Berner
Fachhochschule

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Institut für Optimierung und Datenanalyse



Fahrbahnlabor

Erste Modellierung und Auswertung der Daten

Im Auftrag der Allianz Fahrweg Normalspur

Biel, Februar 2024

Impressum

Auftraggeberin
Allianz Fahrweg Normalspur, CH-3001 Bern.

Auftragnehmerin
Berner Fachhochschule (BFH), Departement Technik und Informatik (TI), Institut für Optimierung und Datenanalyse (IODA).

Autor
Dr. Niki Zumbrunnen

Begleitung SBB
Dr. Marc Schmid, Michael Hafner, Dr. Urs Schönholzer

Hinweis
Dieser Bericht wurde im Auftrag der Allianz Fahrweg Normalspur verfasst. Für den Inhalt ist alleine die Auftragnehmerin verantwortlich.

Titelbild
Fahrbahnlabor (Quelle: www.fahrbahnlabor.ch)

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung **1**

2. Datengrundlage **3**
2.1. Messaufbau . . . 3
2.2. Beschreibung der einzelnen Variablen . . . 3
2.3. Datenqualität und Ausschlüsse . . . 5
2.4. Verteilung von *TEL* und *TEL80* . . . 7
2.5. Einzelne Zugindividuen . . . 13
2.6. Güterzüge . . . 14

3. Statistische Modelle **17**
3.1. Additive Modelle . . . 17
3.2. Variablenselektion . . . 17

4. Vergleich der Messquerschnitte **19**
4.1. Baseline-Vergleich . . . 19
4.2. Einbau neuer Schienenzwischenlagen . . . 27
4.3. Vergleich der zeitlichen Cluster . . . 32

5. Stichprobengrösse bei Kurzzeitmessungen **35**
5.1. Verlässlichkeit von Testresultaten . . . 36
5.2. Benötigte Stichprobengrösse . . . 37

6. Diskussion und Ausblick **41**
6.1. Diskussion . . . 41
6.2. Ausblick . . . 42

A. Anhang **43**
A.1. Verteilung von *TEL* und *TEL80* . . . 43
A.2. Residuenplots . . . 70
A.3. Partial plots des additiven Modells . . . 71
A.4. Simulationsergebnisse . . . 73

1. Einleitung

Das Fahrbahnlabor in Sempach ist ein Abschnitt der regulären SBB-Strecke, der im Mai 2022 mit Sensoren ausgerüstet wurde. Diese liefern seitdem kontinuierlich Daten unter anderem zu Lärm, Beschleunigung und Wetter. In diesem Bericht wird die Modellierung und Auswertung dieser Daten beschrieben.

Das Fahrbahnlabor wird von der Schweizerischen Eidgenossenschaft finanziert. Die Leitung des Projekts liegt bei den Bundesämtern für Umwelt (BAFU) und für Verkehr (BAV). Den vorliegenden Bericht hat die Allianz Fahrweg Normalspur finanziert, die neben der SBB Infrastruktur, als Eigentümerin der Bahnanlage, und der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa ebenfalls am Projekt beteiligt ist. Für die technische Umsetzung und den laufenden Betrieb ist Müller-BBM Rail Technologies GmbH verantwortlich.

Das Projekt zur Auswertung der Daten wurde von der SBB begleitet. Es wurde ein exploratives Vorgehen gewählt. Vertreter der BFH und der SBB trafen sich regelmässig, um allfällige Fragen und aktuelle Ergebnisse zu diskutieren und die nächsten Analyseschritte festzulegen. Als Ausgangspunkt dienten folgende Fragestellungen:

a. Wie gut ist die Datenqualität?
b. Wie vergleichbar sind die Messquerschnitte untereinander?
c. Was sind die Kriterien bzw. Randbedingungen für zukünftige Messkampagnen?
d. Wie wirken sich die Umwelteinflüsse allgemein auf den Oberbau und im speziellen auf den Lärm aus?
e. Welchen Einfluss haben die neuen Zwischenlagen und die Besohlung der Betonschwellen (B-91) auf den Lärm?

2. Datengrundlage

2.1. Messaufbau

Die Teststrecke besteht aus drei Abschnitten. Im ersten Abschnitt wurden Betonschwellen B91 mit steifer Schwellenbesohlung verbaut. Die Betonschwellen des zweiten Abschnitts sind unbesohlt und im dritten Abschnitt hat es Holzschwellen. Insgesamt wurden sieben Messquerschnitte eingerichtet. Die Querschnitte MQ1.1, MQ1.2 und MQ1.3 befinden sich im besohlten Abschnitt, die Querschnitte MQ2.1, MQ2.2 und MQ2.3 im unbesohlten Abschnitt und ein Referenzquerschnitt (REF) im Abschnitt mit Holzschwellen.

An jedem Messquerschnitt sind auf beiden Seiten des Gleises je ein Mikrofon der Klasse 1 mit einer Messungenauigkeit < 1 dB angebracht. Der Abstand beträgt 3.0 m bzw. 7.5 m auf der Seite des Nachbargleises. Die Höhe beträgt jeweils 1.2 m ab Schienenoberkante. Zudem wird von jedem vorbeifahrenden Zug die Geschwindigkeit und die Beschleunigung gemessen.

Die Schienen- und Schwellentemperatur und weitere Wetterdaten wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Regenmenge, Sonneneinstrahlung, Windrichtung und -geschwindigkeit werden nur an einem Messquerschnitt gemessen. Es gibt also nur eine Messung pro Zugdurchfahrt.

Für eine detaillierte Beschreibung der Teststrecke und des Messaufbaus verweisen wir auf Schmid *et al.* [2] und Isert und Lutzenberger [3].

Einbau neuer Schienenzwischenlagen

In der Nacht vom 17. auf den 18.05.2023 wurden bei den Messquerschnitten MQ1.1 sowie MQ2.1 neue Schienenzwischenlagen eingebaut. Der Effekt dieser neuen Zwischenlagen untersuchen wir im Abschnitt 4.2.

2.2. Beschreibung der einzelnen Variablen

2.2.1. Vorbeifahrtexpositionspegel *TEL*

Als Mass für den Lärm verwenden wir den Vorbeifahrtexpositionspegel *TEL* (engl.: Transit Exposure Level) in dB (A). *TEL* ist der A-bewertete Schallpegel einer einzelnen Zugvorbeifahrt als energetischer Mittelwert über die Schallereignisdauer normiert auf die Vorbeifahrtzeit. Für die genaue Definition von *TEL* verweisen wir auf [3].

2.2.2. Normierter Vorbeifahrtexpositionspegel *TEL80*

Der auf 80 km/h normierte Vorbeifahrtexpositionspegel einer Zugvorbeifahrt wird mit $TEL80$ bezeichnet und ist definiert als

$$TEL80 := TEL - 30 \cdot \lg\left(\frac{v}{80}\right).$$

Dabei steht v für die Vorbeifahrtgeschwindigkeit und 80 für die Bezugsgeschwindigkeit 80 km/h.

Mit Hilfe des $TEL80$-Wertes können Zugvorbeifahrten mit verschiedenen Geschwindigkeiten verglichen werden. Die Verwendung von $TEL80$ setzt aber voraus, dass der in der Definition verwendete Zusammenhang gilt. Das heisst TEL hängt linear von $\lg(v/80)$ ab, also

$$TEL = a + b \lg\left(\frac{v}{80}\right)$$

mit $a = TEL80$ und $b = 30$. Dies impliziert insbesondere, dass es keine Interaktionen zwischen der Geschwindigkeit und anderen erklärenden Variablen geben darf. Der Effekt der Geschwindigkeit auf den TEL-Wert ist also für alle Zugtypen gleich und hängt beispielsweise auch nicht von der Temperatur oder anderen Wettervariablen ab.

Mit den Daten aus dem Fahrbahnlabor können wir überprüfen, ob diese Annahme zumindest für die gegebenen Messstellen plausibel ist.

2.2.3. Zugtyp

Personenzüge, Güterzüge und Dienstzüge unterscheiden sich stark bezüglich der Verteilung des TEL-Wertes und sollten deshalb einzeln untersucht werden. Personenzüge unterteilen wir weiter nach Zugtyp. Für die Bestimmung des Zugtyps werden mit RFID die UIC-Wagennummern ausgelesen. Diese werden dann mit einem Python-Skript von Laurence Conreaux einem Zugtypen zugeordnet.

Für unsere Analysen beschränken wir uns auf die in Tabelle 2.1 aufgeführten, auf der Teststrecke häufig vorkommenden Zugtypen. Dabei bezeichnet EWIV_IC2000 eine Kombination aus EWIV und IC2000. Alle Zugvorbeifahrten von seltenen Zugtypen oder von nicht zuordenbaren Zügen verwenden wir nicht.

Tabelle 2.1.: Für die Analyse verwendete Typen von Personenzügen.

Zugtyp
ETR610
EWIV
EWIV_IC2000
FV-Dosto
Flirt
IC2000
RABe501
RBDe560
RV-Dosto
Traverso

Güterzüge unterteilen wir nicht weiter in verschiedene Zugtypen. Dienstzüge betrachten wir nicht, da zu wenige Messungen zur Verfügung stehen.

2.2.4. Wetterdaten

Einmal pro Minute werden diverse Wetterdaten aufgezeichnet. Wir verwenden jeweils für die ganze Zugvorbeifahrt die Messung, welche der Vorbeifahrtszeit beim Referenzquerschnitt entspricht. In Tabelle 2.2 sind die verwendeten Variablen aufgeführt.

Tabelle 2.2.: Verwendete Wettervariablen.

Variable	Beschreibung
TE	Temperatur, °C
ZA	Schienentemperatur, °C
ZB	Schwellentemperatur, °C
SO	Globalstrahlung, W/me
WG	Windgeschw., km/h
WS	Windspitze, km/h
WD	Winddurchschnitt, km/h
DR	Luftdruck, hPa
FE	Feuchte, %
TP	Taupunkt, °C
HU	Humidex, °C
RE	Regen, mm
RD	Regenstärke, mm
RH	Regen/Std, mm

Die Variablen in Tabelle 2.3 verwenden wir nicht. Zwischen der Windrichtung und dem *TEL*-Wert besteht sicher kein linearer Zusammenhang. Um diese Variable zu verwenden müsste man sie zuerst anpassen. Man könnte sie beispielsweise kategorisieren. Für den vorliegenden Bericht verzichten wir jedoch darauf. Die restlichen Variablen betreffen die Technik der Wetterstation.

Tabelle 2.3.: Nicht verwendete Wettervariablen.

Variable	Beschreibung
WR	Windrichtung, °
WV	Hauptwindrichtung, °
TD	Innentemperatur, °C
DB	Barometer, hPa (der gerundete Wert von DR)
UH	Heizstatus
UB	Betriebsspannung, V
FS	Lüfterstatus

2.3. Datenqualität und Ausschlüsse

Wir betrachten für unsere Analyse Messungen zwischen dem 1.6.2022 und dem 30.11.2023 und verwenden die Version 2 der Datenbank. Insgesamt stehen 706092 Messungen aus diesem Zeitraum zur Verfügung. Wir müssen jedoch aus den folgenden Gründen einen grossen Teil der Beobachtungen ausschliessen.

Fehlende Passby-ID

Bei jeder Zugvorbeifahrt werden 14 Messungen gemacht, je eine pro Querschnitt und Mikrofon. Die Messungen einer Vorbeifahrt werden vom System zusammengeführt und erhalten alle die gleiche Passby-ID. Wenn eine Messung keiner Vorbeifahrt zugeordnet werden kann, erhält sie keine Passby-ID. In diesem Fall schliessen wir sie aus.

Ungültige Messungen

Manche Messungen werden von Müller-BBM als ungültig erklärt, zum Beispiel weil etwas mit dem Sensor nicht stimmt, die Fahrtrichtung nicht korrekt ist oder eine Zugsbegegnung vorliegt.

Falsche Zugkategorie oder ungültiger Zugtyp

Für unsere Analysen der Personenzüge beschränken wir uns auf die in Tabelle 2.1 aufgeführten häufig vorkommenden Zugtypen. Alle Zugvorbeifahrten von seltenen Zugtypen oder von nicht zuordenbaren Zügen werden ausgeschlossen.

Bei den Güterzügen machen wir keine Aussschlüsse bezüglich Zugtypen.

Schnee

Im Messzeitraum hatte es drei kurze Phasen, während denen eine Schneedecke vorhanden war. Diese dämpfte den Lärm und führte zu Einbrüchen des *TEL*80-Wertes von circa 2 dB. Messungen von diesen Tagen schliessen wir aus. Dies betrifft die Zeiträume vom 9.-18.12.2022 und 17.-23.1.2023 sowie den 11.3.2023.

Langsame und beschleunigte Vorbeifahrten

Der *TEL*80 wird nur für Zugvorbeifahrten verwendet, die mit mehr als 60 km/h und ohne Beschleunigung (positiv oder negativ) stattgefunden haben. Deshalb schliessen wir Vorbeifahrten aus, wenn sie langsamer als 60 km/h oder beschleunigt waren. Wir betrachten eine Vorbeifahrt als beschleunigt, wenn die maximale absolute Differenz zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Durchschnittsgeschwindigkeit mehr als 5 km/h beträgt.

Zu hoher *TEL*-Wert

Es hat einzelne Messungen mit extrem hohen *TEL*-Werten, die im Vergleich zu den anderen Messungen krasse Ausreisser sind. Weil lineare Modell nicht gut mit diesen Ausreissern umgehen können, schliessen wir Messungen mit einem *TEL*-Wert über 105 dB aus. Bei diesen Messungen kann davon ausgegangen werden, dass es sich um Messfehler handelt oder dass eine andere Ursache vorliegt wie zum Beispiel die Betätigung des Makrofons.

Unvollständige Vorbeifahrten

Für den Vergleich der Messquerschnitte verwenden wir nur Messungen aus vollständigen Vorbeifahrten, also aus Vorbeifahrten mit 14 gültigen Messungen. Das ist wichtig, um die Vergleichbarkeit der Datensätze zu gewährleisten. Für den Querschnitt MQ1.3 fehlen sehr viele Messungen. Dies führt dazu, dass wir über einen Drittel aller Messungen ausschliessen müssen.

Keine Wetterdaten

Die Wetterdatenerfassung ist vom 27.1. bis 17.2.2023 ausgefallen. Deshalb können die Daten aus diesem Zeitraum nicht für Modelle mit Wettervariablen verwendet werden.

Tabelle 2.4 zeigt die Anzahl ausgeschlossener Messungen pro Ausschlussgrund. Dabei werden sie in der Reihenfolge aufgeführt, in welcher die Filter angewendet wurden. Eine Beobachtung wird nicht gezählt, wenn sie bereits durch ein früheres Kriterium ausgeschlossen wurde. Beispielsweise wird eine ungültige Messung an einem Schneetag nicht als Ausschluss mit dem Grund Schnee gezählt.

Tabelle 2.4.: Anzahl ausgeschlossener Messungen pro Ausschlussgrund.

Grund	Ausschlüsse
Fehlende Passby-ID	27236
Messung ungültig	4623
Kein Personenzug	30747
Zugtyp ungültig	127997
Schnee	9424
Zu langsam	3990
Beschleunigt	17123
Unvollständige Vorbeifahrt	202600
Keine Wetterdaten	2758

Nach diesen Ausschlüssen bleiben für die Modelle ohne Wetterdaten 282352 Messungen übrig. Dies entspricht 20168 Vorbeifahrten. Für Modelle mit Wetterdaten reduziert sich die Anzahl Messungen auf 279594.

2.4. Verteilung von *TEL* und *TEL80*

Abbildung 2.1 zeigt die Verteilung der TEL-Werte über die Zeit für den Querschnitt MQ1.1. Die Abbildungen für die anderen Querschnitte befinden sich im Anhang A.1. Aufgrund der in Abschnitt 2.3 aufgeführten Ausschlüsse hat es mehrere lange Zeiträume ohne Messungen. Anhand dieser Lücken haben wir die Messungen in zeitliche Cluster aufgeteilt. Die Trennung zwischen dem 17. und 18. Mai 2023 erfolgte wegen dem Einbau der neuen Zwischenlagen. Die Cluster sind in Tabelle 2.5 aufgeführt und werden im Abschnitt 4.3 miteinander verglichen.

Beim *TEL*-Wert hat es einzelne Ausreisser gegen unten und relativ viele gegen oben. In Abbildung 2.1 sind die *TEL*80-Werte aufgeführt. Dort sieht man nur Ausreisser gegen oben.



Abbildung 2.1.: Verteilung der *TEL*-Werte über die Zeit für MQ1.1.



Abbildung 2.2.: Verteilung der *TEL*80-Werte über die Zeit für MQ1.1.

Tabelle 2.5.: Zeitliche Cluster.

Bezeichnung	von	bis
T22_09	09.09.2022	30.09.2022
T22_10	19.10.2022	12.11.2022
T23_01	25.01.2023	15.03.2023
T23_04	06.05.2023	17.05.2023
T23_05	18.05.2023	12.07.2023
T23_07	18.07.2023	30.11.2023

Betrachtung mit unvollständigen Messungen

Wenn man nur Zugvorbeifahrten mit erfolgreichen Messungen bei jeder Kombination aus Querschnitt und Mikrofon betrachtet, fallen sehr viele Messungen weg. In den Abbildungen A.13 bis A.19 im Anhang sind die Verteilungen der *TEL*-Werte für jeden Messquerschnitt dargestellt, ohne dass unvollständige Messungen entfernt wurden. Dies gibt einen Überblick darüber, bei welchen Querschnitten während längeren Zeiträumen keine Messungen vorhanden sind.

Gleitender Mittelwert

Die Darstellungen mit den einzelnen Messwerten geben zwar einen guten Überblick. Wegen den vielen Beobachtungen und der grossen Streuung kann man jedoch daraus den Verlauf über die Zeit nicht gut ablesen. Deshalb betrachten wir nun den gleitenden Mittelwert über 7 Tage, dargestellt in Abbildung 2.3 für *TEL* und Abbildung 2.4 für *TEL*80. Dabei werden nur Fernverkehrszüge berücksichtigt. In den Abbildung A.20 bis A.33 im Anhang sind die gleitenden Mittelwerte noch einmal einzeln pro Querschnitt aufgezeichnet.

Der Effekt des Einbaus der neuen Zwischenlagen im Mai ist gut zu erkennen. Bei den Querschnitten MQ1.1 und MQ2.1 nehmen die Werte zu diesem Zeitpunkt, markiert mit der roten vertikalen Linie, deutlich ab.

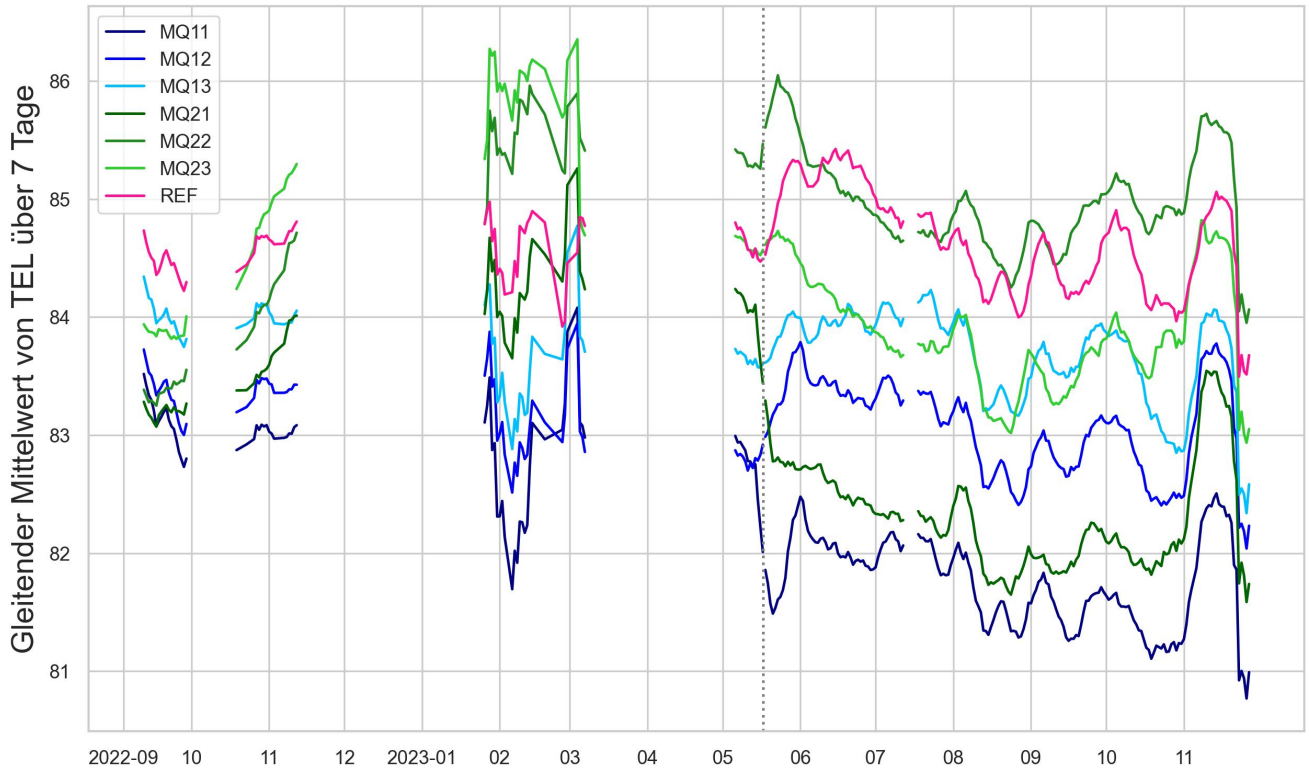


Abbildung 2.3.: Gleitender Mittelwert von *TEL* über 7 Tage pro Messquerschnitt für das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

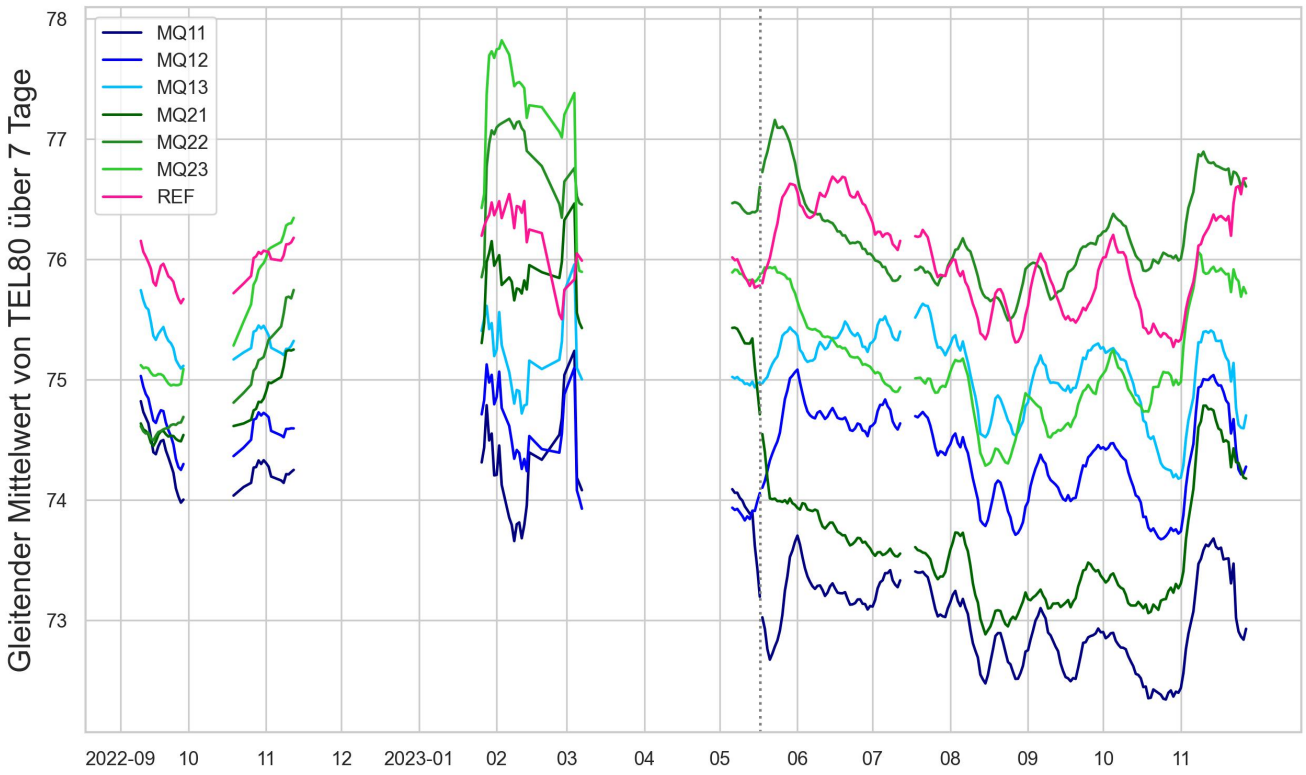


Abbildung 2.4.: Gleitender Mittelwert von *TEL*80 über 7 Tage pro Messquerschnitt für das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

Verteilung von *TEL80* pro Zugtyp

Die Verteilung von *TEL80* für den Querschnitt MQ1.1 ist in den Abbildungen 2.5 bis 2.7 pro Zugtyp aufgezeichnet. Die Verteilung von *TEL* pro Zugtyp ist im Anhang A.1 aufgeführt. Die Abbildungen für die anderen Querschnitte werden aus Platzgründen nicht gezeigt.

Es fällt vor allem auf, dass der RBDe560 deutlich höhere *TEL*- und *TEL*80-Werte aufweist als die anderen Typen. Auch die Streuung ist bei RBDe560 deutlich grösser als bei den anderen.

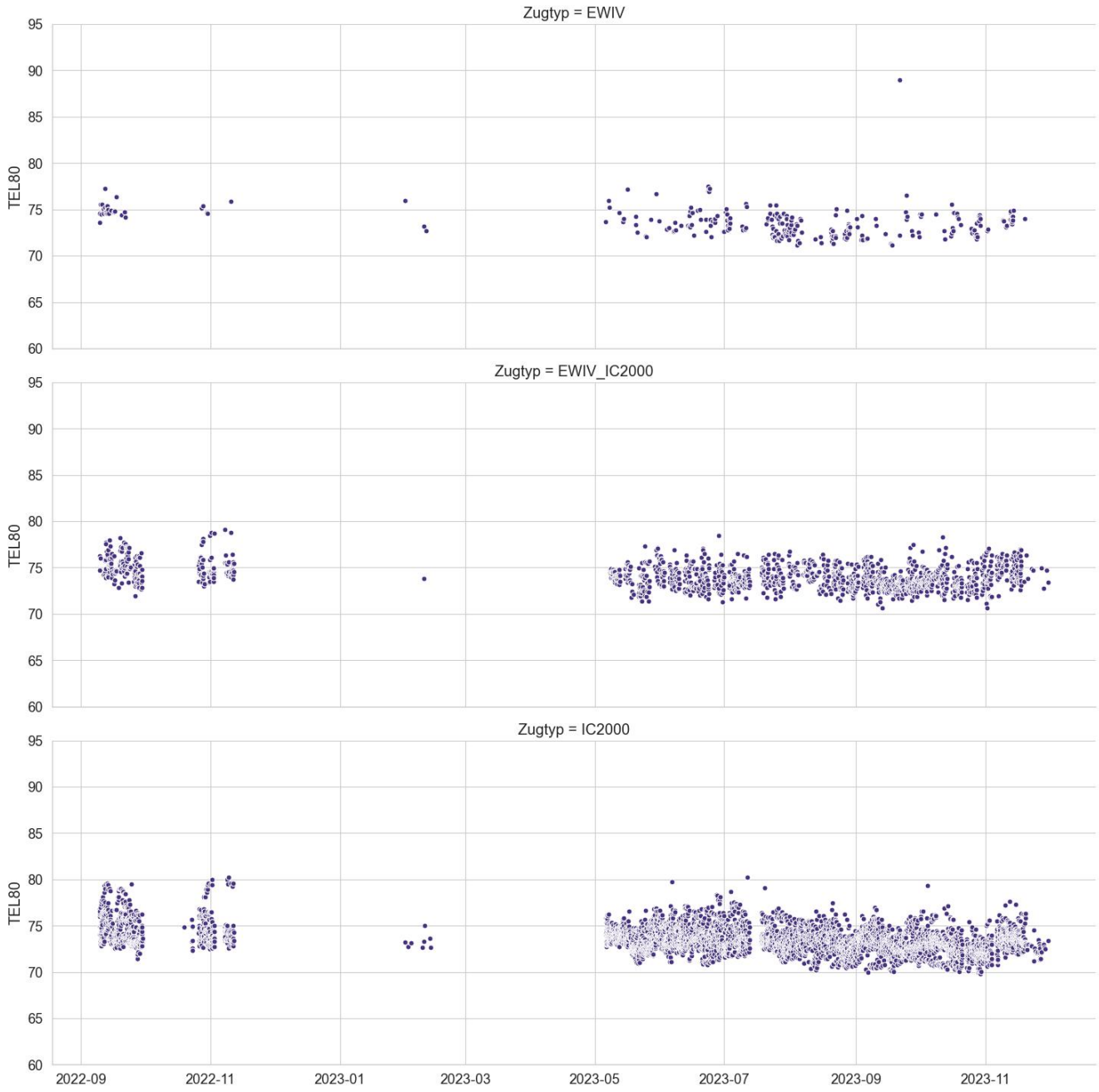


Abbildung 2.5.: Verteilung der *TEL*80-Werte über die Zeit für MQ1.1 und die Zugtypen EWIV, EWIV_IC2000 und IC2000.



Abbildung 2.6.: Verteilung der *TEL*80-Werte über die Zeit für MQ1.1 und die Zugtypen RBDe560, Flirt, Traverso.

