

Zero Emission Drive Unit - Übersicht der Bremskonzepte

Franz Philipps¹, Linda Bondorf² und Sven Reiland³

¹ Institut für Fahrzeugkonzepte, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, 70569, Deutschland
franz.philipps@dlr.de

² Institut für Verbrennungstechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, 70569, Deutschland
linda.bondorf.dlr.de

³ Institut für Fahrzeugkonzepte, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, 70569, Deutschland
sven.reiland@dlr.de

Zusammenfassung. Im Rahmen des ZEDU1 (Zero Emission Drive Unit Generation 1) Projekts wurden sowohl ein konventionelles Elektrofahrzeug, als Referenzfahrzeug, als auch ein Versuchsträger der Zero Emission Drive Unit, zur messtechnischen Charakterisierung konzipiert und vermessen. Ein zentrales Element des Projekts war die Untersuchung und Charakterisierung einer grauguss- und einer hartmetallbeschichteten Brems Scheibe im realen Betrieb als auch auf einem Komponentenprüfstand. Dabei wurde auch der Einfluss der Rekuperation auf die Bremsmissionen luftgetragener Partikel vermessen. Ebenso wurden dazu geeignete Methoden und Messkonzepte zur online On-Board-Charakterisierung entwickelt und im Einsatz erfolgreich getestet.

Die Messergebnisse zeigen, dass die Temperatur der Bremse einen Einfluss auf Generierung von Partikeln im Größenbereich von 10 nm hat, wohingegen der Bremsvorgang hauptsächlich Partikel im Größenbereich 200 nm bis 300 nm erzeugt. Ebenso konnte Messtechnisch gezeigt werden, dass über Rekuperation bei Realfahrten, im RDE-Zyklus, eine Reduktion der luftgetragenen Abriebsemissionen von bis zu knapp 90 % möglich sind. Eine weitere Reduktion der luftgetragenen Bremsabriebe von bis zu 83 %, wurde für Partikel der Größe 300 nm bis 10 µm für hartmetallbeschichtete Brems Scheiben bestimmt.

Des Weiteren konnte im Rahmen der Messungen gezeigt werden, dass die herangezogenen Fahrzyklen zur Bestimmung der Bremsabriebe einen entscheidenden Einfluss auf die Emissionen aufweisen.

Im Projekt wurde auch ein neuartiges Bremssystem ohne luftgetragene Abriebsemissionen entwickelt und validiert. Dazu wurde ein Demonstrator-Fahrzeug, als Träger der neu entwickelten Technologie, der ZEDU1-Einheit, konzipiert, konstruiert, aufgebaut, vermessen und auf seine Alltagstauglichkeit untersucht. Die durchgeführten Tests und Untersuchungen für die entwickelte Lamellenbremse bestätigen die volle Funktionsfähigkeit sowie eine Dauerfestigkeit und somit die Alltagstauglichkeit.

Keywords: ZEDU1, Feinstaub, Ultrafeinstaub, Bremsabriebe, Bremsemissionen, Abriebsemissionen, Emissionen aus Nichtverbrennungsprozessen, PM₁₀, PM_{2,5}, Lamellenbremse, Hartmetallbeschichtung, Rekuperation.

1 Einleitung

Neben den Abgasen von Verbrennungsmotoren belastet vor allem Feinstaub die Umwelt. Hierbei handelt es sich um kleine Partikel, die in die Luft emittiert werden und einen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometern haben. Feinstaub kann aus verschiedenen Quellen stammen. Der größte Anteil kommt aus dem Verkehr. In Stuttgart am Neckartor sind dies ca. 58 % LUBW [1]. Ein besonderer hoher Anteil aus den Verkehrsemissionen ist beim Ultrafeinstaub (UFP) zu verzeichnen. Die Feinstaub Belastung kann zu erheblichen Gesundheitsproblemen führen. Insbesondere die Belastung mit Ultrafeinpartikeln, da diese nicht nur Lungengängig sind, sondern bis zu den Alveolen (**Fig. 1**) vordringen (ca. 50 %) [2], dort ins Lungengewebe dringen und so in den Blutkreislauf übergehen und damit alle Organe betreffen [3]. Aufgrund ihrer, im Verhältnis zur Größe, hohen Oberfläche können diese Partikel, obwohl ihr Beitrag zur Masse eher gering ist, je nach Beschaffenheit ein hohes gesundheitsgefährdendes Potential aufweisen [2, 22].

