


Stadtbahn Tübingen



Gutachten zu möglichen Einwirkungen auf das Klinik- und Forschungsumfeld der Universität durch Erschütterungen und elektromagnetische Felder

Bericht-Nr.: 40-10428-01-D8 vom 16.12.2020

Textteil: Seite 8 - 53, Anhänge: Seite 54 - 249

| | | | | | |
|---------------------|---|------------|------------------|---|-----------------------------|
| Projektbezeichnung | Stadtbahn Tübingen | | | | |
| Projekt-Nr. | 40-10428-01 | | | | |
| Bericht-Nr. | 40-10428-01-D8 (Rev.A) | | | | |
| Inhalt | Erschütterungs- und Magnetfeldimmissionen auf das Klinik- und Forschungsumfeld der Universität | | | | |
| Seitenzahl | 249 Seiten | | | | |
| Berichtsdatum | 16.12.2020 | | | | |
| Auftraggeber | Eberhard Karls Universität Tübingen Geschwister-Scholl-Platz 72074 Tübingen | | |  EBERHARD KARLS UNIVERSITÄT TÜBINGEN | |
| 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 www.baudynamik.de | | | | |
| Verfasser | Prof. Dr.-Ing. D. Heiland ö.b.u.v. Sachverständiger für Baudynamik und Erschütterungen | | | | |
| Mitverfasser | Dr.-Ing. M. Mistler Sachverständiger für Baudynamik | | | | |
| | M.Sc. Maximilian Nitschke Sachverständiger für Baudynamik | | | | |
| Datum der Messungen | 03.-04.12.2019 (Messungen in Tübingen); 04.- 05.03.2020 (Referenzmessungen in Karlsruhe und Ulm) | | | | |
| Messpersonal | D. Heiland, M. Mistler, M. Nitschke, T. Schulte Pelkum, M. Wydra, A. Wende, F. Sadat | | | | |
| Dateiname | 40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx | | | | |
| Bearbeitungsstand | <input type="checkbox"/> in Bearbeitung | | | | |
| | <input type="checkbox"/> vorgelegt | | | | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> fertig gestellt | | | | |
| Änderungen | Revision | Datum | ersetzer Bericht | Geänderte Kapitel | Beschreibung |
| | - | 24.11.2020 | - | alle | Ersterstellung |
| | A | 16.12.2020 | Ersterstellung | 5,6 | Kapitel 5,6 zusammengefasst |
| | | | | | |

Fachlich Verantwortlicher im Sinne der 41. BImSchV: Dr.-Ing. Michael Mistler

Stellvertreter: Prof. Dr.-Ing Dieter Heiland, Dipl.-Ing. Philipp Meckbach

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

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 8 |
| 1.1 | Anlass und Aufgabenstellung | 8 |
| 1.2 | Vorgehensweise | 8 |
| 1.3 | Verwendete Unterlagen | 9 |
| 2 | Evaluierung der vorhandenen Standortbedingungen | 11 |
| 2.1 | Auswahl repräsentativer und maßgebender Standorte | 11 |
| 2.2 | Messtechnische Beweissicherung | 13 |
| 2.3 | Auswertung der Schwingungsmessungen | 14 |
| 2.3.1 | Beschreibung des Auswerteverfahrens | 14 |
| 2.3.2 | VC-Kriterien nach VDI 2038-2 zur Klassifizierung des Standorts | 15 |
| 2.3.3 | Standortevaluierung der Messorte MO1 bis MO13 | 16 |
| 2.4 | Auswertung der der Magnetfeldmessungen | 17 |
| 3 | Prognose der Schwingungsimmissionen infolge des Stadtbahnbetriebs | 19 |
| 3.1 | Allgemeines | 19 |
| 3.2 | Kraftbasierte Erschütterungsprognose | 19 |
| 3.3 | Ermittlung der Linien-Übertragungsdmittanz | 20 |
| 3.4 | Messungen in Tübingen mit künstlicher Anregung entlang der zukünftigen Stadtbahn | 21 |
| 3.5 | Bestimmung des Kraftdichtespektrums | 24 |
| 3.6 | Referenz- und Vergleichsmessung in Karlsruhe | 24 |
| 3.7 | Prognoseergebnisse | 26 |
| 3.7.1 | Gebäudespezifische Prognose und Beurteilung | 27 |
| 3.7.2 | Ermittlung von Korridorbreiten | 32 |
| 3.8 | Zusammenfassung der Erschütterungsprognose | 35 |
| 4 | Prognose und Beurteilung der durch den Stadtbahnbetrieb hervorgerufenen Magnetfeldimmissionen (Near-DC-Shifts) | 40 |
| 4.1 | Allgemeines | 40 |
| 4.2 | Referenzmessungen in Ulm und Karlsruhe | 40 |
| 4.3 | Ergebnisse der Magnetfeldmessung in Ulm und Karlsruhe | 42 |
| 4.4 | Vergleich mit der rechnerischen Prognose in [12] | 43 |
| 4.5 | Prognose der Magnetfeldänderungen bei Stadtbahnbetrieb in Tübingen | 44 |
| 5 | Zusammenfassung | 49 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6 | Anlage I: Ergänzende Informationen | 54 |
| 6.1 | Anhaltswerte für Schwingungen nach VDI 2038-2 | 55 |
| 6.2 | Gebäudeübertragungsfunktion gemäß Ril 820.2050 | 57 |
| 7 | Anlage II: Dokumentation der IST-Messung in Tübingen | 58 |
| 7.1 | Allgemeines | 59 |
| 7.2 | Verwendetes Messequipment | 59 |
| 7.3 | Messunsicherheiten | 60 |
| 7.4 | Übersicht der einzelnen Messorte | 61 |
| 7.5 | MO1 – Otfried-Müller-Straße 25 (CIN - E2) | 62 |
| 7.5.1 | Dokumentation der Messung am MO1 | 62 |
| 7.5.2 | Schwingungspegel am MO1 | 64 |
| 7.5.3 | Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 66 |
| 7.5.4 | Near-DC Magnetfeldänderungen am MO1 | 67 |
| 7.6 | MO2 – Otfried-Müller-Straße 25 (CIN - E5) | 69 |
| 7.6.1 | Dokumentation der Messung am MO2 | 69 |
| 7.6.2 | Schwingungspegel am MO2 | 71 |
| 7.6.3 | Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 73 |
| 7.6.4 | Near-DC Magnetfeldänderungen am MO2 | 74 |
| 7.7 | MO3 – Röntgenweg 15 (Werner-Siemens-Imaging-Center - KG) | 77 |
| 7.7.1 | Dokumentation der Messung am MO3 | 77 |
| 7.7.2 | Schwingungspegel am MO3 | 79 |
| 7.7.3 | Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 81 |
| 7.7.4 | MO3 – Röntgenweg 15 (Werner-Siemens-Imaging-Center - KG) | 82 |
| 7.8 | MO4 – Auf der Morgenstelle 18 (Gebäude A – E7) | 84 |
| 7.8.1 | Dokumentation der Messung am MO4 | 84 |
| 7.8.2 | Schwingungspegel am MO4 | 86 |
| 7.8.3 | Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 88 |
| 7.8.4 | Near-DC Magnetfeldänderungen am MO4 | 89 |
| 7.9 | MO5 – Auf der Morgenstelle 28 (Gebäude E) | 91 |
| 7.9.1 | Dokumentation der Messung am MO5 | 91 |
| 7.9.2 | Schwingungspegel am MO5 | 93 |
| 7.9.3 | Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 95 |
| 7.9.4 | Near-DC Magnetfeldänderungen am MO5 | 96 |
| 7.10 | MO6 – Auf der Morgenstelle 15 (Verfügungsgebäude) | 98 |
| 7.10.1 | Dokumentation der Messung am MO6 | 98 |
| 7.10.2 | Schwingungspegel am MO6 | 100 |
| 7.10.3 | Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 102 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 7.10.4 | Near-DC Magnetfeldänderungen am MO6 | 103 |
| 7.11 | MO7 – Auf der Morgenstelle 94/96 (GUZ KG) | 105 |
| 7.11.1 | Dokumentation der Messung am MO7 | 105 |
| 7.11.2 | Schwingungspegel am MO7 | 107 |
| 7.11.3 | Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 110 |
| 7.11.4 | Near-DC Magnetfeldänderungen am MO7 | 111 |
| 7.12 | MO8 – Auf der Morgenstelle 32 (ZMBP KG) | 113 |
| 7.12.1 | Dokumentation der Messung am MO8 | 113 |
| 7.12.2 | Schwingungspegel am MO8 | 115 |
| 7.12.3 | Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 117 |
| 7.12.4 | Near-DC Magnetfeldänderungen am MO8 | 119 |
| 7.13 | MO9 – Auf der Morgenstelle 32 (ZMBP - OG) | 121 |
| 7.13.1 | Dokumentation der Messung am MO9 | 121 |
| 7.13.2 | Schwingungspegel am MO9 | 123 |
| 7.13.3 | Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 125 |
| 7.13.4 | Near-DC Magnetfeldänderungen am MO9 | 126 |
| 7.14 | MO10 – Auf der Morgenstelle 18 (Gebäude A - OG) | 129 |
| 7.14.1 | Dokumentation der Messung am MO10 | 129 |
| 7.14.2 | Schwingungspegel am MO10 | 131 |
| 7.14.3 | Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 133 |
| 7.14.4 | Near-DC Magnetfeldänderungen am MO10 | 134 |
| 7.15 | MO11 – Auf der Morgenstelle 16 (Zwischengebäude A-B) | 137 |
| 7.15.1 | Dokumentation der Messung am MO11 | 137 |
| 7.15.2 | Schwingungspegel am MO11 | 139 |
| 7.15.3 | Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 141 |
| 7.15.4 | Near-DC Magnetfeldänderungen am MO11 | 142 |
| 7.16 | MO12 – Auf der Morgenstelle 14 (Gebäude D - KG) | 145 |
| 7.16.1 | Dokumentation der Messung am MO12 | 145 |
| 7.16.2 | Schwingungspegel am MO12 | 147 |
| 7.16.3 | Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 149 |
| 7.16.4 | Near-DC Magnetfeldänderungen am MO12 | 150 |
| 7.17 | MO13 – Auf der Morgenstelle 14 (Gebäude D - OG) | 153 |
| 7.17.1 | Dokumentation der Messung am MO13 | 153 |
| 7.17.2 | Schwingungspegel am MO13 | 155 |
| 7.17.3 | Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 157 |
| 7.17.4 | Near-DC Magnetfeldänderungen am MO13 | 158 |

| | |
|--|------------|
| 7.18 MO14 – Auf der Morgenstelle 3 (Gebäude I) | 160 |
| 7.18.1 Dokumentation der Messung am MO14 | 160 |
| 7.18.2 Schwingungspegel am MO14 | 162 |
| 7.18.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 163 |
| 7.19 MO15 – Calwerstraße 7 (Frauenklinik, med. Genetik) | 165 |
| 7.19.1 Vorbemerkung | 165 |
| 7.19.2 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 165 |
| 7.20 MO16 – Calwerstraße 7/6 (Neonatologie) | 167 |
| 7.20.1 Vorbemerkung | 167 |
| 7.20.2 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt | 167 |
| | |
| 8 Anlage III: Dokumentation der Übertragungsadmittanz-Messungen in Tübingen | 168 |
| 8.1 Dokumentation der Messung | 169 |
| 8.2 Verwendetes Messequipment | 169 |
| 8.3 Messunsicherheiten | 169 |
| 8.4 Auswertung der diskreten Übertragungsadmittanzen | 170 |
| 8.5 A1 – CIN-Gebäude | 172 |
| 8.5.1 Dokumentation der Messung mit künstlicher Impulsanregung | 172 |
| 8.5.2 Baugrundadmittanzen: Ergebnisse der Regressionsanalyse | 175 |
| 8.6 A2 – Werner-Siemens-Imaging-Center | 178 |
| 8.6.1 Dokumentation der Messung mit künstlicher Impulsanregung | 178 |
| 8.6.2 Baugrundadmittanzen: Ergebnisse der Regressionsanalyse | 182 |
| 8.7 A3 –GUZ | 185 |
| 8.7.1 Dokumentation der Messung mit künstlicher Impulsanregung | 185 |
| 8.7.2 Baugrundadmittanzen: Ergebnisse der Regressionsanalyse | 188 |
| 8.8 A4 – Morgenstelle 3 | 191 |
| 8.8.1 Dokumentation der Messung mit künstlicher Impulsanregung | 191 |
| 8.8.2 Baugrundadmittanzen: Ergebnisse der Regressionsanalyse | 194 |
| 8.9 A5 – Gebäude A | 197 |
| 8.9.1 Dokumentation der Messung mit künstlicher Impulsanregung | 197 |
| | |
| 9 Anlage IV: Dokumentation der Referenzmessungen in Karlsruhe und Ulm | 199 |
| 9.1 Allgemeines | 200 |
| 9.2 Verwendetes Messequipment | 200 |
| 9.3 Untersuchte Zweisystem-Stadtbahnfahrzeuge | 201 |
| 9.4 Referenzmessung Karlsruhe, Ruppurrer Straße | 203 |
| 9.4.1 Lageskizze | 203 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 9.4.2 | Kanalbelegung | 204 |
| 9.4.3 | Registrierte Fahrzeugvorbeifahrten | 205 |
| 9.5 | Referenzmessung Karlsruhe, Durlacher Straße – Park am Gottesauer Schloss | 207 |
| 9.5.1 | Lage | 207 |
| 9.5.2 | Kanalbelegung | 208 |
| 9.6 | Magnetfeldmessung – Ulm | 212 |
| 9.6.1 | Übersicht | 212 |
| 9.6.2 | Dokumentation der Messung am MQ1– Bereich ohne Kompensation | 213 |
| 9.6.3 | Dokumentation der Messung am MQ2 (Hans-Krebs-Weg) – Abschnitt mit Kompensation | 215 |
| 9.6.4 | Dokumentation der Messung am MQ3 – Bereich mit Kompensation | 218 |
| 10 | Anlage V: Untersuchung einer alternativen Trassenführung (Variante 2) | 221 |
| 10.1 | Vorbemerkung | 222 |
| 10.2 | Prognose und Beurteilung der Schwingungsmissionen infolge des Stadtbahnbetriebs | 224 |
| 10.2.1 | MO4 – Auf der Morgenstelle 18 (Gebäude A) | 225 |
| 10.2.2 | MO5 – Auf der Morgenstelle 28 (Gebäude E) | 226 |
| 10.2.3 | MO6 – Auf der Morgenstelle 15 (Verfügungsgebäude) | 227 |
| 10.2.4 | MO7 – Auf der Morgenstelle 94/96 (GUZ) | 228 |
| 10.2.5 | MO8 – Auf der Morgenstelle 32 (ZMBP KG) | 229 |
| 10.2.6 | MO9 – Auf der Morgenstelle 32 (ZMBP OG) | 230 |
| 10.2.7 | MO10 – Auf der Morgenstelle 18 (Gebäude A) | 231 |
| 10.2.8 | MO11 – Auf der Morgenstelle 16 (Zwischengebäude A-E) | 232 |
| 10.2.9 | MO12 – Auf der Morgenstelle 14 (Gebäude D KG) | 233 |
| 10.2.10 | MO13 – Auf der Morgenstelle 14 (Gebäude D OG) | 234 |
| 10.2.11 | MO14 – Auf der Morgenstelle 3 (Gebäude I) | 235 |
| 10.2.12 | MO17 – An der Morgenstelle 8 (Gebäude B) | 236 |
| 10.2.13 | MO18 – an der Morgenstelle 10 (Gebäude C) | 237 |
| 10.2.14 | Zusammenfassung der spektralen Erschütterungsprognose | 238 |
| 10.2.15 | Einflusskorridore | 241 |
| 10.3 | Prognose und Beurteilung der Magnetfeldmissionen (Near-DC-Shifts) | 242 |
| 10.4 | Vergleich zwischen Variante 1 und Variante 2 | 246 |
| 10.5 | Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse für Variante 2 | 247 |

1 Einleitung

1.1 Anlass und Aufgabenstellung

In der Region Neckar-Alb wird der Bau einer Regionalstadtbahn geplant. Der Trassenverlauf führt auch durch die Stadt Tübingen. Ein wichtiges Erschließungsgebiet ist hier die Universität sowie die Kliniken im Bereich der Morgenstelle, weil dort ein hoher Bedarf an Mobilität durch Mitarbeiter, Studierende, Patienten und Besucher vorhanden ist. Daher soll die geplante Trasse vom Hauptbahnhof zur Morgenstelle unter anderem dem Verlauf der Calwerstraße und der Schnarrenbergstraße folgen. Im Nahbereich der geplanten Trassenlage befinden sich verschiedene Institute und Einrichtungen der Universität Tübingen (Campus Morgenstelle) sowie des Universitätsklinikums Tübingen (Kliniken Berg und Kliniken Tal), wo viele technische Geräte, Anlagen und Messinstrumenten genutzt werden, die hochempfindlich in Bezug auf Schwingungseinwirkungen und Magnetfeldveränderungen reagieren. Aus diesem Grund ist zu klären, ob der geplante zukünftige Betrieb einer Stadtbahn einen negativen Einfluss auf die empfindlichen Geräte hat.

1.2 Vorgehensweise

Im Rahmen der vorliegenden gutachterlichen Untersuchung soll diese Frage mit Hilfe der folgenden drei Schritte beantwortet werden:



Abbildung 1-1: Untersuchungsschritte

Zunächst erfolgt eine Standortevaluierung. Es werden die maßgebenden hochempfindliche Geräte, Anlagen und Instrumente auf dem Areal der Universitätskliniken und der wissenschaftlichen Einrichtungen der Universität Tübingen detektiert, um anschließend die aktuelle IST-Situation in Bezug auf die vorhandenen Schwingungspegel und Magnetfelder an den unterschiedlichen Standorten messtechnisch beweiszusichern. Die Auswahl erfolgt zum einen auf Basis einer Gerätezusammenstellung [10], die die Mitarbeiter der Kliniken und der universitären Forschungseinrichtungen zusammengestellt haben, sowie auf Basis einer Vor-Ort-Begehung am 19.06.2019 in Anwesenheit der verantwortlichen Labor- und Institutsleiter.

In einem zweiten Schritt erfolgt eine Prognose der zukünftigen Baugrund- und Gebäudeschwingungen sowie der Magnetfeldveränderungen, die durch den Betrieb der Stadtbahn hervorgerufen wer-

den. Diese Immissionsprognose basiert auf Vor-Ort-Messungen in Tübingen mit Hilfe künstlicher Anregung sowie auf Vergleichs- und Referenzmessungen an Stadtbahnstrecken mit vergleichbaren Fahrzeugen in Karlsruhe. Die Wirksamkeit einer der modernsten und effektivsten Magnetfeldkompensationen einer Tram-Gleisanlage wurde in Ulm messtechnisch ermittelt.

Die Prognose zusammen mit der durchgeführten Standortaufnahme bilden dann die Basis für die Beurteilung, in wie weit die zukünftigen Immissionen durch den Betrieb der geplanten Stadtbahn den Forschungsbetrieb an den Kliniken und Universität beeinflussen oder sogar stören.

Gegenstand dieses Berichtes ist die gutachterliche Untersuchung und Bewertung inklusive der Dokumentation aller durchgeführten Messungen, deren Auswertung, sowie die Prognoseberechnung. Zusätzlich sei darauf hingewiesen, dass im Anhang eine Untersuchung und Bewertung einer alternativen Trassenführung im Campusbereich Morgenstelle (Variante 2) durchgeführt wurde.

1.3 Verwendete Unterlagen

- [1] VDI 2038 (01/2013): Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen. Blatt 2: Schwingungen und Erschütterungen – Prognose, Messungen, Beurteilung und Minderung.
- [2] DIN 45669-1 (03/2019): Messung von Schwingungsimmissionen. Teil 1: Schwingungsmesser - Anforderungen und Prüfungen
- [3] DIN 45669-2 (02/2005): Messung von Schwingungsimmissionen. Teil 2: Messverfahren
- [4] DIN 4150 Teil 1 (06/2001): Erschütterungen im Bauwesen – Vorermittlung von Schwingungsgrößen.
- [5] DIN 4150 Teil 2 (06/1999): Erschütterungen im Bauwesen – Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden.
- [6] DIN 4150 Teil 3 (12/2016): Erschütterungen im Bauwesen – Einwirkungen auf bauliche Anlagen.
- [7] Ril 820.2050: Erschütterungen und sekundärer Luftschall. Richtlinie der DB Netz AG mit 6 Anhängen A01 bis A06. Gültig ab 01.11.2017
- [8] ©OpenStreetMap and contributors, Creative Commons Share Alike License (CC-BY-SA)
- [9] Bescheid über die Bekanntgabe der Baudynamik Heiland & Mistler GmbH, Bergstraße 174, 44807 Bochum, als Messstelle nach §29b Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in Verbindung mit der Bekanntgabeverordnung (41. BImSchV) mit Wirkung vom 04.07.2017. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV).

- [10] Zusammenstellung hochempfindlicher Geräte entlang der geplanten Trassenführung im Bereich der Schnarrenbergstraße. Dezernat VIII – Bau, Sicherheit und Umwelt, Eberhard-Karls-Universität Tübingen. Zugeschickt per Email vom Leiter des Dezernats VIII, Herr Manfred Gerblinger. 16.05.2019
- [11] Bette, U., Gralla, G., Gummersbach, R., „Magnetfeldreduzierte Fahrleitungsanlage Straßenbahn Ulm“, veröffentlicht in: Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen - 118 (2020) Heft 1
- [12] Vick, R.: „Abschätzung von Beeinflussungsbereichen wissenschaftlicher Geräte durch die Innestadtdurchführung Tübingen“. Steinbeis Transfer GmbH, Stuttgart. Stand 22.09.2018
- [13] Übersichtsplan Variantenübersicht Gesamt – Magnetfeldänderung, Planungsgemeinschaft Regional-Stadtbahn Neckar-Alb Mailänder Consult GmbH / Schüßler Plan Ingenieurgesellschaft mbH, Stand. 12/2016
- [14] FTA-VA-90-1003-06: Transit noise and vibration impact assessment. Office of Planning and Environment, Federal Transit Administration U. S. Department of Transportation, Washington DC 20590, USA, 2006
- [15] Heiland, D., Mistler, M., Neyen, N.: Experimentelle kraftbasierte Erschütterungsprognose für die neue Straßenbahn in Luxemburg, 4. VDI Tagung in Kassel, 25.-26.04.2012
- [16] AVG-Broschüre: Stadtbahn verbindet Stadt und Region. Eine Idee aus Karlsruhe setzt sich durch. Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH. www.kvv.de. Karlsruhe, 2015
- [17] ASTOC Architects and Planners GmbH: Tübingen, NWI Campus Variantenstudie. Präsentation von ASTOC. April 2020

2 Evaluierung der vorhandenen Standortbedingungen

2.1 Auswahl repräsentativer und maßgebender Standorte

Auf dem Areal der Universitätskliniken und der Universität Tübingen werden eine Vielzahl technischer Geräte, Anlagen und Messinstrumente (nachfolgend als „Tool“ bezeichnet) genutzt, die hochempfindlich gegenüber einwirkenden Schwingungen und Magnetfeldveränderungen sind. Dies belegt eine Auflistung des Dezernats VIII Bau, Sicherheit und Umwelt der Eberhard-Karls-Universität Tübingen [10], die die Mitarbeiter der Kliniken und der universitären Forschungseinrichtungen zusammengestellt haben. Nicht jeder Raum kann individuell bewertet werden. Aus diesem Grund konzentriert sich das vorliegende Gutachten auf ausgewählte Standorte, die nachfolgend aufgeführt werden und im weiteren Verlauf individuell beurteilt werden. Zusätzlich erfolgt aber auch eine flächendeckende, allgemeine Prognose zur Beurteilung des gesamten Areals. Mit dieser allgemeinen Prognose kann dann auch die Einwirkung der Stadtbahn auf andere Standorte abgeschätzt werden. Auf Basis von [10] sowie einer Vor-Ort-Begehung am 19.06.2019 in Anwesenheit der verantwortlichen Labor- und Institutsleiter wurden folgende Standorte als repräsentativ und maßgebend ausgewählt:

| ID # | Adresse | Gebäude | Ebene | Raum | Abstand zur Trasse [m] | Tool | Spezifikation |
|------|----------------------------|----------|---------|----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|
| MO1 | Otfried-Müller-Straße 25 | CIN | E2 | 2-523 2-520 | 36 | Mikroskop auf Labortisch | VC-B (*) |
| MO2 | | | E5 | 5-506 | 83 | Photonenmikroskop | VC-B |
| MO3 | Röntgenweg 13-15 | WSIC | KG | U44 U45 | 16 | NMR, MRT | Bruker Nano-C |
| MO4 | Auf der Morgenstelle 18 | Geb. A | E7 | 7O25 | 78 | Röntgendiffraktometer | VC-B |
| MO5 | Auf der Morgenstelle 28 | Geb. E | E2 | 2H08 2H11 | 128 | TEM, REM | VC-E |
| MO6 | Auf der Morgenstelle 15 | VG | KG | 0.127.1 | 319 | Ionenmikroskop | 50 µg |
| MO7 | Auf der Morgenstelle 94/96 | GUZ | E2 (KG) | 2M03 | 144 | REM | VC-F |
| MO8 | Auf der Morgenstelle 32 | ZMBP | E1 (KG) | 1L21 | 210 | Laserpinzette | VC-D |
| MO9 | | | E3 | 3W04 3Y01 | 213 | TEM, Mikroskope | VC-D |
| MO10 | Auf der Morgenstelle 18 | Geb. A | E5 | 5G04 5G35 | 82 | REM, STM | VC-C (*) |
| MO11 | Auf der Morgenstelle 16-18 | Geb. A-B | E3 | 4E01 4E02 | 126 | NMR | Bruker Nano-C |
| MO12 | Auf der Morgenstelle 14 | Geb. D | E1 (KG) | 1Q21 1Q27 | 248 | Optische Messtische (Kryostat) | VC-D |
| MO13 | | Geb. D | D5 | 5H40 | 261 | Optische Messtische (REM) | VC-D (*) |

(*) in Verbindung mit der vorhandenen, schwingungs isolierten Aufstellung

Tabelle 2-1: Auflistung der messtechnisch beweisgesicherten und individuell beurteilten Standorte

| | | |
|--|--|------------------|
| Projekt: Stadtbahn Tübingen Bericht-Nr.: 40-10428-01-D8 | Erschütterungs- und Magnetfeldimmissionen auf das Klinik- und Forschungsumfeld der Universität | Seite - 11/249 - |
|--|--|------------------|

Die Lage dieser 13 Standorte ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Die Messorte decken das untersuchte Universitäts- und Klinikum-Areals gut ab.

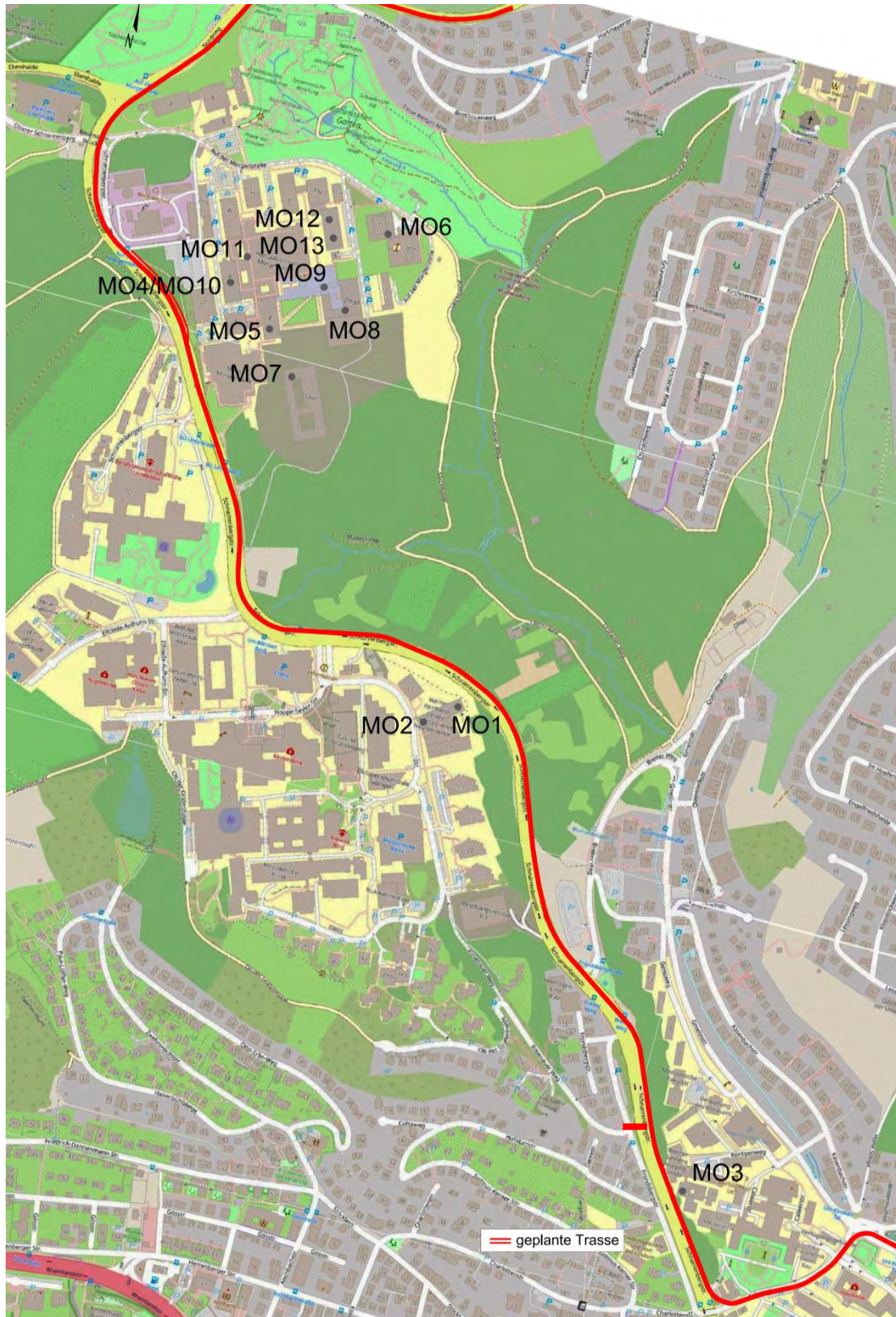


Abbildung 2-1: Lage der der messtechnisch beweisgesicherten und individuell beurteilten Standorte

Im Rahmen der weiteren Bearbeitung wurden die drei nachfolgend genannten Standorte MO14 bis MO16) mit aufgenommen und näher untersucht, allerdings wurde bei diesen Gebäuden keine detaillierte Beweissicherung der IST-Situation durchgeführt:

- MO14: Auf der Morgenstelle 3 (Geb. I)
- MO15: Calwerstraße 7 (Frauenklinik)
- MO16: Calwerstraße 7/6 (Neonatologie)

2.2 Messtechnische Beweissicherung

An allen 13 aufgelisteten Standorten erfolgt eine Standortaufnahme in Bezug auf Schwingungen und Magnetfeldänderungen in Form einer messtechnischen Beweissicherung der aktuellen IST-Situation. Die Messungen fanden im Zeitraum vom 03. bis 04.12.2019 statt. An jedem dieser Standorte erfolgte eine mindestens zweistündige Dauermessung der Schwingungen und Magnetfelder. Die Eckdaten sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst.

| Messung | Beschreibung | Bemerkung |
|--------------|-------------------------|--|
| Datum | 03.-04.12.2019 | Messungen an 13 Standorten |
| Ort | Tübingen | - |
| Dauer | ≥ 2h | - |
| Schwingungen | 1x 3D 1x 1D vertikal | Messung in alle drei Raumrichtungen Messung der vertikalen Schwingrichtung Verwendung hochauflösender Geophone gemäß DIN 45669 |
| Magnetfeld | 1x 3D | Verwendung von Dreiachsmagnetometer (Fluxgate-Sonden); Stativhöhe: 120cm |

Tabelle 2-2: Kurzbeschreibung Standort-Messungen

Eine detaillierte Dokumentation aller Messungen findet sich in der Anlage II, Abschnitt 7. Sie enthält die Beschreibung des verwendeten Messequipments, die jeweilige Kanalbelegung, eine Fotodokumentation, Lageskizze der Messpunkte sowie die Darstellung der Messergebnisse jedes Standorts.

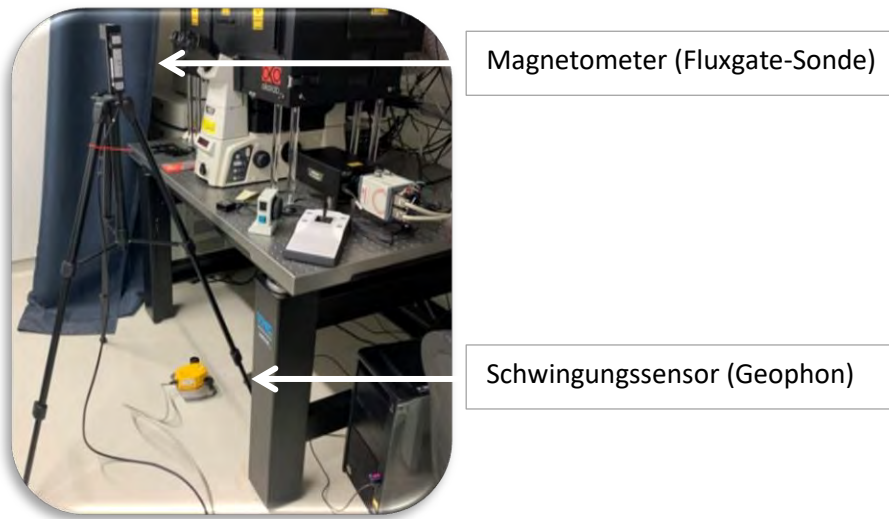


Abbildung 2-2: Exemplarische Abbildung eines Messaufbaus

2.3 Auswertung der Schwingungsmessungen

2.3.1 Beschreibung des Auswerteverfahrens

Die Auswertung der gemessenen Schwinggeschwindigkeiten erfolgt entsprechend den in der Nanotechnik üblichen Methoden: Aus den Zeitverläufen der Schwinggeschwindigkeitsmessungen werden durch Fast-Fourier-Transformationen (FFT) schmalbandige Frequenzspektren berechnet. Aus diesen Schmalbandspektren werden durch Integration Terzspektren generiert. Die Auswerteparameter sind in Tabelle 2-3 zusammengefasst.

| | |
|--------------------------------|------------------------------|
| Zeitfenster | T = 4 s |
| Frequenzauflösung | $\Delta f = 0,25 \text{ Hz}$ |
| Fenstertyp | Hanning |
| Overlap | 50 % |
| Beurteilung der Einzelspektren | 1 % - Perzentil |

Tabelle 2-3: Parameter der Auswertung

Bei Verwendung dieser Parameter erhält man bei einer zweistündigen Messung mindestens 3.600 einzelne Terzspektren, die die Datengrundlage für eine statistische Aus- und Bewertung darstellen. Beispielhaft sind in Abbildung 2-3 die Terzspektren für einen Messort dargestellt.

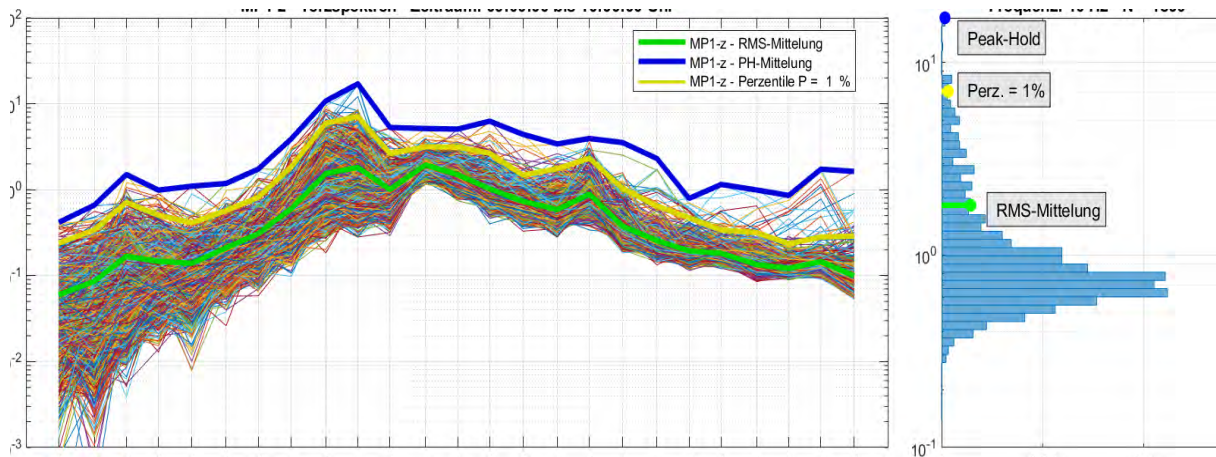


Abbildung 2-3: 4-Sekunden-Terzspektren, RMS-Mittelung, Peak-Hold, 1%-Perzentil und Histogramm für 10 Hz

Das linke Diagramm in Abbildung 2-3 zeigt die 4-Sekunden-Spektren (50% Overlap) über eine Messdauer von 1 Stunde – also insgesamt 1800 Einzelspektren. Zusätzlich sind die RMS-Mittelung in grün, der Peak-Hold-Wert in blau und das 1 % Perzentil in gelb zu sehen. Die Auswertung des 1%-Perzentil gibt den Wert an, der von 99% der Messwerte nicht überschritten wird. Das rechte Diagramm stellt die Werte in der maßgebenden Terz (hier: 10 Hz) in Form eines Histogramms dar.

In Abbildung 2-3 ist ersichtlich, dass aufgrund der Streuungen sehr viele Einzelspektren deutlich höhere Werte als der RMS-Mittelwert aufweisen. Störeinträge gehen quasi unter. Die Peak-Hold-Kurve dagegen wird durch einzelne Ausreißer extrem zu hohen Werten verschoben. Die Kurve kann aber auch nicht als repräsentativ für den Standort angesehen werden und ist daher für eine Standortbeurteilung weniger geeignet. Das 1%-Perzentil dagegen berücksichtigt sehr gut die Störeinträge. Extreme Einzelereignisse (Ausreißer) bleiben aber unberücksichtigt. Deshalb wird dieser statistische Wert zur Standortbeurteilung herangezogen, da somit sowohl kurzzeitig auftretende Schwingungsereignisse (wie gehende Personen oder Busvorbeifahrten), als auch die ambienten Schwingungen (ständig vorhanden Schwingungen z.B. aus Betrieb von Gebäude- und Versorgungstechnik) berücksichtigt werden.

2.3.2 VC-Kriterien nach VDI 2038-2 zur Klassifizierung des Standorts

Die Klassifizierung des Standorts erfolgt zunächst in einem ersten Schritt geräteunabhängig anhand der sogenannten VC-Kriterien („vibration criterion curves“). Diese verallgemeinerten, spektralen Grenzkurven werden seit Jahrzehnten im Bereich der Halbleitertechnik und der Nanotechnologie für die Auslegung von schwingungsempfindlichen Flächen und Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit hochempfindlicher Geräte herangezogen. Sie sind in der VDI 2038-2 [1] definiert. Eine genauere Beschreibung und Definition der VC-Kriterien befindet sich im der Anlage I, Abschnitt 6.1.

2.3.3 Standortevaluierung der Messorte MO1 bis MO13

In Abbildung 2-4 sind die Messergebnisse aller 13 Standorte (Messorte MO1 bis MO13) dargestellt, die zugehörigen Zahlenwerte sind in Tabelle 2-4 zusammengefasst. Wie oben erwähnt wurde bei den Messorten MO14 bis MO16 keine detaillierte IST-Beweissicherung durchgeführt und daher nachfolgend nicht aufgeführt.

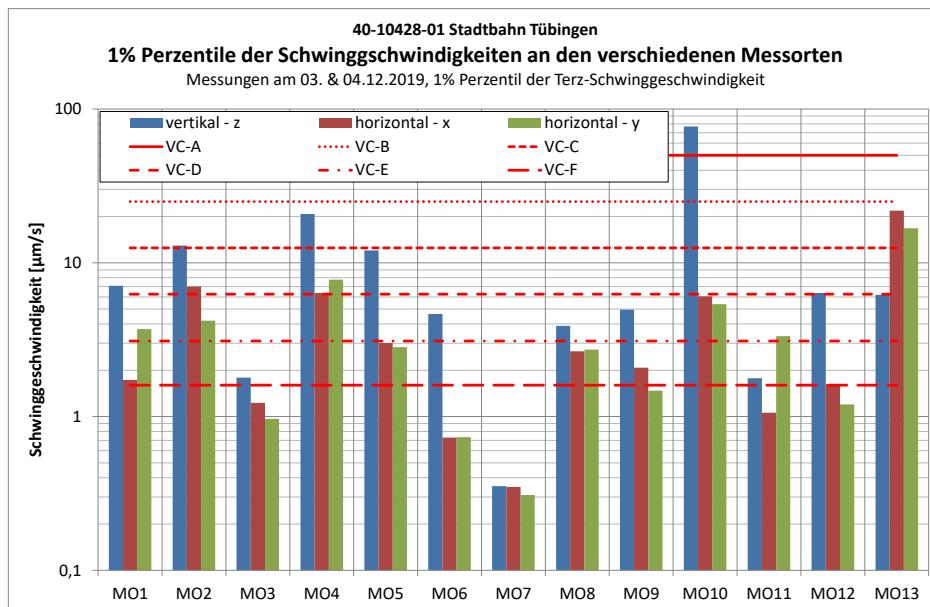


Abbildung 2-4: MO1 bis MO13 – IST-Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

| | Vertikal | Horizontal | Horizontal | Klassifizierung | |
|------|----------|------------|------------|-----------------|------------|
| | z | x | y | Vertikal | horizontal |
| MO1 | 7,1 | 1,7 | 3,7 | VC-D (knapp) | VC-D |
| MO2 | 13,0 | 7,0 | 4,2 | VC-D | VC-C |
| MO3 | 1,8 | 1,2 | 1,0 | VC-E | VC-F |
| MO4 | 20,7 | 6,4 | 7,8 | VC-B | VC-C |
| MO5 | 12,0 | 3,0 | 2,8 | VC-C | VC-E |
| MO6 | 4,6 | 0,7 | 0,7 | VC-D | VC-G |
| MO7 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | VC-G | VC-G |
| MO8 | 3,9 | 2,7 | 2,7 | VC-D | VC-E |
| MO9 | 5,0 | 2,1 | 1,5 | VC-D | VC-E |
| MO10 | 77,0 | 6,0 | 5,4 | Fühlschwelle | VC-D |
| MO11 | 1,8 | 1,1 | 3,3 | VC-E | VC-D |
| MO12 | 6,4 | 1,6 | 1,2 | VC-C | VC-F |
| MO13 | 6,2 | 21,8 | 16,8 | VC-D | VC-B |

Tabelle 2-4 Maximalwerte der IST-Schwinggeschwindigkeiten der 1% Perzentile in [µm/s] an den Messorten und VC-Kriterien

Es ist gut zu erkennen, dass die niedrigsten Schwinggeschwindigkeiten an den Messorten auf Gebäude-Bodenplatten (MO3, MO6, MO7, MO8, MO12) erzielt werden.

Die besonders tiefen Pegel bei MO7 sind dem Umstand geschuldet, dass das GUZ zum Zeitpunkt der Messung noch nicht in Betrieb war. Bei den Messorten, welche sich auf Geschossdecken befinden (MO1, MO2, MO4, MO5, MO9, MO10, M11, MO13), liegen die Schwinggeschwindigkeiten erwartungsgemäß höher. Außerdem ist zu erkennen, dass in der Regel die vertikale Komponente maßgebend ist. Allerdings gibt es zwei Ausnahmen. Bei MO11 (Geb. A, 5. Etage) und MO13 (Geb. D, 5. Etage) sind die horizontalen Schwingrichtungen größer als die vertikale Komponente, da es sich in beiden Fällen um relativ hohe Gebäude mit geringer horizontaler Aussteifung handelt.

Im Anhang ist eine ausführliche Standortevaluierung der IST-Situation jedes einzelnen Standorts dokumentiert. Die Ergebnisse dieser Auswertung bilden den aktuellen IST-Zustand an den unterschiedlichen Messorten ab. Zu berücksichtigen ist, dass dies trotz der Messdauer von zwei Stunden einer „Momentaufnahme“ gleicht. Sollten sich lokale Gegebenheiten ändern (Veränderung der Haustechnik, Gerätschaften etc.), hat dies selbstverständlich einen Einfluss auf die IST-Situation der Schwingungspegel.

2.4 Auswertung der der Magnetfeldmessungen

Die Auswertung der messtechnisch erfassten magnetischen Flussdichte B erfolgt entsprechend den im Bereich der nanotechnologischen Anwendungen üblichen Methoden. Generell wird zwischen dem „Near DC-Signal (< 1 Hz) und dem AC-Signal (1 – 400 Hz) unterschieden. Da die Messungen aber im Hinblick auf die Einwirkungen der zukünftigen Stadtbahn durchgeführt werden und die zukünftigen Fahrzeuge im Bereich der Stadt über Gleichstrom betrieben werden, liegt das Hauptaugenmerk der Auswertung auf den Near-DC-Magnetfeldänderungen.

Für die Auswertung des „Near DC-Signal“ wird zunächst das Rohsignal mit einem low-pass-Filter (Butterworth Charakteristik, 4. Ordnung, Eckfrequenz 1Hz) gefiltert. Dieses Signal zeigt dann den DC-Anteil des gemessenen Signals über die Messdauer. Frequenzen höher als 1 Hz bleiben hier unberücksichtigt. Die Schwankungen des so ausgewerteten Kurvenverlaufes sind ein Kriterium für die Stabilität des magnetischen Feldes am gemessenen Ort. Die Peak-Peak Veränderungen der magnetischen Flussdichte im DC-Bereich können direkt aus dem Zeitverlauf abgelesen werden.

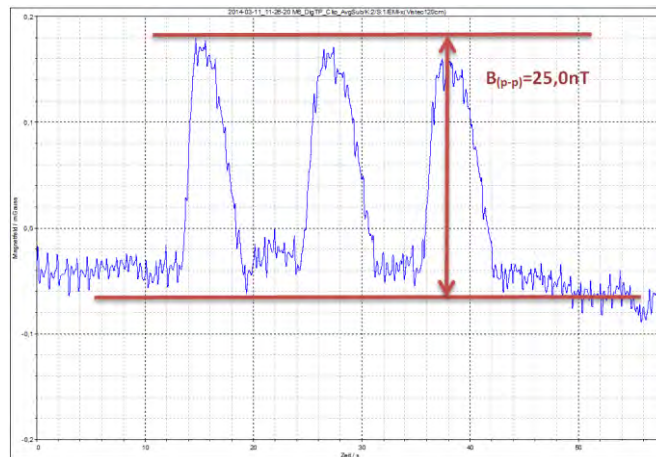
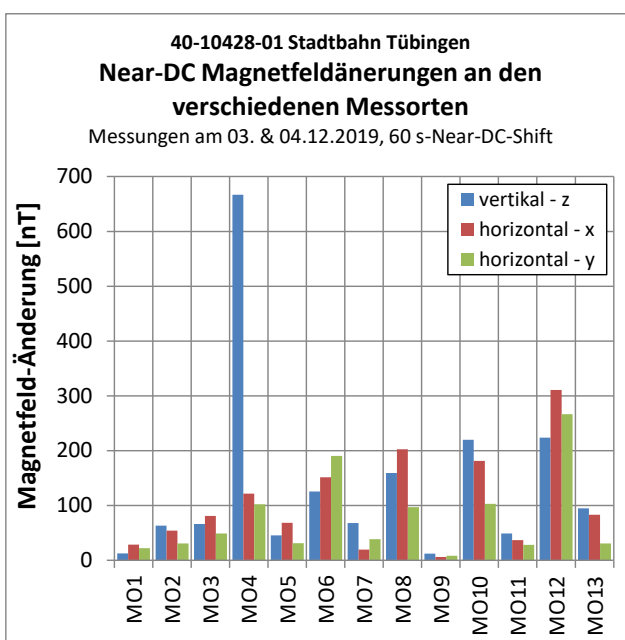


Abbildung 2-5: Beispiel DC-Feldveränderung (ohne Projektbezug)

Eine Auswertung der AC-Magnetfeldänderung erfolgt zwar ebenfalls für jeden Standort, aber nur im Anhang rein informativ. Die Auswertung erfolgt für die zwei einzelnen, aber maßgebenden Frequenzen von 16 Hz (Vollbahnstrom) und 50 Hz (Netzfrequenz). Dazu werden aus den Zeitverläufen der Messdaten durch Fast-Fourier-Transformationen (FFT) Frequenz-Amplitudenspektren berechnet und der Maximalwert (Peak Hold) für jeden Messpunkt und Messrichtung ausgewertet.

Die Near-DC-Magnetfeldänderungen sind in Abbildung 2-6 zu sehen. Dargestellt ist der Maximalwert des 60 s-Near-DC-Shifts über die gesamte Messdauer von zwei Stunden. Die Werte unterscheiden sich – abhängig von der Lage des Messortes – relativ stark. Aktuell wird der größte Near-DC-Shift von bis zu 670 nT am Messort MO4 (Gebäude A, Etage 7) durch Fahrstuhlbetrieb hervorgerufen. Aber auch bei einigen anderen Gebäuden ist der Fahrstuhlbetrieb der maßgebende Verursacher für den Near-DC-Shift.



| | maximaler Near-DC Shift [nT] | | |
|-------------|------------------------------|--------------|--------------|
| | Vertikal z | Horizontal x | Horizontal y |
| MO1 | 12,6 | 28,9 | 22,3 |
| MO2 | 63,5 | 54,1 | 31,1 |
| MO3 | 66,1 | 81,0 | 49,1 |
| MO4 | 666,8 | 121,9 | 102,2 |
| MO5 | 45,4 | 68,4 | 31,4 |
| MO6 | 125,7 | 151,7 | 190,7 |
| MO7 | 68,2 | 19,7 | 38,8 |
| MO8 | 159,5 | 202,4 | 97,0 |
| MO9 | 12,1 | 6,2 | 8,4 |
| MO10 | 220,0 | 181,3 | 102,9 |
| MO11 | 49,1 | 36,8 | 28,4 |
| MO12 | 223,9 | 310,6 | 266,8 |
| MO13 | 94,8 | 83,3 | 30,7 |

Abbildung 2-6: MO1 bis MO13 – Maximaler Near-DC Shift

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

3 Prognose der Schwingungsimmissionen infolge des Stadtbahnbetriebs

3.1 Allgemeines

Bei einer Vorbeifahrt eines Schienenfahrzeugs entstehen dynamische Kräfte, die über das Gleis auf den Untergrund einwirken (Emission). Hiervon gehen Erschütterungen aus, die sich über den Baugrund ausbreiten und mit zunehmendem Abstand vermindern (Transmission). Benachbarte Bauwerke werden von den Erschütterungen am Fundament erfasst und ebenfalls zu Schwingungen angeregt, die sich innerhalb der Gebäude aufgrund der Gebäudeeigendynamik verstärken oder abschwächen können und dort auf den Menschen oder schwingungsempfindliche Geräte einwirken (Immission).

Wird ein Schienenverkehrsweg modifiziert, so lässt sich die zukünftige Erschütterungssituation (Prognose-Situation) aus der Ist-Situation ableiten. Die Emission der Fahrzeuge, die Abnahmebeziehung der Bodenschwingungen sowie das Übertragungsverhalten im Gebäude kann messtechnisch ermittelt und eine Veränderung der Gleisanlage dann rechnerisch gut prognostiziert werden.

Bei Schienenverkehrswegen, die in Planung sind, kann naturgemäß nicht auf örtliche Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Emissionspegel, die an anderen Strecken gemessen werden, können nur in sehr eingeschränktem Maß verwendet werden, da diese Spektren nicht nur vom Fahrzeug, sondern ebenfalls von der Admittanz des Unterbaus bzw. Untergrunds abhängen. Unterschiedliche lokale Baugrundverhältnisse würden somit unberücksichtigt bleiben.

3.2 Kraftbasierte Erschütterungsprognose

Für die Erschütterungsprognose der geplanten, neuen Stadtbahn eignet sich ein kraftbasiertes Verfahren, das nicht von einem fahrzeugspezifischen Bewegungsspektrum, sondern von einem fahrzeugspezifischen Kraftspektrum ausgeht. Ist dieses Kraftemissionsspektrum bekannt, so reicht es aus, vor Ort mittels einer künstlichen Anregungsquelle ein Kraftimpuls entlang der geplanten Gleisstrecke in den Baugrund einzuleiten und am Immissionsort die zugehörige Schwingungsantwort zu messen, um die Erschütterungsemission unter Berücksichtigung der lokalen Baugrundverhältnisse prognostizieren zu können vgl. [14], [15].

Das Verfahren besteht aus folgenden Schritten:

1. Messtechnische Ermittlung der Baugrund-Übertragungsadmittanzen entlang der geplanten Trasse, vgl. Abschnitt 3.3
2. Messtechnische Ermittlung des Kraftemissionsspektrums des zukünftigen Fahrzeugs an einem Referenzstandort, vgl. Abschnitt 3.5.
3. Prognoseberechnung der Emissionspegel aus den vor Ort messtechnisch ermittelten Übertragungsadmittanzen und dem ortsunabhängigen Kraftspektrum, vgl. Abschnitt 3.7.

3.3 Ermittlung der Linien-Übertragungsdmittanz

Entlang der geplanten Gleisstrecke wird durch eine künstliche Anregungsquelle eine Reihe von Kraftimpulsen in den Baugrund eingeleitet.

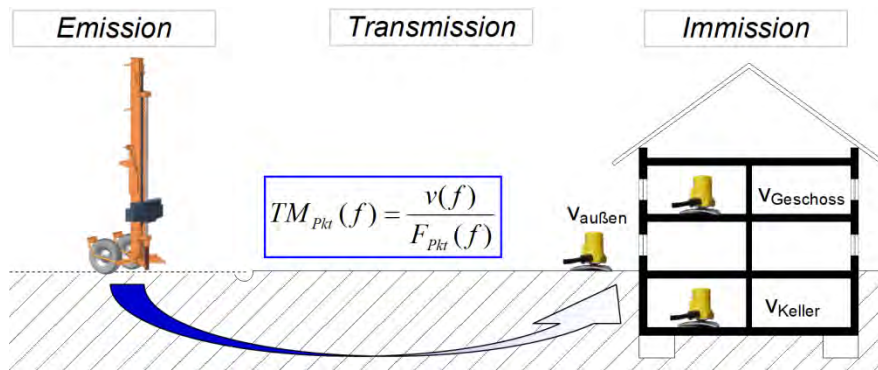


Abbildung 3-1: Messtechnische Ermittlung der Übertragungsdmittanz TM („transfer mobility“)

Warum dies ein Impuls und nicht eine harmonische Anregungsquelle ist, hat hauptsächlich praktische Gründe, da sich ein Impuls bzw. Stoß auf sehr einfache Art und Weise realisieren lässt. Beim vorliegenden Projekt wurde dazu ein Fallgewicht mit einer Kraftmessdose eingesetzt (DYNPACT® mit einer Fallmasse von ca. 50 kg, Fallhöhe: 1,0 m, ca. 30 Stöße/Minute). Das Gerät lässt sich händisch verschieben und positionieren. Die kraftschlüssige Anbindung der Kraftmessdose an den Untergrund wird durch eine Lastverteilplatte mit Sandkissen sichergestellt (vgl. Abbildung 3-2).



Abbildung 3-2: Künstliche Impulsanregung DYNPACT®

Während des Versuchs werden sowohl die eingeleitete Kraft der Impulse als auch die dazugehörige Schwingungsantwort in unterschiedlichen Entfernungen oder direkt am Immissionsort (Beurteilungspunkt) gemessen. An jedem Einleitungspunkt wird die gemittelte Transferfunktion aller Impulsschläge, die sog. Übertragungsdmittanz $TM_{Pkt}(f)$, ermittelt (Details hierzu finden sich im Anhang, Abschnitt 8.4). Sie stellt die Schwingungsantwort je Krafteinheit des jeweiligen lokalen Punktes dar. Durch Integration der einzelnen Kraftimpulse erhält man den Einfluss über die ganze Länge eines Fahrzeuges, die sogenannte Übertragungsfunktion der Linienquelle $TM_{Linie}(f)$, vgl. Abbildung 3-2.

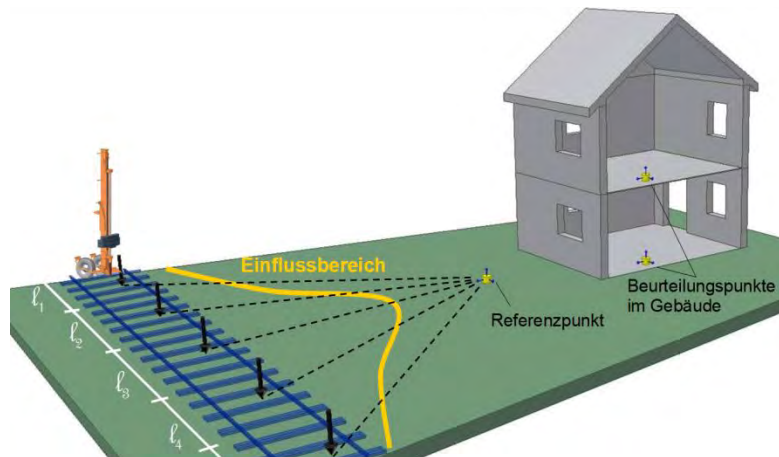


Abbildung 3-2: Ermittlung der Linienquellen-Übertragungsadmittanz mittels Punktanregung

Damit wird der Einfluss der linienförmigen Anregung durch den Zug und der evtl. unterschiedlichen Übertragungswege für jeden Ort berücksichtigt.

3.4 Messungen in Tübingen mit künstlicher Anregung entlang der zukünftigen Stadtbahn

In Tübingen wurden die Linien-Übertragungsadmittanz an vier Standorten entlang der geplanten Trasse gemessen, zeitgleich zu den Beweissicherungsmessungen gemäß Abschnitt 2.2, d.h. im Zeitraum vom 03. bis 04.12.2019 statt. Die Lage der vier Orte sind in Abbildung 3-3 dargestellt und mit A1 bis A4 gekennzeichnet.

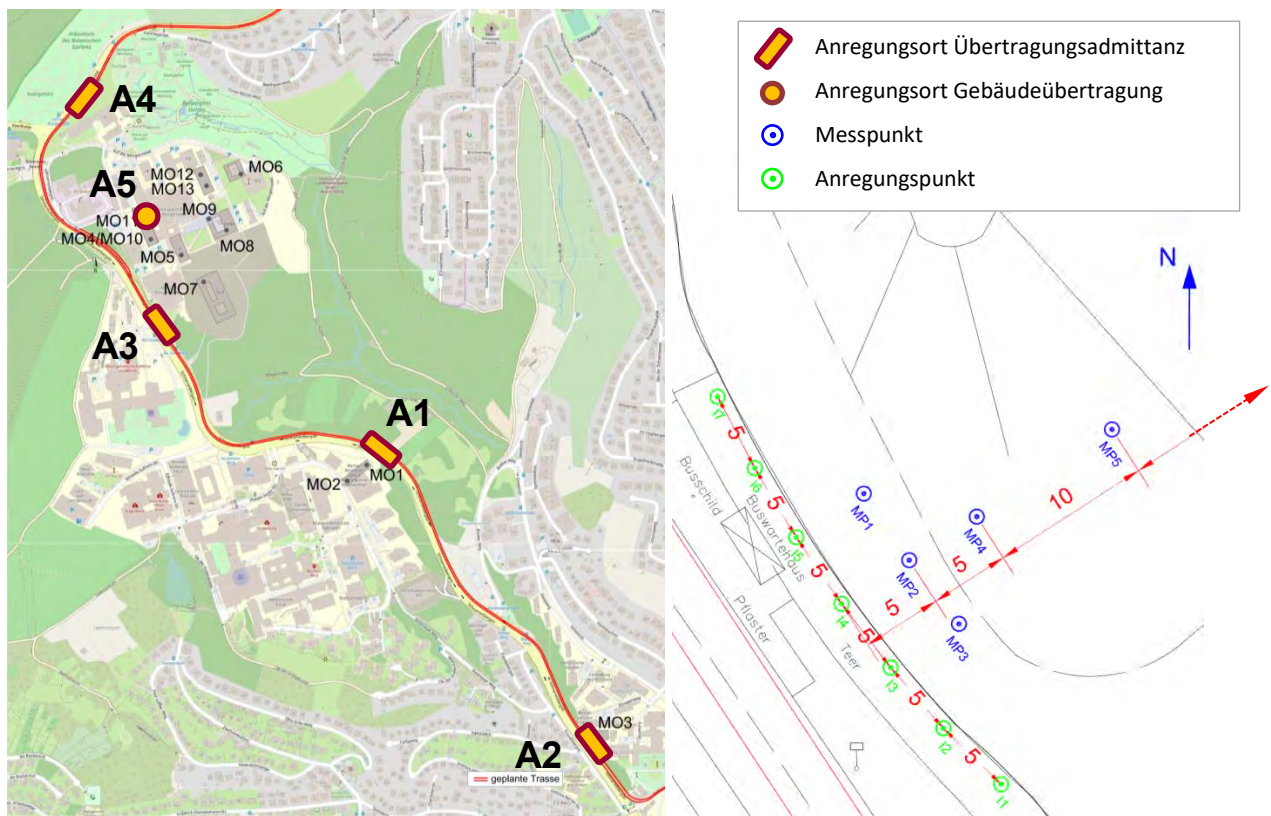


Abbildung 3-3. Messorte in Tübingen mit künstlicher Anregung

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

An jedem dieser Standorte A1 bis A4 wurde gemäß Abschnitt 3.3 die Schwingungsantwort infolge des eingeleiteten Impulses in mehreren Abständen gemessen. Die Anregungen erfolgte ebenfalls an mehreren einzelnen Punkten in 5m-Abständen entlang der geplanten Trasse, um die Linienübertragungsadmittanz bestimmen zu können. Die genaue Messdokumentation sowie die Lage der Mess- und Anregungspunkte sind im Anhang 8 ausführlich dokumentiert.

Mit diesen Messungen können nun folgende drei erschütterungstechnisch relevante Standorteigenschaften ermittelt werden:

1. Die Linienübertragungsadmittanz (vgl. Abschnitt 3.3): Sie entspricht der frequenzabhängigen Anregbarkeit des lokalen Baugrunds und ist entfernungsabhängig. In Abbildung 3-4 sind die messtechnisch ermittelten Admittanzen für einen Referenzabstand von 8m dargestellt.

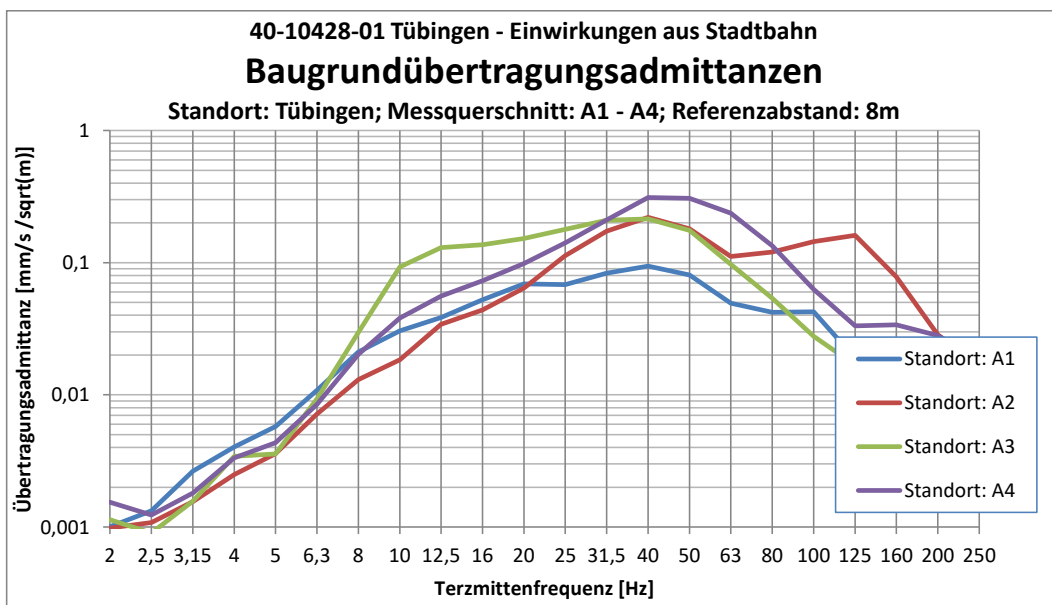


Abbildung 3-4: Baugrundübertragungsadmittanzen in Tübingen

2. Weiterleitung der Schwingungen im Baugrund: Die abstandsabhängige Auswertung (vgl. hierzu Anhang, Abschnitt 8.4) enthält ebenfalls die Information, wie sich die Erschütterungen über die Entfernung verringern. Allerdings ist dies spektral zu betrachten. Die nachfolgende Abbildung 3-5 zeigt den über die Terzmittenfrequenzen aufgetragene Ausbreitungskoeffizient bzw. -exponent „n“, sofern folgende Ausbreitungsbedingung zugrunde gelegt wird.

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^n$$

mit r_0 : Referenzabstand; R : Entfernung; A_0 : Amplitude im Referenzabstand; A : Amplitude.

Ein Ausbreitungskoeffizient von $n = -1,0$ [-] bedeutet, dass sich die Schwingungspegel bei doppelter Entfernung halbieren. Dagegen bedeutet ein Ausbreitungskoeffizient von $n = -0,5$ [-], dass sich die Schwingungspegel erst bei vierfacher Entfernung halbieren.

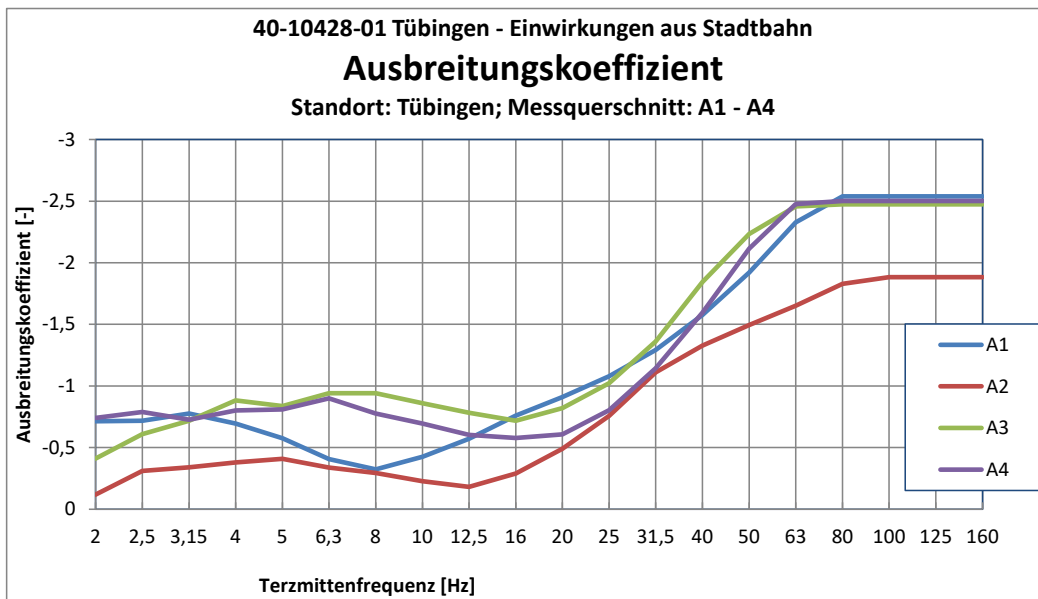


Abbildung 3-5: Frequenzabhängiger Ausbreitungskoeffizient

Das Ergebnis gemäß Abbildung 3-5 zeigt, dass die Schwingungen im Frequenzbereich bis 20Hz wesentlich weniger gedämpft und über die Entfernung gemindert werden als Schwingungen mit Frequenzen größer 25 Hz.

- Abminderung durch die Fundamentkonstruktion: An den Messorten A1, A2, A4 und zusätzlich am Messort A5 (Gebäude A, Morgenstelle 18) wurde mittels künstlicher Anregung die Abminderung der Schwingungen infolge der Gebäudefundamentierung ebenfalls messtechnisch ermittelt, indem sowohl Messpunkte im Freifeld als auch Fundament-Messpunkte installiert wurden. Im Hinblick auf eine generalisierte Aussage wurden die Kurven idealisiert und mittels einer Umhüllenden verallgemeinert, vgl. Abbildung 3-6.

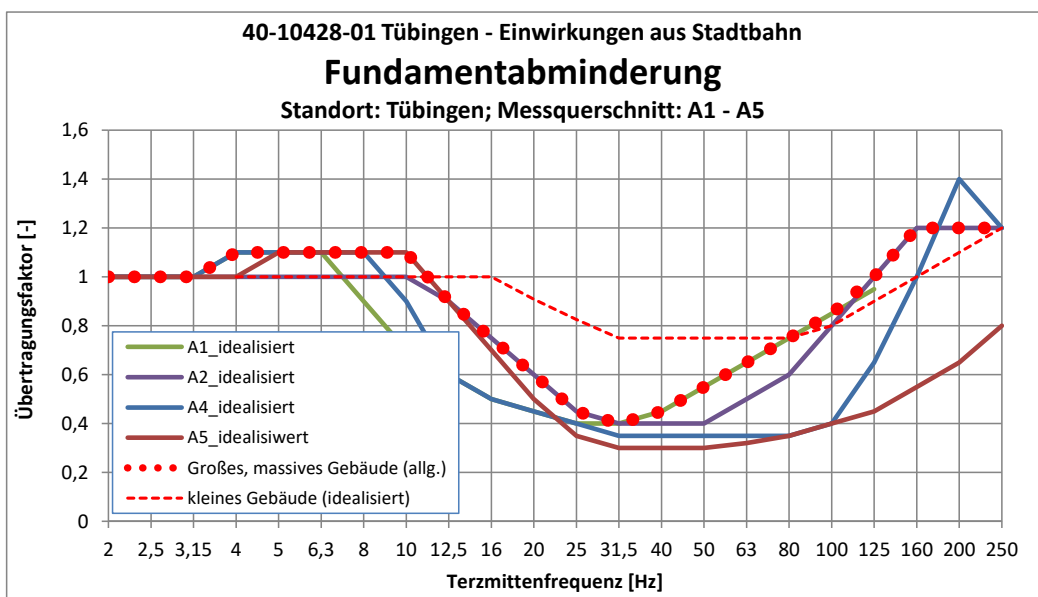


Abbildung 3-6: Frequenzabhängige Fundamentabminderung

3.5 Bestimmung des Kraftdichtespektrums

Liegt das Kraftdichtespektrum des zukünftig eingesetzten Fahrzeuges nicht vor (so wie im vorliegenden Fall der Zweisystem-Regionalstadtbahn), so muss dieses an einem oder mehreren Referenzstandorten ermittelt werden. Es wird dadurch ermittelt, dass an der Referenzstrecke

- die Fahrzeugemissionen an mehreren repräsentativen Referenz-Messpunkten mit einer statistisch ausreichenden Anzahl von Zugvorbeifahrten und
- die lokale Linien-Übertragungsadmittanz für die gewählten Referenz-Messpunkte

gemessen wird. Dadurch kann das Kraftdichtespektrum $F(f)$ des vorbeifahrenden Zuges ermittelt werden. Theoretisch sollte das Kraftdichtespektrum für jeden Referenz-Messpunkt gleich sein. Die Mittelung aller ermittelten Kraftdichtespektren ist daher repräsentativ für den untersuchten Fahrzeugtyp.

Im vorliegenden Fall soll ein Zweisystem-Fahrzeug für die Regionalstadtbahn eingesetzt werden. Weil das Fahrzeug im Vergleich zu anderen üblichen Straßenbahnen schwerer ist, musste das Kraftdichtespektrum neu bestimmt werden. Als Referenzort wurde die Stadt Karlsruhe angefragt.

3.6 Referenz- und Vergleichsmessung in Karlsruhe



Abbildung 3-7: Referenzmessung des Zweisystem-Fahrzeugs der Regionalstadtbahn in Karlsruhe

Die Referenz- und Vergleichsmessungen in Karlsruhe fanden am 04.03.2020 statt. Es wurden zwei Messorte ausgewählt, wobei bei einem Messort zwei Messquerschnitte (mit und ohne Weiche) installiert wurden. Die Eckdaten der Referenzmessung in Karlsruhe sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst.

| Messung | Beschreibung | Bemerkung | |
|-----------------------|------------------------|---|---|
| Datum | 04.03.2020 | - | |
| Ort | Karlsruhe | - | |
| Messorte | 2 | Rüppurrer Straße | Durlacher Allee (Park am Gottesauer Schloss) |
| Messquerschnitte | 3 | 1 | 2 1 MQ im Bereich Weiche 1 MQ außerhalb des Weicheneinflussbereichs |
| Oberbau | FF und Schotteroberbau | FF; Typ Rheda-City Elastische Schienenfußummantelung (ESU), nom. Einsenkung 0,7 – 0,8 mm | Schwellen B 58W mit Zwischenlage ZW686a |
| Untersuchte Fahrzeuge | Zweissystem-Fahrzeuge | Flexity Swift, ET 2010 GT8-100D/2S-M | |

Tabelle 3-1: Kurzbeschreibung Referenzmessung Karlsruhe

Die Lage der Messorte ist in Abbildung 3-8 skizziert. Eine detaillierte Dokumentation aller Messungen findet sich in der Anlage IV, Abschnitt 9 ab Seite 199.

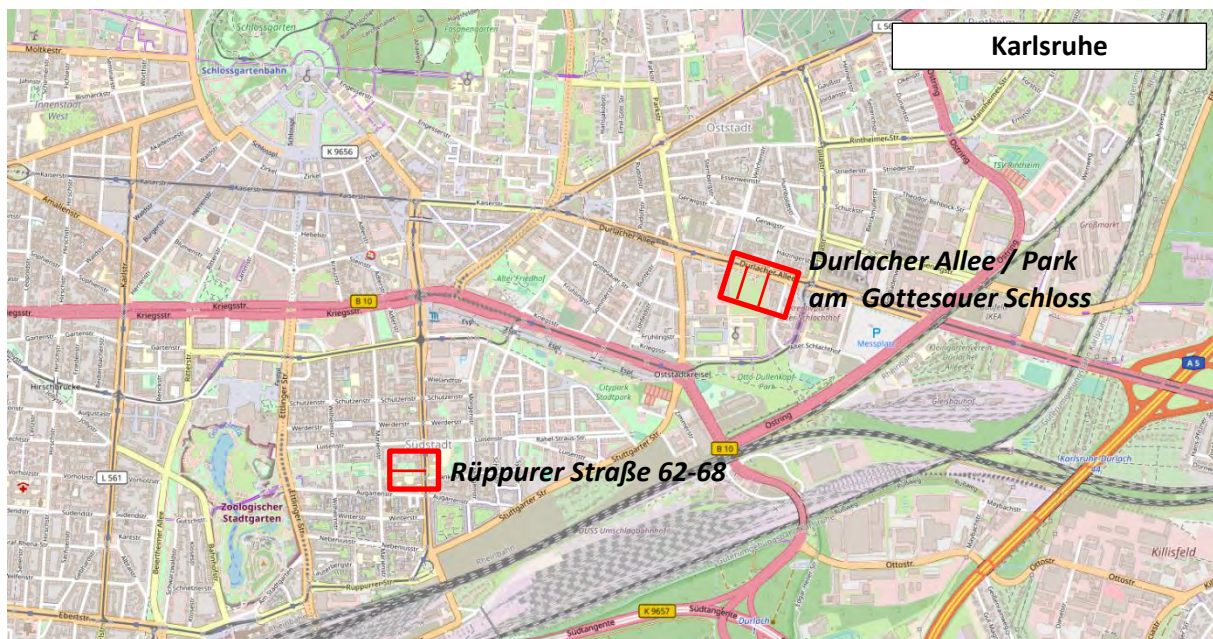


Abbildung 3-8: Lage der Messorte und Messquerschnitte der Referenzmessung in Karlsruhe

Die Lage der Messorte wurde so gewählt, dass Zweissystem-Fahrzeuge der Strecken S4, S5, S7, S8, S51 und S52 gemessen werden konnten.

Beim Karlsruher Verkehrsverbund (KVV) werden folgende Zweissystem-Fahrzeuge aktuell eingesetzt:

- **Flexity Swift, ET 2010** von Bombardier mit einer Fahrzeugmasse von 62,5 to
- **GT8-100D/2S-M** von DUEWAG und Siemens mit einer Fahrzeugmasse von ca. 59 to

Detailliertere Angaben zu den Zweisystem-Fahrzeugen finden sich im Anhang, Abschnitt 9.3. Eine Unterscheidung zwischen den beiden genannten Fahrzeugtypen wurde bei der Auswertung nicht gemacht. Im vorliegenden Fall lag der Schwerpunkt auf der Erfassung repräsentativer Emissionswerte von Zweisystem- im Vergleich zu Einsystem-Fahrzeugen aufgrund des höheren Gewichts.

Nachfolgend dargestellt sind die ermittelten Kraftspektren der Zweisystem-Stadtbahnfahrzeugen, die sich aus den gemessenen Fahrzeugemissionen sowie den lokalen Linien-Übertragungsadmittanzen an allen drei Messquerschnitten in Karlsruhe ergeben.

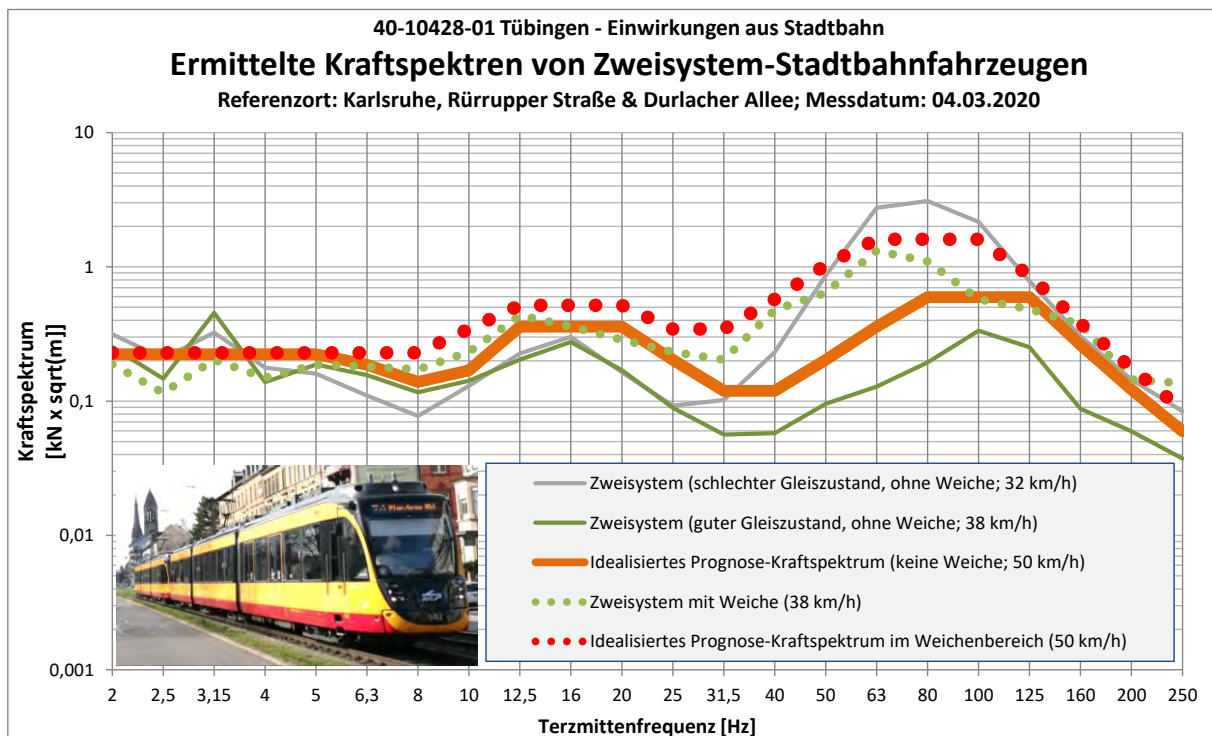


Abbildung 3-9: Messtechnisch ermittelte und idealisierte Kraftspektren als Eingangsgröße für die Prognoseberechnung

3.7 Prognoseergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der prognostizierten Schwingungen infolge Straßenbahn- bzw. Stadtbahnvorbeifahrt dargestellt. Zunächst wird die Berechnung exemplarisch an einem einzelnen Objekt noch einmal konkret erläutert, bevor die Prognoseergebnisse

- für ausgewählte Gebäude (hauptsächlich für die in Abschnitt 2.1 aufgeführten) und
- verallgemeinert in Form von Korridorbreiten

dargestellt werden.

3.7.1 Gebäudespezifische Prognose und Beurteilung

Die Berechnung erfolgt spektral. Es werden folgende baudynamischen Eingangsgrößen berücksichtigt:

- das Kraftdichtespektrum gemäß Abschnitt 3.6, Abbildung 3-9, sowie die standortspezifischen Übertragungsadmittanzen gemäß Abschnitt 3.4, Abbildung 3-4
 - Mit diesen Eingangsgrößen erhält man das Emissionsspektrum im Nahbereich der Trasse
- das standortspezifische, frequenzabhängige Ausbreitungsverhalten der Schwingungen im Baugrund gemäß Abschnitt 3.4, Abbildung 3-5
 - Damit erhält man das Spektrum der Schwingungen im Freifeld.
- die gebäudeabhängige Fundamentabminderung gemäß Abschnitt 3.4, Abbildung 3-6
 - Unter Berücksichtigung des genauen Gebäudeabstandes zur Trasse und der Fundamentabminderung erhält man den Schwingungspegel am Gebäudefundament bzw. Bodenplatte.
- die gebäudeabhängige Übertragungsfunktion gemäß der DB-Richtlinie Ril 820.2050 [7], wobei berücksichtigt wurde, dass die hier angegebenen Kurven sich auf einen Außen-Messpunkt beziehen. Die Übertragungsfunktionen sind im Anhang I, Abbildung 6-2 wiedergegeben.
 - Damit erhält man eine Schar von Prognosespektren für die verschiedenen Stockwerksdecken mit jeweils unterschiedlichen Eigenfrequenzen.

Die Beurteilung erfolgt unter zwei Gesichtspunkten:

- Zum einen werden die Prognosewerte den IST-Werten am beweisgesicherten Punkt gegenübergestellt und hinsichtlich einer Verschlechterung der Standortbedingungen beurteilt.
- Zum zweiten erfolgt eine Verallgemeinerung auf das betrachtete Gebäude bzw. unmittelbar benachbarte Gebäude, bei der auch abweichende Decken-Eigenfrequenzen hinsichtlich der Einhaltung des jeweiligen gültigen Schwingungskriteriums betrachtet werden.

Beispielhaft wird nachfolgend die spektrale Erschütterungsprognose für den Bereich Kliniken Berg, (CIN-Gebäude, Otfried-Müller-Straße 25) dargestellt. Zunächst wird das Kraftdichtespektrum mit der messtechnisch ermittelten Übertragungsadmittanz multipliziert, um das Emissionsspektrum zu erhalten. Mit Hilfe der ermittelten Baugrundausbreitung am Messort A1 und der explizit am CIN-Gebäude gemessenen Fundamentabminderung wird das Immissionsspektrum am Gebäudefundament berechnet. Schließlich wird eine Schar von Prognosespektren für die Geschosdecken ermit-

telt. In Abbildung 3-10 sind die benannten Prognosespektren vom Emissionsort bis hin zur Geschossdecke dargestellt.

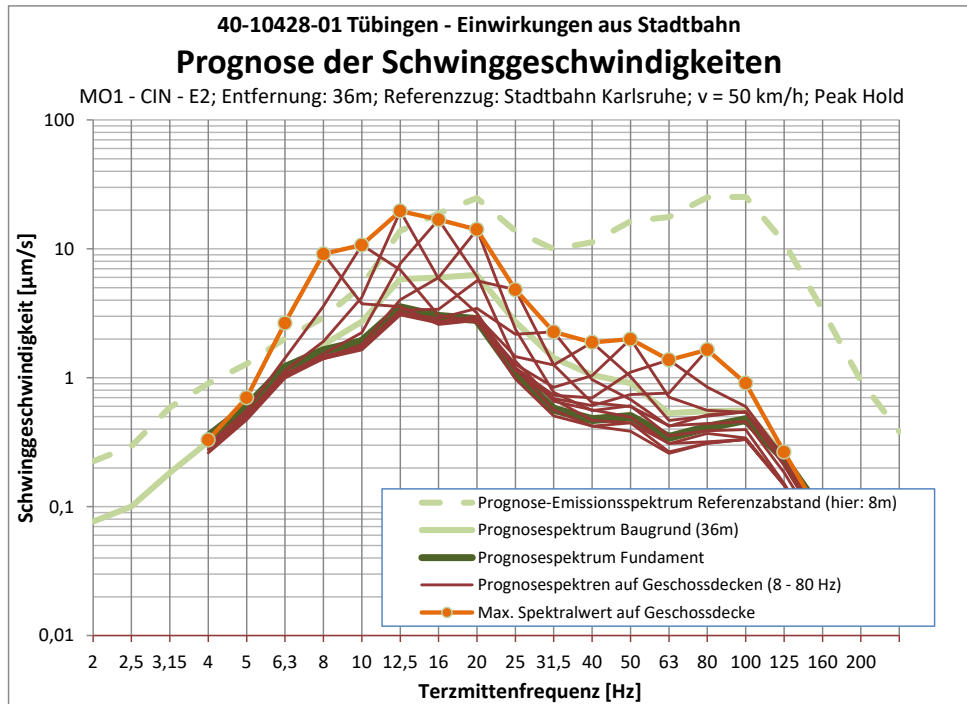


Abbildung 3-10: Prognose der Schwingungen im CIN-Gebäude infolge Stadtbahn-Vorbeifahrt

Diese Prognosespektren können nun mit Hilfe der Messergebnisse der IST-Messung (Auswertung gemäß Abschnitt 2.3.1 bzw. Abschnitt 2.3.3) bzw. anhand der VC-Kriterien (Abschnitt 2.3.2) beurteilt werden.

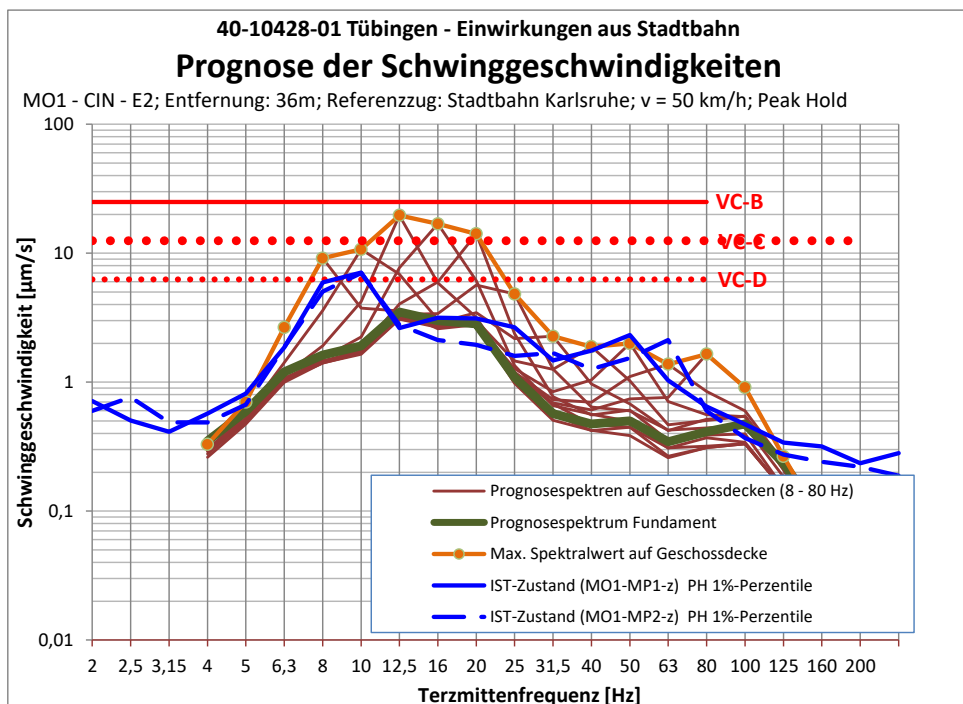


Abbildung 3-11: Vergleich der Schwingungsprognose mit den IST-Messungen und den VC-Kriterien

In Abbildung 3-11 sind nun die Prognosespektren aus Abbildung 3-10 sowie die derzeitigen IST-Werte für zwei beweisgesicherte Messpunkte („MO1-MP1-z“ und „MO1-MP2-z“) dargestellt. Außerdem sind die drei VC-Kriterien VC-B, VC-C und VC-D eingezeichnet. Anhand dieser Abbildung können nun für das CIN-Gebäude folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Die Räume, in denen die beiden genannten Messpunkte installiert waren, weisen eine Decken-Eigenfrequenz von ca. 10 Hz auf. Während der zweistündigen IST-Messung wurde dort als 1% Fraktilwert der spektralen Schwingungsamplitude ein Wert von 7 $\mu\text{m/s}$ gemessen.
- Während Stadtbahnvorbeifahrt wird ein größerer Wert prognostiziert. Und zwar wird für die gemessene Deckeneigenfrequenz von 10Hz ein Wert von 11 $\mu\text{m/s}$ berechnet.
- Im Zuge einer verallgemeinerten Betrachtung wird angenommen, dass andere Deckenfelder eine Decken-Eigenfrequenz auch in der benachbarten Terz haben können, in diesem Fall also 8 Hz oder 12,5 Hz. Der Prognosewert für die Stadtbahnvorbeifahrt liegt im Fall einer Decken-Eigenfrequenz von $f_0 = 12,5\text{Hz}$ bei 20 $\mu\text{m/s}$. Der Wert für eine Decken-Eigenfrequenz von 8 Hz wird in diesem Fall nicht relevant.
- Die Verschlechterung beträgt für das gemessene Deckenfeld bei 10 Hz Faktor $11/7 = 1,6$ [-].
- In dem beweisgesicherten Raum des CIN-Gebäudes befindet sich ein Mikroskop auf einem Labortisch (Lichtmikroskop Nikon N-STORM 4.0). Für ein solches schwingungsisiolierte Mikroskop ist das Schwingungskriterium VC-C (12,5 $\mu\text{m/s}$) als Grenzwert anzunehmen, um es mit ausreichender Präzision nutzen zu können (nachfolgend als „Toolspek“ bezeichnet).
- Für angenommene Deckeneigenfrequenzen zwischen 8 und 12,5 Hz ergibt sich ein maximaler Prognosewert von 20 $\mu\text{m/s}$. Damit wird das VC-C Kriterium um den Faktor $20/12,5 = 1,6$ [-] überschritten.
- Fazit:
 - Durch die zukünftige Stadtbahn werden die Standortbedingungen in Bezug auf die Erschütterungspegel verschlechtert.
 - Damit es zu keiner Standortverschlechterung am beweisgesicherten Messpunkt kommt, ist eine schwingungsmindernde Maßnahme von mindestens 6 dB für Frequenzen $f \geq 10$ Hz erforderlich.
 - Außerdem wird bei einer Decken-Eigenfrequenz von 12,5 Hz auch die Toolspezifikation VC-C zukünftig nicht mehr eingehalten sein. Damit die Toolspezifikation („Toolspek“) auch zukünftig eingehalten wird, ist eine schwingungsmindernde Maßnahme von mindestens 6 dB für Frequenzen $f \geq 12,5$ Hz erforderlich.

Der Übersicht halber werden die erläuterten Ergebnisse nun tabellarisch wie folgt zusammengefasst.

| | | |
|--|--|------------------|
| Projekt: Stadtbahn Tübingen Bericht-Nr.: 40-10428-01-D8 | Erschütterungs- und Magnetfeldimmissionen auf das Klinik- und Forschungsumfeld der Universität | Seite - 29/249 - |
|--|--|------------------|

| Messort | Gebäude Ebene | Tool | Abst. Trasse | Toolspek | IST-Zustand | Prognose Stadtbahn | Beurteilung der Standortbdg. |
|---------|---------------|--------------------------|--------------|----------|--------------|-----------------------------|---|
| MO1 | CIN, E2 | Mikroskop auf Labortisch | 36m | VC-C* | VC-D (knapp) | VC-C am MO VC-B verallg. | Der Standort verschlechtert sich, die Tool-Spez. wird zukünftig nicht mehr eingehalten. |

Tabelle 3-2: Beurteilung der zukünftigen Schwingungseinwirkung infolge Stadtbahnvorbeifahrt für den Messort MO1

| Messort | Gebäude | Erforderliche Minderung | | Empfohlene Maßnahme am Gleis |
|---------|---------|--------------------------------------|---|------------------------------|
| | | zur allgemeinen Einhaltung der Spez. | damit Standortbdg. am Beweissicherungspunkt nicht schlechter werden | |
| MO1 | CIN | 6 dB | 6 dB | 6 dB |
| | | $f \geq 12,5 \text{ Hz}$ | $f \geq 10 \text{ Hz}$ | $f \geq 10 \text{ Hz}$ |

Tabelle 3-3: Erforderliche schwingungsmindernde Maßnahmen für den Messort MO1

Die Erschütterungsprognose wird nun explizit für jeden Messort MO1 bis MO13 durchgeführt. Darüber hinaus wird ebenfalls das Gebäude I (Morgenstelle 3; MO14 bzw. A4) sowie die Kliniken Tag (Calwerstraße 6/7; MO15 und MO16) explizit berücksichtigt. Die Ergebnisse werden in der nachfolgenden Tabelle 3-4 zusammengefasst.

| Messort | Gebäude Ebene | Tool | Abst. Trasse [m] | Toolspek | IST-Zustand | Prognose Stadtbahn | Beurteilung der zuk. Standortbedingung |
|---------|----------------|--------------------------------|------------------|---------------|--------------|-----------------------------|--|
| MO1 | CIN, E2 | Mikroskop auf Labortisch | 36 | VC-C* | VC-D (knapp) | VC-C am MO VC-B verallg. | Der Standort verschlechtert sich, die Toolspek wird zukünftig nicht mehr eingehalten. |
| MO2 | CIN, E5 | Photonenmikroskop | 93 | VC-C | VC-C | VC-C | Keine Verschlechterung am MO und allgemein |
| MO3 | WSIC, KG | NMR, MRT | 16 | Bruker Nano-C | VC-E | VC-B | Deutliche Verschlechterung Toolspek. nicht eingehalten |
| MO4 | Geb. A E7 | Röntgen-diffraktometer | 78 | VC-B | VC-B | VC-B | Toolspek eingehalten. Hauptanregung Bahn bei 12,5 Hz führt zu einer Verschlechterung, allerdings gibt es bei 25Hz noch interne Störung, die höhere Pegel aufweist. |
| MO5 | Geb. E E2 | TEM, REM | 128 | VC-E | VC-C | VC-E (knapp) | Toolspek im IST-Zustand überschritten; keine Verschlechterung infolge Bahn |
| MO6 | VG, KG | Ionenmikroskop | 319 | Orion NanoFab | VC-D | << als Tool-Spez. | Keine Verschlechterung |
| MO7 | GUZ E2 (KG) | REM | 144 | VC-F | VC-G | VC-G | Minimale Verschlechterung (Geb. während Messung noch nicht in Nutzung) |
| MO8 | ZMBP E1 (KG) | Laserpinzette | 210 | VC-D | VC-D | VC-F | Keine Verschlechterung |
| MO9 | ZMBP E3 | TEM, Mikroskope | 213 | VC-D | VC-D | << VC-D | Toolspek derzeit knapp eingehalten, zukünftig aber keine Verschlechterung |
| MO10 | Geb. A E5 | REM, STM | 82 | VC-C* | > VC-A | VC-C | Toolspez. Im IST-Zustand nicht eingehalten, da bei 25Hz hausinterne Störungen. Zukünftig Verschlechterung im Bereich 12,5 - 20 Hz |
| MO11 | Geb. A-B E3 | NMR | 126 | Bruker Nano-C | VC-E | < als Tool-Spez. | Keine Verschlechterung |
| MO12 | Geb. D E1 (KG) | Optische Messtische (Kyrostat) | 248 | VC-D | VC-D | << VC-D | Toolspez. derzeit nur knapp eingehalten, zukünftig aber keine Verschlechterung |
| MO13 | Geb. D E5 | Optische Messtische (REM) | 261 | VC-D* | VC-D | << VC-D | Toolspez. im IST-Zustand nur knapp eingehalten, große Horizontalschwingungen für < 2Hz, zukünftig keine Verschlechterung |
| MO14 | Geb. I KG | TEM, REM | 37 | VC-E | VC-E | VC-D (knapp) | Deutliche Verschlechterung infolge Bahn |
| | EG | Mikroskope | | VC-C | VC-D | VC-A | |
| MO15 | Frauenklinik | MRT (EG) | 90 | Magneton Aera | ** | < als Toolspek | Toolspez. zukünftig eingehalten |
| | Med. Genetik | Sequenzierer (OG) | | VC-A | | VC-C | |
| MO16 | Neonatalogie | Mikrotom Präzisionswaage | 15 | VC-A | ** | >> VC-A | Toolspez. zukünftig deutlich überschritten. |

* Nur in Verbindung mit schwingungsisolierter Aufstellung
** keine IST-Messung vorhanden

Tabelle 3-4: Beurteilung der zukünftigen Schwingungseinwirkung infolge Stadtbahnvorbeifahrt für alle Messorte MO1 bis MO14

Die daraus abgeleiteten Minderungsmaßnahmen, die zur Aufrechterhaltung der derzeitigen Forschungsaktivitäten notwendig sind, werden in Abschnitt 3.8 erläutert und zusammengefasst.

3.7.2 Ermittlung von Korridorbreiten

Neben den expliziten Messorten, wo eine Beweissicherung der Erschütterungspegel des IST-Zustandes durchgeführt wurde, wird ebenfalls eine globale Prognose in Form von Korridorbreiten durchgeführt, um den Einflussbereich der zukünftigen, von der Stadtbahn emittierten Schwingungen auch für andere Gebäude einschätzen zu können. Dazu wird das Untersuchungsgebiet in folgende drei Untersuchungsbereiche unterteilt, vgl. Abbildung 3-12.

