



ZEDU1

Zero Emission Drive Unit
Generation 1

Abschlussbericht

30. Juni 2023

Deutsches Zentrum für Luft-
und Raumfahrt e.V.
Institut für Fahrzeugkonzepte



Frenoza GmbH





Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Fahrzeugkonzepte
Pfaffenwaldring 38-40
D-70569 Stuttgart

Institutsleitung

Projektleitung

Prof. Dr. T. Siefkes
Tel.: +49 (0)711/6862-256
Fax.: +49 (0)711/6862-258

Philipps, Franz
Tel.: +49 (0)711/6862-507
Fax.: +49 (0)711/6862-258

Titel	<u>Z</u>ero <u>E</u>mission <u>D</u>rive <u>U</u>nit - Generation 1		
Autor	Philipps, Franz Tel.: +49 (0)711 6862 507 franz.philipps@dlr.de		
Projekt	ZEDU1		
Dateiname	ZEDU1_Abschlussbericht_2023-06-30.docx		
Ablage	Teamsite ZEDU1		
Versions-Nr.	Änderung	Gesamt-Seitenzahl	Datum
1	Entwurf erstellt		2023.05.30
2	Finalisiert	212	2023.06.30
3	Redigiert und zur Freigebe vorgelegt	209	2023.07.30
4			
5			
6			
7			

Erstellt (Datum, Unterschrift)	Geprüft (Datum, Unterschrift)	Freigegeben (Datum, Unterschrift)
30.06.2023 F. Philipps		

DLR-FK-QM-VD-02-0-02

Inhaltsverzeichnis

0 Management Summary	13
0.1 Einleitung	13
0.2 Lösungsansatz	13
0.3 Kurze Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Teilprojekte	14
1 Einleitung	17
1.1 Allgemeines	17
1.2 Ziele	20
2 Struktur und Organisation	21
2.1 Projektstruktur	21
2.2 Verantwortlichkeiten der Teilprojekte	21
2.3 Kurze Arbeitsbeschreibung der Teilprojekte	22
3 Ergebnisse	23
3.1 TP0: Projektmanagement, Qualitätssicherung und Reporting	23
3.2 TP1: Auslegung und Entwicklung der Zero Emission Drive Unit	24
3.2.1 Getriebe-Bremse-Einheit	24
3.2.2 Reifenpartikelabsaugung	59
3.3 TP 2: Entwicklung emissionsfreie Hybridbremse	84
3.3.1 Motivation	84
3.3.2 Konzept der Hybridbremse	85
3.3.3 Auslegungs- u. Optimierungsmethode	85
3.3.4 Modellbildung	87
3.3.5 Optimierung der Membranfeder	88
3.3.6 Konstruktion des Demonstrators der Hybridbremse	90
3.3.7 Validierung von Teilmodellen	92
3.3.8 Aufbau zur Vermessung des Demonstrators Hybridbremse	93
3.3.9 Methode zur Ermittlung des Reibmomentes	94
3.3.10 Modellvalidierung	96
3.3.11 Zusammenfassung und Fazit	99
3.4 TP3: Fahrzeugdemonstrator	100
3.4.1 Auswahl Versuchsträgerbasis	100
3.4.2 Generierung der CAD-Daten	100
3.4.1 Bremssystem	101
3.4.2 ZEDU1 Kühlsystem	102
3.4.3 Elektrisches Konzept für ZEDU1	103
3.4.4 Softwarekonzept	106
3.4.5 Messequipment	108
3.4.7 Fahrzeugpackage	110

3.4.8	FMEA	119
3.4.9	Konstruktion Versuchsträger	119
3.4.10	Designe Versuchsträger	130
3.4.11	Aufbau Versuchsträger	131
3.4.12	Integration der ZEDU1 Einheit in Versuchsträger	133
3.5	TP4: Testkonzepte	145
3.5.1	Testumgebung	145
3.5.2	Prüfszenarien	145
3.5.3	Rollenprüfstand	147
3.5.4	Testgelände Boxberg und Asperg	148
3.5.5	Komponentenprüfstand	149
3.5.1	Hartmetallbeschichtete Bremsscheibe	150
3.5.2	Referenzfahrzeug	152
3.5.3	Versuchsträger	161
3.5.4	Zusammenfassung TP4	169
3.6	TP 5: Emissionsmessungen	170
3.6.1	Messtechnik und Messkonzept	170
3.6.2	Emissionen des Referenzfahrzeugs	171
3.6.3	Emissionen des ZEDU1-Demonstrators	183
3.6.4	Emissionen der Hybridbremse	189
3.7	TP 6: Fazit, Bewertung und Öffentlichkeitsarbeit	195
3.7.1	Konzepte Reduzierung Bremsenabriebe	195
3.7.2	Konzepte Reduzierung Reifenabriebe	196
3.7.1	Versuchsanordnung Bremspartikelbestimmung	196
3.7.2	Versuchsanordnung Reifenpartikelbestimmung	196
3.7.3	Messkonzept Emissionsuntersuchung	197
3.7.4	Fahrzyklen	198
3.7.5	Öffentlichkeitsarbeit und Kooperationen	199
3.7.6	Veröffentlichungen und Publikationen	200
4	Zeit- und Meilensteinplan	205
4.1	Zeitplan	205
4.2	Meilensteine	206
5	Ressourcen	207
5.1	Aufstellung der Mittel - Übersicht	207
6	Literaturverzeichnis	208

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Anti Blockier System
AEW	Alternative Energiewandler
AP	Arbeitspaket
APA	American Psychological Association (Standard)
BBW	Brake By Wire
CKA	Chemisch und Kinetische Analytik
CPC	Kondensationspartikelzähler
DC-DC	Gleichstrom-Spannungswandler
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
ECU	Electronic Control Unit
EEPS	Engine Exhaust Particle Sizer
ELPI	Elektrical Low Pressure Impactor
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
EU	Europäische Union
FK	Fahrzeugkonzepte
FE	Finite-Elemente
FEK	Fahrzeugenergiekonzepte
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
GBE	Getriebe-Bremse-Einheiten
HM	Hart Metall
HV	Hoch Volt
HWA AG	Hans Werner Aufrecht Aktien Gesellschaft
KMU	Klein und Mittelständisches Unternehmen
LV	Low Voltage (Niedervolt)
MSD	Manual Service Disconnect
MEGI	MEGI®: Gummi-Metall-Schwingungsdämpfer der ContiTech AG
OBC	On-Board Chager
OBD	On-Board Diagnose
OPS	Optical Particle Sizer
PBX	Power Box
PDU	Power Distribution Unit (HV-Verteilerbox)
PDX	Karbongefüllter Polyamid- Werkstoff
PKW	Personenkraftwagen
PM	Particulate Matter
PN	Particle Number
PNC	Partikelanzahlkonzentration
POM	Polyoxymethylen
PSD	Partikelgrößenverteilung
PWM	Pulsweitenmodulation
QM	Qualitätsmanagement
RDE	Real Drive Emission Cycle
TP	Teilprojekt
UA	Unterauftrag
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe (Normen / Regularien)
VT	Verbrennungstechnik
z. B.	zum Beispiel
VCU	Vehicle Control Unit
WLTC	Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles
WLTP	Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Procedure
ZEDU1	Zero Emission Drive Unit Generation 1

Abbildungsverzeichnis

(1)Abbildung 1:	Größenbereich verschiedener Partikelmaterie mit Einteilung in Feinstaub (Partikel kleiner PM_{10}) sowie $PM_{2.5}$ (Partikel kleiner $PM_{2.5}$) und Ultrafeinstaub (UFP) (Partikel kleiner $0,1 \mu m$)	17
Abbildung 2:	Quellenanteil an Gesamtemissionen von PM_{10} , $PM_{2.5}$ und $PM_{0.1}$ in Großbritannien (AQEG 2005) (10)	17
Abbildung 3:	Quellen der Feinstaubbelastung (PM_{10}) am Neckartor, Stuttgart (LUBW). Daten aus (11).	17
Abbildung 4:	Partikeldepositionsregion des Atemtrakts als Funktion des Partikeldurchmessers bei Nasenatmung des Menschen (12)	18
Abbildung 5:	Nanopartikel in einer Plazentazelle (13)	18
Abbildung 6:	PM_{10} (links) und $PM_{2.5}$ (rechts) Emissionen im Straßenverkehr in der EU (Eionet Report - ETC/ATNI 2020/5) (16)	19
Abbildung 7:	Die größten Mikroplastikquellen in Deutschland (Erstellt aus Daten: Fraunhofer 2018)	20
Abbildung 8:	Projektstruktur	21
Abbildung 9:	Konzeptbewertung emissionsfreie Bremsfunktion	25
Abbildung 10:	Konzeptbewertung Übersetzungsstufe	25
Abbildung 11:	Systemschaubild	26
Abbildung 12:	CAD Modell der ZEDU1-Brems-Getriebe-Motor-Einheit	26
Abbildung 13:	Explosionsansicht der ZEDU1-Getriebe-Bremse-Einheit mit E-Motor	27
Abbildung 14:	Planetenge triebe-Komponenten mit Verzahnungen (Hohlrad im Halbschnitt)	29
Abbildung 15:	ZEDU1-Lageranordnung in der Getriebe-Bremse-Einheit	31
Abbildung 16:	ZEDU1-Lamellenpaket in der Getriebe-Bremse-Einheit	32
Abbildung 17:	ZEDU1-Bremsaktuierung in der Getriebe-Bremse-Einheit	32
Abbildung 18:	ZEDU1-Bremsaktuierung mit Kolbenrückstellung	33
Abbildung 19:	ZEDU1 Bremssystem (Normal-Mode)	34
Abbildung 20:	ZEDU1 Bremssystem (Failure-Mode)	34
Abbildung 21:	Verschraubung einer Getriebe-Bremse-Einheit	34
Abbildung 22:	Anbindungspunkte am Gehäuse	35
Abbildung 23:	Lagerung mittels Gummi-Metall-Buchsen	35
Abbildung 24:	Schema der Krafteinleitungen auf das Hohlrad	36
Abbildung 25:	FEM-Modell des Hohlrades mit Krafteinleitung (links: Getriebekräfte, rechts: Lamellenkräfte)	36
Abbildung 26:	Vergleichsspannungen (v. Mises) unter Belastung durch die Getriebekräfte	37
Abbildung 27:	Vergleichsspannungen (v. Mises) unter Belastung durch die Lamellenkräfte	37
Abbildung 28:	FE-Modell zu Berechnung der Chassisanbindung	37
Abbildung 29:	Vergleichsspannungen (v. Mises) unter Torsionsmoment der Lamellenbremse (LF1)	38
Abbildung 30:	Vergleichsspannungen (v. Mises) unter Beschleunigung 35 g in X (LF2)	38
Abbildung 31:	Vergleichsspannungen (v. Mises) unter Beschleunigung 18,8 g in Y (LF3)	38
Abbildung 32:	Vergleichsspannungen (v. Mises) unter Beschleunigung 5 g in Z (LF4)	38
Abbildung 33:	Geänderte Verschraubung einer Getriebe-Bremse-Einheit	39
Abbildung 34:	Verschraubung beider Getriebe-Bremse-Einheiten miteinander	39
Abbildung 35:	ZEDU1-Beölung der Getriebekomponenten (grün) und Lamellen (blau)	39
Abbildung 36:	Öl Zu- und Abfluss der Getriebe-Bremse-Einheit	41
Abbildung 37:	Ölversorgung der Getriebe-Bremse-Einheit	41
Abbildung 38:	Fertigungszeichnungen der konstruierten Komponenten	42
Abbildung 39:	Befestigung der GBE am Prüfstand	43
Abbildung 40:	Aufbau der GBE am Prüfstand	43
Abbildung 41:	Soll/ Ist Vergleich WLTP Zyklus	45
Abbildung 42:	Kühlmitteltemperaturen WLTP Zyklus	46
Abbildung 43:	Lamellenbeölung im WLTP Zyklus	47
Abbildung 44:	Temperaturen an der Lamellenbremse WLTP Zyklus	47
Abbildung 45:	Soll/Ist Vergleich Bergabfahrt	48
Abbildung 46:	Kühlmitteltemperaturen Bergabfahrt	49
Abbildung 47:	Lamellenbeölung Bergabfahrt	49
Abbildung 48:	Temperaturen an der Lamellenbremse Bergabfahrt	50
Abbildung 49:	Soll/ Ist Vergleich Realfahrt Stuttgart	51
Abbildung 50:	Kühlmitteltemperaturen Realfahrt Stuttgart	52
Abbildung 51:	Lamellenbeölung Realfahrt Stuttgart	53
Abbildung 52:	Temperaturen an der Lamellenbremse Realfahrt Stuttgart	53
Abbildung 53:	Bremsdruck ohne Rekuperation	54
Abbildung 54:	Bremsmomente	55
Abbildung 55:	Lamellenbeölung	55
Abbildung 56:	Temperaturen am Bremssystem	56
Abbildung 57:	Bremsdruck mit Rekuperation	57
Abbildung 58:	Bremsmomente	57
Abbildung 59:	Lamellenbeölung WLTP Zyklus	58
Abbildung 60:	Temperaturen am Bremssystem	58

Abbildung 61:	Konzeptbewertung Reifenpartikel	60
Abbildung 62:	Partikelverteilung, Schnitt in xy-Ebene	60
Abbildung 63:	Konzepte Anbindung Absaugung	60
Abbildung 64:	Effektivitätsvergleich verschiedener Konzepte über Fahrzeuggeschwindigkeit	61
Abbildung 65:	Absaugeffizienz in Abhängigkeit vom Bodenabstand	61
Abbildung 66:	Absaugeffizienz in Abhängigkeit vom Abstand Einhausung-Reifen	61
Abbildung 67:	Gegenüberstellung Effizienz Absaugposition	63
Abbildung 68:	Nachlaufgeometrie und Einhausungsgrad	63
Abbildung 69:	Partikelkonzentration mit chassissfester Absaugstelle	63
Abbildung 70:	Partikelkonzentration mit eingekapseltem Rad	63
Abbildung 71:	Auswertung Untersuchung Nachlaufgeometrien und Einhausungsgrad	66
Abbildung 72:	Ergebnisse Einfluss Abdichtung gegenüber Fahrwerkskomponenten	66
Abbildung 73:	Druckverteilung Fahrzeugumströmung	68
Abbildung 74:	Druckverteilung als ZY-Schnitt an der Vorderachse	68
Abbildung 75:	Druckverlauf bei 140 km/h und einem Volumenstrom von 250 l/s	69
Abbildung 76:	Druckverhältnisse an der Absaugstelle und am Auslass	69
Abbildung 77:	Stromlinien und Druckverteilung	70
Abbildung 78:	Δp des Lüfterpakets bei 250 l/s als Funktion der Fahrgeschwindigkeit	70
Abbildung 79:	Die Lüfterleistung bei festem Volumenstrom	70
Abbildung 80:	Druckverlust Δp und Absaugeffizienz bei 250 und 200 l/s	70
Abbildung 81:	Die Lüfterleistung in Abhängigkeit vom Volumenstrom	71
Abbildung 82:	Optimierter Volumenstrom in Abh. von der Geschwindigkeit	71
Abbildung 83:	Lüfterleistung (links) und Fahrgeschwindigkeit über einen WLTP-Zyklus (rechts)	71
Abbildung 84:	Gewählte Geometrie Radeinhausung (Routing 1 855308012.000.00 Radeinhausung VA LI VST)	72
Abbildung 85:	Effizienz als Funktion der Geschwindigkeit	72
Abbildung 86:	Emissionen als Funktion über die Geschwindigkeit	72
Abbildung 87:	Reifen-Emissionen über WLTP Zyklus	73
Abbildung 88:	Aufgenommene (blau) und freigesetzte Reifen Partikel (rot) über WLTP Zyklus	73
Abbildung 89:	Kennlinien der Lüfter	74
Abbildung 90:	Gesamtübersicht der Emissionsabsaugung	76
Abbildung 91:	Darstellung Anbauteile Radeinhausung	76
Abbildung 92:	Aktuatorik der Abdeckungen	77
Abbildung 93:	Dichtungskonzept	77
Abbildung 94:	Schnitt Radträger	78
Abbildung 95:	Zugänglichkeit Radeinhausung	78
Abbildung 96:	Reifengebirge mit Radeinhausung XY-Ebene	78
Abbildung 97:	Reifengebirge mit Radeinhausung ZX-Ebene	78
Abbildung 98:	Explosionsansicht Filter-/Lüftergehäuse	79
Abbildung 99:	Messtechnik zur Volumenstrombestimmung Wassersammler Gehäuse Emissionskanal	79
Abbildung 100:	Leistungsprognose Hauptfilter	81
Abbildung 101:	Befestigung und Abdichtung des Hauptfilters	81
Abbildung 102:	Darstellung Parallelschaltung Lüfter Absaugung	81
Abbildung 103:	Darstellung Entkopplungsprinzip Lüfter	82
Abbildung 104:	Prinzip Schmutzabscheider Gitter Vorfilter	82
Abbildung 105:	Spezifikationen Vorfilter	83
Abbildung 106:	Theoretische Drehmomente einer Wirbelstrombremse mit linear abnehmender Drehzahl und einer Reibungsbremse für niedrigen Geschwindigkeiten.	84
Abbildung 107:	Modell der Hybridbremse auf erster Abstraktionsebene (links) und schematischer Viertelschnitt der Hybridbremse (rechts)	85
Abbildung 108:	Drehmomente bei der Verwendung einer Membranfeder mit einer Steifigkeit gegen Null.	86
Abbildung 109:	Systemmodell der Hybridbremse	87
Abbildung 110:	Mechanische Domäne des Systemmodells	87
Abbildung 111:	Geometrie des Membranfedermodells	88
Abbildung 112:	Ergebnis der Analyse der Federparameter. <i>tcon</i> : Zeit bis zum Kontakt, <i>vimp</i> : Aufprallgeschwindigkeit, <i>γap</i> : aperiodischer Faktor. Die farbigen Punkte (Design1 bis 3) beziehen sich auf die Zustandsraum Trajektorien auf Abbildung VI.3.	88
Abbildung 113:	Federkennlinien für Federparameter die in die Gütekriterien resultieren die auf Abbildung 112 jeweils mit dem grünen blauen und roten Punkt gekennzeichnet sind und dazugehörige Zeitabhängige magnetische Kräfte	89
Abbildung 114:	Zustandstrajektorien der axialen Bewegung des Rotors für verschiedene Federparameter die in jeweils verschiedene Aufprallgeschwindigkeiten, Zeiten bis zum Kontakt und Aperiodische Faktoren führen.	89
Abbildung 115:	Drehmomente in Abhängigkeit der Zeit für verschiedene Designs der Membranfeder.	90
Abbildung 116:	Relativer mittlerer Fehler zwischen gewünschter und mit FEM-Berechneter Federkennlinie für verschiedene Konturradien <i>r_c</i> .	90
Abbildung 117:	Gewünschte Federkennlinie (schwarz) und mit FEM berechnete Federkennlinie (blau).	90
Abbildung 118:	CAD-Konstruktion der Hybridbremse	91
Abbildung 119:	CAD-Konstruktion des Stators	91

Abbildung 120:	CAD-Konstruktion eines Rotors	91
Abbildung 121:	Versuchsaufbau schematisch	92
Abbildung 122:	Realer Versuchsaufbau	92
Abbildung 123:	Messergebnisse der räumlich maximal auftretenden magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit des Erregerstromes bei verschiedenen Luftspalten im Vergleich mit der mit dem Modell berechneten.	92
Abbildung 124:	Normalkraft zwischen Rotor und Stator in Abhängigkeit vom Strom bei einem Luftspalt von 1.5 mm (Mit dem Modell berechnet - durchgehende Linie und gemessene Kraft - gestrichelte Linie).	92
Abbildung 125:	Schematischer Versuchsaufbau	93
Abbildung 126:	Hybridbremse auf dem Prüfstand. Die Laserabstandssensoren dienen zur Messung der axialen Rotorposition	93
Abbildung 127:	Links: Kraftsensoren (grün) mit Bremsbelägen (grau) der Hybridbremse (Bremsbeläge in Klammern sind rückseitig montiert) - Rechts: Kraftsensor mit Bremsbelag und aufgeklebten Dehnmessstreifen	94
Abbildung 128:	Feldspulen zur Messung des magnetischen Flusses in der Materialstruktur (links) sowie im Polkern und der Polabdeckung (rechts).	94
Abbildung 129:	Signal von den Kraftsensoren bei konstantem Erregerstrom (Reibkraft)	95
Abbildung 130:	Gemessene Drehmomente (gestrichelt) und aus dem gemessenen magnetischen Fluss berechnete Drehmomente bei verschiedenen Erregerströmen.	95
Abbildung 131:	Gemessene und berechnete Flussdichten im Polkern bei einem Luftspalt von 0.5mm in Abhängigkeit vom Erregerstrom und gemessene und berechnete Flussdichten im Polkern und in den Stahlstiften für verschiedene Luftspalte bei konstantem Erregerstrom.	96
Abbildung 132:	Kraft-Weg-Kennlinien der Membranfeder als Ergebnis einer FEM-Analyse und einer Messung (links) und deformierter Federmechanismus als Ergebnis einer FEM-Analyse.	97
Abbildung 133:	Kennfeld der Verschleißreduktion bei verschiedenen Drehzahlen und Drehmomenten	98
Abbildung 134:	Kennfeld des relativen Fehlers zwischen berechnetem und gemessenem Bremsmoment.	98
Abbildung 135:	Kennfeld der Simulierten Normalkraft mit den gemessenen magnetischen Luftspalte für verschiedene Erregerströme.	98
Abbildung 136:	Mit dem gemessenen Luftspalt simulierte magnetische Normalkraft und Federkennlinie.	98
Abbildung 137:	Konzeptbewertung Versuchsträger	100
Abbildung 138:	Versuchsträger MPM Erelis	100
Abbildung 139:	MPM Erelis demontiert	100
Abbildung 140:	CAD Modell MPM Erelis	101
Abbildung 141:	CAD Vorderbau	101
Abbildung 142:	Systemschaubild Bremse	101
Abbildung 143:	ZEDU1 Bremssystem (Failure-Mode)	101
Abbildung 144:	ZEDU1 Kühlsystem-Schema	102
Abbildung 145:	Schematische Darstellung der HV-Topologie	104
Abbildung 146:	Schematische Darstellung der LV-Topologie	105
Abbildung 147:	Schematische Darstellung der CAN-Topologie	105
Abbildung 148:	Softwarekonzept	108
Abbildung 149:	DLR-Messequipment	109
Abbildung 150:	Schnittdarstellung Emissionsabsaugung	110
Abbildung 151:	Packageentwurf Vorderbau	110
Abbildung 152:	FEM Berechnung Getriebe-Bremse-Einheit	111
Abbildung 153:	Fall - Krafftfluss beim elektrischen Beschleunigen und Verzögern	111
Abbildung 154:	Fall - Krafftfluss beim mechanischen Verzögern	111
Abbildung 155:	Kühlmedienbereiche im Demonstrator	114
Abbildung 156:	Wasser-Glykol-Kreislauf im Demonstrator	114
Abbildung 157:	Dielektrikum-Kreislauf im Demonstrator	115
Abbildung 158:	Öl-Kreislauf im Demonstrator	115
Abbildung 159:	Package E-System (Orange: HV-Komponenten. Gelb: LV-Komponenten). Schnittbilder links und 3D-Package rechts	116
Abbildung 160:	Package HV-System	116
Abbildung 161:	Package LV-System	116
Abbildung 162:	Übersicht Fahrzeugpackage	118
Abbildung 163:	MPM Erelis. CAD-Modellierung Chassis	121
Abbildung 164:	Rohbauarbeiten (rot & lila) an der Frontstruktur	121
Abbildung 165:	Konstruktion Integralträger	121
Abbildung 166:	Package Vorderwagen: 1) Filter-/Lüftergehäuse, 2) Radeinhausung, 3) Luftkanal und 4) ZEDU-Einheit + Inverter	121
Abbildung 167:	Konstruktion Inverterhalter	122
Abbildung 168:	Konstruktion Kühlhalter mit Luftstromlenkung und Crachfunktion	122
Abbildung 169:	Crashstruktur Vorderwagen. Neue Bauteile in Farbe.	122
Abbildung 170:	Übersicht Frontstruktur. Neukonstruktion in Farbe dargestellt.	122
Abbildung 171:	Package Hinterwagen: 1) Hochvolt-Batterie + E-Komponenten, 2) Batterieabdeckung, 3) Feuerwand Innenraum	123
Abbildung 172:	Heckstruktur	123
Abbildung 173:	Konstruktion HV-Batteriehalter	123
Abbildung 174:	Umfang Heckumbau	123

Abbildung 175:	Ertüchtigungen Hecksruktur: Aufnahme Hinterachse, Knotenpunkte und Batterie-Crash-Sicherheit	124
Abbildung 176:	Spannungen (v. Mises) der Heckstruktur für die Lastfälle LF1 bis LF3	125
Abbildung 177:	Spannungen (v. Mises) der Frontstruktur für die Lastfälle: LF1 oben links, LF2 unten links, LF3 oben rechts und LF4 unten rechts	126
Abbildung 178:	Abbau kinetische Energie	127
Abbildung 179:	Spannungen Pickups	127
Abbildung 180:	Schnittkräfte MEGI-Buchsen	128
Abbildung 181:	Schnittkräfte	129
Abbildung 182:	ZEDU1-Designe-Frontansicht	130
Abbildung 183:	ZEDU1-Design-Seitenansicht (final)	130
Abbildung 184:	Bodywork Außenhaut. Änderungen (blau) und Neugestaltung (grau)	130
Abbildung 185:	Frontstruktur und Schweißlehre	132
Abbildung 186:	Fahrzeugheck & Batterierahmen. Rohbauanpassung für Batterieintegration.	132
Abbildung 187:	Beifahrerzelle & CAD-Modell zur Messgerätefixierung	132
Abbildung 188:	Beifahrerzelle Aufbau	132
Abbildung 189:	Demonstratorshassis lackiert	133
Abbildung 190:	ZEDU1 finale Optik des Versuchsträgers	133
Abbildung 191:	Motorraum Demonstrator	134
Abbildung 192:	Eingebaute Motor-Getriebe-Bremse der ZEDU1-Einheiten	134
Abbildung 193:	Wärmetauscher und Öltank	134
Abbildung 194:	Kühlwasserleitungen (rechts) vor Inverter	134
Abbildung 195:	Hauptwasserkühler (Blick von hinten)	134
Abbildung 196:	Ölpumpen und Ausgleichbehälter Dielektrikum	134
Abbildung 197:	BBW-System neben dem BKV	135
Abbildung 198:	Unterdruckpumpe und Scheibenwischer	135
Abbildung 199:	Sicherungskasten	135
Abbildung 200:	Absauglüfter-Matrix	135
Abbildung 201:	Kühlerlüfter	136
Abbildung 202:	HV-Trennstelle	136
Abbildung 203:	Inverter links	136
Abbildung 204:	Inverter rechts	136
Abbildung 205:	HV-Kabel PDU-Trennstelle	137
Abbildung 206:	HV-Kabel Inverter - E-Motoren	137
Abbildung 207:	HV-Kabel und Wasserleitungen im Kardantunnel	137
Abbildung 208:	Absaugsystem - Filtergehäuse	137
Abbildung 209:	Absaugsystem - Radeinhausung	137
Abbildung 210:	Messstellen im Filter- / Lüftergehäuse	138
Abbildung 211:	Servopumpensystem	139
Abbildung 212:	DC/DC-Wandler und LV-Batterie	139
Abbildung 213:	OBC	139
Abbildung 214:	PDU	139
Abbildung 215:	Ladeinlet	140
Abbildung 216:	HV-Batterie	140
Abbildung 217:	Kühlwasserausgleichbehälter im Fahrzeug Heck	140
Abbildung 218:	Batterieabdeckung	140
Abbildung 219:	Fahrgastzelle - Fahrerseite	141
Abbildung 220:	Beifahrerfußraum – Befestigungen für Messtechnik	141
Abbildung 221:	Elektrisches Gaspedal	142
Abbildung 222:	Kombiinstrument	142
Abbildung 223:	HMI-Mittelkonsole	142
Abbildung 224:	Not-Aus	142
Abbildung 225:	ZEDU1 - Fahrzeugfront	143
Abbildung 226:	ZEDU11 - Fahrzeugheck	143
Abbildung 227:	ZEDU11 - Seitenansicht	143
Abbildung 228:	Federbein	144
Abbildung 229:	Bremsschema inkl. Messstellen	144
Abbildung 230:	RDE-Zyklus in Karte Stuttgart und Umgebung eingezeichnet (Erstellt mit OpenStreetMap.org)	145
Abbildung 231:	RDE-Fahrt. Testfahrzeug BMW i3	145
Abbildung 232:	Eingesetzte Testzyklen: WLTC (o.l.); ZEDU-Accelerate (o.r.); ZEDU-Brake (u.l.) und der gefahrene RDE-Zyklus (u.r.)	146
Abbildung 233:	Rollenklimaprüfstand am DLR-FK Stuttgart	148
Abbildung 234:	Fahrerleitzentrale des Rollenklimaprüfstands	148
Abbildung 235:	Streckenteile im Testgelände Boxberg; 1: Fahrdynamikfläche; 2: Hochgeschwindigkeitsoval; 3: Steigungshügel; 4: Handlingkurs; 5: Multifunktionsfläche	148
Abbildung 236:	ZEDU1-Versuchsträger im Testgelände Boxberg: Hochgeschwindigkeitsoval	148
Abbildung 237:	Komponentenprüfstand für Bremse (Fa. HORIBA) Luftführung (Stand zum Zeitpunkt der Messungen)	149

Abbildung 238:	Messzelle des Komponentenprüfstands für das Referenzsystem Bremse (Fa. HORIBA)	149
Abbildung 239:	Konstruierte Sonden zur Isokinetischen Probeentnahme am Komponentenprüfstand	150
Abbildung 240:	Aufgebautes DLR-Equipment zur Messung der Bremsabriebe am Komponentenprüfstands	150
Abbildung 241:	Originale Graugussbremse des BMW i3	151
Abbildung 242:	Originale Graugussbremse des BMW i3 mit Hartmetall beschichtet	151
Abbildung 243:	Vergleich Masseverlust Bremssysteme	151
Abbildung 244:	Vergleich Reibwert (oben) hartmetallbeschichteten (rot) und Standbremse (blau) im WLTC (unten schwarz. Ausschnitt) und Bremsdruck (unten. Skala rechts) am Rollenprüfstand	152
Abbildung 245:	Vergleich Reibwert (oben) hartmetallbeschichteten (rot) und Standbremse (blau) im WLTC (schwarz, unten. Ausschnitt) und Bremsdruck (unten. Skala rechts) am Komponentenprüfstand	152
Abbildung 246:	Referenzfahrzeug – Messkonzept Bremse	153
Abbildung 247:	Referenzfahrzeug - Konzeptdarstellung. Aufbau separate Bremse / Reifen-Einhausung	153
Abbildung 248:	CAD- Konstruktion Einhausung Bremse-Reifen-Einheit	154
Abbildung 249:	Konstruktion Einhausung Bremse-Reifen-Einheit Querschnitt	154
Abbildung 250:	CAD-Konstruktion Bremse-Einhausung	154
Abbildung 251:	Testaufbau Probenahme Reifen	154
Abbildung 252:	Thermoelementintegration Bremssattel und Bremsbelag	154
Abbildung 253:	Thermoelementintegration Bremsscheibe für Telemetriemodul	154
Abbildung 254:	Referenzfahrzeug - Messrad	155
Abbildung 255:	Referenzfahrzeug - Integration Bremsdrucksensor	155
Abbildung 256:	Referenzfahrzeug - Einhausung Bremse	155
Abbildung 257:	Referenzfahrzeug - Einhausung Reifen	155
Abbildung 258:	Referenzfahrzeug - gefertigte Entnahmesonden	156
Abbildung 259:	Referenzfahrzeug - Testaufbau	156
Abbildung 260:	Referenzfahrzeug - Messgeräte für mobile Messungen	157
Abbildung 261:	Referenzfahrzeug - Datenlogger und Stromversorgung Messgeräte	157
Abbildung 262:	Temperatur der Bremse ohne Einhausung. Fahrprofil Straßenfahrt RDE-Stuttgart. Variation des Luftstroms von 31 m ³ /h bis 78 m ³ /h	159
Abbildung 263:	Temperatur der Bremse mit Einhausung für verschieden Luftströme von 31 m ³ /h bis 78 m ³ /h. Fahrprofil Straßenfahrt RDE-Stuttgart.	159
Abbildung 264:	Referenzfahrzeug auf DLR-Rollenprüfstand	160
Abbildung 265:	Referenzfahrzeug auf DLR-Rollenprüfstand & Messtechnik	160
Abbildung 266:	Referenzfahrzeug bei Straßenfahrt	160
Abbildung 267:	Referenzfahrzeug auf Testgelände Asperg	160
Abbildung 268:	Querbeschleunigungen (rot). Fahrprofil Straßenfahrt RDE-Stuttgart (grün).	161
Abbildung 269:	Längsbeschleunigungen (blau). Fahrprofil Straßenfahrt RDE-Stuttgart (grün).	161
Abbildung 270:	ZEDU1-Versuchsträger. Packaging der Messtechnik für Versuchsfahrten	163
Abbildung 271:	ZEDU1-Versuchsträger-Tests auf dem DLR-Rollenprüfstand	163
Abbildung 272:	Leistung der Lüfter (schwarz) und Volumenstrom (blau) im ansteuerbaren Bereich bei einer konstanten Geschwindigkeit von 120 km/h.	165
Abbildung 273:	Partikelanzahl und Lüftersteuerung (rot) bei einer konstanten Geschwindigkeit von 120 km/h.	165
Abbildung 274:	Lamellenbremse Temperaturvergleich während eines WLTC	166
Abbildung 275:	Temperaturprofil bei beständigen Brems- und Beschleunigungstests	166
Abbildung 276:	Leistungsdaten der Batterie bei Nutzung der Lamellen und Scheibenbremse	166
Abbildung 277:	Partikel in der Messkammer nach Messfahrten hinter der Umhausung (links) und in der Felge (rechts)	168
Abbildung 278:	Überblick der eingesetzten Partikelmessgeräte für mobile und stationäre Messungen von Partikelanzahlkonzentration (PNC), Partikelgrößenverteilung (PSD) und zur morphologisch-chemischen Untersuchung: Ein <i>TSI 3776 Condensation Particle Counter (CPC)</i> zur Messung der PNC von Partikeln zwischen 2,5 nm (D50) und 3 µm, zwei <i>TSI 3752 Condensation Particle Counter (CPC)</i> zur Messung der PNC von Partikeln zwischen 4 nm (D50) und 3 µm; ein <i>TSI 3090 Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS)</i> zur Messung der PSD im Bereich von 5,6 nm bis 560 nm in 32 Kanälen; ein <i>Cambustion DMS 500 Fast Particle Sizer</i> zur Messung der PSD von 5 nm bis 1 µm und ein <i>TSI 3330 Optical Particle Sizer (OPS)</i> zur Messung der PSD im Bereich von 300 nm bis 10 µm in 16 Kanälen. Alle Instrumente wurden mit 1 Hz betrieben. Im <i>Elektrical Low Pressure Impactor (ELPI+)</i> von <i>Dekati</i> wurden Proben zur mikroskopischen Untersuchung gesammelt.	171
Abbildung 279:	Messaufbau am Referenzfahrzeug BMWi3 als Skizze (rechts) und Abbildung (links)	172
Abbildung 280:	Modularer Einsatz der Partikelmessstechnik am Rollenprüfstand, im Referenzfahrzeug und am Komponentenprüfstand für Bremsen.	172
Abbildung 281:	Messaufbau zur Untersuchung der Bremsemissionen.	173
Abbildung 282:	Partikelgrößenverteilung und -konzentration bei einem Testzyklus in logarithmischer Darstellung (a) und das Partikelspektrum der Hintergrundkonzentration, Konstantfahrt und der Bremsung (aus (9) übernommen).	173
Abbildung 283:	a) Partikelanzahlkonzentration bei wiederholenden Bremsungen; b) Partikelgrößenverteilung vor und nach der kritischen Temperatur (aus (9) übernommen).	174
Abbildung 284:	Vergleich der Partikelemissionen für drei Fahrzyklen mit und ohne Rekuperation. Ultrafeine und feine Partikelanzahlkonzentrationen für Partikeldurchmesser zwischen 4 nm und 3 µm und grobe Partikel zwischen 300 nm und 10 µm, gemessen mit CPC bzw. OPS (aus (9) übernommen).	175

Abbildung 285:	Vergleich der Partikelemissionen für drei Fahrzyklen mit der originalen und einer beschichteten Bremsscheibe. Partikelanzahlkonzentrationen für Partikeldurchmesser zwischen 4 nm und 3 µm und grobe Partikel zwischen 300 nm und 10 µm, gemessen mit CPC bzw. OPS (aus (9) übernommen).	176
Abbildung 286:	Elektronenmikroskopaufnahmen luftgetragener Partikel aus Bremsabrieb bei 10.000-facher Vergrößerung.	177
Abbildung 287:	Elektronenmikroskopaufnahmen luftgetragener Partikel aus Bremsabrieb bei 50.000-facher Vergrößerung.	178
Abbildung 288:	Einfluss der Fahrzyklen auf die PM _{2.5} und PM ₁₀ Emissionen pro Bremse mit Rekuperation (links) und ohne Rekuperation (rechts).	178
Abbildung 289:	Einfluss der Rekuperation (links) und der Bremsbeschichtung (rechts) auf die PM _{2.5} und PM ₁₀ Emissionen pro Bremse beim WLTC Brake Zyklus.	179
Abbildung 290:	Messaufbau zur Untersuchung der Reifenemissionen.	179
Abbildung 291:	Partikelanzahlkonzentration bei einem Testzyklus in logarithmischer Darstellung.	180
Abbildung 292:	Partikelgrößenverteilung der Reifenemissionen.	181
Abbildung 293:	Vergleich der Partikelanzahlkonzentration bei der Straßenfahrt und dem gleichen Fahrprofil auf dem Rollenprüfstand.	181
Abbildung 294:	Bremstestzyklus auf dem Testgelände.	182
Abbildung 295:	Partikelanzahlkonzentration und Größenverteilung bei Kurvenfahrten auf einem Testgelände. (Bildquelle: https://verkehrsuebungspla.wixsite.com/msca)	182
Abbildung 296:	Die vier Probenamtestellen am ZEDU-Demonstrator. a): Probenahme vor dem Filter (HP1). b): Probenahme nach dem Filter (HP2). c): Probenahme vor der Reifeneinhausung (NP1). d): Probenahme nach der Reifeneinhausung (NP2).	183
Abbildung 297:	Vergleich von Fahrtests am Rollenprüfstand und auf dem Testgelände in Boxberg.	184
Abbildung 298:	Vergleich der Reifenemissionen vor und nach dem Filter und Filtereffizienz bei unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeit.	185
Abbildung 299:	Vergleich der Reifenemissionen vor der Radeinhausung (grün) und vor dem Filter (blau).	185
Abbildung 300:	Vergleich der Reifenemissionen hinter der Radeinhausung (grün) und vor dem Filter (blau).	185
Abbildung 301:	Partikelanzahlkonzentrationen an HP1 gemessen. Dargestellt sind: Geschwindigkeit (schwarz unten), Partikelemissionen mit Scheibenbrems (grün mitte) und mit Lamellenbremse (orange mitte). Darüber die Konturplot der Größenverteilung. Hier korrespondiert der obere mit der grünen Kurve und der untere mit der orangen Kurve.	186
Abbildung 302:	Gesammelte Reifenpartikel unter dem REM bei 20.000-facher Vergrößerung. Links ist ein größeres plättchenförmiges Partikel zu sehen, rechts kleinere runde Partikel.	187
Abbildung 303:	EDX-Spektrum des reinen Demonstrator-Reifens von Continental	188
Abbildung 304:	EDX-Spektrum einer Reifenprobe, welche während Fahrtests auf dem Rollenprüfstand gesammelt wurde.	188
Abbildung 305:	EDX-Spektrum einer Probe von der Rollenoberfläche, welche aus kleinen Kügelchen, wie abgebildet, besteht.	188
Abbildung 306:	Schematische Darstellung des Messkonzepts mit Partikelmesstechnik und der Probenahme.	189
Abbildung 307:	Versuchsaufbau auf dem DLR-E-Motoren-Prüfstand zur Untersuchung der Partikelemissionen an der Hybridbremse	189
Abbildung 308:	CAD-Modell und Realisierung der Probenahme mit 3D Druck	190
Abbildung 309:	Testzyklus zur Emissionsmessung der Hybridbremse bei konstanter Drehzahl	190
Abbildung 310:	Testzyklus zur Emissionsmessung der Hybridbremse bei konstantem Strom	190
Abbildung 311:	Größenverteilungsdiagramm für konstante Drehzahl bei 1000 U/min (unten blau) und steigendem Strom (unten orange). Dargestellt sind Kraft zweite von unten – grün, darüber Temperatur (grün), #PN in blau darüber und oben Größenverteilung PN.	191
Abbildung 312:	Größenverteilungsdiagramm (oben) für konstante Drehzahl mit steigender Drehzahl von 500 bis 4000 U/min (unten blau) und steigendem Strom von 30 bis 50 A (unten orange). In der Mitte ist die Temperatur der Reibbeläge dargestellt.	191
Abbildung 313:	Größenverteilung für Konstantstrom von 30A – 50A bei abnehmender Geschwindigkeit.	192
Abbildung 314:	Partikelanzahl in Abhängigkeit zur Bremsleistung.	192
Abbildung 315:	Gewichtsmessung vor und nach den Tests an den Bremspads 1 – 6.	193
Abbildung 316:	Elektronenmikroskopische Abbildung von Partikeln aus der Hybridbremse	194
Abbildung 317:	Chemische Zusammensetzung der Emissionen der Hybridbremse	194
Abbildung 318:	Projektplan (Gantt-Diagramm)	205

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verzahnungsdaten Planetengetriebe	30
Tabelle 2:	Berechnete Lager-Lebensdauern	31
Tabelle 3:	Ölfilterspezifikation	41
Tabelle 4:	Messtechnikliste Sensorik Antriebsstrang	44
Tabelle 5:	Maximale Temperaturen des Kühlmittels im WLTP Zyklus	46
Tabelle 6:	Maximal Temperaturen der Bremse imWLTP Zyklus	48
Tabelle 7:	Maximal Temperaturen Kühlmittel Bergabfahrt	49
Tabelle 8:	Maximal Temperaturen Bremse Bergabfahrt	50
Tabelle 9:	Maximal Temperaturen Kühlmittel Realfahrt Stuttgart	52
Tabelle 10:	Maximal Temperaturen Bremse Realfahrt Stuttgart	53
Tabelle 11:	Maximale Temperaturen während dem Bremsvorgang ohne Rekuperation	56
Tabelle 12:	Maximale Temperaturen während dem Bremsvorgang mit Rekuperation	58
Tabelle 13:	Variantenübersicht der untersuchten Absaugstellen	62
Tabelle 14:	Untersuchung Nachlaufgeometrien und Einhausungsgrad	64
Tabelle 15:	Detaillierung Untersuchung Nachlaufgeometrien und Einhausungsgrad	65
Tabelle 16:	Einfluss Abdichtung gegenüber Fahrwerkskomponenten	66
Tabelle 17:	Bewertungsmatrix Radeinhausung	67
Tabelle 18:	Gegenüberstellung Position Auslasskanal	68
Tabelle 19:	Auswahl der Lüfter	74
Tabelle 20:	Varianten Lüfterabhängiger Gehäusekonzepte	75
Tabelle 21:	Parameter des Funktionsdemonstrators der Hybridbremse	93
Tabelle 22:	Entscheidung E-Motor, Inverter und HV-Batterie	103
Tabelle 23:	Auflistung Systemkomponenten I	103
Tabelle 24:	Auflistung Systemkomponenten II	104
Tabelle 25:	Übersicht Kommunikations-Bus	106
Tabelle 26:	Gewichtsabschätzung	109
Tabelle 27:	Gegenüberstellung Inverterposition	112
Tabelle 28:	Gegenüberstellung Wärmetauscherposition	113
Tabelle 29:	Hauptkomponenten Kühlsystem	114
Tabelle 30:	Schraubenkräfte	128
Tabelle 31:	Messtechnik wird am Absaugsystem	138
Tabelle 32:	Fahrzyklen und derer Parameter	146
Tabelle 33:	RDE-Fahrzyklus und dazugehörige Parameter	147
Tabelle 34:	Massenverlust – Standard Bremse vs. Beschichtete Bremse	151
Tabelle 35:	Reibwertverhältnis der beschichteten Brems zu Standardbremse ohne Rekuperation für verschiedene Zyklen	152
Tabelle 36:	Messgrößen - Referenzfahrzeug (i3)	158
Tabelle 37:	Messgrößen - ZEDU1 - Versuchsträger	162
Tabelle 38:	Verbrauchs- und Reichweitenmessungen für ZEDU1 im WLTC Zyklus im Testgelände	164
Tabelle 39:	Verbrauchs- und Reichweitenmessungen für ZEDU1 im WLTC Zyklus auf dem Prüfstand	164
Tabelle 40:	Leistungsbedarf und Reichweitenverkürzung durch das Absaugsystem mit 80 %-Lüfterleistung	165
Tabelle 41:	Gravimetrischer Vergleich des Reifenverbrauchs bei Realfahrten und auf dem Rollenprüfstand	167
Tabelle 42:	Abriebe während der Rollenmesskampagne	168
Tabelle 43:	Bremsemissionen der Graugussbremse und Reduktion durch Rekuperation für verschiedene Zyklen (Werte aus (32))	175
Tabelle 44:	Bremsemissionen einer hartmetallbeschichteten Bremsscheibe im Vergleich zur Graugussbremsscheibe mit gleichen Bremsbelegen für verschiedene Zyklen (Werte aus (32))	176
Tabelle 45:	Pressespiegel ZEDU1 (Auswahl)	200
Tabelle 46:	Übersicht Meilensteine	206

0 Management Summary

0.1 Einleitung

Im Rahmen des ZEDU1 (**Z**ero **E**mission **D**rive **U**nit **G**eneration **1**) Projekts wurden sowohl ein konventionelles Elektrofahrzeug, als Referenzfahrzeug zur messtechnischen Charakterisierung, als auch ein Demonstrator-Fahrzeug, als Träger der neuen, innovativen Technologien, der Zero Emission Drive Unit, erfolgreich konzipiert, konstruiert sowie termingerecht aufgebaut und vermessen. Die im TP 1 neu entwickelten ZEDU1-Komponenten wurden in ein speziell hierfür im TP3 aufgebautes Versuchsfahrzeug integriert. Bei Testfahrten auf der Straße, einem Testgelände und auf dem FK-institutseigenen DLR-Rollenprüfstand wurden diese erprobt und im Rahmen eines messtechnischen Nachweises in Bezug auf den Ausstoß von Feinstaub und Mikroplastik unter realen Bedingungen charakterisiert. Dazu wurden geeignete Messmethoden entwickelt, integriert und angewandt. Zur Bestimmung der Feinstaubemissionen wurden umfangreiche Tests durchgeführt. Über modernste Messtechnik wurden Feinstaub aus Brems- und Reifenabriebs-Messungen bis in den ultrafeinen Bereich nachgewiesen und bestimmt. Im Fokus der Analysen standen die Gesamtmenge an Feinstaubemissionen, die Größenverteilung der Partikel und deren chemische Zusammensetzung. Alle geplanten Messergebnisse wurden erzielt, ausgewertet und bereits in Teilen in entsprechenden Publikationen beschrieben (s. §6). Der ZEDU1 Demonstrator selbst wurde im Roll-Out am 28.09.2022 der breiten Öffentlichkeit in Stuttgart vorgestellt und von der [Ministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut](#) (2) eingeweiht. Der nachfolgende Projektabschlussbericht fasst den Aufbau, die durchgeführten Messungen und die wesentlichen Projektergebnisse zusammen.

0.2 Lösungsansatz

Technologisch beschreitet das Projekt neue Wege, sowohl bei der Fahrzeugbremse, als auch bei der Vermeidung von Reifenemissionen in die Umwelt. Die Bremse wurde aus dem Radkasten herausgenommen und in die Antriebseinheit integrieren. Dies ermöglicht es sehr kompakt zu bauen und die Aerodynamik der Räder ohne Nachteile der Thermodynamik für die Bremse neu zu gestalten. Im Gegensatz zu konventionellen Elektrofahrzeugen, bei denen das ABS mechanische Bremsengriffe vornimmt und die Energie in Wärme und Abriebe umsetzt, wurde im ZEDU1 Demonstrator, in Kombination mit einer speziell entwickelten Hochleistungselektronik, ein System entwickelt, das die Bremsenergie nahezu vollständig elektrisch zurückgewinnt, also rekuperiert, so dass nur noch ein kleiner Anteil mechanisch anfällt. Dazu wurden unterschiedliche Bremskonzepte untersucht und bewertet. Als die beiden erfolgversprechendsten Konzepte wurden die Lamellenbremse und eine induktive Hybridbremse identifiziert, da sie grundsätzlich ohne Emissionen von Bremspartikeln in die Umwelt auskommen. Bei der Lamellenbremse handelt es sich um ein viskoses Bremskonzept mit in einem Ölbad gelagerten Lamellen. Somit verbleibt der Bremsabrieb direkt im Öl, das laufend durch einen Filter gepumpt und gereinigt wird. Die induktive Hybridbremse funktioniert fast bis zum Stillstand verschleißfrei und nutzt die Kraft von Magnetfeldern, um eine Bremswirkung zu erzeugen. Beide Optionen wurden so konzipiert, dass diese direkt in die elektromotorische Antriebseinheit integriert werden können.

Darüber hinaus minimiert ein neu gestalteter Radkasten die Reifenabriebemissionen: Er ist aerodynamisch so ausgelegt, dass beim Fahren auf der Oberseite der Motorhaube Unterdruck und im hinteren Radeinhauungsbereich ein Überdruck entsteht. Die Druckdifferenz, zusammen mit geschwindigkeitsgesteuerten Lüftern, befördert den Reifenabrieb in ein Sammelsystem. Der Abrieb sammelt sich an einer definierten Stelle und ein Abscheider zusammen mit einem Filtersystem nimmt diesen auf.

0.3 Kurze Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Teilprojekte

Die wichtigsten Ergebnisse der Teilprojekte im Einzelnen.

TP 0: Das Projekt wurde, wie vorgesehen, vollumfänglich und in der Planungszeit erfolgreich abgeschlossen. Alle Meilensteine wurden gänzlich erfüllt und die vorgegebenen Ressourcen eingehalten.

Den Berichts- und Dokumentationspflichten wurde termingerecht nachgekommen. Alle erforderlichen Berichte und Dokumentationen wurden erstellt, auf der Teamseite den Projektpartnern bereitgestellt und an die zu Berichtenden weitergereicht. Für das ZEDU1-Projekt konnten weitere Partner interessiert und eingebunden werden. So wurde mit MANN+HUMMEL GmbH ein Vertrag als assoziierter Partner sowie NDA's mit Continental, ZF und Frenozza GmbH geschlossen. Mit diesen Firmen fanden im Projekt eine Kooperation und ein regelmäßiger Austausch statt. Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit wurden mit vielen Firmen Gespräche geführt, das Projekt vorgestellt, sowie eine Reihe von Publikationen und Veröffentlichungen erstellt als auch in Konferenzbeiträgen eingebracht (s. Tabelle 45). Der ZEDU1-Demonstrator wurde im Roll Out am 28.09.2022 der Öffentlichkeit vorgestellt und erfreute sich, wie das gesamte Projekt, hoher Publicity in allen Medien.

TP 1: In diesem Teilprojekt wurde die ZEDU1 Einheit konzipiert, berechnet, konstruiert und gefertigt. Die Getriebe/Bremse Einheit wurde in Prüfstandversuchen parametrisiert, validiert und die Applikation der neu entwickelten Software durchgeführt. Die Auswertungen der Versuche zeigten, dass das gewünschte Verhalten hinsichtlich Bremswirkung und thermischer Stabilität gegeben ist und alle geforderten Spezifikationen eingehalten wurden. Ergebnisse des Realbetriebs im Demonstrator validierten die in diesem Teilprojekt durchgeführten Entwicklungen.

TP 2: In diesem Teilprojekt erfolgte die Entwicklung der Hybridbremse. Diese wurde modelliert, optimiert und das elektromagnetische Modell validiert. Damit wurde dann die Hybridbremse ausgelegt und auf dieser Basis aufgebaut und vermessen. Die Validierungsmessungen erfolgten am Prüfstand. Diese konnten erfolgreich durchgeführt und die Simulationsergebnisse bestätigt werden. Detailliertere Ergebnisse sind weiter unten dem Bericht zu TP2 (Kapitel 3.3) zu entnehmen.

TP 3: In diesem Teilprojekt erfolgte die Entwicklung des Versuchsträgerfahrzeugs zur Integration aller neuen Komponenten (ZEDU1-Einheit und HV Komponenten) sowie die Konstruktion und Berechnung der strukturellen Änderungen der Basiseinheit als Grundlage der Aufbauarbeiten. Das Demonstrator-Fahrzeug wurde erfolgreich aufgebaut und die ZEDU1-Komponenten aus TP1 integriert. Der Versuchsträger wurde zur Testdurchführung und Vermessung zum 30.06.2022 bereitgestellt und an das TP4 übergeben.

TP 4: Zur messtechnischen Charakterisierung wurden im TP4 die Tests und Versuchsdurchführung konzipiert und der ZEDU1-Versuchsträger, als auch das Referenzfahrzeug vermessen. Die für die Testkonzepte geplante Versuchsvorrichtung wurden erfolgreich aufgebaut und sowohl am Referenzfahrzeug als auch am ZEDU1-Versuchsträger appliziert. Die Testkonzepte wurden in enger Zusammenarbeit mit TP5 validiert und alle notwendigen Fahrzeugtests durchgeführt. Die Vermessungen fanden auf dem Rollenprüfstand, auf den Testgeländen in Boxberg und in Asperg sowie bei realen Straßenfahrten w.z.B. der normkonforme Strecke DLR-RDE-Strecke, die am DLR-Standort startet und auch wieder endet, statt. U.a. wurden die Versuche zur Untersuchung und Charakterisierung der Reifenabriebe, einer grauguss- und einer hartmetallbeschichteten Bremscheibe im realen Betrieb als auch auf einem Komponentenprüfstand durchgeführt. Dazu wurden zusammen mit TP5 geeignete Methoden und Messkonzepte zur online On-Board-Charakterisierung entwickelt und getestet. Ergebnisse der Messungen sind im Bericht unter Kapitel 0 und 3.5.4 dargestellt.

TP 5: Die Emissionsmessungen am Referenzfahrzeug, sowie am ZEDU1-Demonstrator als auch an der Hybridbremse und im Komponentenbremsprüfstand wurden in Zusammenarbeit mit TP2 und TP4 erfolgreich abgeschlossen und ausgewertet. Im Rahmen von Vorversuchen wurden zusätzlich Untersuchungen zum Einfluss der Belüftung, Temperatur, Rekuperation und Bremsbeschichtung an einem BMW i3 als Referenz durchgeführt. Bei den Experimenten mit dem Referenzfahrzeug am Rollenprüfstand und auf der Straße zeigten die Bremsen eine nennenswerte Freisetzung von ultra-feinen Partikeln. Dies wurde auch bei Komponentenprüfungen der Bremsen bestätigt. Die Differenzierung der Reifenemissionen ist hingegen - aufgrund des offenen Messsystems - durch wesentlich mehr Parameter beeinflusst. Hierbei wurden besonders bei Kurvenfahrten erhöhte Freisetzungen beobachtet. Reifenabriebmessungen auf der Straße im realen Verkehr zeigen sich aufgrund hoher Hintergrund Immissionen als eher schwierig. Daher wurde zur Vermessung des ZEDU1-Demonstrators der Rollenprüfstand, sowie eine Versuchstrecke ausgewählt. Der Untersuchungsfokus lag hierbei auf bekannten Fahrzyklen (WLTC Class 3b, WLTC Brake und RDE), sowie kurzen Testzyklen zur Vermessung der Nicht-Abgas-Emissionen in Abhängigkeit des Betriebszustands. Die Bewertung der aktuellen Partikelemissionssituation insgesamt, auf Basis des Referenzfahrzeugs und des Demonstrators, wurde so erfolgreich durchgeführt.

Bei den Tests wurden Bremspartikel mit einem Durchmesser von 220 nm, sowie im ultrafeinen Bereich bei 10 – 20 nm identifiziert. Die luftgetragenen Emissionen des Reifens haben einen Durchmesser von ca. 400 nm und 5 – 10 nm. Die Morphologie der Proben deutet auf mechanische Reibung, sowie thermische Prozesse als Emissionsursache hin. Bei Realfahrten auf einem Testgelände und der Straße konnte zusätzlich der Einfluss eines realen Fahrzyklus (RDE), eines realen Bodenbelags, sowie der Querbeschleunigungen auf die Emissionen vermessen werden.

Zur Untersuchung des Emissionsminderungspotentials wurde die Originalbremse des Referenzfahrzeugs mit einer Hartmetallbeschichtung versehen. Die Emissionen wurden am Referenzfahrzeug und Komponentenprüfstand untersucht und mit der unbeschichteten Bremse verglichen. Durch die Beschichtung der Bremscheibe konnte bei Partikelanzahl und Partikelmasse eine deutliche Reduktion, je nach Zyklus von bis zu knapp 80 %, der Emissionen festgestellt werden (3.6.2.1.5). Die relative Reduktion ist stark von der Auswahl des Fahrzyklus, also dem Verhältnis aus Fahrgeschwindigkeit und Bremsvorgängen, abhängig.

Ein weiterer Ansatz zur Minderung der Bremsemissionen ist das Konzept der Hybridbremse. Hier wurde ein neuer Versuchsaufbau zur Vermessung am Komponentenprüfstand implementiert und die luftgetragenen Partikelemissionen bei verschiedenen Betriebszuständen untersucht. Partikelemissionen entstehen erst bei Betriebspunkten mit mechanischem Kontakt bzw. Kraftereinwirkung am Bremsbelag. Die meisten Partikelemissionen liegen im Größenbereich zwischen 100 und 500 nm, bei hohen Temperaturen wurden zusätzlich ultrafeine Emissionen im Bereich von ca. 10 nm detektiert (3.6.4). Es wurde eine lineare Beziehung zwischen mechanischer Bremsleistung und kumulierter Anzahl der emittierten Partikel festgestellt.

Zur Vermessung des ZEDU1-Demonstrators wurden Probenahmestellen, sowie eine mobile Partikelmess-technik für den Größenbereich von 2.5 nm bis 10 µm in das Fahrzeug integriert. Die Reifenemissionen, sowie das Einsaugverhalten und die Filtereffizienz wurden auf dem Rollenprüfstand und einem Testgelände vermessen. Die Absaugung funktioniert bei allen Fahrgeschwindigkeiten zuverlässig und saugt die luftgetragenen Reifenemissionen ein. Der Anteil der Emissionen bezüglich der Partikelanzahl, die durch die Absaugung nicht eingesaugt werden liegt bei maximal 10 % und ist bei mittlerer und niedriger Geschwindigkeit deutlich geringer. Das Filtersystem des Demonstrators reduziert die eingesaugte Partikelanzahl um über 90 %, wobei die Filtereffizienz mit der Geschwindigkeit ansteigt. Durch das zweistufige Filtersystem werden folglich die

relevanten Partikelgrößen zuverlässig eingesammelt und somit die Anzahl der emittierten Reifenpartikel deutlich vermindert (3.6.3).

Die Ergebnisse zeigen, dass die meisten emittierten Partikel durch Reifen und Bremse einen Durchmesser im nm-Bereich haben. Folglich ist es, nicht zuletzt durch die Lungengängigkeit der kleinen Partikel, auch für zukünftige Untersuchungen und Technologiebewertung im Bereich der Nicht-Abgas-Emissionen unerlässlich den messtechnischen Fokus in diesem Größenbereich zu legen.

Mit dem innovativen Gesamtkonzept des ZEDU1-Demonstrators konnte eine deutlich messbare Verringerung der Reifen- sowie Bremsemissionen durch Einhausung/Absaugung und Lamellenbremse bewirkt werden (Kapitel 3.6).

Die vermessene Größenverteilung, sowie die morphologische Untersuchung der Proben gibt zusätzlich Hinweise auf die Entstehung der Emissionen. Hier ist weiterer Forschungsbedarf in Form von systematischen Studien notwendig um z.B. eine mögliche Reduktion der Reifenemissionen durch gezieltes Materialdesign zu ermöglichen.

Die Ergebnisse wurden in wissenschaftlichen Konferenzbeiträgen (4; 5; 6; 7; 8; 9) und einem peer-reviewed Journalbeitrag (10) veröffentlicht. Weitere Journalbeiträge sind in Planung.

TP 6: Es wurden fünf verschiedene Konzepte zur Reduzierung der Feinstaubemissionen der Fahrzeugbremse näher betrachtet. Zwei Bremskonzepte wurden zur Detaillierung, Entwicklung und Demonstration ausgewählt. Für die Integration im Versuchsträger wurde das Konzept mit dem geringeren Risiko für das Erreichen einer Demonstrations-TRL's ausgewählt. Dabei handelt es sich um eine in die Antriebseinheit integrierte Lamellenbremse, die von einem Fluid gekühlt wird.

Neben den zwei neu entwickelten Konzepten, der Hybridinduktionsbremse und der Lamellenbremse wurden im Projekt noch das Konzept einer Hartmetallbeschichtung und, als Referenz, eine Standardgraugussbremse untersucht. Außerdem wurden unterschiedliche Konzepte zur Feinstaubabsorption an den Rädern evaluiert. Gewählt wurde ein System mit unterstützter aktiver Luftabsaugung und Filtrierung. Die Bewertung der ZEDU1-Konzepte sowie die Validierung, Bewertung der Mess- und Testkonzepte konnten auf der Basis der Messergebnisse erfolgreich durchgeführt werden.

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Neben den Abgasen von Verbrennungsmotoren belastet vor allem Feinstaub und Mikroplastik die Umwelt. Feinstaub (Partikelmaterie) umfasst kleine Partikel, die in die Luft emittiert werden und einen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometern haben (Abbildung 1).

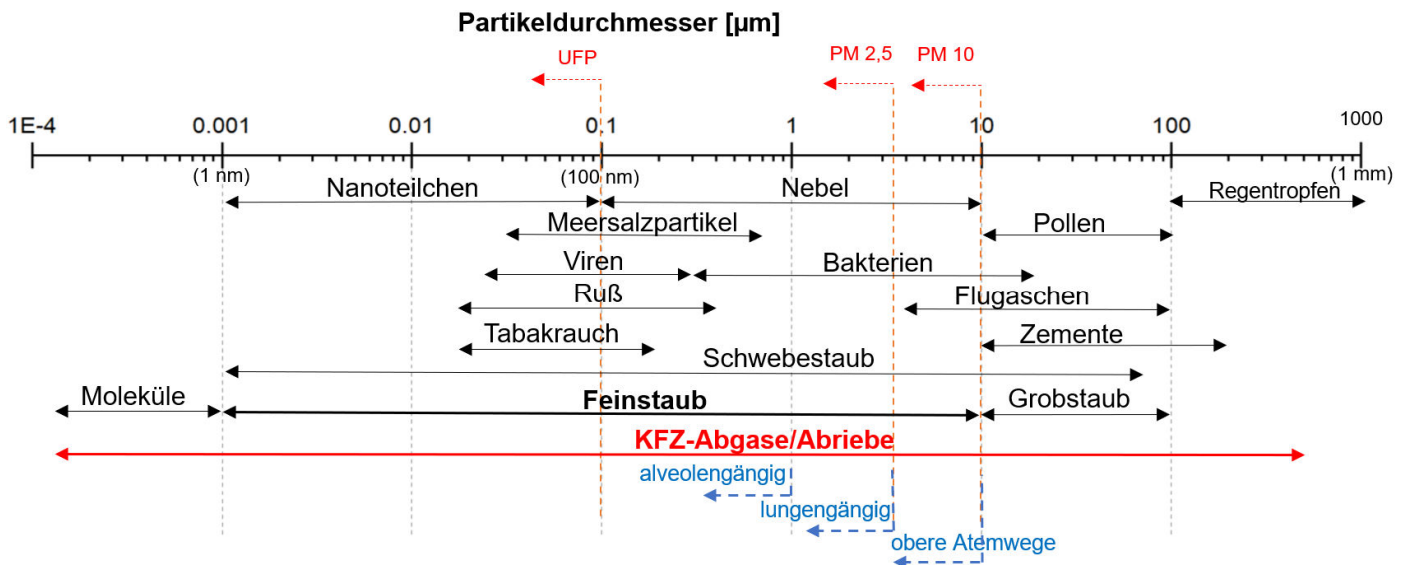


Abbildung 1: Größenbereich verschiedener Partikelmaterie mit Einteilung in Feinstaub (Partikel kleiner PM₁₀) sowie PM_{2,5} (Partikel kleiner PM_{2,5}) und Ultrafeinstaub (UFP) (Partikel kleiner 0,1 µm)

Diese Partikel können aus verschiedenen Quellen stammen, darunter Industrieemissionen, Verkehrsemissionen, Verbrennungsprozesse und natürliche Quellen wie Stäube. Der größte Anteil kommt dabei aus dem Verkehr - insbesondere beim Anteil des Ultrafeinstaubes (UFP) (Abbildung 2).

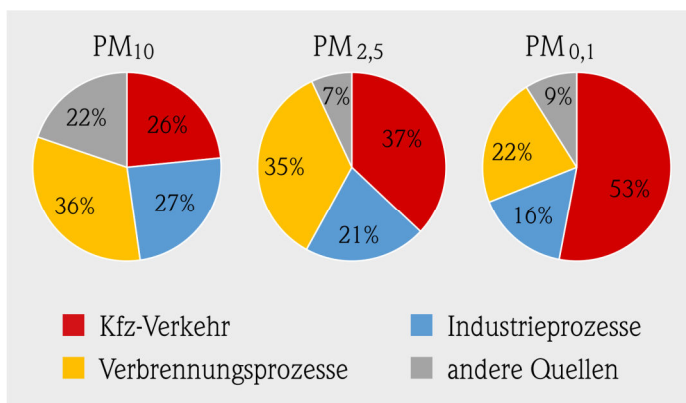


Abbildung 2: Quellenanteil an Gesamtemissionen von PM₁₀, PM_{2,5} und PM_{0,1} in Großbritannien (AQEG 2005) (11)

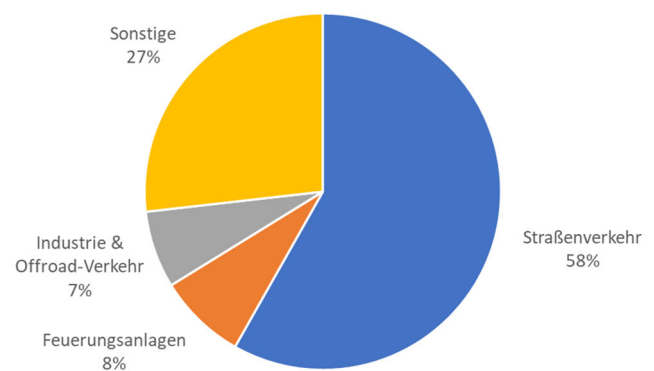


Abbildung 3: Quellen der Feinstaubbelastung (PM₁₀) am Neckartor, Stuttgart (LUBW). Daten aus (12).

Am Neckartor setzt sich der Anteil an Feinstaub, der durch den Straßenverkehr zu 58 % verursacht wird, wie folgt zusammen: Abgas-Immissionsanteil (7 %), Immissionsanteilen der durch Aufwirbelungen von Reifen-, Brems- und Straßenabrieb entsteht (45 %) sowie Sekundärimmissionen des Verkehrs (mit 6,2 %) (Abbildung 3).

Die Exposition gegenüber Feinstaub kann zu einer Reihe von Gesundheitsproblemen führen, insbesondere im Bereich der Atemwege und des Herz-Kreislauf-Systems. Feinstaub- und Ultrafeinstaubpartikel dringen

tief in die Lunge, bis in die Alveolen ein, gehen so ins Lungengewebe und in den Blutkreislauf über und betreffen alle Organe. Wie der Abbildung 4 zu entnehmen ist, sind es besonders die UFP-Partikel, die nicht in den oberen Atemwegen ihre Deposition finden und so zu ca. 50 % in die Lungenbläschen (Alveolen) gelangen. Abbildung 5 zeigt ein solches Partikel in einer Plazentazelle. Aufgrund Ihrer geringen Größe haben Feinstaubpartikel eine relativ große (aktive) Oberfläche, bleiben lange in der Luft (Aerosole) und sind Quelle des oxidativen/toxischen Potentials.

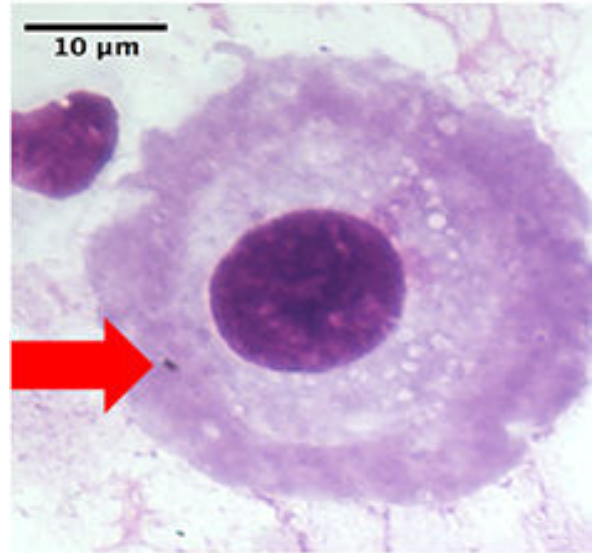
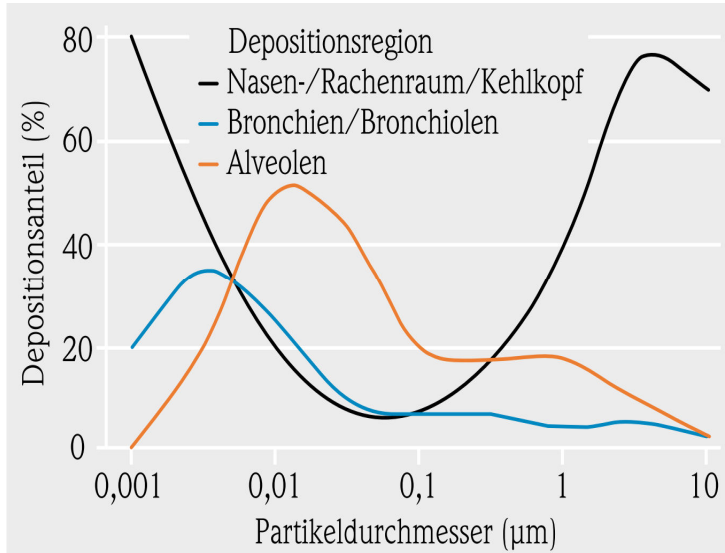


Abbildung 4: Partikeldepositionsregion des Atemtrakts als Funktion des Partikeldurchmessers bei Nasenatmung des Menschen (13)

Abbildung 5: Nanopartikel in einer Plazentazelle (14)

Die WHO hat erkannt, dass Feinstaubemissionen ein ernstes Gesundheitsrisiko darstellen und empfiehlt die Begrenzung der Exposition gegenüber Feinstaubpartikeln. In Bezug auf Feinstaub empfiehlt sie für 2021 einen Grenzwert für $PM_{2,5}$ von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und für PM_{10} $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (15). Laut WHO ist die Luftverschmutzung eines der größten Umweltrisiken für die Gesundheit. Durch die Reduzierung der Luftverschmutzung können Länder die Krankheitslast durch Schlaganfall, Herzerkrankungen, Lungenkrebs sowie chronische und akute Atemwegserkrankungen, einschließlich Asthma, verringern. Im Jahr 2019 lebten 99 % der Weltbevölkerung an Orten, an denen die Luftqualitätsrichtlinien der WHO nicht eingehalten wurden. Schätzungen der WHO zufolge verursachten Auswirkungen der Luftverschmutzung im Jahr 2021 jährlich ca. 6,7 Millionen vorzeitiger Todesfälle. Alleine die Luftverschmutzung im Freien ist für ca. 4,2 Millionen vorzeitiger Todesfälle ursächlich zu nennen.

Im Verkehrsbereich entsteht Feinstaub während des Verbrennungsprozesses sowie durch den Abrieb von Reifen und Bremsen. Dabei nimmt die Anzahl der Partikelemission aus Verbrennungsprozessen, bei gleichzeitiger Zunahme der Emissionen aus Nichtverbrennungsprozessen, ab (s. Abbildung 6). In der EU haben $PM_{2,5}$ -Partikelemissionen im Straßenverkehr aus nicht Verbrennungsprozessen bereits vor dem Jahr 2020 das gleiche Niveau erreicht wie $PM_{2,5}$ -Partikelemissionen aus den Verbrennungsprozessen. Die PM_{10} -Partikelemissionen aus Nichtverbrennungsprozessen gar die der Emissionen aus Verbrennungsprozessen deutlich überschritten. Die Zunahme der Emissionen aus Nichtverbrennungsprozessen ist hauptsächlich der Gewichtszunahme der Fahrzeuge sowie der immer höheren jährlichen Kilometerleistung geschuldet. Dieser Trend wird sich auch in Zukunft fortsetzen und durch zunehmende Elektrifizierung verstärken.

Die EU hat daraus ihre eigenen Luftgrenzwerten abgeleitet, überwacht die Einhaltung dieser Grenzwerte und verpflichtet ihre Mitgliedstaaten zur Umsetzung geeigneter Maßnahmen, um die Luftqualität zu verbessern

und die Grenzwerte einzuhalten. Diese Grenzwerte, um die Qualität der Luft zu schützen und die so Gesundheit der Bürger zu gewährleisten, sind in der Richtlinie 2008/50/EG (16) festgelegt. Als Feinstaub (PM_{10} und $PM_{2,5}$) sind in dieser Richtlinie Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 10 Mikrometern (PM_{10}) und weniger als 2,5 Mikrometern ($PM_{2,5}$) definiert. Der Grenzwert für PM_{10} beträgt 50 Mikrogramm pro Kubikmeter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) im Tagesmittelwert und $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittelwert. Für $PM_{2,5}$ beträgt der Grenzwert $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittelwert.

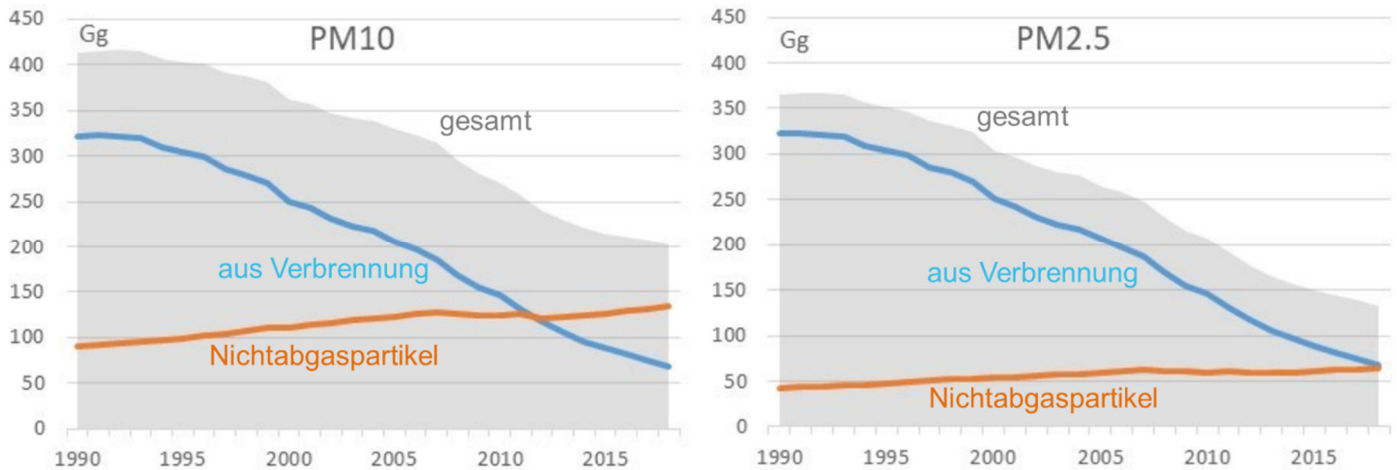


Abbildung 6: PM_{10} (links) und $PM_{2,5}$ (rechts) Emissionen im Straßenverkehr in der EU (Eionet Report - ETC/ATNI 2020/5) (17)

Die Grenzwerte für Schadstoffe in der Luft werden von der EU mit neuen Leitlinien für Luftqualitätsstandards ab 2030 verschärft. So besagen die neue Luftqualitätsrichtlinie für $PM_{2,5}$ $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dies bedeutet eine Reduktion der Werte um den Faktor 2,5 im Vergleich zu heute geltenden Grenzwerten (Richtlinie 2008/50/EG) und für PM_{10} mit $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ d.h. eine Verringerung um den Faktor 2. Zusätzlich hat die EU eine Regelmäßige Überprüfung der Luftqualitätsnormen und eine Laufende Neubewertung anhand wissenschaftlicher Erkenntnisse und gesellschaftlicher und technischer Entwicklungen zur Verbesserung der Umsetzung sowie das Erreichen von Null-Luftverschmutzung bis spätestens 2050 in den neuen Luftqualitätsrichtlinien festgeschrieben (18) (19) (20). Diese Einzuhalten wird für viele Städte, Gemeinden und Kommunen, ohne auf Fahrverbote zurückzugreifen, eine schwer zu leistende Herausforderung. Zusätzlich, um dem Problem der Luftverschmutzung entgegenzuwirken, hat die EU in ihrem Legislativvorschlag zu Euro-7 Abgasnorm die zum 1.7.2025 in Kraft treten sollen auch Emissionen aus nicht Verbrennungsprozessen in ihre Regularien aufgenommen. So dürfen zur Einhaltung der Abgasemissionen in den Euro-7 Norm die Feinstaubemissionen der Bremsen, auf einem Komponentenprüfstand evaluiert, max. $7(3) \text{ mg}/\text{km}$ betragen. Auch diese Grenzwerte sind mit der konventionellen Technologie nicht zu erzielen und werden für viele Zulieferer und Fahrzeughersteller zu einer Herausforderung, die nur über neu einzusetzende Materialien oder Bremskonzepte zu bewältigen ist. Vorgaben für Reifen sollen folgen.

Mikroplastik hingegen bezieht sich auf winzige Plastikpartikel mit einer Größe von weniger als 5 Millimetern. Diese Partikel können entweder absichtlich in Produkten enthalten sein, wie zum Beispiel in Kosmetika, oder aus der Zersetzung größerer Plastikteile entstehen. Den größten Anteil daran haben Reifenabriebe (Abbildung 7). Diese tragen mit ca. 26% zur Mikroplastikemission bei. Alleine in Deutschland sind dies ca. 110.000 t/a und somit pro Bürger ca. 1,23 kg/a – die Abriebe des Asphalt nicht mitgerechnet.

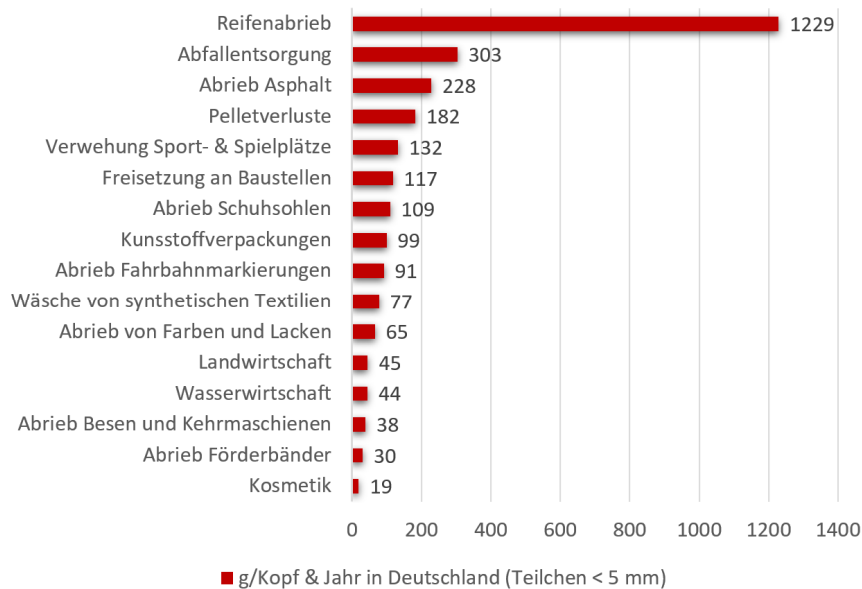


Abbildung 7: Die größten Mikroplastikquellen in Deutschland (Erstellt aus Daten: Fraunhofer 2018)

Es gibt starke Bedenken hinsichtlich der Auswirkungen von Mikroplastik auf die Umwelt und die Gesundheit von Mensch und Tier. Obwohl es derzeit nur begrenzte wissenschaftliche Erkenntnisse zu den Auswirkungen von Mikroplastik auf die menschliche Gesundheit gibt, haben verschiedene Studien gezeigt, dass Mikroplastikpartikel in verschiedenen Geweben und Organen nachgewiesen wurden. Die WHO hat angekündigt, weitere Forschungen durchzuführen, um das Risiko von Mikroplastik für die menschliche Gesundheit besser zu verstehen.

1.2 Ziele

Im Projekt ZEDU1 (Zero Emission Drive Unit – Generation 1) wurde ein innovatives Fahrzeugkonzept entwickelt, aufgebaut und getestet, dessen Ziel es ist es, den Ausstoß von Emissionen aus nicht Verbrennungsprozessen die eine Quelle des Feinstaubs bzw. des Mikroplastiks darstellen, so weit wie möglich zu vermeiden.

Das Projekt adressiert damit Komponenten, die bisher wenig Beachtung gefunden haben. Im Fokus stehen dabei eine feinstaubfreie Bremsanlage sowie das Absaugen und Aufnehmen von Reifenabrieb, so dass dieser nicht in die Umwelt gelangt. In Kombination mit Energie aus erneuerbaren Quellen und elektrischen Antrieben kann Mobilität damit nahezu komplett emissionsfrei werden.

Die wichtigsten Ziele des Projekts sind daher die Entwicklung von feinstaubfreien Antriebskomponenten, im Speziellen Bremse und Reifen bei denen der Abrieb der Bremsen komplett vermeiden und der der Reifen um bis zu 90 Prozent reduziert ist.

Weitere Ziele in diesem Projekt sind: hoher Wirkungsgrad, Kompaktheit, alltagstauglich und vielseitige Einsetzbarkeit der entwickelten ZEDU1-Komponenten und somit die Übertragbarkeit dieser auf zukünftige PKW, Nutz- und auch Schienenfahrzeuge sowie die Realisierbarkeit in einem Versuchsträger, Demonstration und messtechnischer Nachweis im realen Einsatz.

2 Struktur und Organisation

2.1 Projektstruktur

Im Projekt ZEDU1 arbeiteten das DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte und das DLR-Institut für Verbrennungstechnik in Stuttgart mit dem Engineering Dienstleister HWA AG aus Affalterbach im Unterauftrag und dem Oberflächenspezialisten Frenoza GmbH zusammen.

Das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg förderte das Projekt mit insgesamt sechs Millionen Euro.

Das Projekt setzt sich aus sechs Arbeitspaketen zusammen und ist in der in

Abbildung 8 dargestellten Struktur organisiert.

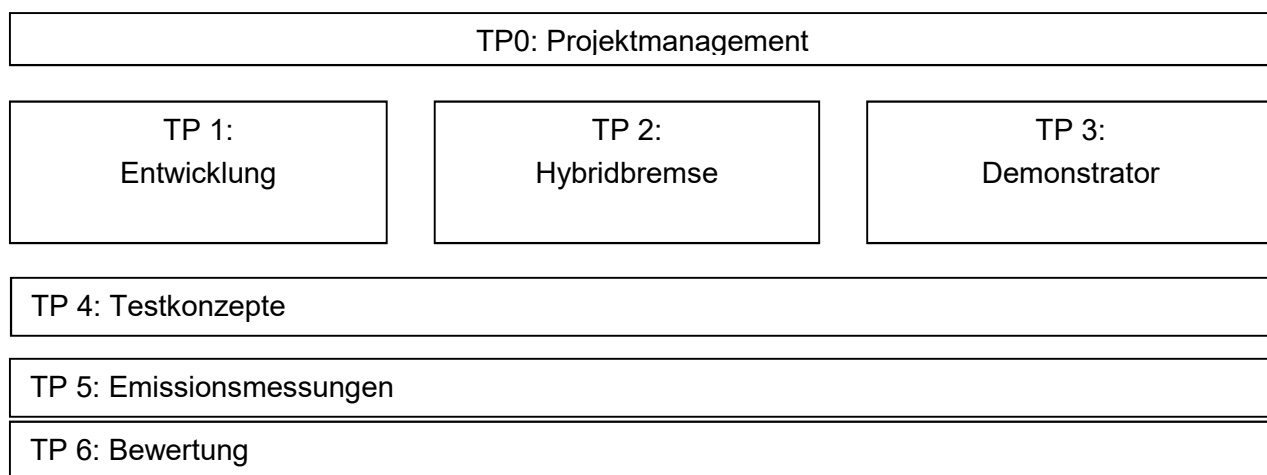


Abbildung 8: Projektstruktur

2.2 Verantwortlichkeiten der Teilprojekte

- TP 0 – Projektmanagement, Qualitätssicherung und Reporting, F. Philipps (DLR-FK-FEK)
- TP 1 – Auslegung und Entwicklung der Zero Emission Drive Unit, T. Kresse (HWA AG)
- TP 2 – Entwicklung emissionsfreie Hybridbremse, C. Holtmann (DLR-FK-AEW)
- TP 3 – Fahrzeugdemonstrator, T. Kresse (HWA AG)
- TP 4 – Testkonzepte, S. Reiland (DLR-FK-FEK)
- TP 5 – Emissionsmessungen, T, Schripp (DLR-VT-CKA)
- TP 6 – Bewertung und Fazit, F. Philipps (DLR-FK-FEK)

2.3 Kurze Arbeitsbeschreibung der Teilprojekte

In dem übergeordneten TP 0 erfolgt die Projektkoordination sowie die Koordination und Überwachung aller Arbeitspakete des Projekts über die gesamte Laufzeit des Vorhabens, die Qualitätssicherung sowie die Koordination zwischen den Beteiligten des Projektkonsortiums und dem Projektträger.

Im TP 1 wurde die Entwicklung der Zero Emission Drive Unit durchgeführt. Im Speziellen erfolgten hier die Arbeiten zur Konzeptionierung, Auslegung, Entwicklung und der Aufbau der emissionsfreien Bremse sowie des quasi emissionsfreien Reifens als auch der Hochleistungsrekuperation und des Energiemanagements.

Im TP 2 wurden als Alternativoption eine innovative, neuartige Hybridbremse auf Wirbelstrombasis zur Integration in eine Null-Emissions-Antriebseinheit entwickelt, ausgelegt, optimiert und als Teilsystem demonstriert.

Im TP 3 erfolgte der Aufbau des Versuchsträgers als Fahrzeugdemonstrator und die Integration der Zero Emission Drive Unit in diesen.

Im TP 4 wurden die zur Charakterisierung erforderlichen Mess- und Testkonzepte entwickelt, aufgebaut und Messungen durchgeführt. Um Basisreferenzen zu generieren wurden in enger Abstimmung mit TP5 zuerst anhand konventioneller Referenzsysteme die Messmethodik entwickelt, aufgebaut und Vergleichsmessungen für die Zielkonfiguration der ZEDU1-Einheit generiert. Die Referenzmessungen wurden als Grundlage zur Beurteilung der Effektivität des ZEDU1-Konzepts herangezogen.

In dem Arbeitspaket TP5 sind die im Rahmen des Projektes entwickelten Komponenten hinsichtlich ihrer Partikelemissionen charakterisiert worden. Die Arbeiten erfolgten in enger Zusammenarbeit mit den TP1, TP2, TP3 und TP4 sowie TP6. Dabei wurden für die in TP1, TP2 und TP4 ermittelten Konzepte Emissionssignaturen evaluiert.

Im TP 6 wurden die gewonnenen Erkenntnisse und Messergebnisse zusammengeführt, analysiert, bewertet in Berichten zusammengeführt sowie der Öffentlichkeit bekannt gemacht.

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse, nach Teilprojekte gegliedert, dargestellt.

3.1 TP0: Projektmanagement, Qualitätssicherung und Reporting

Das Projekt wurde, wie vorgesehen, in der Planunzeit abgeschlossen. Alle Meilensteine wurden vollumfänglich erfüllt und die vorgegebenen Ressourcen eingehalten. Alle Hürden und Widrigkeiten die die Corona-Epidemie mit Lock-Down, limitiertem Zugang zum Werksgelände, Einführung von Homeoffice, Lieferkettenproblematik u.v.a.m. konnten erfolgreich gemeistert werden.

Den Berichts- und Dokumentationspflichten wurde Im Rahmen des TP0 termingerecht nachgekommen. Alle erforderlichen Berichte und Dokumentationen wurden erstellt, auf der Teamseite den Projektpartnern bereitgestellt und an die zu Berichtenden weitergereicht.

Für die Unteraufträge erfolgten, dem Vergaberecht konforme, EU-weite Ausschreibungen. Dazu wurden Leistungsbeschreibungen und Lastenhefte erstellt und von der DLR Administration in entsprechenden Bekanntmachungen veröffentlicht. Die Lastenhefte wurden nach UN/ECE 13-H erstellt und als Grundlage für die die EU-weite Ausschreibung eingesetzt. Dies wurden vom DLR-Einkauf den Bewerber bereitgestellt und die Angebote daran gemessen und bewertet. Von den Bewerbern wurden dazu Pflichtenhefte angefordert, die zur Bewertung der Bieter und im Späteren auch der Projektergebnisse dienen. Die Angebote und Bewerber wurden nach einer Bewertungsmatrix beurteilt und ausgewählt. Den Zuschlag konnte die Fa. HWA AG aus Affalterbach für sich gewinnen. Die Pflichtenhefte wurde von der Fa. HWA AG gänzlich und alle geforderten Meilensteine termingerecht erfüllt. Die Einbindung der Fa. Frenoza GmbH erfolgte, aufgrund eines wesentlich geringeren finanziellen Umfangs, in einer direkten Beauftragung über Vergleichsangebote.

Im Laufe des ZEDU1-Projekts konnten weitere Partner interessiert und eingebunden werden. So wurde mit MANN+HUMMEL GmbH ein Vertrag als assoziierter Partner sowie ein NDA mit Continental und ZF-Friedrichshafen geschlossen. Die Kooperation mit diesen Firmen erfolgte im Rahmen des Projekts über einen regelmäßigen Austausch und Wissenstransfer.

3.2 TP1: Auslegung und Entwicklung der Zero Emission Drive Unit

Die Zero Emission Drive Unit lässt sich in zwei Subsysteme unterteilen – die Getriebe/Bremse Einheit und die Reifenpartikelabsaugung. Für beide Subsysteme wurden softwaregestützt (APIS) FMEAs auf Basis der aktuellen technischen Konzepte für die Getriebe/ Bremse Einheit und die Reifenpartikelabsaugung erstellt. Methodisch wurden alle Baugruppen gelistet, mögliche technische Risiken aufgezeigt und deren Einfluss und Auswirkung bewertet. Geeignete Maßnahmen wurden definiert und dokumentiert um die identifizierten Risiken im Projektverlauf ausschließen zu können. Die FMEAs sind in separaten Dokumenten abgelegt.

In der Entwicklungsphase wurden die Berechnungen und Konstruktionen zu den ZEDU1 Einheiten durchgeführt und in geplanter Zeit abgeschlossen um termingerecht die Bauteile für die Versuchsaufbauten zu bestellen. Parallel wurden die entwickelten ZEDU1 Einheiten ins Package des Demonstrators integriert und die dafür notwendige Peripherie entwickelt. Dazu zählen unter anderem eine komplett neue HV-/LV- Elektrik Topologie, ein auf diese Topologie angepasstes Kühlsystem, sowie die strukturelle Anpassung des Demonstrators auf die Integration der ZEDU1 Einheiten und HV Batterie.

Die Getriebe/ Bremse Einheiten wurden auf dem Antriebstrangprüfstand bei HWA einer ersten Funktionsprüfung unterzogen. Die grundlegenden Funktionen konnten bestätigt werden. Da nicht alle Verbraucher am Prüfstand verbaut waren, erfolgte eine vollständige Vermessung nach Lastenheftvorgaben im Demonstrator. Während der Prüfstandsphase wurde zusätzlich ein hohes Augenmerk auf die Entwicklung, Prüfung und Optimierung der VCU Software gelegt. Mit Abschluss der Prüfstandsphase steht eine funktional geprüfte und applizierte Software für den Fahrzeugbetrieb zur Verfügung.

Basis für die erstellten FMEAs sind Konzeptuntersuchungen und –bewertungen die zu ersten Systemauslegungen führten. Im Folgenden werden diese beiden Subsysteme näher beschrieben.

3.2.1 Getriebe-Bremse-Einheit

3.2.1.1 Konzeptauswahl Getriebe-Bremse-Einheit

Zu Beginn wurden vier verschiedene Konzepte betrachtet die einen positiven Einfluss auf die Partikelemissionen der Bremse haben. Abbildung 9 zeigt diese Gegenüberstellung inkl. der Bewertung verschiedener möglicher Brems-Systeme.

Da im Lastenheft eine vollständige Vermeidung der Emissionen gefordert ist, fallen die Konzepte 1 und 2 aus der Bewertung. Es kann für beide Lösungen keine 100% Vermeidung der Partikelemissionen in die Umwelt gewährleistet werden. Die Konzepte 3,4 und 5 können das durch eine vollständige Kapselung realisieren. Bei Konzept 3, der gekapselten konventionellen Scheibenbremse, ist die Realisierung der notwendigen Kühlung durch Belüftung äußerst aufwendig und mit einem hohen Funktionsrisiko zu bewerten. Zusätzlich würde eine Radeinhausung zur Reifenabriebaufnahme das thermische Problem stark verschärfen. Bei Konzept 4, der nassen Lamellenkupplung, ist durch die Verwendung von Flüssigkeitskühlung in einem geschlossenen Kreislauf die Wärmeabfuhr sehr gut zu realisieren (Abbildung 11). Prinzipiell ist diese Anwendung aus Automatik- oder Doppelkupplungsgetrieben bekannt und serienreife. Weiterer Vorteil von Konzept 4 ist das zu erwartende niedrigere Gewicht und die Möglichkeit eine hochintegrierte Lösung in Kombination mit der Getriebestufe in einem Gehäuse zu schaffen. Abbildung 10 stellt verschiedene Lösungen für die Integration der festen Übersetzungsstufe dar.

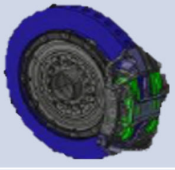
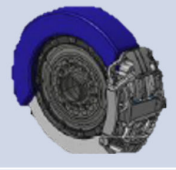
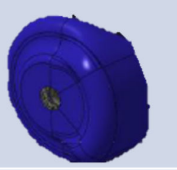
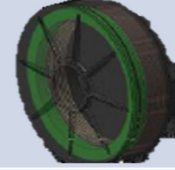
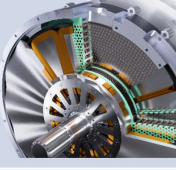
Kriterium	Konzept1	Konzept2	Konzept3	Konzept4	Konzept5
Darstellung					
Beschreibung	Beschichtung	Filter zusätzlich	gekapselt	Lamellenbremse	Induktionsbremse
Grad der Emissionsvermeidung	teilweise ---	teilweise ---	vollständig +++	vollständig +++	vollständig ++
Entwicklungsaufwand	++	+	-	+	---
Entwicklungsrisiko	+	0	--	+	--
Gewicht	+++	+	-	0	-
Kosten	++	+	-	+	-
Bewertung	+	--	0	+++	++
	Frenoza			HWA	DLR

Abbildung 9: Konzeptbewertung emissionsfreie Bremsfunktion

Ziel ist eine möglichst kompakte und leichte Umsetzung der gesamten Getriebe/ Bremse Einheit. Neben der achsparallelen Anordnung von Stirnradstufen bietet die Verwendung eines Planetengetriebes die Möglichkeit einer äußerst kompakten Bauform (Abbildung 12). In der Konzeptvariante 4 ist die Lamellenbremse radial um den Planetensatz angeordnet und erreicht die höchste Integration. Die Getriebestufe wurde als Planetensatz in koaxialer Ausführung gewählt um eine möglichst kompakte Einheit zu ermöglichen. In Abbildung 11 ist das Systemschaubild der gewählten Lösung dargestellt und in Abbildung 12 das dazugehörige CAD Modell dargestellt.

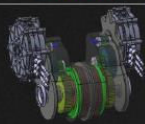
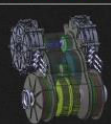

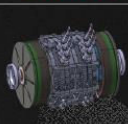
KRITERIUM	KONZEPT 1	KONZEPT 2	KONZEPT 3	KONZEPT 4
DARSTELLUNG				
KURZBESCHREIBUNG GETRIEBE-/BREMSEINHEIT	- Stirnradgetriebe (2-Stufig) - Motoren außenliegend - Bremsen innenliegend	- Stirnradgetriebe (2-Stufig) - Motoren außenliegend - Bremsen außenliegend	- Planetengetriebe - Motoren innenliegend - Bremsen außenliegend	- Planetengetriebe - Motoren innenliegend - Bremsen umgeben Getriebe
DREHZAHL E-MOTOR	< 12.000 1/min	< 12.000 1/min	< 12.000 1/min	< 12.000 1/min
BAURAUUM (Axiale Breite)	++	+	-	+
BAURAUUM (Gesamtvolumen)	--	-	+	++
GEWICHT	-	-	0	++
KOSTEN	-	-	+	+
SUMME	--	--	+	+++++

Abbildung 10: Konzeptbewertung Übersetzungsstufe

Um die Ölplanschverluste möglichst gering zu halten wird die Drehzahl der rotierenden Lamellen niedrig gehalten. Das wird durch die Kopplung über den Planetenträger mit der Antriebswelle erreicht. Bei Bremsaktuierung wird das Bremsmoment über die feststehenden Lamellen über das Getriebegehäuse am Fahrzeugrahmen abgestützt.

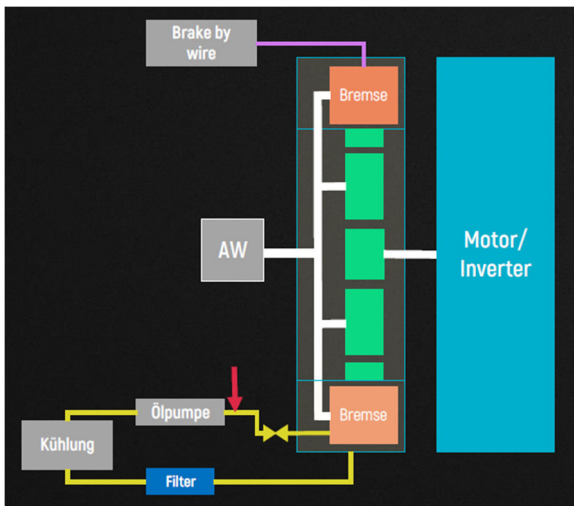


Abbildung 11: Systemschaubild

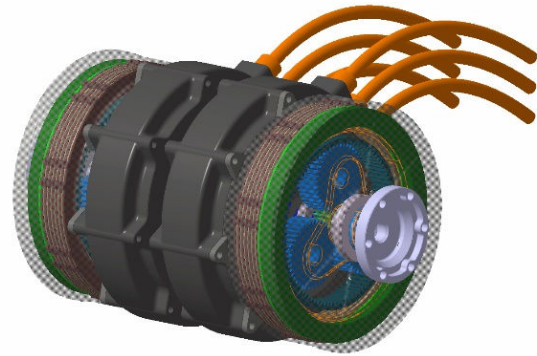


Abbildung 12: CAD Modell der ZEDU1-Brems-Getriebe-Motor-Einheit

Die bei der Bremsung entstehende Wärme wird, zusammen mit dem entstehenden Abrieb der Lamellen, über eine bedarfsgesteuerte Ölkühlung abgeführt. Die abtransportierten Partikel werden in einem Filter gesammelt und können zu regelmäßigen Serviceintervallen (noch zu definieren) entsorgt werden (Abbildung 11). Um Planschverluste zu minimieren werden die Lamellen und Getriebebauteile unterschiedlich mit Öl versorgt, so dass die Ölversorgung der Lamellen während inaktiver Bremse ganz abgeschaltet werden kann.

3.2.1.2 Berechnung und Konstruktion Getriebe-Bremse-Einheit

3.2.1.2.1 Grundausslegung

Die Grundausslegung basiert zunächst auf einigen wichtigen Grunddaten des Demonstrators. Das sind z.B. die Daten der Rad-Reifen-Kombination und die geplante Gesamtmasse des Fahrzeugs. Der Prototyp wurde mit den Rad-Reifen-Dimension 225/45R18 ET45 an der Vorderachse bestückt und auf 1650 kg ausgelegt. Damit wurde im nächsten Schritt ein Fahrdynamik-Modell aufgebaut, das zum Ziel hat, die Antriebs- und Bremsmomente zu ermitteln, die für ein Beschleunigen auf 150 km/h und Verzögern aus gleicher Geschwindigkeit benötigt werden. Es wurden dabei die maximalen Raddrehzahlen untersucht und das maximale Moment bestimmt das ein Reifen an der Vorderachse (im Kontakt zur Straße) übertragen kann. Im zweiten Schritt wurde dann ein Elektromotor ermittelt, dessen Drehzahl- und Drehmomentkennlinie zum simulierten Modell des Demonstrators passt. Auf Grund der ermittelten Spezifikationen wurde für den Antrieb der YASA P400RS ausgewählt, da dessen Eigenschaften die Anforderungen gut erfüllen. Bei 150 km/h weist der Demonstrator eine Raddrehzahl von ca. 1135 Umdrehungen/min auf. Dazu wurde dann eine geeignete Getriebeübersetzung gewählt, bei der die E-Motor-Drehzahl unterhalb der Maximaldrehzahl (8000 Umdrehungen/min) bleibt und in diesem Lastpunkt noch ausreichend Drehmoment zum Antreiben sowie zum elektrischen Verzögern zur Verfügung steht. Zur Erfüllung dieser Vorgaben wurde eine Getriebeübersetzung von 6,27 gewählt. Bei dem zu Beginn gewählten und im Folgenden umgesetzten Konzept 4 (Abbildung 9) handelt es sich um ein Planetengetriebe, neben dem sich eine Lamellenbremse befindet. Der Aufbau der Getriebe-Bremse-Einheit ist auf Abbildung 13 als Explosionsansicht dargestellt und wird nachfolgend genauer beschrieben.

3.2.1.2.2 Systemaufbau

Im Folgenden ist die Konzeption der kompakten Getriebe-Bremse-Einheit als 3D Explosionszeichnung dargestellt (Abbildung 13) und die Subkomponenten näher erläutert. Insbesondere wird noch auf den Ölkreislauf der Einheit eingegangen (Abbildung 11).

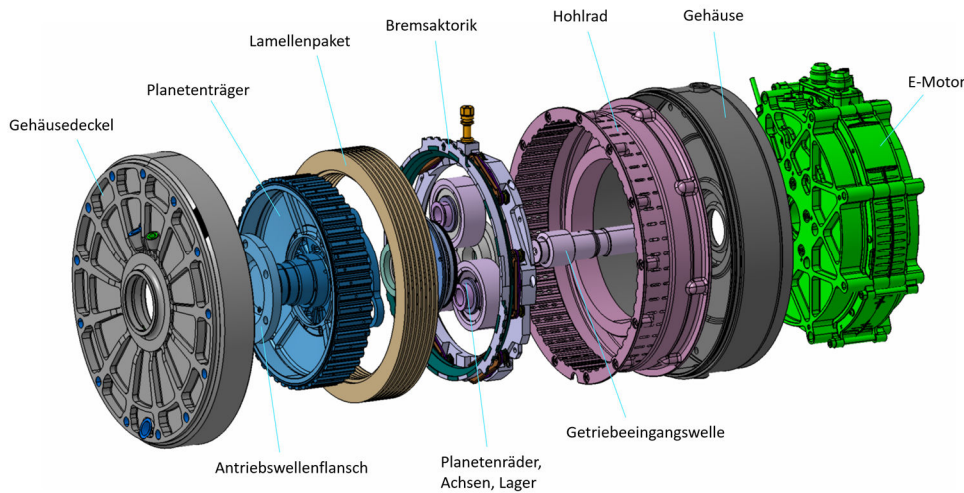


Abbildung 13: Explosionsansicht der ZEDU1-Getriebe-Bremse-Einheit mit E-Motor

Wie der Abbildung 13 zu entnehmen ist, ist die kompakte, geschlossene Bremseinheit mit einem geschlossenen Gehäuse mit Gehäusedeckel (grau) auf den E-Motor (grün) aufgesetzt. Innerhalb des Gehäuses befinden sich ein einstufiges Planetengetriebe sowie die Lamellenbremse. Das System besteht hauptsächlich aus folgenden Komponenten:

Planetenträger:

Das zentrale Element des Planetengetriebes bildet der Planetenträger. Er lagert (mittels Achsen) die Planetenräder, stellt die Anbindung an den Antriebswellenflansch sicher und führt die inneren Lamellen des Lamellenpakets.