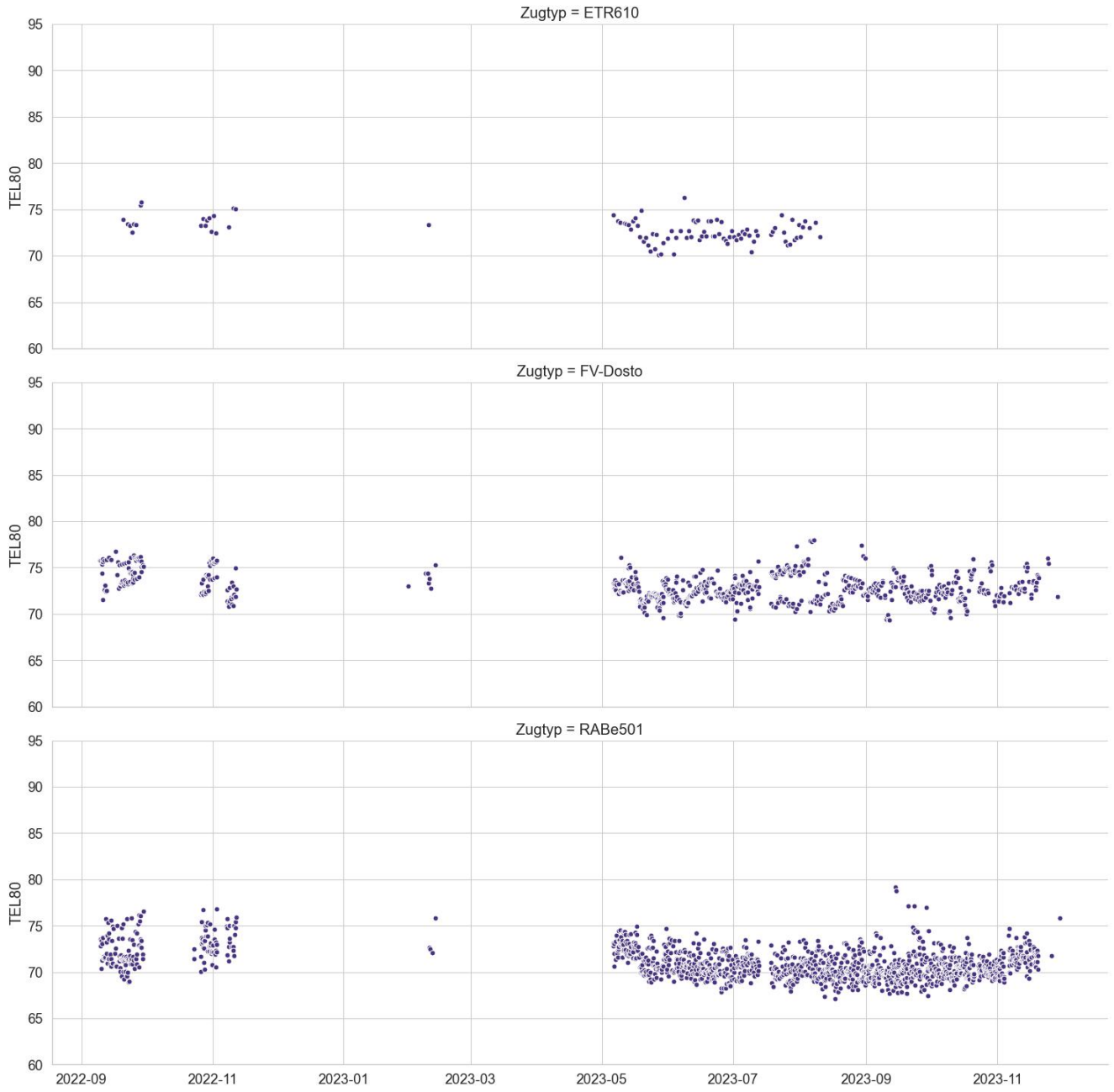


Abbildung 2.7.: Verteilung der *TEL*80-Werte über die Zeit für MQ1.1 und die Zugtypen ETR610, RABe501, FV-Dosto.

2.5. Einzelne Zugindividuen

Wir haben auch den Verlauf der *TEL*-Werte von einzelnen Zugindividuen betrachtet. Das brachte jedoch keine neuen Erkenntnisse. Die Streuung ist nicht offensichtlich erklärbar. Man sieht keine Muster, wie zum Beispiel ein tieferer *TEL*-Wert nach der Revision der Räder. Die Resultate werden deshalb nicht gezeigt.

2.6. Güterzüge

Abbildung 2.8 und 2.9 zeigen für die Güterzüge die Verteilung der *TEL*- bzw. *TEL*80-Werte über die Zeit für den Querschnitt MQ1.1. Die Abbildungen für die anderen Querschnitte befinden sich im Anhang A.1. Für die Güterzüge wurden auch die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Ausschlüsse gemacht.

Im Vergleich zu den Personenzügen fällt auf, dass es vor allem Ausreisser gegen unten hat.

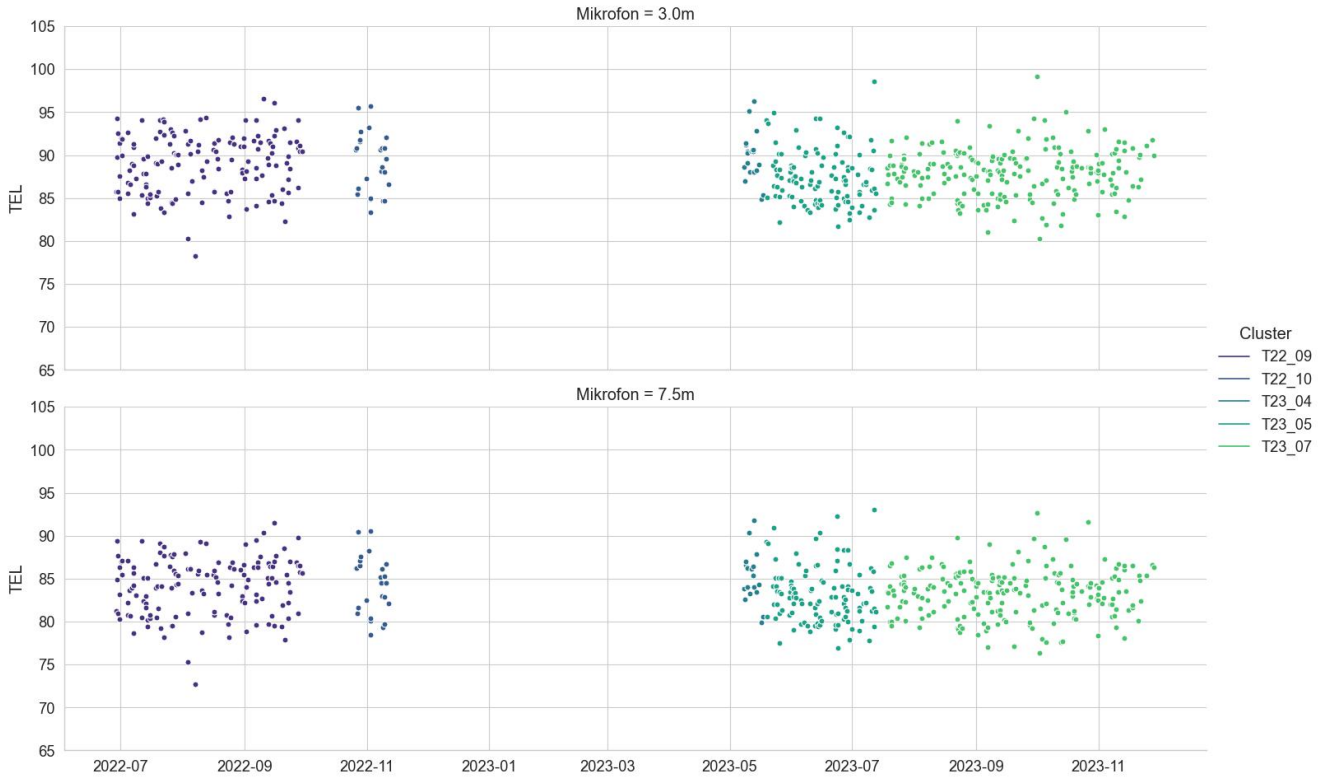


Abbildung 2.8.: Verteilung der *TEL*-Werte über die Zeit für Güterzüge und MQ1.1.

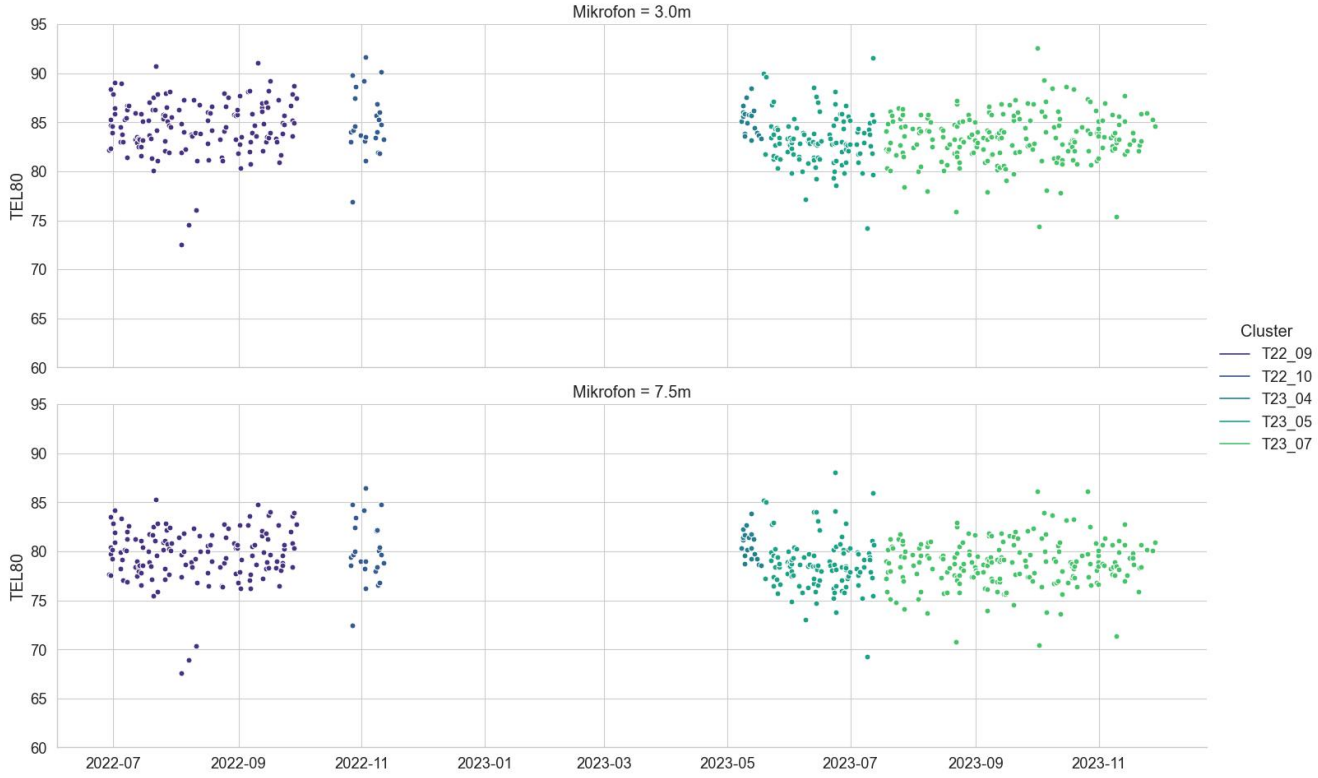


Abbildung 2.9.: Verteilung der *TEL*80-Werte über die Zeit für Güterzüge und MQ1.1.

3. Statistische Modelle

Die Definition von *TEL*80 unterstellt einen linearen Zusammenhang zwischen *TEL* und lg(v/80). Deshalb ist es naheliegend, eine lineare Regression für die Modellierung von *TEL* zu verwenden.

Natürlich gilt es anhand der Daten zu überprüfen, ob dieser lineare Zusammenhang plausibel ist.

3.1. Additive Modelle

In Fällen, in denen der Zusammenhang nicht linear ist, verwenden wir additive Modelle. Additive Modelle sind eine Verallgemeinerung von klassischen linearen Modellen. Neben den parametrischen Termen enthalten sie eine Summe von glatten Funktionen der Prädiktorvariablen. In unserem Fall hat das Modell die Form

$$y_i = \beta_0 + f(x_i) + \epsilon_i$$

wobei y_i die Zielvariable *TEL*, x_i die erklärende Variable lg(v/80) und ϵ_i standardnormalverteilte Zufallsvariablen bezeichnen. Mit der glatten Funktion f wird die Abhängigkeit der Zielvariablen von lg(v/80) modelliert. Dabei wird f durch kubische Splines repräsentiert.

Eine ausführliche Beschreibung von (verallgemeinerten) additiven Modellen findet sich in [4].

3.2. Variablenselektion

Um zu bestimmen, welche Wettervariablen einen Einfluss auf *TEL* haben, verwenden wir zwei Methoden zur Variablenselektion.

3.2.1. Forward selection

Für die forward selection beginnt man mit dem Nullmodell, also mit dem Modell ohne erklärende Variablen. Dann fügt man in jedem Schritt eine Variable hinzu bis man das volle Modell erreicht hat. In jedem Schritt fügt man diejenige Variable hinzu, welche die Modellanpassung am meisten verbessert. Man rechnet also alle Modelle mit einer zusätzlichen Variablen und vergleicht sie mit dem Modell aus dem letzten Schritt. Für den nächsten Schritt verwendet man dann das beste Modell. Der Prozess wird gestoppt, wenn keines der Kandidatenmodelle besser ist als das aktuelle.

Um zu bestimmen, welches Modell das beste ist, braucht man ein Vergleichskriterium. In der Literatur gibt es verschiedene Kriterien. Wir verwenden das Akaike-Informationskriterium (AIC). Es ist eines der am häufigsten verwendeten Kriterien. Das AIC belohnt die Anpassungsgüte und bestraft zu hohe Modellkomplexität.

3.2.2. Lasso

Das lasso (least absolute shrinkage and selection operator) ist eine weitere Selektionsmethode. Sie wurde für hochdimensionale Daten mit mehreren Tausend Erklärenden entwickelt und geht davon aus, dass die meisten Erklärenden keinen Einfluss auf die Zielvariable haben, dass also die meisten Parameter Null sind.
Diese Voraussetzungen sind in unserem Fall zwar nicht gegeben. Dennoch kann man lasso verwenden, um das Problem der Überanpassung in den Griff zu kriegen.

Lasso und die anderen verwendeten Selektionsmethoden werden beispielsweise in [5] ausführlicher beschrieben.

4. Vergleich der Messquerschnitte

4.1. Baseline-Vergleich

Für den Baseline-Vergleich verwenden wir nur Messungen vor dem Umbau am 17./18. Mai 2023 mit den in Abschnitt 2.3 aufgeführten Ausschlüssen. Insbesondere verwenden wir nur Messungen von Vorbeifahrten, für die alle 14 Messungen gültig sind. Die Messungen ohne Wetterdaten schliessen wir nur für die Modelle mit Wettervariablen aus. In Tabelle 4.1 ist aufgelistet, wie viele Messungen pro Zugtyp verwendet werden. Die genannten Anzahlen stehen für jede Kombination von Querschnitt und Mikrofon zur Verfügung.

Tabelle 4.1.: Verfügbare Messungen pro Zugtyp für den Baseline-Vergleich.

Zugtyp	Anzahl Messungen
Güterzüge	186
Fernverkehrszüge	
IC2000	942
Traverso	397
EWIV_IC2000	287
FV-Dosto	180
EWIV	40
ETR610	30
Regionalzüge	
Flirt	1986
RABe501	246

Die Verteilungen der *TEL*-Werte von Fernverkehrs-, Regional- und Güterzügen unterscheiden sich stark. Deshalb betrachten wir sie separat.

4.1.1. Fernverkehrszüge

Für die Fernverkehrszüge stehen 2122 Messungen pro Kombination von Querschnitt und Mikrofon zur Verfügung.

Zugtyp und Geschwindigkeit

Im Modell mit den Erklärenden Zugtyp und Geschwindigkeit können je nach Messquerschnitt zwischen 39 % und 56 % der Variabilität von *TEL* erklärt werden. Die Werte für das R^2 sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Tabelle 4.2.: R^2 für die Modelle für Fernverkehrszüge und das 3.0m-Mikrofon mit Geschwindigkeit und Zugtyp als Erklärende.

	MQ1.1	MQ1.2	MQ1.3	MQ2.1	MQ2.2	MQ2.3	REF
R^2	0.43	0.47	0.46	0.50	0.39	0.56	0.49

Auf dem Residuenplot in Abbildung 4.1 sieht man eine leicht schiefe Verteilung. Es hat relativ viele Ausreisser gegen oben. Wegen der grossen Stichprobengrösse ist das aber kein Problem.

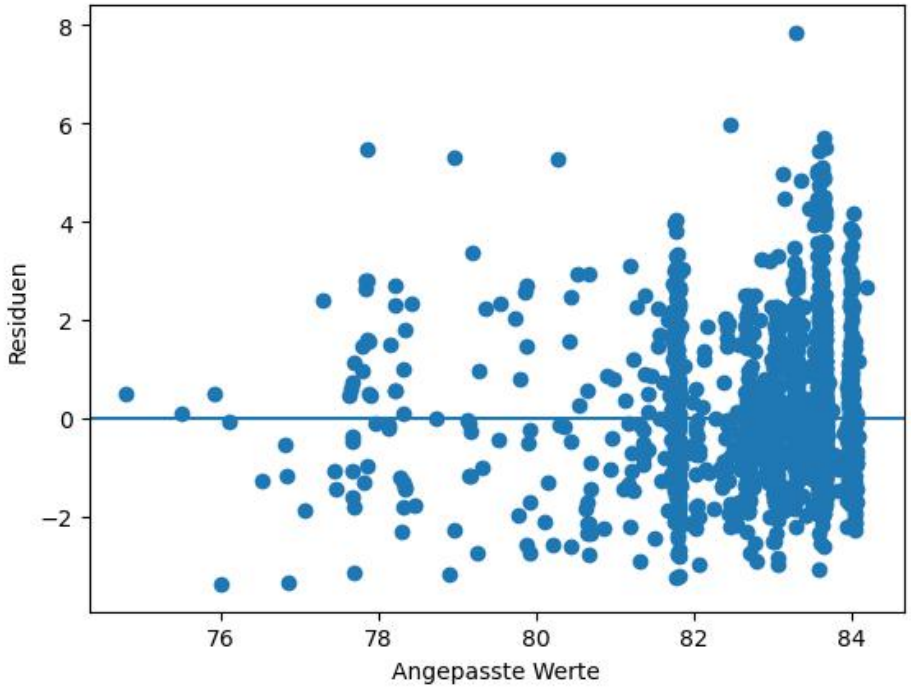


Abbildung 4.1.: Residuenplot für das Modell mit FV-Zügen für den MQ1.1 und das 3.0m-Mikrofon mit den Erklärenden Zugtyp und Geschwindigkeit.

Tabelle 4.3 zeigt die geschätzten Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervallen für die Modelle für das 3.0m-Mikrofon.
Die Effekte für die Geschwindigkeit sind für alle Querschnitte sehr ähnlich und nahe beim Wert 30, der für die Berechnung von *TEL*80 verwendet wird. Der mittlere *TEL*-Wert des lautesten Zugtyps (EWIV_IC2000) ist bei den meisten Querschnitten rund 2 dB höher, als derjenige des leisesten Typs (RABe501).
Die geschätzten mittleren *TEL*-Werte unterscheiden sich zwischen den Querschnitten um maximal rund 2 dB. Beispielsweise liegen sie für den RABe501 bei 80 km/h zwischen 76.01 dB bei MQ1.1 und 78.21 dB bei MQ2.2.
Tabelle 4.3 enthält auch ein Modell, dass mit den Messungen aller Querschnitte gerechnet wurde. Für dieses Modell ist die Annahme unabhängiger Beobachtungen verletzt. Konfidenzintervalle sollten deshalb nicht betrachtet werden. Man kann aber die Schätzwerte interpretieren. Sie sind das Resultat einer Kleinste-Quadrate-Schätzung ohne Verteilungsannahme für die Residuen.

Tabelle 4.3.: Modelle für Fernverkehrszüge und das 3.0m-Mikrofon mit Geschwindigkeit und Zugtyp als Erklärende. Geschätzte Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervallen.

	MQ1.1	MQ1.2	MQ1.3
Intercept	76.98 [76.37, 77.60]	77.29 [76.71, 77.87]	77.91 [77.32, 78.50]
lg(v/80)	32.87 [30.83, 34.91]	31.82 [29.89, 33.76]	31.88 [29.89, 33.88]
Zugtyp (Ref.: ETR610)			
EWIV	1.15 [0.48, 1.82]	1.24 [0.61, 1.88]	1.21 [0.56, 1.86]
EWIV_IC2000	1.19 [0.66, 1.73]	1.39 [0.89, 1.89]	1.60 [1.09, 2.12]
FV-Dosto	0.11 [-0.43, 0.66]	0.20 [-0.32, 0.72]	0.54 [0.01, 1.07]
IC2000	0.78 [0.27, 1.30]	0.95 [0.46, 1.44]	1.18 [0.68, 1.68]
RABe501	-0.97 [-1.51, -0.43]	-0.86 [-1.36, -0.35]	-0.70 [-1.22, -0.18]
Traverso	0.58 [0.05, 1.10]	0.31 [-0.19, 0.81]	0.43 [-0.08, 0.94]
	MQ2.1	MQ2.2	MQ2.3
Intercept	77.99 [77.49, 78.50]	78.28 [77.76, 78.81]	78.65 [78.18, 79.11]
lg(v/80)	30.96 [29.21, 32.70]	32.30 [30.50, 34.11]	30.91 [29.30, 32.52]
Zugtyp (Ref.: ETR610)			
EWIV	0.90 [0.36, 1.44]	0.35 [-0.21, 0.91]	0.75 [0.26, 1.25]
EWIV_IC2000	0.98 [0.55, 1.41]	0.54 [0.09, 0.98]	1.05 [0.65, 1.44]
FV-Dosto	-0.22 [-0.66, 0.22]	0.67 [0.21, 1.12]	-0.24 [-0.65, 0.16]
IC2000	0.76 [0.34, 1.17]	0.36 [-0.07, 0.79]	0.90 [0.51, 1.28]
RABe501	-1.15 [-1.59, -0.72]	-0.07 [-0.52, 0.37]	-1.13 [-1.52, -0.73]
Traverso	0.88 [0.45, 1.30]	0.58 [0.14, 1.02]	0.55 [0.16, 0.94]
	REF	Alle Querschnitte	
Intercept	78.71 [78.18, 79.24]	78.04	
lg(v/80)	31.34 [29.45, 33.22]	31.31	
Zugtyp (Ref.: ETR610)			
EWIV	1.54 [0.97, 2.12]	1.02	
EWIV_IC2000	1.48 [1.02, 1.94]	1.18	
FV-Dosto	0.53 [0.06, 1.00]	0.23	
IC2000	1.14 [0.69, 1.58]	0.87	
RABe501	-0.71 [-1.17, -0.25]	-0.80	
Traverso	0.38 [-0.07, 0.83]	0.52	

Zugtyp und Geschwindigkeit mit Interaktionen

Das im vorherigen Abschnitt betrachtete Modell verwendet nur einen Parameter für die Geschwindigkeit. Es setzt also voraus, dass der Effekt der Geschwindigkeit auf den *TEL*-Wert für alle Zugtypen gleich ist. Nun betrachten wir ein Modell mit Interaktionen zwischen Zugtyp und Geschwindigkeit. Es wird also für jeden Zugtyp einzeln eine Steigung bezüglich Geschwindigkeit geschätzt. Wenn die Interaktion das Modell deutlich verbessern würde, spräche das gegen die Annahme, dass der Geschwindigkeitseffekt für alle Zugtypen gleich ist. Dies ist jedoch nicht der Fall. Das in Tabelle 4.4 aufgeführte R^2 ist bei allen Querschnitten höchstens 0.03 grösser und die für multiples Testen adjustierten Interaktionseffekte sind nicht signifikant von Null verschieden (hier nicht gezeigt). Das einfachere Modell ohne Interaktion ist also zu bevorzugen.

Tabelle 4.4.: R^2 für die Modelle für Fernverkehrszüge und das 3.0m-Mikrofon mit Geschwindigkeit, Zugtyp und deren Interaktion als Erklärende.

	MQ1.1	MQ1.2	MQ1.3	MQ2.1	MQ2.2	MQ2.3	REF
R^2	0.45	0.49	0.48	0.53	0.41	0.58	0.50

4.1.2. Fernverkehrszüge und RBDe560

Wenn wir zusätzlich zu den Fernverkehrszügen den RBDe560 mit ins Modell nehmen, haben wir 2251 Messungen pro Kombination von Querschnitt und Mikrofon. Die Schätzwerte ändern sich nicht wesentlich. Weil der RBDe560 aber deutlich höhere *TEL*-Werte mit deutlich grösserer Streuung aufweist als die FV-Züge, ist die Homoskedastizität nicht mehr gegeben. Dies sieht man gut auf dem Residuenplot in Abbildung 4.2 am Beispiel des Modells für den MQ1.1 und das 3.0m-Mikrofon mit den Erklärenden Zugtyp und Geschwindigkeit. Auf der rechten Seite sieht man die grossen angepassten Werte (für RBDe560). Ihre Residuen streuen deutlich mehr als diejenigen für die kleineren angepassten Werte. Wenn die Modellannahme der Homoskedastizität erfüllt wäre, wäre die Streuung der Residuen für alle angepassten Werte ungefähr gleich.
Für den RBDe560 sollte man also ein separates Modell rechnen.

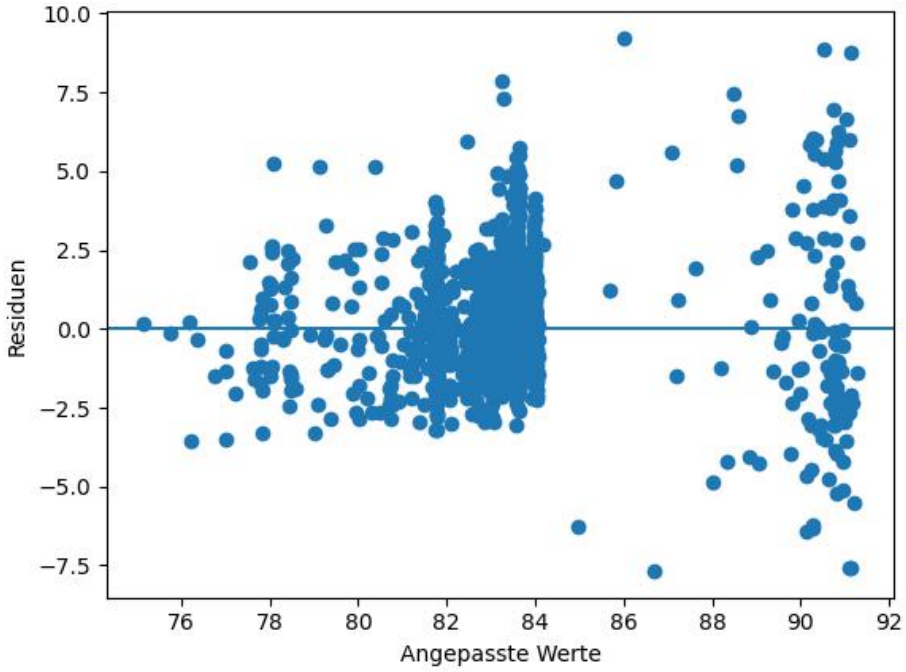


Abbildung 4.2.: Residuenplot für das Modell mit FV-Zügen und RBDe560.

4.1.3. RBDe560

Wenn man ein Modell nur für RBDe560 rechnet, ist die Schätzung des Effekts der Geschwindigkeit sehr instabil. Der in Tabelle 4.5 aufgeführte Koeffizient für die Geschwindigkeit unterscheidet sich sehr stark zwischen den Querschnitten. Er variert zwischen 23.45 und 40.63. Dies spricht nicht für dieses Modell. Zumindest kann der Effekt der Geschwindigkeit mit den vorhandenen Daten nicht gut geschätzt werden.

Tabelle 4.5.: Effekte für die Geschwindigkeit für die Modelle für RBDe560 und das 3.0m-Mikrofon.

	MQ11	MQ12	MQ13	MQ21	MQ22	MQ23	REF
lg(v/80)	23.92	23.96	23.45	25.85	29.35	31.87	40.63

Die Residuenplots sehen gut aus. In Abbildung A.49 im Anhang ist als Beispiel der Residuenplot des Modells für den MQ 1.1 und das 3.0m-Mikrofon mit den Erklärenden Zugtyp und Geschwindigkeit gegeben.

4.1.4. Flirt

Der Zugtyp Flirt verhält sich bezüglich *TEL*-Wert ziemlich anders als die anderen Zugtypen. Für die Messquerschnitte MQ1.1, MQ1.2 und MQ1.3 besteht zwar ein linearer Zusammenhang zwischen *TEL* und lg(v/80), die Steigung ist aber bei rund 20 anstatt 30 wie bei den anderen Zugtypen und in der Definition von *TEL*80.

Für die restlichen Querschnitte ist der Zusammenhang zwischen *TEL* und lg(v/80) nicht linear. Für grosse Geschwindigkeiten nimmt die Lautstärke nicht mehr zu. Zudem sind die *TEL*-Werte für sehr tiefe Geschwindigkeiten kleiner, als es ein lineares Modell schätzt. Wenn man trotzdem ein lineares Modell anpasst, ist die Regressionsgerade fast flach (vgl. die Koeffizienten in Tabelle 4.6).

Ein additives Modell ist flexibler als ein lineares und kann auch nichtlineare Zusammenhänge abbilden. Abbildung 4.3 zeigt den partial plot für ein additives Modell für den REF-Querschnitt für Flirt und das 3.0m-Mikrofon. Man sieht deutlich, dass die Regressionskurve abflacht und dann sogar leicht sinkt. Ab ca. 95 km/h nimmt der *TEL*-Wert nicht mehr zu.

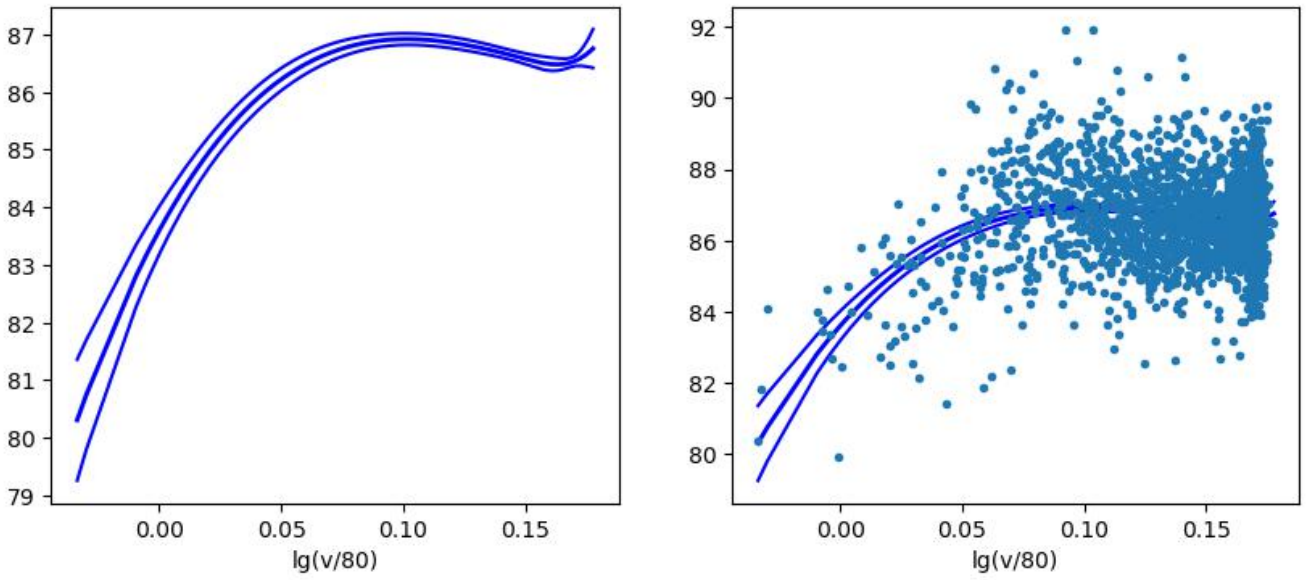


Abbildung 4.3.: Partial plot für ein additives Modell für den REF-Querschnitt für Flirt und das 3.0m-Mikrofon. Links ohne, rechts mit Daten.

Tabelle 4.6.: Effekte für die Geschwindigkeit für die linearen Modelle für Flirt und das 3.0m-Mikrofon.

	MQ1.1	MQ1.2	MQ1.3	MQ2.1	MQ2.2	MQ2.3	REF
lg(v/80)	21.23	19.57	18.89	4.67	6.44	4.62	2.76

4.1.5. Güterzüge

Für die Güterzüge haben wir ein Modell mit Zugtyp und Geschwindigkeit gerechnet. Es sind deutlich weniger Messungen verfügbar als für die Personenzüge. Pro Kombination von Querschnitt und Mikrofon sind es 186 Messungen.
Die in Tabelle 4.8 aufgeführten Effekte für die Geschwindigkeit sind für alle Querschnitte relativ nahe beim Wert 30, der für die Berechnung von $TEL80$ verwendet wird. Wegen der kleineren Stichprobengrösse ist die Schätzung aber weniger stabil, variiert also stärker zwischen den Querschnitten. Der Anteil der erklärten Streuung ist tiefer als bei den Fernverkehrszügen, weil es hier nicht verschiedene Zugtypen gibt (vgl. die Koeffizienten in Tabelle 4.7).

