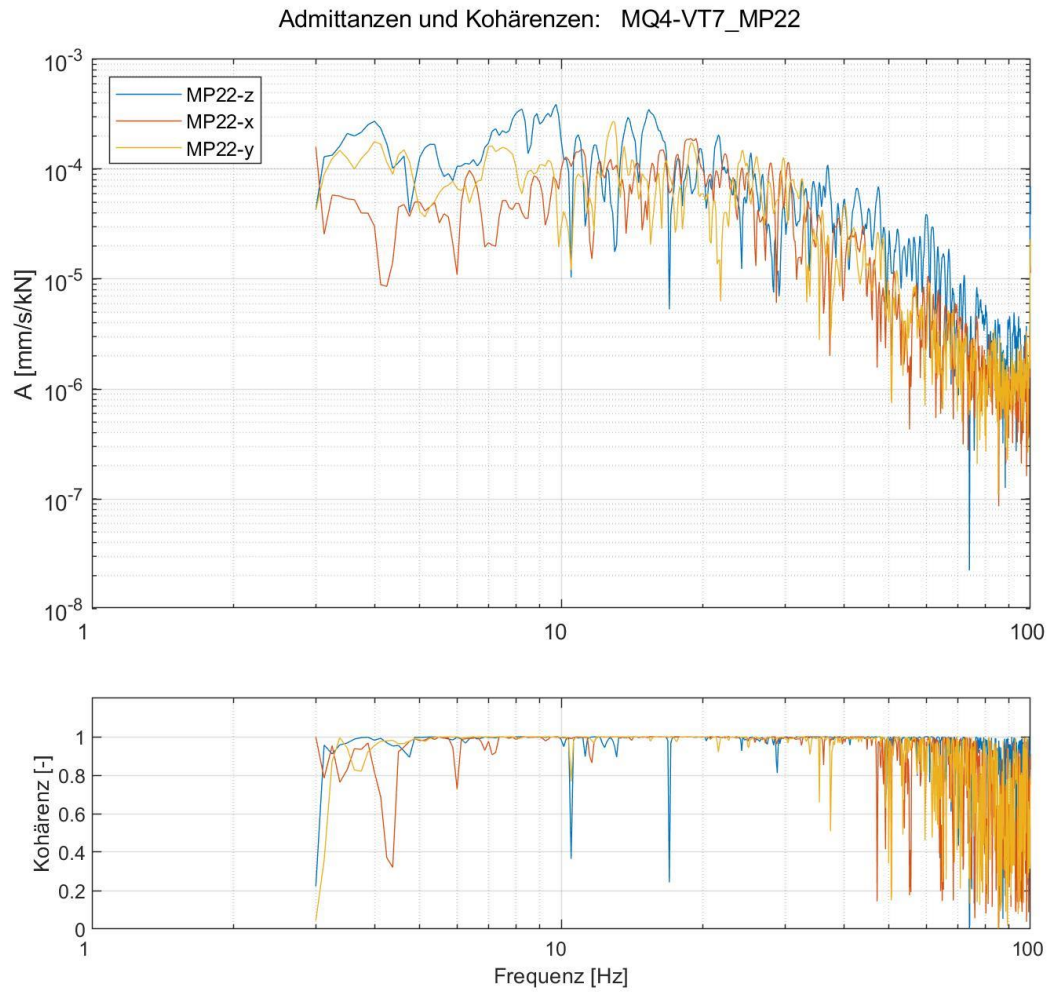


Abbildung 9-204: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT7)

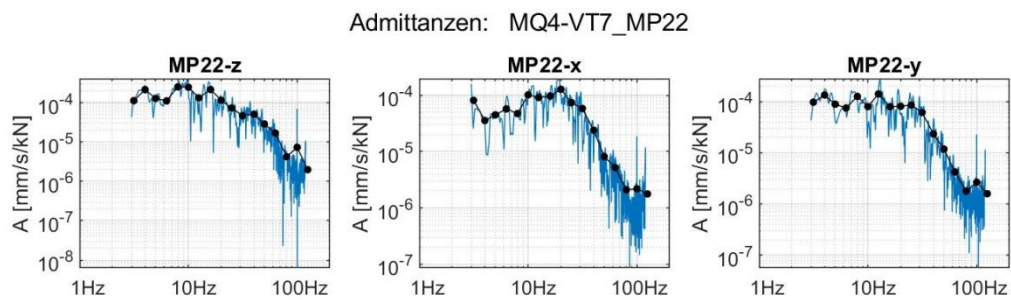


Abbildung 9-205: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT7)

### 9.7.10 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP23

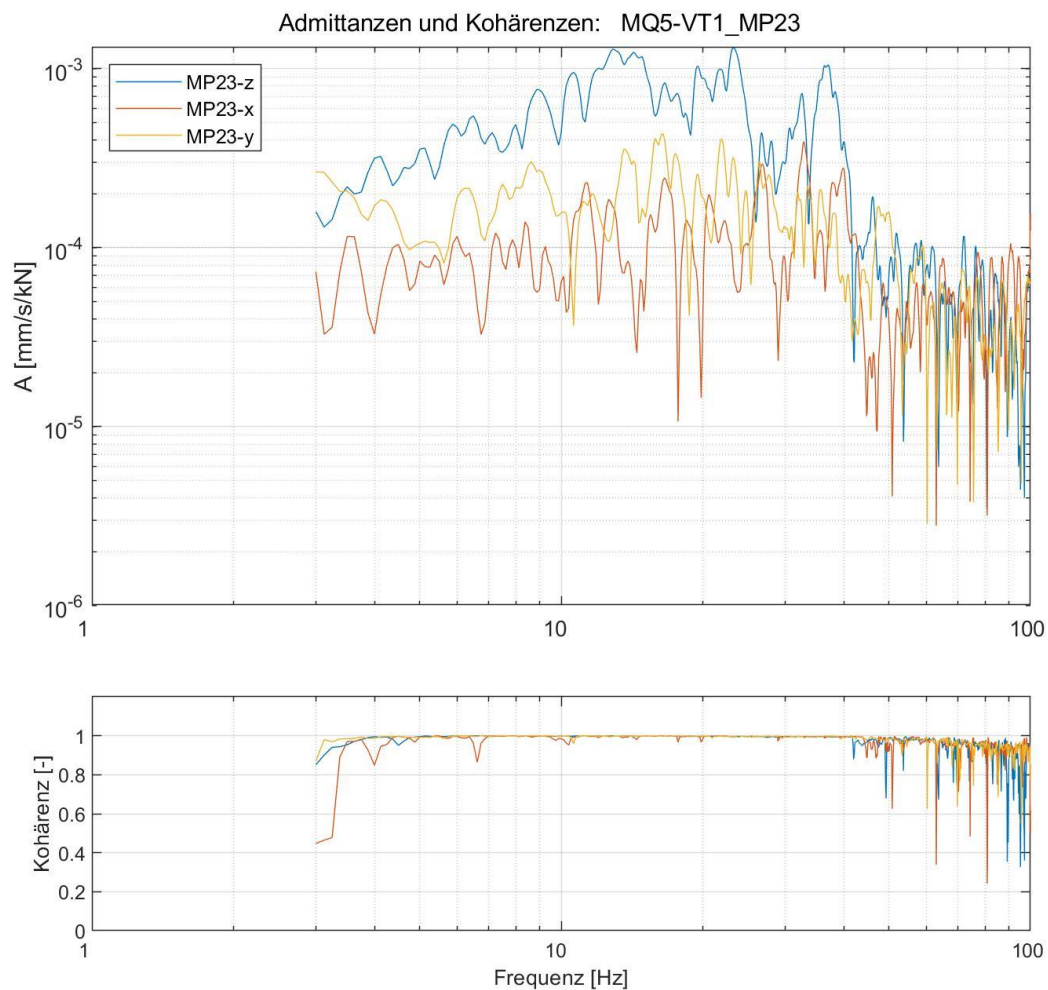


Abbildung 9-206: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

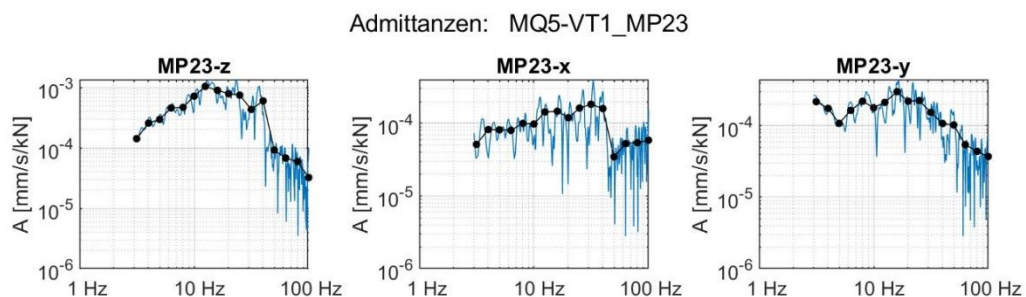


Abbildung 9-207: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)



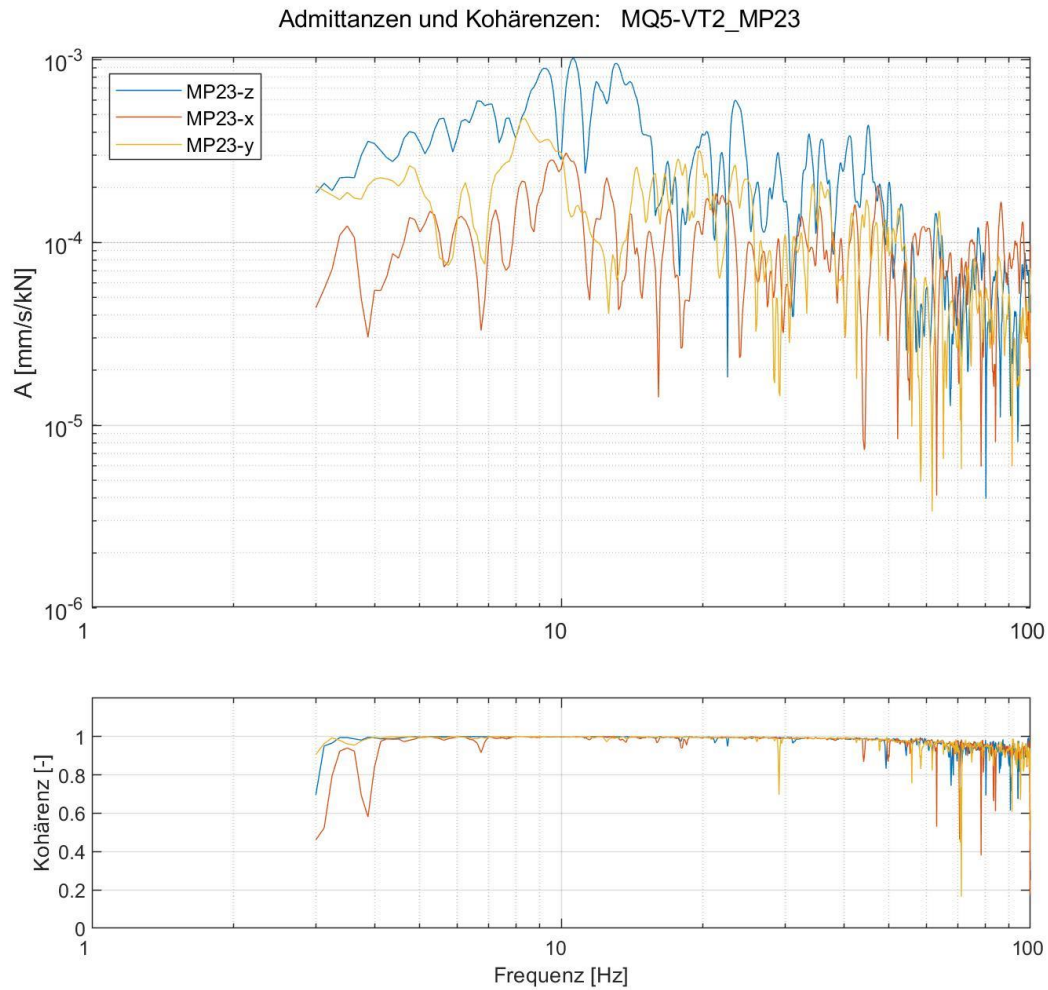


Abbildung 9-208: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

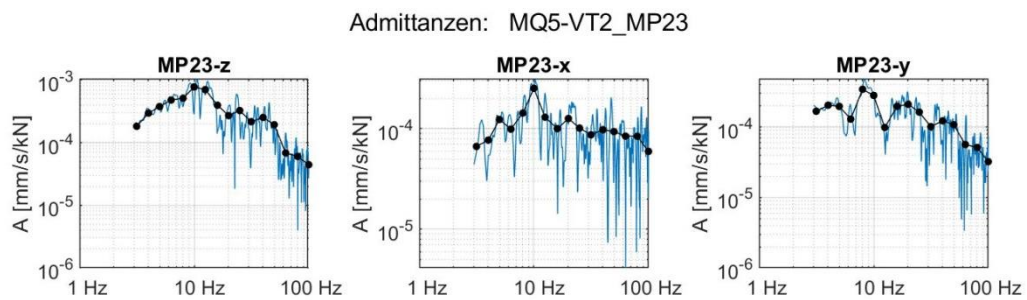


Abbildung 9-209: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

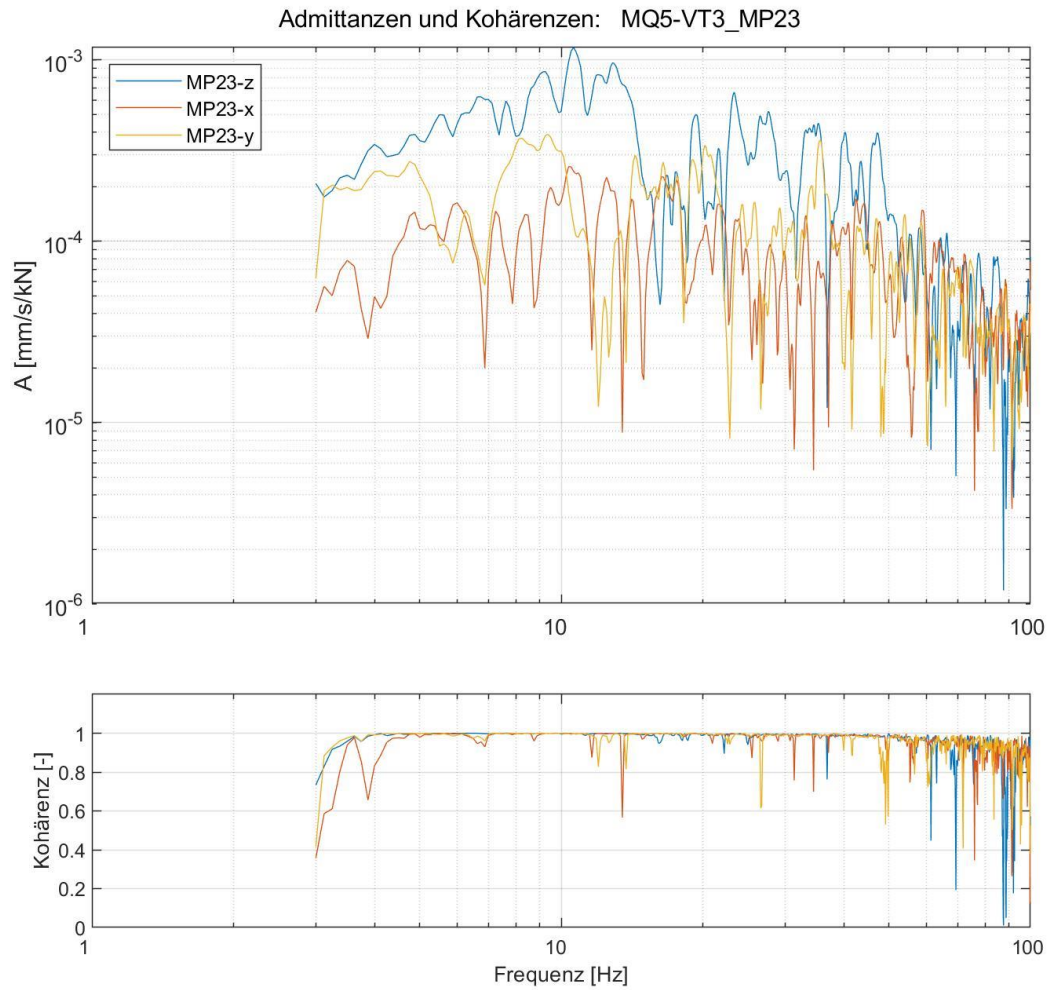


Abbildung 9-210: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

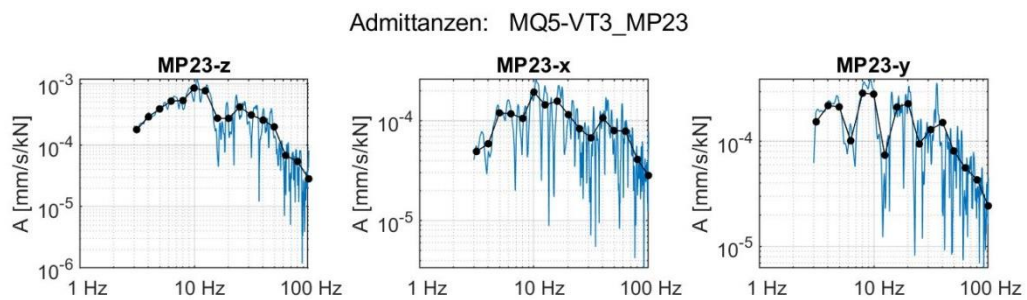


Abbildung 9-211: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

### 9.7.11 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP24

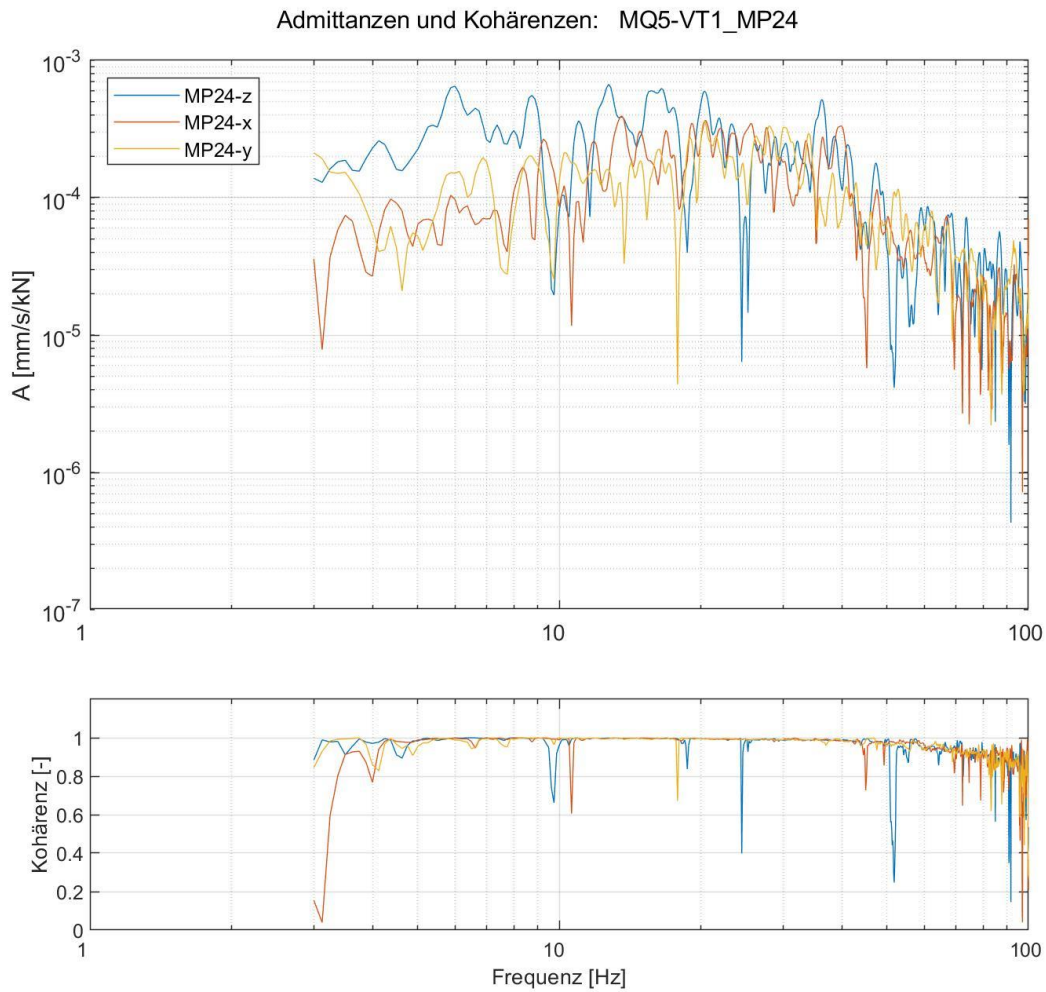


Abbildung 9-212: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

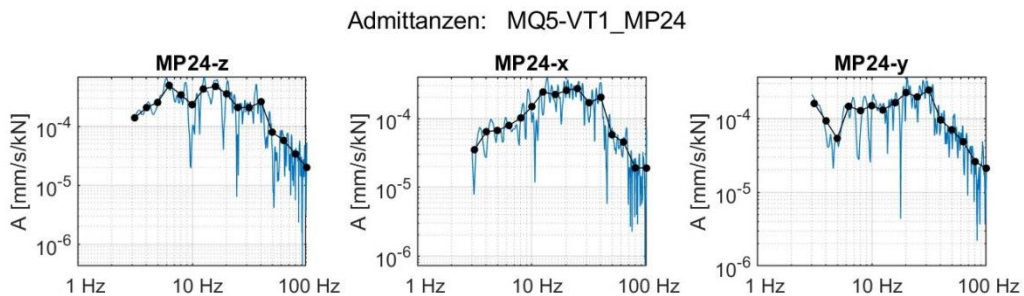


Abbildung 9-213: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

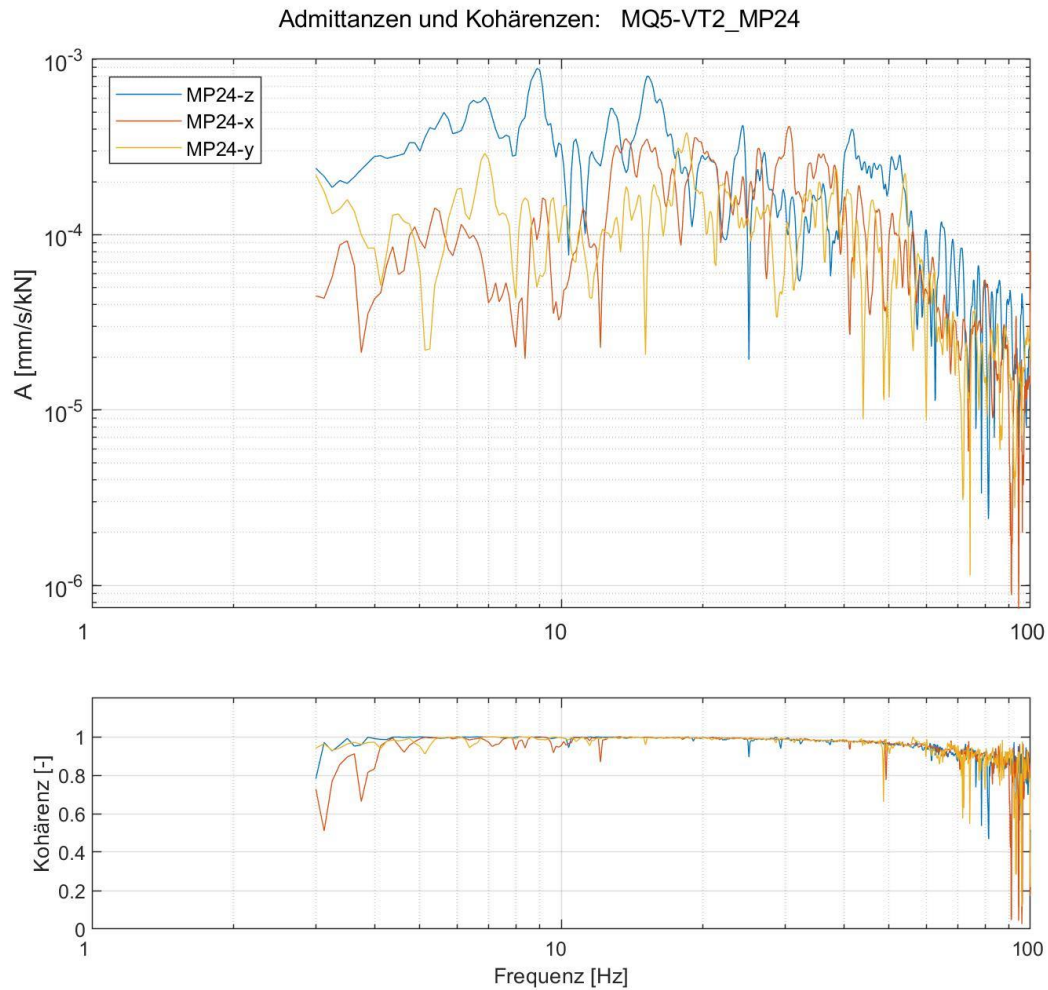


Abbildung 9-214: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

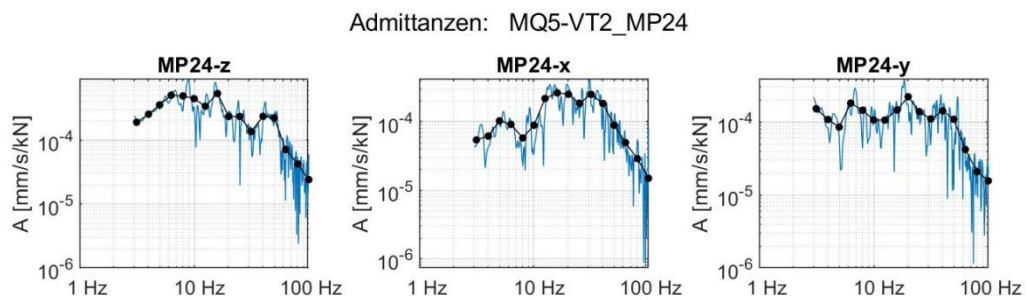


Abbildung 9-215: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)



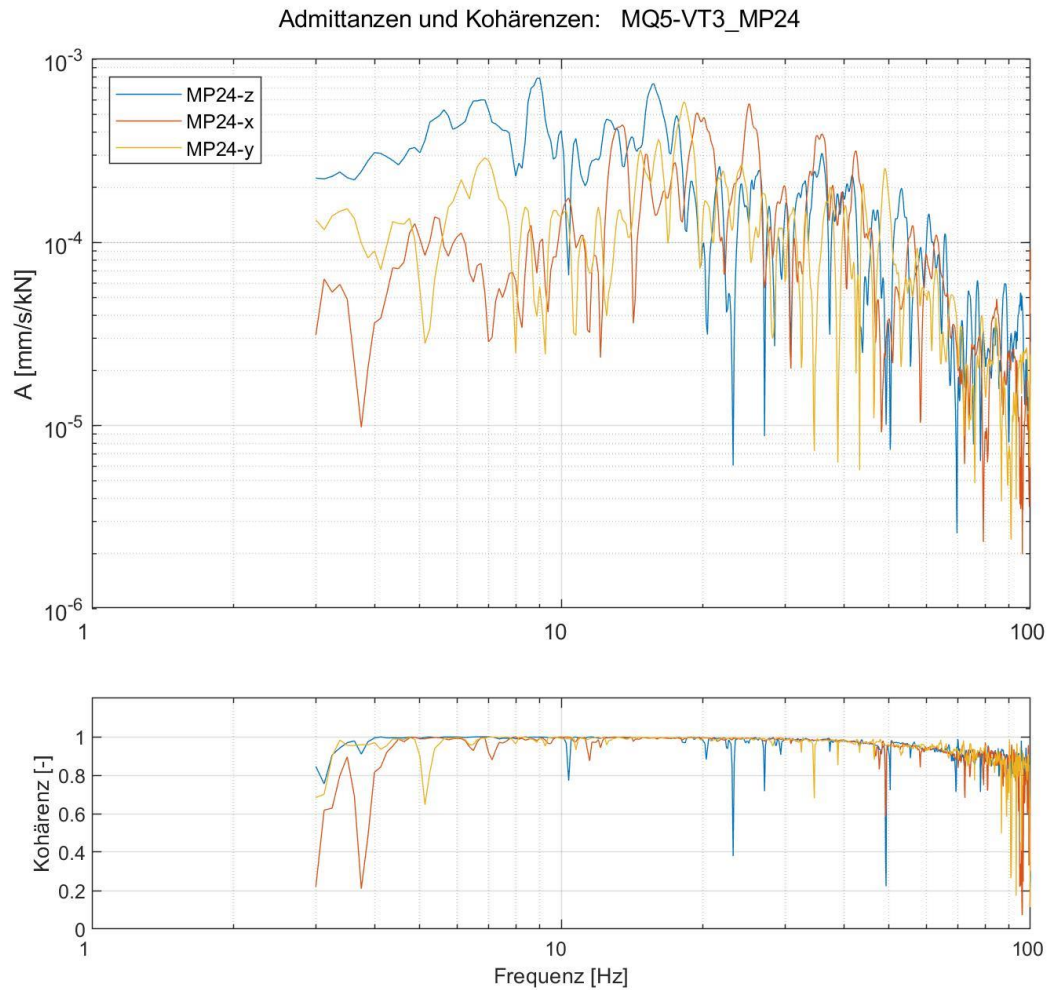


Abbildung 9-216: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

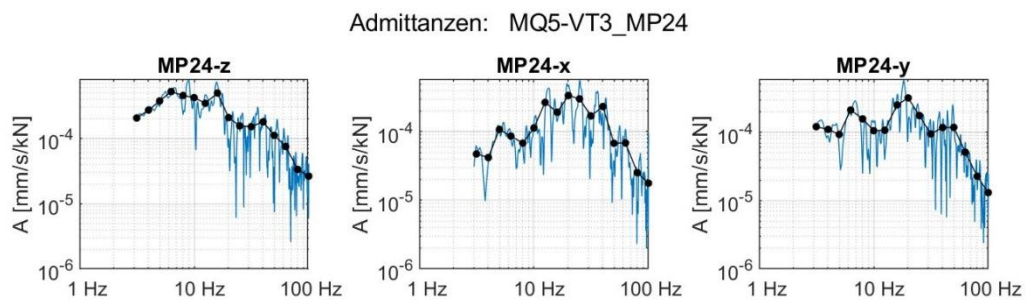


Abbildung 9-217: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

### 9.7.12 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP25

Die Gebäudeadmittanzen bei dem Messpunkt MP25 wurden auf Grundlage der Anregungen des VibroTrucks bei Messquerschnitt MQ3 und MQ4 berechnet. Zunächst folgen die Auswertungen auf Grundlage der Anregung bei MQ3.

#### Gebäudeadmittanzen bei Anregung mit VibroTruck am MQ3

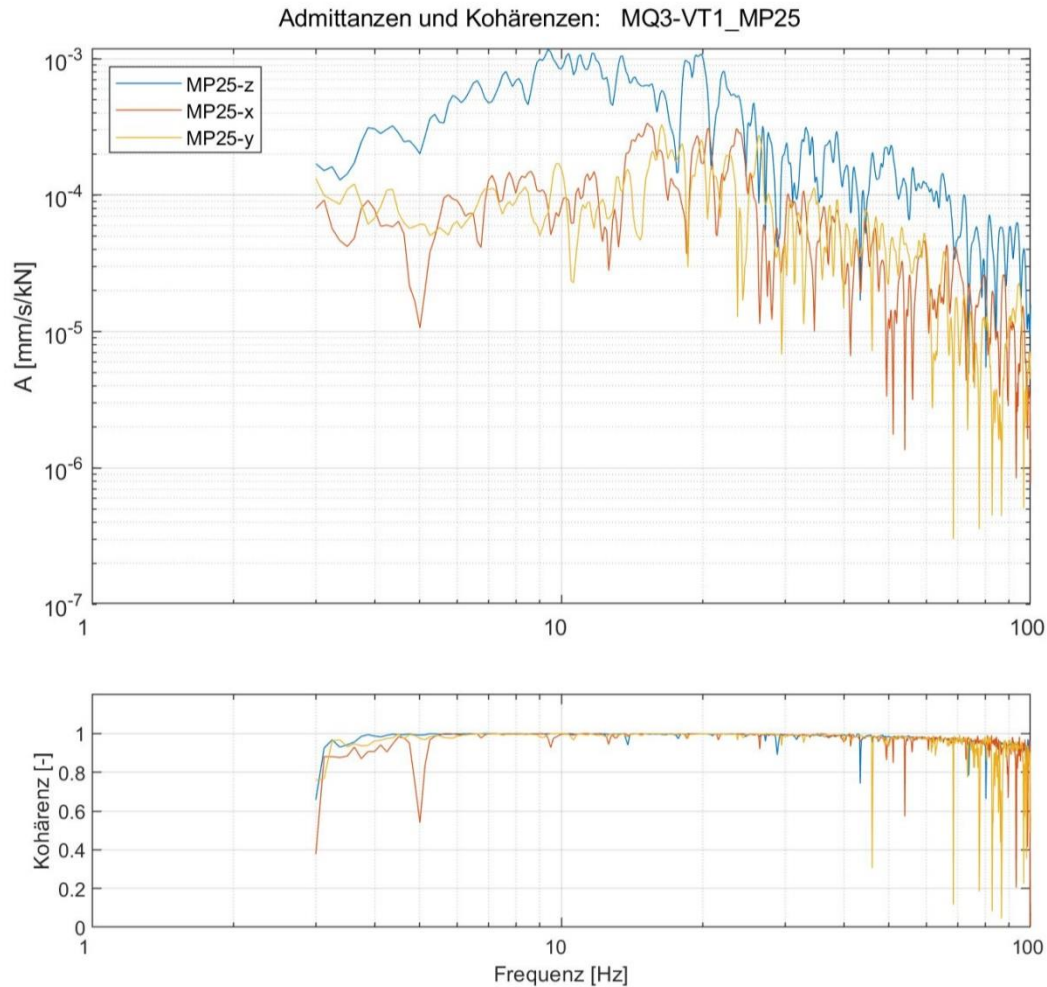


Abbildung 9-218: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

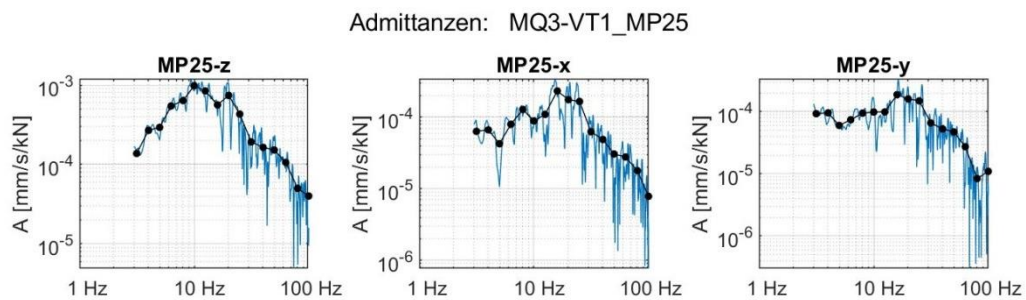


Abbildung 9-219: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

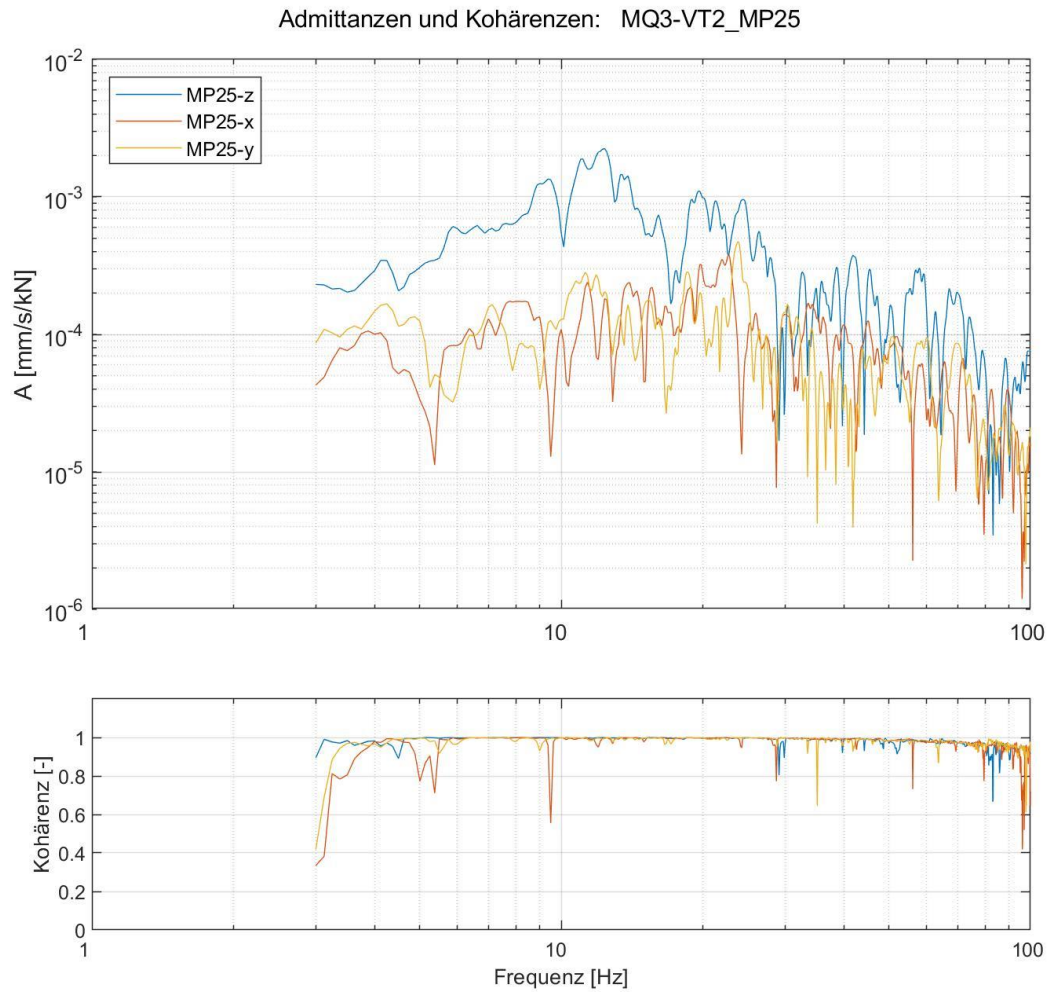


Abbildung 9-220: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

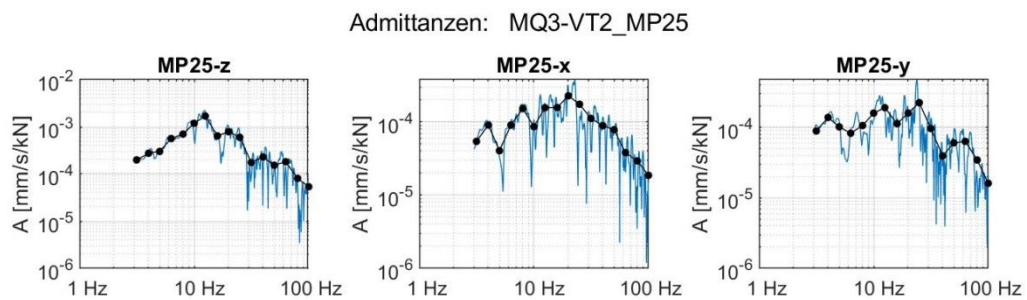


Abbildung 9-221: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

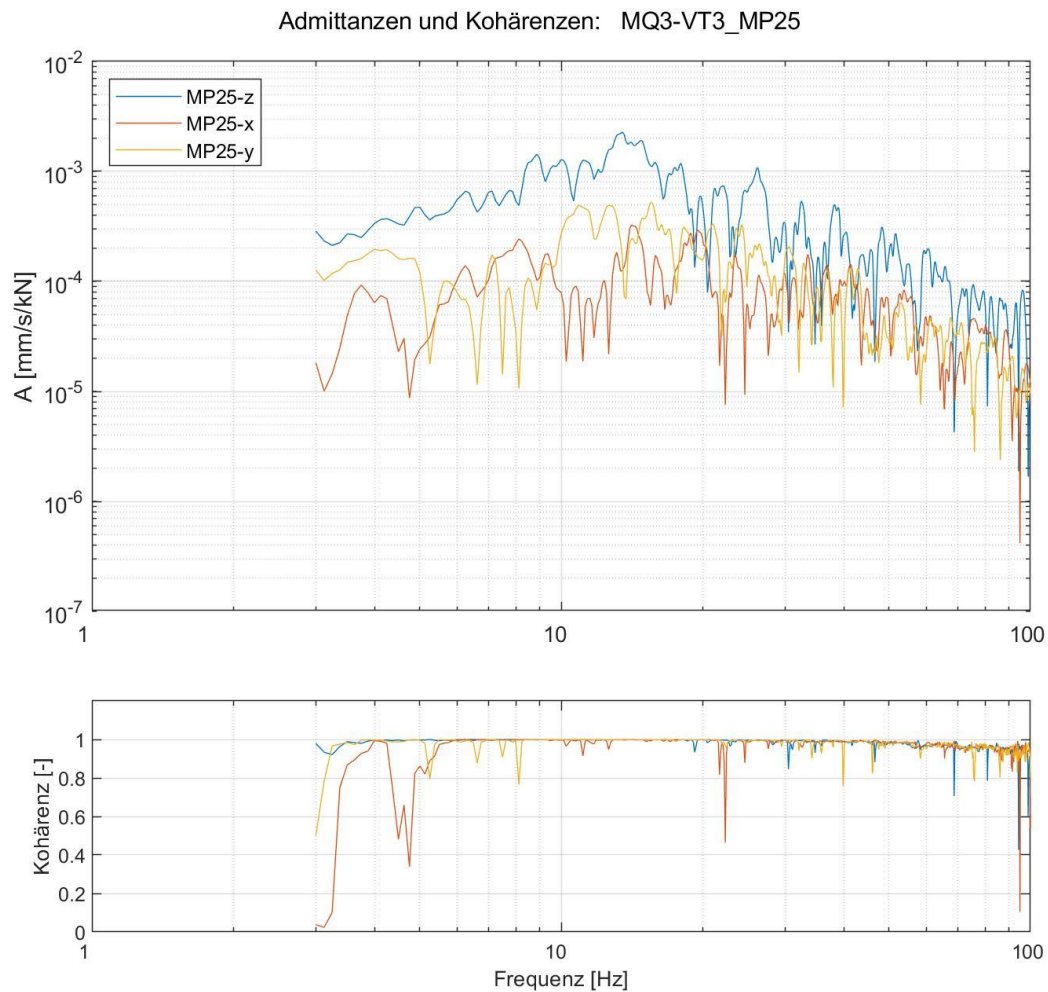


Abbildung 9-222: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

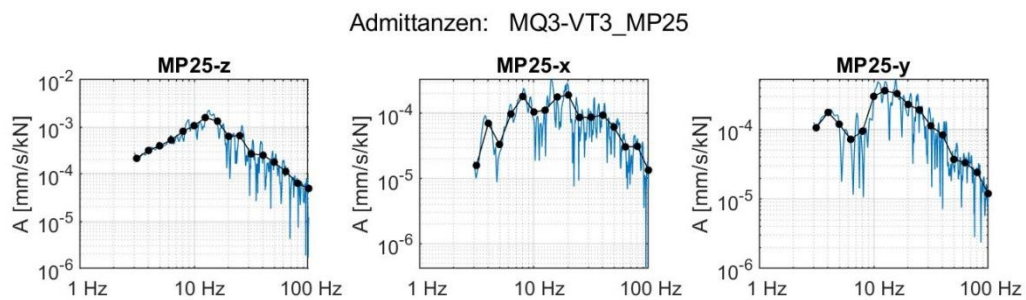


Abbildung 9-223: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)



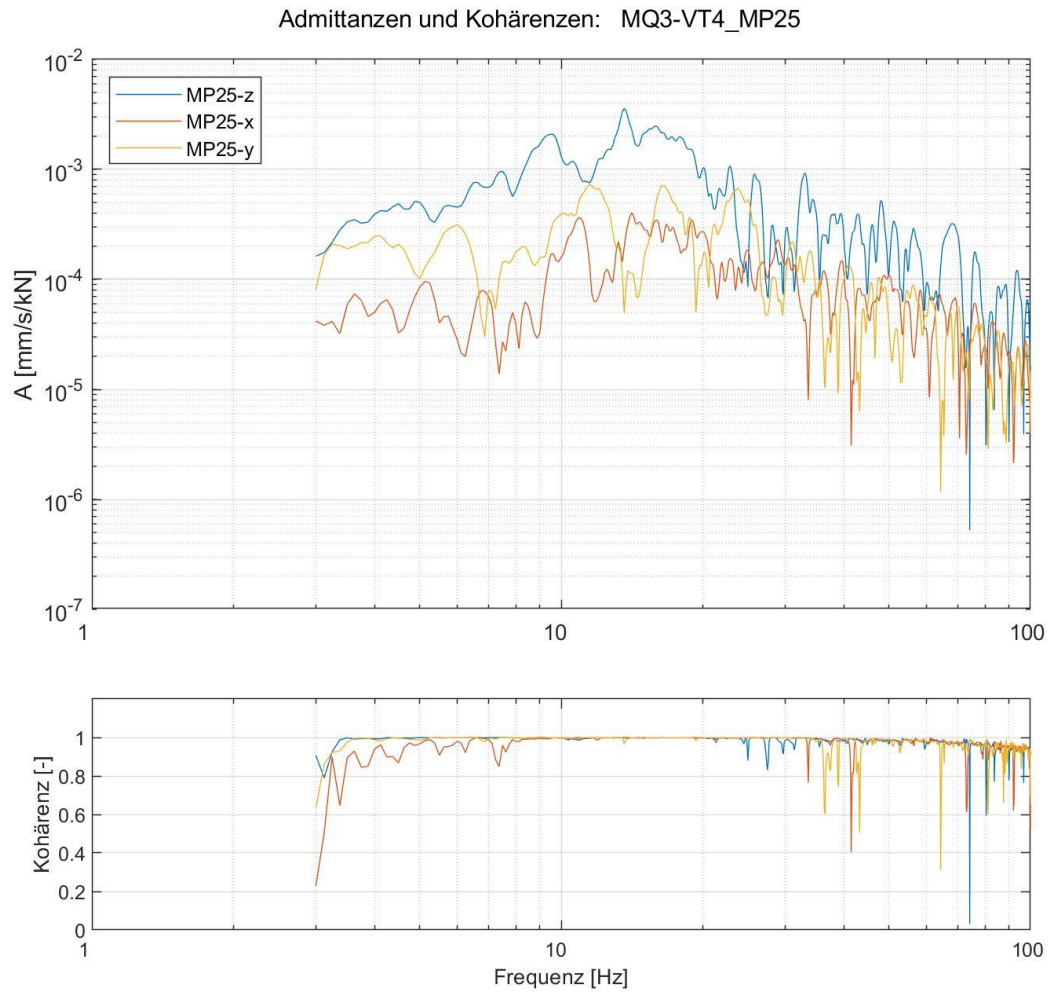


Abbildung 9-224: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

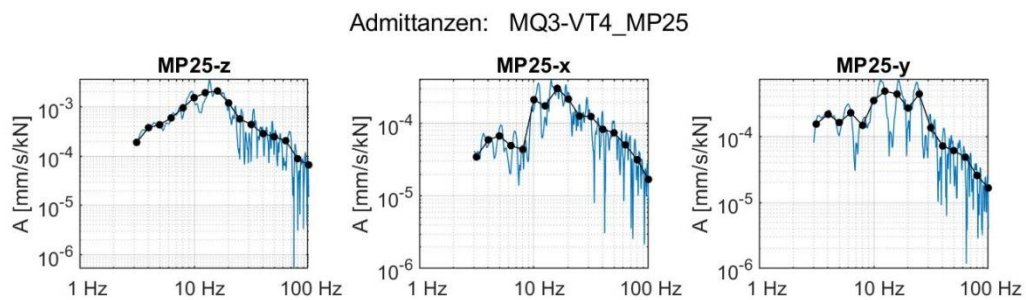


Abbildung 9-225: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)

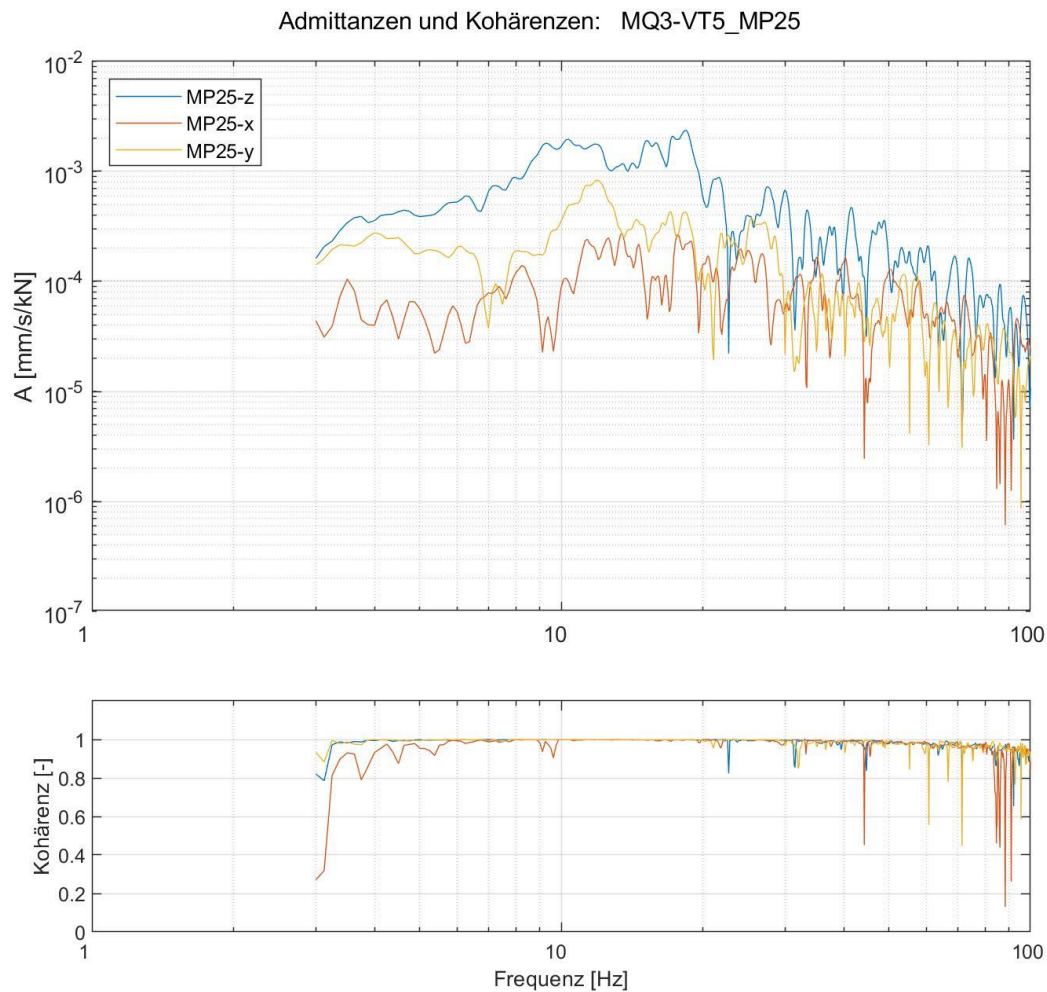


Abbildung 9-226: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

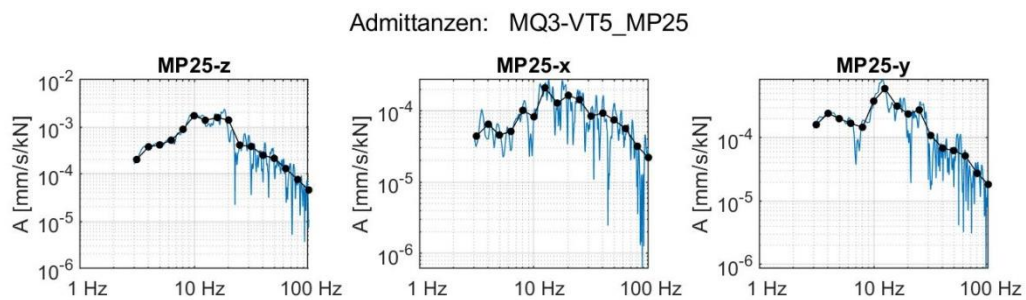


Abbildung 9-227: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

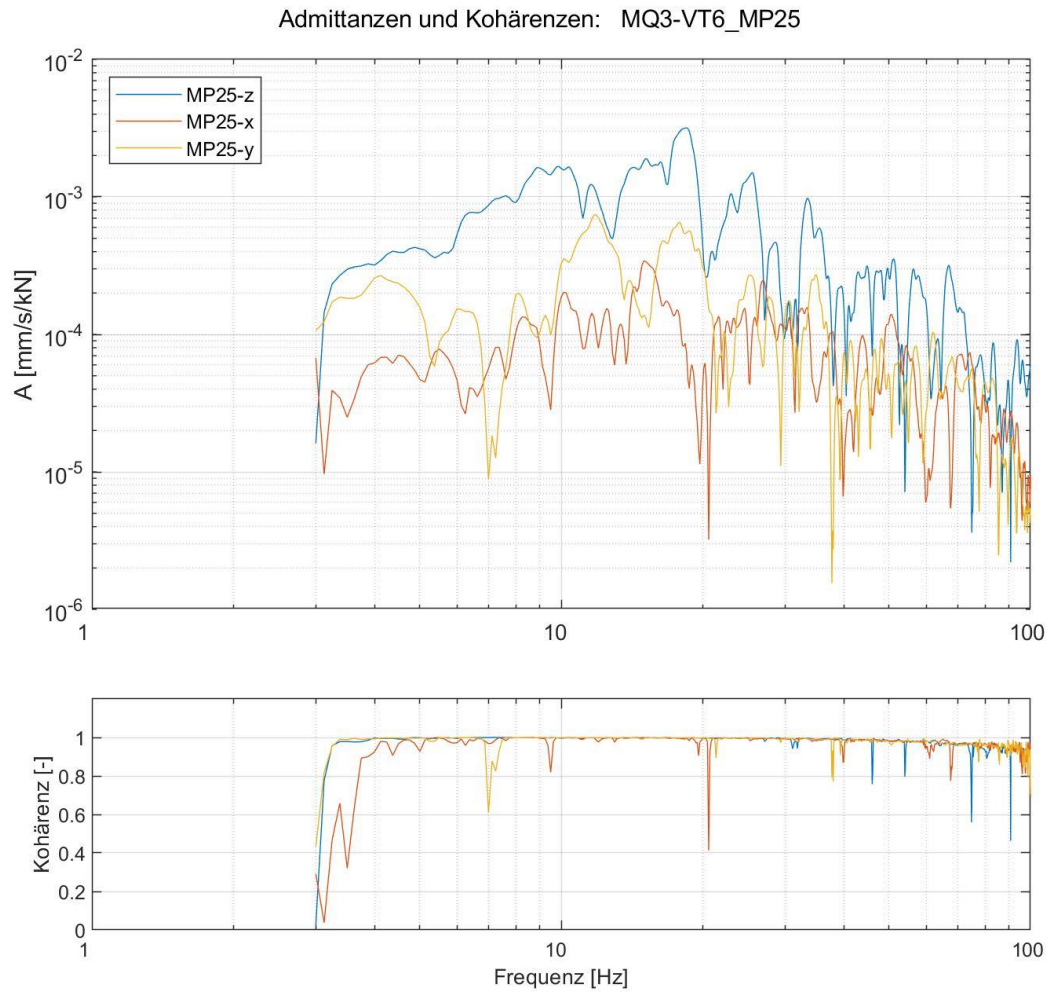


Abbildung 9-228: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

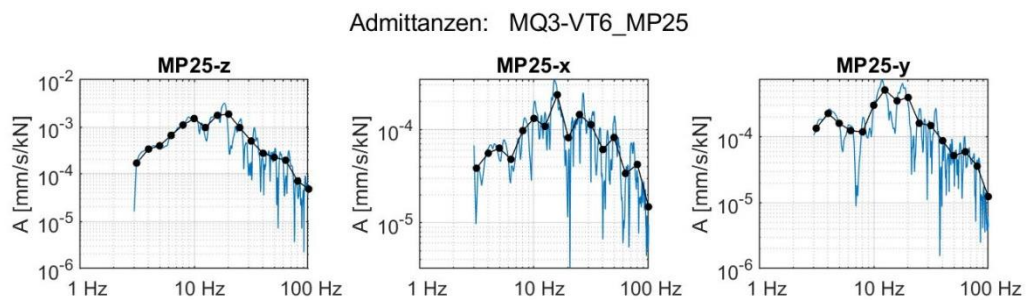


Abbildung 9-229: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

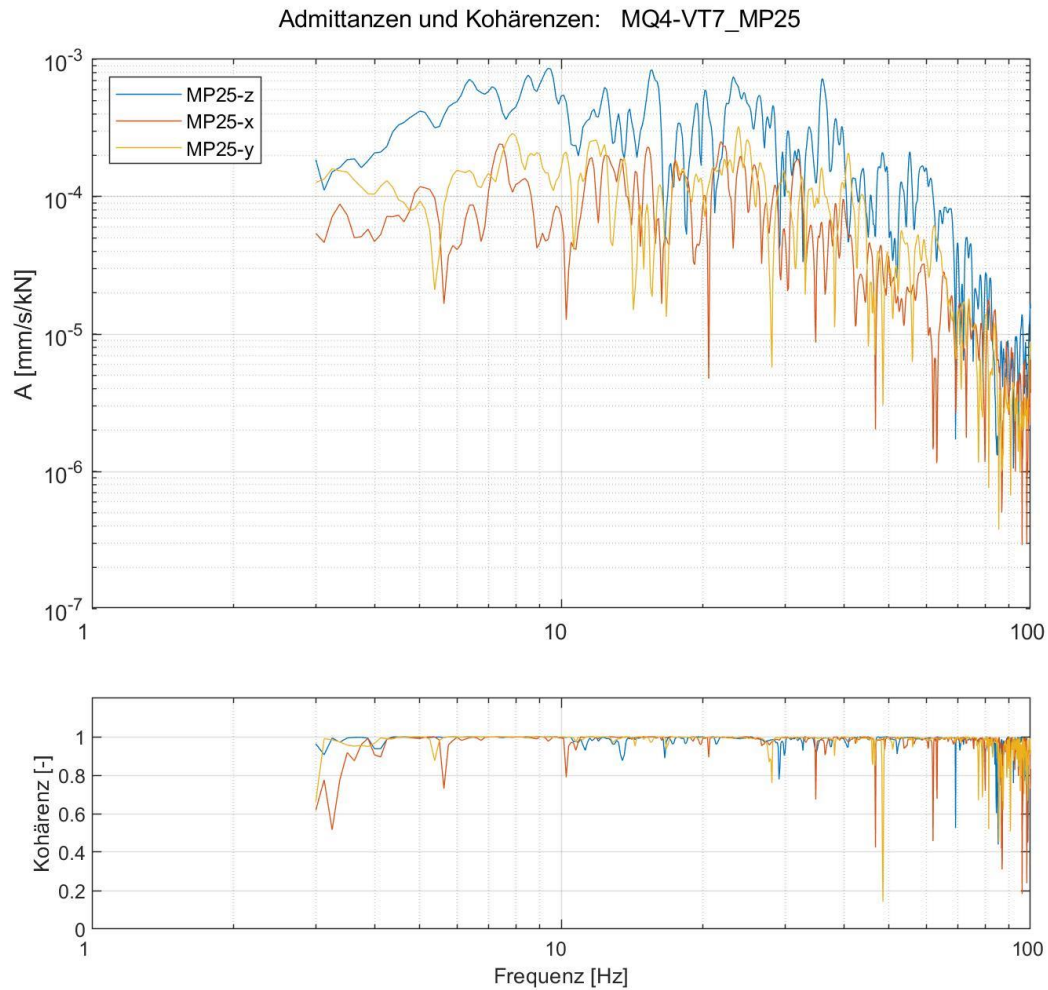


Abbildung 9-230: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT7)

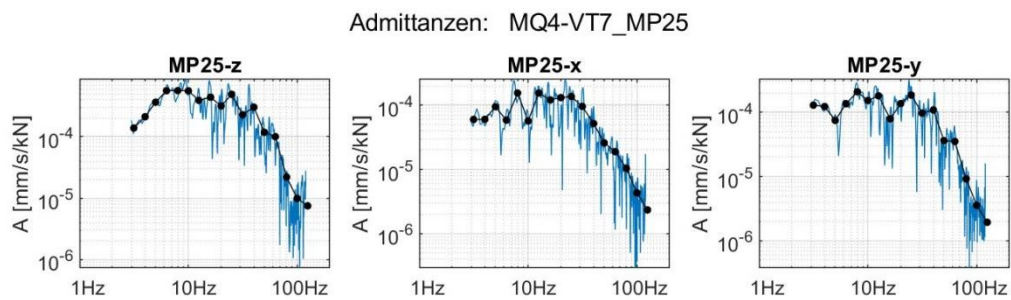


Abbildung 9-231: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT7)