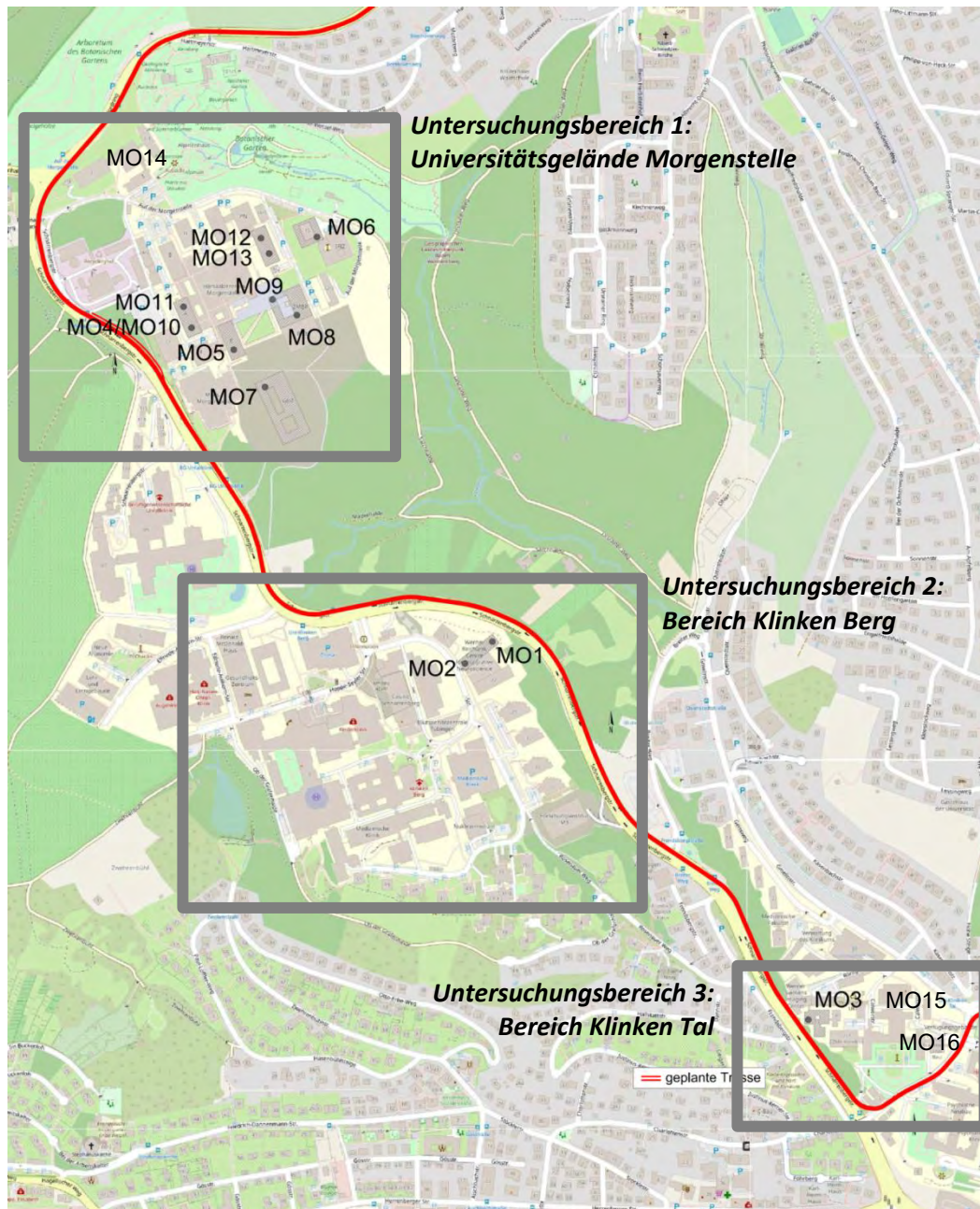


Abbildung 3-12: Einteilung in drei Untersuchungsgebiete

Zur Ermittlung der Korridore werden die gleichen Berechnungsschritte, wie in Abschnitt 0 erläutert, durchgeführt. Iterativ wird nun die Entfernung so lange variiert, bis das jeweilige VC-Kriterium erreicht wird. Diese iterative Berechnung erfolgt getrennt für die Schwingungen am Fundament und auf den Geschosdecken. Außerdem wird zusätzlich Einfluss der Weichen berücksichtigt. Nachfolgend sind die Korridore für die drei Untersuchungsgebiete dargestellt.

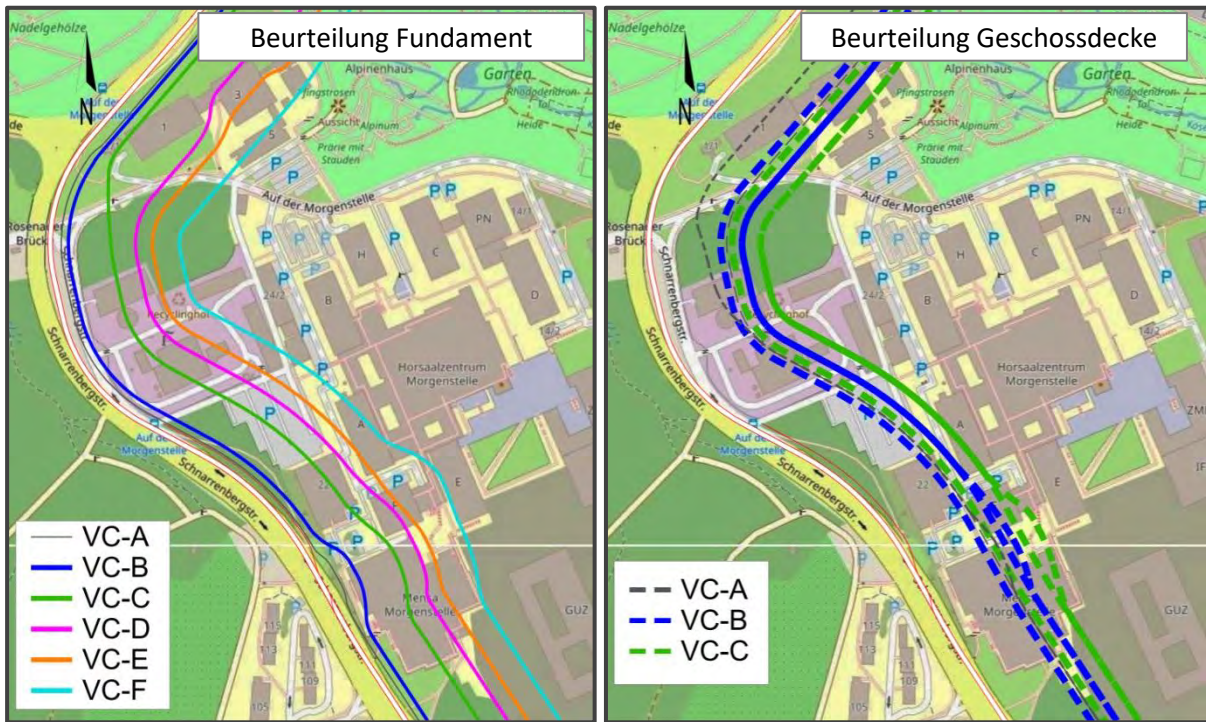


Abbildung 3-13: Einflussbreiten (VC-Korridore) infolge Stadtbahn-Vorbeifahrten im Bereich des Universitätsgeländes Morgenstelle

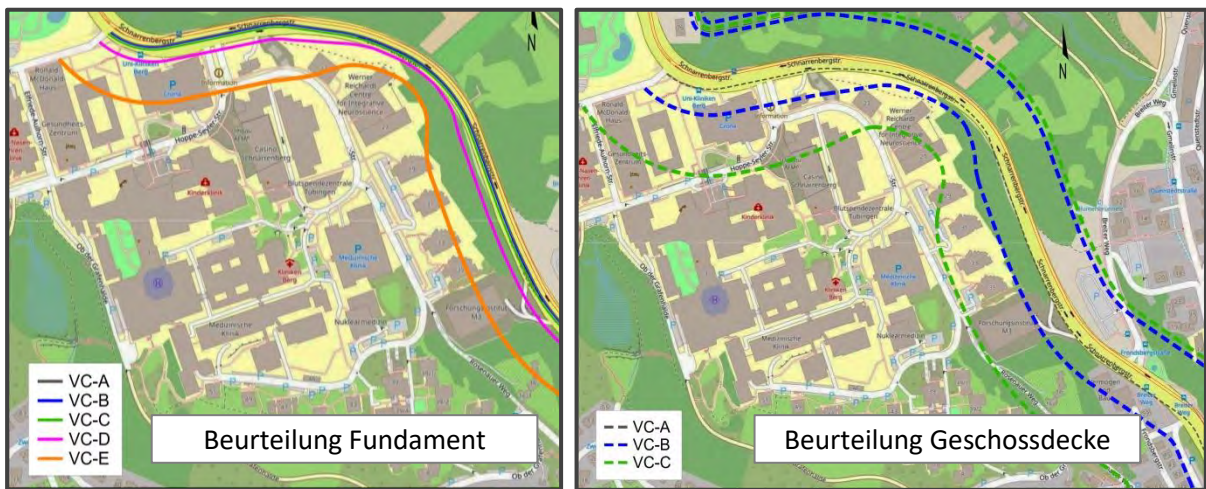


Abbildung 3-14: Einflussbreiten (VC-Korridore) infolge Stadtbahn-Vorbeifahrten im Bereich der Kliniken Berg

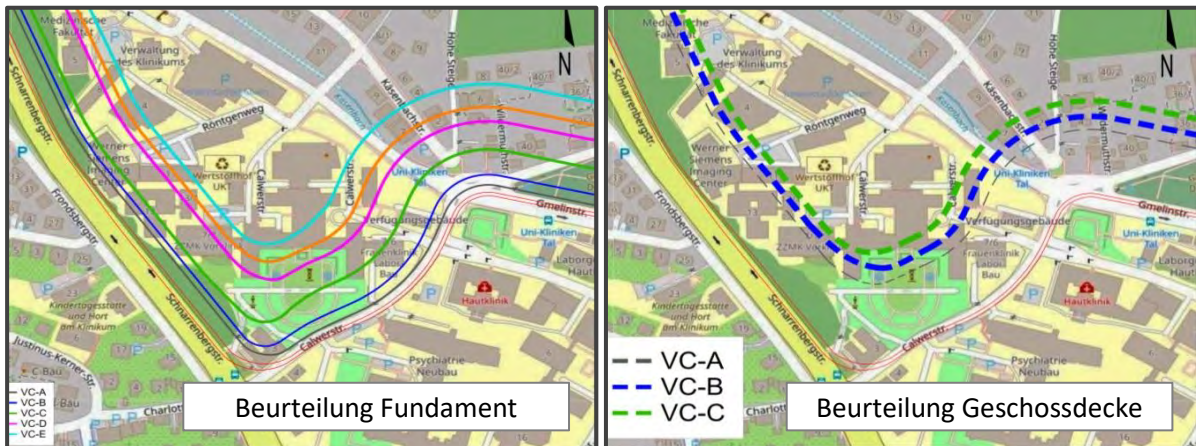


Abbildung 3-15: Einflussbreiten (VC-Korridore) infolge Stadtbahn-Vorbeifahrten im Bereich der Kliniken Tal

3.8 Zusammenfassung der Erschütterungsprognose

Die Ergebnisse der Erschütterungsprognose können wie folgt zusammengefasst werden und sind in Abbildung 3-16 grafisch dargestellt:

- Entfernt liegende Gebäude sind nicht betroffen (grüne Ampel, 10 MOs).
- Ab ca. 180m gibt es keinen Einfluss bzw. keine Verschlechterung der Standortbedingungen.
- Bei 6 der untersuchten Messorte MO1 bis MO16 wird es zukünftig zu einer deutlichen Erhöhung des Schwingungspegels durch die Vorbeifahrt der Stadtbahn kommen:
 - An 4 dieser Standorte wird dadurch zukünftig die Toolspezifikation nicht mehr eingehalten sein (rote Ampel), so dass die Funktionsfähigkeit nicht mehr gegeben ist. Diese vier Standorte sind nachfolgend noch einmal aufgelistet:
 - Röntgenweg 13-15 (Werner-Siemens-Imaging-Center, MO3)
 - Otfried-Müller-Straße 25 (CIN-Gebäude, MO1)
 - Morgenstelle 3 (Gebäude I, MO14)
 - Calwerstraße 7/6 (Neonatologie, MO16)
 - Im Gebäude A, Morgenstelle 18 (MO4 und MO10) werden sich durch die Stadtbahn die Standortbedingungen verschlechtern (gelbe Ampel). Anzumerken ist aber auch, dass derzeit hausinterne Störungen vorhanden sind, die jedoch leicht durch lokale Maßnahmen behoben werden können.

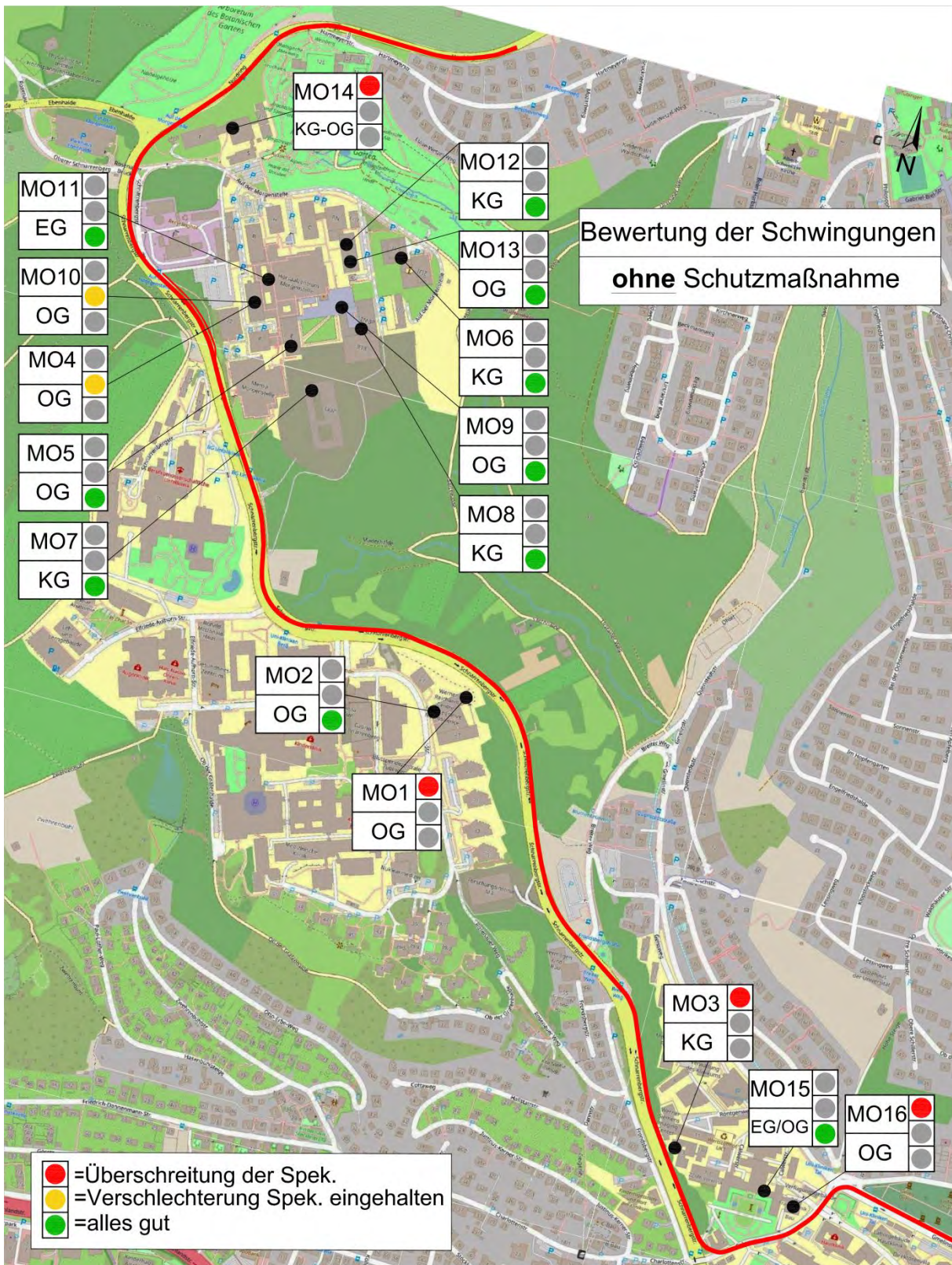


Abbildung 3-16: Bewertung der Erschütterungseinwirkung infolge Stadtbahn (ohne Schutzmaßnahme)

Um die Funktionsfähigkeit der schwingungsempfindlichen Geräte weiterhin gewährleisten zu können, sind bei der Planung der Stadtbahn schwingungsmindernde Maßnahmen zu berücksichtigen. Die erforderlichen Maßnahmen sind in Tabelle 3-5 zusammengefasst und quantifiziert. Zu unterscheiden ist dabei zwischen

- der Minderung, die zur allgemeinen Einhaltung der Toolspezifikation notwendig ist (Spalte 3, rot hinterlegt),
- der Minderung, die erforderlich ist, damit sich die Standortbedingungen hinsichtlich des Schwingungspegels nicht verschlechtern (Spalte 4, gelb hinterlegt).

Unter Berücksichtigung der Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit werden in Tabelle 3-5 Minderungsmaßnahmen empfohlen (Spalte 5, grün hinterlegt). Angemerkt sei, dass eine Minderung

- bis zu 6 dB erfahrungsgemäß mit einer hochelastische Schienenlagerung in Kombination mit einem verstärkten Oberbau
- größer als 6 dB mit Masse-Feder-Systemen

erzielt werden kann.

| 1 Messort | 2 Gebäude | 3 Erforderliche Minderung | | 4 damit Standortbdg. nicht schlechter werden | 5 Empfohlene Minderungs-Maßnahme am Gleis | 6 Bemerkung |
|--------------|--------------|------------------------------|--|--|--|--|
| | | zur Einhaltung der Spez. | | | | |
| MO1 | CIN | 6 dB | | 6 dB | 6 dB | - |
| | | $f \geq 12,5 \text{ Hz}$ | | $f \geq 10 \text{ Hz}$ | $f \geq 10 \text{ Hz}$ | |
| MO3 | WSIC | 3 dB | | 3 dB 20 dB | 6 dB | Standort wg. EMV ungeeignet |
| | | $f \geq 12,5 \text{ Hz}$ | | $f \geq 8 \text{ Hz}$ $f \geq 12,5 \text{ Hz}$ | $f \geq 10 \text{ Hz}$ | |
| MO10 | Geb. A | - | | 6 dB | 6 dB | schwingungs isolierte Aufstellung der internen Störquellen |
| | | - | | $f > 12,5 \text{ Hz}$ | $f \geq 10 \text{ Hz}$ | |
| MO14 | Geb. I | > 8dB | | > 16 dB | 8 dB | Eignung der OGs fraglich für empfindliche Geräte |
| | | $f > 12,5 \text{ Hz}$ | | $f > 12,5 \text{ Hz}$ | $f > 10 \text{ Hz}$ | |
| MO16 | Neonatalogie | > 10dB | | - | 10 dB | ggf. weitere Schutzmaßnahmen am Gerät |
| | | $f \geq 12,5 \text{ Hz}$ | | - | $f \geq 12,5 \text{ Hz}$ | |

Tabelle 3-5: Erforderliche und empfohlene schwingungsmindernde Maßnahmen

Trotz der in Tabelle 3-5 empfohlenen Schwingungsschutzmaßnahmen wird es bei drei Gebäuden zu deutlich schlechteren Standortbedingungen im Hinblick auf die Schwingungsruhe kommen (gelbe Ampel):

- Beim Röntgenweg 13-15 (Werner-Siemens-Imaging-Center, MO3) wird zwar mit der empfohlenen „6 dB“-Maßnahme die Tool-Spezifikation eingehalten, trotzdem werden sich die Standortbedingungen in aufgrund des geringen Abstandes zur geplanten Trasse verschlech-

tern. Allerdings kommt hinzu, dass an diesem Standort die Magnetfeldimmissionen noch deutlich kritischer zu bewerten sind (vgl. Abschnitt 4.5), so dass ohnehin über einen alternativen Standort bzw. eine geänderte Nutzung des Gebäudes nachgedacht werden muss.

- Beim Gebäude Morgenstelle 3 (Gebäude I, MO14) ist mit der empfohlenen „8 dB“-Maßnahme die Tool-Spezifikation im Kellergeschoss eingehalten, die Standortbedingungen verschlechtern sich jedoch. Da allerdings die generelle Eignung der Geschossdecken des Gebäudes zur Aufstellung von hochempfindlichen Geräten in Frage gestellt wird, sollte eine höherwertige Schutzmaßnahme am Gleis auch nur dann in Betracht gezogen werden, wenn auch gleichzeitig gebäudeseitige konstruktive Minderungsmaßnahmen am Gebäude durchgeführt werden. Die „8 dB“-Maßnahme stellt daher eine Mindestforderung dar.
- Bei der Neonatologie (MO16) ist trotz der empfohlenen „10 dB“-Maßnahme zur Einhaltung der Tool-Spezifikation mit einer Verschlechterung zu rechnen. Hier ist eine Kompensation durch individuelle Schutzmaßnahmen an den Geräten möglich und daher empfehlenswert.

Die Lage und die Bewertung der Erschütterungseinwirkung unter Berücksichtigung der empfohlenen Schutzmaßnahmen ist in der nachfolgenden Abbildung 3-17 dargestellt.

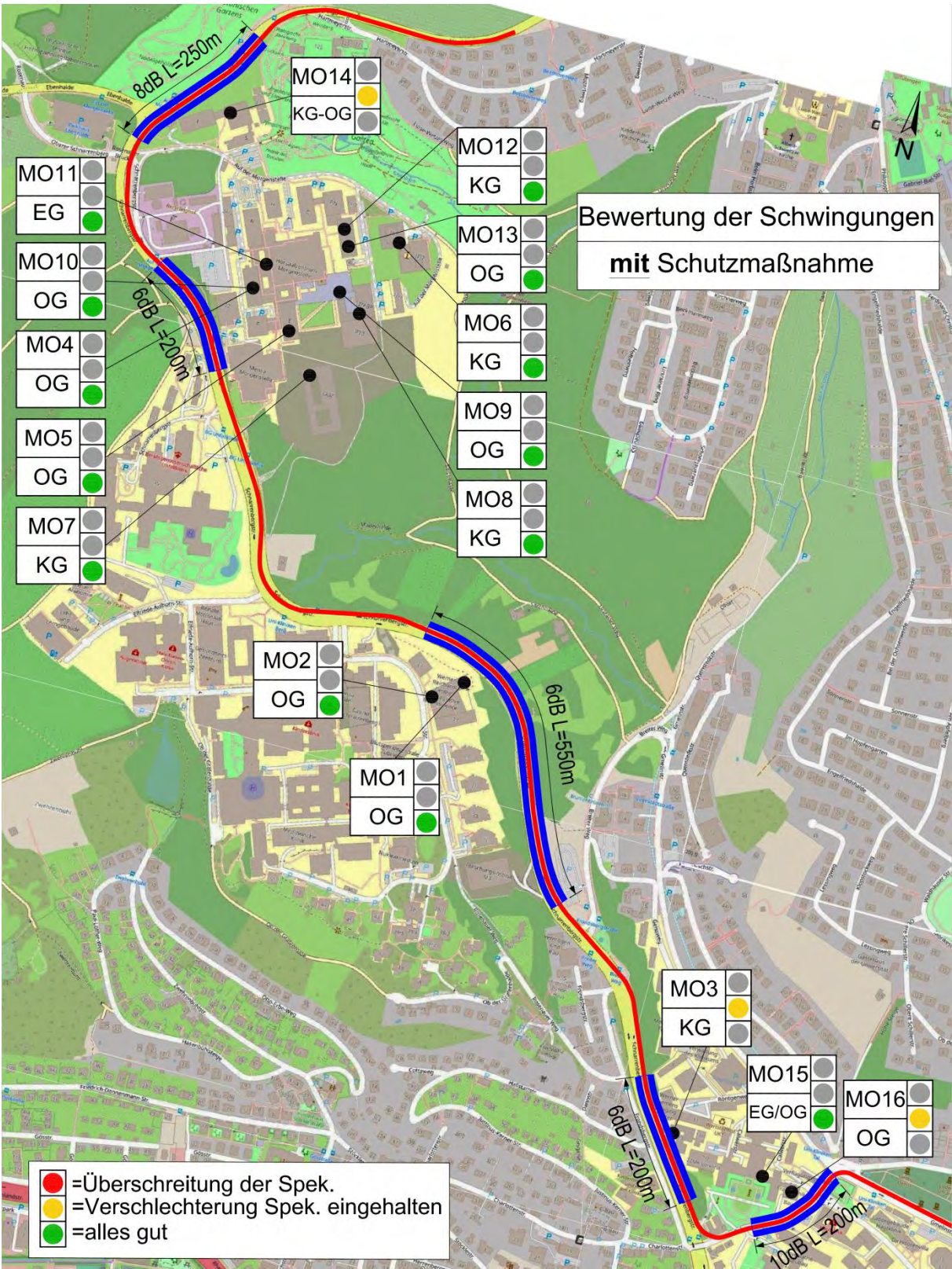


Abbildung 3-17: Bewertung der Erschütterungseinwirkung infolge Stadtbahn unter Berücksichtigung der empfohlenen Schutzmaßnahmen

4 Prognose und Beurteilung der durch den Stadtbahnbetrieb hervorgerufenen Magnetfeldimmissionen (Near-DC-Shifts)

4.1 Allgemeines

Die universitären Einrichtungen im Untersuchungsgebiet betreiben die unterschiedlichsten technischen Geräte, die gegenüber elektromagnetischen Feldveränderungen empfindlich reagieren.

Deshalb wurde bereits im September 2018 von Herrn Prof. Vick, Steinbeis Transfer GmbH, ein Gutachten zur *Abschätzung von Beeinflussungsbereichen wissenschaftlicher Geräte durch die Innestadtdurchführung Tübingen* erstellt [12]. In dieser Stellungnahme werden Abstände zur Trasse rechnerisch prognostiziert, in denen unter Worst Case Annahmen Beeinträchtigungen von empfindlichen Geräten zu erwarten sind. Außerdem wird eine Möglichkeit zur magnetfeldoptimierten Ausführung einer Straßenbahntrasse dargelegt.

| Horizontales ΔB | Seitlicher Abstand | |
|-------------------------|--------------------|-------------------------|
| | Standardausführung | Kompensierte Ausführung |
| 20 nT | 380 m | 140 m |
| 50 nT | 245 m | 102 m |
| 100 nT | 175 m | 82 m |
| 300 nT | 102 m | 56 m |
| 1000 nT | 56 m | 37 m |

Tabelle 4-1: Mindestabstände zur Einhaltung der magnetischen Feder gemäß Vick [12]

Im Rahmen dieses Gutachtens sollen die theoretisch und rechnerisch abgeleiteten Prognoseergebnissen der bereits erstellten Studie [12] nicht noch einmal wiederholt, sondern

- anhand von Vergleichs- und Referenzmessungen messtechnisch verifiziert,
- die tatsächlichen Konfliktbereiche in Bezug auf die universitären und klinischen Einrichtungen untersucht / beleuchtet und
- die Forderungen zur magnetfeldoptimierten Ausführung der Trasse konkretisiert werden.

4.2 Referenzmessungen in Ulm und Karlsruhe

Die Vergleichs- und Referenzmessungen der tieffrequenten Magnetfeldimmissionen wurden an drei Messquerschnitten in Ulm und an zwei Messquerschnitten in Karlsruhe durchgeführt. Die Messungen in Karlsruhe erfolgten dabei bei an den gleichen Querschnitten, wo auch die erschütterungstechnischen Vergleichsmessungen zur Ermittlung des Kraftdichtespektrums gemäß Abschnitt 3.6 stattfanden. Bei diesen Abschnitten handelt es sich um gewöhnliche Trassen ohne besondere elektromagne-

tische Kompensationsmaßnahmen. Eine detaillierte Beschreibung ist im Anhang 9.4 und 9.5 zu finden.

Der Standort Ulm wurde bewusst deshalb ausgewählt, weil hier im Bereich der Universität eine Trasse mit besonderen Kompensationsmaßnahmen ausgeführt worden ist und die Wirksamkeit bereits nachgewiesen worden ist [11]. Die Strecke wurde Ende 2018 eröffnet. Die dort umgesetzten Maßnahmen sind u.a. in [11] beschrieben und in Abbildung 4-2 dargestellt. Im Wesentlichen wurde dort ein zusätzlicher Kompensationsleiter 1m unter SOK zwischen den Schienen verlegt, der an den beidseitigen Masten jeweils hoch- und runtergeführt ist. Außerdem ist der Mastabstand auf 25m verkürzt.



Abbildung 4-1: Straßenbahn Ulm – Übergang kompensierte Trasse und Standardausführung



Abbildung 4-2: Kompensationsmaßnahme in Ulm [11]

Im Bereich der Universität Ulm wurde an drei Messquerschnitten gemessen: Ein Messquerschnitt wurde außerhalb des kompensierten Bereichs angeordnet, zwei weitere Messquerschnitte im magnetfeld-optimierten Bereich. Der prinzipielle Aufbau der Referenz-Magnetfeldmessungen ist in nachfolgender Abbildung 4-3 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung ist im Anhang 9.6 zu finden.

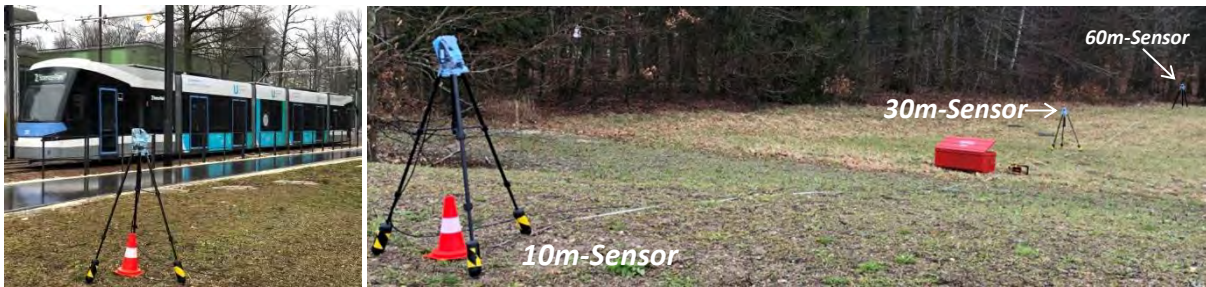


Abbildung 4-3: Aufbau der Referenz-Magnetfeldmessung in Ulm, exemplarisch an MQ3 in Ulm

Der Messaufbau in jedem Messquerschnitt bestand aus 3 triaxialen Magnetfeldsensoren, die im Abstand von 10 m, 30 m und 60 m vom Gleis die Veränderung des tiefrequenten Magnetfeldes („Near-DC Shift“) infolge Straßenbahn-Vorbeifahrt gemessen haben.

4.3 Ergebnisse der Magnetfeldmessung in Ulm und Karlsruhe

Die Ergebnisse der Referenz-Magnetfeldmessungen in Karlsruhe und Ulm sind in der nachfolgenden Abbildung 4-4 zu sehen. Dargestellt ist das Abnahme-Verhalten des 10-Sekunden Near-DC-Shifts über verschiedene Abstände. Ausgewertet wurde dabei die horizontale Messrichtung (y-Richtung) lateral zur Fahrtrichtung der Fahrzeuge, da dort die größte Magnetfeldänderung erreicht wurde. Die Magnetfeldänderungen in horizontaler x-Richtung (Fahrtrichtung der Bahn) und vertikaler z-Richtung, sowie die Magnet-Wechselfeld-Änderung (AC – 16 Hz, 50 Hz und oberharmonische) werden hier nicht im Detail dargestellt, da diese deutlich geringer als die Near-DC-Änderungen in lateraler Richtung sind.

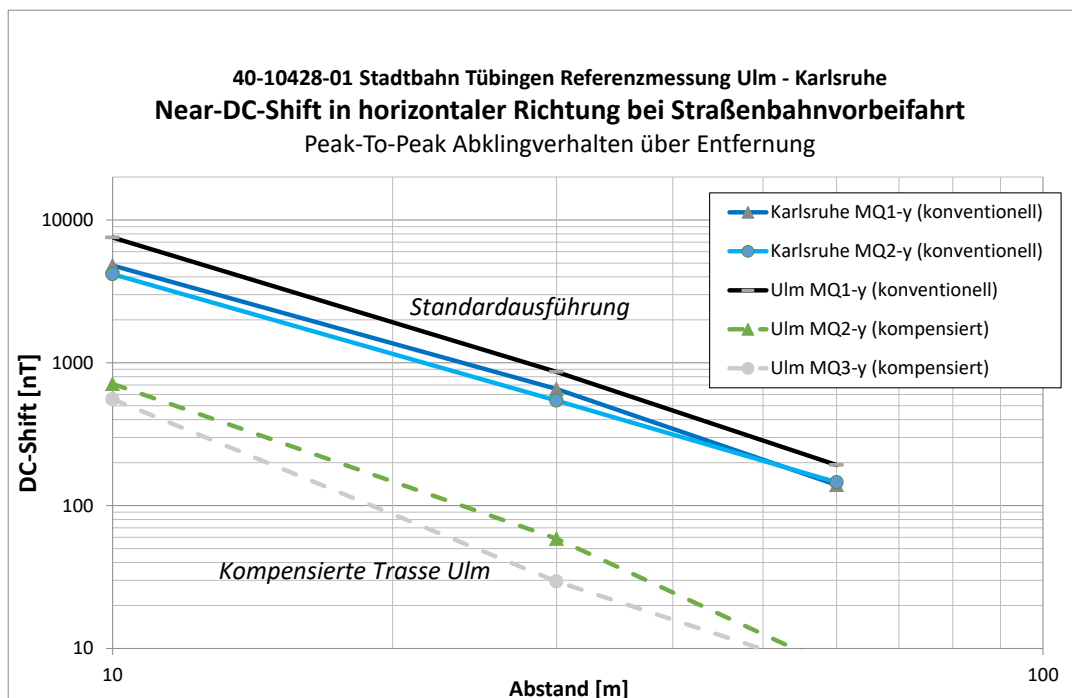


Abbildung 4-4: Magnetfeldänderungen (Near-DC-Shift) in Abhängigkeit des Gleisabstands

Es ist gut zu erkennen, dass sich die Messwerte in Abbildung 4-4 in zwei Gruppen unterteilen: eine Gruppe mit hohen Magnetfeldänderungen (ohne Magnetfeldkompensation) und eine mit deutlich geringeren Magnetfeldänderungen (mit Kompensationsmaßnahmen).

4.4 Vergleich mit der rechnerischen Prognose in [12]

Um die Messergebnisse mit der Prognose in [12] vergleichen zu können, müssen folgende Faktoren berücksichtigt werden:

- In Ulm fahren Fahrzeuge mit einer Leistung von etwa 480 kW, in Tübingen sollen später Fahrzeuge mit etwa 600 kW verkehren. Daraus folgt Faktor 1,25 zur Leistungskorrektur.
- In der Prognose in [12] wird unterstellt, dass es regelmäßig zum Begegnungsverkehr kommt, das heißt pro Strecken-Speiseabschnitt fährt in jede Richtung eine Straßenbahn. Daraus folgt Faktor 2,0 zur Berücksichtigung des zweiten Fahrzeuges.
- Bei der in [12] durchgeführten Prognoseberechnung wurde mit einer erhöhten Stromaufnahme gerechnet, was hier mit einem Faktor von $\sqrt{2}$ berücksichtigt wird.

Insgesamt sind die Messwerte um den Faktor von ca. 3,5 zu erhöhen, damit die gemessenen Magnetfeldänderungen mit den Prognosewerten verglichen werden können. Die so an die unterschiedlichen Bedingungen angepassten Werte sind in der nachfolgenden Abbildung 4-5 dargestellt. Gleichzeitig sind die Prognoseergebnisse aus [12] eingetragen.

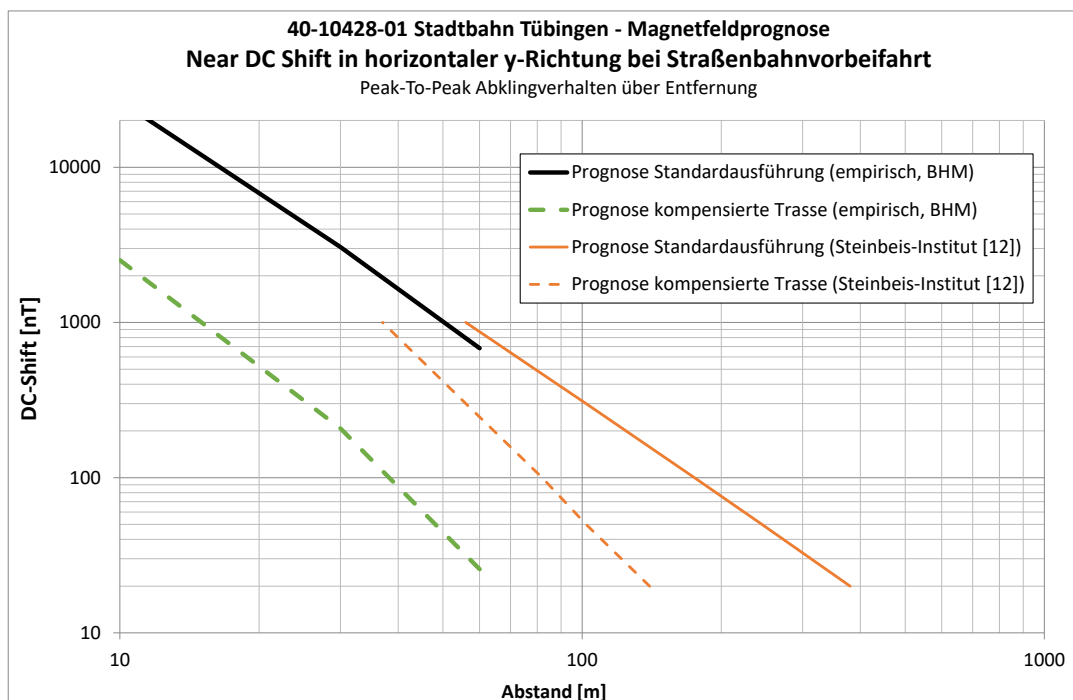


Abbildung 4-5: Magnetfeldänderungen (Near-DC-Shift): Vergleich empirische Prognose (BHM) und Prognose nach [12]

Für die Standardausführung decken sich die umgerechneten Messwerte sehr gut mit den Prognosewerten aus [12]. Die Minderungswerte für Trasse mit Kompensationsmaßnahmen ist jedoch in [12] wesentlich geringer als die in Ulm gemessenen Minderungswerte. Mögliche Gründe hierfür liegen in den Unterschieden zwischen der in [12] vorausgesetzten Maßnahmen und der Ulm realisierten Maßnahmen. Beispielhaft seien genannt:

- Die kürzeren Mastabstände: In Ulm sind 25m Mastabstand realisiert, in [12] sind 30m angesetzt.
- Unterschiede in der Kabelführung: Im kompensierten Bereich in Ulm ist der Kompensationsfahrdraht an jedem Mast hoch- und wieder runtergeführt, was zu einer reduzierten Emission der vertikalen Stromführung führt. In [12] wird vorausgesetzt, dass der Kompensationsdraht in Gleismitte bei jedem Mast auf einfache Weise lediglich abgegriffen wird.

Jedenfalls zeigen die Messungen, dass eine Kompensationsmaßnahme noch effektiver ausgeführt werden kann als in [12] rechnerisch angesetzt.

4.5 Prognose der Magnetfeldänderungen bei Stadtbahnbetrieb in Tübingen

Auf Basis der durchgeführten Messungen erfolgt nun eine Prognose der Magnetfeldänderung infolge Stadtbahn-Betrieb für die geplante Strecke in Tübingen

1. für eine Trasse in Standardausführung
2. für eine Trasse mit Kompensationsmaßnahmen gemäß [12] mit geringeren Anforderungen
3. für eine Trasse mit erhöhten Anforderungen an die Kompensation gemäß Ausführung in Ulm

Die Prognose für diese drei Varianten basiert auf den in Abschnitt 4.4 dargestellten Ergebnissen. Das bedeutet, dass für die Trasse in Standardausführung die Prognose nach [12] übernommen wird, ebenso für die Trasse mit geringeren Anforderungen an die Kompensation. Für die Prognose einer Trasse, bei der das „System Ulm“ umgesetzt wird, erfolgt die Prognose rein empirisch, basierend auf den Messwerten. Es wird deshalb eine Prognosesicherheit von 6 dB berücksichtigt.

Die Magnetfeldprognose wird für alle messtechnisch untersuchten und beweisgesicherten Messorte gemäß Abschnitt 2.3.3 (MO1 bis MO13) sowie zusätzlich für das Gebäude I (MO14; neuer Standort für MO9) und die Kliniken Tag (Calwerstraße 6/7; MO15 und MO16) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Prognose sind in der nachfolgende Tabelle 4-2 zusammengefasst und hinsichtlich

- a) der Tool-Spezifikation
- b) einer Verschlechterung gegenüber der derzeitigen IST-Situation

bewertet. Die Tool-Spezifikation ist in der Regel den aktuellen Handbüchern entnommen oder gutachterlich abgeschätzt. Bei MO16 wurde eine allgemeine Anforderung von 2000 nT zugrunde gelegt, da kein EMV-empfindliches Tool bekannt ist.

| ID # | Geb. | Abstand zur Trasse [m] | Tool | Tool-Spez. [nT] | IST-Zustand | Prognostizierte Magnetfeldänderung [nT] | | |
|------|--------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------|---|-------------------------------|--|
| | | | | | | Standard (Steinbeis-Prog.) | kompensiert (Steinbeis-Prog.) | kompensiert, System Ulm (BHM-Prog.; inkl. 6dB) |
| MO1 | CIN | 36 | Nikon | 300 | 29 | 1999 | 1096 | 213 |
| MO2 | | 83 | Photonenmikroskop; EEG-Labore* | 300 | 64 | 363 | 94 | 26 |
| MO3 | WSIC | 16 | NMR, MRT | 500 | 81 | 10460 | 6763 | 1658 |
| MO4 | Geb. A | 78 | Röntgen-diffraktometer | 300 | 667 | 412 | 112 | 30 |
| MO5 | Geb. E | 128 | TEM, REM | 100 | 68 | 150 | 26 | 9 |
| MO6 | VG | 319 | Ionenmikroskop | 25 | 191 | 23 | 2 | 1 |
| MO7 | GUZ | 144 | REM | 50 | 68 | 118 | 18 | 6 |
| MO8 | ZMBP | 210 | Laserpinzette | 300 | 202 | 55 | 6 | 2 |
| MO9 | | 213 | TEM, Mikroskope | 20 | 12 | 53 | 6 | 2 |
| MO10 | Geb. A | 82 | REM, STM | 150 | 220 | 372 | 97 | 26 |
| MO11 | Geb. A-B | 126 | NMR | 100 | 49 | 155 | 27 | 9 |
| MO12 | Geb. D | 248 | Messsysteme Physik, Kyrostat | 10 | 311 | 39 | 4 | 2 |
| MO13 | | 261 | Messsysteme Physik, REM | 100 | 95 | 35 | 3 | 1 |
| MO14 | Geb. I | 50 | REM, REM | 100 | 68 | 1022 | 416 | 92 |
| MO15 | Frauenklinik | 90 | MRT, Sequenzierer | 1250 | keine Messung | 308 | 74 | 21 |
| MO16 | Neonatologie | 15 | Mikrotom, Präzisionswaage | 2000 | keine Messung | 11932 | 7715 | 1952 |

* Im Nachbargebäude (Hertie-Institut) befinden sich gemäß [10] weitere EMV-empfindliche Geräte

| | |
|-----|--|
| | Tool-Spezifikation eingehalten |
| | Tool-Spezifikation nicht eingehalten |
| XXX | Erhöhung gegenüber dem beweisgesicherten IST-Zustand |

Tabelle 4-2: IST-Zustand und Prognose des Near-DC-Shifts bei Straßenbahn-Betrieb

Die Ergebnisse von Tabelle 4-2 zeigt, dass die Ausführung einer konventionellen Trasse in Standardausführung bei den meisten Geräte-Standorten (11 von 15) zu Überschreitungen der Tool-spezifikationen führen würde. In der nachfolgenden Abbildung 4-7 ist dies grafisch dargestellt. An nur 4 der 16 MO werden bei einer Standard-Ausführung der Stromversorgung die Grenzwerte für niederfrequente magnetische Felder eingehalten (grüne Ampel).

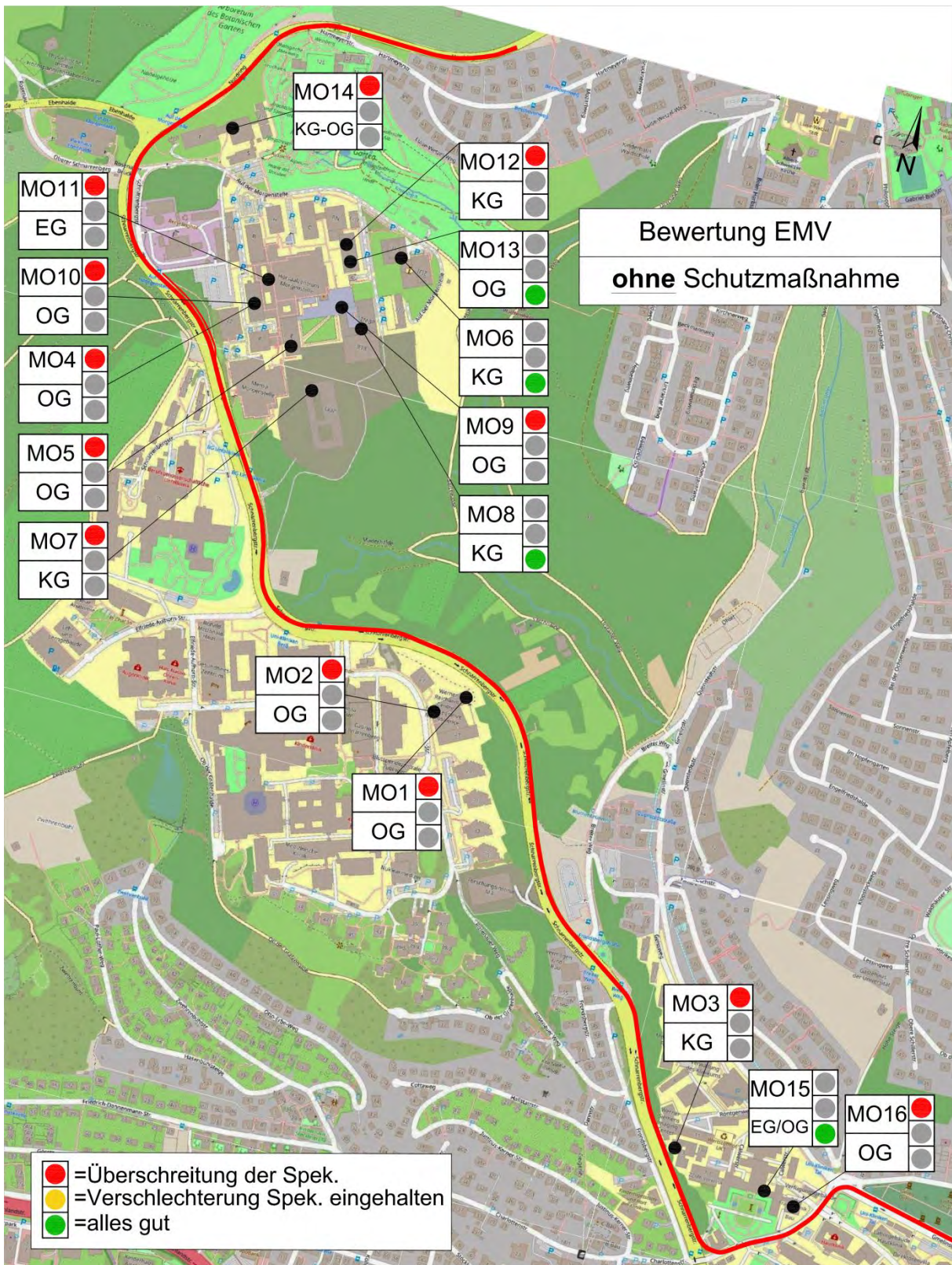


Abbildung 4-6: Bewertung der EMV-Immissionen (ohne Berücksichtigung von EMV-Kompensationsmaßnahmen)

Bei einer Trasse mit Kompensationsmaßnahmen gemäß den Berechnungen von Prof. Vick [12] werden die Tool-Spezifikationen immer noch an vier Standorten überschritten (vgl. Tabelle 4-2: Unikliniken Berg, dem Werner-Siemens-Imaging-Center, dem Gebäude I und der Neonatologie).

Bei einer Trassenausführung mit erhöhten Anforderungen an die Kompensationsmaßnahmen gemäß dem „System Ulm“ können zumindest an drei dieser verbleibenden vier Standorte die Magnetfeldänderungen so reduziert werden, dass die Toolspezifikation eingehalten ist, vgl. Tabelle 4-2.

Nur am Standort des Werner-Siemens-Imaging-Centers (MO3) bleibt eine Überschreitung der Tool-Spezifikation aufgrund des äußerst geringen Abstandes. Für dieses Forschungsgebäude ist eine Sonderbetrachtung in der weiteren Planung erforderlich.

Die vorgeschlagenen Maßnahmen sowie deren Einfluss auf die Standorte sind in der nachfolgenden Abbildung 4-7 grafisch dargestellt. An den Standorten MO1, MO15 und MO16 werden zwar die Tool-Spezifikationen eingehalten, allerdings verschlechtern sich die Standortbedingungen (gelbe Ampel). Sollten an diesen Standorten EMV-empfindliche Geräte zukünftig genutzt werden, müsste geprüft werden, ob lokale Kompensationsmaßnahmen vorgesehen werden müssen und ausreichend sind. Das Werner-Siemens-Imaging Center (MO3) ist mit einer roten Ampel gekennzeichnet.

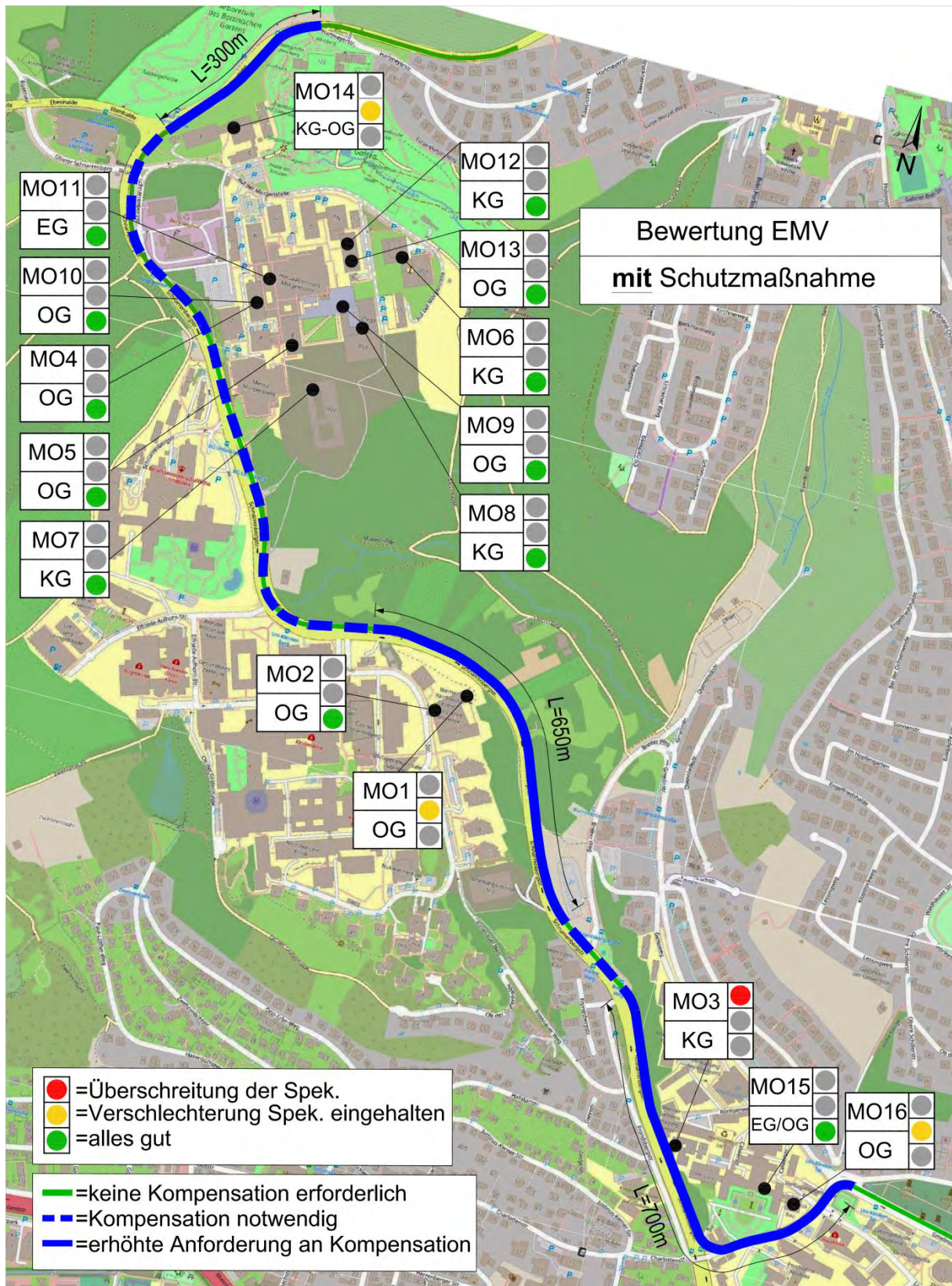


Abbildung 4-7: Bewertung der EMV-Immissionen unter Berücksichtigung von Kompensationsmaßnahmen mit unterschiedlichen Wirksamkeiten

5 Zusammenfassung

Das vorliegende Gutachten untersucht die möglichen Einwirkungen, die durch die geplante Stadtbahn auf das Klinik- und Forschungsumfeld der Universität durch Erschütterungen und elektromagnetische Felder einwirken werden. Beide Emissionsarten können dazu führen, dass empfindliche technische Geräte, Anlagen und Messinstrumente nicht mehr adäquat funktionieren und genutzt werden können.

Im Rahmen der vorliegenden gutachterlichen Untersuchung erfolgte zunächst eine Standortevaluierung. Es wurde an 13 maßgebenden und repräsentativen Standorten die aktuelle IST-Situation in Bezug auf die vorhandenen Schwingungspegel und Magnetfelder messtechnisch beweisgesichert.

In einem zweiten Schritt erfolgten messtechnische Untersuchungen an mehreren Stellen entlang der geplanten Trasse, bei denen mit Hilfe künstlicher Anregung die Übertragung der Schwingungen vom Anregungsort (Trasse) in die Forschungsgebäude analysiert wurde. Zusammen mit Referenzmessungen an hier zum Einsatz kommenden Fahrzeugen in Karlsruhe und Ulm konnten die Prognosen der zukünftigen Gebäudeschwingungen sowie der Magnetfeldveränderungen, die durch den Betrieb der Stadtbahn hervorgerufen werden, erstellt werden. Insgesamt werden 16 Einzelstandorte beurteilt.

Die Prognose zusammen mit der durchgeführten Standortaufnahme bilden dann die Basis für die Beurteilung, in wie weit die zukünftigen Immissionen durch den Betrieb der geplanten Stadtbahn den Forschungsbetrieb an den Kliniken und an der Universität beeinflussen oder sogar stören.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Erschütterungen:

- Der Einfluss der Stadtbahn auf die Standortbedingungen hinsichtlich des Ruhepegels ist sehr weitreichend. Nur sehr entfernt liegende Gebäude (ab ca. 180 m) sind überhaupt nicht mehr betroffen.
- Ohne Erschütterungsschutzmaßnahmen werden sich bei 5 der 16 untersuchten Standorte die Erschütterungsbedingungen deutlich verschlechtern. Bei 4 dieser Standorte werden sogar die Tool-Spezifikationen nicht mehr eingehalten sein, so dass die Funktionsfähigkeit der erschütterungsempfindlichen Geräte nicht mehr sichergestellt sein wird, vgl. Abbildung 3-16. Diese vier Standorte sind nachfolgend noch einmal aufgeführt:
 - Röntgenweg 13-15 (Werner-Siemens-Imaging-Center, MO3)
 - Otfried-Müller-Straße 25 (CIN-Gebäude, MO1)
 - Morgenstelle 3 (Gebäude I, MO14)
 - Calwerstraße 7/6 (Neonatologie, MO16)

- Um die Funktionsfähigkeit der schwingungsempfindlichen Geräte weiterhin gewährleisten zu können, müssen bei der Stadtbahn-Planung schwingungsmindernde Maßnahmen berücksichtigt werden. Sie sind in der Tabelle 3-5 auf Seite 37 zusammengefasst und quantifiziert.
- Trotz der in Tabelle 3-5 quantifizierten Schwingungsschutzmaßnahmen wird es bei den Gebäuden
 - Röntgenweg 13-15 (Werner-Siemens-Imaging-Center, MO3)
 - Morgenstelle 3 (Gebäude I, MO14)
 - Neonatologie (MO16)

zu deutlich schlechteren Standortbedingungen im Hinblick auf die Schwingungsruhe kommen, als dies heute (ohne Straßenbahn) der Fall ist. Hier sind ggf. alternative Standorte zu suchen, falls ergänzende Schutzmaßnahmen an den empfindlichen Geräten selbst nicht ausreichen.

Elektromagnetische Feldveränderungen (Near-DC):

Bei der Prognose der tieffrequenten Magnetfelder wurden drei Situationen untersucht. Sie unterscheiden sich in der Art der Bahnenergieversorgung und haben eine enorme Auswirkung auf die zu erwartenden Magnetfelder:

- Bei einer „Standard-Ausführung“ der Bahnenergieversorgung werden die Grenzwerte der Gerätschaften für niederfrequente magnetische Felder an nur 4 der 16 untersuchten Standorte eingehalten, vgl. Abbildung 4-6.
- Mit einer „kompensierten Bahnenergieversorgung“ gemäß Gutachten „Steinbeis“ (Prof. Vick) können die Grenzwerte an 12 der 16 Standorte eingehalten werden.
- Mit einer „besonders hochwertig“ kompensierten Trasse (vergleichbar zum Projekt Ulm, vgl. Beschreibung in Abschnitt 4.2) sind die zu erwartenden Immission an allen Gebäuden nochmals erheblich niedriger und weitere zwei Bereiche werden ausreichend geschützt, sodass insgesamt 14 der 16 untersuchten Standorte geschützt werden
- Nur das Werner-Siemens-Imaging-Center (Röntgenweg 13-15) erfährt noch deutliche Überschreitungen der maximal zulässigen Feldveränderungen. Hier muss ein alternativer Standort mit einem neuen Gebäude gesucht werden.
- Darüber hinausgehende Einzelanforderungen, wie sie ggf. am Gebäude Neonatologie (MO16) vorhanden sein könnten, können durch lokale aktive Kompensationsmaßnahmen am Gerät ausgeglichen werden.

Nachfolgend ist der Einflusskorridor der Stadtbahn bezüglich Schwingungseinwirkungen und Magnetfeldeinwirkungen dargestellt. Der Korridor bezieht sich bezüglich der Erschütterungen auf ein „Stan-

„Standard-Gleis“ und bezüglich der Magnetfelder auf eine „kompensierte Bahnenergieversorgung“ gemäß Gutachten „Steinbeis“ (Prof. Vick). Beide Korridore haben eine Breite von ungefähr jeweils 80m links und rechts der Trasse.

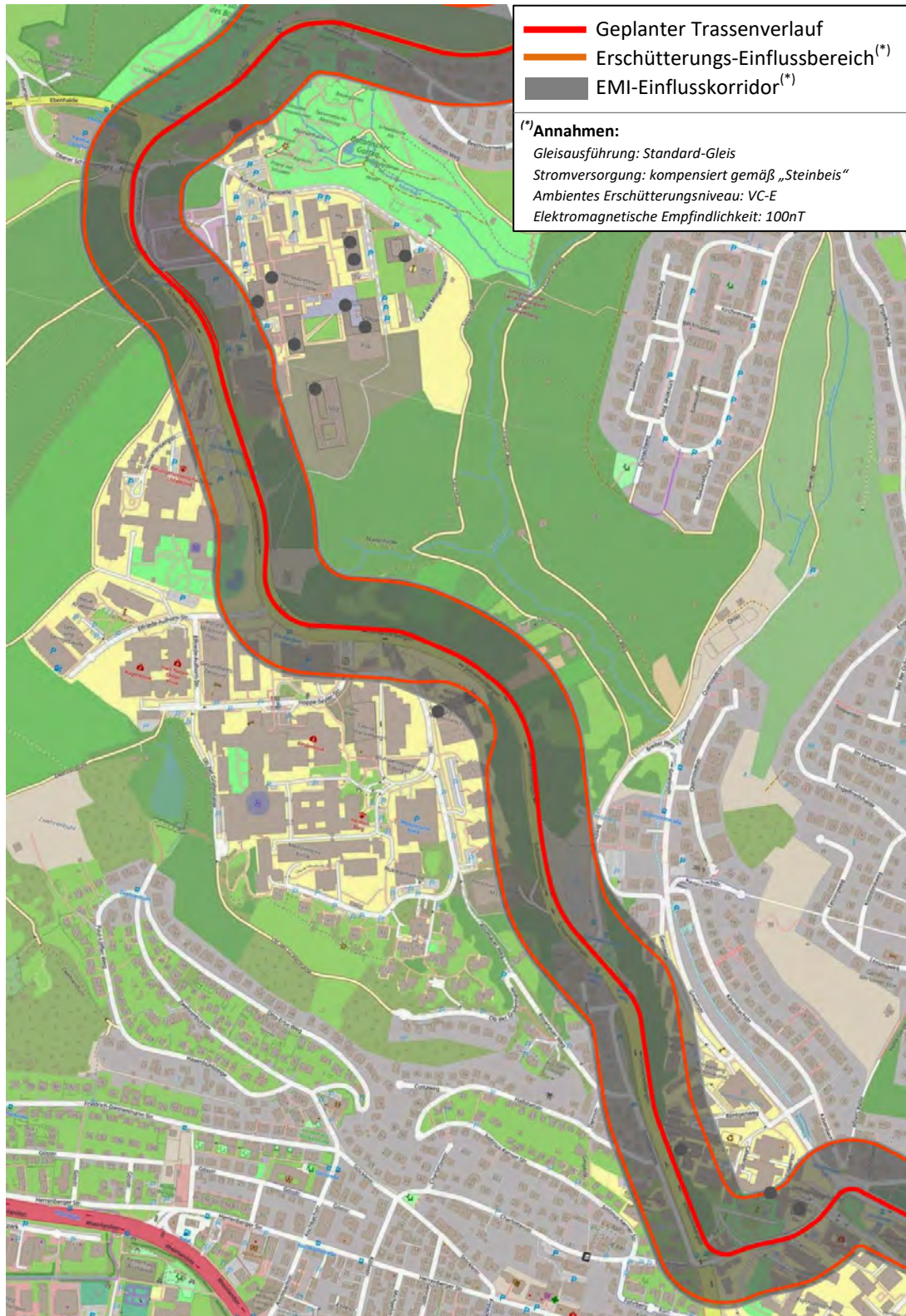


Abbildung 5-1: Einflusskorridor Erschütterung und EMI

Wahrung der Flexibilität und Entwicklungspotentiale

Die hier durchgeführten Untersuchungen zu den Auswirkungen der durch den Stadtbahnbetrieb hervorgerufenen Erschütterungen und Magnetfeldveränderungen in Kapitel 3 und Kapitel 4 können sich nur auf den derzeitigen Bebauungszustand und die derzeitige Nutzung beziehen (IST-Situation). Zu berücksichtigen sind aber unbedingt auch die in die Zukunft gerichteten Aspekte:

- die zukünftige Nutzung von Geräten mit noch höheren Anforderungen,
- die Flexibilität in der Nutzung der vorhandenen Gebäude sowie
- das Entwicklungspotential von Bauflächen.

Diese drei Aspekte sind notwendige Voraussetzungen für eine zukunftsweisende und -fähige universitäre und klinische Forschungsumgebung und deshalb auch zu beachten, um langfristig den Standort der Universität Tübingen zu sichern.

Im Hinblick auf die vorzusehenden Schutzmaßnahmen bedeutet dies folgendes:

- Zur Reduktion des Einflusskorridors der elektromagnetischen Feldveränderungen sollte die bestmögliche Kompensationsmaßnahme („besonders hochwertig“ vergleichbar mit System Ulm) entlang des gesamten Trassenabschnitts (von der Frauenklinik bis zum botanischen Garten) vorgesehen werden.
- Zur Reduktion der Erschütterungen sind bestmögliche Schutzmaßnahmen an der Schienenlagerung (hochelastisch) entlang des gesamten hier betrachteten Streckenabschnitts vorzusehen. Darüber hinaus sind in zwei Teilabschnitten noch höherwertige Maßnahmen am Oberbau in Form von Masse-Feder-Systemen vorzusehen.
- Selbst wenn diese Schutzmaßnahmen ergriffen werden, ist eine uneingeschränkte zukünftige Entwicklung der vorhandenen Baufelder links und rechts der Stadtbahntrasse nur ab einem bestimmten Mindestabstand möglich und garantiert. Dementsprechend müssen bei Bauvorhaben mit Nutzung durch hochempfindliche Geräte neue Grundstücke erschlossen werden, die eine größere Distanz zur Stadtbahntrasse aufweisen.
- Wie dargelegt ist selbst die Nutzung der bestehenden Gebäude teilweise eingeschränkt, so dass unbedingt sichergestellt werden muss, dass die Universität und das Klinikum genügend Entwicklungspotentiale haben, die jenseits der 80 m links und rechts der Stadtbahntrasse liegen.
- Bei Neubaumaßnahmen können eine baudynamisch optimierte Gebäudekonstruktion oder sonstige gebäudeseitige Schutzmaßnahmen am Gebäude Immissionen mindern, sie allein reichen aber nicht aus, um die notwendigen Umgebungsbedingungen für hochempfindliche

Tools zu gewährleisten. Nur die Kombination von Schutzmaßnahmen direkt an der Gleistrasse und einer baulasttechnisch optimierten Gebäudekonstruktion ist sinnvoll und nachhaltig.

- Ein späterer Einbau von Schutzmaßnahmen am Gleis ist quasi nicht möglich bzw. kommt einem Neubau der Trasse gleich.

--- Ende des Berichts ---

Es folgen Anlagen.

6 Anlage I: Ergänzende Informationen

zum Bericht mit der Nr.: 40-10428-01-D8 vom 16.12.2020

6.1 Anhaltswerte für Schwingungen nach VDI 2038-2

Zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit eines empfindlichen Gebäudes hinsichtlich der Schwingungseigenschaften werden in der VDI 2038-2 [1] Grenzwerte, bekannt als VC- bzw. Nano-Kurven, definiert.

Die VC Kurven („vibration criterion curves“) werden seit Jahrzehnten im Bereich der Halbleitertechnik und der Nanotechnologie für die Auslegung von schwingungsempfindlichen Flächen herangezogen.

Die entsprechenden Kriterien (Kurven) sind in Abbildung 6-1 dargestellt, die der VDI 2038-2 [1] entnommen wurde. Tabelle 6-1 enthält die allgemeinen Anwendungsbeschreibungen der Grenzkurven.

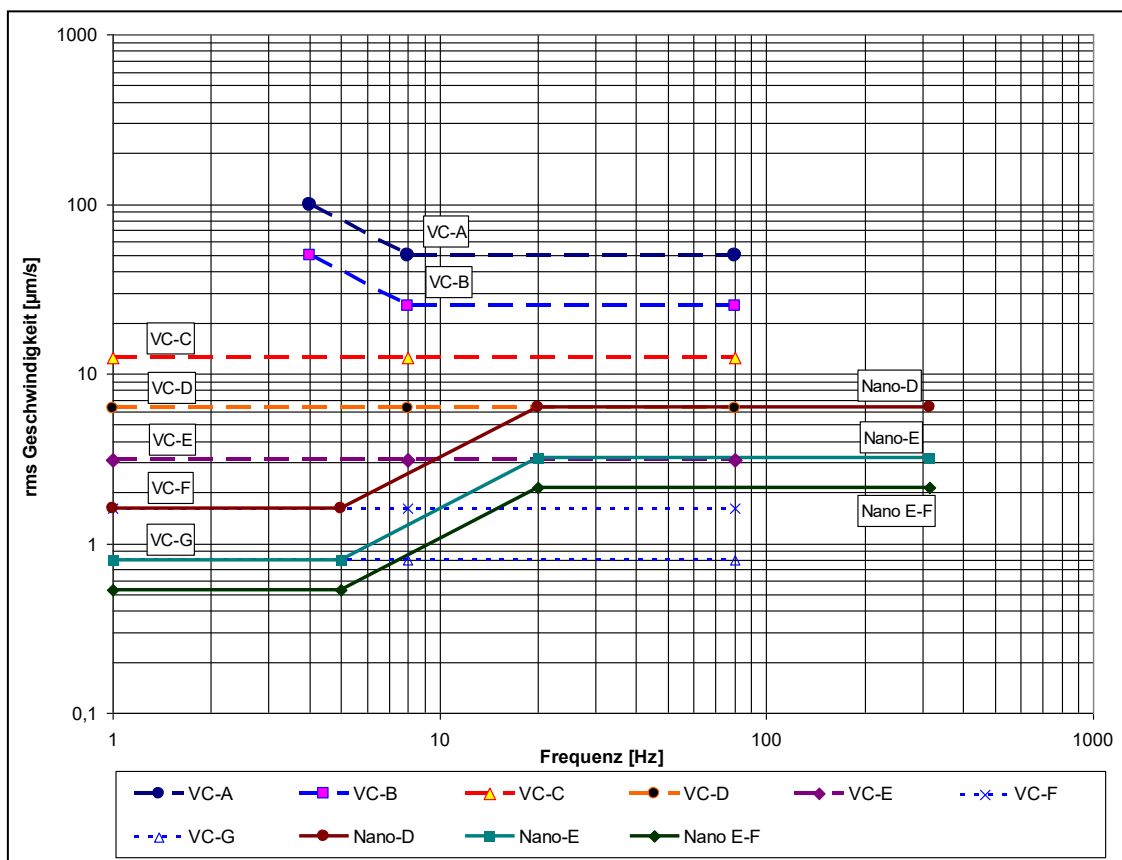


Abbildung 6-1: Darstellung Grenzwertdefinitionen nach VDI 2038-2 [1]

| VC-Linien (Vibration Criteria) | Schwingungspegel RMS-Terzspektr in $\mu\text{m/s}$ | Tabelle typischer Nutzungen | Strukturgröße/ Genauigkeit |
|--------------------------------------|--|---|-------------------------------|
| Menschlich Fühlschwelle | 100 (8-80 Hz) | menschliche Fühlschwelle, für empfindliche Schlafbereiche, für Operationssäle, für Mikroskope mit 100-facher Vergrößerung | 30 μm |
| VC-A | 50 (8-80 Hz) | unter fast allen Umständen geeignet für optische Mikroskope mit bis zu 400-facher Vergrößerungen | 8 μm |
| VC-B | 25 (8-80 Hz) | ein geeigneter Standard für Inspektionsgeräte, allgemeine anspruchsvolle Labore, Lithografiegeräte (inkl. Stepper) bis zu 3 μm Strukturbreite | 3 μm |
| VC-C | 12,5 (1-80 Hz) | ein geeigneter Standard für Mikroskope mit bis zu 1000-facher Vergrößerung, ein guter Standard für die meisten Lithografie- und Inspektionsgeräte bis hinunter zu 1 μm Strukturbreite | 1 μm |
| VC-D | 6,25 (1-80 Hz) | unter fast allen Umständen passend für sehr hochwertige Elektronenmikroskope (REM, TEM), ebeam-Systeme usw., die bis an ihre Leistungsgrenze eingesetzt werden | 0,3 μm |
| VC-E | 3,1 (1-80 Hz) | die Einhaltung dieses Kriteriums ist sehr schwierig, es kann nur in wenigen Fällen eingehalten werden, vorzugsweise auf nicht unterkellerten Bodenplatten, erforderlich für Geräte höchster Präzision | < 0,1 μm |
| VC-F | 1,6 (1-80 Hz) | Kriterium für extrem ruhige Forschungsräume, sehr schwierig zu erreichen, dieses Kriterium ist nur zur Charakterisierung, nicht jedoch als Auslegungskriterium geeignet. | - |
| VC-G | 0,8 (1-80 Hz) | Kriterium für extrem ruhige Forschungsräume, sehr schwierig zu erreichen, dieses Kriterium ist nur zur Charakterisierung, nicht jedoch als Auslegungskriterium geeignet. | - |

| Nano-Linien | Schwingungspegel RMS-Terzspektr in $\mu\text{m/s}$ ((1...5) / (20...100) Hz) | Tabelle typischer Nutzungen | Struktur- größe/ Genauigkeit |
|-------------|--|---|------------------------------------|
| Nano-D | 1,6 / 6,4 | sehr schwierig einzuhaltendes Kriterium für REM der Nanotechnik für Auflösungen bis 1 nm, Obergeschosse mit hohen Anforderungen an die dynamische Steifigkeit und Eigenfrequenz | 1 nm |
| Nano-E | 0,8 / 3,2 | extremes Kriterium für REM der Nanotechnik für Auflösungen bis 2 Å bis 5 Å (10 Å = 1 nm), nur auf sehr massiven Bodenplatten und nur bei sehr günstigen Baugrundvoraussetzungen einhaltbar | (0,2...0,5) nm |
| Nano-EF | 0,53 / 2,1 | strengstes Kriterium für REM und TEM der Nanotechnik für Auflösungen im Sub-Ångströmbereich (10 Å = 1 nm) nur unter sehr speziellen Bedingungen und besonderen Baukonstruktionen einhaltbar | < 0,1 nm |

Tabelle 6-1: Grenzwertdefinitionen gemäß VDI 2038-2 [1]

6.2 Gebäudeübertragungsfunktion gemäß Ril 820.2050

Die Übertragung ins Gebäude (Immissionsort) wird anhand der statistisch ermittelten Gebäude-Übertragungsfunktionen gemäß Richtlinie 820.2050 „Erschütterungen und sekundärer Luftschall“ [7] im Anhang A02 „Messung und Prognose von Erschütterungseinwirkungen“ abgeschätzt. In dieser Richtlinie werden unterschiedliche Gebäude-Übertragungsfunktionen für Räume mit Betondecken und Räume mit Holzbalkendecken angegeben. Somit können die Deckeneigenfrequenzen über den baulastrelevanten Frequenzbereich von 8 Hz – 80 Hz variiert werden. Damit stellt man sicher, dass alle möglicherweise vorhandenen Deckeneigenfrequenzen berücksichtigt werden. Nachfolgend sind die angegebenen Übertragungsfunktionen für Betondecken grafisch dargestellt.

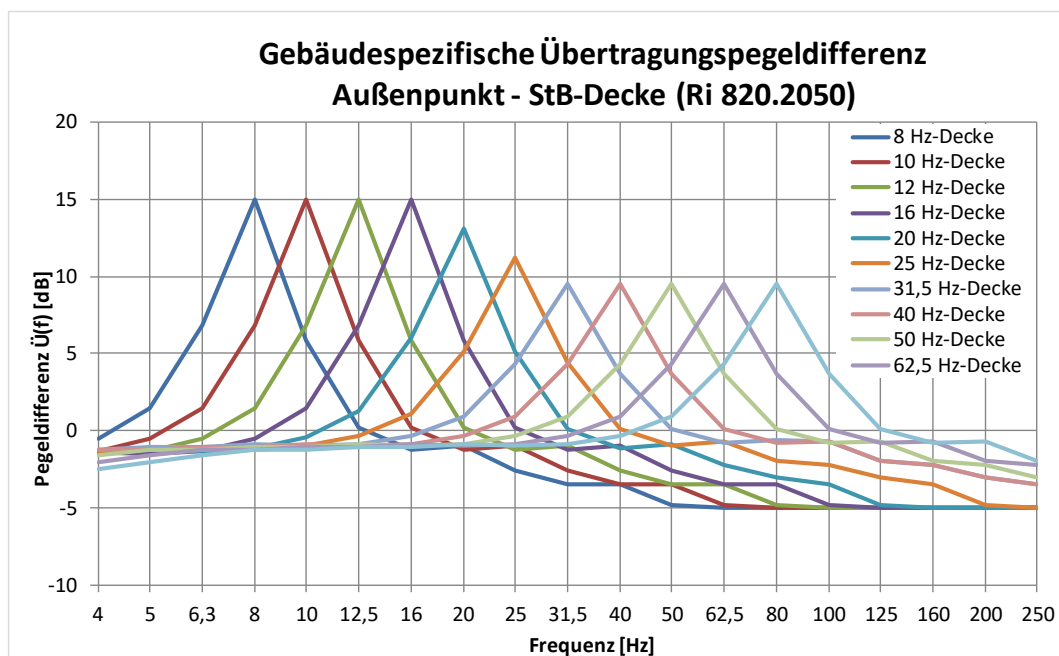


Abbildung 6-2: Übertragungsfunktion vom Gebäude-Außenmesspunkt zur Deckenmitte für Beton-Decken in Abhängigkeit der Deckeneigenfrequenzen

7 Anlage II: Dokumentation der IST-Messung in Tübingen

zum Bericht mit der Nr.: 40-10428-01-D8 vom 16.12.2020

7.1 Allgemeines

| | |
|---------------------|--|
| Messdatum | 03.-04.12.2019 |
| Messpersonal | D. Heiland, M. Mistler, M. Nitschke, T. Schulte Pelkum, M. Wydra, A. Wende, F. Sadat |
| Wetter | sonnig, etwa 0°C |

Tabelle 7-1: Allgemeine Angaben zur Messung

7.2 Verwendetes Messequipment

Zur Messung der Schwinggeschwindigkeiten wurde folgendes Messequipment verwendet:

| | |
|--|--|
| Geschwindigkeitssensoren | Geophone 1 – 315 Hz gemäß DIN 45669 Sensornummer gemäß Tabelle „Übersicht der Messpunkte“ |
| Magnetfeldsensoren | Dreiaxismagnetometer (Fluxgate-Sensoren) FGM3D/100; Messbereich +/- 100 μ T; Auflösung: <0,15nT |
| Messverstärker | MSE, 8 Kanal, SN: 20011103 MSE, 1 Kanal, SN: 1001 3D-Magnetometer, 3 + 9 Kanal, SN: EMI2018 |
| A/D Wandlerkarte | Data Translation DT9826, 16 Simultaneous, 24bit 41,6kS/s |
| Messrechner | Panasonic CF-53, SN: 5GTCA08979 Panasonic CF-53, SN: 7CTCA98538 |
| Letzte Kalibrierung der Messkette | 03/2018 |
| Messsoftware | MARS Version 3.1.29 |

Tabelle 7-2: Verwendetes Messequipment

Die elektrodynamischen Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer liefern eine der Schwinggeschwindigkeit proportionale Spannung. Diese wird im Messverstärker verstärkt, dem PC zugeleitet, digitalisiert sowie in der Messsoftware weiterverarbeitet. Die Parameter für die Schwingungsmessungen waren wie folgt eingestellt:

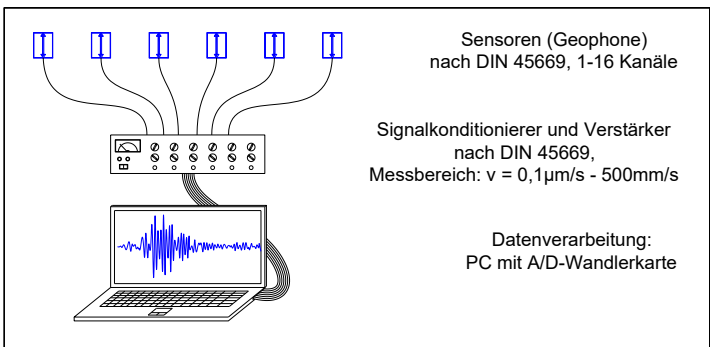
| | | |
|---|---------|---|
| Anzahl Messkanäle Geophone | 4 |  <p>Sensoren (Geophone) nach DIN 45669, 1-16 Kanäle</p> <p>Signalkonditionierer und Verstärker nach DIN 45669, Messbereich: $v = 0,1 \mu\text{m/s} - 500\text{mm/s}$</p> <p>Datenverarbeitung: PC mit A/D-Wandlerkarte</p> |
| Anzahl Messkanäle Magnetfeldsensoren | 3 | |
| Bandbreite | 400 Hz | |
| Abtastfrequenz | 1024 Hz | |
| Antialiasing | 315 Hz | |

Tabelle 7-3: Messparameter und Blockschaltbild

7.3 Messunsicherheiten

Die bei der Schwingungsmessung eingesetzten Messgeräte entsprechen den Vorgaben für Schwingungsmesser gemäß DIN 45669-1 [2]. Dadurch, dass die Einzelanforderungen an die Schwingungsmesser gemäß DIN 45669-1 eingehalten werden, können Messabweichungen klein gehalten werden. Durch Einhaltung der in der Norm definierten Einzelabweichungen der Geräte innerhalb der Messkette ist zu erwarten, dass die Messabweichung einer einzelnen aufgezeichneten Messgröße, unabhängig von der Signalart, die Vertrauensgrenze von 15 % für effektivwertbasierte Messwerte und 20 % für Spitzenwerte mit hohem statistischem Vertrauensniveau einhält.

7.4 Übersicht der einzelnen Messorte

In den folgenden Abschnitten werden die Messungen in den einzelnen Gebäuden der Universität und des Universitätsklinikums dokumentiert – die Einzelnen Gebäude werden als **Messort** (MO1 bis MO13) bezeichnet.

| ID # | Adresse | Gebäude-Bezeichnung | Ebene | Raum | Abstand zur geplanten Trasse [m] | Grenzwert des Tools |
|------|----------------------------|---------------------|---------|----------------|----------------------------------|---------------------|
| MO1 | Otfried-Müller-Straße 25 | CIN | E2 | 2-523 2-520 | 36 | VC-B (*) |
| MO2 | | | E5 | 5-506 | 83 | VC-B |
| MO3 | Röntgenweg 13-15 | WSIC | KG | U44 U45 | 20 | Bruker Nano-C |
| MO4 | Auf der Morgenstelle 18 | Geb. A | E7 | 7025 | 78 | VC-B |
| MO5 | Auf der Morgenstelle 28 | Geb. E | E2 | 2H08 2H11 | 128 | VC-E |
| MO6 | Auf der Morgenstelle 15 | VG | KG | 0.127.1 | 319 | Nano-E |
| MO7 | Auf der Morgenstelle 94/96 | GUZ | E2 (KG) | 2M03 | 144 | Jeol JXA-8230 |
| MO8 | Auf der Morgenstelle 32 | ZMBP | E1 (KG) | 1L21 | 210 | VC-D |
| MO9 | | | E3 | 3W04 3Y01 | 213 | |
| MO10 | Auf der Morgenstelle 18 | Geb. A | E5 | 5G04 5G35 | 82 | VC-A (*) |
| MO11 | Auf der Morgenstelle 16-18 | Geb. A-E | E3 | 4E01 4E02 | 126 | Bruker Nano-C |
| MO12 | Auf der Morgenstelle 14 | Geb. D | E1 (KG) | 1Q21 1Q27 | 248 | VC-D (*) |
| MO13 | | Geb. D | D5 | 5H40 | 261 | VC-D (*) |

Tabelle 7-4: Auflistung der messtechnisch beweisgesicherten und individuell beurteilten Standorte

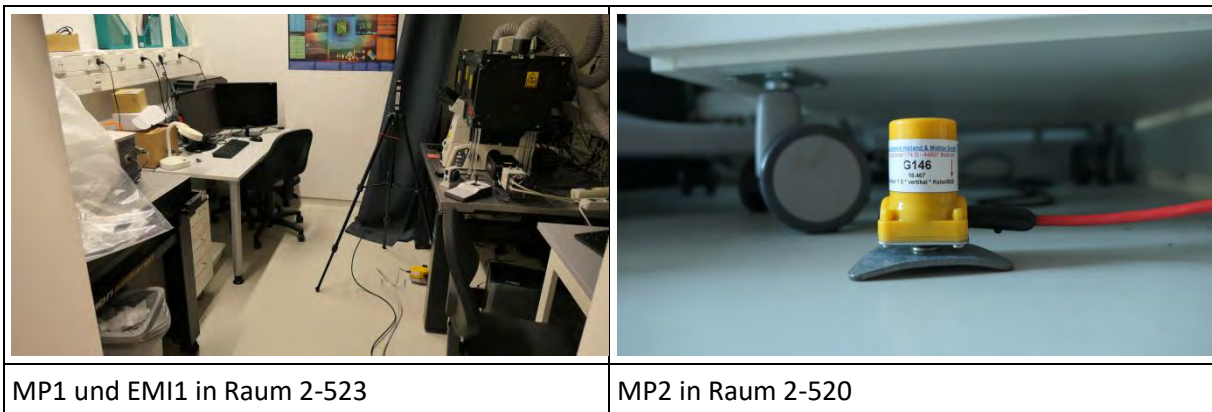
7.5 MO1 – Otfried-Müller-Straße 25 (CIN - E2)

7.5.1 Dokumentation der Messung am MO1

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage / Raum | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
| 1 | MP1 | Z | 2-523 | Dreifuß | G52 | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 2 | | X | | | | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 3 | | Y | | | | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 4 | EMI1 | Z | 2-523 | Stativ h = 120 cm | S37 | +/- 100 [μT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |
| 7 | MP2 | Z | 2-520 | Dreifuß | G146 | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |

Tabelle 7-5: Messpunkte an MO1

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].



MP1 und EMI1 in Raum 2-523

MP2 in Raum 2-520

Tabelle 7-6: Fotodokumentation der Messpunkte am MO1

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:



Abbildung 7-1: Lage der Messpunkte am MO1

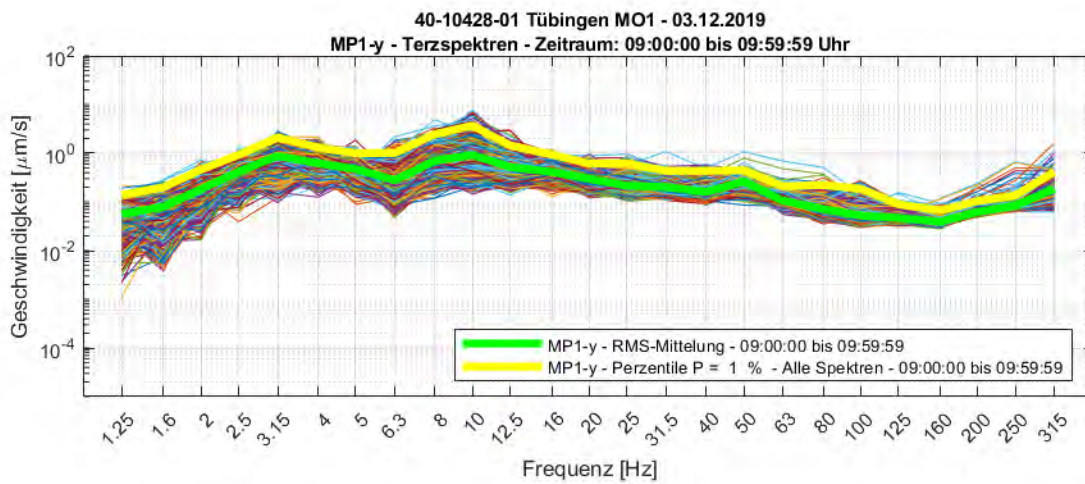
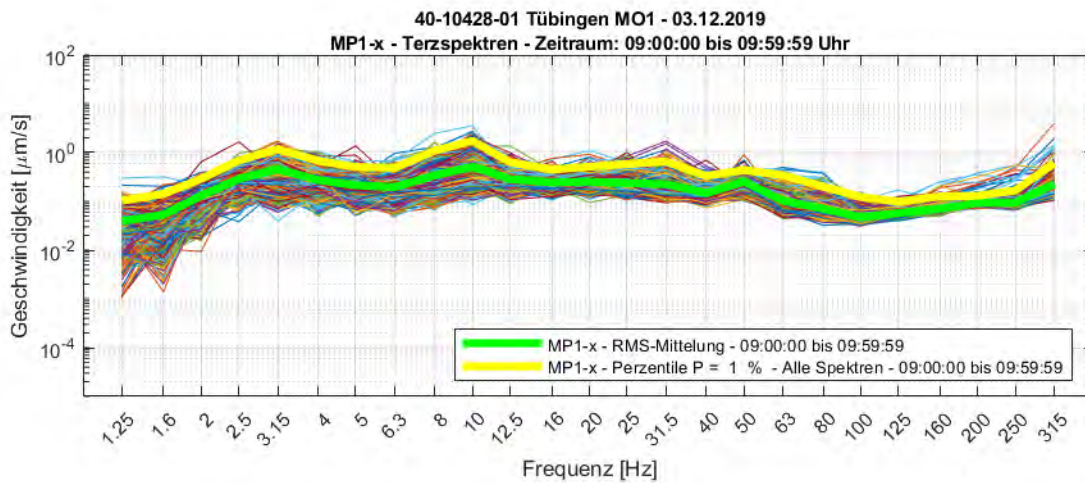
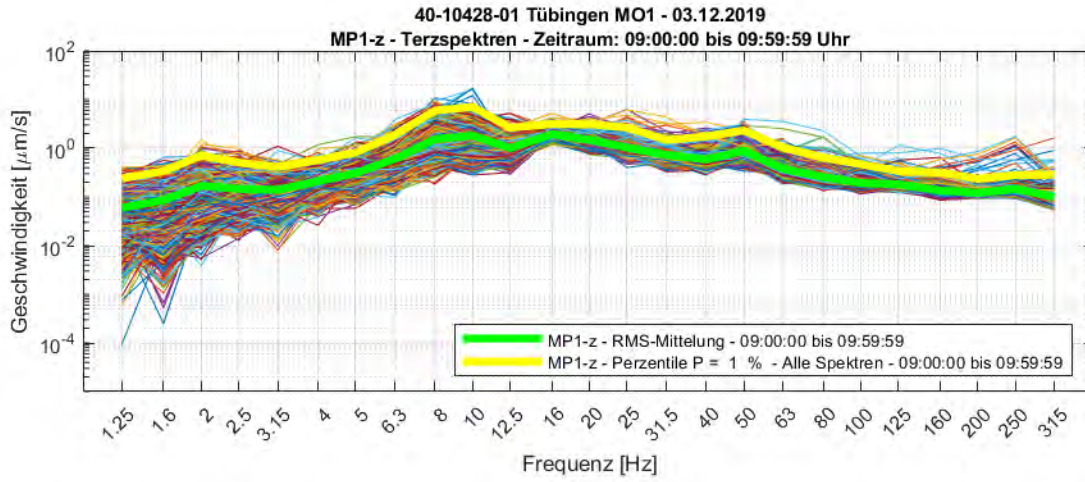
Folgende Messungen wurden am 03.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|--------------------|--|
| M1 | 2 Personen gehen im Flur |
| M2 | Fersenstoß |
| M3 | Ambiente Schwingungen & Magnetfeldänderungen und Admittanzmessung mittels Impulsanreger Dynpact® |

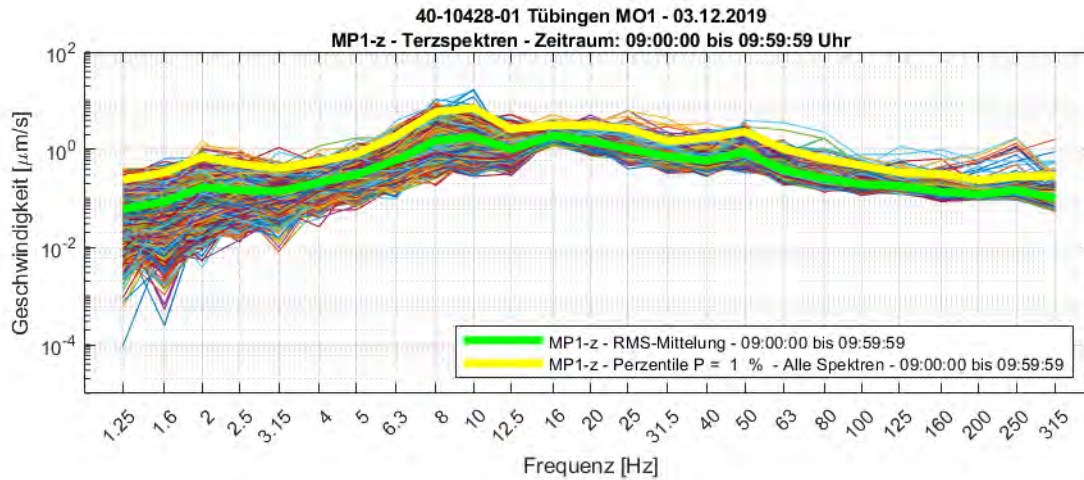
Tabelle 7-7: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO1

7.5.2 Schwingungspegel am MO1

4-Sekunden Terzspektren



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



Die nachfolgende Abbildung 7-2 zeigt die Terzspektrn aller drei Raumrichtungen mit 1%-Überschreitenswahrscheinlichkeit am Messort MO1. Ein dominanter Peak bei einer Frequenz von 10 Hz ist zu erkennen, welcher auf den Busverkehr auf der Schnarrenbergstraße zurückzuführen ist.

Die maximale Schwinggeschwindigkeit in vertikaler (z) Richtung beträgt 7,1 µm/s bei einer Frequenz von 10 Hz - Bei dieser Schwinggeschwindigkeit wird das Schwingungskriterium VC-C ($v \leq 12,5 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) gut eingehalten.

In horizontaler (x, y) Richtung liegt die maximale Schwinggeschwindigkeit bei 3,7 µm/s – so wird in horizontale Richtung das strengere Kriterium VC-D ($v \leq 6,25 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten.

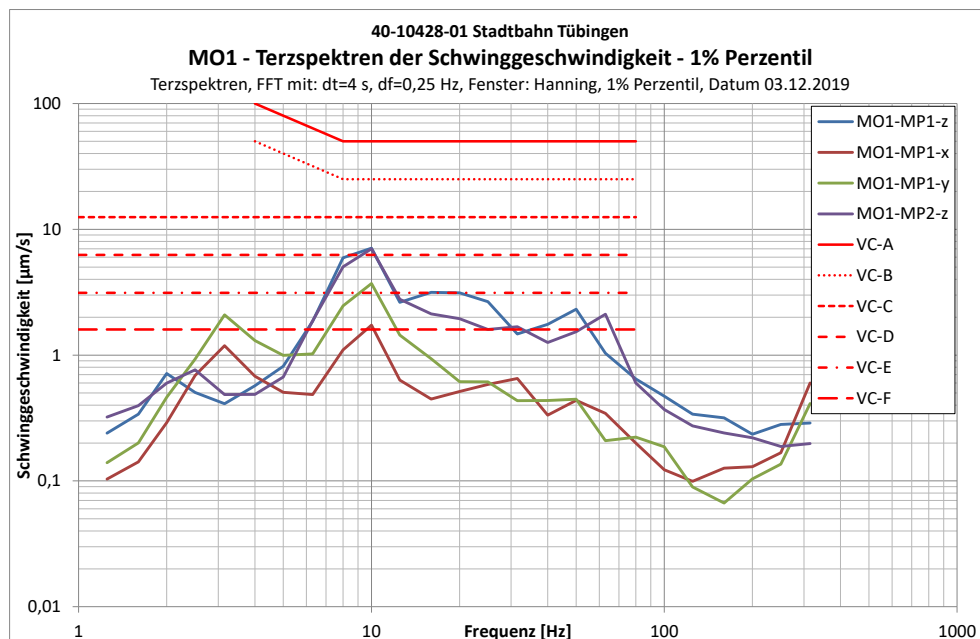


Abbildung 7-2: MO1 – Terzspektrn der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

7.5.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO1 |
| Gebäude | CIN-E2 |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A1 |
| Ausbreitung | A1 |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 36m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Messtechnisch ermittelt am CIN-Gebäude (Messung A1) |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-C |

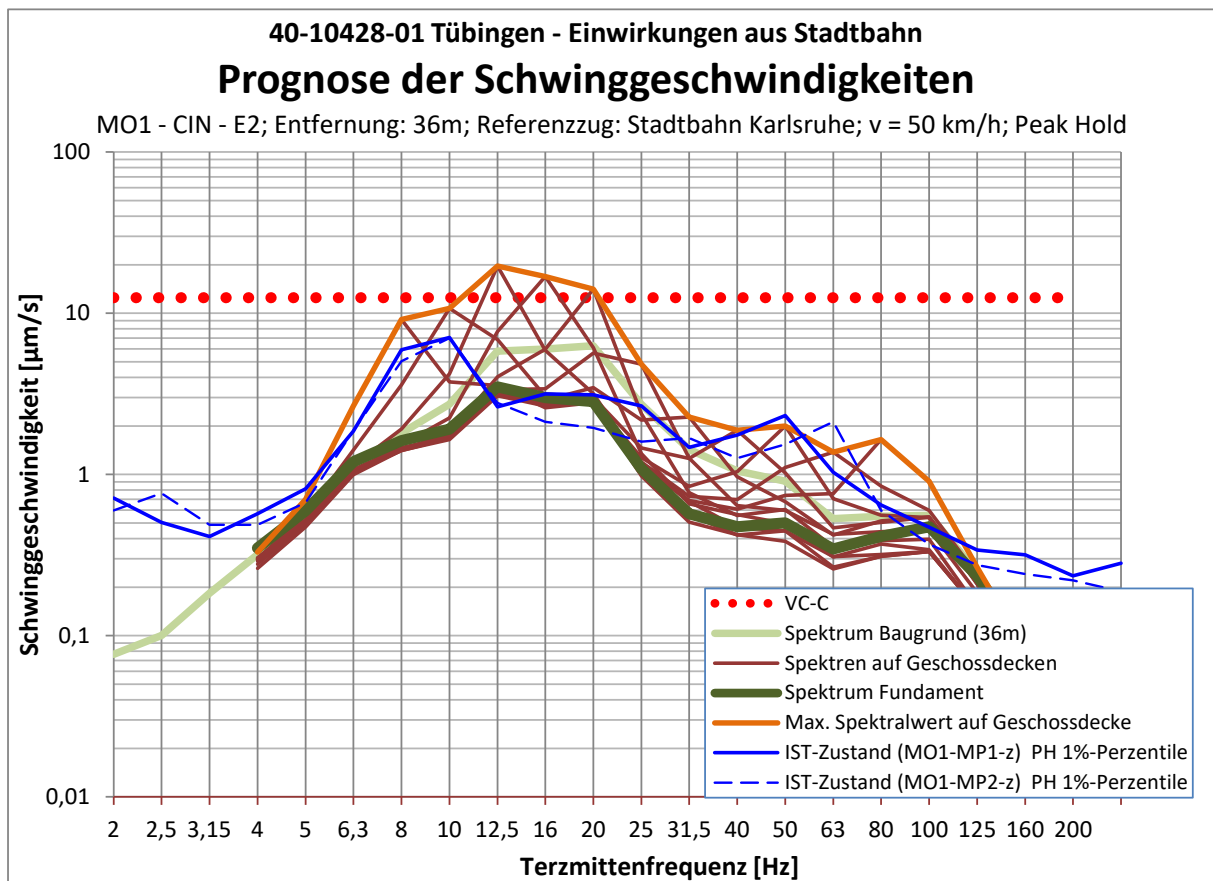
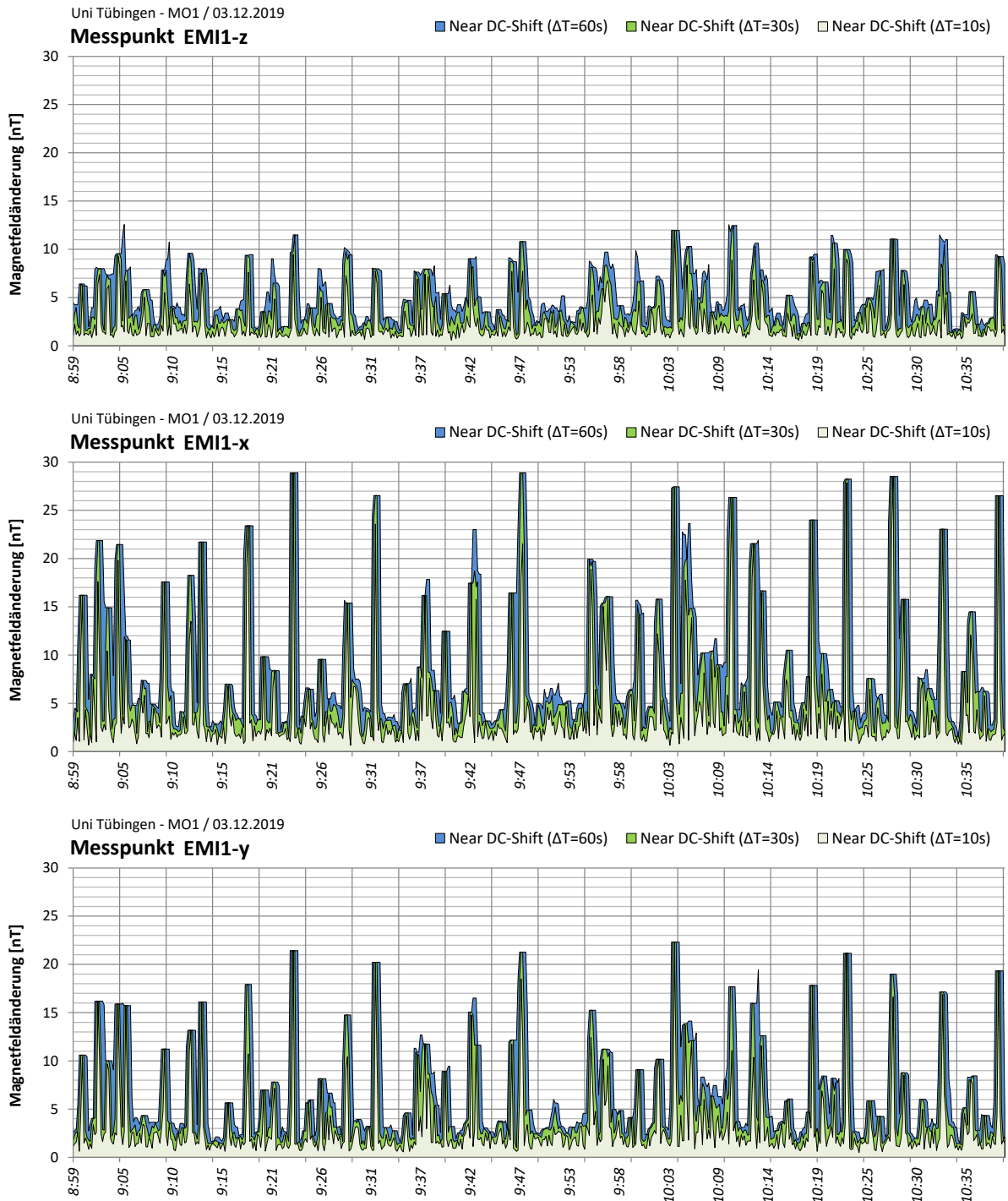


Abbildung 7-3: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO1

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

7.5.4 Near-DC Magnetfeldänderungen am MO1



Die oben dargestellten Abbildungen zeigen die Near-DC-Magnetfeldänderungen (Peak-to-Peak) an MO1 über einen Auswertungszeitraum von 10 Sekunden, 30 Sekunden und 60 Sekunden. Es ist ein vergleichsweise niedriger Grundpegel von etwa 5 nT zu erkennen sowie zahlreichen Einzel-Peaks mit deutlich höheren Werten. Diese Einzelpeaks sind auf Busvorbeifahrten auf der Schnarrenbergstraße

zurückzuführen und erreichen Werte von bis zu 29 nT. Dies sind sehr niedrige Werte, die sich sogar für empfindliche Elektronenmikroskope eignen.

