
Recherche zu Bremsstaubemissionen im Rahmen von EURO 7

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Fahrzeugtechnik Heft F 170

Recherche zu Bremsstaubemissionen im Rahmen von EURO 7

**Technologiebewertung verschiedener
Bremsysteme zur Erfüllung der Euro 7
Bremspartikelgrenzwerte**

von

Manfred Crampen, Oliver Vossen, Daniel Seibel
Fka GmbH, Aachen

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Fahrzeugtechnik Heft F 170

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 84.0539
Recherche zu Bremsstaubemissionen im Rahmen von EURO 7

Fachbetreuung:
Sigrid Limbeck

Referat:
Emissionen im Kraftfahrzeugbereich

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9307 | ISBN 978-3-95606-882-9 | <https://doi.org/10.60850/bericht-f170>

Bergisch Gladbach, September 2025

Kurzfassung

In der Vergangenheit konnte gezeigt werden, dass Feinstaubemissionen eine Belastung für Mensch und Umwelt sind. Einer der Treiber dieser Emissionen ist der straßengebundene Verkehr. Aus diesem Grund wurden die Grenzwerte der Abgasemissionen immer weiter verschärft. Studien belegen jedoch, dass für PM10 bereits seit 2012 die nichtabgasbezogenen Partikelemissionen, hauptsächlich durch Bremspartikel und Reifenabrieb, im Verkehr höher sind als die Abgasemissionen (Phillips, 2023). Vor diesem Hintergrund wird die Europäische Kommission in der kommenden Euro 7 Gesetzgebung erstmals auch nicht-abgasbezogene Partikelemissionen durch Bremsen und Reifen regulieren. Um die eingeführten Grenzwerte für Bremsstaubemissionen künftig erfüllen zu können, sind Änderungen gegenüber dem aktuellen Stand der Technik von Bremssystemen im Fahrzeug notwendig.

Inhalt dieses Projektes ist in einem ersten Schritt die Recherche und Einordnung aktuell verfügbarer, beziehungsweise in der Entwicklung befindlicher Bremssysteme und deren erwartbares Emissionsminderungspotential. Dadurch soll ein Überblick über bestehende Bremsentechnologien und Ansätze für künftige Bremssysteme geschaffen werden.

Mithilfe des ermittelten Überblicks werden die recherchierten Technologien in einem zweiten Schritt basierend auf Bewertungskriterien hinsichtlich der allgemeinen Anforderungen an ein Bremssystem und des Emissionsminderungspotentials bewertet und miteinander verglichen. Die Technologiebewertung erfolgt unter Berücksichtigung der verschiedenen Fahrzeugsegmente und Triebstrangkonfigurationen für Fahrzeuge mit verbrennungsmotorischem, Hybrid- und Elektroantrieb.

Abstract

Previous investigations reveal that particulate matter emissions are a burden on people and the environment. One of the drivers of these emissions is the road-bound traffic. For this reason, the legal limits for exhaust emissions have been continually tightened. However, studies have shown that for PM10 non-exhaust-related particulate emissions, mainly from brake particles and tire abrasion, exceed exhaust emissions in the road-bound traffic sector since 2012 (Phillips, 2023). With this in mind, the European Commission wants to regulate non-exhaust particulate emissions from brakes and tires for the first time in the upcoming Euro 7 legislation. In order to meet the introduced limit values for brake dust emission in the future, changes to the braking system of a vehicle are necessary.

In a first step, the aim of this project is to research and classify currently available braking systems, or those currently under development, and their expected emission reduction potential. This provides an overview of existing brake technologies and approaches for future brake systems.

In a second step, the researched technologies are evaluated and compared with each other based on evaluation criteria regarding the general requirements for a braking system, in addition to the emission reduction potential. The technology evaluation additionally considers the different vehicle segments and powertrain configurations of internal combustion engine, hybrid and electric vehicles.