Auf dem Residuenplot in Abbildung 4.1 sieht man, dass es hier im Gegensatz zu den Fernverkehrszügen vor allem Ausreisser gegen unten hat. Weiter sieht man, dass die Geschwindigkeitsverteilung gleichmässiger ist als bei den Fernverkehrszügen. Die meisten Fernverkehrszüge fahren mit der Sollgeschwindigkeit und es gibt nur wenige Messungen bei tieferen Geschwindigkeiten.

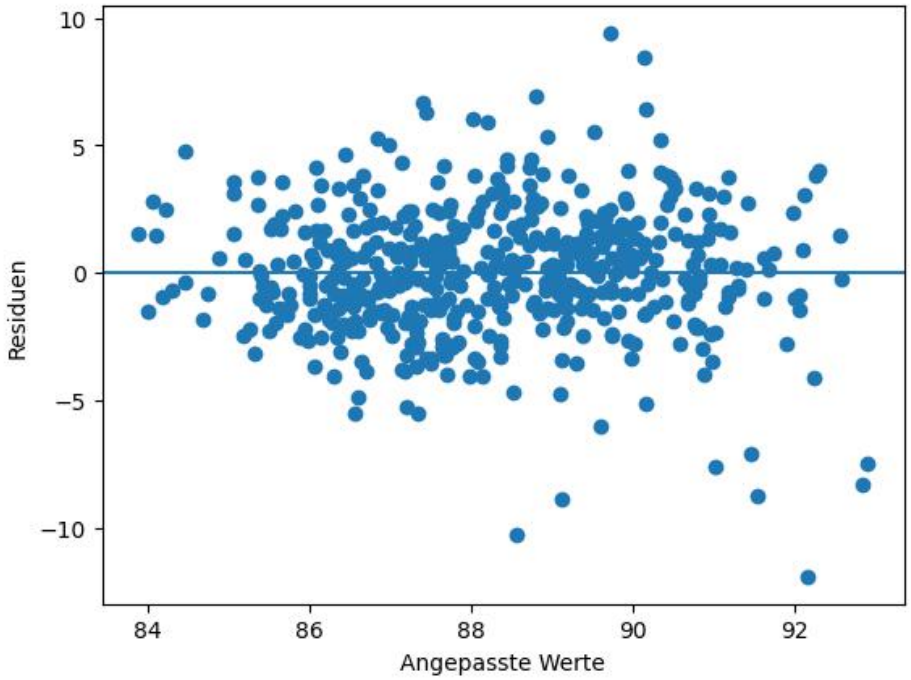


Abbildung 4.4.: Residuenplot für das Modell mit Güterzügen für den Querschnitt MQ1.1 und das 3.0m-Mikrofon mit der Erklärenden Geschwindigkeit.

Tabelle 4.7.: R^2 für die Modelle für Güterzüge und das 3.0m-Mikrofon mit Geschwindigkeit und Zugtyp als Erklärende.

	MQ1.1	MQ1.2	MQ1.3	MQ2.1	MQ2.2	MQ2.3	REF
R^2	0.35	0.33	0.33	0.32	0.31	0.31	0.32

Tabelle 4.8.: Geschätzte Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervallen für die Modelle für Güterzüge und das 3.0m-Mikrofon mit Geschwindigkeit und Zugtyp als Erklärende.

	MQ11	MQ12	MQ13
Intercept	88.44 [88.03, 88.86]	88.51 [88.09, 88.93]	89.09 [88.66, 89.52]
lg(v/80)	31.16 [24.95, 37.37]	31.21 [24.78, 37.63]	31.68 [25.08, 38.28]
	MQ21	MQ22	MQ23
Intercept	88.15 [87.74, 88.56]	88.08 [87.65, 88.51]	88.11 [87.68, 88.54]
lg(v/80)	28.02 [22.01, 34.02]	28.11 [22.06, 34.16]	27.65 [21.63, 33.68]
	REF		
Intercept	90.03 [89.56, 90.5]		
lg(v/80)	31.72 [25.03, 38.4]		

4.1.6. Wettervariablen

Um den Einfluss des Wetters zu untersuchen betrachten wir nur die Fernverkehrszüge. Pro Kombination von Querschnitt und Mikrofon sind 2082 Messungen mit Wetterdaten verfügbar.
Für die Selektion der Variablen, die neben der Geschwindigkeit einen Einfluss auf den TEL-Wert haben, verwenden wir zwei Verschiedene Verfahren.

Als erstes verwenden wir die AIC als Kriterium. Die resultierende Selektion ist ziemlich instabil und es werden relativ viele Variablen selektiert. Tabelle 4.9 zeigt die Koeffizienten für die selektierten Wettervariablen. Die Beschreibung der Variablen befindet sich in Tabelle 2.2.

Tabelle 4.9.: Effekte für die mit dem AIC-Kriterium selektierten Wettervariablen für die Modelle für das 3.0m-Mikrofon mit Zugtyp und Geschwindigkeit als Erklärenden.

	MQ11	MQ12	MQ13	MQ21	MQ22	MQ23	REF
TE	0.28	—	0.02	—	—	—	—
FE	0.05	-0.01	—	—	-0.08	—	—
DR	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02
WS	-0.01	-0.02	-0.01	—	0.02	—	—
RD	3.09	2.35	2.40	1.34	—	—	—
SO	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00
ZA	-0.02	—	-0.01	—	—	0.05	—
TP	-0.25	—	—	0.02	0.45	0.05	—
RH	-0.14	-0.15	-0.16	—	—	—	—
RE	—	-0.01	—	—	0.01	—	—
WG	—	—	—	0.02	—	—	—
ZB	—	—	—	0.04	0.08	-0.03	—
HU	—	—	—	-0.08	-0.53	-0.10	—

Mit lasso (least absolute shrinkage and selection operator) wird die Selektion viel stabiler. Es hat jedoch hochkorrellierte Variablen, deren Effekte sich (teilweise) aufheben. Dies spricht nicht für das Modell und ist ein Zeichen für eine Überanpassung an die Daten.
Die Koeffizienten für die mit lasso selektierten Wettervariablen sind in Tabelle 4.10 aufgeführt.

Die Effekte der erklärenden Wettervariablen auf den *TEL*-Wert sind sehr klein. Die zusätzlichen Variablen verbessern das Modell nicht wesentlich. Um die Grössenordnung der Effekte zu veranschaulichen, nehmen wir die Differenz zwischen dem Maximum und dem Minimum einer Erklärenden und multiplizieren sie mit dem Koeffizienten. So erhalten wir die in Tabelle 4.11 aufgeführte grösstmögliche Differenz im geschätzten mittleren *TEL*-Wert, die auf die Erklärende zurückzuführen ist. Der grösste (absolute Effekt) beträgt 1.97 dB (A).

Tabelle 4.10.: Effekte für die mit LASSO selektierte Wettervariablen.

	MQ11	MQ12	MQ13	MQ21	MQ22	MQ23	REF
TE	0.03	0.01	0.02	-0.06	-0.06	-0.05	-0.01
ZA	-0.01	-0.01	-0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
SO	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	—
DR	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04	0.02
FE	0.00	-0.01	0.00	—	—	—	0.00

Tabelle 4.11.: Grössenordnung der Effekte auf *TEL* (in dB (A)).

	MQ11	MQ12	MQ13	MQ21	MQ22	MQ23	REF
TE	0.98	0.33	0.66	-1.97	-1.97	-1.64	-0.33
ZA	-0.50	-0.50	-0.50	0.99	0.99	0.50	0.50
SO	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	—
DR	0.67	0.67	0.67	0.34	0.34	1.35	0.67
FE	0.00	-0.60	0.00	—	—	—	0.00

4.2. Einbau neuer Schienenzwischenlagen

In diesem Abschnitt untersuchen wir den Effekt der neuen Schienenzwischenlagen. Sie wurden in der Nacht vom 17. auf den 18. Mai 2023 in den Messquerschnitten MQ1.1 und MQ2.1 eingebaut.
Wir betrachten nur Fernverkehrszüge und Güterzüge. Dabei verwenden wir Messungen bis zum 30.11.2023 mit den in Abschnitt 2.3 aufgeführten Ausschlüssen. Insbesondere verwenden wir nur Messungen von Vorbeifahrten, für die alle 14 Messungen gültig sind.

4.2.1. Fernverkehrszüge

In Tabelle 4.12 ist aufgelistet, wie viele Messungen pro Zugtyp verwendet werden. Die genannten Anzahlen stehen für jede Kombination von Querschnitt und Mikrofon zur Verfügung. Insgesamt haben wir 10647 Messungen pro Kombination von Querschnitt und Mikrofon.

Zusätzlich zu Zugtyp und Geschwindigkeit nehmen wir die neue Zwischenlage ins Modell bzw. für die Querschnitte ohne Umbau die Variable vor/nach dem Zeitpunkt des Umbaus. Tabelle 4.13 zeigt die Effekte für die Modelle der verschiedenen Querschnitte für das 3.0m-Mikrofon. Die neuen Zwischenlagen verringern den geschätzten mittleren *TEL*-Wert um 1.25 dB (A) für die besohlten Schwellen und um 1.34 dB (A) für die unbesohlten Schwellen. Interessant ist jedoch zu sehen, dass es auch bei den anderen Messquerschnitten Effekte hat, die deutlich von Null verschieden sind. So ist der geschätzte mittlere *TEL*-Wert für den Querschnitt MQ2.2 nach dem Zeitpunkt des Umbaus 0.85 dB (A) höher als vorher. Dies obwohl an diesem Messquerschnitt nichts verändert wurde. Der Grund hierfür sind tiefen *TEL*80-Werte im Herbst 2022. Im Winter sind sie dann deutlich höher und, anders als z. B. beim MQ2.3., bleiben sie dann auch im Jahr 2023 hoch. Dies ist in Abbildung A.31 gut zu sehen.

Tabelle 4.12.: Verfügbare Messungen pro Zugtyp für die Modelle für den Einbau neuer Schienenzwischenlagen.

Zugtyp	Anzahl Messungen
IC2000	4680
Traverso	1920
EWIV_IC2000	1516
RABe501	1404
FV-Dosto	756
EWIV	271
ETR610	100

Für die Güterzüge stehen 509 Messungen pro Kombination von Querschnitt und Mikrofon zur Verfügung.

Tabelle 4.13.: Geschätzte Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervallen für die Modelle für Fernverkehrszüge und das 3.0m-Mikrofon mit Geschwindigkeit, Zugtyp und Umbau als Erklärende.

	MQ1.1	MQ1.2	MQ1.3
Intercept	76.90 [76.59, 77.21]	77.06 [76.79, 77.34]	77.72 [77.43, 78.02]
lg(v/80)	33.05 [32.10, 34.01]	32.36 [31.49, 33.22]	32.02 [31.09, 32.95]
Zugtyp (Ref.: ETR610)			
EWIV	1.00 [0.69, 1.31]	1.27 [0.99, 1.54]	1.28 [0.98, 1.58]
EWIV_IC2000	1.39 [1.12, 1.66]	1.65 [1.41, 1.90]	1.93 [1.66, 2.19]
FV-Dosto	0.17 [-0.11, 0.45]	0.47 [0.22, 0.73]	0.96 [0.69, 1.24]
IC2000	0.92 [0.65, 1.18]	1.14 [0.90, 1.38]	1.38 [1.12, 1.63]
RABe501	-1.65 [-1.92, -1.38]	-1.26 [-1.50, -1.01]	-0.97 [-1.23, -0.70]
Traverso	0.81 [0.54, 1.08]	0.52 [0.27, 0.76]	0.55 [0.29, 0.81]
Umbau	-1.25 [-1.31, -1.18]	-0.04 [-0.10, 0.01]	-0.16 [-0.22, -0.10]
	MQ2.1	MQ2.2	MQ2.3
Intercept	77.83 [77.58, 78.09]	78.24 [78.02, 78.46]	78.42 [78.18, 78.66]
lg(v/80)	31.22 [30.40, 32.04]	30.79 [30.09, 31.49]	31.18 [30.41, 31.96]
Zugtyp (Ref.: ETR610)			
EWIV	0.99 [0.74, 1.24]	0.75 [0.53, 0.97]	0.97 [0.73, 1.21]
EWIV_IC2000	1.22 [1.00, 1.45]	0.92 [0.73, 1.11]	1.33 [1.12, 1.55]
FV-Dosto	-0.14 [-0.38, 0.09]	1.13 [0.94, 1.33]	0.04 [-0.17, 0.26]
IC2000	0.95 [0.73, 1.17]	0.71 [0.52, 0.90]	1.17 [0.96, 1.38]
RABe501	-1.53 [-1.75, -1.30]	-0.12 [-0.31, 0.07]	-1.42 [-1.63, -1.21]
Traverso	1.05 [0.83, 1.27]	0.85 [0.66, 1.04]	0.71 [0.50, 0.91]
Umbau	-1.34 [-1.39, -1.29]	0.85 [0.81, 0.90]	-0.44 [-0.49, -0.39]
	REF		
Intercept	78.45 [78.16, 78.74]		
lg(v/80)	31.79 [30.85, 32.73]		
Zugtyp (Ref.: ETR610)			
EWIV	1.53 [1.24, 1.81]		
EWIV_IC2000	1.92 [1.67, 2.18]		
FV-Dosto	0.82 [0.56, 1.08]		
IC2000	1.48 [1.23, 1.73]		
RABe501	-1.17 [-1.42, -0.92]		
Traverso	0.40 [0.15, 0.65]		
Umbau	0.05 [-0.01, 0.11]		

Interaktion Umbau und Geschwindigkeit

Um die Frage zu beantworten, ob sich der Effekt der Geschwindigkeit auf *TEL* mit den neuen Zwischenlagen ändert, betrachten wir das Modell mit einem Interaktionseffekt zwischen Geschwindigkeit und Umbau. Es wird also vor und nach dem Umbau separat je eine Steigung für *TEL* bezüglich lg(v/80) geschätzt.

Für die Querschnitte MQ1.1 und MQ2.1 mit neuen Zwischenlagen ist der Interaktionseffekt nicht signifikant von Null verschieden. Die Konfidenzintervalle überdecken die Null. Das einfachere Modell ohne Interaktion ist also zu bevorzugen und es muss keine separate Steigung nach dem Umbau geschätzt werden. Der Effekt der neuen Zwischenlage ist additiv.

Für den Referenzquerschnitt ist der Interaktionseffekt signifikant von Null verschieden. Da es dort aber gar keine Anpassungen am Oberbau gab, spricht das vor allem dafür, dass die Schätzung des Geschwindigkeits-Effekts nicht sehr robust ist.

Tabelle 4.14.: Modelle für Fernverkehrszüge und das 3.0m-Mikrofon mit der Interaktion zwischen Geschwindigkeit und Umbau sowie dem Zugtyp als Erklärende. Gezeigt werden nur die geschätzten Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervallen für Geschwindigkeit, Umbau und deren Interaktion.

	MQ1.1	MQ1.2	MQ1.3
lg(v/80)	32.59 [30.70, 34.47]	31.34 [29.63, 33.05]	31.16 [29.32, 33.00]
Umbau	-1.35 [-1.72, -0.99]	-0.27 [-0.60, 0.06]	-0.35 [-0.69, 0.00]
Umbau:lg(v/80)	0.62 [-1.53, 2.77]	1.35 [-0.61, 3.30]	1.13 [-0.97, 3.24]
	MQ2.1	MQ2.2	MQ2.3
lg(v/80)	30.49 [28.84, 32.14]	31.75 [30.33, 33.16]	30.06 [28.51, 31.60]
Umbau	-1.50 [-1.82, -1.18]	1.07 [0.79, 1.35]	-0.69 [-0.99, -0.39]
Umbau:lg(v/80)	0.95 [-0.92, 2.83]	-1.26 [-2.87, 0.36]	1.48 [-0.28, 3.24]
	REF		
lg(v/80)	29.76 [27.87, 31.66]		
Umbau	-0.39 [-0.74, -0.03]		
Umbau:lg(v/80)	2.65 [0.50, 4.80]		

Interaktion Umbau und Zugtyp

Um die Frage zu beantworten, ob sich der Effekt des Zugtyps auf *TEL* mit den neuen Zwischenlagen ändert, betrachten wir das Modell mit einem Interaktionseffekt zwischen Umbau und Zugtyp. Es wird also untersucht, ob die Unterschiede zwischen den Zugtypen mit den neuen Zwischenlagen ändern.

In Tabelle 4.15 sieht man, dass der RABe501 tendenziell mehr von den neuen Zwischenlagen zu profitieren scheint als die anderen Zugtypen. Jedoch sind die Effekte für den RABe501 auch für die Messquerschnitte ohne Umbau deutlich negativ.

Tabelle 4.15.: Modelle für Fernverkehrszüge und das 3.0m-Mikrofon mit der Interaktion zwischen Zugtyp und Umbau sowie der Geschwindigkeit als Erklärende. Gezeigt werden nur die geschätzten Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervallen für den Interaktionseffekt.

	MQ11	MQ12	MQ13
Umbau:Zugtyp (Ref.: ETR610)			
EWIV	-0.16 [-0.89, 0.57]	0.06 [-0.60, 0.72]	0.13 [-0.58, 0.83]
EWIV_IC2000	0.25 [-0.35, 0.85]	0.35 [-0.19, 0.90]	0.43 [-0.15, 1.01]
FV-Dosto	0.08 [-0.54, 0.69]	0.38 [-0.18, 0.93]	0.57 [-0.02, 1.17]
IC2000	0.18 [-0.40, 0.76]	0.27 [-0.26, 0.79]	0.28 [-0.28, 0.84]
RABe501	-0.82 [-1.42, -0.22]	-0.46 [-1.01, 0.08]	-0.29 [-0.87, 0.30]
Traverso	0.30 [-0.29, 0.90]	0.28 [-0.26, 0.81]	0.18 [-0.40, 0.75]
	MQ21	MQ22	MQ23
Umbau:Zugtyp (Ref.: ETR610)			
EWIV	0.14 [-0.46, 0.74]	0.54 [0.03, 1.06]	0.30 [-0.27, 0.86]
EWIV_IC2000	0.33 [-0.17, 0.82]	0.53 [0.11, 0.96]	0.39 [-0.07, 0.85]
FV-Dosto	0.11 [-0.39, 0.62]	0.64 [0.21, 1.08]	0.40 [-0.08, 0.88]
IC2000	0.26 [-0.22, 0.74]	0.49 [0.08, 0.90]	0.38 [-0.07, 0.83]
RABe501	-0.43 [-0.93, 0.07]	0.02 [-0.40, 0.45]	-0.32 [-0.79, 0.15]
Traverso	0.23 [-0.25, 0.72]	0.43 [0.01, 0.84]	0.22 [-0.24, 0.68]
	REF		
Umbau:Zugtyp (Ref.: ETR610)			
EWIV	0.02 [-0.65, 0.70]		
EWIV_IC2000	0.58 [0.03, 1.14]		
FV-Dosto	0.41 [-0.16, 0.98]		
IC2000	0.46 [-0.07, 1.00]		
RABe501	-0.52 [-1.08, 0.03]		
Traverso	0.05 [-0.50, 0.60]		

4.2.2. Güterzüge

Für die Güterzüge stehen 509 Messungen pro Kombination von Querschnitt und Mikrofon zur Verfügung. Tabelle 4.13 zeigt die Effekte für die Modelle der verschiedenen Querschnitte für das 3.0m-Mikrofon. Die neuen Zwischenlagen verringern den geschätzten mittleren *TEL*-Wert um 1.40 dB (A) für die besohlten Schwellen und um 1.09 dB (A) für die unbesohlten Schwellen.

Die Effekte für die Messquerschnitte ohne Umbau sind deutlich kleiner als bei den Fernverkehrszügen. Die Konfidenzintervalle überdecken die Null oder sind nicht weit von Null entfernt.

Tabelle 4.16.: Geschätzte Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervallen für die Modelle für Güterzüge und das 3.0m-Mikrofon mit Geschwindigkeit und Umbau als Erklärende.

	MQ11	MQ12	MQ13
Intercept	88.52 [88.14, 88.89]	88.34 [88.05, 88.63]	89.05 [88.75, 89.35]
lg(v/80)	27.64 [24.04, 31.23]	28.33 [24.68, 31.98]	28.34 [24.52, 32.15]
Umbau	-1.40 [-1.86, -0.94]	0.23 [-0.23, 0.70]	0.11 [-0.37, 0.59]
	MQ21	MQ22	MQ23
Intercept	88.19 [87.84, 88.54]	88.55 [88.26, 88.84]	88.15 [87.86, 88.43]
lg(v/80)	26.73 [23.30, 30.16]	27.46 [23.95, 30.96]	27.60 [24.12, 31.08]
Umbau	-1.09 [-1.50, -0.67]	-0.45 [-0.87, -0.03]	-0.03 [-0.45, 0.38]
	REF		
Intercept	89.82 [89.50, 90.13]		
lg(v/80)	29.80 [25.83, 33.77]		
Umbau	0.29 [-0.17, 0.75]		

4.3. Vergleich der zeitlichen Cluster

Die durch mehrere grössere Lücken in den Messungen entstandenen und in Tabelle 2.5 beschriebenen Cluster sollen nun miteinander Verglichen werden. Für den Vergleich der Cluster verwenden wir nur Messungen von Fernverkehrszügen und rechnen Modelle mit den Erklärenden Zugtyp und Geschwindigkeit. In Tabelle 4.17 sind die Anzahl verfügbaren Messungen pro Cluster aufgeführt.

Tabelle 4.18 zeigt die geschätzten Koeffizienten für die Modelle für das 3.0m Mikrofon. Die Cluster unterscheiden sich deutlich. Die Unterschiede betragen zum Teil mehr als 2 dB, ohne dass etwas am Oberbau angepasst wurde. Es fällt vor allem auf, dass im Winter die *TEL*-Werte deutlich höher waren als sonst.

Tabelle 4.17.: Verfügbare Messungen pro Cluster (nur Fernverkehrszüge).

Cluster	Anzahl Messungen
T22_09	969
T22_10	538
T23_01	50
T23_04	565
T23_05	2790
T23_07	5735

Tabelle 4.18.: Geschätzte Koeffizienten mit 95%-Konfidenzintervallen für die Modelle zum Vergleich der Cluster für das 3.0m-Mikrofon.

	MQ11	MQ12	MQ13
Intercept	76.97 [76.66, 77.29]	77.13 [76.85, 77.41]	77.76 [77.46, 78.06]
lg(v/80)	33.11 [32.16, 34.06]	32.49 [31.64, 33.34]	32.02 [31.10, 32.94]
Zugtyp (Ref.: ETR610)			
EWIV	1.08 [0.77, 1.39]	1.37 [1.10, 1.65]	1.37 [1.07, 1.66]
EWIV_IC2000	1.47 [1.19, 1.74]	1.76 [1.52, 2.01]	2.01 [1.75, 2.27]
FV-Dosto	0.22 [-0.06, 0.50]	0.55 [0.30, 0.80]	1.02 [0.76, 1.29]
IC2000	0.99 [0.72, 1.25]	1.24 [1.00, 1.48]	1.45 [1.19, 1.71]
RABe501	-1.56 [-1.84, -1.29]	-1.14 [-1.38, -0.89]	-0.88 [-1.14, -0.62]
Traverso	0.88 [0.61, 1.15]	0.61 [0.37, 0.85]	0.62 [0.36, 0.88]
Cluster (Ref.: T22_09)			
T22_10	-0.14 [-0.28, 0.00]	0.01 [-0.12, 0.13]	-0.03 [-0.17, 0.10]
T23_01	-0.11 [-0.49, 0.27]	0.27 [-0.07, 0.61]	0.12 [-0.25, 0.49]
T23_04	-0.43 [-0.57, -0.29]	-0.73 [-0.86, -0.61]	-0.39 [-0.52, -0.25]
T23_05	-1.21 [-1.30, -1.11]	0.03 [-0.06, 0.12]	-0.08 [-0.17, 0.02]
T23_07	-1.50 [-1.59, -1.40]	-0.36 [-0.44, -0.28]	-0.36 [-0.45, -0.28]

	MQ21	MQ22	MQ23
Intercept	77.34 [77.09, 77.60]	77.41 [77.21, 77.62]	77.68 [77.45, 77.92]
lg(v/80)	31.09 [30.29, 31.90]	30.40 [29.76, 31.05]	31.15 [30.41, 31.89]
Zugtyp (Ref.: ETR610)			
EWIV	1.14 [0.90, 1.39]	0.94 [0.74, 1.14]	1.17 [0.94, 1.40]
EWIV_IC2000	1.38 [1.16, 1.60]	1.12 [0.94, 1.29]	1.54 [1.33, 1.74]
FV-Dosto	-0.04 [-0.27, 0.19]	1.26 [1.08, 1.45]	0.18 [-0.03, 0.39]
IC2000	1.08 [0.86, 1.30]	0.87 [0.70, 1.04]	1.35 [1.15, 1.55]
RABe501	-1.38 [-1.60, -1.16]	0.05 [-0.12, 0.23]	-1.23 [-1.43, -1.03]
Traverso	1.17 [0.96, 1.39]	1.00 [0.83, 1.18]	0.86 [0.66, 1.06]
Cluster (Ref.: T22_09)			
T22_10	0.44 [0.32, 0.55]	0.72 [0.63, 0.81]	1.05 [0.95, 1.16]
T23_01	1.43 [1.12, 1.74]	2.36 [2.11, 2.61]	2.71 [2.42, 2.99]
T23_04	0.88 [0.77, 0.99]	1.85 [1.76, 1.94]	0.88 [0.78, 0.98]
T23_05	-0.74 [-0.82, -0.66]	1.80 [1.73, 1.86]	0.39 [0.31, 0.46]
T23_07	-1.07 [-1.14, -1.00]	1.48 [1.42, 1.54]	-0.01 [-0.07, 0.06]

	REF	Alle Querschnitte
Intercept	78.23 [77.94, 78.52]	77.55
lg(v/80)	31.59 [30.68, 32.51]	31.42
Zugtyp (Ref.: ETR610)		
EWIV	1.73 [1.45, 2.01]	1.26
EWIV_IC2000	2.12 [1.88, 2.37]	1.63
FV-Dosto	0.97 [0.71, 1.22]	0.60
IC2000	1.65 [1.41, 1.90]	1.24
RABe501	-0.97 [-1.22, -0.72]	-1.01
Traverso	0.57 [0.32, 0.81]	0.82
Cluster (Ref.: T22_09)		
T22_10	0.19 [0.06, 0.32]	0.32
T23_01	0.81 [0.46, 1.16]	1.08
T23_04	0.03 [-0.10, 0.15]	0.30
T23_05	0.50 [0.42, 0.59]	0.10
T23_07	-0.07 [-0.15, 0.02]	-0.27

5. Stichprobengrösse bei Kurzzeitmessungen

Durch die kontinuierlichen Langzeitmessungen im Fahrbahnlabor steht eine grosse Datenmenge zur Verfügung. Damit kann beispielsweise der Effekte der neuen Zwischenlagen gut erkannt und quantifiziert werden. Es können jedoch nicht in jedem Projekt solch aufwendige Langzeitmessungen durchgeführt werden, um den Effekt einer Massnahme zu bestimmen. Bei Kurzzeitmessungen stellen sich unter anderem die folgenden beiden Fragen.

Für die erste Frage nehmen wir an, dass wir vor und nach einer Massnahme Messungen durchgeführt und einen Unterschied im mittleren $TEL80$-Wert erhalten haben. Haben wir nun einen systematischen Unterschied gefunden oder war es nur Zufall und der Unterschied ist nur in der Streuung der $TEL80$-Werte begründet?

Für zukünftige Messungen stellt sich die Frage, wie oft wir vor und nach der Massnahme messen müssen, um mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit einen Unterschied zu erkennen.

Fehler 1. und 2. Art bei statistischen Tests

Um einen Unterschied zwischen den mittleren $TEL80$-Werten vor und nach einer Massnahme mit einer gewissen Sicherheit feststellen zu können, führen wir einen statistischen Test durch. Bei einem statistischen Test wird immer eine Nullhypothese H_0 und eine Alternativhypothese H_A formuliert. Das Ziel ist dann, die Nullhypothese aufgrund des Testresultats abzulehnen und die Alternativhypothese zu akzeptieren.
In unserem Fall betrachten wir zwei Gruppen von Messungen. μ_{vor} bezeichne den Mittelwert der $TEL80$-Werte vor der Massnahme und μ_{nach} bezeichne den Mittelwert der $TEL80$-Werte nach der Massnahme. Dann lauten die Hypothesen

$$H_0 : \mu_{nach} \geq \mu_{vor},$$
$$H_A : \mu_{nach} < \mu_{vor}.$$

Weil die Verteilung von $TEL80$ schief ist und wir mit kleinen Stichproben rechnen, verwenden wir den Wilcoxon-Rangsummentest. Wir nehmen an, dass sich die beiden Verteilungen nur um eine Verschiebung unterscheiden. In diesem Fall prüft der Test, ob die Mittelwerte der beiden Verteilungen gleich sind.

Wenn der Test nun einen P-Wert kleiner als $\alpha = 5\%$ liefert, können wir die Nullhypothese verwerfen und mit einer Sicherheit von 95 % behaupten, dass der mittlere $TEL80$-Wert nach der Massnahme tiefer liegt als vorher.
Wenn der P-Wert grösser ist als $\alpha = 5\%$, können wir die Nullhypothese nicht ablehnen und können keine Aussage machen.

Mit einem statistischen Test kann man immer nur Aussagen mit einer bestimmten Sicherheit machen. Es kann sein, dass man einen Fehlentscheid trifft. Dabei unterscheidet man zwei Arten von Fehlern.
Wenn man die Nullhypothese verwirft, obwohl sie wahr ist, handelt es sich um einen Fehler 1. Art (oder α-Fehler). Den α-Fehler kontrolliert man mit dem Signifikanzniveau α.
Wenn man die Nullhypothese nicht verwirft, obwohl sie falsch ist, handelt es sich um einen Fehler 2. Art (oder β-Fehler). Den β-Fehler kann man nicht kontrollieren, weil man die Verteilung unter der Alternativhypothese nicht kennt.
Die Gegenwahrscheinlichkeit des Fehlers 2. Art $(1 - \beta)$ nennt man die Power des Tests, wobei β die Wahrscheinlichkeit für einen β-Fehler bezeichnet. Abbildung 5.1 illustriert die α- und β-Fehlerwahrscheinlichkeiten.