Die AC-Magnetfeldänderungen wurden für die maßgebenden Frequenzen von 16 Hz (Bahnstromnetz) und 50 Hz (Drehstromnetz) beurteilt.

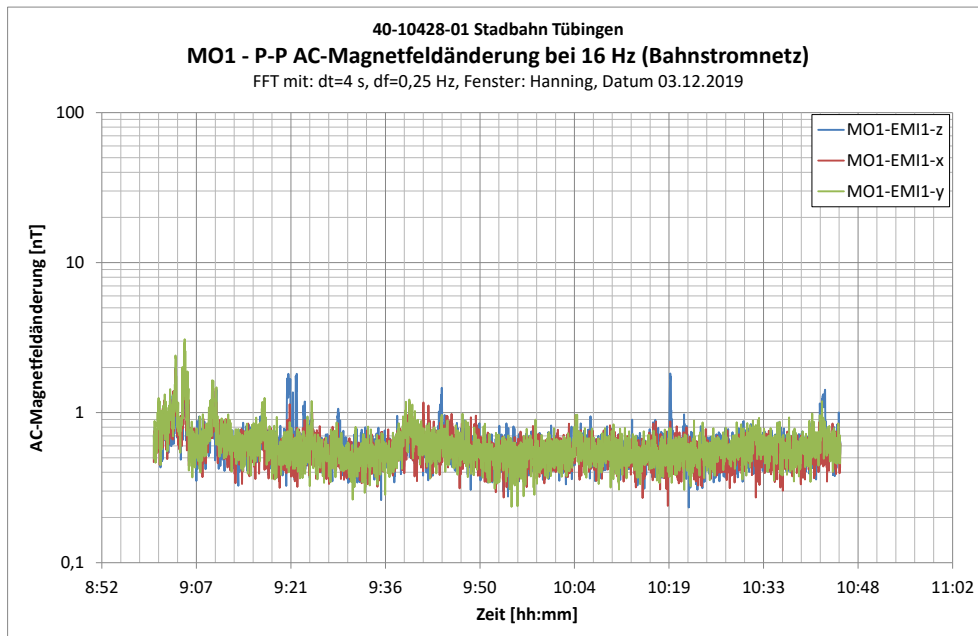


Abbildung 7-4: MO1 – AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz – Bahnstromnetz

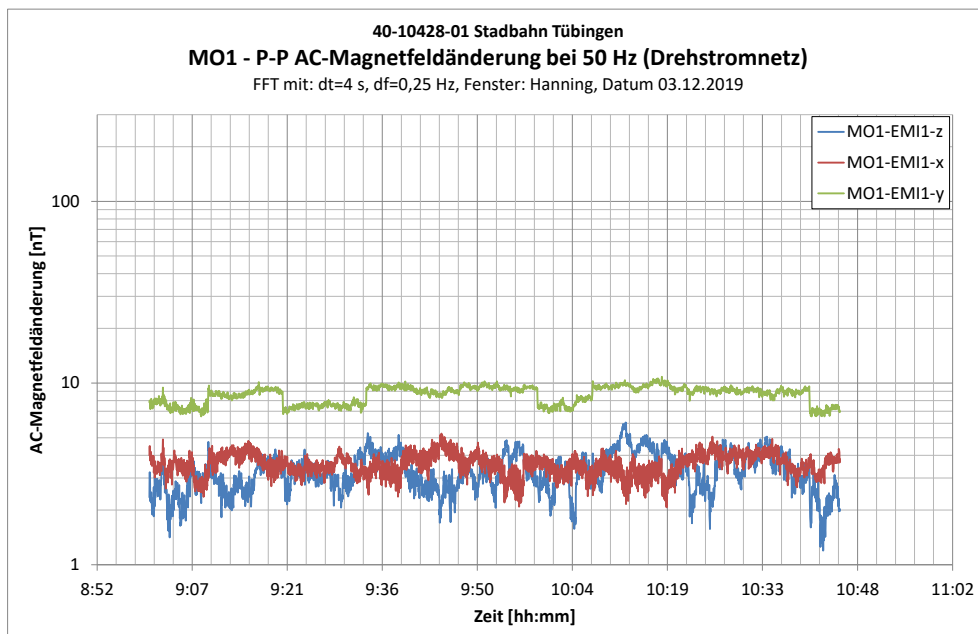


Abbildung 7-5: MO1 – AC-Magnetfeldänderung bei 50 Hz - Drehstromnetz

Der AC-Shift bei 16 Hz ist mit maximal 3,1 nT sehr gering. Die Magnetfeldänderung bei 50 Hz wird Größtenteils durch Gebäudetechnik verursacht und ist mit maximal 10,8 nT an Messpunkt MO1-EMI1-y ebenfalls sehr niedrig.

7.6 MO2 – Otfried-Müller-Straße 25 (CIN - E5)

7.6.1 Dokumentation der Messung am MO2

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage / Raum | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
| 1 | MP1 | Z | Raum 506 | Dreifuß | G65 | +/- 2.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 2 | | X | | | | +/- 2.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 3 | | Y | | | | +/- 2.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 4 | EMI1 | Z | Raum 506 | Stativ h = 120 cm | S53 | +/- 100 [μT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |
| 7 | MP2 | Z | Raum 506 | Dreifuß | G145 | +/- 2.000 [$\mu\text{m/s}$] |

Tabelle 7-8: Messpunkte an MO2

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].



Tabelle 7-9: Fotodokumentation der Messpunkte am MO2

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:



Abbildung 7-6: Lage der Messpunkte am MO2

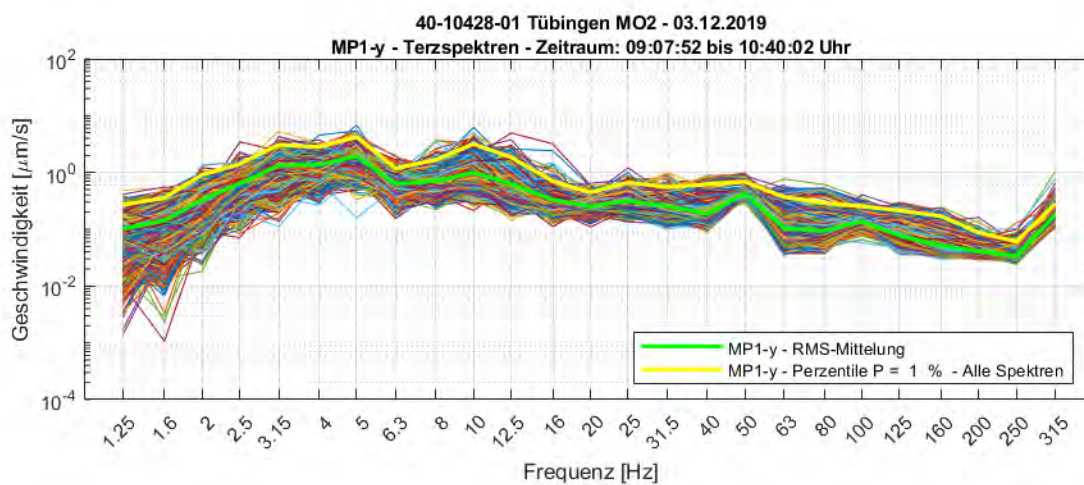
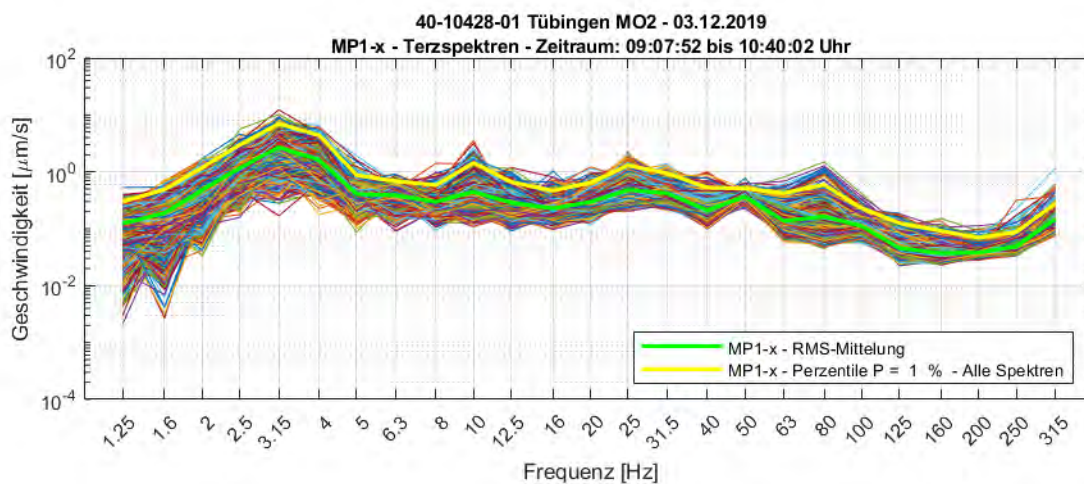
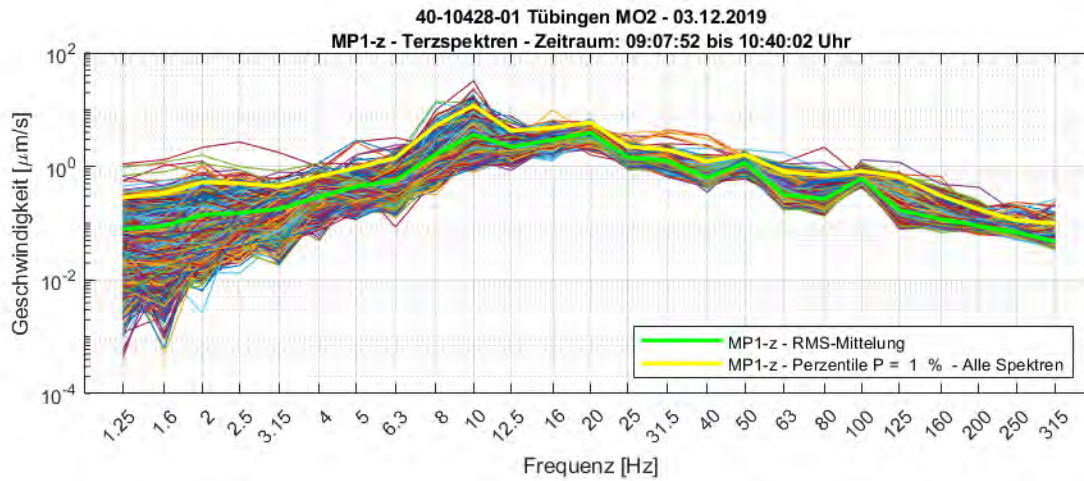
Folgende Messungen wurden am 03.12.2019 durchgeführt:

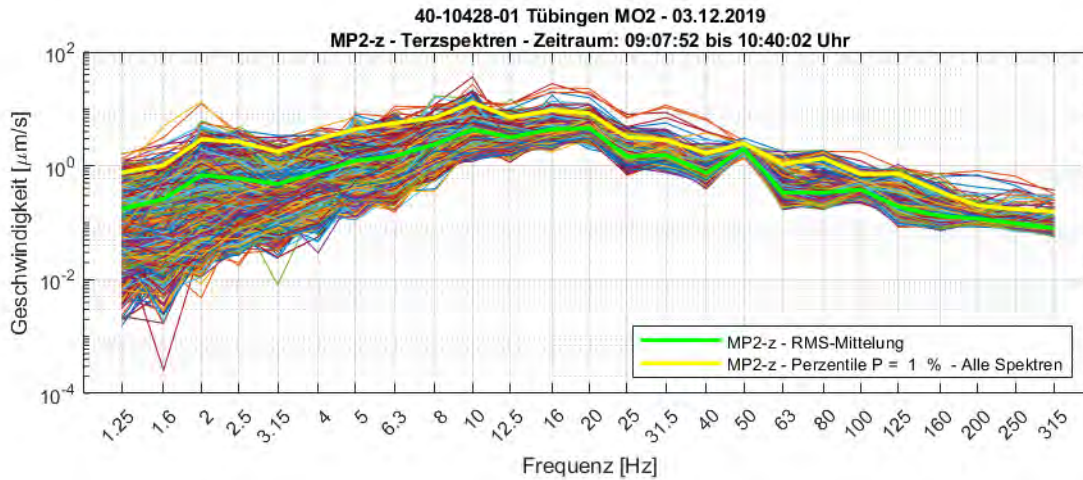
| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--|
| M1 | Ambiente Schwingungen & Magnetfeldänderungen und Admittanzmessung mittels Impulsanreger Dynpact® |

Tabelle 7-10: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO2

7.6.2 Schwingungspegel am MO2

4-Sekunden Terzspektren





Die nachfolgende Abbildung 7-7 zeigt die 1%-Perzentile der Terzspektren aller drei Raumrichtungen an MO2. Es ist ein dominanter Peak bei einer Frequenz von 10 Hz zu erkennen, welcher auf Straßenverkehr auf der Schnarrenbergstraße und der Otfried-Müller-Straße zurückgeführt wird.

In vertikaler z-Richtung liegt die maximale Schwinggeschwindigkeit bei 13,0 µm/s, so dass hier das Schwingungskriterium VC-B ($v \leq 25 \mu\text{m/s}$, $8 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten wird.

Die Schwinggeschwindigkeit in horizontaler Richtung liegen mit maximal 7,0 µm/s etwas niedriger und halten das strengere Kriterium VC-C ($v \leq 12,5 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) ein.

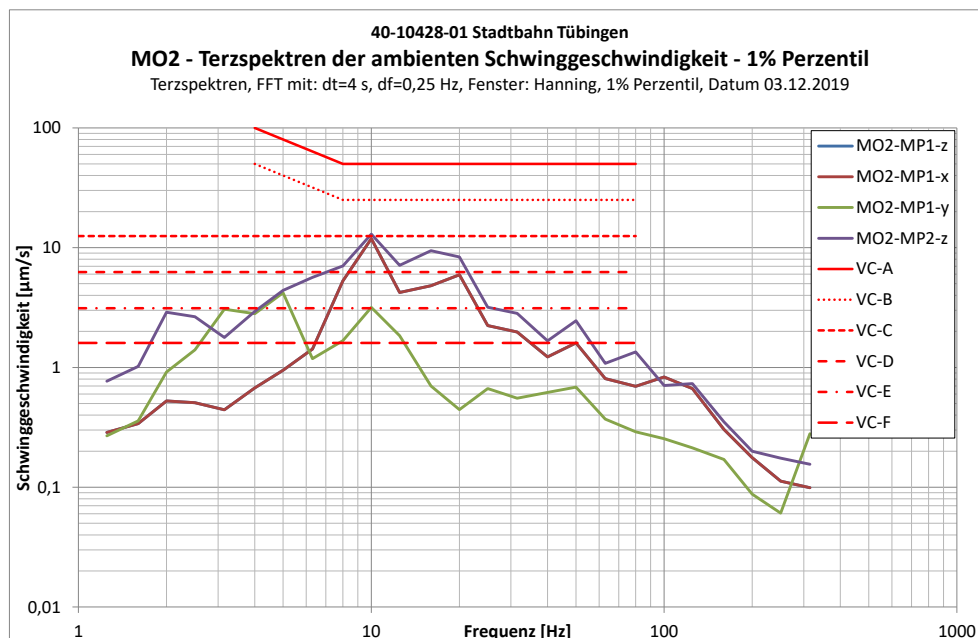


Abbildung 7-7: MO2 – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

7.6.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO2 |
| Gebäude | CIN-E5 |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A1 |
| Ausbreitung | A1 |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 83m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Messtechnisch ermittelt am CIN-Gebäude (Messung A1) |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-C |

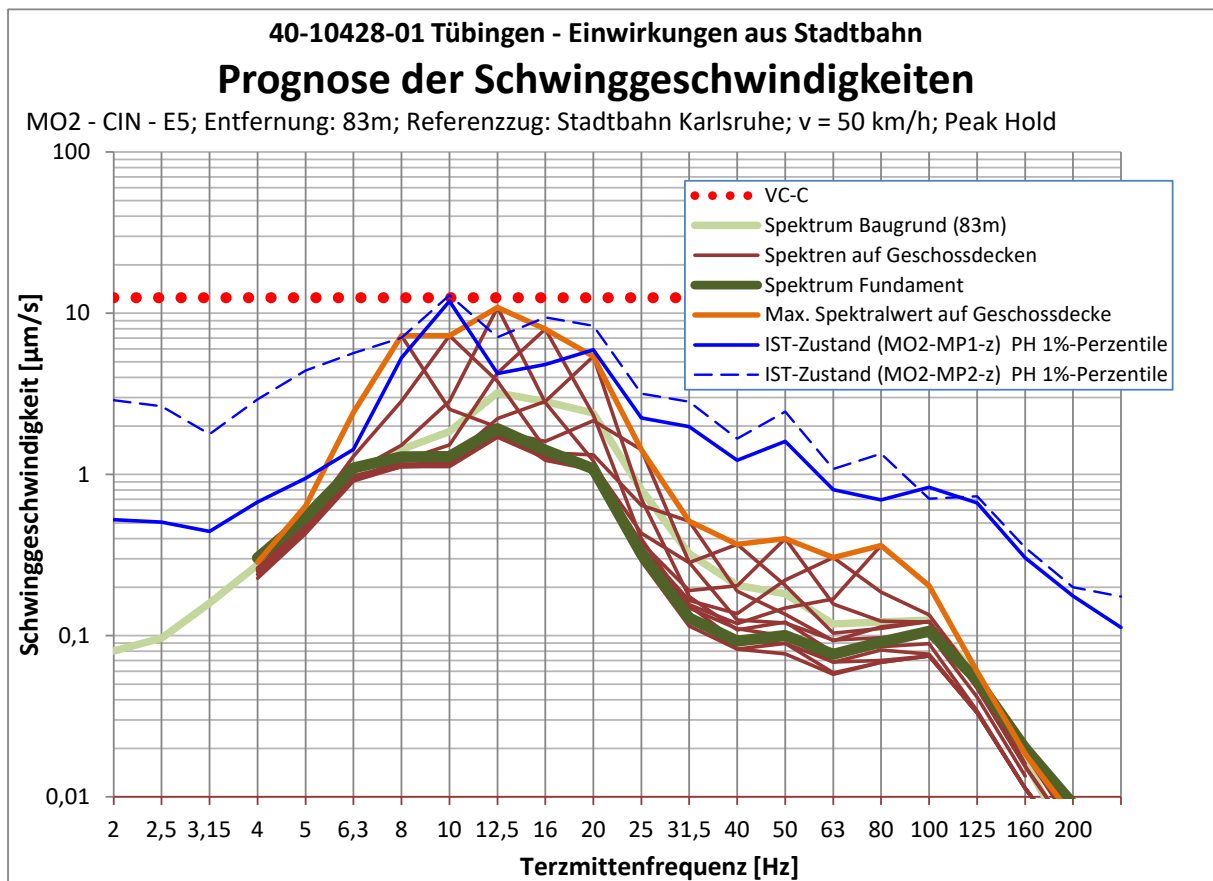
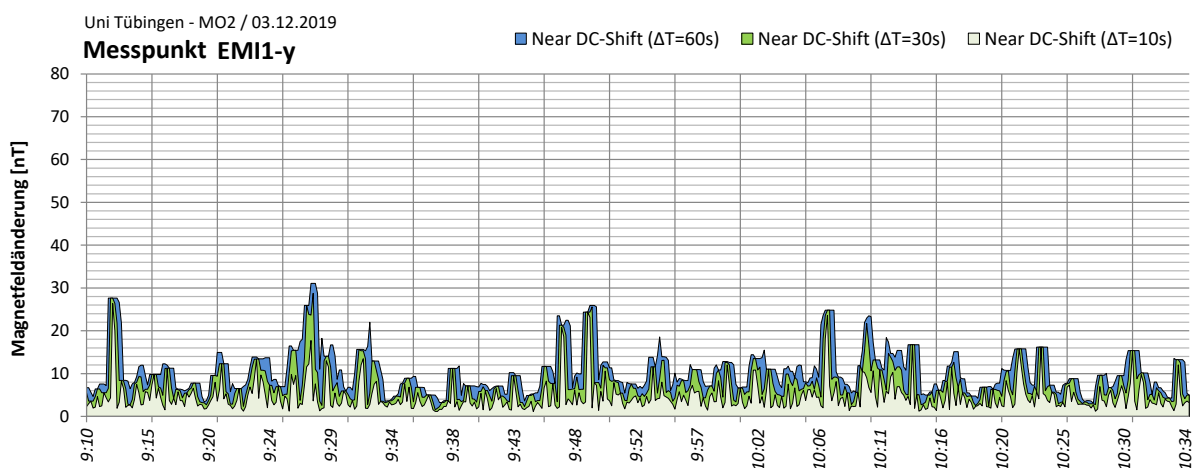
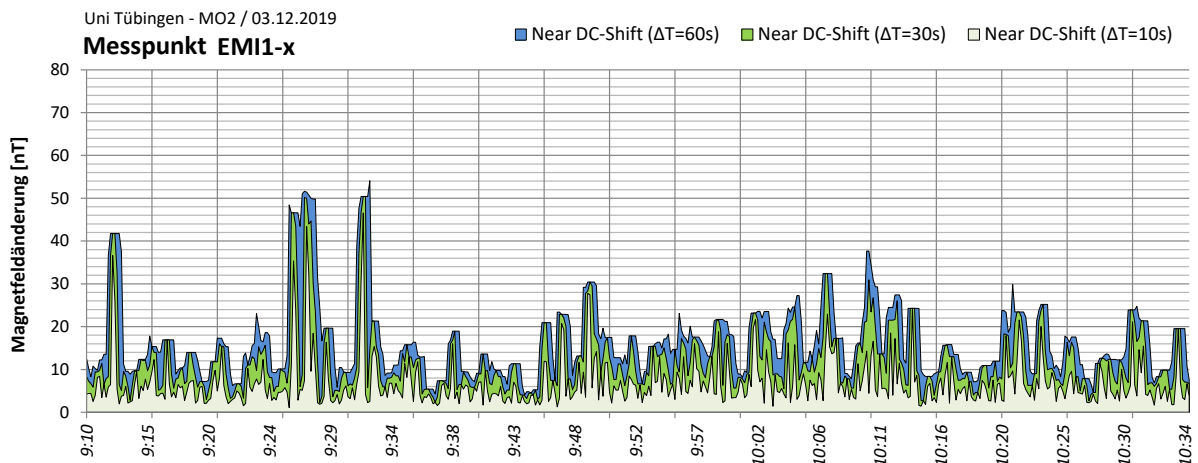
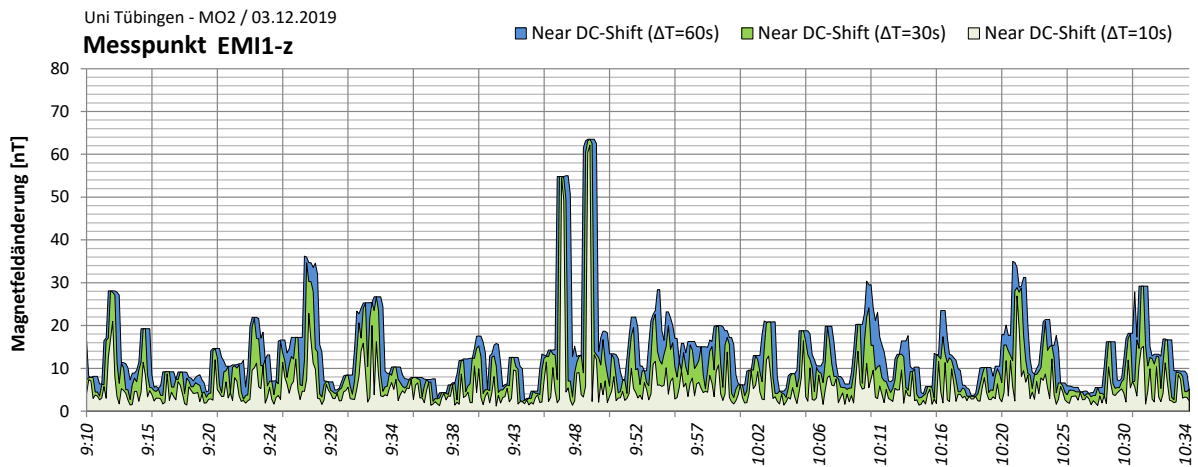


Abbildung 7-8: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO2

7.6.4 Near-DC Magnetfeldänderungen am MO2



Die oben dargestellten Abbildungen zeigen die Near-DC-Magnetfeldänderungen (Peak-to-Peak) am Messort MO2 über einen Auswertungszeitraum von 10 Sekunden, 30 Sekunden und 60 Sekunden. Es sind zahlreiche Einzel-Peaks zu erkennen, welche auf PKW- & LKW-Vorbeifahrten auf der Otfried-Müller-Straße zurückzuführen sind.

Außerdem sind zwei dominante Peaks gegen 9:48 Uhr zu sehen, bei denen ein maximaler DC-Shift von 63,5 nT erreicht wird. Diese hohen Peaks sind wahrscheinlich durch den Betrieb des nahegelegenen Fahrstuhls zurückzuführen. Im Allgemeinen sind die DC-Magnetfeldänderungen jedoch vergleichsweise niedrig.

Die AC-Magnetfeldänderungen wurden für die maßgebenden Frequenzen von 16 Hz (Bahnstromnetz - Abbildung 7-9) und 50 Hz (Drehstromnetz - Abbildung 7-10) beurteilt.

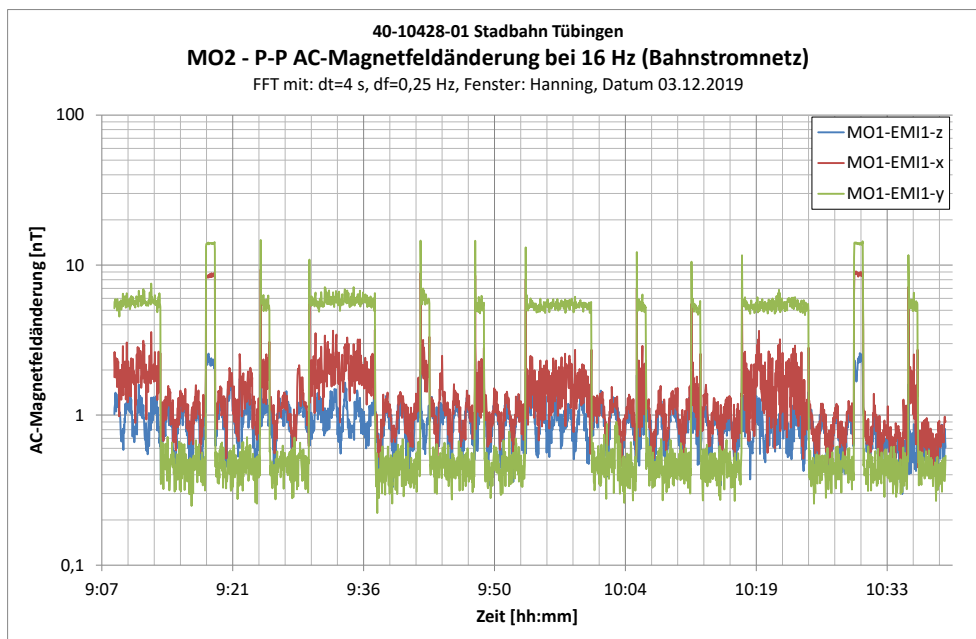


Abbildung 7-9: MO2 – AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz – Bahnstromnetz

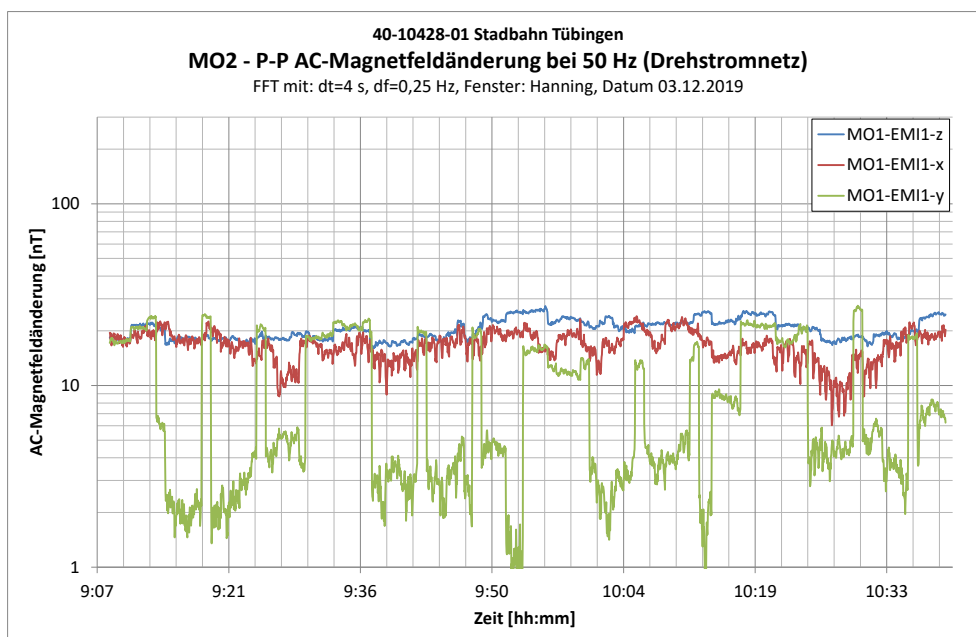


Abbildung 7-10: MO2 – AC-Magnetfeldänderung bei 50 Hz – Drehstromnetz

Der AC-Shift bei 16 Hz ist mit maximal 14,7 nT gering. Die Magnetfeldänderung bei 50 Hz wird Größtenteils durch Gebäudetechnik verursacht und ist mit Maximal 27,4 nT an Messpunkt MO2-EMI1-z niedrig.

7.7 MO3 – Röntgenweg 15 (Werner-Siemens-Imaging-Center - KG)

7.7.1 Dokumentation der Messung am MO3

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage / Raum | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
| 1 | MP3 | Z | Raum 45 | Dreifuß | G52 | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 2 | | X | | | | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 3 | | Y | | | | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 4 | EMI2 | Z | Raum 45 | Stativ h = 120 cm | S37 | +/- 100 [μT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |
| 7 | MP4 | Z | Raum 44 | Dreifuß | G146 | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |

Tabelle 7-11: Messpunkte an MO3

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].

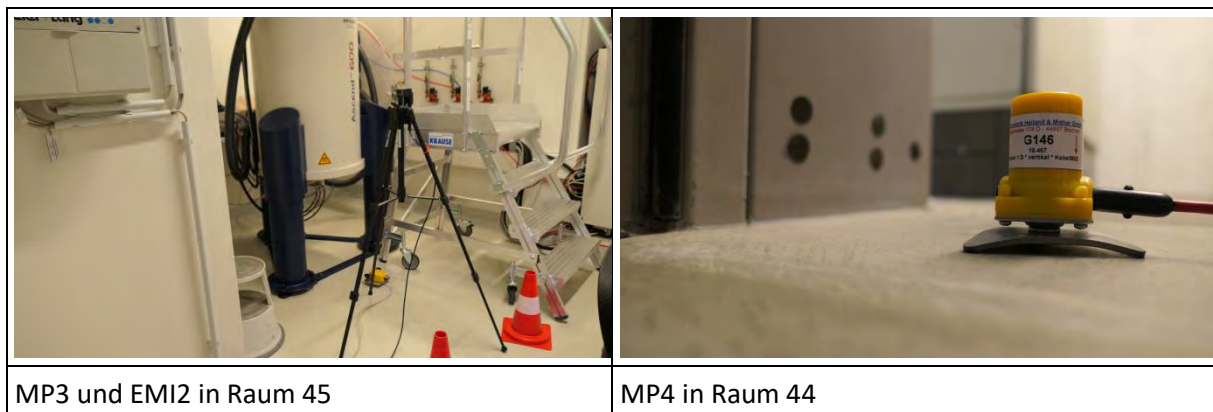


Tabelle 7-12: Fotodokumentation der Messpunkte am MO3

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:

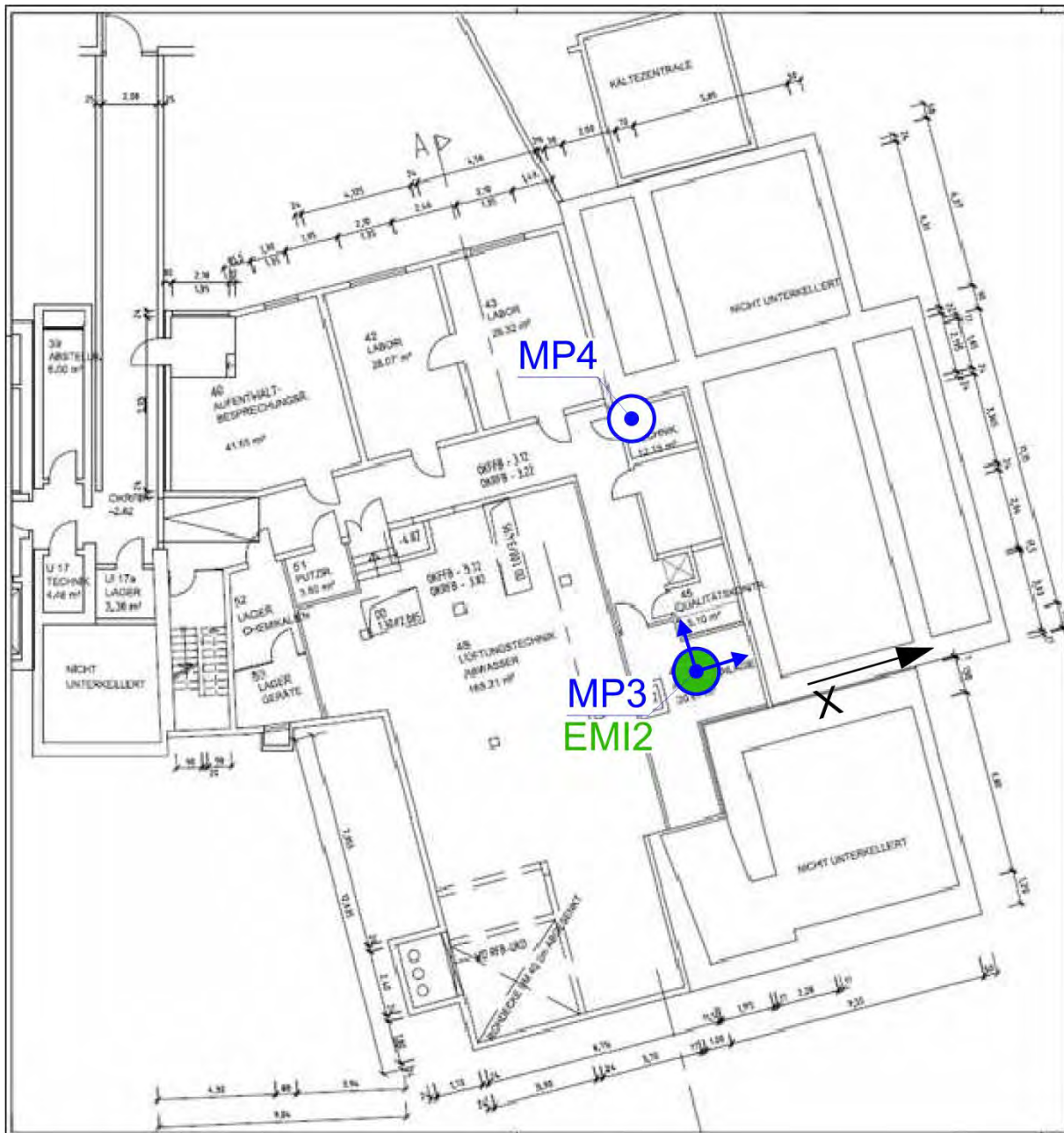


Abbildung 7-11: Lage der Messpunkte am MO3

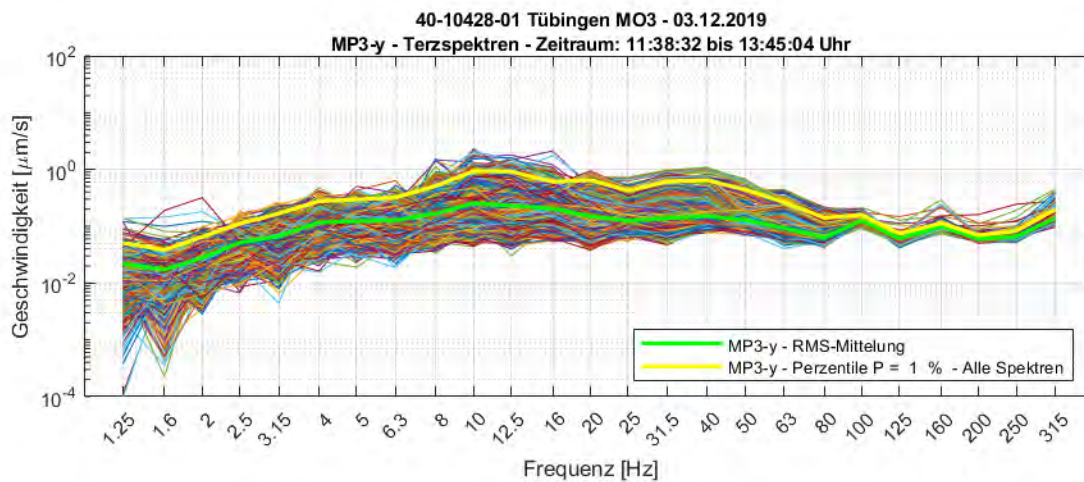
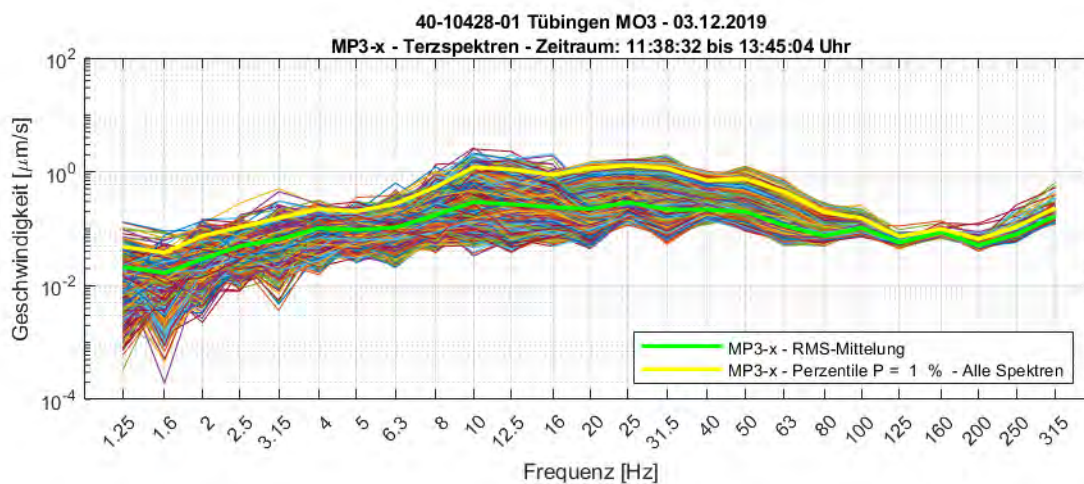
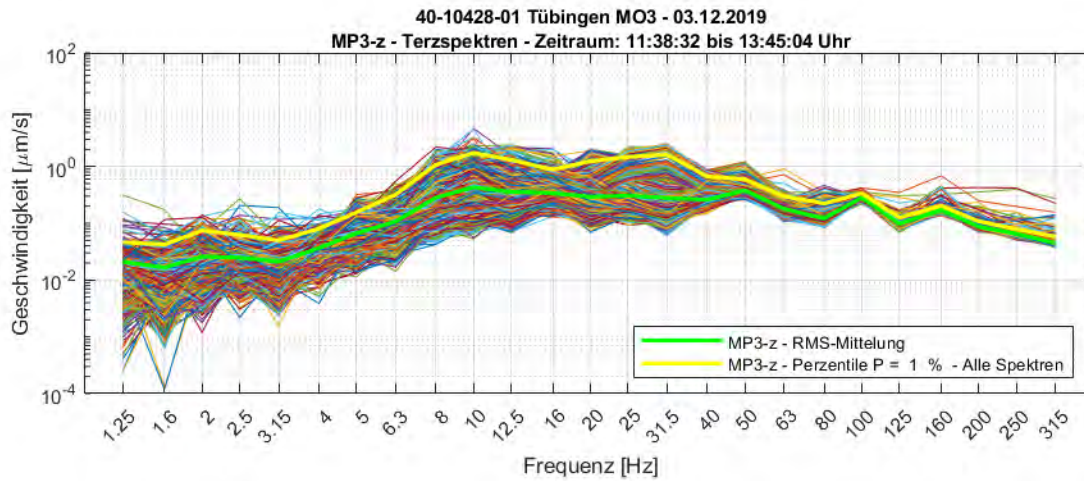
Folgende Messungen wurden am 03.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--|
| M1 | 2 Personen gehen im Flur |
| M2 | Ambiente Schwingungen & Magnetfeldänderungen und Admittanzmessung mittels Impulsanreger Dynpact® |

Tabelle 7-13: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO3

7.7.2 Schwingungspegel am MO3

4-Sekunden Terzspektren



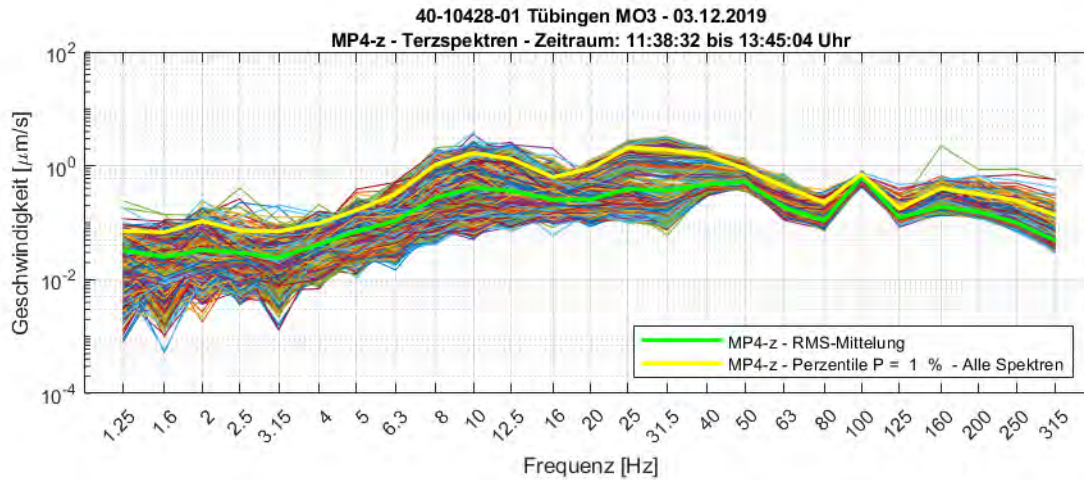


Abbildung 7-12 zeigt das 1% Perzentil der Terzspektren aller drei Raumrichtungen an MO3. In vertikaler (z) und horizontaler (x, y) ist ein Peak bei einer Frequenz von 10 Hz zu erkennen, welcher auf die Busvorbeifahrten auf der nahegelegenen Schnarrenbergstraße zurückgeführt wird.

Die maximale Schwinggeschwindigkeit in vertikaler Richtung liegt mit 1,8 µm/s sehr niedrig, so dass das strenge Kriterium VC-E ($v \leq 3,1 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten wird. In horizontaler Richtung sind die Schwinggeschwindigkeiten nochmals geringer und halten das strengere Kriterium VC-F ($v \leq 1,6 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) ein.

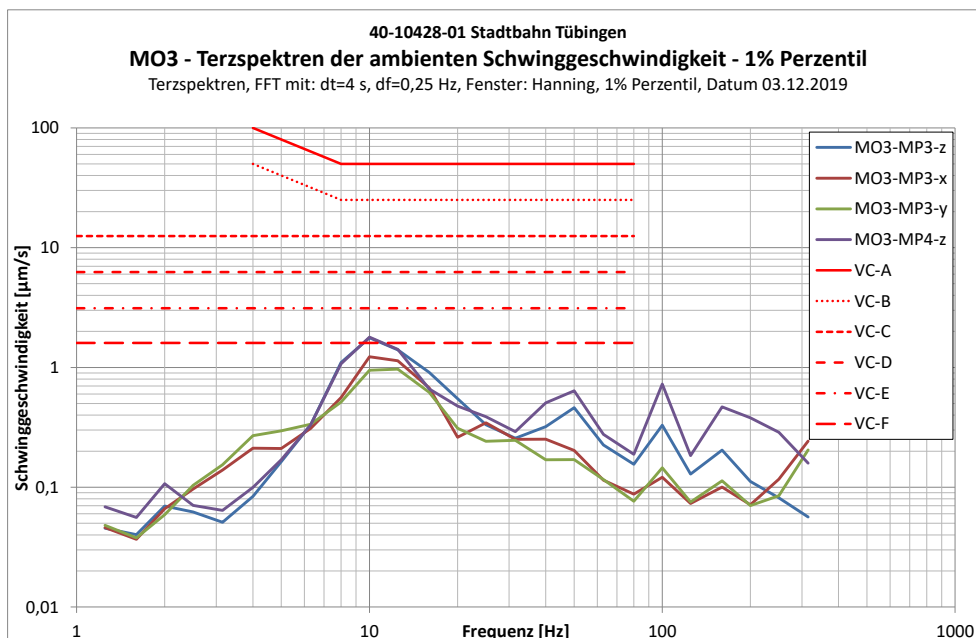


Abbildung 7-12: MO3 – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

7.7.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO3 |
| Gebäude | Werner-Siemens-Imaging-Center (KG) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A2 |
| Ausbreitung | A2 |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 16m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Messtechnisch ermittelt am WSIC-Gebäude (Messung A2) |
| Gebäudeübertragung | - |
| Tool-Spezifikation | Bruker Nano-C |

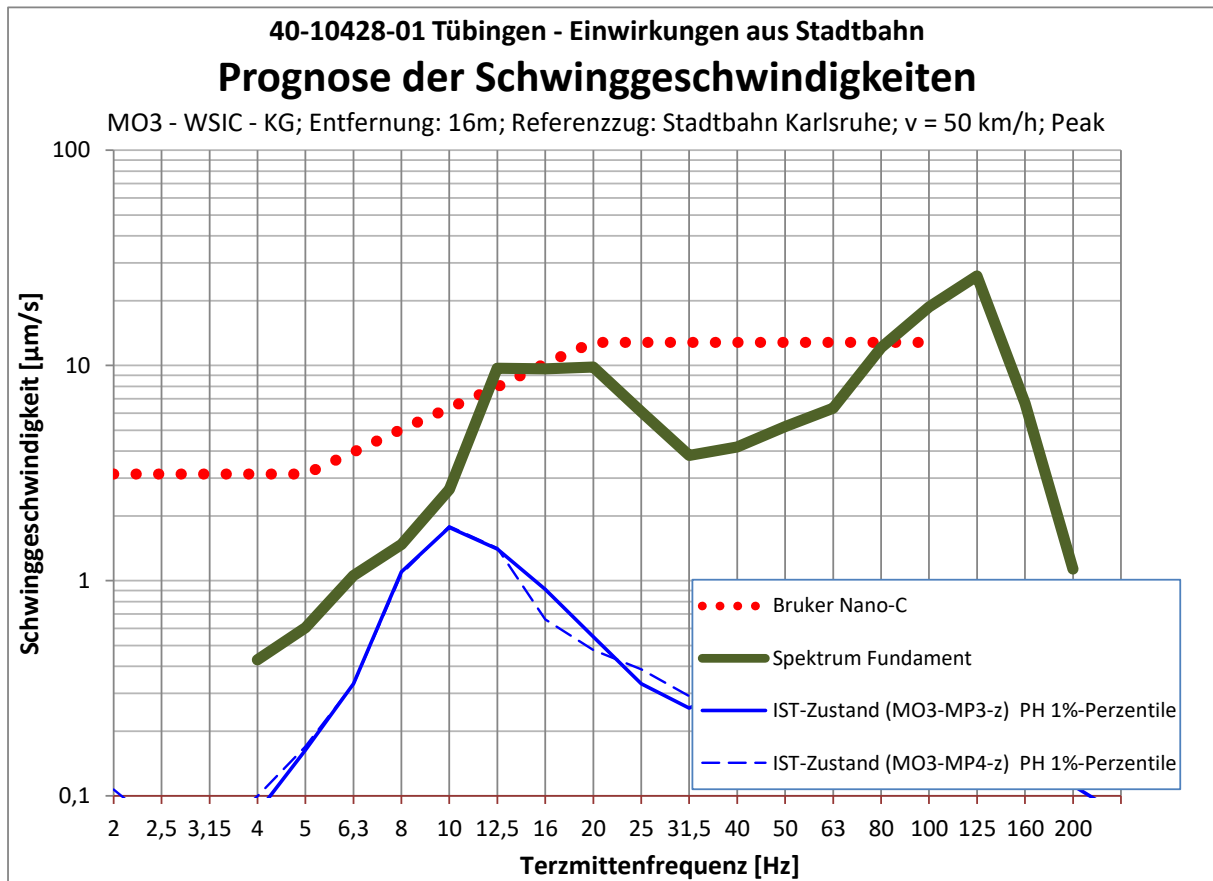
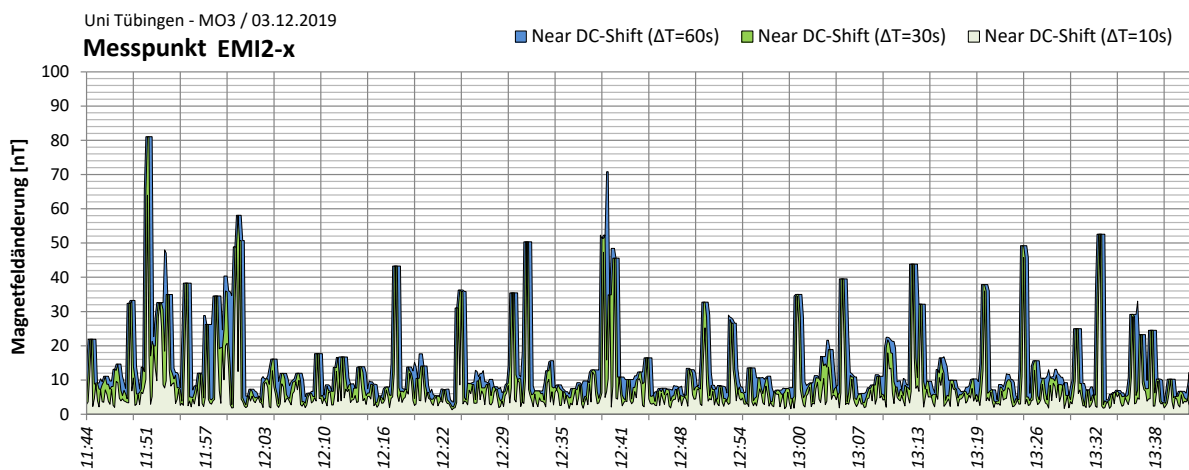
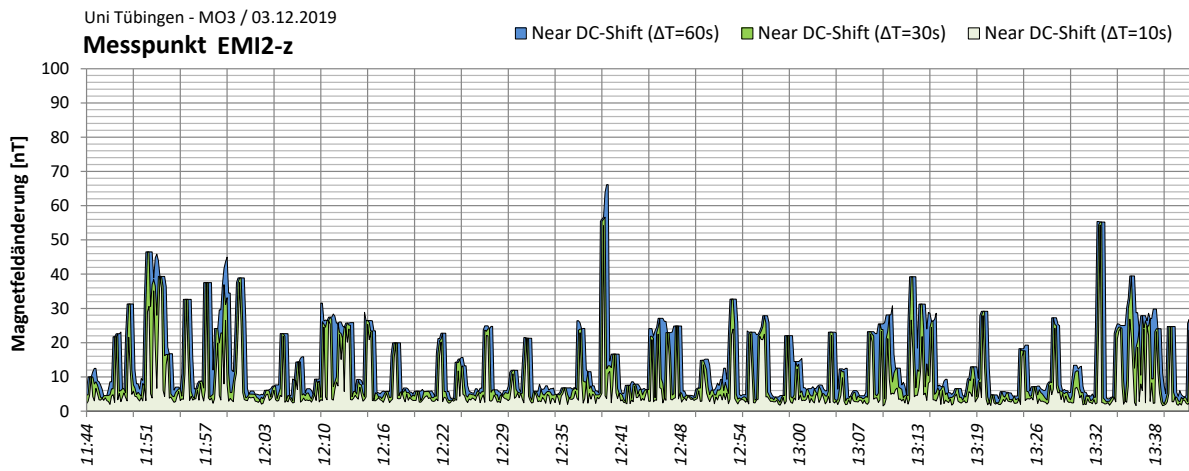


Abbildung 7-13: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO3

7.7.4 MO3 – Röntgenweg 15 (Werner-Siemens-Imaging-Center - KG)



Die oben dargestellten Abbildungen zeigen die Near-DC-Magnetfeldänderungen (Peak-to-Peak) am Messort an MO3 über einen Auswertungszeitraum von 10 Sekunden, 30 Sekunden und 60 Sekunden. Es sind zahlreiche Einzel-Peaks zu erkennen, welche auf Bus-Vorbeifahrten auf der Schnarrenbergstraße zurückzuführen sind. Der maximale Near-DC Shift beträgt 81 nT.

Während der Messungen wurde der Einfluss vom Ein- und Ausschalten des NMR auf die Magnetfeldänderungen nicht untersucht, da das NMR aus anlagentechnischen Gründen während der gesamten Messdauer eingeschaltet bleiben musste.

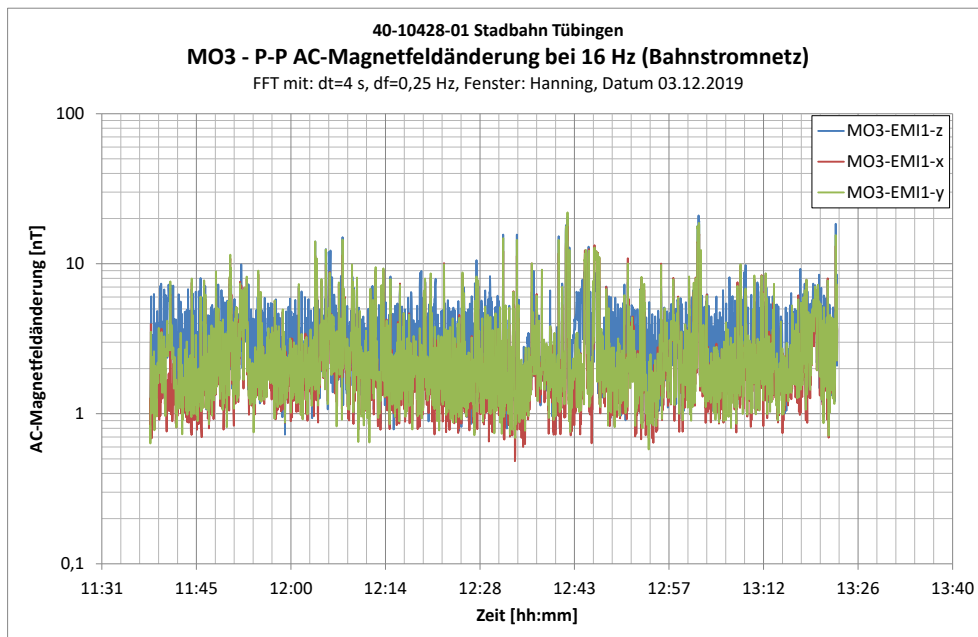


Abbildung 7-14: MO3 – AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz – Bahnstromnetz

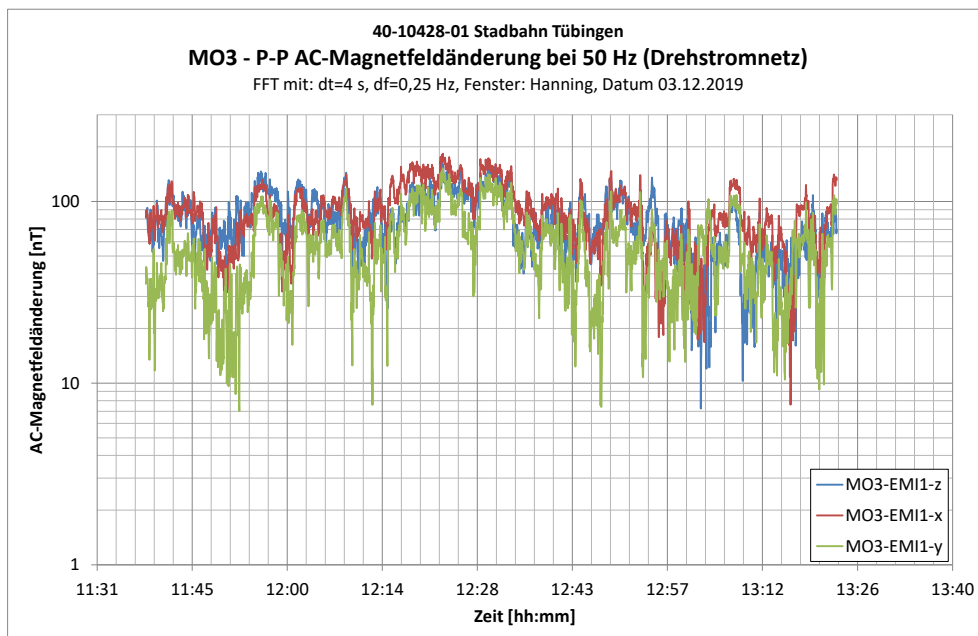


Abbildung 7-15: MO3 – AC-Magnetfeldänderung bei 50 Hz – Drehstromnetz

Die 16 Hz (Bahnstromnetz) Magnetfeldänderungen streuen vergleichsweise stark, liegen mit 0,5 nT bis 22,0 nT jedoch sehr niedrig.

Die AC-Magnetfeldänderung sind mit werten bis zu 183,3 nT auf einem Niveau, welches der aktuellen Nutzung als NMR-Labor entspricht.

7.8 MO4 – Auf der Morgenstelle 18 (Gebäude A – E7)

7.8.1 Dokumentation der Messung am MO4

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage / Raum | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------|------------------|
| 1 | MP1 | Z | 7 O 25 | Dreifuß, PVC | G65 | +/- 2.000 [µm/s] |
| 2 | | X | | | | +/- 2.000 [µm/s] |
| 3 | | Y | | | | +/- 2.000 [µm/s] |
| 4 | EMI1 | Z | 7 O 25 | Stativ h = 120 cm | S53 | +/- 100 [µT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [µT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [µT] |
| 7 | MP2 | Z | 7 O 25 | Dreifuß, PVC | G145 | +/- 2.000 [µm/s] |

Tabelle 7-14: Messpunkte an MO4

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].

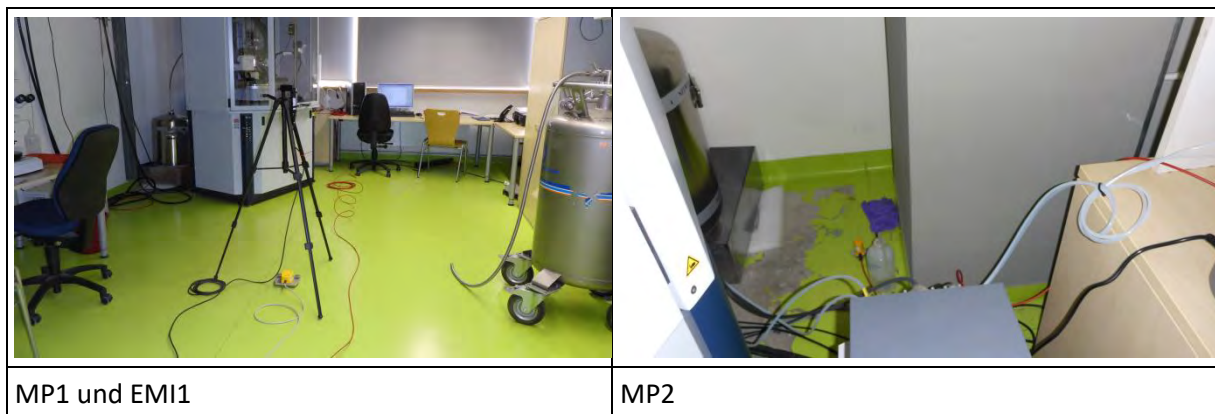


Tabelle 7-15: Fotodokumentation der Messpunkte am MO4

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:

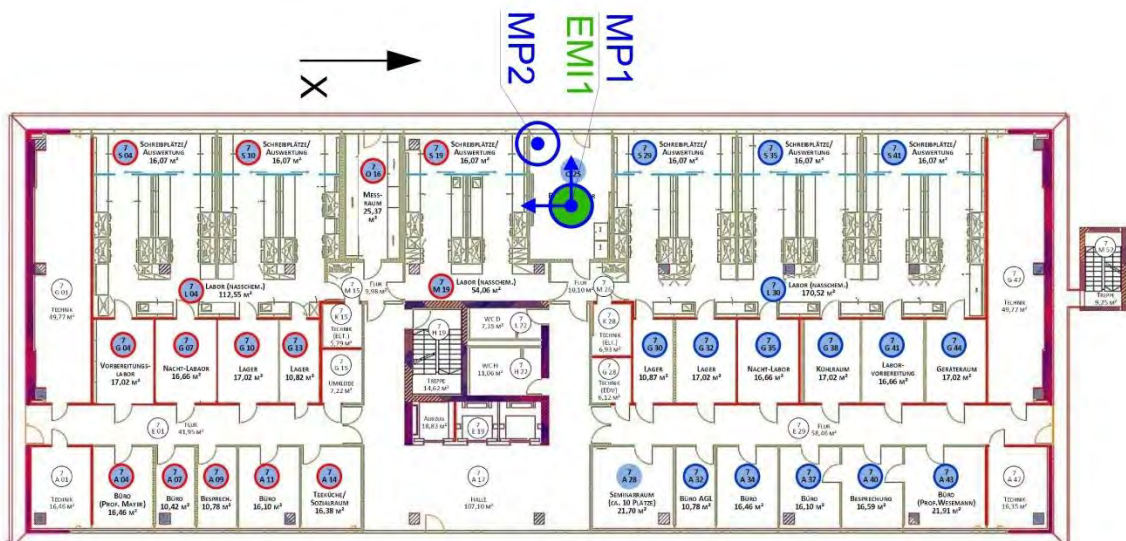


Abbildung 7-16: Lage der Messpunkte am MO4

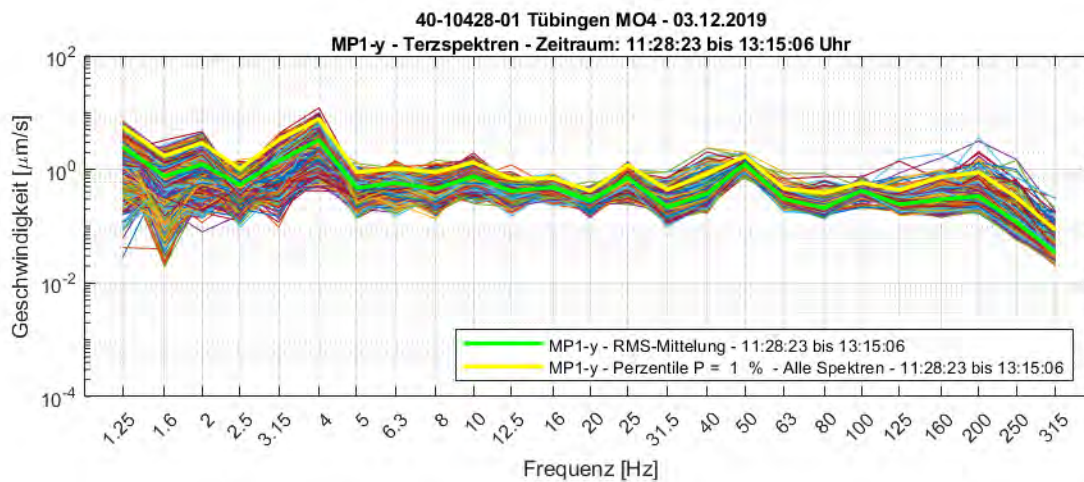
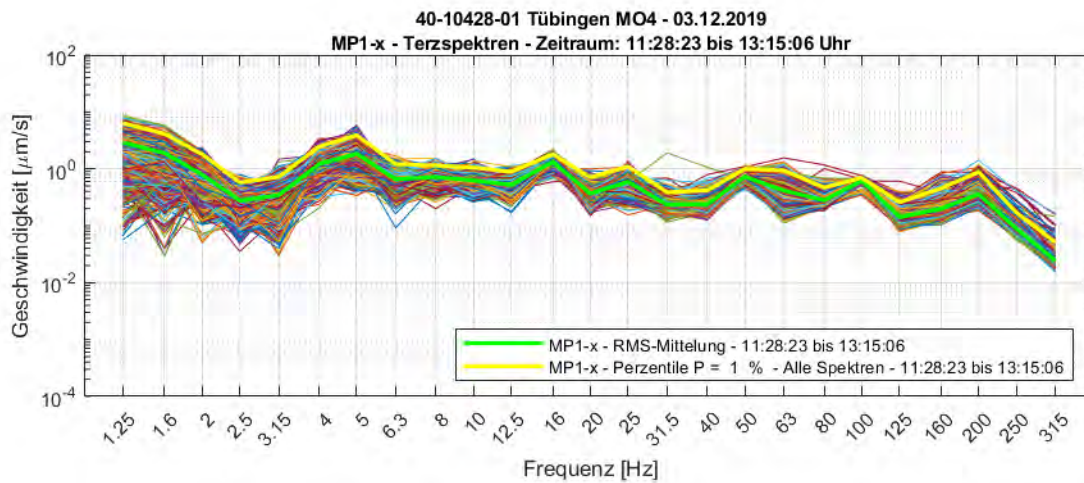
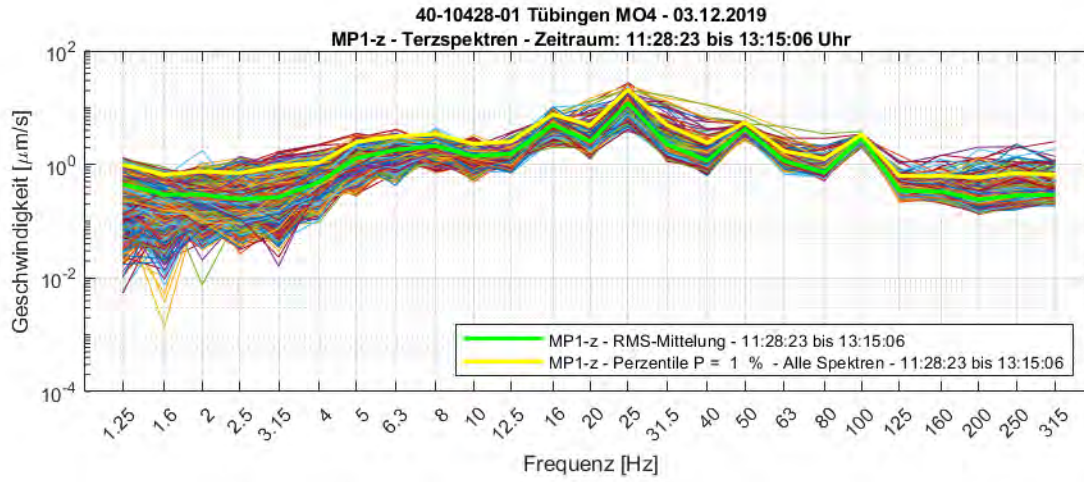
Folgende Messungen wurden am 03.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--|
| M1 | Fersenstoß |
| M2 | 2 Personen gehen im Flur |
| M3 | Ambiente Schwingungen & Magnetfeldänderungen und Admittanzmessung mittels Impulsanreger Dynpact® |

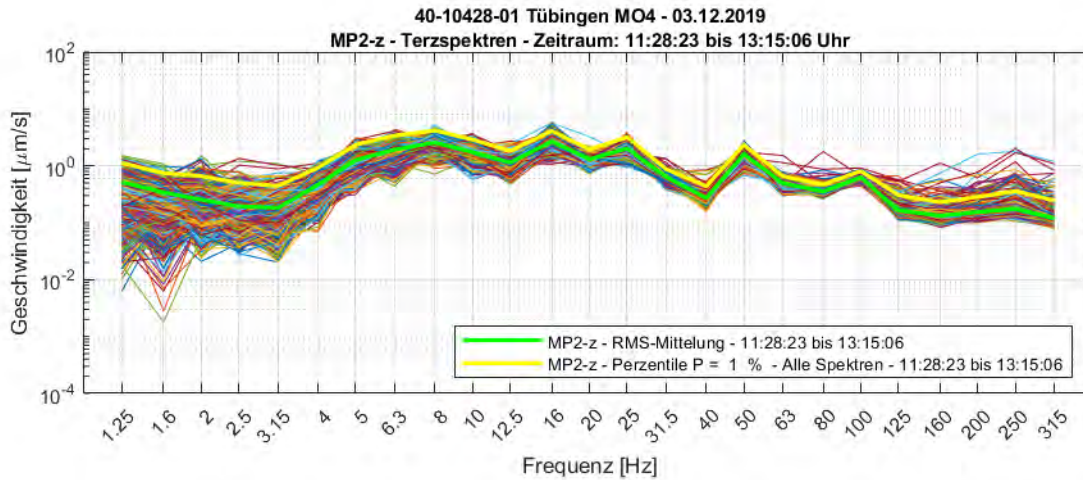
Tabelle 7-16: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO4

7.8.2 Schwingungspegel am MO4

4-Sekunden Terzspektren



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



An MO4 wurden zwei Messpunkte für die Schwingungsmessungen installiert. Die 1%-Perzentile der Terzspektren aller drei Raumrichtungen sind in Abbildung 7-17 dargestellt. Die höchste Schwinggeschwindigkeit wurde an Messpunkt MO4-MP1-z mit 20,7 µm/s bei einer Frequenz von 25 Hz erfasst, womit das Schwingungskriterium VC-B ($v \leq 25 \mu\text{m/s}$, $8 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten wird. Zusätzlich sind weitere Peaks bei 12,5 Hz, 50 Hz und 100 Hz zu erkennen. Diese sind auf den Betrieb von Haus- bzw. Versorgungstechnik zurückzuführen. Die Schwinggeschwindigkeiten an Messpunkt MO4-MP2-z sind deutlich niedriger, da dieser Messpunkt an einer Gebäudewand platziert war.

In horizontaler (x, y) Richtung liegen die Schwinggeschwindigkeiten bei maximal 7,8 µm/s und halten das Schwingungskriterium VC-B ($v \leq 12,5 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) ein.

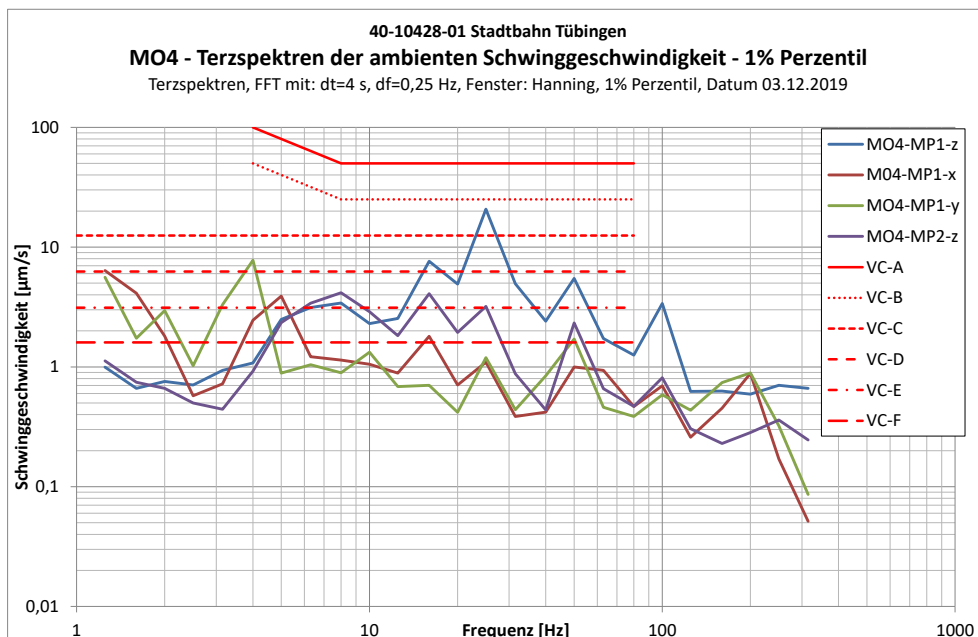


Abbildung 7-17: MO4 – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

Sonstige Anmerkungen

Es wurden hohe Schwinggeschwindigkeiten bei 12,5 Hz, 25 Hz, 50 Hz und 100 Hz erfasst, welche wahrscheinlich auf den Betrieb von Pumpen, Lüftern, Kompressoren o.ä. zurückzuführen sind. Wenn diese Erschütterungsquellen gefunden und angemessen Schwingungs isoliert werden, können die Schwingungen an MO4 deutlich reduziert werden, so dass das Schwingungskriterium VC-C eingehalten wird.

7.8.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO4 |
| Gebäude | Geb. A (E7) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 78m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Messtechnisch ermittelt am Gebäude A (Messung A5) |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-B |

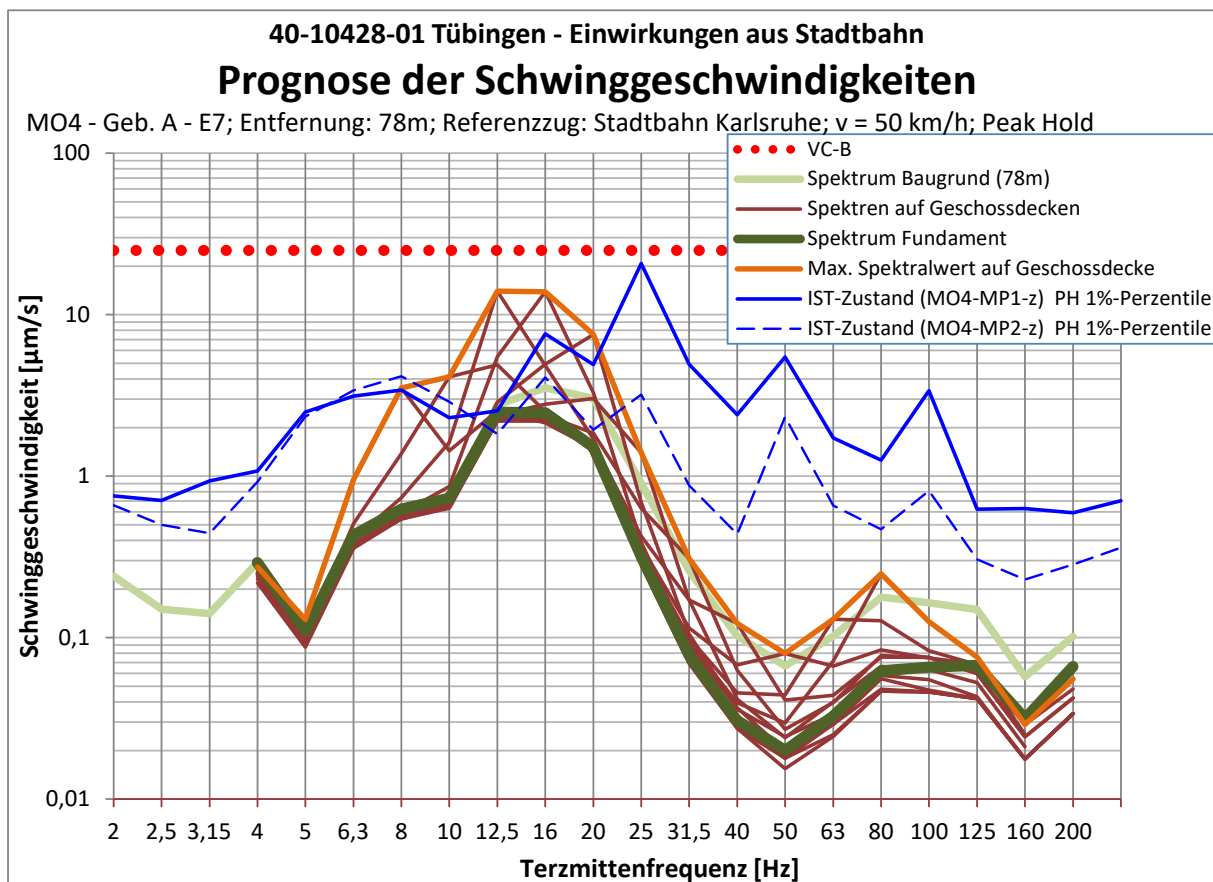
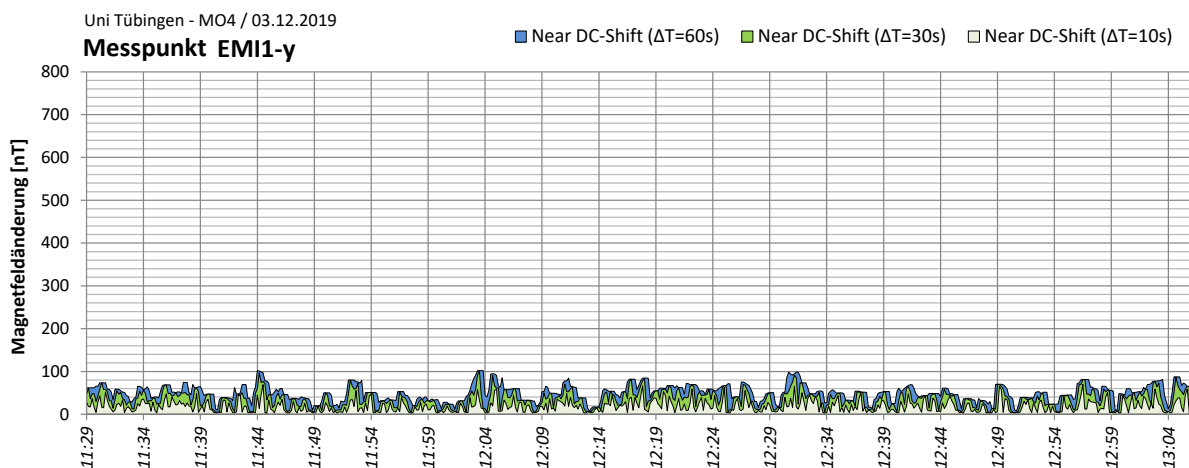
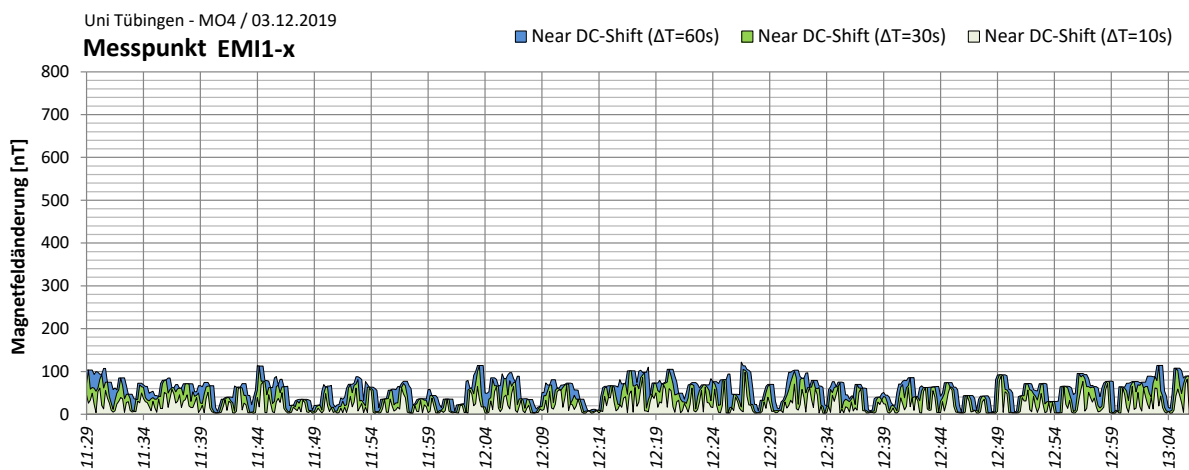
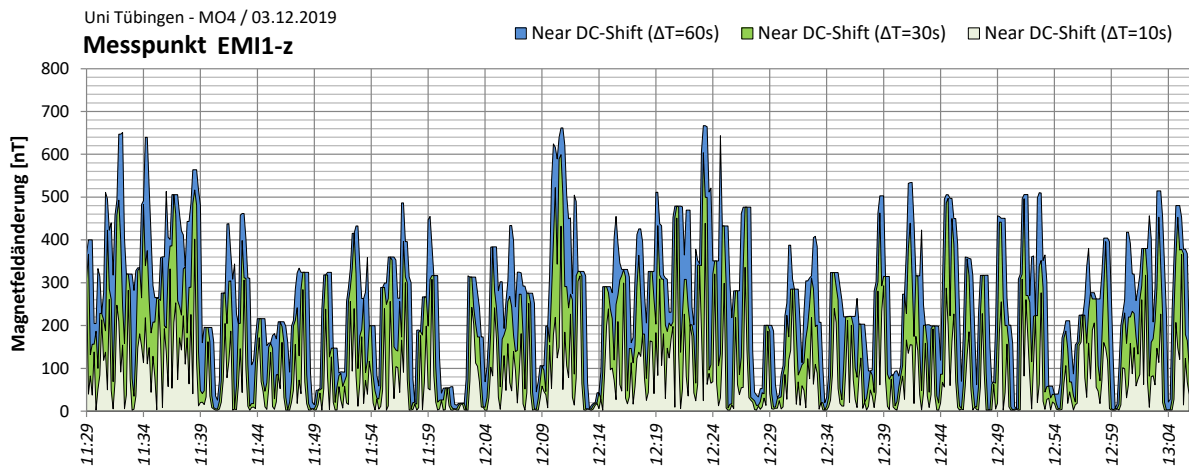


Abbildung 7-18: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO4

7.8.4 Near-DC Magnetfeldänderungen am MO4



Die oben dargestellten Abbildungen zeigen die Near-DC-Magnetfeldänderungen (Peak-to-Peak) am Messort an MO4 über einen Auswertungszeitraum von 10 Sekunden, 30 Sekunden und 60 Sekunden. Die Near-DC Magnetfeldänderungen an MO4 sind mit bis zu 666,8 nT sehr hoch.

Auch die AC-Magnetfeldänderung sind mit bis zu 85,2 nT bei 16 Hz und 1237,0 nT bei 50 Hz sehr hoch.

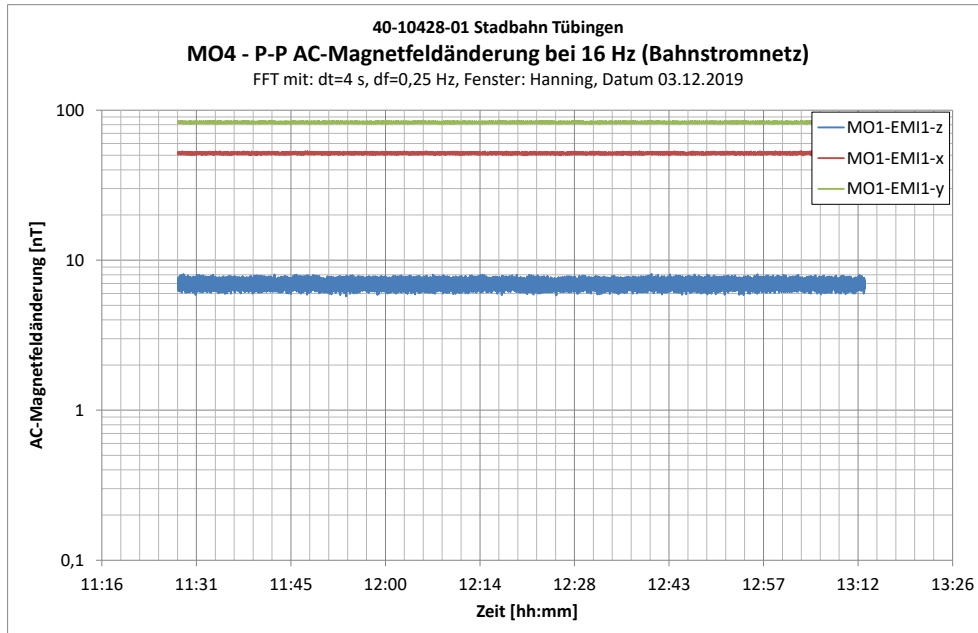


Abbildung 7-19: MO4 – AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz – Bahnstromnetz

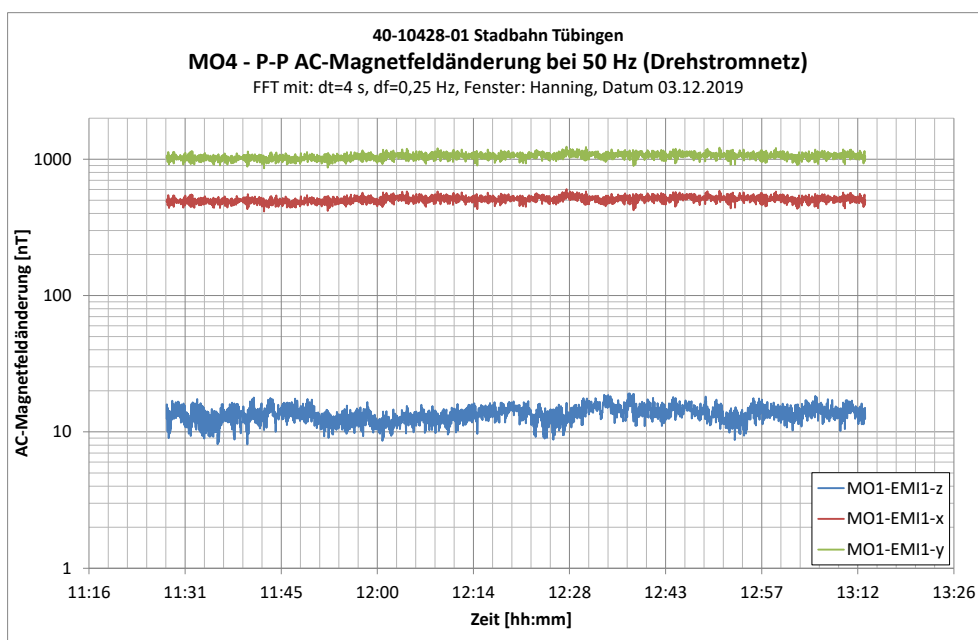


Abbildung 7-20: MO4 – AC-Magnetfeldänderung bei 50 Hz - Drehstromnetz

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

7.9 MO5 – Auf der Morgenstelle 28 (Gebäude E)

7.9.1 Dokumentation der Messung am MO5

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage / Raum | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
| 1 | MP5 | Z | H08 | Dreifuß | G52 | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 2 | | X | | | | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 3 | | Y | | | | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 4 | EMI3 | Z | H08 | Stativ h = 120 cm | S37 | +/- 100 [μT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |
| 7 | MP6 | Z | H11 | Dreifuß | G146 | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |

Tabelle 7-17: Messpunkte an MO5

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].



Tabelle 7-18: Fotodokumentation der Messpunkte am MO5

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:



Abbildung 7-21: Lage der Messpunkte am MO5

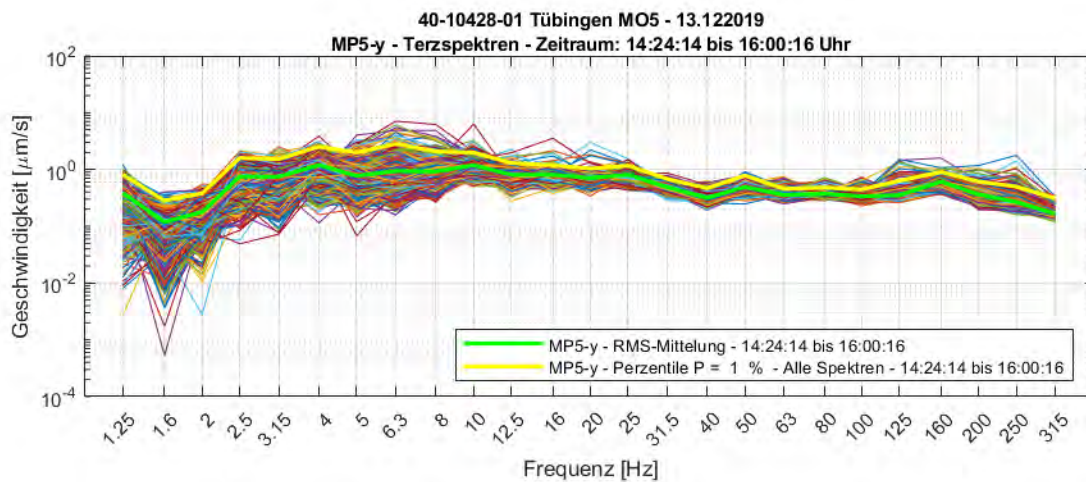
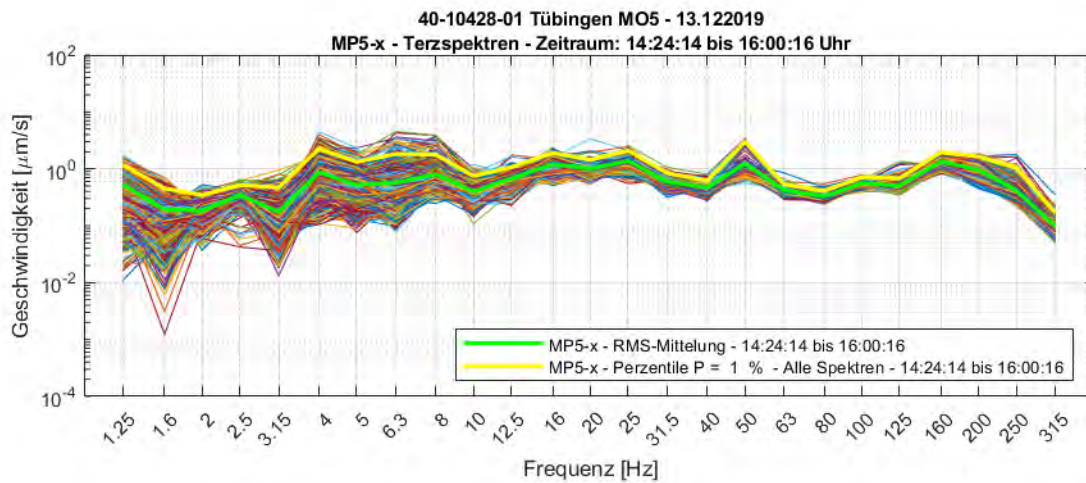
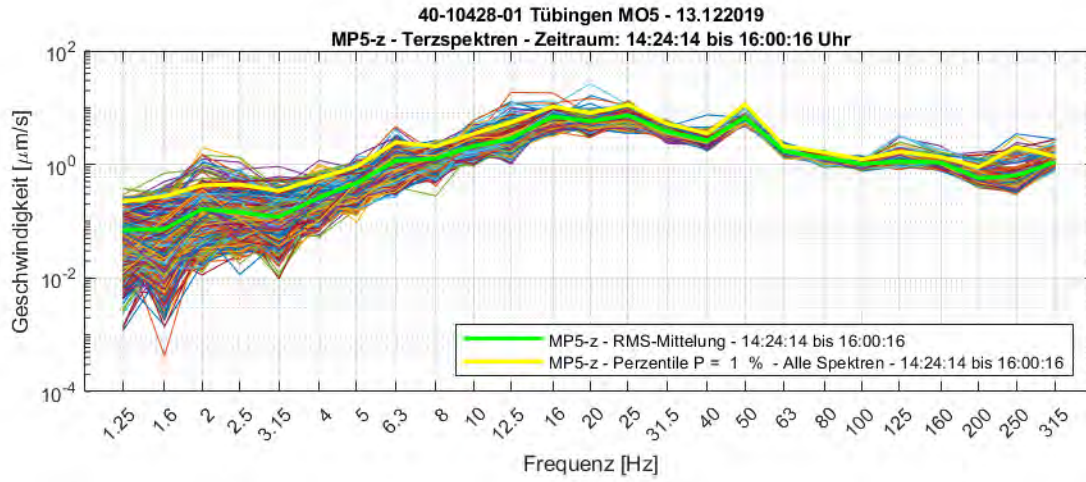
Folgende Messungen wurden am 03.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--|
| M1 | 2 Personen gehen im Flur |
| M2 | Fersenstoß |
| M3 | Ambiente Schwingungen & Magnetfeldänderungen und Admittanzmessung mittels Impulsanreger Dynpact® |

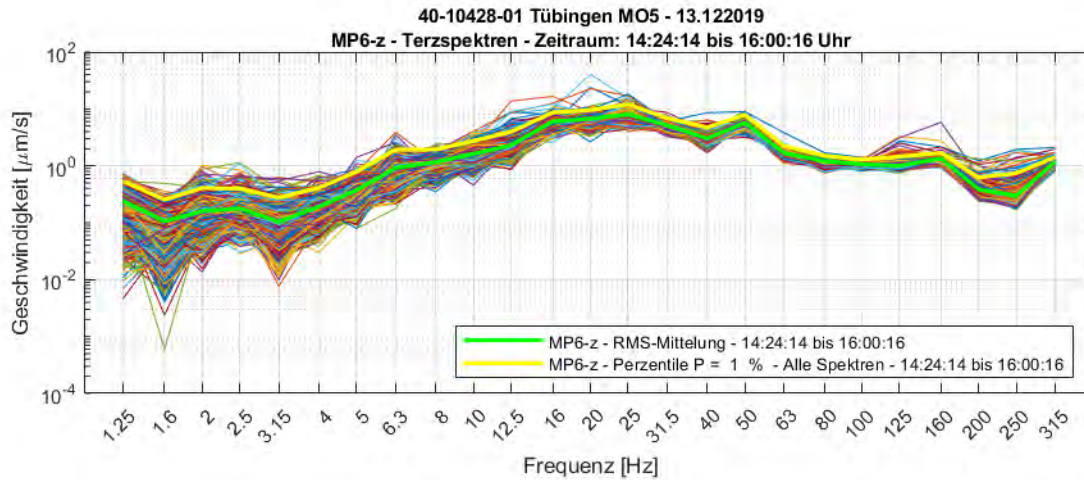
Tabelle 7-19: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO5

7.9.2 Schwingungspegel am MO5

4-Sekunden Terzspektren



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



Die nachfolgende Abbildung 7-22 sind die 1% Perzentile der Terzspektrern aller drei Raumrichtungen am Messort MO5 dargestellt. In vertikaler (z)-Richtung liegt die maximale Schwinggeschwindigkeit beim 12,0 µm/s, somit wird das Schwingungskriterium VC-C ($v \leq 12,5 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) knapp eingehalten. Die Schwinggeschwindigkeiten in horizontaler (x, y) Richtung liegt die maximale Schwinggeschwindigkeit bei 3,0 µm/s – damit wird das strenge Kriterium VC-E ($v \leq 3,1 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) knapp eingehalten. Zusätzlich sind weitere Peaks bei 50 Hz zu erkennen, welche auf den Betrieb von Gebäude- oder Versorgungstechnik zurückgeführt werden.

