



Klemens Stessl

## **Partikelemissionen im Eisenbahnverkehr**

### **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Dipl.-Ing.**

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Sturm  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Daniel Fruhwirt, BSc  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Mag.rer.nat. Dr.techn. Marlene Hinterhofer

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, April 2019

## **Vorwort**

Ich möchte mich hiermit bei Herrn Prof. Sturm, Herrn DI Fruhwirt, Herrn DI Dr. Rodler, Herrn Ing. Nöst, Herrn Leonhardt und bei Frau DI Dr. Hinterhofer für die Unterstützung und die Betreuung bedanken, da die Messungen und Auswertungen mit erheblichem Arbeits- und Zeitaufwand verbunden waren. Ein weiterer Dank gilt der ÖBB Personenverkehr GmbH für die zur Verfügungstellung der Fahrplandaten für den Auswertzeitraum sowie dem Institut für Chemische Technologien und Analytik der Technischen Universität Wien für die chemische Analyse der gemessenen Partikelfraktionen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>VORWORT</b> .....	<b>II</b>
<b>FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN</b> .....	<b>V</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>X</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>2</b>
2.1 ALLGEMEINES ÜBER PARTIKEL .....	2
2.1.1 Primär emittierte Partikel .....	2
2.1.1.1 Exhaust-Partikel (Verbrennungsbedingt) .....	4
2.1.1.2 Non-Exhaust Partikel (Nicht durch Verbrennungsvorgänge verursacht) .....	5
2.1.2 Sekundär gebildete Partikel .....	7
2.2 PARTIKELENTSTEHUNG .....	13
2.2.1 Bremsenabrieb .....	13
2.2.2 Radabrieb/Schienenabrieb .....	16
2.2.3 Fahrdraht/Stromabnehmerabrieb .....	19
2.3 LITERATURERCHE .....	22
2.3.1 PM – Emissionen des Verkehrs, Statusbericht Schienenverkehr [14] .....	22
2.3.2 PM10-Emissionen Verkehr Teil Schienenverkehr, Schlussbericht [8] .....	26
2.3.3 PM-Messung im Lainzer Eisenbahntunnel [15] .....	27
<b>3 MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG</b> .....	<b>30</b>
3.1 STRÖMUNGSMESSUNG .....	30
3.2 STAUBMESSUNG .....	31
3.2.1 High Volume Aerosol Sampler (Partisol) .....	31
3.2.2 TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) .....	32
<b>4 BERECHNUNG DER VERBRENNUNGSBEDINGTEN EMISSIONEN</b> .....	<b>34</b>
4.1 MATHEMATISCHES MODELL .....	34
4.2 PROGRAMMSTRUKTUR .....	36
<b>5 MESSAUFBAU UND MESSDURCHFÜHRUNG</b> .....	<b>41</b>
5.1 MESSAUFBAU .....	41
5.1.1 Messort/Messzeit .....	41
5.1.2 Teilstromentnahme .....	42
5.1.3 Positionierung der Messgeräte .....	43
5.2 MESSDURCHFÜHRUNG .....	45
<b>6 AUSWERTUNG/DATENANALYSE DER MESSERGEBNISSE</b> .....	<b>46</b>
6.1 BESTIMMUNG DER EFFEKTIVEN PARTIKELKONZENTRATION .....	46
6.2 AUSWERTUNG DER ROHDATEN .....	47
6.3 BERÜCKSICHTIGUNG DER VERDÜNNUNG .....	60
6.4 ERMITTLUNG VON PARTIKELMISSIONSFAKTOREN .....	64
6.5 ERMITTLUNG DER DURCHSCHNITTLICHEN PM-EMISSION PRO ZUG .....	73
6.5.1 Ermittlung der PM-Emission <sub>eff.gesamt</sub> (Exhaust + Non-Exhaust) .....	73
6.5.2 Simulation der Exhaust-Emission .....	73
6.5.3 Ermittlung PM-Emission Non-Exhaust .....	74
6.5.4 Regressionsanalyse .....	76
6.6 CHEMISCHE ANALYSE DER PARTIKELFRAKTION .....	82
<b>7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>85</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>87</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>90</b>
<b>LITERATUR</b> .....	<b>92</b>
<b>8 ANHANG</b> .....	<b>95</b>

---

8.1	STATISTISCHE GRUNDLAGEN .....	95
8.1.1	<i>Statistische Kennwerte</i> .....	97
8.1.2	<i>Graphische Darstellungen für Verteilungen</i> .....	98
8.1.3	<i>Testprozeduren zur Überprüfung/Beurteilung von Verteilungsannahmen</i> .....	100
8.1.4	<i>Verteilungen</i> .....	101
8.1.5	<i>Regressionsanalyse</i> .....	103
8.1.6	<i>Varianzanalyse (Analysis of Variances, ANOVA)</i> .....	105
8.1.7	<i>t-Test</i> .....	106
8.1.8	<i>Messunsicherheit</i> .....	106
8.2	ÜBERPRÜFUNG DER DATEN AUF NORMALVERTEILUNG UND GGF. ADAPTION .....	109

## Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

### Lateinische Formelzeichen

a	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigung
a <sub>i</sub>	Beliebige Einheit	Untere Klassengrenze; Gewichtungsfaktoren
anz <sub>Wag</sub>	#	Anzahl Waggon
B	Beliebige Einheit <sup>2</sup>	Varianz der linearen Regression
B	m	Tunnelbreite
b <sup>2</sup>	Beliebige Einheit	Standardabweichung der linearen Regression
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
D	m	Länge des Messpfades
D	m	Durchmesser des Tunnels
d <sub>i</sub>	Beliebige Einheit	Klassenbreite
dm	μg	Akkumulierte Partikelmasse innerhalb eines Zeitintervalls
f(y)	-	Dichtefunktion
f <sub>0</sub>	1/s	Schwingfrequenz zum Zeitpunkt t <sub>0</sub>
f <sub>1</sub>	1/s	Schwingfrequenz zum Zeitpunkt t <sub>1</sub>
f <sub>2,Lok</sub>	-	Luftwiderstandsfaktor Lok 2
f <sub>2,Wag</sub>	-	Luftwiderstandsfaktor Waggon 2
F <sub>B</sub>	N	Beschleunigungswiderstand
F <sub>emp</sub>	-	Empirischer F-Wert für den F-Test
F <sub>H</sub>	N	Steigungswiderstand
F <sub>krit</sub>	-	Kritischer F-Wert für den F-Test
F <sub>L</sub>	N	Luftwiderstand
F <sub>max</sub> /F <sub>rad</sub>	N	Zugkraft/Kraft am Rad
f <sub>0,Lok</sub>	-	Luftwiderstandsfaktor Lok 0
f <sub>0,Wag</sub>	-	Luftwiderstandsfaktor Waggon 0
F <sub>reib</sub>	N	Reibkraft
Δh	m	Höhenänderung
h <sub>i</sub> '	-	Klassendichte
I	-	Laufvariable (1-∞)
i	Beliebige Einheit	Wert der jeweiligen Merkmalsausprägung
k	-	Zahlenpaare
K <sub>0</sub>	μg/s <sup>2</sup>	Konstante, experimentell bestimmbar
L	m	Abstand Sender/Empfänger
L <sub>S</sub>	km	Streckenlänge
m	Anzahl	Anzahl unabhängiger Variablen
M <sub>F</sub>	kg/mol	Molare Masse der feuchten Luft
m <sub>i</sub>	Beliebige Einheit	Klassenmitte
m <sub>Lok</sub>	kg	Masse Lok
m <sub>Rot,Lok</sub>	-	Rotatorische Trägheit Lok
m <sub>Rot,Wag</sub>	-	Rotatorische Trägheit Waggon
m <sub>Wag</sub>	kg	Masse Waggon
N	Anzahl	Anzahl beliebiger Merkmale
n	-	Anzahl der Sensoren, Messwerte
P <sub>e</sub>	W	Effektivleistung
p <sub>i</sub>	Beliebige Einheit	Quantilszahlen
PM-Emission	g/Zug=g/#	Partikelemission pro Zug
PM-Emissionsfaktor gesamt/effektiv	g/km	Emissionsfaktor gesamt (mit Hintergrundeinfluss)/effektiv (ohne Hintergrundeinfluss) Exhaust

		(verbrennungsbedingt)/Non-Exhaust (nicht verbrennungsbedingt)
$P_{\text{mot}}$	W	Antriebsleistung
$P_{\text{Nebenverbraucher}}$	W	Leistung der Nebenverbraucher
$P_{\text{rad}}$	W	Radleistung
$P_{\text{rated}}$	W	Nennleistung
$P_{\text{reib}}$	W	Reibleistung
$q_P$	Beliebige Einheit	1., 2. oder 3. Quartil
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß
$R^2_{\text{korr}}$	-	Korrigiertes Bestimmtheitsmaß
$r_{xy}$	-	Pearson'scher Korrelationskoeffizient
$s$	Beliebige Einheit	Standardabweichung
$\Delta s$	m	Wegänderung
$s/s_{\text{vorher}}$	m	Weg zum Zeitpunkt t/t-1
$s^2$	Beliebige Einheit <sup>2</sup>	Varianz
$Se(\beta_i)$	Beliebige Einheit	Standardfehler der Koeffizienten; Standardabweichung des Schätzwertes der Koeffizienten; Modellpräzision für die Schätzung der unbekanntenen Koeffizienten
SSE	Beliebige Einheit <sup>2</sup>	Quadrierte Fehlersumme
SSR	Beliebige Einheit <sup>2</sup>	Summe der quadrierten Abweichungen der Residuen
SSY	Beliebige Einheit <sup>2</sup>	Gesamte Varianz
$s_x$	Beliebige Einheit	Mittlere absolute Messunsicherheit
$s_{xr}$	Beliebige Einheit	Mittlere relative Messunsicherheit
T	s	Fahrzeit
$T_1$	s	Laufzeit, wenn Schall und Wind parallel
$T_2$	s	Laufzeit, wenn Schall und Wind gegensinnig orientiert
$t_{\text{emp}}$	-	Empirischer t-Wert für den t-Test
$t_{\text{krit}}$	-	Kritischer t-Wert für den t-Test
$T_v$	K	virtuelle Temperatur
$u(x)$	Beliebige Einheit	Gesamtabweichung
$u(x_1)$	Beliebige Einheit	Zufällige Abweichung
$u(x_2)$	Beliebige Einheit	Systematische Abweichung
$u(x_i)$	Beliebige Einheit	Einzelunsicherheit der jeweiligen gemessenen Größe
$u(y)$	Beliebige Einheit	Gesamtunsicherheit nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung
$v$	m/s	Windgeschwindigkeit
$v/v_{\text{vorher}}$	m/s	Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t/t-1
$v_{00,\text{Lok}}$	m/s	Referenzgeschwindigkeit Lok
$v_{00,\text{Wag}}$	m/s	Referenzgeschwindigkeit Waggon
$v_{\text{rel}}$	m/s	Relativgeschwindigkeit Rad/Schiene
$\Delta v_{\text{Lok}}$	m/s	Geschwindigkeitsänderung Lok
$\Delta v_{\text{Wag}}$	m/s	Geschwindigkeitsänderung Waggon
W	-	Teststatistik
X	Beliebige Einheit	Zufallsvariable
$X(n_p+1)$	-	Position in der aufsteigend sortierten Datenreihe

$X_{arithm}$	-	Arithmetischer Mittelwert
$X_i$	Beliebige Einheit	Merkmalsausprägung, unabhängige Variable (exogen)
$X_n$	Beliebige Einheit	Merkmalsausprägung
$X_{quer}, Y_{quer}$	Beliebige Einheit	Arithmetischer Mittelwert, (un)abhängige Variable
$y^{\wedge}$	Beliebige Einheit	Abhängige Variable (endogen), Schätzwert von $y_i$ ; Wert auf der Regressionsgeraden zugehörig zu $y_i$
$y_i$	Beliebige Einheit	Abhängige Variable (endogen), Merkmalsausprägung
$Z$	-	Transformationsparameter
$z_i$	Beliebige Einheit	Merkmalsausprägung, weitere unabhängige Variable (exogen)

### Konstanten

$R = 287,06$	J/(kg·K)	spezifische Gaskonstante für Luft
$R_m = 8,3145$	J/(mol·K)	allgemeine (molare) Gaskonstante
$M_D = 18,01 \cdot 10^{-3}$	kg/mol	molare Masse des Wasserdampfs
$M_T = 28,97 \cdot 10^{-3}$	kg/mol	molare Masse der trockenen Luft

### Griechische Formelzeichen

$\widehat{\beta}_0$	Beliebige Einheit	Regressionskoeffizient, Schätzwert
$\widehat{\beta}_1$	Beliebige Einheit	Regressionskoeffizient, Schätzwert
$\widehat{\beta}_2$	Beliebige Einheit	Weiterer Regressionskoeffizient, Schätzwert
$\beta_i$	Beliebige Einheit	Standardabweichung
$\eta_{mech}$	-	Mechanischer Wirkungsgrad
$\eta_{emot}$	-	Wirkungsgrad E-Motor
$\eta_{ÜW}$	-	Übersetzungswirkungsgrad
$\eta_{rekup}$	-	Rekuperationswirkungsgrad
$\mu$	Beliebige Einheit	Erwartungswert
$\sigma$	Beliebige Einheit	Standardabweichung

### Operatoren und Bezeichnungen

$\sum$	Summe
$\Delta$	Differenz zweier Größen; Laplace-Operator
Gl.	Gleichung
Abb.	Abbildung
Tab.	Tabelle
'	Sättigung
2	Zustand 2

### Weitere Indices und Abkürzungen

:=	Definition
----	------------

## **Eidesstattliche Erklärung**

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

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

Graz, 05.04.2019



## Zusammenfassung

Ziel dieser Masterarbeit ist die Bestimmung von Partikelemissionsfaktoren (Non-Exhaust) für Schienenfahrzeuge in einem einröhrigen zweigleisigen Eisenbahntunnel mit Personen- und Güterzugverkehr. Ein kurzer literarischer Überblick soll die bis dato geringe Datenlage darstellen. Für die Partikelmessung wird ein Partikelmessgerät in einem Rettungstollen in der Mitte des Tunnels installiert. Durch Absaugung eines Teilvolumenstromes aus dem Tunnel und der Probennahme durch eine Sonde aus diesem Teilvolumenstrom, kann die Partikelkonzentration (TSP) in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  als gleitender 10 Minuten Mittelwert ausgegeben werden. Durch Heranziehung von Messdaten aus der näheren Umgebung des Landes Steiermark, ist eine Differenzbildung zwischen der Hintergrundkonzentration und der gemessenen PM-Konzentration für die Ermittlung der effektiven PM-Konzentration möglich. Nach darauffolgender statistischer Analyse der Rohdaten, werden anschließend Partikelemissionsfaktoren hergeleitet. Durch Simulation der Exhaust Partikelemissionen können diese von den gemessenen Partikelemissionen in Abzug gebracht werden und somit Non-Exhaust Partikelemissionsfaktoren abgeleitet werden. Auch diese werden einer statistischen Auswertung unterzogen. Zusätzlich erfolgt die Berechnung einer durchschnittlichen PM-Emission/Zug Non-Exhaust, um auch eine Regression mit wichtigen Zugparametern durchführen zu können. Für die Bestimmung der chemischen Bestandteile der Partikelfraktion wird eine chemische Analyse von mit Partikel belegten Filtern durchgeführt. Zuletzt werden noch Empfehlungen für weitere Validierungsmessungen bzw. Berechnungen gegeben.

## Abstract

The aim of this master thesis is to estimate non-exhaust particle emission factors. Therefore, measurements of particle fraction (TSP) are done in a single-tube double-track railway tunnel with passenger and freight traffic called Unterwaldertunnel in Styria. A short literature overview is given to show the sparse data material about this topic. For calculating the particle non-exhaust emissions factors a partial volume flow was sucked off from the tunnel through a sampling probe for getting the particle concentration in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  as 10 minutes average values. To determine the effective particle concentration, the background particle concentration (measured at two locations near Unterwaldertunnel) is subtracted from the measured particle concentration in the Unterwaldertunnel. After that, a statistical analysis with the raw data is done. Through a simulation of the exhaust particle emissions, the non-exhaust particle emissions can be calculated after subtracting the measured particle emissions (include exhaust + non-exhaust particles) from the simulated exhaust particle emissions. Additionally, an average non-exhaust particle emission factor per train is determined for doing a regression with important train parameters. Furthermore, a chemical analysis of the measured particle fraction on filters is done to get more information about the composition of the particle fraction in a railway tunnel. Finally recommendations for further measurements and calculations are given.

# 1 Einleitung

Die Entstehungsmechanismen der Partikelemissionen im Eisenbahnsektor sind weitestgehend bekannt, jedoch liegen bis dato nur geringe qualitative (Zusammensetzung der Emissionen) und quantitative (Partikelgröße und Menge) Informationen vor. Die Auswirkungen der Partikel auf die Umwelt insbesondere deren humantoxische Wirkung werden in dieser Arbeit ebenfalls beleuchtet, jedoch liegt der Fokus auf dem Einfluss der vorhandenen Partikel auf die Instandhaltung und Wartung der betriebs- und sicherheitstechnischen Einrichtungen im Eisenbahntunnel. Außerdem wird ein literarischer Überblick über bereits vorhandenes Datenmaterial in diesem Sektor gegeben, um vor allem die Komplexität der Bestimmung von Emissionsfaktoren aufzuzeigen. Die Partikelemissionen in Eisenbahntunnel setzen sich generell aus Exhaust-Partikel, hervorgerufen durch verbrennungsmotorische Vorgänge von Diesellokomotiven und Non-Exhaust-Partikel, verursacht durch Reibung bei Bremsvorgängen, durch den Rad-Schiene Kontakt, durch Aufwirbelung und Staubeintrag sowie Abrieb durch den Kontakt zwischen Fahrdrabt (Oberleitung) und Stromabnehmer, zusammen. Auch bei dieser Unterscheidung liegt das Augenmerk auf den Non-Exhaust-Partikeln, da deren Bestimmung großteils nur messtechnisch möglich und deren Menge nicht zu vernachlässigen ist.

In dieser Masterarbeit soll einerseits anhand von bereits vorliegenden Messdaten ein genereller Überblick über Partikelemissionen im Eisenbahnverkehr gegeben werden, andererseits werden Messungen in einem Eisenbahntunnel durchgeführt, um Grundlagedaten zu erheben sowie das noch sehr sporadisch vorhandene Datenmaterial zu erweitern bzw. zu ergänzen. Die Rohdaten der Messungen werden anschließend statistisch ausgewertet. Nach Ermittlung der Hintergrundkonzentration, wird diese von der gemessenen PM-Konzentration (TSP) in Abzug gebracht, um die effektive PM (Particulate Matter) -Konzentration zu erhalten. Zudem wird die PM-Konzentration Exhaust (verursacht durch dieselbetriebene Lokomotiven laut ÖBB Fahrplan) durch Simulation aus Erfahrungswerten berechnet und danach von den gemessenen Werten (=Summe Exhaust + Non-Exhaust) abgezogen. Anschließend erfolgt daraus eine Ableitung von PM-Emissionsfaktoren Non-Exhaust je Zuggattung, welche ebenfalls statistisch ausgewertet werden. Zusätzlich wird noch eine durchschnittliche Partikelemission Non-Exhaust pro Zug (unabhängig von der Zuggattung) errechnet. Darauffolgend werden für diese PM-Emission statistische Kennzahlen und Plots ermittelt, sowie durch eine Regressionsanalyse Korrelationen zwischen Emission und Zugparametern wie Gesamtmasse, Zuglänge und Waggonanzahl, nachzuweisen. Abschließend wird noch eine chemische Analyse akkumulierter Partikel auf einem Filter durchgeführt, um die einzelnen Bestandteile (Elemente) der Partikelfraktionen zu eruieren. Aus den Ergebnissen aller Auswertungen werden schlussendlich noch Handlungsempfehlungen für zukünftige Messungen bzw. Berechnungen gegeben.

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen über die Entstehung von Partikeln, deren Zusammensetzung und deren Auswirkungen auf den menschlichen Organismus sowie auf technische Einrichtungen in Tunnel erläutert.

Partikel bestehen grundsätzlich aus flüssigen, festen oder einem Gemisch aus festen und flüssigen Stoffen (flüssiger Stoff befindet sich auf festem Kern). Diese Stoffe können dabei verschiedenste Größen und chemische Zusammensetzungen aufweisen. Humanmedizinisch von großer Wichtigkeit sind Partikel mit aerodynamischen Durchmessern von kleiner 10 Mikrometer, auch Particulate Matter (PM10) genannt, Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), sowie auch Schwermetalle wie beispielsweise Blei, Cadmium oder selten auch Quecksilber. Entscheidend für die menschliche Gesundheit ist demnach vor allem die Größe und der chemische Aufbau der Partikel, welcher das Kondensationsvermögen, die Absorptionsfähigkeit der Luft für Wasser und das chemische Reaktionsverhalten beeinflusst. Grundsätzlich erfolgt eine Unterscheidung der Partikel in primär emittierte und sekundär gebildete.

### 2.1 Allgemeines über Partikel

Nachfolgend werden die Entstehung, die Toxizität auf den Menschen und die Auswaschung von primär emittierten und sekundär gebildeten Partikeln erläutert.

#### 2.1.1 Primär emittierte Partikel

Diese Klasse von Partikel beinhaltet die emittierten Anteile aus dieselbetriebenen Fahrzeugen und Lokomotiven und den damit verbundenen Rußausstoß sowie Partikel aus Abriebsmechanismen bei Bremsvorgängen, Reifen-Straße Kontakt, Rad-Schiene Kontakt bei Eisenbahnen, eventuell Kupplungsabrieb bei Fahrzeugen und Aufwirbelung von Oberflächenteilchen. Partikel aus windinduzierter Oberflächenerosion, Vulkanstaub oder Pollenflug werden den natürlichen Quellen zugeordnet. Die Dichte, die geometrische Form und die Größe beeinflussen die Aufenthaltszeit der Partikel und zudem weist der Aggregatzustand eine sehr starke Temperaturabhängigkeit auf. Eine Einteilung der Partikel nach ihrem aerodynamischen Durchmesser ist aufgrund dessen Wichtigkeit zweckmäßig (Abbildung 2-1) und kann wie folgt getroffen werden: [1] [2] [3]

- Gesamter Schwebestaub (Total Suspended Particles, TSP)
- Feinstaub (Particulate Matter; PM10, beinhaltet alle Partikel mit aerodynamischem Durchmesser kleiner gleich 10 Mikrometer)
- PM2,5 (beinhaltet alle Partikel mit aerodynamischem Durchmesser kleiner, gleich 2,5 Mikrometer)
- Grob (Coarse Mode Partikel) > 1 Mikrometer
- Fein (Akkumulationsklasse; 0,1-1 Mikrometer)
- Nukleationsklasse <= 50 Nanometer

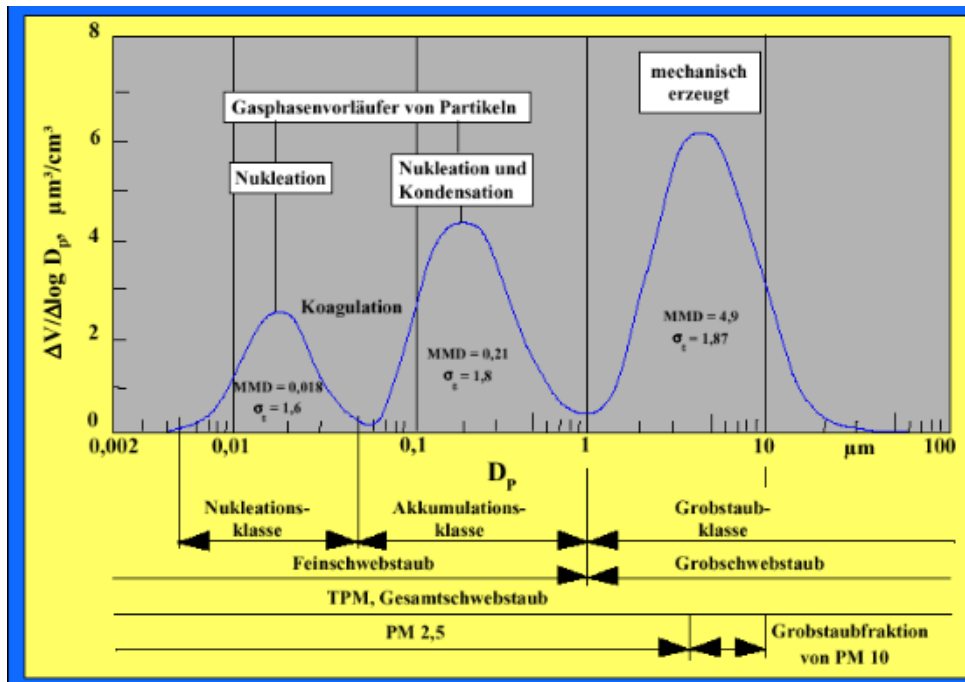


Abbildung 2-1: Größenspektrum [1]

### Nukleationsklasse

Diese Klasse von Partikel ist führend in Bezug auf die Partikelanzahl, jedoch ist der Anteil hinsichtlich der Masse gering. Diese entstehen vorwiegend infolge von Kondensationsvorgängen bei Verbrennungen (z.B. Dampfkondensation). Geringe Verweilzeiten und gute Agglomerationseigenschaften sind ebenfalls charakteristisch. [4]

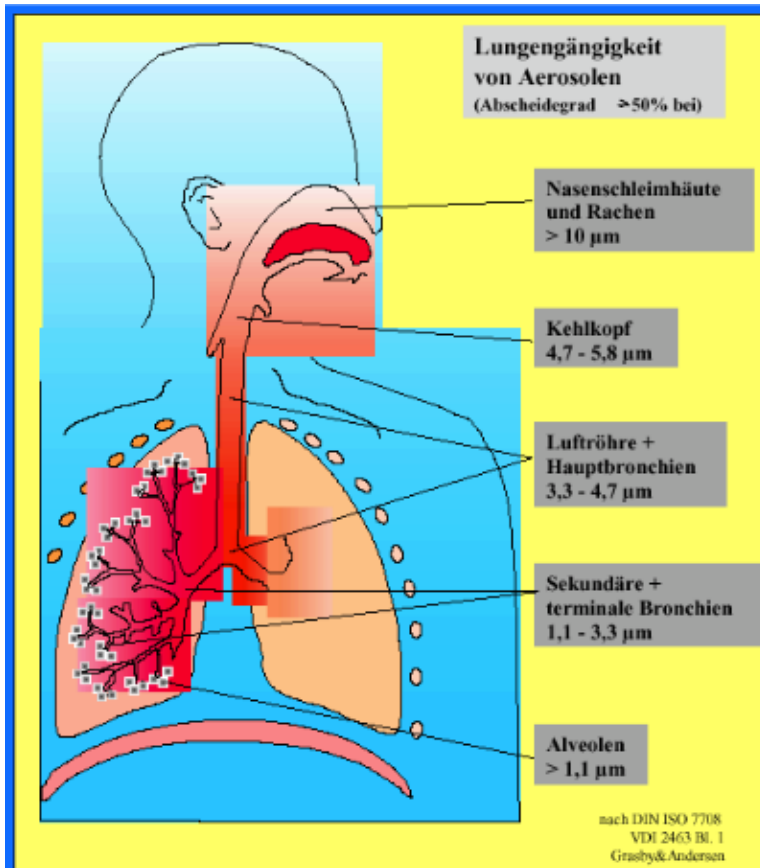
### Akkumulationsklasse

Die Entstehung lässt sich durch Akkumulation sehr feiner Partikel (aus der Nukleationsklasse stammend) erklären. Der Anteil an der Partikelgesamtmasse sowie die Aufenthaltszeiten in der Atmosphäre sind wesentlich höher. [4]

### Grobstaub

Dieser entsteht hauptsächlich durch mechanische Vorgänge wie beispielsweise Aufwirbelungs- oder Abriebsprozesse.

Nicht außer Acht zu lassen ist, dass je kleiner die Partikel sind, desto größer ist in der Regel deren Anzahl, aber desto geringer deren Massenanteil in der Atmosphäre und umgekehrt. Insbesondere feine und ultrafeine Partikel haben eine negative Wirkung auf die menschlichen Atmungsorgane, da diese die Nasenschleimhäute, den Rachen und die Bronchien durchdringen (=lungengängig) und somit den Gasausstoß an den Alveolen erschweren und zudem auch kanzerogene Wirkung aufweisen (siehe Abbildung 2-2). [1] [2] [3] [4]



**Abbildung 2-2:** Lungengängigkeit [1]

Eine weitere Unterscheidung erfolgt nach deren Herkunft.

#### 2.1.1.1 Exhaust-Partikel (Verbrennungsbedingt)

Die Entstehungsmechanismen sind hierbei gut erforscht. Die Entstehung liegt der unvollständigen Verbrennung von mit Verbrennungskraftmaschinen betriebenen Kraftfahrzeugen und Lokomotiven zugrunde. Diese Partikel bestehen aus Kohlenstoffmolekülen und Nebenprodukten (Ruß). Anlagerungen von PAHs (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) an Kohlenstoffkerne (organische Verbindungen) sind ebenfalls häufig vorhanden. Späne aus Metall, Motorölbestandteile und korrosive Partikel sind den anorganischen Partikeln zuzuordnen und können auch verbrennungsbedingt emittiert werden. Somit bildet die Summe aus Ruß und organisch gebundenem Kohlenstoff sowie anorganische Anteile diese Art von Partikel. Abbildung 2-3 illustriert die Bildung der Exhaust-Partikel als Funktion der Temperatur und des Druckes. Es ist zu erkennen, dass die Bildung bei sehr hohen Drücken und Temperaturen im Motor stattfindet. Alterung tritt in der Atmosphäre bei Umgebungsdruck und Temperatur nach kurzer Zeit ein. [1] [2] [3]

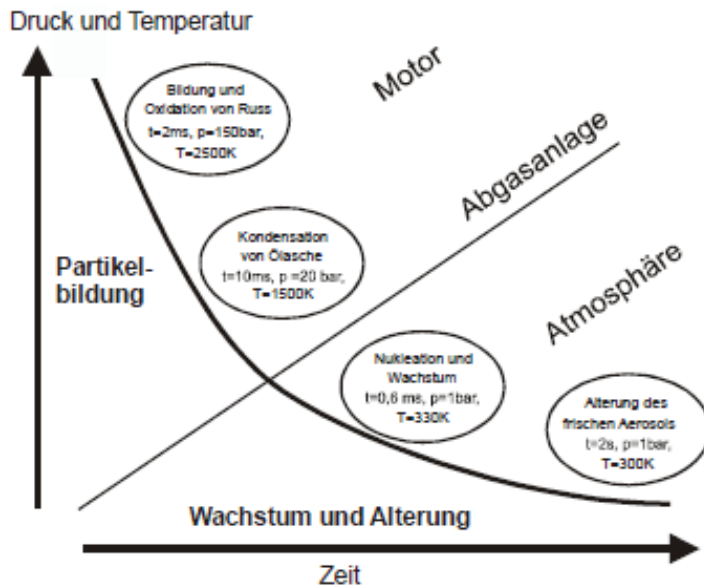


Abbildung 2-3: Bildung von Exhaust-Partikel [1]

### 2.1.1.2 Non-Exhaust Partikel (Nicht durch Verbrennungsvorgänge verursacht)

Dieser Art von Partikel wird zumeist zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt, obwohl deren Anteil an den gesamten Partikelemissionen erheblich ist, wie bereits durchgeführte Messungen zeigen. In dieser Arbeit wird daher der Fokus auch auf diese Art von Partikel liegen. Die Zuordnung zu deren Ursprung (=Emittent) ist meist schwierig und von vielen korrelierenden Einflussparametern abhängig. Fahrwegeigenschaften, Beschleunigungs- und Verzögerungscharakteristik der Straßenfahrzeuge und Schienenfahrzeuge, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und Schienen sowie Flottencharakteristik sind die wichtigsten Parameter. Die wichtigsten Emittenten sind Industrieprozesse, Aufwirbelungen (Split, Salz, Brems sand bei Schienenfahrzeugen, Bodenbearbeitungs- und Düngvorgänge in der Landwirtschaft, Pollenstaub, Bodenerosion, Kiesherstellung) und auch Abriebsmechanismen durch Bremsen, Kupplungen, Reifen und insbesondere bei Eisenbahnen der Fahrdrabt-Stromabnehmer und Rad-Schiene Kontakt. Nachstehende Abbildung 2-4 zeigt die Interaktion der Einflussparameter für den Straßenverkehr schematisch, wobei die stattfindenden Prozesse auch größtenteils im Schienenverkehr ablaufen.

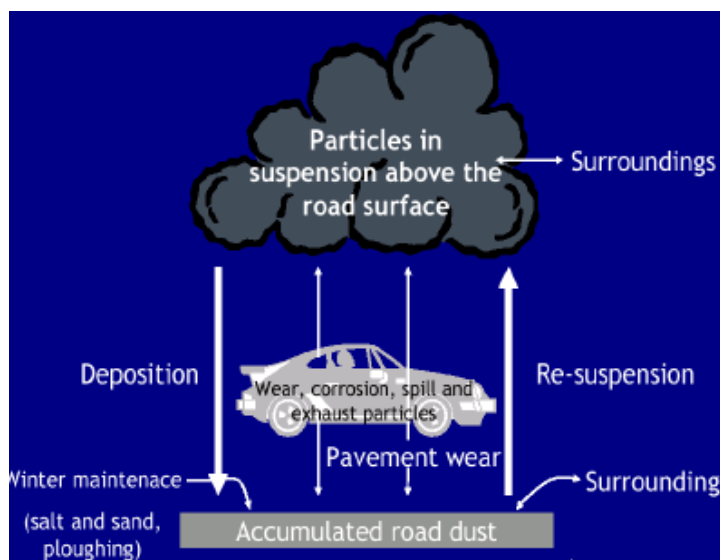


Abbildung 2-4: Interaktion der Einflussparameter [3]

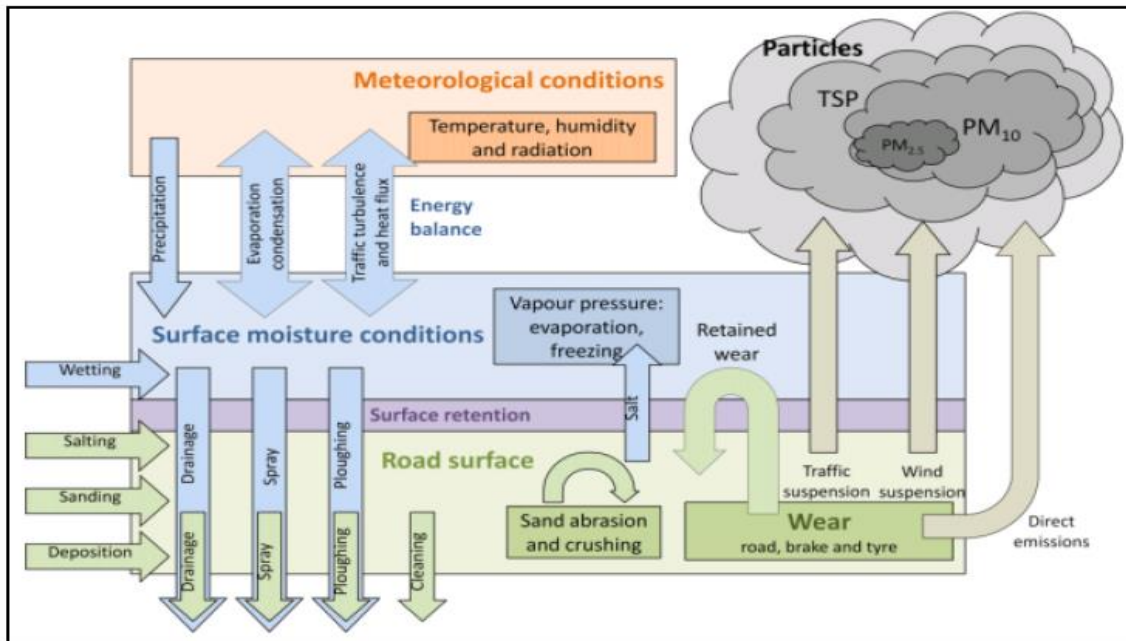
Durch Bremsvorgänge bei Gussklotzbremsen (vorwiegend im Güterverkehr eingesetzt) und Scheibenbremsen (im Personenverkehr im Einsatz) bestehen diese Partikel vor allem aus Eisen, Graphit (Anteil bei Gussbauteilen relativ hoch), Kokspulver, Antimontrisulfid (bei Scheibenbremsen im Einsatz für lärminderndes Verhalten) und teilweise auch aus Ruß aufgrund der Überschreitung von Schmelztemperaturen bei hoher Belastung. Einen Zusammenhang zwischen chemischem Aufbau, aerodynamischem Durchmesser (Korngröße), Verweildauer, Transportweg, Löslichkeit und Emissionsquelle zu finden gestaltet sich schwierig, jedoch ist ein erster Versuch laut [4] in Tabelle 2-1 dargestellt. [1] [2] [3]

**Tabelle 2-1:** Zusammenhang verschiedener Einflussgrößen [4]

	feine Partikel (< 2,5 µm)	grobe Partikel (> 2,5 µm)
Entstehung aus:	Gasen	Größeren Partikeln
Entsteht bei	chemischen Umwandlungen, Nukleation, Kondensation, Koagulation, Evaporation von Nebel- und Wolkentropfen, in denen Gase gelöst waren	mechanischen Vorgängen (Abrieb, Vermahlen, ...), Aufwirbelung
Zusammensetzung	Sulfat, Nitrat, Ammonium, elementarer Kohlenstoff, organischer Kohlenstoff, Schwermetalle, Wasser	Aufgewirbelter Staub (geogener Staub, Straßenabrieb), Flugasche, Elemente der Erdkruste als Oxide (Si, Al, Ti, Fe), CaCO <sub>3</sub> , NaCl, Meersalz, Pollen und Sporen, andere Teilchen biogenen Ursprungs,...
Löslichkeit	tw. löslich, oft hygroskopisch	oft unlöslich und nicht-hygroskopisch
Quellen	Verbrennungsvorgänge (Dieselruß, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , ...), Landwirtschaft (NH <sub>3</sub> ), atmosphärische Transformationen (sek. Partikel), bestimmte industrielle Prozesse, Lösemittel	(Wieder-)aufwirbelung von Staub von Straßen, Winderosion, Aufwirbelung durch anthropogene Tätigkeiten (Schüttvorgänge, Befahren unbefestigter Straßen, Bergbau, Abbruch- und Bauarbeiten...), biolog. Quellen, ...
Verweildauer in der Atmosphäre	Tage bis Wochen	Minuten bis Stunden
Atmosphärische Transportdistanz	einige 100 bis > 1000 km	< 1 km bis einige 10 km

In Abbildung 2-5 sind schematisch die Bildung und die Depositionsvorgänge von Non-Exhaust-Partikeln und die komplexe Interaktion vieler Prozesse (meteorologische Bedingungen und Feuchtigkeitsbedingungen der Oberfläche) dargestellt. Diese Prozesse lassen sich auch auf den Eisenbahnverkehr anwenden. [2]





**Abbildung 2-5:** Bildung und Deposition von Partikel [2]

### 2.1.2 Sekundär gebildete Partikel

Nicht zu vergessen sind die sekundär gebildeten Partikel. Chemische Verbindungen aus Kohlenstoff, Schwefel oder auch Stickstoff sind die häufigsten Vertreter. Daraus bilden sich Aerosole (organisch), Nitrate und Sulfate (anorganisch). Charakteristisch ist deren geringe Größe und deren große Verweilzeit. Die Größe dieser Partikel ist meist mit unter 10 Mikrometern zu beziffern, daher werden sie zu den PM<sub>10</sub> Partikel hinzugerechnet. Die Entstehung ist auf komplexe und bisher noch wenig erforschte luft- sowie photochemischen Reaktionen (v.a. Oxidationen) zurückzuführen. Die Bildung erfolgt hauptsächlich durch Oxidationen von Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) am Tag und weiteren chemischen Reaktionen, beeinflusst durch die Bewölkung, die aktuelle Luftfeuchtigkeit und maßgeblich auch durch Ozon (O<sub>3</sub>). Sekundär gebildete Partikel können zudem in organische und anorganische Stoffe unterteilt werden, wobei die Bildung der organischen Partikel noch weitgehend unerforscht ist. Prinzipiell werden organischen Partikel durch Adsorption an festen Partikeln, durch Kondensation infolge photochemischer Reaktionen oder durch Auflösung von Gasen gebildet. Photochemische Prozesse finden großteils in den Sommermonaten statt und adsorptive Vorgänge werden durch Feuchtigkeits- und Temperaturfluktuationen induziert. [1] [2] [3]

### Entfernungsmechanismen aus der Luft

Die Aufenthaltszeit in der Luft wird sehr stark vom aerodynamischen Durchmesser (Korngröße) und der chemischen Zusammensetzung beeinflusst, die wiederum Einfluss auf die Wasserlöslichkeit hat.

Bei großen Partikel (größer 20 Mikrometer) erfolgt die Deposition schon nach einigen Stunden, da die Gravitation maßgeblich ist. Partikel kleiner als 20 und größer 1 Mikrometer können bis zu 4 Tage in der Atmosphäre verweilen.

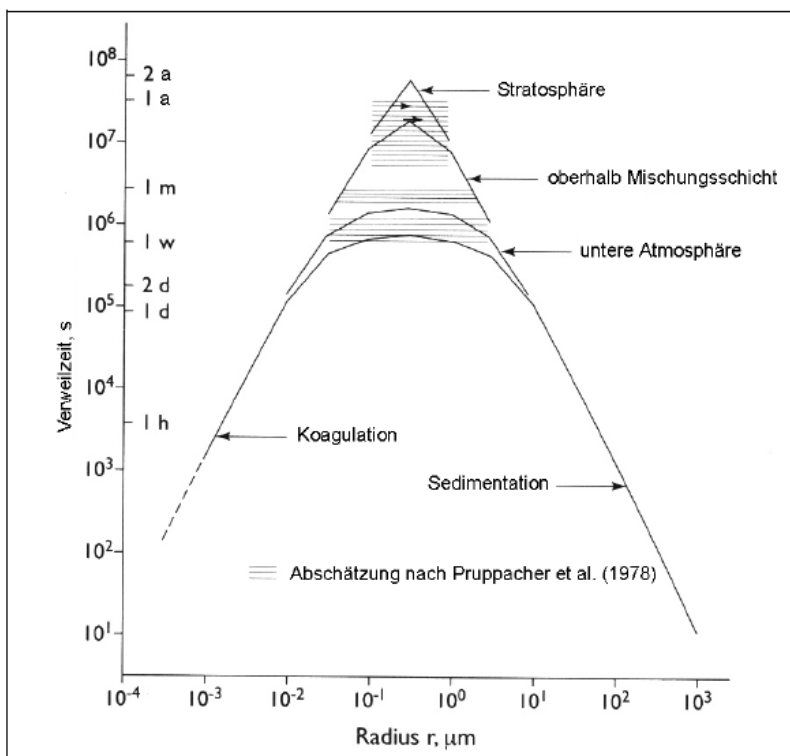
Akkumulationspartikel werden vorwiegend aus der Luft ausgewaschen (abhängig von deren Wasserlöslichkeit) und besitzen die größte Aufenthaltszeit mit bis zu 10 Tagen und dadurch können diese auch große Entfernungen (mehr als 1000 km) zurücklegen.

Nukleationspartikel akkumulieren zuerst zu größeren Partikelfraktionen bzw. es kommt zur Koagulation mit Partikeln größeren Durchmessers (gute Diffusionseigenschaften).

Diese werden anschließend mit den größeren Partikeln entfernt. Ein Wachstum durch Kondensation dieser Partikelklasse ist auch möglich.

Generell findet die Entfernung größerer und ultrafeiner Partikel aufgrund deren guten Verdünnungseigenschaften zügig statt (nahe Emissionsquelle), wobei Partikel mit mittlerem Durchmesser (Akkumulationsklasse) auch in größerer Entfernung zur Quelle noch nachweisbar sind. Vorhandene Kohlenstoffmoleküle in der Atmosphäre weisen eine schlechte Absorptionsfähigkeit für Wasser auf (unpolar), daher ist eine Entfernung erst nach Oxidationsvorgängen mit einhergehender Feuchtigkeitsaufnahme mit entsprechend größerer Verweilzeit möglich. Partikel anorganischen Ursprungs weisen daher generell kürzere Verweilzeiten auf als organische.

Partikel aus natürlichen Quellen wie Vulkanstaub können ebenso große Entfernungen zurücklegen. In Abbildung 2-6 ist die Verweilzeit in Abhängigkeit vom Radius der Partikel graphisch dargestellt. Bei einem bestimmten Radius ist die Verweilzeit ein Maximum. [1] [3] [4]



**Abbildung 2-6:** Verweilzeit der Partikel [4]

Um den Ursprung von Nicht-Abgas Partikeln zu eruieren respektive den Bereich einzugrenzen, ist es essentiell, die einzelnen Bestandteile der erfassten Partikel zu bestimmen. Die wichtigsten und am häufigsten vorkommenden Stoffe sind nachfolgend aufgelistet und werden in Bezug auf ihre Herkunft und ihre Wirkung kurz erläutert. [4] [5]

### Wasser (H<sub>2</sub>O)

Der Wasseranteil der Partikel kann je nach Luftfeuchte stark variieren. Die messtechnische Erfassung erfolgt meist gravimetrisch am Filter, da eine andere beispielsweise direkte Bestimmung meist mit hohem Aufwand verbunden ist. Eine negative humantoxische Wirkung ist nicht gegeben. [4] [5]

## **Material organischer Herkunft (OM)/organischer (OC) und elementarer Kohlenstoff**

Der elementare Kohlenstoff ist hauptsächlich Verbrennungsvorgängen zuzuordnen und findet sich in Form von Rußpartikel (besteht großteils aus Kohlenstoff sowie Nebenprodukte) aus der dieselmotorischen Verbrennung oder Hausbrand wieder. Organischer Kohlenstoff und organisches Material können aus anthropogenen Quellen (Verbrennung, meist unvollständig) oder biogenen Quellen (Bakterien) stammen und diese kommen meist in Verbindungen mit Stickstoff, Sauer- oder Wasserstoff vor. Der Abrieb von Gussklotzbremsen im Güterverkehr kann auch mehr Ruß freisetzen. Genaue Details über Entstehung und Aufbau sind noch nicht bekannt. Humantoxisch wirken sich diese Stoffe negativ aus und können den Gasausstoß in der Lunge erschweren. Auch kanzerogene Wirkungen sind nicht ausgeschlossen. Zu erwähnen ist an dieser Stelle auch noch Graphit als eine Modifikation des Kohlenstoffs. Dieser ist teilweise in den Schleifleisten der Oberleitung enthalten, um Abriebsbeständigkeit zu gewährleisten. [5] [6]

## **Natrium (Na), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K) und Chlor (Cl) [5]**

Das Element **Kalium** kommt vorwiegend in Biomasseverbrennungen als Tracerstoff vor und ist im Eisenbahnverkehr nicht anzutreffen. Im menschlichen Organismus nimmt es wichtige Funktionen ein wie Stimulierbarkeit des Nervensystems oder Blutdruckregelung. Für Pflanzen und Bodenlebewesen ist es ebenfalls essentiell. In Verbindung mit OH Ionen bildet sich Kalilauge und diese ist ätzend. Als Reinstoff ist es nicht gefährlich.

**Calcium** ist insbesondere in Streusplitt zu finden, wird aber durch Erosionsprozesse ebenso freigesetzt. Für den menschlichen Körper ist es großteils gesundheitsfördernd (für Knochenaufbau erforderlich), jedoch bei extrem hoher Dosis kann es ebenfalls zu übermäßigen Calciumablagerungen kommen.

**Natrium** ist als Reinstoff nicht toxisch, aber in Verbindung mit OH Ionen weist es ätzende Wirkung auf. Die sehr exotherme Reaktion mit Wasser sollte beachtet werden und der dabei entstehende Wasserstoff kann darauffolgend zur Explosion führen. Bei einer Übermenge von Natrium im Körper führt dies zu Nierenschädigungen und Bluthochdruck. Andererseits übt es wichtige Funktionen im Bereich des Nervensystems und des Flüssigkeitshaushaltes aus. Einsatz findet Natrium in Auftauchemikalien, im Eisenbahnsektor tritt es nur vereinzelt auf.

**Chlor bzw. Natriumchlorid** wird meist als Auftausalz eingesetzt und ist ebenfalls ätzend. Unter speziellen physikalischen Bedingungen kann Chlor vom Wasser in die umgebende Luft übergehen und damit Atemwegsbeschwerden bei Tieren hervorrufen. Im Eisenbahnverkehr ist es jedoch die Ausnahme.

**Magnesium** findet sich in Streusplitt wieder, kann aber auch durch Erosionsvorgänge freigesetzt werden, da es sich meist als Legierungselement wiederfindet. Sehr feines Magnesiumpulver kann sich selbstentzünden aufgrund der Reaktionsfreudigkeit mit Sauerstoff, hervorgerufen durch ein großes Oberflächen-Volumenverhältnis. Ein Magnesiumbrand mit Temperaturen nahe 3000°C kann nur durch Erstickung wirkungsvoll gelöscht werden. Andere Löschmittel wie Stickstoff, Wasser oder Kohlendioxid führen zu stark exothermen Reaktionen (Knallgas). In Eisenbahntunnel ist nur mit geringen Mengen zu rechnen.

## **Komponenten mineralischer Natur**

Mineralische Anteile entstehen durch Aufwirbelungsvorgänge von Oberflächenstaub, induziert durch fahrende Züge, Winde oder Baustellenstaub. Die Erfassung ist meist nur mit beträchtlichem Aufwand möglich, daher werden diese Komponenten als nicht-näher-spezifizierter Rest ausgegeben. [5]

### **Eisen (Fe)**

Dieses Element tritt im Schienenverkehr durch Abrasionsvorgänge bei Bremsen (v. a. Bremsbacken und Bremsscheiben) und bei Schienen durch den Rad-Schiene Kontakt sehr häufig auf. In längeren Eisenbahntunnel kann es bei hohen Konzentrationen aufgrund deren ferromagnetischen Eigenschaften zu technischen Defekten der sicherheits- und betriebstechnischen Anlagen führen. Daher ist eine quantitative Bestimmung unerlässlich. Weitere Emittenten von Eisenstaub sind die Metallindustrie oder Zusätze bei korrosionsschützenden Farben. Generell ist Eisen als Spurenelement wichtig für den menschlichen Organismus (Bestandteil des Hämoglobins), in hohen Konzentrationen führt es jedoch zu Organschäden (insbesondere der Leber), kann unter Umständen Infektionskrankheiten begünstigen, Lungenkrebs verursachen oder zu einer Staublunge führen. [5]

### **Zink (Zn)**

Zink ist ebenfalls in Bremsbacken und Bremsscheiben enthalten, kann daher nahe Eisenbahnanlagen vermehrt auftreten. Zink wird aber auch durch industriellen Abfall, Batterien, Schuttmaterial auf Baustellen oder kalorischen Kraftwerken freigesetzt. Für den menschlichen Körper ist es wiederum ein Spurenelement und für den Eisweiß-, Zucker- und Fetthaushalt wichtig. Schädigende Wirkung ist bei vermehrter Einatmung von Zinkstaub zu erwarten, es kommt zu Übelkeit sowie zu erhöhtem Fieber (Zinkfieber). Eine dauerhafte Schädigung ist bei nicht regelmäßiger Exposition nicht zu erwarten. [5]

### **Blei (Pb)**

Es ist hauptsächlich in Stahlwerken, Korrosionsschutzfarben oder vereinzelt noch in Kraftstoffen enthalten, im Eisenbahnbereich sind keine bzw. nur vereinzelte Vorkommen wahrscheinlich. Metallisches Blei ist für den Menschen grundsätzlich nicht toxisch, aber durch Einatmen von Bleistäuben kommt es zu erhöhter Müdigkeit, Kopfschmerz und zu Schwierigkeiten bei der Blutneubildung, Sauerstofftransport im Blut und Schädigungen der Muskulatur. Die Ausscheidung von Blei nimmt einen großen Zeithorizont in Anspruch (chronische Vergiftung), da es sich akkumuliert. Bei extrem hohen Konzentrationen kann es zum Tod führen. Auswirkungen auf Trinkwasser sowie Böden sind aufgrund der Akkumulationsfähigkeit nicht zu vernachlässigen. [5]

### **Kupfer (Cu)**

Kupfer entsteht durch Verschleiß der Bremsbeläge, somit muss dem Element im Schienenverkehr Bedeutung zugemessen werden. Weitere Emissionsquellen sind der Fahrdrabt (Oberleitung), die Schleifleisten des Stromabnehmers im elektrifizierten Schienenverkehr, die Metallindustrie sowie die Erosion durch Winde. Es wird weiters sehr häufig im Elektrobereich als Stromkabel eingesetzt, aufgrund der guten elektrischen Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Es muss beachtet werden, dass bei Kontakt mit einem edleren Metall unter Feuchtigkeitseinfluss es zur Kontaktkorrosion kommt. Bei geringen aufgenommenen Kupfermengen liegt keine toxische Wirkung für den Menschen vor. Infolge von Genmutationen kann jedoch schon eine geringe Menge an Kupfer zu Übelkeit, Brechreiz, Schwindel oder zur Organschädigung führen (Leber usw.), aufgrund des gestörten Kupferstoffwechsels (Kupferspeicherkrankheit). [5]

### **Nickel (Ni)**

Nickel ist Bestandteil von Bremsbacken (hohe Temperaturbeständigkeit), wird aber auch in der Metallindustrie und bei Akkumulatoren verwendet. Auch im menschlichen Organismus ist Nickel in geringen Konzentrationen vorhanden und in diesen Mengen verträglich. Bei überhöhten Konzentrationen von Nickelstaub kann dies zu Atemwegserkrankungen, Lungenerkrankungen, Hautausschläge oder Übelkeit führen.

Zudem muss beachtet werden, dass aufgrund der ferromagnetischen Eigenschaften in Eisenbahntunnel ein erhöhtes Risiko für Defekte bei elektrischen Anlagen besteht. [5]

### **Cadmium (Cd)**

Dieses Element wird durch industrielle Prozesse wie Müllverbrennung, Batteriebetrieb und Recycling sowie durch Farbenherstellung in die Atmosphäre freigesetzt, aber auch Tabakrauch beinhaltet Cadmium. Für den menschlichen Körper führt eine zu hohe Konzentration zu Nierenschäden, Magenbeschwerden, Beeinträchtigung des Zentralnervensystems oder schlimmsten falls zu Krebsbildung. In Gewässer weist Cadmium lange Transportwege auf, da Schlamm Cadmium absorbiert. Weiters wirkt es sich bei erhöhter Absorption negativ auf Tiere und Pflanzen aus. Im Eisenbahnsektor tritt dieses Element nur in sehr geringem Ausmaß auf. [5]

### **Chrom (Cr)**

Grundsätzlich wird Chrom über die Ernährung in den Körper aufgenommen, da Chrom in der richtigen Form (meist Chrom (III)) wichtig für den Stoffwechsel ist. Es muss aber beachtet werden, dass insbesondere Chrom (VI)oxid, welches in der Textil- und chemischen Industrie sowie bei Beschichtungen und als Legierungselement für die Korrosionsbeständigkeit Einsatz findet, kanzerogen ist. Beeinträchtigung des Immunsystems, Leber- und Nierenschäden können auch Folgen eines hohen Chrom (VI)gehaltes in der Luft sein. Auch im Eisenbahntunnel sind Chromvorkommen (Chrom (VI)oxid) sehr wahrscheinlich. [5]

### **Zinn (Sn)**

Die reine Form von Zinn birgt für den Menschen nur geringe Gefahren mit sich, jedoch alle organischen Zinnverbindungen sind resistent und besitzen ein geringes Abbaupotential. Die Aufnahme erfolgt entweder durch Einatmung, Nahrungsaufnahme oder durch Kontakt mit der Haut. Die Auswirkungen der organischen Verbindungen sind Schäden in der Leber, Kopfschmerz, Schlafstörungen, reduzierte Funktion des Immunsystems, Zerstörung der Erythrozyten über längere Zeit. Kurzfristig können auch Übelkeit, extremes Schwitzen oder Atemprobleme auftreten. Eingesetzt wird Zinn in der Industrie, aber auch bei Legierungen in Materialien für Eisenbahnen, aufgrund des Korrosionswiderstandes. [5]

### **Beryllium (Be)**

Beryllium wird meist als Legierungszusatz eingesetzt, insbesondere bei Brems Scheiben, aufgrund des guten Korrosionswiderstandes, der hohen Härte und der guten Ermüdungsbeständigkeit. Thermische und elektrische Leiteigenschaften sind ebenfalls gegeben. Durch Bremsenabrieb bei Schienenfahrzeugen entsteht feiner Staub, welcher durch Einatmung zu Lungenbeschwerden, Müdigkeit und Atemproblemen führt. Die guten elektrischen Eigenschaften können auch in Eisenbahntunnel zu Störungen der elektrischen Infrastruktur bei erhöhten Konzentrationen führen. Dieser Staub kann auch Allergieauslöser (auch Chronic Beryllium Disease genannt), sein. Weiters kann Beryllium in die Luft und ins Wasser gelangen, zum Beispiel durch Metallerzeugung oder Verbrennungsprozessen. [5]

### **Mangan (Mn)**

Dieses Element ist für den Menschen ein wichtiges Spurenelement, bei Mangel kommt es zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen (z.B.: bei der Haut, im Blut). In die Atmosphäre gelangt Mangan durch industrielle Prozesse (Verbrennung) und es ist auch ein häufiger Legierungszusatz. Daher ist ein Auftreten nahe Eisenbahnanlagen wahrscheinlich. Humanmedizinisch führt eine zu hohe Konzentration zu Muskelschwäche, Nervenschädigungen, Schlafprobleme und Kopfschmerz. Die Schädlichkeit bei zu großen Mengen im Wasser sollte nicht unterschätzt werden. [5]

### **Molybdän (Mo)**

Dieses Element besticht vor allem durch seine mannigfaltigen Einsatzmöglichkeiten. Es findet sich in Katalysatoren, Elektroden, Heizdrähten und Düngemittel wieder. Die hohe Bruchfestigkeit, Härte und der relativ hohe Elastizitätsmodul machen es zu einem häufig eingesetzten Legierungselement. Zudem weist es einen hohen Schmelzpunkt auf, weshalb es vor allem bei Anwendungen mit erhöhten Temperaturen eingesetzt wird. In der näheren Umgebung von Eisenbahnanlagen sowie in Eisenbahntunnel ist es daher auch anzutreffen. Die gesundheitlichen Auswirkungen sind noch nicht ausreichend erforscht, aber es wurde bei Fabrikarbeitern, die einer erhöhten Belastung ausgesetzt waren, Störungen in der Leberfunktion sowie Hand-, Fuß- und Knieschmerzen festgestellt. Umweltbezogene Auswirkungen sind noch nicht näher bekannt. [5]

### **Antimon (Sb)**

Antimon kann durch Trinkwasser oder durch Atmung in den Körper gelangen. Von Menschen sollte auch Hautkontakt vermieden werden. Bei Einatmung ist Antimon an Sauerstoff gebunden, dies führt unter längerer Exposition zu Haut- und Lungenreizungen, Herzbeschwerden oder Brechreiz sind schwerwiegendere Folgen. Einzelne Krebsfälle mit Antimon als Auslöser sind bereits nachgewiesen. Die Ausbreitung durch den Transport in Grundwasser ist auch zu beachten. Emissionsquellen sind hauptsächlich die Industrie und Bremsanlagen. [5]

### **Vanadium (V)**

Menschen nehmen Vanadium durch Nahrungsmittel auf, wobei eine zu hohe Exposition gegenüber Vanadiumstaub zu Lungen-, Haut-, Augenreizungen, Ausschlag, Kopfschmerz, Übelkeit und Schwindel führt. Als Legierungszusatz ist es häufig im Einsatz aufgrund der damit verbundenen Zähigkeitserhöhung und Härtesteigerung. Die Endzündbarkeit von Vanadiumstaub ist nicht zu unterschätzen. [5]

### **Silber (Ag)**

Silber wird meist als Legierungszusatz für Fahrdrähte der Oberleitung verwendet. Der Einsatz lässt sich durch die enorme elektrische Leitfähigkeit begründen. Wenn Silber durch die Atmung in den Körper gelangt, führt dies meist zur Atemwegsbeschwerden, Kopfschmerz oder Entzündungen. Bei größeren Mengen sind Bewusstlosigkeit und starker Schwindel die Folge. Langfristig können Augen-, Nieren- oder Leberschäden auftreten. Aufgenommenes Silber kann nur begrenzt resorbiert werden und daher haben auch hohe Konzentrationen langfristig negative Folgen. Die gute elektrische Leitfähigkeit ist auch in Tunnel in Kombination mit den dortigen elektrischen Anlagen problematisch. [5]

### **Quarz (SiO<sub>2</sub>)**

Quarzsand ist nur mehr vereinzelt im Eisenbahnverkehr im Einsatz, vornehmlich wird dieser als Bremsand zur Bremsunterstützung auf die Gleise gestreut. Die Bestandteile sind Silizium und Sauerstoff. Reiner Siliziumstaub ist nur bei sehr hohen Mengen gesundheitsschädlich. Als Verbindung mit Sauerstoff (Siliziumdioxid, Staub) ist Silizium sehr gefährlich, da starke Augen- und Hautreizungen auftreten, Ausschläge und Juckreiz auftreten. Es wurde auch ein kausaler Zusammenhang zwischen Siliziumstaub und Lungenkarzinomen bei langer Exposition gefunden. [5]

## 2.2 Partikelentstehung

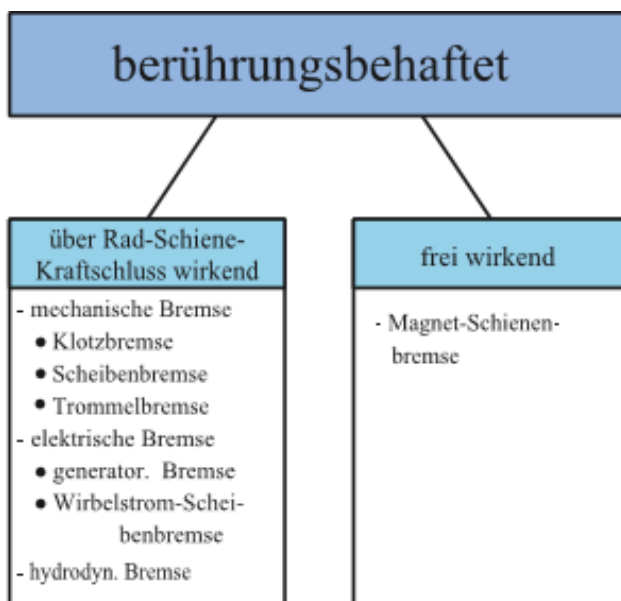
In den nachstehenden Ausführungen wird auf die Emissionsquellen (und deren Mechanismen zur Emissionsentstehung), welche im Eisenbahnverkehr maßgeblich sind, näher eingegangen.