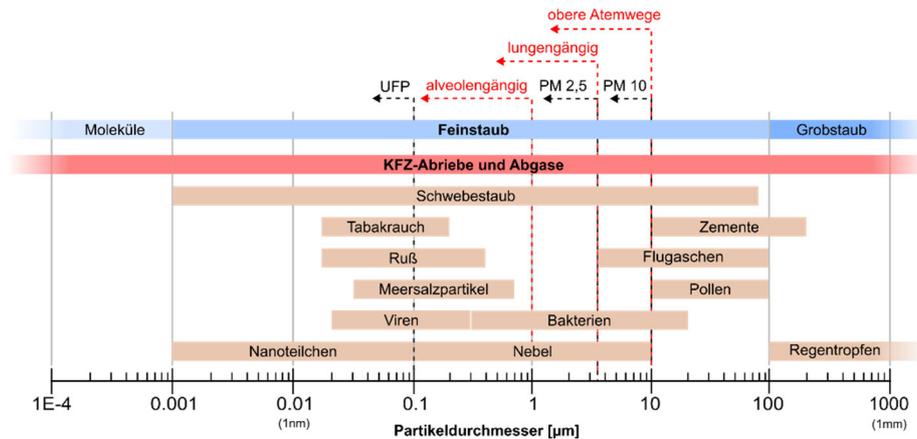


Fig. 1. Feinstäube und Partikeldurchmesser

Die WHO sieht in einer Verringerung der Feinstaub-Belastungen eine Reduktion der Krankheitslasten bei Asthma, Lungenkrebs, Schlaganfall, Herz-Kreislauf-erkrankungen sowie bei akuten und chronischen Atemwegserkrankungen und empfiehlt daher einen Grenzwert für PM_{2,5} von 5 µg/m³ und für PM₁₀ auf 15 µg/m³ [4]. Die EU leitete daraus für die Mitgliedsländer neue verbindliche Grenzwerte, von weniger als 10 µg/m³ für PM_{2,5} und 20 µg/m³ für PM₁₀, für 2030 ab, sowie das Erreichen einer Null-Luftverschmutzung bis spätestens 2050 [5, 6].

Um der Feinstaubbelastung entgegenzuwirken führt die EU mit der Euro 7 Grenzwerte für Bremsabriebe zum 1.7.2025 (Plan) von 7 mg/km, der später auf 3 mg/km reduziert werden soll, ein.

Die alleinige Elektrifizierung des Verkehrs stellt, was die Feinstaubemissionen aus Nichtverbrennungsprozessen, wie z.B. aus Bremsabrieben, angeht keine Lösung dar. Der Feinstauanteil aus Nichtverbrennungsprozessen steigt stetig und ist seit 2013 bei PM₁₀ und seit 2018 bei PM_{2,5} höher als der Anteil aus den Verbrennungsprozessen [7]. Dies ist der Zunahme an gefahrener Kilometerleistung und der Zunahme an Fahrzeuggewicht geschuldet.

Im Rahmen des ZEDU1 (**Z**ero **E**mission **D**rive **U**nit **G**eneration **1**) Projekts wurden neue innovative Lösungsansätze der Brems und Reifenabriebe untersucht und realisiert. Es wurden sowohl ein konventionelles Elektrofahrzeug, als Referenzfahrzeug zur messtechnischen Charakterisierung des State of the Art, sowie ein Demonstrator-Fahrzeug das als Träger der neu entwickelten Technologie, der Zero Emission Drive Unit, konzipiert, konstruiert, aufgebaut, vermessen und auf seine Alltagstauglichkeit untersucht. Ebenso wurden dazu Methoden und geeignete Messkonzepte zur OnBoard-Charakterisierung entwickelt und im Einsatz erfolgreich getestet.

2 Bremskonzepte

Für eine in fragekommende Auswahl an Bremskonzepten für die abriebemissionsfreie ZEDU1-Einheit wurden fünf Konzepte in engere Auswahl genommen und bewertet [20, 21]. In der **Tabelle 1** ist die Bewertung der Konzepte dargestellt.

Tabelle 1. Bewertung Bremskonzepte.

| Konzept | Beschichtung | Teilfilter | Kapselung | Lamellen | Induktion |
|----------------|---------------------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Emissionen | reduziert | reduziert | keine | keine | keine |
| Aufwand | kein | gering | mittel | mittel | sehr hoch |
| Risiko | keins | gering | sehr hoch | gering | sehr hoch |
| Gewicht | sehr gering | gering | mittel | gering | mittel |
| Kosten | sehr gering | sehr hoch | hoch | gering | hoch |
| Bewertung | + | -- | 0 | +++ | ++ |
| Entwicklung | Frenoza | | | HWA | DLR |

Da der Anspruch einer vollständigen Vermeidung von Bremsabrieben bestand wurden im Rahmen des ZEDU1-Projekts die Bremskonzepte mit Teilemissionen an Bremsabrieben nicht weiter betrachtet sondern einmal eine nasse Lamellenbremse und zum anderen eine Induktionshybridbremse bis zum TRL-Level (Technology Readiness Level) 7 resp. 6 entwickelt und als Prototyp in einem Versuchsträger erprobt, bzw. bei der Hybridbremse auf dem Prüfstand, charakterisiert und getestet.

Eine Sonderstellung erhielt das Bremskonzept einer hartmetallbeschichteten Brems Scheibe. Im Hinblick auf künftige Euro 7 mit Grenzwertvorgabe bei Bremsemissionen wurde in diesem Konzept in diesem Zusammenhang, auch aufgrund des relativ

geringen technischen Aufwands und der Kostenstruktur, Potential gesehen und in die Referenzuntersuchungen zur Charakterisierung mit einbezogen.

