



Lukas Landl, BSc

# **Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme eines Prüfstandes zum Test von PEMS-Systemen in realen Fahrsituationen**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
DiplomingenieurIN  
Masterstudium Maschinenbau / Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

eingereicht an der

### **Technischen Universität Graz**

Vorstand  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Betreuer/in  
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Zweitbetreuer/in  
Dipl.-Ing. Thomas Vuckovic  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, August 2018





## **Vorwort**

Ich möchte mich bei Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger für die Unterstützung und die Möglichkeit, meine Masterarbeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik durchführen zu können, bedanken.

Weiter möchte ich mich ganz herzlich bei Dipl.-Ing. Thomas Vuckovic für die Betreuung meiner Arbeit und die Hilfe bei Problemstellungen bedanken.

Ich möchte mich auch bei allen Mitarbeitern des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gilt auch Mohammad Ali Golkani, M.Sc. vom Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung des Prüfstandsaufbaus.

Schließlich möchte ich mich noch bei meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung im Laufe meiner gesamten Studienzeit bedanken.

# Inhaltsverzeichnis

<b>VORWORT</b> .....	<b>III</b>
<b>FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN</b> .....	<b>VI</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG</b> .....	<b>VIII</b>
<b>GESETZTLICH ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>X</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>2</b>
2.1 MOBILE EMISSIONSMESSGERÄTE .....	2
2.1.1 AVL MOVE.....	2
2.1.2 SEMTECH DS.....	8
2.2 STATIONÄRE EMISSIONSMESSGERÄTE .....	9
2.3 GRUNDLAGEN ZUR PARTIKELANZAHLMESSUNG.....	9
2.3.1 TUG-Verdünnungssystem.....	9
2.3.2 DTT-Verdünnungssystem .....	10
2.3.3 CPC - Condensation Particle Counter.....	11
<b>3 DTT-MESSUNGEN</b> .....	<b>12</b>
3.1 ZIEL DER DTT-MESSUNGEN.....	12
3.2 FAHRZEUGBESCHREIBUNG .....	12
3.3 TESTZYKLEN .....	13
3.4 MESSAUFBAU .....	15
3.5 DATENAUSWERTUNG.....	21
3.6 ERGEBNISSE DER DTT-MESSUNGEN .....	26
3.6.1 Vergleich der gasförmigen Emissionskomponenten.....	26
3.6.2 Vergleich der Partikelmessungen.....	28
3.7 ZUSAMMENFASSUNG DER DTT-MESSUNGEN .....	33
<b>4 KONSTRUKTION DES PET PRÜFSTANDES</b> .....	<b>34</b>
4.1 ERSTELLUNG DES ANFORDERUNGSKATALOGES FÜR DEN PET .....	34
4.2 KONZEPTERSTELLUNG, VORAUSLEGUNG UND BERECHNUNG .....	36
4.3 KONSTRUKTION.....	45
4.3.1 Mechanische Komponenten.....	45
4.3.2 Elektronische Komponenten.....	52
<b>5 PET-MESSUNGEN</b> .....	<b>54</b>
5.1 ZIEL DER PET-MESSUNGEN .....	54
5.2 FAHRZEUGBESCHREIBUNG .....	54
5.3 TESTZYKLEN .....	54
5.4 BEWEGUNGSPROFIL FÜR DEN PET PRÜFSTAND.....	57
5.5 MESSAUFBAU .....	58
5.6 DATENAUSWERTUNG.....	62
5.7 ERGEBNISSE DER PET MESSUNG.....	63
5.7.1 SEMTECH Ergebnisse .....	63
5.7.2 AVL MOVE Ergebnisse.....	64
<b>6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK</b> .....	<b>70</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>71</b>
<b>FORMELVERZEICHNIS</b> .....	<b>74</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>75</b>
<b>LITERATUR</b> .....	<b>76</b>
<b>ANHANG A: DTT-MESSUNG</b> .....	<b>78</b>

<b>ANHANG B: PET-MESSUNG .....</b>	<b>83</b>
<b>ANHANG C: BERECHNUNG PET .....</b>	<b>85</b>
<b>ANHANG D: KONSTRUKTIONSZEICHNUNGEN PET .....</b>	<b>111</b>

## Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

### Lateinische Formelzeichen

$a$	$\text{m/s}^2$	Beschleunigung
$CO$	$\text{g/h, g/s, g/km, ppm}$	Kohlenmonoxid
$CO_2$	$\text{g/h, g/s, g/km, ppm}$	Kohlendioxid
$f$	$\text{s}^{-1}$	Frequenz
$F$	N	Kraft
$g$	$\text{m/s}^2$	örtliche Fallbeschleunigung
$HC$	$\text{g/h, g/km}$	Kohlenwasserstoff
$I$	A	Stromstärke
$l, L$	$\text{km, m, mm}$	Länge
$Kf$	-	Korrekturfaktor
$m$	$\text{kg oder mol}$	Masse
$\dot{m}$	$\text{kg/s}$	Massenstrom
$NO$	$\text{g/h, g/s, g/km, ppm}$	Stickstoffmonoxid
$NO_2$	$\text{g/h, g/s, g/km, ppm}$	Stickstoffdioxid
$NOx$	$\text{g/h, g/s, g/km, ppm}$	Stickoxide
$p$	$\text{bar, Pa}$	Druck
$t$	$^{\circ}\text{C}$	Celsius-Temperatur
$T$	K	thermodynamische Temperatur
$U$	V	elektrische Spannung
$U_{Gas}$	-	Verhältnis der Molzahlen
$V$	$\text{m}^3, \text{l}$	Volumen
$\dot{V}$	$\text{m}^3/\text{h, l/min}$	Volumenstrom

### Konstanten

$g = 9,8067$	$\text{m/s}^2$	Normfallbeschleunigung
$R_m = 8,3145$	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	allgemeine (molare) Gaskonstante

### Griechische Formelzeichen

$\alpha$	$^{\circ}; \text{rad}$	Winkel
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Dichte
$\sigma$	$\text{N/mm}^2$	Spannung

### Weitere Indices und Abkürzungen

3D	dreidimensional
AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
CS	Catalytic Stripper
CVS	Constant Volume Sampling
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTT	Down To Ten
DUV-RAS	Dispersive-Ultraviolette-Resonanz-Absorptions-Spektroskopie
ED	Ejector Diluter
EFM	Exhaust Flow Meter
FID	Flammenionisationsdetektor
FTIR	Fourier Transform Infrarot Spektroskopie
LED	Lichtemittierende Diode
LKW	Lastkraftwagen
max	maximal

---

MFC	Massflowcontroller
min	minimal
MOVE	Mobile Vehicle Evaluation
NDIR	Nichtdispersiver Infrarot-Analysator
NDUV	Nichtdispersiver Ultraviolett-Analysator
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
PA	Gefilterte Pressluft
PD1	Primärverdünnungsstufe
PD2	Sekundärverdünnungsstufe
PEMS	Portable Emission Measurement System
PET	Portable Emission accuracy Testbench
PKW	Personenkraftwagen
PN	Partikelanzahl
RDE	Real Driving Emissions
WHVC	World Harmonized Vehicle Cycle
WLTC	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle

## **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.

Lukas Landl

Graz, Datum

**Gesetzlich**

## Zusammenfassung

Für PKW und leicht Nutzfahrzeuge die seit September 2017 neu typisiert wurden, ist es gesetzlich vorgeschrieben, dass sie Emissionsgrenzwerte im realen Straßenverkehr einhalten müssen. Für schwere Nutzfahrzeuge ist diese Vorschrift bereits seit 2013 in Kraft. Emissionen werden im realen Fahrbetrieb mit mobilen Emissionsmessgeräten (PEMS) aufgezeichnet. Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, ob die PEMS bei realen Straßenfahrten richtig messen, denn verbaut im Auto oder LKW sind sie den Beschleunigungen sowie Temperatur- und Druckschwankungen während der Fahrt ausgesetzt. Um diese am Prüfstand nachbilden zu können, ist der PET (Portable Emission accuracy Testbench) konstruiert, gebaut und getestet worden. Das notwendige Hintergrundwissen zu den verwendeten Messgeräten ist im Kapitel Theoretische Grundlagen erläutert.

Zeitgleich mit der PET Entwicklung sind Vergleichsmessungen von PEMS und Prüfstandsanalytoren durchgeführt worden, um die Abweichungen dieser Messgeräte voneinander zu bestimmen. Im Zuge dieser Messkampagne ist auch ein neu entwickeltes Verdünnungssystem mit unverdünnter Probenentnahme für Partikelmessungen getestet worden.

Nach Fertigstellung des PET wurden Versuche an einem LKW durchgeführt. Zwei verschiedene PEMS sind während ihres Betriebes vertikalen Beschleunigungen ausgesetzt worden.

Aus den, aus einer umfangreichen Datenauswertung gewonnen, Messergebnissen geht klar hervor, dass es bei einem der getesteten PEMS deutliche Abweichungen in den sekundlich aufgezeichneten Emissionswerten NO und NO<sub>2</sub> von PEMS und Prüfstandsmessgeräten gibt. Warum der hier verwendete NDUV Analysator nicht korrekte Werte ausgibt ist noch nicht zur Gänze geklärt und ist Teil der laufenden Forschung

## Abstract

Since September 2017, it is a legal requirement for newly type approved cars and light commercial vehicles to comply with emission limits in real road traffic. For heavy duty vehicles a similar regulation is in force already since 2013. The emissions in real driving operation are recorded with portable emission measuring systems (PEMS). The aim of this work is to identify whether the PEMS measure correctly when driving on real roads, because they are installed in cars or trucks and are exposed to accelerations and variations in temperature and pressure while driving. The PET (Portable Emission Accuracy Testbench) has been designed, built and tested to simulate these accelerations on the test bench. The necessary background knowledge of the measuring instruments used is explained in the chapter Theoretical Basics.

At the same time as the PET development, comparative measurements of PEMS and test bench analysers were carried out to determine the deviations of these measuring instruments from each other. In the course of this measurement campaign, a newly developed dilution system with undiluted sampling for particle measurements was also tested.

After completion of the PET, tests were carried out on a truck. Two different PEMS have been subjected to vertical accelerations during operation.

The measurement results, obtained from extensive data evaluation, clearly show that there are significant deviations in the emission values NO and NO<sub>2</sub> recorded every second from one of the PEMS and test bench measuring instruments. Why the used NDUV analyser does not output correct values has not yet been fully clarified and is part of ongoing research.

---

# 1 Einleitung

Mit der im September 2016 in Kraft getretenen neuen Schadstoffverordnung Euro 6d-Temp ist es für neu typisierte PKW seit September 2017 verpflichtend, Schadstoffgrenzwerte auch unter realen Fahrbedingungen einzuhalten. Bei diesen sogenannten RDE-Fahrten (Real Drive Emission) werden PEMS (Portable Emission Measuring Systems), also On-Board Messsysteme, verwendet, um das Abgas-Emissionsverhalten von Autos während der Fahrt zu messen. Bisher ist noch nicht bekannt, ob die dabei wirkenden Beschleunigungen und Verzögerungen auf die Messergebnisse der PEMS einen Einfluss haben.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wird ein Prüfstand für On-Board Messsysteme, konstruiert, gebaut und getestet. Dieser PET-Prüfstand (**P**ortable **E**mission accuracy **T**estbench) soll die Beschleunigungen während einer RDE Fahrt am Rollenprüfstand nachbilden, um so die PEMS mit den Prüfstandsmessgeräten vergleichen zu können. Die theoretischen Grundlagen erläutern unter anderem welche Schadstoffanalysatoren in den vermessenen On-Board Messgeräten verbaut sind sowie deren Funktionsweise.

Parallel zur Entwicklung des PET-Prüfstandes sind Messungen zum Ist-Vergleich Prüfstandsmesssysteme zu PEMS im unbewegten Zustand durchgeführt worden. Des Weiteren ist ein Prototyp zur Abgasverdünnung für Partikelmessungen kleiner 10nm (DTT- (**D**own **T**o **T**en) Verdünnungssystem) getestet und ebenfalls mit der Prüfstandsmesstechnik verglichen worden.

Nach Abschluss der PET-Entwicklung sind zwei am Institut verfügbare PEMS mit dem PET am LKW-Rollenprüfstand getestet worden und deren Messdaten analysiert worden.

Am Ende der Arbeit sind die Ergebnisse der Messungen diskutiert worden und es gibt einen Ausblick auf zukünftige Verwendungsmöglichkeiten des entwickelten Prüfstands.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Mobile Emissionsmessgeräte

Mobile Emissionsmessgeräte, genannt PEMS (aus dem englischen für Portable Emission Measuring System), dienen zur Aufzeichnung der Emissionen während realen Fahrbetriebs auf der Straße. Diese Arbeit beschäftigt sich intensiv mit dem Vergleich von PEMS (in Ruhe und in Bewegung) zu stationären Messgeräten. Im Folgenden werden die für die durchgeführten Messungen verwendeten PEMS näher beschrieben.

#### 2.1.1 AVL MOVE

Das AVL MOVE der Firma AVL List GmbH wird für die Messungen im Zuge dieser Diplomarbeit in der Konfiguration aus Gas PEMS und PN PEMS verwendet. Wie der Name schon vermuten lässt misst das Gas PEMS die gasförmigen Emissionskomponenten CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub> und das PN PEMS die Partikelanzahl im Abgas. In Abbildung 1 ist der Systemaufbau des AVL MOVE Gas PEMS schematisch dargestellt. Der in rot dargestellte HC-Analysator (FID: Flammenionisationsdetektor) wird nicht näher beschrieben, da er bei den Messungen nicht im AVL MOVE verbaut war.

Der unverdünnt entnommene Teilabgasvolumenstrom von 2,5 [l/min] wird über eine beheizte Leitung zum AVL MOVE geleitet. Dort durchströmt das Rohabgas zuerst einen beheizten Partikelfilter. Danach erfolgt eine Abkühlung des Abgasstroms zuerst mit Hilfe von Umgebungstemperatur, danach mittels eines Kühlers (TEC1). Dies ist notwendig um Wasser aus dem Abgas abzuscheiden, da die nachfolgenden Analysatoren empfindlich auf Wasser reagieren. Das nun trockene Abgas durchströmt den UV-RAS Analysator, wo NO und NO<sub>2</sub> gemessen werden. Nach der Messung der Stickoxide wird der Abgasstrom geteilt. Ein Teilstrom durchströmt die zweite Kühlstufe (TEC2) und mit dem NDIR-Analysator wird der CO und CO<sub>2</sub> Gehalt gemessen. Abschließend wird über einen O<sub>2</sub>-Sensor noch der Sauerstoff im Abgas bestimmt bevor das Abgas das Messsystem wieder verlässt.

Das AVL MOVE gibt die gemessenen Werte in einer Frequenz von 10 [Hz] aus. Der UV-RAS Analysator liefert die NO und NO<sub>2</sub> Konzentration in [ppm], der NDIR Analysator gibt die CO Messergebnisse in [ppm] und CO<sub>2</sub> Messergebnisse in [Vol%] aus. [2]

Der Aufbau und die Funktionsweise der CO, CO<sub>2</sub>, NO und NO<sub>x</sub> Analysatoren sowie das PN-PEMS werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

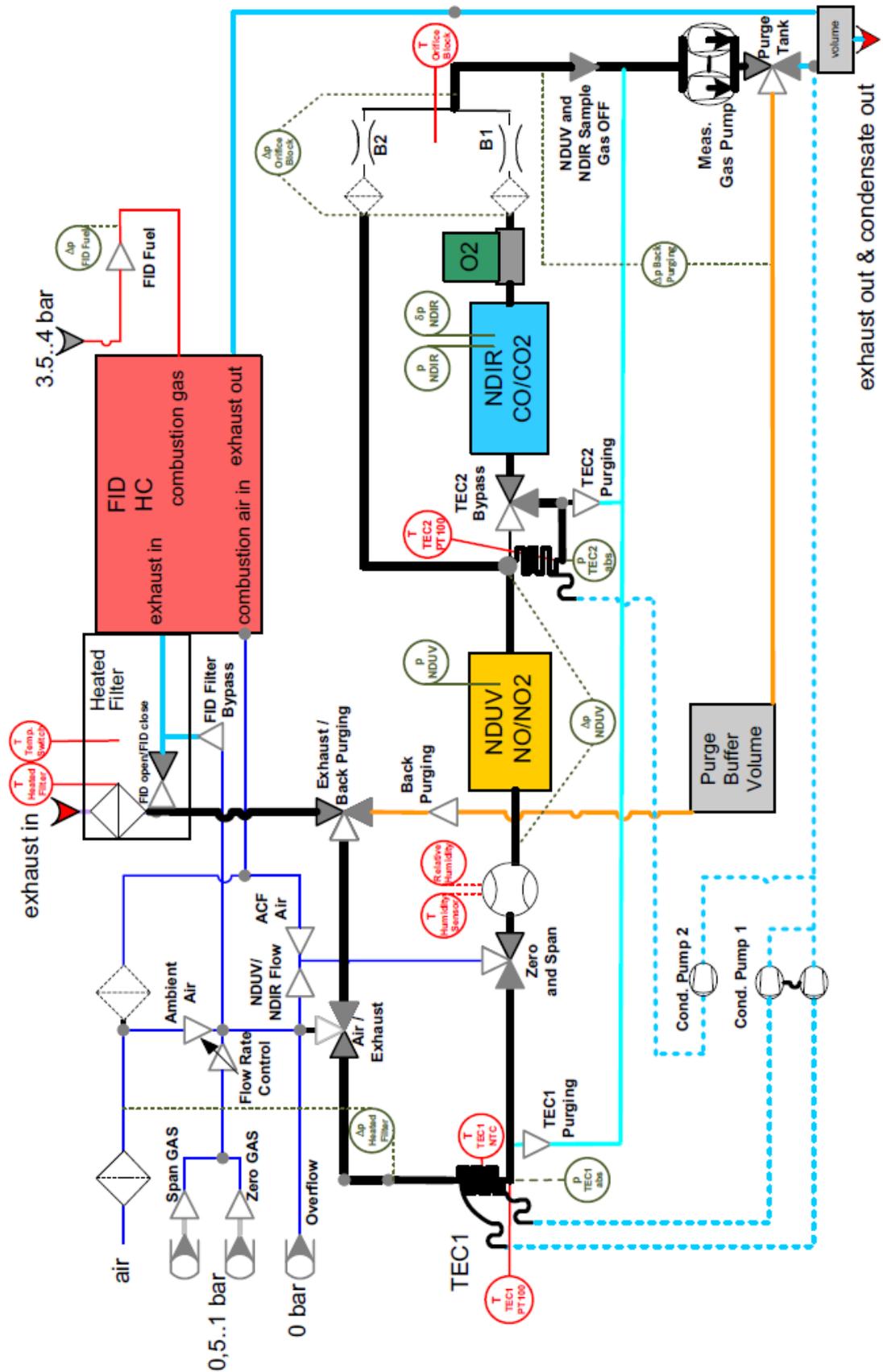


Abbildung 1: Systemaufbau des AVL MOVE [2]

### 2.1.1.1 NDUV Analysator

Der NDUV (Nicht Dispersive Ultraviolett) Analysator dient zur Messung von Stickoxiden. Mit diesem Analysator werden NO und NO<sub>2</sub> gleichzeitig gemessen. Abbildung 2 zeigt schematisch einen NDUV Analysator.

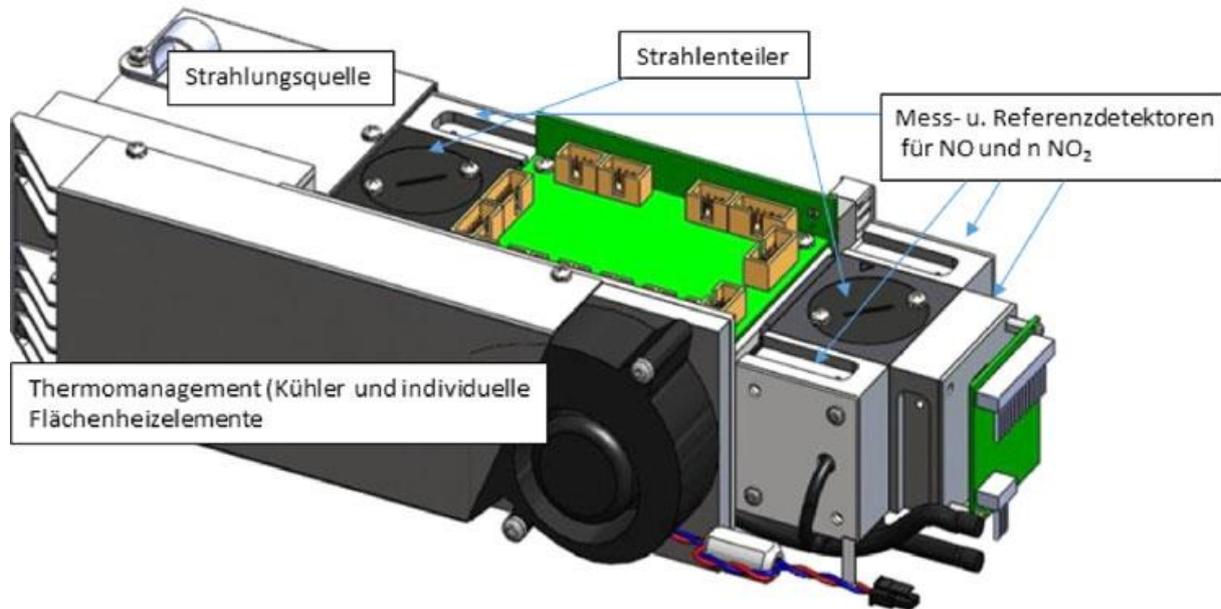


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines NDUV Analysators [6]

Der NDUV Analysator besitzt zwei Strahlungsquellen. Für die Messung von NO wird eine elektrodenlose Gasentladungslampe (EDL) eingesetzt, für die NO<sub>2</sub> Messung ist eine UV-LED verbaut. Beide Strahlungsquellen emittieren Strahlung mit verschiedenen Wellenlängen im UV-Spektrum (200-500nm). Diese Strahlung wird von NO und NO<sub>2</sub> absorbiert. Bei der Messung von NO spricht man vom DUV-RAS (Dispersive Ultraviolett Resonanz-Absorptions-Spektroskopie). Abbildung 3 veranschaulicht dieses Messprinzip. Die Strahlung von der EDL gelangt in die mit Messgas gefüllte Probenzelle, wo NO Strahlung absorbiert. Dadurch verringert sich die Energie der Strahlung welche am Detektor gemessen wird. Somit ist die am Detektor ankommende Intensität der Strahlung ein Maß für die NO-Konzentration in der Probenzelle. [2] [6]

Wird NO<sub>2</sub> gemessen, so handelt es sich hier um das NDUV (Nicht Dispersive Ultraviolett) Messverfahren. Dieses Verfahren ähnelt dem im Kapitel 2.1.1.2 beschriebenen NDIR Messverfahren, unterscheidet sich im Prinzip nur in der Wellenlänge der Strahlungsquelle.

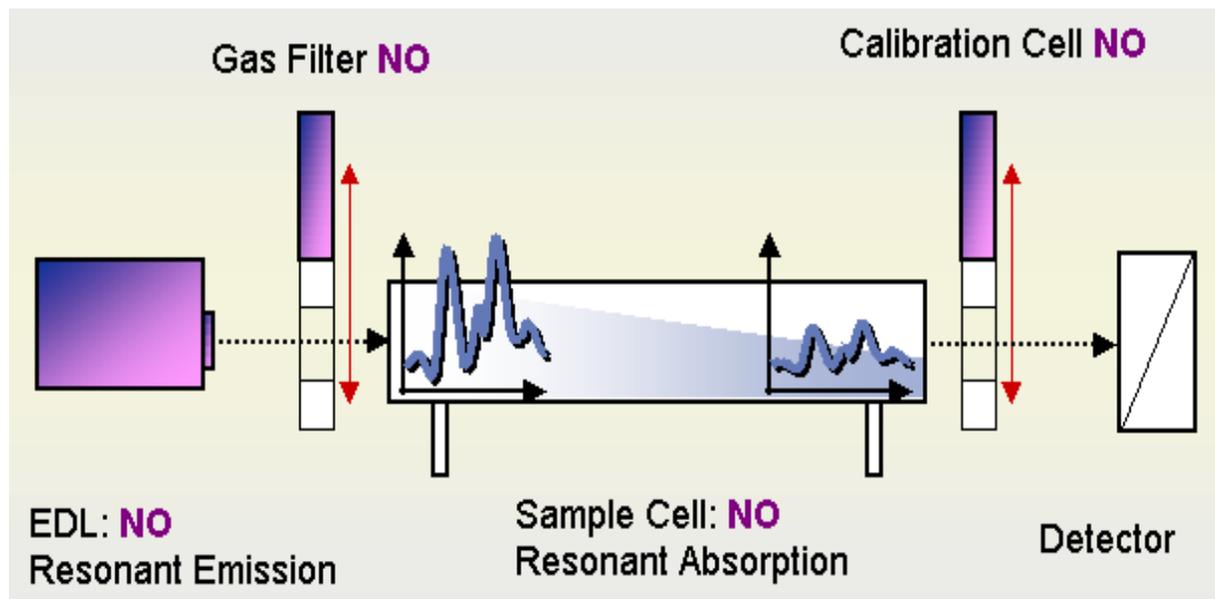


Abbildung 3: Messprinzip DUV-Analysator [2]

### 2.1.1.2 NDIR

Der NDIR (Nicht dispersiver Infrarot) Analysator dient zur Messung von CO und CO<sub>2</sub> im Abgas. Es gibt NDIR Analysatoren in unterschiedlichen Ausführungen, welche sich in der Art der Detektionstechniken unterscheiden. Die Funktionsweise des NDIR Analysators mit Infrarot Detektor ist in Abbildung 4 zu sehen. Die Infrarotlichtquelle erzeugt verschiedene Wellenlängen von Infrarotlicht, welches über einen Monochromator in die Probenkammer einfällt. Der Monochromator dient zur Selektion der Strahlung, damit sich die in die Probenkammer einfallende IR-Strahlung und das Absorptionsband der zu messenden Gase überlappen. In der Probenkammer wird das Infrarotlicht von den Gasen absorbiert (jedes Gas absorbiert charakteristische Wellenlängen). Nach der Probenkammer wird das absorbierte Infrarotlicht durch einen Bandpassfilter zum Infrarotdetektor geleitet. Der Filter lässt dabei nur die Wellenlängen durch, welche das zu messende Gas absorbiert. Die am Detektor detektierte Energiemenge der nicht vom Messgas absorbierten Strahlung ist ein Maß für die Gaskonzentration in der Probenkammer. NDIR Analysatoren weisen eine starke Querempfindlichkeit zu Wasserdampf auf, weil Wasserdampf einen großen Wellenbereich von Infrarotlicht absorbiert. Deshalb ist genau darauf zu achten, wie im vorigen Kapitel erwähnt, Wasser aus dem Probenabgas vor dem NDIR Analysator abzuscheiden. [2] [4] [7] [9]

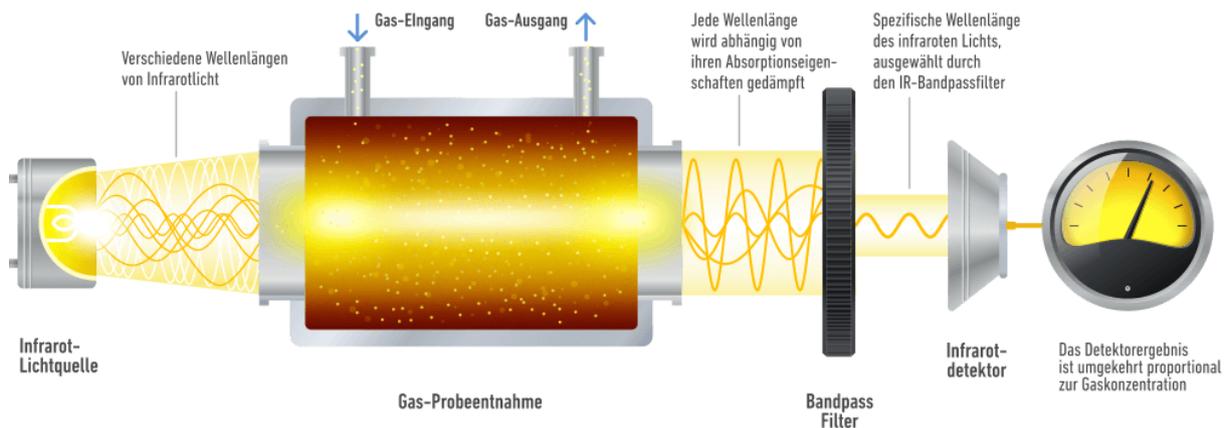


Abbildung 4: Aufbau eines NDIR Analysators [9]

### 2.1.1.3 PN Analysator

Zusätzlich zum AVL MOVE Gas PEMS ist in den durchgeführten Messungen dieser Arbeit das AVL MOVE PN PEMS zur Messung der Partikelanzahlen verwendet worden. Der vereinfachte Aufbau der Komponenten des PN PEMS ist in Abbildung 5 dargestellt. Das PN PEMS entnimmt kontinuierlich Abgas mittels einer beheizten Entnahmeleitung um Kondensation zu verhindern. In der Verdünnungszelle wird das Abgas mit gefilterter und getrockneter Verdünnungsluft verdünnt. Anschließend gelangt der verdünnte Abgasvolumenstrom zur Sensoreinheit.

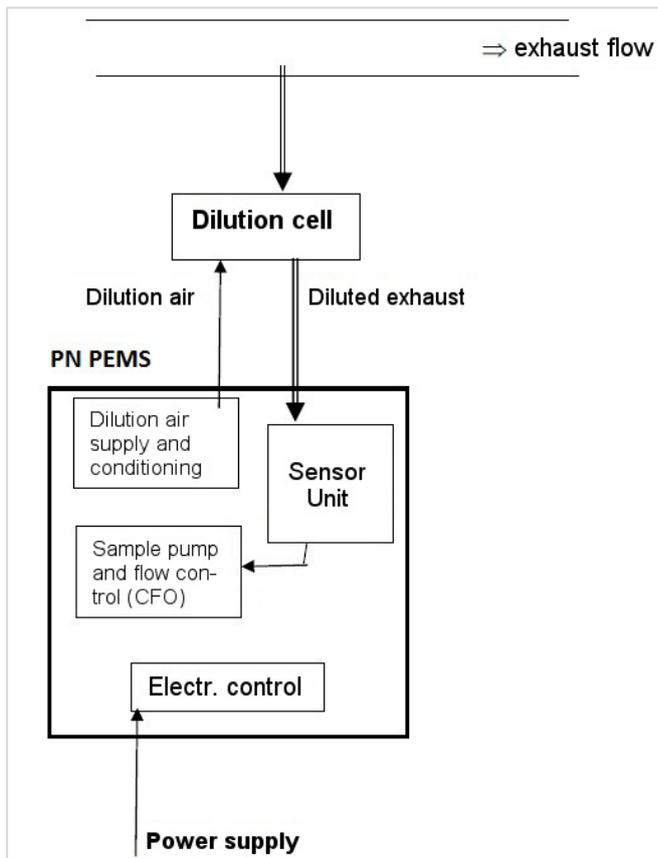


Abbildung 5: vereinfachter schematischer Aufbau des PN PEMS [5]

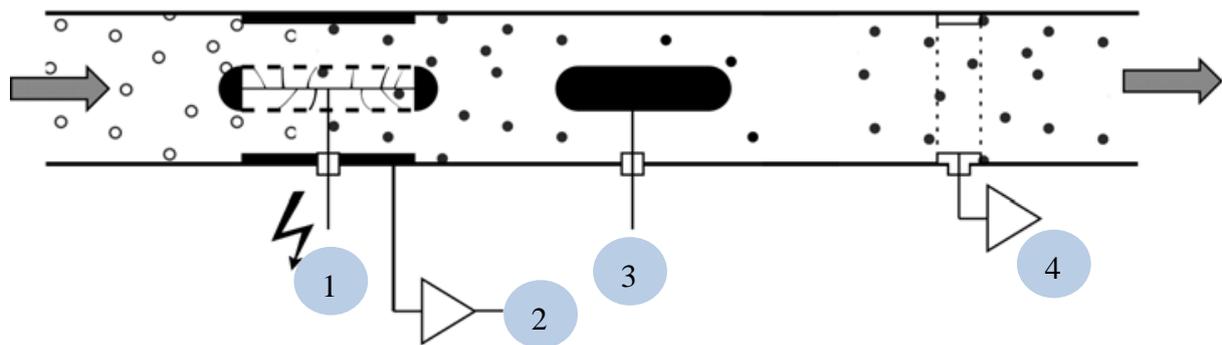


Abbildung 6: Prinzip der Diffusions Aufladung [5]

Der Sensor funktioniert nach dem Prinzip der Diffusionsaufladung (Abbildung 6). Zuerst werden die Partikel im verdünnten Abgas durch ein unipolares Diffusionsladegerät (1) ionisiert. Dies geschieht durch den Effekt der Koronaentladung. Dabei liegt eine Hochspannung an einem dünnen Draht an. In unmittelbarer Nähe zur Drahtoberfläche befindet sich die Koronaregion, wo Elektronen auf jene Geschwindigkeit beschleunigt werden, um bei einer Kollision mit Luftmolekülen ein Elektron dieser Moleküle freizuschlagen. Es entstehen dabei ein freies Elektron und ein positives Ion. Diese Reaktion unterstützt sich selber und es entsteht eine Vielzahl von positiv geladenen Ionen und Elektronen. Das Rohr ist negativ geladen und der Koronadraht positiv. Somit ergibt sich eine Bewegung der Elektronen zum Draht hin und eine Bewegung der positiv geladenen Ionen zur Rohrwand hin. Strömen nun mit der Luft auch Partikel zwischen Draht und Rohrwand, kollidieren Ionen mit den Partikeln. Die Partikel sind somit positiv geladen. Nach dieser Aufladung wird der Ladestrom (2) gemessen. Der gepulste Elektrofilter (3) erzeugt eine Ladungsmodulation im Aerosol welche im Faraday-Käfig-Elektrometer (4) kompensiert wird. Der gemessene Kompensationsstrom ist proportional der Partikelladung und der daraus ermittelte Elektrometerrausschlag entspricht der Partikelanzahl. [5] [8]

## 2.1.2 SEMTECH DS

Im SEMTECH DS der Firma Sensors sind für die CO, CO<sub>2</sub> bzw. NO NO<sub>2</sub> Messung Analysatoren mit gleichem Messprinzip wie im AVL MOVE verbaut. Zusätzlich enthält das SEMTECH DS noch eine FID Analysator zur THC (total hydrocarbons) Messung, welcher im Folgenden genauer beschrieben ist.

### 2.1.2.1 FID

Der FID (Flammenionisationsdetektor) misst die im Abgas vorhandenen, sprich teil- und unverbrannten, Kohlenwasserstoffe. Dabei werden die HC's in einer Helium-/Wasserstoffflamme verbrannt. Die dabei entstehenden Ionen werden elektrisch detektiert und der gemessene Ionenstrom ist ein Maß für den Gehalt an unverbrannten Kohlenstoffen. Zur Kondensationsvermeidung in der FID Zuleitung und im Analysator selbst sind diese beheizt ausgeführt. Des Weiteren benötigt der FID immer ein Betriebsgas für die Flamme (Wasserstoff oder Helium). Der schematische Aufbau des FID ist in Abbildung 7 dargestellt. [4] [6] [7]

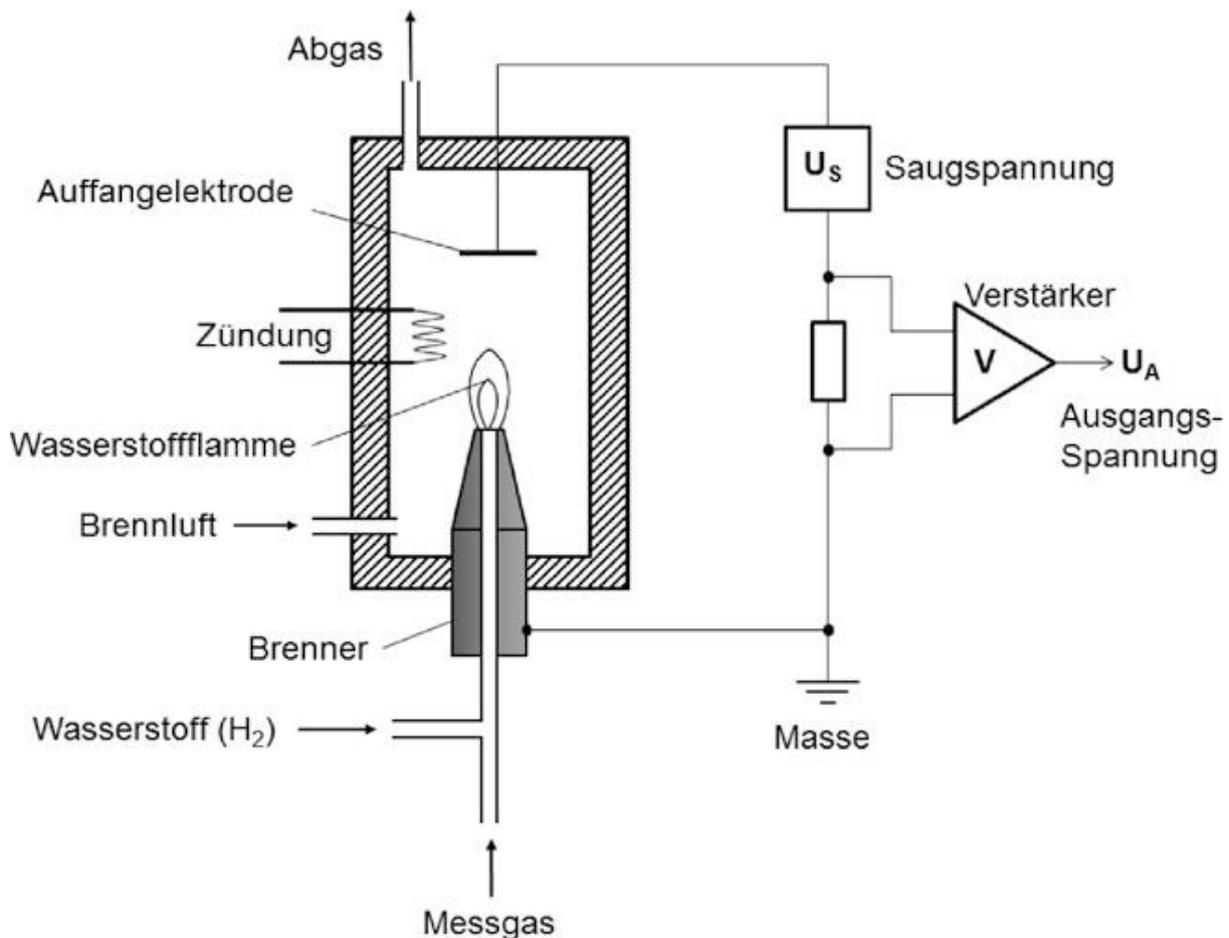


Abbildung 7: Aufbau eines Flammenionisationsdetektors (FID) [6]

## 2.2 Stationäre Emissionsmessgeräte

Bei den Messungen wurden folgende stationäre Emissionsmessgeräte verwendet:

- Prüfstandsanalytoren für gasförmige Emissionskomponenten (CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, HC)
- FTIR (Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie)
- CPC's zur Partikelanzahlmessung

Auf eine detaillierte Beschreibung der Prüfstandsanalytoren sowie des FTIR wird in dieser Arbeit verzichtet. Die Partikelmessung wird im folgenden Kapitel genauer beschrieben.