Die Emissionen von Partikel im Allgemeinen setzen sich im Schienenverkehr aus folgenden Mechanismen zusammen: [7] [8]

- Bremsenabrieb
- Radabrieb
- Schienenabrieb
- Fahrdrabt- und Stromabnehmerabrieb

### 2.2.1 Bremsenabrieb

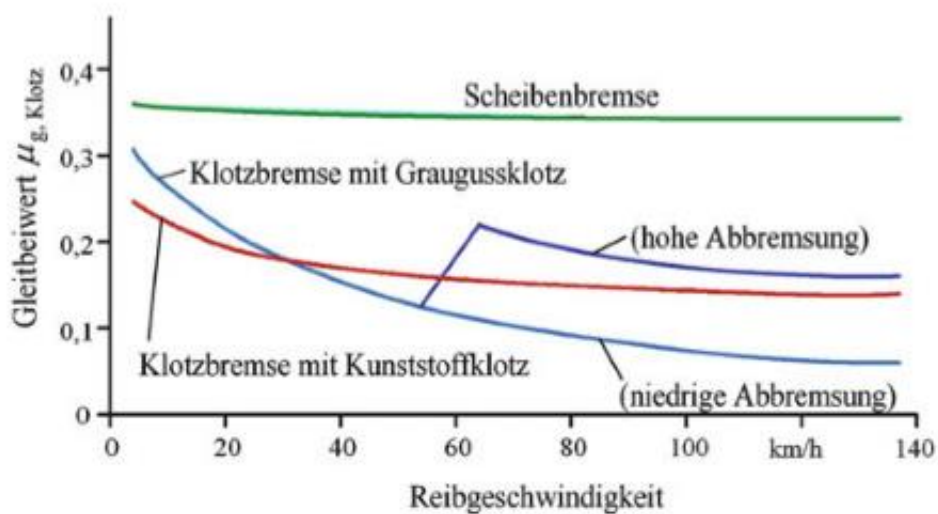
Die Bremsen erfüllen in der Schienenfahrzeugtechnik wichtige Aufgaben wie Geschwindigkeitsreduktion, Sicherung von stehenden Fahrzeugen und Sicherstellung einer konstanten Geschwindigkeit auf Gefällestrrecken. Dabei sind die Bremsbacken und Bremsscheiben hohen Reibkräften ausgesetzt. Es existieren eine Vielzahl an Bremssystemen für spurgeführte Fahrzeuge, es wird aber nur überblicksmäßig auf die berührungsbehafteten Bremssysteme (nur mechanische Bremse) näher eingegangen, da vor allem durch diese der Abrieb (Non-Exhaust-Partikel) entsteht. Abbildung 2-7 zeigt eine generelle Übersicht der berührungsbehafteten Bremsen. [7] [8]



**Abbildung 2-7:** Bremseneinteilung [7]

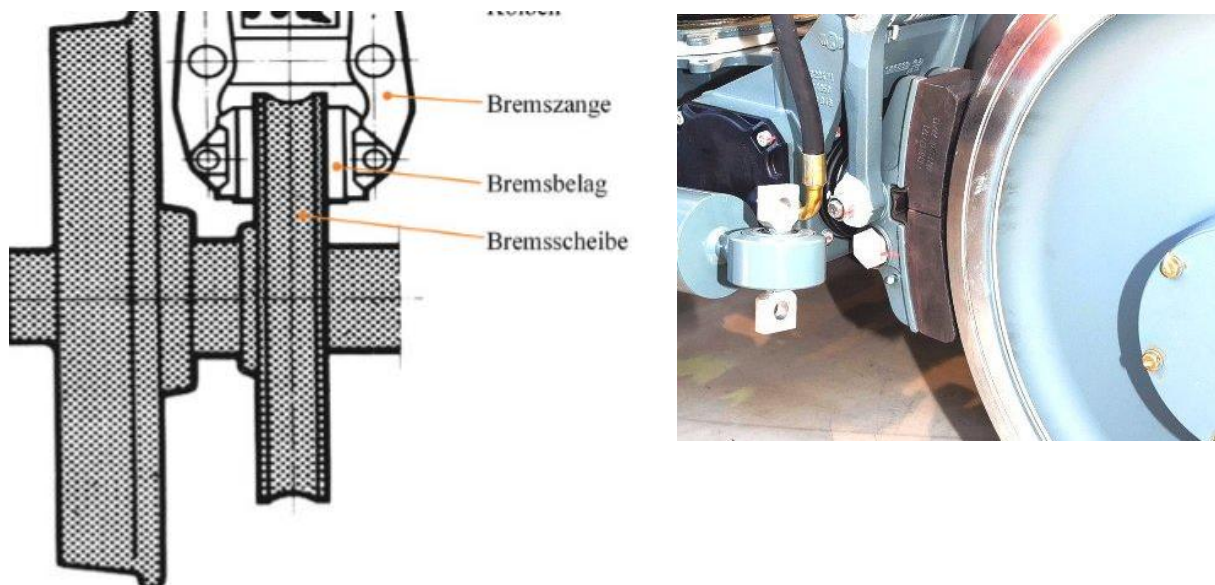
Während des Bremsvorganges wird kinetische Energie des Fahrzeuges in thermische Energie umgewandelt (durch Reibung zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe) und damit dissipiert. Ein Teil der kinetischen Energie wird durch andere Bremssysteme wieder als elektrische Energie in das Versorgungsnetz rückgespeist. Um gutes Brems- und Traktionsverhalten zu gewährleisten, sind Einflussfaktoren wie Verschmutzung, Materialkombination und Witterung in der Entwicklung zu berücksichtigen. Der Kraftschlussbeiwert zwischen Schiene und Rad sollte möglichst hoch sein, um Bremskräfte besser übertragen zu können. Des Weiteren sind die Lärmemissionen beim Bremsen beachtlich, daher werden z.B. in Deutschland schon seit geraumer Zeit Bremsklötze aus Grauguss (bessere Duktilität bei dynamischen Belastungen, v. a. im Güterverkehr noch vermehrt im Einsatz) durch Kunststoff-Klötze substituiert. Daraus ergeben sich geringere Lärmemissionen, keine elektrisch und magnetisch leitfähigen Bremsstäube, welche durch Lüfter von Lokomotiven angesaugt werden könnten

und höhere Kraftschlussbeiwerte, auch bei größeren Reibgeschwindigkeiten. Durch den Einsatz von Kunststoffen muss aber mit anderen freiwerdenden Stäuben und Wirkungen gerechnet werden. Abbildung 2-8 zeigt den Kraftschlussverlauf über der Reibgeschwindigkeit. [7] [8]



**Abbildung 2-8:** Verlauf des Reibbeiwertes [7]

Bei zu geringem Kraftschluss verlängert sich der Anhalteweg und es kann zu Blockierungen der Räder verbunden mit Radschäden kommen. Um den Kraftschlussbeiwert zu steigern werden meist Putzklotze (für die Reinigung der Bremsscheibe), Bremsen mit Schlupfsteuerung, Magnetschienenbremse oder Bremsand eingesetzt. Letzteres führt zur Erhöhung der toxischen PM-Emissionen aufgrund des Quarzgehaltes. Abbildung 2-9 zeigt den generellen Aufbau einer Scheibenbremse links und einer Klotzbremse rechts. [7]



**Abbildung 2-9:** Aufbau Scheibenbremse links [7], Aufbau Klotzbremse rechts [31]

Sehr viele Fahrzeuge verwenden geteilte Klotzeinheiten, um eine gleichmäßigere Druckverteilung und damit einhergehenden gleichmäßigeren Abrieb sowie günstigere Wärmeverteilung zu ermöglichen.

Um die Wartungskosten zu senken, höhere Bremsleistungen bei höheren Reibgeschwindigkeiten zu ermöglichen (Reibwert annähernd konstant), Quietschen und Rucke beim Anhalten zu vermeiden, längere Lebensdauer und verbesserte Kompaktheit zu erreichen, werden heute bei Personenzügen ausschließlich und im Güterverkehr zunehmend



Scheibenbremsen verbaut. Die Bremsscheiben bestehen vorwiegend aus Grauguss (meist Kugelgraphit) und die Beläge meist aus gesinterten Metallen. Dadurch können infolge Abriebsvorgänge verschiedene Sinterwerkstoffe frei werden.

In Abbildung 2-10 sind drei Bremsscheiben einer Radsatzwelle, einer üblichen Ausführung, ersichtlich.



**Abbildung 2-10:** Radsatzwelle mit Scheibenbremsen [7]

Der dritte Vertreter ist die Trommelbremse, wobei diese auch vermehrt durch Scheibenbremsen abgelöst wird. Die Werkstoffe sind auch hier vorwiegend Grauguss mit/ohne Kugelgraphit.

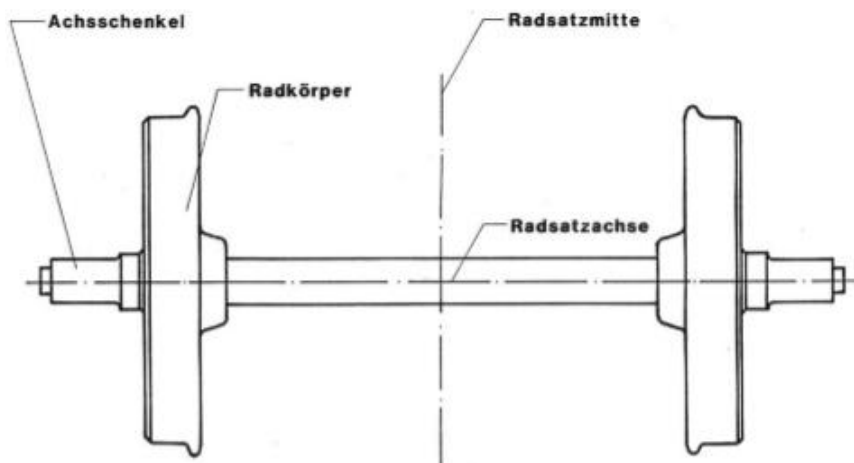
Einen großen Einfluss auf die Bremswirkung bei Schienenfahrzeugen haben die Umgebungsbedingungen (z.B.: Laub oder Feuchtigkeit auf den Gleisen). Um auch unter diesen Umständen noch eine ausreichende Bremswirkung zu erzielen, ist in Abhängigkeit des Bahnbetreibers und den Höchstgeschwindigkeiten des Zuges, eine vom Rad-Schienen Kontakt unabhängige Bremsanlage erforderlich. Die Bremswirkung wird erzielt durch Aufpressen der Klötze auf die Schienenköpfe infolge von Wirbelströmen induziert durch elektromagnetische Felder. Es kommt zur Reibung zwischen Schienenkopf und Polschuh. Durch diese tribologischen Effekte entstehen wiederum Eisenpartikel. Abbildung 2-11 zeigt eine solche Bremse. [7]



**Abbildung 2-11:** Magnetschienenbremse [7]

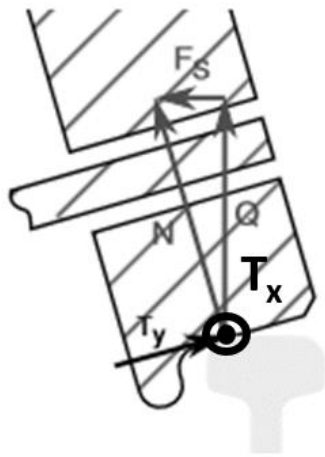
## 2.2.2 Radabrieb/Schienenabrieb

Um den Radabrieb (bzw. Schienenabrieb durch Rad-Schiene Kontakt) besser zu verstehen, wird nachfolgend näher auf das Zusammenspiel zwischen Rad und Schiene eingegangen. Grundsätzlich sind heute die Prozesse im Kontaktbereich zwischen Schiene und Rad noch nicht vollständig erfasst. Die Schiene erfüllt als Hauptfunktion die Spurführung des Rades, da keine aktive Lenkung des Rades möglich ist. Um das Rad in der Spur zu halten, müssen die Materialien und die Konstruktion von Rad und Schiene aufeinander abgestimmt sein. Die wichtigsten Funktionen des Rades und der Schiene sind generell die Gewichtsaufnahme des Waggons (tragende Funktion) und Spurführungsfunktion. Der Kontaktbereich (Lauffläche) zwischen Rad und Schiene kann mit einer durchschnittlichen Fläche von  $1,5 \text{ cm}^2$  beziffert werden. In dieser Fläche treten auch die Kontaktkräfte auf. Daher sollte die Fläche sehr klein sein, um geringen Materialverschleiß und Rollwiderstand zu gewährleisten. Um das Rad auf der Schiene sicher zu führen und um die Zentrifugalkräfte bei Kurvenfahrten am höher belasteten Schienenaußenbogen besser aufzunehmen, werden innenliegende Spurkränze verwendet. Die Räder sind starr mit der Achswelle verbunden und die Achsschenkel dienen zur Kraftübertragung vom Wagenkasten zum Radsatz (siehe Abbildung 2-12). [9] [10]



**Abbildung 2-12:** Achse eines Radsatzes [10]

Die Kräfte werden hierbei in normal- und tangential zur Kontaktfläche liegende Achsen aufgesplittet. Die Kräfte in der tangentialen Ebene werden zudem aufgeteilt in Längs- und Transversalkräfte. Abbildung 2-13 illustriert das Zusammenwirken der Kräfte. Es sind die Normalkraft  $N$  (=Zwangskraft infolge des Gewichts), die Schlupfkraft  $T_y$  ( $T_x$  wirkt in Bildebene; resultieren aus relativer Bewegung zwischen Schiene und Rad und somit ist eine Kraftübertragung möglich), die Profilseitenkraft ( $F_s$ , Zwangskraft) und die Radstützkraft ( $Q$ , Zwangskraft) ersichtlich. [9] [10]



**Abbildung 2-13:** Kräftesituation zwischen Rad/Schiene [9]

Für die Kompensation des Gewichtskraftanteils, welcher von jedem Rad in die Schienen eingeleitet wird, ist die Radstützkraft  $Q$  verantwortlich, bei gleicher Aufteilung der Gewichtskraft auf alle vier Räder eines Drehgestells. Die Profilseitenkraft  $F_s$  kompensiert Verdrehungen des Radsatzes.

In der Fläche, wo Rad und Schiene permanent in Kontakt sind, tritt durch Relativbewegung der sogenannte Bohr-, Quer- und Längsschlupf auf. Die Kontaktfläche besteht dabei aus einer Haft- und einer Gleitzone, je nach vorhandenem Schlupf. Die auftretenden Schlupfkkräfte werden durch atomare, chemische und mechanische Vorgänge im Kontaktbereich in den unterschiedlichen Materialschichten wesentlich beeinflusst, wobei diese teilweise noch unbekannt sind.

Die wichtigsten Einflussfaktoren sind die Materialien der Kontaktpartner, Oberflächenzustand (rau, Korndurchmesser, nass, trocken), Fahrgeschwindigkeit, Relativgeschwindigkeit und dynamische Vorgänge (Schwingungen, Fluktuationen der Normalkraft).

Der Verschleiß an Rad und Schiene entsteht durch Reibung in den Gleitzonen des Kontaktbereiches. Es wird zwischen mildem, stärkerem und extremen Verschleißmechanismus in Abhängigkeit der Reibung respektive der Reibarbeit unterschieden. Der Verschleiß und die damit freiwerdenden Partikel werden versuchstechnisch durch Messung des abgetragenen Materials über einen definierten Zeitraum ermittelt. Um die Gültigkeit eines Tests festzulegen, müssen Werkstoff, Geometrie, Oberflächenzustand, qualitativer und quantitativer zeitlicher Verlauf der Belastung, Bewegungsart und die Umgebungsbedingungen (v. a. Temperaturverlauf) berücksichtigt werden. [9] [10]

Gleichung 2-1 beschreibt den durch die Reibleistung induzierten Materialabtrag. [9]

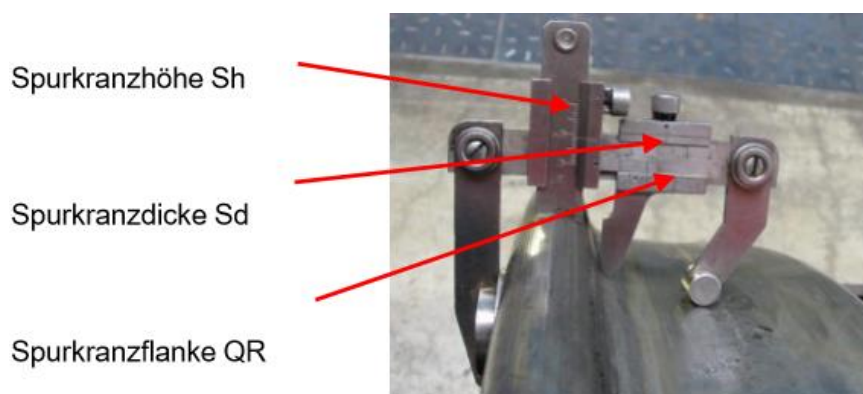
$$P_{reib} = F_{reib} * v_{rel} \quad (Gl. 2-1)$$

$P_{reib}$  = Reibleistung [W]

$F_{reib}$  = Reibkraft [N]

$v_{rel}$  = Relativgeschwindigkeit [m/s]

Die Bestimmung des Radverschleißes (Radabnutzung) kann auch noch mithilfe von konventionellen Methoden (mechanisch) erfolgen, wie beispielsweise mit Radreifenabnutzungslehren, Innenabstandslehren oder Radreifendickenlehren (siehe Abbildung 2-14). [11]



**Abbildung 2-14:** Radabnutzungshilfsmittel [11]

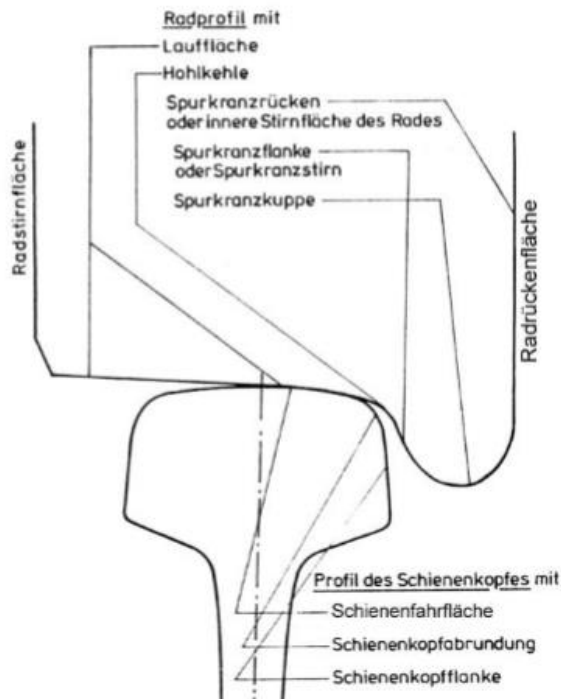
In der Industrie werden meist optoelektronische Radsatzmessgeräte (Abbildung 2-15) eingesetzt. Hierbei wird einerseits mit einer Kamera und andererseits mit einem Laser das Profil (Bremscheiben und Radkontur) gefilmt bzw. gescannt. Die Auswertung erfolgt sekundlich durch eine entsprechende Software.



**Abbildung 2-15:** Optisches Radsatzmessgerät [11]

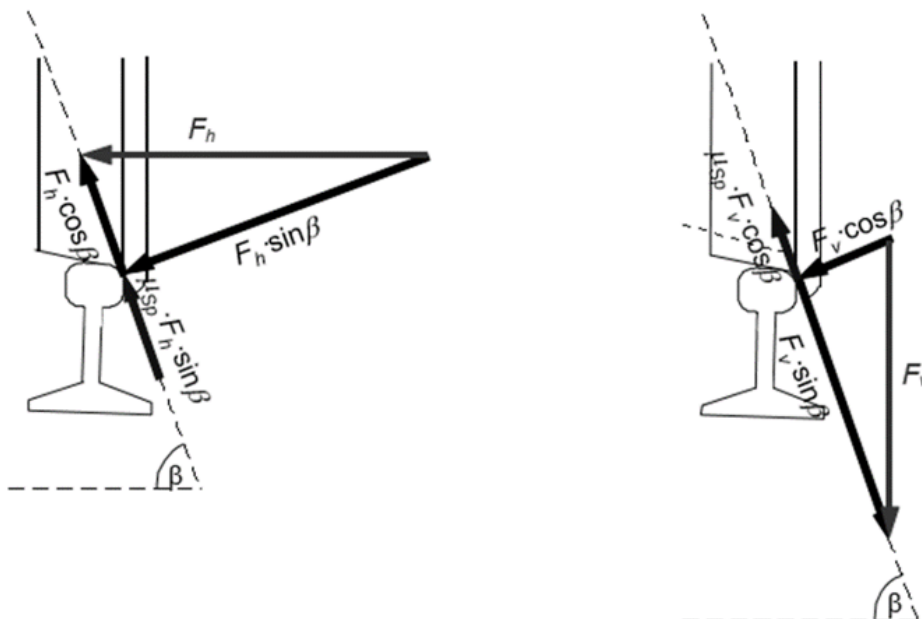
Während des Fahrens, kommt es zur wellenförmigen Bewegung (Wellenlauf) des Rades relativ zur Schiene aufgrund konisch ausgebildeter Radlaufflächen und damit verbundene Wendebewegung um die Gierachse bei Fahrt in einer Geraden. Dies führt zu den bereits erläuterten Verschleißmechanismen. Bei Bogenfahrten erfolgt der Drehzahlausgleich zwischen Innen- und Außenrad durch Gleitbewegungen, daraus ergibt sich wiederum vermehrt Abrieb. In Abbildung 2-16 ist der Rad-Schienen Kontakt exemplarisch dargestellt. Auf österreichischen Eisenbahnstrecken ist der Radsatzverschleiß bei Lokomotiven durch oftmals enge Kurvenbögen relativ hoch, dementsprechend ist auch mit erhöhten PM-Emissionen zu rechnen. Durch Einbau von aktiven und frequenzselektiven Dämpfern sowie durch verbesserte Profilgeometrien, konnten der Verschleiß und die Querkräfte bei Kurvenfahrten reduziert werden. [9] [10]

Für tiefere Betrachtungen sei auf [11] verwiesen.



**Abbildung 2-16:** Rad/Schiene Kontakt [10]

In unterer Abbildung 2-17 sind die horizontal ( $F_h$ ) und vertikal ( $F_v$ ) wirkenden Kräfte bei einer bestimmten Winkelstellung ( $\beta$ ) und einem Reibkoeffizienten  $\mu_{sp}$  exemplarisch dargestellt. [9] [10]

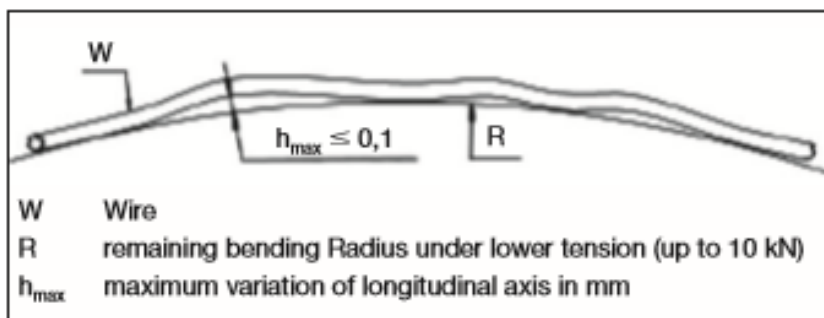


**Abbildung 2-17:** Kräfte des Rad/Schiene Kontaktes [10]

### 2.2.3 Fahrdrabt/Stromabnehmerabrieb

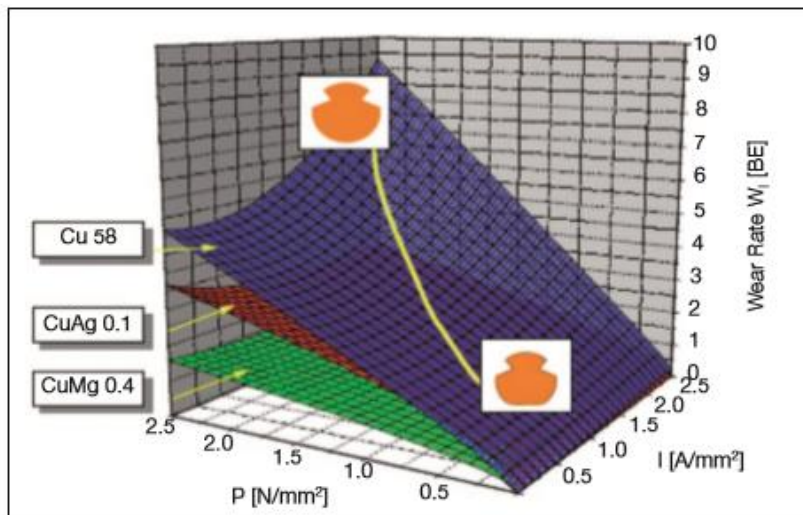
Der Kontakt zwischen Fahrdrabt/Oberleitung und Stromabnehmer (Schleifleiste) verursacht ebenfalls Partikelemissionen aufgrund der dabei vorhandenen tribologischen Effekte. In den nachfolgenden Ausführungen wird kurz auf die Anforderungen an Fahrdrähte und Stromabnehmer eingegangen.

Durch die starke Erhöhung der Fahrgeschwindigkeiten und der damit verbundenen Vergrößerung der Zugkräfte im Fahrdrabt, sind die Anforderungen an die Materialien der **Fahrdrähte**, um eine bessere Stabilität und sichere Stromversorgung zu gewährleisten, massiv gestiegen. Daher bestehen heutzutage die Fahrdrähte vorwiegend aus Kupfer-Zinn und Kupfer-Magnesium Legierungen, um ausreichende Zugfestigkeiten sicherzustellen. Diese Materialzusammensetzung führt aber zu einer starken Verminderung der elektrischen Leitfähigkeit, größeren Übertragungsverlusten und erhöhten Spannungsabfällen und muss durch adaptierte Materialien und entsprechende Montage ausgeglichen werden. Vormalig wurden meist Kupfer-Silber Legierungen eingesetzt, aufgrund der guten Temperaturbeständigkeit, was sich aber in einer plastischen Deformation in Form von Wellen (Mikrowelligkeit) kurzer Wellenlänge und kleiner Auslenkung (Amplitude) widerspiegelte. Daher wurden die Montage- und Fertigungsprozesse adaptiert, um dies zu vermeiden. [12] [13]



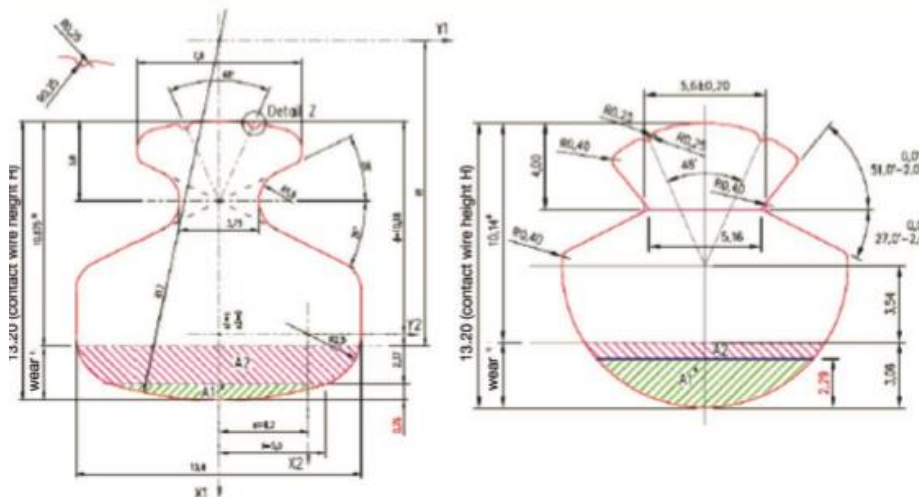
**Abbildung 2-18:** Fahrdrabt [12]

In Abbildung 2-18 ist ein Fahrdrabt mit Mikrowelligkeit unter einer Zugspannung mit bis zu 10kN dargestellt. Infolge der Mikrowelligkeit ist die kontinuierliche Stromübertragung (ausreichende Kontaktkräfte) nicht immer gewährleistet und dies hat wiederum negative fahrdynamische Folgen. Die Verschleißgrenze heutiger Fahrdrähte liegt bei ca. 80% des Nennquerschnitts, um noch eine sichere Versorgung zu gewährleisten. [12]



**Abbildung 2-19:** Verschleißrate Fahrdrabt [12]

In Abbildung 2-19 ist die Verschleißrate (Ordinate) über der Stromdichte (Sekundärachse) und der Zugfestigkeit (Primärachse) dargestellt. Es zeigt sich, dass Kupfer-Magnesium Legierungen bei gegebener Zugfestigkeit und Stromdichte eine niedrigere Verschleißrate aufweisen als Kupfer-Silber Legierungen. Durch adaptierte Profilgeometrien (Profildraht, Abbildung 2-20 links statt Rillendraht, Abbildung 2-20 rechts) und verbesserte Kupfer-Legierungen, konnte die Verschleißrate nach durchgeführten Langzeitversuchen (Anpresskraft und Stromdichte messen und variieren) gesenkt werden. [12] [13]



**Abbildung 2-20:** Profil- und Rillenfahrdrabt [12]

Aufgrund der oben angeführten Legierungszusammensetzungen von Oberleitungen sind bei PM-Messungen Untersuchungen hinsichtlich dieser Elemente durchzuführen.

Für **Oberleitung bzw. Stromabnehmer** im Eisenbahnverkehr sind generell niedrige Lebenszykluskosten, gute statische und dynamische Eigenschaften, Anlagensicherheit, entsprechende Festigkeitseigenschaften und elektrische Leitfähigkeit Voraussetzung. [12]

Im Eisenbahnverkehr erfolgt die Stromentnahme in Österreich durch sogenannte Kohleschleifleisten. Diese sind am Stromabnehmer, welcher auf dem Dach der Triebfahrzeuge bzw. Lokomotiven situiert ist, montiert. Die Anpresskraft, mit der die Abnehmer gegen die Fahrleitung gedrückt werden, muss in engen Grenzen eingehalten werden, um in unterschiedlichen Fahrsituationen ausreichend Kontakt bereitzustellen. Bei zu großen Kräften erhöht sich der Verschleiß der Kohleleisten durch Reibung und dies führt zur Schlagbeanspruchung der Schleifleiste und des Fahrdrabtes. Wenn die Anpresskräfte zu gering sind, führt dies wiederum zu kurzen Stromunterbrechungen, dies verursacht partielle Lichtbögen (Bügelfeuer) zwischen Fahrdrabt und Leitung. Die damit verbundene Temperaturerhöhung führt zur Entfestigung der Fahrleitung, es entstehen härtere und weichere Sektionen und damit kommt es zu einem dauerhaften unregelmäßigen Verschleiß des Fahrdrabtes. Die Kohleleisten unterliegen durch die Lichtbögen ebenfalls einem erheblichen Materialabtrag durch Oxidationsvorgänge. Durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass auch die Schleifleisten unregelmäßigem Materialabtrag unterliegen aufgrund von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen sowie unterschiedlichen Fahrleitungshöhen.

Die Kohleleisten (auch Schleifleisten genannt) bestehen hauptsächlich aus Koks und dem Bindemittel Teer (mehrere organische Verbindungen). Durch anschließende Brennvorgänge entsteht ein Koks-Bindemittel Gemisch mit einer Porosität von ca. 20%. Um dem Eindringen von Sauerstoff und den damit verbundenen Redoxreaktionen sowie dem erhöhten Verschleiß entgegen zu wirken, werden die Schleifkörper meist mit Wachs überzogen. Es sei noch zur Vollständigkeit erwähnt, dass es durch Diffusionsprozesse und Verunreinigungen der Leisten sowie durch die hohen Temperaturen der Kohleleisten im Fahrbetrieb (ca. 450°C) zur Bildung von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid kommt.

Der mechanisch induzierte Verschleiß (daraus entstehen die relevanten Partikelemissionen) entsteht durch tribologische Vorgänge zwischen Oberleitung und Kohleleisten sowie durch Stoßprozesse. Diese Stoßvorgänge führen bei den Schleifleisten zu strukturellen Schäden. [12] [13]

Bei wiederholter Belastung entstehen zudem Querrillen und Abplatzungen und im extremen Fall kommt es zum Bruch der Kohleleisten. Durchschnittlich beträgt der Abrieb ca.  $2\text{mm}^3/(\text{Fahr-km})$ , abhängig von Umwelteinflüssen, Materialeigenschaften der Schleifleisten und dem Stromdurchgang. Wenn die Schleifleisten werkstoffseitig sehr widerstandsfähig sind, führt dies aber zu erhöhtem Fahrleitungsverschleiß. Daher ist eine Abstimmung der Werkstoffe untereinander notwendig. Um generell den Abrieb bzw. den Verschleiß der Kohleleisten und der Fahrleitung zu minimieren, wird der Fahrdraht in Zick-Zack Lage geführt, da sonst eine lokale thermische und mechanische Überlastung eintritt und dies hohe Instandhaltungskosten nach sich ziehen würde. Abbildung 2-21 zeigt einen Stromabnehmer, bestehend aus 2 Kohleleisten und Halterungsapparatur. [12] [13]



**Abbildung 2-21:** Schleifleisten, Stromabnehmer [13]

Die ordnungsgemäße Funktion und Lage der Oberleitung wird regelmäßig durch Regulierungswägen und entsprechenden Messeinrichtungen kontrolliert, um rechtzeitig Präventivmaßnahmen zu setzen und damit einen hohen Materialabtrag bzw. Bruch zu vermeiden. [13]

## 2.3 Literaturrecherche

In diesem Unterkapitel wird ein kurzer Überblick über bereits durchgeführte Untersuchungen und deren Ergebnissen gegeben. Dies soll auch das noch sehr marginale Wissen sowie die Komplexität der Quantifizierung derartiger Emissionen im Eisenbahnverkehr, zeigen.

### 2.3.1 PM – Emissionen des Verkehrs, Statusbericht Schienenverkehr [14]

Aus Berichten des BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) aus dem Jahr 2001 geht hervor, dass die PM-Emissionen des Schienenverkehrs, beziffert mit ca. 2800 Tonnen/Jahr (ca. 11% der gesamten emittierten Partikel), nicht zu vernachlässigen sind. Aus diesem Grund wurden im Jahr 2002 Emissionen auf einem Bremsenprüfstand der SBB gemessen und Immissionen nahe Eisenbahnanlagen aufgezeichnet. Es wird in diesem Bericht darauf hingewiesen, dass der größte Anteil der PM-Emissionen des Schienenverkehrs den Non-Exhaust Partikeln zuzuordnen ist, wobei dies auch mit Unsicherheiten behaftet ist.

Infolge durchgeführter Bremstests auf einem Prüfstand konnte gezeigt werden, dass der Anteil des in die Luft gelangten Bremsabriebs am gesamten erzeugten Bremsstaub nicht so groß ist, wie in ursprünglich vorher durchgeführten Messungen ermittelt wurde.

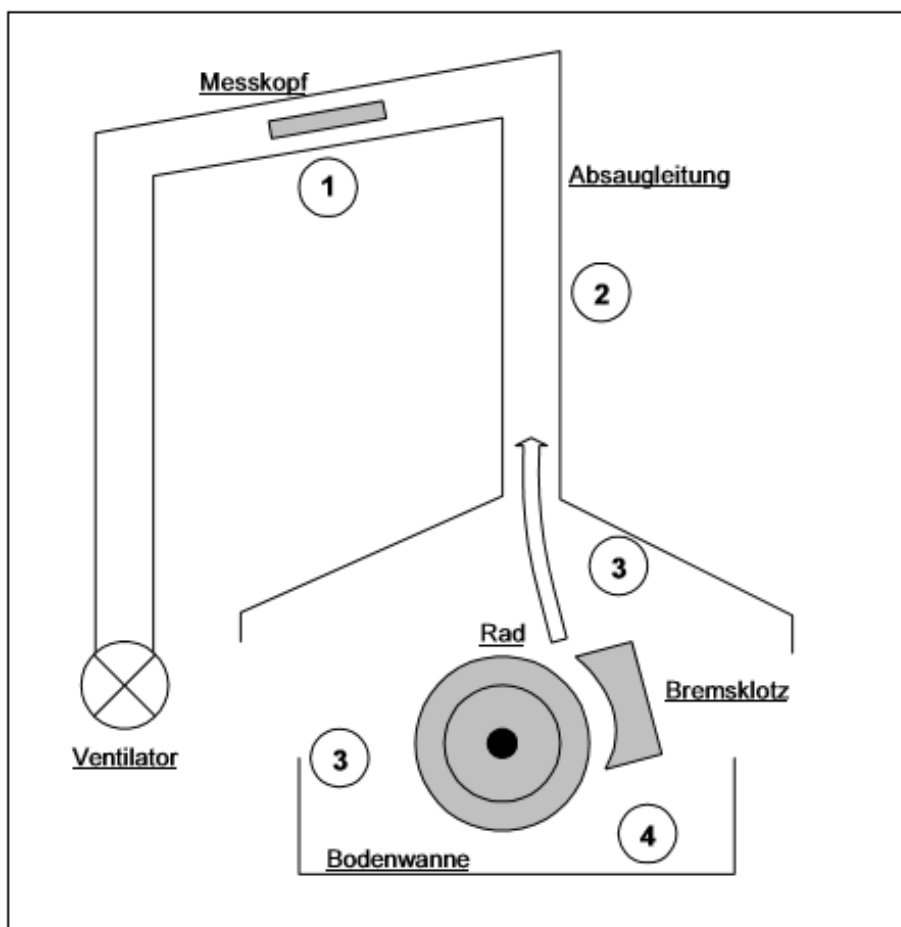


Diese Berechnungen basierten auf Schätzungen durch Emissionsfaktoren sowie Entsorgungs- und Einkaufszahlen der SBB (siehe Tabelle 2-2). Ein großer Teil des in die Luft emittierten Staubs ist der PM-Fraktion größer 10 Mikrometer zuzuordnen. [14]

**Tabelle 2-2:** PM10-Emissionen [14]

<b>PM10-Emissionen Schienenverkehr</b>			
Stand Jan. 2000			
Anteile	2000		Anteil PM10 (Annahmen)
	t/a	%	
Bremsabrieb	2066	73	100%
Schienenabrieb	546	19	50%
Radabrieb	124	5	50%
Fahrleitungsabrieb	36	1	100%
Auspuff (Dieselloks)	45	2	100%
<b>Total</b>	<b>2817</b>	<b>100</b>	

Um erstmals Datenmaterial hinsichtlich des Bremsenabriebs zu erhalten, wurde der Abrieb von Grauguss-Bremsen (sehr häufig eingesetzt) bei 2 verschiedenen Radlasten bestimmt. Nach einer Einschleifphase wurde die Größenverteilung der Partikel mithilfe eines Kaskadenimpaktors durch Absaugung der Luft aus dem Messraum bestimmt und durch Differenzwiegen der Masseverlust eruiert. In Abbildung 2-22 ist das Rad mit dem Bremsklotz, der Absaugleitung, dem Messkopf und der Absaugluft erzeugende Ventilator dargestellt.



**Abbildung 2-22:** Bremsenprüfstand [14]

Aus den Messungen geht hervor, dass bei größerer Radlast der PM10 Anteil in der Luft geringer wird, jedoch der Anteil grober Partikel (>10 Mikrometer) erheblich steigt und der angebackene Staub unter Berücksichtigung von großen Messunsicherheiten (Tabelle 2-3) ebenfalls sinkt. Generell wurde aber festgestellt, je größer die Radlast, desto mehr Abrieb ist vorhanden.

**Tabelle 2-3:** Analyse Staubemissionen [14]

<b>ANALYSE DER LUFTGETRAGENEN STAUBEMISSIONEN</b>		
<b>Staubfraktion</b>	<b>Radlast 2.5 t</b>	<b>Radlast 11.25 t</b>
Angebackener Staub und Grobstaub in der Wanne	56%	28%
Luftgetragener Staub	44%	72%
bestehend aus Feinstaub PM10	21%	12%
Staubteilchen mit Durchmessern > 10 µm	23%	60%
Gesamtstaub	100%	100%

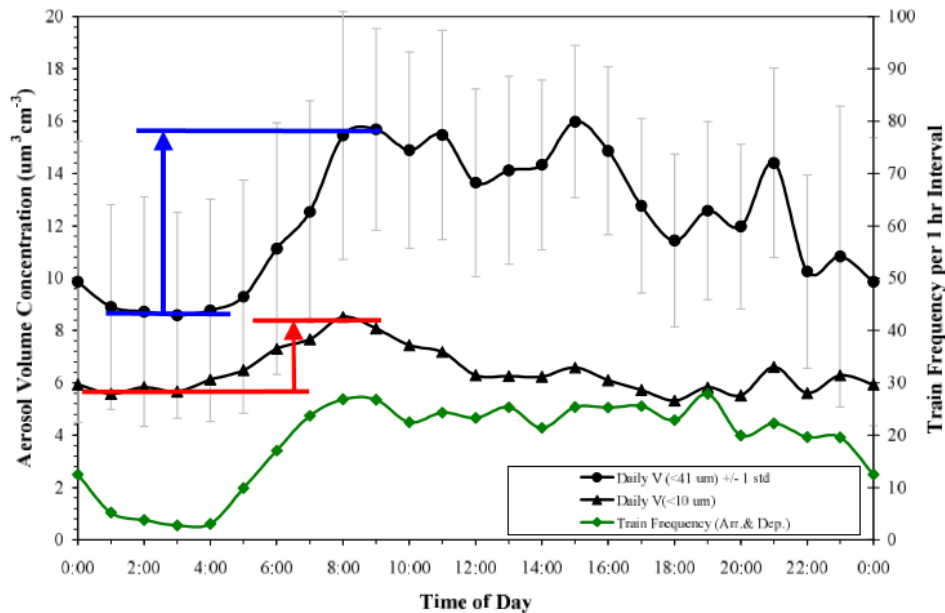
Des Weiteren wurden noch Immissionsmessungen an zwei charakteristischen Punkten (hohe Personenverkehrsfrequenz und hohe Güterverkehrsfrequenz) und einem von Gleisanlagen weit entfernten Standort durchgeführt, um eine Erhöhung der PM10-Emissionen an bahnnahen Standorten gegenüber von gleisfernen Punkten nachzuweisen. Dazu wurden an den Messstellen die Massekonzentrationen von Eisen und Partikel bestimmt. In Tabelle 2-4 sind die Ergebnisse dargestellt.

Es zeigt sich laut [14], dass die PM-Emissionen im Personenverkehr höher als im Güterverkehr sind. Ein Grund ist, dass die eingesetzten Scheibenbremsen und die damit zusätzlich freiwerdenden Partikel anderer Materialien einen Beitrag liefern oder das in der Umgebung andere mineralische Partikel (z.B.: durch Aufwirbelung) vorhanden sind. Die Eisenkonzentrationen (dieses liegt meist in oxidiert Form vor) differieren minimal. [14]

**Tabelle 2-4:** PM10 und Eisen Konzentration [14]

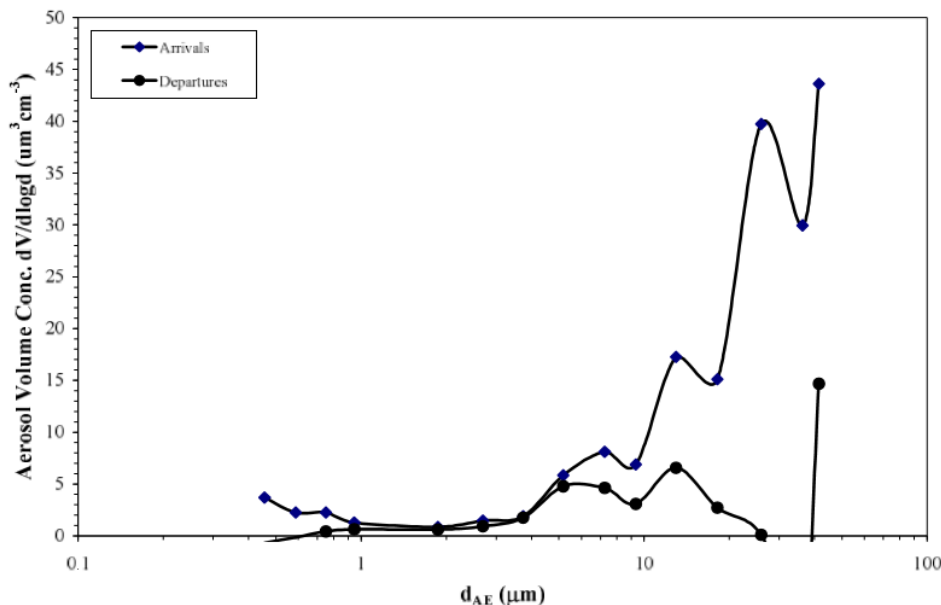
	<b>Bahnstandort</b>	<b>Hintergrund</b>	<b>Differenz</b>	<b>Bahnstandort</b>	<b>Hintergrund</b>	<b>Differenz</b>
<b>Brugg/Windisch mit vorwiegend Güterschienenverkehr</b>						
20 Tagesproben	Brugg µg/m <sup>3</sup>	Windisch µg/m <sup>3</sup>	Differenz µg/m <sup>3</sup>	Brugg µg/m <sup>3</sup>	Windisch µg/m <sup>3</sup>	Differenz µg/m <sup>3</sup>
Komponente	<b>PM10-Konzentration</b>			<b>Eisen-Konzentration</b>		
Mittelwert	20.8	18.1	2.7	1.79	0.33	1.46
Mittelwert als Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	--	--	--	2.57	0.47	2.09
<b>Basel/Binningen mit vorwiegend Personenschienenverkehr</b>						
28 Tagesproben	Basel SBB µg/m <sup>3</sup>	Binningen µg/m <sup>3</sup>	Differenz µg/m <sup>3</sup>	Basel SBB µg/m <sup>3</sup>	Binningen µg/m <sup>3</sup>	Differenz µg/m <sup>3</sup>
	<b>PM10-Konzentration</b>			<b>Eisen-Konzentration</b>		
Mittelwert	29.2	21.4	7.8	2.25	0.17	2.08
Mittelwert als Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	--	--	--	3.21	0.25	2.96

Um weitere Erkenntnisse über den Ursprung der Partikel zu erhalten, wurden an den identischen Standorten (Basel SBB und Brugg) Immissionsmessungen mittels optischen Partikelzähler mit Impaktor für die Größenklassifizierung durchgeführt. Abbildung 2-23 beinhaltet die Ergebnisse (für Basel, vorwiegend Personenverkehr). Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Zugfrequenz über den Tag auch die PM10 Emissionen steigen. Ein ähnliches Bild zeigen die Resultate der Messung in Brugg (Güterverkehr, nicht dargestellt) hinsichtlich des Zeitpunktes des PM Anstiegs, jedoch ohne Anstieg der Zugfrequenz. Dies könnte auf lokale Quellen zurückzuführen sein. [14]



**Abbildung 2-23:** PM-Emissionen über der Messzeit Bahnhof Basel [14]

Weiters wurde untersucht, welche Auswirkungen einzelne ein- und ausfahrende Züge auf die Partikelgrößen aufweisen. Dazu wurde eine Messung in der Einfahrt/Ausfahrt des Baseler Bahnhofs durchgeführt.



**Abbildung 2-24:** Partikelmassen Baseler Bahnhof [14]

In Abbildung 2-24 sind die Massen der Partikel über dem Durchmesser aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass einfahrende Züge höhere Emissionen als ausfahrende Züge aufweisen, was sich durch Bremsvorgänge begründen lässt. Weiters sind die Durchmesser eher im oberen Segment angesiedelt (>6 Mikrometer). In einer ebenfalls angewandten Elementanalyse wurden Mangan, Calcium und Eisen sowie deren Oxide nachgewiesen, was sich mit der Legierungszusammensetzung der Bremsen und der Schienen deckt.

Um die gemessenen Werte nachzurechnen, wurden noch Immissionsmodelle und daraus Sensitivitätsanalysen mit verschiedenen Varianten für das gesamte Schweizer Eisenbahnnetz erstellt.

Die Modellerstellung basierte auf quellenbezogenen Emissionskataster, um anschließend mittels Ausbreitungsfunktionen die Emissionen in Immissionen umzurechnen.

Durch Übereinstimmung der simulierten Immissionswerte mit den gemessenen, kann daraus auf die Emissionsquelle, welche im Modell vorgegeben wird, geschlossen werden.

Das Resultat aus den Sensitivitätsanalysen zeigt, dass die PM-Emissionen nicht wie berechnet bzw. geschätzt 2800, sondern zwischen 800-1200 Tonnen/Jahr betragen und dass an hochfrequentierten Bahnanlagen mit erhöhten Konzentrationen zu rechnen ist. Dies illustriert die Komplexität der Berechnungen aufgrund vieler Einflussfaktoren. Um bessere und präzisere Ergebnisse zu erhalten, wird vom BUWAL empfohlen Aufwirbelungen (meist mineralischen Ursprungs) besser zu berücksichtigen, lokalere Modelle zu erstellen und mehrere Emissions- (auch Rad, Schienen sowie Fahrdrattrieb) und Immissionsmessungen durchzuführen. [14]

### 2.3.2 PM10-Emissionen Verkehr Teil Schienenverkehr, Schlussbericht [8]

Auf Basis des bereits erläuterten Berichts aus dem Jahr 2002 (siehe [14]), wird auf die Ergebnisse des 2007 erstellten Schlussberichts eingegangen. Hierin wurde auf Basis der bereits vorhandenen Kenntnisse aus dem vorigen Bericht versucht, die Größenaufteilung und die chemischen Bestandteile durch weitere Messungen und Modellrechnungen besser zu analysieren. So erfolgte die Bestimmung des Bremsenabriebs durch weitere detailliertere Prüfstandsmessungen. Der Schienenabrieb wurde auch durch Prüfstandsmessungen eruiert, der Radabrieb wurde anhand von empirischen Aufzeichnungen für Personen- als auch für den Güterverkehr aus der Instandhaltung abgeschätzt und der Fahrdrat/Stromabnehmerabrieb konnte über die Betrachtung der Netzlänge, der Abnutzung und der Beschleunigungsvorgänge bestimmt werden. Durch darauffolgende Hochrechnungen konnten für das gesamte Schweizer Schienennetz die PM-Emissionen ermittelt werden (siehe Tabelle 2-5). Aus der Tabelle 2-2 ist erkennbar, dass der Bremsabrieb den größten Anteil aufweist und der Personenverkehr mehr Emissionen als der Güterverkehr verursacht. [8]

**Tabelle 2-5:** PM-Emissionen Schienennetz Schweiz [8]

Quelle	PM10-Emissionen Schienenverkehr 2004 Schweiz			
	Personenverkehr t/a	Güterverkehr t/a	Summe t/a	%
Bremsen	354	264	618	60%
Schienen	90	49	139	14%
Räder	82	160	242	24%
Fahrdrat	20	5	25	2%
Summe	546	478	1024	100%
Anteile	53%	47%	100%	

Es muss erwähnt werden, dass die Hochrechnung für den Fahrdrat/Stromabnehmer Abrieb über Zugskilometer, Rad-, Schienen- und Bremsabrieb über Personenkilometer (für Personenzüge) und Tonnenkilometer (für Güterverkehr) erfolgte. Grundsätzlich liefert diese Berechnung sehr ähnliche Resultate wie die Berichte zuvor, sie zeigt auch, dass der Bremsabrieb nicht vollständig der PM10 Fraktion zuzurechnen ist.

Zudem wurden weitere Immissionsmessungen im Einfahrtsbereich des Hauptbahnhofs Zürich (Gleis nah 10m und Gleis fern 36m) und im Bahnhof Juchhof (Gleis nah 10m, Gleis fern 36m und 120m) durchgeführt. Die Auswertungen zeigen, dass mit Abstandsvergrößerung von den Gleisanlagen die Konzentrationen abnehmen. Die höchste Konzentration weist Eisen bzw. Eisenoxid auf und dies ist dem Güterverkehr, bedingt durch schwere lange Züge, zuzurechnen.

Mittels Röntgenfluoreszenzspektroskopie wurden die einzelnen Elemente der Partikel ermittelt und durch optische Zähler die Größenverteilung bestimmt. Daraus wurden Elemente wie Magnesium, Aluminium, Natrium und Calcium festgestellt, jedoch nur in geringfügig höherer Menge gegenüber der Hintergrundkonzentration. Dies wurde dadurch erklärt, dass die Aufwirbelungsemissionen von Oberflächenstaub eher gering sind. Weitere aus der Spektroskopie bestimmte Elemente sind Mangan, Chrom, Chlor, Schwefel, Kupfer, Zink und Brom. Der Kupferabrieb lässt sich vorwiegend durch die Fahrleitung erklären. [8]

**Tabelle 2-6:** PM-Anteile Eisen, Kupfer [8]

Element	Verkehr	PM1	PM2.5-PM1	PM10-PM2.5
		%	%	%
Eisen	Güterverkehr	0-7	20-27	73
	Personenverkehr	0-7	37-44	56
Kupfer	Güterverkehr	0-7	18-25	75
	Personenverkehr	0-7	33-40	60

In Tabelle 2-6 ist zu sehen, dass der Güterverkehr für Eisen und Kupfer höhere Anteile bei PM10-2,5 aufweist. Eine mögliche Erklärung wären die differenten Triebfahrzeuge und damit einhergehend verschiedene Anpresskräfte auf die Fahrleitung.

Um die Plausibilität zu überprüfen, wurden wiederum Immissionsmodelle auf Basis von Emissionskatastern erstellt und die Emissionen durch Ausbreitungsgleichungen in Immissionen umgerechnet. Die Differenzen zwischen Modell und Messung sind nicht erheblich, aber durch Adaptierung einiger Parameter sowie unter Berücksichtigung, dass der Modellwert einen Mittelwert für eine Fläche darstellt und die Messdaten einen lokalen Wert repräsentieren, kann eine Verbesserung laut [8] erzielt werden.

### 2.3.3 PM-Messung im Lainzer Eisenbahntunnel [15]

Um aufwirbelungs- und verschleißbedingte Emissionsfaktoren sowie Korngrößenverteilungen zu ermitteln, wurde 2014 eine Messkampagne im Lainzer Tunnel in Österreich (Wien) durchgeführt. TSP, PM10, PM2,5 und PM1 wurden kontinuierlich gemessen, für TSP und PM10 und metallische Komponenten in den Partikeln, erfolgte auch eine diskontinuierliche Messung über einen Halbtage, für Vergleichs- und Kalibrierzwecke mit den kontinuierlichen Messergebnissen. Es mussten auch Hintergrundkonzentrationen berücksichtigt werden durch Messung der Partikel außerhalb des Tunnels.