An dieser Stelle wird im weiteren Verlauf nur kurz auf die einzelnen Entwicklungskonzepte eingegangen und über die Untersuchungen an der Referenzcharakterisierung berichtet.

2.1 Lamellenbremse

Im Rahmen des ZEDU1-Projekts wurde von HWA im Unterauftrag eine alltagstaugliche Lammellenbremse als kompakte Getriebe Bremseinheit entwickelt und aufgebaut [8, 20]. Diese wurde zuerst auf einem Prüfstand getestet in Betrieb genommen und anschließend in den ZEDU1-Versuchsträger eingebaut [21].

Die Lamellenbremse besteht aus einem Lamellenpaket aus sieben Stahlringblechen. Jede zweite Lamelle ist mit dem Hohlradzahnkranz verzahnt. Dieses ist fix mit dem Gehäuse verbunden. Die anderen Lamellen sind mit dem Planetenzahnrad verzahnt, welches über ein Planetengetriebe und Sonnenrad mit der Welle gekoppelt ist und eine Übersetzung für die rotierenden Lamellen von 1,9 realisiert. Dadurch wird die Drehgeschwindigkeit der Lamelle und mögliche Ölplanschverluste reduziert.

Die Lamellenbremse wird über Breake By Wire System (BBW) aktuiert und ist als sehr kompaktes Package direkt auf den E-Motor angeflanscht. Diese wird über die eigens dafür entwickelte Vehicle Control Unit (VCU)-Software gesteuert. Der größte Teil der Bremsverzögerung wird VCU-gesteuert über den Elektromotor sowie die speziell hierfür entwickelte Hochleistungselektronik und Batterie rekuperiert. Bei Bedarf wird das restliche Moment mechanisch durch das Aufeinanderpressen der Lamellen erzeugt. Dabei wird gleichzeitig dem System Öl zugeführt und so das Thermomanagement geregelt.

Realisiert wurde auch ein Notfall Modus. Bei Ausfall des elektrischen Systems wird direkt über Hydraulik als Durchtrieb das Lamellenpaket aktuiert und so rein mechanisch gebremst. Dieses ist so ausgelegt, dass das Fahrzeug aus einer Geschwindigkeit von 100 km/h ohne weitere Bremsunterstützung in mindestens 168 m zum völligen Stillstand gebracht wird.

2.2 Hartmetallbeschichtete Bremsscheibe

Zur Untersuchung des Potentials einer Hartmetallbeschichtung von Bremsscheiben wurde exemplarisch eine konventionelle Graugussbremse des Referenzfahrzeugs, BMW i3, von der Fa. Frenoza GmbH beschichten. Dazu wurde zuerst eine Verbindungsschicht aus Edelstahl und anschließend eine Karbidschicht aus 20 % Wolframkarbid mit 30 % Titancarbid in einer 50 % duktilen Matrix aus Edelstahl über eine Oxyfuel-Beschichtung aufgebracht [9].

In **Fig. 2** ist die originale Bremsscheibe und in **Fig. 3** die hartmetallbeschichtete Bremsscheibe abgebildet.

Diese wurde dann sowohl im Referenzmessfahrzeug als auch auf einem Komponentenprüfstand vermessen und mit der unbeschichteten originalen Bremse im Abriebemissionsverhalten bezüglich luftgetragener Partikel verglichen.



Fig. 2. Original Graugussbremsscheibe des BMW i3 (Neu-Zustand)



Fig. 3. Hartmetallbeschichtete Bremsscheibe des BMW i3 (nach Einsatz)

2.3 Induktionshybridbremse

Parallel zu der Lamellenbremse wurde im Projekt, beginnend mit der Auslegung über Modellbildung und Feldberechnung bis hin zu Konstruktion und Aufbau eine Induktionshybridbremse entwickelt, konstruiert, aufgebaut und validiert [10, 11].

Die prinzipiellen Herausforderungen bei diesem Bremssystem bestehen zum einen in der geringen Leistungsdichte die aus dem Skin-Effekts resultiert sowie dem Thermomanagement, und zum Anderem in der Gegebenheit, dass bei geringen Drehzahlen auch die Induktion und damit das Bremsmoment geringer wird. So dass bei der Drehzahl Null keine Bremsung vorhanden ist.

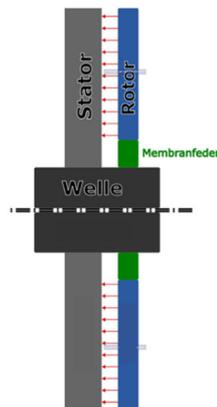


Fig. 4. Induktionsbremse. Schematischer Aufbau

Zur Lösung wurde die reine Induktionsbremse als Hybridbremse konzipiert [12]. Im Zwischenraum zwischen Stator und Rotor wurden Reibflächen konstruiert. **Fig. 4** zeigt

den schematischen Aufbau. Durch das Ausnutzen der magnetischen Anziehungskraft zwischen Rotor und Stator wird mit Hilfe einer Feder ein Spalt zwischen beiden Komponenten gehalten. Bei niedrigen Drehzahlen nimmt das elektromagnetische Bremsmoment ab. Die, durch ein Erregerstrom erzeugte axial wirkende Reluktanzkraft nimmt zu und ermöglicht ein Bremsen zum Stillstand, indem durch Reibung zwischen Rotor und Stator verzögert wird.