Summary

Research on brake dust emissions in the context of EURO 7

Current Situation

As part of the Euro 7 legislation, the European Commission has defined limit values for non-exhaust particulate emissions for the first time. These include brake dust emissions and tire abrasion. The first step is to define particle mass limit values for PM10. These are particles with an aerodynamic diameter of less than 10 micrometres (μm). PM2.5 corresponds to particles smaller than 2.5 μm . (Phillips, 2023) Limit values for the PM2.5 particle mass or the number of particles (PN) have not yet been published (EUROPEAN COMMISSION, 2022; Kroher, 2024a).

The regulation of non-exhaust emissions is driven by the increased relevance over exhaust emissions which have fallen continuously in recent years as a result of ever stricter limit values for combustion engines. Meanwhile, emissions from brake and tire abrasion have remained virtually unchanged and have tended to increase slightly (Phillips, 2023). In 1990, exhaust emissions accounted for 80 % of PM10 emissions in the transport sector. The year 2012 is considered to be the break-even point with equal relevance of exhaust- and non-exhaust particulate emissions. In 2018, non-exhaust emissions from brake dust and tire abrasion account for around 70 % of PM10 particulate emissions from road transport in the EU. (Phillips, 2023)

Motivation

According to the current status, the PM10 limit values of 7 mg/km per combustion engine-powered vehicle and 3 mg/km per electrically powered vehicle should apply according to the Euro 7 legislation. This will apply in a transitional phase until 2035, after which the limit value for PM10 of 3 mg/km will apply to all vehicles. (Kroher, 2024a)

Based on studies carried out, the Joint Research Center (JRC) of the European Commission assumes brake particle emissions PM10 of around 13.4-19.7 mg/km per vehicle, depending on the vehicle weight, that decelerates exclusively via a conventional mechanical brake (Giechaskiel et al., 2024). Battery electric vehicles can absorb a significant proportion of the deceleration energy via recuperation. However, these vehicles tend to have a higher weight, which means that limits are also likely to be exceeded here (OECD, 2020). As a result, new braking technologies or measures on the vehicle will be required in the future to enable these limits to be met.

Approach

Subject of this project is the research, classification and evaluation of currently available braking systems and emission reduction technologies, or those currently under development, with regard to various aspects. The research ranges from the emission-relevant components of the material pairing to the braking system and consideration of the vehicle as a whole.

The project is divided into two work packages. In the first work package, an overview of the state of the art in the field of braking systems is compiled with a focus on brake dust emissions. The technologies are grouped into the component, subsystem and overall system levels. For each individual technology measured values for the absolute or relative reduction of the number and mass of particles as well as the underlying measurement technology and the measurement method (component level/vehicle level & test bench or RDE) are listed as far as published. The content consists of compiling a list of all identified technologies and reduction measures with regard to brake dust emissions. 16 brake particle emission reduction technologies from a total of 112 sources were summarised. These sources correspond to the websites of manufacturers and suppliers, various publications on the technologies, as well as patents and independently conducted meta-studies on the savings potential. In addition, a further focus of the research work was to classify information on the technologies found with regard to the evaluation criteria defined in this work in order to enable the evaluation of the technologies in the further course of the work.

In the second work package, an evaluation system was developed that allows the technologies to be compared in term of their brake dust emission reduction potential and other general requirements of a braking system. Not all technologies researched from the state of the art are considered in the assessment. The technologies considered in the assessment correspond:

- Hard metal coated brake disc (HMC)
- Alternative brake disc material carbon-ceramik (CC)
- Alternative friction material brake pad
- Optimized conventional disc brake
- Drum brake
- Passive filter unit
- Active extraction technology
- Electromechanical brake actuation
- Recuperation

The corresponding justifications for the other technology variants excluded from the search results are documented in the final report. The technologies are evaluated considering the vehicle segments defined by the Kraftfahrtbundesamt (KBA) in the light-duty vehicle (LDV) sector (KBA, 2024a) and the powertrain configurations of conventional, hybrid and electric vehicles, with a focus on hybrid and electrified vehicles. The requirement attributes used for this project are based on the list provided by the client and on standard literature (Breuer, 2017). In addition, the Technology Readiness Level (TRL) developed by NASA is taken into account to evaluate the maturity and actual development status of the technology (NASA, 1988).