**Tabelle 2-7:** PM-Emissionen im Tunnel und außerhalb [15]

Komponente	Tunnel	Vorbelastung
TSP <sup>2)</sup>	985 µg/m <sup>3</sup>	38 µg/m <sup>3</sup>
PM <sub>10</sub>	432 µg/m <sup>3</sup>	29 µg/m <sup>3</sup>
PM <sub>2,5</sub> <sup>3)</sup>	76 µg/m <sup>3</sup> <sup>1)</sup>	22 µg/m <sup>3</sup>
PM <sub>1</sub>	30 µg/m <sup>3</sup> <sup>1)</sup>	n.b

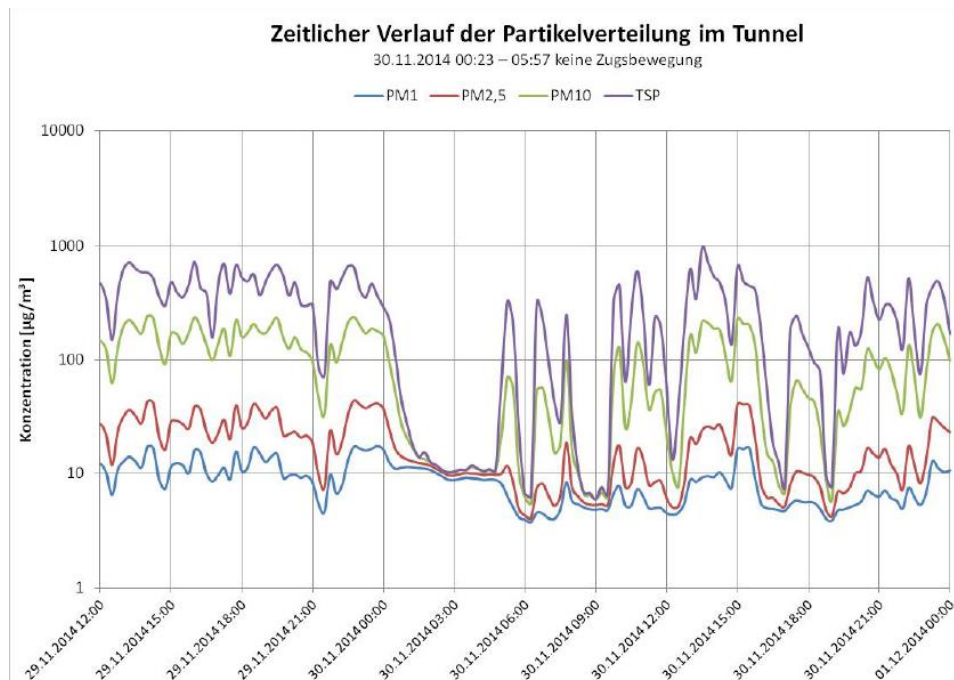
In Tabelle 2-7 sind die Ergebnisse gemittelt über die Messzeit für den Tunnelinnenbereich und der Konzentrationsmessstelle Außen (=Hintergrundkonzentration) dargestellt. In Tabelle 2-8 sind die Konzentrationen der einzelnen Bestandteile der Partikel sowie die PM10 Konzentration für jeden Halbtage dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Eisenkonzentrationen am größten sind, wobei im Tunnel die ca. 8-fach höheren Konzentrationen für alle Elemente außer bei Beryllium und Cadmium gegenüber der Außenmessstelle festgestellt wurden. Aus den beiden Tabellen geht eindeutig hervor, dass die Konzentrationen, verursacht durch den Zugbetrieb, nicht vernachlässigbar klein sind und daher weiterer Erhebungsbedarf besteht.

**Tabelle 2-8:** Zusammensetzung der PM-Emissionen [15]

Datum Uhrzeit Tunnel	PM <sub>10</sub> µg/m <sup>3</sup>	Fe µg/m <sup>3</sup>	Be ng/m <sup>3</sup>	Cd ng/m <sup>3</sup>	Cr ng/m <sup>3</sup>	Cu ng/m <sup>3</sup>	Mn ng/m <sup>3</sup>	Mo ng/m <sup>3</sup>	Ni ng/m <sup>3</sup>	Pb ng/m <sup>3</sup>	V ng/m <sup>3</sup>	Zn ng/m <sup>3</sup>
24.11.14 12:00-24:00	452	174	<1,0	<0,3	222	396	940	53	93	42	37	1082
25.11.14 00:00-12:00	337	117	<1,0	<0,2	159	172	655	56	106	28	25	480
25.11.14 12:00-24:00	1147	332	<1,0	<0,5	574	1183	2156	212	218	120	111	3095
26.11.14 00:00-12:00	621	201	<1,0	<0,6	296	515	1130	87	74	65	46	1209
26.11.14 12:00-24:00	581	210	<1,0	<0,5	303	580	1265	80	125	62	51	1203
27.11.14 00:00-12:00	505	199	<1,0	<0,3	297	304	1162	63	134	40	46	859
27.11.14 12:00-24:00	455	172	<1,0	<0,4	280	607	1004	62	113	42	36	961
28.11.14 00:00-12:00	350	141	<1,0	<0,2	249	548	797	39	101	16	37	524
28.11.14 12:00-24:00	411	189	<1,0	<0,2	265	1388	966	51	115	21	33	875
29.11.14 00:00-12:00	266	109	<1,0	<0,2	171	843	616	38	96	11	22	446
29.11.14 12:00-24:00	295	123	<1,0	<0,2	190	859	681	38	101	11	23	457
30.11.14 00:00-12:00	81	31	<1,0	<0,2	59	99	184	11	20	6	5	118
30.11.14 12:00-24:00	117	45	<1,0	<0,2	73	135	278	11	20	7	7	170
Mittelwert	432	157	<1,0	<0,3	241	587	910	62	101	36	37	883

Zu erwähnen ist auch, dass die durchgeführten Messungen lediglich bei reinem Güterverkehr mit elektrisch betriebenen Lokomotiven durchgeführt wurden. Für eine bessere messtechnische Erfassung wäre laut [15] eine Messung in Tunnel mit getrennten Richtungsfahrbahnen und unter Berücksichtigung der Strömungsrichtung in Verbindung mit der Zuganzahl vorteilhaft.



**Abbildung 2-25:** Zeitverlauf der Partikelkonzentration [15]

Abbildung 2-25 verdeutlicht nochmals oben genannte Schlussfolgerung, da die Partikelkonzentration bei keinem Zugverkehr (Zeitraum 30.11.2014 01:30 - 30.11.2014 04:30 Uhr) auf Hintergrundkonzentration an der Vorbelastungsmessstelle sinkt (ca. 10µg/m<sup>3</sup>). [15]

Aus den 3 angeführten Untersuchungen (Kapitel 2.3.1 – 2.3.3) geht eindeutig hervor, dass Partikelkonzentrationen im Eisenbahntunnel sowie generell durch den Schienenverkehr verursachte Emissionen beachtenswerte Konzentrationen aufweisen. Weiters ist anzumerken, dass die messtechnische qualitative und quantitative Erfassung der Partikel von vielen Einflussparametern wie Luftströmungsgeschwindigkeit (Strömungsverhältnisse), Hintergrundkonzentration, Richtungsverkehr ja/nein beeinflusst wird, die Zuordnung des Ursprungs sich komplex gestaltet und daher die Wichtigkeit weiterer Datenerhebungsmaßnahmen verdeutlicht wird.

### 3 Messtechnische Untersuchung

In diesem Kapitel werden die verwendeten Messverfahren für die PM- und Windgeschwindigkeitserfassung und deren Spezifika näher beschrieben. Es werden kontinuierliche (3D-Ultraschallanemometer, TEOM-Messgerät) und diskontinuierliche Parameter (mittels High Volume Aerosol Sammler, Partisol) erfasst. Die Erfassung der diskontinuierlichen Parameter im und außerhalb des Tunnels dient zur Ermittlung der einzelnen Partikel Bestandteile, zur Kalibrierung sowie für Vergleichszwecke mit den zeitlich aufgelösten Daten.

Die statistischen Grundlagen für die Auswertung der Messdaten werden im Anhang (siehe Kapitel 8.1) behandelt.

#### 3.1 Strömungsmessung

Um den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit und die Strömungsrichtung im Tunnel sowie die PM-Emissionsfaktoren unter Berücksichtigung der Verdünnung mit der Luft zu ermitteln, muss auch die vektorielle Strömungsgeschwindigkeit gemessen werden. Dazu wurde ein **3D-Ultraschallanemometer** eingesetzt.

Ein 3D-Ultraschallanemometer besteht aus 3 Paaren von Sonotroden (Kombination aus Mikrophon und Lautsprecher; 120° versetzt angeordnet, um Störungen der Strömung durch das Messgerät zu minimieren), wobei jedes Paar einen definierten Abstand  $L$  (10-20cm) aufweist. Wenn die auftretende Windgeschwindigkeit  $v$  aus einer bestimmten Richtung kommend sich in Richtung der ausgesendeten Ultraschallwellen (bis ca. 10 GHz, um keine Geräuschemissionen zu generieren) bewegt, wird die Laufzeit ( $T_1$ ) zwischen Sender und Empfänger verkürzt, da die Schallwellen mit dem Wind mitgetragen werden.

Bei gegenseitiger Bewegung von Schall und Wind (Schall- und Windgeschwindigkeit gegeneinander gerichtet), erhöht sich dementsprechend die Laufzeit ( $T_2$ ; Gl.3-1).

$$T_1 = \frac{L}{c+v}; T_2 = \frac{L}{c-v} \quad (\text{Gl.3-1})$$

Daraus ergibt sich nach Messung der Laufzeiten die Windgeschwindigkeit  $v$  (Gl.3-2).

$$v = \frac{1}{2} * L * \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (\text{Gl.3-2})$$

Im 3D-Fall ergeben die 3 Paare die Geschwindigkeitsvektoren in allen 3 Raumrichtungen. Meist erfolgt aus Gründen der besseren Verständlichkeit eine Koordinatentransformation in Polarkoordinaten. Es werden daher meist der Windgeschwindigkeitsbetrag mit dazugehörigem Windrichtungswinkel angegeben. Des Weiteren muss beachtet werden, dass auch die Lufttemperatur und die Luftfeuchte einen Einfluss auf die Schallausbreitung ausüben. Durch bidirektionale Laufzeitmessungen wird der Temperatureinfluss beseitigt. Oftmals ist aber eine zusätzliche Temperaturmessung erforderlich, daher wird diese direkt aus der Schallgeschwindigkeit berechnet (Gl.3-3).

$$T_v = \frac{c^2}{R * K} \quad (\text{Gl.3-3})$$

Die errechnete Temperatur entspricht der sogenannten virtuellen Temperatur, aufgrund der vorhandenen Luftfeuchtigkeit. Die virtuelle Temperatur ist immer größer als die der vollkommen trockenen Luft und sie entspricht der Temperatur der trockenen Luft, die bei gleichem Luftdruck dieselbe Luftdichte hat, wie die feuchte Luft, da mit zunehmender Temperatur und Luftfeuchtigkeit die Dichte sinkt. Dadurch werden einige weitere Berechnungen simplifiziert.



Geometrisch zu beachten ist, dass die Messstreckenlänge wesentlich größer als die Messkopfgröße ist, um Einflüsse der Messköpfe auf die Strömungsverhältnisse zu unterbinden. Heutige 3D-Anemometer sind horizontal um  $120^\circ$  und auch vertikal um  $45^\circ$  geneigt, um vollständige Unabhängigkeit bezüglich der Anströmrichtung zu gewährleisten (Abbildung 3-1). [23]



**Abbildung 3-1:** 3D-Ultraschallanemometer [23]

Diese Art von Sensoren wird heute aufgrund folgender Merkmale häufig eingesetzt:

- Keine Bauteile mit Reibung
- Keine bewegten Bauteile
- Windgeschwindigkeit und Windrichtung in einem Messgerät erfasst
- Fluktuationen des Windes, vertikale Windgeschwindigkeit sowie Temperaturmessung ebenfalls möglich, Ableitung des Turbulenzgrades möglich

## 3.2 Staubmessung

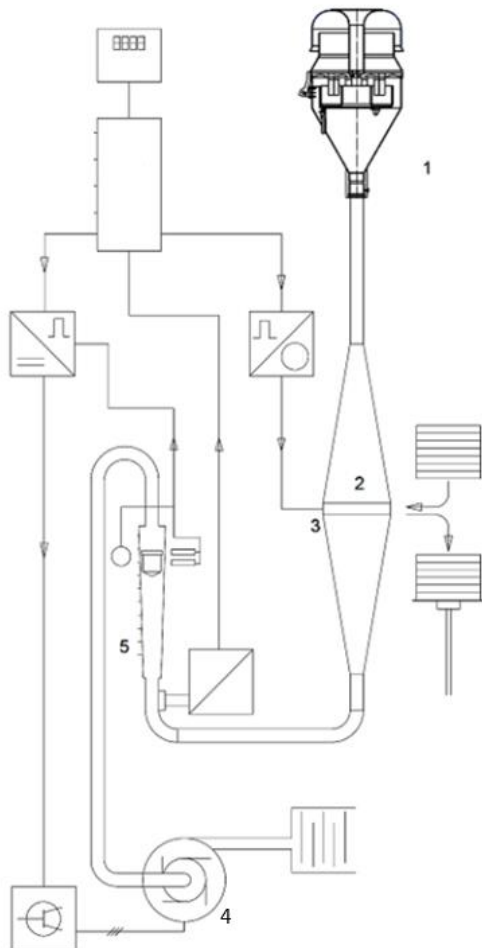
Für die Ermittlung der Partikelemissionen werden zwei Messgeräte eingesetzt.

### 3.2.1 High Volume Aerosol Sampler (Partisol)

Dieses Messgerät dient zur Sammlung von Partikel und Aerosolfractionen für weitere Analysen. Durch einen drehzahlgeregelten Verdichter (4, für konstanten Volumenstrom) wird ein voreingestellter Volumenstrom über einen Vorabscheider (1; für bestimmte Partikelgrößen) angesaugt, weiter zur Bestromungskammer (2) mit darin befindlichem Filter (3) transportiert, um sich dort abzuscheiden. Durch die diffusorförmige Ausbildung der Strömungskammer vor dem Filter wird die Durchflussgeschwindigkeit reduziert (ca. 0,5 m/s), um bestes Abscheidevermögen sicherzustellen.

Die Filter (Quarz, Glasfaser- und Cellulosefilter; Teflon beschichtet) werden automatisch gewechselt.

Um beste Messbedingungen für die Luftdurchsatzmessung zu schaffen, wird nach dem Filter die Geschwindigkeit durch Verringerung des Strömungsquerschnitts erhöht. Die Durchflussmessung wird anschließend mit einem Schwebekörper (5) mit Lichtschranken zur Positionserfassung durchgeführt. Weiters wird noch eine Temperaturmessung der Luft durchgeführt (Abb. 3-2). Die Druckverluste sind im akzeptablen Bereich von ca. 130mbar. Nach erfolgter Konditionierung der Proben hinsichtlich Temperatur (ca. 50°C) und damit geringer relativer Feuchte kann durch Differenzwiegen die Masse der abgeschiedenen Partikel in einem bestimmten Zeitintervall auf dem Filter bestimmt werden. Es kann daher sowohl die Partikelmasse in einem bestimmten Zeitintervall, als auch die gesamte Masse während der Messkampagne bestimmt werden. Ebenso ist eine Ermittlung der Partikelkonzentration möglich. Dazu wird der berechnete Partikelmassenstrom des Zeitintervalls auf den eingestellten Volumenstrom bezogen. Um Rauschen des Messsignals zu eliminieren bzw. zu minimieren, werden noch Glättungsfunktionen auf die Messwerte für die Auswertung herangezogen. [24]



**Abbildung 3-2:** Aerosolsammler [24]

### 3.2.2 TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance)

Dieses Messverfahren wird ebenfalls häufig zur Schwebstaubmessung eingesetzt. Hierzu ist ein Filter in einer konisch verlaufenden Glasröhre situiert, durch den der Partikelluftstrom hindurch geleitet wird. Auf der oberen Seite der Glasröhre ist diese von einer elektrisch leitfähigen Beschichtung umgeben, auf dieser wiederum 2 Elektroden appliziert sind. Dadurch ist es möglich einen durch die leitfähige Schicht oszillierenden Stromfluss zu generieren.

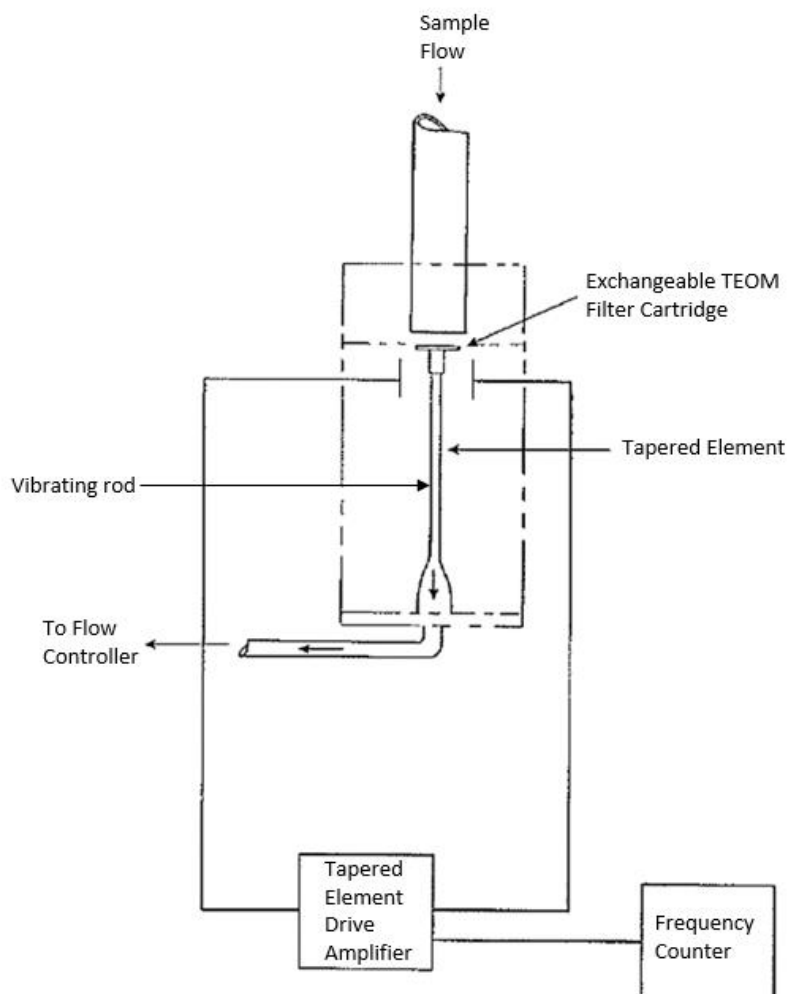
Durch diesen Stromfluss schwingt die Glasröhre mit einer bestimmten Frequenz (Eigenfrequenz). Durch anschließendes Abscheiden der Partikelmasse auf dem Filterplättchen am oberen Ende des Glasrohres nimmt die Frequenz bezogen auf den Ausgangszustand direkt proportional ab (Abb. 3-3).

Wenn also die Frequenz am Beginn des Zeitintervalls ( $f_1$ ) und am Ende des Zeitintervalls ( $f_2$ ) bekannt ist, kann daraus die abgeschiedene (sich akkumulierte) Masse ( $dm$ , Gl.3-4) in dem jeweils festgelegten Zeitintervall ermittelt werden ( $K_0$  = Konstante, experimentell zu bestimmen).

Meist wird ein gleitender Mittelwert der Konzentration in einem festgelegten Zeitintervall durch Sampling des Messwertes (meist 2 Sekunden) ermittelt und anschließenden Bezug der errechneten Masse auf den angesaugten Volumenstrom.

$$dm = K_0 * \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_0^2} \right) \quad (\text{Gl.3-4})$$

Nach einer gewissen Zeit müssen die beladenen Filter gewechselt werden. Meist wird zudem die Temperatur im Gerät auf ca. 50°C konstant gehalten, um eventuelle Kondensationen zu vermeiden. Dieses Prinzip wird häufig für Immissionsmessungen eingesetzt. Durch die Applikation entsprechender Vorabscheider kann eine Differenzierung der Partikel hinsichtlich Größe (PM10; PM2,5, usw.) vorgenommen werden. [25] [29]



**Abbildung 3-3:** TEOM Messprinzip [29]

## 4 Berechnung der verbrennungsbedingten Emissionen

Die Simulationssoftware (Modell) RECEM (Railway Energy Consumption and Emission Model) wurde vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik an der TU Graz für die Simulation der Emissionen NO<sub>x</sub>, HC, CO, PM und des Stromverbrauchs/Kraftstoffverbrauchs von elektrisch und auch Diesel getriebenen Lokomotiven entwickelt. Fahrverhaltenweisen, Rekuperation sowie die Modellierung verschiedener Zuggattungen und Zugkonfigurationen ist ebenso möglich. Aus der Vorgabe einer oder mehrerer Fahrstrecken (Längen- und Höhenprofil), der zulässigen Fahrgeschwindigkeit und eventueller Stops oder einem Messsignal (gemessene Geschwindigkeit, Höhe über Meeresniveau, Distanz und Zeitschrittweite), des jeweiligen Loktyps (Leistung, Dienstmasse, Maximalgeschwindigkeit, Wirkungsgrade, Zugkraftkennlinie welche am Prüfstand ermittelt wurde), Waggonanzahl, Masse pro Waggon, zulässige Fahrgeschwindigkeiten, Beschleunigungskennwerten und Luftwiderstandsfaktoren, kann daraus die aktuelle Geschwindigkeit in vorgegebener Zeitschrittweite kalkuliert werden. Aus der Geschwindigkeit wird die Leistung/Stromkonsumation und daraus mit den am Prüfstand gemessenen Emissionskennlinien die jeweiligen Emissionen in g/h mittels linearer Interpolation bestimmt. Durch die Möglichkeit der Vorgabe dieser umfangreichen Spezifikationen können mit RECEM mannigfaltige Zugkombinationen simuliert werden. Es wird nun das mathematische Modell erklärt und anschließend auf die einzelnen Excel-Files (Programmaufbau) für die Eingabe näher eingegangen. [26] [30]

### 4.1 Mathematisches Modell

Nachstehend werden die wichtigsten Gleichungen kurz erklärt. Zur Ermittlung des Geschwindigkeitsverlaufs muss zuerst die Zugbeschleunigung errechnet werden. Dazu muss die erforderliche Zugkraft der Lokomotive zur Überwindung der Luftwiderstände, Beschleunigungswiderstände und Steigungswiderstände bestimmt werden. Der Beschleunigungswiderstand ergibt sich wie folgt (Gl.4-1):

$$F_B = a * (m_{Lok} * m_{Rot,Lok} + m_{Wag} * m_{Rot,Wag} * anz_{Wag}) \quad (Gl.4-1)$$

Der Luftwiderstand von Lok und Waggon wird laut Gl.4-2 ermittelt.

$$F_L = m_{Lok} * g * \left( f_{0,Lok} + f_{2,Lok} * \left( \frac{(v+\Delta v_{Lok})}{v_{00,Lok}} \right)^2 \right) + m_{Wag} * g * \left( f_{0,Wag} + f_{2,Wag} * \left( \frac{(v+\Delta v_{Wag})}{v_{00,Wag}} \right)^2 \right) * anz_{Wag} \quad (Gl.4-2)$$

Der Steigungswiderstand kann folgendermaßen ermittelt werden (Gl.4-3):

$$F_H = (m_{Lok} + m_{Wag} * anz_{Wag}) * g * \frac{\Delta h}{\Delta s} \quad (Gl.4-3)$$

Aus diesen 3 Widerständen wird danach die theoretische Zugkraft ( $F_{max} = F_B + F_L + F_H$ ) aus der Summe der 3 Widerstandskräfte berechnet und darauffolgend auf die Beschleunigung umgeformt (Gl.4-4).

$$a(t) = \frac{(F_{max} - (F_H + F_L))}{(m_{Lok} * m_{Rot,Lok} + m_{Wag} * m_{Rot,Wag} * anz_{Wag})} \quad (Gl.4-4)$$

Die theoretische Zugkraft  $F_{\max}$  in Gl.4-4 wird durch Interpolation aus der Zugkraftkennlinie (Abb. 4-2) bei der aktuellen Geschwindigkeit  $v$  der Lokomotive ermittelt. Daraus kann die Beschleunigung ( $a$ ) laut Gl.4-4 zum aktuellen Zeitpunkt bestimmt werden.

Anschließend ist die Ermittlung der Geschwindigkeit zu einem neuen Zeitpunkt ( $t$ ) unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit zum vorhergehenden Zeitpunkt ( $t-1$ ) und der berechneten Beschleunigung zum aktuellen Zeitpunkt sowie dem gewählten Zeitschritt ( $\Delta t$ ) möglich (Gl.4-5).

$$v(t) = v_{t-1} + a(t) * \Delta t \quad (\text{Gl.4-5})$$

Bei gegebener Startgeschwindigkeit (=Vorgabe) können damit die Beschleunigung, die Geschwindigkeit und die Zugkraft der Lokomotive für die einzelnen Zeitschritte ermittelt (simuliert) werden.

Die zurückgelegte Fahrstrecke wird nach Gleichung 4-6 für den jeweiligen Zeitpunkt bestimmt.

$$s(t) = s_{t-1} + 0,5 * (v_{t-1} + v(t)) * \Delta t \quad (\text{Gl.4-6})$$

Um des Weiteren die notwendige Leistung am Rad (Gl.4-7) zu berechnen, erfolgt zuerst die Bestimmung der Kraft am Rad für jeden Zeitschritt aus Summe der Beschleunigungs-, Steigungs- und Luftwiderstände.

$$P_{rad} = (F_H + F_L + F_B) * v(t) = F_{rad} * v(t) \quad (\text{Gl.4-7})$$

Je nach Vorzeichen der Radkraft wird Leistung rekuperiert ( $F_{rad}$  negativ) oder vom Netz (aus Verbrennungsmotor bei D-Loks;  $F_{rad}$  positiv) entnommen. Unter Einbeziehung von Wirkungsgraden (Generator, Gleichrichter) wird aus der Radkraft die momentane Antriebsleistung ( $P_{mot(+,-)}$ ; Gl.4-8) errechnet. Diese ist im Motorbetrieb positiv (in Klammer gesetzte arithmetische Operatoren) und im Generatorbetrieb negativ.

$$P_{mot(+,-)} = P_{rad}(/) * (\eta_{mech} * \eta_{emot} * (\eta_{\ddot{u}W}) * \eta_{rekup}) \quad (\text{Gl.4-8})$$

Aus der Antriebsleistung für einen bestimmten Zeitpunkt wird schließlich die Effektivleistung unter Berücksichtigung von Nebenverbrauchern bestimmt (Gl.4-9).

$$P_e = P_{mot(+,-)} + \sum P_{Nebenverbraucher} \quad (\text{Gl.4-9})$$

In dieser Arbeit werden jedoch ausschließlich Dieselloks simuliert, daher müssen noch die Emissionen ermittelt werden. Dazu wird im Programm die aktuelle effektive Leistung  $P_e$  auf die Nennleistung  $P_{rated}$  bezogen und durch lineare Interpolation die PM-Emission je nach Grenzwert aus der Kennlinie (Abb.4-4) berechnet (Gl.4-10). [26] [30]

$$PM\_Emission \left[ \frac{g}{h} \right] = P_{rated} [kW] * Kennlinienwert \left( f \left( \frac{P_e}{P_{rated}} \right) \right) \left[ \frac{g}{h * kW} \right] \quad (\text{Gl.4-10})$$

Die Kennlinien sind auf g/h bezogen, folglich auch die interpolierten Emissionswerte. Daher müssen diese gegebenenfalls auf die jeweilige Zeiteinheit umgerechnet werden.

## 4.2 Programmstruktur

Im sogenannten Strecken-File (vzg) des Programmes erfolgte in dieser Arbeit die Vorgabe der zulässigen Geschwindigkeit (Geschwindigkeitsverlauf) auf dem jeweiligen Streckenabschnitt (=Vorgabesignal), der Höhe über Meeresebene für die Steigleistungsberechnung (generell geringe Steigung vorgeben), der Streckendiskretisierung (meist 5m) und eventuell vorhandener Stopzeiten der Züge (in dieser Arbeit sind keine Stopzeiten vorhanden). Messsignale wurden ebenfalls nicht verwendet und werden daher nicht erklärt. Abbildung 4-1 zeigt exemplarisch ein solches File.

! VzG-InputFile for RECEM			
!			
! Railway line: Wr. Neustadt - Graz			
! VzG data: from OeBB (original without any construction sites)			
! Altitude data: as measured with GPS during test run			
! Stop time: Intercity train as measured during test run			
!			
! Berechnungsmodus (M = Messsignal, V = Vorgabesignal)			
!			
! distance	vzG	altitude	stop time
! [km]	[km/h]	[m] a.s.l.	[s] (integer)
48,120	120,0	290,564	1
48,125	120,0	290,101	0
48,130	120,0	289,633	0
48,135	120,0	289,200	0
48,140	120,0	288,809	0
48,145	120,0	288,456	0
48,150	120,0	288,136	0
48,155	120,0	287,838	0
48,160	120,0	287,563	0
48,165	120,0	287,302	0
48,170	120,0	287,039	0
48,175	120,0	286,773	0
48,180	120,0	286,503	0
48,185	120,0	286,237	0
48,190	120,0	285,976	0

**Abbildung 4-1:** Streckenfile mit Vorgabesignal [30]

Das File .zug benötigt als Startparameter den Zugtyp, Masse, Leistung, Höchstgeschwindigkeit, Wirkungsgrade (Generator, Gleichrichter), Rekuperationswerte, die am Motorprüfstand gemessene Zugkraftkennlinie der Lokomotiven, die Waggonanzahl, Masse pro Waggon, Maximalgeschwindigkeit des Zugs und Luftwiderstandsfaktoren (siehe beispielhaft Abb. 4-2).

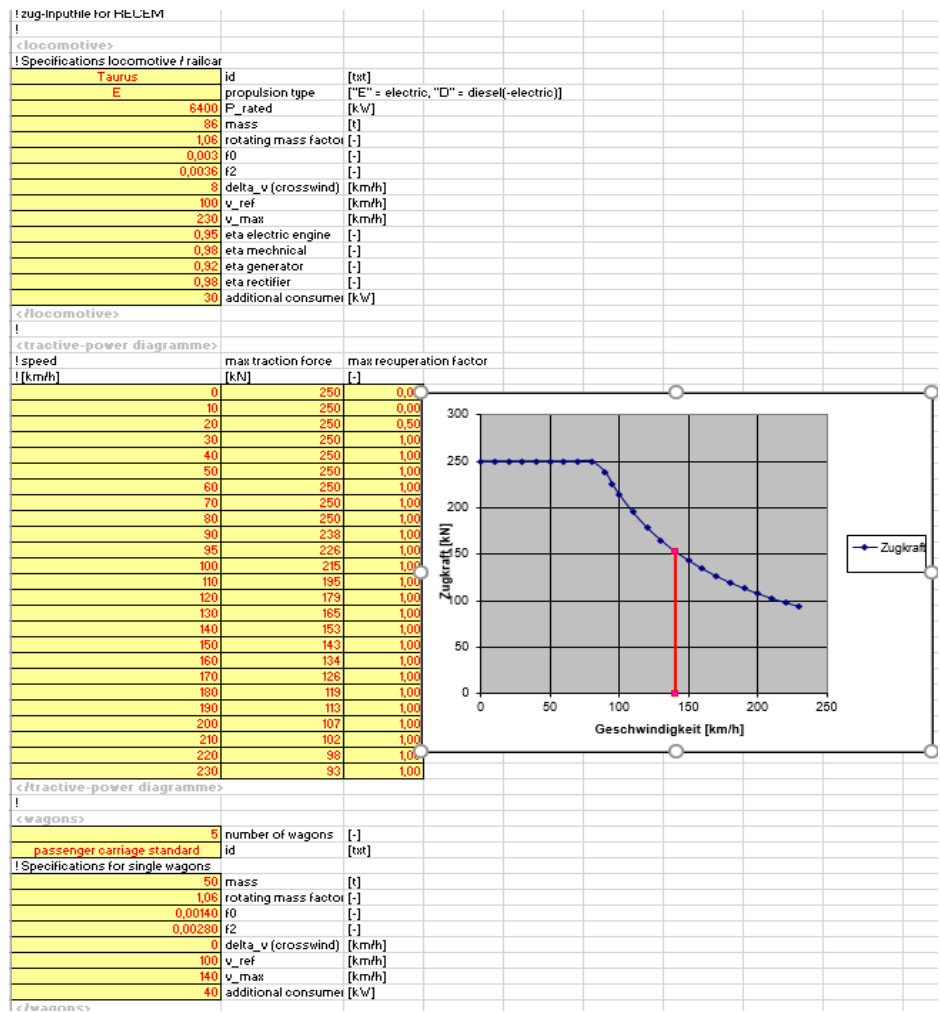


Abbildung 4-2: Zug-File [30]

Die oben genannten Eingabeparameter der gefahrenen Züge wurden aus Datenblätter der Hersteller entnommen. Eine Liste der durch den Tunnel gefahrenen Züge (Zugtyp, Gesamtmasse Zug, Waggonanzahl, Länge des Zuges, Fahrtrichtung, Datum, Uhrzeit) im Auswertzeitraum wurde durch die ÖBB Personenverkehr GmbH zur Verfügung gestellt.

Das dritte File (.tff) beinhaltet das Fahrverhalten wie maximale Verzögerungen/Beschleunigungen, Beharrungszeiten und die Bremsmomentenkurve (als Funktion des Zugtyps, Abb. 4-3). Diese Parameter sind für die einzelnen Zugtypen im Programm bereits implementiert und mussten nur mehr für die Simulation des jeweiligen Zugtyps ausgewählt werden.

! tff-InputFile for RECEM		
0.9	utilisation factor for recuperation	
30	acceleration criteria: minimum requirement for dwell time at target speed level [s]	
200	start of acceleration after vzG increase [m]	
<acceleration for braking events>		
! speed	target accelel	maximum acceleration
[km/h]	[m/s²] (<0!)	[m/s²] (>0!)
0	-0.6	1.2
10	-0.6	1.2
20	-0.6	1.2
30	-0.6	1.2
40	-0.6	1.2
50	-0.6	1.2
60	-0.6	1.2
70	-0.6	1.2
80	-0.6	1.2
90	-0.6	1.2
95	-0.6	1.2
100	-0.6	1.2
110	-0.6	1.2
120	-0.6	1.2
130	-0.6	1.2
140	-0.6	1.2
150	-0.6	1.2
160	-0.6	1.2
170	-0.6	1.2
180	-0.6	1.2
190	-0.6	1.2
200	-0.6	1.2
210	-0.6	1.2
220	-0.6	1.2
230	-0.6	1.2
</acceleration for braking events>		

Abbildung 4-3: Fahrverhaltens-File [30]

Das letzte einzulesende File enthält die Emissionskennlinie (.ken) woraus durch lineare Interpolation mit der normierten Nennleistung als Eingangsparameter die PM-Emission eruiert wird (Abb. 4-4). Die Auswahl der jeweiligen Emissionskennlinie wurde durch die Emissionsgrenzwerte laut Gesetz als Funktion des Baujahres und der Leistung der Lokomotive getroffen. Das dazu notwendige Datenmaterial wurde von der ÖBB zur Verfügung gestellt. [26]

Auf Grund oben angeführter Auswahlkriterien wurden in dieser Arbeit nur IIIA und IIIB Kennlinien verwendet. [26] [30]

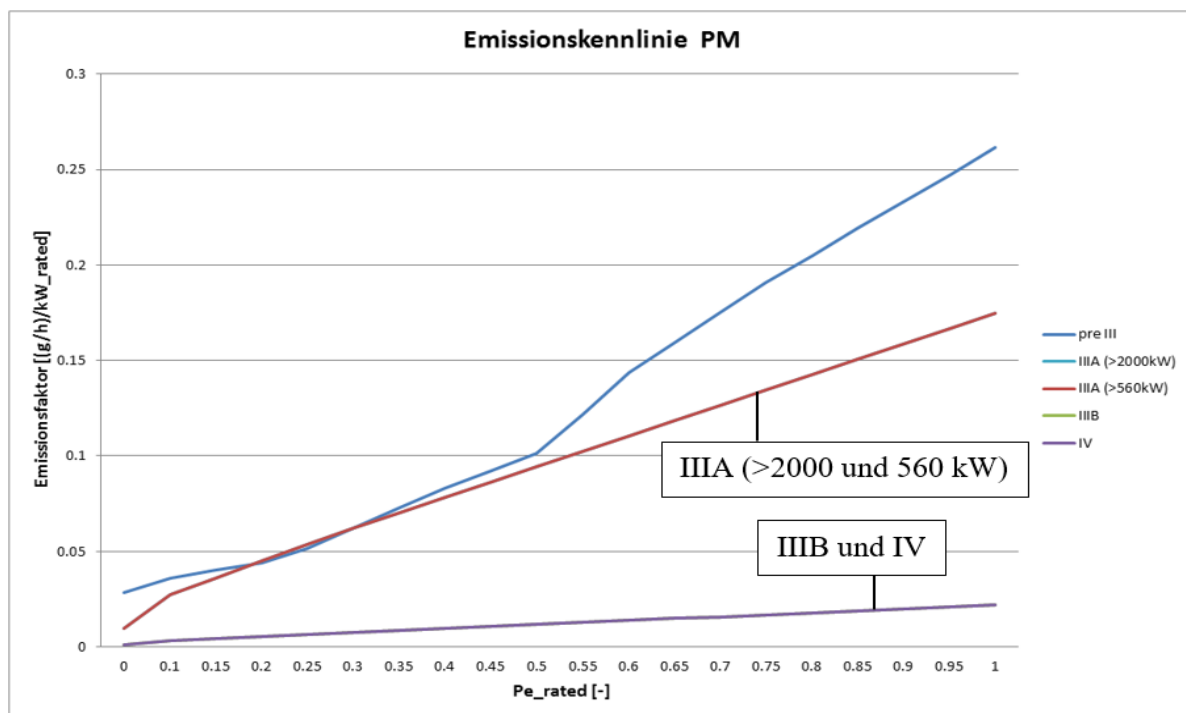
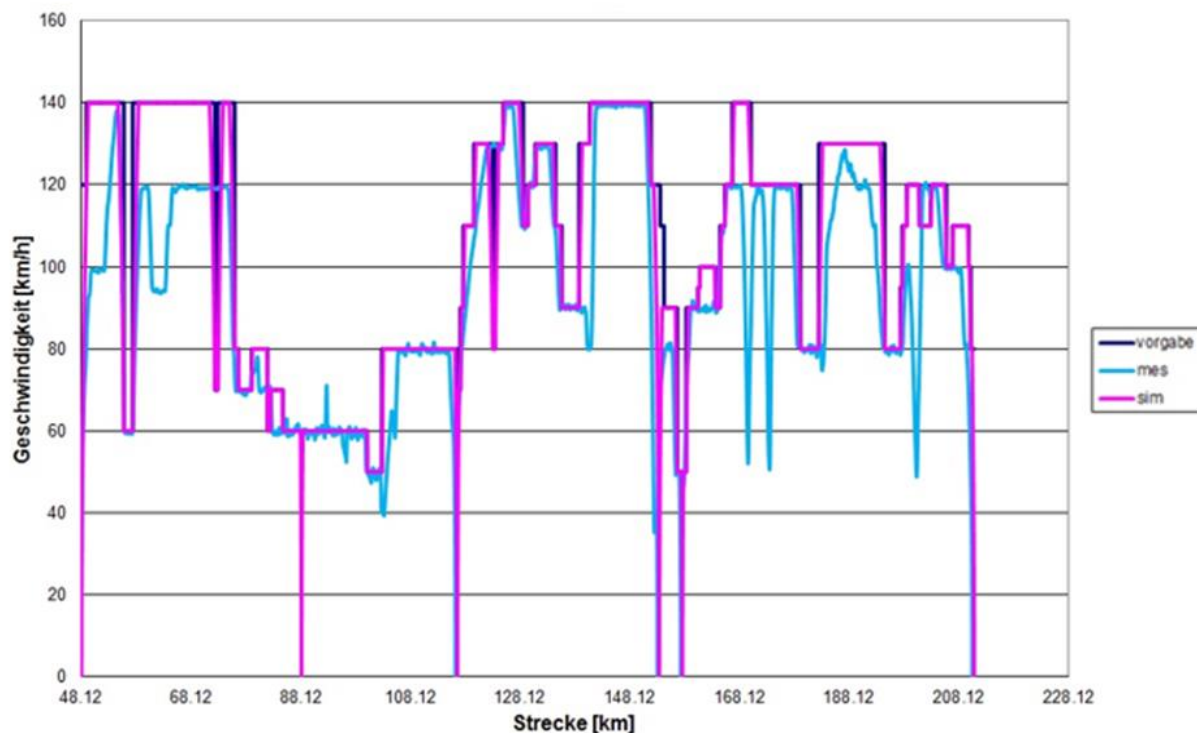


Abbildung 4-4: PM-Emissionskennlinie [30]



In Abbildung 4-5 ist ein vorgegebener (kann vom Benutzer beliebig gewählt werden), gemessener (aus aufgezeichneten Geschwindigkeitsdaten einer Zugfahrt) und daraus simulierter (mittels RECEM nach Eingabe eines vorgegebenen oder gemessenen Geschwindigkeitsprofils berechnet) Geschwindigkeitsverlauf beispielhaft dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die simulierte Geschwindigkeit Abweichungen zum Vorgabe- und Messsignal aufgrund der wirkenden Fahrwiderstände und der zur Verfügung stehenden Zugkraft der Lok (je nach Zugkraftkennlinie), aufweist.



**Abbildung 4-5:** Exemplarischer Geschwindigkeitsverlauf [30]

Nach Eingabe und Laden aller erwähnten Parameter über die Benutzeroberfläche (Abb. 4-6), kann die Berechnung gestartet werden und als Ergebnis werden die (je nach Zeitschrittweite ermittelten) Emissionen und der Leistungsbedarf ausgegeben. Auch die Ausgabe eines Mittelwertes über der Simulationszeit aller Größen ist möglich. [26] [30]

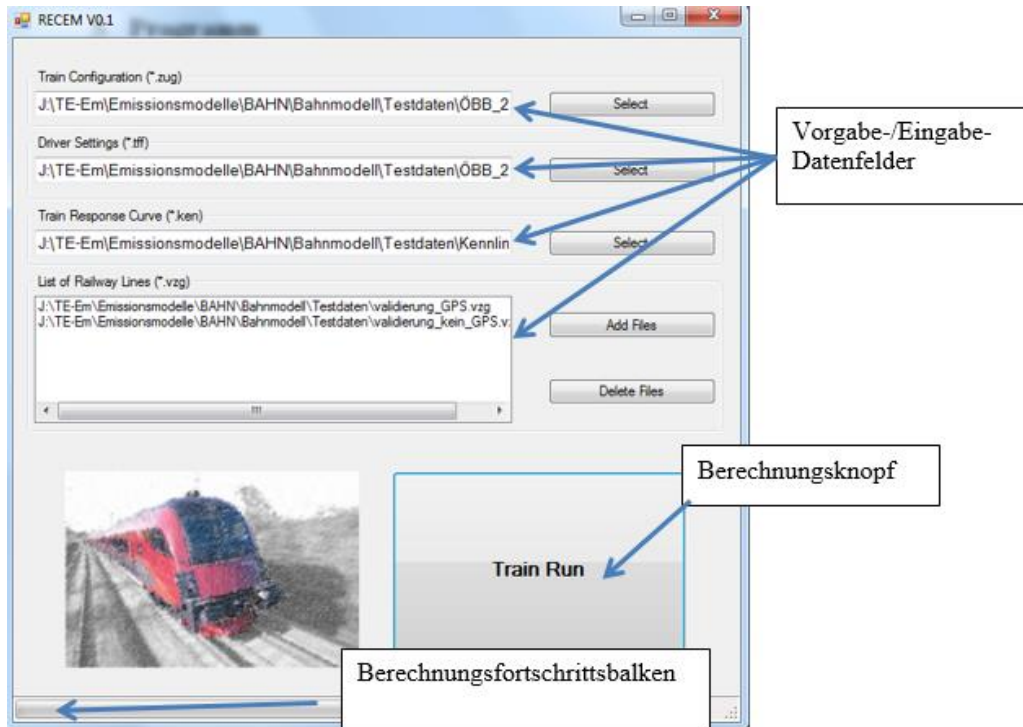


Abbildung 4-6: Benutzeroberfläche [30]

## 5 Messaufbau und Messdurchführung

In diesem Kapitel werden der Messaufbau im Tunnel und die Messdurchführung näher beschrieben.

### 5.1 Messaufbau

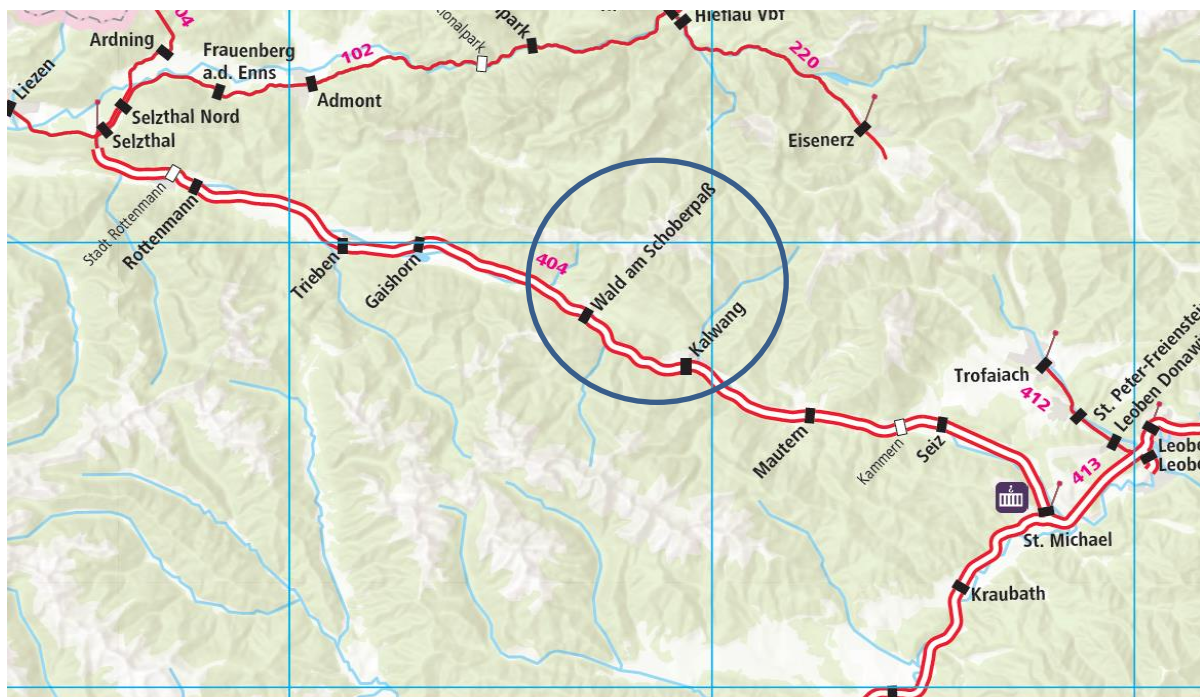
Nachfolgend werden der Messort, die Teilstromabsaugung und die Positionierung der Messgeräte erklärt.

#### 5.1.1 Messort/Messzeit

Die Messungen begannen mit 6. Juni 2018. Für die Datenanalyse in dieser Arbeit wurde folgender Zeitraum mit durchgehenden Messdaten ohne nennenswerte Zeitlücken herangezogen:

**06.06.2018 00:00 Uhr bis 20.07.2018 23:59 Uhr.**

Als Messort wurde der **einröhrige Unterwaldertunnel (2-gleisig)** mit einer Länge von **1055 Meter** und dem **Tunnelquerschnitt von 72,5m<sup>2</sup>** ausgewählt. Dieser befindet sich auf der **Regionalstrecke (Schoberpass-Strecke) 404 01** zwischen Selzthal und Sankt Michael. Der Tunnel ist mit einer festen Fahrbahn ausgestattet, folglich befindet sich im Tunnel kein Gleisbettschotter. Dieser Umstand wirkt sich positiv aus, da damit die durch Aufwirbelung induzierten Emissionen verringert werden. Abbildung 5-1 illustriert die geographische Lage des Messortes.



**Abbildung 5-1:** Lageplan der Messung [27]

In Abbildung 5-2 ist zudem die exakte Messlokation inklusive Zufahrtsstraße und Rettungsstollen ersichtlich. **Die Messstelle befindet sich in der Mitte des Tunnels (bei 527,5m)**. Aufgrund der leichten Zugänglichkeit durch den Rettungsstollen, entsprechendem Raumbedarf für das Messequipment und beidseitig größtmöglicher Entfernung vom Tunnelportal, wurde diese Lage ausgewählt.



**Abbildung 5-2:** Detaillageplan [28]

Für die Bestimmung von Partikelemissionen im Eisenbahnverkehr eignet sich ein Tunnel besonders gut, da eine Zuordnung von Zugfahrten (Zugtyp) und die dadurch emittierten Partikel (durch Aufwirbelungsprozesse, tribologische Effekte und durch in den Tunnel einfahrende Züge miteingebrachte Partikel), zu den jeweiligen Konzentrationspeaks erleichtert wird. Im freien Gelände wäre diese Zuordnung nicht so leicht möglich, da zu große Quereinflüsse (Wind, schwankende Wetterbedingungen, eventuell durch den Straßenverkehr emittierte Partikel) existieren. Nachteilig ist aber die Zweigleisigkeit zu erwähnen, da bei Begegnungen von 2 Zügen im Tunnel, eine eindeutige Zuordnung des Partikelkonzentrationspeaks zum Zugtyp, erschwert bzw. unmöglich wird.

### 5.1.2 Teilstromentnahme

Für die Bestimmung der Partikelkonzentration wurde ein Teilstromluftstrom aus dem Tunnel abgesaugt und den Messgeräten (TEOM-Messgerät und Partisol) zugeführt. Die wichtigsten Messparameter lauten wie folgt:

Durchmesser des Kanals für die Luftabsaugung: 315mm

Volumenstrom im Kanal: 0,36m<sup>3</sup>/s

Strömungsgeschwindigkeit im Kanal: 4,65m/s

Innendurchmesser Ansaugrohr (Sonde) TEOM-Messgerät: 8mm

Eingestellter Ansaugvolumenstrom TEOM-Gerät: 1 l/min

Aus der Kontinuitätsgleichung ergibt sich daraus eine Strömungsgeschwindigkeit in der Sonde des TEOM-Gerätes von: 0,33m/s.

Bei der Probennahme sollte auf eine annähernde isokinetische Absaugung geachtet werden (Strömungsgeschwindigkeit in Probennahmesonde  $\sim$  Strömungsgeschwindigkeit in Absaugkanal), um eine Verfälschung der Messwerte zu vermeiden. Durch geeignete Wahl des Durchmessers der Probennahmesonde oder des Ansaugvolumenstromes kann dies gewährleistet werden. Obige Berechnung zeigt jedoch eine hypokinetische Ansaugung (0,33m/s im Ansaugrohr (Sonde) und 4,65m/s im Absaugkanal).

Nachfolgende Messungen mit isokinetischen Bedingungen haben aber gezeigt, dass der dadurch verursachte Fehler vernachlässigbar (<10%) ist.

Innendurchmesser Ansaugrohr (Sonde) Partisol-Messgerät: 31,75mm

Eingestellter Ansaugvolumenstrom Partisol-Gerät: 0,00027778m<sup>3</sup>/s=1m<sup>3</sup>/h

Eine isokinetische Ansaugung ist bei diesem Gerät in dieser Konfiguration nicht überprüfbar, da aufgrund des Aufsatzes am Kopf des Ansaugrohres (Vorabscheider) eine Umleitung der Strömung (seitliche Einströmung in die Probennahmesonde, grüner Pfeil, Abb. 5-3 rechts) erfolgt.

### 5.1.3 Positionierung der Messgeräte

In Abbildung 5-3 sind die aufgebauten Messgeräte ersichtlich. Links ist die Messeinheit für die kontinuierliche Partikelkonzentrationsbestimmung (TEOM Messprinzip) mit zugehöriger Luftansaugung (Ansaugstutzen) aus dem Absaugkanal in das Messgerät zu sehen. Die starke Umlenkung der Strömung (Absaugkanal – Ansaugrohr (Sonde) TEOM) ist strömungstechnisch ungünstig, lässt sich aufgrund der vorhandenen Randbedingungen (Raumengpass) jedoch nicht vermeiden.

Im rechten Bild der Abbildung 5-3 ist das Partisol Messgerät (High Volume Aerosol Sampler) in einem Versuchsraum (mit Gipskartonplatten eingehauster Raum innerhalb des Rettungstollens) zur Bestimmung der einzelnen Bestandteile der abgesaugten Partikelfractionen (diskontinuierliche Messung) ersichtlich. Bei der Positionierung der Ansaugvorrichtung des Messgerätes wurde auf eine zentrale Ausrichtung im Querschnitt des Absaugrohres geachtet, um beste Anströmbedingungen zu gewährleisten. Dadurch konnte der Einfluss der sich strömungstechnisch negativ auswirkenden 90° Umlenkung (2. Umlenkung, Übergang horizontal in vertikale Führung) des Absaugkanals kurz vor der Ansaugung, reduziert werden (Abb. 5-4). Die Gründe für diese Umlenkung sind ebenfalls eingeschränkte Platzverhältnisse. Weiters erfolgte auch eine Temperaturmessung im Versuchsraum und eine Strömungsgeschwindigkeitserfassung des abgesaugten Luftstromes (siehe Abb. 5-3). Es befanden sich zudem noch weitere Messgeräte im Versuchsraum für die Untersuchung der Auswirkungen von erhöhten Temperaturen auf elektrotechnische Anlagen in einem Eisenbahntunnel. Diese sind aber nicht Gegenstand dieser Arbeit und werden somit auch nicht näher erklärt. Die Temperaturen im Versuchsraum liegen im Bereich 30-35°C, wodurch eine Kondensation von etwaigen Stoffen aus dem Absaugvolumenstrom des Kanals im Zuströmbereich (Übergang Absaugkanal zu Ansaugrohr Partisol) ausgeschlossen werden kann.

In Abbildung 5-4 ist die räumliche Anordnung der einzelnen Messgeräte dargestellt. Die 3D-Windgeschwindigkeits- und Windrichtungssensoren sowie auch die Temperatur- und Feuchtesensoren sind direkt im Tunnel (nahe der Ulme) appliziert. Dies ermöglicht eine gute Erfassung der realen Bedingungen (strömungstechnisch und hygrothermisch) im Fahrraum des Tunnels. Das TEOM-Messgerät befindet sich aus Platzgründen außerhalb des Versuchsraums und das Partisol Messgerät innerhalb, um konstante Versuchsbedingungen zu gewährleisten. Die Leitungslängen sind so gering als möglich ausgeführt worden, um mögliche Störeinflüsse (Kondensation) auf ein Minimum zu reduzieren. Die 1. Umlenkung für die Zuführung der Strömung in den Versuchsraum lässt sich aufgrund der Platzverhältnisse jedoch auch nicht vermeiden (Abb. 5-4).



Abbildung 5-3: TEOM Messgerät links und Partisol Messgerät rechts

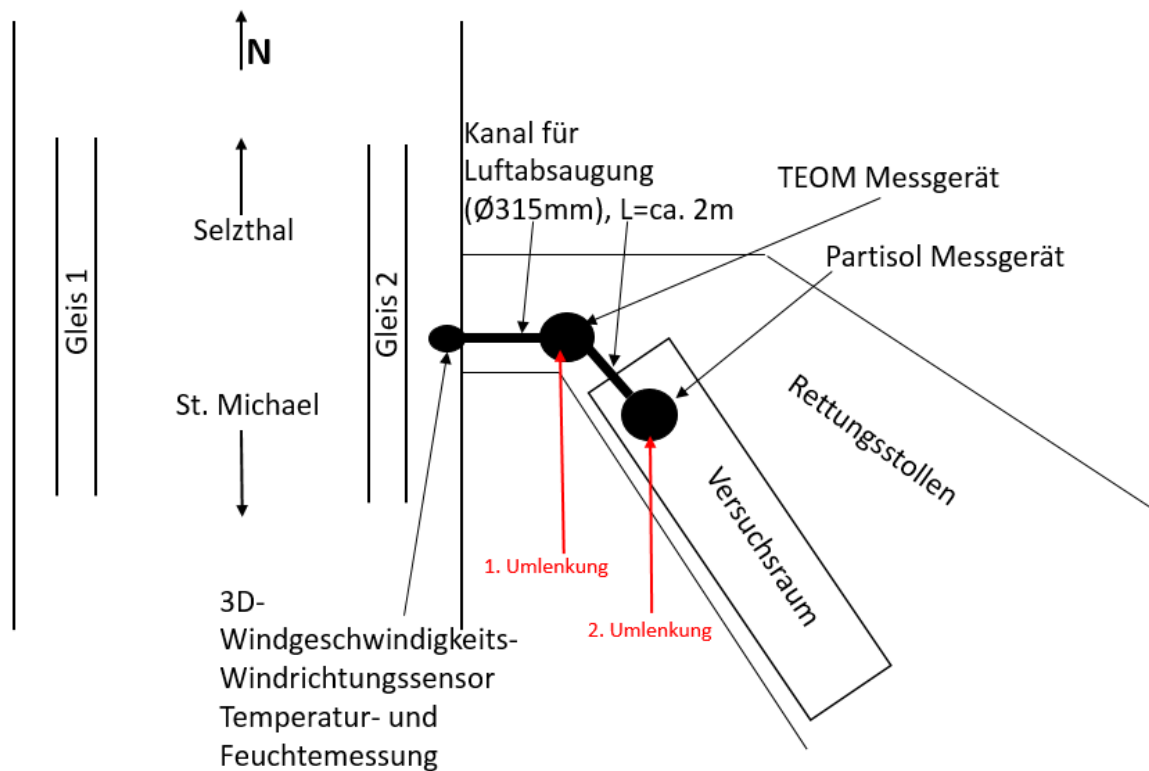


Abbildung 5-4: Skizze des Lageplans der Messeinrichtungen im Tunnel

## 5.2 Messdurchführung

Die kontinuierliche Messung wurde zur Ermittlung der Partikelemissionsfaktoren herangezogen. Dazu wurden mittels TEOM-Messgerät gleitende 10 Minuten Mittelwerte der Partikelkonzentration gebildet. Die Datenerfassung erfolgte bei diesem Messgerät mittels DaisyLab (Dewesoft). Die Daten mussten für die Auswertung in regelmäßigen Zeitintervallen ausgelesen werden.

Für die Ermittlung der chemischen Bestandteile der Partikel wurde noch eine diskontinuierliche Messung mit dem Partisol Messgerät durchgeführt. Die dafür zu beprobenden Filter befinden sich dazu in einer Kartusche und werden regelmäßig (nach 24 Stunden) automatisch der Beprobungseinheit zugeführt. Die beprobten Filter (mit Partikelmasse belegte Filter) werden ebenfalls in einer separaten Kartusche automatisch gesammelt und können daher in regelmäßigen Zeitintervallen ausgetauscht und anschließend ausgewertet werden (Abb. 5-5). Es wurden zudem verschiedene Filterarten (Quarz, Cellulose) eingesetzt, um ein möglichst großes Spektrum an unterschiedlichen Elementen zu erfassen. Die Eingabe bzw. Einstellung von Volumenströmen und sonstiger Parameter kann direkt am Messgerät erfolgen.