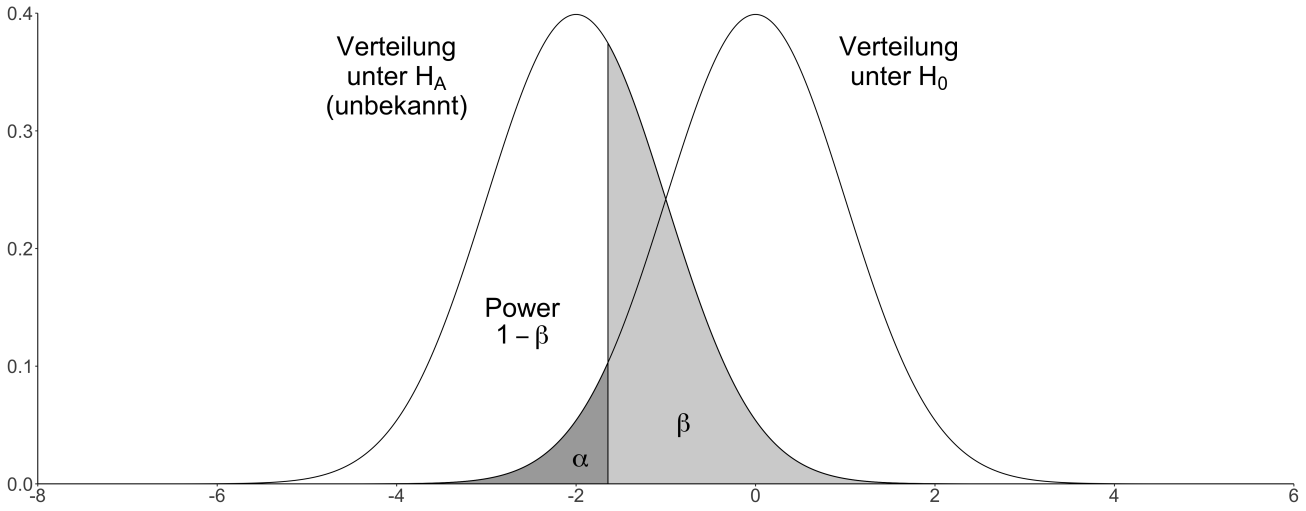


Abbildung 5.1.: α- und β-Fehlerwahrscheinlichkeiten für einen einseitigen statistischen Test.

5.1. Verlässlichkeit von Testresultaten

Angenommen wir haben vor und nach einer Massnahme Messungen durchgeführt und einen Unterschied im mittleren *TEL*80-Wert erhalten. Die Frage ob wir nun einen systematischen Unterschied gefunden haben oder es nur Zufall war, lässt sich nicht direkt beantworten. Wir können aber abschätzen, wie wahrscheinlich es wäre, ein signifikantes Testresultat zu erhalten, wenn es keinen Unterschied gäbe, die Nullhypothese also wahr wäre. Dies ist die Fehlerwahrscheinlichkeit 1. Art. Den α-Fehler kontrolliert man eigentlich mit dem Signifikanzniveau. Die Wahrscheinlichkeit liegt also bei höchstens $\alpha = 5\%$. Dies setzt aber voraus, dass die Voraussetzung für den Test erfüllt sind. Insbesondere müssen die Beobachtungen unabhängig sein. In unserem Fall gibt es eine leichte zeitliche Abhängigkeit der Beobachtungen, die wir aber ignorieren. Deshalb stellt sich die Frage, ob das Signifikanzniveau eingehalten wird, also ob die α-Fehlerwahrscheinlichkeit kleiner als 5 % ist.

Um die α-Fehlerwahrscheinlichkeit abzuschätzen, haben wir Simulationen durchgeführt. Dafür haben wir Messungen von Fernverkehrszügen aus dem Cluster 07_2023 vom 18.7.2023 bis 30.11.2023 verwendet, weil wir dort viele relativ homogene Messungen haben. In diesem Zeitraum wurde am Oberbau nichts angepasst. Für die Simulation sind wir wie folgt vorgegangen:

Wir wählen zufällig einen Zeitpunkt innerhalb des betrachteten Zeitraums. Dann nehmen wir die n Messungen vor und die n Messungen nach diesem Zeitpunkt und führen damit den Test durch. Das machen wir 3000-mal und zählen, wie oft ein signifikanter Unterschied gefunden wurde. Der relative Anteil liefert uns einen Schätzwert für die α-Fehlerwahrscheinlichkeit, also für die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese verworfen wird, obwohl sie richtig ist.

In Abbildung 5.2 sind für den Querschnitt MQ1.1 und das 3.0m-Mikrofon die geschätzten α-Fehlerwahrscheinlichkeiten für Stichprobengrössen zwischen 3 und 100 aufgezeichnet. Die Darstellungen für die anderen Querschnitte befinden sich im Anhang in den Abbildungen A.53 bis A.59.
Für kleine Stichprobengrössen bis etwa $n = 60$ wird das Signifikanzniveau eingehalten. Danach steigt die Fehlerwahrscheinlichkeit an. Bei grossen Stichproben werden also auch kleine Unterschiede als statistisch signifikant eingestuft, die nicht auf die Massnahme zurückzuführen sind. Verantwortlich für diese Unterschiede sind Umwelteinflüsse oder andere Faktoren, die wir mit den vorhandenen Daten nicht erklären können.

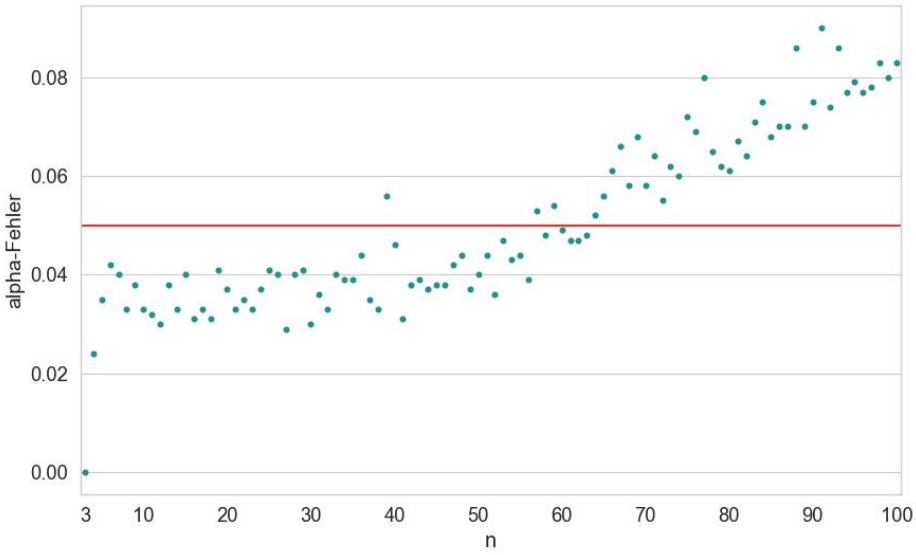


Abbildung 5.2.: α-Fehlerwahrscheinlichkeit für verschiedene Stichprobengrössen, Querschnitt MQ1.1 und 3.0m-Mikrofon.

5.2. Benötigte Stichprobengrösse

Für zukünftige Messkampagnen stellt sich die Frage, wie oft wir vor und nach der Massnahme messen müssen, um mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit einen Unterschied zu erkennen. Also welche Stichprobengrösse n benötigt wird, um eine Power $1-\beta$ von 80 % bzw. 90 % zu erreichen.
Dafür betrachten wir zwei Szenarien. Zuerst gehen wir von einer gegebenen festen Effektgrösse d von 1 dB bzw. 2 dB aus. Dann schauen wir uns den Einbau der neuen Zwischenlagen an, bei dem wir den wahren Effekt nicht kennen.

5.2.1. Gegebene Effektgrösse *d*

Wir nehmen an, dass der Effekt der Massnahme $d = 1$ dB bzw. $d = 2$ dB beträgt. Um die bentötigten Stichprobengrössen n für eine bestimmte Power $1-\beta$ zu schätzen, führen wir Simulationen durch. Das Vorgehen ist analog zum vorherigen Abschnitt. Der einzige Unterschied ist, dass wir von den Messungen nach dem gewählten Zeitpunkt den Effekt d abziehen. Wir simulieren also die Situation, dass die Alternativhypothese stimmt und die Differenz d beträgt.

Wir zählen wiederum, wie viele der 3000 Tests einen signifikanten Unterschied finden. Der relative Anteil liefert uns einen Schätzwert für die Power, also für die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese verworfen werden kann, gegeben sie ist falsch. Das ganze führen wir für verschiedene Stichprobengrössen n durch, und bestimmen so die benötigte Stichprobengrösse für eine Power von 80 % bzw. 90 %.

In Tabelle 5.1 sind die benötigten Stichprobengrössen für den Querschnitt MQ1.1 aufgeführt. Für die restlichen Querschnitte finden sich die Resultate im Anhang in Tabelle A.1.

Man kann dies auch für jeden Zugtyp einzeln durchführen. Die Resultate unterscheiden sich dann zum Teil recht stark. Sie sind in den Tabellen A.3 bis A.5 aufgeführt. Die Haupterkenntnis ist, dass ein Unterschied von 2 dB gut mit einer vernünftigen Stichprobengrösse erkannt werden kann. Ein Unterschied von 1 dB liegt an der Grenze von dem, was man erkennen kann. Es gibt Kombinationen von Querschnitten und Zugtypen, bei denen ein solcher Unterschied auch mit einer sehr grossen Stichprobe nicht mit hoher Wahrscheinlichkeit gefunden werden kann. Die Power nimmt dort ab einer bestimmten Stichprobengrösse nicht mehr zu. In der Tabelle wird die benötigte Stichprobengrösse dann mit $\gg 50$ angegeben. Dies ist beispielsweise für den MQ1.1 und den EW IV der Fall. Es kann

jedoch nicht abschliessend beurteilt werden, ob der spezifische Zugtyp der Grund dafür ist, oder ob andere, uns zur Zeit nicht bekannte Einflüsse dafür verantwortlich sind.

Tabelle 5.1.: Benötigte Stichprobengrössen für MQ1.1, um bei $d = 1$ dB bzw. $d = 2$ dB eine Power von 80% bzw. 90% zu erreichen, wenn Messungen aller Zugtypen verwendet werden.

Differenz	Mikrofon	n für $(1-\beta) = 80\%$	n für $(1-\beta) = 90\%$
1 dB	3.0 m	29	40
1 dB	7.5 m	24	35
2 dB	3.0 m	9	12
2 dB	7.5 m	7	10

5.2.2. Einbau neuer Schienenzwischenlagen

Nun betrachten wir den Einbau neuer Schienenzwischenlagen im Mai 2023. Den wahren Effekt der neuen Zwischenlagen kennen wir nicht. Im Abschnitt 4.2.1 haben wir ihn auf rund 1.3 dB geschätzt. Mit Simulationen schätzen wir nun konkret für diese Massnahme die bentötigten Stichprobengrössen n für eine bestimmte Power $1-\beta$.

Vor dem Umbau verwenden wir die 565 Messungen des Clusters T23_05 zwischen dem 6.5. und dem 17.5. und aus Symmetriegründen die ersten 565 Messungen nach dem Umbau bis am 29.5.

Das Vorgehen ist wiederum analog zum vorherigen Abschnitt. Der Zeitpunkt der Massnahme ist jedoch gegeben. Deshalb wählen wir zufällig eine Zahl m und verwenden dann die $(m+n-1)$-te bis m-te Messung vor dem Umbau und die m-te bis $(m+n-1)$-te Messung nach dem Umbau. Wir simulieren also die Situation, dass vor und nach dem Umbau n-mal gemessen wurde und gehen davon aus, dass die Alternativhypothese stimmt.

Wir zählen wiederum, wie viele der 3000 Tests einen signifikanten Unterschied finden. Der relative Anteil liefert uns einen Schätzwert für die Power, also für die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese verworfen werden kann, gegeben sie ist falsch. Das ganze führen wir für verschiedene Stichprobengrössen n durch, und bestimmen so die benötigte Stichprobengrösse für eine Power von 80 % bzw. 90 %.

Tabelle 5.2 zeigt die benötigten Stichprobengrössen für eine Power von 80% bzw. 90%, wenn man alle Fernverkehrszugtypen verwendet. Die Power $(1-\beta)$ ist für verschiedene Stichprobengrössen in Abbildung 5.3 aufgezeichnet. Wenn man sich auf einen Zugtypen beschränkt, kann man n deutlich reduzieren, wie man dies in Tabelle 5.3 für den FV-Dosto sehen kann. Es gibt aber auch Zugtypen, die eine viel grössere Stichprobe benötigen wie zum Beispiel der EWIV_IC2000 (vgl. Tabelle 5.4).
Pro Zugtyp haben wir nur relativ wenige Messungen kurz vor und nach dem Umbau. Deshalb haben wir bei den Simulationen für die einzelnen Zugtypen nicht n aufeinanderfolgende Messungen verwendet, sondern zufällig n Messungen gezogen mit Zurücklegen.

Tabelle 5.2.: Benötigte Stichprobengrössen, um für die neuen Zwischenlagen eine Power von 80% bzw. 90% zu erreichen, wenn Messungen aller Zugtypen verwendet werden.

Zugtyp: alle			
Querschnitt	Mikrofon	n für $(1-\beta) = 80\%$	n für $(1-\beta) = 90\%$
MQ1.1	3.0 m	15	20
MQ1.1	7.5 m	13	17
MQ2.1	3.0 m	9	11
MQ2.1	7.5 m	10	13

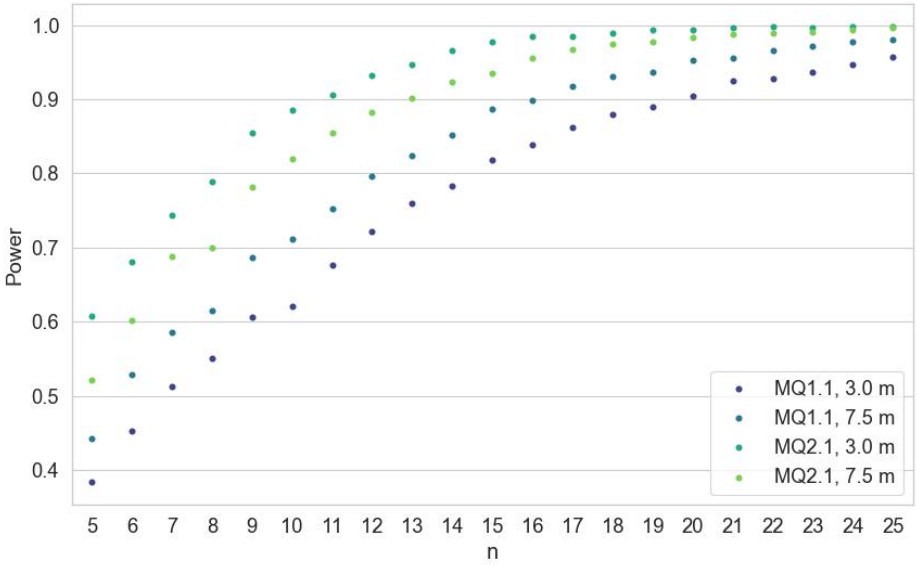


Abbildung 5.3.: Power $(1-\beta)$ für verschiedene Stichprobengrössen, wenn Messungen aller Zugtypen verwendet werden.

Tabelle 5.3.: Benötigte Stichprobengrössen, um für die neuen Zwischenlagen eine Power von 80% bzw. 90% zu erreichen, wenn nur Messungen von FV-Dosto verwendet werden.

Zugtyp: FV-Dosto			
Querschnitt	Mikrofon	n für $(1-\beta)=80\%$	n für $(1-\beta)=90\%$
MQ1.1	3.0 m	3	4
MQ1.1	7.5 m	5	6
MQ2.1	3.0 m	3	4
MQ2.1	7.5 m	7	9

Tabelle 5.4.: Benötigte Stichprobengrössen, um für die neuen Zwischenlagen eine Power von 80% bzw. 90% zu erreichen, wenn nur Messungen von EWIV_IC2000 verwendet werden.

Zugtyp: EWIV_IC2000			
Querschnitt	Mikrofon	n für $(1-\beta)=80\%$	n für $(1-\beta)=90\%$
MQ1.1	3.0 m	71	98
MQ1.1	7.5 m	27	37
MQ2.1	3.0 m	7	9
MQ2.1	7.5 m	5	7

6. Diskussion und Ausblick

6.1. Diskussion

Die Definition von $TEL80$ impliziert den linearen Zusammenhang

$$TEL = a + b \lg\left(\frac{v}{80}\right)$$

zwischen TEL und $\lg(v/80)$ mit $a = TEL80$ und $b = 30$. Die Verwendung von $TEL80$ setzt voraus, dass dieser Zusammenhang wirklich gilt. Zumindest für die Fernverkehrs- und die Güterzüge unterstützen die Modelle diese Annahme. Der geschätzte Wert für b ist in der Nähe von 30. Für eine genaue, verlässliche Schätzung von b müssten die Geschwindigkeiten jedoch gleichmässiger verteilt sein. Die meisten Fernverkehrszüge fahren mit der Sollgeschwindigkeit vorbei. Deshalb hat es viele Messungen in diesem Bereich und nur wenige bei tieferen Geschwindigkeiten. Eine genaue Schätzung für den Parameter b ist deshalb mit den vorliegenden Daten nicht möglich. Aber zumindest kann man mit den Daten den Wert $b = 30$ plausibilisieren.
Für den RBDe560 ist die Schätzung für b sehr ungenau, aber die Modelle sprechen nicht gegen die Annahme dass $b = 30$.
Der Zugtyp Flirt verhält sich bezüglich TEL-Wert ziemlich anders als die anderen Zugtypen. Für die Messquerschnitte MQ1.1, MQ1.2 und MQ1.3 besteht zwar ein linearer Zusammenhang zwischen TEL und $\lg(v/80)$, die Steigung ist aber bei rund 20 anstatt 30 wie bei den anderen Zugtypen. Für die restlichen Querschnitte ist der Zusammenhang zwischen TEL und $\lg(v/80)$ nicht linear. Für grosse Geschwindigkeiten ab ca. 95 km/h nimmt der TEL-Wert nicht mehr zu. Die Regressionskurve des additiven Modells flacht ab und sinkt dann sogar leicht. Weil der lineare Zusammenhang zwischen TEL und $\lg(v/80)$ für die vorliegenden Messungen des Flirts nicht gegeben ist, sollte der $TEL80$-Wert für den Flirt nicht verwendet werden. Für den Flirt sollten also nur Messung mit ähnlicher Geschwindigkeit miteinander verglichen werden. Dies gilt zumindest für die Daten des Fahrbahnlabors. Ob dies auch für andere Messstandorte gilt, müsste man mit Messdaten dieser Standorte überprüfen.

Die Modelle, welche die Umwelteinflüsse berücksichtigen, liefern keine klaren Hinweise, dass eine der betrachteten Wettervariablen einen grossen Einfluss auf den TEL-Wert hätte. Die Effekte der erklärenden Wettervariablen auf den TEL-Wert sind sehr klein und die zusätzlichen Variablen verbessern das Modell nicht wesentlich. Zudem sind die Variablen teilweise hochkorrelliert mit sich aufhebenden Effekten. Dies deutet auf eine Überanpassung an die Daten hin.
Eventuell gibt es nichtlineare Zusammenhänge zwischen den Umwelteinflüssen und dem TEL-Wert und eine Berechnung neuer Erklärender (feature engineering) würde das Modell verbessern.

Aus diversen Gründen mussten sehr viele Messungen ausgeschlossen werden. Es hat zwar noch immer sehr viele Messungen, so dass die Modelle gut geschätzt werden können. Aber speziell im Winter fehlen sehr viele Messungen. Dies führt dazu, dass der Effekt des kalten Wetters nicht gut geschätzt werden kann. Verglichen mit den anderen zeitlichen Clustern sind die TEL-Werte im Winter deutlich grösser. Zum Teil sind die Unterschiede grösser als 2 dB. Die Modelle können diese Unterschiede aber nicht auf Umwelteinflüsse wie die Temperatur zurückführen. Es wird interessant sein, die Daten des Winters 2023/2024 auszuwerten, die hoffentlich vollständiger sein und eine Aussage zum kalten Wetter zulassen werden.
Die TEL-Werte weisen viele Ausreisser gegen oben auf. Mit den verfügbaren erklärenden Variablen konnte der Grund dafür nicht eruiert werden. Wahrscheinlich gibt es auch nicht nur einen, sondern viele verschiedene Gründe.

Die Betrachtung der gleitenden Mittelwerte von TEL zeigt grosse Schwankungen, die mit den vorhandenen Daten grösstenteils nicht erklärt werden können. Die meiste Zeit bewegen sich die Kurven für die verschiedenen Messquerschnitte ungefähr parallel. Zum Teil hat es aber auch Ausschläge, die nur

einzelne Querschnitte betreffen. Insgesamt ist die Streung und insbesondere die von den Modellen nicht erklärte Streuung recht gross. Das erschwert das Erkennen der Effekte von Massnahmen wie dem Einbau neuer Zwischenlagen.

Die geschätzten mittleren *TEL*-Werte für die Fernverkehrszüge unterscheiden sich zwischen den Querschnitten um maximal rund 2 dB. Beispielsweise liegen sie für den RABe501 bei 80 km/h zwischen 76.01 dB bei MQ1.1 und 78.21 dB bei MQ2.2. Auch die Querschnitte mit dem gleichen Oberbau unterscheiden sich. Für den RABe501 ist der Wert beim MQ1.1 mehr als 1 dB tiefer als beim Querschnitt MQ1.3. Bei den Querschnitten ohne Besohlung sind die Unterschiede kleiner.
Die nicht erklärten Unterschiede zwischen den Querschnitten erschweren das Erkennen von Effekten der Massnahmen in der Grössenordnung von 1 dB.

Für Fernverkehrszüge verringern die neuen Zwischenlagen den geschätzten mittleren *TEL*-Wert um 1.25 dB (A) für die besohlten Schwellen und um 1.34 dB (A) für die unbesohlten Schwellen. Gleichzeitig ist aber der geschätzte mittlere *TEL*-Wert für den Querschnitt MQ2.2 nach dem Zeitpunkt des Umbaus 0.88 dB (A) höher als vorher. Dies obwohl es dort keine Veränderungen am Oberbau gibt. Das relativiert die Effekte für die neuen Zwischenlagen ein wenig. Es ist nicht klar, welchen Anteil des Effekts wirklich auf den neuen Oberbau zurückzuführen ist.

Für zukünftige Messkampagnen stellt sich die Frage, wie gross die Stichprobe sein sollte. Die Simulationen haben gezeigt, dass der Wilcoxon-Rangsummentest für kleine Stichprobengrössen bis etwa 60 Messung vor und nach der Massnahme das Signifikanzniveau einhält. Bei grösseren Stichproben ist die Wahrscheinlichkeit für einen α-Fehler grösser. Es werden also auch kleine Unterschiede als statistisch signifikant eingestuft, die nicht auf die Massnahme zurückzuführen sind. Verantwortlich für diese Unterschiede sind Umwelteinflüsse oder andere Faktoren, die wir mit den vorhandenen Daten nicht erklären können.
Weiter zeigen die Simulationen, dass wir bei einem Effekt von 1 dB und einer Stichprobengrösse von $n = 50$ eine Power von über 90 % erreichen. Das heisst, die Wahrscheinlichkeit einen Effekt von 1 dB zu entdecken liegt über 90 %.
Zusammengenommen führt dies zur Empfehlung, je rund 50 bis 60 Messungen vor und nach der Massnahme durchzuführen. Dies ist jedoch als Grössenordnung zu verstehen und nicht als genaue Angabe. Die Simulationen basieren auf den Daten aus dem Herbst 2023. Es kann nicht garantiert werden, dass sich die daraus gewonnen Erkenntnisse genau so auf Messungen an anderen Orten oder in anderen Zeiträumen übertragen lassen. Die Empfehlung basiert auch auf der Annahme, dass vor und nach der Massnahme am selben Ort gemessen wird. Für einen Vergleich von zwei Messorten können wir ohne weitere Annahmen keine Aussage machen.
Auf den Darstellungen der gleitenden Mittelwerte für *TEL* sieht man, dass sich zeitlich weit auseinander liegende Messungen zum Teil sehr stark unterscheiden. Deshalb sollten die Messungen vor und nach einer Massnahme möglichst zeitnah durchgeführt werden.

6.2. Ausblick

Im Frühlingssemester 2024 wird an der Berner Fachhochschule im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen eine Bachelorarbeit zum Thema Fahrbahnlabor geschrieben. Dabei werden unter anderem die folgenden Punkte betrachtet.

Mit einem Feature Engineering für die Wetterdaten sollen die Modelle verbessert und nichtlineare Zusammenhänge gefunden werden. Insbesondere soll untersucht werden, welchen Einfluss der Luftdruck auf die Lärmmessungen hat.

Die Messungen des Winters 2023/2024 können ausgewertet und damit hoffentlich eine Aussage zum Einfluss des kalten Wetters gemacht werden.

Die Simulationen zur Schätzung der benötigten Stichprobengrössen könnten verfeinert werden. Zum Beispiel könnten mit Konfidenzintervallen Aussagen darüber gemacht werden, welche Differenz mit einer gegebenen Sicherheit und Effektgrösse nachgewiesen werden könnte.

A. Anhang

A.1. Verteilung von *TEL* und *TEL80*

Verteilung von *TEL*



Abbildung A.1.: Verteilung der TEL-Werte über die Zeit für MQ1.2



Abbildung A.2.: Verteilung der TEL-Werte über die Zeit für MQ1.3



Abbildung A.3.: Verteilung der TEL-Werte über die Zeit für MQ2.1



Abbildung A.4.: Verteilung der TEL-Werte über die Zeit für MQ2.2



Abbildung A.5.: Verteilung der TEL-Werte über die Zeit für MQ2.3



Abbildung A.6.: Verteilung der TEL-Werte über die Zeit für REF

Verteilung von TEL80



Abbildung A.7.: Verteilung der TEL80-Werte über die Zeit für MQ1.2



Abbildung A.8.: Verteilung der TEL80-Werte über die Zeit für MQ1.3

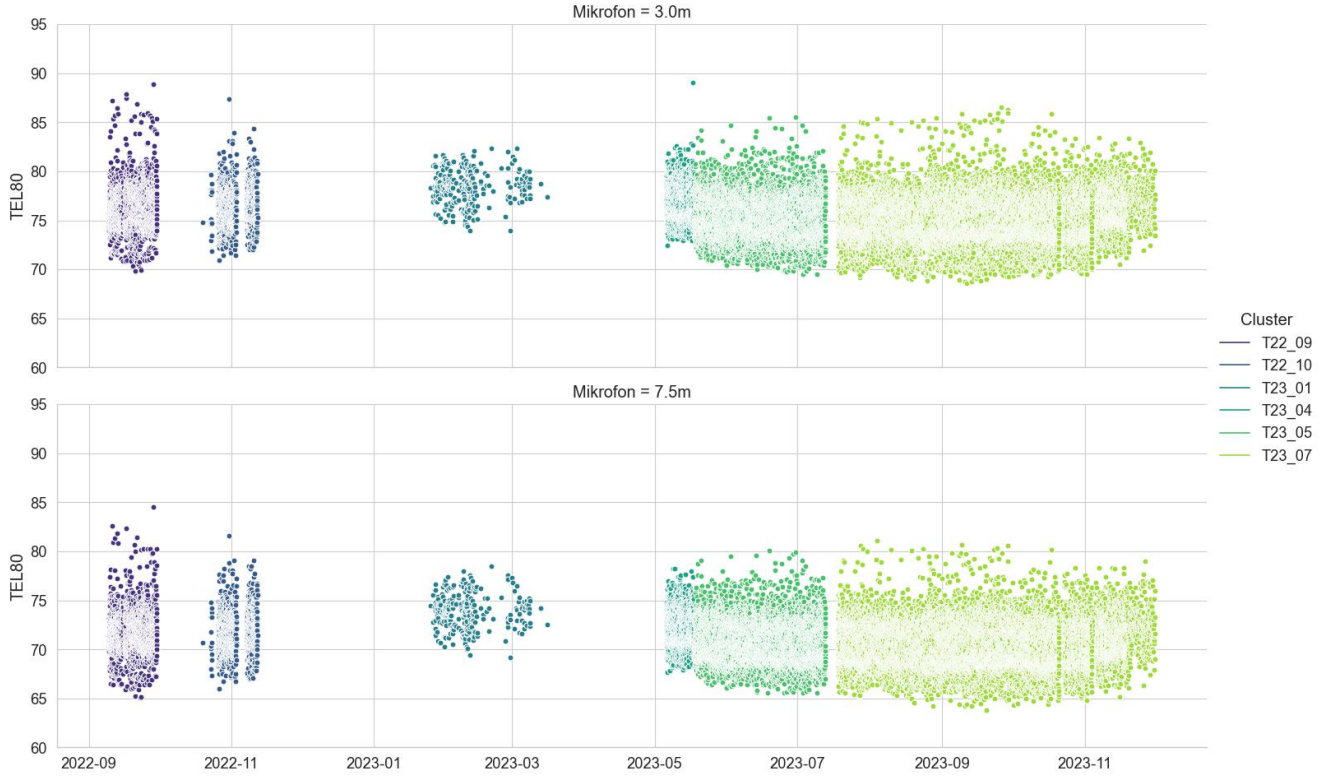


Abbildung A.9.: Verteilung der TEL80-Werte über die Zeit für MQ2.1



Abbildung A.10.: Verteilung der TEL80-Werte über die Zeit für MQ2.2

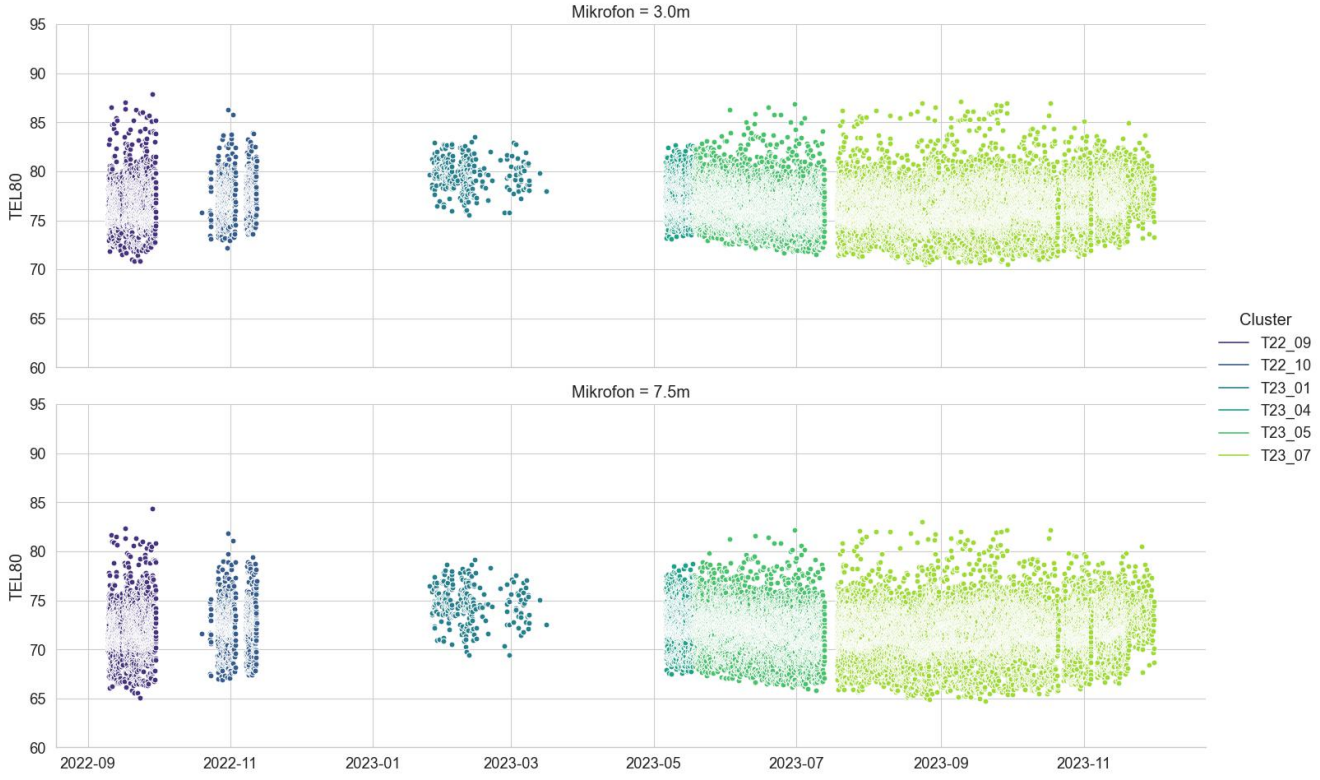


Abbildung A.11.: Verteilung der TEL80-Werte über die Zeit für MQ2.3



Abbildung A.12.: Verteilung der TEL80-Werte über die Zeit für REF

Betrachtung mit unvollständigen Messungen: Verteilung von TEL

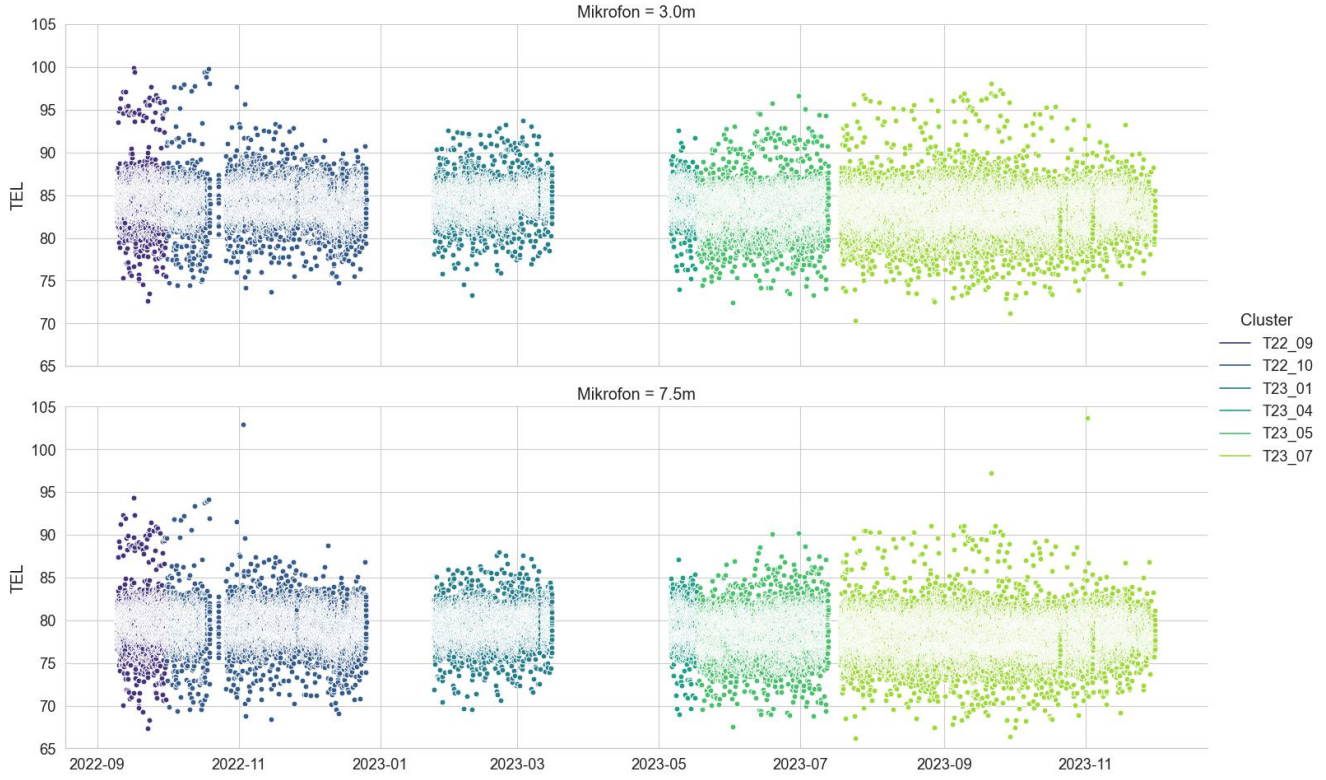


Abbildung A.13.: Verteilung der *TEL*-Werte über die Zeit für MQ1.1 inkl. unvollständige Messungen.