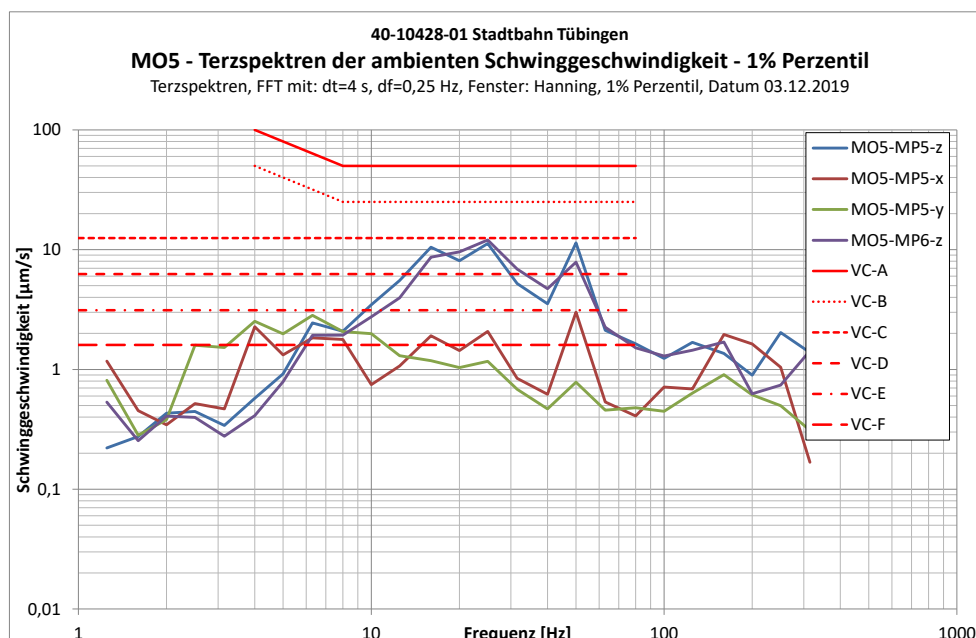


Abbildung 7-22: MO5 – Terzspektrern der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

Sonstige Anmerkungen

Es wurden hohe Schwinggeschwindigkeiten bei 50 Hz erfasst, welche wahrscheinlich auf den Betrieb von Pumpen, Lüftern, Kompressoren o.ä. zurückzuführen sind. Wenn diese Erschütterungsquellen

gefunden und angemessen Schwingungsisoliert werden, können die Schwingungen an MO4 deutlich reduziert werden, so dass das Schwingungskriterium VC-C eingehalten wird.

7.9.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO5 |
| Gebäude | Geb. E (E2) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 128m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-E |

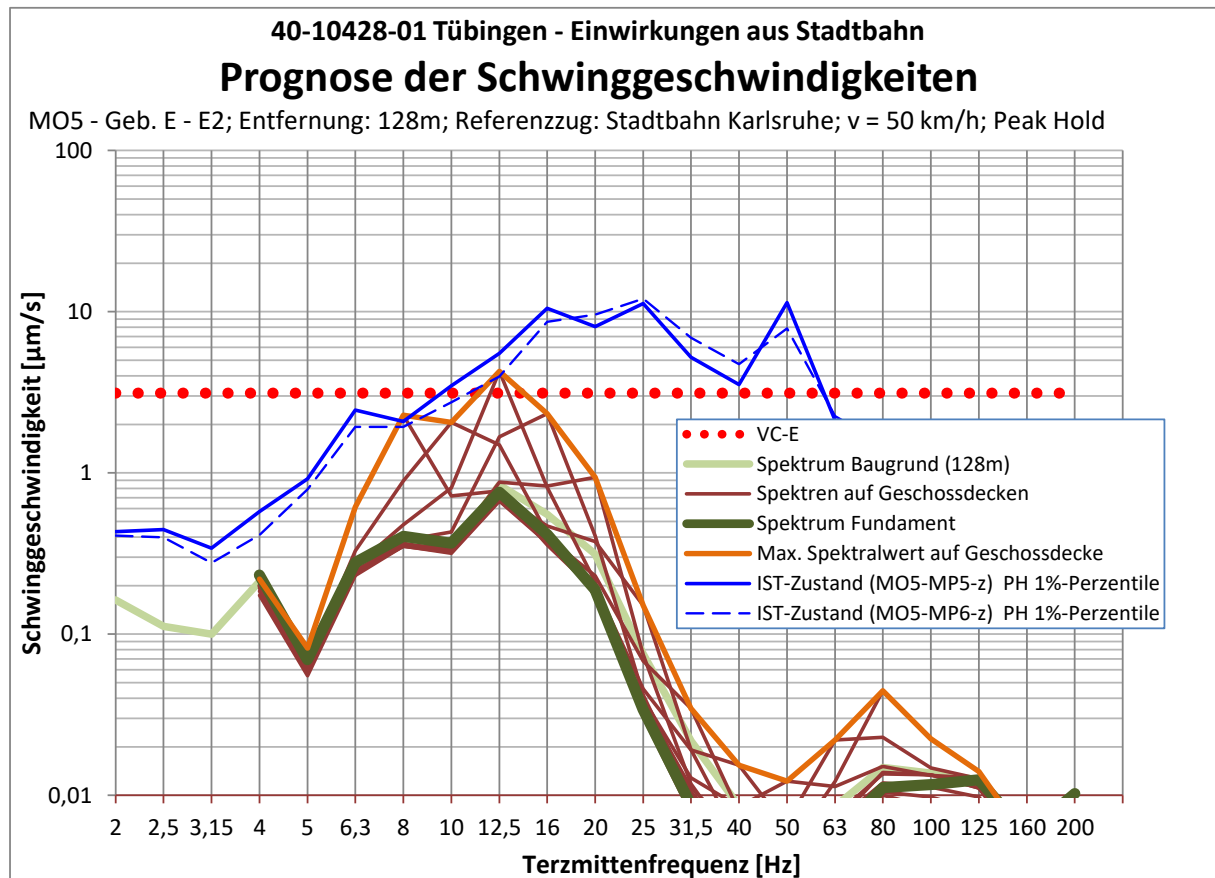
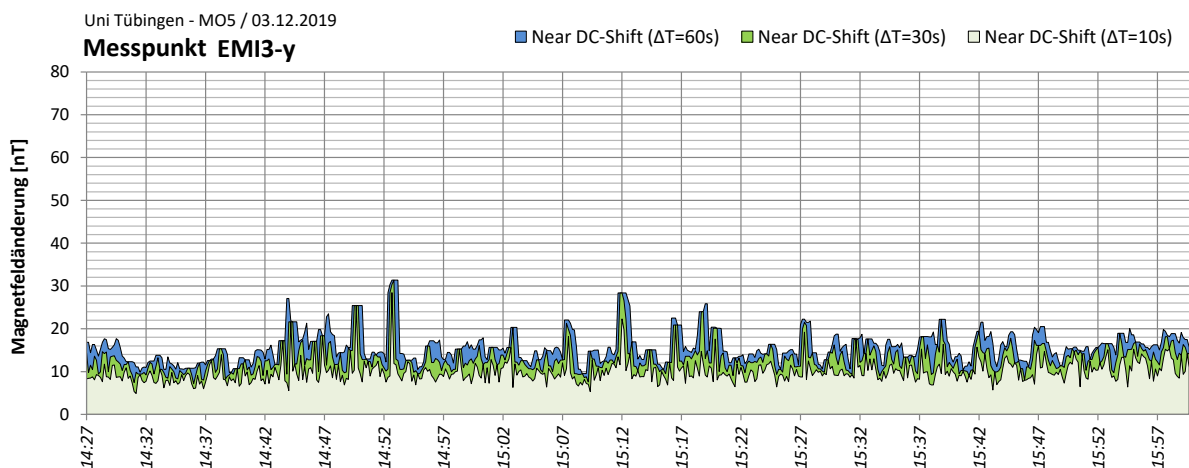
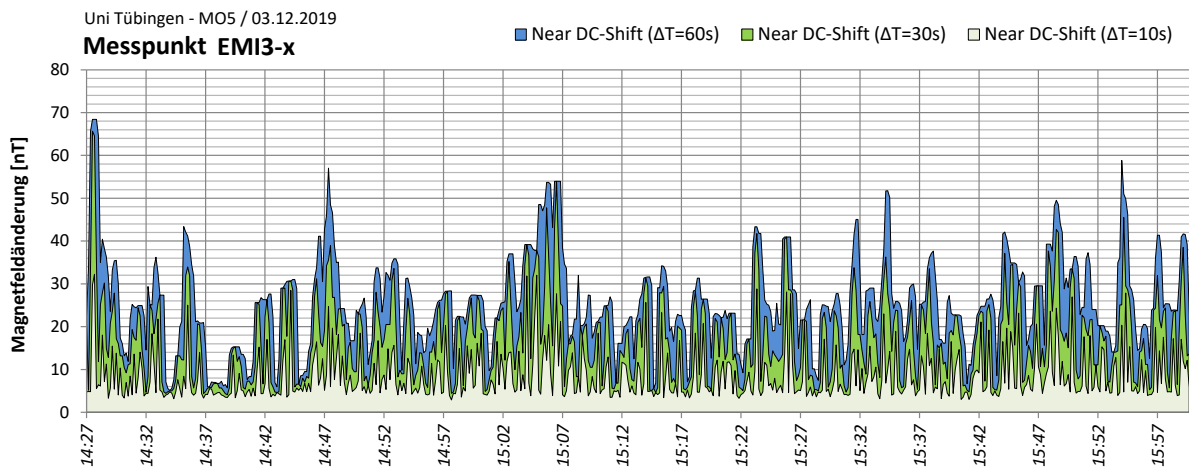
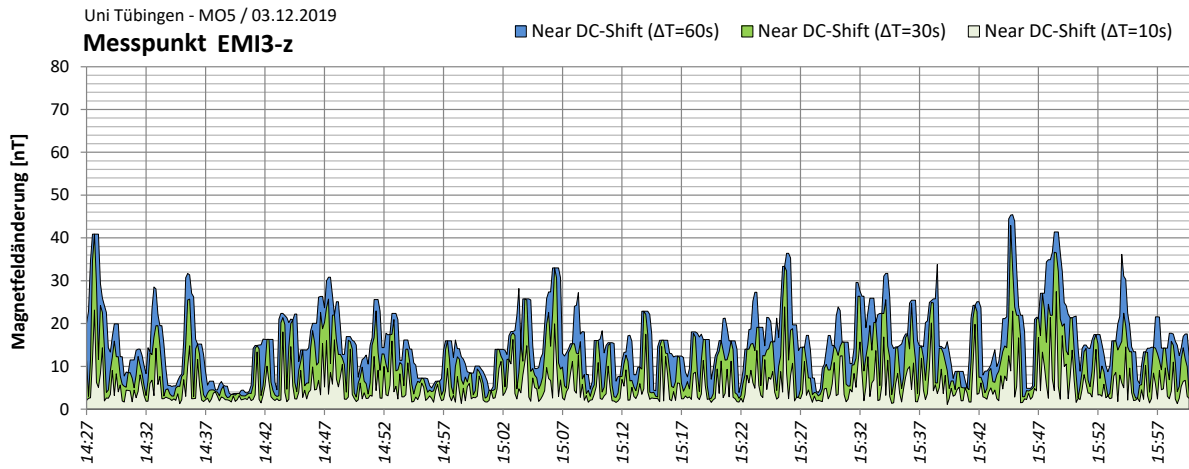


Abbildung 7-23: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO5

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

7.9.4 Near-DC Magnetfeldänderungen am MO5



Die oben dargestellten Abbildungen zeigen die Near-DC-Magnetfeldänderungen (Peak-to-Peak) am Messort MO5. Wahrscheinlich ist der nahegelegene Fahrstuhl die Ursache für die häufigen und mit ähnlichem Betrag auftretenden Magnetfeldänderungen. Mit maximal 68,4 nT ist die Near-DC-Magnetfeldänderung hier jedoch relativ gering.

In Abbildung 7-24 und Abbildung 7-25 ist der AC-Shift bei für die Frequenzen von 16 Hz und 50 Hz zu sehen.

Der AC-Shift liegt bei 16 Hz ist mit 32,7 nT und ist relativ niedrig. Der AC-Shift bei 50 Hz ist mit bis zu 307,6 nT deutlich höher und ist wahrscheinlich auf den Betrieb der Versorgungstechnik des NMR zurückzuführen.

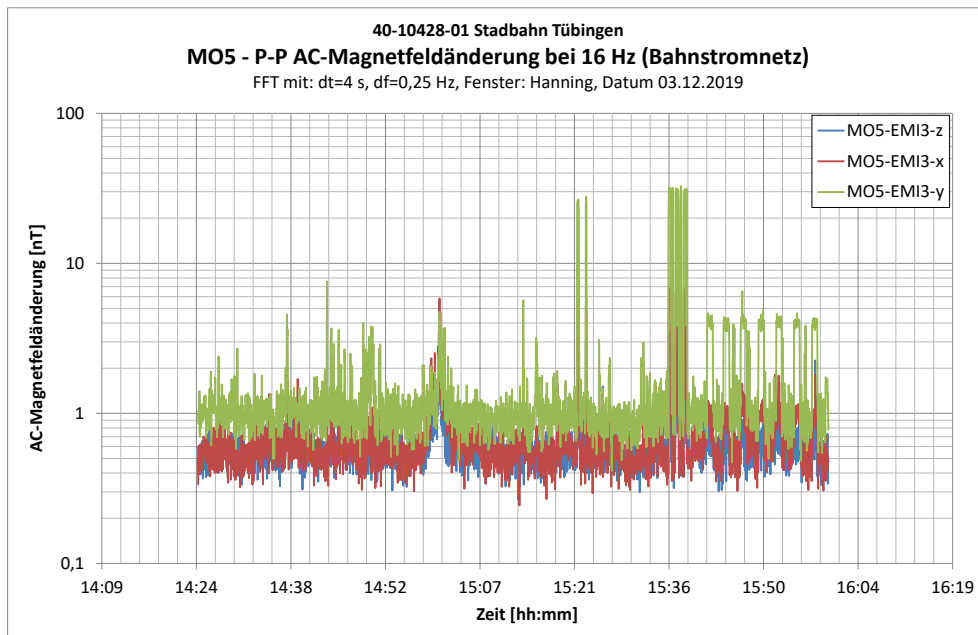


Abbildung 7-24: MO5 – AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz – Bahnstromnetz

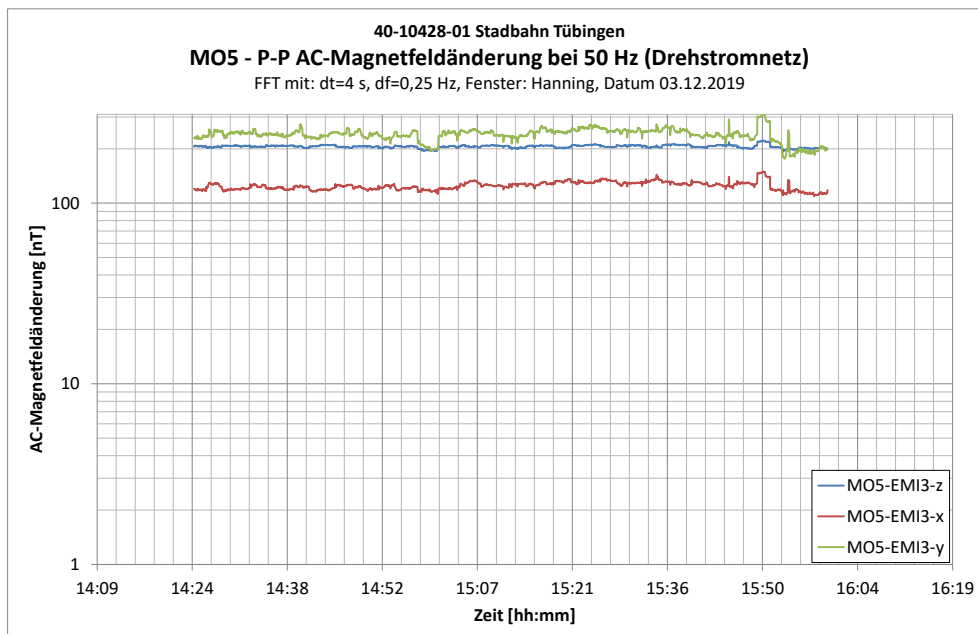


Abbildung 7-25: MO5 – AC-Magnetfeldänderung bei 50 Hz - Drehstromnetz

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

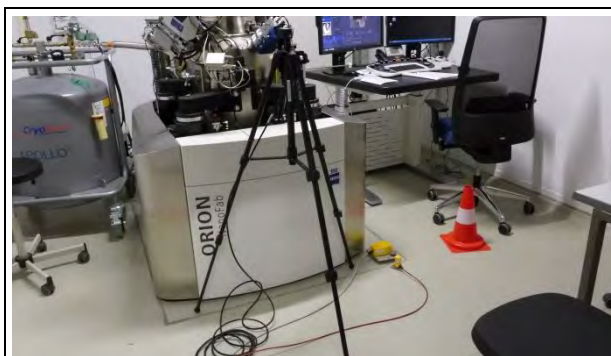
7.10 MO6 – Auf der Morgenstelle 15 (Verfügungsgebäude)

7.10.1 Dokumentation der Messung am MO6

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage / Raum | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
| 1 | MP1 | Z | 0127 Entkoppeltes Fundament | Dreifuß | G65 | +/- 2.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 2 | | X | | | | +/- 2.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 3 | | Y | | | | +/- 2.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 4 | EMI1 | Z | 0127 | Stativ h = 120 cm | S53 | +/- 100 [μT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |
| 7 | MP2 | Z | 0127 Bodenplatte | Dreifuß | G145 | +/- 2.000 [$\mu\text{m/s}$] |

Tabelle 7-20: Messpunkte an MO6

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].



MP1, MP2 und EMI1

Tabelle 7-21: Fotodokumentation der Messpunkte am MO6

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:

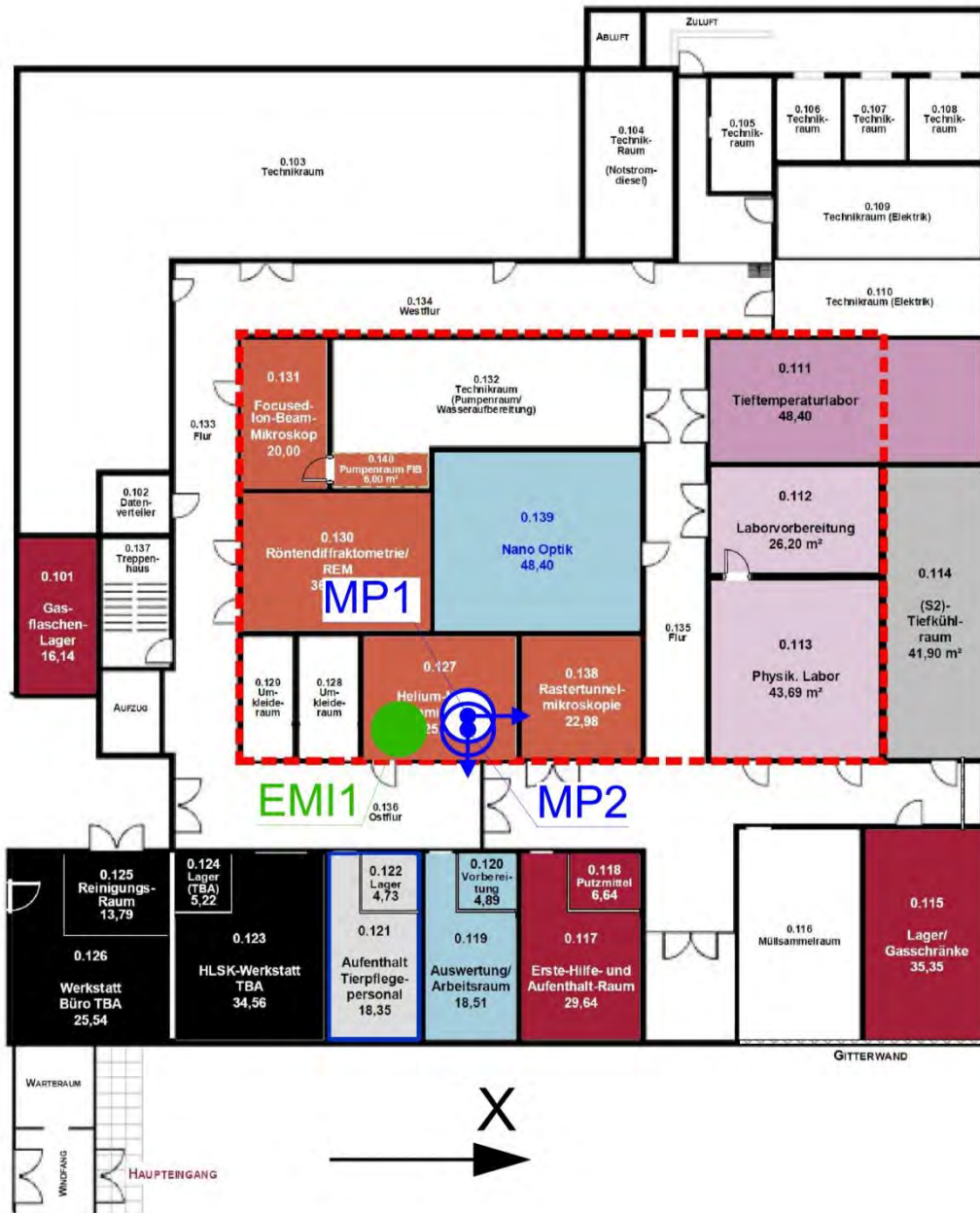


Abbildung 7-26: Lage der Messpunkte am MO6

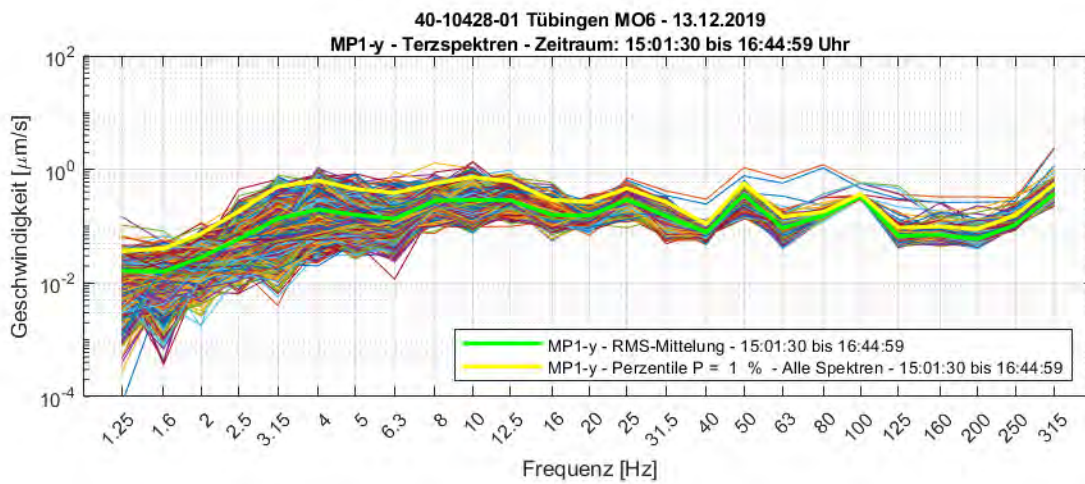
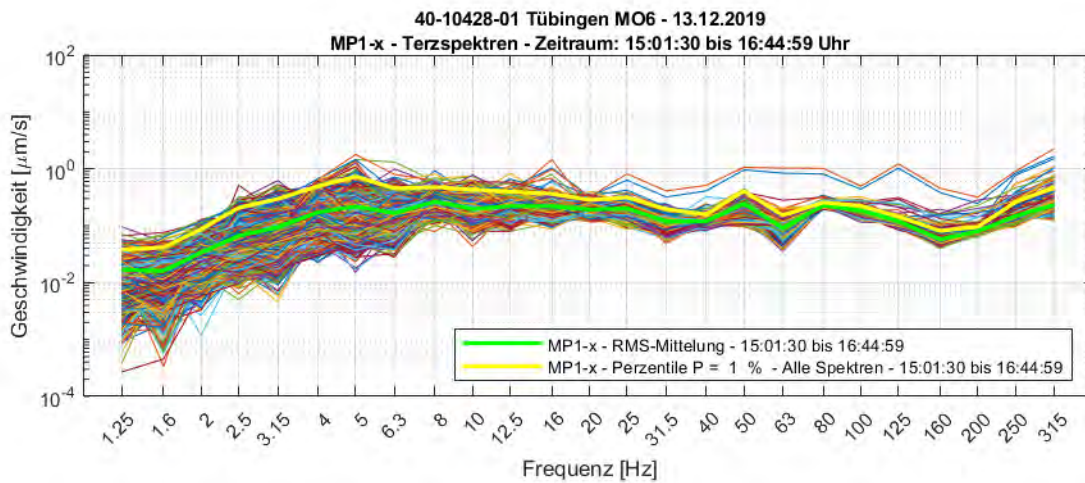
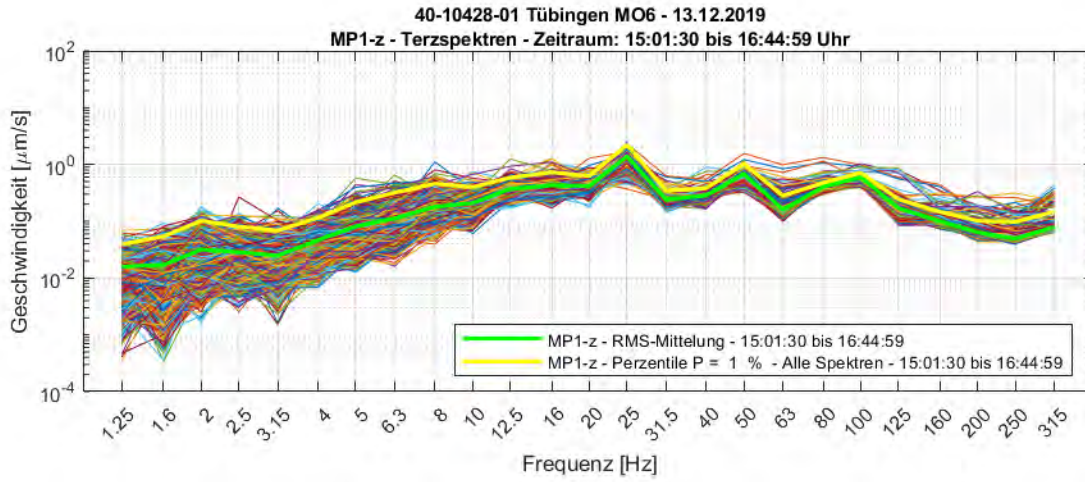
Folgende Messungen wurden am 03.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--|
| M1 | Fersenstoß auf Boden |
| M2 | Fersenstoß auf Fundament |
| M3 | 2 Personen gehen im Flur |
| M4 | Ambiente Schwingungen & Magnetfeldänderungen und Admittanzmessung mittels Impulsanreger Dynpact® |

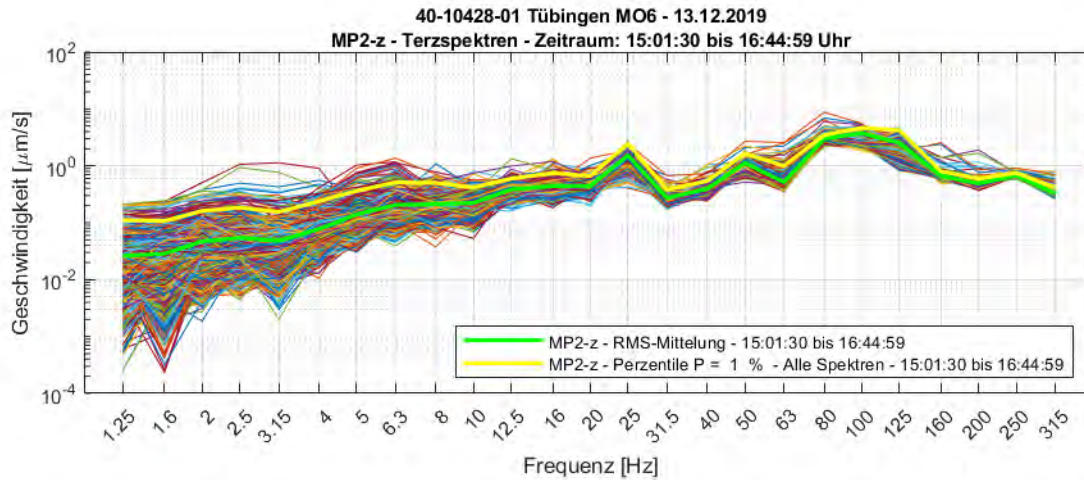
Tabelle 7-22: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO6

7.10.2 Schwingungspegel am MO6

4-Sekunden Terzspektren



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



Die nachfolgende Abbildung 7-27 zeigt die 1% Perzentile Terzspektrern aller drei Raumrichtungen am Messort MO6. Der Messpunkt MO6-MP1-z befand sich auf dem entkoppelten und elastisch gelagerten Bereich des Labors. MO6-MP2-z befindet sich auf der Gesamt-Bodenplatte des Gebäudes.

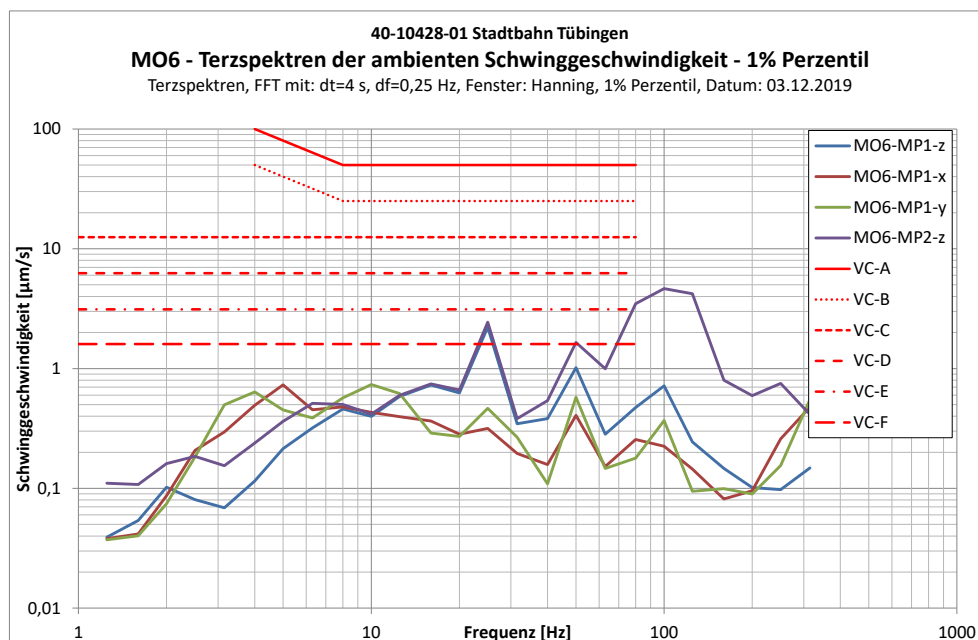


Abbildung 7-27: MO6 – Terzspektrern der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

Auf dem entkoppelten Fundamentbereich an MO6-MP1-z liegt die maximale vertikale Schwinggeschwindigkeit bei 4,6 µm/s und das Schwingungskriterium VC-D ($v \leq 6,25 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) wird eingehalten. In horizontaler Richtung wird das weniger strenge Kriterium VC-F eingehalten.

Auf der Gesamt-Bodenplatte des MO6-MP2-z Gebäudes liegen die Schwinggeschwindigkeiten im hochfrequenten Bereich deutlich höher als auf dem entkoppelten Beton-Fundament. Die Schwingungen auf dem entkoppelten Fundament-Bereich sind folglich günstiger. Dies kann durch die spezielle Anregungs-Charakteristik an MO6 erklärt werden. Dominante Schwingungs-Peaks sind vor allem im

hochfrequenten Bereich ($31,5 \leq f \leq 300$ Hz) festzustellen. Diese hochfrequente Anregung ist auf gebäudeinterne Aktivitäten zurückzuführen wie den Betrieb von Haustechnik (Pumpen, Lüfter, Kompressoren) und das Vorbeifahren mit Rollwagen auf dem unebenen Bodenbelag außerhalb des Labors.

7.10.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO6 |
| Gebäude | Verfügungsgebäude (KG) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 319m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | - |
| Tool-Spezifikation | Orion NanoFab |

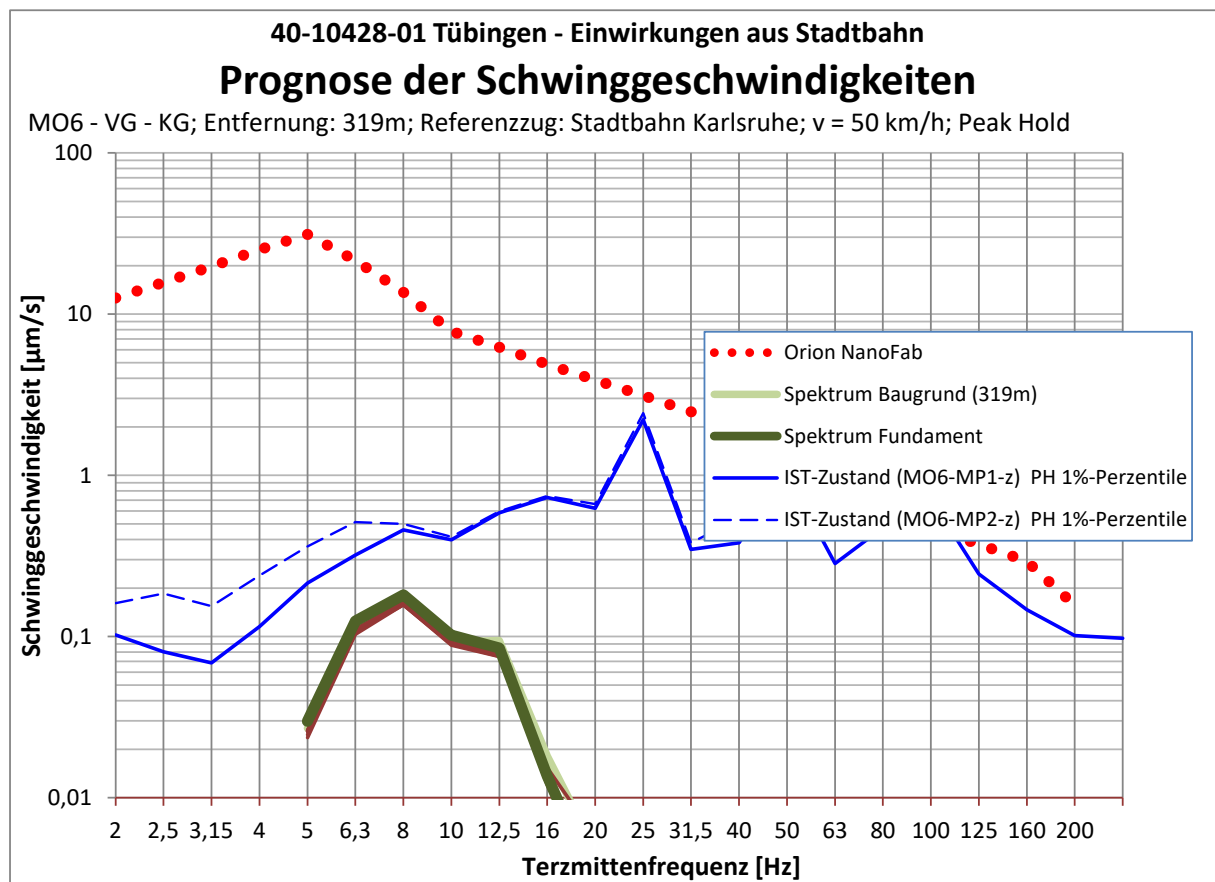
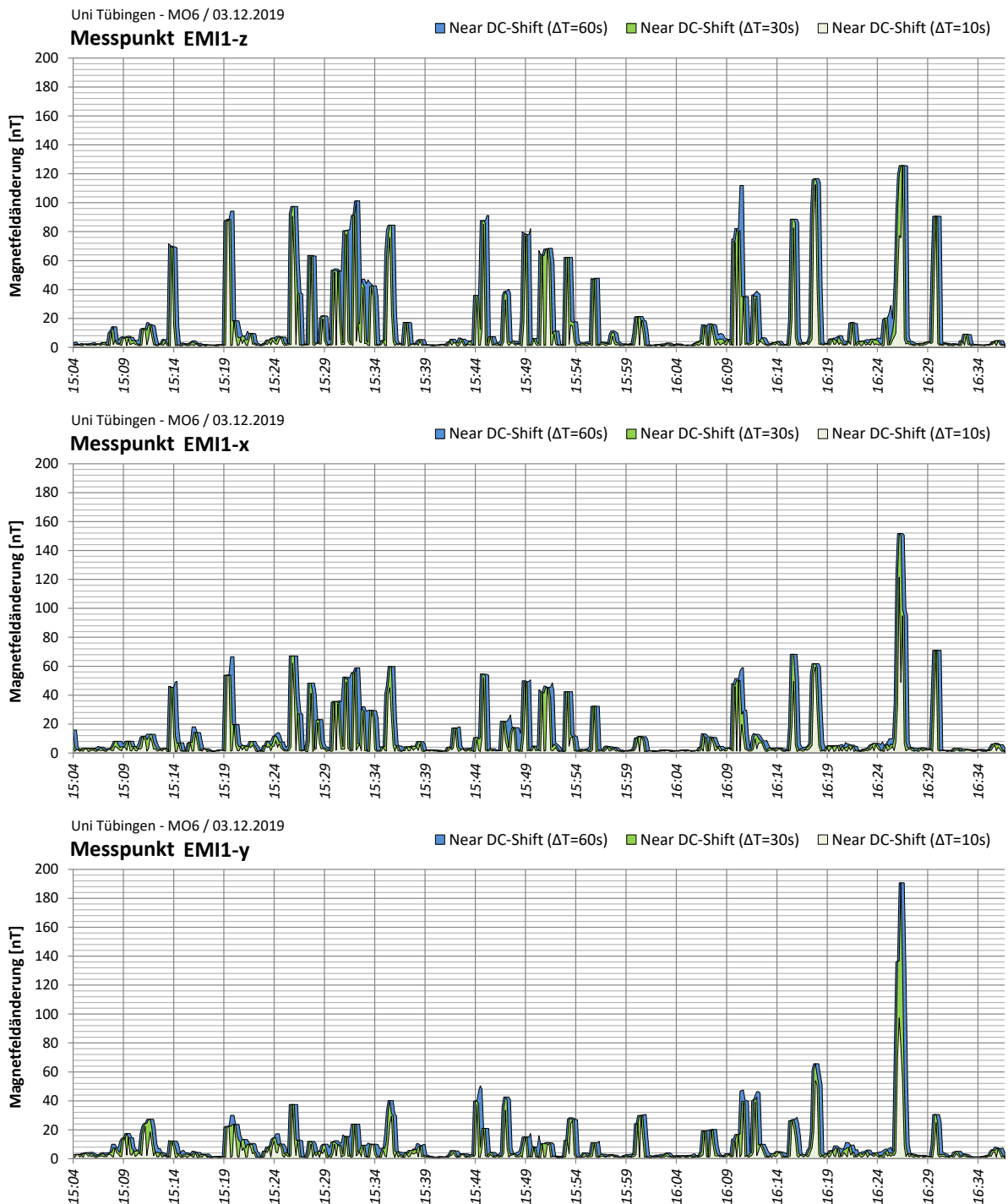


Abbildung 7-28: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO6

7.10.4 Near-DC Magnetfeldänderungen am MO6



Die oben dargestellten Abbildungen zeigen die Near-DC-Magnetfeldänderungen (Peak-to-Peak) am Messort MO6. Bei der Änderung der Near-DC (statischen) Magnetfelder ist ein dominanter Peak gegen 16:26 Uhr zu erkennen, der einen Maximalwert von 190,7 nT erreicht. Dieser vergleichsweise

hohe Wert ist wahrscheinlich auf den Betrieb des nahegelegenen Fahrstuhls zurückzuführen. Über die verbleibende Messdauer ist die Near-DC Magnetfeldänderung mit < 70 nT deutlich geringer.

Die Magnetfeldänderung der AC-Wechselfelder ist in Abbildung 7-29 und Abbildung 7-30 für die maßgebenden Frequenzen 16 Hz und 50 Hz dargestellt. Der AC-Shift bei 16 Hz liegt mit maximal 3,8 nT sehr niedrige, was an dem großen Abstand von MO6 zur nächstgelegenen Vollbahn-Linie liegt.

Die AC-Wechselfelder bei 50 Hz weisen hingegen einen vergleichsweise hohen Wert von bis zu 273,0 nT auf. Dieser hohe Wert wird auf den Betrieb von Gebäude- oder Versorgungstechnik zurückgeführt.

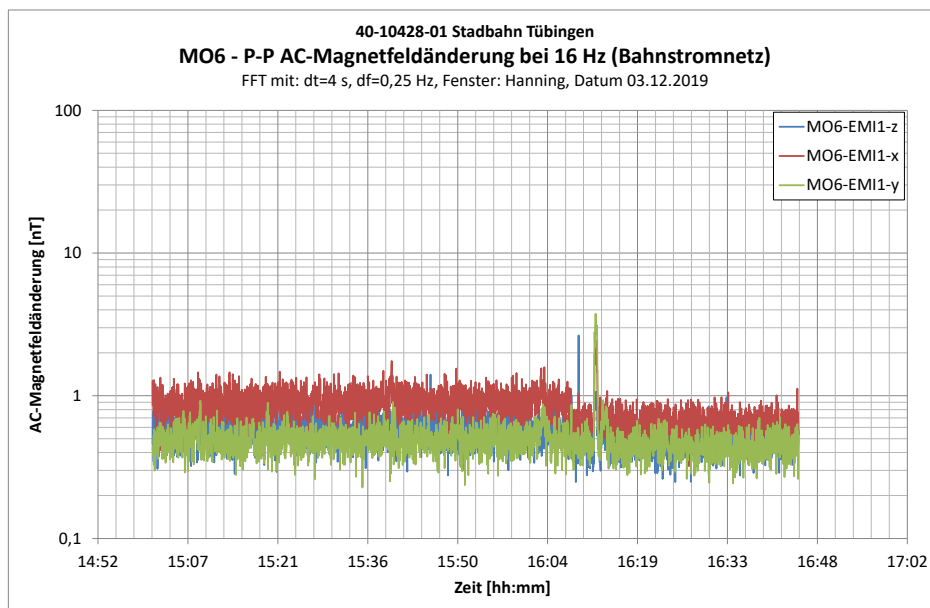


Abbildung 7-29: MO6 – AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz – Bahnstromnetz

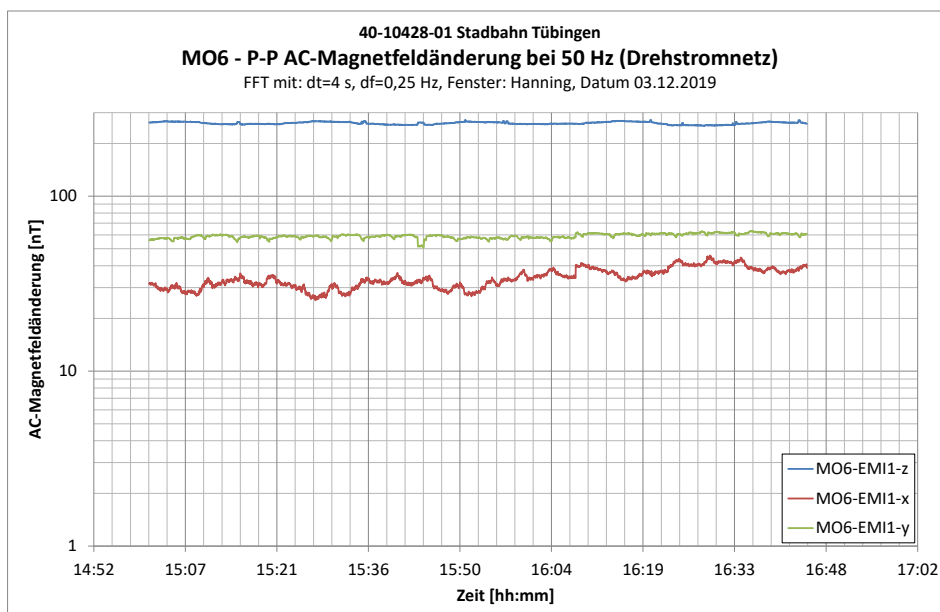


Abbildung 7-30: MO6 – AC-Magnetfeldänderung bei 50 Hz - Drehstromnetz

7.11 MO7 – Auf der Morgenstelle 94/96 (GUZ KG)

7.11.1 Dokumentation der Messung am MO7

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage / Raum | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------|------------------|
| 1 | MP7 | Z | 2M03 | Dreifuß | G52 | +/- 5.000 [µm/s] |
| 2 | | X | | | | +/- 5.000 [µm/s] |
| 3 | | Y | | | | +/- 5.000 [µm/s] |
| 4 | EMI4 | Z | 2M03 | Stativ h = 120 cm | S37 | +/- 100 [µT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [µT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [µT] |
| 7 | MP8 | Z | 2M03 | Dreifuß | G146 | +/- 5.000 [µm/s] |

Tabelle 7-23: Messpunkte an MO7

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].

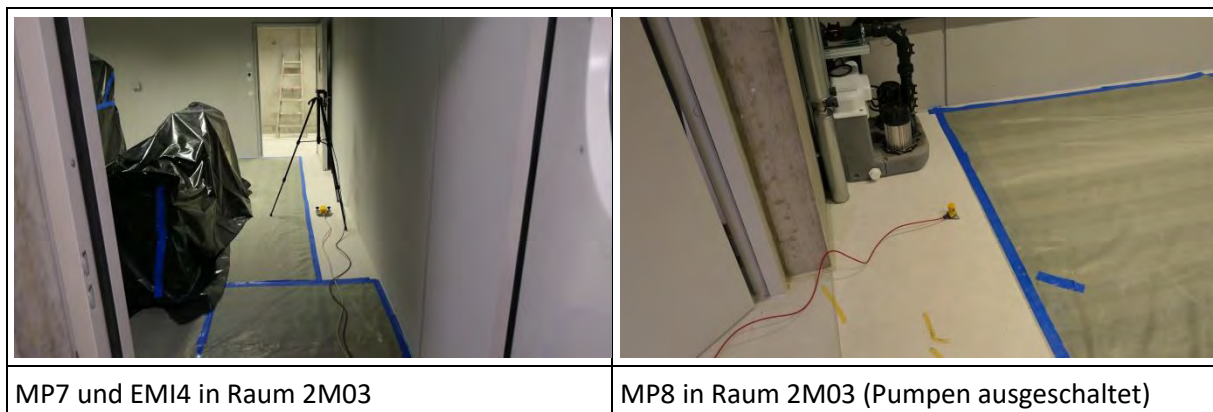


Tabelle 7-24: Fotodokumentation der Messpunkte am MO7

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:

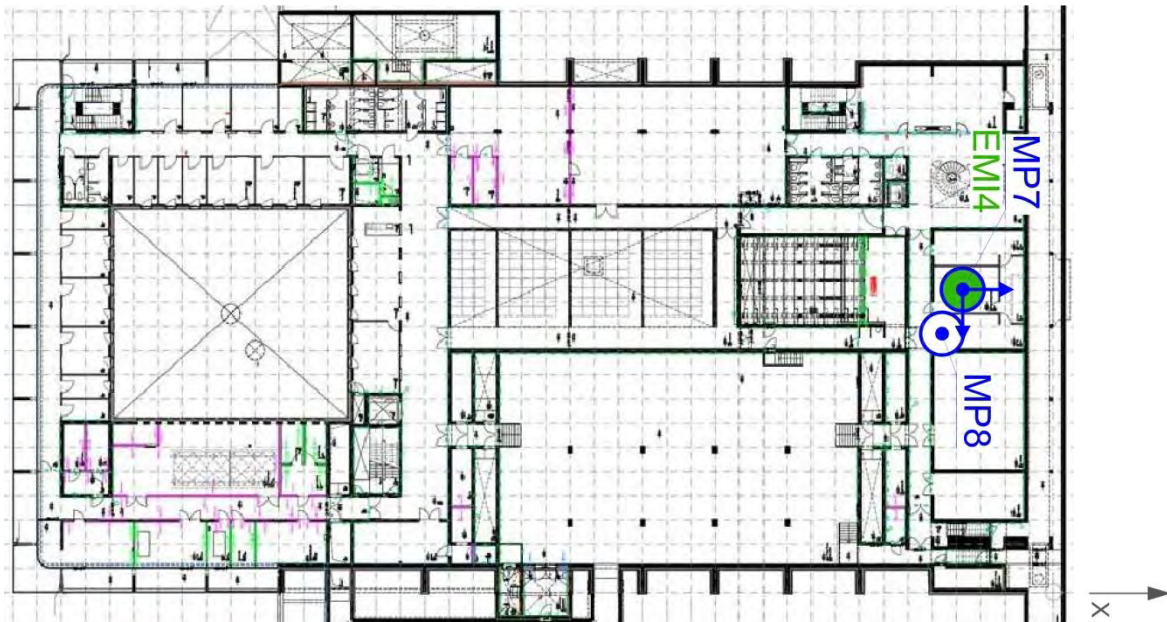


Abbildung 7-31: Lage der Messpunkte am MO7

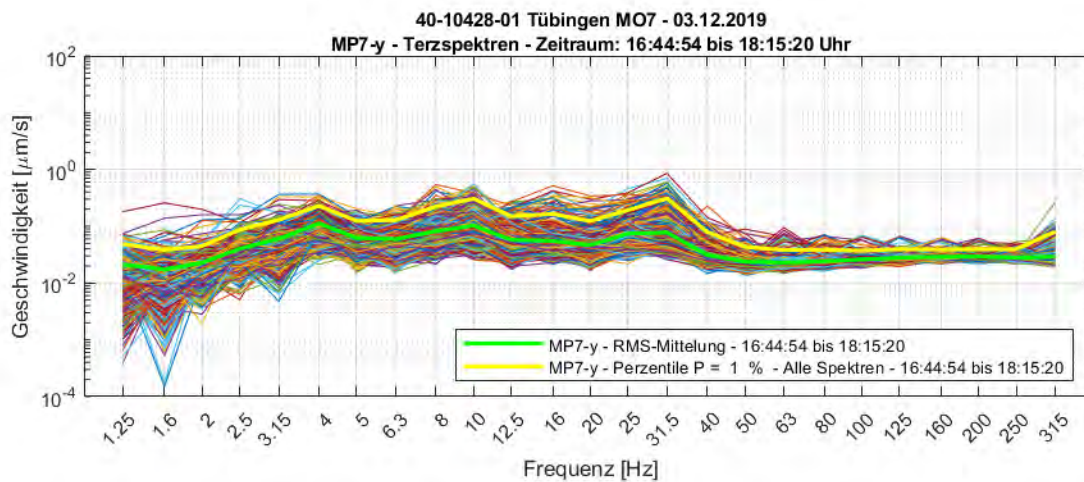
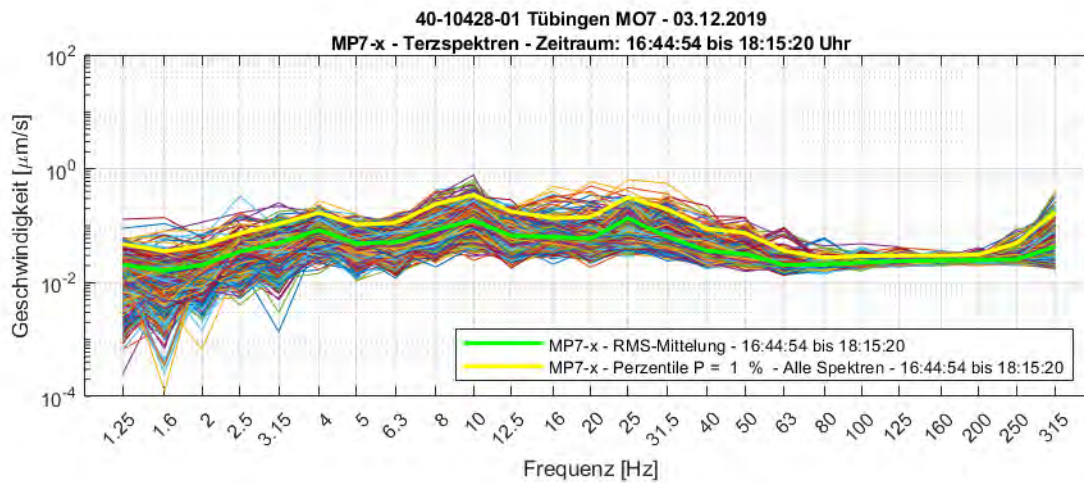
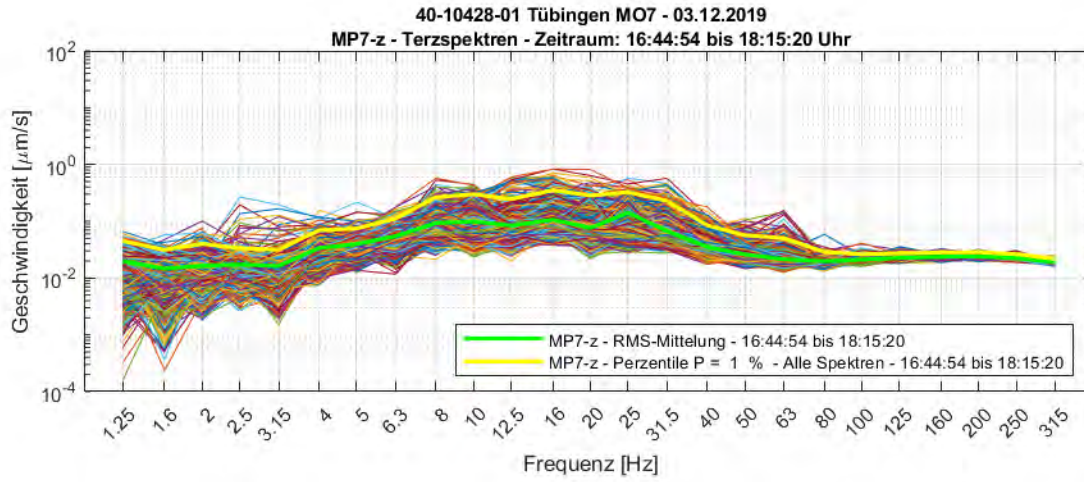
Folgende Messungen wurden am 03.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--|
| M1 | 2 Personen gehen im Flur |
| M2 | Fersenstoß |
| M3 – M6 | Ambiente Schwingungen & Magnetfeldänderungen und Admittanzmessung mittels Impulsanreger Dynpact® |

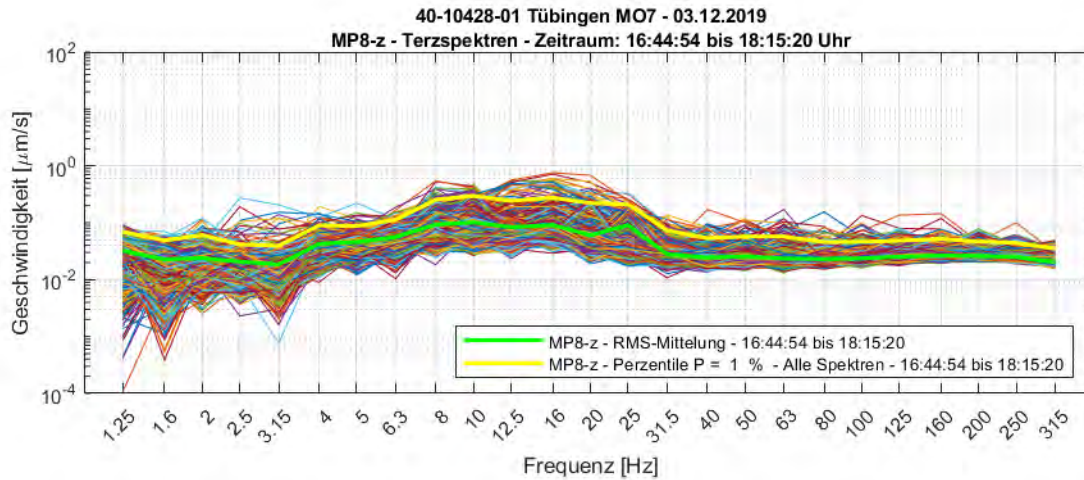
Tabelle 7-25: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO7

7.11.2 Schwingungspegel am MO7

4-Sekunden Terzspektren



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



In der nachfolgenden Abbildung 7-32 sind die 1% Perzentile der Terzspektren aller drei Raumrichtungen auf der Bodenplatte im Neubau GUZ zu sehen. Zum Zeitpunkt der Messung war keine Gebäude- oder Versorgungstechnik in Betrieb und es folgten keine Arbeiten im GUZ. An Hand der VC-Linien in Abbildung 7-32 ist direkt ersichtlich, dass die Schwinggeschwindigkeiten im GUZ besonders niedrig und damit sehr günstig sind.

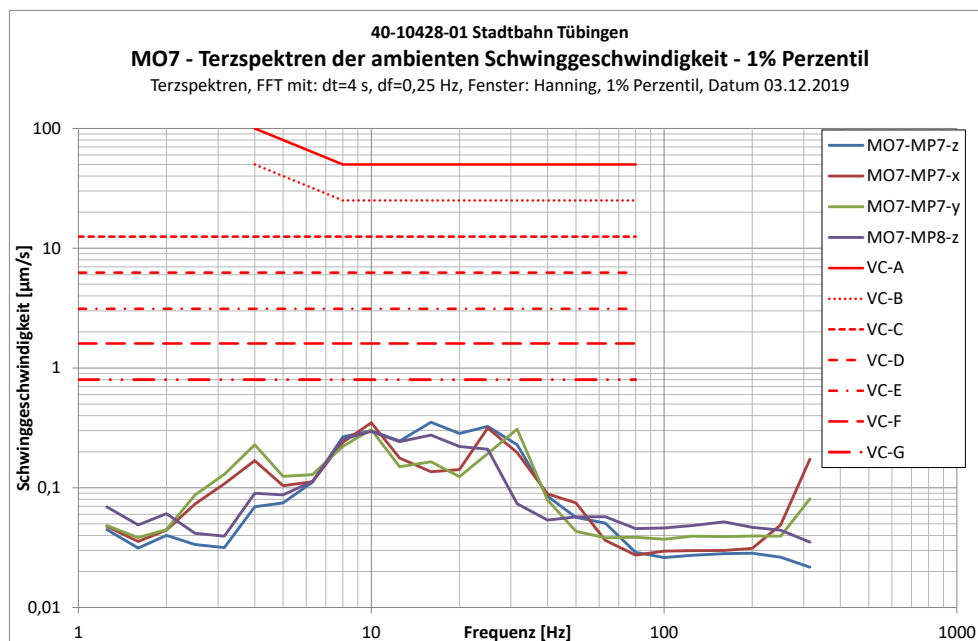


Abbildung 7-32: MO7 – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

Der Messpunkt MO7-MP7-z befand sich auf dem entkoppelten Bodenplattenbereich des Labors – hier wird eine maximale Schwinggeschwindigkeit von 0,35 µm/s erreicht. Damit wird das besonders strenge Kriterium VC-G ($v \leq 0,8 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$).

Auf der Gesamt-Bodenplatte (MO7-MP8-z) liegt die Schwinggeschwindigkeit nochmals niedriger und erreicht einen Maximalwert von 0,29 $\mu\text{m/s}$, womit ebenfalls das strenge Schwingungskriterium VC-G ($v \leq 0,8 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten wird.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Schwingungen bei vollem Betrieb der Gebäude- und Versorgungstechnik sowie bei größeren, im Flur gehenden Personengruppen, ansteigen werden.

Sonstige Anmerkungen

In Abbildung 7-33 ist ein Ausschnitt der 1% Perzentile der Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit dargestellt (gleiche Daten wie in Abbildung 7-32). Es ist ersichtlich, dass die Schwinggeschwindigkeiten auf der Bodenplatte des Gesamt-Gebäudes (MO7-MP8-z) und der entkoppelten Bodenplatte (MO7-MP7-z) bis zu einer Frequenz von 12,5 Hz nahezu identisch sind.

Für Frequenzen von 12,5 Hz bis 50 Hz sind die Schwinggeschwindigkeiten auf der Gesamt-Bodenplatte des Gebäudes (MO7-MP8-z) jedoch deutlich niedriger, als auf dem entkoppelten Laborbereich (MO7-MP7-z). Falls die Entkopplung bzw. elastische Lagerung des Laborbereiches zur Schwingungsreduktion geplant war, wird dies nicht erreicht. Die elastische Lagerung des Laborbereiches führt – in weiten Frequenzbereichen - zu einer Erhöhung der Schwingungen in diesem.

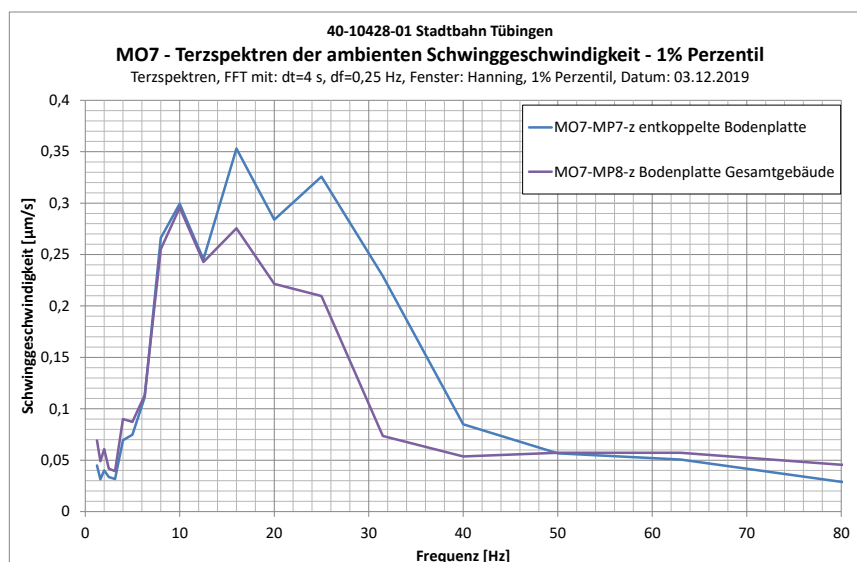


Abbildung 7-33: MO7 –Schwinggeschwindigkeit auf Gesamt-Gebäudefundament (MP8) und entkoppeltem Labor (MP7)

7.11.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO7 |
| Gebäude | GUZ (E2; KG) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 144m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | - |
| Tool-Spezifikation | VC-F |

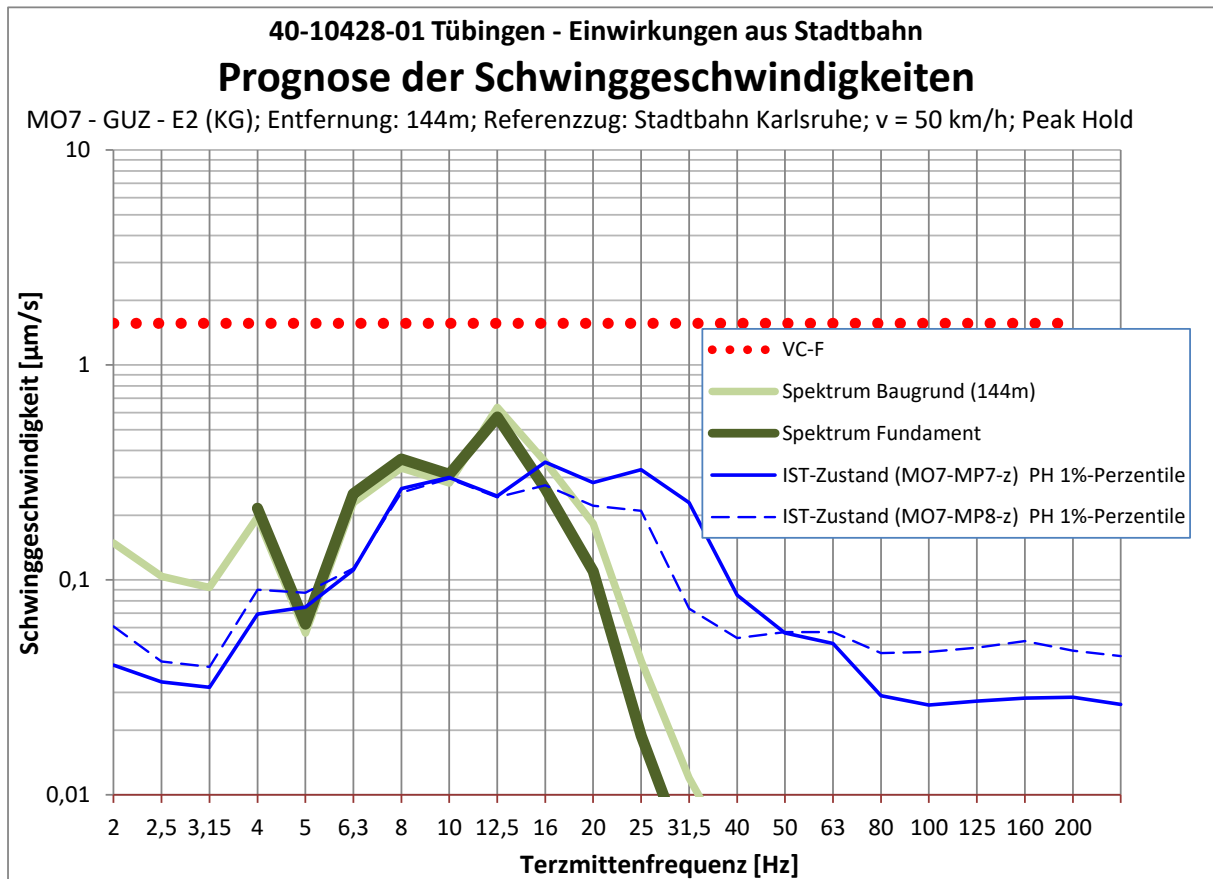
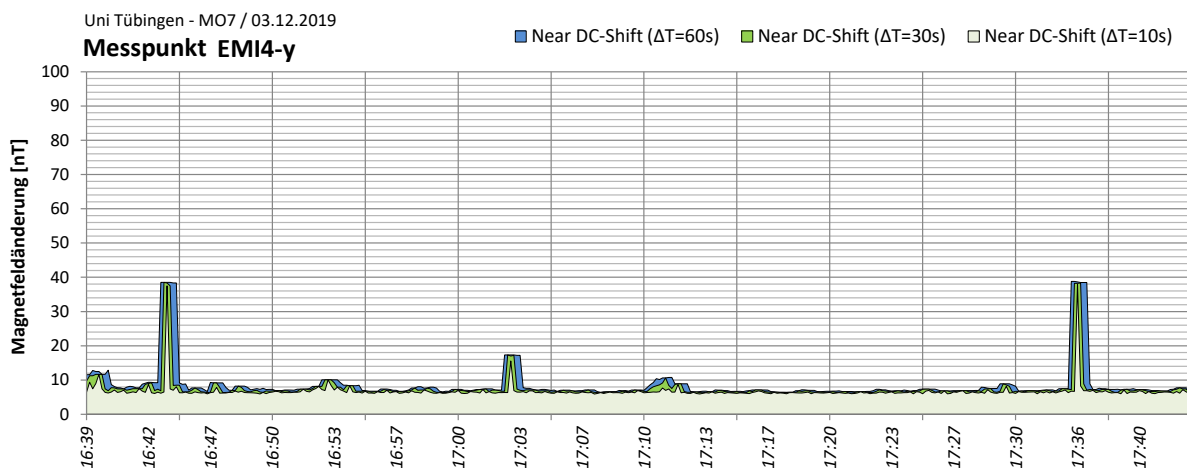
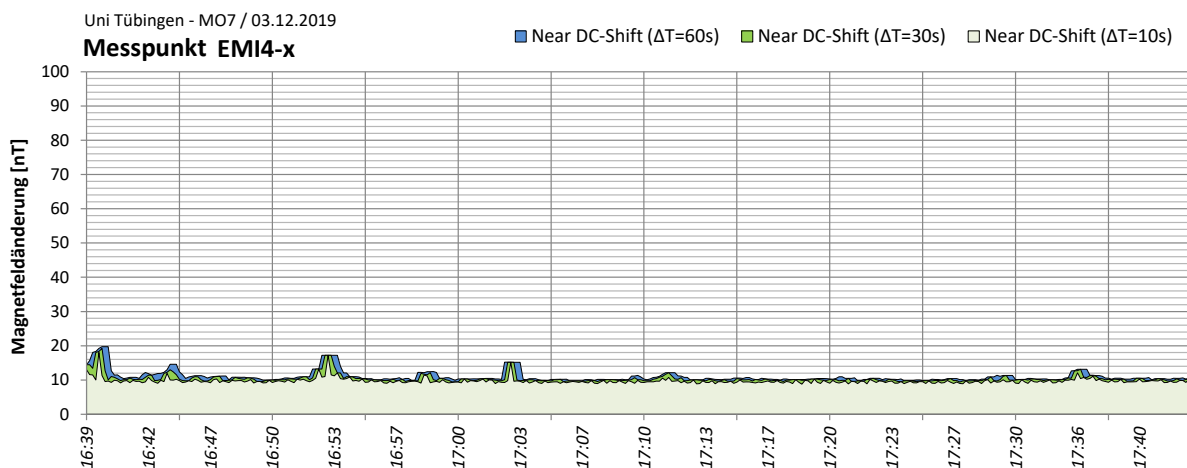
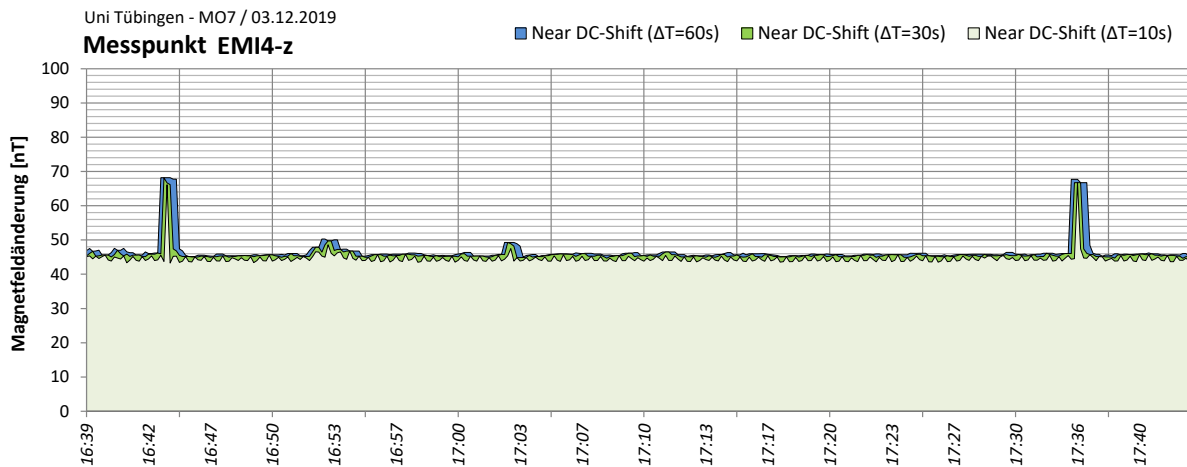


Abbildung 7-34: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO7

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

7.11.4 Near-DC Magnetfeldänderungen am MO7



Die oben dargestellten Abbildungen zeigen die Near-DC-Magnetfeldänderungen (Peak-to-Peak) am Messort MO7; die Near-DC-Magnetfeldänderung wurde hier mit einem 5 Hz Low-Pass Filter ausgewertet, da dort eine dominante Anregung im Frequenzbereich von 1 Hz bis 2 Hz vorliegt. Mit 68,2 nT liegt der maximale Near-DC Shift jedoch relativ gering.

Da MO7 in großer Entfernung zur nächsten Bahnlinie liegt und die Gebäudetechnik noch nicht in Betrieb war, sind die AC-Magnetfeldänderungen sehr niedrig. Bei 16 Hz (Bahnstromnetz) liegt der maximale AC-Shift bei nur 2,6 nT, bei 50 Hz (Drehstromnetz) bei 5,5 nT.

Vor allem die Wechselfelder bei 50 Hz werden bei Vollbetrieb der Gebäude- und Versorgungstechnik deutlich zunehmen.

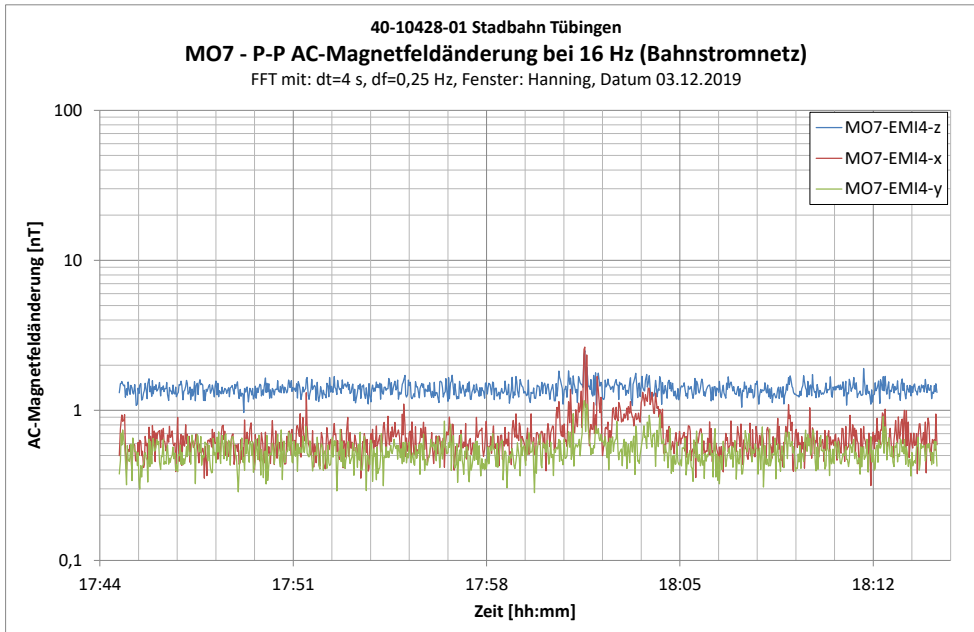


Abbildung 7-35: MO7 – AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz – Bahnstromnetz

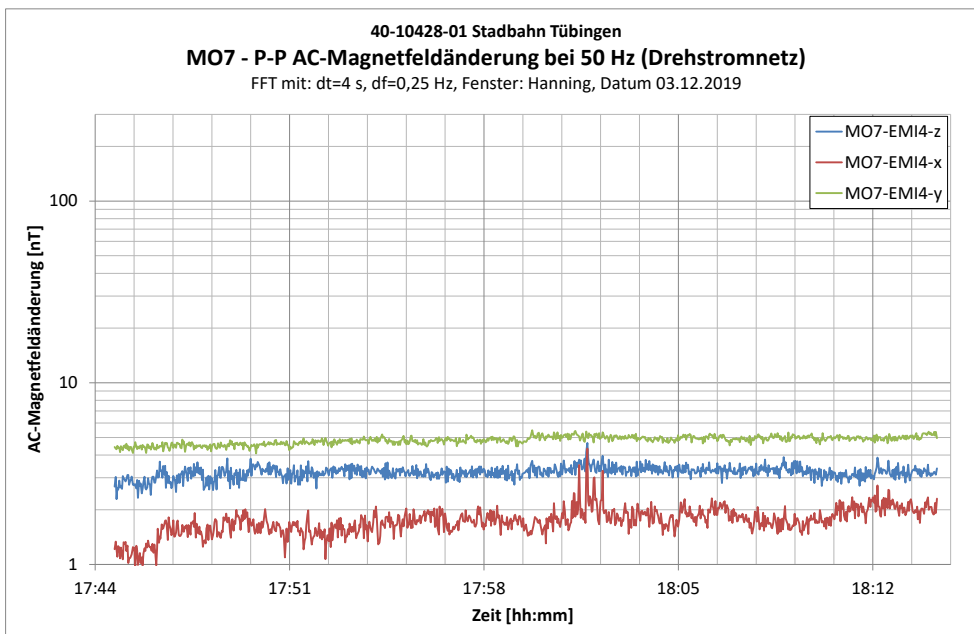


Abbildung 7-36: MO7 – AC-Magnetfeldänderung bei 50 Hz - Drehstromnetz

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

7.12 MO8 – Auf der Morgenstelle 32 (ZMBP KG)

7.12.1 Dokumentation der Messung am MO8

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage / Raum | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|--|-----------------------------------|--------|------------------|
| 1 | MP9 | Z | 1L21 | Dreifuß | G52 | +/- 5.000 [µm/s] |
| 2 | | X | Stahlplatte auf Elastomer in Laser-Labor | | | +/- 5.000 [µm/s] |
| 3 | | Y | Laser-Labor | | | +/- 5.000 [µm/s] |
| 4 | EMI5 | Z | 1L21 | Stativ h = 120 cm | S37 | +/- 100 [µT] |
| 5 | | X | Stahlplatte auf Elastomer in Laser-Labor | | | +/- 100 [µT] |
| 6 | | Y | Laser-Labor | | | +/- 100 [µT] |
| 7 | MP10 | Z | 1L21 - Fundament | Dreifuß | G146 | +/- 5.000 [µm/s] |

Tabelle 7-26: Messpunkte an MO8

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].

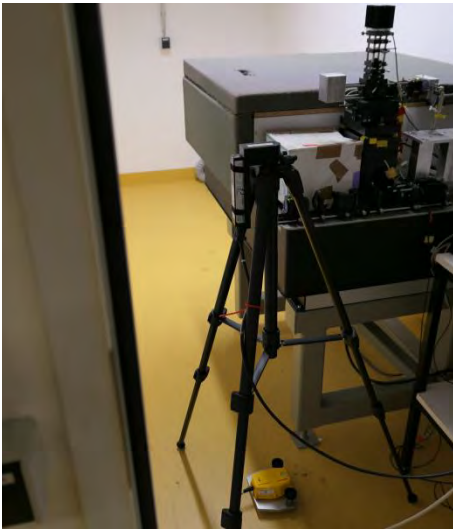
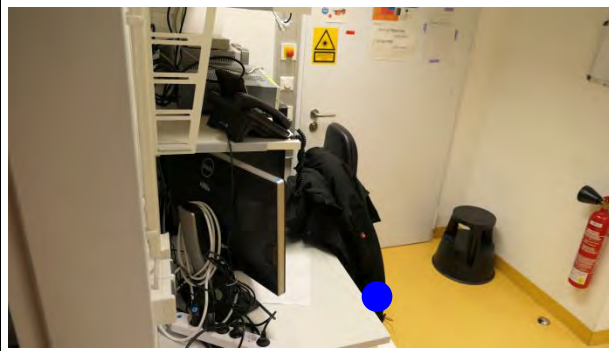
| | |
|---|--|
|  |  |
| MP9 und EMI5 in Raum 1L21 | MP10 in Raum 1L21 |

Tabelle 7-27: Fotodokumentation der Messpunkte am MO8

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:

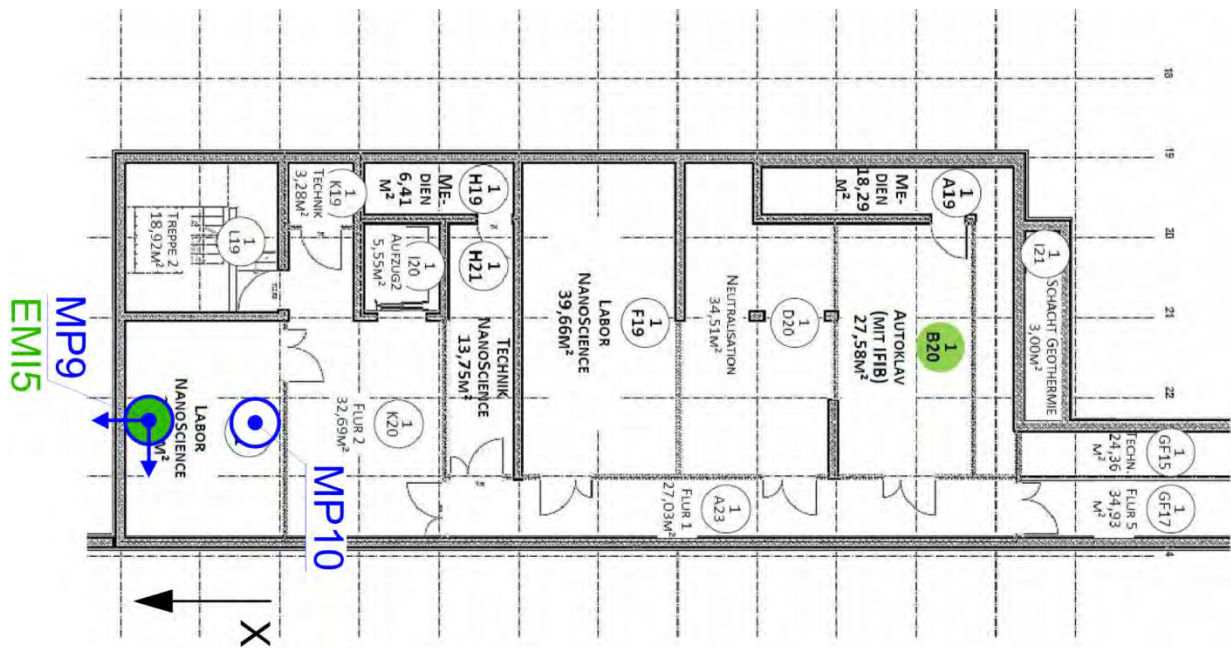


Abbildung 7-37: Lage der Messpunkte am MO8

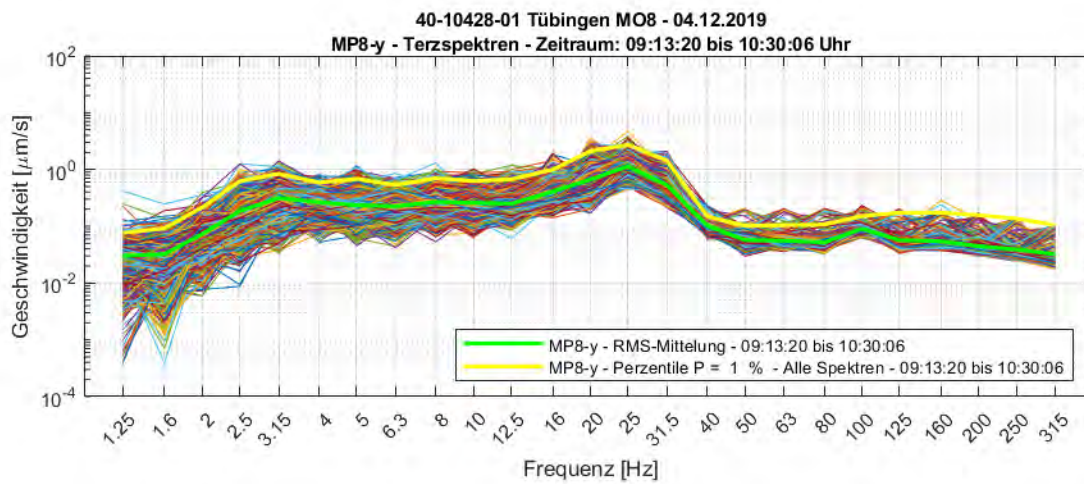
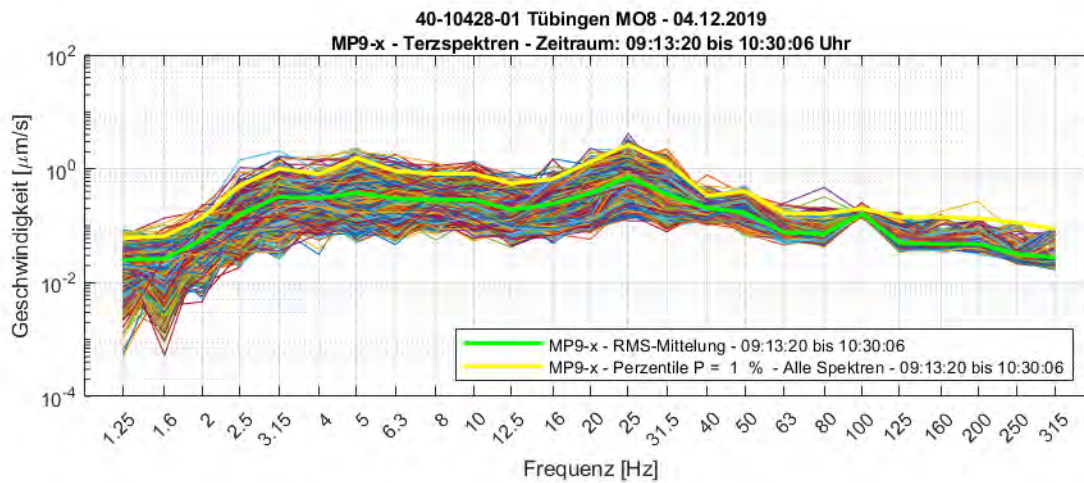
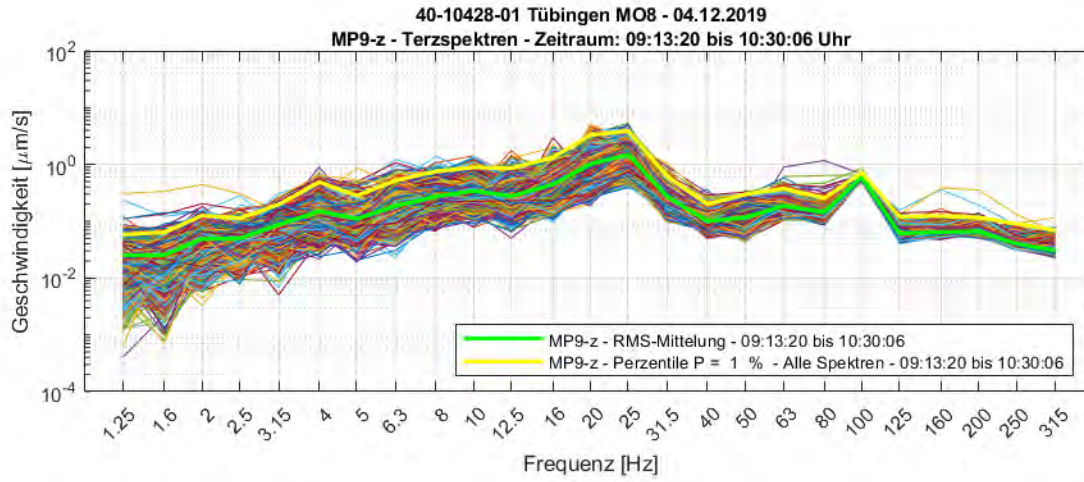
Die Tür zum Laserlabor (Stahlplatte) war während der Messungen geschlossen. Folgende Messungen wurden am 04.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--|
| M1 | 2 Personen gehen im Flur |
| M2 | Fersenstoß |
| M3 | Ambiente Schwingungen & Magnetfeldänderungen und Admittanzmessung mittels Impulsanreger Dynpact® |

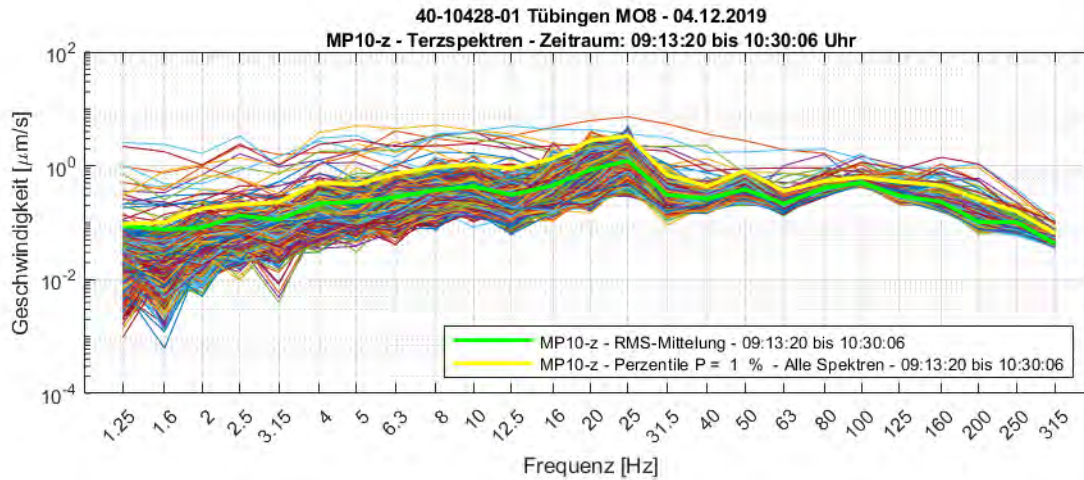
Tabelle 7-28: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO8

7.12.2 Schwingungspegel am MO8

4-Sekunden Terzspektren



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



Die nachfolgende Abbildung 7-38 zeigt das 1% Perzentil der Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit an MO8. In vertikaler Richtung liegt die maximale Schwinggeschwindigkeit bei 3,9 µm/s – damit wird das strenge Schwingungskriterium VC-D ($v \leq 6,25 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten. In horizontaler Richtung liegt der Maximalwert der Schwinggeschwindigkeit bei 2,7 µm/s und es wird das Kriterium VC-E ($v \leq 3,1 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten.

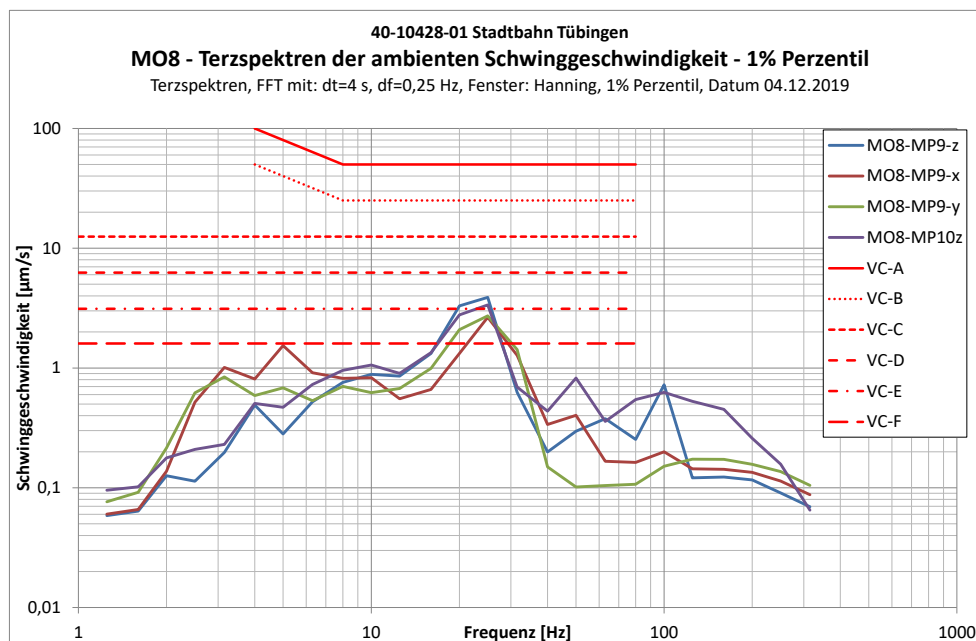


Abbildung 7-38: MO8 – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

Sonstige Anmerkungen

Im untersuchten Laborbereich wurden zwei Messpunkte für die Schwingungsmessung instrumentiert: einer befand sich auf der Bodenplatte des Gesamtgebäudes (MO8-MP10-z), der andere auf einer elastisch gelagerten Stahlplatte (MO8-MP10-z). Die nachfolgende Abbildung 7-39 zeigt einen

vergrößerten Ausschnitt der 1% Perzentile der Schwinggeschwindigkeit (gleiche Daten wie in Abbildung 7-38) zur besseren Vergleichbarkeit.

Das Maximum der Schwinggeschwindigkeit wird bei einer Frequenz von 25 Hz erreicht. Auf der Gesamt-Bodenplatte des Gebäudes (MO8-MP10-z) liegt die maximale Schwinggeschwindigkeit bei 3,4 $\mu\text{m/s}$, auf der entkoppelten Stahlplatte des Labors bei 3,9 $\mu\text{m/s}$ – also um etwa 15% höher und somit ungünstiger. In den übrigen Frequenzbereichen – bei denen die absoluten Schwinggeschwindigkeiten deutlich niedriger liegen – variiert das Verhalten frequenzabhängig stark. In bestimmten Frequenzbereichen sind die Schwinggeschwindigkeiten in dem entkoppelten Labor niedriger (= günstiger), in andere dafür höher (= ungünstiger) als auf der Gesamt-Bodenplatte des Gebäudes.