Antriebswellenflansch:

Um die Getriebe-Bremse-Einheit mit dem Rad zu verbinden, kommt der Antriebswellenflansch (und die Antriebswelle) zum Einsatz. Das Bauteil besitzt dazu eine Steckverzahnung, die eine formschlüssige Verbindung zum Planetenträger bildet. Zudem bietet eine Flanschfläche mit Verschraubungspunkten die Möglichkeit eine Antriebswelle zu befestigen.

Hohlrads & Planetenräder:

Das Hohlrads ist fest mit dem Getriebegehäuse verbunden und führt die Außenlamellen der Lamellenbremse. Außerdem beinhaltet es die Hohlradsverzahnung, die für ein Planetengetriebe benötigt wird. Darin rotieren die Planetenräder und stützen sich dagegen ab.

Getriebeeingangswelle mit Sonnenrad:

Die Getriebeeingangswelle überträgt Drehzahl und Drehmoment vom und zum E-Motor. Dazu bildet ein Teil der Welle das Sonnenrad, das im Planetengetriebe sitzt und mit den Planetenrädern im Eingriff steht. Auf der anderen Seite besitzt diese Welle eine Steckverzahnung, die mit dem E-Motor verbunden ist.

Lamellenpaket & Bremsaktuierung:

Die Lamellenbremse besteht aus zwei Teilen. Zum einen enthält sie das Lamellenpaket, dessen Innenlamellen mit dem Planetenträger verbunden sind und mit Raddrehzahl rotieren. Wohin gegen sich die Außenlamellen am Hohlrad abstützen und somit stillstehen. Sie bilden die Reibpaarung im Bremsfall und nehmen das mechanische Bremsmoment auf. Zum anderen kommt eine Bremsaktuierung zum Einsatz, die durch den hydraulischen Bremsdruck eine axiale Kraft auf das Lamellenpaket bewirkt und damit eine Reibung im Lamellenpaket erzeugt.

Getriebegehäuse & -deckel:

Sie umschließen das Getriebe und die Bremse und bieten eine Verschraubungsmöglichkeit zum E-Motor. Außerdem stellen sie sicher, dass Schmierstoffe nicht heraustreten und Verschmutzungen nicht eindringen können. Sie sorgen auch dafür, dass kein Bremsenabrieb in die Umwelt gelangt und die Antriebseinheit somit emissionsfrei betrieben werden kann.

3.2.1.2.3 Konstruktion

Die Getriebe-Bremse-Einheit wurden auskonstruiert und finalisiert, um im nächsten Schritt in die Bauteilbeschaffung starten zu können. Dazu wurden die einzelnen Konzepte und deren Komponenten zunächst in detaillierte CAD-Modelle überführt, sowie fertigungsgerechte Zeichnungen erstellt. Bei ausgewählten hochbelasteten Bauteilen wurden FEM-Rechnungen zum Nachweis der Festigkeit durchgeführt. Nachfolgend sind die wesentlichen Bauteile bzw. Baugruppen und Komponenten beschrieben.

Sonnenrad, Planetenräder, Planetenträger und das Hohlrad

Die kraftübertragenden Elemente des Getriebes, die sich innerhalb des Getriebegehäuses befinden, sind das Sonnenrad, die Planetenräder, der Planetenträger und das Hohlrad (Abbildung 14). Die Zahnräder stehen durch die Evolventenverzahnung dauerhaft miteinander im Eingriff.

Von außen wird der Antriebswellenflansch in den Planetenträger eingesteckt und der E-Motor auf die Getriebeeingangswelle aufgesteckt. Dazu sind an beiden Seiten jeweils Steckverzahnungen angebracht, die auf wechselnde Belastungen ausgelegt sind (Umkehr der Momentenrichtung durch Beschleunigen und Bremsen).

Die beiden zentralen Elemente des Getriebes sind der Planetenträger und das Hohlrad, wobei sie auch jeweils die Bremslamellen führen und die mechanischen Bremskräfte aufnehmen müssen. Beide sind im Zuge der Dimensionierung und Konstruktion mittels FEM berechnet, um sicherzustellen, dass die auftretenden Momente und Kräfte abgestützt werden können.

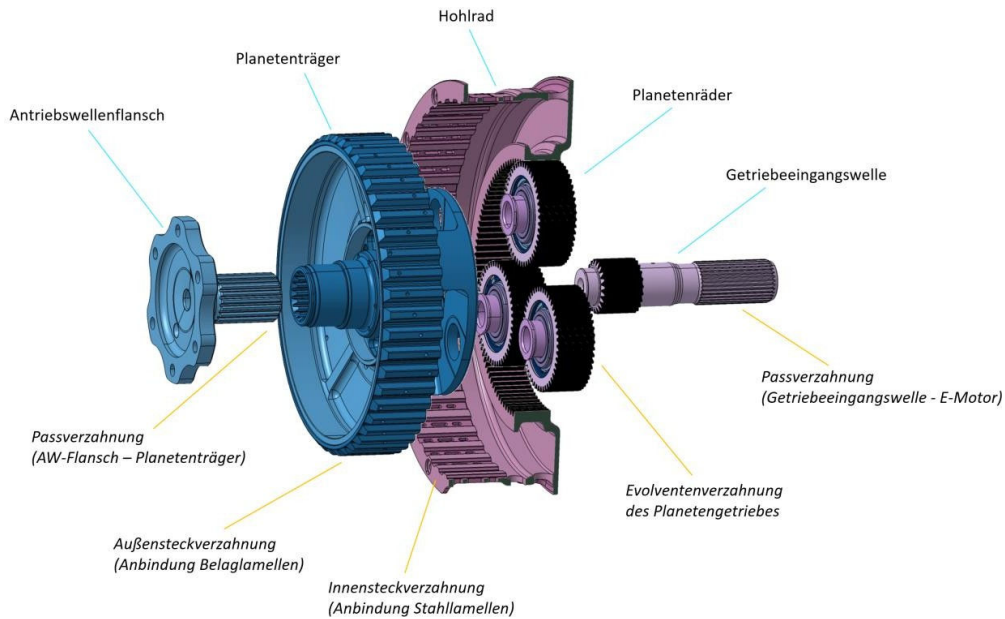


Abbildung 14: Planetengetriebe-Komponenten mit Verzahnungen (Hohlrad im Halbschnitt)

Zahnradatz

Bei der Auslegung des Zahnradatzes des Planetengetriebes wurde zunächst darauf geachtet, dass die Getriebeeingangswelle mit dem Sonnenrad einen Durchmesser von 35 mm (im Fußkreisdurchmesser) nicht unterschreitet. Dadurch kann die Steckverzahnung zur Anbindung des E-Motors (am anderen Wellenende) auch auf die Welle gebracht werden. Um die geometrische Forderung des Mindestdurchmessers zu halten, jedoch auch eine ausreichende Anzahl an Zähne zu erhalten und um einen erhöhten Überdeckungsfaktor zu erreichen, wurde ein niedriges Normalmodul von 1,75mm (gemäß Vorzugsreihe II, DIN 780) und für das Sonnenrad eine Zähnezah von 22 gewählt.

Anschließend wurden die geometrischen Einschränkungen des Hohlrads untersucht. Hierbei muss das Hohlrad deutlich kleiner als der umgebende Innendurchmesser der Bremsaktuierung sein. Daraus resultiert die Bedingung, dass der Hohlradverzahnung im Außendurchmesser (Fußkreisdurchmesser) maximal 210 mm zur Verfügung stehen. Hieraus und mit der Vorgabe, dass eine Übersetzung von 6,27 erreicht werden muss, ergeben sich folgende, in der Tabelle 1 dargestellten Verzahnungsdaten. Die Breite der Zahnräder hat maßgeblichen Einfluss auf die Zahnfestigkeit und somit auch auf die Belastbarkeit des Getriebes. Für den vorliegenden Fall ist eine Breite von 30 mm gewählt und mittels Berechnungen zur Verzahnungsfestigkeit bestätigt worden. Die Berechnungen basieren auf den auftretenden Maximal-Momenten und Drehzahlen. Sie berücksichtigen außerdem auch die Lastprofile:

Vollbeschleunigung 0 – 150 km/h (dauerhaft anliegendes max. Beschleunigungsmoment)

- Notbremsen 150 – 0 km/h (dauerhaft anliegendes max. Verzögerungsmoment)
- Bergabfahrt (Kombination aus beschl. und verzög. Moment)

Die auftretenden Maximal-Momente sind theoretisch begrenzt durch die Haftreibgrenze des Demonstrator-Reifens, die bei ca. 1750 Nm liegt. Diese Begrenzung entfällt jedoch am Antriebsstrang-Prüfstand und der YASA-E-Motor könnte grundsätzlich ein Peakmoment von 370 Nm stellen, was in einem Moment von 2319,9 Nm (durch die Übersetzung 6,27) resultiert. Des Weiteren könnten die Belastungen auf die Verzahnung in der Praxis auch aufgrund von Lastspitzen, Momentenstöße, Lastwechselstöße, Regelungenaugigkeiten beim Re-kuperieren etc. über die theoretisch auftretenden Lasten steigen.

Tabelle 1: Verzahnungsdaten Planetengetriebe

Parameter	Wert
Übersetzung	6,27
Normalmodul	1,75
Achsabstand	61,000 mm
Schrägungswinkel	0° (geradverzahnt)
Anzahl Planeten	3
Zahnradbreite	30 mm
Sonnenrad	
Zähnezahl	22
Teilkreisdurchmesser	38,5 mm
Kopfkreisdurchmesser	44,0260 mm
Fußkreisdurchmesser	35,5466 mm
Planetenrad	
Zähnezahl	47
Teilkreisdurchmesser	82,25 mm
Kopfkreisdurchmesser	84,9009 mm
Fußkreisdurchmesser	76,3657 mm
Hohlrad	
Zähnezahl	116
Teilkreisdurchmesser	203 mm
Kopfkreisdurchmesser	200,0038 mm
Fußkreisdurchmesser	208,7288 mm

Somit muss der Verzahnung eine zusätzliche Sicherheit eingeräumt werden, um nicht bei der ersten kurzen Überlast bereits zu versagen. Außerdem wirkt sich dies positiv auf die zu erwartende Lebensdauer der Verzahnung aus. Es wird daher ein Überlastfaktor von 1,9 gewählt.

Lagerkonzept

In der Getriebe-Bremse-Einheit befinden sich mehrere Lagerstellen für die rotierenden Bauteile Planetenträger, die Planetenräder und die Getriebeeingangswelle.

Die folgende Ansicht in Abbildung 15 zeigt einen Schnitt durch die Einheit, in dem die Lager schematisch dargestellt und farbig hervorgehoben sind:

- Lager 1 (grün) und Lager 2 (orange) halten die Getriebeeingangswelle innerhalb des Planetenträgers.
- Lager 3 (cyan) und Lager 4 (blau) stützen den Planetenträger gesamt im Getriebegehäuse.
- Lager 5 (gelb) hält jeweils ein Planetenrad.

Es wurden hierfür Wälzlager gewählt, da diese im Gegensatz zu Gleitlagern keine Schmierung unter kontinuierlichem Öldruck benötigen. Eine Beölung der Lagerstellen ohne dauerhaft hohen Öldruck ist innerhalb des Gehäuses (insb. an den Lagern 1 und 5) aufgrund des beengten Bauraums und der rotierenden Komponenten einfacher zu realisieren. Auch bei kurzer Unterbrechung der Beölung ist daher kein Versagen der Lager zu erwarten.

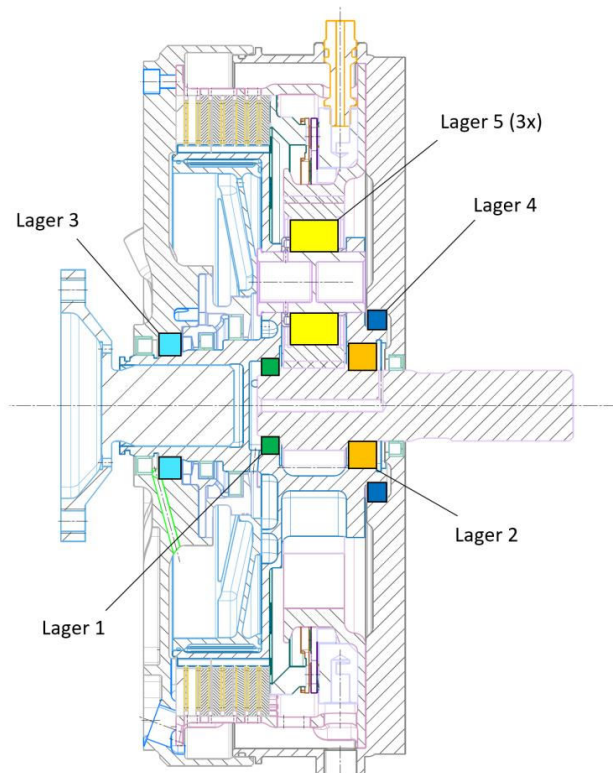


Abbildung 15: ZEDU1-Lageranordnung in der Getriebe-Bremse-Einheit

Zur Dimensionierung der Lagerstellen wurden neben der Betrachtung der statischen Belastung auch Lebensdauer-Berechnungen mit den gleichen Randbedingungen, wie bei der Verzahnungsberechnung durchgeführt. Es wird dazu ebenfalls eine Kombination der maximal auftretenden Belastungen inkl. deren zeitlichen Anteile am jeweiligen Fahrzyklus (Vollbeschl., Notbremsung, Bergabfahrt) berücksichtigt. Bei der Auswahl des Lagertyps sind diese Lagerbelastungen und auch die geometrischen Anforderungen durch die unterschiedlichen Positionen innerhalb der Einheit berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Berechnung der zu erwartenden Lebensdauern sind in der Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Berechnete Lager-Lebensdauern

Lagerbezeichnung	Lagertyp	Modifizierte Referenzlebensdauer*
Lager 1	61906	5.238 h
Lager 2	6007-C3	932 h
Lager 3	61910	97626 h
Lager 4	61815-Y	1499 h
Lager 5	3206-XL-BD	150 h

Bei den berechneten Lebensdauern handelt es sich um die Zeitdauer, unter der ein Lager die Einwirkung der Belastung, des mittleren Betriebsspiels, der Schmierung und der Sauberkeit mindestens ertragen sollte.

Hierbei sei daraufhin gewiesen, dass diese errechnete Zeitangabe die Dauer beschreibt, die das Lager unter seiner vorherrschenden Spitzenbelastung mindestens ertragen sollte. Da in den Fahrzyklen jedoch nicht dauerhaft die höchste Last gefahren wird, werden die Lager eine deutlich längere Zeitdauer als die durch die Berechnung evaluiert aushalten können.

Lamellen

Die für das ZEDU1-Fahrzeug entwickelte mechanische Bremse kommt mit einem Lamellenpaket pro Getriebe-Bremse-Einheit zum Einsatz. Dieses besteht aus acht Stahllamellen und sieben Belaglamellen, die im Wechsel angeordnet sind. Alle Außenlamellen (Stahllamellen) stützen sich am Hohlrad ab und stehen daher still. Die Innenlamellen (Belaglamellen) sind an den Planetenträger angebunden und rotieren mit Raddrehzahl. Um diese formschlüssig anzubinden, besitzt jede Lamelle am Innen- bzw. Außendurchmesser eine Steckverzahnung, die eine axiale Verschiebung zulässt. Im Bremsfall bewirkt eine Axialkraft das Zusammen-drücken aller Lamellen zueinander, sodass durch die Reibung der Beläge zu den Stahllamellen ein Bremsmoment erzeugt wird.

Das Lamellenpaket ist auf Abbildung 16 in Einbauposition gezeigt. Deutlich zu erkennen sind die Zähne, die am Außendurchmesser mit dem Hohlrad und am Innendurchmesser mit dem Planetenträger im Eingriff stehen (das Getriebegehäuse ist dazu transparent dargestellt).

Die Lamellen sind so dimensioniert, dass im Falle einer Notbremsung von 150 km/h bis zum Stillstand abgebremst werden kann. Die Lamellen bringen dafür das benötigte Bremsmoment von 2625 Nm (Haftreibgrenze des Demonstrator-Reifens; 1750 Nm + Sicherheit 1,5) auf. Des Weiteren ist auch die Bergabfahrt als Lastfall zur Auslegung herangezogen, bei der die mechanische Bremse mehrfach hintereinander zum Einsatz kommt. Die Lamellen sind für den nasslaufenden Betrieb entwickelt, bei dem als Fluid ein mineralisches Öl gewählt ist.

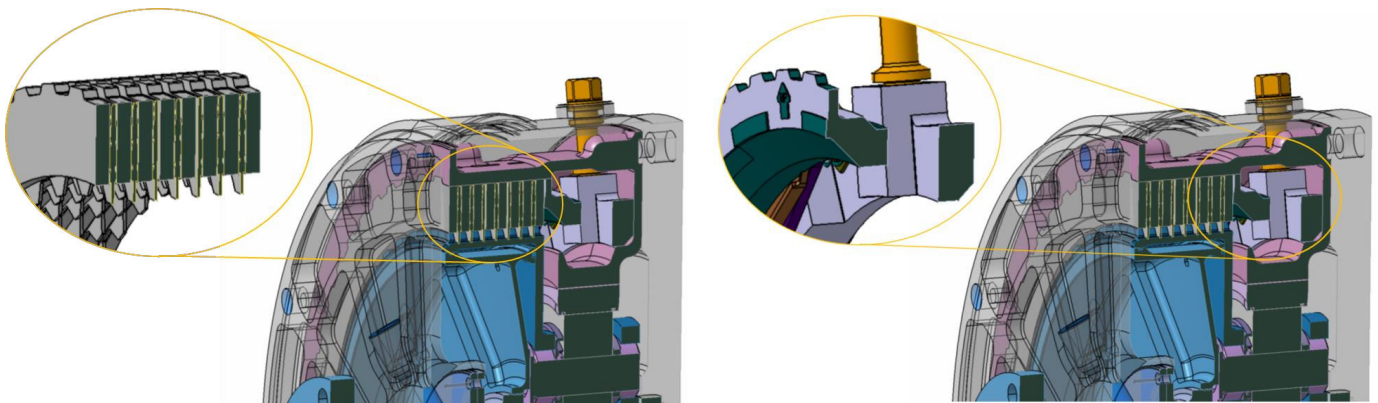


Abbildung 16: ZEDU1-Lamellenpaket in der Getriebe-Bremse-Einheit

Abbildung 17: ZEDU1-Bremsaktuierung in der Getriebe-Bremse-Einheit

Das hat die folgenden Vorteile:

- Kühlwirkung des Fluids: verbesserter Wärmetransport ggü. Trockenlauf
- Schmierwirkung des Fluids: nahezu kein Verschleiß zu erwarten
- Reinigungswirkung des Fluids: geringfügig auftretender Abrieb wird vom Öl in den Filter gefördert

Eine genauere Darstellung des Ölkreislaufs und der Beölung der Lamellen ist im Kapitel *Ölkreislauf* beschrieben.

3.2.1.2.4 Bremsaktuierung

Die Bremsaktuierung (Abbildung 17) bildet neben dem Lamellenpaket die andere Hauptkomponente der mechanischen Lamellen-Bremse. Sie setzt den hydraulischen Leitungsdruck im Bremssystem in eine Axialkraft um und drückt damit das Lamellenpaket zusammen.

Damit sich die Axialkraft möglichst gleichmäßig auf das Lamellenpaket verteilt, besteht die Aktuierung aus sechs Zylindern mit Hubkolben (Abbildung 18), die auf den Umfang verteilt sind. Sie sind über ringförmig angeordnete Bohrungen miteinander verbunden und an die Bremshydraulik angeschlossen. Gemeinsam drücken sie auf den Druckring, der wiederum auf die erste Lamelle des Lamellenpakets drückt.

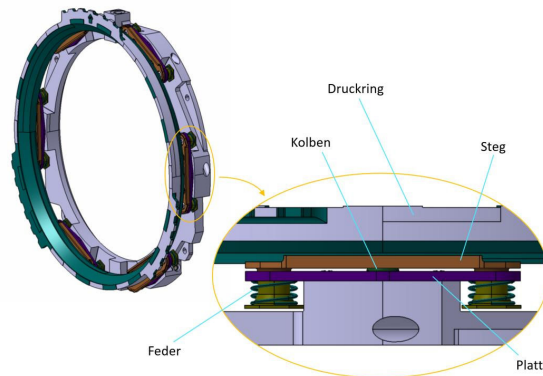


Abbildung 18: ZEDU1-Bremsaktuierung mit Kolbenrückstellung

Jeder Kolben besitzt eine eigene Rückstellung, um das Lamellenpaket nach der Bremsung zu lösen. Dazu sind je zwei Federn neben einem Kolben gegen eine verschraubte Platte gespannt, die auf Abbildung 18 violett eingefärbt ist. Mittels des orangenen Stegs wird der Kolben in seine Anfangsposition zurückgeschoben.

Am Kolben sind des Weiteren zwei Dichtungen angebracht: Eine dichtet von Innen gegenüber der Bremsflüssigkeit und dem Hydraulikdruck ab. Es muss davon ausgegangen werden, dass sich das Mineralöl der Lamellen überall in der Getriebe-Bremse-Einheit verteilen wird und somit auch an die Bremsaktuierung gelangen wird. Daher befindet sich eine zweite Dichtung in Form einer Schutzkappe außen auf jedem Kolben.

Die Aktuierung ist auf zwei Fälle ausgelegt. Diese Fälle decken zum einen den Normal-Mode ab und zum anderen den Failure-Mode.

Normal-Mode

Der Normalfall beschreibt den ordnungsgemäßen Zustand und die Funktionsfähigkeit des Bremssystems. Dabei arbeiten die Vehicle Control Unit (VCU), das Brake By Wire System (BBW), die elektrische Rekuperation und alle weiteren Komponenten fehlerfrei.

Für eine Vollbremsung benötigt die Bremsaktuierung einer Getriebe-Bremse-Einheit mindestens 112 bar Hydraulikdruck und 3800 mm³ Verdrängungsvolumen. Druck und Volumen liefert dabei das BBW-System (s. Abbildung 19).

Falls bei der VCU, dem BBW oder weiteren am Bremssystem beteiligten elektrischen Komponenten ein Fehler oder eine Störung vorliegt, schaltet das BBW in den Failure-Mode (Abbildung 20). Das bedeutet, dass das BBW-System auf hydraulischen Durchtrieb schaltet und damit die Betätigungsleitung vom Bremspedal nun direkt in Verbindung mit der Hydraulikleitung an die Aktuierung steht.

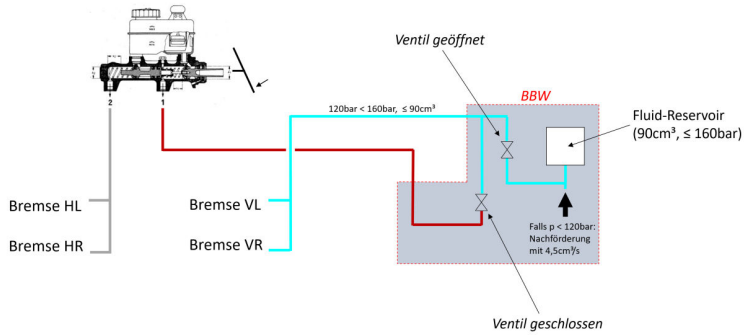


Abbildung 19: ZEDU1 Bremssystem (Normal-Mode)

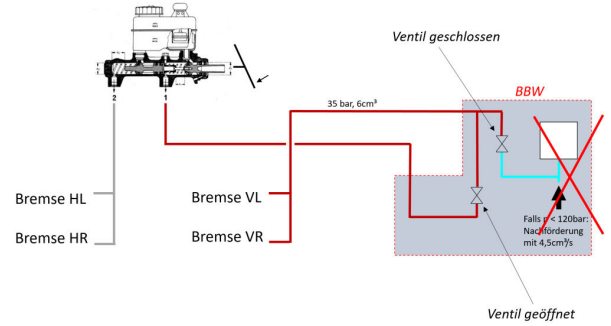


Abbildung 20: ZEDU1 Bremssystem (Failure-Mode)

Failure-Mode

Somit kann auch in diesem Falle das Fahrzeug ohne weitere Bremskraftunterstützung in mindestens 168 m aus 100 km/h zum Stillstand gebracht werden kann. Dazu darf maximal eine Pedalkraft von 50 daN (500N) durch die Fußbetätigung benötigt werden. Diese Anforderung stellt die Regelung ECE R13-H „Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Personenkraftwagen hinsichtlich der Bremsen [2015/2364]“ an die Auslegung von PKW-Bremssysteme und wurde bei der Auslegung eingehalten.

Die Bremsaktuierung erhält hierbei das Verdrängungsvolumen und den Hydraulikdruck direkt vom Bremspedal des Fahrers. Es reichen für die oben genannte Vorgabe ca. 23 bar und 3000 mm³ aus. Bei 500 N Pedalkraft entstehen im vorderen Hydraulikkreis des Demonstrators bereits ein Hydraulikdruck von ca. 35 bar und ein Gesamt-Verdrängungsvolumen von 6000 mm³.

Somit bietet die hydraulische Auslegung des Aktors auch für den Failure-Mode einen Sicherheitsfaktor von 1,5.

3.2.1.3 Gehäuse und Chassis-Anbindung

Die Einhausung der Getriebe-Bremse-Einheit besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen. Das rückseitige Gehäuse ermöglicht die Verschraubung mit dem E-Motor mit Hilfe von acht Stiftschrauben (Abbildung 21). Damit ist der Motor fest an die Einheit angebunden.

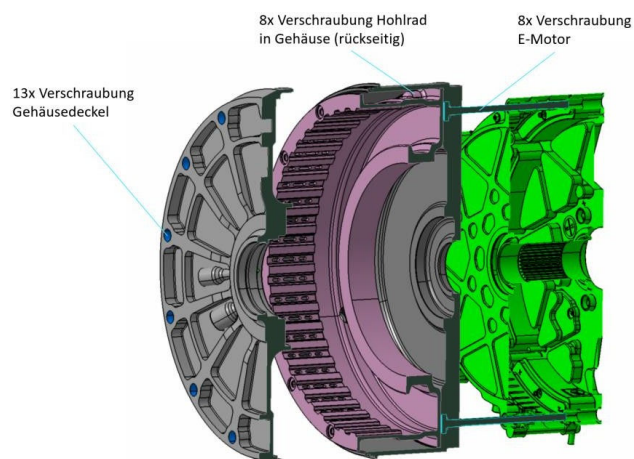


Abbildung 21: Verschraubung einer Getriebe-Bremse-Einheit

Das Hohlrad wird von außen in das Gehäuse geschraubt, damit die darin auftretenden Kräfte und Momente ans Gehäuse übertragen werden können. Abschließend wird der Gehäusedeckel von außen aufgeschraubt.

Beide Getriebe-Bremse-Einheiten (inkl. beider E-Motoren) werden außerdem durch eine mittige Flanschplatte miteinander verschraubt, sodass die Antriebsgruppe einen kompakten und verwindungssteifen Verbund bildet, der als Gesamtes gegenüber dem Fahrzeugchassis gelagert und verschraubt wird. Zur Anbindung der Getriebe-Bremse-Einheiten an das umgebende Fahrzeug-Chassis sind Anbindungspunkte am Gehäuse konstruiert.

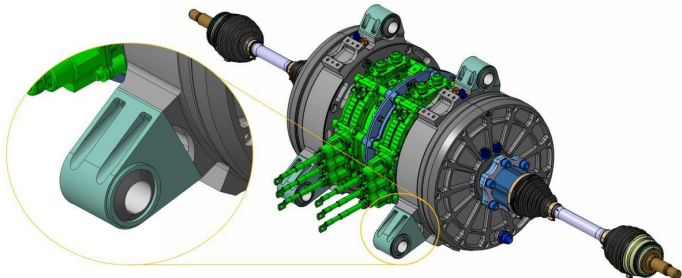


Abbildung 22: Anbindungspunkte am Gehäuse

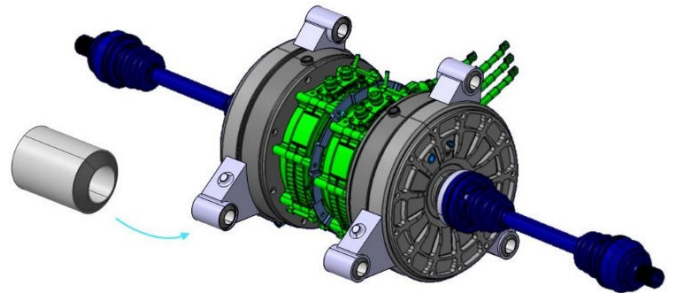


Abbildung 23: Lagerung mittels Gummi-Metall-Buchsen

Die konstruierten Lagerböcke, die Gummi-Metall-Buchsen beinhalten, werden von außen an das Gehäuse geschraubt (Abbildung 22). Die verwendet zur Lagerung werden Gummi-Metall-Buchsen (Abbildung 23) besitzen einerseits ausreichende Festigkeit, um den auftretenden Kräften und Momenten standhalten zu können und andererseits eine dämpfende Wirkung. Durch diese Entkopplung werden mögliche auftretende Geräusche und Vibrationen nicht direkt in den Fahrzeugrahmen eingeleitet. Die Gummi-Metall-Buchsen sind sog. Megi-HL-Buchsen, die sowohl radial als auch axial beansprucht werden können, ohne dass sich der Gummianteil gegenüber den Metallteilen verschiebt.

3.2.1.4 FMEA Getriebe-Bremse-Einheit

Für das Subsystem Getriebe-Bremse-Einheit wurde eine FMEA erstellt. Diese wurde softwaregestützt mit dem Tool „Apis“ durchgeführt. Die getroffenen Bewertungen und Maßnahmen dienen als Richtlinien für die konstruktive Auslegung der Bauteile. Die Dokumentation der FMEA ist durch ein nach VDA-Richtlinien erstelltes Gesamtdokument dargestellt worden. Dieses wurde für die ZEDU1 Projektpartner veröffentlicht und ist bei Bedarf zugänglich.

Exemplarisch für die Berechnungsumfänge soll in diesem Bericht die Berechnung des Hohlrades dargestellt werden. Weitere Berechnungen sind den ausführlichen Dokumentationsunterlagen die ebenfalls für die ZEDU1 Projektpartner veröffentlicht wurden, zu entnehmen. Beispielhaft sind nachfolgend ein Teil der FEM-Berechnungen des Hohlrad gezeigt.

Bei den Belastungen auf das Hohlrad müssen prinzipiell zwei Fälle untersucht werden. Zum einen tritt eine Kräfteinleitung durch das Lamellenpaket (beim mechanischen Bremsen) auf die Innensteckverzahnung auf. Zum anderen müssen die Kräfte, die im Planetengetriebe durch die Planetenräder (beim elektr. Bremsen und Beschleunigen) wirken, abgestützt werden.

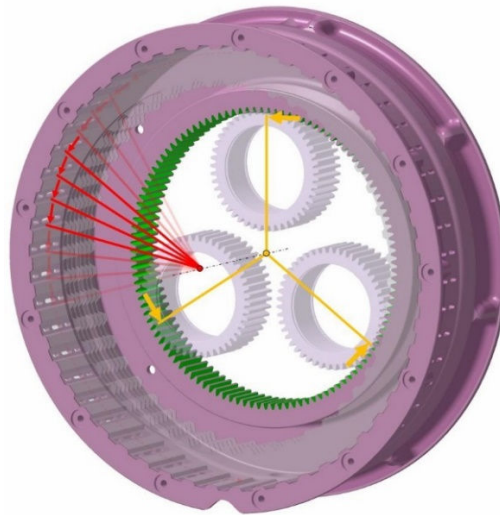


Abbildung 24: Schema der Kräfteinleitungen auf das Hohlrad

Die Getriebekräfte sind auf Abbildung 24 schematisch in Gelb dargestellt. Die abstützenden Kräfte der Stahllamellen wirken an jedem Zahn der Innensteckverzahnung jeweils auf eine Zahnflanke und sind beispielhaft an ein paar Positionen in Rot skizziert.

Im FEM-Modell ist die Geometrie des Hohlrades vernetzt und die Kräfteinleitungspunkte sind entsprechend nachgebildet (Abbildung 25).

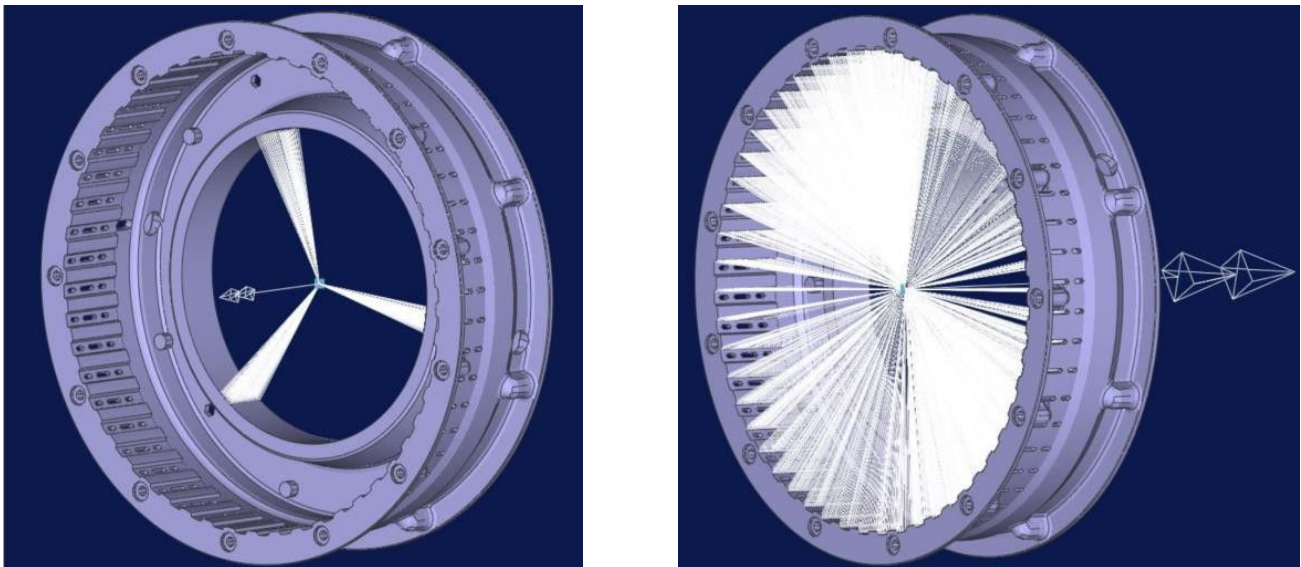


Abbildung 25: FEM-Modell des Hohlrades mit Kräfteinleitung (links: Getriebekräfte, rechts: Lamellenkräfte)

Das Hohlrad ist im Modell an den Verschraubungspunkten zum Gehäuse hin fixiert, sodass dieselben Belastungen wie im verbauten Zustand im Gehäuse simuliert werden. Die Kräfte, die in der Berechnung aufgeprägt werden, sind durch die maximalen Momente beim Beschleunigen und Bremsen und durch die Bauteilgeometrie definiert. Diese wurden auf 2319,9 Nm im Planetengetriebe und 2625 Nm durch die Lamellenbremse evaluiert. Daraus resultierend wurde für das das Hohlrades gewählt:

- Material 31CrMoV (1.8519)
- Dehngrenze (Rp0,2): 900 N/mm²
- Zugfestigkeit (Rm): 1100 N/mm²

Unter Belastung ergeben sich die auf Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellten v. Mises-Vergleichsspannungen für Getriebe und die Lamellen.

Den Berechnungen ist zu entnehmen, dass im Getriebe durch die Kräfte Maximalspannungen von bis zu 60 N/mm^2 auftreten. Die Abstützung der Lamellen führt sogar zu noch geringeren Spannungen (max. 36 N/mm^2). Da beide Lastfälle sehr deutlich unter den zulässigen Spannungen des gewählten Stahls liegen, sind die auftretenden Lasten unkritisch und somit die Dimensionierung des Hohlrades als sicher anzusehen.

Insgesamt sind alle Komponenten über die Berechnung so optimiert, dass sie alle Lastfälle mit ausreichender Sicherheit erfüllen.

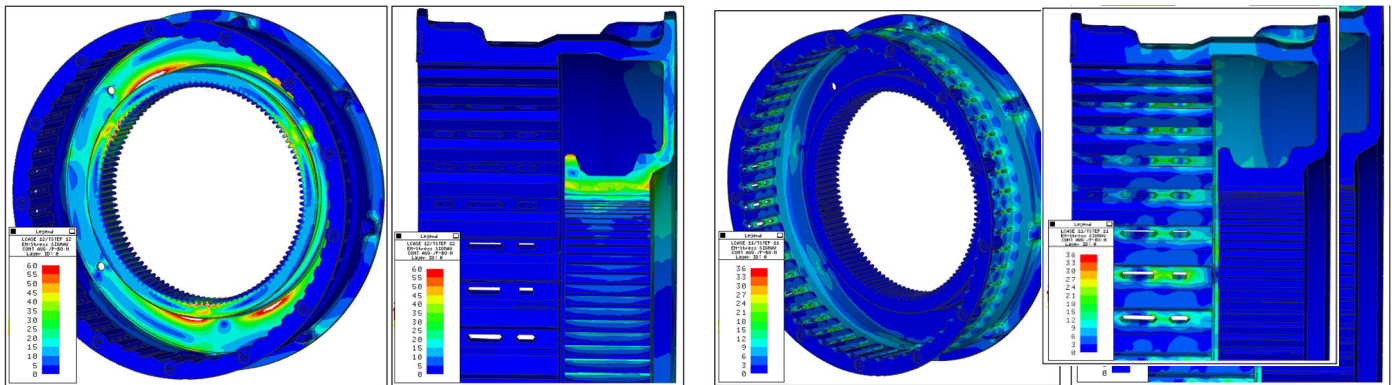


Abbildung 26: Vergleichsspannungen (v. Mises) unter Belastung durch die Getriebekräfte

Abbildung 27: Vergleichsspannungen (v. Mises) unter Belastung durch die Lamellenkräfte

3.2.1.5 Festigkeitsberechnung

Die beiden Gehäuse mit den jeweiligen Lagerböcken sind vorab auf Festigkeit berechnet worden. Hierzu ist der Vorderwagen des Demonstrators inkl. den Getriebe-Bremse-Einheiten im FEM-Modell nachgebildet und mit den auftretenden Lastfällen beaufschlagt (Abbildung 28).

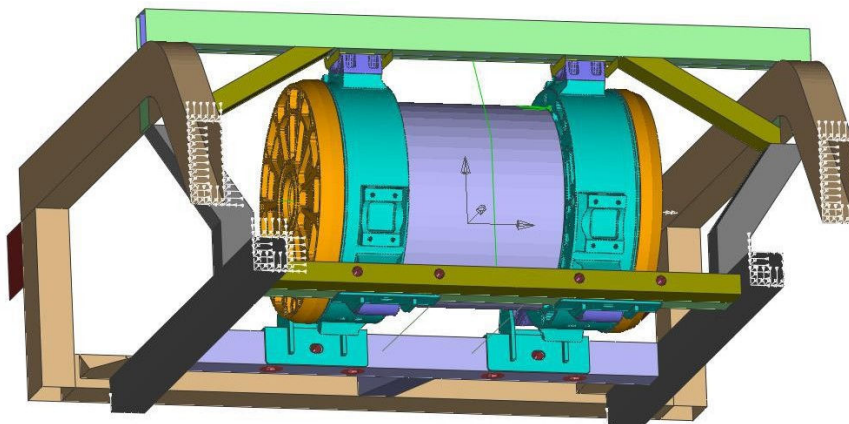


Abbildung 28: FE-Modell zu Berechnung der Chassisanbindung

Die Lastfälle zur Berechnung sind:

- LF1: Torsionsmoment Bremse (2x) (Normalbetrieb)
- LF2: Beschleunigung 35g in X (Crashlast)
- LF3: Beschleunigung 18,8g in Y (Crashlast)
- LF4: Beschleunigung 5g in Z (Crashlast)

Bei den Berechnungen ist die Masse der beiden Getriebe-Bremse-Einheiten inkl. beider E-Motoren mit 150 kg hinterlegt. Auf Grund der Berechnungen wurde als Material des Gehäuses und der Lagerböcken als AlZnMgCu1.5 (EN AW 7075) mit diesen relevanten Daten gewählt:

- Dehngrenze (Rp0,2): 460 N/mm²
- Zugfestigkeit (Rm): >500 N/mm²

Durch die Lastfälle ergeben sich die auf Abbildung 29 bis Abbildung 32 dargestellten v. Mises-Vergleichsspannungen. Die FEM-Berechnung zeigen sehr deutlich, dass die Beanspruchung im normalen Betrieb (Torsionsmoment durch die Lamellenbremse) mit 52 N/mm² völlig unkritisch sind. Eine höhere Beanspruchung liegt durch die Beschleunigungen in X, Y oder Z vor. Jedoch ist auch hier der maximale Wert von 127 N/mm² (bei LF3) deutlich unterhalb der Materialdehngrenze von 460 N/mm² und somit auch im zulässigen Rahmen.

Die Anbindungen und das Gehäuse der Getriebe-Bremse-Einheiten sind ausreichend stabil, um sowohl die Belastungen bei normaler Nutzung, als auch den Crash-Fall mit hohen Beschleunigungen ertragen zu können. Die Verschraubungen zwischen den E-Motoren und den Gehäusen wurden während der Konstruktionsphase nochmals optimiert. Die im Ausgangskonzept zur rückseitigen Verschraubung des E- Motors an das Gehäuse Stehbolzen sind vorgesehen gewesen (Abbildung 21), die zwischen Hohlrad und Gehäuserückwand von innen eingesetzt werden sollten.

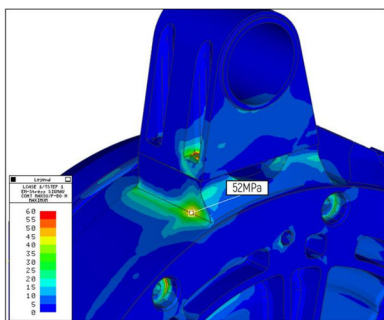


Abbildung 29: Vergleichsspannungen (v. Mises) unter Torsionsmoment der Lamellenbremse (LF1)

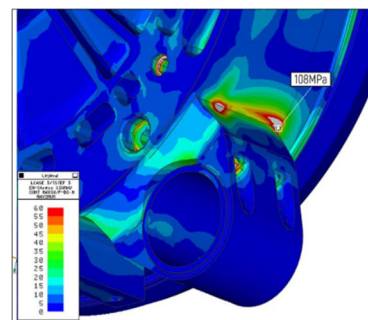
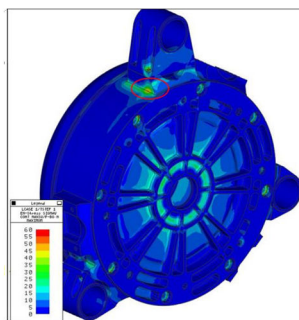


Abbildung 30: Vergleichsspannungen (v. Mises) unter Beschleunigung 35 g in X (LF2)

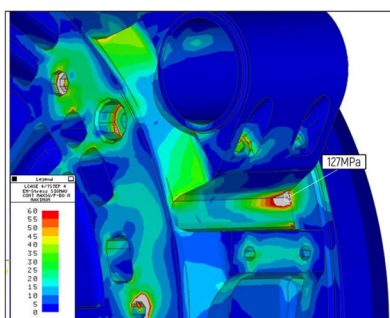
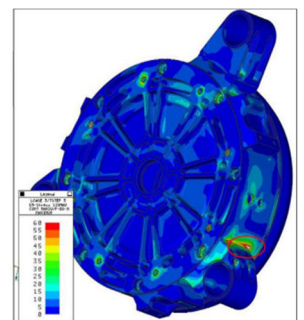


Abbildung 31: Vergleichsspannungen (v. Mises) unter Beschleunigung 18,8 g in Y (LF3)

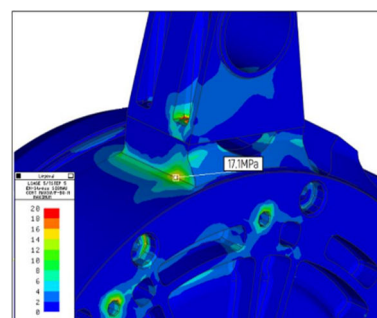
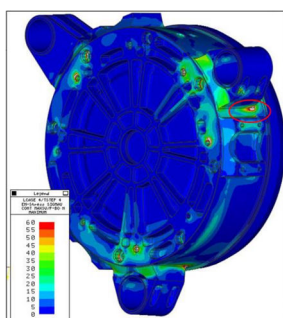
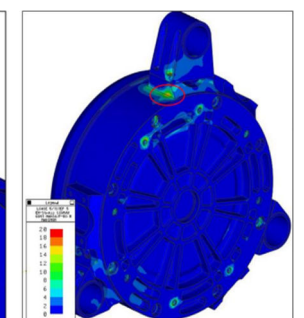


Abbildung 32: Vergleichsspannungen (v. Mises) unter Beschleunigung 5 g in Z (LF4)



Beim finalen Designstand wurden Zylinderschrauben mit Innensechskant anstatt der Stehbolzen verwendet (Abbildung 108), die von außen verschraubt werden. Dadurch ergeben sich diese Vorteile:

- Die Bohrungen an der Gehäuserückwand können als Sacklochbohrung ausgeführt werden und nicht wie zuvor als Durchgangsbohrung. Das Risiko von Undichtigkeiten entfällt damit an diesen Positionen.

- Das Montagematerial bzw. in diesem Fall die Innensechskantschrauben können getauscht werden, ohne die Getriebe-Bremse-Einheit komplett auseinandernehmen zu müssen.

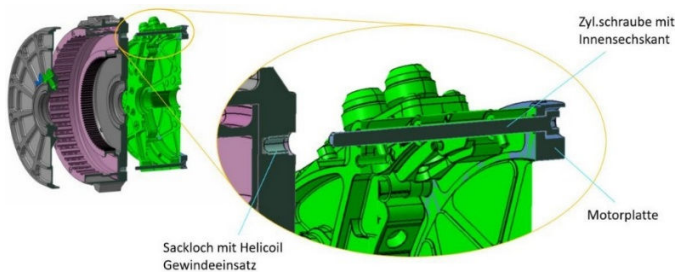


Abbildung 33: Geänderte Verschraubung einer Getriebe-Bremse-Einheit

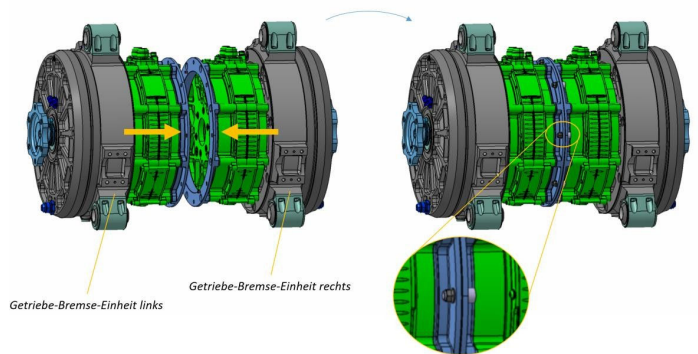


Abbildung 34: Verschraubung beider Getriebe-Bremse-Einheiten miteinander

Mittels beider Motorplatten, die jeweils an die E-Motoren geschraubt sind, können beide Getriebe-Bremse-Einheiten verschraubt werden. Sie bilden damit einen in sich stabilen Gesamtverbund (Abbildung 34).

3.2.1.6 Ölkreislauf der Getriebekomponenten

In der Schnittansicht (Abbildung 35) ist die Beölung der Getriebeverzahnung und der Wälzlager zu sehen. Der Ölzufluss verzweigt sich zu Beginn und fließt sowohl zum Lager 3 und durch den Planetenträger.

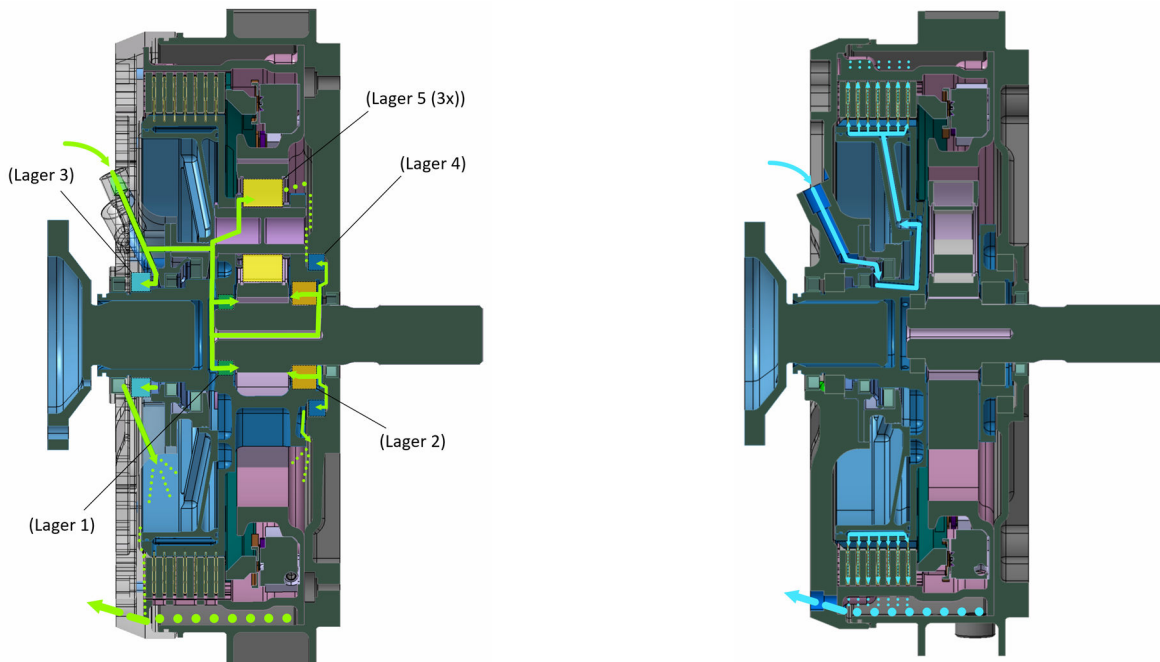


Abbildung 35: ZEDU1-Beölung der Getriebekomponenten (grün) und Lamellen (blau)

Von dort aus führen weitere Bohrungen das Öl zum Lager 1, in den Planetenbolzen und in die Getriebeeingangswelle. Durch das Lager 1 gelangt das Öl an die Verzahnung, wird durch die Rotation der Zahnräder verteilt und nach außen an die Gehäusewand geschleudert.

Weiterhin besitzt der Planetenbolzen eine Bohrung, die das Fluid an die Lager 5 (3x) bringt. Die mechanischen Bauteile innerhalb der Getriebe-Bremse-Einheit müssen aktiv gekühlt und geschmiert werden, da beim Antreiben und insbesondere beim Abbremsen aufgrund von Reibung Wärme entsteht.

- Das Öl besitzt diese Aufgaben:
- Kühlung und Schmierung der - Lamellenbremse
- Getriebeverzahnung
- Wälzlager
- Aufnahme von Abrieb und sonstigen Verschmutzungen, sowie
- Abtransport in den Filter

Die Lamellenbremse und die Getriebekomponenten benötigen in unterschiedlichen Situationen unterschiedliche Ölmengen. Getriebeverzahnung und Wälzlager müssen kontinuierlich mit geringen Mengen Öl versorgt werden. Die Lamellenbremse benötigt hingegen nur im mechanischen Bremsfall (d.h. wenn sie betätigt wird) den Ölzufuhr. Es werden dadurch die Schleppmomente reduziert, wenn nicht gebremst wird.

Die exakte Ölverteilung und die Volumenströme werden durch Versuche am Prüfstand bestimmt. Es wird im ersten Schritt von folgenden Größen ausgegangen:

- Getriebekomponenten: $\dot{V} < 2 \text{ l/min}$
- Lamellenbremse: $\dot{V} \geq 15 \text{ l/min}$
- Hydraulischer Druck beider Kreisläufe $< 2 \text{ bar}$

Die Einheit besitzt zur Versorgung aller Komponenten somit zwei getrennte Ölkreisläufe, die aus separaten Anschlüssen am Gehäuse gespeist werden. Um den Volumenstrom zum Kreislauf der Lamellenbeölung regulieren und im Nicht-Bremsfall auch stoppen zu können, wird in der Anschlussleitung ein Regelventil integriert werden. In der Abbildung 35 ist der Kreislauf zur Beölung der Getriebekomponenten hellgrün gefärbt. In hellblau ist der Kreislauf zur Beölung der Lamellenbremse dargestellt. Beide Kreisläufe treffen erst am unteren Sammelpunkt zusammen. Von dort wird das Öl aus dem Gehäuse gesaugt. In der Schnittansicht ist die Beölung der Getriebeverzahnung und der Wälzlager zu sehen. Der Ölzufuhr verzweigt sich zu Beginn und fließt sowohl zum Lager 3 und durch den Planetenträger. Von dort aus führen weitere Bohrungen das Öl zum Lager 1, in den Planetenbolzen und in die Getriebeeingangswelle. Durch das Lager 1 gelangt das Öl an die Verzahnung, wird durch die Rotation der Zahnräder verteilt und nach außen an die Gehäusewand geschleudert. Weiterhin besitzt der Planetenbolzen eine Bohrung, die das Fluid an die Lager 5 (3x) bringt. Durch die Getriebeeingangswelle wird das Öl zum Lager 2 und Lager 4 transportiert. Von dort aus wird es ebenfalls an die Gehäusewand geschleudert und fließt schlussendlich in den unteren Bereich. Dort befindet sich die Sammelstelle, aus der das erwärmte Öl aus der Einheit gesaugt wird. Der Ölfluss kühlt und schmiert die Lamellenbremse. Durch den Anschluss am Gehäusedeckel strömt das Öl im Falle einer mechanischen Bremsung zunächst in Richtung der Rotationsachse des Planetenträgers, um dort ringförmig zwischen zwei Wellendichtringen gesammelt zu werden. Mit Hilfe mehrere Bohrungen, die von dieser Sammelstelle durch den Planetenträger verlaufen, kann das Öl in einen Ringspalt direkt unter das Lamellenpaket gebracht werden. Von dort wird es durch das Lamellenpaket geschleudert, da die Belagoberfläche der Innenlamellen viele kleine Nuten besitzt. Durch Schlitze im Hohlrad kann das Öl heraustreten und an der Gehäusewand nach unten zur Sammelstelle fließen, von wo aus es gemeinsam mit dem Öl des anderen Kreislaufs abgesaugt wird. Diese Art der Beölung nutzt den Vorteil, dass durch die Fliehkraft (entstanden durch die Rotation des Planetenträgers) der Öltransport durch das Lamellenpaket massiv unterstützt wird. Sie erfolgt jedoch

auch mit Überdruck von innen nach außen. Dadurch kann nach einer Bremsung, die z.B. bei niedrigen Geschwindigkeiten oder beim Stillstand endet, weiterhin Öl durch das Paket gebracht werden. Nach dem Austritt aus dem Gehäuse wird der Öl-Volumenstrom durch einen Filter gepumpt, der das Öl von möglichen Partikeln reinigt. Die Filterspezifikation ist auf das „empfindlichste“ Element der Getriebe-Bremse-Einheit ausgerichtet, welches hierbei die Wälzlager sind. Die dazu erforderliche Ölspezifikationen sind in der Tabelle 3 aufzeigt.

Tabelle 3: Ölfilterspezifikation

Parameter	Wert
Öl-Daten	Mineralisches Öl (ähnl. ATF-Öl)
Öl-Temperaturbereich	10 – 100°C
Volumenstrom durch Filter nach ISO 16889:	15 l/min - max. 30 l/min (ein Filter pro Einheit)
Partikelgröße	25 µm
βx-Wert	75
nach ISO 4406:	
Reinheitsklasse:	- / 17 / 14

Um das Planetengetriebe mit den Lagern und die Lamellenbremse mit Öl zu schmieren und zu kühlen, benötigt die Getriebe-Bremse-Einheit Anbindungen an den Ölkreislauf des Kühlsystems. Dabei muss zusätzlich unterschieden werden, dass beim Planetengetriebe ein deutlich geringerer Volumenstrom als an der Lamellenbremse benötigt wird. Jedoch soll die Lamellenbremse nur im Bremsfall mit Öl versorgt werden, um in allen anderen Situationen die Verluste durch entstehende Schleppmomente reduzieren zu können. Um die Drosselung der Lamellenbeölung zu realisieren wurde in diese Leitung ein Magnetventil integriert, das elektrisch angesteuert werden kann und nur dann Öffnet, wenn rein mechanisch (also mit der Lamellenbremse) gebremst wird (Abbildung 37).

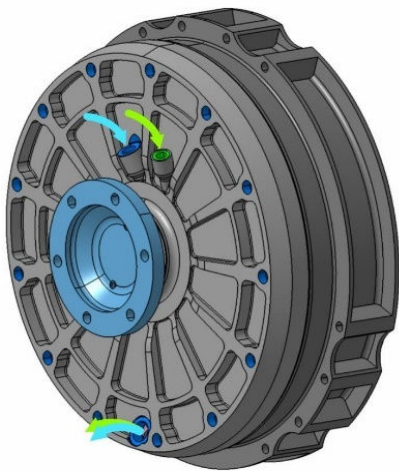


Abbildung 36: Öl Zu- und Abfluss der Getriebe-Bremse-Einheit

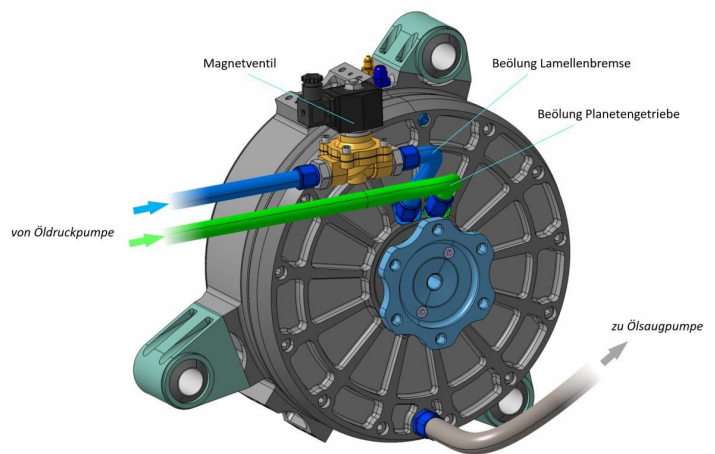


Abbildung 37: Ölversorgung der Getriebe-Bremse-Einheit

3.2.1.8 Vermessung Getriebe-Bremse-Einheit

3.2.1.8.1 Prüfstands Aufbau

Zur Inbetriebnahme der ZEDU1 Getriebe-Bremse-Einheit, zur Sicherstellung der Softwarefunktionen und zur Vorabprüfung der im Lastenheft verlangten Lastzyklen, werden auf dem Antriebstrangprüfstand der HWA AG Versuche durchgeführt.

Hierfür ist ein Halterahmen angefertigt worden, der im Aufbau der Frontstruktur des Demonstrator- Fahrzeugs entspricht (Abbildung 39). Darin sind die beiden Getriebe-Bremse-Einheiten (GBE) in der gleichen Position und mit den gleichen Anbindungspunkten des Fahrzeugs verschraubt. Die nachgebildete Frontstruktur ist zur Abstützung auf einen Prüfstandtisch fixiert. Dabei sind die Antriebswellen der Getriebe-Bremse-Einheiten anstatt mit den Rädern, mit je einer Radmaschine verbunden, die dem Prüfling sämtliche Fahrwiderstände und Fahrprofile aufprägen können.

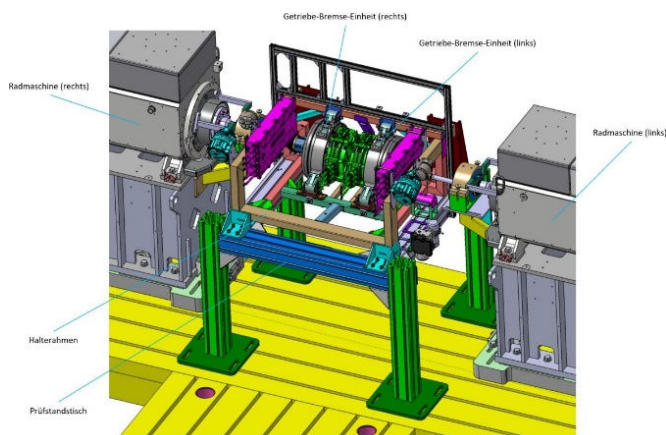


Abbildung 39: Befestigung der GBE am Prüfstand

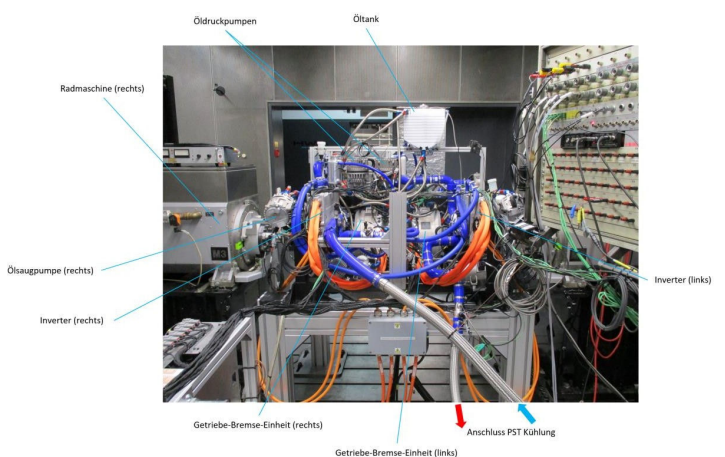


Abbildung 40: Aufbau der GBE am Prüfstand

Es wurden die benötigten Hochvolt-, Kühlsystem- und Bremskomponenten verbaut und mit der GBE verbunden. Auch sie sind, dem Packaging soweit möglich folgend, in der gleichen Position angeordnet wo diese später auch im Fahrzeug ihren Platz finden werden (Abbildung 40).

Beim Prüfstands Aufbau wurde der Wasserkühler durch einen direkten Anschluss des Kühlsystems an die Prüfstandkühlung ersetzt. Mit dieser Konfiguration wurden Wassertemperatur-Vorgaben gesetzt und das Kühlsystem ausreichend erprobt.

Folgende Zyklen und Lastkollektive wurden so abgeprüft:

- WLTP Zyklus
- Bergabfahrt
- Realfahrt Stuttgart
- Bremsung 100 km/h (ohne Rekuperation)
- Bremsung 100 km/h (mit Rekuperation)

3.2.1.8.2 Messtechnik

Die folgende Tabelle 4 zeigt die Messtechnikliste der Sensorik am Prüfstand für den Antriebsstrang.

Tabelle 4: Messtechnikliste Sensorik Antriebsstrang

Powertrain		
Powertrain	Wasser-Temperatur Kühler ein	tCooltRadrIn
Powertrain	Wasser-Temperatur Kühler aus	tCooltRadrOut
Powertrain	Wasser-Temperatur Inverter ein	tCooltInvtrIn
Powertrain	Wasser-Temperatur Inverter aus	tCooltInvtrOut
Powertrain	Wasser-Temperatur Batterie aus	tCooltBatHvOut
Powertrain	Wasser-Temperatur OBC aus	tCooltObcOut
Powertrain	Isolationsöl-Temperatur WT ein	tOilIslHeatExchIn
Powertrain	Isolationsöl-Temperatur WT aus	tOilIslHeatExchOut
Powertrain	Getriebeöl-Temperatur WT ein	tOilGbxHeatExchIn
Powertrain	Getriebeöl-Temperatur WT aus	tOilGbxHeatExchOut
Powertrain	Wasser-Druck Kühler ein	pCooltRadrIn
Powertrain	Wasser-Druck Kühler aus	pCooltRadrOut
Powertrain	Wasser-Druck Inverter ein	pCooltInvtrIn
Powertrain	Wasser-Druck Inverter aus	pCooltInvtrOut
Powertrain	Wasser-Druck Batterie ein	pCooltBatHvIn
Powertrain	Wasser-Druck Batterie aus	pCooltBatHvOut
Powertrain	Wasser-Druck OBC ein	pCooltObcIn
Powertrain	Wasser-Druck OBC aus	pCooltObcOut
Powertrain	Isolationsöl-Druck WT ein	pOilIslHeatExchIn
Powertrain	Isolationsöl-Druck WT aus	pOilIslHeatExchOut
Powertrain	Getriebeöl-Druck WT ein	pOilGbxHeatExchIn
Powertrain	Getriebeöl-Druck WT aus	pOilGbxOut
Powertrain	Wasser-Volumenstrom	In_rateDynoCooltFlow
Powertrain	Isolationsöl-Volumenstrom	In_rateMotFrntLeIslFlow
Powertrain	Getriebeöl vor Getriebe Hauptstrom	In_rateGbxOilFlow
Powertrain	Getriebeöl vor Magnetventil	In_rateGbxVlvOilFlow
Powertrain	Lamellenpaket-Temperatur Einheit 1	tBrkDscFrntLeDyno
Powertrain	Lamellenpaket-Temperatur Einheit 2	tBrkDscFrntRiDyno
Powertrain	Bremskolben-Temperatur Einheit 1	tBrkPistFrntLeDyno
Powertrain	Bremskolben-Temperatur Einheit 2	tBrkPistFrntRiDyno
Powertrain	Temperatur Kühlmittel Eintritt (TWE)	tCooltRadrOutDyno
Powertrain	Druck Kühlmittel Eintritt (PWE)	pCooltRadrOutDyno

3.2.1.8.3 Messergebnisse

Die Getriebe-Bremse-Einheiten wurden bei HWA auf dem Antriebsstrangprüfstand aufgebaut und in vollständiger Achskonfiguration inkl. Antriebswellen und Kühlsystem erprobt. Wesentliche Umfänge waren die Inbetriebnahme der Komponenten E-Motoren+Inverter, PDU, VCU, Getriebe, Lammellenbremse, Brake-By-Wire, Hochvolt-, Kühlsystem- und Bremskomponenten.

Nach abgeschlossener Inbetriebnahme der Subkomponenten lag der Fokus auf der Inbetriebnahme und Applikation der neu entwickelten VCU Software zur Steuerung und Regelung von E-Motoren, Getriebe/Bremse Einheiten, sowie den Schmier- und Kühlkreisläufen. In umfangreichen Versuchsreihen wurden die Kennfelder bedatet und Softwarefunktionalitäten optimiert. Abschluss der Vermessung am Prüfstand bildete das Abprüfen einiger der im Lastenheft geforderten Fahrzyklen, wie WLTP, Stadtfahrt, Bergabfahrt und Vollbremsung. Exemplarisch dargestellt sind ein WLTP und eine Vollbremsung ohne Rekuperation.

WLTP Zyklus

Auf Abbildung 41 ist das am Prüfstand gefahrene Profil im Vergleich zu der Sollvorgabe aus der Gesetzgebung dargestellt. Es zeigt den WLTP Zyklus (Vorgabe in blau) am Batteriesimulator und Messung (rot). Die abgebildeten Kanäle im Graph stellen folgende Messgrößen dar:

- Sig_vVEeh [km/] Fahrzeuggeschwindigkeit
- Sig_ratPedAccr [%] Gaspedalstellung / Momentananforderung
- Arbn_tqActRgnMotFrnt [Nm] Rekuperationsmoment
- EBS_pCaliper_extPwm [bar] Bremsdruck

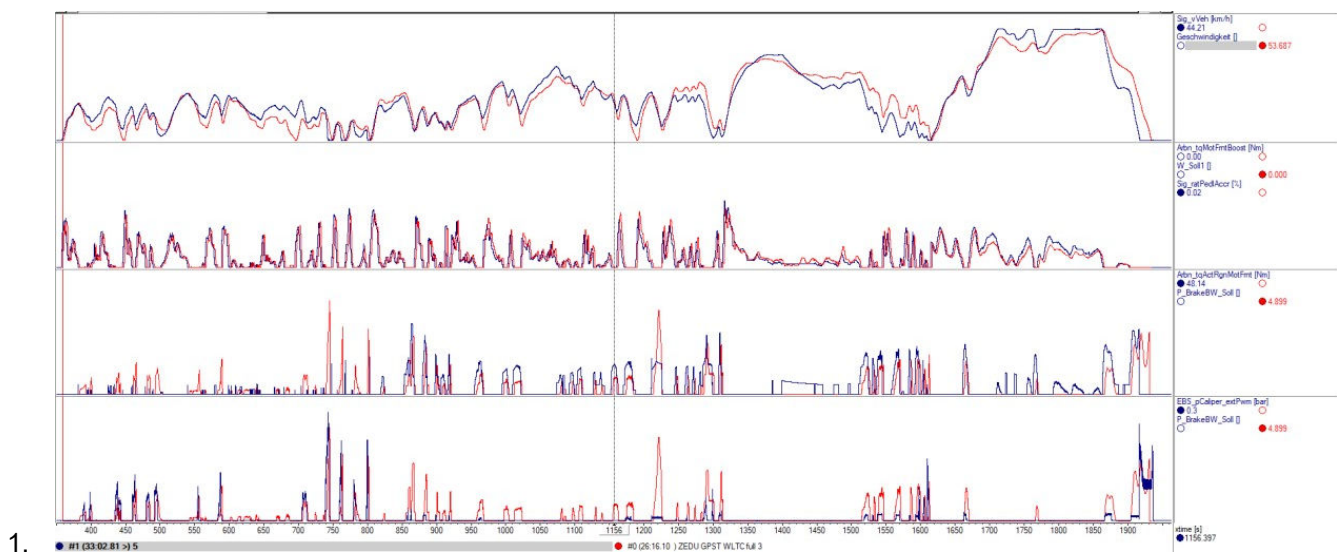


Abbildung 41: Soll/ Ist Vergleich WLTP Zyklus

Eine 100 %-tige Übereinstimmung war hier nicht das Ziel, da die lastenheftrelevanten Messungen im Fahrzeug stattfinden (am Prüfstand sind nicht alle elektrischen Verbraucher integriert und somit geben diese Messungen nicht das komplette Bild wieder) Vielmehr dienten die Versuche dazu, die Applikation der VCU Funktionalität zu prüfen, zu optimieren und erste Erkenntnisse über das Temperaturverhalten der Bremse zu gewinnen. Die Temperaturverläufe sind auf Abbildung 42 dargestellt und erwiesen sich im WLTP auf Grund der geringen Last auf der Lamellenbremse als absolut unkritisch.

Da am Batteriesimulator mit Momentenregelung gefahren wird, entspricht die Momentenanforderung besser dem Sollsignal als die Geschwindigkeitsanforderung. Die beiden unteren Messbereiche zeigen das Rekupe-
rationsmoment und den Bremsdruck. Gut zu sehen ist, dass im ersten Teil des Zyklus (bis ca. 810 s) fast nur
mechanisch gebremst wird, da die Batterie zu Beginn des Zyklus vollgeladen und somit nur sehr geringe
Rekuperation möglich ist.

Die Temperaturverläufe von Getriebeöl, Dielektrikum und Kühlwasser während dem WLTP Zyklus sind auf
Abbildung 42 dargestellt. Die angezeigten Kanäle sind:

- Sig_vVEeh [km/h] Fahrzeuggeschwindigkeit
- In_tOilGbxHeatExchIn [°C] Temperatur Getriebeöl Wärmetauscher Eingang
- In_tOilGbxHeatExchOut [°C] Temperatur Getriebeöl Wärmetauscher Ausgang
- In_tOillslHeatExchIn [°C] Temperatur Dielektrikum Wärmetauscher Eingang
- In_tOillslHeatExchOut [°C] Temperatur Dielektrikum Wärmetauscher Ausgang
- In_tColltRadrIn [°C] Temperatur Kühler Eingang
- In_ColltRadrOut [°C] Temperatur Kühler Ausgang

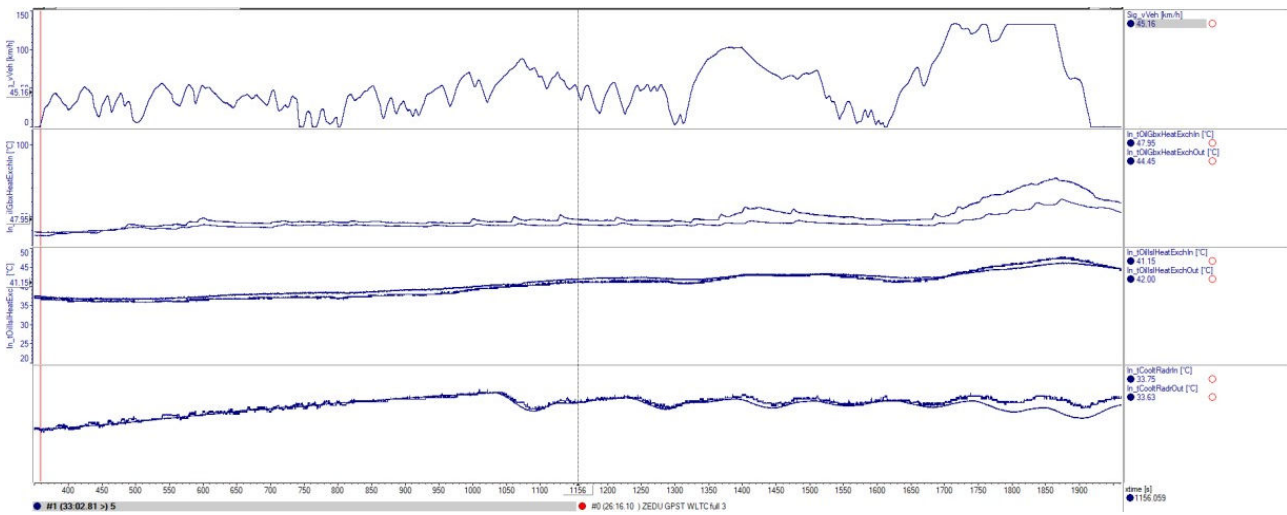


Abbildung 42: Kühlmitteltemperaturen WLTP Zyklus

Tabelle 5 zeigt die maximal erreichten Kühlmitteltemperaturen über den WLTP Zyklus.

Tabelle 5: Maximale Temperaturen des Kühlmittels im WLTP Zyklus

Kanalname	Max. Temperatur [°C]
In_tOilGbxHeatExchIn [°C]	76,95
In_tOilGbxHeatExchOut [°C]	61,94
In_tOillslHeatExchIn [°C]	47,85
In_tOillslHeatExchOut [°C]	46,36
In_tColltRadrIn [°C]	35,95
In_tColltRadrOut [°C]	35,46

Die Lamellenbeölung während dem WLTP Zyklus zeigt Abbildung 43. Es sind das Bit zur Öffnung des Ventils
der Lamellenbeölung und der Volumenstrom dargestellt.

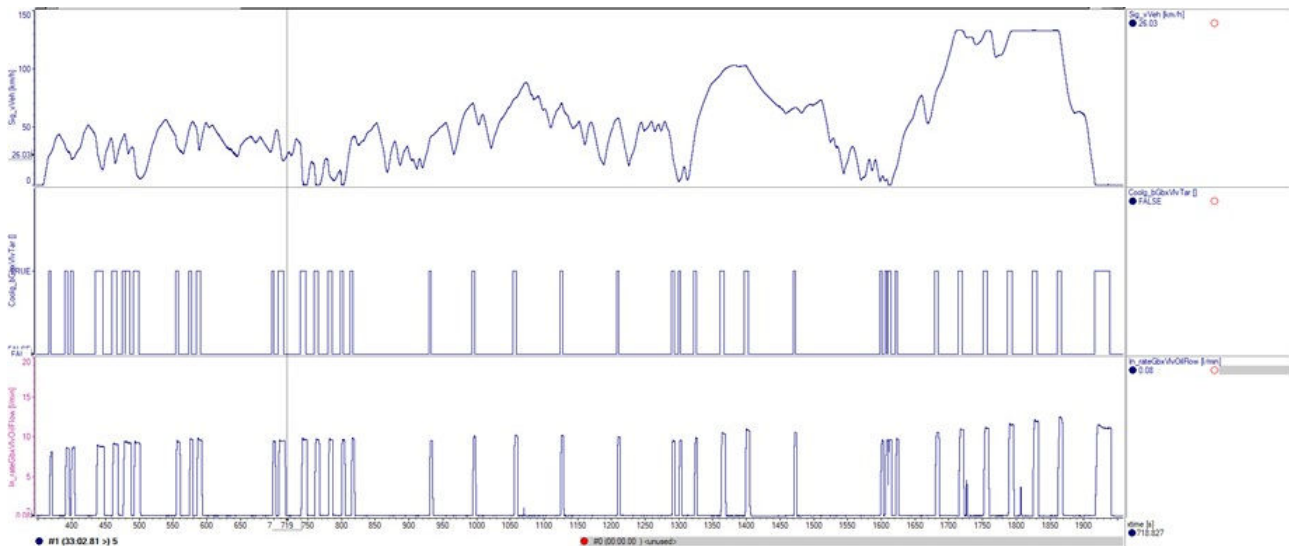


Abbildung 43: Lamellenbeölung im WLTP Zyklus

Die dargestellten Messgrößen sind:

- Sig_vVEeh [km/] Fahrzeuggeschwindigkeit
- Collg_bGbxVlvTar [-] Bit zur Öffnung des Ventils der Lamellenbeölung
- In_rateGbxVlvOilRow [l/min] Volumenstrom Lamellenbeölung

Die sich ergebenden Bremssystemtemperaturen zeigt Abbildung 44. Dargestellt sind:

- Sig_vVEeh [km/] Fahrzeuggeschwindigkeit
- tBrkDscFrntLeDyno [°C] Lammellentemperatur linke Seite
- tBrkDscFrntReDyno [°C] Lammellentemperatur rechte Seite
- tBrkPstFrntLeDyno [°C] Temperatur der Bremsaktuatorik linke Seite
- tBrkPstFrntReDyno [°C] Temperatur der Bremsaktuatorik rechte Seite

Die maximalen Bremssystemtemperaturen die während des WLTP Zyklus erreicht werden sind in der

Tabelle 6 zusammengestellt.

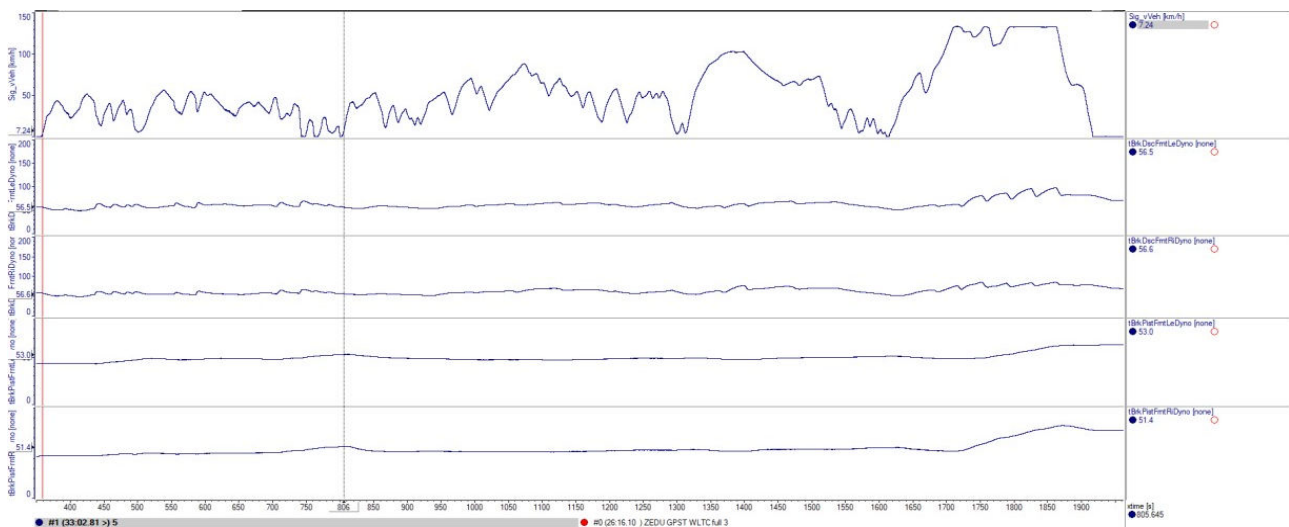


Abbildung 44: Temperaturen an der Lamellenbremse WLTP Zyklus

Tabelle 6: Maximal Temperaturen der Bremse imWLTP Zyklus

Kanalname	Max. Temperatur [°C]
tBrkDscFrntLeDyno [°C]	69,40
tBrkDscFrntReDyno [°C]	78,00
tBrkPstFrntLeDyno [°C]	53,20
tBrkPstFrntReDyno [°C]	51,50

Bergabfahrt

Abbildung 45 zeigt die Bergabfahrt (in blau) am Batteriesimulator im Vergleich zur Sollvorgabe (in rot). Die dargestellten Kanäle im Graph sind:

- Sig_vVEeh [km/] Fahrzeuggeschwindigkeit
- Sig_ratPedAccr [%] Gaspedalstellung / Momentananforderung
- Arbn_tqActRgnMotFrnt [Nm] Rekeuperationsmoment
- EBS_pCaliper_extPwm [bar] Bremsdruck

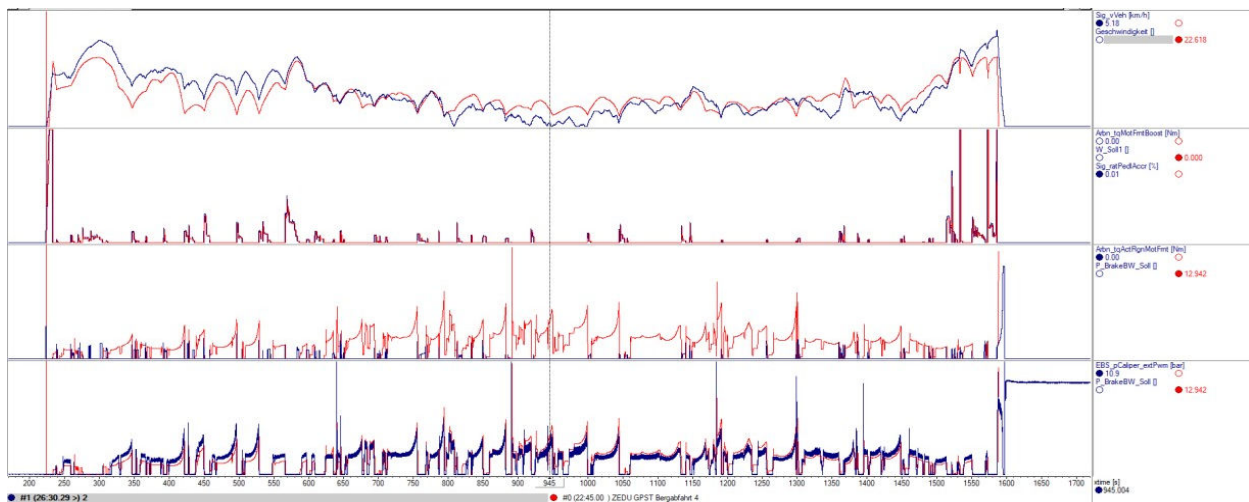


Abbildung 45: Soll/Ist Vergleich Bergabfahrt

Da am Batteriesimulator mit Momentenregelung gefahren wird, entspricht die Momentananforderung besser dem Sollsignal als die Geschwindigkeitsanforderung. Die Temperaturverläufe von Getriebeöl, Dielektrikum und Kühlwasser während dem WLTP Zyklus sind auf Abbildung 46 dargestellt. Die angezeigten Kanäle sind folgende:

- Sig_vVEeh [km/] Fahrzeuggeschwindigkeit
- In_tOilGbxHeatExchIn [°C] Temperatur Getriebeöl Wärmetauscher Eingang
- In_tOilGbxHeatExchOut [°C] Temperatur Getriebeöl Wärmetauscher Ausgang
- In_tOilIslHeatExchIn [°C] Temperatur Dielektrikum Wärmetauscher Eingang
- In_tOilIslHeatExchOut [°C] Temperatur Dielektrikum Wärmetauscher Ausgang
- In_tColltRadrIn [°C] Temperatur Kühler Eingang
- In_ColltRadrOut [°C] Temperatur Kühler Ausgang

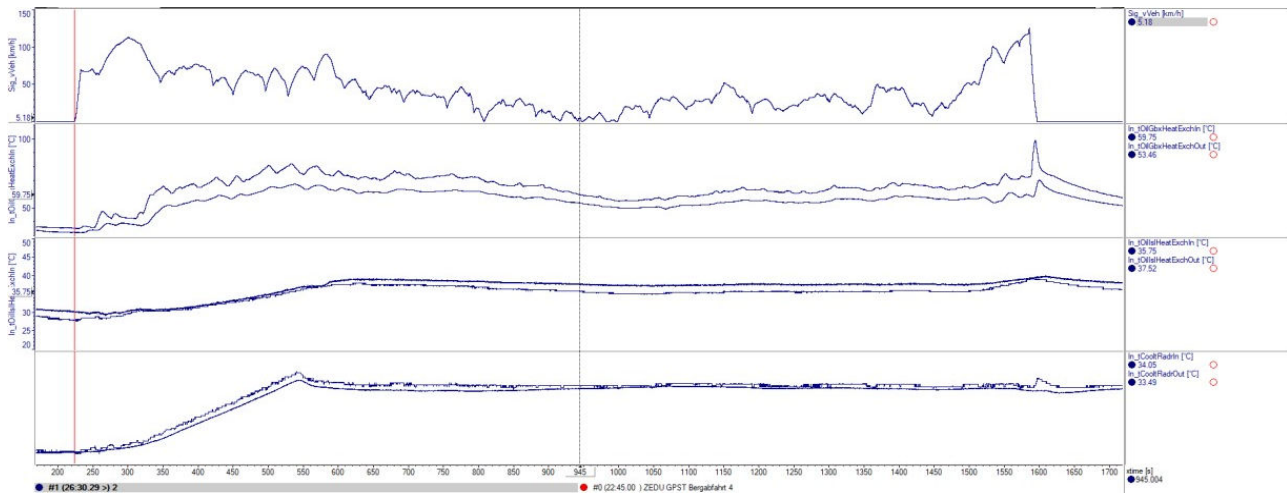


Abbildung 46: Kühlmitteltemperaturen Bergabfahrt

Tabelle 7 zeigt die maximalen Kühlmitteltemperaturen während der Bergabfahrt.

Tabelle 7: Maximal Temperaturen Kühlmittel Bergabfahrt

Kanalname	Max. Temperatur [°C]
In_tOilGbxHeatExchIn [°C]	98,95
In_tOilGbxHeatExchOut [°C]	7,19
In_tOillslHeatExchIn [°C]	40,01
In_tOillslHeatExchOut [°C]	39,55
In_tColltRadrIn [°C]	36,65
In_tColltRadrOut [°C]	35,06

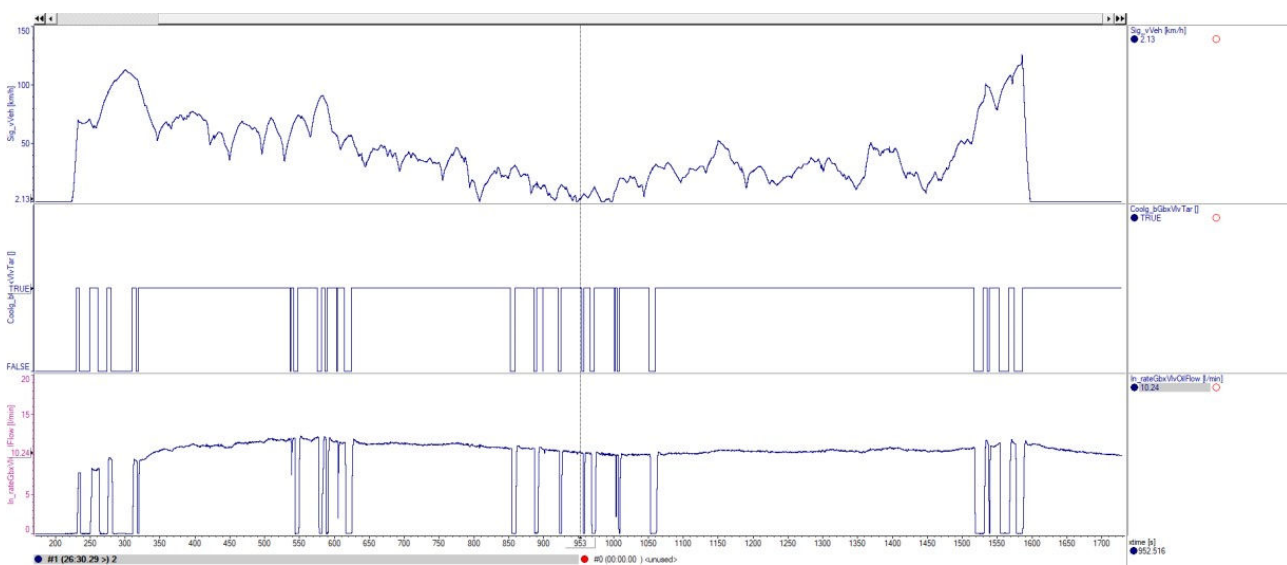


Abbildung 47: Lamellenbeölung Bergabfahrt

Die Lamellenbeölung während der Bergabfahrt zeigt Abbildung 47. Es sind das Bit zur Öffnung des Ventils der Lamellenbeölung und der Volumenstrom abgebildet. Aufgetragen sind die Kanäle:

- Sig_vVEeh [km/] Fahrzeuggeschwindigkeit
- Collg_bGbxVlvTar [-] Bit zur Öffnung des Ventils der Lamellenbeölung
- In_rateGbxVlvOilRow [l/min] Volumenstrom Lamellenbeölung

Die sich ergebenden Bremssystemtemperaturen zeigt Abbildung 48 und die maximalen Bremssystemtemperaturen während der Bergabfahrt sind in der

Tabelle 8 aufgetragen.

- Sig_vVEeh [km/] Fahrzeuggeschwindigkeit
- tBrkDscFrntLeDyno [°C] Lammellentemperatur linke Seite
- tBrkDscFrntReDyno [°C] Lammellentemperatur rechte Seite
- tBrkPstFrntLeDyno [°C] Temperatur der Bremsaktuatorik linke Seite
- tBrkPstFrntReDyno [°C] Temperatur der Bremsaktuatorik rechte Seite

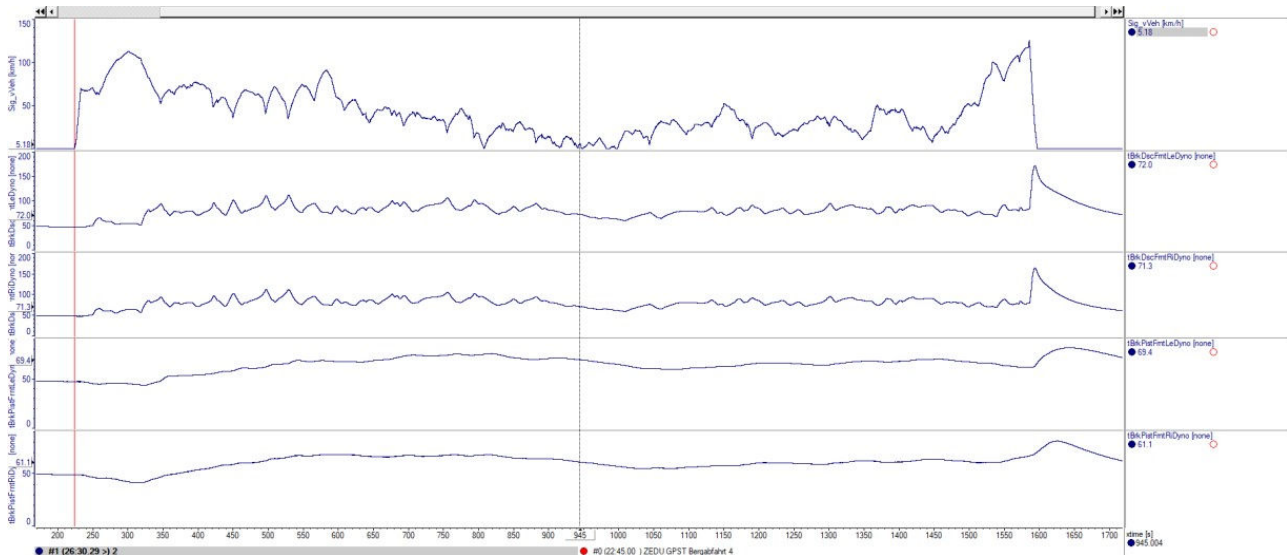


Abbildung 48: Temperaturen an der Lamellenbremse Bergabfahrt

Tabelle 8: Maximal Temperaturen Bremse Bergabfahrt

Kanalname	Max. Temperatur [°C]
tBrkDscFrntLeDyno [°C]	171,80
tBrkDscFrntReDyno [°C]	164,60
tBrkPstFrntLeDyno [°C]	81,50
tBrkPstFrntReDyno [°C]	81,10

Realfahrt Stuttgart

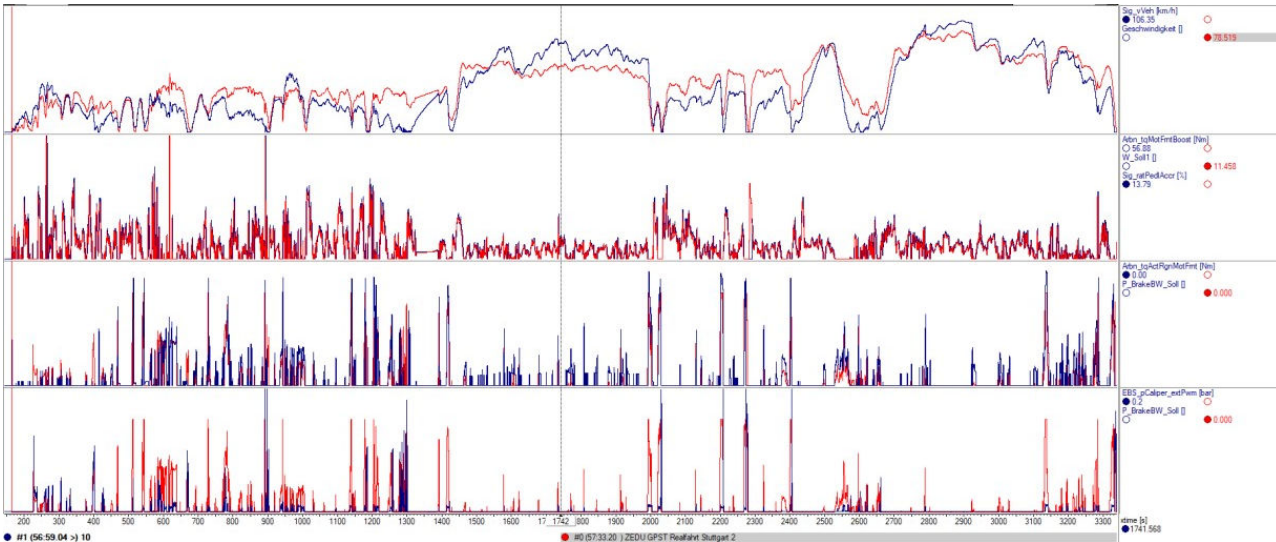


Abbildung 49 zeigt die Realfahrt (RDE) Stuttgart (blau) am Batteriesimulator im Vergleich zur Sollvorgabe (rot).

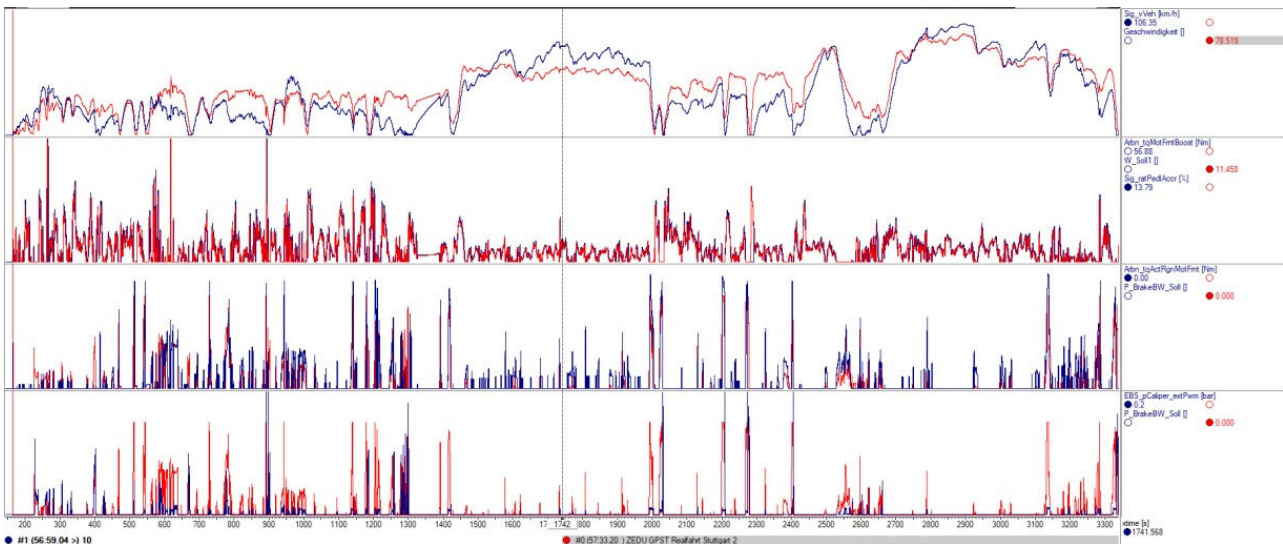


Abbildung 49: Soll/ Ist Vergleich Realfahrt Stuttgart

Die dargestellten Kanäle im Graph sind:

- Sig_vVEeh [km/h] Fahrzeuggeschwindigkeit
- Sig_ratPedAccr [%] Gaspedalstellung / Momentananforderung
- Arbn_tqActRgnMotFrnt [Nm] Rekeuperationsmoment
- EBS_pCaliper_extPwm [bar] Bremsdruck

Da am Batteriesimulator mit Momentenregelung gefahren wird, entspricht die Momentenanforderung besser dem Sollsignal als die Geschwindigkeitsanforderung. Die beiden unteren Messbereiche zeigen das Rekupe-
rationsmoment und den Bremsdruck.

Die Temperaturverläufe von Getriebeöl, Dielektrikum und Kühlwasser während der Realfahrt in Stuttgart sind auf Abbildung TP1.74 dargestellt. Die angezeigten Kanäle sind:

- Sig_vVEeh [km/] Fahrzeuggeschwindigkeit
- In_tOilGbxHeatExchIn [°C] Temperatur Getriebeöl Wärmetauscher Eingang
- In_tOilGbxHeatExchOut [°C] Temperatur Getriebeöl Wärmetauscher Ausgang
- In_tOillslHeatExchIn [°C] Temperatur Dielektrikum Wärmetauscher Eingang
- In_tOillslHeatExchOut [°C] Temperatur Dielektrikum Wärmetauscher Ausgang
- In_tColltRadrIn [°C] Temperatur Kühler Eingang
- In_tColltRadrOut [°C] Temperatur Kühler Ausgang

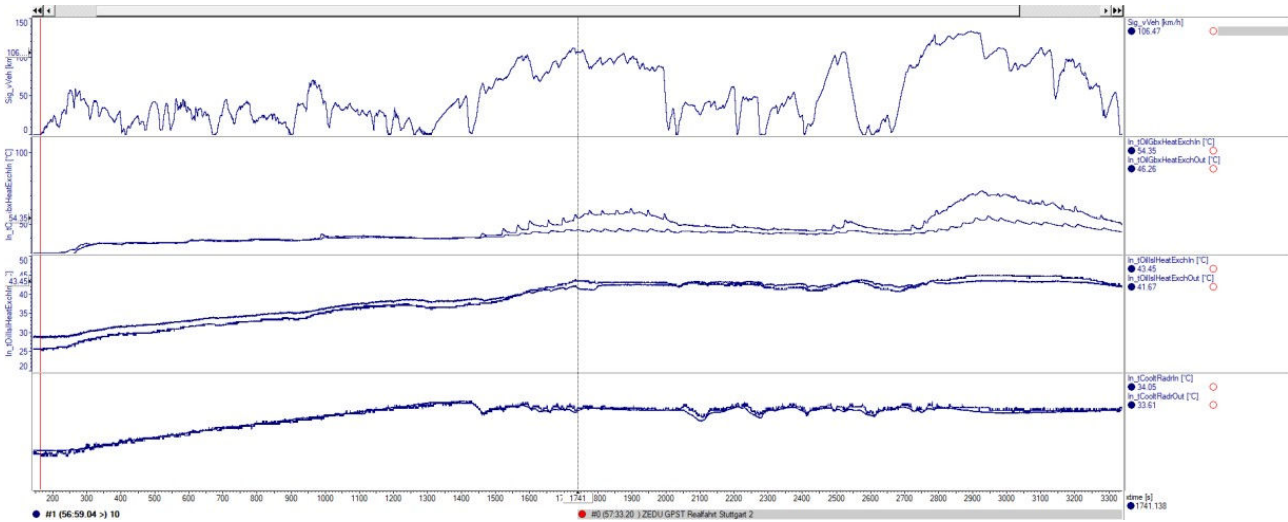


Abbildung 50: Kühlmitteltemperaturen Realfahrt Stuttgart

Tabelle 9 zeigt die maximalen Kühlmitteltemperaturen während der Realfahrt in Stuttgart.

Tabelle 9: Maximal Temperaturen Kühlmittel Realfahrt Stuttgart

Kanalname	Max. Temperatur [°C]
In_tOilGbxHeatExchIn [°C]	73,45
In_tOilGbxHeatExchOut [°C]	55,6
In_tOillslHeatExchIn [°C]	45,14
In_tOillslHeatExchOut [°C]	43,98
In_tColltRadrIn [°C]	35,45
In_ColltRadrOut [°C]	35,4

Die Lamellenbeölung während der Realfahrt in Stuttgart zeigt Abbildung 51. Es sind das Bit zur Öffnung des Ventils der Lamellenbeölung und der Volumenstrom abgebildet.