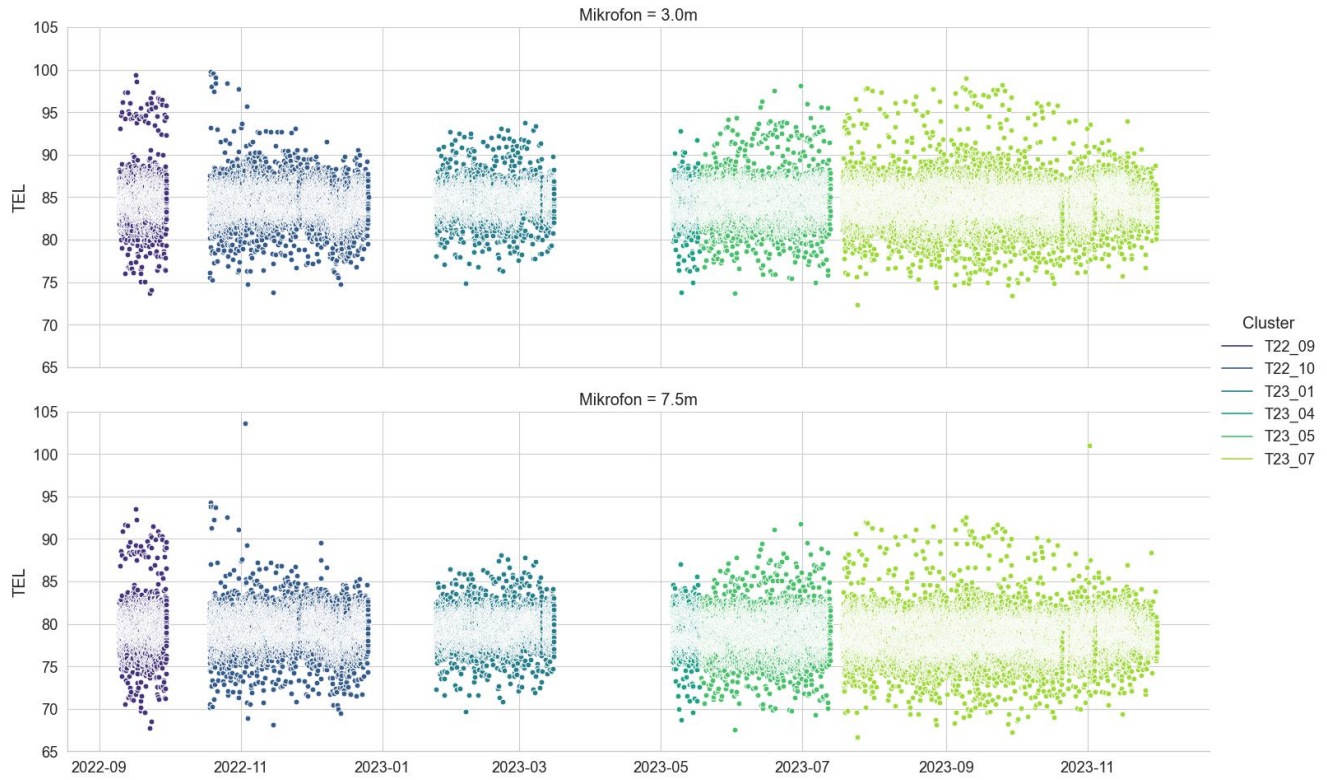


Abbildung A.14.: Verteilung der TEL-Werte über die Zeit für MQ1.2 inkl. unvollständige Messungen.



Abbildung A.15.: Verteilung der TEL-Werte über die Zeit für MQ1.3 inkl. unvollständige Messungen.

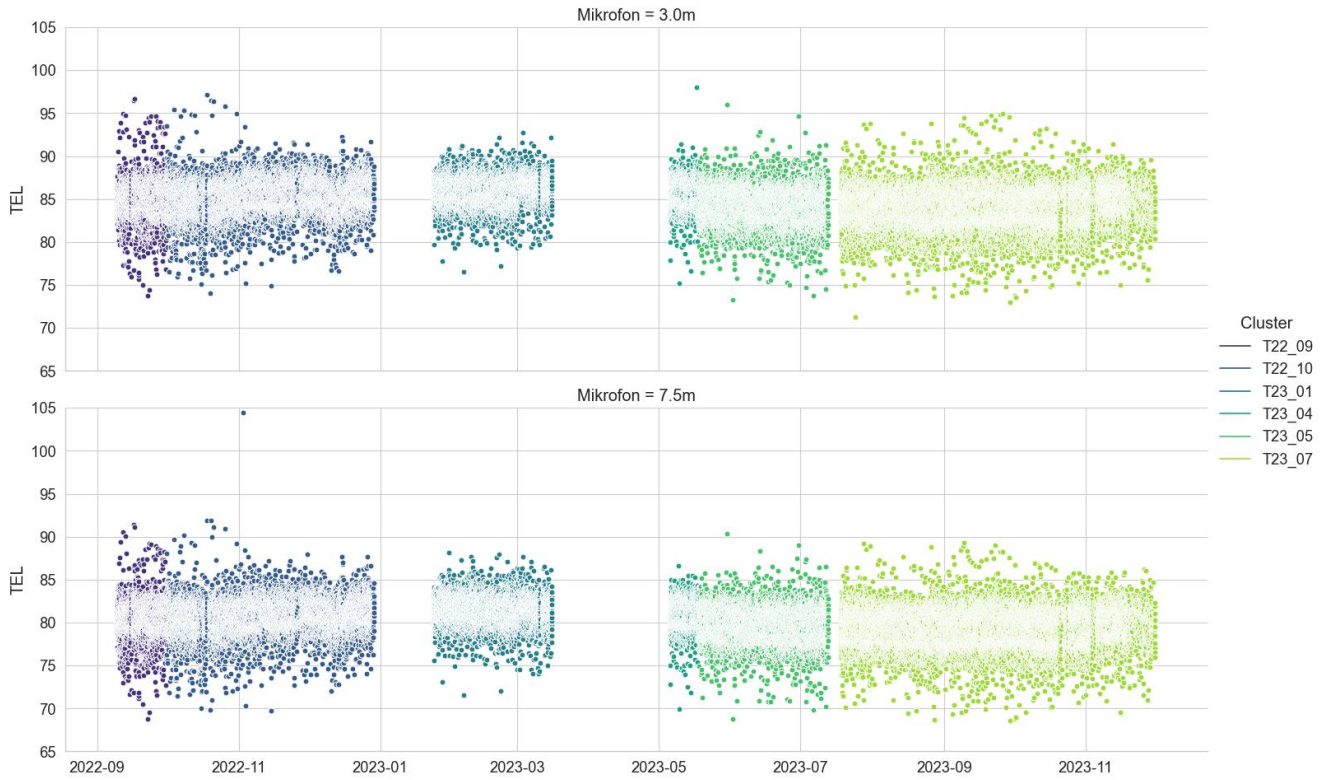


Abbildung A.16.: Verteilung der TEL-Werte über die Zeit für MQ2.1 inkl. unvollständige Messungen.



Abbildung A.17.: Verteilung der TEL-Werte über die Zeit für MQ2.2 inkl. unvollständige Messungen.



Abbildung A.18.: Verteilung der TEL-Werte über die Zeit für MQ2.3 inkl. unvollständige Messungen.



Abbildung A.19.: Verteilung der TEL-Werte über die Zeit für REF

Gleitender Mittelwert von TEL

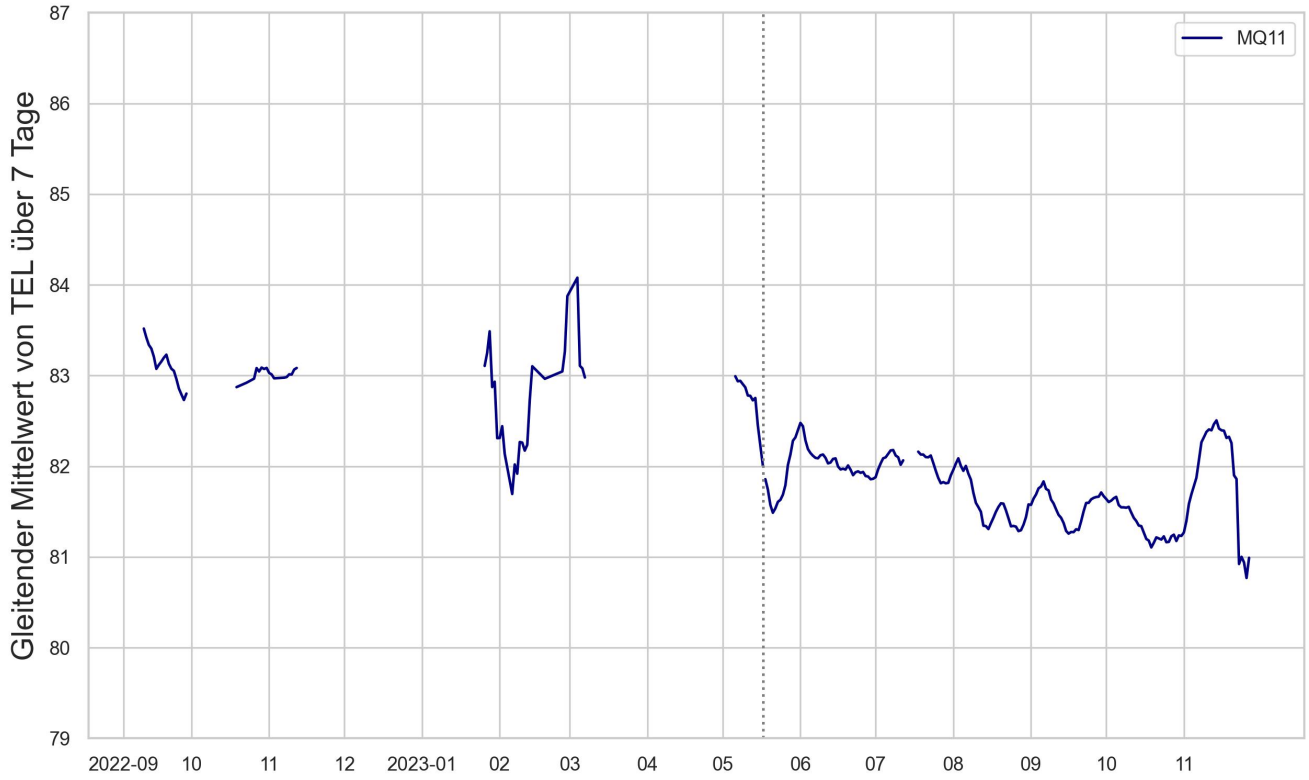


Abbildung A.20.: Gleitender Mittelwert von *TEL* über 7 Tage für MQ1.1 und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

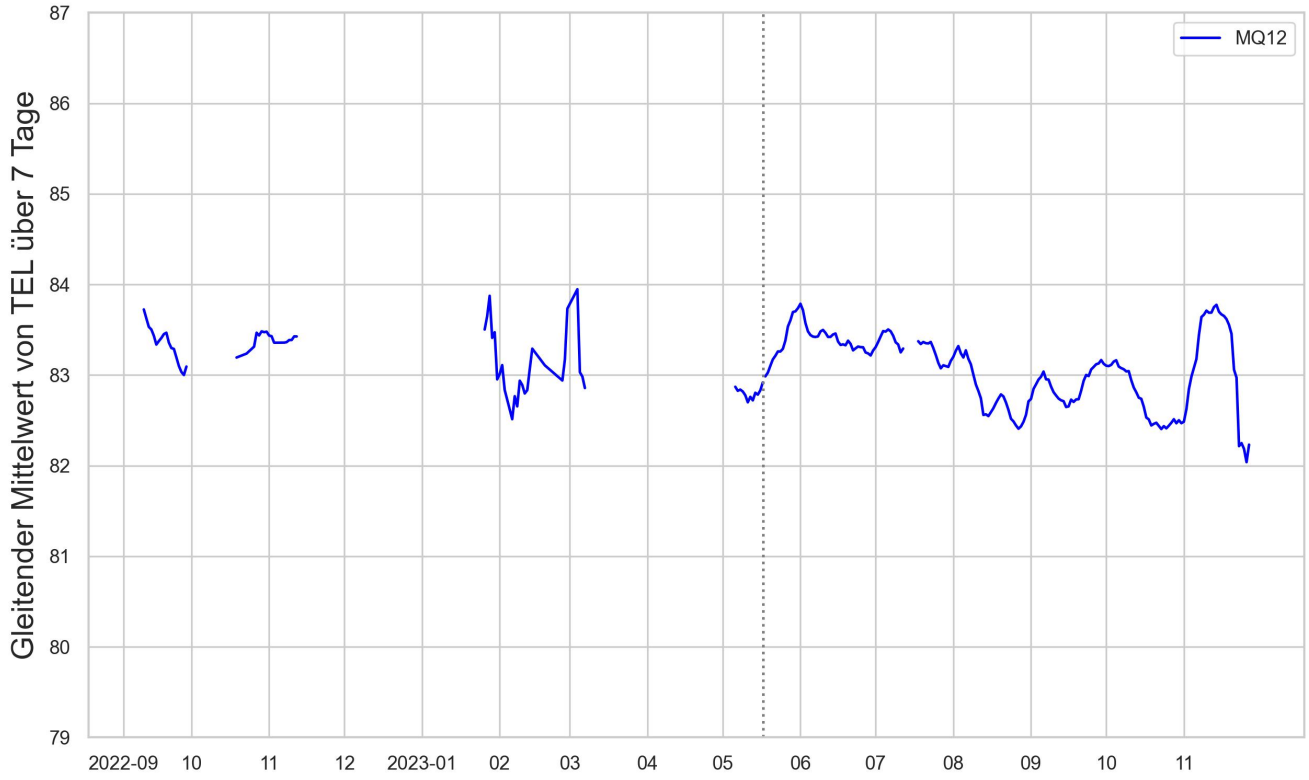


Abbildung A.21.: Gleitender Mittelwert von *TEL* über 7 Tage für MQ1.2 und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

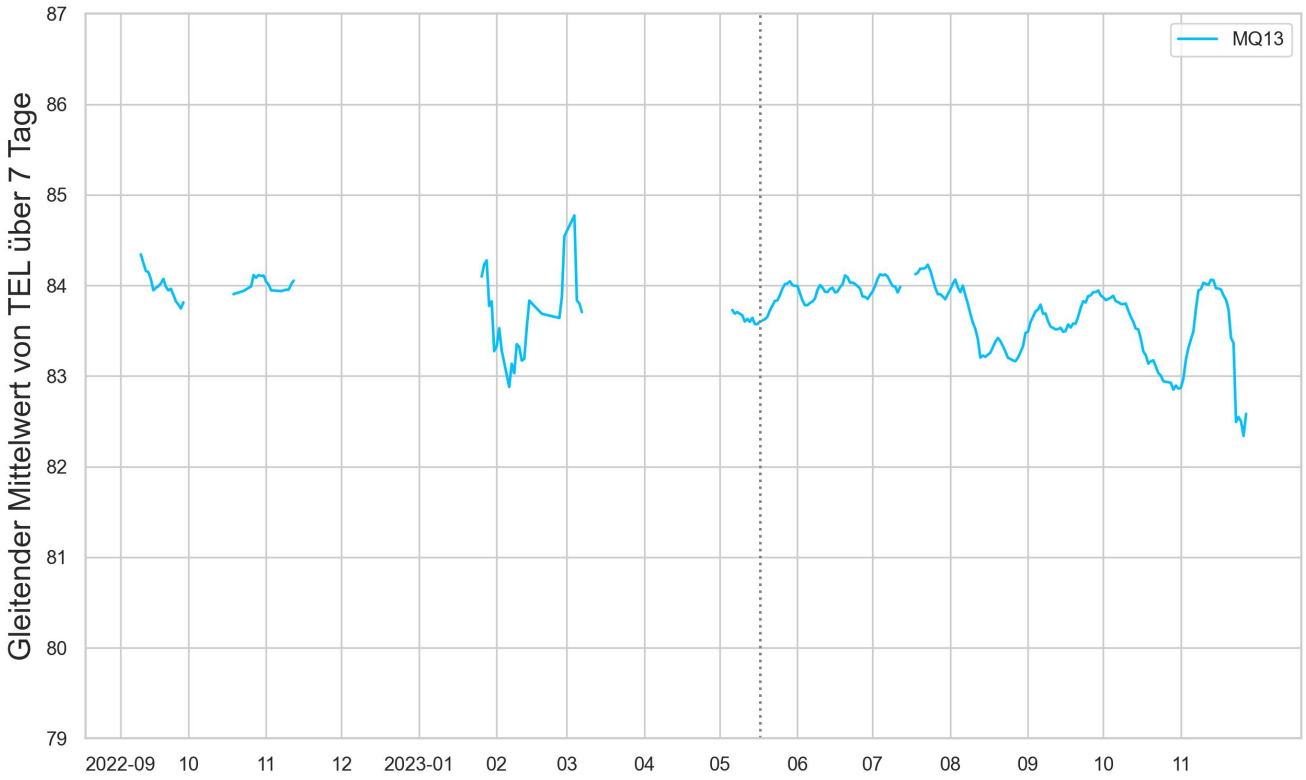


Abbildung A.22.: Gleitender Mittelwert von *TEL* über 7 Tage für MQ1.3 und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

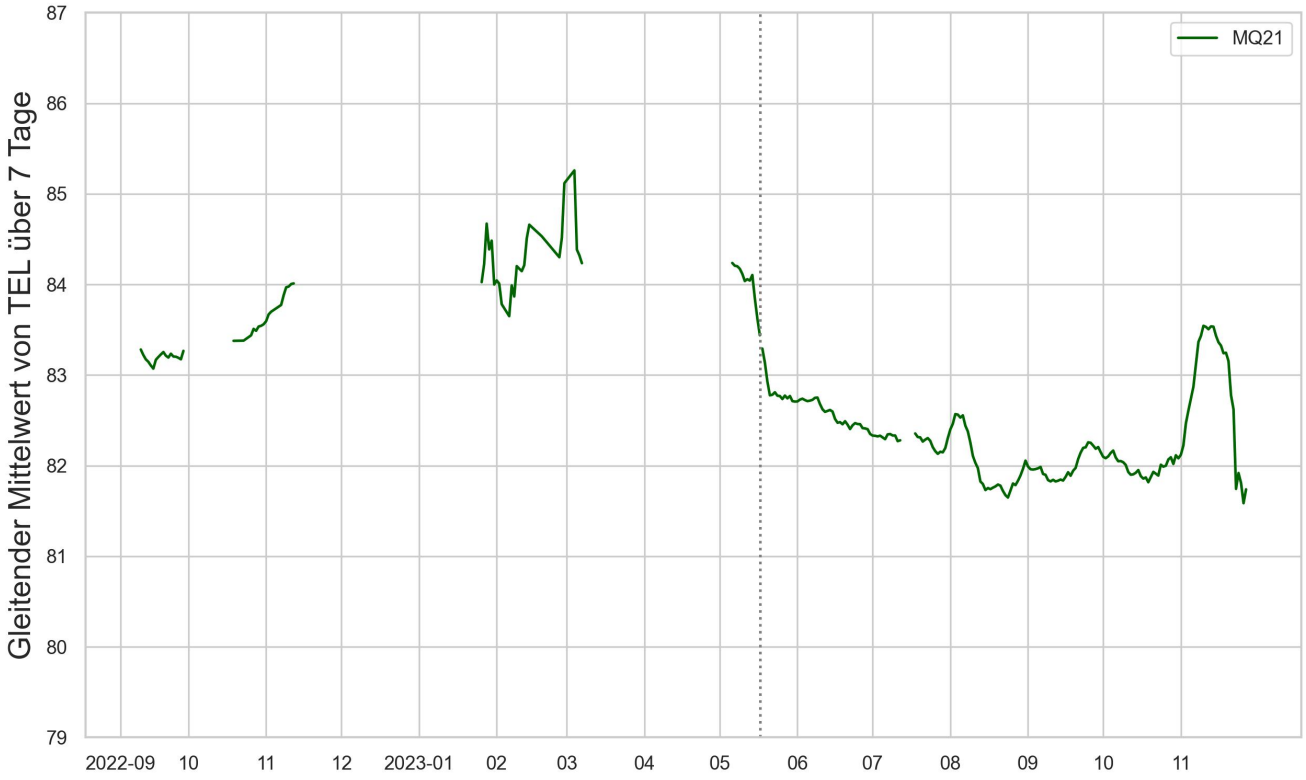


Abbildung A.23.: Gleitender Mittelwert von *TEL* über 7 Tage für MQ2.1 und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

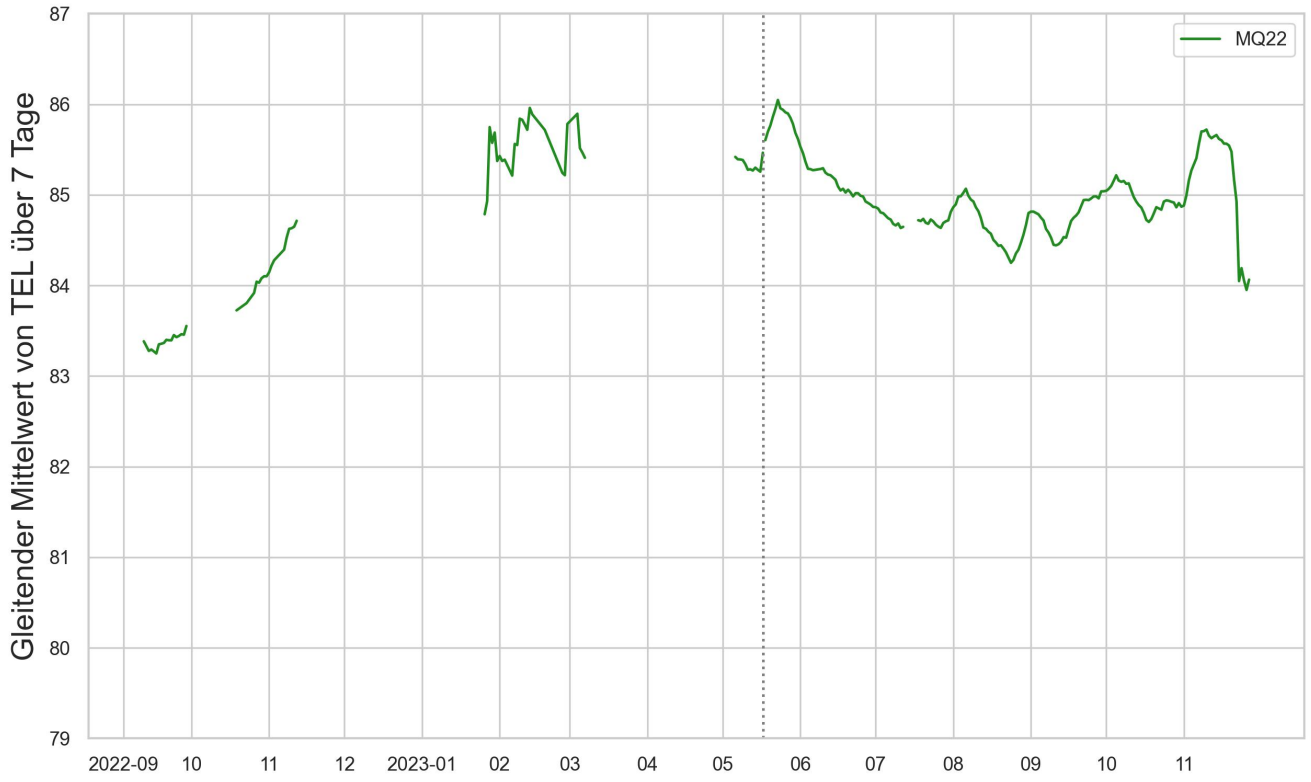


Abbildung A.24.: Gleitender Mittelwert von *TEL* über 7 Tage für MQ2.2 und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

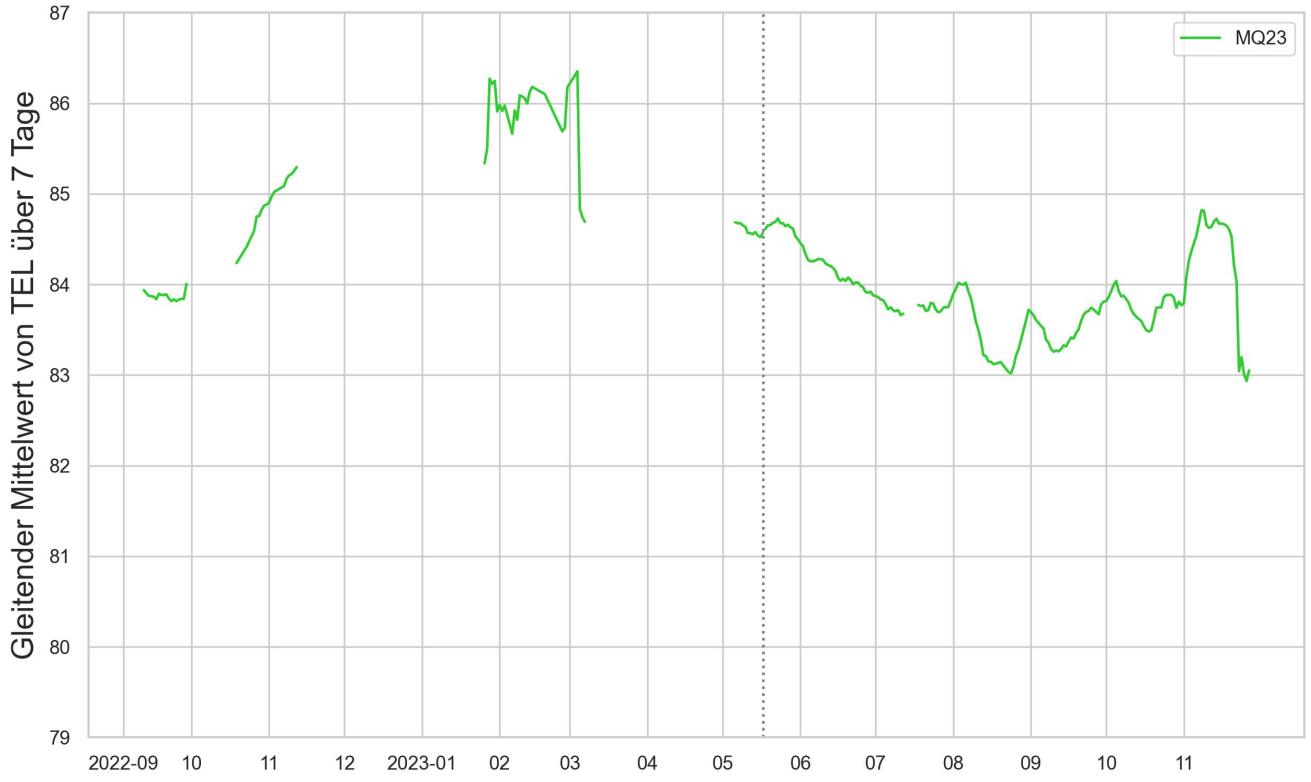


Abbildung A.25.: Gleitender Mittelwert von *TEL* über 7 Tage für MQ2.3 und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