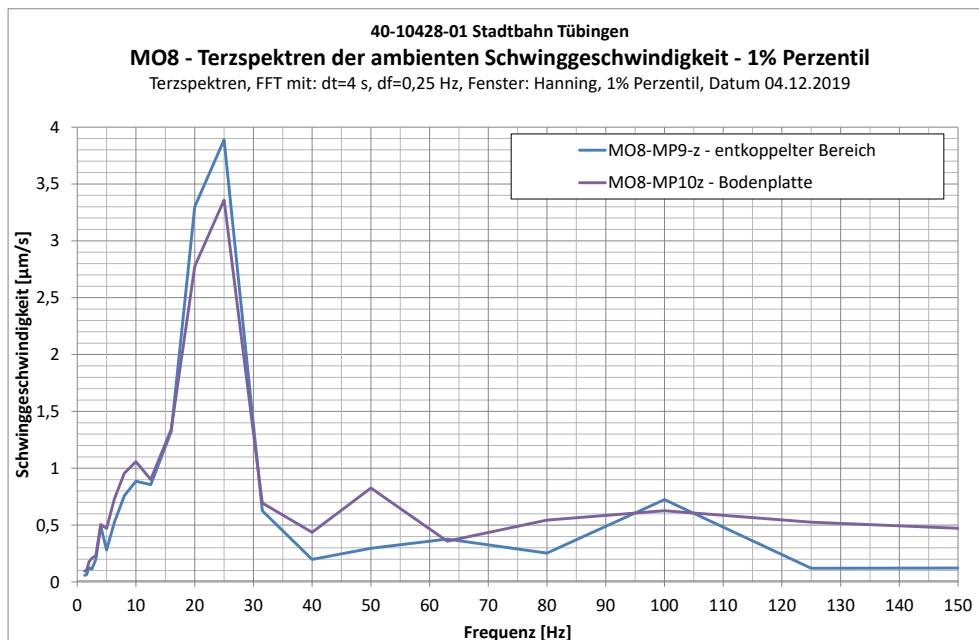


Abbildung 7-39: MO8 – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

7.12.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO8 |
| Gebäude | ZMBP (E1; KG) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 210m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | - |
| Tool-Spezifikation | VC-D |

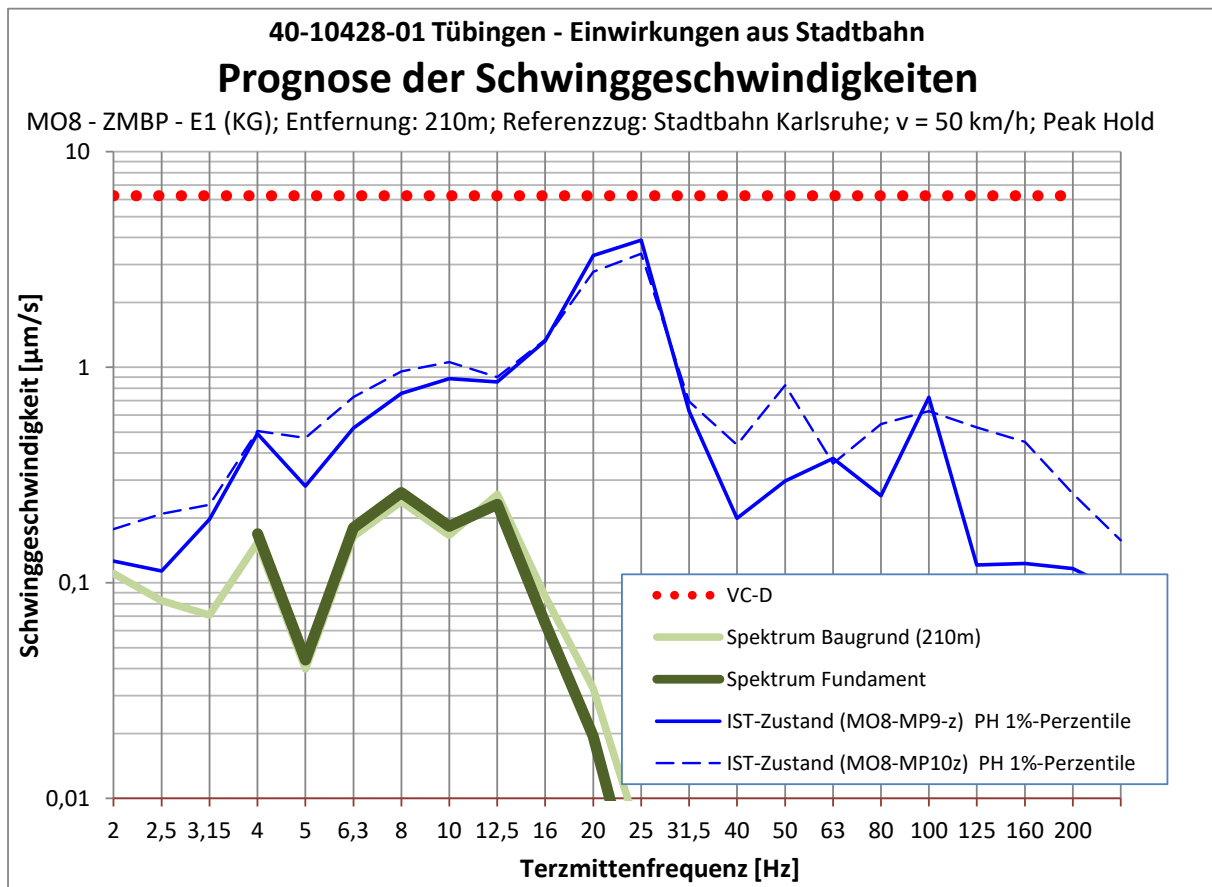
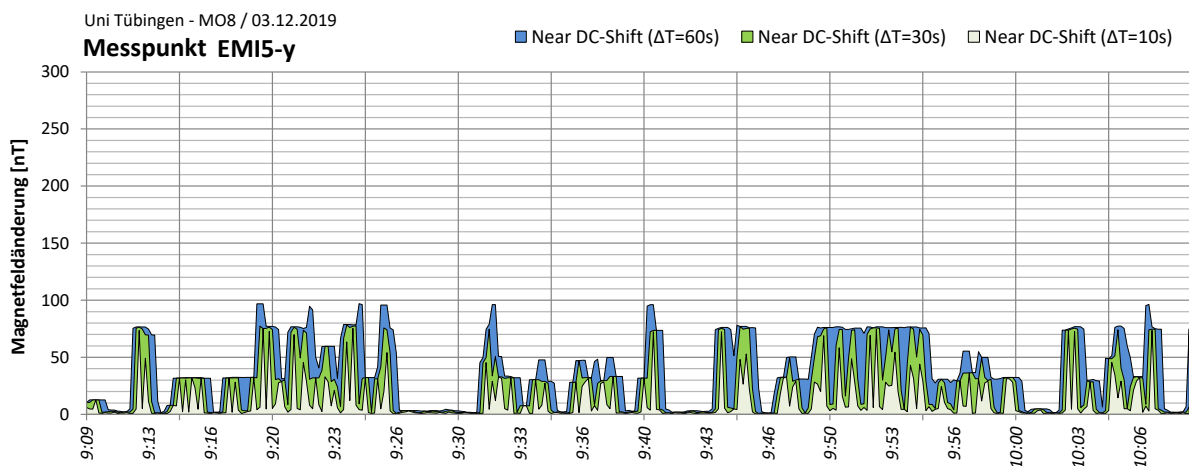
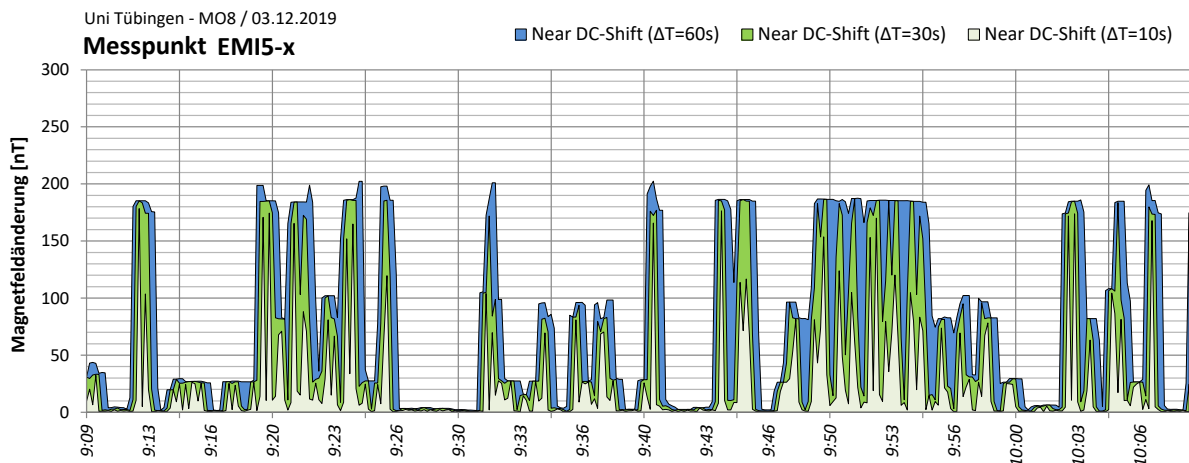
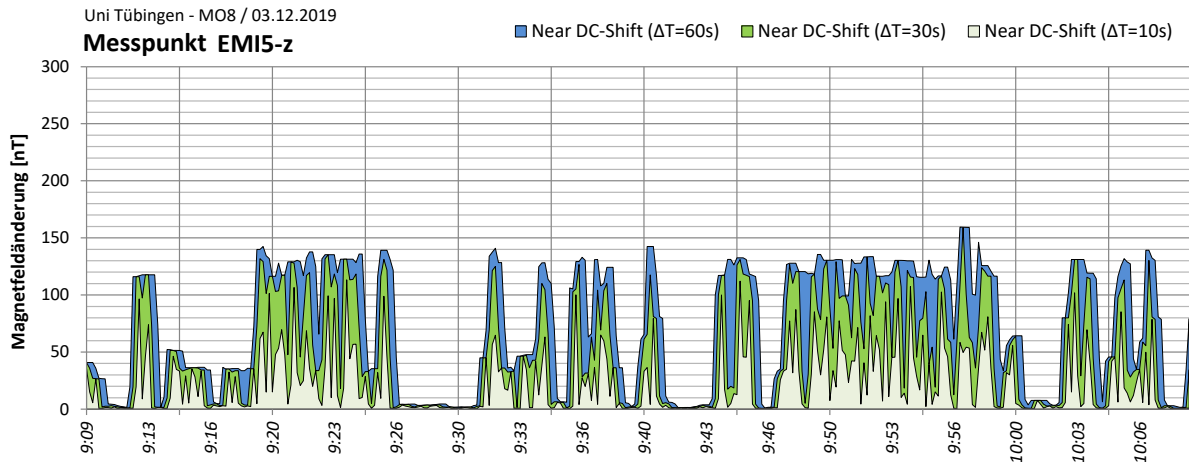


Abbildung 7-40: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO8

7.12.4 Near-DC Magnetfeldänderungen am MO8



Die oben dargestellten Abbildungen zeigen die Near-DC-Magnetfeldänderungen (Peak-to-Peak) am Messort MO8. Es sind viele hohe Peaks mit dazwischen liegenden „Ruhezeiten“ zu erkennen. Die hohen Peaks können eindeutig auf den Betrieb des direkt angrenzenden Fahrstuhls zurückgeführt werden. Während der Fahrstuhlvorbeifahrt liegt die maximale Near-DC-Magnetfeldänderung bei bis

zu 202,4 nT. In den Zeiten ohne Fahrstuhlvorbeifahrten liegen die Maximalwerte des Near-DC-Shifts mit < 20 nT deutlich niedriger und somit günstiger.

In der nachfolgenden Abbildung 7-41 und Abbildung 7-42 ist der AC-Shift für die Frequenzen von 16 Hz und 50 Hz zu sehen. Die Maximalwerte liegen mit 7,2 nT bei 16 Hz und 12,8 nT bei 50 Hz sehr niedrig.

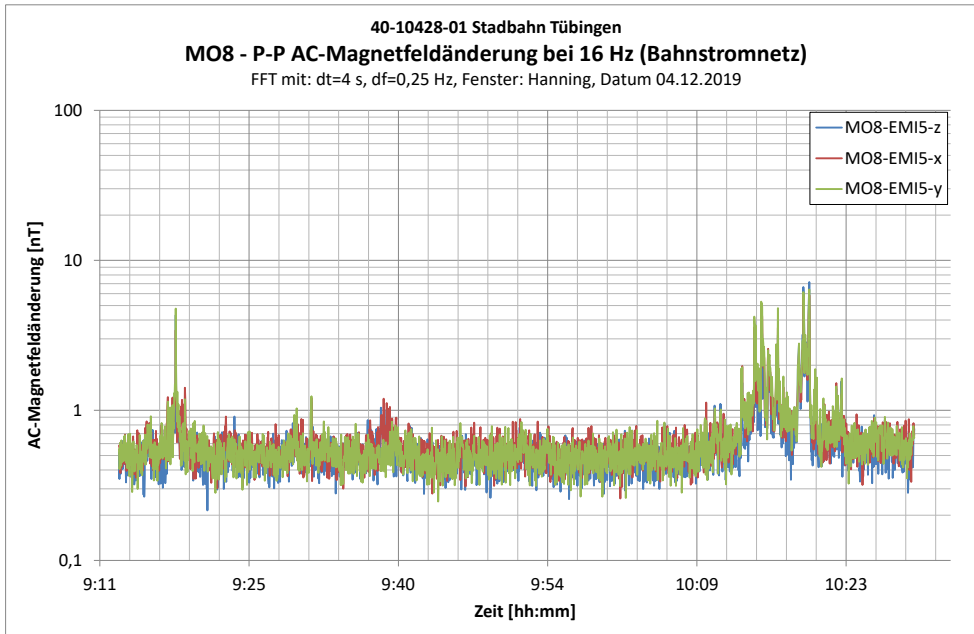


Abbildung 7-41: MO8 – AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz – Bahnstromnetz

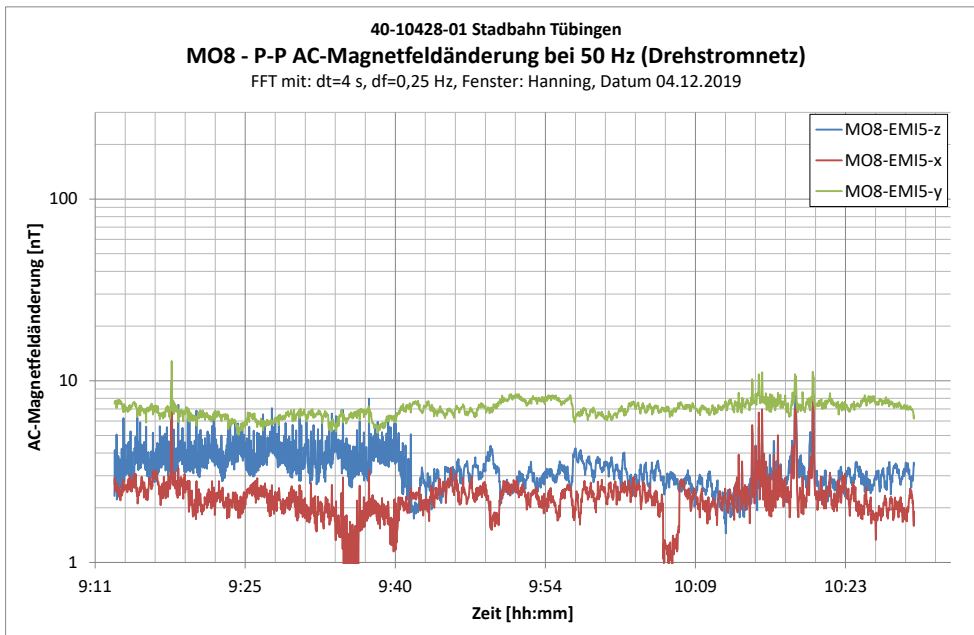


Abbildung 7-42: MO8 – AC-Magnetfeldänderung bei 50 Hz - Drehstromnetz

7.13 MO9 – Auf der Morgenstelle 32 (ZMBP - OG)

7.13.1 Dokumentation der Messung am MO9

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage / Raum | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
| 1 | MP1 | Z | Raum 3 W04 | Dreifuß | G65 | +/- 2.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 2 | | X | | | | +/- 2.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 3 | | Y | | | | +/- 2.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 4 | EMI1 | Z | Raum 3W04 | Stativ h = 120 cm | S53 | +/- 100 [μT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |
| 7 | MP2 | Z | Raum 3Y01 | Dreifuß | G145 | +/- 2.000 [$\mu\text{m/s}$] |

Tabelle 7-29: Messpunkte an MO9

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].

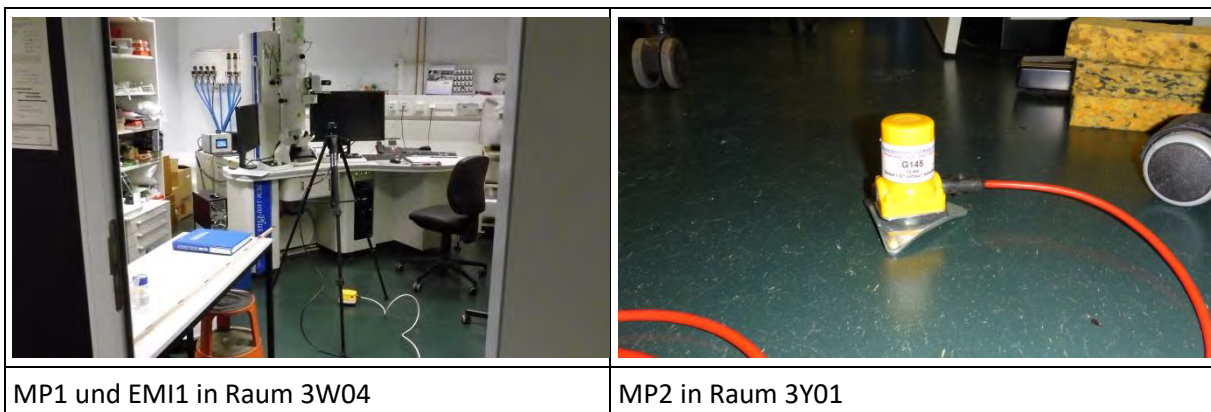


Tabelle 7-30: Fotodokumentation der Messpunkte am MO9

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:

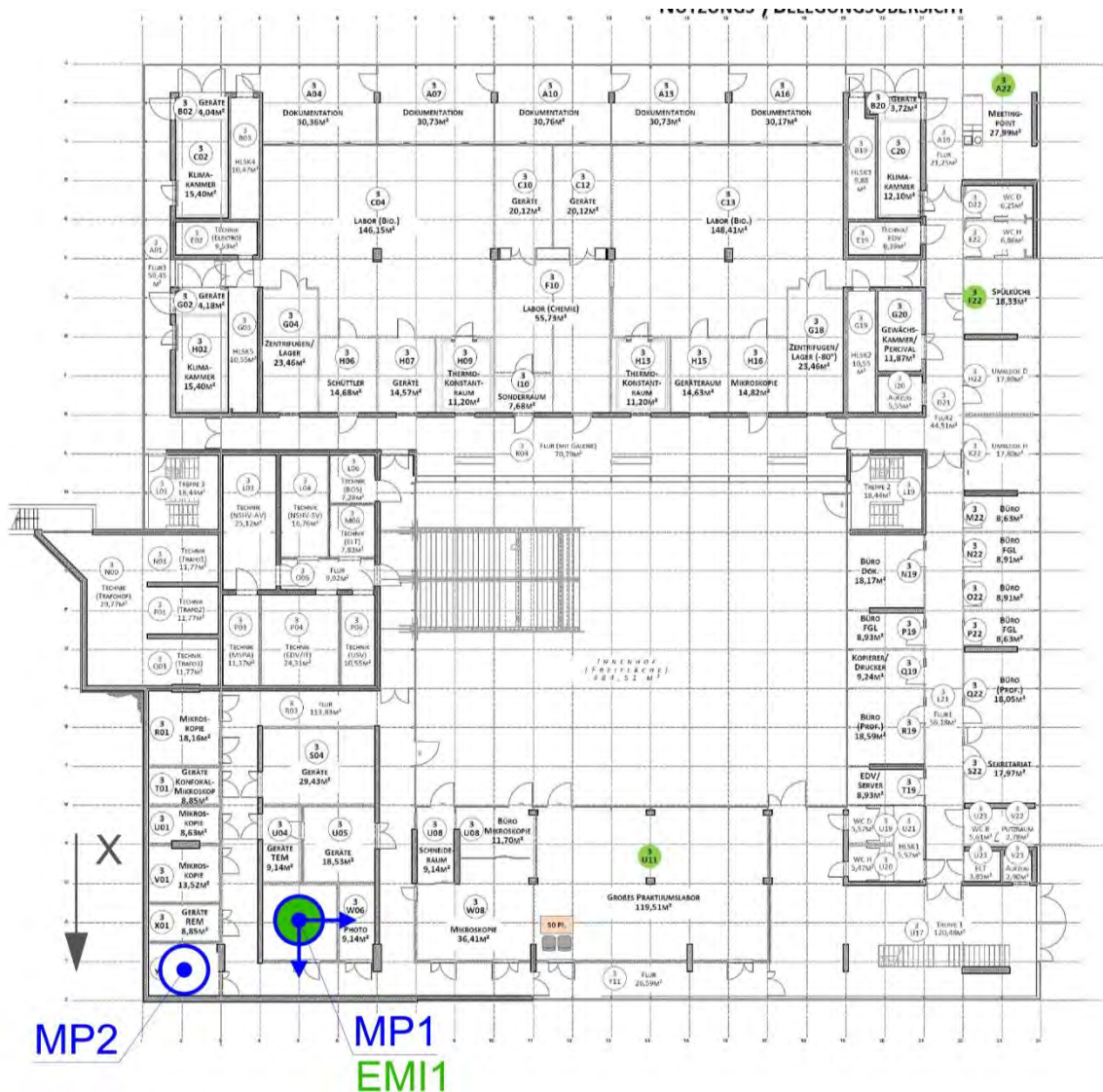


Abbildung 7-43: Lage der Messpunkte am MO9

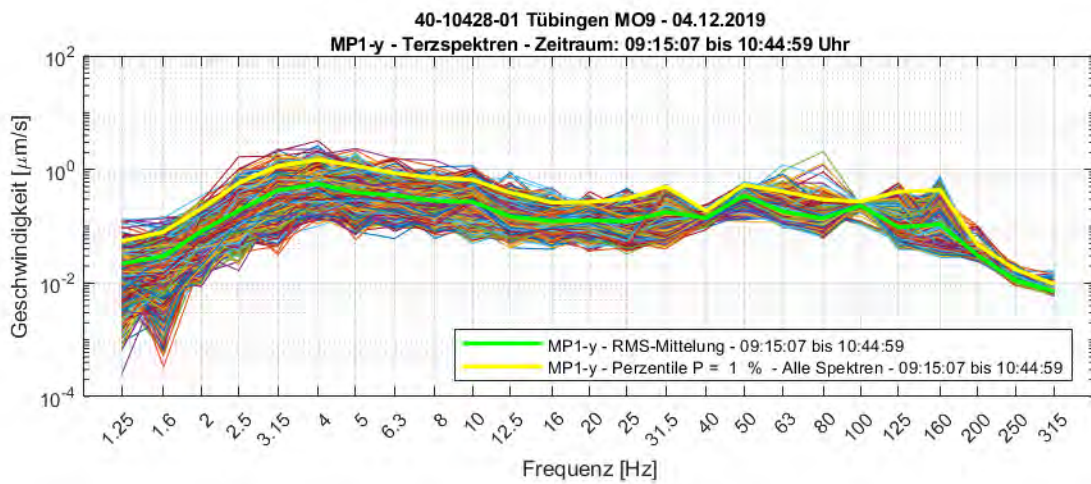
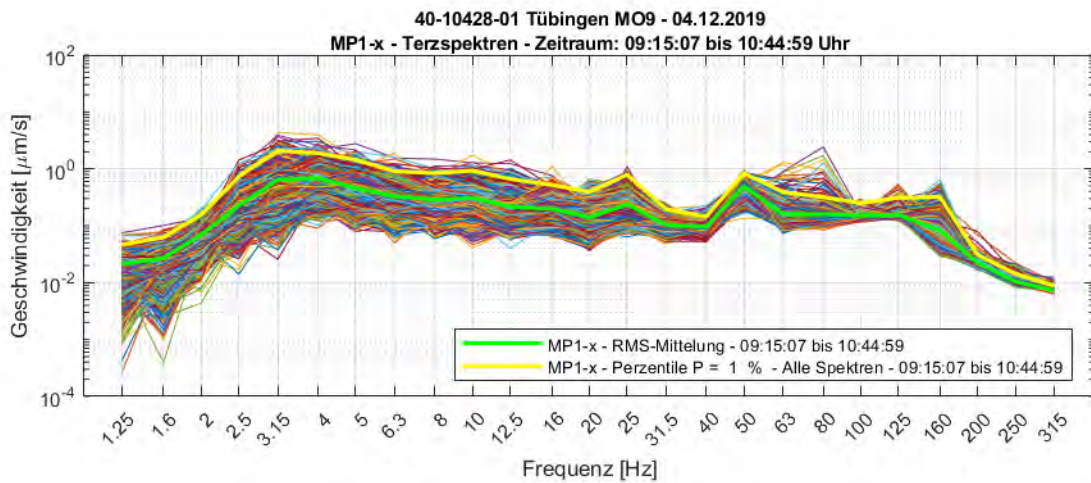
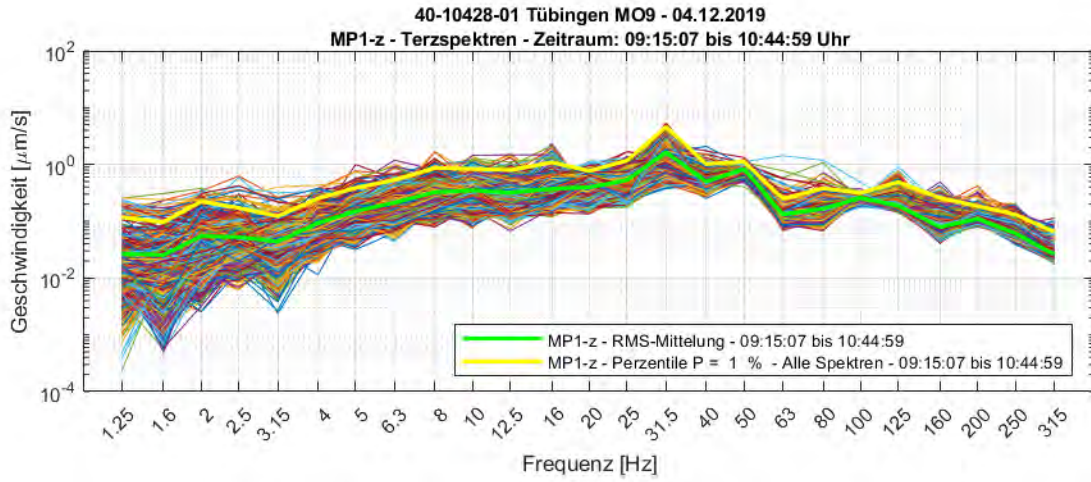
Folgende Messungen wurden am 04.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--|
| M1 | 2 Personen gehen im Flur |
| M2 | Ambiente Schwingungen & Magnetfeldänderungen und Admittanzmessung mittels Impulsanreger Dynpact® |

Tabelle 7-31: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO9

7.13.2 Schwingungspegel am MO9

4-Sekunden Terzspektren



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

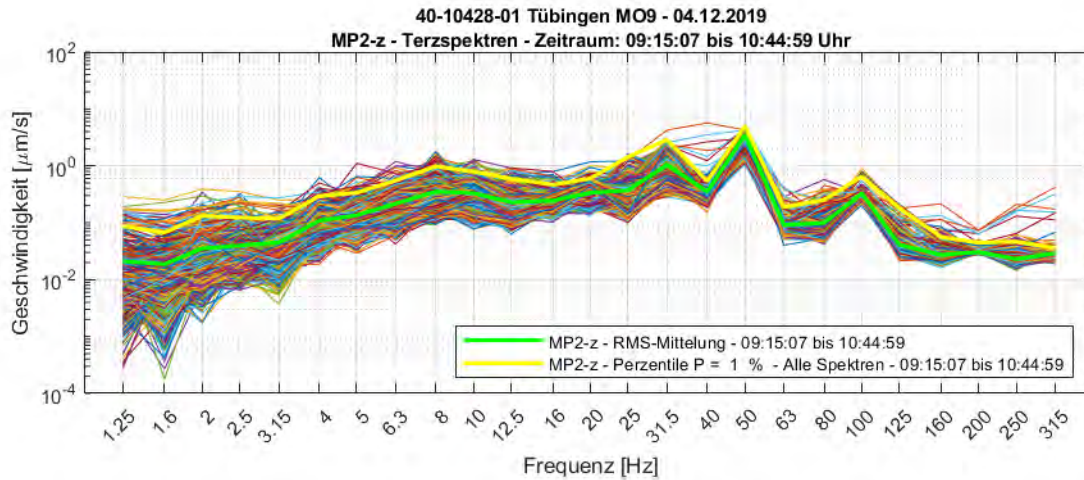


Abbildung 7-44 zeigt die 1% Perzentile der Terzspektren aller drei Raumrichtungen an MO9. In vertikaler (z) Richtung liegt die maximale Schwinggeschwindigkeit bei $5,0 \mu\text{m/s}$ – es wird das Kriterium VC-D ($v \leq 6,25 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten. Die Schwingungen in horizontaler (x, y) liegen mit $2,1 \mu\text{m/s}$ etwas niedriger und das Schwingungskriterium VC-E wird eingehalten ($v \leq 3,1 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$).

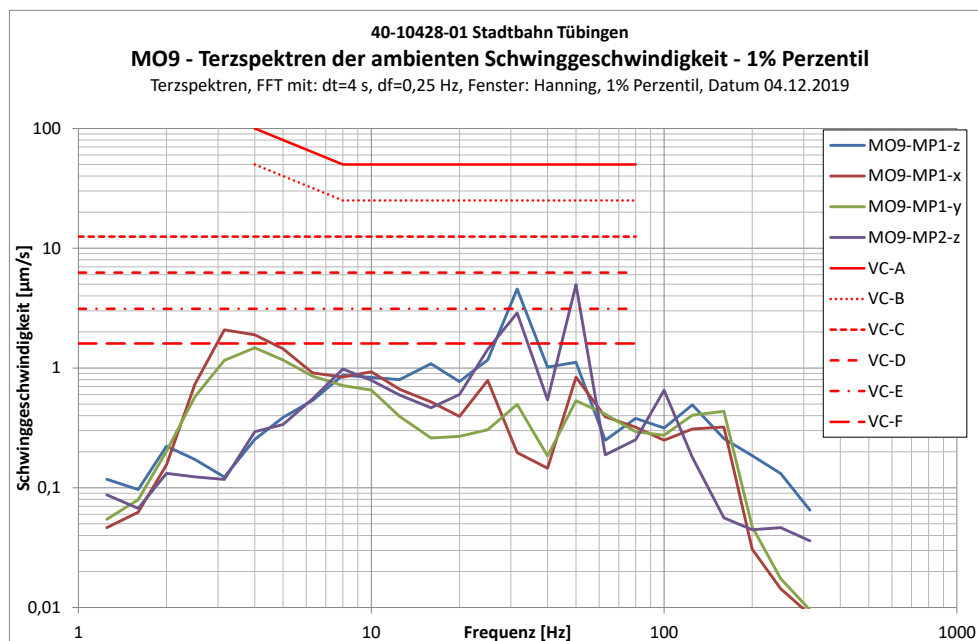


Abbildung 7-44: MO9 – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

7.13.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO9 |
| Gebäude | ZMBP (E3) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 213m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-D |

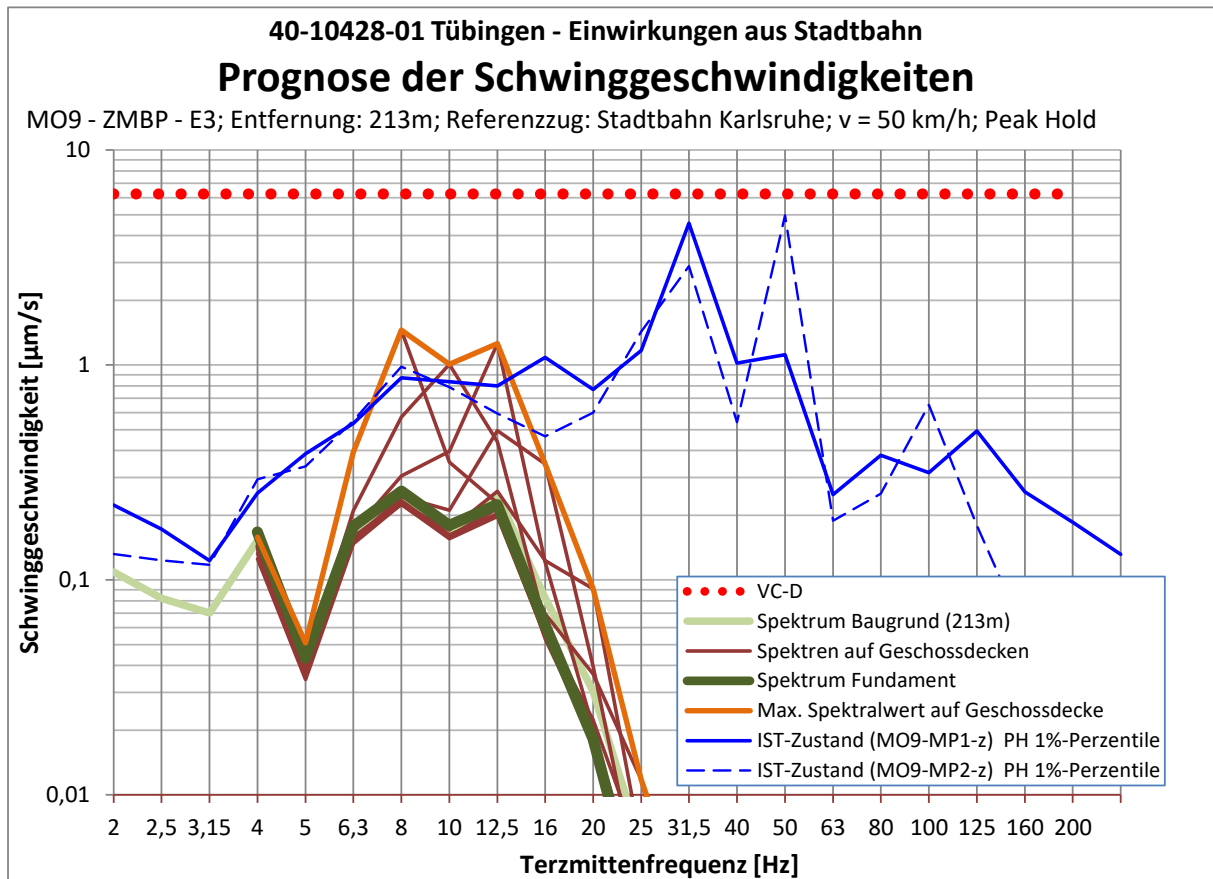
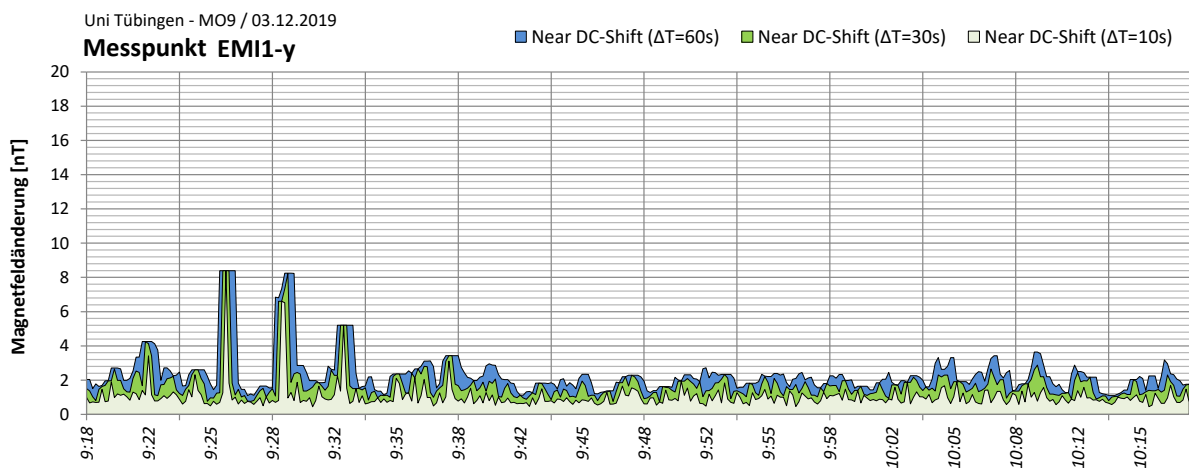
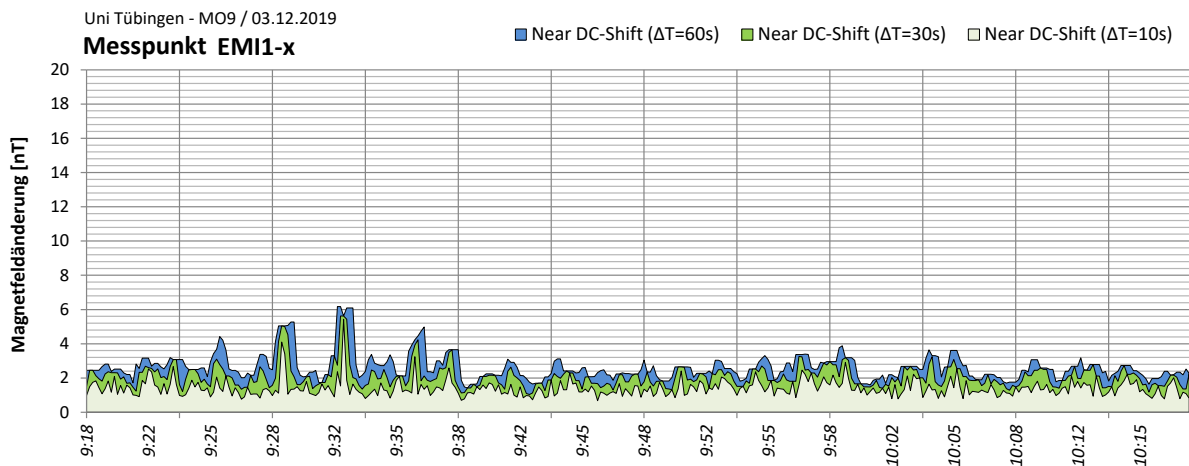
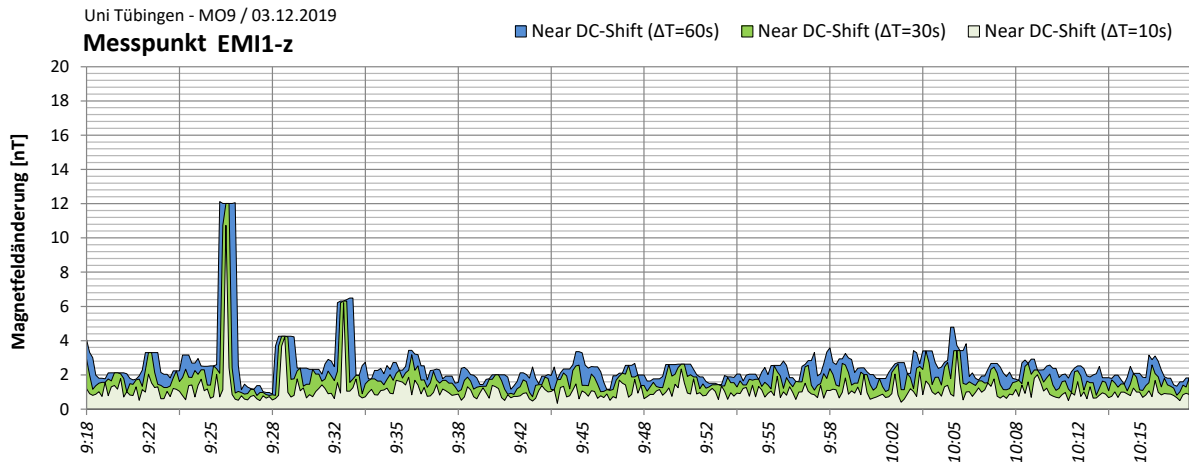


Abbildung 7-45: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO9

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

7.13.4 Near-DC Magnetfeldänderungen am MO9



Die oben dargestellten Abbildungen zeigen die Near-DC-Magnetfeldänderungen (Peak-to-Peak) am Messort MO9. Es ist ein dominanter Peak gegen 9:25 Uhr zu sehen, an dem ein maximaler Shift von 12,1 nT erreicht wird – dies ist ein besonders niedriger Wert – über die verbleibende Messdauer liegen die Near-DC-Shifts mit < 7 nT nochmal niedriger und somit günstiger.

Auf Grund des großen Abstandes von MO9 zu der nächsten Vollbahnstrecke ist der AC-Shift bei 16 Hz (s. Abbildung 7-46) mit maximal 2,0 nT sehr niedrig.

Im Bereich des Stromnetzes (50 Hz, Abbildung 7-47) wird ein deutlich größerer Shift erreicht der bei maximal 125,7 nT liegt.

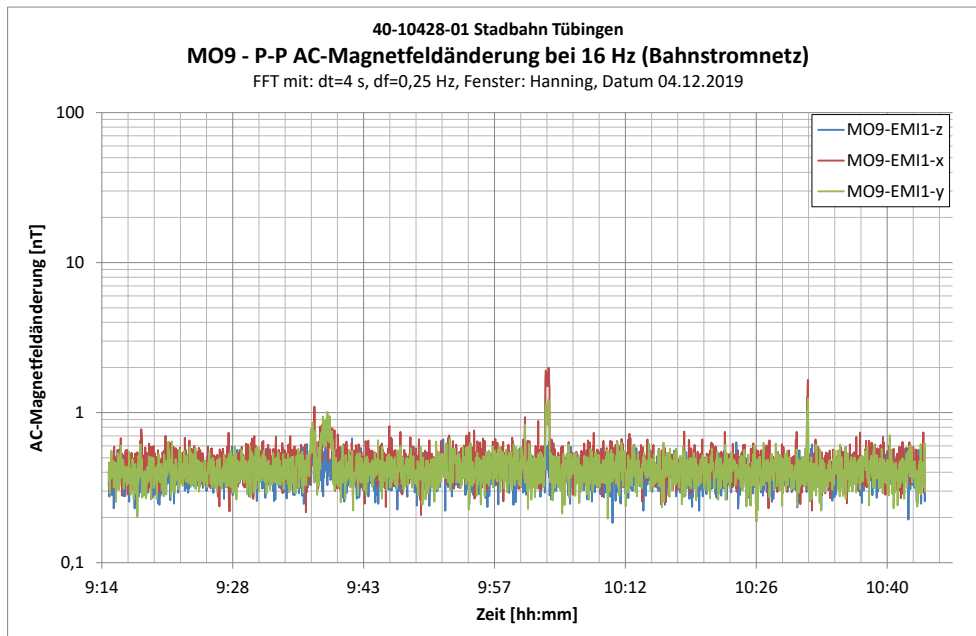


Abbildung 7-46: MO9 – AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz – Bahnstromnetz

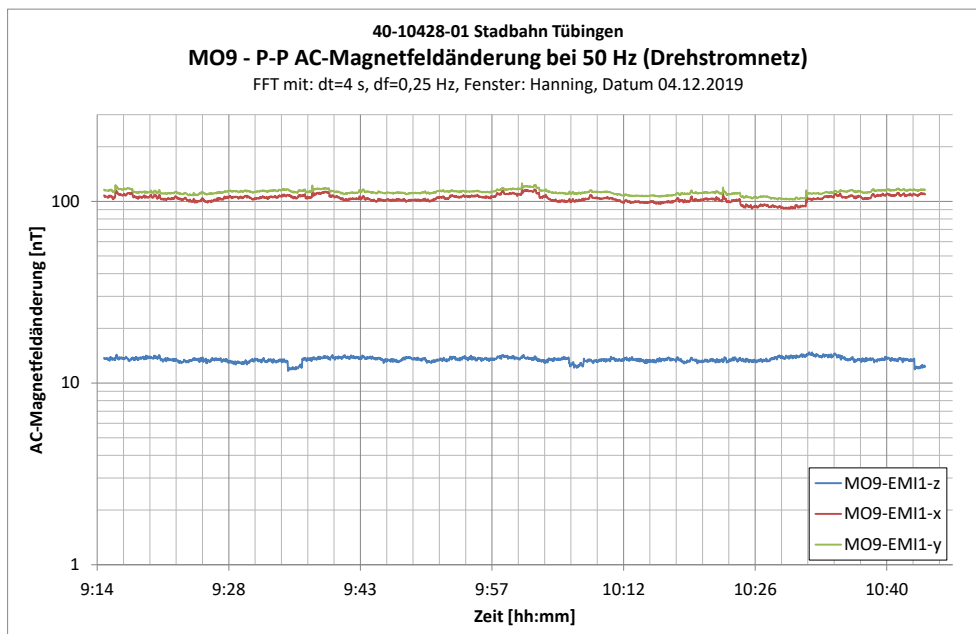


Abbildung 7-47: MO9 – AC-Magnetfeldänderung bei 50 Hz - Drehstromnetz

Sonstige Anmerkungen

Bei der Schwingungsmessung ist ein dominanter Peak an MO9-MP2-z bei einer Frequenz von 50 Hz zu erkennen, welcher auf den Betrieb in der Nähe befindlicher Gebäude- und Versorgungstechnik (Pumpen, Lüfter, Kompressoren, o.ä.) zurückgeführt wird. Wenn die entsprechenden Aggregate identifiziert und mit einer angemessenen Schwingungsentkopplung ausgestattet werden, kann der Schwingungseintrag deutlich reduziert werden.

7.14 MO10 – Auf der Morgenstelle 18 (Gebäude A - OG)

7.14.1 Dokumentation der Messung am MO10

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage / Raum | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------|------------------|
| 1 | MP11 | Z | 5 G 04 | Dreifuß | G52 | +/- 5.000 [µm/s] |
| 2 | | X | | | | +/- 5.000 [µm/s] |
| 3 | | Y | | | | +/- 5.000 [µm/s] |
| 4 | EMI6 | Z | 5 G 04 | Stativ h = 120 cm | S37 | +/- 100 [µT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [µT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [µT] |
| 7 | MP12 | Z | 5 G 35 | Dreifuß | G146 | +/- 5.000 [µm/s] |

Tabelle 7-32: Messpunkte an MO10

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].

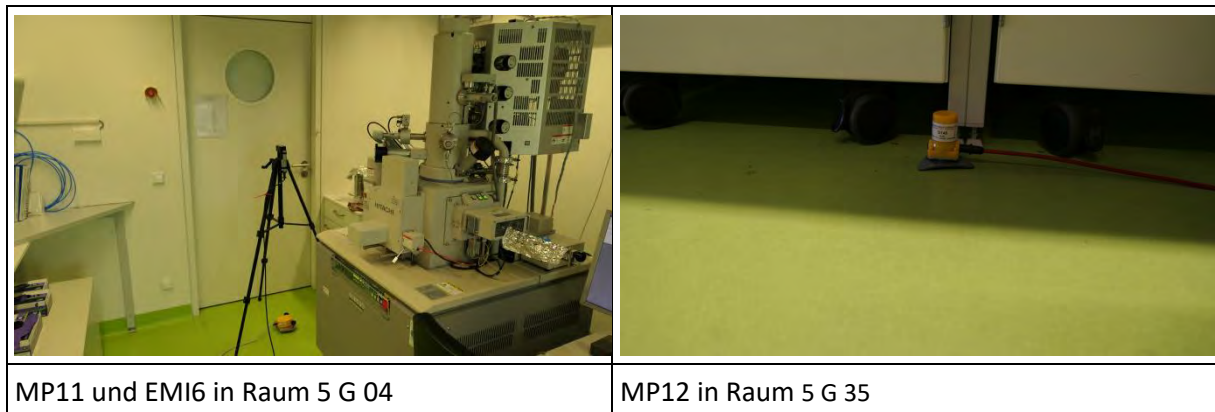


Tabelle 7-33: Fotodokumentation der Messpunkte am MO10

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:

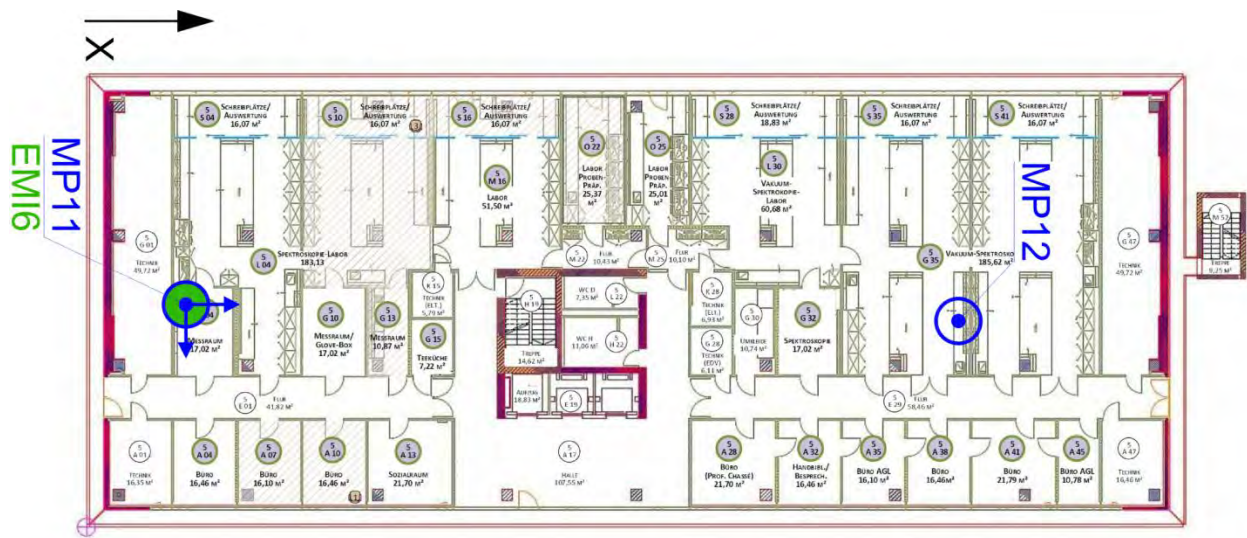


Abbildung 7-48: Lage der Messpunkte am MO10

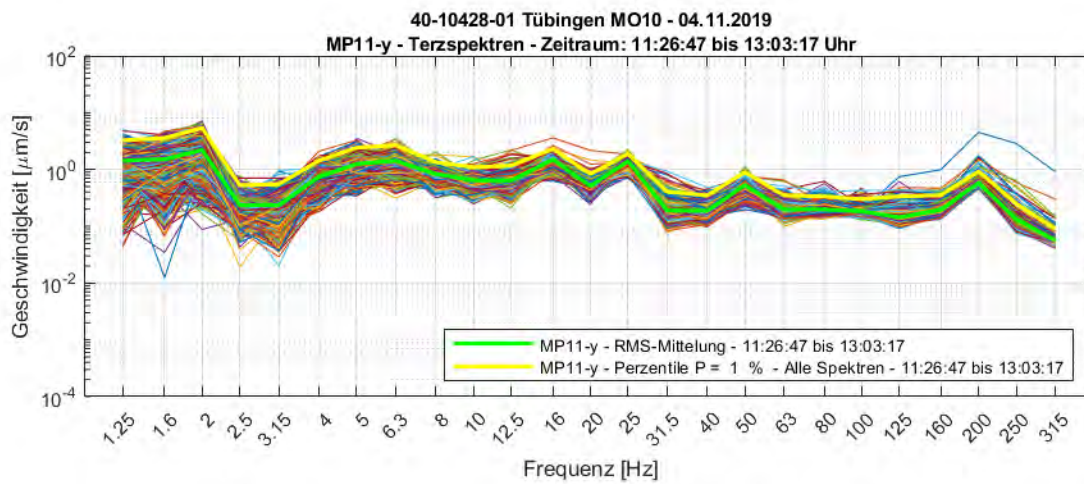
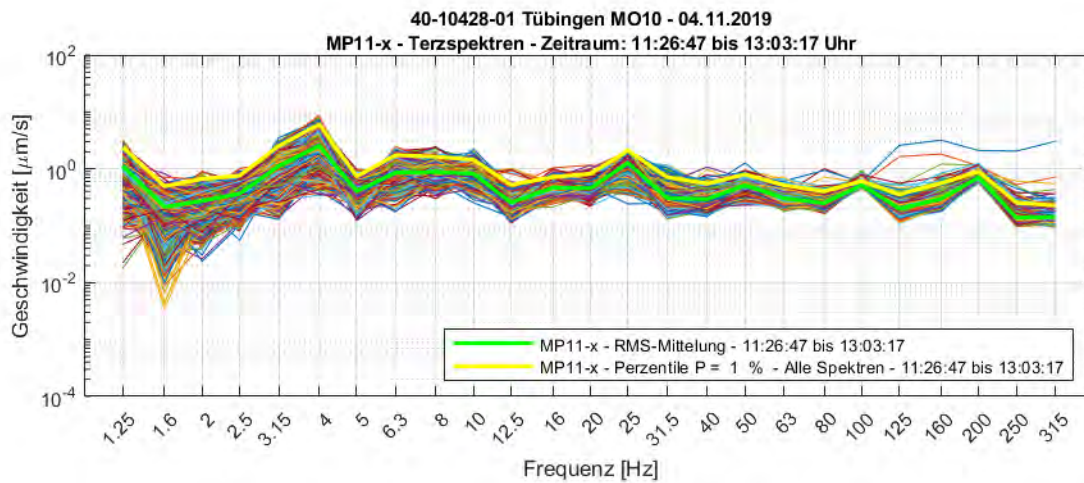
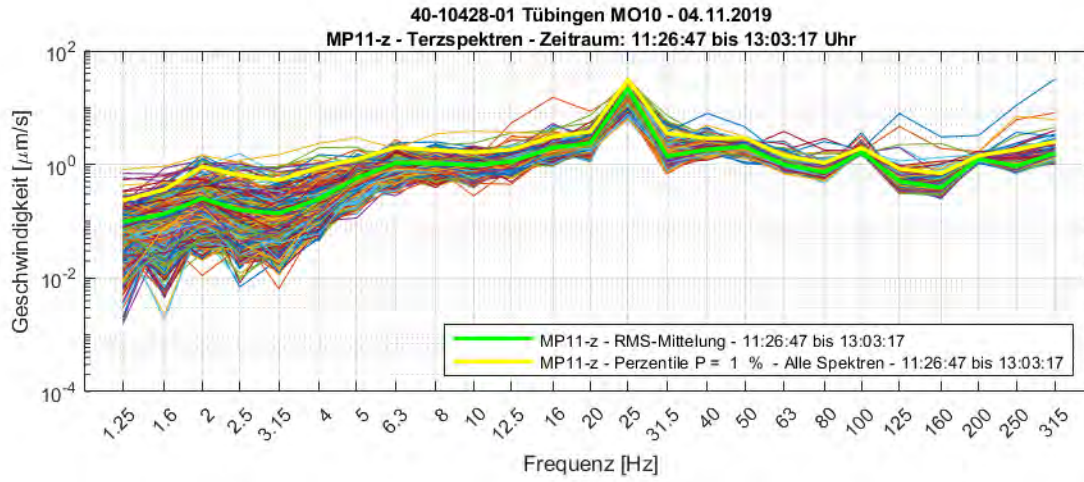
Folgende Messungen wurden am 04.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--|
| M1 | Fersenstoß & 1 Personen geht im Flur |
| M2 | Ambiente Schwingungen & Magnetfeldänderungen und Admittanzmessung mittels Impulsanreger Dynpact® |

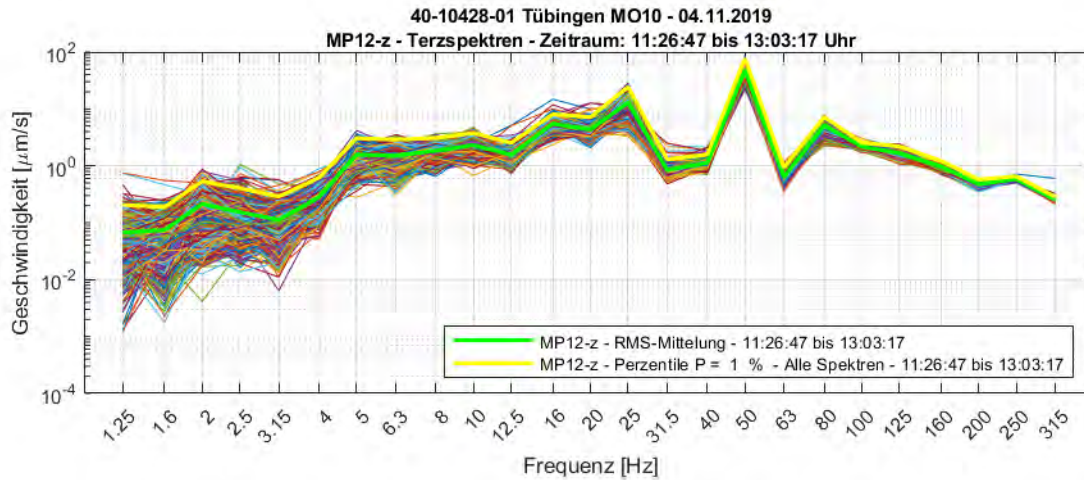
Tabelle 7-34: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO10

7.14.2 Schwingungspegel am MO10

4-Sekunden Terzspektren



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



Nachfolgende Abbildung 7-49 zeigt die 1% Perzentile der Terzspektren aller drei Raumrichtungen an MO10.

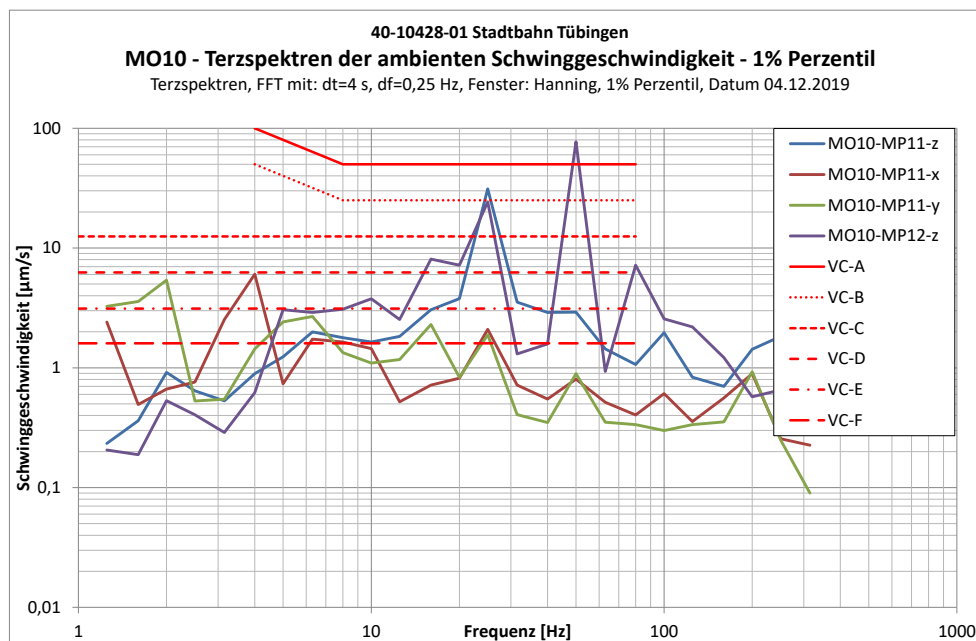


Abbildung 7-49: MO10 – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

Für die Standortevaluierung wird hier zunächst zwischen (REM-Labor 5G04) und MO10-MP12-z (allgemeines Labor 5G35). Unabhängig davon wird darauf hingewiesen, dass an beiden Standorten besonders hohe Schwinggeschwindigkeiten bei den Frequenzen 25 Hz und 50 Hz erfasst wurden. Diese sind dem Betrieb von Pumpen, Kompressoren, Chillern o.ä. in den Laboren zuzuordnen.

REM-Labor 5G04 (MO10-MP11-z)

Die maximale Schwinggeschwindigkeit in vertikaler Richtung liegt an MO10-MP11-z bei 31 µm/s, so dass das Kriterium VC-A ($v \leq 50 \mu\text{m/s}$, $8 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten wird. In horizontaler Richtung

liegt die Maximale Schwinggeschwindigkeit bei 6,0 $\mu\text{m/s}$ sodass das Kriterium VC-D ($v < 6,25 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) eingehalten wird.

allgemeines Labor 5G35 (MO10-MP12-z)

Die Schwinggeschwindigkeit an MO10-MP12-z liegt mit bis zu 77,0 $\mu\text{m/s}$ deutlich höher, diese hohen Werte liegen unterhalb der menschlichen Fühlschwelle ($v \leq 100 \mu\text{m/s}$, $8 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$).

7.14.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO10 |
| Gebäude | Geb. A (E5) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 82m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Messtechnisch ermittelt am Gebäude A (Messung A5) |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-C |

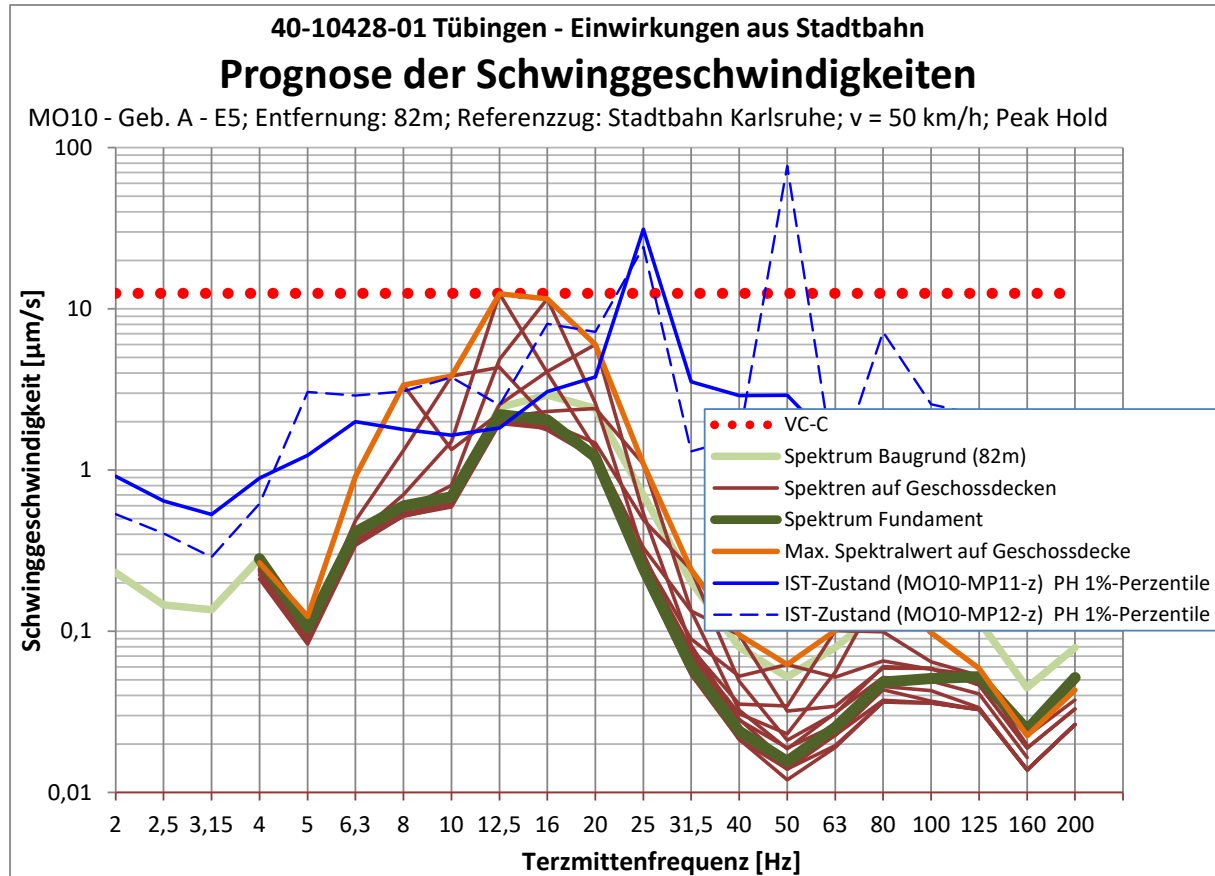
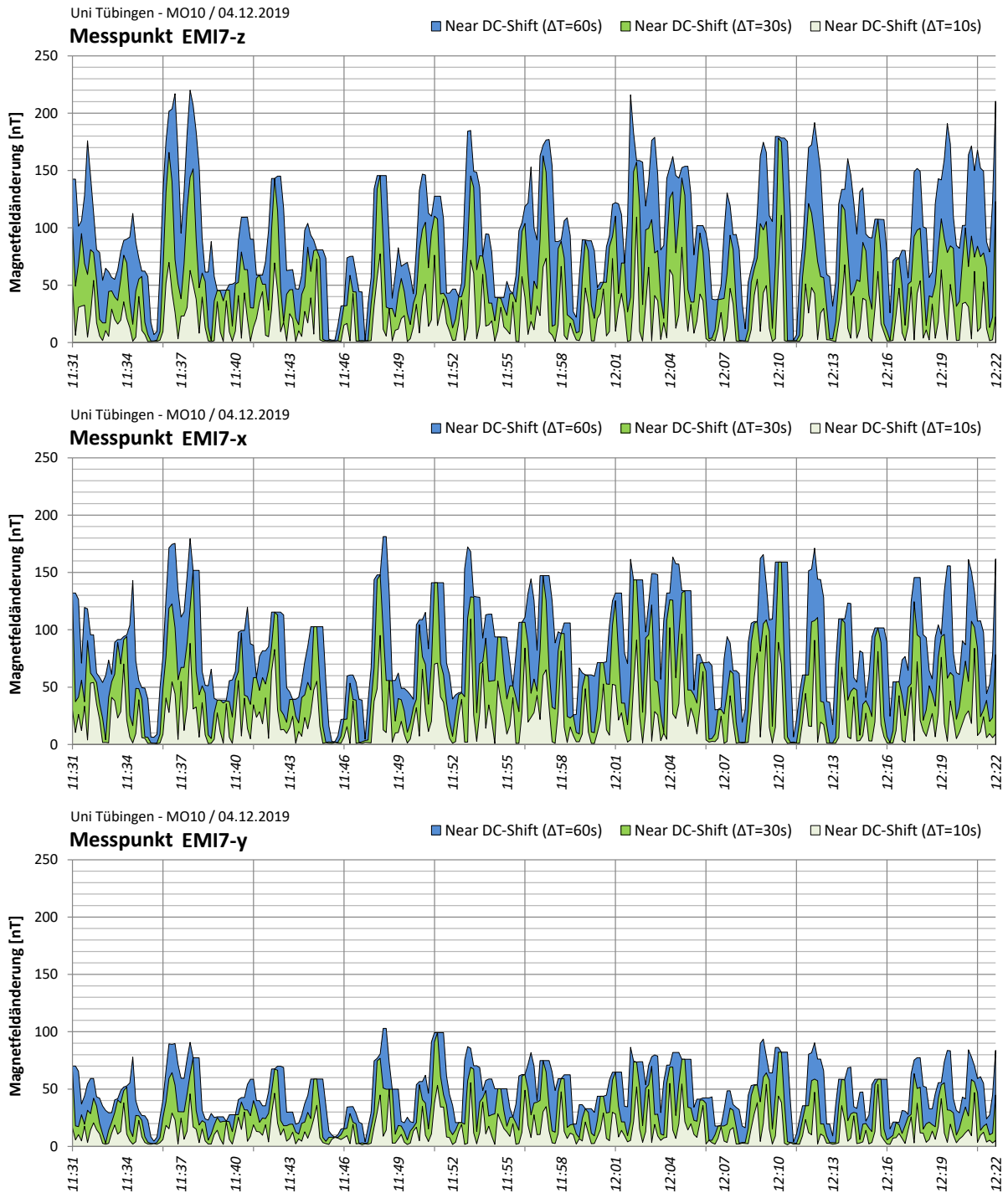


Abbildung 7-50: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO10

7.14.4 Near-DC Magnetfeldänderungen am MO10



Die oben dargestellten Abbildungen zeigen die Near-DC-Magnetfeldänderungen (Peak-to-Peak) am Messort, . über 10 Sekunden, 30 Sekunden und 60 Sekunden. Der Maximalwert liegt mit bis zu 220 nT relativ hoch.

Auf Grund des großen Abstandes von MO10 zur nächstgelegenen Vollbahnstrecke ist der AC-Shift bei 16 Hz sehr niedrig und erreicht – gemäß Abbildung 7-51 - Maximalwerte von 10,5 nT.

Im Bereich des Stromnetzes von 50 Hz (Abbildung 7-52) wird ein relativ hoher AC-Shift von höchstens 125,5 nT erreicht.

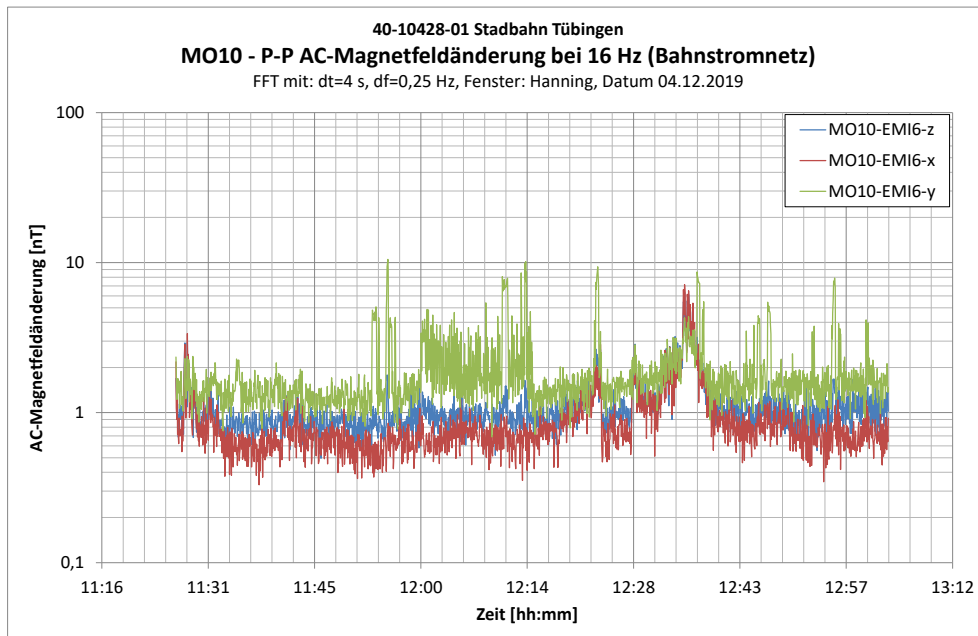


Abbildung 7-51: MO10 – AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz – Bahnstromnetz

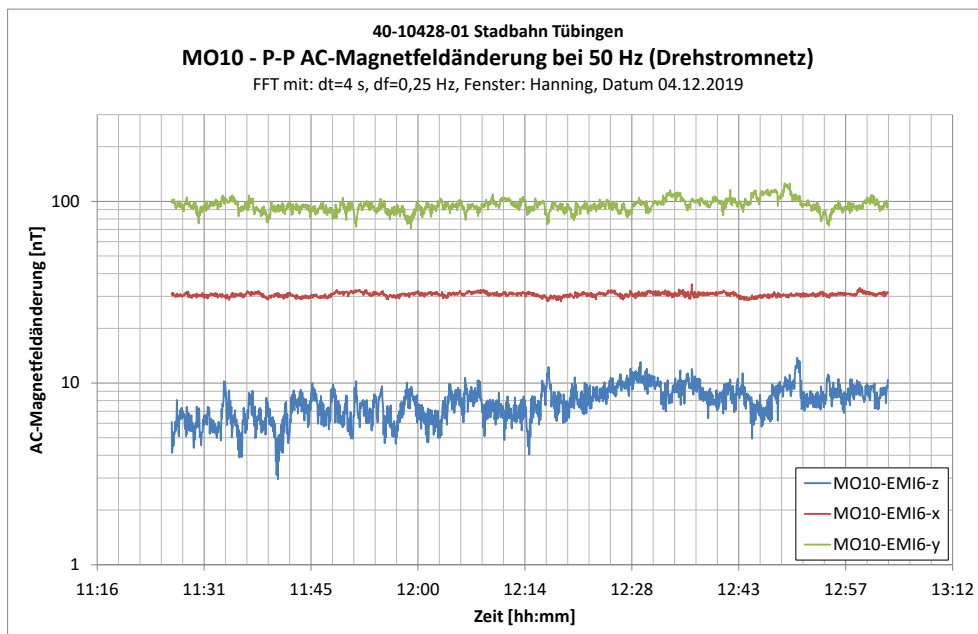


Abbildung 7-52: MO10 – AC-Magnetfeldänderung bei 50 Hz - Drehstromnetz

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

Sonstige Anmerkungen

Bei der Schwingungsmessung sind in beiden Räumen an MO10 dominante Peaks bei 25 Hz und 50 Hz festzustellen, welche auf den Betrieb in der Nähe befindlicher Gebäude- und Versorgungstechnik (Pumpen, Lüfter, Kompressoren, o.ä.) zurückgeführt werden. Wenn die entsprechenden Aggregate identifiziert und mit einer angemessenen Schwingungsentkopplung ausgestattet werden, kann der Schwingungseintrag deutlich reduziert werden, sodass in beiden untersuchten Räumen vermutlich das Schwingungskriterium VC-C ($v \leq 12,5 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten werden kann .

7.15 MO11 – Auf der Morgenstelle 16 (Zwischengebäude A-B)

7.15.1 Dokumentation der Messung am MO11

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage / Raum | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------|------------------|
| 1 | MP1 | Z | 4 E 01 | Dreifuß | G65 | +/- 2.000 [µm/s] |
| 2 | | X | | | | +/- 2.000 [µm/s] |
| 3 | | Y | | | | +/- 2.000 [µm/s] |
| 4 | EMI1 | Z | 4 E 01 | Stativ h = 120 cm | S53 | +/- 100 [µT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [µT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [µT] |
| 7 | MP2 | Z | 4 E 02 | Dreifuß | G145 | +/- 2.000 [µm/s] |

Tabelle 7-35: Messpunkte an MO11

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].

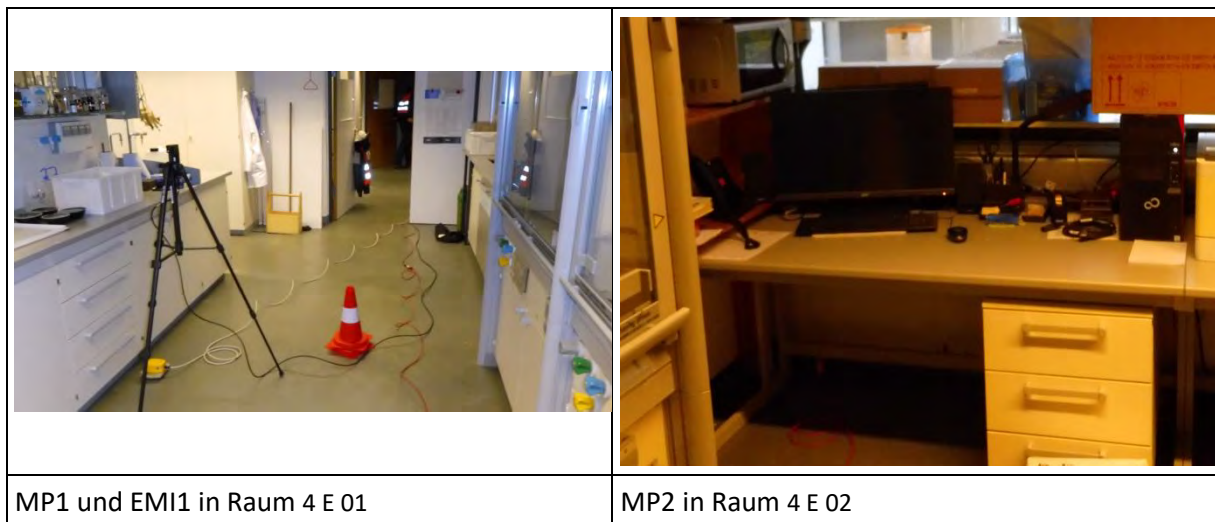


Tabelle 7-36: Fotodokumentation der Messpunkte am MO11

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:

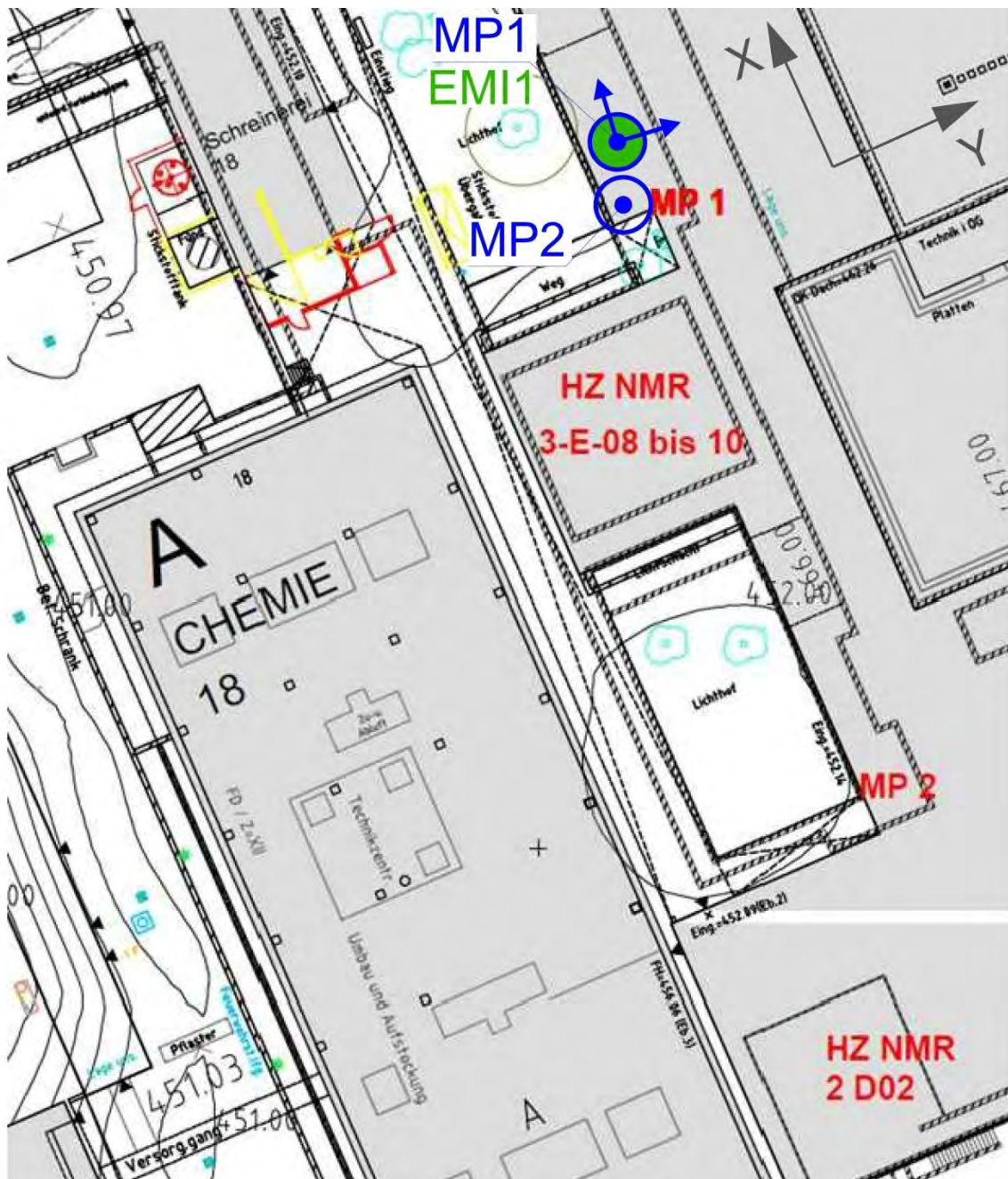


Abbildung 7-53: Lage der Messpunkte am MO11

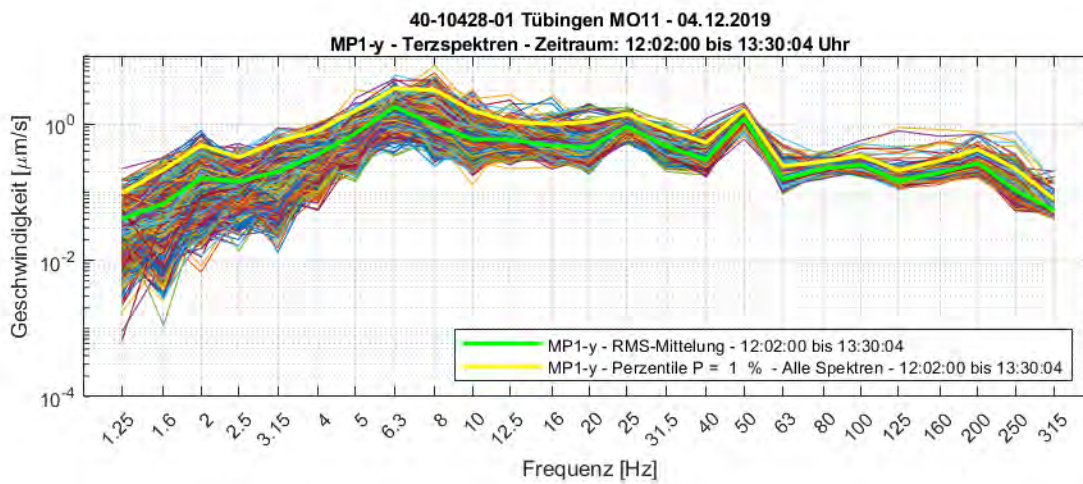
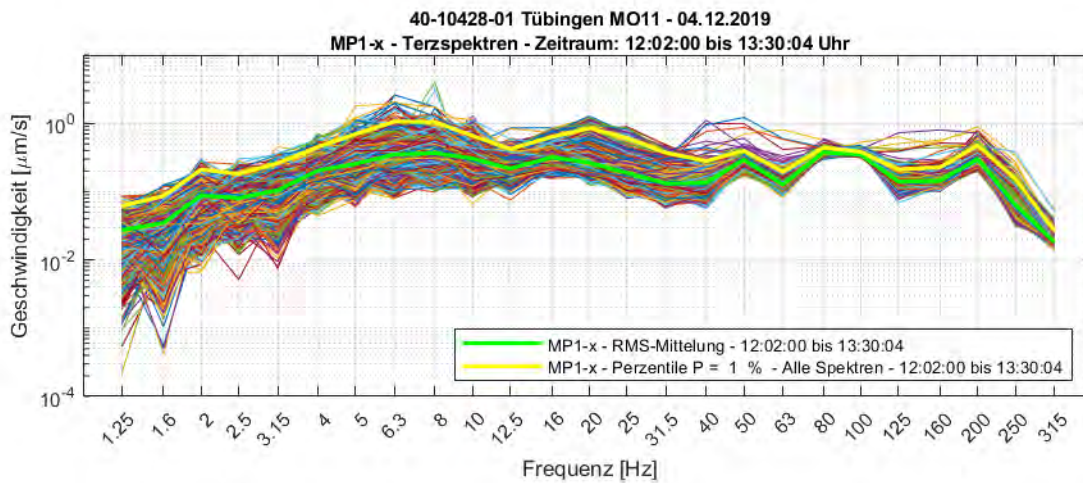
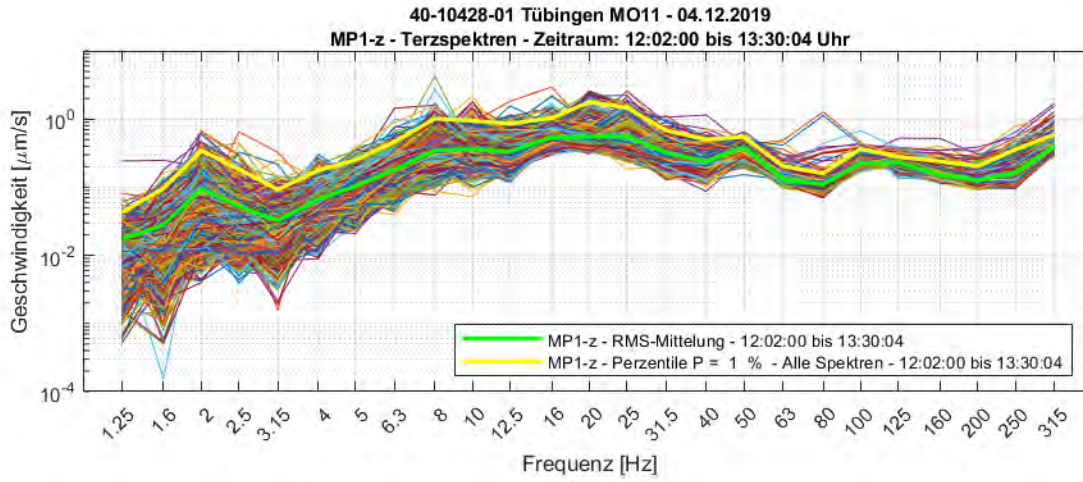
Folgende Messungen wurden am 04.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--|
| M1 | Ambiente Schwingungen & Magnetfeldänderungen und Admittanzmessung mittels Impulsanreger Dynpact® |

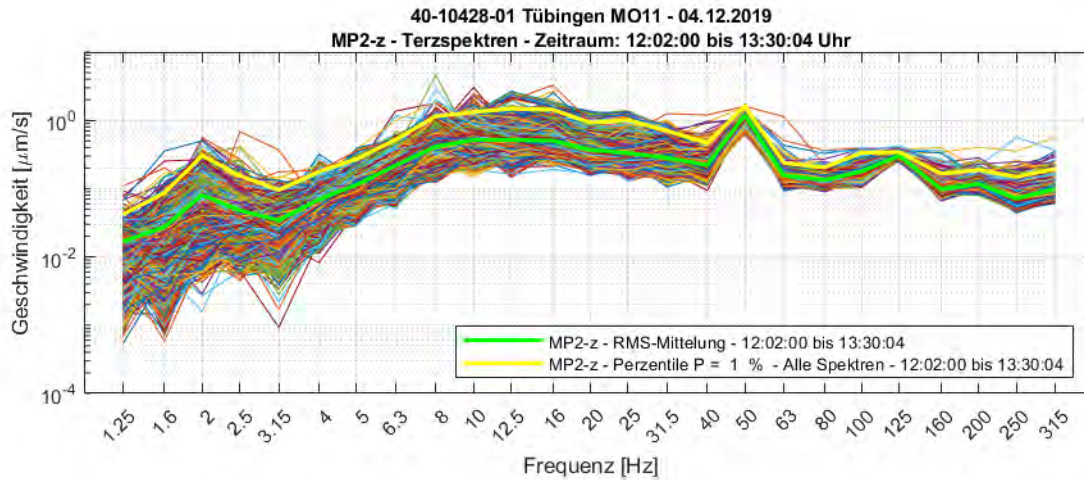
Tabelle 7-37: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO11

7.15.2 Schwingungspegel am MO11

4-Sekunden Terzspektren



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



In Abbildung 7-54 sind die 1% Perzentile der Terzspektren aller drei Raumrichtungen an MO11 zu sehen. In vertikaler Richtung liegt die maximale Schwinggeschwindigkeit bei 1,8 µm/s. Bei diesem niedrigen Wert wird das Schwingungskriterium VC-E ($v \leq 3,1 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten. Die Schwinggeschwindigkeiten in horizontaler Richtung sind mit bis zu 3,3 µm/s leicht höher und das weniger strenge Kriterium VC-D ($v \leq 6,25 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) wird gut eingehalten.

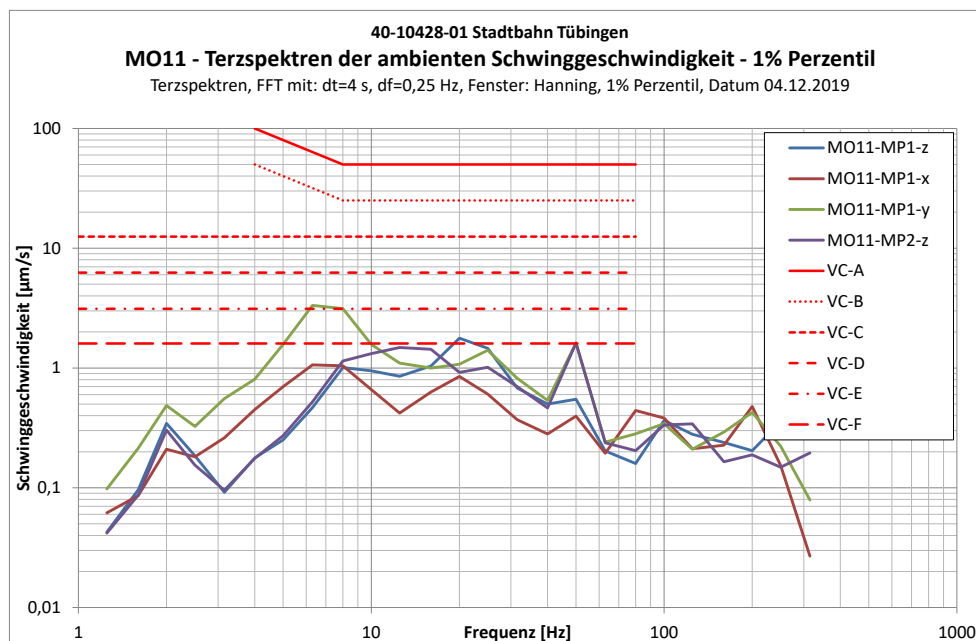


Abbildung 7-54: MO11 – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

7.15.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO11 |
| Gebäude | Geb. A-E (E3) (Prognose erfolgt für Bodenplatte) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 126m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | - |
| Tool-Spezifikation | Bruker Nano-C |

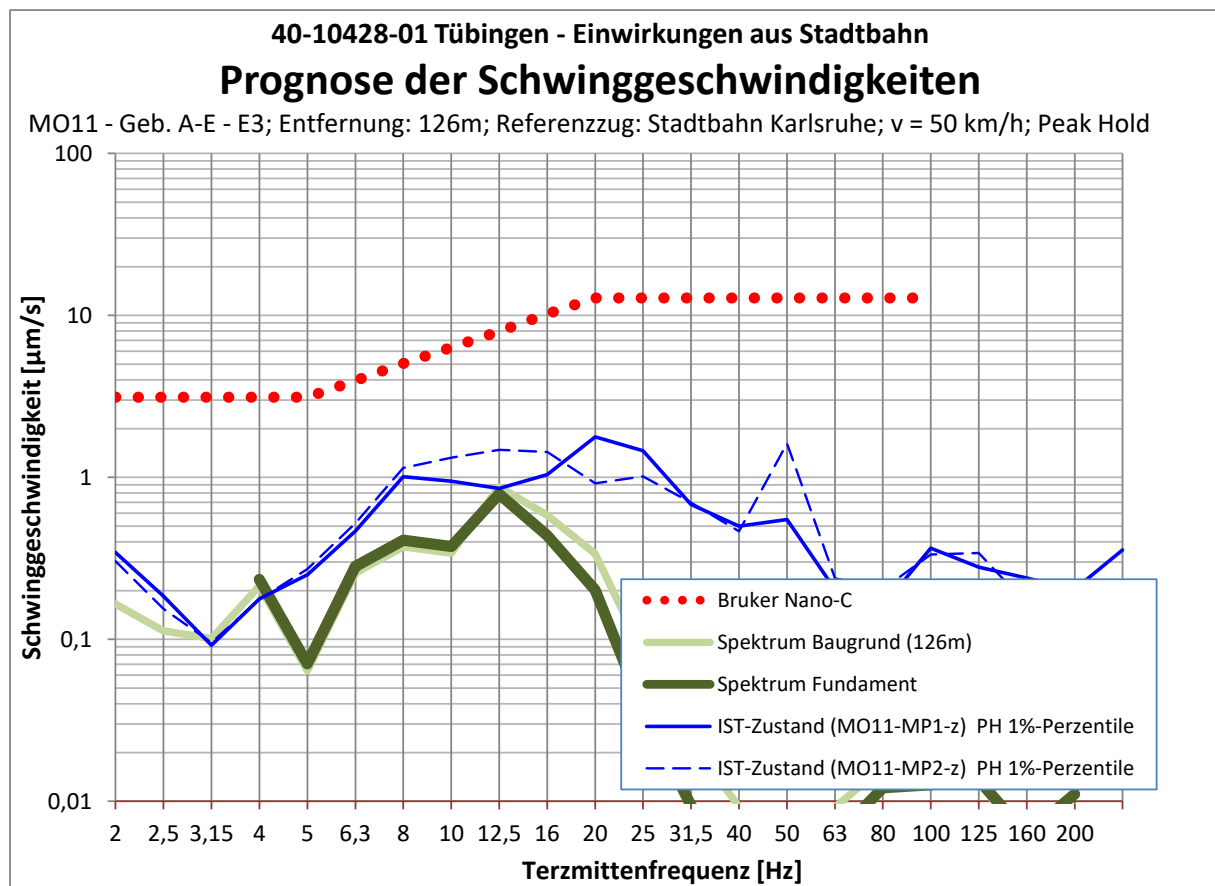
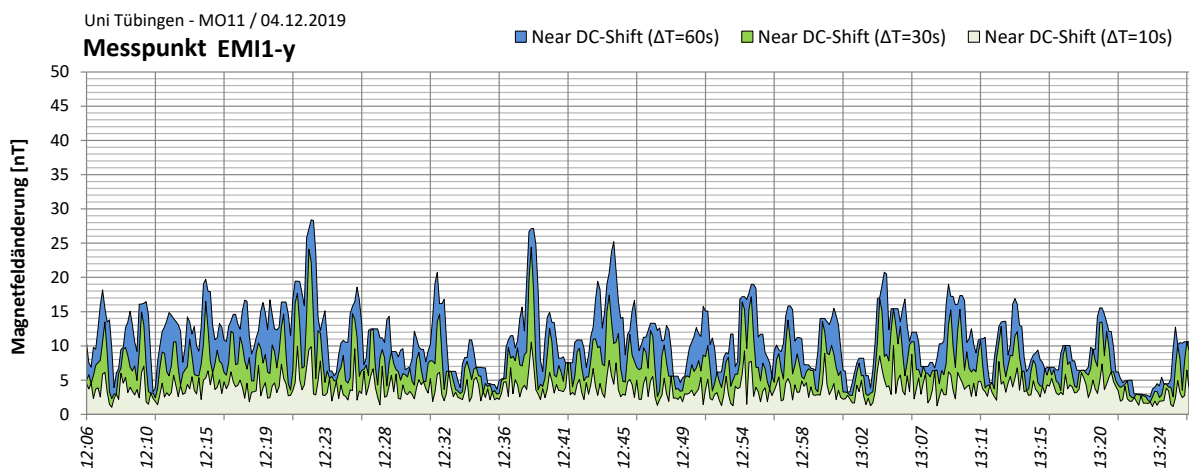
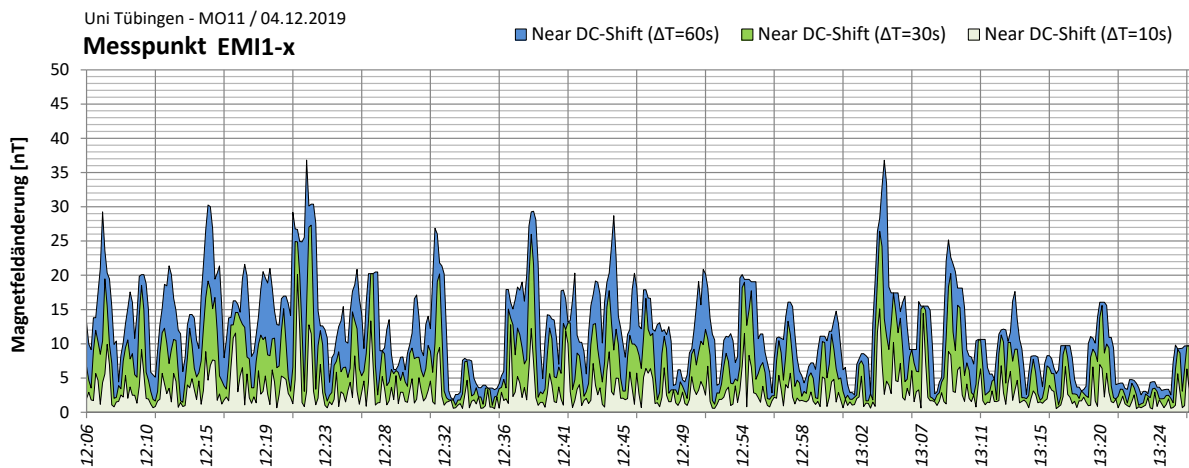
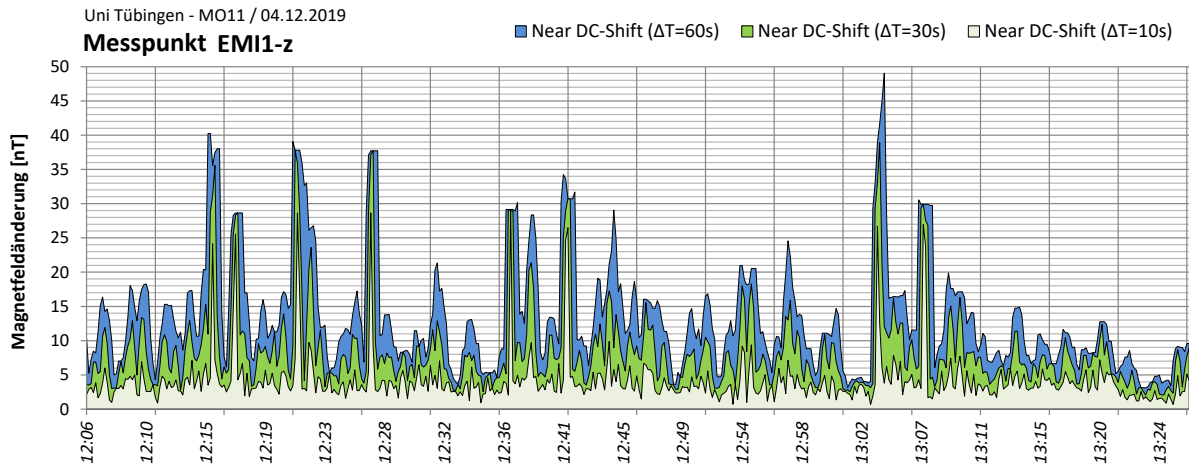


Abbildung 7-55: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO11

7.15.4 Near-DC Magnetfeldänderungen am MO11



Die oben dargestellten Abbildungen zeigen die Near-DC-Magnetfeldänderungen (Peak-to-Peak) am Messort MO11 zu sehen – der Maximalwert liegt bei 49,1 nT.

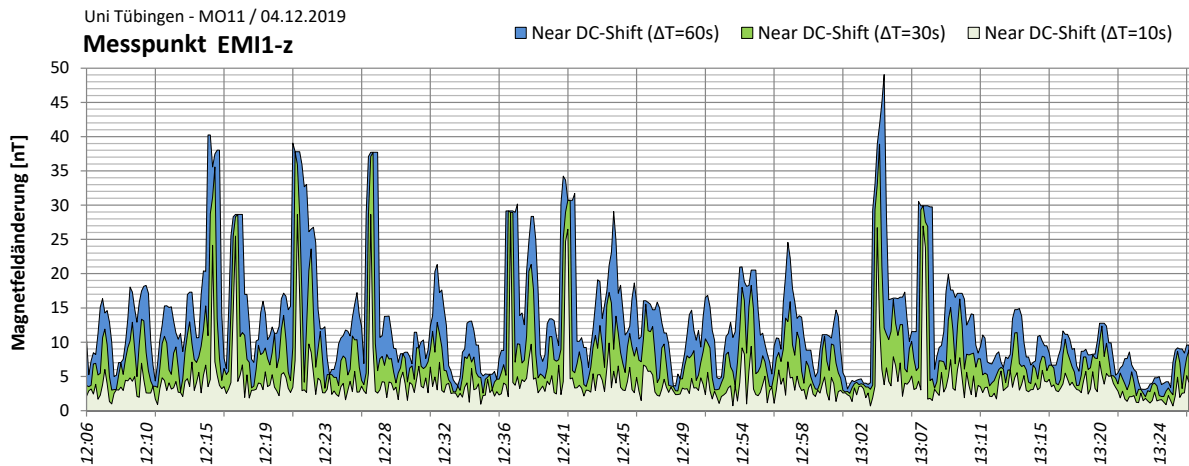


Abbildung 7-56: MO11 – Near-DC Shift

Abbildung 7-57 zeigt die AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz. Auf Grund des großen Abstandes zur nächstgelegenen Vollbahnstrecke liegt der Maximalwert mit 5,0 nT sehr niedrig. Im Bereich des Stromnetzes von 50 Hz (s. Abbildung 7-58) wird – wahrscheinlich auf Grund des Betriebes von nahegelegenen Geräten der Haust- und Versorgungstechnik – ein deutlich höherer Shift von 103,1 nT erreicht.

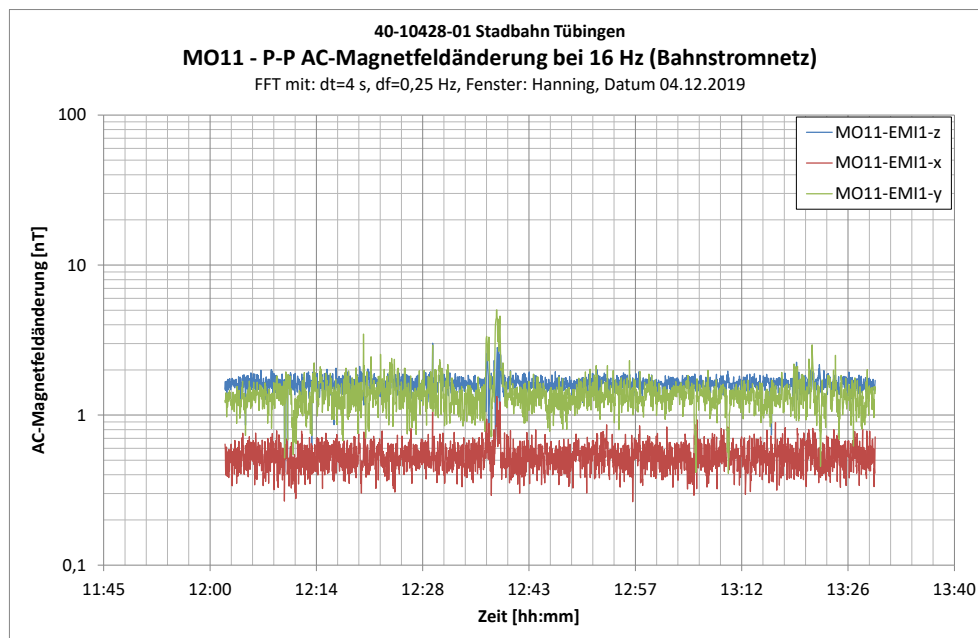


Abbildung 7-57: MO11 – AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz – Bahnstromnetz

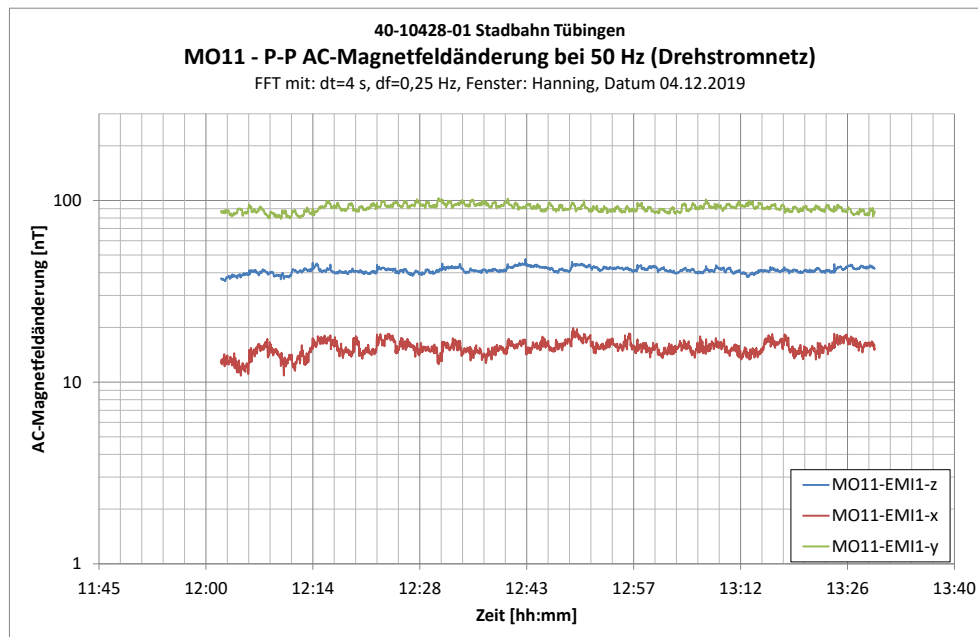


Abbildung 7-58: MO11 – AC-Magnetfeldänderung bei 50 Hz - Drehstromnetz

7.16 MO12 – Auf der Morgenstelle 14 (Gebäude D - KG)

7.16.1 Dokumentation der Messung am MO12

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage / Raum | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
| 1 | MP13 | Z | 1 Q 21 | Dreifuß | G52 | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 2 | | X | | | | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 3 | | Y | | | | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 4 | EMI7 | Z | 1 Q 21 | Stativ h = 120 cm | S37 | +/- 100 [μT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |
| 7 | MP14 | Z | 1 Q 27 | Dreifuß | G16 | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |

Tabelle 7-38: Messpunkte an MO12

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].