## 2.3 Grundlagen zur Partikelanzahlmessung

Die von Fahrzeugen ausgestoßenen Partikelanzahlen [# / km] sind laut Gesetz limitiert. Bei der Messung von Partikelanzahlen sollen nur Partikel mit festem Kern gemessen werden, da diese am gesundheitsschädlichsten sind. Um die Messgasprobe von Partikel ohne festen Kern zu befreien, sowie die Partikelkonzentration der Messprobe zu senken um in den Messbereich der CPC's zu kommen, ist ein Messaufbau mit geeignetem Verdünnungssystem notwendig. Eine Verdünnung mit trockener, gefilterter Luft senkt den Partialdruck der löslichen Komponenten im Abgas und durch zusätzliche Beheizung verdampfen die löslichen Substanzen. Anschließend wird die Abgasprobe noch einmal mit unbeheizter Luft verdünnt, um die geforderte niedere Temperatur (<35°C), bei gleichzeitiger Verhinderung der Wiederkondensation der zuvor verdampften Substanzen, für die Messung mittels CPC zu erreichen. Bei den DTT-Messungen sind zwei verschiedene Verdünnungssysteme miteinander verglichen worden, welche nachfolgend näher beschrieben werden. [7] [18]

### 2.3.1 TUG-Verdünnungssystem

In Abbildung 8 ist der Aufbau des TUG-Verdünnungssystems dargestellt. Bei (1) tritt der, aus der CVS Anlage entnommene, Teilabgasvolumenstrom in das Verdünnungssystem ein. Die erste Verdünnungsstufe ist in rot dargestellt. Hier läuft ein kleiner Teil des Abgases durch die Bypassleitung. Der andere Teil läuft durch einen Filter, welcher nahezu alle Partikel filtert und durch ein Ventil zur Durchflussregelung. Am Ende der Primärverdünnungsstufe werden beide Ströme wieder vermischt und der gefilterte Abgasstrom verdünnt den, durch den Bypass kommenden, Abgasstrom (Verdünnungsfaktor bis zu circa 80 erreichbar). Im Anschluss an die Primärverdünnung wird das Abgas auf etwa 180°C erhitzt (grün dargestellt). Danach wird der Abgasstrom aufgeteilt. Ein Teil des Abgases (5 l/min) fließt durch die Sekundärverdünnungsstufe (gelb). Hier wird mittels eines Ejector Diluters der Firma Dekati nochmals um den Faktor 7,5 verdünnt. Am Ende der Sekundärverdünnungsstufe (2) können bis zu 3 CPC's angeschlossen werden. In blauer Farbe ist die Pumpeneinheit und in violetter Farbe die vorgeschaltete Kühlstrecke zur Pumpe dargestellt. [19]

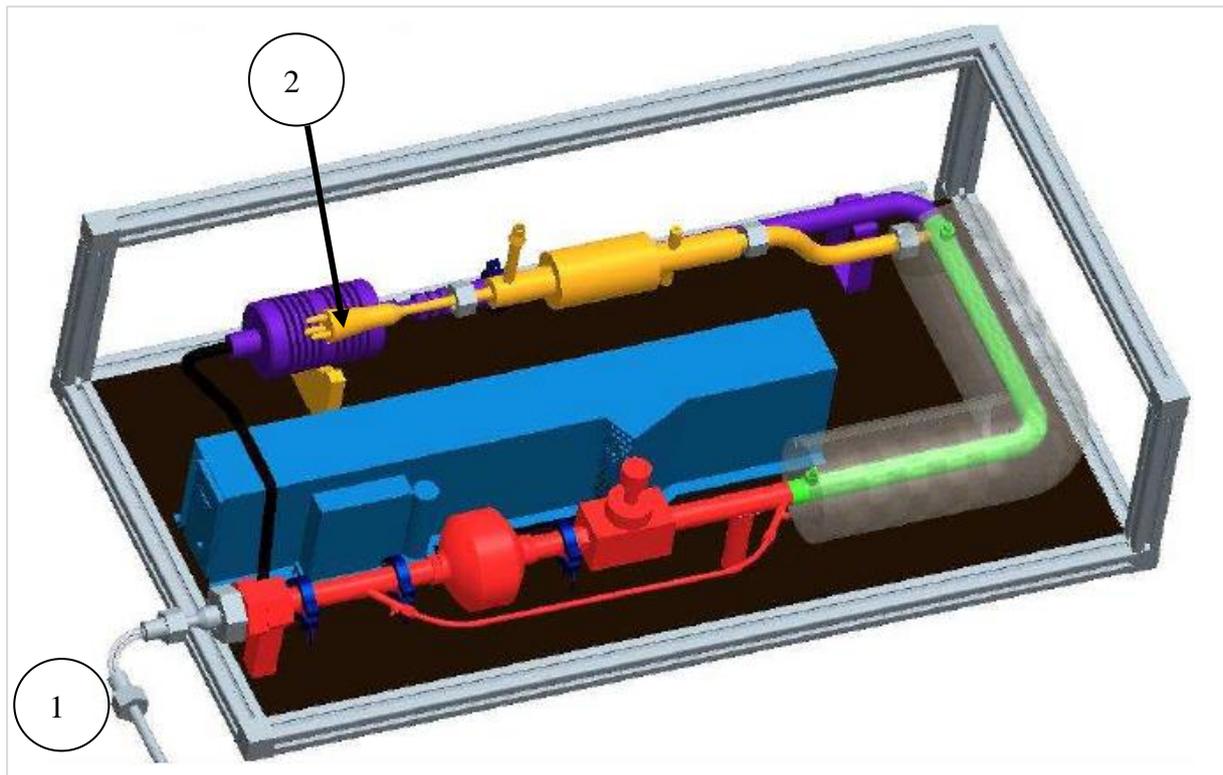


Abbildung 8: TUG-Verdünnungssystem [19]

### 2.3.2 DTT-Verdünnungssystem

Das DTT-Verdünnungssystem wurde vom Institut für elektronische Sensorsysteme (IES) entwickelt und bei den DTT-Messungen erstmals mit dem IVT TUG-Verdünnungssystem verglichen. Abbildung 9 zeigt den schematischen Aufbau dieses Verdünnungssystems. Im Unterschied zum TUG Verdünnungssystem ist das DTT-Verdünnungssystem für die Entnahme von unverdünntem Abgas entwickelt worden. Das unverdünnte Abgas strömt über eine beheizte Leitung zum Verdünnungssystem (Sample Inlet). Danach wird es mit gefilterter Pressluft (PA) in der Primärverdünnungsstufe (PD1) verdünnt. Der Verdünnungsfaktor für die Primärverdünnungsstufe sowie für die Sekundärverdünnungsstufe errechnet sich aus den an den mass flow controller (MFC) gemessenen Massenströmen. In der Primärverdünnungsstufe wird das Abgas zusätzlich noch beheizt. Nach der Primärverdünnungsstufe durchströmt das Abgas den catalytic stripper (CS). Der CS ist ein beheiztes, katalytisches Bauteil. Dieser entfernt die durch die Primärverdünnung und Erhitzung entstandenen gasförmigen Substanzen aus dem Abgas zur Verhinderung der Wiederkondensation. Anschließend wird in der Sekundärverdünnung ein zweites Mal verdünnt. Die überschüssigen Gase aus PD1 und PD2 werden abgekühlt (nur PD1) und über Filter und MFC's zur Pumpe geleitet. Nach der Pumpe verlassen sie das System. Die letzte Verdünnungsstufe besteht bei den DTT-Messungen aus einem Ejector Diluter (ED) (gleich wie bei TUG-Verdünnungssystem) oder einer, ebenfalls vom IES entwickelten, Bypassverdünnung. Es können mit diesem Aufbau Verdünnungsfaktoren bis 4000 erreicht werden.

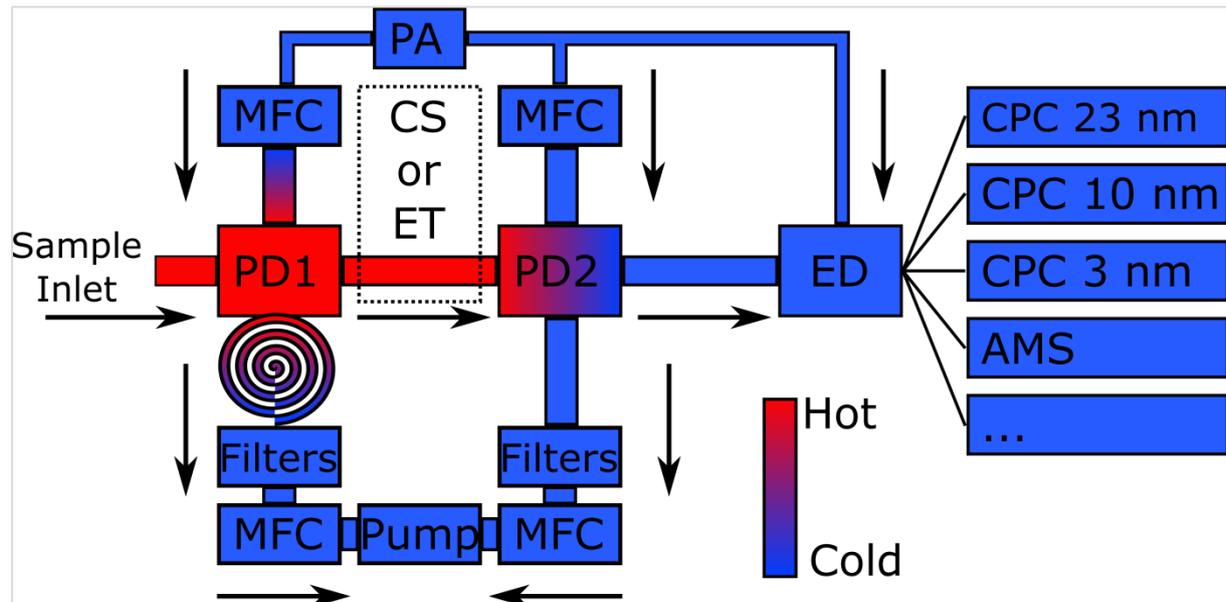


Abbildung 9: schematischer Aufbau des DTT-Verdünnungssystems

### 2.3.3 CPC - Condensation Particle Counter

Mit einem Kondensationspartikelzähler (CPC) können Partikelanzahlen im Abgas gemessen werden. Um die Partikel für den optischen Partikelzähler sichtbar zu machen, müssen diese vergrößert werden. Dafür wird 1-Butanol durch Beheizung verdampft. Das Abgas fließt durch die übersättigte Butanolumgebung. Die folgende Abkühlung zwingt das 1-Butanol an den Partikeln zu kondensieren, wodurch die Partikel wachsen können und nun durch den Photodetektor gezählt werden. Durch eine kritische Düse wird der Probenvolumenstrom im CPC konstant gehalten.[7] [8] [10]

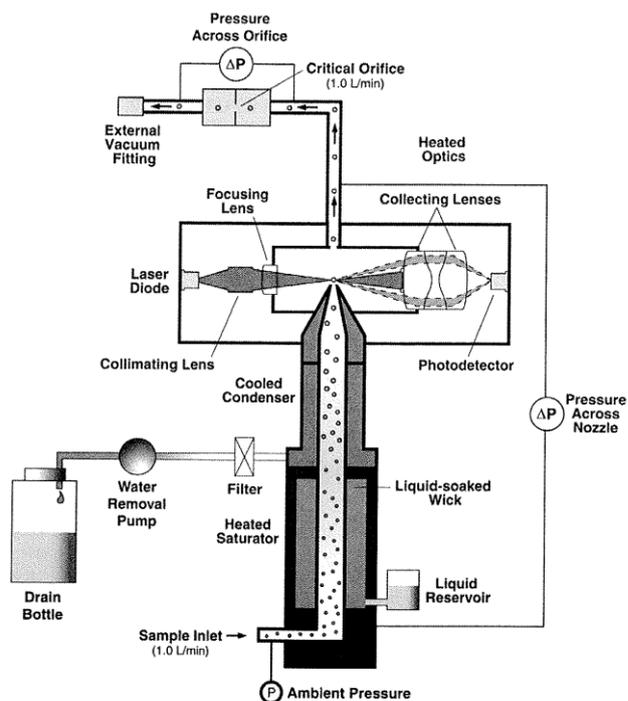


Abbildung 10: Funktionsschema CPC [10][7]

### 3 DTT-Messungen

#### 3.1 Ziel der DTT-Messungen

Ziel dieser Messungen ist es, ein neues Verdünnungssystem (DTT-Verdünnungssystem siehe Kapitel 2.2) für Partikelmessungen zu testen bzw. mit dem aktuellen Partikelmesssystem am PKW-Rollenprüfstand zu vergleichen. Des Weiteren dienen diese Messungen zur Analyse des Ist-Zustandes, um die Abweichungen zwischen PEMS in unbewegten Zustand und den TUG Labormessgeräten bei verschiedenen Testzyklen zu erfassen. Die Messwerte des AVL MOVE PEMS sind mit denen des Standard-CVS Systems sowie eines FTIR Analysators verglichen worden.

#### 3.2 Fahrzeugbeschreibung

Die Versuche am Rollenprüfstand wurden mit einem Ford Mondeo Turnier 1.5 EcoBoost durchgeführt. Bei dem Modell handelt es sich um ein EURO 6b Fahrzeug mit einem Benzinmotor mit Direkteinspritzung und Vorderradantrieb. Eine Übersicht der relevanten Fahrzeugdaten ist in Tabelle 3-1 ersichtlich:

Tabelle 3-1: Übersicht der Fahrzeugdaten

Zylinderanzahl	4
Hubraum	1499ccm
Leistung bei 5700 U/min	118 kW (160 PS)
Maximales Drehmoment bei 1600 U/min	240 Nm
Kraftübertragung	Vorderradantrieb
Getriebe	6-Gang-Schaltgetriebe
Aufladung	Ja
Kraftstoff	Benzin
Abgasklasse	Euro 6b
Abgasnachbehandlung	3-Wege-Katalysator
Karosserievariante	Kombilimousine
Leergewicht	1630 kg
Kilometerstand bei Testbeginn	21000 km

### 3.3 Testzyklen

Bei den Messungen wurden zwei verschiedene Testzyklen verwendet. Einerseits der WLTC (Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle) und andererseits der ERMES V7 (beide sind jeweils als Kalt- und Warmstart gefahren worden). In Abbildung 11 und Abbildung 12 sind die Geschwindigkeitsprofile beider Zyklen abgebildet. Es ist deutlich ersichtlich, dass der ERMES Zyklus steilere Beschleunigungsrampen aufweist, sogar sogenannte „Full Load Ramps“, welche das Fahrzeug auch unter Vollgas nicht korrekt nachfahren kann.

Des Weiteren wurden bei jeder der 5 unterschiedlichen Testapplikationen konstante Punkte gefahren, sprich das Fahrzeug fuhr einige Minuten, bis sich die Emissionswerte einpendelten, konstant 50 km/h bei 0, 4, 8 und 12% Steigung. Die Steigung wurde am Rollenprüfstand durch eine Vergrößerung des Rollenwiderstandes realisiert.

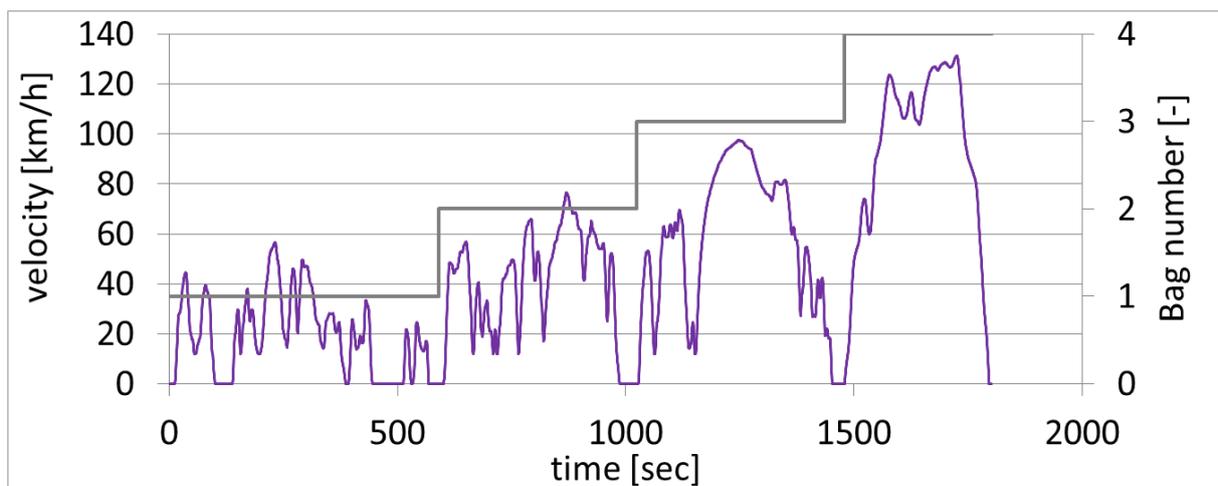


Abbildung 11: WLTC Testzyklus

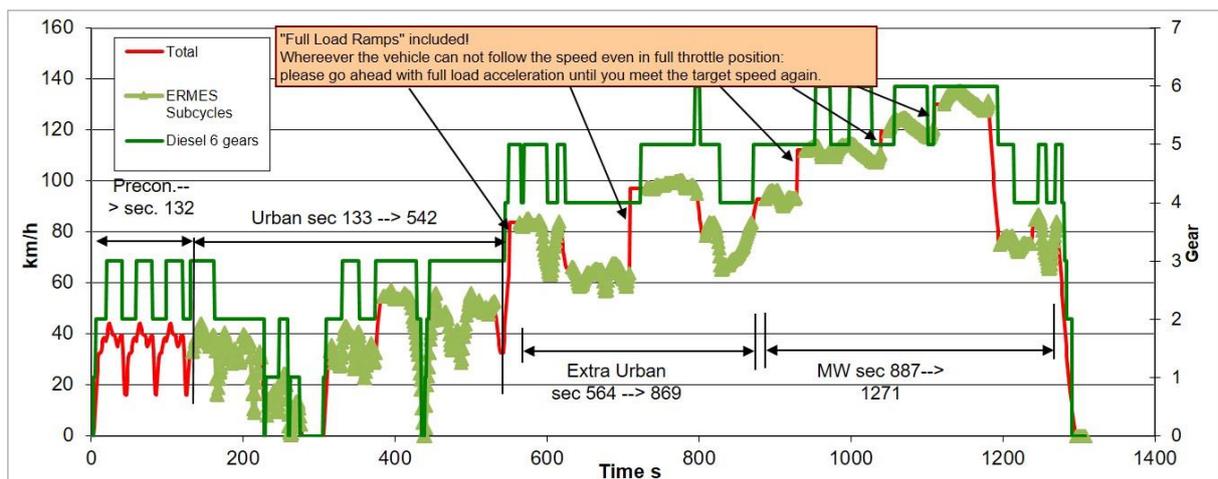


Abbildung 12: ERMESV8 Testzyklus

Tabelle 3-2 zeigt die durchgeführte Messmatrix. Die in der zweiten Spalte angeführten Messvarianten werden im nächsten Kapitel beschrieben.

Tabelle 3-2: Messprogramm PKW-Rolle

Zyklusnr.	Variante	Projektnr.	Datum	Zyklusart	Konditionierung
7722	Variante 1	274	09.01.2018	WLTC	cold
7723	Variante 1	274	10.01.2018	WLTC	cold
7724	Variante 1	274	10.01.2018	WLTC	hot
7725	Variante 1	274	10.01.2018	Ermes_V8_Benzin_6Gang	hot
7726	Variante 1	274	11.01.2018	Ermes_V8_Benzin_6Gang	cold
7727	Variante 1	274	11.01.2018	Ermes_V8_Benzin_6Gang	hot
7728	Variante 1	274	11.01.2018	Ermes_V8_Benzin_6Gang	hot
7729	Variante 1	274	11.01.2018	Konstantpunkte	hot
7730	Variante 2	274	15.01.2018	WLTC	cold
7731	Variante 2	274	15.01.2018	WLTC	hot
7732	Variante 2	274	15.01.2018	Ermes_V8_Benzin_6Gang	hot
7733	Variante 2	274	15.01.2018	Ermes_V8_Benzin_6Gang	hot
7734	Variante 2	274	16.01.2018	Ermes_V8_Benzin_6Gang	cold
7735	Variante 2	274	16.01.2018	Ermes_V8_Benzin_6Gang	hot
7736	Variante 2	274	16.01.2018	Konstantpunkte	hot
7737	Variante 3	274	17.01.2018	Ermes_V8_Benzin_6Gang	cold
7738	Variante 3	274	17.01.2018	WLTC	hot
7739	Variante 3	274	17.01.2018	Konstantpunkte	hot
7740	Variante 4	274	18.01.2018	Ermes_V8_Benzin_6Gang	cold
7741	Variante 4	274	18.01.2018	Ermes_V8_Benzin_6Gang	hot
7742	Variante 4	274	18.01.2018	Konstantpunkte	hot
7743	Variante 5	274	18.01.2018	Ermes_V8_Benzin_6Gang	hot
7744	Variante 5	274	18.01.2018	Konstantpunkte	hot
7745	Variante 5	274	19.01.2018	Ermes_V8_Benzin_6Gang	cold

### 3.4 Messaufbau

Um verschiedene Applikationen des DTT-Verdünnungssystems zu untersuchen, wurden vier unterschiedliche Messaufbauten verwendet:

In Abbildung 13 ist Variante 1 ersichtlich. Hier erfolgte die Probenentnahme beider Systeme an derselben Stelle am Ende des CVS-Tunnels um das DTT-Verdünnungssystem mit dem TUG-IVT Verdünnungssystem zu vergleichen.

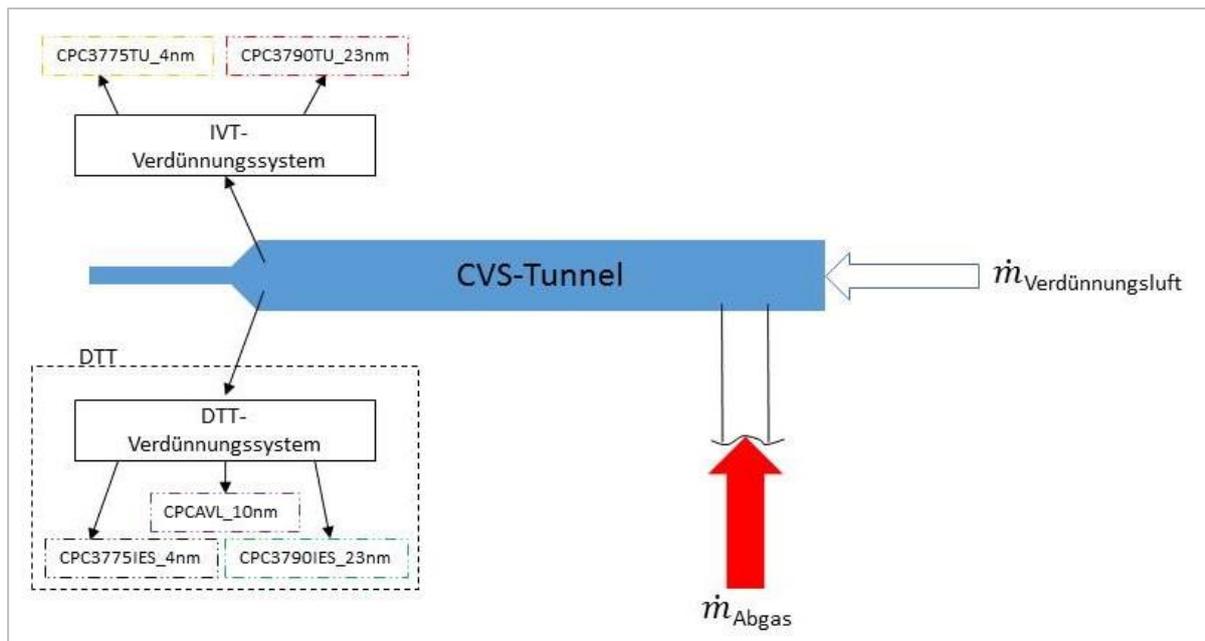


Abbildung 13: Messaufbau Variante 1

Bei den Messvarianten 2 und 4 (Abbildung 14 und Abbildung 15) entnimmt das DTT-Verdünnungssystem unverdünntes Abgas, wobei der Unterschied dieser 2 Aufbauten nur in der Art der letzten Verdünnungsstufe des DTT-Verdünnungssystems liegt. Bei Version 2 wird mit einem Ejector Diluter verdünnt und bei Version 4 mit einem vom IES selbst entwickelten Bypass System.

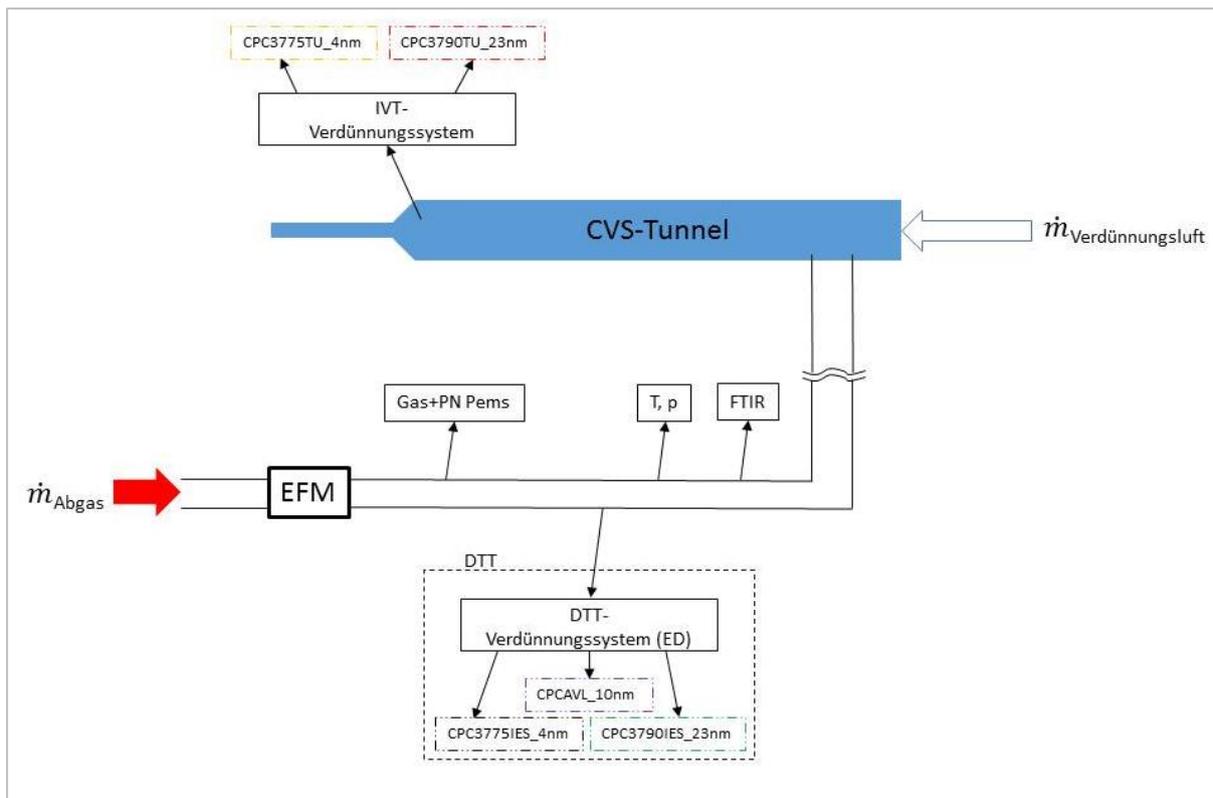


Abbildung 14: Messaufbau Variante 2

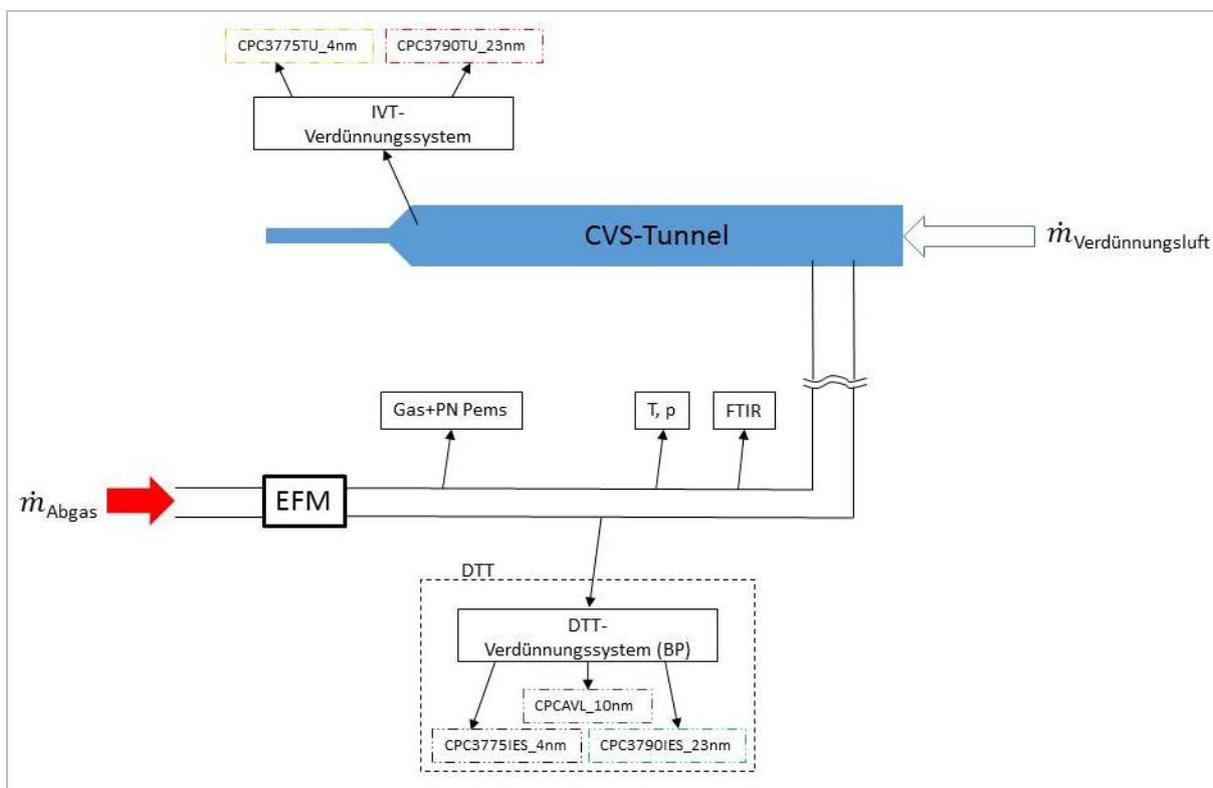


Abbildung 15: Messaufbau Variante 4

Der Messaufbau Variante 5 (Abbildung 16) ist mit einem offenen Trichter nach der DTT Entnahmestelle und vor dem CVS-Tunnel versehen. Dieser dient der Simulation von RDE on-board Tests, wo das Abgas nach der Entnahmestelle in die Umgebung (sprich in

Umgebungsdruck  $p_u$ ) abströmt.

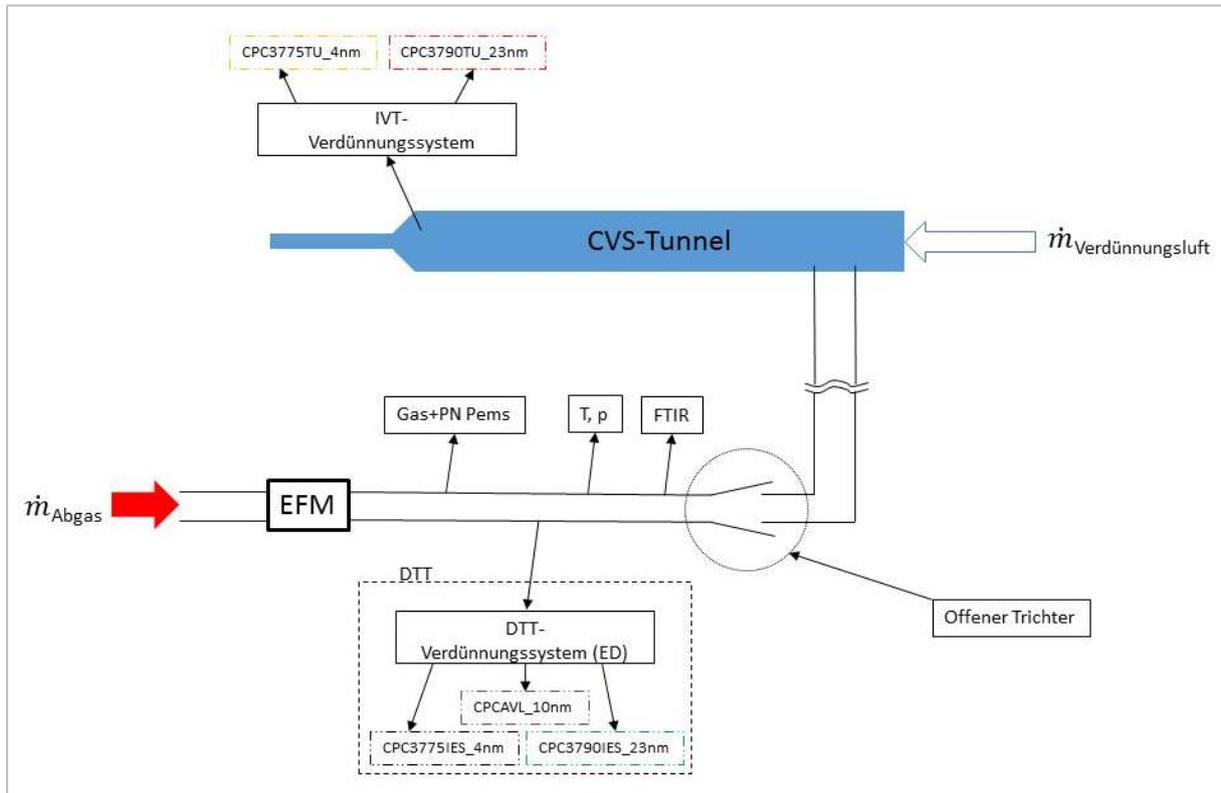


Abbildung 16: Messaufbau Variante 5

Der Messaufbau Nummer 3 (Abbildung 17) lieferte keine plausiblen Werte, da der Unterdruck im Abgasrohr zu groß war und die CPC's dadurch kein Abgas mehr ansaugen konnten. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird daher auf diesen Messaufbau und dessen Messergebnisse nicht mehr genauer eingegangen.

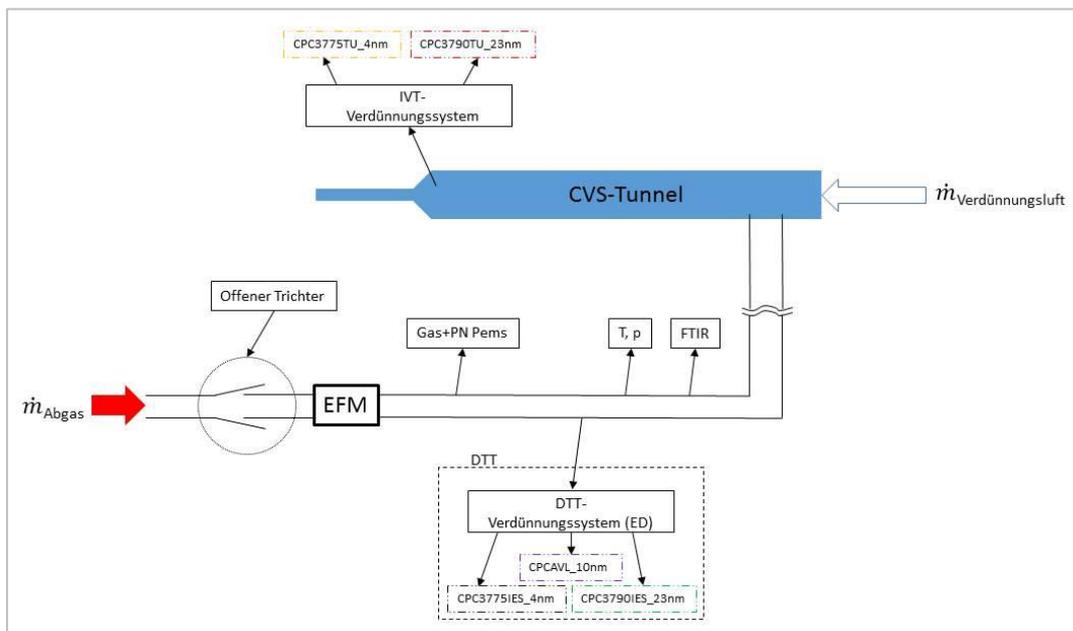


Abbildung 17: Messaufbau Variante 3

Abbildung 18 zeigt den Aufbau der Messgeräte für die verdünnte Probenentnahme am Ende des CVS-Tunnels. Hier ist anzumerken, dass auf eine gleiche Rohrleitungslänge von der Entnahmestelle zur Verdünnungseinheit (Prüfstandsverdünnung und DTT-Verdünnung) geachtet worden ist.

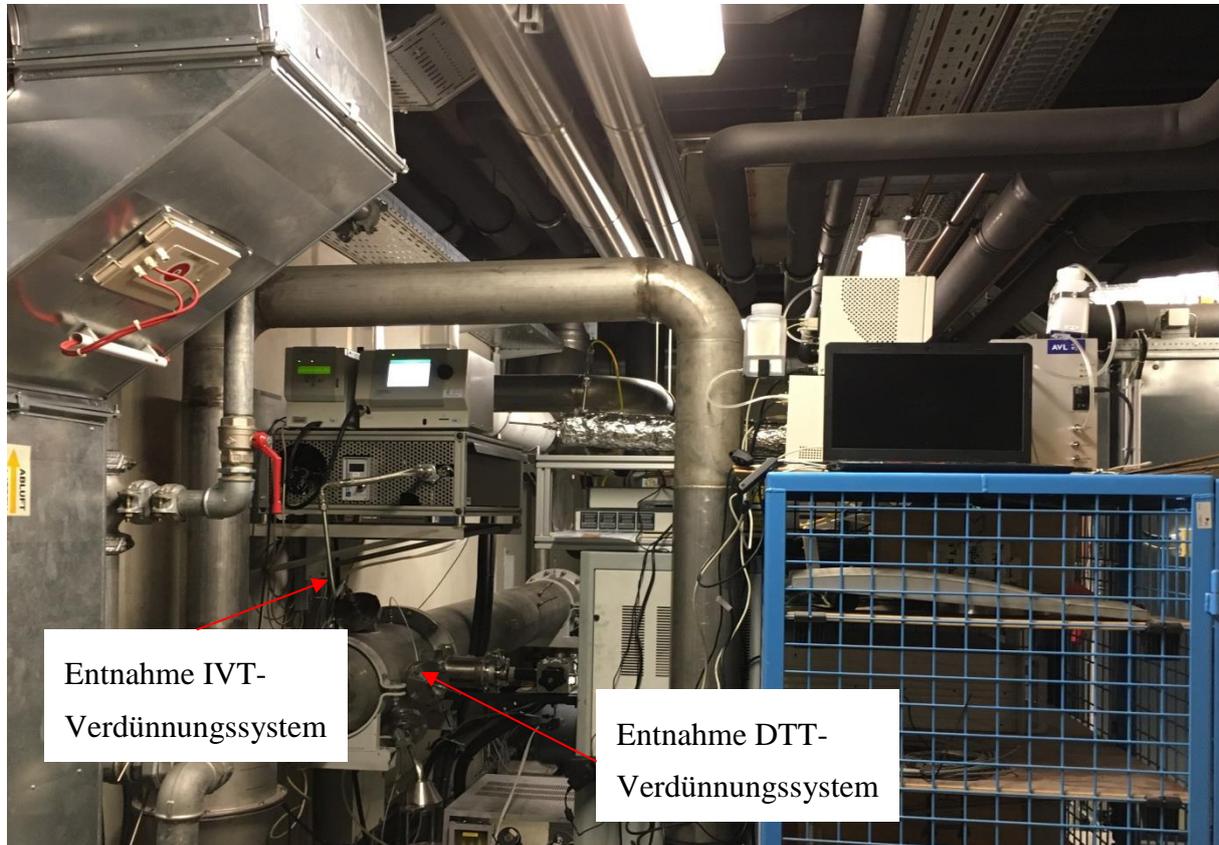


Abbildung 18: Messaufbau der verdünnten Probenentnahme Variante 1

Der tatsächliche Messaufbau für die unverdünnte Probenentnahme des DTT-Verdünnungssystems Variante 2-5 ist in Abbildung 19, Abbildung 20 sowie in Abbildung 21 ersichtlich. Abbildung 22 zeigt den für die Messvariante 5 eingebauten Trichter vor CVS-Eingang.



Abbildung 19: gesamter Messaufbau der DTT-Messung am PKW-Rollenprüfstand

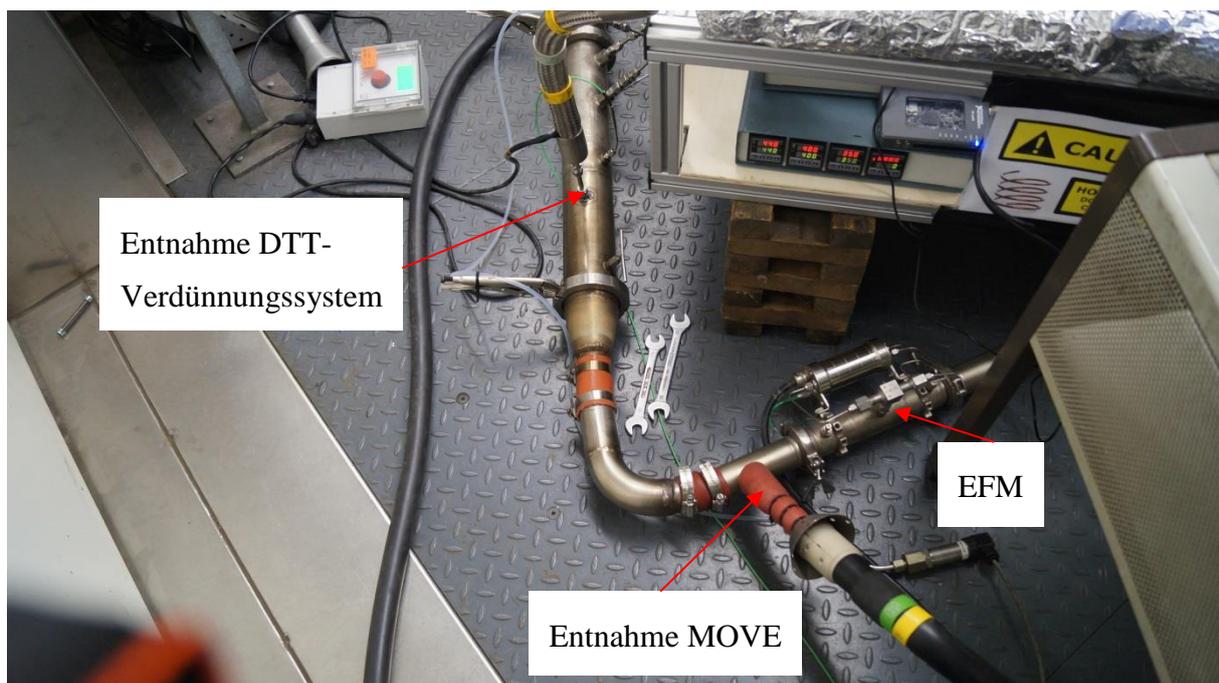


Abbildung 20: DTT-Messung: Detail EFM und Entnahmeposition AVL MOVE

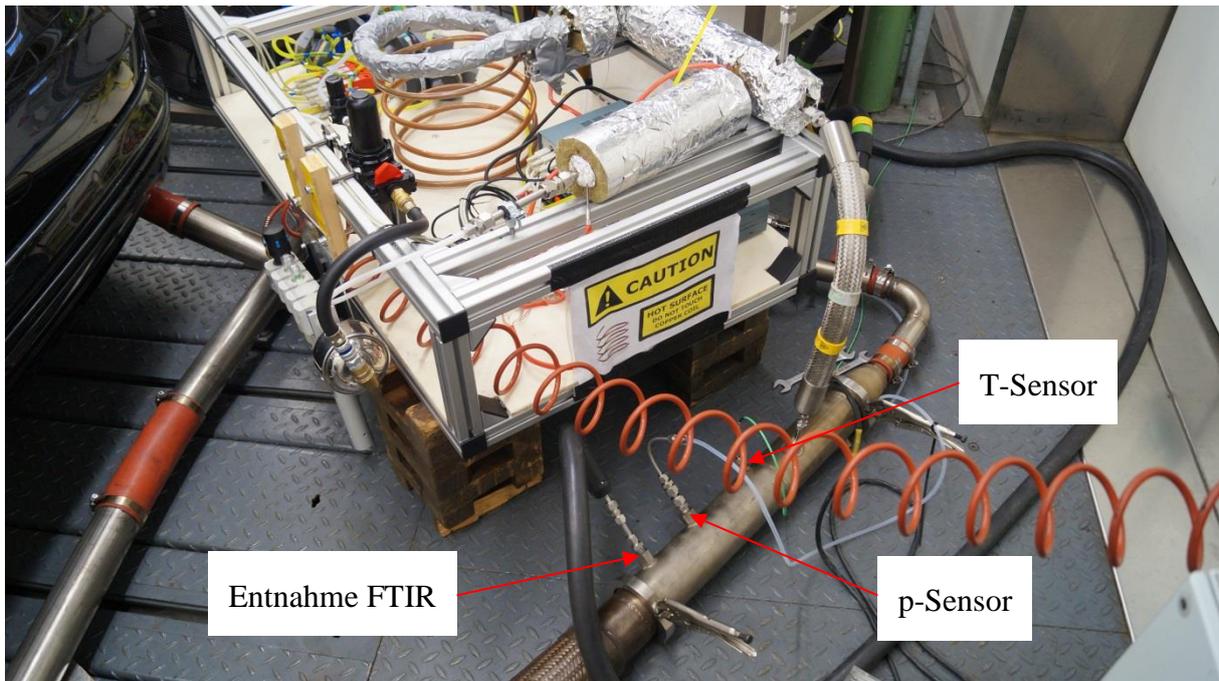


Abbildung 21: DTT-Messungen: Detail Entnahmeposition FTIR und DTT-Verdünnungssystem



Abbildung 22: Trichtereinbau vor CVS-Eingang Messvariante 5

### 3.5 Datenauswertung

Die im vorherigen Kapitel beschriebenen Messungen lieferten eine Fülle an Daten, welche nun ausgewertet werden mussten. Die aus den verwendeten Messgeräten gewonnen Rohdaten (Prüfstandsmesstechnik, AVL MOVE, FTIR und die an das DTT-Verdünnungssystem angeschlossenen CPC's) sind jeweils mit verschiedenen Auswerteprogrammen bzw. Auswertetechniken ausgewertet worden. Die Rollenprüfstandsmessgeräte und das AVL MOVE sind mit dem am Institut entwickelten ERMES Tool ausgewertet worden, die FTIR Daten mit einem eigens zur FTIR Auswertung programmierten Excel Programm und die einzelnen DTT-CPC's Daten sind mittels angefertigter Excel Datei richtig zeitverschoben worden und mit dem Abgasmassenstrom multipliziert worden.