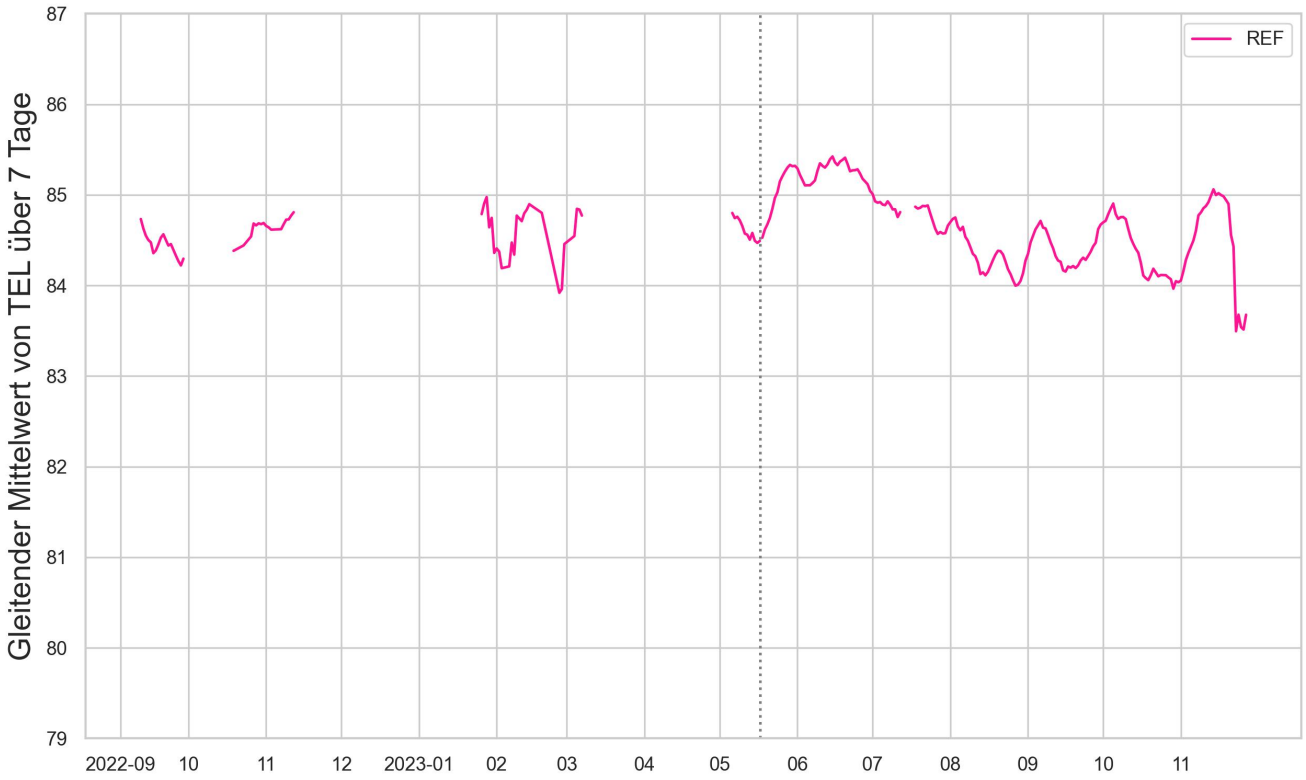


Abbildung A.26.: Gleitender Mittelwert von *TEL* über 7 Tage für REF und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

Gleitender Mittelwert von TEL80

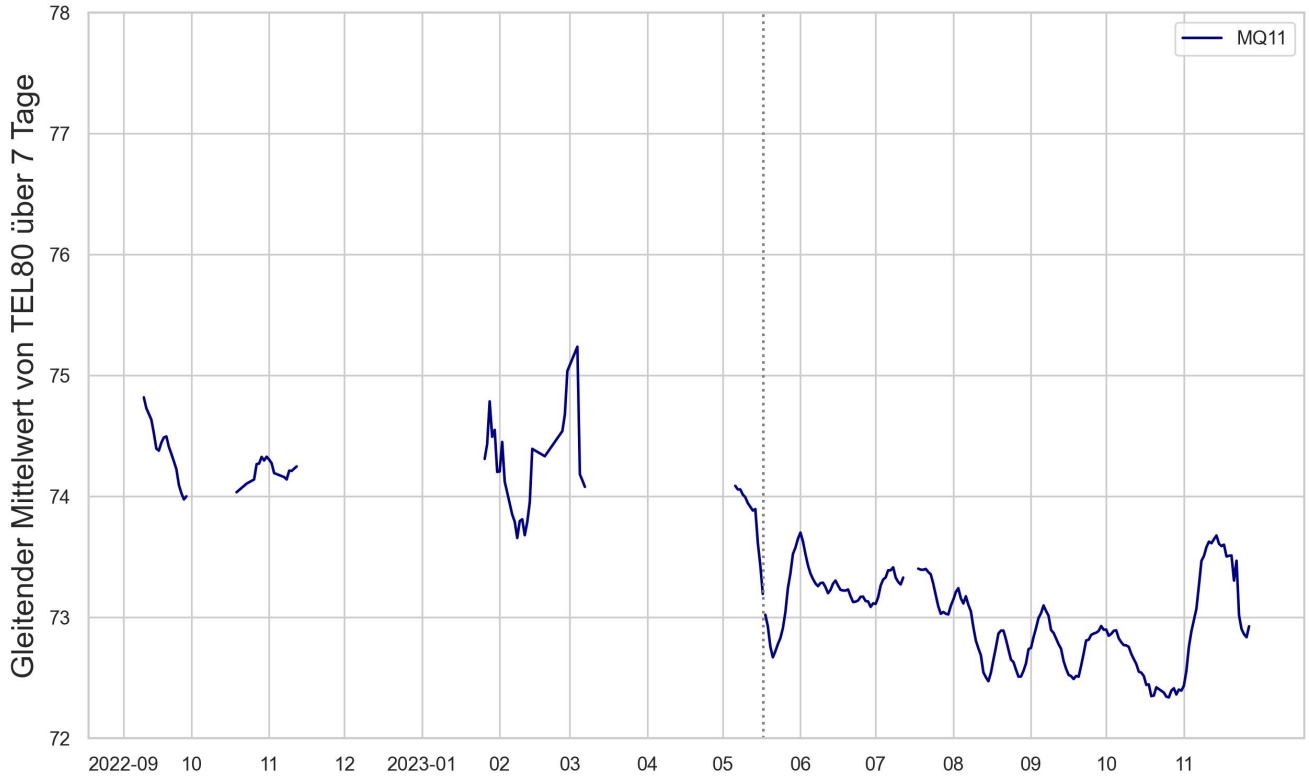


Abbildung A.27.: Gleitender Mittelwert von *TEL*80 über 7 Tage für MQ1.1 und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

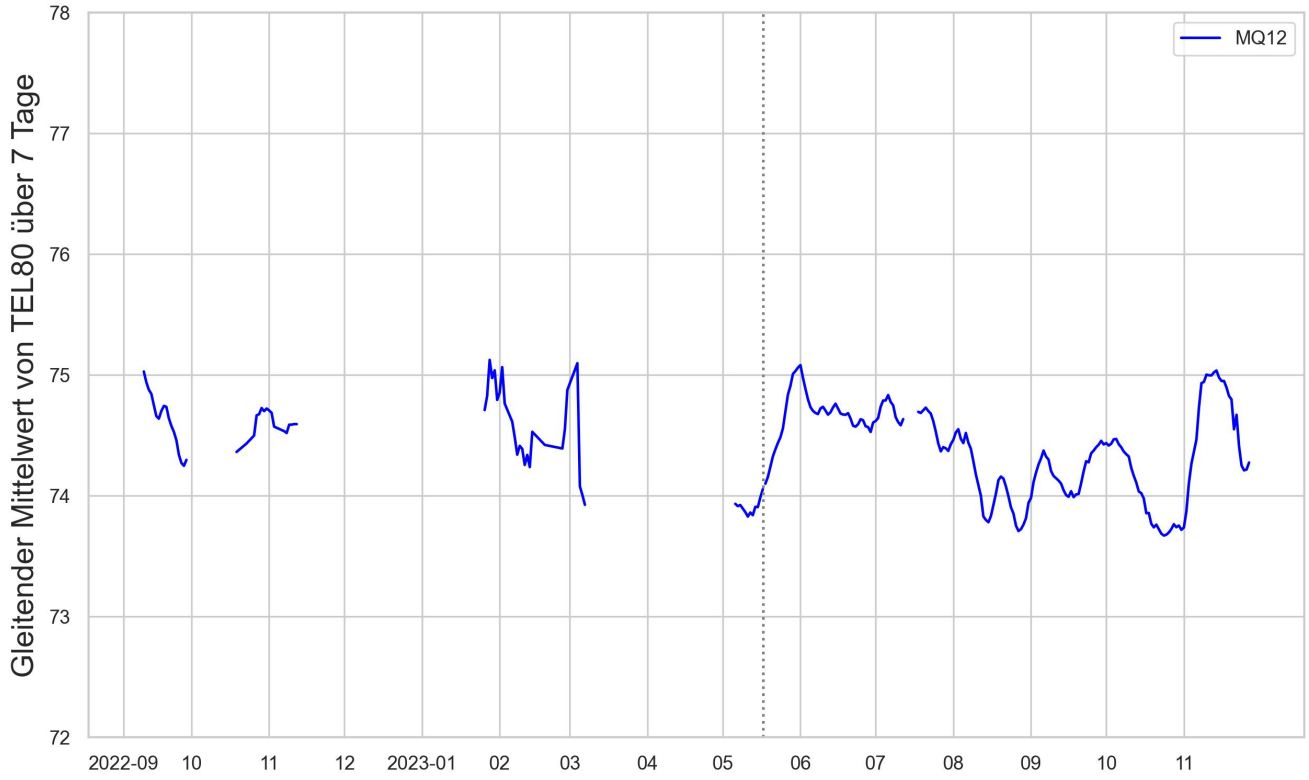


Abbildung A.28.: Gleitender Mittelwert von *TEL*80 über 7 Tage für MQ1.2 und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

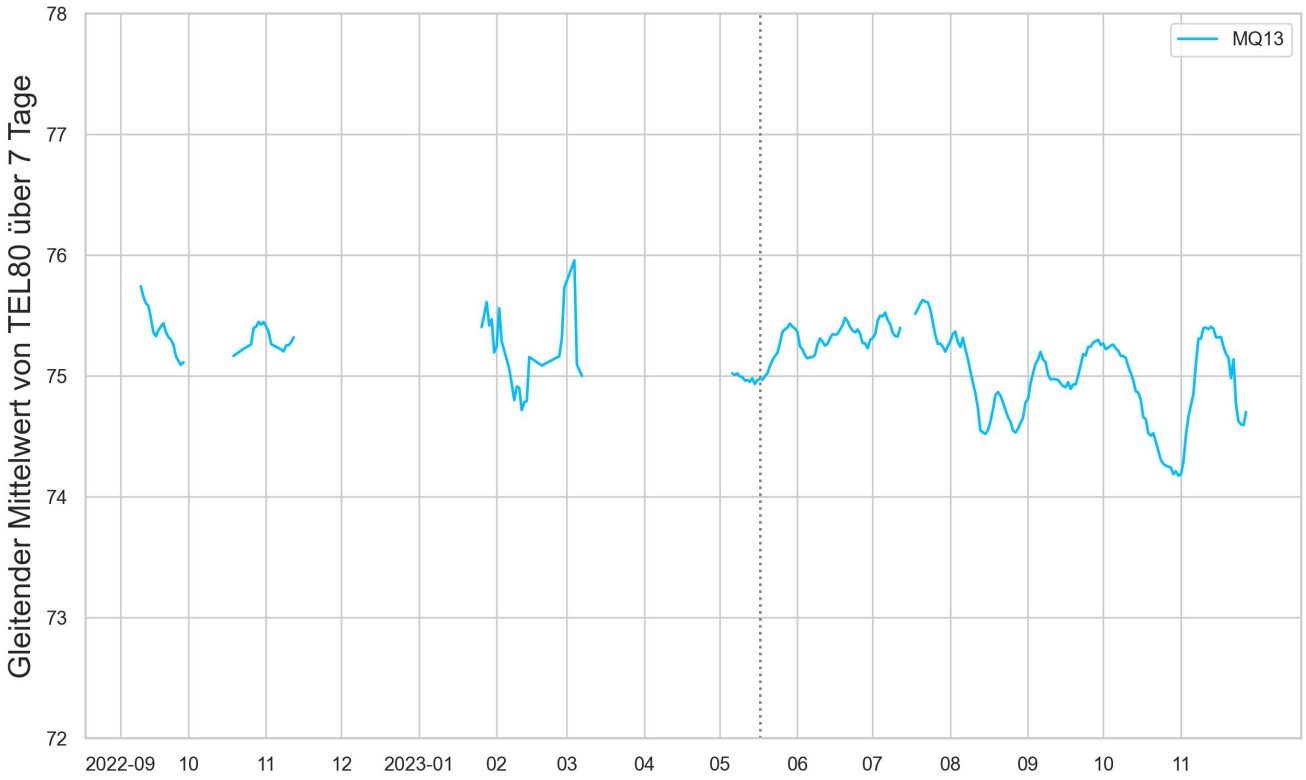


Abbildung A.29.: Gleitender Mittelwert von *TEL*80 über 7 Tage für MQ1.3 und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

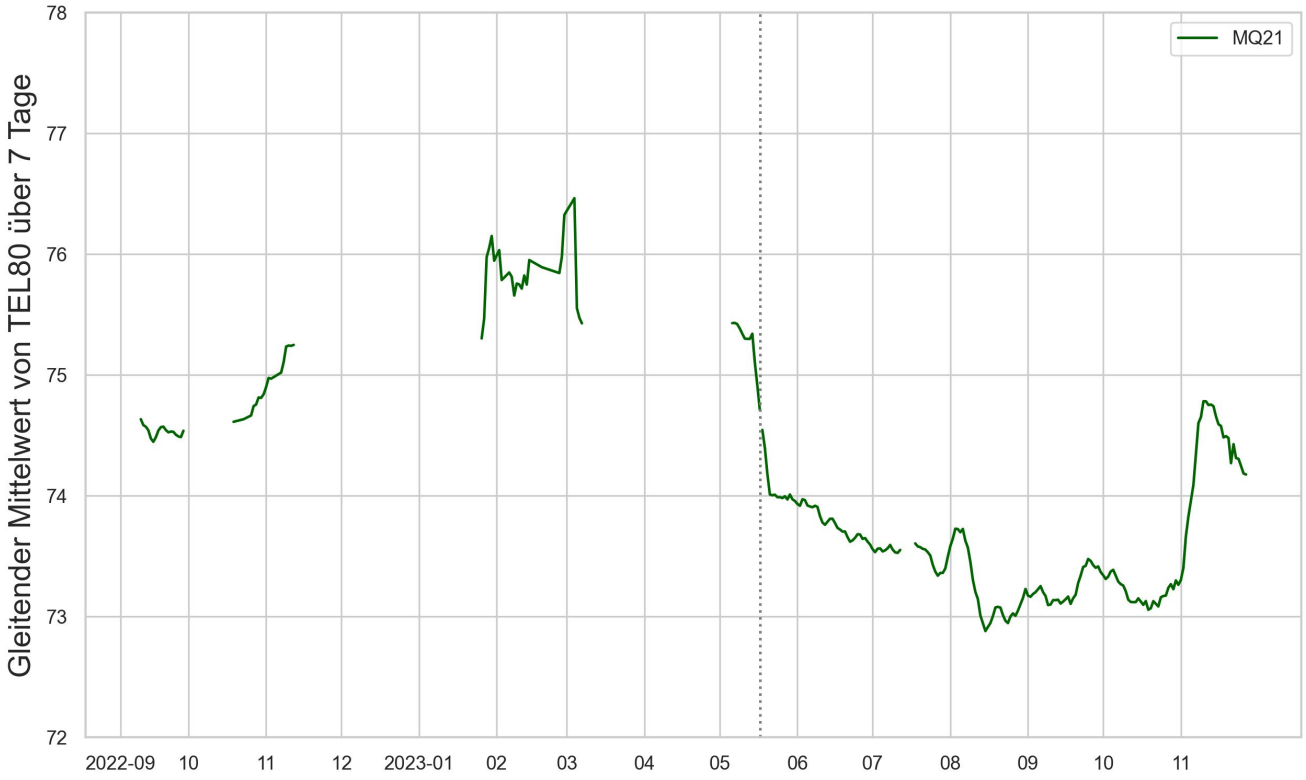


Abbildung A.30.: Gleitender Mittelwert von *TEL*80 über 7 Tage für MQ2.1 und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

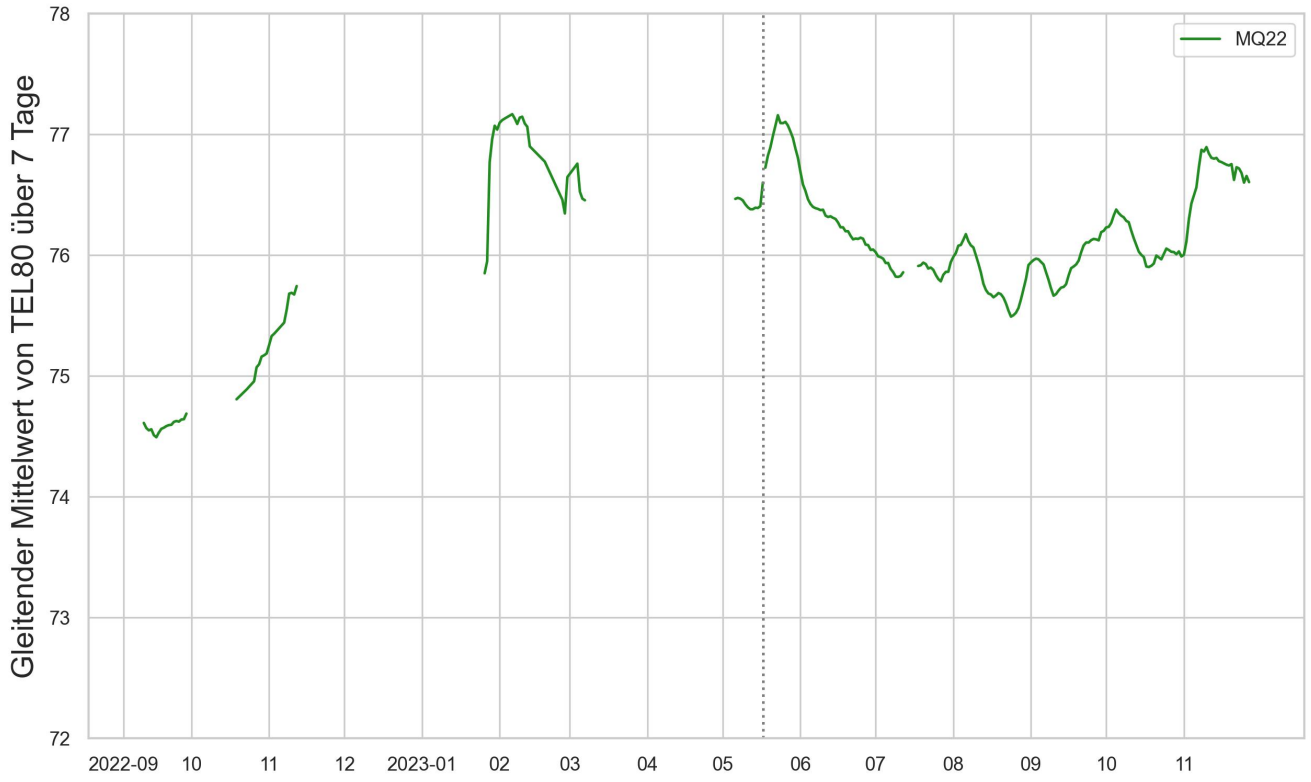


Abbildung A.31.: Gleitender Mittelwert von *TEL*80 über 7 Tage für MQ2.2 und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

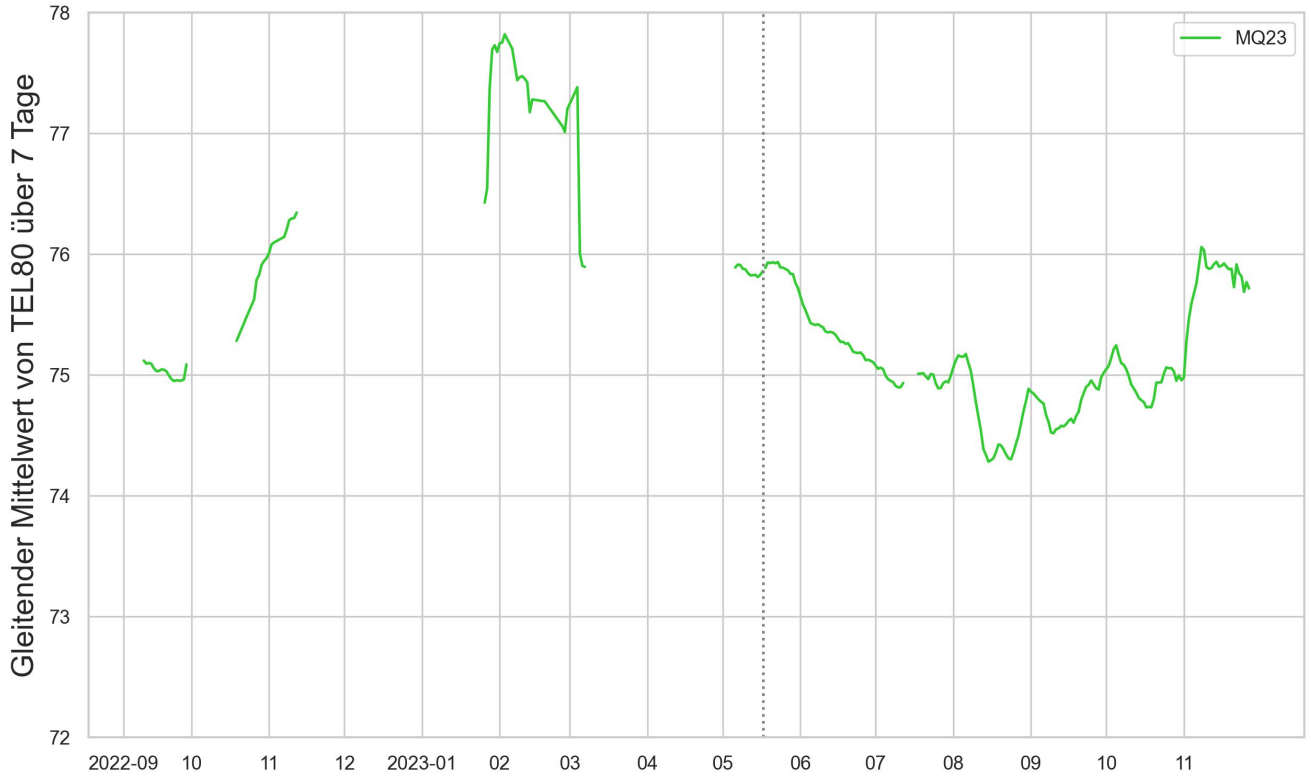


Abbildung A.32.: Gleitender Mittelwert von *TEL*80 über 7 Tage für MQ2.3 und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

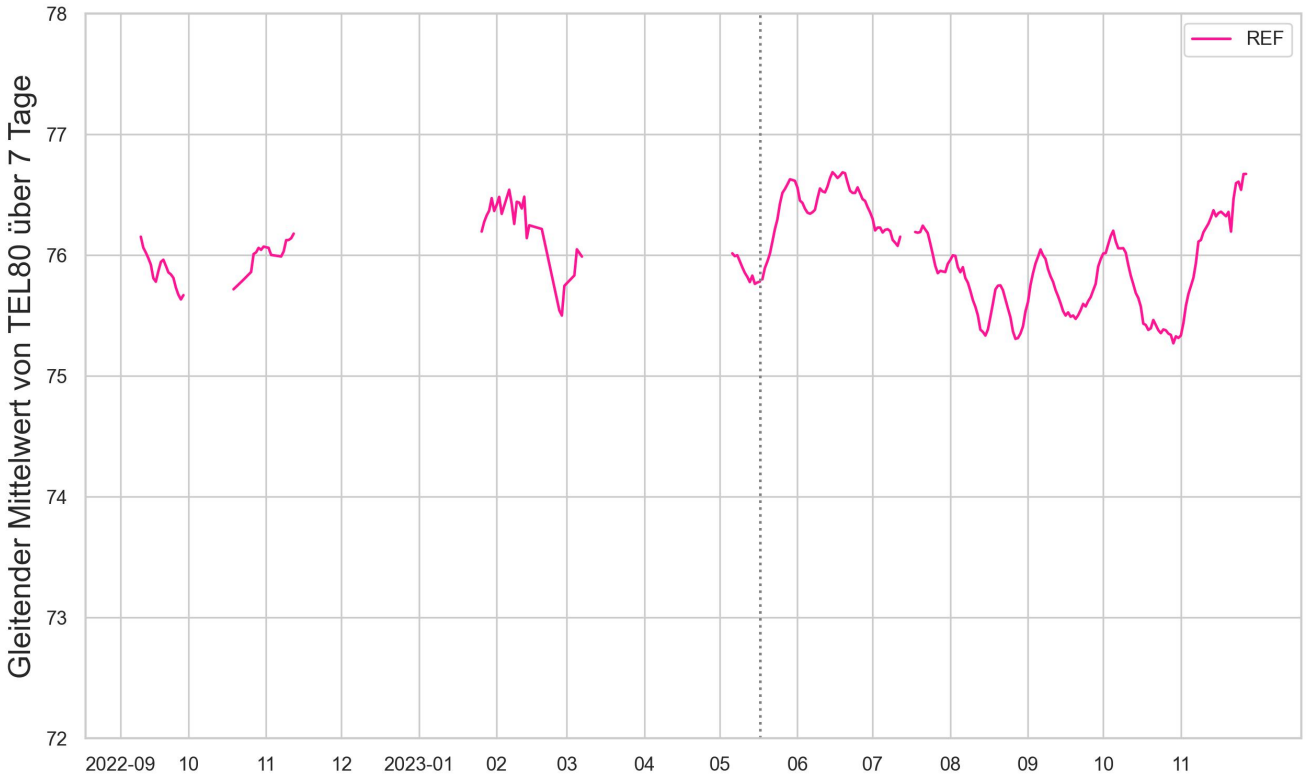


Abbildung A.33.: Gleitender Mittelwert von *TEL*80 über 7 Tage für REF und das 3.0m-Mikrofon. Die vertikale gepunktete Linie markiert den Einbau der neuen Zwischenlagen.

Verteilung von *TEL* pro Zugtyp



Abbildung A.34.: Verteilung der *TEL*-Werte über die Zeit für MQ1.1 und die Zugtypen EWIV, EWIV_IC2000 und IC2000.



Abbildung A.35.: Verteilung der *TEL*-Werte über die Zeit für MQ1.1 und die Zugtypen RBDe560, Flirt, Traverso.



Abbildung A.36.: Verteilung der *TEL*-Werte über die Zeit für MQ1.1 und die Zugtypen ETR610, RABe501, FV-Dosto.

Güterzüge: Verteilung von TEL



Abbildung A.37.: Verteilung der *TEL*-Werte über die Zeit für Güterzüge und MQ1.2.



Abbildung A.38.: Verteilung der *TEL*-Werte über die Zeit für Güterzüge und MQ1.3.

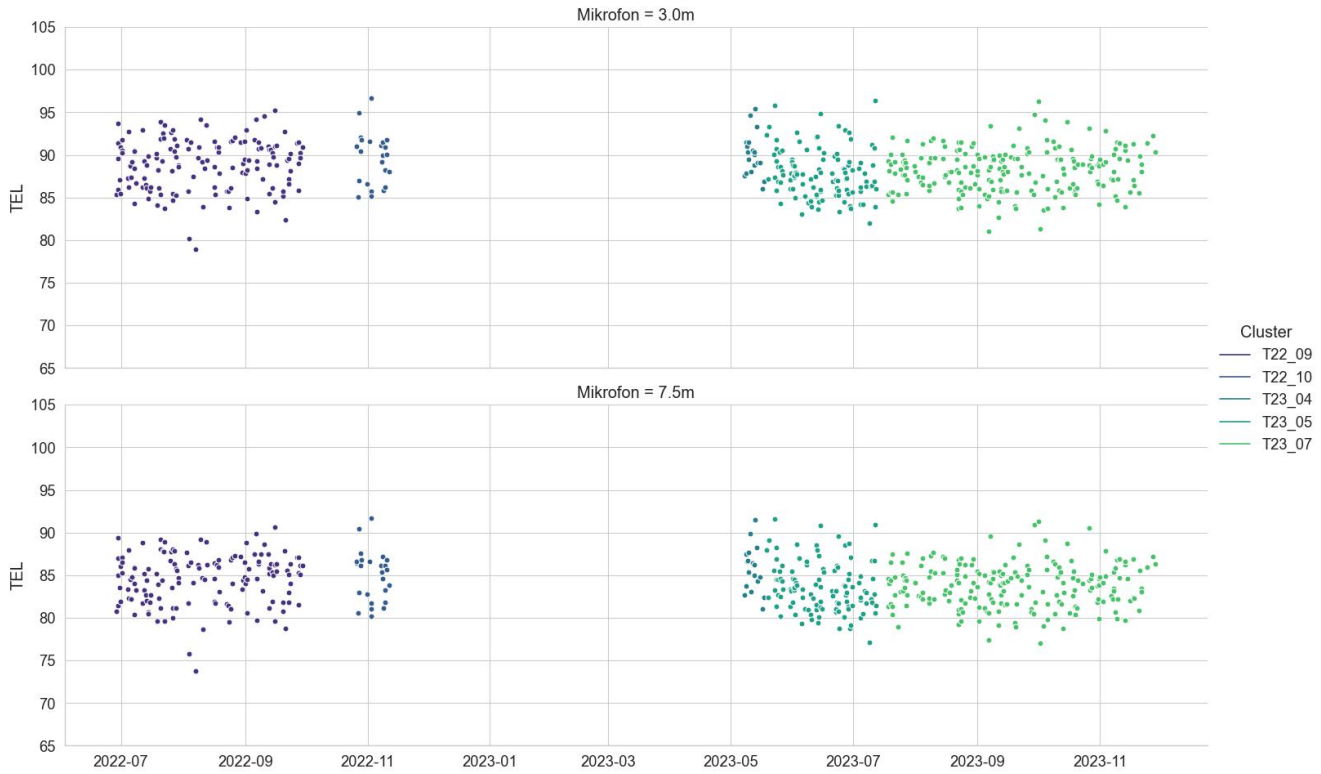


Abbildung A.39.: Verteilung der *TEL*-Werte über die Zeit für Güterzüge und MQ2.1.