**Abbildung 5-5:** Partisol Messgerät mit Filterkartuschen

Die Temperatur- und relative Feuchtemessung erfolgte sekundlich direkt im Tunnel, wobei auch 10 Minuten Mittelwerte vom Messgerät errechnet wurden. Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Tunnel sowie deren Richtung wurden ebenfalls sekundlich aufgezeichnet. Die Erfassung dieser Daten im Tunnel erfolgte wiederum mittels Dewesoft und ein regelmäßiges Auslesen aus dem Datenlogger war ebenfalls nötig.

## 6 Auswertung/Datenanalyse der Messergebnisse

In diesem Kapitel werden die Datenanalyse der gemessenen Rohdaten, die Ermittlung der Hintergrundkonzentration, die Herleitung der Partikelemissionsfaktoren (PM=Particulate Matter-Emissionsfaktoren) und Regressionsanalysen durchgeführt. Die Messungen der Partikelkonzentration für die Emissionsfaktorbestimmung wurden nach dem Messprinzip TEOM (siehe Kapitel 3.2.2) durchgeführt. Weiters wurde kein Vorabscheider auf dem Messgerät montiert, folglich beinhaltet die gemessene Konzentration alle Partikelgrößen (gesamter Schwebestaub, TSP).

### 6.1 Bestimmung der effektiven Partikelkonzentration

Um die Hintergrundkonzentration zu ermitteln, wurde zuerst der Tagesverlauf (09.06.2018) mit der geringsten Anzahl an Zügen innerhalb des Auswertzeitraums (Summe Güter- und Personenzüge = 48) der gemessenen PM-Konzentration betrachtet. Aus jenen Abschnitten (2x), wo das Zeitintervall zwischen zwei Zugfahrten (bei Zugfahrt, Peak im Kurvenverlauf sichtbar) ausreichend groß ist (=keine Zugfahrt in diesem Zeitabschnitt, absinken der PM-Konzentration nahe Hintergrundkonzentration, siehe Abb. 6-1, mit schwarzen Pfeilen markiert), wurde ein arithmetischer Mittelwert der gemessenen PM-Konzentration gebildet. Dieser Wert repräsentiert die Hintergrundkonzentration, jedoch ist ersichtlich, dass dieser Wert je nach Wahl des Zeitintervalls stark fluktuiert. Somit wurde noch eine andere Methode angewandt.

Hierbei wurde ein Mittelwert über den Auswertzeitraum (**06.06.2018 00:00 Uhr bis 20.07.2018 23:59 Uhr.**) zweier Messstellen (**Leoben-Donawitz und Liezen**, abseits von Hauptverkehrsrouten, Abb. 6-2) des Landes Steiermark nahe dem Messpunkt berechnet und anschließend durch Differenzbildung die **effektive PM-Konzentration\_gesamt** (ges.=Exhaust + Non-Exhaust, korrigiert um Hintergrundeinfluss) ermittelt (Gl.6-1). Es muss aber angemerkt werden, dass die Hintergrundkonzentration der Messstellen des Landes Steiermark lediglich PM10-Werte liefern, somit ist davon auszugehen, dass die Hintergrundkonzentration (TSP) etwas höher liegt. Eine vollständige Kompensation des Offsets ist daher nicht möglich.

$$PM_{Conc\_eff\_ges} \left[ \frac{\mu g}{m^3} \right] = PM_{Conc\_gemessen} \left[ \frac{\mu g}{m^3} \right] - PM_{Conc\_Hintergrund} \left[ \frac{\mu g}{m^3} \right] \quad (Gl.6-1)$$

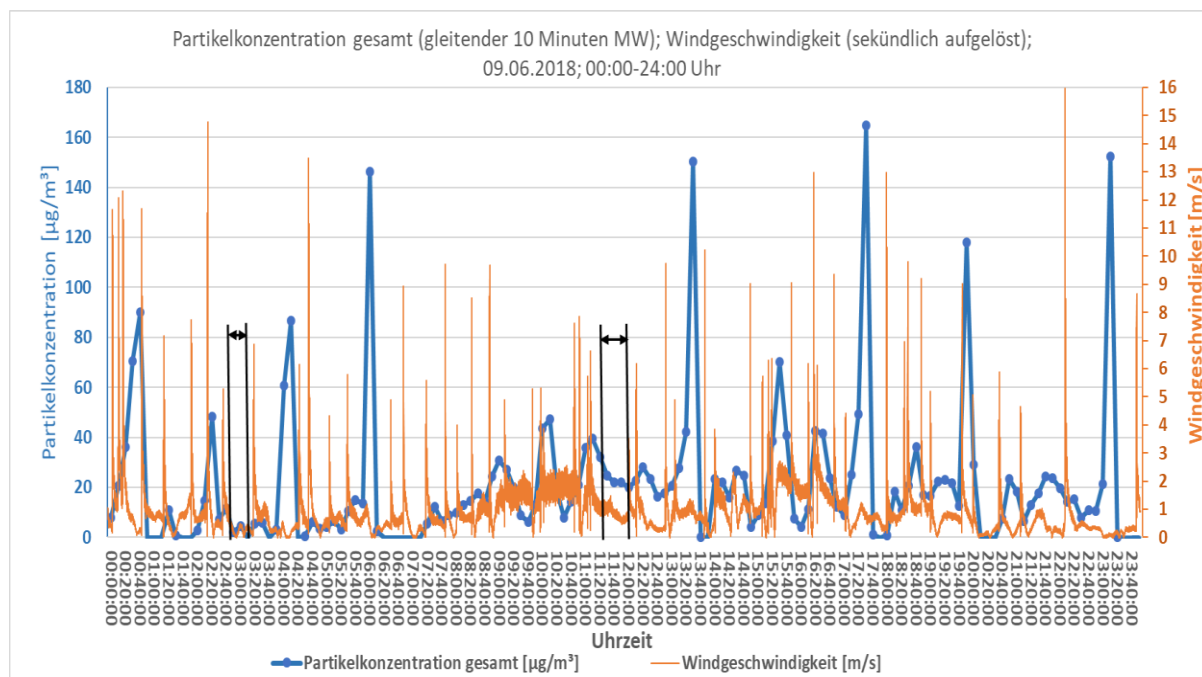


Abbildung 6-1: PM-Konzentration\_gesamt (ges.; Exhaust+Non-Exhaust)





Abbildung 6-2: Darstellung der Messstellen [28]

Die Ergebnisse der Berechnung der effektiven (eff.) PM-Konzentration gesamt (ges.) und der Messstellen sind in Tabelle 6-1 ersichtlich.

Tabelle 6-1: Berechnung der Hintergrundkonzentration

<b>MW Leoben Donawitz - Liezen</b>	<b>12,84</b>	<b>µg/m³ Hintergrund (PM10)</b>
<b>MW aus Messdaten</b>	<b>3,00</b>	<b>µg/m³ Hintergrund</b>
<b>09.06.18 02:50 Uhr - 09.06.18 03:20 Uhr</b>		
<b>MW aus Messdaten</b>	<b>24,20</b>	<b>µg/m³ Hintergrund</b>
<b>09.06.18 11:20 Uhr - 09.06.18 12:00 Uhr</b>		

Alle weiteren Berechnungen und Analysen wurden mit der **effektiven PM-Konzentration** ausgeführt.

## 6.2 Auswertung der Rohdaten

Nachstehend werden die Rohmessdaten statistisch ausgewertet und analysiert. Die nachfolgend dargestellten Messdaten repräsentieren Mittelwerte (Tages-, Wochenmittelwerte) induziert durch Konzentrationspeaks infolge von Zugfahrten.

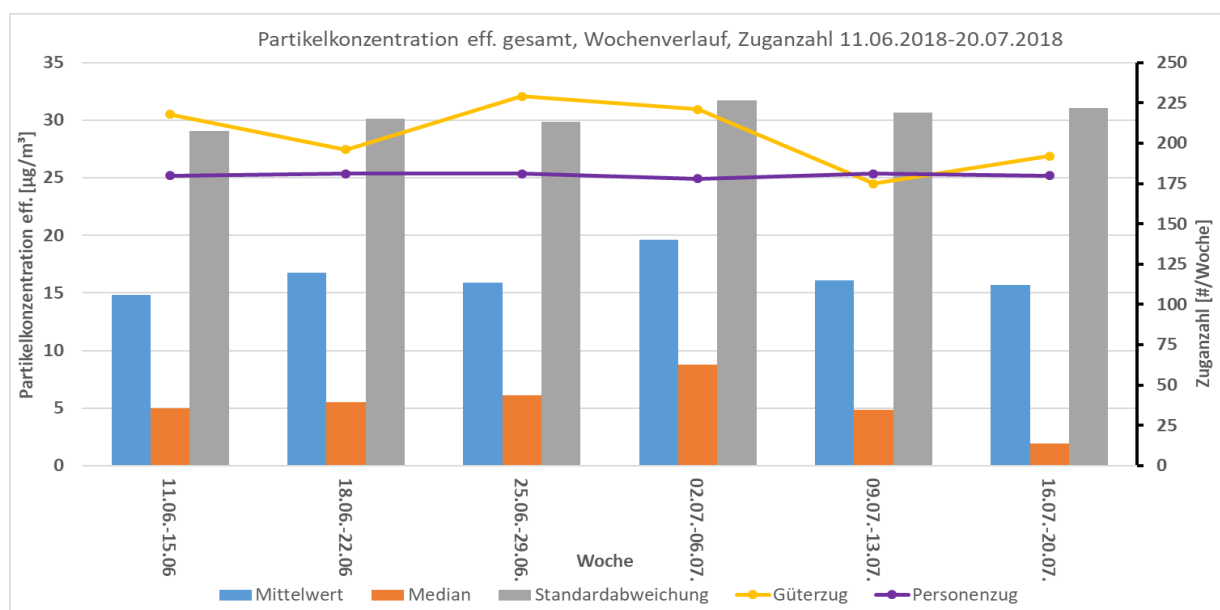
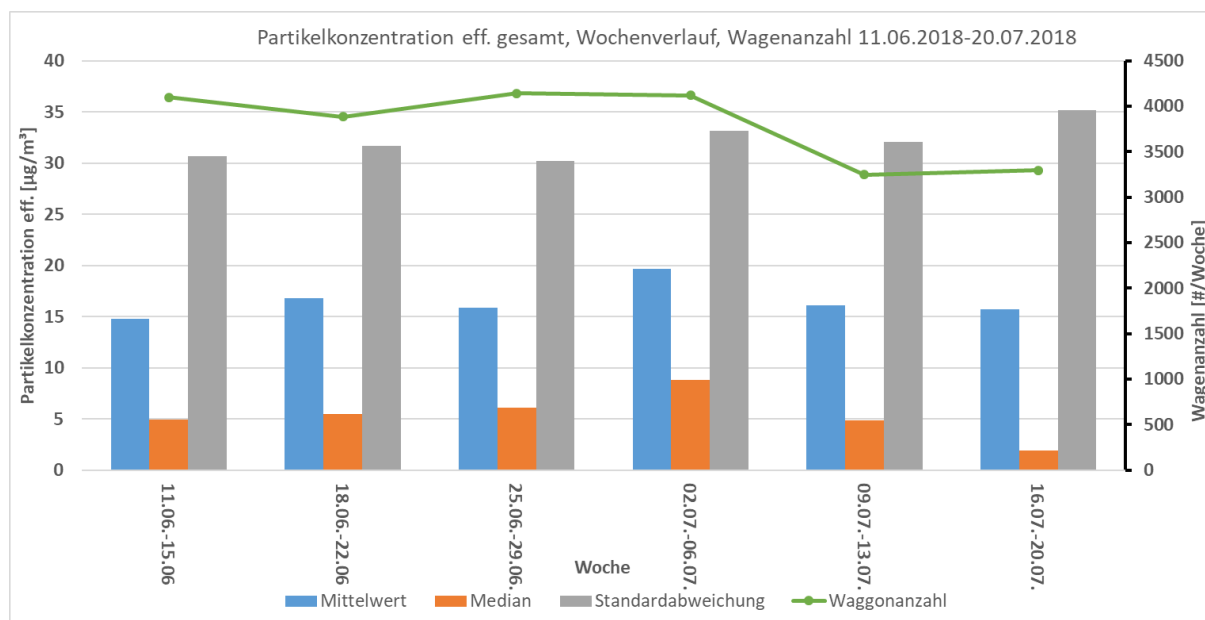


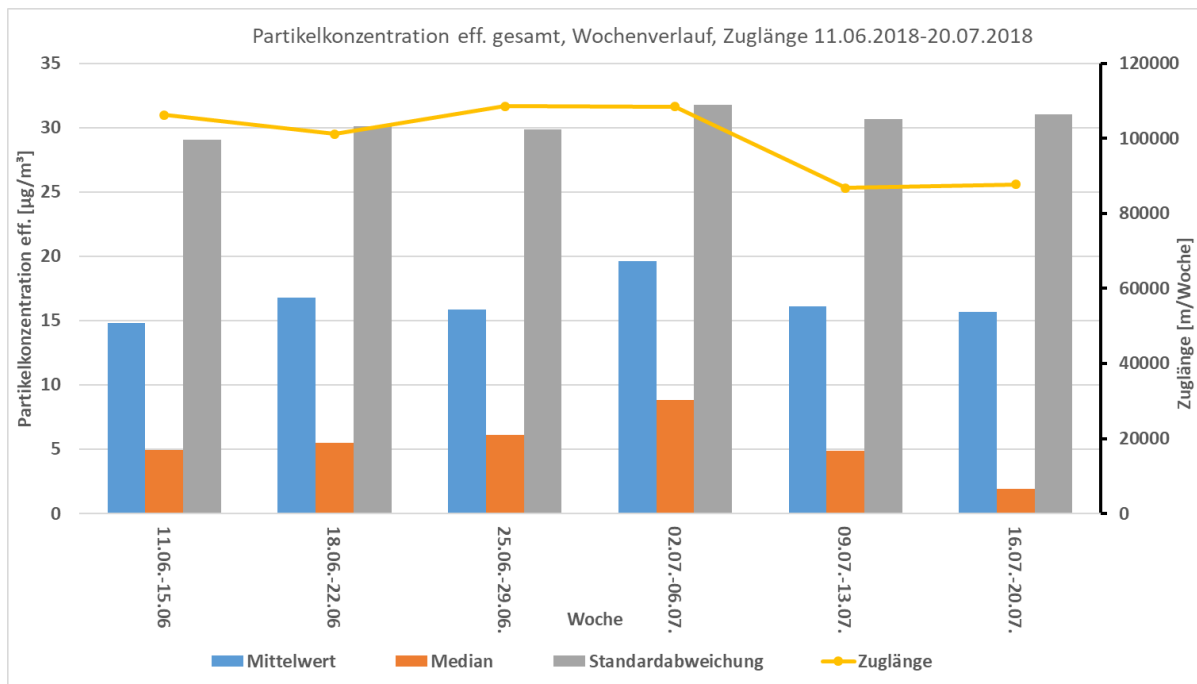
Abbildung 6-3: Wochengemittelte Werte Partikelkonzentration\_eff. \_ges. - Zuganzahl

In Abbildung 6-3 ist der Verlauf der Wochenmittelwerte, der Mediane und der Standardabweichungen je Woche der effektiven PM-Konzentration gesamt (Summe aus Exhaust und Non-Exhaust) für beide Richtungen ersichtlich. Für die Berechnung der wochengemittelten Werte werden nur die Werkzeuge herangezogen, da an diesen Tagen die Zugfrequenz deutlich höher und somit auch deren Einfluss auf die Immission größer als an den Wochenenden ist (siehe dazu Abb. 6-12). Die Grundlage für diese Daten bilden gleitende 10 Minuten (600s) Mittelwerte, welche durch das TEOM-Messgerät aufgezeichnet wurden. Zudem ist noch die Anzahl der Güter- und Personenzüge/Woche auf der Sekundärachse aufgetragen (Summe für beide Richtungen), um eine etwaige Korrelation zwischen diesen Variablen und der Konzentration zu erkennen. Es kann gesagt werden, dass die Mittelwerte und die Mediane fluktuieren und zwischen diesen Kennzahlen eine deutliche Differenz vorhanden ist, da die Messwerte einer großen Streuung unterliegen (Standardabweichung ebenfalls hoch). Weiters lässt sich diese relativ große Differenz zwischen Median und Mittelwert durch eine erhebliche Anzahl an extrem hohen und extrem niedrigen Werten (=Ausreißer) erklären, da der Mittelwert eine hohe Sensitivität für Ausreißer besitzt. Zudem ist ersichtlich, dass die Anzahl der Personenzüge annähernd konstant ist, da diese festen Fahrplänen unterliegen, die Güterzuganzahl weist größere Fluktuationen auf. Es ist nicht eindeutig erkennbar, dass mit steigender Güterzuganzahl auch die PM-Konzentration steigt (Abb. 6-3). Insbesondere die Woche vom 25.06.18-29.06.18 liefert ein diskrepantes Ergebnis, da die Konzentration gering ist und die Zuganzahl ein Maximum erreicht. Ein Grund dafür könnten schwankende Wetterverhältnisse (hohe relative Luftfeuchte => bessere Bindung von Partikel) sein. Analoges gilt für das Ergebnis der Woche vom 11.06.18-15.06.18 (Konzentration minimal, Zuganzahl hoch). Ein anderer möglicher Grund ist, dass die Konzentration durch die Zuganzahl nicht ausreichend beschrieben wird und weitere Einflussgrößen existieren (Beladungsart, Zuggattung, Geschwindigkeit), sowie die nicht exakt ermittelte lokale Hintergrundkonzentration ebenfalls Einfluss ausübt.



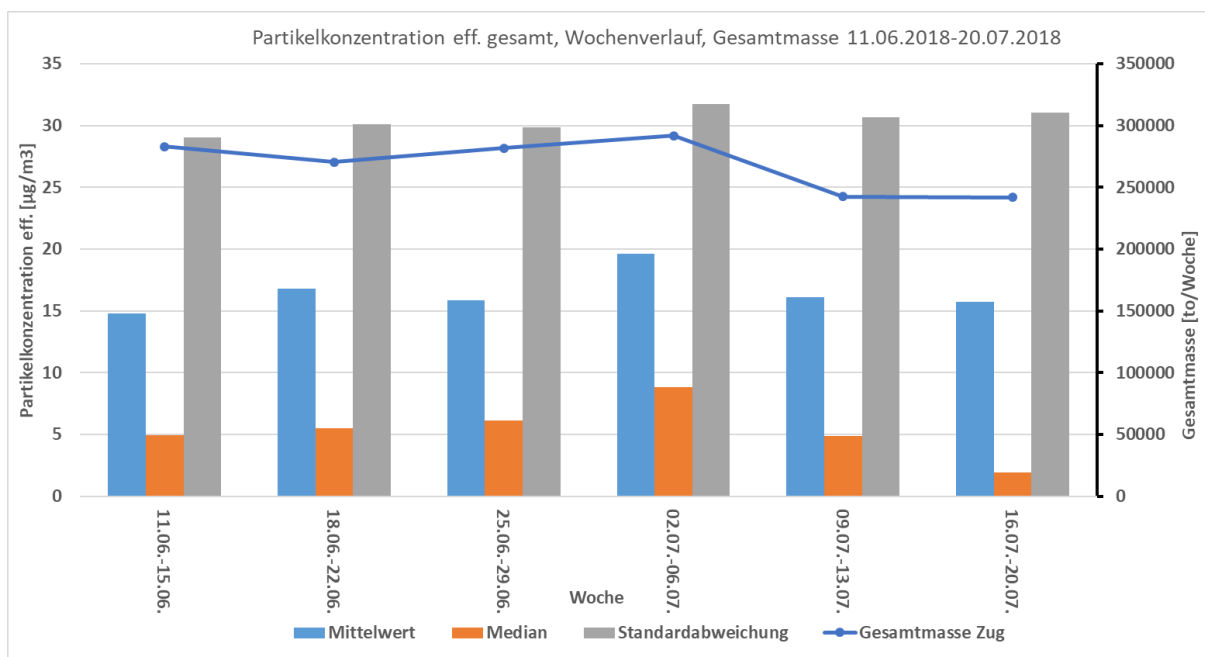
**Abbildung 6-4:** Wochengemittelte Werte Partikelkonzentration\_eff. \_ges.– Wagenanzahl

In Abbildung 6-4 zeigt sich, dass sich die Partikelkonzentration eff. gesamt mit der Wagenanzahl (Summe der jeweiligen Woche) leicht direkt proportional verändert. Eine deutliche Korrelation ist aber nicht erkennbar, jedoch eine leichte Diskrepanz in der Woche vom 16.07.18-20.07.18, aufgrund bereits genannter Gründe.



**Abbildung 6-5:** Wochengemittelte Werte Partikelkonzentration\_eff.\_ges. – Zuglänge

In Abbildung 6-5 ist keine direkte Proportionalität zwischen Zuglänge (Summe/Woche) und Partikelkonzentration (Diskrepanz in Woche vom 16.07.18-20.07.18 und 25.06.18-29.06.18) erkennbar, obwohl Konzentration sowie auch die Zuglänge in der Woche vom 02.07.18-06.07.18 hoch sind.



**Abbildung 6-6:** Wochengemittelte Werte Partikelkonzentration\_eff.\_ges. – Gesamtmasse\_Zug

Abbildung 6-6 zeigt die Gesamtmasse (Summe/Woche) der jeweiligen Züge als Sekundärparameter. Es ist zu erkennen, dass bei maximaler Gesamtmasse auch die Konzentration ihr Maximum erreicht. Jedoch kann trotzdem keine allgemeine direkte Proportionalität zwischen Gesamtmasse und Konzentration festgestellt werden. Dieser Verlauf zeigt nochmals, dass wie bereits erwähnt, Zugkonfiguration, Beladungsart, Alter, Zuggattung, Fahrgeschwindigkeit einen Einfluss ausüben, welcher zumindest auf Basis der Mittelwerte und Mediane durch diese erwähnten Parameter nicht ausreichend abgedeckt wird.

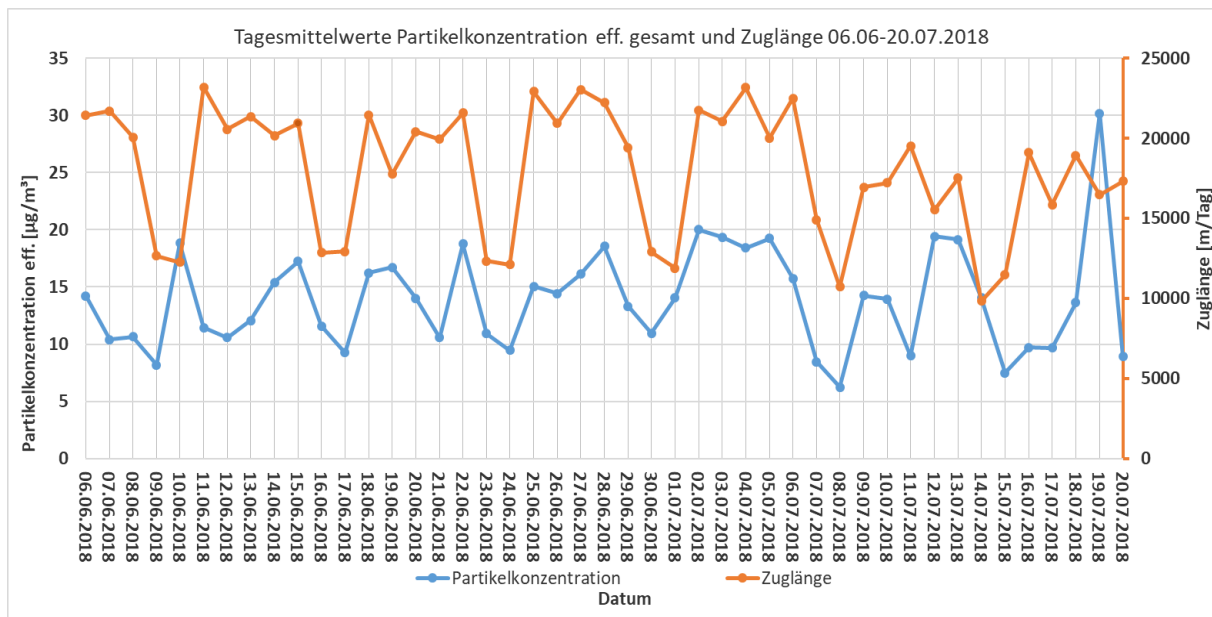
Weiters ist erkennbar, dass Zuglänge, Gesamtmasse und Waggonanzahl ihr Maximum nicht in derselben Woche erreichen. Die Gesamtmasse erreicht ihr Maximum in der Woche vom 02.07.18-06.07.18, Zuglänge und Waggonanzahl haben ihr Maximum eine Woche davor. Daraus ist erkennbar, dass wie bereits erwähnt auch die Beladung der Waggone Einfluss nimmt. Dies konnte jedoch nicht näher untersucht werden, da dazu kein detaillierteres Datenmaterial vorlag. Zudem sind die Kurvenverläufe (Zuglänge, Gesamtmasse, Waggonanzahl) ähnlich. Diese Ähnlichkeit deutet auf eine Korrelation der 3 Parameter mit der Konzentration hin und wird nachfolgend näher untersucht.

In Tabelle 6-2 sind die Werte aus Abbildung 6-3 bis 6-6 tabellarisch dargestellt. Alle Parameter wurden tages- und anschließend wochengemittelt. Es erfolgte zudem eine Unterteilung der Zugzahlen in Richtung 1 (Nord-Süd = Selzthal-St.Michael) und Richtung 2 (Süd-Nord = St.Michael-Selzthal).

**Tabelle 6-2:** Wochenwerte; Partikelkonzentration\_eff.\_gesamt– Zuganzahl – Wagenanzahl – Zuglänge – Gesamtmasse\_Zug

	Wochenwerte (TEOM)					
	11.06.-15.06.	18.06.-22.06.	25.06.-29.06.	02.07.-06.07.	09.07.-13.07.	16.07.-20.07.
<b>Mittelwert [<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>]</b>	<b>14,80</b>	<b>16,79</b>	<b>15,87</b>	<b>19,64</b>	<b>16,12</b>	<b>15,70</b>
<b>Median [<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>]</b>	<b>4,96</b>	<b>5,49</b>	<b>6,13</b>	<b>8,80</b>	<b>4,86</b>	<b>1,93</b>
<b>STABW [<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>]</b>	<b>29,03</b>	<b>30,13</b>	<b>29,86</b>	<b>31,76</b>	<b>30,67</b>	<b>31,04</b>
Minimum [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Maximum [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	244,23	239,85	246,86	235,64	238,25	231,56
PZ R1 [# /Woche]	90	90	91	89	90	90
GZ R1 [# /Woche]	115	103	121	116	96	104
PZ R2 [# /Woche]	90	91	90	89	91	90
GZ R2 [# /Woche]	103	93	108	105	79	88
<b>Summe PZ [# /Woche]</b>	<b>180</b>	<b>181</b>	<b>181</b>	<b>178</b>	<b>181</b>	<b>180</b>
<b>Summe GZ [# /Woche]</b>	<b>218</b>	<b>196</b>	<b>229</b>	<b>221</b>	<b>175</b>	<b>192</b>
<b>Summe gesamt [# /Woche]</b>	<b>398</b>	<b>377</b>	<b>410</b>	<b>399</b>	<b>356</b>	<b>372</b>
Wagenanzahl [# /Woche]	4098	3887	4140	4119	3249	3298
Zuglänge [m /Woche]	106198	101143	108536	108481	86731	87663
Gesamtmasse [to /Woche]	282870	270464	281704	291655	242320	241747

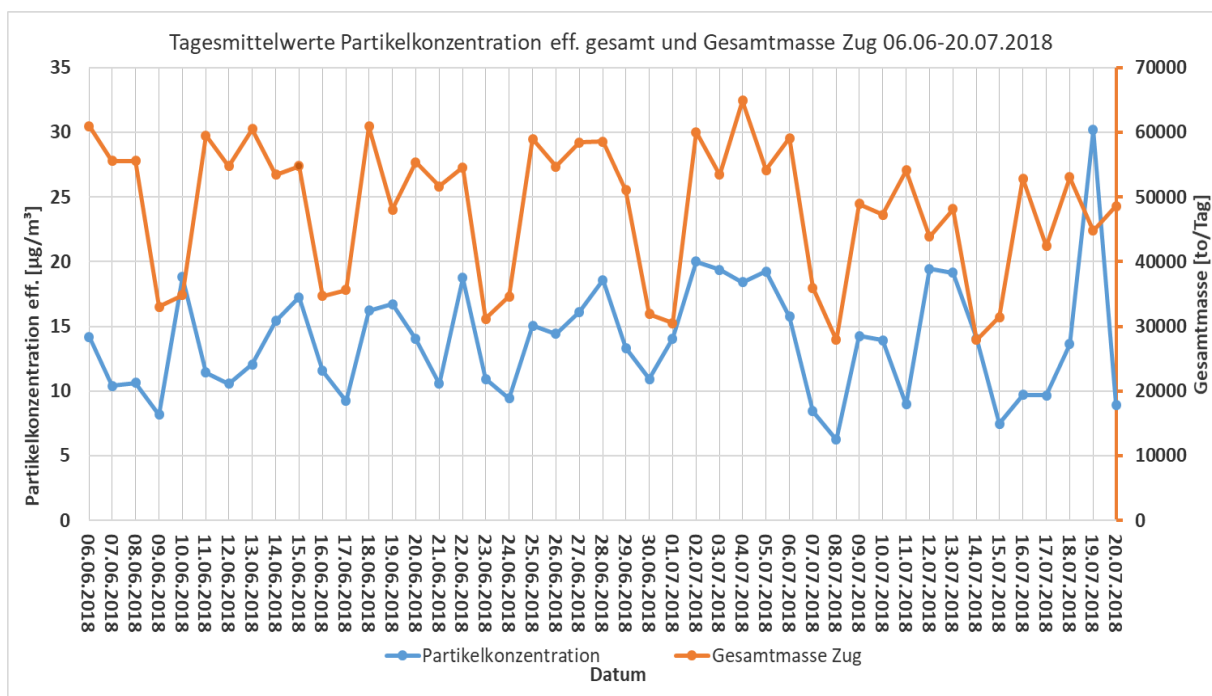
Um eine detaillierte Darstellung der Partikelkonzentration in Kombination mit den einzelnen Einflussparametern zu erreichen sowie auch Ausreißer und Messartefakte herauszumitteln, wurden aus den Messdaten (Partikelkonzentration, Zuglänge, Gesamtmasse der Züge, Windgeschwindigkeit und relative Feuchte im Tunnel sowie der Waggonanzahl) Tagesmittelwerte gebildet und anschließend graphisch aufbereitet.



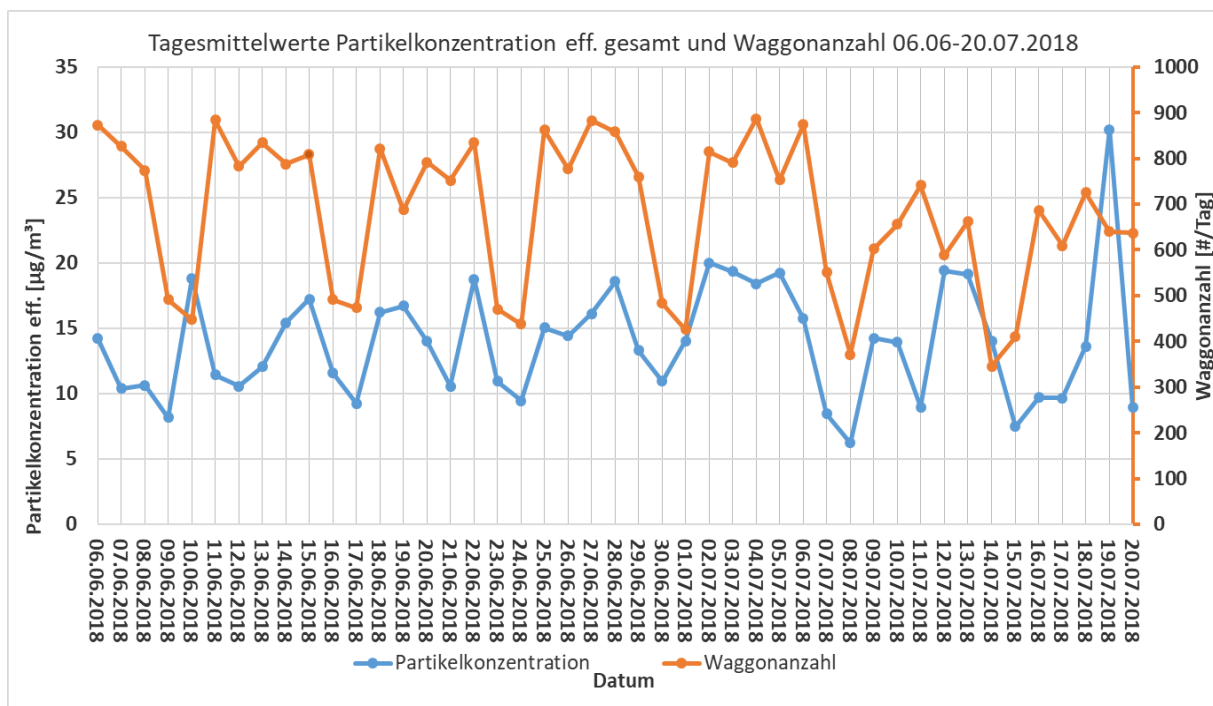
**Abbildung 6-7:** Tagesmittelwerte Partikelkonzentration\_eff.\_ges.- Zuglänge

Abbildung 6-7 zeigt, dass die Partikelkonzentration sowie die Zuglänge (Summenwert pro Tag) einer gewissen Fluktuation unterliegen, mit Erhöhung der durchschnittlichen täglichen Zuglänge ist aber eine Erhöhung der Konzentration oftmals nicht eindeutig ersichtlich. Diese Erkenntnis korreliert mit der bereits erläuterten Wochendarstellung. Am 10.06.18 und 19.07.18 ist eine Diskrepanz im Kurvenverlauf erkennbar (hohe Konzentration, niedrige Zuglänge). Dies bestätigt, dass noch weitere nicht berücksichtigte Parameter (z.B.: Beladung, Wetterbedingungen) Einfluss haben.

Auch in Abbildung 6-8 ist erkennbar, dass eine Erhöhung der Gesamtmasse\_Zug nicht immer eine Erhöhung der Konzentration zur Folge hat und Diskrepanzen existieren (10.06.18, 19.07.18).



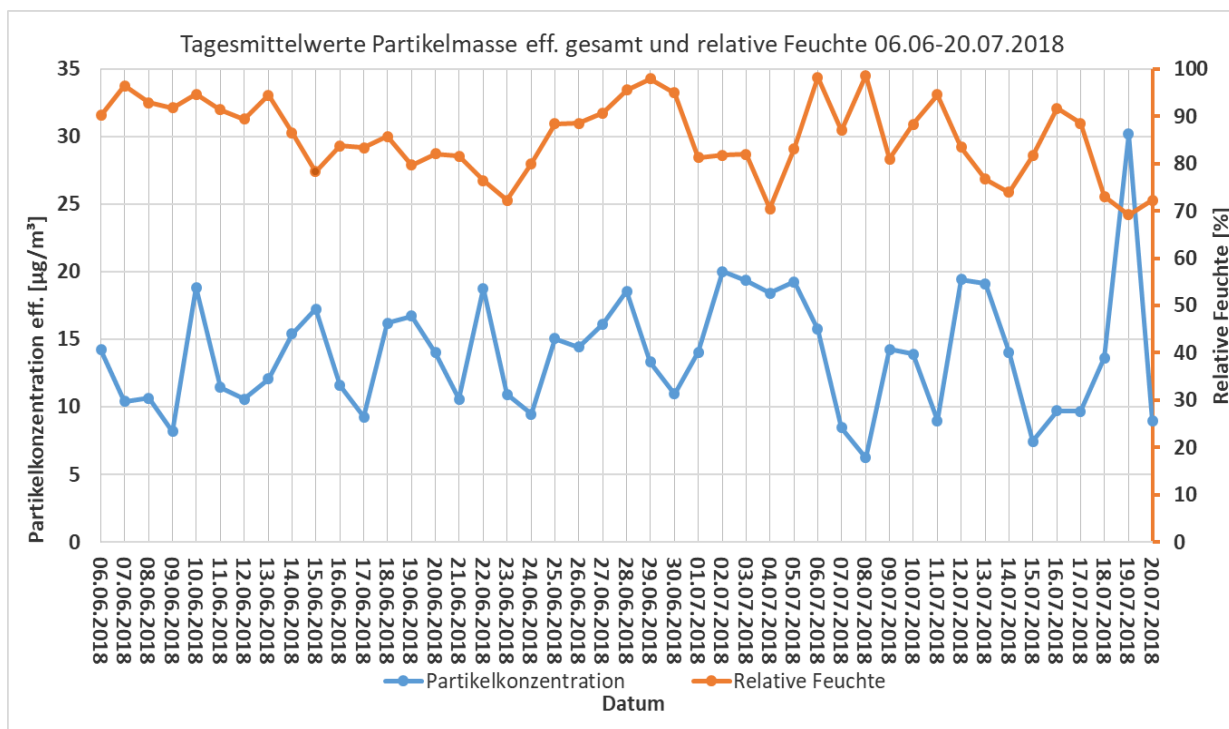
**Abbildung 6-8:** Tagesmittelwerte Partikelkonzentration-eff.\_ges. – Gesamtmasse\_Zug



**Abbildung 6-9:** Tagesmittelwerte Partikelkonzentration\_eff.\_ges. - Waggonanzahl

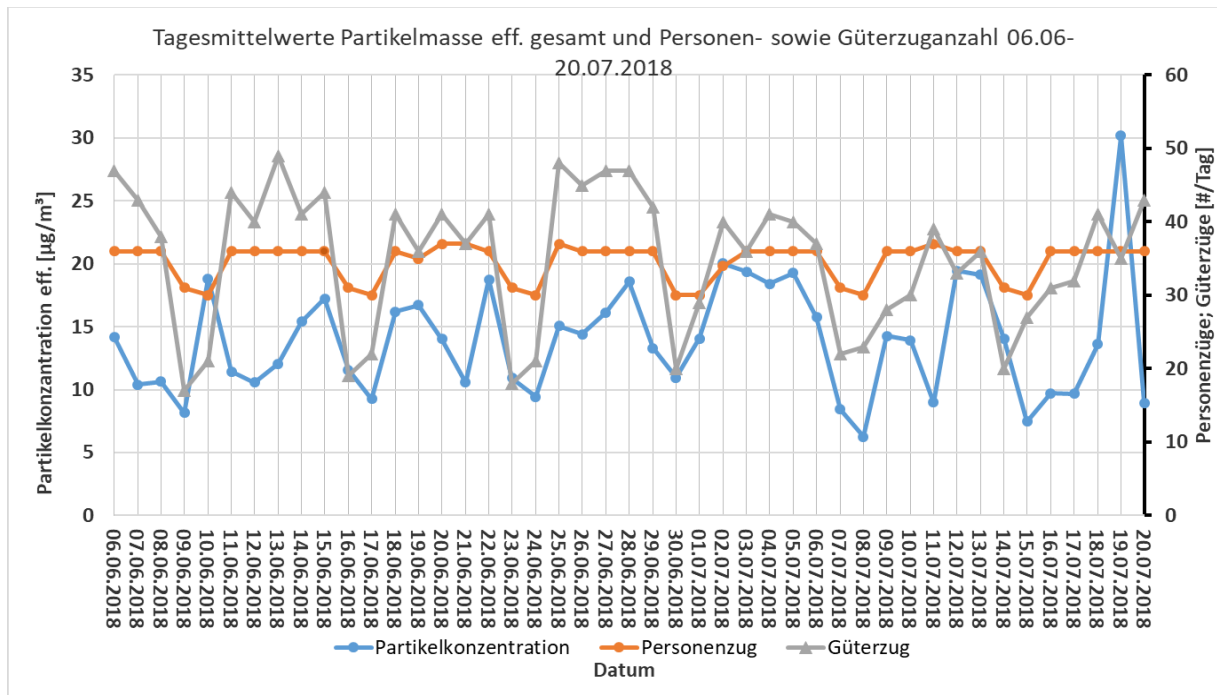
Abbildung 6-9 illustriert ebenfalls eine Fluktuation der Waggonanzahl (Summe pro Tag), wobei auch hier eine eindeutige direkte Proportionalität der Parameter nicht festgestellt werden kann. Die Abbildungen 6-7 bis 6-9 weisen aber ähnliche Verläufe auf, bis auf 2 diskrepante Werte (10.06.18, 19.07.18), was auf eine Korrelation hindeutet. Der starke Abfall der Kurve an einigen Tagen ist auf die verminderte Zugfrequenz an Wochenenden zurückzuführen.

Um den Einfluss der relativen Feuchte auf die Konzentration darzustellen, erfolgte auch von diesen Messwerten eine Tagesmittelung, um insbesondere die Wirkung von Ausreißer zu minimieren und um Zusammenhänge besser zu erkennen.



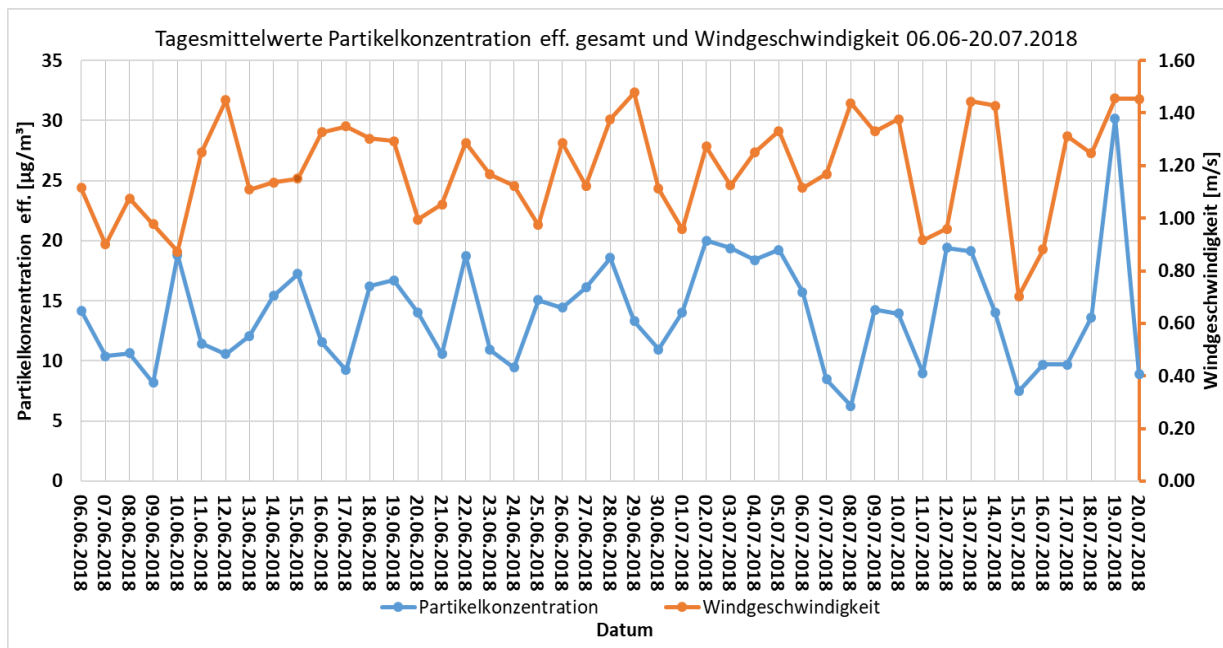
**Abbildung 6-10:** Tagesmittelwert Partikelkonzentration\_eff.\_ges. – Relative Feuchte

Abbildung 6-10 zeigt den Verlauf der relativen Feuchte im Tunnel. Erkennbar ist, dass eine Erhöhung der relativen Feuchte mit einem Absinken der Konzentration und umgekehrt einhergeht. Dies kann durch eine bessere Bindung von Partikel (Luftfeuchtigkeit nahe Sättigung) erklärt werden. Somit ist auch der Einfluss der Witterungsverhältnisse auf die Konzentration nicht vernachlässigbar. Auch hier (Abb. 6-10) ist am 10.06.18 ein widersprüchlicher Verlauf ersichtlich, was durch bereits erwähnte Gründe erklärt werden kann.



**Abbildung 6-11:** Tagesmittelwert Partikelkonzentration\_eff.\_ges. - Personen-Güterzuganzahl

In Abbildung 6-11 ist auch noch die Zuganzahl (Summe/Tag) den tagesgemittelten Konzentrationswerten gegenübergestellt und es zeigt sich, dass die Anzahl der Güterzüge stark fluktuiert, da diese im Gegensatz zur Personenzuganzahl keinem sich wiederholenden Fahrplan unterliegen (=jeweilige Zuggattung besitzt den gleichen Fahrtzeitpunkt für jeden wiederkehrenden Wochentag bzw. jeden Tag), welche annähernd konstant ist. Zudem ist an den Wochenenden eine deutlich geringere Anzahl von Güterzügen sowie eine etwas niedrigere Anzahl von Personenzügen zu beobachten (widerspiegelt sich auch in den Verläufen von Zuglänge, Gesamtmasse Zug und Waggonanzahl). Eine Steigerung oder Senkung der Partikelmasse einhergehend mit einer Erhöhung oder Verringerung der Zuganzahl ist nicht immer gegeben (Diskrepanzen sind vorhanden).



**Abbildung 6-12:** Tagesmittelwert Partikelkonzentration\_eff.\_ges. - Windgeschwindigkeit

Abbildung 6-12 zeigt abschließend, dass die sekundlich gemessene Windgeschwindigkeit (Tagesmittelwert) im Tunnel eine erkennbare direkte Proportionalität zur Konzentration im Tunnel aufweist, jedoch auch hier teilweise diskrepante Werte erkennbar sind. Dies kann wiederum durch unterschiedliche Witterungsbedingungen (Luftdruck variiert und damit auch die Windgeschwindigkeit) erklärt werden.

Um die Partikelkonzentration\_eff.\_ges. (Exhaust + Non-Exhaust) mit der gemessenen Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Tunnel in Verbindung zu bringen sowie etwaige vorhandene Korrelationen zwischen Windgeschwindigkeitsanstieg und der Partikelkonzentration zu erkennen, wird nachfolgend der Tagesverlauf der Partikelkonzentration (Primärachse) mit der höchsten Zugfrequenz pro Tag (85 Personen- und Güterzüge; Mittwoch, 13.06.2018) dargestellt. Zudem werden im Diagramm die Zugfahrten laut Plan der ÖBB gekennzeichnet, um diese mit den Konzentrations- sowie Windgeschwindigkeitsmesswerten (Sekundärachse) zu vergleichen (eventuell Zugausfälle zu eruieren). Eine Differenzierung zwischen Personen- (fett durchgezogen markiert) und Güterzüge (strichliert dünner markiert) und Fahrtrichtung (Richtung 1 (R1) = Süd-Nord; Richtung 2 (R2) = Nord-Süd) findet ebenso Anwendung. Es ist jedoch zu beachten, dass der PM-Konzentrationswert einen 10-minütigen gleitenden Mittelwert repräsentiert, die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung (Sekundärachse) aber sekundlich aufgelöst sind. Für die Gewährleistung der Übersichtlichkeit und Interpretierbarkeit werden pro Diagramm immer nur 6 Stunden im Querformat dargestellt (Abb. 6-13 bis 6-16).



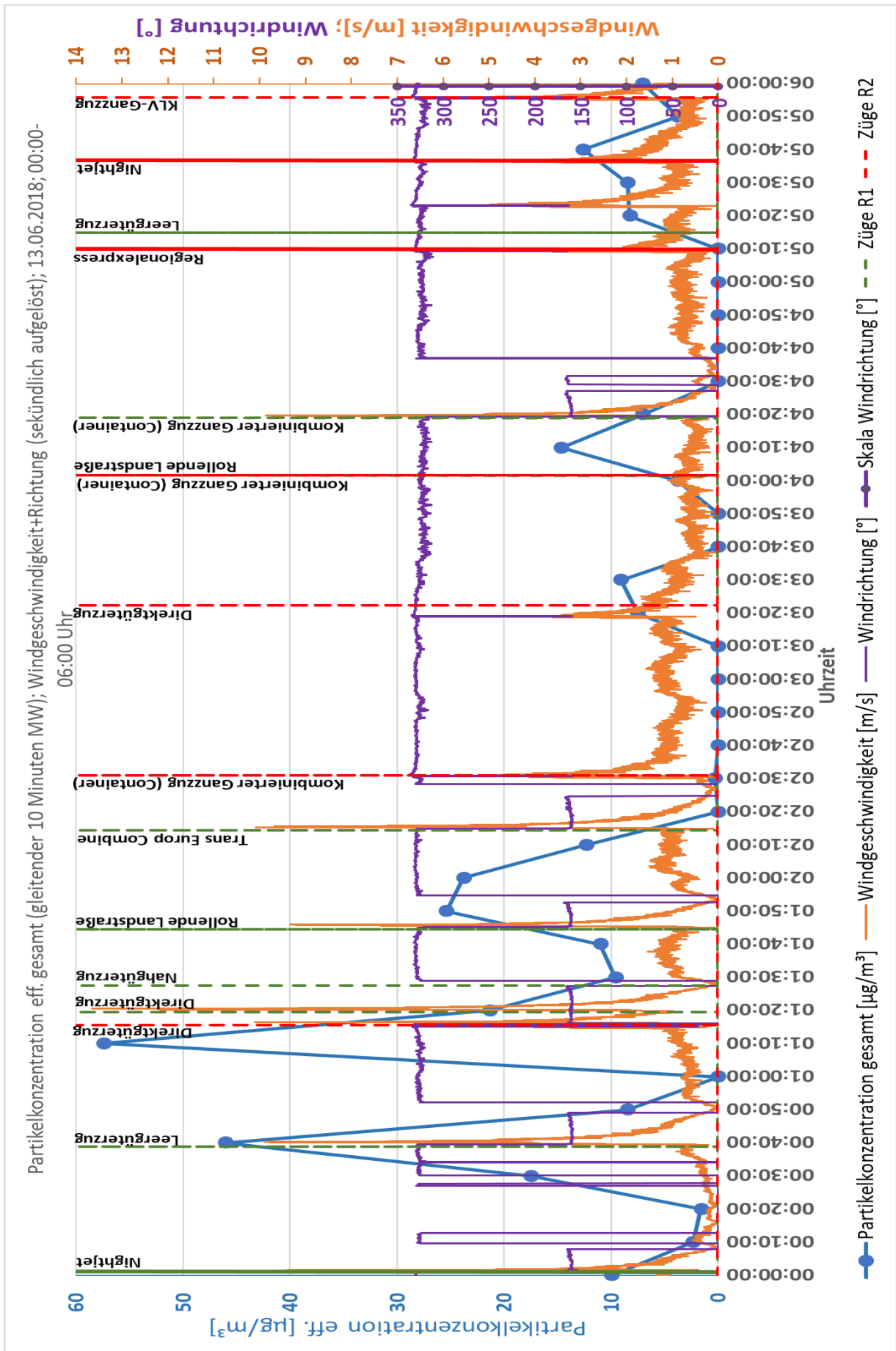


Abbildung 6-13: Tagesverlauf Partikelkonzentration\_eff.\_gesamt (00:00 – 06:00 Uhr)



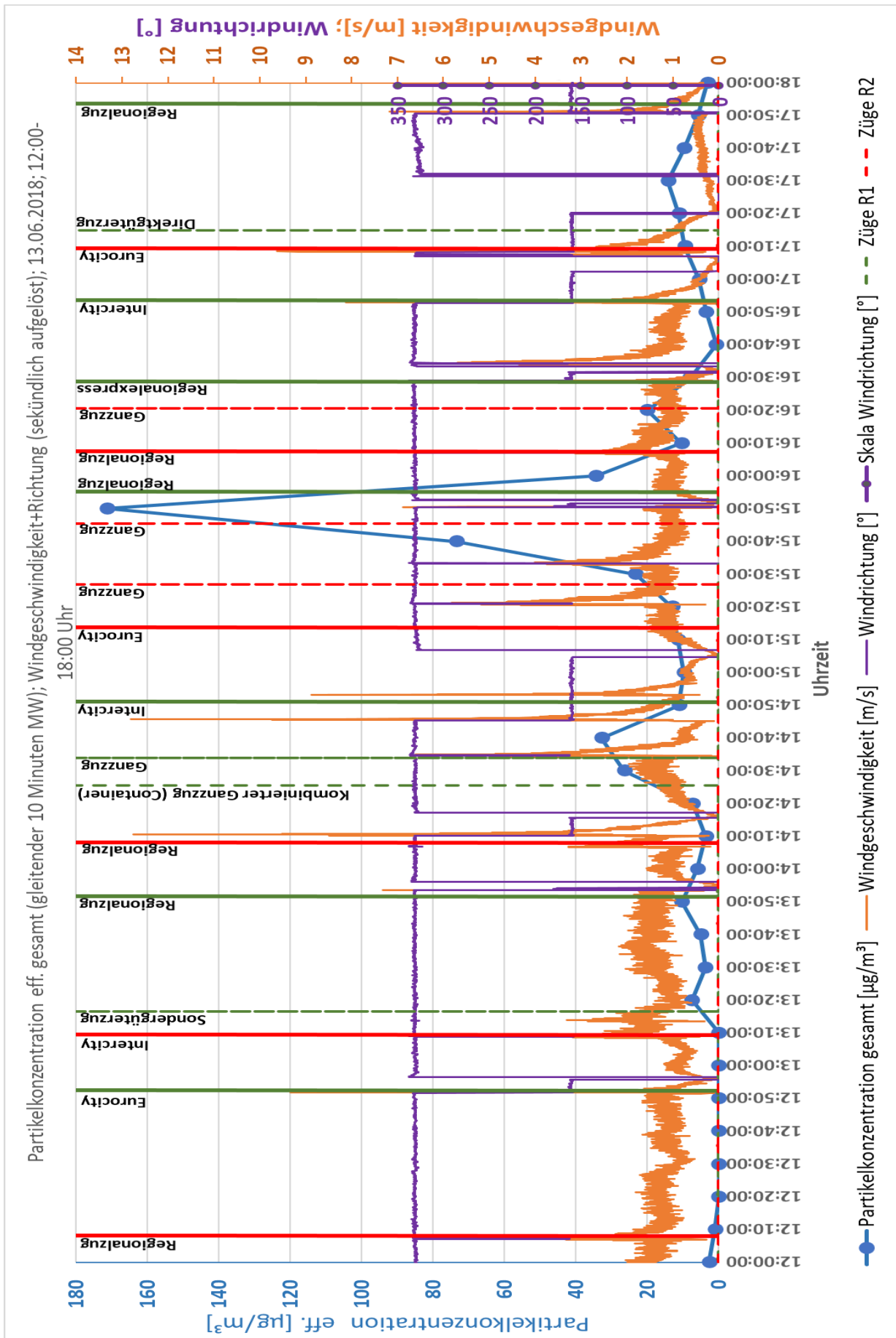


Abbildung 6-15: Tagesverlauf Partikelkonzentration\_eff.\_gesamt (12:00 – 18:00 Uhr)

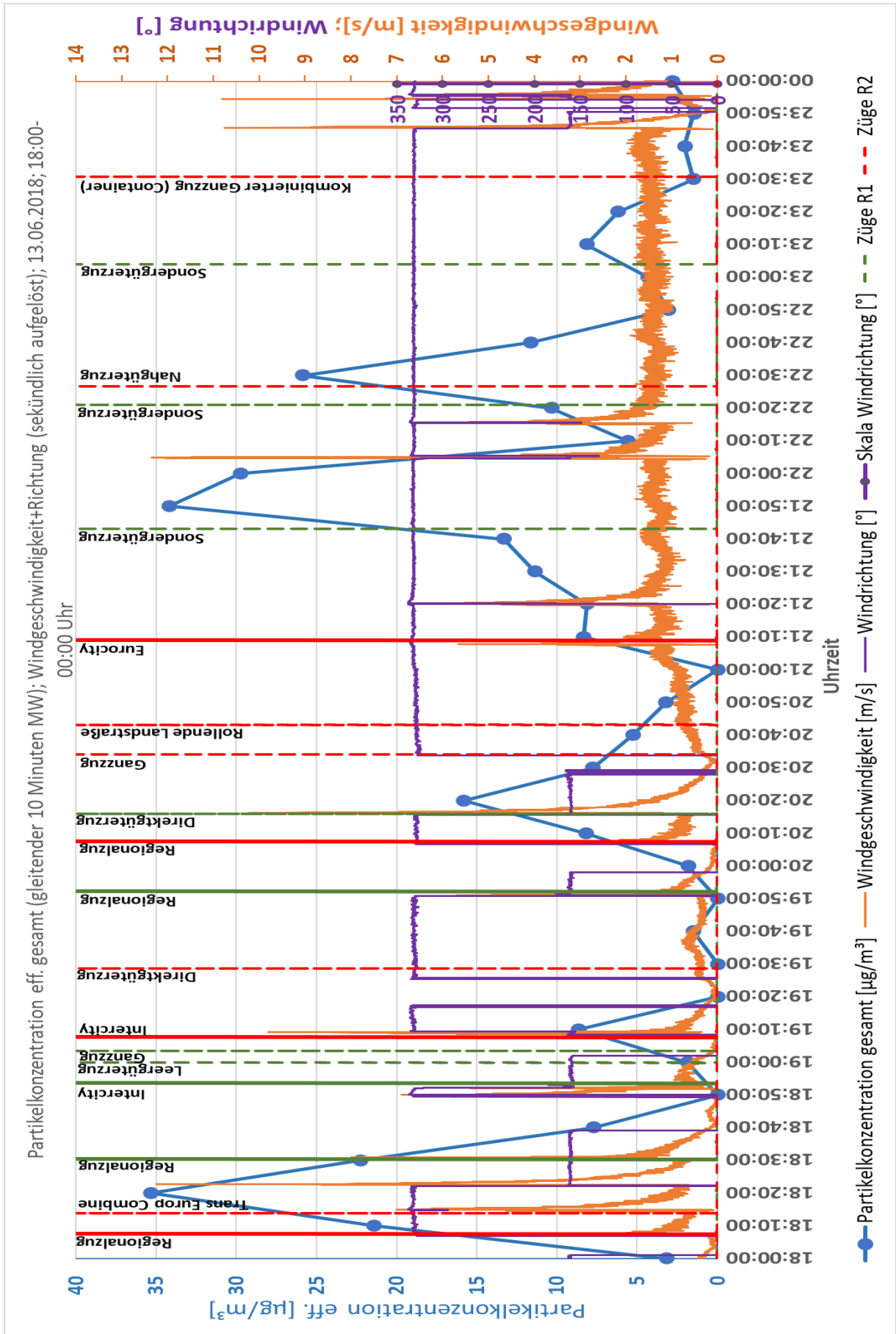
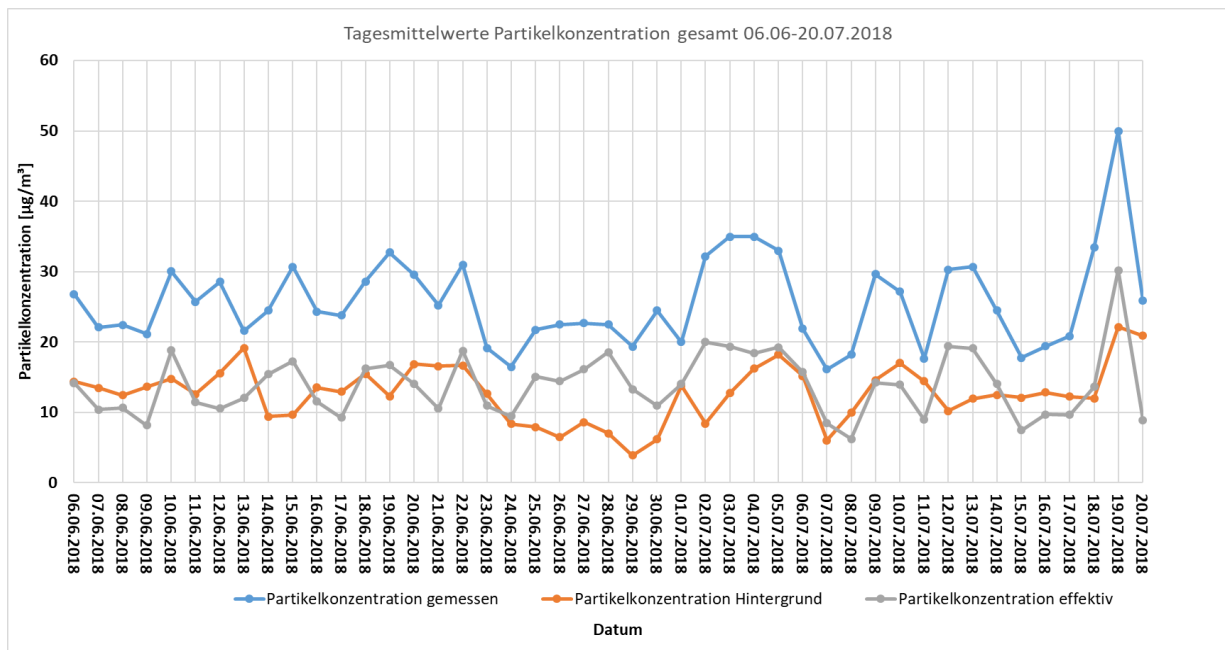


Abbildung 6-16: Tagesverlauf Partikelkonzentration\_eff.\_gesamt (18:00 – 00:00 Uhr)

In obigen Abbildungen ist zu erkennen, dass die Partikelkonzentration nicht immer sofort nach dem Windgeschwindigkeitsanstieg (=Zugvorbeifahrt am Ansaugrohr) steigt. Ein Grund dafür wäre, dass eine gewisse Latenzzeit zwischen der Partikelfreiwerdung durch Abrieb, darauffolgender Verwirbelung (Turbulenz infolge der erhöhten Luftbewegung), Sogwirkung durch nachfolgende Waggone und damit erschwelter Absaugung, anschließender Absaugung, Deposition auf dem Filter und abschließender Messung vorhanden ist. Somit kann ein fahrender Zug, welcher beispielsweise gegen Ende der 10 Minuten Mittelungszeit fährt, erst im nächsten Messintervall größere Auswirkungen auf die Konzentration ausüben und messtechnisch erfasst werden. Quantitative Differenzen der Konzentration hinsichtlich Personen- oder Güterzugfahrt sowie Richtung 1 und 2 können nicht eruiert werden. Des Weiteren sind einige Ausreißer (hohe Werte) ersichtlich, welche durch die Schubwirkung der fahrenden Züge induziert werden könnten und damit die Schwingung der Glasröhre negativ beeinflusst wird (Selektivität). Aus den Diagrammen ist auch ableitbar, dass vereinzelt Windgeschwindigkeitspeaks vorhanden sind, ohne Zugfahrt laut Plan und umgekehrt sowie zwischen Zugfahrt laut Plan und tatsächlich gemessenem Geschwindigkeitsanstieg ein zeitlicher Offset besteht. Der Grund dafür ist einerseits, dass die Zeitpunkte der Zugfahrten lediglich einen Plan repräsentieren und nicht die tatsächlich vorhandenen Zugfahrten (Ausfall oder zusätzlicher Zug möglich).