### Gebäudeadmittanzen bei Anregung mit VibroTruck am MQ4



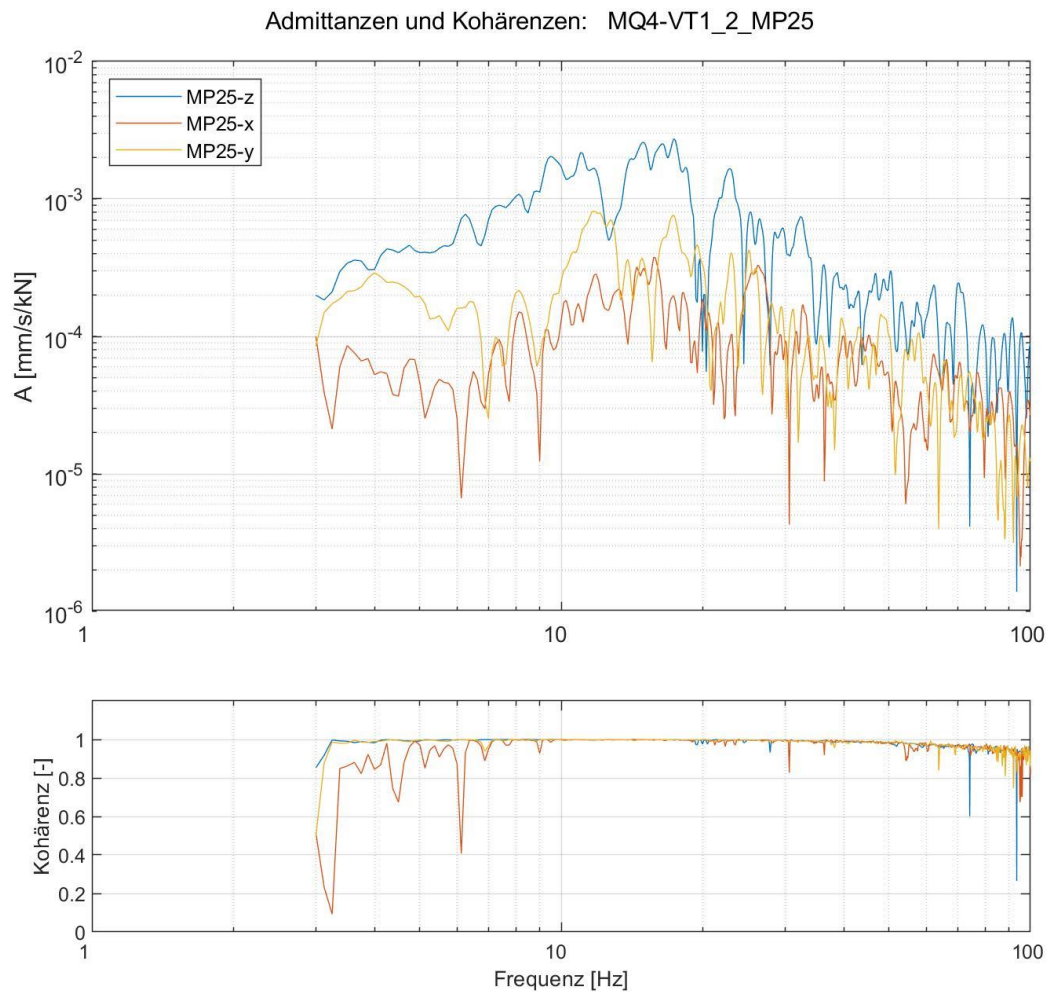


Abbildung 9-232: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

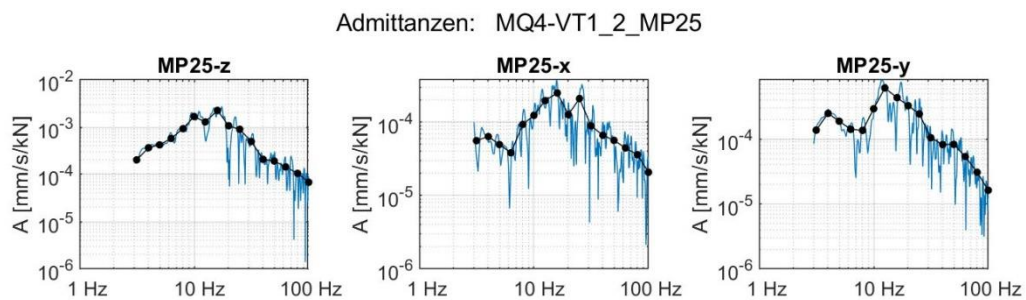


Abbildung 9-233: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

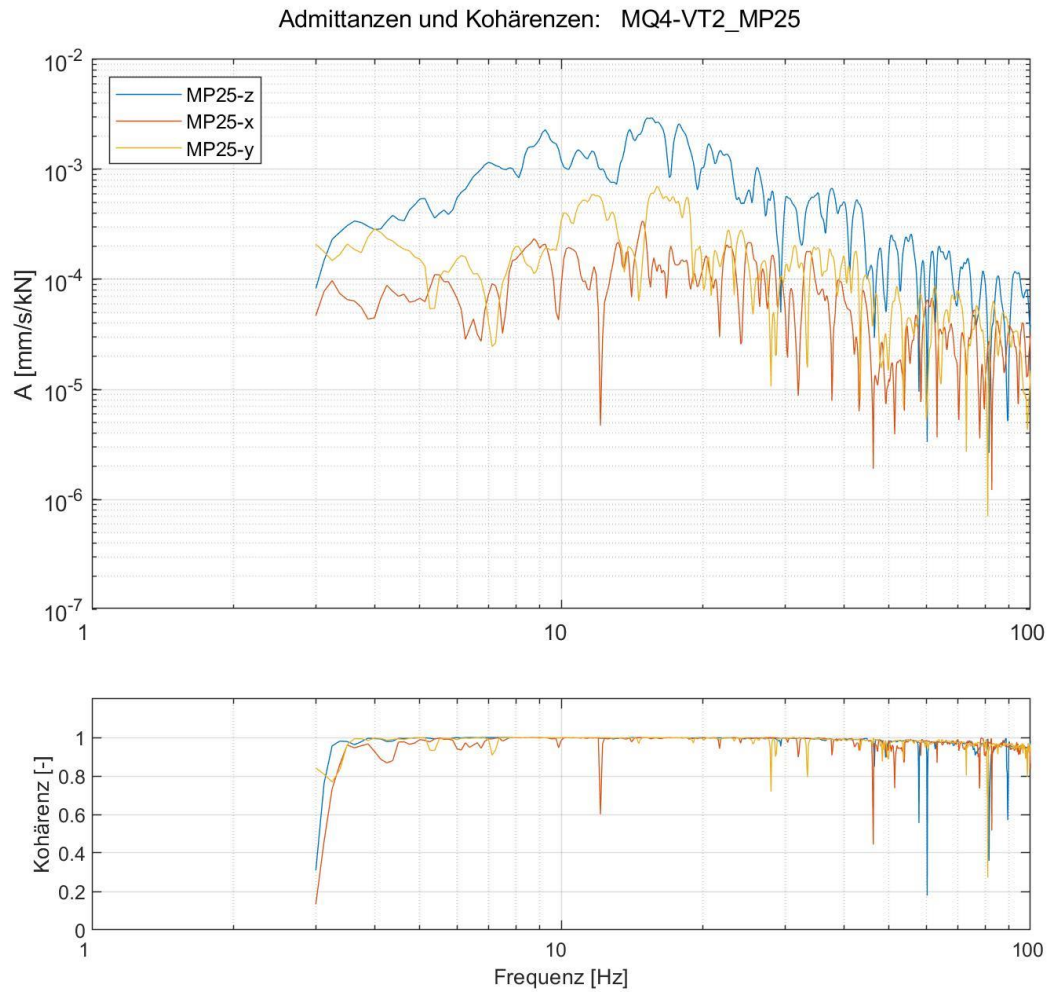


Abbildung 9-234: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

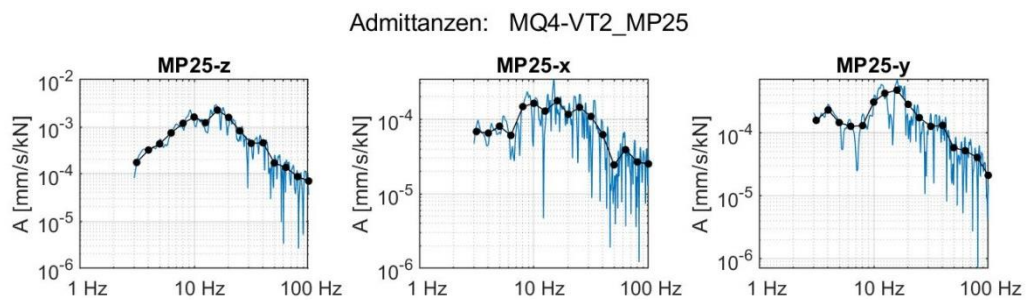


Abbildung 9-235: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

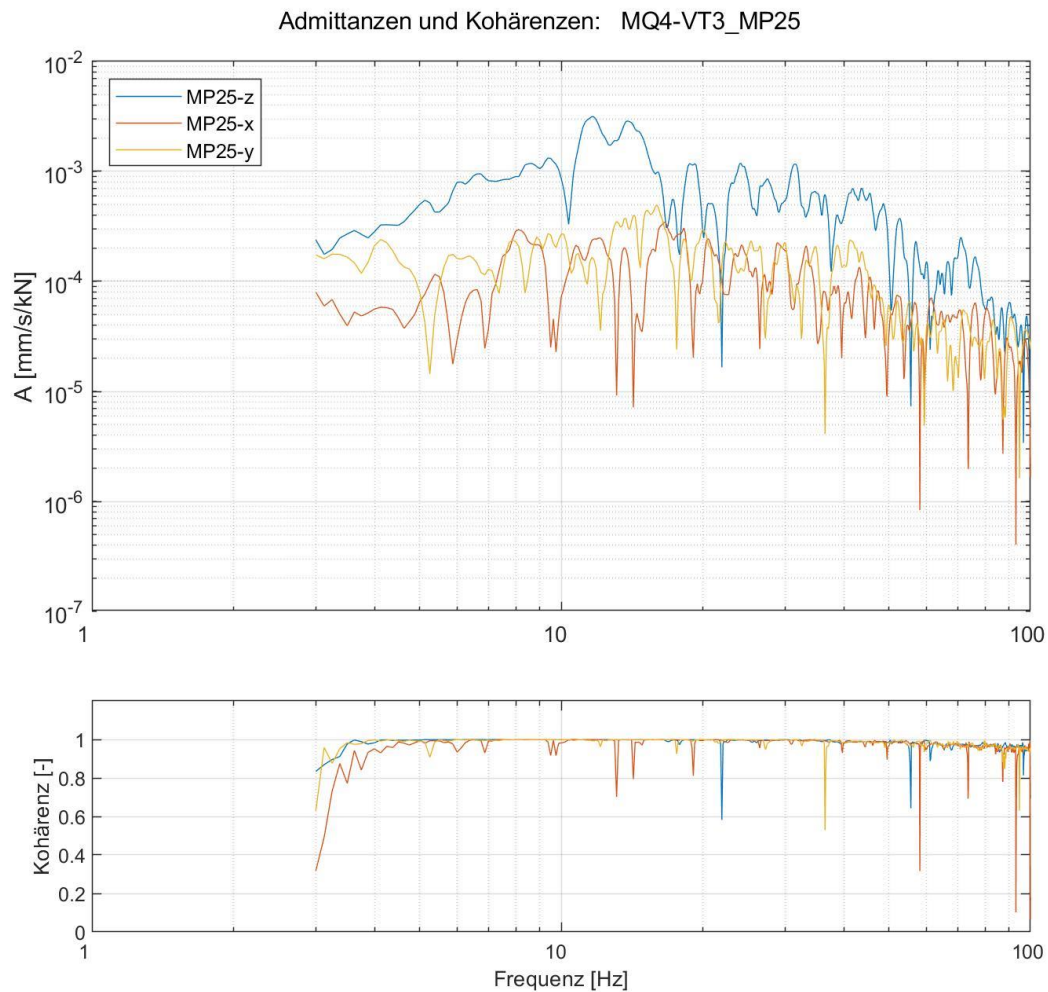


Abbildung 9-236: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

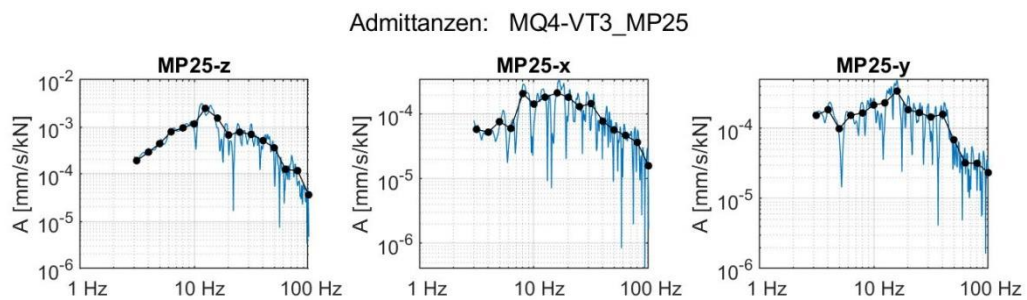


Abbildung 9-237: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

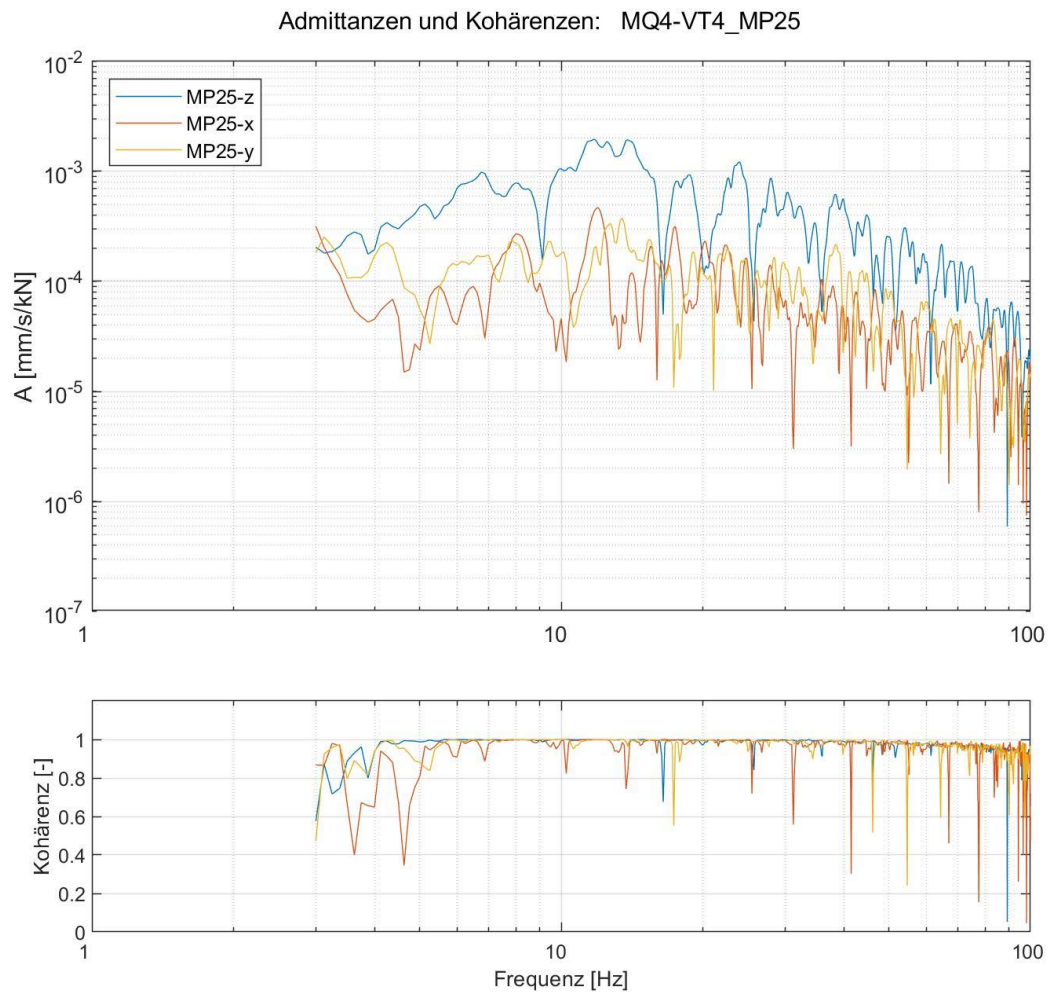


Abbildung 9-238: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

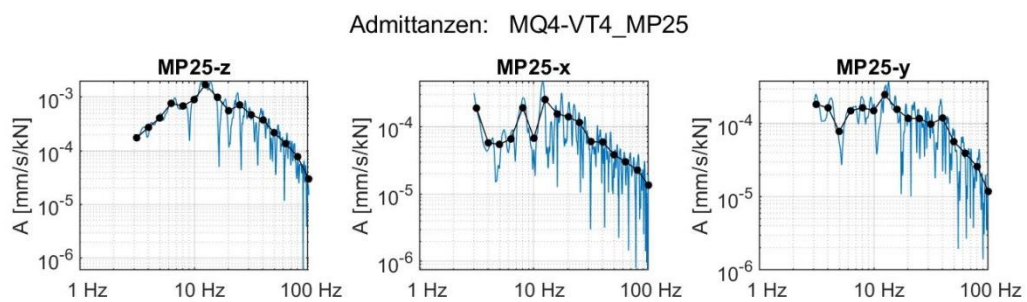


Abbildung 9-239: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)



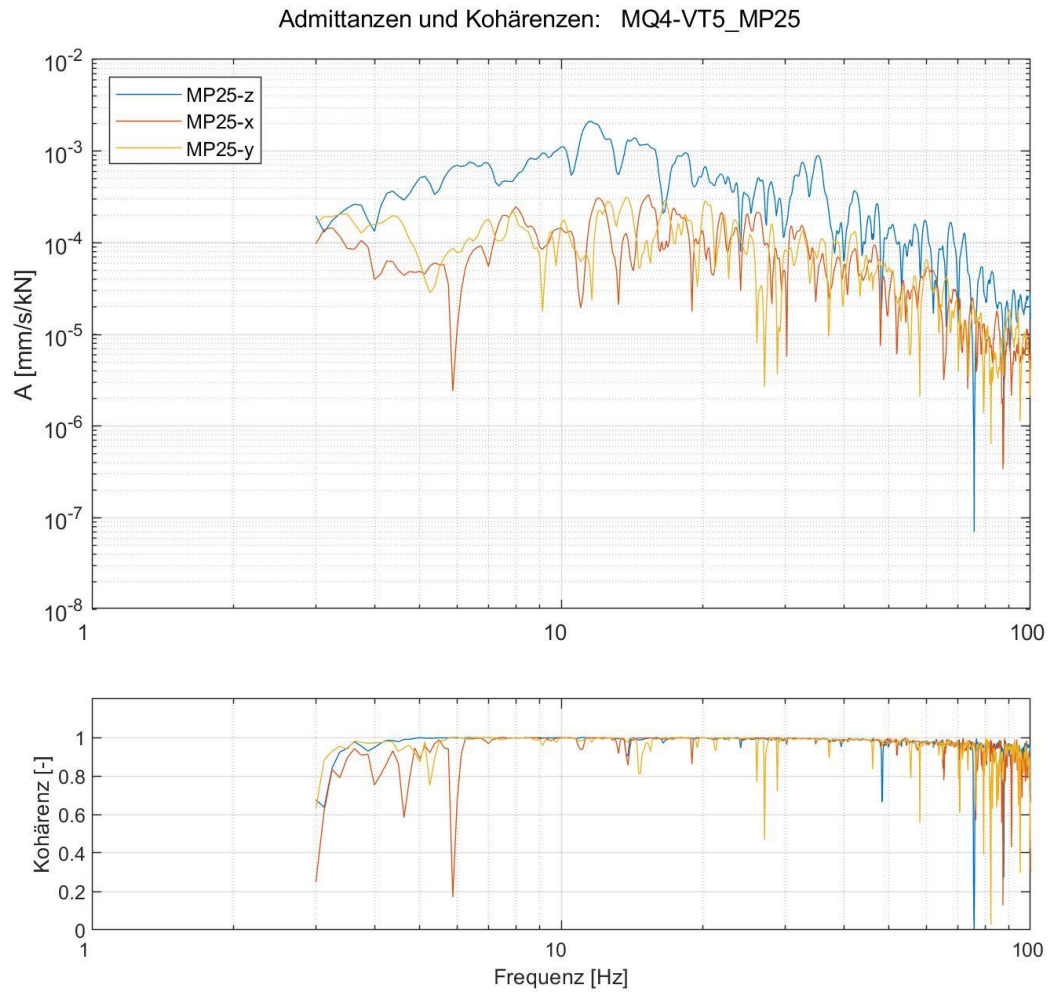


Abbildung 9-240: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

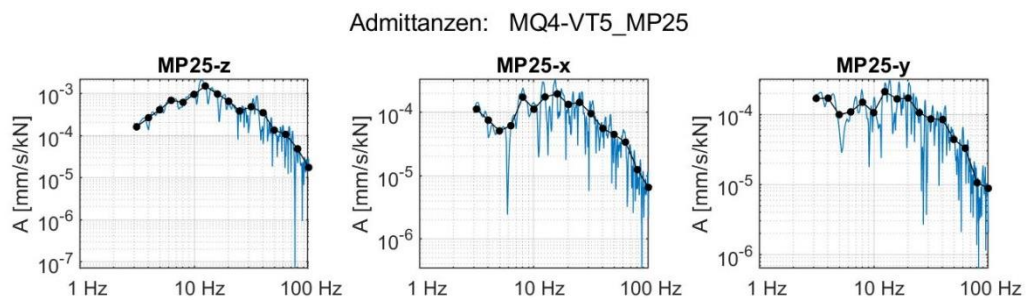


Abbildung 9-241: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

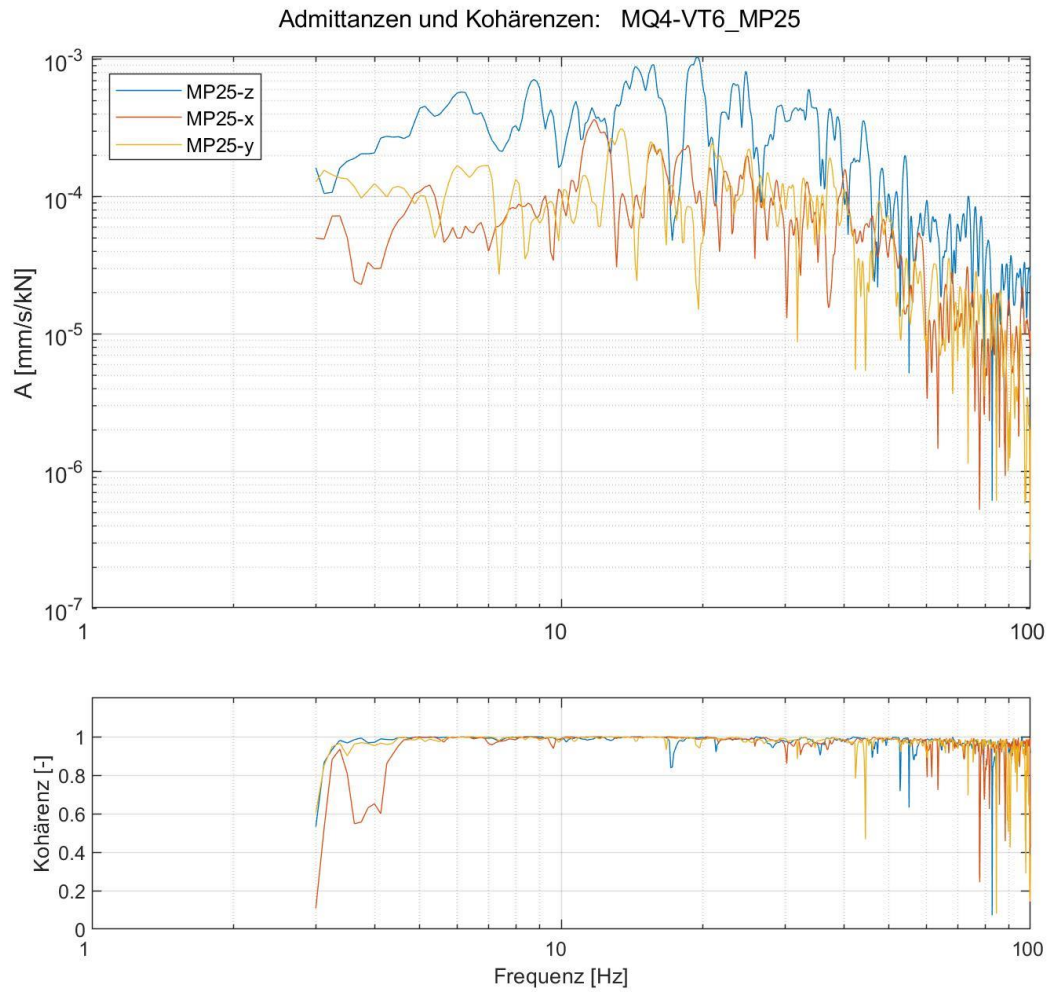


Abbildung 9-242: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

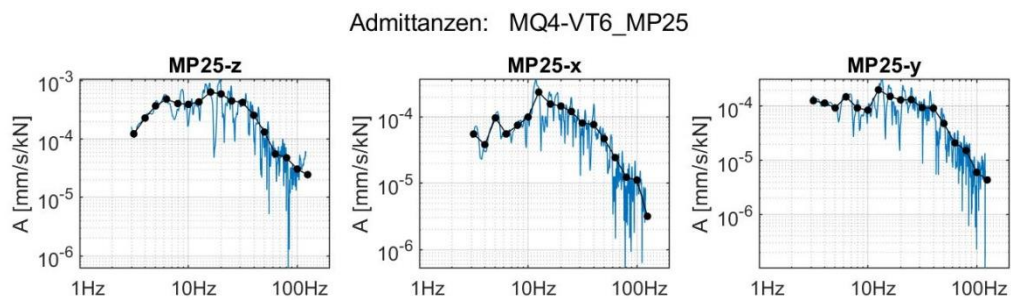


Abbildung 9-243: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

### 9.7.13 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP26

Die Gebäudeadmittanzen bei dem Messpunkt MP26 wurden auf Grundlage der Anregungen des VibroTrucks bei Messquerschnitt MQ3 und MQ4 berechnet. Zunächst folgen die Auswertungen auf Grundlage der Anregung bei MQ3.

#### Gebäudeadmittanzen bei Anregung mit VibroTruck am MQ3

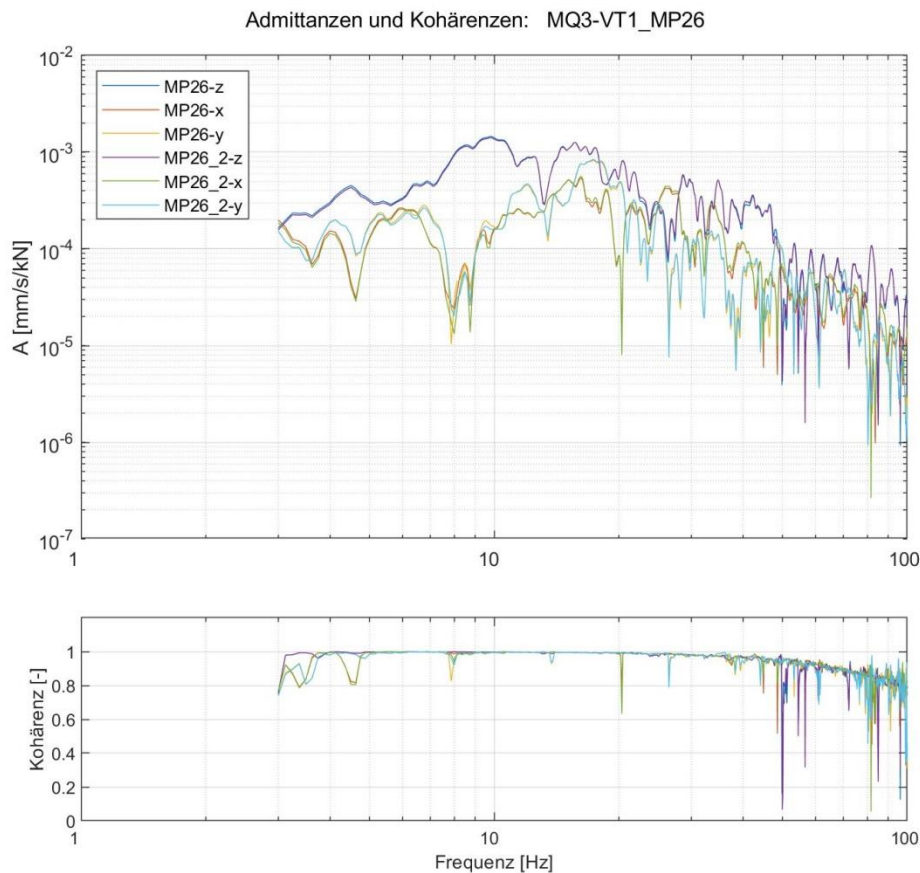


Abbildung 9-244: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

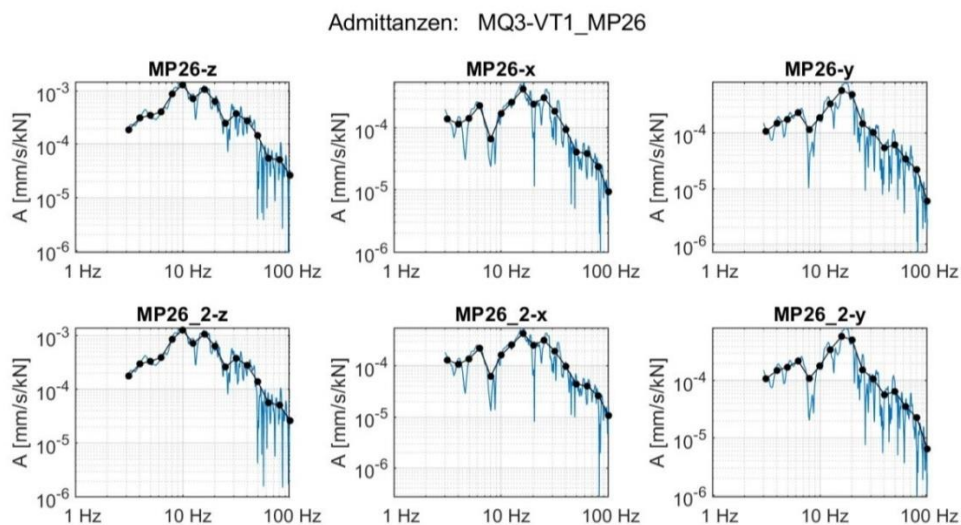


Abbildung 9-245: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)



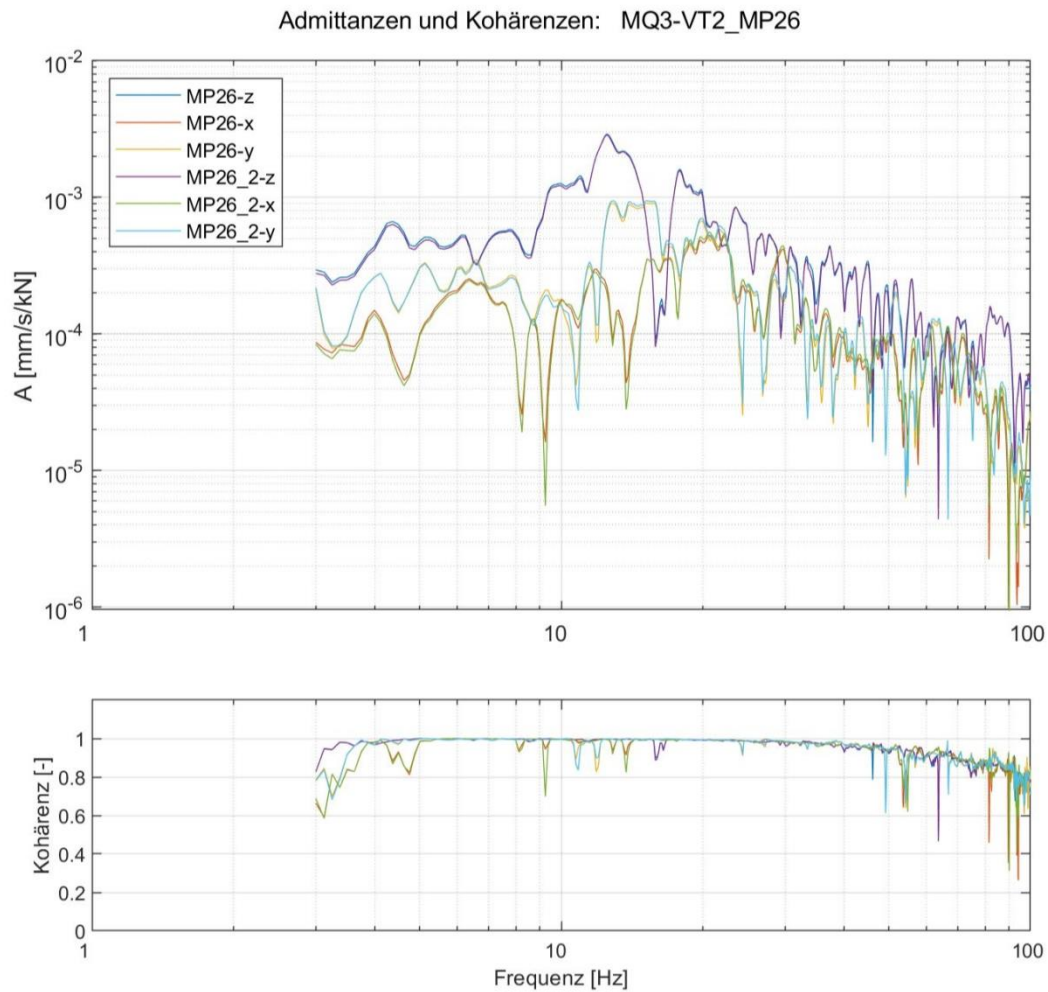


Abbildung 9-246: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

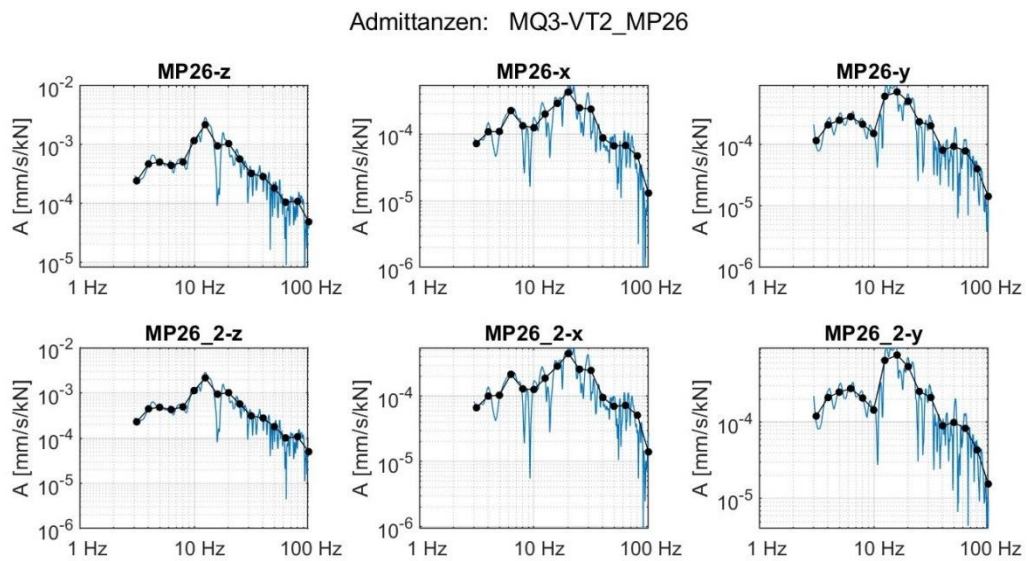


Abbildung 9-247: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)



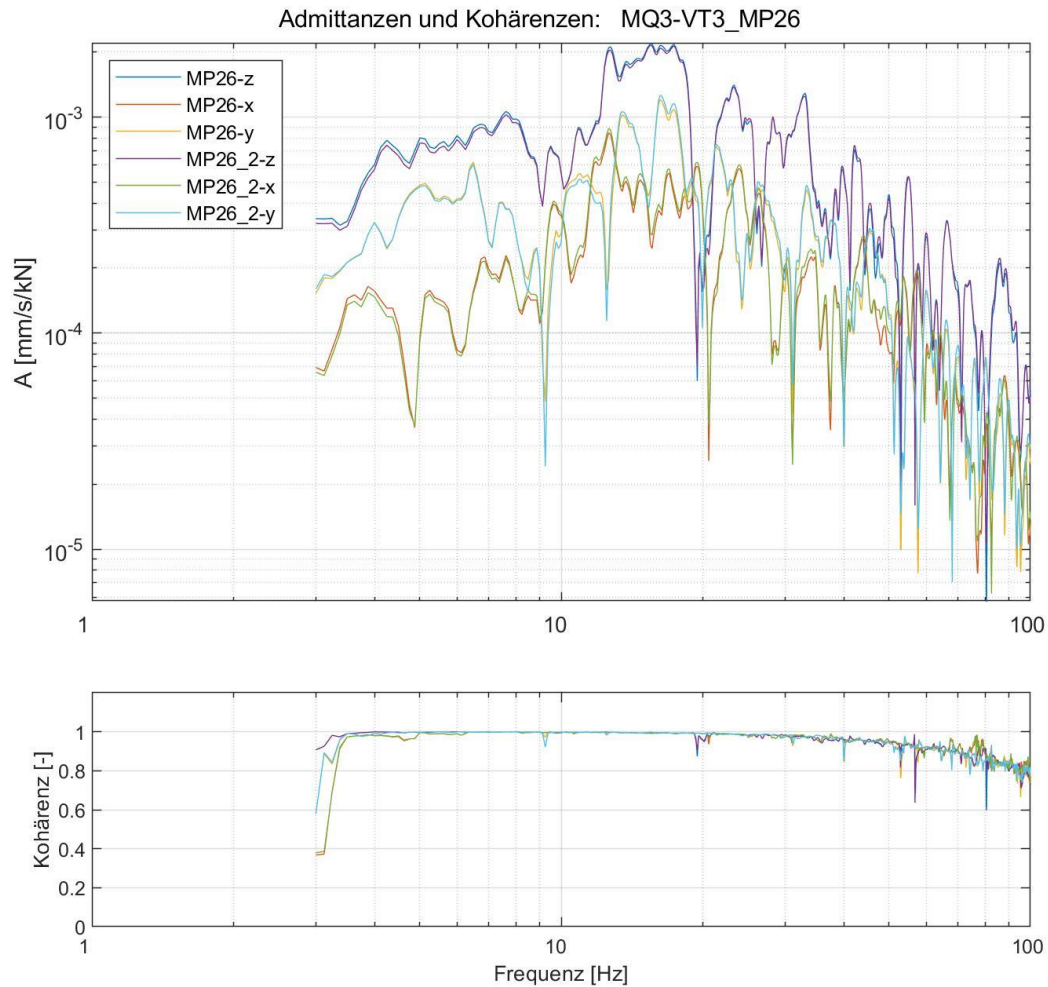


Abbildung 9-248: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

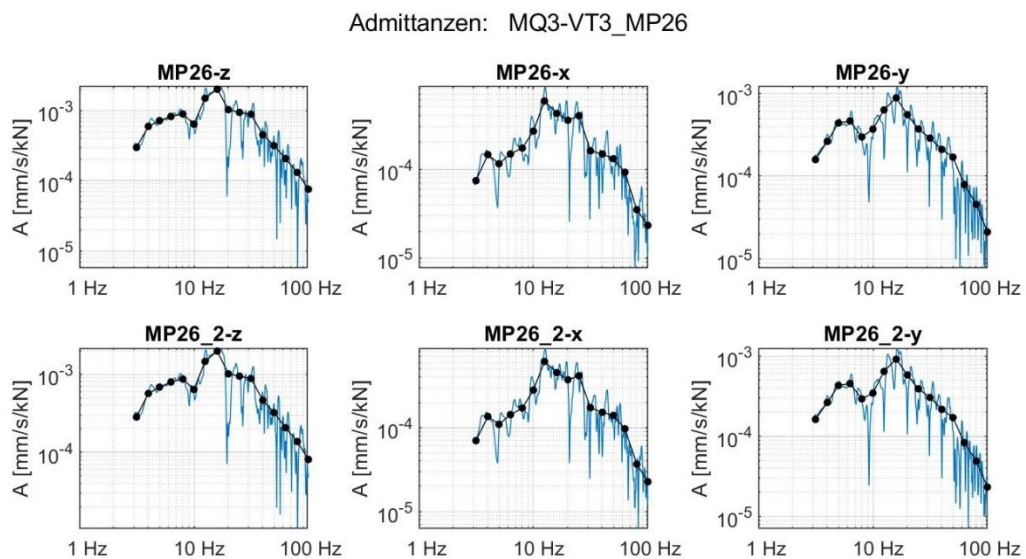


Abbildung 9-249: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

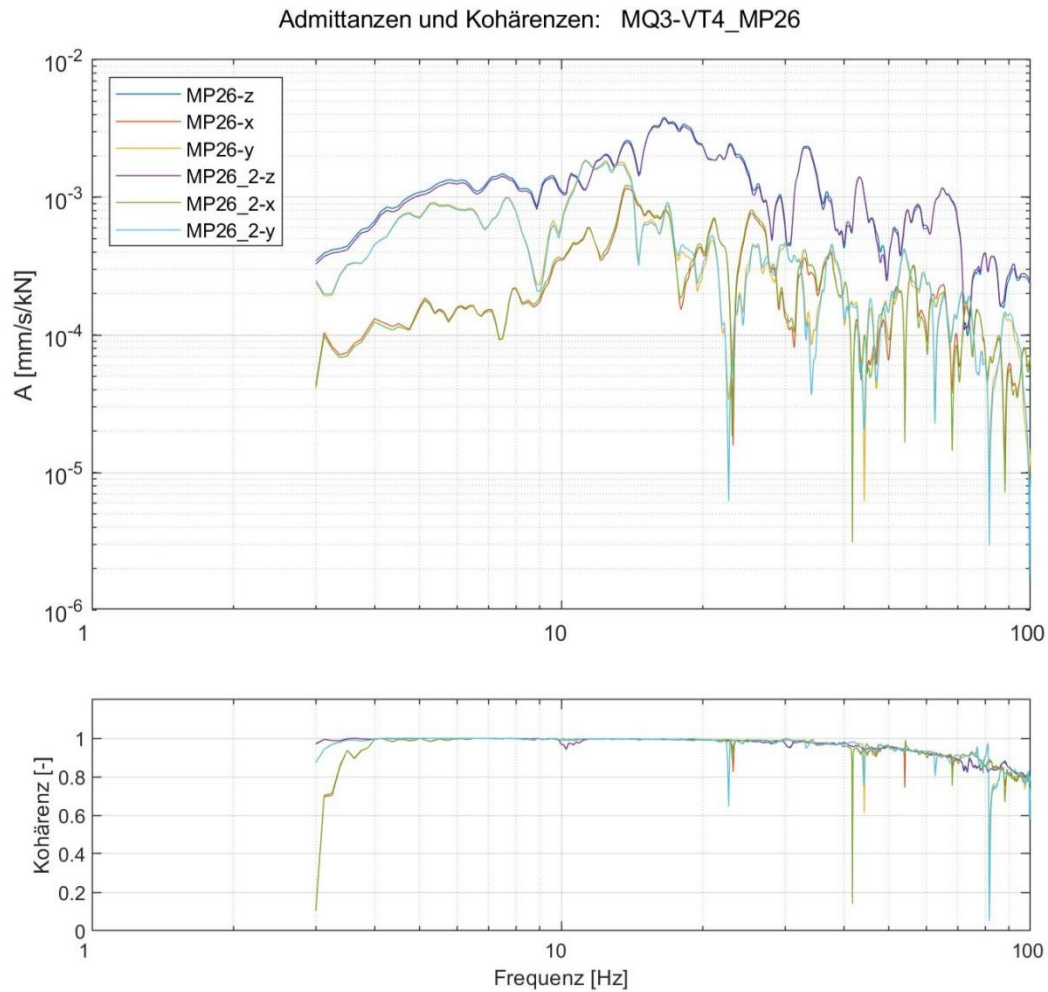


Abbildung 9-250: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

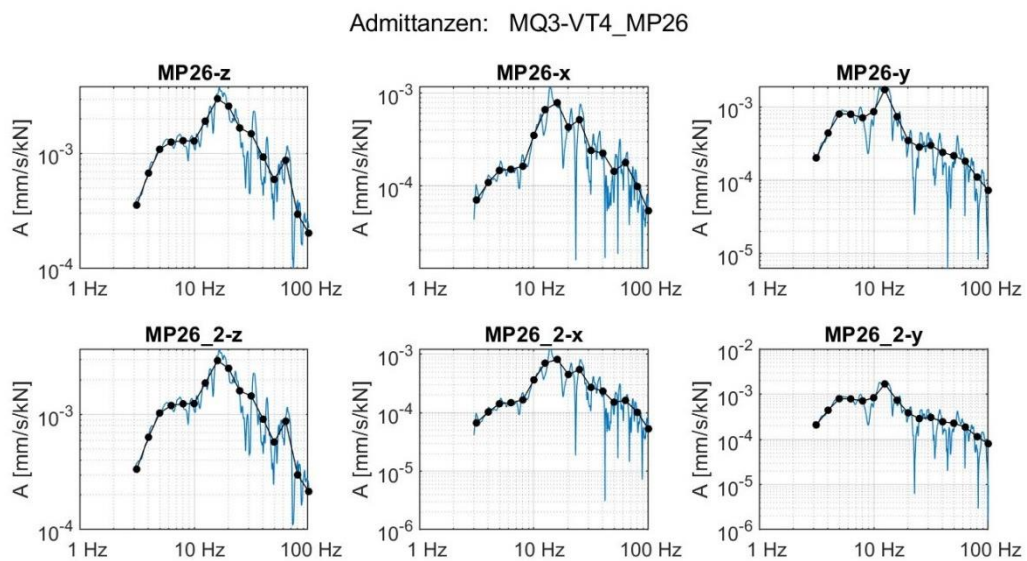


Abbildung 9-251: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)

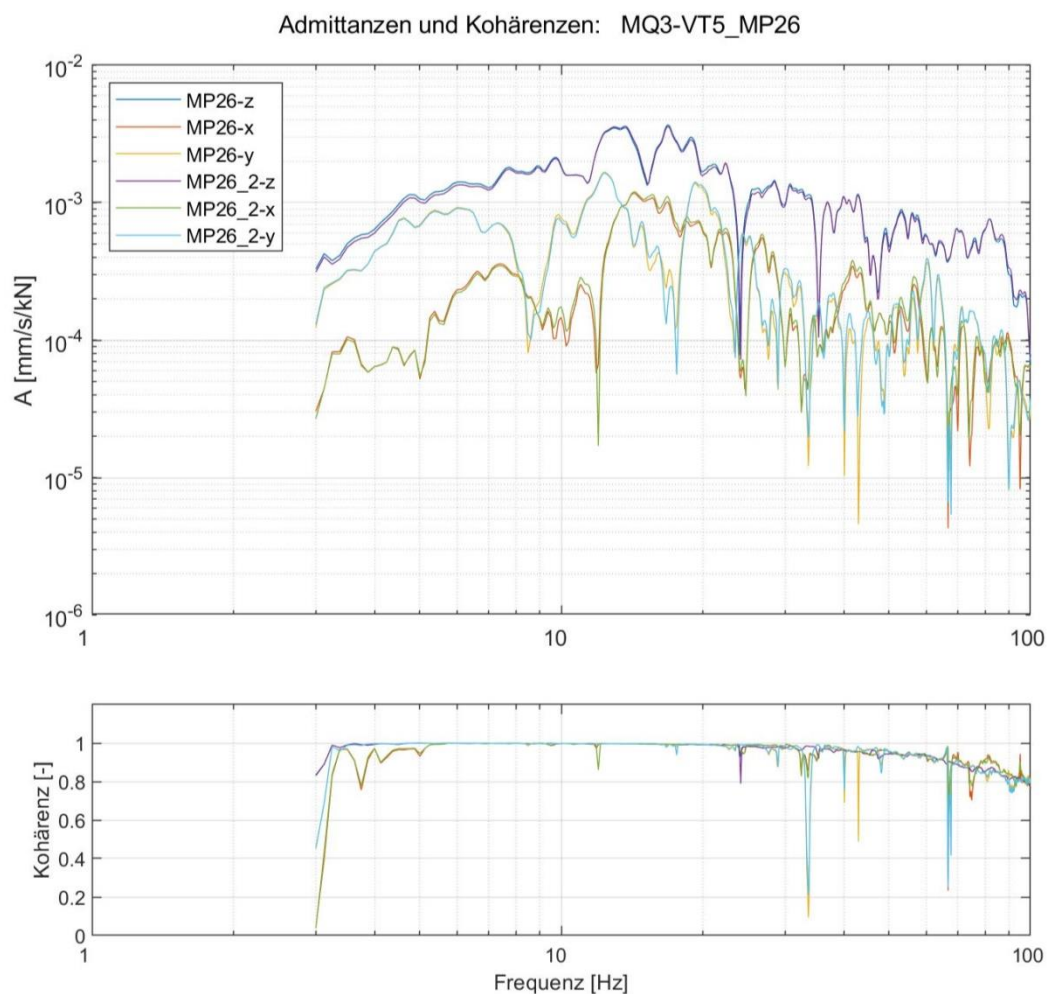


Abbildung 9-252: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

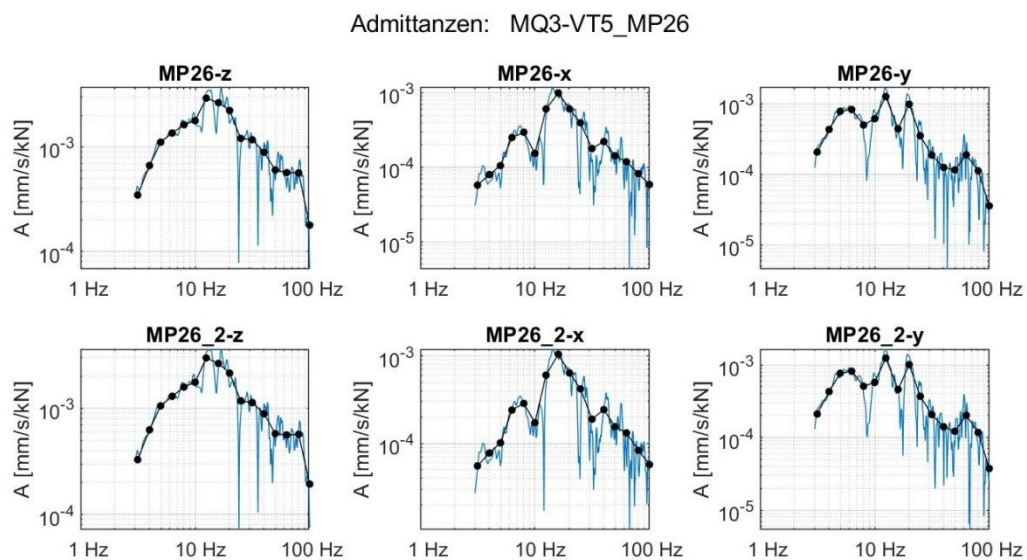


Abbildung 9-253: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)



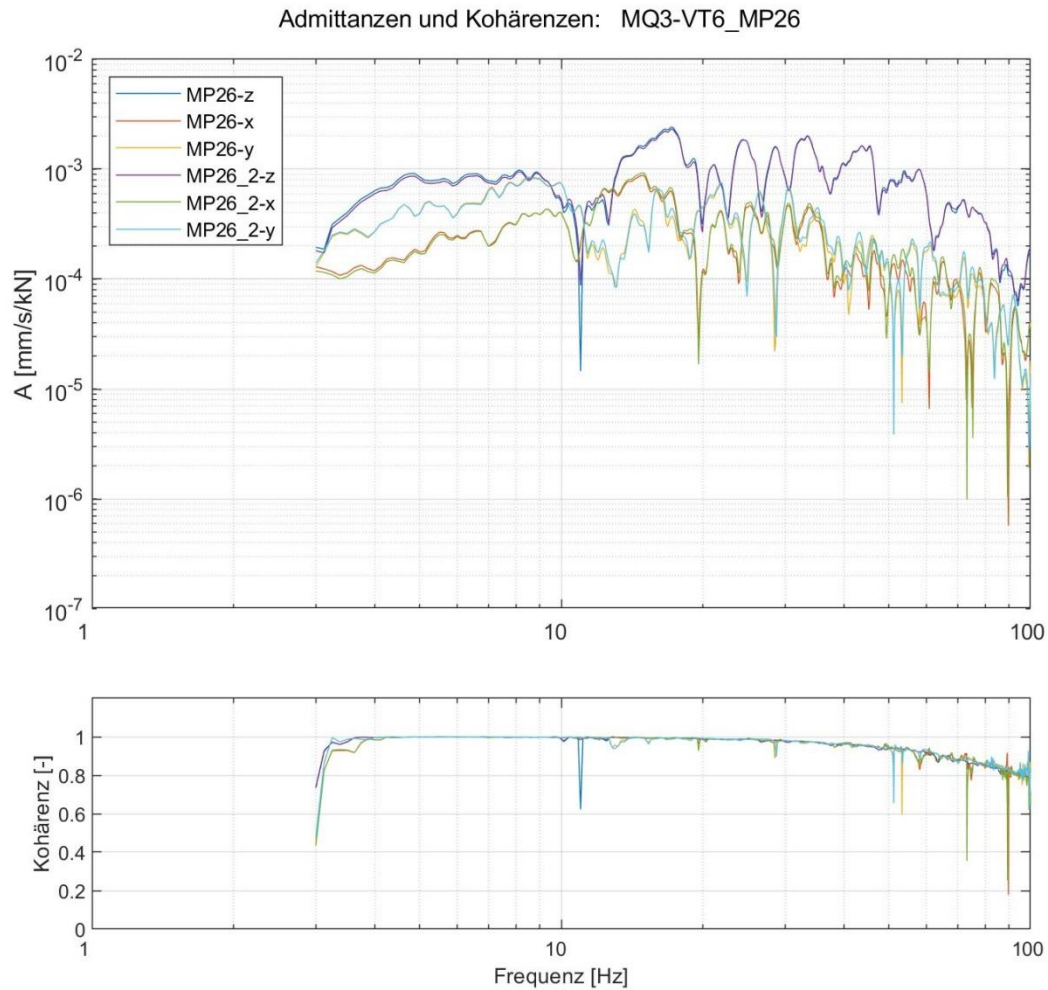


Abbildung 9-254: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

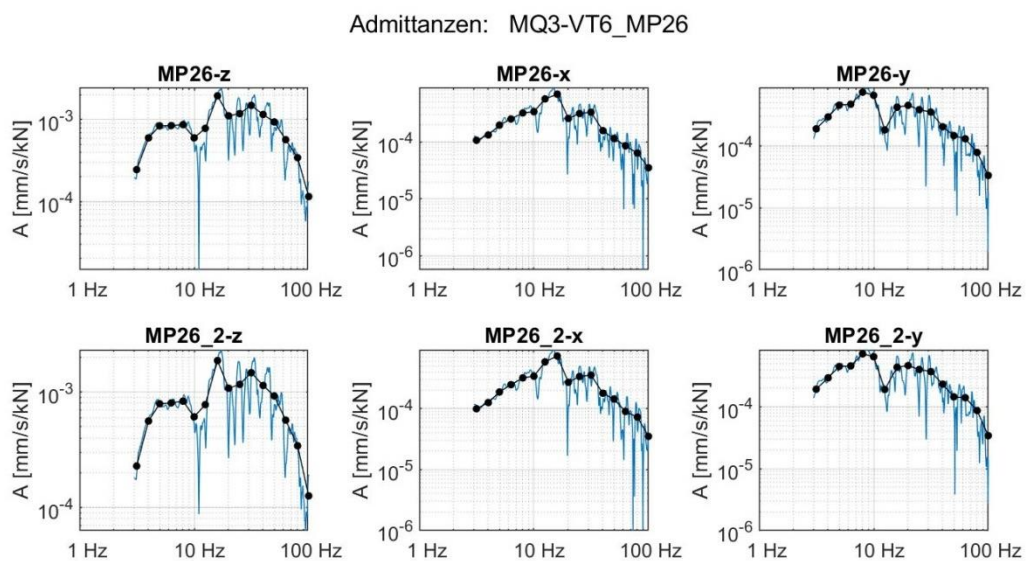


Abbildung 9-255: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)



## Gebäudeadmittanzen bei Anregung mit VibroTruck am MQ4

Admittanzen und Kohärenzen: MQ4-VT1\_2\_MP26

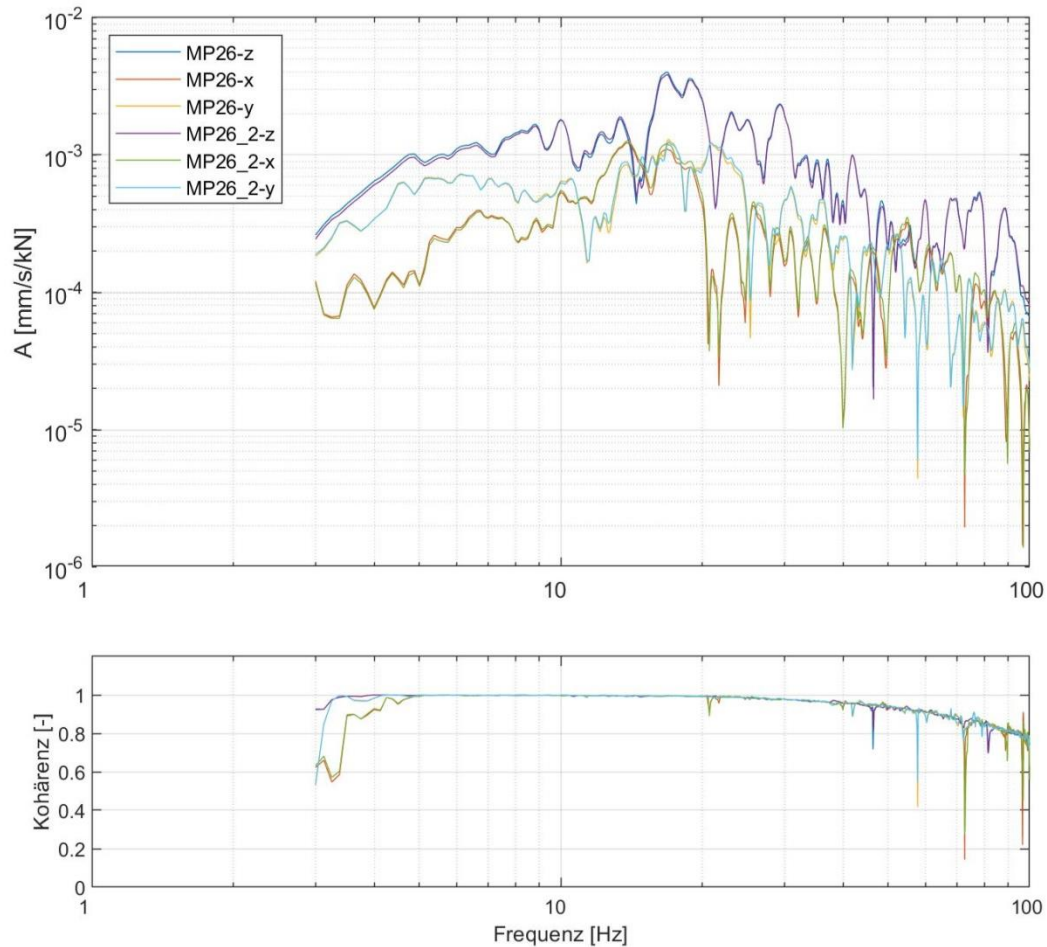


Abbildung 9-256: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

Admittanzen: MQ4-VT1\_2\_MP26

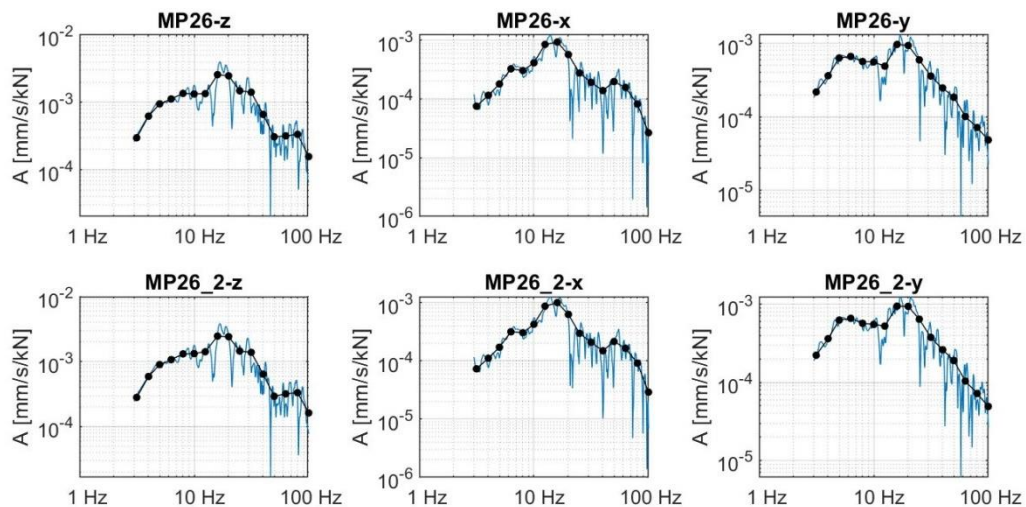


Abbildung 9-257: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

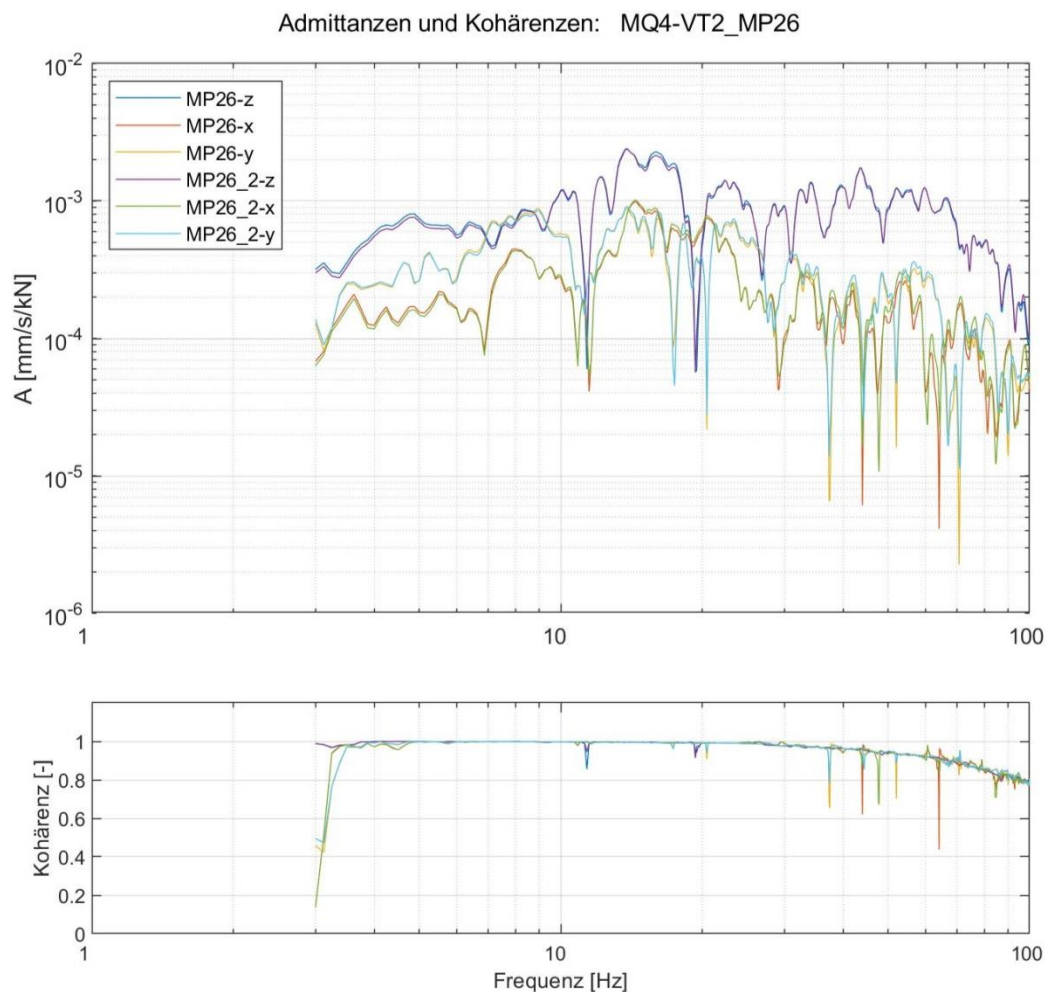


Abbildung 9-258: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

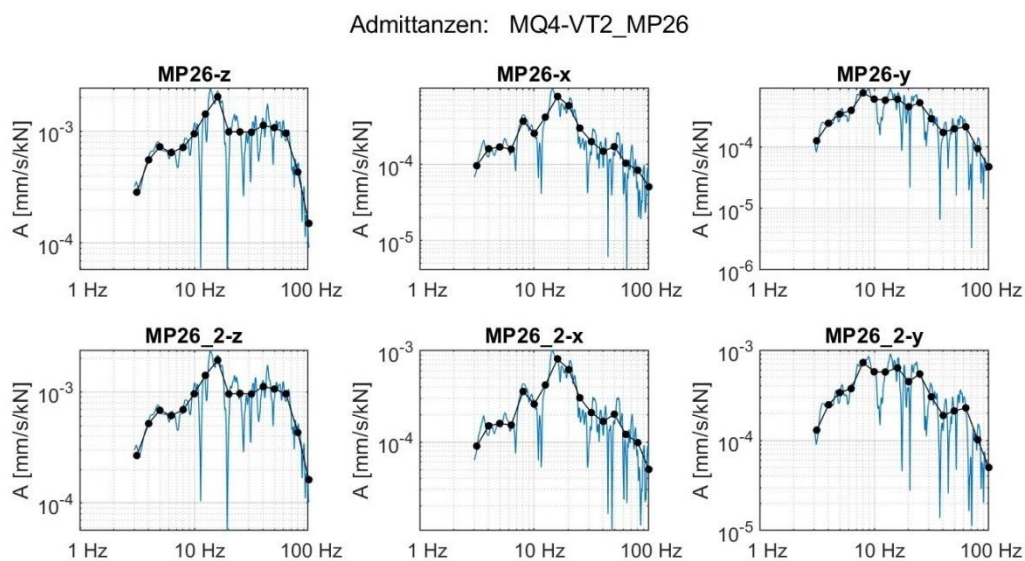


Abbildung 9-259: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

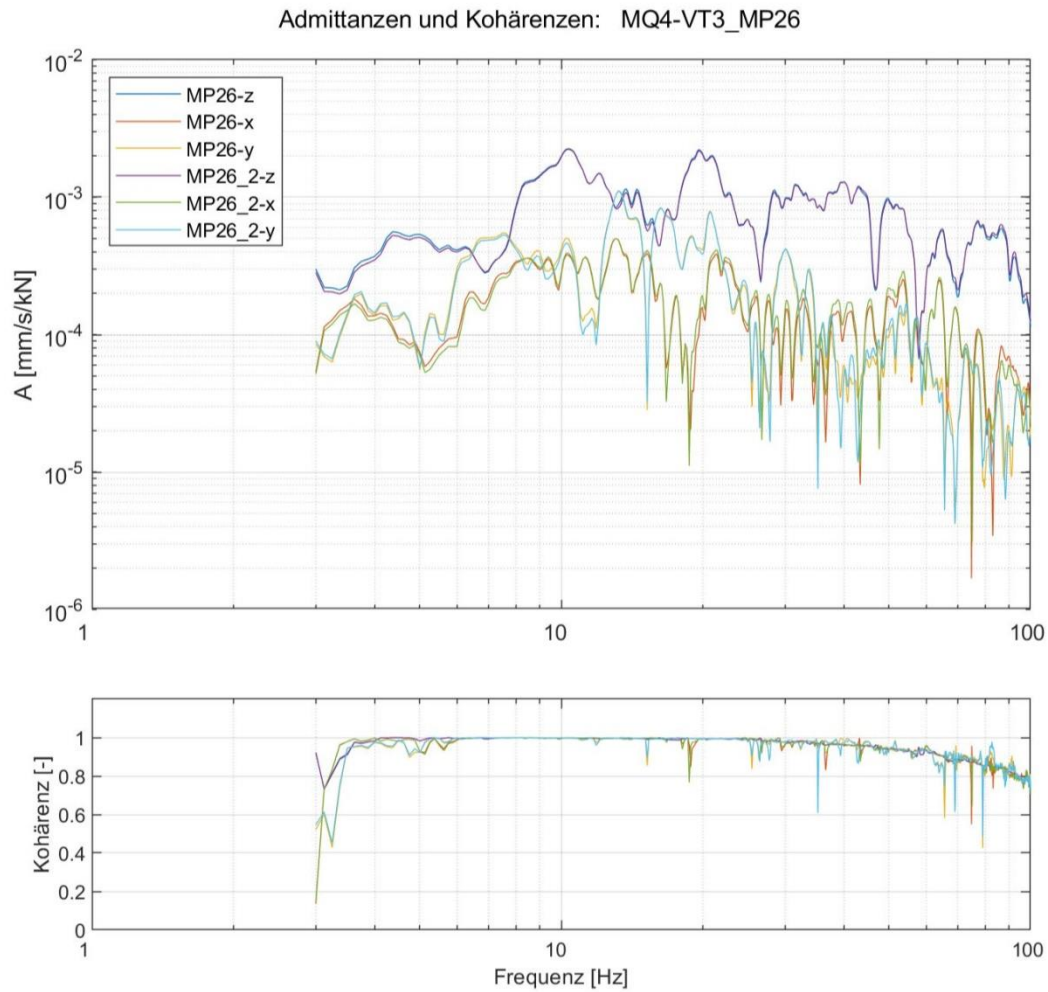


Abbildung 9-260: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

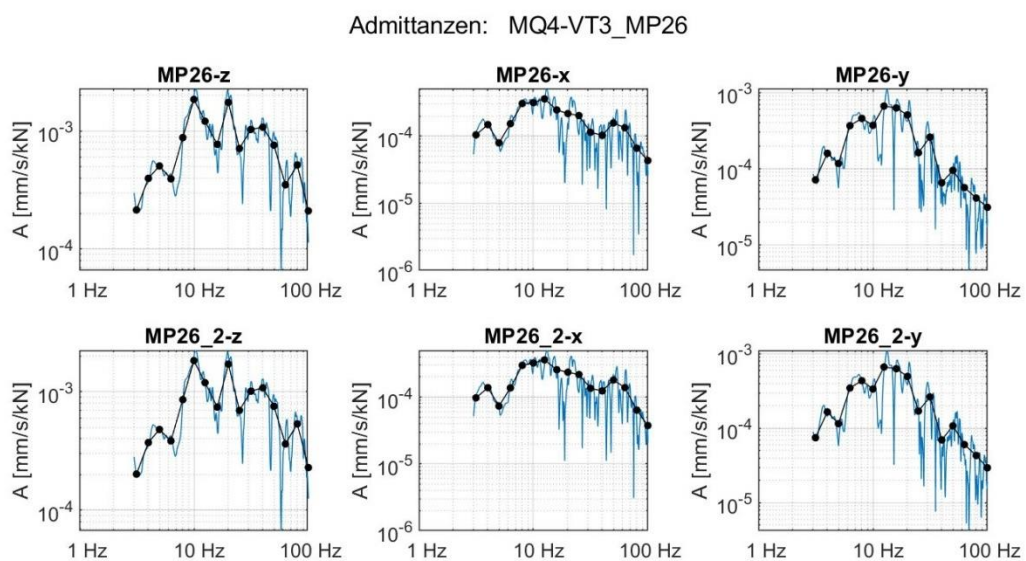


Abbildung 9-261: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)



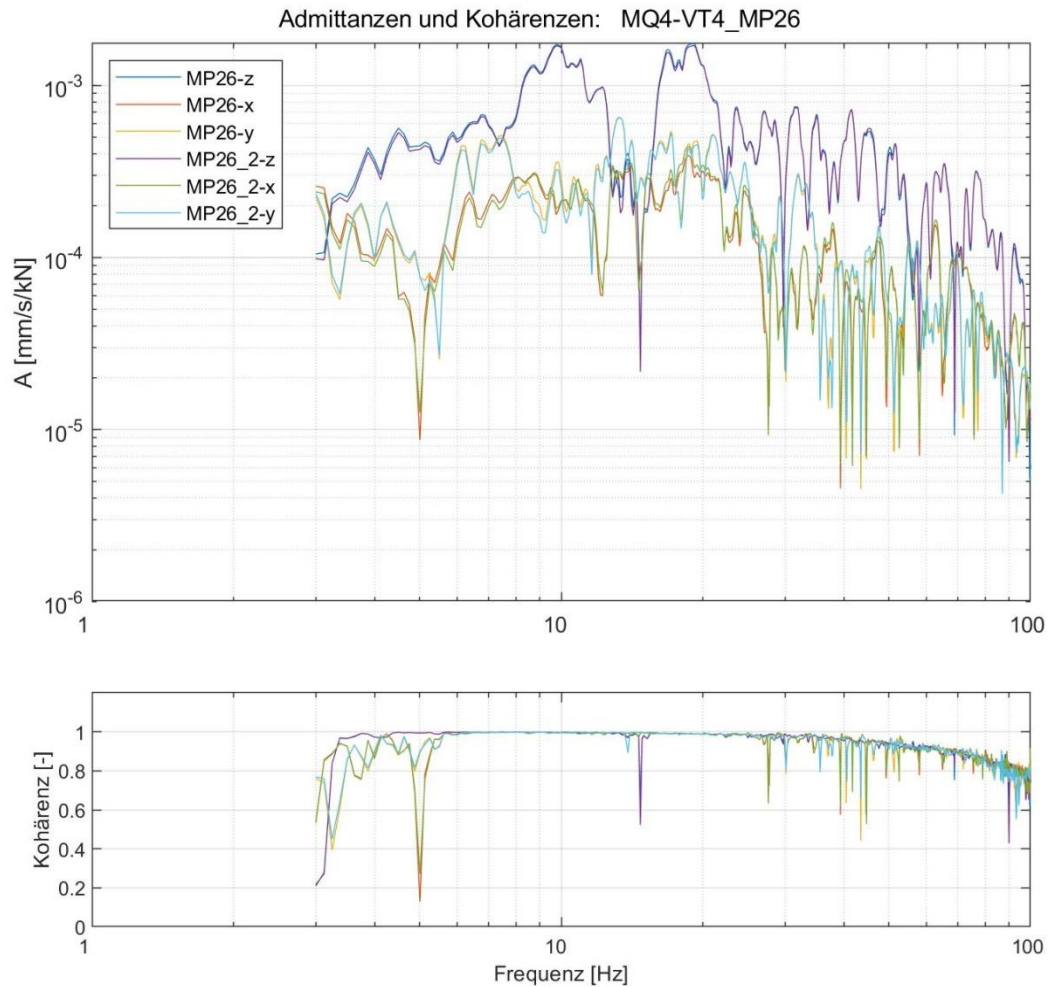


Abbildung 9-262: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

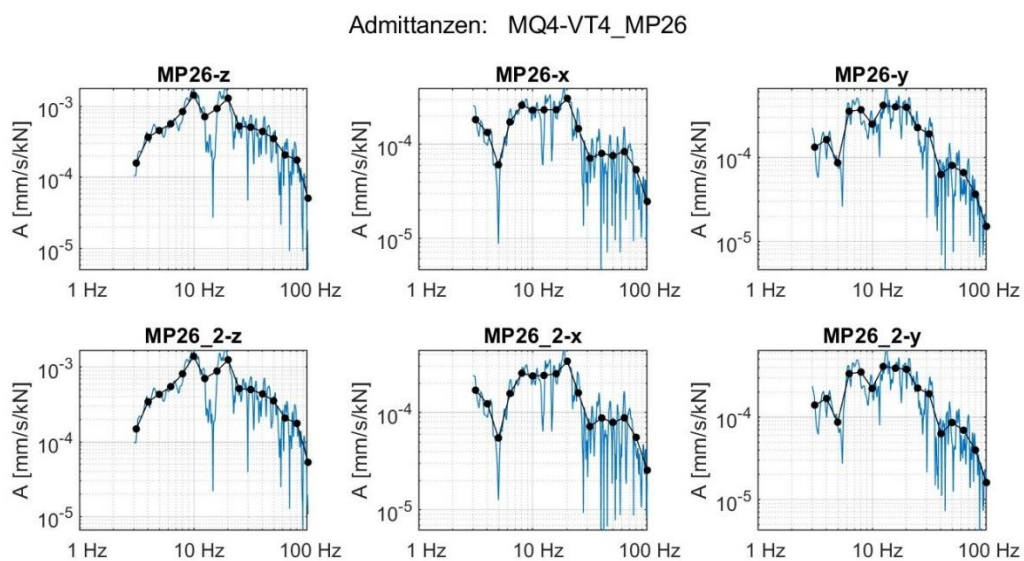


Abbildung 9-263: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)