The following list is showing the requirements a braking system is evaluated in this project:

- Basic Requirements
 - Thermal braking power
 - Maximum deceleration
 - Brake pedal characteristics
 - Noise Vibration Harshness (NVH)
 - Harmfulness of emissions
 - Corrosion resistance
- Additional Requirements
 - Effort for technical feasibility
 - System costs
 - Qualitative assessment of the costs
 - Technology Readiness Level (TRL)
 - Emission reduction potential
 - Repair costs and procurement of spare parts
 - Testability by technical services as part of the periodic technical inspection (PTI)
 - Service life
 - Compatibility with existing vehicles systems (ABS, ESP, driver assistance systems)
 - Sensitivity of the effectiveness of the emission reduction due to external influences or in real operation

In the second step, evaluation functions are defined for these requirements, with which a dimensionless scoring is determined for the properties of the respective technology (qualitative or quantitative). Within the scales, the current state of the art, defined as a hydraulically actuated, conventional disc brake with ECE brake pads, serves as a reference. To supplement the consideration of individual technologies, additional technology packages consisting of a combination of individual technologies are created in parallel. To evaluate the technology packages, combination formulas are defined that are dependent on the individual technologies. As not every requirement is equally important across different vehicle segments, weighting factors are determined separately for each vehicle segment in the next step. The requirements are weighted by comparing them in pairs for each of the vehicle segments. In the final step, a reasoned plausibility check is carried out in which technology variants that cannot be implemented or are not accepted on the market are excluded. One example of a non-implementable variant is recuperation in vehicles powered by internal combustion engines.

The described procedure for evaluating the technologies is carried out using an Excel working document, which is provided as part of this work. A comparison of the technologies can be carried out in the form of a utility value analysis. The results matrix enables various considerations of the results.

The resulting findings are presented and discussed in two different variants. The first analysis is based on vehicle segment and powertrain and shows all technology variants as well as the favoured technology. The second analysis is based on technology and powertrain and enables a comparison of a technology for different vehicle segments.

Results

As a result, statements can be made about the most promising technology variants for the individual vehicle segments.

Even if various technologies have advantages due to individual properties, based on the literature sources found it can generally be stated that modified conventional brake systems are promising candidates for market entry in terms of material selection. These technologies are characterized by modified friction pairings in the form of hard metal coated

brake disc (HMC) and alternative material compositions for the brake pads. The main reasons for this are the sufficient reduction in brake particulate emissions, the justifiable additional costs and the simple integration of the technologies into existing vehicle systems. This statement is confirmed by the number of publications found on these technology variants and the choice of topics at specialist conferences such as “Eurobrake 2024” (Fisita, 2024). Based on the present assessment, technologies with profound changes compared to the state of the art are not expected for the introduction of Euro 7.

The carbon-ceramik brake disc has a high particle emission reduction potential and good technical properties. Nevertheless, due to the high costs and the high production effort, this technology is more likely to be used in the higher-priced vehicle segments.

Depending on the expansion stage of recuperation, it can be assumed in some cases that the current state of recuperation complies with Euro 7 legislation in all vehicle segments for battery electric vehicles. If recuperation in electric vehicles does not meet the legal limits, it makes sense to combine recuperation with other expected technologies, such as the hard metal-coated brake disc or alternative friction materials for the brake pads.

Other possible technologies for complying with the Euro 7 legislation are active and passive filter systems as well as the drum brake on the rear axle as part of a technology package. The drum brake on the front axle in combination with recuperation and electromechanical brake actuation is also conceivable for light vehicles. These technologies perform worse in the present assessment than the options described above. With further development, other evaluation criteria or, for example, further tightening of legislation, these options could achieve a higher rating in future assessments or become the most promising solutions. In addition, there are solutions with a lower probability of realization, some of which were excluded from the analysis.