Begonnen wurde mit der Auswertung der Prüfstandsdaten mittels ERMES Tool. Die sekundlichen Emissionsmassenwerte als auch die PN's der Prüfstandsanalytoren wurden auf die positive Motorleistung zeitlich zugeordnet. Anschließend wurden die AVL MOVE Daten ebenfalls mit dem ERMES Tool ausgewertet. Da bei dieser Messkampagne das AVL MOVE nicht in die Prüfstandssoftware eingegliedert wurde, das heißt die Messung mit dem AVL MOVE System ist vor dem eigentlichen Messstart gestartet wurden und nach Ende des jeweiligen Zyklus beendet wurden, sind die sekundlichen Emissionsmassenwerte sowie der Abgasmassenstrom des AVL MOVE auf die der Prüfstandsanalytoren zeitlich verschoben worden. Dabei sind die zeitlichen CO<sub>2</sub>-Verläufe des AVL MOVE auf die zeitlichen CO<sub>2</sub>-Verläufe der Prüfstandsdaten angepasst worden und alle anderen sekundlichen Emissionsmassenwerte sowie der Abgasmassenstrom mit derselben zeitlichen Differenz verschoben worden. Die Messdaten vom FTIR Messgerät sind im Prinzip mit derselben Methode ausgewertet worden, nur dass hier die zeitliche Zuordnung von den CO<sub>2</sub>-Verläufen schon vor der eigentlichen Umrechnung vom [ppm] auf [g/s] durchgeführt worden ist. (CO<sub>2</sub>\_FTIR in [ppm] angepasst auf CO<sub>2</sub>\_Prüfstand in [ppm] und alle anderen Rohdaten der FTIR Messung gleich zeitverschoben, sowie Start und Ende der FTIR-Messung auf Zykluslänge abgeschnitten, da auch die FTIR Messung vor dem tatsächlichen Messstart begonnen wurde bzw. erst nach dem eigentlichen Messenden gestoppt wurde)

Abschließend sind die einzelnen CPC's, welche an das DTT-Verdünnungssystem angeschlossen waren, ausgewertet worden. Bei der ersten Kontrolle der erhaltenen Rohdaten der CPC's ist aufgefallen, dass der CPC3790IES\_23nm keine korrekten Daten wiedergegeben hat (die Übermittlung der Daten erfolgte nicht in der Frequenz von 2 [Hz], sondern willkürlich) und wurde somit auch nicht ausgewertet. Der CPC3775IES\_4nm war in die Prüfstandssoftware eingebunden und musste somit nicht extra zeitverschoben bzw. die Signallänge (Start/Ende der Messung) und die Signalfrequenz nicht geändert werden. Der CPCAVL\_10nm lieferte Rohdaten in 2 [Hz], welche auf 1[Hz] interpoliert wurden, und zeitlich an den CPC3775IES\_4nm angepasst. Somit konnten aus den angepassten sekundlichen Rohdaten [ppm] über die Gleichung (3-1) die sekundliche Partikelanzahl PN in [#s] berechnet werden. Dafür wird der Abgasvolumenstrom bei Normbedingungen benötigt, welcher aus dem gemessenen Abgasmassenstrom berechnet wurde (siehe Gleichung(3-2)). Bei dem Verdünnungsfaktor DF wurde eine kleine Vereinfachung getroffen. Dieser ist für die Auswertung über den jeweiligen Zyklus gemittelt worden und beinhaltet einen Korrekturfaktor von 1,2 für Partikelverluste in den Zuleitungen. Die gemittelten Verdünnungsfaktoren sind in Tabelle 3-3 dargestellt.

$$PN = pc * DF * \dot{V}_{Abgas_{Norm}} * 10^6 \quad (3-1) [3]$$

$PN$  .....Partikelanzahl [#s]

$pc$  .....Partikelanzahlkonzentration [#/cm<sup>3</sup>]

$DF$  .....Verdünnungsfaktor [/]

$\dot{V}_{Abgas_{Norm}}$ .....Abgasvolumenstrom bei Normbedingungen [m<sup>3</sup>/s]

$$\dot{V}_{Abgas_{Norm}} = \dot{m}_{Abgas} * R_{Luft} * \frac{T_{Norm}}{p_{Norm}} \quad (3-2) [1]$$

$\dot{m}_{Abgas}$ .....gemessener Abgasmassenstrom [kg/s]

$R_{Luft}$ .....Gaskonstante für Luft 287,1[J/kgK]

$T_{Norm}$ .....Temperatur bei Normbedingungen 273,15[K]

$p_{Norm}$ .....Druck bei Normbedingungen 101330[Pa]

Tabelle 3-3: Verdünnungsfaktoren des DTT-Verdünnungssystems

Zyklusnummer	Verdünnung
7723	132,16
7724	145,61
7725	145,30
7726	162,12
7727	145,39
7728	144,96
7729	145,01
7730	948,12
7731	945,34
7732	942,55
7733	942,40
7734	920,36
7735	914,79
7736	913,89
7737	878,09
7738	828,68
7739	879,99
7740	3947,42
7741	3952,09
7742	3904,71
7743	920,13
7744	920,78
7745	923,89

Bei erster Betrachtung der nun ausgewerteten Daten ist erkennbar, dass die CO<sub>2</sub> Verläufe von dem Prüfstandanalysator nicht sehr gut mit den AVL MOVE CO<sub>2</sub> Verläufen zusammenstimmen (nur bei Vergleich CVS-Messung mit unverdünnter Messung Zyklen 7730-7745). Besonders am Ende der gefahrenen Zyklen, also in den höherlastigen Bereichen (vgl. Abbildung 11 und Abbildung 12 sowie in Abbildung 24 deutlich zu erkennen), ist eine größere Abweichung zu erkennen. Beispielhaft für alle Zyklen ist diese in Abbildung 23, Abbildung 25 und Abbildung 24 dargestellt.

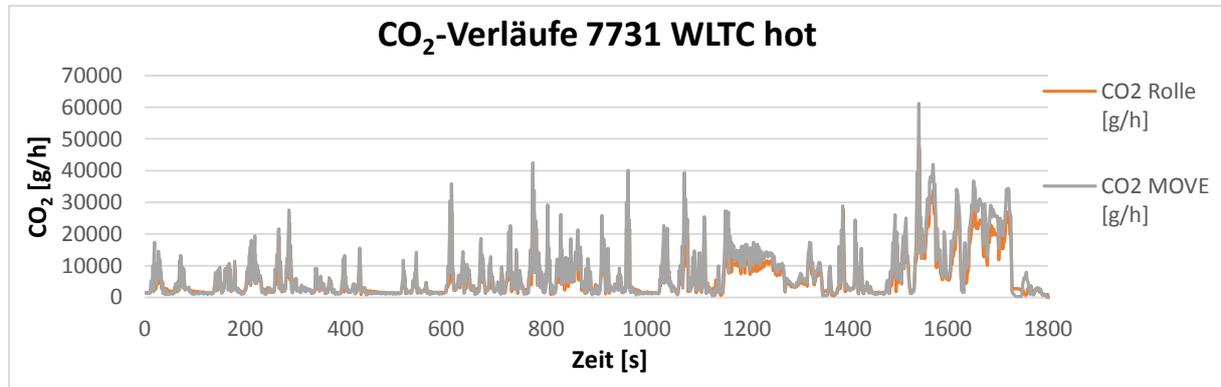


Abbildung 23: CO<sub>2</sub> Verläufe 7731 WLTC hot

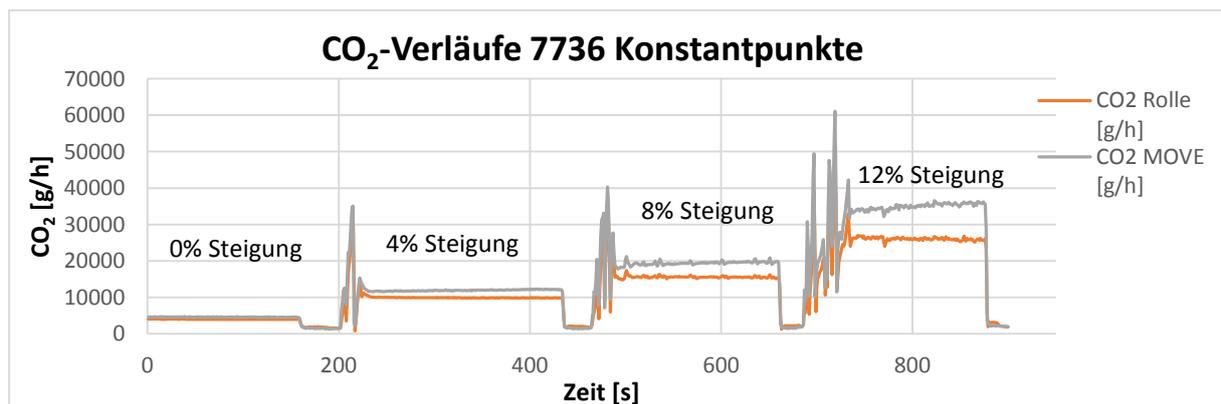


Abbildung 24: CO<sub>2</sub> Verläufe 7736 Konstantpunkte

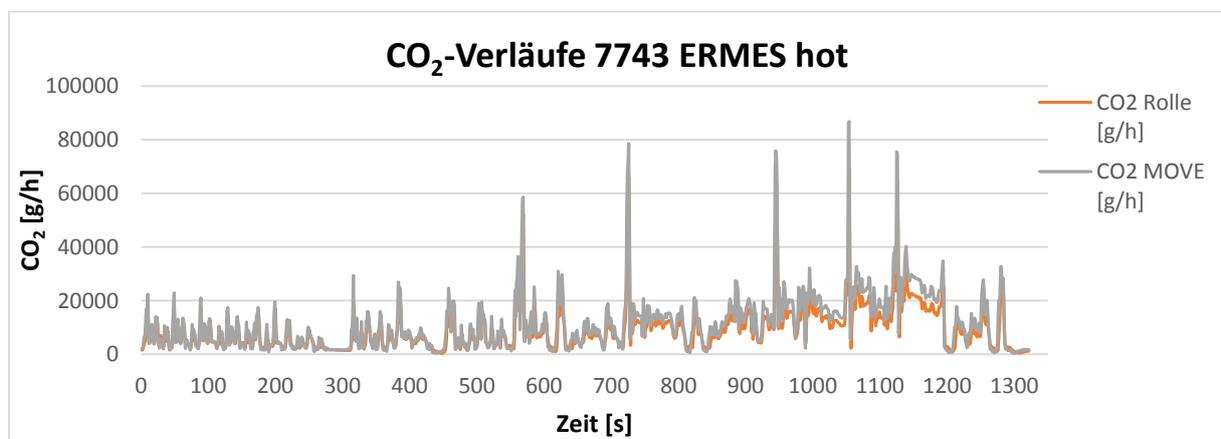


Abbildung 25: CO<sub>2</sub> Verläufe 7743 ERMES hot

Grund für diese Abweichung war das EFM des AVL MOVE, welches eine nicht korrekte Softwareaktualisierung bekommen hatte. Da die gesamte Auswertung schon durchgeführt worden war, ist versucht worden, eine Massenstromkorrekturfunktion Polynom 2. Grades zu finden, mit der man die Daten, welche mit dem falschen AVL MOVE Massenstrom berechnet worden sind, auf einfachem Weg hätte korrigieren können. Die Ergebnisse waren nicht befriedigend und die Funktion ist verworfen worden.

Somit musste die vorher beschriebene Auswertung geändert werden und der Abgasmassenstrom für jeden Zyklus nach Gleichung (3-3) berechnet werden.

$$\dot{m}_{Abgas} = \frac{CO_{2\_Rolle}}{CO_{2\_FTIR} * U_{Gas\_Benzin}} \quad (3-3)$$

$\dot{m}_{Abgas}$ .....berechneter Abgasmassenstrom [kg/s]

$CO_{2\_Rolle}$ .....sekündliche  $CO_2$  Massenemissionswerte des Prüfstandsmessgerätes [g/s]

$CO_{2\_FTIR}$ .....von 5 [Hz] auf 1 [Hz] interpolierte  $CO_2$  Rohdaten des FTIR [%]

$U_{Gas\_Benzin}$ ..... $U_{Gas}$  Faktor für Benzin=1.518 [mg  $CO_2$ /mg Abgas]

Mit dem neu berechneten Abgasmassenstrom sind nun die AVL MOVE und FTIR Massenemissionen sowie die PN der DTT-CPC's neu ausgewertet worden.

Des Weiteren sind die gemittelten Emissionswerte der Prüfstandsanalytoren noch mit einem Korrekturfaktor multipliziert worden, weil zwischen Auspuff und CVS-Anlage-Eingang einige Messgeräte angeschlossen waren, welche den zugeführten Abgasmassenstrom zur CVS-Anlage verringerten. Abbildung 26 zeigt die genauen Entnahmepositionen der einzelnen Messgeräte. Das AVL MOVE entnimmt konstant einen Normvolumenstrom 2,5 [l/min], das FTIR circa [15 l/min] (nicht konstant). Das DTT-Verdünnungssystem entnimmt abhängig von der Auswahl der letzten Verdünnungsstufe einen Normvolumenstrom von 3,1 [l/min] (Zyklen: 7730-7739 und 7743-7745 bei Einbau eines Ejector Diluters) oder 4,0 [l/min] (Zyklen: 7740-7742 bei Einbau der Bypass Verdünnung).

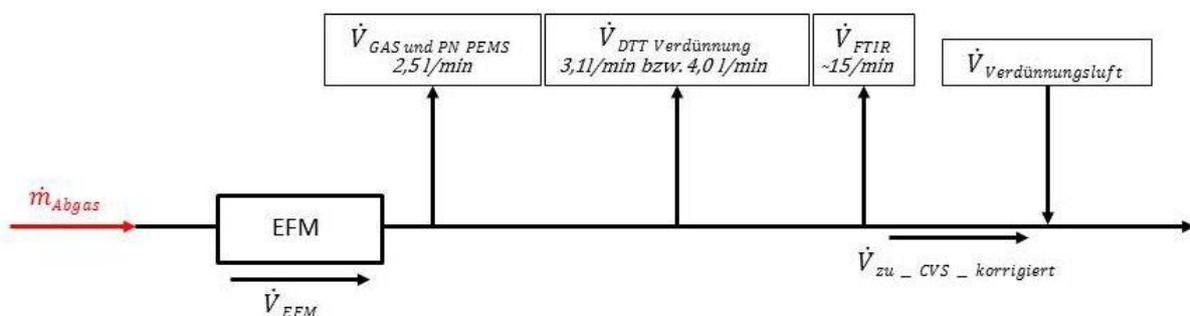


Abbildung 26: Entnahmeposition der Messgeräte

Der FTIR Volumenstrom musste auf einen Normvolumenstrom umgerechnet werden. Die dazu benötigten Werte FTIR-Druck, FTIR-Temperatur und FTIR-Durchfluss sind bekannt. Damit lässt sich über die ideale Gasgleichung zuerst der vorhandene Massenstrom berechnen und mit diesem Massenstrom sowie Normtemperatur und Normdruck nach Gleichung (3-2) der Normvolumenstrom des FTIR berechnen. Somit sind alle vor CVS-Eingang entnommenen Normvolumenströme bekannt und mittels einfacher Subtraktion (Gleichung (3-4)) kann der tatsächliche, der CVS-Anlage zugeführte, Volumenstrom  $\dot{V}_{zu-CVS-korrigiert}$  berechnet werden.

$$\dot{V}_{zu-CVS-korrigiert} = \dot{V}_{zu-CVS-unkorrigiert} - \dot{V}_{Gas\ und\ PN\ PEMS} - \dot{V}_{DTT\ Verdünnung} - \dot{V}_{FTIR} \quad (3-4)$$

Der Korrekturfaktor  $Kf$  berechnet sich nun nach der Formel (3-5):

$$Kf = \frac{\dot{V}_{zu-CVS-unkorrigiert}}{\dot{V}_{zu-CVS-korrigiert}} \quad (3-5)$$

Nun ist eine Iteration ( $i=1; 2, \dots, 100$ ) von Nöten, da für die oben angeführte erste Berechnung des Abgasvolumenstroms die FTIR Daten und die CVS-Daten verwendet werden. Der unkorrigierte Abgasvolumenstrom  $\dot{V}_{zu-CVS-unkorrigiert}$  ist mit dem Korrekturfaktor  $Kf$  zu multiplizieren (Gleichung (3-6)) und dieses Ergebnis ist in Gleichung (3-7) einzusetzen. Der Iterationsschritt endet mit der Berechnung des neuen Korrekturfaktors (Gleichung (3-8)).

$i=1$ :

$$\dot{V}_{zu-CVS-unkorrigiert}^i = Kf^i * \dot{V}_{zu-CVS-unkorrigiert} \quad (3-6)$$

$$\dot{V}_{zu-CVS-korrigiert}^i = \dot{V}_{zu-CVS-unkorrigiert}^i - \dot{V}_{Gas\ und\ PN\ PEMS} - \dot{V}_{DTT\ Verdünnung} - \dot{V}_{FTIR} \quad (3-7)$$

$$Kf(i+1) = \frac{\dot{V}_{zu-CVS-unkorrigiert}^i}{\dot{V}_{zu-CVS-korrigiert}^i} \quad (3-8)$$

Mit diesem Korrekturfaktor sind abschließend alle sekundlichen Emissionsmassenwerte [g/s] und die Partikelanzahl [#s] der Prüfstandsanalytoren sowie die sekundlichen Emissionsmassenwerte [g/s] des FTIR multipliziert worden. Für die Partikelanzahlen aus den DTT-Verdünnungssystem [#s] ist der, mit  $Kf$  korrigierte, Abgasmassenstrom verwendet worden. Abbildung 27 zeigt die korrigierten CO<sub>2</sub>-Verläufe der Prüfstandsmessgeräte und die des AVL MOVE. Es ist eine deutliche Verbesserung zu den in Abbildung 27 dargestellten, mit falschem Abgasmassenstrom berechneten CO<sub>2</sub> Verläufen erkennbar. Auch die modalen CO<sub>2</sub> FTIR Daten passen sehr gut mit jenen von den Prüfstandsmessgeräten und AVL MOVE zusammen, sind aber der Übersicht halber nicht im Diagramm dargestellt.

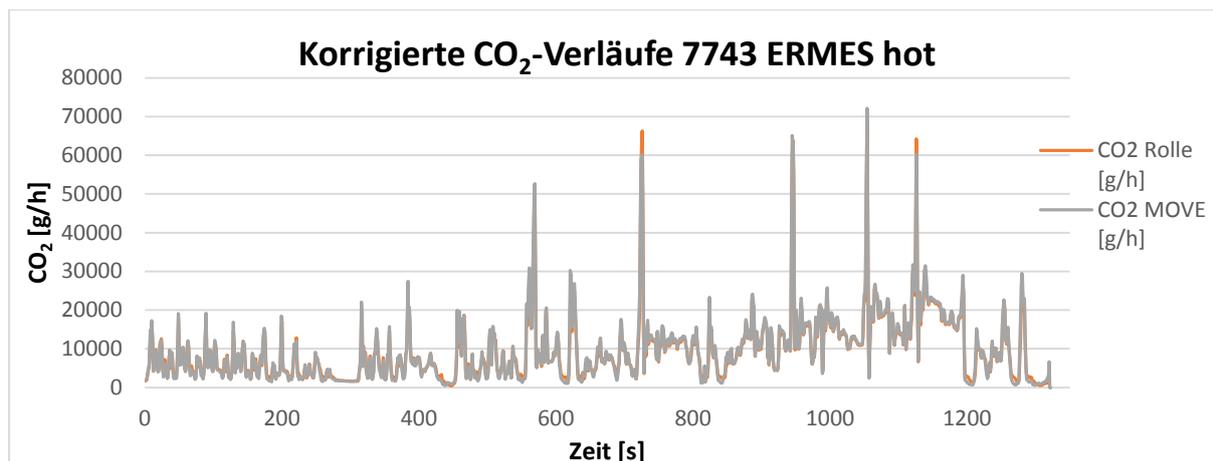


Abbildung 27: korrigierte CO<sub>2</sub> Verläufe 7743 ERMES

Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Datenauswertung korrekt durchgeführt worden ist. Im folgenden Kapitel wird nun auf die Ergebnisse der DTT-Messkampagne genauer eingegangen.

### 3.6 Ergebnisse der DTT-Messungen

Für die in Kapitel 5 folgende Messung am PET Prüfstand ist es wichtig zu wissen, wie sehr die verschiedenen eingesetzten Messgeräte voneinander abweichen. Beim Vergleich der gasförmigen Emissionen werden nur die Zyklen 7730-7745 betrachtet, da bei der Messvariante 1 (Abbildung 13) nur mit den Prüfstandsanalysatoren (in den folgenden Diagrammen als Prüfstand bezeichnet) gemessen wurde. Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Partikelmessung wird auf alle gefahrenen Zyklen näher eingegangen

#### 3.6.1 Vergleich der gasförmigen Emissionskomponenten

In Abbildung 28 und Abbildung 29 sind die gemittelten CO<sub>2</sub>, CO, NO und NO<sub>x</sub> Werte für den Zyklus 7731 WLTC hot in [g/km] dargestellt. Einen Überblick der gesamten Messwerte aller Zyklen sowie die prozentuelle Abweichung der AVL MOVE Werte zu den FTIR Werten zeigt die im Anhang ersichtliche Tabelle 0-1. Bei der Gegenüberstellung der Messwerte ist darauf zu achten, in welcher Konzentration diese im Abgas vorkommen, denn bei geringen Konzentrationen ergibt eine kleine Abweichung schon einen großen prozentualen Fehler. Dies ist am Beispiel der NO bzw. NO<sub>x</sub> Werte in Abbildung 30 ersichtlich.

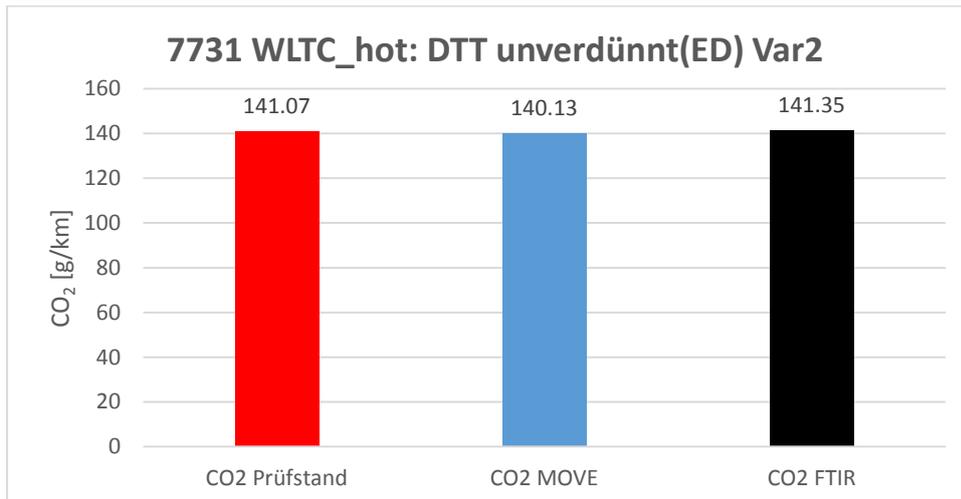


Abbildung 28: 7731 WLTC hot: CO<sub>2</sub> Vergleich

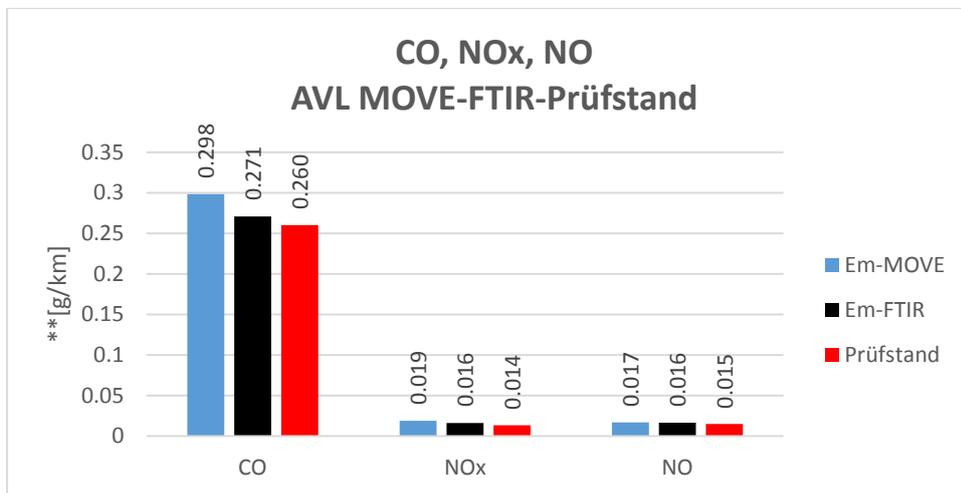


Abbildung 29: 7731 WLTC hot: Vergleich von CO, NO<sub>x</sub>, NO

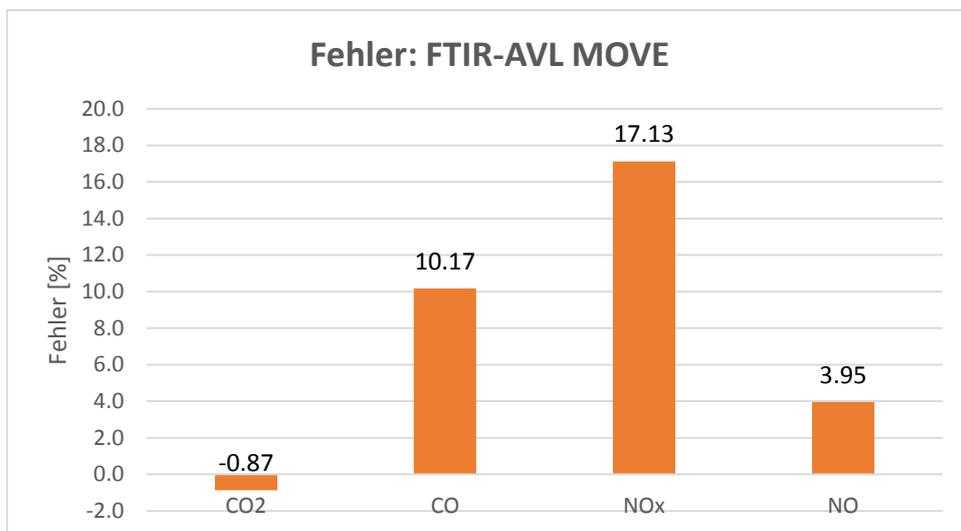


Abbildung 30: 7731 WLTC hot: prozentueller Fehler bei unverdünnter Messung von AVL MOVE zu FTIR

Die gemessenen Abweichungen von FTIR zu AVL MOVE liegen für die jeweiligen Abgaskomponenten in den Bereichen von:

- CO<sub>2</sub>: -0,87% bis 2,84%
- CO: -23,84% bis 10,17%
- NO<sub>x</sub>: -10,05% bis 17,13%
- NO: -12,05% bis 8,87%

### 3.6.2 Vergleich der Partikelmessungen

In diesem Kapitel wird auf die Messergebnisse der Partikelmessung eingegangen und hier im Speziellen auf den Unterschied zwischen der IVT Prüfstandsverdünnung und der DTT Verdünnung. In den folgenden Diagrammen sind Messwerte der Labor-CPC's immer rot bzw. orange sowie die Messwerte der DTT-CPC's immer schwarz bzw. violett dargestellt. Das AVL MOVE PN PEMS ist mit blauer Farbe gekennzeichnet.

Bei den ersten durchgeführten Messungen (Messungen 7722 bis 7730) haben beide Verdünnungssysteme einen Teilabgasvolumenstrom an derselben Stelle im CVS-Tunnel entnommen (siehe Abbildung 13). In Abbildung 31 und Abbildung 32 sind die gemessenen Partikelanzahlen für einen WLTC-Warmstart Zyklus und für einen ERMES-Warmstart Zyklus abgebildet. Wie zu erwarten war, geben die 4nm CPC's höhere Partikelanzahlen aus als die 10 bzw. 23 nm CPC's. An dieser Stelle ist noch zu erwähnen, dass der 23nm CPC des IVT Labormesssystems nicht korrekt kalibriert war und deswegen die Messwerte des in rot dargestellten CPC's um circa 10% zu gering sind. Vergleicht man hier die zwei baugleichen 4nm CPC's, so kann man durchaus sagen, dass der Unterschied der Messwerte, für Partikelmessungen mit etwa 15% bis 20% im WLTC nicht allzu groß ist. Mögliche Ursachen für Abweichungen sind generell die gemessenen Verdünnungsfaktoren der PN Messsysteme, der gemittelte Verdünnungsfaktor bei der DTT-Verdünnung, Unterschiede in Partikelverlusten in den Entnahmesystemen, sowie Unterschiede in der Effizienz, mit der Nukleationspartikel entfernt werden.

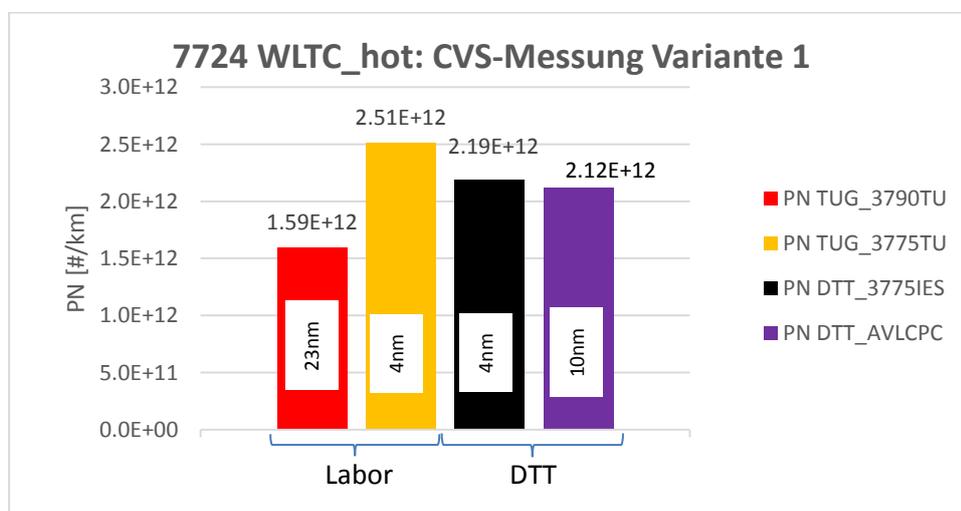


Abbildung 31: Partikelmessung CVS-Entnahme 7724 WLTC hot

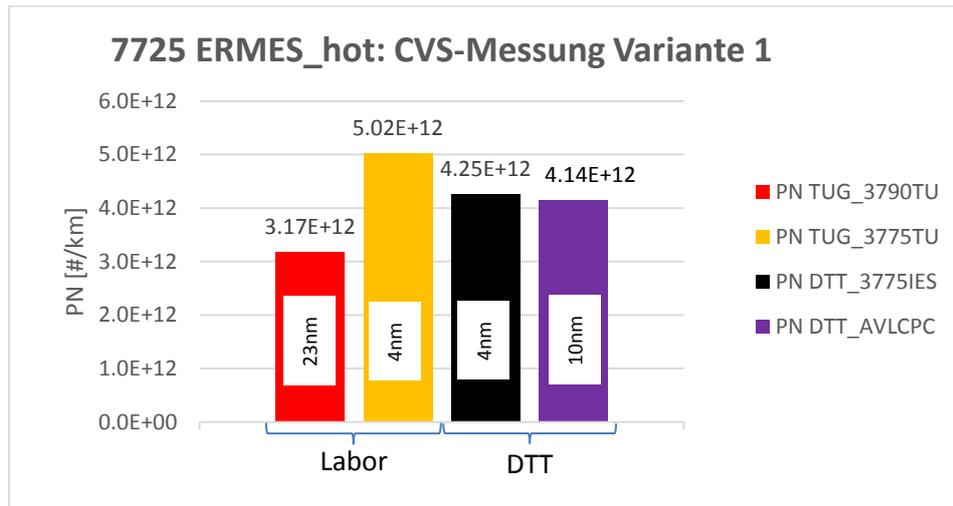


Abbildung 32: Partikelmessung CVS-Entnahme 7725 WLTC hot

Betrachtet man die Ergebnisse des Zyklus 7729 (Abbildung 33), bei dem Konstantpunkte gefahren worden sind, so ist deutlich ersichtlich, dass der 4nm CPC des Labormesssystems eine erheblich größere Partikelanzahl misst, als der 4nm CPC angeschlossen an das DTT-Verdünnungssystem. In Abbildung 34 ist zu sehen, dass dieser Unterschied vor allem bei hoher Last (12% Steigung) entsteht. Aufgrund dessen ist der Abgastemperaturverlauf über der Zeit (Abbildung 35) betrachtet worden und es zeigte sich ein deutlicher Abgastemperaturanstieg bei der Fahrt mit 50km/h bei 12% Steigung (Temperaturanstieg von 72°C auf 183°C). Wahrscheinlich handelt es sich um volatile Partikel, denn es ist zu erwarten, dass das IVT-Verdünnungssystem anfälliger für die RE-Kondensation volatiler Partikel nach der Verdünnung ist als das DTT-System. Das IVT-System hat ja eine Verdünnungsstufe, in der zwar die Partikel, nicht jedoch gasförmige Komponenten aus dem Abgas entfernt werden. Das würde erklären, warum nicht beide 4nm CPC's ähnlich hohe Werte anzeigen.

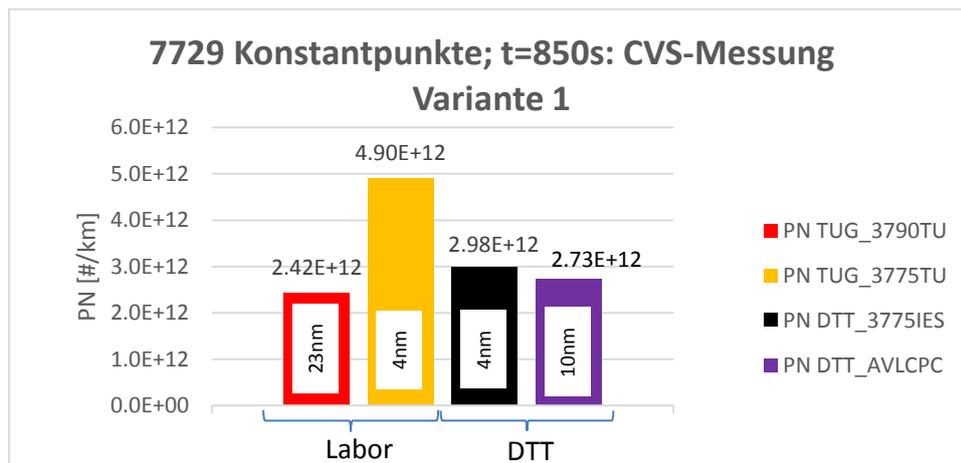


Abbildung 33: Partikelmessung CVS-Entnahme 7729 Konstantpunkte

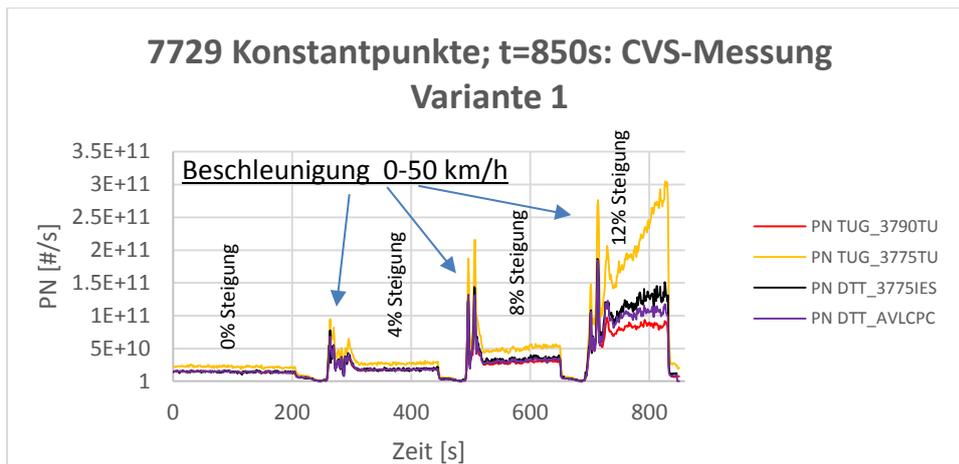


Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der Partikelanzahl für den Zyklus 7729

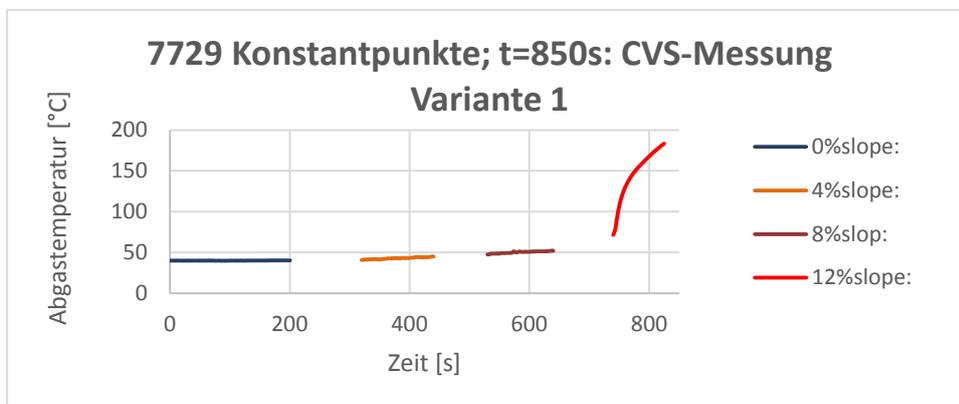


Abbildung 35: Abgastemperaturen für den Zyklus 7729

Nach abgeschlossener verdünnter Probenentnahme ist der Messaufbau adaptiert worden und das DTT-Verdünnungssystem hat nun unverdünntes Abgas entnommen (siehe Abbildung 14 und Abbildung 21). Des Weiteren sind die PN nun auch noch mit dem AVL MOVE PN PEMS gemessen worden (Abbildung 20).

Der Messaufbau 2 unterscheidet sich, wie in Kapitel 3.4 zuvor erwähnt, nur durch die Wahl der letzten Verdünnungsstufe des DTT-Verdünnungssystems. Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen den gleichen gefahrenen Zyklus (ERMES Kaltstart) einmal gemessen mit dem Ejector Diluter und einmal gemessen mit dem Bypass-System. Betrachtet man beide Messwerte der 4nm CPC's so ist kaum ein Unterschied erkennbar und die selbstgebaute Bypassverdünnung funktioniert einwandfrei. Dass die unverdünnte Messung (DTT in Abbildung 36 und Abbildung 37) etwas höhere Werte zeigt als die Labormessung aus dem CVS-Tunnel dürfte an den Partikelverlusten in der CVS-Anlage liegen.

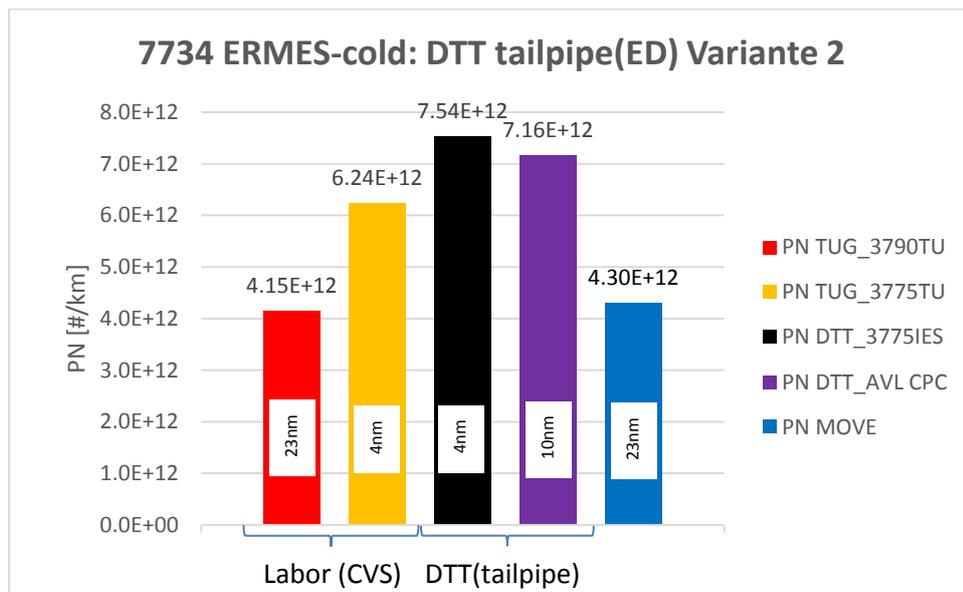


Abbildung 36: Partikelmessung DTT-Verdünnung mit Ejector Diluter (ED)

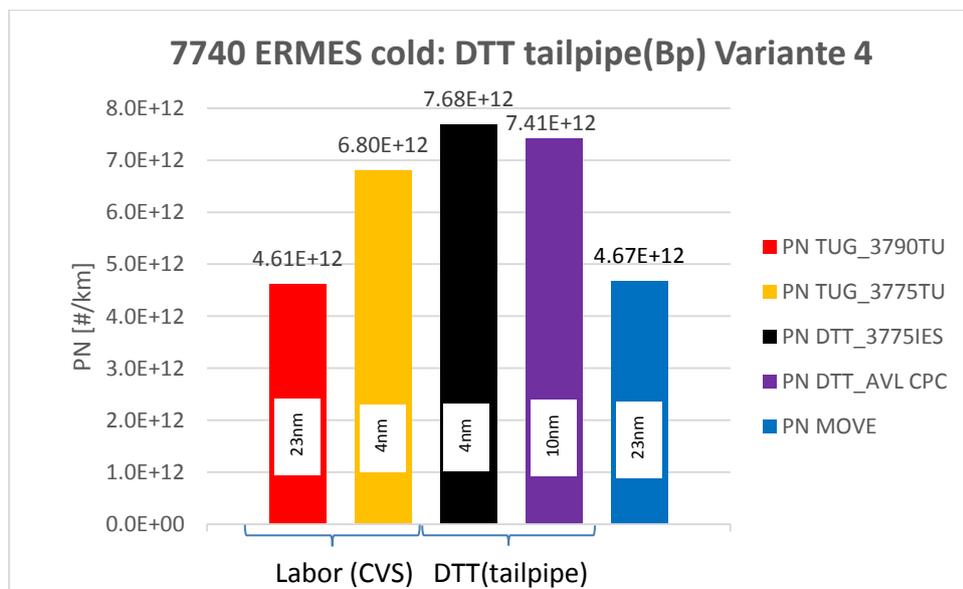


Abbildung 37: Partikelmessung DTT-Verdünnung mit Bypass (Bp)

Abschließend werden die Ergebnisse aus dem Messaufbau Variante 5: Messapplikation mit offenem Trichter (Abbildung 16), näher betrachtet. Vergleicht man Variante 5 mit Variante 2 so ist zu erkennen, dass bei geschlossener Abgasleitung (Variante 2) das 4nm CPC der DTT-Verdünnung mehr misst als das 4nm CPC der Laborverdünnung. Bei der Messvariante 5 ist das genau umgekehrt (siehe Abbildung 38 und Abbildung 39).