Die Erreichung der erforderlichen Leistungsdichten wurde durch entwickelte Strukturen aus anisotropen Materialien realisiert. Die so, durch die erzeugten, erforderlichen Leistungsdichten bedingte hohen Temperaturen, wurden über ein Thermomanagement des Stators gelöst und die entstehende Wärme über eine Wärmeträgermedium ausgebracht.

Die Charakterisierung und Untersuchungen dieser Bremse sind nicht Bestandteil dieses Artikels [s. dazu 10, 11,12 & 21].

2.4 Referenzbremse

Die originale Graugussbremse des BMW i3 wurde als Referenz zur Bestimmung von Bremsabriebsemissionen herangezogen. Zum einen konnte so, mit der entwickelten Methode und dem Messkonzept Bremsabriebe größenverteilt, von 4 nm bis 10 μm bestimmt und ein konventionelles Elektrofahrzeug charakterisiert werden. Zum Anderen diente das Konzept als Vergleich in Bezug auf die anderen Bremskonzepte die untersucht wurden.

3 Messkonzept und Versuchsaufbau

3.1 Messtechnik

Die Messtechnik wurde zur Bestimmung der größenverteilten Partikelanzahlkonzentration (PNC) luftgetragener Partikeln (PSD) der Nicht-Abgas-Emissionen gewählt. Die Geräte wurden so kombiniert, dass diese den gesamten Messbereich 4 nm (UFP) bis 10 μm (PM_{10}) abdecken [18]

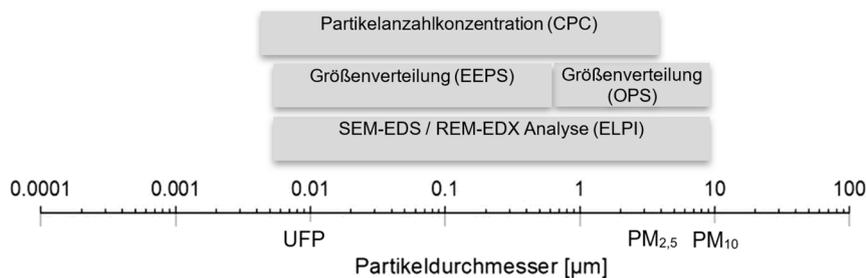


Fig. 5. Verwendete Messtechnik zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration, Partikelanzahlgrößenverteilung und Morphologie der luftgetragenen Bremsemissionen

Zusätzlich ermöglicht diese Wahl auch einen Einsatz zur mobilen Messung im realen Straßenverkehr. Einen Überblick der zum Einsatz gekommenen Messgeräte und der jeweiligen Messbereiche gibt **Fig. 5**. So wurde die Partikelkonzentration mit einem Kondensationspartikelzähler (CPC) der Fa. TSI GmbH gemessen. Die Partikelgrößenverteilung wurde mit einem EEPS und OPS der TSI GmbH vermessen. Zur Offline-Analyse wurden desweiteren Proben mit dem Niederdruckkaskadenimpaktor ELPI+ gesammelt und über Rasterelektronenmikroskopie mit Röntgenspektroskopie, kurz REM-EDX, analysiert.

3.2 Referenzfahrzeug

Auswahl Versuchsträger

Als Testaufbau zur Charakterisierung der Standard Graugussbremse für konventionelle Elektrofahrzeuge und der hartmetallbeschichteten Bremsscheibe wurde ein BMW i3 gewählt. Dieses Fahrzeug ermöglicht es, aufgrund seines Hinterradantriebs, eine vereinfachte separate Einhausung der Bremse an der un gelenkten Hinterradbremse und über Ausnahmegenehmigung eine Untersuchung der Bremsabriebe nicht nur auf dem DLR eigenen Rollenprüfstand, sondern auch im realen Straßenbetrieb wie z.B. der DLR-RDE (Real Drive Emission) -Teststrecke. Der zum Einsatz gekommene BMW i3 ist Baujahr 2015 mit einem Leergewicht von 1228 kg und einer Batterie mit 60 Ah Kapazität.

Messkonzept

Zur eindeutigen Bestimmung der Bremsemissionen wurde die Hinterradbremse über eine Distanzplatte separiert. Eine schematische Darstellung des Testaufbaus ist in **Fig. 6** zu sehen.

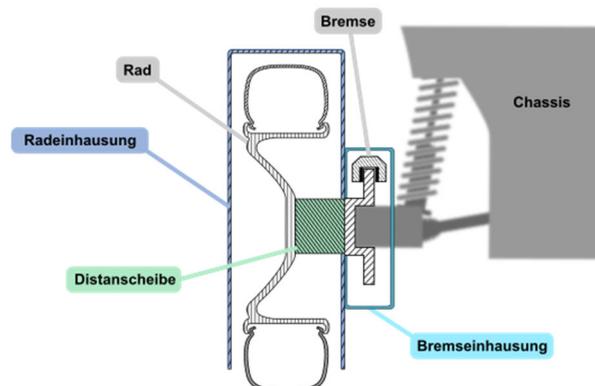


Fig. 6. Testaufbau Referenzfahrzeug Hinterachse. Schematische Darstellung.