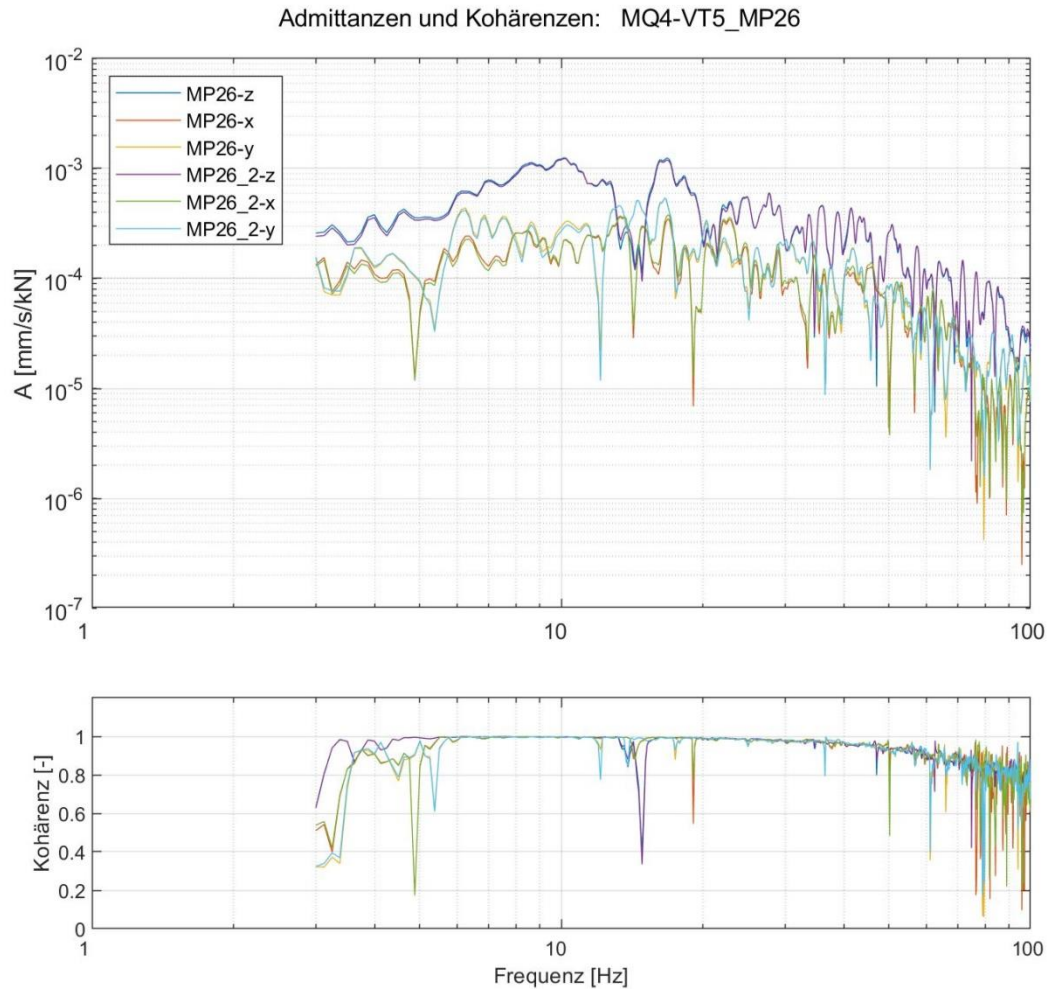


Abbildung 9-264: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

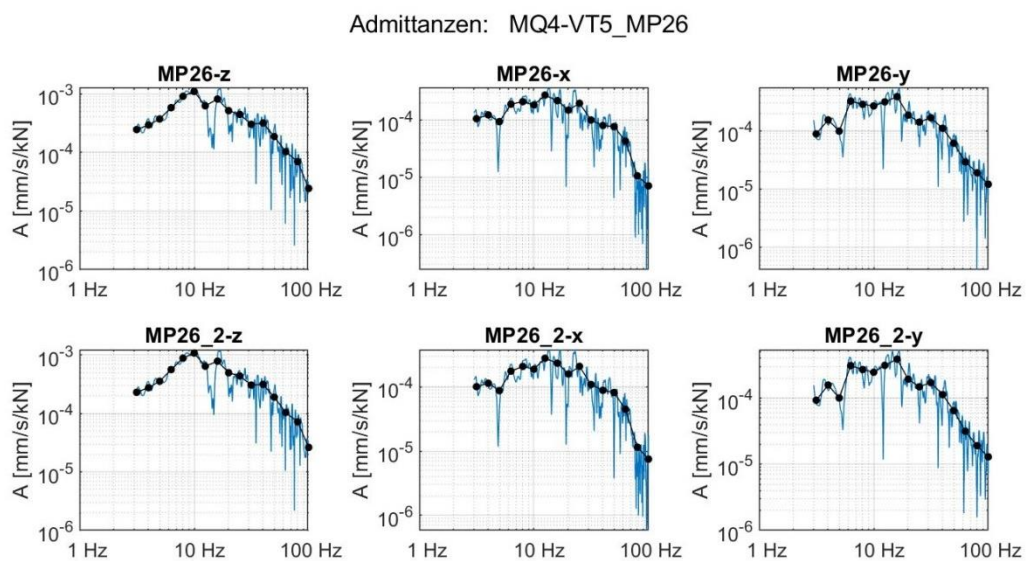


Abbildung 9-265: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

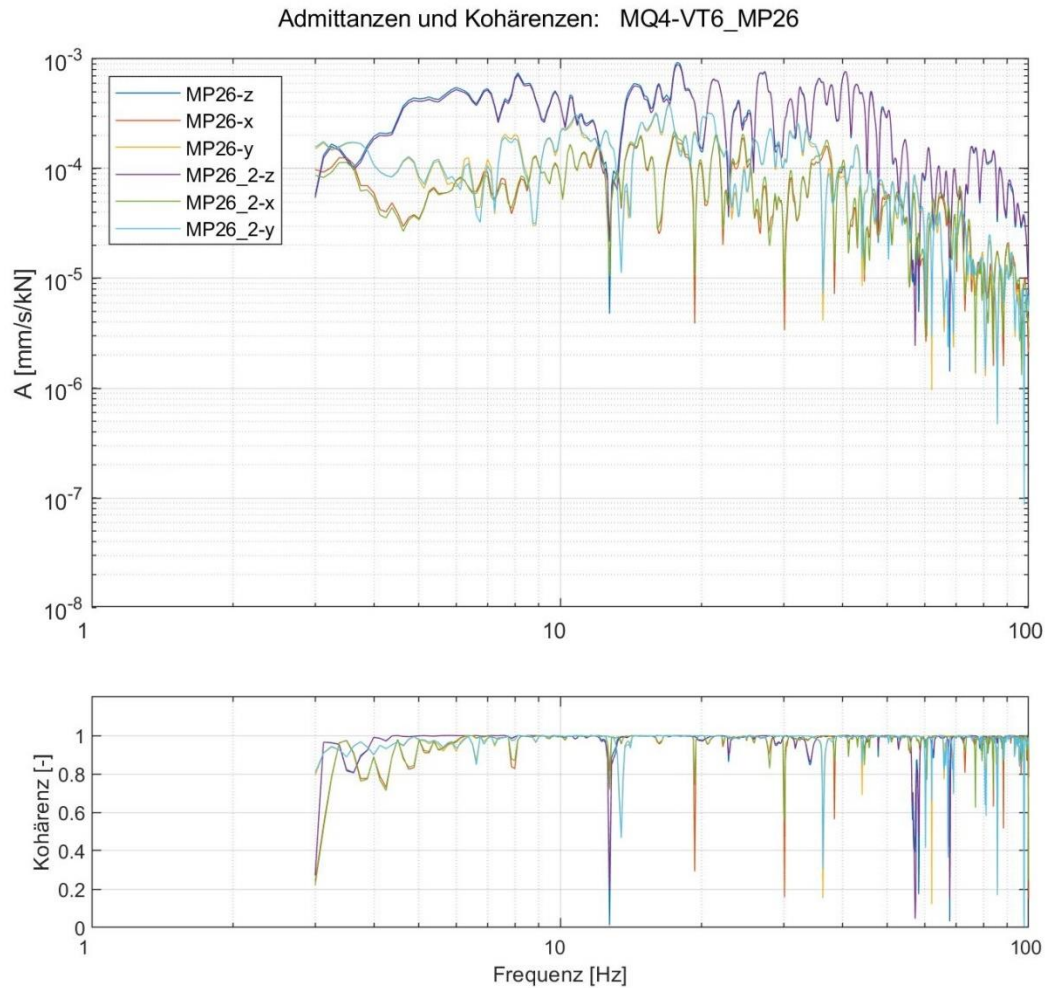


Abbildung 9-266: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

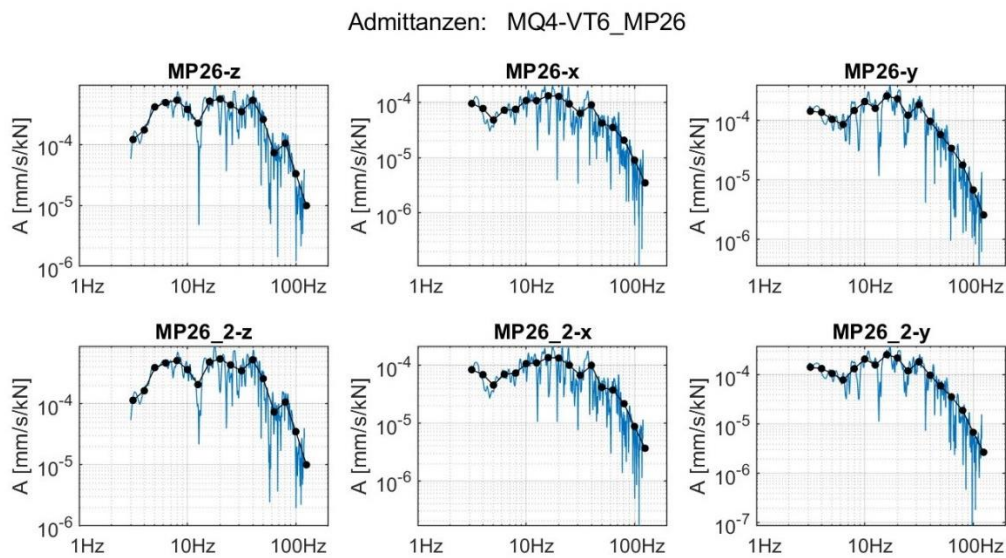


Abbildung 9-267: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ4-VT7\_MP26

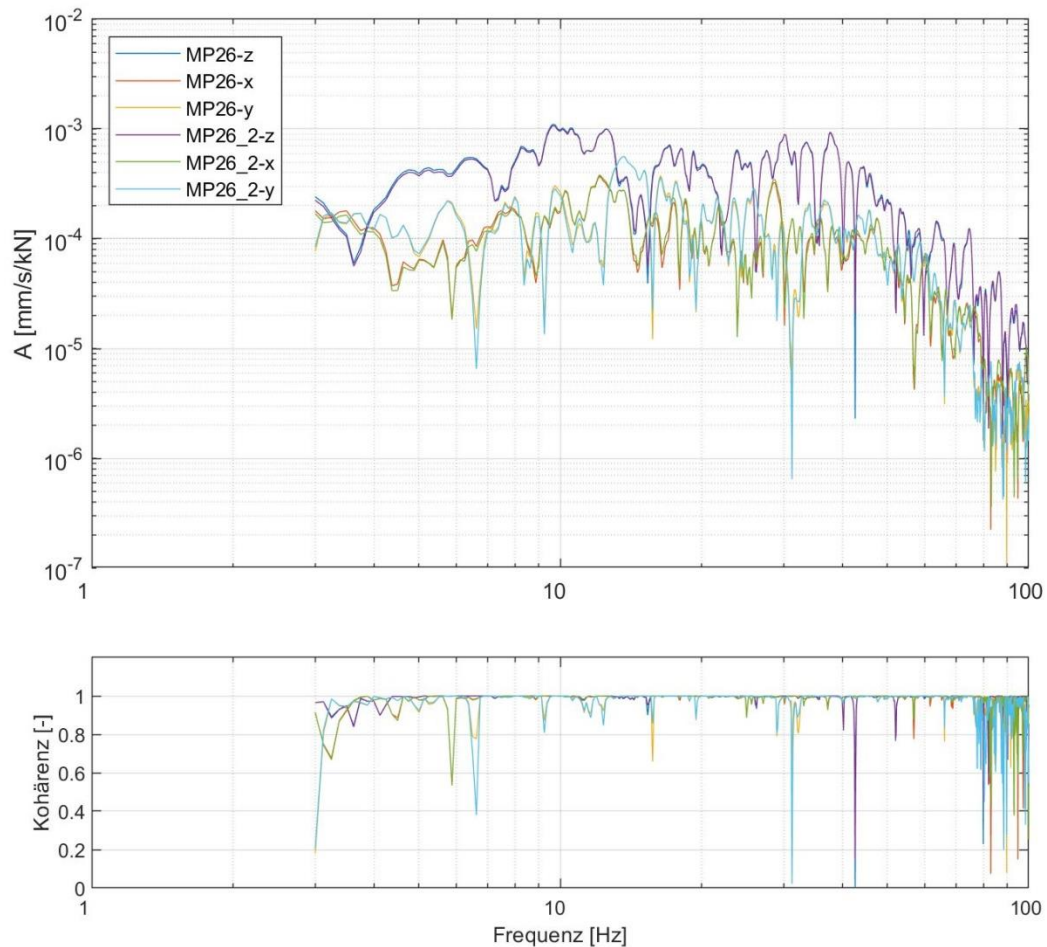


Abbildung 9-268: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT7)

Admittanzen: MQ4-VT7\_MP26

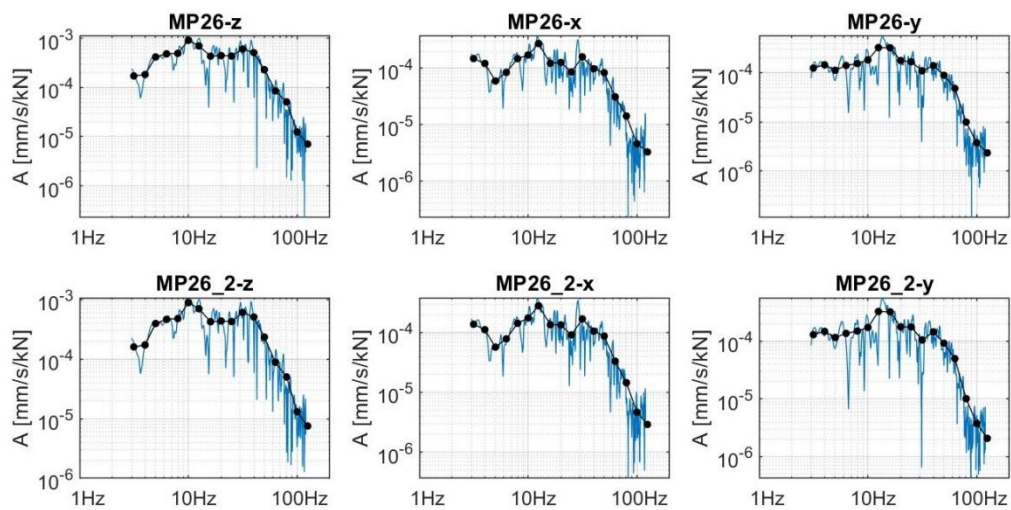


Abbildung 9-269: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT7)



### 9.7.14 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP32

Am Messpunkte MP32 wurden 2 Sensoren nebeneinander aufgestellt, welche beide jeweils in alle 3 Raumrichtungen messen.

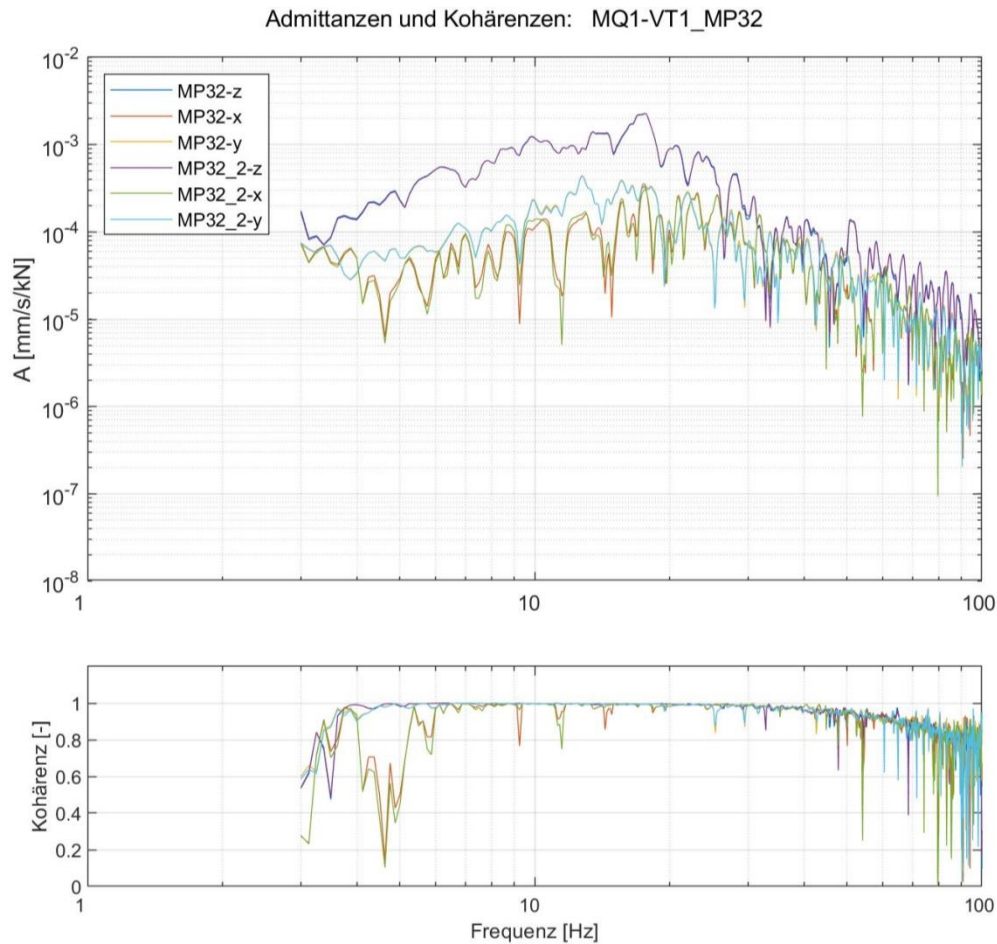


Abbildung 9-270: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

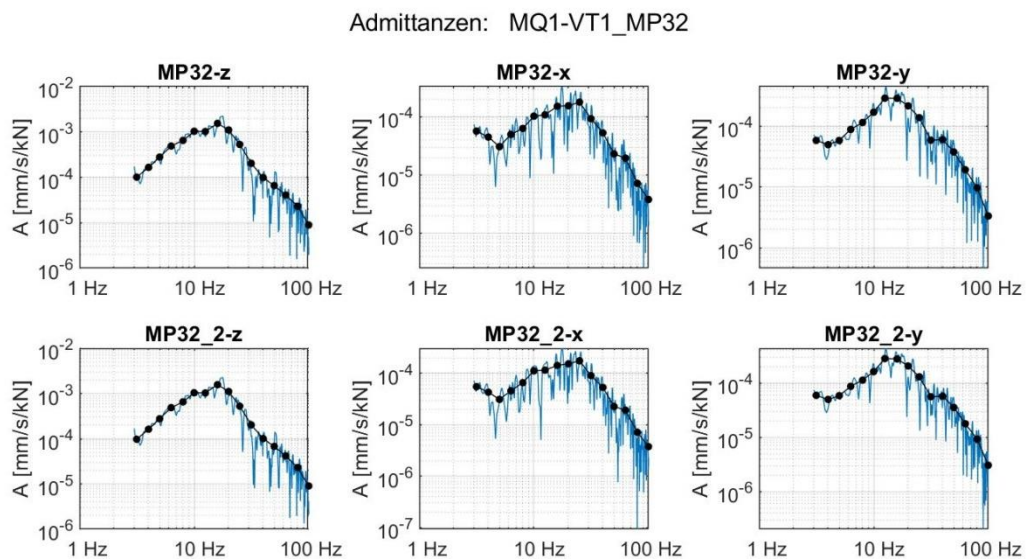


Abbildung 9-271: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)



Admittanzen und Kohärenzen: MQ1-VT2\_MP32

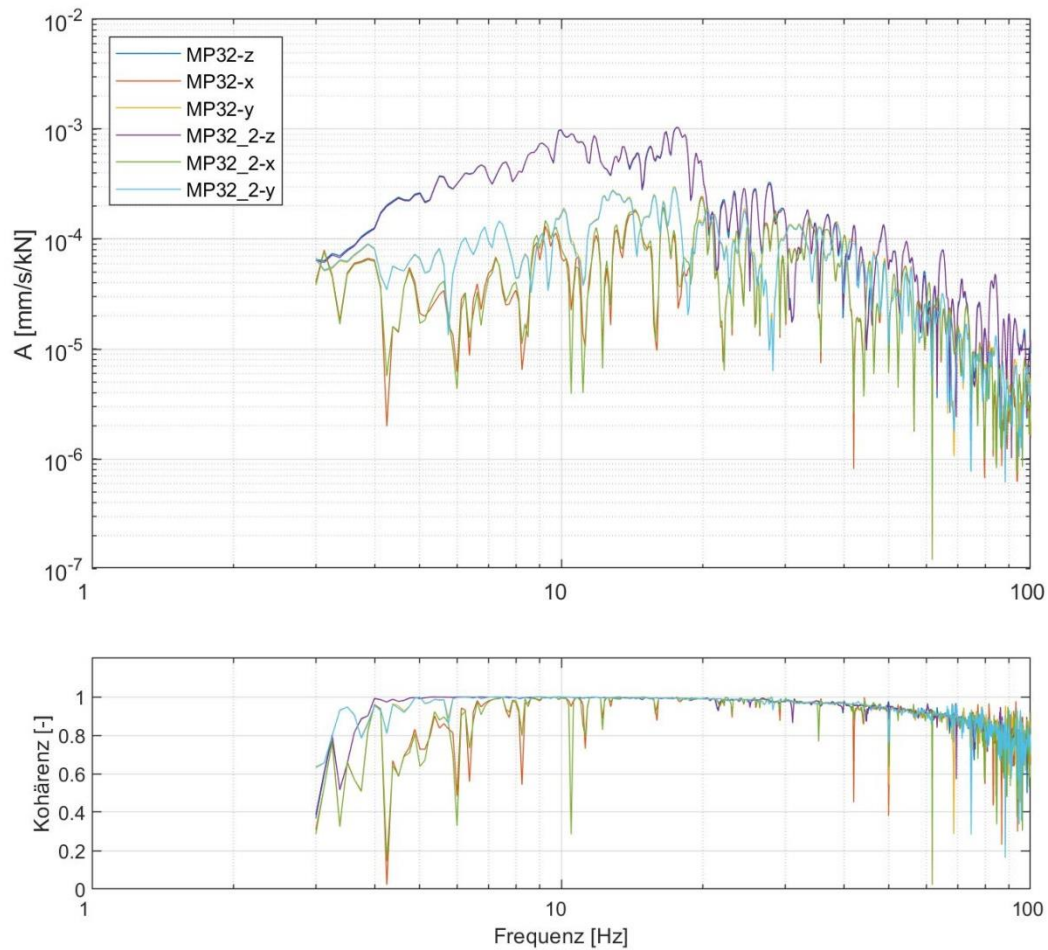


Abbildung 9-272: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

Admittanzen: MQ1-VT2\_MP32

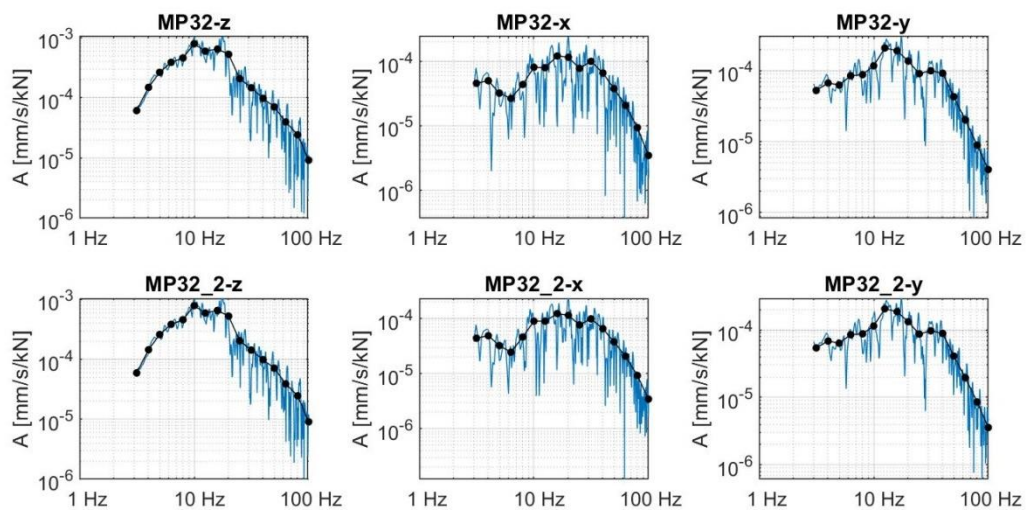


Abbildung 9-273: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

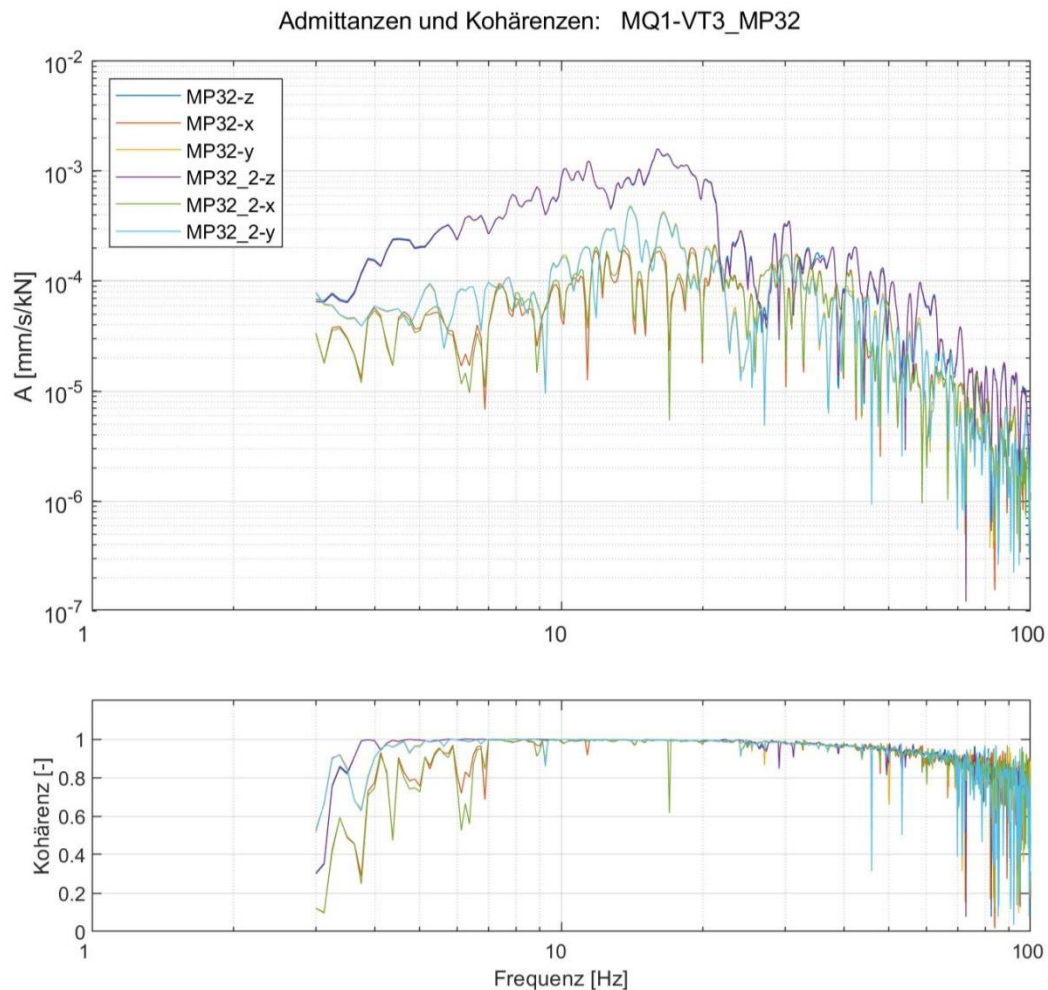


Abbildung 9-274: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

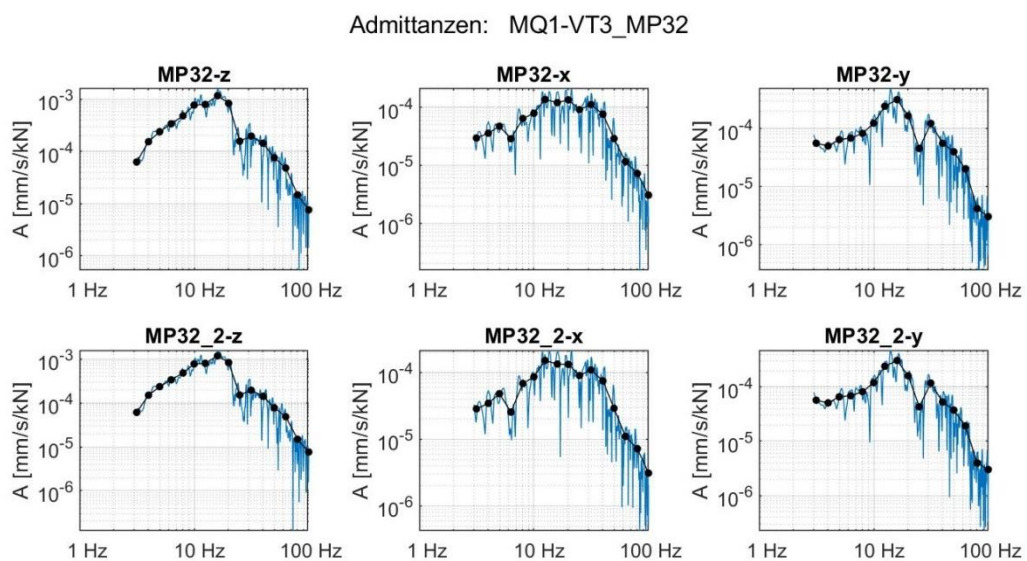


Abbildung 9-275: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

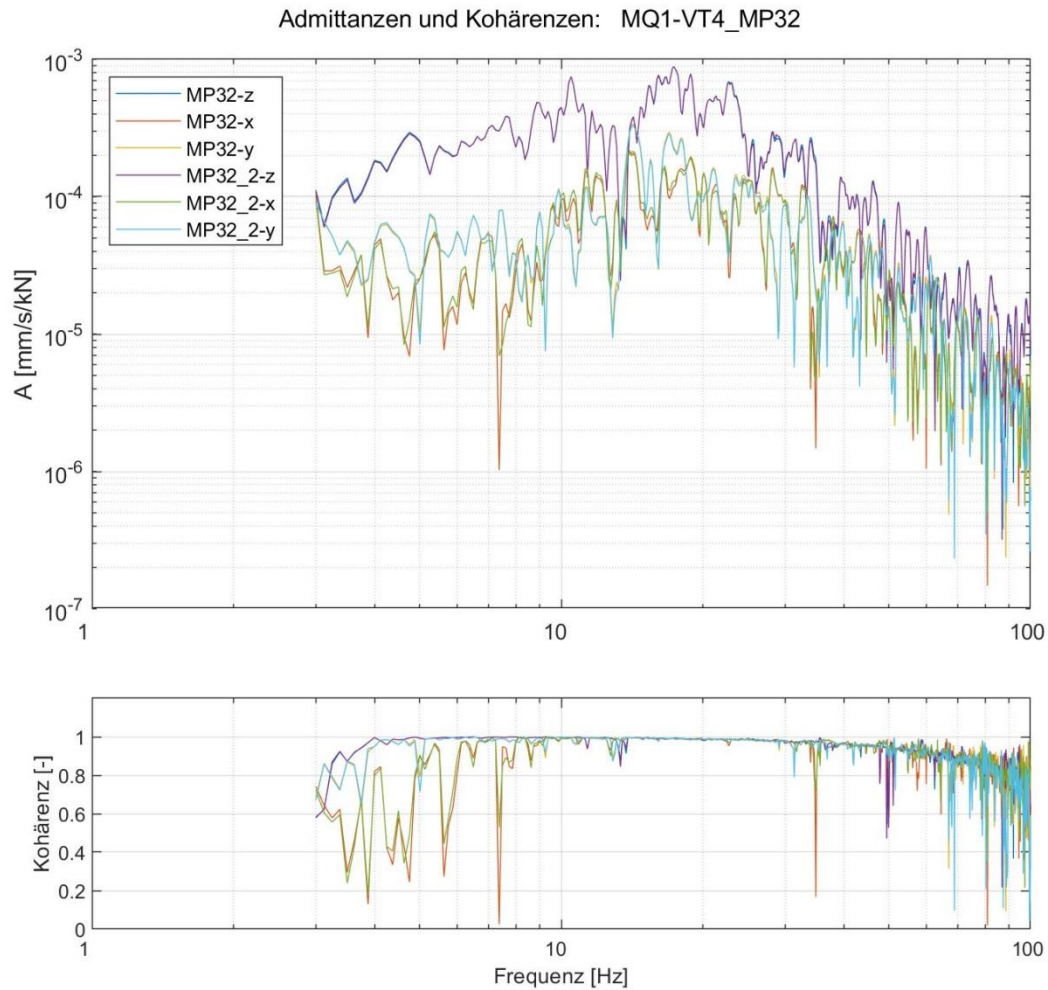


Abbildung 9-276: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

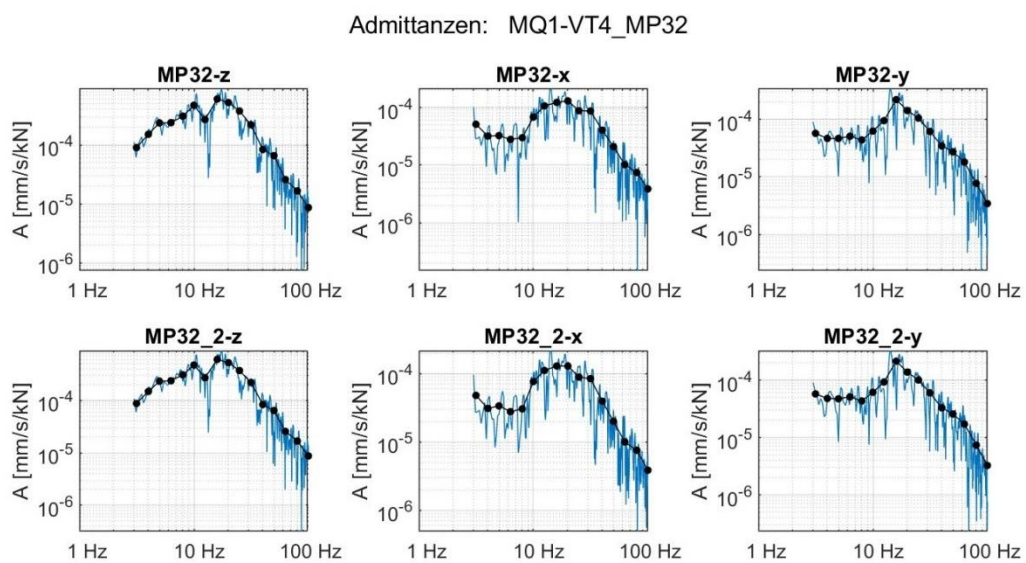


Abbildung 9-277: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)



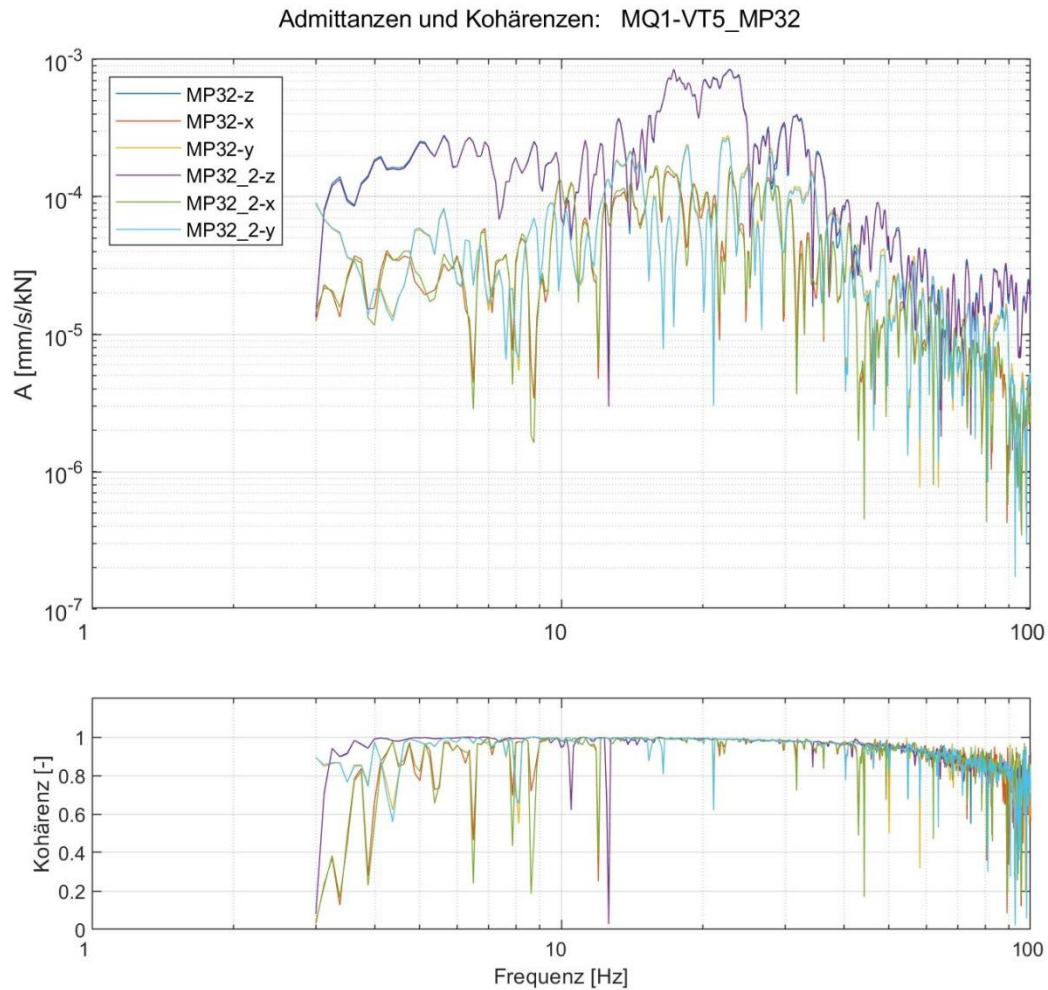


Abbildung 9-278: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

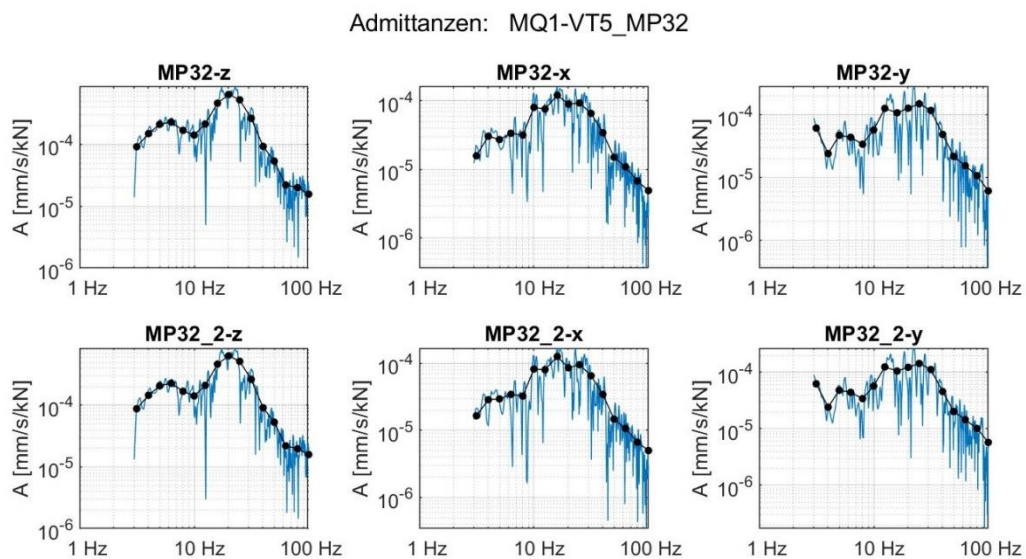


Abbildung 9-279: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)



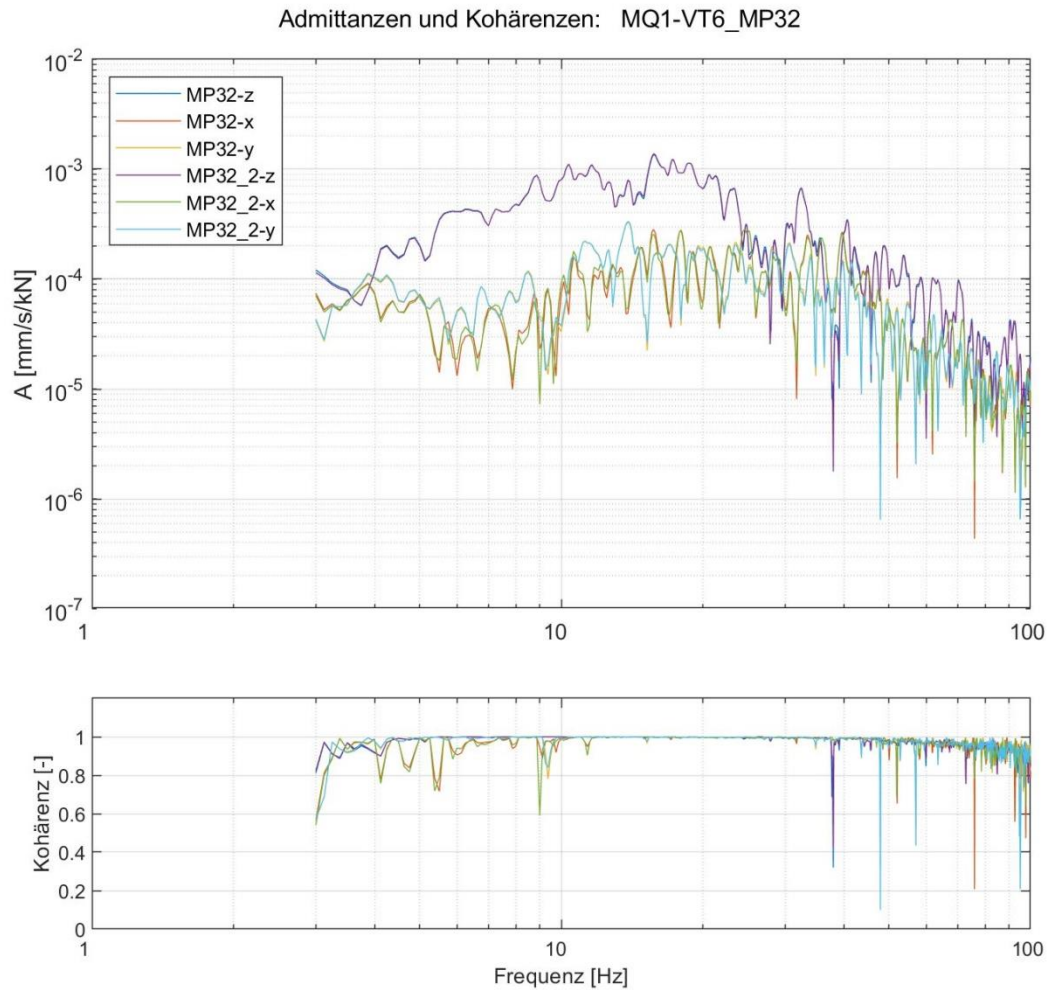


Abbildung 9-280: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

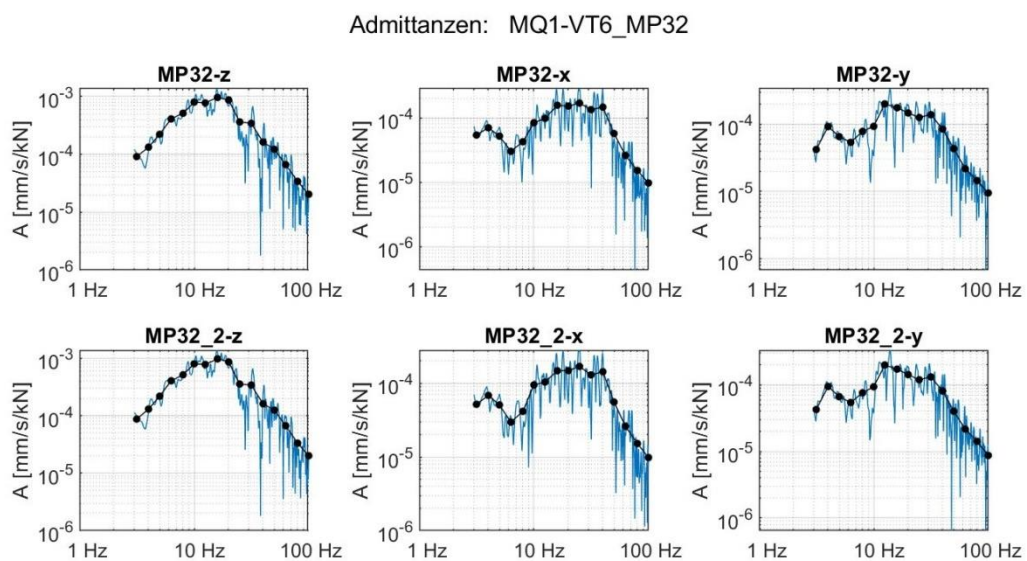


Abbildung 9-281: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

### 9.7.15 Ergebnisse der Gebäudeadmittanzen MP33

Die Gebäudeadmittanzen bei dem Messpunkt 9 wurden auf Grundlage der Anregungen des VibroTrucks bei Messquerschnitt MQ2 und MQ3 berechnet. Zunächst folgen die Auswertungen auf Grundlage der Anregung bei MQ2.

#### Gebäudeadmittanzen bei Anregung mit VibroTruck am MQ2

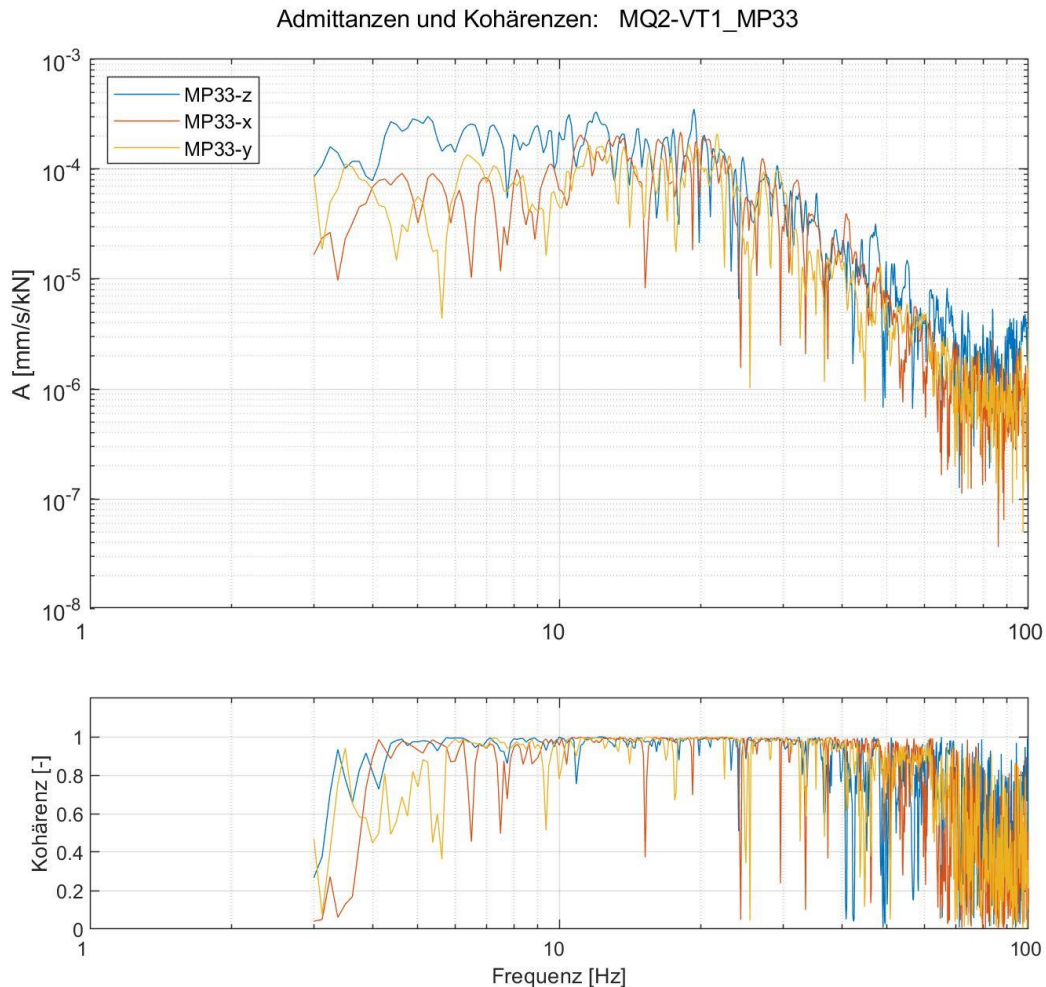


Abbildung 9-282: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

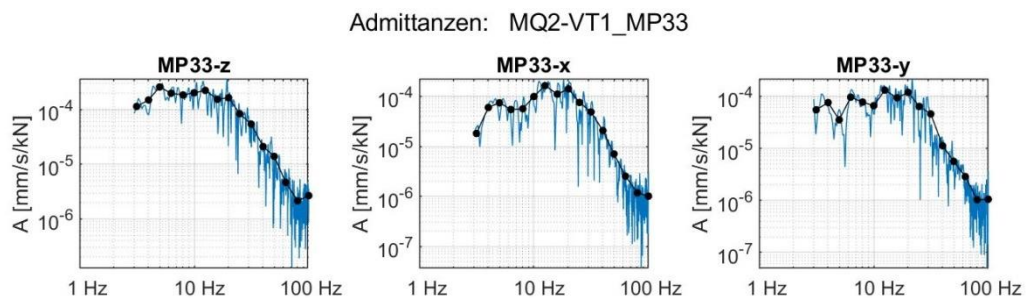


Abbildung 9-283: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

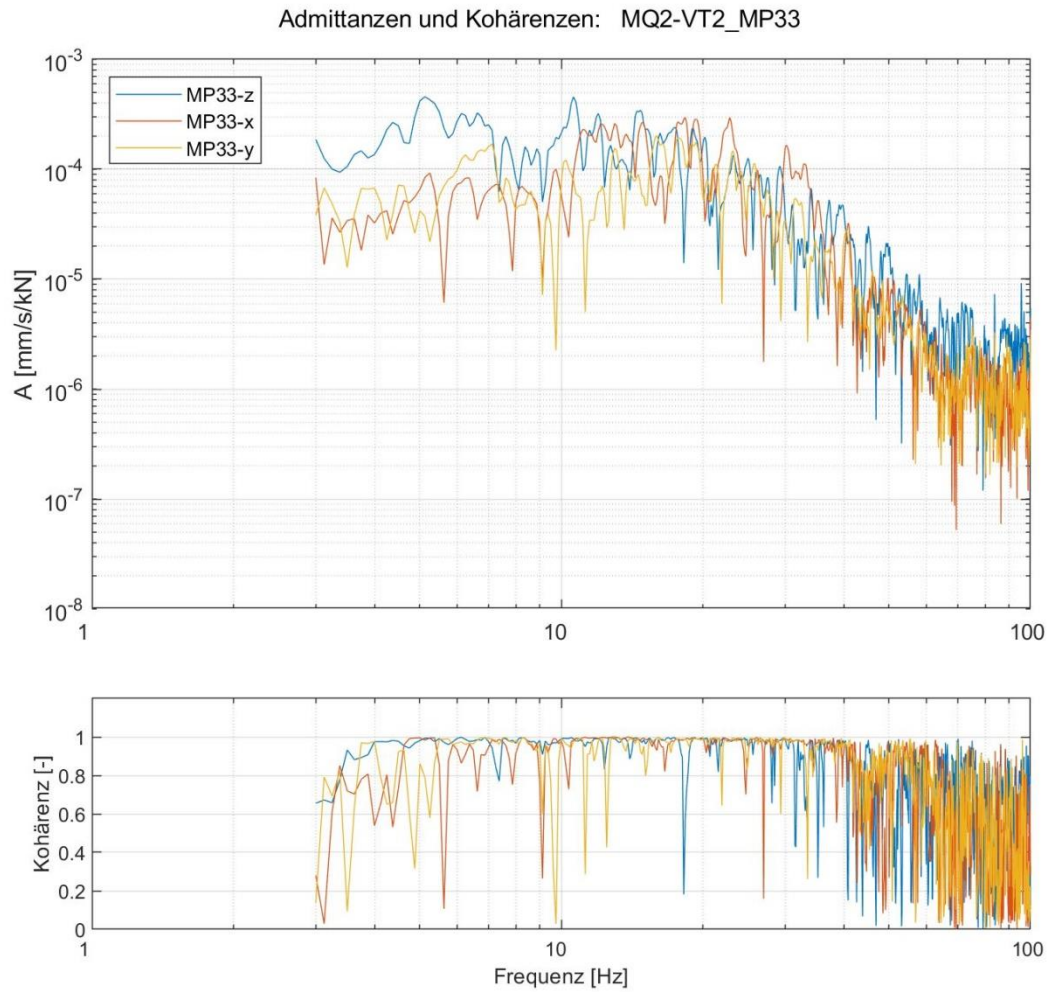


Abbildung 9-284: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

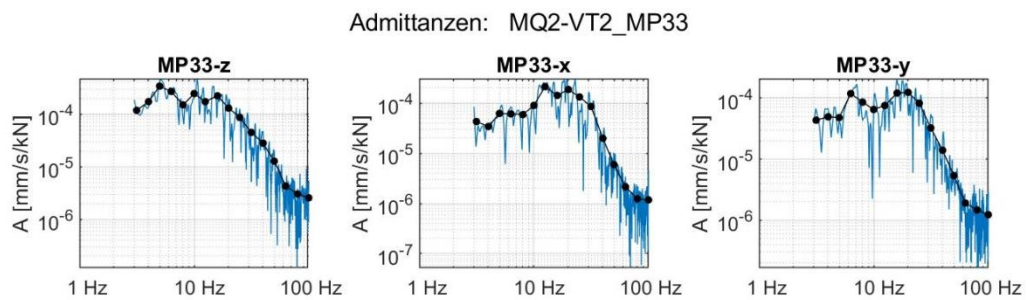


Abbildung 9-285: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)



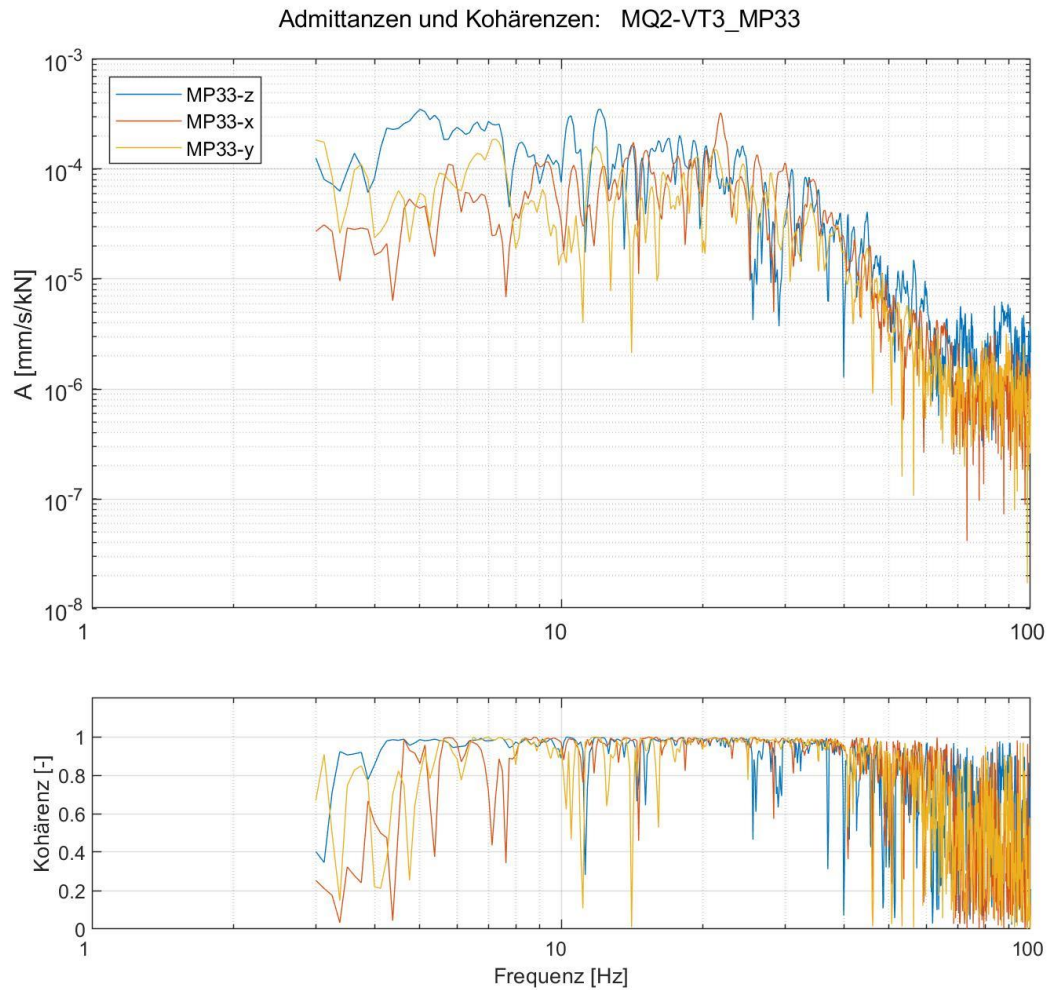


Abbildung 9-286: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

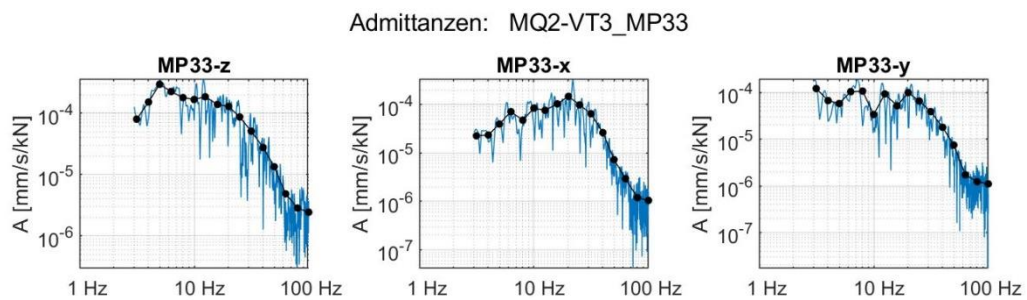


Abbildung 9-287: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)



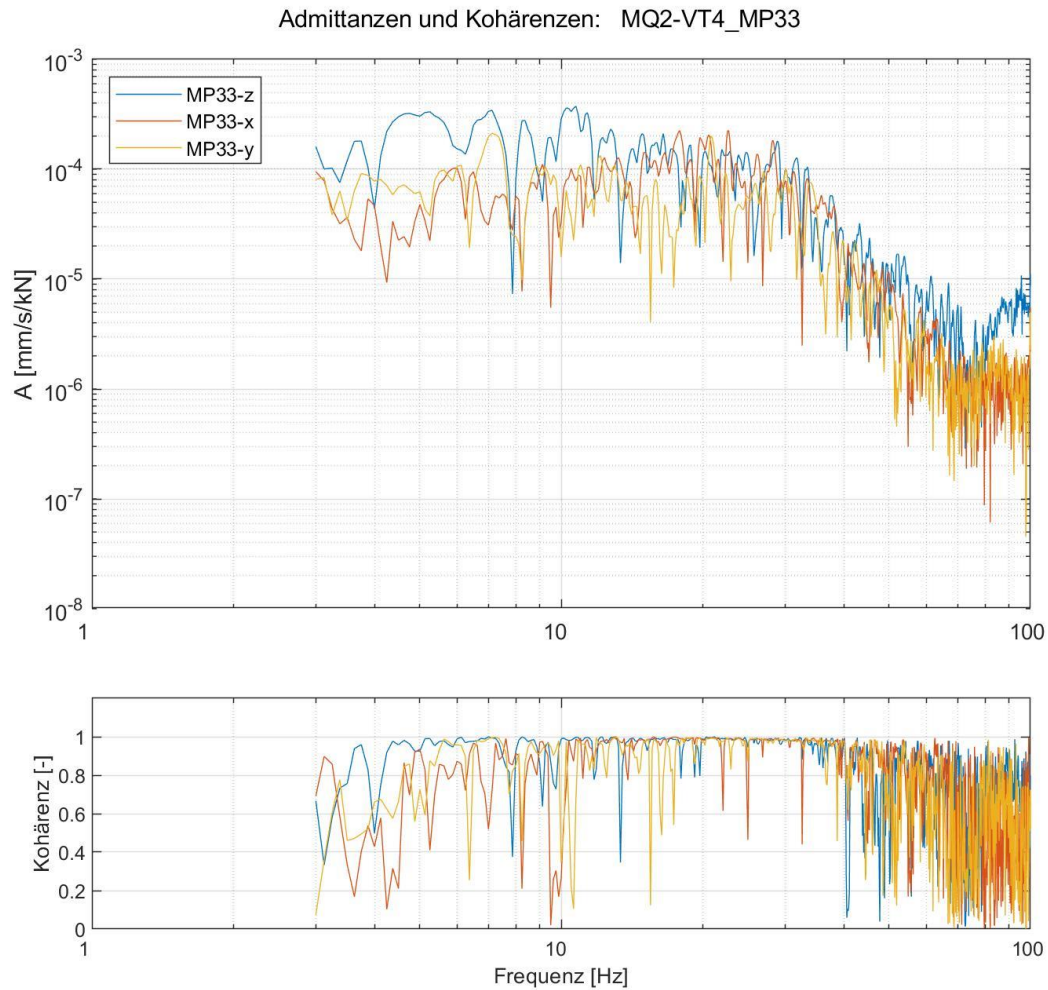


Abbildung 9-288: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

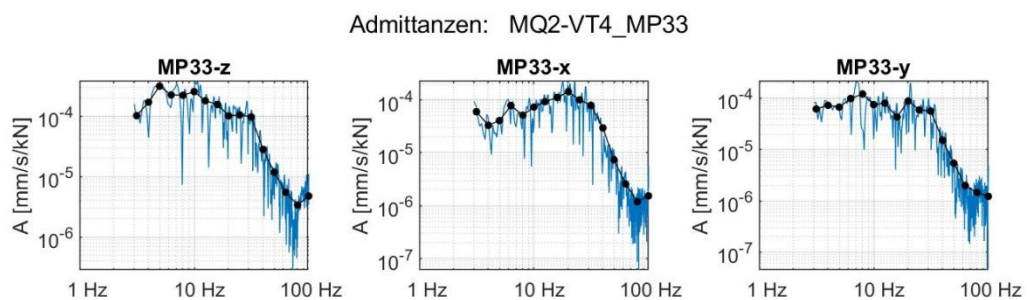


Abbildung 9-289: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)