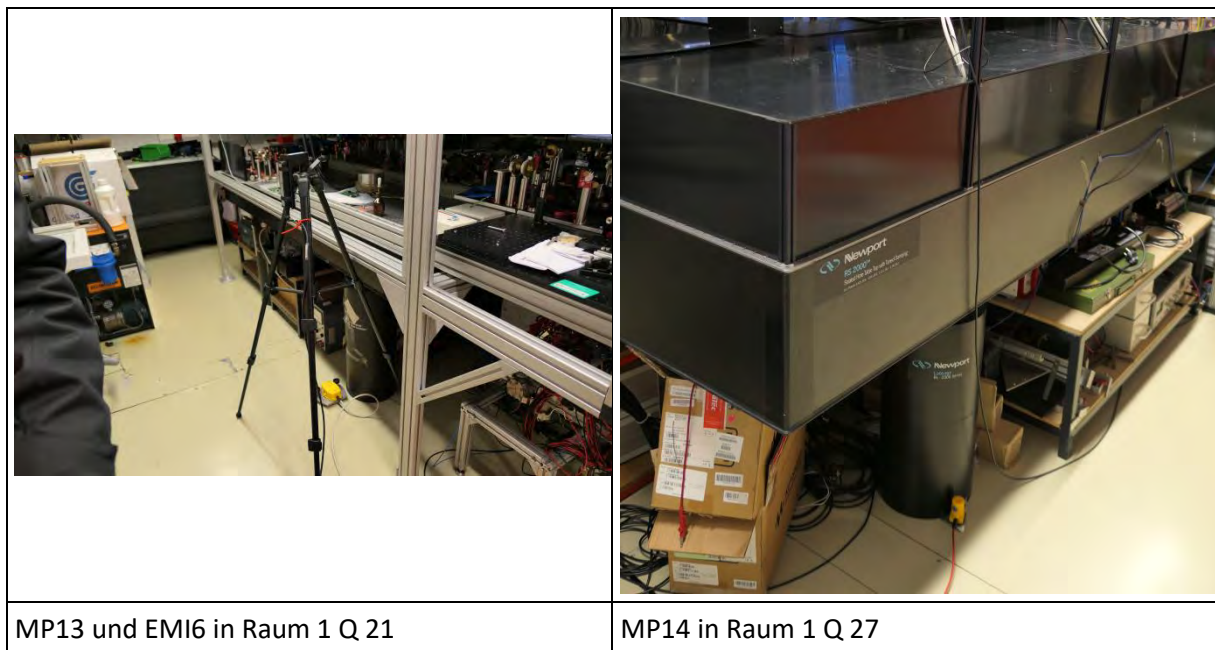


Tabelle 7-39: Fotodokumentation der Messpunkte am MO12

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:



Abbildung 7-59: Lage der Messpunkte am MO12

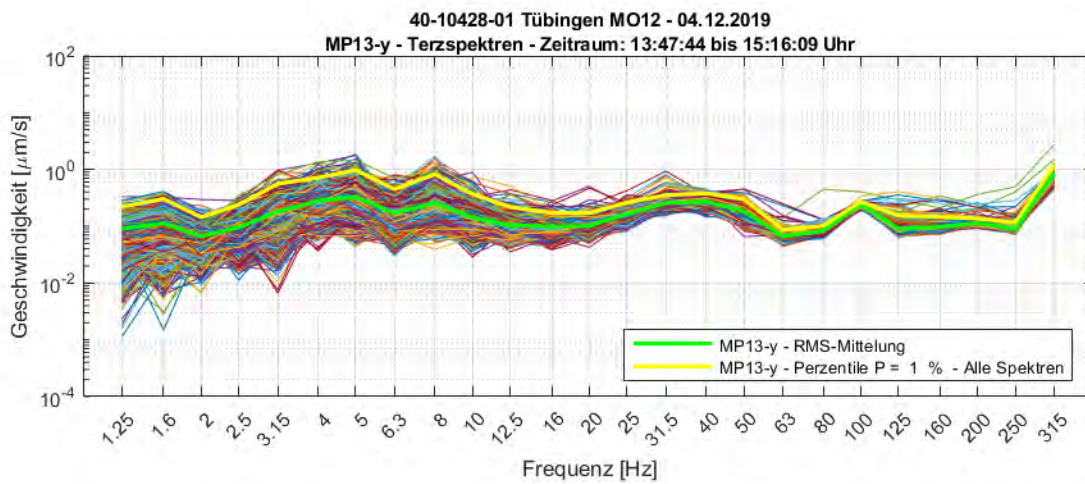
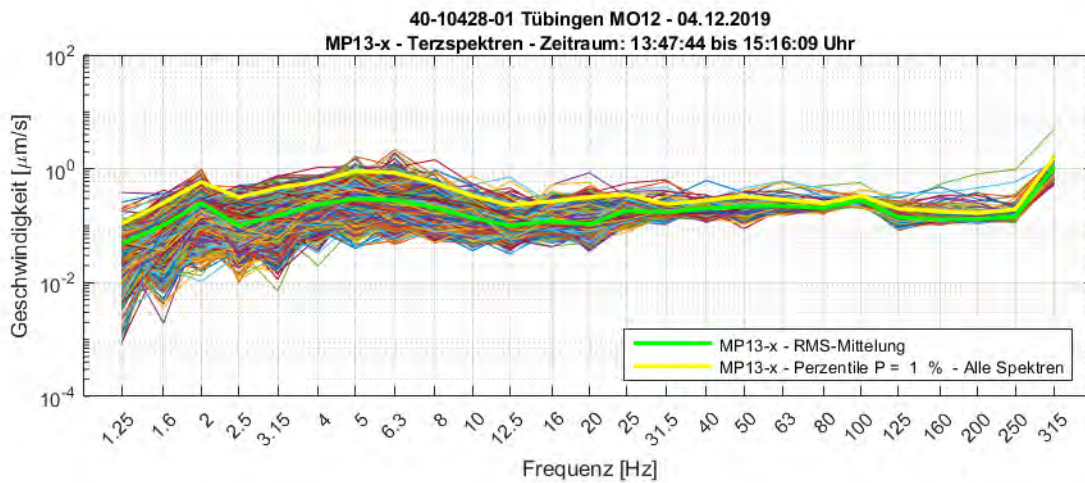
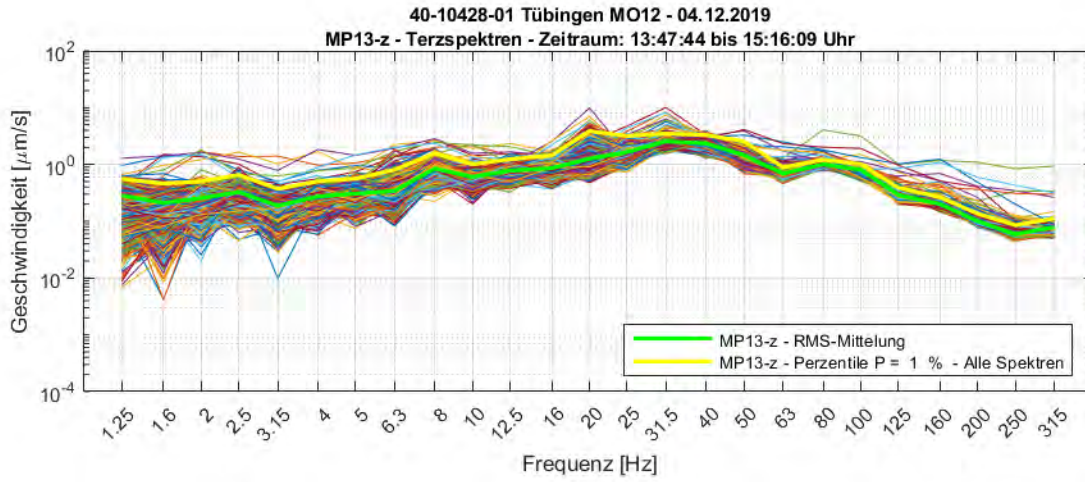
Folgende Messungen wurden am 04.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--|
| M1 | 1 Personen geht im Flur |
| M2 | Ambiente Schwingungen & Magnetfeldänderungen und Admittanzmessung mittels Impulsanreger Dynpact® |

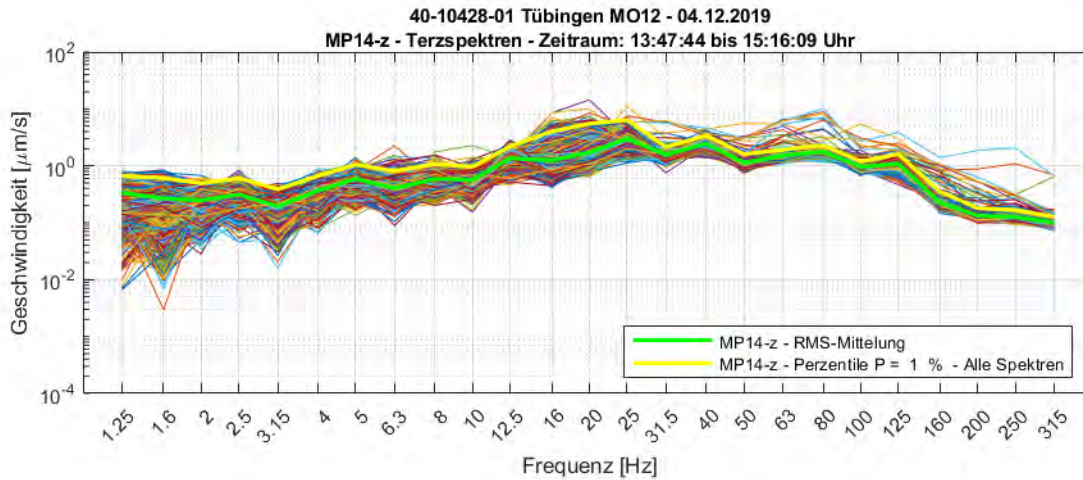
Tabelle 7-40: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO12

7.16.2 Schwingungspegel am MO12

4-Sekunden Terzspektren



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



In Abbildung 7-60 sind die 1% Perzentile der Terzspektren aller drei Raumrichtungen am MO12 dargestellt.

An MO12-MP14-z ist ein dominanter Peak bei einer Frequenz von 25 Hz erkennen, sowie ein weiterer bei 50 Hz. Diese Peaks werden auf den (lokalen) Betrieb von Versorgungstechnik (Pumpen, Kompressoren, Chillern o.ä.) zurückgeführt.

In vertikaler Richtung liegt die maximale Schwinggeschwindigkeit bei 6,4 $\mu\text{m/s}$, sodass das Kriterium VC-C ($v \leq 12,5 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten wird.

Die Schwinggeschwindigkeiten in horizontaler (x, y) Richtung liegen mit 1,6 $\mu\text{m/s}$ deutlich niedriger, so dass das Kriterium VC-F ($v \leq 1,6 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten wird.

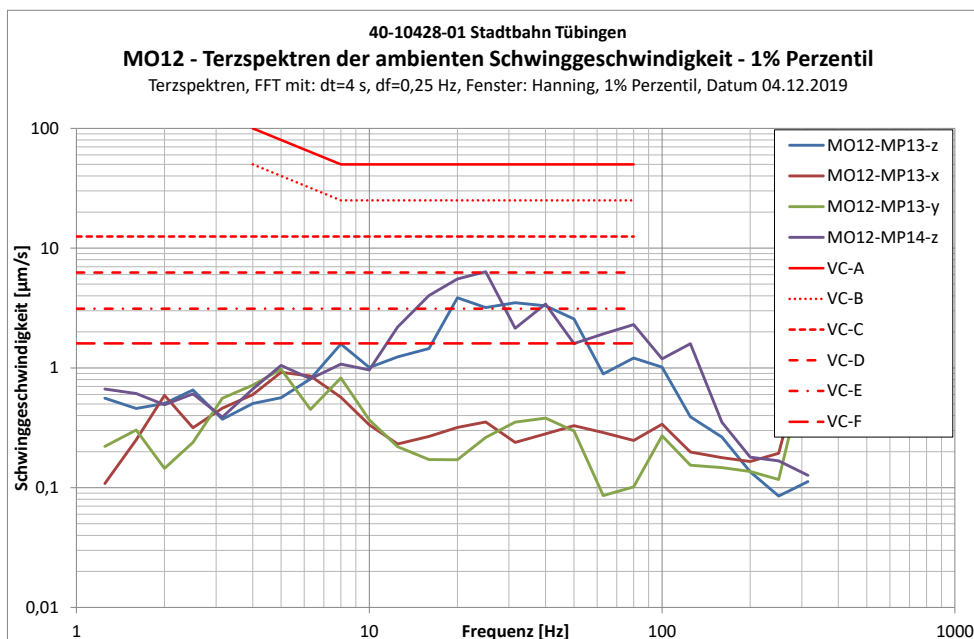


Abbildung 7-60: MO12 – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

Sonstige Anmerkungen

Bei den Schwingungsmessung sind in beiden Räumen an MO10 dominante Peaks bei 25 Hz und 50 Hz festzustellen, welche auf den Betrieb in der Nähe befindlicher Gebäude- und Versorgungstechnik (Pumpen, Lüfter, Kompressoren, o.ä.) zurückgeführt werden. Wenn die entsprechenden Aggregate identifiziert und mit einer angemessenen Schwingungsentkopplung ausgestattet werden, kann der Schwingungseintrag deutlich reduziert werden, sodass in beiden untersuchten Räumen vermutlich das Schwingungskriterium VC-D ($v \leq 6,25 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten werden kann.

7.16.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO12 |
| Gebäude | Geb. D (KG) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 248m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | - |
| Tool-Spezifikation | VC-D |

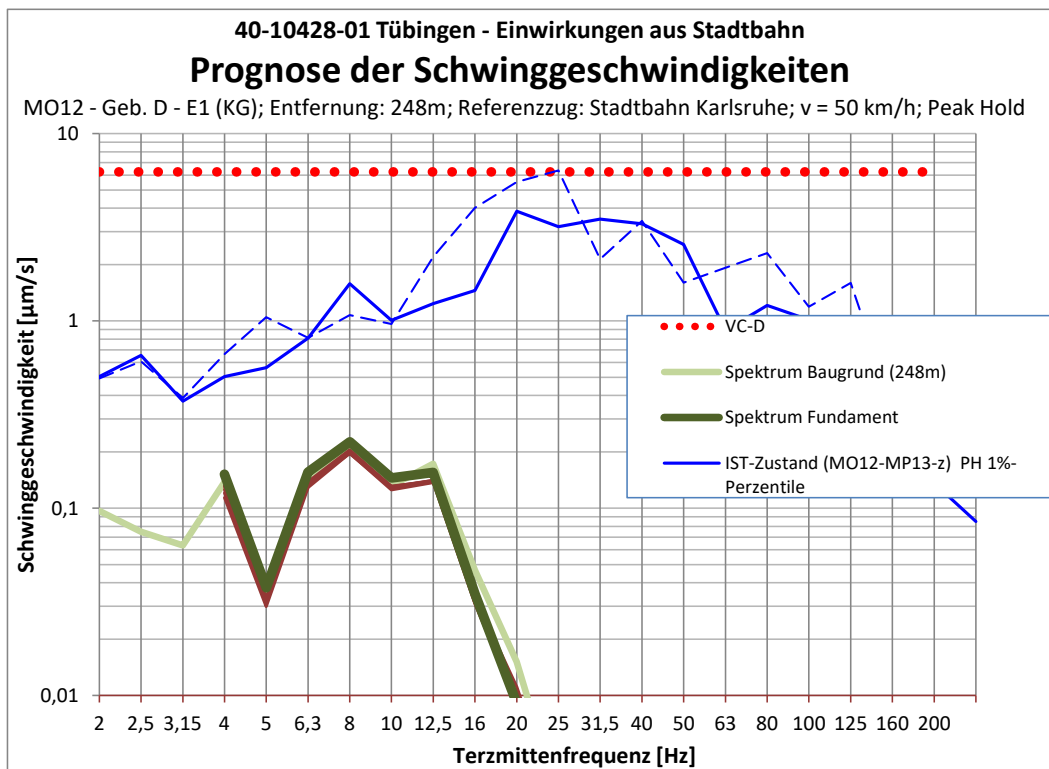
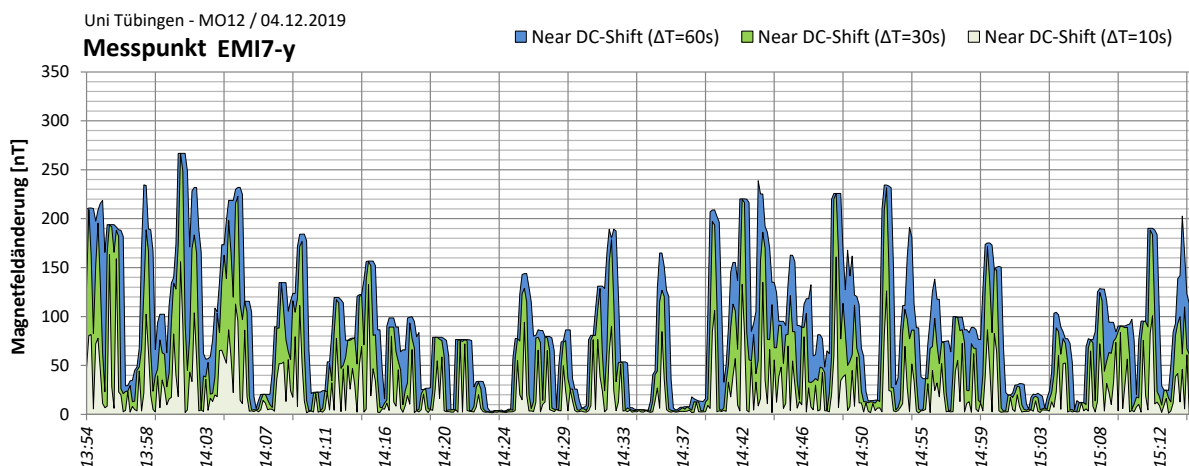
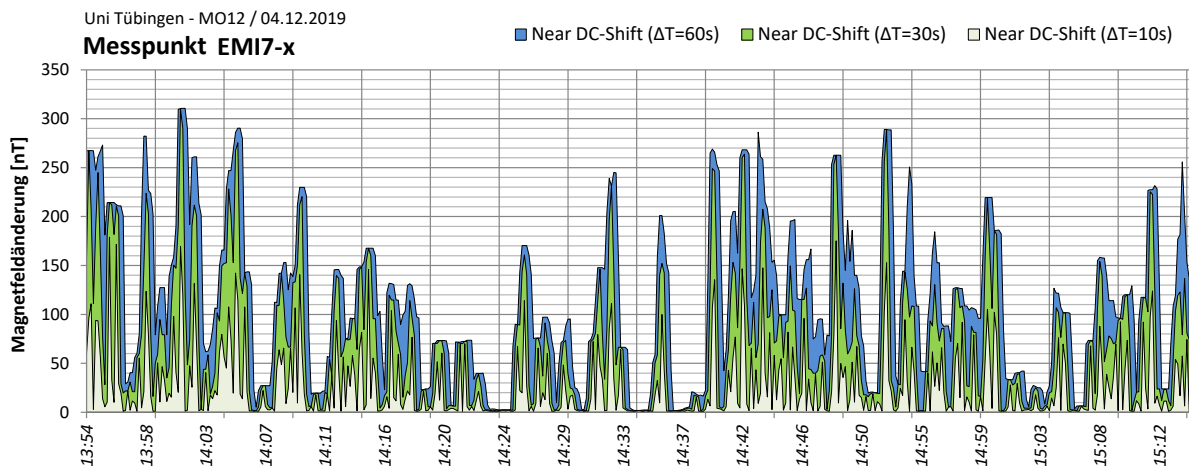
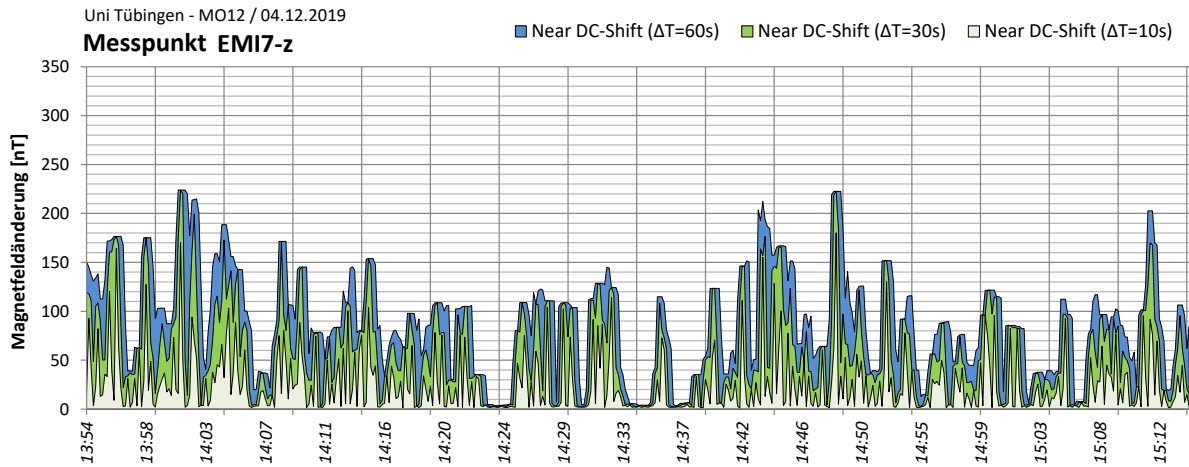


Abbildung 7-61: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO12

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

7.16.4 Near-DC Magnetfeldänderungen am MO12



Die oben dargestellten Abbildungen zeigen die Near-DC-Magnetfeldänderungen (Peak-to-Peak) am Messort MO12. Es sind etliche Peaks zu erkennen, die Maximalwerte bis 310,6 nT erreichen und eindeutig auf den Betrieb des nahegelegenen Fahrstuhls zurückgeführt werden. In den Zeiträumen und

Fahrstuhl-Vorbeifahrt liegt die Near-DC-Magnetfeldänderung mit < 30 nT deutlich niedriger und ist somit günstiger.

Abbildung 7-62 und Abbildung 7-63 zeigen den AC-Shift bei einer Frequenz von 16 Hz und 50 Hz. Im Bereich des Bahnstromnetzes von 16 Hz liegt der maximale AC-Shift mit 20,0 nT relativ niedrig.

Bei einer Frequenz von 50 Hz ist hingegen deutlich das Ein- und Ausschalten bestimmter Geräte zu sehen. Der Maximalwert beim Einschalten dieses Gerätes erreicht recht hohe Werte bis maximal 200,5 nT. Ist das Gerät ausgeschaltet liegt der Maximalwert der AC-Magnetfeldänderung bei < 120 nT.

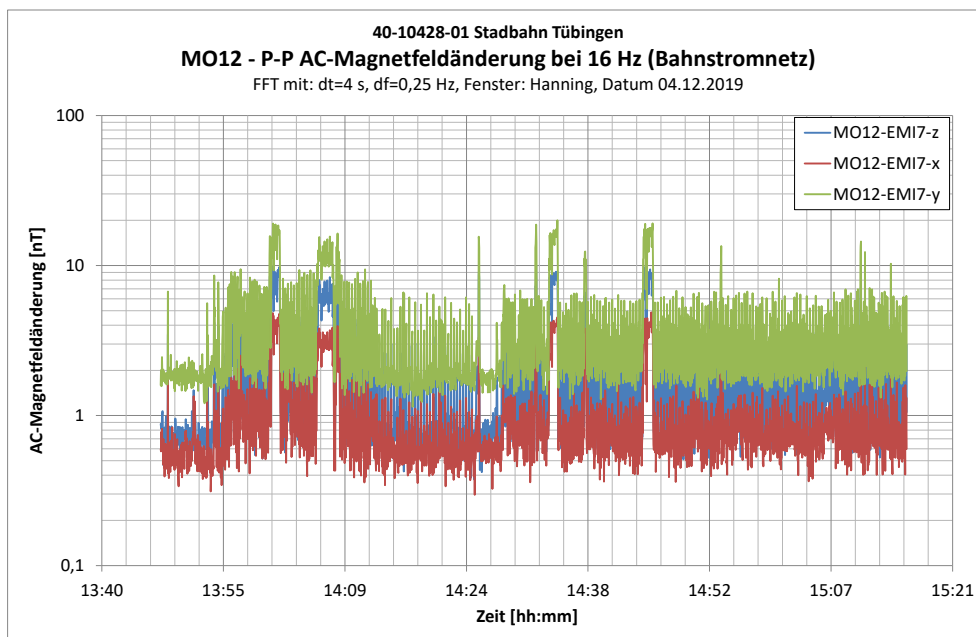


Abbildung 7-62: MO12 – AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz – Bahnstromnetz

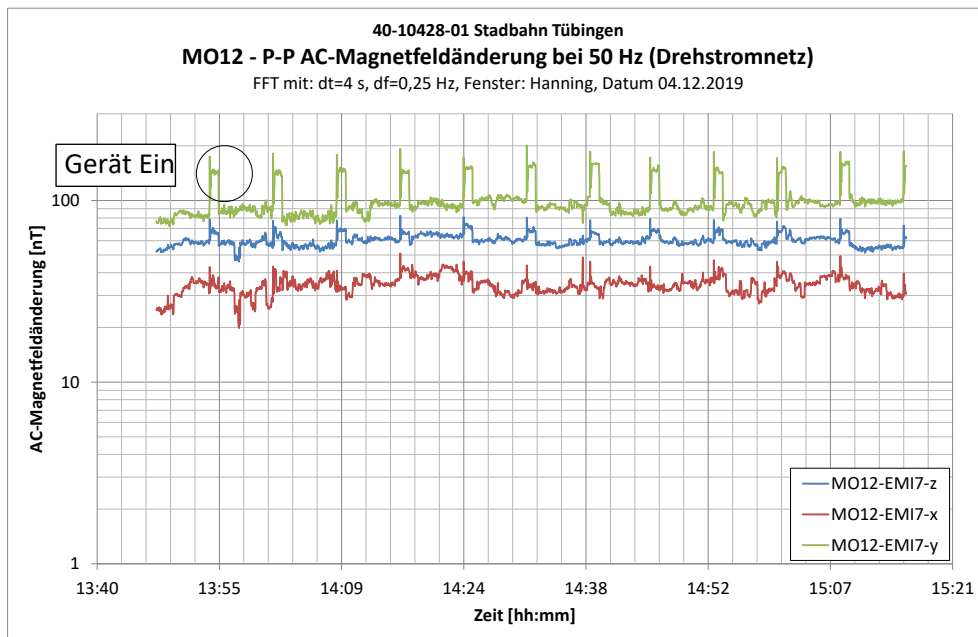


Abbildung 7-63: MO12 – AC-Magnetfeldänderung bei 50 Hz - Drehstromnetz

7.17 MO13 – Auf der Morgenstelle 14 (Gebäude D - OG)

7.17.1 Dokumentation der Messung am MO13

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage / Raum | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------|------------------|
| 1 | MP1 | Z | 5 H 40 | Dreifuß | G65 | +/- 2.000 [µm/s] |
| 2 | | X | | | | +/- 2.000 [µm/s] |
| 3 | | Y | | | | +/- 2.000 [µm/s] |
| 4 | EMI1 | Z | 5 H 40 | Stativ h = 120 cm | S53 | +/- 100 [µT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [µT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [µT] |
| 7 | MP2 | Z | 5 H 40 | Dreifuß | G145 | +/- 2.000 [µm/s] |

Tabelle 7-41: Messpunkte an MO13

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].

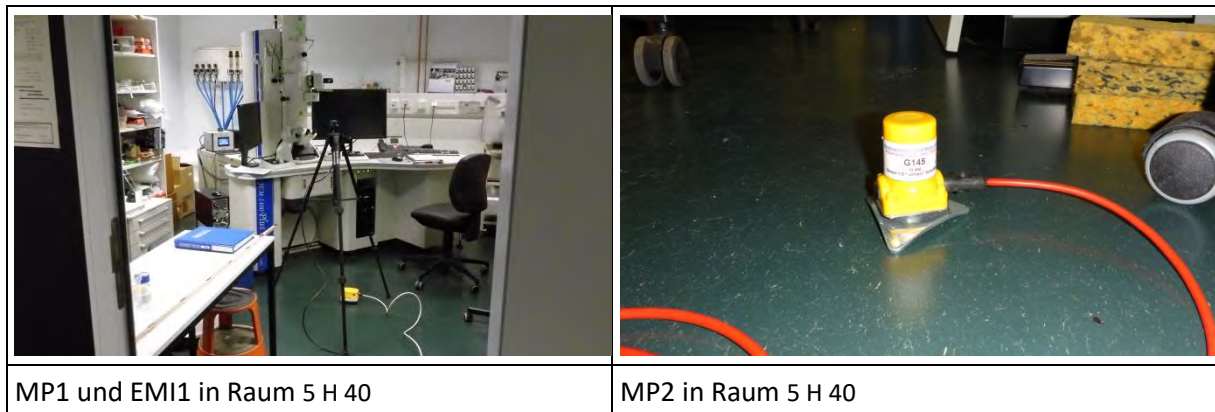


Tabelle 7-42: Fotodokumentation der Messpunkte am MO13

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:



Abbildung 7-64: Lage der Messpunkte am MO13

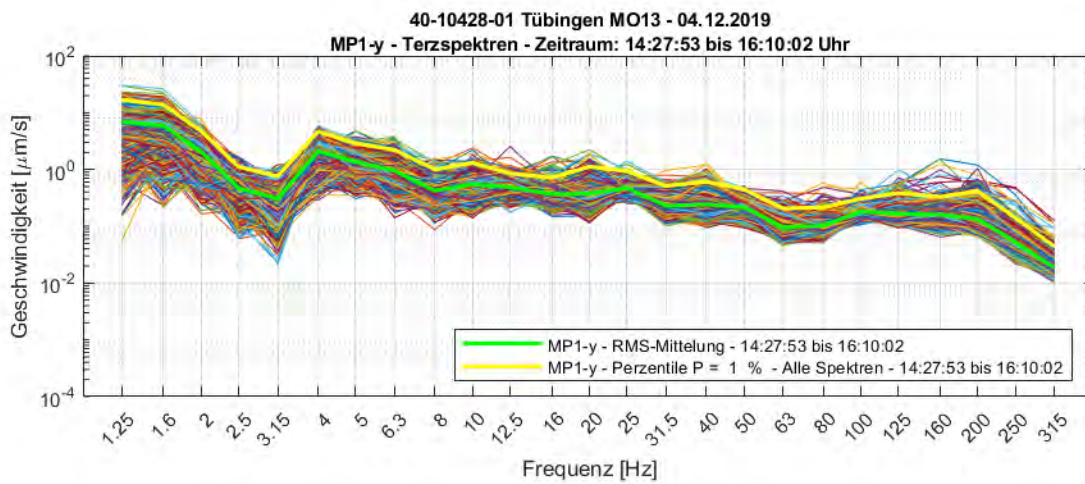
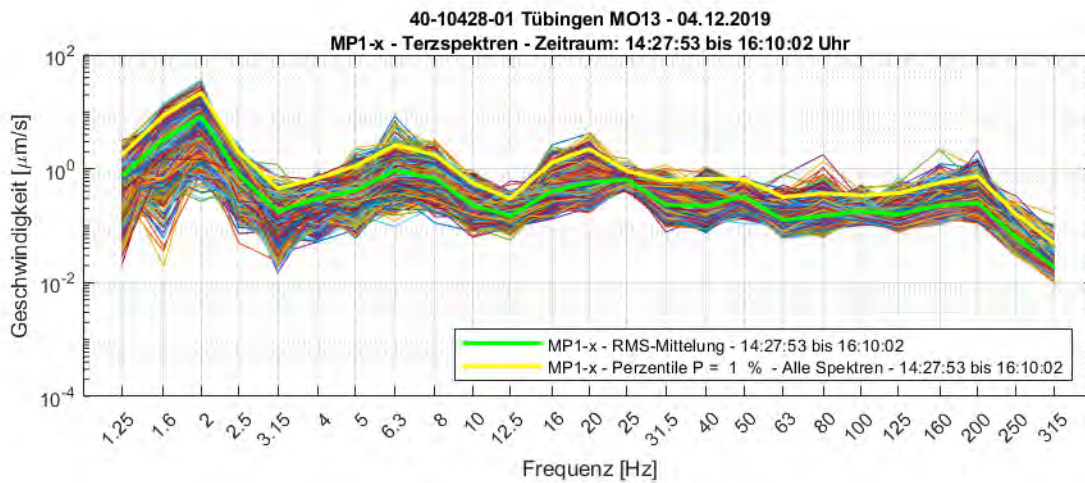
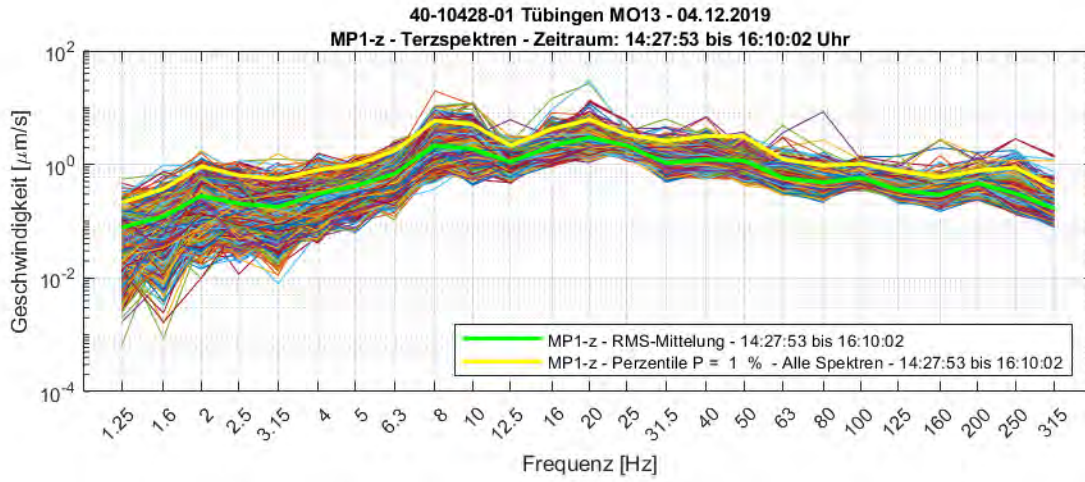
Folgende Messungen wurden am 04.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--|
| M1 | Fersenstoß |
| M2 | 2 Personen gehen im Flur |
| M3 | Ambiente Schwingungen & Magnetfeldänderungen und Admittanzmessung mittels Impulsanreger Dynpact® |

Tabelle 7-43: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO13

7.17.2 Schwingungspegel am MO13

4-Sekunden Terzspektren



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

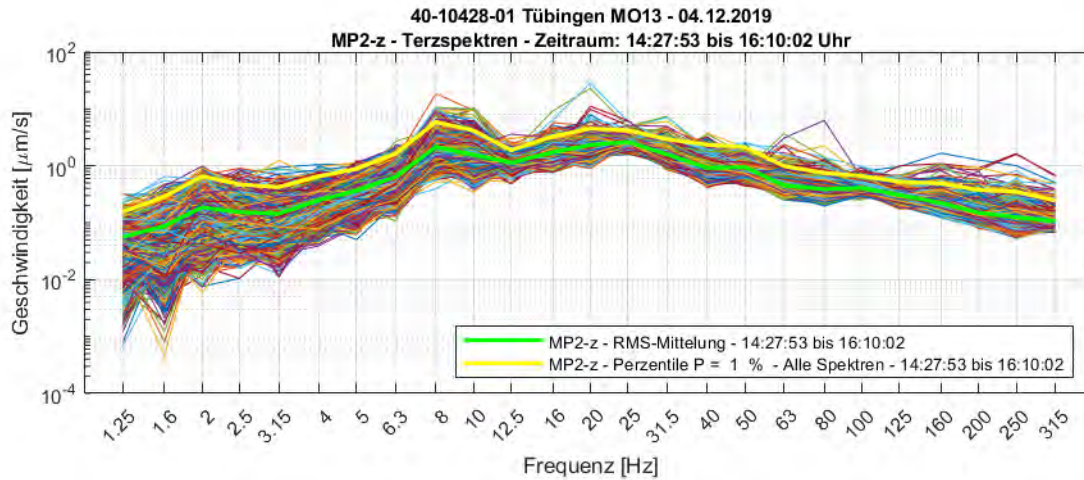


Abbildung 7-65 zeigt die 1% Perzentile der Terzspektren aller drei Raumrichtungen an MO13.

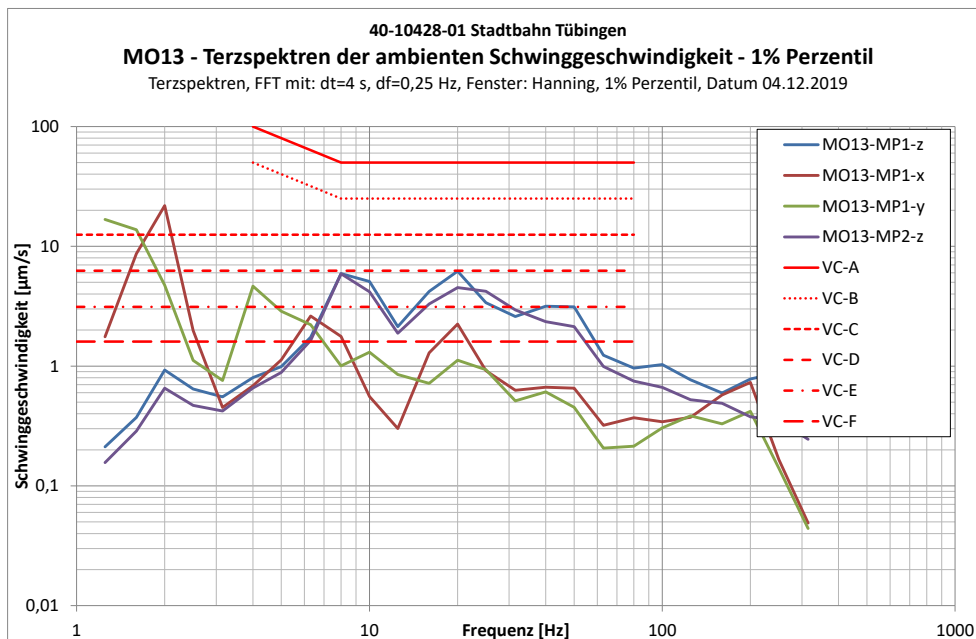


Abbildung 7-65: MO13 – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – 1% Perzentil

An den horizontalen Messpunkten sind hohe Peaks bei 1,25 Hz (MO13-MP1-y) und 2,0 Hz (MO13-MP1-x) zu erkennen – diese sind aller Wahrscheinlichkeit nach auf die horizontale Eigenfrequenz des Gebäudes zurückzuführen. Die maximale Schwinggeschwindigkeit in horizontaler (x, y) Richtung liegt bei 21,8 $\mu\text{m/s}$; somit wird das Kriterium VC-B ($v \leq 25 \mu\text{m/s}$, $8 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) eingehalten.

Die Schwinggeschwindigkeiten in vertikaler (z) Richtung liegen mit maximal 6,2 $\mu\text{m/s}$ deutlich niedriger und halten das Kriterium VC-D ($v \leq 6,25 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) knapp ein.

7.17.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO13 |
| Gebäude | Geb. D (E5) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 261m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-D |

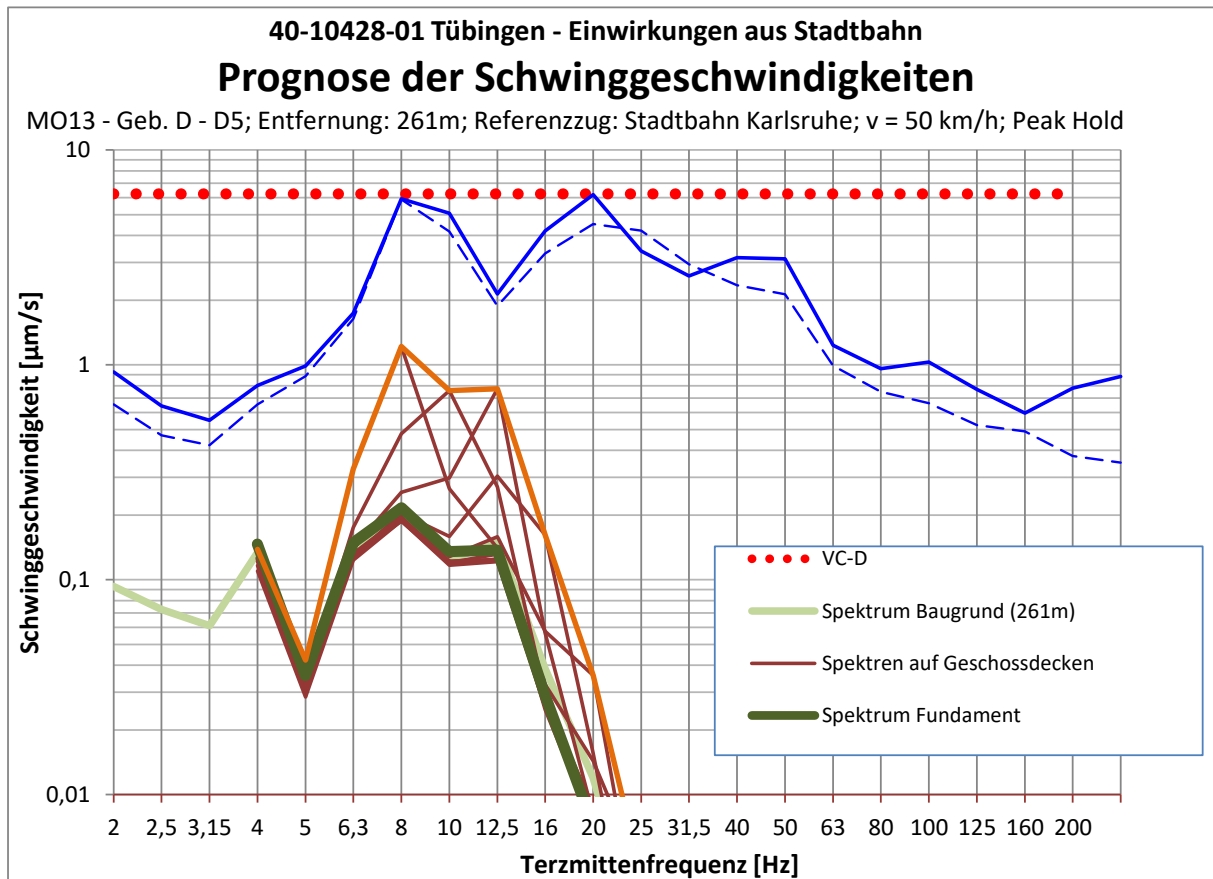
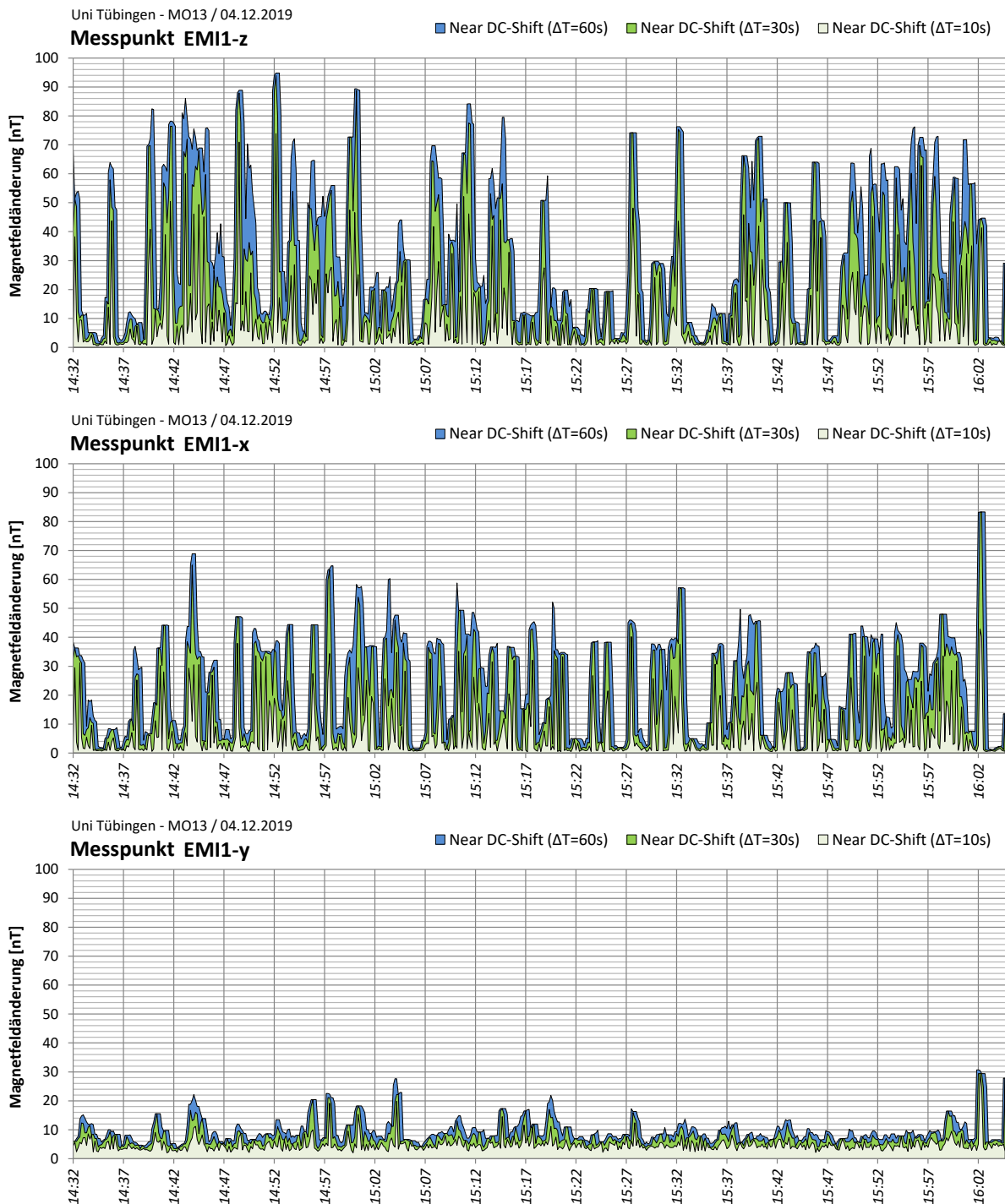


Abbildung 7-66: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO13

7.17.4 Near-DC Magnetfeldänderungen am MO13



Die oben dargestellten Abbildungen zeigen die Near-DC-Magnetfeldänderungen (Peak-to-Peak) am Messort MO13. Die Peaks über den Zeitverlauf der Messung resultieren aus Fahrstuhlvorbeifahrten – hier werden Maximalwerte von 94,8 nT erreicht. Im Zeitraum von 16:03 bis 16:05 ist eine „Ruhephase“ zu erkennen, in welchem der Fahrstuhlbetrieb bewusst unterbrochen wurde. Im Zeitraum ohne Fahrstuhlbetrieb liegt die Near-DC Magnetfeldänderung mit < 20 nT deutlich günstiger.

Abbildung 7-67 und Abbildung 7-68 zeigen den AC-Shift für 16 Hz und 50 Hz an MO13. Die Maximalwerte liegen hier mit 22,7 nT bzw. 41,4 nT niedrig und sind somit sehr günstig.

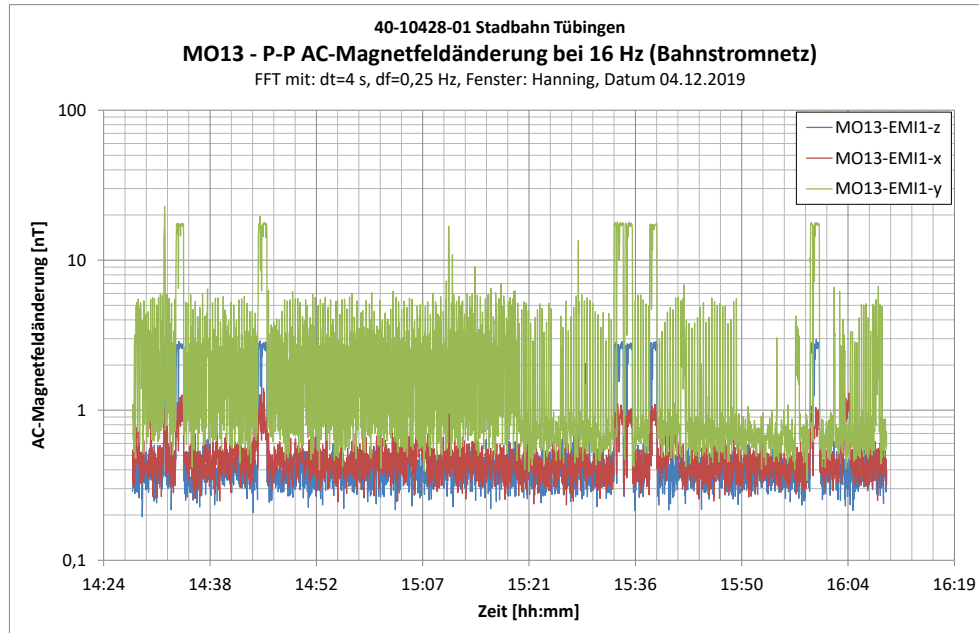


Abbildung 7-67: MO13 – AC-Magnetfeldänderung bei 16 Hz – Bahnstromnetz

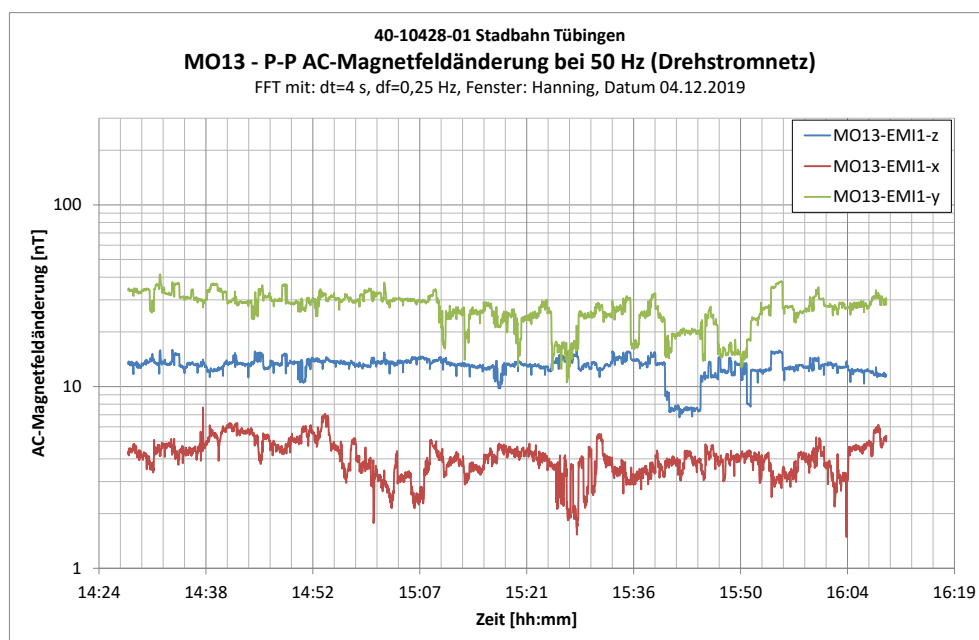


Abbildung 7-68: MO13 – AC-Magnetfeldänderung bei 50 Hz - Drehstromnetz

7.18 MO14 – Auf der Morgenstelle 3 (Gebäude I)

7.18.1 Dokumentation der Messung am MO14

Im Gebäude Morgenstelle 3 wurde keine gesonderte Beweissicherungsmessung durchgeführt. Während der Ausbreitungsmessung A4 (s. Anlage 8.8) waren im Gebäude jedoch Schwingungssensoren instrumentiert. Die Schwingungen an diesen Messpunkten werden analog zu den übrigen Messorten ausgewertet, um den IST-Zustand in diesem Gebäude zu dokumentieren. Aufgrund der reduzierten Messdauer wurde allerdings auf eine statistische Auswertung (1%-Perzentile) verzichtet und stattdessen der PH-Wert ersatzweise dokumentiert.

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-----------------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
| 6 | MP5 | Z | Fundament | Tripod | G35 | +/- 1.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 7 | MP6 | Z | Fundament | Tripod | G142 | +/- 1.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 8 | MP7 | Z | 1. OG Feldmitte | Tripod | G27 | +/- 1.000 [$\mu\text{m/s}$] |

Tabelle 7-44: Messpunkte an MO14

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].


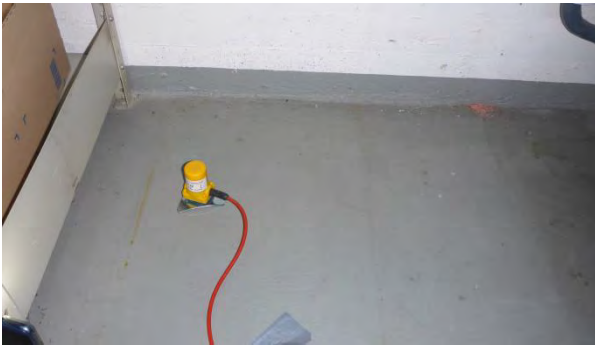

| | |
|---|--|
|  |  |
| MP5 – WC Kellergeschoss (Nord) | MP6 – Herbarium U29 - Kellergeschoss |
|  | |
| MP7 – Kursraum 3 (161) – 1. Obergeschoss | |

Tabelle 7-45: Fotodokumentation der Messpunkte am MO14

| | | |
|--|--|-------------------|
| Projekt: Stadtbahn Tübingen Bericht-Nr.: 40-10428-01-D8 | Erschütterungs- und Magnetfeldimmissionen auf das Klinik- und Forschungsumfeld der Universität | Seite - 160/249 - |
|--|--|-------------------|

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:



Abbildung 7-69: Lage der Messpunkte am MO14

Folgende Messungen wurden am 04.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|-----------------------|
| M4 | Ambiente Schwingungen |

Tabelle 7-46: Auflistung der durchgeführten Messungen am MO14

7.18.2 Schwingungspegel am MO14

Abbildung 7-65 und Abbildung 7-71 zeigen die Peak-Hold und RMS-Spektren aller drei Raumrichtungen an MO14.

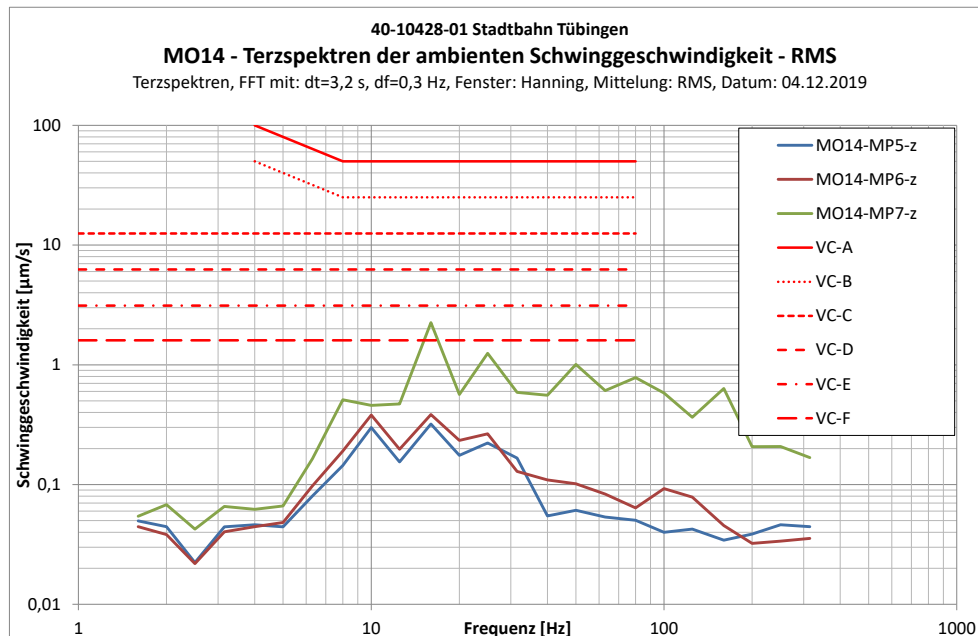


Abbildung 7-70: MO14 – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – RMS-Mittelung

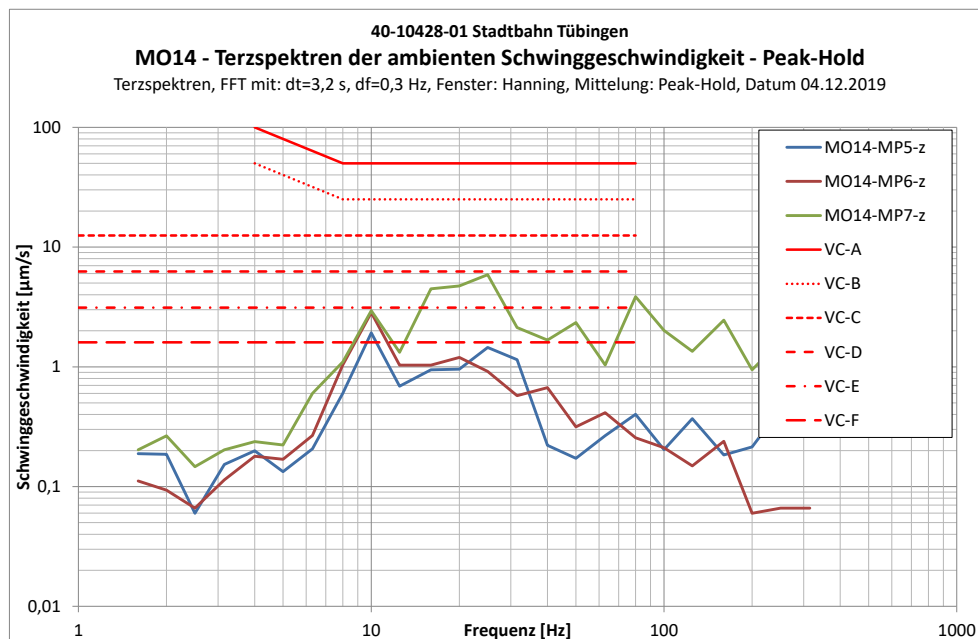


Abbildung 7-71: MO14 – Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit – Peak-Hold

Die Spezifikation des Standortes MO14 erfolgt auf Basis der Peak-Hold-Terzspektren in Abbildung 7-71. Die Schwingungen auf der Bodenplatte erreichen ihren Maximalwert bei 10 Hz, die höchste

Schwinggeschwindigkeit liegt dort bei 2,9 $\mu\text{m/s}$, so dass das Schwingungskriterium VC-E ($v \leq 3,1 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) gerade eingehalten wird.

Auf der Decke (MO14-MP7) sind die Schwinggeschwindigkeiten deutlich höher. Die größte Schwinggeschwindigkeit wird bei einer Frequenz von 25 Hz erreicht und beträgt 5,9 $\mu\text{m/s}$. Auf dieser Decke wird das Schwingungskriterium VC-D ($v \leq 6,25 \mu\text{m/s}$, $1 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$) knapp eingehalten.

7.18.3 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO14 |
| Gebäude | Geb. I |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A4 |
| Ausbreitung | A4 |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 37m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Messtechnisch ermittelt (Messung A4) |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-E |

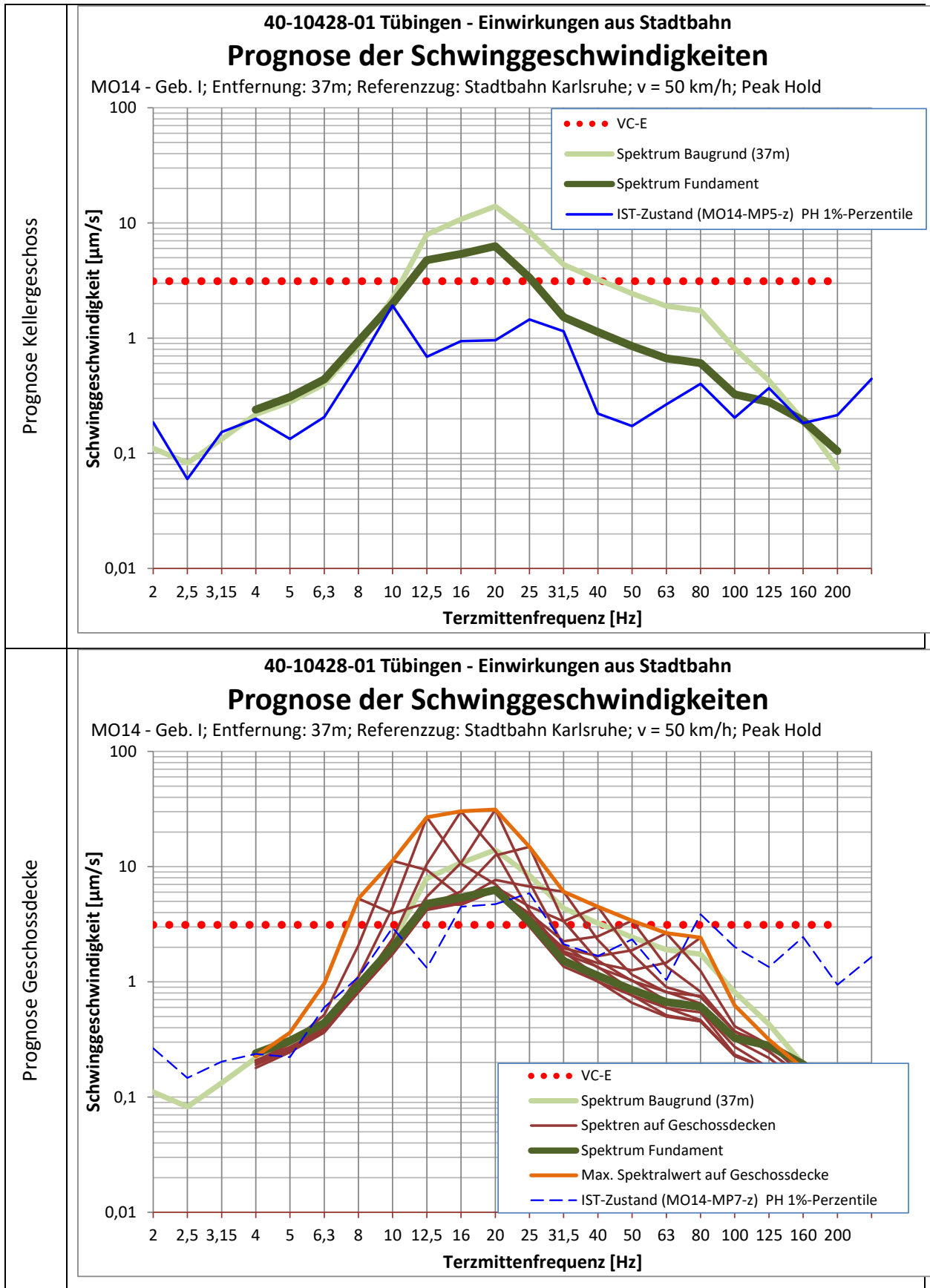


Abbildung 7-72: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO14

7.19 MO15 – Calwerstraße 7 (Frauenklinik, med. Genetik)

7.19.1 Vorbemerkung

Bei diesem Objekt mit einem Abstand von 90m zur geplanten Trasse wurde keine IST-Messung durchgeführt. Gemäß [10] befinden sich dort

- Im Raum 1.526 (Erdgeschoss, nicht unterkellert) ein MRT vom Typ Siemens Magnetom Aera,
- Sequenzier-Geräte vom Typ NovaSeq 6000.

7.19.2 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Bezeichnung | MO15 |
| Gebäude | Frauenklinik, med. Genetik |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsdmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 90m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | Im KG: Magnetom Aera 1.5 Tesla Im OG: VC-A |

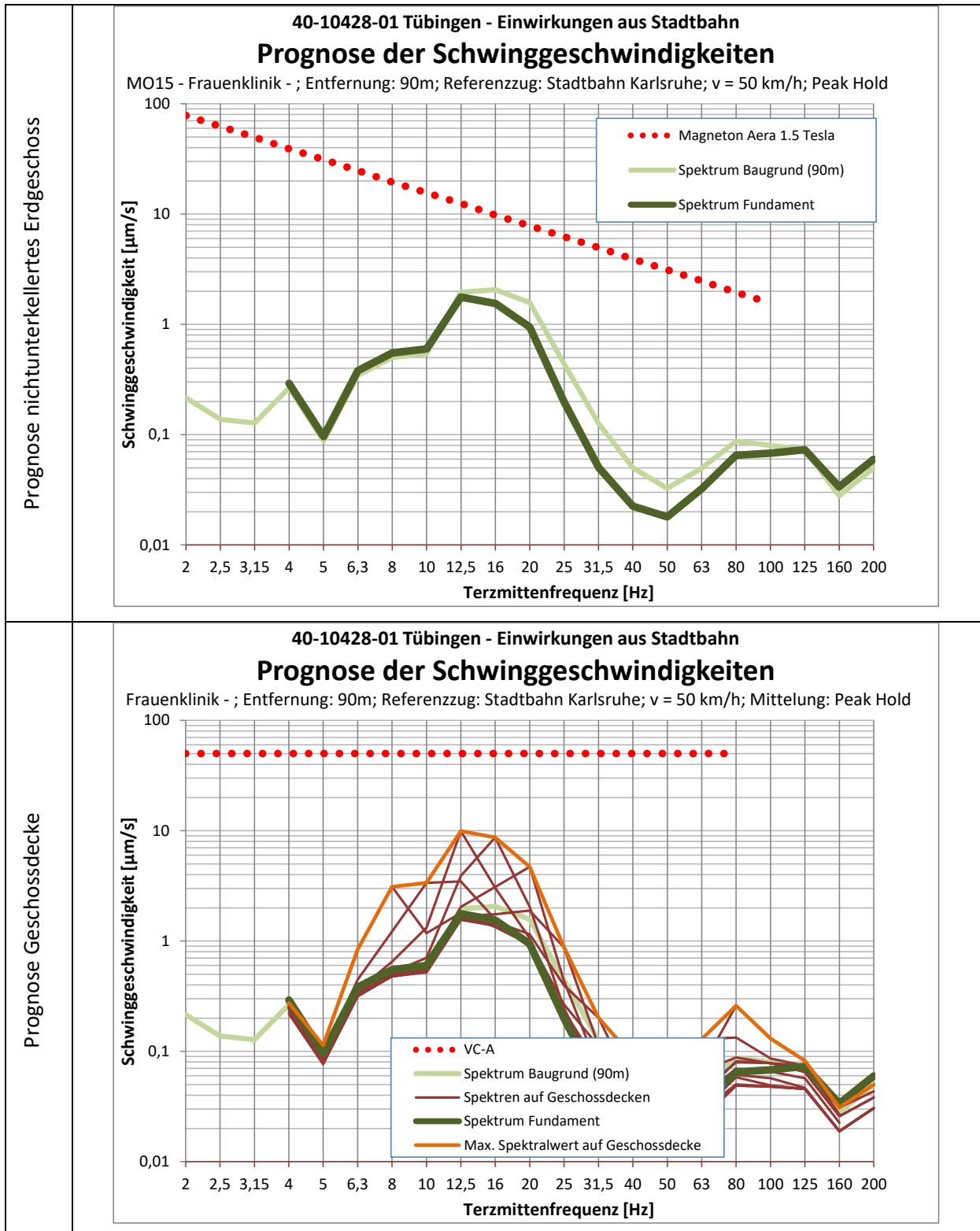


Abbildung 7-73: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO15

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

7.20 MO16 – Calwerstraße 7/6 (Neonatologie)

7.20.1 Vorbemerkung

Dieses Gebäude befindet sich im Nahbereich zur geplanten Trasse (minimal 12m; nächstgelegene Forschungslabore 15m). Es wurde keine IST-Messung durchgeführt. Gemäß [10] befinden sich dort

- Präzisionswaagen,
- ein Mikrotom.

7.20.2 Prognose der einwirkenden Schwingungen während Stadtbahn-Vorbeifahrt

| | |
|----------------------------------|--|
| Bezeichnung | MO16 |
| Gebäude | Neonatologie |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 |
| Ausbreitung | A3 |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 15m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-A |

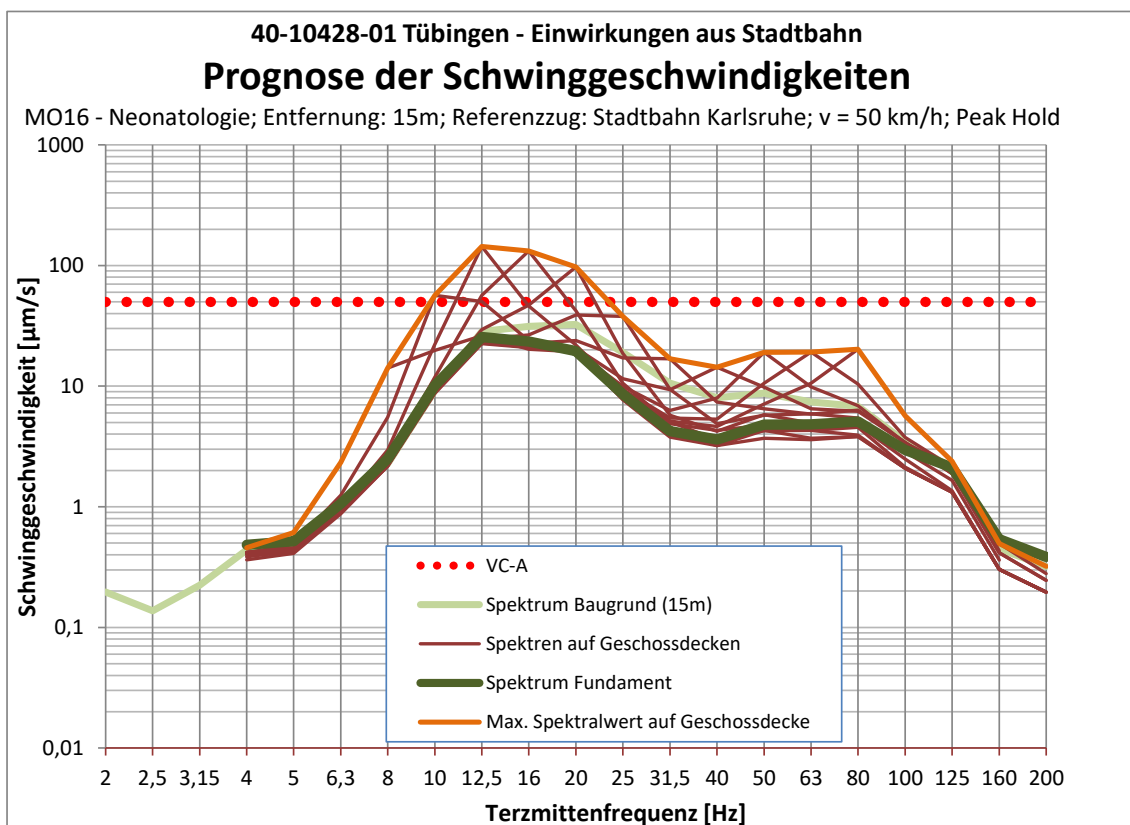


Abbildung 7-74: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO16

8 Anlage III: Dokumentation der Übertragungsadmittanz-Messungen in Tübingen

zum Bericht mit der Nr.: 40-10428-01-D8 vom 16.12.2020

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

8.1 Dokumentation der Messung

Die Übertragungsadmittanz-Messungen fanden am 03.-04.12.2019 in Tübingen statt. Dabei wurden Ausbreitungsmessungen im Freifeld auf unversiegelter Fläche infolge künstlicher Impulsanregung (DYNPACT®) durchgeführt.

| | |
|---------------------|--|
| Messdatum | 03.-04.12.2019 |
| Messpersonal | D. Heiland, M. Mistler, M. Nitschke, T. Schulte Pelkum, M. Wydra, A. Wende, F. Sadat |
| Wetter | sonnig, etwa 0°C |

Tabelle 8-1: Allgemeine Angaben zur Messung

8.2 Verwendetes Messequipment

Zur Messung der Schwinggeschwindigkeiten wurde folgendes Messequipment verwendet:

| | |
|--|--|
| Geschwindigkeitssensoren | Geophone 1 – 315 Hz gemäß DIN 45669 Sensornummer gemäß Tabelle „Übersicht der Messpunkte“ |
| Messverstärker | Wölfel, 12 Kanal, SN: 020.4610.6021 Messverstärker KAM350 DMS |
| A/D Wandlerkarte | NI DAQCard-6036 E, 16 AE, 16bit, 200kS/s |
| Messrechner | Panasonic CF-52, SN: 0ITCA55478 |
| Letzte Kalibrierung der Messkette | 03/2018 |
| Messsoftware | Meda_AD Version 2019-1 |

Tabelle 8-2: Verwendetes Messequipment

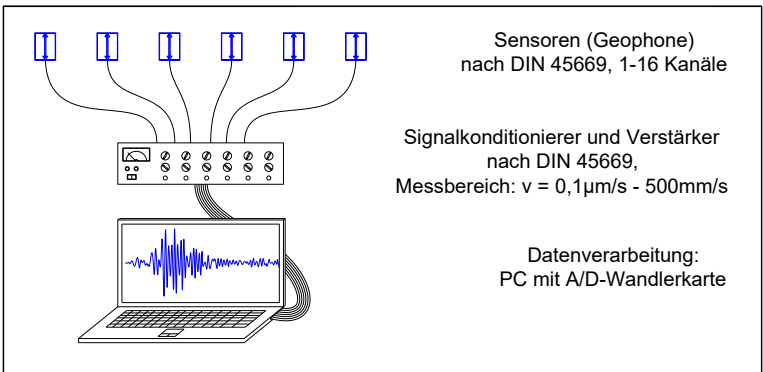
| | | |
|--------------------------|------------------------------|--|
| Anzahl Messkanäle | 6-12 Abhängig vom Messort |  <p>Sensoren (Geophone) nach DIN 45669, 1-16 Kanäle</p> <p>Signalkonditionierer und Verstärker nach DIN 45669, Messbereich: $v = 0,1\mu\text{m/s} - 500\text{mm/s}$</p> <p>Datenverarbeitung: PC mit A/D-Wandlerkarte</p> |
| Bandbreite | 1000 Hz | |
| Abtastfrequenz | 2560 Hz | |
| Antialiasing | 1000 Hz | |

Tabelle 8-3: Messparameter der DYNPACT-Messungen

8.3 Messunsicherheiten

Die bei der Schwingungsmessung eingesetzten Messgeräte entsprechen den Vorgaben für Schwingungsmesser gemäß DIN 45669-1 [2]. Dadurch, dass die Einzelanforderungen an die Schwingungsmesser gemäß DIN 45669-1 eingehalten werden, können Messabweichungen klein gehalten werden. Durch Einhaltung der in der Norm definierten Einzelabweichungen der Geräte innerhalb der Mess-

kette ist zu erwarten, dass die Messabweichung einer einzelnen aufgezeichneten Messgröße, unabhängig von der Signalart, die Vertrauensgrenze von 15 % für effektivwertbasierte Messwerte und 20 % für Spitzenwerte mit hohem statistischem Vertrauensniveau einhält.

8.4 Auswertung der diskreten Übertragungsdmittanzen

Die Übertragungsdmittanz wird innerhalb eines Anregungsortes von allen Anregungspunkten I1 bis I6 Anregungspunkten zu allen 6 bis 11 Messpunkten MP1 bis MP11 ausgewertet. Die jeweilige Übertragungsdmittanz wird durch Bildung der Transferfunktion (Betrag- und Phasen-Spektrum) des Kraftimpulses zu der Schwingungsantwort für jeden einzelnen Impuls mittels Amplitudentriggerung des Kraftsignals wie folgt ausgewertet und über alle Kraftimpulse gemittelt:

$$TF(f) = \frac{S_A(f) \cdot S_E(f)^*}{S_E(f) \cdot S_E(f)^*}$$

$S_A(f)$: komplexes Spektrum der Systemantwort

$S_E(f)$: komplexes Spektrum der Systemerregung.

$S_E(f)^*$: konjugiert komplexes Spektrum der Systemerregung

Dabei werden folgende Auswerteparameter zugrunde gelegt:

| Trigger-Parameter | | FFT-Parameter | |
|-------------------|----------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Triggertyp: | Kraftamplitude | Fensterbreite | 4096 Pkt. = 4096/2560Hz = 1,6s |
| Pre-Trigger-Zeit: | 0,1s | Fenstertyp der Erregung: | Rechteck |
| Triggerschwelle: | 15kN | Fenstertyp der Antwort | Rechteck |

Tabelle 8-4: Auswerteparameter der Übertragungsdmittanzen

Die schmalbandigen Übertragungsdmittanz-Spektren mit einer Frequenzauflösung von $\Delta f = 1/1,6s = 0,625$ Hz werden jeweils in ein äquivalentes, auf die Terzmittenfrequenzen bezogenes Spektrum transformiert, und zwar für jeden Messpunkt bezogen auf jeden Anregungspunkt.

Nachdem sämtliche Übertragungsdmittanzen von allen Anregungspunkten zu allen Messpunkten berechnet worden sind, werden folgende Schritte durchgeführt:

- Es werden für jede Terzmittenfrequenz die Übertragungsdmittanzen $TF_{Punkt}(f)$ in Abhängigkeit der Entfernung d dargestellt.
- Mittels Regressionsanalyse wird die exponentielle Abnahmefunktion in der Form

$$TF_{Punkt}(f, d) = TF_{8m}(f) \cdot \left(\frac{8m}{d}\right)^{n_{Punkt}(f)}$$

statistisch ermittelt, wobei der Exponent n_{Punkt} frequenzabhängig ist und daher für jede Terzmittenfrequenz individuell bestimmt wird. 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 Regressionsanalyse sind in den folgenden Unterkapiteln für alle Standorte und für jede Terzmittenfrequenz dargestellt.

Mit dieser Vorgehensweise wird die statistische Zuverlässigkeit erhöht, da sämtliche Übertragungsadmittanzen mit in die Auswertung einbezogen werden und nicht nur die einzelnen Stützstellen ausgewertet werden.

- Da eine gemittelte Übertragungsadmittanz in Abhängigkeit der Entfernung vorliegt, kann durch Integration der Punktquellenadmittanzen über die Einflusslänge die Linienquellen-Admittanz berechnet werden. Die zu berücksichtigende Einflusslänge wird über einen festgelegten Ausbreitungswinkel von 70° ermittelt, so dass der erfasste Einflussbereich abhängig von dem Referenzabstand ist.

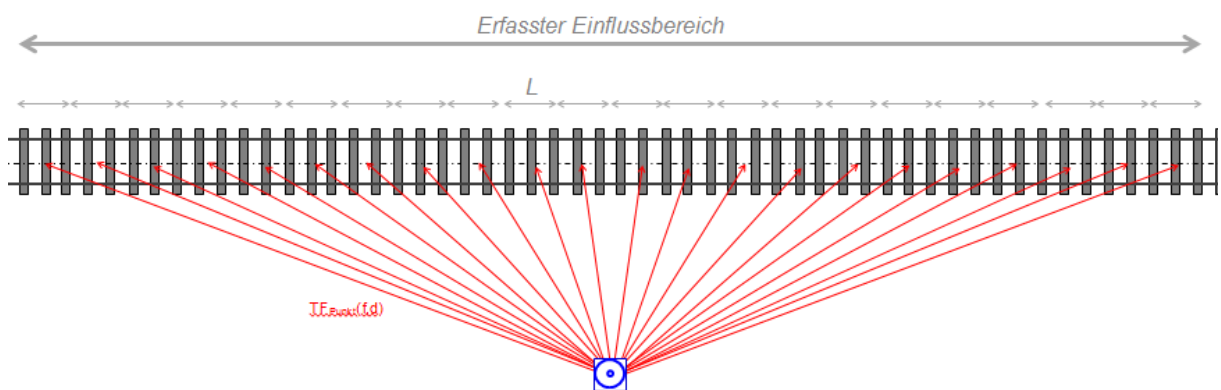


Abbildung 8-1: Ermittlung der Linienquellen-Admittanz

- Die Linienquelle hat eine geringere Abnahme im Vergleich zur Punktquelle. Die Auswertung zeigt, dass der zu einer Linienquelle zugehörige, frequenzabhängige Abnahmeexponent folgenden Wert aufweist:

$$n_{Linie} = n_{Punkt} + 0,5$$

8.5 A1 – CIN-Gebäude

8.5.1 Dokumentation der Messung mit künstlicher Impulsanregung

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|--------------------|-----------------------------------|--------|----------------|
| 1 | Kraft | Z | I1-I6 | Dynapct (Kam350) | S41 | 0-350[kN] |
| 2 | MP1 | Z | 5m-Punkt | Spike | G101 | +/- 10k [µm/s] |
| 3 | MP2 | Z | 5m-Punkt | Spike | G2 | +/- 10k [µm/s] |
| 4 | MP3 | Z | 5m-Punkt | Spike | G23 | +/- 10k [µm/s] |
| 5 | MP4 | Z | 10m-Punkt | Spike | G104 | +/- 10k [µm/s] |
| 6 | MP5 | Z | 20m-Punkt | Spike | G105 | +/- 1k [µm/s] |
| 7 | MP6 | Z | 40m-Punkt | Spike | G16 | +/- 1k [µm/s] |
| 8 | MP7 | Z | 60m-Punkt | Spike | G107 | +/- 1k [µm/s] |
| 9 | MP8 | Z | Fundament-Punkt | Tripod auf Beton | G42 | +/- 1k [µm/s] |
| 10 | MP9 | Z | 5m-Punkt vom Gulli | Spike | G8 | +/- 10k [µm/s] |

Tabelle 8-5: Messpunkte an A1

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].



Messpunkte MP1-MP3



MP4



MP5

MP6



MP7

MP8



MP9

Übersicht

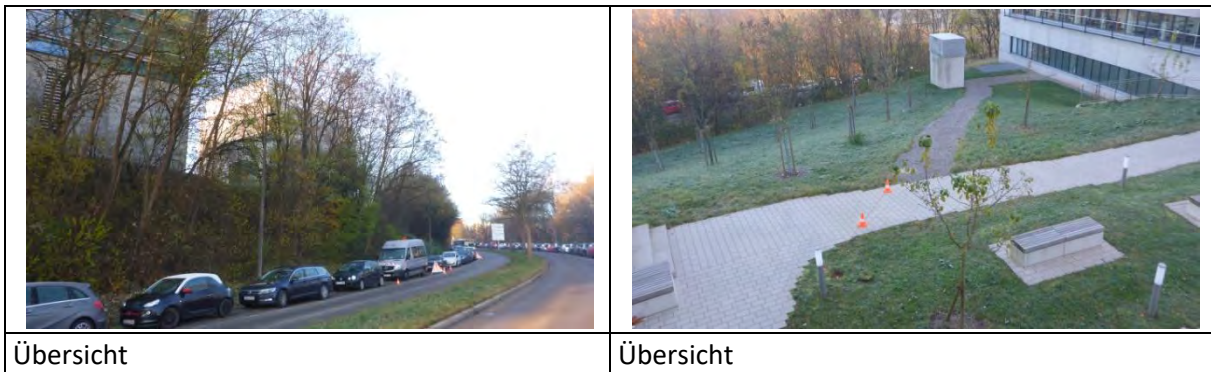


Tabelle 8-6: Fotodokumentation der Messpunkte am A1

In der folgenden Grafik ist die Lage der Messpunkte skizziert:

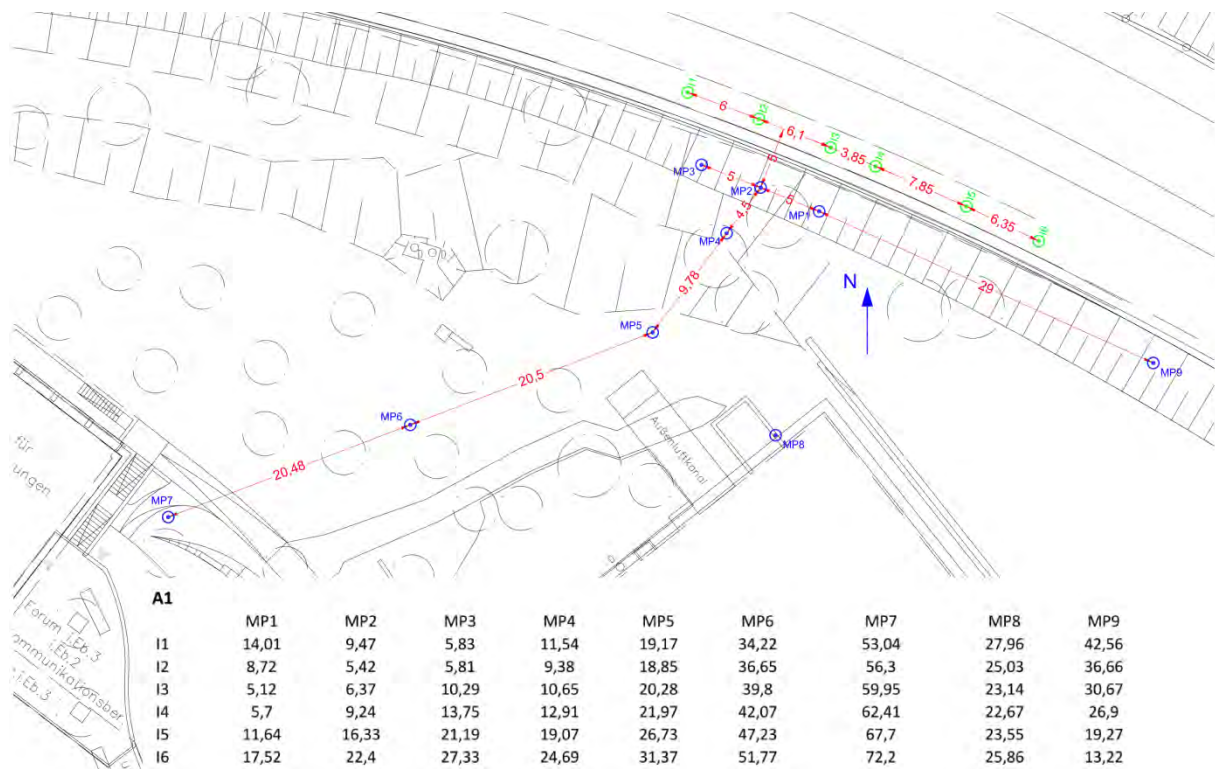


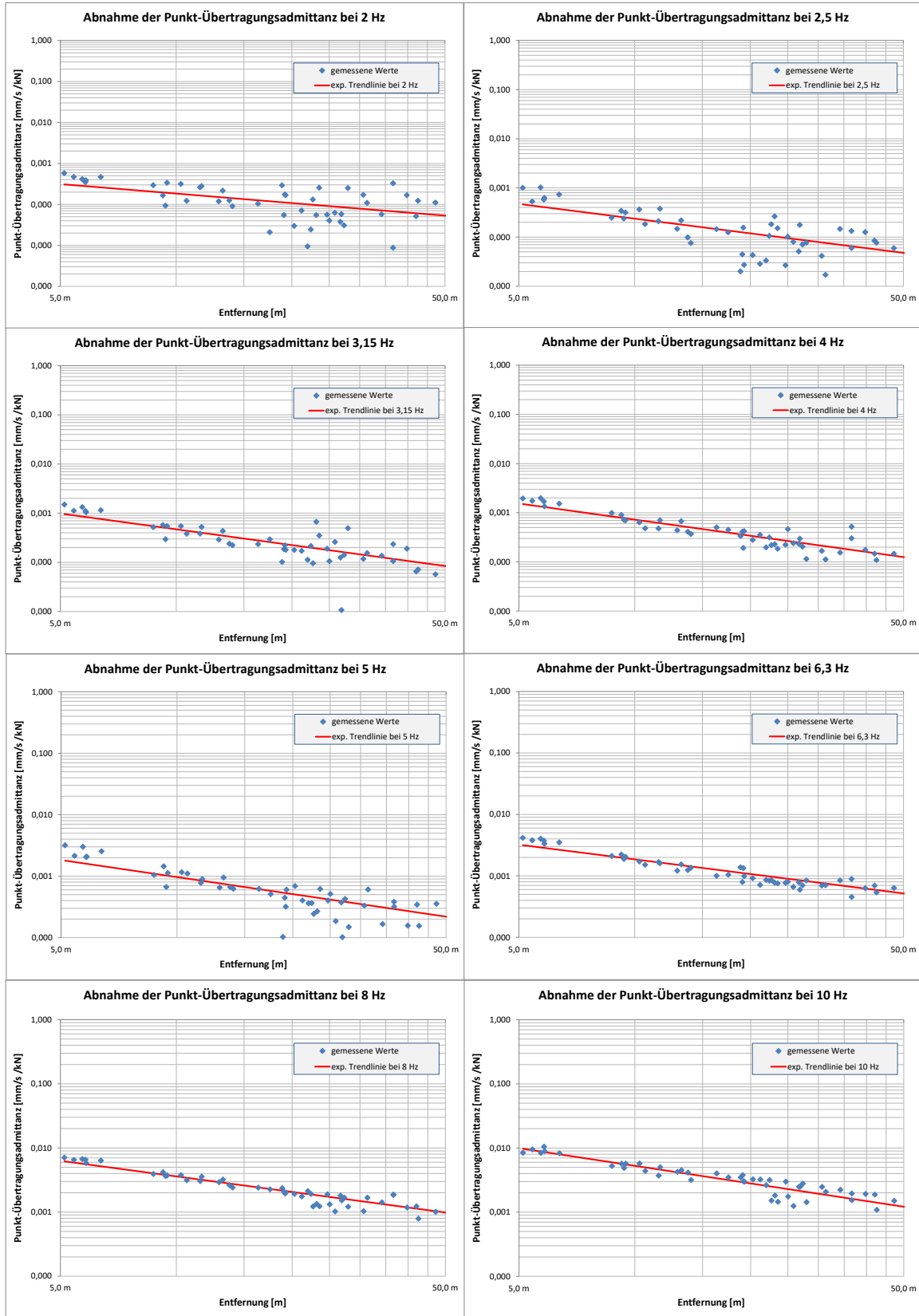
Abbildung 8-2: Lage der Messpunkte am A1

Folgende Messungen wurden am Messort A1 durchgeführt:

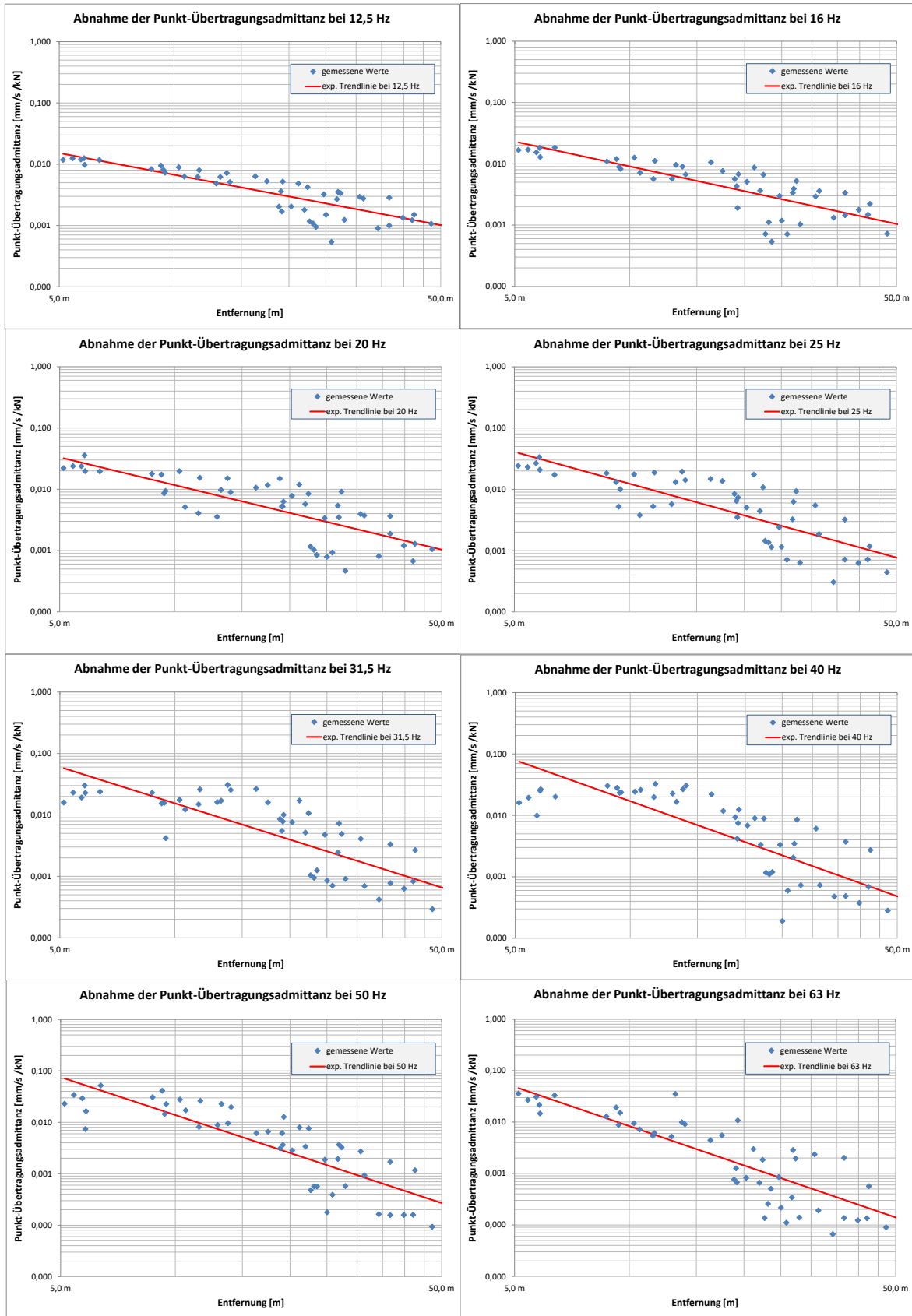
| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--------------------|
| Abklopfen | QS-Prüfung |
| A1-I2 | Impact am MQ A1-I2 |
| A1-I1 | Impact am MQ A1-I1 |
| A1-I3 | Impact am MQ A1-I3 |
| A1-I4 | Impact am MQ A1-I4 |
| A1-I5 | Impact am MQ A1-I5 |
| A1-I6 | Impact am MQ A1-I6 |
| A1-M1 | Ruhemessung 1800s |

Tabelle 8-7: Auflistung der durchgeführten Messungen am A1

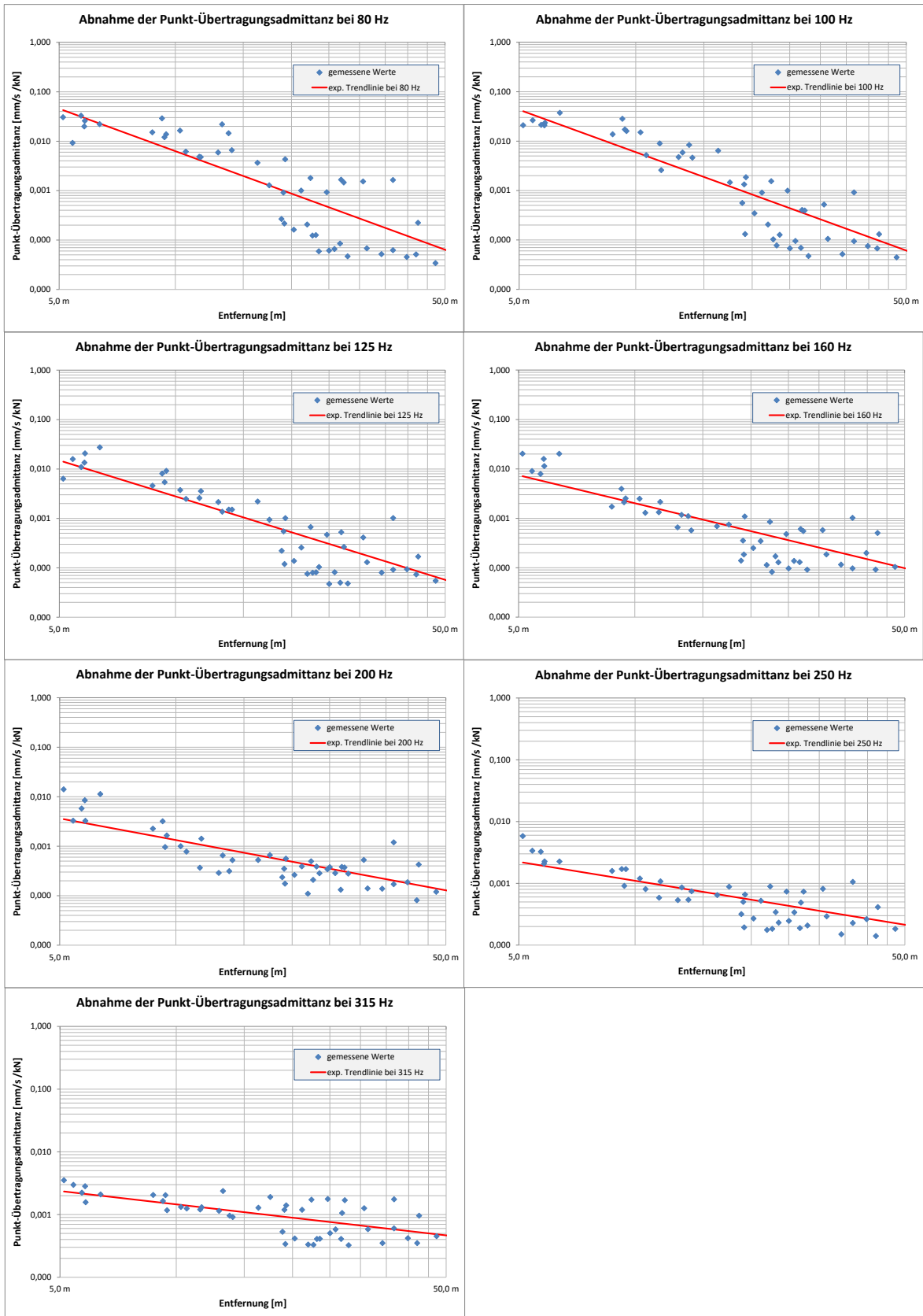
8.5.2 Baugrundadmittanzen: Ergebnisse der Regressionsanalyse



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



8.6 A2 – Werner-Siemens-Imaging-Center

8.6.1 Dokumentation der Messung mit künstlicher Impulsanregung

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-----------------|-----------------------------------|--------|----------------|
| 1 | Kraft | Z | I1-I12 | Dynapct (Kam350) | S41 | 0-350[kN] |
| 2 | MP1 | Z | 5m-Punkt | Spike | G101 | +/- 10k [µm/s] |
| 3 | MP2 | Z | 5m-Punkt | Spike | G2 | +/- 10k [µm/s] |
| 4 | MP3 | Z | 5m-Punkt | Spike | G23 | +/- 10k [µm/s] |
| 5 | MP4 | Z | 10m-Punkt | Spike | G104 | +/- 10k [µm/s] |
| 6 | MP5 | Z | 10m-Punkt | Spike | G105 | +/- 10k [µm/s] |
| 7 | MP6 | Z | Fundament-Punkt | Tripod auf Beton | G142 | +/- 1k [µm/s] |
| 8 | MP7 | Z | Fundament-Punkt | Tripod auf Fensterbank | G35 | +/- 1k [µm/s] |

Tabelle 8-8: Messpunkte an A2

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].