Due to the highly dynamic development of brake technology, driven by the Euro 7 legislation, the evaluation and assessment in the attached table document can be adapted and expanded over the next few years. On the one hand, it is to be expected that technologies that perform worse in this evaluation due to their costs will become cheaper in the coming years and will therefore be evaluated differently. On the other hand, new technologies that are currently prototypes on a development stage and are not considered in this study may also be a technical alternative in the next few years due to further developments or introduction into series production.

Zero-emission technologies, which are presented and summarized in the state of the art are currently not expected until legislation is tightened.

Inhalt

1	Einleitung	11
1.1	Ausgangssituation	11
1.2	Motivation	11
1.3	Vorgehensweise	11
2	Recherche zum Stand der Technik	13
2.1	Systematik der Quellenrecherche	13
2.2	Recherche-Ergebnisse	14
2.2.1	Überblick der Emissionsminderungstechnologien	14
2.2.2	Erläuterungen der Emissionsminderungstechnologien	14
3	Bewertung der Emissionsminderungs- technologien für Bremsstaub	22
3.1	Systematik der Technologiebewertung	22
3.1.1	Prozess der Nutzwertanalyse	22
3.1.2	Definition und Erläuterung der Bewertungskriterien	23
3.1.3	Auswahl von betrachteten Technologien und Technologiepaketen	26
3.1.4	Betrachtung verschiedener Fahrzeugzeugsegmentgruppen	28
3.1.5	Plausibilisierung der Technischen Anwendung je Fahrzeug- segmentgruppe	29
3.2	Elemente der Nutzwertanalyse	31
3.2.1	Einführung und Quantifizierung der Bewertungsfunktionen	31
3.2.2	Einführung und Ermittlung der Gewichtungsfaktoren nach Segmenten	35
3.2.3	Erläuterung des Tabellendokuments zum Bericht	37
3.3	Anwendung der Nutzwertanalyse und Ergebnisse	41
3.3.1	Übersicht der ermittelten Nutzwerte	41
3.3.2	Interpretation der Ergebnisse	45
3.4	Zusammenfassung	47

Literatur	50
Tabellen	55
Bilder	56
Anhang	57

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Im Zuge der Euro 7 Gesetzgebung werden erstmalig von der Europäischen Kommission Grenzwerte für die nichtabgasbezogenen Partikelemissionen definiert. Hierzu zählen die Bremsstaubemissionen und der Reifenabrieb. Im ersten Schritt sind Partikelmassengrenzwerte für PM10 definiert. Darunter sind Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 10 Mikrometer (μm) zu verstehen. PM2,5 entsprechen Partikeln die kleiner sind als 2,5 μm . (Phillips, 2023) Grenzwerte für die Partikelmasse PM2,5 oder die Partikelanzahl (PN) sind bislang nicht veröffentlicht (EUROPEAN COMMISSION, 2022; Kroher, 2024a).

Die Regulierung der nichtabgasbezogenen Emissionen ist unter anderem dem geschuldet, dass die Abgasemissionen in den letzten Jahren aufgrund der immer strengeren Grenzwerte für Verbrennungsmotoren kontinuierlich gesunken sind. Während dessen bleiben die Emissionen durch Bremsen- und Reifenabrieb nahezu unverändert und sind tendenziell leicht gestiegen (Phillips, 2023). 1990 machen die Abgasemissionen 80 % der PM10 Emissionen im Verkehrssektor aus. Das Jahr 2012 gilt als Brake-Even-Point, bei dem beide Emissionstypen gleich relevant waren. 2018 entsprachen die nichtabgasbezogenen Emissionen aus Bremsstaub und Reifenabrieb etwa 70 % der PM10 Partikelemissionen im Straßenverkehr in der EU. (Phillips, 2023)