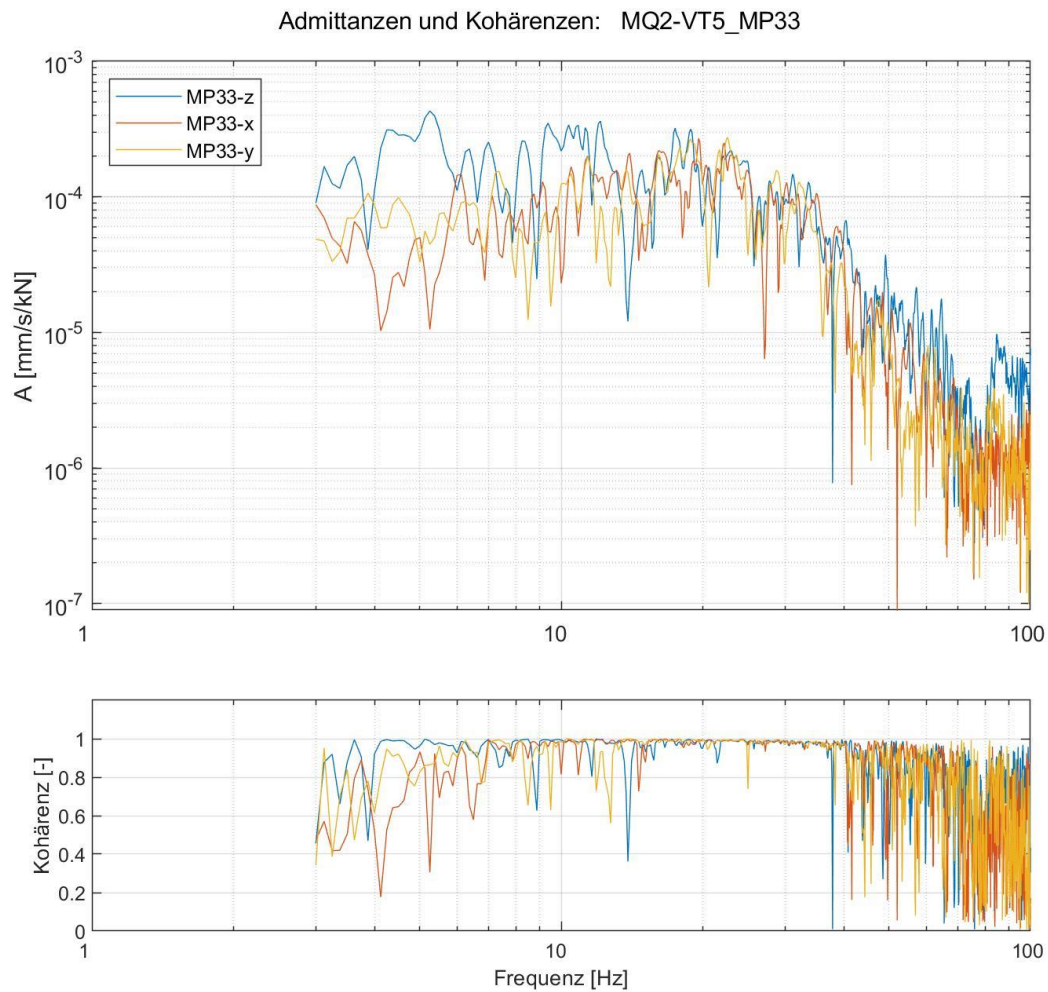


Abbildung 9-290: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

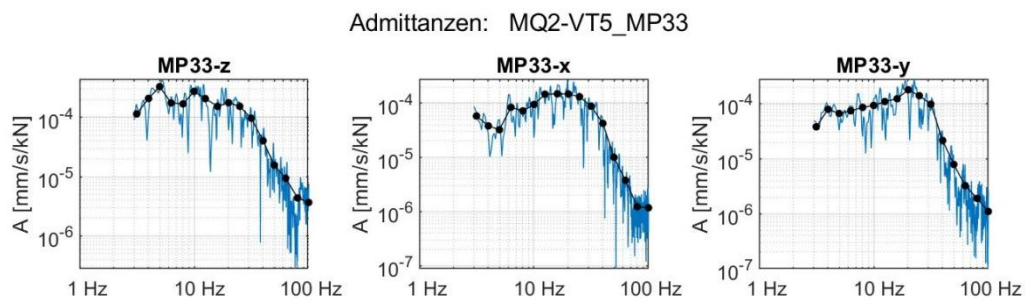


Abbildung 9-291: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

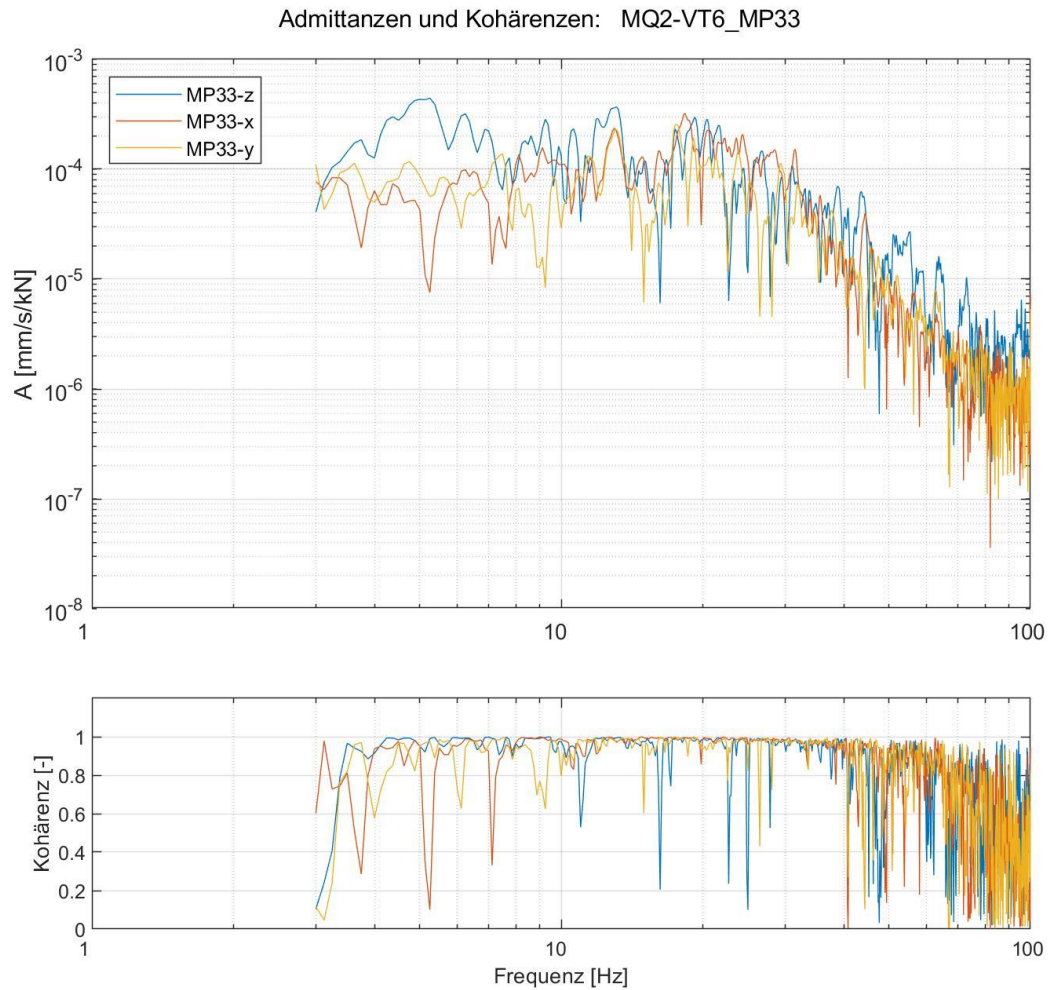


Abbildung 9-292: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

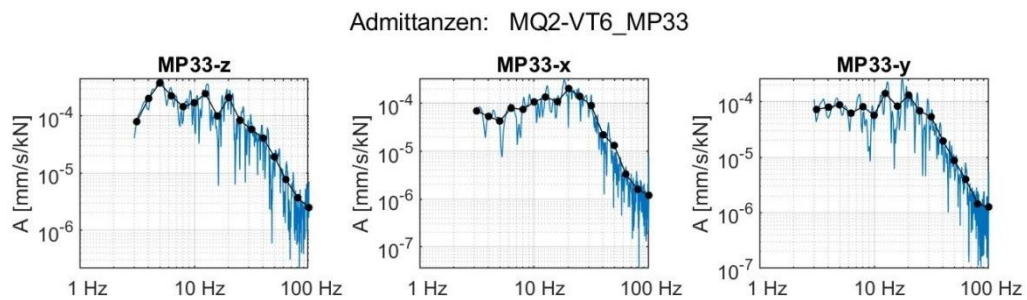


Abbildung 9-293: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

## Gebäudeadmittanzen bei Anregung mit VibroTruck am MQ3

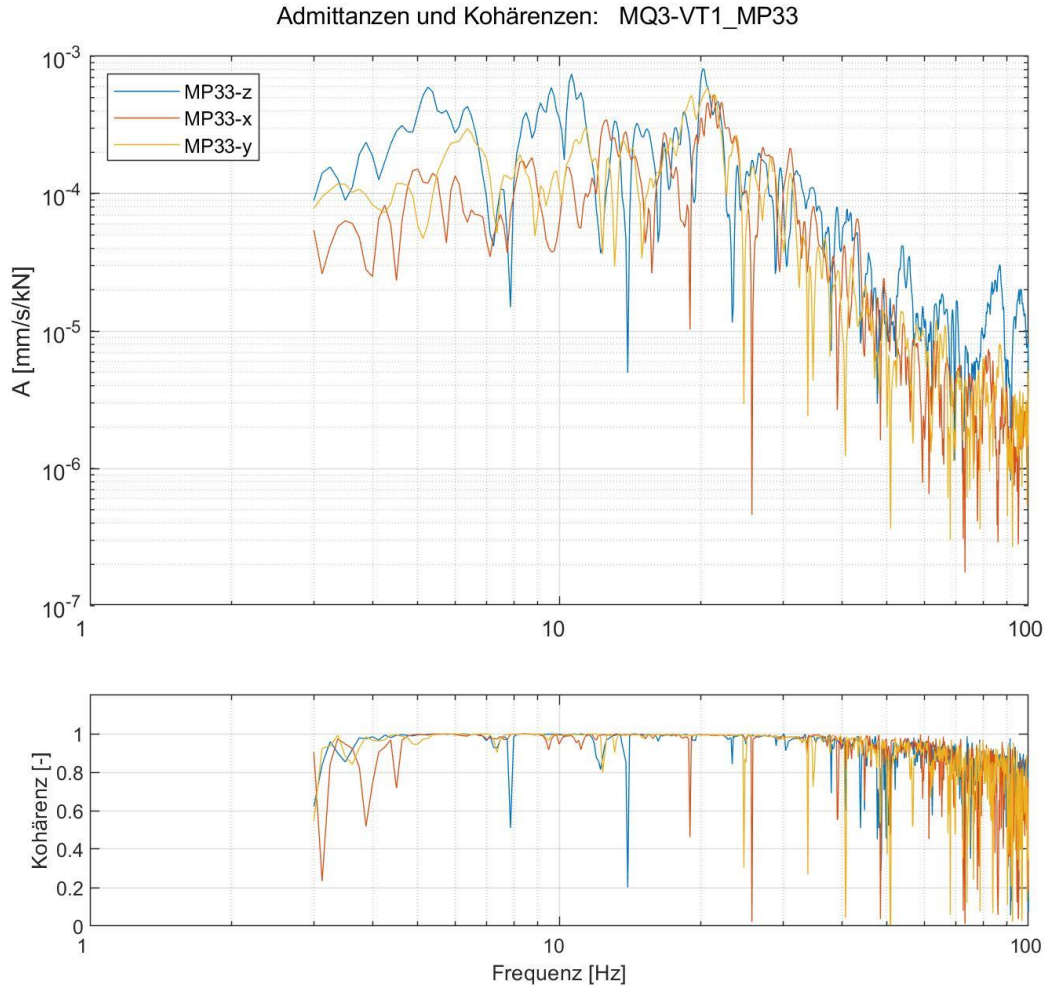


Abbildung 9-294: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

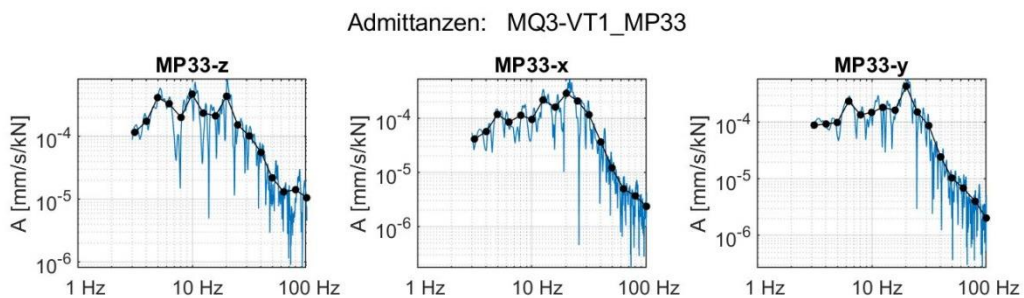


Abbildung 9-295: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)



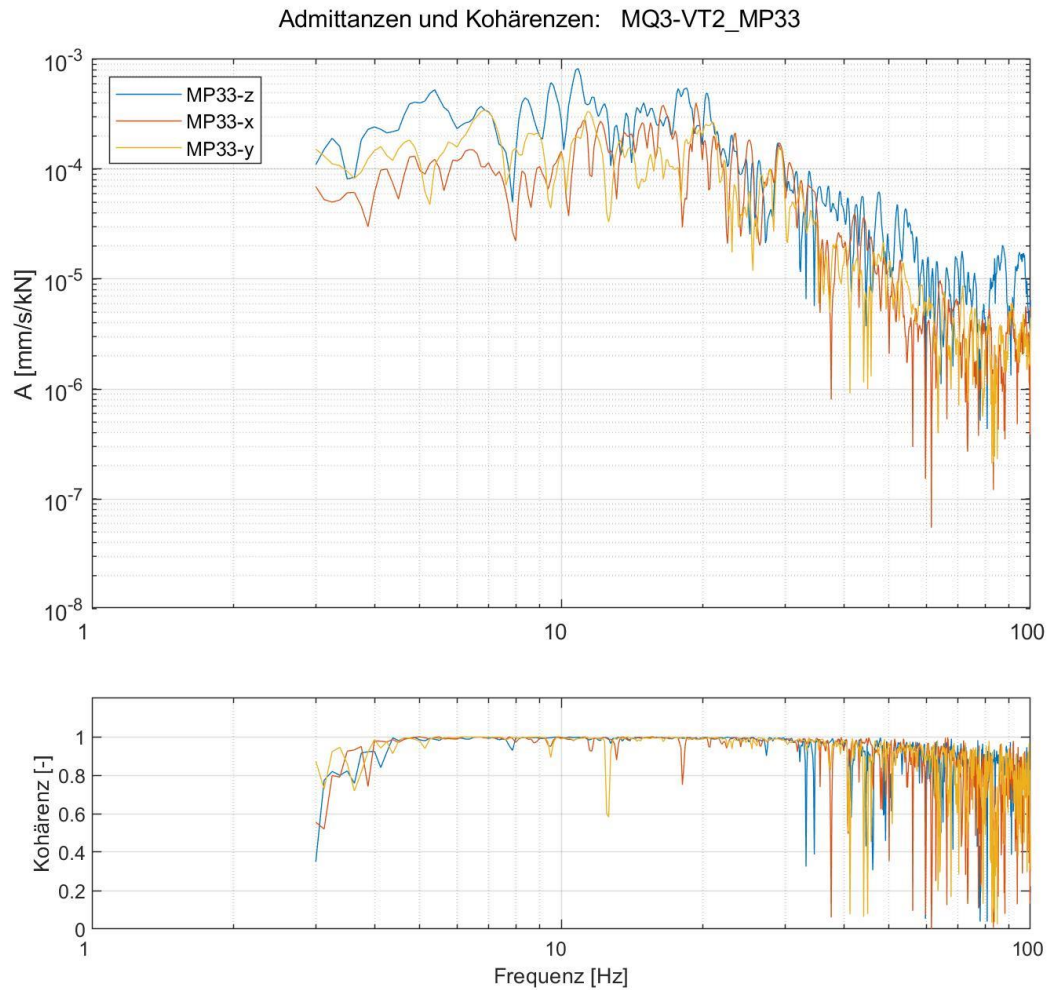


Abbildung 9-296: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

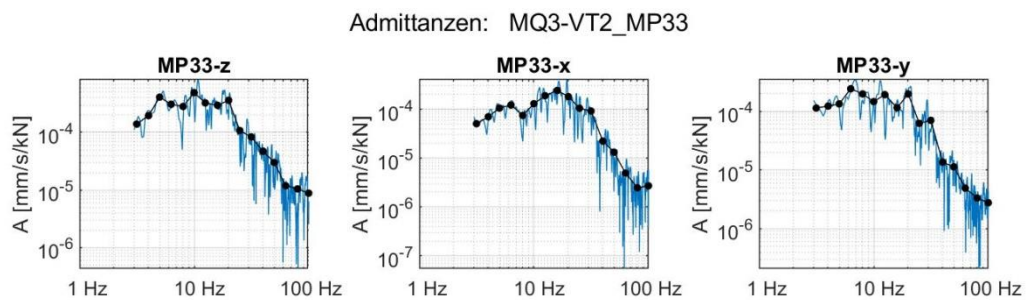


Abbildung 9-297: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ3-VT3\_MP33

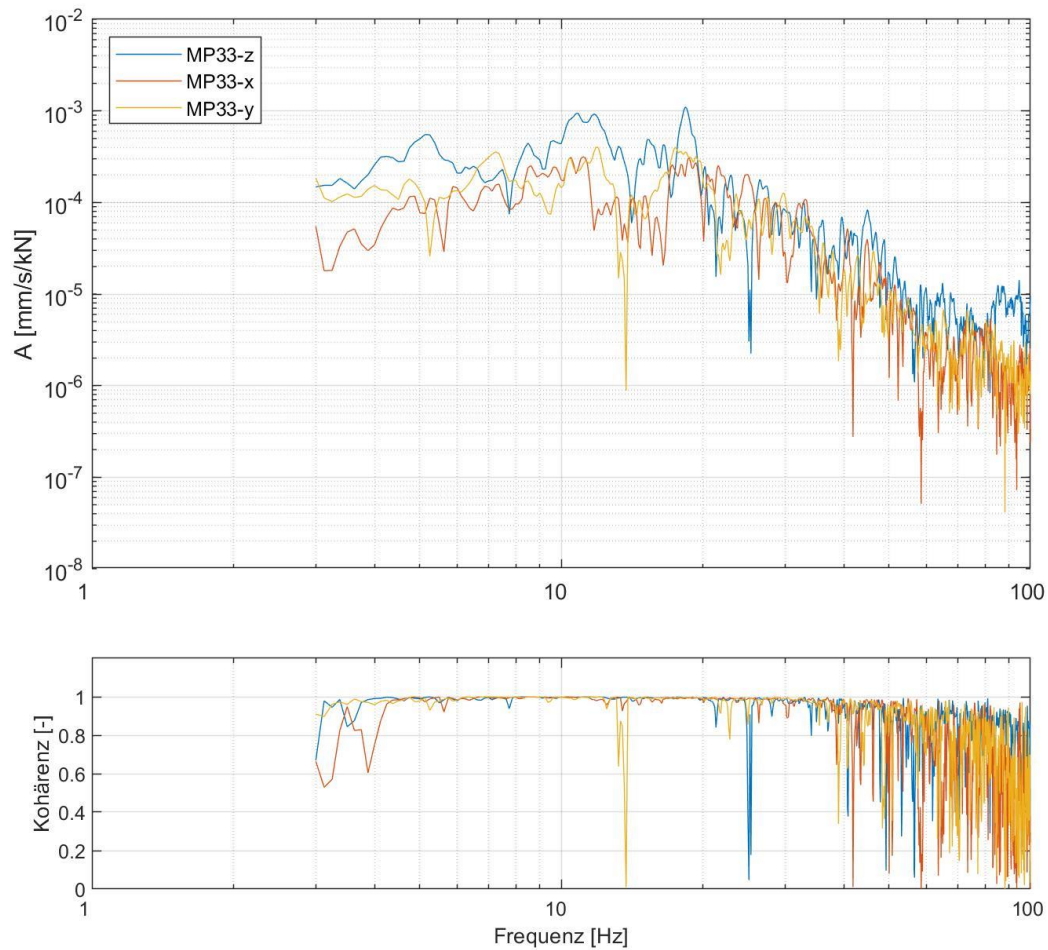


Abbildung 9-298: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

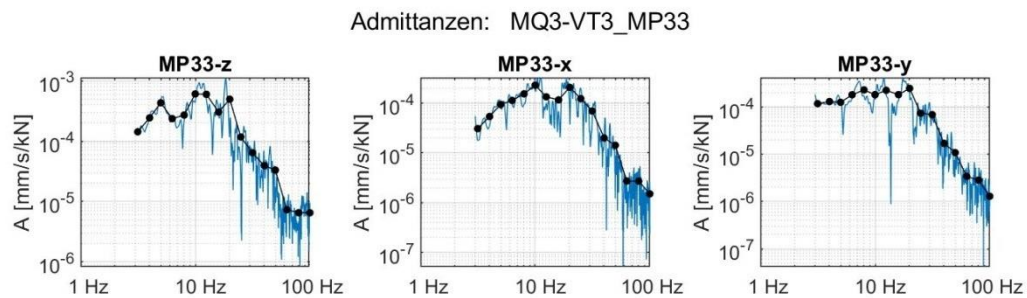


Abbildung 9-299: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)

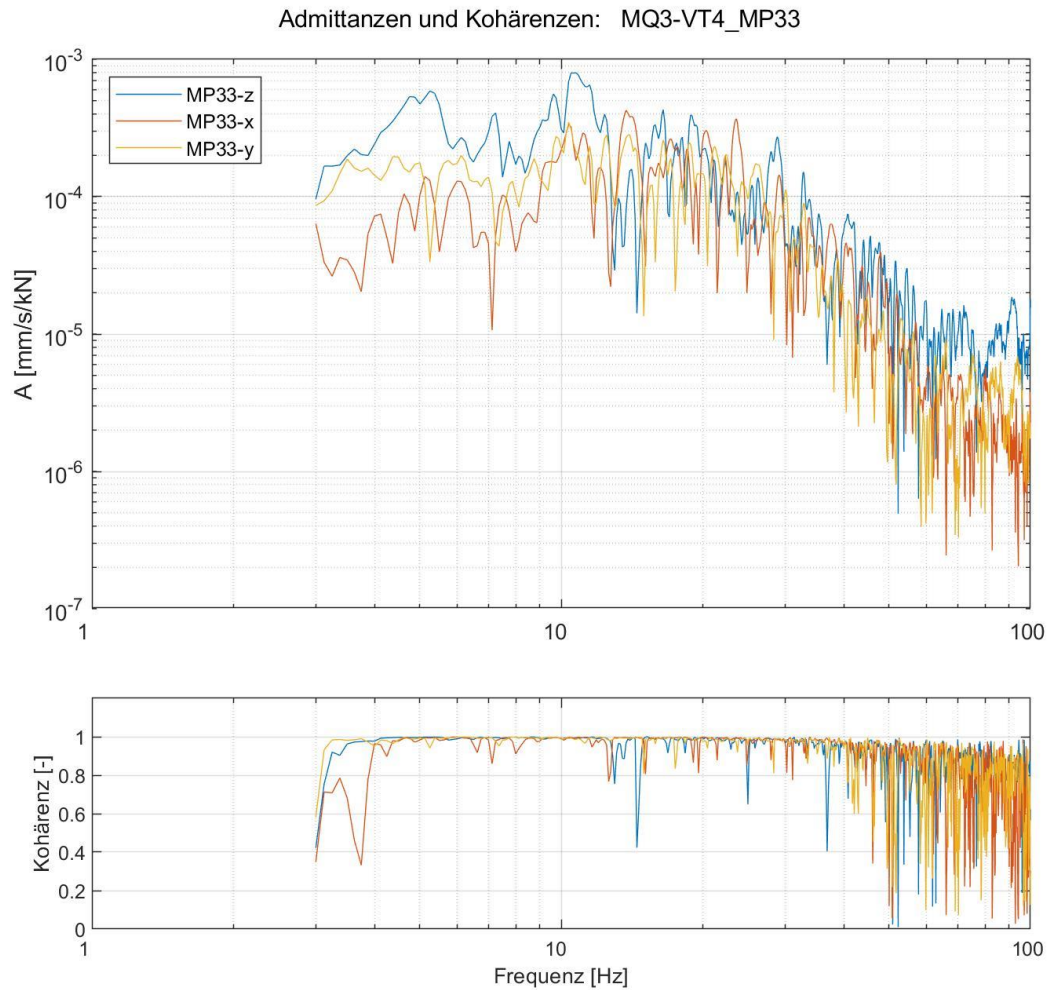


Abbildung 9-300: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

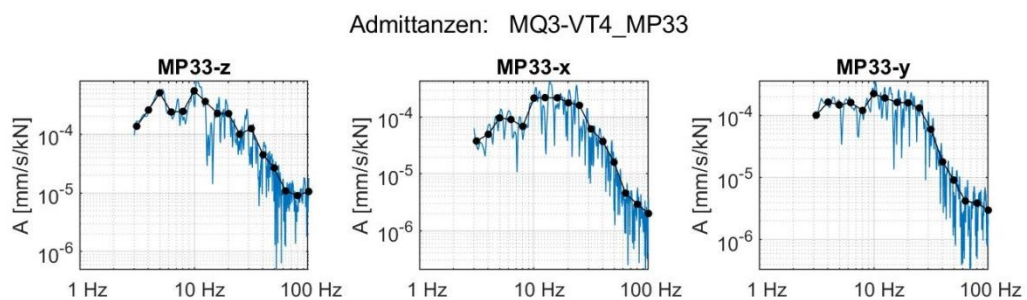


Abbildung 9-301: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)

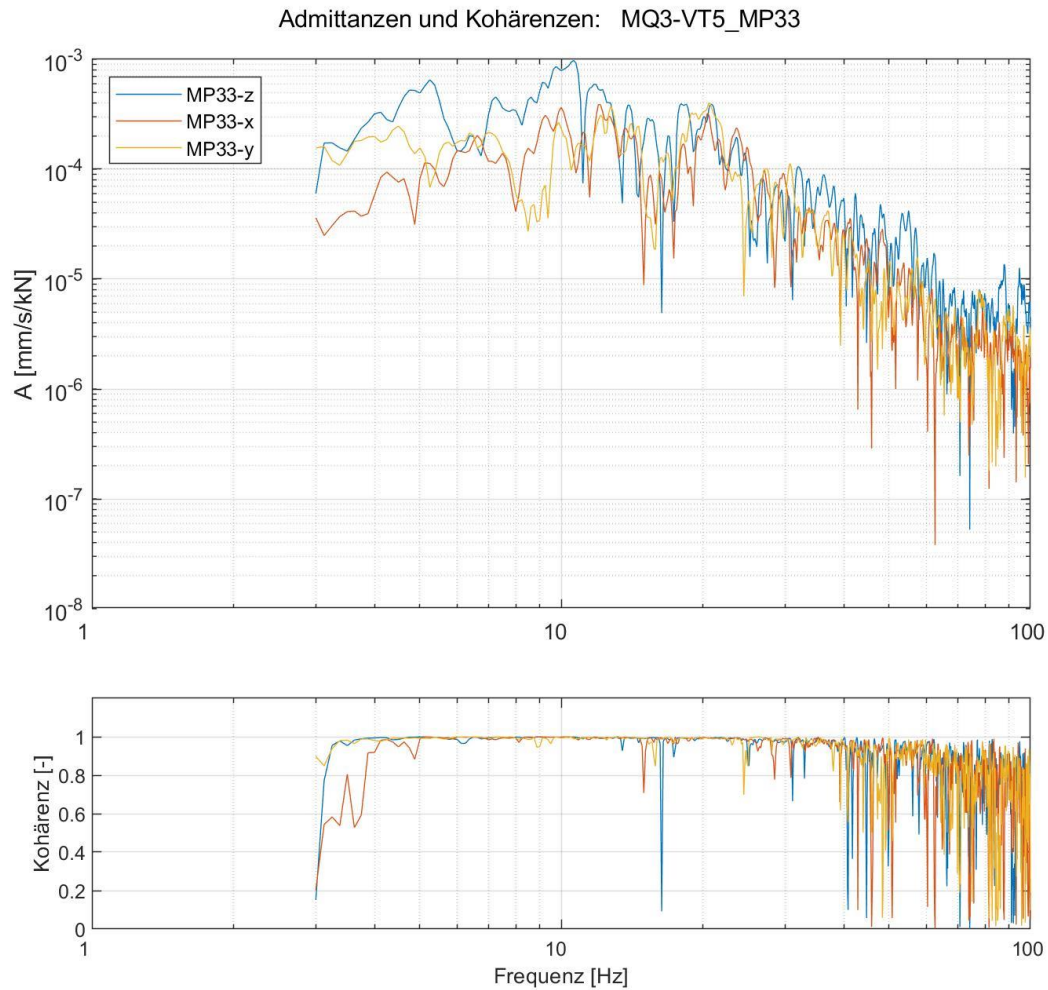


Abbildung 9-302: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

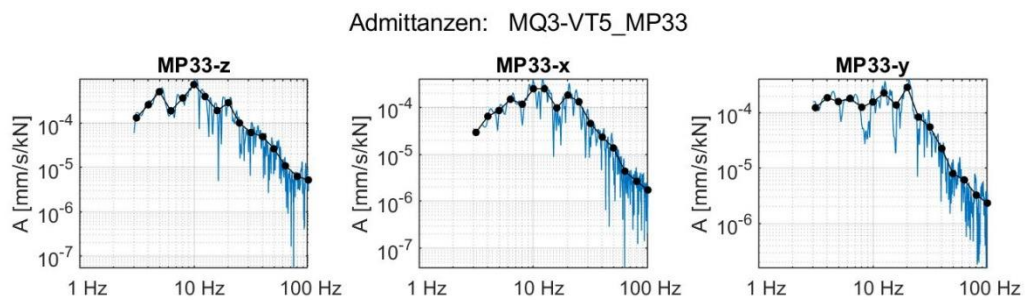


Abbildung 9-303: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)



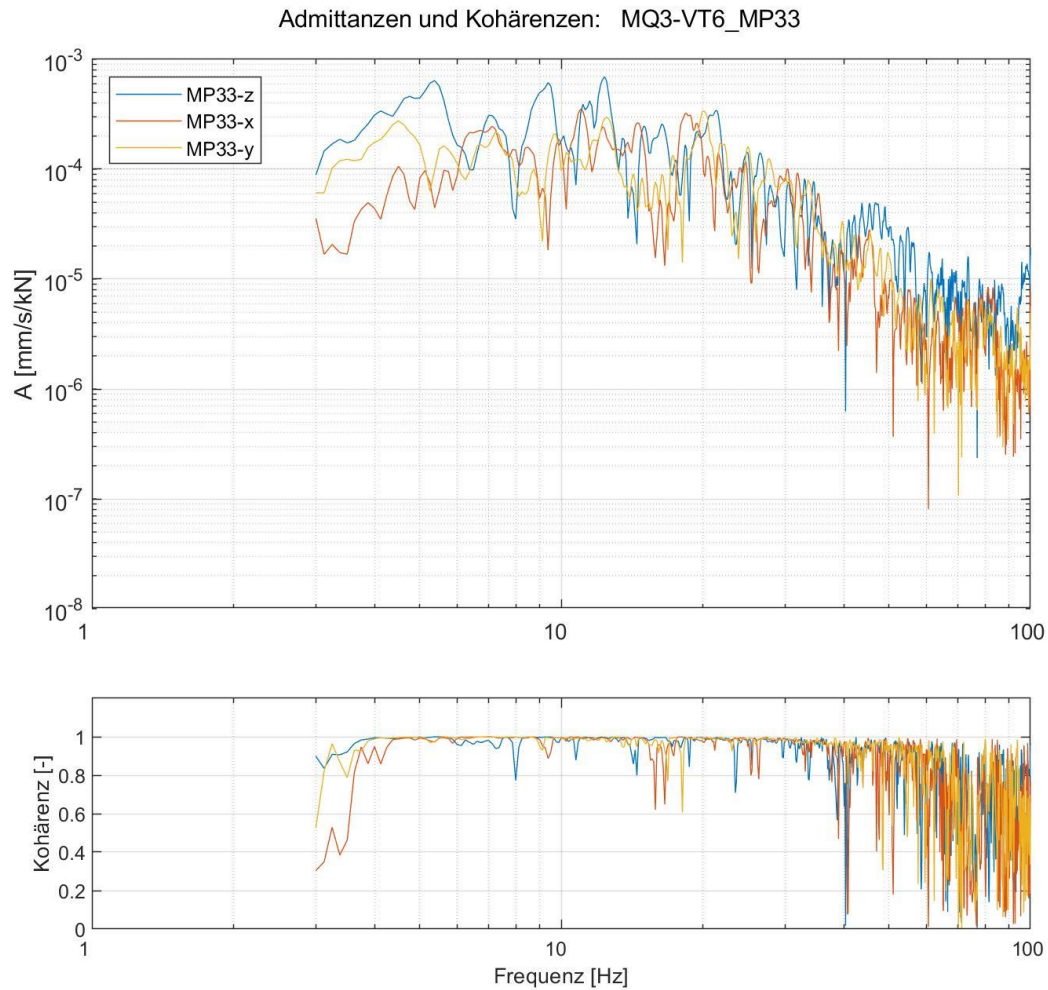


Abbildung 9-304: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

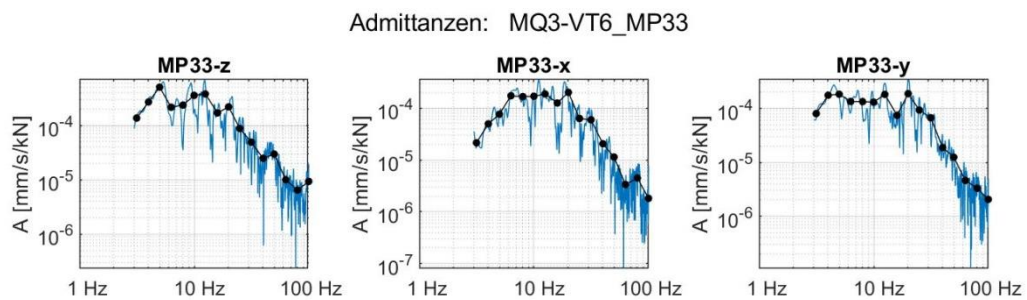


Abbildung 9-305: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

### 9.8 Ergebnisse der Bohrlochadmittanzen MP30

Die Admittanzen zu dem Messpunkt MP30 (Bohrloch) wurden auf Grundlage der Anregungen des VibroTrucks am Messquerschnitt MQ4 berechnet.

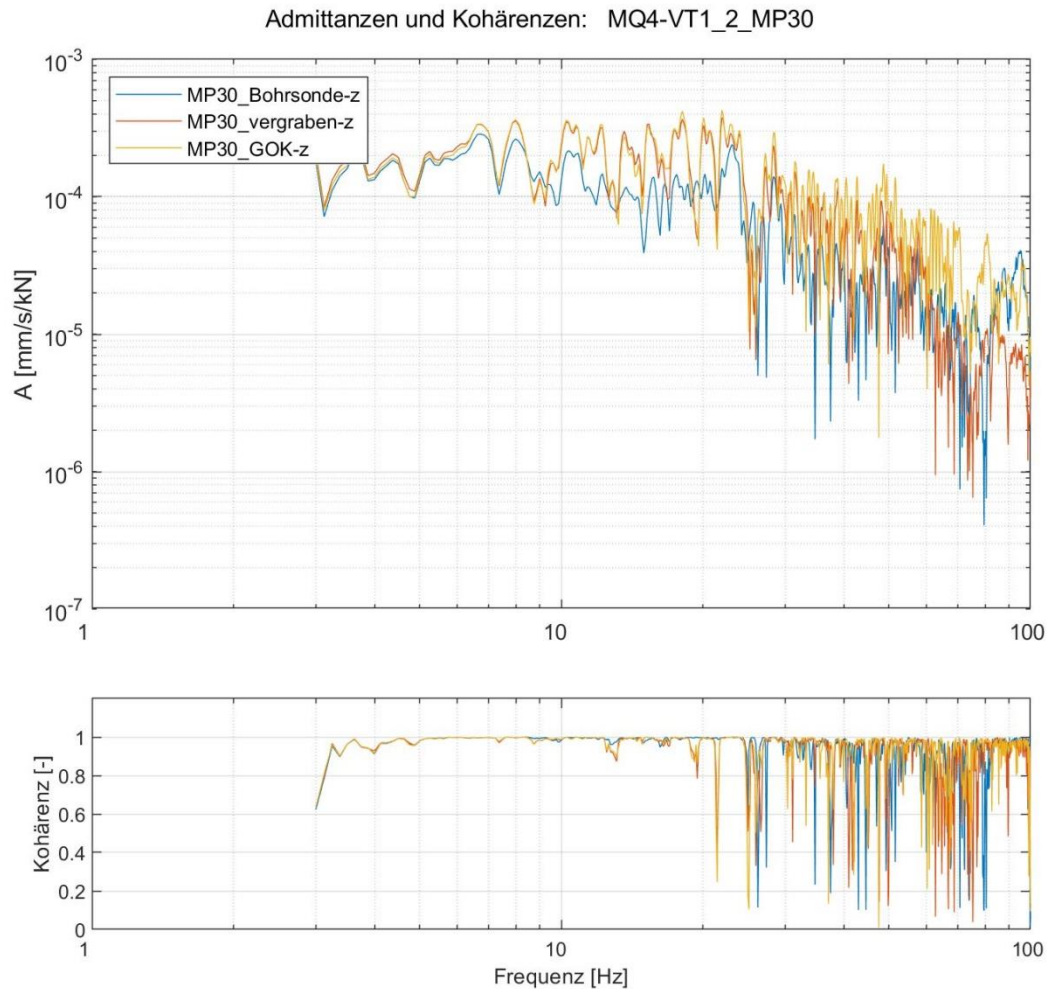


Abbildung 9-306: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT1)

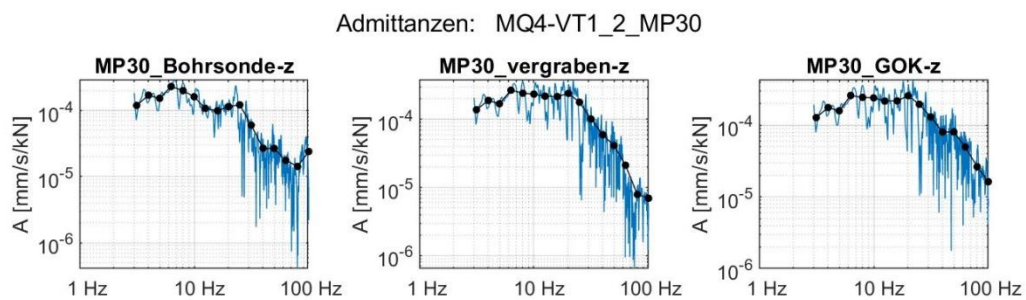


Abbildung 9-307: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT1)

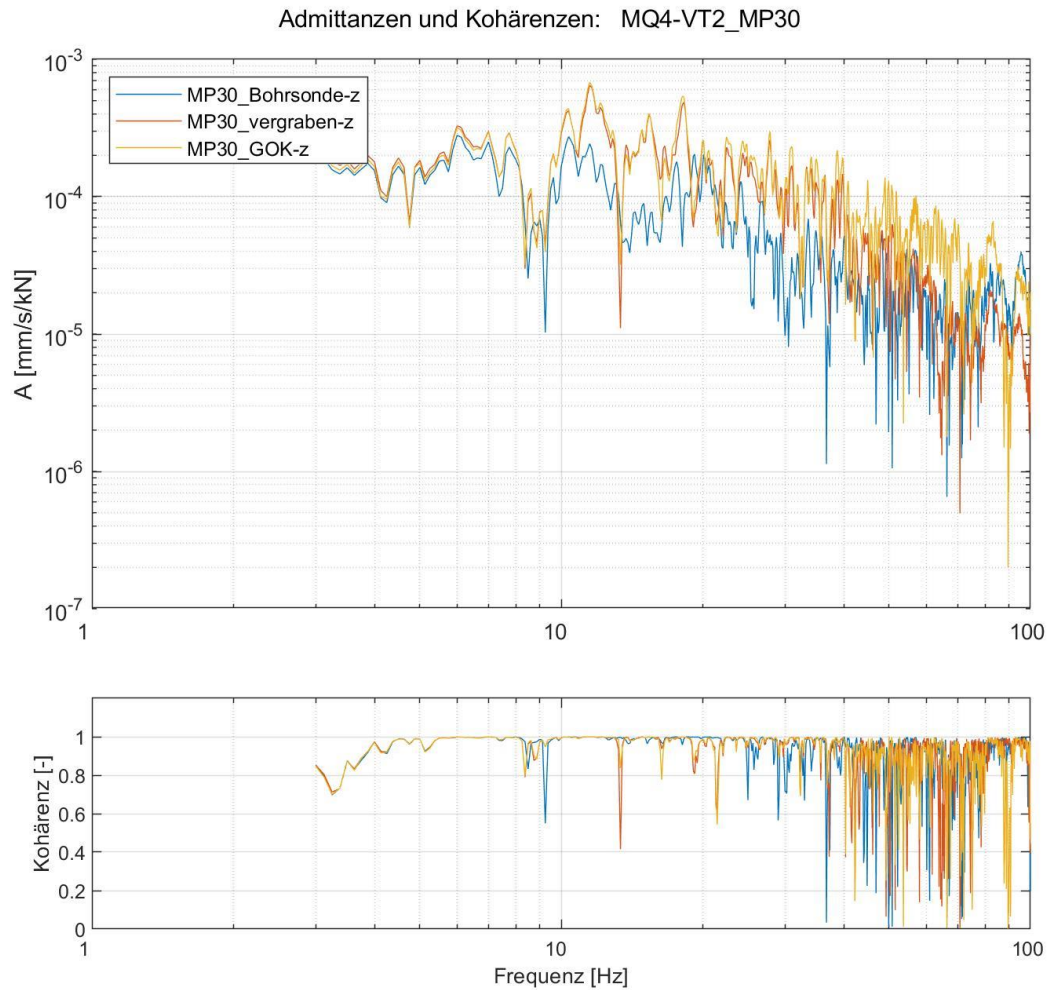


Abbildung 9-308: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT2)

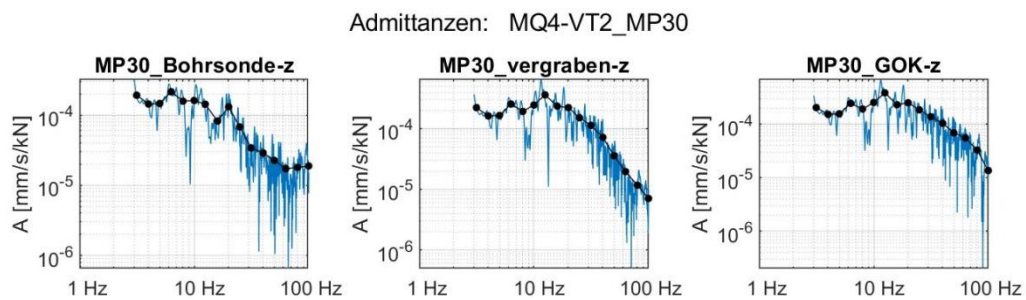


Abbildung 9-309: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT2)

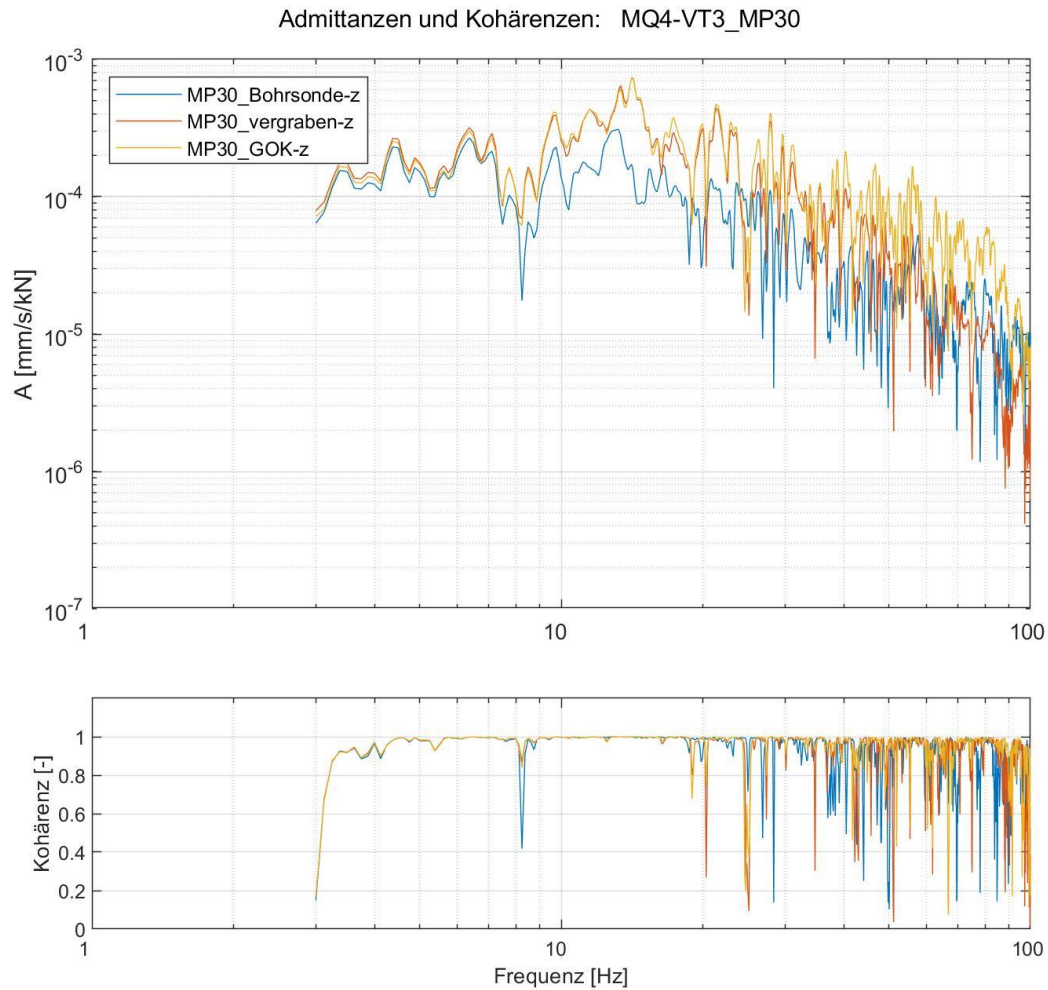


Abbildung 9-310: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT3)

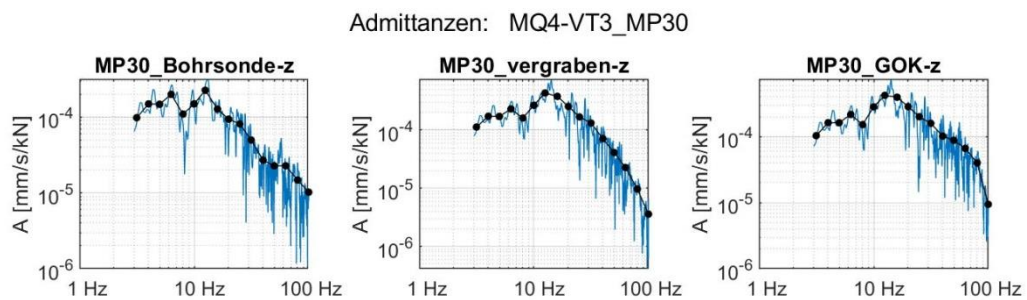


Abbildung 9-311: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT3)



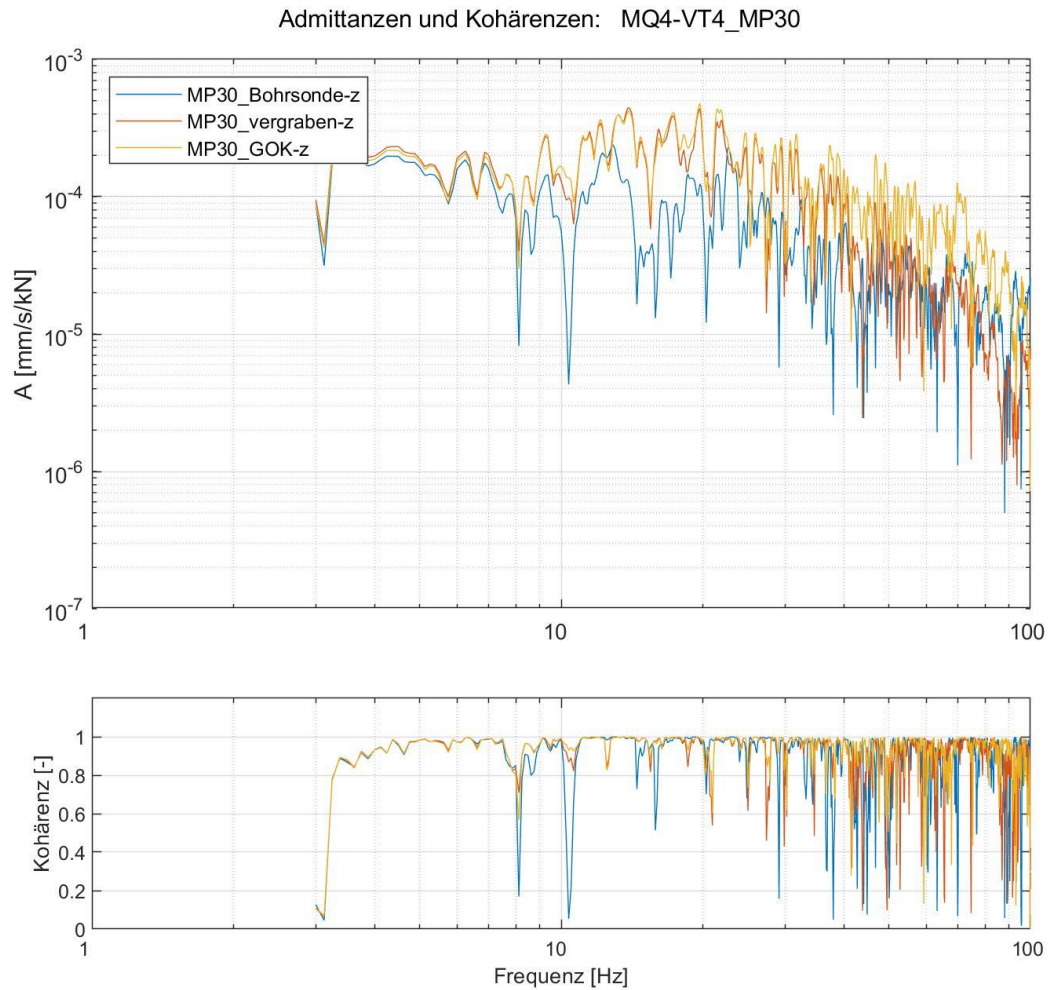


Abbildung 9-312: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT4)

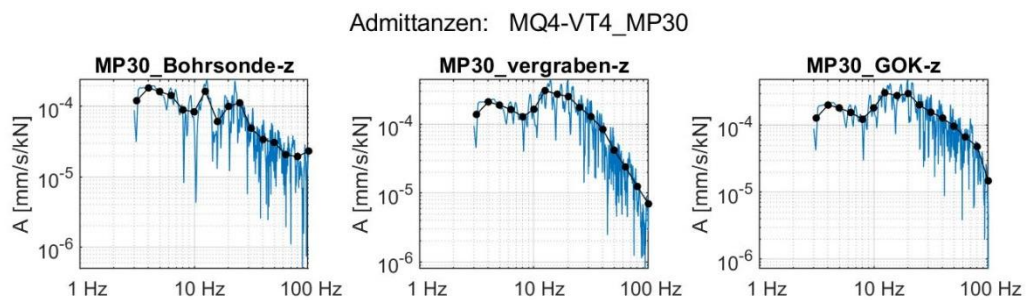


Abbildung 9-313: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT4)

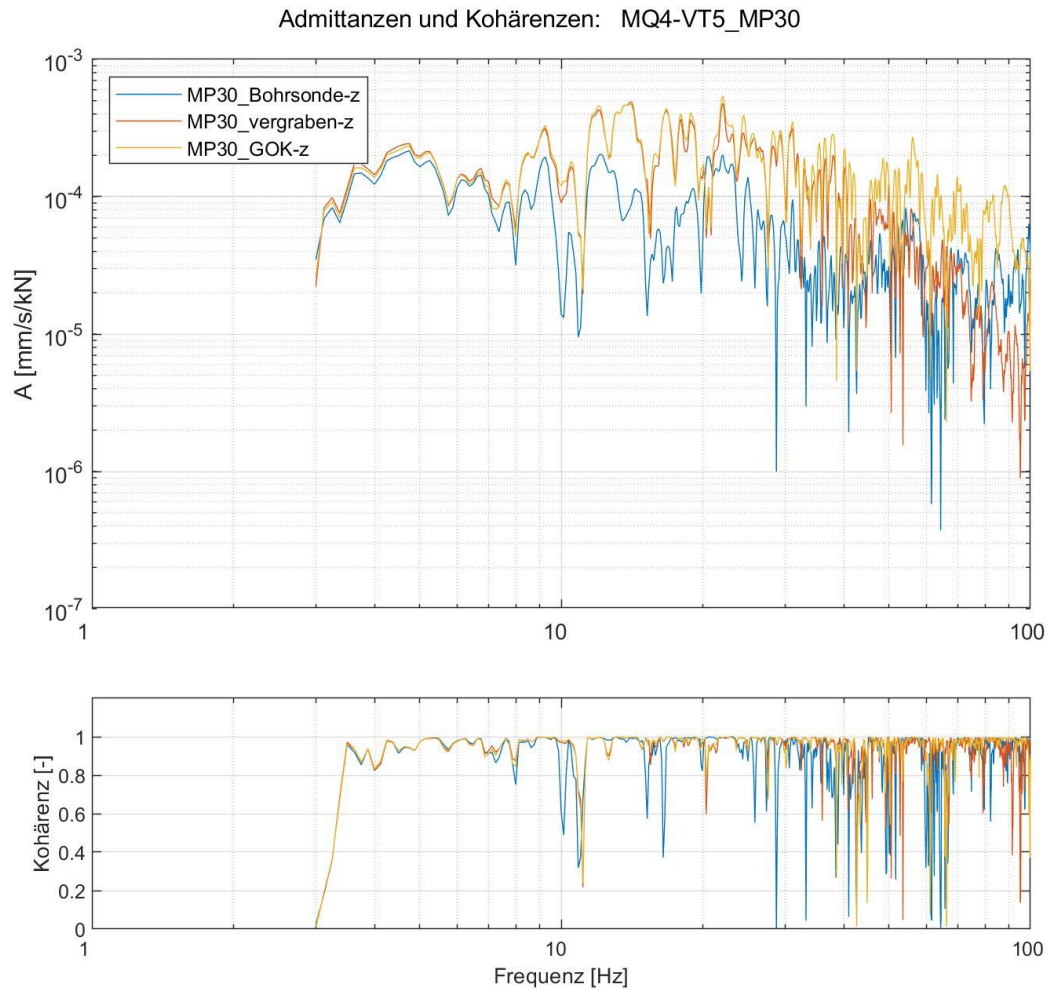


Abbildung 9-314: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT5)

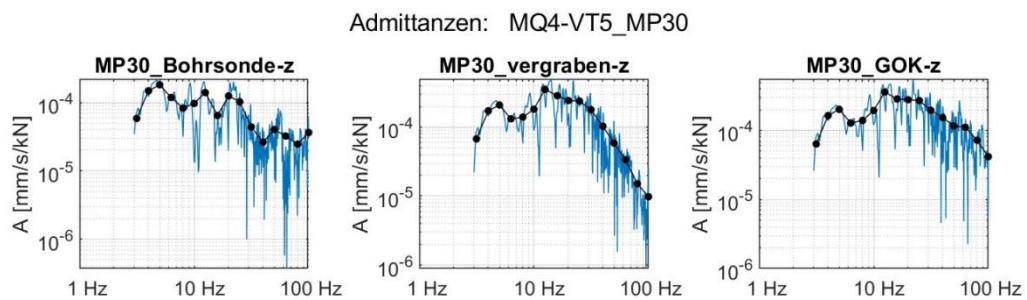


Abbildung 9-315: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT5)

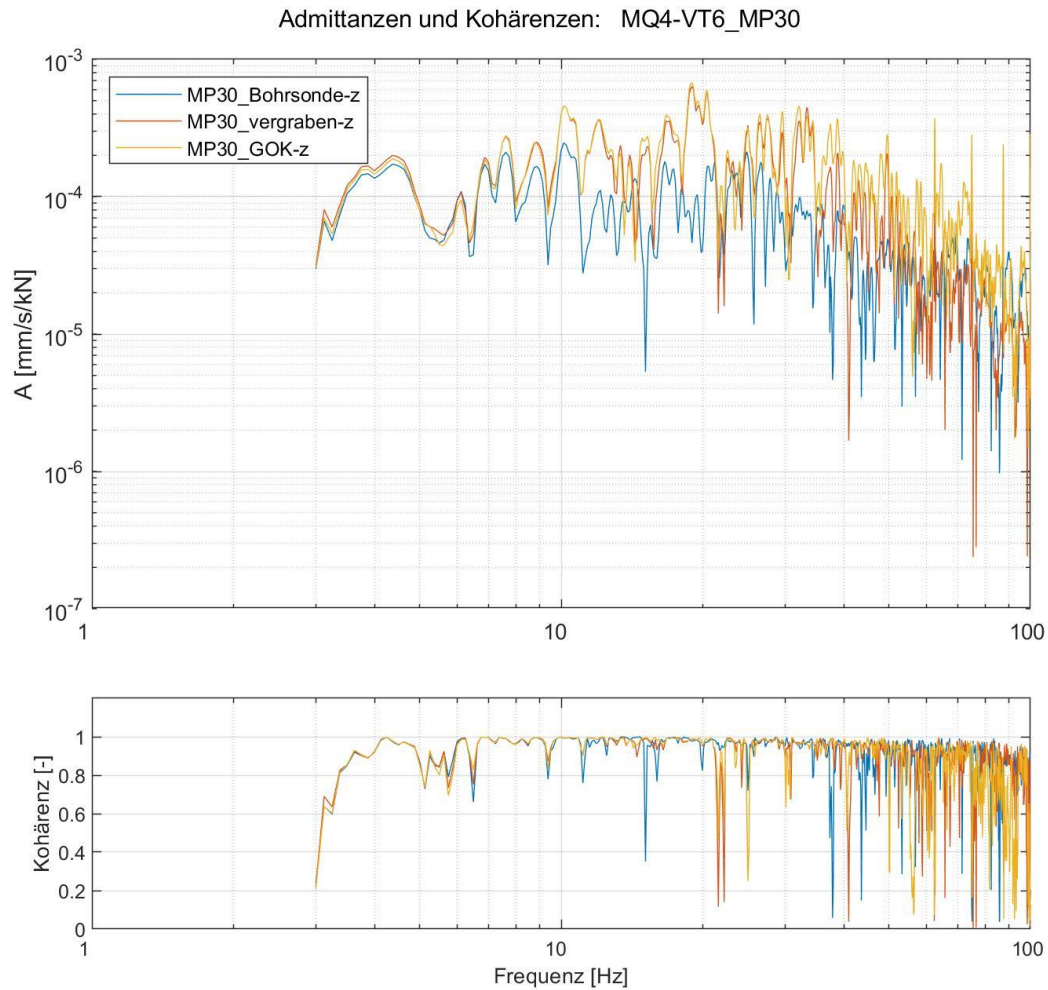


Abbildung 9-316: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT6)

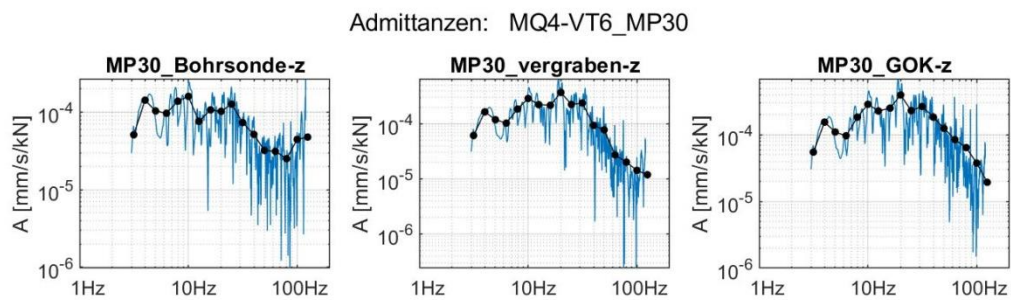


Abbildung 9-317: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT6)

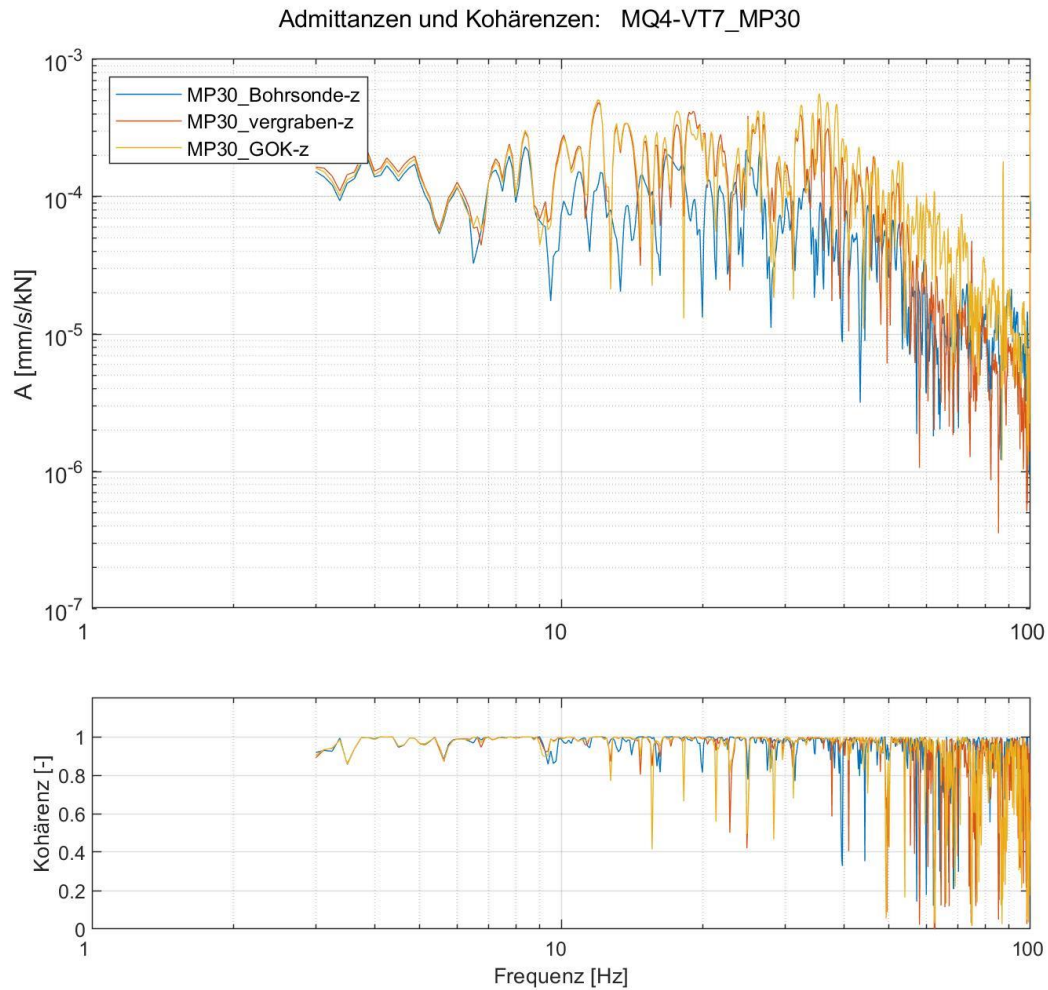


Abbildung 9-318: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung VT7)

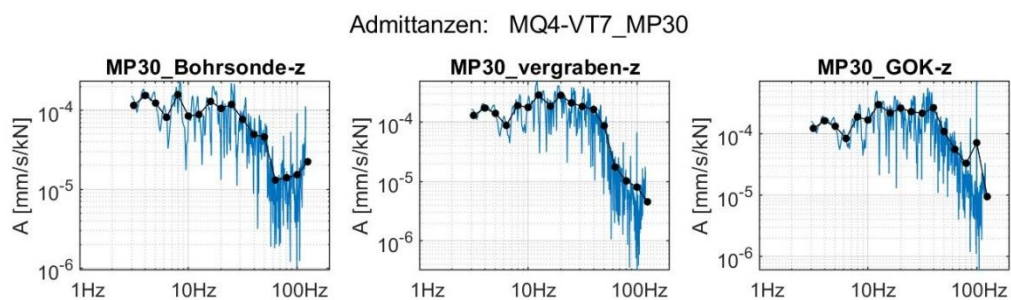


Abbildung 9-319: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung VT7)



## 9.9 Zusammenfassung der angesetzten Übertragungsfunktionen von GOK zum Messpunkt

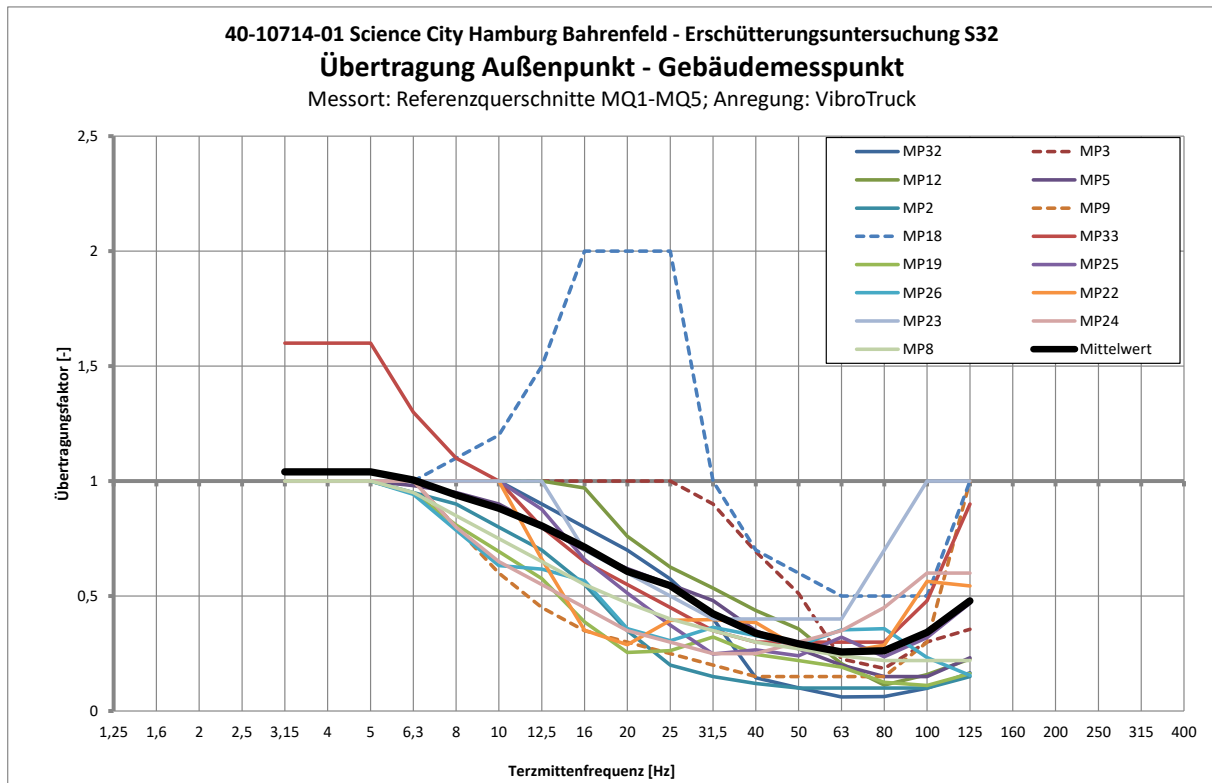


Abbildung 9-320: Messtechnisch ermittelte Gebäude-/Fundamentübertragungsfunktionen und deren Mittelwert

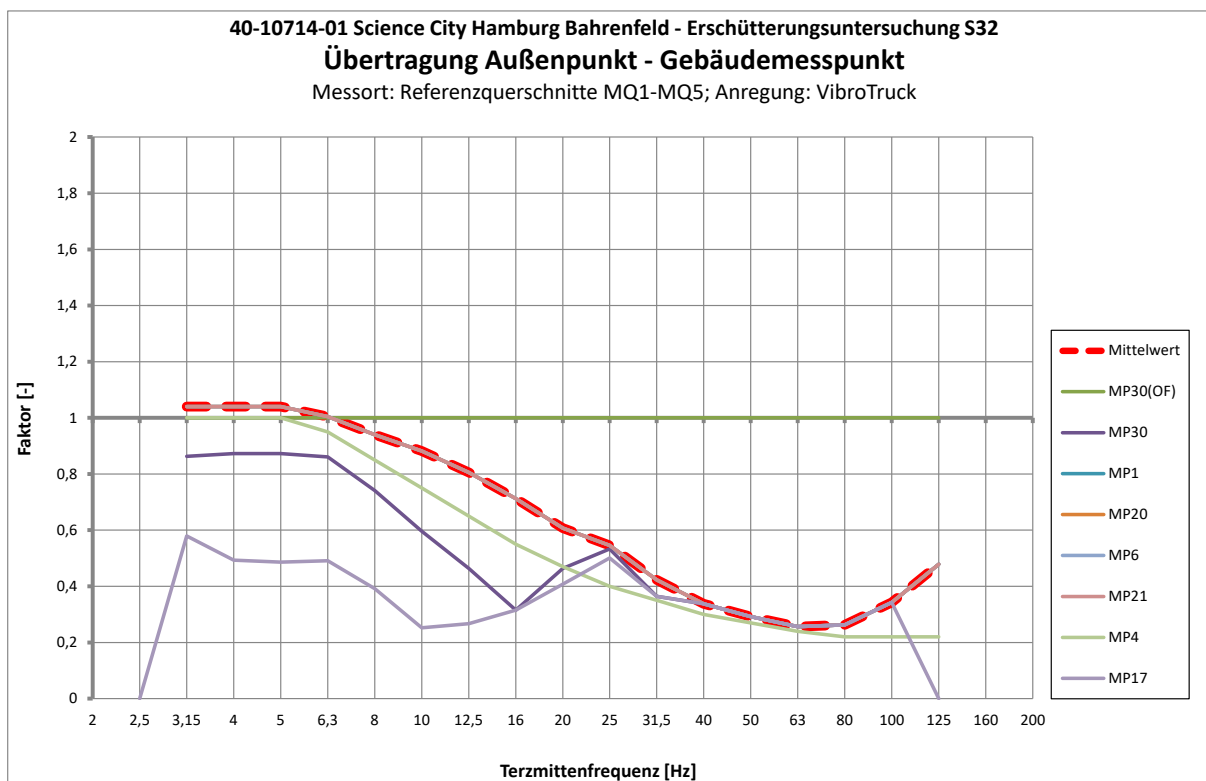


Abbildung 9-321: Ermittelte Übertragungsfunktionen unter Berücksichtigung der ambienten Messung

## 10 Anlage III: Dokumentation der DYNPACT® Messungen

### 10.1 Allgemeine Angaben der Messungen

Die Übertragungsadmittanz-Messungen fanden am 25.05. - 28.05.2021 in Hamburg an der Königsstraße statt bzw. am Forschungscampus Bahrenfeld. Dazu wurden infolge künstlicher Impulsanregung (DYNPACT®) Schwingungsmessungen in jeweils 2 Bohrlöchern und einem Oberflächenpunkt durchgeführt.