Messpunkte MP1-MP3



MP2, MP3 und MP5



MP6



MP7



Übersicht



Übersicht

Tabelle 8-9: Fotodokumentation der Messpunkte am A2

In der folgenden Grafik ist die Lage der Messpunkte skizziert:

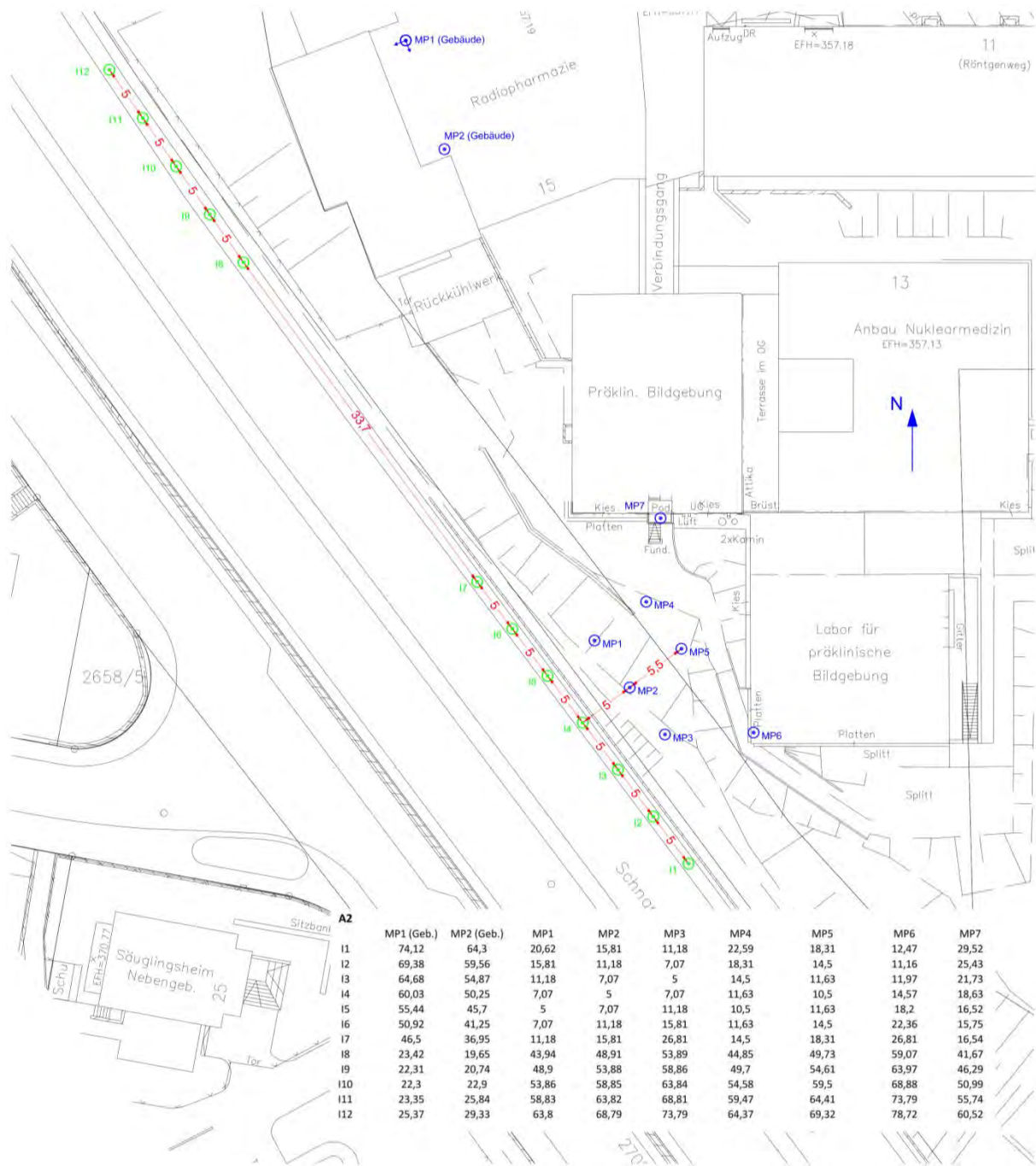


Abbildung 8-3: Lage der Messpunkte am A2

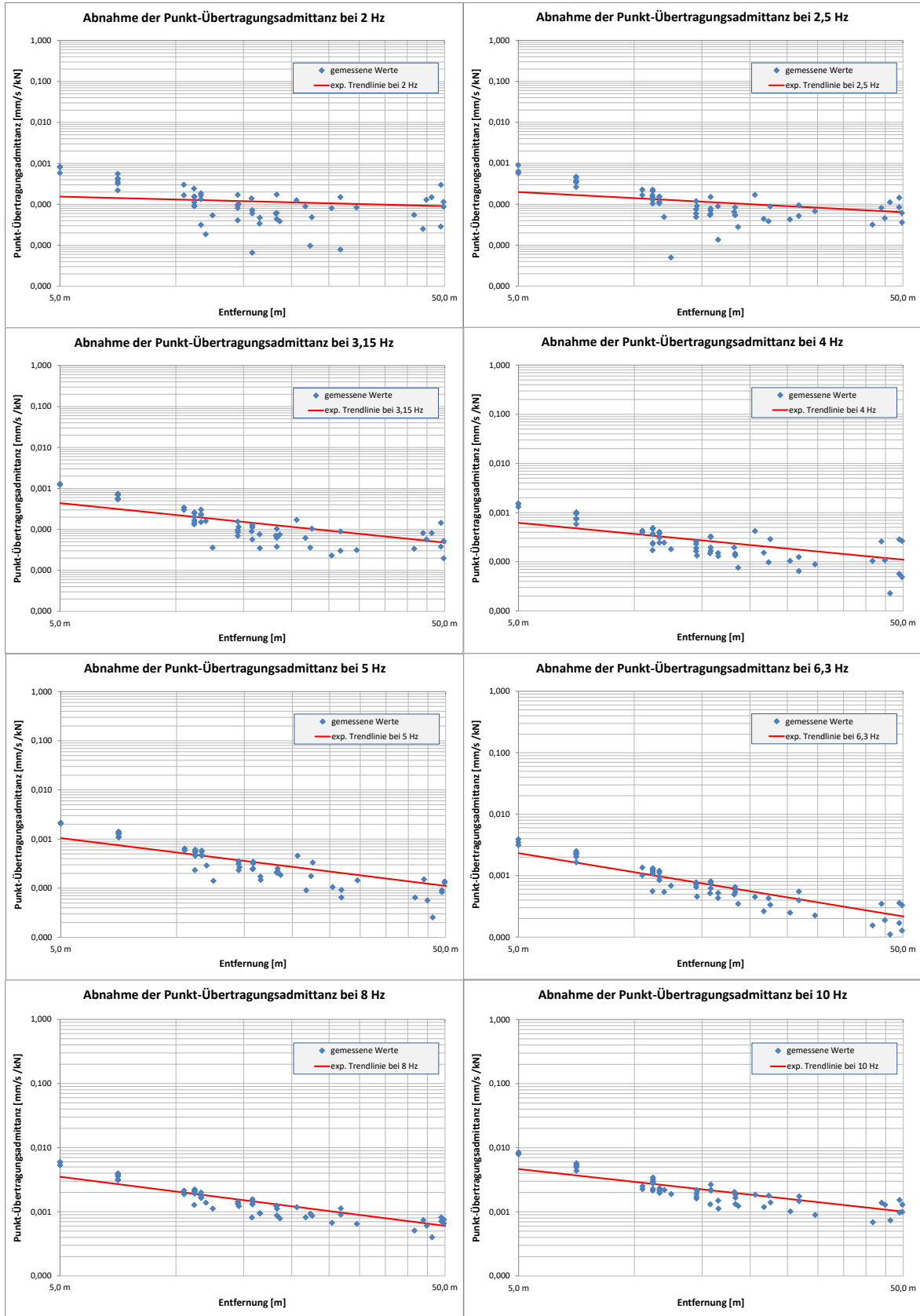
Folgende Messungen wurden am 03.12.2019 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|---------------------|
| A2-I12 | Impact am MQ A2-I12 |
| A2-I11 | Impact am MQ A2-I11 |
| A2-I10 | Impact am MQ A2-I10 |
| A2-I9 | Impact am MQ A2-I9 |
| A2-I8 | Impact am MQ A2-I8 |

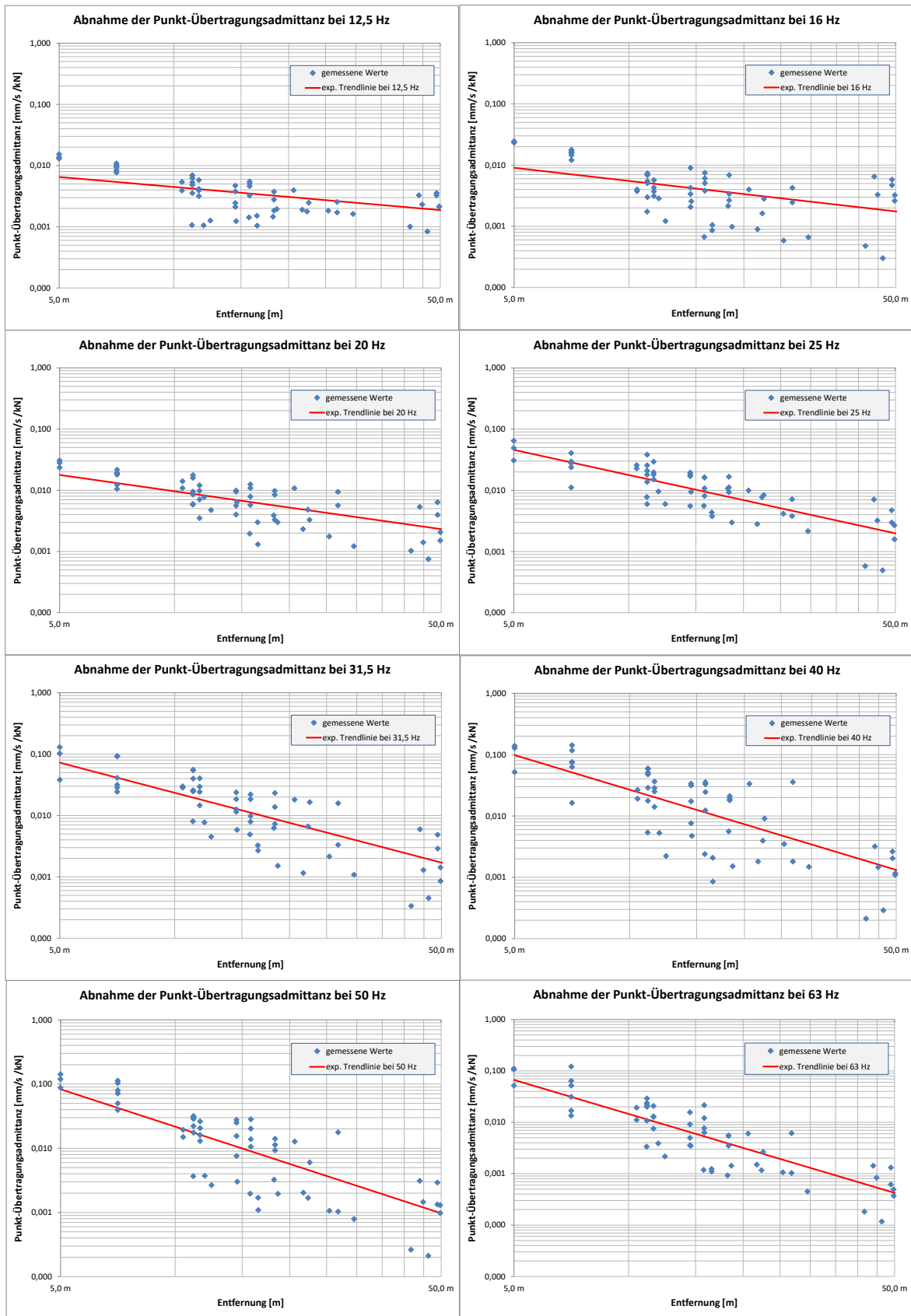
| | |
|-----------|--------------------|
| Abklopfen | QS-Prüfung |
| A2-I7 | Impact am MQ A2-I7 |
| A2-I6 | Impact am MQ A2-I6 |
| A2-I5 | Impact am MQ A2-I5 |
| A2-I4 | Impact am MQ A2-I4 |
| A2-I3 | Impact am MQ A2-I3 |
| A2-I2 | Impact am MQ A2-I2 |
| A2-I1 | Impact am MQ A2-I1 |
| A2-M2 | Ruhemessung 1800s |

Tabelle 8-10: Auflistung der durchgeführten Messungen am A2

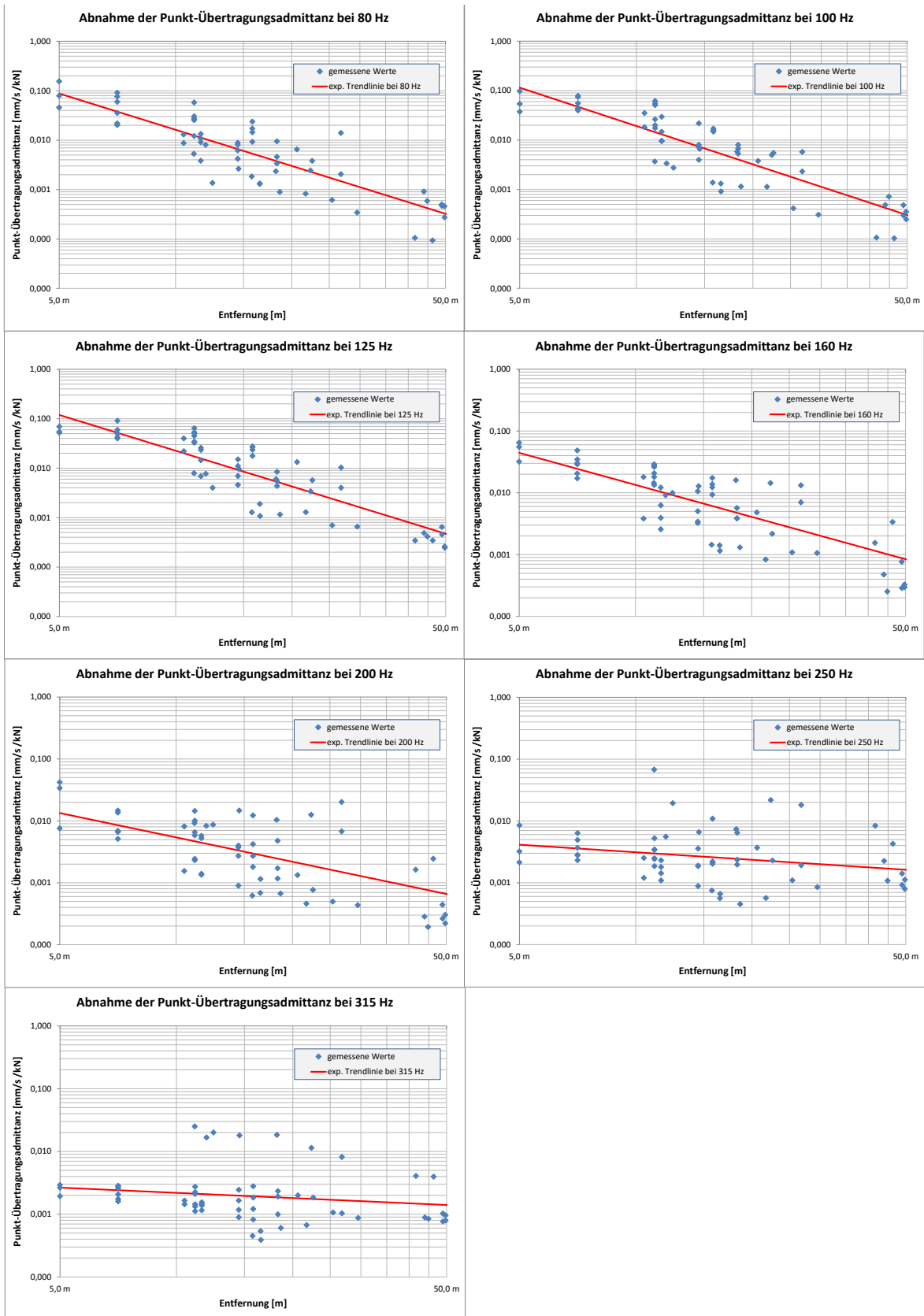
8.6.2 Baugrundadmittenzen: Ergebnisse der Regressionsanalyse



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



8.7 A3 –GUZ

8.7.1 Dokumentation der Messung mit künstlicher Impulsanregung

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|------------|-----------------------------------|--------|----------------|
| 1 | Kraft | Z | I1-I7 | Dynapct (Kam350) | S41 | 0-350[kN] |
| 2 | MP1 | Z | 5m-Punkt | Spike | G101 | +/- 10k [µm/s] |
| 3 | MP2 | Z | 5m-Punkt | Spike | G2 | +/- 10k [µm/s] |
| 4 | MP3 | Z | 5m-Punkt | Spike | G33 | +/- 10k [µm/s] |
| 5 | MP4 | Z | 10m-Punkt | Spike | G104 | +/- 10k [µm/s] |
| 6 | MP5 | Z | 20m-Punkt | Spike | G105 | +/- 1k [µm/s] |
| 7 | MP6 | Z | 40m-Punkt | Spike | G16 | +/- 1k [µm/s] |
| 8 | MP7 | Z | 60m-Punkt | Spike | G27 | +/- 1k [µm/s] |
| 9 | MP8 | Z | 100m-Punkt | Spike | G8 | +/- 1k [µm/s] |

Tabelle 8-11: Messpunkte an A3

Die Ankopplung erfolgte angepasst an den Untergrund gemäß DIN 45669-2 (2005) [3].



MP1 bis MP4









| | |
|---|--|
|  |  |
| MP4 | MP5 |
|  |  |
| MP6 | MP6 und MP7 |
|  |  |
| MP8 | MP8 |
|  |  |
| Übersicht | Übersicht |

Tabelle 8-12: Fotodokumentation der Messpunkte am A3

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:

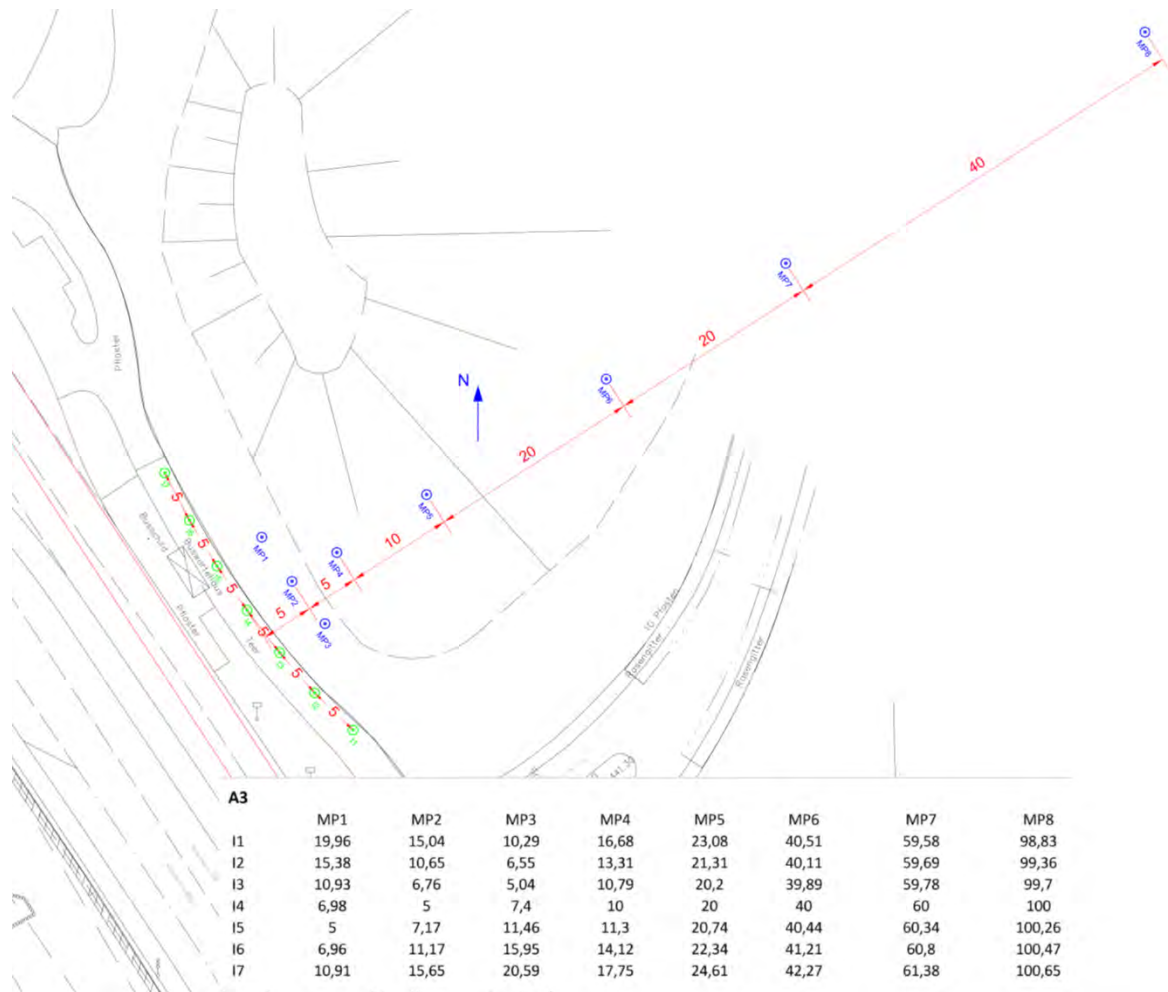


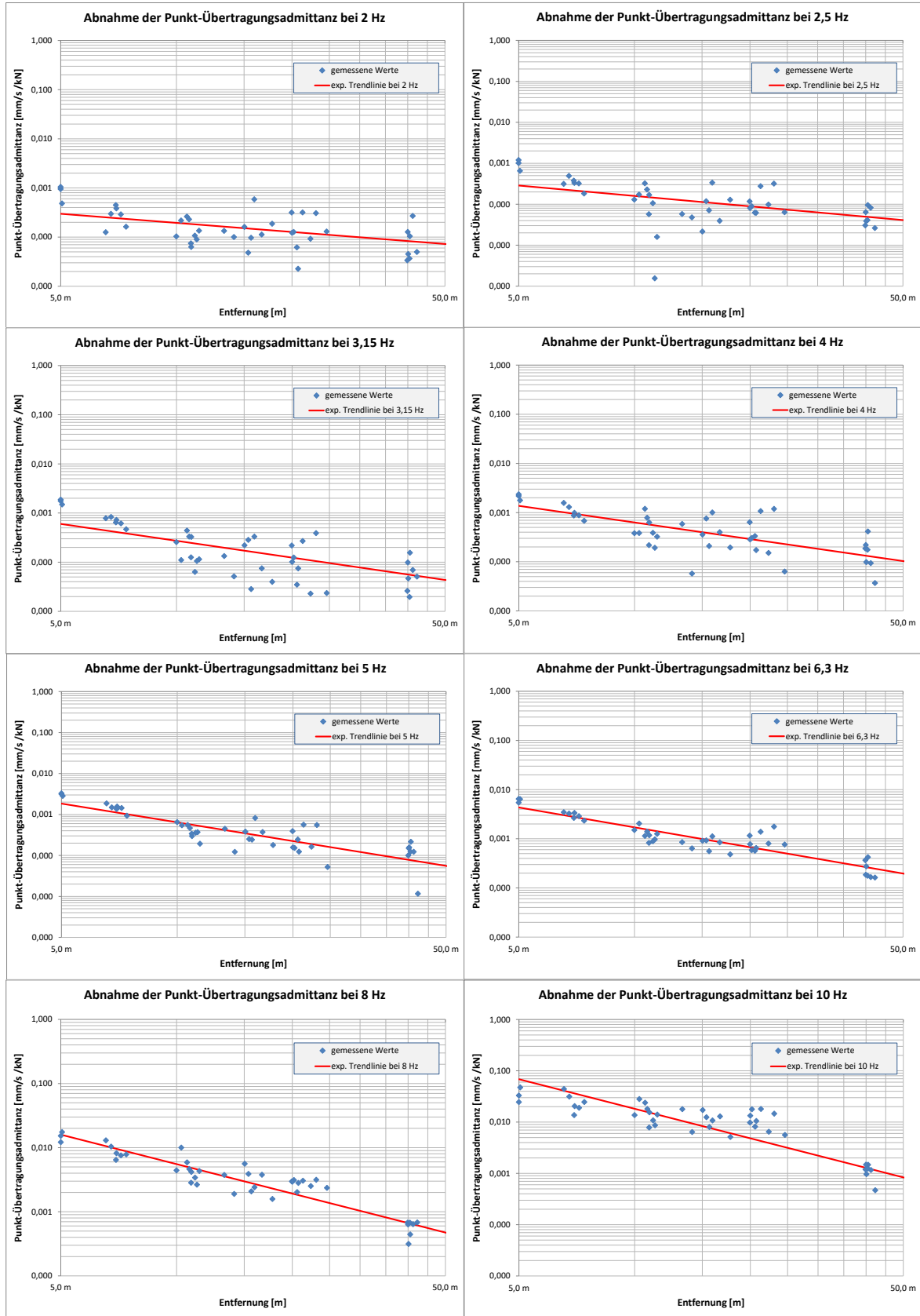
Abbildung 8-4: Lage der Messpunkte am A3

Folgende Messungen wurden am 03.12.2019 durchgeführt:

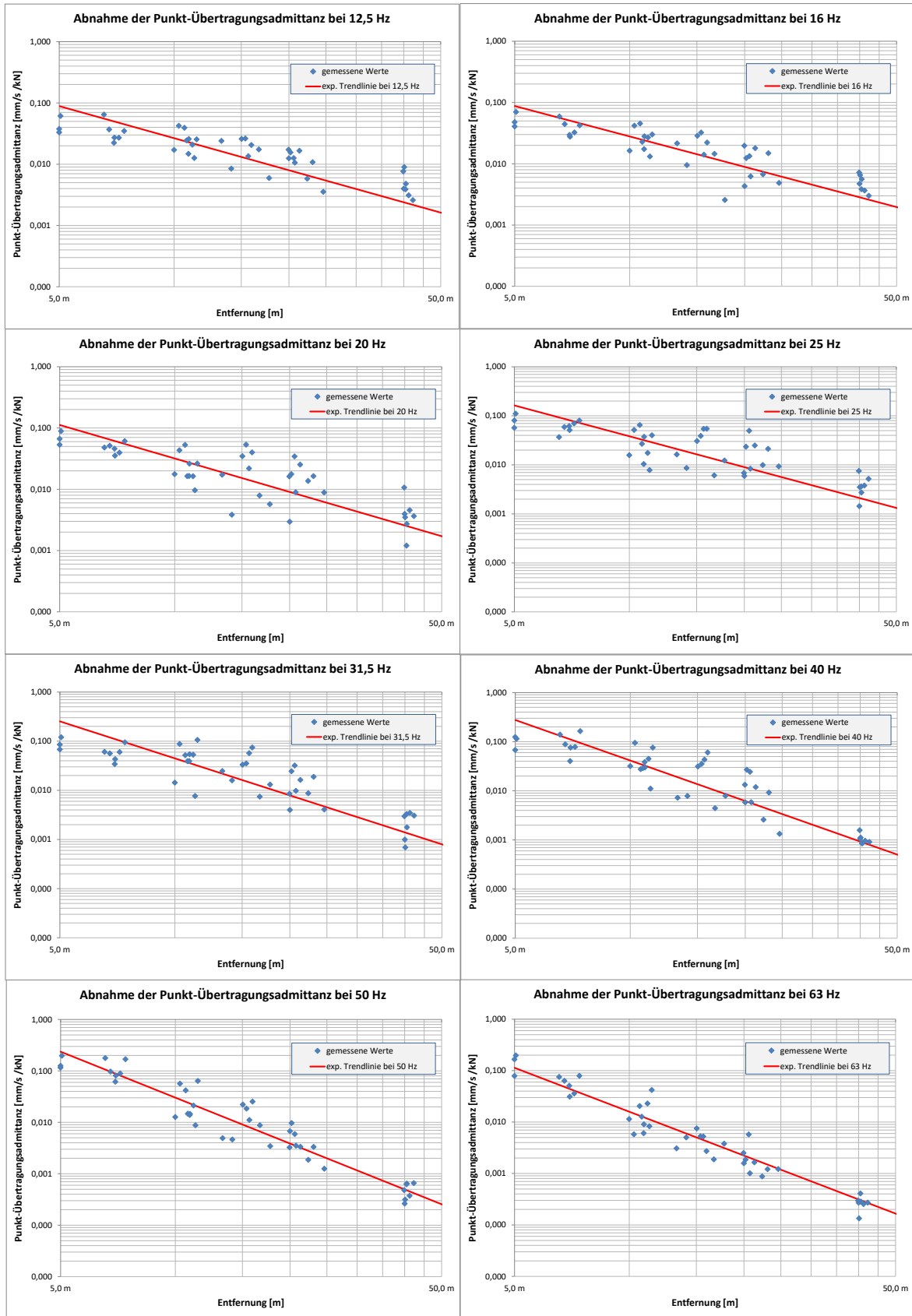
| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|--------------------|
| Abklopfen | QS-Prüfung |
| A3-I7 | Impact am MQ A3-I7 |
| A3-I6 | Impact am MQ A3-I6 |
| A3-I5 | Impact am MQ A3-I5 |
| A3-I4 | Impact am MQ A3-I4 |
| A3-I3 | Impact am MQ A3-I3 |
| A3-I2 | Impact am MQ A3-I2 |
| A3-I1 | Impact am MQ A3-I1 |
| A3-M2 | Ruhemessung 1800s |

Tabelle 8-13: Auflistung der durchgeführten Messungen am A3

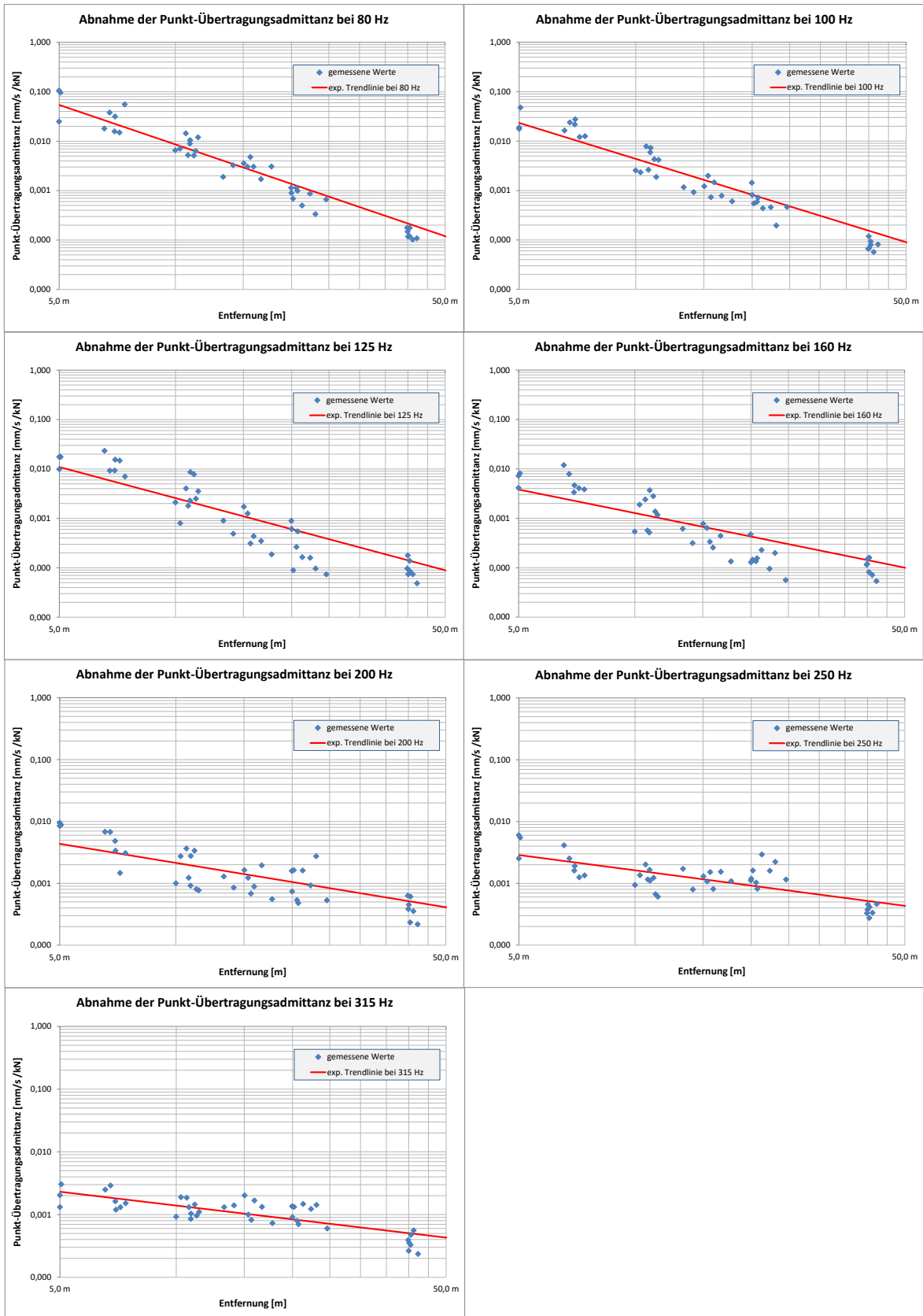
8.7.2 Baugrundadmittanzen: Ergebnisse der Regressionsanalyse



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

8.8 A4 – Morgenstelle 3

8.8.1 Dokumentation der Messung mit künstlicher Impulsanregung

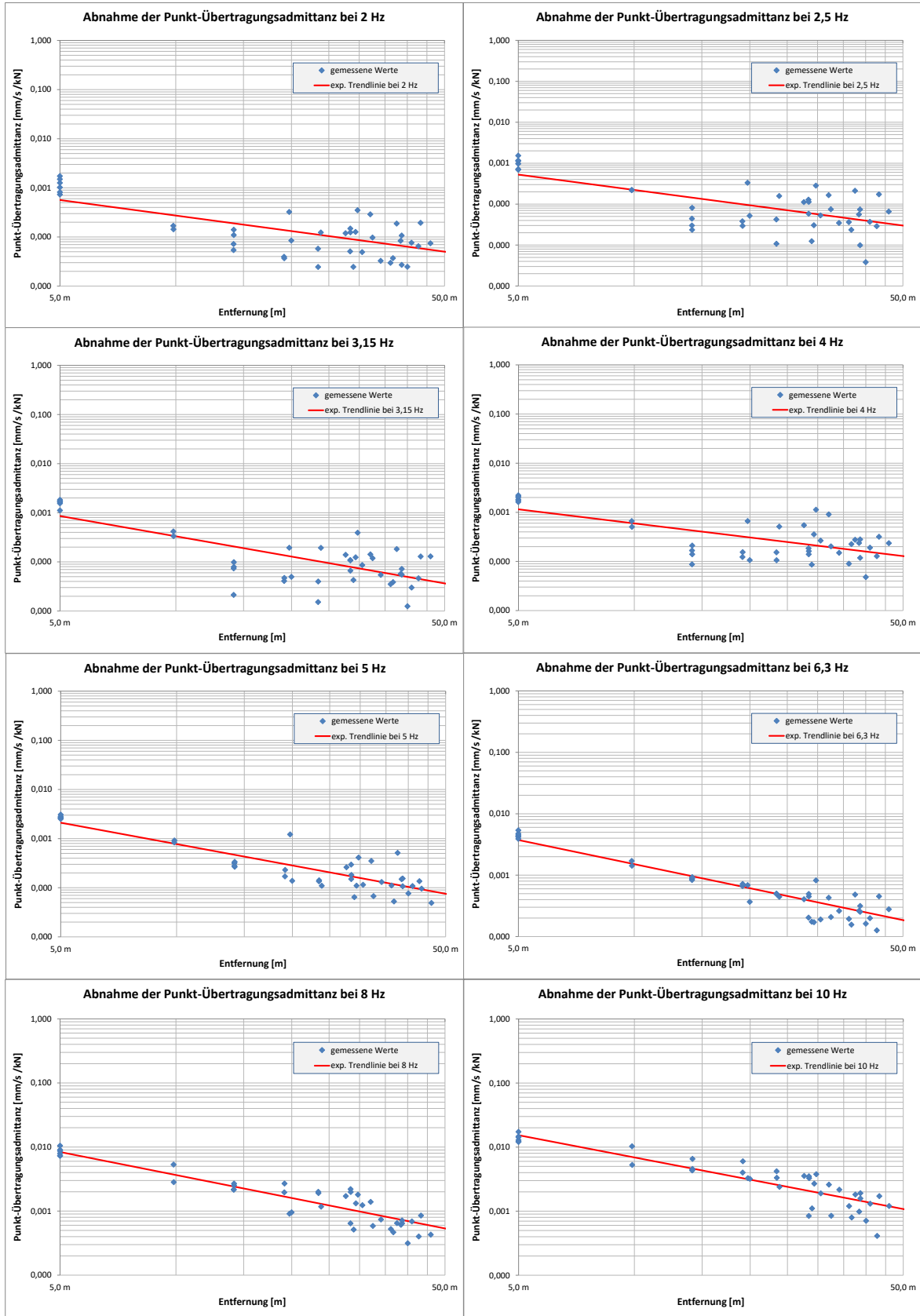
| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-------------------|-----------------------------------|--------|----------------|
| 1 | Kraft | Z | I1-I7 | Dynapct (Kam350) | S41 | 0-350[kN] |
| 2 | MP1 | Z | Wiese vor Gebäude | Spike | G23 | +/- 1k [µm/s] |
| 3 | MP2 | Z | Wiese vor Gebäude | Spike | G101 | +/- 1k [µm/s] |
| 4 | MP3 | Z | Wiese vor Gebäude | Spike | G104 | +/- 1k [µm/s] |
| 5 | MP4 | Z | Wiese vor Gebäude | Spike | G2 | +/- 1k [µm/s] |
| 6 | MP5 | Z | Fundament | Tripod | G35 | +/- 1k [µm/s] |
| 7 | MP6 | Z | Fundament | Tripod | G142 | +/- 1k [µm/s] |
| 8 | MP7 | Z | 1. OG Feldmitte | Tripod | G27 | +/- 1k [µm/s] |
| 9 | MP8 | Z | Innenhof | Tripod auf Pflaster | G16 | +/- 1k [µm/s] |
| 10 | MP9 | Z | 5m-Punkt | Spike | G105 | +/- 10k [µm/s] |
| 11 | MP10 | Z | 5m-Punkt | Spike | G107 | +/- 10k [µm/s] |
| 12 | MP11 | Z | 5m-Punkt | Spike | G8 | +/- 10k [µm/s] |

Tabelle 8-14: Messpunkte an A4

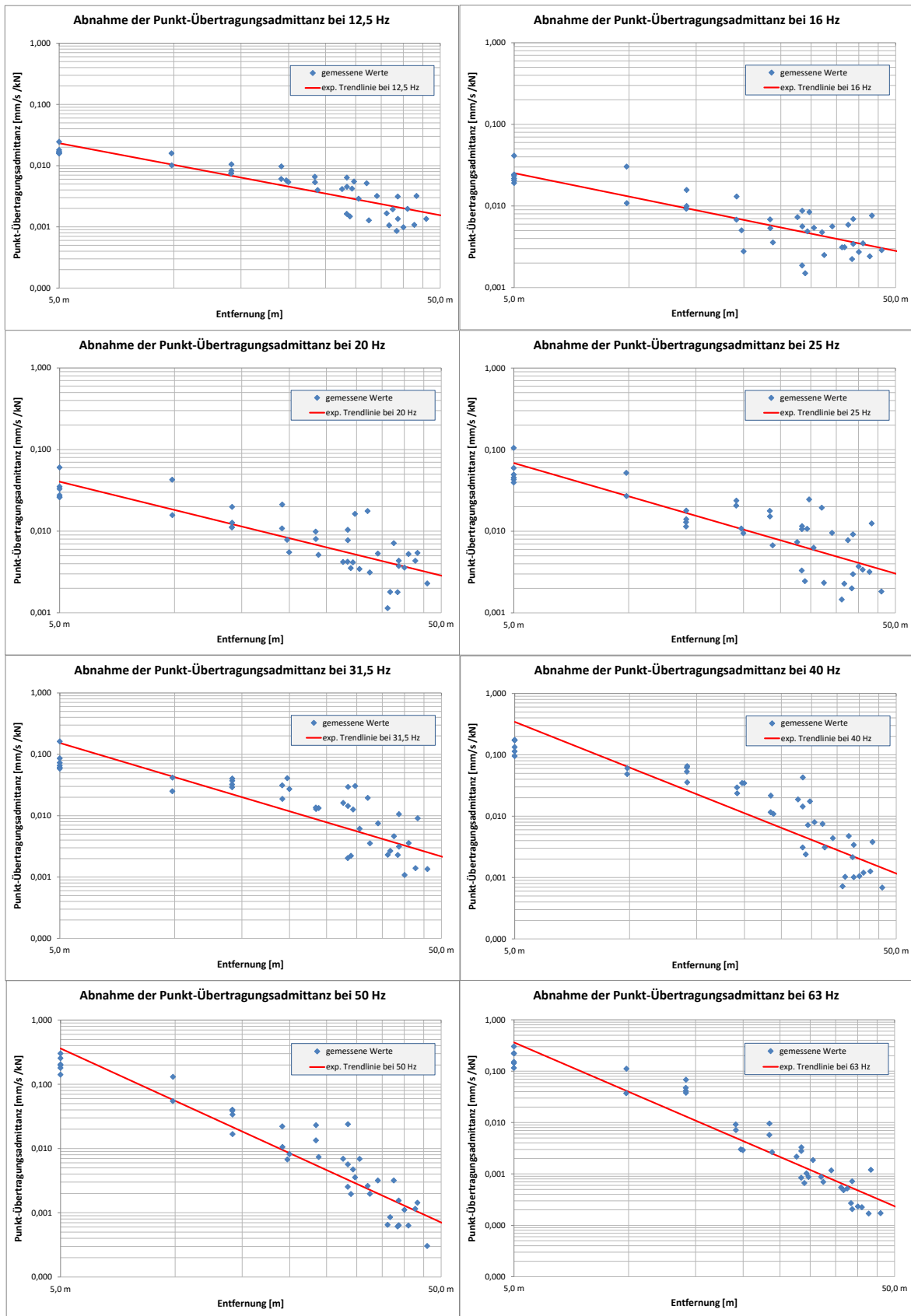
| | |
|--|--|
|  | |
| MP1 bis MP4 | MP2 in Raum 5 H 40 |
|  |  |
| MP5 | MP7 |
|  |  |
| MP8 | MP9-MP11 |
|  | |
| Übersicht | |

Tabelle 8-15: Fotodokumentation der Messpunkte am A4

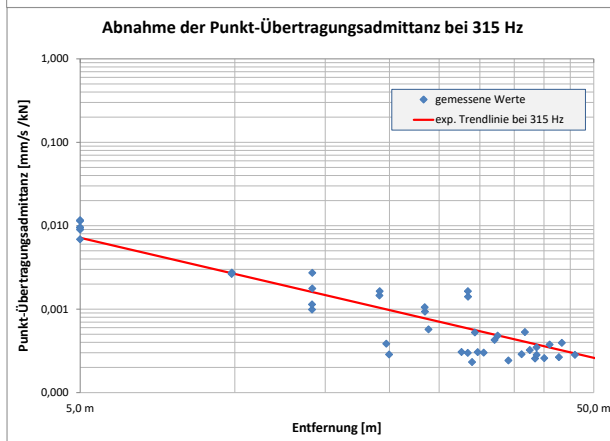
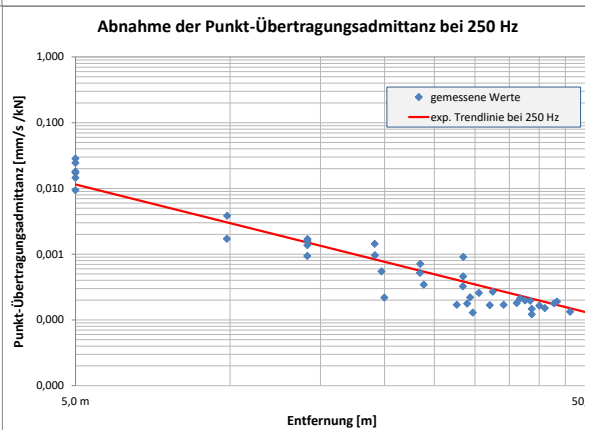
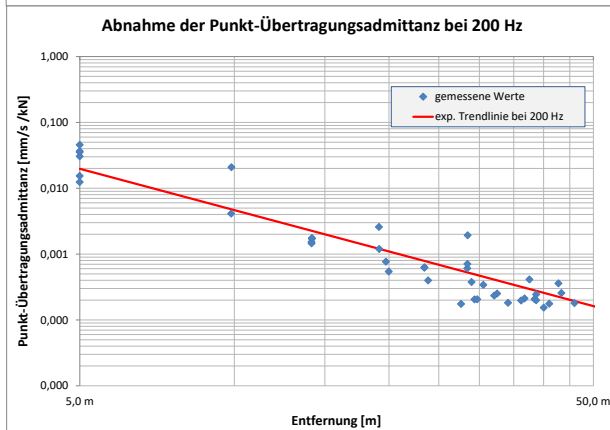
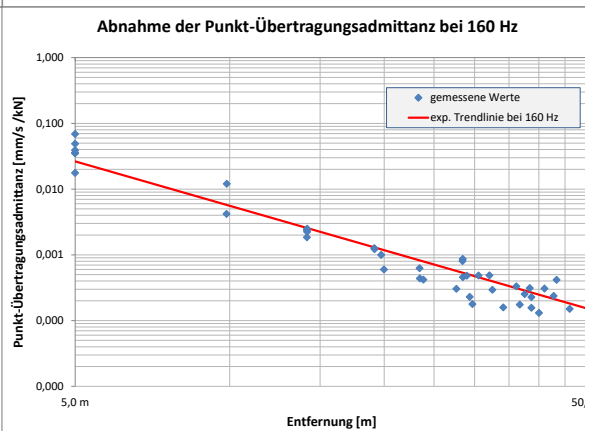
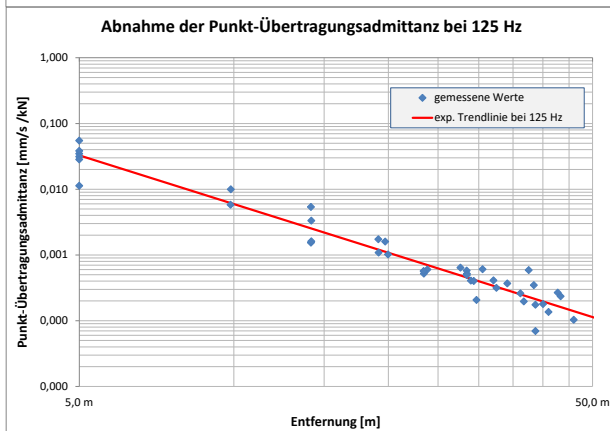
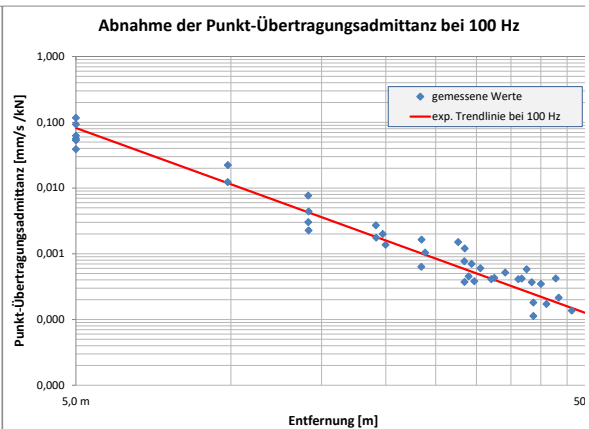
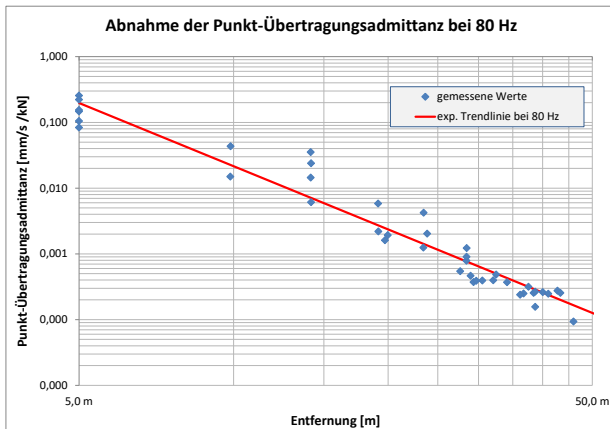
8.8.2 Baugrundadmittanzen: Ergebnisse der Regressionsanalyse



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx



8.9 A5 – Gebäude A

8.9.1 Dokumentation der Messung mit künstlicher Impulsanregung

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-----------------|-----------------------------------|--------|----------------|
| 1 | Kraft | Z | I1-I3 | Dynapct (Kam350) | S41 | 0-350[kN] |
| 2 | MP1 | Z | Fundament | Tripod auf Beton | G27 | +/- 1k [µm/s] |
| 3 | MP2 | Z | Außenpunkt | Spike | G8 | +/- 10k [µm/s] |
| 4 | MP3 | Z | Außenpunkt | Tripod auf Teer | G142 | +/- 10k [µm/s] |
| 5 | MP4 | Z | Innen Stütze | Tripod auf Beton | G105 | +/- 1k [µm/s] |
| 6 | MP5 | Z | Innen Feldmitte | Tripod auf Beton | G107 | +/- 1k [µm/s] |
| 7 | MP6 | Z | Außenpunkt | Tripod auf Teer | G101 | +/- 10k [µm/s] |

Tabelle 8-17: Messpunkte an A5

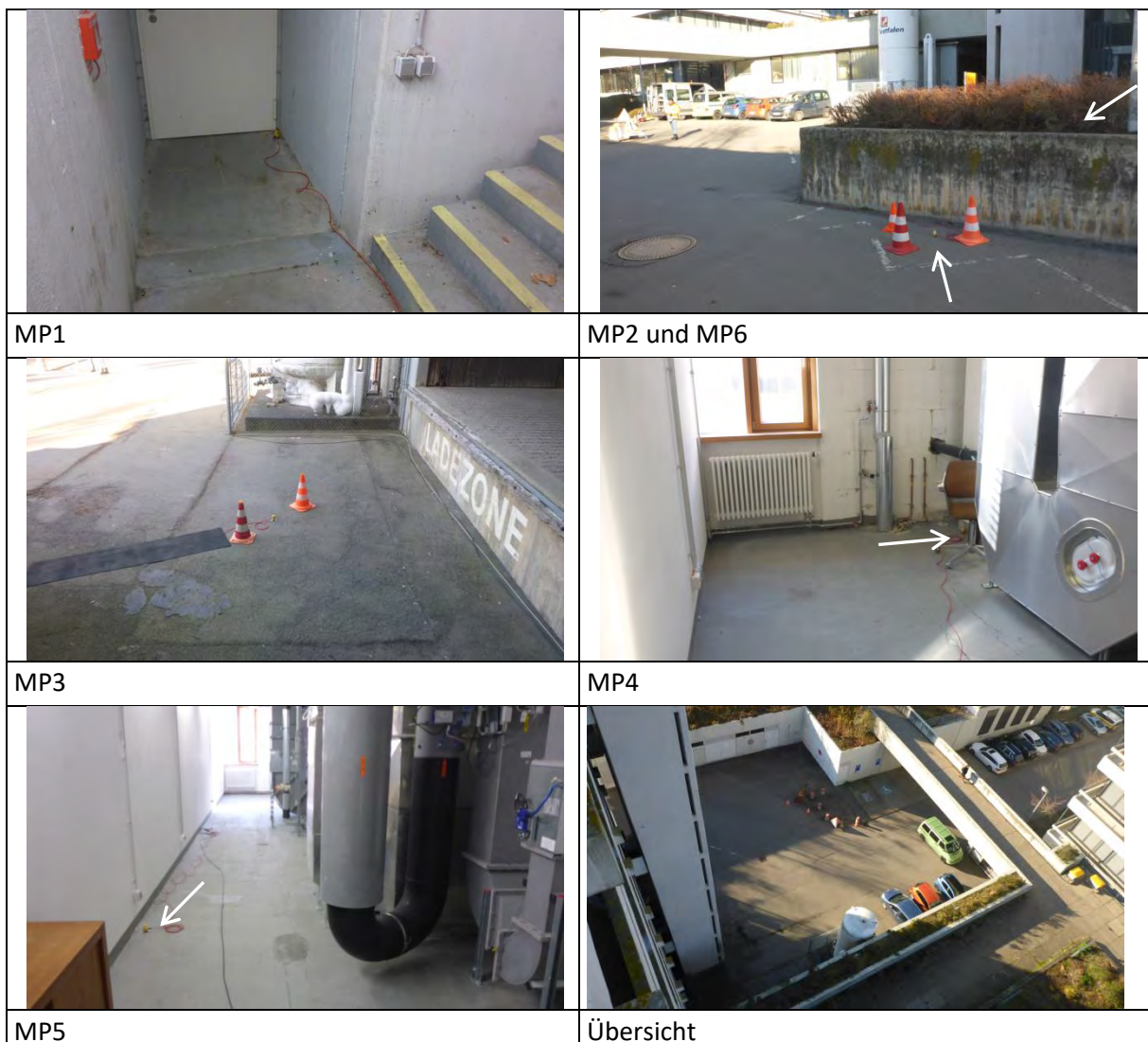


Tabelle 8-18: Fotodokumentation der Messpunkte am A5

In der folgenden Grafik ist die Lage der Messpunkte skizziert:

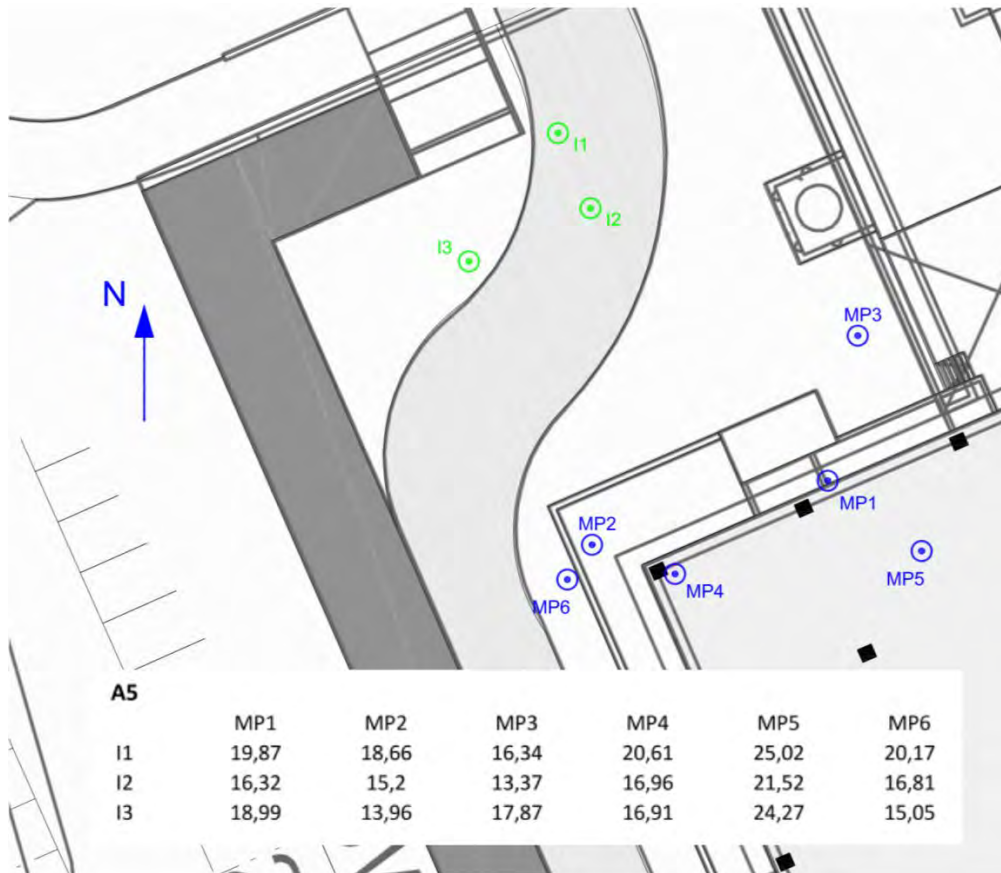


Abbildung 8-6: Lage der Messpunkte am A5

Folgende Messungen wurden am Messort A5 durchgeführt:

| Bezeichnung | Inhalt |
|-------------|---|
| Abklopfen | QS-Prüfung |
| A5-I1 | Impact am MQ A5-I1 |
| A5-I2 | Impact am MQ A5-I2 |
| A5-I3 | Impact am MQ A5-I3 |
| A5-M5 | Ruhemessung 1800s |
| Hacke | Fersenstöße: 5x MP4, 5x MP5 (MP5 -> 10k $\mu\text{m/s}$) |

Tabelle 8-19: Auflistung der durchgeführten Messungen am A5

9 Anlage IV: Dokumentation der Referenzmessungen in Karlsruhe und Ulm

zum Bericht mit der Nr.: 40-10428-01-D8 vom 16.12.2020

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

9.1 Allgemeines

| | |
|--------------------------------|--|
| Messort | Karlsruhe |
| Messdatum | 04.03.2020 |
| Messpersonal | M. Mistler, M. Nitschke, T. Schulte Pelkum |
| Wetter | 2° C, bedeckt |
| Anzahl Messorte | 2 (Rüppurrer Straße, Durlacher Allee) |
| Anzahl Messquerschnitte | 3 (1x Rüppurrer Straße, 2x Durlacher Allee) |
| Art der Messungen je MQ | Vorbeifahrtmessungen der Stadtbahn Übertragungsadmittanz-Messung EMI-Messung |

Tabelle 9-1: Allgemeine Angaben zur Messung in Karlsruhe

| | |
|----------------------------|-------------------------|
| Messort | Ulm |
| Messdatum | 05.03.2020 |
| Messpersonal | M. Mistler, M. Nitschke |
| Wetter | Regnerisch |
| Anzahl Querschnitte | 3 |
| Art der Messung | EMI-Messung |

Tabelle 9-2: Allgemeine Angaben zur Messung in Ulm

9.2 Verwendetes Messequipment

Zur Messung der Schwinggeschwindigkeiten wurde folgendes Messequipment verwendet:

| | |
|--|---|
| Geschwindigkeitssensoren | Geophone 1 – 315 Hz gemäß DIN 45669 Sensornummer gemäß Tabelle „Übersicht der Messpunkte“ FGM3D/100; Messbereich +/- 100 µT; Auflösung: <0,15nT |
| Messverstärker | MSE, 8 Kanal, SN: 20011103 3D-Magnetometer, 9 Kanal, SN: EMI2018 |
| A/D Wandlerkarte | NI DAQCard-6036 E, 16 AE, 16bit, 200kS/s Data Translation DT9826, 16 Simultaneous, 24bit 41,6kS/s |
| Messrechner | Panasonic CF-52, SN: 0ITCA55478 Panasonic CF-53, SN: 5GTCA08979 Panasonic CF-53, SN: 7CTCA98538 |
| Letzte Kalibrierung der Messkette | 03/2018 |
| Messsoftware | Meda_AD Version 2019-1 MARS Version 3.1.29 |

Tabelle 9-3: Verwendetes Messequipment

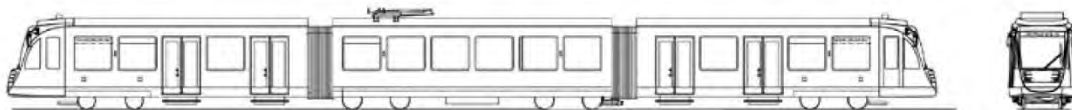
| | Messanlage mit Geophonen und Magnetfeldsensoren | Messung mit Dynpact® |
|--------------------------|---|----------------------|
| Anzahl Messkanäle | | |
| Geophone | 3 | 7-14 |
| Magnetfeldsensoren | 9 | |
| Bandbreite | 400 Hz | 1000 Hz |
| Abtastfrequenz | 1024 Hz | 2560 Hz |
| Antialiasing | 315 Hz | 1000 Hz |

Tabelle 9-4: Messparameter

9.3 Untersuchte Zweisystem-Stadtbahnfahrzeuge

Flexity Swift, ET 2010

- Bombardier Elektrotriebwagen 2010
- Länge L = 37m,
- Fahrzeugmasse (leer): 62,5 to
- Max. Achslast: 11,5 to
- Drehgestell unter dem Mittelwagen, Triebgestell außen

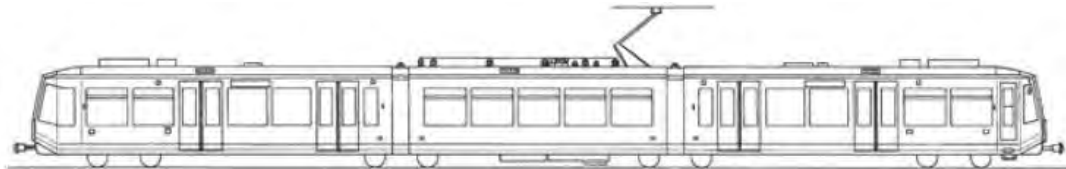


| | |
|---|---|
| Hersteller/Fahrzeugtyp | Bombardier Flexity Swift |
| Bauart | Zwei-Richtungsfahrzeug |
| Fahrzeuglänge | 37,03 m |
| Fahrzeugbreite | 2,65 m |
| Einstiegshöhe | 58 cm |
| Raddurchmesser (neu) | 74 cm |
| Spurbreite | 1.435 mm |
| Minimaler horizontaler Kurvenradius | 23 m |
| Antrieb | Zweisystemtechnik für 750 Volt DC und 15 kV, 16 2/3 Hz AC |
| Motorleistung (Drehstrom-Asynchronmotoren) | 4 x 150 kW |
| Durchschnittliche Beschleunigung (2/3 beladen) von 0 auf 80 km/h | 0,6 m/s ² |
| Höchstgeschwindigkeit | 100 km/h |
| Verzögerung Betriebsbremse (2/3 beladen) / Verzögerung Gefahrenbremse (2/3 beladen) | 1,6 m/s ² / 2,73 m/s ² |
| Max. befahrbare Steigung | 60 ‰ |
| Platzkapazität | 93 Sitz- / 151 Stehplätze, 3 Mehrzweckbereiche |
| Leergewicht | 63 t |

Abbildung 9-1: Technische Angaben Flexity Swift [16]

GT8-100D/2S-M

- Hersteller: DUEWAG und Siemens
- Länge: L = 37,6m
- Fahrzeugmasse (leer): 58,5 - 59,8 to; Dienstmasse 75,6 to
- Max. Achslast: 11,5 to
- Ladehöhe: 58cm
- Vorgängermodell mit Jakobsdrehgestell



| | |
|---|--|
| Hersteller/Fahrzeugtyp | Konsortium Bombardier/Siemens GT8-100 D/2-SM |
| Bauart | Zwei-Richtungsfahrzeug |
| Fahrzeuginnenlänge | 36,5 m |
| Fahrzeuginnenbreite | 2,65 m |
| Einstiegshöhe | 57 cm |
| Raddurchmesser (neu) | 74 cm |
| Spurbreite | 1.435 mm |
| Minimaler horizontaler Kurvenradius | 23 m |
| Antrieb | Zweissystemtechnik für 750 Volt DC und 15 kV, 16 2/3 Hz AC |
| Motorleistung (Drehstrom-Asynchronmotoren) | 4 x 127 kW bei 750 V DC |
| Durchschnittliche Beschleunigung (2/3 beladen) von 0 auf 80 km/h | 0,53 m/s ² |
| Höchstgeschwindigkeit | 100 km/h |
| Verzögerung Betriebsbremse (2/3 beladen) / Verzögerung Gefahrenbremse (2/3 beladen) | 1,6 m/s ² / 2,73 m/s ² |
| Max. befahrbare Steigung | 60 ‰ |
| Platzkapazität | 97 Sitz-/118 Stehplätze (mit Mehrzweckabteil) |
| Leergewicht | 58,5 t |

Abbildung 9-2: Technische Angaben GT8-100D [16]

9.4 Referenzmessung Karlsruhe, Rüppurrer Straße

9.4.1 Lageskizze

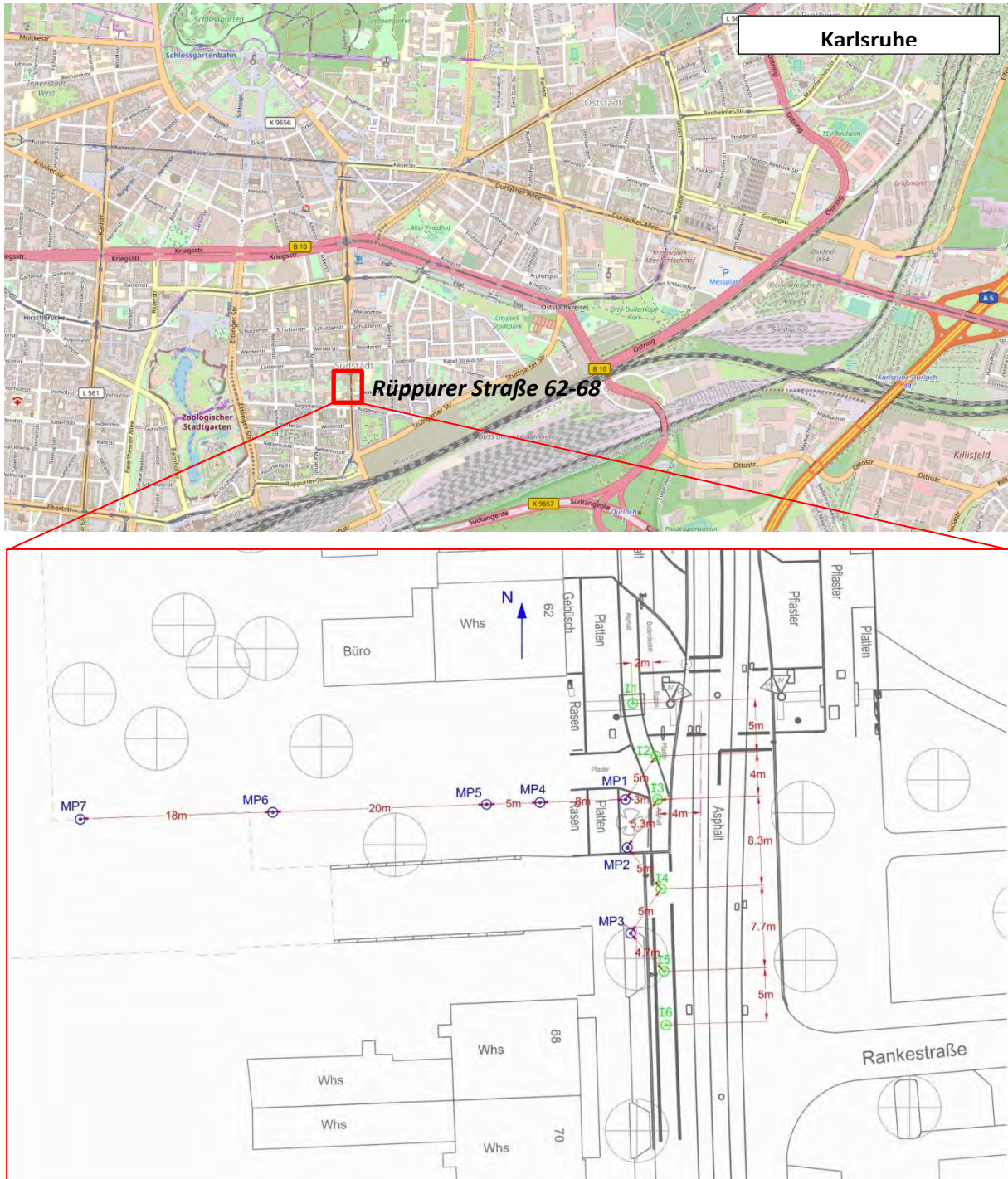


Abbildung 9-3: Lage der Messpunkte

9.4.2 Kanalbelegung

EMI-Messanlage

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|------------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
| 1 | MP1 | Z | 10 m Punkt | Dreifuß | G155 | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 2 | | X | | | | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 3 | | Y | | | | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 4 | EMI1 | Z | 10 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S36 | +/- 100 [μT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |
| 7 | EMI2 | Z | 30 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S37 | +/- 100 [μT] |
| 8 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 9 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |
| 10 | EMI3 | Z | 60 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S38 | +/- 100 [μT] |
| 11 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 12 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |

Tabelle 9-5: Kanalbelegung EMI-Messanlage an MQ1, Ruppurrer Straße in Karlsruhe

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich | |
|-------|-----------|--------------|-------------------------|-----------------------------------|--------|-------------|---------------|
| 1 | DYNPACT | Z | Anregungsorte I1 bis I6 | Sandsack | KAM350 | 0- 350 [kN] | |
| 2 | MP1-7m | | Blumenbeet | | Spike | G107 | +/- 10 [mm/s] |
| 3 | MP2-7m | | | | | G1 | +/- 10 [mm/s] |
| 4 | MP3-7m | | | | | S36G8 | +/- 10 [mm/s] |
| 5 | MP4-15m | | Rasenfläche | | Spike | G36 | +/- 5 [mm/s] |
| 6 | MP5-20m | | | | | G35 | +/- 1 [mm/s] |
| 7 | MP6-40m | | | | | G144 | +/- 1 [mm/s] |
| 8 | MP7-58m | | | | | G95 | +/- 1 [mm/s] |

Tabelle 9-6: Kanalbelegung Geophone-Messanlage an MQ1, Ruppurrer Straße in Karlsruhe



Tabelle 9-7: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ1 in Karlsruhe

9.4.3 Registrierte Fahrzeugvorbeifahrten

| Nr | Datum | Uhrzeit | Gleis | Richtung | Linie | Zwei-system | Geschw. [km/h] |
|----|------------|----------|-------|----------|-------|-------------|----------------|
| 1 | 04.03.2020 | 9:21:20 | 1 | Süd | - | Ja | 32 |
| 2 | 04.03.2020 | 9:22:25 | 1 | Süd | S1 | Nein | 16 |
| 3 | 04.03.2020 | 9:24:15 | 1 | Süd | 2 | Nein | 31 |
| 4 | 04.03.2020 | 9:25:25 | 2 | Nord | S4 | Ja | 26 |
| 5 | 04.03.2020 | 9:29:05 | 1 | Süd | S7 | Ja | 35 |
| 6 | 04.03.2020 | 9:30:50 | 2 | Nord | S1 | Nein | 24 |
| 7 | 04.03.2020 | 9:32:30 | 1 | Süd | S11 | Nein | 30 |
| 8 | 04.03.2020 | 9:33:40 | 2 | Nord | S7 | Ja | 24 |
| 9 | 04.03.2020 | 9:36:35 | 1 | Süd | S4 | Ja | 36 |
| 10 | 04.03.2020 | 9:38:04 | 2 | Nord | 2 | Nein | 27 |
| 11 | 04.03.2020 | 9:41:29 | 2 | Nord | S11 | Nein | 26 |
| 12 | 04.03.2020 | 9:47:15 | 2 | Nord | 2 | Nein | 27 |
| 13 | 04.03.2020 | 9:54:17 | 1 | Süd | 1 | Nein | 35 |
| 14 | 04.03.2020 | 10:00:55 | 1 | Süd | S4 | Ja | 38 |
| 15 | 04.03.2020 | 10:02:50 | 1 | Süd | 2 | Nein | 25 |
| 16 | 04.03.2020 | 10:06:20 | 1 | Süd | S11 | Nein | - |
| 17 | 04.03.2020 | 10:07:40 | 1 | Süd | S8 | Ja | 36 |
| 18 | 04.03.2020 | 10:10:20 | 2 | Nord | S11 | Nein | 26 |
| 19 | 04.03.2020 | 10:16 | 1 | Süd | 2 | Nein | 27 |

| Nr | Datum | Uhrzeit | Gleis | Richtung | Linie | Zwei-system | Geschw. [km/h] |
|----|------------|----------|-------|----------|-------|-------------|----------------|
| 20 | 04.03.2020 | 10:17 | 2 | Nord | 2 | Nein | 28 |
| 21 | 04.03.2020 | 10:18: | 1 | Süd | S4 | Ja | 28 |
| 22 | 04.03.2020 | 10:21:45 | 1 | Süd | S1 | Nein | 30 |
| 23 | 04.03.2020 | 10:25:00 | 2 | Nord | 2 | Nein | 25 |
| 24 | 04.03.2020 | 10:26:05 | 2 | Nord | S4 | Ja | 40 |
| 25 | 04.03.2020 | 10:27:55 | 1 | Süd | S7 | Ja | 33 |
| 26 | 04.03.2020 | 10:31:15 | 2 | Nord | S1 | Nein | 28 |
| 27 | 04.03.2020 | 10:32:20 | 2 | Nord | S7 | Ja | 34 |
| 28 | 04.03.2020 | 10:34:30 | 1 | Süd | S11 | Nein | 30 |
| 29 | 04.03.2020 | 10:35:30 | 1 | Süd | S4 | Ja | 33 |
| | | | 2 | Nord | - | - | 40 |
| 30 | 04.03.2020 | 10:36:50 | 1 | Süd | 2 | Nein | 28 |
| 31 | 04.03.2020 | 10:38:35 | 2 | Nord | S4 | Ja | 35 |
| 32 | 04.03.2020 | 10:44:20 | 1 | Süd | S1 | Nein | 33 |
| 33 | 04.03.2020 | 10:45:15 | 1 | Süd | 2 | Nein | 32 |
| 34 | 04.03.2020 | 10:45:50 | 2 | Nord | 2 | Nein | 32 |
| 35 | 04.03.2020 | 10:49:33 | 2 | Nord | S1 | Nein | 30 |
| 36 | 04.03.2020 | 10:51:17 | 1 | Süd | S1 | Nein | 33 |
| 37 | 04.03.2020 | 10:53:18 | 2 | Nord | S8 | Ja | 33 |
| 38 | 04.03.2020 | 10:59:09 | 1 | Süd | 2 | Nein | 38 |
| 39 | 04.03.2020 | 10:55:18 | 1 | Süd | S4 | Ja | 26 |
| 40 | 04.03.2020 | 11:00:05 | 2 | Nord | S4 | Ja | 28 |
| 41 | 04.03.2020 | 11:01:55 | 1 | Süd | S11 | Nein | 34 |

Tabelle 9-8: Auflistung der gemessenen Zugvorbeifahrten am MQ1 in Karlsruhe

9.5 Referenzmessung Karlsruhe, Durlacher Straße – Park am Gottesauer Schloss

9.5.1 Lage

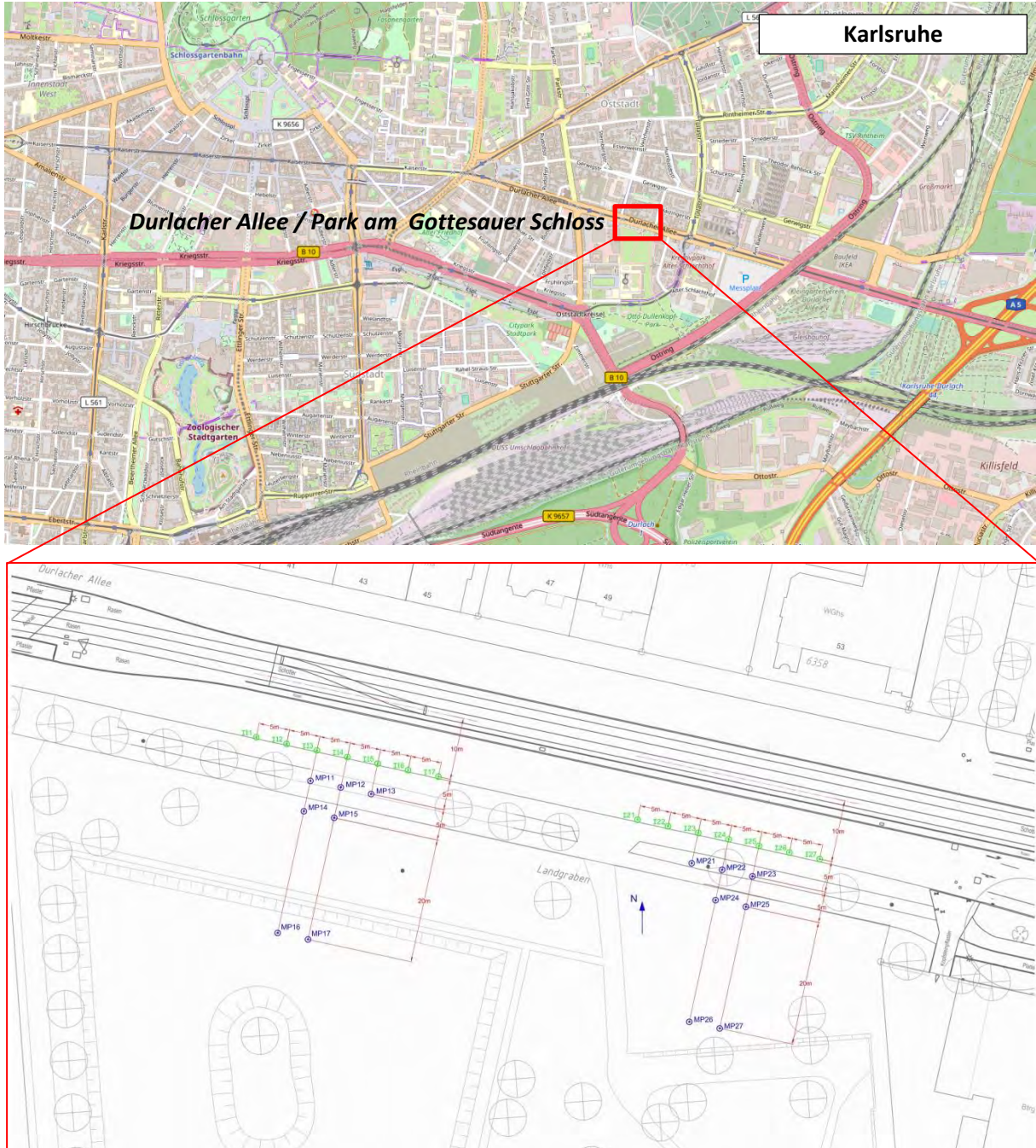


Abbildung 9-4: Lage der Messpunkte am Messquerschnitt MQ2

9.5.2 Kanalbelegung

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|------------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
| 1 | MP1 | Z | 10 m Punkt | Dreifuß | G155 | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 2 | | X | | | | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 3 | | Y | | | | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 4 | EMI1 | Z | 14 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S36 | +/- 100 [μT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |
| 7 | EMI2 | Z | 30 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S37 | +/- 100 [μT] |
| 8 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 9 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |
| 10 | EMI3 | Z | 60 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S38 | +/- 100 [μT] |
| 11 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 12 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |

Tabelle 9-9: Kanalbelegung EMI-Messanlage an MQ2 in Karlsruhe

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich | |
|-------|-------------|--------------|---|-----------------------------------|--------|-------------|---------------|
| 1 | DYNPACT | Z | Anregungsorte I11 bis I17 I21 bis I27 | Sandsack | KAM350 | 0- 350 [kN] | |
| 2 | MP11-z(15m) | | MQ im Bereich der Weiche | Rasenfläche | Spike | G103 | +/- 10 [mm/s] |
| 3 | MP12-z(15m) | | | | | G25 | +/- 10 [mm/s] |
| 4 | MP13-z(15m) | | | | | G105 | +/- 10 [mm/s] |
| 5 | MP14-z(20m) | | | | | G104 | +/- 1 [mm/s] |
| 6 | MP15-z(20m) | | | | | G7 | +/- 1 [mm/s] |
| 7 | MP16-z(40m) | | | | | G143 | +/- 1 [mm/s] |
| 8 | MP17-z(40m) | | | | | G147 | +/- 1 [mm/s] |
| 9 | MP21-z(15m) | | | | | G144 | +/- 10 [mm/s] |
| 10 | MP22-z(15m) | | G95 | +/- 10 [mm/s] | | | |
| 11 | MP23-z(15m) | | G35 | +/- 10 [mm/s] | | | |

| | | | | |
|----|-------------|-------------|------|--------------|
| 12 | MP24-z(20m) | Rasenfläche | G107 | +/- 1 [mm/s] |
| 13 | MP25-z(20m) | | G36 | +/- 1 [mm/s] |
| 14 | MP26-z(40m) | | G1 | +/- 1 [mm/s] |
| 15 | MP27-z(40m) | | G8 | +/- 1 [mm/s] |

Tabelle 9-10: Kanalbelegung Geophone-Messanlage an MQ2, Durlacher Allee in Karlsruhe

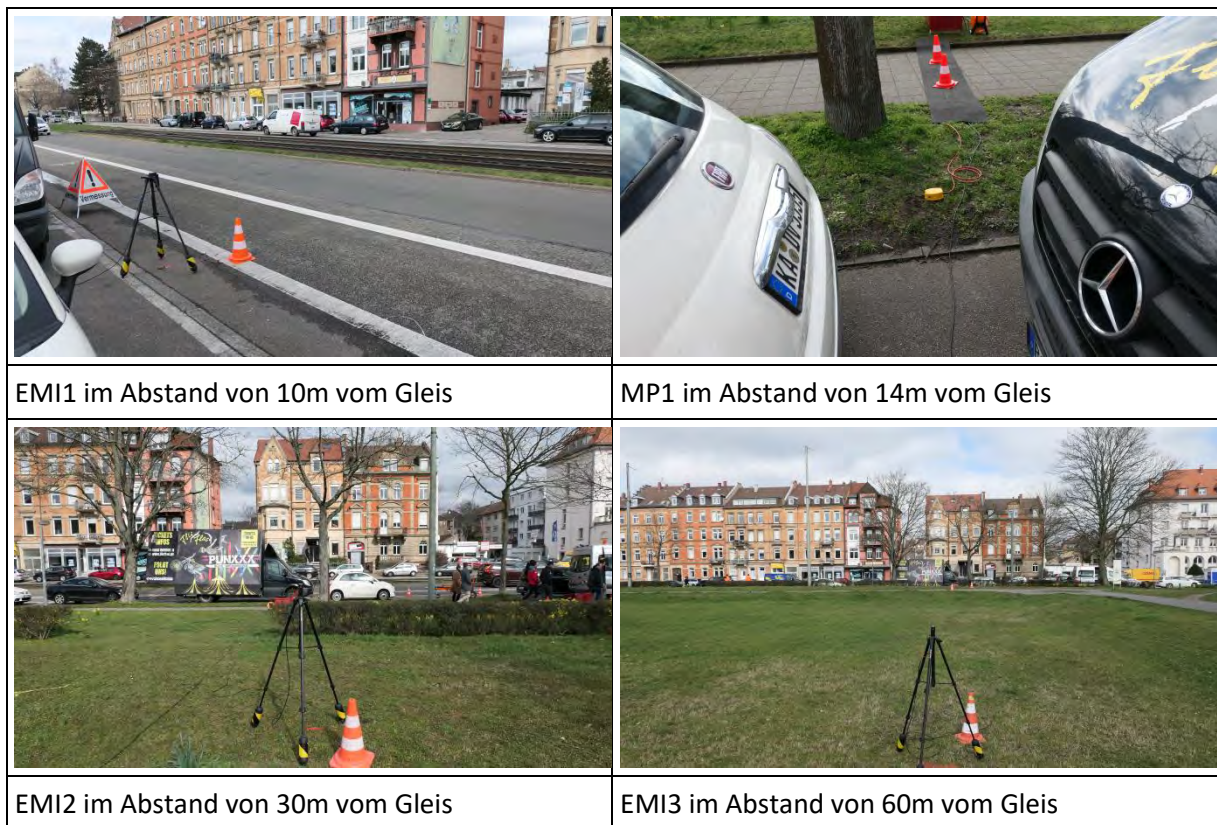


Tabelle 9-11: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ2 in Karlsruhe

Registrierte Fahrzeug-Vorbeifahrten

| Nr | Datum | Uhrzeit | Gleis | Richtung | Linie | Zwei-system | Geschw. [km/h] |
|----|------------|----------|-------|----------|-------|-------------|----------------|
| 1 | 04.03.2020 | 13:35:00 | 1 | Ost | S5 | Ja | 38 |
| 2 | 04.03.2020 | 13:37:42 | 1 | Ost | 2 | Nein | - |
| 3 | 04.03.2020 | 13:39:24 | 1 | Ost | 1 | Nein | 40 |
| 4 | 04.03.2020 | 13:42:30 | 1 | Ost | S5 | Ja | 35 |
| 5 | 04.03.2020 | 13:44:25 | 1 | Ost | S7 | Ja | 29 |
| 6 | 04.03.2020 | 13:45:10 | 2 | West | 2 | Nein | - |
| 7 | 04.03.2020 | 13:48:15 | 1 | Ost | S4 | Ja | 47 |
| 8 | 04.03.2020 | 13:49:10 | - | - | S5 | Ja | 38 |

| Nr | Datum | Uhrzeit | Gleis | Richtung | Linie | Zwei-system | Geschw. [km/h] |
|----|------------|-------------|-------|----------|-------|-------------|----------------|
| 9 | 04.03.2020 | 13:50:10 | 2 | West | 1 | Nein | 42 |
| 10 | 04.03.2020 | 13:53:16 | 1 | Ost | 1 | Nein | 44 |
| 11 | 04.03.2020 | Dynpact I11 | | | | | |
| 12 | 04.03.2020 | 13:56:30 | 2 | West | 2 | Nein | 46 |
| 13 | 04.03.2020 | 13:59:50 | 1 | Ost | 2 | Nein | 45 |
| 14 | 04.03.2020 | Dynpact I12 | | | | | |
| 15 | 04.03.2020 | 14:04:20 | 1 | Ost | 1 | Nein | 43 |
| 16 | 04.03.2020 | Dynpact I13 | | | | | |
| 17 | 04.03.2020 | 14:09:50 | 1 | Ost | S4 | Ja | 52 |
| 18 | 04.03.2020 | Dynpact I14 | | | | | |
| 19 | 04.03.2020 | 14:13:20 | 2 | West | S4 | Ja | 49 |
| 20 | 04.03.2020 | 14:16:00 | 2 | West | 2 | Nein | 27 |
| 21 | 04.03.2020 | Dynpact I15 | | | | | |
| 22 | 04.03.2020 | 14:19:25 | 2 | West | S7 | Ja | 31 |
| 23 | 04.03.2020 | 14:20:25 | 2 | West | S5 | Ja | 35 |
| 24 | 04.03.2020 | Dynpact I16 | | | | | |
| 25 | 04.03.2020 | 14:27:10 | 2 | West | S4 | Ja | 33 |
| 26 | 04.03.2020 | Dynpact I17 | | | | | |
| 27 | 04.03.2020 | 14:31:15 | 1 | Ost | S5 | Ja | 34 |
| 28 | 04.03.2020 | 14:33:05 | 1 | Ost | S4 | Ja | 38 |
| 29 | 04.03.2020 | 14:38:00 | 2 | West | 2 | Nein | 45 |
| 30 | 04.03.2020 | 14:38:38 | 1 | Ost | 2 | Nein | 43 |
| 31 | 04.03.2020 | 14:41:00 | 1 | Ost | S7 | Ja | 45 |
| 32 | 04.03.2020 | Dynpact I21 | | | | | |
| 33 | 04.03.2020 | 14:43:53 | 1 | Ost | 2 | Nein | 32 |
| 34 | 04.03.2020 | 14:45:40 | 1 | Ost | S5 | Ja | 33 |
| 35 | 04.03.2020 | 14:46:40 | 2 | West | 2 | Nein | 45 |
| 36 | 04.03.2020 | Dynpact I22 | | | | | |
| 37 | 04.03.2020 | 14:50:00 | 1 | Ost | 1 | Nein | 43 |
| 38 | 04.03.2020 | 14:51:06 | 2 | West | S5 | Ja | 38 |
| 39 | 04.03.2020 | Dynpact I23 | | | | | |
| 40 | 04.03.2020 | 14:55:50 | 2 | Ost | 2 | Nein | 42 |
| 41 | 04.03.2020 | Dynpact I24 | | | | | |
| 42 | 04.03.2020 | 15:04:20 | 1 | Ost | 2 | Nein | 46 |
| 43 | 04.03.2020 | 15:05:42 | 1 | Ost | S51 | Ja | 39 |
| 44 | 04.03.2020 | 15:06:55 | 2 | West | 2 | Nein | 47 |
| 45 | 04.03.2020 | Dynpact I25 | | | | | |
| 46 | 04.03.2020 | Dynpact I26 | | | | | |
| 47 | 04.03.2020 | 15:17:40 | 2 | West | S5 | Ja | 35 |
| 48 | 04.03.2020 | 15:19:45 | 2 | West | S7 | Ja | 32 |
| 49 | 04.03.2020 | 15:20:13 | 1 | Ost | S5 | Nein | 35 |
| 50 | 04.03.2020 | Dynpact I27 | | | | | |
| 51 | 04.03.2020 | 15:24:05 | 1 | Ost | 1 | Nein | 40 |
| 52 | 04.03.2020 | 15:25:10 | 2 | West | S4 | Ja | 40 |

| Nr | Datum | Uhrzeit | Gleis | Richtung | Linie | Zwei-system | Geschw. [km/h] |
|----|------------|----------|-------|----------|-------|-------------|----------------|
| 53 | 04.03.2020 | 15:26:01 | 1 | Ost | S5 | Ja | 27 |
| 54 | 04.03.2020 | 15:30:00 | 2 | West | 1 | Nein | 37 |
| 55 | 04.03.2020 | 13:36:40 | 1 | Ost | S5 | Ja | 41 |
| 56 | 04.03.2020 | 15:39:00 | 2 | West | 2 | Nein | 37 |
| 57 | 04.03.2020 | 15:39:40 | 2 | West | S5 | Ja | 40 |
| 58 | 04.03.2020 | 15:41:30 | 1 | Ost | S7 | Ja | 34 |
| 59 | 04.03.2020 | 15:43:13 | 1 | Ost | 1 | Nein | 56 |
| 60 | 04.03.2020 | 15:43:56 | 1 | Ost | S5 | Ja | 39 |
| 61 | 04.03.2020 | 15:47:02 | 1 | Ost | S5 | Ja | 34 |
| 62 | 04.03.2020 | 15:49:20 | 1 | Ost | S4 | Ja | 41 |
| 63 | 04.03.2020 | 15:50:33 | 2 | West | S4 | Ja | 45 |
| 64 | 04.03.2020 | 15:51:40 | 2 | West | 1 | Nein | 45 |
| 65 | 04.03.2020 | 15:56:40 | 1 | Ost | 1 | Nein | 52 |
| 66 | 04.03.2020 | 15:57:40 | 1 | Ost | 2 | Nein | 38 |
| | | | 2 | West | S8 | Ja | - |
| 67 | 04.03.2020 | 16:00:10 | 2 | West | S51 | Ja | 40 |

Tabelle 9-12: Auflistung der gemessenen Zugvorbeifahrten am MQ2 in Karlsruhe

9.6 Magnetfeldmessung – Ulm

9.6.1 Übersicht

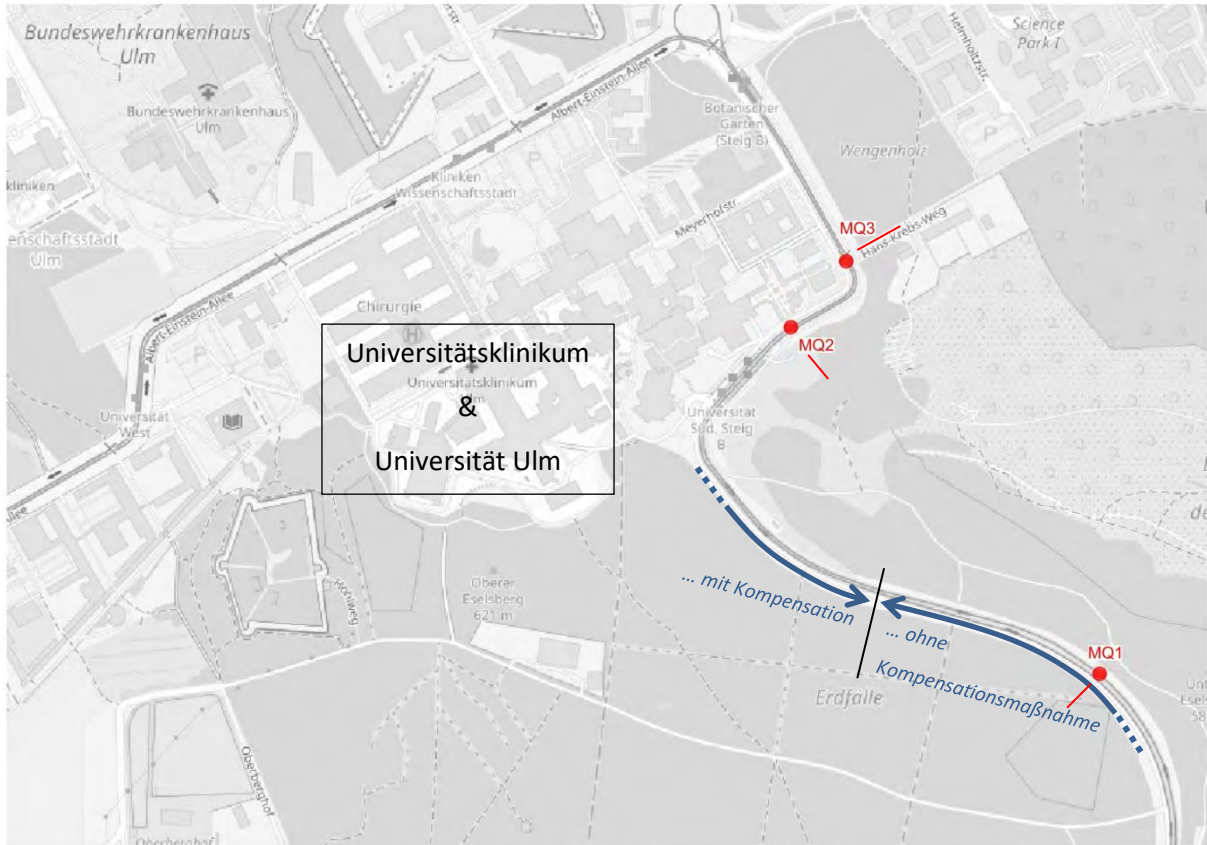


Abbildung 9-5: Lage der Messquerschnitte MQ1 bis MQ3

Messquerschnitt MQ1 liegt in einem Trassenabschnitt, wo keine Kompensationsmaßnahmen umgesetzt worden sind. Die Messquerschnitt MQ2 und MQ3 liegen im Bereich mit Kompensationsmaßnahmen.

Alle drei Messquerschnitte haben prinzipiell den gleichen Messaufbau, und zwar wurde im Abstand von 10 m, 30 m und 60m jeweils ein 3D-Sensor in 120cm Höhe aufgestellt.