1.2 Motivation

Nach aktuellem Stand soll für Bremsstaubemissionen PM10 der Grenzwert von 7 mg/km pro verbrennungsmotorisch angetriebenem und 3 mg/km pro elektrisch angetriebenem Fahrzeug gelten. Dies gilt in einer Übergangsphase bis 2035. Anschließend soll der Grenzwert für PM10 von 3 mg/km für alle Fahrzeuge gelten. (Kroher, 2024a)

Basierend auf durchgeführten Studien geht das Joint Research Center (JRC) der europäischen Kommission von einem Bremspartikelaustritt PM10 abhängig vom Fahrzeuggewicht von etwa 13,4-19,7 mg/km pro Fahrzeug aus, sofern dieses ausschließlich über eine konventionelle mechanische Bremse verzögert (Giechaskiel et al., 2024). Batterieelektrische Fahrzeuge können zwar einen nennenswerten Anteil der Verzögerungsenergie über die Rekuperation aufnehmen. Jedoch haben diese Fahrzeuge tendenziell ein höheres Gewicht, sodass auch hier eine Grenzwertüberschreitung zu erwarten ist (OECD, 2020). Aufgrund dessen sind künftig neue Technologien oder Maßnahmen an den Bremsen eines Fahrzeugs erforderlich, die es ermöglichen die zukünftigen Grenzwerte einzuhalten.

1.3 Vorgehensweise

Gegenstand des im Folgenden beschriebenen Projektes ist die Recherche, Einordnung und Bewertung aktuell verfügbarer, beziehungsweise in der Entwicklung befindlicher Bremssysteme und deren Emissionsminderungstechnologien hinsichtlich verschiedener Aspekte. Die Recherche erstreckt sich von den Bremspartikel emissionsrelevanten Komponenten der Materialpaarung über das Bremssystem bis hin zur Betrachtung auf Gesamtfahrzeugebene.

Das Projekt ist in zwei Arbeitspakete unterteilt. Im ersten Arbeitspaket wird eine Übersicht zum Stand der Technik im Bereich der Bremssysteme mit dem Fokus auf den Bremsenemissionen erarbeitet. Im zweiten Arbeitspaket erfolgt die Bewertung der Technologien zum einen hinsichtlich des Emissionsminderungspotentials, zum anderen hinsichtlich der allgemeinen Anforderungen an ein Bremssystem, wie beispielsweise hinsichtlich der Sicherheit, des Komforts und der technischen Machbarkeit. Die für dieses Projekt herangezogenen Bewertungskriterien lehnen sich an die vom Auftraggeber beigestellte Liste sowie an Standardliteratur (Breuer, 2017) an. Zusätzlich wird der von der NASA entwickelte Technology Readiness Level (TRL) hinzugezogen, um eine Aussage zum Reifegrad und dem Entwicklungsfortschritt der Technologie zu treffen (NASA, 1988). Die Bewertung der Technologien erfolgt unter Berücksichtigung der vom Kraftfahrtbundesamt (KBA) definierten Fahrzeugsegmente im Light-Duty Vehicle (LDV)-Bereich und der Triebstrangkonfigurationen Konventionelles-, Hybrid- und Elektro-Fahrzeug, wobei der Fokus auf hybriden und elektrifizierten Fahrzeugen liegt.

2 Recherche zum Stand der Technik

2.1 Systematik der Quellenrecherche

Im ersten Arbeitspaket wird eine Übersicht zum Stand der Technik im Bereich der Bremsysteme mit dem Fokus auf den Bremsenemissionen erarbeitet. So weit veröffentlicht, werden den einzelnen Technologien Messwerte zur absoluten bzw. relativen Reduktion der Partikelanzahl und -masse zugeordnet, wobei die zugrundeliegende Messtechnik und die Messmethode (Komponentenebene/Fahrzeugebene & Prüfstand oder Real-Driving Emissions (RDE)) aufgeführt werden.