<b>Messdatum</b>	25.05. - 28.05.2021
<b>Messpersonal</b>	[REDACTED]
<b>Wetter</b>	wechselhaft mit Regen

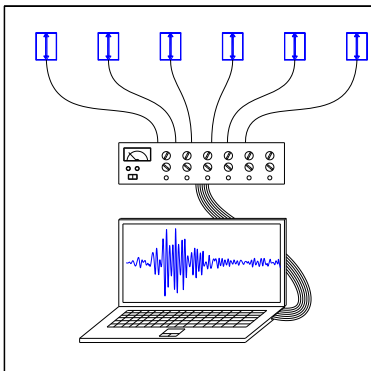
**Tabelle 10-1: Allgemeine Angaben zur Messung**

Zur Messung der Schwinggeschwindigkeiten wurde folgendes Messequipment verwendet:

<b>Geschwindigkeitssensoren</b>	Geophone 1 – 315 Hz gemäß DIN 45669 Sensornummer gemäß Tabelle „Übersicht der Messpunkte“
<b>Messverstärker</b>	MSE, 8 Kanal, SN: 20011103 (V12) KAM350 DMS, SN:07164a0023 (V43)
<b>A/D Wandlerkarte</b>	NI USB-6210, 16Bit
<b>Messrechner</b>	Panasonic FZ-55, SN:0ATCA07808
<b>Letzte Kalibrierung der Messkette</b>	03/2020 (Geophone, Verstärker)
<b>Messsoftware</b>	Meda_AD Version 2019-1

**Tabelle 10-2: Verwendetes Messequipment**

An den Messquerschnitten MQ1-MQ4 waren für die DYNPACT® Messungen folgende Messparameter eingestellt und die Ankopplung der Geophone erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 [5].

<b>Anzahl Messkanäle</b>	4	 <p>Sensoren (Geophone) nach DIN 45669, 1-16 Kanäle</p> <p>Signalkonditionierer und Verstärker nach DIN 45669, Messbereich: <math>v = 0,1\mu\text{m/s} - 500\text{mm/s}</math></p> <p>Datenverarbeitung: PC mit A/D-Wandlerkarte</p>
<b>Bandbreite</b>	1000 Hz	
<b>Abtastfrequenz</b>	2560 Hz	
<b>Antialiasing</b>	1000 Hz	

**Tabelle 10-3: Messparameter der DYNPACT®-Messungen**

## 10.2 DYNPACT® am MQ1

### 10.2.1 Lageskizze

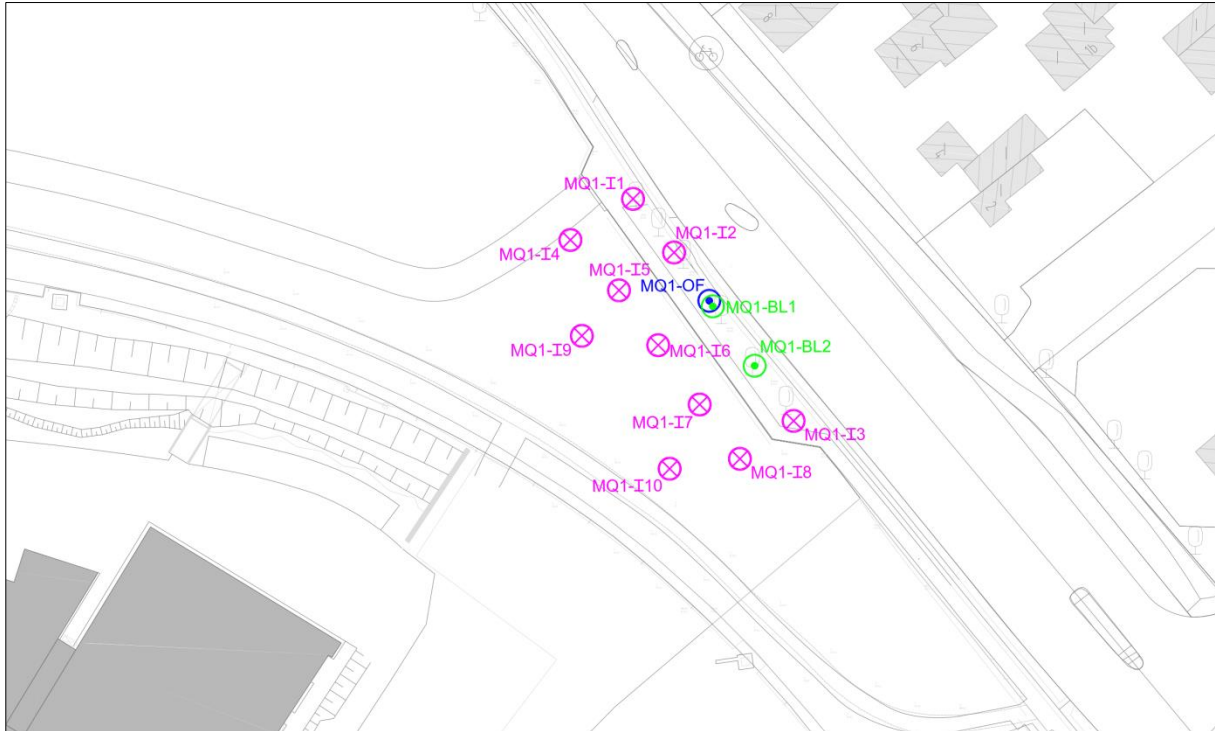


Tabelle 10-4: Lageskizze der Anregungs- und Messpunkte der DYNPACT®-Messungen am MQ1

### 10.2.2 Abstände

Sämtliche Mess- und Anregungspunkte wurden mit dem GNSS Gerät gemäß Tabelle 9-4 eingemessen und daraus die Abstände zwischen Mess- und Anregungspunkt ermittelt. Die folgende Tabelle listet die Entfernungen zwischen den Anregungspunkten mit DYNPACT® und den Bohrloch- bzw. Oberflächenmesspunkt in Metern.

Anregungspunkt Messpunkt	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10
MQ1-BL1 / MQ1-OF	20,0	9,9	20,9	23,4	14,2	10,0	14,8	23,1	20,0	25,0
MQ1-BL2	30,8	20,7	10,1	33,3	23,2	14,7	10,0	14,0	26,2	19,9

Tabelle 10-5: Entfernungen [m] der Messpunkte zu den DYNPACT® Anregungspunkten am MQ1

10.2.3 Dokumentation der Messung

Kanal	Messpunkt	Lage	Aufstell- bedingung	Sensor	Kabel	Messbereich [mm/s]
1	DYNPACT®			Kraftmessdose	BNC 24	0-350 [kN]
2	MQ1-BL1	Bohrloch	Sonde	BS5	120	+/-5
3	MQ1-BL2	Bohrloch	Sonde	BS6	120	+/-5
4	MQ1-OF1	GOK neben Bohrloch 1	Spike	138	120	+/-5

Tabelle 10-6: Messpunkte DYNPACT® am MQ1





	
MQ1-BL1	MQ1-BL2
	
MQ1-OF1-z	DYNPACT® im Einsatz am MQ1

Tabelle 10-7: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ1

Folgende Messungen mit dem DYNPACT® wurden am Messquerschnitt MQ1 durchgeführt:

Bezeichnung	Inhalt
Abklopfen	QS-Prüfung
MQ1-I1	Impact am MQ1-I1
MQ1-I2	Impact am MQ1-I2
MQ1-I3	Impact am MQ1-I3
MQ1-I4	Impact am MQ1-I4



MQ1-I5	Impact am MQ1-I5
MQ1-I6	Impact am MQ1-I6
MQ1-I7	Impact am MQ1-I7
MQ1-I8	Impact am MQ1-I8
MQ1-I9	Impact am MQ1-I9
MQ1-I10	Impact am MQ1-I10

Tabelle 10-8: Auflistung der durchgeführten Messungen am MQ1 mit DYNPACT®

10.2.4 Ergebnisse der Baugrundadmittanzen

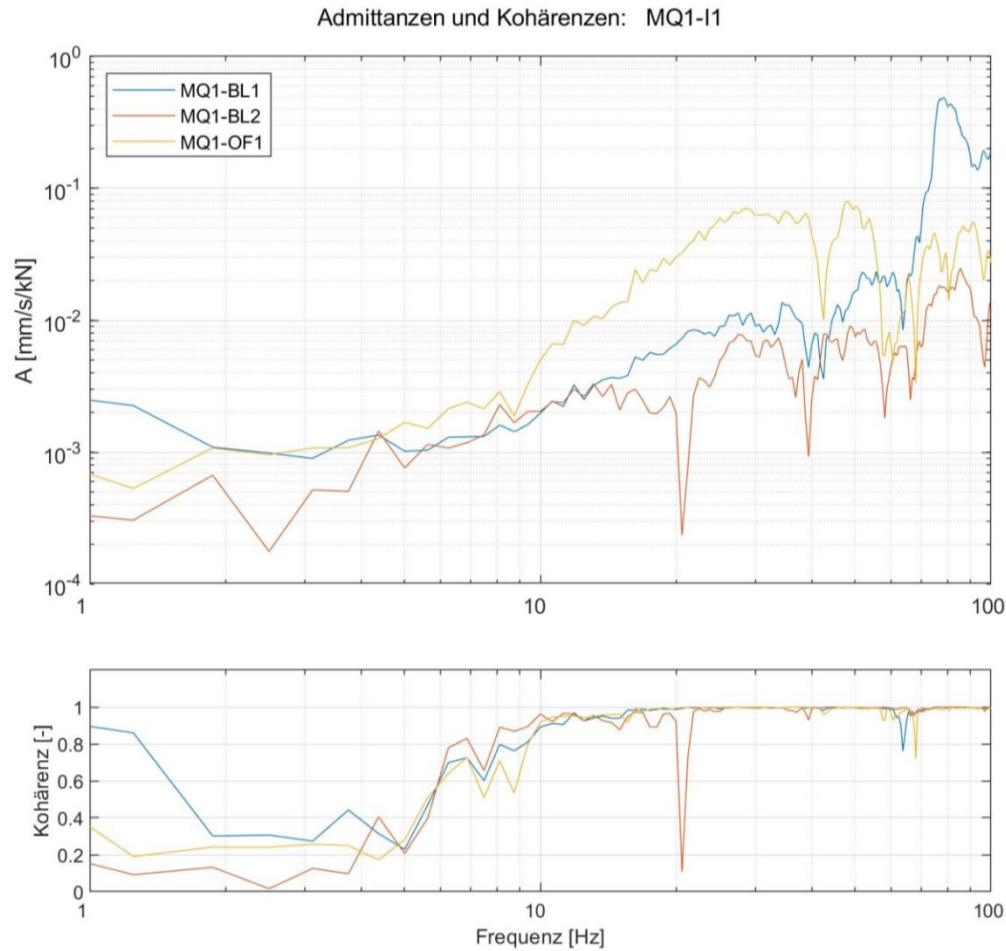


Abbildung 10-1: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I1)

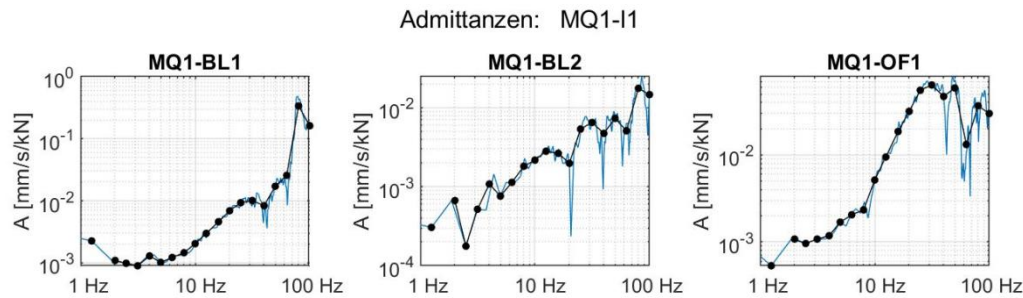


Abbildung 10-2: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I1)

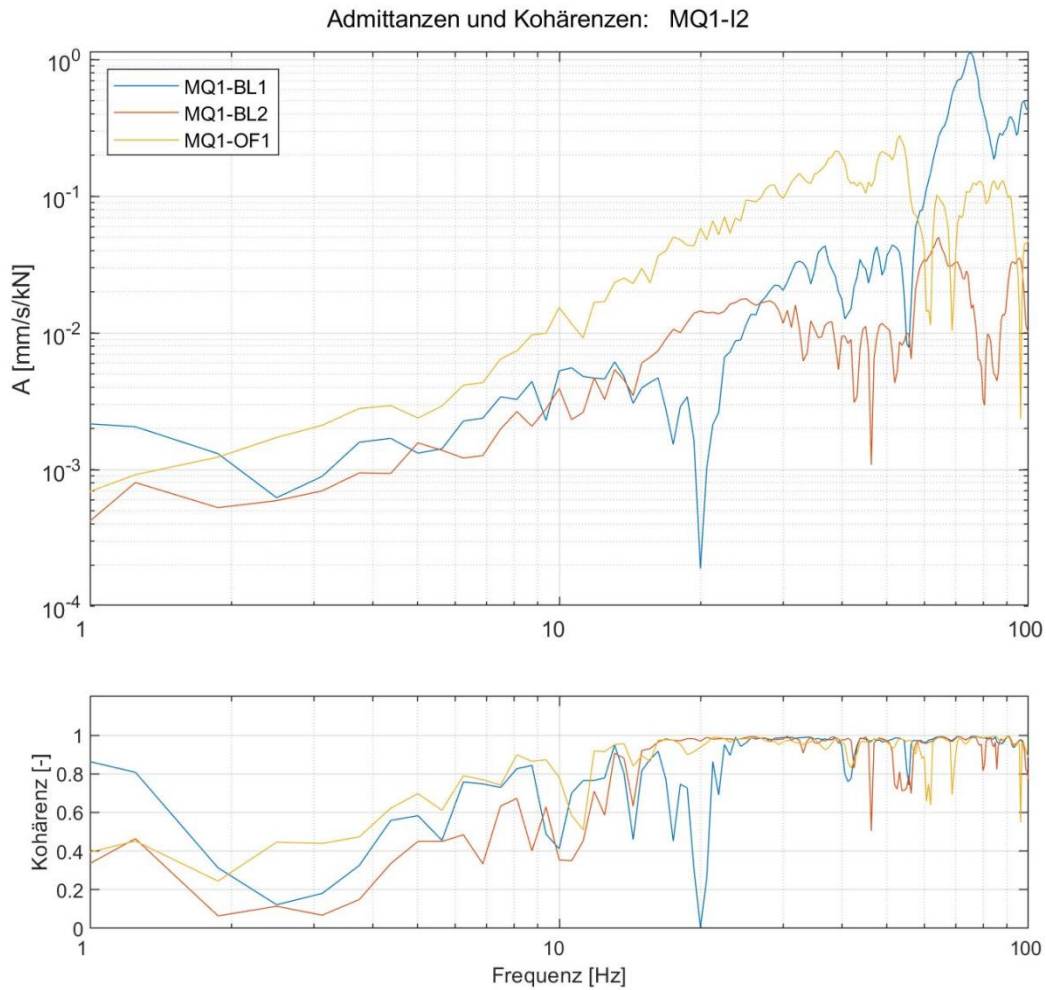


Abbildung 10-3: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I2)

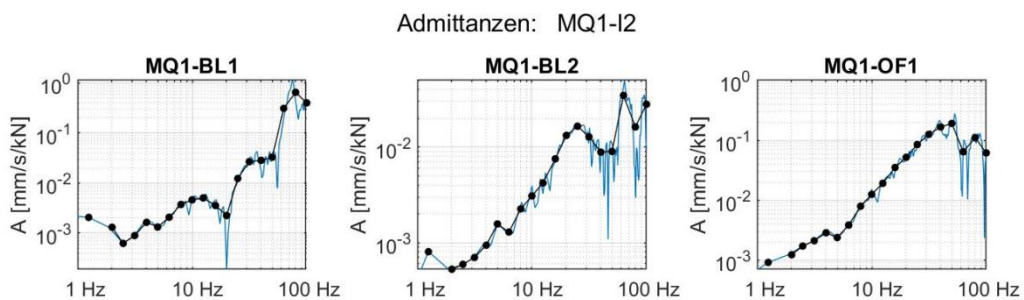


Abbildung 10-4: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I2)

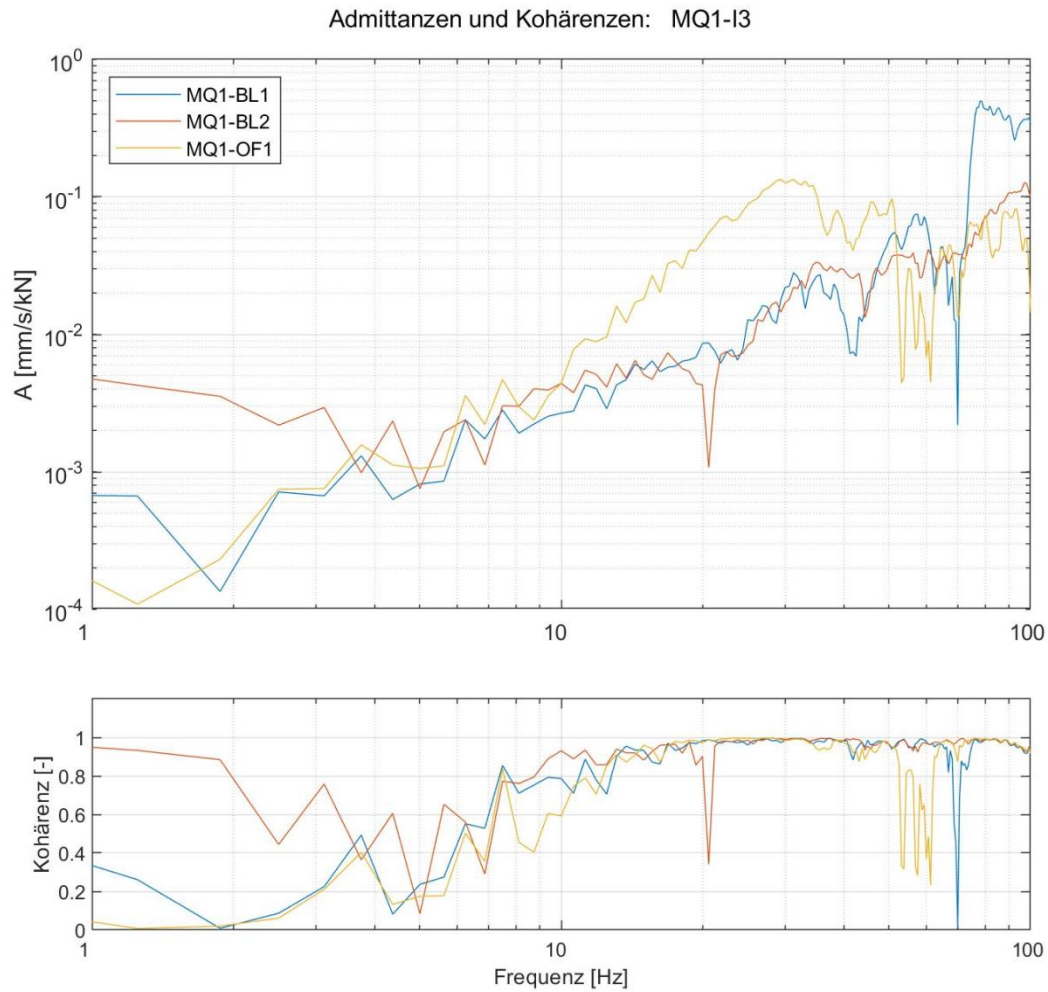


Abbildung 10-5: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I3)

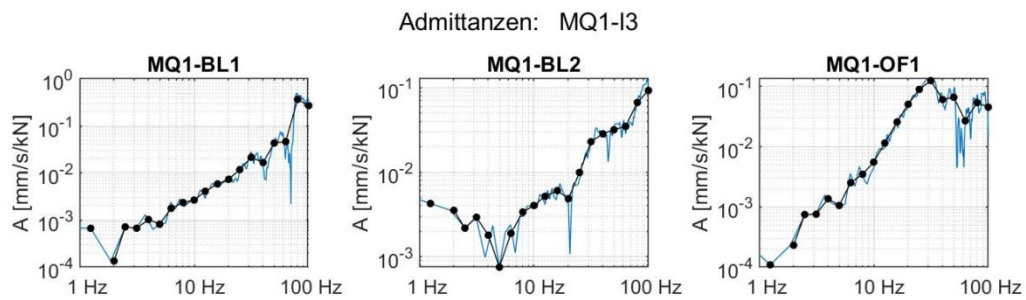


Abbildung 10-6: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I3)

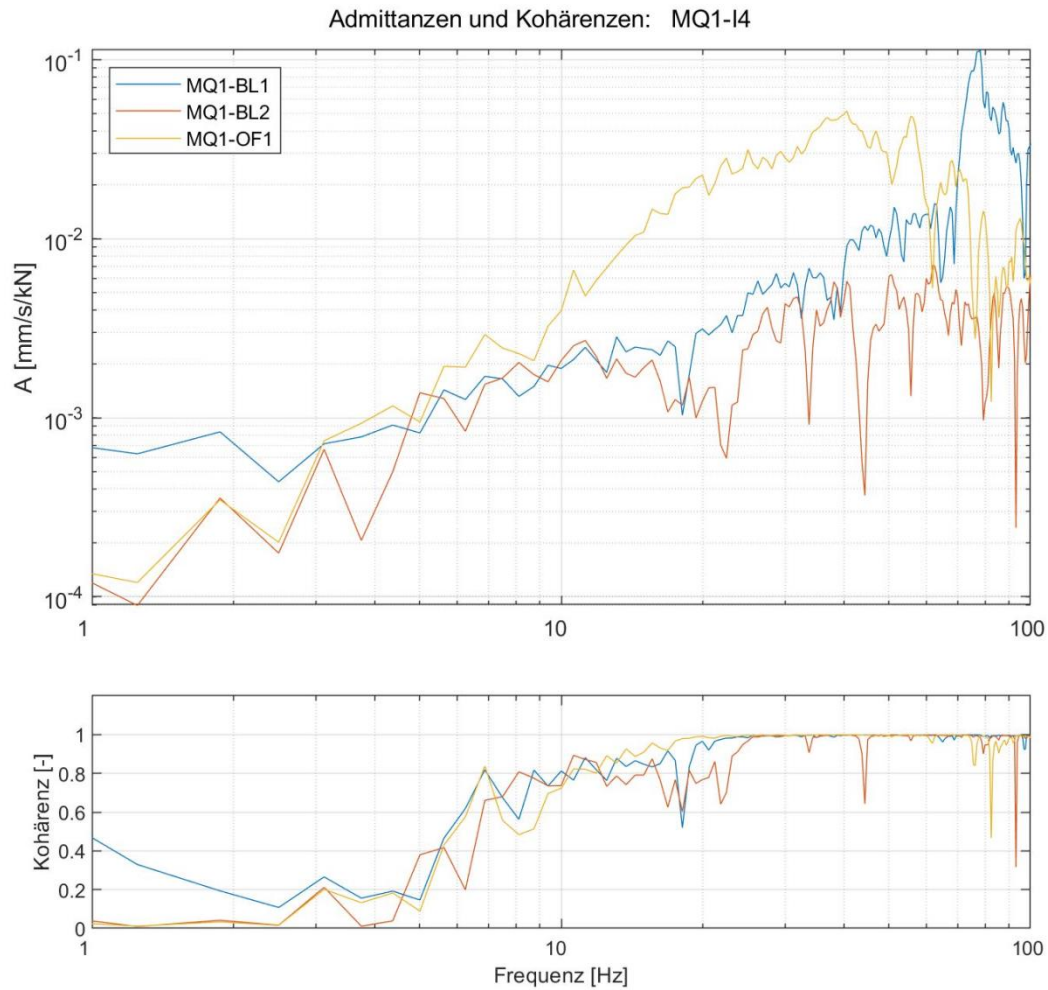


Abbildung 10-7: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I4)

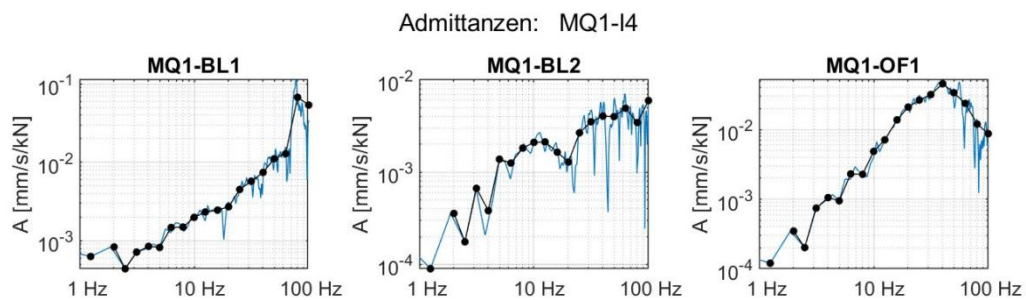


Abbildung 10-8: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I4)



Admittanzen und Kohärenzen: MQ1-I5

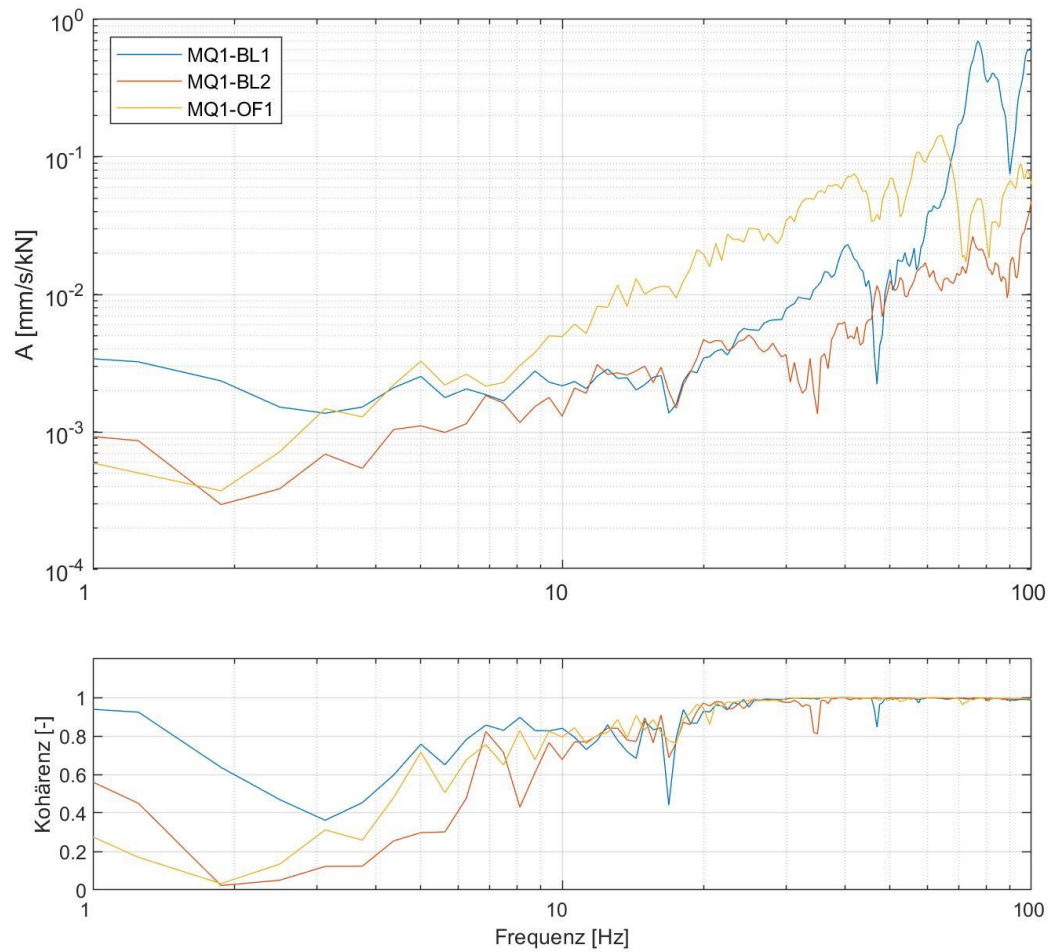


Abbildung 10-9: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I5)

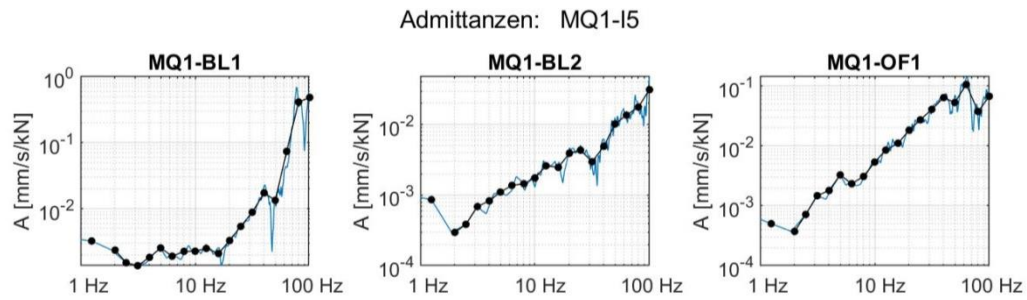


Abbildung 10-10: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I5)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ1-I6

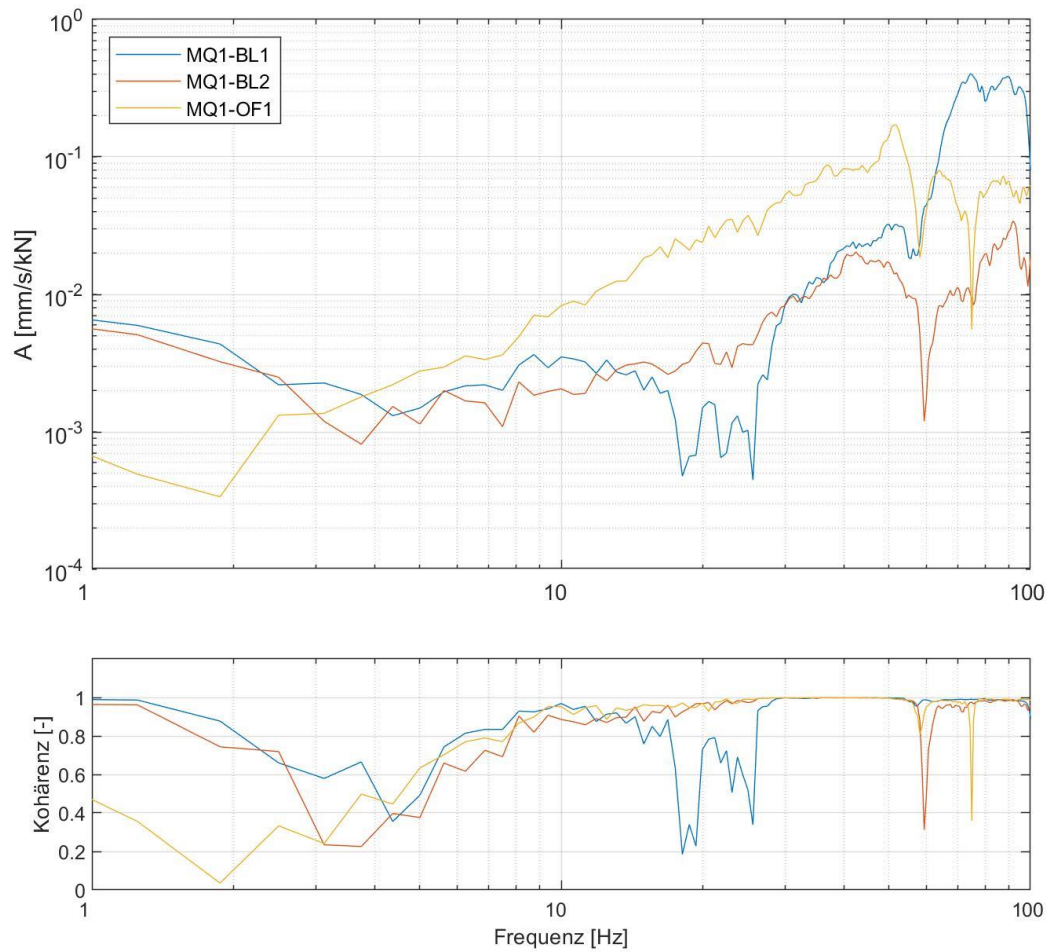


Abbildung 10-11: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I6)

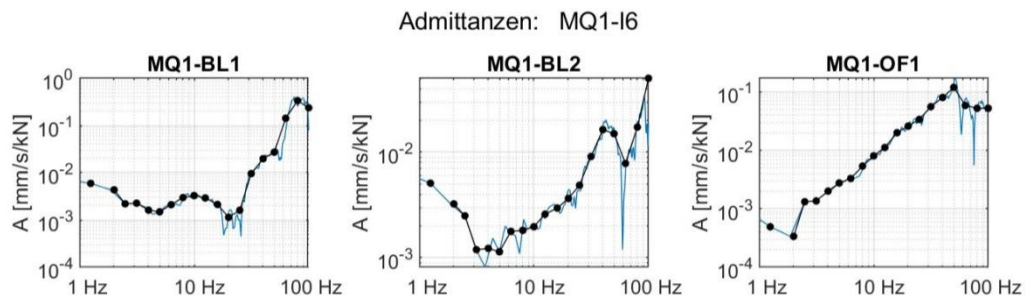


Abbildung 10-12: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I6)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ1-I7

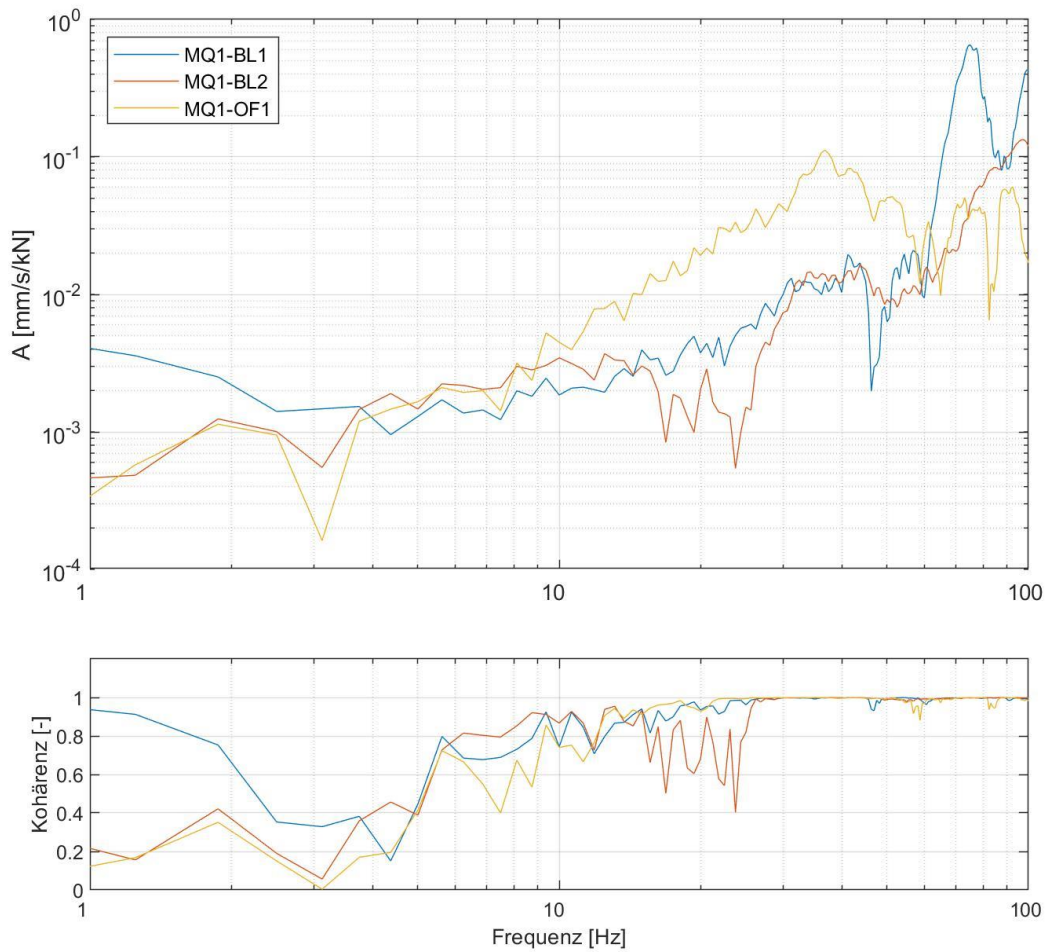


Abbildung 10-13: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I7)

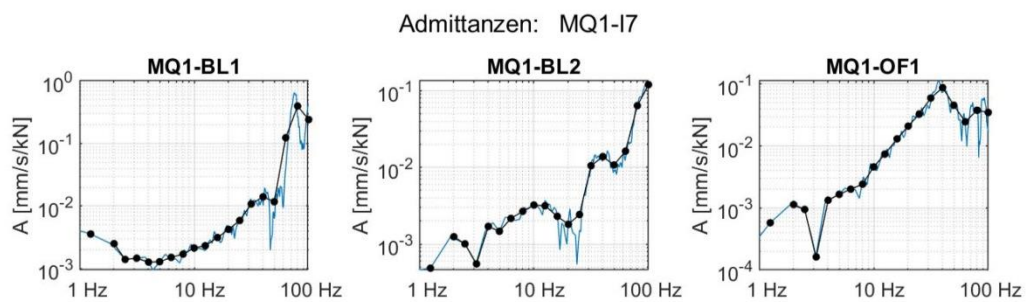


Abbildung 10-14: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I7)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ1-I8

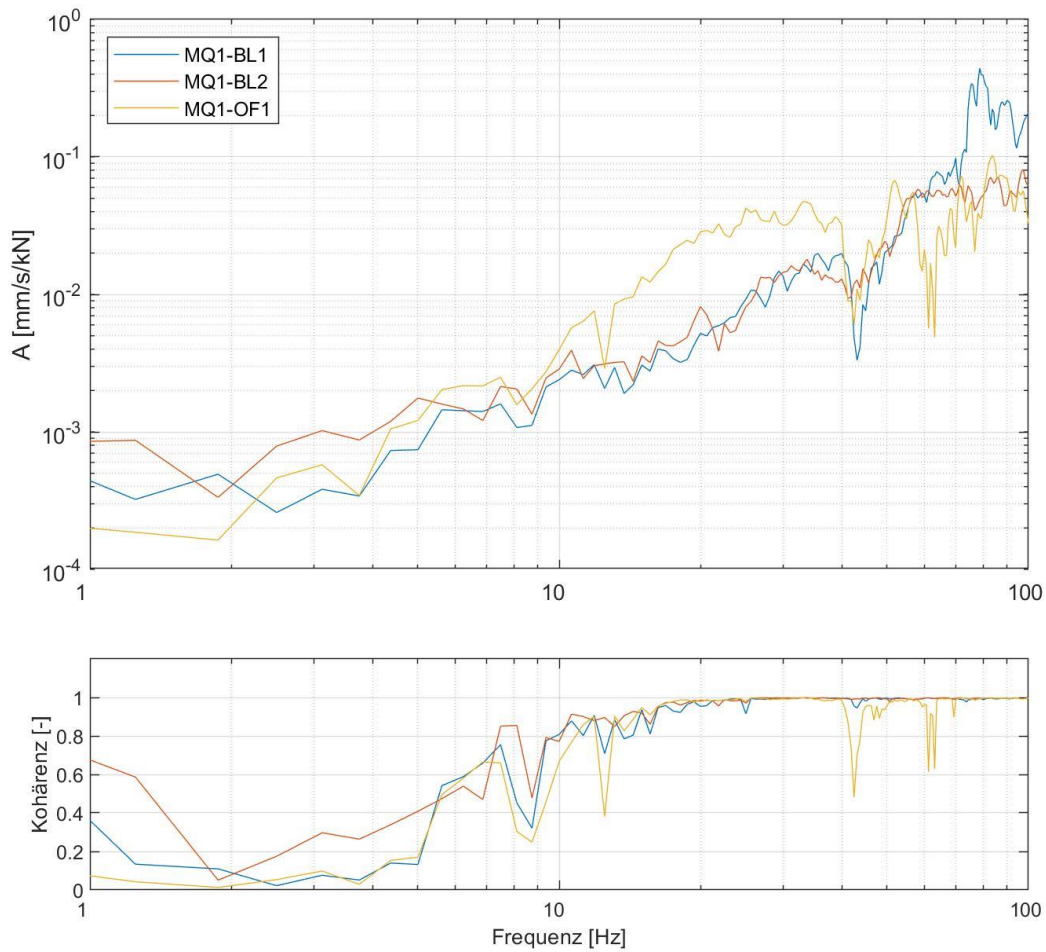


Abbildung 10-15: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I8)

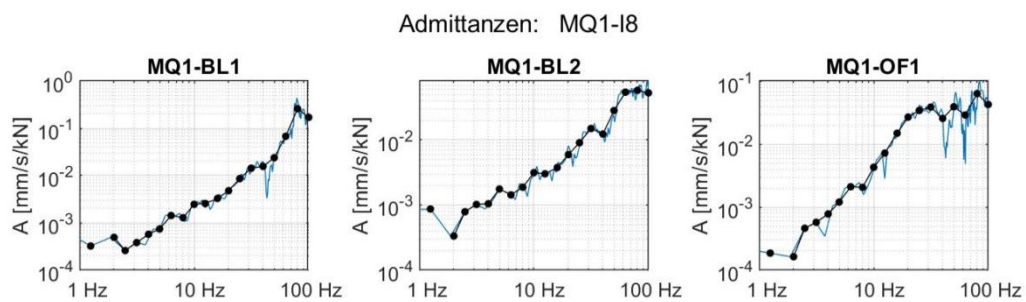


Abbildung 10-16: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittenzen (Anregung I8)



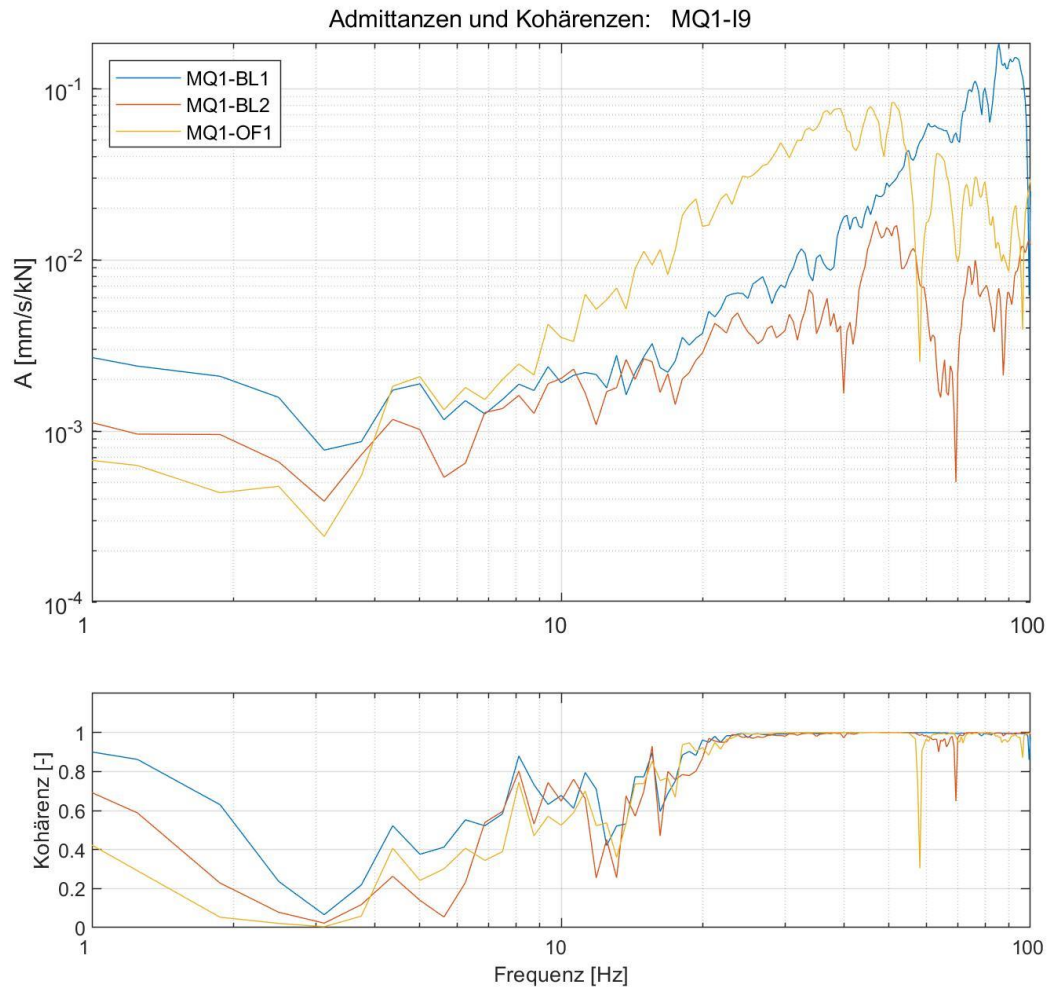


Abbildung 10-17: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I9)

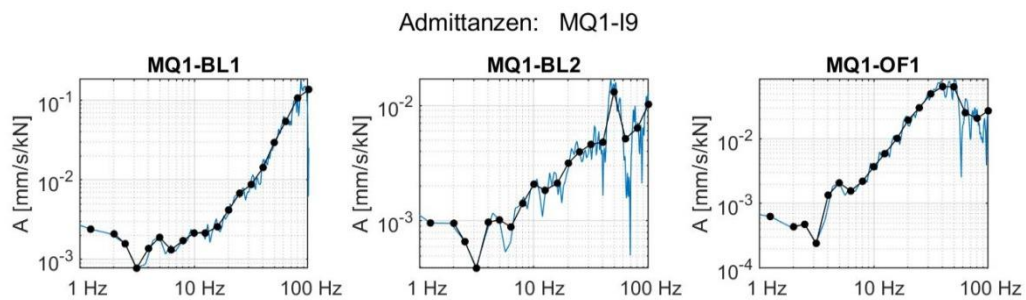


Abbildung 10-18: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I9)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ1-I10

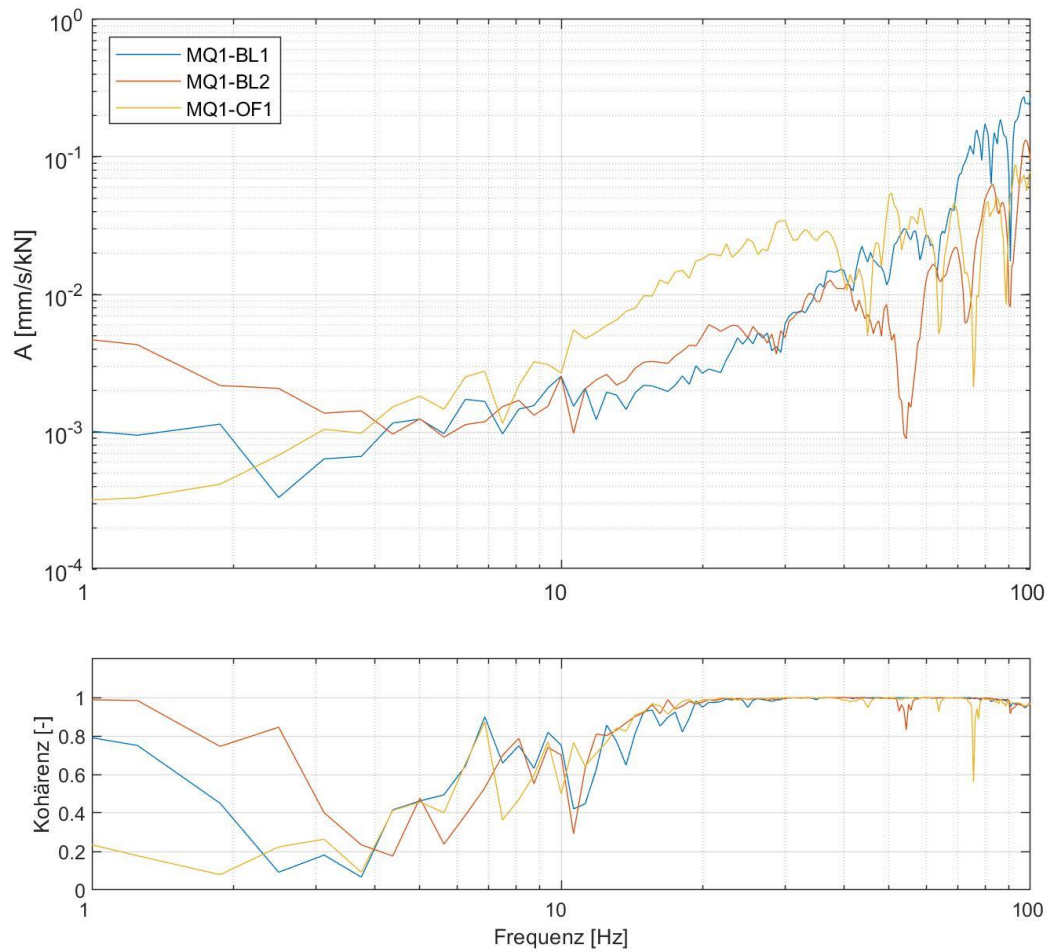


Abbildung 10-19: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I10)

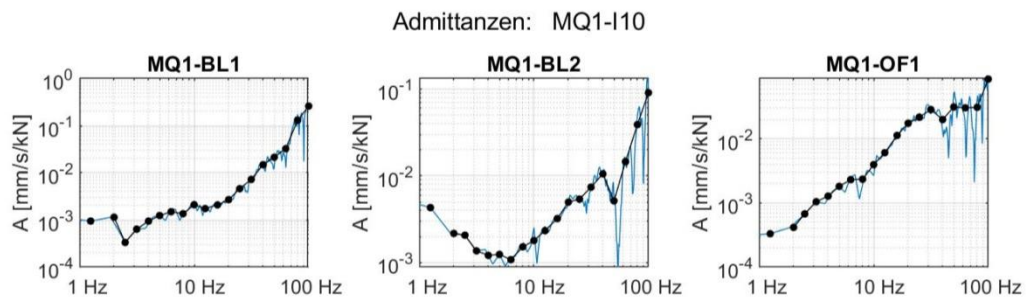


Abbildung 10-20: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I10)

## 10.2.5 Ergebnisse der Regressionsanalyse

Abnahme Admittanz:

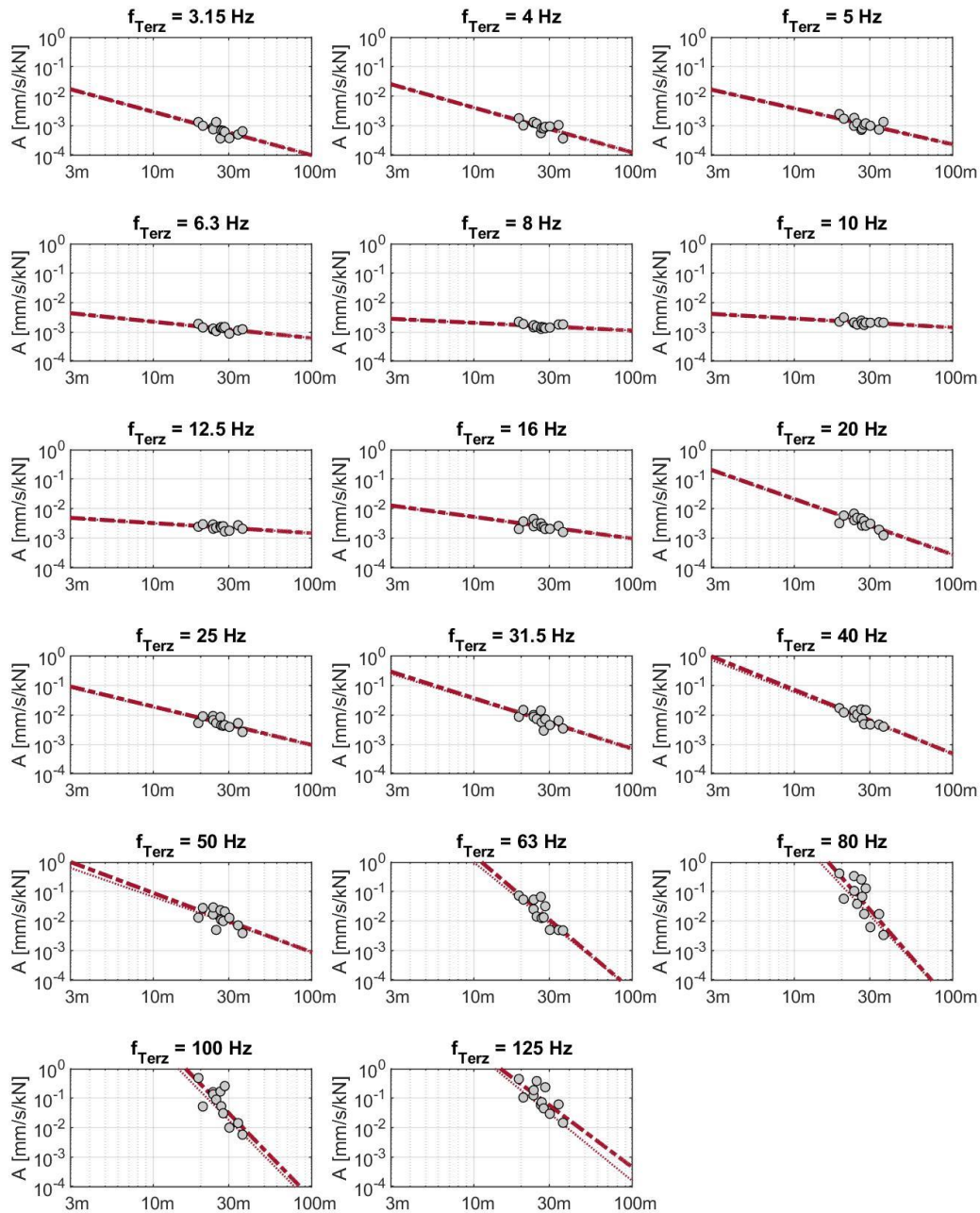


Abbildung 10-21: Ergebnisse der Regressionsanalyse: Abnahme der Admittanzen über die Entfernung

10.3 DYNPACT® am MQ2

10.3.1 Lageskizze

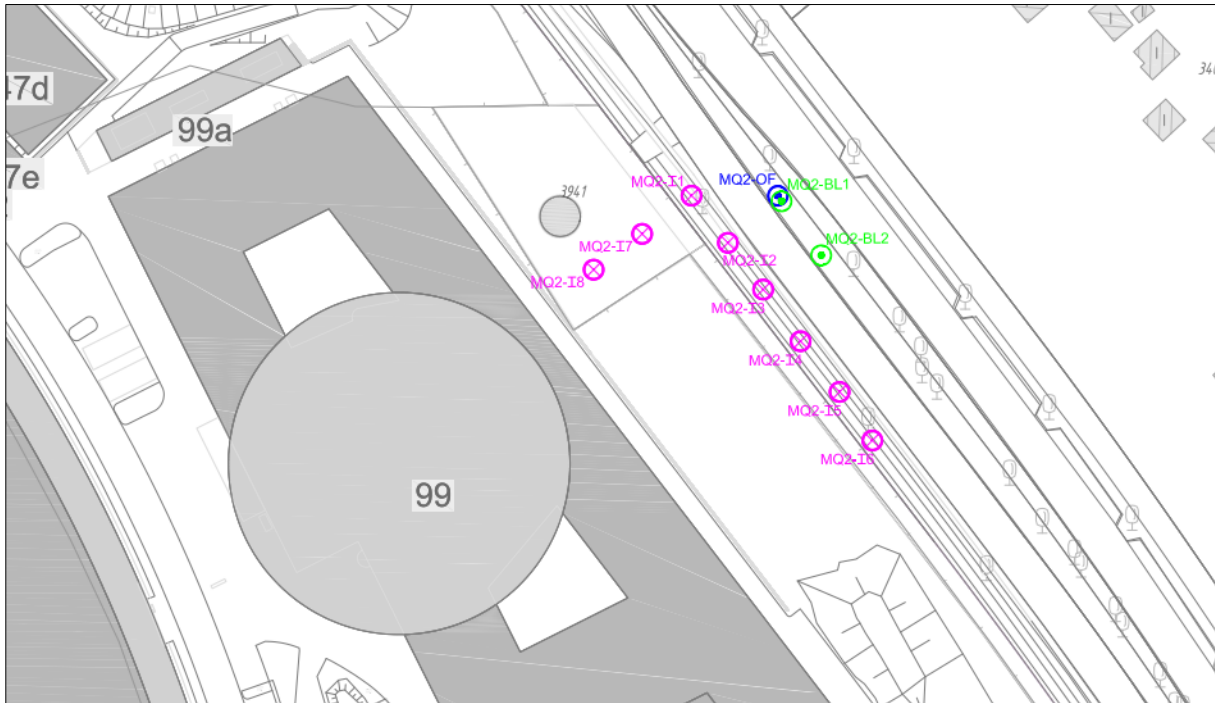


Tabelle 10-9: Lageskizze der Anregungs- und Messpunkte der DYNPACT®-Messungen am MQ2

10.3.2 Abstände

Sämtliche Mess- und Anregungspunkte wurden mit dem GNSS Gerät gemäß Tabelle 9-4 eingemessen und daraus die Abstände zwischen Mess- und Anregungspunkt ermittelt. Die folgende Tabelle listet die Entfernungen zwischen den Anregungspunkten mit DYNPACT® und den Bohrloch- bzw. Oberflächenmesspunkt in Metern.