9.6.2 Dokumentation der Messung am MQ1– Bereich ohne Kompensation

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
| 1 | MP1 | Z | 9,5 m Punkt | Dreifuß | G100 | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 2 | MP2 | Z | | | G60 | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 3 | MP3 | Z | | | G143 | +/- 5.000 [$\mu\text{m/s}$] |
| 4 | EMI1 | Z | 10 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S36 | +/- 100 [μT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |
| 7 | EMI2 | Z | 30 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S37 | +/- 100 [μT] |
| 8 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 9 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |
| 10 | EMI3 | Z | 60 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S38 | +/- 100 [μT] |
| 11 | | X | | | | +/- 100 [μT] |
| 12 | | Y | | | | +/- 100 [μT] |

Tabelle 9-13: Messpunkte an MQ1 in Ulm

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:

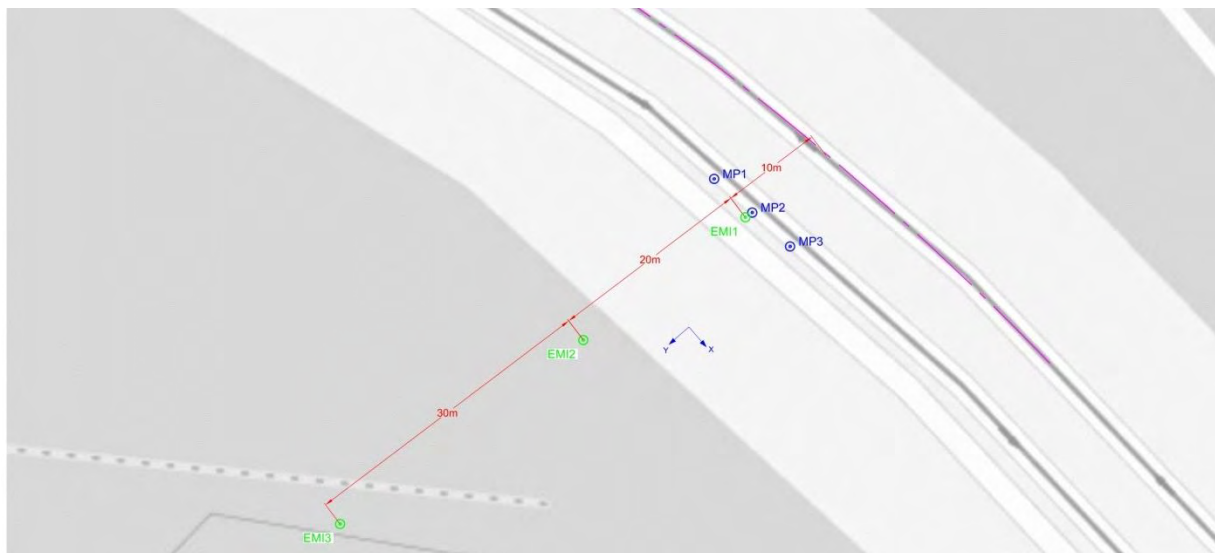


Abbildung 9-6: Lage der Messpunkte am MQ1



MP3 und EMI1 im Abstand von 10m vom Gleis

EMI2 im Abstand von 30m vom Gleis



EMI3 im Abstand von 60m vom Gleis

Ausbreitungskette Magnetfeldmessung

Tabelle 9-14: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ1 in Ulm

Folgende Zug-Vorbeifahrten wurden am Messquerschnitt MQ1 am 05.03.2020 dokumentiert:

| Nr | Datum | Uhrzeit | Gleis | Richtung | Zug- typ | Geschw. [km/h] |
|----|------------|----------|-------|----------|-------------|-------------------|
| 1 | 05.03.2020 | 9:30:39 | 1 | S | TW | 50 |
| 2 | 05.03.2020 | 9:35:55 | 1 | S | TW | 44 |
| 3 | 05.03.2020 | 9:36:10 | 2 | N | TW | 52 |
| 4 | 05.03.2020 | 9:39:26 | 2 | N | TW | 46 |
| 5 | 05.03.2020 | 9:40:20 | 1 | S | TW | 47 |
| 6 | 05.03.2020 | 9:46:57 | 2 | N | TW | 39 |
| 7 | 05.03.2020 | 9:50:14 | 1 | S | TW | 49 |
| 8 | 05.03.2020 | 9:53:58 | 2 | N | TW | 44 |
| 9 | 05.03.2020 | 10:00:17 | 2 | N | TW | 57 |
| 10 | 05.03.2020 | 10:00:45 | 1 | S | TW | 41 |
| 11 | 05.03.2020 | 10:05:38 | 1 | S | TW | 45 |
| 12 | 05.03.2020 | 10:11:06 | 1 | S | TW + Bus | 47 |
| 13 | 05.03.2020 | 10:11:35 | 2 | N | T | 52 |

Tabelle 9-15: Auflistung der gemessenen Zugvorbeifahrten am MQ1 in Ulm

9.6.3 Dokumentation der Messung am MQ2 (Hans-Krebs-Weg) – Abschnitt mit Kompensation

| Kanal | Messpunkt | Mess- rich- tung | Lage | Ankopplung bzw. Auf- stellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|------------------------|------------|--|--------|------------------|
| 1 | MP1 | Z | 10 m Punkt | Dreifuß | G100 | +/- 5.000 [µm/s] |
| 2 | MP2 | Z | | | G60 | +/- 5.000 [µm/s] |
| 3 | MP3 | Z | | | G143 | +/- 5.000 [µm/s] |
| 4 | EMI1 | Z | 10 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S36 | +/- 100 [µT] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [µT] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [µT] |
| 7 | EMI2 | Z | 30 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S37 | +/- 100 [µT] |
| 8 | | X | | | | +/- 100 [µT] |
| 9 | | Y | | | | +/- 100 [µT] |
| 10 | EMI3 | Z | 60 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S38 | +/- 100 [µT] |
| 11 | | X | | | | +/- 100 [µT] |
| 12 | | Y | | | | +/- 100 [µT] |

Tabelle 9-16: Messpunkte an MQ2 in Ulm



EMI1 und MP1 bis MP3 im Abstand von 10m vom Gleis



EMI2 im Abstand von 30m zum Gleis



EMI3 im Abstand von 60m vom Gleis

Tabelle 9-17: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ2 in Ulm

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:



Abbildung 9-7: Lage der Messpunkte am MQ1

Folgende Zug-Vorbeifahrten wurden am 05.03.2020 am Messquerschnitt MQ2 dokumentiert:

| Nr | Datum | Uhrzeit | Gleis | Richtung | Zug- typ | Geschw. [km/h] |
|----|------------|----------|-------|----------|-------------|-------------------|
| 1 | 05.03.2020 | 12:09:11 | 1 | S | TW | 24 |
| 2 | 05.03.2020 | 12:18:52 | 1 | S | TW | 33 |
| 3 | 05.03.2020 | 12:23:02 | 2 | N | TW | 28 |
| 4 | 05.03.2020 | 12:32:07 | 2 | N | TW | 29 |
| 5 | 05.03.2020 | 12:39:16 | 1 | S | TW | 25 |
| 6 | 05.03.2020 | 12:43:08 | 2 | N | TW | 26 |
| 7 | 05.03.2020 | 12:48:40 | 1 | S | TW | 22 |
| 8 | 05.03.2020 | 12:52:33 | 2 | N | TW | 27 |
| 9 | 05.03.2020 | 12:59:07 | 1 | S | TW | 21 |
| 10 | 05.03.2020 | 13:02:25 | 2 | N | TW | 25 |
| 11 | 05.03.2020 | 13:10:25 | 1 | S | TW | 22 |
| 12 | 05.03.2020 | 13:13:08 | 2 | N | TW | 24 |
| 13 | 05.03.2020 | 13:19:33 | 1 | S | TW | 24 |
| 14 | 05.03.2020 | 13:23:50 | 2 | N | TW | 28 |
| 15 | 05.03.2020 | 13:29 | 1 | S | TW | 27 |

Tabelle 9-18: Auflistung der gemessenen Zugvorbeifahrten am MQ2 in Ulm

9.6.4 Dokumentation der Messung am MQ3 – Bereich mit Kompensation

| Kanal | Messpunkt | Messrichtung | Lage | Ankopplung bzw. Aufstellbedingung | Sensor | Messbereich |
|-------|-----------|--------------|------------|-----------------------------------|--------|--------------------|
| 1 | EMI1 | Z | 14 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S36 | +/- 100 [μ T] |
| 2 | | X | | | | +/- 100 [μ T] |
| 3 | | Y | | | | +/- 100 [μ T] |
| 4 | EMI2 | Z | 30 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S37 | +/- 100 [μ T] |
| 5 | | X | | | | +/- 100 [μ T] |
| 6 | | Y | | | | +/- 100 [μ T] |
| 7 | EMI3 | Z | 60 m Punkt | Stativ h = 120 cm | S38 | +/- 100 [μ T] |
| 8 | | X | | | | +/- 100 [μ T] |
| 9 | | Y | | | | +/- 100 [μ T] |

Tabelle 9-19: Messpunkte an MQ3 in Ulm

In den folgenden Grafiken ist die Lage der Messpunkte skizziert:

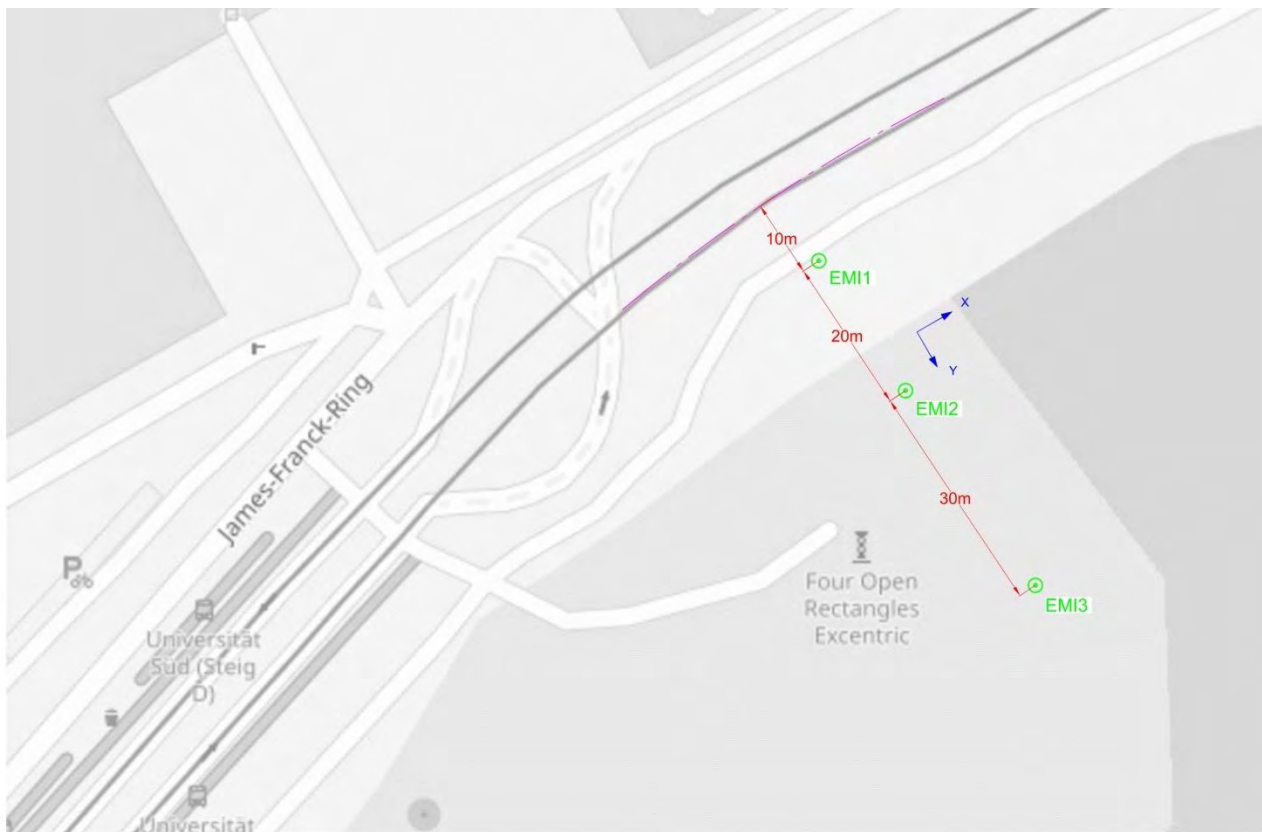


Abbildung 9-8: Lage der Messpunkte am MQ3



EMI1 im Abstand von 10m vom Gleis



EMI2 im Abstand von 30m zum Gleis



EMI3 im Abstand von 60m vom Gleis

Tabelle 9-20: Fotodokumentation der Messpunkte am MQ3 in Ulm

Folgende Zug-Vorbeifahrten wurden am 05.03.2020 am Messquerschnitt MQ3 dokumentiert:

| Nr | Datum | Uhrzeit | Gleis | Richtung | Zug- typ | Geschw. [km/h] |
|----|------------|----------|-------|----------|-------------|---|
| 1 | 05.03.2020 | 12:52:24 | 1 | N | TW | Geschwindigkeit nicht gemessen, da direkt an Haltepunkt |
| 2 | 05.03.2020 | 12:59:29 | 2 | S | TW | |
| 3 | 05.03.2020 | 13:02:10 | 1 | N | TW | |
| 4 | 05.03.2020 | 13:10:45 | 2 | SW | TW | |
| 5 | 05.03.2020 | 13:12:48 | 1 | N | TW | |
| 6 | 05.03.2020 | 13:19:57 | 2 | S | TW | |
| 7 | 05.03.2020 | 13:22:29 | 1 | N | TW | |
| 8 | 05.03.2020 | 13:29:50 | 2 | S | TW | |
| 9 | 05.03.2020 | 13:32:55 | 1 | N | TW | |
| 10 | 05.03.2020 | 13:40:08 | 2 | S | TW | |
| 11 | 05.03.2020 | 13:42:15 | 1 | N | TW | |
| 12 | 05.03.2020 | 13:49:43 | 2 | S | TW | |
| 13 | 05.03.2020 | 13:51:51 | 1 | N | TW | |
| 14 | 05.03.2020 | 13:59:58 | 2 | S | TW | |
| 15 | 05.03.2020 | 14:02:18 | 1 | N | TW | |
| 16 | 05.03.2020 | 14:06:38 | 1 | N | TW | |
| 17 | 05.03.2020 | 14:09:15 | 2 | S | TW | |
| 18 | 05.03.2020 | 14:11:25 | 1 | N | TW | |

Tabelle 9-21: Auflistung der gemessenen Zugvorbeifahrten am MQ3 in Ulm

10 Anlage V: Untersuchung einer alternativen Trassenführung (Variante 2)

zum Bericht mit der Nr.: 40-10428-01-D8 vom 16.12.2020

10.1 Vorbemerkung

Neben der bisher untersuchten Trassenführung gemäß Abbildung 2-1 werden derzeit alternative Trassenvarianten im Bereich des Universitätscampus „Auf der Morgenstelle“ entworfen [17]. Dabei soll die Trasse, statt dem Verlauf der Schnarrenbergstraße zu folgen, durch den Campus Morgenstelle östlich des Kraftwerks geführt werden, um einen zentralen Campus-Haltepunkt zwischen dem Heizkraftwerk und Gebäude B möglich zu machen. Diese sogenannte Variante 2 ist nachfolgend in Abbildung 10-1 dargestellt.

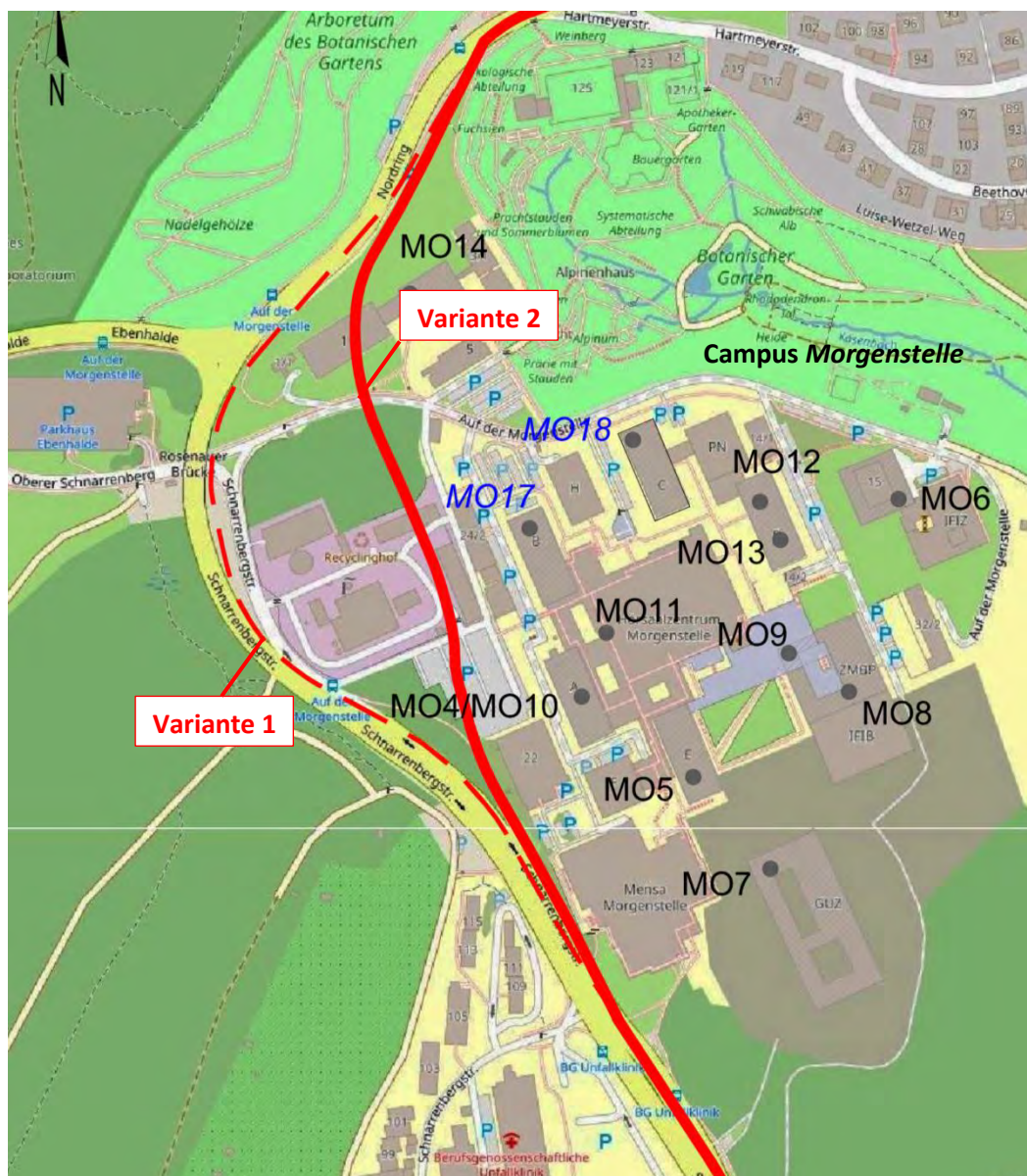


Abbildung 10-1: Alternative Trassenführung der neuen Stadtbahn im Bereich des Campus Morgenstelle sowie die Lage der zugehörigen maßgebenden Beurteilungsstandorte

Bei der Trassenführung „Variante 2“ werden im Vergleich zur bisher untersuchten Trassenführung (Variante 1) zwei zusätzliche Standorte (MO17 und MO18, nachfolgend in blau dargestellt) berücksichtig

sichtigt und beurteilt. Es handelt sich um die Uni-Gebäude B und C. Bei Variante 1 sind diese Gebäude nicht explizit untersucht, da das Gebäude A aufgrund des wesentlich geringeren Abstands maßgebend ist. Bei Variante 2 ist dies nicht der Fall, und es müssen alle drei Gebäude explizit untersucht werden.

Eine vollständige Liste aller berücksichtigten Beurteilungsstandorte mit Angabe der auf Trassenvariante 2 bezogenen Abstände befindet sich in Tabelle 10-1.

| ID # | Adresse | Gebäude | Ebene Raum | Abstand zur Trasse [m] | | Tool | Spezifikation | IST-Messung durchgeführt? |
|------|----------------------------|----------|------------------------|---------------------------|------------|--------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | | | | Variante 1 | Variante 2 | | | |
| MO4 | Auf der Morgenstelle 18 | Geb. A | E7 7O25 | 78 | 64 | Röntgen- diffraktometer | VC-B | Ja |
| MO5 | Auf der Morgenstelle 28 | Geb. E | E2 2H08 2H11 | 128 | 125 | TEM, REM | VC-E | Ja |
| MO6 | Auf der Morgenstelle 15 | VG | KG 0.127.1 | 319 | 296 | Ionen- Mikroskop | 50 µg | Ja |
| MO7 | Auf der Morgenstelle 94/96 | GUZ | E2(KG) 2M03 | 144 | 143 | REM | VC-F | Ja |
| MO8 | Auf der Morgenstelle 32 | ZMBP | E1 (KG) 1L21 | 210 | 208 | Laserpinzette | VC-D | Ja |
| MO9 | | | E3 3W04 3Y01 | 213 | 202 | TEM, Mikro- skope | VC-D | Ja |
| MO10 | Auf der Morgenstelle 18 | Geb. A | E5 5G04 5G35 | 82 | 74 | REM, STM | VC-C (*) | Ja |
| MO11 | Auf der Morgenstelle 16-18 | Geb. A-B | E3 4E01 4E02 | 126 | 96 | NMR | Bruker Nano-C | Ja |
| MO12 | Auf der Morgenstelle 14 | Geb. D | E1(KG) 1Q21 1Q27 | 248 | 210 | Optische Messtische (Kryostat) | VC-D | Ja |
| MO13 | | Geb. D | E5 5H40 | 261 | 210 | Optische Messtische (REM) | VC-D (*) | Ja |
| MO14 | Auf der Morgenstelle 3 | Geb. I | KG OG | 34 | 24 | TEM, REM Mikroskope | VC-E VC-C | Vib. ja, EMI nein** |
| MO17 | Auf der Morgenstelle 8 | Geb. B | KG OG | 115 | 54 | REM, NMR Mikroskope | Bruker Nano-C VC-D | Nein |
| MO18 | Auf der Morgenstelle 10 | Geb. C | OG | 270 | 143 | AFM, Mikro- skope | VC-D | nein |

(*) in Verbindung mit der vorhandenen, schwingungs isolierten Aufstellung

** während der Messung A4 wurde der Erschütterungspegel im KG und OG gemessen, aber nicht EMV

Tabelle 10-1: Auflistung der maßgebenden Beurteilungsstandorte

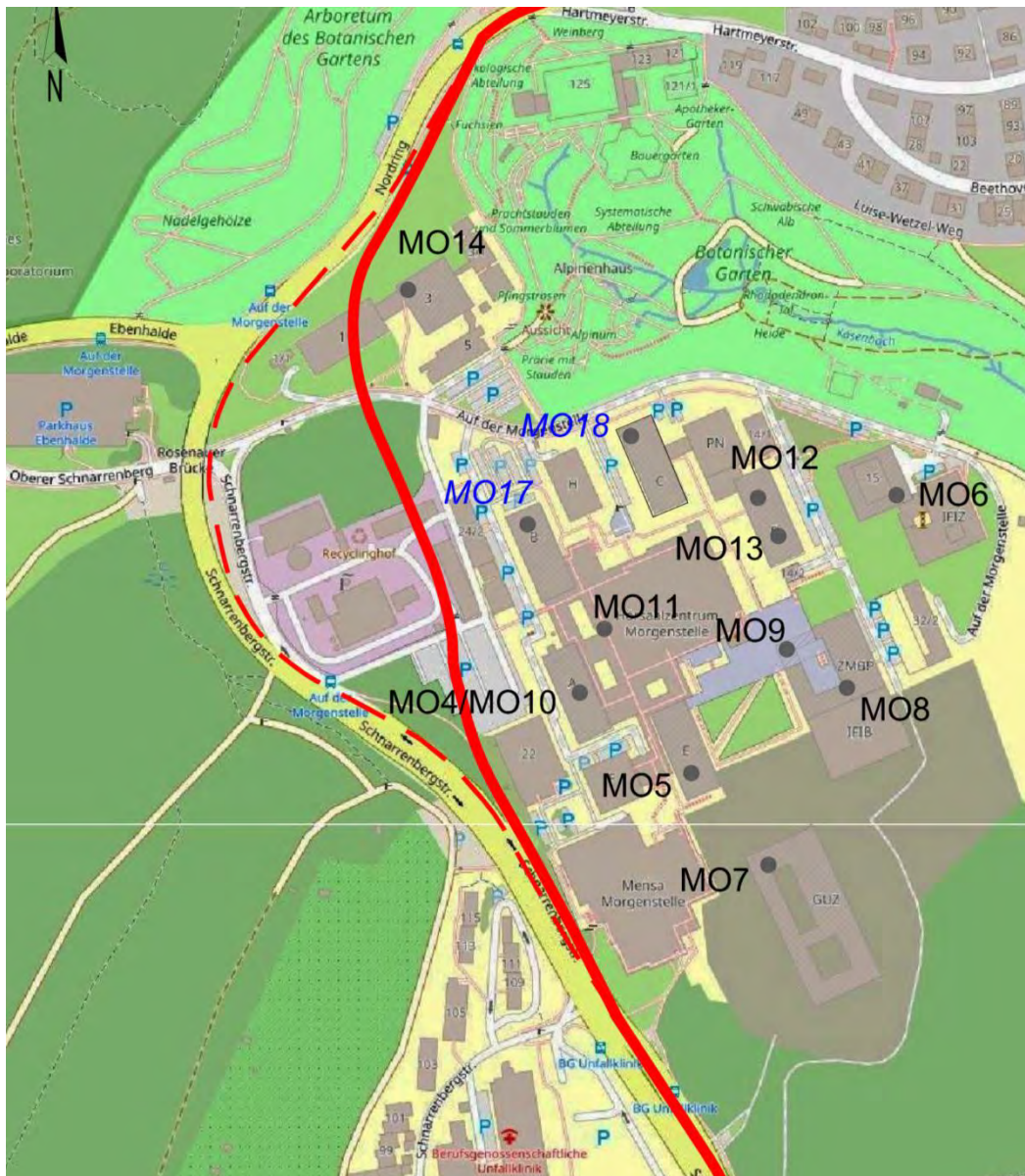


Abbildung 10-2: Lage der maßgebenden Beurteilungsstandorte

10.2 Prognose und Beurteilung der Schwingungsimmissionen infolge des Stadtbahnbetriebs

Die Prognose der durch die Stadtbahn-Vorbeifahrten erzeugten Schwingungsimmissionen erfolgt analog zu Kapitel 3. Die Beurteilung erfolgt unter zwei Gesichtspunkten:

- Zum einen werden die Prognosewerte den IST-Werten am beweisgesicherten Punkt gegenübergestellt und hinsichtlich einer Verschlechterung der Standortbedingungen beurteilt.
- Zum zweiten erfolgt eine Verallgemeinerung auf das betrachtete Gebäude bzw. unmittelbar benachbarte Gebäude, bei der auch abweichende Decken-Eigenfrequenzen hinsichtlich der Einhaltung des jeweiligen gültigen Schwingungskriteriums betrachtet werden.

Die Erschütterungsprognose erfolgt für jeden individuellen Standort gemäß Tabelle 10-1.

10.2.1 MO4 – Auf der Morgenstelle 18 (Gebäude A)

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO4 |
| Gebäude | Geb. A (E7) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 64 m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Messtechnisch ermittelt am Gebäude A (Messung A5) |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-B |

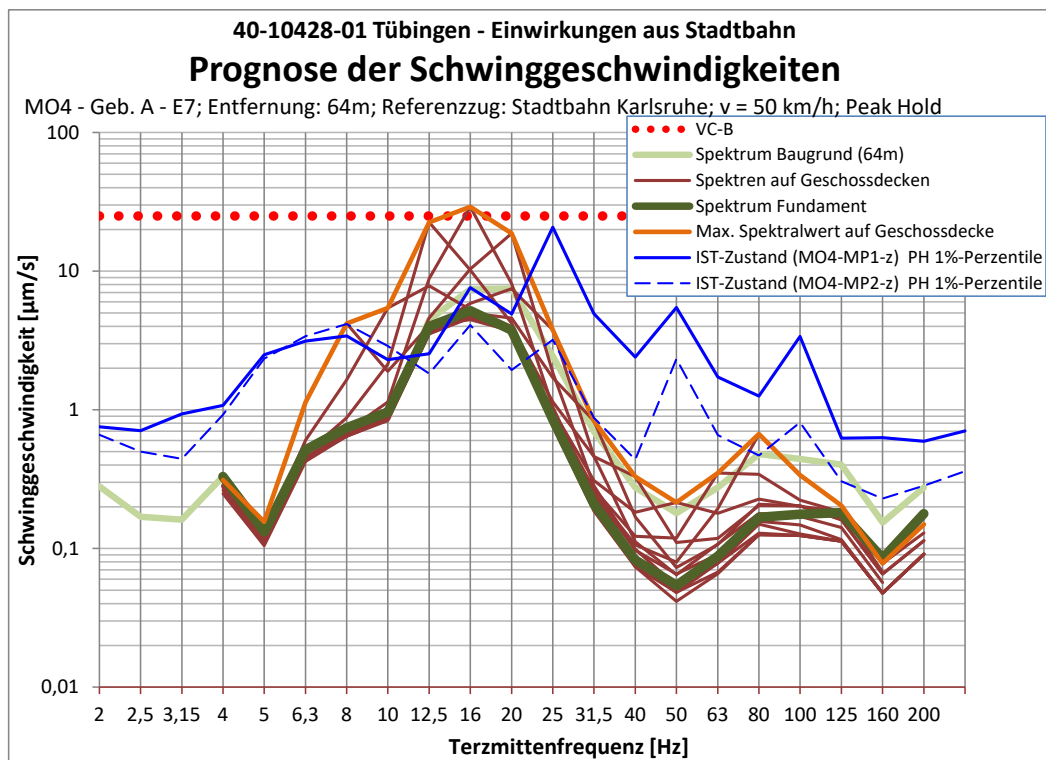


Abbildung 10-3: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO4

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

10.2.2 MO5 – Auf der Morgenstelle 28 (Gebäude E)

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO5 |
| Gebäude | Geb. E (E2) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 125m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-E |

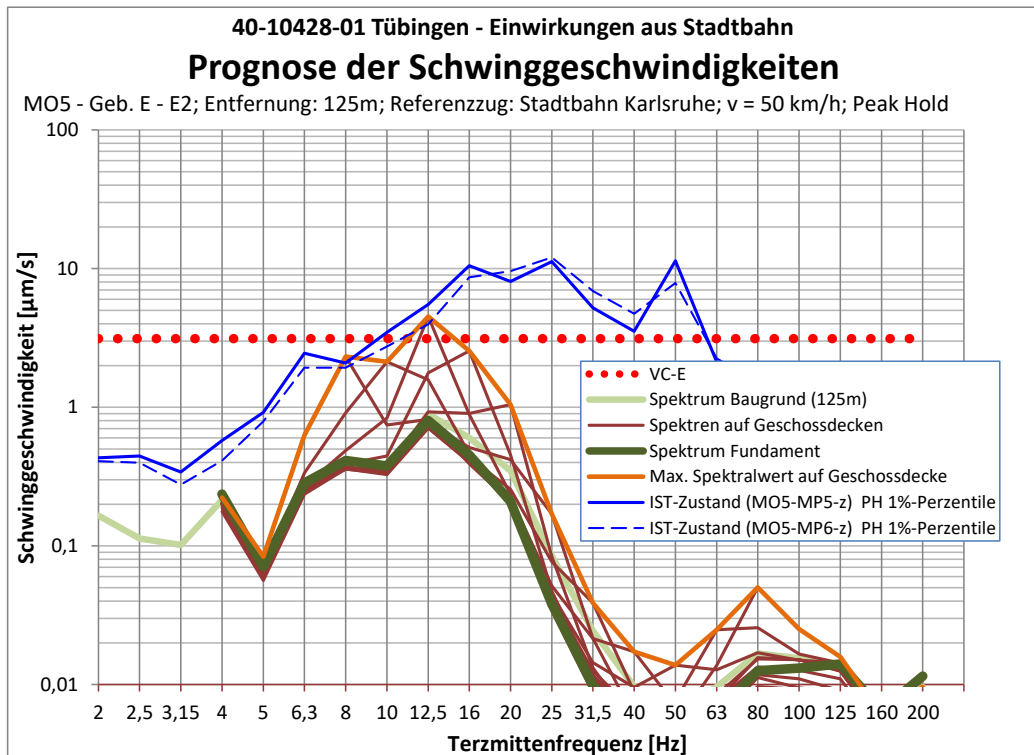


Abbildung 10-4: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO5

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

10.2.3 MO6 – Auf der Morgenstelle 15 (Verfügungsgebäude)

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO6 |
| Gebäude | Verfügungsgebäude (KG) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 296m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | - |
| Tool-Spezifikation | Orion NanoFab |

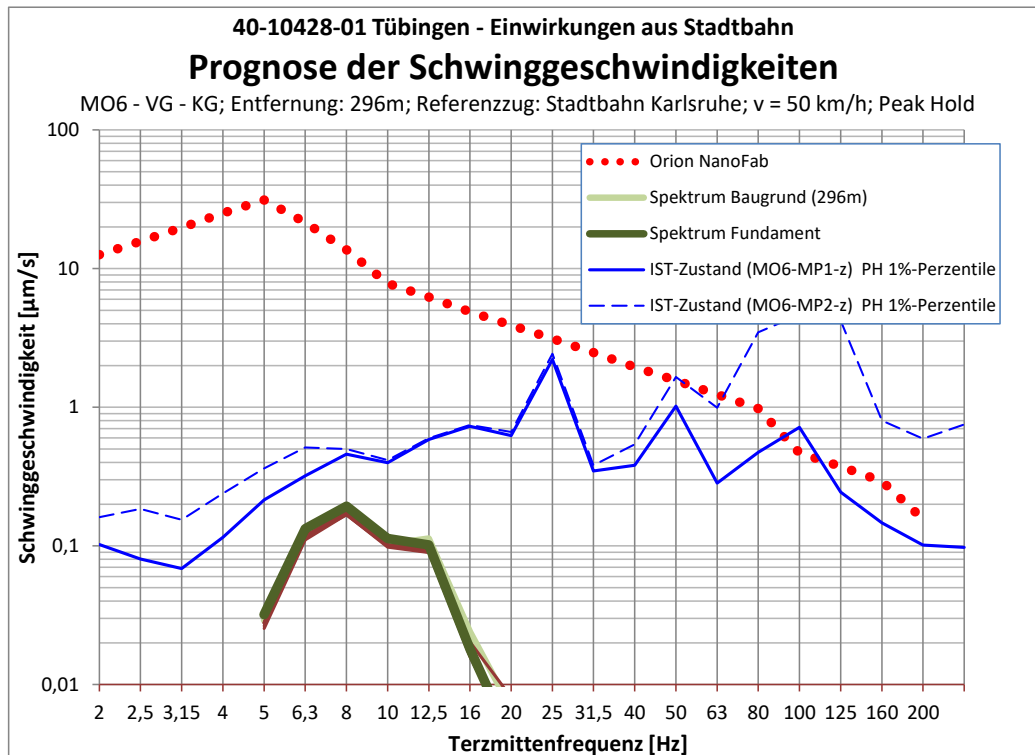


Abbildung 10-5: Prognose Schwingungsgeschwindigkeit MO6

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

10.2.4 MO7 – Auf der Morgenstelle 94/96 (GUZ)

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO7 |
| Gebäude | GUZ (E2; KG) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 143m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | - |
| Tool-Spezifikation | VC-F |

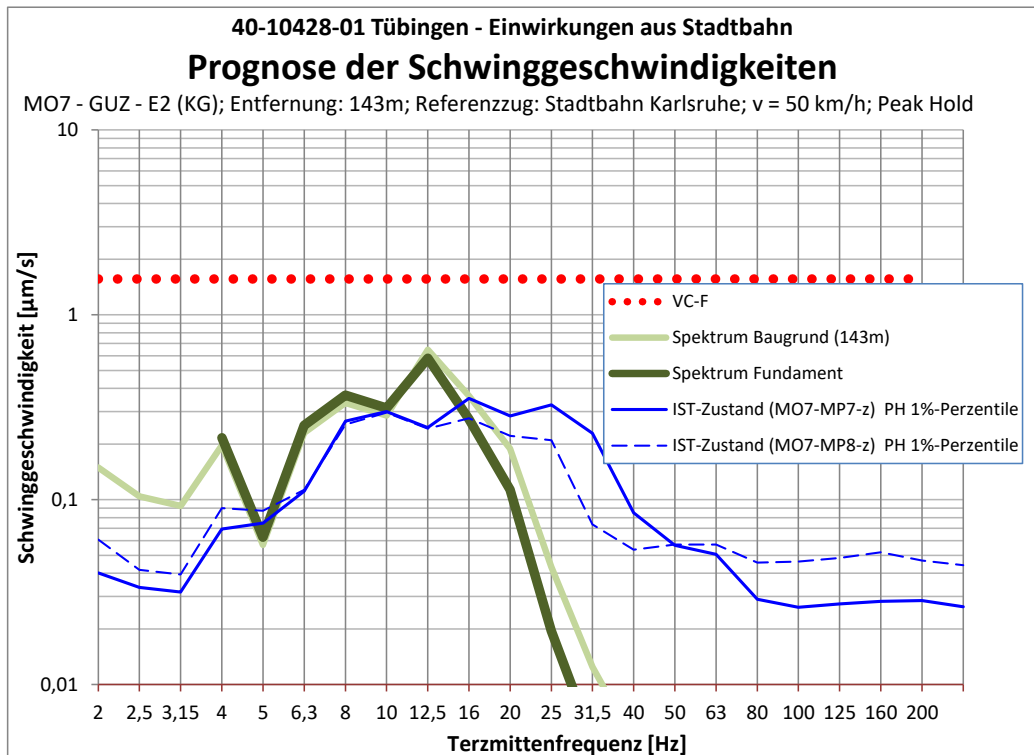


Abbildung 10-6: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO7

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

10.2.5 MO8 – Auf der Morgenstelle 32 (ZMBP KG)

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO8 |
| Gebäude | ZMBP (E1; KG) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 208m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | - |
| Tool-Spezifikation | VC-D |

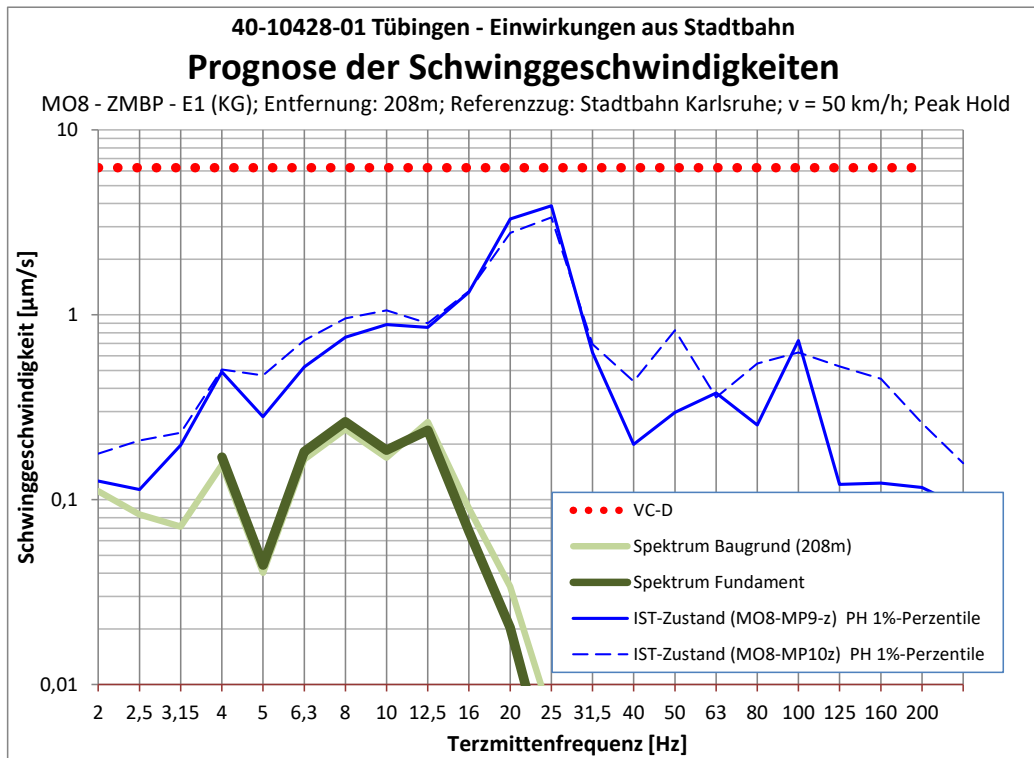


Abbildung 10-7: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO8

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

10.2.6 MO9 – Auf der Morgenstelle 32 (ZMBP OG)

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO9 |
| Gebäude | ZMBP (E3) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 202m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-D |

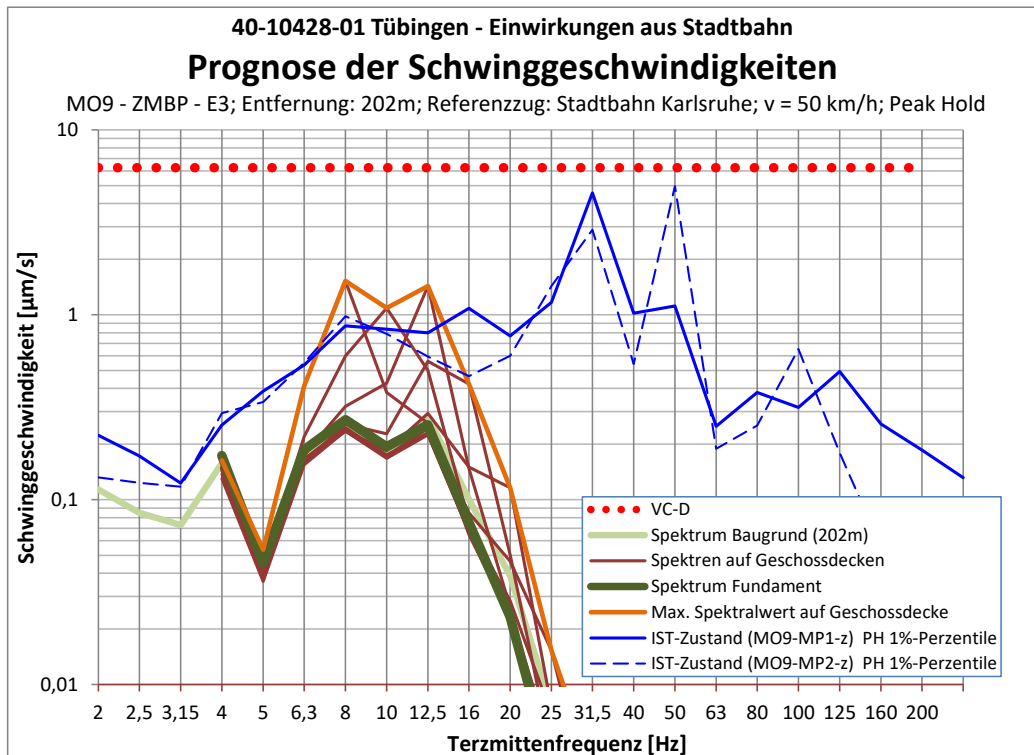


Abbildung 10-8: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO9

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

10.2.7 MO10 – Auf der Morgenstelle 18 (Gebäude A)

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO10 |
| Gebäude | Geb. A (E5) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 74m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Messtechnisch ermittelt am Gebäude A (Messung A5) |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-C |

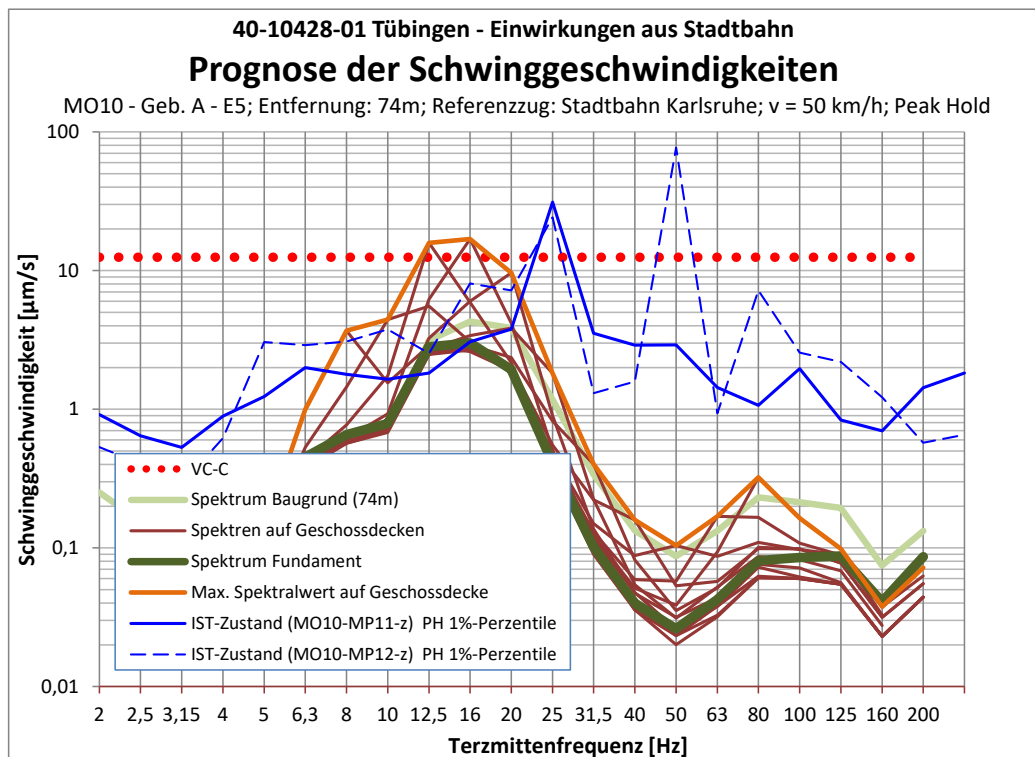


Abbildung 10-9: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO10

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

10.2.8 MO11 – Auf der Morgenstelle 16 (Zwischengebäude A-E)

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO11 |
| Gebäude | Geb. A-E (E3) (Prognose erfolgt für Bodenplatte) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 96m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | - |
| Tool-Spezifikation | Bruker Nano-C |

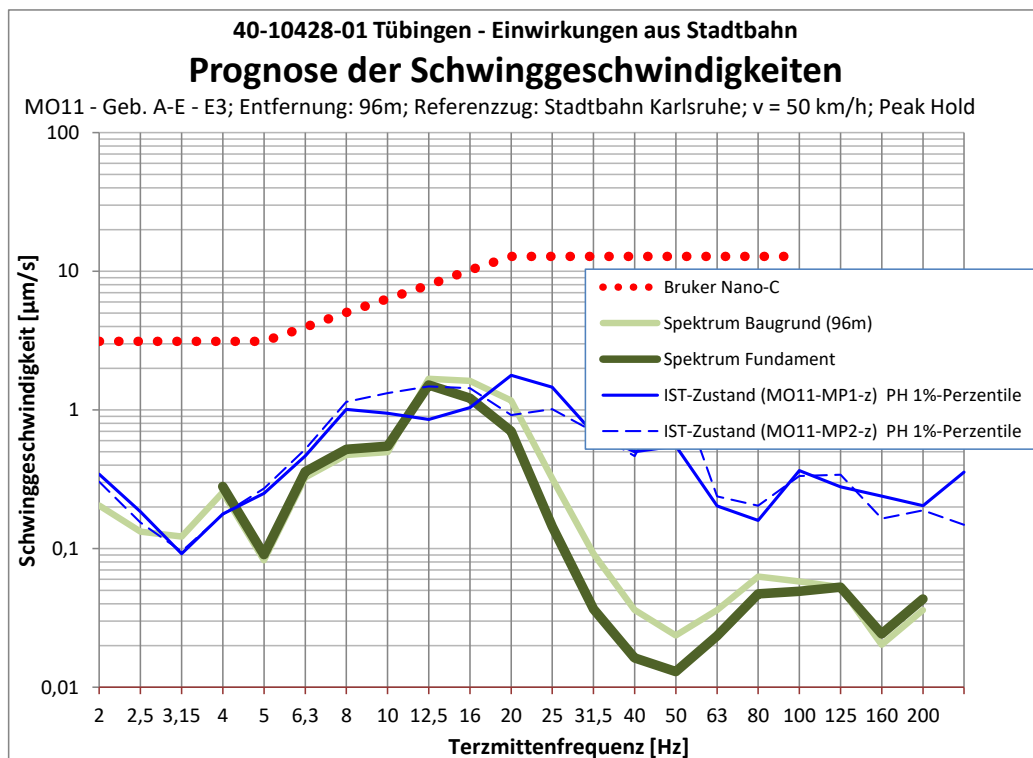


Abbildung 10-10: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO11

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

10.2.9 MO12 – Auf der Morgenstelle 14 (Gebäude D KG)

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO12 |
| Gebäude | Geb. D (KG) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 210m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | - |
| Tool-Spezifikation | VC-D |

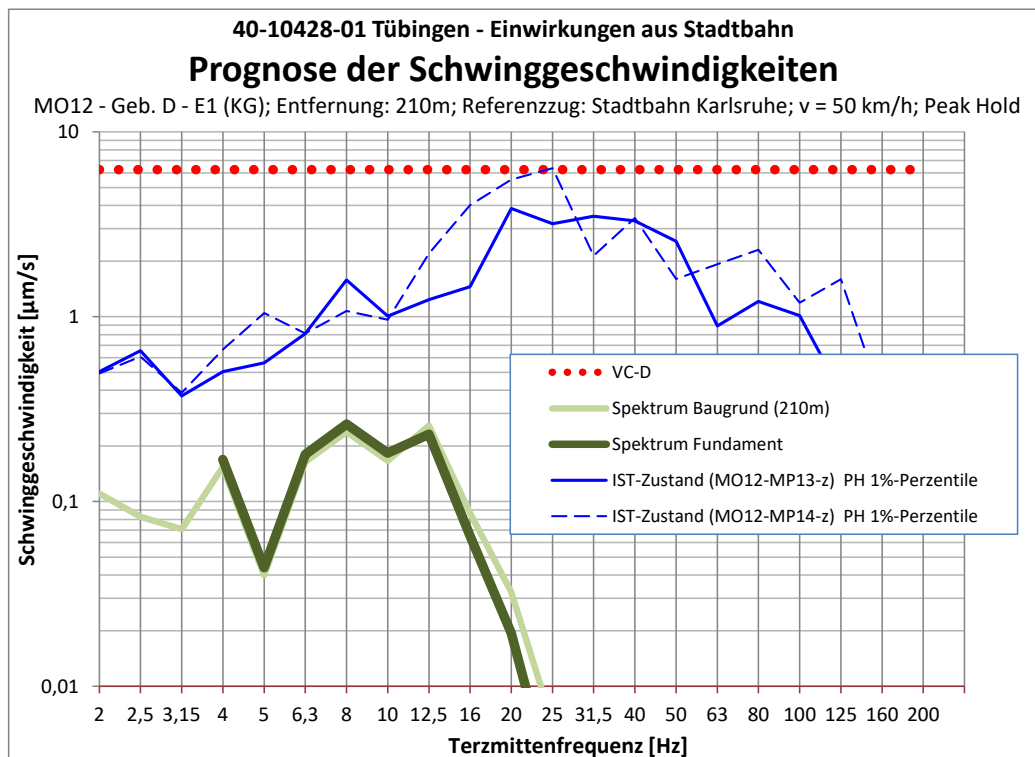


Abbildung 10-11: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO12

10.2.10 MO13 – Auf der Morgenstelle 14 (Gebäude D OG)

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO13 |
| Gebäude | Geb. D (E5) |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 210m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-D |

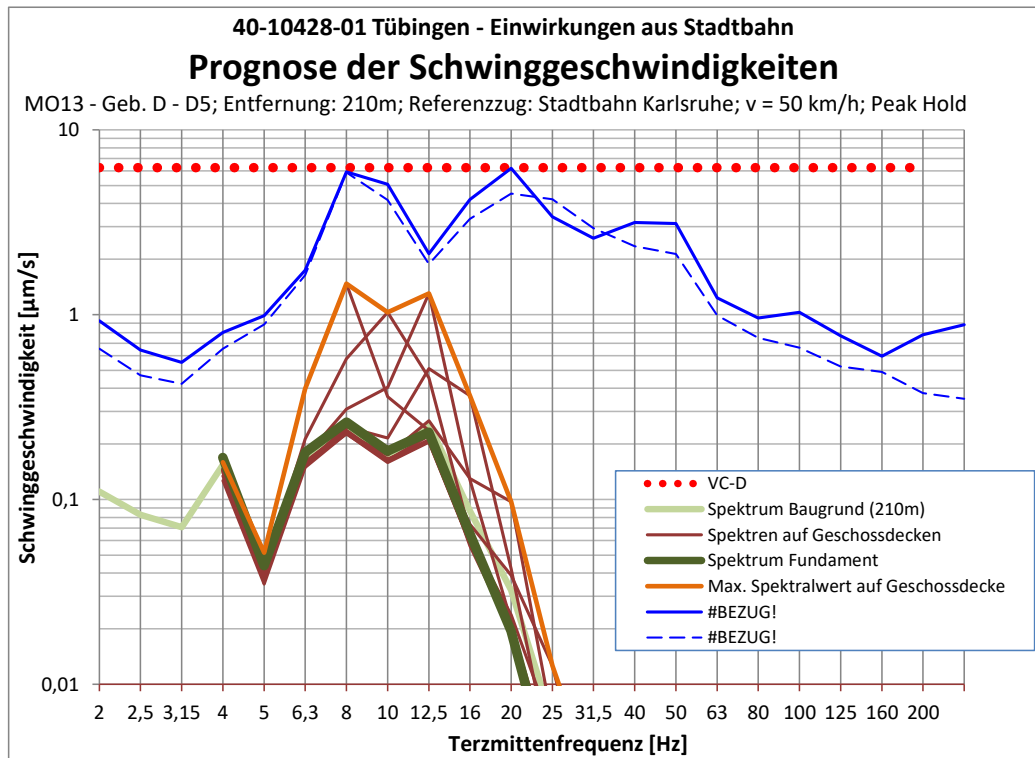


Abbildung 10-12: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO13

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

10.2.11 MO14 – Auf der Morgenstelle 3 (Gebäude I)

| | |
|----------------------------------|--|
| Messort | MO14 |
| Gebäude | Geb. I |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A4 |
| Ausbreitung | A4 |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 37m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Messtechnisch ermittelt (Messung A4) |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-E im KG und VC-C im OG |

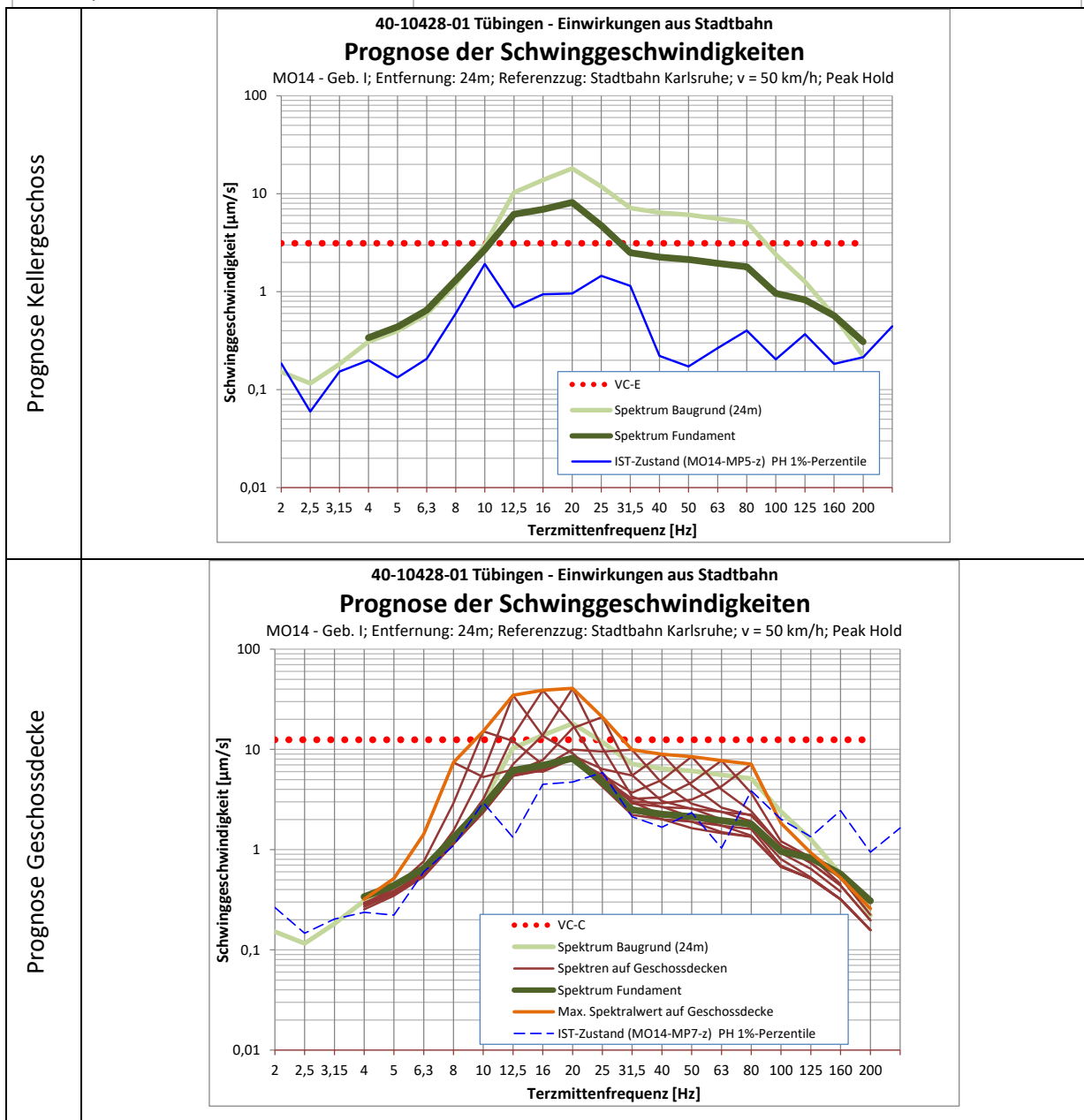


Abbildung 10-13: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO14

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

10.2.12 MO17 – An der Morgenstelle 8 (Gebäude B)

Bei diesem Objekt wurde keine IST-Messung durchgeführt. Gemäß [10] befinden sich dort mehrere empfindliche Tools:

Ebene 1: REM, NMR Spektrometer

Ebene 2: Massenspektrometer, NMR-Spektrometer

Ebene 3: NMR-Spektrometer

Ebene 5: versch. Mikroskope, Tropfenvolumensiometer

| | |
|----------------------------------|--|
| Bezeichnung | MO17 |
| Gebäude | Geb. B |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 (Fernfeld) |
| Ausbreitung | A3 (Fernfeld) |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 54m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | Bruker Nano-C bzw. VC-D |

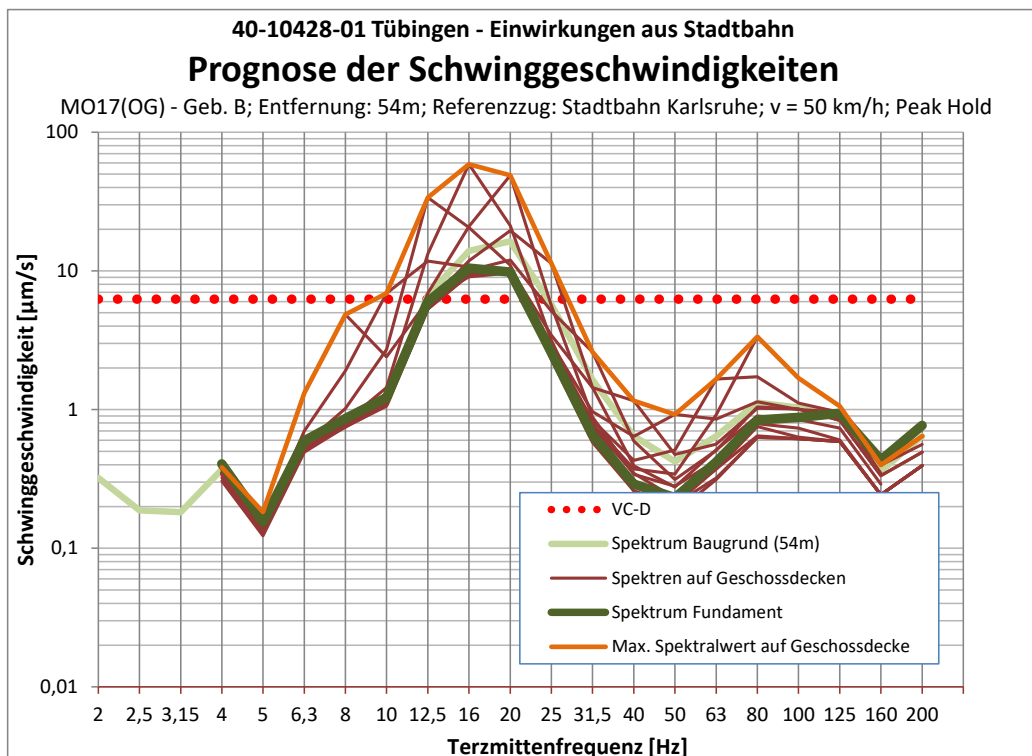


Abbildung 10-14: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO17

40-10428-01-D8 RevA Erschütterungen und Magnetfelder Stadtbahn Tübingen.docx

10.2.13 MO18 – an der Morgenstelle 10 (Gebäude C)

Es wurde keine IST-Messung durchgeführt. Gemäß [10] befinden sich im Raum P34 (Ebene 7) ein AFM und ein Raman-Mikroskop.

| | |
|----------------------------------|--|
| Bezeichnung | MO18 |
| Gebäude | Geb. C |
| Kraftdichtespektrum | Idealisiertes Prognosekraftspektrum; keine Weiche, 50 km/h |
| Übertragungsadmittanz | Standort A3 |
| Ausbreitung | A3 |
| Angesetzte Entfernung zur Trasse | 143m |
| Fundament-Abminderungsfunktion | Idealisierte Abnahme gem. Abbildung 3-6 |
| Gebäudeübertragung | Übertragungsfunktion gem. Ril 820.2050 |
| Tool-Spezifikation | VC-D |

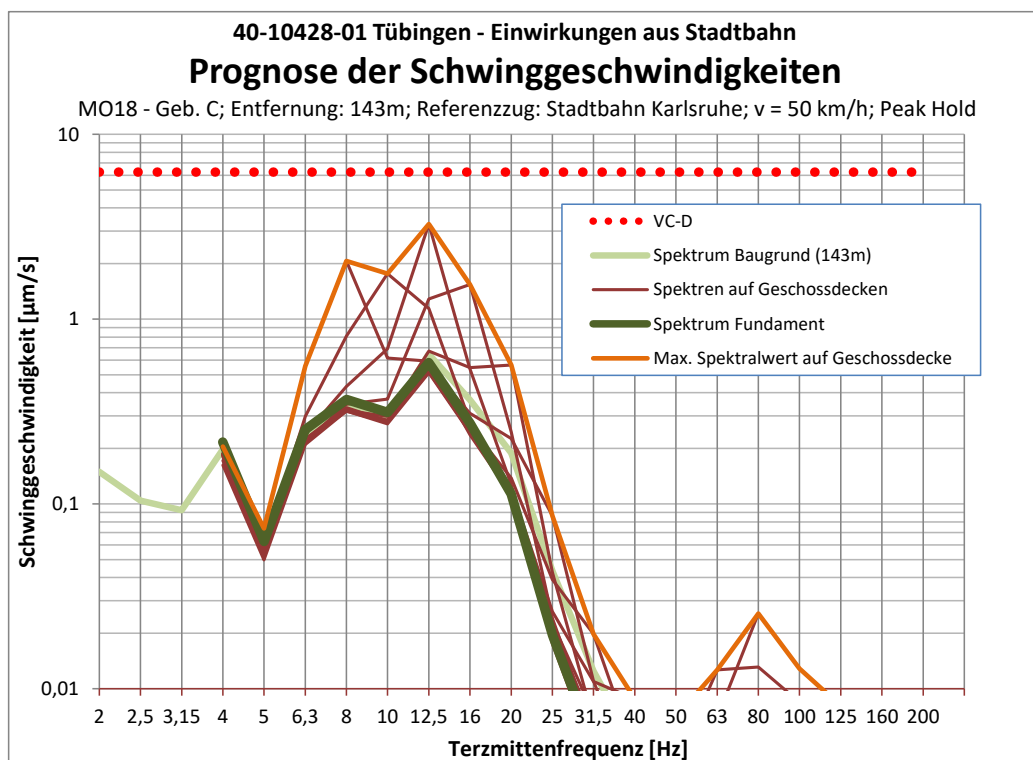


Abbildung 10-15: Prognose Schwinggeschwindigkeit MO18

10.2.14 Zusammenfassung der spektralen Erschütterungsprognose

Die qualitativen Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 3-4 zusammengefasst.

| Messort | Gebäude Ebene | Tool | Abst. Trasse [m] | Toolspek | IST-Zustand | Prognose Stadtbahn | Beurteilung der zuk. Standortbedingung |
|---------|-----------------|--------------------------------|------------------|---------------------|-------------|--------------------|---|
| MO4 | Geb. A, E7 | Röntgen-diffraktometer | 64 | VC-B | VC-B | VC-A | Toolspek bei Vorbeifahrt knapp überschritten. |
| MO5 | Geb. E, E2 | TEM, REM | 125 | VC-E | VC-C | VC-D | Toolspek bei Vorbeifahrt überschritten |
| MO6 | VG, KG | Ionenmikroskop | 296 | Orion NanoFab | VC-D | << als Tool-Spez. | Keine Verschlechterung |
| MO7 | GUZ, E2 (KG) | REM | 143 | VC-F | VC-G | VC-G | Minimale Verschlechterung (Geb. während Messung noch nicht in Nutzung) |
| MO8 | ZMBP, E1 (KG) | Laserpinzette | 208 | VC-D | VC-D | VC-F | Keine Verschlechterung |
| MO9 | ZMBP, E3 | TEM, Mikroskope | 202 | VC-D | VC-D | << VC-D | Toolspek derzeit knapp eingehalten, zukünftig keine Verschlechterung |
| MO10 | Geb. A, E5 | REM, STM | 74 | VC-C* | > VC-A | VC-B | Toolspek bei Vorbeifahrt knapp überschritten |
| MO11 | Geb. A/B, E3 | NMR | 96 | Bruker Nano-C | VC-E | < als Tool-Spez. | Keine Verschlechterung |
| MO12 | Geb. D, E1 (KG) | Optische Messtische (Kyrostat) | 210 | VC-D | VC-D | << VC-D | Toolspek derzeit nur knapp eingehalten, zukünftig aber keine Verschlechterung |
| MO13 | Geb. D, E5 | Optische Messtische (REM) | 210 | VC-D* | VC-D | << VC-D | Toolspek im IST-Zustand nur knapp eingehalten, große Horizontalschwingungen für < 2Hz, zukünftig keine Verschlechterung |
| MO14 | Geb. I, KG | TEM, REM | 24 | VC-E | VC-E | VC-C | Deutliche Verschlechterung infolge Bahn |
| | EG | Mikroskope | | VC-C | VC-D | VC-A | |
| MO17 | Geb. B KG-OG | REM, Mikroskope, NMR | 54 | VC-D, Bruker Nano-C | ** | VC-A | Toolspek zukünftig deutlich überschritten. |
| MO18 | Geb. C, OG | AFM, Mikroskope | 143 | VC-D | ** | < VC-D | Toolspek durch Vorbeifahrt nicht überschritten. |

* Nur in Verbindung mit schwingungsisolierter Aufstellung
** keine IST-Messung vorhanden

Tabelle 10-2: Beurteilung der zukünftigen Schwingungseinwirkung infolge Stadtbahnvorbeifahrt für die Standorte auf dem Unicampus Morgenstelle

Die Lage der einzelnen Standorte auf dem Unicampus Morgenstelle sowie deren Bewertung hinsichtlich der durch Stadtbahnvorbeifahrten induzierten Schwingungsimmissionen ist in der folgenden Abbildung 3-16 grafisch dargestellt.

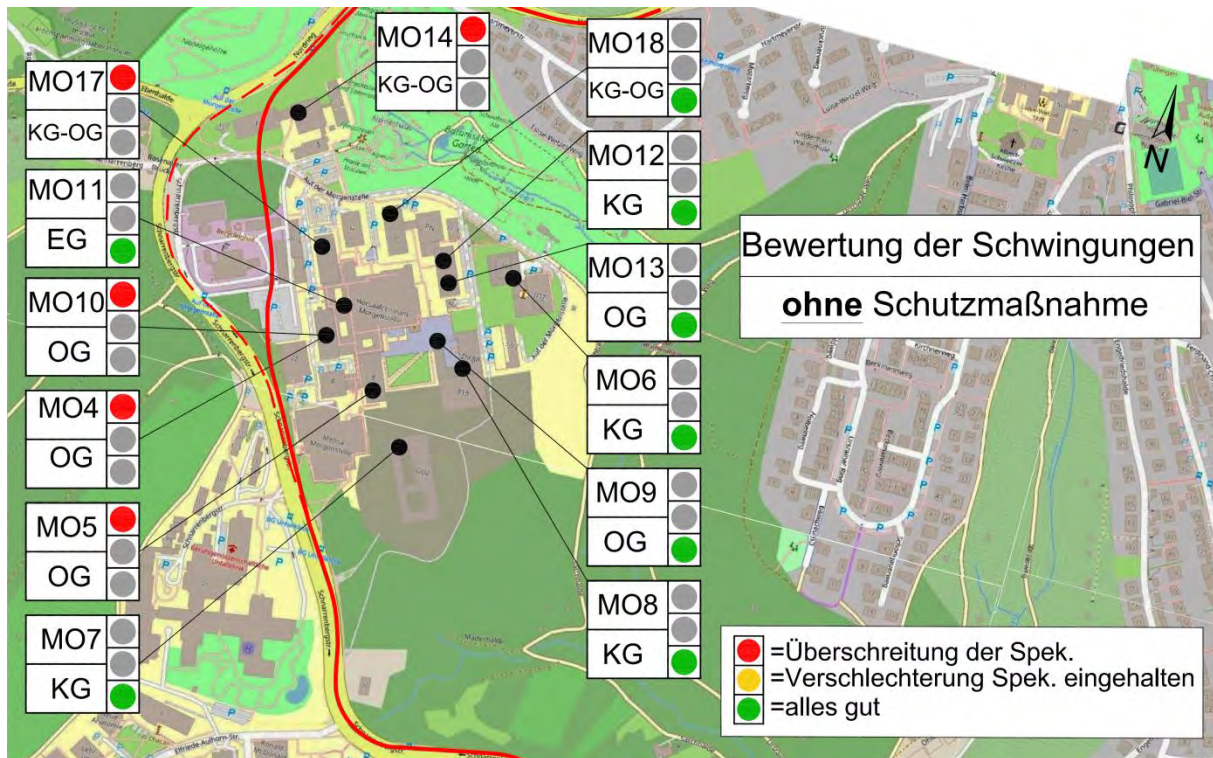


Abbildung 10-16: Bewertung der Erschütterungseinwirkung infolge Stadtbahn (ohne Schutzmaßnahme)

Tabelle 3-4 und Abbildung 3-16 machen folgendes deutlich:

- Entfernt liegende Gebäude sind weiterhin – genau wie beim Trassenverlauf Variante 1 – nicht negativ betroffen (keine Verschlechterung).
- Da die Variante 2 im Vergleich zu Variante 1 insgesamt näher am Campus Morgenstelle verläuft, sind insgesamt jedoch mehr Gebäude betroffen, vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

| | Variante 1 | Variante 2 |
|---|------------|------------|
| Betroffene Gebäude auf dem Campus Morgenstelle (sowohl Standort-Verschlechterung als auch Toolspek überschritten) | 3 | 5 |
| Gebäude, bei denen Toolspek verletzt ist | 1 | 5 |

Tabelle 10-3: Gegenüberstellung der betroffenen Gebäude von Variante 1 und Variante 2

- Bei 5 der untersuchten Einzelobjekte MO4 bis MO18 wird es zukünftig zu einer deutlichen Erhöhung des Schwingungspegels durch die Vorbeifahrt der Stadtbahn kommen, so dass dadurch die Toolspezifikation nicht mehr eingehalten sein wird und die Funktionsfähigkeit nicht mehr gegeben ist. Es betrifft die Gebäude A, B, E und I, also im Wesentlichen alle in erster Reihe neben der Trasse liegende Gebäude.

Um die Funktionsfähigkeit der schwingungsempfindlichen Geräte weiterhin gewährleisten zu können, müssen bei der Planung der Stadtbahn schwingungsmindernde Maßnahmen berücksichtigt werden. Sie sind in Tabelle 3-5 zusammengefasst und quantifiziert. Unterschieden wird dabei zwischen

- der Minderung, die zur allgemeinen Einhaltung der Toolspezifikation notwendig ist,
- der Minderung, die erforderlich ist, damit sich die Standortbedingungen hinsichtlich des Schwingungspegels nicht verschlechtern.

Unter Berücksichtigung der Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit werden folgende Minderungsmaßnahmen empfohlen.

| Messort | Gebäude | Erforderliche Minderung | | Empfohlene Maßnahme | |
|-------------|---------|--------------------------------------|---|------------------------|--|
| | | zur allgemeinen Einhaltung der Spez. | damit Standortbdg. am Beweissicherungspunkt nicht schlechter werden | am Gleis | Bemerkung |
| MO4 MO10 | Geb. A | 3 dB | 12 dB | 12 dB | Schwingungs isolierte Aufstellung der internen Störquellen |
| | | $f \geq 12,5 \text{ Hz}$ | $f \geq 10 \text{ Hz}$ | $f \geq 10 \text{ Hz}$ | |
| MO5 | Geb. E | 4 dB | | 6 dB | - |
| | | $f \geq 12,5 \text{ Hz}$ | | $f \geq 10 \text{ Hz}$ | |
| MO14 | Geb. I | > 10dB | > 20 dB | 12 dB | Eignung OGs fraglich für empfindliche Geräte |
| | | $f > 10 \text{ Hz}$ | $f > 12,5 \text{ Hz}$ | $f > 10 \text{ Hz}$ | |
| MO17 | Geb. B | > 20dB | - | 12 dB | ggf. weitere Schutzmaßnahmen am Gerät erforderlich |
| | | $f \geq 12,5 \text{ Hz}$ | | $f \geq 10 \text{ Hz}$ | |

Tabelle 10-4: Erforderliche und empfohlene schwingungsmindernde Maßnahmen

Trotz der in Tabelle 3-5 empfohlenen Schwingungsschutzmaßnahmen wird es aber bei

- Gebäude B zu Überschreitungen der Toolspek (ungelöster Schutzfall) und bei
- Gebäude I (MO14, Morgenstelle 3) zu einer Verschlechterung gegenüber den jetzigen Standortbedingungen im Hinblick auf die Schwingungsruhe kommen.

Die Lage und die Bewertung der Erschütterungseinwirkung unter Berücksichtigung der empfohlenen Schutzmaßnahmen ist in der nachfolgenden Abbildung 3-17 dargestellt.

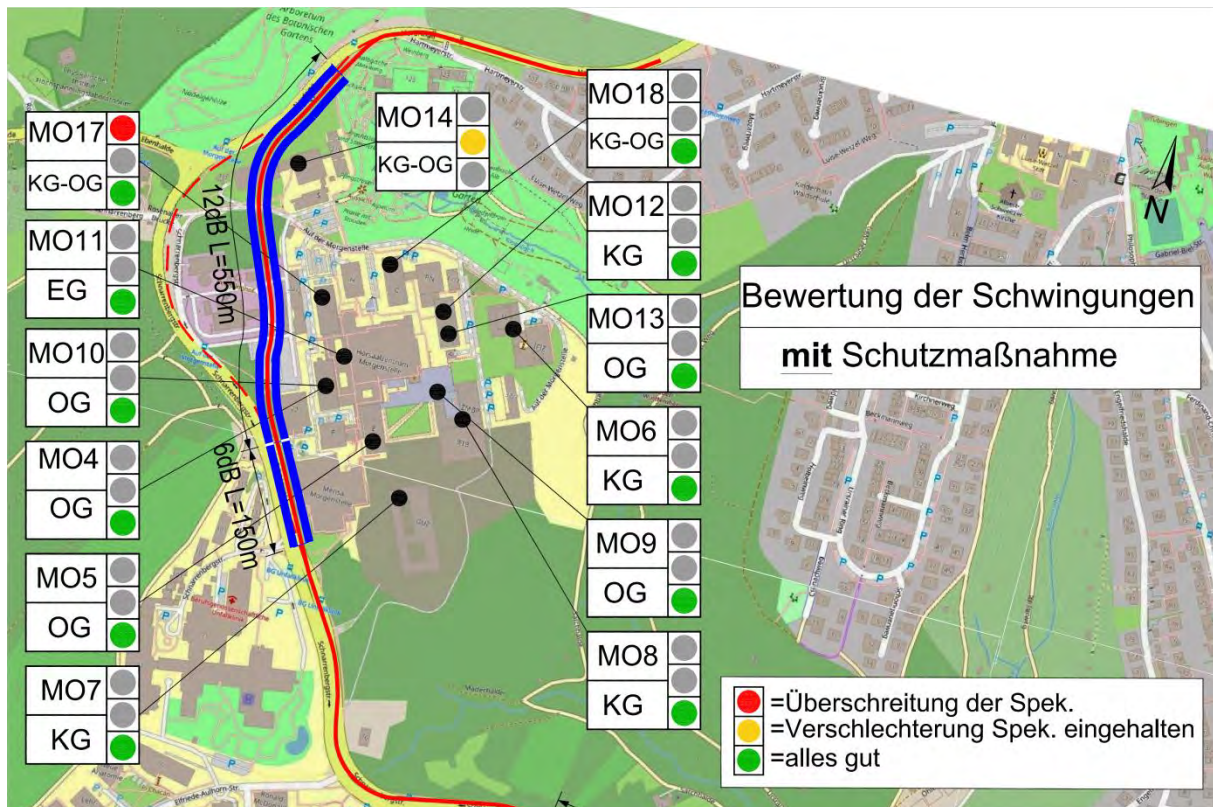


Abbildung 10-17: Bewertung der Erschütterungseinwirkung infolge Stadtbahn unter Berücksichtigung der empfohlenen Schutzmaßnahmen

10.2.15 Einflusskorridore

Um die Immissionen der durch die Stadtbahn verursachten Schwingungen auch für andere Gebäude einschätzen zu können, wird eine globale Prognose in Form von Korridorbreiten durchgeführt, so dass der Einfluss der Stadtbahn auch flächenmäßig visualisiert werden kann. Die Ermittlung der Korridore erfolgt iterativ analog zu Abschnitt 3.7.2, getrennt für die Schwingungen am Fundament und auf den Geschossdecken. Der Einfluss von Weichen, der zu einer Erhöhung der Immissionen und damit zu größeren Korridoren führt, wird hier nicht berücksichtigt, da über das Vorhandensein und die Lage von Weichen keine Informationen vorliegen.

Nachfolgend sind die Korridore für die drei Untersuchungsbereich dargestellt.

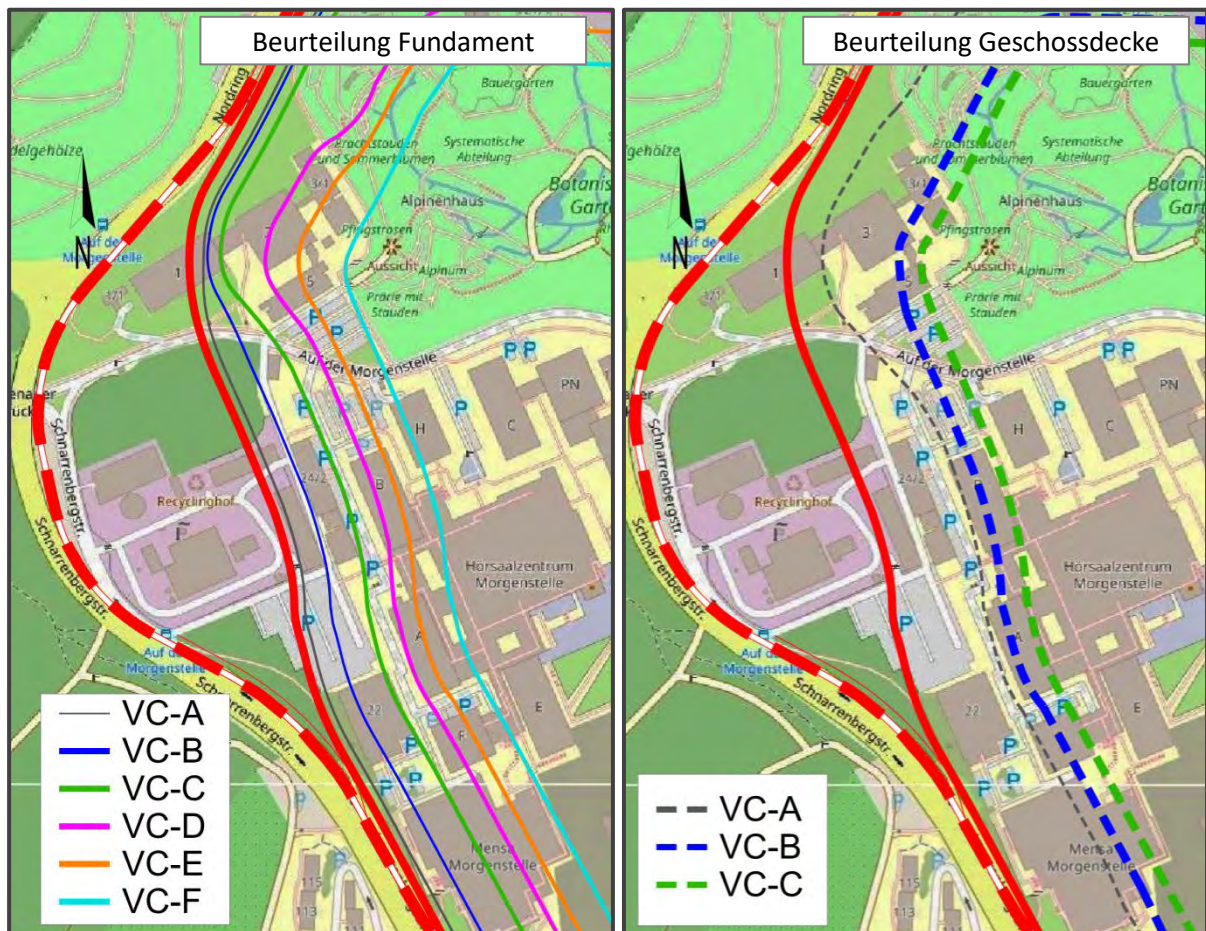


Abbildung 10-18: Einflussbreiten (VC-Korridore) infolge Stadtbahn-Vorbeifahrten im Bereich des Universitätsgeländes Morgenstelle

10.3 Prognose und Beurteilung der Magnetfeldimmissionen (Near-DC-Shifts)

Analog zu Abschnitt 4.5 erfolgt nun eine Prognose die durch den Stadtbahnbetrieb hervorgerufene Magnetfeldänderung für Variante 2 im Bereich des Uni-Campus Morgenstelle

4. für eine Trasse in Standardausführung
5. für eine Trasse mit Kompensationsmaßnahmen gemäß [12] mit geringeren Anforderungen
6. für eine Trasse mit erhöhten Anforderungen an die Kompensation gemäß Ausführung in Ulm

Für die Trasse in Standardausführung wird die Prognose nach [12] übernommen, ebenso für die Trasse mit geringeren Anforderungen an die Kompensation. Für die Prognose einer Trasse, bei der das „System Ulm“ umgesetzt wird, erfolgt die Prognose rein empirisch, basierend auf den Messwerten. Es wird deshalb eine Prognosesicherheit von 6 dB berücksichtigt.

Die Magnetfeldprognose erfolgt für alle maßgebenden Standorte gemäß Tabelle 10-1. Die Ergebnisse dieser Prognose sind in der nachfolgende Tabelle 4-2 zusammengefasst und hinsichtlich

- c) der Tool-Spezifikation
- d) einer Verschlechterung gegenüber der derzeitigen IST-Situation

bewertet. Die Tool-Spezifikation ist den aktuellen Handbüchern entnommen oder gutachterlich abgeschätzt.

| ID # | Geb. | Abstand zur Trasse [m] | Tool | Tool-Spez. [nT] | IST-Zustand | Prognostizierte Magnetfeldänderung [nT] | | |
|------|----------|------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|---|-------------------------------|--|
| | | | | | | Standard (Steinbeis-Prog.) | kompensiert (Steinbeis-Prog.) | kompensiert, System Ulm (BHM-Prog.; inkl. 6dB) |
| MO4 | Geb. A | 64 | Röntgen-diffraktometer | 300 | 667 | 618 | 201 | 49 |
| MO5 | Geb. E | 125 | TEM, REM | 100 | 68 | 158 | 28 | 9 |
| MO6 | VG | 296 | Ionenmikroskop | 25 | 191 | 27 | 2 | 1 |
| MO7 | GUZ | 143 | REM | 50 | 68 | 120 | 19 | 6 |
| MO8 | ZMBP | 208 | Laserpinzette | 300 | 202 | 56 | 6 | 2 |
| MO9 | | 202 | TEM, Mikroskope | 20 | 12 | 59 | 7 | 3 |
| MO10 | Geb. A | 74 | REM, STM | 150 | 220 | 459 | 131 | 34 |
| MO11 | Geb. A-B | 96 | NMR | 100 | 49 | 270 | 61 | 18 |
| MO12 | Geb. D | 210 | Messsysteme Physik, Kyrostat | 10 | 311 | 55 | 6 | 2 |
| MO13 | | 210 | Messsysteme Physik, REM | 100 | 95 | 55 | 6 | 2 |
| MO14 | Geb. I | 24 | REM, REM | 100 | 68 | 4572 | 2956 | 594 |
| MO17 | Geb. B | 54 | | 100 | keine Messung* | 874 | 332 | 76 |
| MO18 | Geb. C | 143 | | 2000 | keine Messung | 120 | 19 | 6 |

* keine Messung, aber vergleichbar mit MO10 bzw. MO11

| | |
|-----|--|
| | Tool-Spezifikation eingehalten |
| | Tool-Spezifikation nicht eingehalten |
| XXX | Erhöhung gegenüber dem beweisgesicherten IST-Zustand |

Tabelle 10-5: IST-Zustand und Prognose des Near-DC-Shifts bei Straßenbahn-Betrieb

Die Ergebnisse von Tabelle 4-2 zeigt, dass die Ausführung einer konventionellen Trasse in Standardausführung bei den meisten Geräte-Standorten (10 von 13) zu Überschreitungen der Tool-spezifikationen führen würde. In der nachfolgenden Abbildung 4-7 ist dies grafisch dargestellt.

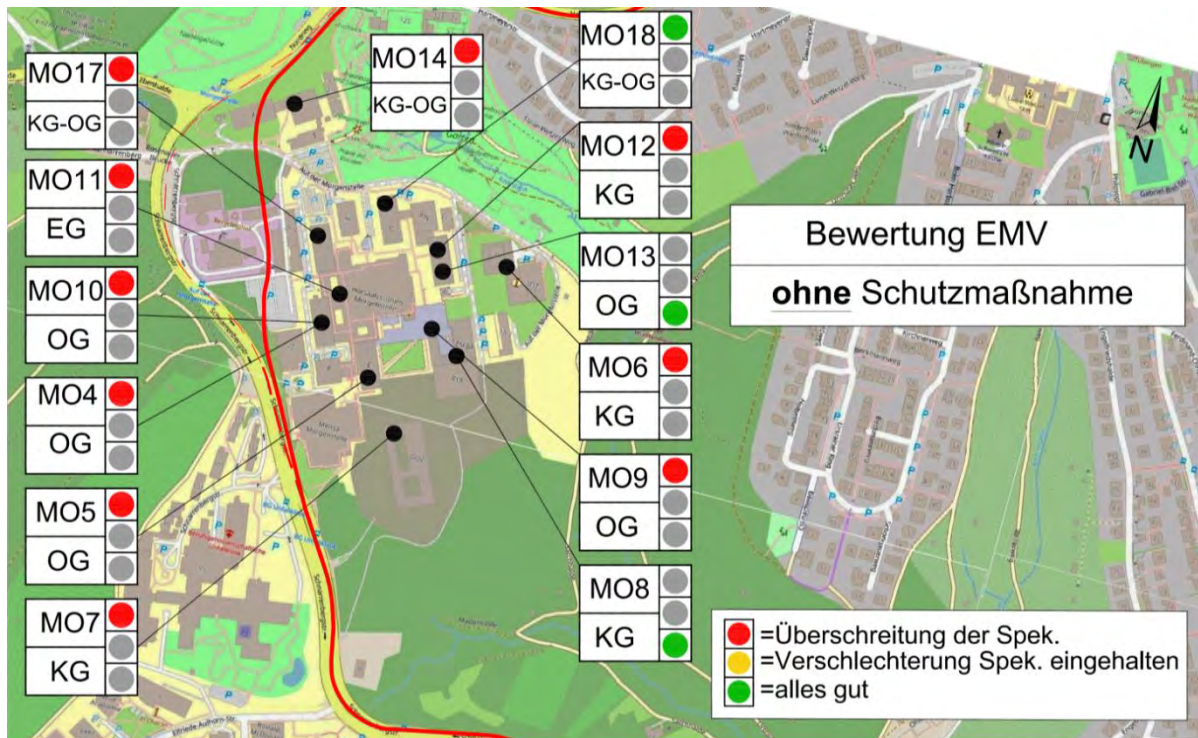


Abbildung 10-19: Bewertung der EMV-Immissionen (ohne Berücksichtigung von EMV-Kompensationsmaßnahmen)

Bei einer Trasse mit Kompensationsmaßnahmen gemäß den Berechnungen von Prof. Vick [12] sind noch zwei Tool-Spezifikationen überschritten, zusätzlich verschlechtern sich die Standortbedingungen bei MO11 bzw. im Nahbereich der Trasse.

Bei einer Trassenausführung mit erhöhten Anforderungen an die Kompensationsmaßnahmen gemäß dem „System Ulm“ können zumindest bei allen Standorten bis auf MO14 die Magnetfeldänderungen auf ein tolerables Maß reduziert werden.

Beim Gebäude I (MO14) bleibt eine Überschreitung der Tool-Spezifikation aufgrund des äußerst geringen Abstandes. Hier muss geprüft werden, ob lokale Kompensationsmaßnahmen vorgesehen werden müssen und ausreichend sind.

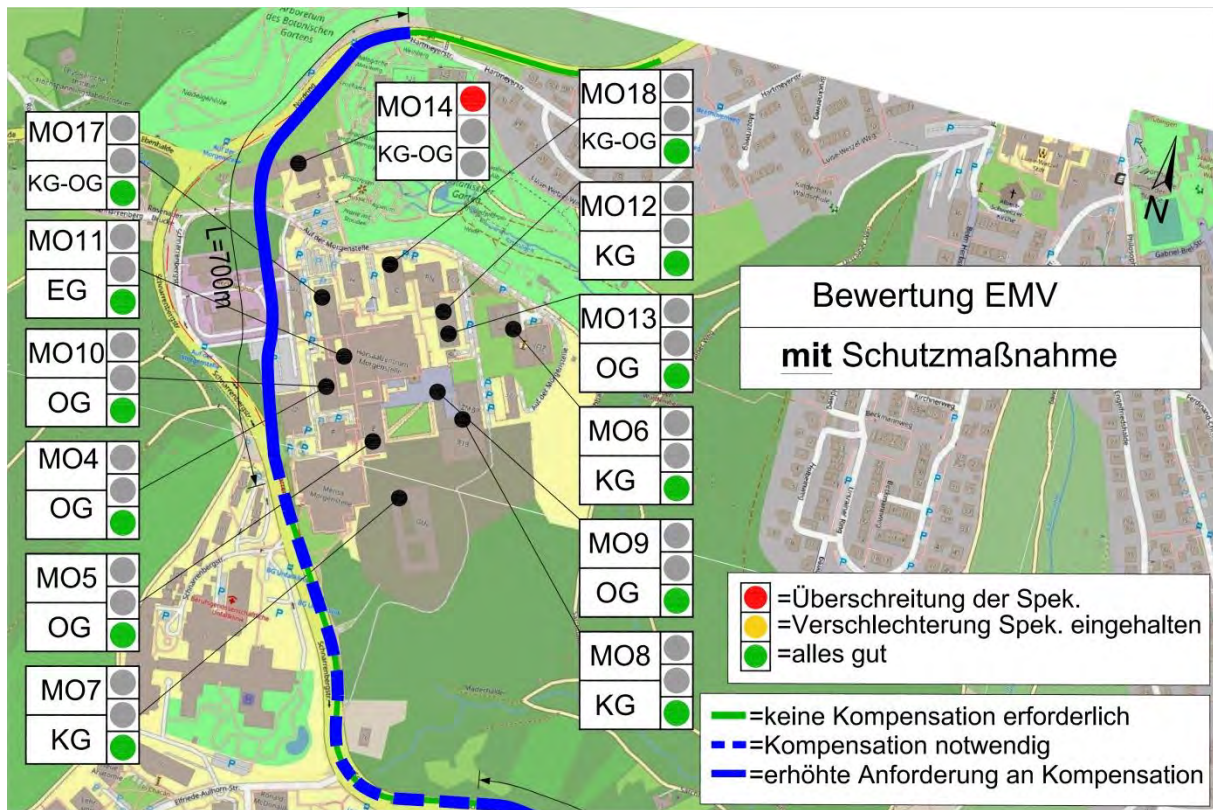


Abbildung 10-20: Bewertung der EMV-Immissionen unter Berücksichtigung von Kompensationsmaßnahmen mit unterschiedlichen Wirksamkeiten

10.4 Vergleich zwischen Variante 1 und Variante 2

Variante 2 verläuft im Vergleich zu Variante 1 insgesamt näher am Campus Morgenstelle vorbei. Dadurch sind mehr Gebäude betroffen, bei denen zukünftig die Grenzwerte in Bezug auf die Erschütterungen (Abschnitt 10.2) und in Bezug auf die Einwirkungen durch elektromagnetische Felder (Abschnitt 10.3) nicht mehr eingehalten sind.

Um dies zu kompensieren, ist der Aufwand für entsprechende Schutz- bzw. Kompensationsmaßnahmen bei Variante 2 deutlich größer im Vergleich zu Variante 1, obwohl die Trassenlänge etwas kürzer ist. Im Rahmen dieses Gutachtens erfolgt ein monetärer Vergleich der Aufwendungen für die Schutz- und Kompensationsmaßnahmen der geschätzten Mehrkosten. Die Gegenüberstellung der Kosten bezieht sich lediglich auf den Campusbereich Morgenstelle, da in den übrigen Bereichen die notwendigen Schutzmaßnahmen dieselben sind.

| Erschütterungs-Schutzmaßnahme | | | Variante 1 | | Variante 2 | |
|--|---|--------------------------------------|-----------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|
| geforderte Minderung | Maßnahme (beispielhaft) | Geschätzte Mehrkosten je lfd m Gleis | Abschnittslänge | Kosten für beide Gleise | Abschnittslänge | Kosten für beide Gleise |
| 6 dB | hochelastische Schienenlagerung inkl. verstärktem Unterbau | 800 €/m | 200 m | 320.000 € | 150 m | 240.000 € |
| 8 dB | Masse-Feder-System (streifenförmig oder flächig gelagert) | 3500 €/m | 250 m | 1.750.000 € | 0 m | - € |
| 12 dB | tief abgest. Masse-Feder-System (punktförmig oder flächig gelagert) | 5500 €/m | 0 m | - € | 550 m | 6.050.000 € |
| Gesamtkosten für Erschütterungsschutzmaßnahmen im Bereich Morgenstelle | | | | 2.070.000 € | 6.290.000 € | |
| Mehrkosten für Erschütterungs-Schutzmaßnahmen bei Variante 2 gegenüber Variante 1: | | | | | 4.220.000 € | |

Tabelle 10-6: Vergleich Variante 1 zu Variante 2 bzgl. der Erschütterungsschutzmaßnahmen

| EMV-Kompensation | | Variante 1 | | Variante 2 | |
|--|--------------------------------------|-----------------|---------------------|------------------|---------------------|
| geforderte Minderung | Geschätzte Mehrkosten je lfd m Gleis | Abschnittslänge | Kosten für 2 Gleise | Abschnittslänge | Kosten für 2 Gleise |
| Kompensationsmaßnahme gem. Steinbeis | 750 €/m | 550 m | 825.000 € | 50 m | 75.000 € |
| Kompensationsmaßnahme gem. "System Ulm" | 1100 €/m | 300 m | 660.000 € | 700 m | 1.540.000 € |
| Gesamtkosten für EMV-Kompensation im Bereich Morgenstelle | | | 1.485.000 € | 1.615.000 € | |
| Mehrkosten für EMV-Kompensation bei Variante 2 gegenüber Variante 1: | | | | 130.000 € | |

Tabelle 10-7: Vergleich Variante 1 zu Variante 2 bzgl. der EMV-Kompensation

Tabelle 10-6 und Tabelle 10-7 zeigen, dass die Mehrkosten für die Erschütterungsschutzmaßnahmen bei ca. 4,2 Mio Euro, für die EMV-Kompensation bei ca. 0,1 Mio Euro, also insgesamt bei 4,3 Mio Euro liegen.

10.5 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse für Variante 2

Die in diesem Anhang untersuchte Trassenvariante „Variante 2“ unterscheidet sich von Variante 1 nur im Bereich der Morgenstelle. Bei Variante 2 soll die Trasse durch den Campus östlich des Kraftwerks geführt werden. Daher werden die Immissionen durch Erschütterungen und elektromagnetische Feldveränderungen auch nur im Bereich des Universitätscampus neu untersucht. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Erschütterungen:

- Entfernt liegende Gebäude (ab ca. 180 m) sind nicht betroffen (keine Verschlechterung).
- Da die Variante 2 im Vergleich zu Variante 1 insgesamt näher am Campus Morgenstelle verläuft, sind nun auch mehr Gebäude betroffen: Insgesamt sind bei 5 Standorten die Grenzwerte überschritten. Im Wesentlichen sind dies die der Trasse nahegelegenen Gebäude:
 - Gebäude A
 - Gebäude B
 - Gebäude E
 - Gebäude I
- Um die Funktionsfähigkeit der schwingungsempfindlichen Geräte weiterhin gewährleisten zu können, müssen bei der Planung der Stadtbahn sehr hochwertige schwingungsmindernde Maßnahmen berücksichtigt werden. Sie sind in der Tabelle 3-5 auf Seite 37 zusammengefasst und quantifiziert.
- Trotz der in Tabelle 3-5 quantifizierten Schwingungsschutzmaßnahmen wird es bei
 - Gebäude B
 - Gebäude Izu deutlich schlechteren Standortbedingungen im Hinblick auf die Schwingungsruhe kommen.
- Die Mehrkosten von Variante 2 gegenüber Variante 1 für die erforderlichen Erschütterungsschutzmaßnahmen liegen bei ca. 4,2 Mio Euro.

Elektromagnetische Feldveränderungen (Near-DC):

- Im Bereich der Morgenstelle werden an 10 von 13 Standorten die Grenzwerte der Gerätschaften für niederfrequente magnetische Felder bei einer normalen Bahnenergieversorgung erheblich überschritten.
- Außerdem verschlechtern sich großflächig die Standortbedingungen auf dem Campus Morgenstelle, da die Bahn insgesamt näher heranrückt.

- Mit einer kompensierten Bahnenergieversorgung gemäß Gutachten „Steinbeis“ (Prof. Vick) verschlechtern sich beim Magnetresonanzzentrum (Zwischengebäude A-B, MO11) sowie bei den Gebäuden B und I (MO14 und MO17) die Standortbedingungen gegenüber dem IST-Zustand. Bei den Gebäuden B und I werden sogar immer noch die Grenzwerte überschritten.
- Mit einer sehr hochwertigen kompensierten Trasse (vergleichbar zum Projekt Ulm, vgl. Abschnitt 10.3) werden die Immission an allen Gebäuden nochmals erheblich vermindert, und nur noch beim Gebäude I (Morgenstelle 3) werden die Grenzwerte überschritten. Je nach Anforderung und Nutzung in diesem Gebäude wären hier lokale aktive Kompensationsmaßnahmen an den empfindlichen Tools erforderlich.
- Die Mehrkosten von Variante 2 gegenüber Variante 1 für die bahnseitigen erforderlichen EMV-Kompensationsmaßnahmen liegen bei ca. 0,1 Mio Euro.

--- Ende Anhang ---