- Sig_vVEeh [km/] Fahrzeuggeschwindigkeit
- Collg_bGbxVlvTar [-] Bit zur Öffnung des Ventils der Lamellenbeölung
- In_rateGbxVlvOilRow [l/min] Volumenstrom Lamellenbeölung

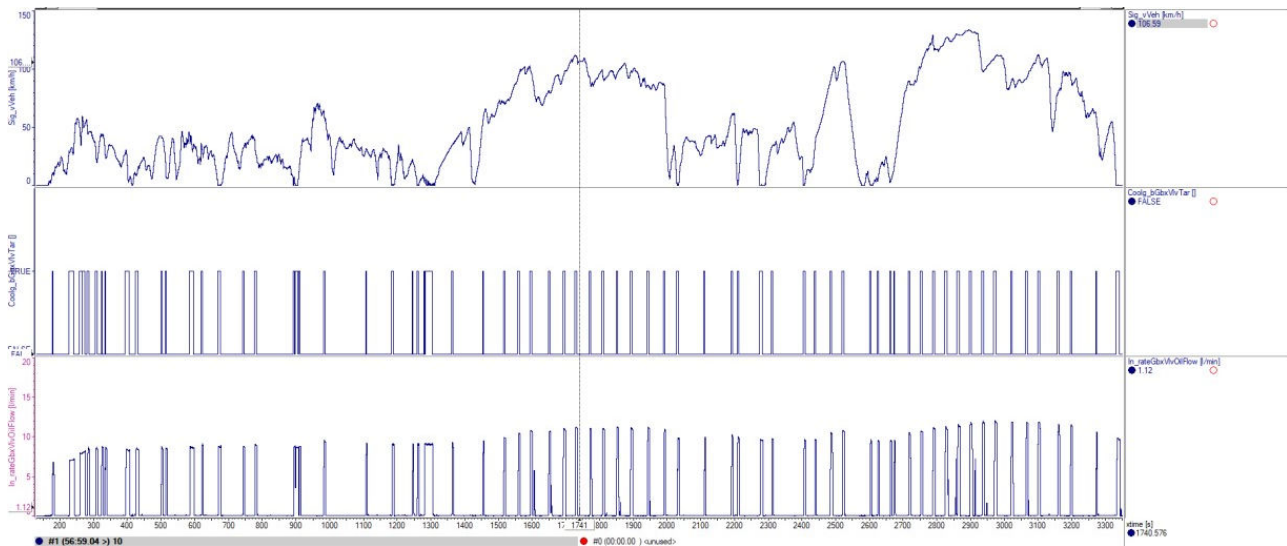


Abbildung 51: Lamellenbeölung Realfahrt Stuttgart

Die sich ergebenden Bremssystemtemperaturen zeigt Abbildung 52 und die maximalen Bremssystemtemperaturen während der Realfahrt Stuttgart sind in der Tabelle 10 aufgetragen. Die Kanalnamen bedeuten:

- Sig_vVEeh [km/h] Fahrzeuggeschwindigkeit
- tBrkDscFntLeDyno [°C] Lammellentemperatur linke Seite
- tBrkDscFntReDyno [°C] Lammellentemperatur rechte Seite
- tBrkPstFntLeDyno [°C] Temperatur der Bremsaktuatorik linke Seite
- tBrkPstFntReDyno [°C] Temperatur der Bremsaktuatorik rechte Seite

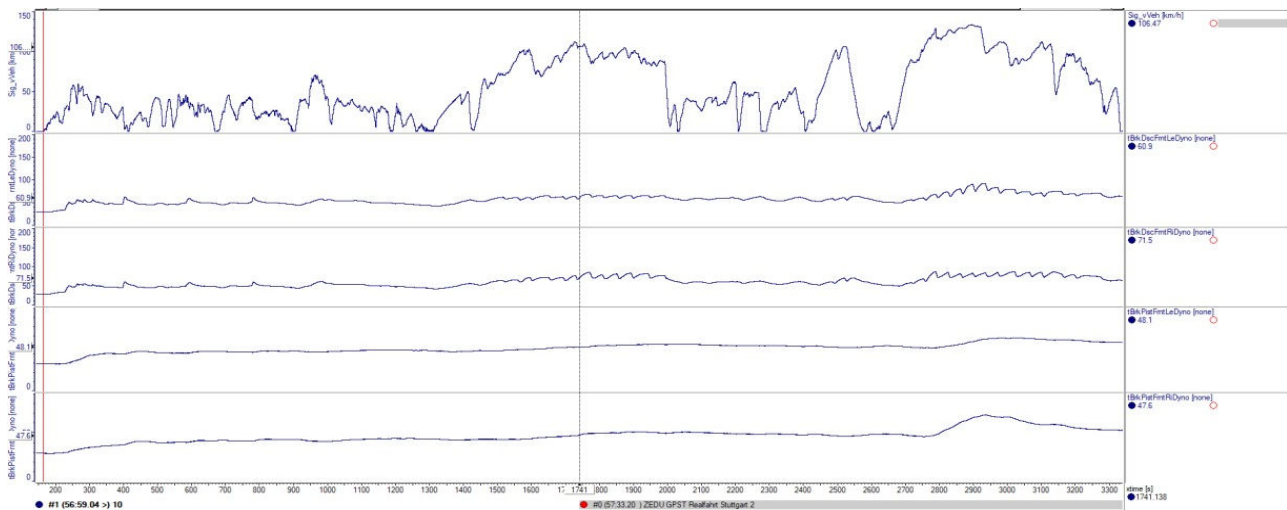


Abbildung 52: Temperaturen an der Lamellenbremse Realfahrt Stuttgart

Tabelle 10: Maximal Temperaturen Bremse Realfahrt Stuttgart

Kanalname	Max. Temperatur [°C]
tBrkDscFntLeDyno [°C]	92,5
tBrkDscFntReDyno [°C]	87,7
tBrkPstFntLeDyno [°C]	57,8
tBrkPstFntReDyno [°C]	68,5

Bremmung aus 100 km/h

Kritischer für die Temperaturentwicklung ist der Fall Vollbremsung ohne elektrisches System, also rein mit der mechanischen Lamellenbremse. Im Folgenden sind die Ergebnisse dieser Prüfstandversuche dargestellt (Abbildung 53 ff.). Ebenso wurden auch die Bremsungen mit Rekuperation untersucht (Abbildung 57 f.f.).

Bremmung ohne Rekuperation

Um die geforderte Bremsleistung aus dem Lastenheft zu erfüllen, werden bereits auf dem Batteriesimulator erste Bremsversuche gefahren. Abbildung 53 zeigt beispielhaft eine Bremsung aus 135 km/h ohne Rekuperation. Die einzelnen Bereiche der Grafik zeigen folgende Kanäle:

- Sig_vVEeh [km/] Fahrzeuggeschwindigkeit
- In_pVacBrkBoost [bar] Druck im Bremskraftverstärker
- EBS_pCaliper_extPwm [bar] Bremsdruck
- Arbn_tqMotFrntRgn [Nm] Rekuperationsmoment

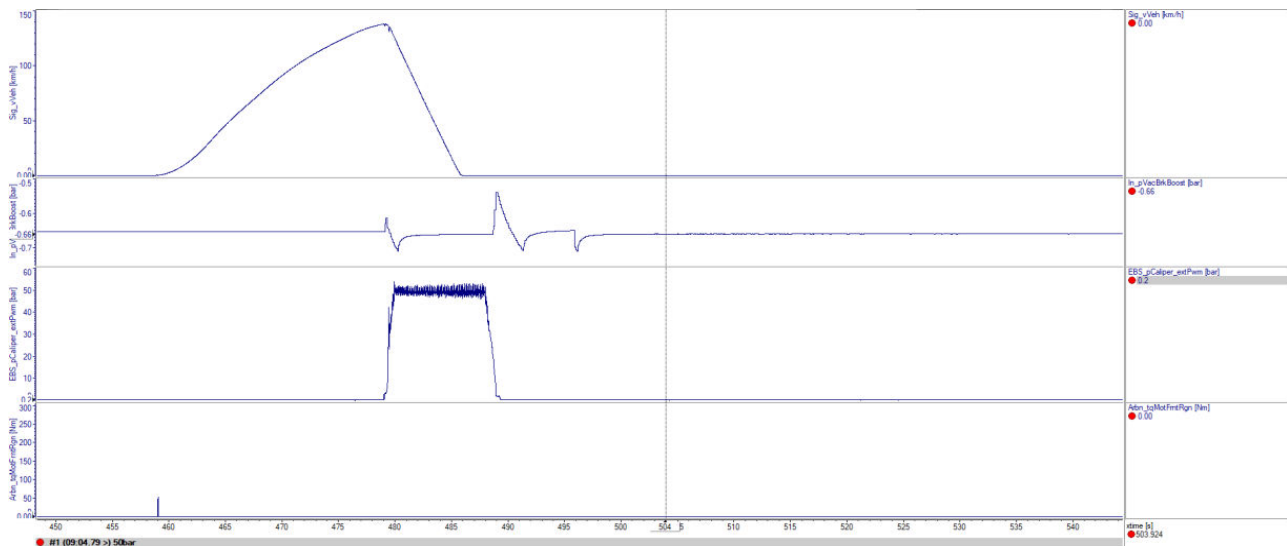


Abbildung 53: Bremsdruck ohne Rekuperation

Gebremst wird mit 50 bar Bremsdruck und der Bremskraftverstärker hat einen Unterdruck von 0,65 bar. Abbildung 54 zeigt die entstehenden Bremsmomente. Die einzelnen dargestellten Kanäle sind:

- Sig_vVEeh [km/] Fahrzeuggeschwindigkeit
- In_tqDyno2 [Nm] Bremsmoment linke Seite
- In_tqDyno3 [Nm] Bremsmoment rechte Seite

Im Durchschnitt liegen die Bremsmomente bei 1640 Nm pro Rad über den gesamten Bremsvorgang. Somit sind sie unter der theoretische Schlupfgrenze von 1750 Nm der später verbauten Reifen (siehe gestrichelte Linie auf Abbildung 54).

Die erreichten maximale Temperaturen während dem Bremsvorgang Insgesamt sind unkritisch.

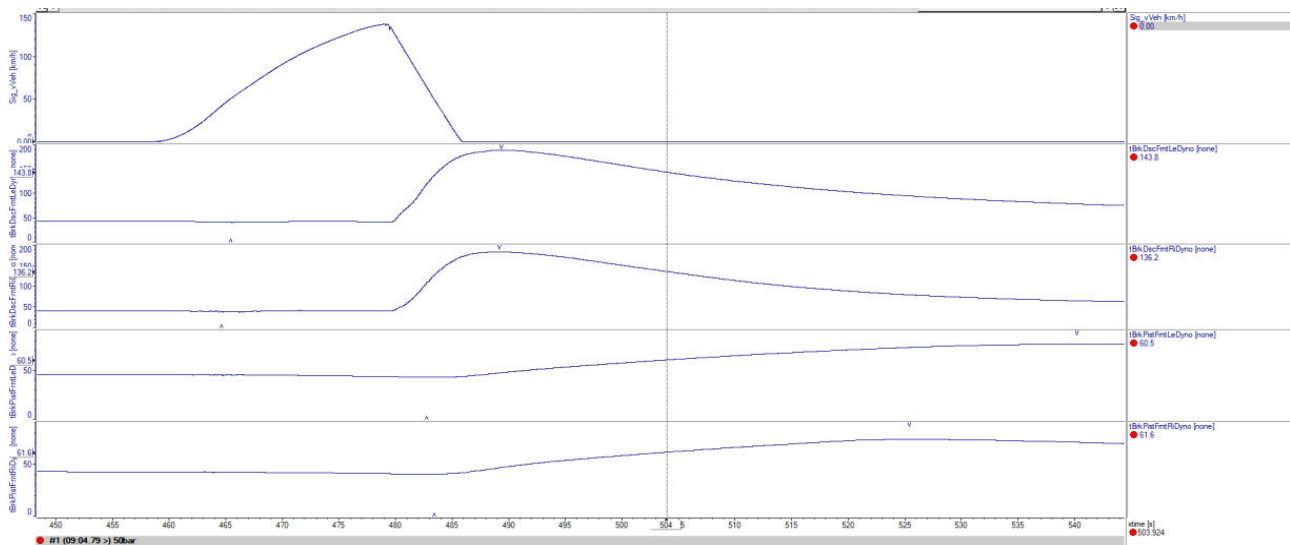


Abbildung 56: Temperaturen am Bremssystem

Die maximale Temperatur der Bremslamellen ist zusammen mit dem Lieferanten auf 200°C und damit auf der sicheren Seite definiert worden. Da aber noch wenig Erfahrung mit solchen Systemen vorliegt, besteht abhängig von visueller Begutachtung und Verschleißmessung die Chance die Grenztemperatur zu erhöhen. Erste Vermessungen und Begutachtungen zeigen minimalsten Verschleiß und keinerlei Temperaturverfärbungen an den Lamellen nach den Prüfstandsversuchen.

Tabelle 11: Maximale Temperaturen während dem Bremsvorgang ohne Rekuperation

Kanalname	Max. Temperatur [°C]
tBrkDscFrntLeDyno [°C]	189,2
tBrkDscFrntReDyno [°C]	183,7
tBrkPstFrntLeDyno [°C]	76,5
tBrkPstFrntReDyno [°C]	73,9

Bremsung mit Rekuperation

Abbildung 57 einen Bremsvorgang mit Rekuperation. Die dargestellten Messdaten sind folgende:

- Sig_v[Eeh] [km/] Fahrzeuggeschwindigkeit
- In_pVacBrkBoost [bar] Druck im Bremskraftverstärker
- EBS_pCaliper_extPwm [bar] Bremsdruck
- Arbn_tqMotFrntRgn [Nm] Rekuperationsmoment

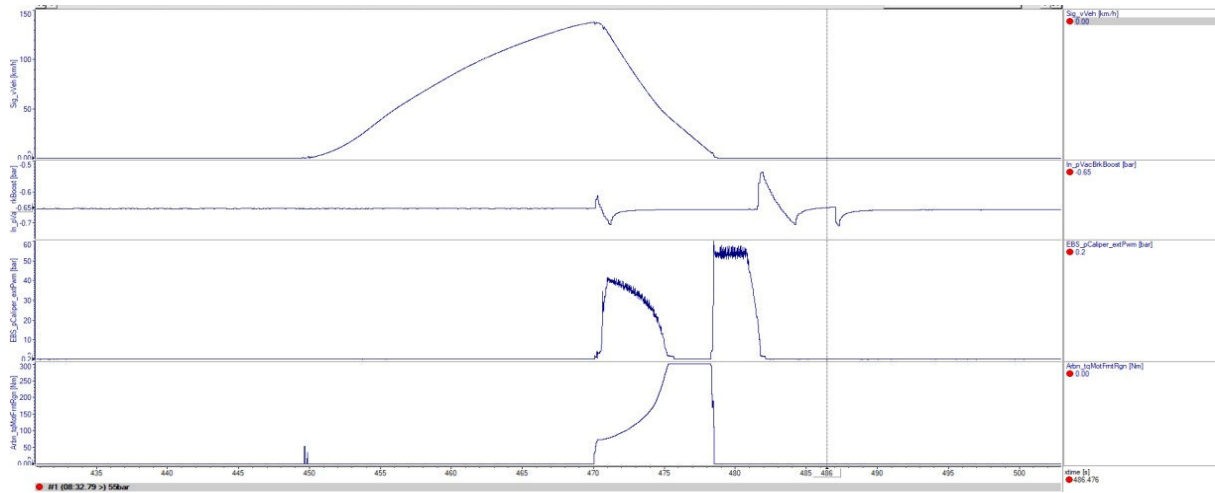


Abbildung 57: Bremsdruck mit Rekuperation

Auch bei dieser Bremsung bleiben die Bremsmomente der einzelnen Räder unter der theoretischen Schlupfgrenze (gestrichelte Linie auf Abbildung 58). Im Durchschnitt liegen sie bei 1554 Nm. Die dargestellten Messdaten sind folgende:

- Sig_vVEeh [km/h] Fahrzeuggeschwindigkeit
- In_tqDyno2 [Nm] Bremsmoment linke Seite
- In_tqDyno3 [Nm] Bremsmoment rechte Seite

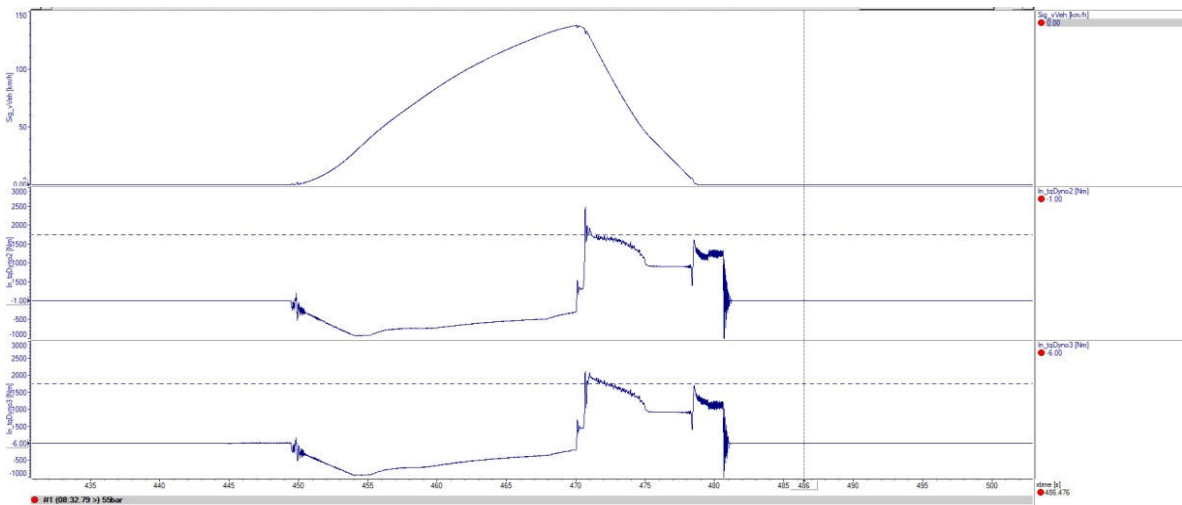


Abbildung 58: Bremsmomente

Abbildung 59 zeigt die Lamellenbeölung während dem Bremsvorgang mit Rekuperation. Die dargestellten Messdaten sind:

- Sig_vVEeh [km/h] Fahrzeuggeschwindigkeit
- Collg_bGbxVlvTar [-] Bit zur Öffnung des Ventils der Lamellenbeölung
- In_rateGbxVlvOilRow [l/min] Volumenstrom Lamellenbeölung

Erwartungsgemäß sind die Temperaturen geringer, als bei einer Bremsung ohne Rekuperation. Auch hier sind die Temperaturen unkritisch s.

Tabelle 12.

3.2.2 Reifenpartikelabsaugung

Im Folgenden sind die Konzeptstudien, Auslegung und Konstruktion des Subsystems Reifenpartikelabsaugung näher beschrieben.

3.2.2.1 CFD-Konzeptstudien und Auslegung

Basis für die FMEAs sind Konzeptuntersuchungen und – bewertungen die zu Systemauslegungen führten. Für die Auslegung des Reifenabrieb-Absaugsystems im Rahmen von ZEDU1 wurde eine eigene CFD-Methodik entwickelt.

3.2.2.1.1 CFD Methodik - Reifenpartikelabsaugung

Die zur Untersuchung eingesetzte CFD-Methodik basiert auf dem “passive scalar transport”-Verfahren, dem folgende Annahmen zugrunde liegen:

- Der in der Simulation betrachtete Skalar wird von der Strömung beeinflusst. Die mathematische Modellierung dieses Geschehens erfolgt mittels einer Advektionsgleichung.
- Der Skalar ist passiv. Das heißt, die Strömung wird nicht von dem Skalar beeinflusst.
- Der Skalar wird ausschließlich von der Strömung beeinflusst. Schwerkraft, elektrostatische Kräfte und andere Effekte werden nicht modelliert.

Dieser Art der Simulationen kann verwendet werden um die Verteilung und Ausbreitung von z.B. Rauch, Aerosolen, Wärme usw. zu modellieren. Der Skalar, auch Tracer genannt, lässt sich am besten mit einem Farbtropfen im fließenden Wasser vergleichen.

Zu Beginn des Projekts wurden verschiedene Konzepte entwickelt und in CFD Berechnungen gegenübergestellt. Viele Iterationsschleifen zwischen Konstruktion und Simulation wurden durchgeführt um die unterschiedlichen Varianten zu optimieren und auf vergleichbare Funktionsumfänge zu entwickeln. Detailliert sind die Schritte im Meilensteinbericht MS-TP1-005 beschrieben. Die finale Bewertungsmatrix für die Radeinhauung ist in Tabelle 17 dargestellt.

Erste Konzeptüberlegungen zur Reifenpartikelabsaugung unterteilen das Thema in zwei wesentliche Richtungen – passives System mit ausschließlicher Nutzung von aerodynamischen Effekten am Fahrzeug und aktives System mit zusätzlich eingebrachter Energie für den Betrieb einer Absaugung. Die Konzeptbewertung auf Abbildung 61 weist vor allem bei der Effektivität einen deutlichen Vorteil für das aktive System aus. Bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten prägen sich nur sehr geringe aerodynamische Effekte (Druckdifferenzen, Wirbel) aus, die man für eine gezielte Beeinflussung des Partikeltransports nutzen könnte. Eine Überlagerung mit einem zusätzlichen hohen Luftstrom eines Absauglüfters lässt eine deutliche Steigerung der Effektivität zu. Bei höheren Geschwindigkeiten werden die aerodynamisch aufgeprägten Potentiale größer. Diese vollumfänglich auszuschöpfen erfordert allerdings eine genaue Analyse der Strömungsverhältnisse um den Partikeltransport durch das Filtersystem.

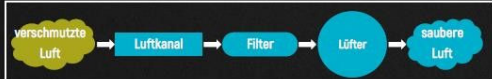

KRITERIUM	Aktives System	Passives System
		
Effektivität	+	--
Komplexität	0	+
Skalierbarkeit Serie	+	-
Energiebedarf	-	+
Gesamtbewertung	+	-

Abbildung 61: Konzeptbewertung Reifenpartikel

CFD Untersuchungen am gewählten Versuchsträger zeigen auf Abbildung 62 das prinzipielle Verhalten des Partikeltransports hinter der Kontaktfläche. Dieses Verhalten ist grundlegend bei Straßen-PKW zu beobachten. Hinter dem Rad entsteht eine Strömung (hier dargestellt in einem xy parallelen Schnitt) nach „außen“, die entstehenden Partikel werden also nach der Kontaktfläche Reifen/ Boden noch vor Beginn des Kotflügel- oder Schwellerbereichs in ein Gebiet außerhalb der Karosserie transportiert. Das lässt den Schluss zu, dass eine Sammelstelle für Reifenpartikel möglichst nah an der Entstehungsstelle (Kontaktfläche Reifen/ Fahrbahn) platziert sein muss. Zwei Konzepte sind auf Abbildung Abbildung 63 exemplarisch dargestellt. Der Reifen ist komplett eingehaust und eine Absaugstelle mit Anschluss für den Lüfter ist hinter der Kontaktfläche konstruktiv integriert.

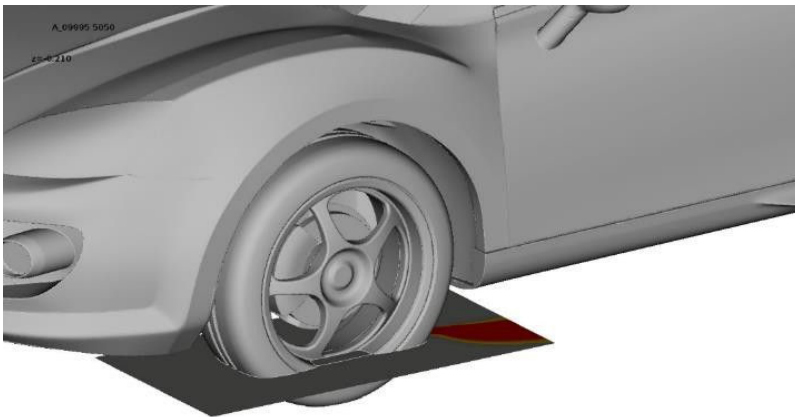


Abbildung 62: Partikelverteilung. Schnitt in xy-Ebene

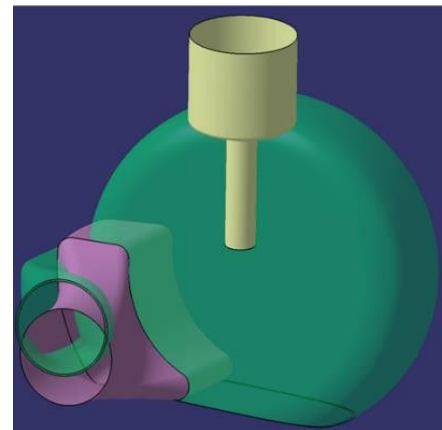


Abbildung 63: Konzepte Anbindung Absaugung

Die entwickelte Methodik wurde validiert um die Anwendung und die verschiedenen grundlegender Konzepte untersucht und so die besten Topologien definiert. Die Ergebnisse wurden sowohl anhand ihrer Effektivität (Verhältnis aufgefangener Partikel zu entstandener Partikel) über verschiedene Fahrzeuggeschwindigkeiten, als auch in einer WLTP betrachtet und bewertet. Exemplarisch ist auf Abbildung 64 die Effektivität verschiedener Konzepte über Fahrzeuggeschwindigkeit dargestellt.

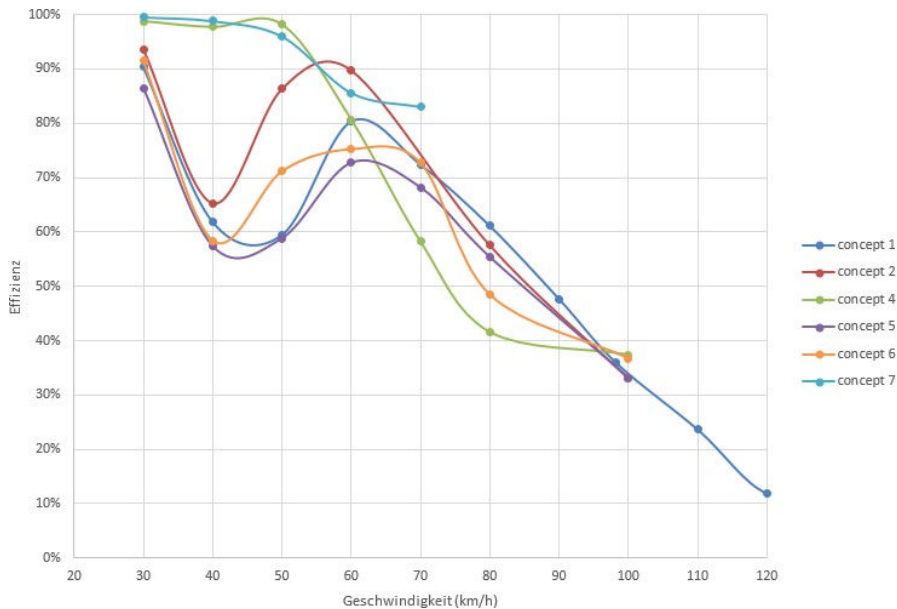


Abbildung 64: Effektivitätsvergleich verschiedener Konzepte über Fahrzeuggeschwindigkeit

3.2.2.1.2 CFD-Untersuchung - Bodenabstand

Zu Beginn wurde der Einfluss zwischen Fahrbahn und Einhausung, sowie zwischen Einhausung und Reifen auf die Absaugeffizienz untersucht. Die Parametervariation ergab, dass die Partikelabsaugeffizienz mit abnehmendem Bodenabstand zunimmt und ein Abstand zur Fahrbahn von 40mm der beste Kompromiss zwischen Partikeleffizienz und Alltagstauglichkeit darstellt (Abbildung 65).

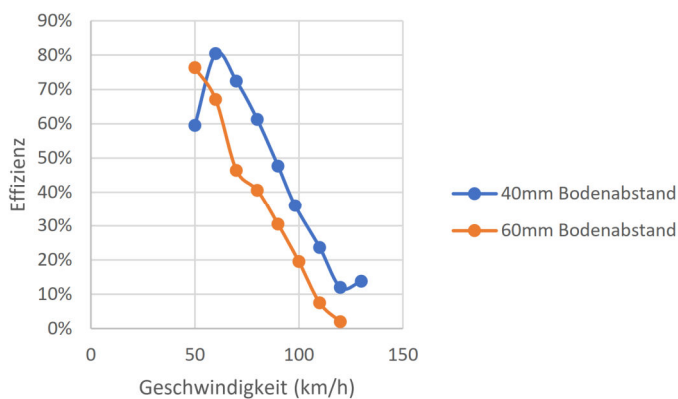


Abbildung 65: Absaugeffizienz in Abhängigkeit vom Bodenabstand

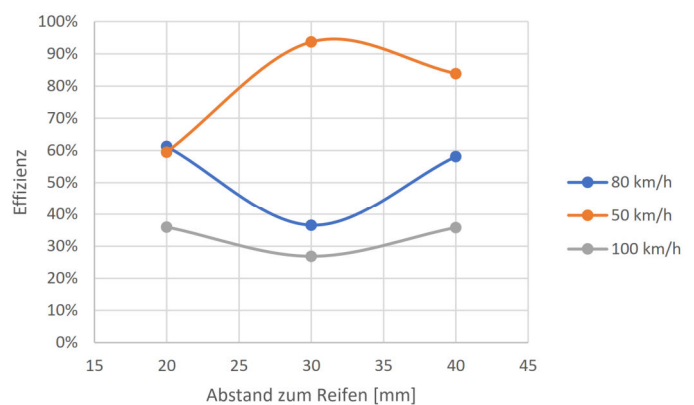


Abbildung 66: Absaugeffizienz in Abhängigkeit vom Abstand Einhausung-Reifen

Der Abstand zwischen Einhausung und Reifen ist auf Abbildung 66 dargestellt hat einen direkten Einfluss auf die Absaugeffizienz. Der Zusammenhang ist nichtlinear und abhängig von der Geschwindigkeit. Daraus resultieren wurden für die Untersuchung der Basisvarianten folgende Annahmen für die Abstandsverhältnisse getroffen:



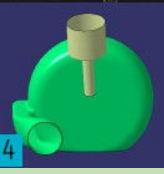
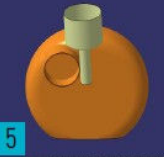
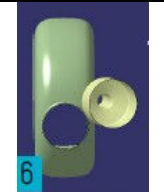
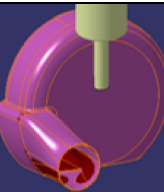
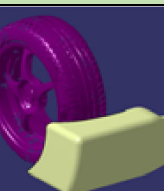
- Abstand zwischen Fahrbahn und Einhausung = 40mm
- Abstand von Einhausung zu Reifen = 20mm

3.2.2.1.3 CFD-Untersuchung – Absaugstelle

Nachdem die Abstandsverhältnisse zur Reifeneinhausungsgeometrie definiert wurden, wurde in der zweiten CFD Schleife der Einfluss der Absaugposition untersucht (

Tabelle 13).

Tabelle 13: Variantenübersicht der untersuchten Absaugstellen

Konzept	Nummer	Benennung	Bemerkung	Bewertung	Bild
1	855112028.ENT.00	Radkapselung Konzept 1	Absaugstelle innen Mitte vorne	0	
2	--		Absaugstelle innen Mitte hinten	+	
4	855112029.ENT.00	Radkapselung Konzept 4	Absaugstelle Mitte hinten direkt an Abrollfläche	++	
5	855112031.ENT.00	Radkapselung Konzept 5	Absaugstelle innen Mitte hinten	0	
6	855112032.ENT.00	Radkapselung Konzept 6	Absaugstelle Mitte oben direkt an Abrollfläche	0	
7	855112033.ENT.00	Radkapselung Konzept 7		++	
8	855112046.000.00	Radkapselung Konzept 8	“Schlaufenkonzept”	--	

Es wurden verschiedene Absaugstellen konzeptionell umgesetzt und nach Effizienz in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bewertet. Unter der Annahme, dass die Partikel an der Radaufstandsfläche entstehen, bzw. sich kurz dahinter vom Reifen lösen ist es naheliegend die Absaugstelle möglichst nah am Ort der Entstehung anzuordnen.

Das Ergebnis der Auswertung (Abbildung 67) zeigt ebenfalls, dass Konzept 4 und Konzept 7 (Absaugstelle hinter dem Rad) die effizienteste Absaugleistung bewirken. Im Vergleich weist Konzept 7 insbesondere bei niedrigeren Geschwindigkeiten eine höhere Effizienz aus.

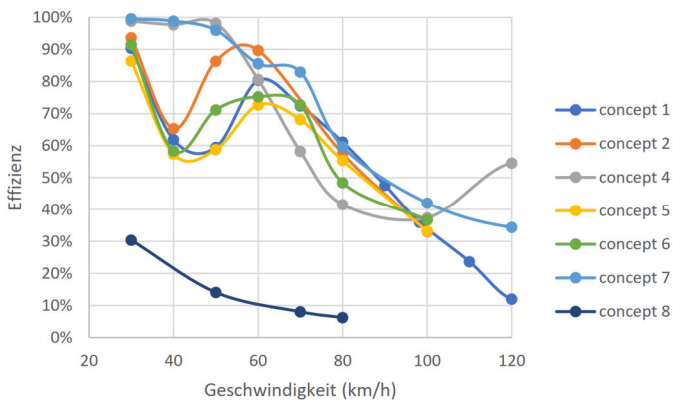


Abbildung 67: Gegenüberstellung Effizienz Absaugposition

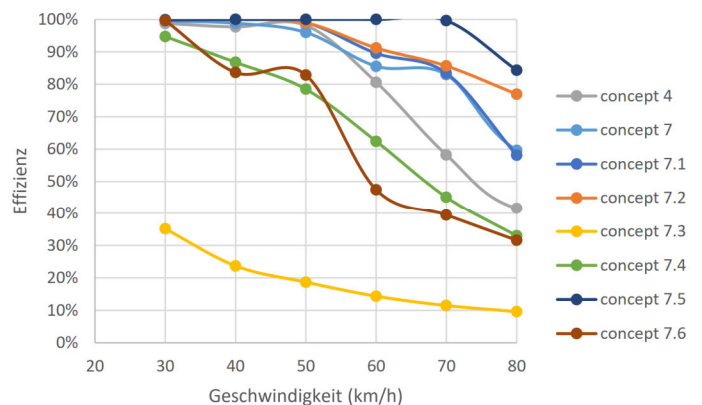


Abbildung 68: Nachlaufgeometrie und Einhausungsgrad

Nachfolgend wurde das chassisfeste Konzept gegenüber einem Konzept mit eingekapseltem Rad verglichen (siehe Abbildung 69 & Abbildung 70).

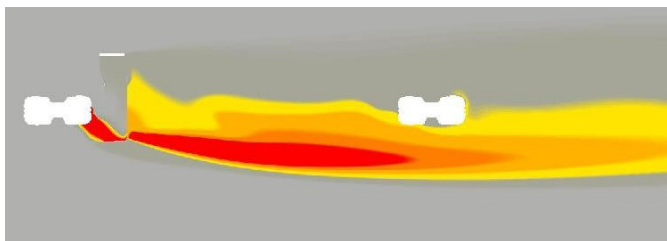


Abbildung 69: Partikelkonzentration mit chassisfester Absaugstelle

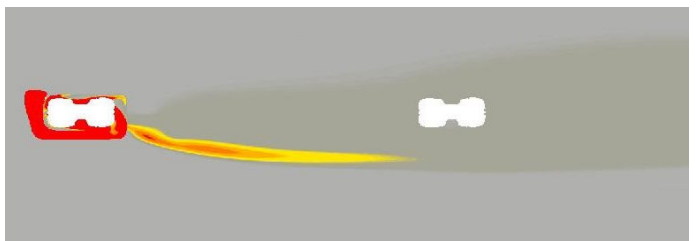


Abbildung 70: Partikelkonzentration mit eingekapseltem Rad


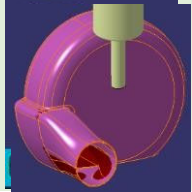
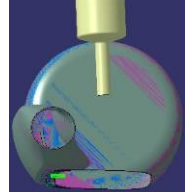

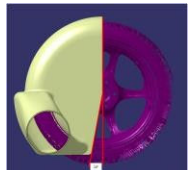

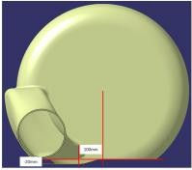
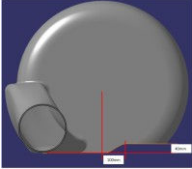
Abbildung 69 zeigt die Partikelkonzentration in einer Ebene 100 mm oberhalb der Fahrbahn mit chassisfester Absaugstelle. Diese Variante weist eine deutlich schlechtere Effizienz auf und wird nachfolgend nicht mehr berücksichtigt. Abbildung 70 zeigt die Partikelkonzentration in einer Ebene 100 mm oberhalb der Fahrbahn mit eingekapseltem Rad. Diese Variante zeigt eine wesentlich höhere Partikelabsorptionseffizienz und wurde als Grundlage für die verschiedene Geometrievarianten die nachfolgend vorgestellt werden, herangezogen.

3.2.2.1.4 CFD–Untersuchung - Nachlaufgeometrien und Einhausungsgrad

Mit der Bestimmung der Absaugstelle wurden im nächsten Schritt verschiedene Geometrievarianten auf Basis von Konzept 7 erstellt und untersucht.

Neben den angepassten Nachlaufgeometrien (Abstand zum Reifen bzw. Abstand zur Fahrbahn) wurde außerdem der Einfluss des Einhausungsgrades (halb offen bzw. zur Felge hin abgedichtet) untersucht.

Tabelle 14: Untersuchung Nachlaufgeometrien und Einhausungsgrad

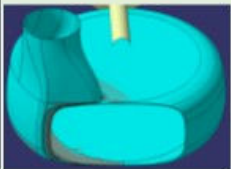
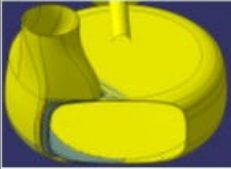
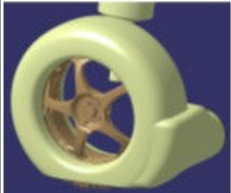

Konzept	Nummer	Benennung	Bemerkung	Bewertung	Bild
4	855112029.ENT.00	Radkapselung Konzept 4	Absaugstelle mitte hinten direkt an Abrollfläche	++	
7	855112033.ENT.00	Radkapselung Konzept 7		++	
7.1	855112036.ENT.00	Radkapselung Konzept 7.1	Nachlauf +20mm	++	
7.2	855112037.ENT.00	Radkapselung Konzept 7.2	Nachlauf +40mm	++	
7.3	855112038.ENT.00	Radkapselung Konzept 7.3	40mmBodenfreiheit Option Tulpe gekürzt 12Uhr ungedichtet zum Reifen	--	
7.4	855112039.ENT.00	Radkapselung Konzept 7.4	40mm Option Tulpe gekürzt 12 Uhr gedichtet zum Reifen	-	
7.5	855112040.ENT.00	Radkapselung Konzept 7.5	Reduzierte Bodenfreiheit -> Abstand vorne "normal" 40mm / hinten 20mm	0	
7.6	855112041.ENT.00	Radkapselung Konzept 7.6	Bodenfreiheit hinten "normal" 40mm / Bodenfreiheit vorne 80mm)	-	

Die angepasste Nachlaufgeometrie bei Konzept 7.2 bewirkt eine höhere Abscheideleistung insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten. Konzept 7.5 weist in diesem Vergleich die höchste Effizienz auf, ist aber aufgrund der reduzierten Bodenfreiheit von 20mm nicht alltagstauglich.

3.2.2.1.5 CFD-Untersuchung – Detaillierung Nachlaufgeometrien und Einhausungsgrad

Auf Basis der Geometrievariante 7.2 wurden weitere Detailuntersuchungen angestellt und sind nachfolgend in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Detaillierung Untersuchung Nachlaufgeometrien und Einhausungsgrad

Konzept	Nummer	Benennung	Bemerkung	Bewertung	Bild
7.2.1	855112042.ENT.00	Radkapselung Konzept 7.2.1	Nachlauf +20mm (von 7.2 Baseline)	++	
7.2.2	855112043.ENT.00	Radkapselung Konzept 7.2.2	Nachlauf +31.85mm (von 7.2 Baseline)	++	
7.2.3	855112045.ENT.00	Radkapselung Konzept 7.2.3	Basisgeometrie aus Konzept 7.2 inkl. seitlicher Öffnung mit ca. 1mm Abstand zu Felge (abgedichtet).	0	
7.4.1	855112044.ENT.00	Radkapselung Konzept 7.4.1	Basisgeometrie aus Konzept 7.4 inkl. seitlicher Öffnung / nach vorne hin geöffnet mit ca. 1mm Abstand zu Felge (abgedichtet).	-	

Gegenüber der Ausgangsvariante 7.2 wurde bei den Konzepten 7.2.1 bis 7.2.3 lediglich der Abstand hinter dem Rad zwischen Reifen und Einhausung variiert (Abbildung 71).

Die Auswertung zeigt, dass durch Erhöhung des Abstandes (Konzepte 7.2.1 & 7.2.2) die Effizienz für höhere Geschwindigkeiten zunimmt.

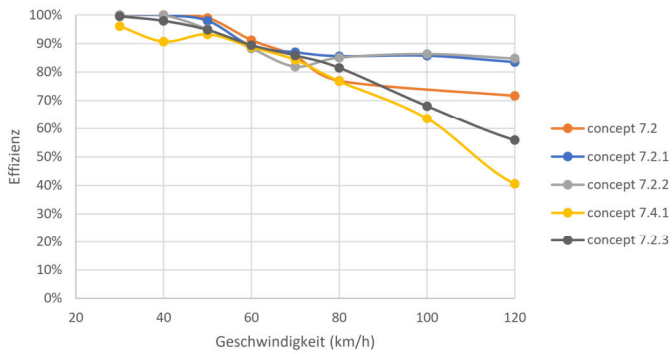


Abbildung 71: Auswertung Untersuchung Nachlaufgeometrien und Einhausungsgrad

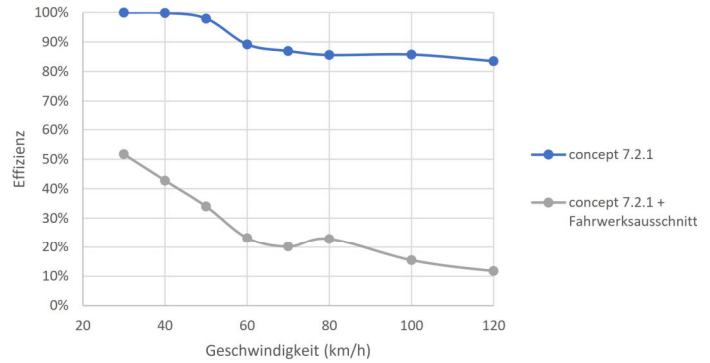


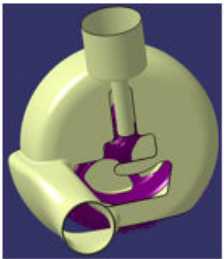
Abbildung 72: Ergebnisse Einfluss Abdichtung gegenüber Fahrwerkskomponenten

Auf Basis der Auswertung auf Abbildung 71 wurden alle zukünftigen Detaillierungsvarianten in Anlehnung an die Geometrie 7.2.1 erstellt.

3.2.2.1.6 CFD-Untersuchung –Einfluss Abdichtung gegenüber Fahrwerkskomponenten.

Das Konzept 7.2.1 inkl. Fahrwerksausschnitt (Tabelle 16) weist aufgrund der Öffnungen eine deutliche Verschlechterung im Vergleich zur abgedichteten Ursprungsgeometrie 7.2.1 auf. Die Ergebnisse der 5. CFD Schleife dienen zur Bestätigung der Geometrievariante 7.2.1 und zeigen eine Effizienzsteigerung beim Abdichten der Fahrwerksausschnitte.

Tabelle 16: Einfluss Abdichtung gegenüber Fahrwerkskomponenten

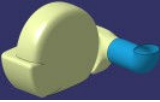

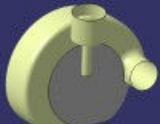


Konzept	Nummer	Benennung	Bemerkung	Bewertung	Bild
7.2.1 + Fahrwerksausschnitt	855112047.000.00	Radkapselung Konzept 7.2.1 + Fahrwerksausschnitt	Basisgeometrie aus 7.2.1 inkl. Fahrwerksfreigang (nicht abgedichtet)	--	

Im Vorfeld wurden der Einfluss verschiedener Absaugpositionen am Rad und verschiedene Abstände zur Fahrbahn und zum Reifen in der CFD-Simulation untersucht und bewertet. Im Anschluss wurden weitere Geometrievarianten unter Berücksichtigung der Absaugstelle hinter dem Rad konzeptionell dargestellt. Bei der Geometrievorauswahl wurde das Hauptaugenmerk auf die Effizienz der Partikelabsaugung und den Druckverlust in einem definierten Geschwindigkeitsbereich gelegt. Im nächsten Schritt wurde die Basisgeometrie so weiterentwickelt, damit diese auf das bestehende Demonstratorfahrzeug adaptiert werden kann. Neben den technischen Kenngrößen wurden außerdem folgende Kriterien bewertet:

- Die Modifikationen am Bestandsfahrzeug
- Die Komplexität – Bewertung wie einfach oder schwierig eine sichere technische Umsetzung ist.
- Die Alltagstauglichkeit – Bspw. Rangierbetrieb, Parkhauseinfahrten, Bordsteinüberfahrten, etc.
- Optisches Erscheinungsbild
- Bauteilkosten

Die vielversprechendsten Varianten wurden in einer Bewertungsmatrix gegenübergestellt und bewertet. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Bewertungsmatrix Radeinhausung

Variante	Bild	Druckverlust [Pa] 30 bis 140 km/h	Effizienz über WLTP bei 250 l/s	Modifi- kati- onen Bestands- fahrzeug	Komplexi- tät	Alltagstaug- lichkeit	Erschei- nungsbild	Kosten	Gesamt
855112048. Absaugungs-ka- 000.00 nal Routing 1		520 - 560 +	82% ++	+	+	--	--	0	+
855112049. Absaugungs-ka- 000.00 nal Routing 3		370 - 730 -	+ +	--	-	+	+	+	0
855112050. Absaugungs-ka- 000.00 nal Routing 2		500 - 670 0	62% -	0	0	+	0	0	0
8551120XX. Absaugungs-ka- 000.00 nal Routing 4		690 - 1100 --	78% +	+	0	-	+	+	+
8551120XX. Absaugungs-ka- 000.00 nal Routing 5		680 - 720 0	81% ++	+	+	-	0	0	+++

Der „Absaugkanal Routing 5“ bietet neben einer sehr hohen Effizienz einen guten Kompromiss aus Komplexität, Alltagstauglichkeit und Erscheinungsbild. Diese Variante wird im weiteren Verlauf d Für die weitere Konstruktion des Systems wurde das Routing 5, als bester Kompromiss aus Effizienz der Partikelreduzierung und Umsetzbarkeit, ausgewählt.

3.2.2.1.7 CFD Optimierung

Das ausgewählte Konzept wurde nicht nur konstruktiv ausgearbeitet, sondern auch mittels CFD Simulation stetig weiter optimiert. Die Ziele der Optimierung sind:

- Eine Minimierung des Druckverlustes im System. Eine Verringerung des Druckverlustes reduziert die benötigte Lüfterleistung und hat damit einen positiven Einfluss auf den Energieverbrauch des Fahrzeugs.
- Eine Maximierung der Partikeleffizienz über den gesamten Fahrgeschwindigkeitsbereich.

Der Optimierungsprozess umfasste mehrere Iterationsschleifen, in denen die aerodynamischen und konstruktiven Kriterien stets im Blick gehalten werden.

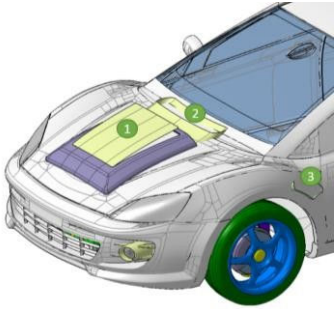
Die Bewertung der Gesamtleistung erfolgt anhand folgender Kriterien

1. Absaugeffizienz als Funktion der Geschwindigkeit (30-140 km/h), wobei ein konstanter Volumenstrom aufgebracht (250l/s) aufgebracht wird
2. Mithilfe dieser Funktion wird die Effizienz über den WLTP-Zyklus ermittelt

3.2.2.1.8 Position Auslasskanal

Für die Position des Auslasskanales wurden drei Konzepte erstellt und im Fahrzeugpackage dargestellt. Die Vor-/Nachteile der jeweiligen Variante sind in der untenstehenden Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Gegenüberstellung Position Auslasskanal

Variante	Bild	Vorteile	Nachteile	Gesamt
Konzept 1 Powerdome		mechanisch betätigte Öffnung (Schutz vor Wassereintritt)	+ Einfluss auf das Gesamtbild Einfluss Sichtfeld	-- -
Konzept 2 Auslass Was-serkasten		Einfache Ausführung	0 Keine Aeroeffekte nutzbar Wasserabdichtkonzept notwendig	- -
Konzept 3 Auslasskanal seitlich		Kein Einfluss auf Fahrersichtfeld Aeroeffekte insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten nutzbar unempfindlicher gegen Wassereindringen	++ Aufwändigere Kanalführung	0

Ein wesentlicher Vorteil von Konzept 3 ist die günstige Position bei der Fahrzeugumströmung. Insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten entsteht an der Auslassstelle ein Unterdruckgebiet, wodurch die Lüfterleistung theoretisch reduziert werden kann. Für die weitere Detaillierung wurde Konzept 3 beschlossen und ins Fahrzeugpackage übernommen.

3.2.2.1.9 Berechnung der Druckverhältnisse

Zur Finalisierung der Position des Auslasskanals und Möglichkeit der optimalen Nutzung der aerodynamischen Strömungsverhältnisse für die Emissionsabsorption wurden die geschwindigkeitsabhängige Druckverhältnisse am Fahrzeug simulativ berechnet (Abbildung 73).

Auf Grund der Druckverhältnisse wurde für die weitere Detaillierung Konzept 3 Tabelle 18 beschlossen und ins Fahrzeugpackage übernommen. (Aus Gründen des Aufwands der Umsetzbarkeit wurde dann beim finalen Packaging von dem Konzept leicht abgewichen und die Auslasskanäle in die Motorhaube nahe der Windschutzhaube realisiert.)

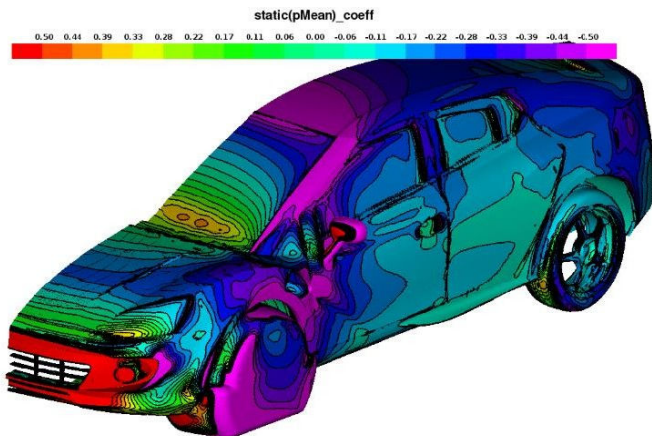


Abbildung 73: Druckverteilung Fahrzeugumströmung

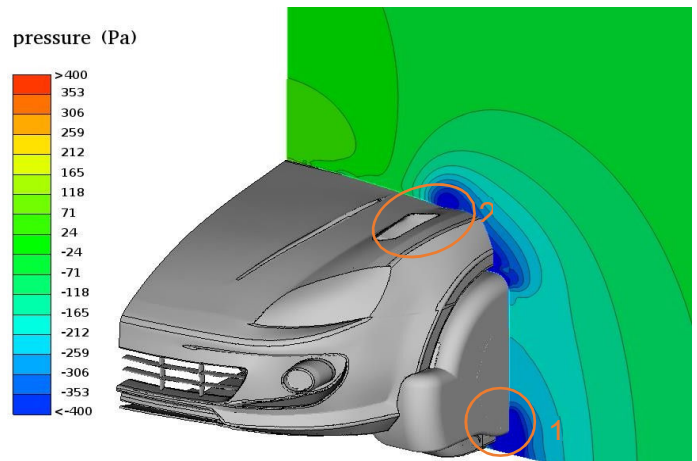


Abbildung 74: Druckverteilung als ZY-Schnitt an der Vorderachse

Der Druckverlauf im System wird von der Fahrzeugaerodynamik und vom Luftdurchsatz bestimmt. Der Einfluss der Aerodynamik ist stark fahrgeschwindigkeitsabhängig, im Stand oder bei sehr geringen Geschwindigkeiten bis 30 km/h spielt sie keine Rolle, bei 140 km/h können die Druckunterschiede am Fahrzeug die Lüfterleistung um ein Vielfaches übersteigen. Um die richtige Funktion des Systems zu gewährleisten, ist eine Analyse der Strömungsverhältnisse um das Fahrzeug herum unverzichtbar.

In der Abbildung 74 ist der Druck in einem ZY-Schnitt auf Höhe der Vorderachse dargestellt. Die direkte Umgebung der Reifenkontaktfläche (in der Abbildung mit 1 gekennzeichnet) ist von einem starken Unterdruckgebiet gekennzeichnet. Der Reifen stellt ein Hindernis für die anströmende Luft dar, die stark beschleunigt um den Reifen herum fließt. Dieser Effekt erzeugt einen Unterdruck der typisch ist für Straßenfahrzeuge. Der Auslass der Reifenabsaugung ist ebenfalls an einem Unterdruckgebiet (in der Abbildung mit 2 gekennzeichnet) positioniert. Damit wird sichergestellt, dass der Druckunterschied zwischen Einlass und Auslass nicht zu groß werden kann.

Innerhalb des Systems treten Druckverluste auf in den Kanälen und in den Filtern. Figur Abbildung 75 zeigt den Druckverlauf bei einer Geschwindigkeit von 140 km/h und einem Volumenstrom von 250 l/s. Hier ist zu sehen, dass am Reifen ein Unterdruck von ca. 150 Pa herrscht. Über die Einhausung und den Einlasskanal bis zum Grobfilter verliert die Strömung weitere 400 Pa, das Δp über dem Grobfilter beträgt 55 Pa. Die Lüfter erhöhen den Druck um 780 Pa, die Luft fließt durch den Feinfilter und verliert 112 Pa. Der relativ kurze Auslasskanal hat einen Druckverlust von ca. 100 Pa.

In der grafischen Darstellung der Strömung Abbildung 77 sind die Stromlinien nach Druckwert farblich dargestellt. Die Radeinhausungen stellen sicher, dass die Reifenpartikel mit der Strömung angesaugt werden und durch die flexiblen Schläuche in den Filter-/Lüfterkasten geführt werden. Gefiltert wird die Luft dann über Auslässe an der Motorhaube der Umgebung zugeführt. Das Konzept wurde weiter optimiert und zur Umsetzung im Demonstrator auskonstruiert. Die Druckverluste im System werden nur vom Massenstrom bestimmt, die Fahrzeugumströmung bestimmt lediglich die Druckverhältnisse am Einlass und Auslass. Dies ist auf Abbildung 75 dargestellt. Hier ist zu sehen, dass die Lüfter bei 140 km/h einen größeren Drucksprung leisten müssen als bei 30 km/h (Abbildung 76).

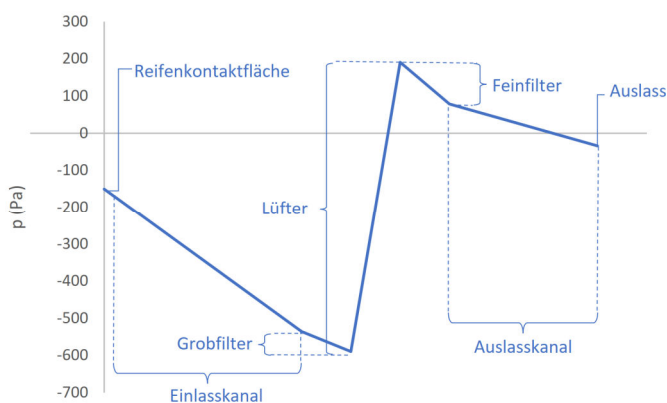


Abbildung 75: Druckverlauf bei 140 km/h und einem Volumenstrom von 250 l/s

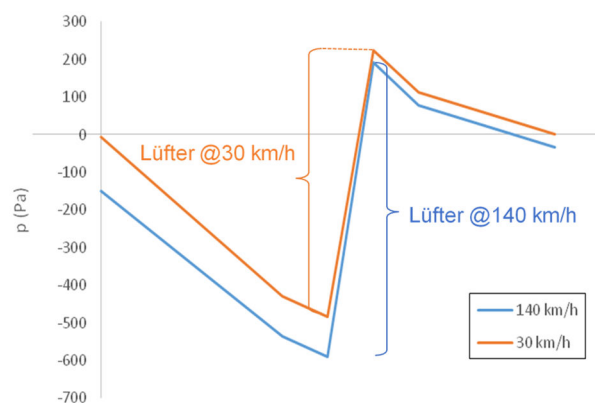


Abbildung 76: Druckverhältnisse an der Absaugstelle und am Auslass

Der Druckdifferenz des Absaugsystems Δp bei 250 l/s als Funktion der Fahrgeschwindigkeit ist auf Abbildung 78 dargestellt. Von 30 bis 80 km/h steigt der Druck kontinuierlich an und nimmt danach wieder ab. Durch die Aerodynamik und das Lüftersystem generierte Absaugung ist somit für einen fixen Luftstrom von 250 l/s bei 80 km/h am höchsten.

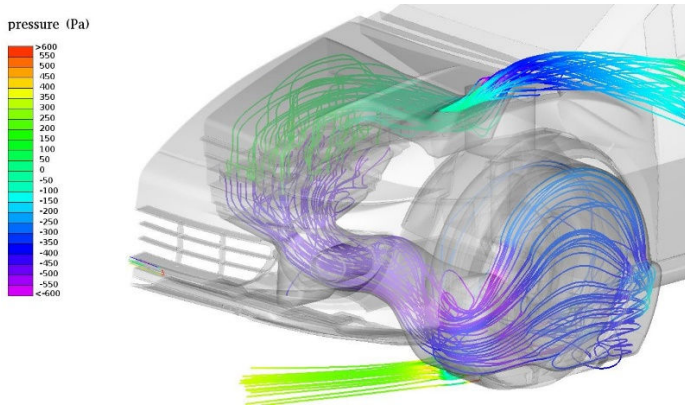


Abbildung 77: Stromlinien und Druckverteilung

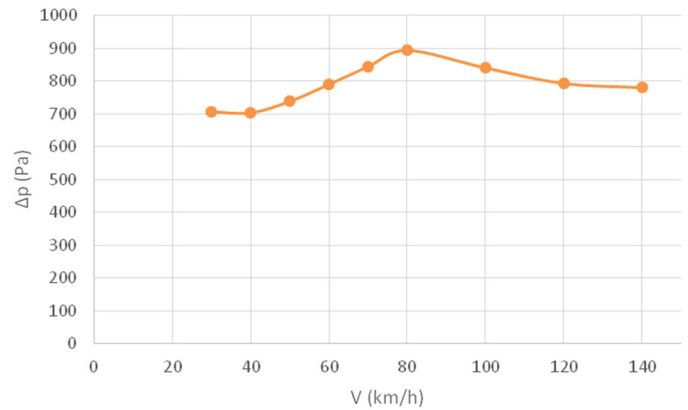


Abbildung 78: Δp des Lüfterpakets bei 250 l/s als Funktion der Fahrgeschwindigkeit

(4) (21) Die Lüfterleistung bei konstantem Volumenstrom hat einen ähnlichen Verlauf. Diese ist dargestellt auf Abbildung 79. Diesen beiden Randbedingungen - Optimale Druckdifferenz und möglichst geringe Leistungsaufnahme wurde Rechnung getragen und zur Reduktion der erforderlichen Lüfterenergie diese abhängig von der Geschwindigkeit im Bereich 77 - 98 % der Maximalleistung gesteuert. Die direkte Steuergröße der Lüfter im Demonstrator ist jedoch nicht die Fahrgeschwindigkeit, sondern das Optimum des Volumenstroms, der mittels einer Druckmessung im Abluftkanal berechnet wird. So wird sichergestellt, dass bei geringst möglichem Energiekonsum der Lüfter immer der richtige Volumenstrom im System herrscht, auch wenn die Druckverhältnisse am Fahrzeug nicht so sind, wie von der CFD vorhergesagt.

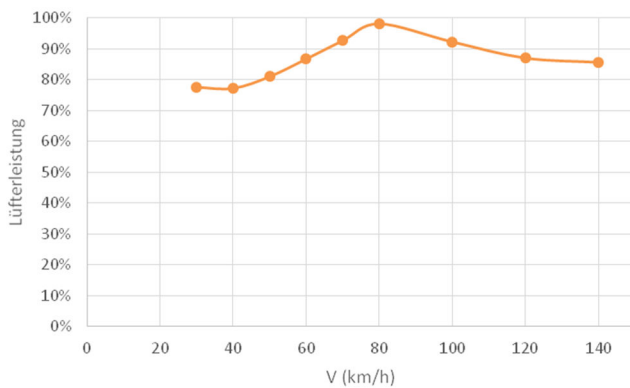


Abbildung 79: Die Lüfterleistung bei festem Volumenstrom

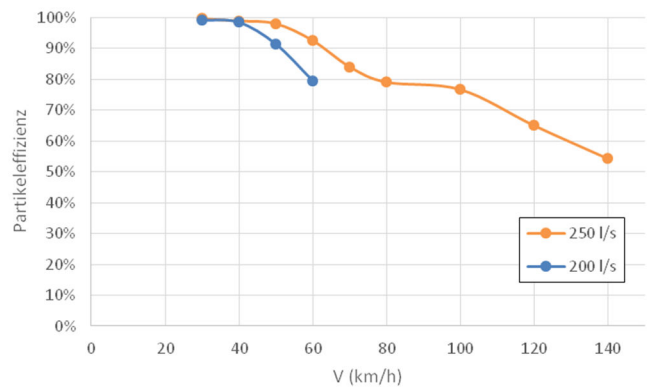


Abbildung 80: Druckverlust Δp und Absaugeffizienz bei 250 und 200 l/s

Reduzierung des Volumenstroms bei geringen Fahrgeschwindigkeiten

Auf Grund der Simulationsergebnisse wurde der Volumenstrom von 250 l/s als der Zielwert festgelegt und in der Entwicklungsphase regelmäßig überprüft, ob mit einem geringeren Volumenstrom ähnlich gute Ergebnisse zu erreichen sind. Es hat sich herausgestellt, dass die Partikeleffizienz bei geringen Fahrgeschwindigkeiten bis 40 km/h und eine Absaugmenge von 200 l/s nahezu 100 % beträgt. Auf Abbildung 80 sind Δp und Effizienz bei 250 und 200 l/s zu sehen.

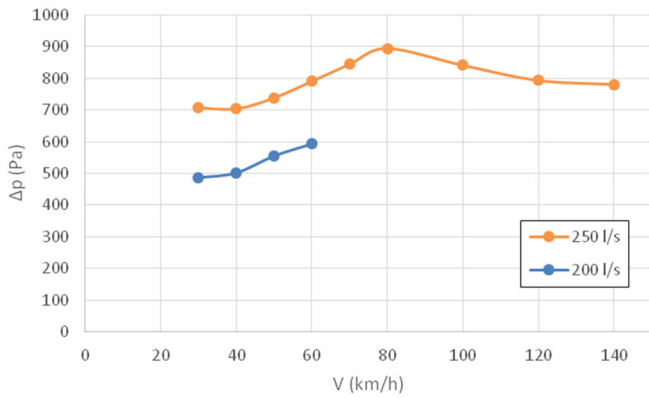


Abbildung 81: Die Lüfterleistung in Abhängigkeit vom Volumenstrom

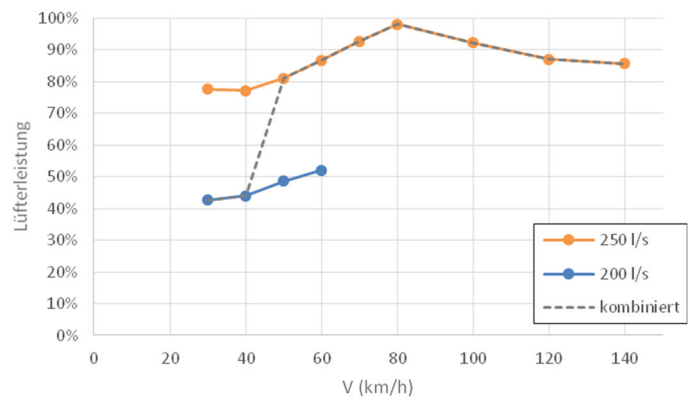


Abbildung 82: Optimierter Volumenstrom in Abh. von der Geschwindigkeit

Die Energiebilanz des Systems lässt sich verbessern, indem die Lüfter bis 40 km/h Fahrgeschwindigkeit mit weniger Leistung betrieben werden. Die generierte Druckdifferenz für den Fall 250 l/s und 200 l/s ist aus Abbildung 81 und die entsprechende Lüfterleistung aus Abbildung 82 dargestellt.

Bei Geschwindigkeiten unter 10 km/h werden die Lüfter ausgeschaltet, da nur sehr wenig Feinstaub freigesetzt wird und die Radeinhausung bei Rangierbetrieb hochgefahren wird. Damit wurde folgende erster Ansatz für die Betriebsstrategie der Lüfter gewählt:

- 0 bis 10 km/h: Aus
- 10 bis 40 km/h: 200 l/s pro Rad
- Über 40 km/h: 250 l/s pro Rad

Die mit dieser Betriebsstrategie ermittelte Lüfterleistung und Fahrgeschwindigkeit über einen WLTP-Zyklus ist auf Abbildung 83 dargestellt.

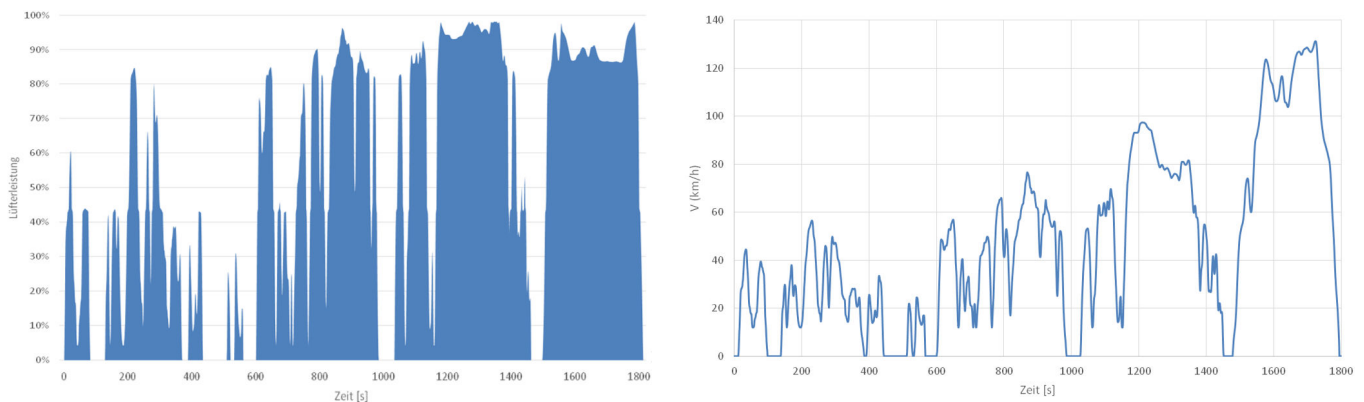


Abbildung 83: Lüfterleistung (links) und Fahrgeschwindigkeit über einen WLTP-Zyklus (rechts)t

Eine weitere, feinere Optimierung der Lüfterbetriebsstrategie ist nachzuschalten und im Rahmen der Tests im Versuchsträger diese angepasst und validiert werden.

3.2.2.1.10 Berechnung der Effizienz der finalen Geometriestand (855308012.000.00 Radeinhausung VA LI VST)

Das finale Ergebnis der Konstruktionsphase der Radeinhausung ist auf Abbildung 84 detailliert dargestellt. In dieser sind die oben diskutierten Auswahl- und Bewertungskriterien eingeflossen.

Es wurden neun CFD-Simulationen bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Effizienz als Funktion der Geschwindigkeit zeigt den auf Abbildung 85 dargestellten Verlauf.

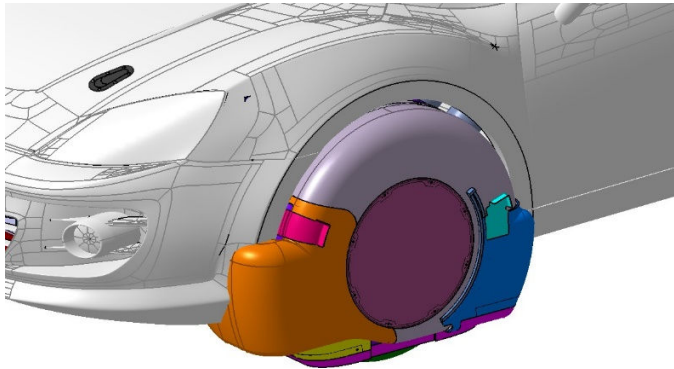


Abbildung 84: Gewählte Geometrie Radeinhausung (Routing 1 855308012.000.00 Radeinhausung VA LI VST)

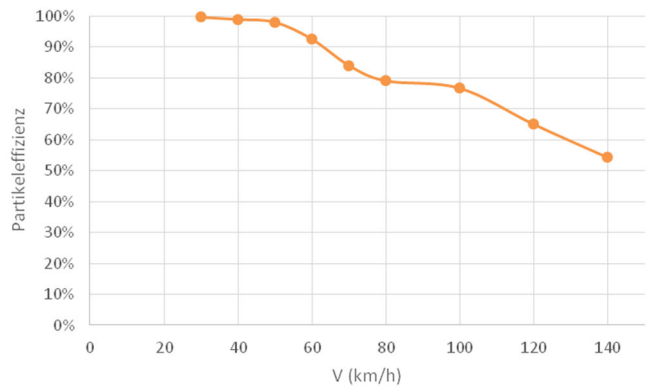


Abbildung 85: Effizienz als Funktion der Geschwindigkeit

Die Reifenpartikelemission sind geschwindigkeitsabhängig. Da die genaue Relation zwischen Geschwindigkeit und Emission nicht bekannt ist, wurden dazu Daten aus der Literatur (22) herangezogen. Mit diesen Werten wurde eine Emissionsfunktion Abbildung 86 erstellt.

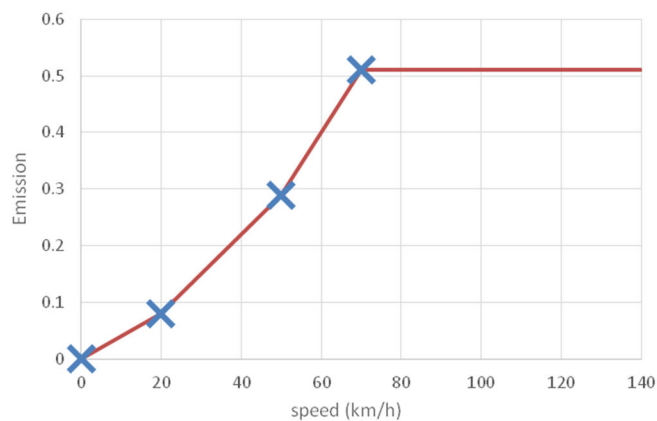


Abbildung 86: Emissionen als Funktion über die Geschwindigkeit

Appliziert man diese Emissionsfunktion mit dem WLTP-Geschwindigkeitsverlauf, so ergibt sich der auf Abbildung 87 berechnete Emissionsverlauf für die ausgelegte Einhausung. Wird für jeden Punkt im WLTP-Zyklus auch die Partikeleffizienz herangezogen, so lässt sich die Menge an freigesetzten und eingefangenen Partikeln berechnen. Die Ergebnisse sind auf Abbildung 88 dargestellt.

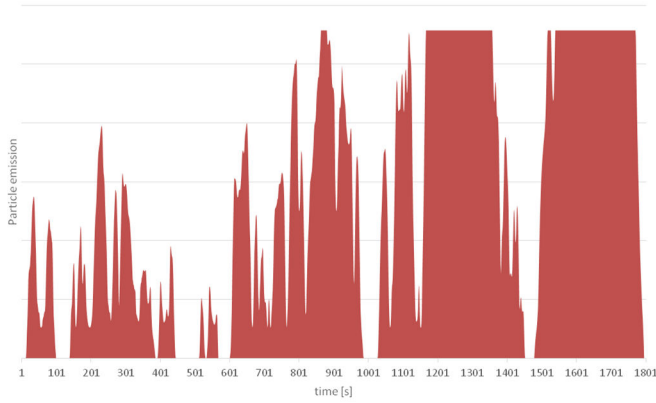


Abbildung 87: Reifen-Emissionen über WLTP Zyklus

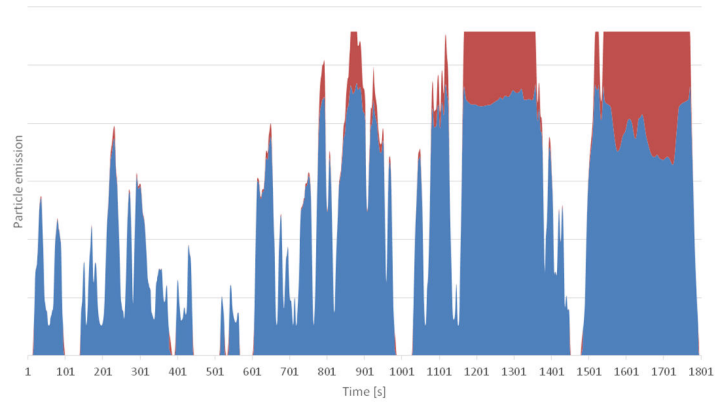


Abbildung 88: Aufgenommene (blau) und freigesetzte Reifen Partikel über WLTP Zyklus

Aus der Abbildung 88 wird ersichtlich, dass die Absaugung insbesondere im Stadtverkehr eine sehr hohe Absaugeffizienz ausweist. Bei höheren Geschwindigkeiten wird ein Teil der Partikel in die Umwelt freigesetzt. Die Gesamteffizienz für das finale Konzept liegt für eine WLTC-Zyklus rechnerisch bei 85 %. Die Filtereffizienz ist in dieser Berechnung nicht berücksichtigt. Diese ist abhängig ist von der Partikelgrößenverteilung.

3.2.2.1.11 Lüfterauswahl

Auf Basis der beschriebenen CFD-Methodik (3.2.2.1.1) wurde im Vorfeld mit vereinfachten Reifeneinhausungs-Geometrieständen die Effizienz über die Geschwindigkeit untersucht. Für die Basisuntersuchungen wurde jeweils mit einem festgelegten Volumenströmen von 125 l/s bis 250 l/s gerechnet. Des Weiteren wurde eine erste Abschätzung über den Gesamtdruckverlust getroffen. Der Gesamtdruckverlust setzt sich wie folgt zusammen:

$$\Delta p_{\text{total}} = \Delta p_{\text{Rad}} + \Delta p_{\text{Grobfilter}} + \Delta p_{\text{Feinfilter}} + \Delta p_{\text{Luftführung}} - \Delta p_{\text{Aerodynamik}}$$

Die Druckabhängige Größen weisen folgende Abhängigkeiten auf:

Δp_{Rad} : Abhängig von der Einhausungsgeometrie

$\Delta p_{\text{Grobfilter}} + \Delta p_{\text{Feinfilter}}$: Zuleitungsdurchströmung und der Größe der Filterfläche

$\Delta p_{\text{Luftführung}}$: Druckverlust der im Einlasskanal und Auslasskanal entsteht

$\Delta p_{\text{Aerodynamik}}$: Druckdifferenz die durch die Aerodynamik des Fahrzeugs erzeugt wird

Diese Auslegungsgrößen sind für Lüfterauswahl relevant. Damit wurde für die Lüfterleistung folgende Kenngrößen ermittelt:

$$\dot{v} = 250 \text{ l/s}$$

$$\Delta p_{\text{Lüfterleistung}} = 1000 \text{ Pa}$$

Anhand des Bedarfes wurden am Markt verfügbare Lüfter aus verschiedensten Anwendungen untersucht. Die Zusammenfassung der drei geeignetsten Lüfter ist nachfolgend in der Tabelle 19 zusammengestellt. Die dazugehörigen Kennlinien sind in der Abbildung 89 aufgeführt.

Tabelle 19: Auswahl der Lüfter

Hersteller	Telemeter	LMB	
Modell	9WG5748P5 G001	Hyper 150- 08	Hyper 160
Spannung [V]	48 bzw. 55	28	28
Anzahl	12	2	1
Stückpreis	127 €	7939 €	8640 €
Zusatzkosten Regelung/Stromversorgung	7000 €	- €	- €
Geräusch [dB]	78	98	88
Lieferzeit	Direkt	-	20 Wochen
Verbrauch - Max [W]	1700	-	1260
Kriterien			
Aero	0	+	+
Elektrik - Steuerung	+	-	+
Elektrik - Stromversorgung	-	+	+
Design/Package	+	-	-
Gesamtpreis	9540 €	23817	17280

Um die Projektzeiten einhalten zu können wurde verfügbarkeitsbedingt der Telemeter-Lüfter gewählt. Diese Wahl unterstützte auch ein anvisiertes kompaktes Packaging (Tabelle 20).

Ein weitere Vorteil des gewählten Lüftersystems ist ein über den Volumenstrom fas konstante Druckdifferenz (Abbildung 89). Somit kann für die erforderliche Druckdifferenz (Steuergröße) der Volumenstrom breit variieren.

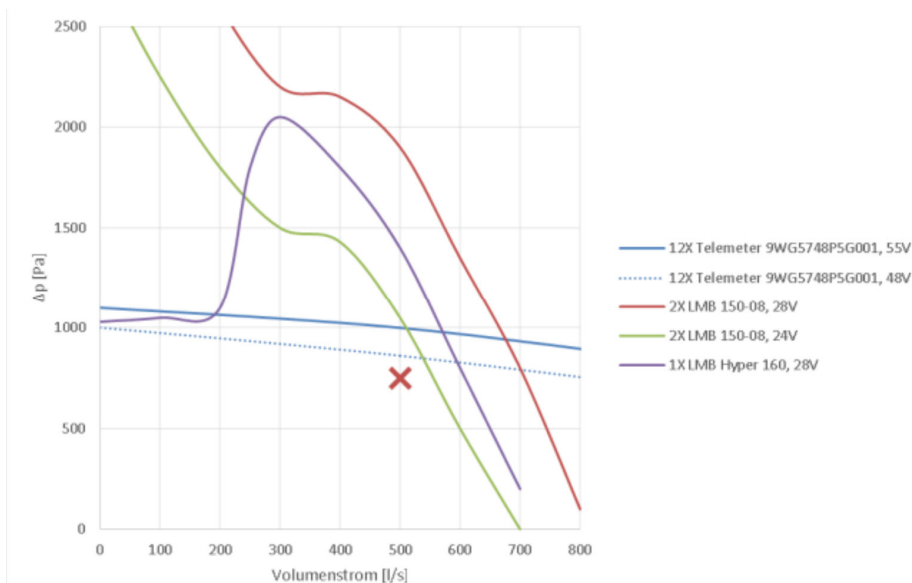


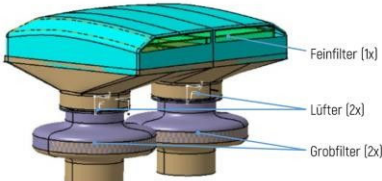
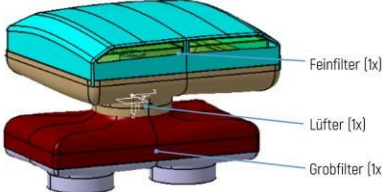
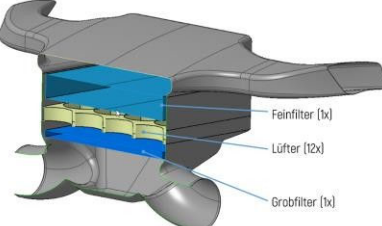
Abbildung 89: Kennlinien der Lüfter

3.2.2.1.12 Gehäusekonzept

Parallel zur Lüfterauswahl wurden die jeweiligen Gehäusekonzepte dargestellt und bewertet. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung sind nachfolgend in der Tabelle 20 aufgeführt.

Aufgrund der kompakten Bauform, der ausreichenden Leistungsdaten, der sofortigen Verfügbarkeit und der Kosten wurde Konzept 3, Telemeter 9WG5748P5G001, für das Fahrzeugpackage beschlossen und zur weiteren Detaillierung übernommen.

Tabelle 20: Varianten Lüfterabhängiger Gehäusekonzepte

Variante	Bild	Lüfteranzahl	Vorteile	Nachteile	Gesamt		
Konzept 1 Doppellüfter (LMB Hyper 150-08)		2 Stk.	hohe Leistung	+	Bauraum hohe Druckverluste aufgrund Einschnürungen Kosten	--	-
Konzept 2 Einzellüfter (LMB Hyper 160)		1 Stk.	sehr hohe Leistung	+	Bauraum hohe Druckverluste aufgrund Einschnürungen Kosten	--	-
Konzept 3 Telemeter 9WG5748P5G0 01		12 Stk.	kompakter Bau- raum geringere Druck- verluste & Kosten einfache el. An- steuerung	++	hoher Stromver- brauch aufgrund Anzahl der Lüfter geringe Reserve hinsichtlich Lüfterleistung	0	++

3.2.2.2 Konstruktion

Aus den CFD Auswertungen und Simulationen wurde der Beste Kompromiss Ausgewählt. Nachfolgend werden die einzelnen Systembestandteile, die Gesamtübersicht der Emissionsabsaugung sowie deren Funktion detaillierter vorgestellt.

3.2.2.2.1 Radeinhausung

Auf Basis der Geometrieuntersuchungen (Konzeptstudien und Auswahl), wurde im nächsten Schritt die ausgewählte Variante „Konzept Absaugkanal Routing 5“ herangezogen und unter dem Aspekt der Alltagstauglichkeit und Herstellbarkeit weiter detailliert. Das Gesamtsystem der Emissionsabsaugung ist auf Abbildung 90 dargestellt.

Die Radeinhausung basiert auf einem mehrteiligen Konzept, wobei die Alltagstauglichkeit mittels beweglicher Bauteile sichergestellt wird. Als Werkstoff der Hauptbauteile kommt ein Hybridbau aus Carbon- und Ara-

midfasern zum Einsatz. Durch diese Kombination erzielt man eine hohe Festigkeit im Verhältnis zum Gewicht, hohe Schlagzähigkeit und Abriebfestigkeit. Die einzige Ausnahme sind die Opferbauteile und die Verschlussdeckel radträgerseitig, welche additiv aus PDX gefertigt werden. Die Führungsschienen sind aus POM gefertigt und die Werkzeugseite ist außen.

In der Abbildung 91 ist die Übersicht der einzelnen Komponenten der Radeinhausung für das linke Vorderrad dargestellt. Einhausung des rechten Rades ist zu der linken gespiegelt. Die Aufteilung erfolgt in Haupt- und Anbauteile.

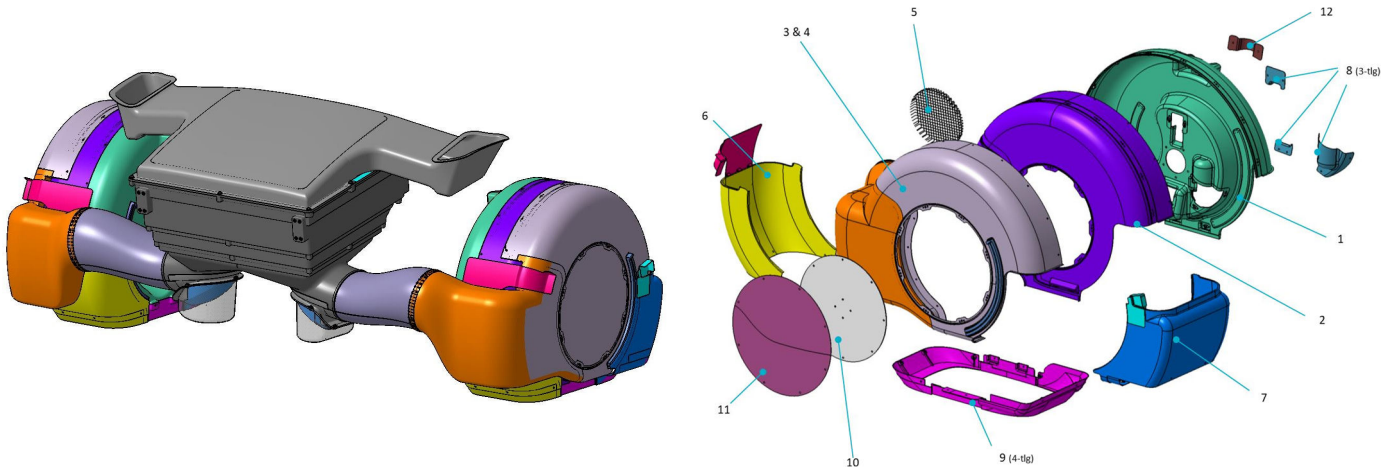


Abbildung 90: Gesamtübersicht der Emissionsabsaugung

Abbildung 91: Darstellung Anbauteile Radeinhausung

Hauptteile:

1. Befestigung Radträger. Befestigung radträgerseitig und am Federbein.
2. Haupteinhausung. Zusammen mit der Radträger-Befestigung bildet die Haupteinhausung die Kapselung des Rades.
3. Kanal (grau) inkl. verklebten Auslasskanal (orange). Die Kanalführung in dieser Baugruppe führt die Luft von der Absaugstelle über den Auslassstutzen über einen flexiblen Schlauch zur Filter-/Lüftereinheit.
4. Führungsschiene (an Hauptteilen verschraubt und verklebt). Die Schienen aus Polyoxymethylene stellen die Führung für die Aktuierung dar. Die Hauptbaugruppe wird mittels Floating Nuts (schwimmende Mutter; welche mittels Nieten befestigt wird und für einen Toleranzausgleich sorgt) miteinander verschraubt.

Anbauteile:

5. Schutzgitter - Zum Schutz der Filter ist am Auslassstutzen ein Schutzgitter für den Grobschmutz (zum Beispiel Zigarettenstummel etc.) vorgesehen. Das Gitter ist um den Stutzen gebördelt
6. ZB Abdeckung vorne mit verklebtem Griff. Die vordere Abdeckung lässt sich händisch um 20° auf den POM-Schienen verschieben
7. ZB Abdeckung hinten mit verklebtem Griff. Die hintere Abdeckung lässt sich händisch um 20° auf den POM-Schienen verschieben
8. Deckel Radträger (3x) Die drei Deckel auf der Rückseite verschließen die nötigen Öffnungen für die Montage am Radträger und sind additiv gefertigt
9. Opferbauteile (4x) Die Opferbauteile werden additiv gefertigt und sind wechselbar

10. Deckel innen (Flach oder Messradvariante). Pos. 2 Haupteinhausung besitzt eine Öffnung, welche die Zugänglichkeit gewährleistet. Diese Öffnung wird mittels des inneren Deckels verschlossen. Den Deckel gibt es in zwei Varianten, damit der Einsatz des Messrades (rechte Seite) ermöglicht wird. Beide Varianten besitzen Verschraubpunkte für die Abstützung
11. Deckel Kanal. Der Deckel schließt die Reifeneinhausung und sorgt für das optische Erscheinungsbild
12. Fixierung Federbein

3.2.2.2.2 *Bewegliche Radeinhausungsteile*

Damit der Demonstrator eine gewisse Alltagstauglichkeit aufweist, sind die Abdeckungen vorne und hinten an der Radeinhausung beweglich. Auf Schienen fixiert lassen sich die Abdeckungen um 20° nach oben rotieren (Abbildung 92). Diese Verschiebung erfolgt manuell über Betätigung des Griffs.

- Die Abdeckungen werden beim Rotieren durch den profilierten Flansch und die profilierten Schienen aufgeweitet
- Dadurch sinkt der Druck auf die Dichtung, was ein einfacheres Rotieren zur Folge hat
- Nach 20° rasten die Abdeckungen wieder ein

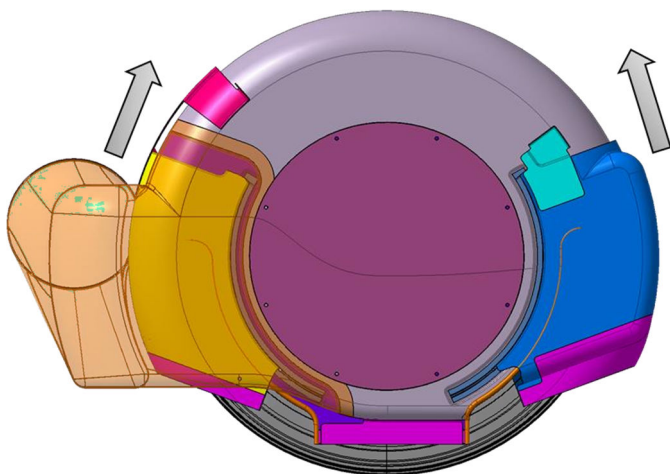


Abbildung 92: Aktuatorik der Abdeckungen

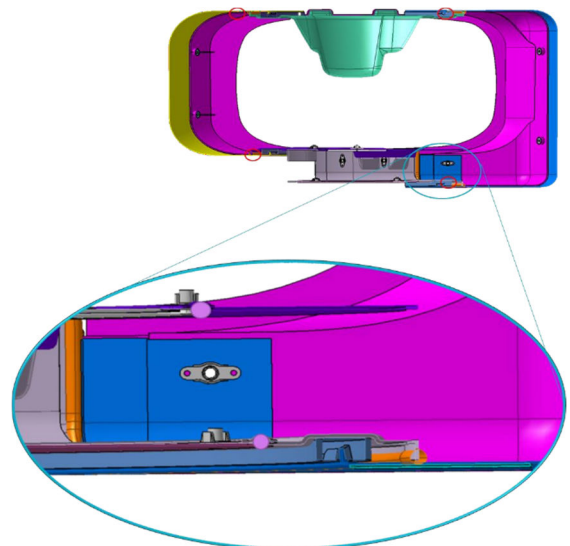


Abbildung 93: Dichtungskonzept

3.2.2.2.3 *Dichtungskonzept*

Der Spalt zwischen den Abdeckungen und den Haupt-Gehäuseteilen wird mittels einer umlaufenden Aufsteckdichtung aus einem witterungsbeständigen Synthetikgummi (EPDM) gedichtet. In der Abbildung 93 orange dargestellt. Das Abdichten der Bauteile zueinander ist notwendig, um eine Reduktion des Wirkungsgrades aufgrund Falschluff zu vermeiden. Die Abdichtung zwischen den Hauptteilen und die Abdichtung zwischen den Deckeln 10 und 11 Abbildung 91. und den Hauptteilen erfolgt mittels Butyl Dichtschnur (grün). Dazu ist eine entsprechende Nut auf den Bauteilen vorgesehen. Kleine Öffnungen und Spalte radträgerseitig werden mit einem Konstruktionsklebstoff von Würth „Klebt&Dichtet“ verschlossen.

3.2.2.2.4 Abstützungskonzept

Die Radeinhausung wird an drei Positionen fixiert Abbildung 94:

- Verschraubung in verklebten Adapter am Radträger
- Axiale Abstützung über Welle auf Radmutter, Verschraubung Lagerhülse (gelb) an Deckel innen
- Fixierung über Bügel am Federbein

3.2.2.2.5 Einbauuntersuchung / Zugänglichkeit

Die inneren Deckel und äußere Kanaldeckel sind verschraubt und können abgenommen werden (Abbildung 95). Durch die dadurch entstehende Öffnung ist eine Zugänglichkeit zu den Radschrauben und dem Luftventil ermöglicht. Für die Demontage des Reifens muss die Einhausung demontiert werden.

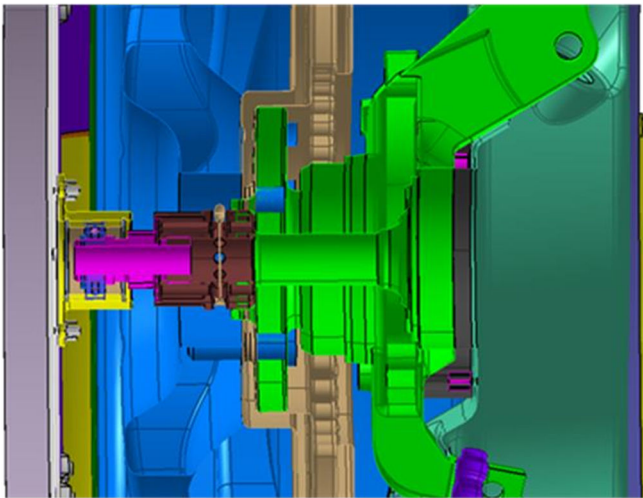


Abbildung 94: Schnitt Radträger

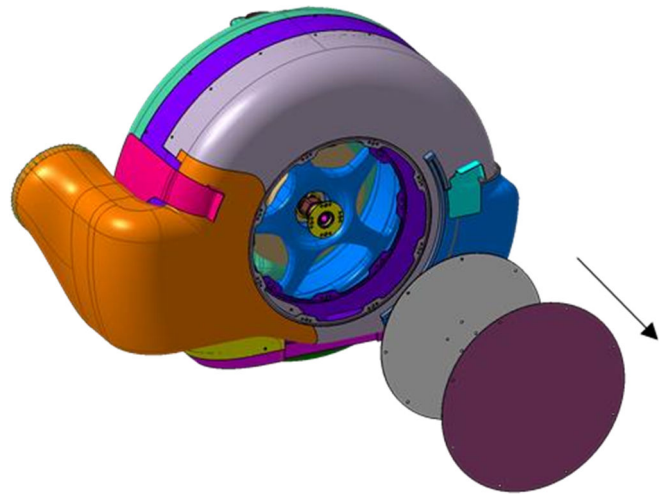


Abbildung 95: Zugänglichkeit Radeinhausung

3.2.2.2.6 Freigangskurve & Kinematik

Um den Freigang sicherzustellen, wurden Kinematikuntersuchungen eine Radhüllkurve mitsamt der Radeinhausung durchgeführt. Folgende Extrema mit Zwischenwerten wurden dargestellt und überlagert:

- Lenkhub max. links / max. rechts (Abbildung 96)
- Federweg min. / max. (Abbildung 97)

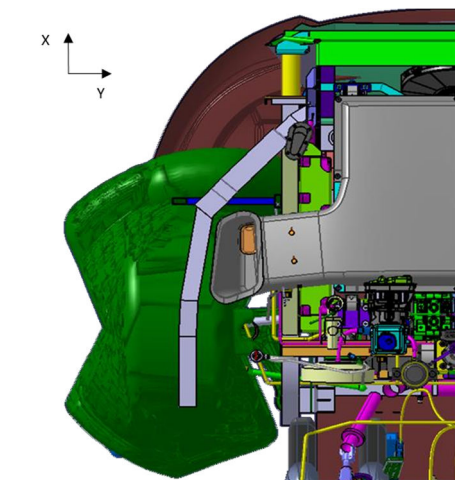


Abbildung 96: Reifengebirge mit Radeinhausung XY-Ebene

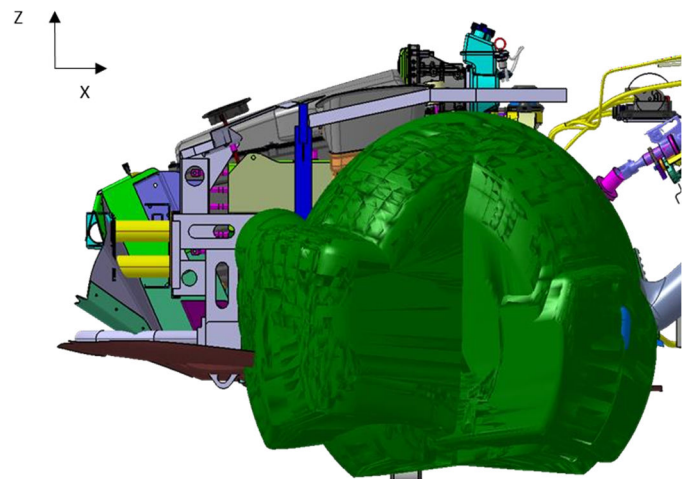


Abbildung 97: Reifengebirge mit Radeinhausung ZX-Ebene

3.2.2.2.7 Filter-/Lüftergehäuse

Abbildung 98 zeigt die Übersicht der Filter-/Lüftergehäuse-Aufbaus mit den dazugehörigen Komponenten.

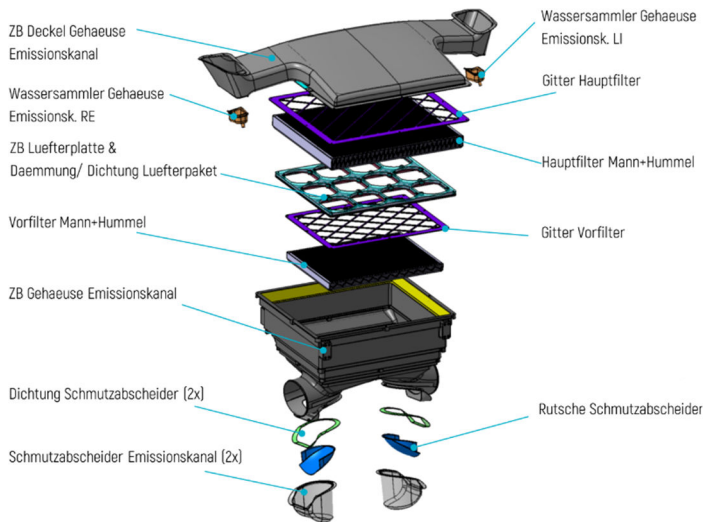


Abbildung 98: Explosionsansicht Filter-/Lüftergehäuse

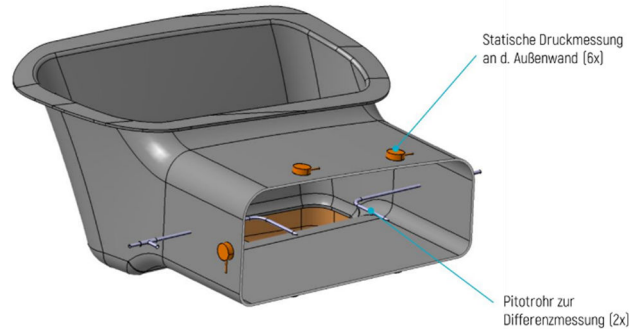


Abbildung 99: Messtechnik zur Volumenstrombestimmung Wassersammler Gehäuse Emissionskanal

Die Befestigung am Chassis erfolgt durch 4 Gummielemente jeweils an der Vorder- und Rückseite des Gehäuses angeschraubt.

Deckel Gehäuse Emissionskanal

Der Deckel des Emissionskanals (Abbildung 99) ist die Verbindung zwischen Fahrzeugkarosserie und der Emissionsabsaugung. Der Auslasskanal ist umlaufend mithilfe eines Gummiprofiles zur Fronthaube abgedichtet und schwingungsseitig entkoppelt. Des Weiteren beinhaltet der Deckel die Aufnahme für das Gitter welches den Hauptfilter in Position hält. Das Bauteil ist aus einem Faserverbundwerkstoff mit Naturfasern hergestellt, die durch ihre schwingungsdämpfenden Eigenschaften besonders geeignet sind. Außerdem wird zur Steifigkeitserhöhung ein Sandwichmaterial aus Kork eingebracht. Um das Eindringen des Wassers in den Filterbereich zu verhindern, befindet sich jeweils beidseitig an der tiefsten Stelle des Auslasskanals ein Wassersammler.

Der Emissionskanaldeckel beinhaltet beidseitig die Messtechnik zur Volumenstrombestimmung und auf der rechten Seite (in Fahrtrichtung) die Probeentnahmestelle für die Emissionsmesstechnik.

Als zusätzliches Bauteil ist beidseitig, jeweils eine Sammelstelle für Wasser angeordnet. Diese beinhaltet an der tiefsten Stelle des Auslasskanals, eine Ablaufleitung. Eventuelles Wasser wird so durch eine Ablaufleitung abgeführt.

Gitter

Das Gitter hält den Vorfilter in Position und stellt die Überpressung der Dichtung zur Anlagefläche sicher. Außerdem wird der Vorfilter gestützt, sodass ein Durchbiegen des Filters vermieden werden kann. Das Gitter wird von oben verschraubt

Hauptfilter

Beim Haupt- und Vorfilter handelt es sich um eine gemeinsame Neuentwicklung mit M&H als assoziierter Partner des ZEDU1-Projektes. Ziel ist es die Partikel der Fraktionen PM₁₀ bis in den UFP-Bereich bestmöglich abzuscheiden. Ursprünglich war ein Filter der HEPA Filterklasse angedacht, diese war allerdings aus materialtechnischen und betriebstechnischen Gründen nicht umsetzbar. Die Gründe gegen den Einsatz eines HEPA-Filters werden im Folgenden erläutert.

- Materialtechnische Gründe gegen den Einsatz einer H13/H14 Filterklasse:
 - H13/H14 Elemente nutzen entweder Glasfasermedien oder Membranmedien, seltener Ultrafeinfasermedien
 - Glasfasermedien sind aus folgenden Gründen ungeeignet für die geplante Anwendung da:
 - Mangelnde Widerstandsfähigkeit gegenüber Vibrationen.
 - Bruch und Austrag der Glasfasern ist zu erwarten
 - Stark hygroskopisch
 - Brandschutzklasse unzureichend
 - Staubanalyse nach Feldversuch problematisch
 - Membranmedien oder Ultrafeinfasermedien haben hingegen sehr hohe Druckverluste
- Betriebstechnische Gründe gegen den Einsatz einer H13/H14 Filterklasse:
 - Der querschnittbezogene Volumenstrom im ZEDU1-Bauraum liegt ca. 2.5x höher als in typischen H13/H14-Anwendungen
 - Sehr hohe Druckverluste der H13/H14 Elemente:
 - H13 ~290 Pa gegenüber E10 115 Pa
 - Deutliche Erhöhung der Lüfterdrehzahl nötig im Vergleich zum vorgeschlagenen Element, sonst Volumenstromrückgang um ca. 40 %
 - Deutlich höherer Stromverbrauch und deutlich erhöhte Schallemission
 - Die Filtrationsgeschwindigkeit ist höher als typisch
 - Abscheidegrad sinkt gegenüber der theoretischen Filterklasse deutlich (H13 wird nicht mehr erreicht)
 - Die Lebensdauer ist deutlich verkürzt
 - Die Komplexität einer Dichtung für ein derart großes Filterelement unter Fahreinfluss ist deutlich größer

Aus den oben genannten Gründen wurde für die ZEDU1 Applikation für den Filter ein E10 Medium ausgewählt, für die Anwendung optimiert und angepasst.

Kennwerte für Filterauslegung

Die Berechnungskennwerte zum Druckverlust in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit sind in Abbildung 100 aufgeführt.

- Volumenstrom 1800 m³/h
- Abscheidegrad EN1822 E10
- Druckverlustsimulation: Basierend auf analytischem Strömungsmodell, Werte gültig für homogene Anströmung
 - Optimale Faltenzahl: 115
 - Druckverlust: 112 Pa
 - CFD-Koeffizienten für Simulation als porous block s.u.
- Abscheidegrad Most Penetrating Particle Size: 90%

Fluent/StarCD Coefficients	C1 [1/m ²]	C2 [1/m]	β [Pa s/m ²]	α [kg/m ⁴]
Through Pleats	8.89E+07	6.81E+01	1.65E+03	4.10E+01
Perpendicular to Pleats	2.08E+10		3.85E+05	
Parallel to Pleats	2.60E+06		4.81E+01	

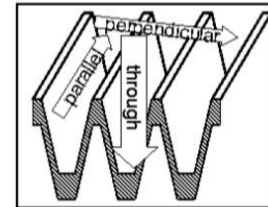


Abbildung 100: Leistungsprognose Hauptfilter

Die Befestigung und Abdichtung des Filters erfolgt durch die Fixierung des Gitters gemeinsam mit dem Deckel (Abbildung 101). Die notwendige Überpressung wurde im Vorfeld entsprechend ausgelegt und rechnerisch überprüft.

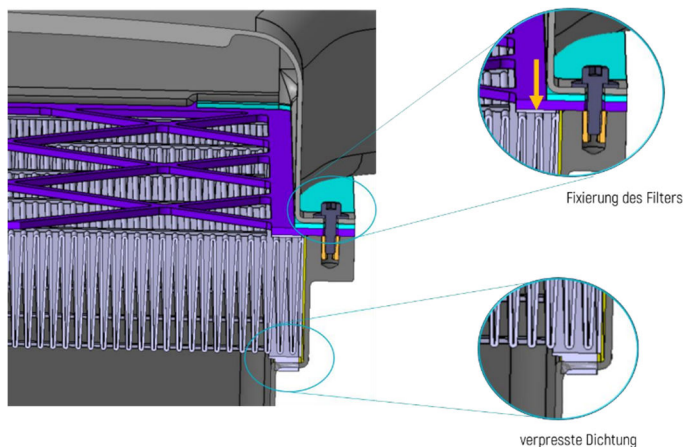


Abbildung 101: Befestigung und Abdichtung des Hauptfilters

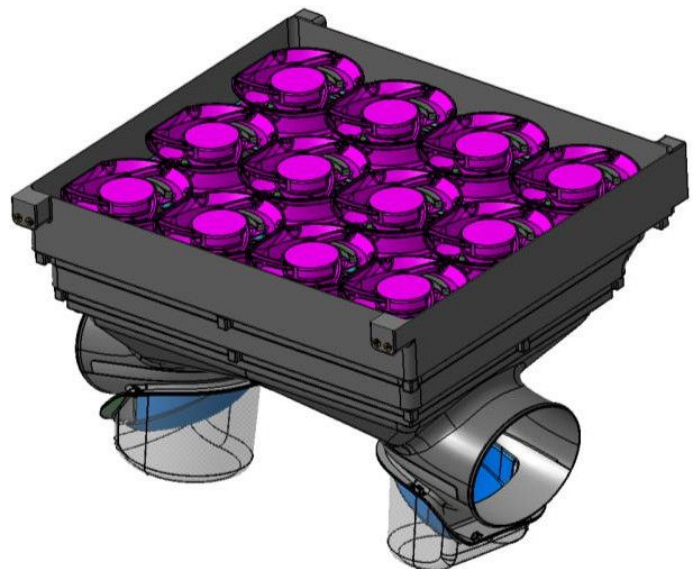


Abbildung 102: Darstellung Parallelschaltung Lüfter Absaugung

Lüfterplatte

Um den benötigten Volumenstrom und die notwendige Druckdifferenz zu erreichen, werden insgesamt 12 Lüfter parallelgeschaltet (Abbildung 102). Damit kein Schwingungsübertrag von der Lüfteraufnahme zum Gehäuse erfolgt, werden die Lüfter, bzw. die Aufnahmeplatte zusätzlich entkoppelt.