Andererseits wird der Zug zum Zeitpunkt der Vorbeifahrt am Windgeschwindigkeitssensor im Tunnel nicht zur gleichen Zeit und am selben Ort von der ÖBB (laut Plan) registriert, sondern die Registrierung durch die ÖBB erfolgt bei Einfahren in einen Sicherheitsblock. Die Größe dieses Blocks (längenmäßige Ausdehnung) konnte aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht eruiert werden. Daher ist eine 100 prozentige Übereinstimmung dieser Zeitpunkte nicht möglich. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass bei Anstieg der Windgeschwindigkeit tatsächlich eine Zugfahrt stattgefunden hat. Hingegen eine sehr gute Übereinstimmung zeigen die Messdaten der Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Bei Passieren der Messstelle durch den Zug erhöht sich die Windgeschwindigkeit und es entsteht zudem eine Sogwirkung. Nach Passieren des Zuges nimmt die Windgeschwindigkeit durch Wandreibungseffekte wieder ab. Weiters ist anzumerken, dass die Windgeschwindigkeit nie den Wert Null erreicht, sondern je nach Druckverhältnissen (Wetterlage) immer eine gewisse Grundgeschwindigkeit herrscht. Die Grundwindrichtung und -geschwindigkeit sind vom Höhenunterschied zwischen den Tunnelportalen und dem damit entstehenden Druckgradienten sowie den Wetterbedingungen abhängig. Je nach Richtung des vorbeifahrenden Zuges und vorhandenen Strömungsverhältnissen liegt der Messwert der Windrichtung bei 330 oder 160 Grad. Die Partikelkonzentration eff. ges. weist häufig den Wert Null auf, da hier die Hintergrundkonzentration größer oder gleich der gemessenen Konzentration war. Dies ist plausibel, da bei keiner Zugfahrt und nach Abtransport der eingebrachten Partikel nach einer Zugfahrt aus dem Tunnel durch die Luftströmung und nach Abzug der Hintergrundkonzentration kein Offset auf der Ordinate mehr existieren darf. Daraus folgt, dass die Peaks im gezeigten Konzentrationsverlauf durch die jeweiligen Zugfahrten induziert werden. Die einzelnen Diagramme zeigen vor allem auch die unterschiedliche Zugfrequenz je nach Tageszeit. Zwischen 06:00 und 18:00 Uhr ist die Zugfrequenz am größten. In dieser Zeitspanne überwiegen die Personenzüge, nachts sind aber die Güterzüge die bestimmende Kategorie.

Für dieses Unterkapitel werden abschließend noch die gemessene, die Hintergrund- und die daraus resultierende effektive PM-Konzentration dargestellt.



**Abbildung 6-17:** Tagesmittelwerte PM-Konzentration gem., eff., Hintergrund

Aus Abbildung 6-17 ist erkennbar, dass die gemessene sowie die Hintergrundkonzentration (Tagesmittelwert) fluktuieren und die Hintergrundwerte oftmals gegensätzliche Werte zu den im Tunnel gemessenen Werten aufweisen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Hintergrundkonzentration von relativ weit entfernten Standorten stammt und somit eine starke Abhängigkeit von den lokalen Verhältnissen aufweist. An den Wochenenden ist die gemessene Konzentration meist wesentlich geringer als werktags, aufgrund deutlich geringerer Zuganzahl. Dies wird durch den bereits gezeigten Verlauf der Zuganzahl über den Auswertzeitraum bestätigt.

### 6.3 Berücksichtigung der Verdünnung

Um die Verdünnung durch die Luftströmung zu eliminieren, wurde die Partikelkonzentration<sub>eff.\_ges.</sub> (gleitender 10 Minuten Mittelwert) mit dem Tunnelquerschnitt (72,5m<sup>2</sup>) und der zugehörigen Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel (sekündlich aufgezeichnet und anschließend 10 Minuten gemittelt) multipliziert (Gl.6-2).

$$PM_{Emission\_ohne\_Verdünnung} \left[ \frac{\mu g}{s} \right] = \left( \text{Partikelkonzentration}_{eff\_ges} \left[ \frac{\mu g}{m^3} \right] \right) * \text{Tunnelquerschnitt}(A) [m^2] * \text{Strömungsgeschwindigkeit}(v) \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (Gl.6-2)$$

Anschließend wurden 2 Tage mit sehr geringer Zuganzahl herausgegriffen (10.06.18, Sonntag und 17.06.18, Sonntag) und zu jeder Zugfahrt die dazugehörige Emission (Massenstrom) in [µg/s] im jeweiligen Zeitintervall (immer 10 Minuten) berechnet.

Nachstehend werden die Spezifikationen der einzelnen Zugattungen kurz erläutert.

Eurocity, Intercity, Railjet, Nightjet (in der Nacht verkehrend): Personenzüge, verkehren transnational, hohe Fahrgeschwindigkeiten, wenig Stops

Regionalzug: Personenzug mit Stop in allen Haltestellen, nur 2. Wagenklasse wird geführt, geringere Fahrgeschwindigkeiten als Eurocity

Leergüterzug: Güterzug ohne Fracht

Rollende Landstraße: Transport von LKWs

Nur Triebfahrzeug/Sonderlozug: Zug besteht nur aus Lokomotive

Sondergüterzug: Zusätzlicher Güterzug, welcher außerplanmäßig verkehrt

Ganzzug/Leerwagenganzzug: Güterzug mit gleichen Waggongattungen zwischen Start- und Zielstation/besitzt kein Ladegut

Trans Europe Combine: Güterzug, bei dem zwischen Start- und Zielort die Güter mehrmals umgeschlagen werden

Nahgüterzug: Zuglänge wird zwischen Start- und Zielbahnhof verändert

Direktgüterzug: Güterzug, bei dem zwischen Start- und Zielort die Güter nicht umgeschlagen werden

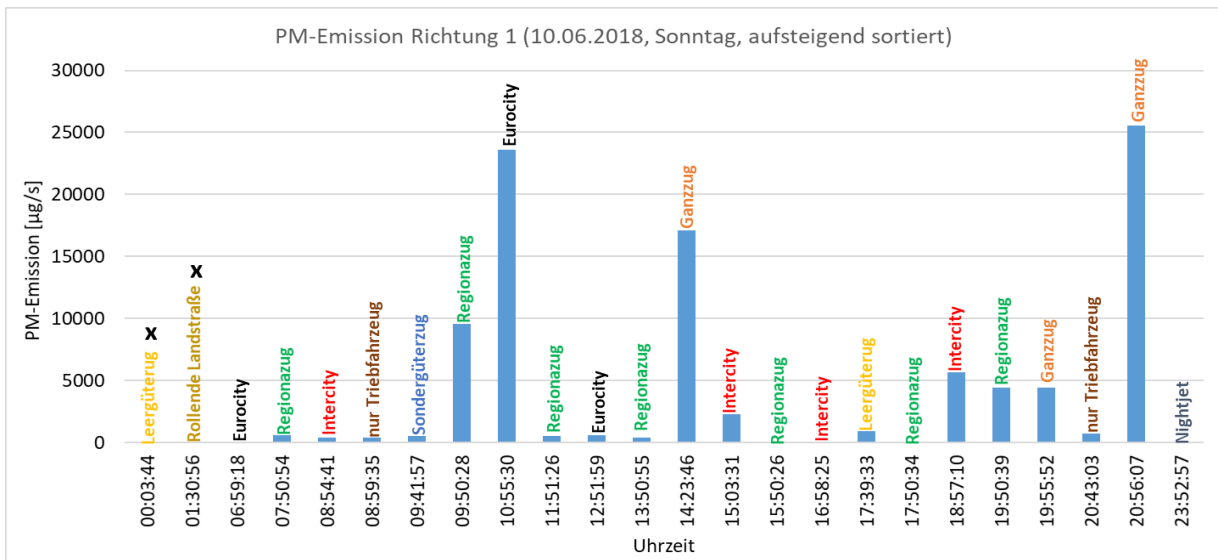


Abbildung 6-18: PM-Emission, Richtung 1, 10.06.18

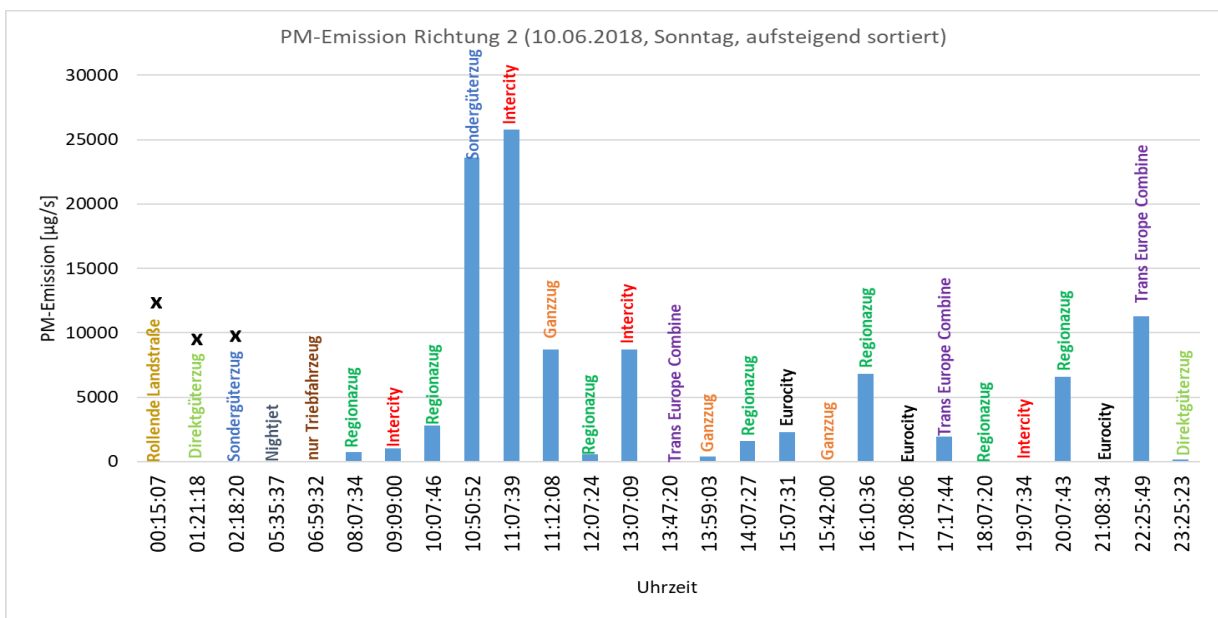


Abbildung 6-19: PM-Emission, Richtung 2, 10.06.18

Abbildung 6-18 und 6-19 illustrieren die PM-Emission je fahrenden Zug und Zuggattung, separat für jede Fahrtrichtung aufsteigend nach der Uhrzeit sortiert. Es ist ersichtlich, dass öfters innerhalb des Mittelungsintervalls der PM-Konzentration von 10 Minuten 2 Züge fahren und daher der jeweilige Messwert beiden Zuggattungen zugeordnet wird (Bsp. 08:54 Uhr (Richtung 1) Intercity und 08:59 Uhr (Richtung 2) Triebfahrzeug);

10:50 Uhr (Richtung 2) Sondergüterzug und 10:55 Uhr (Richtung 1) Eurocity; 15:03 Uhr (Richtung 1) Intercity und 15:07 Uhr (Richtung 2) Eurocity).

Eine Differenzierung hinsichtlich Zuggattung ist somit nicht immer möglich. Jene Züge, welche mit einem x gekennzeichnet sind, sollten laut Fahrplan der ÖBB den Tunnel passiert haben, jedoch sind im Windgeschwindigkeitsverlauf (Abb. 6-20) des Tunnels zu dieser Uhrzeit keine Peaks ersichtlich und somit werden diese Züge als ausgefallen deklariert. Zudem weisen diese Züge keinen Emissionswert auf, was plausibel ist.

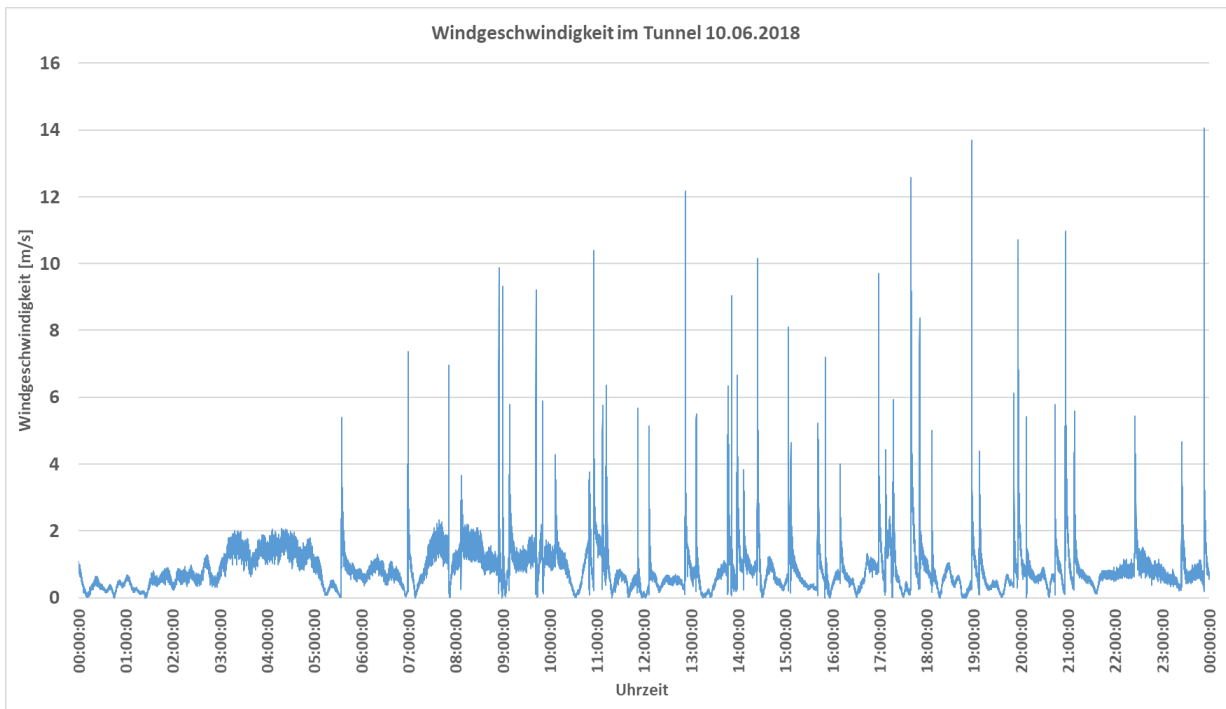


Abbildung 6-20: Windgeschwindigkeitsverlauf Tunnel 10.06.2018

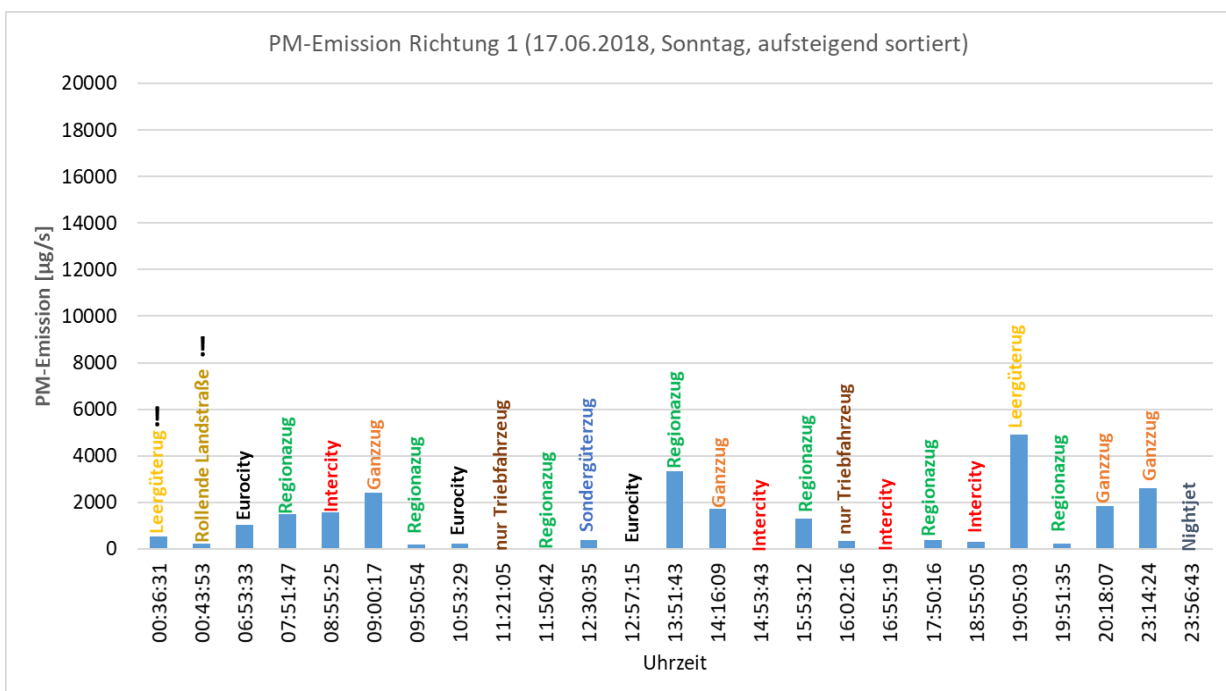
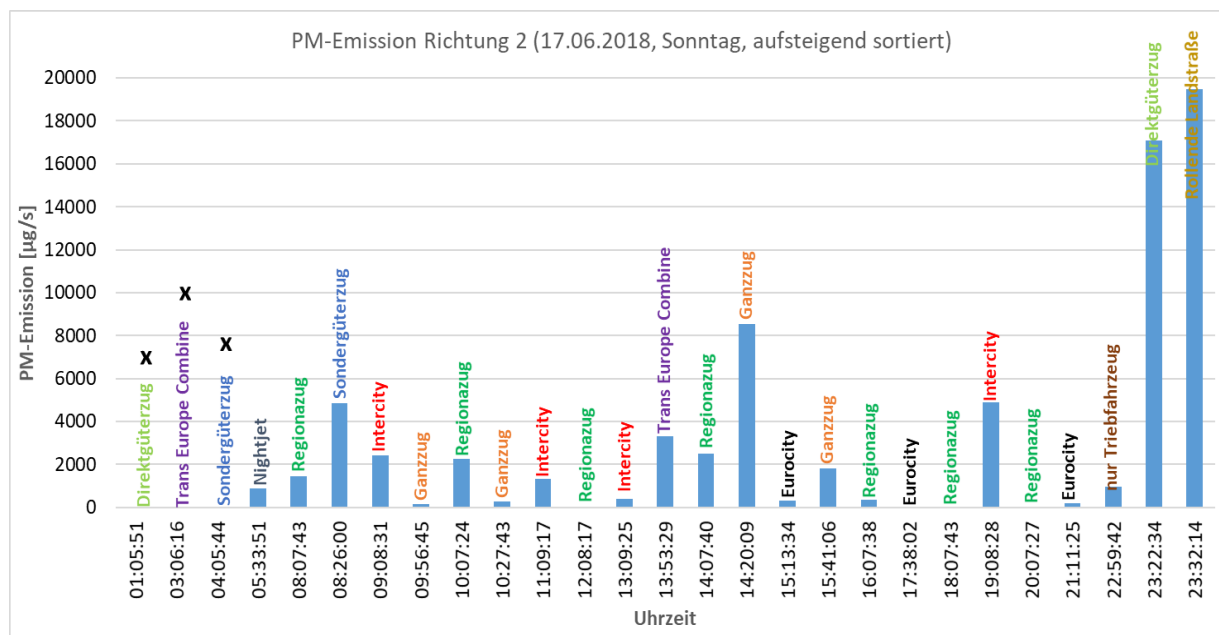


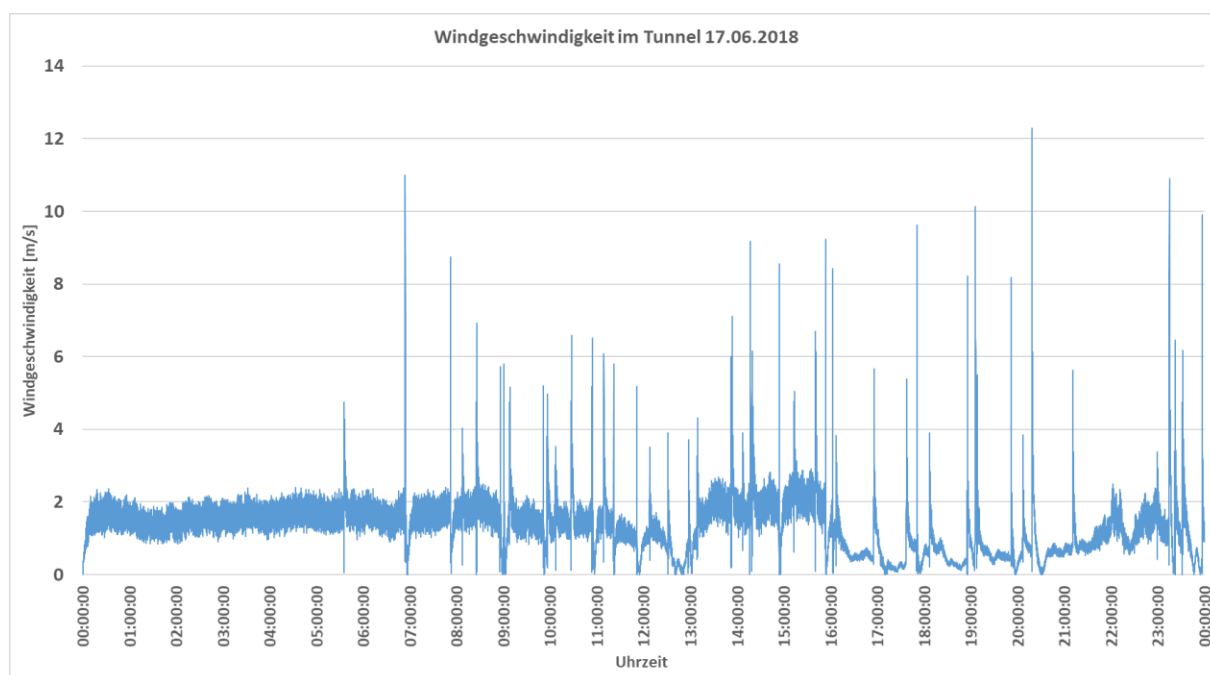
Abbildung 6-21: PM-Emission, Richtung 1, 17.06.18





**Abbildung 6-22:** PM-Emission, Richtung 2, 17.06.18

Für die Bestätigung der oben genannten Erklärungen wurde noch ein 2.Tag (17.06.18) untersucht. Auch hier sind 3 Züge ausgefallen und es ist auch kein Emissionswert vorhanden (Abb. 6-22), jedoch existieren 2 Züge (Abb. 6-21, Kennzeichnung mittels Rufzeichen), wo Emissionen gemessen wurden, aber im Windgeschwindigkeitsverlauf (Abb. 6-23) keine nennenswerten Peaks zu dieser Uhrzeit erkennbar sind. Diese Diskrepanz könnte auf eine witterungsbedingte niedrige Hintergrundkonzentration (hohe relative Feuchte) und relativ hohe Grundströmungsgeschwindigkeit im Tunnel (Abb. 6-23, ca. 1,8 - 2m/s) zurückzuführen sein. Ein weiterer möglicher Grund wäre, dass diese 2 Züge mit sehr geringer Geschwindigkeit durchgefahren sind, aufgrund eines möglichen Stops in Wald am Schoberpass. Unter Betrachtung der Abbildungen 6-18, 6-19, 6-21 und 6-22 ist eine starke Fluktuation der Emissionswerte innerhalb jeder Zuggattung erkennbar. Zudem sind Ausreißer (hohe Emissionswerte und Werte von Null bei Zugfahrt) ersichtlich. Grund dafür könnten einerseits die bereits erwähnten vorherrschenden Witterungsverhältnisse (beeinflusst Grundströmung) sein, andererseits sind die Zeitabstände zwischen den Zugfahrten (beide Richtungen betrachtend) oftmals relativ kurz, sodass ein Absinken der verursachten Emission eff. eines fahrenden Zuges auf Null durch vollständigen Luftaustausch im Tunnel nicht möglich ist. Daher kann der Peak eines fahrenden Zuges zum Zeitpunkt  $t$  durch den Emissionswert der Zugfahrt zum Zeitpunkt  $t-1$  beeinflusst sein.

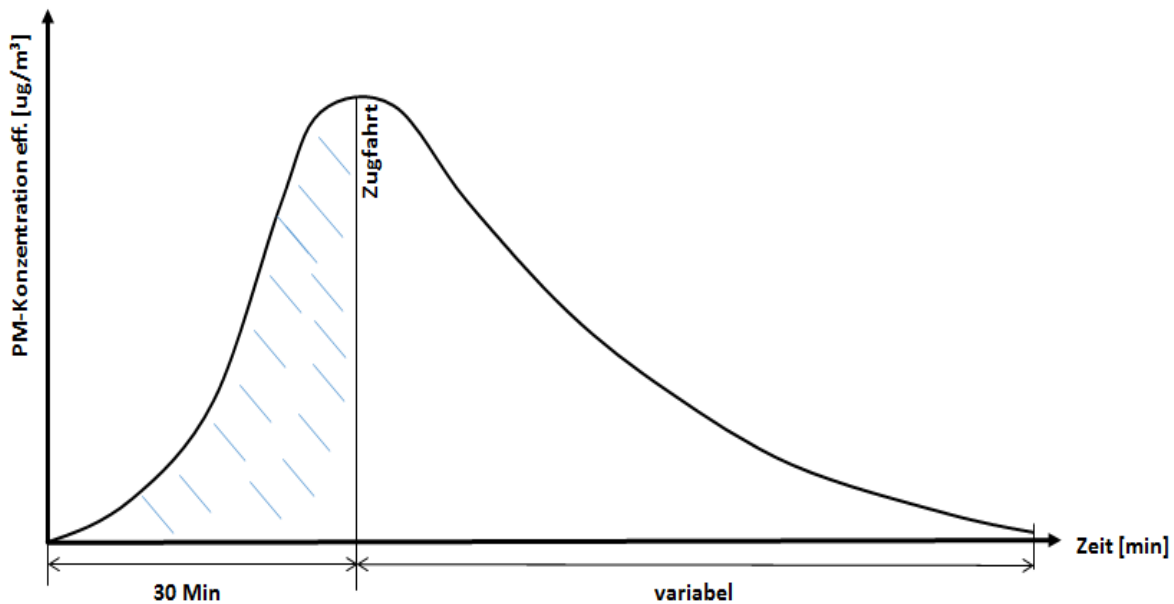


**Abbildung 6-23:** Windgeschwindigkeitsverlauf Tunnel 17.06.2018

Aufgrund oben angeführter Gründe ist eine Berechnung von Emissionsfaktoren mit diesem Ansatz nicht zweckmäßig, da eine eindeutige Zuordnung zu einer Zuggattung nicht möglich ist.

#### 6.4 Ermittlung von Partikelemissionsfaktoren

Um plausible und valide PM-Emissionsfaktoren für die jeweilige Zuggattung herzuleiten, musste der obige Ansatz adaptiert und präzisiert werden. Für die Gewährleistung, dass ein Peak im Emissionskurvenverlauf einer bestimmten Zugfahrt und damit auch einer bestimmten Zuggattung zugeordnet werden kann, wurden nur jene Zugfahrten im Auswertzeitraum betrachtet, wo 30 Minuten vor einer Zugfahrt mit dazugehörigem Emissionspeak und 60 Minuten nach einer Zugfahrt keine weitere Zugfahrt in beide Richtungen stattgefunden hat. Dadurch kann eine Selektivität durch mehrere in kurzen aufeinanderfolgenden Zeitabständen auftretenden Zugfahrten ausgeschlossen werden. Die Zeit, bis die Emission nach einer Zugfahrt wieder Null ist (vollständiger Luftwechsel durch Luftströmung), ist variabel (abhängig von den herrschenden Witterungsbedingungen), jedoch wurde mit 60 Minuten ein ausreichend großes Zeitfenster gewählt. Abbildung 6-24 illustriert das erläuterte Selektionsschema. Auf der Ordinate ist die effektive PM-Konzentration aufgetragen, folglich existiert kein Offset der Kurve auf der Ordinate (bereinigt um Hintergrundkonzentration). Der Betrachtungszeitraum erstreckt sich wiederum zwischen 06.06.-20.07.2018.



**Abbildung 6-24:** Selektionsschema für die maßgeblichen Zugfahrten

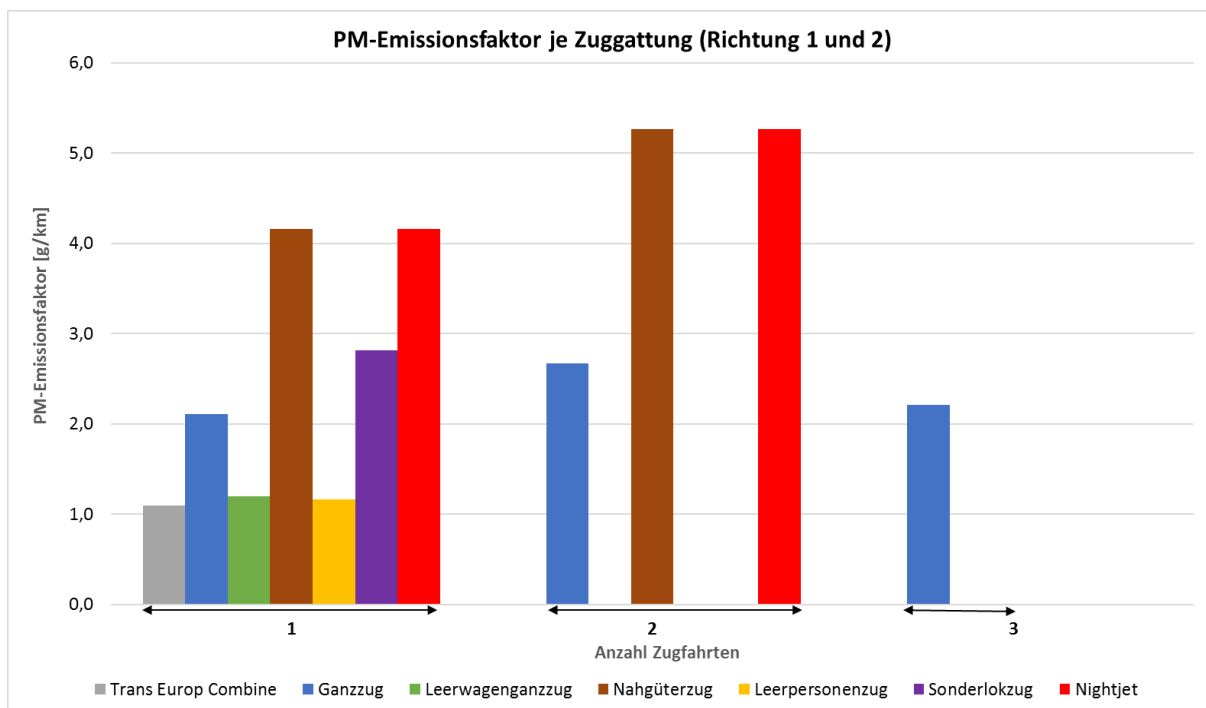
Die Berechnungsformel für den effektiven Emissionsfaktor (EF) Non-Exhaust ist in Gleichung 6-3 wiedergegeben.

$$PM_{EF\_eff\_Non\_Exhaust} \left[ \frac{g}{km} \right] = \frac{\left( \text{Partikelkonzentration}_{eff.} \left[ \frac{\mu g}{m^3} \right] \right) * \text{Tunnelquerschnitt} (A) [m^2] * \text{Strömungsgeschwindigkeit} (v) \left[ \frac{m}{s} \right] * \Delta t [s]}{\text{Anzahl Züge} [\#] * \left( \frac{\text{Tunnellänge}}{2} \right) [km]} * 10^{-6}$$

(Gl.6-3)

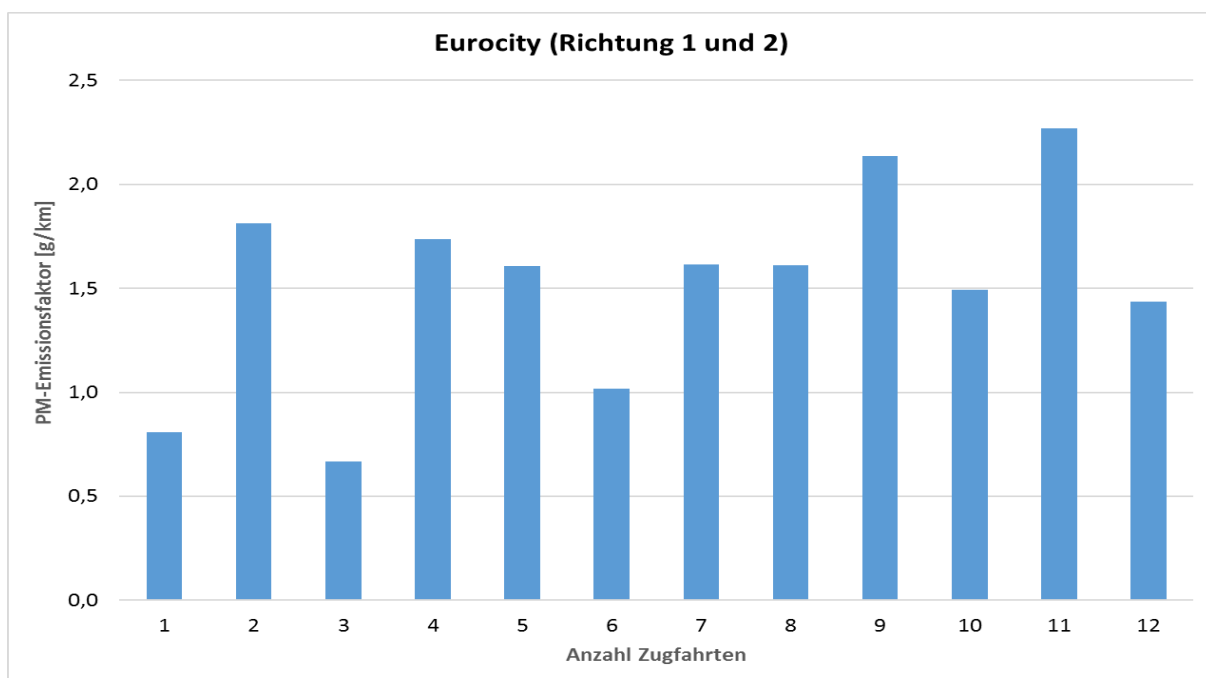
Aufgrund des großen Zeitintervalls vor und nach einer Zugfahrt, ist die Anzahl der Züge für alle maßgeblichen Zugfahrten immer mit 1 zu beziffern. Die gewählte Mittelungszeit ( $\Delta t$ ) für die Emissionsberechnung vor der maßgebenden Zugfahrt beträgt immer 30 Minuten (Messwerte von 30 Minuten vor Peak bis Peak (Zugfahrt)). Zudem wird immer nur die halbe Tunnellänge berücksichtigt, da bei Einfahrt des Zuges in den Tunnel bis zur Messstelle (in der Mitte des Tunnels positioniert) die durch Abrieb, Aufwirbelung generierten Partikelemissionen durch die Luftströmung zur Messstelle transportiert werden und nach passieren des Messpunktes durch den Zug die danach entstehenden Partikel durch den Schub des Zuges wieder nach außen (zur Tunnelausfahrt) transportiert werden. Der Bezug der Emissionen auf Kilometer simplifiziert eine weitere mögliche Hochrechnung auf ein bestimmtes Schienennetz. Der Tunnelquerschnitt und die gemessene Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Tunnel werden zudem für die Berücksichtigung der Verdünnung der Emissionen durch die Luft benötigt.

Die nachfolgend dargestellten PM-Emissionsfaktoren<sub>eff.</sub> können als Non-Exhaust angesehen werden, da keiner der maßgeblichen 40 Züge dieselelektrisch betrieben wurden.



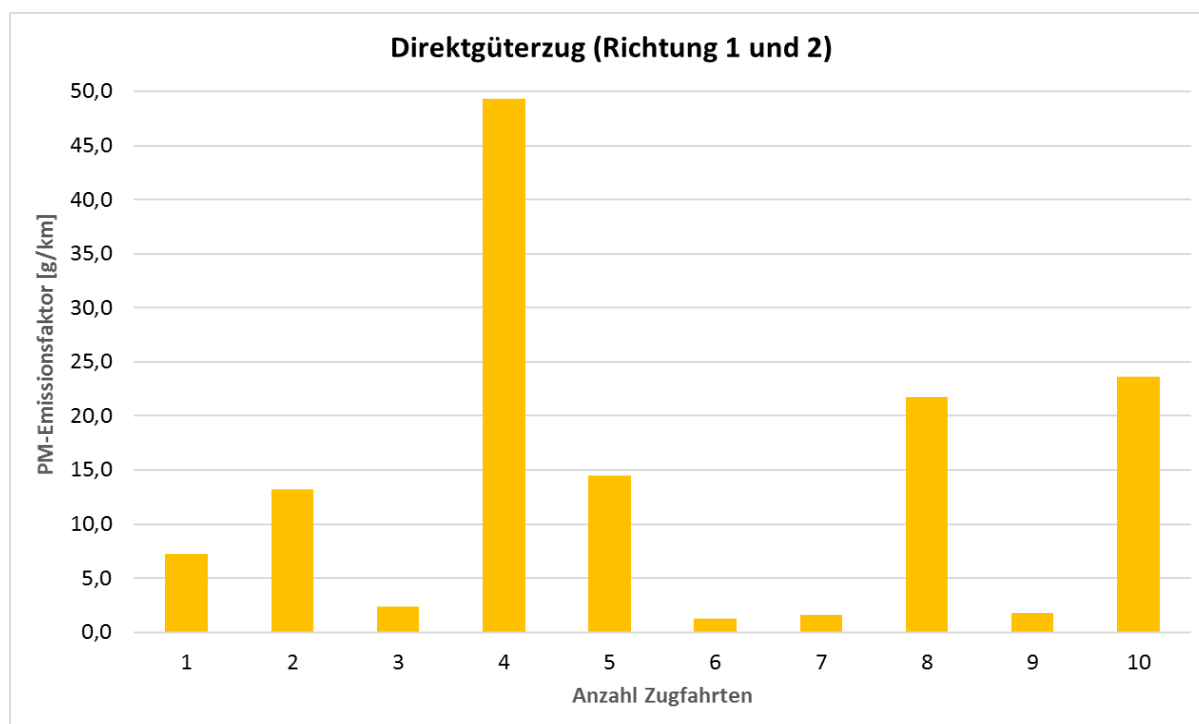
**Abbildung 6-25:** PM-Emissionsfaktor je Zuggattung

In Abbildung 6-25 sind die Emissionsfaktoren der jeweiligen Zugfahrt (beide Fahrtrichtungen berücksichtigt) und der zugehörigen Zuggattung dargestellt. Es zeigt sich, dass einige Zuggattungen (Trans Europe Combine, Leerpersonenzug, Leerwagenganzzug und Sonderlokozug) lediglich eine Zugfahrt aufweisen, welche die oben genannten Selektionskriterien erfüllen. Alle anderen Zuggattungen weisen 2 oder 3 Zugfahrten auf und der Emissionsfaktor in g/km besitzt je Zuggattung Werte in ähnlicher Größenordnung für jede Zugfahrt. Daher ist dieser Ansatz als akzeptabel für die Emissionsfaktorermittlung anzusehen. Aufgrund der erhöhten Anzahl an Zugfahrten und der unterschiedlichen Größenordnung der Emissionsfaktoren werden nachfolgend einige Zuggattungen in separaten Diagrammen dargestellt.



**Abbildung 6-26:** PM-Emissionsfaktor Eurocity

Abbildung 6-26 macht deutlich, dass der Wertebereich der Emissionsfaktoren nicht allzu stark fluktuiert, jedoch sind einige Ausreißer (hohe und niedrige Werte) zu erkennen.

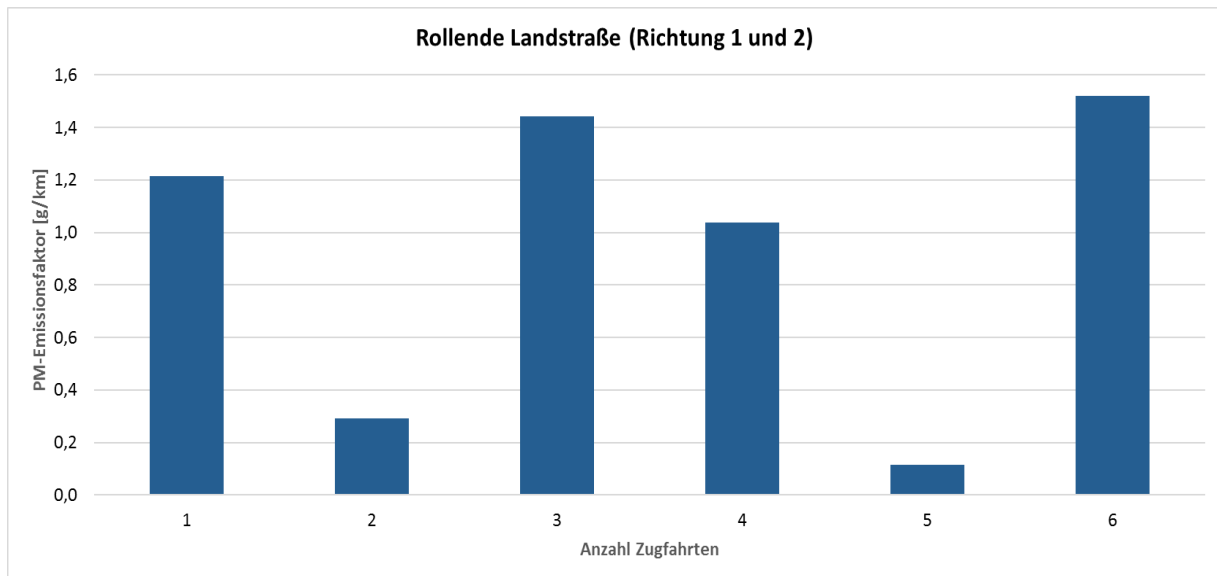


**Abbildung 6-27:** PM-Emissionsfaktor Direktgüterzug

Abbildung 6-27 beinhaltet die Emissionsfaktoren von Direktgüterzügen. Hier sind wesentlich mehr Ausreißer zu erkennen. Zugfahrt Nummer 4 besitzt einen extrem hohen Wert, wobei dieser durch eine hohe PM-Konzentration verursacht wird. Alle anderen Ausreißer besitzen entweder hohe oder niedrige PM-Konzentrationen, die Strömungsgeschwindigkeit fluktuiert nur geringfügig. Somit übt die gemessene PM-Konzentration den größten Einfluss auf die Höhe der Emissionsfaktoren aus. Daher könnte der große Wertebereich einerseits durch unterschiedliche Zugkonfigurationen verursacht werden (unterschiedliches Ladegut (offener oder geschlossener Transport, nur bei Güterzügen relevant; unterschiedliches Alter der Waggon, Loks und damit verbundene Technik, Datenmaterial liegt diesbezüglich jedoch nicht vor), andererseits können auch die Witterungsverhältnisse (relative + absolute Feuchte) Einfluss auf Konzentration ausüben (beispielsweise niedrige Hintergrundkonzentration, hoher Messwert im Tunnel). Zudem weisen speziell Direktgüterzüge größere Schwankungen hinsichtlich Gesamtmasse, Zuglänge und Wagenanzahl auf. Ein im Tunnel durchgeführter Bremsvorgang oder unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten könnten ebenfalls ein Grund für die Ausreißer sein. Unter Berücksichtigung der Witterungsverhältnisse, Gesamtmasse, Zuglänge und der Waggonanzahl sowie der erwähnten möglichen Gründe konnte jedoch kein eindeutiger allgemeiner Zusammenhang (direkte oder indirekte Proportionalität) zwischen Höhe des Emissionfaktors und den genannten Einflussfaktoren (für Eurocity und Direktgüterzug) hergestellt werden.

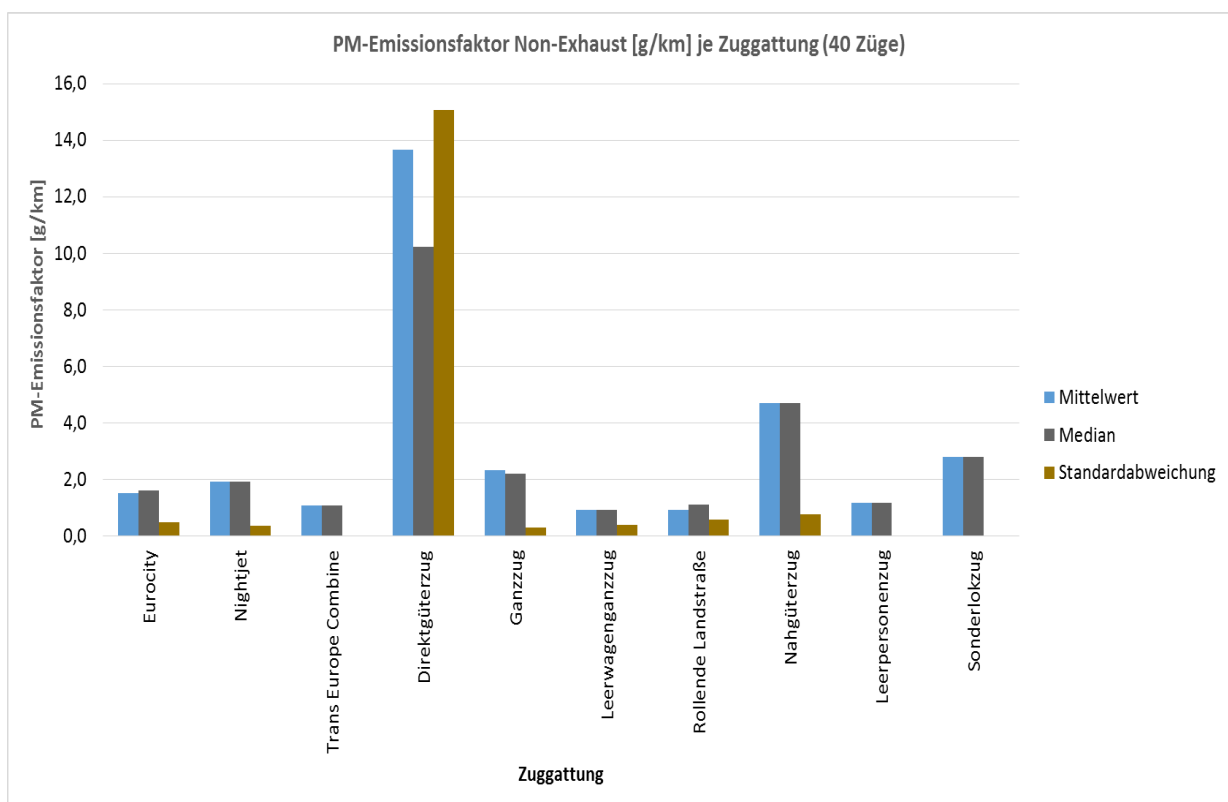
Abbildung 6-28 gibt zu erkennen, dass die Emissionsfaktoren bei Rollender Landstraße der einzelnen Zugfahrten generell im ähnlichen Größenbereich liegen, aber es sind auch bei dieser Zuggattung (LKWs als Ladegut) 2 Ausreißer vorhanden. Die Gründe hierfür sind analog zu jenen, welche bereits für die Zuggattungen Eurocity und Direktgüterzug erläutert wurden. Ein allgemeiner Zusammenhang zwischen den bereits angeführten Einflussparametern und des Emissionsfaktors konnte auch hier nicht abgeleitet werden. Als letzten möglichen Grund für die Fluktuation der PM-Konzentration wäre für alle Zuggattungen das Messsystem zu nennen, da durch den eingebrachten Schub infolge der Zugfahrt,

die Schwingungsfrequenz der Glasröhre beeinflusst werden kann oder sich teilweise auch etwas größere Partikel auf der Glasröhre akkumulieren (kein Vorabscheider montiert, TSP gemessen).



**Abbildung 6-28:** PM-Emissionsfaktor Rollende Landstraße

Um einen Überblick über die Größenordnungen der Emissionsfaktoren zu bekommen, ist in Abbildung 6-29 eine Darstellung der Emissionsfaktoren aller Zuggattungen als jeweiliger Mittelwert über alle Zugfahrten der jeweiligen Zuggattung ersichtlich.



**Abbildung 6-29:** PM-Emissionsfaktor aller Zuggattungen

Abbildung 6-29 bestätigt vor allem, dass die Zuggattung „Direktgüterzug“ einen deutlich höheren Emissionsfaktor aufweist. Bei allen anderen Zuggattungen sind nur geringe Differenzen zwischen Median und Mittelwert erkennbar und die Standardabweichung ist ebenfalls nicht all zu hoch.

3 Zuggattungen besitzen keine Standardabweichung und der Mittelwert entspricht dem Median aufgrund von nur einer Zugfahrt (=1 Datenpunkt für diese Zugkategorie).

Da die Emissionsfaktoren dieser 3 Zugkategorien aber in ähnlichem Größenbereich wie jene der anderen Zuggattungen liegen, können auch diese Werte als plausibel deklariert werden. Jedoch wären natürlich mehr Datenpunkte pro Zugkategorie für eine statistische Auswertung vorteilhafter.

Eine numerische Wiedergabe der gezeigten Diagramme ist in Tabelle 6-3 gegeben. Zudem ist noch die Zuganzahl je Zuggattung und das Konfidenzintervall (Überschreitungswahrscheinlichkeit 5%) angegeben. Auch dieses ist in der Zuggattung „Direktgüterzug“ ausreißerbedingt dementsprechend hoch. Die restlichen Konfidenzintervalle befinden sich im akzeptablen Bereich.

**Tabelle 6-3:** Zusammenfassung PM-Emissionsfaktoren\_eff.\_Non-Exhaust

Zuggattung	Zuggattung Nr.	MW Em. Non-Exhaust [g/km]	Median Em. Non-Exhaust [g/km]	STABW Em. Non-Exhaust [g/km]	Konfidenzintervall +/- (Alpha = 5%) [g/km]	n
Eurocity	2	1,52	1,61	0,49	0,25	12
Nightjet	12	1,94	1,94	0,35	0,73	2
Trans Europe Combine	41	1,10	1,10	0,00	0,00	1
Direktgüterzug	43	13,66	10,23	15,07	8,64	10
Ganzzug	44	2,33	2,21	0,30	0,41	3
Leerwagenganzzug	45	0,93	0,93	0,38	0,79	2
Rollende Landstraße	46	0,94	1,13	0,60	0,47	6
Nahgüterzug	53	4,71	4,71	0,78	1,61	2
Leerpersonenzug	61	1,16	1,16	0,00	0,00	1
Sonderlokozug	63	2,81	2,81	0,00	0,00	1

Des Weiteren erfolgte eine Klassifizierung der maßgeblichen Zugkategorien und gefahrenen Züge nach Personen- und Güterzügen, um daraus statistische Kennwerte abzuleiten. Aufgrund der dadurch erhaltenen größeren Anzahl an Messpunkten ist eine umfassende statistische Analyse dieser 2 Klassen zweckmäßig und sinnvoll.

**Tabelle 6-4:** Zusammenfassung statistische Auswertung PM-Emissionsfaktoren\_eff.\_Non-Exhaust in g/km

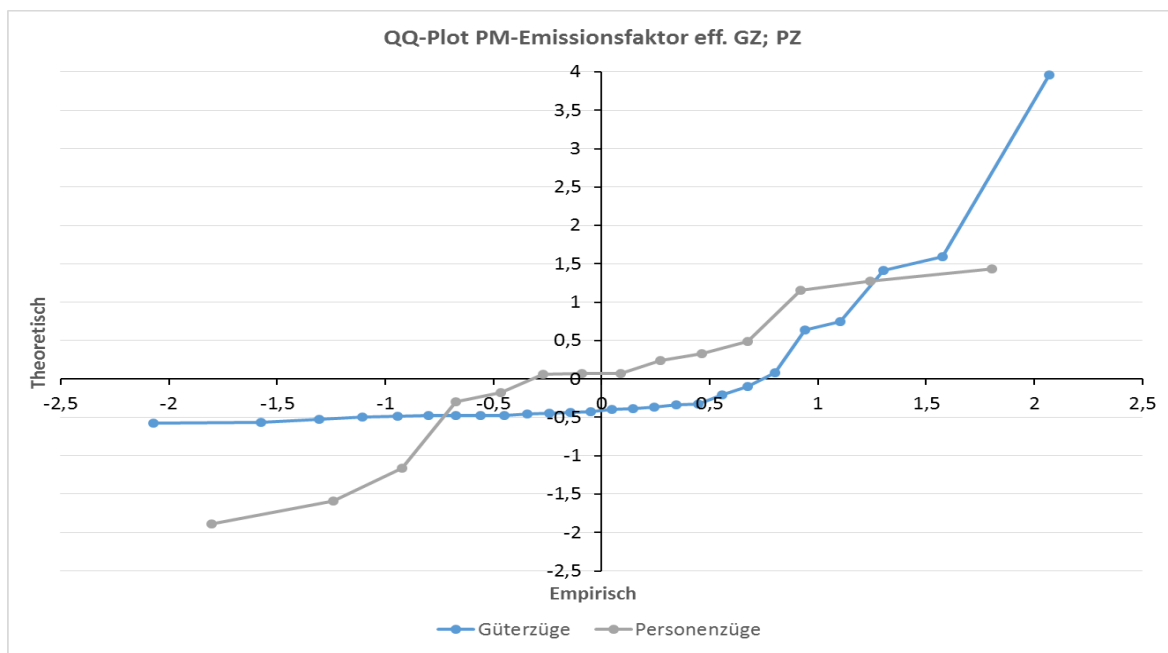
<u>Güterzüge</u>		<u>Personenzüge</u>	
<b>Min</b>	0,11	<b>Min</b>	0,67
<b>1. Quartil</b>	1,20	<b>1. Quartil</b>	1,45
<b>MW</b>	6,37	<b>MW</b>	1,58
<b>Median</b>	1,94	<b>Median</b>	1,61
<b>3. Quartil</b>	4,99	<b>3. Quartil</b>	1,79
<b>Max</b>	49,30	<b>Max</b>	2,27
<b>STABW</b>	10,84	<b>STABW</b>	0,48
<b>Schiefe</b>	6,13	<b>Schiefe</b>	-0,78
<b>Kurtosis</b>	10,12	<b>Kurtosis</b>	-0,16
<b>n</b>	26,00	<b>n</b>	14,00
<b>p-W Shapiro</b>	1,71E-07	<b>p-W Shapiro</b>	0,33

Tabelle 6-4 beinhaltet alle relevanten statistischen Kennzahlen. Es zeigt sich, dass bei der Kategorie „Güterzüge“ eine große Differenz zwischen Mittelwert und Median existiert, die Standardabweichung ebenfalls hoch ist und dass Schiefe und Kurtosis auch außerhalb der zulässigen Grenzen von +/-2 sind. Dies ist auf große Streuungen der Daten zurückzuführen, hauptsächlich bedingt durch die bereits gezeigten Ausreißer, insbesondere jener der

Direktgüterzüge. Die Emissionsfaktoren der Personenzüge weisen eine wesentlich geringere Standardabweichung auf und Schiefe sowie Kurtosis sind innerhalb der Grenzen.