Da der einzige Unterschied beider Messvarianten nur in der Verbauung eines Trichters liegt, bei der das Ausströmen des Abgasmassenstroms in die Umgebung (in Umgebungsdruck) simuliert werden soll, liegt es nahe den Grund für diese Auffälligkeit bei den unterschiedlichen Druckniveaus in der Abgasleitung zu suchen. Der Anschaulichkeit wegen ist in Abbildung 40 nur ein kleiner Ausschnitt des Abgasdruckes für die Messvarianten 2, 4 und 5 dargestellt. Zu sehen ist ein markanter Peak. Bei den Messungen mit gänzlich geschlossener Abgasleitung (Variante 2 und 4) ist der Druckverlauf nahezu identisch (die

Abweichung stammt vom unterschiedlichen Umgebungsdruck, da diese Messungen nicht am gleichen Tag durchgeführt worden sind). Die Messung mit offenem Trichter hingegen weist einen deutlich niedrigeren Peak auf. Die Verdünnungsrate des Ejektor Diluters hängt vom Druck ab, daher sind leicht unterschiedliche Ergebnisse bei unterschiedlichen Drücken im Auspuffrohr zu erwarten.

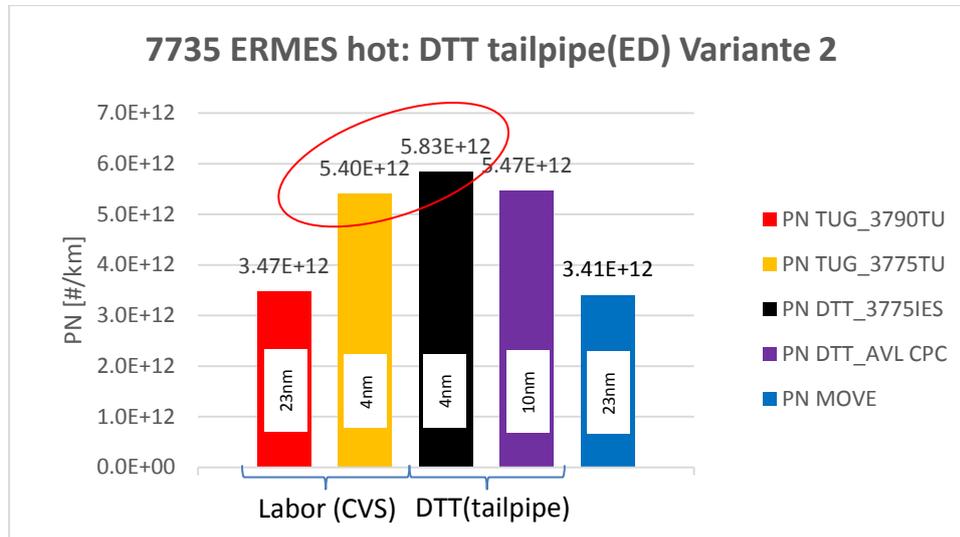


Abbildung 38: Partikelmessung Variante 2 für Zyklus 7735 ERMES hot

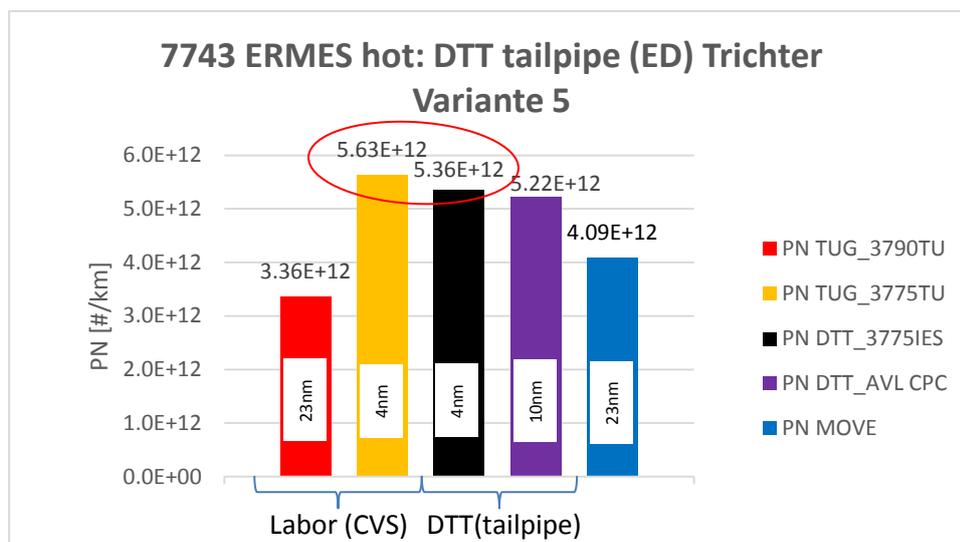


Abbildung 39: Partikelmessung Variante 5 für Zyklus 7743 ERMES hot

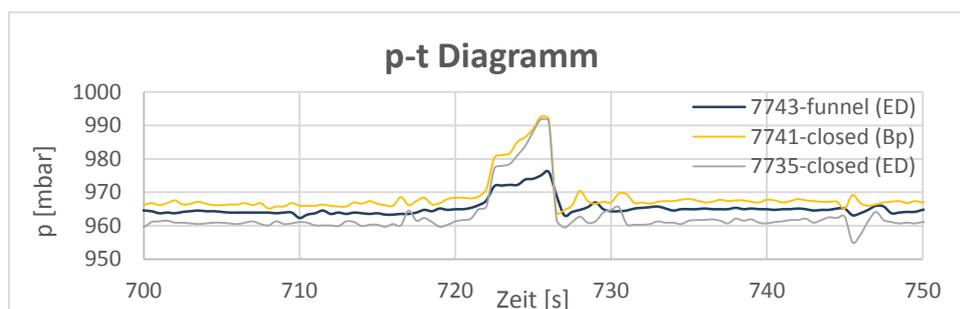


Abbildung 40: Detail des Abgasdrucks bei den Messvariante 2, 4 und 5

---

### **3.7 Zusammenfassung der DTT-Messungen**

Anhand der ermittelten Messdaten kann man zusammenfassend sagen, dass alle Messungen plausible Messergebnisse lieferten und dass das DTT-Verdünnungssystem für Partikelmessungen, vor allem für unverdünnte Probenentnahme, sehr gut geeignet ist. Durch die Druckabhängigkeit des Ejector Diluters kann es zu kleinen Ungenauigkeiten bei der Verdünnungsrate kommen, welche sich aber in einem durchaus akzeptablen Rahmen bewegen.

Der Ist-Vergleich von AVL MOVE PEMS zu FTIR bzw. zu den Prüfstandsanalytoren lieferte speziell bei den gasförmigen Abgasemissionen wertvolle Daten für die nachfolgenden Messungen mit dem PET-Prüfstand. Bei der Partikelanzahlmessung wird es deutlich schwieriger einen Unterschied in der Abweichung von gerüttelten zu nicht gerüttelten Messgeräten festzustellen, da schon bei ruhenden Messgeräten höhere Abweichungen erkennbar sind.

## 4 Konstruktion des PET Prüfstandes

In diesem Kapitel werden die Konstruktion, der Aufbau und die Inbetriebnahme des PET beginnend mit der Analyse der Ausgangsdaten über die Vorauslegung und Berechnung der wichtigsten Komponenten bis hin zur Konstruktion und Zusammenbau, näher beschrieben. In den Kapiteln 4.2 und 4.3 wird ein Überblick über die Konstruktion und deren Berechnung gegeben. Für die wichtigsten Konstruktionszeichnungen sowie die vollständige Berechnung von relevanten Bauteilen sei auf den Anhang C: Berechnung PET und auf den Anhang D: Konstruktionszeichnungen PET verwiesen.

### 4.1 Erstellung des Anforderungskataloges für den PET

Das für die Vorauslegung, Berechnung und Konstruktion notwendige Beschleunigungsprofil wurde während realen RDE Messfahrten mittels eines 3-achsigen Beschleunigungssensors aufgezeichnet, der jeweils auf den PEMS Geräten montiert war. Abbildung 41 zeigt ein gemessenes Beschleunigungsprofil und die aus diesem abgeleiteten Geschwindigkeits- und Positionsprofile. Aus den Messdaten wurden auch die Frequenzspektren der Bewegungen berechnet, welche für die Beschleunigungen in den der Achsen in Abbildung 42 zu sehen ist. Hier ist ersichtlich, dass sich die meisten Bewegungen während der RDE Fahrten in einer Frequenz von 1-5 [Hz] ändern. Aus diesen Daten wurden die grundlegenden Anforderungen an das PET-System abgeleitet.

Des Weiteren sind auch Einschränkungen bezüglich der Größe des PET-Prüfstandes festgelegt worden, da es auf Prüfständen neben dem zu messenden Fahrzeug aufgebaut werden muss.

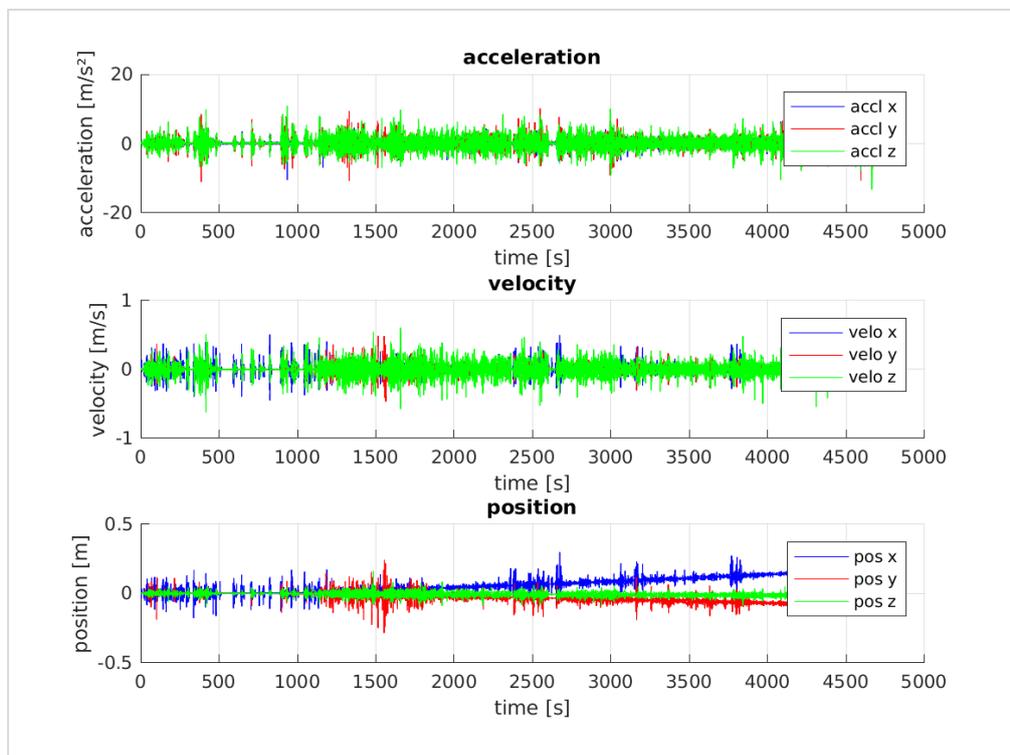


Abbildung 41: Bewegungsprofil einer RDE Messfahrt

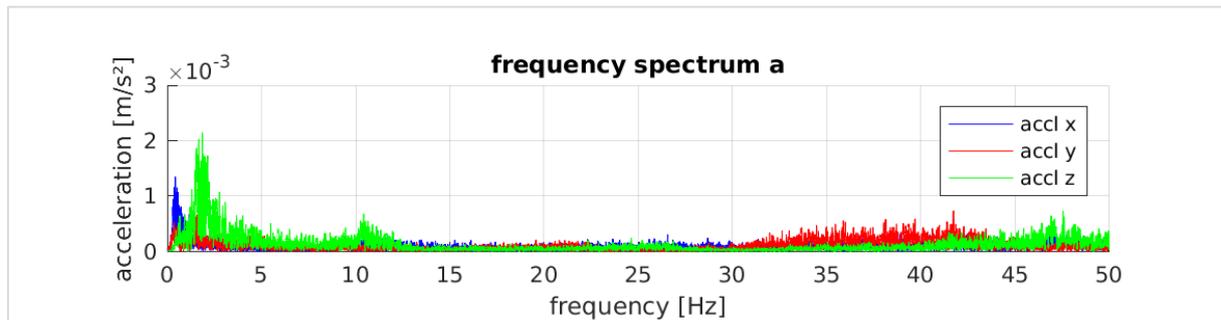


Abbildung 42: Frequenzspektrum der Beschleunigungen während einer RDE Messung

#### Anforderungskatalog PET:

- Beschleunigung: +/- 20 m/s<sup>2</sup>
- Hub: +/-100mm Verei
- Maximale Hauptabmessungen: 1500x1500x1500 (LxBxH)
- $\Delta p$ : 200 mbar Unterdruck
- $\Delta T$ : +/-10°C in 3 Minuten

Anfangs war gedacht das PEMS am PET mit einer Art Klimahaube abzudichten, um Druck- und Temperaturänderungen bei z.B. einer Fahrt auf einer Passstraße oder einer Fahrt in bzw. aus einem Tunnel nachbilden zu können, doch während der Konstruktionsphase wurde beschlossen, die Klimahaube separat zu bauen. Da es bei der Fertigstellung des PET Bewegungsapparates zu zeitlichen Verzögerungen gekommen ist, ist die Klimahaube zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht fertiggestellt und es wird deshalb in der folgenden Arbeit nicht näher darauf eingegangen.

Eine weitere Überlegung war die Bewegung in Fahrzeuginnenrichtung, am PET die x-Achse, darzustellen, da es hier im realen Fahrbetrieb beim Beschleunigen und Verzögern des Fahrzeuges zu länger andauernden Beschleunigungen kommt, welche aufgrund der Abmessungen des PET nicht nachgestellt werden können. Aus diesem Grund und auch weil das System einfacher wird, wird die Bewegung des PET in x-Richtung gesperrt. Sollte man jedoch trotzdem den Einfluss dieser Beschleunigungen auf die PEMS testen wollen, so ist es durchaus möglich die Messgeräte um 90° um die z-Achse verdreht zu montieren. Damit kann man durch y-Bewegung des PET Beschleunigungen in Fahrzeuginnenrichtung auf die Messgeräte simulieren.

## 4.2 Konzepterstellung, Vorauslegung und Berechnung

Nach anfänglicher Literaturrecherche über Schwingungsprüfstände und parallelkinematische Maschinen [16] ist ein erster Konzeptentwurf erstellt worden. Die erste Skizze des Konzeptes wird in Abbildung 43 gezeigt. Prinzipiell handelt es sich um einen sogenannten Tripod. Die einzelnen Beine des Tripods sind als rote Linien dargestellt. Befestigt werden die Beine auf beiden Seiten mit Kugelgelenken, um die Plattform in alle Richtungen bewegen zu können. Angeordnet sind die 3 Motoren zueinander in einem Winkel von  $120^\circ$  und mit einem Anstellwinkel  $\alpha_0$  von  $70^\circ$  (siehe Abbildung 44). Um die Kräfte auf die Motoren im ruhenden Zustand zu minimieren, wurden um die Motoren Federn eingebaut, welche das statische Gewicht der auf der Plattform montierten Messgeräte aufnehmen. Die genaue Realisierung der Konstruktion ist im nächsten Kapitel genauer erklärt.

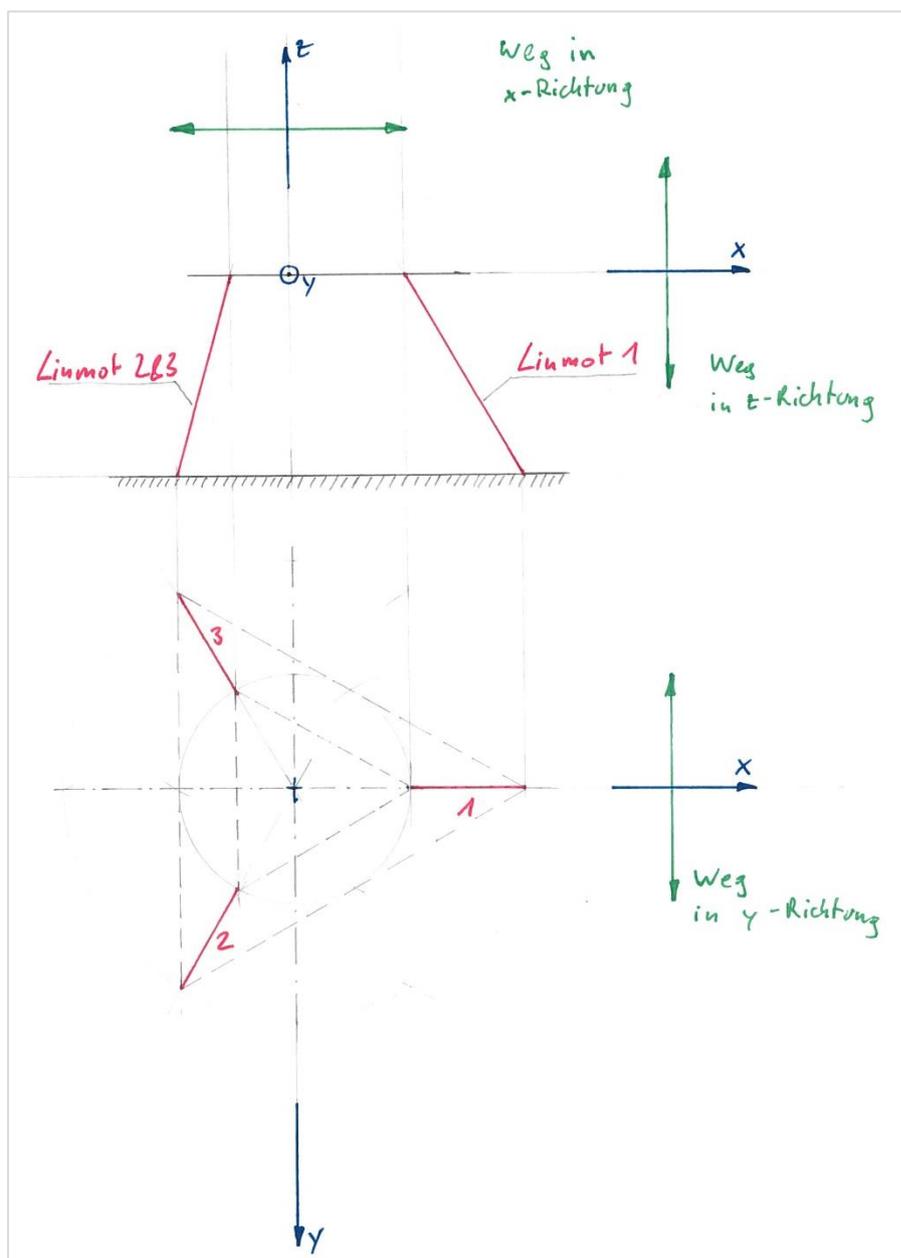


Abbildung 43: Konzeptskizze Tripod

Für diese Geometrie ist nun die Bewegung der Plattform in x-, y- und z-Richtung in Abhängigkeit der Längenänderung der einzelnen Motoren berechnet worden. Beispielhaft ist im Folgenden die Bewegung der Plattform in z-Richtung angeführt, x- und y- Richtung sind im Anhang C: Berechnung PET zu finden.

Aus Symmetriegründen ist der z-Hub für alle 3 Linearmotoren gleich.

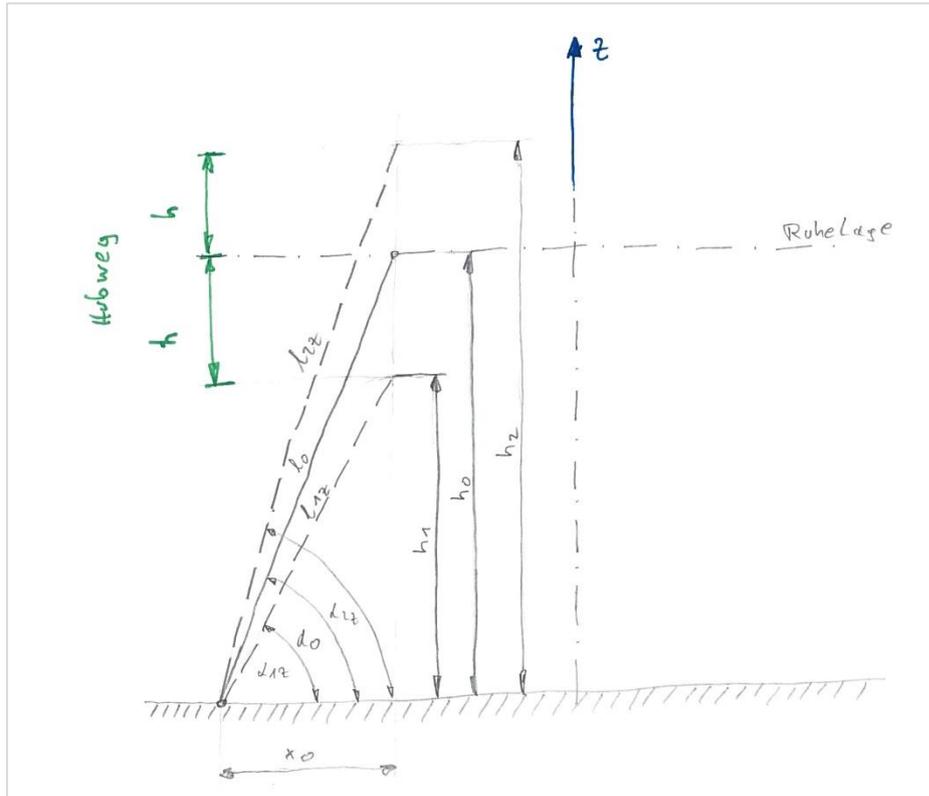


Abbildung 44: Skizze: Längenänderung bei Bewegung in z-Richtung

Mit folgenden Gleichungen lässt sich die minimale Länge  $l_{1z}$  der Linearmotoren bzw. die maximale Länge  $l_{2z}$  der Linearmotoren berechnen:

$$h_0 = l_0 * \sin(\alpha_0) \text{ mit } \alpha_0 = 70^\circ \quad (4-1)$$

$$x_0 = l_0 * \cos(\alpha_0) \quad (4-2)$$

$$h_1 = h_0 - h \quad (4-3)$$

$$h_2 = h_0 + h \quad (4-4)$$

$$l_{1z} = \sqrt{h_1^2 + x_0^2} \quad (4-5)$$

$$l_{2z} = \sqrt{h_2^2 + x_0^2} \quad (4-6)$$

Mit der Ausgangslänge  $l_0 = 948 \text{ mm}$  kommt man nun zu den Ergebnissen:

- $l_{1z} = 854,72 \text{ mm}$
- $l_{2z} = 1042,53 \text{ mm}$

Mit den entwickelten Gleichungen wurde ein MATLAB Skript programmiert, welches die Längenänderungen der Linearmotoren als Funktion der Bewegung in den drei Achsen berechnet. Die Ergebnisdiagramme (jeweils die Linearmotorenlängenänderung über der Bewegungsänderung) sind in Abbildung 45 dargestellt.

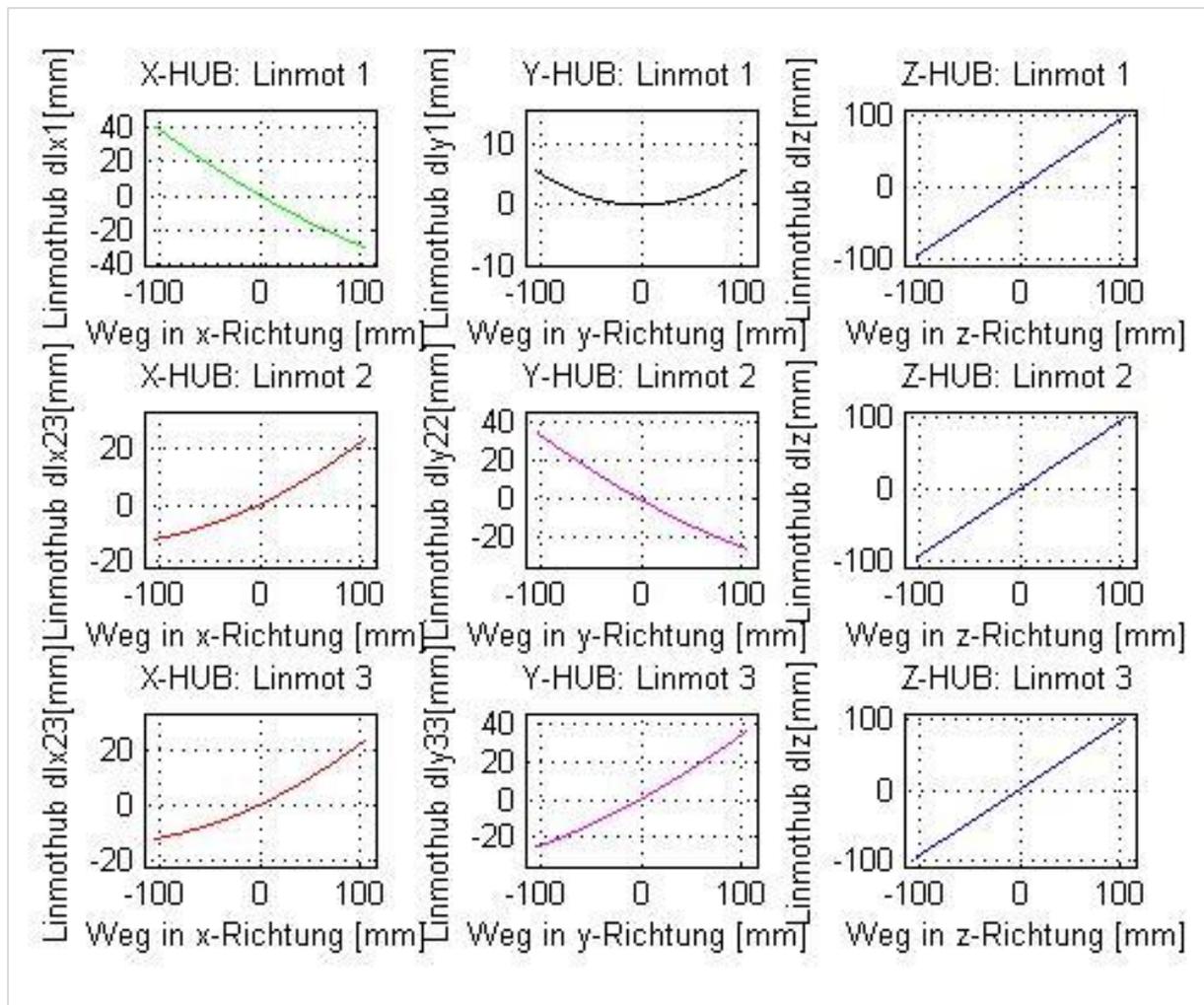


Abbildung 45: Linearmotorenhub über Weg in x-, y- und z-Richtung

Für die im Kapitel 5 beschriebene PET Messung wurde nur der Linearmotorhub für die Bewegung in z-Richtung benötigt. Für die Bewegung des PET an einen beliebigen Punkt auf der y-z Ebene wurden zuerst aus den oben angeführten Diagrammen Polynome 2-ten Grades für die y- und z-Bewegung ermittelt. Aus Symmetriegründen folgt, dass die drei Polynome für die z-Richtung ident sind und sich die Polynome für den y-Weg der Motoren 2 und 3 nur durch das Vorzeichen bei der 2ten Konstante unterscheiden (siehe Gleichungen (4-10) und (4-12)). Die Längen  $dlz1$ ,  $dlz2$  und  $dlz3$  stehen für die Längenänderungen an den jeweiligen Linearmotoren bei Bewegung der Plattform in reiner z-Richtung um den Weg  $\Delta z$ . Die Längen  $dly11$ ,  $dly22$  und  $dly33$  stehen für die Längenänderungen an den jeweiligen Linearmotoren bei Bewegung der Plattform in reiner y-Richtung um den Weg  $\Delta y$ .

Die Polynome lauten:

$$dlz1 = 0.0001 * \Delta z^2 + 0.9393 * \Delta z - 0.0006 \quad (4-7)$$

$$dly11 = 0.0005 * \Delta y^2 + 0.0015 \quad (4-8)$$

$$dlz2 = 0.0001 * \Delta z^2 + 0.9393 * \Delta z - 0.0006 \quad (4-9)$$

$$dly22 = 0.0005 * \Delta y^2 - 0.2952 * \Delta y + 0.0008 \quad (4-10)$$

$$dlz3 = 0.0001 * \Delta z^2 + 0.9393 * \Delta z - 0.0006 \quad (4-11)$$

$$dly33 = 0.0005 * \Delta y^2 + 0.2952 * \Delta y + 0.0008 \quad (4-12)$$

Will man nun um die Plattform des PET um  $\Delta y$  und  $\Delta z$  verschieben, so berechnet man die einzelnen Längenänderungen  $dli$  mit den oben angeführten Gleichungen und addiert jeweils die zu den einzelnen Motoren gehörenden y-Längenänderungen und z Längenänderungen und man erhält die Längenänderungen der Motoren  $dlyzi$  (Gleichungen (4-13) bis (4-15)).

$$dlyz1 = dlz1 + dly11 \quad (4-13)$$

$$dlyz2 = dlz2 + dly22 \quad (4-14)$$

$$dlyz3 = dlz3 + dly33 \quad (4-15)$$

Im nächsten Schritt wurden die maximal wirkenden Kräfte an den Linearmotoren berechnet. Hier sind folgende Vereinfachungen getroffen worden:

- Max. Kräfte sind nur in reiner x-, y- und z- Richtung berechnet worden
- Der Angriffspunkt der Gewichtskraft der bewegten Massen liegt genau im Mittelpunkt des von den Gelenken aufgespannten gleichschenkligen Dreiecks. Betrachtet man Abbildung 43 so liegt dieser Angriffspunkt genau im Koordinatenursprung
- Die Masse der bewegten Teile beträgt 70 kg
- Die Kräfte der Federn sind nur in der Berechnung der Kräfte aus der Bewegung in z-Richtung berücksichtigt
- Beschleunigung in z-Richtung:  $a_z=2g=19.62 \text{ m/s}^2$
- Beschleunigung in x- und y-Richtung  $a_x=a_y=g=9.81 \text{ m/s}^2$
- Jeder Linearmotor ist auf beiden Enden gelenkig gelagert, das Eigengewicht wird vernachlässigt und es greifen keine weiteren äußeren Kräfte auf den Motor an. Somit handelt es sich hierbei um eine Pendelstütze, was die Berechnung deutlich vereinfacht

Beispielhaft wird hier wieder die Berechnung der Kräfte an den Linearmotoren für reine z-Bewegung erläutert, für die Kräfte aus x- und y-Bewegung ist wieder auf Anhang C: Berechnung PET verwiesen.

Abbildung 46 zeigt die wirkenden Kräfte bei Beschleunigung in z-Richtung (vertikal). Alle 3 Motoren erfahren dieselben Kräfte. Die Position  $z_0$  bezeichnet die Ruhelage,  $z_1$  die tiefste mögliche Lage und  $z_2$  die höchst mögliche Lage des Massenangriffspunktes. In roter Farbe ist die Kraft aus der Beschleunigung nach unten dargestellt, in blau die Kraft aus der Beschleunigung nach oben. Die Indizes der Federkräfte stehen für die unterschiedliche Lage des Massenangriffspunktes (0 für Ruhelage, 1 für tiefste Lage, 2 für höchste Lage). In Lage 2 erfährt das System nur Beschleunigungskräfte in positive z-Richtung (rot dargestellt), in Lage 1 nur Beschleunigungskräfte in negative z-Richtung (blau dargestellt). In Lage 0 sind beide Beschleunigungskraftrichtungen möglich.

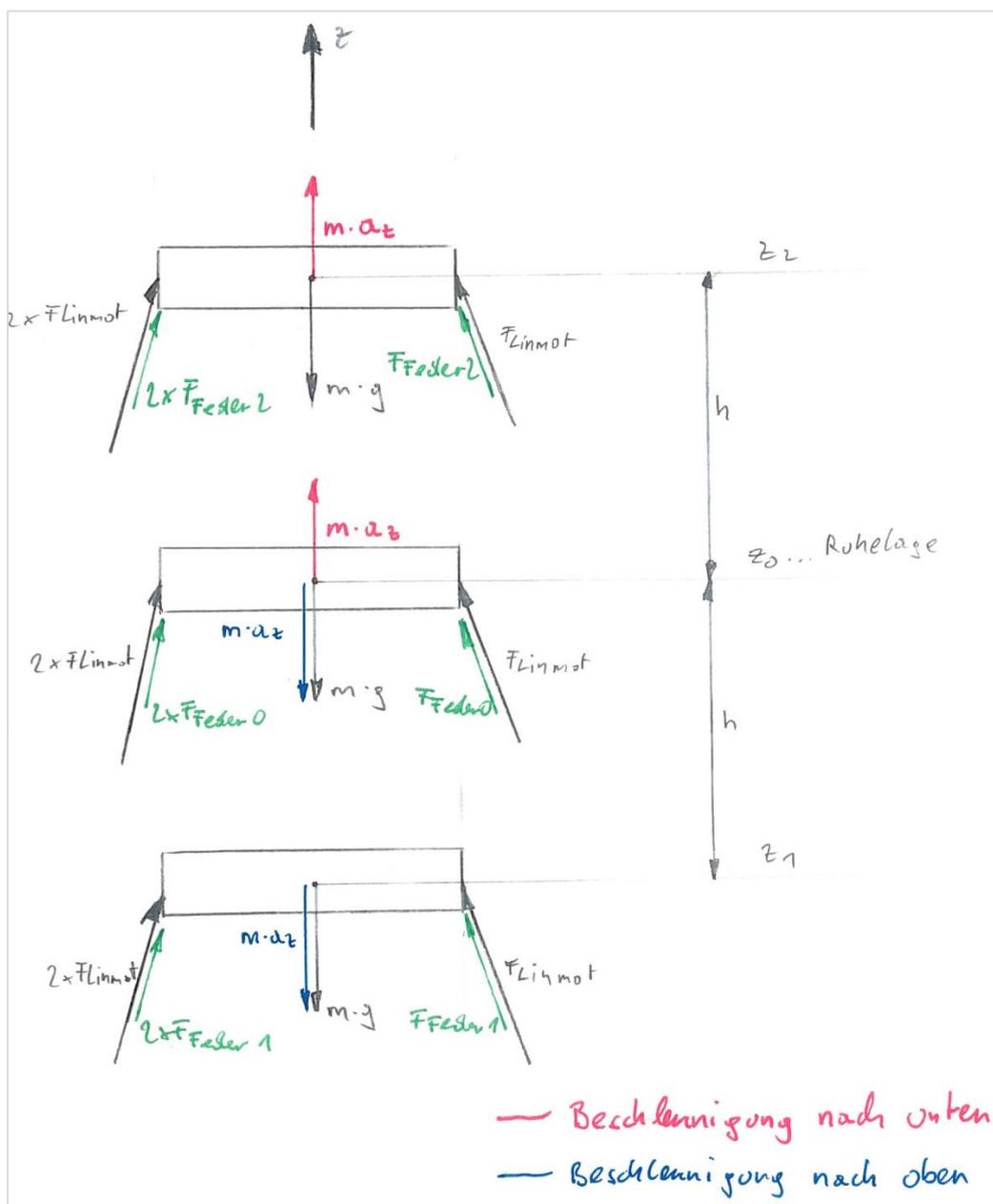


Abbildung 46: Kräfte bei Beschleunigung in z-Richtung

Die Federkraft  $F_{Federi}$  berechnet sich abhängig von der Lage nach Gleichung (4-16):

$$F_{Federi} = (l_{Feder} - z_i) * R \quad (4-16)$$

$F_{Federi}$ ..... Federkraft abhängig von der Lage  $z_i$  [N]

$l_{Feder}$ ..... Federlänge 710mm (aus Federberechnung)

$z_i$ ..... Lage ( $z_0= 420\text{mm}$ ,  $z_1=320\text{mm}$ ,  $z_2=520\text{mm}$ )

$R$ ..... Federkonstante  $R=1.3047 \text{ N/mm}$  (aus Federberechnung)

Mit Einbezug der Symmetrie lassen sich die Gleichungen (4-17 ) bis (4-19 ) für die am Linearmotor wirkenden Kräfte in Abhängigkeit von der Lage und von der Richtung der Beschleunigung aufstellen:

$$F_{LinMot\_z0} = \frac{(m * g \pm m * a_z)}{3 * \sin(\alpha_0)} - F_{Feder0} \quad (4-17)$$

$$F_{LinMot\_z1} = \frac{(m * g \pm m * a_z)}{3 * \sin(\alpha_{1z})} - F_{Feder1} \quad (4-18)$$

$$F_{LinMot\_z2} = \frac{(m * g \pm m * a_z)}{3 * \sin(\alpha_{2z})} - F_{Feder2} \quad (4-19)$$

In Tabelle 4-1 sind die maximal auftretenden Kräfte je Bewegungsrichtung aufgelistet. Unter anderem sind mittels dieser Werte die Linearmotoren ausgesucht worden (siehe Kapitel 4.3).

Tabelle 4-1: Maximal auftretende Kräfte am Linearmotor

maximale Kraft bei Bewegung in:	Motor 1 [N]	Motor 2 [N]	Motor 3 [N]
x-Richtung:	2245	1357	157
y-Richtung:	245	1493	1493
z-Richtung:	756,2	756,2	756,2

Mit den ermittelten Kräften und den Beschränkungen bezüglich der Baugröße des PET ist die Motorauswahl getroffen worden. Um die Bewegung der PET-Box angemessen zu gestalten, wurde beschlossen, drei Linearmotoren (von LinMot) zu verwenden, bei denen es sich um permanent betätigte Synchron-Servomotoren handelt. Da die lineare Bewegung rein magnetisch erzeugt wird und keine mechanische Kraftübertragung stattfindet, können auch extrem dynamische Anwendungen mit einer langen Lebensdauer realisiert werden. Die leistungsstärksten Motoren (Produktfamilie P10-70) für dynamische Linearbewegung wurden ausgewählt und die Motoren (P10-70x240U) mit einer maximalen Kraft von 1650N pro Motor und 210mm Hub wurden eingerichtet. Diese sind mit Inkremental-Encodern ausgestattet, so dass die Positionsausgänge standardmäßige 1 Vss Sin / Cos-Signale mit einer Periodendauer von 40 mm sind. Daher können die Motoren mit Software von Drittanbietern gesteuert werden. Diese Linearmotoren können frei positioniert werden und es ist möglich, jede Position im Hubbereich mit absoluten oder relativen Bewegungsbefehlen zu bewegen. Da der Linearantrieb ein Closed-Loop-System ist, werden nicht nur die Endlagen überwacht, sondern auch Positionsabweichungen während der Fahrt. Somit ist eine präzise Vorgabe von Fahrgeschwindigkeiten, Beschleunigungs- und Bremsrampen sowie von Kurvenfahrten möglich. Einmal programmierte Bewegungen werden über die gesamte Lebensdauer der Maschine gleich ausgeführt. Abbildung 47 zeigt den Aufbau der Linearmotoren.



Abbildung 47: Aufbau der Linearmotoren [14]

Die Linearmotoren selbst sind über einen wassergekühlten Flansch mit der Halterung verbunden. Prinzipiell gibt es drei Varianten der Motorkühlung: luftgekühlt, gebläsegekühlt und wassergekühlt. Welche Kühlung für das PET notwendig ist, wurde mittels des Computerprogramms LinMot Designer 1.8.2 der Firma LinMot simuliert. Abbildung 48 zeigt die Input-Diagramme für die Simulation. Das oberste Diagramm stellt den Hub des Linearmotorläufers dar, unterhalb folgen die daraus resultierenden Läufergeschwindigkeit und die Läuferbeschleunigung sowie die Kräfte am Linearmotor (für reine z-Bewegung).

Abbildung 49 veranschaulicht das Ergebnis der Simulation für wassergekühlte Flansche. Die thermische Beanspruchung liegt hier deutlich innerhalb der blau dargestellten Grenzen. Bei luft- und gebläsegekühlten Flansche werden diese Grenzen überschritten. Deshalb werden im PET Linearmotoren mit wassergekühlten Flanschen (Baureihe PF10-70x270-FC) verbaut.

Weitere durchgeführte Berechnung wie die Federberechnung, Gelenklagerauslegung sowie überschlägige Festigkeitsberechnung der Linearmotorhalterung sind Anhang C: Berechnung PET zu entnehmen. Die dafür notwendigen Berechnungsgleichungen wurden aus [11] [12] entnommen und für die Materialkennwerte und Materialnormen wurde [13] herangezogen.