Die Entkopplung erfolgt in zwei Stufen. Zuerst werden die Lüfter jeweils einzeln auf Gummielementen gelagert eingebaut und auf die Aufnahmeplatte geschraubt. Zusätzlich ist die Aufnahmeplatte gegenüber dem Gehäuse entkoppelt. Damit sich kein Spalt zwischen Lüfter und Aufnahme bildet und keine Leckage Stelle entsteht, wird dazwischen eine geeignete Dichtmatte verbaut.

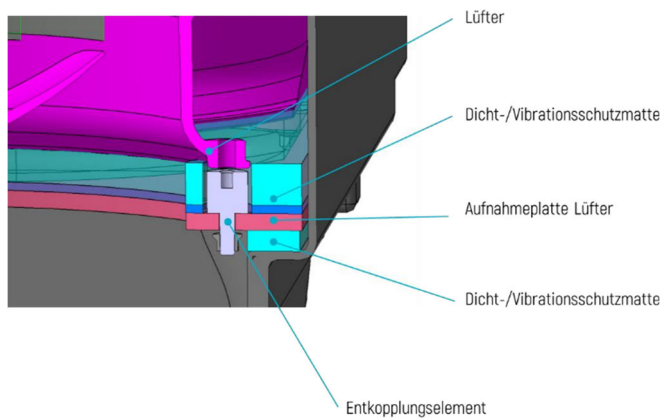


Abbildung 103: Darstellung Entkopplungsprinzip Lüfter

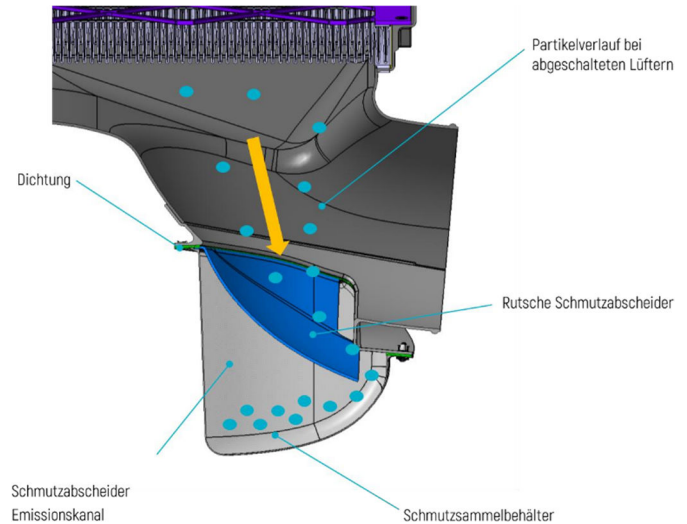


Abbildung 104: Prinzip Schmutzabscheider Gitter Vorfilter

Schmutzabscheider

Bei abgeschaltetem System fallen die größeren Partikel (die nicht im Filter gebunden werden) wieder zurück und werden über die „Rutsche Schmutzabscheider“ im Schmutzsammelbehälter gesammelt (Abbildung 104). Beim Wiedereinschalten der Lüfter werden diese Partikel durch das Labyrinthsystem nicht wieder aufgewirbelt, sondern verbleiben im Schmutzsammelbehälter. Die Reinigung / Leerung erfolgt durch die von unten zugängliche Verschraubung.

Vorfilter

Der Vorfilter hält die groben Partikel zurück und schützt so die nachfolgend positionierten Lüfter vor Stein schlagen u.ä.. Der Filter weist aufgrund seiner geringeren Filterklasse einen sehr geringen Druckverlust auf (Abbildung 105). Durch die Vielzahl an Falten ist die Filterfläche gegenüber dem Gehäusequerschnitt deutlich vergrößert. Aufgrund seiner Widerstandsfähigkeit gegen Wasser/Feuchte/Eis ist dieser besonders gut für mobile Anwendungen geeignet. Weitere Eigenschaften sind nachfolgend Zusammengefasst.

Eigenschaften Vorfilter:

- Polyurethandichtung, axial verpresst
- Umlaufender Vliesrahmen, C-Profil
- Filtermaterial: MICROGRADE C-SB D
- 95 Falten, 2.25 m² Filtermedium
- Versteifungselemente beidseitig
- Performance-Auslegung für 0.5 m³/s:
 - ISO 16890 Abscheidegrad PM10 55%
 - Druckverlust: 54 Pa
- Flammschutz nach DIN 53 438-3: F1
- Hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Wasser/Feuchte/Eis
- Verwendung von freigegebenen, serientauglichen Materialien und

- Volumenstrom 1800 m³/h
- Druckverlustsimulation: Basierend auf analytischem Strömungsmodell, Werte gültig für homogene Anströmung
 - Ideale Faltenzahl: 95
 - Druckverlust: 54 Pa
 - Abscheidegrad ISO 16890: PM10 55%
- CFD-Koeffizienten für Simulation als porous block

Fluent/StarCD Coefficients	C1 [1/m ²]	C2 [1/m]	β [Pa s/m ²]	α [kg/m ³]
Through Pleats	2.56E+07	2.95E+02	4.73E+02	1.78E+02
Perpendicular to Pleats	1.99E+09		3.69E+04	
Parallel to Pleats	2.07E+06		3.84E+01	

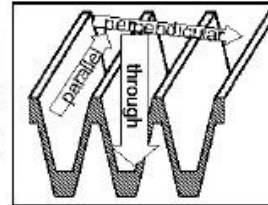


Abbildung 105: Spezifikationen Vorfilter

3.2.2.3 FMEA

Für das System Reifenpartikelabsaugung wurde eine FMEA erstellt. Diese wurde softwaregestützt mit dem Tool „Apis“ durchgeführt. Die getroffenen Bewertungen und Maßnahmen dienen als Richtlinien für die konstruktive Auslegung der Bauteile. Die Dokumentation der FMEA ist durch ein nach VDA Richtlinien erstelltes Gesamtdokument dargestellt. Nähere Erläuterungen zur FMEA-Betrachtung s. §3.4.8. Dieses ist im Rahmen der ZEDU1-Projektdokumentation abgelegt und bei Bedarf zugänglich.

3.3 TP 2: Entwicklung emissionsfreie Hybridbremse

3.3.1 Motivation

Im Zuge der Elektrifizierung von Fahrzeugen kann ein großer Teil der umzusetzenden Bremsenergie zurückgewonnen werden. Aus Sicherheitsgründen ist jedoch weiterhin eine mechanische Bremse erforderlich. Ein Grund ist die Notwendigkeit eines redundanten Systems. Ein weiterer Grund ist, dass das maximal erforderliche Bremsmoment mit dem elektrischen Antriebssystem nicht erreicht werden kann. Eine Möglichkeit, den Einsatz einer verschleißbehafteten Reibungsbremse weiter zu reduzieren, ist der Einsatz einer verschleißfreien Wirbelstrombremse. Wirbelstrombremsen, die dem Stand der Technik entsprechen, haben jedoch folgende Nachteile:

- sehr geringe Leistungsdichte im Vergleich zu Reibungsbremsen
- ein Abbremsen bis zum Stillstand ist nicht möglich.

Abbildung 106 zeigt die Bremsmomente bei einem Bremsvorgang bei konstantem erforderlichem Drehmoment M_{req} und linear abnehmender Drehzahl n bei Verwendung einer Wirbelstrombremse. Bei niedrigeren Drehzahlen muss eine zusätzliche mechanische Reibungsbremse die Differenz zwischen dem erforderlichen Drehmoment und dem Drehmoment der Wirbelstrombremse M_{ec} mit dem Drehmoment M_{fric} liefern.

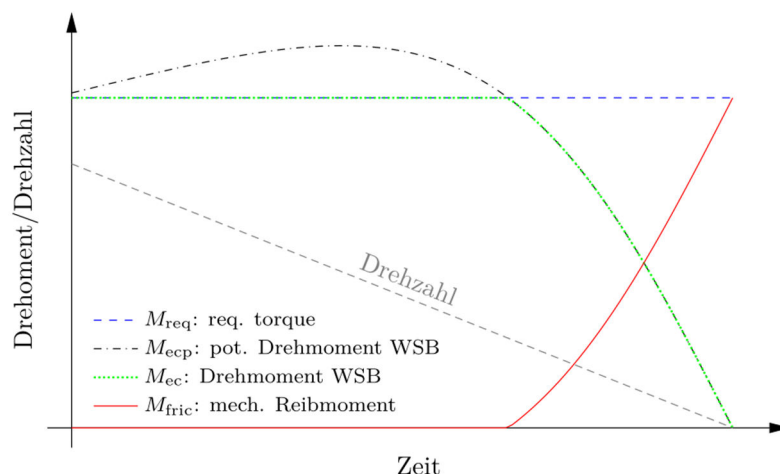


Abbildung 106: Theoretische Drehmomente einer Wirbelstrombremse mit linear abnehmender Drehzahl und einer Reibungsbremse für niedrigen Geschwindigkeiten.

In (23) wird gezeigt, dass der Nachteil der geringen Leistungsdichte durch eine anisotrope Materialstruktur kompensiert werden kann. Diese Struktur ermöglicht die Reduzierung des Skin-Effekts zu reduzieren und die freie Kühlfläche zu vergrößern. Der zweite Nachteil, des fehlenden Drehmoments bei Drehzahl Null, kann beseitigt werden, indem die Wirbelstrombremse zu einer Hybridbremse, wie im Patent (24) gezeigt, erweitert wird. Kombinationen von Wirbelstrombremsen und Reibungsbremsen werden auch in anderen Veröffentlichungen vorgestellt. In (25) wird ein Konzept vorgestellt, bei dem die Wirbelstrombremse und die Reibungsbremse lokal getrennt betrieben werden. In anderen Konzepten (26), (27) werden zusätzliche Erregerpole auf der Bremsscheibe positioniert, um Wirbelströme und damit einen verschleißfreien Anteil des Bremsmoments zu erzeugen. Alle diese Konzepte erzeugen das Reibmoment über einen klassischen Bremsattel. Das hier vorgestellte Konzept nutzt jedoch die magnetische Anziehung zwischen dem Rotor mit Erregerpolen und dem Stator einer Wirbelstrombremse, um das zusätzliche Reibmoment zu erzeugen. Ein zusätzlicher Aktuator mit Leistungselektronik oder gar ein hydraulisches System ist daher nicht erforderlich.

3.3.2 Konzept der Hybridbremse

Abbildung 107 zeigt das übergeordnete Funktionsprinzip der Hybridbremse. Der Strom in den Erregerwicklungen des Rotors erregt Wirbelströme im Stator, die bei der Drehbewegung ein Wirbelstrommoment M_{ec} erzeugen.

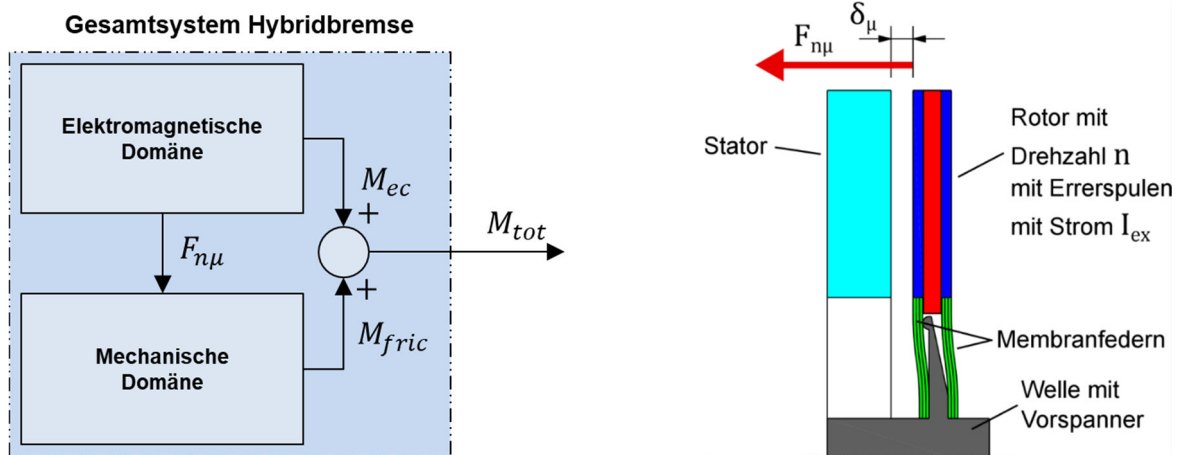


Abbildung 107: Modell der Hybridbremse auf erster Abstraktionsebene (links) und schematischer Viertelschnitt der Hybridbremse (rechts)

Bei niedrigen Drehzahlen nimmt die Induktionswirkung stark ab bis bei Drehzahl Null kein Bremsmoment durch Wirbelströme erzeugt wird. Bei diesen niedrigen Drehzahlen wird die magnetische Anziehungskraft $F_{n\mu}$ zwischen Rotor und Stator zur Erzeugung eines Reibmoment M_{fric} zum Abbremsen bis zum Stillstand ausgenutzt. Da der Kontakt zwischen dem Rotor und dem Stator für die Reibung notwendig ist, wird eine Feder verwendet, um sicherzustellen, dass der Kontakt nicht vorhanden ist, wenn kein Bremsmoment benötigt wird. Da das Drehmoment vom Rotor auf die Nabe übertragen werden muss und der Rotor gleichzeitig axial verschiebbar sein muss, wird eine Membranfeder verwendet die das Drehmoment übertragen kann.

3.3.3 Auslegungs-u. Optimierungsmethode

Wie die Wirbelstrombremse in (23) ist die Hybridbremse auf maximale Verschleißreduzierung im Falle einer Notbremsung gegenüber dem Einsatz einer konventionellen Reibungsbremse optimiert. Da der Verschleiß einer mechanischen Reibungsbremse annähernd proportional zur umgesetzten Bremsenergie ist (28), ist der Verschleißminderungsfaktor definiert als

$$\Delta\varepsilon_w = \frac{\int M_{ec}(t)2\pi n(t)dt}{\int M_{req}(t)2\pi n(t)dt} \quad (1)$$

wobei M_{ec} das verschleißfreie Drehmoment aufgrund von Wirbelströmen ist und M_{req} das gesamte erforderliche Drehmoment ist (Abbildung 106). Im ersten Schritt wird die Geometrie des aktiven magnetischen Materials genau nach der Methode die in (23) beschrieben ist optimiert, wobei das zusätzliche Reibmoment vernachlässigt wird. Im besten Fall kann eine Hybridbremse mit dieser Geometrie den Verschleißminderungsfaktor aus der Optimierung, bei der das Reibmoment vernachlässigt wurde erreichen. Das Reibmoment M_{fric} der Hybridbremse ergibt sich aus der Normalkraft F_{ns} , die auf die Fläche mit dem mittleren Radius r_m und dem entsprechenden Reibwert Reibungskoeffizient μ_{fric} .

Bei Verwendung einer Feder mit einer Steifigkeit nahe Null entspricht die Normalkraft zwischen den Oberflächen F_{ns} der magnetischen Normalkraft $F_{n\mu}$ zwischen Rotor und Stator. Um ein direktes Beispiel zu geben,

sehen die Drehmomente in diesem Fall wie auf Abbildung 108 aus. In diesem Fall führt der maximale Erregerstrom zu einer Normalkraft und damit zu einem Reibungsmoment, das durch die rote gestrichelte Linie dargestellt ist. Daher muss der Erregerstrom so lange reduziert werden, bis das Gesamtdrehmoment gleich dem erforderlichen Drehmoment ist. Das bedeutet, dass der maximale Erregerstrom auch bei Drehzahlen reduziert werden muss, bei denen das durch die Wirbelströme verursachte Drehmoment geringer als das erforderliche Drehmoment ist. Dies hat zur Folge, dass auch das Drehmoment der Wirbelströme stark reduziert wird und der Verschleißminderungsfaktor der vorherigen Optimierung nicht erreicht werden kann.

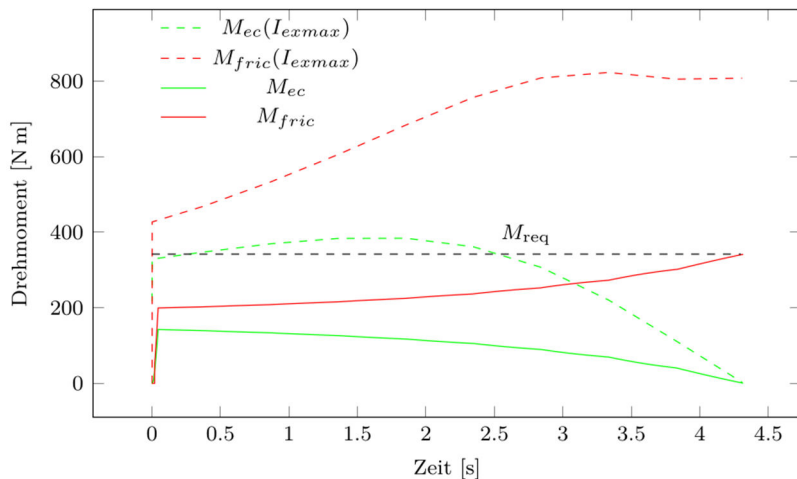


Abbildung 108: Drehmomente bei der Verwendung einer Membranfeder mit einer Steifigkeit gegen Null.

Idealerweise sollte der Erregerstrom so eingestellt werden, dass das Drehmoment der Wirbelströme unter Berücksichtigung der Randbedingungen $M_{ec} \leq M_{req}$ und $I_{ex} \leq I_{exmax}$ möglichst hoch ist (siehe Abbildung 106). Der Federmechanismus muss also so ausgelegt werden, dass die Normalkraft F_{ns} so weit reduziert wird, dass die Verschleißreduzierung möglichst nahe an den Wert der vorherigen Optimierung heranreicht. Im Einzelnen bedeutet dies, dass die Federkennlinie so optimiert werden sollte, dass die Zeit bis zum Kontakt des Rotors mit dem Stator t_{cont} möglichst lang ist, so dass das Reibungsmoment in diesem Zeitbereich Null ist, was der erste Qualitätsfaktor für die Federparameteranalysen ist. Aus Stabilitätsgründen sollten sich die Rotoren bei einem konstanten erforderlichen Drehmoment stabil verhalten. Das bedeutet, dass die axiale Geschwindigkeit hauptsächlich in einer Richtung, d.h. möglichst aperiodisch sein sollte. Ein aperiodischer Faktor ist als zweiter Qualitätsparameter definiert mit

$$\gamma_{ap} = \frac{\int_0^{t=t_{con}} \dot{s} dt}{\int_0^{t=t_{con}} |\dot{s}| dt} \quad (2)$$

wobei \dot{s} die Geschwindigkeit des Rotors oder die erste Ableitung der Rotorposition s auf Abbildung 110 ist. Der aperiodische Faktor γ_{ap} ist eins, wenn sich der Rotor nur in eine Richtung bewegt, und geht gegen Null, wenn er lange Zeit hin und her schwingt. Da eine hohe Aufprallgeschwindigkeit der Rotoren auf den Stator zu einer hohen Spitzen-Normalkraft und damit zu einem hohen mechanischen Spitzendrehmoment führen würde, das wahrscheinlich höher ist als das erforderliche Drehmoment, sollte zusätzlich die Aufprallgeschwindigkeit so niedrig wie möglich sein. Um einen zusätzlichen Freiheitsgrad zur Erfüllung dieser Anforderungen zu schaffen, hat die Nabe des Rotors eine Kontur, an der sich die Feder beim Komprimieren anlegen kann. Mit dieser Kontur lässt sich die Charakteristik der Federkennlinie beeinflussen. Die Geometrie der Feder ist auf Abbildung 111 dargestellt. Die vorgegebenen Parameter für die Optimierung sind der zulässige

Auslegungsraum für die Feder, der Außendurchmesser d_{os} , der Innendurchmesser d_{is} , die Gesamtdicke h_{stot} und die zulässige mechanische Spannung.

3.3.4 Modellbildung

Abbildung 109 zeigt das Systemmodell der Hybridbremse. Die Eingangsspannung u_{ex} treibt den Erregerstrom I_{ex} durch die Erregerwicklungen der in Abhängigkeit von der Zeit t mit

$$I_{ex}(t) = \frac{1}{L_{ex}} \int_{\tau=0}^t (u_{ex}(\tau) - R_{ex}I_{ex}(\tau)) d\tau \quad (3)$$

Dabei ist R_{ex} der Widerstand und L_{ex} die Induktivität der Erregerwicklungen. Das Drehmoment in Folge von Wirbelströmen M_{ec} sowie die magnetische Normalkraft $F_{n\mu}$ aufgrund der Feldkopplung werden in Lookup-Tabellen als Funktion des Erregerstroms I_{ex} , der Drehzahl n und des magnetischen Luftspalts δ_μ beschrieben. Zu diesem Zweck wird das elektromagnetische Modell aus (29), das durch einen co-energetischen Ansatz (30) - (31) erweitert wird zur Berechnung der Normalkraft erweitert wurde, verwendet.

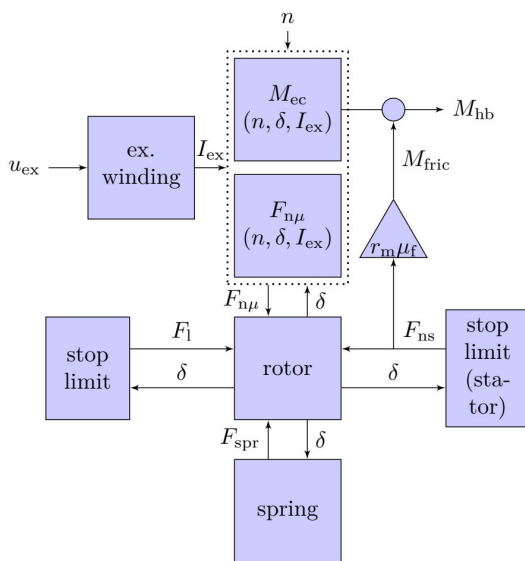


Abbildung 109: Systemmodell der Hybridbremse

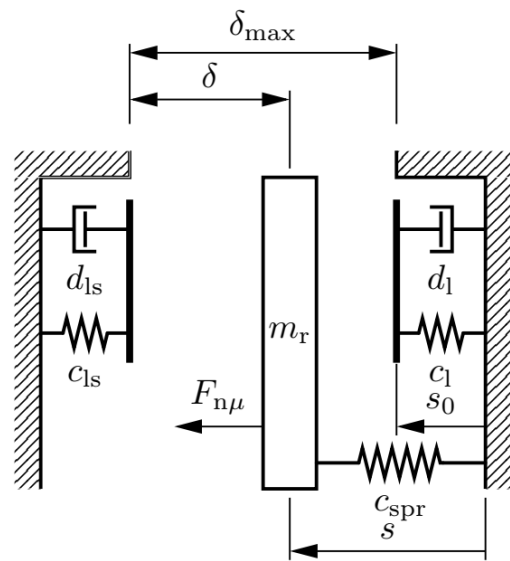


Abbildung 110: Mechanische Domäne des Systemmodells

Auf Abbildung 110 ist das Modell des mechanischen Bereichs des dynamischen Modells dargestellt. Die Bewegungsgleichung des Rotors mit der Masse m_r lautet

$$\frac{d^2s}{dt^2} = \frac{1}{m_r} (F_{n\mu} + F_l - F_{ls} - F_{spr}) \quad (4)$$

wobei die Kräfte der Anschlaggrenzen eine Kombination aus einer elastischen Kraft, ausgedrückt mit einer Steifigkeit c_l und einer Dämpfungskraft Kraft sind.

$$F_l = \Delta s_{is} c_l + \frac{a\dot{s}}{(|\delta| + \delta_0)^3} \quad (5)$$

In Wirklichkeit ist die elastische Kraft das Ergebnis der Verformung des Stators und des Rotors. Die Verformung wird jedoch durch eine virtuelle Überlappung Δs_{is} von Festkörpern dargestellt. Im Fall des Anschlags gegen den Stator kann die Überlappung ausgedrückt werden durch

$$\Delta s_{is} = \frac{|\delta_{max} - s + s_0| - (\delta_{max} - s + s_0)}{2} \quad (6)$$

wie es auf Abbildung 110 zu sehen ist. Durch die Betragsfunktion gilt $\Delta s_{is} \geq 0$. Der zweite Term in Gleichung (6) ist die Dämpfungskraft. Die Dämpfungskraft ist eine Mischung aus der Dämpfung aufgrund einer gequetschten Strömung, wenn der Luftspalt sehr klein wird, und der Dämpfung aufgrund der inneren Reibung der Körper. Das erste Dämpfungsphänomen wird in (32) beschrieben. Unter der inneren Reibung wird die Dämpfung inhärent mit der mit der Dämpfung der verdrängten Luft modelliert, indem Gleichung 1 in (32) modifiziert wird und die Parameter a und δ_0 sinnvoll gewählt werden.

Das analytische Modell der Feder basiert auf der Eulerschen Balkentheorie. Ziel des Modells ist es die Federkennlinie für die auf Abbildung 111 ersichtlichen geometrischen Parameter zu berechnen. Die genaue Beschreibung des Federmodells kann in (33) nachvollzogen werden.

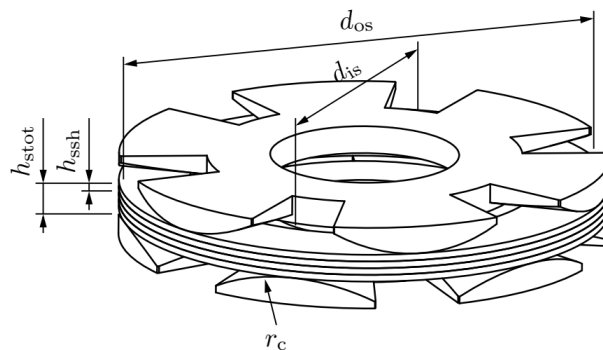


Abbildung 111: Geometrie des Membranfedermodells

3.3.5 Optimierung der Membranfeder

Nach einer transienten Simulation des Systemmodells werden die Qualitätskriterien durch Variation der Federparameter bewertet, die jeweils zu unterschiedlichen Federkennlinien führen. Abbildung 112 zeigt verschiedene Entwurfspunkte im Raum der Qualitätskriterien.

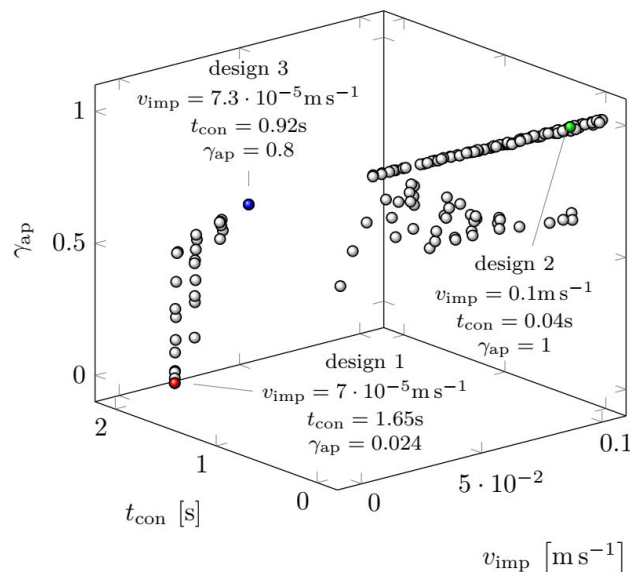


Abbildung 112: Ergebnis der Analyse der Federparameter. t_{con} : Zeit bis zum Kontakt, v_{imp} : Aufprallgeschwindigkeit, γ_{ap} : aperiodischer Faktor. Die farbigen Punkte (Design1 bis 3) beziehen sich auf die Zustandsraum Trajektorien auf Abbildung VI.3.

Zum besseren Verständnis des Systems wird das Verhalten für drei verschiedene Entwurfspunkte im Detail analysiert. Die roten, grünen und blauen Designpunkte (Design 1-3) sind jeweils das Ergebnis von Federparametern, die die Federkennlinien auf Abbildung 113 erzeugen. Jede dieser Federkennlinien führt zu einem anderen dynamischen Verhalten, das durch die Zustandstrajektorien auf Abbildung 114 veranschaulicht wird.

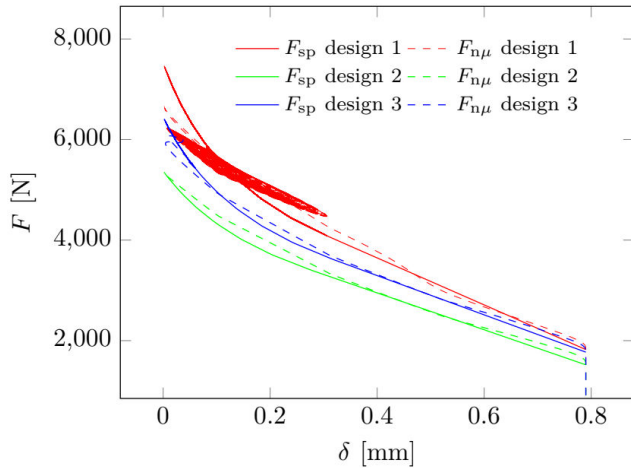


Abbildung 113: Federkennlinien für Federparameter die in die Gütekriterien resultieren die auf Abbildung 112 jeweils mit dem grünen blauen und roten Punkt gekennzeichnet sind und dazugehörige Zeitabhängige magnetische Kräfte

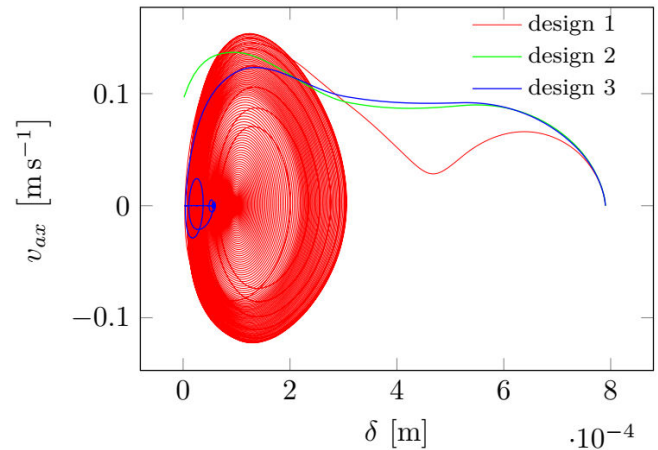


Abbildung 114: Zustandstrajektorien der axialen Bewegung des Rotors für verschiedene Federparameter die in jeweils verschiedene Aufprallgeschwindigkeiten, Zeiten bis zum Kontakt und Aperiodische Faktoren führen.

Es ist ersichtlich, dass die Auslegung 2 mit der grünen Federkennlinie die geringste Zeit bis zum Kontakt des Rotors mit dem Stator und die höchste Aufprallgeschwindigkeit ergibt, da sie die geringste Steifigkeit und Vorspannung aufweist. Design 1 mit der roten Federkurve ergibt die höchste Zeit bis zum Aufprall, eine sehr niedrige Aufprallgeschwindigkeit, aber auch ein dynamisches Verhalten mit einer hohen Anzahl von periodischen Schwingungen (siehe Abbildung 114). Irgendwann übersteigt die Federkraft die magnetische Anziehungskraft, wodurch die axiale Bewegung des Rotors verlangsamt wird und er sich zurückbewegt. Design 3 bietet einen Kompromiss zwischen einer geringeren Zeit bis zum Aufprall und einer geringeren Oszillationsrate. Auf Abbildung 115 wird deutlich, dass Konstruktionen, die zu einer höheren Zeit bis zum Auftreffen führen, auch einen höheren Verschleißminderungsfaktor $\Delta\varepsilon_w$ aufweisen, da das Reibungsmoment länger bei Null bleibt. Die Ausführung 1 hat den höchsten Verschleißminderungsfaktor von $\Delta\varepsilon_w = 0.9$, führt aber auch zu Drehmomentschwankungen aufgrund der instabilen Bewegung des Rotors.

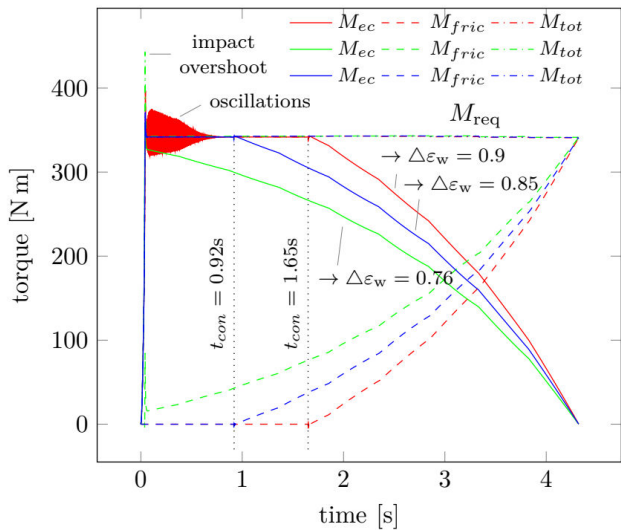


Abbildung 115: Drehmomente in Abhängigkeit der Zeit für verschiedene Designs der Membranfeder.

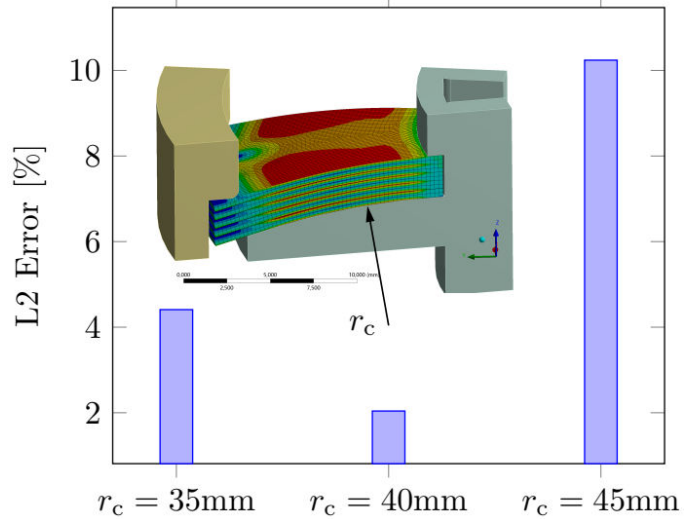


Abbildung 116: Relativer mittlerer Fehler zwischen gewünschter und mit FEM-Berechneter Federkennlinie für verschiedene Konturradien r_c .

Bauform 3 ist die Ausführung mit dem nächsthöheren Verschleißminderungsfaktor von $\Delta\varepsilon_w = 0.85$ und einem akzeptablen aperiodischen Faktor von $\gamma_{ap} = 0.8$. Dieses Design, das die blaue Federkurve ergibt, wird für den Bau eines funktionalen Demonstrators für zukünftige Experimente verwendet. Um sicherzustellen, dass das Federdesign Federkonstruktion in der Realität zu der gewünschten Federkurve führt (siehe Abbildung 117), wird im folgenden eine FEM Analyse durchgeführt. Abbildung 116 zeigt die mit FEM berechnete Federkennlinie der endgültigen Federauslegung. Der relative mittlere quadratische Fehler dieser Federkennlinie ist kleiner als 3% zur gewünschten.

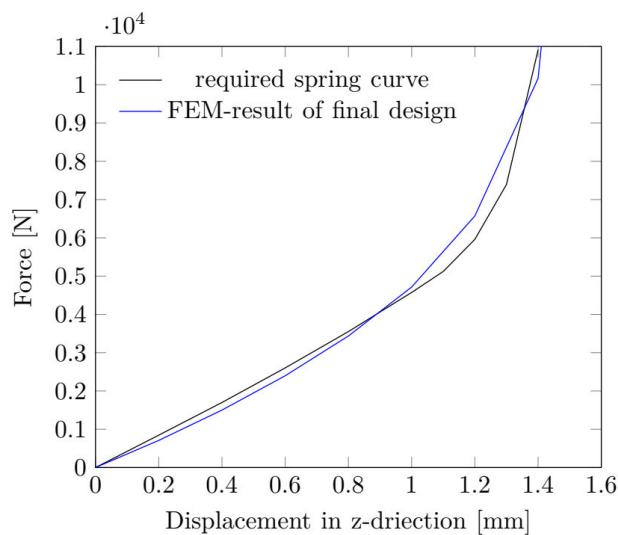


Abbildung 117: Gewünschte Federkennlinie (schwarz) und mit FEM berechnete Federkennlinie (blau).

3.3.6 Konstruktion des Demonstrators der Hybridbremse

Abbildung 118 zeigt die CAD-Konstruktion der Hybridbremse. Sie besteht aus dem Stator und den beiden Rotoren. Die geometrischen Parameter wurden in der vorhergehenden Optimierung für eine maximale Verschleißreduktion und Leistungsdichte ermittelt.

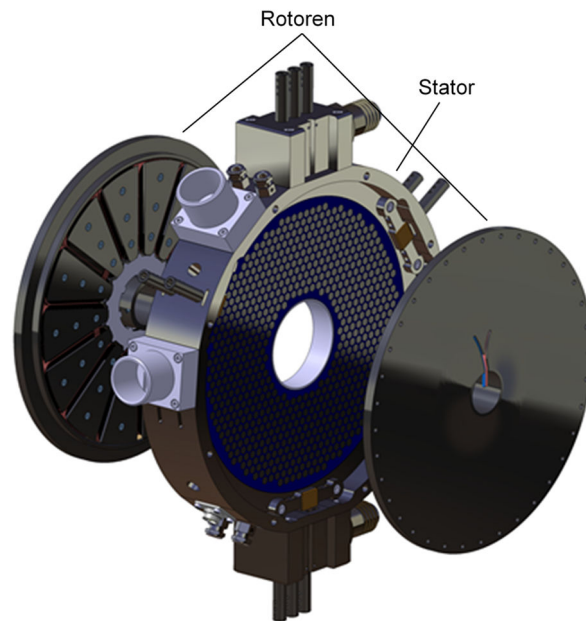


Abbildung 118: CAD-Konstruktion der Hybridbremse

Der Stator besteht wie auf Abbildung 119 dargestellt aus dem Gehäuse in dem sich die anisotrope Materialstruktur befindet. Sie ermöglicht durch die Unterdrückung des Skin-Effektes und durch eine Vervielfachung der Kühlfläche eine hohe Leistungsdichte im Vergleich zu herkömmlichen Wirbelstrombremsen mit Vollmaterial. Abbildung 120 zeigt die Konstruktion eines Rotors. Die Rotoren bestehen aus dem Grundkörper mit Polkernen auf den die Erregerspulen aufgeschoben sind. Die Polabdeckungen sorgen für eine Reduktion der Luftspaltreluktanz. Der Federmechanismus besteht aus der Membranfeder und der Konturbuchse die auf einen Absatz der Welle befestigt wird und sich so abstützt.

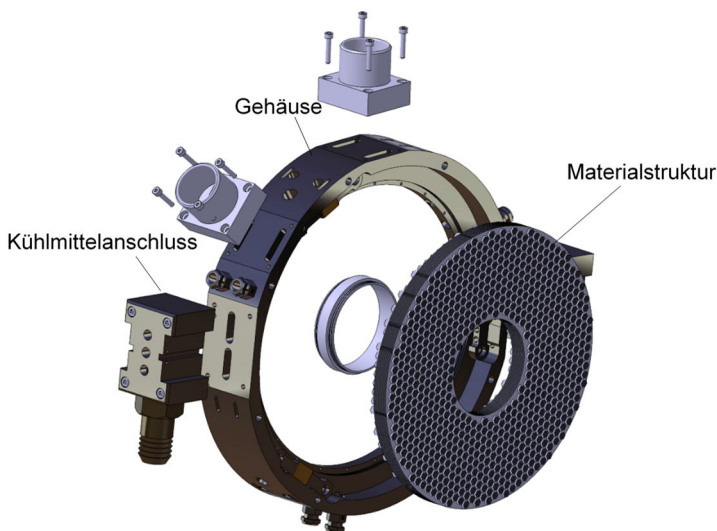


Abbildung 119: CAD-Konstruktion des Stators

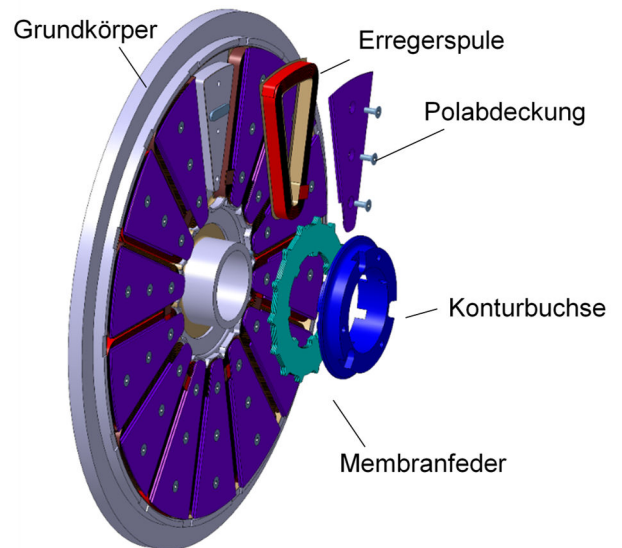


Abbildung 120: CAD-Konstruktion eines Rotors

3.3.7 Validierung von Teilmodellen

Die Validierung des elektromagnetischen Modells erfolgt indem die Flussdichten im Stator und die Anzugskraft zwischen dem Rotor und Stator einer Wirbelstrombremse in Abhängigkeit des Erregerstromes gemessen und mit den Modellergebnissen verglichen wird.

Die folgende (Abbildung 121) zeigt schematisch den Versuchsaufbau. Die Anzugskraft zwischen Rotor und Stator wird über den Kraft-Drehmoment-Sensor gemessen. Der Luftspalt zwischen Rotor und Stator kann mit Hilfe von Distanzringen eingestellt werden. Die magnetische Flussdichte in der Materialstruktur des Stators wird über sieben Feldspulen die um die Stahlstifte der Materialstruktur gewickelt sind gemessen. Die Abbildung 122 zeigt den realisierten Versuchsaufbau. Mit diesem wurden die Validierungsmessungen durchgeführt.

Auf Abbildung 123 ist das Messergebnis der räumlich maximal auftretenden Flussdichte im Stator in Abhängigkeit des Erregerstromes bei verschiedenen Luftspalten im Vergleich zur mit dem Modell berechneten dargestellt. Die Abweichung beträgt bei den Luftspalten 1 mm und 0.5 mm weniger als 5 %. Bei 0.3 mm Luftspalt tritt ein Fehler von max. 20 % auf

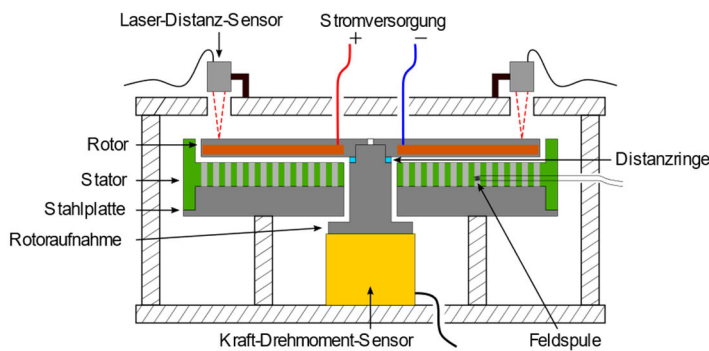


Abbildung 121: Versuchsaufbau schematisch

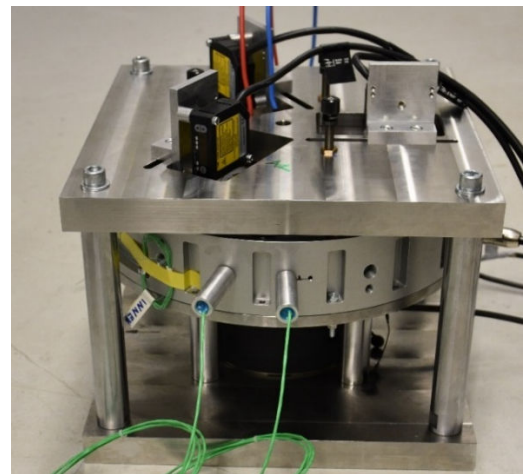


Abbildung 122: Realer Versuchsaufbau

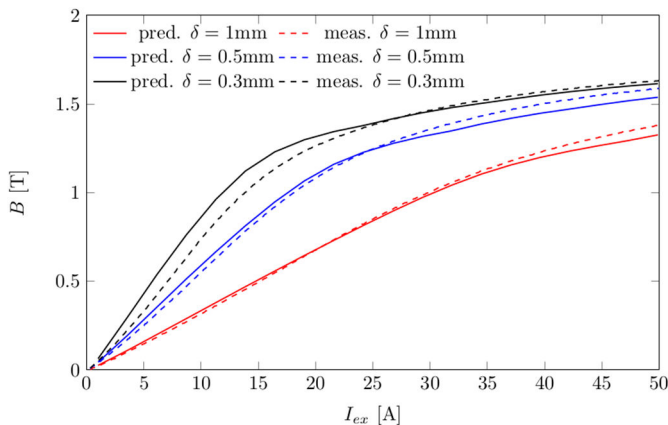


Abbildung 123: Messergebnisse der räumlich maximal auftretenden magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit des Erregerstromes bei verschiedenen Luftspalten im Vergleich mit der mit dem Modell berechneten.

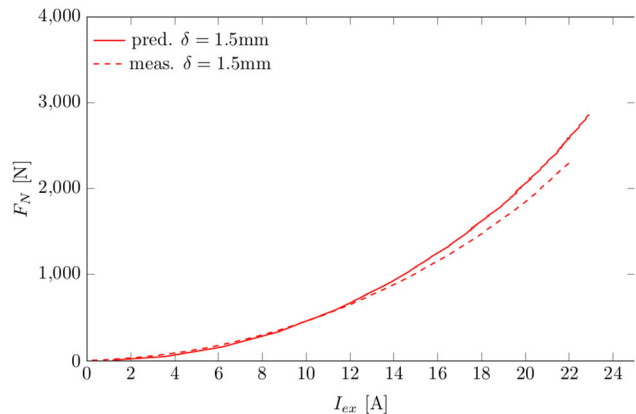


Abbildung 124: Normalkraft zwischen Rotor und Stator in Abhängigkeit vom Strom bei einem Luftspalt von 1.5 mm (Mit dem Modell berechnet - durchgehende Linie und gemessene Kraft - gestrichelte Linie).

Auch die Normalkraft zwischen Rotor und Stator lässt sich mit dem Modell gut vorhersagen. Auf Abbildung 124 ist die Normalkraft in Abhängigkeit des Erregerstromes aufgetragen. Die Abweichung zwischen den berechneten und den Messergebnissen beträgt maximal 8 %.

3.3.8 Aufbau zur Vermessung des Demonstrators Hybridbremse

Ziel der Vermessung ist es, das Funktionsprinzip und die erwartete Verschleißminderung zu demonstrieren und Daten zur Validierung des Systemmodells zu gewinnen. Abbildung 118 zeigt das CAD-Modell des Funktionsdemonstrators mit den in Tabelle 21 angegebenen Parametern. In erster Linie wird das Drehmoment M bei konstanten Drehzahlen n für verschiedene Erregerströme I_{ex} auf einem Elektromotorenprüfstand gemessen. Abbildung 125 zeigt den Versuchsaufbau in schematischer Darstellung. Der Demonstrator wird auf dem Elektromotorenprüfstand im Institut für Fahrzeugkonzepte vermessen.

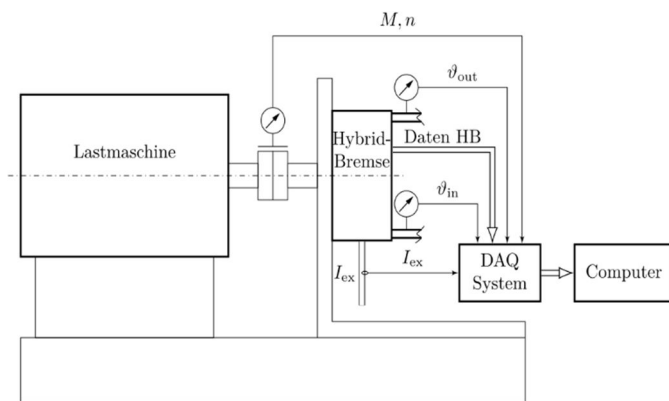


Abbildung 125: Schematischer Versuchsaufbau

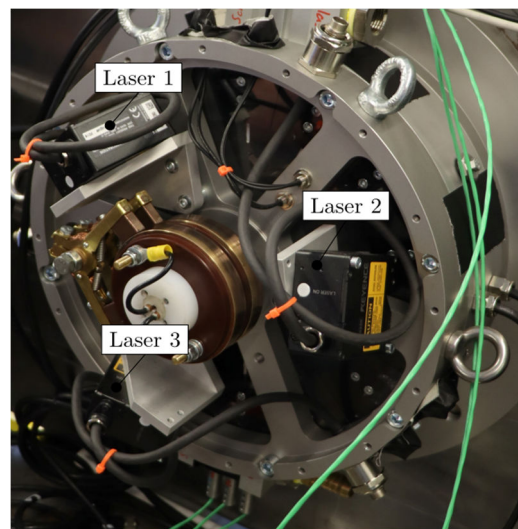


Abbildung 126: Hybridbremse auf dem Prüfstand. Die Laserabstandssensoren dienen zur Messung der axialen Rotorposition

Tabelle 21: Parameter des Funktionsdemonstrators der Hybridbremse

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Max. Bremsmoment	M_{max}	250	Nm
Max. Drehzahl	n_{max}	8000	min^{-1}
Außendruckmesser	D	0.31	m
Rotordurchmesser	D_o	0.25	m
Länge mit Lagerschilden	L	0.110	m
Länge ohne Lagerschilden	l	0.056	m

Die Welle der Hybridbremse ist über einen Drehmoment-Drehzahlsensor mit der Lastmaschine verbunden über den das Drehmoment und die Drehzahl gemessen werden. Weiterhin wird der Erregerstrom und die Temperaturen des Kühlmittels am Eintritt und Austritt als weitere Eingangs-/Ausgangsgrößen gemessen. Für eine detailliertere Modellvalidierung und zum Ermitteln der Verschleißreduktion werden zusätzlich Interne

Größen gemessen. Zum Ermitteln der Verschleißreduktion ist es erforderlich das verschleißfreie Bremsmoment resultierend aus Wirbelströmen und das Reibmoment getrennt messen zu können. Zum messen des Reibmomentes werden die Reibbeläge auf Kraftsensoren montiert, wie auf Abbildung 127 dargestellt. Weiterhin werden für die detaillierte Validierung des elektromagnetischen Modells und des Modells des Federmechanismus die axiale Verschiebung der Rotoren und die magnetischen Flüsse innerhalb der Materialstruktur sowie der Erregerwicklungen gemessen. Abbildung 128 (links) zeigt Feldsonden innerhalb der Materialstruktur zur Messung des magnetischen Flusses innerhalb der Stahlstifte und Abbildung 128 (rechts) Feldspulen zur Messung des magnetischen Flusses im Polkern und in der Polabdeckung.

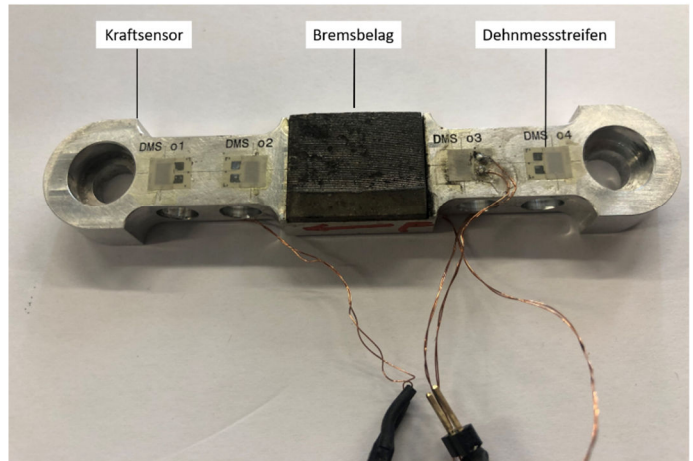
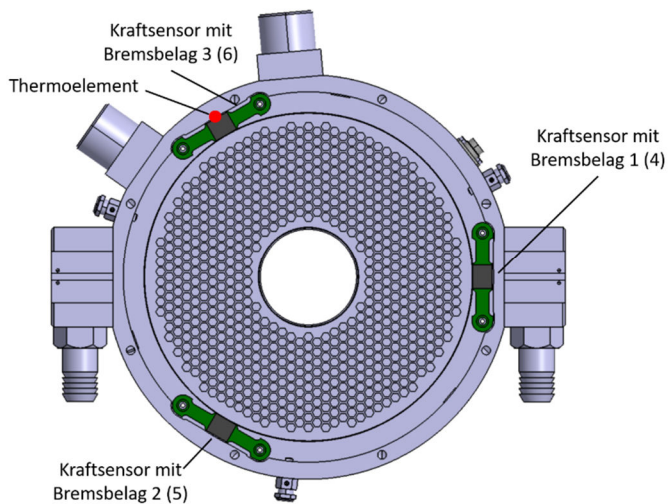


Abbildung 127: Links: Kraftsensoren (grün) mit Bremsbelägen (grau) der Hybridbremse (Bremsbeläge in Klammern sind rückseitig montiert) - Rechts: Kraftsensor mit Bremsbelag und aufgeklebten Dehnmessstreifen

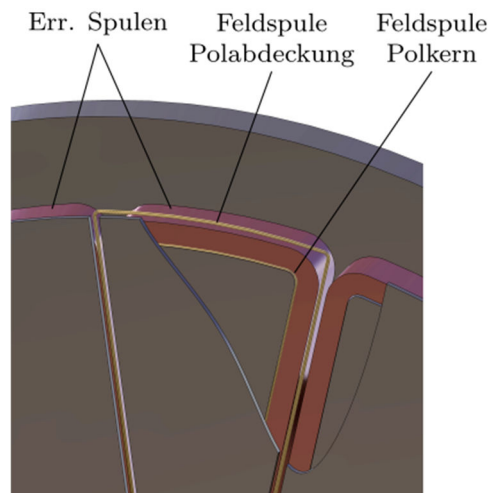
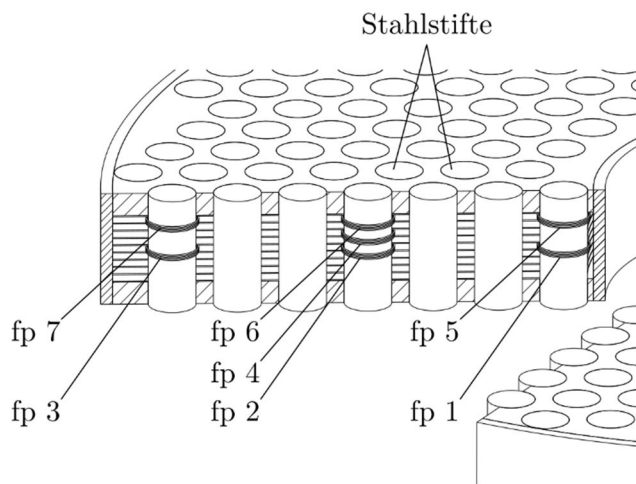


Abbildung 128: Feldspulen zur Messung des magnetischen Flusses in der Materialstruktur (links) sowie im Polkern und der Polabdeckung (rechts).

3.3.9 Methode zur Ermittlung des Reibmomentes

Um zwischen dem durch Wirbelströme verursachten Drehmoment und dem mechanischen Reibungsmoment zu unterscheiden, wurde die Reibungskraft an den Bremsbelägen mit Kraftsensoren über Dehnmessstreifen, wie auf Abbildung 127 dargestellt, gemessen. Abbildung 129 zeigt das resultierende Kraftsignal (Reibkraft) für eine Drehzahl von $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ und einen Erregerstrom von $I_{ex} = 50 \text{ A}$. Es ist zu erkennen, dass das Signal höchstwahrscheinlich durch Temperatureffekte gestört wurde. Das Kraftsignal für die Normalkraft

weiß diesen Effekt nicht auf. Dieses kann aufgrund des nichtlinearen Reibungskoeffizienten des Bremsbelags nicht für die Berechnung der Reibungskraft verwendet werden.

Um genauere Messergebnisse zu erhalten, muss eine alternative Methode zur Unterscheidung der Drehmomente gefunden werden. Eine Idee ist, das Drehmoment als Ergebnis der Wirbelströme aus dem gemessenen magnetischen Fluss in den Stiften zu berechnen, indem eine vereinfachte Version der Gleichung (8) aus (29) modifiziert wird. Das aus den gemessenen Flüssen berechnete Drehmoment wird berechnet mit

$$\bar{M}_{ecmeas} = \frac{C_{measT}n}{\rho_{20}[1 + \alpha_{el}(\vartheta_{sh} - 20^{\circ}C)]} \sum_{i=1}^{i=N_{\tau}} \left[(\phi_{fp6(i+1)} - \phi_{fp6(i-1)})^2 + (\phi_{fp4(i+1)} - \phi_{fp4(i-1)})^2 + (\phi_{fp2(i+1)} - \phi_{fp2(i-1)})^2 \right] \quad (7)$$

Dabei sind ϕ_{fp6} , ϕ_{fp4} und ϕ_{fp2} die magnetischen Flüsse in den Stahlstiften der Materialstruktur die mit den Feldspulen auf Abbildung 128 gemessen wurden, N_{τ} ist die Anzahl von äquidistanten Datenpunkten unter einem Polpaar und C_{measT} ist eine Konstante. Die Konstanten C_{measT} wird mit einer Referenzmessung bestimmt bei dem kein Kontakt zwischen Rotor und Stator auftritt und das Drehmoment somit nur aus Wirbelströmen resultiert. Die Temperatur der Bleche ϑ_{sh} wird mit der gemessenen Leistung und den Ein- und Austrittstemperaturen des Kühlwassers (siehe Abbildung 15) unter Verwendung der Nusselt-Korrelation aus (34) approximiert. Um diese Methode zu testen, wurde eine Messung mit blockiertem Federmechanismus und einem magnetischen Luftspalt von $\delta_{\mu} = 1.3mm$ durchgeführt, so dass alle gemessenen Drehmomente das Ergebnis von Wirbelströmen waren und im Prinzip mit (7) berechnet werden konnten. Abbildung 130 zeigt die gemessenen Drehmomente und die mit dem gemessenen Fluss berechneten Drehmomente in der Materialstruktur bei verschiedenen Drehzahlen und Erregerströmen. Bis zu einer Drehzahl von $n = 6500 \text{ min}^{-1}$ beträgt der Fehler zwischen dem mit den gemessenen magnetischen Flüssen berechneten Drehmoment und dem direkt gemessenen Drehmoment weniger als 10 %. Der große Unterschied bei Drehzahlen über $n = 6500 \text{ min}^{-1}$ ist höchstwahrscheinlich auf die Verformung des Rotors aufgrund von Fliehkräften zurückzuführen.

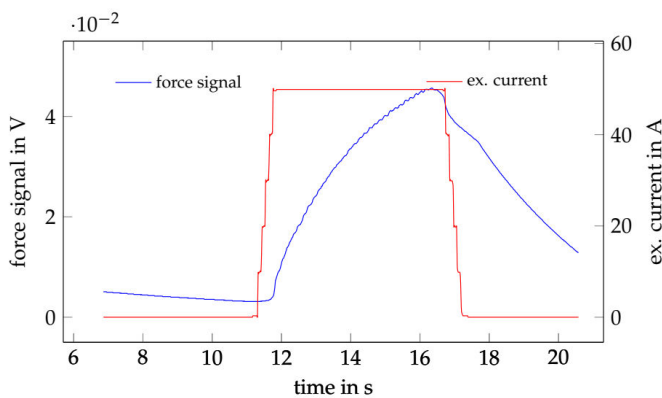


Abbildung 129: Signal von den Kraftsensoren bei konstantem Erregerstrom (Reibkraft)

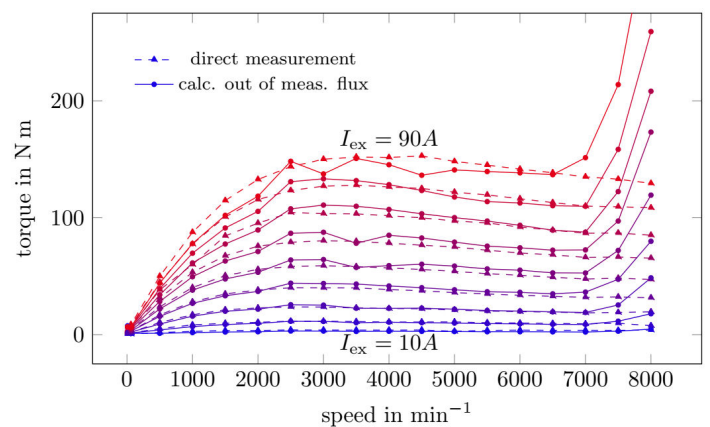


Abbildung 130: Gemessene Drehmomente (gestrichelt) und aus dem gemessenen magnetischen Fluss berechnete Drehmomente bei verschiedenen Erregerströmen.

3.3.10 Modellvalidierung

3.3.10.1 Validierung von Teilmodellen

Die folgende Abbildung 131 (links) zeigt die Primäre Flussdichte im Polkern in Abhängigkeit vom Erregerstrom und Abbildung 131 (rechts) die primäre Flussdichte in den Pins und im Polkern in Abhängigkeit vom Luftspalt. Die Abweichung zwischen Simulation und Experiment beträgt maximal 0.1 Tesla. Diese Abweichung ist höchstwahrscheinlich auf die Abweichung von angenommenen und wahren Magnetisierungsverhalten der Materialien zurückzuführen.

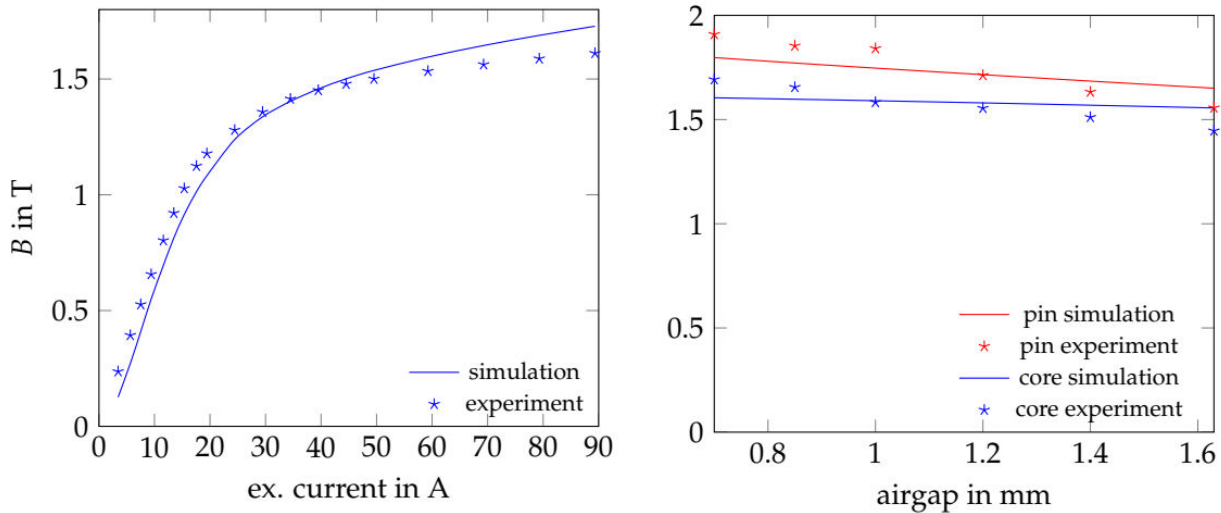


Abbildung 131: Gemessene und berechnete Flussdichten im Polkern bei einem Luftspalt von 0.5mm in Abhängigkeit vom Erregerstrom und gemessene und berechnete Flussdichten im Polkern und in den Stahlstiften für verschiedene Luftspalte bei konstantem Erregerstrom.

Zur Validierung des Teilmodells der Membranfeder wurde die Kraft-Weg-Kurve verschiedener Federn auf einer Zugprüfmaschine gemessen. Abbildung 132 (links) zeigt die Kraft-Weg-Kurve der für das Experiment ausgewählten Feder als Ergebnis einer FEM-Analyse und als Ergebnis eines Experiments. Die gestrichelte Linie zeigt das Ergebnis der FEM-Analyse, bei der nur die Federblätter verformbar sind, um Rechenzeit zu sparen. Dieses FEM-Ergebnis weicht über den gesamten Auslenkungsbereich stark von dem des Experiments ab. Ein wesentlich besseres Ergebnis liefert die FEM-Analyse, bei der auch die Konturbuchse und die Welle ebenfalls als verformbare Teile implementiert sind (siehe Abbildung 132 (rechts)). Durch die Verformung der Wellenmutter wird das Federblechpaket um einen entstehenden Kontaktpunkt gebogen. Dadurch ergibt sich ein weniger steifes Verhalten als bei der FEM-Analyse mit fester Konturbuchse und Wellenmutter.

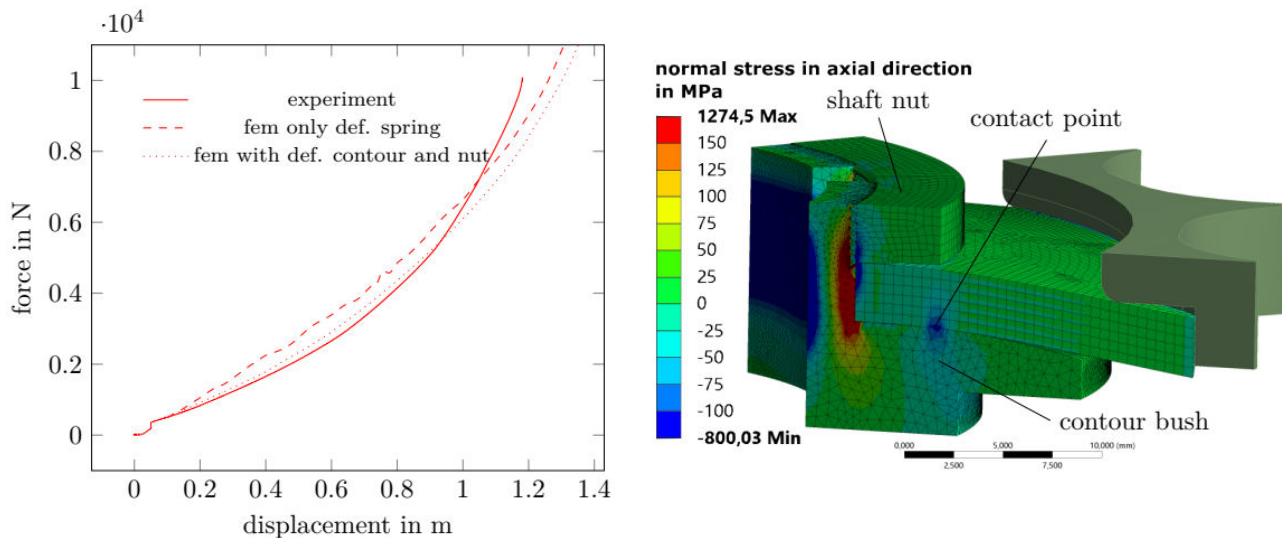


Abbildung 132: Kraft-Weg-Kennlinien der Membranfeder als Ergebnis einer FEM-Analyse und einer Messung (links) und deformierter Federmechanismus als Ergebnis einer FEM-Analyse.

3.3.10.2 Vermessung und Validierung des Gesamtsystems Hybridbremse

Hauptziel der Messung war die Ermittlung des verschleißfreien Drehmoments als Folge der induzierten Wirbelströme und des Reibungsmoments. In der folgenden Abbildung 133 sind ersten Messergebnisse der Drehmomente spezifischen Verschleißreduktion bei verschiedenen Drehzahlen und Drehmomenten aufgetragen. Komplett grüne Punkte bedeuten, dass das Bremsmoment verschleißfrei durch Wirbelströme generiert wird, während bei völlig roten Punkten das Bremsmoment ausschließlich durch Reibung hervorgerufen wird. Es ist ersichtlich, dass der größte Drehzahl-Drehmoment-Bereich insbesondere bei hohen Drehzahlen komplett verschleißfrei gefahren werden kann. Das bedeutet, dass die geforderte Verschleißreduktion von 80% bei einer Vollbremsung erreicht werden kann. Die höchste bisher gemessene Leistungsdichte beträgt bei einer Drehzahl von 5500 1/min 6 kW/kg.

Die Validierung des Gesamtsystems wird schrittweise durchgeführt. Zunächst wurde das zur Berechnung des Wirbelstromdrehmoments verwendete elektromagnetische Modell mit dem gemessenen Luftspalt validiert, d. h. unter Vernachlässigung des Federmodells. Abbildung 134 zeigt den relativen Fehler zwischen dem vorhergesagten und dem experimentell gemessenen Wirbelstromdrehmoment in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl. Die meisten Datenpunkte weisen einen relativen Fehler von weniger als 10 % auf. Allerdings gibt es relativ hohe Fehler für einen Erregerstrom von $I_{ex} = 10A$ und $I_{ex} = 20A$ im Drehzahlbereich von $n = 4000 \text{ min}^{-1}$ bis $n = 7500 \text{ min}^{-1}$. Darüber hinaus ergeben sich im unteren Drehzahlbereich bei Erregerströmen von $I_{ex} = 30 A$ bis $I_{ex} = 50 A$ relativ große Fehler. Der Grund für die Fehler im niedrigen Drehmomentbereich sind höchstwahrscheinlich die Reibungsmomente des Prüfstandes. Bei allen anderen Messpunkten wird davon ausgegangen, dass die Fehler hauptsächlich darauf zurückzuführen sind, dass der Luftspalt in radialer Richtung nicht homogen ist und der Luftspalt nur bei einem Radius von $r = 0.1 m$ gemessen wird und der Außenradius der Pole $r_o = 0.125 m$ beträgt.

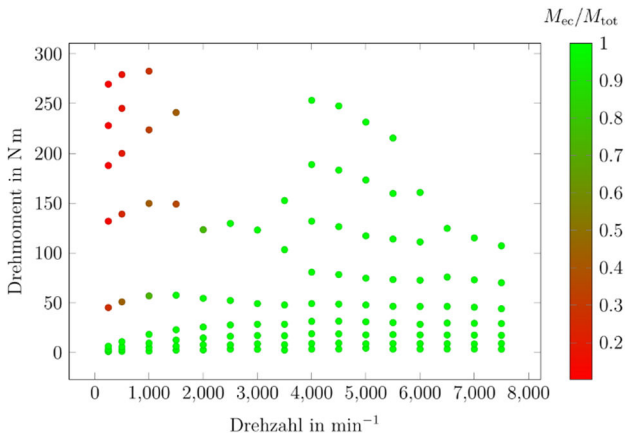


Abbildung 133: Kennfeld der Verschleißreduktion bei verschiedenen Drehzahlen und Drehmomenten

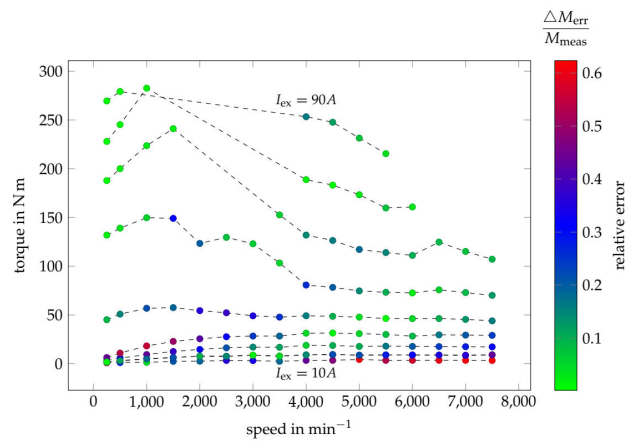


Abbildung 134: Kennfeld des relativen Fehlers zwischen berechnetem und gemessenem Bremsmoment.

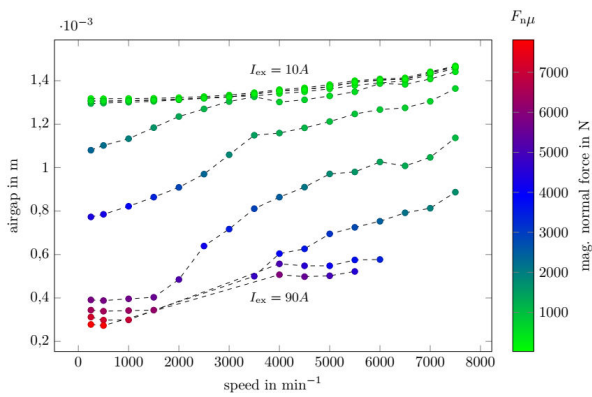


Abbildung 135: Kennfeld der Simulierten Normalkraft mit den gemessenen magnetischen Luftspalte für verschiedene Erregerströme.

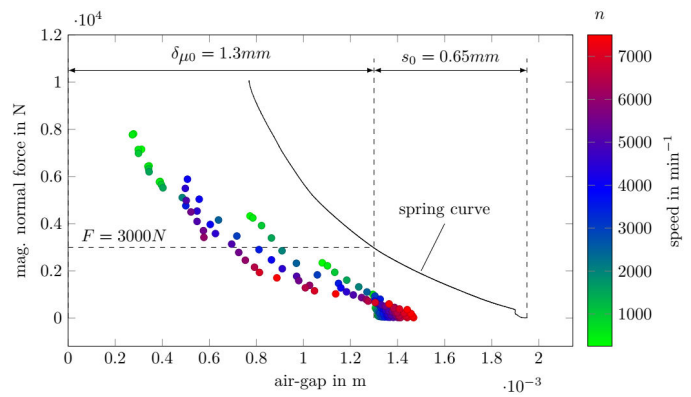


Abbildung 136: Mit dem gemessenen Luftspalt simulierte magnetische Normalkraft und Federkennlinie.

In Abbildung 135 ist der Luftspalt über der Drehzahl dargestellt, wobei die Farben die entsprechende berechnete Normalkraft zeigen. Bei einem niedrigen Erregerstrom und damit einer geringen magnetischen Anziehungskraft vergrößert sich der gemessene Luftspalt bei hohen Drehzahlen. Das bedeutet, dass der Rotor durch die Fliehkräfte in axialer Richtung deformiert wird, so dass die Luftspalte in radialer Richtung inhomogen sind. Daher wird er auch durch die magnetische Anziehungskraft verformt, allerdings in die andere Richtung. Daher ist der Luftspalt entlang des Radius während der Messung unbekannt, außer an dem Radius, an dem die Laserabstandssensoren positioniert sind. Die Verformung des Rotors führt nicht nur zu einem unbekanntem Luftspalt, sondern wirkt sich auch stark auf das gesamte Systemverhalten aus. So ist für eine bestimmte Verkleinerung des Luftspalts eine deutlich geringere Anziehungskraft erforderlich als in der Theorie. Abbildung 136 zeigt die mit dem gemessenen Luftspalt berechnete magnetische Anziehungskraft über dem gemessenen Luftspalt, wobei die schwarze Kurve die gemessene Federkurve ist. Aufgrund der Vorverformung der Membranfeder, die $s_0 = 0.65\text{mm}$ beträgt, sollte es theoretisch bis zu einer magnetischen Anziehungskraft von $F_{N\mu} = 3000\text{N}$ zu keiner Verringerung des Luftspalts kommen. Aufgrund der Verformung des Rotors verringert sich der Luftspalt jedoch sofort mit einer Erhöhung der magnetischen Normalkraft.

3.3.11 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Arbeitspaket wurden das Modell und die Entwicklungsmethode für eine Hybridbremse vorgestellt. Schließlich wurde ein funktionierender Demonstrator getestet. Vor allem aber zeigen die Ergebnisse (35), dass es möglich ist, die magnetische Anziehungskraft einer Wirbelstrombremse zu nutzen, um bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten bis zum Stillstand zu bremsen. Die Feder, die die axiale Bewegung der Rotoren ermöglicht, wurde für eine hohe Verschleißreduzierung sowie ein stabiles dynamisches Verhalten optimiert. Aufgrund der Reibung in der Buchse wurden bei den Tests keine axialen Schwingungen festgestellt oder gemessen. Daher sollte es möglich sein, eine Federauslegung zu verwenden, die zu einer höheren Verschleißreduzierung führt, wovon bei der Auslegung ausgegangen wurde, dass sie zu starken Schwingungen führt. Die Verschleißminderung im Fahrzyklus wurde noch nicht analysiert, da das Drehmoment-Drehzahl-Kennfeld noch nicht vollständig gemessen wurde. Außerdem zeigen die Messdaten eine starke Verformung des Rotors, so dass der Luftspalt entlang des Radius inhomogen ist. Die Validierung der Teilsysteme war erfolgreich. Sowohl das elektromagnetische Modell zur Berechnung des primären magnetischen Flusses als auch das FEM-Modell der Feder weichen um weniger als 10% von den experimentellen Ergebnissen ab. Die vorgeschlagene Methode zur Berechnung des Wirbelstrommoments aus den gemessenen magnetischen Flüssen wurde ebenfalls erfolgreich getestet. Die endgültige Validierung des Gesamtsystems war aufgrund der Verformung des Rotors, die zu einem inhomogenen Luftspalt führte, nur teilweise möglich. Selbst wenn der Luftspalt an mehr Punkten gemessen worden wäre, wäre eine Validierung des Modells ebenfalls nicht möglich gewesen, da das elektromagnetische Modell ein zweidimensionales Modell ist. Daher muss das elektromagnetische Modell zu einem dreidimensionalen Modell erweitert werden, und die Laser-Distanzsensoren sollten an verschiedenen radialen Standorten positioniert werden, um das Modell vollständig zu validieren.

Auszüge der Ergebnisse bezüglich der Hybridbremse wurden in (33) und (35) veröffentlicht.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eine Verschleißreduktion von 80% bei einer Vollbremsung kann erreicht werden.
- Die gemessene Leistungsdichte beträgt 7,8 kW/kg womit der Zielwert von 7 kW/kg übertroffen wird.
- In der Modellvalidierung beträgt die Abweichung zwischen Messung und Berechnung bei Drehmomenten und Flussdichten <10% bezogen auf die jeweiligen Maximalwerte.

3.4 TP3: Fahrzeugdemonstrator

3.4.1 Auswahl Versuchsträgerbasis

Die Vorgaben des Lastenhefts sind in ein Pflichtenheft überführt worden. Um die beste Auswahl eines Versuchsträgers gewährleisten zu können wurden in einem ersten Schritt mehrere mögliche Fahrzeuge gegenübergestellt und miteinander verglichen. Wesentlich einschränkend war hier vor allem der Anspruch den ZEDU1-Demonstrator keinem OEM zuzuordnen und somit die Anforderung eine OEM unabhängige Basis für den Versuchsträgeraufbau zu verwenden. Auf Abbildung 137 sind die 4 Konzepte der Endauswahl gegenübergestellt.





KRITERIUM	KONZEPT 1	KONZEPT 2	KONZEPT 3	KONZEPT 4
BILD				
ELEKTROANTRIEB / BATTERIEKAPAZITÄT	Nein	Ja / 19,2kWh	Ja / 31kWh	Nein
[E-] LEISTUNG / VMAX / REICHWEITE	- / - / -	45kW / 120km/h / 183km	110kW / 130km/h / 130km	- / - / -
PASSAGIERE	4 Sitzler	2 Sitzler	7 Sitzler	2 Sitzler
BAURAUM	++	--	+	-
GEWICHT	1240kg	600kg	2230kg	1105kg
KOSTEN	Ca. 16.500€	Ca. 20.000CHF (Bausatz)	Ca. 60.000€	Versch. Kits erhältlich

Abbildung 137: Konzeptbewertung Versuchsträger

Für das Konzept 1, den MPM Erelis, als Basis für den Versuchsträgeraufbau spricht vor allem der verfügbare Bauraum, der niedrige Basispreis und die Kombination aus Stahlkarosserie und Kunststoffaußenhaut, die einfache Modifikationen gewährleisten. Ebenso sind CAD-Daten der Außenhaut käuflich zu erwerben und somit für die Erstellung von CFD Simulationsmodellen zu nutzen. Dieses Fahrzeug (Abbildung 138) wurde zu Beginn des Projekts ebenso beschafft wie die CAD-Daten der Außenhaut (Karosserie).



Abbildung 138: Versuchsträger MPM Erelis



Abbildung 139: MPM Erelis demontiert

3.4.2 Generierung der CAD-Daten

CAD Daten die für die Integration der ZEDU1 Einheiten, elektrischen Komponenten und Kühlung zusätzlich notwendig sind, wurden bei HWA „in house“ erzeugt. Hierzu wurde das Fahrzeug zerlegt (Abbildung 139) und die notwendigen Flächen und Bauteile mit einem Messarm abgetastet. Die dadurch entstandene Punktwolke wurde mittels Flächenrückführung in ein konstruktiv nutzbares CAD zurückgeführt. Auf Abbildung 140 ist dieser Stand dargestellt. Exemplarisch ist der Vorderbau des Fahrzeugs auf Abbildung 141 vergrößert

dargestellt. An diesen Bereich sind hohe Genauigkeitsanforderungen gestellt, da hier die ZEDU1 Einheiten und die wesentlichen Komponenten der Kühlung integriert werden.

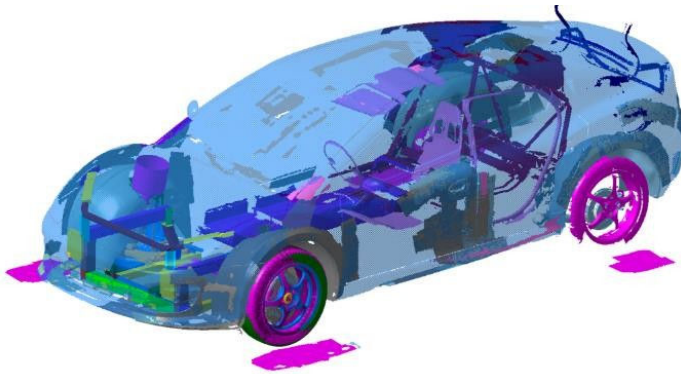


Abbildung 140: CAD Modell MPM Erelis

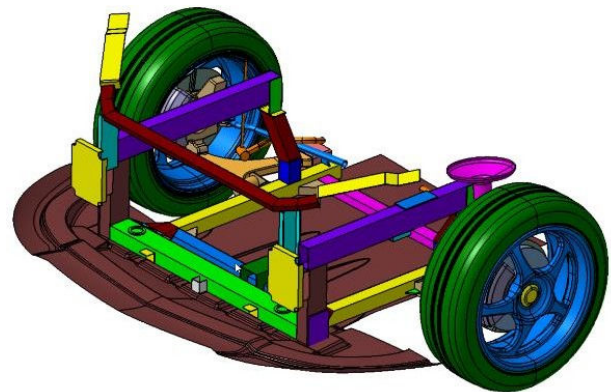


Abbildung 141: CAD Vorderbau

Im ersten Schritt wurden anschließend die ersten Konzepte aus TP1 für die Getriebe-Bremse- Einheit und die Reifenpartikelabsaugung integriert, um den iterativen Packageprozess zu starten. Abbildung 151 stellt diesen ersten Stand dar und dient als Basis für die folgenden Berechnungen (Kühlung, FEM), konstruktiven Auslegungen und die FMEA des Versuchsträgers.

3.4.1 Bremssystem

Das Bremssystem (Abbildung 142) wurde in Teilen vom Originalfahrzeug übernommen und durch ZEDU1 spezifische Komponenten ergänzt. Die Funktion des Bremskraftverstärkers wird durch eine zusätzliche Unterdruckpumpe sichergestellt. Um ungewünschte Interaktionen zwischen BBW und ABS zu vermeiden, wurde das ABS-System für den ZEDU1 Prototypen entfernt und im Innenraum ein Hinweis sowie eine Ergänzung in der Bedienungsanleitung angebracht. Dieser Sachverhalt ist Bestandteil der Fahrerunterweisung.

Der Bremskreislauf an der Hinterachse bleibt unberührt. Der Vorderachsbremskreislauf wurde kurz nach dem Hauptbremszylinder an ein mechanisches Umschaltventil geleitet. Hierbei kann zwischen der Original Scheibenbremse (VA II) und Getriebe-Bremse Einheit (VA I) umgeschaltet werden.

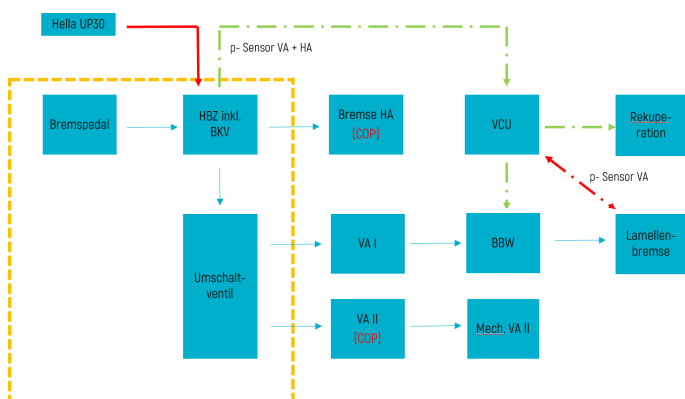


Abbildung 142: Systemschaubild Bremse

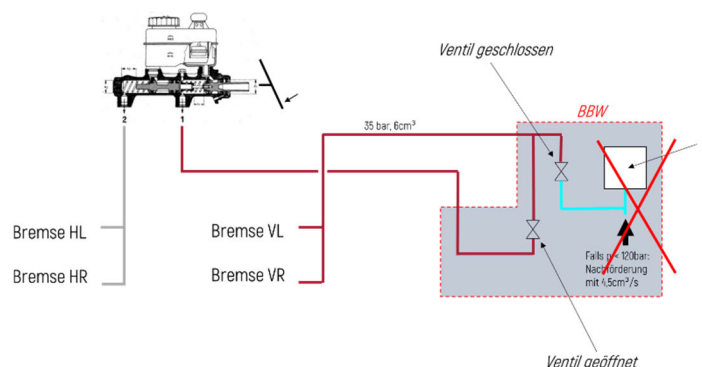


Abbildung 143: ZEDU1 Bremssystem (Failure-Mode)

Für die Auslegung des Bremssystems wurde der ungünstigste Fehlerfall (Bremsung nur hydraulisch und mit leerem Unterdruckspeicher) gemäß ECE R13H herangezogen (s.a. 3.2.1). Bei aktivem BBW System erzeugt der Fahrer über die Pedalbetätigung einen hydraulischen Druck im Hauptbremszylinder. Der Drucksensor leitet den „Bremsbedarf“ an die VCU weiter. Die VCU „entscheidet“ anhand des Systemzustandes ob und zu welchem Anteil regeneriert bzw. mechanisch gebremst werden kann. Im Fehlerfall schaltet das System auf Durchtrieb und es erfolgt eine rein mechanische Bremsung mittels Lamellenbremse (Abbildung 143).

3.4.2 ZEDU1 Kühlsystem

Das Kühlsystem reguliert gesamtheitlich das Temperaturniveau aller Komponenten im Versuchsträger, die aktiv (mittels Fluid) gekühlt werden müssen. Die Auslegung des gesamten Systems sowie die Auswahl der einzelnen zur Wärmeregulierung benötigten Komponenten erfolgt mit Hilfe von 1D-Thermosimulationen, in denen die einzelnen Fahrzyklen und Lastfälle (z. B. WLTP, Bergabfahrt, Notbremsung) berücksichtigt sind. Dazu wurde die Software „GT-Suite“ verwendet.

Aufgrund unterschiedlicher Kühlanforderung der Komponenten (wie z.B. Kühlfluid-Art, zulässiger Temperaturbereich, zulässiger Druckbereich) kann das Kühlsystem nicht mit einem einzigen Kreislauf realisiert werden. Das System ist daher in drei Kreisläufe aufgeteilt; einen Hauptkreislauf und zwei Nebenkreisläufe.

Der Hauptkreislauf (auf Abbildung 144 blau) wird von einer Wasser-Glycol-Mischung durchströmt und stellt mit einem Luft-Wasser-Radiator (Wasserkühler) mit nachgeschaltetem Sauglüfter (luftseitig) die Wärmeabgabe an die Umgebung sicher. Zudem sind die beiden Inverter, die Batterie und der Onboard-charger (OBC) integriert. Zur bedarfsgerechten und energieeffizienten Versorgung befinden sich eine Haupt-Wasserpumpe sowie zwei kleinere Wasserpumpen vor den Komponenten im System. Zum Bauteilschutz der Komponenten werden Sicherheitsventile vor Batterie und Inverter positioniert, die im Öffnungsfall in den Ausgleichsbehälter absondern.

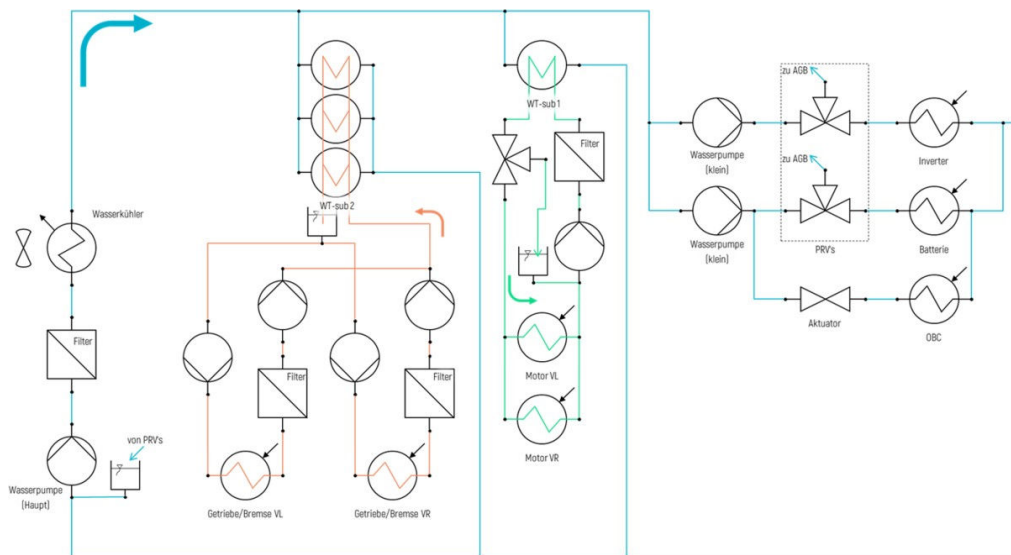


Abbildung 144: ZEDU1 Kühlsystem-Schema

Die beiden Nebenkreisläufe sind jeweils mit Öl-Wasser-Wärmetauschern parallel in den Hauptkreislauf eingebunden. Ein Subkreislauf (grün) kühlt die beiden Elektromotoren und verwendet dazu ein dielektrisches Fluid, das mittels einer Pumpe zirkuliert. Wie auch im Hauptkühlkreis ist zum Komponentenschutz ein Überdruckventil (PRV) mit einem Rücklauf in den Ausgleichsbehälter vorgesehen.

Der zweite Nebenkreislauf (orange) wird mit Öl betrieben und stellt die Kühlung und Schmierung der beiden Getriebe-Bremse-Einheiten sicher. Um auch hier den Fluidvolumenstrom in Abhängigkeit zur auftretenden (mechanischen) Bremsleistung regeln zu können, sind je eine Pumpe vor und nach der Getriebe-Bremse-Einheit positioniert. Sie fungieren zum einen als Druckpumpe und zum anderen als Saugpumpe und können unabhängig voneinander angesteuert werden. Das rücklaufende (erwärmte) Öl wird aus den Getriebe-Bremse-Einheiten durch je einen Filter gesaugt, durchströmt die Wärmetauscher und fließt zurück in einen Öltank.

3.4.3 Elektrisches Konzept für ZEDU1

Für die Auslegung des elektrischen Systems wurde im Vorfeld eine simulative Untersuchung durchgeführt, um die Komponenten E-Motor, Inverter und HV-Batterie auszuwählen. Berücksichtigt wurden dabei die Anforderungen aus dem Lastenheft, sowie die vorgegebenen Fahrzyklen. Die Auswahl ist auf folgende Komponenten gefallen.

Tabelle 22: Entscheidung E-Motor, Inverter und HV-Batterie

Komponentenname	Produktname	Hersteller	Anzahl
E-Motor	P400 RS N-End	Yasa	2
Inverter	Gen 4 Size 10	Sevcon	2
HV-Batterie	15 AKM 46 POC	Akasol	1

Ausgehend von den weiteren Anforderungen aus dem Lastenheft wurden die weiteren Komponenten (Tabelle 23 &

Tabelle 24) gewählt. Alle aufgezeigten Komponenten erfüllen gängige Automotive-Standards.

Tabelle 23: Auflistung Systemkomponenten I

Komponentenname	Produktname	Hersteller	Anzahl
LV-DC/DC 13,8V	DVCH3003	Deutronic	1
LV-DC/DC 24V		Deutronic	1
LV-DC/DC 28V	DVCH3003	Deutronic	1
LV-DC/DC 55,2V	DVCH3003	Deutronic	1
Wasserpumpe Hauptkre.	CWA400	Pierburg	1
Öl-/ Dielektrikum- pumpe	OP80	EMP	5
Wasserpumpe	S120	Valeo	2
Unterdruckpumpe	UP 30	Hella	1
PDU		TBD	1
Onboard Charger	Innoelectric 42/82.1c	Innoelectric	1
Servopumpe	100-C	ZF	1
Kühlerlüfter		TBD	2
Display Mittelkonsole	Vision 312 plus	TTTech	1
Gierrate	MM05.10	Bosch	1
12V Batterie		Bosch	1
BBW	EBS	Bosch	1
Dashboard	AIM MXG Strada (Street)	MeMoTec	1
Switch Panel	PKP-2600-SI	Blinkmarine	1
Reifenabsaugung	9WG5748P5G001	Telemeter	12
VCU	MS50.4	Bosch	1
PBX	PBX90	Bosch	1

Tabelle 24: Auflistung Systemkomponenten II

Nummer	Komponentenname	Funktion
1	Dielektrikum-Pumpe	Kühlung der E-Motoren
2	Öl-Pumpen	Kühlung der Getriebe/Bremse
3	Wasser-Pumpe Hinterwagen	Kühlung von HV-Batterie, OBC
4	Wasser-Pumpe Vorderwagen	Hauptkühlkreis mit Wärmetauschern
5	Absaugung	Absaugen von Reifenabrieb
6	BBW	Brake-by-Wire System für Bremsaktuierung
7	VCU	Hauptsteuergerät des Fahrzeugs
8	Dashboard	Fahreranzeige
9	Display	Anzeige von Systeminfos
10	Kühler Lüfter	Lüfter für aktiven Betrieb des Kühlers
11	Servo	El. Servopumpe für Lenkunterstützung
12	UDP	El. Unterdruckpumpe für Bremskraftverstärker
13	BMS	Batterie Management System der HV-Batterie
14	PBX	Powerbox für Stromversorgung und Steuerung
15	Switch Panel	Tasten für Fahrereingabe (z.B. Fahrmodi)
16	Inverter	Motor Controller zur Steuerung des E-Motors
17	OBC	On-Board-Charger
18	PDU	Power Distribution Unit zur Verteilung von HV
19	DC/DC Lüfter	Kühlung der DC/DC-Wandler
20	TPMS	Reifendruck Sensorik
21	Autoelektrik	Vorhandene Elektrik aus Demonstrator
22	LV-Batterie	LV-Stützbatterie
23	13,8V DC/DC	13,8V Versorgung
24	24V DC/DC	24V Versorgung für HV-Batterie
25	28V DC/DC	28V Versorgung für Pumpen
26	55,2V DC/DC	55,2V Versorgung für Reifenabsaugung
27	Kill-Switch	Not-Schalter

Das elektrische Konzept ist zum einfacheren Verständnis in drei Teil-Topologien aufgeteilt. Diese beinhalten die HV-Topologie, die LV-Topologie und die CAN-Topologie. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden diese näher beschrieben.

3.4.3.1 HV-Topologie

In der Abbildung 145 ist das elektrische Konzept für die Hochvolt-Komponenten dargestellt.

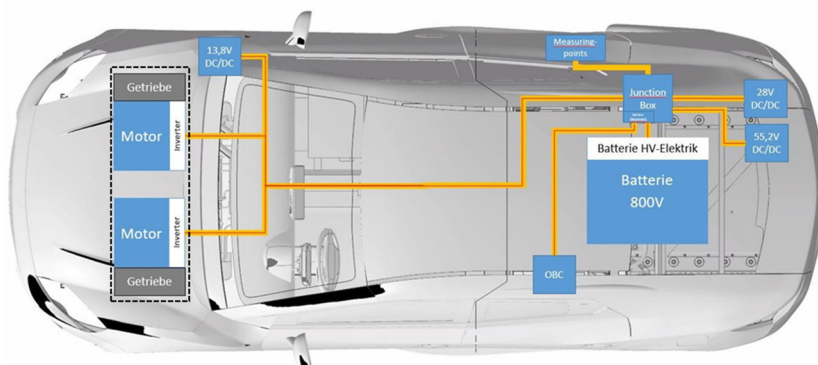


Abbildung 145: Schematische Darstellung der HV-Topologie

Das System besteht aus 2 E-Motoren, mit jeweils zugehörigen Invertern, einer 800V Hochvolt-Batterie, einem On-Board-Charger (OBC), drei DC/DC-Wandlern, sowie einer Power Distribution Unit (PDU - Stromverteilereinheit) zur Verbindung aller HV- Komponenten, mit zusätzlichem Abgang für Messpunkte. Die HV-Komponenten für die ZEDU1-Einheit umfassen dabei die E-Motoren und die Inverter an der Vorderachse, markiert mit einer gestrichelten schwarzen Umrandung. Die restlichen HV-Komponenten befinden sich im hinteren Bereich des Fahrzeugs, da hier ausreichend Bauraum vorhanden ist und damit die Insassen von den HV-Komponenten räumlich getrennt sind. Lediglich der 12V-DC/DC ist mit in den Motorraum gewandert, da der Großteil der 12V- Verbraucher im vorderen Bereich des Fahrzeugs platziert ist. Die HV-Komponenten im Motorraum werden über HV-Kabel versorgt, die durch den vorhandenen Abgastunnel verlegt werden. Die rot dargestellte Verbindung der HV-Komponenten mit der PDU stellt den HV-Interlock-Kreis da. Dieser fungiert als Sicherheitskreis und trennt im Notfall die HV-Komponenten elektrisch vom Fahrzeugsystem. In der Übersicht nicht dargestellt, ist der Ladestecker für die Ladesäule, der zum OBC führt. Dieser befindet sich hinter dem früheren Tankdeckel des Fahrzeugdemonstrators.

3.4.3.2 LV-Topologie

In der Abbildung 146 ist die Niedervolt-Topologie schematisch dargestellt. Zur Vereinfachung wurden doppelte Verbraucher nur einfach dargestellt.

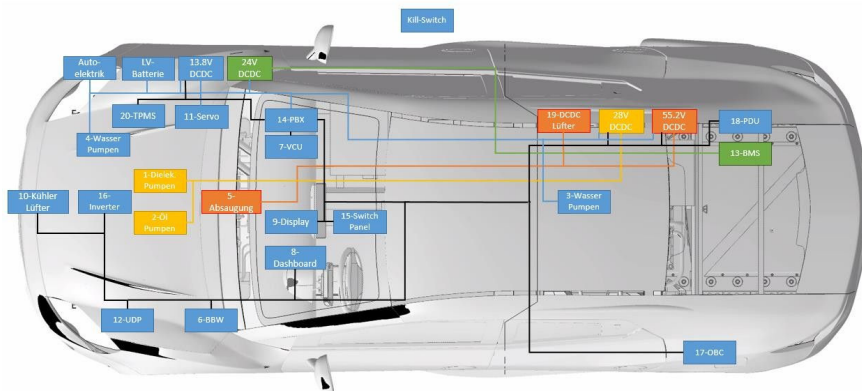


Abbildung 146: Schematische Darstellung der LV-Topologie

3.4.3.3 CAN-Topologie

Die CAN-Topologie auf Abbildung 147 zeigt die Buskommunikation der Komponenten.

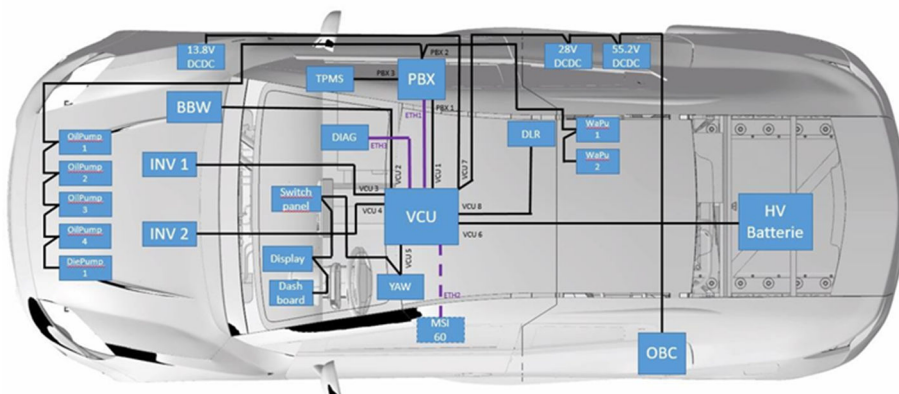


Abbildung 147: Schematische Darstellung der CAN-Topologie

Die Darstellung ist unterteilt in VCU Schnittstellen und in PBX Schnittstellen. Um die Schnittstellen unterschieden zu können, wurden die Verbindung mit VCU und PBX beschriftet.

In Tabelle 25 ist aufgelistet, welche Komponenten an welchen Kommunikations-Bus angeschlossen sind. Zusätzlich verfügt die Fahrzeugelektronik über Ethernet für die Kommunikation zwischen VCU und PBX (ETH 1), sowie VCU zu DIAG (ETH 2 - Diagnose-Schnittstelle) und VCU zu MSI60 (ETH 3 - Modularer Sensor Eingang).

Tabelle 25: Übersicht Kommunikations-Bus

CAN-Name	CAN-Geschwindigkeit	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3	Komponent 4	Komponente 5
VCU 1	1000 kbit/s	PBX 90				
VCU 2	1000 kbit/s	BBW				
VCU 3	1000 kbit/s	Inverter 1				
VCU 4	1000 kbit/s	Inverter 2				
VCU 5	1000 kbit/s	Dashboard	Display	Switch Panel	MM 5.10	
VCU 6	250 kbit/s	HV-Batterie				
VCU 7	500 kbit/s	DC/DC 12V	DC/DC 24V	DC/DC 55,2V	OBC	YAW-Sensor
VCU 8	Nach Vorgabe	Messtechnik DLR				
PBX 1	1000 kbit/s	VCU				
PBX 2	250 kbit/s	Wasser Pumpe 1-2	Öl Pumpe 1-4	Die. Pumpe 1		
PBX 3	Tbd	TPMS (Reifendruck)				

3.4.4 Softwarekonzept

Abbildung 148 zeigt das Softwarekonzept. Dargestellt ist das Softwarekonzept das ausgehend von dem abgeschlossenen Fahrzeugkonzept und der abgeschlossenen Fahrzeug-FMEA entwickelt wurde. Die finale Version wurde dann im Rahmen durchgeführter Test und Versuche noch erweitert, angepasst und validiert. Die zuvor genannten Konzepte und die FMEA bilden die Grundlage für die Ausgestaltung der Software. Die Entwicklung der Software kann in mehrere Phasen geteilt werden.

Nach der Fertigstellung des Softwarekonzepts erfolgte die Erstellung des ersten Basissoftware Stands. In Vorbereitung auf die Prüfstandumfänge wurden alle prüfstandsrelevanten Softwarefunktionen erstellt und mit den Prüfstandläufen finalisiert. Dieser Ablauf erleichtert die Entwicklung und sorgt für eine schnelle Detektion und Behebung von Fehlern.

Die Software ist in einzelne Funktionsbausteine aufgeteilt und stellt in der Übersicht eine Kette dar, beginnend mit dem Modul „Inputs“, zum Einlesen von Informationen. Nachfolgend findet im Modul „Signal Conditioning“ die Filterung, Plausibilisierung und Aufbereitung der Daten statt. Die angepassten Signale werden an die Module „Driver Demand“, „Vehicle Dynamics & Limits“, „Battery Limits“, „Motor Limits“, „Driver Interface“, „BBW & Motor Communication“ und „Miscellaneous“ weitergeleitet.

Im Modul „Driver Demand“ werden die Anforderungen des Fahrers bestimmt und ausgewertet, um den Momentenwunsch zu bestimmen.



In „Vehicle Dynamics & Limits“ wird der fahrdynamische Fahrzeugzustand bestimmt und die physikalischen Limits des Fahrzeugs berechnet.

Das Modul „Battery Limits“ bestimmt die maximal zulässigen Ströme des Batteriesystems, die zu dem jeweiligen Zeitpunkt möglich sind.

Die Berechnung der maximal möglichen Motor-Momente in Abhängigkeit der Batterie-Limits und der Motordrehzahl erfolgt im Modul „Motor Limits“.

Die Informationen aus den zuvor genannten Modulen laufen im Modul „Torque Arbitration“ zusammen, um die Soll-Motor- und Soll-Brems-Momente zu berechnen.

Im „BBW-Controller“ wird das angeforderte Bremsmoment auf elektrische und mechanische Bremse verteilt. Dies geschieht in Abhängigkeit von den vorliegenden Limits.