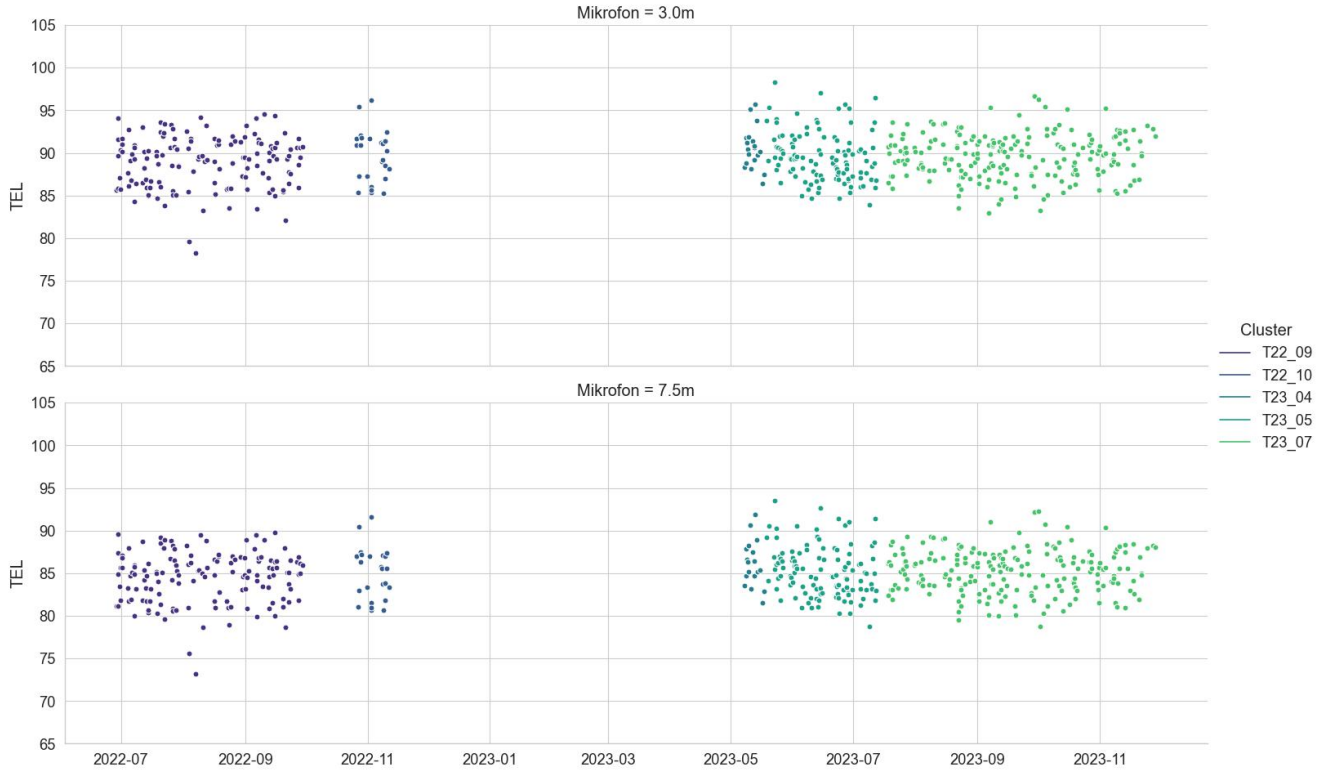


Abbildung A.40.: Verteilung der *TEL*-Werte über die Zeit für Güterzüge und MQ2.2.

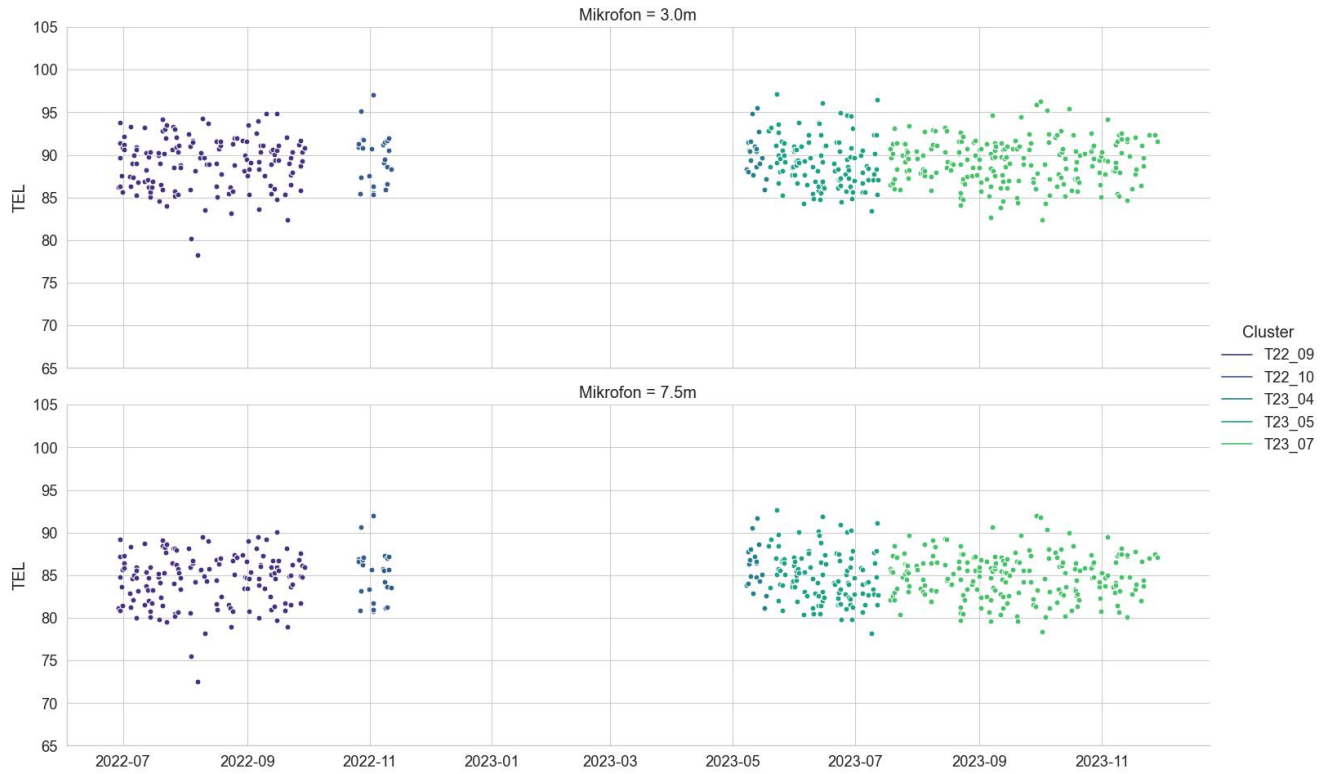


Abbildung A.41.: Verteilung der *TEL*-Werte über die Zeit für Güterzüge und MQ2.3.



Abbildung A.42.: Verteilung der *TEL*-Werte über die Zeit für Güterzüge und REF.

Güterzüge: Verteilung von TEL80

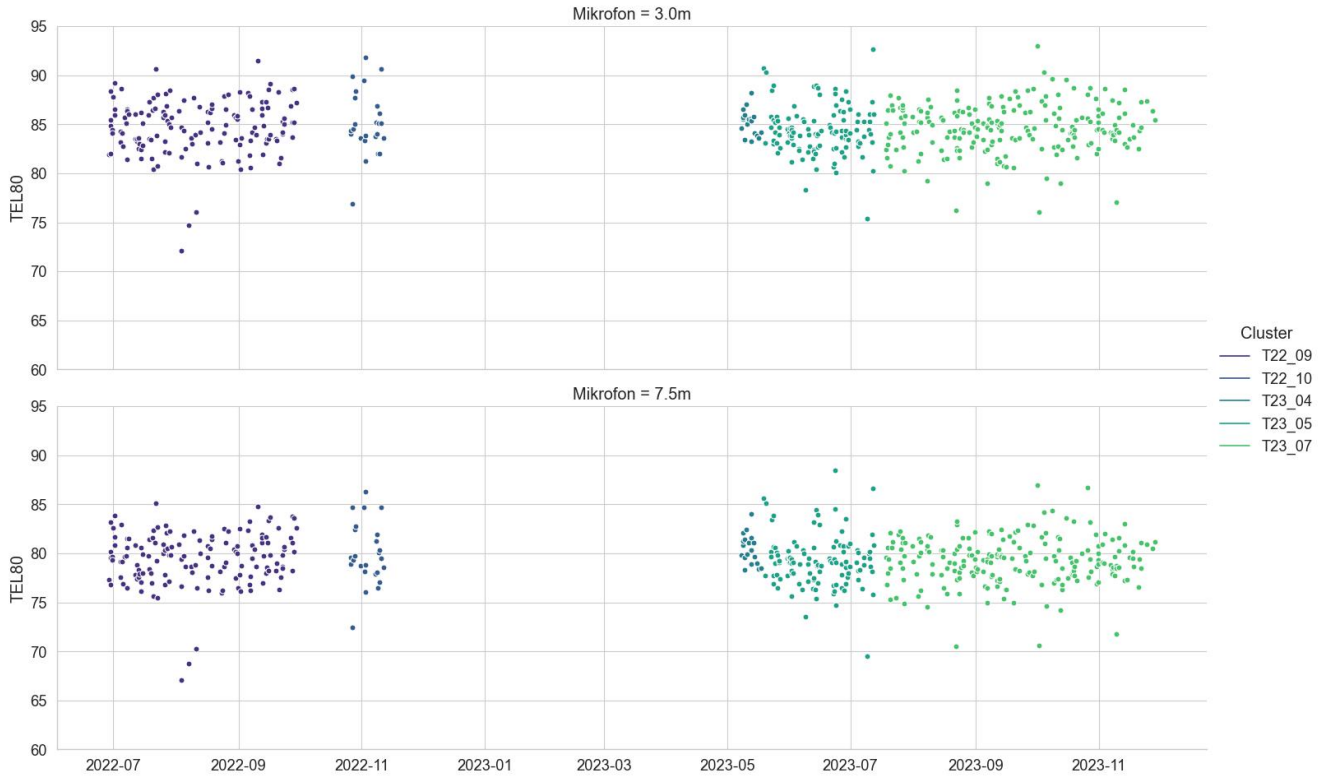


Abbildung A.43.: Verteilung der *TEL*80-Werte über die Zeit für Güterzüge und MQ1.2.

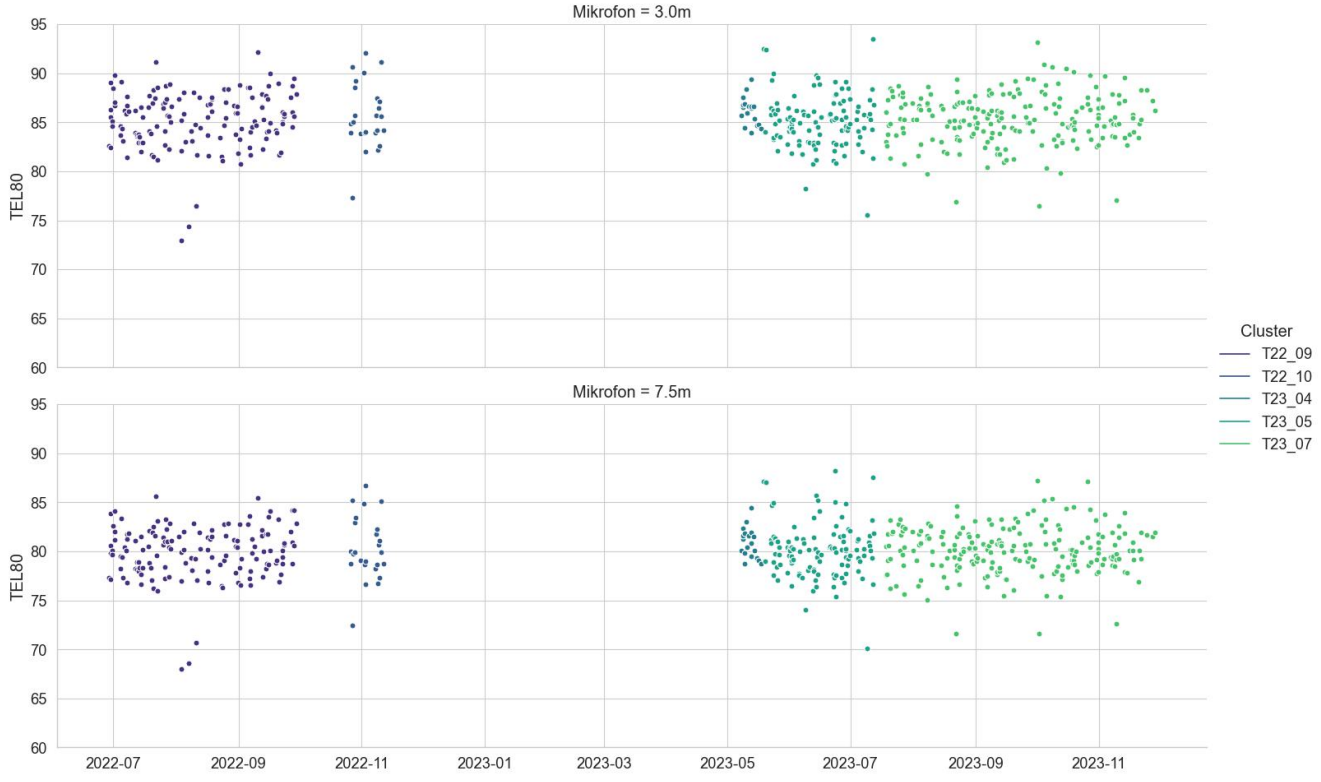


Abbildung A.44.: Verteilung der *TEL*80-Werte über die Zeit für Güterzüge und MQ1.3.

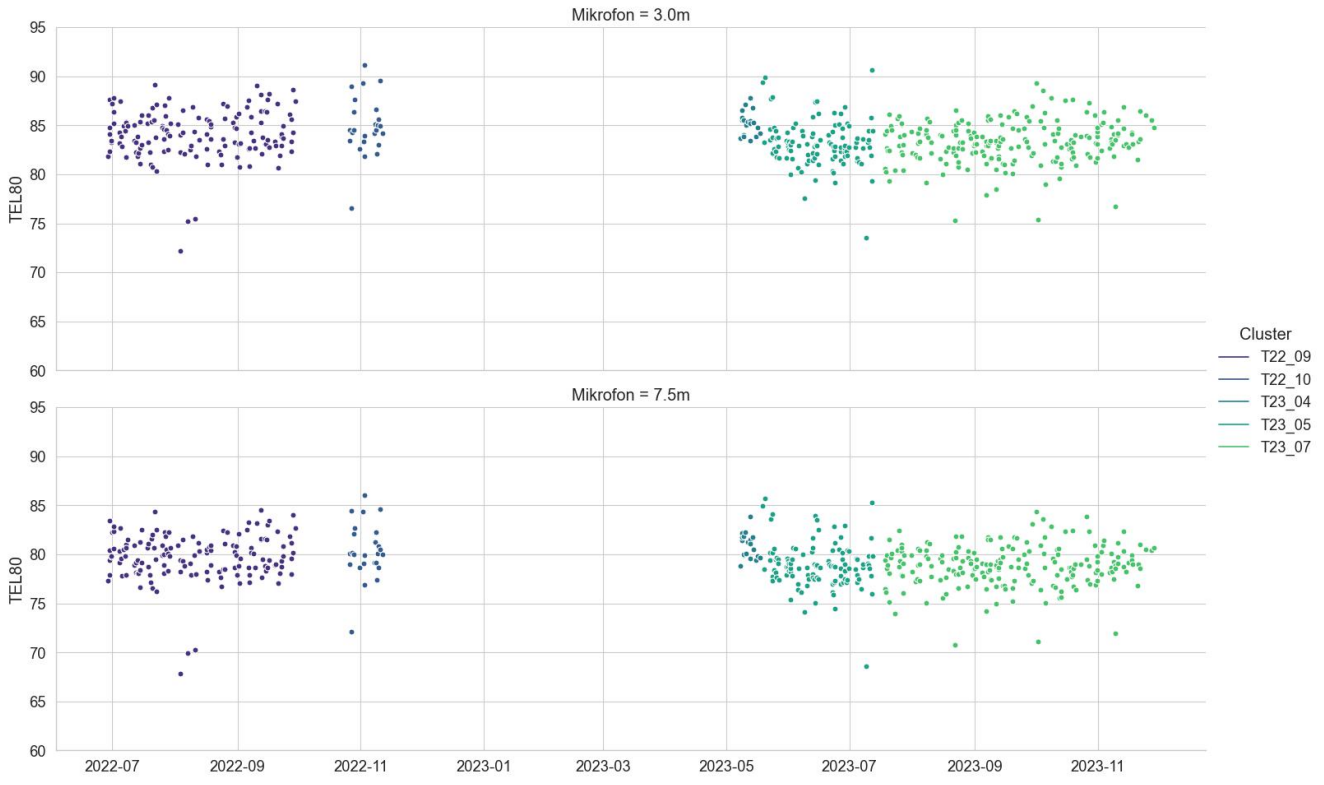


Abbildung A.45.: Verteilung der *TEL*80-Werte über die Zeit für Güterzüge und MQ2.1.

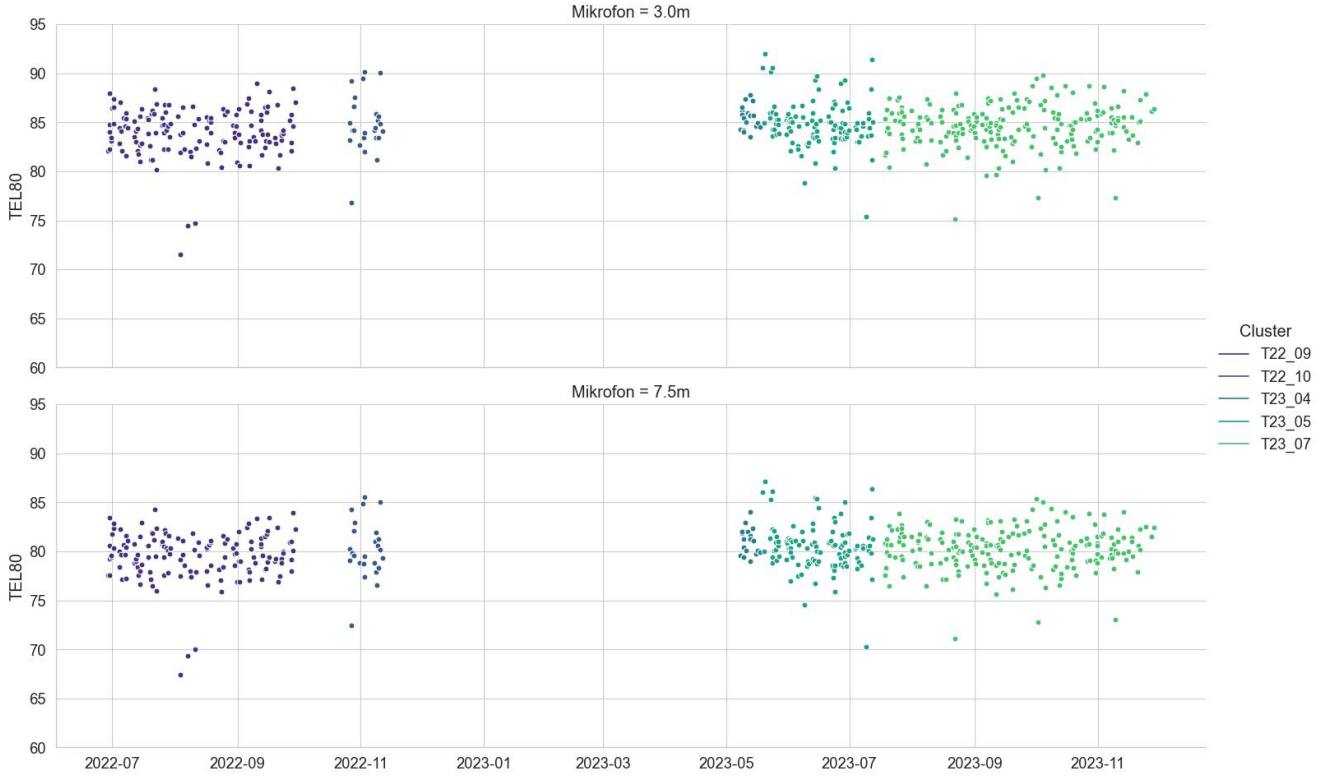


Abbildung A.46.: Verteilung der *TEL*80-Werte über die Zeit für Güterzüge und MQ2.2.

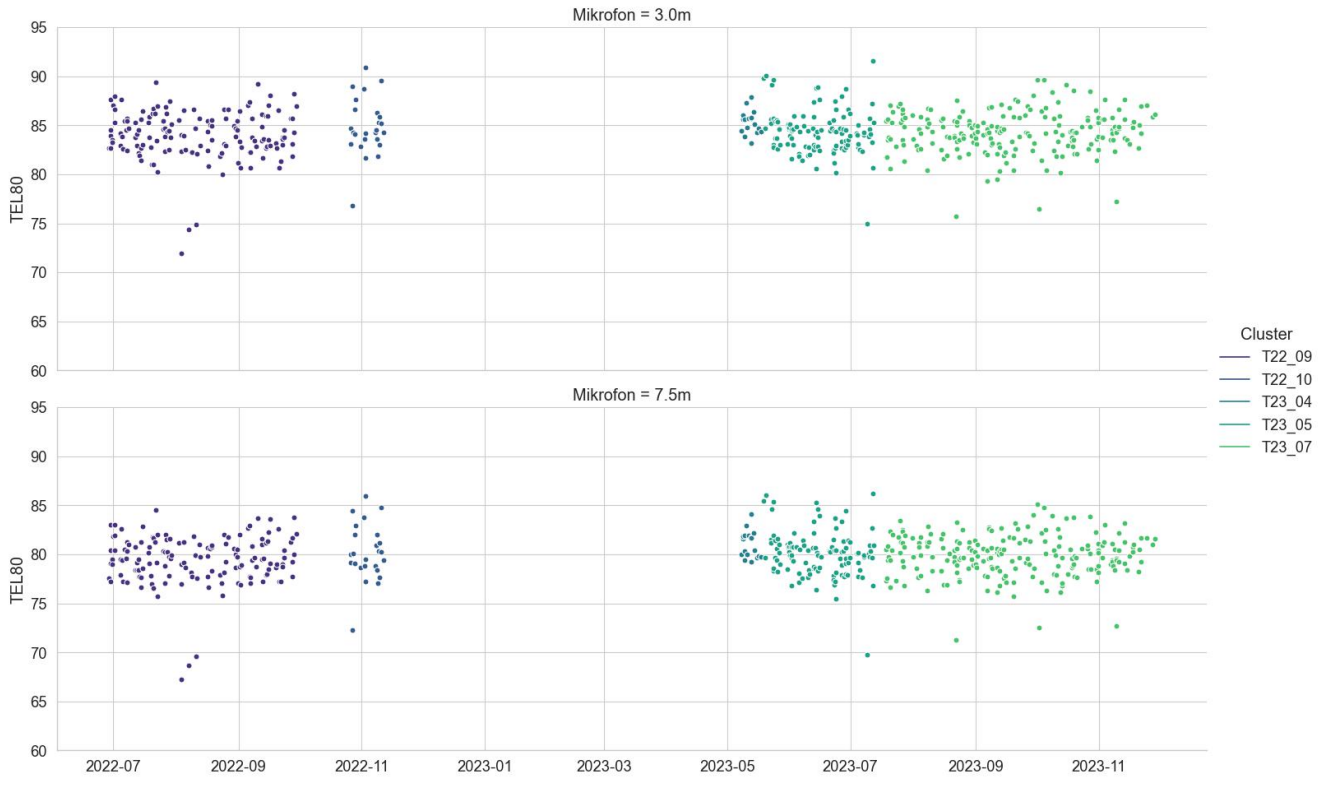


Abbildung A.47.: Verteilung der *TEL*80-Werte über die Zeit für Güterzüge und MQ2.3.

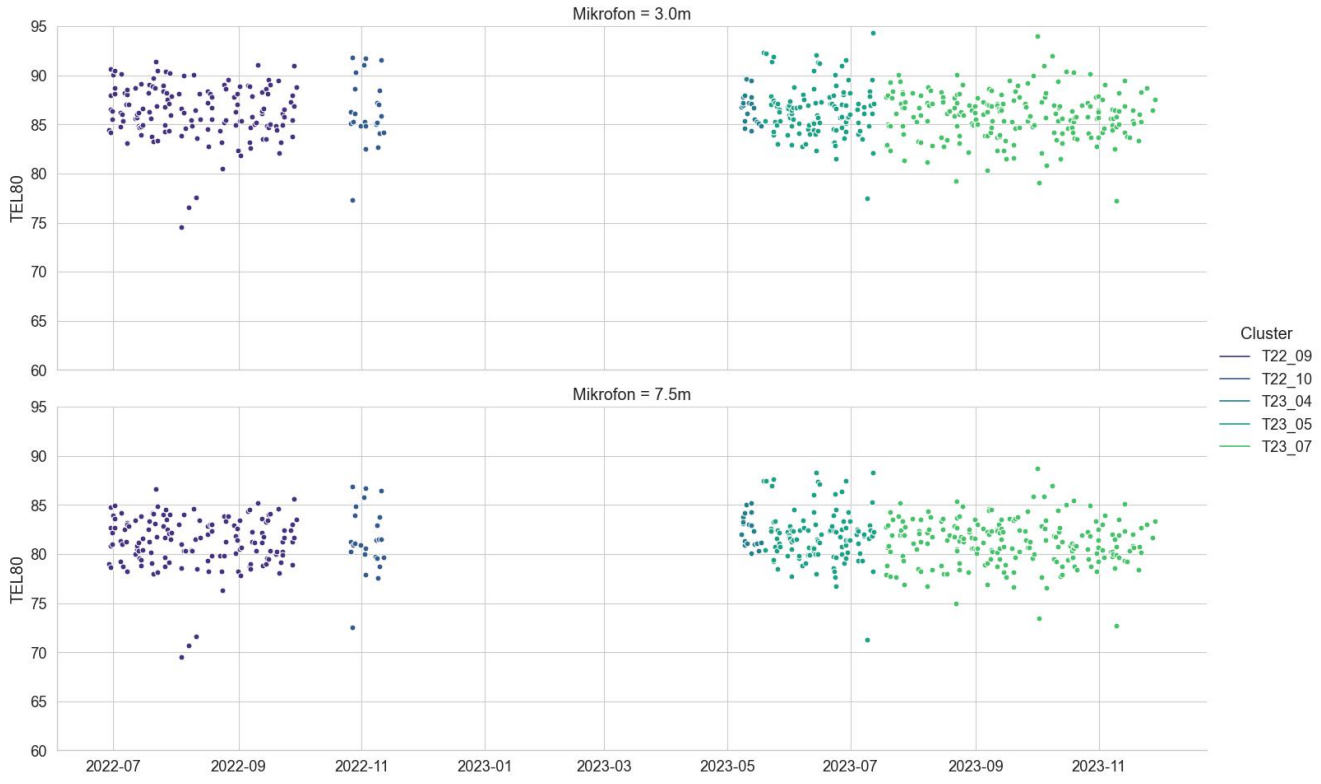


Abbildung A.48.: Verteilung der *TEL*80-Werte über die Zeit für Güterzüge und REF.

A.2. Residuenplots

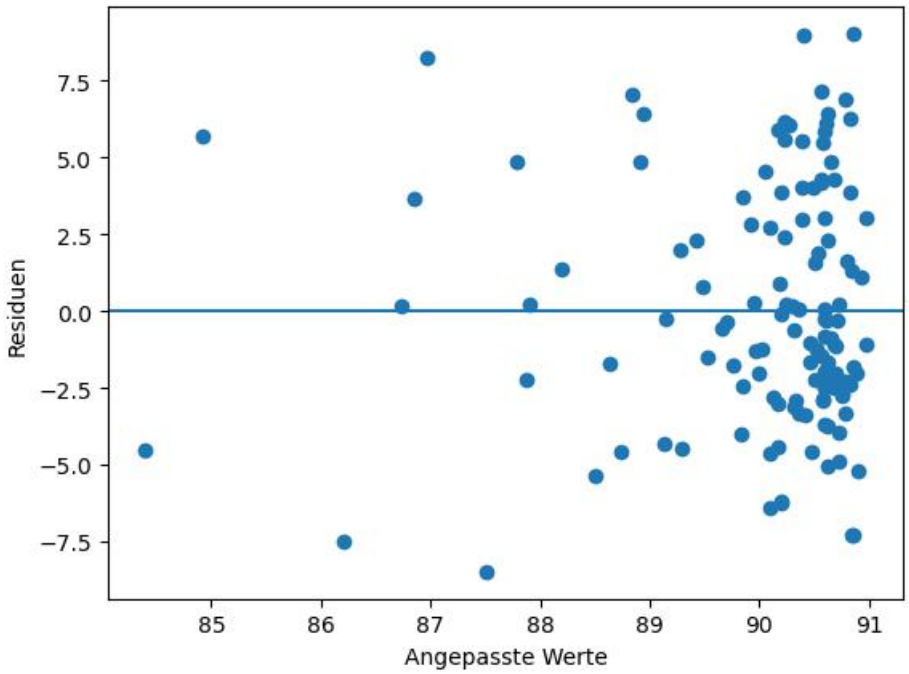


Abbildung A.49.: Residuenplot für das Modell mit RBDe560 für den MQ 1.1 und das 3.0m-Mikrofon mit den Erklärenden Zugtyp und Geschwindigkeit.

A.3. Partial plots des additiven Modells

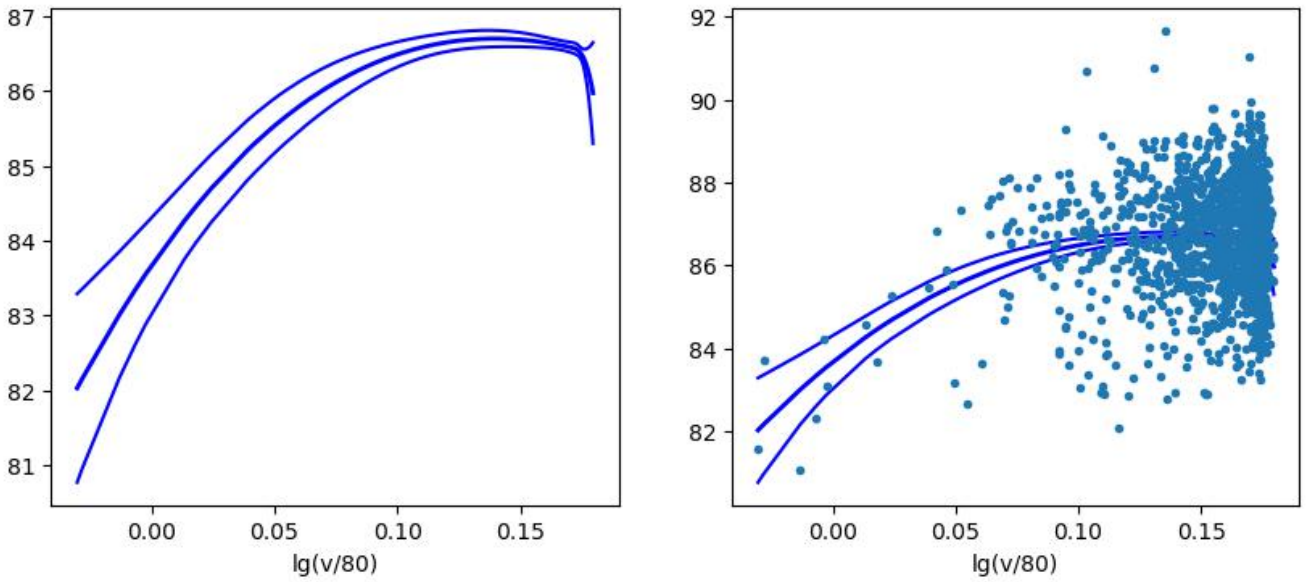


Abbildung A.50.: Partial plot für ein additives Modell für den Querschnitt MQ21 für Flirt und das 3.0m-Mikrofon.