Anregungspunkt Messpunkt								
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8
MQ2-BL1 / MQ2-OF	15,2	11,4	15,2	23,9	33,7	43,2	24,2	33,8
MQ2-BL2	24,1	15,9	11,4	14,9	23,3	32,4	30,5	38,5

Tabelle 10-10: Entfernungen [m] der Messpunkte zu den DYNPACT® Anregungspunkten am MQ2



10.3.3 Dokumentation der Messung

Kanal	Messpunkt	Lage	Aufstellbe- dingung	Sensor	Kabel	Messbereich [mm/s]
1	DYNPACT®			Kraftmessdose	BNC 24	0-350 [kN]
2	MQ2-BL1	Bohrloch	Sonde	BS4	100, 120	+/-2
3	MQ2-BL2	Bohrloch	Sonde	BS7	100, 120	+/-2
4	MQ2-OF1	GOK neben Bohrloch 1	Spike	Spike	100, 120	+/-2

Tabelle 10-11: Messpunkte DYNPACT® am MQ2





	
MQ2-BL1	MQ2-BL2
	
MQ2-OF1-z	DYNPACT® im Einsatz am MQ2

Tabelle 10-12: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ2

Folgende Messungen mit dem DYNPACT® wurden am Messquerschnitt MQ2 durchgeführt:

Bezeichnung	Inhalt
Abklopfen	QS-Prüfung
MQ2-I1	Impact am MQ2-I1
MQ2-I2	Impact am MQ2-I2
MQ2-I3	Impact am MQ2-I3
MQ2-I4	Impact am MQ2-I4
MQ2-I5	Impact am MQ2-I5

MQ2-I6	Impact am MQ2-I6
MQ2-I7	Impact am MQ2-I7
MQ2-I8	Impact am MQ2-I8

Tabelle 10-13: Auflistung der durchgeführten Messungen am MQ2 mit DYNPACT®

10.3.4 Ergebnisse der Baugrundadmittanzen

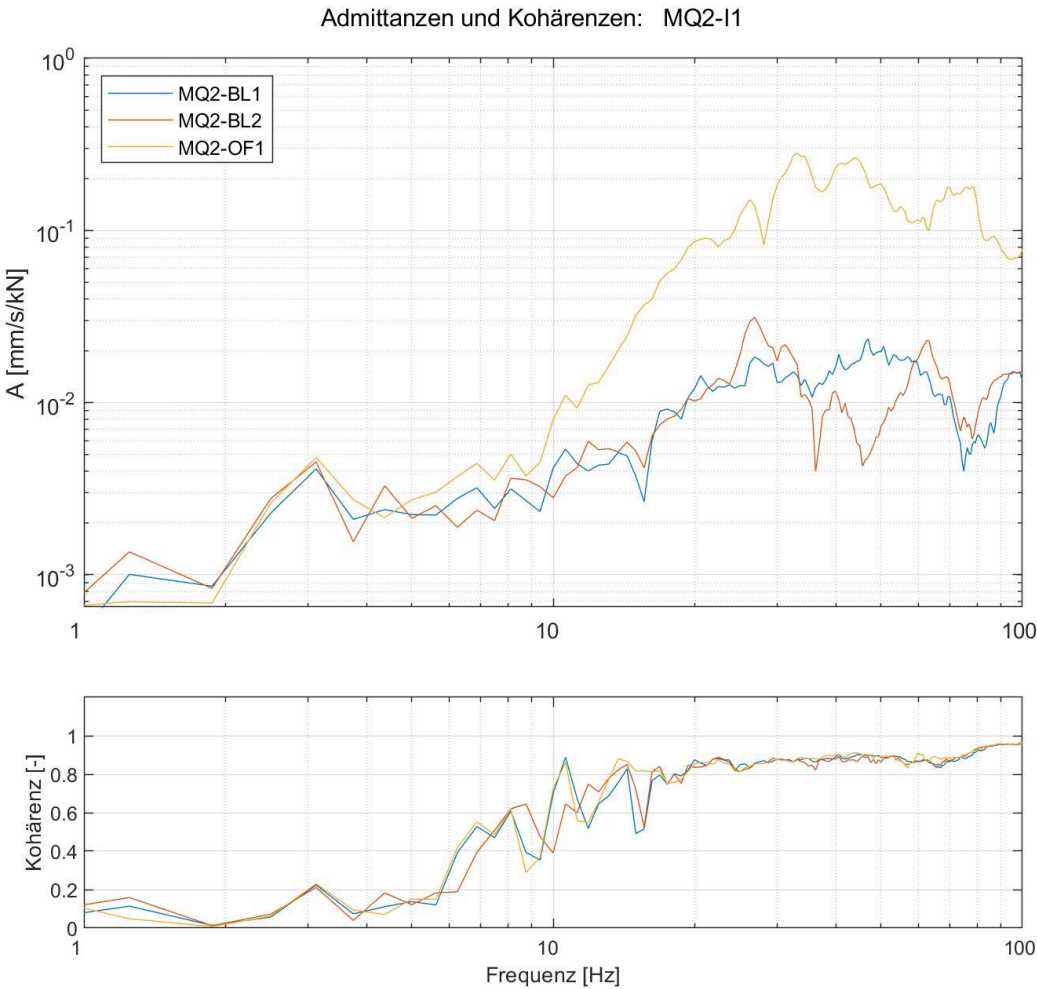


Abbildung 10-22: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I1)

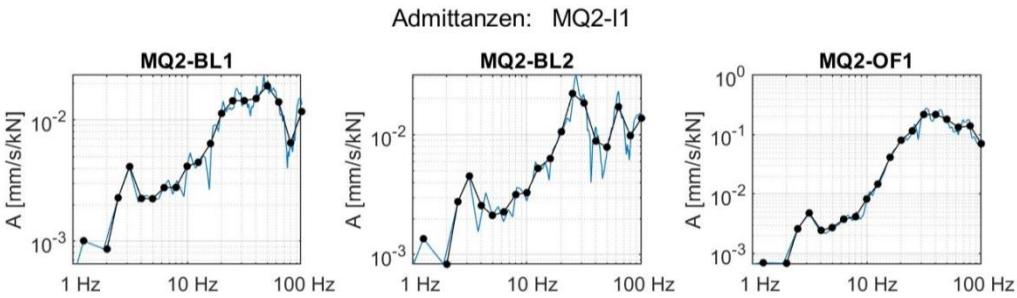


Abbildung 10-23: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I1)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ2-I2

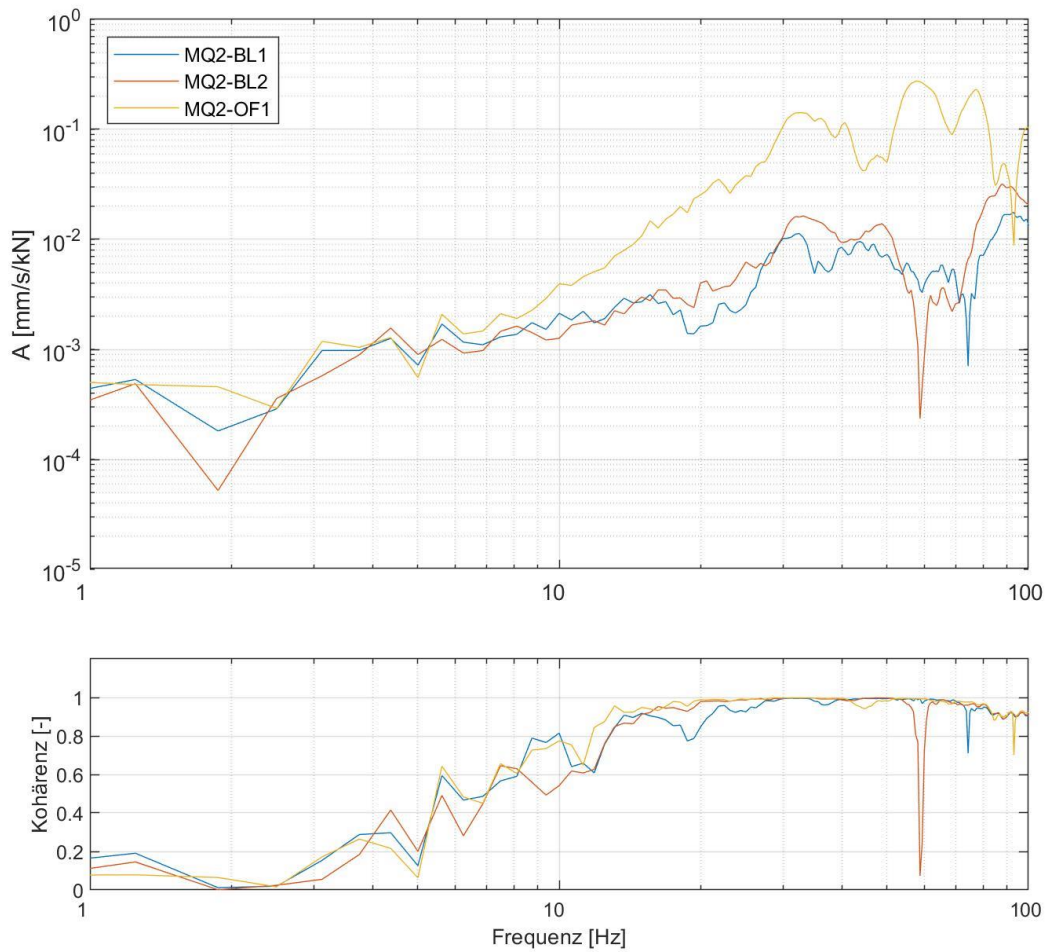


Abbildung 10-24: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I2)

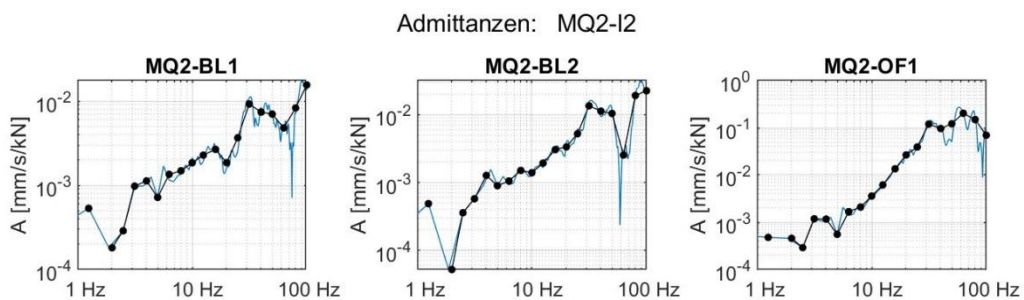


Abbildung 10-25: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I2)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ2-I3

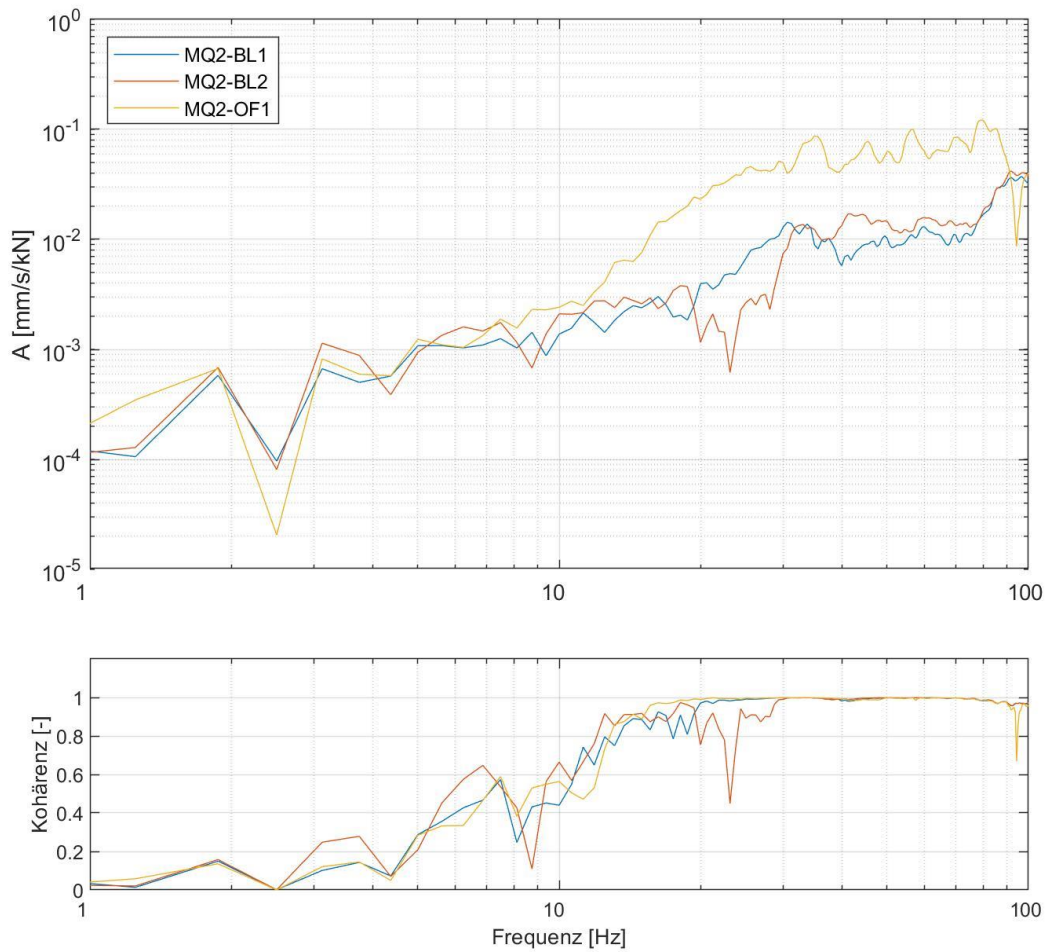


Abbildung 10-26: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I3)

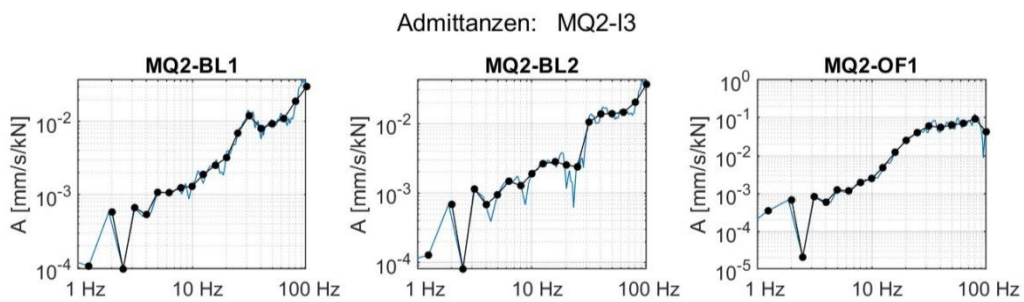


Abbildung 10-27: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I3)



Admittanzen und Kohärenzen: MQ2-I4

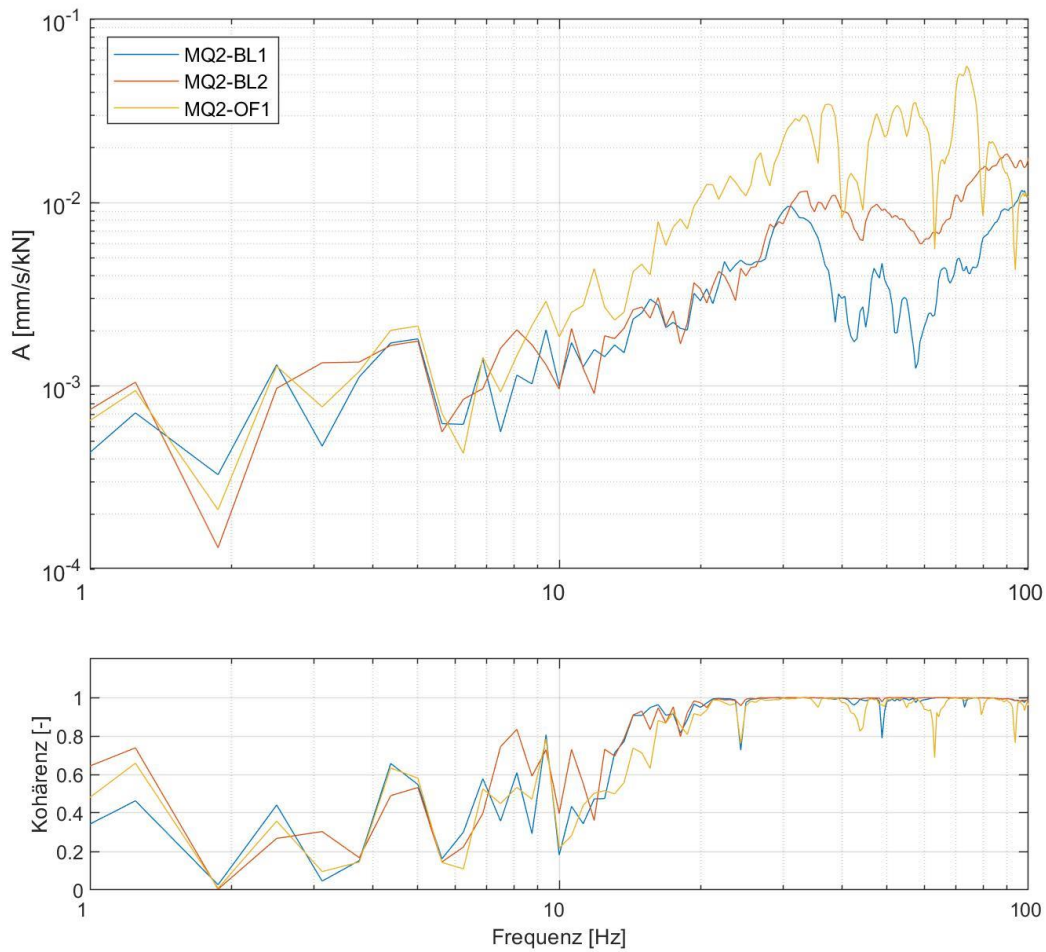


Abbildung 10-28: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I4)

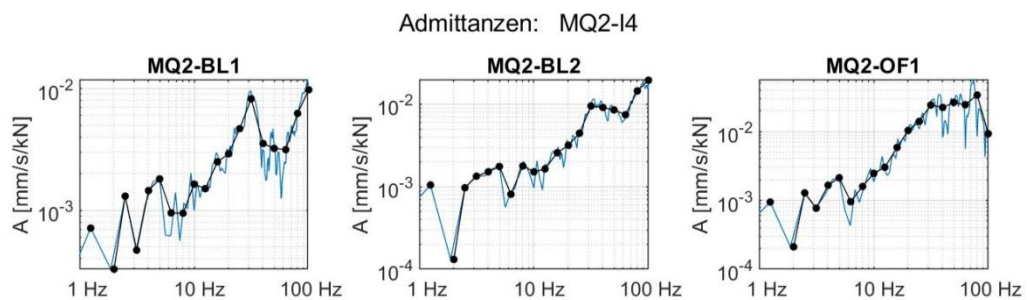


Abbildung 10-29: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I4)

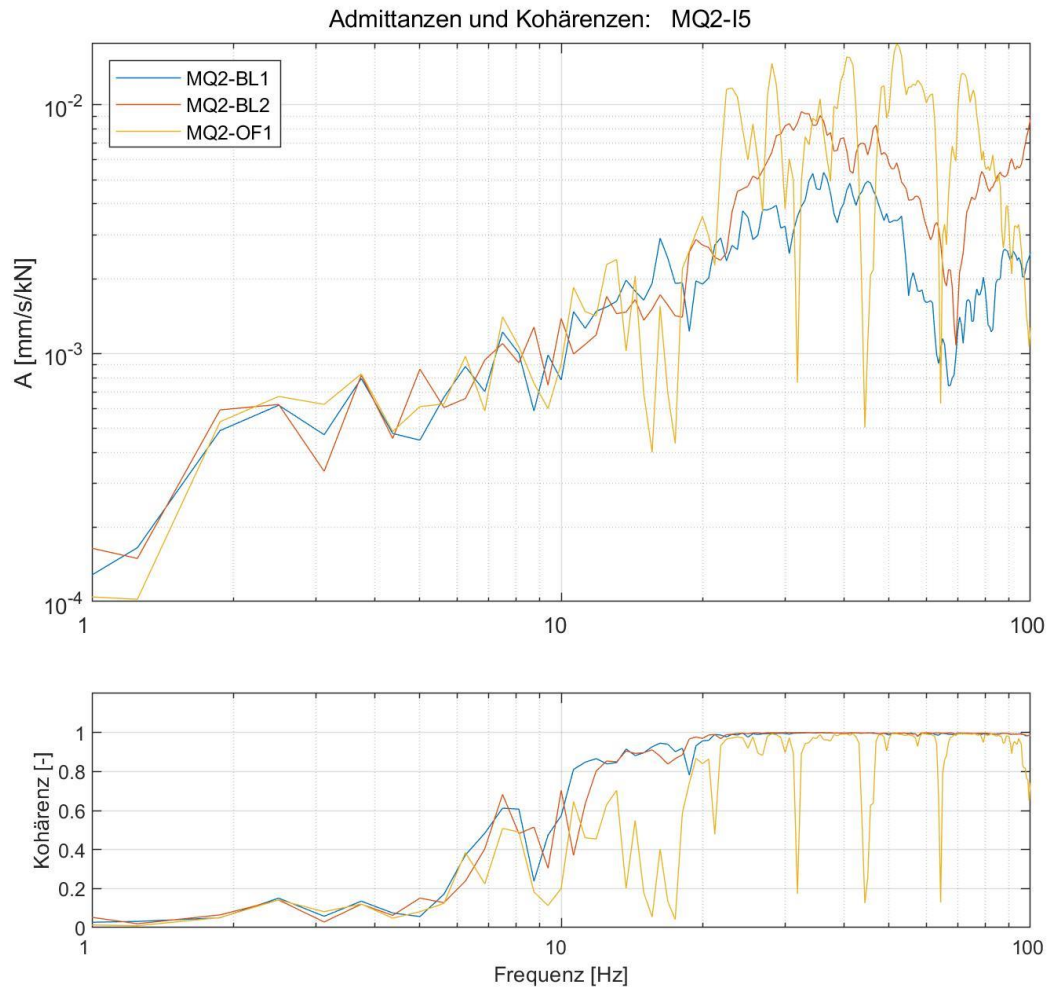


Abbildung 10-30: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I5)

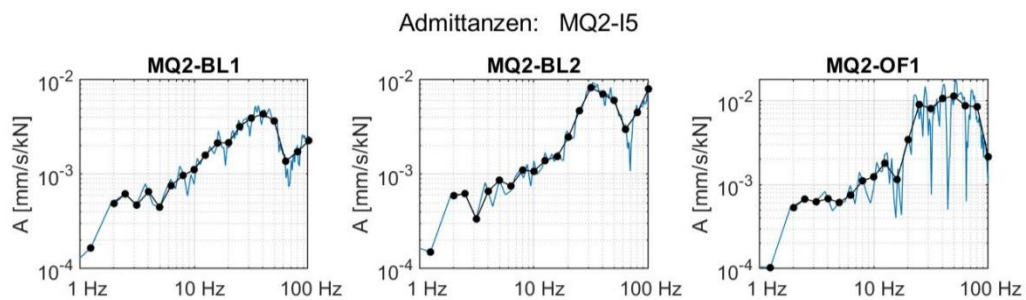


Abbildung 10-31: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I5)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ2-I6

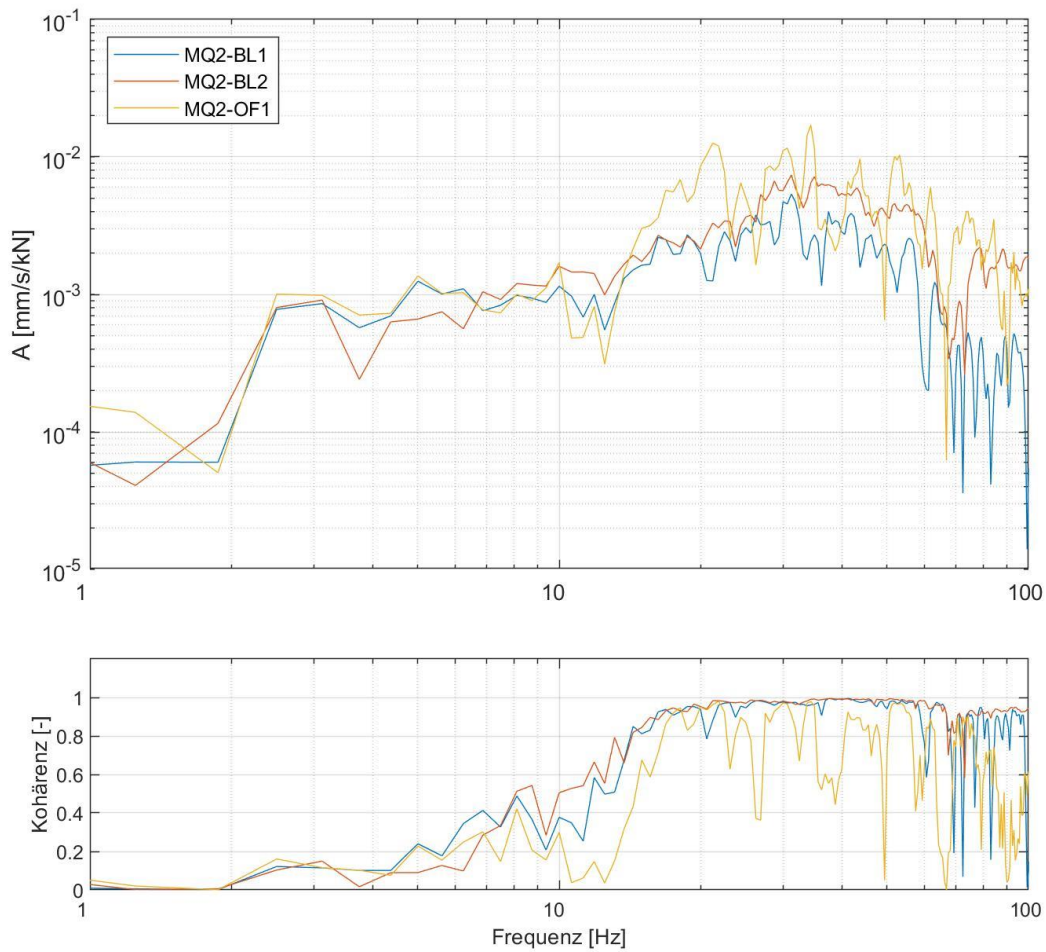


Abbildung 10-32: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I6)

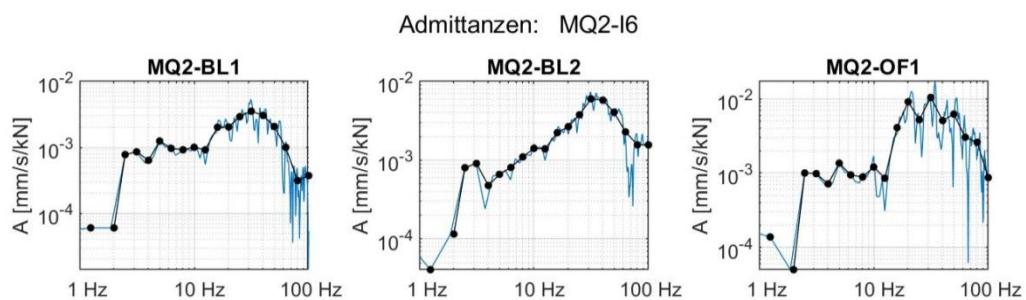


Abbildung 10-33: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzaadmittanzen (Anregung I6)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ2-I7

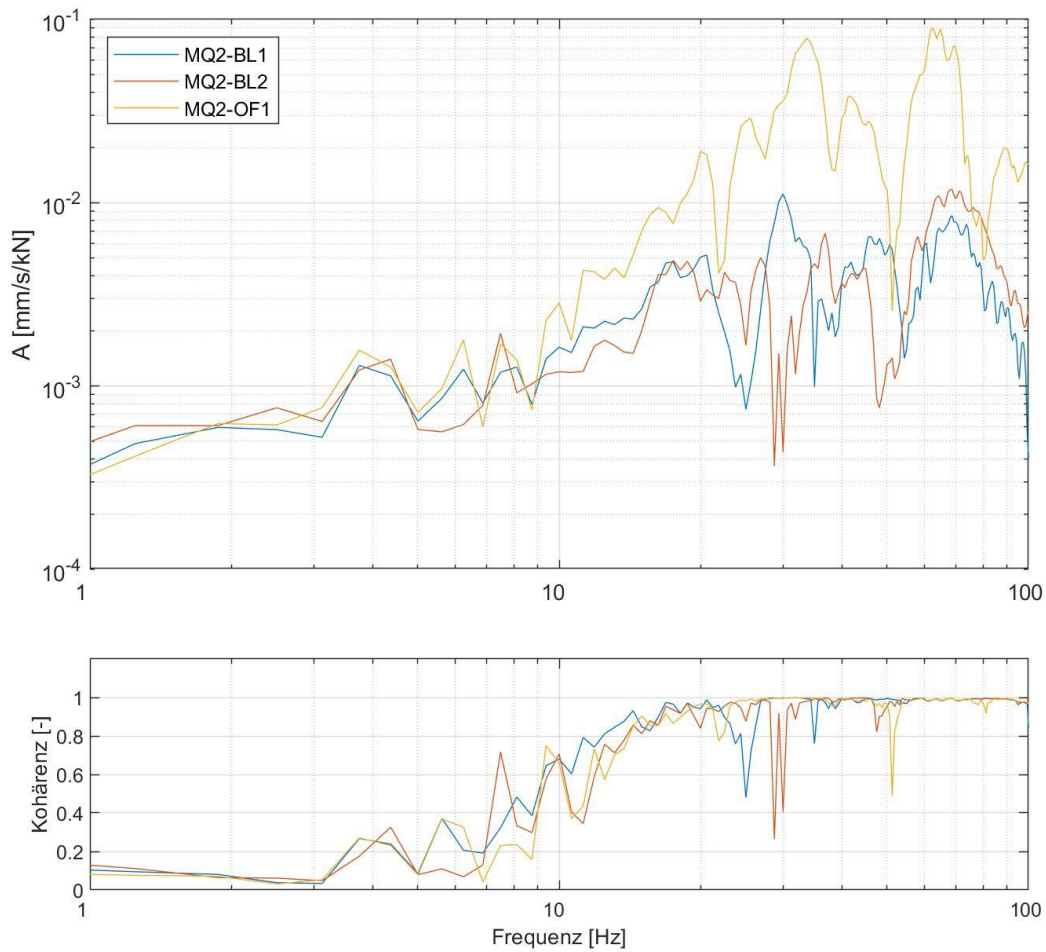


Abbildung 10-34: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I7)

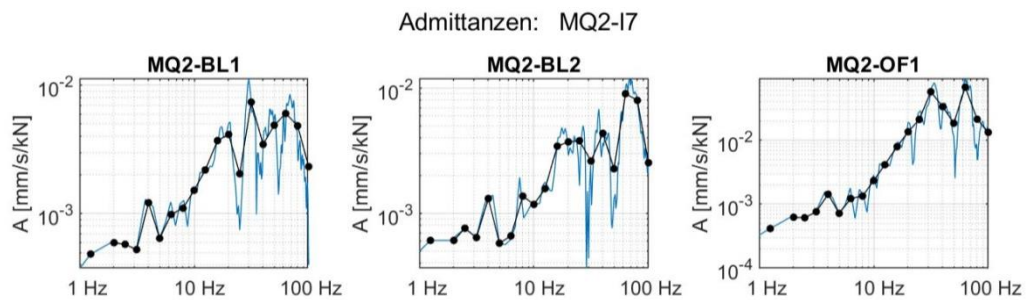


Abbildung 10-35: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I7)



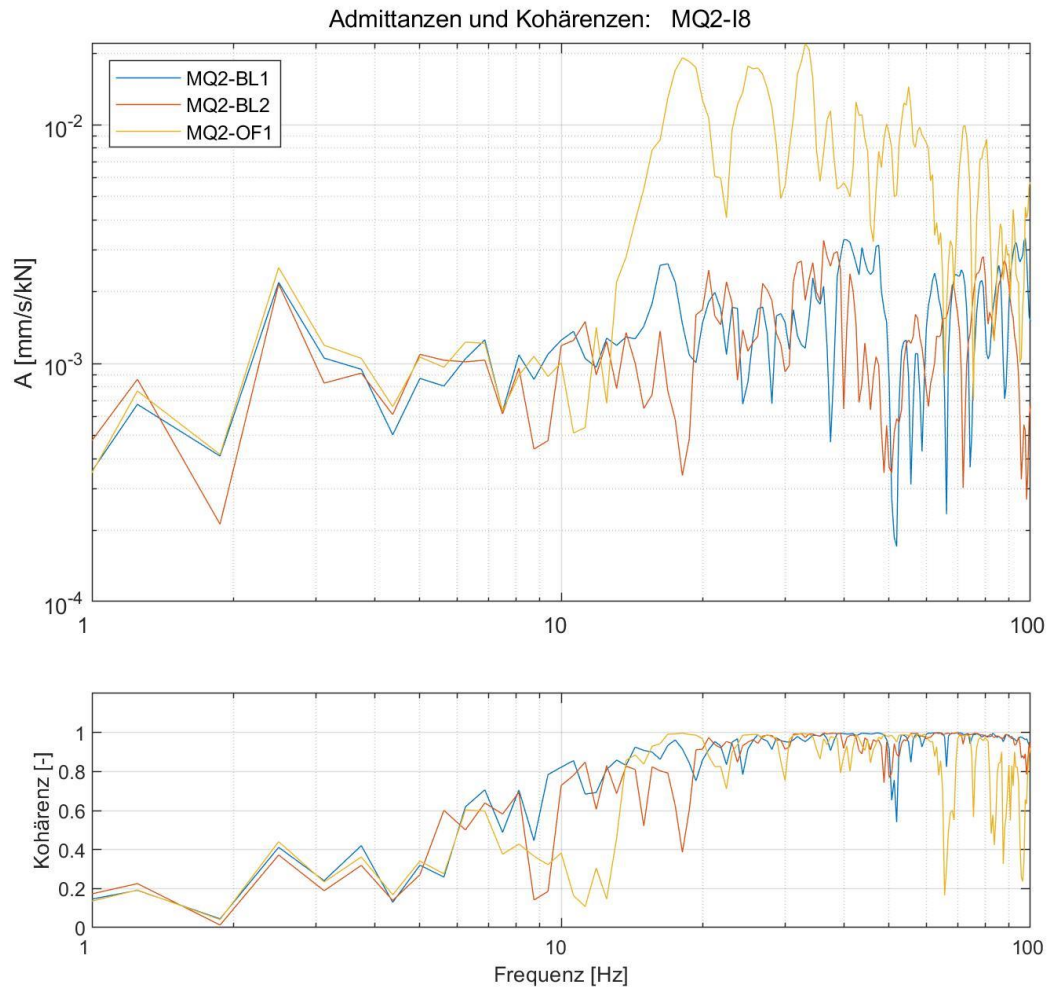


Abbildung 10-36: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I8)

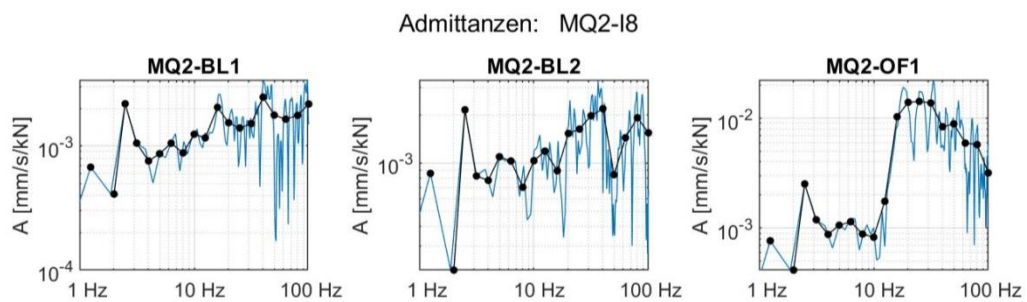


Abbildung 10-37: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I8)

### 10.3.5 Ergebnisse der Regressionsanalyse

Abnahme Admittanz:

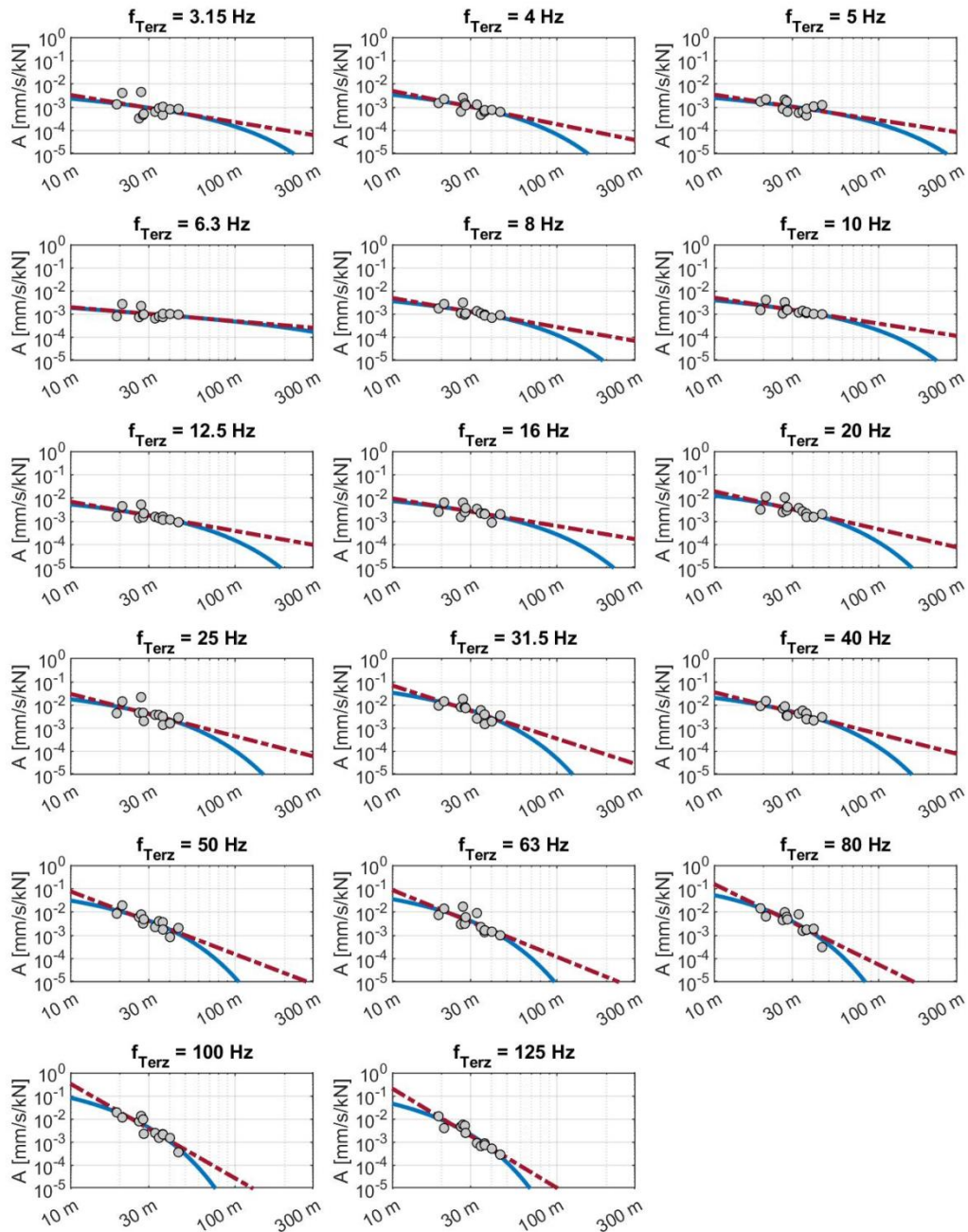


Abbildung 10-38: Ergebnisse der Regressionsanalyse: Abnahme der Admittanzen über die Entfernung (rot=zu Grunde gelegtes Abnahmegesetz)

10.4 DYNPACT® am MQ3

10.4.1 Lageskizze

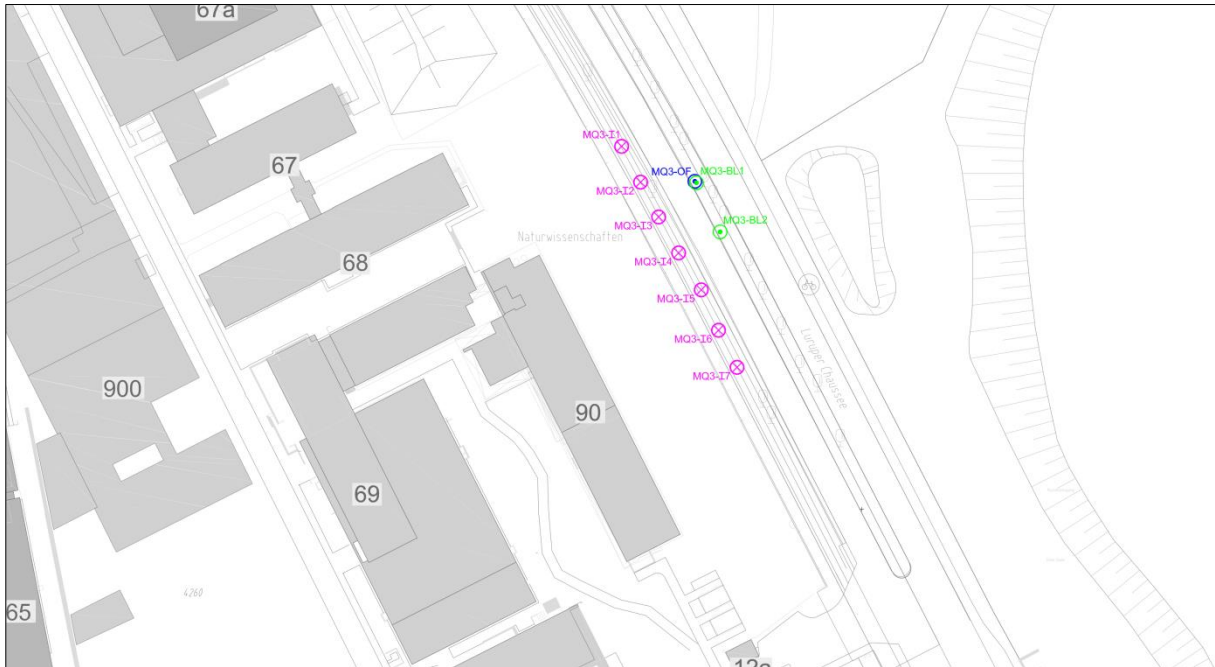


Tabelle 10-14: Lageskizze der Anregungs- und Messpunkte der DYNPACT®-Messungen am MQ3

10.4.2 Abstände

Sämtliche Mess- und Anregungspunkte wurden mit dem GNSS Gerät gemäß Tabelle 9-4 eingemessen und daraus die Abstände zwischen Mess- und Anregungspunkt ermittelt. Die folgende Tabelle listet die Entfernungen zwischen den Anregungspunkten mit DYNPACT® und den Bohrloch- bzw. Oberflächenmesspunkt in Metern.

Anregungspunkt Messpunkt							
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
MQ3-BL1 / MQ3-OF	20,0	13,5	12,3	17,4	25,8	35,9	45,5
MQ3-BL2	31,4	22,6	15,2	11,2	14,7	23,7	32,8

Tabelle 10-15: Entfernungen [m] der Messpunkte zu den DYNPACT® Anregungspunkten am MQ3



10.4.3 Dokumentation der Messung

Kanal	Messpunkt	Lage	Aufstellbe- dingung	Sensor	Kabel	Messbereich [mm/s]
1	DYNPACT			Kraftmessdose	BNC 24	0-350 [kN]
2	MQ3-BL1	Bohrloch	Sonde	BS5	100, 120	+/-2
3	MQ3-BL2	Bohrloch	Sonde	BS6	100, 120	+/-2
4	MQ3-OF1	GOK neben Bohrloch 1	Spike	G23	100, 120	+/-2

Tabelle 10-16: Messpunkte DYNPACT® am MQ3





	
MQ3-BL1	MQ3-BL2
	
MQ3-OF1-z	Übersicht

Tabelle 10-17: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ3

Folgende Messungen mit dem DYNPACT® wurden am Messquerschnitt MQ3 durchgeführt:

Bezeichnung	Inhalt
Abklopfen	QS-Prüfung
MQ3-I1	Impact am MQ3-I1
MQ3-I2	Impact am MQ3-I2
MQ3-I3	Impact am MQ3-I3
MQ3-I4	Impact am MQ3-I4
MQ3-I5	Impact am MQ3-I5



MQ3-I6	Impact am MQ3-I6
MQ3-I7	Impact am MQ3-I7

Tabelle 10-18: Auflistung der durchgeführten Messungen am MQ3 mit DYNPACT®

10.4.4 Ergebnisse der Baugrundadmittanzen

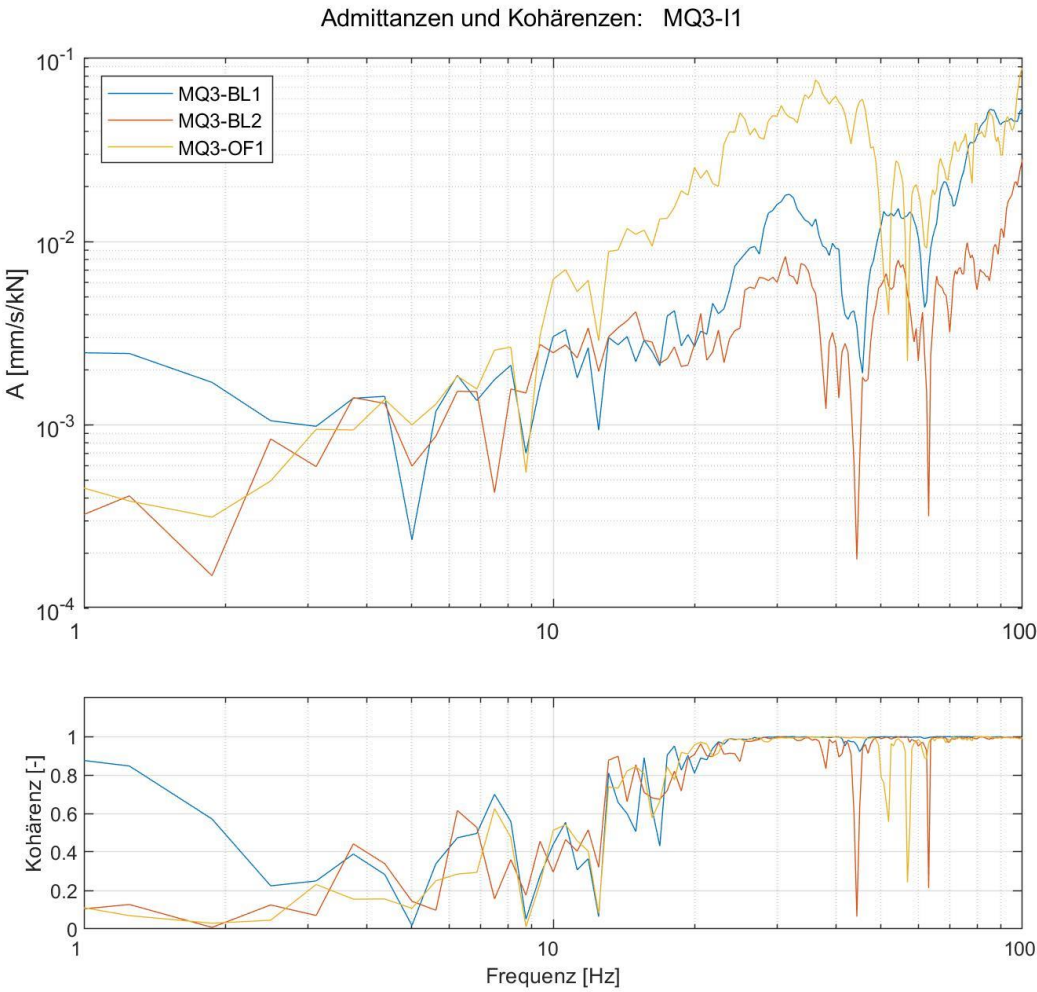


Abbildung 10-39: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I1)

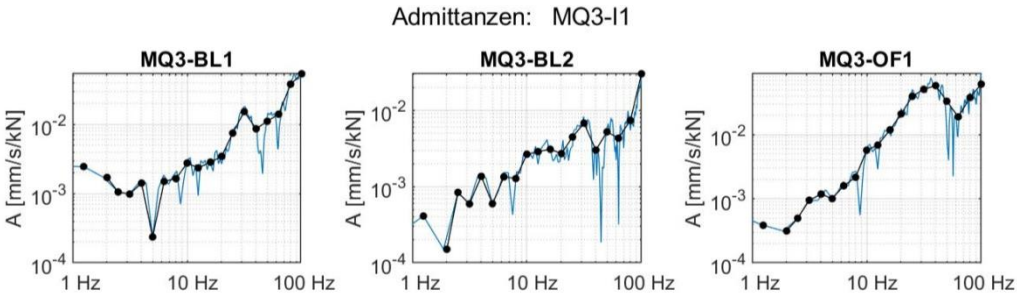


Abbildung 10-40: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I1)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ3-I2

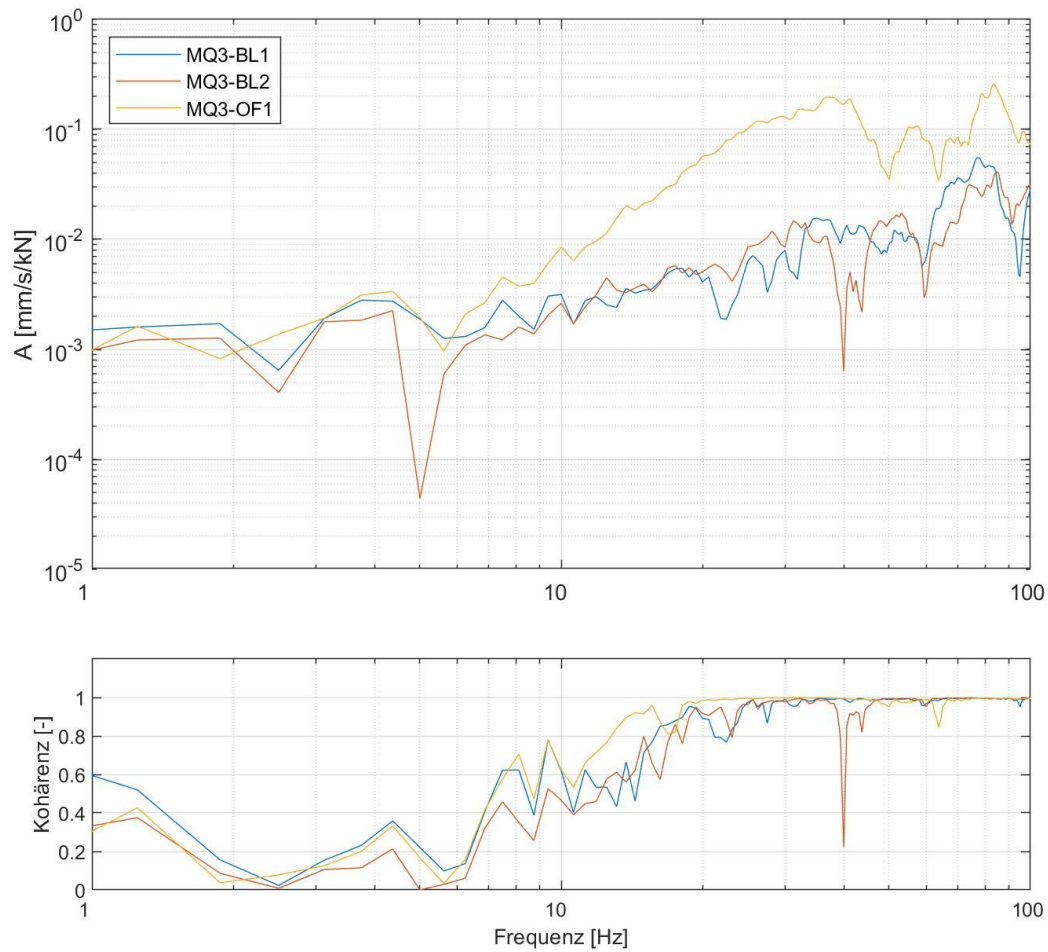


Abbildung 10-41: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I2)

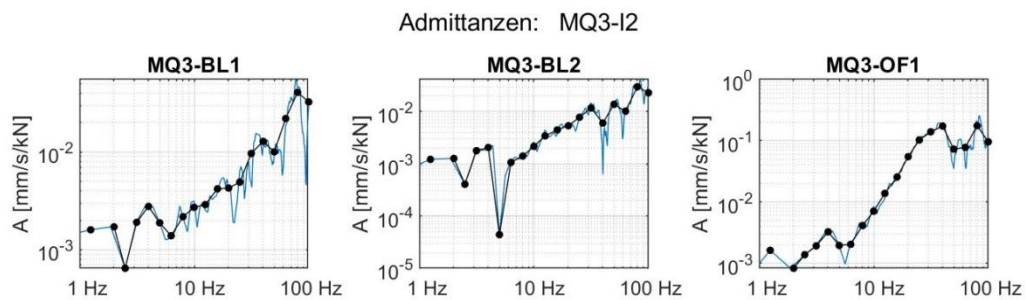


Abbildung 10-42: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I2)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ3-I3

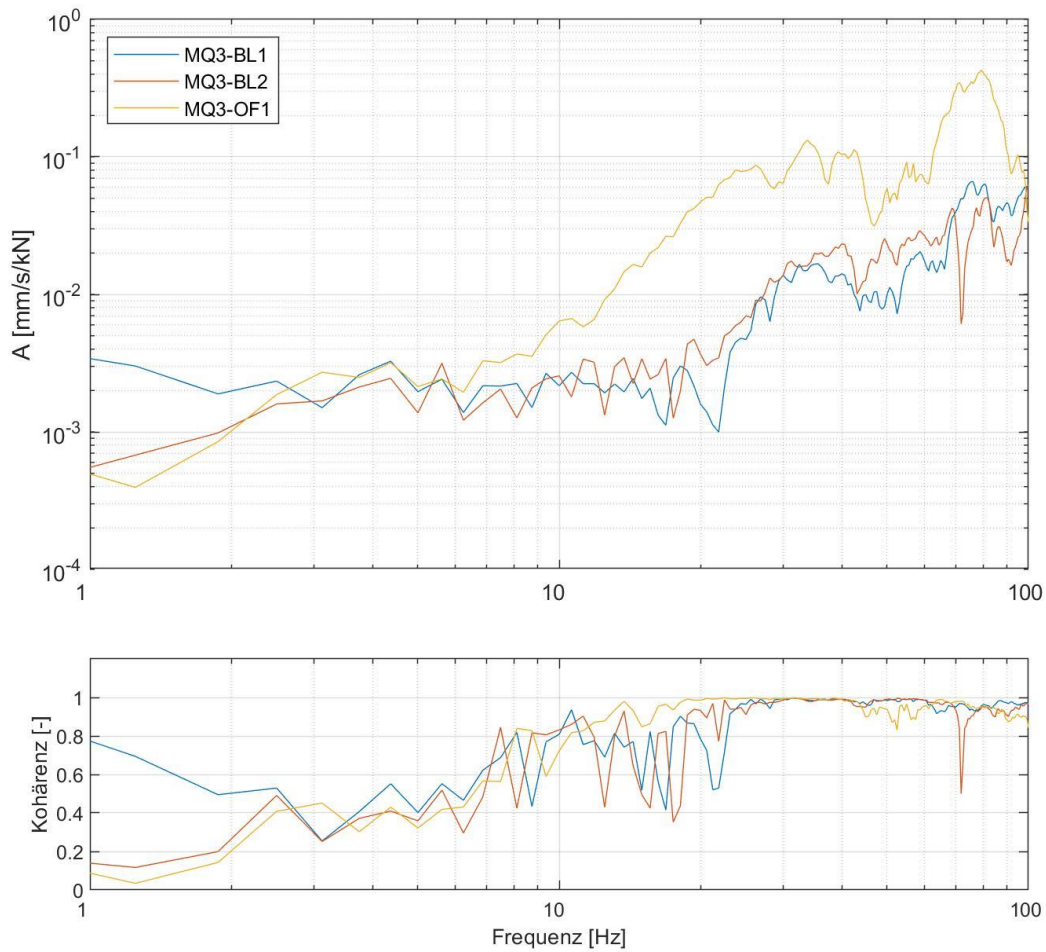


Abbildung 10-43: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I3)

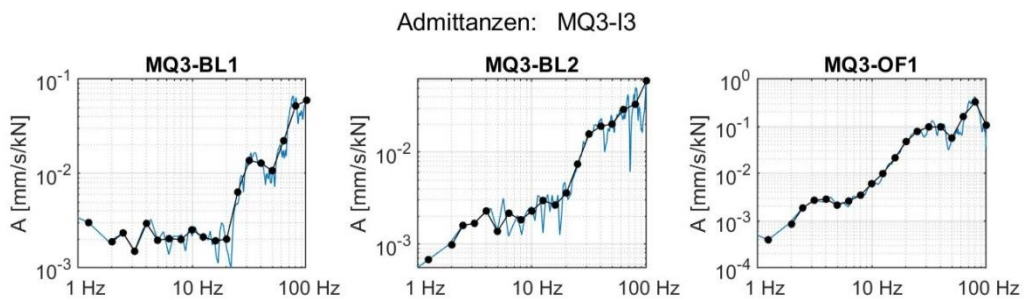


Abbildung 10-44: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I3)

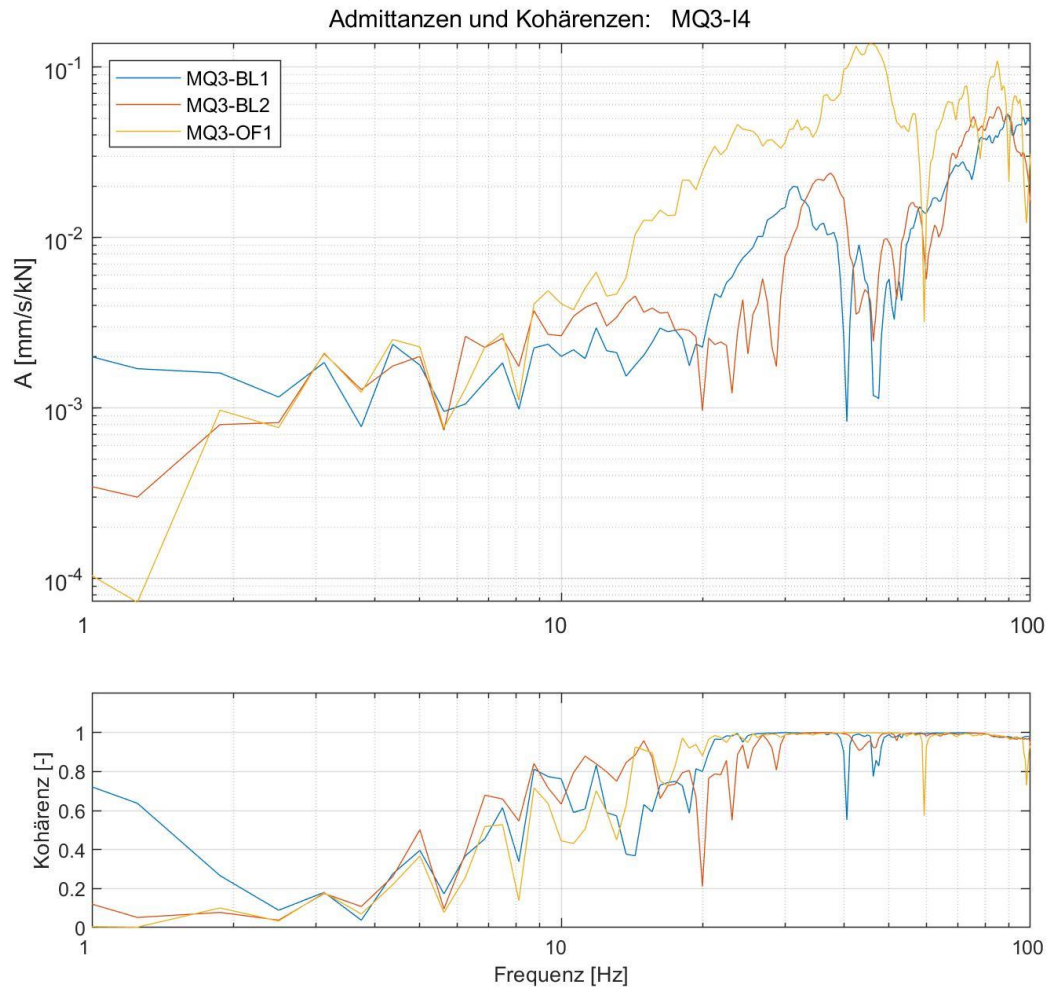


Abbildung 10-45: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I4)

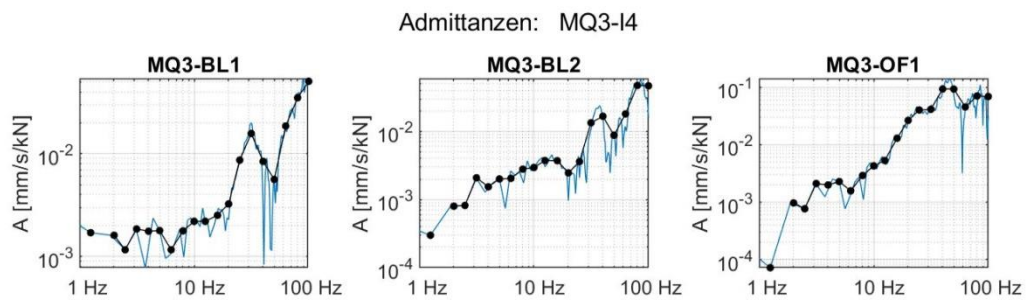


Abbildung 10-46: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittenzen (Anregung I4)



Admittanzen und Kohärenzen: MQ3-I5

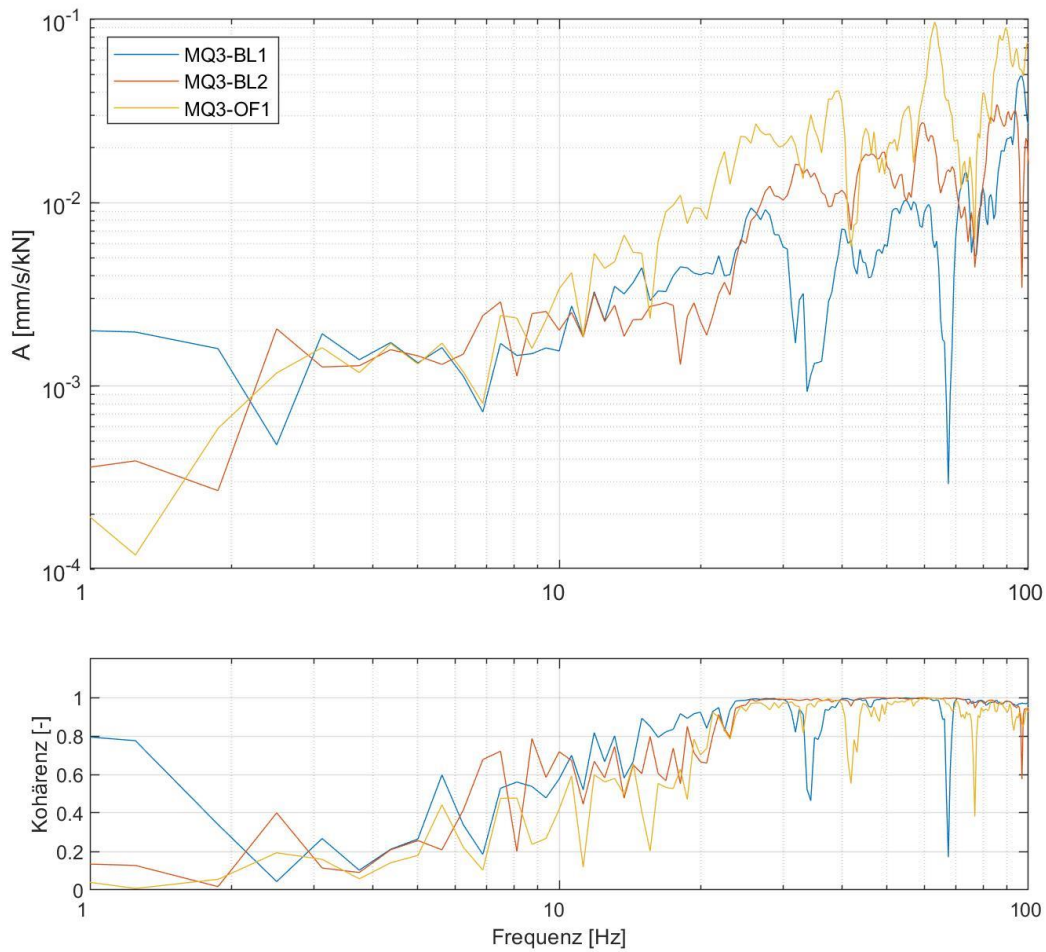


Abbildung 10-47: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I5)

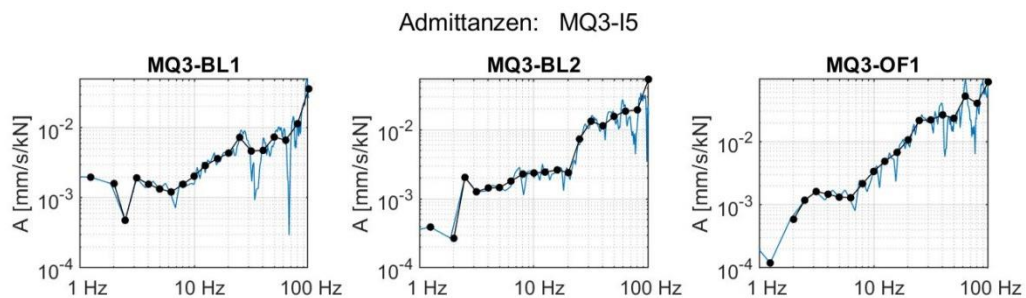


Abbildung 10-48: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I5)

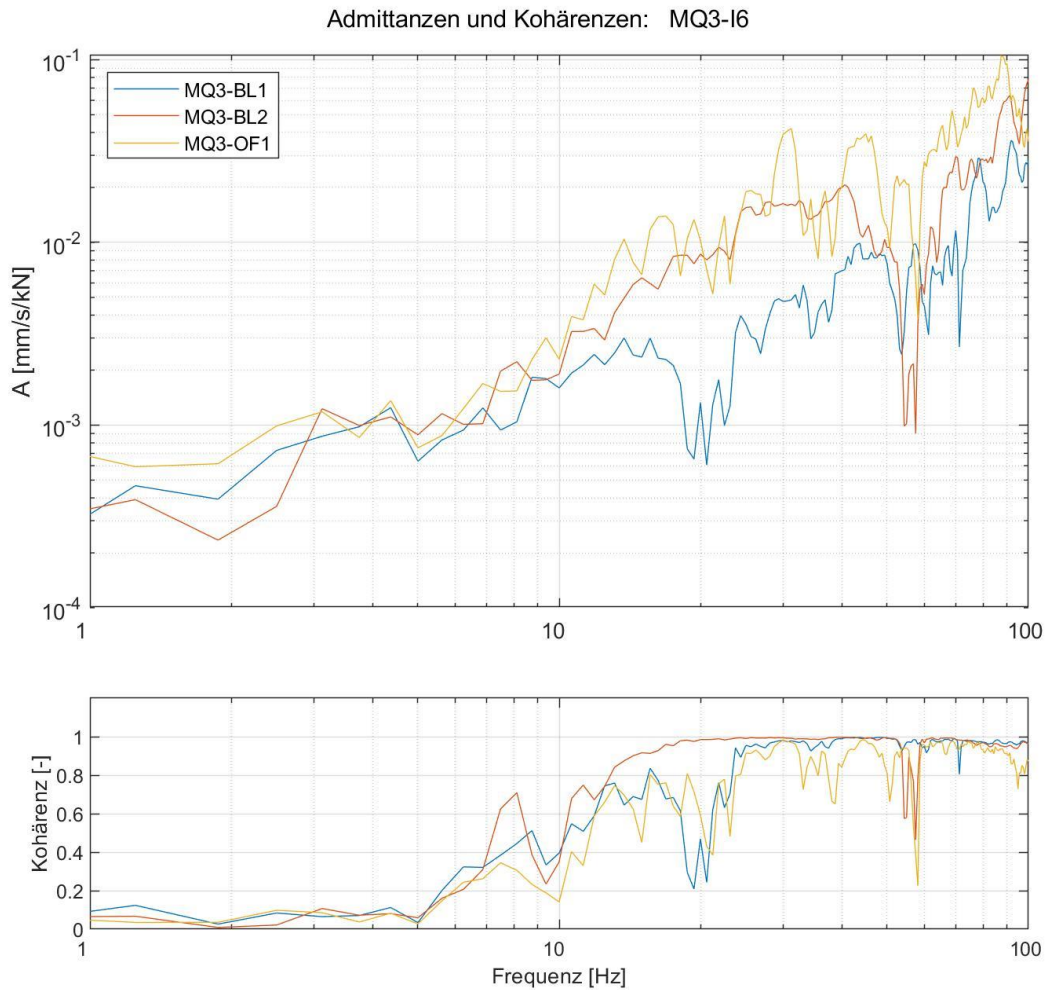


Abbildung 10-49: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I6)

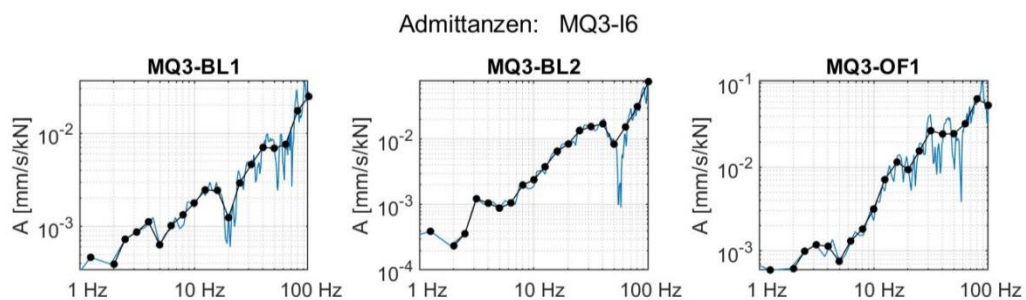


Abbildung 10-50: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittenzen (Anregung I6)

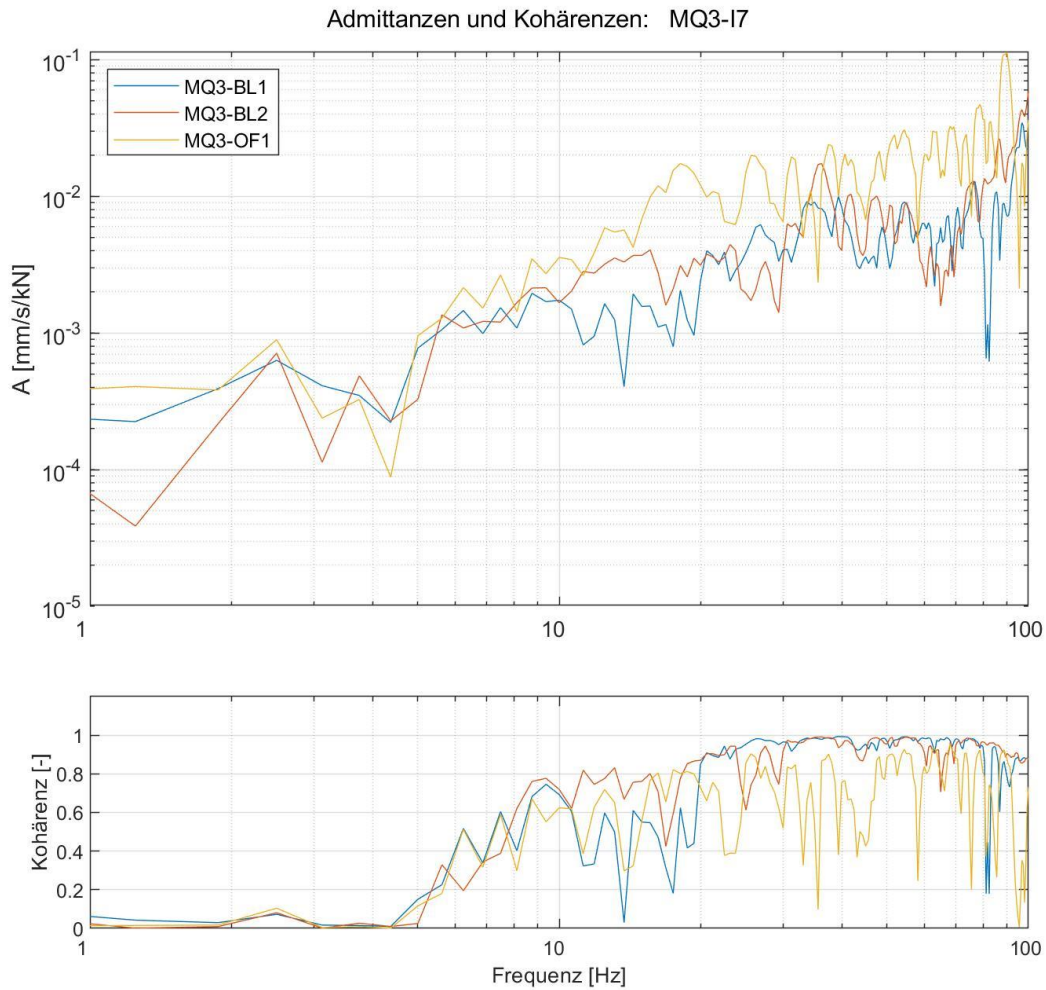


Abbildung 10-51: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I7)

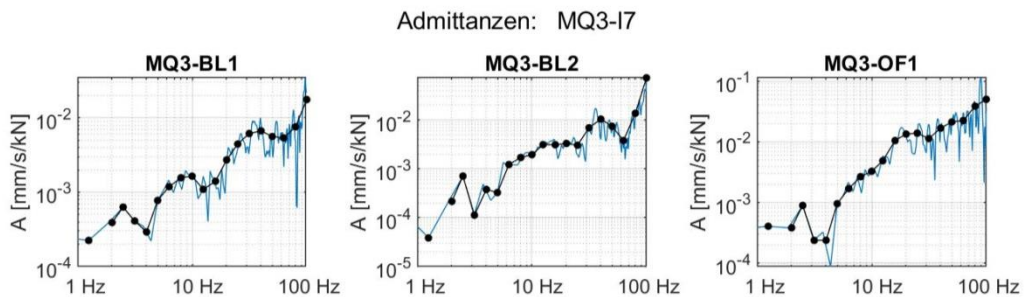


Abbildung 10-52: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I7)

### 10.4.5 Ergebnisse der Regressionsanalyse

Abnahme Admittanz:

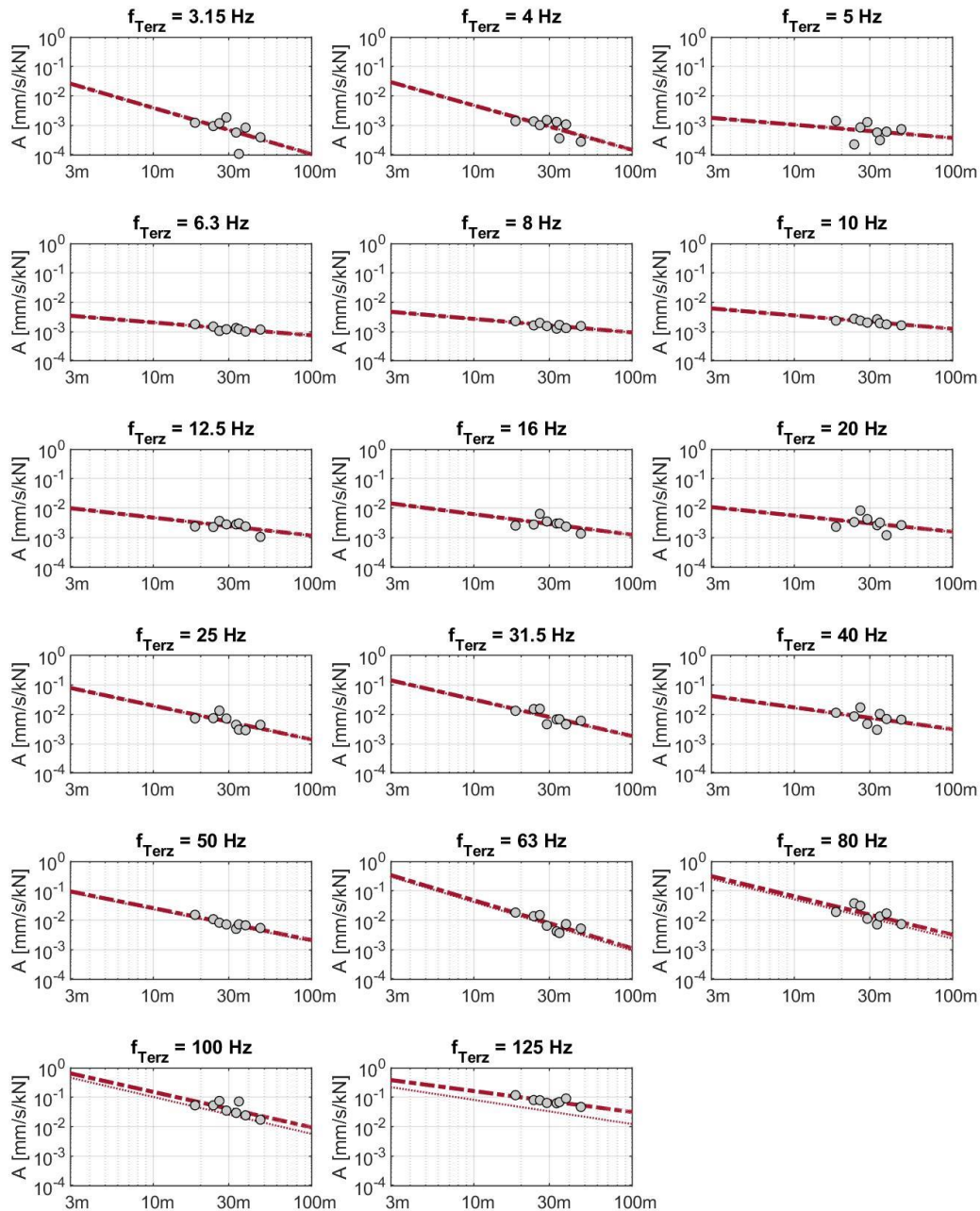


Abbildung 10-53: Ergebnisse der Regressionsanalyse: Abnahme der Admittanzen über die Entfernung



## 10.5 DYNPACT® am MQ4

### 10.5.1 Lageskizze

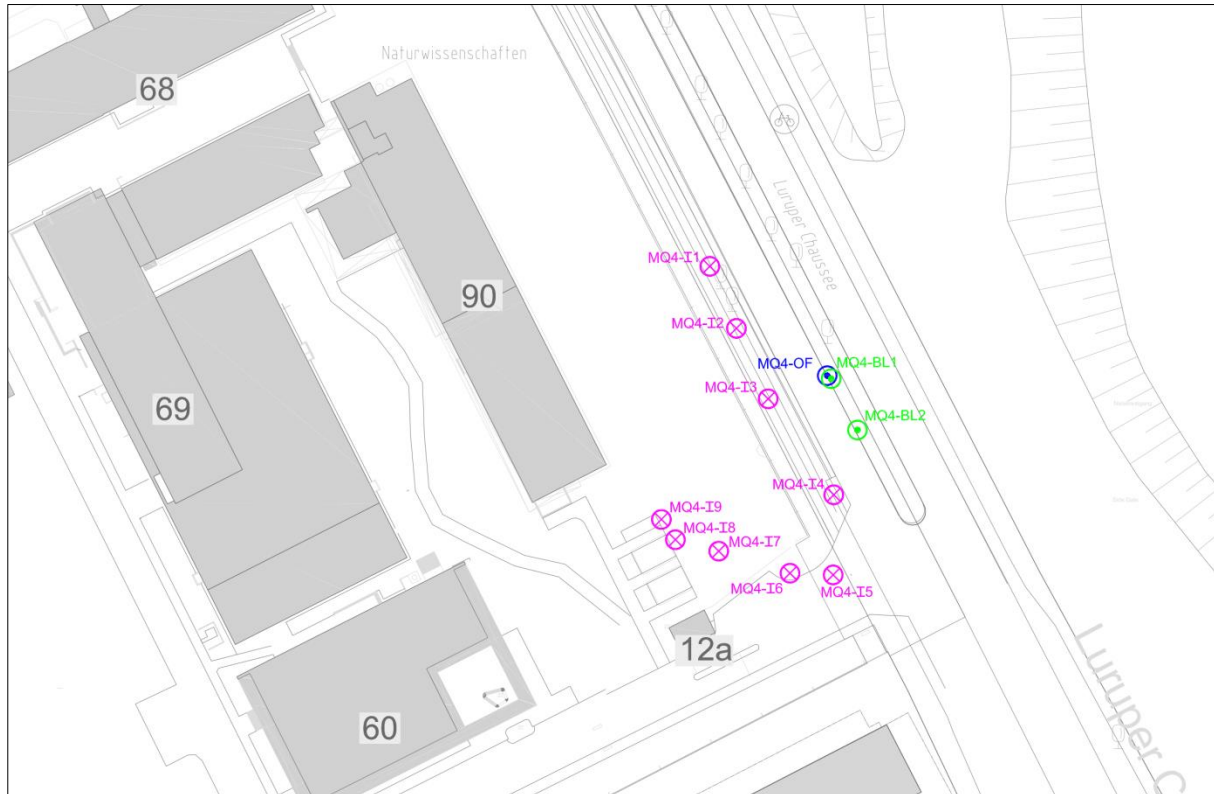


Tabelle 10-19: Lageskizze der Anregungs- und Messpunkte der DYNPACT®-Messungen am MQ4

### 10.5.2 Abstände

Sämtliche Mess- und Anregungspunkte wurden mit dem GNSS Gerät gemäß Tabelle 9-4 eingemessen und daraus die Abstände zwischen Mess- und Anregungspunkt ermittelt. Die folgende Tabelle listet die Entfernungen zwischen den Anregungspunkten mit DYNPACT® und den Bohrloch- bzw. Oberflächenmesspunkt in Metern.