Das Modul „Fahrer Interface“ verarbeitet die Fahrereingaben an den HMI Schnittstellen und erstellt die Fahrinformationen für das Display und Dashboard.

Im Modul „BBW & Motor Communication“ wird die Kommunikation zu BBW und Motor abgebildet.

Unter dem Modul „Miscellaneous“ laufen alle Funktionen zusammen, die für die restliche Fahrzeugperipherie benötigt werden, wie Absauganlage, Kühlmittelpumpen, etc.

Über alle genannten Module wacht der „Safety Watchdog“ und stellt sicher, dass das System einwandfrei arbeitet.

Über das Modul „Output“ werden die Signale für die nachfolgenden Komponenten aufbereitet und bereitgestellt.

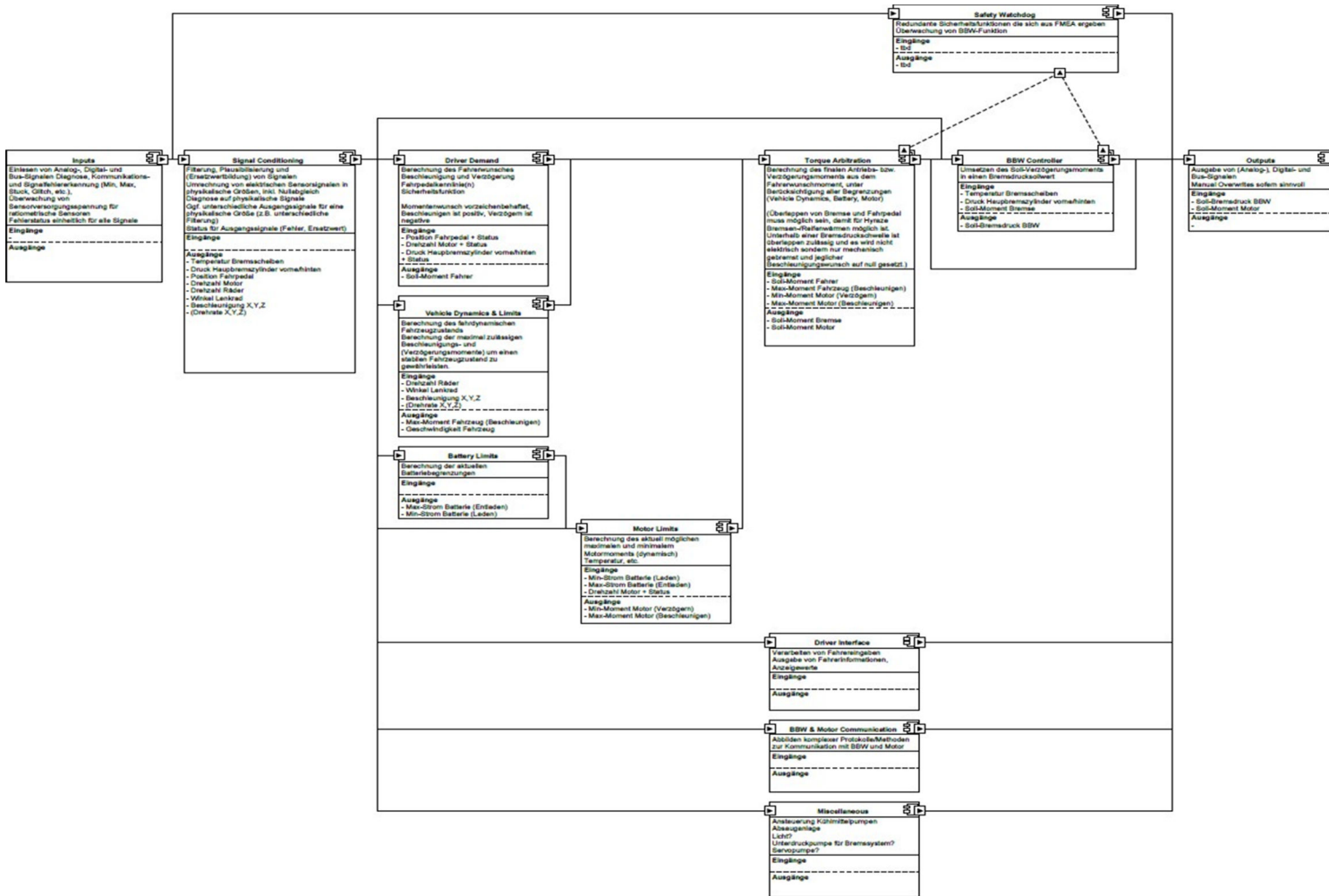


Abbildung 148: Softwarekonzept

3.4.5 Messequipment

Die Anordnung der Messgeräte (Abbildung 149) erfolgt für Messfahrten auf der Beifahrerseite. Für das eingebaute Messequipment wurde eine Sichtfelduntersuchung durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass die 180° Rundumsicht vom Fahrer minimal (ca. 5°) eingeschränkt wird. Die Befestigung dazu wurden dann direkt am Rohbau eikonstruiert und eingebaut. Somit bedingte das so realisierte Packaging, dass die Partikelmessungen einfachheitshalber auf der rechten Fahrzeugseite erfolgten. Hierzu wurden die erforderlichen Durchführungen geschaffen. Auf Abbildung 149 sind diese, für die Messungen integrierten Schlauchleitungen, Entnahmestellen der Partikelmessung und die Sensoren nicht eingezeichnet.

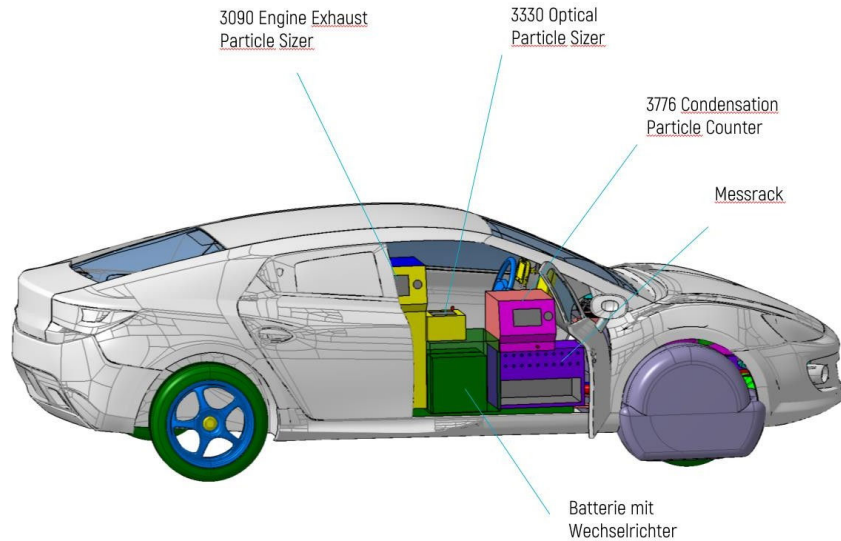


Abbildung 149: DLR-Messequipment

3.4.6 Gewichtsabschätzung

Die Gewichtsabschätzung erfolgte auf Basis der Übernahmekomponenten des MPM Erelis (Chassis, Deckel, Türen usw.), der gewogenen Komponenten sowie der theoretisch ermittelten Gewichte der Entwicklungsumfänge.

Tabelle 26: Gewichtsabschätzung

Bereich	Ermittlung	Gewicht [kg]
Übernahme MPM Erelis	physisch	85
Gesamtfahrzeug	theoretisch	150
Antrieb	theoretisch	220
Elektrik	theoretisch	550
DLR Messequipment	theoretisch	105
Summe*		1800

*ohne Messequipment inkl. Fahrer 75kg

Im Laufe des Projektes wurde die o.g. Abschätzung validiert. Nach aktuellem Stand wird das Fahrzeuggewicht bei 1800kg $\pm 5\%$ liegen mit einer geplanten Radlastverteilung von $rWeightBal = 55\% (\pm 5\%)$.

Dadurch ergeben sich statische Vertikallasten an den Reifenauflandspunkten von (Wert \pm Unsicherheit):

- Vorderachse 4860 ± 440 N
- Hinterachse 3970 ± 440 N

Ausgehend von den Fahrzeugmassenkalkulationen (Tabelle 26), wurde in den Versuchsträger eine für dieses Gewicht geeigneten Feder-/Dämpfersystem, integriert. Dieses gewährleistet die Fahrzeugsicherheit und das Fahrgefühl lenkt nicht von der Technologie ab.

3.4.7 Fahrzeugpackage

3.4.7.1 Package Filter-/Lüftergehäuse

Die hinter der Radaufstandsfläche entstehenden Partikel werden durch die geometrische Begrenzung der Einhausung und einen geführten Luftstrom vom Entstehungsort über die äußere Kanalführung zum zentral angeordneten Filter-/Lüftergehäuse geleitet (Abbildung 150). Hierbei werden die groben Partikel vorgefiltert bzw. über ein entsprechendes Abscheidekonzept von den feineren Partikeln getrennt. Die Abscheidung der Feinpartikel erfolgt hinter dem Lüfterpaket im darüber angeordneten Feinfilter.

Hauptaugenmerk bei der Auswahl der Filter war neben der Filterklasse, ein möglichst hoher Luftdurchsatz, bzw. ein möglichst geringer Druckverlust über die Filterfläche.

Für die Auswahl des Lüfters wurden alle gängigen Anwendungen beleuchtet in denen entsprechende Systeme in dieser Leistungsklasse ($\Delta p = 1000 \text{ Pa}$ und $\dot{V} = 250 \text{ l/s}$ pro Rad) zum Einsatz kommen. Es wurden verschiedene Bauformen und Anordnungskonzepte berücksichtigt. Neben den technischen Kriterien wurde außerdem auf die Kosten und auf die Verfügbarkeit geachtet.

Der Auslasskanal für den Luftstrom befindet sich an der Motorhaube, seitlich hinter dem Kotflügel. Die Lage des Auslasskanal wurde in einem strömungstechnisch günstig liegenden Unterdruckgebiet gewählt.

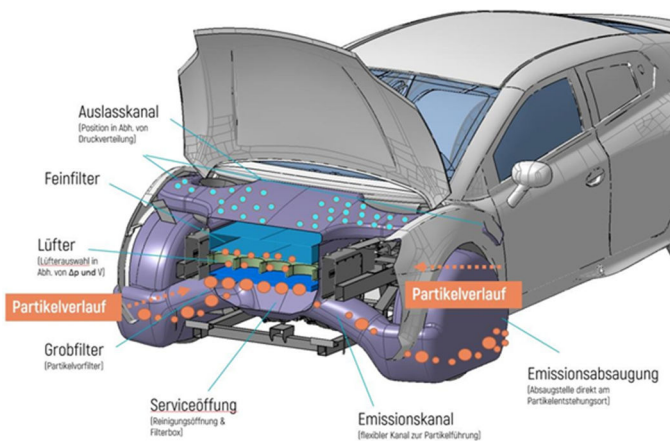


Abbildung 150: Schnittdarstellung Emissionsabsaugung

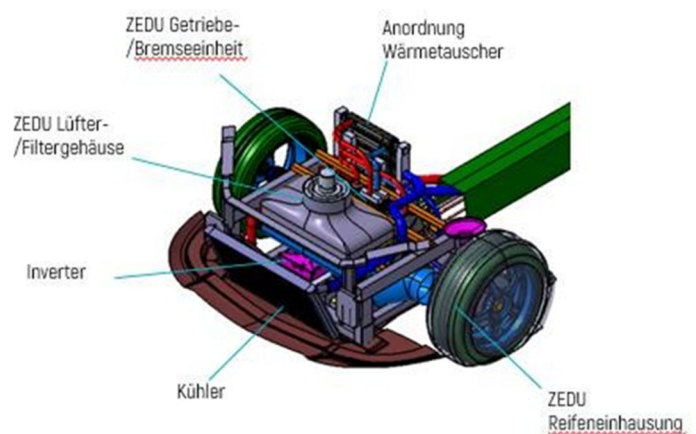


Abbildung 151: Packageentwurf Vorderbau

3.4.7.2 Package Getriebe-Bremse-Einheit

Die Anbindung der Getriebe-Bremse-Einheiten erfolgt, wie Abbildung 152 abgebildet, über Querträger. Diese halten beide Einheiten und stellen somit die mechanische Verbindung zum Fahrzeug-Chassis dar. Sie nehmen dabei die Kräfte auf, die beim Beschleunigen und Bremsen entstehen. Dadurch wirken die Kraftflüsse im Falle des ZEDU1 an anderer Stelle in die Karosserie als bei konventionalen Fahrzeugen. Daher wurde um das Packaging-Konzept hinsichtlich Betriebs- und Crashlasten abzusichern, Belastungsanalysen durchgeführt. Für die rechnerische Absicherung wurde ein vereinfachtes Modell mit Annahmen herangezogen. Die Ergebnisse (Abbildung 152) zeigen die prinzipielle Eignung der Anbindung der Getriebe-Bremse-Einheit über drei Querträger die am Frontrahmen befestigt werden. Dieses Konzept wurde in der weiteren Detailkonstruktion unter Berücksichtigung der Packageanforderungen optimiert und auskonstruiert.

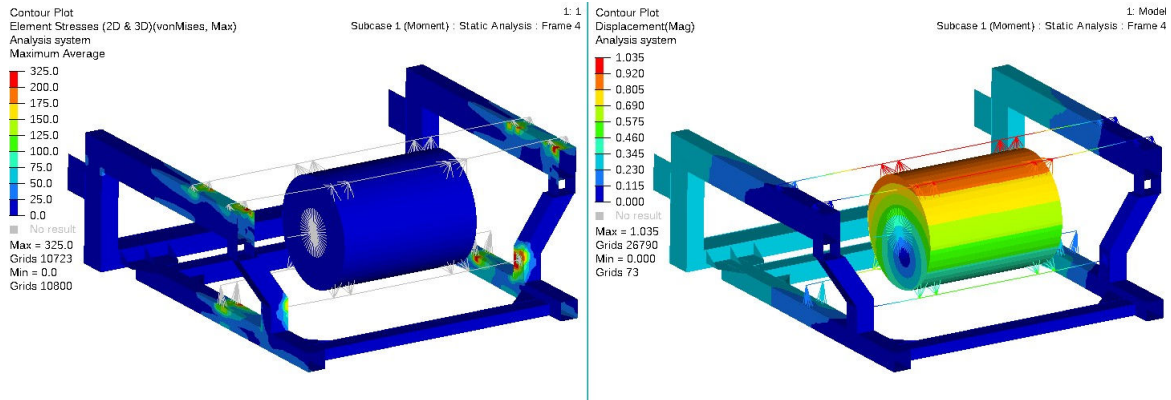


Abbildung 152: FEM Berechnung Getriebe-Bremse-Einheit

Jede Getriebe-Bremse-Einheit bietet mit dem Elektromotor die Möglichkeit das Fahrzeug zu Beschleunigen und auf zwei Arten Bremsen zu können. Dadurch entstehen zwei unterschiedliche Kraftflüsse, die im Folgenden beschrieben sind.

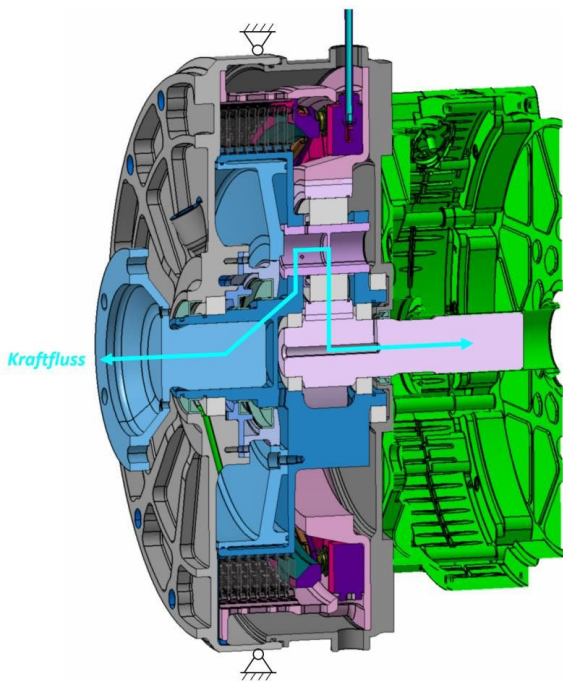


Abbildung 153: Fall - Kraftfluss beim elektrischen Beschleunigen und Verzögern

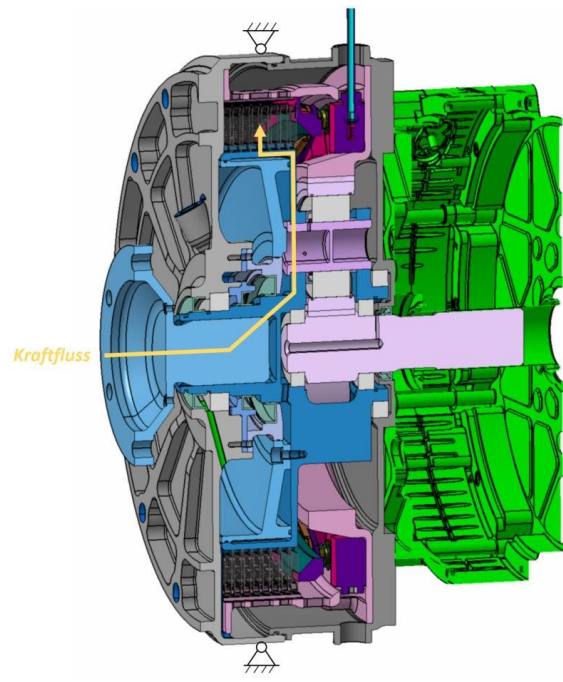


Abbildung 154: Fall - Kraftfluss beim mechanischen Verzögern

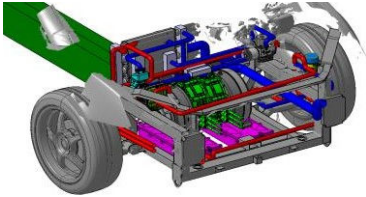
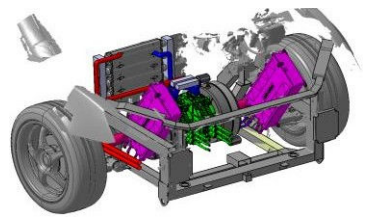
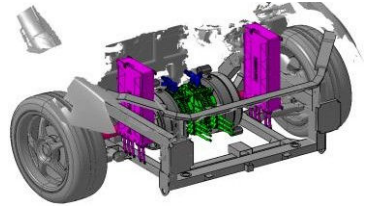
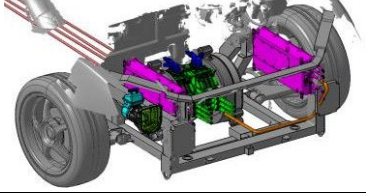
Der erste Fall bildet das elektrische Beschleunigen und Verzögern. Dabei liefert der Elektromotor ein antreibendes Moment und eine Drehzahl an die Getriebeeingangswelle. Das Planetengetriebe innerhalb der Getriebe-Bremse-Einheit übersetzt dies und treibt damit über den Planetenträger die Antriebswelle (und somit das Rad) an.

Umgekehrt verläuft im elektrischen Bremsfall auch das treibende Moment vom Rad zum E-Motor, das beim Rekuperieren in elektrische Energie gewandelt wird. Der Pfad über den der Kraftfluss läuft ist dabei derselbe. Er ist auf Abbildung 153 dargestellt ist.

3.4.7.3 Package Inverter

Für die Position der Inverter wurden vier Konzepte erstellt und im Fahrzeugpackage dargestellt. Die Vor-/Nachteile der jeweiligen Position sind in der untenstehenden Tabelle 27 aufgeführt.

Tabelle 27: Gegenüberstellung Inverterposition

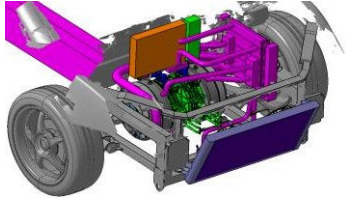
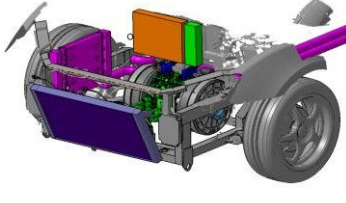
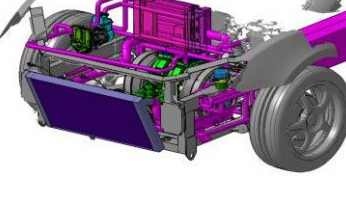
Variante	Bild	Vorteile	Nachteile	Gesamt
Konzept 1 Inverterposition unter ZEDU-Einheit		Kompakte Anordnung von Motor und Inverter Umgeben von Rahmenstruktur Tiefer Schwerpunkt	Position ZEDU-Einheit nach oben Antriebswellenwinkel ungünstig	0
Konzept 2 Inverterposition seitlich geneigt		Kompakte Anordnung von Motor und Inverter Umgeben von Rahmenstruktur Antriebswellenwinkel günstig Position ZEDU-Einheit nach unten	höherer Schwerpunkt Bauraumreduktion f. Filter-/Lüftergehäuse	-
Konzept 3 Inverterposition seitlich stehend		Kompakte Anordnung von Motor und Inverter Umgeben von Rahmenstruktur Antriebswellenwinkel günstig Position ZEDU-Einheit nach unten	höherer Schwerpunkt Bauraumreduktion f. Filter-/Lüftergehäuse	-
Konzept 4 Inverterposition seitlich liegend		Umgeben von Rahmenstruktur Antriebswellenwinkel günstig Position ZEDU-Einheit nach unten Bauraum f. Filter-/Lüftergehäuse	höherer Schwerpunkt lange HV-Kabel	+

Aufgrund der Vorteile: Umgeben von Rahmenstruktur, günstiger Antriebswellenwinkel und der vorteilhaften-Position der ZEDU1-Einheit im unteren Bauraum sowie dem erforderlichen Bauraum für Filter- und Lüftergehäuse wurde Konzept 4 ins Fahrzeugpackage übernommen.

3.4.7.4 Package Wärmetauscher

Für die Position der Wärmetauscher wurden drei Konzepte erstellt und im Fahrzeugpackage untersucht. Die Vor-/Nachteile der jeweiligen Position sind in der Tabelle 28 aufgeführt. Aufgrund der Vorteile: Kompakte Bauform, Freigang für ZEDU1-Einheit und der Möglichkeit einer Symmetrische Bauraumbelegung wurde für den Wärmetauscher Konzept 3 ins Fahrzeugpackage übernommen.

Tabelle 28: Gegenüberstellung Wärmetauscherposition

Variante	Bild	Vorteile	Nachteile	Gesamt
Konzept 1 Wärmetauscherpa- ket in Fahrtrich- tung links		Kompakte Bauform	Asymmetrische Package- belegung Bauraumengpass im Fahrerfußraum (Lenkungsturm in Fahrt- richtung rechts)	0 -- --
Konzept 2 Wärmetauscherpa- ket in Fahrtrichtung rechts		Kompakte Bauform Weniger Störkontur als im Fahrerfußraum	Kompakte Bauform Frei- gang für ZEDU-Einheit Symmetrische Bau- raumano+A6:M9rdnung möglich	+ - 0
Konzept 3 Wärmetauscherpa- ket vor Bordwand		Kompakte Bauform Freigang für ZEDU- Einheit Symmetri- sche Bauraumbele- gung möglich	höherer Schwerpunkt	++ - +

3.4.7.1 Package Kühlsystem

Das Konzept des Kühlsystems (s. Abbildung 155) wurde zuerst konstruktiv umgesetzt. Dabei wurde neben den Anforderungen der einzelnen zu kühlenden Bauteile auch das Fahrzeugpackage, d.h. der zur Verfügung stehende Bauraum, beachtet. Eine Übersicht über die Hauptkomponenten des Kühlsystems, die aufgrund ihres Einsatzzwecks bereits eine fest vorgegebene Position im Fahrzeug haben, gibt die Tabelle 29. Aus Package-Gründen und um unnötig lange Leitungen und somit schlussendlich Gewicht zu reduzieren, wurde darauf geachtet, die einzelnen Kreisläufe möglichst nur dort zu positionieren, wo das jeweilige Fluid benötigt wird. Dazu sind für das Demonstrator-Fahrzeug drei verschiedene Bereiche skizziert worden, in denen der jeweilige Fluid-Kreislauf angeordnet werden soll. Im Wesentlichen ist dies durch die Lage der Wärmequellen definiert. Zusätzlich werden in jedem Bereich alle weiteren benötigten Bestandteile der Kreisläufe, wie z.B. Pumpen, Filter und Leitungen angeordnet.

Durch die Betrachtung der Bereiche wird deutlich, dass eine Anordnung sämtlicher Komponenten der Öl- und Dielektrikum-Kreisläufe nur im Vorderwagen sinnvoll zu erachten ist. Die ebenfalls zu kühlende Batterie und Onboard Charger allerdings vom Packeging im Heck des Fahrzeugs vorgesehen wurden. Damit sich innerhalb des Fahrgastraumes aber kein Teil des Kühlsystems befindet, ist der Wasser-Glykol-Bereich für Batterie und OBC im Fahrzeugheck durch die Feuerwand abgegrenzt. Wasserleitungen die den Vorderwagen mit dem Heck verbinden, verlaufen durch den Kardantunnel.

Tabelle 29: Hauptkomponenten Kühlsystem

Bauteile	Anzahl	Kühlmedium	Pos. im Fzg.
Getriebe-Bremse-Einheit	2	Öl	Vorderwagen
E-Motoren	2	Dielektrikum	Vorderwagen
HV-Batterie	1	Wasser-Glycol	Heck
Onboard-Charger	1	Wasser-Glycol	Heck
Inverter	2	Wasser-Glycol	Vorderwagen
Kühler (Wasser-Luft-Radiator)	1	Wasser-Glycol	Vorderwagen
Wärmetauscher	3	1x Wasser-Dielektrikum 2x Wasser-Öl	Vorderwagen

Die einzelnen Kreisläufe sind in der Abbildung 156 Folgenden dargestellt und kurz erläutert. Sie sind zur besseren Übersichtlichkeit einzeln in der Draufsicht abgebildet.

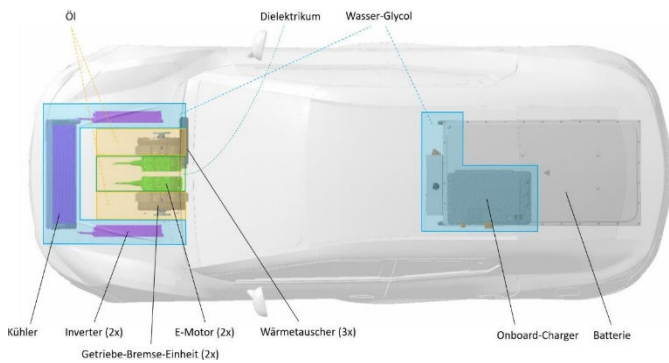


Abbildung 155: Kühlmedienbereiche im Demonstrator

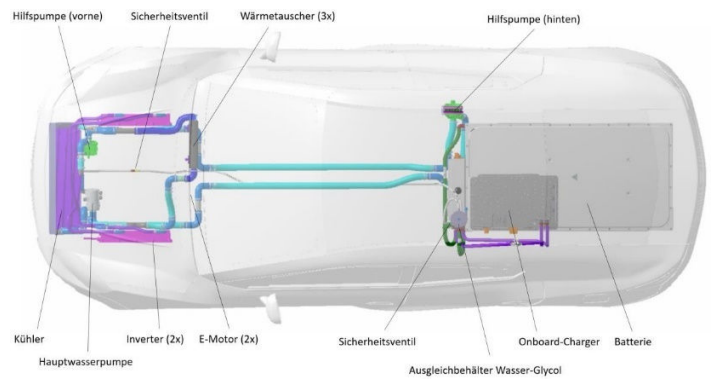


Abbildung 156: Wasser-Glykol-Kreislauf im Demonstrator

Beim Wasser-Glykol-Kreislauf befindet sich die Hauptwasserpumpe direkt an der Fahrzeugfront. Sie treibt das Kühlwasser durch den Kühler und durch die Wärmetauscher. Aus diesem Kreislauf verläuft parallel ein Abzweig durch die beiden Inverter, die mittels der vorderen Hilfspumpe bedient werden. Ein weiterer Strang verläuft durch den Kardantunnel ins Fahrzeugheck, um dort den OBC und die Batterie zu kühlen. Dazu sitzt hinten eine weitere Hilfspumpe, die für eine Zirkulation durch diesen Abzweig sorgt. Direkt nach beiden Hilfspumpen ist jeweils ein Sicherheitsventil für den Bauteilschutz von Inverter und Batterie angeordnet. Damit können Druckspitzen im Kühlkreislauf der elektrischen Komponenten verhindert werden. Sie öffnen bei 1,1bar Überdruck und lassen das Kühlmedium wieder in den Ausgleichbehälter zurückströmen.

Mittels der Wärmetauscher ist eine thermische Verbindung zwischen dem Wasser-Glykol-Kreislauf und den beiden Nebenkreisläufen „Öl“ und „Dielektrikum“ geschaffen. Der Dielektrikum-Kreislauf befindet sich größtenteils mittig im Vorderwagen (unterhalb des Filter-Lüfter-Gehäuses). Somit ist auf geringstem Platz ein Kreislauf realisiert, der die beiden E-Motoren, den Wärmetauscher, den Ausgleichbehälter, die Pumpe und den Filter verbindet. Auch hierbei ist nach der Pumpe ein Sicherheitsventil zum Schutz der E-Motoren angeordnet. Dieser Kreislauf ist auf Abbildung 157 mit seiner Position im Fahrzeug und vergrößert dargestellt.

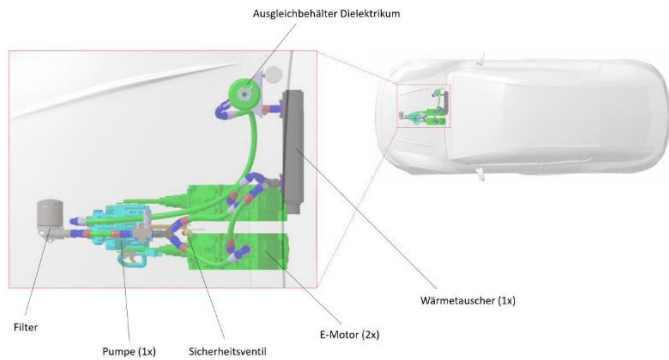


Abbildung 157: Dielektrikum-Kreislauf im Demonstrator

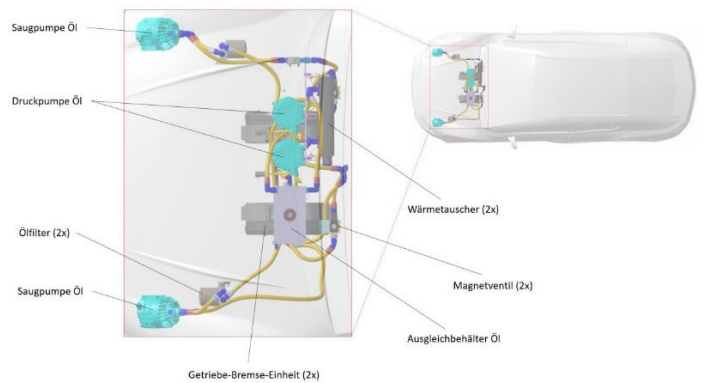


Abbildung 158: Öl-Kreislauf im Demonstrator

Der Filter ist hinter dem Kühler positioniert und von unten zugänglich, sodass er ohne allzu großen Montageaufwand getauscht werden könnte. Da jedoch kein mechanischer Verschleiß an den E-Motoren und den restlichen Bauteilen im Kreislauf zu erwarten ist, sollte auch kein direkter Partikeleintrag ins Dielektrikum auftreten. Mit einem regelmäßigen Filterwechsel ist daher nicht zu rechnen.

Der Ölkreislauf befindet sich ebenfalls im Vorderwagen und ist durch zwei Wärmetauscher parallel zum Dielektrikum-Kreislauf ins Wassersystem eingebunden. Er besteht quasi aus zwei Kreisen, die nur im Ausgleichbehälter miteinander verbunden sind; ein Kreis bedient die linke Getriebe-Bremse-Einheit und einer die Rechte. Mit Ausnahme geringfügig unterschiedlicher Leitungslängen sind beide Kreise gleich aufgebaut. In der (Abbildung 158) sind alle Kreisläufe und die zu kühlenden Bauteile im Demonstrator positioniert zu erkennen.

Die Druckpumpe saugt Öl aus dem Ausgleichbehälter und fördert es in die Getriebe-Bremse-Einheit, an die Lagerstellen und die Verzahnung. Im mechanischen Bremsfall (d.h. wenn mittels der Lamellenbremse gebremst wird) öffnet sich zusätzlich das Magnetventil, sodass Öl auch durch die Lamellenbremse strömt. Aus der Getriebe-Bremse-Einheit saugt die Ölsaugpumpe das erwärmte Öl wieder ab und fördert es durch einen Ölfilter zum Wärmetauscher. Dort gibt das Öl seine Wärme an das Kühlwasser ab und fließt zurück in den Ausgleichbehälter. Die beschriebenen Druck- und Saugpumpen werden benötigt, um zu vermeiden, dass die Getriebe-Bremse-Einheiten voll mit Öl laufen und somit erhebliche Schleppmomente durch das Öl entstehen. Es ist daher (im Gegensatz zum Wasser-Glycol und Dielektrikum Kreislauf) kein permanent geschlossenes zirkulierendes System. Würde auf eine der Pumpen verzichtet werden, würde das Öl im Kreislauf erst zirkulieren, wenn dieser komplett gefüllt ist. Das heißt, wenn das Öl von der Druckseite wieder die Saugseite der Pumpe erreicht.

Durch das Abwälzen der Planetenzahnräder und durch das mechanische Bremsen der Lamellen tritt ein geringer Verschleiß auf, der sich in Form von Verschmutzungen und Partikeleinträge ins Öl zeigt. Dieser wird in den beiden Ölfilter zurückgehalten. Für eine einfache und unkomplizierte Zugänglichkeit sind diese im Motorraum links und rechts außen so angeordnet, dass bei geöffneter Motorhaube nur der Deckel des Filter-/Lüftergehäuses abgenommen werden muss, um die Filter wechseln zu können.

3.4.7.2 Package Elektrik

Die (Abbildung 159) zeigt das elektrische Package des Versuchsträgers. Dieses wurde komplett neu ausgelegt und ausgelegt. Das elektrische System wurde in zwei e-Systeme unterteilt. Das Hochvoltsystem (HV)

(In der Abbildung 159 orange dargestellt) und das Niederspannungssystem (LV) (In der Abbildung 159 gelb dargestellt)

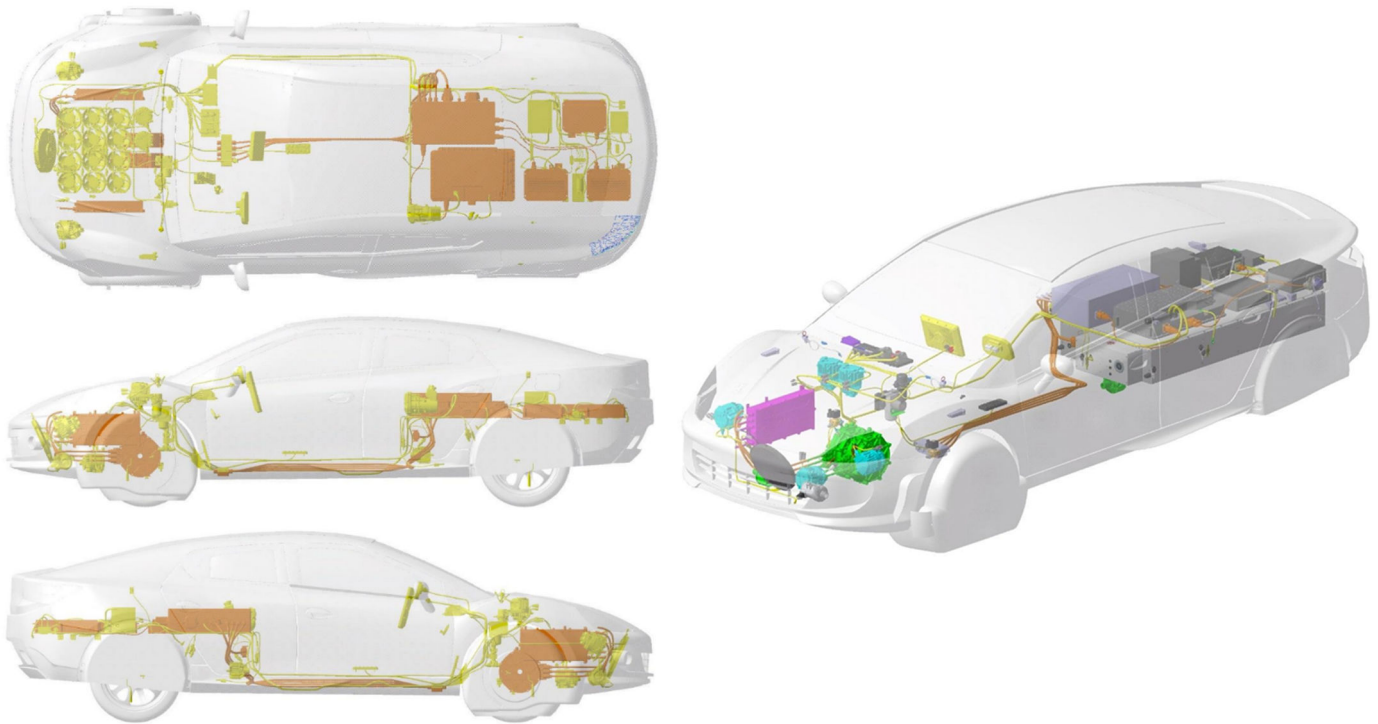


Abbildung 159: Package E-System (Orange: HV-Komponenten. Gelb: LV-Komponenten). Schnittbilder links und 3D-Package rechts

Die beiden Elektrische Systeme HV und LV sind auf Abbildung 160 und Abbildung 161 separat dargestellt und im Folgenden in 3.4.7.2.1 und 3.4.7.2.2 beschrieben.

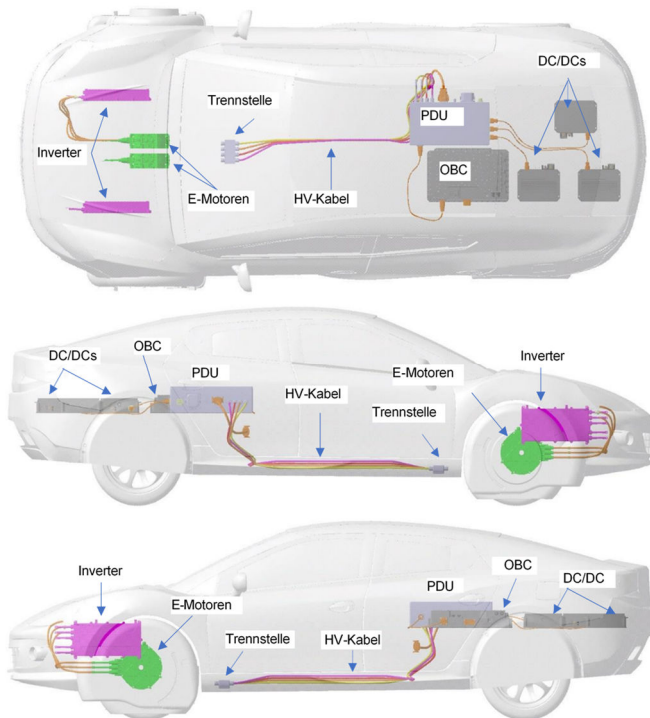


Abbildung 160: Package HV-System

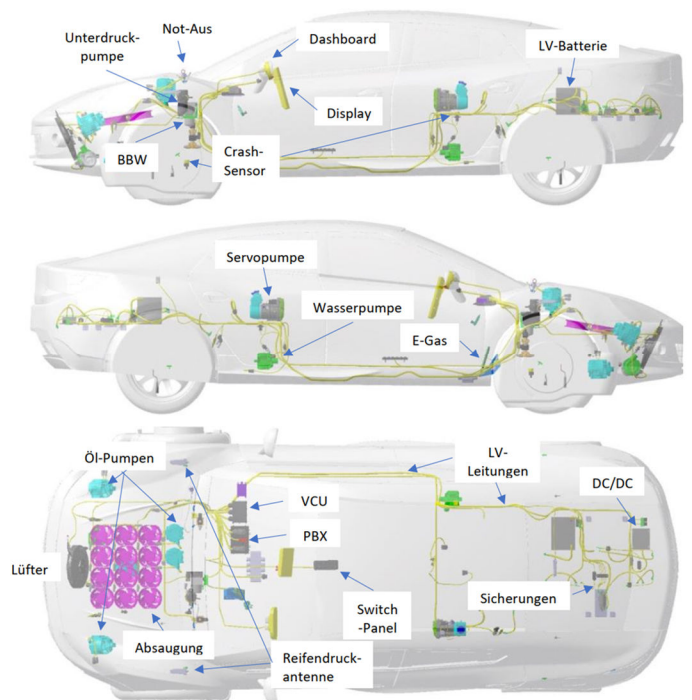


Abbildung 161: Package LV-System

3.4.7.2.1 *Package HV-System*

Abbildung 160 zeigt den Umfang der HV-Integration. Zur besseren Übersicht sind die Messgeräte und Komponenten vom DLR, sowie die HV-Batterie nicht mit abgebildet. Bei dem Package des E-Systems wurde aus Sicherheitsgründen darauf geachtet, dass die HV-Komponenten vom Fahrgastraum getrennt sind. So befinden sich die die HV-Komponenten: HV-Batterie, der OBC, die PDU und die DC/DC-Wandler im Heck hinter der Fahrgastzelle und sind durch eine Feuerschutzwand dicht vom Fahrgastraum getrennt. Beim Package der Komponenten wurde neben der Trennung von HV und LV auch auf die Länge der HV-Kabel geachtet. Die E-Motoren an der Vorderachse sind mit den Invertern über eine möglichst kurze Strecke verbunden. Als kürzest mögliche Distanz zwischen E-Motor und Inverter konnte eine Kabellänge von 1 m realisiert werden. Die Inverter sind mittels Trennstelle mit der PDU im Heck verbunden. Die gesamte Kabellänge zwischen Inverter und PDU beträgt 5 m. Die HV-Leitungsverlegung und die Versorgung der Kühlung erfolgen außerhalb des Fahrgastraumes. Für die Verlegung der HV-Kabel wurde der ehemaligen Kardantunnel genutzt. Eine Trennstelle dient zur einfachen Montage beim Aufbau und findet ebenfalls Platz im Kardantunnel. Somit sind die HV-Leitungen von den LV-Leitungen und vom Fahrgastraum getrennt. Auf Grund von Gewicht und Größe befindet sich die HV-Batterie im Heck des Fahrzeugs. Die PDU, als zentraler Verteiler, befindet sich direkt über der HV-Batterie. Neben dem OBC sind hier auch die DC/DC Wandler positioniert. Durch diese Anordnung der Komponenten, konnten die HV-Kabel kurz gehalten werden. Die direkte Nähe des OBC zum Lade-Inlet im ehemaligen Tankdeckel sorgt ebenfalls für eine kurze HV-Leitung. Ein weiterer Vorteil der gewählten Anordnung ist der einfache Aufbau des Fahrzeugs und die einfache Zugänglichkeit, was für einen Versuchsträger sehr relevant ist.

Durch das so gewählte Packaging der Elektrokomponenten konnte die ZEDU1-Einheit ohne Einschränkungen im Bauraum an der Vorderachse aufgebaut und einfach im Fahrzeug montiert werden. Parallel dazu konnte so das HV-System im Heck unabhängig aufgebaut und in Betrieb genommen werden.

3.4.7.2.2 *Package LV-System*

Die LV-Komponenten wurden da platziert worden, wo sie von ihrer Funktion her benötigt werden. In der Abbildung 161 ist das LV-System dargestellt.

Im Vorderwagen befinden sich wegen des Bremssystems die Unterdruckpumpe für den Bremskraftverstärker, das BBW sowie die Öl-Pumpen für die Lamellenkühlung. Zusätzlich befindet sich die Öl-Pumpe für die Kühlung der E-Motoren im Vorderwagen. Neben dem Kühlerlüfter ist die Reifenpartikelabsaugung unter der Motorhaube platziert und besteht aus einer Matrix aus zwölf Lüftern (s.a. Abbildung 102). Oberhalb der Motorhaube direkt unter dem Fenster befinden sich zwei Not-Ausschalter für die Deaktivierung des gesamten E-Systems von außen. Für die sichere Abschaltung im Falle eines Crashes ist ein Crash-Sensor im Vorderwagen und einer im Heck montiert. Die Sensoren befinden sich an formsteifen Karosserieteilen. Neben der Radeinhausung an der Vorderachse befinden sich auf beiden Seiten Antennen für den Empfang der Daten der Raddrucksensoren. Im Innenraum sind neben der VCU und der PBX die HMI-Komponenten platziert. Zum HMI-System gehört neben dem E-Gaspedal das Dashboard für die wichtigsten Fahrzeuginfos, ein Display in der Mittelkonsole für die erweiterte Anzeige von Fahrzeugdaten und ein Switch-Panel mit dem neben der Fahrmodi-Wahl das Fahrzeug auch die Reifenabsaugung ein- und ausgeschaltet werden kann.

Im Heck hinter dem Fahrer ist die Servopumpe für die Lenkunterstützung verbaut. Ebenso befindet sich im Heck die Wasserpumpe für den Kühlkreislauf, sowie die LV-Batterie und der 24V-DC/DC-Wandler für die Versorgung der HV-Batterie. Nicht aufgeführt in der Abbildung sind die Fahrzeugstandard E-Systeme wie Beleuchtung, Scheinwerfer, Scheibenwischer, etc.

3.4.7.3 Package Messequipment

Eine weitere Anforderung an den Demonstrator war die Sonderausstattung zur Aufnahme des Messequipments. Hierzu wurden Querstreben ins Fahrzeug verschweißt, damit man ein einheitliches Z-Niveau erreicht. Seitlich wurden zwei Markisenprofile auf die Querstreben verschraubt. Um die Anbindungspunkte der Spanngurte variable zu gestalten, bieten Nutzensteine die nötige Flexibilität. Trotz des Aufbaus ist die Montage und Demontage des Beifahrersitzes, je nach Bedarf, problemlos möglich.

3.4.7.4 Package Gesamtfahrzeug

Die Getriebe-Bremse-Einheit ist circa auf der Mitte der Vorderachse, nahe der ursprünglichen Position des Verbrennungsmotors positioniert (Abbildung 162). Die Inverter sind jeweils an beiden Längsträgern, an der Fahrzeugfront platziert und die Befestigung erfolgt in Anlehnung an gängige Normen und Vorschriften. Die Emissionsabsaugung (in der Abbildung 162 nicht dargestellt) befindet sich zwischen Kühler und Getriebe-Bremse-Einheit.

Die Wärmetauscher (4 Stk.) wurden gestapelt angeordnet und quer im Motorraum vor der Trennwand platziert. Der Wasserkühler befindet sich vor der Frontstruktur und ist leicht geneigt angeordnet. Bei Bedarf können zusätzlich zwei Lüfter montiert werden um die Kühlungsbedarfe bei niedrigen Geschwindigkeiten und im Stillstand sicherzustellen. Die Versorgung des Servosystems erfolgt nach dem Entfall des Verbrennungsmotors durch eine zusätzliche elektrische Servopumpe (Anordnung rechts in Fahrtrichtung neben dem Inverter).

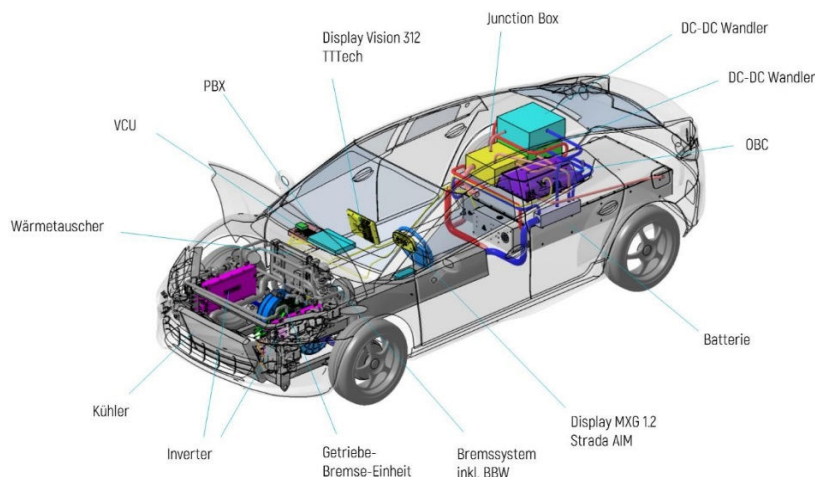


Abbildung 162: Übersicht Fahrzeugpackage

Durch die Integration von zwei zusätzlichen Displays erhält der Fahrer alle notwendigen Informationen zum Fahrzeug- und Systemzustand. Des Weiteren sind die PBX (Power Box) und die VCU (Vehicle Control Unit) verdeckt im Innenraum untergebracht. Der Fond- und Kofferraumbereich wurde durch die Integration der ZEDU1 Komponenten komplett umgestaltet. Die bestehende Rückbank, die Abgasanlage und der Kraftstofftank wurden entfernt und der Rohbau entsprechend neu konstruiert und verstärkt. Der Batterieeinbau erfolgt von unten in einen vom Fahrgastraum abgedichteten Bereich.

Die Auslegung der Batteriebefestigung erfolgte in Anlehnung an die Normen und Vorgaben für Fahrzeuge mit Elektroantrieb, sowie unter Berücksichtigung der Herstellervorgabe. Zusätzlich wurden zwei Spannungswandler (DC-DC) und der OBC (Onboard Chager) oberhalb der Batterie angeordnet und die Ladebuchse anstelle des Einfüllstutzens positioniert.

3.4.8 FMEA

Im Vorfeld der FMEA wird ein Produkt gemäß Stücklistenstruktur gegliedert und in die entsprechende Form gebracht. Jede Baugruppe und jedes Bauteil wird auf seine Funktionen und Fehler untersucht, anschließend bewertet und fortlaufend optimiert. Dabei erfolgt die Bewertung/Beschreibung stets vom Groben ins Feine.

Auch die FMEAs für das ZEDU1 folgten diesem Vorgehen. Am Bsp. der Getriebe-Bremse-Einheit sei dies erläutert. Die FME-Betrachtung geht, Beginnend mit der Funktionsbeschreibung der obersten Ebene des „ZEDU1“, über Antriebsstrang VST, Getriebe-Bremse-Einheit VST bis zu den ZEDU1 spezifischen einzelnen Bauteilen. Auf Bauteilebene erfolgt dann die Unterscheidung jeweils in Material und Geometrie.

Anschließend werden alle möglichen Fehlfunktionen der Einzelteile und Baugruppen aufgeführt. Die möglichen Fehler sind mit den Fehlern des nächsthöheren Systemelements verknüpft (analog zur Systemstruktur). Somit entsteht für jeden Fehler auf unterster Ebene (Material/Geometrie) ein Pfad bis zur höchsten Ebene. Daraus lässt sich erkennen, welche Folgen jeder Fehler hat. Die Risikobewertung aller möglichen Fehler erfolgt mit Hilfe der 3 Kategorien:

- Höchste Priorität für die Maßnahme: *
Das Team **muss** entweder eine angemessene Maßnahme identifizieren, um das Auftreten und/oder die Entdeckung zu verbessern oder rechtfertigen und dokumentieren, warum getroffenen Maßnahmen angemessen sind.
- Mittlere Priorität für die Maßnahme: *
Das Team **sollte** angemessene Maßnahmen identifizieren, um das Auftreten und/oder die Entdeckung zu verbessern oder nach Ermessen des Unternehmens zu rechtfertigen und dokumentieren, warum Maßnahmen angemessen sind.
- Niedrige Priorität für die Maßnahme: *
Das Team **kann** Maßnahmen identifizieren, um Auftreten oder Entdeckung zu verbessern.

Damit ergibt sich eine vergleichbare Bewertung jeder Funktion und jedes Bauteils. Die Bewertung der Schwere der Fehlerfolge (Bedeutung) erfolgt bei den Funktionen auf der höchsten Ebene, d.h. auf der ZEDU1-Ebene (s.a. §3.2.2.3).

Die Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit wird auf Material und Geometrie- Ebene bewertet.

Ein Überblick über das System und die FMEA gibt (u.a.) die Häufigkeitsanalyse der Action-Priorities (AP). Die Auswertung basiert auf einer Kombination der Bewertungen von Bedeutung, Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit, um Aktionen zur Risikoreduzierung zu priorisieren.

Die FMEA-Dokumentationen sind als ZEDU1-Projektdokumentation entsprechend abgelegt und bei Bedarf einsehbar.

3.4.9 Konstruktion Versuchsträger

3.4.9.1 Chassis Rohbauarbeiten und Ertüchtigung

Der Rohbau des MPM Erelis war für ein konventionell angetriebenes Fahrzeug mit Verbrennungsmotor konzipiert. Bei der Karosseriebauart wurde eine Skelettkarosserie ausgewählt. Charakteristisch hierfür ist der

Einsatz von geschlossenen Hohlprofilen, die an Knotenpunkten, wie zum Beispiel A-Säule – Schweller, miteinander verbunden sind. Flächige Bauteile wie die Windschutzscheibe, Heckscheibe oder das Dach werden hierbei steif mit dem Skelett verbunden und können dadurch Schubkräfte aufnehmen.

Um das alternative Antriebskonzept in dem oben genannten Chassis sinnvoll einzubinden, musste das Chassis einen Wandel erfahren. Damit Aspekte wie Sicherheitsanforderungen oder Radlastverteilung nach aktuellem Standard bedient werden, war eine Anpassung des Chassis unumgänglich.

Auf Basis von getasteten Flächen (3.4.2) wurde ein CAD Modell nachmodelliert und generiert. Abbildung 163 zeigt das so erzeugten CAD-Chassis des MPM Erelis. (Da die Struktur des Innenraums nicht wesentlich umgebaut wurde, wurde in diesem Bereich auf eine CAD-Modellierung/Auskonturierung verzichtet.)

Um im späteren Projektverlauf eine sinnvolle Werkstoffpaarung sicherzustellen und um die FEM-Absicherung präzise zu gestalten, wurden verschieden Werkstoffproben entnommen und mittels Spektralanalyse untersucht. Alle entnommenen Proben bestehen aus dem gleichen Werkstoff und es sind kaum Abweichungen zwischen den Analysen zu erkennen.

Aufgrund der chemischen Zusammensetzung können zwei Werkstoffe in Betracht gezogen werden:

- S235 (DIN EN 10025-2:201910)
- DC04 (DIN EN 10130:2006-12)

Der Werkstoff S235 verfügt dabei über eine höhere Zugfestigkeit während der DC04 eine deutlich höhere Bruchdehnung besitzt. Die Streckgrenzen beider Werkstoffe haben keinen signifikanten Unterschied. Für den weiteren Projektverlauf wird der Werkstoff DC04 angenommen, da er die geringere Streckgrenze der beiden Möglichkeiten besitzt und man so die Absicherung mittels FEM konservativ betrachtet.

Aus den oben genannten Randbedingungen wurde ein erstes Strukturkonzept erstellt und ein erstes rudimentäres Gesamtfahrzeug-Package erarbeitet Abbildung 151, Abbildung 162. Im weiteren Projektverlauf wurden die Komponenten-Spezifikationen konkretisiert und das Package final abgeleitet. Auf dessen Basis dann die Änderungen und die Ertüchtigungsmaßnahmen definiert und umgesetzt wurden.

Frontstruktur

Die Frontstruktur ist maßgeblich von dem neuen Antrieb, der ZEDU1-Einheit, abhängig. Die tragende MPM-Frontstruktur musste aus diesem Grund umkonstruiert, und ertüchtigt werden. Dabei wurde auf das Package eingegangen und alle Elemente, welche das Package vervollständigen, bestmöglich im Bauraum um die ZEDU1-Einheit positioniert und die dazu erforderliche Befestigungen ausgelegt und auskonstruiert.

In der Abbildung 166 ist das Package und der Neukonstruktionsumfang (Bestand grau; Erneuerung in Farbe) der Fahrzeugfront dargestellt. Die originalen Anbindungspunkte für den Verbrennungsmotor sowie einige Streben und Halter vom Serienfahrzeug führen zu Kollisionen mit den neuen Komponenten und mussten ebenfalls neu auskonstruiert werden. Um alle genannten Elemente des Packages in die Frontstruktur integrieren zu können, wurde eine Reihe Änderungen an der Frontstruktur vorgenommen. Alle rot markierten Elemente wurden angepasst und die violetten Elemente wurden entfernt (Abbildung 164).

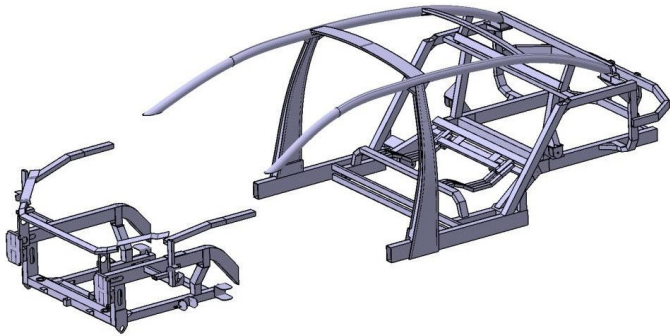


Abbildung 163: MPM Erelis. CAD-Modellierung Chassis

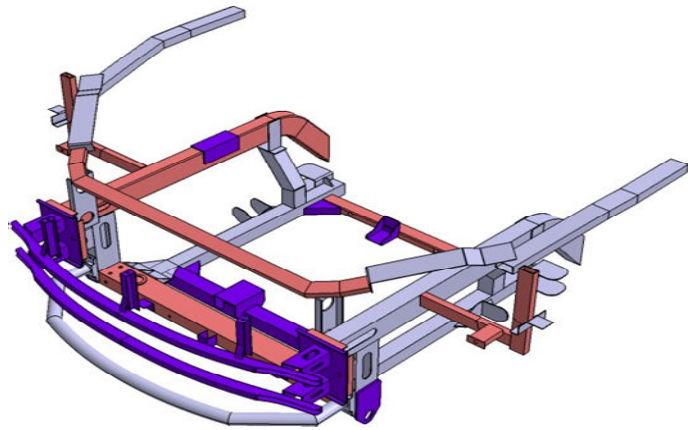


Abbildung 164: Rohbauarbeiten (rot & lila) an der Frontstruktur

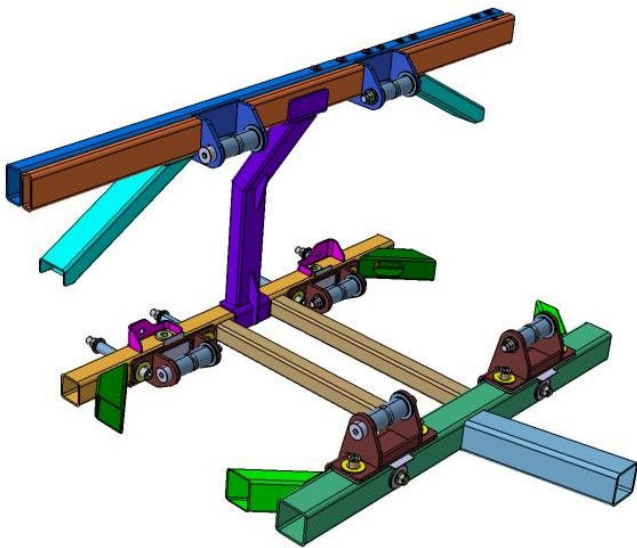


Abbildung 165: Konstruktion Integralträger

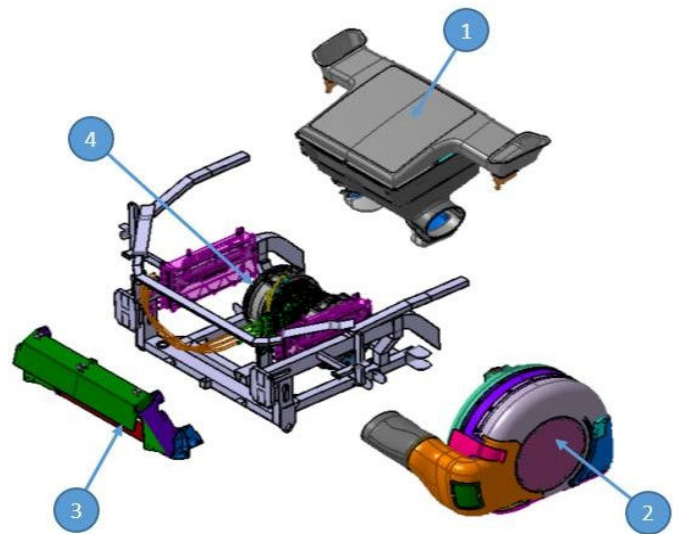


Abbildung 166: Package Vorderwagen: 1) Filter-/Lüftergehäuse, 2) Radeinhausung, 3) Luftkanal und 4) ZEDU-Einheit + Inverter

Die ZEDU1-Einheit wird durch einen Integralträger in der Fronstruktur aufgenommen (Abbildung 165). Der genannte Integralträger wurde unter den Gesichtspunkten der Stabilitätserhöhung der Fronstruktur und der einfachen Montage des Antriebes entwickelt. Die ZEDU1-Einheit wird an diesem durch sechs Lagerpunkte befestigt, wobei die zwei obere Lager Festlager sind. Sie definieren die Achse für die Rotation der Einheit während des Einbaus. Die vier unteren Punkte werden durch verschraubte Pick-Ups generiert, um mit Hilfe von Shims die Toleranzen der ZEDU1-Einheit auszugleichen.

Die neuen Profile des Integralträgers wurden in Anlehnung an die originale Struktur konstruiert. Der Integralträger stellt den Hauptteil der Ertüchtigung der Frontstruktur dar und generiert die erforderliche Steifigkeitserhöhung. Aus Platzgründen musste jedes einzelne Teil der Fronstruktur mehrere Funktionen übernehmen. So dienen die Inverter-Halter (Abbildung 167) beispielsweise auch gleichzeitig der Aufnahme des Emissionskanals. Die vorderen Befestigungspunkte des Emissionskanals sitzen auf einer Querstrebe, die die Schlossbrücke ersetzt. Die Entwicklung dieser komplexen Funktionsbauteile bedurfte vieler Konzeptarbeit im Vorfeld und Interdisziplinärer Abstimmung.

Zusätzlich muss die Fronstruktur auch die Einbau-Kinematik aller neuen Elemente ermöglichen. Daher wurde es erforderlich auch Streben und Profile der bisherigen Schlossbrücke neu zu konstruieren und zu bauen. Des

Weiteren wies die originale Struktur des Motorhauben-Verschlusses, der mittels Aerocatches auf Blechhaltern positioniert war, mit die kinematische-Bewegung der neuen ZEDU1-Radeinhausung eine Kollision auf. Um diese Kollision zu entschärfen, wurde diese Struktur im Bereich der Kotflügelanbindungen ebenfalls angepasst.

Die neue Antriebstechnologie, inklusive der HV-Batterie und der Partikelabsaugung, benötigt eine hoch effiziente Kühlung. In Verbindung mit einem großen Kühler ist daher der Einlasskanal zwischen Kühler und Stoßfänger elementar, um die dazu erforderliche Luftströmungen zu ermöglichen. Damit der Luftstrom keine Störung erfährt, wurden die originalen Querstreben entfernt und durch ein Kombinationsbauteil der neuen Crashstruktur ersetzt (Abbildung 167).

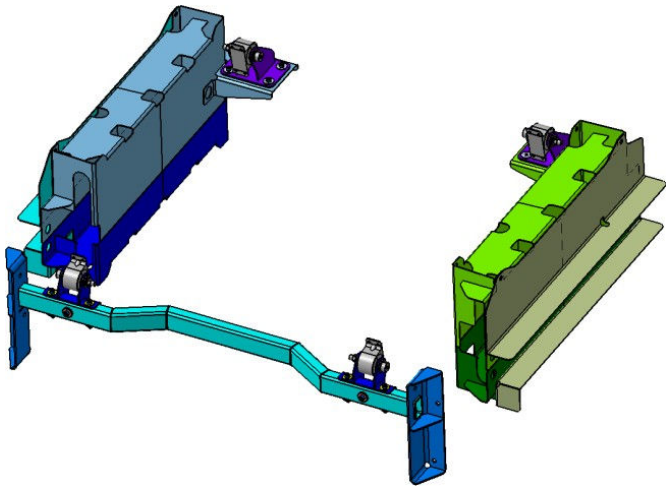


Abbildung 167: Konstruktion Inverterhalter

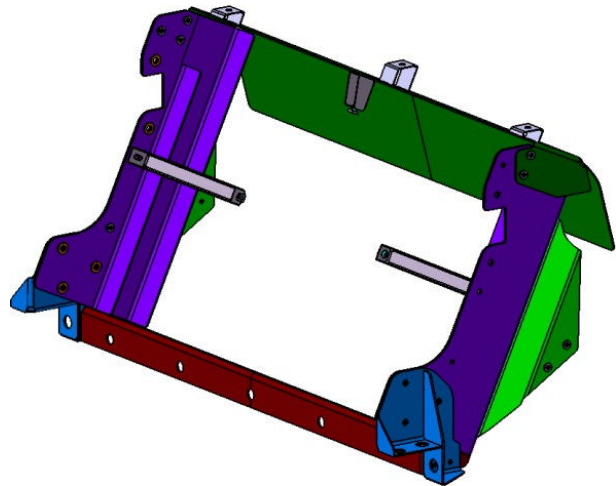


Abbildung 168: Konstruktion Kühlerhalter mit Luftstromlenkung und Crachfunktion

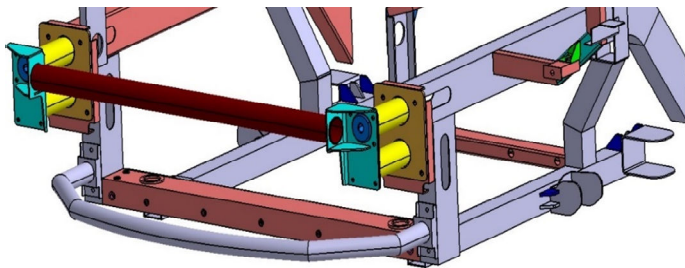


Abbildung 169: Crashstruktur Vorderwagen. Neue Bauteile in Farbe.

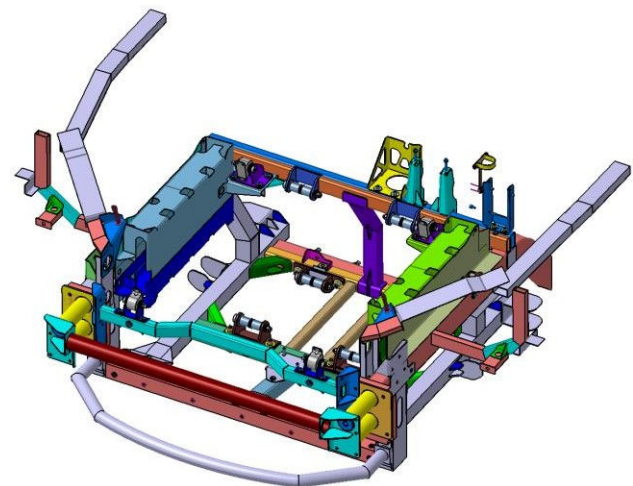


Abbildung 170: Übersicht Frontstruktur. Neukonstruktion in Farbe dargestellt.

Die Crashstruktur des Vorderwagens besteht aus zwei separaten Crashboxen (Abbildung 169). Ziel dieser Entwicklung war es, das Mehrgewicht und damit die höhere kinematische Energie im Crashfall abbauen zu können. Gleichzeitig dient diese Struktur auch für die Aufnahme der Abschleppöse.

Kausal hat die höhere Fahrzeugmasse Einfluss auf die dynamischen Lasten auf den Rohbau und das Fahrverhalten. Aus diesem Grund wurden die Lastpfade durch Verstärkungsbleche zusätzlich ertüchtigt.

Darüber hinaus wurden verschiedene Halter auf die Fronstruktur angebracht, um Bauteile des Brems- und Kühlsystems aufzunehmen (Abbildung 170).

Heckstruktur

Im Lastenheft wurde für den Versuchsträger als Vorgabe mindestens ein Fahrer und ein Versuchsingenieur definiert. Daraus abgeleitet wurde das Konzept des ZEDU1-Versuchsträgers als ein Zwei-Sitzer ausgelegt. Damit konnte die Rücksitzbank samt Struktur zugunsten der HV-Batterie und der E-Komponenten entfernt und das Fahrzeugheck für das Packaging dieser genutzt und neu konstruiert werden. Dadurch sind die Veränderungen am Fahrzeug im hinteren Bereich wesentlich gravierender als im Vorderwagen. Die Neukonstruktionen und Umbauarbeiten sind in den Abbildung 171 bis Abbildung 175 dargestellt. In der Abbildung 175 ist der Packageumfang und der Umfang der Neukonstruktion (Bestand grau; Erneuerung in Farbe) für das Fahrzeugheck dargestellt.

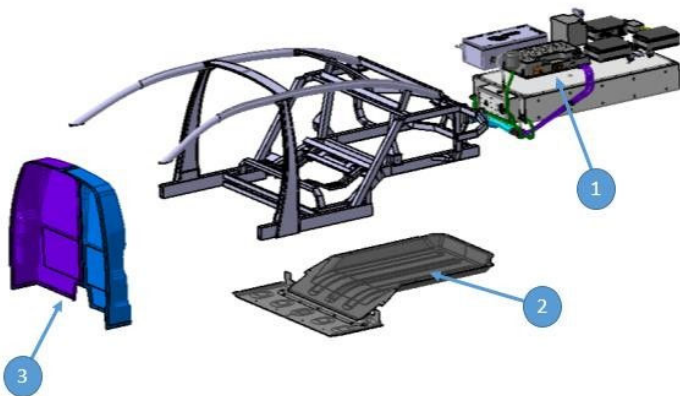


Abbildung 171: Package Hinterwagen: 1) Hochvolt-Batterie + E-Komponenten, 2) Batterieabdeckung, 3) Feuerwand Innenraum

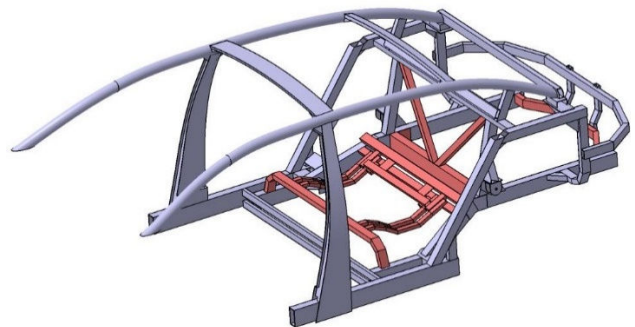


Abbildung 172: Heckstruktur

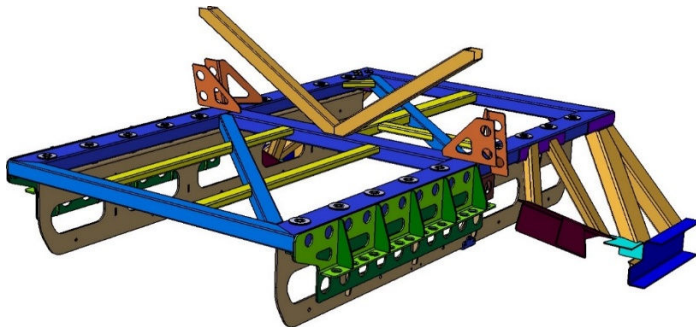


Abbildung 173: Konstruktion HV-Batteriehalter

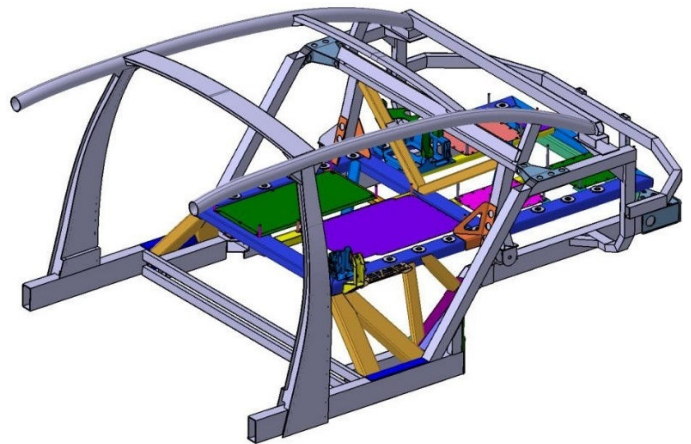


Abbildung 174: Umfang Heckumbau

Die Ansprüche an das Fahrzeugheck sind zum einen die Integration der HV-Batterie und der E-Komponenten und zum anderen die Crashesicherheit, sowie aus der FEA abgeleiteten Steifigkeitsanforderungen. Um alle Elemente des Packages in der Heckstruktur integrieren zu können, mussten umfangreiche Änderungen des Fahrzeughecks vorgenommen werden. Die Batterie und diverse E-Komponenten mussten sicher angebunden werden. Alle rot markierten Elemente in der Abbildung 172 mussten entfernt und durch neue Konstruktionen (Abbildung 173 und Abbildung 175) ersetzt werden. Der neu konstruierte Batterierahmen wurde eingeschweißt und die notwendigen elektrischen Anbindungspunkte für den Potentialausgleich der einzelnen

HV-Komponenten definiert (Abbildung 175). Die Anschraubpunkte der gewählten HV-Batterie wurden als Befestigungspunkte in die Konstruktion übernommen. Es muss allerdings sichergestellt sein, dass keiner dieser Anschraubpunkte direkt einleitende Kräfte erfährt. Um einen Kraftfluss über die Batterie zu verhindern, wurde ein hängendes Konzept zur Batteriebefestigung umgesetzt. Hierbei dient der Batterierahmen (Abbildung 173 - blau) für die Kraftübertragung und die Batterie wird von unten mittels Halter eingehängt und verschraubt. Wie Abbildung 175 zeigt, bietet der Batterierahmen eine gute Integration aller Anbindungspunkte für die E-Komponenten und Peripherien im Fahrzeugheck. Der Batterierahmen versteift die Heckstruktur hervorragend, sodass der Entfall der Serienstreben mehr als kompensiert wurde. Dieses Konzept ist mit dem Batteriehersteller abgestimmt und freigegeben.

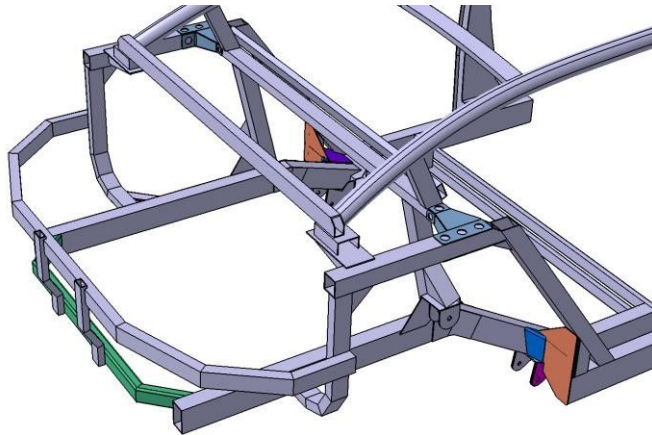


Abbildung 175: Ertüchtigungen Heckstruktur: Aufnahme Hinterachse, Knotenpunkte und Batterie-Crash-Sicherheit

Trotz der Neuentwicklung der Heckstruktur war es erforderlich einige Bereiche der originalen Struktur zusätzlich zu ertüchtigen. Exemplarisch ist diese auf Abbildung 175 dargestellt. Hier wurde zum einen die Aufnahme der Hinterachse, aufgrund des höheren Fahrzeuggewichtes und zum anderen die Knotenpunkte, um die Lasten mittels Schubfelder besser zu verteilen verstärkt und angepasst.

3.4.9.2 FEA - Finite-Elemente-Analyse

Aufgrund des umfangreichen strukturellen Eingriffs wurde eine numerische Finite-Elemente-Analyse (FEA) zur numerischen Absicherung der Bauteile sowie der Baugruppen zur Kräfteeinleitung unter Last als auch im Crashfall zwingend erforderlich. Aufgrund des höheren Fahrzeuggewichtes musste die Struktur hierfür ausgelegt und abgesichert werden. Für die Simulationen wurde ein FE-Modell aus Schalenelementen erstellt. Das aus Tastdaten erzeugte CAD-Modell diente hierbei als Referenz. Für die Festigkeitsberechnung wurden Beschleunigungslastfälle für alle Richtungen definiert. Die so auf das Modell wirkenden Massenkräfte stellten die Grundlastfälle für die Struktur dar.

FE-Lastfälle:

- LF1- Beschleunigung 35,0 g in X
- LF2 - Beschleunigung 18,8 g in Y
- LF3 - Beschleunigung 5,0 g in Z

3.4.9.2.1 Auswertung Heckstruktur

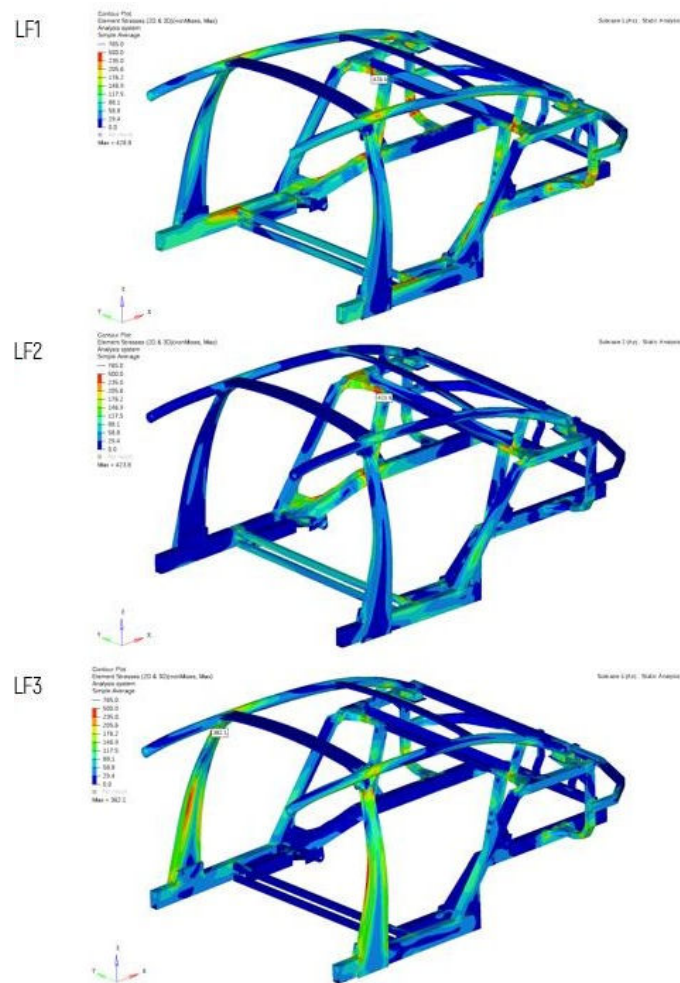


Abbildung 176: Spannungen (v. Mises) der Heckstruktur für die Lastfälle LF1 bis LF3

Fazit zur Analyse der Heckstruktur: Die Beschleunigungslasten werden nicht mehr elastisch ertragen und führen in der Struktur zu lokalen Plastifizierungen an den Hochbelasteten Bereichen. Da diese Lasten keine Betriebslasten, sondern als Missbrauchs- bzw. Crashlasten zu verstehen sind, ist dies zulässig. Ein Kollabieren der Struktur ist nicht zu erwarten.

3.4.9.2.2 Auswertung Frontstruktur

Zusätzlich zu den Beschleunigungslastfällen muss für die Frontstruktur noch das Antriebs- und Bremsmoment der Antriebseinheit untersucht werden. Aus diesem Grund wird mit LF4 Lastfall vier eingeführt.

- LF4 - Torsionsmoment 2625Nm (2x)

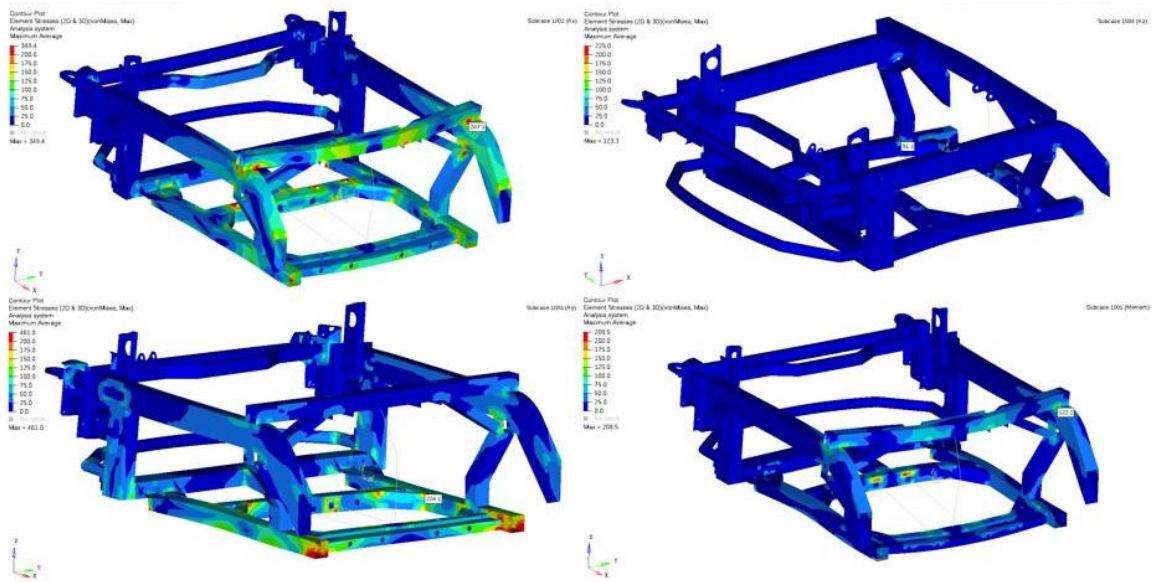


Abbildung 177: Spannungen (v. Mises) der Frontstruktur für die Lastfälle: LF1 oben links, LF2 unten links, LF3 oben rechts und LF4 unten rechts

Fazit Frontstrukturanalyse: Die Beschleunigungslasten werden an der Frontstruktur weitgehend elastisch ertragen. Auch der Torsionslastfall (LF4) führt zu Spannungen, die ausreichend Sicherheit für einen zuverlässigen Betrieb der Antriebs-/Bremseinheit bieten (Dieser Lastfall ist als Betriebslastfall anzusehen).

3.4.9.2.3 Auswertung Crashelement

Durch den Umbau des Fahrzeugs auf den elektrischen Antrieb und der diversen anderen Maßnahmen hat sich die Fahrzeugmasse um ca. 150 kg erhöht. Um diese zusätzliche Energie im Crashfall abbauen zu können, wurden zusätzliche Crashelemente in die Struktur eingebracht. Folgende Randbedingungen wurden angenommen:

- Masse: 150 kg,
- Geschwindigkeit: 50 km/h
- => Energie: 14,7 kJ

Fazit der Crashelement Analyse: Die durch höhere Masse erzeugte zusätzliche Energie des Fahrzeugs wird mit den vorgesehenen Crashelementen vollständig abgebaut.

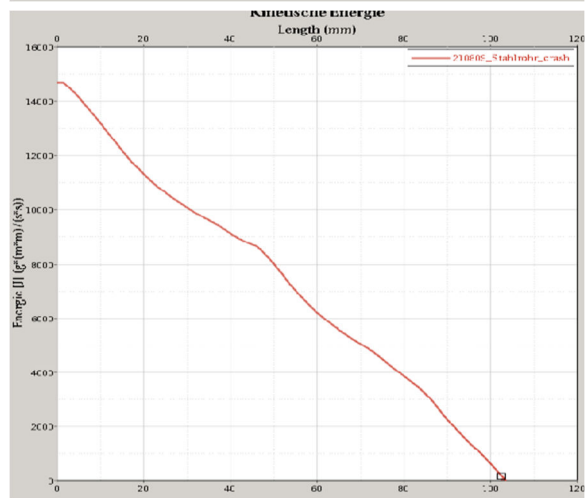
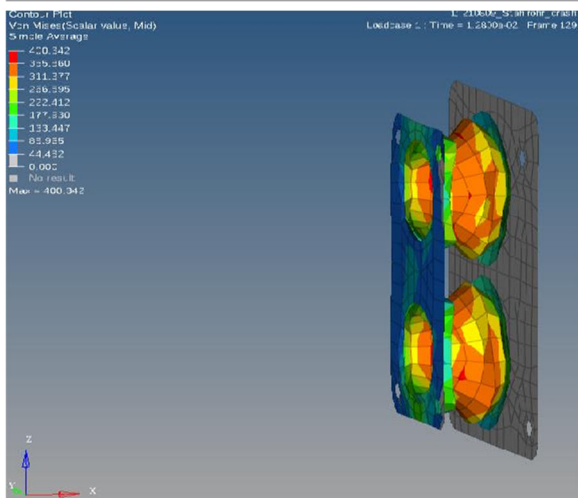
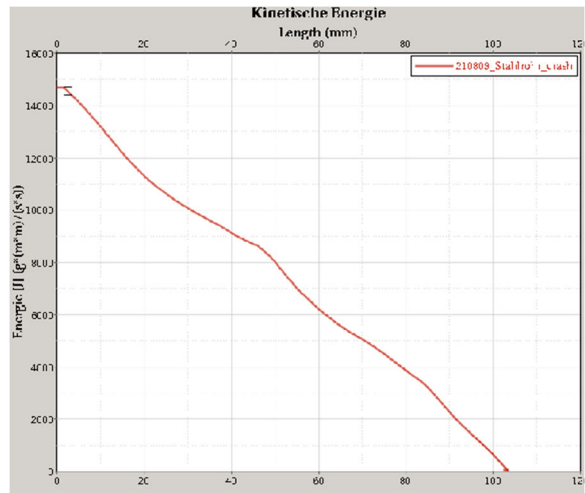
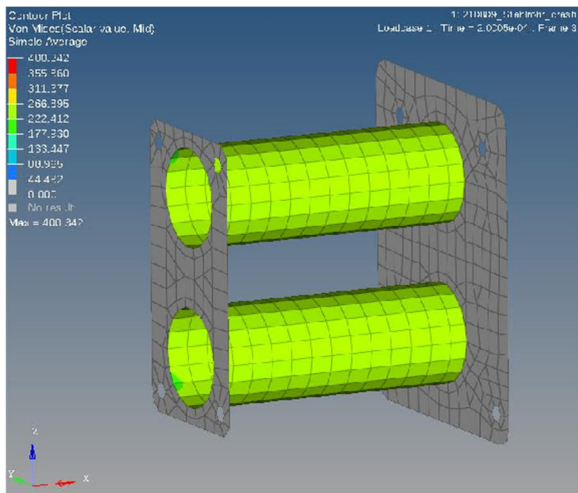


Abbildung 178: Abbau kinetische Energie

3.4.9.2.4 Auswertung Anbindung ZEDU-Einheit- Pickup

Für die ZEDU-Einheit wurden die Befestigungspickups und ihre Schraubverbindungen ebenfalls überprüft. Als Lastfälle wurden die Torsion- und Beschleunigungslasten zusammen mit den Schraubenvorspannkräften angewendet. Abbildung 179 zeigt die Lastfälle LF1 bis LF4 überlagert.

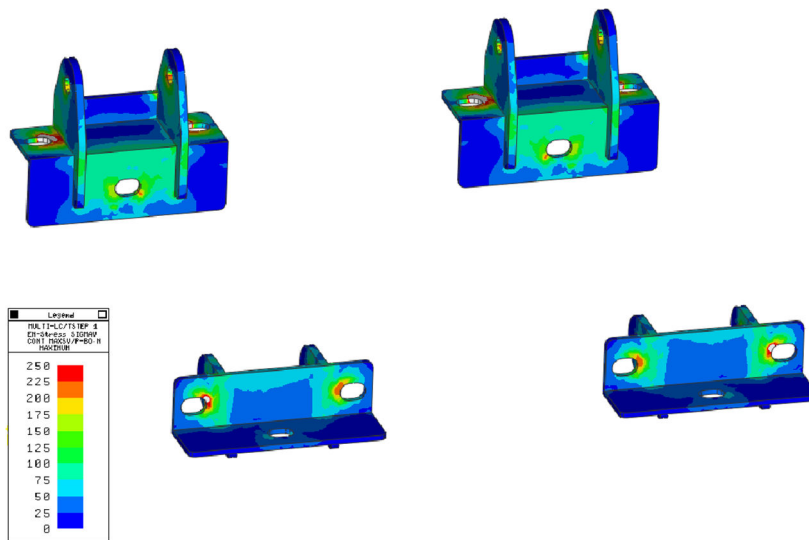


Abbildung 179: Spannungen Pickups

Fazit Lastanalyse Pickups: Die höchsten Spannungen in den Pickups aus dem Material 1.4310 liegen mit 240 Mpa unterhalb von Rp0,2 und sind damit im zulässigen Bereich und daher unkritisch.

3.4.9.2.5 Kräfteauswertung - Pickup-Schrauben

Die Tabelle 30 zeigt die Auswertung der auftretenden Schraubenkräfte für die M12 10.9 mit einem gewählten Anzugsmoment von 120 Nm und einem Reibkoeffizient von 0,15.

Tabelle 30: Schraubenkräfte

Schraube: M12 10.9 **Fvorsp:** 53kN **Fquer:** 8kN

LF	1001		1002		1003		1004	
	Node	F_ax	F_rad	F_ax	F_rad	F_ax	F_rad	F_ax
11	813.4	207.4	795.3	2514.5	591.0	1441.6	362.1	659.9
12	6473.8	2581.6	8457.2	3054.0	5912.7	3817.6	563.9	144.0
13	6504.0	2524.2	7976.6	2499.0	-58.7	2556.8	542.0	125.5
21	831.7	199.7	810.0	2533.5	470.5	1348.4	407.5	741.9
22	6544.0	2552.4	7673.7	2464.5	4759.8	2953.3	612.6	144.3
23	6992.9	2599.6	8622.1	2950.4	3159.8	3123.6	645.2	152.3
111	497.8	1376.4	1360.8	2353.5	620.2	1261.6	23.2	101.5
112	3164.2	898.6	19230.1	7625.4	1558.0	1250.0	1669.9	431.9
113	2609.2	601.3	18259.4	7436.4	164.7	842.7	1358.2	322.0
201	537.6	1451.5	1337.8	2319.3	149.2	465.7	10.9	75.9
202	2506.5	582.2	18141.1	7351.2	3576.2	1367.8	1336.2	331.2
203	3141.0	921.5	18928.5	7504.2	435.9	978.1	1669.9	439.0

Fazit Schraubenkräfte: Die Spezifikationen zeigen eine passende Dimensionierung. In axialer Richtung sind die Reserven hoch und selbst die höchste Querkomponente bleibt im zulässigen Bereich. Es bleibt anzumerken, dass jeder Pickup mit drei Schrauben befestigt wird und sich dadurch die gemittelte Belastung reduziert.

3.4.9.2.6 Auswertung MEGI-Buchsen

Für die Antriebs-/Bremseinheit wurden für eine Entkopplung elastische Elemente ausgelegt, die MEGI-Buchsen. Auch hier wurden die Torsion- und Beschleunigungslasten zur Auslegung, wie in 3.4.9.2 definiert, verwendet. Die zulässigen Belastungen nach Herstellerangabe betragen radial 8830N und axial 6300N. Abbildung 180 zeigt die Berechnung der auftretenden Kräfte.

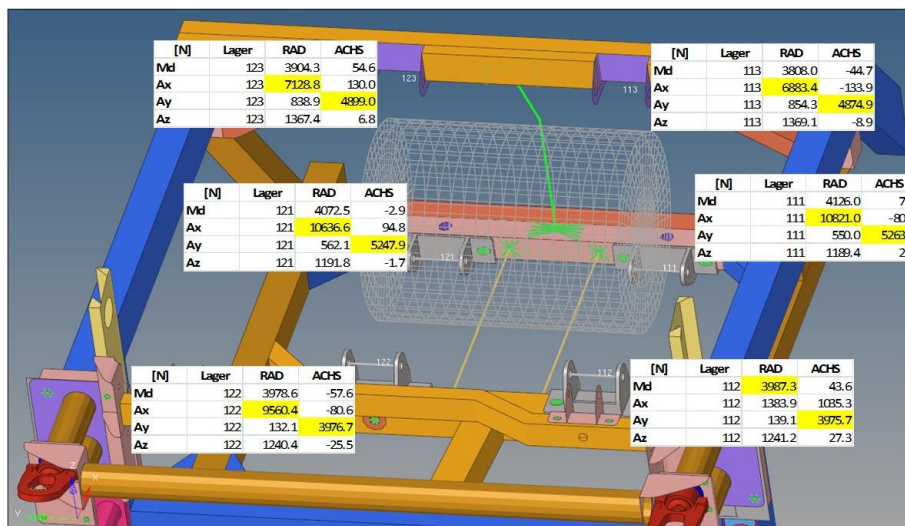


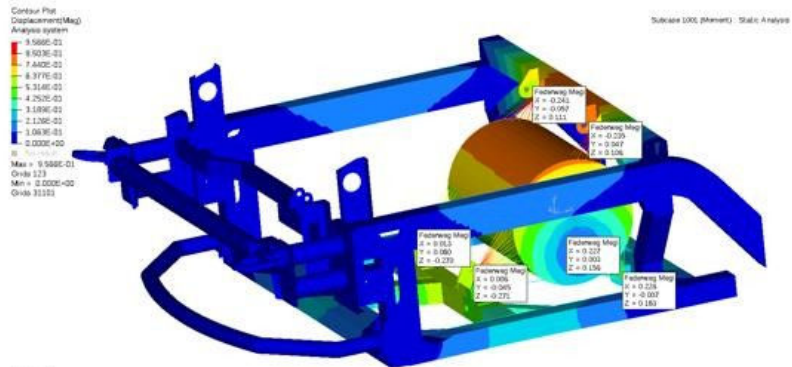
Abbildung 180: Schnittkräfte MEGI-Buchsen

Fazit Auslegung MEGI-Buchsen: Die maximale Belastung stellt der LF1 (Ax 35 g in X) dar, bei dem die höchste radiale Kraft auf die MEGI-Buchse wirkt. Mit über 10kN radial wird der zulässige Bereich überschritten, die Buchse wird ohne strukturelles Versagen auf Block gehen. Da es sich hierbei um einen Crash-Lastfall handelt, kann dieser Wert zugelassen werden. Der LF2 (Ay 18,8 g) ist ebenfalls ein Crash-Lastfall, hier bleiben wir jedoch innerhalb der Spezifikation. Der LF4 ist der eigentliche Betriebslastfall, hier liegt die Sicherheit bei 2,14.

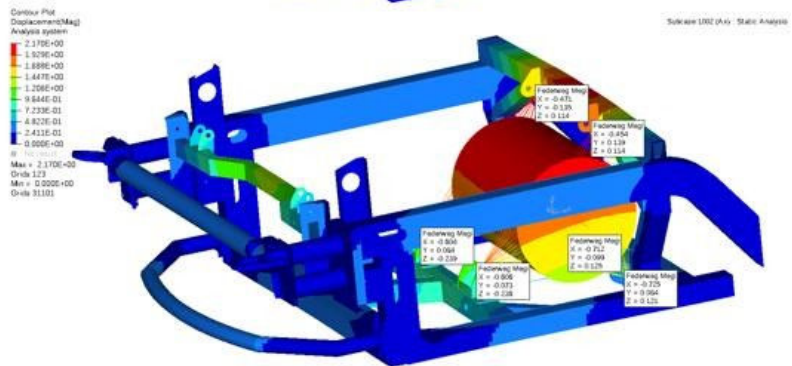
3.4.9.2.7 Auswertung Federweg MEGI-Buchsen

Für die Antriebs-/Bremseinheit muss die Entkopplung ausreichend Spiel vorhalten, damit es während des Betriebs zu keinen Berührungen kommt. Die ZEDU1-MotorGetriebeBremse sind über MEGI-Buchsen (Gummi-Metall-Schwingungsdämpfer der ContiTech AG) am Rahmen befestigt. Die FE-Analyse und Auswertung (Abbildung 181) beschreibt den Weg in X-, Y -und Z-Richtung, den die MEGI-Buchsen unter der Belastung nachgeben.

Federweg MEGI-Buchse LF4 (Moment)



Federweg MEGI-Buchse LF1 (Ax)



Federweg MEGI-Buchse LF2 (Ay)

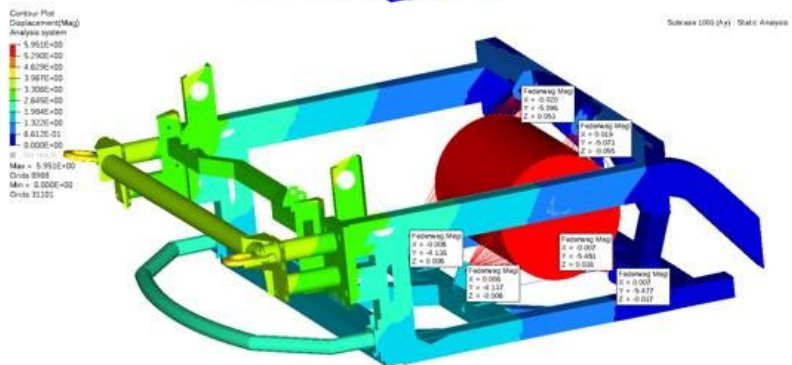


Abbildung 181: Schnittkräfte

Fazit der Auswertung: Die Federwege der MEGI-Buchsen bleiben im zulässigen Bereich.

3.4.10 Designe Versuchsträger

Zur Erreichung eines Alleinstellungsmerkmals des Projekts und eines Wiedererkennungswerts des Versuchsträgers, wurde der DLR-FK-Designer beauftragt Entwürfe für den Versuchsträger zu erstellen. Auch die Änderung des Antriebskonzeptes und Integration des komplexen Emissionsabsaugungssystems machte einen Neuentwurf der Außenhaut und des Designes zwingend erforderlich. Abbildung 182 zeigt den Entwurf und Abbildung 183 die finale Optik des vom DLR-FK-Designer entworfenen optischen Erscheinungsbildes des Versuchsträgers mit entsprechender Farbdefinition. Die Radeinhausung an der Vorderachse auf Abbildung 182 ist hierbei exemplarisch zu sehen. Die final tatsächlich realisierten Einhausungen weichen, konstruktiv bedingt, von dieser Darstellung etwas ab und sind als finales Designe auf Abbildung 183 zu sehen. Folgende Farben kamen zum Einsatz:

- Weiß: Signalweiß 9003
- Blau: Pantone 2945 #2c538f
- Schwarz: Proceda Schwarz
- Gelb: Pantone 7499



Abbildung 182: ZEDU1-Designe-Frontansicht



Abbildung 183: ZEDU1-Designe-Seitenansicht (final)

Dazu wurden die auf Abbildung 184 dargestellten Modifikationen und Neugestaltung der Außenhaut sowie Gestaltung neuer Anbauteile vorgenommen.

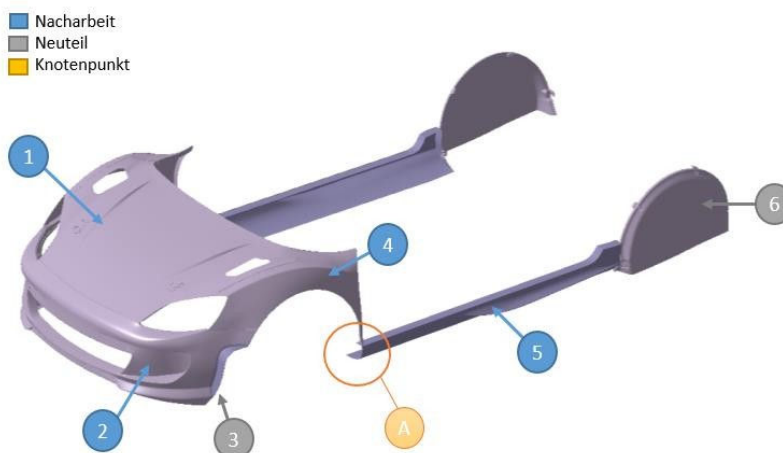


Abbildung 184: Bodywork Außenhaut. Änderungen (blau) und Neugestaltung (grau)

Unterschieden wird hierbei zwischen Neuteil: die gilt für die Radlaufabdeckung (3) und die Radeinhausung der HA und der VA (6) sowie Anpassung der Geometrien in diesem Falle der Fronthaube (1), der Frontschürze (2), des Kotflügels (4), der Schwellerabdeckung (5).

Um den angesaugten und gefilterten Luftstrom über den Emissionskanal und final die Fronthaube auszustoßen, wurden zwei Öffnungen an der Motorhaube angebracht. Hierbei wurden die Beschnittkanten kaschiert und die Öffnung mittels Drahtmasche vor Verschmutzung und Eingriffen geschützt. Die Frontschürze und der Kotflügel wurden im Bereich der Radeinhausung, abgeleitet von der Kinematik-Untersuchung, beschnitten, um den nötigen Freigang zu garantieren. Für eine homogene Optik in der Frontansicht sorgt eine neue Radlaufabdeckung. Im Bereich des Knotenpunktes A (Abbildung 184) (Schnittpunkt – A-Säule/Längsträger/Frontstruktur) musste der Kotflügel und die Schwellerabdeckung, ebenfalls zugunsten der Kinematik, gekürzt werden. An der Hinterachse sorgt die Radeinhausungsoptik so für ein angeglichenes Erscheinungsbild, analog zur Vorderachse.

3.4.11 Aufbau Versuchsträger

Abgeleitet von der FEA-Absicherung wurden zusätzliche Schwachstellen am Fahrzeug ertüchtigt, damit die erhöhte Fahrzeugmasse kein Sicherheitsrisiko darstellt. Zusätzlich wurden im Rahmen dieser Arbeiten Bereiche ausgetauscht, welche durch Korrosion des eingesetzten Chassis bedenklich betroffen waren.

In der Frontstruktur wurde ein komplexer Integralträger aufgebaut und mittels der Schweißlehre die Anbindungspunkte für die ZEDU-Einheit definiert. Des Weiteren wurden die Crashstrukturen sowie die Anbauteile gefertigt und an die gegebenen Bedingungen angepasst. Abbildung 185 zeigt diese Arben.

Um das Messequipment in der Beifahrerzelle sicher aufzunehmen und dynamisch bei den Messfahrten sicher anzubinden, werden die Quer- und Längsprofile wie im CAD-Modell konstruiert (Abbildung 187) auf dem Bodenblech eingebracht (Abbildung 188). Die Installation des Beifahrersitzes ist weiterhin gewährleistet.

Im Fahrzeugheck wurden die Batterie und diverse E-Komponenten sicher angebunden. Hierfür wurde der Batterierahmen eingeschweißt (Abbildung 186) und die notwendigen elektrischen Anbindungspunkte für den Potentialausgleich der einzelnen HV-Komponenten definiert.

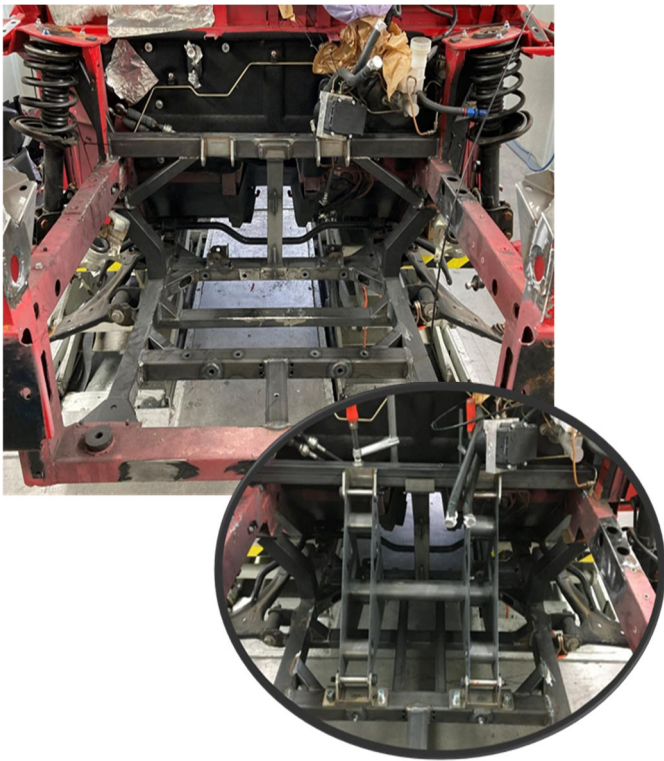


Abbildung 185: Frontstruktur und Schweißlehre



Abbildung 186: Fahrzeugheck & Batterierahmen. Rohbauanpassung für Batterieintegration.