Die aus dem Rad herausgenommene Bremse konnte dadurch eingehaust [13] werden und die luftgetragenen Abriebemissionen unabhängig von denen des Reifens auch im

mobilen Einsatz gemessen werden. Zur Temperatureinstellung wurde ein Thermomanagement über eine Belüftung mit zwei Ventilatoren realisiert [17, 19].

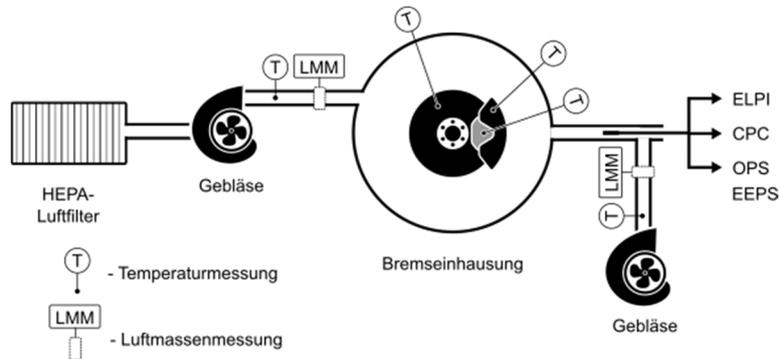


Fig. 7. Messkonzept zur Probenahme von Bremsemissionen am Referenzfahrzeug

Dazu wurde bei einer Realfahrt die Temperatur der Bremse aufgenommen und der Volumenstrom der Belüftung so geregelt das die im zulässigen Temperaturbereich der PMP-Group Empfehlung liegt. Darüber wurde ein Volumenstrom für die Bremsabriebsmessungen von $31 \text{ m}^3/\text{h}$ für die Messungen evaluiert. Zur Kontrolle wurden während der Tests die Bremstemperaturen an beiden Bremsen mitgemessen. Zur Untersuchung wird die Temperatur des Prüflings an der Brems Scheibe über Telemetrie, den Bremsbacken und den Bremsbelägen gemessen.



Fig. 8. Einhausung und Belüftungssystem der Bremse am Referenztestfahrzeug

Die eingeleitete Luft wurde über einen zweistufigen HEPA-Filter (H13/F17) zugeführt. Damit konnte auch für die Realfahrten auf den Straßen ein Verfälschen der Messungen durch Verwenden von mit Feinstaub belasteten Luft ausgeschlossen werden. Durch die Belüftung über einen HEPA-Filter liegt die Hintergrundkonzentration im System unter 20 Partikel pro Kubikzentimeter.

3.3 ZEDU1 - Versuchsträger

Zur Demonstration eines Zero Emission Fahrzeugs wurde ein Versuchsträger mit dem ZEDU1-Konzept konstruiert und aufgebaut. Zum Einsatz kam die ZEDU1-Einheit, bestehend aus zwei radnahen E-Motoren mit integrierten Lamellenbremsen sowie entsprechenden Radeinhausungen mit Reifenabriebsabsaugung und Filtersystem [20]. Für das Fahrzeug wurde mit dem Projekt Partner HWA im Unterauftrag, ein eigener Antriebsstrang, inklusive der VCU, entwickelt.



Fig. 9. ZEDU1-Versuchsträger im Test

Bereits früh im Projekt fiel die Entscheidung zur Wahl des in den ZEDU1-Demonstrator zu integrierende Bremssysteme, auf die Lamellenbremse, da diese unkritischer in der Entwicklung und im Rahmen der Projektlaufzeit in einem höheren TRL-Level realisiert zu realisieren ist (**Tabelle 1**).

Messkonzept

Der Versuchsträger wurde mit der gleichen Messtechnik, ähnlich dem des Referenzfahrzeugs (s. oben), ausgestattet. Da die Lamellenbremse, als gekapseltes System kein Bremsemissionen aufweist, sind diese nur zur Bestimmung der luftgetragenen Reifenabriebsemissionen eingesetzt worden. Für die Charakterisierung der Lamellenbremse wurde weitere Messtechnik installiert. Dazu gehören Temperaturmessung,

Bestimmung der Bremsmomente und der Drücke im Hydraulikbremssystem sowie Strom und Spannungen des Hochvoltsystems zur Detektion der bei Bremsvorgängen recuperierten Energiemenge.

3.4 Fahrzyklen

Als Testzyklen wurden die Fahrzyklen WLTC Class 3b, WLTC Brake Part 10, RDE-Zyklus sowie die im Projekt definierten ZEDU-Accelerate und ZEDU-Brake eingesetzt.

Der ZEDU-Accelerate-Zyklus ist ein Fahrzyklus in dem die Fahrgeschwindigkeit in 30 km/h-Schritten von 30 km/h bis auf 120 km/h gesteigert und ein Intervall konstant gefahren wird. Dabei wird zwischen den Fahrstufen durch eine lineare Verzögerung bis zum Stillstand gebremst.