Es muss aber beachtet werden, dass die Anzahl der Zugfahrten von 14 (Personenzüge) wesentlich geringer als jene der Güterzüge (26) ist. Laut Tabelle 6-4 ist der Emissionsfaktor der Güterzüge im Mittel höher als jener der Personenzüge, aber unter Betrachtung von Abbildung 6-29 kann generell geschlussfolgert werden, dass einige Güterzüge nicht unbedingt höhere Emissionsfaktoren aufweisen, als Personenzüge. Folglich ist eine Einzelbetrachtung jeder Zugkategorie essentiell.

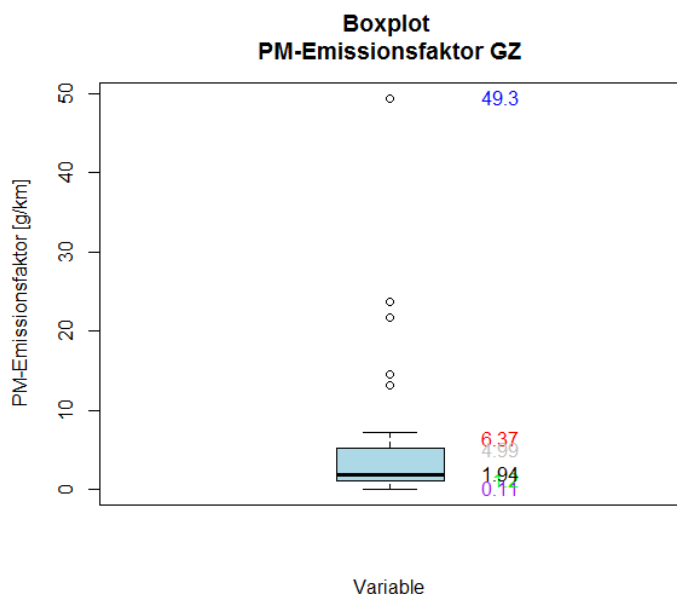
Weiters zeigt auch der Quantil-Quantil Plot (Abb. 6-30), dass die Güterzüge eine stark asymmetrische Verteilung aufweisen, die Personenzüge hingegen symmetrischer sind (optimal wäre 45 Grad Gerade).



**Abbildung 6-30:** QQ-Plot PM-Emissionsfaktor\_eff.\_Non-Exhaust

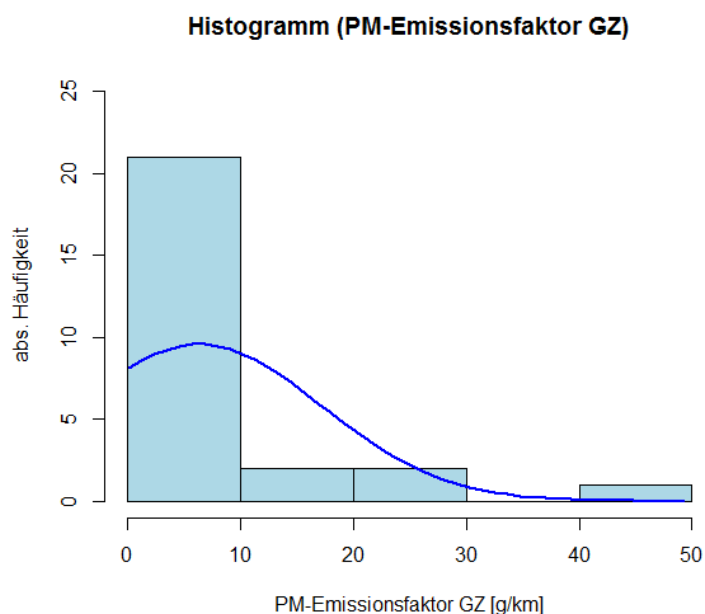
Abbildung 6-31 bestätigt, dass Güterzüge großen Streuungen unterliegen und Ausreißer vorhanden sind.





**Abbildung 6-31:** Box-Whisker Plot PM-Emissionsfaktor\_eff.\_Non-Exhaust\_Güterzug (GZ)

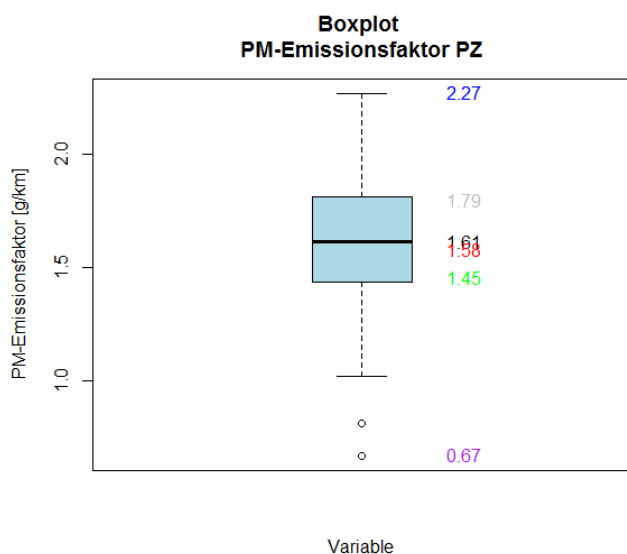
Vor allem die Verteilung der Daten entspricht keiner Normalverteilung, wie das Histogramm (Abb. 6-32) illustriert. Dies widerspiegelt sich auch in einem p-Wert des Shapiro-Wilk Tests von kleiner 0,05 (5% Signifikanzniveau, Tab.6-4).



**Abbildung 6-32:** Histogramm PM-Emissionsfaktor\_eff.\_Non-Exhaust\_Güterzug (GZ)

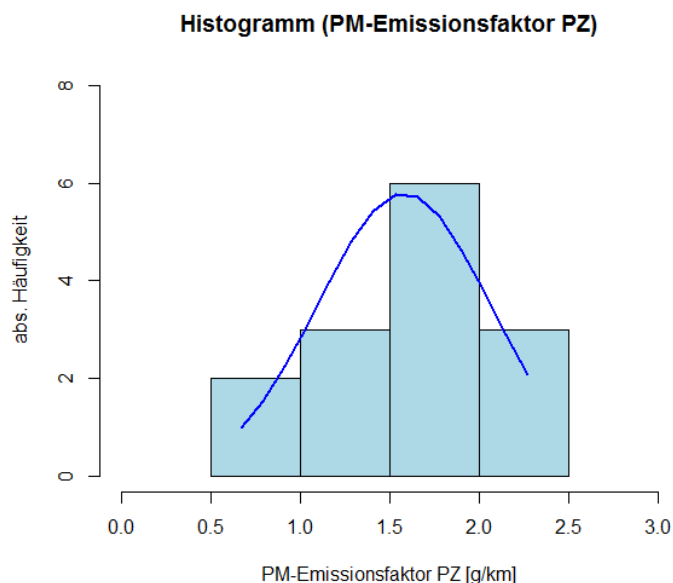
Durch Abbildung 6-33 zeigt sich, dass die Ausreißeranzahl und die Streuung der Personenzüge

gering ist und Median sowie Mittelwert wie in Tabelle 6-4 ersichtlich, nahe beieinander liegen.



**Abbildung 6-33:** Box-Whisker Plot PM-Emissionsfaktor\_eff.\_Non-Exhaust\_Personenzug (PZ)

Das Histogramm (Abb. 6-34) stellt eine akzeptable Normalverteilung dar, was auch durch den wesentlich größeren p-Wert (Shapiro-Wilk Test) als 0,05 bestätigt wird.



**Abbildung 6-34:** Histogramm PM-Emissionsfaktor\_eff.\_Non-Exhaust\_Personenzug (PZ)

Ein Vergleich der berechneten PM-Emissionsfaktoren mit der erwähnten Literatur ist nicht möglich, da in den dortigen Untersuchungen keine Emissionsfaktoren nach ähnlichen Gesetzmäßigkeiten ermittelt wurden (bsp. meist PM10, nicht TSP; Messpunkt nicht im Tunnel, sondern am Tunnelportal). Jedoch kann die gemessene PM-Konzentration effektiv mit Literaturwerten verglichen werden.

Bei Betrachtung der Tabelle 6-2 (Mittelwert für eine Woche) sowie des mittleren täglichen Partikelkonzentrationsverlaufs eff. über den Auswertzeitraum (Abb. 6-17), ist ersichtlich, dass durch Vergleich mit Abbildung 2-25 (Messung Lainzer Tunnel [15], auch TSP gemessen und anderes Messverfahren (optisches Aerosolspektrometer) eingesetzt) die Größenordnung

der Konzentration ähnlich ist, unter Berücksichtigung der Hintergrundkonzentration. Im Lainzer Tunnel [15] sind zudem oftmals sehr hohe Konzentrationen (TSP) gemessen worden und es ist eine Fluktuation der Messdaten zu beobachten, ähnlich wie im Unterwaldertunnel. Außerdem sinkt die Konzentration im Lainzer Tunnel bei keiner Zugfahrt auf ca. 10-12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (TSP) (=Hintergrundkonzentration). Dieser Wert korreliert gut mit dem bestimmten Wert in dieser Arbeit ( $\sim 12\text{-}13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , siehe Tab. 6-1). Somit ist die Validität der gemessenen PM-Konzentration gegeben.

## 6.5 Ermittlung der durchschnittlichen PM-Emission pro Zug

Nach der Berechnung der Emissionsfaktoren für jede Zugkategorie, wurde noch eine durchschnittliche Emission pro Zug (keine Differenzierung hinsichtlich Personen- oder Güterzug sowie Zuggattung) errechnet. Dazu erfolgte die Betrachtung und Analyse einer Arbeitswoche (nur Werktage; **25.06. – 29.06.2018**, Zugfahrten von Woche zu Woche ähnlich aufgrund des Fahrplanes vor allem bei Personenzügen) mit der höchsten Zuganzahl (=406) innerhalb des gesamten Auswertzeitraums, um möglichst viele Zuggattungen zu inkludieren.

### 6.5.1 Ermittlung der PM-Emission\_eff.\_gesamt (Exhaust + Non-Exhaust)

Die Berechnung der Emission\_eff.\_gesamt (Summe Exhaust + Non-Exhaust) wird durch Gleichung 6-4 beschrieben. Dazu mussten die Messdaten aus dem TEOM-Messgerät herangezogen werden.

$$PM_{Emission\_eff\_ges} \left[ \frac{g}{Zug} \right] = \frac{\left( \text{Partikelkonzentration}_{eff\_ges} \left[ \frac{\mu g}{m^3} \right] \right) * \text{Tunnelquerschnitt}(A) [m^2] * \text{Strömungsgeschwindigkeit}(v) \left[ \frac{m}{s} \right] * \Delta t [s]}{\text{Anzahl Züge} [\#]} * 10^{-6} \quad (\text{Gl.6-4})$$

Die Formel weist Similaritäten zu jener für die Emissionsfaktorberechnung auf (siehe Kap. 6.4), jedoch erfolgt bei der Emissionsermittlung keine Referenzierung auf eine Strecke und die Anzahl der Züge pro Zeitintervall fluktuiert zwischen 2 oder 1, je nachdem, wie viele Züge innerhalb des Mittelungsintervalls in beide Richtungen gefahren sind. Das Mittelungsintervall beträgt hierbei immer 10 Minuten und es wird jener Messwert herangezogen, in welchem Mittelungsintervall der jeweilige Zug gefahren ist. Alle anderen Größen finden aus analogen Gründen wie in Kapitel 6.4 bereits erklärt, Eingang in die Gleichung.

Innerhalb der betrachteten Woche, sind außerdem noch 8 dieselektrisch angetriebene Züge gefahren, daher mussten die dadurch emittierten Exhaust-Emissionen von den gemessenen Werten in Abzug gebracht werden, um schlussendlich die Non-Exhaust Emissionen in g/# zu erhalten.

### 6.5.2 Simulation der Exhaust-Emission

Die durch Dieselloks generierten Exhaust-Emissionen wurden durch die bereits erklärte Simulationsumgebung RECEM berechnet. In diesem Unterkapitel werden daher nur mehr die wichtigsten Eingangs- bzw. Vorgabeparameter erläutert.

Die 4 Vorgabefiles wurden wie folgt bedatet:

#### .zug File

Leistung Lok, Masse Lok, vmax Lok, Masse/Waggon, Waggonanzahl, vmax Waggon laut Datenblatt der Hersteller bzw. der ÖBB; Güterzug vmax = 100km/h, Personenzug vmax = 120km/h, Sonderzüge vmax = 100km/h (laut Gesetz, tatsächliche Geschwindigkeit unbekannt); Wirkungsgrade (Generator, Rekuperation), Luftwiderstandsfaktoren laut Datenblatt der Hersteller bzw. der ÖBB; Zugkraftkennlinie (bereits in Software implementiert) der Rangierlok für Sonderlokozüge und Kleinwagen ebenfalls verwendet.

**.tff File**

Unterscheidung nach Personen– Güter- und Sonderzüge, generell Übernahme von Default-Werte (voreingestellt)

**.vzg File**

Der Tunnel wurde in 5 Meter Abschnitte unterteilt, anschließend wurde die Höhendifferenz zwischen Nord- und Südportal des Tunnels gebildet (Daten aus Google-Maps) und danach die Höhendifferenz auf die Anzahl der Abschnitte bezogen. Daraus ergibt sich eine konstante Steigung der Fahrstrecke von 1,6% (Tab. 6-5). Zudem ist die Vorgabegeschwindigkeit über der gesamten Streckenlänge konstant und es existieren keine Stops der Züge (=jeder Zug fährt mit konstanter Geschwindigkeit durch den Tunnel).

**Tabelle 6-5:** Ermittlung der Steigung

Höhe Nord [m]	821,10	Höhe Nord - Höhe Süd [m]	16,70
Höhe Süd [m]	804,40	# Abschnitte	211
Delta x [m]	5,00	delta h/Abschnitt [m]	0,0791

**.ken File**

Das File für die Emissionskennlinie wurde je nach Baujahr und Leistung der Lok gewählt und der damit verbundenen Gesetzgebung, wobei einige Loks über mehrere Jahre hinweg gebaut wurden und somit eine Zuordnung zur jeweiligen Gesetzgebung schwierig ist.

In diesem Fall erfolgte die Verwendung der konservativeren Kennlinie.

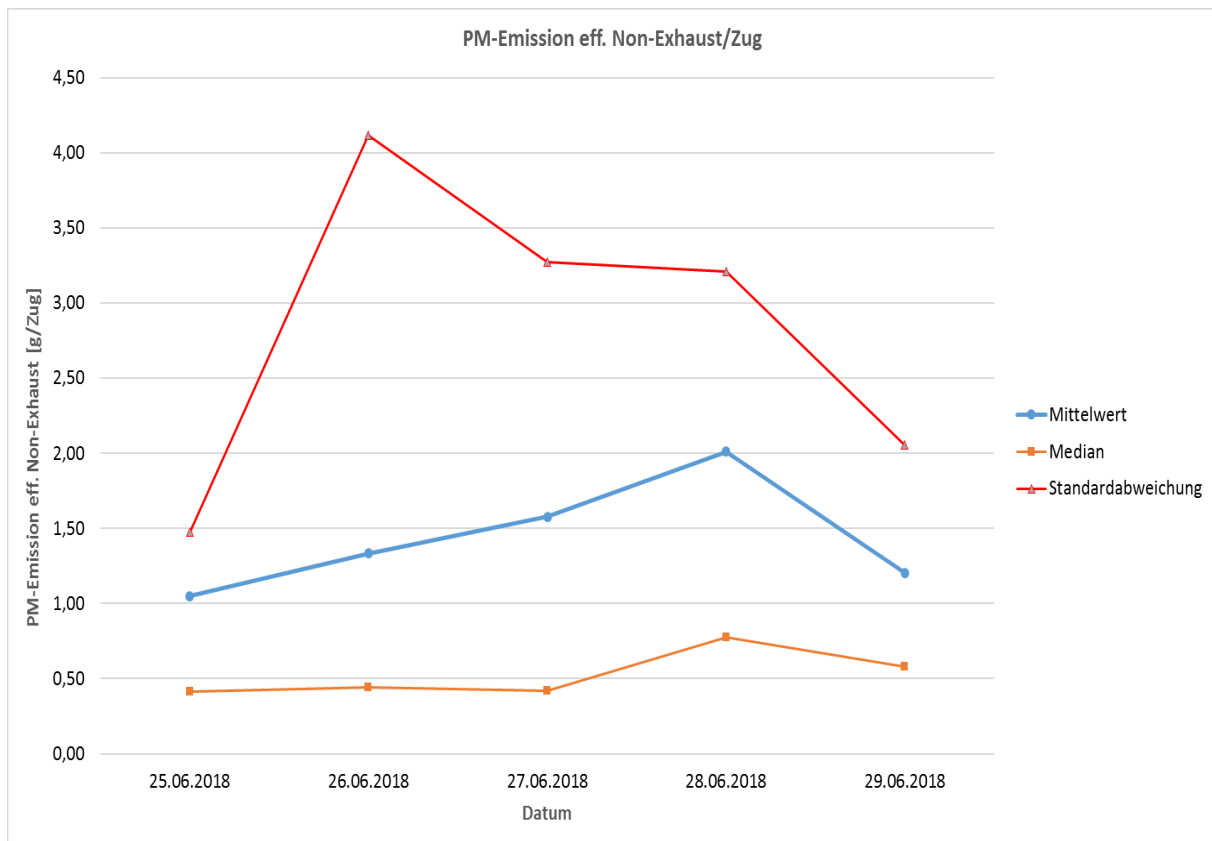
Das Ergebnis der Simulationen pro fahrenden Zug ist ein gemittelter PM-Emissionswert über der Fahrzeit auf der vorgegebenen Streckenlänge, hochgerechnet auf eine PM-Emission in g/h (TSP), da die Emissionskennlinien in dieser Einheit vorliegen.

Um die Emission auf einen Zug zu beziehen, musste die Emission in g/h auf die tatsächliche Fahrzeit, die der Zug in Abhängigkeit der vorgegebenen Geschwindigkeit ( $v_{Vorgabe}$ ) benötigt, um die halbe Tunnellänge zurückzulegen, umgerechnet werden (Gl.6-5).

$$PM_{Emission\_Exhaust} \left[ \frac{g}{Zug} \right] = \frac{\left( Partikelemission_{exhaust} \left[ \frac{g}{h \cdot \#} \right] \right)}{3600 \left[ \frac{s}{h} \right]} * \frac{\left( \frac{Tunnellänge}{2} \right) [m]}{v_{Vorgabe} \left[ \frac{m}{s} \right]} \quad (Gl.6-5)$$

**6.5.3 Ermittlung PM-Emission Non-Exhaust**

Nach Berechnung der PM-Exhaust Emissionen der dieselelektrisch betriebenen Loks konnte durch Differenzbildung zwischen dem Messwert der PM-Emission\_eff.\_gesamt und dem zugehörigen PM-Emissionswert\_Exhaust des dieselbetriebenen Zuges, die **PM-Emission\_eff.\_ Non-Exhaust/Zug** für die Zugfahrten bestimmt werden.



**Abbildung 6-35:** PM-Emission\_eff.\_Non-Exhaust/Zug

In Abbildung 6-35 sind der Mittelwert, der Median und die Standardabweichung der durchschnittlichen PM-Emission\_eff.\_Non-Exhaust/Zug als Tagesmittel dargestellt. Es zeigt sich, dass der Tagesmittelwert sich zwischen 1-2 Gramm/Zug bewegt. Die Standardabweichung fluktuiert etwas stärker und erreicht ihren Peak am 26.6.2018.

An diesem Tag sind bei detaillierter Betrachtung der Messdaten einige gemessene PM-Konzentrationen sehr hoch (Ausreißer). Diese erhöhte Konzentration könnte auf das Ladegut zurückzuführen sein, dies ist jedoch nicht verifizierbar, da keine Daten diesbezüglich vorliegen. Der Einfluss der Gesamtmasse, Zuglänge und der Waggonanzahl werden nachfolgend mittels Regressionsanalyse noch präziser untersucht. Die Strömungsgeschwindigkeit ist zudem bei diesen Konzentrationspeaks ebenfalls wesentlich höher als bei den übrigen Zugfahrten. Dies kann durch eine erhöhte Fahrgeschwindigkeit (tatsächliche Fahrgeschwindigkeit jedes einzelnen Zugs ist unbekannt, daher nicht verifizierbar) oder veränderte Luftverdrängung infolge unterschiedlicher Luftwiderstandsfaktoren (sind eine Funktion der Geometrie) erklärt werden. Durch die damit verbundenen erhöhten Luftbewegungen kann auch die Schwingungsfrequenz der Glasröhre beeinflusst und somit die Messdaten verfälscht werden.

Unter Betrachtung der Witterungsverhältnisse (rel. Feuchte) ist zu erkennen, dass sich die relative Feuchte im Tunnel zwischen 88-94% bewegt (zwischen 25.06.18-29.06.18) und somit keiner großen Fluktuation unterliegt. Daher ist dieser Einfluss eher gering bzw. vernachlässigbar. Tabelle 6-6 stellt die wichtigsten statistischen Kennzahlen dar (Emission in g/Zug = g/#).

**Tabelle 6-6:** Übersicht über die statistischen Kennwerte PM-Emission\_eff.\_Non-Exhaust

Datum	MW Emission ges. [g/#]	MW Emission Exhaust [g/#]	MW Emission Non Ex. [g/#]	% Anteil Exhaust/ Gesamt	% Anteil Non-Exhaust/ Gesamt	Median Non-Exhaust [g/#]	STABW Non-Exhaust [g/#]	Konfidenzintervall +- (Alpha = 5%) [g/#]	n
25.06.2018	1,05	0,00270	1,0490	0,26	99,74	0,42	1,48	0,27	85
26.06.2018	1,35	0,01265	1,3347	0,94	99,06	0,44	4,12	0,76	81
27.06.2018	1,58	0,00029	1,5786	0,02	99,98	0,42	3,28	0,61	80
28.06.2018	2,01	0,00000	2,0108	0,00	100,00	0,78	3,21	0,59	82
29.06.2018	1,21	0,00236	1,2055	0,20	99,80	0,58	2,06	0,39	78
<b>25.6.-29.6.2018</b>	<b>1,44</b>	<b>0,00360</b>	<b>1,4357</b>	<b>0,25</b>	<b>99,75</b>	<b>0,54</b>	<b>2,98</b>	<b>0,24</b>	<b>406</b>
Züge Diesellok		8		1,97					
Züge E-Lok		398			98,03				
Züge gesamt		406							

Tabelle 6-6 zeigt, dass der Anteil der Exhaust-Emissionen sehr gering ist (sowohl pro Tag als auch pro Woche), dies ist plausibel aufgrund der geringen Anzahl an Dieselloks innerhalb der betrachteten Woche (1,97%). Weiters verkehrte an einem Tag keine Diesellok, daher ist der Exhaust-Anteil naturgemäß null. Die Standardabweichung und die Konfidenzintervalle sind zudem relativ hoch, begründbar durch erhöhte Streuungen und Ausreißer. Eine qualitative Bestimmung der Partikel (Elementcharakterisierung bsp. ob Kupfer, Eisen) bei dieser Messkampagne erfolgte in diesem Zusammenhang nicht. Grundsätzlich kann es zur Deposition von Partikel jeder Größe und Form kommen, aufgrund des fehlenden Vorabscheiders, dies erhöht natürlich die Einflussfaktoren für Ausreißer.

#### 6.5.4 Regressionsanalyse

Für die quantitative und qualitative Bestimmung einer Korrelation zwischen Gesamtmasse (GM), Zuglänge (ZL), Waggonanzahl (WA) (=unabhängige Variablen) und PM-Emission\_eff.\_ Non-Exhaust (=um Hintergrundkonzentration bereinigt; abhängige Variable) wurde noch eine Regressionsanalyse mit diesen Parametern durchgeführt. Aufgrund der großen Messwertanzahl von 406, können auch valide Ergebnisse erwartet werden.

Bevor eine Regression durchgeführt wird, sollten die Daten mittels Graphiken, Kennzahlen und Testverfahren (Theorie siehe Kapitel 8.1) auf Normalverteilung überprüft und gegebenenfalls durch Transformation adaptiert werden, um annähernd normalverteilte Daten für eine aussagekräftige Regression zu erhalten.

Die Überprüfung der Daten auf Normalverteilung und die erforderlichen Adaptionen (Tabellen und Diagramme) werden im Anhang (siehe 8.2) detailliert beschrieben.

Es wird daher direkt auf die Ergebnisse der Regressionsanalyse übergegangen.

Die Regression wurde mit den adaptierten respektive transformierten Daten (Transf.) durchgeführt. Zuvor erfolgte die Berechnung der Korrelationskoeffizienten zwischen den Variablen (siehe Tab. 6-7). Die Ermittlung der Koeffizienten bringt zum Ausdruck, dass zwischen den einzelnen Variablen (jede mit jeder) eine starke direkte Proportionalität herrscht. Somit ist eine multiple lineare Regression nicht mehr schlüssig, da die Variablen nicht mehr unabhängig voneinander sind. Dies bestätigt die Vermutung anhand der Auswertung der Rohdaten (siehe Kapitel 6.2). Aus diesem Grund wurde nur eine einfache lineare Regression berechnet.

**Tabelle 6-7:** Korrelationskoeffizienten zwischen den Variablen

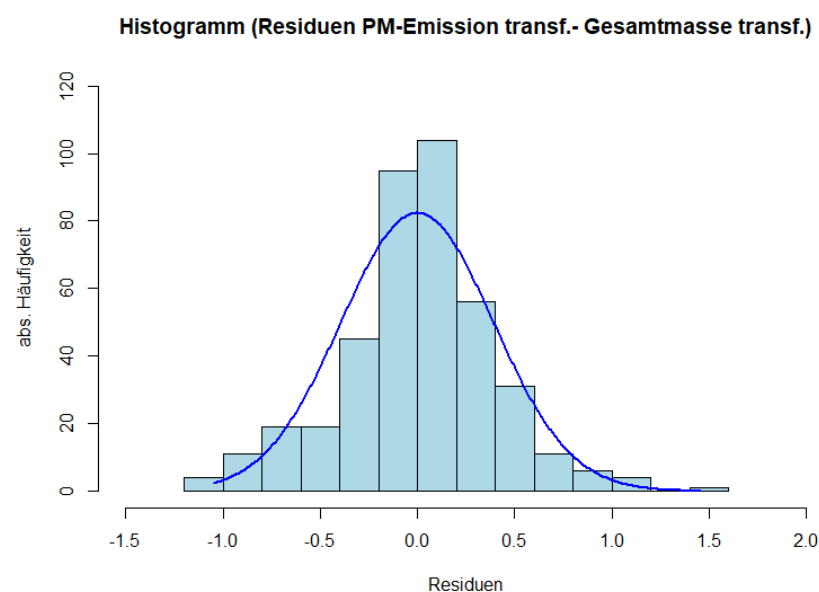
r <sup>2</sup> ZL - GM	0,78
r <sup>2</sup> ZL - WA	0,95
r <sup>2</sup> GM - WA	0,77

Tabelle 6-8 zeigt das Ergebnis der Regression zwischen PM-Emission\_eff.\_transf. und Gesamtmasse\_Zug\_transf.

**Tabelle 6-8:** Ergebnis Regression PM-Emission\_eff.\_transf. – Gesamtmasse\_transf.

R <sup>2</sup>	0,08	temp, b0	4,70
R <sup>2</sup> korr	0,08	tkrit, b0	1,65
Femp	34,71	temp, GM_t	5,89
Fkrit	3,87	tkrit, GM_t	1,65

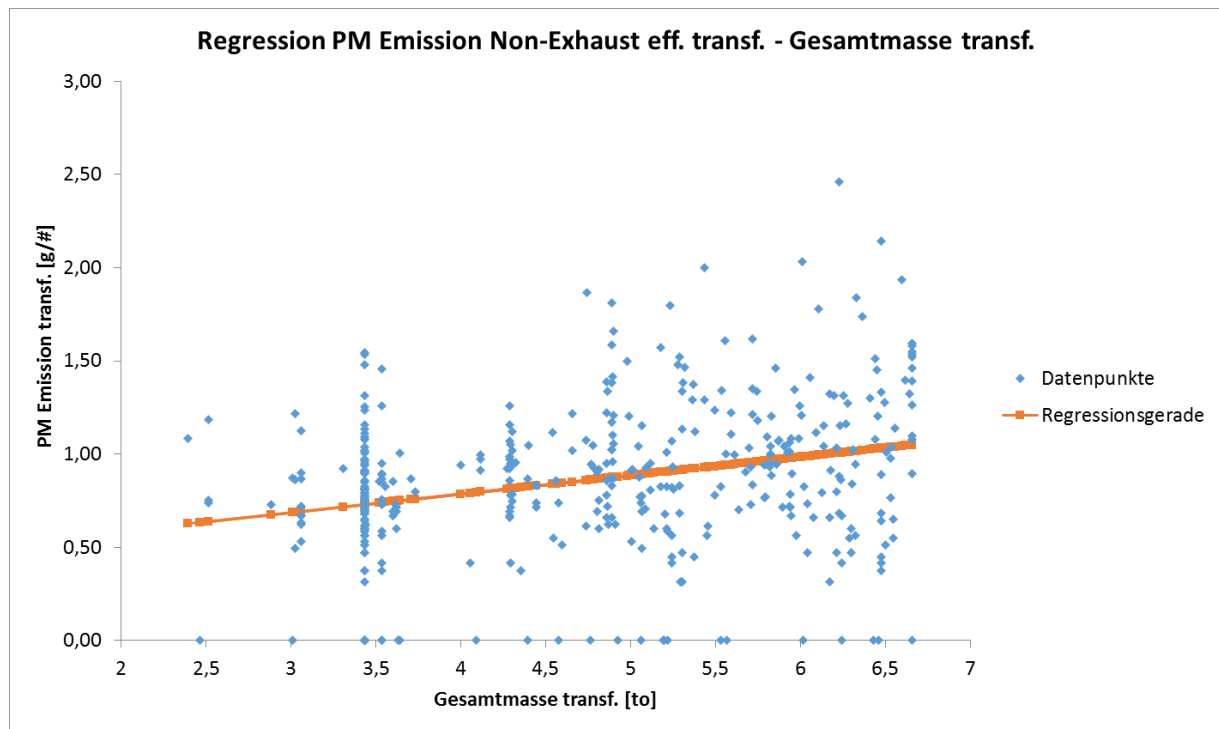
Die Modellgültigkeit (Modellübertragbarkeit auf die Grundgesamtheit,  $F_{emp} > F_{krit}$ ) und die Gültigkeit der Regressionskoeffizienten (Übertragbar auf Grundgesamtheit,  $t_{emp} > t_{krit}$ ) sind erfüllt.



**Abbildung 6-36:** Histogramm Residuen PM-Emission\_eff.\_transf.- Gesamtmasse\_transf.

In Abbildung 6-36 ist die Verteilung der Residuen ersichtlich. Diese folgen einer akzeptablen Normalverteilung. Daher ist das Modell auch richtig spezifiziert bzw. gültig.

Das adjustierte Bestimmtheitsmaß (Stärke des Zusammenhangs) ist mit rund 8% sehr gering, aufgrund der starken Streuung der Daten (siehe Abb. 6-37).



**Abbildung 6-37:** Regressionsgerade PM-Emission\_eff.\_tranf.- Gesamtmasse\_transf. (GM\_t)

Die Regressionsgleichung kann wie folgt angegeben werden (Gl.6-6):

$$PM_{Emission\_eff\_Non\_Exhaust} \left[ \frac{g}{Zug} \right] = (0,3888 + 0,09912 * GM\_t)^4 \quad (Gl.6-6)$$

Es ist eine direkte Proportionalität zwischen Gesamtmasse Zug und PM-Emission pro Zug erkennbar. Die Plausibilität ist gegeben, wobei ein Offset auf der Ordinate vorhanden ist. Dies ist auf die mit Unsicherheiten behaftete in Abzug gebrachte Hintergrundkonzentration zurückzuführen, da diese lediglich PM10 enthält (gemessen wurde im Tunnel TSP) und somit höchstwahrscheinlich zu gering beziffert wurde. Die Potenzierung der gesamten Regressionsgleichung mit 4 kann durch die notwendige Rücktransformation der PM-Emissionsdaten begründet werden. Nach der Rücktransformation ist der Offset  $(0,3888^4)$  wesentlich geringer.

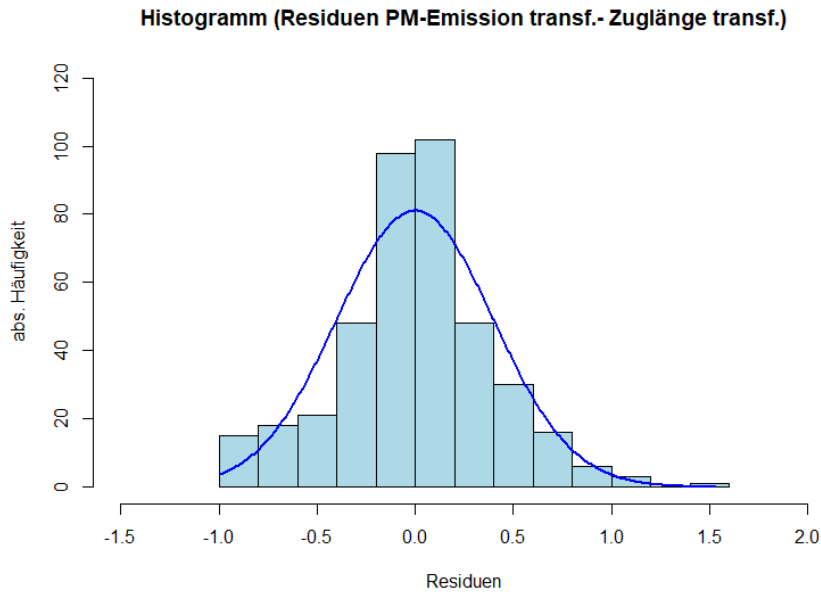
Die Ergebnisse der Regression mit den adaptierten Daten „Zuglänge“ sind in Tabelle 6-9 dargestellt.

**Tabelle 6-9:** Ergebnis Regression PM-Emission\_eff.\_tranf. – Zuglänge\_transf.

R <sup>2</sup>	0,05	temp, b0	12,98
R <sup>2</sup> korr	0,05	tkrit, b0	1,65
Femp	20,87	temp, ZL_t	4,57
Fkrit	3,87	tkrit, ZL_t	1,65

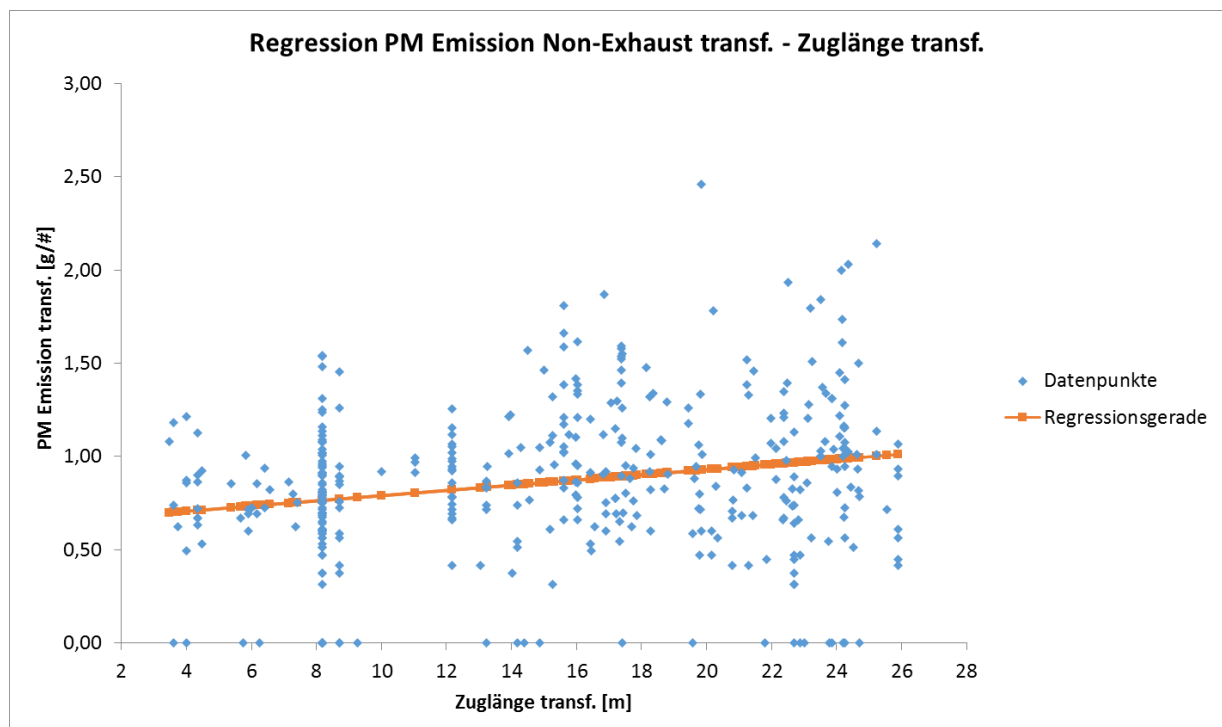
Die Gültigkeit des Modells und der Regressionskoeffizienten ist ausreichend gegeben. Die Verteilung der Residuen zeigt eine adäquate Spezifikation des Modells (erkennbare Normalverteilungsform, siehe dazu Abb. 6-38).





**Abbildung 6-38:** Histogramm Residuen PM-Emission\_eff.\_tranf.- Zuglänge\_transf.

Das adjustierte Bestimmtheitsmaß (5%) ist geringer als bei voriger Regression mit der Gesamtmasse\_transf. Folglich ist die Streuung der Daten noch größer. In Abbildung 6-39 ist die Regressionsgerade mit den Datenpunkten ersichtlich.



**Abbildung 6-39:** Regressionsgerade PM-Emission\_eff.\_tranf.- Zuglänge\_transf. (ZL\_t)

Der mathematische Zusammenhang wird folgendermaßen beschrieben (Gl.6-7):

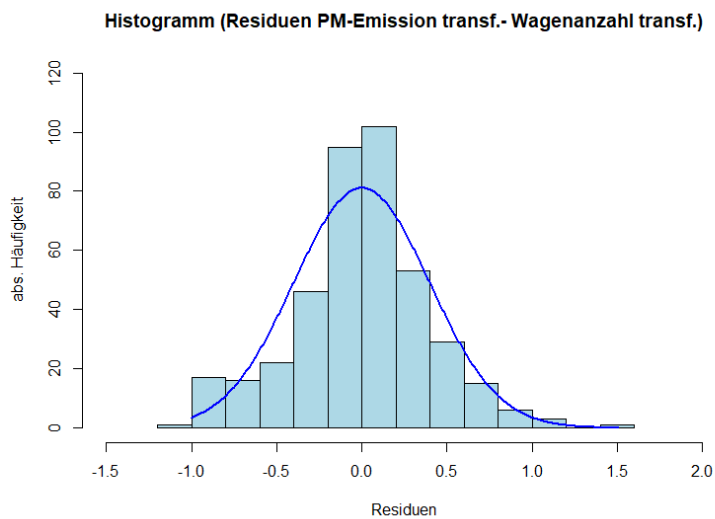
$$PM_{Emission\_eff\_Non\_Exhaust} \left[ \frac{g}{Zug} \right] = (0,6515 + 0,01389 * ZL\_t)^4 \quad (Gl.6-7)$$

Auch bei dieser Regression ist ein Offset (etwas größer als bei voriger Regression) zu beobachten, wobei durch die Potenzierung sich dieser wieder deutlich verringert. Die Gründe hierfür sind analog zu den bereits Erwähnten bezüglich der Regression mit der Gesamtmasse Zug\_transf.

Abschließend sind noch die Ergebnisse der Regression mit der Waggonanzahl\_transf. ersichtlich (Tab. 6-10). Die Modellgültigkeit und Gültigkeit der Regressionskoeffizienten sind vorhanden. Die Verteilung der Residuen (Abb. 6-40) lässt auf eine gute Spezifikation des Modells schließen.

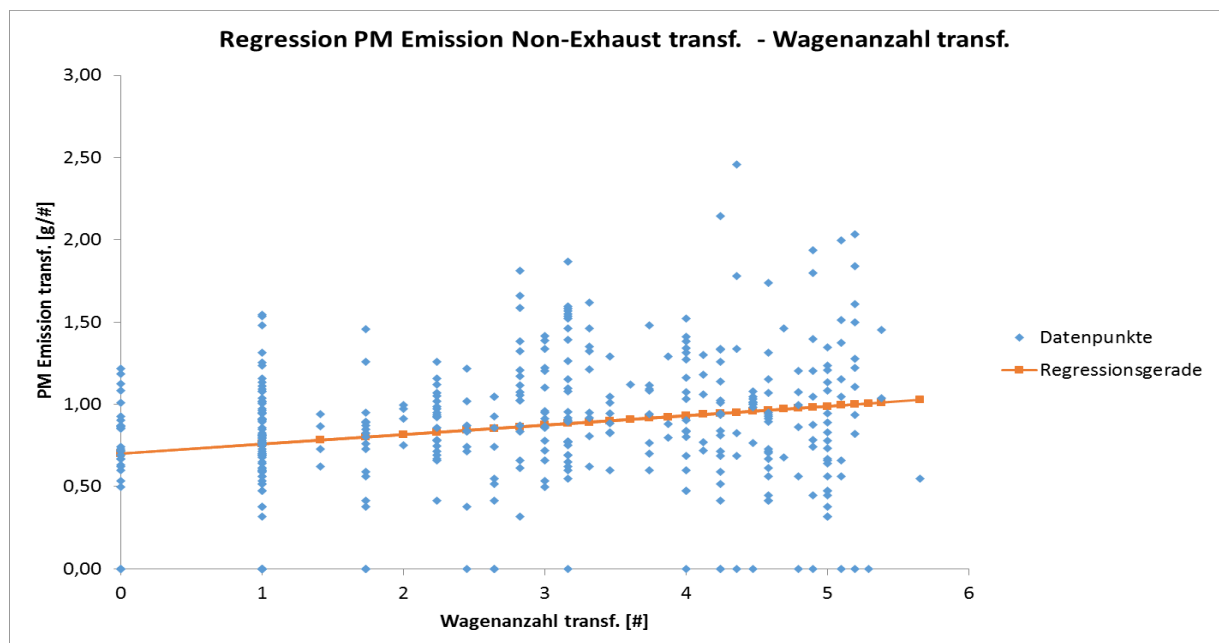
**Tabelle 6-10:** Ergebnis Regression PM-Emission\_eff.\_transf. – Wagenanzahl\_transf.

R <sup>2</sup>	0,05	temp, b0	17,48
R <sup>2</sup> korr	0,05	tkrit, b0	1,65
Femp	21,58	temp, ZL_t	4,64
Fkrit	3,87	tkrit, ZL_t	1,65



**Abbildung 6-40:** Histogramm Residuen PM-Emission\_eff.\_transf. – Wagenanzahl\_transf.

Mit einem adjustierten Bestimmtheitsmaß von ~5% ist dieses ebenfalls gering, da auch diese Daten einer großen Streuung (große Standardabweichung) trotz Adaption unterliegen.



**Abbildung 6-41:** Regressionsgerade PM-Emission\_eff.\_transf.- Wagenanzahl\_transf. (WA\_t)

Abbildung 6-41 illustriert die vorhandenen Streuungen. Zudem sind einige Datenpunkte mit dem Wert Null beziffert, da diese Züge nur aus einer Lok bzw. einem Triebwagen bestehen. Die Regressionsgerade unterliegt folgender mathematischer Beschreibung (Gl.6-8):

$$PM_{Emission\_eff\_Non\_Exhaust} \left[ \frac{g}{Zug} \right] = (0,7003 + 0,0576 * WA_t)^4 \quad (Gl.6-8)$$

Die Regressionsgleichung beinhaltet ebenfalls einen Offset aufgrund bereits genannter Gründe. Durch Potenzierung mit 4 ist auch dieser Offset akzeptabel.

Unter Betrachtung aller 3 Regressionsgeraden zeigt sich, dass die Gerade der Gesamtmasse Zug die größte Steigung besitzt. Folglich steigt die PM-Emission\_eff.\_Non-Exhaust pro Zug mit der Gesamtmasse des Zuges am stärksten und wird durch diese unabhängige Variable am besten beschrieben (adjustierte Bestimmtheitsmaß ist auch am größten). Dieses Ergebnis erscheint logisch, da mit zunehmender Beladung der einzelnen Waggone (bis zur max. Achslast) und damit steigender Gesamtmasse bei gleicher Waggonanzahl höchstwahrscheinlich auch der Abrieb durch größere Kontaktkräfte steigt. Es muss jedoch beachtet werden, dass eine größere Beladung der Waggone nicht unbedingt eine größere Gesamtmasse des Zuges zur Folge hat, da die Waggonanzahl verringert sein kann. Dies konnte aufgrund fehlender Daten über die Beladung nicht näher untersucht werden.

Zudem ist aus den 3 Scatter-Plots erkennbar, dass oftmals mehrere Datenpunkte vertikal übereinander angeordnet sind. Aufgrund dessen, dass einige Züge die gleiche Gesamtmasse, Zuglänge und Waggonanzahl besitzen, jedoch unterschiedliche Emissionen generieren, entsteht diese Anomalie. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass die Züge differente Geschwindigkeiten oder Beladungen aufweisen. Eine diesbezügliche Verifizierung ist auch hierbei aufgrund fehlenden Datenmaterials leider nicht möglich. In den 3 Scatter-Plots für die Regression sind auch Emissionswerte mit null belegt, da entweder die Hintergrundkonzentration hoch (=größer als die gemessene) ist oder die Durchfahrtsgeschwindigkeit des Zuges gering war (z.B.: rotes Signal, => geringe Windgeschwindigkeit => geringe Emission).

## 6.6 Chemische Analyse der Partikelfraktion

Abschließend wird die quantitative Analyse der chemischen Bestandteile (Elemente) der gemessenen Partikelfraktionen erläutert. Es sollten sich die in Kapitel 2.2 erwähnten Legierungselemente großteils wiederfinden. Für die Eruiierung der Elemente wurden einerseits Quarzfilter (gute Adsorptionsfähigkeit, hohe Durchflussmengen möglich, gute chemische Stabilität = nahezu keine chem. Reaktionen mit Gasen) für die Bestimmung von Natrium, Ammonium, Magnesium, Kalium, Calcium, Chlor, Stickstoffdioxid, Nitrate, Sulfate, organischem und elementarem Kohlenstoff und andererseits Cellulosefilter (besitzen hohen Reinheitsgrad) für die Ermittlung von Lithium, Beryllium, Aluminium, Titan, Chrom, Vanadium, Mangan, Eisen, Cobalt, Nickel, Kupfer, Zink, Selen, Zirconium, Niob, Molybdän, Silber, Cadmium, Antimon, Tellur und Blei verwendet. Eine separate Messung der Hintergrundkonzentration wurde nicht durchgeführt, jedoch ist in der im Tunnel abgesaugten Luft auch ein gewisser latenter Hintergrundanteil inkludiert. Daher ist eine genaue Separation nicht möglich.

Die Filter wurden in 24 Stunden Intervallen automatisch gewechselt. Für die Ermittlung der Konzentrationen der einzelnen Elemente wurde die jeweilige Masse pro Filter auf den angesaugten Volumenstrom innerhalb von 24 Stunden bezogen und ein Mittelwert der Konzentrationen über 5 Filter (=5 Proben je Filtertyp) gebildet. Zudem ist noch die gesamte Partikelkonzentration des jeweiligen Filtertyps (über 5 Filter gemittelte Summe der Konzentration aus allen eruierten Stoffen = Gesamt eruiert) angegeben. Es wurden großteils Werkstage für die Beprobung gewählt, um einen hohen Personen- aber vor allem hohen Güterzuganteil zu inkludieren.

Beprobungsdaten Quarzfilter: 13.10., 16.10., 17.10., 18.10. und 20.10.2018

Beprobungsdaten Cellulosefilter: 24.10., 25.10., 30.10., 02.11. und 05.11.2018

Abbildung 6-42 zeigt die Elemente, welche mittels Quarzfilter bestimmt wurden. Eine quantitative Ermittlung aller auf dem Filter abgelagerten Partikel war aufgrund von Interferenzen nicht möglich. Die über 5 Filter gemittelte durchschnittliche Gesamtkonzentration der 5 Quarzfilter beträgt daher  $65,50\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Somit ist der Anteil der eruierten Stoffe ( **$=26,53\mu\text{g}/\text{m}^3$  von  $65,50\mu\text{g}/\text{m}^3$** ) relativ gering.

In Abbildung 6-42 ist zudem ersichtlich, dass vor allem die organische und elementare Kohlenstoffkonzentration am größten ist. Diese hohe EC/OC Konzentration ist im Vergleich zu Ergebnissen aus [32] großteils als Hintergrundkonzentration anzusehen. Ein geringer Anteil kann den Verbrennungsvorgängen in Dieselloks, dem Bremsenabrieb vor allem bei Gussklotzbremsen und dem Abrieb der Kohleschleifleisten des Stromabnehmers zugeordnet werden. Eventuell kann auch die Beladung einen Beitrag zum Kohlenstoffanteil liefern. Zudem ist der Anteil der EC/OC-Konzentration an der gesamten Konzentration am größten. Einen erkennbaren Anteil liefern auch Sulfate, größtenteils als Hintergrund einzuordnen, aber auch durch Verbrennung von Diesel (sehr geringer Anteil), durch Abrieb der Bremsen, des Rad-Schiene sowie Fahrdrabt-Stromabnehmer Kontaktes (in Legierungen enthalten) kann diese Konzentration verursacht werden. Die geringe Ammonium-Konzentration kann primär dem Hintergrund zugeordnet werden, aber auch durch Transport von Düngemittel (Abwehen) oder durch den Eintrag aus der näheren Umgebung (Düngemittleinsatz in der Landwirtschaft) verursacht werden. Calcium, Natrium, Kalium und Magnesium besitzen einen geringen Anteil, wobei Calcium und Magnesium durch Abwehen von Splitt verursacht werden könnte. Alle anderen Elemente liefern keinen nennenswerten Beitrag.

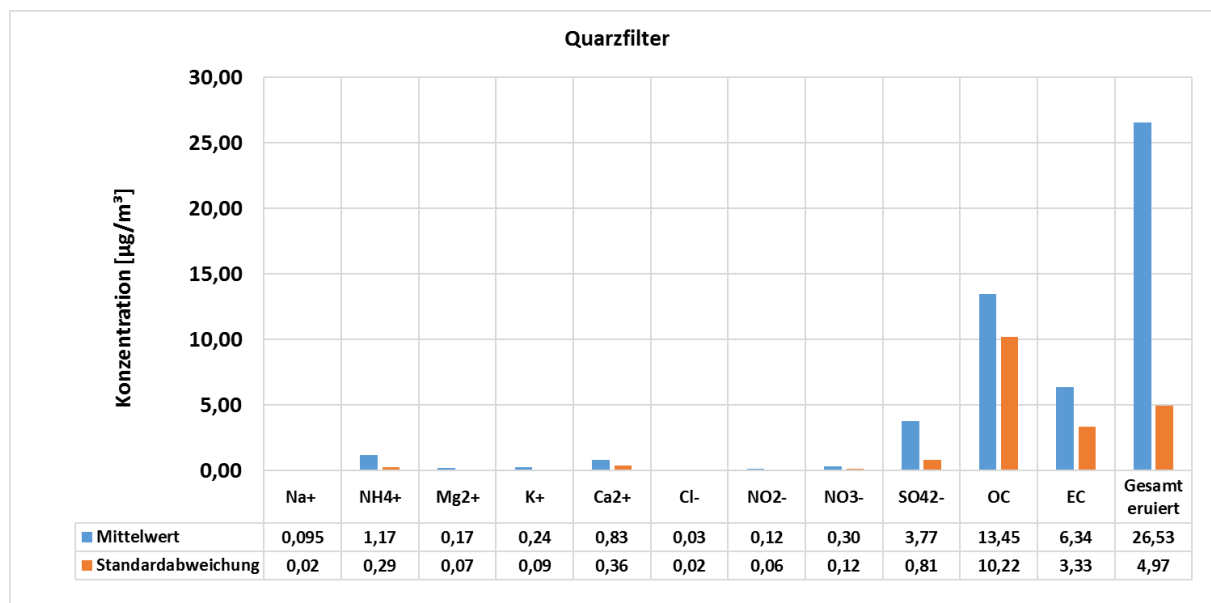


Abbildung 6-42: Chemische Analyse Quarzfilter

Auch mit dem Cellulosefilter war aufgrund von Quereinflüssen eine quantitative Bestimmung aller auf dem Filter deponierten Partikel nicht möglich (Abb. 6-43 und 6-44). Die gemittelte durchschnittliche Gesamtkonzentration der 5 Cellulosefilter beträgt somit 23,50µg/m³. Der Anteil der eruierten Stoffe (=14,64 µg/m³ von 23,50µg/m³) ist daher ebenfalls gering.

In Abbildung 6-43 ist ersichtlich, dass Eisen die größte Konzentration (auch größter Anteil an Gesamt-Konzentration) aufweist, was plausibel ist, da es den Hauptteil aller Legierungen bildet. Der Anteil aller Stoffe des Cellulosefilters außer Eisen an der gesamten Konzentration ist gering. Aluminium (laut Bericht [32] groÙtenteils der Hintergrundkonzentration zuzuordnen, verursacht durch Aufwirbelung von Staub und Erdkrustenmaterial), Titan, Chrom und Mangan sind ebenfalls in Legierungen enthalten und finden sich daher wieder. Alle weiteren Elemente besitzen vernachlässigbar kleine Konzentrationen. Werte, welche mit Null beziffert sind, konnten aufgrund der sehr kleinen Konzentration nicht quantifiziert werden (gilt auch für Abb. 6-44).

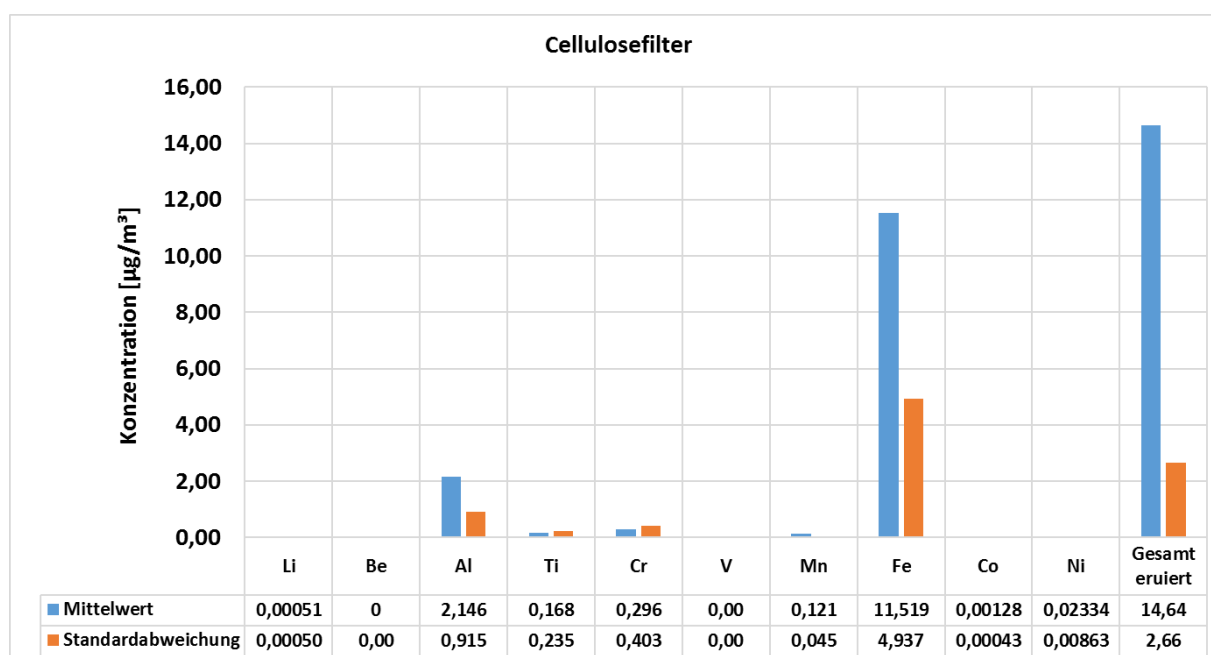
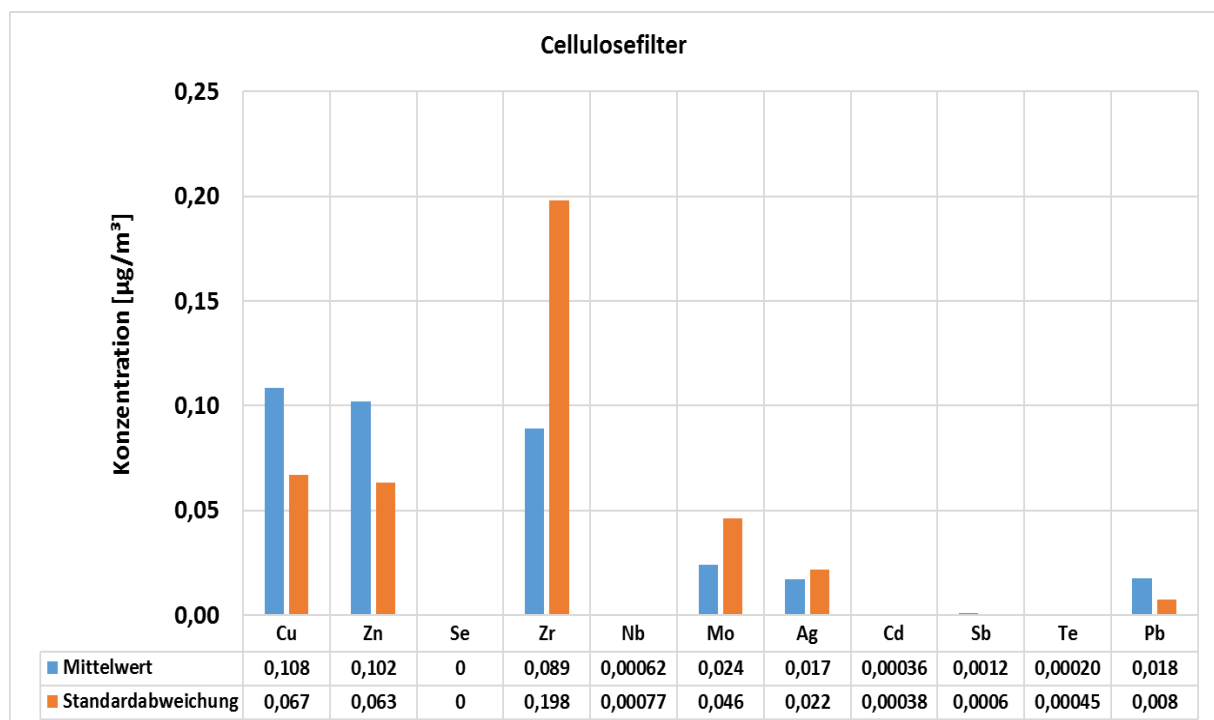


Abbildung 6-43: Chemische Analyse Cellulosefilter 1

Abbildung 6-44 illustriert relativ hohe Konzentrationen von Kupfer, Zink und Zirkonium. Ein Grund dafür ist, dass Kupfer einen wichtigen Legierungszusatz insbesondere bei Fahrdrähten darstellt. Zink wird ebenso als Legierungszusatz bei Bremscheiben und Bremsbacken verwendet, aber auch in Schüttgut ist es häufig enthalten. Zirkonium wird auch als Legierungszusatz aufgrund der guten Korrosionsbeständigkeit eingesetzt. Die Molybdän-Konzentration kann durch dessen Legierungszusatz (hohe Härte, Bruchfestigkeit und hoher Schmelzpunkt) sowie durch die Zugabe bei Düngemitteln (auch Eintrag durch Hintergrund möglich = Landwirtschaft) erklärt werden. Silber wird durch den Fahrdraht-Stromabnehmer Kontakt emittiert, da es bei Fahrdrähten einen wichtigen Zusatz darstellt (gute elektrische Leitfähigkeit). Die nennenswerte Blei-Konzentration könnte durch Legierungszusätze begründet werden.