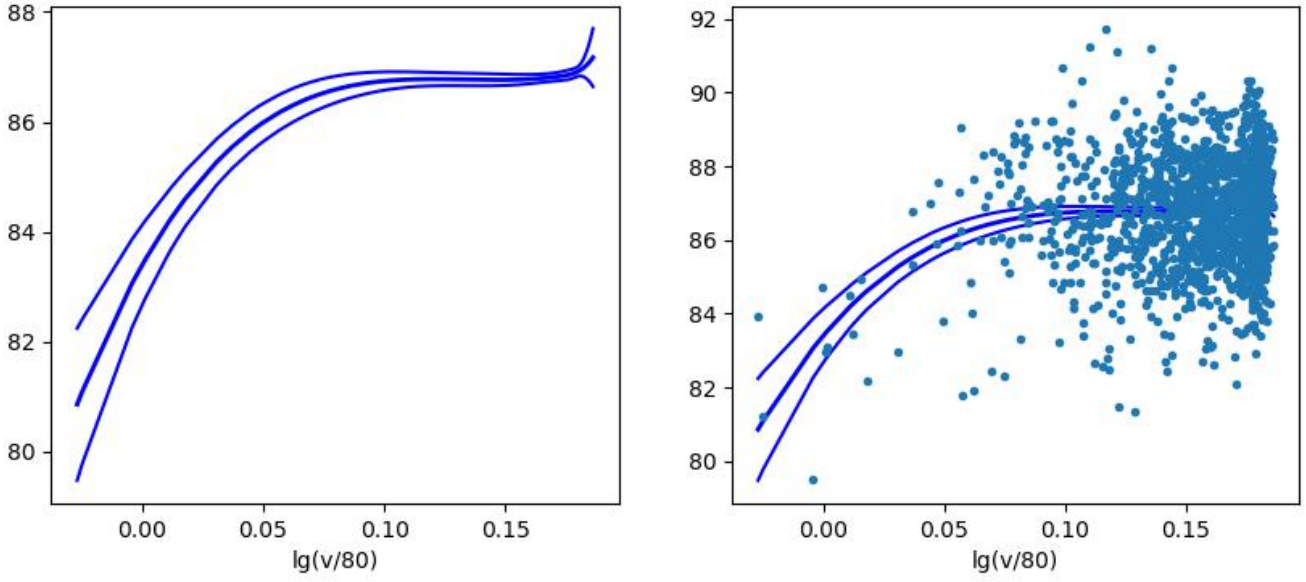


Abbildung A.51.: Partial plot für ein additives Modell für den Querschnitt MQ22 für Flirt und das 3.0m-Mikrofon.

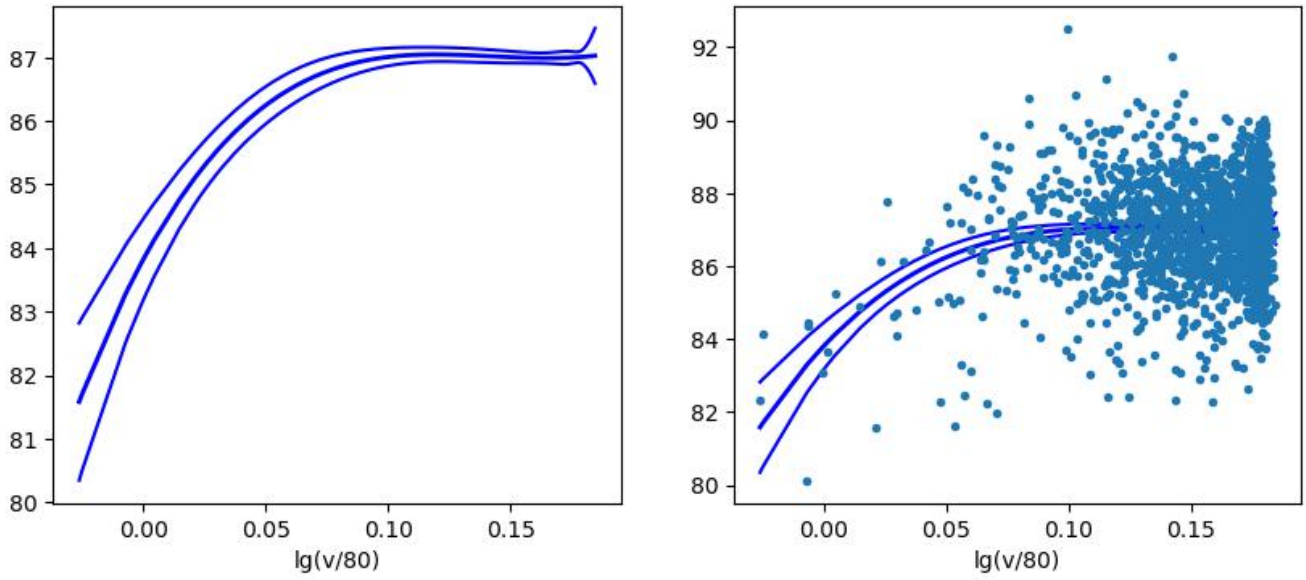


Abbildung A.52.: Partial plot für ein additives Modell für den Querschnitt MQ23 für Flirt und das 3.0m-Mikrofon.

A.4. Simulationsergebnisse

α-Fehlerwahrscheinlichkeit

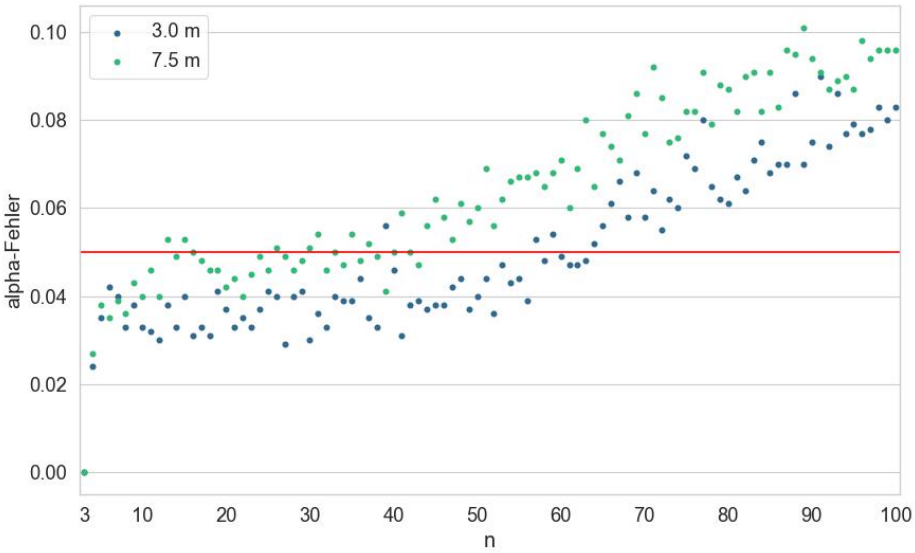


Abbildung A.53.: α-Fehlerwahrscheinlichkeit für verschiedene Stichprobengrössen und Querschnitt MQ1.1.

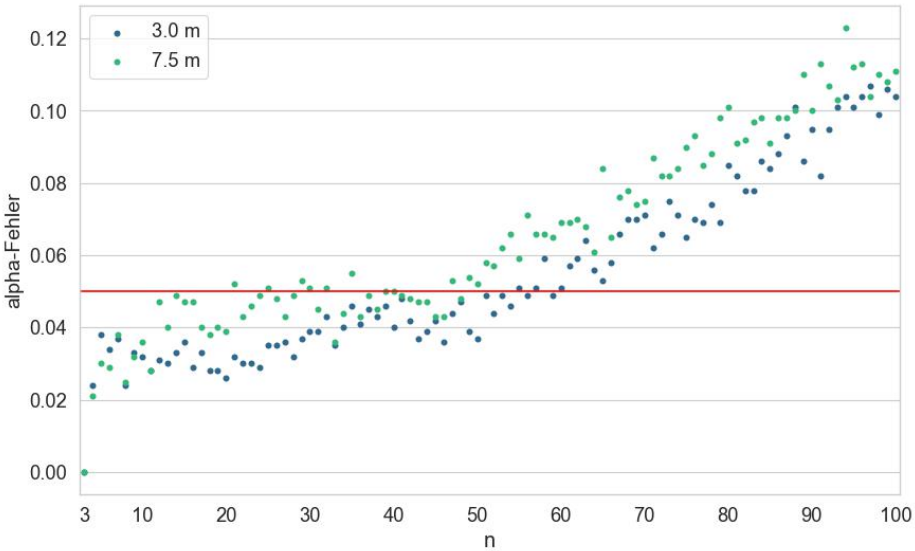


Abbildung A.54.: α-Fehlerwahrscheinlichkeit für verschiedene Stichprobengrössen und Querschnitt MQ1.2.

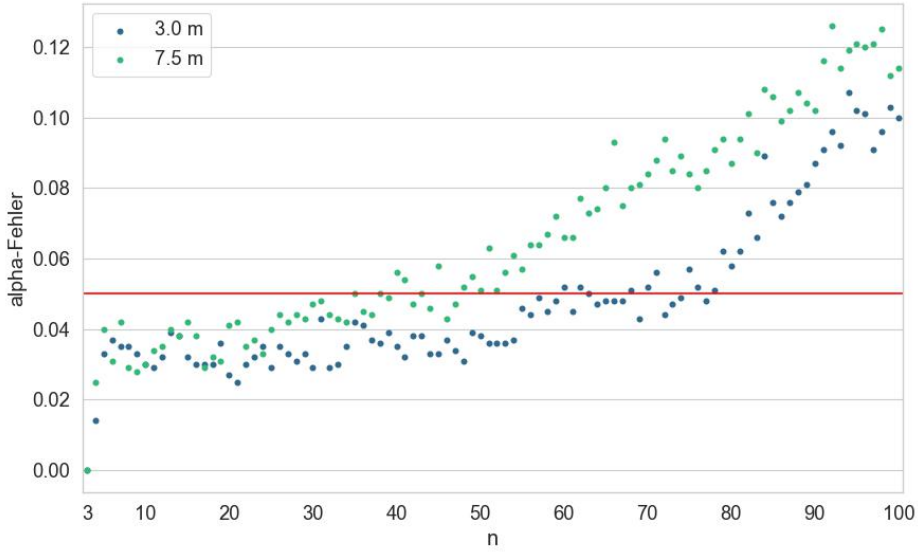


Abbildung A.55.: α-Fehlerwahrscheinlichkeit für verschiedene Stichprobengrössen und Querschnitt MQ1.3.

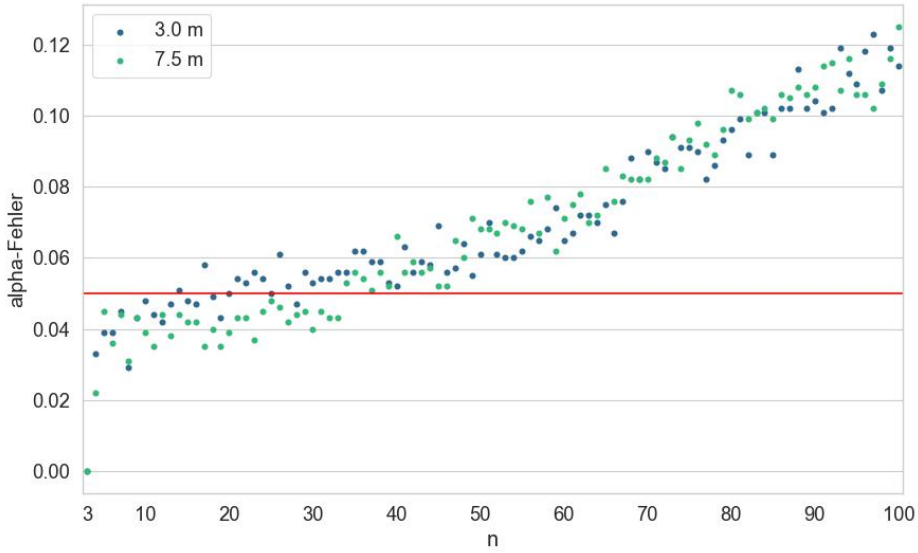


Abbildung A.56.: α-Fehlerwahrscheinlichkeit für verschiedene Stichprobengrössen und Querschnitt MQ2.1.

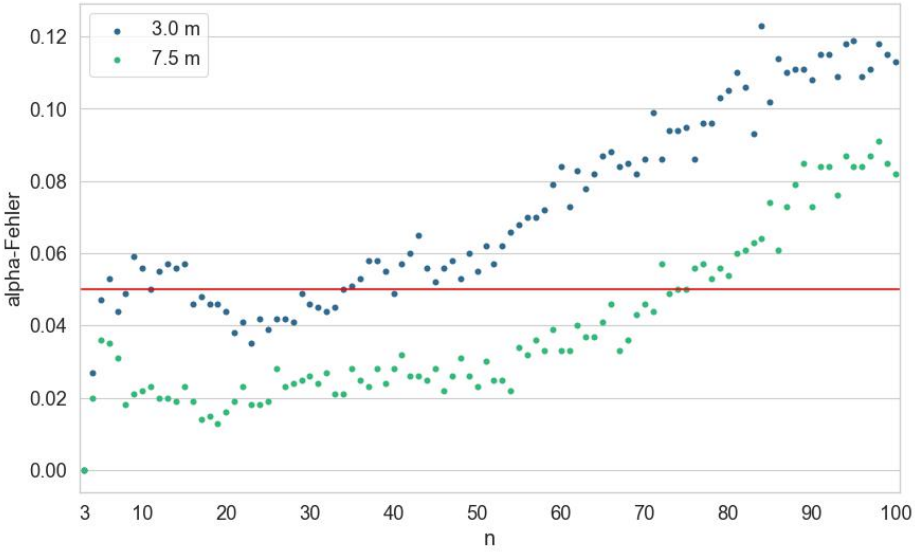


Abbildung A.57.: α-Fehlerwahrscheinlichkeit für verschiedene Stichprobengrössen und Querschnitt MQ2.2.

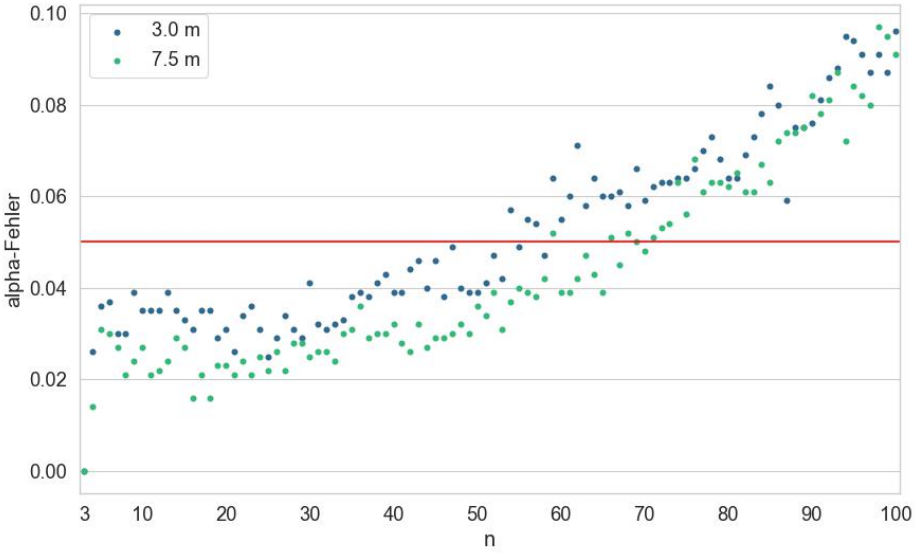


Abbildung A.58.: α-Fehlerwahrscheinlichkeit für verschiedene Stichprobengrössen und Querschnitt MQ2.3.

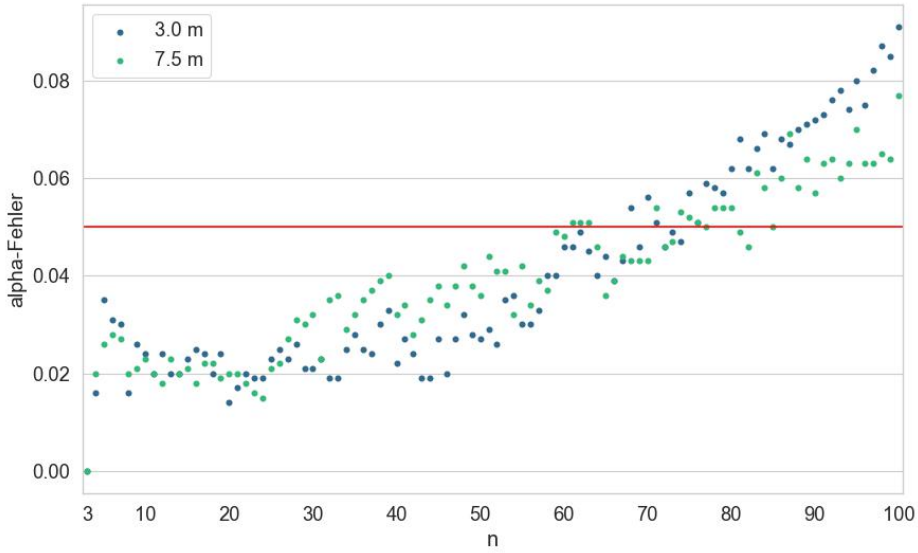


Abbildung A.59.: α-Fehlerwahrscheinlichkeit für verschiedene Stichprobengrössen und Querschnitt REF.

Benötigte Stichprobengrössen

Tabelle A.1.: Benötigte Stichprobengrössen, um bei $d = 1$ dB bzw. $d = 2$ dB eine Power von 80% bzw. 90% zu erreichen, wenn Messungen aller Zugtypen verwendet werden.

Querschnitt	Differenz	Mikrofon	n für $(1-\beta) = 80\%$	n für $(1-\beta) = 90\%$
MQ1.2	1 dB	3.0 m	23	34
MQ1.2	1 dB	7.5 m	22	30
MQ1.2	2 dB	3.0 m	8	10
MQ1.2	2 dB	7.5 m	7	9
MQ1.3	1 dB	3.0 m	27	36
MQ1.3	1 dB	7.5 m	22	29
MQ1.3	2 dB	3.0 m	8	11
MQ1.3	2 dB	7.5 m	7	9
MQ2.1	1 dB	3.0 m	23	33
MQ2.1	1 dB	7.5 m	19	26
MQ2.1	2 dB	3.0 m	7	10
MQ2.1	2 dB	7.5 m	6	8
MQ2.2	1 dB	3.0 m	11	14
MQ2.2	1 dB	7.5 m	22	28
MQ2.2	2 dB	3.0 m	4	5
MQ2.2	2 dB	7.5 m	8	9
MQ2.3	1 dB	3.0 m	21	27
MQ2.3	1 dB	7.5 m	29	38
MQ2.3	2 dB	3.0 m	7	9
MQ2.3	2 dB	7.5 m	9	11
REF	1 dB	3.0 m	25	34
REF	1 dB	7.5 m	26	34
REF	2 dB	3.0 m	8	10
REF	2 dB	7.5 m	8	11

Tabelle A.2.: Benötigte Stichprobengrössen für MQ1.1 und MQ1.2, um bei $d = 1$ dB bzw. $d = 2$ dB eine Power von 80% bzw. 90% zu erreichen, wenn nur Messungen eines Zugtyps verwendet werden.

Querschnitt	Zugtyp	Differenz	Mikrofon	n für $(1-\beta) = 80\%$	n für $(1-\beta) = 90\%$
MQ11	EWIV	1 dB	3.0 m	$\gg 50$	$\gg 50$
MQ11	EWIV	1 dB	7.5 m	$\gg 50$	$\gg 50$
MQ11	EWIV	2 dB	3.0 m	5	8
MQ11	EWIV	2 dB	7.5 m	5	36
MQ11	EWIV_IC2000	1 dB	3.0 m	15	30
MQ11	EWIV_IC2000	1 dB	7.5 m	12	18
MQ11	EWIV_IC2000	2 dB	3.0 m	5	7
MQ11	EWIV_IC2000	2 dB	7.5 m	4	5
MQ11	FV_Dosto	1 dB	3.0 m	36	50
MQ11	FV_Dosto	1 dB	7.5 m	30	45
MQ11	FV_Dosto	2 dB	3.0 m	9	19
MQ11	FV_Dosto	2 dB	7.5 m	5	9
MQ11	IC2000	1 dB	3.0 m	17	22
MQ11	IC2000	1 dB	7.5 m	12	17
MQ11	IC2000	2 dB	3.0 m	6	7
MQ11	IC2000	2 dB	7.5 m	4	5
MQ11	RABe501	1 dB	3.0 m	38	> 50
MQ11	RABe501	1 dB	7.5 m	29	> 50
MQ11	RABe501	2 dB	3.0 m	7	9
MQ11	RABe501	2 dB	7.5 m	5	8
MQ11	Traverso	1 dB	3.0 m	19	24
MQ11	Traverso	1 dB	7.5 m	18	23
MQ11	Traverso	2 dB	3.0 m	6	8
MQ11	Traverso	2 dB	7.5 m	6	7
MQ12	EWIV	1 dB	3.0 m	19	$\gg 50$
MQ12	EWIV	1 dB	7.5 m	14	$\gg 50$
MQ12	EWIV	2 dB	3.0 m	5	8
MQ12	EWIV	2 dB	7.5 m	4	7
MQ12	EWIV_IC2000	1 dB	3.0 m	12	19
MQ12	EWIV_IC2000	1 dB	7.5 m	10	15
MQ12	EWIV_IC2000	2 dB	3.0 m	4	5
MQ12	EWIV_IC2000	2 dB	7.5 m	4	5
MQ12	FV_Dosto	1 dB	3.0 m	35	40
MQ12	FV_Dosto	1 dB	7.5 m	28	45
MQ12	FV_Dosto	2 dB	3.0 m	7	15
MQ12	FV_Dosto	2 dB	7.5 m	5	9
MQ12	IC2000	1 dB	3.0 m	13	19
MQ12	IC2000	1 dB	7.5 m	11	15
MQ12	IC2000	2 dB	3.0 m	5	6
MQ12	IC2000	2 dB	7.5 m	4	5
MQ12	RABe501	1 dB	3.0 m	26	$\gg 50$
MQ12	RABe501	1 dB	7.5 m	26	$\gg 50$
MQ12	RABe501	2 dB	3.0 m	5	8
MQ12	RABe501	2 dB	7.5 m	5	8
MQ12	Traverso	1 dB	3.0 m	14	19
MQ12	Traverso	1 dB	7.5 m	16	20
MQ12	Traverso	2 dB	3.0 m	5	6
MQ12	Traverso	2 dB	7.5 m	5	7

Tabelle A.3.: Benötigte Stichprobengrössen für MQ1.3 und MQ2.1, um bei $d = 1$ dB bzw. $d = 2$ dB eine Power von 80% bzw. 90% zu erreichen, wenn nur Messungen eines Zugtyps verwendet werden.

Querschnitt	Zugtyp	Differenz	Mikrofon	n für $(1-\beta) = 80\%$	n für $(1-\beta) = 90\%$
MQ13	EWIV	1 dB	3.0 m	20	27
MQ13	EWIV	1 dB	7.5 m	12	29
MQ13	EWIV	2 dB	3.0 m	6	8
MQ13	EWIV	2 dB	7.5 m	4	5
MQ13	EWIV_IC2000	1 dB	3.0 m	14	21
MQ13	EWIV_IC2000	1 dB	7.5 m	10	14
MQ13	EWIV_IC2000	2 dB	3.0 m	5	6
MQ13	EWIV_IC2000	2 dB	7.5 m	4	5
MQ13	FV_Dosto	1 dB	3.0 m	36	42
MQ13	FV_Dosto	1 dB	7.5 m	29	42
MQ13	FV_Dosto	2 dB	3.0 m	9	20
MQ13	FV_Dosto	2 dB	7.5 m	5	13
MQ13	IC2000	1 dB	3.0 m	16	24
MQ13	IC2000	1 dB	7.5 m	11	15
MQ13	IC2000	2 dB	3.0 m	6	7
MQ13	IC2000	2 dB	7.5 m	4	5
MQ13	RABe501	1 dB	3.0 m	29	$\gg 50$
MQ13	RABe501	1 dB	7.5 m	29	$\gg 50$
MQ13	RABe501	2 dB	3.0 m	6	9
MQ13	RABe501	2 dB	7.5 m	5	8
MQ13	Traverso	1 dB	3.0 m	15	21
MQ13	Traverso	1 dB	7.5 m	15	22
MQ13	Traverso	2 dB	3.0 m	5	7
MQ13	Traverso	2 dB	7.5 m	5	7
MQ21	EWIV	1 dB	3.0 m	21	$\gg 50$
MQ21	EWIV	1 dB	7.5 m	10	$\gg 50$
MQ21	EWIV	2 dB	3.0 m	4	5
MQ21	EWIV	2 dB	7.5 m	3	4
MQ21	EWIV_IC2000	1 dB	3.0 m	10	15
MQ21	EWIV_IC2000	1 dB	7.5 m	9	13
MQ21	EWIV_IC2000	2 dB	3.0 m	4	4
MQ21	EWIV_IC2000	2 dB	7.5 m	4	4
MQ21	FV_Dosto	1 dB	3.0 m	44	$\gg 50$
MQ21	FV_Dosto	1 dB	7.5 m	22	42
MQ21	FV_Dosto	2 dB	3.0 m	5	8
MQ21	FV_Dosto	2 dB	7.5 m	3	5
MQ21	IC2000	1 dB	3.0 m	11	15
MQ21	IC2000	1 dB	7.5 m	10	13
MQ21	IC2000	2 dB	3.0 m	4	5
MQ21	IC2000	2 dB	7.5 m	4	4
MQ21	RABe501	1 dB	3.0 m	19	$\gg 50$
MQ21	RABe501	1 dB	7.5 m	14	27
MQ21	RABe501	2 dB	3.0 m	5	6
MQ21	RABe501	2 dB	7.5 m	4	6
MQ21	Traverso	1 dB	3.0 m	17	24
MQ21	Traverso	1 dB	7.5 m	16	21
MQ21	Traverso	2 dB	3.0 m	6	7
MQ21	Traverso	2 dB	7.5 m	6	7

Tabelle A.4.: Benötigte Stichprobengrössen für MQ2.2 und MQ2.3, um bei $d = 1$ dB bzw. $d = 2$ dB eine Power von 80% bzw. 90% zu erreichen, wenn nur Messungen eines Zugtyps verwendet werden.

Querschnitt	Zugtyp	Differenz	Mikrofon	n für $(1-\beta) = 80\%$	n für $(1-\beta) = 90\%$
MQ22	EWIV	1 dB	3.0 m	12	17
MQ22	EWIV	1 dB	7.5 m	11	20
MQ22	EWIV	2 dB	3.0 m	3	4
MQ22	EWIV	2 dB	7.5 m	3	4
MQ22	EWIV_IC2000	1 dB	3.0 m	7	10
MQ22	EWIV_IC2000	1 dB	7.5 m	8	10
MQ22	EWIV_IC2000	2 dB	3.0 m	3	4
MQ22	EWIV_IC2000	2 dB	7.5 m	3	4
MQ22	FV_Dosto	1 dB	3.0 m	11	33
MQ22	FV_Dosto	1 dB	7.5 m	12	23
MQ22	FV_Dosto	2 dB	3.0 m	3	4
MQ22	FV_Dosto	2 dB	7.5 m	3	4
MQ22	IC2000	1 dB	3.0 m	8	11
MQ22	IC2000	1 dB	7.5 m	8	11
MQ22	IC2000	2 dB	3.0 m	4	4
MQ22	IC2000	2 dB	7.5 m	4	4
MQ22	RABe501	1 dB	3.0 m	7	12
MQ22	RABe501	1 dB	7.5 m	8	14
MQ22	RABe501	2 dB	3.0 m	3	4
MQ22	RABe501	2 dB	7.5 m	3	5
MQ22	Traverso	1 dB	3.0 m	9	11
MQ22	Traverso	1 dB	7.5 m	13	17
MQ22	Traverso	2 dB	3.0 m	3	4
MQ22	Traverso	2 dB	7.5 m	5	6
MQ23	EWIV	1 dB	3.0 m	20	28
MQ23	EWIV	1 dB	7.5 m	7	$\gg 50$
MQ23	EWIV	2 dB	3.0 m	3	4
MQ23	EWIV	2 dB	7.5 m	3	4
MQ23	EWIV_IC2000	1 dB	3.0 m	8	14
MQ23	EWIV_IC2000	1 dB	7.5 m	8	14
MQ23	EWIV_IC2000	2 dB	3.0 m	3	4
MQ23	EWIV_IC2000	2 dB	7.5 m	4	4
MQ23	FV_Dosto	1 dB	3.0 m	44	$\gg 50$
MQ23	FV_Dosto	1 dB	7.5 m	19	47
MQ23	FV_Dosto	2 dB	3.0 m	5	9
MQ23	FV_Dosto	2 dB	7.5 m	4	7
MQ23	IC2000	1 dB	3.0 m	9	12
MQ23	IC2000	1 dB	7.5 m	9	12
MQ23	IC2000	2 dB	3.0 m	4	4
MQ23	IC2000	2 dB	7.5 m	4	4
MQ23	RABe501	1 dB	3.0 m	18	$\gg 50$
MQ23	RABe501	1 dB	7.5 m	19	40
MQ23	RABe501	2 dB	3.0 m	4	6
MQ23	RABe501	2 dB	7.5 m	5	6
MQ23	Traverso	1 dB	3.0 m	15	20
MQ23	Traverso	1 dB	7.5 m	18	24
MQ23	Traverso	2 dB	3.0 m	5	6
MQ23	Traverso	2 dB	7.5 m	5	7

Tabelle A.5.: Benötigte Stichprobengrössen für REF, um bei $d = 1$ dB bzw. $d = 2$ dB eine Power von 80% bzw. 90% zu erreichen, wenn nur Messungen eines Zugtyps verwendet werden.

Querschnitt	Zugtyp	Differenz	Mikrofon	n für $(1-\beta) = 80\%$	n für $(1-\beta) = 90\%$
REF	EWIV	1 dB	3.0 m	20	24
REF	EWIV	1 dB	7.5 m	14	18
REF	EWIV	2 dB	3.0 m	6	8
REF	EWIV	2 dB	7.5 m	4	5
REF	EWIV_IC2000	1 dB	3.0 m	13	27
REF	EWIV_IC2000	1 dB	7.5 m	9	14
REF	EWIV_IC2000	2 dB	3.0 m	4	6
REF	EWIV_IC2000	2 dB	7.5 m	4	4
REF	FV_Dosto	1 dB	3.0 m	31	37
REF	FV_Dosto	1 dB	7.5 m	19	33
REF	FV_Dosto	2 dB	3.0 m	7	12
REF	FV_Dosto	2 dB	7.5 m	5	8
REF	IC2000	1 dB	3.0 m	15	21
REF	IC2000	1 dB	7.5 m	11	16
REF	IC2000	2 dB	3.0 m	5	7
REF	IC2000	2 dB	7.5 m	4	5
REF	RABe501	1 dB	3.0 m	21	$\gg 50$
REF	RABe501	1 dB	7.5 m	22	39
REF	RABe501	2 dB	3.0 m	5	7
REF	RABe501	2 dB	7.5 m	5	8
REF	Traverso	1 dB	3.0 m	12	17
REF	Traverso	1 dB	7.5 m	14	19
REF	Traverso	2 dB	3.0 m	4	5
REF	Traverso	2 dB	7.5 m	5	6

Literaturverzeichnis

[1] *Website des Fahrbahnlabors.* https://www.fahrbahnlabor.ch/

[2] M. Schmid, L. Conreaux und U. Schönholzer, *Das Fahrbahnlabor: Forschung zur Rad/Schiene-Interaktion im Hinblick auf Erschütterung, Schallentstehung und Oberbaudynamik,* BAHNAKUSTIK Infrastruktur, Fahrzeuge, Betrieb, München 2023.

[3] N. Isert und S. Lutzenberger, *Jahresbericht 2022 Fahrbahnlabor*. https://www.fahrbahnlabor.ch/de/berichte/jahr/Jahresbericht_2022_Fahrbahnlabor.pdf

[4] S.N. Wood, 2017, *Generalized Additive Models: An Introduction with R (2nd edition)*, Chapman and Hall/CRC, Boca Raton.

[5] G. James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani, 2013, *An introduction to statistical learning – with applications in R*, Springer, New York.