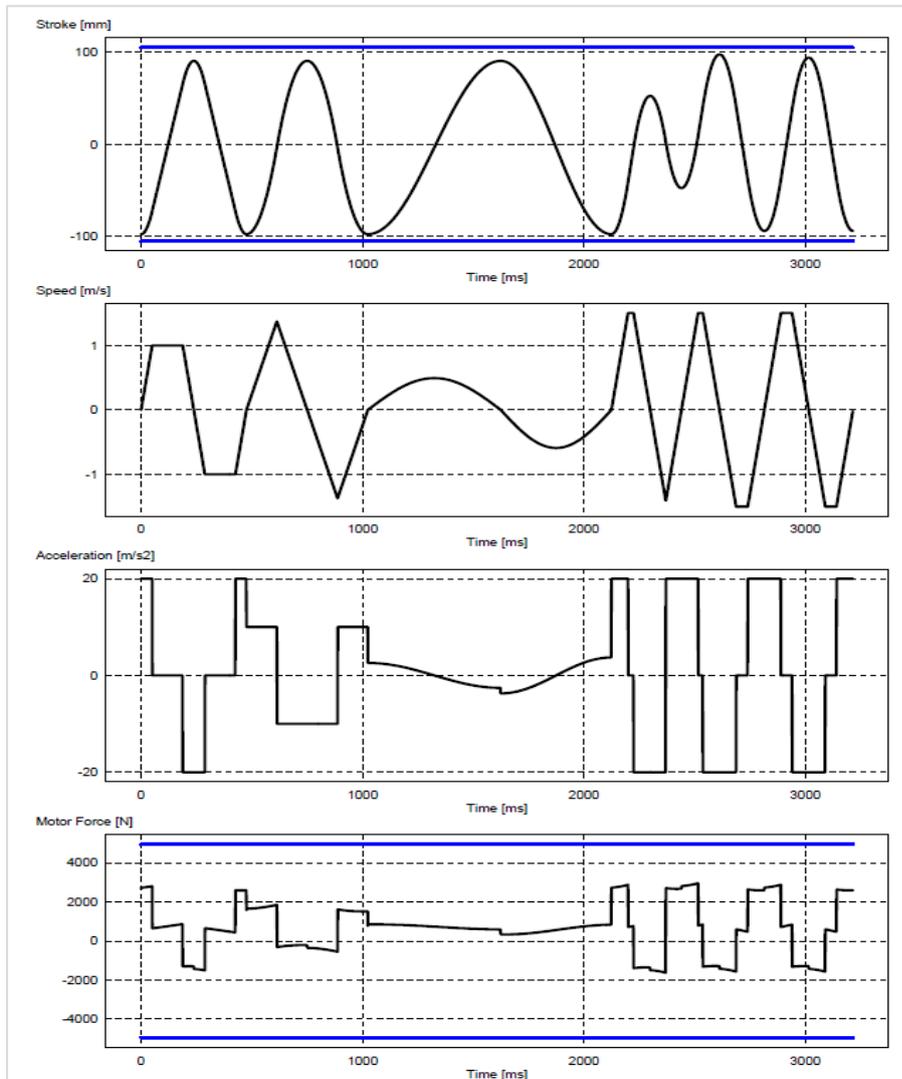


Abbildung 48: Simulation der Linearmotoren

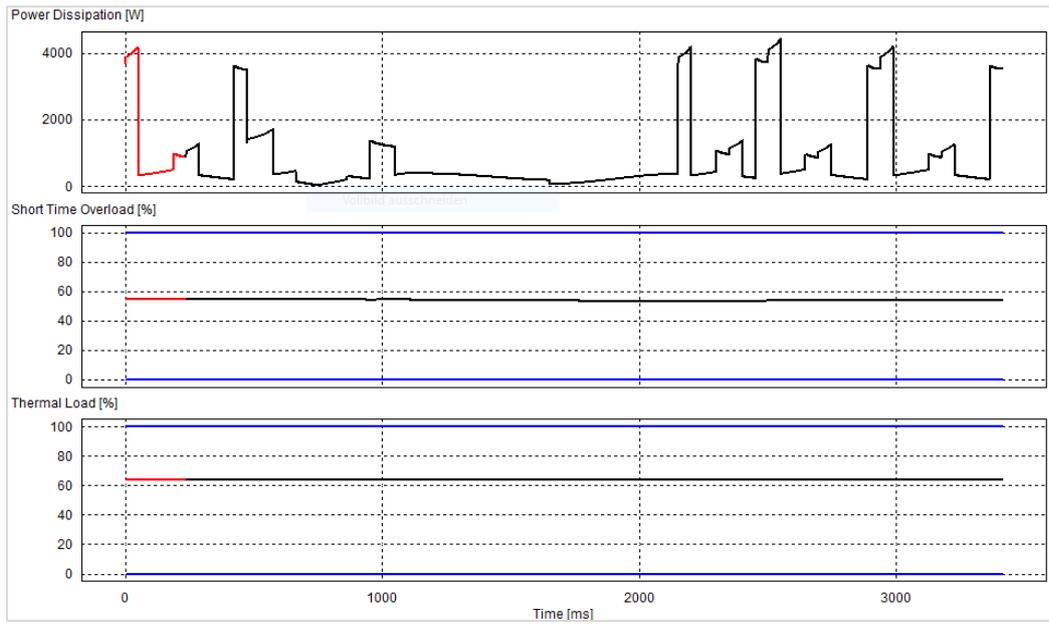


Abbildung 49: Ergebnis der Temperatursimulation für die Linearmotoren

## 4.3 Konstruktion

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Ausführung der Konstruktion des PET. Es wird auch grob auf die einzelnen Komponenten der Steuerung eingegangen, welche in Zusammenarbeit mit dem Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik entstanden ist. Es wird nur ein kleiner Teil der angefertigten Zeichnungen im Folgenden näher erklärt. Die gesamten Zusammenstellungs- und Fertigungszeichnungen sowie die dazugehörigen Stücklisten sind Anhang D: Konstruktionszeichnungen PET zu entnehmen.

### 4.3.1 Mechanische Komponenten

In Abbildung 50 ist die PET Konstruktion in 3D und in Abbildung 51 als 2D-Zeichnungsableitung zu sehen. Das Gestell ist eine Schweißkonstruktion aus 50x50x3 [mm] Formrohren, an welches die Unterseiten der Beine angeschraubt werden. Am oberen Ende der Beine ist die Aufnahme für die PEMS, ebenfalls ausgeführt als Schweißkonstruktion aus 40x40x3 [mm] Formrohr. Rechts und links angeschraubt an die PEMS-Aufnahme sind die Stabilisatoren. Zweck dieser Stabilisatoren ist zum einen die Verdrehsicherung um die x-Achse (Fahrzeuginnenachse) und zum anderen wird durch diese Stabilisatoren die Bewegung entlang der x-Achse (in Fahrtrichtung) blockiert. Erst diese Stabilisatoren ermöglichen die gezielte Steuerung des PET in der yz-Ebene. Dabei ist anzumerken, dass die Bewegung eigentlich nicht exakt auf einer Ebene stattfindet, sondern durch eben diese Stabilisatoren auf einer Kugeloberfläche. Jedoch ist für die bei den Messungen abgefahrenen Wege von maximal +-100 mm in y- und z-Richtung die Abweichung äußerst gering und aufgrund der gegebenen Fertigungstoleranzen der Einzelbauteile stellt es kein Problem dar, die Bewegung auf einer Ebene und nicht die Bewegung auf einer Kugeloberfläche zu berechnen. Die Stabilisatoren selbst bestehen vereinfacht aus einem Rohr, an dem an beiden Enden Kreuzgelenke verschraubt sind.

Die in gelb dargestellten Kabel dienen zur Stromversorgung der Motoren, die grünen Kabel sind die Sensorkabel. Die Leitungen für die Wasserkühlung von und zu den Motorflanschen sind nicht extra eingezeichnet.

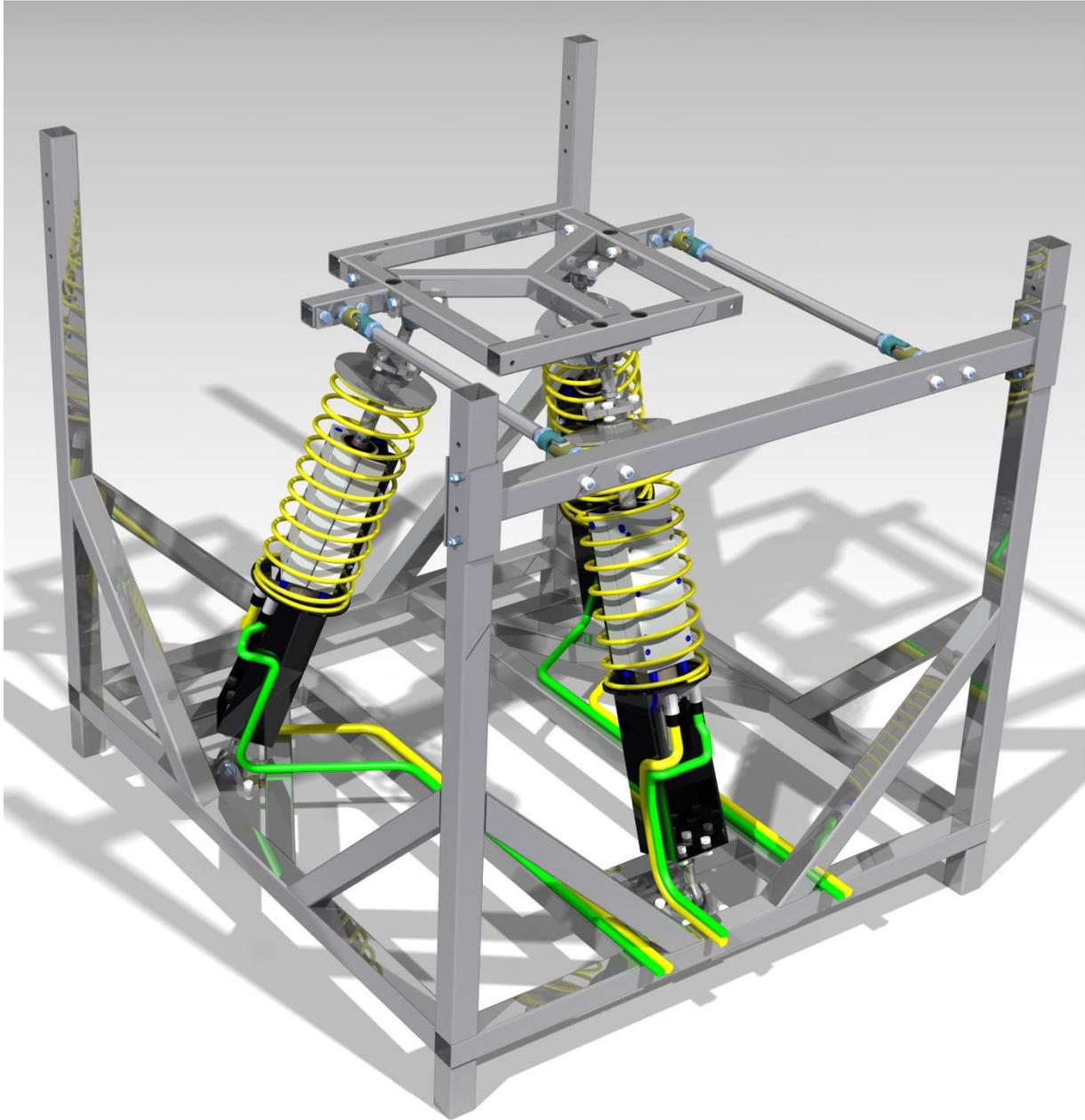


Abbildung 50: PET 3D Ansicht

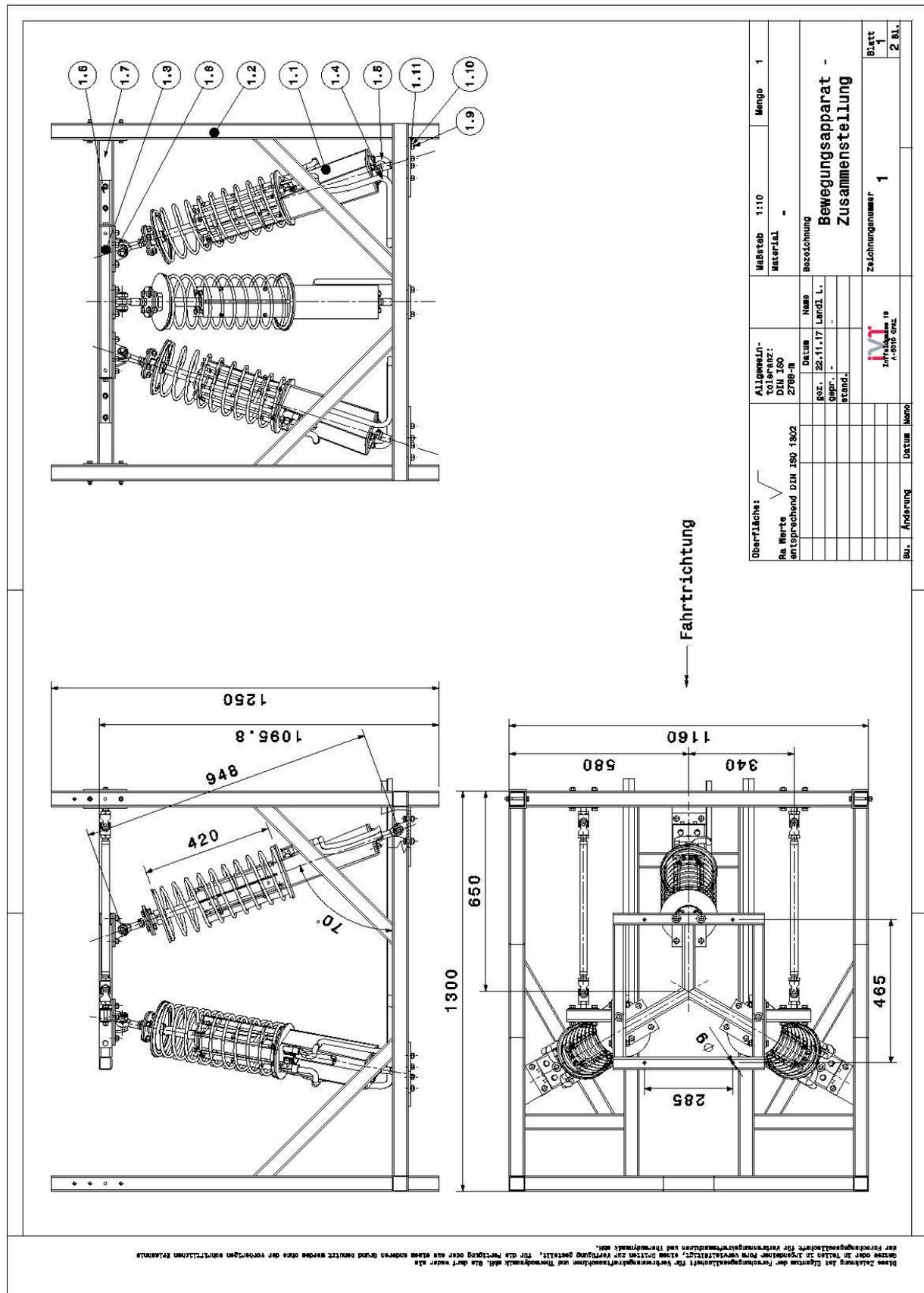


Abbildung 51: PET Zusammenstellungszeichnung

Abbildung 52 zeigt die Zusammenstellungszeichnung der Unterbaugruppe Bein und in Abbildung 53 ist ein Bein in 3D zu sehen. In schwarz ist die Halterung der Linearmotoren dargestellt. An dieser Halterung ist auch der untere Federteller angeschweißt. Am oberen und unteren Ende der Beine befindet sich jeweils die Lagerung der Beine. Diese Lagerung ist mit Gelenkköpfen nach DIN ISO 12240-4 ausgeführt. Die Feder ist in gelber Farbe dargestellt. Am oberen Ende ist die Feder mit einem verstellbaren Federteller mit dem Läufer des Linearmotors bzw. mit der oberen Gelenklagerung verbunden. Durch diesen höhenverstellbaren Federteller, ähnlich zu einem Gewindefahrwerk bei PKW's, lässt sich die Federvorspannung in einem gewissen Bereich verstellen. Das bringt folgende Vorteile gegenüber einem festen Federteller:

- Einfacher Ausgleich von Fertigungstoleranzen der Feder und somit schnelle Einpassung der Ruhelage des PET
- Es können unterschiedlich schwere Messgeräte mit denselben Federn gerüttelt werden (in einem gewissen Rahmen, bei zu großem Gewichtsunterschied sind steifere bzw. weichere Federn einzubauen)

Der komplette PET Bewegungsapparat inklusive darauf montiertem AVL MOVE PEMS ist in Abbildung 54 zu sehen.

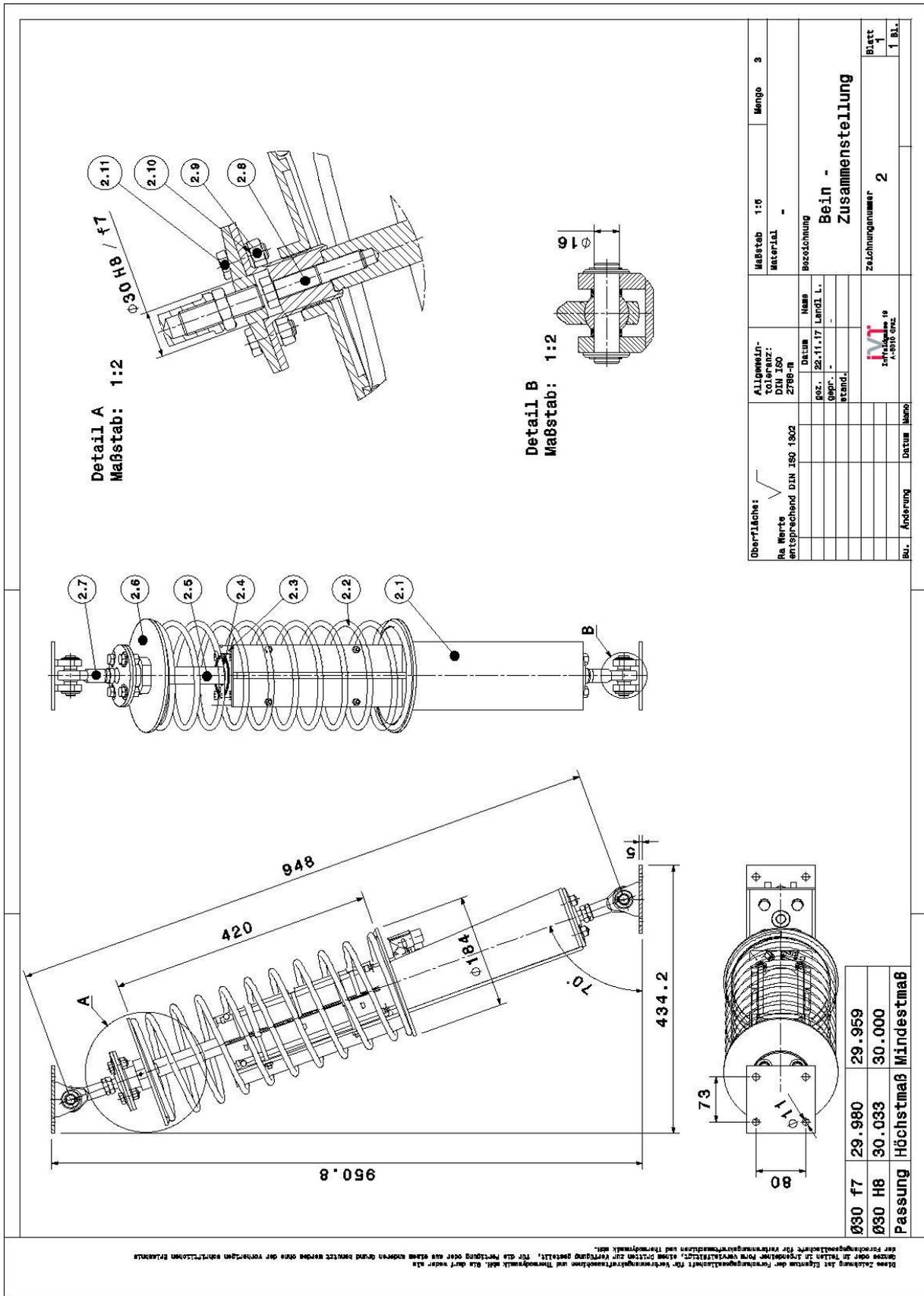


Abbildung 52: Unterbaugruppe Bein Zusammenstellungszeichnung



Abbildung 53: Einzelansicht der Unterbaugruppe Bein in 3D gerendert und eingebaut

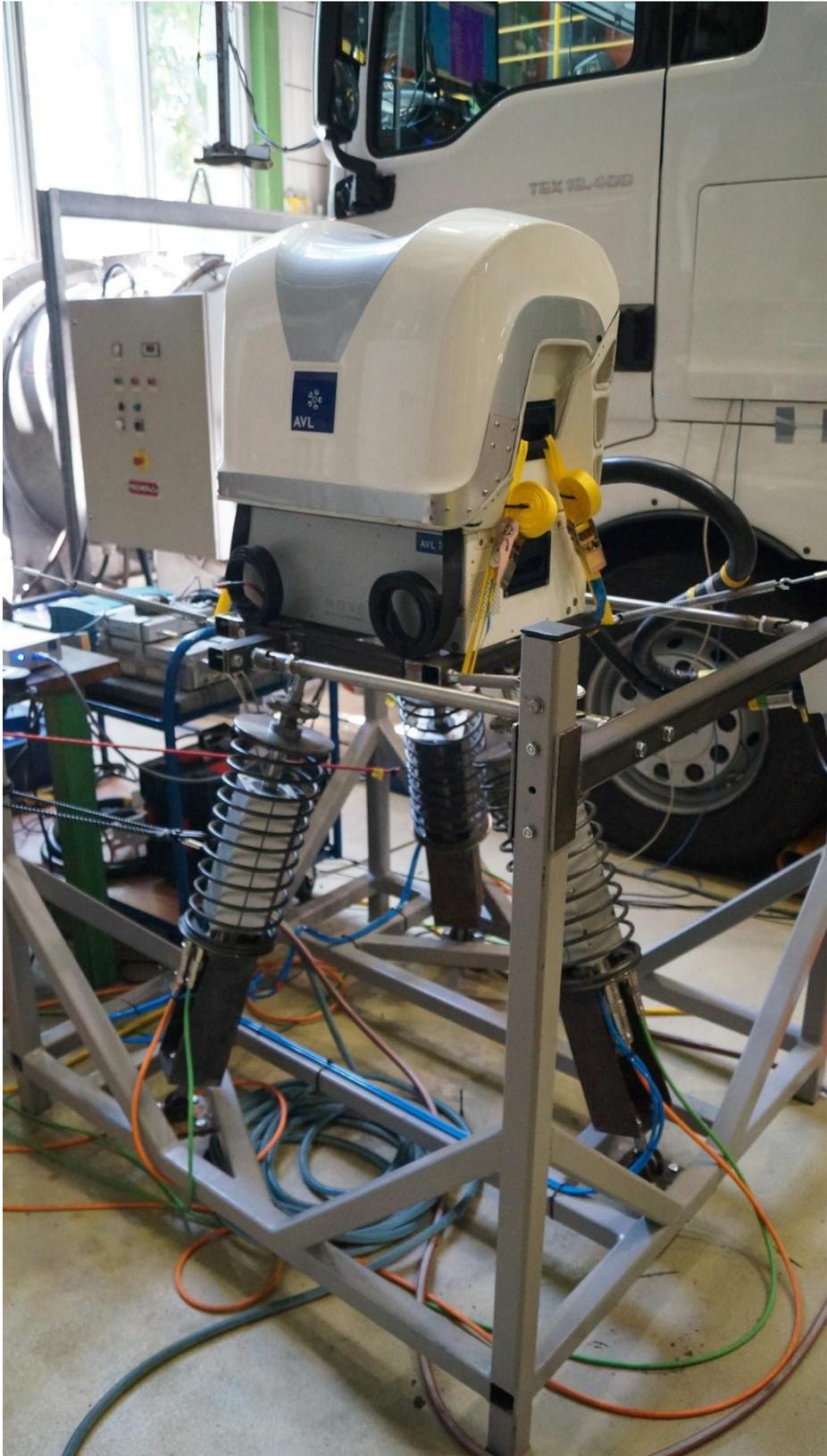


Abbildung 54: Kompletter PET mit aufgebautem AVL MOVE

### 4.3.2 Elektronische Komponenten

Die Steuerung und Regelung ist vom Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik der TU Graz entwickelt worden. Dieses Kapitel beschreibt kurz den Aufbau der PET-Steuerung sowie die verwendeten elektronischen Bauteile.

Die Antriebsteereinheit ACOPOSmulti (von B & R) wurde im Schaltschrank installiert. Es ist die universelle Lösung für alle Automatisierungsaufgaben im Maschinenbau. Das System besteht aus einer Montageplatte, verschiedenen Modulen (Stromversorgung, Hilfsversorgung und Wechselrichter), einem Netzfilter und einem Bremswiderstand. Das passive Stromversorgungsmodul fungiert als zentrale Stromversorgung für die ACOPOSmulti-Antriebe und speist den DC-Bus. Es wird eine konstante Zwischenkreisspannung unabhängig von der Hauptversorgung bereitgestellt, was eine maximale Auslastung durch die Wechselrichtermodule und -motoren bedeutet. Die 24 Volt-Versorgung der Antriebe sowie der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) erfolgt über das Hilfsversorgungsmodul, das bei Stromausfall für ein vorhersehbares Maschinenverhalten sorgt. Da zweiachsige Wechselrichtermodule (bis zu 22 A) verfügbar sind, wurden ein- und zweiachsige Module bei der Konfiguration von Wechselrichtermodulen verwendet, um eine kompakte Bauweise zur Steuerung der oben genannten drei Motoren zu erreichen.

Das Power Panel C70, ein HMI-Terminal mit integrierter SPS von B & R, wurde als Steuersystem ausgewählt. Dieses Power Panel ist platzsparend und sehr einfach zu installieren. Es hat keine Festplatte, Lüfter oder Batterie, was es wartungsfrei macht. Um es in Betrieb zu nehmen, wird eine Vollversion von Automation Runtime, dem Software-Kernel, der das Ausführen von Anwendungen auf einem Zielsystem ermöglicht, über die Online-Schnittstelle mit dem B & R Automation Studio zum Power Panel übertragen. Das Automation Studio ist die integrierte Softwareentwicklung, die Werkzeuge für alle Phasen eines Projekts enthält. Die Steuerung, das Laufwerk, die Kommunikation und die Visualisierung können alle in einer Umgebung konfiguriert werden. Hier werden Befehle definiert und an den Antrieb übertragen und Signale aus dem Prozess ausgewertet. Das für dieses Projekt verwendete Programm, das die in dem Prozess verwendeten Laufwerke mit einer automatischen Sequenz steuert, wurde in ANSI C-Sprache entwickelt. Es ist eine Programmiersprache für Anwendungen und Bibliotheken, die den Aufruf von Funktionsblöcken sowie den Zugriff auf Variablen anderer IEC-Sprachen (International Electrotechnical Commission) ermöglicht. Die Kommunikation zwischen der Steuerung und den Antrieben erfolgt über POWERLINK, das sich an die Anforderungen der Maschine und des Systems anpasst. Im POWERLINK-Netzwerk trägt die Linienstruktur (kein Ring) zu einer minimalen Verdrahtung bei. Daten werden zwischen der Steuerung und dem Antrieb am Bussystem ausgetauscht und vom NC-Manager gesteuert.

Dass auf das Projekt angewendete Positionsprofil wurde in MATLAB / Simulink aufgebaut und mittels Embedded Coder automatisch in C-Code für das B & R Zielsystem übersetzt. B&R Automation Studio Target für Simulink bietet eine Schnittstelle für diese automatische Code-Generierung. Für weitere Informationen zum Antriebssystem, zur Steuerung sowie zur Software sei auf die B & R-Website verwiesen. [15]

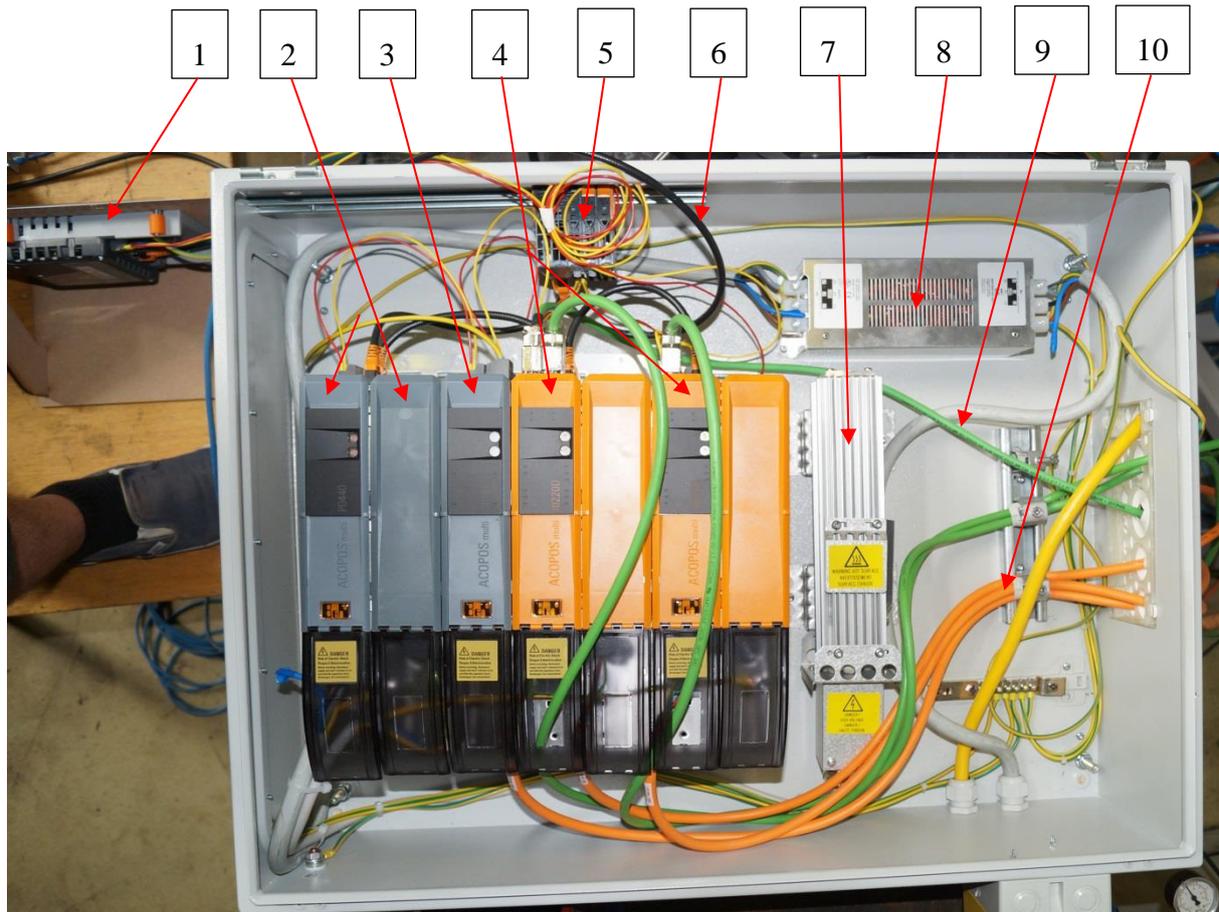


Abbildung 55: elektronische Komponenten des PET

- 1) PLC: Power Panel; Steuerungssystem
- 2) Hauptstromversorgung: 750 Volt Gleichstrom für Motorenbetrieb
- 3) Hilfsspannungsversorgung: 24 Volt Gleichstrom für PLC-Betrieb und Schaltoperationen der Treiber
- 4) Treiber: Schnittstelle zwischen PLC und Motoren
- 5) In- & Output für Sensoren (für spätere Applikationen)
- 6) Lineares Powerlink Netzwerk für die Kommunikation zwischen PLC-Hauptstromversorgung und Treiber
- 7) Bremswiderstand: Limitierung des Stroms, den die Motoren benutzen können
- 8) Filter: Verhindert Oberschwingungen zurück ins Stromnetz
- 9) Encoderkabel: Zur Steuerung der Motoren
- 10) Stromkabel: Zur Stromversorgung der Motoren

## 5 PET-Messungen

### 5.1 Ziel der PET-Messungen

Wie schon anfangs in der Einleitung erwähnt ist das Ziel dieser Messungen die Kontrolle von On-Bord Messsystemen, da diese bei Einsatz während RDE-Messungen Fahrbeschleunigungen ausgesetzt sind und auch während dieser realen Situationen korrekte Messergebnisse liefern sollten.

Bei dieser Messserie sind nur Beschleunigungen in z-Richtung simuliert worden, sprich alle 3 Linearmotoren bewegen sich gleich, da die Programmierung und Erprobung des PET für die Bewegung in der y-z-Ebene zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen war.

### 5.2 Fahrzeugbeschreibung

Bei der Messserie am LKW-Rollenprüfstand wurde ein MAN TGX18.400 mit 400 PS und einem Kilometerstand von 800000 km vermessen. Genauere Daten zur Sattelzugmaschine sind der Tabelle 5-1 zu entnehmen:

Tabelle 5-1: Übersicht der LKW-Daten

Zylinderanzahl	6
Hubraum	10518ccm
Leistung bei 1800 U/min	294 kW (400 PS)
Kraftübertragung	Hinterrad
Getriebe	12-Gang-Automatikgetriebe (12AS 2130TD)
Aufladung	Ja
Kraftstoff	Diesel
Abgasklasse	Euro VI
Abgasmachbehandlung	DOC/SCR/DPF
Leergewicht	7853 kg
Kilometerstand bei Testbeginn	800.000 km

### 5.3 Testzyklen

Bei dieser Messung sind einerseits Konstantpunkte (konstant 50km/h bei 1%Steigung) gefahren worden sowie der WHVC (World Harmonized Vehicle Cycle) einphasig und zweiphasig. Diese WHVC Zyklen sind in Abbildung 56 und Abbildung 57 dargestellt. Die ersten 900 Sekunden des einphasigen WHVC repräsentieren Stadtfahrten, die folgenden 481 Sekunden sollen Überlandfahrten darstellen und die letzten 419 Sekunden repräsentieren Autobahnfahrten. Der zweiphasige WHVC besteht aus zwei einphasigen WHVC's mit einer

Leerlaufphase von 10 Minuten dazwischen, wobei der erste WHVC kalt gestartet wird.[17]

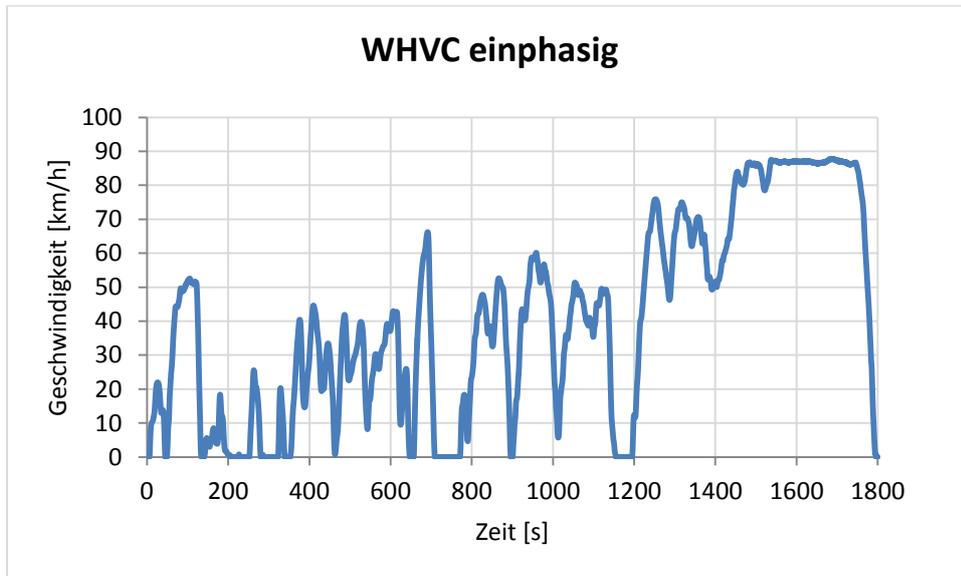


Abbildung 56: Testzyklus WHVC einphasig

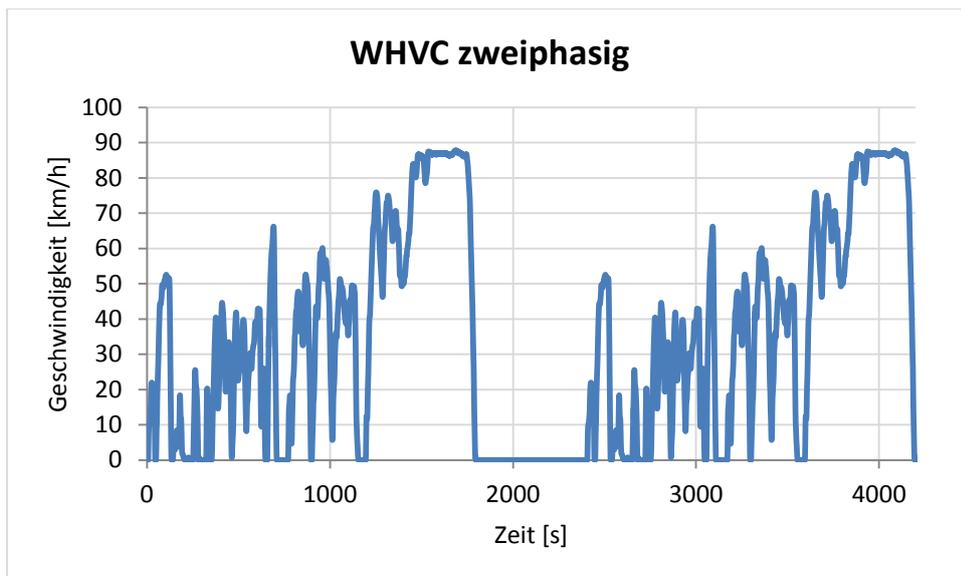


Abbildung 57: Testzyklus WHVC zweiphasig

Die gesamte durchgeführte Messmatrix ist in Tabelle 5-2 ersichtlich. Die WHVC Zyklen sind jeweils einmal mit ruhendem SEMTECH bzw. AVL MOVE und einmal mit geschütteltem SEMTECH oder AVL MOVE gefahren worden. Bei den Konstantpunktfahrten erfolgte der Messstart nach der Geschwindigkeitseinregelung und wenn die Abgastemperaturen konstant waren. Danach ist 900 Sekunden mit ruhendem Messgerät gemessen worden. Genau nach 900 Sekunden hat der PET-Prüfstand zu rütteln begonnen, das in Kapitel 4.1 beschriebene Schwingungsprofil ist 3-mal abgefahren worden und nach insgesamt 1800 Sekunden wurden die Konstantpunktmessungen beendet.

Tabelle 5-2: Messmatrix PET

Zyklusnr.	Variante	Datum	Zyklusart	Konditionierung	Anmerkung
2474	Variante SEMTECH	06.07.2018	WHVC zweiphasig	cold	SEMTECH ruhend
2475	Variante SEMTECH	06.07.2018	WHVC einphasig	hot	SEMTECH ruhend
2479	Variante SEMTECH	09.07.2018	Konstantpunkte	hot	
2480	Variante SEMTECH	09.07.2018	Konstantpunkte	hot	
2481	Variante SEMTECH	10.07.2018	WHVC zweiphasig	cold	SEMTECH gerüttelt
2482	Variante SEMTECH	10.07.2018	WHVC einphasig	hot	SEMTECH gerüttelt
2483	Variante MOVE	12.07.2018	WHVC einphasig	hot	MOVE ruhend
2484	Variante MOVE	12.07.2018	WHVC einphasig	hot	MOVE gerüttelt
2485	Variante MOVE	12.07.2018	Konstantpunkte	hot	
2486	Variante MOVE	12.07.2018	Konstantpunkte	hot	

## 5.4 Bewegungsprofil für den PET Prüfstand

Aus dem Frequenzspektrum und den Beschleunigungsverläufen in Kapitel 4.1 ist das Bewegungsprofil (Positionsprofil) für den PET Prüfstand entwickelt worden (siehe Abbildung 58). In den ersten Versuchen sind Sinusschwingungen mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen sowie ein Sprung abgefahren worden. Das Schwingungsprofil dauert 5 min und wurde für die am Rollenprüfstand gefahrenen Testzyklen (30 min Testlänge) immer wiederholt. Die Gleichungen der einzelnen Schwingungen und deren Dauer sind in Tabelle 5-3 ersichtlich.

Tabelle 5-3: Übersicht der verwendeten Sinusschwingungen

	Schwingungsgleichung	Dauer
1)	$y = 10 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t) + 40$	5-15s
2)	$y = 6 \cdot \sin(3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot t) + 40$	15-100s
3)	$y = 16 \cdot \sin(4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot t) + 40$	105-170s
4)	$y = 8 \cdot \sin(5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot t) + 40$	170-230s
5)	$y = 6 \cdot \sin(6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot t) + 40$	230-290s

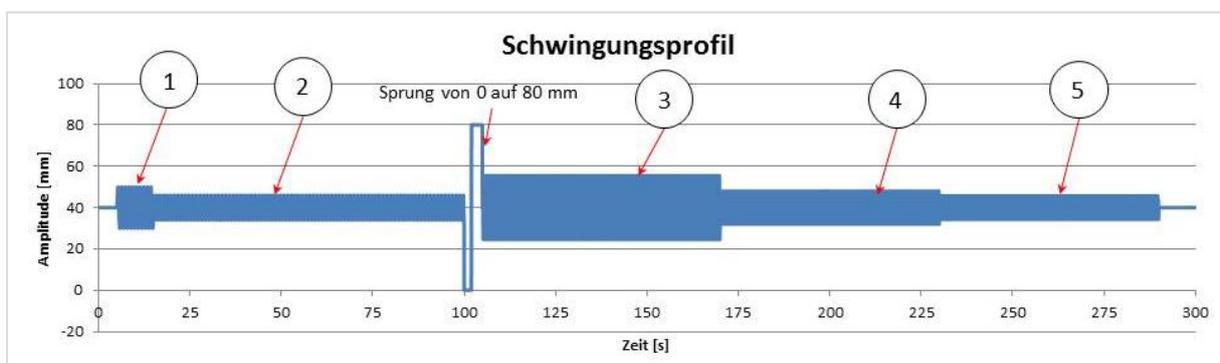


Abbildung 58: Bewegungsprofil des PET Prüfstandes

Die während der Messungen tatsächlich auftretenden Beschleunigungen wurden mittels eines 3-achsigen Beschleunigungssensors in einer Frequenz von 40 [Hz] aufgezeichnet.

## 5.5 Messaufbau

Der schematische Messaufbau für die PET-Messserie ist in Abbildung 59 dargestellt.