In allen Auswertungen (Abb. 6-42 bis 6-44) ist eine erhebliche Standardabweichung der Messwerte zu beobachten, was auf große Streuungen zurückzuführen ist.



**Abbildung 6-44:** Chemische Analyse Cellulosefilter 2

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden Partikelemissionsfaktoren<sub>Non-Exhaust</sub> für unterschiedliche Zuggattungen (ausschließlich Eisenbahnverkehr) bestimmt. Dazu wurden Partikelmessungen durch Teilstromentnahme aus dem Tunnel (Aufzeichnung eines gleitenden 10 Minuten Mittelwertes (TSP) in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in einem einröhrigen zweigleisigen Eisenbahntunnel mit Güter- und Personenverkehr durchgeführt. Unter Verwendung von Messdaten für die Hintergrundkonzentration aus der nahen Umgebung des Landes Steiermark, konnte durch Abzug dieser von den gemessenen Partikelkonzentrationen im Tunnel die effektive Partikelkonzentration bestimmt werden. Um den Exhaust-Anteil in den Messwerten im Tunnel zu eliminieren, wurden die Partikelemissionen der dieselelektrisch betriebenen Züge durch Simulation unter Vorgabe eines Geschwindigkeitsprofils ermittelt. Durch Abzug dieser Partikelfraktion von den gemessenen Partikeln im Tunnel (Summe aus Exhaust und Non-Exhaust), konnten die nicht verbrennungsbedingten Partikelemissionsfaktoren der jeweiligen Zuggattung für selektierte Zugfahrten (ausreichender Zeitabstand zwischen den Zugfahrten notwendig, um Quereinflüsse zu reduzieren) berechnet werden (für Güterzüge  $6,37\text{g}/\text{km}$  (=Mittelwert der selektierten Zugfahrten); für Personenzüge  $1,58\text{g}/\text{km}$  (=Mittelwert der selektierten Zugfahrten)). Des Weiteren erfolgte die Ermittlung einer durchschnittlichen Partikelemission<sub>Non-Exhaust</sub> pro Zug (keine Unterscheidung zwischen Zuggattungen;  $1,4357\text{g}/\text{Zug}$  = Mittelwert der Zugfahrten von 5 Werktagen). Auch hierbei wurde durch Simulation der Exhaust-Anteil in Abzug gebracht. Anschließend konnten durch Regressionsanalysen Korrelationen zwischen Partikelemission<sub>Non-Exhaust</sub> pro Zug, Gesamtmasse<sub>Zug</sub>, Zuglänge und Waggonanzahl nachgewiesen werden. Abschließend wurde eine chemische Analyse der auf spezielle Filter (Quarz- und Cellulosefilter) deponierten Partikel durchgeführt, um die einzelnen Bestandteile der Partikel zu eruieren und um daraus etwaige Rückschlüsse auf die Emittenten (verursachende Prozesse der Partikelentstehung) ziehen zu können. Diese Analyse zeigte, dass die Eisenkonzentration ( $11,52\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) eine der größten ist. Zudem konnten weitere wichtige Legierungselemente (Kupfer, Aluminium, Zirkonium, Silber, Magnesium, Molybdän) und Stoffe ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4$ ) quantifiziert werden. Ein kurzer literarischer Überblick über die momentane Datenlage ergänzt diese Arbeit.

Des Weiteren wurden die gemessenen PM-Konzentrationen durch vorangegangene Messungen validiert, jedoch konnten die PM-Emissionsfaktoren<sub>eff.</sub><sub>Non-Exhaust</sub> je Zuggattung sowie die durchschnittlichen PM-Emissionen<sub>eff.</sub><sub>Non-Exhaust</sub> pro Zug nicht validiert werden, aufgrund fehlender Vergleichsmessungen (fehlende analoge Randbedingungen (z.B.: analoger Messpunkt); ähnliches Auswerteverfahren (Bestimmung der Emission je Zuggattung und der Emissionsfaktoren)). Generell unterliegen die gemessenen Konzentrationen (Wochenmittelwerte, Tagesmittelwerte) und damit auch die Emissionsfaktoren sowie die PM-Emission/Zug einer erheblichen Fluktuation, deren Ursache sehr wahrscheinlich in den mannigfaltigen Zugkonfigurationen (Beladung (offen, geschlossen), Alter des Drehgestells (Bremsart)) liegt. Diese Vermutung konnte aufgrund fehlenden Datenmaterials jedoch nicht verifiziert werden. Auch die hohe Strömungsgeschwindigkeit bei hohen gemessenen PM-Konzentrationen<sub>eff.</sub> und damit verbundener steigender PM-Emission/Zug, könnte durch veränderte Luftwiderstandsbeiwerte (Funktion der Oberflächengeometrie) in Abhängigkeit des Zuges erklärt werden. Durch den hohen Schub, Impuls (induziert durch die fahrenden Züge) im Tunnel, könnte zudem auch die Schwingung der Glasröhre (TEOM-Messprinzip) beeinflusst werden und somit für sehr hohe oder niedrige Werte (verfälschte Werte) mitverantwortlich sein. Auch diese möglichen Ursachen sind mit derzeitiger Datenlage und unter diesen Randbedingungen nicht weiter überprüfbar.

Infolge der angewandten Regressionsanalyse, konnte auch gezeigt werden, dass die Gesamtmasse des Zugs, den größten Einfluss auf die durchschnittliche PM-Emission/Zug ausübt, wobei der Einfluss auf die Emission mäßig ist (relativ flache Regressionsgerade, siehe Abb. 6-37, Tab. 6-9).

Der PM-Konzentrationsverlauf\_eff. über einen Tag (Abb. 6-13 bis 6-16) zeigte auch, dass Zugfahrten als Peak im Konzentrationsverlauf identifiziert werden können und nach einer Abklingphase (Durchlüftung des Tunnels) die Konzentration auf Null fällt (unter Berücksichtigung der Hintergrundkonzentration). Zudem ist der Einfluss der Witterungsverhältnisse im Tunnel nicht vernachlässigbar (Luftdruck beeinflusst Strömungsgeschwindigkeit, relative Feuchte nimmt Einfluss auf Bindungsfähigkeit der Partikel, Abb. 6-10 und 6-12). Für die Hintergrundkonzentration ist die Wetterlage ebenfalls relevant (hohe relative Feuchte, geringere Konzentration), wobei gezeigt werden konnte, dass die Hintergrundkonzentration wesentlich niedriger als die Gemessene ist (Tab. 6-1). Die Bestimmung der Exhaust-Emissionen durch eine Simulation brachte auch zum Ausdruck, dass die Anzahl der Dieselloks schon sehr gering ist und infolgedessen die Exhaust-Emissionen keinen nennenswerten Beitrag liefern (Tab. 6-6).

Die chemische Analyse zeigte eine erwartungsgemäße erhebliche Eisenkonzentration. Kupfer, Zink, Zirkonium, Molybdän und Silber konnten ebenfalls nachgewiesen werden. Diese Elemente können den Partikelentstehungsmechanismen Bremsenabrieb, Abrieb durch Rad-Schiene und Fahrdraht-Stromabnehmer Kontakt zugeordnet werden. Durch Vergleich der Konzentrationen im Unterwaldertunnel zu jenen im Lainzer Tunnel [15], sind jene im Unterwaldertunnel wesentlich niedriger, da dieser Tunnel auch mit Personenverkehr (=nicht nur Güterverkehr) belastet wird. Aufgrund fehlender Messdaten konnte kein Vergleich mit Konzentrationen an einer Vorbelastungsstelle in der näheren Umgebung durchgeführt werden.

Um die hier durchgeführten Berechnungen umfassend zu validieren, bedarf es aber weiterführender Messungen mit einem anderen Messprinzip. Zudem sollte eine Sensitivitätsanalyse der oben erwähnten möglichen Einflussfaktoren durchgeführt werden. Empfehlenswert für die Ermittlung der PM-Emissionsfaktoren ist, dass für die Messungen ein eingleisiger Tunnel herangezogen wird aufgrund der geringeren Zuganzahl pro Zeitintervall (größere Zeitabstände zwischen den Zügen). Dadurch wäre eine leichtere Zuordnung des Emissionspeaks zum jeweiligen vorbeifahrenden Zug möglich. Für präzisere Simulationsergebnisse wäre auch umfangreicheres Datenmaterial (genauere Angaben zur Lok (Emissionskennlinie, Zugkraftlinie für jede Lok, Beschleunigungswerte); präzisere Höhenangaben; tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit des Zuges) von Vorteil. Die Messunsicherheit wurde nicht berechnet, da keine adäquaten Unsicherheiten (empirische Werte) des TEOM-Messgerätes bekannt sind und dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Es muss auch noch darauf hingewiesen werden, dass eine Messung der Hintergrundkonzentration TSP (hier nur PM10) ebenfalls zweckmäßig ist, da die Ergebnisse dadurch beeinflusst werden (derzeit zu geringe Hintergrundkonzentration gemessen). Eine zusätzliche Adaption des eingestellten Volumenstroms oder des Durchmessers der Probennahmesonde für eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit in der Sonde (bessere Isokinetik, geringerer Fehler) wäre auch empfehlenswert.

Abschließend ist anzumerken, dass die Partikelemissionen (Non-Exhaus) in Eisenbahntunnel wie in dieser Arbeit gezeigt, nicht vernachlässigbar sind und immenser Forschungsbedarf besteht, um sicherheitstechnische Einrichtungen im Tunnel und am Zug (an Loks im Speziellen) durch geeignete Filteranlagen zu schützen.



## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2-1:</b> Größenspektrum [1] .....	3
<b>Abbildung 2-2:</b> Lungengängigkeit [1] .....	4
<b>Abbildung 2-3:</b> Bildung von Exhaust-Partikel [1].....	5
<b>Abbildung 2-4:</b> Interaktion der Einflussparameter [3].....	5
<b>Abbildung 2-5:</b> Bildung und Deposition von Partikel [2] .....	7
<b>Abbildung 2-6:</b> Verweilzeit der Partikel [4] .....	8
<b>Abbildung 2-7:</b> Bremseneinteilung [7] .....	13
<b>Abbildung 2-8:</b> Verlauf des Reibbeiwertes [7].....	14
<b>Abbildung 2-9:</b> Aufbau Scheibenbremse links [7], Aufbau Klotzbremse rechts [31].....	14
<b>Abbildung 2-10:</b> Radsatzwelle mit Scheibenbremsen [7] .....	15
<b>Abbildung 2-11:</b> Magnetschienenbremse [7].....	15
<b>Abbildung 2-12:</b> Achse eines Radsatzes [10] .....	16
<b>Abbildung 2-13:</b> Kräftesituation zwischen Rad/Schiene [9] .....	17
<b>Abbildung 2-14:</b> Radabnutzungshilfsmittel [11] .....	18
<b>Abbildung 2-15:</b> Optisches Radsatzmessgerät [11].....	18
<b>Abbildung 2-16:</b> Rad/Schiene Kontakt [10] .....	19
<b>Abbildung 2-17:</b> Kräfte des Rad/Schiene Kontaktes [10] .....	19
<b>Abbildung 2-18:</b> Fahrdrabt [12].....	20
<b>Abbildung 2-19:</b> Verschleißrate Fahrdrabt [12] .....	20
<b>Abbildung 2-20:</b> Profil- und Rillenfahrdrabt [12] .....	21
<b>Abbildung 2-21:</b> Schleifleisten, Stromabnehmer [13] .....	22
<b>Abbildung 2-22:</b> Bremsenprüfstand [14] .....	23
<b>Abbildung 2-23:</b> PM-Emissionen über der Messzeit Bahnhof Basel [14] .....	25
<b>Abbildung 2-24:</b> Partikelmassen Baseler Bahnhof [14] .....	25
<b>Abbildung 2-25:</b> Zeitverlauf der Partikelkonzentration [15] .....	28
<b>Abbildung 3-1:</b> 3D-Ultraschallanemometer [23].....	31
<b>Abbildung 3-2:</b> Aerosolsammler [24] .....	32
<b>Abbildung 3-3:</b> TEOM Messprinzip [29] .....	33
<b>Abbildung 4-1:</b> Streckenfile mit Vorgabesignal [30] .....	36
<b>Abbildung 4-2:</b> Zug-File [30] .....	37
<b>Abbildung 4-3:</b> Fahrverhaltens-File [30] .....	38
<b>Abbildung 4-4:</b> PM-Emissionskennlinie [30].....	38
<b>Abbildung 4-5:</b> Exemplarischer Geschwindigkeitsverlauf [30] .....	39
<b>Abbildung 4-6:</b> Benutzeroberfläche [30] .....	40

<b>Abbildung 5-1:</b> Lageplan der Messung [27] .....	41
<b>Abbildung 5-2:</b> Detaillageplan [28] .....	42
<b>Abbildung 5-3:</b> TEOM Messgerät links und Partisol Messgerät rechts .....	44
<b>Abbildung 5-4:</b> Skizze des Lageplans der Messeinrichtungen im Tunnel .....	44
<b>Abbildung 5-5:</b> Partisol Messgerät mit Filterkartuschen .....	45
<b>Abbildung 6-1:</b> PM-Konzentration_gesamt (ges.; Exhaust+Non-Exhaust) .....	46
<b>Abbildung 6-2:</b> Darstellung der Messstellen [28] .....	47
<b>Abbildung 6-3:</b> Wochengemittelte Werte Partikelkonzentration_eff._ges. - Zuganzahl .....	47
<b>Abbildung 6-4:</b> Wochengemittelte Werte Partikelkonzentration_eff._ges.- Wagenanzahl ..	48
<b>Abbildung 6-5:</b> Wochengemittelte Werte Partikelkonzentration_eff._ges. – Zuglänge.....	49
<b>Abbildung 6-6:</b> Wochengemittelte Werte Partikelkonzentration_eff._ges. – Gesamtmasse_Zug .....	49
<b>Abbildung 6-7:</b> Tagesmittelwerte Partikelkonzentration_eff._ges.- Zuglänge.....	51
<b>Abbildung 6-8:</b> Tagesmittelwerte Partikelkonzentration-eff._ges. – Gesamtmasse_Zug .....	51
<b>Abbildung 6-9:</b> Tagesmittelwerte Partikelkonzentration_eff._ges. - Waggonanzahl.....	52
<b>Abbildung 6-10:</b> Tagesmittelwert Partikelkonzentration_eff._ges. – Relative Feuchte.....	52
<b>Abbildung 6-11:</b> Tagesmittelwert Partikelkonzentration_eff._ges. - Personen-Güterzuganzahl .....	53
<b>Abbildung 6-12:</b> Tagesmittelwert Partikelkonzentration_eff._ges. - Windgeschwindigkeit .	54
<b>Abbildung 6-13:</b> Tagesverlauf Partikelkonzentration_eff._gesamt (00:00 – 06:00 Uhr).....	55
<b>Abbildung 6-14:</b> Tagesverlauf Partikelkonzentration_eff._gesamt (06:00 – 12:00 Uhr).....	56
<b>Abbildung 6-15:</b> Tagesverlauf Partikelkonzentration_eff._gesamt (12:00 – 18:00 Uhr).....	57
<b>Abbildung 6-16:</b> Tagesverlauf Partikelkonzentration_eff._gesamt (18:00 – 00:00 Uhr).....	58
<b>Abbildung 6-17:</b> Tagesmittelwerte PM-Konzentration gem., eff., Hintergrund .....	60
<b>Abbildung 6-18:</b> PM-Emission, Richtung 1, 10.06.18 .....	61
<b>Abbildung 6-19:</b> PM-Emission, Richtung 2, 10.06.18 .....	61
<b>Abbildung 6-20:</b> Windgeschwindigkeitsverlauf Tunnel 10.06.2018.....	62
<b>Abbildung 6-21:</b> PM-Emission, Richtung 1, 17.06.18 .....	62
<b>Abbildung 6-22:</b> PM-Emission, Richtung 2, 17.06.18 .....	63
<b>Abbildung 6-23:</b> Windgeschwindigkeitsverlauf Tunnel 17.06.2018.....	64
<b>Abbildung 6-24:</b> Selektionsschema für die maßgeblichen Zugfahrten.....	65
<b>Abbildung 6-25:</b> PM-Emissionsfaktor je Zuggattung.....	66
<b>Abbildung 6-26:</b> PM-Emissionsfaktor Eurocity .....	66
<b>Abbildung 6-27:</b> PM-Emissionsfaktor Direktgüterzug.....	67
<b>Abbildung 6-28:</b> PM-Emissionsfaktor Rollende Landstraße.....	68
<b>Abbildung 6-29:</b> PM-Emissionsfaktor aller Zuggattungen.....	68
<b>Abbildung 6-30:</b> QQ-Plot PM-Emissionsfaktor_eff._Non-Exhaust.....	70

<b>Abbildung 6-31:</b> Box-Whisker Plot PM-Emissionsfaktor_eff._Non-Exhaust_Güterzug (GZ)	71
<b>Abbildung 6-32:</b> Histogramm PM-Emissionsfaktor_eff._Non-Exhaust_Güterzug (GZ)	71
<b>Abbildung 6-33:</b> Box-Whisker Plot PM-Emissionsfaktor_eff._Non-Exhaust_Personenzug (PZ)	72
<b>Abbildung 6-34:</b> Histogramm PM-Emissionsfaktor_eff._Non-Exhaust_Personenzug (PZ)	72
<b>Abbildung 6-35:</b> PM-Emission_eff._Non-Exhaust/Zug	75
<b>Abbildung 6-36:</b> Histogramm Residuen PM-Emission_eff._tranf.- Gesamtmasse_tranf.	77
<b>Abbildung 6-37:</b> Regressionsgerade PM-Emission_eff._tranf.- Gesamtmasse_tranf. (GM_t)	78
<b>Abbildung 6-38:</b> Histogramm Residuen PM-Emission_eff._tranf.- Zuglänge_tranf.	79
<b>Abbildung 6-39:</b> Regressionsgerade PM-Emission_eff._tranf.- Zuglänge_tranf. (ZL_t)	79
<b>Abbildung 6-40:</b> Histogramm Residuen PM-Emission_eff._tranf. – Waggonanzahl_tranf.	80
<b>Abbildung 6-41:</b> Regressionsgerade PM-Emission_eff._tranf.- Wagenanzahl_tranf. (WA_t)	80
<b>Abbildung 8-1:</b> Beispiel Histogramm [16]	95
<b>Abbildung 8-2:</b> Histogramm klassiert [16]	96
<b>Abbildung 8-3:</b> Empirische Verteilungsfunktion [16]	96
<b>Abbildung 8-4:</b> Schiefe und Kurtosis [18]	98
<b>Abbildung 8-5:</b> Box-Whisker Plot Beschreibung [17]	98
<b>Abbildung 8-6:</b> Box-Whisker Plot [16]	99
<b>Abbildung 8-7:</b> QQ-Plot [17]	99
<b>Abbildung 8-8:</b> Dichtefunktion mit unterschiedlichen Konfidenzintervallen [17]	102
<b>Abbildung 8-9:</b> Log-Normalverteilung [18]	102
<b>Abbildung 8-10:</b> Badewannenkurve [18]	103
<b>Abbildung 8-11:</b> Regressionsgerade und Varianzaufspaltung [17]	104
<b>Abbildung 8-12:</b> Rechteck- Dreieckverteilung [21]	107
<b>Abbildung 8-13:</b> Gauß'sche Fehlerfortpflanzung [21]	108
<b>Abbildung 8-14:</b> Box-Whisker Plot PM-Emission_eff._Non-Exhaust	109
<b>Abbildung 8-15:</b> Histogramm PM-Emission_eff._Non-Exhaust	110
<b>Abbildung 8-16:</b> QQ-Plot PM-Emission_eff._Non-Exhaust	110
<b>Abbildung 8-17:</b> Box-Whisker Plot PM-Emission_eff._Non-Exhaust_transformiert	110
<b>Abbildung 8-18:</b> Histogramm PM-Emission_eff._Non-Exhaust_transformiert	111
<b>Abbildung 8-19:</b> Box-Whisker Plot Gesamtmasse_Zug	111
<b>Abbildung 8-20:</b> Histogramm Gesamtmasse_Zug	112
<b>Abbildung 8-21:</b> QQ-Plot Gesamtmasse_Zug	112
<b>Abbildung 8-22:</b> Box-Whisker Plot Gesamtmasse_Zug_transformiert	112

<b>Abbildung 8-23:</b> Histogramm Gesamtmasse_Zug_transformiert.....	113
<b>Abbildung 8-24:</b> Box-Whisker Plot Zuglänge.....	113
<b>Abbildung 8-25:</b> Histogramm Zuglänge.....	114
<b>Abbildung 8-26:</b> QQ-Plot Zuglänge.....	114
<b>Abbildung 8-27:</b> Box-Whisker Plot Zuglänge_transformiert.....	114
<b>Abbildung 8-28:</b> Histogramm Zuglänge_transformiert.....	115
<b>Abbildung 8-29:</b> Box-Whisker Plot Wagenanzahl.....	115
<b>Abbildung 8-30:</b> Histogramm Wagenanzahl.....	116
<b>Abbildung 8-31:</b> QQ-Plot Wagenanzahl.....	116
<b>Abbildung 8-32:</b> Box-Whisker Plot Wagenanzahl_transformiert.....	116
<b>Abbildung 8-33:</b> Histogramm Wagenanzahl_transformiert.....	117

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2-1:</b> Zusammenhang verschiedener Einflussgrößen [4].....	6
<b>Tabelle 2-2:</b> PM10-Emissionen [14].....	23
<b>Tabelle 2-3:</b> Analyse Staubemissionen [14].....	24
<b>Tabelle 2-4:</b> PM10 und Eisen Konzentration [14].....	24
<b>Tabelle 2-5:</b> PM-Emissionen Schienennetz Schweiz [8].....	26
<b>Tabelle 2-6:</b> PM-Anteile Eisen, Kupfer [8].....	27
<b>Tabelle 2-7:</b> PM-Emissionen im Tunnel und außerhalb [15].....	27
<b>Tabelle 2-8:</b> Zusammensetzung der PM-Emissionen [15].....	28
<b>Tabelle 6-1:</b> Berechnung der Hintergrundkonzentration.....	47
<b>Tabelle 6-2:</b> Wochenwerte; Partikelkonzentration_eff._gesamt– Zuganzahl – Wagenanzahl – Zuglänge – Gesamtmasse_Zug.....	50
<b>Tabelle 6-3:</b> Zusammenfassung PM-Emissionsfaktoren_eff._Non-Exhaust.....	69
<b>Tabelle 6-4:</b> Zusammenfassung statistische Auswertung PM-Emissionsfaktoren_eff._Non- Exhaust in g/km.....	69
<b>Tabelle 6-5:</b> Ermittlung der Steigung.....	74
<b>Tabelle 6-6:</b> Übersicht über die statistischen Kennwerte PM-Emission_eff._Non-Exhaust ..	76
<b>Tabelle 6-7:</b> Korrelationskoeffizienten zwischen den Variablen.....	76
<b>Tabelle 6-8:</b> Ergebnis Regression PM-Emission_eff._transf. – Gesamtmasse_transf.....	77
<b>Tabelle 6-9:</b> Ergebnis Regression PM-Emission_eff._transf. – Zuglänge_transf.....	78
<b>Tabelle 6-10:</b> Ergebnis Regression PM-Emission_eff._transf. – Wagenanzahl_transf.....	80
<b>Tabelle 8-1:</b> PM-Emission_eff._Non-Exhaust.....	109
<b>Tabelle 8-2:</b> Gesamtmasse_Zug.....	111

---

<b>Tabelle 8-3:</b> Zuglänge .....	113
<b>Tabelle 8-4:</b> Waggonanzahl.....	115

## Literatur

- [1] Umweltauswirkungen des Verkehrs, Skript, Prof. Sturm; Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2016
- [2] Endbericht FE 84.0525/2016 „Relevanz von Nicht-Abgas Partikelemissionen“; Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Brüderstraße 53, 51427 Bergisch Gladbach; erstellt von Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Mohrenstraße 14, 01445 Radebeul, 22.12.2017
- [3] Endbericht Berechnung der KFZ-bedingten Feinstaubemissionen infolge Aufwirbelung und Abrieb für den Emissionskataster Sachsen, Arbeitspakete 1 und 2; Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Zur Wetterwarte 10, 01109 Dresden, erstellt von Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Mohrenstraße 14, 01445 Radebeul; November 2004
- [4] Schwebestaub in Österreich, Fachgrundlagen für eine kohärente österreichische Strategie zur Verminderung der Schwebestaubbelastung; Umweltbundesamt, Spittelauer Lände 5, 1090 Wien/Österreich, Bericht BE-277, Februar 2006
- [5] <https://www.lenntech.com/periodic/elements/be.htm> Zugriffsdatum: 06.08.2018
- [6] [http://www.cumschmidt.de/sm\\_graphit.htm](http://www.cumschmidt.de/sm_graphit.htm) Zugriffsdatum: 06.08.2018
- [7] Lehrbuch Schienenfahrzeugtechnik; Springer Verlag, Joachim Ihme, Februar 2016
- [8] Schlussbericht PM-10 Emissionen Verkehr, Teil Schienenverkehr; Jürg Heldstab, Natascha Kljun, INFRAS; Bern, 10. Jänner 2007
- [9] Dissertation Selbstoptimierende Spurführung für ein neuartiges Schienenfahrzeug, MSc Jens Geisler; Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, 2014
- [10] Spurführung Skript, Prof. Fengler; Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List" Prof. f. Gestaltung v. Bahnanlagen; G 02, Version 01-24
- [11] Bestimmung des Verschleißminderungspotential der ÖBB-Lokomotivflotte, Ein Ansatz zur Optimierung des Bogenlaufverhaltens, H. Tisch, ÖBB Produktion GmbH; R. Schmid, ÖBB Infrastruktur AG; P. Mittermayr, BAMM; D. Salvenmoser, ÖBB Technische Services GmbH; W. Zottl, ÖBB Infrastruktur AG; 2013
- [12] Qualitätskriterien für Fahrdrähte und die Montageprozesse; Infrastruktur und Bau, Fahrdraht, DI Manfred Irsigler, Eurailpress, April 2014, Nr. 4
- [13] Systemuntersuchungen - Fahrleitung, Schleifleiste, Stromabnehmer, Zick-Zack-Lage; Mitteilung der Fa. DTK Deutzer Technische Kohle GmbH im TGZ Wildau; Technische Fachhochschule Wildau, Dipl.-Chem. Manfred Deutzer, Dipl.-Ing. Torsten Richter; 01/1997
- [14] Statusbericht, PM10-Emissionen des Verkehrs, Teil Schienenverkehr;

- Umwelt-Materialien Nr. 144, Luft; BUWAL Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2002, CH
- [15] Ermittlung von aktuellen Emissionsfaktoren für limitierte und nicht limitierte Schadstoffkomponenten des Straßen- und Schienenverkehrs, Lainzer Tunnel – Schienenfahrzeuge; Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH, DI Dr. Peter Sturm Ing. Thomas Nöst; Laboratorium für Umweltanalytik GesmbH, Dipl.-Ing. Reinhard Ellinger, Dr. Christian Hübner, Dr. Michael F. Kalina; November 2014
- [16] Skript Mathematik 3 für Bauingenieure, Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie; a.o. Prof. i.R. Peter Berglez, Ass.Prof. Reinhard Brandner, Univ.Prof. Martin Fellendorf, Wintersemester 2017/2018, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, TU Graz
- [17] Skript Statistik Infrastruktur; Prof. Martin Fellendorf, DI Michael Cik; Sommersemester 2018, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, TU Graz
- [18] <https://www.statistik-nachhilfe.de/ratgeber/statistik/deskriptive-statistik/masszahlen/parameter-der-form/schiefe>  
Zugriffsdatum: 14.08.2018
- [19] <https://welt-der-bwl.de/QQ-Plot> Zugriffsdatum 14.08.2018
- [20] [http://methodenlehre.sowi.uni-mainz.de/download/Lehre/WS2008\\_2009/StatistikI/UE\\_2008\\_12\\_11.pdf](http://methodenlehre.sowi.uni-mainz.de/download/Lehre/WS2008_2009/StatistikI/UE_2008_12_11.pdf)  
Zugriffsdatum: 16.08.2015
- [21] Laborübung Wärmetechnik (LV-Nr. 307027) Übung 1; Institut für Wärmetechnik, TU Graz; DI Hannes Gerhardter, SS 2018
- [22] <https://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-5033/3.pdf> Zugriffsdatum: 21.08.2018
- [23] Leitfäden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst Nr. 6, Meteorologische Bodenmesstechnik; RDir a.D. Hans Löffler, 3. Auflage, Offenbach am Main, 2012
- [24] <http://www.digitel-ag.com/de/wp-content/uploads/Prospekt-DHA-80-2012-DE.pdf>  
Zugriffsdatum: 22.08.2018
- [25] [https://www-app.uni-regensburg.de/Fakultaeten/CHP/Analytische\\_Chemie/web/dateien/duerkop/AAS.pdf](https://www-app.uni-regensburg.de/Fakultaeten/CHP/Analytische_Chemie/web/dateien/duerkop/AAS.pdf)  
Zugriffsdatum: 23.08.2018
- [26] Dissertation Entwicklung eines Simulationsmodells zur Ermittlung von Energieverbrauch und Emissionen auf Verkehrsnetzwerken; Dipl.-Ing. Martin Dippold; TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, April 2016
- [27] <https://infrastruktur.oebb.at/de/geschaeftpartner/schienenetz/dokumente-und-daten/netzkarten/karte-oebb-netz.pdf> Zugriffsdatum: 04.03.2019

- [28] [https://www.geoland.at/webgisviewer/geoland/map/Geoland\\_View/Geoland](https://www.geoland.at/webgisviewer/geoland/map/Geoland_View/Geoland)  
Zugriffsdatum: 22.08.2018
- [29] TEOM Operating Manual, Series 1400a; Rupprecht & Patashnick Co., Inc. 25 Corporate Circle, Albany, NY 12203 USA; Mai 1996, Revision B
- [30] Bericht Emissionsmodell RECEM, Version 1.0; Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2013
- [31] <https://www.vdi-nachrichten.com/mediaviewer/show/338607/338695>  
Zugriffsdatum 01.03.2019
- [32] Endbericht Nr. Lu-08/07 „AQUELLA“ Steiermark, Bestimmung von Immissionsbeiträgen in Feinstaubproben; H. Bauer, I. Marr, A. Kasper-Giebl, A. Limbeck, A. Caseiro, M. Handler, N. Jankowski, B. Klatzer, P. Kotianova, P. Pouresmaeil, Ch. Schmidl, M. Sageder, H. Puxbaum; Institut für Chemische Technologien und Analytik, Technische Universität Wien, 17.08.2007



## 8 Anhang

Nachfolgend werden die statistischen Grundlagen, welche für die Auswertung verwendet wurden, erklärt. Außerdem erfolgt in diesem Kapitel noch eine genaue Beschreibung der Überprüfung der Daten auf Normalverteilung und der angewandten Adaptionen.

### 8.1 Statistische Grundlagen

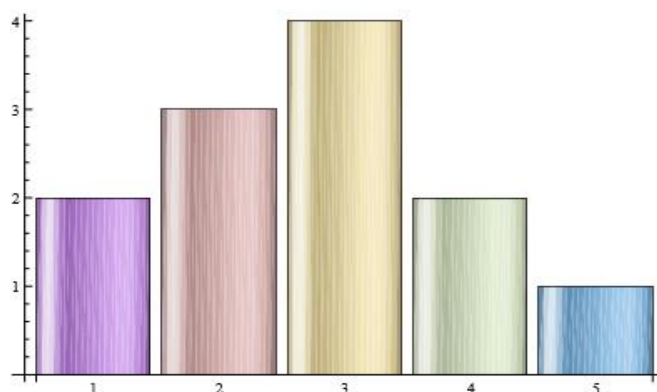
Nachfolgend wird auf die wichtigsten statistischen Analysemethoden und Kennzahlen eingegangen.

Generell hat die Statistik die Aufgabe, gemessene bzw. vorhandene Daten aufzubereiten, zu analysieren, zu interpretieren sowie graphisch aussagekräftig darzustellen. Man unterteilt die Statistik in die deskriptive (Informationsaufbereitung mittels Kenngrößen und Darstellungen), explorative (Herstellen von Zusammenhängen, Hypothesen aufstellen) und die induktive Statistik (Aufstellen von wahrscheinlichkeitsbasierten Modellen und Differenzierung zwischen systematischen und stochastischen Effekten).

Statistische Methoden dienen hauptsächlich dazu, Entscheidungen, Beurteilungen, Schlussfolgerungen oder Zusammenhänge bestmöglich abzusichern. Dazu wird aus einer Grundgesamtheit (z.B.: produzierte Stück eines Arbeitstages) eine repräsentative Stichprobe entnommen und auf bestimmte Eigenschaften untersucht. Merkmalsträger bzw. Versuchseinheiten definieren die Grundgesamtheit.

Man unterscheidet grundsätzlich quantitative, ordinale und qualitative Merkmale. Für die Auswertung ist vor allem die Merkmalsverteilung in der Grundgesamtheit respektive in der ausgewählten Stichprobe von Bedeutung. Die Anzahl der Merkmalsausprägung pro Stichprobe wird auch absolute Häufigkeit einer Merkmalsausprägung der Stichprobe bezeichnet. Wenn die absolute Häufigkeit auf die Stichprobenanzahl bezogen wird, ergibt sich die relative Häufigkeit.

Um diese Informationen übersichtlich graphisch darzustellen, werden meist Histogramme (Häufigkeitsverteilung) eingesetzt wie in Abbildung 8-1 zu sehen. Die Abszisse repräsentiert die Merkmalsausprägungen, die Ordinate die absolute oder relative Häufigkeit. [16]

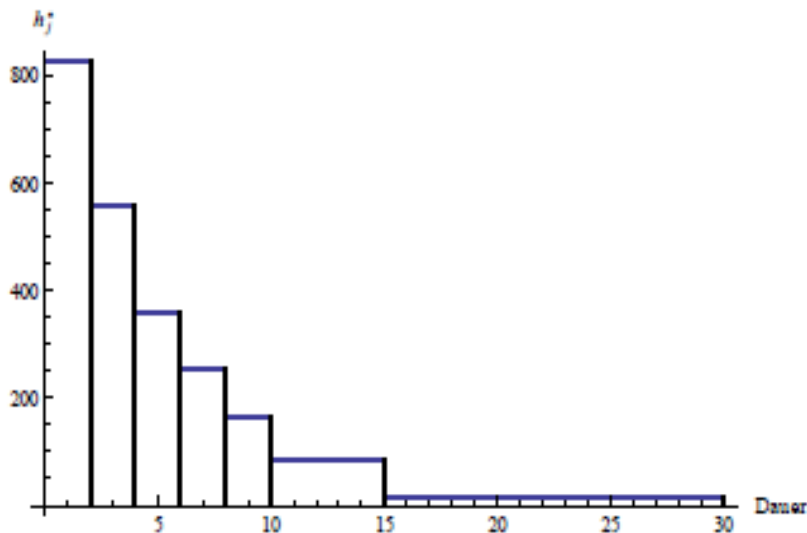


**Abbildung 8-1:** Beispiel Histogramm [16]

In weiterer Folge können noch die kumulierten absoluten und relativen Häufigkeiten durch Summierung der jeweiligen Häufigkeiten ermittelt werden.

Bei einer großen Anzahl an Ausprägungen eines Merkmals, werden die unterschiedlichen Ausprägungen in Klassen eingeteilt, um die Übersichtlichkeit besser zu gewährleisten. Der Wertebereich (Intervall) eines Merkmals  $X$  besteht dabei aus einer reellen Zahlenfolge. Der Wertebereich von  $X$  wird so durch Klassen (nicht überdeckend) abgebildet. Die obere Klassengrenze gehört bereits der nächsten Klasse an.

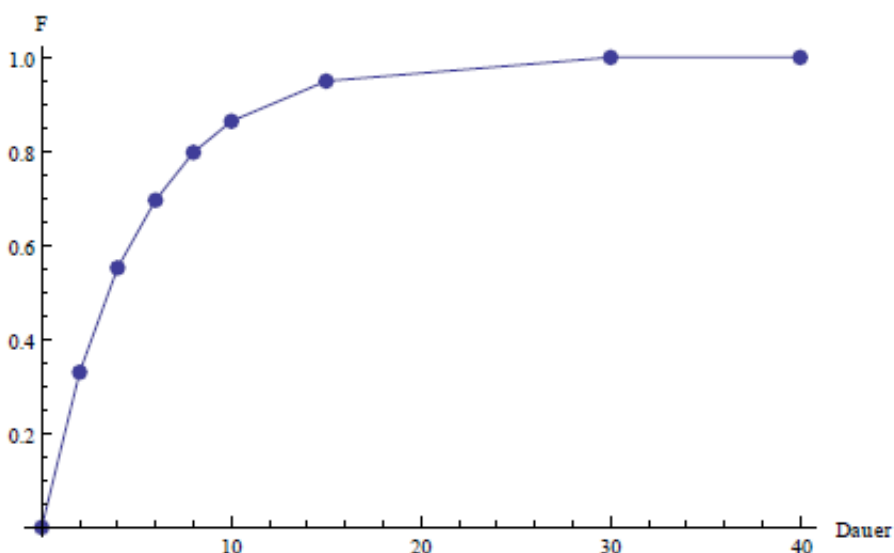
Eine klassierte Häufigkeitsverteilung (Histogramm) ist in Abbildung 8-2 dargestellt. Jedes Rechteck repräsentiert eine Klasse mit entsprechender Klassenbreite (muss gewählt werden) und Klassenhöhe, je nach Häufigkeit.



**Abbildung 8-2:** Histogramm klassiert [16]

Weiters soll damit auch noch das p-Quantil kurz erklärt werden. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen 25% Quantil (auch 1. Quartil genannt) und 75% Quantil (3. Quartil). Es repräsentiert den Anteil einer Merkmalsausprägung, der kleiner als 25% bzw. 75% (100% \* 0,75) der gesamten Ausprägung ist.

Durch Verbinden der Stützpunkte der Klassen nach aufsteigender Sortierung der Werte dividiert durch die Anzahl der gesamten Werte der Stichprobe mittels Strecken, kann die empirische Verteilungsfunktion gezeichnet werden (Abbildung 8-3).



**Abbildung 8-3:** Empirische Verteilungsfunktion [16]

### 8.1.1 Statistische Kennwerte

Um Differenzen zwischen den zu untersuchenden Daten besser festzustellen, werden sogenannte Streu-, Lage- und Formparameter verwendet.

So charakterisiert ein Lageparameter, in welchem Bereich eine Anhäufung einer Merkmalsausprägung auftritt, Variationen von Ausprägungen werden durch Streuparameter erfasst und Formparameter beschreiben die geometrische Form von Ausprägungen.

#### Lageparameter

Es werden nachfolgend die wichtigsten Lageparameter erläutert.

#### **Mittelwert**

Die Berechnung erfolgt durch Aufsummierung aller Merkmalsausprägungen dividiert durch die Anzahl der Elemente. Der Mittelwert kann nur bei quantitativen Merkmalen eingesetzt werden und kann interpretiert werden als jene Zahl, bei dem die Summe der Abweichungen der einzelnen Werte gleich 0 und die Summe der quadrierten Abweichungen minimal ist.

#### **Zentralwert (Median)**

Die Merkmalsausprägungen werden zuerst der Größe nach aufsteigend sortiert und anschließend ist der mittlere Wert bei einer ungeraden Anzahl von Werten der Median. Wenn eine gerade Zahl von Werten vorliegt, wird der Median aus dem arithmetischen Mittel der mittleren Werte berechnet. Der Median ist gegenüber Ausreißern der Merkmalsausprägungen robust, im Gegensatz zum Mittelwert. Wenn eine vollkommen symmetrische Verteilung um den Mittelwert vorliegt, ist der Median ident mit dem Mittelwert.

#### **Modalwert (Modus)**

Dieser Wert stellt den häufigsten vorkommenden Wert der Daten (Urliste) dar.

#### Streuparameter

Es werden einige Streuparameter erklärt.

#### **Empirische Varianz**

Diese wird bei der Auswertung von Daten sehr häufig eingesetzt und entspricht der Summe der quadrierten Deviationen der einzelnen Messwerte einer Messung vom Mittelwert der Messwerte (Streuung um den Mittelwert). Meist wird aber die empirische Standardabweichung  $\sigma$  angegeben und diese ist die Wurzel (positiver Wert) aus der Varianz. Mit dem Ausdruck empirisch ist der Verweis auf eine Stichprobenkennzahl gekennzeichnet.

#### **Spannweite**

Die Spannweite ist die Differenz zwischen minimalem und maximalem Wert einer bestimmten Reihe an Messwerten. Robustheit gegenüber Ausreißern und steigender Informationsverlust bei gesteigertem Stichprobeumfang sind die charakteristischen Merkmale.

#### Formparameter

Ein Formparameter ist die sogenannte Schiefe („Skewness“; Gl.8-1) einer Verteilung, sie beschreibt, ob eine symmetrische (Schiefe = 0) oder eher links- (Schiefe negativ) oder rechtsschiefe (Schiefe positiv) Verteilung (Abbildung 8-4 rechts) der Daten vorliegt. Zudem wird auch noch die Kurtosis (Wölbung, 0 = Gauß Form) einer Häufigkeitsverteilung angegeben, um die Flach- (Kurtosis positiv) bzw. Steilheit (Kurtosis negativ, Abbildung 8-4 links) zu charakterisieren (Gl.8-2).

$$\text{Schiefe} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \text{ mit Standardfehler } \sqrt{6/n} \quad (\text{Gl.8-1})$$

$$\text{Kurtosis} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 - 3 \text{ mit Standardfehler } \sqrt{24/n} \quad (\text{Gl.8-2})$$

Anschließend werden Schiefe und Kurtosis noch durch den Standardfehler dividiert und dieser Wert sollte kleiner als +2 sein, um eine Normalverteilung voraussetzen zu können.

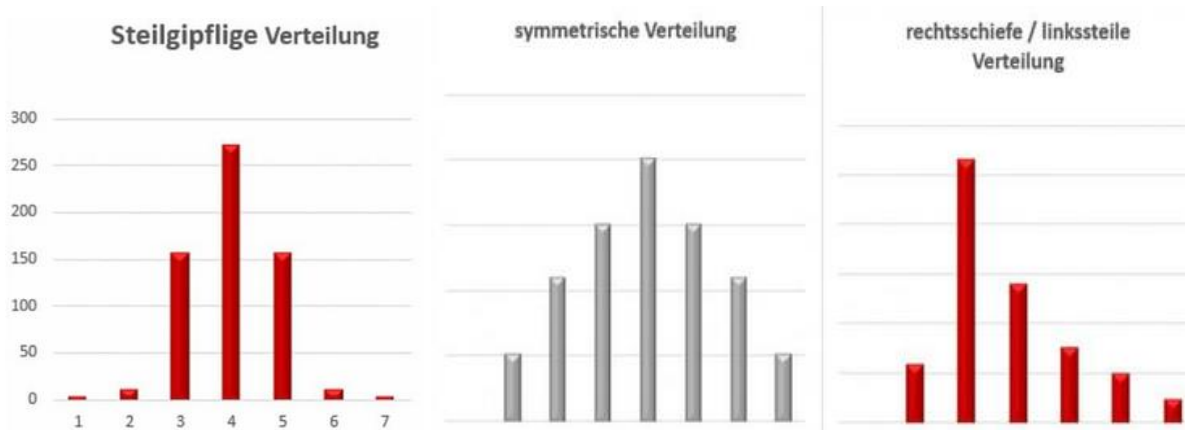


Abbildung 8-4: Schiefe und Kurtosis [18]

### 8.1.2 Graphische Darstellungen für Verteilungen

Es können auch Verteilungsannahmen zusätzlich zu den statistischen Kenngrößen über graphische Darstellungen getroffen werden und daraus etwaige Ansätze für Verteilungsmodelle abgeleitet werden. Es werden nachstehend die wichtigsten und auch in dieser Arbeit verwendeten Darstellungen vorgestellt.

#### Box Plot (Box-Whisker Diagramm)

Der Box-Whisker Plot ist ein oft genutztes Diagramm, um die statistische Verteilung der Daten (Messwerte einer Messreihe) übersichtlich darzustellen. Grundsätzlich werden Lage- und Streuparameter in einem Diagramm gemeinsam dargestellt. Dadurch kann eine erste Interpretation der Daten und deren Verteilung erfolgen. Der Plot beinhaltet die Extremwerte Maximum und Minimum, den Median, 25% und 75% Quantile und optional den Mittelwert der Datenreihe (nicht dargestellt). Ausreißer werden separat markiert. Innerhalb des Rechtecks, begrenzt durch das 1. und 3. Quartil (Interquartilsabstand), befinden sich 50% aller Merkmalsausprägungen (Abbildung 8-5). Werte außerhalb der Whisker repräsentieren Ausreißer.

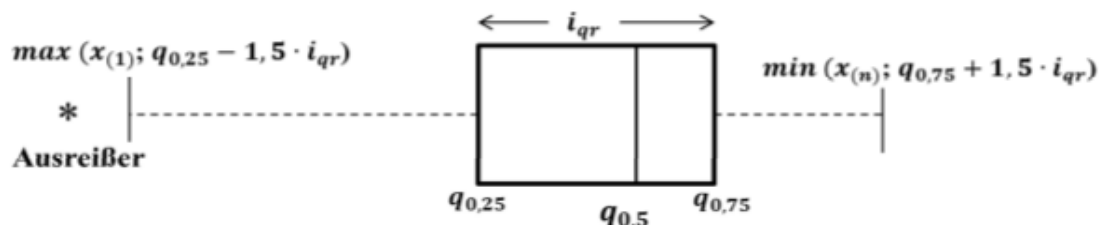
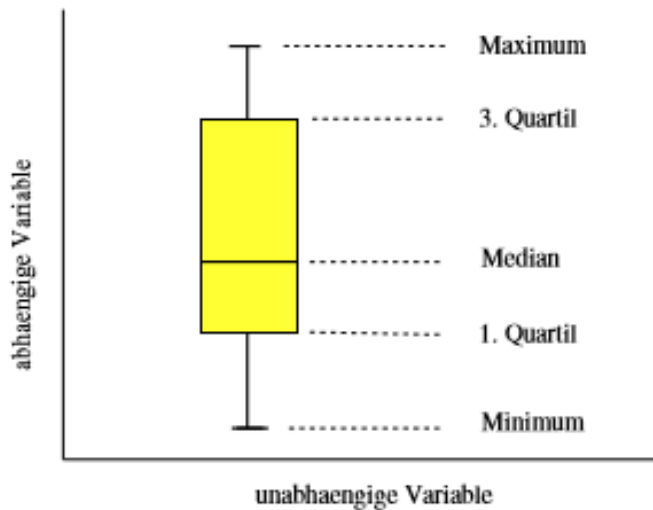


Abbildung 8-5: Box-Whisker Plot Beschreibung [17]

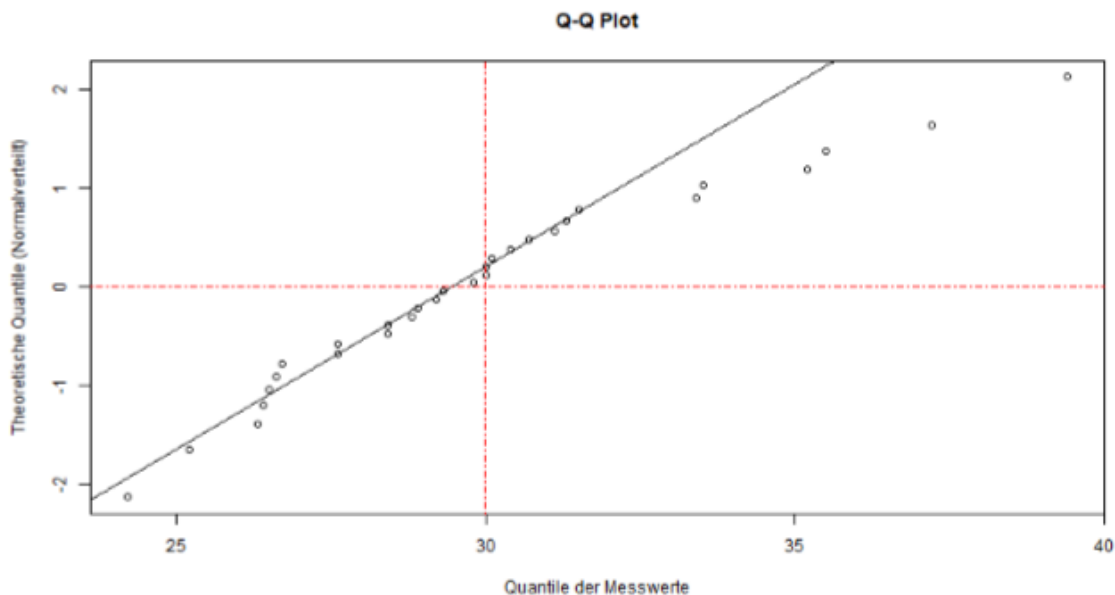
Mithilfe des Box-Whisker Plots können zudem durch die Lage des Medians erste Aussagen hinsichtlich der Schiefe einer Verteilung getroffen werden (links- oder rechtsschief) und durch die Kurtosis Abschätzungen bezüglich der Verteilungscharakteristik (eng, kompakt oder breit) angestellt werden. Abbildung 8-6 stellt ein Beispiel eines Box-Whisker Plots dar. [16] [17]



**Abbildung 8-6:** Box-Whisker Plot [16]

### QQ-Plot

Dieser dient dazu, um die Quantile von 2 unterschiedlichen Verteilungen graphisch zu visualisieren, um zu überprüfen, ob eine Normalverteilung (Verteilung mit Symmetrie um den Mittelwert, Gauß'sche Glockenkurve) der Messwerte vorliegt. Dazu werden auf der Abszisse die Quantile der gemessenen Werte (empirisch) und auf der Ordinate die theoretischen Quantile (=der Standardnormalverteilung = Normalverteilung mit Mittelwert 0 und Standardabweichung sowie Varianz von 1) aufgetragen. Ist eine 45 Grad Diagonale zu erkennen (alle Punkte liegen annähernd auf einer Geraden), liegt eine Normalverteilung vor (Abbildung 8-7). [16] [17] [19]



**Abbildung 8-7:** QQ-Plot [17]

Die theoretischen Quantile werden nach aufsteigender Sortierung der Daten durch die z-Transformation laut Gleichung 8-3 bestimmt.

$$Z = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (\text{Gl.8-3})$$

Die Quantile  $Q_p$  der Messwerte werden nach der Berechnung der Quantilszahlen  $p_i$  (Gl. 8-4) aus der Tabelle für die Standardnormalverteilung ermittelt. [20]

$$p_i = \frac{i-0,5}{n} \quad (\text{Gl.8-4})$$

### 8.1.3 Testprozeduren zur Überprüfung/Beurteilung von Verteilungsannahmen

Um quantitativ zu überprüfen, ob eine gewisse Verteilung (Normal, Log-Normal, Weibull) vorliegt bzw. Annahmen darüber zu verifizieren, existieren sogenannte statistische Testverfahren (Anpassungstests). Um ein Maximum an Objektivität bei der Beurteilung der Verteilung zu gewährleisten, wird diese quantitative Methode mit den qualitativen Methoden (Median, Mittelwert, Schiefe, Kurtosis, QQ-Plot) für eine endgültige Beurteilung kombiniert. Dazu werden meist Testverfahren verwendet, welche weder parameter- noch verteilungsbehaftet sind. Das Ziel ist, das vermutete bzw. vorausgesetzte Modell zu bestätigen, daher muss der Anpassungstest auch eine gewisse Schärfe aufweisen. Nachteilig anzumerken ist, dass diese Tests meist eine gewisse Sensitivität bezüglich Ausreißer und großer Kurtosis besitzen sowie auf redundant vorkommende Werte in der Stichprobe. Grundsätzlich existieren eine Vielzahl an Anpassungstests wie Chi-Quadrat-Test, KS-Test usw., jedoch wird in dieser Arbeit nur der Shapiro-Wilk-Test näher erläutert, welcher für die Überprüfung der Daten auf Normalverteilung speziell entwickelt wurde und dadurch eine entsprechende Schärfe aufweist. Für die Überprüfung auf Normalverteilung wird berechnet, ob eine Nullhypothese einer Stichprobe (angenommen normalverteilt) bei einem bestimmten Signifikanzniveau abgelehnt wird oder nicht. Wenn eine Ablehnung aus dem Test resultiert, sind weitere Untersuchungen (Testverfahren) durchzuführen (Formparameter betrachten). Praktisch werden dazu 2 Varianzen miteinander verglichen. Als sogenannte Teststatistik wird eine durch lineare Regression des QQ-Plots berechnete Varianz dividiert durch die Stichprobenvarianz verwendet. Die Berechnungsschritte sind kurz erklärt.

- Bestimmung der Ordnungsstatistik durch aufsteigende Sortierung der einzelnen Werte der Stichprobe → Zuordnung eines Ranges zu jedem Wert → Ordnungsstatistik mit Stichprobenwerte  $x_{(i)}$
- Bestimmung der Zahlenpaare  $k$  ( $k = n/2$  bei gerader Werteanzahl;  $k = (n-1)/2$  bei ungerader Werteanzahl der Stichprobe)
- Berechnung der Varianz der linearen Regression  $b$  aus QQ-Plot mit den Gewichtungsfaktoren  $a_i$  (eruiert aus Tabellen der Ordnungsstatistik der Normalverteilung (Gl.8-5))

$$b = \sum_{i=1}^k a_i * (x_n - x_i) \quad (\text{Gl.8-5})$$

- Berechnung der Stichprobenvarianz mit der Ordnungsstatistik  $x_i$  und dem arithmetischen Mittel  $\bar{x}$ .(Gl.8-6)

$$s^2 = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Gl.8-6})$$

- Ermittlung der Teststatistik  $W$  (Gl.8-7)

$$W = \frac{b^2}{(n-1)*s^2} \quad (\text{Gl.8-7})$$

Durch Vergleich der ermittelten Teststatistik  $W$  mit der kritischen  $W_{\text{kritisch}}$  aus Tabellenwerken bei einem definierten Signifikanzniveau, wird die Hypothese  $H_0$  (= Normalverteilung liegt vor) abgelehnt, wenn  $W$  kleiner  $W_{\text{kritisch}}$  ist. Daraus folgt, dass keine Normalverteilung der Daten vorliegt. Meist wird aber auch der  $p$  (probability)-Wert, welcher von Softwareprodukten ebenfalls errechnet wird, für die Beurteilung herangezogen. Wenn also der berechnete  $p$ -Wert größer als das Signifikanzniveau (0,05) ist, liegt sehr wahrscheinlich eine Normalverteilung vor ( $H_0$  wird nicht verworfen). Folglich ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Grundgesamtheit normalverteilt ist, umso größer, je größer der  $p$ -Wert ist. [16] [17]

#### 8.1.4 Verteilungen

In der Statistik unterscheidet man generell zwischen diskreten und stetigen Verteilungen. Die bekanntesten Vertreter von diskreten Verteilungen sind die Binomial- und die Poissonverteilung, da die Merkmalsausprägungen der Zufallsvariablen eine finite Menge sind. In dieser Arbeit tritt diese Art von Verteilung jedoch nicht auf und daher wird diese nicht näher erläutert. Die stetigen Verteilungen kommen in natur- und ingenieurwissenschaftlichen Bereichen sehr häufig vor, da die Merkmalsausprägungen der Zufallsvariablen beliebig viele (infinite) Datenwerte in einem definierten Intervall einnehmen können.

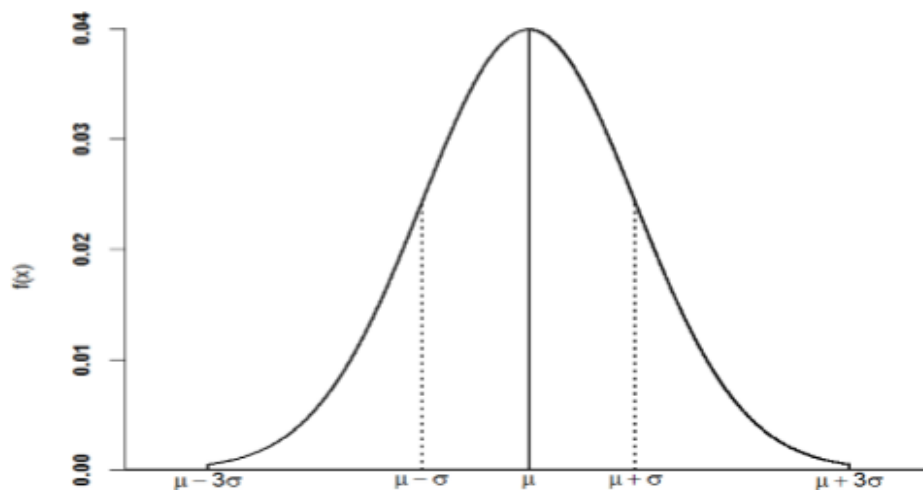
Die häufigste und bedeutendste Verteilung ist die **Normalverteilung** (Gauß'sche Glockenkurve  $f(y)$ , Dichtefunktion, Gl.8-8). Hierbei sind alle Werte symmetrisch um den Mittelwert mit einer bestimmten Standardabweichung angeordnet. Die Dichtefunktion wird durch Klassenbildung (Abszisse) und anschließendem auftragen der Häufigkeit einer Klasse (Ordinate) gebildet.