Der ZEDU-Brake ist ein definierter Fahrzyklus in dem bis auf 80 km/h stark beschleunigt und nach kurzer Haltezeit auf 0 km/h abgebremst wird. Dabei werden die Bremsverzögerungen bei jedem Folgebremsvorgang stärker.

Durch die Verwendung von exakt definierten Fahrzyklen war es möglich reproduzierbare und vergleichbare Messungen sowohl auf den Prüfständen als auch im realen Einsatz durchzuführen.

Dazu wurde einerseits der RDE-Zyklus bei realer Fahrt inkl. Geschwindigkeit, Beschleunigung und Steigung über der Zeit aufgezeichnet, um diesen dann unter kontrollierten Bedingungen fahren zu können. Zum anderen wurde auch z.B. Prüfstandzyklen wie der WLTC im Demonstrator dargestellt, um diese im Testgelände nachfahren zu können.

3.5 Testumgebung

Die Untersuchungen zu Bremsabrieben erfolgten auf dem DLR Rollenprüfstand, einem Testgelände, einem Komponentenprüfstand sowie auf der DLR eigenen RDE-Strecke.

RDE-Strecke

Die Durchführung der Real-Tests erfolgte in der Umgebung von Stuttgart, hier wurde eine normkonforme Strecke definiert die am DLR-Standort startet und auch wieder endet. Die DLR-RDE-Strecke hat eine Länge von 47,4 km und dauert ca. 3619 s mit einem Stadtanteil von 50 %, einem Anteil an Überlandfahrt von 31 % sowie einer Autobahnfahrt von 19 % Anteil (**Fig. 10**).



Fig. 10. Reale RDE-Testfahrt mit dem Referenzfahrzeug

Rollenprüfstand

Zur Vermessung mit normkonformen Zyklen wie dem WLTPC aber auch zum reproduzierten Nachfahren der RDE-Strecke wurde der klimatisierbare Vierrad-Rollenprüfstand des DLR-FK verwendet. Dieser besteht aus vier unabhängige 48“-Rollen mit je 100 kW und einer 3600 N pro Rad. Damit könne Fahrzeuge bis zu 4.5 Tonnen und einem Radstand bis zu 4 m in einer Klimaumgebung von -40 °C bis 60 °C und einer relativen Feuchte bis 80 % getestet werden. Auf dem Prüfstand könne alle Fahrzyklen inklusive Steigung in Straßensimulation gefahren werden. Der Prüfstand ist nach GTR15 vom TÜV abgenommen und nach ISO 9001 zertifiziert [14].

Testgelände

Für spezielle Fahrmanöver und Tests, aber auch, da der Versuchsträger keine Zulassung für öffentlichen Straßen hat, für Realversuche mit dem Versuchsträger wurde bei diesen Versuchen auf Testgelände ausgewichen. Als Testgelände wurden das Bosch-Testgelände Boxberg [20] und ein Testgelände in Asperg genutzt.

Komponentenprüfstand

Um eine Korrelation der durchgeführten Messungen mit Messungen auf einem Komponentenprüfstand zu erhalten wurden zusätzlich Versuche mit original BMW i3 Bremsen und den hartmetallbeschichteten Bremsscheiben auf einem Prüfstand der Fa. Horiba in Flörsheim, durchgeführt.

Damit eine Vergleichbarkeit gegeben ist, erfolgte vor der Messkampagne mit Hilfe eines Partikelgenerators eine größenabhängige Kalibrierung des Teststands. Die Bestimmung der luftgetragenen Bremsemissionen am Komponentenprüfstand erfolgte mit dem DLR-Equipment, das auch bei den Versuchen auf dem Rollenprüfstand und im Testfahrzeug auf der Straße zum Einsatz kam.

4 Ergebnisse

4.1 Charakterisierung der Partikelemissionen

Partikelemissionen

Untersuchungen der Bremsemissionen mit dem ZEDU-Accelerate-Zyklus zeigen, dass Bremsemissionen nicht nur während der Bremsvorgänge, sondern auch bei Konstantfahrten und während der Beschleunigungsvorgängen entstehen. Bei der Betrachtung der Größenverteilung sind hauptsächlich zwei Emissions-Modi zu sehen. Eine um Ultrafeinbereich mit ca. 10 nm und eine zweite Bereich 200 nm bis 300 nm. Bei Konstantfahrten ist die Emissionsanzahl von Partikeln mit einer Partikelgröße zwischen 200 nm und 300 nm wesentlich höher als die der Größenordnung von 10 nm und steigt um ein Vielfaches bei Bremsvorgängen [16].