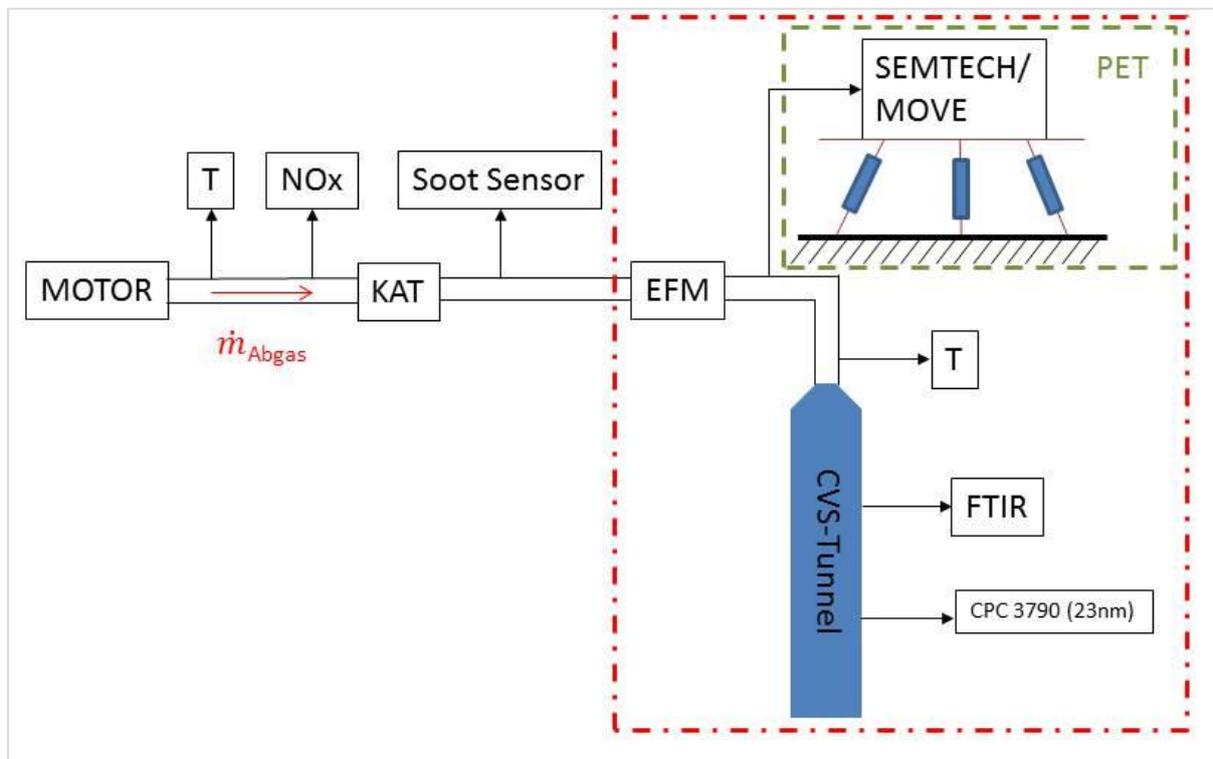


Abbildung 59: Schematischer Aufbau der PET Messung

Der Messaufbau am LKW-Rollenprüfstand ist in Abbildung 60 bis Abbildung 64 zu sehen. Es ist zu erwähnen, dass für diese PET-Messung der Messaufbau eigentlich um einiges einfacher hätte ausfallen können, da dieser LKW auch noch für andere Projekte vermessen wurde (der Messaufbau musste für RDE Fahrten tauglich sein). Prinzipiell wäre der in rot gekennzeichnete Bereich in Abbildung 59 ausreichend gewesen.



Abbildung 60: PET Messungen Prüfstandsaufbau von vorne

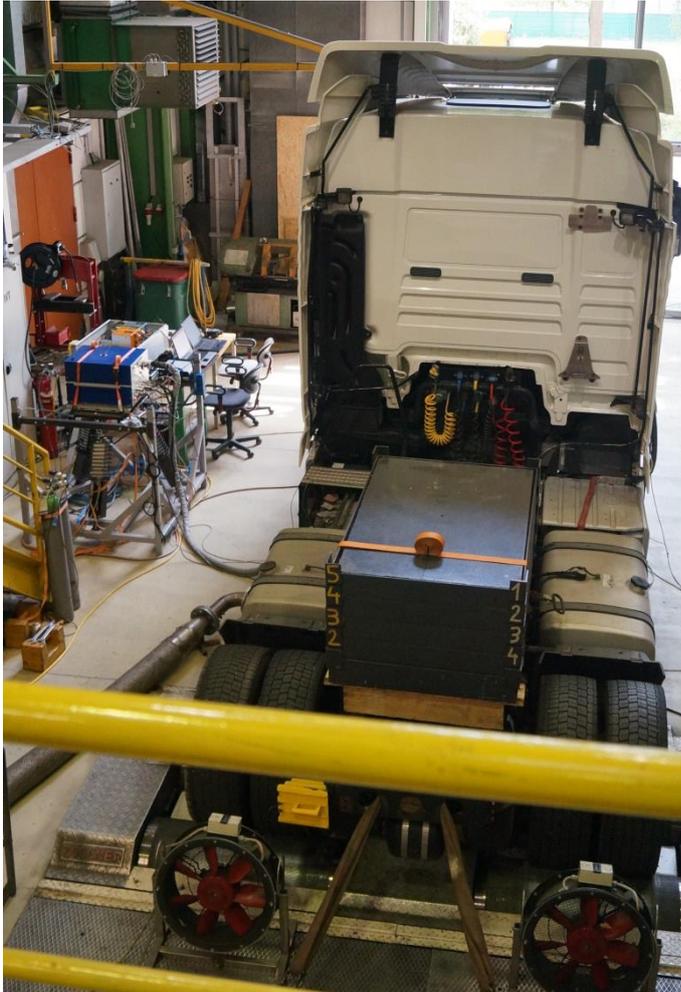


Abbildung 61: PET Messungen Prüfstands Aufbau von hinten (SEMTECH am PET aufgebaut)

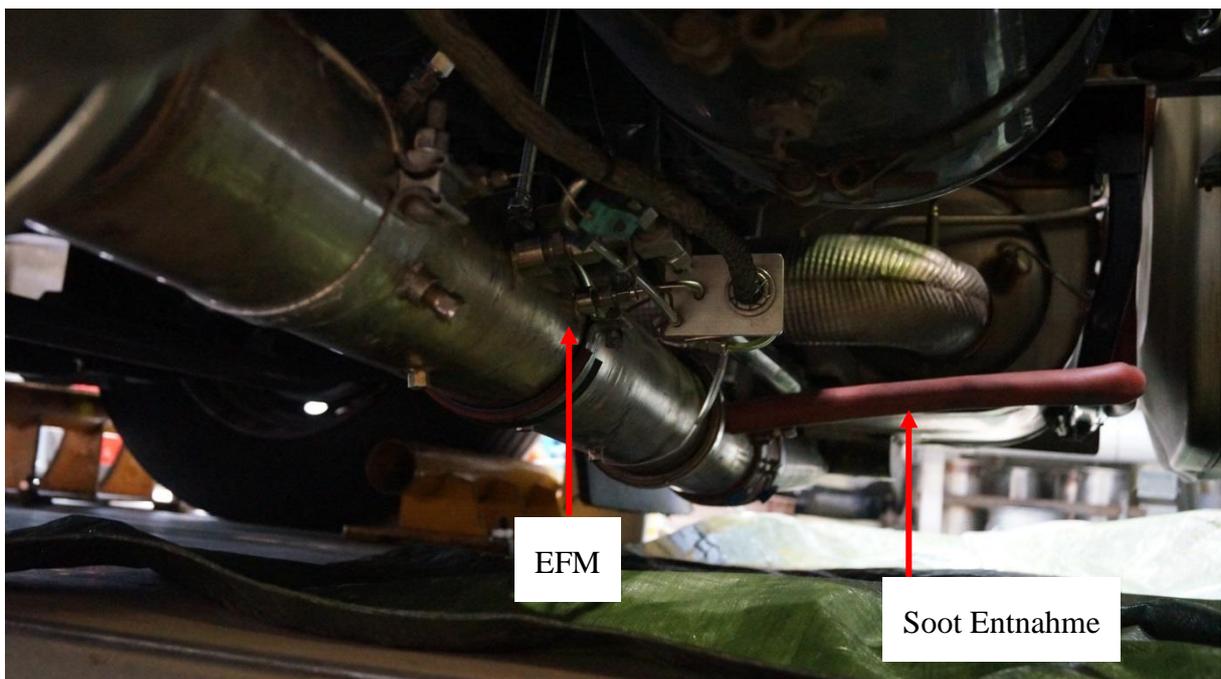


Abbildung 62: PET Messungen Prüfstands Aufbau LKW Unterseite



Abbildung 63: Entnahmeposition SEMTECH

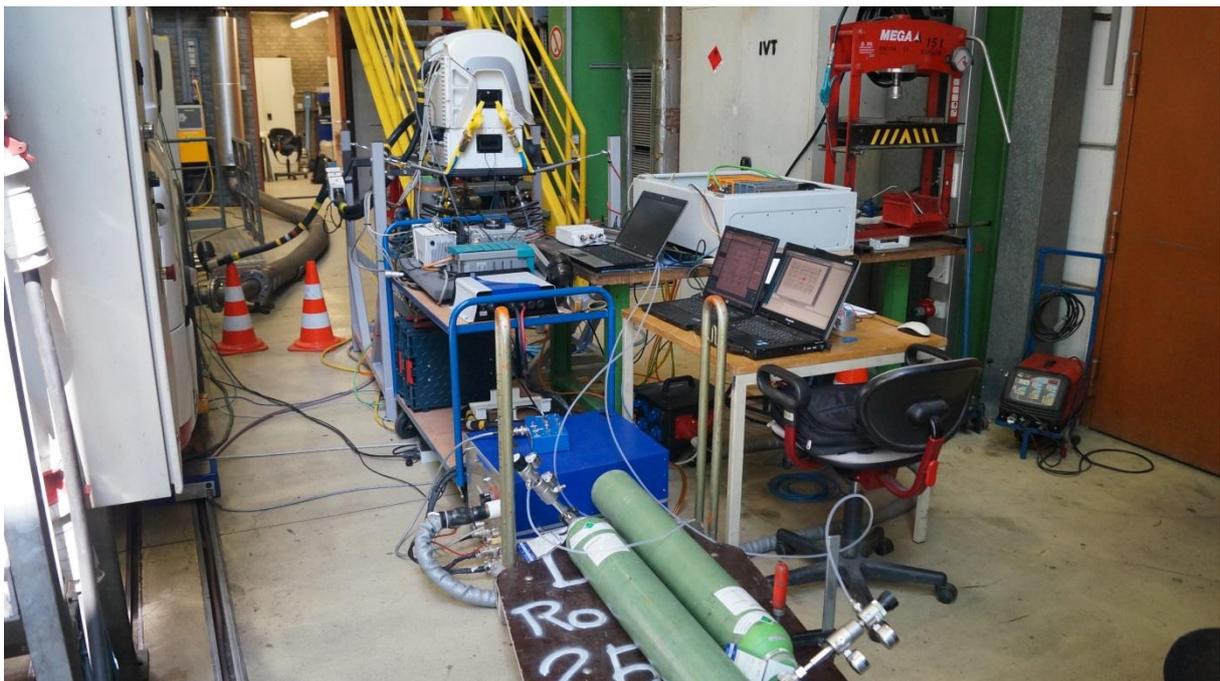


Abbildung 64: Kompletter Aufbau der PET Messgeräte mit AVL MOVE

## 5.6 Datenauswertung

Im Anschluss an die PET Messungen wurden die Daten der Messgeräte ausgewertet. Da für die Messungen keine Prüfstandsanalytoren verwendet worden sind, sind nur die Daten von AVL MOVE, SEMTECH, FTIR sowie des CPC3790\_23nm ausgewertet worden.

AVL MOVE, SEMTECH und das CPC sind standardmäßig mit dem ERMES Tool ausgewertet worden, wobei die sekundlichen Emissionswerte auf die positive Motorleistung zeitlich zugeordnet worden sind. Die FTIR-Rohdaten (Daten für CO<sub>2</sub>, CO, NO und NO<sub>x</sub>) sind in die Excel Tabelle für die CVS Messdaten anstelle der CVS Daten eingefügt worden und danach ebenfalls mit dem ERMES Tool ausgewertet worden. Am Ende sind dann die sekundlichen FTIR-Emissionsmassenwerte zeitlich zu den AVL MOVE bzw. SEMTECH angepasst worden (CO<sub>2</sub> Anpassung).

Mit den so aufbereiteten Daten sind die im folgenden Kapitel genau beschriebenen Ergebnisse der PET Messserie erstellt worden.

## 5.7 Ergebnisse der PET Messung

### 5.7.1 SEMTECH Ergebnisse

Die Abbildung 65 bis Abbildung 67 zeigen CO<sub>2</sub>, NO und HC in [g/s] bei einer Konstantfahrt (Zyklusnummer 2480) über der Zeit. Bei den HC Emissionen ist eine Veränderung des Messwertes bei gerütteltem SEMTECH zu erkennen, jedoch ist bei diesen Messungen keine HC Vergleichsmessung mit einem ruhenden Messgerät durchgeführt worden, da das FTIR keine Summen-HC misst. CO<sub>2</sub> und NO weisen keine Veränderung zu den Referenzmesswerten des FTIR auf.

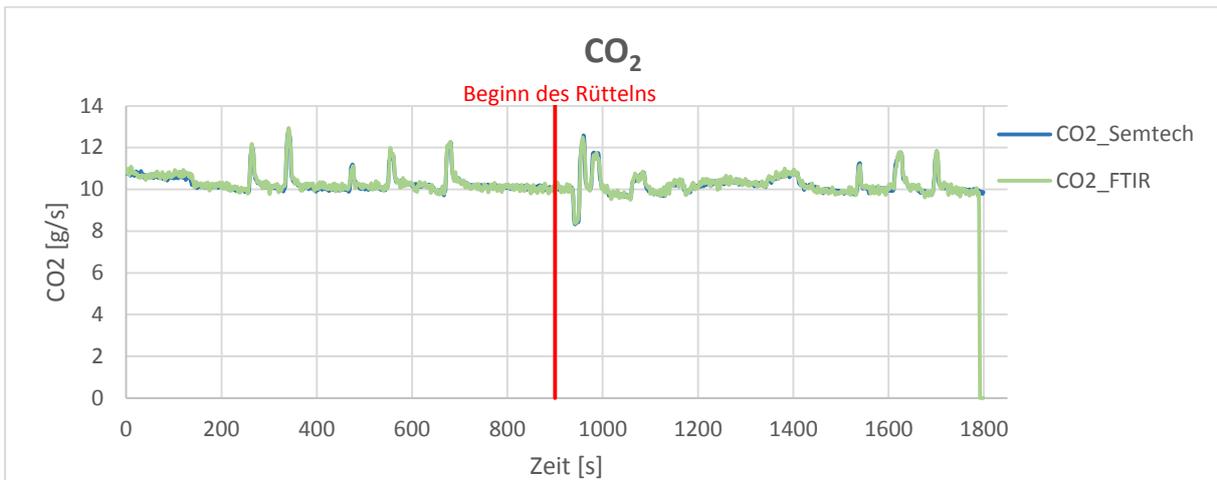


Abbildung 65: CO<sub>2</sub> SEMTECH Zyklus 2480

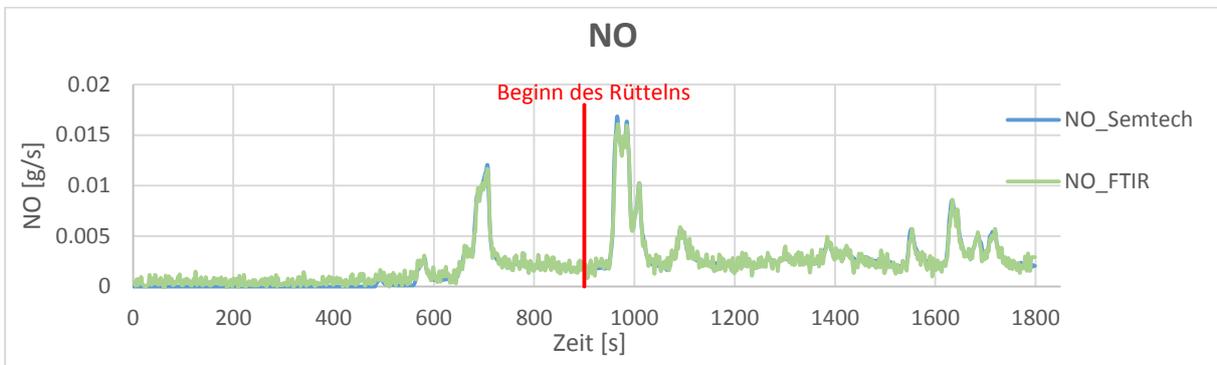


Abbildung 66: NO SEMTECH Zyklus 2480

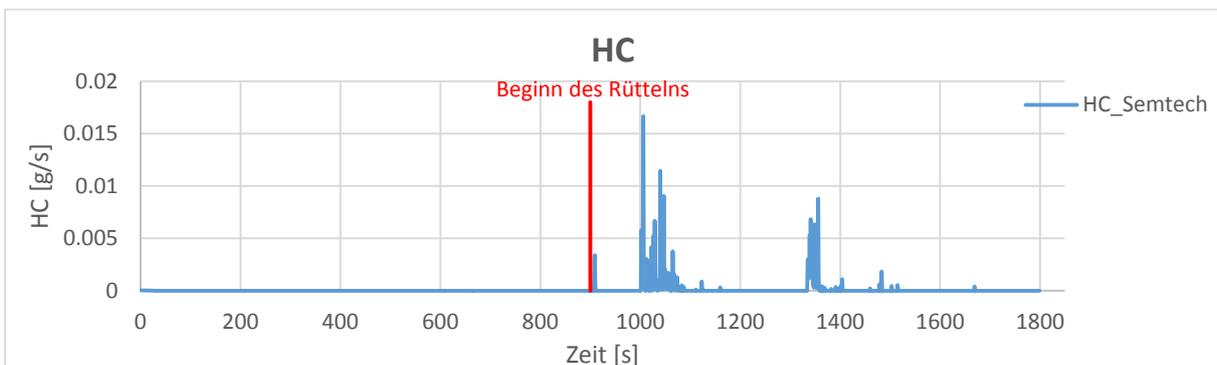


Abbildung 67: HC SEMTECH Zyklus 2480

## 5.7.2 AVL MOVE Ergebnisse

Die Messergebnisse des AVL MOVE bei einer Konstantfahrt (Zyklus 2485) sind in Abbildung 68 bis Abbildung 71 dargestellt. Wiederum beginnt das PET System ab 900 Sekunden zu rütteln. Bei den sekundlichen NO und NO<sub>x</sub> Messwerten ist hier deutlich eine Abweichung von den FTIR Messwerten erkennbar. Die Partikelanzahlen sind, wie schon in Kapitel 3.6.2 erwähnt, aufgrund der Streuung der Ergebnisse von allen Messgeräten schwer miteinander vergleichbar.

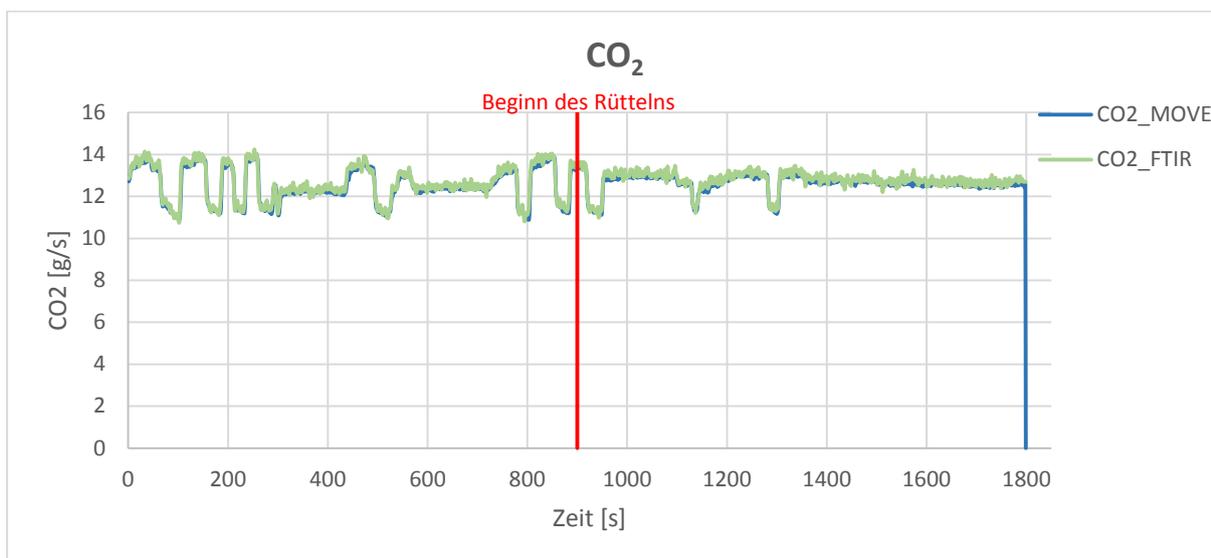


Abbildung 68: CO<sub>2</sub> MOVE Zyklus 2485

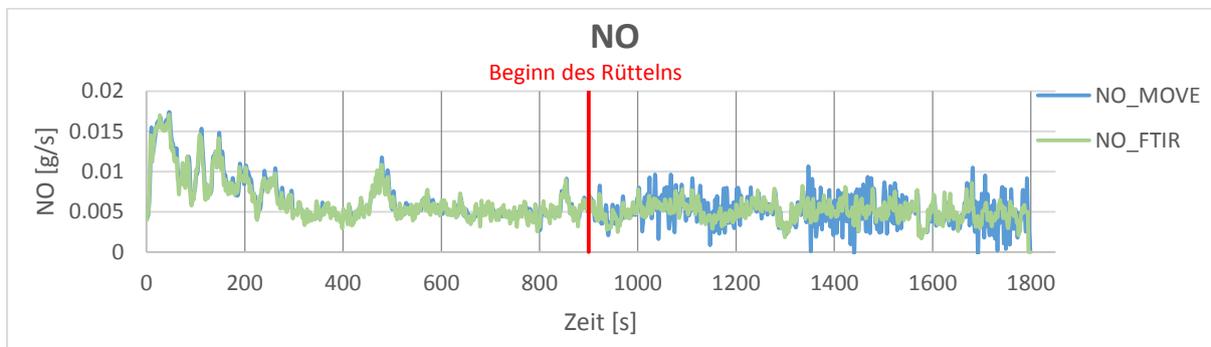


Abbildung 69: NO MOVE Zyklus 2485

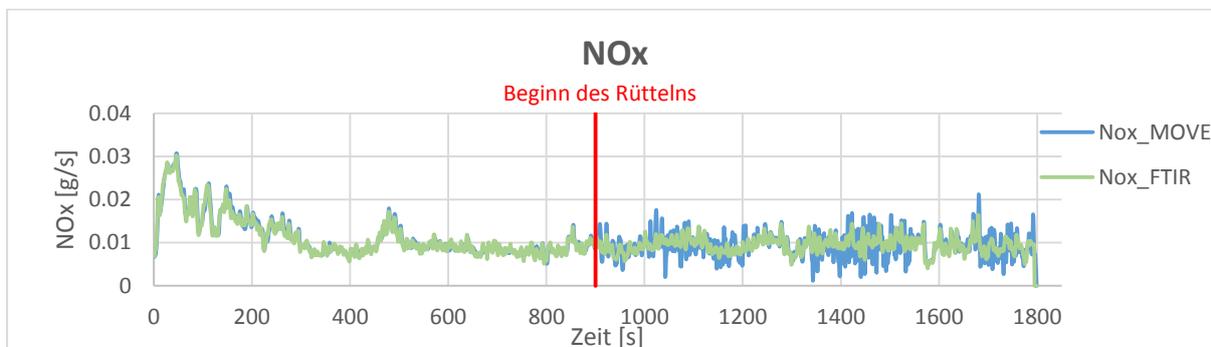


Abbildung 70: NO<sub>x</sub> MOVE Zyklus 2485

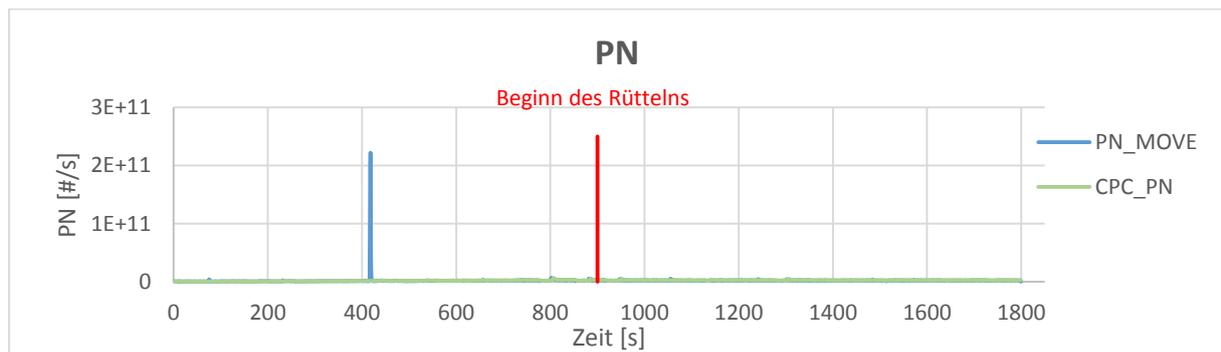


Abbildung 71: PN MOVE Zyklus 2485

Tabelle 5-4 zeigt beispielhaft für eine Konstantpunktfahrt die Abweichungen der AVL Move Messwerte zu den FTIR Werten. Für die NO und NO<sub>x</sub> Werte ist keine Verschlechterung der Zyklusgesamtwerte erkennbar.

Tabelle 5-4: Messwerte AVL MOVE Konstantfahrt Zyklus 2485

	Summe nicht geschüttelt (0-900s)					Summe geschüttelt (901-1793s)				
	CO <sub>2</sub>	CO	NO	NO <sub>x</sub>	PN	CO <sub>2</sub>	CO	NO	NO <sub>x</sub>	PN
MOVE [g]	11258.55	2.34	6.16	10.45	1.64E+12	11279.03	2.34	4.54	8.47	1.89E+12
FTIR [g]	11374.78	0.05	6.01	10.34	1.32E+12	11404.15	0.06	4.49	8.44	2.19E+12
Abweichung [%]	1.0%	-97.7%	-2.5%	-1.1%	-19.2%	1.1%	-97.3%	-1.1%	-0.4%	15.8%

Abbildung 72 zeigt den NO-Verlauf von ruhendem AVL MOVE und FTIR für den Zyklus 2483 WHVC von Sekunde 1000 bis zum Zyklusende. Vergleicht man diesen mit dem NO-Verlauf vom geschüttelten AVL MOVE und FTIR (Zyklus 2484 WHVC Abbildung 73 Sekunde 1400 bis 1700), so sind auch hier Unterschiede zu erkennen: die Messwerte des geschüttelten AVL MOVE schwanken deutlich mehr im Vergleich mit den FTIR Messwerten.

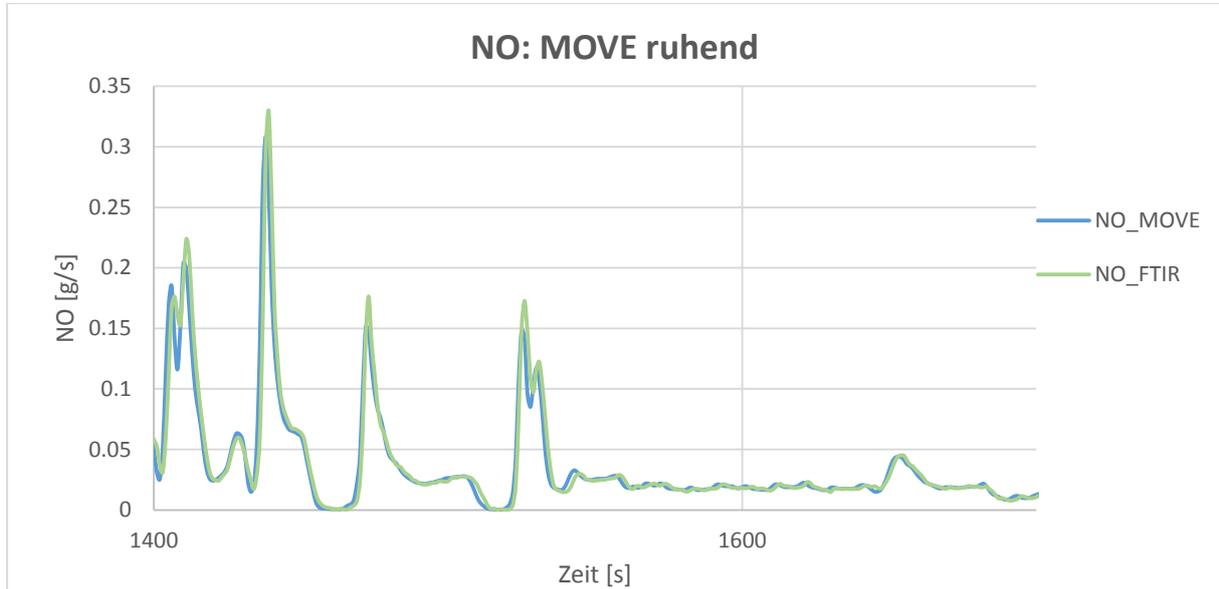


Abbildung 72: NO bei WHVC einphasig Zyklus 2483 MOVE ruhend

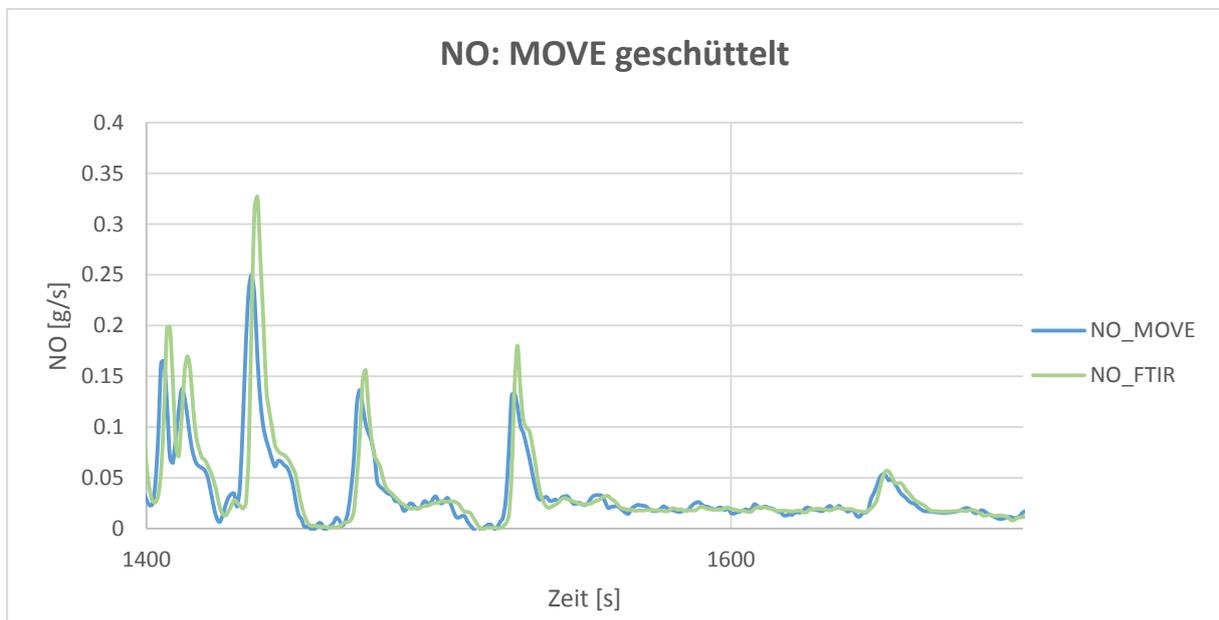


Abbildung 73: NO bei WHVC einphasig Zyklus 2484 MOVE geschüttelt

Auch bei der Betrachtung der Abweichung von AVL MOVE zu FTIR der NO und NOx Zyklusgesamtemissionen ist ein deutlicher Unterschied von geschütteltem zu ruhendem MOVE zu erkennen (siehe Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6).

Tabelle 5-5: Abweichungen MOVE-FTIR Zyklus 2483 WHVC MOVE ruhend

Abweichung: MOVE FTIR für Zyklus 2483			
CO <sub>2</sub>	CO	NO	NO <sub>x</sub>
4.9%	-60.3%	5.4%	4.6%

Tabelle 5-6: Abweichungen MOVE-FTIR Zyklus 2484 WHVC MOVE geschüttelt

Abweichung: MOVE-FTIR Zyklus 2484			
CO <sub>2</sub>	CO	NO	NO <sub>x</sub>
7.4%	-64.2%	14.5%	-25.4%

Für die weitere Analyse gewonnenen Messergebnisse wurden die zeitaufgelösten PEMS Messwerte über den FTIR Messwerten aufgetragen. Aus Abbildung 74 am Beispiel für das AVL MOVE PEMS ist ersichtlich, dass die NO und NO<sub>x</sub> Messwerte bei Rütteln deutlich mehr streuen als bei ruhender Messung. Die Regressionsgerade zwischen MOVE und FTIR weicht geschüttelt auch deutlich von der Soll-Steigung 1,0 ab und hat einen Offset beim Nullpunkt. CO<sub>2</sub> hingegen verhält sich konstant, egal ob das MOVE in Bewegung ist oder nicht (Abbildung 75).

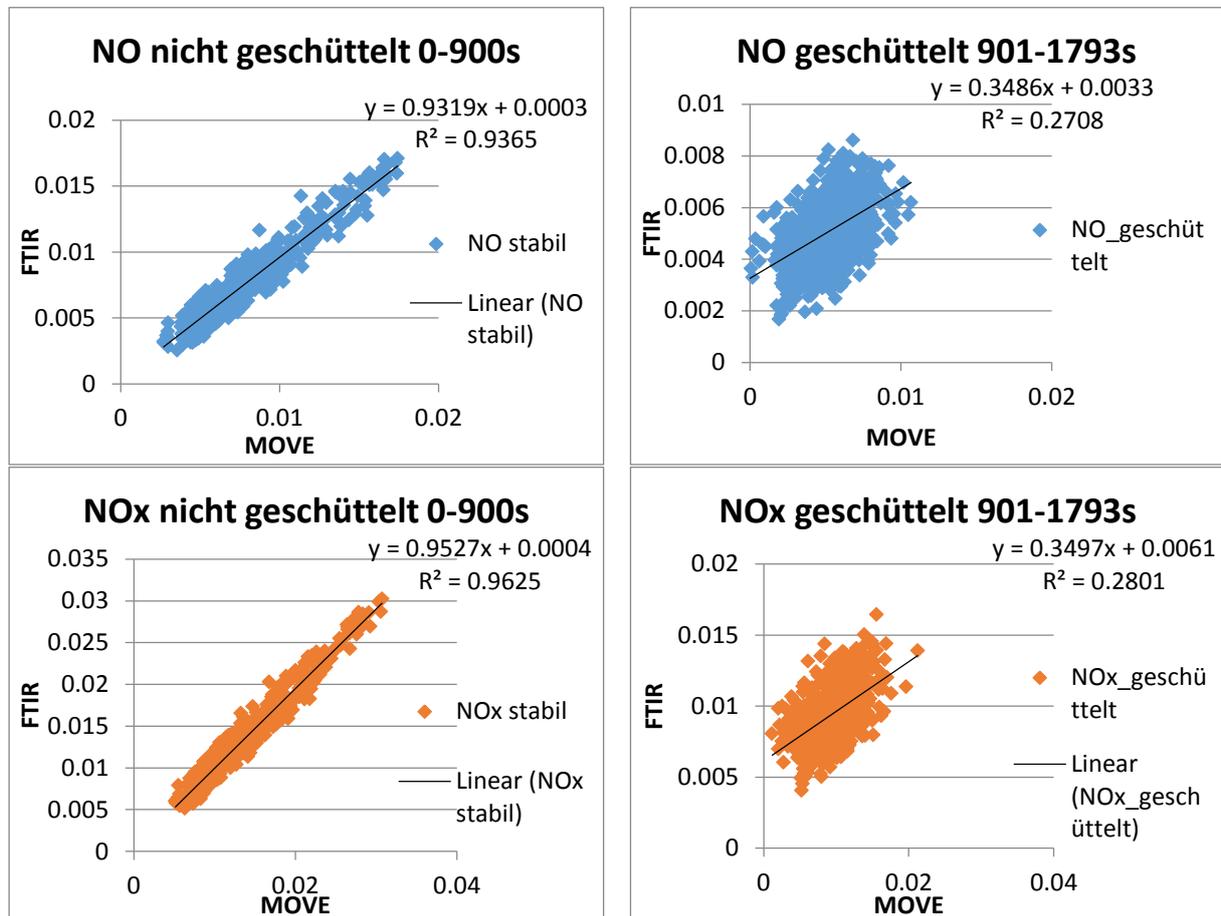


Abbildung 74: NO und NO<sub>x</sub> Messwerte in 1 Hz (FTIR über AVL MOVE für Konstantfahrt Zyklus 2485)

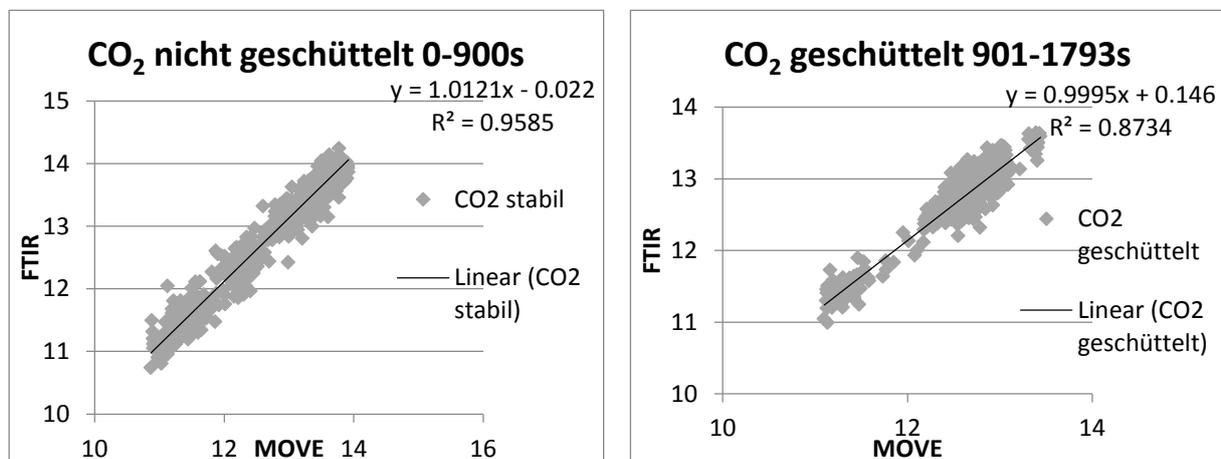


Abbildung 75: CO<sub>2</sub> Messwerte in 1 Hz (FTIR über AVL MOVE für Konstantfahrt Zyklus 2485)

Abschließend wurde eine lineare Regressionsanalyse mit den Parametern PET Beschleunigung, PET Frequenz und PET Amplitude als unabhängige Variablen und der Differenz aus dem PEMS Signal und dem FTIR Signal als abhängige Variable für die sich auffällig verhaltenden Abgaskomponenten NO und NOx durchgeführt. Damit sollte die Möglichkeit getestet werden, die Effekte des Rüttelns mathematisch zu korrigieren. Es zeigt sich keine signifikante Abhängigkeit der NO bzw. NOx Differenz von AVL MOVE und FTIR in Bezug auf die auftretende Beschleunigung in z-Richtung, der Frequenz oder der Amplitude. Tabelle 5-7 zeigt das Ergebnis einer Regressionsanalyse für  $\Delta$ NO einer Konstantfahrt.

Eine mögliche mathematische Korrektur der Messwerte kann wegen des sehr kleinen korrigierten R<sup>2</sup>-Wertes (<0.1) verworfen werden. Es muss also vermutlich an der Hardware der PEMS Geräte eingegriffen werden, um die Einflüsse der Bewegung auf das Messergebnis zu minimieren.

Ein möglicher Grund dafür, dass keine passende Korrekturfunktion gefunden wurde, kann das in den Versuchen verwendete Schwingungsprofil des PET Prüfstandes sein. Dabei ändern sich die Amplitude und die Frequenz der Schwingung gleichzeitig. Für kommende Untersuchungen sollen zusätzlich eine sich ändernde Frequenz bei konstanter Amplitude bzw. eine konstante Frequenz bei sich ändernder Amplitude aufgeprägt werden.

Tabelle 5-7: Ergebnis der Regressionsanalyse für NO einer Konstantfahrt

Modellzusammenfassung				
Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	,092 <sup>a</sup>	,009	,007	,001025843

a. Einflussvariablen : (Konstante), a\_z\_max\_calc, Amp.\_calc, Frequenz\_calc

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Ziel dieser Diplomarbeit, ein Testgerät zur Simulation von Beschleunigungen, die während einer RDE Fahrt auftreten, für mobile On-Board Messgeräte zu entwickeln ist erreicht worden. Der PET-Prüfstand wurde während einer Messkampagne auf der LKW-Rolle eingesetzt und die Messwerte von den Labormessgeräten und den, mittels PET realistisch in z-Richtung bewegten PEMS Geräten konnten direkt am Prüfstand miteinander verglichen werden.

Im Zuge der DTT-Messungen ist ein neu entwickeltes Verdünnungssystem für Partikelmessungen erstmals getestet worden. Die Ergebnisse sind sehr zufriedenstellend, da die Abweichungen zum Laborverdünnungssystem für Partikelmessungen in erwartbaren Bereichen liegen.

Die Ergebnisse der PET-Messungen zeigen einen deutlichen Offset der Messwerte NO und NO<sub>x</sub> bei bewegtem AVL MOVE im Vergleich mit dem FTIR Analysator. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der NDUV-Analysator oder die Massflowcontroller bei Beschleunigungen fehlerhaft agieren. Eine genaue Ursachenforschung wird noch durchgeführt. Da es sich bei NO<sub>x</sub> Emissionen um eine sehr kritische Emissionskomponente handelt, sind diese Messfehler im realen Betrieb nicht akzeptabel. Bei den Tests mit dem SEMTECH zeigen sich Abweichungen bei der HC Messung.

Zurzeit werden der PET-Prüfstand und die Klimahaube am Institut weiterentwickelt. Es ist schon möglich, kombinierte Bewegungen in y- und z-Richtung mit dem PET zu simulieren. Für weitere Test wird auch das Bewegungsprofil für den PET modifiziert. So sollen sich entweder die Amplitude oder die Frequenz der Schwingungen ändern und nicht wie bei den bis dato durchgeführten Versuchen beide Parameter gleichzeitig. Somit kann bestimmt werden, ob einer der zwei Bewegungsparameter alleine für die falschen Messergebnisse verantwortlich ist.