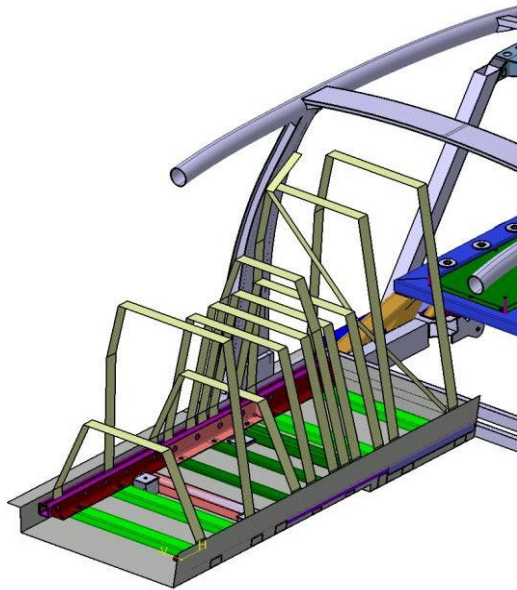


Abbildung 187: Beifahrerzelle & CAD-Modell zur Messgerätefixierung

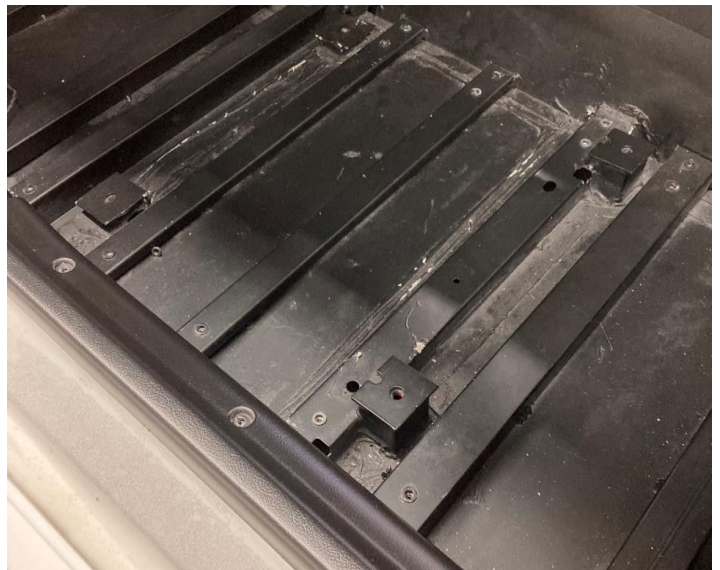


Abbildung 188: Beifahrerzelle Aufbau

Nach Abschluss der Schweißarbeiten wurde der gesamte Rohbau schwarz lackiert. Damit es im weiteren Aufbau zu einem harmonischen colourmatch kommt, wurden alle Halter ebenfalls schwarz lackiert. Im Rahmen der Rohbaulackierung wurde auch die Außenhaut, mit Ausnahme der Anbauteile, in der in §3.4.10 definierten Farben lackiert. Abbildung 189 zeigt das aufgebaute und lackierte Demonstratorshassis. Das definierte finale Design Abbildung 183 wurde dann mittels Folierung umgesetzt und finalisiert. Die abgeschlossenen Arbeiten an der Lackierung und Folierung sind auf Abbildung 190 dargestellt.



Abbildung 189: Demonstratorshassis lackiert



Abbildung 190: ZEDU1 finale Optik des Versuchsträgers

3.4.12 Integration der ZEDU1 Einheit in Versuchsträger

In diesem Abschnitt ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Bereiche Antrieb, Elektrik und Gesamtfahrzeug dargestellt. Es wird der finale Aufbau des Demonstrators und die Integration aller Entwicklungsumfänge beschrieben. Der Bericht ist entsprechend den Fahrzeugbereichen unterteilt. Zu Beginn werden die Arbeiten an der Fahrzeugfront und die Integration der ZEDU1 Einheit inklusive der Radeinhausung und Filter- / Lüftergehäuse aufgezeigt. Anschließend wird auf das Fahrzeugheck eingegangen, wobei das Hauptaugenmerk auf der Fahrzeugbatterie und den E-Komponenten liegt. Darauf folgt die Vorstellung der Fahrgastzelle und abschließend wird die Außenhaut / optisches Erscheinungsbild vorgestellt sowie auf allgemeine Punkte eingegangen.

3.4.12.1 Fahrzeugheck

Der Motorraum wurde entsprechend der in § 3.4.9 ausgeführten Konstruktionen und Auslegungen für den Einbau sämtlicher neuer Komponenten vorbereitet (Abbildung 191) Im ersten Schritt wurde die Getriebe-Bremse-Einheiten vormontiert mit den beiden E-Motoren im Vorderwagen verbaut (Abbildung 192). Die gummielagerte Anbindung erfolgt mittels sechs Haltern, die sich bereits beim Aufbau am Prüfstand bewährt haben. Anschließend wurden die Komponenten verbaut, die vor der Stirnwand, aber hinter dem Filter-/Lüftergehäuse sitzen. Das sind hauptsächlich Kühlsystem Bauteile, wie z.B. Wärmetauscher und Öltank (Abbildung 193). Beidseitig wurden dann die Kühlwasserleitungen verbaut (Abbildung 194). Sie verbinden den Hauptwasserkühler mit den Wärmetauschern und Invertern (im Motorraum), sowie Batterie und OBC (im Fahrzeug Heck). Danach wurden die Wasserpumpen für die Nebenkreisläufe hinter dem Hauptwasserkühler platziert (Abbildung 195). Mittig sitzen die Dielektrikum-Pumpe und der nachgeschaltete Filter. Anschließend wurden die Öldruckpumpen und der Ausgleichbehälter des Dielektrikumkreislaufs verbaut und angeschlossen (Abbildung 196).



Abbildung 191: Motorraum Demonstrator

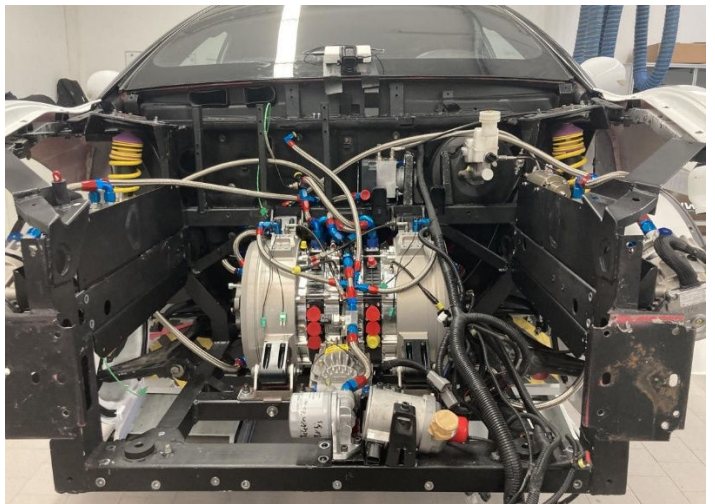


Abbildung 192: Eingebaute Motor-Getriebe-Bremse der ZEDU1-Einheiten

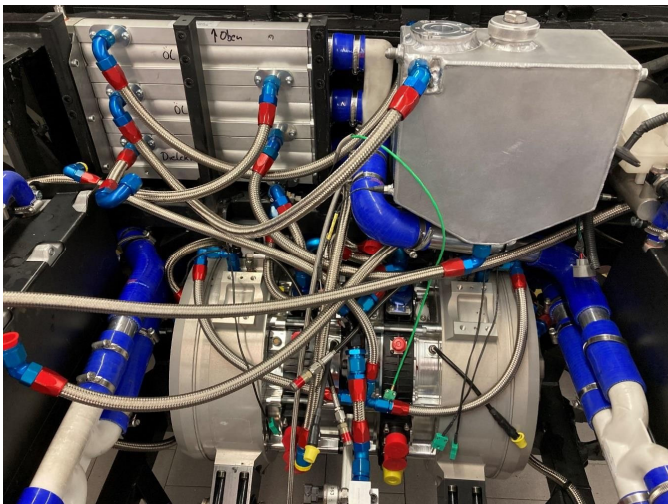


Abbildung 193: Wärmetauscher und Öltank

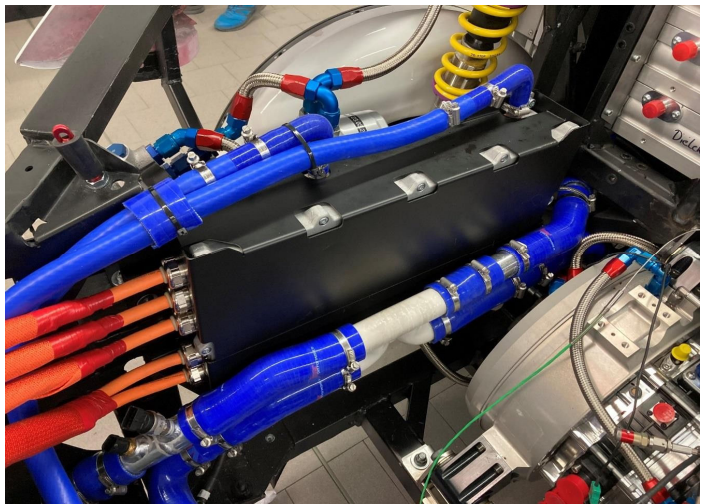


Abbildung 194: Kühlwasserleitungen (rechts) vor Inverter

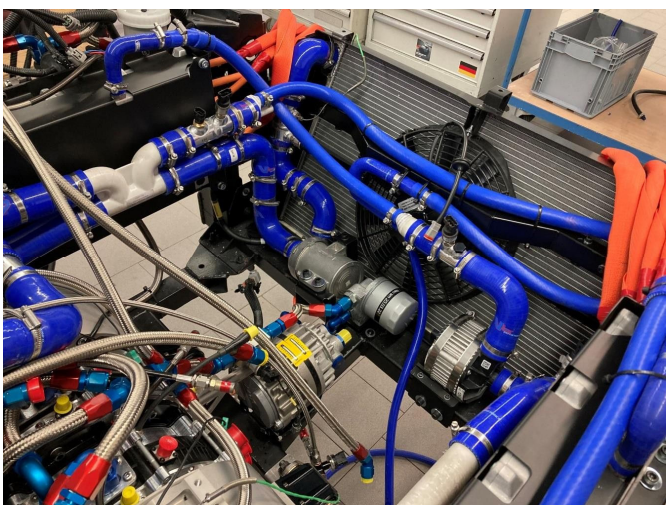


Abbildung 195: Hauptwasserkühler (Blick von hinten)



Abbildung 196: Ölpumpen und Ausgleichbehälter Dielektrikum

Des Weiteren befinden sich im Motorraum, wie auf Abbildung 159, Abbildung 160 und Abbildung 161 dargestellt, eine Reihe von Elektro-Komponenten rund um die ZEDU1-Einheit. In den Bildern Abbildung 197, Abbildung 198, Abbildung 199 und Abbildung 200 ist der reale Aufbau dieser Systeme zu sehen.

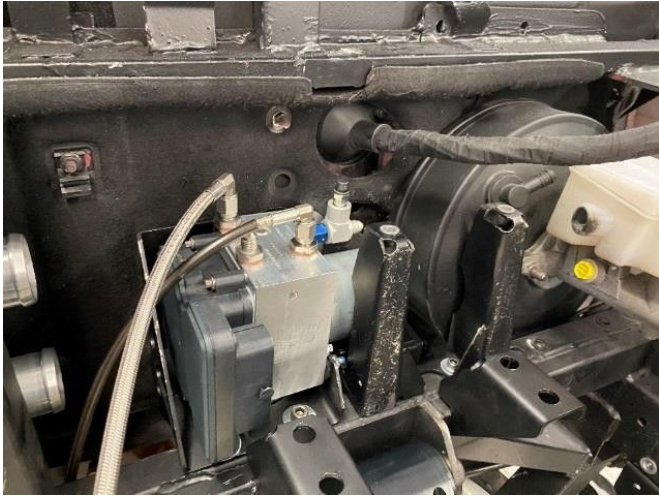


Abbildung 197: BBW-System neben dem BKV

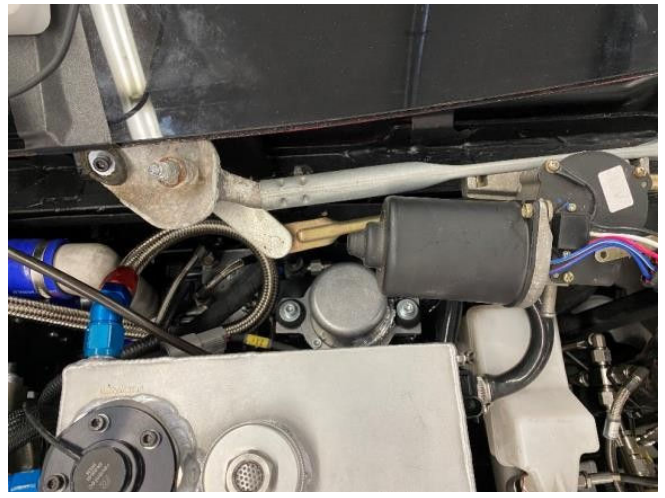


Abbildung 198: Unterdruckpumpe und Scheibenwischer

An der Motorraumrückwand befinden sich neben dem BBW-System die Unterdruckpumpe für den Bremskraftverstärker und der Scheibenwischermotor, siehe Abbildung 197 und Abbildung 198. Der Sicherungskasten des Spenderfahrzeugs befindet sich in Fahrtrichtung rechts hinter dem Scheinwerfer (Abbildung 199).

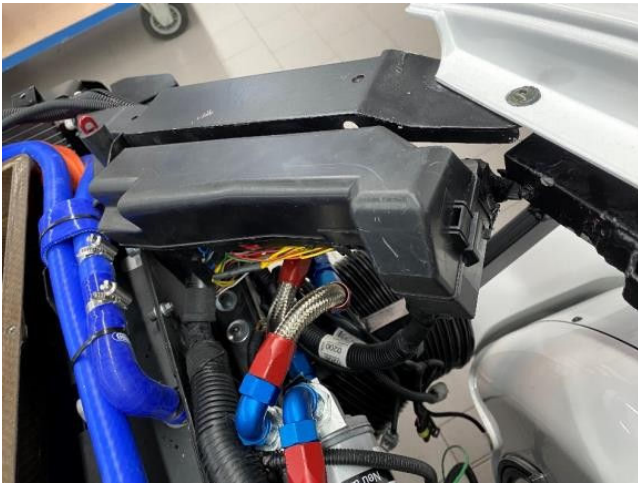


Abbildung 199: Sicherungskasten



Abbildung 200: Absauglüfter-Matrix

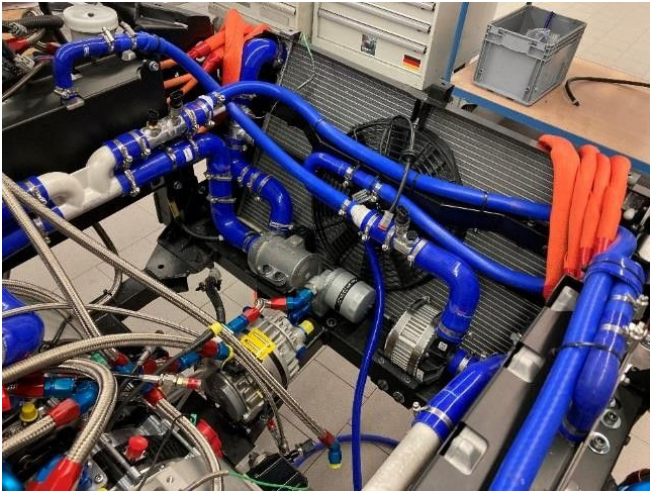


Abbildung 201: Kühlerlüfter

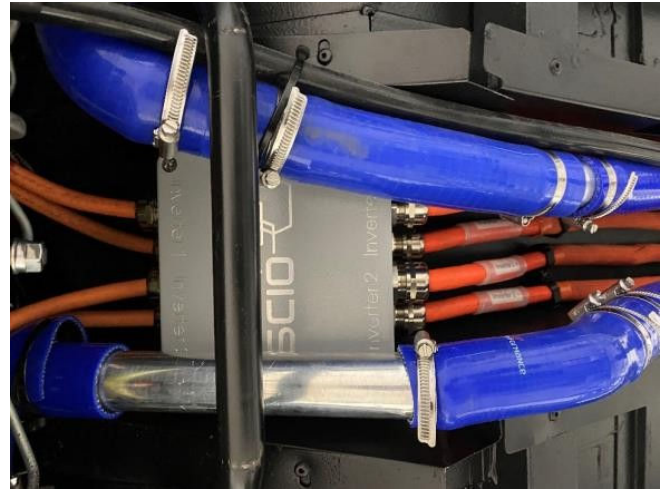


Abbildung 202: HV-Trennstelle

Auf Abbildung 200 ist die Absauglüfter-Matrix zu sehen. Die 12 Lüfter besitzen eine Gesamtleistung von 2,1 kW und werden über ein PWM-Signal (Pulsweitenmodulation) angesteuert. Dadurch ist es möglich die Lüfter individuell anzusteuern. Ein weiterer Lüfter im Motorraum fungiert als Kühlerlüfter und sorgt für ausreichend Durchströmung des Kühlers bei geringen Geschwindigkeiten und im Stand (Abbildung 201). Die HV-Trennstelle befindet sich am Ende des ursprünglichen Kardantunnels und verbindet die PDU mit den Invertern. Diese ist auf Abbildung 202 dargestellt. Dadurch können die Komponenten im Motorraum stromlos geschaltet und gewartet werden, ohne dass im restlichen Fahrzeug eingegriffen werden muss.

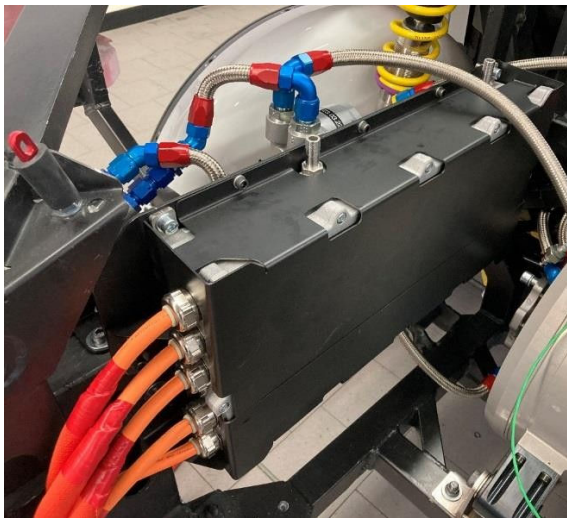


Abbildung 203: Inverter links

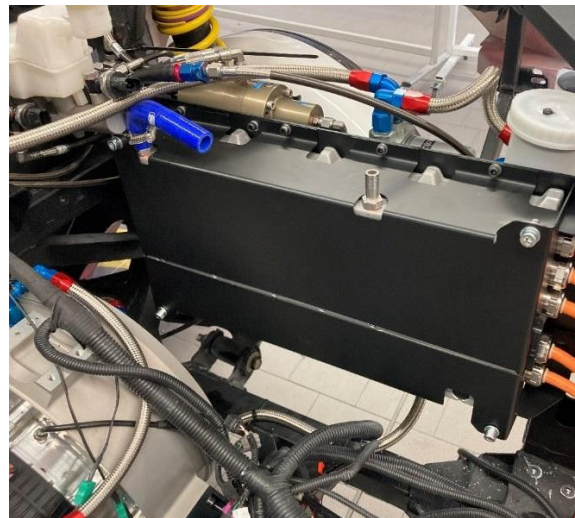


Abbildung 204: Inverter rechts

Die Inverter befinden sich seitlich am Träger so, dass die Kühlleitungen oben sind, Abbildung 203. Dadurch ist ein vollständiges Entlüften der Inverter gegeben.

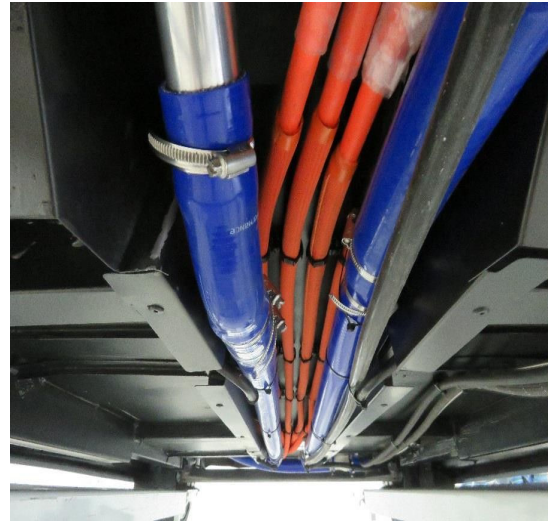
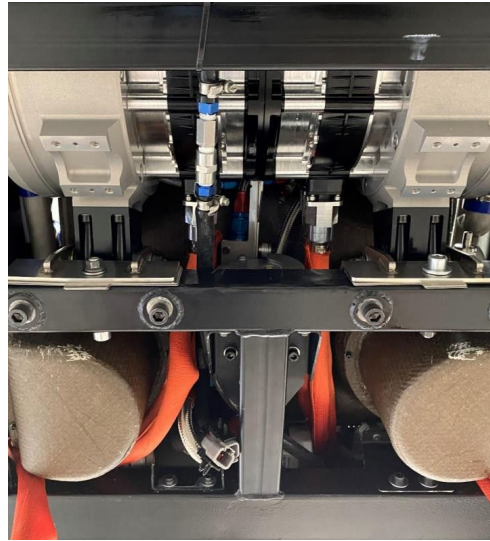


Abbildung 205: HV-Kabel PDU-Trennstelle

Abbildung 206: HV-Kabel Inverter - E-Motoren

Abbildung 207: HV-Kabel und Wasserleitungen im Kardantunnel

In der Untersicht Abbildung 205, Abbildung 206 und Abbildung 207 ist die Verlegung der HV-Komponenten zu sehen. Alle HV-Kabel im Fahrzeug sind mit der Signalfarbe orange gekennzeichnet.

Im Kardantunnel verlaufen neben den HV-Kabeln auch Kühlwasserleitungen. Sie verbinden den Teil des Kühlsystems im Motorraum mit den Komponenten im Fahrzeugheck. Diese sind in der Abbildung 207 als blauen Schlauchleitungen zu erkennen.

In der Abbildung 208 ist die fertig aufgebaute Fahrzeugfront mit allen im Packaging vorgesehenen Bauteilen abgebildet. Zu sehen ist vor allem das Filter- /Lüftergehäuse, das an den definierten Anbindungspunkten im Frontwagen befestigt ist.



Abbildung 208: Absaugsystem - Filtergehäuse

Abbildung 209: Absaugsystem - Radeinhausung

Die eingebaute Radeinhausung sind auf Abbildung 209 dargestellt. Sie wird über die Anbindungspunkte am Radträger fixiert. Um den Luftstrom in das Filter-Lüftergehäuse zu leiten, ist ein spezieller Luftschlauch mit Kunststoffspirale und glatter Innenwand verbaut. Dieser hat den Vorteil, dass er sehr gute Rückstellkräfte aufweist und nicht bleibend verformt. Durch die glatte Innenwand hat der Luftstrom wenig Verluste.

3.4.12.2 Messtechnik

Für die Messaufgaben wurden die in der Tabelle 31 dargestellten Messstellen definiert und wie auf Abbildung 210 zu sehen im Absaugsystem realisiert.

Tabelle 31: Messtechnik wird am Absaugsystem

Messgröße	Messort
Luftvolumenstrom	Nach Filter
Luftdruck	Nach Filter
Luftdruck	Vor Filter
Luftdruck	Radeinhausung
Probenahme Partikel	Vor Filter
Probenahme Partikel	Nach Filter
Probenahme Partikel	Boden vor Radeinhausung
Probenahme Partikel	Boden nach Radeinhausung

Die beide Emissionskanäle sind mit sechs Druckmessstellen und zwei Staudruckröhren versehen. Diese dienen zur Ermittlung der Differenz zwischen dem gemittelten statischen Druck und den jeweiligen Staudrücken. Aus dieser Differenz wird den Volumenstrom berechnet, der als Steuergröße für die Lüfter dient. Zudem werden die Messwerte für den Abgleich Validierung zwischen den Realversuchen und der CFD-Simulation verwendet. Neben der Druckmesstechnik ist im Emissionskanal nach dem Filter an der Beifahrerseite eine Probenahmestelle für die Partikelmessung vorgesehen. Eine zweite Probenahmestelle befindet sich im Ansaugkanal vor dem Filter. In der Abbildung 210 ist der Emissionskanal und das Filter- / Lüftergehäuse mit den integrierten Messstellen zu sehen.

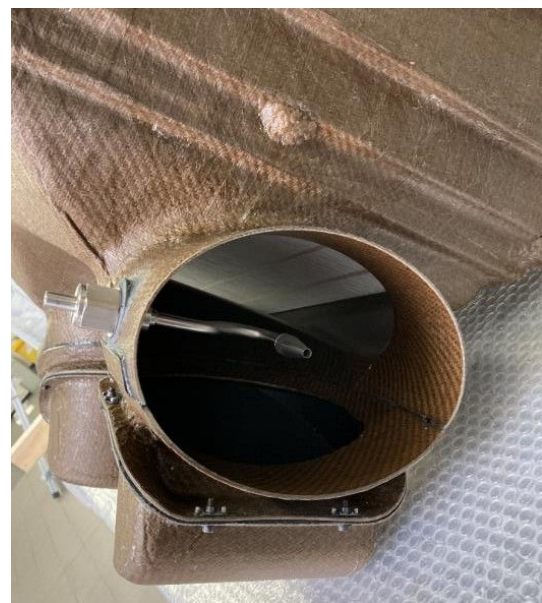


Abbildung 210: Messstellen im Filter- / Lüftergehäuse

3.4.12.3 Fahrzeugheck

Neben den großen HV-Komponenten befinden sich im Heck des Fahrzeugs Teile des LV-Systems. Dazu gehört neben der 12 V LV-Batterie ein 12 V/24 V DC/DC-Wandler auch die Servopumpe für die Lenkunterstützung. Diese sind in der Abbildung 211 und Abbildung 212 dargestellt.



Abbildung 211: Servopumpensystem



Abbildung 212: DC/DC-Wandler und LV-Batterie



Abbildung 213: OBC



Abbildung 214: PDU

Der OBC befindet sich hinter dem Fahrer oberhalb des Batteriehalters (Abbildung 213). Verbunden ist dieser zum einen mit der HV-Verteilerbox, kurz PDU (Power Distribution Unit) genannt, und zum anderen mit dem Ladeinlet. Die PDU ist im Heck, hinter dem Beifahrer platziert (Abbildung 214). Zur Tür hin befinden sich die sicherheitsrelevanten Einrichtungen des HV-Systems. Dazu gehört u.a. die LED für die optische Diagnose der Zwischenkreisspannung des HV-Systems, das Manual Service Disconnect (MSD) sowie der Measuringpoint. Die LED zur optischen Spannungsdiagnose zeigt an ob eine Spannung über 60 V anliegt. Sobald die se erreicht oder überschreitet ist beginnt die LED an zu leuchten. Über den Measuringpoint (links) kann ein Messadapter angeschlossen werden. Über diesen kann die Systemspannung sowie die Isolationswiderstände gemessen und der Isolationswächter getestet werden. Mittels Manual Service Disconnect (MSD)

kann das HV-System, sobald die Zwischenkreisspannung 0V beträgt, auch komplett deaktiviert werden. Ein Wiedereinschalten des HV-Systems ist dann nicht möglich.

Das Ladeinlet befindet sich hinter dem ehemaligen Tankdeckel, Abbildung 215. Der Deckel kann weiterhin per Hebel am Fahrersitz geöffnet werden. Zum Laden des Fahrzeugs ist lediglich die Schutzkappe des Inlets zu entfernen und das Ladekabel anzuschließen. Das Inlet verriegelt zu Beginn des Ladevorgangs selbsttätig das Ladekabel. Die HV-Batterie befindet sich unterhalb des Kofferraums im Heck (Abbildung 216).



Abbildung 215: Ladeinlet

Abbildung 216: HV-Batterie

Im Fahrzeugheck befindet sich der Kühlwasser-Ausgleichbehälter (Abbildung 217). Er bildet den höchsten Punkt im System und gleicht die Zu- und Abnahme des Wasservolumens aus, die sich aufgrund der Temperaturunterschiede ergeben. Außerdem sind daran die Rücklaufleitungen der Sicherheitsventile angeschlossen, die beide Inverter und die Batterie vor einem Überdruck im Wasserkreislauf schützen.

Um die Batterie vor äußeren Einflüssen, wie zum Beispiel Spritzwasser zu schützen, ist eine Batterieabdeckung (Abbildung 218) verbaut. Dieses Bauteil aus schwarzem Glasfasergewebe schließt das Fahrzeugheck nach unten ab. Die Entwicklung hierzu ist in Kapitel 3.4.9. dargestellt.

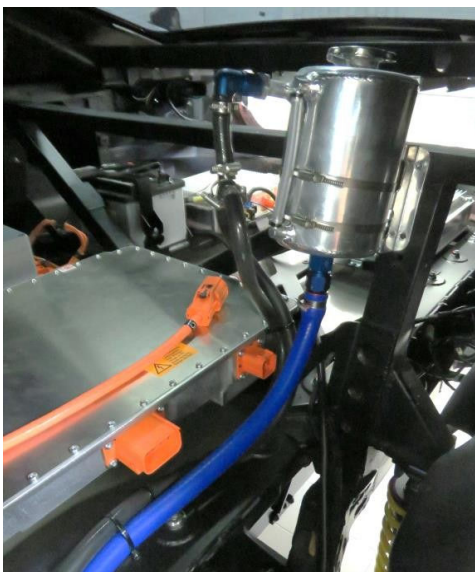


Abbildung 217: Kühlwasserausgleichbehälter im Fahrzeug Heck

Abbildung 218: Batterieabdeckung

3.4.12.4 Fahrgastzelle

In der Fahrgastzelle wurde auf ein einheitliches Erscheinungsbild hinsichtlich Colourmatch geachtet. Aus diesem Grund wurde der Dachhimmel neu bespannt und die Verkleidungsteile ebenfalls neu lackiert.



Abbildung 219: Fahrgastzelle - Fahrerseite



Abbildung 220: Beifahrerfußraum – Befestigungen für Messtechnik

Der Versuchsträger wurde mit speziell hergerichteten neuen Sitzen mit einem ZEDU-1-Branding ausgestattet (Abbildung 219). Dahinter wurde eine Feuerwand installiert, welche die Fahrgastzelle zum Fahrzeugheck, in dem eine Reihe prototypischer Komponenten verbaut wurde, abschließt. Ziel dieser ist es, bei einem unvorhergesehenen Störfall oder Unfall den Innenraum des Fahrzeugs und damit den Fahrer vor möglichem Feuer, Rauch und Staub zu schützen.

Auf der Beifahrerseite kann wahlweise der Beifahrersitz montiert werden oder das Messequipment aufgenommen werden. Zur Befestigung der Spanngurte gibt es zwei U-Profile mit Nutensteinen und Ringschrauben (Abbildung 220). Die Querprofile sorgen für einen festen Stand und ein einheitliches Höhenniveau der Messgeräte.

Zu dem System gehört zum einen ein „E-Gas“ (elektrisches Gaspedal). Der Fahrerwunsch wird mit diesem elektronisch aufgenommen, in der VCU ausgewertet und die gewünschte Beschleunigung an die ZEDU1-Einheit weitergegeben (Abbildung 221).



Abbildung 221: Elektrisches Gaspedal



Abbildung 222: Kombiinstrument

Das Kombiinstrument, oder auch Dashboard genannt, wurde ebenfalls entfernt und durch ein voll elektrisches Display ersetzt (Abbildung 222).

Dieses bietet die Möglichkeit der freien Programmierung der Anzeige, bei gleichzeitiger Erfüllung aller gängigen Straßenanforderungen. Auf dem für das ZEDU1 entwickelten und programmierten Dashboard werden alle für den Fahrer relevanten Informationen für den Fahrbetrieb dargestellt. Dazu gehören auch Status- und Warnungsanzeigen des Systems. In den Fahrzeuginnenraum wurde ein aufwendiges HMI-System, das dem Fahrer eine optimale Kontrolle über das Fahrzeug ermöglicht integriert (Abbildung 223). Über dieses Display in der Mittelkonsole erhält der Fahrer weitere Informationen zum Fahrzeugzustand und relevanten Messwerten des Systems. Unterhalb des Displays befindet sich der Warnblinkerschalter, sowie Schalter und Taster zum Starten des Fahrzeugs. Mittels des ebenfalls neu installierten Switchpanels neben der Handbremse kann der Fahrer verschiedene Funktionen auswählen und einstellen. Dazu gehört unter anderem z.B. das Wählen des gewünschten Fahrmodus. Oberhalb der Mittelkonsole wurde ein Not-Aus-Schalter (Abbildung 224) sichtbar und gut zugänglich angebracht. Mit dem Not-Aus-Schalter kann das Fahrzeug im Notfall komplett stromlos geschaltet werden.



Abbildung 223: HMI-Mittelkonsole



Abbildung 224: Not-Aus

3.4.12.5 Erscheinungsbild Versuchsträger

Der Demonstrator wurde mit der Farbdefinition aus 3.4.10 lackiert und erhielt die vorgegeben Design-Elemente mittels Aufkleber. Die in Kapitel 3.4.10 vorgestellte Farbgestaltung, wurde über Beschnitte an der Außenhaut umgesetzt. Um den Volumenstrom ausströmen zu lassen, wurden in der Motorhaube Auslässe für den Emissionskanal umgesetzt. In den Ansichten Abbildung 225, Abbildung 226 und Abbildung 227 ist die Umsetzung des Designentwurfs der Fahrzeugfront, des Fahrzeugheck und der Fahrzeugseite dargestellt.



Abbildung 225: ZEDU1 - Fahrzeugfront



Abbildung 226: ZEDU11 - Fahrzeugheck



Abbildung 227: ZEDU1 - Seitenansicht

3.4.12.6 Federbein

Um die erhöhte Fahrzeugmasse kompensieren zu können und sichere Fahreigenschaften sicherzustellen, wurde ein neues, individuell abgestimmtes Feder- / Dämpfersystem an der Vorder- und Hinterachse im ZEDU1 Demonstrator eingebaut. Dieses ist in enger Zusammenarbeit mit der Firma K&W ausschließlich für dieses Fahrzeug entwickelt worden. Am Ende des Aufbaus wurde der ZEDU1 Demonstrator eingemessen.



Abbildung 228: Federbein

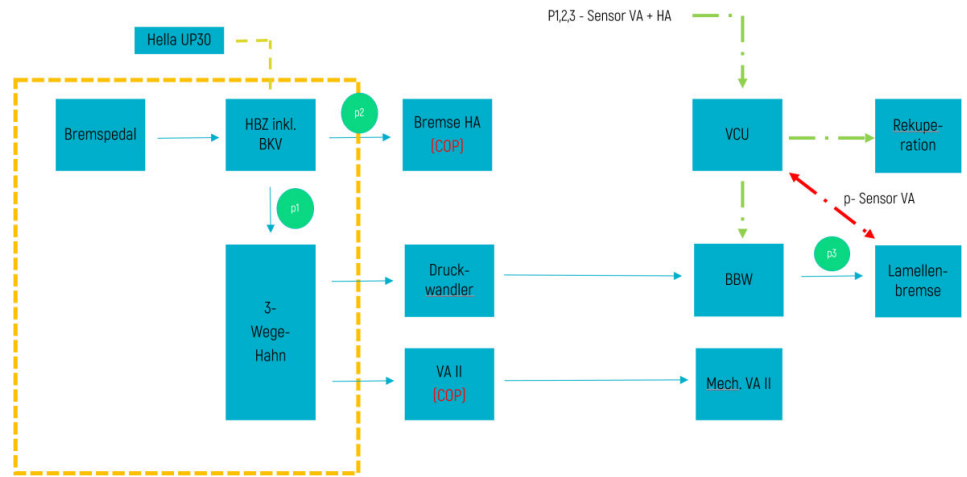


Abbildung 229: Bremsschema inkl. Messstellen

3.4.12.7 Bremsen

Weiterhin wurden die originalen Bremsscheiben und Bremsbeläge ausgetauscht. An der Hinterachse wird während des Betriebs weiterhin konventionell verzögert. An der Vorderachse wird im Normalfall nur über die beiden Lamellenbremsen verzögert. Das in 3.4.1 Bremsschema wurde inkl. Bremssensorik nochmal überarbeitet und wie Abbildung 229 dargestellt umgesetzt.

Parallel und in Abstimmung mit den Aktivitäten aus TP1 wurde der Demonstrator zur Integration aller notwendigen Komponenten ertüchtigt. Die Auflistung aller Details und Berechnungen sind in Meilensteinberichten dokumentiert und in der Projektablage zu finden.

3.5 TP4: Testkonzepte

In diesem Teil des Projekts erfolgten einmal für ein Referenzfahrzeug und zum anderen für den ZEDU1-Demonstrator die Entwicklung der Testkonzepte, die Planung der Versuchsaufbauten, Konstruktion und Aufbau als auch die Erstellung der Messkonzepte und die Testdurchführung. Ebenso wurden für die durchzuführenden Tests die Testzyklen ausgewählt, definiert und spezifiziert. Im Folgenden wird dies einmal für das Referenzfahrzeug unter 3.5.1 und für den ZEDU1-Versuchsträger unter 3.5.3 beschrieben.

Alle Dokumentationen und Listen der Messkonzepte wurden für alle Projektpartner zugänglich in der Projektdokumentationsablage abgelegt.

3.5.1 Testumgebung

Entscheidend für die Gestaltung des Testkonzeptes ist unter anderem die Auswahl der Testumgebung bzw. des Prüfstandes. Verschiedene Konzepte wurden erstellt und bewertet. Um ein möglichst realitätsnahes Bild der Partikelemissionen zu erhalten und auch die Kosten für das Testkonzept resp. den Versuchsaufbau im Projekt-Budgetrahmen zu halten wurde für die Durchführung der Referenztests zur Abriebuntersuchung das Konzept eines Referenzfahrzeugs (3.5.1) gewählt. Hier können die Brems- und Reifenabriebe, im Gegensatz zu einzelnen Komponentenprüfständen, an einem Aufbau realitätsnahe untersucht werden ohne das separate, kostenintensive Prüfstände für die beiden Betrachtungen, Bremsen- und Reifenemissionen, zeitaufwendig aufgebaut werden müssen. Die Versuche können damit sowohl auf dem DLR-eigenen Rollenprüfstand als auch im Realbetrieb auf der Straße oder auf abgesperrten Testgeländen durchgeführt werden. Zum Abgleich und Validierung der Messergebnisse wurden zusätzlich Vergleichsversuche an einem Komponentenprüfstand vorgenommen (3.5.5).

3.5.2 Prüfscenarien

Die Messkonzepte zur Abriebemissionsmessung wurden mit dem Ziel ausgelegt, repräsentative und reproduzierbare Testergebnisse zu erzielen.

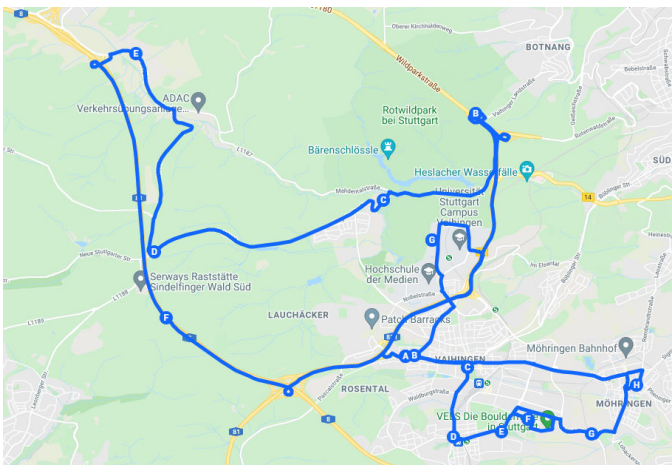


Abbildung 230: RDE-Zyklus in Karte Stuttgart und Umgebung eingezeichnet (Erstellt mit OpenStreetMap.org)



Abbildung 231: RDE-Fahrt. Testfahrzeug BMW i3

Dazu wurden als Prüfscenarien die normkonformen Fahrzyklen „WLTC 3b“ und „WLTC Break Cycle Part 10“ (Abbildung 232, Tabelle 32) und der „Real Drive Emission Cycle (RDE)“ (Abbildung 230, Tabelle 33) als Testzyklen herangezogen. Der „WLTC 3b“ ist der Zyklus nach dem in Europa Energieverbräuche und Reichweiten sowie Abgasmessungen von PKW's zertifiziert werden. Dieser wurde hauptsächlich entwickelt für Messungen zur Bestimmung von Verbrennungsemissionen. Der WLTC Brake (Teil 10) hingegen wurde für die Messung von Bremsemissionen auf einem Komponentenprüfstand entwickelt.

Tabelle 32: Fahrzyklen und derer Parameter

Fahrzyklus	Zeit [s]	Distanz [km]	Ø Geschwindigkeit [km/h]	Max. Geschwindigkeit [km/h]
WLTC 3b	1800	23.2	46.5	131
WLTC Brake Part 10	5272	64.7	44.2	132.5
Real Driving Emission	3619	47.4	47.2	111.1
ZEDU-Accelerate s	390		75	120
ZEDU-Brakes	290		40	80

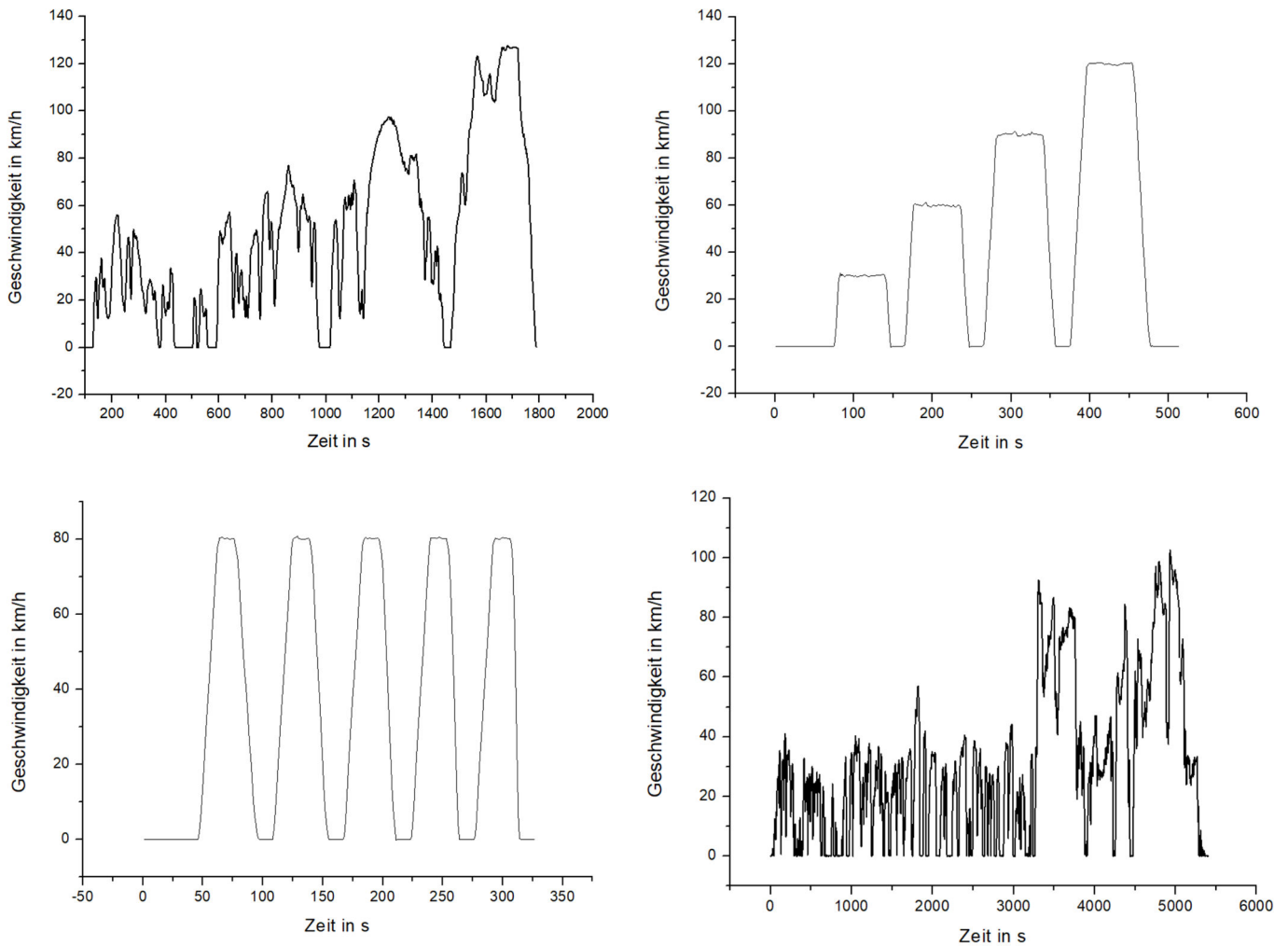


Abbildung 232: Eingesetzte Testzyklen: WLTC (o.l.); ZEDU-Accelerate (o.r.); ZEDU-Brake (u.l.) und der gefahrene RDE-Zyklus (u.r.)

Der RDE-Zyklus ist ein realer Fahrzyklus zur realitätsnahen Abgasemissionsmessung bei Verbrennerfahrzeugen mit Stadt-, Land- und Autobahnabschnitten auf öffentlichen Straßen (Abbildung 231). Für die Straßenfahrten wurde um Vergleichbarkeit der Tests zu gewährleisten, eine RDE-konforme Route als Fahrprofil um Stuttgart definiert (Abbildung 230). Diese startet und endet am DLR-Standort Stuttgart. Sie dient für normkonforme RDE-Fahrten und wurde bereits mehrfach für andere RDE-Fahrten verwendet (36), (Tabelle 33). Das Geschwindigkeits- und Höhenprofil der Realfahrt wurde aufgezeichnet und am Prüfstand nachgefahren, um eventuelle Abweichungen in den Messergebnissen zwischen Prüfstandversuch und Realfahrt feststellen zu können. Fahrt mit dem BMW i3 sind auf Abbildung 231 dargestellt. Somit konnten alle Fahrzyklen unter reproduzierbaren Bedingungen auf dem Rollenprüfstand wiederholt durchgeführt werden. Wie in Tabelle 32 zu sehen, variierten die Parameter der untersuchten Fahrzyklen in Länge und Strecke, was die Erwärmung der Bremse über die Zeit beeinflusst. Außerdem umfassen sie eine unterschiedliche Vielzahl von verschiedenen Geschwindigkeiten und Bremsvorgängen. Da die Verzögerungen und damit die Belastung der Bremse im „WLTC 3b“ verhältnismäßig gering ausfallen, wurden zur Abriebbestimmung zusätzlich Messungen mit der WLTC10, ein Abschnitt des „WLTC Break Cycle“, durchgeführt. Dieser bildet einen repräsentativen Mix aus verschiedenen Verkehrsumfeldern, wie Stadtverkehr oder Überlandfahrt, ab und beinhaltet im Vergleich zum „WLTC 3b“ stärkere Verzögerungen (21).

Tabelle 33: RDE-Fahrzyklus und dazugehörige Parameter

Fahrzyklus	Zeit [s]	Distanz [km]	Stadt [%]	Land [%]	Autobahn [%]
RDE	3619	47.4	50	31	19

Des Weiteren wurde ein ZEDU-Accelerate Zyklus entwickelt, bei dem mit vorgegebener Beschleunigung jeweils auf die Geschwindigkeiten 30 km/h, 60 km/h, 90 km/h und 120 km/h mit anschließender Konstantfahrt erhöht wird, gefolgt von einer Abbremsphase auf 0 km/h, sowie ein Fahrprofil ZEDU-Brake mit wiederholter Beschleunigung bis 80 km/h und Abbremsung auf 0 km/h.

3.5.3 Rollenprüfstand

Die Versuche zur Charakterisierung sowohl der Bremsabriebe- als auch der Reifenabriebe beim Referenzfahrzeug dem BMW i3, als auch beim ZEDU1-Versuchsträger fanden, neben den Fahrten auf dem Testgelände und den öffentlichen Straßen (RDE-Zyklus), auf dem klimatisierten Allrad-Prüfstand am DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte in Stuttgart statt. Der umfangreich ausgestattete Prüfstand der Firma MAHA/AIP ist ein Allrad-Rollenprüfstand mit vier voneinander unabhängig betreibbaren 48"-Rollen (1,22 m x 0,7 m) und einer Dauerleistung von jeweils 100 kW pro Rolle. Getestet werden können Fahrzeuge von 45 kg bis 4.500 kg Gewicht in einem Temperaturbereich von -40 °C bis +60 °C und einstellbaren relativen Feuchte (rF) bis 80 %. Er ist auf die Erprobung und Entwicklung neuer Antriebskonzepte an Forschungsfahrzeugen ausgerichtet. Im Rollen-Klimaprüfstand können PKW aller Klassen sowie Kleintransporter mit einem Radstand von 1,6 m bis 4 m bis zu einer maximalen Geschwindigkeit vom 200 km/h untersucht werden. Der Prüfstand erlaubt den Betrieb von Elektrofahrzeugen, Fahrzeugen mit flüssigen sowie gasförmigen Kraftstoffen wie etwa Wasserstoff und Erdgas. Die Fahrzeugantriebe können für alle üblichen und für spezifisch definierten Fahrzyklen inklusive Steigung, auf ihre energetische Effizienz hin untersucht werden. Ebenso kann das Emissionsverhalten im realen Betrieb geprüft werden. Die Fahrwiderstände können bis zu 3600 N/Rad bei unterschiedlichen Straßenbedingungen nachgebildet und Fahrten unter Last simuliert werden. Ebenso kann das

Beschleunigungs- sowie das Kaltstartverhalten gemessen oder auch alle normkonforme oder selbst aufgenommene Fahrzyklen nachgebildet werden. Die Steuerungseinheit des Rollenprüfstands unterstützt alle üblichen Betriebsmodi und bietet die Möglichkeit für Front-, Heck- und Allradantriebsuntersuchungen. Alle aufgenommenen Messdaten können über CAN an externe Messtechniken zur Verfügung gestellt werden. Der Prüfstand ist ISO 9001-Zertifiziert und TÜV-GTR15 abgenommen.



Abbildung 233: Rollenklimaprüfstand am DLR-FK Stuttgart

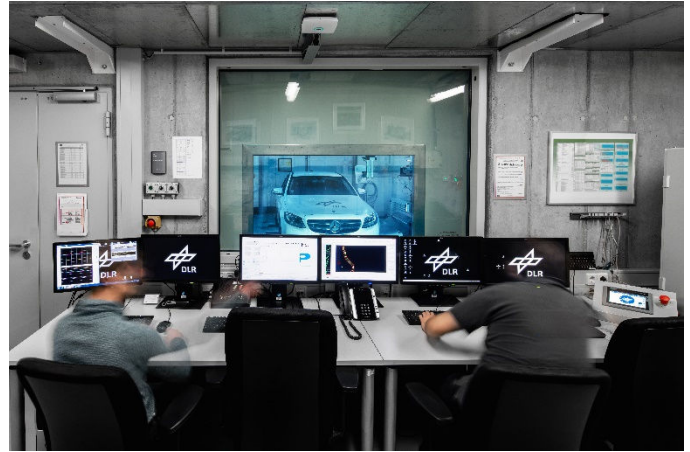


Abbildung 234: Fahrerleitzentrale des Rollenklimaprüfstands

Die Rollen des Prüfstands sind mit einer FeCrB-Deckschicht mit 114 µm Körnung beschichtet. Zur Abriebbestimmung wurden für die Messungen die in Abbildung 232 dargestellten Fahrzyklen und RDE-Simulationen gefahren.

3.5.4 Testgelände Boxberg und Asperg

Das Testgelände Boxberg von Bosch ist eine moderne Versuchsanlage in der Nähe von Boxberg, Deutschland. Es erstreckt sich über mehrere Quadratkilometer und dient der umfangreichen Erprobung und Erforschung von Fahrzeugtechnik. Boxberg bietet eine Vielzahl von Teststrecken für verschiedene Straßenbedingungen, darunter Autobahnen, Landstraßen, Bergstraßen und Stadtverkehrsszenarien (Abbildung 235). Diese Strecken sind speziell entwickelt, um realistische Fahrsituationen zu simulieren und die Leistungsfähigkeit und den Funktionsumfang der Fahrzeuge unter authentischen Bedingungen zu testen.

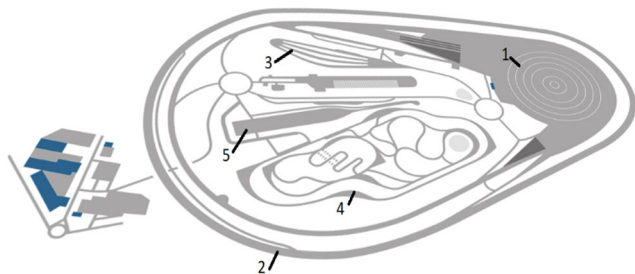


Abbildung 235: Streckenteile im Testgelände Boxberg; 1: Fahrdynamikfläche; 2: Hochgeschwindigkeitsoval; 3: Steigungshügel; 4: Handlingkurs; 5: Multifunktionsfläche



Abbildung 236: ZEDU1-Versuchsträger im Testgelände Boxberg: Hochgeschwindigkeitsoval

Zusätzlich erfolgen Abriebemissionsmessungen bei Realfahrten auf dem Testgelände in Asperg. Die Messungen für den BMWi3 wurden auf dem Testgelände in Asperg (Abbildung 267 und Abbildung 295) und die Messungen mit dem ZEDU1 auf dem Testgelände in Boxberg (Abbildung 235 und Abbildung 236) durchgeführt. Messergebnisse zu den Abriebemissionen sind im Kapitel 3.5.2.2.3 und 3.6.2.2.3 ZED beschrieben.

3.5.5 Komponentenprüfstand

Um die ermittelten Messergebnisse zu überprüfen und die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die vermessenen Bremsen zusätzlich auf einem Komponentenprüfstand vermessen. Die Tests auf dem Komponentenprüfstand dienen zum Vergleich mit den direkt am Fahrzeug ermittelten Messergebnissen und wurden vom DLR im Brake Test Center von HORIBA Europe GmbH, in Flörsheim, durchgeführt. Dabei erfolgten neben den Messungen mit der Standardbremse auch Messungen mit einer Hartmetallbeschichteten Version der originalen Bremse.

Dabei wurde zuerst die Einstellung des Kühlluftstromes zur Temperatureinstellung analog zu dem Prozess am Fahrzeug, vorgenommen und die Messraten größenabhängig kalibriert. Anschließend wurden dann die Versuche mit den Fahrzyklen (s. § 3.5.2):

- WLTC Emission
- WLTC Brake Teil 10
- Definierte Bremsungen mit Variation der Ausgangsgeschwindigkeit sowie des Bremsdrucks
- RDE

gefahren. Untersucht wurden auch der Einfluss der Rekuperation und einer Hartmetallbeschichtung auf die luftgetragenen Abriebemissionen der Bremse. Ebenso wurde das realitätsnahe Abbilden des Emissionsverhaltens des Prüfstands betrachtet (3.6).

Der Bremskomponenten Prüfstand, als Performance Prüfstand, weist eine hohen Luftvolumenstrom mit zwei 90° Umlenkungen von der Probe bis zur Entnahmestelle auf (Abbildung 237). Messungen erfolgten mit einem Luftvolumenstrom von 1000 l/min. Zur Temperaturbestimmung wurden an der Bremse im Gleichen Verfahren wie am Versuchsträger (§ 3.5.1) Temperaturelemente angebracht (Abbildung 238).

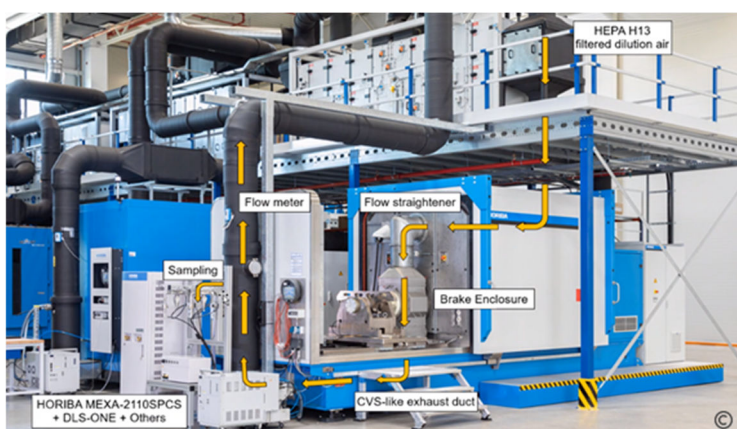


Abbildung 237: Komponentenprüfstand für Bremse (Fa. HORIBA) Luftführung (Stand zum Zeitpunkt der Messungen)

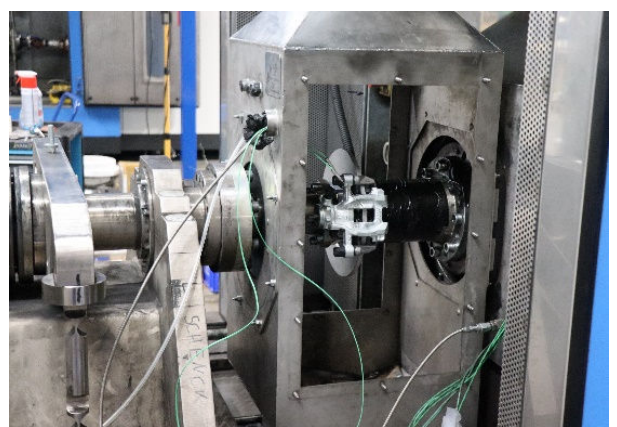


Abbildung 238: Messzelle des Komponentenprüfstands für das Referenzsystem Bremse (Fa. HORIBA)

Zur Durchführung der Messungen wurde eine Probenahmestelle mit Sonden, die eine Isokinetische Probeentnahme gewährleisten, ausgelegt und konstruiert (Abbildung 239). Die Entnahmestelle ermöglicht den Anschluss und Nutzung des umfangreichen DLR-Messequipments (Abbildung 240) zur Bestimmung der Bremsemissionen am den HORIBA-Bremsprüfstand.

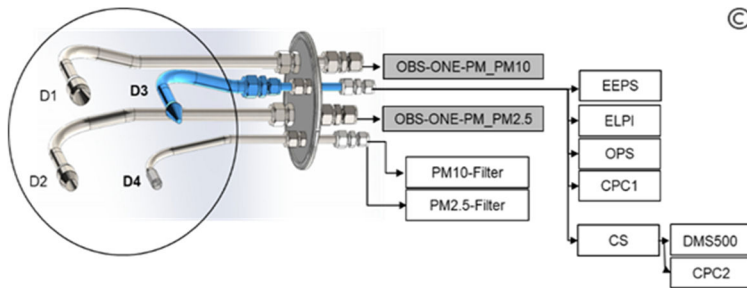


Abbildung 239: Konstruierte Sonden zur Isokinetischen Probeentnahme am Komponentenprüfstand



Abbildung 240: Aufgebautes DLR-Equipment zur Messung der Bremsabriebe am Komponentenprüfstands

An den auf Abbildung 239 dargestellten Probe-Entnahmesonden D1 bis D4 dienen zur Bestimmung der:

- Partikelanzahlkonzentration (CPC1, CPC2)
- Partikelanzahlgrößenverteilung (EEPS, DMS500)
- Vergleich volatile und nicht-volatile Partikel
- Partikelsammlung für Offline-Analyse (ELPI, PM₁₀, PM_{2.5})
- Gravimetrische Messung durch HORIBA (Filter, PM₁₀, PM_{2.5})

für die Bremsabriebe einer Bremse mit der originalen BMW i3 Bremse und einer mit Hartmetall beschichteten Bremsscheibe des BMW i3 und den originalen Bremsbelägen und die in § 3.5.2 beschriebenen Fahrzyklen. Dabei wurden im Vorfeld die Verlustmessungen am Prüfstand größenabhängigen bestimmt und die Messergebnisse damit korrigiert.

3.5.1 Hartmetallbeschichtete Bremsscheibe

Um das Verbesserungspotential von hartmetallbeschichteten Bremsscheiben gegenüber konventionellen Bremsscheiben zu quantifizieren, wurden neben den Serienbremsscheiben des BMW i3 auch beschichtete Bremsscheiben angefertigt und getestet. Bei der Beschichtung der Bremsscheiben arbeitete das DLR hier mit der ARS Autoteile GmbH (heute FRENOZA GmbH) als Technologiepartner zusammen.

Die verwendeten Bremsscheiben, original und beschichtet, sind auf Abbildung 241 und Abbildung 242 dargestellt. Die originale Graugussbremse wurde von der ARS Autoteile GmbH (heute FRENOZA GmbH) mit einem Zweischichtsystem beschichtet. Zunächst wurde eine Edelstahllaftschicht direkt auf das Grundmaterial aufgetragen. Seine relative Ähnlichkeit zum Grundmaterial sorgt für eine optimale Verbindung zwischen den beiden Schichten. Danach wurde die Karbidschicht, bestehend aus 20 % Wolframkarbid mit 30 % Titantkarbid in einer 50 % duktilen Matrix aus Edelstahl, auf die Haftschicht aufgebracht. Die Beschichtung wurde mit einer Hochgeschwindigkeits-Oxy-Fuel-Beschichtung aufgetragen und erhielt anschließend eine glatte Oberfläche durch Politur.



Abbildung 241: Originale Graugussbremse des BMW i3

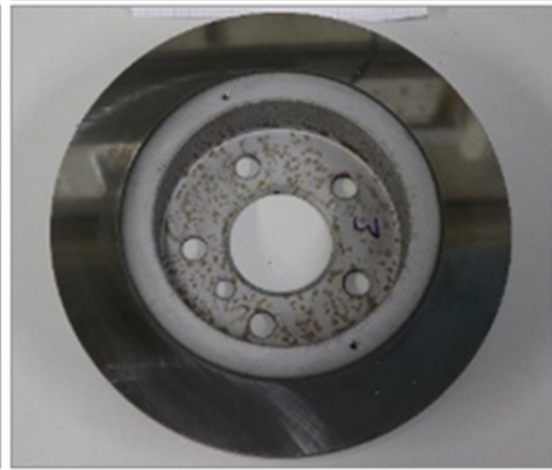


Abbildung 242: Originale Graugussbremse des BMW i3 mit Hartmetall beschichtet

Die Vermessung der beschichteten Bremse erfolgte direkt am Fahrzeug auf dem DLR-eigenen Rollenprüfstand sowie auf einem Bremsenprüfstand der Firma HORIBA Europe GmbH. Der direkte Vergleich mit der Standard-Bremsanlage ergab eine Reduzierung der pro km emittierten Masse von 74 % Abbildung 243 (37), (38). Die Anzahl der emittierten Partikel konnte um einen ähnlichen Faktor reduziert werden. Die Einsparung verteilt sich sowohl auf die Bremsscheibe als auch auf die Bremsbeläge. Letztere wurden unverändert von der Standardbremsanlage übernommen Tabelle 34



Abbildung 243: Vergleich Masseverlust Bremssysteme

Tabelle 34: Massenverlust – Standard Bremse vs. Beschichtete Bremse

Bremse	Massenverlust	Anteil Scheibe	Anteil Belege
	[g/100 km]	[%]	[%]
Standard	0,77	63	37
Beschichtet	0,20	58	42

Zur Qualifizierung der Hartmetallbeschichteten Bremse wurde auch ein Vergleich des Reibwerts der Standardbremse zu hartmetallbeschichteter Bremse für verschiedenen Fahrzyklen ohne Rekuperation sowohl im Referenzfahrzeug als auch auf dem Komponentenprüfstand durchgeführt. Abbildung 244 und Abbildung 245 zeigen exemplarisch die Messergebnisse des Reibwert-Vergleichs einer hartmetallbeschichteten und der Standbremse im WLTC-Ausschnitt am Rollenprüfstand und im Komponentenprüfstand ohne Rekuperation.

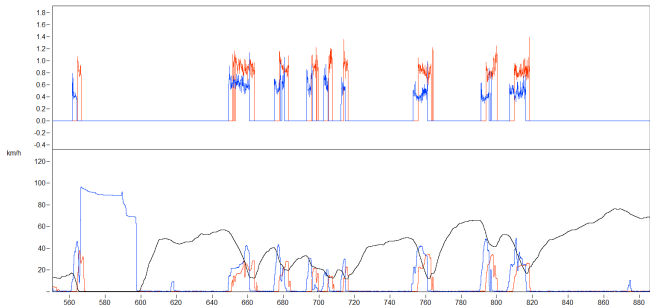


Abbildung 244: Vergleich Reibwert (oben) hartmetallbeschichteten (rot) und Standbremse (blau) im WLTC (unten schwarz. Ausschnitt) und Bremsdruck (unten. Skala rechts) am Rollenprüfstand

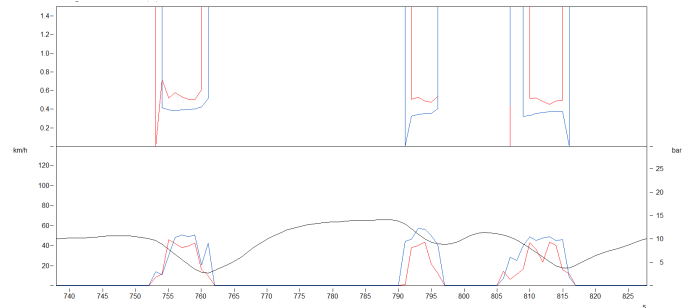


Abbildung 245: Vergleich Reibwert (oben) hartmetallbeschichteten (rot) und Standbremse (blau) im WLTC (schwarz, unten. Ausschnitt) und Bremsdruck (unten. Skala rechts) am Komponentenprüfstand

Ergebnisse sind in der Tabelle 35 zusammengestellt. Wie der Tabelle zu entnehmen ist liegt der Reibwert der hartmetallbeschichteten Scheibe bei fast allen Messungen im Vergleich deutlich über dem Reibwert der Standardscheibe. Die Verbesserung des Reibwertes fällt bei Messungen auf dem Rollenprüfstand mit 30 % bis 100% deutlich höher aus als auf dem Komponentenprüfstand mit nur bis zu 40 %.

Tabelle 35: Reibwertverhältnis der beschichteten Brems zu Standardbremse ohne Rekuperation für verschiedene Zyklen

	WLTC	WLTC-Brake	Realfahrt
Rollenprüfstand	1,5 – 2,0	1,3 – 2,0	1,5 – 2,0
Komponentenprüfstand	1,2 – 1,4	1,1 – 1-3	~ 1

Die Ergebnisse zu den Abriebemissionsmessungen sind im Kapitel 3.6.2.1.5 beschrieben.

3.5.2 Referenzfahrzeug

3.5.2.1 Versuchsaufbau

Als Referenzsystem wurde ein Standardelektrofahrzeug, ein BMW i3, ausgewählt und beschafft. Das Fahrzeug, Baujahr 2015, hat ein Leergewicht von 1228 kg und eine Batteriekapazität von 60 Ah. Der Fahrzeugtyp ist, durch die Gestaltung des Antriebs- und Bremssystems sowie durch die Fahrzeugmasse, repräsentativ für batterieelektrische Kompaktfahrzeuge die häufig in Städten verwendet werden.

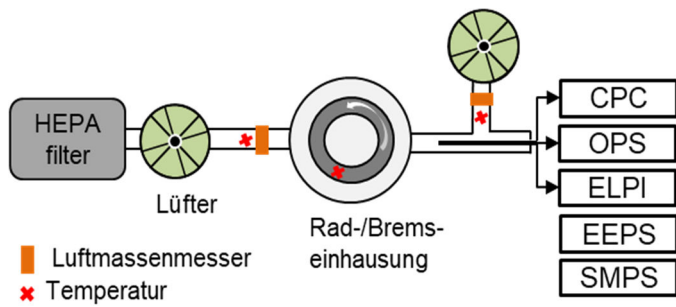


Abbildung 246: Referenzfahrzeug – Messkonzept Bremse

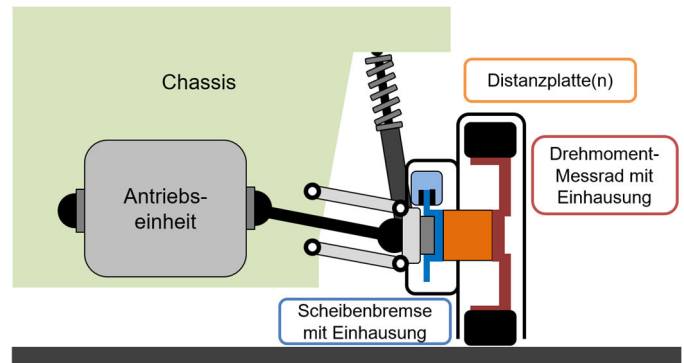


Abbildung 247: Referenzfahrzeug - Konzeptdarstellung. Aufbau separate Bremse / Reifen-Einhausung

Der BMW i3 hat einen elektrischen Hinterradantrieb und Scheibenbremsen an allen Rädern. Damit sowohl Antriebs- als auch Bremskräfte auf das untersuchte Rad wirken und aus Gründen der Umsetzbarkeit wurden die Messungen am nicht gelenkten Hinterrad des BMW i3 durchgeführt. Dies bietet auch die Möglichkeit einer einfacheren Separation und Einhausung sowohl der Bremse als auch des Reifens die zur differenzierten Bestimmung der Brems- bzw. der Reifenabriebe erforderlich ist (Abbildung 247).

Als Referenzkomponenten zur Vermessung dienten die originale Hinterradbremse, eine modifizierte Version dieser mit einer beschichteten Bremsscheibe und der originale Reifen des Fahrzeuges.

Die erforderlichen Testkonzepte (37), (38) zur Vermessung der Referenzkomponenten wurden in enger Abstimmung mit TP5 entwickelt (Abbildung 246). Zur Bestimmung der Reifenabriebe war in der Konzeptphase, analog wie beim Konzept zur Bestimmung der Bremsabriebe, für die Luftzuführung ein HEPA Filter durch den die zugeführte Luft gereinigt wird, vorgesehen. Aufgrund des offenen Systems erwies sich hier, mit einem vertretbaren Aufwand, die Regelung der Druckverhältnisse im System als schwierig. Daher wurde im Testverlauf für das offene System „Reifen-Test-Konzept“ bei Messungen auf die Luftzufuhr durch den HEPA-Filter verzichtet. Die Druckverhältnisse wurden hier über den die Absaugung der Luft für Probenahme bestimmenden Lüfter so eingestellt, dass ein leichter Unterdruck in der Einhausung erfolgt (Abbildung 290) und die Luft, wie beim ZEDU1-Versuchsträger, auch beim Referenzfahrzeug durch die Spalten der Boden-Reifeneinhausung einströmt und so alle Reifenabriebe der Messung zugeführt werden.

Die entwickelten Testkonzepte und Versuchsaufbauten wurden anschließend spezifiziert, auskonstruiert (Abbildung 247 bis Abbildung 251) und gebaut (Abbildung 252 bis Abbildung 259). Ebenso wurden die Komponenten der Luftstrecke wie Lüfter, Filter, Luftmassenmesser sowie die Verrohrung ausgelegt und dimensioniert sowie die benötigte Sensorik definiert, spezifiziert und beschafft.

Der Versuchsaufbau am Referenzfahrzeug BMW i3 wurde, trotz Corona bedingten Lieferkettenproblematik, erfolgreich umgesetzt. Alle erforderlichen Sensoren und Aktuatoren wurden spezifiziert, beschafft sowie die entsprechenden Versuchsvorrichtungen, die am Fahrzeug mit Spurverbreiterung und Einhausungen verbaut wurden, CAD-konstruiert (Abbildung 248) und inkl. der Sensor Integrations- und Messentnahmestellen ausgelegt, konstruiert und DLR-intern gefertigt (Abbildung 258).

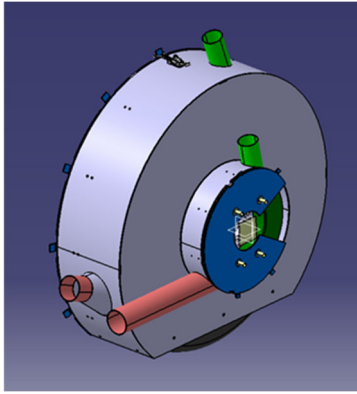


Abbildung 248: CAD- Konstruktion Einhausung Brems-Reifen-Einheit

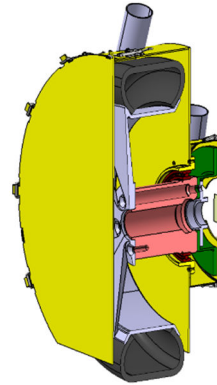


Abbildung 249: Konstruktion Einhausung Brems-Reifen-Einheit Querschnitt

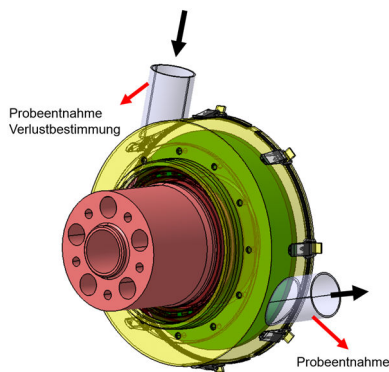


Abbildung 250: CAD-Konstruktion Brems-Einhausung

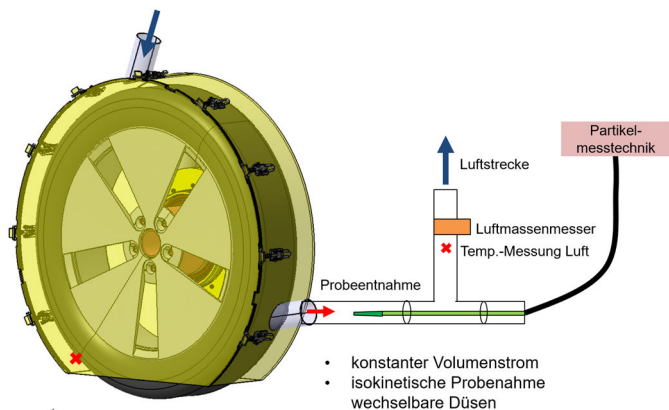


Abbildung 251: Testaufbau Probenahme Reifen

Die anschließende Montage aller Komponenten am Fahrzeug und Fertigungen ausgewählter Bauteile fand in der Kfz-Werkstatt des Instituts für Fahrzeugkonzepte statt. Abbildung 252 und Abbildung 253 zeigen die Integration der Temperatursensoren an der Bremse.

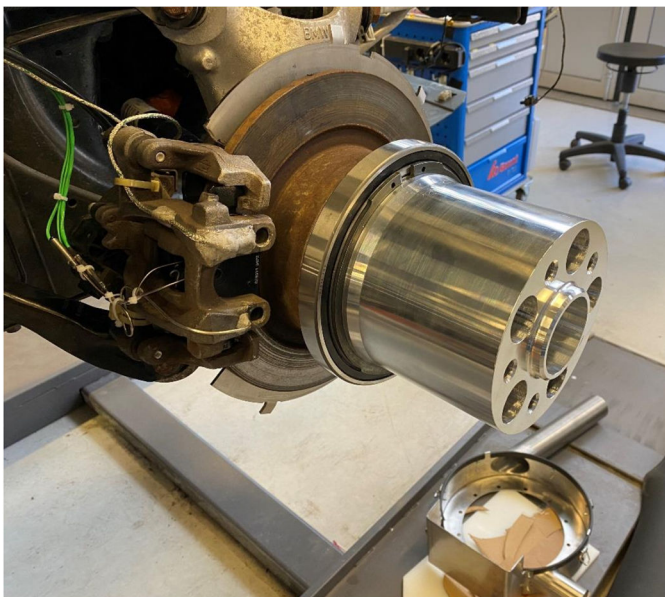


Abbildung 252: Thermoelementintegration Bremsattel und Bremsbelag



Abbildung 253: Thermoelementintegration Bremsscheibe für Telemetriemodul

Auf Abbildung 254 ist das Messrad zur Bestimmung des Drehmoments und somit der Wirkenden Kräfte abgebildet und Abbildung 255 zeigt die Integration des Bremsdrucksensors. Des Weiteren sind auf Abbildung 256 und Abbildung 257 einmal die Einhausung der Bremse und einmal die des Reifens zu sehen.

Die Bremseinhausung konnte rundum geschlossen gestaltet werden (39). Die Radeinhausung muss jedoch nach unten hin offen sein, damit der Reifen auf der Prüfstandrolle beziehungsweise auf der Straße abrollen kann. Die Einhausung sind so gestaltet, dass möglichst wenig Luftaustausch mit der Umgebungsluft stattfindet. Der Spalt zwischen Einhausung und Boden wird durch verschiebbare Bleche einstellbar gestaltet, um je nach Versuchsumgebung den Luftaustausch minimieren zu können.



Abbildung 254: Referenzfahrzeug - Messrad

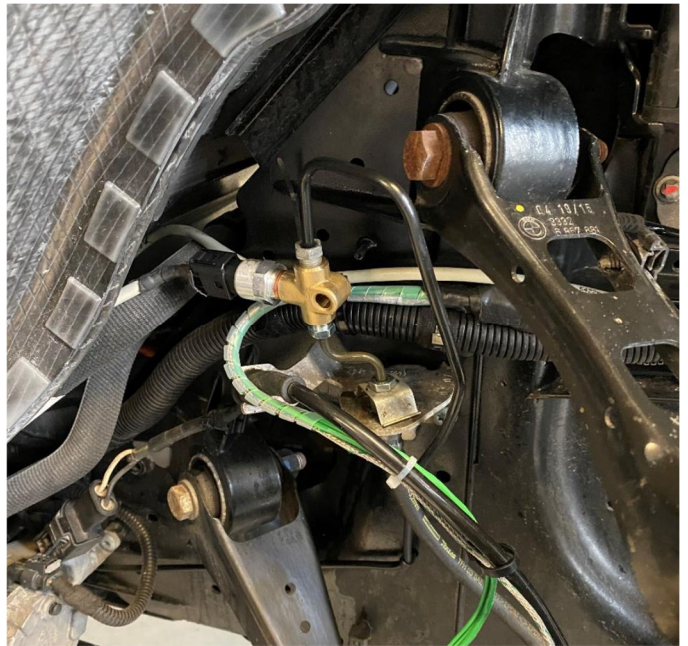


Abbildung 255: Referenzfahrzeug - Integration Bremsdrucksensor

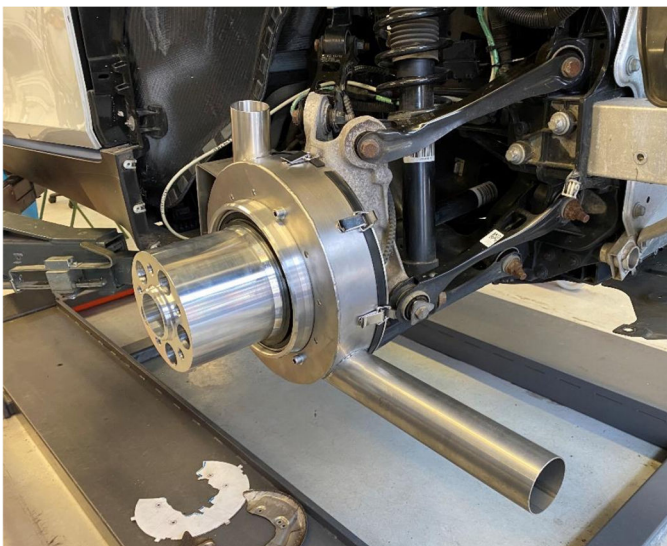


Abbildung 256: Referenzfahrzeug - Einhausung Bremse

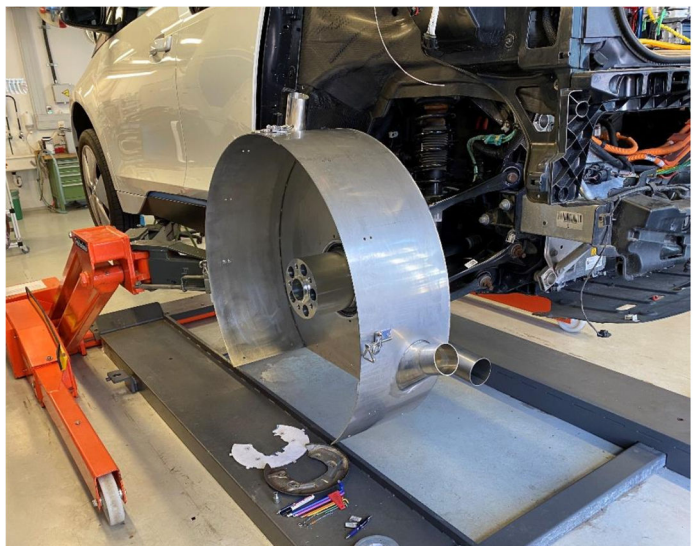


Abbildung 257: Referenzfahrzeug - Einhausung Reifen

Die Luftstrecke (Abbildung 259) besteht aus einem mehrstufigen HEPA (H 13 / F7)-Filtersystem der eine Partikelhintergrundkonzentration unter $15 \text{ \#}/\text{cm}^3$ gewährleiste, einem Lüfter vor der Einhausung, den beiden Einhausungen, von denen nur jeweils eine auf einmal angeschlossen wird, der Probenahmestelle und einem Lüfter nach der Einhausung. Es wurde zwei Lüfter eingebaut um den Luftdruck in der Einhausung möglichst

nahe an das atmosphärische Niveau zu bringen und so den Luftaustausch mit der Umgebung zu minimieren. Über den Volumenstrom können die Temperaturen des Prüflings eingestellt bzw. geregelt werden. Um mobile Messungen zu ermöglichen wurden die Komponenten der Luftstrecke für Realfahrten auf dem Dach des Fahrzeuges platziert.

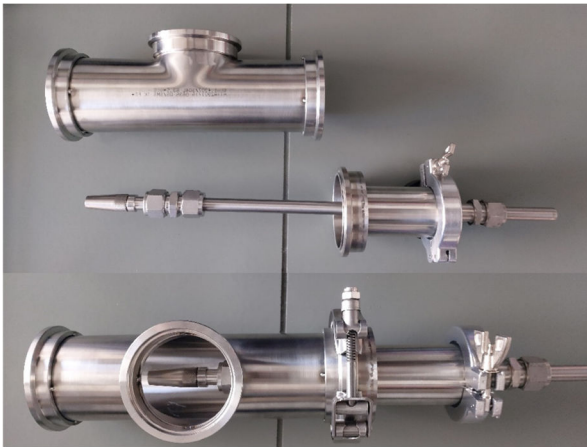


Abbildung 258: Referenzfahrzeug - gefertigte Entnahmesonden

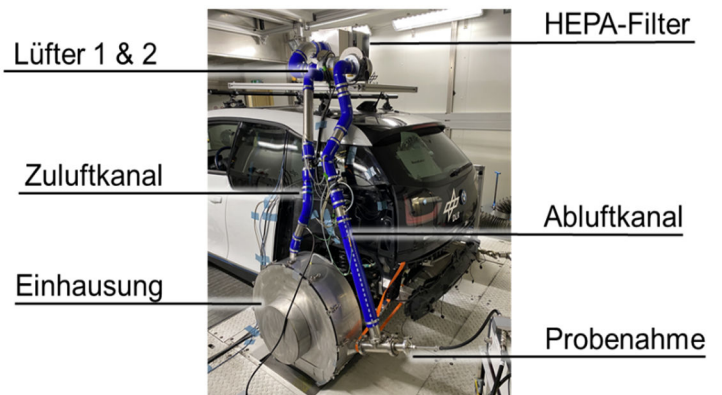


Abbildung 259: Referenzfahrzeug - Testaufbau

Die Realisierung des Testkonzepts am BMW i3, wie auf Abbildung 246 entwickelt, ist auf Abbildung 259 als finaler Versuchsaufbau dargestellt und in TP5 konstruierten Sonden zur isokinetischen Probeentnahme sind in Abbildung 258 zu sehen. Des Weiteren ist der Abbildung 259 das Packaging der Lüfter und des HEPA-Filtersystems auf dem Dach des Versuchsträgers zu entnehmen.

Die Untersuchung von Reifen und Bremse finden beide am selben Rad statt. Um die entstandenen Partikel am Reifen bzw. der Bremse unabhängig voneinander einzufangen und analysieren zu können, wurde jeweils für Reifen und Bremse eine separate Einhausung vorgesehen (Abbildung 256 und Abbildung 257). Um dies zu ermöglichen sind Rad und Bremse mithilfe einer Distanzplatte voneinander getrennt. Beide Einhausungen verfügen über je einen Lufteinlass- sowie einen Luftauslasskanal. Durch den Lufteinlass strömt definierte, gefilterte Luft in die Einhausung ein. Die Luft strömt am Reifen bzw. an der Bremse entlang und wird durch den Luftauslasskanal abgesaugt. Der partikelbelasteten Luft wird durch eine Sonde (Abbildung 258) kontinuierlich eine Probe entnommen, welche in der Partikelmesstechnik analysiert wird. Es wird immer nur eine Messung an einer Komponente gleichzeitig durchgeführt. So können eine Luftstrecke und eingesetzte Messtechnik für beide Untersuchungen genutzt werden.

Für die Durchführung der Messungen bei Realfahrten (§ 3.5.2.2.2) und Fahrten auf einem Testgelände (§ 3.5.2.2.3) wurden die Abmessungen, das Gewicht und die elektrischen Leistungsbedarfe der spezifizierten Messtechnik ermittelt. Mit diesen Größen wurde, zur Integration der Messtechnik gemeinsam mit TP5 und TP3, ein Packaging, dass sowohl die Orientierung der Messgeräte, die Zugänglichkeit sowie Befestigungen und Verrohrungen als auch Sicherheit gewährleistet, entwickelt (Abbildung 260). Aus den für die Dauer der definierten Messzyklen kalkulierten Leistungsbedarfe wurde eine Stromversorgung ausgelegt, aufgebaut und in das Testfahrzeug integriert (Abbildung 261). Als Bedarf wurde ein 1200 VA Wechselrichter sowie 400 Ah die mit zwei Batterien je 2560 Wh realisiert werden konnten, spezifiziert.

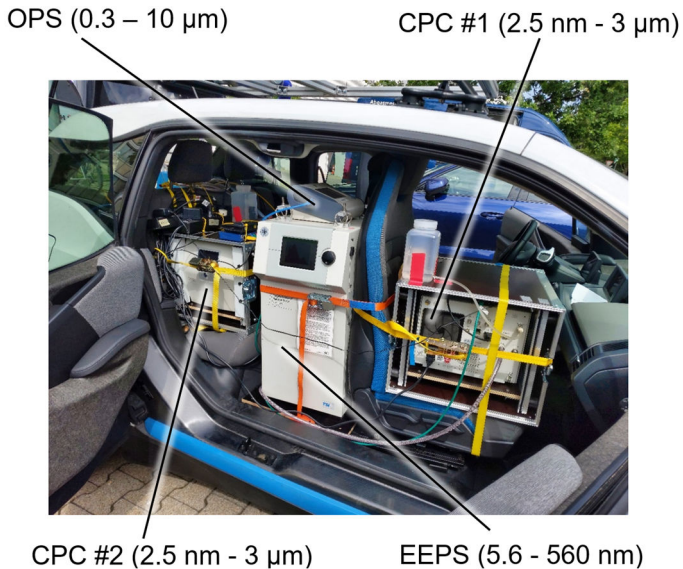


Abbildung 260: Referenzfahrzeug - Messgeräte für mobile Messungen

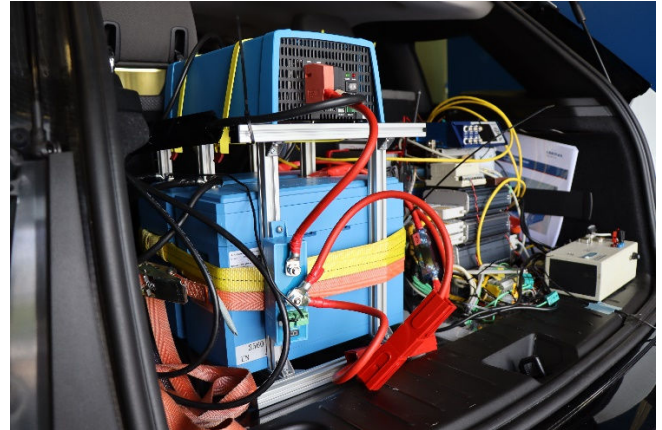


Abbildung 261: Referenzfahrzeug - Datenlogger und Stromversorgung Messgeräte

Im Verlaufe der Tests wurden an den Messkonzepten und dem Aufbau durchgehend Optimierungen vorgenommen, um die Stabilität zu erhöhen und den Funktionsumfang zu erweitern. U.a. wurde die Einhausung zusätzlich versteift, da diese während den ersten Tests in bestimmten Fahrzuständen zu schwingen begann. Des Weiteren wurde Sensorik zur kontaktlosen Temperaturmessung mittels Infrarot-Technik an Bremsen und Reifen integriert.

3.5.2.2 Messgrößen

Um die Anzahl der emittierten Partikel zu bestimmen, muss neben der Partikelkonzentration in der Probe auch der Volumenstrom der Belüftungsluft bestimmt werden. Hierzu werden der Luftmassenstrom, die Lufttemperatur sowie der Luftdruck an jeweils zwei Stellen in der Luftstrecke gemessen. Um die Emissionen mit den Einflussfaktoren in Bezug setzen zu können, werden außerdem die Bremstemperatur, das Antriebs- bzw. Bremsmoment am betreffenden Rad sowie charakteristische Fahrdaten wie Fahrgeschwindigkeit, Längsbeschleunigung und Querbewegung aufgenommen. Um beurteilen zu können wann das Fahrzeug rekuperiert und wann die mechanische Bremse betätigt wird, werden zusätzlich der Batteriestrom des Antriebssteuergeräts des Fahrzeuges ausgelesen und der Bremsdruck gemessen.

Die Temperaturen wurden mit einem Typ K Thermoelement der Klasse 1, IEC 584-3 K-NiCr/Ni, mit einer Toleranz von $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ zwischen -40°C und 1000°C und 1 Hz Auflösung ermittelt. Dazu wurden diese in den Bremsattel, die Bremsbeläge und Bremsscheibe integriert (Abbildung 252 und Abbildung 253). Der Luftmassenstrom, Temperatur und Druck des Lüftungssystems werden durch integrierte Sensoren (Bosch HFM 5, Typ K, AMS 4712-1200-B, AMS 4712-0020-D-B) bestimmt.

Zur Durchführung der Tests wurde die zeitliche Abfolge der Messaufgaben, ein Messplan, erstellt und geeignete Messtechnik ausgewählt.

Eine Übersicht über Messgrößen am Referenzfahrzeug gibt die Tabelle 36 Der Testaufbau wurde so konzipiert, dass Messungen sowohl auf einem Rollenprüfstand (Abbildung 264 und Abbildung 265) als auch bei Realfahrten (Abbildung 266 und Abbildung 267) damit durchgeführt werden können.

Tabelle 36: Messgrößen - Referenzfahrzeug (i3)

Messgröße	Messstelle	Erforderlich für			
		Referenzfahrt	Prüfstand- messung	Straßen- messung	
Luftstrecke	Luftmassenstrom	Vor Einhausung	x	x	
	Luftmassenstrom	Nach Einhausung	x	x	
	Lufttemperatur	Vor Einhausung	x	x	
	Lufttemperatur	Nach Einhausung	x	x	
	Luftdruck	Vor Einhausung	x	x	
	Luftdruck	In Einhausung	x	x	
	Luftdruck	Nach Einhausung	x	x	
	Probenahme Partikel	Nach Einhausung	x	x	
	Probenahme Partikel	Knapp über Boden vor Einhausung	x	x	
	Einlass Partikelgenerator Bremse			x	
Einlass Partikelgenerator Rad			x		
Messrad	Rad-Drehmoment	Messrad	x	x	x
	Rad-Drehzahl	Messrad	x	x	x
Rad	Oberflächentemperatur Laufflä- che Reifen	Infrarot	x	x	x
	Luftdruck Reifen		x	x	x
Bremse	Temperatur Bremssattel (2x)	links	x	x	x
	Temperatur Bremssattel (2x)	rechts	x	x	x
	Temperatur Bremsbelag (2x)	links	x	x	x
	Temperatur Bremsbelag (2x)	rechts	x	x	x
	Temperatur Bremsscheibe (2x)	Links (Telemetriemodul)	x	x	x
	Bremsdruck	links	x	x	x
OBD-Tester	Batteriespannung	OBD/HV Batterie	x	x	x
	Batteriestrom	OBD/HV Batterie	x	x	x
GPS-Modul	Position (X,Y,Z)		x		x
	Fahrgeschwindigkeit		x		x
	Höhe über Meeresniveau		x		x
	Querbeschleunigung		x		x
	Längsbeschleunigung		x		x
	Kurvenradius		x		x
Rollenprüfstand	Drehmoment			x	
	Drehzahl			x	
	Kraft			x	
	Geschwindigkeit			x	
	Beschleunigung			x	
	Temperatur Umgebung			x	

3.5.2.1 Temperatur Bremse und Volumenstrom Einhausung

Da die Partikelemissionen temperaturabhängig sind, wurde Wert daraufgelegt die Thermodynamik der Bremse dem Realbetrieb möglichst exakt nachzubilden, dazu wird die Bremse mittels umströmender Luft gekühlt und die Temperatur geregelt. Diese wird jeweils über den Luftstrom zur Belüftung der Einhausung, mit zwei Ventilatoren, eingestellt.

Zur Temperaturbestimmung der Bremse im Realbetrieb wurden vor den Emissionsmessungen Vergleichsfahrten ohne Einhausung auf der Straße durchgeführt. Während dieser Straßenfahrten wurde das Geschwindigkeits- und Steigungsprofil sowie die Bremstemperaturen aufgezeichnet. Das Fahrprofil der Referenzfahrt wurde am Rollenprüfstand bei verschiedener Belüftung der Bremseneinhausung mehrfach realitätsnah nachgefahren und der Luftvolumenstrom variiert (Abbildung 263).

Um die richtige Belüftung der Bremse sicherzustellen, werden die Bremstemperaturen auf dem Rollenprüfstand mit der Referenzmessung auf der Straße und ohne Einhausung verglichen. Abbildung 262 zeigt den gemessenen Bremstemperaturverlauf der Referenz- und Wiederholungsfahrten auf der Straße.

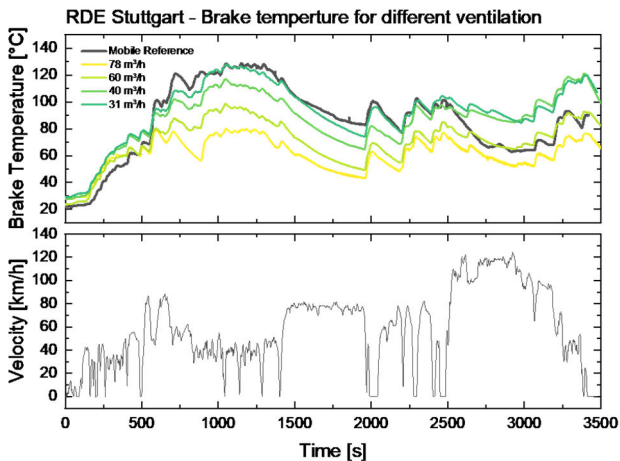


Abbildung 262: Temperatur der Bremse ohne Einhausung. Fahrprofil Straßenfahrt RDE-Stuttgart. Variation des Luftstroms von 31 m³/h bis 78 m³/h

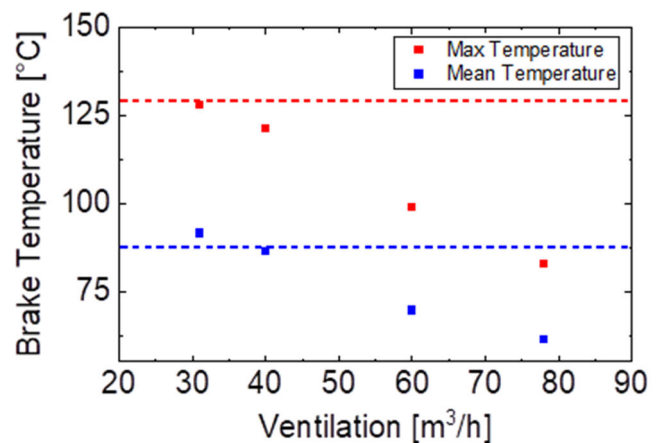


Abbildung 263: Temperatur der Bremse mit Einhausung für verschieden Luftströme von 31 m³/h bis 78 m³/h. Fahrprofil Straßenfahrt RDE-Stuttgart.

Für Messungen wurde dieser so eingestellt, dass die Kühlung der Bremse den Temperaturverlauf den real auftretenden Temperaturen im Realbetrieb möglichst entsprach bzw. nahekam (Abbildung 262). Bei einem Volumenstrom von 31 m³/h werden die Vorgaben der PMP-Empfehlung eingehalten (Abbildung 263). Mit dieser VolumenstromEinstellung wurden anschließend die Tests und Emissionsmessungen durchgeführt.

3.5.2.2 Testdurchführung

Die Tests mit dem Referenzsystem erfolgten in unterschiedlichen Prüfscenarien. Es wurden Tests auf einem Rollenprüfstand, bei Realfahrten auf der Straße, auf einem Testgelände sowie auf einem Bremsenprüfstand durchgeführt. Dabei wurden sowohl die Reifen- als auch die Bremsemissionen unter verschiedenen Randbedingungen untersucht. Unter anderem wurden Messung mit eingeschalteter als auch mit ausgeschalteter Rekuperation durchgeführt um auch diesen Einfluss auf die Partikelemissionen bewerten zu können.

3.5.2.2.1 Rollenprüfstand

Die Versuche zur Charakterisierung sowohl der Bremsabriebe- als auch der Reifenabriebe fanden auf dem klimatisierten Vierrad-Prüfstand am DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte in Stuttgart statt (1). Abbildung 264 und Abbildung 265 zeige die Durchführung der Emissionsbestimmung am Referenzfahrzeug, BMW i3. Zur Bestimmung der luftgetragenen Emissionen wurden für die Messungen die auf Abbildung 232 dargestellten Fahrzyklen gefahren.

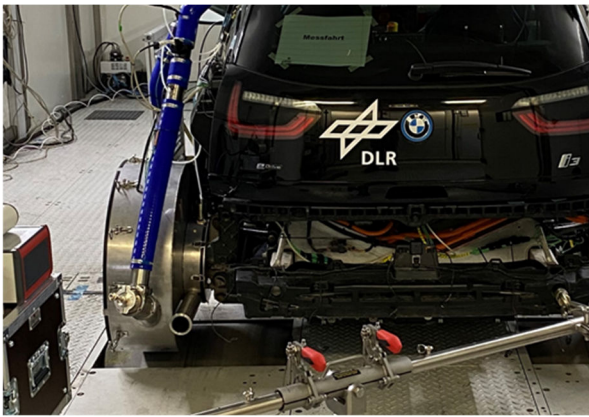


Abbildung 264: Referenzfahrzeug auf DLR-Rollenprüfstand

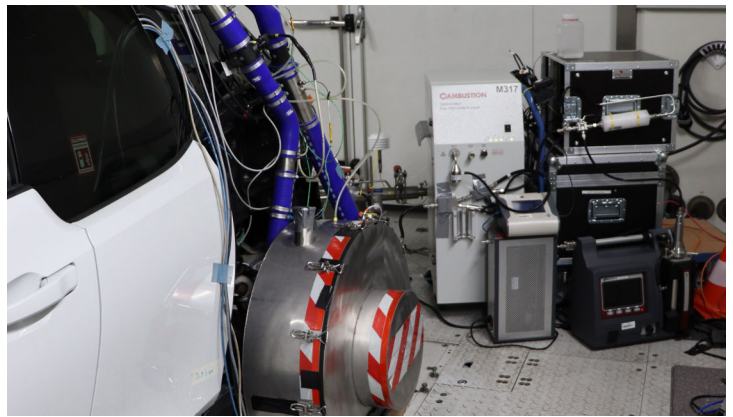


Abbildung 265: Referenzfahrzeug auf DLR-Rollenprüfstand & Messtechnik

Nach dem Lastausgleich des Testfahrzeugs betragen die ermittelten A, B und C Koeffizienten des Rollenprüfstands 21,85, -0,9376 resp. 0,03683. Durch den Kraftvergleich an der Vorder- und Hinterachse der Rolle wurde die Verteilung der Bremskraft am Vorder- und Hinterrad ermittelt. Bei dem WLTC-Breake Teil 10 ohne Rekuperation beträgt die Vorder-Hinterrad-Verteilung der Bremskraft: hinten 30,8 % und vorne 69,2 %. Untersucht wurden Bremsabriebe der originale Bremsscheibe, die hartmetallbeschichteten Bremsscheibe als auch die Reifenabriebe des original BMW i3-Reifens.

3.5.2.2.2 Straßenfahrten

Die Straßenfahrten fanden auf der DLR-spezifischer RDE-Route in Stuttgart-Vaihingen und Umgebung statt (§ 3.5.2, Abbildung 230). Die Strecke ist so ausgelegt, dass Start und Ende jeder Fahrt der DLR Standort Stuttgart ist.



Abbildung 266: Referenzfahrzeug bei Straßenfahrt



Abbildung 267: Referenzfahrzeug auf Testgelände Asperg

Die Fahrstrecke setzte sich entsprechend der gültigen RDE-Norm etwa zu gleichen Teilen aus Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt zusammen. Um Stau und dichten Verkehr möglichst zu vermeiden wurden die Fahrten am späten Vormittag und am frühen Nachmittag durchgeführt. Somit konnten täglich zwei Fahrten absolviert werden.

Die dabei auftretenden Quer- (Abbildung 268) bei Kurvenfahrten im urbanen Raum 0,1 G bis 0,3 G und Längsbeschleunigung (Abbildung 269) 0,1 G bis 0,2 G. Die maximalen Querbeschleunigungen mit 0,4 G traten bei der Autobahnfahrt auf. Die Maximale Längsbeschleunigung lag bei ca. 0,3 G

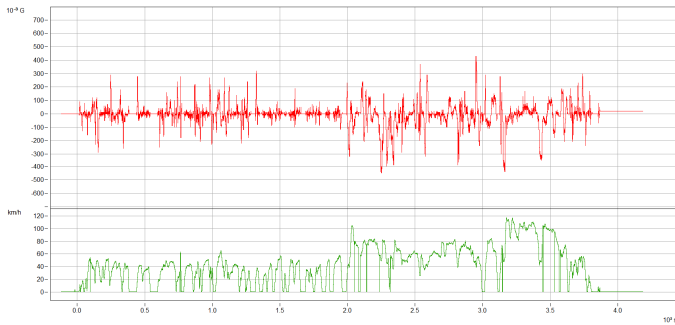


Abbildung 268: Querbeschleunigungen (rot). Fahrprofil Straßenfahrt RDE-Stuttgart (grün).

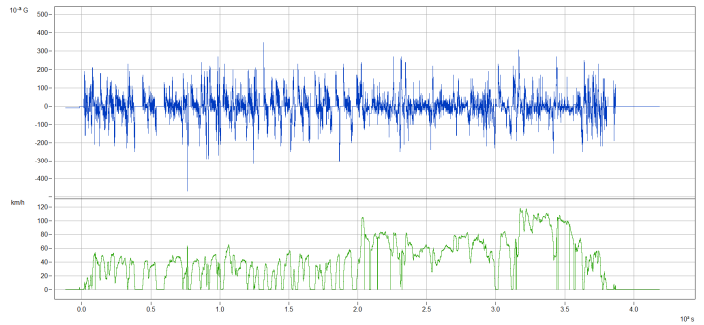


Abbildung 269: Längsbeschleunigungen (blau). Fahrprofil Straßenfahrt RDE-Stuttgart (grün).

3.5.2.2.3 Testgelände

Die Fahrten auf dem Testgelände wurden genutzt um definierte Fahrsituationen darzustellen, die im öffentlichen Straßenverkehr zwar auftreten, jedoch auf Grund des Verkehrs nicht reproduzierbar gefahren werden können. Untersucht wurde dabei neben dem Einfluss der Fahrzeuglängsdynamik auch der Einfluss der Querb beschleunigung speziell auf den Reifenabrieb. Gefahren wurden dabei folgende Tests:

- Definierte Beschleunigungen
- Definierte Bremsungen mit Variation der Ausgangsgeschwindigkeit sowie des Bremsdrucks
- Definierte Kurvenfahrten mit Variation der Geschwindigkeit
- Ein Rundkurs mit Variation der Fahrweise (defensiv/sportlich)

3.5.3 Versuchsträger

Die im TP1 entwickelten ZEDU1-Komponenten: die Getriebe-Bremse-Einheit (§ 3.2.1) und die Reifenpartikelabsaugung (§ 3.2.2) wurden in den im TP3 aufgebauten Versuchsträger (§ 3.4) zur Vermessung dieser integriert und der Versuchsträger fahrfähig ertüchtigt.