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2*\pi*s^2}} * e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2*s^2}} \quad (\text{Gl.8-8})$$

Durch aufintegrieren der Dichtefunktion erhält man die Verteilungsfunktion, welche die Wahrscheinlichkeit definiert, dass eine Zufallsvariable  $X$  kleiner gleich einem Wert auf der Ordinate ist.

Ein Spezialfall der Normalverteilung ist die Standardnormalverteilung, welche den Bezug für die Normalverteilung darstellt, folglich kann jede Normalverteilung in eine standardisierte Form transformiert werden (siehe dazu QQ Plot, oder mittels Tabellenwerken ermittelbar). Der Mittelwert ist dabei null und die Standardabweichung sowie die Varianz sind 1.

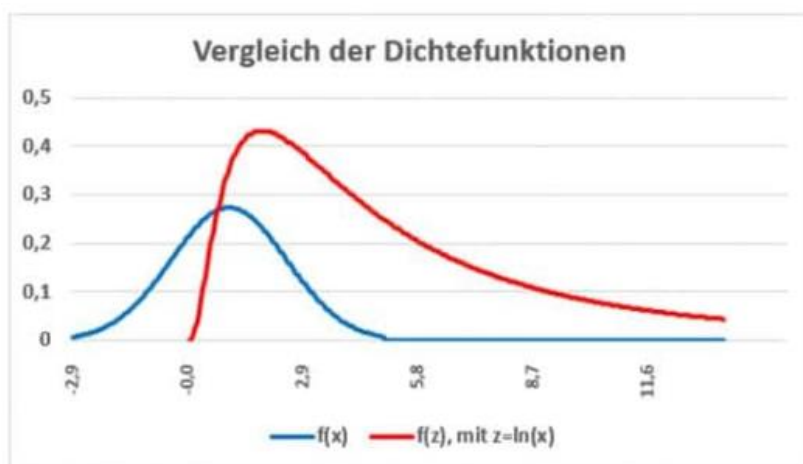
Wenn die Normalverteilung einer Stichprobe ermittelt wurde, kann daraus ebenfalls das Konfidenzintervall (Vertrauensintervall) bestimmt werden. Innerhalb dieses Intervalls befindet sich mit einer vordefinierten Wahrscheinlichkeit der zu bestimmende Parameter der Grundgesamtheit.



**Abbildung 8-8:** Dichtefunktion mit unterschiedlichen Konfidenzintervallen [17]

In Abbildung 8-8 ist die Dichtefunktion mit 2 Konfidenzintervallen (einfache und dreifache Standardabweichung) sowie dem Mittelwert dargestellt. Meist werden Intervalle mit der einfachen (68,3%), zweifachen (95%) und dreifachen (99,7%) Standardabweichung festgelegt. Die dreifache Standardabweichung ist das höchste Konfidenzniveau und sie besagt, dass der wahre Wert mit 99,7% Wahrscheinlichkeit innerhalb dieses Intervalls liegt.

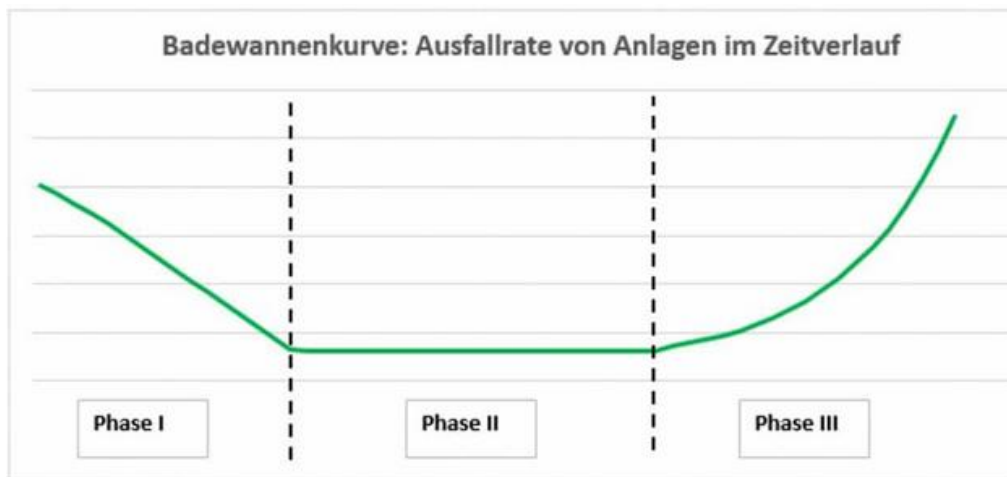
Weitere mögliche Verteilungen sind die **logarithmische Normalverteilung** mit Zufallszahlen, welche logarithmisch transformiert wurden. Charakteristisch für diese Verteilung ist, dass zu dieser analog zur Normalverteilung (Abbildung 8-9, blaue Kurve), auch keine exakte Lösung vorliegt und diese eine rechtsschiefe Verteilung (größere Häufigkeiten im linken Bereich) repräsentiert (siehe Abbildung 8-9, rote Kurve). [16] [17] [18]



**Abbildung 8-9:** Log-Normalverteilung [18]

Die dritte noch kurz zu erwähnende Verteilungsart ist die **Weibullverteilung**. Ihre Grundannahme ist, dass das Versagen des Bauteils mit der geringsten Festigkeit zum gesamten Systemversagen führt. Die Funktion der Verteilung besitzt eine geschlossene Lösung, jedoch müssen die Parameter iterativ ermittelt werden.





**Abbildung 8-10:** Badewannenkurve [18]

In oberer Abbildung 8-10 ist die Badewannenkurve (Ausfälle (Ordinate) über der Zeit (Abszisse) aufgetragen) ersichtlich, da mithilfe der Weibullverteilung in Abhängigkeit des Formparameters verschiedene Lebensdauerabschnitte eines Bauteils beschrieben werden können. Phase 1 kennzeichnet Frühausfälle, Phase 2 (Ausfälle durch regulären Betrieb) und Phase 3 beschreibt Verschleiß- und Ermüdungsausfälle. Auf die einzelnen Formeln sei auf Fachliteratur verwiesen. [16] [17] [18]

### 8.1.5 Regressionsanalyse

Nachfolgend werden die Zusammenhänge der einfachen linearen, multiplen, univariaten und multivariaten Regression näher erklärt.

#### Einfache lineare (univariate) Regression

Diese Art von Regression dient dazu, einen linearen Zusammenhang zwischen einer unabhängigen Variablen  $x$  (exogen) und einer abhängigen (endogen) Variablen  $y$  herzustellen. Um diesen Zusammenhang mathematisch auszudrücken, wird eine Geradengleichung aus den vorhandenen Datenpunkten aufgestellt, um die abhängige Variable durch die unabhängige Variable zu berechnen (Gl.8-9). Beispielsweise können dadurch Korrelationen zwischen Messdaten und Simulationsergebnissen ermittelt werden.

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * x_i \quad (\text{Gl.8-9})$$

In obiger Gleichung (Schätzung der Geradengleichung, Abbildung 8-11) sind die ab- und unabhängigen Variablen mit den dazugehörigen Regressionskoeffizienten dargestellt.  $\beta_0$  definiert jenen Wert, welche die abhängige Variable  $y$  annimmt, wenn die unabhängige Variable  $x$  Null ist.  $\beta_1$  repräsentiert die Steigung der Regressionsgeraden und diese ist konstant bei der dieser Art von Regression. Wenn die Steigung größer ist, ist auch die Korrelation zwischen den beiden Variablen stärker.

Um die Parameter (Regressionskoeffizienten) zu ermitteln bzw. zu schätzen, werden 2 gängige Verfahren angewandt. Einerseits das **OLS (Ordinary Least Square)** Verfahren. Dabei wird jene Gerade aus den vorhandenen Datenpunkten kalkuliert, deren quadrierte Fehlersumme (Residuum, Sum of Squared Errors = SSE) minimal ist (Gl.8-10).

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * x_i))^2 \quad \text{mit den Koeffizienten}$$

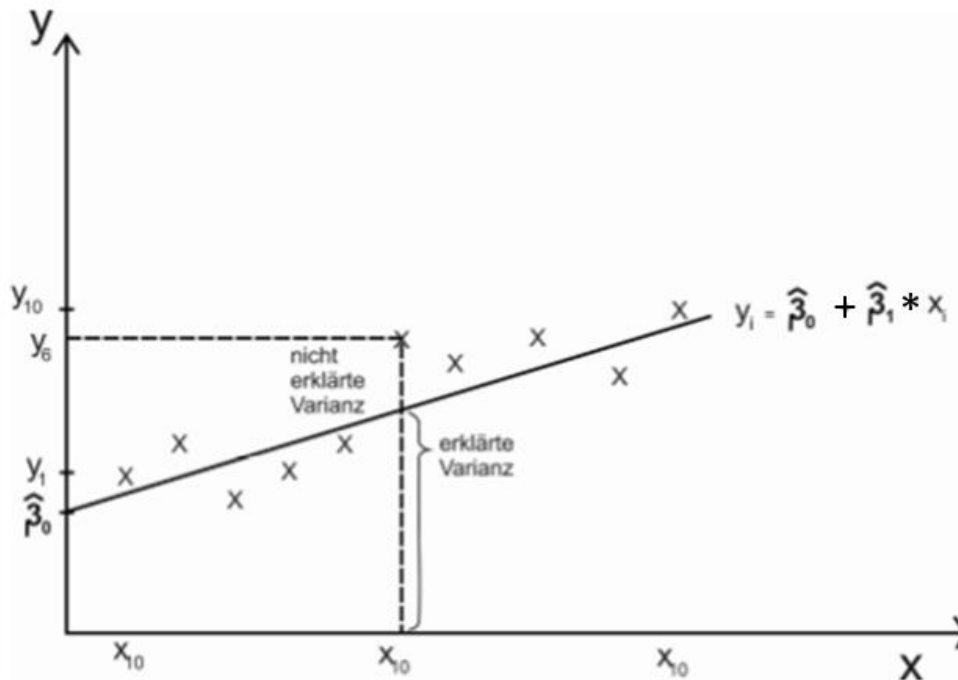
$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 * \bar{x} \quad (\text{Gl.8-10})$$

Um die gesamte Varianz der  $y$ -Werte zu ermitteln, wird noch die Summe der quadrierten Deviationen der Residuen ( $SSR = \text{Residual Sum of Squares}$ ) berechnet (Gl.8-11).

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{Gl.8-11})$$

Die Summe aus Gleichung 8-10 und 8-11 ( $SSY = SSE + SSR$ ) ergibt die gesamte Varianz in den  $y$ -Werten bestehend aus dem erklärten Regressionsanteil und der nicht erklärten Varianz der quadrierten Fehlersumme (Abbildung 8-11).



**Abbildung 8-11:** Regressionsgerade und Varianzaufspaltung [17]

Das zweite Verfahren, es sei zur Vollständigkeit noch erwähnt (**MLE = Maximum Likelihood Estimation**), ist der ersten erklärten Variante sehr ähnlich, jedoch werden für die Schätzwerte nur jene ausgewählt, für die die Zufallsvariablen der Stichprobe die größte Wahrscheinlichkeit aufweisen. [16] [17] [18]

### Bestimmtheitsmaß

Ein weiteres wichtiges Maß in der Regression ist das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  (Determinationsmaß), da es eine Größe für die Stärke/Aussagekräftigkeit des Zusammenhangs zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen ist (Gl.8-12).

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SSY} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\text{Residuen}}{\text{Gesamtvarianz}} \quad (\text{Gl.8-12})$$

Es wird mit dieser Größe lediglich die Übereinstimmung des Geradenverlaufs zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen (z.B.: Mess- und Simulationswerten) überprüft, jedoch ist keine Aussage über eine kausale Verbindung zwischen ab- und unabhängiger Variable möglich (Güte des Modells nicht verifizierbar). Bei einfacher linearer Regression ist das Bestimmtheitsmaß (Wertebereich 0 bis 1) gleich dem quadrierten Pearson'schen Korrelationskoeffizienten, welcher sich im Wertebereich von -1 bis 1 bewegt (Gl.8-13).

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{Gl.8-13})$$

Ein Wert von -1 bedeutet, dass ein negativer (wenn eine Variable steigt, fällt die andere) und +1 ein positiver Zusammenhang (wenn eine Variable steigt, steigt auch die andere) zwischen  $x$  und  $y$  besteht, wobei Null keine Korrelation zwischen den Variablen  $x$ ,  $y$  darstellt. Bei mehreren ab- und unabhängigen Variablen ist die Berechnung des Korrelationskoeffizienten ebenso möglich, jedoch mit erheblichem Rechenaufwand verbunden (Matrix Schreibweise).

Zudem muss beachtet werden, dass durch eine größere Anzahl an unabhängigen Variablen auch das Bestimmtheitsmaß unabhängig von der Stärke der zusätzlichen unabhängigen Variablen wächst, daher wird in diesen Fällen das adjustierte, bereinigte Bestimmtheitsmaß unter Berücksichtigung der Variablenanzahl  $m$ , verwendet (Gl.8-14). [16] [17] [18]

$$R^2_{\text{korrr}} = 1 - \frac{(n-1)}{(n-m-1)} * (1 - R^2) \quad (\text{Gl.8-14})$$

### **Multiple lineare Regression**

Hierbei werden lineare Zusammenhänge zwischen mehreren unabhängigen Variablen auf eine abhängige Variable untersucht. Jede zusätzliche unabhängige Variable widerspiegelt sich in additiven Termen (Gl.8-15).

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * x_i + \hat{\beta}_2 * z_i \quad (\text{Gl.8-15})$$

Die Regressionskoeffizienten und das Bestimmtheitsmaß werden nach den analogen Prinzipien wie bei der einfachen Regression bestimmt. Es muss aber beachtet werden, dass Interdependenzen zwischen den einzelnen unabhängigen Variablen (Multikollinearität) zu fehlerbehafteten Regressionskoeffizienten führen können. [16] [17] [18]

### **Multivariate Regression**

In dieser Art von Regression werden gleichzeitig mehrere abhängige Variablen auf Korrelationen überprüft, da für jede abhängige Variable eine eigene Gleichung aufgestellt wird. Es ist damit möglich, Übereinstimmungen zwischen dem aufgestellten Regressionsmodell und dem Aufbau des zugrundeliegenden Datensatzes zu eruieren. Dadurch können gewisse Similaritäten sowie Muster im Datensatz gefunden werden. Voraussetzung für die Anwendung sind eine große Stichprobenanzahl und eine gewisse Mindestkorrelation der abhängigen Variablen. Beispiele für deren Anwendung sind meist große Gesundheitsstudien. Abschließend sei noch kurz erwähnt, dass wenn Zusammenhänge (Korrelationen) von mehreren abhängigen und mehreren unabhängigen Variablen untersucht werden, dies als multivariate multiple Regression bezeichnet wird. Der Rechenaufwand ist generell hoch, daher ist die Durchführung solcher Regressionsanalysen nur mehr mit Softwarepaketen möglich. [16] [17] [18]

### **Nichtlineare Regression**

Bei Daten, wo lineare Korrelationen zu keinem sinnvollen Ergebnis führen, wird die nichtlineare Regression angewandt. Die Bestimmung der Kurve (inklusive Regressionskoeffizienten) erfolgt meist durch Iterationen, um eine mathematische Funktion an den vorhandenen Datensatz bestmöglich zu approximieren.

Es können Funktionen mit beliebig hoher Ordnung verwendet werden, jedoch steigt der Rechenaufwand mit höherer Ordnung. [18]

#### **8.1.6 Varianzanalyse (Analysis of Variances, ANOVA)**

Diese Art von Analyse dient dazu, um zu eruieren, ob das gesamte aufgestellte Modell aus der Regressionsanalyse Gültigkeit besitzt. Dazu wird erstens ein F-Test durchgeführt.

## **F-Test**

Zur Überprüfung der Modellsignifikanz wird dazu der empirische F-Wert aus der Regressionsanalyse berechnet (Gl. 8-16) und mit einem Tabellenwert  $F_{\text{krit}}$  für ein bestimmtes Signifikanzniveau (Irrtumswahrscheinlichkeit in der Ergebnisinterpretation) verglichen.

$$F_{\text{emp}} = \frac{(R^2/m)}{\left(\frac{1-R^2}{n-m-1}\right)} \quad (\text{Gl.8-16})$$

Falls der empirische Wert größer als der kritische Wert  $F_{\text{krit}}$  ist, kann von einem signifikanten Modell (kein Zufall des Zusammenhangs  $\rightarrow$  abhängige wird durch unabhängige Variable beeinflusst, widerspiegelt sich auch in Grundgesamtheit) ausgegangen werden. Wenn jedoch die Daten nicht normalverteilt sind, kann auch dieser Test keine Aussage treffen.

### **8.1.7 t-Test**

Mithilfe dieses Tests wird überprüft, ob die Regressionskoeffizienten auch eine gewisse Signifikanz aufweisen. Dazu muss für beide Parameter der empirische t-Wert (Gl.8-17) berechnet und mit dem Tabellenwert  $t_{\text{krit}}$  verglichen werden. Ist der empirische Wert größer, ist die Signifikanz gegeben (Regressionskoeffizienten widerspiegeln sich auch in der Grundgesamtheit).

$$t_{\text{emp}} = \frac{\widehat{\beta}_i}{\text{se}(\widehat{\beta}_i)} = \text{mit } \frac{\widehat{\beta}_i}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2}{n-2} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}} \quad \text{mit } \widehat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{und } \widehat{\beta}_0 = \bar{y} - \widehat{\beta}_1 \cdot \bar{x} \quad (\text{Gl.8-17})$$

Zudem kann auch noch der p-Wert (realisierte Signifikanz; wird ebenfalls bei facheinschlägigen Softwarepaketen ausgegeben; kann auch aus der Standardnormalverteilungstabelle entnommen werden mit  $t_{\text{emp}}$  als Eingangsgröße) betrachtet werden. Wenn dieser geringer ist, als das gesetzte Signifikanzniveau, ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass der Zusammenhang der Variablen der Regression aus der Stichprobe zufällig ist (Variablen haben auch in der Grundgesamtheit Gültigkeit). Diese Überprüfungen setzen aber eine annähernde Normalverteilung der Daten voraus. Mithilfe der Residuen Plots (Residuum = Differenz zwischen geschätztem Datenpunkt der Regressionsgerade  $\widehat{y}_i$  und Datenpunkt  $y_i$ ) können ebenfalls Fehler in der Definition des Regressionsmodells (= zu wenig Einflussgrößen berücksichtigt) erkannt werden, wenn diese nicht normalverteilt sind. [17]

### **8.1.8 Messunsicherheit**

Es werden kurz die elementaren Grundlagen zu dieser umfangreichen und wichtigen Thematik behandelt. Um eine physikalische Größe messtechnisch zu erfassen, muss diese qualitativ und quantitativ erfassbar sein. Der Messvorgang sollte die zu erfassende Größe so gering wie möglich beeinflussen wobei jede Messung mit gewissen Unsicherheiten behaftet ist (der wahre Wert kann nicht erfasst werden, lediglich ein mit Unsicherheiten versehener Schätzwert). Das Messergebnis unter Angabe der Messunsicherheit mit der dazugehörigen Dimension beinhalten den Wertebereich, wo sich der wahre Wert mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (je nach Konfidenzintervall, meist mit 5% Überschreitungswahrscheinlichkeit angegeben) befindet unter Beachtung der gesamten vorliegenden Messkette. Für ein adäquates Messergebnis ist es zudem essentiell, vor der Messung erforderliche sinnvolle Messgenauigkeiten und Messbereiche festzulegen sowie Messbedingungen und entstehende Kosten abzuschätzen. [21]

Grobe Fehler (Ablesefehler, Messgerät beschädigt) müssen zudem generell vermieden werden, da diese nachträglich nicht mehr korrigierbar sind.

In der Messtechnik unterscheidet man 2 verschiedene Messabweichungen (Differenz Messergebnis zu richtigem Wert) wie folgt:

### Systematische Messabweichung

Diese wird des Weiteren unterteilt in eine bekannte und unbekannt systematische Abweichung und diese sind einseitige Abweichungen um den Erwartungswert.

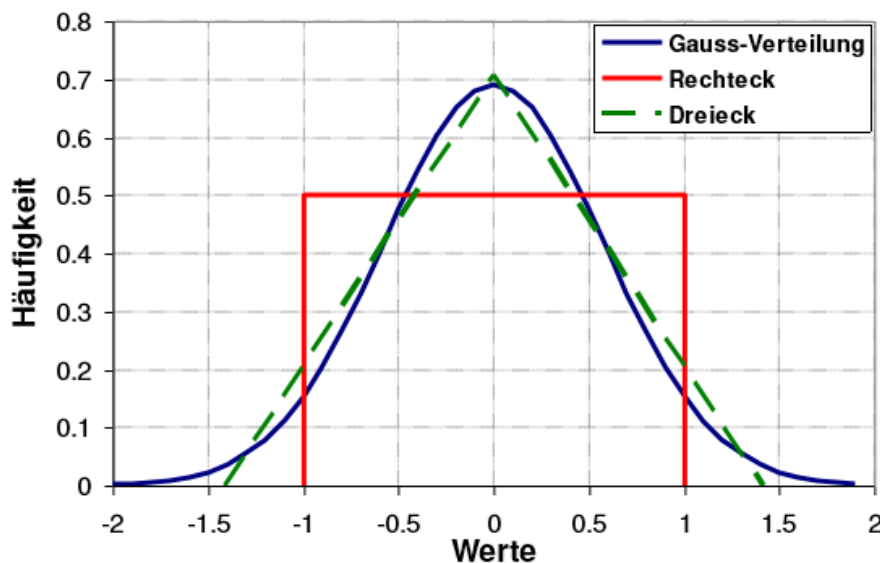
Systematische Abweichungen resultieren allgemein aus unvollkommenen Messgeräten, Beeinflussung des Messobjektes durch die Messung selbst, Temperatur- sowie Feuchteinflüsse oder Einwirkung von elektrischen sowie magnetischen Feldern.

Die Korrektur der bekannten systematischen Messabweichungen erfolgt meist durch Kalibrierungen, Messungen zum Vergleich oder durch bereits (z.B.: aus der Literatur) bekannten Offset.

Die unbekannt systematische Abweichung wird durch Abgleich mit vorausgegangenen Messungen, durch Literaturwerte oder Schätzen durch Empirie, korrigiert. Oftmals wird auch eine Standardunsicherheit unter Annahme einer Rechteck- (=alle Werte innerhalb der Grenzen weisen die gleiche Wahrscheinlichkeit auf, Gl.8-18 mit b=obere definierte und a=untere definierte Grenze) oder Dreieckverteilung (Gl.8-19) festgelegt (siehe Abbildung 8-12). [21]

$$u(x_2) = \frac{b-a}{\sqrt{12}} \quad (\text{Gl.8-18})$$

$$u(x_2) = \frac{b-a}{\sqrt{6}} \quad (\text{Gl.8-19})$$



**Abbildung 8-12:** Rechteck- Dreieckverteilung [21]

### Zufällige statistische Abweichungen

Diese bewegen sich zweiseitig um den Erwartungswert und werden durch Rauschen der Sensoren oder durch stochastische Wechselwirkungsvorgänge mit der Messumgebung verursacht.

Die Berücksichtigung der statistischen Abweichungen erfolgt durch statistische Auswertungen. Dazu wird der arithmetische Mittelwert sowie die empirische Standardabweichung mit einem bestimmten Konfidenzintervall und daraus die mittlere absolute (Gl.8-20) und die mittlere relative Messunsicherheit (Gl.8-21) des arithmetischen Mittelwerts kalkuliert. [21]

$$s_x = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{Gl.8-20})$$

$$s_{xr} = \frac{s_x}{\bar{x}} \quad (\text{Gl.8-21})$$

### Kombination systematischer und zufälliger Abweichungen

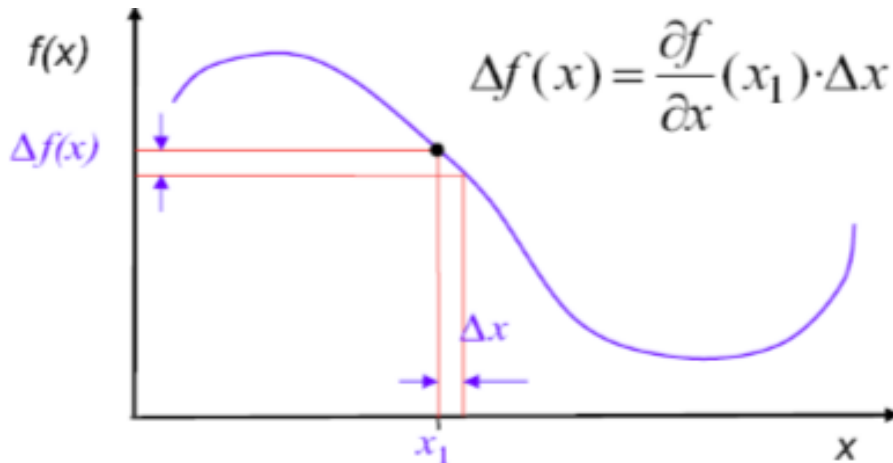
Jede Messung beinhaltet Abweichungen systematischer und zufälliger ( $u(x_1)$ ) Natur, folglich müssen beide Unsicherheiten kombiniert werden. Die Gesamtunsicherheit berechnet sich laut Gl.8-22 unter der Annahme, dass auch die systematischen Unsicherheiten ( $u(x_2)$ ) einer Normalverteilung folgen, was jedoch nicht immer zutrifft (ermittelte Unsicherheit eher kleiner, als tatsächlich Vorhandene). [21]

$$u(x) = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2} \quad (\text{Gl.8-22})$$

### Lineare Fehlerfortpflanzung nach Gauß

Falls physikalische Größen nicht direkt messtechnisch ermittelbar sind, sondern aus anderen gemessenen Größen bestimmt werden, wird eine Taylorreihenentwicklung durchgeführt mit Abbruch nach dem ersten Glied (Abbildung 8-13). Auch hier werden systematische Messabweichungen als normalverteilt angenommen. Folgende Formel (Gl.8-23) zeigt die Zusammenhänge für unkorrelierte (1. rechter Term) und korrelierte Messwerte (2. rechter Term). [21]

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 * u(x_i)^2 + 2 * \sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) * u(x_i, x_j)} \quad (\text{Gl.8-23})$$



**Abbildung 8-13:** Gauß'sche Fehlerfortpflanzung [21]

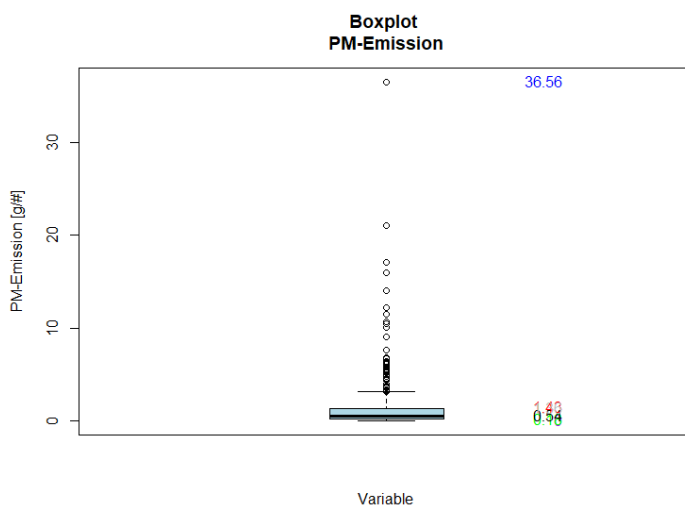
## 8.2 Überprüfung der Daten auf Normalverteilung und ggf. Adaption

Tabelle 8-1 (links Original Werte, rechts adaptierte bzw. transformierte Werte) beinhaltet alle wichtigen statistischen Kennwerte. Es zeigt sich, dass die PM-Emissionsdaten eine asymmetrische Verteilung (Schiefe und Kurtosis außerhalb des Grenzbereichs, keine Normalverteilung) aufweisen. Dies wird auch durch den Box-Whisker Plot (Abb. 8-14), durch das Histogramm (Abb. 8-15) sowie durch den QQ-Plot (Abb. 8-16) bestätigt. Durch Transformation der Daten mit der  $\frac{1}{4}$ . Potenz konnte eine annähernde Normalverteilung bzw. akzeptable Werte der Kennzahlen erreicht werden (siehe Abb. 8-16 (geringere Krümmung der Kurve), Abb. 8-17 (weniger Ausreißer, Median-Mittelwert nahe beieinander), Abb. 8-18 (ähnlich Gauß'scher Glockenform)). Die Abbildungen in diesem Kapitel sind lediglich zur qualitativen Darstellung der Messdaten angeführt (Ablesen von Messdaten oft schwer möglich).

Die transformierten Daten (PM-Emission, Wagenanzahl, Gesamtmasse des Zuges, Zuglänge) dürfen zudem nicht quantitativ beurteilt werden, da diese in ihrer Quantität verändert wurden und somit keine physikalische Sinnhaftigkeit (=besitzen keine sinngebende physikalische Einheit) aufweisen. Lediglich die Verteilung der jeweiligen Messdaten wurde durch die Transformation verändert, um eine aussagekräftige Regression durchführen zu können. Erst nach Rücktransformation der Daten im Zuge der Regressionsgleichung (siehe Gl.6-6, 6-7, 6-8) ist eine quantitative und qualitative Beurteilung möglich (physikalische Einheit =  $g/Zug=g/\#$ ).

**Tabelle 8-1:** PM-Emission\_eff.\_Non-Exhaust

PM-Emission			
Min	0,00	Min transf.	0,00
1. Quartil	0,18	1. Quartil transf.	0,65
MW	1,43	MW transf.	0,86
Median	0,54	Median transf.	0,86
3. Quartil	1,36	3. Quartil transf.	1,08
Max	36,56	Max transf.	2,46
STABW	2,98	STABW transf.	0,41
Schiefe	51,08	Schiefe transf.	0,94
Kurtosis	230,45	Kurtosis transf.	3,60
n	406,00	n	406,00



**Abbildung 8-14:** Box-Whisker Plot PM-Emission\_eff.\_Non-Exhaust

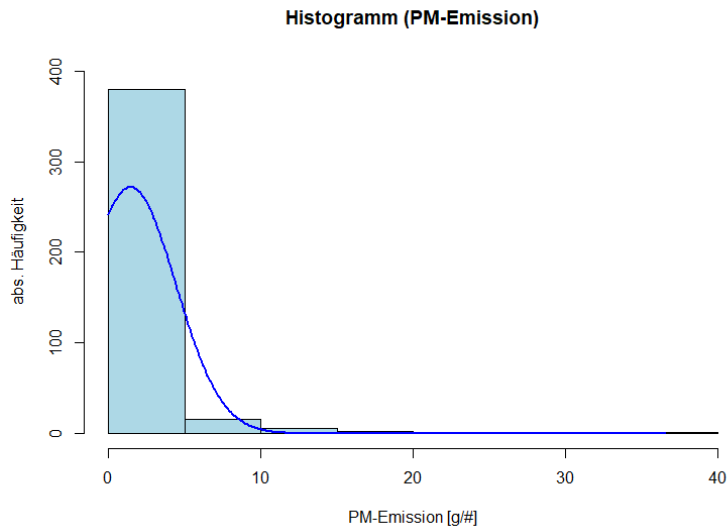


Abbildung 8-15: Histogramm PM-Emission\_eff.\_Non-Exhaust

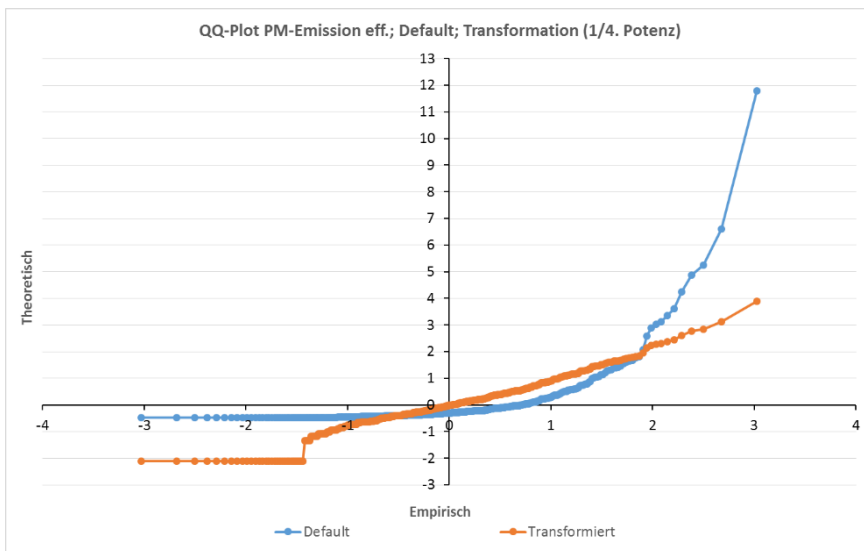


Abbildung 8-16: QQ-Plot PM-Emission\_eff.\_Non-Exhaust

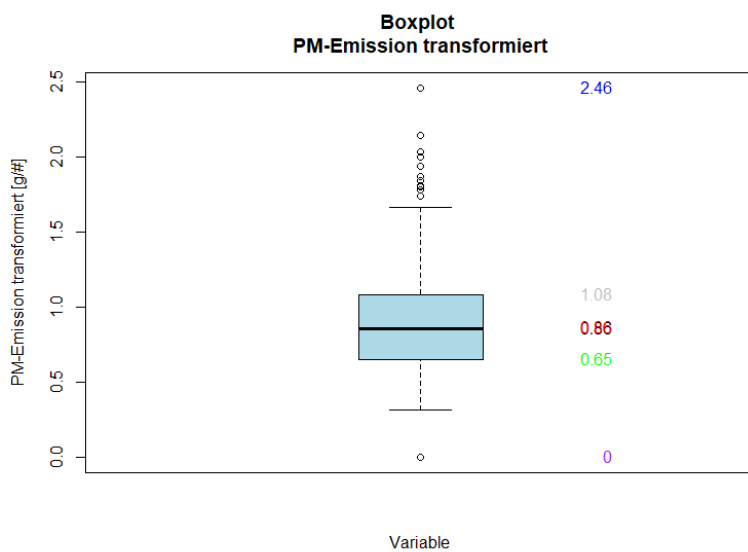
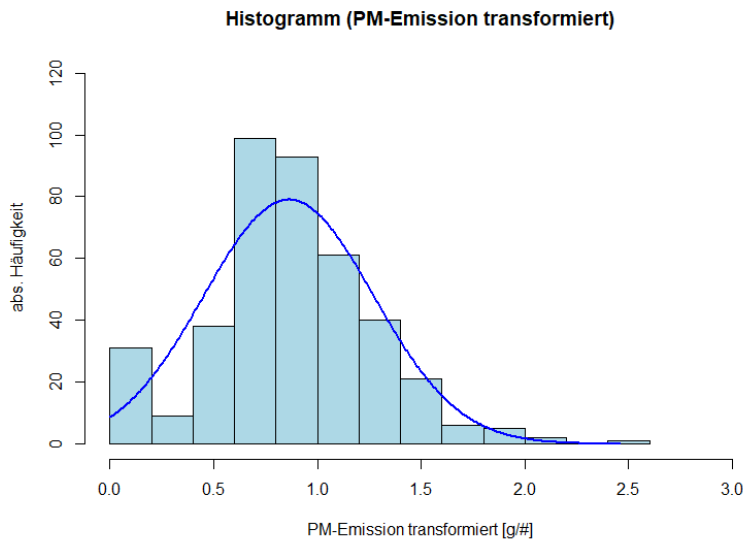


Abbildung 8-17: Box-Whisker Plot PM-Emission\_eff.\_Non-Exhaust\_transformiert



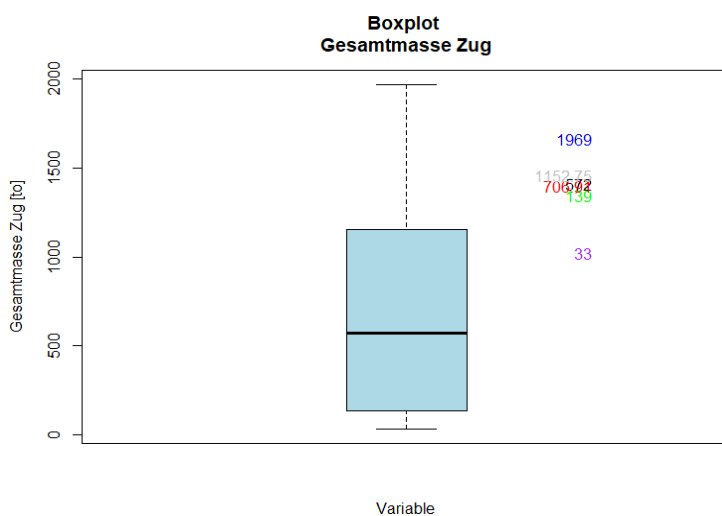


**Abbildung 8-18:** Histogramm PM-Emission\_eff.\_Non-Exhaust\_transformiert

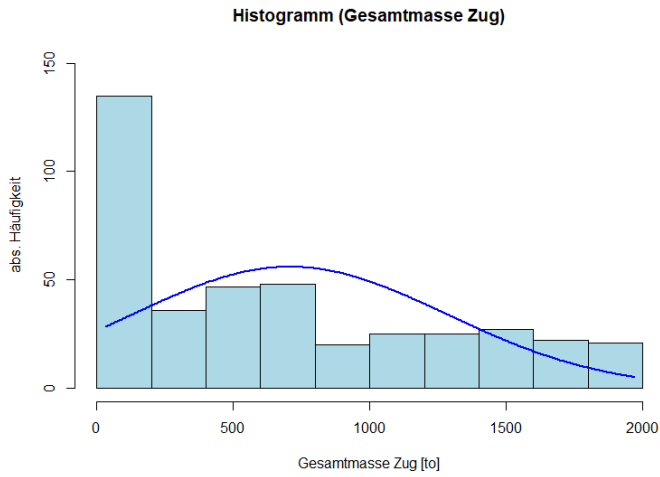
In Tabelle 8-2 links sind die Kennzahlen der Gesamtmasse ersichtlich. Auch hier entsprechen die originalen Daten keiner Normalverteilung (siehe Abb. 8-19, 8-20, 8-21, Tab. 8-2 links). Durch die Modifikation der Daten mit der  $\frac{1}{4}$ . Potenz konnte eine akzeptable Verbesserung erreicht werden (siehe Abb. 8-21, 8-22, 8-23, Tab 8-2 rechts).

**Tabelle 8-2:** Gesamtmasse\_Zug

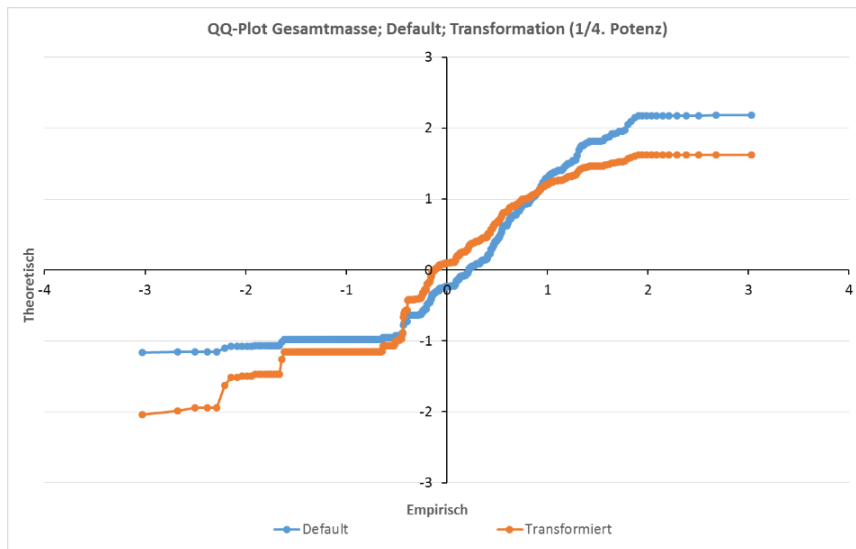
<b>Gesamtmasse</b>			
<b>Min</b>	33,00	<b>Min transf.</b>	2,40
<b>1. Quartil</b>	139,00	<b>1. Quartil transf.</b>	3,43
<b>MW</b>	706,91	<b>MW transf.</b>	4,77
<b>Median</b>	572,00	<b>Median transf.</b>	4,89
<b>3. Quartil</b>	1152,75	<b>3. Quartil transf.</b>	5,83
<b>Max</b>	1969,00	<b>Max transf.</b>	6,66
<b>STABW</b>	578,75	<b>STABW transf.</b>	1,16
<b>Schiefe</b>	5,75	<b>Schiefe transf.</b>	-0,01
<b>Kurtosis</b>	-3,15	<b>Kurtosis transf.</b>	-5,43
<b>n</b>	406,00	<b>n</b>	406,00



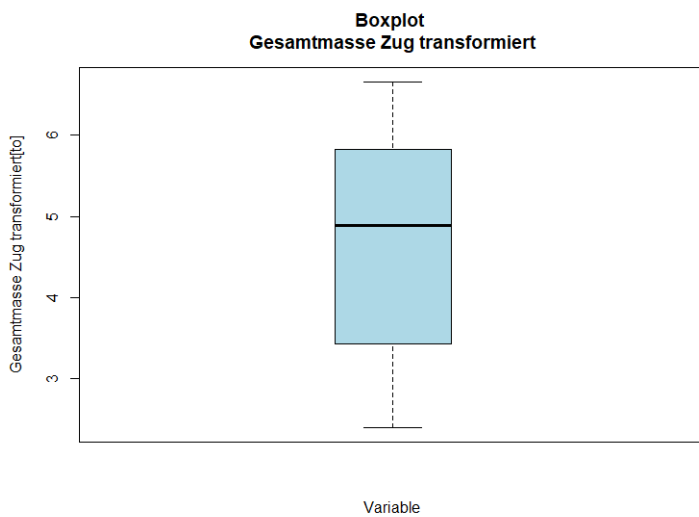
**Abbildung 8-19:** Box-Whisker Plot Gesamtmasse\_Zug



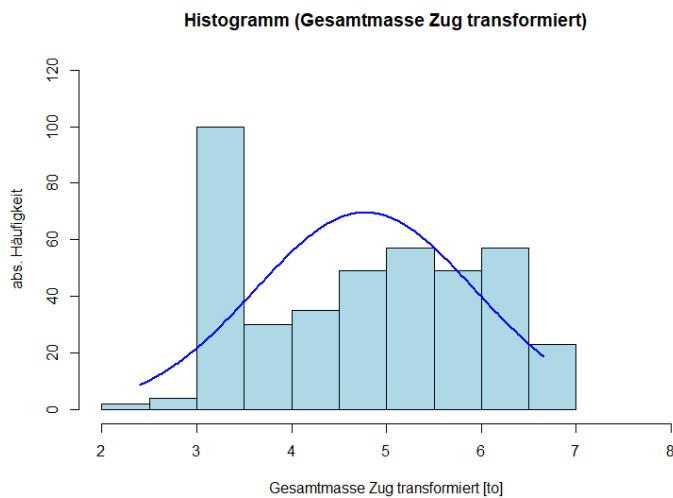
**Abbildung 8-20:** Histogramm Gesamtmasse\_Zug



**Abbildung 8-21:** QQ-Plot Gesamtmasse\_Zug



**Abbildung 8-22:** Box-Whisker Plot Gesamtmasse\_Zug\_transformiert

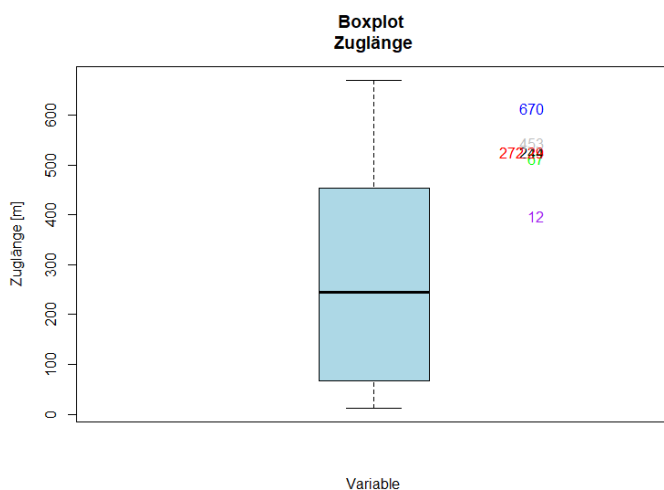


**Abbildung 8-23:** Histogramm Gesamtmasse\_Zug\_transformiert

Die Rohdaten der Zuglänge weisen ebenfalls Streuungen auf (Tab. 8-3 links) und können nicht als normalverteilt gesehen werden (siehe Abb. 8-24, 8-25, 8-26). Durch Potenzierung der Daten mit  $\frac{1}{2}$ , wurden die Kennzahlen sowie die Verteilung in einen annehmbaren Bereich transformiert (siehe Abb. 8-26, 8-27, 8-28, Tab. 8-3 rechts).

**Tabelle 8-3:** Zuglänge

Zuglänge			
Min	12,00	Min transf.	3,46
1. Quartil	67,00	1. Quartil transf.	8,19
MW	272,29	MW transf.	15,15
Median	244,00	Median transf.	15,62
3. Quartil	453,00	3. Quartil transf.	21,28
Max	670,00	Max transf.	25,88
STABW	200,49	STABW transf.	6,54
Schiefe	3,24	Schiefe transf.	-0,16
Kurtosis	-5,02	Kurtosis transf.	-5,51
n	406,00	n	406,00



**Abbildung 8-24:** Box-Whisker Plot Zuglänge

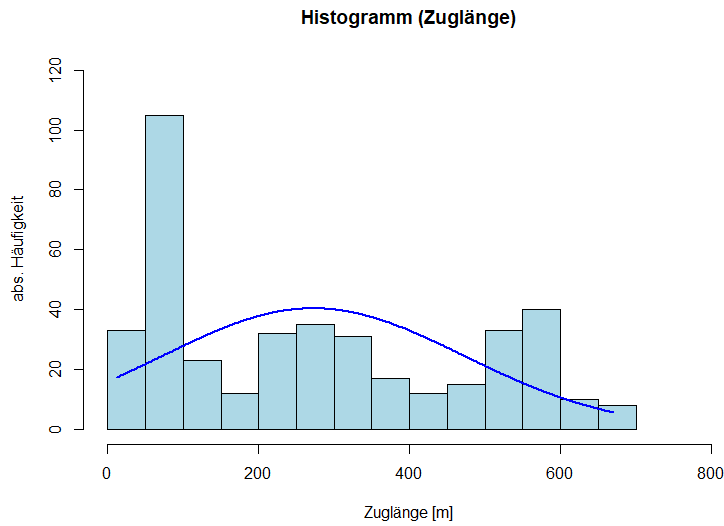


Abbildung 8-25: Histogramm Zuglänge

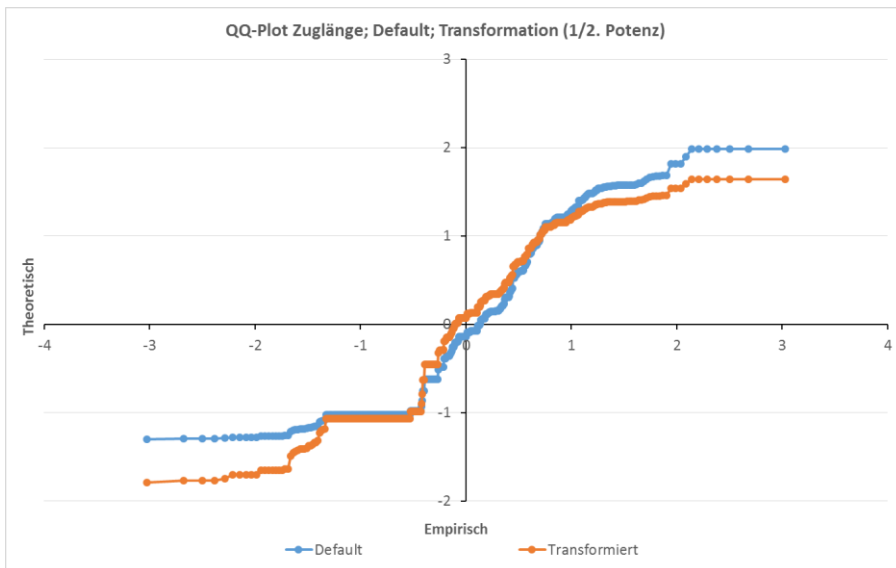


Abbildung 8-26: QQ-Plot Zuglänge

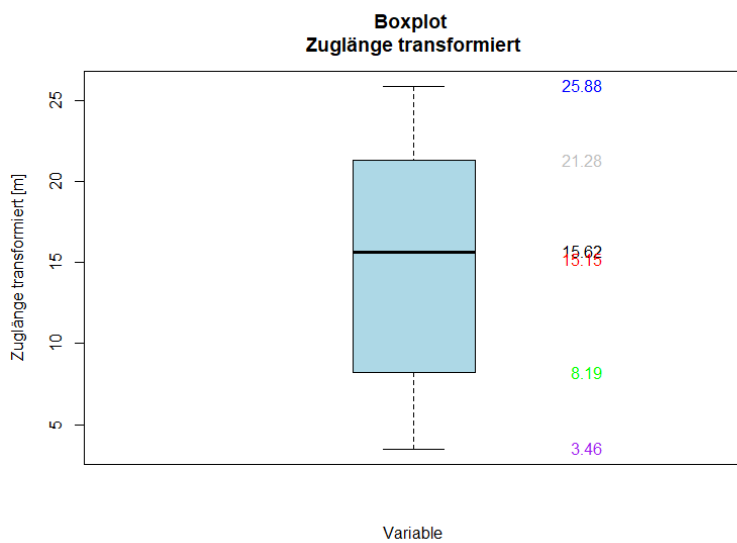
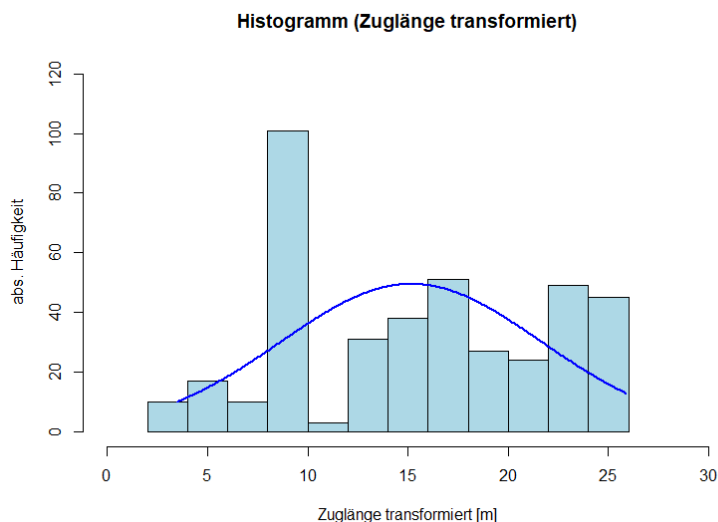


Abbildung 8-27: Box-Whisker Plot Zuglänge\_transformiert

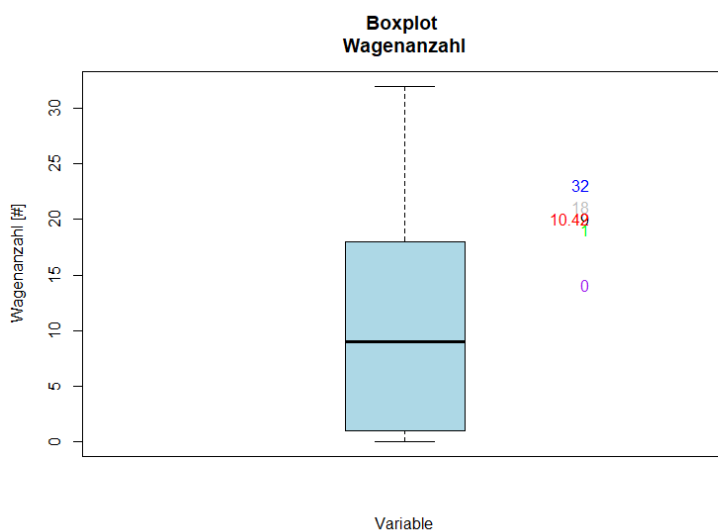


**Abbildung 8-28:** Histogramm Zuglänge\_transformiert

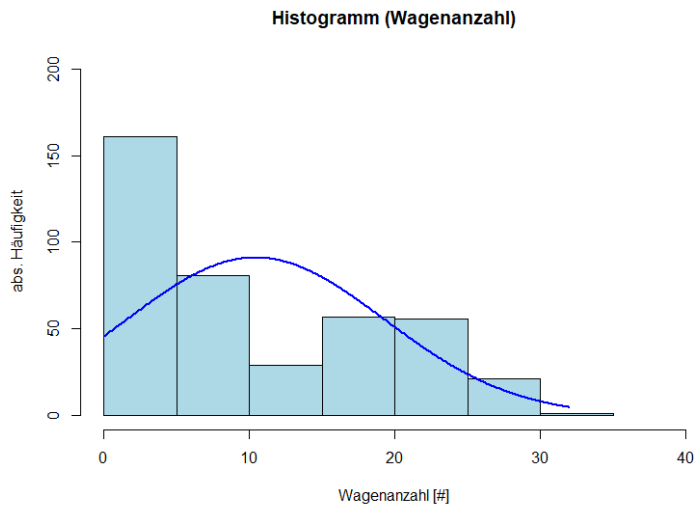
Abschließend erfolgt noch die Analyse der Daten „Waggonanzahl“, welche ebenfalls nur geringfügig einer Normalverteilung folgen (siehe dazu Tab. 8-4 links, Abb. 8-29, 8-30, 8-31). Auch hier ist eine Transformation mit der 1/2. Potenz (analog zu den Daten der Zuglänge) durchgeführt worden. Dadurch lässt sich teilweise eine Verbesserung erzielen (Tab. 8-4 rechts, Abb. 8-31, 8-32, 8-33).

**Tabelle 8-4:** Waggonanzahl

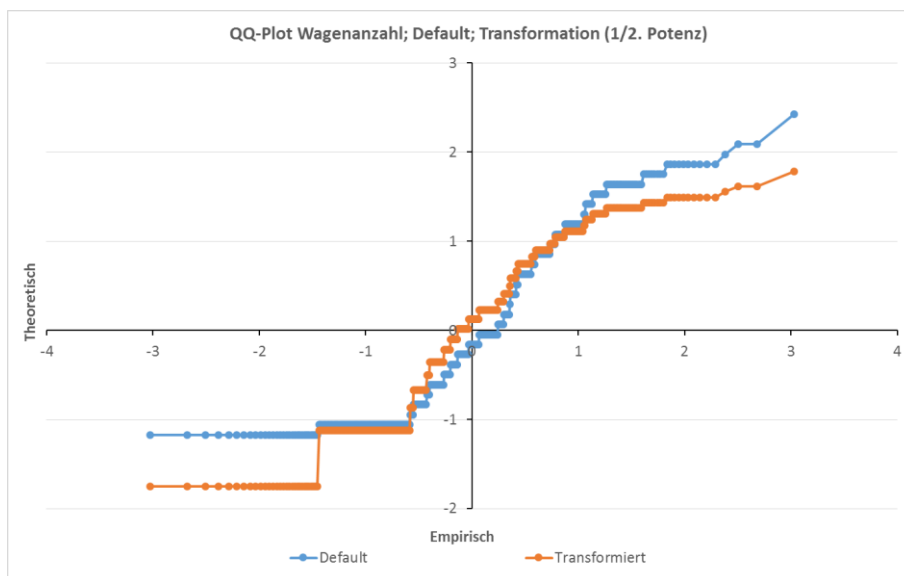
<u>Waggonanzahl</u>			
Min	0,00	Min transf.	0,00
1. Quartil	1,00	1. Quartil transf.	1,00
MW	10,42	MW transf.	2,80
Median	9,00	Median transf.	3,00
3. Quartil	18,00	3. Quartil transf.	4,24
Max	32,00	Max transf.	5,66
STABW	8,90	STABW transf.	1,60
Schiefe	3,87	Schiefe transf.	-1,19
Kurtosis	-4,60	Kurtosis transf.	-5,00
n	406,00	n	406,00



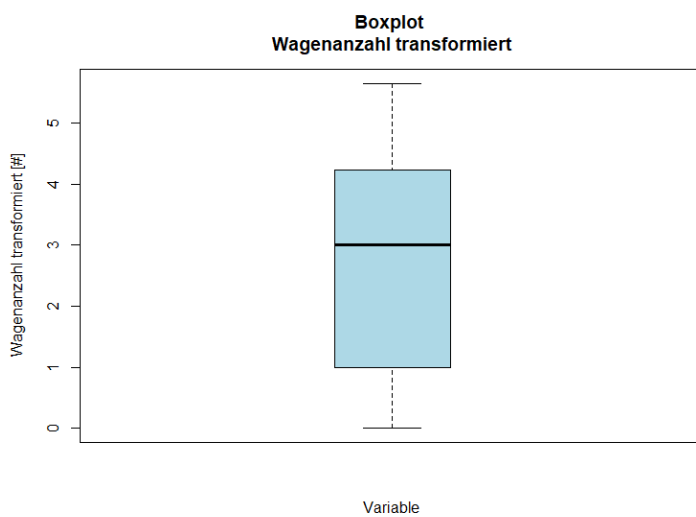
**Abbildung 8-29:** Box-Whisker Plot Wagenanzahl



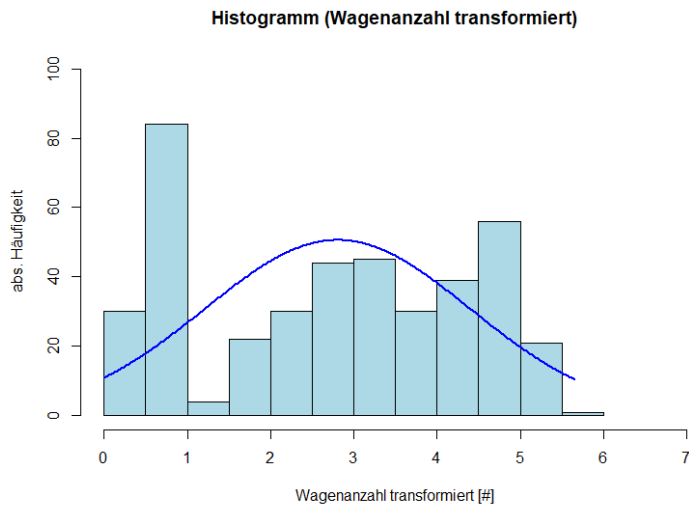
**Abbildung 8-30:** Histogramm Wagenanzahl



**Abbildung 8-31:** QQ-Plot Wagenanzahl



**Abbildung 8-32:** Box-Whisker Plot Wagenanzahl\_transformiert



**Abbildung 8-33:** Histogramm Wagenanzahl\_transformiert

Mit den transformierten Daten wurde anschließend die Regression durchgeführt (siehe Kapitel 6.5.4).