Bei kommenden Messungen sollen weitere PEMS Systeme anderer Hersteller, das DTT-Verdünnungssystem (in kompakterer Form als in dieser Arbeit beschrieben) und CPC's am PET getestet werden. Nach Fertigstellung der Klimahaube werden an den PEMS Tests mit Änderungen der Temperatur, des Drucks und insbesondere der Luftfeuchtigkeit durchgeführt.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systemaufbau des AVL MOVE [2] .....	3
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines NDUV Analysators [6] .....	4
Abbildung 3: Messprinzip DUV-Analysator [2].....	5
Abbildung 4: Aufbau eines NDIR Analysators [9].....	6
Abbildung 5: vereinfachter schematischer Aufbau des PN PEMS [5] .....	6
Abbildung 6: Prinzip der Diffusions Aufladung [5] .....	7
Abbildung 7: Aufbau eines Flammenionisationsdetektors (FID) [6].....	8
Abbildung 8: TUG-Verdünnungssystem [19].....	10
Abbildung 9: schematischer Aufbau des DTT-Verdünnungssystems .....	11
Abbildung 10: Funktionsschema CPC [10][7].....	11
Abbildung 11: WLTC Testzyklus .....	13
Abbildung 12: ERMESV8 Testzyklus .....	13
Abbildung 13: Messaufbau Variante 1 .....	15
Abbildung 14: Messaufbau Variante 2.....	16
Abbildung 15: Messaufbau Variante 4.....	16
Abbildung 16: Messaufbau Variante 5.....	17
Abbildung 17: Messaufbau Variante 3.....	17
Abbildung 18: Messaufbau der verdünnten Probenentnahme Variante 1 .....	18
Abbildung 19: gesamter Messaufbau der DTT-Messung am PKW-Rollenprüfstand .....	19
Abbildung 20: DTT-Messung: Detail EFM und Entnahmeposition AVL MOVE .....	19
Abbildung 21: DTT-Messungen: Detail Entnahmeposition FTIR und DTT-Verdünnungssystem .....	20
Abbildung 22: Trichtereinbau vor CVS-Eingang Messvariante 5 .....	20
Abbildung 23: CO <sub>2</sub> Verläufe 7731 WLTC hot .....	23
Abbildung 24: CO <sub>2</sub> Verläufe 7736 Konstantpunkte .....	23
Abbildung 25: CO <sub>2</sub> Verläufe 7743 ERMES hot .....	23
Abbildung 26: Entnahmeposition der Messgeräte .....	24
Abbildung 27: korrigierte CO <sub>2</sub> Verläufe 7743 ERMES .....	26
Abbildung 28: 7731 WLTC hot: CO <sub>2</sub> Vergleich .....	27
Abbildung 29: 7731 WLTC hot: Vergleich von CO, NO <sub>x</sub> , NO .....	27
Abbildung 30: 7731 WLTC hot: prozentueller Fehler bei unverdünnter Messung von AVL MOVE zu FTIR.....	27
Abbildung 31: Partikelmessung CVS-Entnahme 7724 WLTC hot .....	28
Abbildung 32: Partikelmessung CVS-Entnahme 7725 WLTC hot .....	29
Abbildung 33: Partikelmessung CVS-Entnahme 7729 Konstantpunkte.....	29

Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der Partikelanzahl für den Zyklus 7729 .....	30
Abbildung 35: Abgastemperaturen für den Zyklus 7729.....	30
Abbildung 36: Partikelmessung DTT-Verdünnung mit Ejector Diluter (ED).....	31
Abbildung 37: Partikelmessung DTT-Verdünnung mit Bypass (Bp).....	31
Abbildung 38: Partikelmessung Variante 2 für Zyklus 7735 ERMES hot .....	32
Abbildung 39: Partikelmessung Variante 5 für Zyklus 7743 ERMES hot .....	32
Abbildung 40: Detail des Abgasdrucks bei den Messvariante 2, 4 und 5.....	32
Abbildung 41: Bewegungsprofil einer RDE Messfahrt .....	34
Abbildung 42: Frequenzspektrum der Beschleunigungen während einer RDE Messung .....	35
Abbildung 43: Konzeptskizze Tripod .....	36
Abbildung 44: Skizze: Längenänderung bei Bewegung in z-Richtung .....	37
Abbildung 45: Linearmotorenhub über Weg in x-, y- und z-Richtung.....	38
Abbildung 46: Kräfte bei Beschleunigung in z-Richtung.....	40
Abbildung 47: Aufbau der Linearmotoren [14] .....	42
Abbildung 48: Simulation der Linearmotoren .....	43
Abbildung 49: Ergebnis der Temperatursimulation für die Linearmotoren .....	44
Abbildung 50: PET 3D Ansicht .....	46
Abbildung 51: PET Zusammenstellungszeichnung .....	47
Abbildung 52: Unterbaugruppe Bein Zusammenstellungszeichnung.....	49
Abbildung 53: Einzelansicht der Unterbaugruppe Bein in 3D gerendert und eingebaut.....	50
Abbildung 54: Kompletter PET mit aufgebautem AVL MOVE .....	51
Abbildung 55: elektronische Komponenten des PET .....	53
Abbildung 56: Testzyklus WHVC einphasig.....	55
Abbildung 57: Testzyklus WHVC zweiphasig .....	55
Abbildung 58: Bewegungsprofil des PET Prüfstandes .....	57
Abbildung 59: Schematischer Aufbau der PET Messung.....	58
Abbildung 60: PET Messungen Prüfstandsaufbau von vorne .....	59
Abbildung 61: PET Messungen Prüfstandsaufbau von hinten (SEMTECH am PET aufgebaut) .....	60
Abbildung 62: PET Messungen Prüfstandsaufbau LKW Unterseite .....	60
Abbildung 63: Entnahmeposition SEMTECH.....	61
Abbildung 64: Kompletter Aufbau der PET Messgeräte mit AVL MOVE.....	61
Abbildung 65: CO <sub>2</sub> Semtech Zyklus 2480 .....	63
Abbildung 66: NO Semtech Zyklus 2480 .....	63
Abbildung 67: HC Semtech Zyklus 2480 .....	63
Abbildung 68: CO <sub>2</sub> MOVE Zyklus 2485 .....	64

---

Abbildung 69: NO MOVE Zyklus 2485 .....	64
Abbildung 70: NO <sub>x</sub> MOVE Zyklus 2485 .....	64
Abbildung 71: PN MOVE Zyklus 2485 .....	65
Abbildung 72: NO bei WHVC einphasig Zyklus 2483 MOVE ruhend .....	66
Abbildung 73: NO bei WHVC einphasig Zyklus 2484 MOVE geschüttelt .....	66
Abbildung 74: NO und NO <sub>x</sub> Messwerte in 1 Hz (FTIR über AVL MOVE für Konstantfahrt Zyklus 2485) .....	68
Abbildung 75: CO <sub>2</sub> Messwerte in 1 Hz (FTIR über AVL MOVE für Konstantfahrt Zyklus 2485).....	68
Abbildung 76: PET Zusammenstellung .....	111
Abbildung 77: PET Unterbaugruppe Bein Zusammenstellung.....	112
Abbildung 78: PET Unterbaugruppe LinMot_Halterung Zusammenstellung .....	113
Abbildung 79: PET Unterbaugruppe Gelenk_M16 Zusammenstellung .....	114
Abbildung 80: PET Unterbaugruppe Federteller_Federwegverstellung Zusammenstellung	115
Abbildung 81: PET Unterbaugruppe Grundgestell Zusammenstellung .....	116
Abbildung 82: PET Unterbaugruppe PEMS_Aufnahme Zusammenstellung.....	117
Abbildung 83: PET Unterbaugruppe Stabilisator Zusammenstellung .....	118

## Formelverzeichnis

(3-1 ) [3] .....	22
(3-2 ) [1] .....	22
(3-3 ) .....	24
(3-4 ) .....	25
(3-5 ) .....	25
(3-6 ) .....	25
(3-7 ) .....	25
(3-8 ) .....	25
(4-1 ) .....	37
(4-2 ) .....	37
(4-3 ) .....	37
(4-4 ) .....	37
(4-5 ) .....	37
(4-6 ) .....	37
(4-7 ) .....	39
(4-8 ) .....	39
(4-9 ) .....	39
(4-10 ) .....	39
(4-11 ) .....	39
(4-12 ) .....	39
(4-13 ) .....	39
(4-14 ) .....	39
(4-15 ) .....	39
(4-16 ) .....	41
(4-17 ) .....	41
(4-18 ) .....	41
(4-19 ) .....	41

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Übersicht der Fahrzeugdaten .....	12
Tabelle 3-2: Messprogramm PKW-Rolle .....	14
Tabelle 3-3: Verdünnungsfaktoren des DTT-Verdünnungssystems .....	22
Tabelle 4-1: Maximal auftretende Kräfte am Linearmotor .....	41
Tabelle 5-1: Übersicht der LKW-Daten .....	54
Tabelle 5-2: Messmatrix PET .....	56
Tabelle 5-3: Übersicht der verwendeten Sinusschwingungen .....	57
Tabelle 5-4: Messwerte AVL MOVE Konstantfahrt Zyklus 2485 .....	65
Tabelle 5-5: Abweichungen MOVE-FTIR Zyklus 2483 WHVC MOVE ruhend .....	67
Tabelle 5-6: Abweichungen MOVE-FTIR Zyklus 2483 WHVC MOVE geschüttelt .....	67
Tabelle 5-7: Ergebnis der Regressionsanalyse für NO einer Konstantfahrt .....	69
Tabelle 0-1: Ergebnisse für die gasförmigen Emissionskomponenten der DTT-Messung .....	78
Tabelle 0-2: Ergebnisse PN der DTT-Messungen .....	80
Tabelle 0-3: Vergleich der zwei 23nm CPC (verdünnte und unverdünnte Entnahme) .....	82
Tabelle 0-4: Übersicht der PET Messergebnisse mit SEMTECH .....	83
Tabelle 0-5: Übersicht der PET Messergebnisse mit AVL MOVE .....	84

## Literatur

- [1] Eichlseder, H.: Thermodynamik, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2013
- [2] AVL List GmbH.: AVL Gas PEMS und AVL Gas PEMS iX Product Guide, 2016
- [3] Weller, K., et al: A comprehensive evaluation method for instantaneous emission measurements, Technische Universität Graz : s.n., 2016.
- [4] Reif, Konrad: Abgastechnik für Verbrennungsmotoren. Wiesbaden : Springer, 2015.
- [5] AVL List GmbH.: AVL M.O.V.E. PN PEMS iS Product Guide, 2015
- [6] Wiegleb, G.: Gasmesstechnik in Theorie und Praxis, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016
- [7] Hausberger, S.: Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil I, Technische Universität Graz, 2015
- [8] Hinds, William C.: Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [9] LumaSense Technologies GmbH. LumaSense Technologies. [Online] [Zitat vom: 25. August 2018.] <https://www.lumasenseinc.com/DE/produkte/technologie-grundlagen/unsere-technologien/nichtdispersive-infrarot-absorption-ndir/ndir.html>.
- [10] TSI Inc.: Model 3790 Engine Exhaust Condensation Particle Counter Operating and Service Manual, 2008
- [11] Wittel, Herbert; Jannasch, Dieter; Voßiek, Joachim; Spura, Christian: Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2017.
- [12] Wittel, Herbert; Muhs, Dieter; Jannasch, Dieter; Vobiek, Joachim: Roloff/Matek Maschinenelemente Formelsammlung. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2012.
- [13] Fischer, Ulrich, et al.: Tabellenbuch Metall. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2011.
- [14] NTI AG LinMot. LinMot Linearmotoren. [Online] [Zitat vom: 23. August 2018.] <http://www.linmot.com/de/produkte/linearmotoren/>
- [15] B&R Industrial Automation GmbH. B&R Produkte ACOPOSmulti. [Online] [Zitat vom: 25. August 2018.] <https://www.br-automation.com/de-at/produkte/antriebstechnik/acoposmulti/>
- [16] Neugebauer, Reimund: Parallelkinematische Maschinen: Entwurf, Konstruktion, Anwendung. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2006.
- [17] ECOpoint Inc. Emission Test Cycles. [Online] 2018. [Zitat vom: 24. August 2018.] <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/whvc.php>

- [18] Andreas Wiartalla, Christopher Severin. Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln. Berlin : FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V., 2012
- [19] Tieber, K.; Fleischhacker, P.: Validierung und Revidierung einer Partikelzählervorkonditioniereinheit, Graz, 2012

## Anhang A: DTT-Messung

Tabelle 0-1: Ergebnisse für die gasförmigen Emissionskomponenten der DTT-Messung

		CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	NO
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
7730 WLTC cold	Prüfstand	145.7203	0.3533	0.0194	0.0214
	AVL MOVE	144.9384	0.3160	0.0260	0.0250
	FTIR	146.0928	0.3149	0.0252	0.0254
	Abweichung: MOVE/FTIR	-0.79%	0.37%	3.36%	-1.64%
		CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	NO
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
7731 WLTC hot	Prüfstand	141.0689	0.2601	0.0136	0.0150
	AVL MOVE	140.1256	0.2983	0.0191	0.0171
	FTIR	141.3510	0.2708	0.0163	0.0165
	Abweichung: MOVE/FTIR	-0.87%	10.17%	17.13%	3.95%
		CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	NO
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
7732 ERMES hot	Prüfstand	144.4631	0.9161	0.0270	0.0278
	AVL MOVE	146.6835	1.0849	0.0293	0.0271
	FTIR	144.4262	1.0590	0.0308	0.0309
	Abweichung: MOVE/FTIR	1.56%	2.45%	-4.73%	-12.05%
		CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	NO
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
7733 ERMES hot	Prüfstand	143.7851	0.7866	0.0199	0.0207
	AVL MOVE	146.6536	0.7548	0.0272	0.0244
	FTIR	143.6096	0.8561	0.0243	0.0245
	Abweichung: MOVE/FTIR	2.12%	-11.84%	11.93%	-0.33%
		CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	NO
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
7734 ERMES cold	Prüfstand	149.2301	0.7732	0.0260	0.0266
	AVL MOVE	150.6977	0.8161	0.0290	0.0294
	FTIR	149.2599	0.8180	0.0293	0.0295
	Abweichung: MOVE/FTIR	0.96%	-0.23%	-1.22%	-0.07%
		CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	NO
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
7735 ERMES hot	Prüfstand	143.0099	1.4183	0.0111	0.0115
	AVL MOVE	144.8466	1.6759	0.0129	0.0126
	FTIR	142.8285	1.7649	0.0125	0.0127
	Abweichung: MOVE/FTIR	1.41%	-5.04%	2.78%	-0.12%

		CO2	CO	NOx	NO
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
7736 Konstant- punkte	Prüfstand	293.4698	2.5975	0.0323	0.0495
	AVL MOVE	302.0434	2.7470	0.0400	0.0386
	FTIR	293.9659	2.5379	0.0353	0.0355
	Abweichung: MOVE/FTIR	2.75%	8.24%	13.29%	8.87%
		CO2	CO	NOx	NO
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
7740 ERMES cold	Prüfstand	148.8737	1.3464	0.0385	0.0394
	AVL MOVE	149.9971	1.5659	0.0403	0.0410
	FTIR	150.0463	1.6555	0.0430	0.0430
	Abweichung: MOVE/FTIR	-0.03%	-5.41%	-6.42%	-4.83%
		CO2	CO	NOx	NO
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
7741 ERMES hot	Prüfstand	142.2098	1.4253	0.0118	0.0121
	AVL MOVE	144.0824	1.8301	0.0139	0.0144
	FTIR	143.2244	1.7811	0.0144	0.0144
	Abweichung: MOVE/FTIR	0.60%	2.75%	-3.23%	-0.27%
		CO2	CO	NOx	NO
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
7742 Konstant- punkte	Prüfstand	242.0119	1.2863	0.0241	0.0386
	AVL MOVE	253.4538	1.4077	0.0287	0.0283
	FTIR	246.4483	1.2871	0.0267	0.0268
	Abweichung: MOVE/FTIR	2.84%	9.37%	7.27%	5.63%
		CO2	CO	NOx	NO
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
7743 ERMES hot	Prüfstand	143.5029	1.4056	0.0422	0.0425
	AVL MOVE	145.9409	1.7946	0.0443	0.0436
	FTIR	145.6539	1.8902	0.0492	0.0493
	Abweichung: MOVE/FTIR	0.20%	-5.06%	-10.05%	-11.41%
		CO2	CO	NOx	NO
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
7744 Konstant- punkte	Prüfstand	275.0235	1.3185	0.0194	0.0357
	AVL MOVE	280.8268	1.4035	0.0239	0.0230
	FTIR	276.0574	1.3069	0.0212	0.0212
	Abweichung: MOVE/FTIR	1.73%	7.39%	12.75%	8.36%
		CO2	CO	NOx	NO
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
7745 ERMES cold	Prüfstand	148.6659	1.0563	0.0609	0.0613
	AVL MOVE	150.4790	0.9780	0.0631	0.0634
	FTIR	147.9449	1.2841	0.0677	0.0678
	Abweichung: MOVE/FTIR	1.71%	-23.84%	-6.77%	-6.55%

Tabelle 0-2: Ergebnisse PN der DTT-Messungen

7722				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	
3,427E+12	4,624E+12	0,000E+00	0	
7723				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	
3,211E+12	4,323E+12	2,976E+12	0	
7724				
PN TUG_3790TU	PN TUG_3775TU	PN DTT_3775IES	PN MOVE	
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	
1,595E+12	2,513E+12	2,187E+12	0	
7725				
PN TUG_3790TU	PN TUG_3775TU	PN DTT_3775IES	PN MOVE	
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	
3,173E+12	5,020E+12	4,253E+12	0	
7726				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	
4,19311E+12	6,05436E+12	2,97902E+12	0	
7727				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	
2,75849E+12	4,47557E+12	2,86701E+12	0	
7728				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	
3,35234E+12	5,1308E+12	3,40775E+12	0	
7729				
PN TUG_3790TU	PN TUG_3775TU	PN DTT_3775IES	PN MOVE	
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	
2,42444E+12	4,90189E+12	2,97579E+12	0	
7730				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	PN AVL CPC
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]
3,94765E+12	5,20926E+12	6,38682E+12	4,3026E+12	6,28787E+12

7731				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	AVL CPC
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]
1,91093E+12	2,92233E+12	3,3941E+12	2,2096E+12	3,13405E+12
7732				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	PN AVL CPC
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]
3,22924E+12	5,06474E+12	5,58714E+12	3,5805E+12	5,48765E+12
7733				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	PN AVL CPC
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]
2,77793E+12	4,55942E+12	5,04363E+12	3,1034E+12	4,64643E+12
7734				
PN TUG_3790TU	PN TUG_3775TU	PN DTT_3775IES	PN MOVE	PN DTT_AVL CPC
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]
4,14704E+12	6,23791E+12	7,53577E+12	4,2956E+12	7,15651E+12
7735				
PN TUG_3790TU	PN TUG_3775TU	PN DTT_3775IES	PN MOVE	PN DTT_AVL CPC
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]
3,4683E+12	5,40288E+12	5,83119E+12	3,4077E+12	5,46941E+12
7736				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	PN AVL CPC
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]
2,83166E+12	6,63604E+12	5,97271E+12	2,849E+12	5,22735E+12
7740				
PN TUG_3790TU	PN TUG_3775TU	PN DTT_3775IES	PN MOVE	PN DTT_AVL CPC
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]
4,61371E+12	6,80038E+12	7,67951E+12	4,6744E+12	7,40689E+12
7741				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	PN AVL CPC
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]
3,45669E+12	5,40634E+12	5,98153E+12	3,6257E+12	5,88554E+12
7742				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	PN AVL CPC
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]
2,54874E+12	4,95892E+12	5,16464E+12	2,7423E+12	4,7456E+12

7743				
PN TUG_3790TU	PN TUG_3775TU	PN DTT_3775IES	PN MOVE	PN DTT_AVL CPC
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]
3,35978E+12	5,63311E+12	5,35855E+12	4,0899E+12	5,22192E+12
7744				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	PN AVL CPC
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]
2,30802E+12	4,5186E+12	4,49623E+12	2,9406E+12	4,207E+12
7745				
PN Rolle_3790TU	PN Rolle_3775TU	PN Rolle_3775IES	PN MOVE	PN AVL CPC
[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]	[#/km]
4,20668E+12	6,60248E+12	6,46899E+12	4,5385E+12	6,42604E+12

Tabelle 0-3: Vergleich der zwei 23nm CPC (verdünnte und unverdünnte Entnahme)

	PN 3790TU 23nm: verdünnte Entnahme	PN MOVE 23nm: unverdünnte Entnahme	Abweichung
	[#/km]	[#/km]	[%]
7730: WLTC cold	3,94765E+12	4,30263E+12	9,0
7731: WLTC hot	1,91093E+12	2,20963E+12	15,6
7732: ERMES V8 hot	3,22924E+12	3,58053E+12	10,9
7733: ERMES V8 hot	2,77793E+12	3,10336E+12	11,7
7734: ERMES V8 cold	4,14704E+12	4,29559E+12	3,6
7735: ERMES V8 hot	3,4683E+12	3,40773E+12	-1,7
7736: Konstantpunkt	2,83166E+12	2,84896E+12	0,6
7740: ERMES V8 cold	4,61371E+12	4,67438E+12	1,3
7741: ERMES V8 hot	3,45669E+12	3,62575E+12	4,9
7742: Konstantpunkt	2,54874E+12	2,74233E+12	7,6
7743: ERMES V8 hot	3,35978E+12	4,08989E+12	21,7
7744: Konstantpunkt	2,30802E+12	2,94064E+12	27,4
7745: ERMES V8 cold	4,20668E+12	4,53846E+12	7,9

## Anhang B: PET-Messung

Tabelle 0-4: Übersicht der PET Messergebnisse mit SEMTECH

2479				
	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	NOx[g/km]
SEMTECH	724,15	0,09	0,30	0,39
FTIR	720,58	0,01	0,18	0,27
Abweichung [%]	-0,49	-92,49	-39,84	-30,57
2480				
	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	NOx[g/km]
SEMTECH	718,87	0,31	0,16	0,35
FTIR	716,95	0,01	0,17	0,33
Abweichung [%]	-0,27	-97,69	6,81	-5,62
2481				
	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	NOx[g/km]
SEMTECH	994,74	0,47	3,44	3,90
FTIR	995,64	0,21	3,24	3,64
Abweichung [%]	0,09	-56,41	-5,84	-6,67
2482				
	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	NOx[g/km]
SEMTECH	963,18	0,68	2,34	3,04
FTIR	957,68	0,11	2,46	3,14
Abweichung [%]	-0,57	-84,61	5,27	3,12

Tabelle 0-5: Übersicht der PET Messergebnisse mit AVL MOVE

2483				
	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	PN[#/km]
MOVE	917,77	0,31	2,03	3,2667E+11
FTIR	962,84	0,12	2,14	2,6424E+11
Abweichung [%]	4,91	-60,33	5,40	-19,11
2484				
	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	PN [# /km]
MOVE	919,72	0,32	1,94	1,3405E+11
FTIR	987,75	0,11	2,22	1,0006E+11
Abweichung [%]	7,40	-64,22	14,51	-25,35
2485				
	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	PN [# /km]
MOVE	887,79	0,18	0,42	1,39E+11
FTIR	897,80	0,00	0,41	1,3862E+11
Abweichung [%]	1,13	-97,47	-2,03	-0,27
2486				
	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NO [g/km]	PN [# /km]
MOVE	891,31	0,19	0,35	9,5819E+10
FTIR	898,47	0,01	0,36	1,0108E+11
Abweichung [%]	0,80	-97,30	2,60	5,49

## Anhang C: Berechnung PET

### **1.) Trigonometrische Berechnung des Tripods**

*Ausgangswerte:*

- Länge der Linmot Baugruppe (von oberen bis unteren Gelenk):  $l_0=948\text{mm}$
- Anstellwinkel der Linmot-Baugruppe in Ausgangslage:  $\alpha_0=70^\circ$
- Maximal möglicher Hub:  $+h=100\text{mm}$

$$l_0 := 948 \text{ mm} \quad h := 100 \text{ mm}$$
$$\alpha_0 := 70^\circ$$

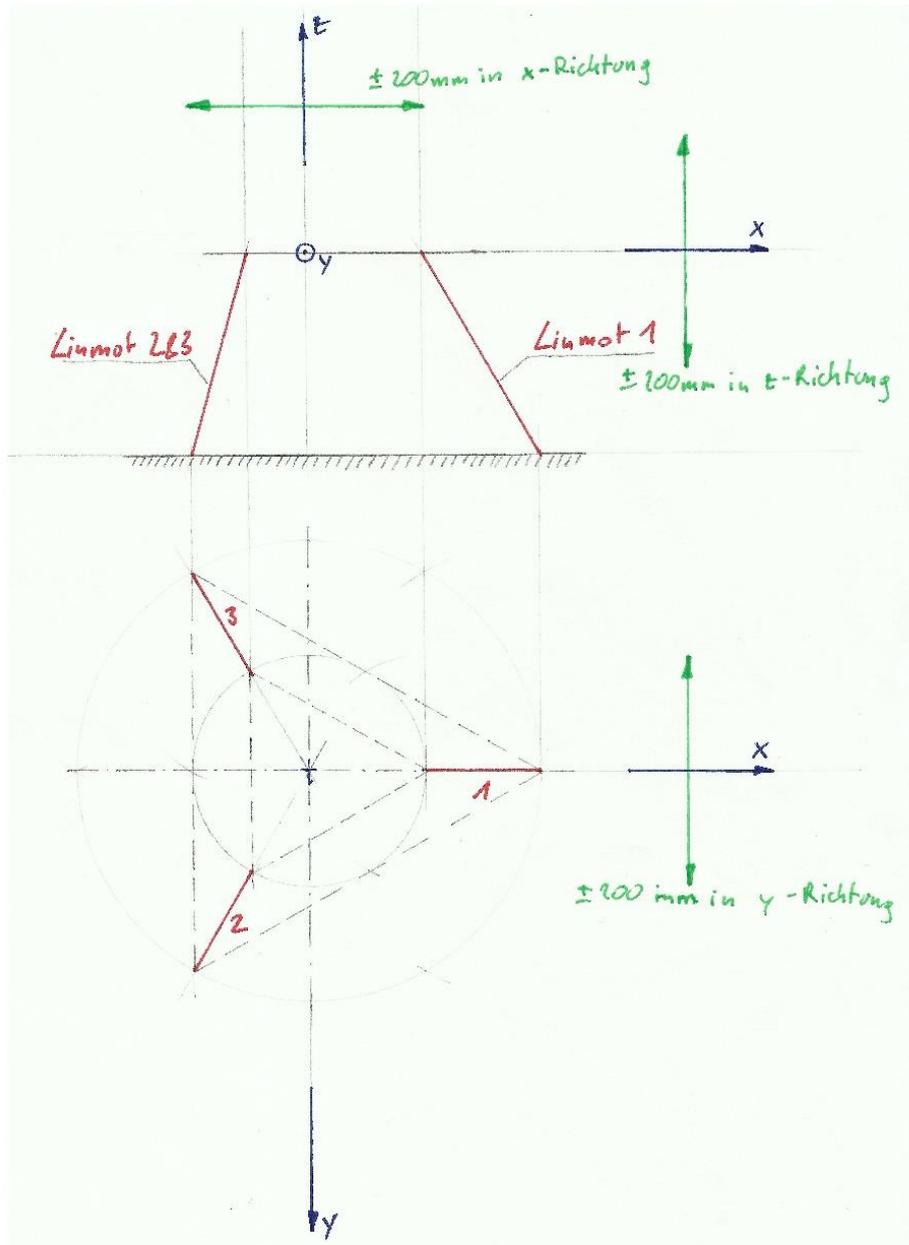
$$h_0 := l_0 \cdot \sin(\alpha_0) = 890.83 \text{ mm}$$

$$x_0 := l_0 \cdot \cos(\alpha_0) = 324.235 \text{ mm}$$

$$r := 250 \text{ mm}$$

$$R := x_0 + r = 574.235 \text{ mm} \quad \text{Radius der unteren Gelenke}$$

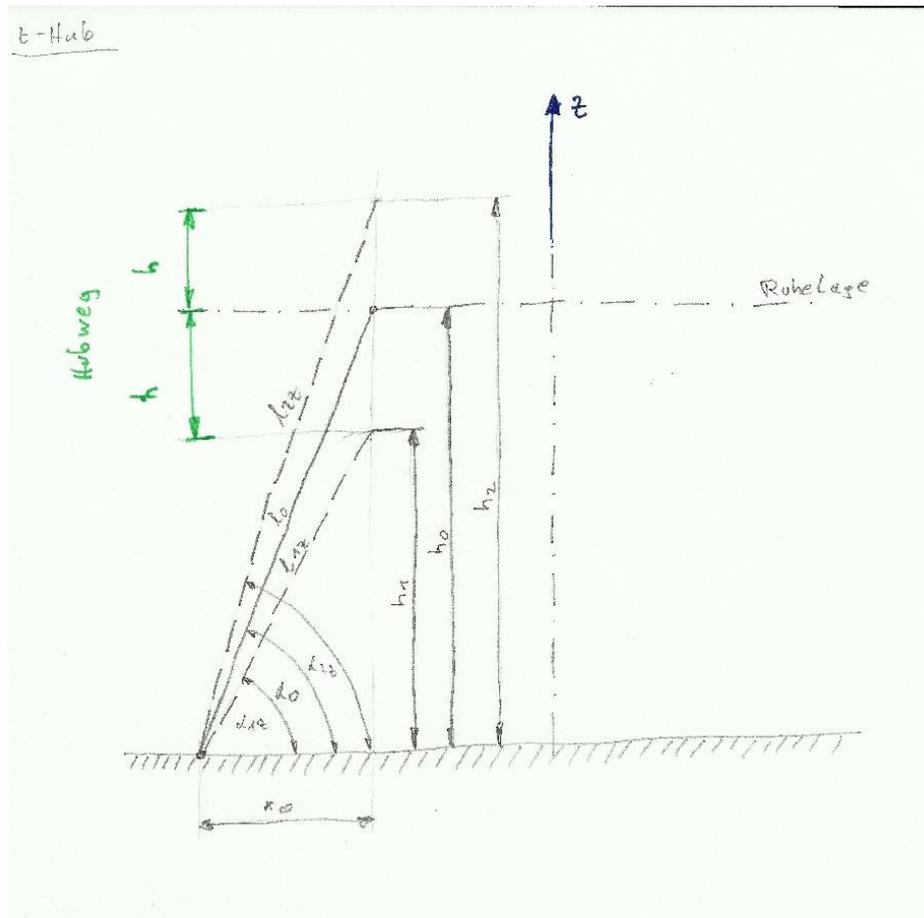
$$h_{\text{dreieck}} := R \cdot \frac{3}{2} = 861.353 \text{ mm}$$



Skizze: Skizze Tripod-Gesamtsystem

### 1.1) Bewegung in z-Richtung um $\pm 100\text{mm}$

Wegen der Symmetrie ist der z-Hub für alle 3 Linearmotoren gleich



Skizze: z-Hub

$$h1z := h0 - h = 790.829 \text{ mm}$$

$$h2z := h0 + h = 990.829 \text{ mm}$$

$$l1z := \sqrt{h1z^2 + x0^2} = 854.715 \text{ mm}$$

$$l2z := \sqrt{h2z^2 + x0^2} = (1.043 \cdot 10^3) \text{ mm}$$

$$z\_erf\_min := l2z - l0 = 94.53 \text{ mm}$$

$$\alpha1z := \text{atan}\left(\frac{h1z}{x0}\right) = 67.707^\circ$$

$$z\_erf\_max := l1z - l0 = -93.285 \text{ mm}$$

$$\alpha2z := \text{atan}\left(\frac{h2z}{x0}\right) = 71.88^\circ$$

$\alpha1z$  und  $\alpha2z$  sind jeweils die Maximalwinkel bzw. die Minimalwinkel der Linearmotoren bei reiner Bewegung in z-Richtung und nicht gekippten PEMS.

Diese Winkel werden für die Berechnung der auftretenden Kräfte infolge der z-Bewegung benötigt.

$z\_erf\_min$  und  $z\_erf\_max$  sind die minimalen bzw. maximalen Hublängen der Linearmotoren.

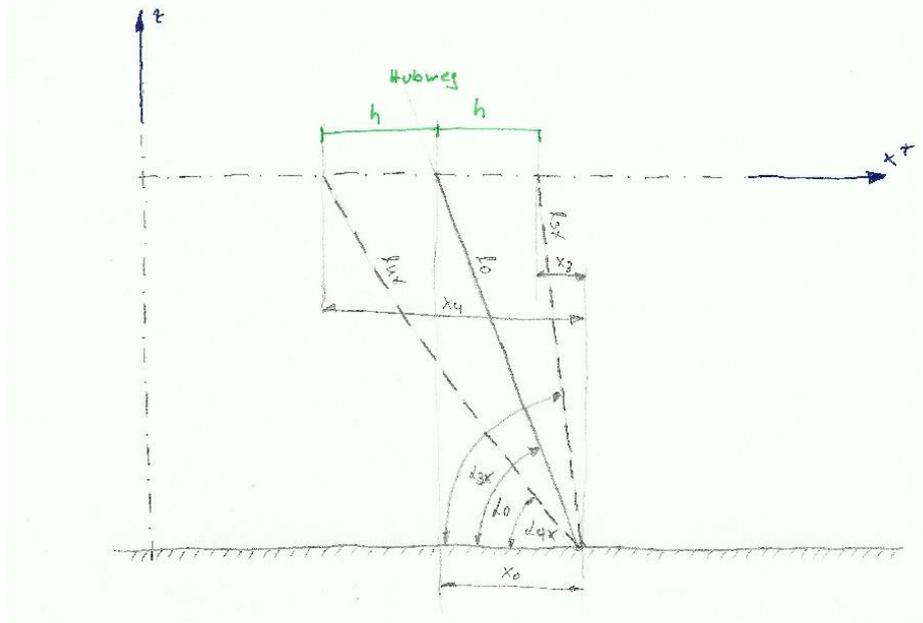
#### Ergebnis:

Für die Bewegung in z-Richtung um +-100mm ist also ein Hubweg von **+94.53mm** und **-93.29mm** der Linearmotoren notwendig.

## 1.2) Bewegung in x-Richtung um +/-200mm

### 1.2.1) Berechnung x-Hub für Linearmotor 1:

x-Hub: Linearmot 1



Skizze: x-Hub Linearmotor 1

$$x3 := x0 - h = 224.235 \text{ mm}$$

$$x4 := x0 + h = 424.235 \text{ mm}$$

$$l3x := \sqrt{x3^2 + h0^2} = 918.617 \text{ mm}$$

$$l4x := \sqrt{x4^2 + h0^2} = 986.687 \text{ mm}$$

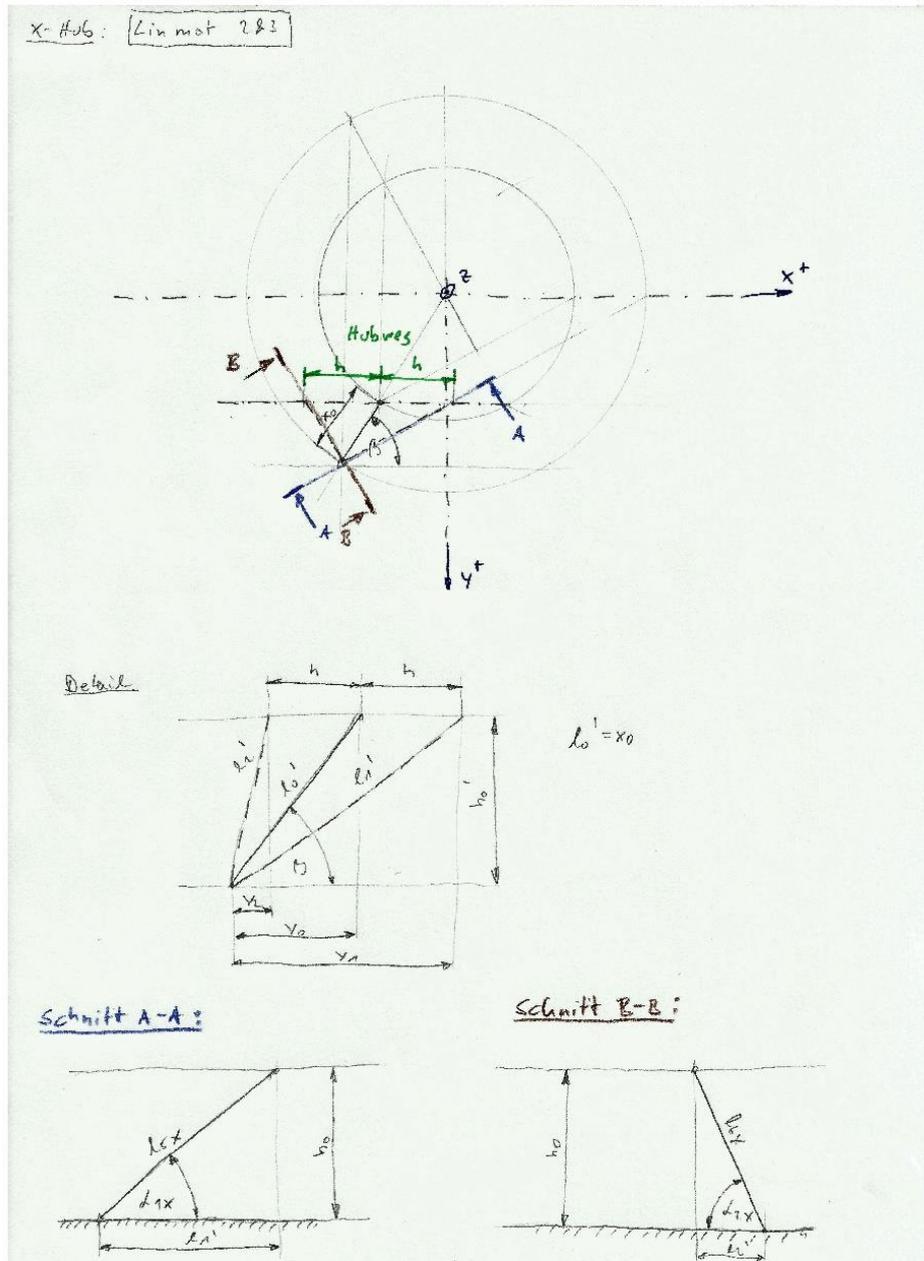
$$x1\_erf\_min := l3x - l0 = -29.383 \text{ mm}$$

$$\alpha3x := \text{atan}\left(\frac{h0}{x3}\right) = 75.871^\circ$$

$$x1\_erf\_max := l4x - l0 = 38.687 \text{ mm}$$

$$\alpha4x := \text{atan}\left(\frac{h0}{x4}\right) = 64.535^\circ$$

## 1.2.2) Berechnung x-Hub für Linearmotoren 2&amp;3:



Skizze: x-Hub für Linearmotoren 2 &amp; 3

$$\beta_0 := 60^\circ$$

$$h_0' := x_0 \cdot \sin(\beta_0) = 280.796 \text{ mm}$$

$$y_{0\_x} := x_0 \cdot \cos(\beta_0) = 162.118 \text{ mm}$$

$$y_{1\_x} := y_{0\_x} + h = 262.118 \text{ mm}$$

$$y_{2\_x} := y_{0\_x} - h = 62.118 \text{ mm}$$

$$l_{1\_x'} := \sqrt{h_0'^2 + y_{1\_x}^2} = 384.125 \text{ mm}$$

$$l_{2\_x'} := \sqrt{h_0'^2 + y_{2\_x}^2} = 287.585 \text{ mm}$$

Schnitt A-A:

Schnitt B-B:

$$l_{5x} := \sqrt{l_{1\_x'}^2 + h_0^2} = 970.117 \text{ mm}$$

$$l_{6x} := \sqrt{l_{2\_x'}^2 + h_0^2} = 936.099 \text{ mm}$$

$$x_{23\_erf\_min} := l_{6x} - l_0 = -11.901 \text{ mm} \quad \alpha_{2x} := \text{atan}\left(\frac{h_0}{l_{2\_x'}}\right) = 72.108^\circ$$

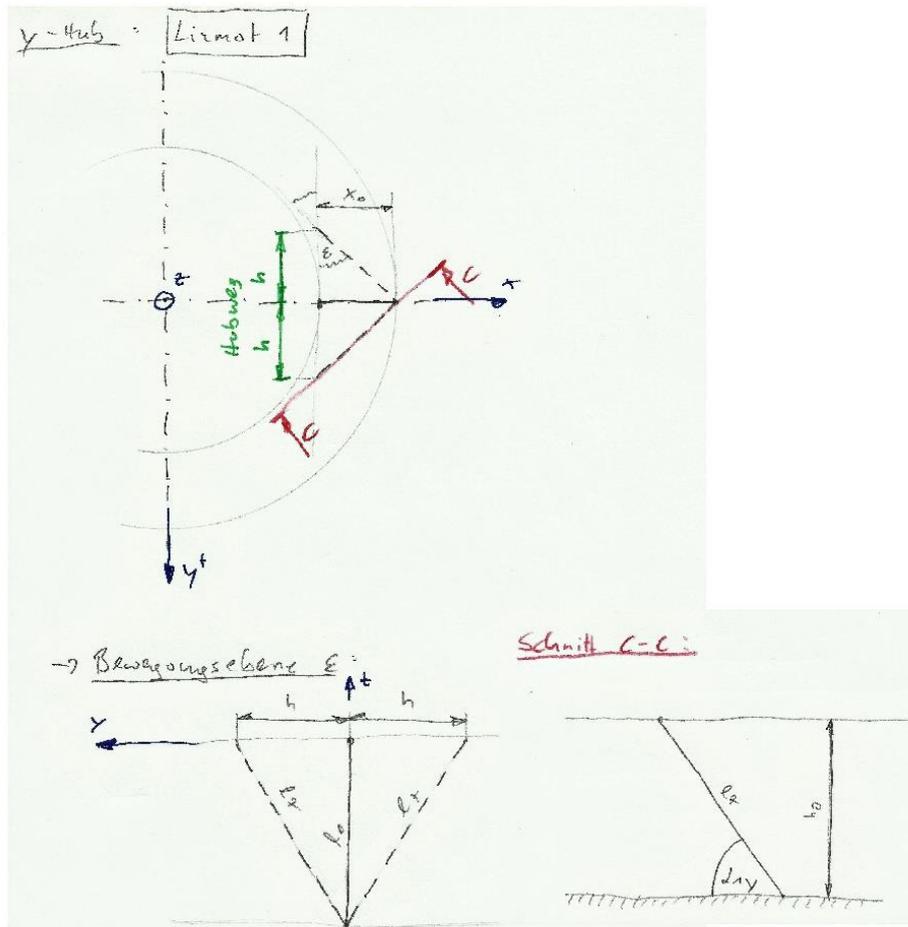
$$x_{23\_erf\_max} := l_{5x} - l_0 = 22.117 \text{ mm} \quad \alpha_{1x} := \text{atan}\left(\frac{h_0}{l_{1\_x'}}\right) = 66.674^\circ$$

$\alpha_{1x}$ ,  $\alpha_{2x}$ ,  $\alpha_{3x}$  und  $\alpha_{4x}$  sind jeweils die Maximalwinkel bzw. die Minimalwinkel der Linearmotoren bei reiner Bewegung in x-Richtung und nicht gekippten PEMS. Diese Winkel werden für die Berechnung der auftretenden Kräfte infolge der z-Bewegung benötigt.

$x_{1\_erf\_min}$  und  $x_{1\_erf\_max}$  bzw.  $x_{23\_erf\_min}$  und  $x_{23\_erf\_max}$  sind die minimalen bzw. maximalen Hublängen der Linearmotoren. Aus Symmetriegründen können die Motoren 2 und 3 gleich berechnet werden.