Zur Charakterisierung wurden für den Versuchsträger Messgrößen und Messkonzepte aus dem Referenzfahrzeug abgeleitet, Versuchspläne entwickelt und definiert. Ebenso wurden Messgrößen bestimmt um die die Rekuperationsenergie die in Kombination mit einer eigens entwickelten Hochleistungselektronik und einer speziellen Batterie zu evaluieren so wie auch fahrzyklenabhängige Verbräuche und Reichweiten.

3.5.3.1 Messgrößen

Eine Übersicht über Messgrößen für den Versuchsträger gibt die Tabelle 37. Das Konzept wurde so entwickelt, dass Messungen zur Charakterisierung des Versuchsträgers sowohl auf einem Rollenprüfstand () als auch bei Realfahrten damit durchgeführt werden können.

Um die Anzahl der emittierten Partikel zu bestimmen, muss neben der Partikelkonzentration in der Probe auch der Volumenstrom der Luft bestimmt werden. Hierzu werden auch im Versuchsträger der Luftmassenstrom, die Lufttemperatur sowie der Luftdruck an jeweils zwei Stellen in der Luftstrecke gemessen. Abbildung 210 zeigt die dafür im Filter-Lüftergehäuse integrierten Sensoren.

Tabelle 37: Messgrößen - ZEDU1 - Versuchsträger

	Messgröße	Messstelle	Erforderlich für	
			Prüfstand- messung	Straßenmes- sung
Luftabsaugung	Luftvolumenstrom	nach Filter	x	x
	Luftdruck	vor Filter	x	x
	Luftdruck	nach Filter	x	x
	Luftdruck	Einhausung	x	x
	Probenahme Partikel	vor Filter	x	x
	Probenahme Partikel	nach Filter	x	x
	Probenahme Partikel	Knapp über Boden vor Einhausung	x	x
	Probenahme Partikel	Knapp über Boden hinter Einhausung	x	x
Messrad	Rad-Drehmoment	Messrad	x	x
	Rad-Drehzahl	Messrad	x	x
CAN-Bus	Temperatur Lamellenpaket Bremse		x	x
	Temperatur Öl Bremse	vor Wärmetauscher	x	x
	Temperatur Öl Bremse	nach Wärmetauscher	x	x
	Bremsdruck		x	x
	Batteriespannung		x	x
	Batteriestrom		x	x
	Antriebsleistung		x	x
	Fahrgeschwindigkeit		x	x
	Laststellsignal		x	x
	Bremsstellsignale		x	x
GPS-Modul	Fahrgeschwindigkeit			x
	Höhe über Meeresniveau			x
	Querbeschleunigung			x

Zusätzlich wurde zur Bestimmung der Emissionsaufnahme Messtelen und Sonden vor und nach dem Filter als auch vor und nach der Radeinhausung platziert. Diese sind in der Abbildung 296 dargestellt. Damit lassen sich sowohl die Filtereffizienz als auch Partikelaufnahme der Radeinhausung bestimmen. Zur Durchführung der Tests wurde die eine zeitliche Abfolge ein Messplan erstellt, geeignete Messtechnik ausgewählt und alle erforderlichen Tests sowohl auf dem Rollenprüfstand als auch im Testgelände absolviert.

3.5.3.2 Prüfscenarien

Die Messkonzepte zur Vermessung des Versuchsträgers wurden mit dem Ziel entwickelt, repräsentative und reproduzierbare Testergebnisse zu erzielen die mit den Messungen am Referenzfahrzeug abgeglichen werden können. Daher wurden als Prüfscenarien die gleichen Zyklen „WLTC 3b“, „WLTC Break “ und ZEDU-Accelerate, wie bei der Vermessung des Referenzfahrzeugs eingesetzt. Diese sind auf Abbildung 232 dargestellt und in 3.5.2 beschrieben.

3.5.3.3 Testdurchführung

3.5.3.3.1 Rollenprüfstand

Der ZEDU-1 Demonstrator wurde in verschiedenen Umgebungen getestet. Begonnen mit einer Rollenmesskampagne am DLR in Stuttgart. Um effizient und aussagekräftig einzelne Feinstaub-Events identifizieren zu können, wurden für die Messungen intern erstellte Testzyklen genutzt. Die ZEDU-Accelerate und ZEDU-Brake Zyklen stellen ein uniformes Beschleunigungs- und Verzögerungsprofil dar, das helfen soll die Extremsituationen in der Emissionserzeugung abzubilden. Es wurden ebenfalls WLTC und Großglockner-Zyklen gefahren und vermessen. Die Fahrprofile sind auf Abbildung 232 dargestellt und im Kapitel 3.5.2 beschrieben.



Abbildung 270: ZEDU1-Versuchsträger. Packaging der Messtechnik für Versuchsfahrten



Abbildung 271: ZEDU1-Versuchsträger-Tests auf dem DLR-Rollenprüfstand

3.5.3.3.2 Testgelände Boxberg

Um realitätsnahe Messergebnisse zu erhalten, die dem normalen Fahrverhalten und Konditionen entsprechen, wurde unterschiedliche Streckenteile des Testgeländes in Boxberg verwendet. Begonnen wurde mit dem auf Abbildung 235 mit (2) dargestelltem Hochgeschwindigkeitsoval, das neben klassischen Konstantfahrten auch die Möglichkeit gegeben hat WLTC unter realen Straßenkonditionen zu fahren und diese später mit den Rollentests zu vergleichen. Die Fahrdynamikfläche und der Handlingkurs haben es ermöglicht einzelne Feinstaub-Events durch laterale Beschleunigung isolierter zu betrachten. Die Steigungshügel (3), wurde genutzt um mögliche Einflüsse der Steigung zu bestimmen. Die Multifunktionsfläche wurde für Beschleunigungs- und Bremstests verwendet.

3.5.3.4 Komponentenbetrachtung

3.5.3.4.1 Effizienzvergleich WLTC

Es wurden auf beiden Testkampagnen WLTCs gefahren, die sich anbieten um vergleichende Verbrauchsmessungen durchzuführen. Die Auswertungen haben ergeben, dass die verbrauchte Energie reproduzierbar abweicht.

Tabelle 38: Verbrauchs- und Reichweitenmessungen für ZEDU1 im WLTC Zyklus im Testgelände

Testgelände Boxberg	WLTC 1	WLTC 2	Mittelwert
Elektr. Energie in kWh	7,1	7,0	7,1
Verbrauch in kWh/100 km	30,5	29,9	30,2
Reichweite in km	98,4	100,2	99,3

Tabelle 39: Verbrauchs- und Reichweitenmessungen für ZEDU1 im WLTC Zyklus auf dem Prüfstand

Rollenprüfstand DLR-FK	WLTC 1	WLTC 2	Mittelwert
Elektr. Energie in kWh	9,7	9,7	9,7
Verbrauch in kWh/100 km	41,7	41,7	41,7
Reichweite in km	72	72	72

Die Messungen zeigen eine Diskrepanz zwischen den Energieverbräuchen des Fahrzeugs bei gleichem Zyklus. Die Werte wurden gemittelt um Abweichungen einzelner Fahrten zu minimieren. Die Mittelwerte zeigen ebenfalls deutlich einen erhöhten Verbrauch bei Rollenprüfstands-Fahrten im Vergleich zum Testgelände.

Eine mögliche plausible Erklärung können fehlerhaften Widerstandskoeffizienten sein, die zur Fahrsimulation für das ZEDU1 am Rollenprüfstand verwendet wurden. Diese wurden über Ausrollversuche auf der Teststrecke in Speyer erhoben. Hier können Wind oder schon auch eine leichte Steigung bzw. auch, dass das Fahrzeug noch nicht eingefahren war oder, dass nach den Ausrollversuchen noch Feinabstimmungen des Fahrzeugantriebs stattfanden, die Ermittlung des Rollwiderstands und damit die Widerstandskoeffizienten verfälschen. Wohl dem geschuldet beträgt die Reichweite am Rollenprüfstand nur 72 % der Reichweite der Realfahrten.

3.5.3.4.2 Effizienzbetrachtung des Absaugsystems

Die Lüfter des ZEDU1 Demonstrators stellen eine essentielle Funktionseinheit dar. Sie erzeugen einen Volumenstrom, der die Partikel direkt nach der Radaufstandsfläche absaugt und durch das mehrstufige Filtersystem führt. Der Energieverbrauch der Lüfter ist stark abhängig von dem geforderten Volumenstrom.

In Abbildung 272 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist der linear ansteigende Volumenstrom im Verhältnis zum exponentiell ansteigenden Leistungsbedarf zu erkennen. Dies lässt mit der in der Abbildung 273 angedeuteten Sättigung der luftgetragenen Reifenpartikelemissionen bei ca. 50% Lüfteransteuerung, die Vermutung zu, dass eine erhebliche energetische Effizienzsteigerung durch eine bedarfsgerechtere Nutzung der Hardware möglich ist.

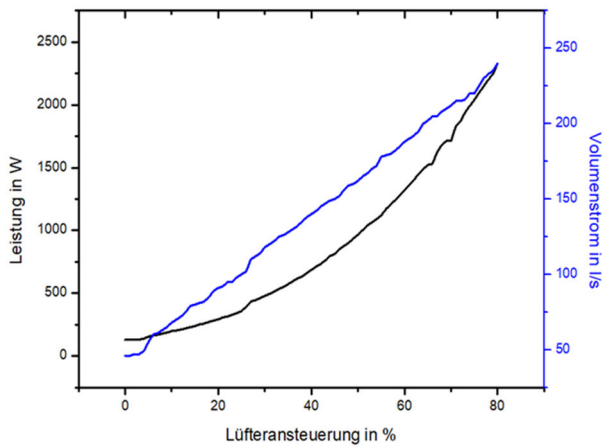


Abbildung 272: Leistung der Lüfter (schwarz) und Volumenstrom (blau) im ansteuerbaren Bereich bei einer konstanten Geschwindigkeit von 120 km/h.

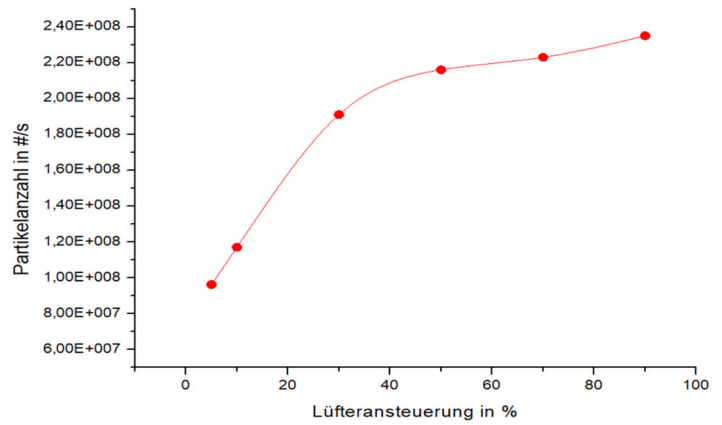
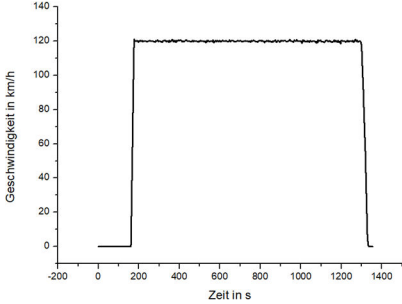
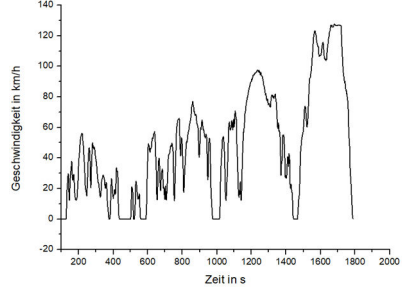


Abbildung 273: Partikelanzahl und Lüftersteuerung (rot) bei einer konstanten Geschwindigkeit von 120 km/h.

Die Lüfter würden dann ihren maximal benötigten Volumentstrom bei 50 % erreichen und ungefähr 1 kW Leistung benötigen. Wohingegen die ursprüngliche Einstellung bis zu 2,3 kW Leistungsaufnahme benötigen kann. Der Mehrverbrauch des Absaugsystems hat einen negativen Einfluss auf den Energieverbrauch und damit auf die Reichweite des Fahrzeugs. So werden bei einer Einstellung von 80 % der Lüftereinstellung, die Reichweiten bei einer Konstantfahrt mit 120 km/h um 3 % reduziert. Während eines WLTC-Zyklus kann diese Reduzierung bis zu 12 % betragen. Dies Ergebnisse sind in der Tabelle 40 zusammengestellt

Tabelle 40: Leistungsbedarf und Reichweitenverkürzung durch das Absaugsystem mit 80 %-Lüfterleistung

Fahrzyklus	Zyklus-Diagramm	Leistungsbedarf Fahrzeug	Leistungsbedarf Lüfter	Anteil der Gesamtleistung
Konstantfahrt 120 km/h		72,2 kW	2,3 kW	3 %
WLTC-3b		9,7 kW	1,2 kW	12 %

3.5.3.4.3 Charakterisierung der Lamellenbremse

Eine der Schlüsselkomponenten des ZEDU-1 ist die integrierte Lamellenbremse. Die Lamellenbremse ist eine mechanische Bremse, die aus mehreren Lamellen besteht, die an einer rotierenden Welle befestigt sind. Die Lamellen werden durch einen hydraulischen Aktuator zusammengedrückt, um die Bremskraft zu erzeugen. Die ZEDU-1-Lamellenbremse ist gekapselt und wird bei Betätigung mit Öl bestückt. Das Ölbad dient zur Kühlung der Bremslamellen und sorgt dafür, dass der Abrieb der Lamellen nicht in die Umwelt gelangt, sondern im Öl verbleibt. Das Öl wird laufend durch einen Filter gepumpt und gereinigt. Dadurch werden die Abriebs- und Feinstaubemissionen der Bremse verhindert. Es ist essentiell das thermische Verhalten der Bremse zu testen und die Kühlfähigkeit des Systems zu validieren. Wie auf Abbildung 275 dargestellt übersteigt die Lamellentemperatur selbst bei extremer Beanspruchung nicht 85°C und liegt damit weit unter der materialbedingten Grenztemperatur (§ 3.2.1). Ein Vergleich des thermischen Verhaltens der beiden installierten Lamellenbremsen wurde ebenfalls durchgeführt. Die Temperaturdifferenz der beiden Bremsen ist in (Abbildung 274) dargestellt. Schwarz und Blau zeigen die jeweilige Temperatur der rechten und linken Lamellenbremse und in Rot die Differenztemperatur. Zu sehen ist, dass der Temperaturunterschied weniger als 10 °C beträgt und damit auf ein gleichmäßiges Bremsverhalten deutet.

Das Fahrzeug wurde im Rahmen diverser Brems- und Beschleunigungstests auch einem Belastungstest für das Bremssystem unterzogen. Das Temperaturverhalten bei starken und häufigen Verzögerungen erreicht ein Maximum von 85 °C. Damit ist auch das Bremssystem als dauerhaft im Fahrzeug erprobt.

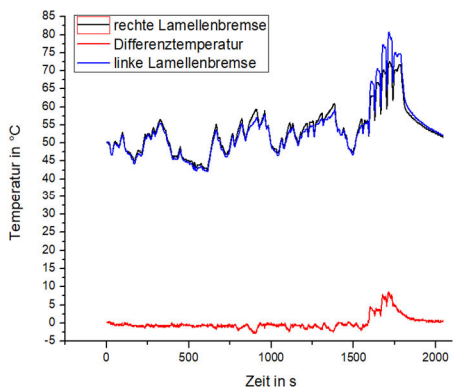


Abbildung 274: Lamellenbremse Temperaturvergleich während eines WLTC

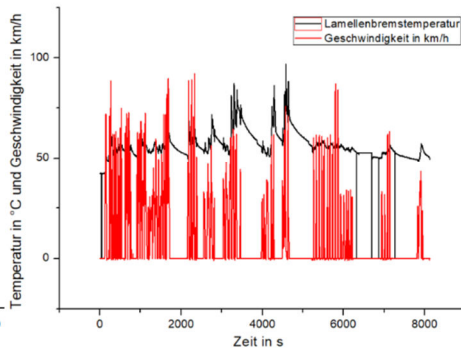


Abbildung 275: Temperaturprofil bei beständigen Brems- und Beschleunigungstests

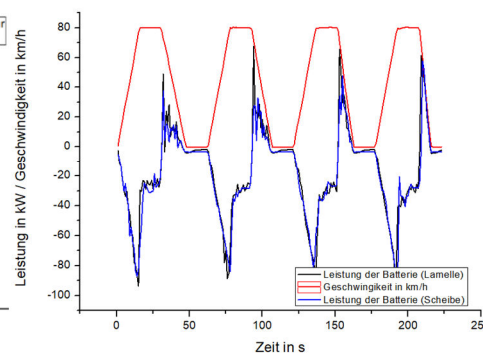




Abbildung 276: Leistungsdaten der Batterie bei Nutzung der Lamellen und Scheibenbremse

Der ZED1-Versuchsträger ist so ausgestattet, dass es möglich ist zwischen einem Bremsmodus über die Lamellenbremse und dem einem mit konventioneller Schiebenbremse. Mit dem ZEDU-Brake-Fahrzyklus wurden Bremstest sowohl mit der Lamellenbremse als auch mit der konventionellen Scheibenbremse durchgeführt (Abbildung 276). Dargestellt ist in dieser Abbildung der Rekuperationsanteil beim Bremsen. Da dieser bei beiden Bremsarten gleich ist auch der mechanische Anteil der Bremsen gleich. Damit konnte gezeigt werden, dass die Lamellenbremse das gleiche Bremsverhalten wie die konventionelle Scheibenbremse aufweist.

3.5.3.5 Reifenabrieb

Die Reifen des ZEDU-1 Demonstrators wurden zu Beginn der Realfahrten und nach Abschluss der Testfahrten gewogen und verglichen. Es wurden relevante Unterschiede zwischen den Verschleißmustern bei den Realfahrten und dem Rollenprüfstand evaluiert. Besonders der Masseverlust am Reifen ist auffällig (Tabelle 41).

Tabelle 41: Gravimetrischer Vergleich des Reifenverbrauchs bei Realfahrten und auf dem Rollenprüfstand

Messkampagne	Gefahrene Strecke	Abrieb gravimetrisch	Material im Auffangbereich
Realfahrten	329 km	870 g	
Rollenprüfstand	410 km	37 g	

Gründe für den signifikanten Unterschied zwischen den Verschleißmustern können die gefahrenen Fahrprofile und Umgebungsbedingungen sowie die Oberflächenbeschaffenheit der Straße zur Rolle sein. Während der Messkampagne in Boxberg haben Umgebungstemperaturen über 30 °C und der durch die Sonne aufgeheizte Asphalt zusammen mit dem gefahrenen Fahrzyklus einen extremen Reifenverschleiß erzeugt, der sich auch deutlich im gemessenen Reifengewicht wiedergespiegelt hat. Auch haben sich die starken Querbeschleunigungen beim Fahren auf einem Oval-Kurs und Slaloms zum erhöhten Reifenabrieb beigetragen.

Während der Messkampagne auf der Teststrecke wurden auch Laub, Sand und Kies im Auffangbereich des Abscheiders gefunden, die natürlich keinen gravimetrischen Beitrag beim Reifenwiegen haben.

Die Abriebbemimmung wurde auf dem Rollenprüfstand in zwei Messkampagnen durchgeführt. Insgesamt wurden dabei 410 km hauptsächlich im WLTC-Zyklus gefahren. Davor und danach wurden die Reifen mit einer hochpräzisionswaage gewogen. Insgesamt wurden dadurch ein Verlust von 37 g Reifenmasse ermittelt.

Tabelle 42: Abriebe während der Rollenmesskampagne

Reifen	Masse insgesamt (g)	Masse pro 100 km (g)
Abrieb Reifen (VL)	10,064	2,455
Abrieb Reifen (VR) - Messrad	16,017	3,907
Abrieb Reifen (HL)	5,798	1,414
Abrieb Reifen (HR)	5,288	1,290

Die Messungen zeigen einen höheren Verschleiß der Vorderachse. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Vorderachse beim ZEDU1-Fahrzeug – im Gegensatz zum i3 – eine angetriebene Achse ist. Damit werden alle Beschleunigungskräfte und ein Großteil der Verzögerungskräfte über diese Achse übertragen.

Nach der Messkampagne wurde 1 g Material im Auffangbereich und 5,5 g im Vorfilter gefunden. Damit sind insgesamt 6,5 g von 26 g Reifenabrieb im System wiedergefunden worden. Mögliche Ursachen dafür sind die Partikelverluste bis zum Filterbereich. Durch das Vorbeiführen am Rad kommt es zu Querschnitts- und Geschwindigkeitsänderungen die zum Abscheiden von Partikeln im Reifenpartikelabsaugkanal führen. Ebenfalls wurden große Partikel bei Rollenfahrten außerhalb der Radeinhausung geschleudert.

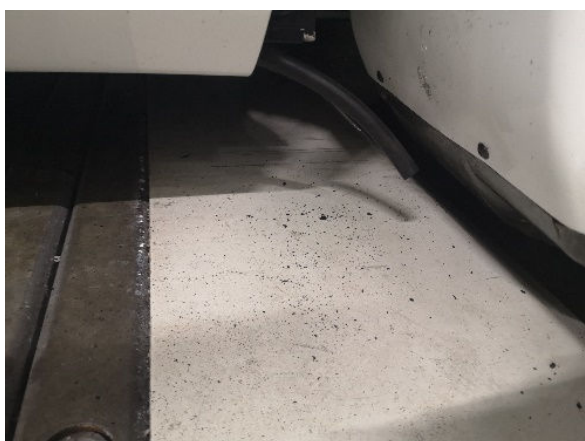


Abbildung 277: Partikel in der Messkammer nach Messfahrten hinter der Umhausung (links) und in der Felge (rechts)

Der Querschnitt der Luftströmung zwischen Gehäuse und Belag ist größer, da durch die Rollenform eine Krümmung vorgegeben ist. Infolge der Querschnittsveränderung sinken die Strömungsgeschwindigkeiten und Partikel können eher hinausgelangen. Des Weiteren erzeugen die rotierenden Rollen einen Sog der die Partikel mitreißt (Siehe auch § 3.5.2.2.1). Außerdem sind die abgeriebenen Reifenpartikel durch den Mangel an anorganischen oder organischen Partikeln aus der Umwelt sehr klebrig. Die Resultate sind exklusiv für das ZEDU1 Fahrzeug und nicht übertragbar auch die Ergebnisse des Referenzfahrzeugs BMW i3. Eine weitere Bewertung findet in 3.6 und 3.7 statt.

Diese Untersuchungen zur Bestimmung von Reifenabriebe und Abriebmechanismen auf einem Prüfstand und derer Vergleichbarkeit mit Realfahrten zeigen weiteren Forschungsbedarf auf.

3.5.4 Zusammenfassung TP4

Im Rahmen des Arbeitspakets TP4 wurden umfangreiche Testfahrten sowohl auf dem Rollenprüfstand als auch im realen Fahrbetrieb mit einem BMW i3 und dem ZEDU1- Versuchsträger durchgeführt. Ziel war es, den ZEDU1-Versuchsträger zu evaluieren und die Leistung seiner einzelnen Komponenten zu untersuchen. Zusätzlich wurden Vergleichstests auf dem Rollenprüfstand und in Realfahrten in Boxberg durchgeführt, um eine umfassende Bewertung des Fahrzeugs zu ermöglichen.

Die durchgeführten Tests haben wichtige Erkenntnisse geliefert. Die Lamellenbremse des ZEDU1-Versuchsträgers wurde als fehlerfrei und funktionsfähig bestätigt. Sie ergänzt logisch das hohe Rekuperationsvermögen des Fahrzeugs, was zu einer effizienten und feinstaubfreien Energierückgewinnung beim Bremsen führt. Dies trägt zur Gesamtleistung des Fahrzeugs bei und ermöglicht eine umfassende Emissionsreduzierung.

Des Weiteren wurde die Reifeneinhausung des ZEDU1-Versuchsträgers untersucht und ihre Auswirkungen auf die Emissionen der Reifen bewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass die Umhausung signifikant zur Reduzierung der Reifenemissionen beiträgt. Dies ist von großer Bedeutung, da Reifenemissionen einen erheblichen Beitrag zu den Gesamtemissionen von Fahrzeugen leisten. Die Umhausung des ZEDU1 stellt somit eine vielversprechende Lösung dar, um die Umweltauswirkungen durch Reifenemissionen zu verringern.

Trotz der positiven Ergebnisse wurden auch Bereiche identifiziert, die weiterhin verbessert werden können. Diese Erkenntnisse und „Lessons learned“ fließen in zukünftige Iterationen des Fahrzeugs ein. Insbesondere werden Anpassungen am Referenzfahrzeug, dem BMW i3, vorgenommen, um dessen für Testmöglichkeiten und zusätzliche Anwendungsgebiete weiter zu optimieren.

Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets tragen dazu bei, das Verständnis für die Leistungsfähigkeit des ZEDU1-Versuchsträgers zu vertiefen und bieten wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung des Fahrzeugs und der entwickelten Technologien. Durch die Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse können gezielte Verbesserungen und Optimierungen vorgenommen werden, um die Synergien des ZEDU1-Versuchsträgers in Bezug auf Energieeffizienz, Emissionsreduktion und Komponentenleistung weiter zu steigern.

3.6 TP 5: Emissionsmessungen

Ziel der Emissionsmessungen ist die Quantifizierung und Charakterisierung der luftgetragenen partikulären Emissionen von Bremsen- und Reifenabrieben. Der Fokus der Betrachtung liegt hierbei bei der Untersuchung von Partikeln $< 10 \mu\text{m}$, so genanntem Feinstaub, und ultrafeinen Partikeln $< 100 \text{ nm}$.

Untersucht wurden Brems- und Reifenemissionen des Referenzfahrzeug BMW i3, einer Bremsscheibe mit Hartmetallbeschichtung, der Prototyp der Hybridbremse, sowie des ZEDU-Demonstrators. Dies beinhaltet jeweils die Auslegung und den Bau von Partikelprobenahmen, die Planung und Durchführung von Messkampagnen, die in enger Abstimmung mit TP4 erfolgten (§ 0), sowie die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse.

3.6.1 Messtechnik und Messkonzept

Zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration (PNC) und der Größenverteilung von luftgetragenen Partikeln (PSD) der Nicht-Abgas-Emissionen wurden verschiedene Messgeräte in Kombination eingesetzt. Die Geräteauswahl wurde je nach Fragestellung und Messsituation – z.B. mobiler oder stationärer Einsatz – getroffen. Einen Überblick der eingesetzten Messgeräte und der jeweiligen Messbereiche gibt Abbildung 278.

Zur Messung der Partikelanzahlkonzentration wurden Kondensationspartikelzähler (CPCs) verwendet, diese können luftgetragene Partikel mit einem Durchmesser von wenigen Nanometern auch bei niedriger Konzentration detektieren. Das Messprinzip basiert hierbei auf der Kondensation von Butanol an den Partikeln: Die Aerosolprobe und der Butanoldampf gelangen gemeinsam in einen gekühlten Kondensator, in dem der Butanoldampf übersättigt und am Partikel kondensiert. Durch das „anwachsen“ der Partikel können anschließend auch nm-kleine einzelne Partikel optisch detektiert werden. Es wurden verschiedene CPCs der *TSI GmbH* verwendet.

Zur Detektion und Charakterisierung größerer Partikel mit einem Durchmesser bis zu $10 \mu\text{m}$ wird ein Optisches Spektrometer (OPS) der *TSI GmbH* verwendet. Hierbei kann die Partikelanzahlkonzentration und die Partikelgröße über Lichtstreuung bestimmt werden.

Das Aerosol wird zusätzlich mit schnellen Partikelspektrometern („Fast Sizer“) charakterisiert. Diese können auf Basis der Bewegung des geladenen Partikels in einem elektrischen Feld ein Spektrum der Partikelgrößen bestimmen. So können die vom CPC detektierten Partikel in der Luft durch die kontinuierliche größenselektive Messung eines Partikelspektrometers einem Größenbereich zugeordnet werden. Für mobile Messungen kommt hier das EEPS der *TSI GmbH* zum Einsatz, für stationäre Messungen das DMS500 von *Cambustion*.

Bei einigen Experimenten wurde ein Catalytic Stripper (CS10) von *Catalytic Instruments* mit einem Durchfluss von 10 l bei $350 \text{ }^\circ\text{C}$ vor dem EEPS oder DMS500 eingesetzt, um den Anteil der nicht flüchtigen Bremsabriebpartikel zu bestimmen. Dies ist für die Bewertung einer möglichen Umweltwirkung von Bedeutung, da die volatilen Bestandteile nach der Freisetzung – abhängig von den Umweltbedingungen – rasch abgebaut werden können.

Für die Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop (REM) mit Röntgenspektroskopie (EDX) wurden Partikel während der Testfahrten größenselektiv mit einem elektrischen Niederdruck-Impaktor (ELPI+) von *Dekati* eingesammelt. Hier wird das Aerosol durch eine Kaskade von immer feineren Düsen gezogen. Durch ihre Trägheit prallen große Partikel auf ebene Probenahmeplatten auf. Die Stufen werden immer feiner, wodurch mit jeder Stufe kleinere Partikel abgeschieden werden. Für die morphologische Untersuchung mit dem REM

wurden die Emissionen auf Aluminium-Substrat abgeschieden, für die chemische Untersuchung im EDX auf Polycarbonatfolien.

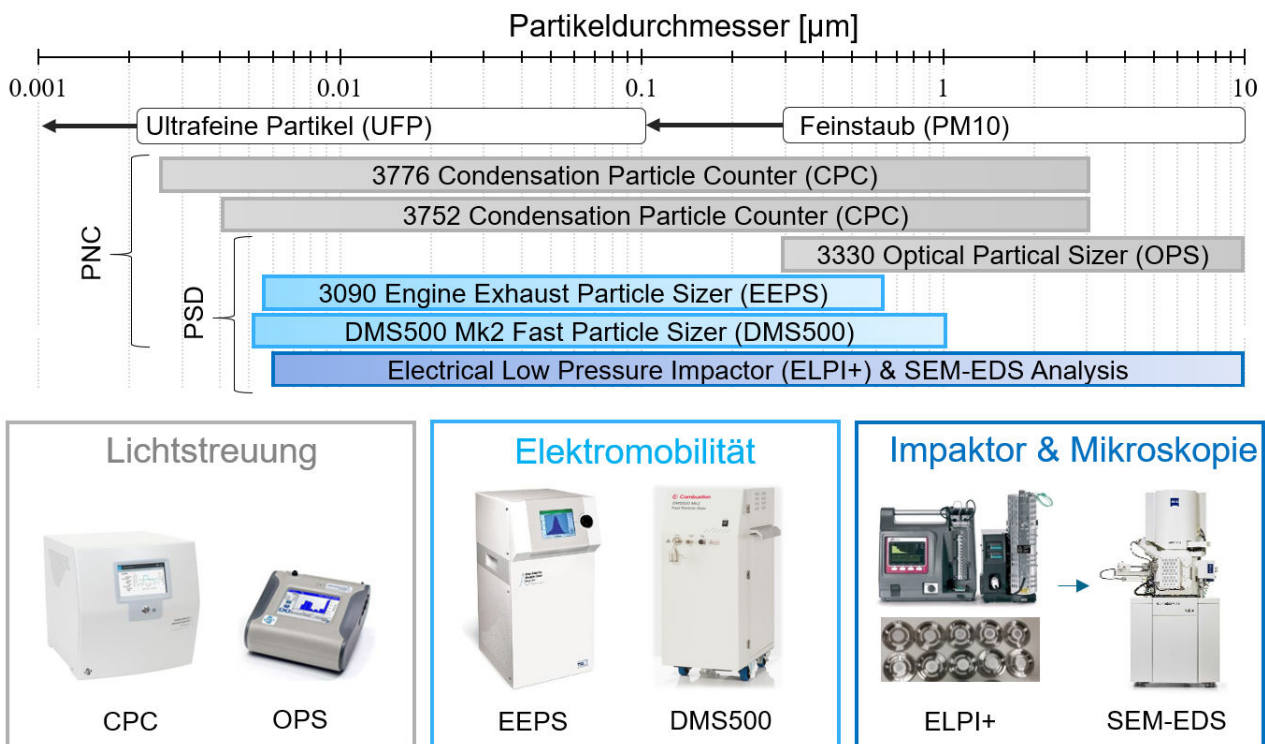


Abbildung 278: Überblick der eingesetzten Partikelmessgeräte für mobile und stationäre Messungen von Partikelanzahlkonzentration (PNC), Partikelgrößenverteilung (PSD) und zur morphologisch-chemischen Untersuchung: Ein TSI 3776 Condensation Particle Counter (CPC) zur Messung der PNC von Partikeln zwischen 2,5 nm (D50) und 3 µm, zwei TSI 3752 Condensation Particle Counter (CPC) zur Messung der PNC von Partikeln zwischen 4 nm (D50) und 3 µm; ein TSI 3090 Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS) zur Messung der PSD im Bereich von 5,6 nm bis 560 nm in 32 Kanälen; ein Cambustion DMS 500 Fast Particle Sizer zur Messung der PSD von 5 nm bis 1 µm und ein TSI 3330 Optical Particle Sizer (OPS) zur Messung der PSD im Bereich von 300 nm bis 10 µm in 16 Kanälen. Alle Instrumente wurden mit 1 Hz betrieben. Im Elektrical Low Pressure Impactor (ELPI+) von Dekati wurden Proben zur mikroskopischen Untersuchung gesammelt.

3.6.2 Emissionen des Referenzfahrzeugs

Die Arbeiten in TP5 zur Vermessung der Nicht-Abgas-Emissionen am Referenzfahrzeug BMW i3 erfolgen in stetigem Austausch mit TP4. Die Implementierung des Messaufbaus inklusive Messtechnikadaption, Design der Probenahme und Belüftung, der Test des neuartigen Testsetups sowie dessen Einsatz zur systematischen Vermessung der Nicht-Abgas Emissionen standen im Fokus von TP5.

Der entwickelte Messaufbau ermöglicht die Bestimmung der Fein- bzw. Ultrafeinstaubemissionen am Rollenprüfstand und bei Realfahrten. Zur selektiven Untersuchung von Brems- und Reifenverschleißpartikeln wurden die beiden Komponenten durch eine Distanzplatte voneinander getrennt. Abbildung 279 zeigt die maßgeschneiderten Gehäuse mit Luftein und -auslass, die um die Bremse und den Reifen herum konstruiert wurden (s. dazu auch § 3.5.1).

Der Aufbau ermöglicht die Anpassung der Volumenströme (§ 3.5.2.1) für Emissionsmessung am Reifen oder der Bremse. Durch die modulare Anpassung der Probenahmedüse (Abbildung 258) wird eine repräsentative Probenahme gesichert. Partikelverluste im Probenahmesystem wurden im Vorfeld der Experimente mit

Hilfe eines Partikelgenerators bestimmt. Während der Fahrzyklen wurde die Partikelanzahl- und Größenverteilung kontinuierlich aufgenommen und durch Hintergrundmessungen der Umgebungsluft ergänzt.

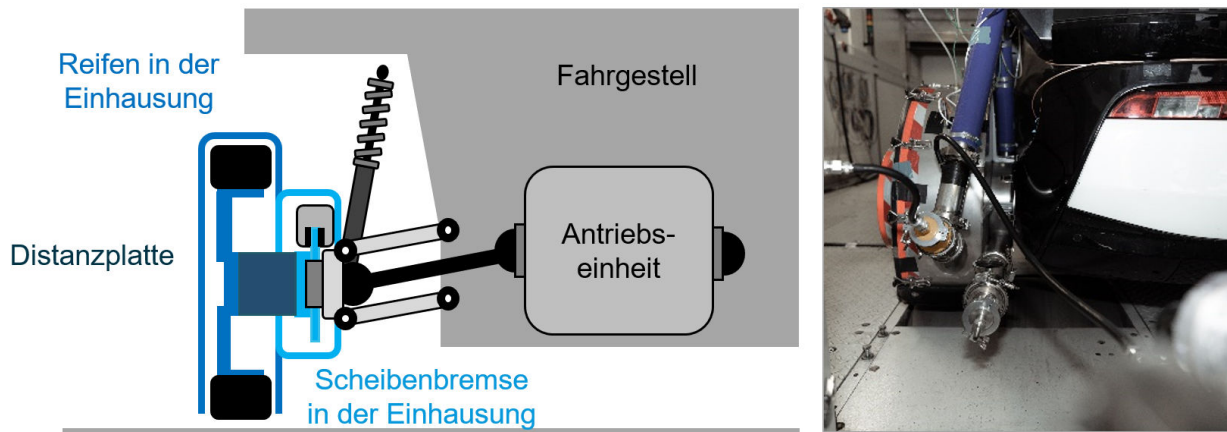


Abbildung 279: Messaufbau am Referenzfahrzeug BMWi3 als Skizze (rechts) und Abbildung (links)

Wie auf Abbildung 280 dargestellt wurde die Partikelmesstechnik modular eingesetzt. Am Rollenprüfstand (links) war die Messtechnik außerhalb des Fahrzeugs, nahe des Hinterrades als Emissionsquelle platziert. Hierbei wurde auf Schutz der Messtechnik vor Vibrationen am Prüfstand geachtet. Für Messungen auf den Straßen oder dem Testgelände (Bildmitte) wurde die Partikelmesstechnik in das Fahrzeug integriert und über eine zusätzliche Batterie außerhalb des Bordnetzes mit Strom versorgt (s. dazu Abbildung 261).



Abbildung 280: Modularer Einsatz der Partikelmesstechnik am Rollenprüfstand, im Referenzfahrzeug und am Komponentenprüfstand für Bremsen.

3.6.2.1 Vermessung der Bremsemissionen

Die Scheibenbremse des Referenzfahrzeugs ist für die Emissionsmessungen vollständig verkapselt. Wie in Abbildung 281 gezeigt, wird über ein regelbares Belüftungssystem das Gehäuse der Bremse mit partikelfreier Luft durchspült, welche vorher durch einen hocheffizienten Partikelfilter (HEPA) geleitet wird. Bei der Bestimmung der Bremsemissionen ist die Freisetzung eines Aerosols mit sehr geringen Durchmessern zu erwarten. Entsprechende Aerosole durchlaufen rasche Änderungsprozesse und müssen daher zeitnah und mit hoher Zeitauflösung vermessen werden. Dabei ist die Probenahme für den Erfolg der Messung entscheidend. Der

verkapselte Aufbau der Bremse des Versuchsfahrzeugs erlaubt hierbei eine isokinetische Probenahme aus der gerichteten Abluft. Hierfür wurde eine Sonde mit einer entsprechenden Eingangsdüse ausgelegt und integriert (Abbildung 258).

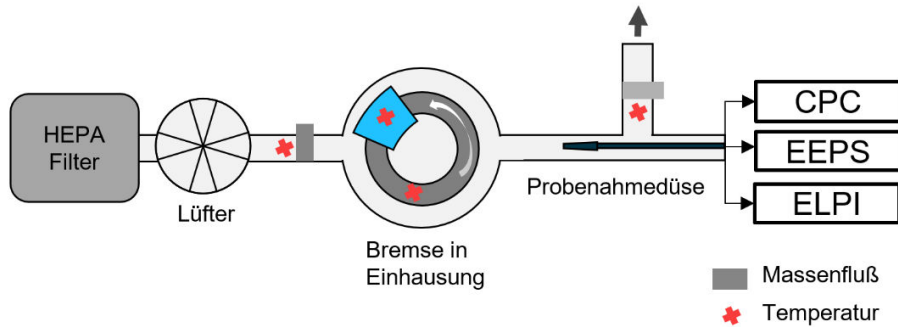


Abbildung 281: Messaufbau zur Untersuchung der Bremsemissionen.

3.6.2.1.1 Einstellung des Belüftungsstroms

Der Volumenstrom der die Bremse umströmenden Luft wurde in Vorversuchen ermittelt (§ 3.5.2.1), um eine ungewollte Änderung der Bremstemperatur gegenüber dem realen Fall ohne Kapselung zu vermeiden. Die Herausforderung bestand in der notwendigen Flexibilität des Aufbaus. Die isokinetische Probenahmesonde wurde daher mit einem Set auswechselbarer Düsen ausgestattet (Abbildung 258). Der Durchmesser dieser Düse wurde so gewählt, dass die Strömungsgeschwindigkeit der Probenahmeleitung der Geschwindigkeit im Inneren des Gehäuses entsprach, um eine repräsentative, isokinetische Probenahme zu erreichen. Die Messungen erfolgten mit einem Volumenstrom von 31 m³/h, womit die Temperaturen aus dem Straßentest erreicht wurden.

3.6.2.1.2 Entstehung und Charakterisierung der Partikelemissionen

Die Bremsemissionen wurden zunächst in einem einfachen Testzyklus untersucht, um die Abhängigkeit von verschiedenen Fahrzeugparametern festzustellen. Wie die Ergebnisse auf Abbildung 282 zeigen, entstehen die Bremsemissionen nicht nur während der eigentlichen Bremsung, sondern auch bei Beschleunigung und

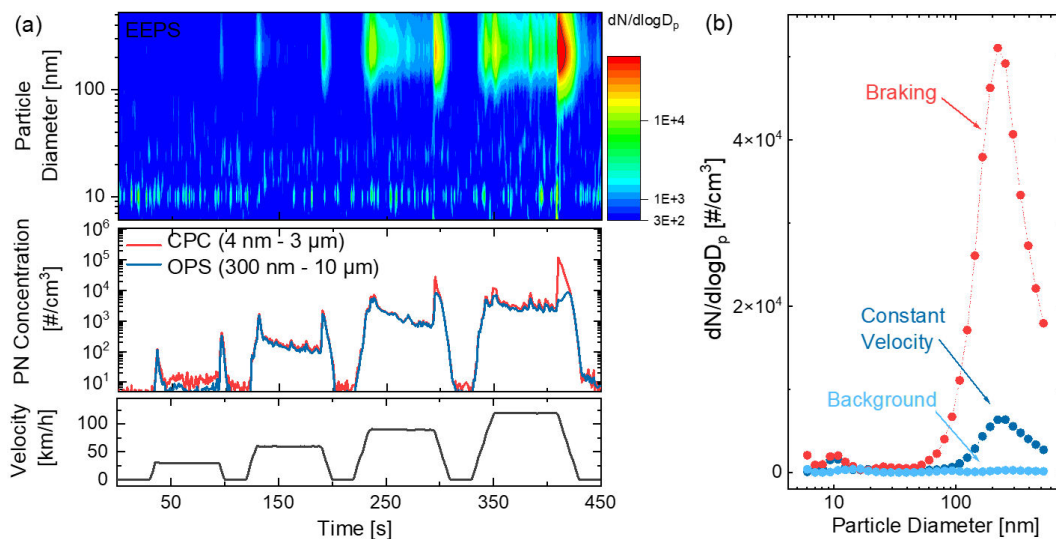


Abbildung 282: Partikelgrößenverteilung und -konzentration bei einem Testzyklus in logarithmischer Darstellung (a) und das Partikelspektrum der Hintergrundkonzentration, Konstantfahrt und der Bremsung (aus (10) übernommen).

Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit. Dies ist an der Größenverteilung der Partikel im Bereich 200 nm – 300 nm zu erkennen, außerdem sind Ultrafeine Partikel mit einem Durchmesser von etwa 10 nm vorhanden.

3.6.2.1.3 Einfluss der Bremsentemperatur

Die Temperaturabhängigkeit der Bremsemissionen wurde anhand eines eigenen Fahrprofils mit rasch wiederholten Bremsungen (ZEDU-Brake Zyklus) am Rollenprüfstand untersucht.

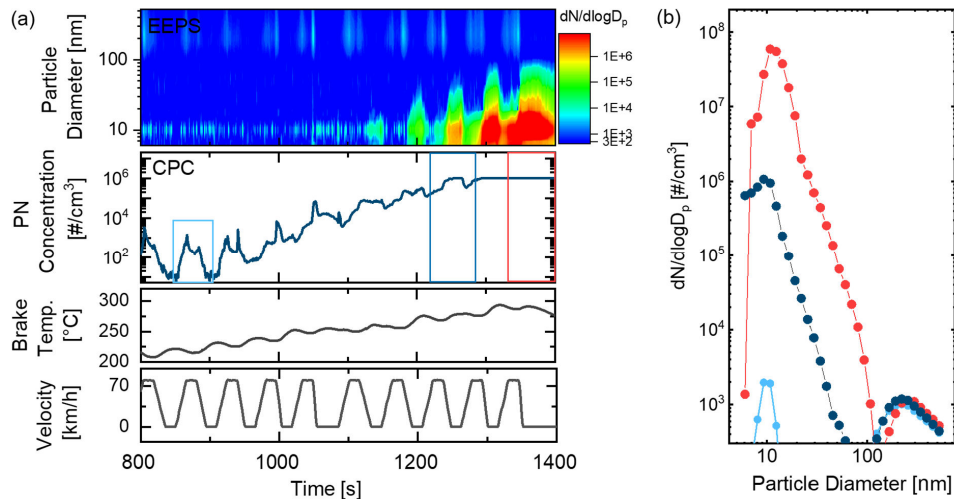


Abbildung 283: a) Partikelanzahlkonzentration bei wiederholenden Bremsungen; b) Partikelgrößenverteilung vor und nach der kritischen Temperatur (aus (10) übernommen).

Die Partikelemissionen bleiben im Temperaturbereich zwischen 20 °C und 245 °C nahezu konstant. Oberhalb der so genannten kritischen Bremsentemperatur beginnt der exponentielle Anstieg der Partikelanzahlkonzentration. Das Partikelspektrometer (EEPS) zeigt zusätzlich eine Verschiebung der Partikelgrößenverteilung zu mehr Partikeln im Bereich von 10 nm und weniger Partikeln bei 220 nm (Abbildung 283). Der exponentielle Anstieg der Partikelkonzentration ist somit hauptsächlich auf die vermehrte Freisetzung von ultrafeinen Partikeln zurückzuführen.

3.6.2.1.4 Einfluss der Rekuperation

Durch Rekuperation des Elektromotors lässt sich die Verwendung der mechanischen Bremse bei leichten und mittleren Bremsungen vermeiden und somit auch Partikelemissionen reduzieren. Wie die meisten anderen Elektroautos verfügt auch der BMW i3 über ein rekuperierendes Bremssystem, welches den elektrischen Antrieb zur Energierückgewinnung nutzt. Hierbei wird von der Fahrzeugsteuerung so geregelt, dass ein Optimum an Bremsenergie zurückgewonnen werden kann. Daher wird das hydraulische Bremssystem nur aktiviert, wenn die angeforderte Bremsleistung nahe an der maximal möglichen Rekuperationsbremsleistung liegt oder diese überschreitet. Die Limitierung erfolgt, wenn zu hohe Ströme für Batterie bzw. die Leistungselektronik erreicht sind, der Batterie Ladestand (SOC) zu hoch ist, eine höhere Verzögerung als durch Rekuperation möglich, erforderlich ist oder das ABS eingreift. Um den Einfluss der Bremsenergieerückgewinnung auf die Partikelemissionen zu untersuchen, wurde die Rekuperation für mehrere Tests deaktiviert. Dies geschah über den Fehlermodus der dynamischen Stabilitätskontrolle (DSC). Die Anzahl der groben und ultrafeinen/feinen Partikelemissionen des Elektrofahrzeugs wurden für drei Fahrzyklen auf dem Rollenprüfstand

mit der Standard-Rekuperationseinstellung und der originalen Standardbremse ermittelt. Abbildung 284 zeigt für jeden Fahrzyklus die gemessene Partikelkonzentration und die relevanten Fahrzeugparameter wie Bremstemperatur, Bremsdruck und Geschwindigkeit. Die Rekuperation führt zu einer deutlichen Reduzierung der Partikelemissionen der Bremse. Die Reduzierung der Emissionen beim rekuperierenden Bremsen ergibt sich aus der reduzierten Anzahl an Bremsvorgängen und der geringeren Leistungsübertragung über die mechanische Bremse. An der Bremsscheibe wirken somit geringere Kräfte.

Obwohl die relative Verringerung der Anzahl der Bremsvorgänge bei allen Fahrzyklen ähnlich war, war die Stärke der Emissionsminderung stark vom Fahrzyklus abhängig. Am höchsten war die Reduktion von Abriebsemissionen im realen Fahrzyklus mit 89,8 % für ultrafeine/feine Partikel (Tabelle 43).

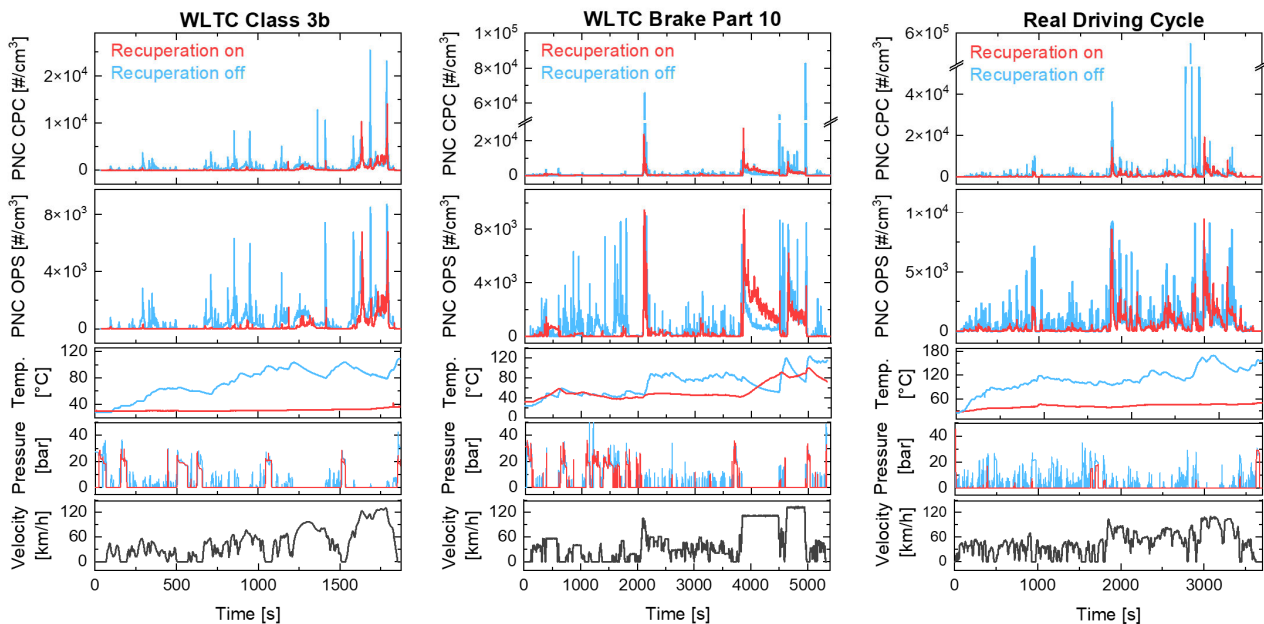


Abbildung 284: Vergleich der Partikelemissionen für drei Fahrzyklen mit und ohne Rekuperation. Ultrafeine und feine Partikelanzahlkonzentrationen für Partikeldurchmesser zwischen 4 nm und 3 µm und grobe Partikel zwischen 300 nm und 10 µm, gemessen mit CPC bzw. OPS (aus (10) übernommen).

Für den Fahrzyklus WLTC-Brake Part 10 wurde für alle gemessenen Partikelgrößen eine geringe oder keine Verringerung der Emissionen beobachtet. Der Grund dafür könnte der Rückstellmechanismus der Bremsbeläge gewesen sein. Dieser kann in einigen schnell aufeinander und starken Bremsvorgängen dazu führen, dass die Bremsbeläge nicht ausreichend zurückstellen und während der Fahrt schleifen, was zu zusätzlichem Verschleiß und damit zu erhöhten Emissionen führt.

Tabelle 43: Bremsmissionen der Graugussbremse und Reduktion durch Rekuperation für verschiedene Zyklen (Werte aus (10))

Fahrzyklus	Reduktion der Bremsereignisse durch Rekuperation (%)	PN-Emissionen an der Standardbremse (#/km)		Reduktion der PN-Emissionen durch Rekuperation (%)	
		CPC	OPS	CPC	OPS
		4 nm - 3 µm	300 nm - 10 µm	4 nm - 3 µm	300 nm - 10 µm
WLTC Clas 3b	95.8	1.63×10^8	$1,29 \times 10^8$	65.4	67.9
WLTC Brake Part 10	88.5	$5,11 \times 10^8$	$4,27 \times 10^8$	4.3	-15.2
Realer Fahrzyklus (RDE)	87.7	4.10×10^8	3.45×10^8	89.8	34.6

Unter idealen Bedingungen führt die Rekuperation zu einer erheblichen Reduzierung der luftgetragenen Partikel (37), (38). Das Ausmaß der Reduzierung hängt jedoch stark vom Fahrzyklus ab und kann durch das Fehlen eines Bremsbelag-Rückstellmechanismus zunichte gemacht werden.

3.6.2.1.5 Einfluss der Hartmetallbremsscheibenbeschichtung

Im Weiteren wurde die Wirkungen einer Hartmetallbeschichtung der Bremsscheibe auf die Reduzierung von Bremsverschleißemissionen für ein batteriebetriebenes Elektrofahrzeug am BMW i3 auf dem Rollenprüfstand als auch die Wirkung der Bremsscheibenbeschichtung anhand von Tests auf einem Komponenten-Bremsprüfstand (§ 3.6.2.1.7) untersucht. Die Tests umfassten zum Vergleich die WLTC-Klasse 3b, WLTC-Bremsteil 10 und den realen Fahrzyklus mit regenerativem Bremsen.

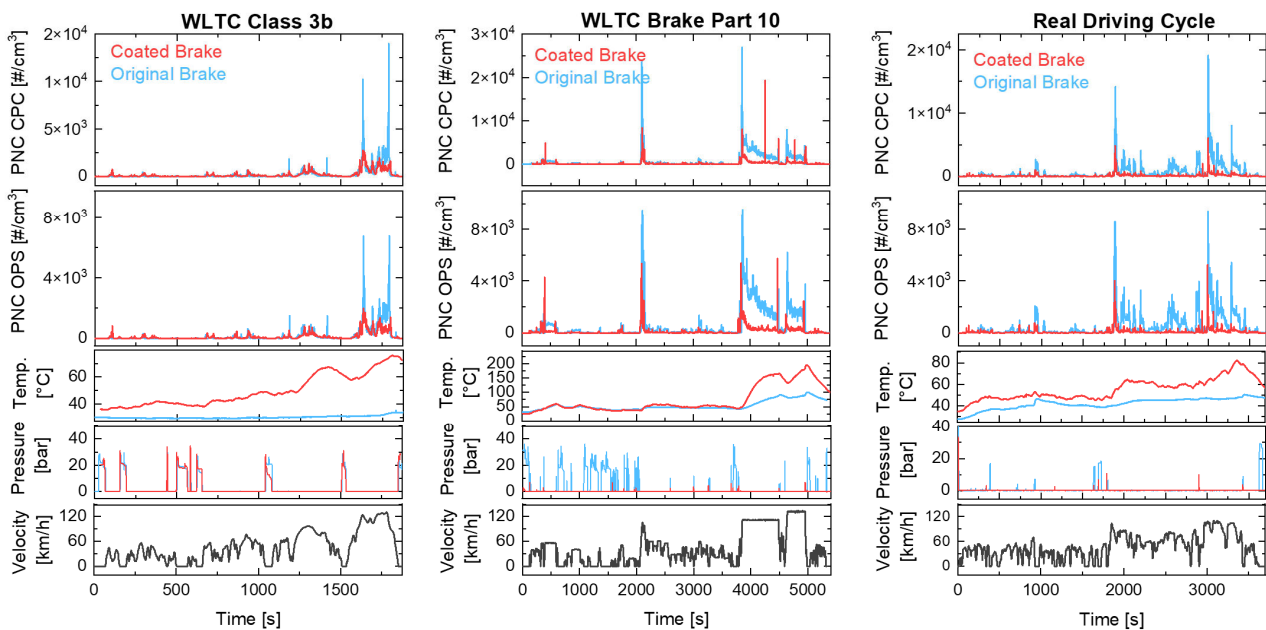


Abbildung 285: Vergleich der Partikelemissionen für drei Fahrzyklen mit der originalen und einer beschichteten Bremsscheibe. Partikelanzahlkonzentrationen für Partikeldurchmesser zwischen 4 nm und 3 µm und grobe Partikel zwischen 300 nm und 10 µm, gemessen mit CPC bzw. OPS (aus (10) übernommen).

Die verwendeten Bremsscheiben, original und beschichtet, sind auf Abbildung 241 und Abbildung 242 dargestellt. Die gusseiserne Bremse wurde mit einem Zweischichtsystem der ARS Autoteile GmbH (jetzt FRENOZA GmbH) beschichtet.

Tabelle 44: Bremsmissionen einer hartmetallbeschichteten Bremsscheibe im Vergleich zur Graugussbremsscheibe mit gleichen Bremsbelägen für verschiedene Zyklen (Werte aus (10))

Fahrzyklus	PN-Emissionen hartmetallbeschichtete Bremsscheibe (#/km)		Reduzierung der PN-Emissionen durch Hartmetallbeschichtung (%)	
	4 nm - 3 µm	300 nm - 10 µm	4 nm - 3 µm	300 nm - 10 µm
WLTC Class 3b	1.33×10^8	8.50×10^7	18.5	33,9
WLTC Brake Part10	1.45×10^8	9.38×10^7	71.7	78
Realer Fahrzyklus (RDE)	$8,64 \times 10^7$	5.85×10^7	78.9	83

Wie Abbildung 287 zeigt, führt eine Hartmetallbeschichtung der Bremsscheibe bei Nutzung der gleichen Bremsbeläge zu einer weiteren deutlichen Verringerung der luftgetragenen Partikelemissionen. Die Fahrprofile wurden mit eingeschalteter Rekuperation aus dem Rollenprüfstand gefahren. Die höchsten Emissionseinsparungen wurden für den RDE-Fahrzyklus mit 78,9 % für CPC bzw. 83 % für OPS gemessen. Die relative Emissionsminderung war je nach Fahrzyklus unterschiedlich (37), (38). Dabei ist ein Zusammenhang mit der Anzahl der hydraulischen Bremsvorgänge festzustellen: Je höher die Anzahl der Bremsvorgänge (trotz Rekuperation), desto größer ist das relative Einsparpotenzial durch den Bremsbelag (Tabelle 44).

Die Reduktion der Emissionen ist auf die durch den Belag veränderten Eigenschaften der Bremsscheibe zurückzuführen. Diese bestimmen das Reibungsverhalten, das durch erhöhte Reibwerte (Tabelle 35) sichtbar wird. Andere Eigenschaften wie die Festigkeit und Widerstandsfähigkeit der Oberfläche sorgen direkt für geringere Emissionen bei gleicher Bremskraft.

3.6.2.1.6 Morphologische Untersuchung

Im Kaskadenimpaktor ELPI+ werden die Partikel anhand ihres aerodynamischen Durchmessers separiert auf 14 Impaktorstufen abgeschieden. Auf Abbildung 286 sind Partikel unterschiedlicher Impaktorstufen auf Aluminiumsubstrat bei 10.000-facher Vergrößerung dargestellt. Der mittlere aerodynamische Partikeldurchmesser liegt bei 0,03 μm für Stufe 3, 0,157 μm für Stufe 6, 0,383 μm für Stufe 8 und bei 1,64 μm bei Stufe 11. Die Größenunterschiede der gesammelten Partikel sind in den Aufnahmen gut ersichtlich.

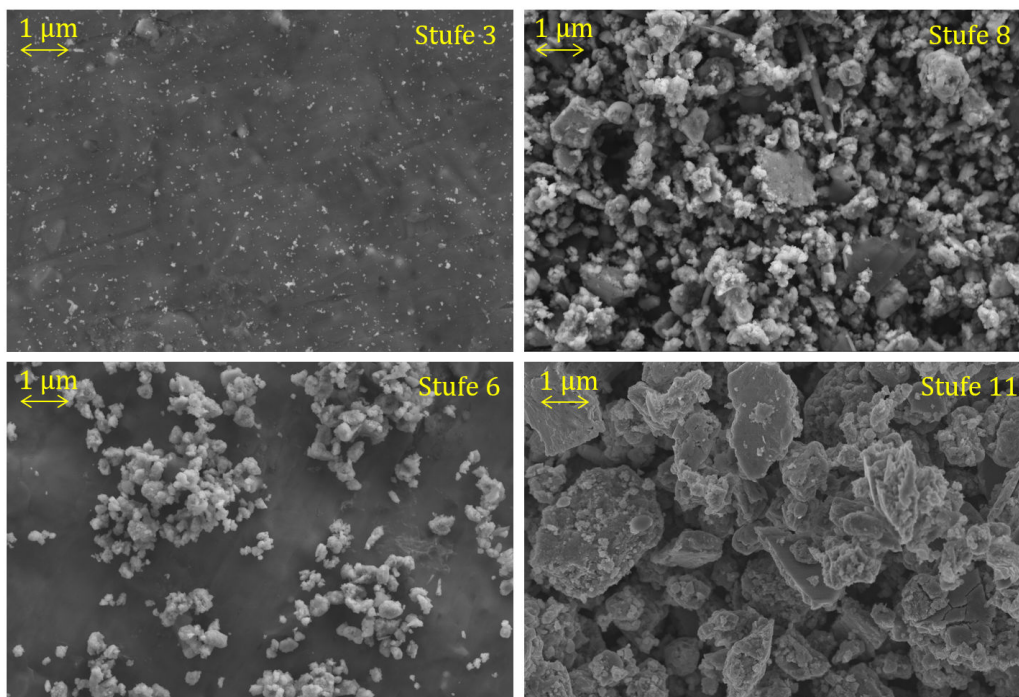


Abbildung 286: Elektronenmikroskopaufnahmen luftgetragener Partikel aus Bremsabrieb bei 10.000-facher Vergrößerung.

Bei höherer Auflösung wie auf Abbildung 287 wird zudem sichtbar, dass sich die Morphologie der Partikel stark unterscheidet. Die Partikel in Stufe 6 sind rund und porös. Dies deutet auf ein Agglomerat aus kleineren Partikeln hin, während die Partikel in Stufe 11 scharfe Kanten aufweisen. Letztere deuten auf die Entstehung durch mechanischen Abrieb hin.

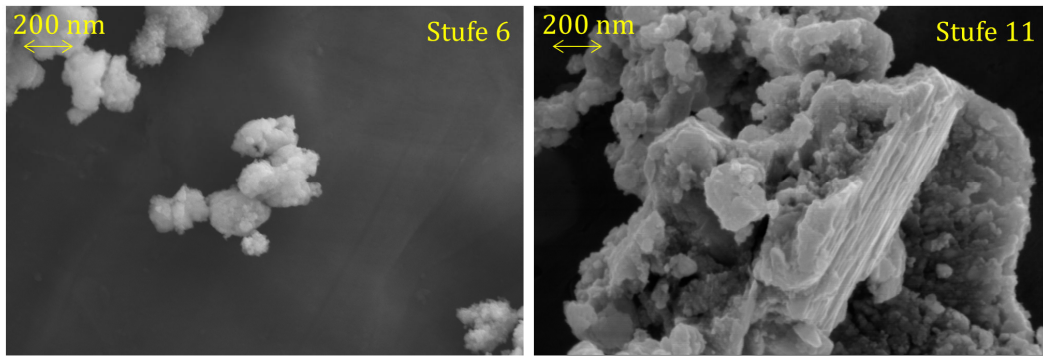


Abbildung 287: Elektronenmikroskopaufnahmen luftgetragener Partikel aus Bremsabrieb bei 50.000-facher Vergrößerung.

3.6.2.1.7 Emittierte Partikelmasse (PM) am Komponentenprüfstand

Bei Untersuchung der Bremse des BMWi3 auf dem Komponentenprüfstand wurde, ergänzend zu den Messungen der Partikelanzahl auf dem Rollenprüfstand, zusätzlich die emittierte Masse der luftgetragenen Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser unter 2,5 μm (PM2.5) bzw. 10 μm (PM10) bestimmt.

Die Partikelmasse wurde für PM2.5 und PM10 jeweils mit einem Zyklon bei einem Volumenstrom von 42 l/min bzw. 65 l/min auf Filtern abgeschieden. Die Filter wurden vor und nach der Messung bei gleicher Temperatur und Luftfeuchtigkeit gewogen. Zur Bestimmung der Emissionsfaktoren wurde die Massendifferenz der Filter auf den Gesamtfluss im Belüftungssystem der Bremse von 1000 l/min hochgerechnet und über die Strecke des Fahrzyklus normiert.

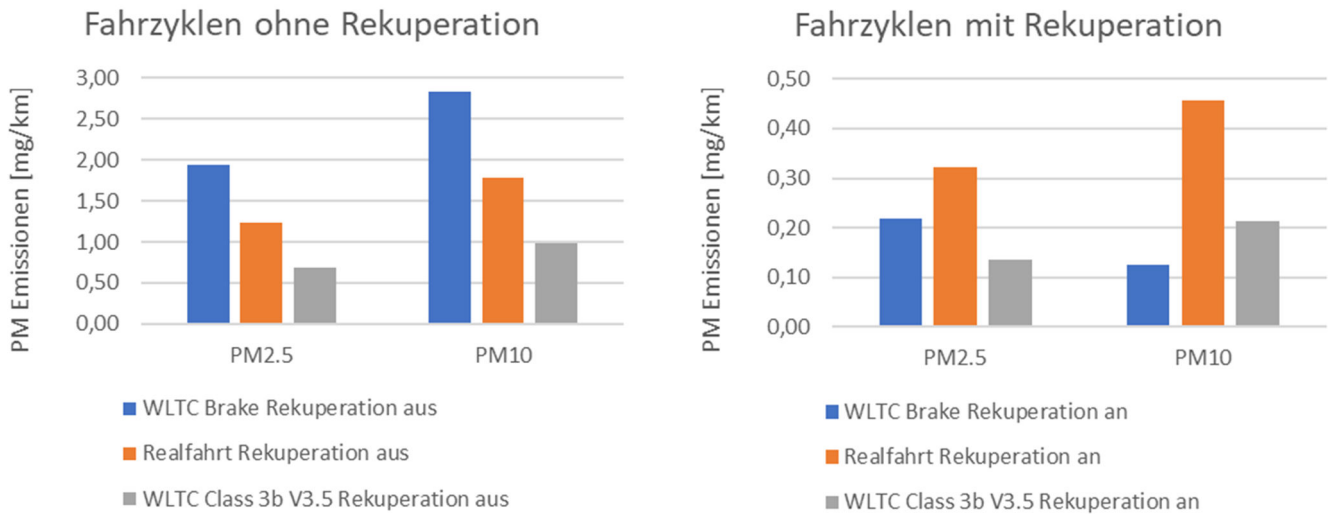


Abbildung 288: Einfluss der Fahrzyklen auf die PM2.5 und PM10 Emissionen pro Bremse mit Rekuperation (links) und ohne Rekuperation (rechts).

In Abbildung 288 werden die PM-Emissionen bei den verschiedenen Fahrzyklen – links ohne Rekuperation und rechts mit Rekuperation – dargestellt. Bei Massenbestimmung über Filterabscheidung werden ohne Rekuperation beim WLTC Brake ebenfalls, wie auch bei der Partikelanzahlkonzentrationsbestimmung von luftgetragenen Emissionen am meiste Partikelmasse emittiert, gefolgt von der Realfahrt (RDE) und dem WLTC Class 3b.

Bei Messungen mit Rekuperation wurde hier für die RDE-Fahrt die meisten Emissionen bestimmt. Aufgrund der geringen Masse sind die Tests hier, im Gegensatz zur Partikelanzahlbestimmung, vor allem bei Messungen mit Rekuperation mit einer hohen Messgenauigkeit behaftet. Für verlässlichere Aussage würde es an

dieser Stelle einer größeren Wiederholung bedürfen um statistischen methoden anwenden zu können. Dennoch geben die hohen Werte der Realfahrt einen Hinweis darauf, dass für die Untersuchung der Bremsemissionen eines Elektrofahrzeugs mit Rekuperation auch realitätsnahe Fahrzyklen notwendig sind. Für den Vergleich verschiedener Bremsen ist die Verwendung des gleichen Fahrzyklus unumgänglich.

Generell lässt sich sagen, dass auch bei der Partikelmassenbestimmung für alle Fahrzyklen, wie auch bei der größenverteilten Messung der Partikelanzahl auf dem Rollenprüfstand (§ 3.6.2.1.4), eine deutliche Reduktion der Partikelmassen zu sehen ist. Die Wahl des Fahrzyklus hat aber einen deutlichen Einfluss auf die Emissionsfaktoren.

Auf Abbildung 289 sind die emittierten luftgetragenen PN-Massen beim Fahrzyklus WLTC Brake dargestellt. Diese geben Hinweise auf das Emissionsminderungspotential bezüglich Partikelmasse des Bremsabriebs. Die Rekuperation sorgt für eine Emissionsminderung von 97 % für PM_{2,5} und PM₁₀. Durch die Hartmetallbeschichtung sinken die Bremsemission um 90 % für PM_{2,5} und um 92 % für PM₁₀.

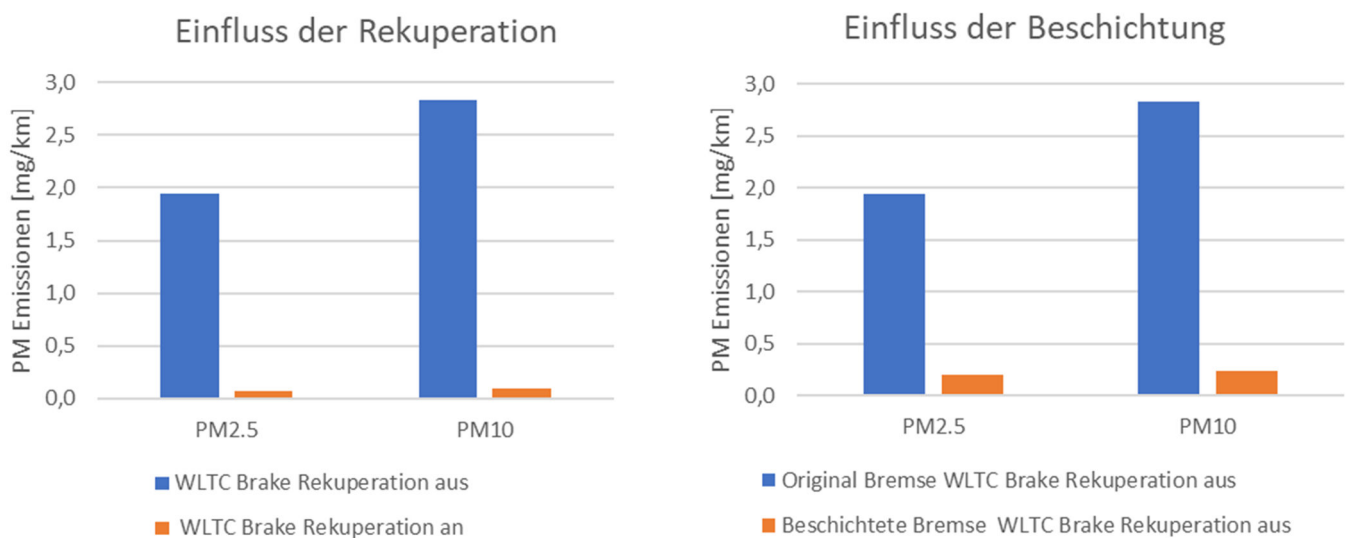


Abbildung 289: Einfluss der Rekuperation (links) und der Bremsbeschichtung (rechts) auf die PM_{2,5} und PM₁₀ Emissionen pro Bremse beim WLTC Brake Zyklus.

3.6.2.2 Vermessung der Reifenemissionen

Zur Emissionsmessung ist der Reifen mit einem Gehäuse versehen, wobei die Einhausung zur Kontaktfläche des Reifens offen liegt (vgl. § 3.5.1). Der Versuchsaufbau ist auf Abbildung 290 dargestellt. Da es sich um ein teil-geschlossenes System handelt, wurde zusätzlich zur Hauptprobenahme redundant auch die Hintergrundkonzentration außerhalb der Einhausung gemessen.

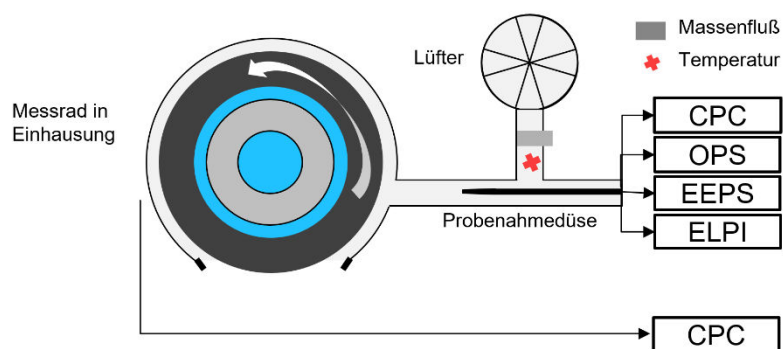


Abbildung 290: Messaufbau zur Untersuchung der Reifenemissionen.

Zu Beginn der Vermessung wurden die idealen Probenahmebedingungen am Reifen bestimmt und eingestellt. Die ursprünglich geplante Durchströmung des Reifens mit gefilterter Luft war nicht realisierbar, da ein Überdruck im System auch zu Verlusten der emittierten Reifenpartikel führt. Durch das Einsaugen der Partikel aus der Einhausung mit 130 m³/h, lässt sich eine stabile und reproduzierbare Probenahme umsetzen. Die Probenahmedüse wurde diesem Volumenstrom angepasst. Der Durchmesser des Probenahmedüse wurde so gewählt, dass die Strömungsgeschwindigkeit der Probenahmeleitung der Geschwindigkeit im Inneren des Gehäuses entsprach, um eine repräsentative, isokinetische Probenahme zu gewährleisten.

3.6.2.2.1 Entstehung und Charakterisierung der Partikelemissionen

Die Reifenemissionen wurden zunächst anhand eines einfachen Testzyklus, ZEDU-Accelerate (Abbildung 232), untersucht. Die emittierten Partikel werden dabei aus der Differenz zwischen Gesamt- und Hintergrundkonzentration bestimmt. Wie auf Abbildung 291 dargestellt, entstehen Reifenpartikel insbesondere während der Beschleunigung des Fahrzeugs, aber auch während den Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit. In beiden Fällen steigt die emittierte Partikelkonzentration mit der Fahrgeschwindigkeit resp. den wirkenden Kräften.

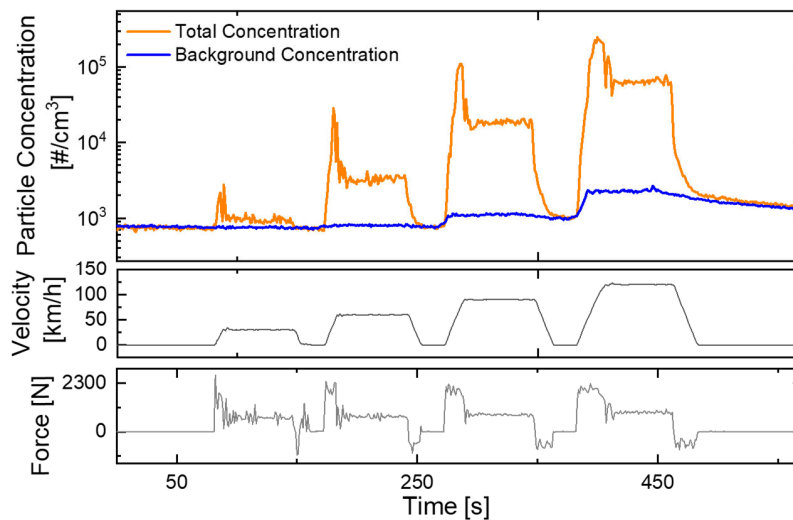


Abbildung 291: Partikelanzahlkonzentration bei einem Testzyklus in logarithmischer Darstellung.

Wie auf Abbildung 292 dargestellt, sind zwei Partikelgrößenbereiche sichtbar: Partikel zwischen 330 und 550 nm, sowie ultrafeine Partikel mit einem Durchmesser von ca. 10 nm.

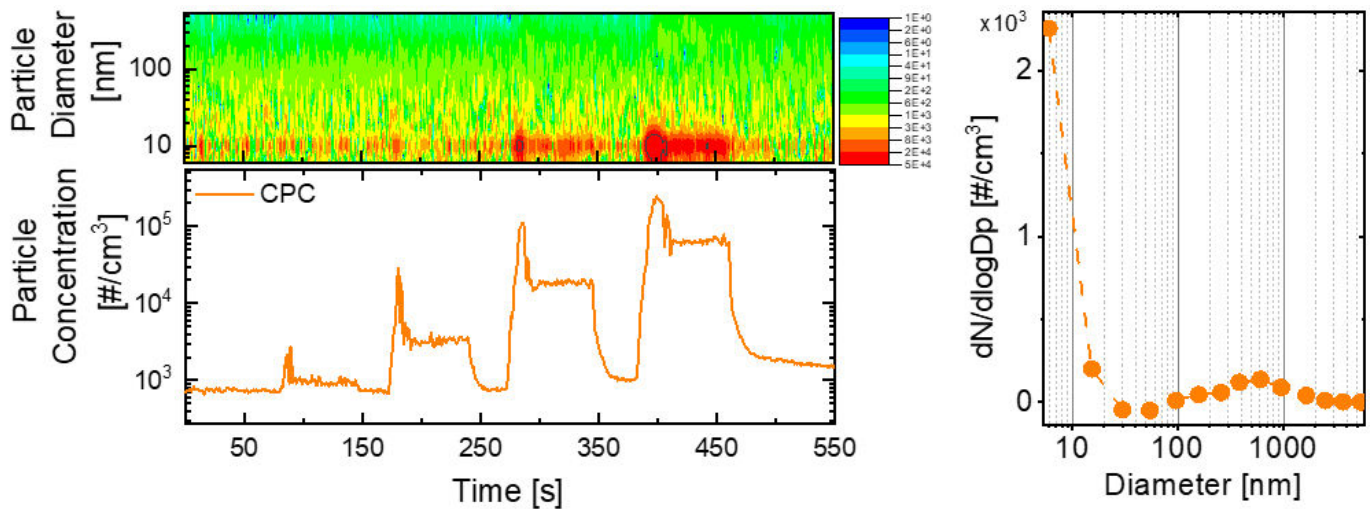


Abbildung 292: Partikelgrößenverteilung der Reifenemissionen.

3.6.2.2.2 Vergleich Straße und Rollenprüfstand

Bei der Straßenfahrt sind sehr hohe Emissionswerte gemessen worden. Es war es bei diesen Messungen trotz zweiter Probenahme und Vermessung der Emissionsgrößenbereiche, nicht möglich die Reifenemissionen von der stark schwankenden durch andere Verkehrsteilnehmer verursachten Hintergrundkonzentration eindeutig zu trennen. Der Vergleich mit den Ergebnissen des gleichen Fahrzyklus auf dem Rollenprüfstand gemessen und der Messungen auf der Straße zeigt, dass die Reifenemissionen ca. zwei Größenordnungen unterhalb der Umgebungskonzentration liegen (Abbildung 293).

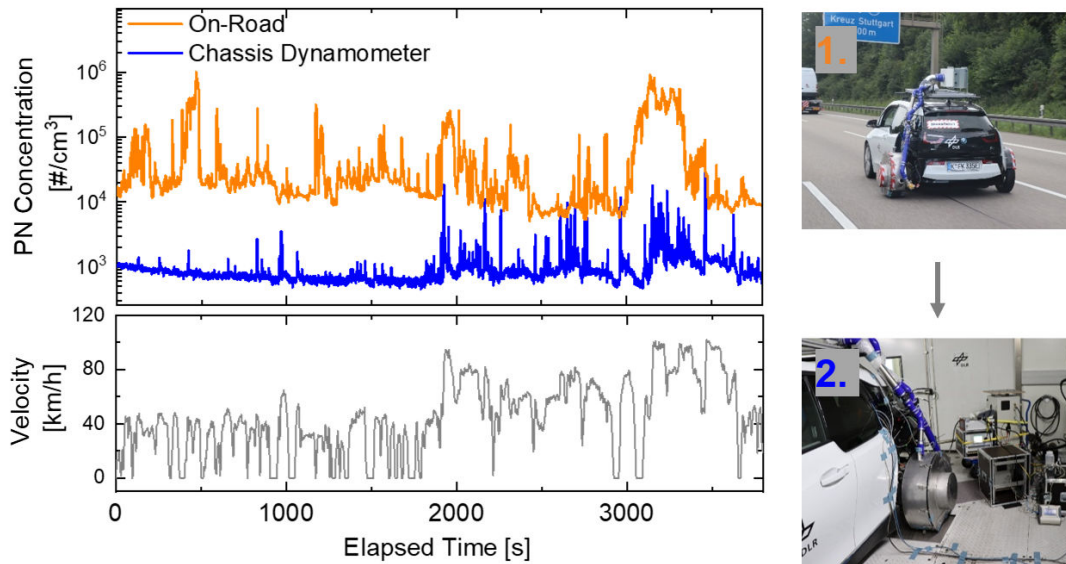


Abbildung 293: Vergleich der Partikelanzahlkonzentration bei der Straßenfahrt und dem gleichen Fahrprofil auf dem Rollenprüfstand.

3.6.2.2.3 Testgelände

On-board Messungen auf einem Testgelände zeigen eine gute Übereinstimmung mit Ergebnissen am Rollenprüfstand in Menge und Größenverteilung der Partikelemissionen. Hier sind die Hintergrundkonzentrationen konstanter und geringer, als auf der Straße.

Hier durchgeführte Bremsstestzyklen wie in Abbildung 294 zeigen, dass insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten eine klare Differenzierung zwischen Hintergrundkonzentration und Reifenemissionen möglich ist. Weiterhin gibt es einen starken Emissionspeak nach Stillstand des Fahrzeugs, der bei Tests auf dem Rollenprüfstand nicht sichtbar war. Es wird vermutet, dass die Ursache hierfür Emissionsaufwirbelung der zwischen Reifen und Straßenbelag eingeschlossenen Partikel und / oder Aufwirbelung der Ablagerungen auf dem Reifen / im Reifenprofil die beim erneuten Beschleunigen freigesetzt werden sein könnte.

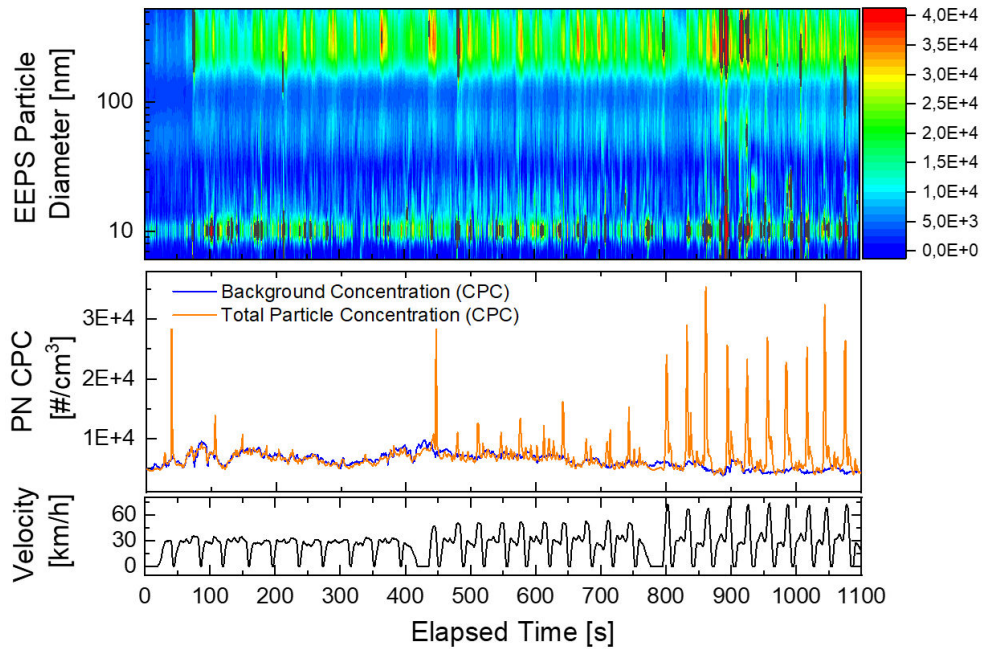


Abbildung 294: Bremsstestzyklus auf dem Testgelände.

Bei Kurvenfahrten auf dem Testgelände (siehe Abbildung 295), die nicht auf dem Rollenprüfstand simuliert werden können, treten zusätzliche ultrafeine Partikelemissionen in einem Größenbereich zwischen 40 und 100 nm auf. Insbesondere bei der Kurvenfahrt mit 30 km/h, wo starke Querbeschleunigung auftreten, entstehen hohe Partikelemissionen.

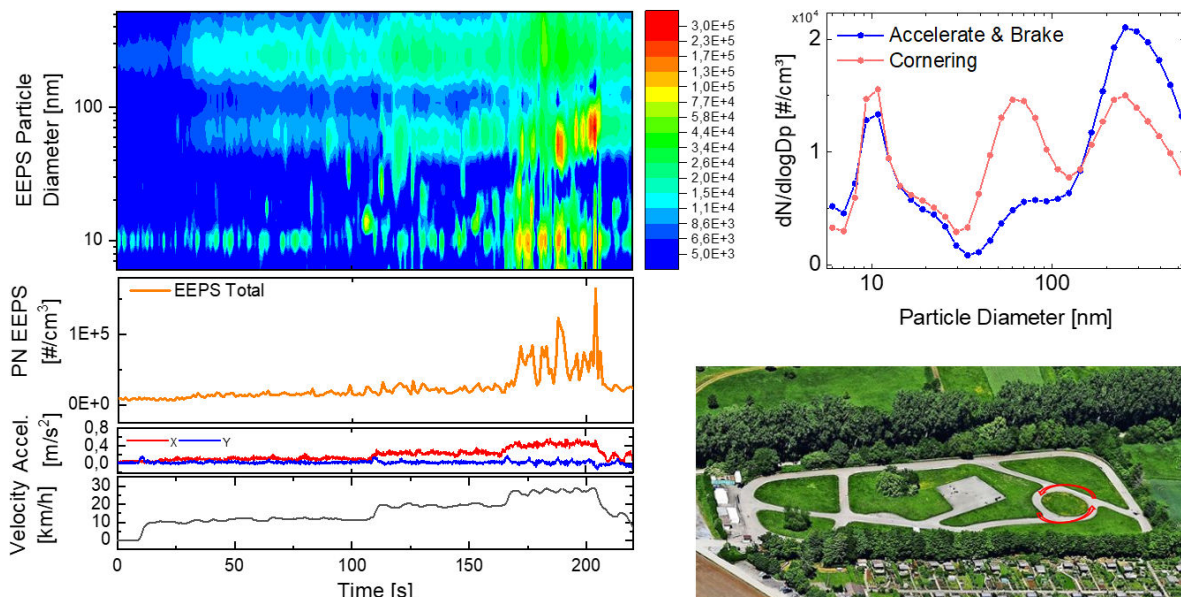


Abbildung 295: Partikelanzahlkonzentration und Größenverteilung bei Kurvenfahrten auf einem Testgelände. (Bildquelle: <https://verkehrsuebungspla.wixsite.com/msca>)

3.6.3 Emissionen des ZEDU1-Demonstrators

3.6.3.1 Probenahme

Für die Charakterisierung der Reifenemissionen am ZEDU1-Demonstrator standen vier verschiedene Probenahmestellen zur Verfügung.

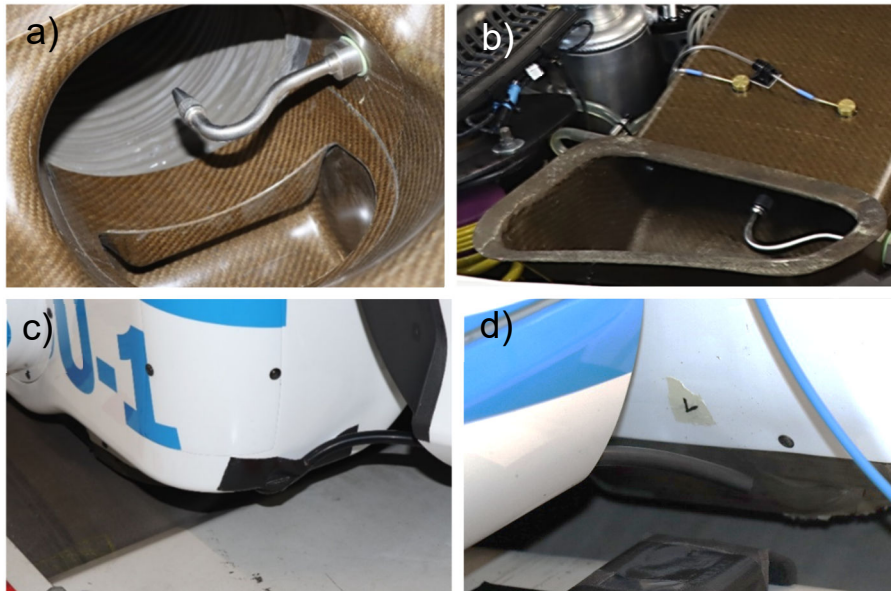


Abbildung 296: Die vier Probenahmestellen am ZEDU-Demonstrator. a): Probenahme vor dem Filter (HP1). b): Probenahme nach dem Filter (HP2). c): Probenahme vor der Reifeneinhausung (NP1). d): Probenahme nach der Reifeneinhausung (NP2).

Diese wurden während der Tests am Rollenprüfstand sowie in Boxberg mit unterschiedlicher Messtechnik beprobt. Die Probenahmen sind auf Abbildung 296 zu sehen. Die erste Hauptprobenahme (HP1) befindet sich im Absaugkanal vor dem Filter. Über einen düsenbestückten Schwanenhals kann die Luft durch eine Leitung ins Fahrzeuginnere gesaugt werden, wo sie an die entsprechende Messtechnik angeschlossen ist. Die zweite Hauptprobenahme (HP2) ist ebenfalls in Form eines Schwanenhalses nach dem Filtersystem im Luftauslass unter der Motorhaube angebracht. Für die beiden Nebenprobenahmen (NP1 & NP2) ist jeweils vor und hinter der Reifeneinhausung eine Leitung ins Fahrzeuginnere verlegt, welche außen individuell an der Radeinhausung oder dem Chassis positioniert werden kann. Mit diesen wurden nichtaufgenommene Partikel bzw. die Hintergrundkonzentration bestimmt.

3.6.3.2 WLTC – Vergleich von Rollenprüfstand mit dem Testgelände Boxberg

Um eine vergleichende Charakterisierung der Partikelemissionen zu erhalten wurde sowohl am Rollenprüfstand als auch in Boxberg ein WLTC gefahren. Die Ergebnisse sind auf Abbildung 297 dargestellt. Das untere Diagramm zeigt die vom Fahrzeug aufgezeichnete Geschwindigkeit in km/h über den gesamten Zyklusverlauf. Beide Fahrverläufe sind sehr ähnlich, sodass hier auch die gemessenen Emissionen miteinander verglichen werden können. Im mittleren Diagramm sind die gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen in $\#/cm^3$ angegeben. Beide Male wurden diese mit einem CPC an HP1 gemessen. Die gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen am Rollenprüfstand lassen sich gut mit dem aufgezeichneten Geschwindigkeitsprofil korrelieren. Die Hintergrundkonzentration liegt hier bei etwa 500–1000 $\#/cm^3$ und damit deutlich unter dem Niveau

der Umgebungspartikelkonzentration auf dem Testgelände in Boxberg (4000 \#/cm^3). Dies führt dazu, dass die Reifenemissionen in Boxberg meist von der hohen Hintergrundkonzentration überlagert wurden und nur bei den beiden höheren Geschwindigkeitsabschnitten eindeutig über der Hintergrundemission liegen (ab ca. 1200 s). Im Unterschied zu dem WLTC am Rollenprüfstand wurde die Fahrt in Boxberg außerdem mit einer wie unter TP4 beschriebenen dynamischen Lüfterregelung durchgeführt. Dies hat auch Einfluss auf die gemessene Partikelanzahlkonzentration, wie an einigen Minima im Kurvenverlauf (blaue) zu erkennen ist.

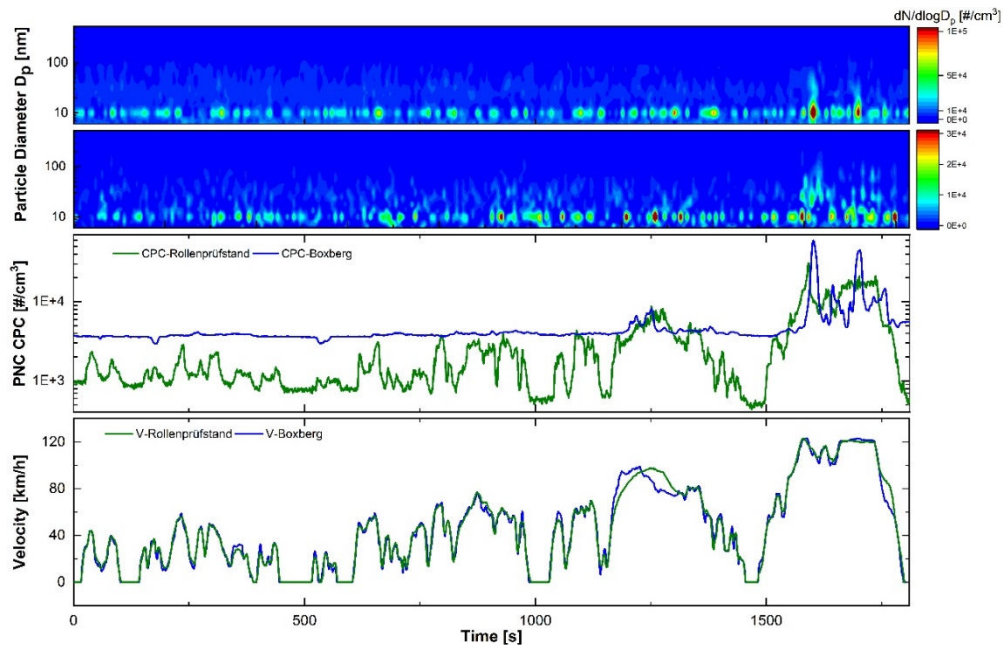


Abbildung 297: Vergleich von Fahrttests am Rollenprüfstand und auf dem Testgelände in Boxberg.

Die gemessenen Maximalkonzentrationen auf dem Testgelände liegen bei ca. $6E+4 \text{ \#/cm}^3$ und sind damit doppelt so hoch wie am Rollenprüfstand ($3E+4 \text{ \#/cm}^3$). Dies lässt sich zum einen durch die deutlich höhere Anzahl an sedimentierten Partikeln auf der Fahrbahn begründen, welche während der Fahrt aufgewirbelt und eingesaugt werden (siehe Filtergewicht Boxberg vs. Rollenprüfstand). Zum anderen war die Temperatur der Außenluft und der Fahrbahn deutlich höher, als im klimatisierten Prüfstand, was ebenfalls zu höheren Emissionen führt. Diese unterschiedlich hohen Emissionen spiegeln sich auch in den EEPS Messungen wieder, welche auf Abbildung 297 auf den zwei oberen Konturplots zu sehen sind, so wie in der gravimetrischen Reifenabriebbestimmung (§ 3.5.3.5). Die Maximalkonzentration liegt für die Boxbergfahrt im Bereich $1E+5$ (oberer Plot), am Rollenprüfstand wurden Konzentrationen im Bereich von $3E+4$ gemessen. Die Hauptmode der Partikelgrößen liegt sowohl in Boxberg als auch auf dem Rollenprüfstand bei etwa 10 nm. Besonders bei den hohen Konzentrationen lassen sich auch größere Partikel in einem Bereich bis ca. 100 nm beobachten. Möglicherweise lösen sich bei höheren Geschwindigkeiten, da hier höhere Kräfte wirken, vermehrt einzelne Stücke aus dem Reifen (tire scrubs) wodurch eine Emissionswolke mit etwas größeren Partikeln gebildet wird.

3.6.3.3 Filtereffizienz

Um die Wirksamkeit des verbauten Filtersystems zu validieren wurden die gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen jeweils vor und nach dem Filter (HP1 & 2) verglichen. Hierfür wurden in Boxberg verschiedene konstante Geschwindigkeiten (110, 90, 70, 50 km/h) gefahren. Die beiden Kurven sind auf Abbildung 298 im

oberen Plot dargestellt (blau & grün). Neben dem Geschwindigkeitsprofil, im unteren Teil der Abbildung (schwarz), ist auch der Volumenfluss der Lüfteranlage dargestellt (graue Kurve). Der Volumenstrom bleibt über alle Geschwindigkeitsbereiche weitestgehend konstant.

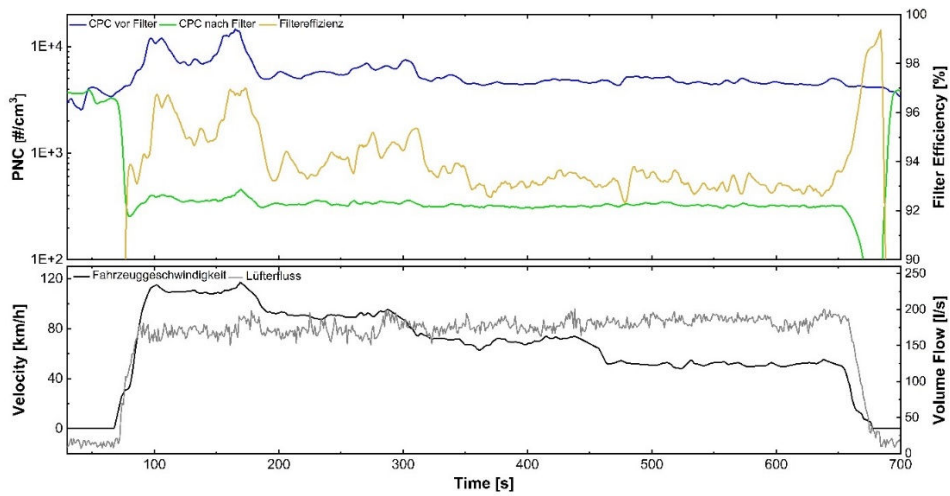


Abbildung 298: Vergleich der Reifenemissionen vor und nach dem Filter und Filtereffizienz bei unterschiedlicher Fahr- geschwindigkeit.

Die Konzentrationen nach dem Filter sind für alle Geschwindigkeiten signifikant geringer als vor dem Filter und liegen im Bereich 200 – 300 #/cm³. Um die Effizienz des Filtersystems evaluieren zu können wurde aus dem Quotienten von Partikelanzahlkonzentration nach und Partikelanzahlkonzentration vor dem Filter die Filtereffizienz berechnet. Diese liegt für alle Geschwindigkeits- und Konzentrationsbereiche deutlich über 90 % und ist als orangefarbene Kurve im oberen Plot dargestellt (rechte Y-Achse). Höhere Konzentrationen, wie bei 110 km/h sind zwar nach dem Filter noch deutlich zu erkennen, allerdings hält das Filtersystem bei höheren Konzentrationen prozentual mehr Partikel zurück als bei niedrigeren.

3.6.3.4 Effizienz der Radeinhausung

Um die Effizienz der Absaugung zu validieren wurden in Boxberg ebenfalls Konstantfahrten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt. Die Partikelanzahlkonzentrationen wurden jeweils vor dem Filter, vor dem Reifen (NP1) sowie nach der Reifeneinhausung (NP2) gemessen. Die Ergebnisse sind auf Abbildung 299 (NP1) und Abbildung 300 (NP2) dargestellt. Es ist zu sehen, dass vor dem Reifen kein signifikanter Anstieg der Partikelkonzentrationen zu beobachten ist (grün), während diese vor dem Filter bei 110 km/h bei etwas über 1E+4 #/cm³ liegen (blau).

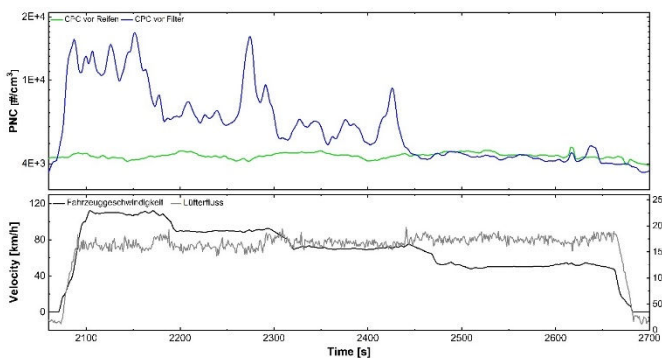


Abbildung 299: Vergleich der Reifenemissionen vor der Radeinhausung (grün) und vor dem Filter (blau).

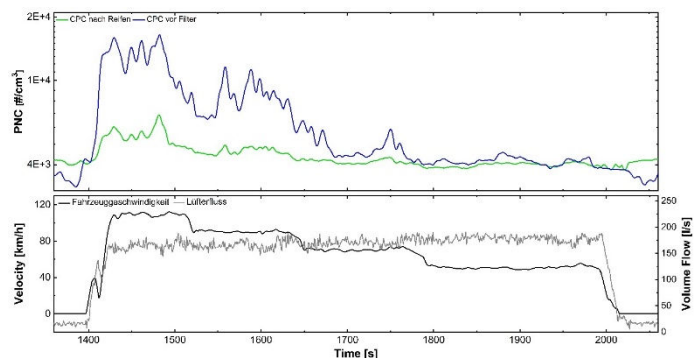


Abbildung 300: Vergleich der Reifenemissionen hinter der Radeinhausung (grün) und vor dem Filter (blau).

Hinter der Reifeneinhausung (Abbildung 300) bei 110 km/h liegt die Partikelkonzentration um $6E+3 \text{ \#/cm}^3$ (grün) und hebt sich deutlich von der Hintergrundkonzentration ab, welche bei ca. $4E+3 \text{ \#/cm}^3$ liegt. Die Konzentration vor dem Filter (blau) ist vergleichbar, mit der Messung auf Abbildung 299.

Da die meisten Reifenpartikel in Fahrtrichtung hinter dem Reifen entstehen bzw. in die Umgebung abgegeben werden, ist die Beobachtung der höheren Konzentration hinter dem Rad durchaus plausibel. Zieht man die entsprechenden Hintergrundkonzentrationen noch von den beiden CPC Kurven ab so treten in Fahrtrichtung vor der Radeinhausung praktisch keine Partikel in die Umwelt aus. Hinter der Radeinhausung sind bei 110 km/h nur gut 10 % der Partikelanzahlkonzentration zu messen, welche vor dem Filter auftreten, bei niedrigeren Geschwindigkeiten ist dieser Wert noch geringer. So sind dies bei der Geschwindigkeit von 90 km/h lediglich in der Größenordnung von 5 % und bei Geschwindigkeiten unter 60 km/h so gut wie keine.

3.6.3.5 Bremsemissionen

Um die Bremsemissionen des Demonstrators zu untersuchen und die Einsparung durch die Lamellenbremse zu validieren wurden neben Fahrten mit dieser Lamellenbremse auch einige Tests unter Verwendung der zuschaltbaren Scheibenbremse an der Vorderachse durchgeführt. Die Zylinder dieser Scheibenbremse waren bis zum Umschalten etwas zurückgedrückt, so dass es während des Fahrtbetriebs mit gekapselter Lamellenbremse zu keinerlei Emissionen der Scheibenbremse kam.

Für die Validierung der Scheibenbremse wurde der Testzyklus „ZEDU-Brake“ gefahren. Dieser besteht aus fünf Beschleunigungsabschnitten auf 80 km/h, einer kurzen Konstantphase und einer vollständigen Bremsung (Abbildung 232). Vom ersten bis zum fünften Abschnitt nimmt die Kraft dieser Verzögerungen jeweils zu, sodass die erste Bremsung die schwächste, die letzte die stärkste ist. Der Vergleich beider Bremsen ist auf Abbildung 301 zu sehen.

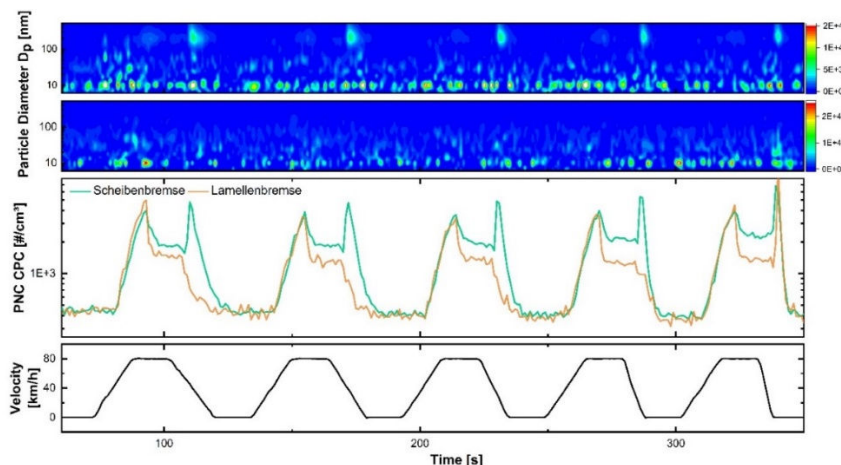


Abbildung 301: Partikelanzahlkonzentrationen an HP1 gemessen. Dargestellt sind: Geschwindigkeit (schwarz unten), Partikelemissionen mit Scheibenbrems (grün mitte) und mit Lamellenbremse (orange mitte). Darüber die Konturplot der Größenverteilung. Hier korrespondiert der obere mit der grünen Kurve und der untere mit der orangenen Kurve.