Die dabei herangezogenen Quellen inklusive der Schlagworte sind auszugsweise der folgenden Tabelle zu entnehmen:

	Betrachtete Quellen-Information/ Datenbank	Schlagworte Deutsch	Schlagworte Englisch
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> - Umweltbundesamt - Webseiten von Hochschulen - Joint Research Centre (JRC) 	<ul style="list-style-type: none"> - Euro 7 - Bremsstaubemissionen - Lösungen zur Emissionsminderung - Einfluss von Feinstaub auf die Gesundheit und Umwelt 	<ul style="list-style-type: none"> - Non-exhaust emissions - Impact of fine dust emissions
Technologien	<ul style="list-style-type: none"> - Webseiten OEM und Tier 1 - Artikel: ADAC, Autohaus News, ATZ, Auto Motor und Sport - Konferenz EuroBrake 2024 	<ul style="list-style-type: none"> - Euro 7 - Neue Bremsentechnologien - Alternative Bremssysteme 	<ul style="list-style-type: none"> - Non-exhaust emissions - Brake particle emissions
Patente	<ul style="list-style-type: none"> - Depatisnet 	<ul style="list-style-type: none"> - Bremsstaubemissionen - Emissionsminderung - Euro 7 - Beschichtung Brems Scheibe - Trommelbremse - Lamellenbremse - Absaugeinheit 	<ul style="list-style-type: none"> - Non- exhaust emissions - Brake particle emissions
Meta Studien	<ul style="list-style-type: none"> - Joint Research Centre (JRC) - Particle Measurement Programme (PMP) by UNECE / GRPE 	<ul style="list-style-type: none"> - Messungen zu Bremsstaubemissionen - GTR 24 Prüfbedingungen 	<ul style="list-style-type: none"> - GTR 24 test bench

Tab. 2-1: Betrachtete Quellen und Datenbanken sowie der dazugehörigen Schlagworte

Zunächst wird nach allgemeinen Schlagworten wie „Euro 7“ und „Bremsstaubemissionen“ recherchiert. Der resultierende Überblick schafft ein Verständnis der aktuellen Situation der nichtabgasbezogenen Partikelemissionen und der daraus abgeleiteten Motivation, Lösungen durch Technologien anzustreben. Die tiefergehende Recherche dient dazu, Hersteller zu identifizieren, die bereits technische Lösungen anbieten oder in naher Zukunft anbieten möchten. Als weitere Informationsquellen dienen durchgeführte Messungen im Rahmen von Meta Studien oder Forschungsprojekten, beispielsweise von Hochschulen

oder der UN. Des Weiteren wird in der Datenbank des Deutschen Patent- und Markenamts nach den in Tab. 2-1 gelisteten Schlagworten nach relevanten Patenten im Themengebiet recherchiert.

2.2 Recherche-Ergebnisse

Im Rahmen dieses Projekts werden Herstellerangaben, Patente, Metastudien sowie Forschungsprojekte berücksichtigt, deren Auswertung im Nachfolgenden dargestellt ist. Die Rechercheergebnisse sind zusätzlich tabellarisch in einer Excel-Datei aufbereitet und sind dieser Dokumentation beigelegt. Die ausführliche Erklärung des Aufbaus und der Verwendung der Excel-Datei ist in Kapitel 3.2.3 enthalten.

2.2.1 Überblick der Emissionsminderungstechnologien

Nach Abschluss der Recherche werden 16 verschiedene Technologien zur Bremsstaubemissionsreduzierung, die in Tab. 2-2 dargestellt sind, zusammengefasst. Dazu zählen sowohl Bremsysteme und -technologien als auch alternative Maßnahmen, wie die Beeinflussung des Fahrerverhaltens. Die Technologien werden in die Kategorien Komponente-, Subsystem- und Gesamtsystemebene unterteilt und sind in Tab. 2-2, ergänzt um die Angaben zur Anzahl der gefundenen Quellen zu den jeweiligen Technologien, zusammengefasst.