Anregungspunkt Messpunkt	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
MQ4-BL1 / MQ4-OF	28,8	18,7	11,5	20,2	34,1	34,6	35,8	39,0	38,4
MQ4-BL2	38,4	27,5	16,5	12,0	25,6	27,6	32,1	37,0	37,5

Tabelle 10-20: Entfernungen [m] der Messpunkte zu den DYNPACT® Anregungspunkten am MQ4

10.5.3 Dokumentation der Messung

Kanal	Messpunkt	Lage	Aufstellbe- dingung	Sensor	Kabel	Messbereich [mm/s]
1	DYNPACT			Kraftmessdose	BNC 24	0-350 [kN]
2	MQ4-BL1	Bohrloch	Sonde	BS4	22	+/-5
3	MQ4-BL2	Bohrloch	Sonde	BS7	22	+/-5
4	MQ4-OF1	GOK neben Bohrloch 1	Spike	G4	22	+/-5

Tabelle 10-21: Messpunkte DYNPACT® am MQ4





	
MQ4-BL1	MQ4-BL2
	
MQ4-OF1-z	DYNPACT® im Einsatz am MQ4

Tabelle 10-22: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ4

Folgende Messungen mit dem DYNPACT® wurden am Messquerschnitt MQ4 durchgeführt:

Bezeichnung	Inhalt
Abklopfen	QS-Prüfung
MQ4-I1	Impact am MQ4-I1

MQ4-I2	Impact am MQ4-I2
MQ4-I3	Impact am MQ4-I3
MQ4-I4	Impact am MQ4-I4
MQ4-I5	Impact am MQ4-I5
MQ4-I6	Impact am MQ4-I6
MQ4-I7	Impact am MQ4-I7
MQ4-I8	Impact am MQ4-I8
MQ4-I9	Impact am MQ4-I9

Tabelle 10-23: Auflistung der durchgeführten Messungen am MQ4 mit DYNPACT®

10.5.4 Ergebnisse der Baugrundadmittanzen

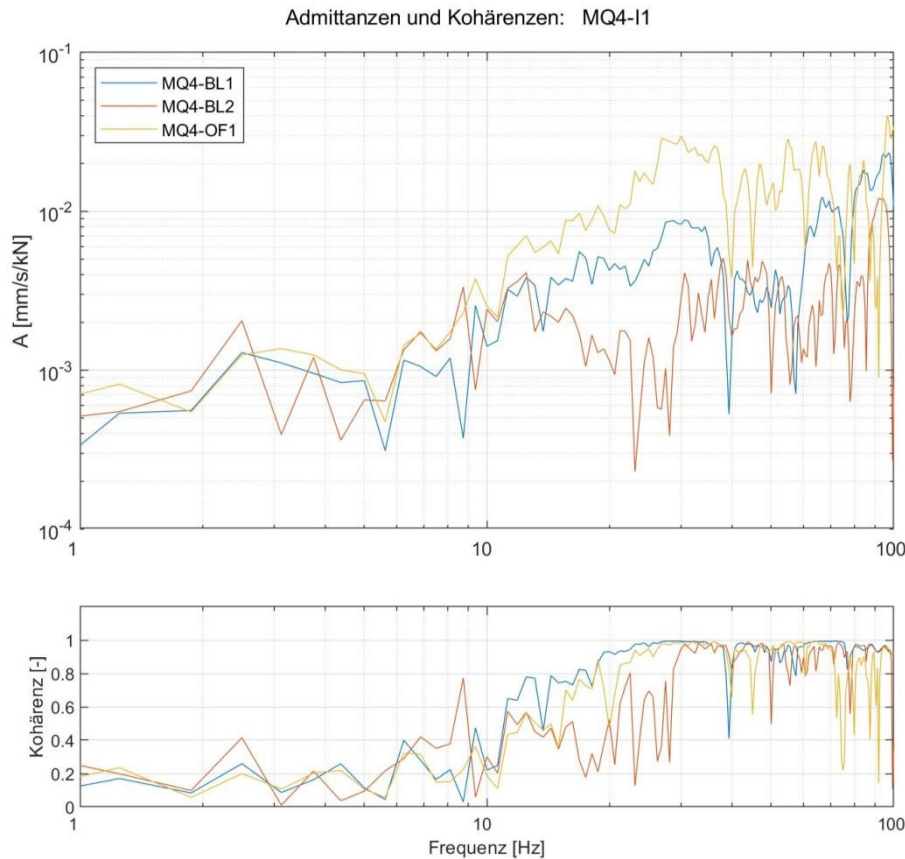


Abbildung 10-54: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I1)

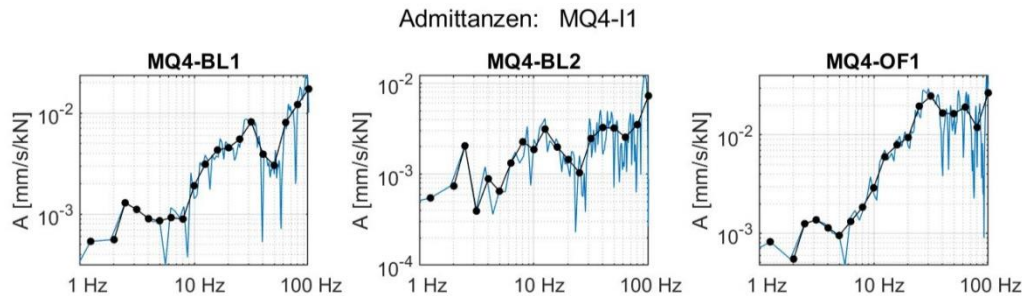


Abbildung 10-55: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I1)



Admittanzen und Kohärenzen: MQ4-I2

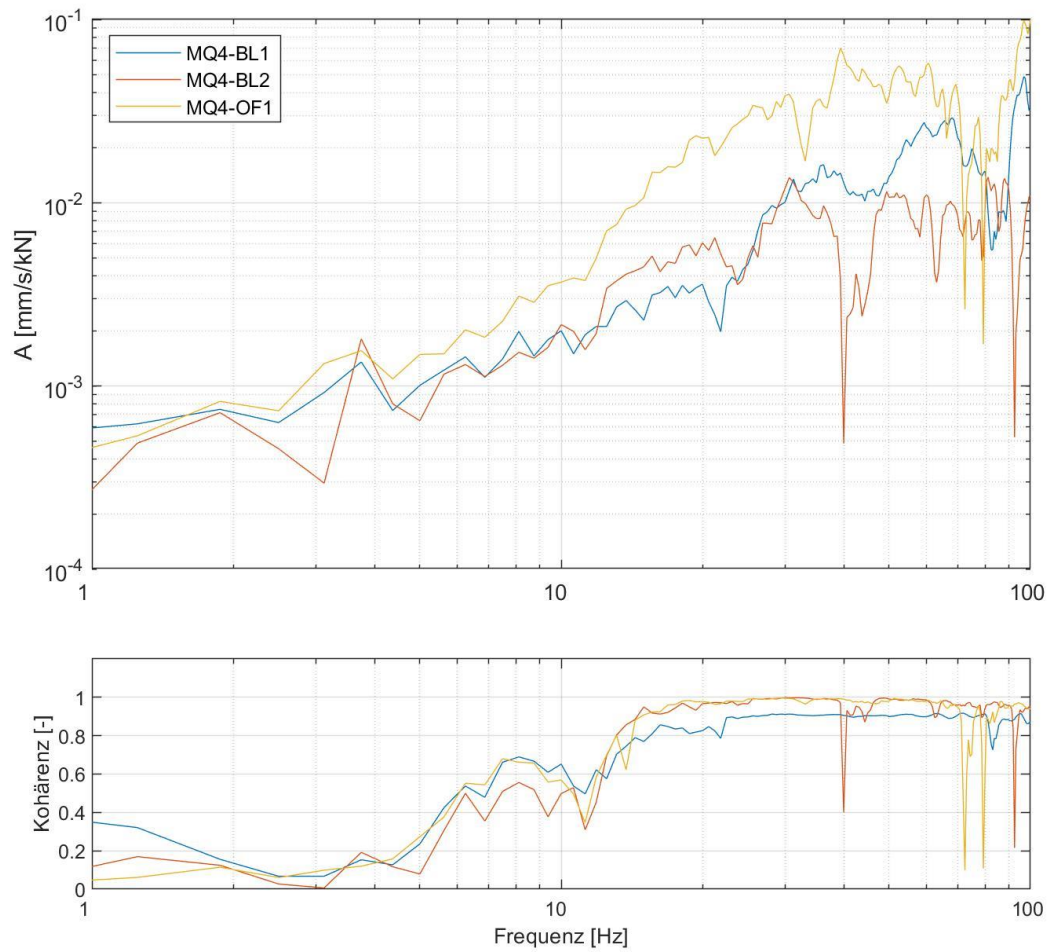


Abbildung 10-56: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I2)

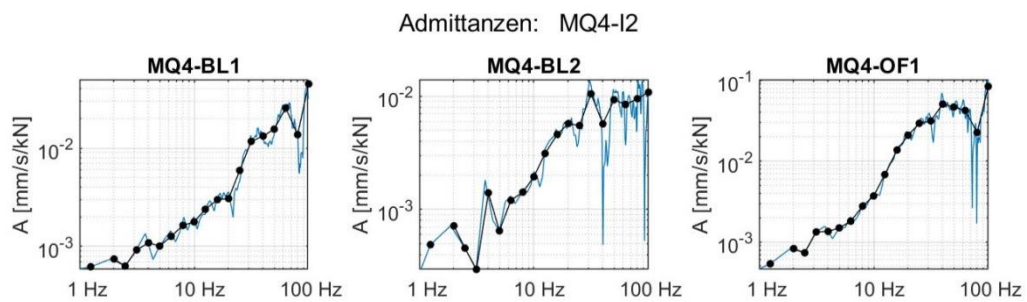


Abbildung 10-57: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I2)



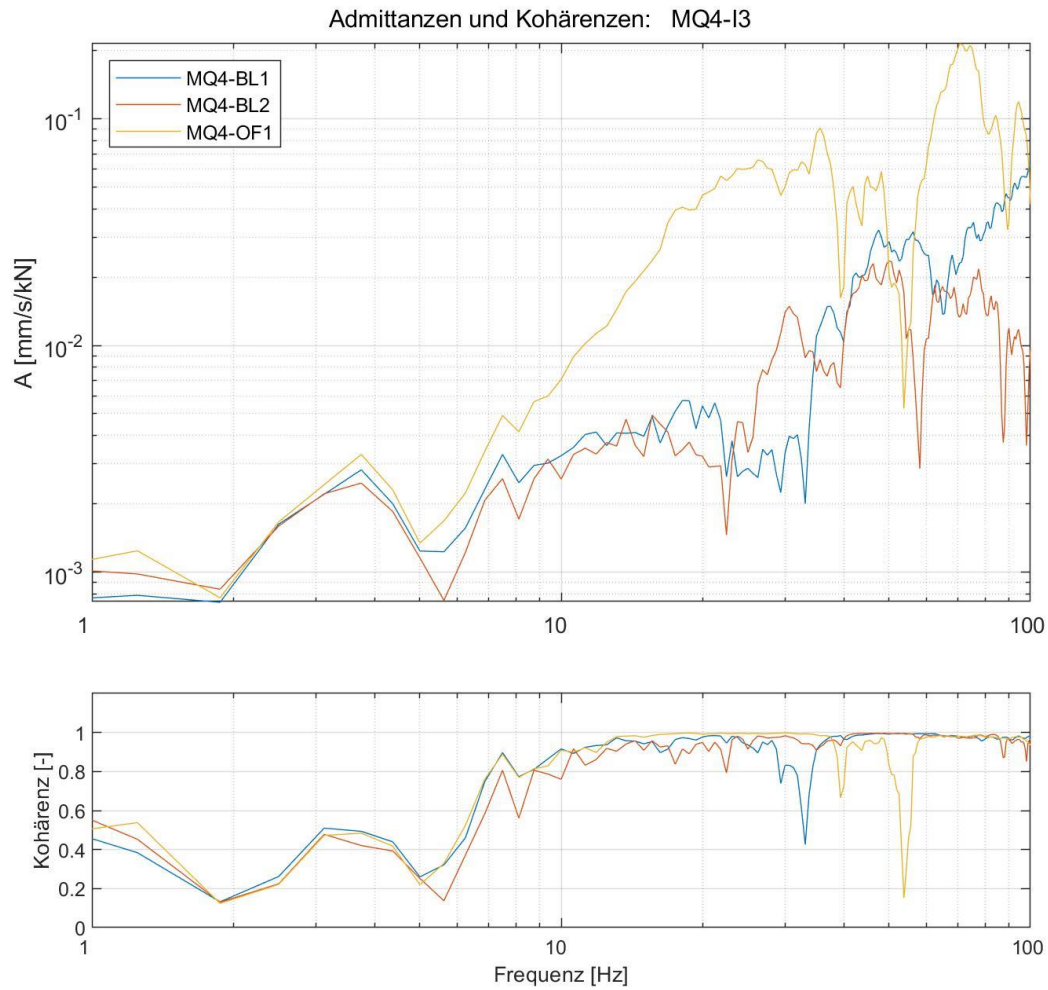


Abbildung 10-58: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I3)

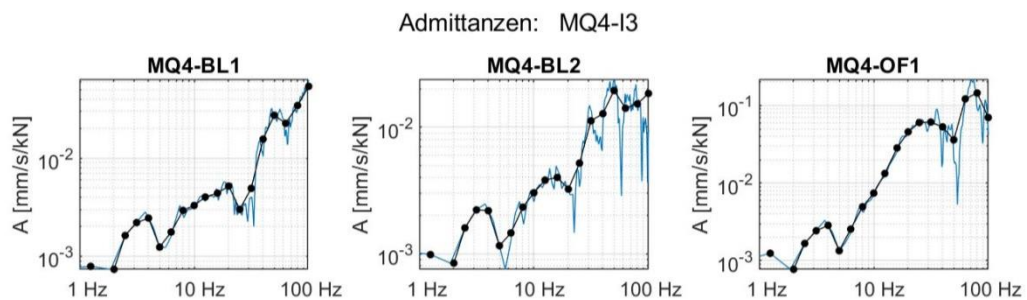


Abbildung 10-59: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I3)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ4-I4

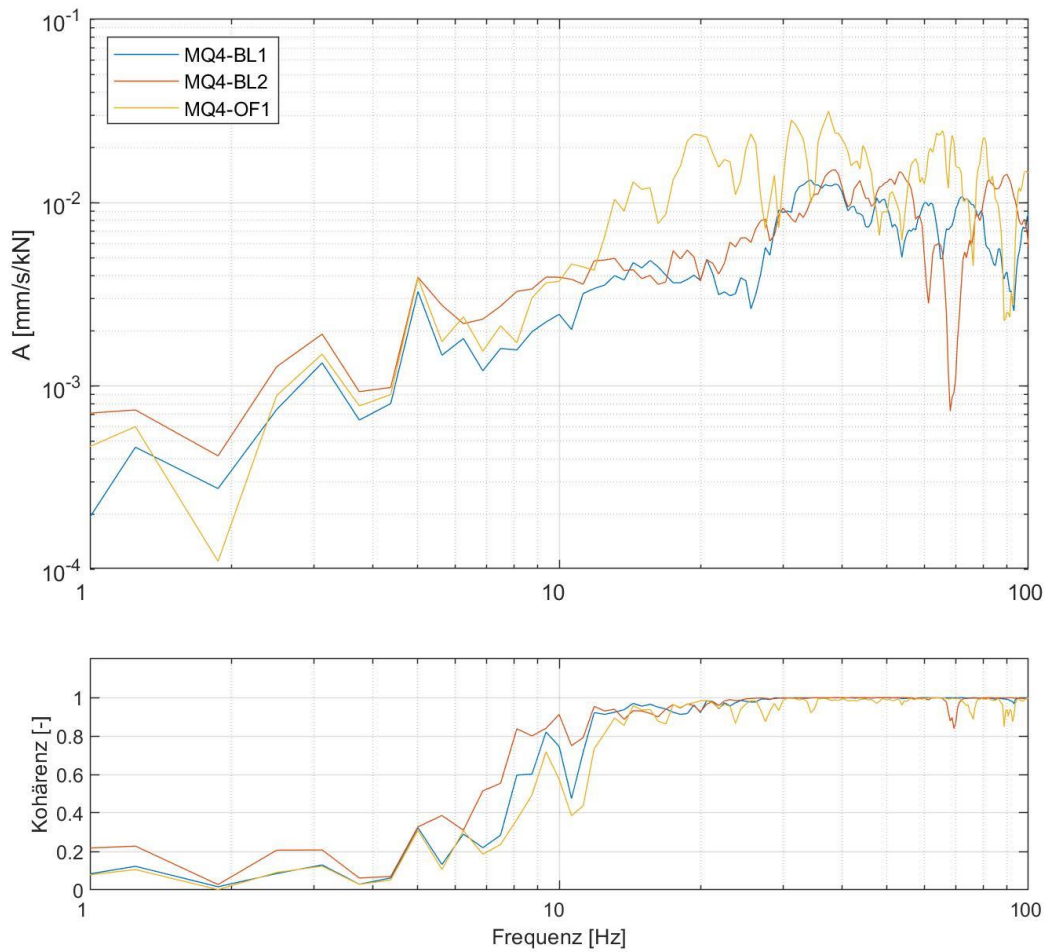


Abbildung 10-60: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I4)

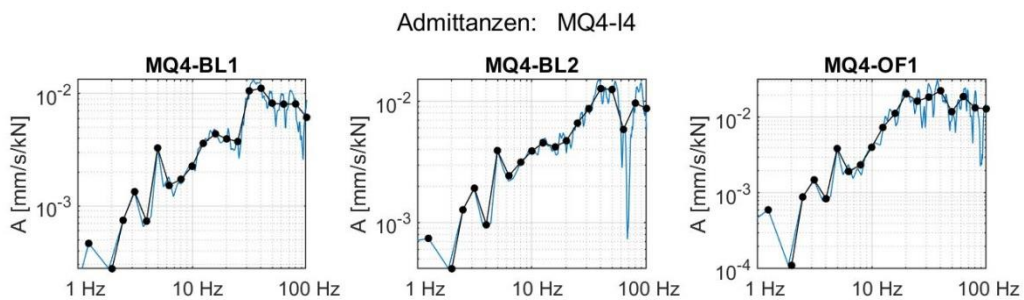


Abbildung 10-61: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I4)

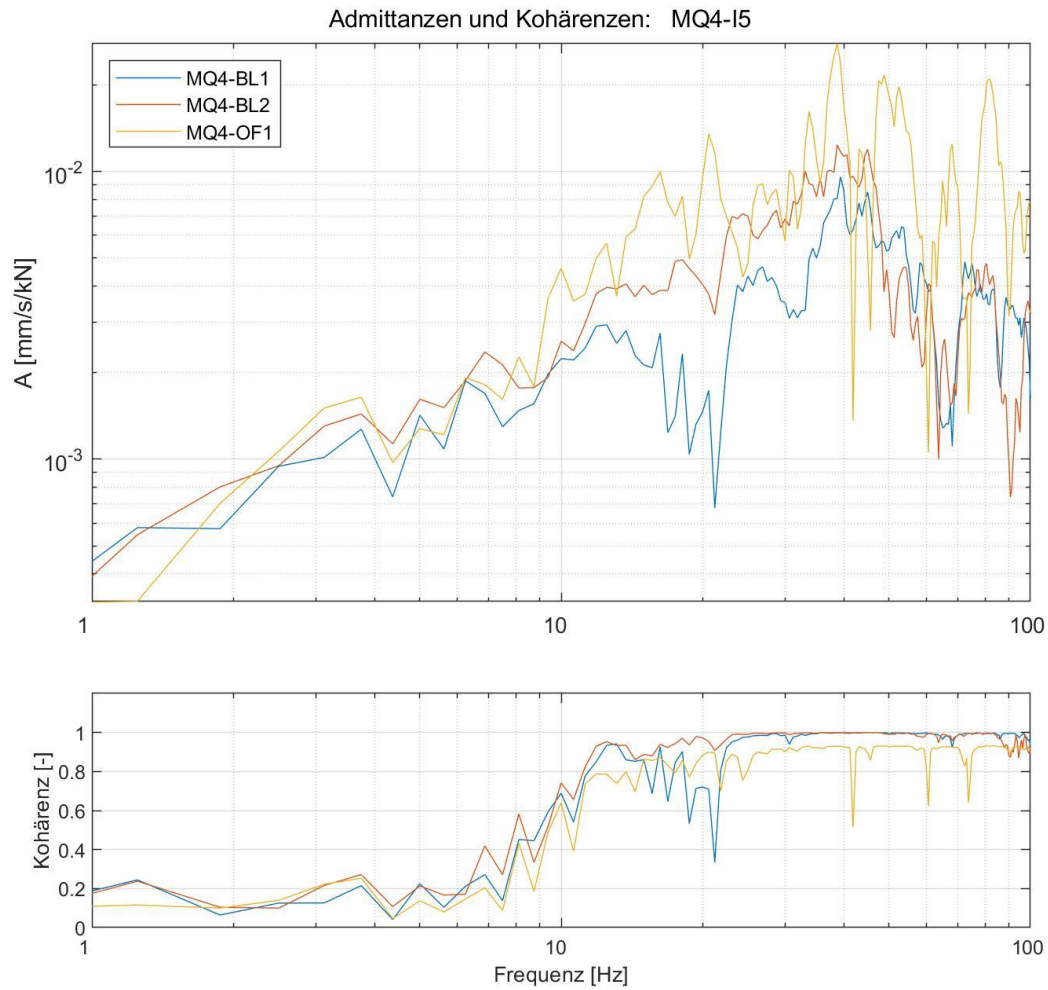


Abbildung 10-62: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I5)

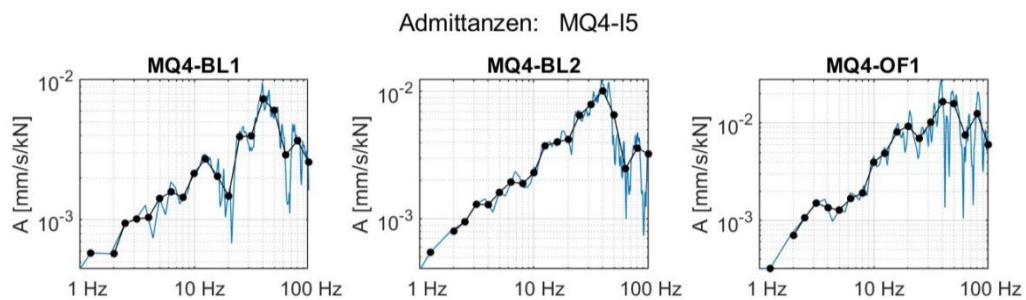


Abbildung 10-63: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I5)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ4-I6

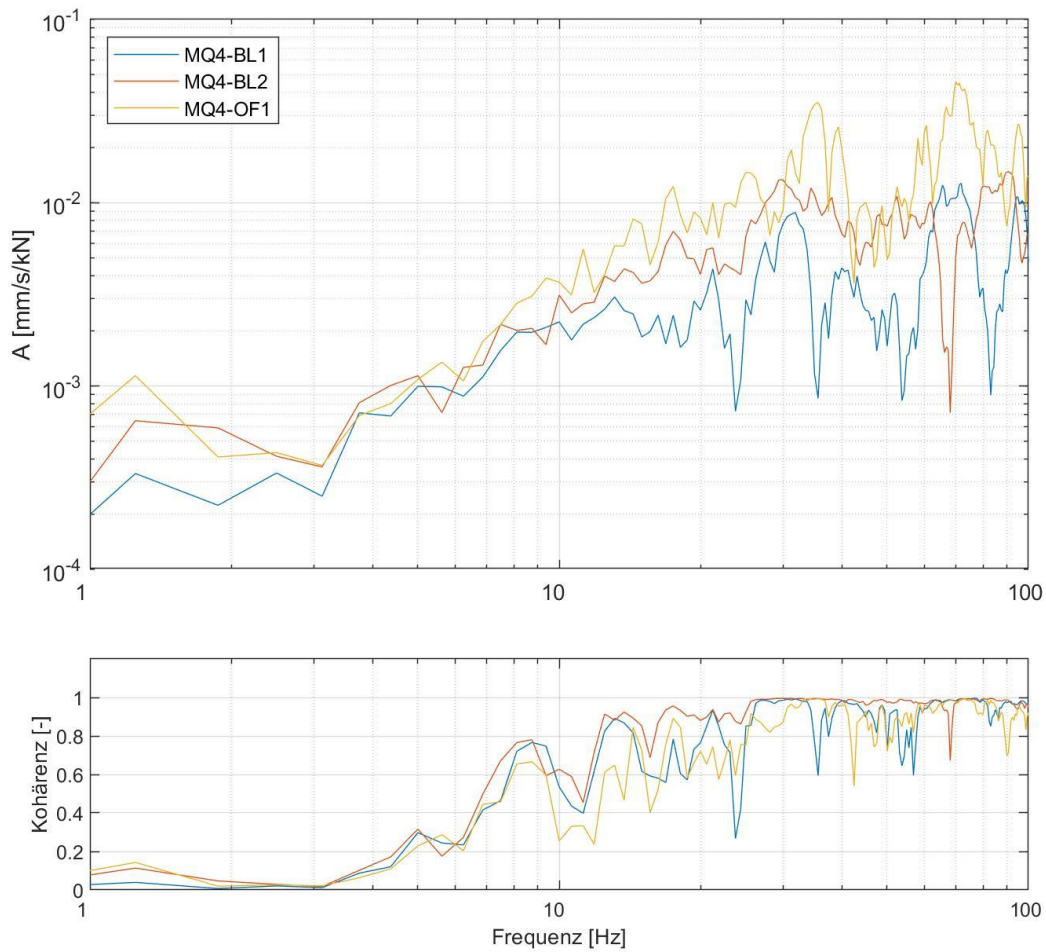


Abbildung 10-64: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I6)

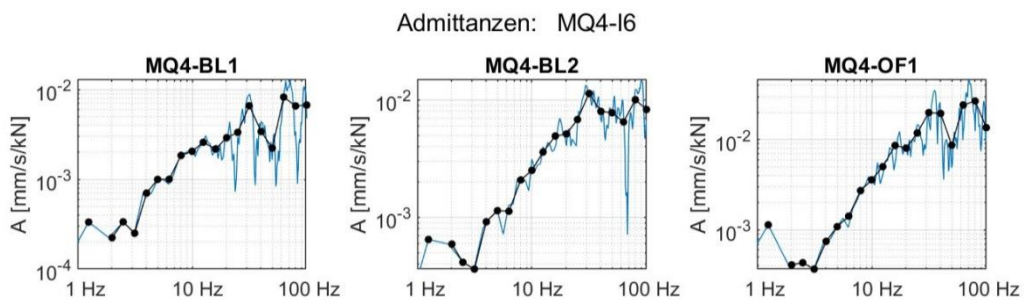


Abbildung 10-65: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittenzen (Anregung I6)



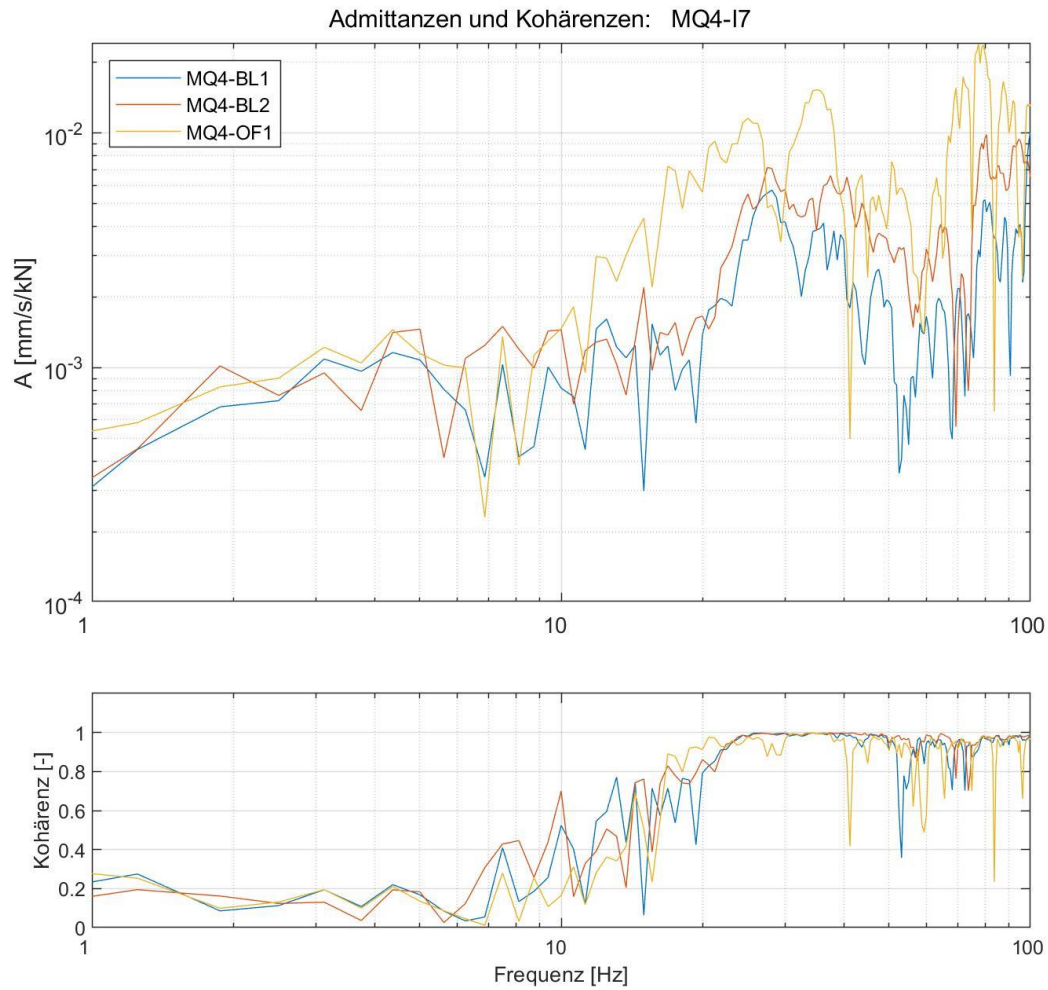


Abbildung 10-66: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I7)

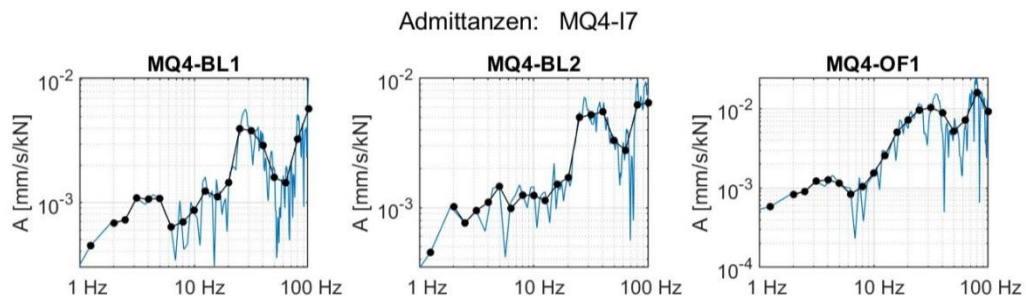


Abbildung 10-67: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I7)

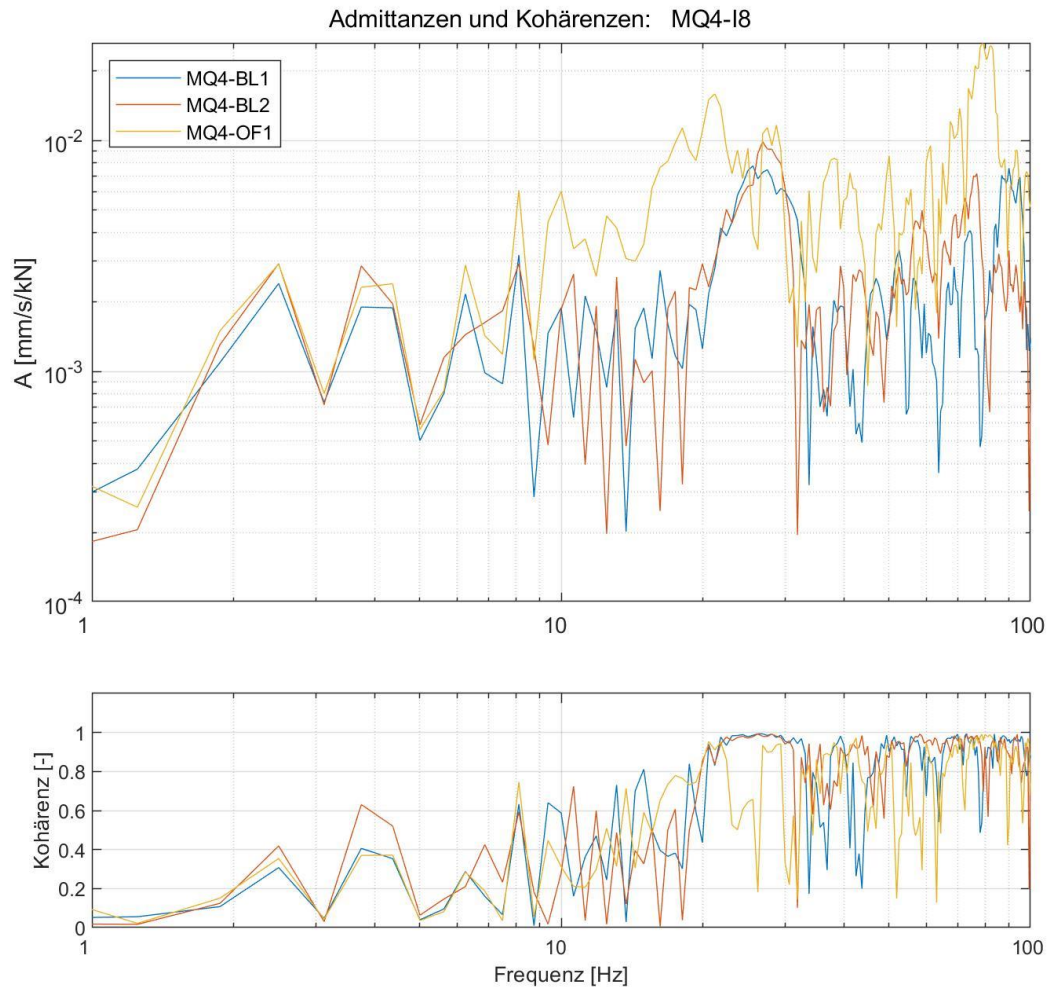


Abbildung 10-68: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I8)

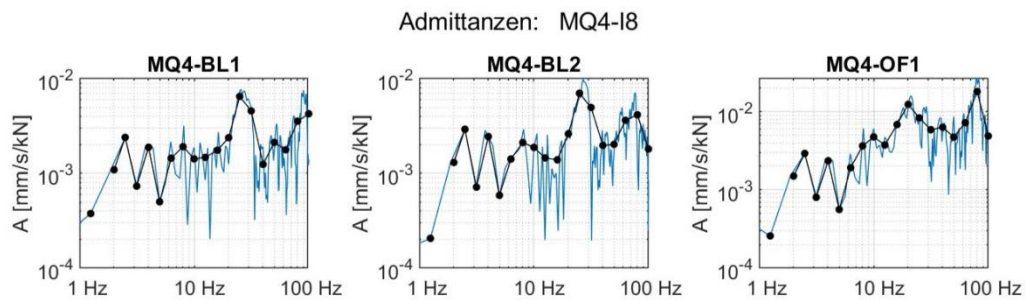


Abbildung 10-69: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I8)

Admittanzen und Kohärenzen: MQ4-I9

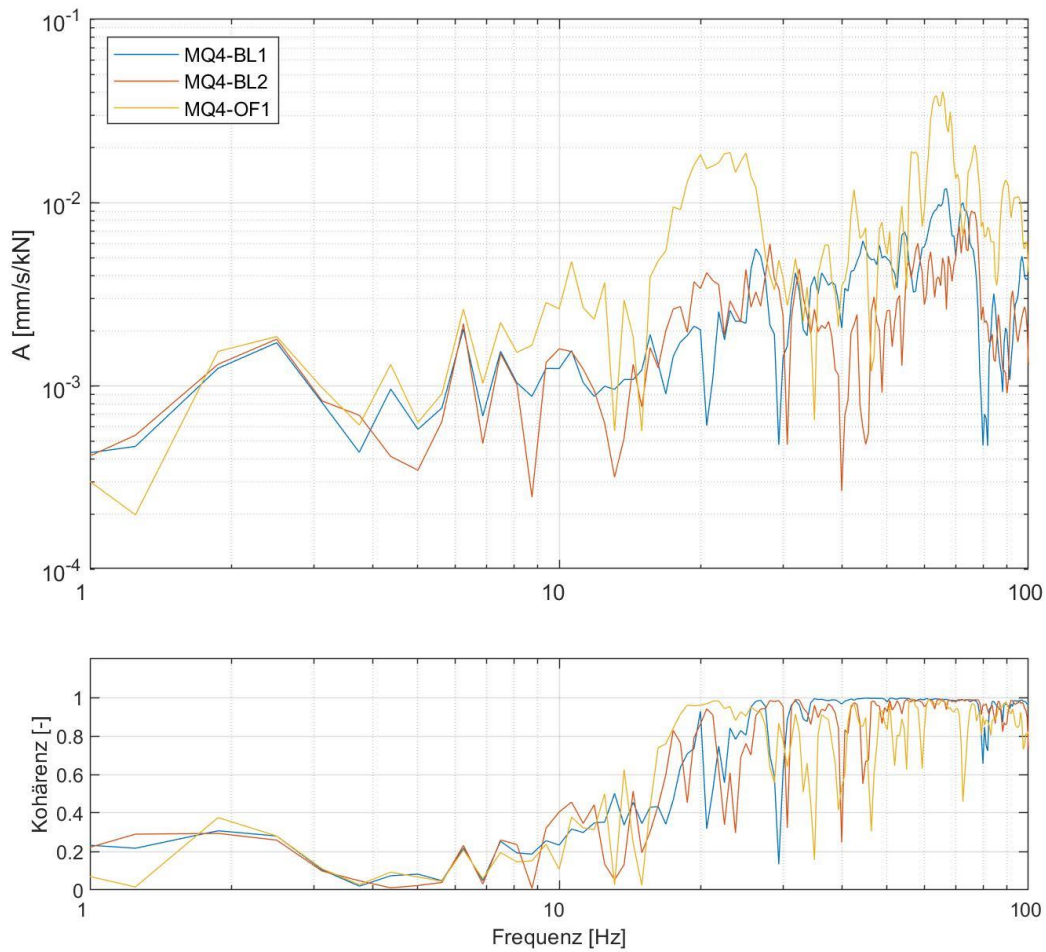


Abbildung 10-70: Ausgewertete Admittanzen sowie zugehörige Kohärenzen (Anregung I9)

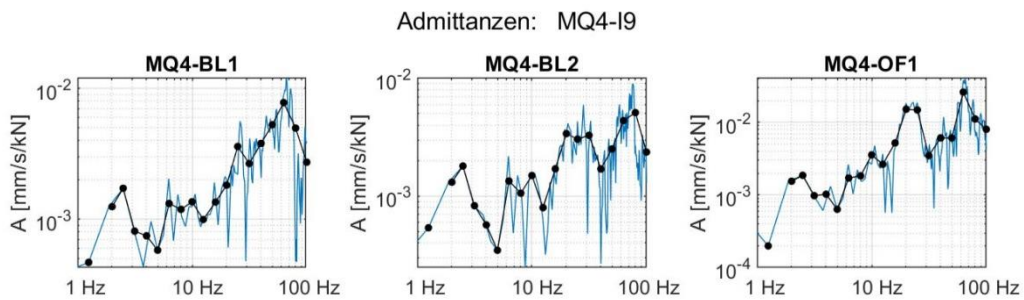


Abbildung 10-71: Ausgewertete schmalbandige Admittanzen und Terzadmittanzen (Anregung I9)

### 10.5.5 Ergebnisse der Regressionsanalyse

Abnahme Admittanz:

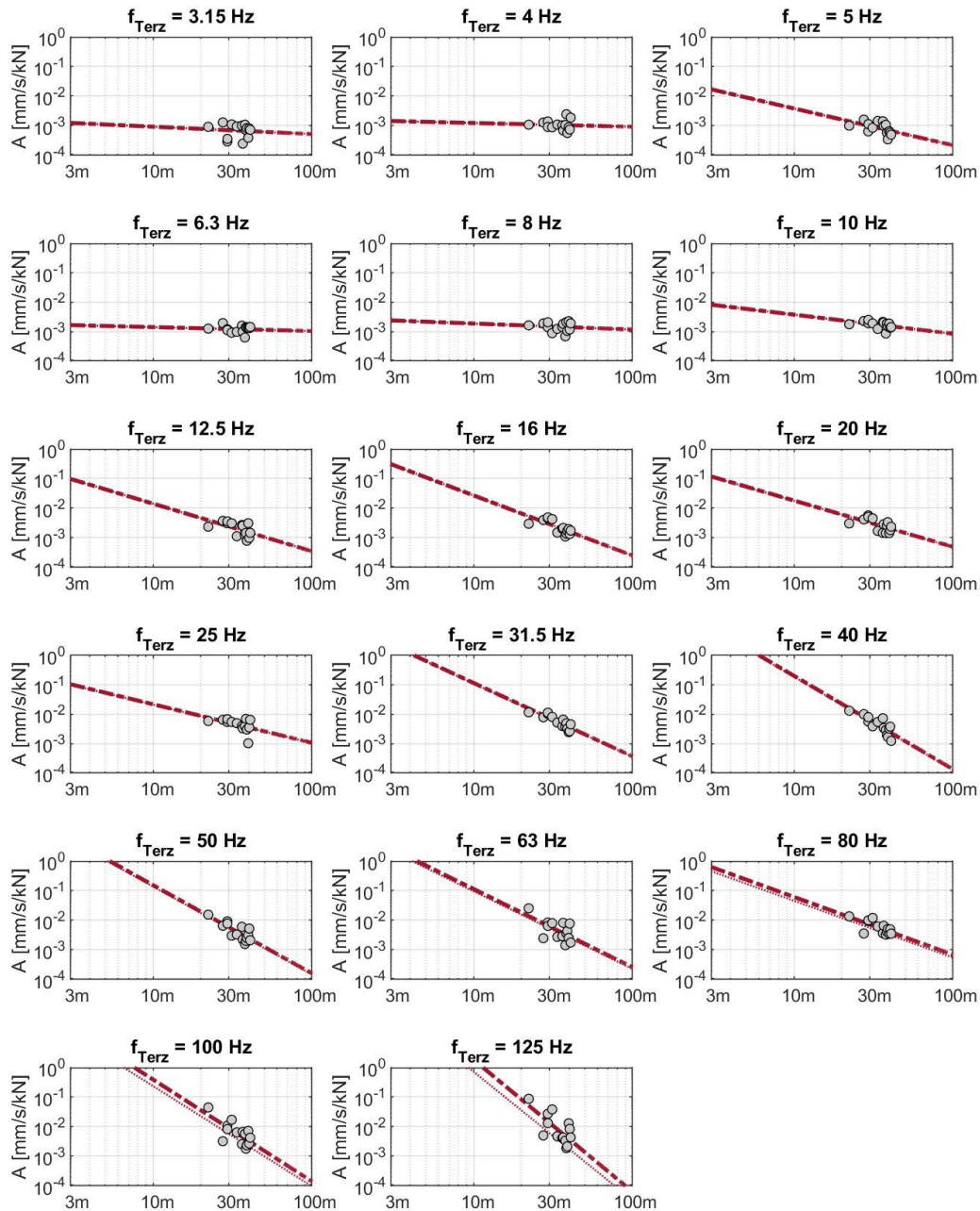


Abbildung 10-72: Ergebnisse der Regressionsanalyse: Abnahme der Admittanzen über die Entfernung



## 11 Anlage IV: Dokumentation der MASW-Baugrundmessung

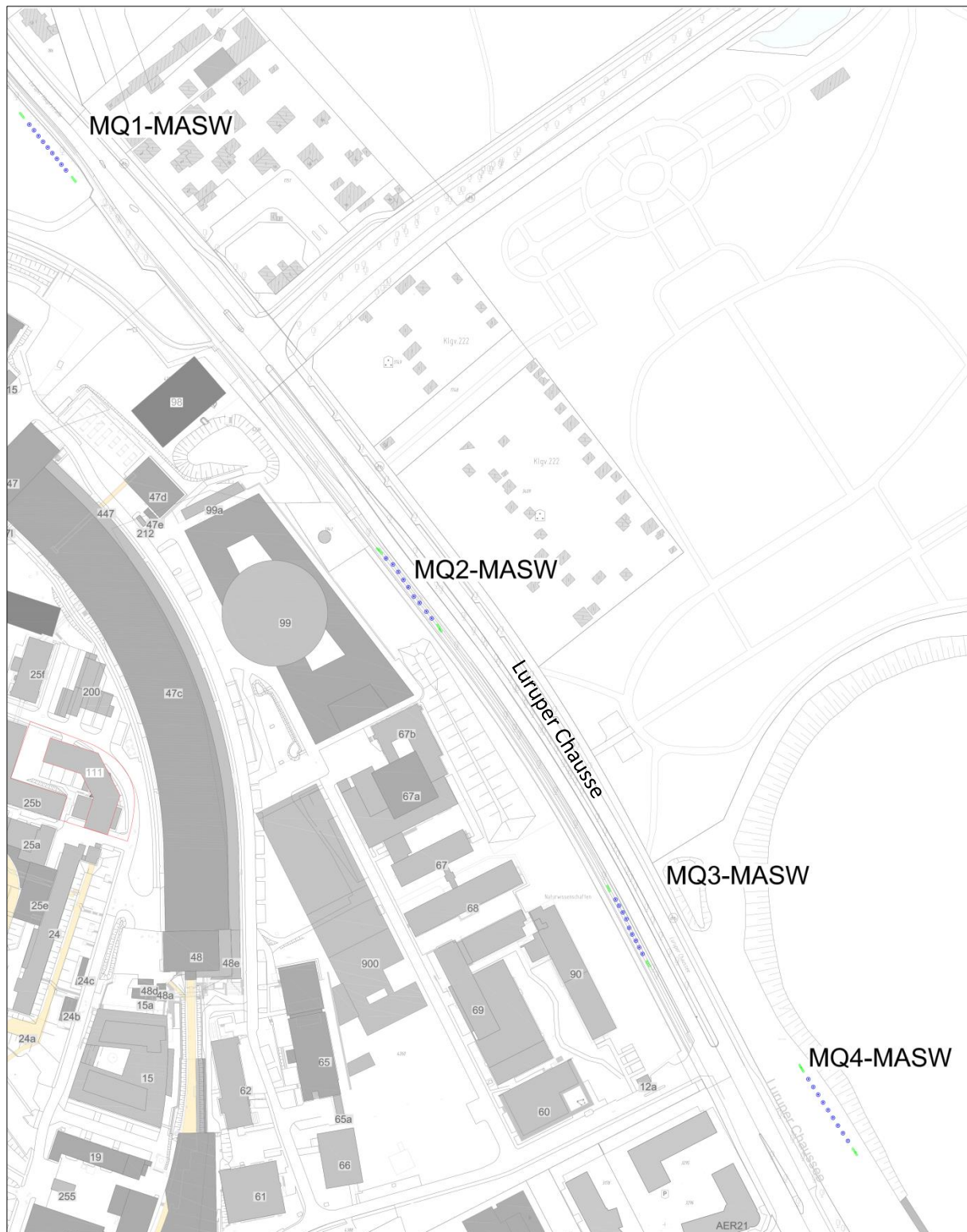
### 11.1 Übersicht

<b>Messort</b>	Hamburg, Luruper Chaussee, im Bereich von MQ1-MQ4
<b>Messdatum</b>	MQ1 am 28.05.21; MQ2 am 02.06.21; MQ3 am 02.06.21; MQ4 am 01.06.21
<b>Messpersonal</b>	
<b>Wetter</b>	18° C, bewölkt
<b>Anzahl Messquerschnitte</b>	4 Stück, Je Messquerschnitt einer (MQ1-MQ4)
<b>Art der Messungen je Querschnitt</b>	MASW, ReMi, HVSR

**Tabelle 11-1: Allgemeine Angaben zur Baugrundmessung in Hamburg an der Luruper Chaussee**

Ziel der Baugrunduntersuchung ist, das Scherwellengeschwindigkeit-Profil und das Profil des dynamischen Schubmoduls im Bereich des zukünftig unterirdisch verlaufenden S-Bahn Tunnels entlang der Luruper Chaussee zu erhalten.

Die Baugrunduntersuchungen erfolgt mit der MASW-Methode. Sie wurde durchgeführt an vier unterschiedlichen Stellen. Dabei wurde im Bereich der Messquerschnitte MQ1 bis MQ4 je eine Messkette nahezu parallel zur Luruper Chaussee installiert, vgl. Abbildung 11-1. Der Aufbau wurde entsprechend der Topologie so gewählt, dass eine größtmögliche Messkette gebildet und eine gute Sensoranbindung an das Erdreich erreicht werden konnte.



**Abbildung 11-1: Lage der MASW-Messketten an den Messquerschnitten MQ1, MQ2, MQ3 und MQ4 entlang der Luruper Chaussee**

Bei der Methode MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) wird mittels Messung und Analyse der dispersiven Eigenschaften der Oberflächenwellen das Scherwellenprofil des Baugrundes ermit-

telt. Die detaillierte Beschreibung der Auswertung der MASW-Methode findet sich im Gutachten über die Referenzmessung an der Königstraße [1].

Die Anregung der Ausbreitungsmessung erfolgt bei dieser Messung mit Hilfe eines großen Impulshammers (12 kg) mit integrierter Kraftmessdose sowie dem Shearbeam, vgl. Abbildung 11-3.



Abbildung 11-2: Großer Impulshammer mit Shearbeam im Einsatz

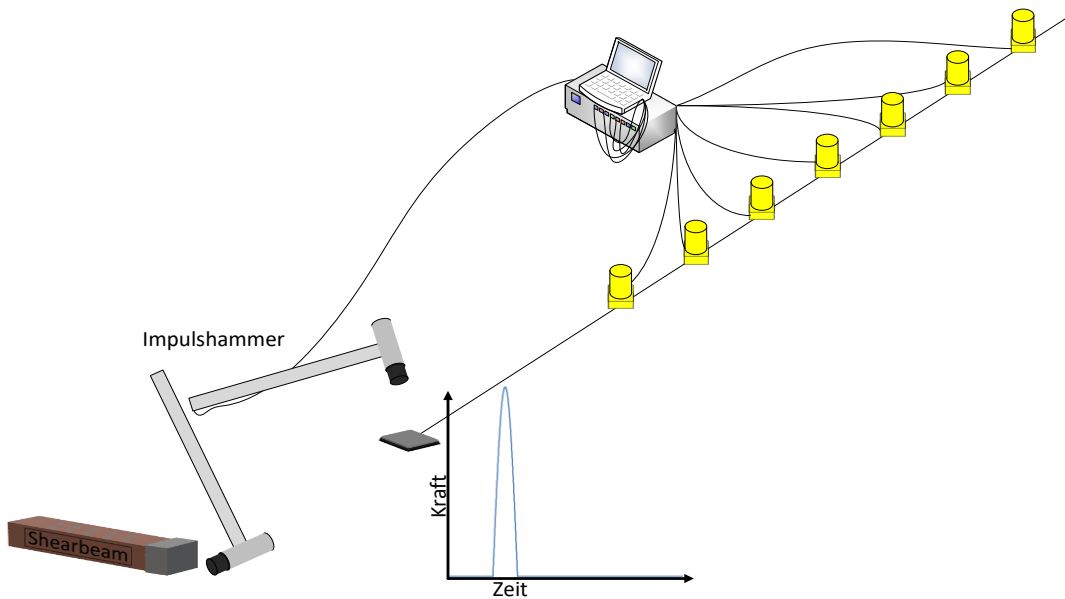


Abbildung 11-3: Großer Impulshammer (Impuls) im Einsatz für eine MASW-Messung

Zur Messung der Schwinggeschwindigkeiten wurde folgendes Messequipment verwendet:

Geschwindigkeitssensoren	Geophone 1 – 315 Hz gemäß DIN 45669 Sensornummer gemäß Tabelle „Übersicht der Messpunkte“
Messverstärker Geophone	Wölfel, 12 Kanal, SN: 020.4610.6021.12 (V16)
Impulshammer	12kg-Impulshammer, Beschleunigungssensor A2 (10 mV/g)
Messverstärker Impulshammer	MMF 1Kanal; SN: 004003 M68D1(V10)
A/D Wandlerkarte	NI USB-6210, 16Bit (MQ2, MQ3)

	NI DAQCard-6036 E, 16 AE, 16bit, 200kS/s (MQ1, MQ4)
<b>Messrechner</b>	Panasonic FZ-55, SN:0ATCA07808 (MQ1, MQ4) Panasonic CF-53, SN: 7CTCA98538 (MQ2, MQ3)
<b>Letzte Kalibrierung der Messkette</b>	03/2020 (Geophone, Verstärker)
<b>Messsoftware</b>	Meda_AD Version 2019-1

**Tabelle 11-2: Verwendetes Messequipment**

	<b>ReMi bzw. HVSR</b>	<b>MASW (active)</b>
<b>Equipment</b>	Geophone	Impulshammer + Geophone
<b>Anzahl Messkanäle</b>	9 (HVSR 3)	10
<b>Bandbreite</b>	400 Hz	1000Hz
<b>Abtastfrequenz</b>	1024 Hz	2560Hz
<b>Antialiasing</b>	315 Hz	-

**Tabelle 11-3: Messparameter**

Folgende Ergebnisse werden nachfolgend zu den 4 untersuchten Messquerschnitten dargestellt:

- Dispersion der Rayleigh- und Lovewellen bei aktiver Anregung (Messung und Modell)
- Dispersion der Rayleighwellen bei ambienter Anregung (Messung und Modell)
- HVSR (Messung und Modell)
- Modellierete Profile der Scherwellengeschwindigkeiten und dyn. Schubmoduli



## 11.2 Baugrundmessung am MQ1

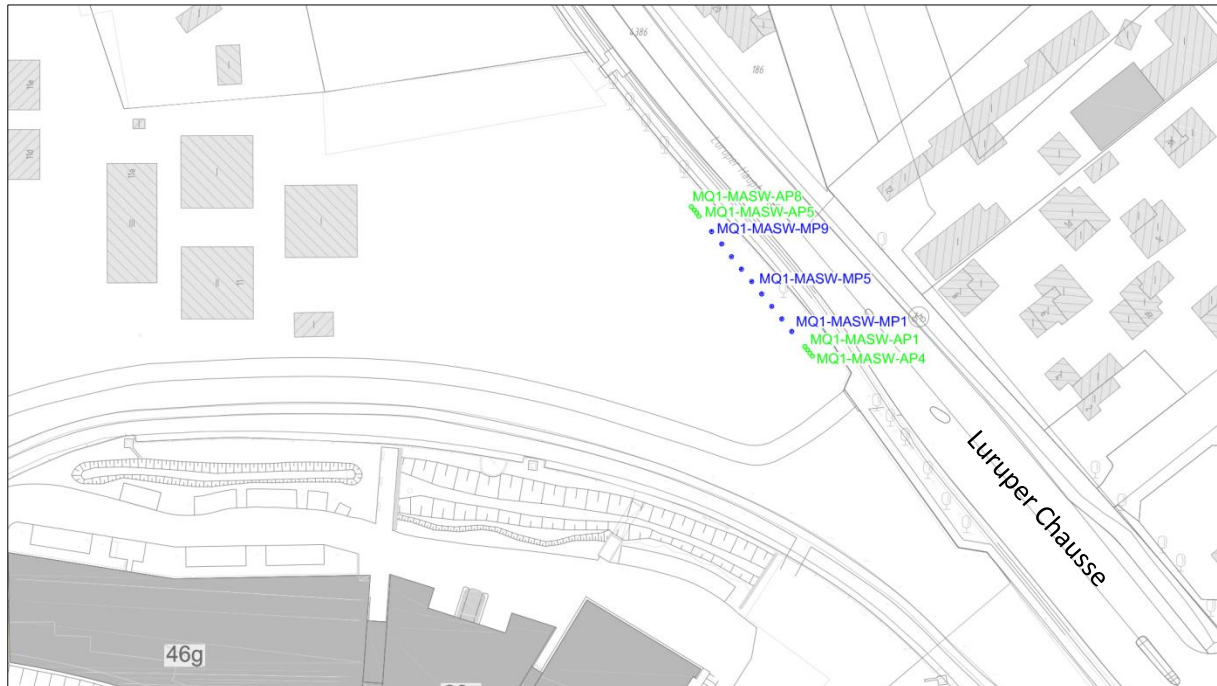


Abbildung 11-4: Lage der MASW-Messketten im Bereich des Messquerschnittes MQ1

Die Lage der einzelnen Messpunkte, sowie Anregungspunkte ist in der nachfolgenden Abbildung skizziert. Die Messkette wurde parallel zu der Luruper Chaussee in etwa 15m Entfernung (zur nächstgelegenen Fahrspur (hier die westliche Fahrspur) aufgebaut.