Temperatureinfluss

Für die Untersuchung des Temperatureinflusses wurde der ZEDU-Brake gefahren. Hierbei stieg die Temperatur der Bremse rasant an. Bei der Betrachtung der Größenverteilung der Bremsemissionen für unterschiedliche Temperaturfenster sind ebenfalls zwei Emissions-Modi zu sehen. Eine um Ultrafeinbereich mit ca. 10 nm und eine zweite Bereich 200 nm bis 300 nm. Im Gegensatz zu den Emissionen bei Konstantfahrten ist die Emissionsanzahl der Partikel mit Partikelgröße 200 nm bis 300 nm für die verschiedenen Temperaturen und gleicher Geschwindigkeit im Wesentlichen konstant. Im Bereich der der Größenordnung von 10 nm bleiben diese im Temperaturbereich zwischen 20 °C und 245°C konstant und steigen nach dieser kritischen Temperatur diese mit der Temperatur signifikant exponentiell an. Der Anstieg der Bremsemissionen ist hier auf den Anstieg von UFP-Partikeln zurückzuführen [16].

4.2 Einfluss der Rekuperation auf Abriebsemissionen

Zur Untersuchung des Einflusses der Rekuperation auf die Bremspartikelemission wurden mit dem BMW i3 einmal in dem Standard-Betriebsmodus und einmal mit deaktivierter Rekuperation Fahrtestes mit den Fahrprofilen WLTC 3b, RDE auf dem Rollenprüfstand und auf dem Komponentenprüfstand WLTC-Brake Part10 gefahren. Gemessen wurden Partikelemissionen, Bremsstemperatur, Geschwindigkeit und Bremsdruck um die Anzahl der Bremsereignisse zu detektieren.

Eine relative Verringerung der Bremsemissionen konnte bei eingeschalteter Rekuperation bei allen Fahrprofilen gemessen werden. Die Emissionsminderung ist jedoch stark vom Fahrprofil abhängig. Am höchsten war diese bei der Realfahrt (RDE-Zyklus). In diesem Zyklus wurde für die ultrafeine und feine Partikel (4 nm bis 3 µm) eine Reduktion von 89,8 % gemessen. Für die Fahrzyklen WLTC Clas 3b wurden 65,4 % und für den WLTC Brake Part 10 lediglich 4,3 %. [16]

Tabelle 2. Reduzierung der Bremsemissionen von Ultrafein- und Feinpartikel durch Rekuperation im Größenbereich 4 nm bis 3 μm für verschieden Testzyklen [16].

| Zyklus | PN-Reduktion durch Rekuperation | |
|-------------------------|---------------------------------|--|
| | (%) | |
| Realer Fahrzyklus (RDE) | 89,8 | |
| WLTC Class 3b | 65,4 | |
| WLTC Brake Part 10 | 4,3 | |

4.3 Einfluss der Hartmetallbeschichtung auf Abriebsemissionen

Neben dem Einfluss der Rekuperation auf die Bremsemissionen wurde auch die Wirkung der Hartmetallbeschichtung bei Elektrofahrzeugen untersucht und mit den originalen Graugussbremsen des BMW i3 verglichen. Für die hartmetallbeschichtete Brems Scheibe wurden die gleichen Originalbremsbeläge eingesetzt wie bei der Graugussbremse. Die Bestimmung des Reibwerts zeigt, dass je nach Fahrzyklus, eine Verbesserung des Reibwertverhältnisses durch die Beschichtung zwischen 1,1 bis 2,0 liegt.

Abriebsmessungen

Die Untersuchungen der Wirkung der Hartmetallbeschichtung der Brems Scheibe wurde sowohl auf dem Rollenprüfstand sowie auf dem Komponentenprüfstand durchgeführt. Auch hier dienten zur Charakterisierung der Bremsemissionen die Fahrzyklen WLTC Class 3b, WLTC-Brake Part 10 und der DLR-RDE-Zyklus für reale Fahrten.

Auch bei der hartmetallbeschichteten Bremse zeigen sich bei den luftgetragenen Abriebsemissionsmessungen die größte Einsparung mit 83 % im RDE-Zyklus für die Partikel mit der Größenverteilung im Bereich 300 nm bis 10 μm (OPS-Messung) und eine Einsparung von 79 % bei ultrafeinen und feinen Partikel im Größenbereich 4 nm bis 3 μm (CPC-Messung) [16].

Tabelle 3. Massenverlust Graugussbremse (Brems Scheibe und Bremsbelege) und einer hartmetallbeschichteten Bremse (Brems Scheibe und Bremsbelege) pro 100 km [16].

| Zyklus | PN-Reduktion | PN-Reduktion |
|-------------------------|-------------------------------------|--|
| | 4 nm – 3 μm (CPC) (%) | 300 nm – 10 μm (OPS) (%) |
| Realer Fahrzyklus (RDE) | 78,9 | 83 |
| WLTC-Brake Part 10 | 71,7 | 78 |
| WLTC Class 3b | 18,5 | 33,9 |

Gravimetrische Bestimmung

Vor Beginn der Messkampagnen am Komponentenprüfstand wurden sowohl die originalen Brems Scheiben als auch die beschichteten Brems Scheiben und die

dazugehörigen Bremsbelegen gewogen. Ebenso wurden diese nach dem Ende der Messkampagne erneut gewogen. Mit der originalen Graugussbremse wurden während der Messkampagne insgesamt 1.684 km gefahren und mit der hartmetallbeschichteten Bremse 1.127 km. Dies beinhaltet unterschiedliche Fahrzyklen.