Die orangefarbene Kurve zeigt die Partikelanzahlkonzentrationen an HP1 (Abbildung 296) unter Verwendung der Lamellenbremse. Zunächst ist bei allen fünf Teilzyklen ein Beschleunigungsspeak zu beobachten, welcher während der Konstantphase in einen leicht abfallenden Konzentrationsverlauf übergeht. Während des

Bremsvorganges fällt die Kurve wieder schnell auf die ursprüngliche PNC zurück. Mit zunehmender Stärke der Verzögerung nimmt auch die Steigung des Kurvenabfalls zu. Lediglich bei der letzten, stärksten Bremsung ist ein deutlicher Peak zu erkennen, welcher auf eine erhöhte Emission von Reifenpartikeln hinweist. Die EEPS Daten legen eine sehr ähnliche Größenverteilung wie bei den Beschleunigungspeaks nahe. Unterer Konturplot zeigt Messungen mit der Lamellenbremse. Hier treten hauptsächlich Partikel bis etwa 100 nm auf. Der obere Plot zeigt Messungen mit der Scheibenbremse. Bei den Emissionsmessungen mit der Scheibenbremse ist zunächst ebenfalls ein Beschleunigungspeak zu beobachten (grüne Kurve). Der Verlauf während der Konstantphase ist höher als bei dem Zyklus mit Lamellenbremse, sodass hier ähnlich wie beim Referenzfahrzeug auch schon Bremspartikel bei konstanter Geschwindigkeit emittiert werden. Während der Bremsphasen ist bei allen Bremsungen ein Emissionspeak zu sehen, welcher bei den Verzögerungen mit Lamellenbremse nicht vorhanden ist. Der Emissionspeak bei der letzten Bremsung (orange mitte) wurde, auf Grund der starken Verzögerung, durch Reifenemissionen erzeugt. Dass es sich bei diesen Peaks um Bremsemissionen handelt lässt sich auch an der Größenverteilung erkennen. Abbildung 301 zeigt im oberen Größenverteilungsplot Partikel im Größenbereich bei ca. 200 nm welche dem Bremsereignis zugeordnet sind¹. Diese treten bei Messungen mit der Lamellenbremse (darunterliegender Größenverteilungsplot, korreliert mit der orangenen Emissionskurve darunter) nicht auf.

Da die Lamellenbremse keinen Beitrag zu den Emissionen leistet sind bei dieser Messung ausschließlich luftgetragene Reifenabriebpartikel zu verzeichnen. Die Differenz zwischen den Messungen mit der Lamellenbremse und der Messung mit der Scheibenbremse im gleichen Fahrprofil weisen den zusätzlichen Beitrag an Partikelemissionen der durch die Scheibenbremse generiert wird auf. Damit zeigen diese Messungen, dass unter Verwendung der Lamellenbremse bis zu 30 % an Partikelemissionen eingespart wird.

3.6.3.6 Morphologische und chemische Eigenschaften der Reifenpartikel

Während der Fahrttests auf dem Rollenprüfstand wurden Reifenpartikel mit einem Niederdruckimpaktor (ELPI+) größenselektiv auf Foliensubstraten gesammelt. Diese wurden im Nachgang mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskopes (REM) auf ihre morphologischen Eigenschaften untersucht.

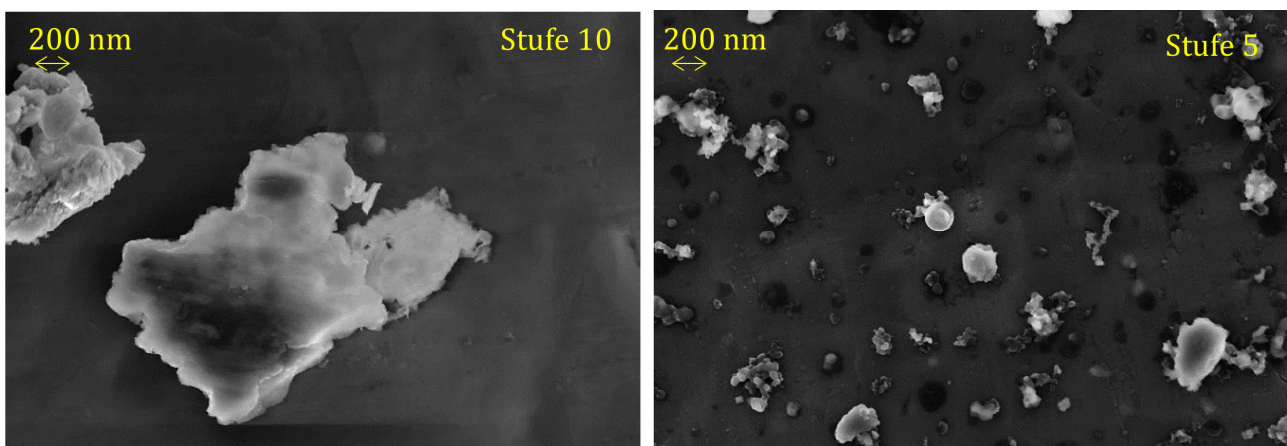


Abbildung 302: Gesammelte Reifenpartikel unter dem REM bei 20.000-facher Vergrößerung. Links ist ein größeres plättchenförmiges Partikel zu sehen, rechts kleinere runde Partikel.

¹ Im Projekt wurden, im Rahmen der größenverteilten Partikelbestimmung bei Abrieben, die Bremspartikel mit einem Durchmesser von 220 nm, sowie im ultrafeinen Bereich von 10 nm – 20 nm identifiziert und die luftgetragene Emissionen des Reifens weisen einen Durchmesser von ca. 400 nm und 5 nm – 10 nm auf.

Des Weiteren wurde die chemische Elementzusammensetzung der Partikel mittels Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) ermittelt. Zwei unterschiedliche Größenklassen sind in Abbildung 302 dargestellt. Links ist ein ca. 2 μm großes plättchenförmiges Partikel mit leicht ausgefranzten Kanten zu erkennen. Auf dem rechten Abbildungsteil sind deutlich kleinere etwa 200–300 nm große Teilchen zu sehen, diese haben eher rundliche Formen.

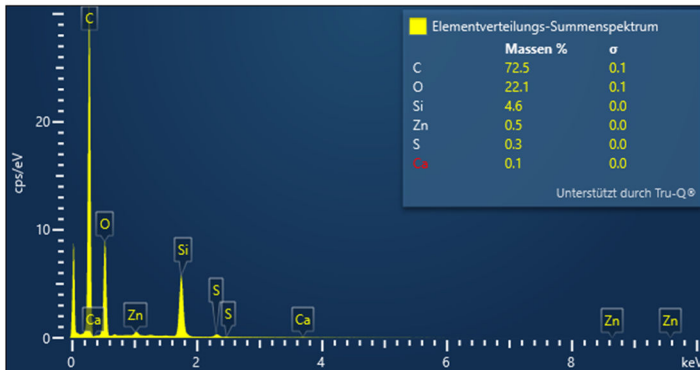


Abbildung 303: EDX-Spektrum des reinen Demonstrator-Reifens von Continental

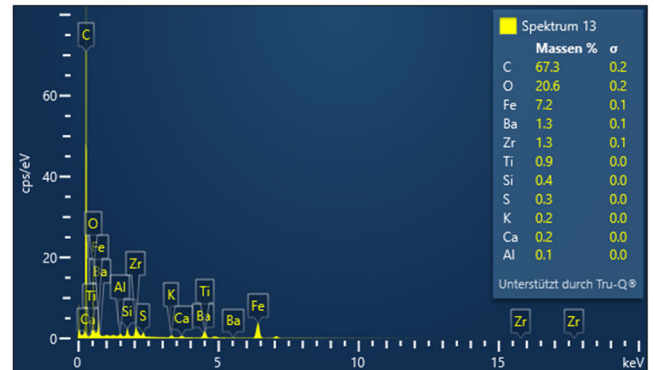


Abbildung 304: EDX-Spektrum einer Reifenprobe, welche während Fahrttests auf dem Rollenprüfstand gesammelt wurde.

Um Elemente eindeutig dem Reifen zuzuordnen wurde eine Probe eines zermahlene Reifens untersucht. Das korrespondierende Spektrum ist auf Abbildung 303 zu sehen und zeigt überwiegend Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Silizium (Si) und Spuren von Zink (Zn) sowie Schwefel (S).

EDX-Spektren von Reifenproben, welche während Fahrttests auf dem Rollenprüfstand gesammelt wurden zeigen neben diesen Elementen auch einige andere wie Eisen (Fe), Barium (Ba), Zirkonium (Zr), Titan (Ti) und einige weiteren Elemente in geringen Konzentrationen. Ein Spektrum dieser Reifenprobe ist auf Abbildung 304 zu sehen. Da diese Proben eine Mischung des Reifenabriebes und Material von der Rollenoberfläche darstellen (s. a. § 3.5.3) wurde eine Probe der Oberfläche der Rolle entnommen und untersucht. Die Oberfläche dieser Probe besteht aus kleinen Kügelchen, welche überwiegend Eisen (Fe) sowie Chrom (Cr) enthalten (siehe Abbildung 305). Insbesondere der hohe Eisenanteil in den Reifenproben lässt sich durch Abrieb der Rollenoberfläche erklären, wenn auch nur in einigen Proben Chrom vorhanden ist. Zusätzlich ist Material auf dieser Oberfläche vorhanden, welches von vorherigen Fahrttests, z.B. durch Bremsen abgelagert wurde.

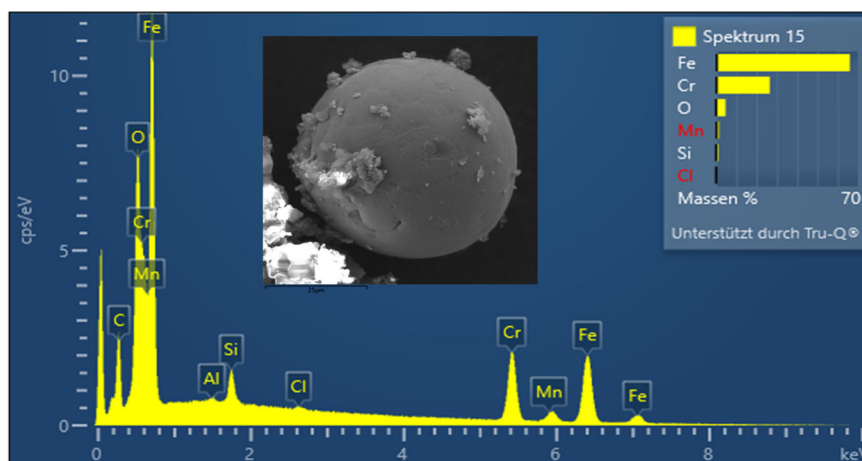


Abbildung 305: EDX-Spektrum einer Probe von der Rollenoberfläche, welche aus kleinen Kügelchen, wie abgebildet, besteht.

3.6.4 Emissionen der Hybridbremse

3.6.4.1 Versuchsaufbau und Probenahme

Der Partikelmessaufbau für die Untersuchung des Bremsabriebs der Hybridbremse ist so konzipiert, dass er einen breiten Bereich von Partikelgrößen von 5 nm bis 10 µm abdeckt. Um den gesamten Größenbereich zu vermessen, wurden mehrere Partikelmessgeräte ausgewählt und in den Aufbau integriert.

Das Schema des kompletten Aufbaus ist auf Abbildung 306 dargestellt. Es zeigt, wie saubere Luft in die Hybridbremse eingeleitet wird und die Probenahmeleitung zwischen der Hybridbremse und dem Partikelmessaufbau angeschlossen ist. Der Versuchsaufbau bezüglich der Bremsparameter ist in Abschnitt 3.3.8. genauer beschrieben. Die Hybridbremse verfügt über 6 baugleiche Bremsbeläge, jeweils 3 an einer Seite des Stators. Die Bremsbeläge sind auf Kraftsensoren aufgebracht, welche mit Hilfe von Dehnmessstreifen die Kraft auf die Bremsbeläge messen. Ebenso sind an den zur Probenentnahme am nächsten liegenden Bremsbeläge (Belag 3 und 6, siehe Abbildung 127) seitlich Thermoelemente aufgeklebt. Diese dienen zur Temperaturbestimmung und stellen eine weitere Größe zur Interpretation der Emissionsdaten dar.

Um die beim Bremsen entstehenden Partikel aufzufangen und zu den Messinstrumenten zu transportieren ist eine Bremseneinhausung mit Belüftungssystem notwendig. Das Bremsengehäuse ist aus Gusseisen gefertigt. Zur Abdichtung zwischen der montierten Bremse und dem Gehäuse wird eine Gummidichtung verwendet. Um die Partikelemissionen der Hybridbremse trotz geringer Konzentration genau zu messen, musste die Hintergrundkonzentration von Partikeln im Raum minimiert werden. Dies wurde erreicht, indem saubere Pressluft in das System eingeleitet wurde. Obwohl dies die Hintergrundpartikelkonzentration verringerte, konnte sie nicht vollständig beseitigt werden da die Einhausung der Hybridbremse konstruktiv bedingt nicht vollständig abgedichtet werden konnte.

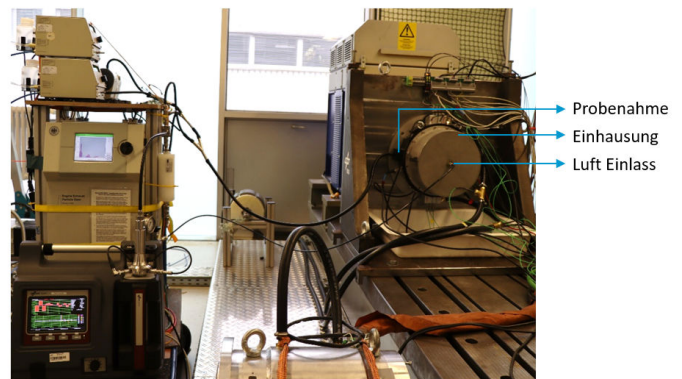
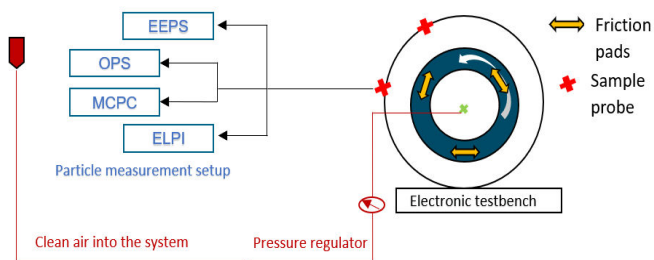


Abbildung 306: Schematische Darstellung des Messkonzepts mit Partikelmesstechnik und der Probenahme.

Abbildung 307: Versuchsaufbau auf dem DLR-E-Motoren-Prüfstand zur Untersuchung der Partikelemissionen an der Hybridbremse

Wie auf Abbildung 307 dargestellt, wurde der Einlass vorne an der Kopfseite der Einhausung genutzt, um die saubere Luft in die Hybridbremse und dann auf die beiden Seiten des Stators (Abbildung 118) zu leiten, wo die Partikelmessung stattfand. Um sicherzustellen, dass der Druck der Reinluft nicht zu hoch war, was die strömungsempfindlichen Partikelmessgeräte beeinträchtigen könnte, wurde ein Druckregler zur Überwachung des Drucks eingesetzt. Die saubere Luft wurde dem System mit einem Druck von 0,5 bar zugeführt.

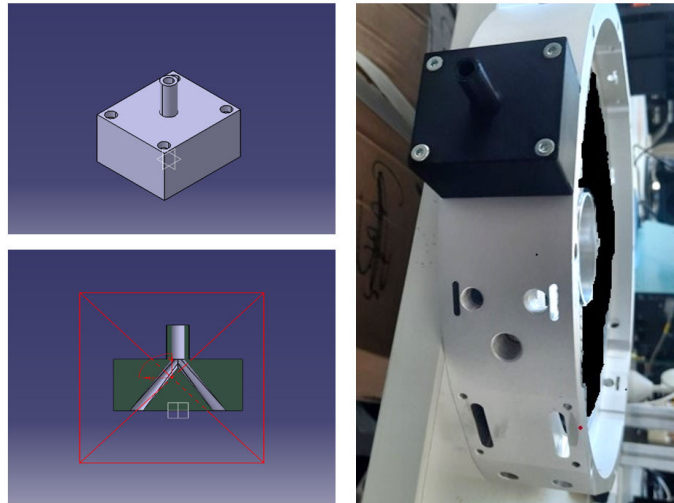


Abbildung 308: CAD-Modell und Realisierung der Probenahme mit 3D Druck

Die Probenahmesonde wurde, wie auf Abbildung 308 dargestellt, mit dem DLR-3D-Drucker mit einem leitfähigen Filament aus der biologisch abbaubaren Plastikalternative Polyacid (PLA) hergestellt. Durch das leitfähige Material werden Partikelverluste durch elektrostatische Aufladung verhindert. Der Vorteil des 3D-Drucks für das Design der Sonde besteht darin, dass er die Herstellung komplexer Geometrien ermöglicht, die mit einer CNC-Maschine nicht realisierbar sind. Das Design der 3D-gedruckten Sonde wurde mehrfach angepasst und optimiert, um Partikelverluste durch turbulente Strömung zu minimieren.

3.6.4.2 Testzyklen

Die Messzyklen wurden auf Basis der Funktionen des Prototyps der Hybridbremse ausgewählt. Aufgrund der gegebenen Spezifikationsmöglichkeiten, war die Auswahl der Testzyklen eingeschränkt. Daher wurden als Zyklen zwei Tests definiert. Einmal Tests mit konstanter Drehzahl bzw. Geschwindigkeit und zum anderen Tests mit konstanten Erregerströmen.

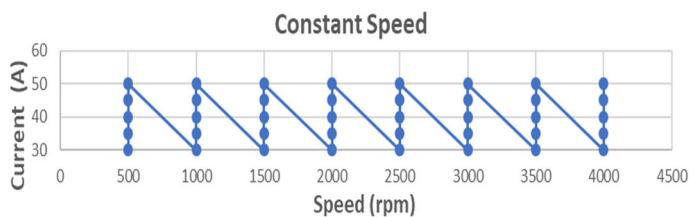


Abbildung 309: Testzyklus zur Emissionsmessung der Hybridbremse bei konstanter Drehzahl

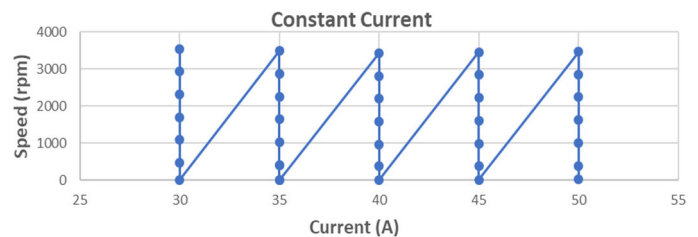


Abbildung 310: Testzyklus zur Emissionsmessung der Hybridbremse bei konstantem Strom

Wie auf Abbildung 309 dargestellt, beschreibt der Test „konstante Drehzahl“ ein Emissionskennfeld unterschiedlicher Erregerströme in Abhängigkeit von der Drehzahl. Bei diesem Testprofil wird als konstante Geschwindigkeit die Drehzahl des Rotors konstant gehalten und der Strom in Schritten von 5 A von 30 A startend auf 50 A erhöht. Diese Erhöhung des Stroms erfolgt für den Drehzahlbereich von 500 bis 4000 U/min in Schritten von 500 U/min. Dieser Testzyklus soll der Zusammenhang zwischen dem Strom in den Kupferwicklungen des Rotors und der Partikelemission der Bremse abbilden.

Beim Testzyklus wie auf Abbildung 310 dargestellt wird hingegen der Strom konstant gehalten, während die Drehzahl von 0 bis 4000 U/min variiert. Dieses Kennfeld ermöglicht die Bewertung der Auswirkungen der Drehzahl auf die Partikelemission. Dies ermöglicht die Auswirkungen unterschiedlicher Geschwindigkeiten bzw. Drehzahlen auf den Bremsmechanismus der Hybridbremse zu untersuchen.

3.6.4.3 Messergebnisse

3.6.4.3.1 Testzyklus Konstante Geschwindigkeit

In der Abbildung 311 ist das Segment aus dem auf Abbildung 309 gezeigtem Prüfzyklus für die konstanter Drehzahl des Rotors von 1000 U/min dargestellt. Der Strom in den Kupferwicklungen des Rotors wird dabei in 5 A Schritten von 10 A auf 50 A erhöht. Bei einem Strom von 40 A ist die magnetische Anziehungskraft stark genug, um den Rotor in Kontakt mit dem Reibbelag 6 zu bringen (§ 3.3). Dies führt zu einer messbaren Normalkraft auf den Kraftsensor 6 und somit auch auf den Reibbelag 6 sowie zu einem Anstieg der Temperatur des Reibbelags 6 (Temp 6 (grün) in Abbildung 311). Die bei diesem Vorgang emittierten Partikel sind zwischen 500 und 100 nm groß (Abbildung 311) und werden als PM_{2,5} eingestuft. Wenn der Strom auf 45 A erhöht wird, steigt die Normalkraft auf den Reibbelag 6 und somit auch auf den Kraftsensor auf 75 N an, was zu einem Anstieg der Temperatur des Reibbelags 6 und der Emission von PM_{2,5}-Partikeln und von ultrafeinen Partikeln unter 100 nm führt. Bei der höchsten Stromstärke von 50 A erreicht die Kraft auf den Reibbelag 6 125 N, und die Temperatur des Reibklotzes 6 erreicht 32 °C, was zu einer deutlichen Erhöhung der Emissionen von ultrafeinen Partikeln führt. Obwohl die Kraft und die Temperatur an der Reibscheibe 6 bei 1000 U/min niedriger sind als bei 500 U/min, ist der Anteil an ultrafeinen Partikeln bei 1000 U/min höher.

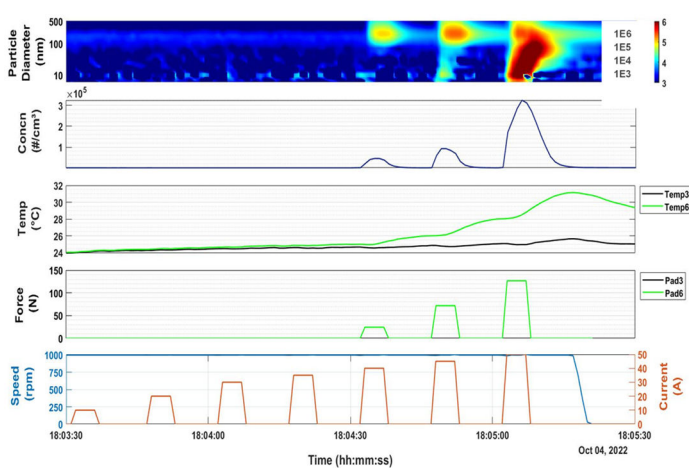


Abbildung 311: Größenverteilungsdiagramm für konstante Drehzahl bei 1000 U/min (unten blau) und steigendem Strom (unten orange). Dargestellt sind Kraft zweite von unten – grün, darüber Temperatur (grün), #PN in blau darüber und oben Größenverteilung PN.

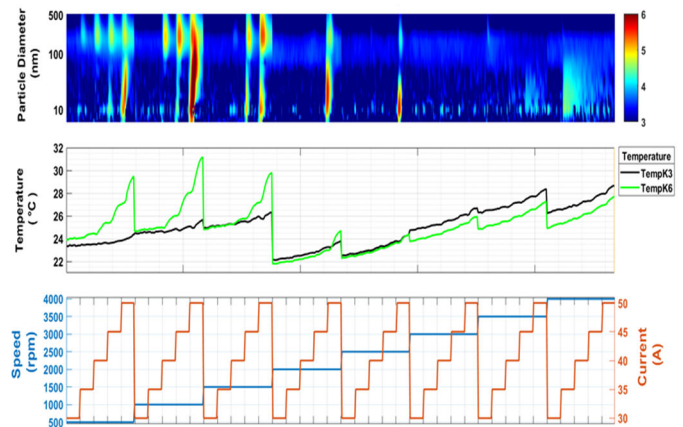


Abbildung 312: Größenverteilungsdiagramm (oben) für konstante Drehzahl mit steigender Drehzahl von 500 bis 4000 U/min (unten blau) und steigendem Strom von 30 bis 50 A (unten orange). In der Mitte ist die Temperatur der Reibbeläge dargestellt.

Um einen vollständigen Überblick über das Verhalten der Partikelemission für das gesamte Kennfeld zu erhalten sind in Abbildung 312 die Messdaten aller konstanten Drehzahl-Segmente zwischen 500 und 4000 Umdrehungen pro Minute (unten in blau) und den variierten Strömen (unten in orange) zwischen 30 A und

50 A dargestellt. Die dazugehörigen Temperaturen der Reibflächen 6 (grün) und 3 (schwarz), die sich auf unterschiedlichen Seiten des Stators befinden sind im Plot in der Mitte zusehen. Darüber ist Größenverteilung der Partikelemission in der Falschfarbendarstellung aufgetragen. Diese Abbildung gibt den Zusammenhang der Korrelation zwischen Drehzahl, Strom, Temperatur und Partikelemission des gesamten Drehzahlkennfelds wieder.

In Abbildung 312 ist zu sehen, dass bei Drehzahlen höher als 2500 U/min keine Emissionen entstehen. Oberhalb von 2500 U/min werden keine feinen oder ultrafeinen Partikel beobachtet, da das Bremsen durch die Wirbelströme im Stator und nicht durch den direkten Kontakt zwischen dem Rotor und den Reibbelägen erfolgt. Hier erfolgt das Bremsmoment rein induktiv. Unter 2500 U/min wird beim Bremsen das erforderliche Moment zusätzlich mit Reibungsbremsen aufgebracht. Die Menge der Partikelemission hängt von der auf die Reibbeläge wirkenden Kraft und Temperatur ab. Aufgrund der höheren wirkenden Kraft zwischen dem Rotor und den Reibbelägen 6 und 3 und, werden schon bei Temperaturen der Reibbeläge über 25 °C, ultrafeine Partikel ausgestoßen.

3.6.4.3.2 Testzyklus Konstanter Strom

Abbildung 313 zeigt die Größenverteilung der Partikel, die während eines Zyklus mit konstantem Strom emittiert wurden. Der Strom wurde dabei in 5A Schritten von 30 A auf 50 A erhöht. Die Darstellung zeigt, dass sich die Partikelgrößenverteilung ähnlich verhält wie beim Kennfeld, dass mit dem Zyklus mit konstanter Geschwindigkeit erstellt wurde. Mit zunehmender Stromstärke steigt die Partikelemission auf ihren höchsten Wert bei 50 A, was hauptsächlich auf die Zunahme von ultrafeinen Partikeln unter 100 nm zurückzuführen ist. Dieser Anstieg der Partikelemission ist auf die stärker wirkende Bremskraft am Kontakt zwischen Rotor und Bremsbelägen aufgrund des erhöhten Stroms und höheren Temperaturen bedingt. Allerdings ist die Anzahl der Partikel, die während des Zyklus mit konstantem Strom emittiert werden, etwas geringer als die des Zyklus mit konstanter Geschwindigkeit.

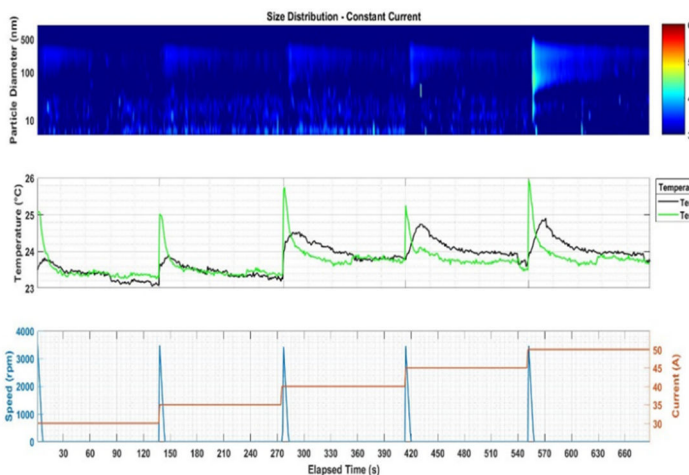


Abbildung 313: Größenverteilung für Konstantstrom von 30A – 50A bei abnehmender Geschwindigkeit.

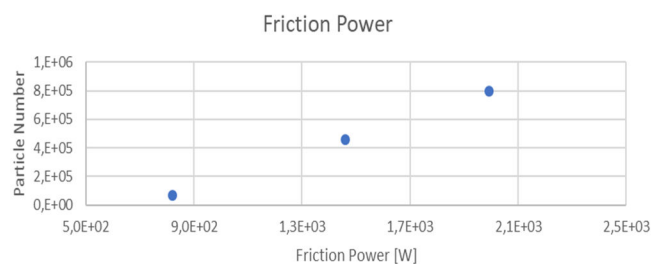


Abbildung 314: Partikelanzahl in Abhängigkeit zur Bremsleistung.

Dies liegt daran, dass der Rotor während des Konstantstromzyklus von 4000 Umdrehungen pro Minute in 6 Sekunden zwischen jedem Stromschritt (30 A, 35 A, 40 A, 45 A und 50 A) auf 0 geht, was bedeutet, dass die Kontaktzeit zwischen dem Rotor und den Bremsbelägen kürzer als beim Konstantdrehzahlzyklus ist, was zu einer geringeren Partikelemission führt.

3.6.4.3.3 Verhältnis von Bremsleistung zur Partikelkonzentration

Bei den Testzyklen mit konstanter Geschwindigkeit wurden für einzelne Bremsereignisse die Partikel integriert um die Partikelanzahl pro Emissionsevent im Kennfeld zu bestimmen. Die Abhängigkeit der emittierten Partikelanzahl von der Bremskraft ist auf Abbildung 314 exemplarisch dargestellt. Die Werte wurden für eine Drehzahl von 500 U/min und 40 A Erregerstrom, für 1000 U/min und 45 A und 1500 und 50 A berechnet. Es ist ein klarer Anstieg der kommutierten Partikelanzahl mit der Reibleistung zu sehen.

3.6.4.3.4 Gravimetrische Messungen

Da die Partikelemissionen von beiden Seiten als eine Einheit beprobt und gemeinsam gemessen werden, ist es schwierig zu bestimmen, von welchem Bremspad der Hybridbremse die Emissionen stammen. Die Mikrowaagenmessungen der Bremsbeläge geben jedoch Aufschluss über das Gewicht der Bremsbeläge vor und nach dem Bremsvorgang, was zur Bestimmung des Verschleißes der Bremsbeläge beitragen kann. Dies bestätigt auch die ermittelte Kraft auf die Reibklötze.

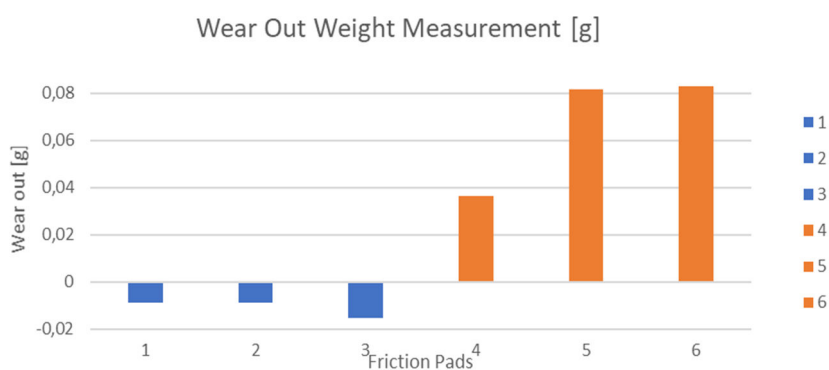


Abbildung 315: Gewichtsmessung vor und nach den Tests an den Bremspads 1 – 6.

Die Mikrowaagenmessungen aller Beläge sind in Abbildung 315 dargestellt. Die Bremsbeläge auf einer Seite des Stators (4, 5, 6) (Abbildung 121, § 3.3.6) nutzten sich deutlich stärker ab wie die Bremsbeläge auf der anderen Seite. Dies deutet darauf hin, dass die Partikelemissionen überwiegend von der Seite des Stators kamen, auf der die Bremsbeläge stärker abgenutzt waren.

Darüber hinaus ist die negative Abnutzung einiger Bremsbeläge (1,2,3) (Abbildung 121, § 3.3.6) darauf zurückzuführen, dass die während des Bremsvorgangs ausgestoßenen Partikel an den Bremsbelägen haftenbleiben d.h. sich Bremspartikel anlagerten. Morphologische und chemische Untersuchung

Abbildung 316 zeigt die gesammelten luftgetragenen Partikelemissionen der Hybridbremse, hier sind sowohl runde, als auch kantige Partikelformen sichtbar. Die Zusammensetzung, anhand einer mikroskopischen Röntgenspektroskopieuntersuchung ist auf Abbildung 317 dargestellt. Neben Kohlenstoff und Sauerstoff, wurden in den Partikeln Kupfer, Eisen und Schwefel identifiziert.

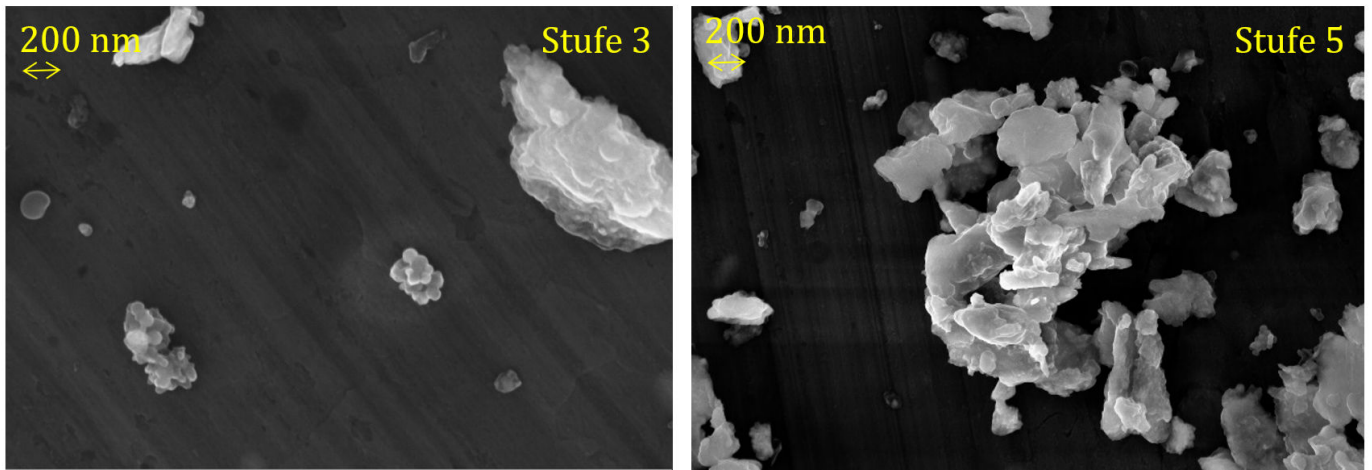


Abbildung 316: Elektronenmikroskopische Abbildung von Partikeln aus der Hybridbremse

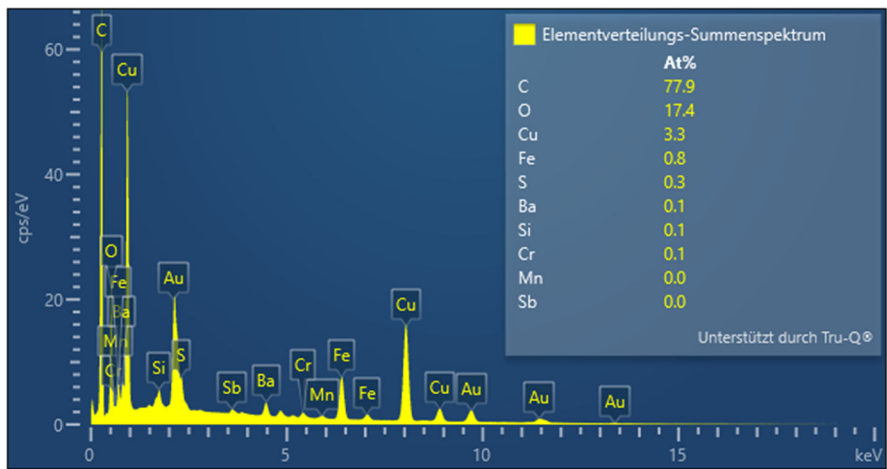


Abbildung 317: Chemische Zusammensetzung der Emissionen der Hybridbremse

3.7 TP 6: Fazit, Bewertung und Öffentlichkeitsarbeit

3.7.1 Konzepte Reduzierung Bremsenabriebe

Zur Reduzierung der Feinstaubemissionen an der Bremse wurden fünf alternative, unterschiedliche Konzepte bewertet, miteinander und mit einer konventionellen Graugussbremse verglichen und bewertet. Die bewerteten Bremskonzepte waren:

1. Konventionelle Scheibenbremse mit optimierten Materialien (Hartmetallbeschichtung der Bremsscheibe)
2. Scheibenbremse mit zusätzlichem Filter
3. Gekapselte, mit Luft umströmte Scheibenbremse
4. Mit Fluid umströmte/gekühlte Lamellenbremse
5. Induktionshybridbremse

Sowohl optimierte Reibpartner als auch zusätzliche Filter können Feinstaubemissionen an der Bremse in die Umgebung nicht gänzlich verhindern. Da dies jedoch im ZEDU1-das Ziel war, wurde das Konzept 2, sowie nach der Bewertung auch die anderen offene Systeme, nicht weiter zur Realisierung verfolgt. Dem Konzept 1 wurde, bei geringen Kosten und ohne technischen Aufwand an der Fahrzeugflotte ein hohes Emissionseinsparpotential bescheinigt. Daher wurde dieses Konzept in die Untersuchungen miteinbezogen. Wie es sich bei den Untersuchungen zeigte bietet dieses System, je nach Fahrzyklus ein Emissionseinsparungen von bis zu ca. knapp 80%. Da die hartmetallbeschichtete Bremsscheibe vor allem auch in den bereits existierenden Fahrzeugflotten, sowie ohne technischen Aufwand auch in Neufahrzeugen zur Erfüllung der Euro 7 und künftiger Normen zum Einsatz kommen kann. Wird dieses Konzept, neben der Rekuperation die allerdings nur bei elektrifizierten Fahrzeugen realisierbar ist, als eins mit relevantem Potential bei der Bremsabriebe-missionsreduktion bewertet. Mit Konzept 3 könnten zwar sämtliche Feinstaubemissionen vermieden werden, das Thermomanagement über eine Kühlung der Bremse wäre allerdings sehr aufwändig umzusetzen und birgt das Risiko einer schnellen Überhitzung des Bremssystems bei Ausfall des Kühlsystems. Dieses Konzept geht auch mit relativ hohem technischem Aufwand einher und ist auch für bereits existierende Fahrzeugflotten nicht umsetzbar. Eine Flüssigkühlung in Konzept 4 ist dagegen deutlich besser realisierbar. Hinzu kommt, dass der Einsatz von Lamellen in Automatikgetrieben zur Kraftübertragung bereits erfolgreich realisiert ist und somit zwar ein risikobehafteten, aber erfolgversprechenden Ansatz darstellte. Die Möglichkeit die Bremse direkt ins Getriebe und damit in die Antriebseinheit zu integrieren, bringt damit zusätzlich Einsparpotential für das Fahrzeuggewicht und ein kompaktes Package mit sich. Dieses Konzept hat einen hohen Innovationsgrad und stellt für Neufahrzeuge eine Nullemission an Luftgetragenen Bremsabriebe in die Umwelt bei akzeptablem technischem Aufwand dar. Nach Abwägung aller Vor- und Nachteile wurde das Konzept 4 als bestes Konzept ausgewählt und für die Umsetzung zur Demonstration (s. 3.2.1.1) ausgewählt. In den Tests konnte die Dauerfestigkeit und Alltagstauglichkeit dieses Systems nachgewiesen werden.

Das zweite Konzept, das ebenfalls eine Nullemission von Luftgetragenen Bremsabriebspartikeln bietet ist das Konzept der Induktionshybridbremse. Da dieses Konzept vom TRL-Level jedoch noch einen hohen Entwicklungsaufwand darstellt und damit mit Entwicklungsrisiken behaftet ist, wurde entschieden dieses Konzept bis zur Technologiedemonstration (TRL 6 – Prototype verified) zu entwickeln und zu validieren. Es konnte für dieses System die technische Umsetzbarkeit gezeigt werden.

Wie messtechnische Untersuchungen zeigten, bietet für elektrifizierte Fahrzeuge auch eine optimierte Rekuperationsstrategie ein hohes Einsparpotential an Luftgetragenen Bremsabriebe-emissionen. Je nach Fahrprofil kann dieses bis zu ca. 90 % an eingesparten Partikeln betragen.

3.7.2 Konzepte Reduzierung Reifenabriebe

Um die Feinstaubemissionen der Reifen zu verringern wurde drei Konzepte erarbeitet und bewertet:

1. Aktives Absaugsystem
2. Passives Absaugsystem
3. Passives Absaugsystem mit aktiver Unterstützung

Im aktiven Absaugsystem wird zusätzliche Energie aufgewendet, um die Luftströmung durch einen Filter zu ermöglichen, während im passiven System ausschließlich aerodynamische Effekte des Fahrtwindes ausgenutzt werden. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass die Partikelabsorption eines passiven Systems besonders bei niedriger Fahrgeschwindigkeit nicht zufriedenstellend ist. Ein aktiv unterstützendes Absaugsystem (Variante 3) jedoch, dass zur Erhöhung der Energieeffizienz, auch geschwindigkeitsabhängig gesteuert werden kann, liefert hier wesentliche bessere Absorptionsergebnisse mit Energieeinsparungspotential, die zusätzlich auch noch über Topologie-Designs optimiert werden kann. Daher wurde zur Demonstration der ZEDU1-Einheit das Konzept 3 gewählt (s. 3.2.2) und zur Realisierung topologisch sowie designtechnisch optimiert und angepasst.

3.7.1 Versuchsanordnung Bremspartikelbestimmung

Im Falle der Bremspartikelemissionen konnte das entwickelte Testkonzept und Vermessung mit einem geschlossenen System auch für Messungen bei Realfahrten mit konventionellen Serienfahrzeugen erfolgreich umgesetzt werden. Bei diesem Konzept wird für das Messsystem einen HEPA-Filter gereinigte Luft verwendet, wodurch die anströmende Luft nahezu keine Partikel mehr enthält und die gemessenen Partikel somit zweifelsfrei den Bremsabriebe zugeordnet werden können. Mit diesem Konzept konnten auch die im realen Betrieb auftretenden Brems Temperaturen ebenfalls nachgebildet werden. Dadurch konnte eine eindeutige Abhängigkeit der Emissionen zu den Größen Fahrgeschwindigkeit, Bremskraft und Brems Temperatur abgeleitet werden. Mit diesem Messkonzept lassen sich auch Größenverteilungen der Emissionspartikel als auch bei Probenahme deren Morphologie größenabhängig bestimmen. Das hier entwickelte Messkonzept ist somit für den vorgesehenen Einsatzzweck zur Bremsabriebeemissionscharakterisierung gut geeignet und wurde erfolgreich validiert.

3.7.2 Versuchsanordnung Reifenpartikelbestimmung

Das entwickelte Testkonzept zur Aufnahme und Bestimmung der Reifenpartikel sowohl bei Messungen am Referenzfahrzeug als auch bei Messungen am ZEDU1-Versuchsträger stellt ein zur Umgebung hin offenes System dar. Dieses Problem wurde durch eine parallele Vergleichsmessung der Umgebungsluft kompensiert. So konnten auf dem Rollenprüfstand eindeutige Abhängigkeiten zwischen Partikelemissionen und Fahrgeschwindigkeit sowie Beschleunigung identifiziert werden. Die Messergebnisse sind reproduzierbar und stellen eine validierbare Datenbasis für Auswertungen dar. Der Versuchsaufbau, das Messkonzept und das Messsystem erfüllt somit alle gestellten Anforderungen und stellt ein in seiner Realisierung und Datengewinnung ein Alleinstellungsmerkmal dar.

Die auf der Straße aufgenommenen Messdaten sind im Vergleich zu den auf dem Rollenprüfstand gewonnenen Ergebnissen aufgrund der sehr hohen Hintergrundkonzentrationen schwieriger zu interpretieren. Die Auswertung wird durch die schwankende Partikelkonzentration in der Umgebungsluft erschwert. Erschwerend

hinzu kommt, dass nicht eindeutig quantifiziert werden kann welcher Anteil der gemessenen Partikel vom untersuchten Reifen emittiert wurden und welcher Anteil von der Straße aufgewirbelt wurde bzw. von der Umgebungsluft, den Luftschwebeteilchen stammt. Dieser Aspekt ist jedoch nicht dem Messkonzept geschuldet, sondern dem Umstand, dass hier mehrere Systeme Reifen, Straße und Luftverschmutzung interagieren. Zur Eingrenzung des zusätzlichen Freiheitsgrades wurde das Messkonzept um weitere Analysen erweitert und aufgefangener Partikelproben durch weitere Analysen unter einem Raster-Elektronen-Mikroskop untersucht um hier eindeutigere Aussagen und Zuordnungen generieren zu können. Um für reale Straßen eindeutigere Messdaten erstellen zu können sind weitere Untersuchungen und wissenschaftliche Arbeiten erforderlich die der Rahmen dieses Projekts nicht bereitstellt.

Beim ZEDU1-Versuchsträger wurde das speziell hierfür entwickelte Testkonzept für die Bestimmung der Reifenabriebpartikel vollständig in das Absaugsystem des Fahrzeuges integriert. Die Probenahmestellen für die Partikelmessung wurden vor und nach dem Filtermodul eingefügt, sodass ein bestmöglicher Vergleich der Partikel-belasteten mit der gereinigten Luft möglich ist. Des Weiteren wurden Probenahmestellen vor und hinter der Radeinhausung platziert um die Restpartikelemissionen die durch die Reifenpartikelabsaugung nicht aufgenommen wurden zu quantifizieren. Das Konzept wurde validiert und ist für vorgesehene Vermessung des Versuchsträger erfolgreich einsetzbar (s. 3.6.3). So konnte für die Effizienz der Partikelaufnahme durch die Reifeneinhausung bei hohen Geschwindigkeiten bis zu ca.90 % gemessen werden. Und eine noch höhere Effizienz bei niedrigen Geschwindigkeiten. So waren Reifenabriebpartikel bis zu einer Geschwindigkeit von 60 km/hm, hinter dem Rad nicht als zusätzliche Konzentration nachweisbar und somit als vollständig aufgenommen detektiert geltend.

Der ZEDU1-Versuchsträger wurde als ein Technologie-Demonstrator entwickelt, um neue Konzepte und Innovationen zu testen. Als solcher kann er spezifische Eigenschaften und Einschränkungen aufweisen, die häufig in ersten Prototypen zu finden sind. Es ist wichtig anzumerken, dass ein Teil der im Laufen der Test ermittelten Verbesserungspotentiale auf Einschränkungen durch die Freiheitsgrade der Basis des Versuchsträger und somit dem Konstruktionsprozesses geschuldet sind. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen und Erfahrungen aus den Ergebnissen der Partikeleinsaugung könnten wertvolle "Lessons learned" abgeleitet werden. Diese Erkenntnisse bieten eine Grundlage für zukünftige iterative Verbesserungen des ZEDU1 Konzepts.

3.7.3 Messkonzept Emissionsuntersuchung

Ziel der Emissionsmessungen war die Quantifizierung und Charakterisierung von luftgetragenen Partikeln aus Nicht-Abgasemissionen, namentlich Brems- und Reifenabrieb. Darüber hinaus wurden neue Messkonzepte und Methoden sowie technologische Ansätze auf ihr Emissionsminderungspotenzial zur Verbesserung der Luftqualität hin untersucht.

Der Schwerpunkt der Messungen lag auf luftgetragenen Partikeln $< 10 \mu\text{m}$, dem sogenannten Feinstaub, sowie ultrafeinen Partikeln $< 100 \text{ nm}$. Sie wurden über die Partikelanzahlkonzentration, also die Anzahl von Partikeln pro definiertem Luftvolumen, quantifiziert, da dieser Parameter auch kleine Partikel mit einer sehr geringen Masse repräsentiert. Obwohl solche Partikel bei der Massenbestimmung nur einen geringen Beitrag repräsentieren können diese alleine schon auf Grund der hohen Anzahl und morphologischer Zusammensetzung gesundheitlich und für die Umwelt wirksamrelevant sein. Größere Partikel ($> 10 \mu\text{m}$) verbleiben aufgrund Ihrer hohen Masse nicht lange in der Luft, können aber je nach chemischer Zusammensetzung eine

relevante Umweltwirkung z.B. im Boden oder Wasser haben. Letztere waren jedoch im Projekt nicht Gegenstand der Untersuchung.

Im Rahmen der Konzeption und Vermessung des Referenzfahrzeugs (BMW i3) wurde ein neuartiges Messverfahren zur Untersuchung von luftgetragenen Partikeln aus Bremsen- und Reifenabrieb entwickelt und validiert. Die eingesetzte modulare Messtechnik konnte hierbei – vor Ort am Rollenprüfstand sowie on-board bei Straßenfahrten – den gesamten Größenbereich der luftgetragenen und lungengängigen Partikel von 2.5 nm bis 10 μm abdecken. Bei Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand wurden die durch Bremsen und Reifen emittierten Partikel des batterie-elektrischen Fahrzeugs bezüglich Anzahl, Größenverteilung, Morphologie und Zusammensetzung charakterisiert.

Durch die Kombination verschiedener Messtechnik, sowie des individuellen Probenahmedesigns war es – trotz unterschiedlicher Aufbauten und Messszenarien – möglich, die Referenz, sowie die im Projekt entwickelten Technologieansätze, erfolgreich zu vermessen und zu charakterisieren.

Bei der Detektion von Nicht-Abgas-Emissionen unter realen Bedingungen spielt insbesondere die Hintergrundkonzentration eine wesentliche Rolle. In unseren Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die emittierten Reifenpartikel bei niedriger Geschwindigkeit unterhalb der üblichen äußeren Partikelanzahlkonzentration liegen. Insbesondere für die Vermessung von urbanen Fahrbedingungen oder zur Untersuchung vollständiger Fahrzyklen hat sich daher die Nutzung eines mit gefilterter Luft belüfteten Rollenprüfstands bewährt.

3.7.4 Fahrzyklen

Zur Untersuchung der Abriebemissionen wurden die Normkonforme Fahrzyklen WLTC Class 3b, WLTC Brake Part 10 und RDE sowie speziell hierfür eigens entwickelte und definierte Fahrzyklen ZEDU-Accelerate und ZDU-Brake herangezogen. Der Untersuchungsfokus lag hierbei auf bekannten Fahrzyklen wie WLTC Class 3b, WLTC Brake und vor allem auf realen Fahrzyklen wie z.B. dem RDE-Zyklus, sowie kurzen Testzyklen zur Vermessung der Nicht-Abgas-Emissionen in Abhängigkeit des Betriebszustands. Eine Charakterisierung von Abrieben sowohl von Bremsen als auch von Reifen im realen Straßenbetrieb stellte eine besondere Herausforderung, sowohl an die Testkonzepte, den Versuchsaufbau als auch die Messtechnik, im mobilen Einsatz.

Die Breite der zur Charakterisierung eingesetzter Fahrzyklen wurde herangezogen, da die Messergebnisse, wie in dem Kapitel (3.6) dargestellt, stark von dem zur Untersuchung gewählten Fahrzyklus abhängen. Eine definierte Prozedur für Abriebbestimmung an Fahrzeugen, speziell im mobilen, realitätsabbildenden Einsatz, ist derzeit noch nicht verfügbar.

3.7.5 Öffentlichkeitsarbeit und Kooperationen

ZEDU1 Projekt stößt auf großes Interesse in der Automobilwirtschaft.

Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit erfolgte mit folgenden Firmen und Forschungseinrichtungen Dialoge und Kennenlerngespräche:

Firmen:

- AMG,
- Avery Dennison
- AUDI
- AVL
- BOSCH
- Brembo Bremse
- Bridgestone
- BMW
- Continental
- Daimler
- Dürr
- EDAG
- FrenoZa GmbH
- Knorr-Bremse
- HWA
- HS-Technik
- Kärcher
- Mann+Hummel
- Michelin
- Pirelli
- Porsche AG
- Ricardo
- VW
- ZF - Friedrichshafen

Forschungseinrichtungen

- ETRMA
- Paul Scherrer Institut
- Universität der Bundeswehr in München
- Universität Magdeburg
- WDK (Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e.V.),

Mit den Firmen AMG, BOSCH, Mann+Hummel und Continental sowie Pirelli mit der wurden weitere Schritte zur Zusammenarbeit initiiert.

- Continental: NDA, Regelaustausch-Austausch, Bereitstellung Reifen
- Mann+Hummel: Assoziationsvertrag geschlossen, NDA, Bereitstellung Filter
- Paul Scherrer Institut: Wissen und Probenaustausch
- Universität Magdeburg: Wissen und Probenaustausch
- Universität der Bundeswehr in München: Weitere Schritte zur Zusammenarbeit initiiert
- ZF – Friedrichshafen: NDA
- Pirelli:
- ETRMA:

3.7.6 Veröffentlichungen und Publikationen

Ebenso erfolgten im Rahmen des Projekts eine Reihe von Veröffentlichungen und Publikationen. Diese sind im §6 Literaturverzeichnis aufgeführt.

Besonders hervorzuheben sind Veröffentlichungen in Medien wie Fernsehen mit Beitrag in:

"Motor Presse" VOX- Automagazin "auto mobil"

- SWR,
- ARD,
- Quarks
- You-Tube
- u.a.m.

Ebenso die Events wie:

- Roll Out mit Ministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut Presse und TV
- ADAC-GT-Masters
- AVL-Breakday,
- Green-Tech
- u.a.

Der Pressespiegel zu ZEDU-1 Demonstrator zähl bereits über 200 Beiträge. Die Quellen sind exemplarisch in Tabelle 45 aufgeführt.

Tabelle 45: Pressespiegel ZEDU1 (Auswahl)

Nr.	ZEDU1 - Pressespiegel	Datum	Erschienen
1	Mobilität ohne Feinstaub: https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2021/01/20210113_null-emissions-antrieb-mobilitaet-ohne-feinstaub.html	Jan 21	DLR-Medien (Webnews, Social Media)
2	Staubsauger im Radkasten	Apr 21	Online: Springer Professional
3	So lassen sich Brems- und Reifenabtrieb reduzieren	Apr 21	Online: VDI-Nachrichten
4	Mobility without particulates	Jan 21	www.terradaaily.com
5	Fahrzeugkonzept des DLR soll Ausstoß von Feinstaub vermeiden	Jan 21	www.springerprofessional.de
6	So lassen sich Brems- und Reifenabtrieb reduzieren	Apr 21	www.im-fokus.de
7	FK_Staubsauger_im_Radkasten	Apr 21	VDI-Nachrichten
8	Staubsauger_im_Radkasten	Apr 21	VDI-Nachrichten
9	Bremsen per Kabel in unter drei Jahren serienreif? https://www.automobil-industrie.vogel.de/bremsen-per-kabel-in-unter-drei-jahren-serienreif-a-1070121/	Okt 21	automobil-industrie.de
10	Rollende Staubsauger: So könnten Autos den Dreck wieder einfangen, den sie hinterlassen	Mrz 22	geo.de
11	https://www.zeit.de/mobilitaet/2022-10/elektromobilitaet-emissionsfreie-autos-forschung/seite-2	Nov 22	Zeit Online
12	https://www.limburger-zeitung.de/das-deutsche-zentrum-fuer-luft-und-raumfahrt-und-hwa-entwickeln-das-bisher-sauberste-konzept/	Okt 22	Limburger Zeitung
13	Erste Messungen mit Weltraumüberwachungsradar GESTRA (esut.de)	Okt 22	Europäische Sicherheit & Technik
14	Kreise: Zulassung von Boeing 737 Max 10 verzögert sich bis Sommer 2023 (handelsblatt.com)	Okt 22	Handelsblatt
15	Das Rennen um den Super-Akku MOTOR SN.at	Okt 22	Salzburger Nachrichten
16	ZEIT ONLINE Lesen Sie zeit.de mit Werbung oder im PUR-Abo. Sie haben die Wahl.	Okt 22	Zeit Online
17	Erster Heißlauf mit Ariane-6-Oberstufe FLUG REVUE	Okt 22	Flug Revue
18	1205143820.pdf (blureport.net)	Okt 22	blureport.net
19	Raumfahrt: Triebwerk der Ariane 6 erfolgreich getestet (weser-kurier.de)	Okt 22	weser-kurier.de
20	Neue europäische Trägerrakete Ariane 6, 1. erfolgreicher Test der Ariane 6 Oberstufe am DLR Lampoldshausen, Gütsel Online, OWL live (guetsel.de)	Okt 22	guetsel.de
21	ESA - Ariane 6 takes next step to first flight with upper stage hot fire tests	Okt 22	European Space Agency
22	El cohete Ariane 6 prueba el motor de su etapa superior - LA NACION	Okt 22	LA NACION
23	1205143826.pdf (blureport.net)	Okt 22	blureport.net
24	Les essais de l'étage réallumable de la fusée Ariane 6 ont débuté Techniques de l'Ingénieur (techniques-ingenieur.fr)	Okt 22	techniques-ingenieur.fr
25	1205143822.pdf (blureport.net)	Okt 22	Haller Kreisblatt
26	s-region Seite '01SPT11' d-spt-11/s-region/A2/abo_workflow1(svc.ngen) (blureport.net)	Okt 22	Kölnener Stadt-Anzeige Köln
27	05 WA SO SOEST 20221007 Prod-Nr 1893496 Seite 4 6. 10. 2022 18:01:25 (blureport.net)	Okt 22	Lüdenschneider Nachrichten
28	1205143816.pdf (blureport.net)	Okt 22	Iserlohner Kreisanzeige Iserlohn

29	1205143812.pdf (bluereport.net)	Okt 22	Göttinger Tageblatt
30	1205143808.pdf (bluereport.net)	Okt 22	Göttinger Tageblatt
31	Untitled from cognita blueReport on Vimeo	Okt 22	WDR 4
32	DLR Medienspiegel (bluereport.net)	Okt 22	Radio B2
33	Solarkerosin soll Flugverkehr revolutionieren, erste Airline mit an Bord TAG24	Okt 22	Tag 24
34	Testanlage für Flugzeug-Solartreibstoff: Airline kooperiert - WELT	Okt 22	Welt Online
35	Nordrhein-Westfalen: Testanlage für Flugzeug-Solartreibstoff: Airline kooperiert - n-tv.de	Okt 22	nt-v online
36	Testanlage für Flugzeug-Solartreibstoff: Airline kooperiert (wn.de)	Okt 22	westfälische Nachrichten
37	Energie - Jülich - Testanlage für Flugzeug-Solartreibstoff: Airline kooperiert - Wirtschaft - SZ.de (sueddeutsche.de)	Okt 22	Süddeutsche Zeitung
38	Testanlage für Flugzeug-Solartreibstoff: Airline kooperiert NRW - Mindener Tageblatt (mt.de)	Okt 22	Mindener Tageblatt
39	Testanlage für Flugzeug-Solartreibstoff: Airline kooperiert (wz.de)	Okt 22	Westdeutsche Zeitung
40	BAZ BAZ-004-20221007 (bluereport.net)	Okt 22	Basler Zeitung
41	Lärm. Intelligentes System hilft Piloten beim leisen Landen. (bluwin.ch)	Okt 22	Bluwin
42	Intelligente Assistenz für leisere Anflüge - pctipp.ch	Okt 22	Pctipp Online
43	Leisere und klimafreundlichere Anflüge – dank intelligenter Assistenz Cockpit	Okt 22	Cockpit
44	Empa-Projekt vermindert Fluglärm beim Landen - Blick	Okt 22	Blick Online
45	Projekt macht Anflüge leiser und klimafreundlicher - punkt4	Okt 22	gmx.ch
46	1205143811.pdf (bluereport.net)	Okt 22	Hannoversche Allgemeine Zeitung Stadttausgabe
47	Luftverkehr - Göttingen - DLR nimmt große Anlage für Turbinen-Forschung in Betrieb - Wirtschaft - SZ.de (sueddeutsche.de)	Okt 22	Süddeutsche Zeitung Online
48	DLR nimmt große Anlage für Turbinen-Forschung in Betrieb - SAT.1 REGIONAL (sat1regional.de)	Okt 22	Sat.1 Regional
49	DLR nimmt große Anlage für Turbinen-Forschung in Betrieb (dewezet.de)	Okt 22	Dewezet.de
50	DLR nimmt große Anlage für Turbinen-Forschung in Betrieb - Hamburger Abendblatt	Okt 22	Hamburger Abendblatt Online
51	DLR nimmt große Anlage für Turbinen-Forschung in Betrieb - WELT	Okt 22	Welt Online
52	Niedersachsen & Bremen: DLR nimmt große Anlage für Turbinen-Forschung in Betrieb - n-tv.de	Okt 22	n-tv.de
53	DLR nimmt Turbinen-Testanlage in Betrieb (aero.de)	Okt 22	aero.de
54	1205143810.pdf (bluereport.net)	Okt 22	Bild Plus
55	Sauberes Auto der Welt: Mit Ölbad und Feinstaubsauger - firmenauto	Okt 22	FirmenAuto
56	ZEDU-1: Das ist das wohl umweltfreundlichste Elektroauto der Welt (basicthinking.de)	Okt 22	Basic Thinking
57	Zedu-1, l'auto più green del mondo. Oltre l'elettrico - la Repubblica	Okt 22	la Repubblica
58	1205143814.pdf (bluereport.net)	Okt 22	duz Wissenschaft & Management
59	SZ-07.10.2022-BKUL_5.arc (bluereport.net)	Okt 22	Saarbrücker Zeitung Saarbrücken
60	1205143809.pdf (bluereport.net)	Okt 22	P.M
61	Weltraum-Besucherzentrum in Darmstadt auf der Kippe (echo-online.de)	Okt 22	Echo Online
62	Bilder des Tages (pnp.de)	Okt 22	PNP-Online
63	Working towards less noise and better fuel efficiency during airport runway approach (techxplore.com)	Okt 22	Phsys.org
64	https://www.standard.co.uk/news/london/train-strikes-london-underground-b1027111.html	Okt 22	London Evening Standard
65	Kloten simule une approche d'avion plus écolo et silencieuse - 20 minutes	Okt 22	20min.ch
66	https://www.poandpo.com/news_business/partners-work-on-less-noise-and-better-fuel-efficiency-during-airport-approach	Okt 22	Post Online Media
67	Drehscheibe Online Foren :: 01 - News :: Schienenbündnis spricht von "rudimentärer Sparlösung" bei Heidekrautbahn (drehscheibe-online.de)	Okt 22	Drehscheibe Online Foren: Museumsbahn
68	07_Oct.WZR WZ-CLUB (bluereport.net)	Okt 22	WZ Westdeutsche Zeitung Düsseldorf
69	1205143824.pdf (bluereport.net)	Okt 22	VDI Nachrichten
70	px (bluereport.net)	Okt 22	Anzeiger für Harlingerland
71	1205143819.pdf (bluereport.net)	Okt 22	P.M.
72	0710-RNZ-ENHP-14 (bluereport.net)	Okt 22	Reihn-Neckar-Zeitung-Heidelberger Nachrichten
73	Vom Airport ins Stadtzentrum: Volocopter testet Flugtaxi - WELT	Okt 22	Welt Online
74	Empa-Projekt vermindert Fluglärm beim Landen - Blick	Okt 22	Blick Online
75	ZEIT ONLINE Lesen Sie zeit.de mit Werbung oder im PUR-Abo. Sie haben die Wahl.	Okt 22	Zeit Online
76	Nasa-Raumsonde kommt Jupiter-Mond Europa sehr nah – Forschende wollen Untergrund-Ozean erforschen (fr.de)	Okt 22	Frankfurter Rundschau Online
77	ZEIT ONLINE Lesen Sie zeit.de mit Werbung oder im PUR-Abo. Sie haben die Wahl.	Okt 22	Zeit Online
78	SpaceX's Crew-5 astronaut mission docks with the space station Space	Okt 22	Space.com
79	https://www.golem.de/news/berlin-deutsche-post-startet-pakettransport-per-solarschiff-2210-168763.html	Okt 22	Golem.de
80	e.Go Life getestet: Abgesang auf ein schwer erfüllbares Versprechen - Golem.de	Okt 22	Golem.de
81	Brennstoffzelle im Nexo geht über den Jordan: Hyundai lässt Kunden abblitzen - EFAHRER.com (chip.de)	Okt 22	Chip Online
82	Leuchtturmprojekt für Wasserstoff im Landkreis Neuburg-Schrobenhausen (donaukurier.de)	Okt 22	Donaukurier.de
83	Wird Heizen mit Holz bald verboten? Experten warnen trotz steigenden Nachfrage: "Nichts verbrennt dreckiger und klimaschädlicher" (infranken.de)	Okt 22	inFranken.de

84	Der blinde Fleck der Klimapolitik (fr.de)	Okt 22	Frankfurter Rundschau Online
85	Innovative Ideen - So kann die Schweizer Industrie energieeffizienter werden - Wissen - SRF	Okt 22	SRF
86	ZEDU-1: Dieses E-Auto könnte das grünste von allen werden - AUTO BILD	Okt 22	Auto Bild
87	https://www.badische-zeitung.de/eu-will-export-von-schlusselftechnologien-nach-russland-verbieten	Okt 22	Badische Zeitung
88	ZEIT ONLINE Lesen Sie zeit.de mit Werbung oder im PUR-Abo. Sie haben die Wahl.	Okt 22	Zeit Online
89	HVV-Switch: Carsharing in Hamburg bald zu 80 Prozent elektrisch - WELT	Okt 22	Welt Online
90	Strom: Erneuerbare Energien decken Anstieg des Strombedarfs - Golem.de	Okt 22	Golem.de
91	ZEDU-1: Das im Betrieb umweltfreundlichste Auto der Welt Elektroauto-News.net	Okt 22	Elektroauto-news.net
92	Das erste E-Auto ohne Feinstaub- und Mikroplastik-Emissionen - ingenieur.de	Okt 22	ingenieur.de
93	FK_TEMPO_150_UND_(FAST)_NULLFEINSTAUB_Bild_Stuttgart.pdf	Okt 22	Bild Stuttgart
94	Der Feinstaubkiller aus Affalterbach	Okt 22	Stuttgarter Zeitung Stadttausgabe
95	Mobilität: Sauberes Auto	Okt 22	
96	https://interestingengineering.com/transportation/the-prototype-of-the-most-eco-friendly-car-has-been-revealed	Okt 22	interestingengineering.com
97	https://www.largus.fr/actualite-automobile/zedu-1-le-prototype-qui-filtre-les-particules-de-freins-et-de-pneus-30002102.html	Okt 22	www.largus.fr
98	https://www.techtimes.com/articles/281746/20221010/hwa-dlr-unveils-prototype-most-eco-friendly-car.htm	Okt 22	www.techtimes.com
99	Roll-out ZEDU-1: emissionsfrei unterwegs in die Zukunft ohne Feinstaub und Mikroplastik	Sep 22	DLR Youtube
100	„Umweltfreundlichstes E-Auto der Welt“ in Stuttgart enthüllt	Sep 22	Merkur.de
101	Deutsches Elektroauto "Zedu-1" soll fast komplett emissionsfrei sein - Trending Topics	Sep 22	Trending Topics
102	Feinstaub und Mikroplastik: Zedu-1 soll das umweltfreundlichste Auto der Welt sein	Sep 22	Golem.de
103	DLR entwickelt emissionsfreies E-Auto ZEDU-1 - Solarserver	Sep 22	Solarserver
104	Mit Ölbad und Feinstaubsauger: „Sauberes Auto der Welt“ - WELT	Sep 22	PS WELT
105	https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/zedu-1-elektroauto-mit-partikelsammler/	Sep 22	automotorsport
106	https://www.handelsblatt.com/mobilitaet/elektromobilitaet/auto-entwicklung-mit-oelbad-und-feinstaubsauger-dieses-auto-soll-das-sauberste-der-welt-sein/28716752.html	Sep 22	auto motor sport
107	https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/stuttgart/stuttgart-umweltfreundlichstes-auto-der-welt-100.html	Sep 22	SWR
108	https://www.golem.de/news/feinstaub-und-mikroplastik-zedu-1-soll-das-umweltfreundlichste-auto-der-welt-sein-2209-168610.html	Sep 22	golem.de
109	https://www.solarserver.de/2022/09/29/nahezu-ohne-feinstaub-und-mikroplastik-dlr-entwickelt-emissionsfreies-e-auto/	Sep 22	Solarserver
110	https://www.pnp.de/ratgeber/auto-und-technik/Mit-Oelbad-und-Feinstaubsauger-4442390.html	Sep 22	PNP.de
111	https://www.welt.de/motor/news/article241326251/Mit-Oelbad-und-Feinstaubsauger-Sauberes-Auto-der-Welt.html	Sep 22	welt.de
112	https://business-panorama.de/news.php?newsid=6530068	Sep 22	Business Panorama.de
113	https://www.tag24.de/technik/auto/auto-der-zukunft-dlr-praesentiert-umweltfreundlichstes-auto-der-welt-2625622	Sep 22	Tag 24
114	https://www.ardmediathek.de/video/Y3JpZDovL3N3ci5kZS9hZXgvbzE3MzMONTQ	Sep 22	Landesschau SWR
115	https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/sendung-1930-uhr-vom-2892022-108.html	Sep 22	SWR
116	https://goettingen-mobil.blogspot.com/2022/09/zedu-1-so-heit-das-im-betrieb-weltweit.html	Sep 22	Göttingen Mobil
117	https://www.welt.de/motor/news/article241326251/Mit-Oelbad-und-Feinstaubsauger-Sauberes-Auto-der-Welt.html	Sep 22	welt.de
118	https://www.merkur.de/deutschland/baden-wuerttemberg/e-auto-prototyp-zedu-1-dlr-hwa-stuttgart-enthuellung-emissionsfrei-rekuperation-entwicklung-wissenschaft-bwg-91820217.html	Sep 22	Merkur.de
119	https://www.heise.de/news/Kein-Bremstaub-weniger-Reifenabrieb-DLR-zeigt-umweltfreundlichstes-Auto-7279824.html?wt_mc=rss.red.autos.autos.atom.beitrag.beitrag	Sep 22	heise online
120	https://www.golem.de/news/feinstaub-und-mikroplastik-zedu-1-soll-das-umweltfreundlichste-auto-der-welt-sein-2209-168610.html	Sep 22	Golem.de
121	https://www.bw24.de/auto/e-autos/e-auto-prototyp-zedu-1-dlr-hwa-stuttgart-enthuellung-emissionsfrei-rekuperation-entwicklung-wissenschaft-91820113.html	Sep 22	BW 24
122	https://caravan-news.de/news.php?newsid=6530068	Sep 22	Carvan-News.de
123	http://windjournal.de/alle-artikel/nahezu-ohne-feinstaub-und-mikroplastik-dlr-entwickelt-emissionsfreies-e-auto-120744	Sep 22	Wind Journal
124	https://www.nordic-market.de/prototyp-zedu-1-das-im-betrieb-umweltfreundlichste-auto-der-welt	Sep 22	nordic market
125	https://www.dasding.de/newszone/umweltfreundlichstes-auto-der-welt-100.html	Sep 22	News Zone
126	https://press24.net/news/20042924/kein-bremstaub-weniger-reifenabrieb-dlr-zeigt-umweltfreundlichstes-auto	Sep 22	presse24.net
127	https://www.solarserver.de/2022/09/29/nahezu-ohne-feinstaub-und-mikroplastik-dlr-entwickelt-emissionsfreies-e-auto/	Sep 22	Solarserver
128	https://www.pnp.de/ratgeber/auto-und-technik/Mit-Oelbad-und-Feinstaubsauger-4442390.html	Sep 22	PNP.de
129	https://www.tag24.de/technik/auto/dlr-praesentiert-umweltfreundlichstes-auto-der-welt-2625622	Sep 22	Tag 24
130	https://business-panorama.de/news.php?newsid=6530068	Sep 22	Business Panorama.de
131	https://www.forschung-und-wissen.de/nachrichten/technik/umweltfreundlichstes-auto-der-welt-praesentiert-13376704	Sep 22	Forschung und Wissen
132	https://www.handelsblatt.com/mobilitaet/elektromobilitaet/auto-entwicklung-mit-oelbad-und-feinstaubsauger-dieses-auto-soll-das-sauberste-der-welt-sein/28716752.html?nlayer=Newsticker_1985586	Sep 22	Handelsblatt
133	https://www.nordic-market.de/prototyp-zedu-1-das-im-betrieb-umweltfreundlichste-auto-der-welt	Sep 22	nordic market
134	Elektroauto soll im Betrieb das "umweltfreundlichste Auto der Welt" sein - ecomento.de	Sep 22	ecomento.de
135	Zedu 1 – laut Entwickler das umweltfreundlichste Auto der Welt Regio TV (regio-tv.de)	Sep 22	regio.tv

136	Elkro ohne Aber	Nov 22	Zeitung Der Standard
137	Neue Abgasnorm Euro 7 soll auch Elektroautos betreffen: https://www.autobild.de/artikel/euro-7-abgasnorm-reifenabrieb-feinstaub-grenzwerte-schadstoffe-e-autos-18563385.html	Nov 22	www.autobild.de
138	DLR versucht neue Techniken, um Bremsstaub und Reifenabrieb zu vermeiden	Nov 22	Tagesspiegel
139	Wie Elektroautos wirklich emissionsfrei werden könnten: https://www.derstandard.at/story/2000140500515/wie-elektroautos-wirklich-emissionsfrei-werden-koennten	Nov 22	www.derstandard.at
140	"Gesamtfinanzierung noch nicht geklappt" - HWA zeigt Hyraze-League-Prototyp "ZEDU-1" in Hockenheim: https://e-formel.de/e-serien/e-serien-news/e-serien-news-detail/gesamtfinanzierung-im-1-schritt-noch-nicht-geklappt-hwa-zeigt-hyraze-league-prototyp-zedu-1-in-hockenheim-15241.html	Nov 22	e-formel.de/
141	Bremsen ohne Feinstaub: https://www.automobil-industrie.vogel.de/bremsen-ohne-feinstaub-a-996080/	Jan 22	automobil-industrie.vogel.de
142	Was steckt im "umweltfreundlichsten Auto der Welt"? https://www.n-tv.de/mediathek/videos/auto/Was-steckt-im-umweltfreundlichsten-Auto-der-Welt--article23742928.html	Nov 22	n-tv
143	Bremsabrieb und Gummi	Nov 22	Dülmener Zeitung
144	Euro-7-Norm betrifft auch E-Autos	Dez 22	bfp fuhrpark + management
145	Weiterer Lösungsansatz gegen zu viel Reifenabrieb in der Umwelt	Jan 23	Neue reifenzeitung
146	OB Nopper informiert sich am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt über innovative Forschungen: https://www.stuttgart.de/service/aktuelle-meldungen/februar-2023/ob-nopper-informiert-sich-am-deutschen-zentrum-fuer-luft-und-raumfahrt-ueber-innovative-forschungen.php	Feb 23	www.stuttgart.de
147	Mit ZEDU auf Zero - Das DLR entwickelt das im Betrieb umweltfreundlichste Auto der Welt	Feb 23	DLR magazin
148	Wissenschaftlerin für einen Tag! - DLR	Feb 23	Wissenschaftlerin für einen Tag! - DLR
149	So spannend kann Wissenschaft sein - WDR 5 Quarks - WDR 5 - Podcasts und Audios - Mediathek - WDR	Feb 23	WDR
150	Unterwegs mit Wasserstoff - Mobilität Zukunft?	Mrz 23	www.stuttgarter-nachrichten.de
151	Mit Wasserstoff angetriebene Lastenräder: Großes Interesse an Präsentation des Feldversuchs	Mrz 23	www.stuttgart.de
152	ZEDU1 (Zero Emission Drive Unit Generation 1) - Das sauberste Auto der Welt im Betrieb	Mrz 23	intranet.dlr.de
153	Euro 7 für Stromer	Mrz 23	www.autostrassenverkehr.de
154	Euro 7 für Stromer	Mrz 23	www.autostrassenverkehr.de
155	Mit ZEDU auf Zero	Mai 23	DLRMagazin
156	Könnte die neue Abgasnorm Euro 7 doch noch scheitern?	Mai 23	www.autobild.de
157	Wie das „Auto der Zukunft“ aussieht	Jun 23	OÖ Nachrichten
158	Greentech Festival in Tegel Werbung für schnelle E-Autos	Jun 23	tagesspiegel.de
159	DLR at the GREENTECH FESTIVAL	Jun 23	www.dlr.de
160	Greentech-Festival 2023: Zwischen Greenwashing und Innovation	Jun 23	www.basicthinking.de
161	Grüner wird es nicht: ZEDU-1; Nachhaltigkeits-Magazin Te.nor:		https://tenor.bethmannbank.de/nachhaltigkeit/zedu-1-gruener-wird-es-nicht
162	Stuttgarter bauen sauberstes Auto der Welt - Tempo 150 und (fast) Nullfeinstaub		Bildzeitung
163	ZEDU-1: Das im Betrieb umweltfreundlichste Auto der Welt - DLR Portal		
164	oder bei YouTube: Roll-out ZEDU-1: emissionsfrei unterwegs in die Zukunft ohne Feinstaub und Mikroplastik		
166	"Gesamtfinanzierung noch nicht geklappt" - HWA zeigt Hyraze-League-Prototyp "ZEDU-1" in Hockenheim - e-Formel.de		
167	Roll-out ZEDU-1: emissionsfrei unterwegs in die Zukunft ohne Feinstaub und Mikroplastik - YouTube		
168	ZEDU-1: Das im Betrieb umweltfreundlichste Auto der Welt - DLR Portal		
169	Mit Ölbad und Feinstaubsauger: „Sauberes Auto der Welt“ - WELT		
170	https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/stuttgart/stuttgart-umweltfreundlichstes-auto-der-welt-100.html		
171	https://www.golem.de/news/feinstaub-und-mikroplastik-zedu-1-soll-das-umweltfreundlichste-auto-der-welt-sein-2209-168610.html		
172	https://www.solarserver.de/2022/09/29/nahezu-ohne-feinstaub-und-mikroplastik-dlr-entwickelt-emissionsfreies-e-auto/		
173	https://www.pnp.de/ratgeber/auto-und-technik/Mit-Oelbad-und-Feinstaubsauger-4442390.html		
174	https://www.welt.de/motor/news/article241326251/Mit-Oelbad-und-Feinstaubsauger-Sauberes-Auto-der-Welt.html		
175	https://business-panorama.de/news.php?newsid=6530068		
176	https://www.tag24.de/technik/auto/auto-der-zukunft-dlr-praesentiert-umweltfreundlichstes-auto-der-welt-2625622		
177	https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/sendung-1930-uhr-vom-2892022-108.html (SWR 28.09.2022. ab Minute 12:20)		
178	https://www.ardmediathek.de/video/Y3JpZDovL3N3ci5kZS9hZXQvZzE3MzM0NTQ (ARD. 28.09.2022-19:30. Landeschau SWR, ab Minute 15:15)		
179	https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/sendung-1930-uhr-vom-2892022-108.html		
180	https://goettingen-mobil.blogspot.com/2022/09/zedu-1-so-heit-das-im-betrieb-weltweit.html		
181	https://www.welt.de/motor/news/article241326251/Mit-Oelbad-und-Feinstaubsauger-Sauberes-Auto-der-Welt.html		
182	https://www.merkur.de/deutschland/baden-wuerttemberg/e-auto-prototyp-zedu-1-dlr-hwa-stuttgart-enthuellung-emissionsfrei-rekuperation-entwicklung-wissenschaft-bwg-91820217.html		
183	https://www.heise.de/news/Kein-Bremsstaub-weniger-Reifenabrieb-DLR-zeigt-umweltfreundlichstes-Auto-7279824.html?wt_mc=rss.red.autos.autos.atom.beitrag.beitrag		

- 184 <https://www.golem.de/news/feinstaub-und-mikroplastik-zedu-1-soll-das-umweltfreundlichste-auto-der-welt-sein-2209-168610.html>
- 185 <https://www.bw24.de/auto/e-autos/e-auto-prototyp-zedu-1-dlr-hwa-stuttgart-enthuellung-emissionsfrei-rekuperation-entwicklung-wissenschaft-91820113.html>
- 186 <https://caravan-news.de/news.php?newsid=6530068>
- 187 <http://windjournal.de/alle-artikel/nahezu-ohne-feinstaub-und-mikroplastik-dlr-entwickelt-emissionsfreies-e-auto-120744>
- 188 <https://www.nordic-market.de/prototyp-zedu-1-das-im-betrieb-umweltfreundlichste-auto-der-welt>
- 189 <https://www.dasding.de/newszone/umweltfreundlichstes-auto-der-welt-100.html>
- 190 <https://press24.net/news/20042924/kein-bremsstaub-weniger-reifenabrieb-dlr-zeigt-umweltfreundlichstes-auto>
- 191 <https://www.solarserver.de/2022/09/29/nahezu-ohne-feinstaub-und-mikroplastik-dlr-entwickelt-emissionsfreies-e-auto/>
- 192 <https://www.pnp.de/ratgeber/auto-und-technik/Mit-Oelbad-und-Feinstaubsauger-4442390.html>
- 193 <https://www.tag24.de/technik/auto/dlr-praesentiert-umweltfreundlichstes-auto-der-welt-2625622>
- 194 <https://business-panorama.de/news.php?newsid=6530068>
- 195 <https://www.forschung-und-wissen.de/nachrichten/technik/umweltfreundlichstes-auto-der-welt-praesentiert-13376704>
- 196 https://www.handelsblatt.com/mobilitaet/elektromobilitaet/auto-entwicklung-mit-oelbad-und-feinstaubsauger-dieses-auto-soll-das-sauberste-der-welt-sein/28716752.html?nlayer=Newsticker_1985586
- 197 <https://www.handelsblatt.com/mobilitaet/elektromobilitaet/auto-entwicklung-mit-oelbad-und-feinstaubsauger-dieses-auto-soll-das-sauberste-der-welt-sein/28716752.html>
- 198 <https://www.nordic-market.de/prototyp-zedu-1-das-im-betrieb-umweltfreundlichste-auto-der-welt>
- 199 <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/zedu-1-elektroauto-mit-partikelsammler/>
- 200 [YouTube: Roll-out ZEDU-1: emissionsfrei unterwegs in die Zukunft ohne Feinstaub und Mikroplastik](#)
- 201 [merkur.de : „Umweltfreundlichstes E-Auto der Welt“ in Stuttgart enthüllt](#)
- 202 [Deutsches Elektroauto "Zedu-1" soll fast komplett emissionsfrei sein - Trending Topics](#)
- 203 [Golem.de: Feinstaub und Mikroplastik: Zedu-1 soll das umweltfreundlichste Auto der Welt sein](#)
- 204 [Solarserver : DLR entwickelt emissionsfreies E-Auto ZEDU-1 - Solarserver](#)
- 205 [Bremsen ohne Feinstaub \(vogel.de\)](#)
- 206 [Fahrzeugtechnik | Fahrzeugkonzept des DLR soll Ausstoß von Feinstaub vermeiden | springerprofessional.de](#)
- 207 [Projekt ZEDU-1: Mobilität ohne Feinstaub - Spotfolio GmbH & Co. KGaA](#)
- 208 [So lassen sich Brems- und Reifenabrieb reduzieren | springerprofessional.de](#)
-
-

Links (Auswahl) zum ZEDU1-Projekt (s. auch Tabelle 45):

- [DLR - Institut für Fahrzeugkonzepte - Mobilität ohne Feinstaub](#)
- [DLR-Fahrzeugkonzept ZEDU-1 - DLR Portal](#)
- [Mobilität ohne Feinstaub - DLR Portal](#)
- [Dritter Fortschrittsbericht Strategiedialog Automobilwirtschaft BW \(2020\)](#)
- [Vierter Fortschrittsbericht Strategiedialog Automobilwirtschaft BW \(2021\)](#)
- [Fünfter Fortschrittsbericht Strategiedialog Automobilwirtschaft BW \(2022\)](#)
-

Die im Rahmen des Projekts entstandene wissenschaftliche Veröffentlichungen sind dem Kapitel 6 Literaturverzeichnis zu entnehmen.

4 Zeit- und Meilensteinplan

4.1 Zeitplan

Das Projekt befindet wurde entsprechend dem Projekt- und Meilensteinplan (Abbildung 318, Tabelle 46) im Zeitplan erfolgreich durchgeführt. Der Ablauf des Gesamtprojekts ist als Gantt-Diagramm auf Abbildung 318 dargestellt.

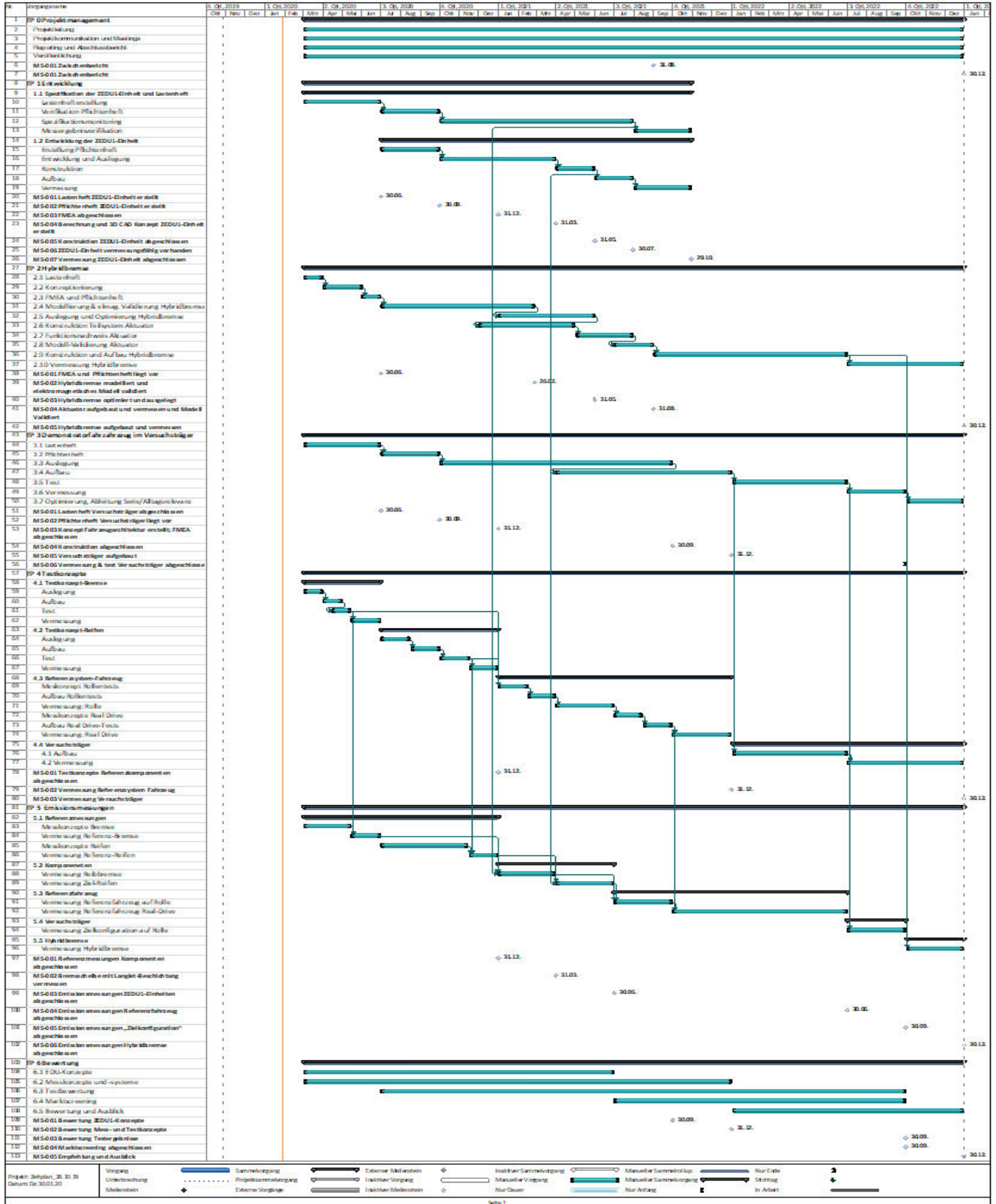


Abbildung 318: Projektplan (Gantt-Diagramm)

4.2 Meilensteine

Einige Meilensteine wurden ohne nachteilige Auswirkungen auf den Projektablauf bei der UA-Vergabe mit dem Bieter HWA neu abgestimmt. In der folgenden

Tabelle 46 sind diese chronologisch zusammengefasst. Der Zeitplan ist davon unberührt und erfolgt im Weiteren wie im Projektplan vorgesehen.

Tabelle 46: Übersicht Meilensteine

Plandatum	Anpassung	Verantw.	# MS	Meilensteinbeschreibung	Status
31.03.2020		PL	MS-TP0-001	Verwendungsnachweis, Sachbericht	
31.03.2020		PL	MS-TP0-002	Fortschrittsbericht (SDA)	
30.06.2020		FEK	MS-TP1-001	Lastenheft ZEDU1-Einheit erstellt	
30.06.2020		AEW	MS-TP2-001	FMEA und Pflichtenheft liegen vor	
30.09.2020		FEK	MS-TP3-001	Lastenheft Entwicklungsträger abgeschlossen	
30.09.2020		PL	MS-TP0-003	Projektbericht (WM)	
31.12.2020		HWA	MS-TP1-002	Pflichtenheft ZEDU1-Einheit erstellt	
31.12.2020		HWA	MS-TP3-002	Pflichtenheft Versuchsträger liegt vor	
28.02.2021		AEW	MS-TP2-002	Hybridbremse modelliert und elektromagnetisches Modell validiert	
31.03.2021		HWA	MS-TP1-003	FMEA abgeschlossen	
31.03.2021		FEK	MS-TP4-001	Testkonzepte Referenzkomponenten abgeschlossen	
31.03.2021		PL	MS-TP0-004	Verwendungsnachweis, Sachbericht	
31.03.2021		PL	MS-TP0-007	Fortschrittsbericht (SDA)	
31.03.2021		PL	MS-TP0-006	Zwischenbericht (WM)	
31.03.2021		PL	MS-TP0-005	Projektbericht (WM)	
31.05.2021		HWA	MS-TP3-003	Konzept Fahrzeugarchitektur erstellt; FMEA abgeschlossen	
31.05.2021		AEW	MS-TP2-003	Hybridbremse optimiert und ausgelegt	
30.06.2021		HWA	MS-TP1-004	Berechnung und 3D CAD Konzept ZEDU1-Einheit erstellt	
31.08.2021		HWA	MS-TP1-005	Konstruktion ZEDU1-Einheit abgeschlossen	
31.08.2021	30.09.2021	AEW	MS-TP2-004	Aktuator aufgebaut und vermessen und Modell Validiert	
30.09.2021		PL	MS-TP0-008	Projektbericht (WM)	
31.12.2021		HWA	MS-TP3-004	Konstruktion Versuchsträger abgeschlossen	
31.12.2021		FEK	MS-TP4-002	Vermessung Referenzsystem Fahrzeug (Rolle)	
31.12.2021	31.01.2022	VT	MS-TP5-001	Referenzmessungen Komponenten abgeschlossen	
31.01.2022		HWA	MS-TP1-006	ZEDU1-Einheit vermessungsfähig vorhanden	
31.12.2021	28.02.2022	VT	MS-TP5-002	Bremsscheibe mit Hartmetall-Beschichtung vermessen	
28.02.2022		HWA	MS-TP1-007	(Vermessung) ZEDU1-Einheit abgeschlossen/aufgebaut	
28.02.2022		HWA	MS-TP3-005	Versuchsträger aufgebaut	
31.12.2021	31.03.2022	FEK	MS-TP6-001	Bewertung ZEDU1-Konzepte	
31.12.2021	31.03.2022	FEK	MS-TP6-002	Bewertung Mess- und Testkonzepte	
31.03.2022		VT	MS-TP5-003	Emissionsmessungen ZEDU1-Einheiten abgeschlossen (Ausgewertet)	
31.03.2022		PL	MS-TP0-009	Zwischenbericht (WM)	
31.03.2022		PL	MS-TP0-010	Verwendungsnachweis, Sachbericht	
31.03.2022		PL	MS-TP0-012	Fortschrittsbericht (SDA)	
31.03.2022		HWA	MS-TP3-006	ZEDU1-Einheit in Versuchsträger integriert	
31.03.2022		PL	MS-TP0-011	Projektbericht (WM)	
31.03.2022		FEK	MS-TP4-003	Vermessung Referenzsystem Fahrzeug (Bremse beschichtet)	
30.06.2022		HWA	MS-TP3-007	Versuchsträger mit ZEDU1-Einheit in Betrieb genommen	
30.06.2022		VT	MS-TP5-004	Emissionsmessungen Referenzfahrzeug abgeschlossen	
30.06.2022		FEK	MS-TP4-004	Vermessung Referenzsystem Fahrzeug (Realdrive)	
30.09.2022		HWA	MS-TP3-008	Vermessung & Test Versuchsträger abgeschlossen	
30.09.2022	31.12.2022	FEK	MS-TP6-003	Bewertung Testergebnisse	
30.09.2022	31.12.2022	FEK	MS-TP6-004	Marktscreening abgeschlossen	
30.09.2022	31.12.2022	PL	MS-TP0-013	Projektbericht (WM)	
31.12.2022	31.03.2023	VT	MS-TP5-005	Emissionsmessungen „Zielkonfiguration“ abgeschlossen	
31.12.2022	31.03.2023	AEW	MS-TP2-005	Hybridbremse aufgebaut und vermessen	
31.12.2022	31.03.2023	FEK	MS-TP4-005	Vermessung Versuchsträger abgeschlossen	
31.12.2022	31.03.2023	VT	MS-TP5-006	Emissionsmessungen Hybridbremse abgeschlossen	
31.12.2022	31.03.2023	FEK	MS-TP6-005	Empfehlung und Ausblick	
31.03.2023	30.06.2023	PL	MS-TP0-015	Abschlussbericht (WM)	
31.03.2023	30.06.2023	PL	MS-TP0-014	Schlussverwendungsnachweis, Sachbericht	

5 Ressourcen

5.1 Aufstellung der Mittel - Übersicht

Die Verwendung der Finanzmittel im Detail können dem Verwendungsnachweis (separates Dokument) entnommen werden.

6 Literaturverzeichnis

1. DLR-FK: Vier-Motoren-Allradrollenprüfstand mit Klimatisierung und Abgasanalyse. . DLR-FK. [Online] www.dlr.de/fk/desktopdefault.aspx/tabid-2900/5862_read-6422/.
2. S WR Aktuell. [Online] SWR, 28. 09 1922. <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/stuttgart/stuttgart-umweltfreundlichstes-auto-der-welt-100.html>.
4. Bondorf, Linda, et al. Electric vehicle emissions: Measurement of brake- and tire wear particles on a chassis dynamometer. Online : European Aerosol Conference, 2021.
5. Bondorf, Linda, et al. Towards the reduction of brake and tire emissions - The Zero Emission Drive Unit (ZEDU-1). s.l. : ETH Nanoparticles Conference, 2021.
6. Bondorf, Linda, et al. On-board measurement of ultrafine non-exhaust particulate emissions from a battery electric vehicle. s.l. : EFCA Symposium, 2022.
7. Wieser, Steffen, et al. Development and Testing of a Zero Emission Drive Unit for Battery Electric Vehicles. s.l. : Second International Conference on Sustain (SMART), 2022.
8. Löber, Manuel, et al. Formation and Morphological Appearance of Tyre Wear Emissions. Zürich : ETH Nanoparticles Conference, 2023.
9. Bondorf, Linda, et al. Towards the reduction of non-exhaust emissions: Particulate measurements to evaluate the novel vehicle concept ZEDU-1 "Zero Emission Drive Unit Generation. European Aerosol Conference : s.n., 2023.
10. Bondorf, Linda, et al. Airborne brake wear emissions from a battery-electric vehicle. Atmosphere. 14, 2023, doi: 10.3390/atmos.
11. AQEG. Particulate matter in the United Kingdom. Draft report for the Department for Environment, Food and Rural Affairs. London, UK : Air Quality Expert Group, 2004.
12. www.stuttgart.de. Feinstaubalarm. [Online] Stuttgart, 30. 06 2023. [Zitat vom: 30. 06 2023.] <https://www.stuttgart.de/leben/umwelt/luft/feinstaubalarm.php>.
13. G ünter Oberdörster, Eva Oberdörster, and Jan Oberdörster. Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles. Environmental Health Perspectives. 2005.
14. Liu. Evidence for the presence of air pollution nanoparticles in placental tissue cells. Science of The Total Environment. 2021, Bd. 751.
15. WHO. What are the WHO Air quality guidelines? www.who.int. [Online] WHO, 22. 09 2021. <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>.
16. U nion, Europäische. RICHTLINIE 2008/50/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über Luftqualität und saubere Luft für Europa. s.l. : DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION , 2008. Amtsblatt der Europäischen Union.
17. Kris Vanherle, Susana Lopez-Aparicio, Henrik Grythe, Anke Lükewille, Andreas Unterstaller, Inge Mayeres. ETC/ATNI Report 5/2020: Transport Non-exhaust PM-emissions. An overview of emission estimates, relevance, trends and policies. www.eionet.europa.eu. [Online] 02. 03 2021. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etc-atni-report-5-2020-transport-non-exhaust-pm-emissions-an-overview-of-emission-estimates-relevance-trends-and-policies>.
18. COMMISSION, EUROPEAN. RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über Luftqualität und saubere Luft für Europa. europa.eu. [Online] 26. 10 2022.
19. Commission, European. European Green Deal: Commission proposes rules for cleaner air and water. ec.europa.eu. [Online] 26. 10 2022. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6278.
20. Bundesamt, Umwelt. Luftreinhaltung in der EU. umweltbundesamt.de. [Online] 31. 03 2022. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/regelungen-strategien/luftreinhaltung-in-der-eu#beurteilung-und-kontrolle-der-luftreinhaltung-in-der-eu>.
21. Perricone, G. und Wahlstrom, J. Olofsson, U. Towards a test stand for standardized measurements of the brake emissions. Proc. Inst. Mech. Eng. 2016. Bde. Part D-J., 1521-1528, 230 (11).
22. Toni Feißel, David Hesse, Klaus Augsburg, Sebastian Gramstat. Measurement of Vehicle Related Non Exhaust Emissions under Real Driving. 2020.
23. Holtmann, Christoph. Design and Optimization Method for a High Power Eddy Current Brake with a Magneto Isotropic Material Structure for the Use in Electrified Heavy Duty Trucks. s.l. : Fisita, 2021.
24. Bremsvorrichtung und Fahrzeug. DE 10 2018 212 386 B4 Deutschland, 25. July 2018.
25. Gay, Sebastian E. Optimized design of an integrated eddy-current and friction brake for automotive applications. Vehicle Power and Propulsion Conference : IEEE, 2005.

26. Yazdanpanah, Reza. Hybrid electromagnetic brakes: design and performance evaluation. IEEE Transactions on Energy Conversion. 30. Januar 2014, S. 60-69.
27. Huang, Shan. Design of a frictional–electromagnetic compound disk brake for automotives. Journal of Automobile Engineering. 2020, S. 1113-1122.
28. von Glasner, Egon Christian. Bremsysteme und bremsverhalten von nutzfahrzeugen und zügen. Bremsenhandbuch. s.l. : Springer, 2012, S. 165-197.
29. Holtmann, Christoph. 2d reluctance model of an eddy current brake with a magneto isotropic material structure. s.l. : IEEE, 2020.
30. Mawardi, Osman B. On the concept of coenergy. Journal of the Franklin Institute. 1957, S. 313-332.
31. Jeltsema, Dimitri. Multidomain modeling of nonlinear networks and systems. IEEE Control Systems Magazine. 29. 04 2009, S. 28-59.
32. Coblas, D. Numerical simulation of constant velocity squeeze flow. s.l. : UPB Bul., 2013.
33. Holtmann, Christoph und Köhler, Christoph. Eddy Current-and Friction Brake Fusion by a Disc-Spring to a Hybrid-Brake. 24th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT) : IEEE, 2021.
34. Köhler, Christoph. Experimental Examination of the Heat Transfer in a High Power Eddy Current Brake with a Magneto-isotropic Material Structure. Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART) : IEEE, 2022.
35. Holtmann, Christoph und Köhler, Christoph. The Hybrid Brake Model and Its Validation. Electronics. Advanced Modelling and Control of Complex Nonlinear Mechatronic Systems–Volume II, 11. Juni 2023, 12, S. 20.
36. Ehrenberger, S, Philipps, F und Konrad, M.: Analysis of Pollutant Emissions of Three Plug-in Hybrid Electric Vehicles Corresponding. Atmospheric Environment. 2019.
37. Zero Emission Drive Unit - Übersicht der Bremskonzepte. Franz Philipps, Linda Bondorf und Sven Reiland. s.l. : Springer Vieweg, 2023, Bde. Internationales μ -Symposium 2023.
38. Zero Emission Drive Unit - overview of the braking concepts. Franz Philipps, Linda Bonndorf und Sven Reiland. s.l. : Springer Vieweg, 2023, Bde. Internationales μ -Symposium 2023.
39. Augsburg, K., Hesse, D. and Wenzel, F. Vorrichtung zur Messung und Klassifizierung der Partikelemissionen einer Radbremse eines Fahrzeuges. DE 10 2017 006 349 B4 Deutschland, 2017.
40. Stuttgarter Zeitung, 8.10.2018, S.18 . 08.10.2018, Stuttgarter Zeitung.
41. Transport & Mobility (TML), REMOVE economic transport and emissions model (Version v.3.3.2), Datenordner: Pivots Exceldatei: Emissions. 2010.
42. Gay S.E. and Ehsani, M. Optimized Design of an Integrated Eddy-Current and Friction Brake for Automotive Applications. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2005, Chicago, IL, USA, Sep. 2005, pp. 189–193.
43. Stuttgart : Stuttgarter Zeitung, 08.10.2018, Stuttgarter Zeitung, S. 18.
44. Wang, K., He, R., Tang, T., and Liu, R. Design and thermal analysis of a novel permanent magnet-friction integrated brake for vehicle . Therm sci, . doi: 10.2298/TSCI190609070W, 2020, Bde. vol. 24, 3 Part A, pp. 1827–1834.
45. Glasner, E.-C. von. Bremsenhandbuch: Bremsysteme und Bremsverhalten von Nutzfahrzeugen und Zügen . s.l. : Springer, 2012. pp. 165–197..
46. Hadžiselimović, M., Vrtič, P., Štumberger, G., Marčič, T., and Štumberger, B. Determining force characteristics of an electromagnetic brake using co-energy. Journal of magnetism and magnetic materials. 2008, Bde. 320, no. 20, 556-561.
47. Jeltsema, D. and Scherpen, J. M. A. Multidomain modeling of nonlinear networks and systems. IEEE Control Systems Magazine. 2009, Bd. 29 no. 4, pp. 28–59.
48. Mawardi, O. B. On the concept of coenergy. Journal of the Franklin Institute. 1957, Bd. 264 no.4, pp. 313–332.
49. Huang, S., Bao, J., Ge, S., Yin, Y. and Liu, T. Design of a frictional–electromagnetic compound disk brake for automotives. Journal of Automobile Engineering, Part D. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Bd. vol. 234, no. 4, pp. 1113–1122,.
50. Coblăș, D., Broboana, D., Balan, C. and Hejjam, M. Numerical Simulation of Constant Velocity Squeeze Flow. UPB Bul. 2013, Bd. 75 no. 2, Series D.
51. Philipps, F. Zero Emission Drive Unit - Generation 1 (ZEDU-1). verkehrsforschung.dlr.de. [Online] DLR, 2022. <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/zero-emission-drive-unit-generation-1-zedu-1>.
52. Köllner, Christiane. So lassen sich Brems- und Reifenabrieb reduzieren. pringerprofessional.de. [Online] Springer Professional, 23. 03 2021. <https://www.springerprofessional.de/fahrwerk/partikel---feinstaub/so-lassen-sich-brems--und-reifenabrieb-reduzieren/18816284>.
53. Staubsauger im Radkasten. Philipps, F. 16.04.2021 , s.l. : VDI-Nachrichten, 2021.