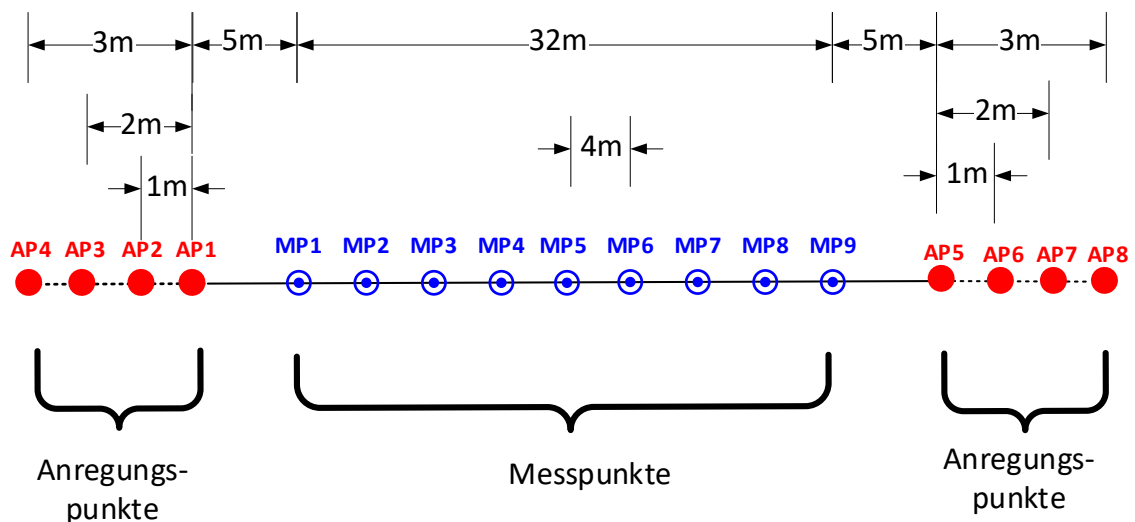






Abbildung 11-5: Messskizze der MASW Messung am MQ1

Kanal	Messpunkt	Maßbandmeter	Aufstellort	Aufstellungsbedingung	Sensor	Kabel/Splitter	Messbereich [mm/s]		
							vorwärts	rückwärts	REMI (ambient)
1	MP1	8m	Parkplatz	Spike	G133	123/157	+/-5	+/-2	+/-2
2	MP2	12m	Parkplatz	Spike	G11	123/157	+/-2	+/-2	+/-2
3	MP3	16m	Parkplatz	Spike	G127	123/157	+/-2	+/-2	+/-2
4	MP4	20m	Parkplatz	Spike	G28	-	+/-2	+/-2	+/-2
5	MP5	24m	Parkplatz	Spike	G135	-	+/-2	+/-2	+/-2
6	MP6	28m	Parkplatz	Spike	G137	-	+/-2	+/-2	+/-2
7	MP7	32m	Parkplatz	Spike	G77	113/161	+/-2	+/-2	+/-2
8	MP8	35m	Parkplatz	Spike	G75	113/161	+/-2	+/-2	+/-2
9	MP9	40m	Parkplatz	Spike	G131	113/161	+/-2	+/-5	+/-2
HVSR ambient	MP100	24m	Parkplatz	Spike	G155	-	-	-	+/-2

Tabelle 11-4: Kanalbelegung der Baugrundmessung MQ1

	
MP1	MP2
	
MP3	MP4



MP5	MP6
MP7	MP8
MP9	Shearbeam-Anregung (SB-Anregung)

Tabelle 11-5: Fotodokumentation der Messpunkte der MASW Messung am MQ1 (MASW, ReMi, HVSR)



## Ergebnisse der Baugrundmessung

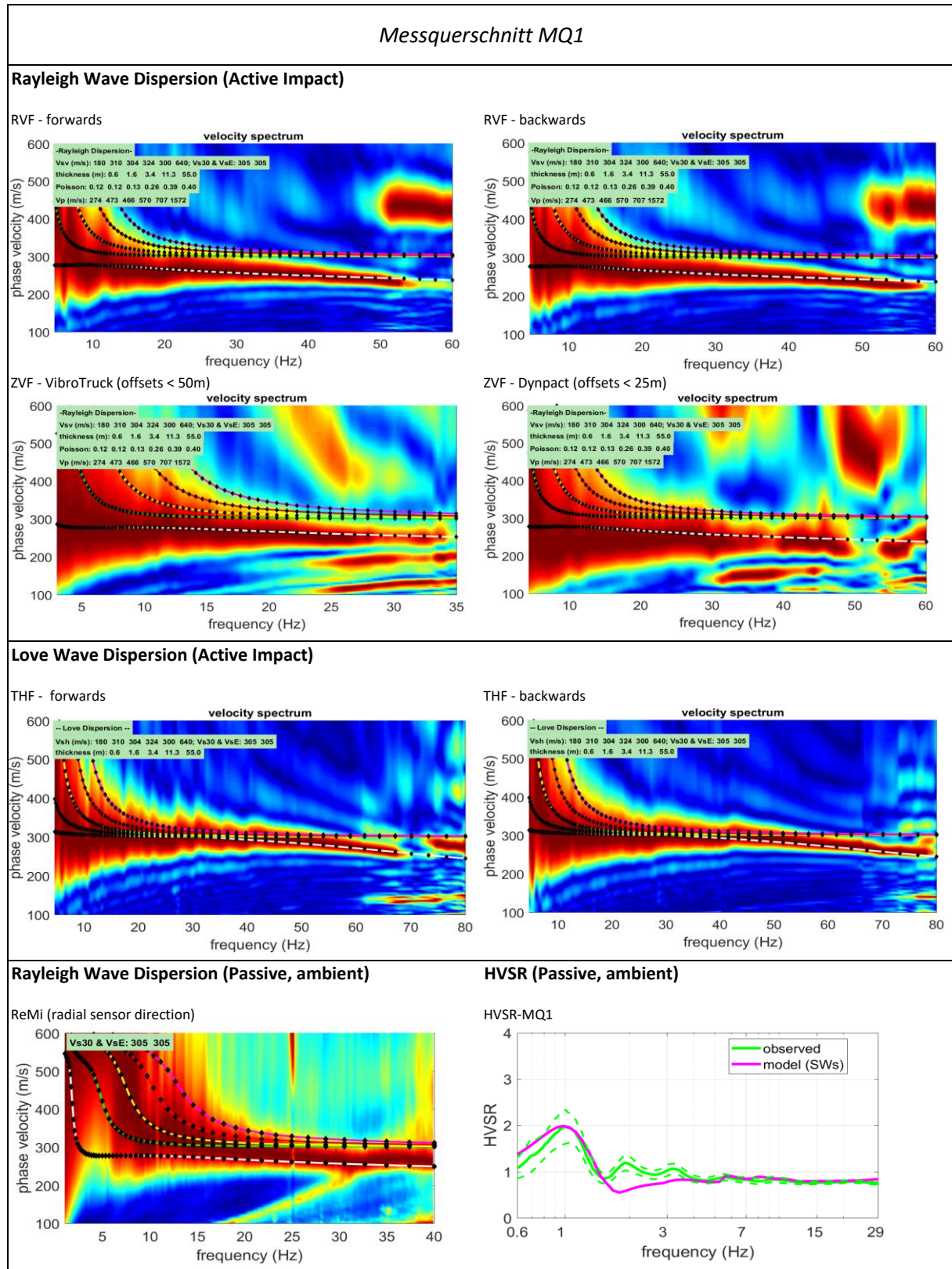


Abbildung 11-6: Messtechnisch ermittelte und modellierte Verläufe von Dispersion und HVSR am Messquerschnitt MQ1



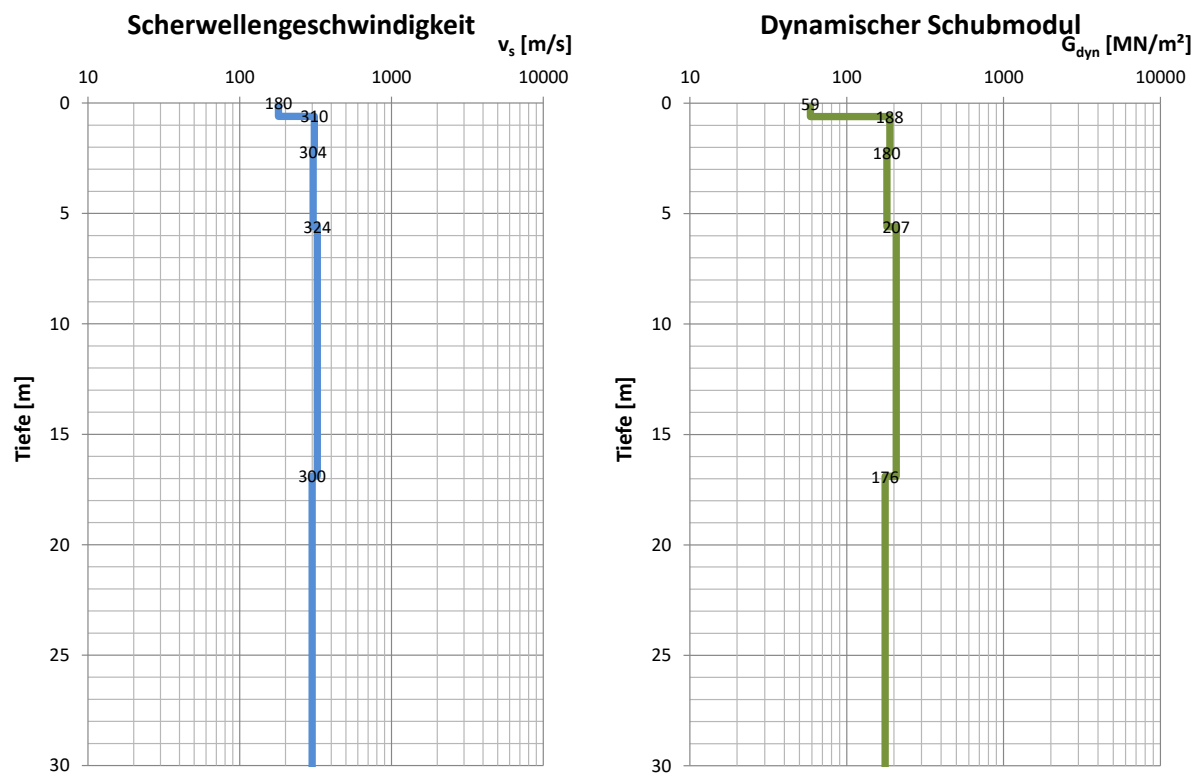


Abbildung 11-7: Ermittelte Bodenprofile am Messquerschnitt MQ1

### 11.3 Baugrundmessung am MQ2

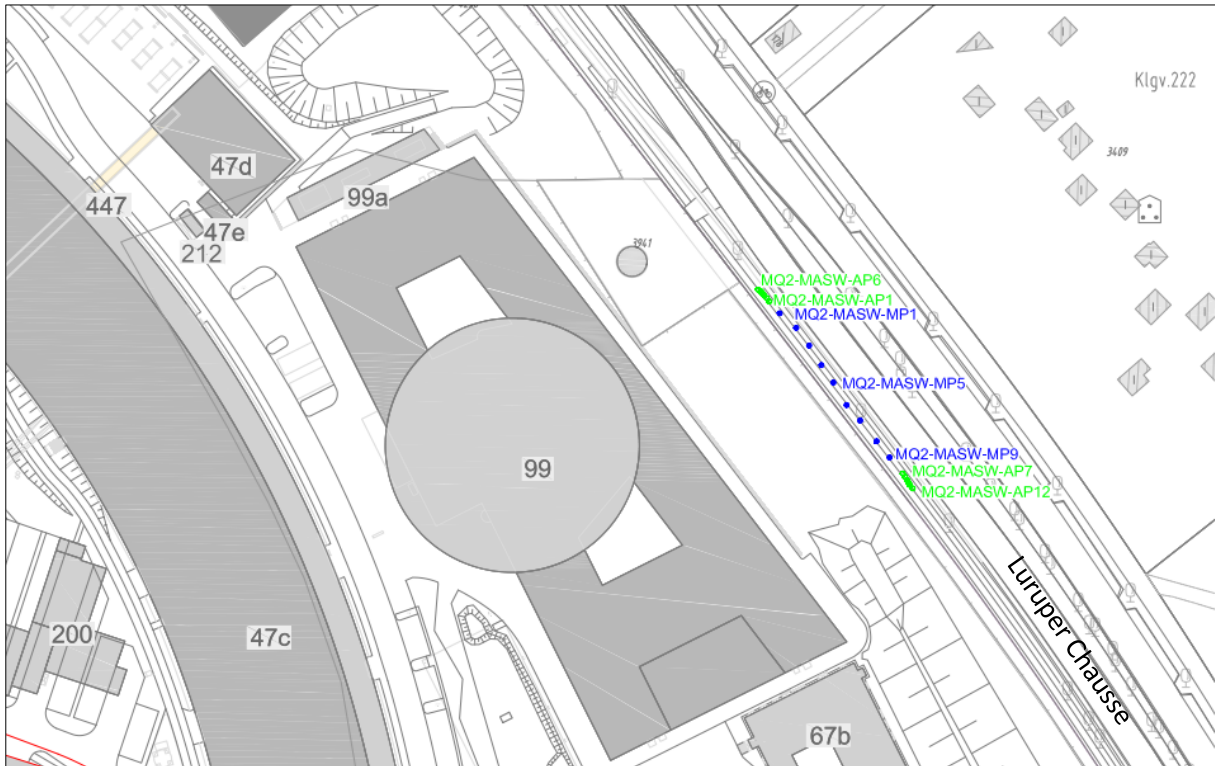


Abbildung 11-8: Lage der MASW-Messketten im Bereich des Messquerschnittes MQ2

Die Lage der einzelnen Messpunkte, sowie Anregungspunkte ist in der nachfolgenden Abbildung skizziert. Die Messkette wurde parallel zu der Luruper Chaussee in etwa 5m Entfernung (zur nächstgelegenen Fahrspur (hier die westliche Fahrspur) aufgebaut.

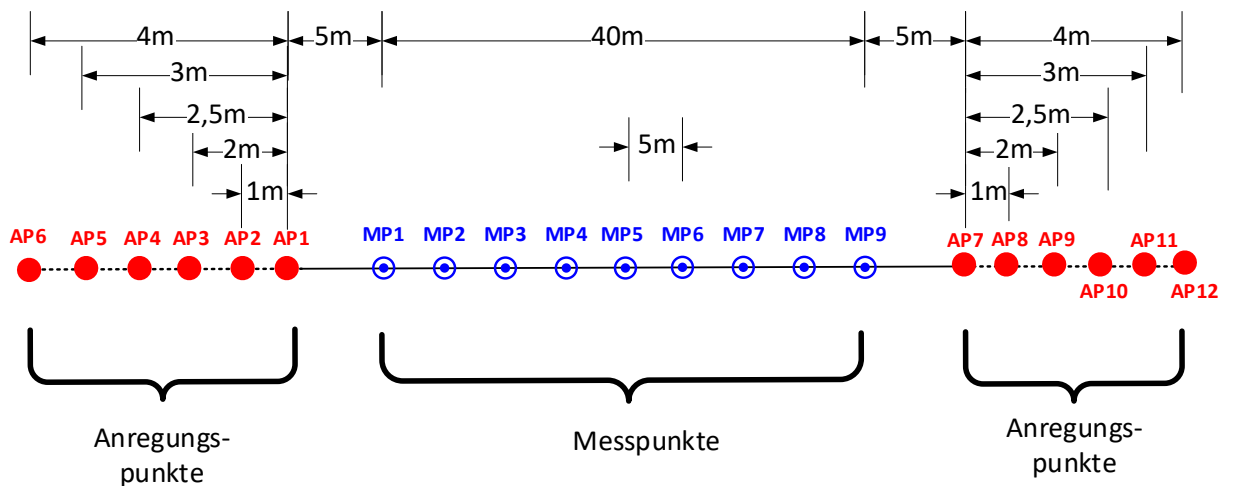
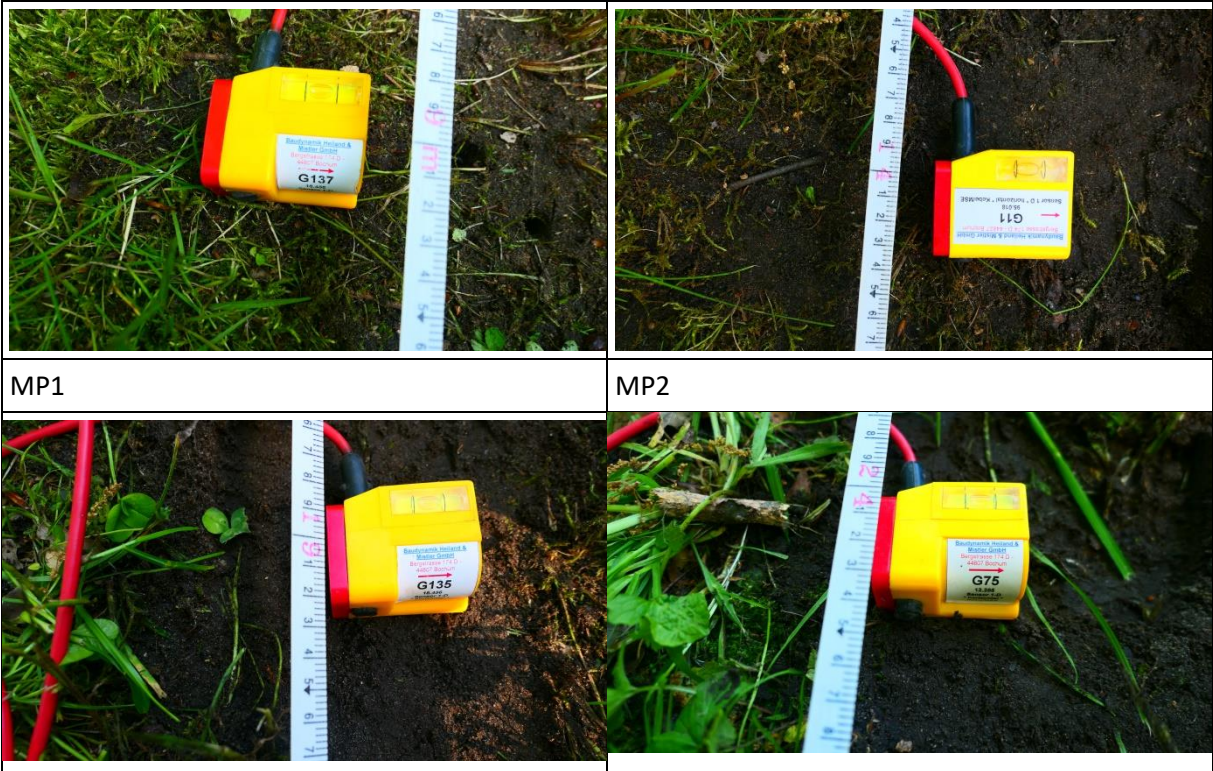


Abbildung 11-9: Messskizze der MASW Messung am MQ2

Kanal	Messpunkt	Maßbandmeter	Aufstellort	Aufstellungsbedingung	Sensor	Kabel/Splitter	Messbereich [mm/s]		
							vorwärts	rückwärts	REMI (ambient)
1	MP1	9m	Grünstreifen	Spike	G137	19, 34, 161	+/-5	+/-10/5	+/-1
2	MP2	14m	Grünstreifen	Spike	G11	19, 34, 161	+/-5	+/-5	+/-1
3	MP3	19m	Grünstreifen	Spike	G136	19, 34, 161	+/-5	+/-5	+/-1
4	MP4	24m	Grünstreifen	Spike	G75		+/-5	+/-5	+/-1
5	MP5	29m	Grünstreifen	Spike	G127		+/-5	+/-5	+/-1
6	MP6	34m	Grünstreifen	Spike	G127		+/-5	+/-5	+/-1
7	MP7	39m	Grünstreifen	Spike	G133	17b, 160	+/-5	+/-5	+/-1
8	MP8	44m	Grünstreifen	Spike	G131	17b, 160	+/-5	+/-5	+/-1
9	MP9	49m	Grünstreifen	Spike	G28	17b, 160	+/-5	+/-10/5	+/-1
HVSR ambient	MP200	24m	Grünstreifen	Spike	G155	-	-	-	+/-1

Tabelle 11-6: Kanalbelegung der Baugrundmessung MQ2






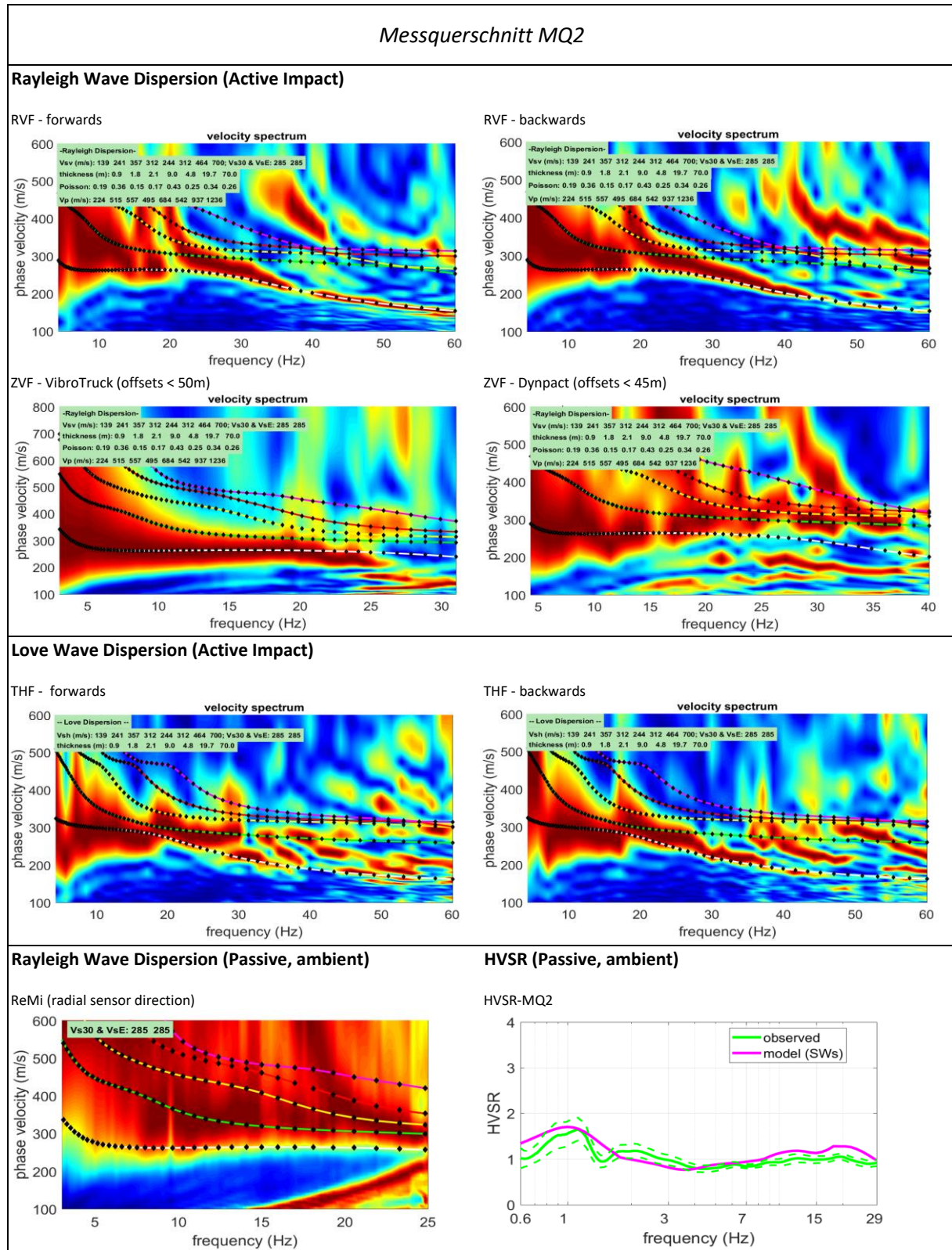
MP3	MP4
	
MP5	MP6
	
MP7	MP8
	
MP9	

Tabelle 11-7: Fotodokumentation der Messpunkte der MASW Messung am MQ2 (MASW, ReMi, HVSR)



## Ergebnisse der Baugrundmessung



**Abbildung 11-10: Messtechnisch ermittelte und modellierte Verläufe von Dispersion und HVSR am Messquerschnitt MQ2**

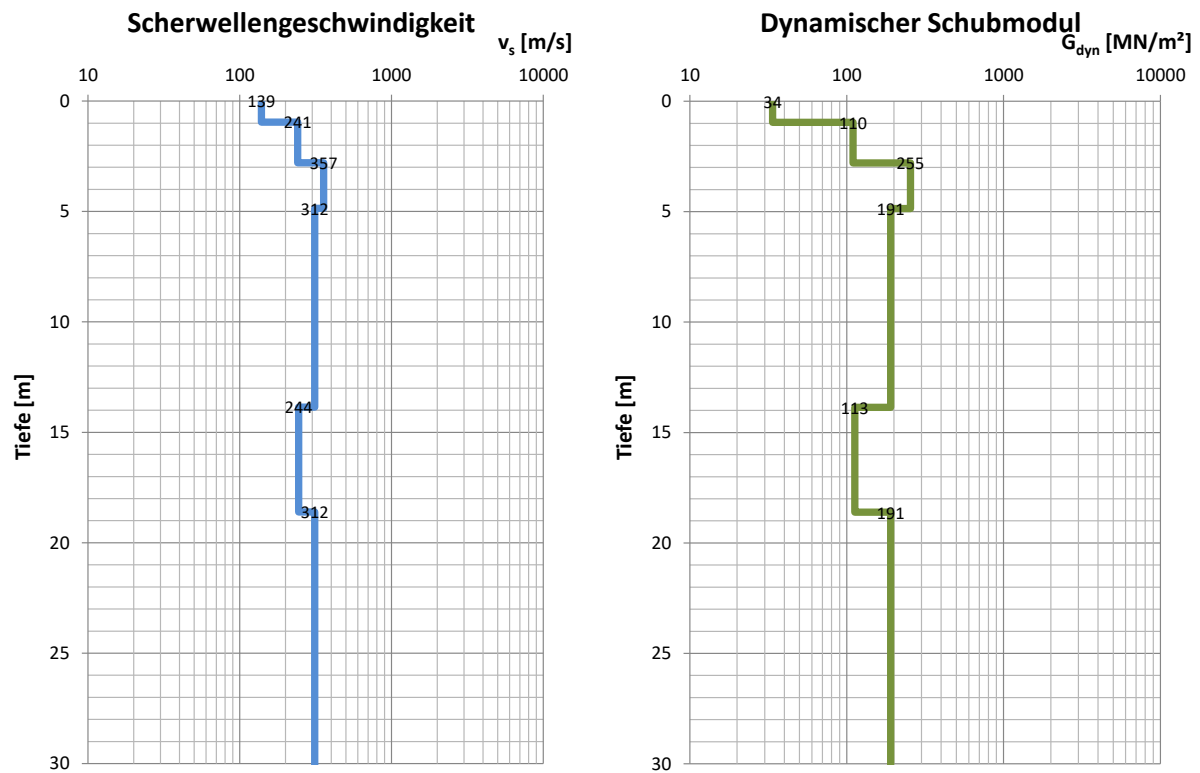


Abbildung 11-11: Ermittelte Bodenprofile am Messquerschnitt MQ2

11.4 Baugrundmessung am MQ3



Abbildung 11-12: Lage der MASW-Messketten im Bereich des Messquerschnittes MQ3

Die Lage der einzelnen Messpunkte, sowie Anregungspunkte ist in der nachfolgenden Abbildung skizziert. Die Messkette wurde parallel zu der Luruper Chaussee in etwa 4m Entfernung (zur nächstgelegenen Fahrspur (hier die westliche Fahrspur) aufgebaut.

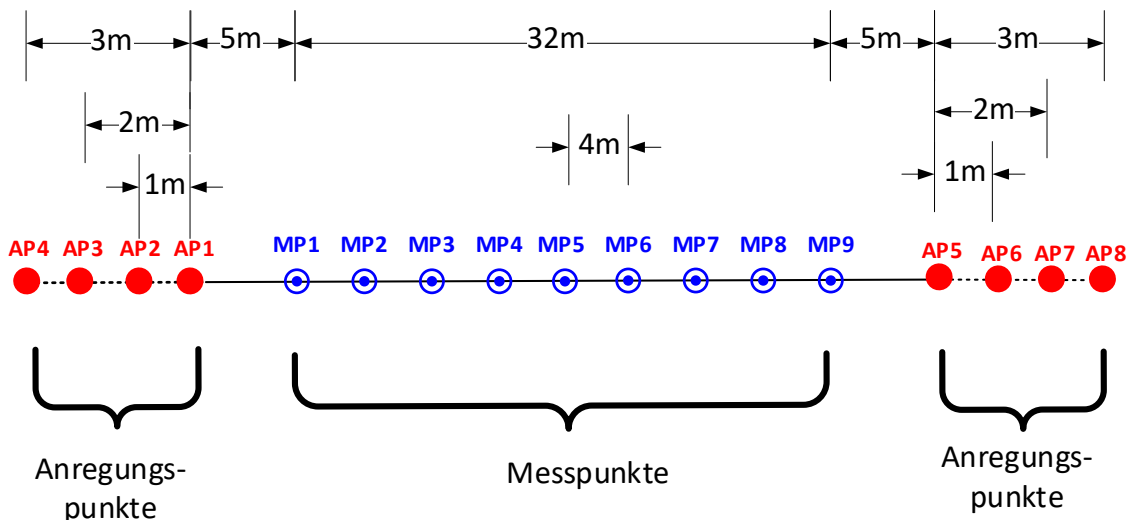
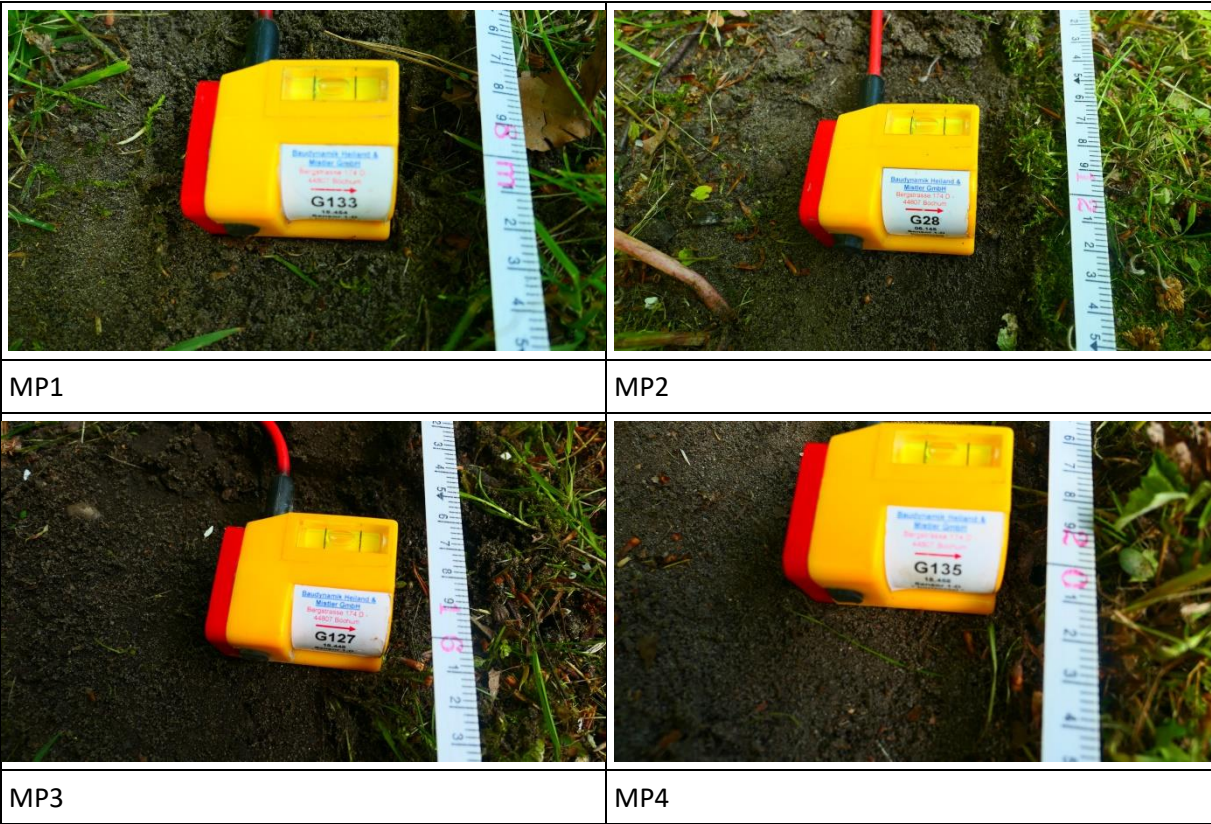


Abbildung 11-13: Messskizze der MASW Messung am MQ3



Kanal	Messpunkt	Maßbandmeter	Aufstellort	Aufstellungsbedingung	Sensor	Kabel/Splitter	Messbereich [mm/s]		
							vorwärts	rückwärts	REMI (ambient)
1	MP1	8m	Grünstreifen	Spike	G133	139, 161	+/-5	+/-5	+/-1
2	MP2	12m	Grünstreifen	Spike	G28	139, 161	+/-5	+/-5	+/-1
3	MP3	16m	Grünstreifen	Spike	G127	139, 161	+/-5	+/-5	+/-1
4	MP4	20m	Grünstreifen	Spike	G135	-	+/-5	+/-5	+/-1
5	MP5	24m	Grünstreifen	Spike	G77	-	+/-5	+/-5	+/-1
6	MP6	28m	Grünstreifen	Spike	G131	-	+/-5	+/-5	+/-1
7	MP7	32m	Grünstreifen	Spike	G75	173, 160	+/-5	+/-5	+/-1
8	MP8	36m	Grünstreifen	Spike	G11	173, 160	+/-5	+/-5	+/-1
9	MP9	40m	Grünstreifen	Spike	G137	173, 160	+/-5	+/-5	+/-1
HVSR ambient	MP300	24m	Grünstreifen	Spike	G155		-	-	+/-1

Tabelle 11-8: Kanalbelegung der Baugrundmessung MQ3











	
MP5	MP6
	
MP7	MP8
	
MP9	Übersichtsbild

Tabelle 11-9: Fotodokumentation der Messpunkte der MASW Messung am MQ3 (MASW, ReMi, HVSR)

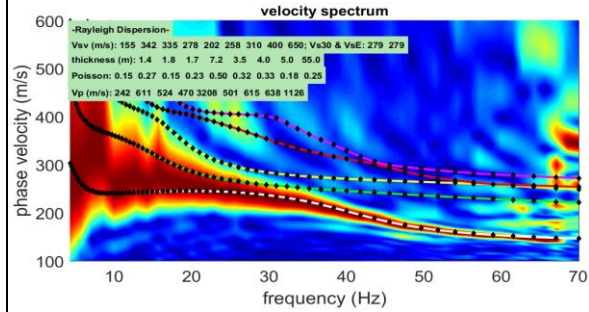


## Ergebnisse der Baugrundmessung

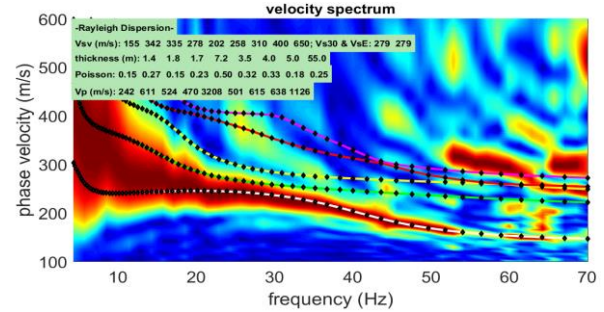
### Messquerschnitt MQ3

#### Rayleigh Wave Dispersion (Active Impact)

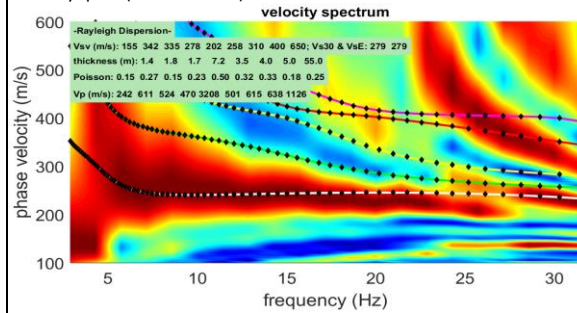
RVF - forwards



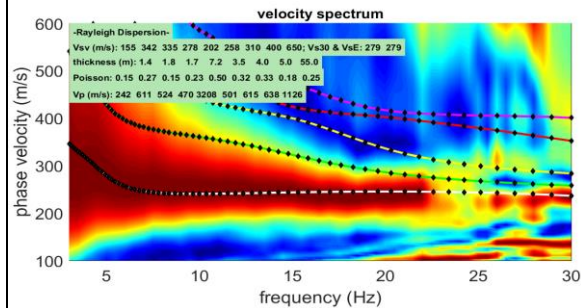
RVF - backwards



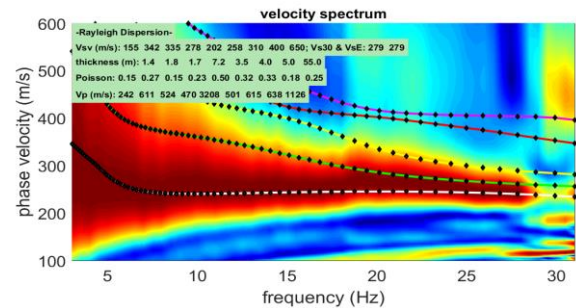
ZVF - Dynpact (offsets < 50m)



ZVF - VibroTruck / MQ3 (offsets < 50m)

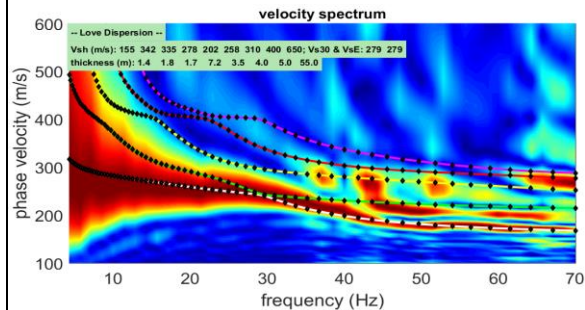


ZVF - VibroTruck / MQ4 (offsets < 50m)

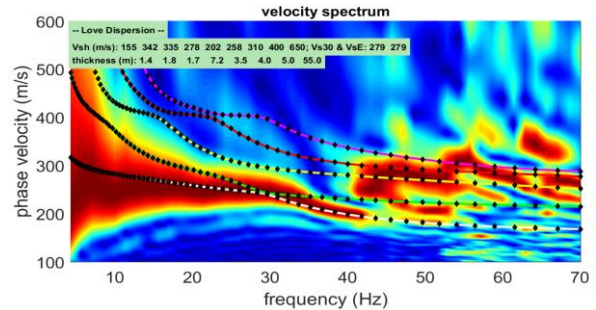


#### Love Wave Dispersion (Active Impact)

THF - forwards



THF - backwards



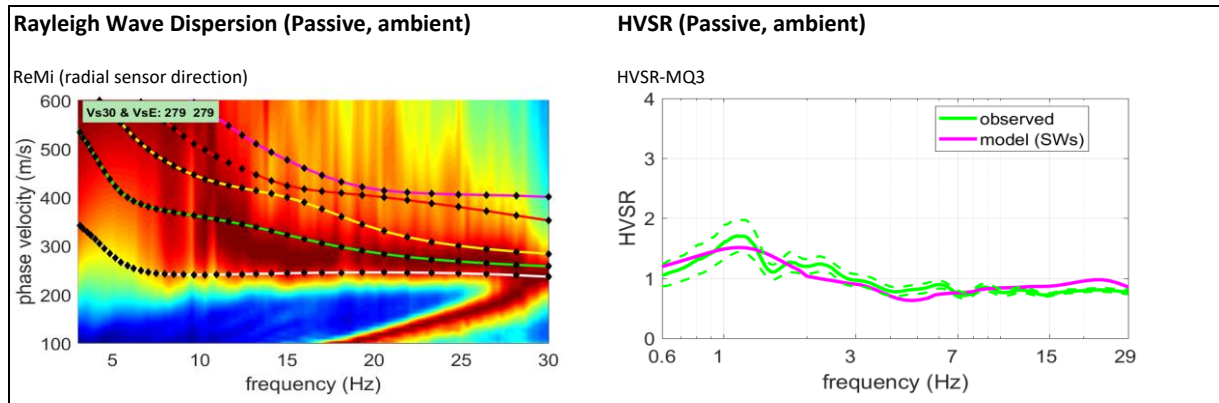


Abbildung 11-14: Messtechnisch ermittelte und modellierte Verläufe von Dispersion und HVSR am Messquerschnitt MQ3

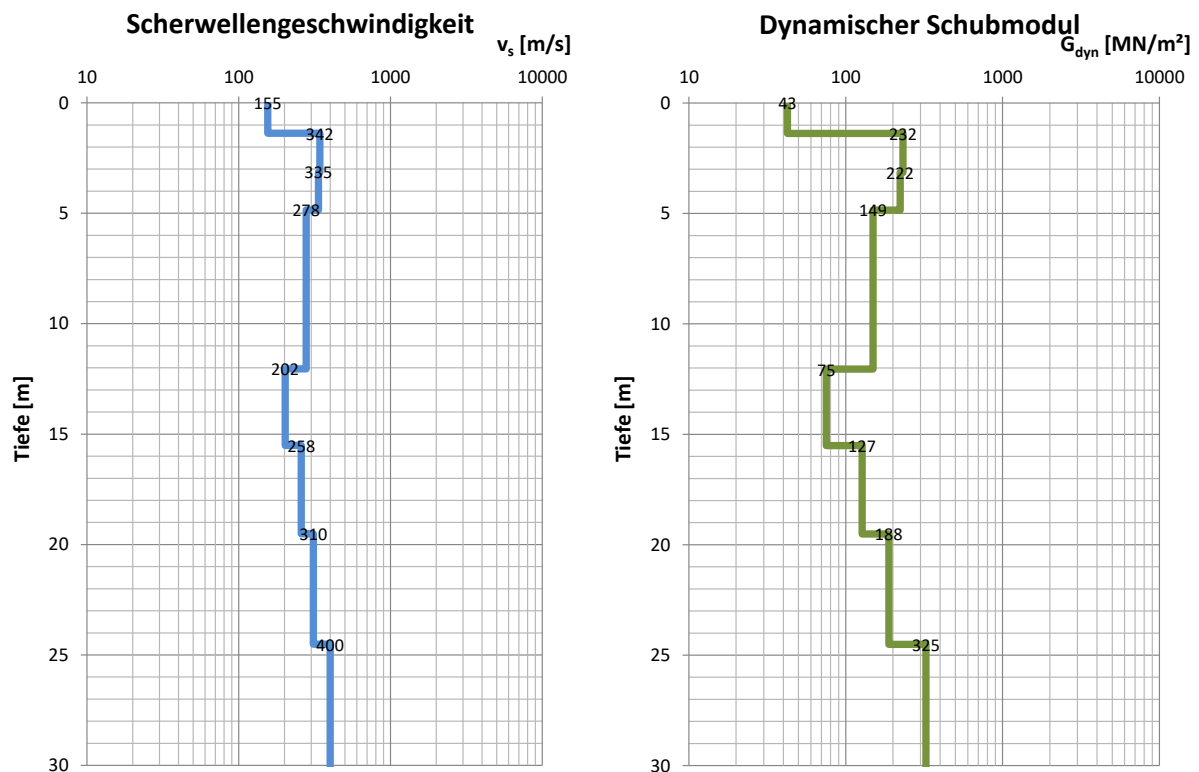


Abbildung 11-15: Ermittelte Bodenprofile am Messquerschnitt MQ3

11.5 Baugrundmessung am MQ4

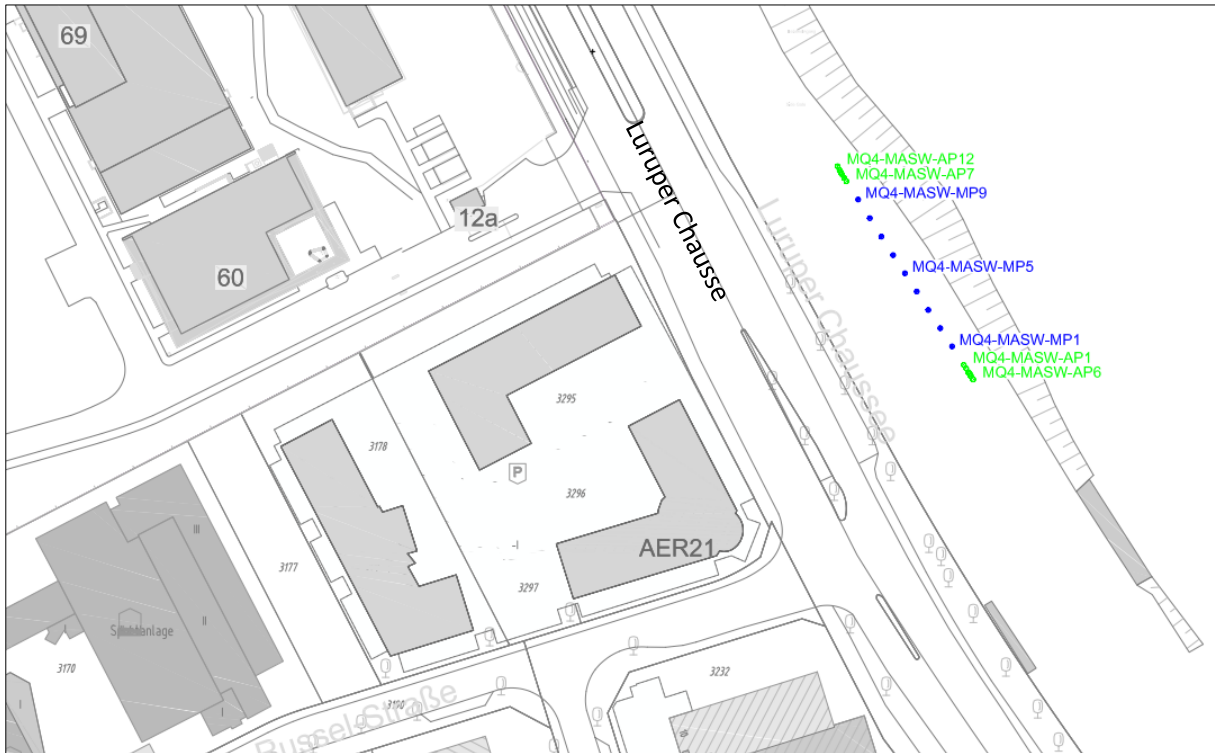


Abbildung 11-16: Lage der MASW-Messketten im Bereich des Messquerschnittes MQ4

Die Lage der einzelnen Messpunkte, sowie Anregungspunkte ist in der nachfolgenden Abbildung skizziert. Die Messkette wurde parallel zu der Lurper Chaussee in etwa 30m Entfernung zur nächstgelegenen Fahrspur (hier die östliche Fahrspur) auf einem Schotterparkplatz aufgebaut.

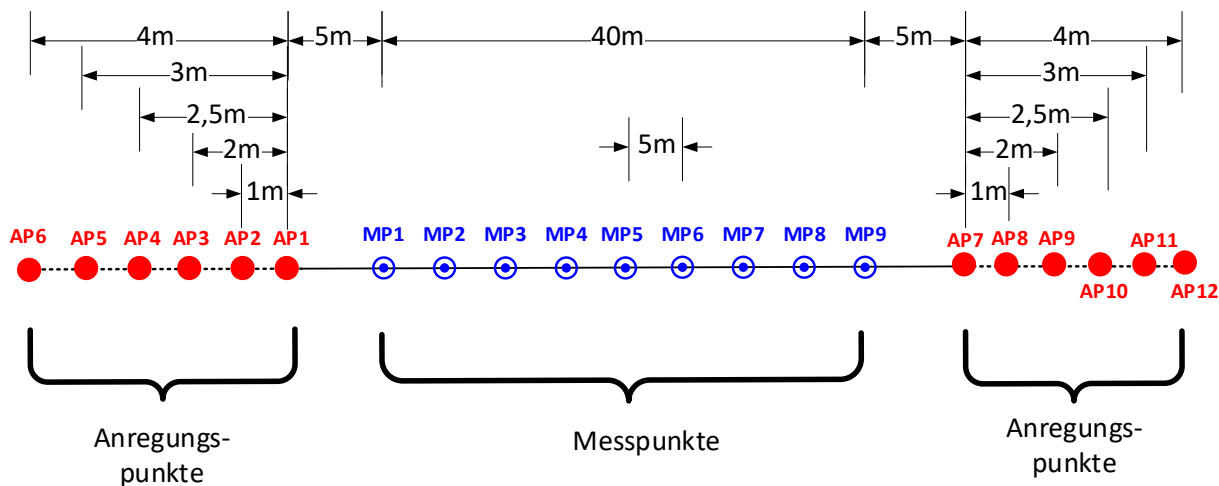
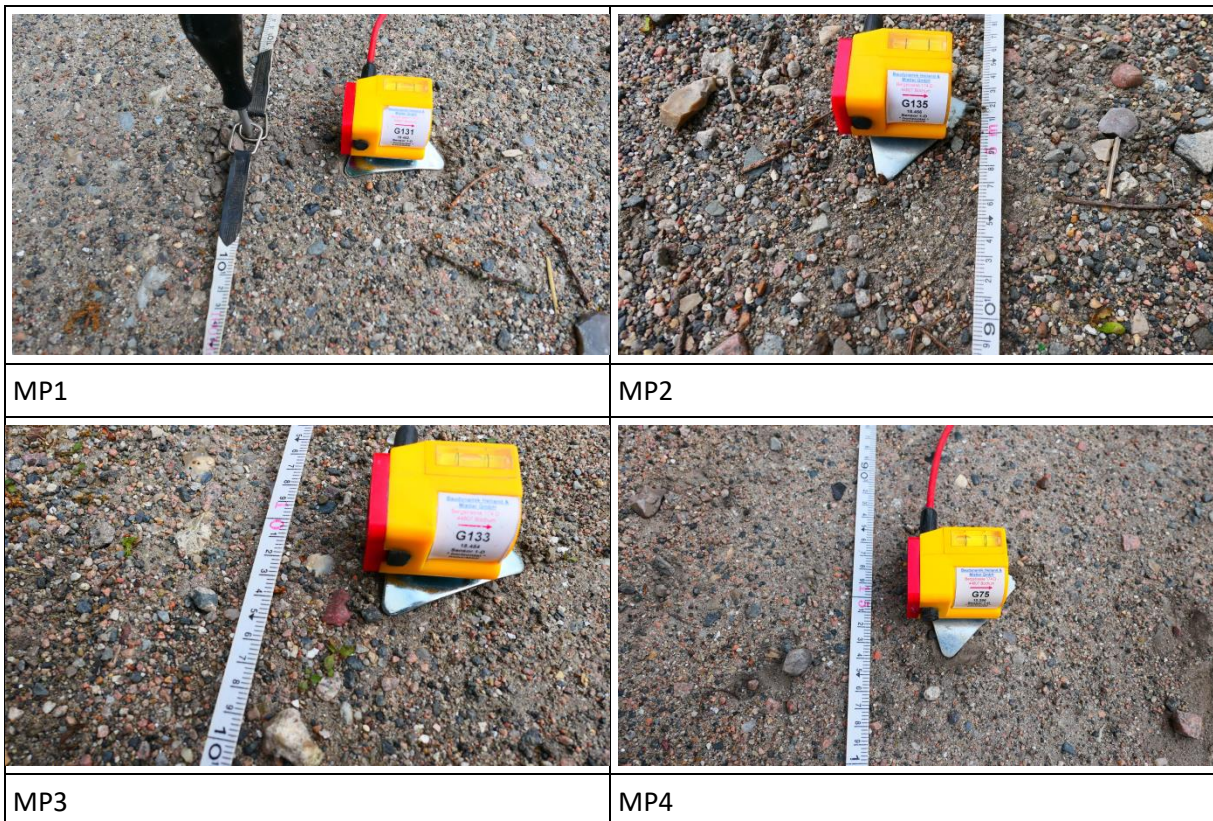


Abbildung 11-17: Messskizze der MASW Messung am MQ4



Kanal	Messpunkt	Maßband meter	Aufstellort	Aufstellbedingung	Sensor	Kabel/Splitter	Messbereich [mm/s]		
							vorwärts	rückwärts	REMI (ambient)
1	MP1	0m	Schotter	Tripod	G131	161/16b	+/-10	+/-5	+/-1
2	MP2	5m	Schotter	Tripod	G136	161/16b	+/-5	+/-5	+/-1
3	MP3	10m	Schotter	Tripod	G133	161/16b	+/-5	+/-5	+/-1
4	MP4	15m	Schotter	Tripod	G75		+/-5	+/-5	+/-1
5	MP5	20m	Schotter	Tripod	G127		+/-5	+/-5	+/-1
6	MP6	25m	Schotter	Tripod	G11		+/-5	+/-5	+/-1
7	MP7	30m	Schotter	Tripod	G77	160/17b	+/-5	+/-5	+/-1
8	MP8	35m	Schotter	Tripod	G137	160/17b	+/-5	+/-5	+/-1
9	MP9	40m	Schotter	Tripod	G28	160/17b	+/-5	+/-5	+/-1
HVSR ambient			Schotter	Tripod	G155		-	-	+/-1

Tabelle 11-10: Kanalbelegung der Baugrundmessung MQ4











	
MP5	MP6
	
MP7	MP8
	
MP9	Shearbeam-Anregung (SB-Anregung)

Tabelle 11-11: Fotodokumentation der Messpunkte der MASW Messung am MQ4 (MASW, ReMi, HVSR)



## Ergebnisse der Baugrundmessung

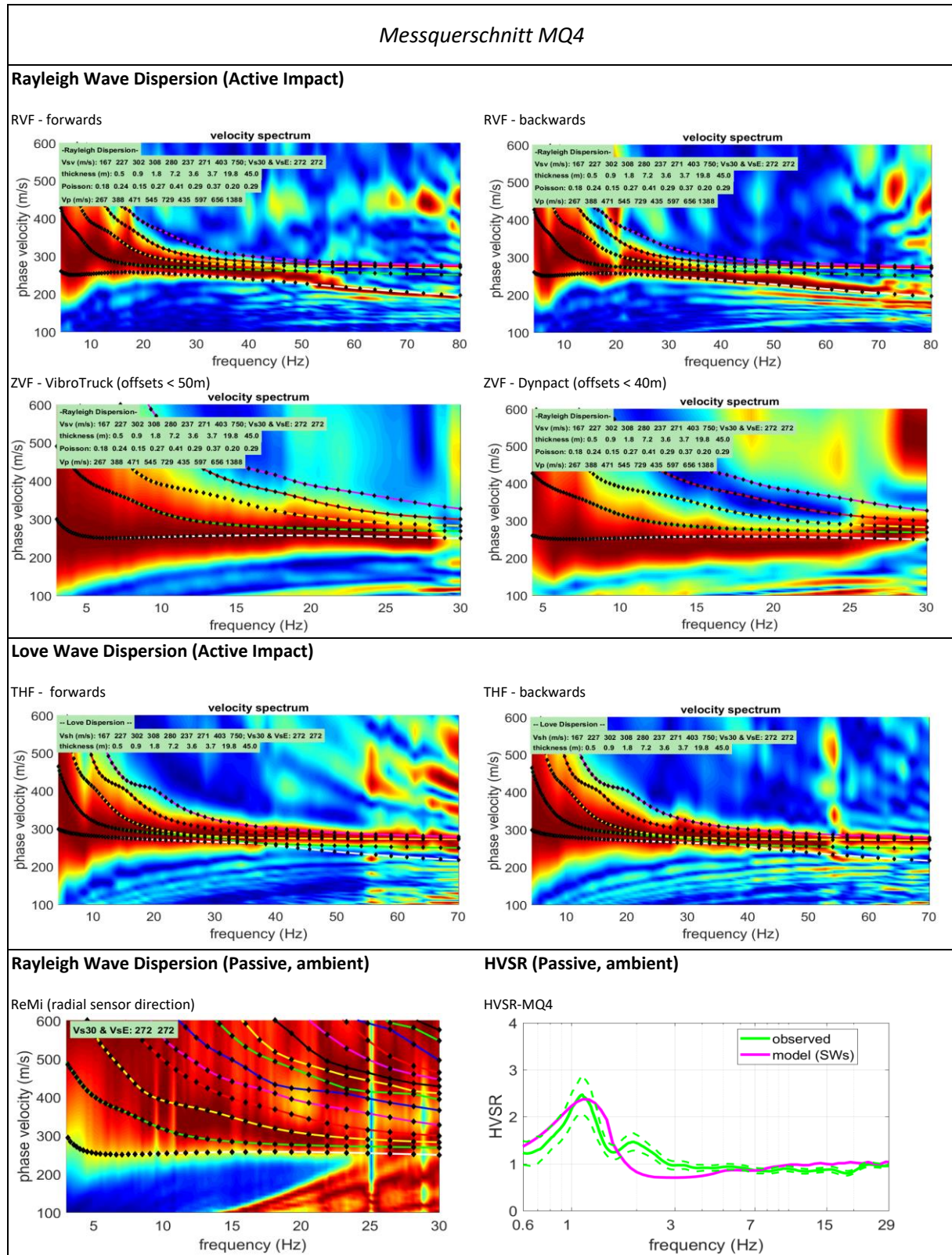


Abbildung 11-18: Messtechnisch ermittelte und modellierte Verläufe von Dispersion und HVSR am Messquerschnitt MQ4

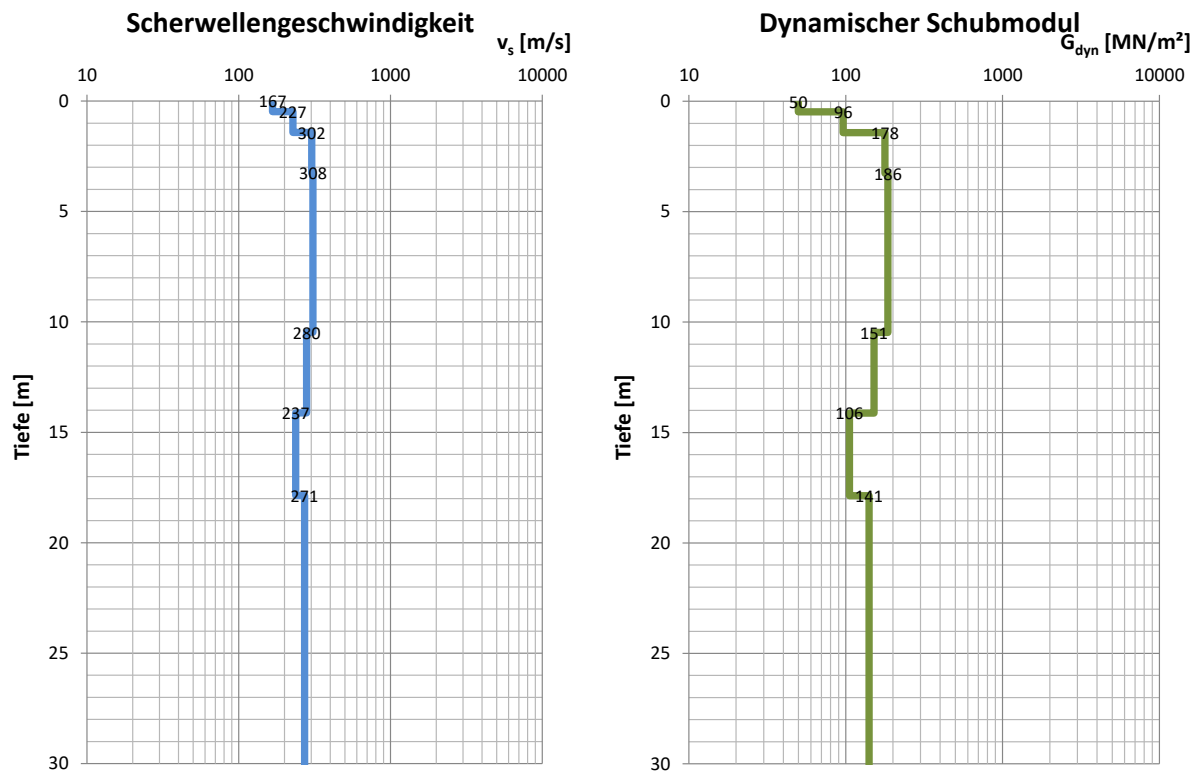


Abbildung 11-19: Ermittelte Bodenprofile am Messquerschnitt MQ4

### 11.6 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

In Abbildung 11-20 und Abbildung 11-21 sind die ermittelten Tiefenprofile der Scherwellengeschwindigkeiten und dynamischen Schubmoduli aller untersuchten Messquerschnitte dargestellt. Somit werden die beiden ermittelten Schubmoduli aus der Referenzmessung an der Königstraße vergleichend mit den Ergebnissen aus den vier Messquerschnitten an der Luruper Chaussee dargestellt.

Man sieht, dass bis ca. 11m Tiefe der dynamische Schubmodul am Referenzquerschnitt geringer ist als im Bereich der Untersuchungsquerschnitte. Das bedeutet der Baugrund ist insgesamt weicher und damit leichter anregbarer als im Bereich Bahrenfeld.

Diese Ergebnisse sind kohärent mit den Ergebnissen der Admittanzmessungen: Die Admittanzen sind am Referenzquerschnitt insgesamt größer als im Untersuchungsgebiet.



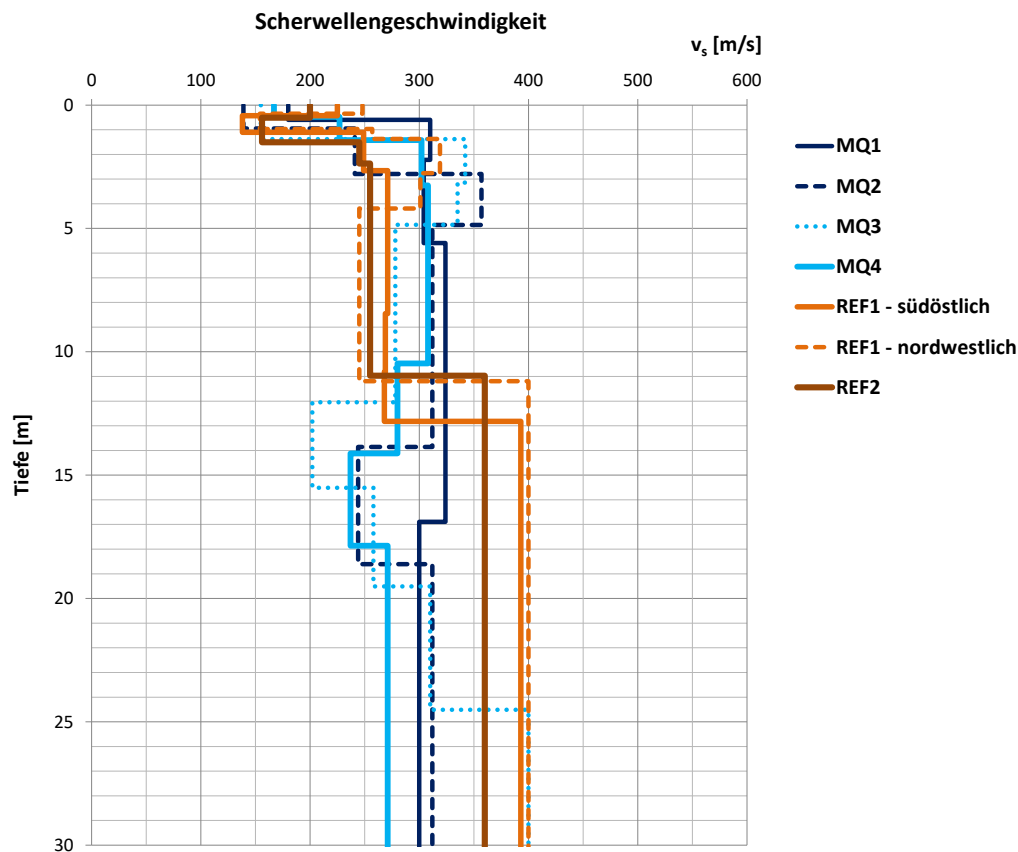


Abbildung 11-20: Ermittelte Bodenprofile der Scherwellengeschwindigkeiten aller Messquerschnitte

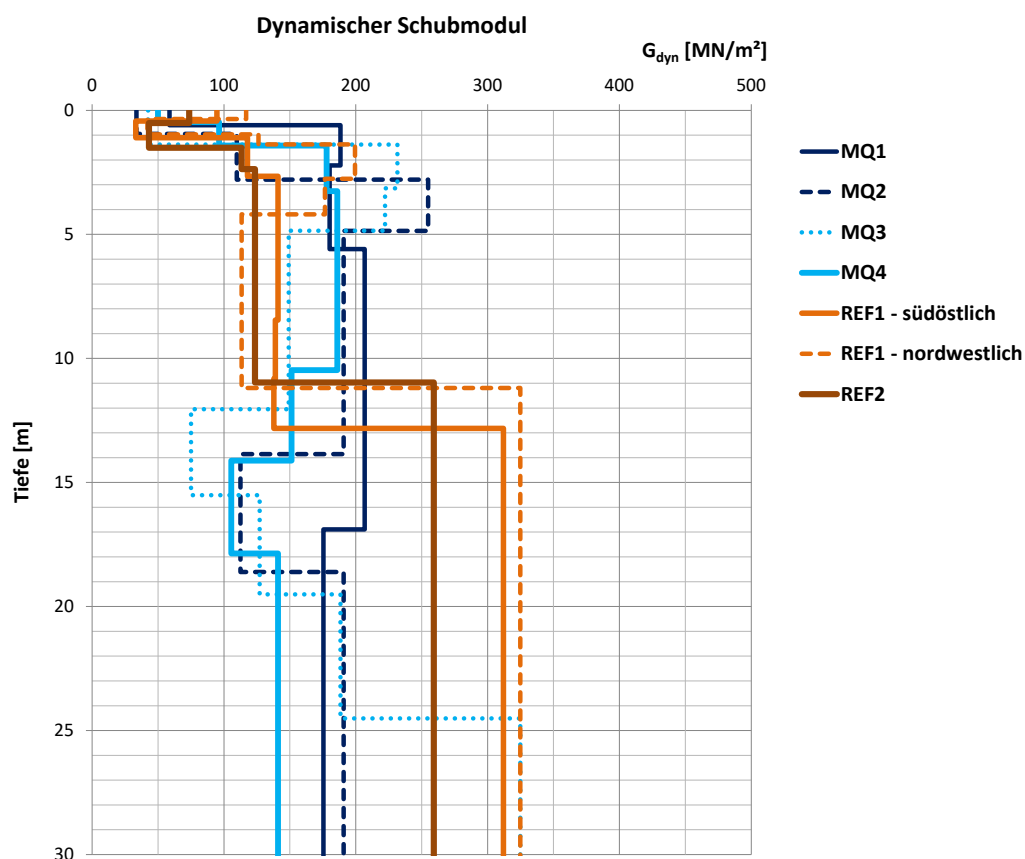


Abbildung 11-21: Ermittelte Bodenprofile der dynamischen Schubmoduli aller Messquerschnitte

## **12 Anlage V: Ergebnisse der Gebäude-Erschütterungsprognose**

12.1 MP1

Standort	MP1
Entfernung	281 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP1 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Mit Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP1 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP1 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP1 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>

12.2 MP2

Standort	MP2
Entfernung	64 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP2 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>
Mit Schutzmaßnahme	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP2 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion	
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP2 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>



12.3 MP3

Standort	MP3	
Entfernung	136 m Abstand zum 1. Gleis	
Ohne Schutzmaßnahme		
Mit Schutzmaßnahme		
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion		
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m		

12.4 MP4

Standort	MP4
Entfernung	554 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP4 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Mit Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP4 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombina- tion mit steifer Tunnel- konstruktion	
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP4 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>

12.5 MP5

Standort	MP5
Entfernung	159 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div> <div>MP5 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div>

12.6 MP6

Standort	MP6
Entfernung	297 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP6 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>
Mit Schutzmaßnahme	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP6 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion	
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP6 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>



12.7 MP8

Standort	MP8	
Entfernung	421 m Abstand zum 1. Gleis	
Ohne Schutzmaßnahme		
Mit Schutzmaßnahme		
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion		
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m		

12.8 MP9

Standort	MP9
Entfernung	280 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP9 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>
Mit Schutzmaßnahme	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP9 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion	
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP9 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>

12.9 MP12

Standort	MP12
Entfernung	142 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP12 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Mit Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP12 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion	
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP12 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>

12.10 MP17

Standort	MP17
Entfernung	619 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP17 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Mit Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP17 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombina- tion mit steifer Tunnel- konstruktion	
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP17 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>



12.11 MP18

Standort	MP18
Entfernung	51 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP18 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Mit Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP18 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombina- tion mit steifer Tunnel- konstruktion	
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP18 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>

12.12 MP19

Standort	MP19
Entfernung	135 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP19 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>
Mit Schutzmaßnahme	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP19 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion	
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP19 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>

12.13 MP20

Standort	MP20
Entfernung	244 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div> <div>MP20 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div>
Mit Schutzmaßnahme	<div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div> <div>MP20 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div>
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion	
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	<div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div> <div>MP20 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div>

12.14 MP21

Standort	MP21	
Entfernung	342 m Abstand zum 1. Gleis	
Ohne Schutzmaßnahme		
Mit Schutzmaßnahme	<p>Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion</p>	
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m		



12.15 MP22

Standort	MP22
Entfernung	214 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP22 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Mit Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP22 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP22 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP22 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>

12.16 MP23

Standort	MP23	
Entfernung	224 m Abstand zum 1. Gleis	
Ohne Schutzmaßnahme		
Mit Schutzmaßnahme		
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion		
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m		

12.17 MP24

Standort	MP24
Entfernung	232 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP24 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Mit Schutzmaßnahme	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP24 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion	
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	<div><div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div><div>MP24 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div></div>

12.18 MP25

Standort	MP25
Entfernung	85 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP25 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>
Mit Schutzmaßnahme	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP25 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion	
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	<div><p>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</p><p><b>MP25 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</b></p></div>



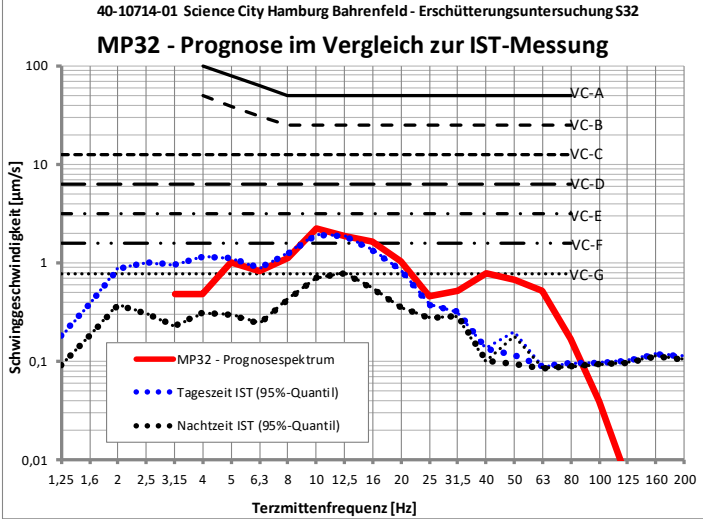
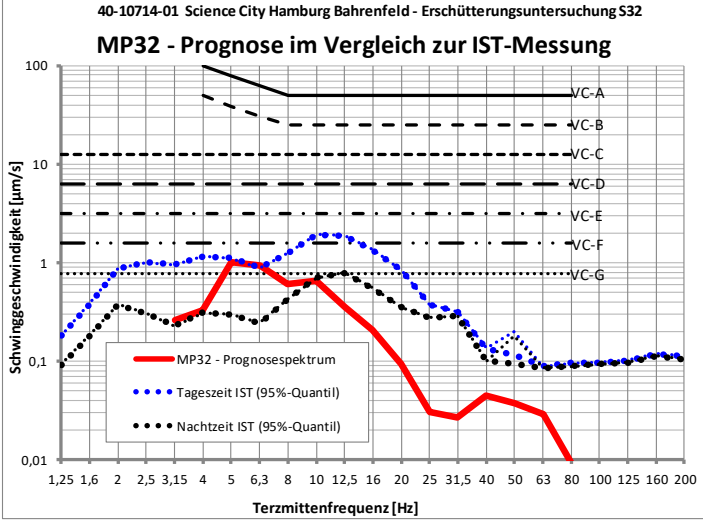
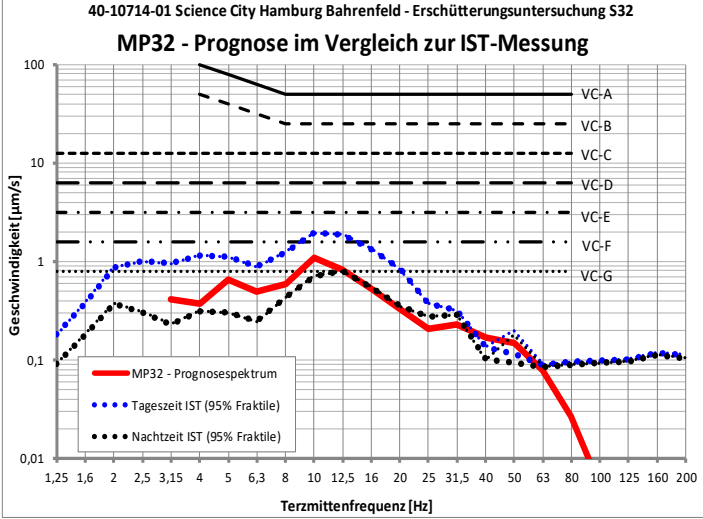
12.19 MP26

Standort	MP26
Entfernung	45 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	<div>40-10714-01 Science City Hamburg Bahrenfeld - Erschütterungsuntersuchung S32</div> <div>MP26 - Prognose im Vergleich zur IST-Messung</div>

12.20 MP30

Standort	MP30 (Bohrloch)	
Entfernung	244 m Abstand zum 1. Gleis	
Ohne Schutzmaßnahme		
Mit Schutzmaßnahme		
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion		
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m		

12.21 MP32

Standort	MP32
Entfernung	182 m Abstand zum 1. Gleis
Ohne Schutzmaßnahme	
Mit Schutzmaßnahme	
Alternative A: 6,0 Hz - MFS in Kombination mit steifer Tunnelkonstruktion	
Alternative B: Verlegung der Trasse um 160 m	

12.22 MP33

Standort	MP33	
Entfernung	219 m Abstand zum 1. Gleis	
Ohne Schutzmaßnahme		



--- Ende der Anlagen ---