Tabelle 4. Massenverlust Graugussbremse (Bremscheibe und Bremsbelege) und einer hartmetallbeschichteten Bremse (Bremscheibe und Bremsbelege) pro 100 km.

| Bremse | Massenverlust (g/100 km) |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Graugussbremse | 0,77 |
| Hartmetallbeschichtete Bremse | 0,20 |

Die Messungen zeigen eine höherem Massenverlust der Graugussbremse um das 3,85-fache im Vergleich zu der beachteten. Bzw. eine Reduktion der Abriebsemissionen durch Beschichtung im Durchschnitt über alle Zyklen um 74 %.

4.4 Lamellenbremse

Die Untersuchungen der Lamellenbremse erfolgten auf dem Rollenprüfstand und im Testgelände Boxberg [20].

Zur Charakterisierung wurden die gleichen Zyklen, wie auch bei Messungen am Referenzfahrzeug: WLTC Class 3b, WLTC-Break Part10 und ZEDU-Accelerate verwendet.

Beim Einsetzen der Lamellen zeigte das ZEDU1-Fahrzeug das gleiche Bremsverhalten wie beim Nutzen der Scheibenbremse und konnte bis zur Haftgrenze des Reifens alle durch die Fahrzyklen vorgegeben Bremsverzögerungen aufbringen. Die dabei entstandenen Maximaltemperaturen von bis zu 95 °C als Spitzentemperatur liegen weit unter den maximal definierten. Die Betrachtung der Rekuperationsenergie für den ZEDU-Brake-Zyklus einmal mit der im Fahrzeug verbauten Scheibenbremsen und im Vergleich zur Lamellenbremse zum anderen zeigen beim Übereinanderlegen ebenfalls identisches Verhalten.

Die Charakterisierung der Lamellenbremse zeigt dass dieses Bremssystem im Einsatz dauerhaft und alltagstauglich ist.

5 Literaturverzeichnis

1. [www.stuttgart.de. Feinstaubalarm.](https://www.stuttgart.de/leben/umwelt/luft/feinstaubalarm.php) [Online] Stuttgart, 30. 06 2023. [Zitat vom: 30. 06 2023.] <https://www.stuttgart.de/leben/umwelt/luft/feinstaubalarm.php>
2. Günter Oberdörster, Eva Oberdörster, and Jan Oberdörster. Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles. *Environmental Health Perspectives*. vo. 113, nr. 7 2005.

3. Liu et al., Evidence for the presence of air pollution nanoparticles in placental tissue cells., *Science of The Total Environment*. 2021, Bd. 751.
4. WHO. What are the WHO Air quality guidelines? www.who.int., 22. 09 2021. <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>
5. European Commission, Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Luftqualität und saubere Luft für Europa. europa.eu. [Online] 26. 10 2022.
6. Der europäische Grüne Deal: Kommission schlägt Vorschriften für saubere Luft und sauberes Wasser vor (europa.eu). https://luxembourg.representation.ec.europa.eu/actualites-et-evenements/actualites/der-europaische-grune-deal-kommission-schlagt-vorschriften-fur-saubere-luft-und-sauberes-wasser-vor-2022-10-26_de
7. 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>
8. Kühner, Michael: DE 10 2021 006 535 A1: Antriebseinheit und ein elektrisch angetriebenes Brennstoffzellenfahrzeug, dass solche Antriebseinheit ausweist. (2022)
9. Langlet GmbH: DE202018102703: Bremskörper für ein Fahrzeug. (2018)
10. 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
11. 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)
12. Holtmann, Christoph. 2d reluctance model of an eddy current brake with a magneto isotropic material structure. s.l. : IEEE, (2020)
13. Augsburg, K., D. Hesse, and F. Wenzel, DE 10 2017 006 349 B4: Vorrichtung zur Messung und Klassifizierung der Partikelemissionen einer Radbremse eines Fahrzeuges. (2017)
14. DLR-FK: Vier-Motoren-Allradrollenprüfstand mit Klimatisierung und Abgasanalyse. [Online] www.dlr.de/fk/desktopdefault.aspx/tabid-2900/5862_read-6422/
15. Ehrenberger, S, Philipps, F und Konrad, M.: Analysis of Pollutant Emissions of Three Plug-in Hybrid Electric Vehicles Corresponding. *Atmospheric Environment*. (2019)
16. Bondorf, Linda, et al. Airborne brake wear emissions from a battery-electric vehicle. *Atmosphere*. 14, 2023, doi: 10.3390/atmos. (2023)
17. Bondorf, Linda, et al. Electric vehicle emissions: Measurement of brake- and tire wear particles on a chassis dynamometer. Online: European Aerosol Conference, (2021)
18. 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)
19. Bondorf, Linda, et al. On-board measurement of ultrafine non-exhaust particulate emissions from a battery electric vehicle. s.l.: EFCA Symposium, (2022)
20. 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)
21. ZEDU1- Zero Emission Drive Unit Generation 1. Abschlussbericht. DLR, Stuttgart (2023)
22. Auswirkungen von Feinstaub auf den menschlichen Organismus. FiS, <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/323053/> (2010)