### 1.3) Bewegung in y-Richtung um +/-100mm

#### 1.3.1) Berechnung y-Hub für Linearmotor 1:



Skizze: y-Hub Linearmotor 1

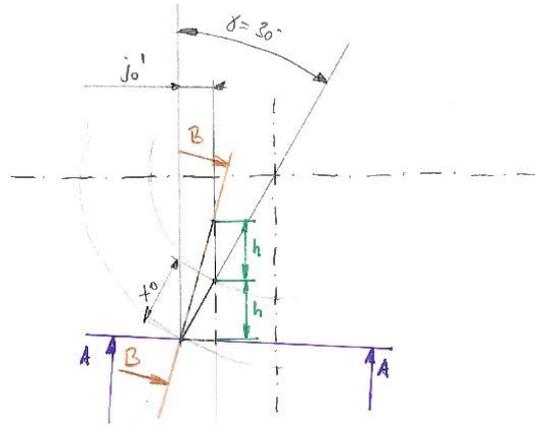
$$l7y := \sqrt{h^2 + l_0^2} = 953.26 \text{ mm}$$

Schnitt C-C:

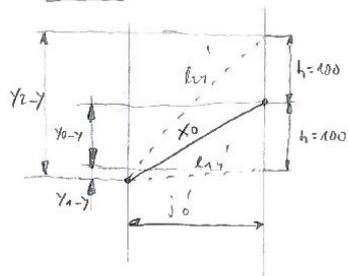
$$y1_{erf} := l7y - l_0 = 5.26 \text{ mm}$$

$$\alpha1y := \arcsin\left(\frac{h_0}{l7y}\right) = 69.149^\circ$$

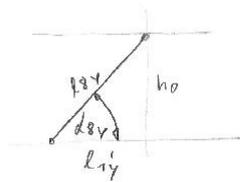
1.3.1) Berechnung y-Hub für Linearmotoren 2 & 3:



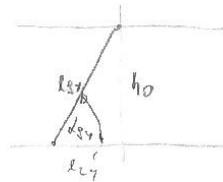
Detail:



Schnitt A-A:



Schnitt B-B:



Skizze: y-Hub für Linearmotoren 2 & 3

$$\gamma := 30 \text{ deg}$$

$$j0' := x0 \cdot \sin(\gamma) = 162.118 \text{ mm}$$

$$y0\_y := x0 \cdot \cos(\gamma) = 280.796 \text{ mm}$$

$$y1\_y := y0\_y - h = 180.796 \text{ mm}$$

$$y2\_y := y0\_y + h = 380.796 \text{ mm}$$

$$l1y' := \sqrt{j0'^2 + y1\_y^2} = 242.836 \text{ mm}$$

$$l2y' := \sqrt{j0'^2 + y2\_y^2} = 413.869 \text{ mm}$$

Schnitt A-A:

Schnitt B-B:

$$l8y := \sqrt{l1y'^2 + h0^2} = 923.334 \text{ mm}$$

$$l9y := \sqrt{l2y'^2 + h0^2} = 982.274 \text{ mm}$$

$$y23\_erf\_min := l0 - l8y = 24.666 \text{ mm}$$

$$\alpha8y := \text{atan}\left(\frac{h0}{l1y'}\right) = 74.752^\circ$$

$$y23\_erf\_max := l9y - l0 = 34.274 \text{ mm}$$

$$\alpha9y := \text{atan}\left(\frac{h0}{l2y'}\right) = 65.081^\circ$$

$\alpha1y$ ,  $\alpha8y$  und  $\alpha9y$  sind jeweils die Maximalwinkel bzw. die Minimalwinkel der Linearmotoren bei reiner Bewegung in y-Richtung und nicht gekippten PEMS. Diese Winkel werden für die Berechnung der auftretenden Kräfte infolge der z-Bewegung benötigt.

$y1\_erf$  bzw.  $y23\_erf\_min$  und  $y23\_erf\_max$  sind die minimalen bzw. maximalen Hublängen der Linearmotoren. Aus Symmetriegründen können die Motoren 2 und 3 gleich berechnet werden nur die Vorzeichen sind vertauscht.

## **2.) Kräfte an den Linearmotoren**

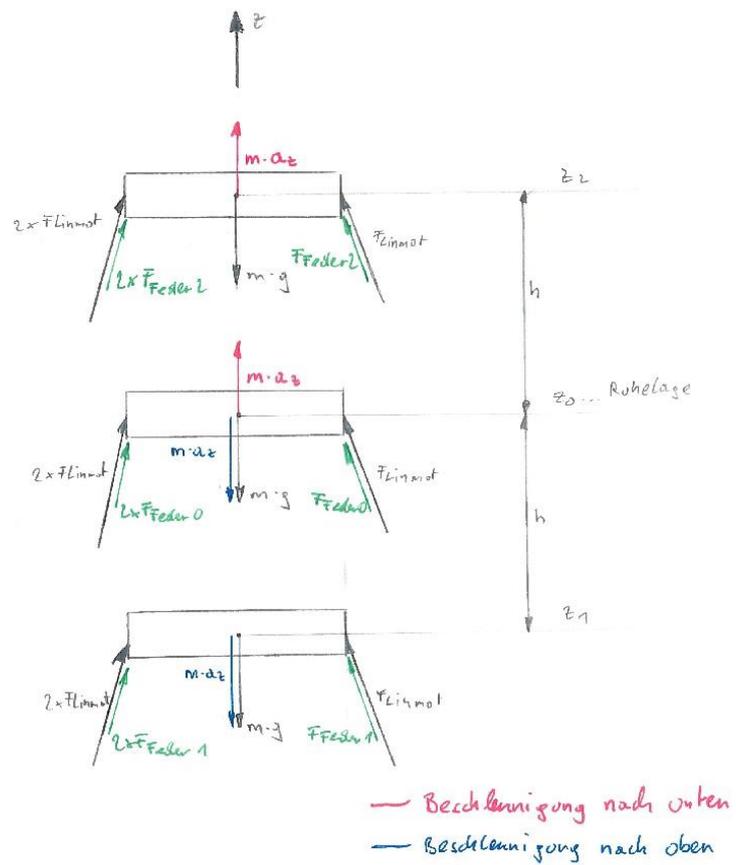
### Ausgangswerte:

- Gewicht der bewegten Masse:  $m=70$  kg
- Anstellwinkel der Linmot-Baugruppe in Ausgangslage:  $\alpha_0=70^\circ$
- Maximal möglicher Hub:  $+h=100$ mm
- Maximale Beschleunigung in z-Richtung:  $a_z=2g$
- Maximale Beschleunigung in x-Richtung und y-Richtung:  $a_x=a_y=g$

$$h=0.1 \text{ m} \quad m:=70 \text{ kg} \quad g:=9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad l_0=0.948 \text{ m} \quad a_z:=2 \cdot g=19.62 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

### **2.1) Bewegung in z-Richtung**

$$R:=1.3047 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad l_{\text{feder}}:=710 \text{ mm} \quad \alpha_{1z}=67.707 \text{ deg} \\ \alpha_{2z}=71.88 \text{ deg}$$
$$z_0:=420 \text{ mm} \quad F_{\text{Feder}0}:= (l_{\text{feder}} - z_0) \cdot R = 378.363 \text{ N}$$
$$z_1:=320 \text{ mm} \quad F_{\text{Feder}1}:= (l_{\text{feder}} - z_1) \cdot R = 508.833 \text{ N}$$
$$z_2:=520 \text{ mm} \quad F_{\text{Feder}2}:= (l_{\text{feder}} - z_2) \cdot R = 247.893 \text{ N}$$



Skizze: Kräfte an den Linearmotoren für Beschleunigung in z-Richtung

$$F_{Linmot\_Ruhe} := \frac{(m \cdot g)}{3 \sin(\alpha_0)} - F\_Feder0 = -134.773 \text{ N}$$

$$F_{Linmot\_Ruhe\_oben} := \frac{(m \cdot g)}{3 \sin(\alpha_{2z})} - F\_Feder2 = -7.049 \text{ N}$$

$$F_{Linmot\_Ruhe\_unten} := \frac{(m \cdot g)}{3 \sin(\alpha_{1z})} - F\_Feder1 = -261.441 \text{ N}$$

2.1.1) Beschleunigung nach oben:

$$F_{Linmot\_z\_0} := \frac{(m \cdot g + m \cdot a_z)}{3 \cdot \sin(\alpha_0)} - F\_Feder0 = 352.408 \text{ N}$$

$$F_{Linmot\_z\_1} := \frac{(m \cdot g + m \cdot a_z)}{3 \cdot \sin(\alpha_{1z})} - F\_Feder1 = 233.342 \text{ N}$$

$$F_{Linmot\_z\_2} := \frac{(m \cdot g + m \cdot a_z)}{3 \cdot \sin(\alpha_{2z})} - F\_Feder2 = 474.639 \text{ N}$$

2.1.2) Beschleunigung nach unten:

$$F_{Linmot\_z\_0} := \frac{(m \cdot g - m \cdot a_z)}{3 \cdot \sin(\alpha_0)} - F\_Feder0 = -621.953 \text{ N}$$

$$F_{Linmot\_z\_1} := \frac{(m \cdot g - m \cdot a_z)}{3 \cdot \sin(\alpha_{1z})} - F\_Feder1 = -756.225 \text{ N}$$

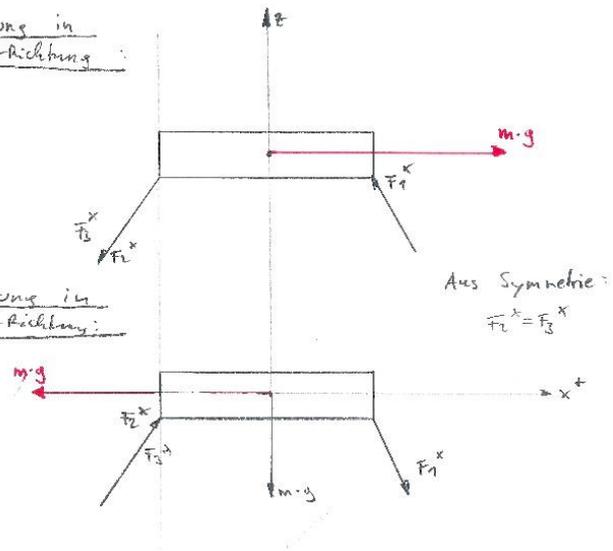
$$F_{Linmot\_z\_2} := \frac{(m \cdot g - m \cdot a_z)}{3 \cdot \sin(\alpha_{2z})} - F\_Feder2 = -488.737 \text{ N}$$

## 2.2) Bewegung in x-Richtung

x-Richtung

Beschleunigung in negative x-Richtung:

Beschleunigung in positive x-Richtung:



Skizze: Kräfte an den Linearmotoren für Beschleunigung in x-Richtung

Mit PTC Mathcad Express erstellt. Weitere Informationen finden Sie unter [www.mathcad.com](http://www.mathcad.com).

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 70 \text{ deg} & a_x &:= g \\ \beta_0 &= 60 \text{ deg} \end{aligned}$$

Hub h=+100mm :

Hub h=-100mm :

LinMot1:

LinMot1:

$$\alpha_{3x} = 75.871 \text{ deg}$$

$$\alpha_{4x} = 64.535 \text{ deg}$$

LinMot23:

LinMot23:

$$\alpha_{1x} = 66.674 \text{ deg}$$

$$\alpha_{2x} = 72.108 \text{ deg}$$

$$\beta_{1x} := \operatorname{atan}\left(\frac{h_{0'}}{y_{2\_x}}\right) = 77.526 \text{ deg}$$

$$\beta_{2x} := \operatorname{atan}\left(\frac{h_{0'}}{y_{1\_x}}\right) = 46.97 \text{ deg}$$

### 2.2.1) Beschleunigung in positive x-Richtung:

Aus Ruhelage:

$$M_{x0\_plus} := \begin{bmatrix} \cos(\alpha_0) & \cos(\alpha_0) \cdot \cos(\beta_0) & \cos(\alpha_0) \cdot \sin(\beta_0) \\ 0 & -\cos(\alpha_0) \cdot \sin(\beta_0) & \cos(\alpha_0) \cdot \cos(\beta_0) \\ -\sin(\alpha_0) & \sin(\alpha_0) & \sin(\alpha_0) \end{bmatrix}$$

$$v_{x0\_plus} := \begin{bmatrix} m \cdot a_x \\ 0 \\ m \cdot g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{LinMot1\_x,0} \\ F_{LinMot2\_x,0} \\ F_{LinMot3\_x,0} \end{bmatrix} := M_{x0\_plus}^{(-1)} \cdot v_{x0\_plus} = \begin{bmatrix} 1.095 \cdot 10^3 \\ 912.849 \\ 912.849 \end{bmatrix} \text{ N}$$

für h=+100mm:

$$M_{x1\_plus} := \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{3x}) & \cos(\alpha_{1x}) \cdot \cos(\beta_{1x}) & \cos(\alpha_{1x}) \cdot \sin(\beta_{1x}) \\ 0 & -\cos(\alpha_{1x}) \cdot \sin(\beta_{1x}) & \cos(\alpha_{1x}) \cdot \cos(\beta_{1x}) \\ -\sin(\alpha_{3x}) & \sin(\alpha_{1x}) & \sin(\alpha_{1x}) \end{bmatrix}$$

$$v_{x1\_plus} := \begin{bmatrix} m \cdot a_x \\ 0 \\ m \cdot g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{LinMot1\_x,1} \\ F_{LinMot2\_x,1} \\ F_{LinMot3\_x,1} \end{bmatrix} := M_{x1\_plus}^{(-1)} \cdot v_{x1\_plus} = \begin{bmatrix} 1.862 \cdot 10^3 \\ 1.357 \cdot 10^3 \\ 1.357 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \text{ N}$$

für  $h=-100\text{mm}$ :

$$Mx2\_plus := \begin{bmatrix} \cos(\alpha 4x) & \cos(\alpha 2x) \cdot \cos(\beta 2x) & \cos(\alpha 2x) \cdot \cos(\beta 2x) \\ 0 & -\cos(\alpha 2x) \cdot \sin(\beta 2x) & \cos(\alpha 2x) \cdot \sin(\beta 2x) \\ -\sin(\alpha 4x) & \sin(\alpha 2x) & \sin(\alpha 2x) \end{bmatrix}$$

$$vx2\_plus := \begin{bmatrix} m \cdot a_x \\ 0 \\ m \cdot g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{LinMot1\_x\_2} \\ F_{LinMot2\_x\_2} \\ F_{LinMot3\_x\_2} \end{bmatrix} := Mx2\_plus^{(-1)} \cdot vx2\_plus = \begin{bmatrix} 851.441 \\ 764.692 \\ 764.692 \end{bmatrix} \mathbf{N}$$

### 2.2.2) Beschleunigung in negative x-Richtung:

Aus Ruhelage:

$$Mx0\_minus := \begin{bmatrix} \cos(\alpha 0) & \cos(\alpha 0) \cdot \cos(\beta 0) & \cos(\alpha 0) \cdot \cos(\beta 0) \\ 0 & \cos(\alpha 0) \cdot \sin(\beta 0) & -\cos(\alpha 0) \cdot \sin(\beta 0) \\ \sin(\alpha 0) & -\sin(\alpha 0) & -\sin(\alpha 0) \end{bmatrix}$$

$$vx0\_minus := \begin{bmatrix} m \cdot a_x \\ 0 \\ m \cdot g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{LinMot1\_x\_0} \\ F_{LinMot2\_x\_0} \\ F_{LinMot3\_x\_0} \end{bmatrix} := Mx0\_minus^{(-1)} \cdot vx0\_minus = \begin{bmatrix} 1.582 \cdot 10^3 \\ 425.669 \\ 425.669 \end{bmatrix} \mathbf{N}$$

für  $h=+100\text{mm}$ :

$$Mx1\_minus := \begin{bmatrix} \cos(\alpha 3x) & \cos(\alpha 1x) \cdot \cos(\beta 1x) & \cos(\alpha 1x) \cdot \cos(\beta 1x) \\ 0 & \cos(\alpha 1x) \cdot \sin(\beta 1x) & -\cos(\alpha 1x) \cdot \sin(\beta 1x) \\ \sin(\alpha 3x) & -\sin(\alpha 1x) & -\sin(\alpha 1x) \end{bmatrix}$$

$$vx1\_minus := \begin{bmatrix} m \cdot a_x \\ 0 \\ m \cdot g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{LinMot1\_x\_1} \\ F_{LinMot2\_x\_1} \\ F_{LinMot3\_x\_1} \end{bmatrix} := Mx1\_minus^{(-1)} \cdot vx1\_minus = \begin{bmatrix} 2.245 \cdot 10^3 \\ 811.334 \\ 811.334 \end{bmatrix} \mathbf{N}$$

für  $h=-100\text{mm}$ :

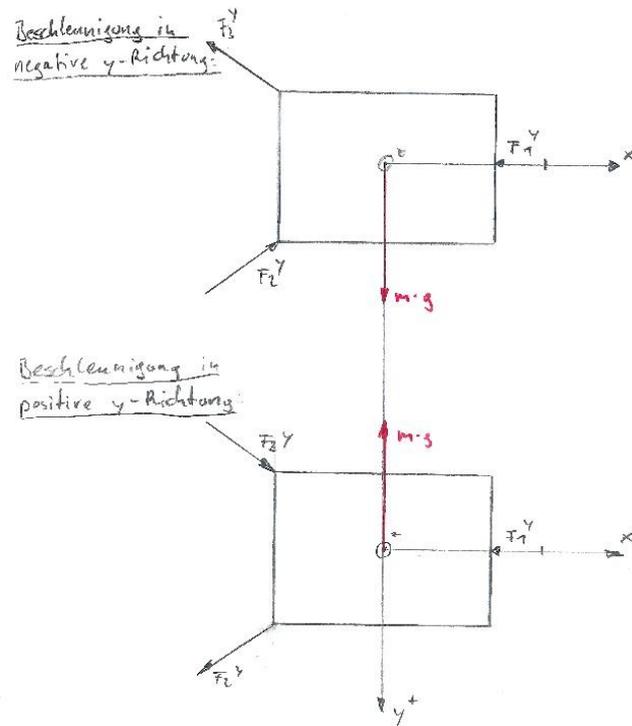
$$Mx2\_minus := \begin{bmatrix} \cos(\alpha 4x) & \cos(\alpha 2x) \cdot \cos(\beta 2x) & \cos(\alpha 2x) \cdot \cos(\beta 2x) \\ 0 & \cos(\alpha 2x) \cdot \sin(\beta 2x) & -\cos(\alpha 2x) \cdot \sin(\beta 2x) \\ \sin(\alpha 4x) & -\sin(\alpha 2x) & -\sin(\alpha 2x) \end{bmatrix}$$

$$vx2\_minus := \begin{bmatrix} m \cdot a_x \\ 0 \\ m \cdot g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{LinMot1\_x\_2} \\ F_{LinMot2\_x\_2} \\ F_{LinMot3\_x\_2} \end{bmatrix} := Mx2\_minus^{(-1)} \cdot vx2\_minus = \begin{bmatrix} 1.333 \cdot 10^3 \\ 271.318 \\ 271.318 \end{bmatrix} \mathbf{N}$$

### 2.3) Bewegung in y-Richtung

y-Richtung



Skizze: Kräfte an den Linearmotoren für Beschleunigung in y-Richtung

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 70 \text{ deg} \\ \beta_0 &= 60 \text{ deg} \\ \delta_0 &:= 0 \text{ deg}\end{aligned}$$

$$a_y := g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Hub h=+100mm :

Hub h=-100mm :

LinMot1:

LinMot1:

$$\alpha_{1y} = 69.149 \text{ deg}$$

$$\alpha_{1y} = 69.149 \text{ deg}$$

$$\delta_{1y\_plus} := 90 \text{ deg} - \text{atan}\left(\frac{x_0}{h}\right) = 17.141 \text{ deg} \quad \delta_{1y\_minus} := 90 \text{ deg} - \text{atan}\left(\frac{x_0}{h}\right) = 17.141 \text{ deg}$$

LinMot2:

LinMot2:

$$\alpha_{8y} = 74.752 \text{ deg}$$

$$\alpha_{9y} = 65.081 \text{ deg}$$

$$\beta_{2y\_plus} := 90 \text{ deg} - \text{atan}\left(\frac{j_{0'}}{y_{1\_y}}\right) = 48.118 \text{ deg} \quad \beta_{2y\_minus} := 90 \text{ deg} - \text{atan}\left(\frac{j_{0'}}{y_{2\_y}}\right) = 66.939 \text{ deg}$$

LinMot3:

LinMot3:

$$\alpha_{9y} = 65.081 \text{ deg}$$

$$\alpha_{8y} = 74.752 \text{ deg}$$

$$\beta_{3y\_plus} := 90 \text{ deg} - \text{atan}\left(\frac{j_{0'}}{y_{2\_y}}\right) = 66.939 \text{ deg} \quad \beta_{3y\_minus} := 90 \text{ deg} - \text{atan}\left(\frac{j_{0'}}{y_{1\_y}}\right) = 48.118 \text{ deg}$$

### 2.3.1) Beschleunigung in positive y-Richtung:

#### Aus Ruhelage:

$$My0\_plus := \begin{bmatrix} -\cos(\alpha 0) \cdot \cos(\delta 0) & -\cos(\alpha 0) \cdot \cos(\beta 0) & \cos(\alpha 0) \cdot \cos(\beta 0) \\ \cos(\alpha 0) \cdot \sin(\delta 0) & \cos(\alpha 0) \cdot \sin(\beta 0) & \cos(\alpha 0) \cdot \sin(\beta 0) \\ \sin(\alpha 0) & -\sin(\alpha 0) & \sin(\alpha 0) \end{bmatrix}$$

$$vy0\_plus := \begin{bmatrix} 0 \\ m \cdot a_y \\ m \cdot g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{LinMot1\_y\_0} \\ F_{LinMot2\_y\_0} \\ F_{LinMot3\_y\_0} \end{bmatrix} := My0\_plus^{(-1)} \cdot vy0\_plus = \begin{bmatrix} 243.59 \\ 915.6 \\ 1.403 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \mathbf{N}$$

#### für h=+100mm:

$$My1\_plus := \begin{bmatrix} -\cos(\alpha 1y) \cdot \cos(\delta 1y\_plus) & -\cos(\alpha 8y) \cdot \cos(\beta 2y\_plus) & \cos(\alpha 9y) \cdot \cos(\beta 3y\_plus) \\ \cos(\alpha 1y) \cdot \sin(\delta 1y\_plus) & \cos(\alpha 8y) \cdot \sin(\beta 2y\_plus) & \cos(\alpha 9y) \cdot \sin(\beta 3y\_plus) \\ \sin(\alpha 1y) & -\sin(\alpha 8y) & \sin(\alpha 9y) \end{bmatrix}$$

$$vy1\_plus := \begin{bmatrix} 0 \\ m \cdot a_y \\ m \cdot g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{LinMot1\_y\_1} \\ F_{LinMot2\_y\_1} \\ F_{LinMot3\_y\_1} \end{bmatrix} := My1\_plus^{(-1)} \cdot vy1\_plus = \begin{bmatrix} 244.942 \\ 765.037 \\ 1.319 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \mathbf{N}$$

#### für h=-100mm:

$$My2\_plus := \begin{bmatrix} \cos(\alpha 1y) \cdot \cos(\delta 1y\_minus) & -\cos(\alpha 9y) \cdot \cos(\beta 2y\_minus) & \cos(\alpha 8y) \cdot \cos(\beta 3y\_minus) \\ \cos(\alpha 1y) \cdot \sin(\delta 1y\_minus) & \cos(\alpha 9y) \cdot \sin(\beta 2y\_minus) & \cos(\alpha 8y) \cdot \sin(\beta 3y\_minus) \\ -\sin(\alpha 1y) & -\sin(\alpha 9y) & \sin(\alpha 8y) \end{bmatrix}$$

$$vy2\_plus := \begin{bmatrix} 0 \\ m \cdot a_y \\ m \cdot g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{LinMot1\_y\_2} \\ F_{LinMot2\_y\_2} \\ F_{LinMot3\_y\_2} \end{bmatrix} := My2\_plus^{(-1)} \cdot vy2\_plus = \begin{bmatrix} -244.942 \\ 1.084 \cdot 10^3 \\ 1.493 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \mathbf{N}$$

2.3.2) Beschleunigung in negative y-Richtung:

Aus Ruhelage:

$$My0\_minus := \begin{bmatrix} -\cos(\alpha 0) \cdot \cos(\delta 0) & \cos(\alpha 0) \cdot \cos(\beta 0) & -\cos(\alpha 0) \cdot \cos(\beta 0) \\ \cos(\alpha 0) \cdot \sin(\delta 0) & \cos(\alpha 0) \cdot \sin(\beta 0) & \cos(\alpha 0) \cdot \sin(\beta 0) \\ \sin(\alpha 0) & \sin(\alpha 0) & -\sin(\alpha 0) \end{bmatrix}$$

$$vy0\_minus := \begin{bmatrix} 0 \\ m \cdot a_y \\ m \cdot g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{LinMot1\_y\_0} \\ F_{LinMot2\_y\_0} \\ F_{LinMot3\_y\_0} \end{bmatrix} := My0\_minus^{(-1)} \cdot vy0\_minus = \begin{bmatrix} 243.59 \\ 1.403 \cdot 10^3 \\ 915.6 \end{bmatrix} \mathbf{N}$$

für h=+100mm:

$$My1\_minus := \begin{bmatrix} \cos(\alpha 1y) \cdot \cos(\delta 1y\_plus) & \cos(\alpha 8y) \cdot \cos(\beta 2y\_plus) & -\cos(\alpha 9y) \cdot \cos(\beta 3y\_plus) \\ \cos(\alpha 1y) \cdot \sin(\delta 1y\_plus) & \cos(\alpha 8y) \cdot \sin(\beta 2y\_plus) & \cos(\alpha 9y) \cdot \sin(\beta 3y\_plus) \\ -\sin(\alpha 1y) & \sin(\alpha 8y) & -\sin(\alpha 9y) \end{bmatrix}$$

$$vy1\_minus := \begin{bmatrix} 0 \\ m \cdot a_y \\ m \cdot g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{LinMot1\_y\_1} \\ F_{LinMot2\_y\_1} \\ F_{LinMot3\_y\_1} \end{bmatrix} := My1\_minus^{(-1)} \cdot vy1\_minus = \begin{bmatrix} -244.942 \\ 1.493 \cdot 10^3 \\ 1.084 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \mathbf{N}$$

für  $h=-100\text{mm}$ :

$$My2\_min := \begin{bmatrix} -\cos(\alpha 1y) \cdot \cos(\delta 1y\_minus) & \cos(\alpha 9y) \cdot \cos(\beta 2y\_minus) & -\cos(\alpha 8y) \cdot \cos(\beta 3y\_minus) \\ \cos(\alpha 1y) \cdot \sin(\delta 1y\_minus) & \cos(\alpha 9y) \cdot \sin(\beta 2y\_minus) & \cos(\alpha 8y) \cdot \sin(\beta 3y\_minus) \\ \sin(\alpha 1y) & \sin(\alpha 9y) & -\sin(\alpha 8y) \end{bmatrix}$$

$$vy2\_min := \begin{bmatrix} 0 \\ m \cdot a_y \\ m \cdot g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{LinMot1\_y\_2} \\ F_{LinMot2\_y\_2} \\ F_{LinMot3\_y\_2} \end{bmatrix} := My2\_min^{(-1)} \cdot vy2\_min = \begin{bmatrix} 244.942 \\ 1.319 \cdot 10^3 \\ 765.037 \end{bmatrix} \mathbf{N}$$

### **3.) Dimensionierung der Feder**

Die folgenden Formel sind aus [11] und [12] :

$$\Delta s := 210 \text{ mm}$$

$$L2 := 420 \text{ mm}$$

$$F1 := F_{Linmot\_Ruhe\_oben} = -7.049 \text{ N}$$

$$Di := 155 \text{ mm}$$

$$F2 := F_{Linmot\_Ruhe} = -134.773 \text{ N}$$

$$k1 := 0.18$$

$$k2 := \frac{\left(2 \cdot \left(k1 \cdot \sqrt[3]{F2 \cdot Di}\right)^2\right)}{3 \cdot Di \cdot 10} \cdot \frac{\text{s}^{\frac{4}{3}}}{\text{kg}^{\frac{2}{3}} \cdot \text{m}^{\frac{1}{3}}} = 0.1057$$

$$q := \sqrt[3]{F2 \cdot Di} \cdot 10 \cdot \frac{\text{s}^{\frac{2}{3}}}{\text{kg}^{\frac{1}{3}} \cdot \text{m}^{\frac{2}{3}}} = -27.541$$

$$d := k1 \cdot q + k2 = -4.852$$

$$d := 9 \text{ mm}$$

$$D := Di + d = 164 \text{ mm}$$

$$\tau 1 := \frac{\left(\frac{F1 \cdot D}{2}\right)}{\left(\frac{\pi}{16} \cdot d^3\right)} = -4.038 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau 2 := \frac{\left(\frac{F2 \cdot D}{2}\right)}{\left(\frac{\pi}{16} \cdot d^3\right)} = -77.207 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$w := \frac{D}{d} = 18.222 \quad k := \frac{(w + 0.5)}{(w - 0.75)} = 1.072$$

$$\tau k1 := \tau1 \cdot k = -4.327 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau k2 := \tau2 \cdot k = -82.731 \frac{N}{mm^2}$$

aus Tab. 10-14b:

$$\tau kO := 735 \frac{N}{mm^2} \quad \tau kU := \tau k1 = -4.327 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau kH := \tau kO - \tau kU = 739.327 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau kh := \tau k2 - \tau k1 = -78.404 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau kH > \tau kh = 1$$

$$Rsoll := \frac{F2 - F1}{\Delta s} = -0.608 \frac{N}{mm} \quad G := 81500 \frac{N}{mm^2}$$

$$Rsoll := 1.3047 \frac{N}{mm}$$

$$n' := \frac{G}{8} \cdot \frac{d^4}{D^3 \cdot Rsoll} = 11.614$$

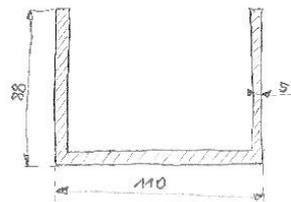
$$nt := n' + 2$$

$$Lc := nt \cdot (d + 0.045 \text{ mm}) = 0.123 \text{ m}$$

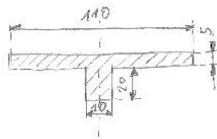
### **3.) Überschlägige Festigkeitsberechnung**

Die verwendeten Materialkennwerte sind aus [13]

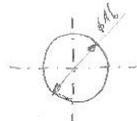
Querschnitt 1:



Querschnitt 2:



Querschnitt 3:



Skizze: Querschnitte

$$\sigma_{zul} := 235 \frac{N}{mm^2} \qquad Fmax := 2500 N$$

Querschnitt 1: Bei LinMot\_Halterung

$$A_1 := 2 \cdot 88 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm} + 100 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm} = (1.38 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{1\_vorh} := \frac{Fmax}{A_1} = 1.812 \frac{N}{mm^2}$$

$$S_1 := \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{1\_vorh}} = 129.72$$

Querschnitt 2: Bei LinMot\_Halterung unter dem Motorflansch

$$A_2 := 110 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm} + 10 \text{ mm} \cdot 20 \text{ mm} = 750 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{2\_vorh} := \frac{Fmax}{A_2} = 3.333 \frac{N}{mm^2}$$

$$S_1 := \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{2\_vorh}} = 70.5$$

Querschnitt 3: Gewindestange bei Gelenk\_M16

$$A_3 := (16 \text{ mm})^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 201.062 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{3\_vorh} := \frac{Fmax}{A_3} = 12.434 \frac{N}{mm^2}$$

$$S_1 := \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{3\_vorh}} = 18.9$$







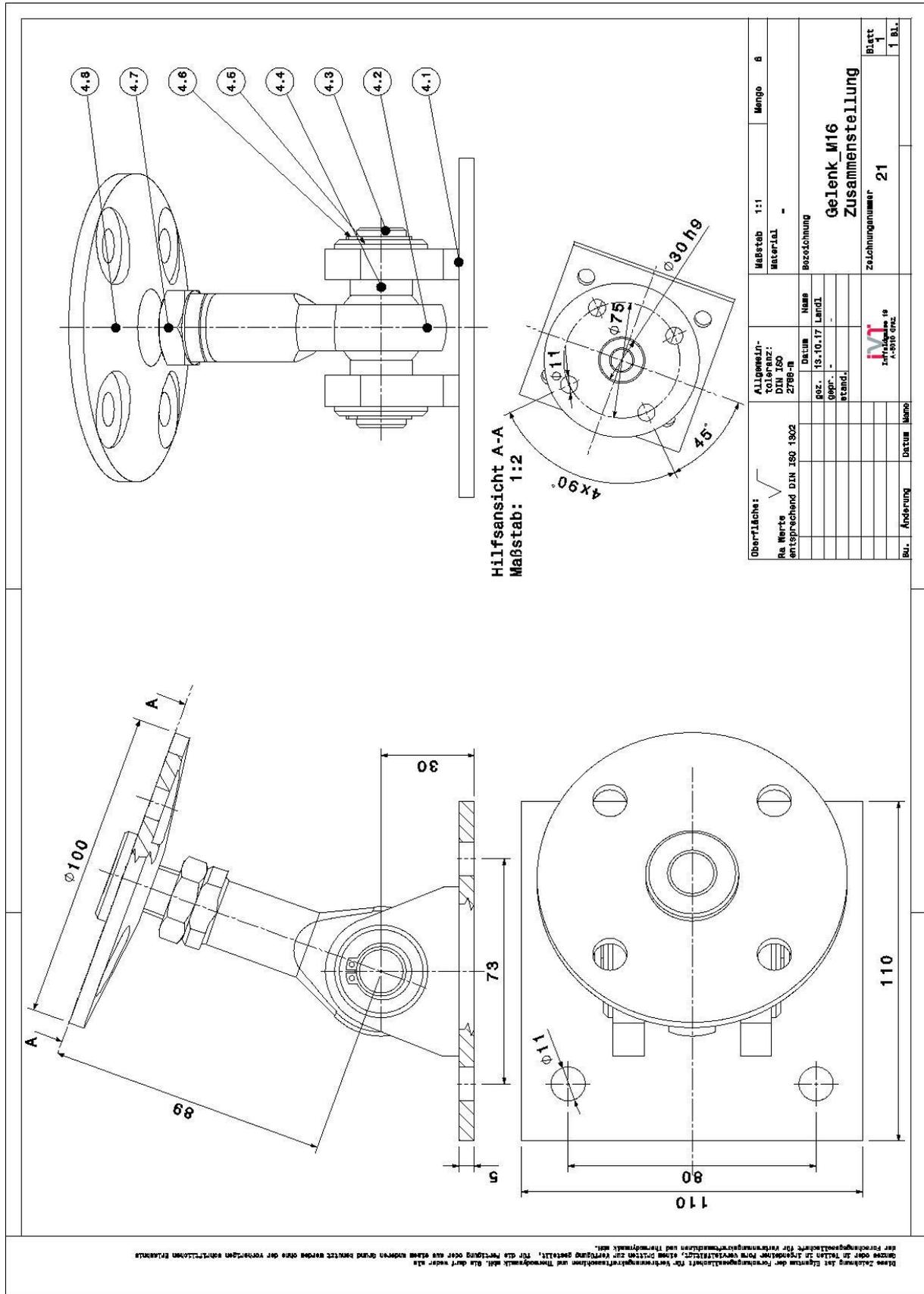


Abbildung 79: PET Unterbaugruppe Gelenk\_M16 Zusammenstellung



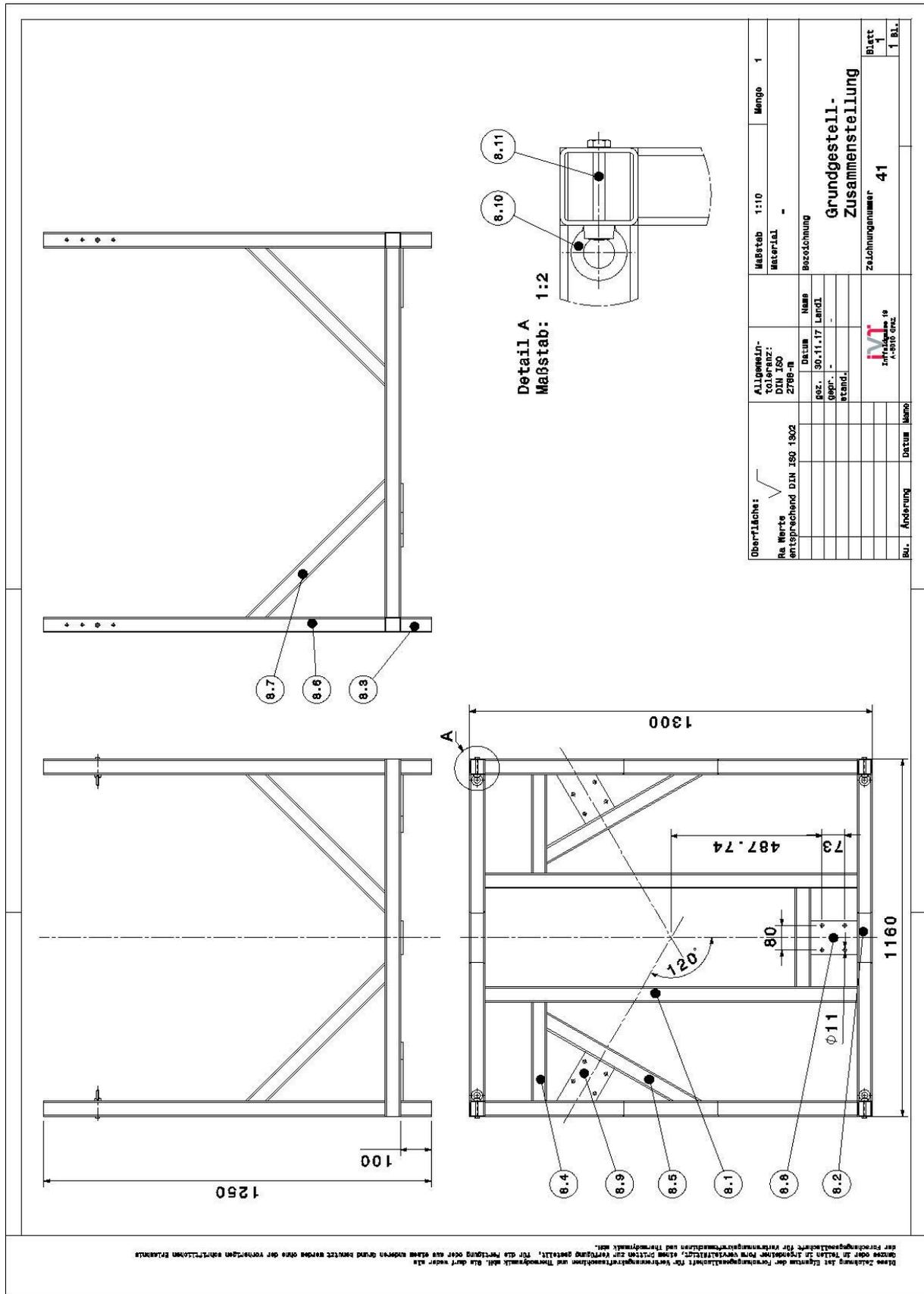


Abbildung 81: PET Unterbaugruppe Grundgestell Zusammenstellung



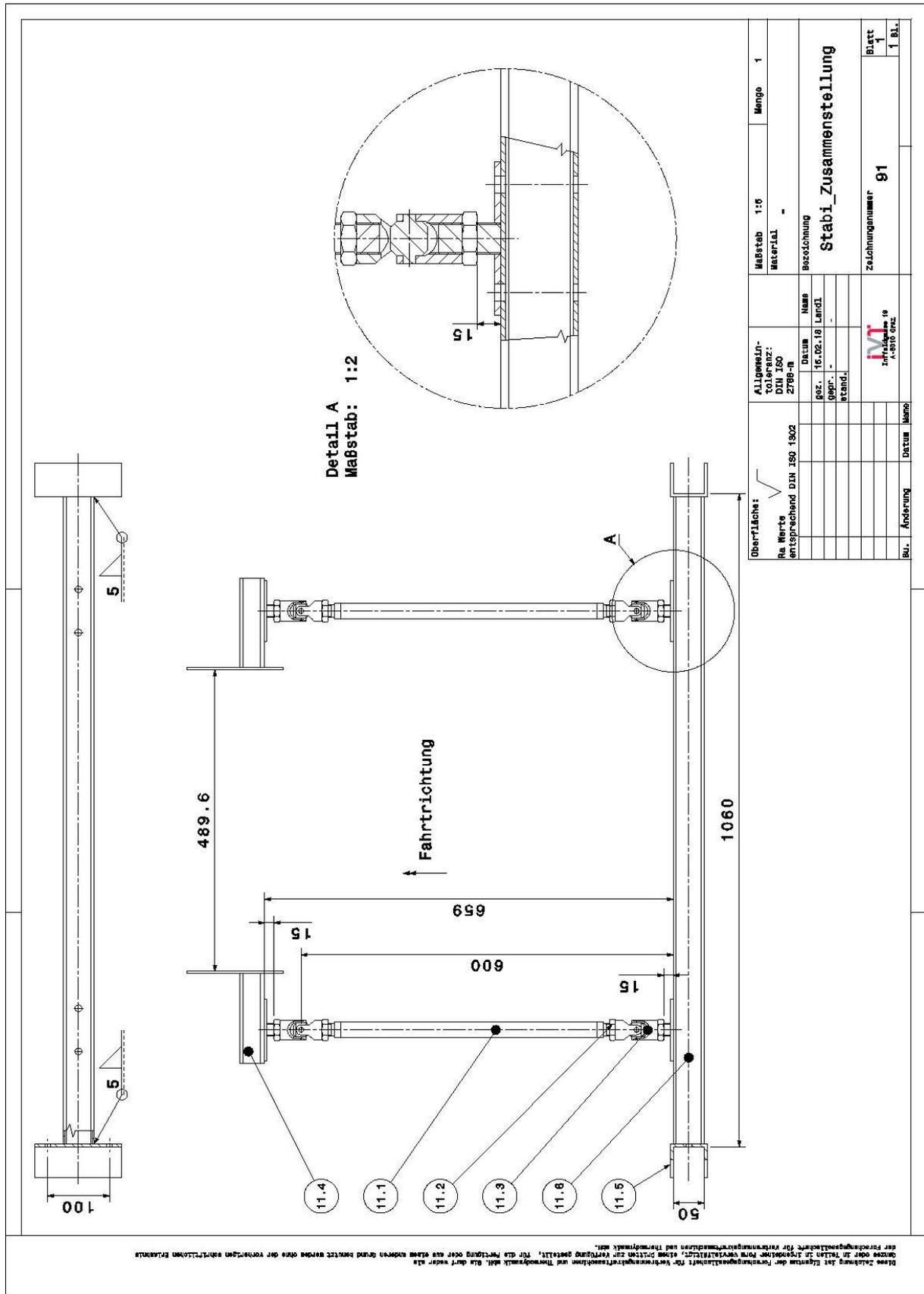


Abbildung 83: PET Unterbaugruppe Stabilisator Zusammenstellung