Ebene	Emissionsminderungstechnologie	Anzahl Quellen
Komponente	Hartmetallbeschichtung der Bremsscheibe (HMC)	25
	Alternativer Werkstoff Bremsscheibe Carbon-Keramik (CC)	4
	Alternatives Reibmaterial Bremsbelag	6
Subsystem	Optimierte konventionelle Scheibenbremse	6
	Eingekapselte Scheibenbremse	1
	Trommelbremse (mit Filterelement, mit Magneteinrichtung, mit aktiver Absaugung)	12
	Passive Filtereinheit	11
	Aktive Absaugtechnik	12
Gesamtsystem	Elektromechanische Bremsbetätigung	6
	Rekuperation	12
	Gewichtsreduzierung Fahrzeug	3
	Alternative Technologien (Lamellenbremse zentral im Antrieb oder im Radhaus, Induktionsbremse, Radnabenantrieb)	10
Sonstige	Beeinflussung des Fahrerverhaltens	4

Tab. 2-2: In der Recherche gefundene Emissionsminderungstechnologien aufgeteilt nach den Ebenen Komponente, Subsystem, Gesamtsystem und Sonstige

2.2.2 Erläuterungen der Emissionsminderungstechnologien

Neben der Beschreibung der Technologien soll in diesem Abschnitt auch Aufschluss über die aus der Literatur gegebenen Informationen zum Einsparpotential der Bremsmissionen zur Verfügung gestellt werden. Prozentuale Angaben zur Emissionsreduzierung beziehen sich, sofern nichts anderes angegeben ist, auf den Referenzwert des Joint Research Centre (JRC) der im Januar 2024 veröffentlicht wurde. (Bericht im „Atmosphäre“) (Giechaskiel et al., 2024) Dieser entspricht einem Partikelmasseausstoß von 3 mg/km/Bremse pro Tonne Fahrzeuggewicht für eine auf dem Prüfstand gemessene Vorderradbremse. Um auf die Partikelemission auf Gesamtfahrzeugebene zu kommen, muss dieser Wert mit der Fahrzeugmasse und mit drei multipliziert werden. Der Faktor drei

ergibt sich aus der angenommenen Bremskraftverteilung des Fahrzeugs zwischen Vorderachse (2/3) und Hinterachse (1/3) (Giechaskiel et al., 2024). Ein Fahrzeug mit einer Masse von 1,8 t, das ausschließlich über eine konventionelle mechanische Bremse aus Grauguss mit europäischen Standard-Bremsbelägen (ECE-Beläge) verzögert, hat demnach einen Bremspartikelaustritt von 16,2 mg/km. In der EU vorgegebene Standardbeläge (ECE-Beläge) entsprechen low-metallic (LM) oder semi-metallic (SM) Bremsbelägen. (Giechaskiel et al., 2024)

Das JRC vergleicht im „Atmosphäre“ Bericht die zum Zeitpunkt veröffentlichten Informationen über Messungen zur Partikelreduzierung verschiedener Technologien. Dabei liegt der Fokus hauptsächlich auf durchgeführten Messungen durch verschiedene Hersteller oder Studien, die den Testbedingungen inklusive eingesetzter Messtechnik nach der UN Global Technical Regulations (GTR) 24 entsprechen. (Phillips, 2023) Die GTR 24 beschreibt die laboratorische Messung von Bremsemissionen im Light-Duty Vehicle (LDV) Bereich. (*Laboratory Measurement of Brake Emissions for Light-Duty Vehicles*. UN, 2023)

Neben den technischen Eigenschaften, die im Rahmen der Recherche gesammelt werden, soll ebenfalls der technische Reifegrad der jeweils gefundenen Technologie betrachtet werden. Die von der NASA entwickelte Technology Readiness Level (TRL)-Skala beschreibt in neun verschiedenen „Levels“ den Entwicklungsstand von neuen Technologien. Level eins bis drei beschreibt den Konzeptnachweis durch die Beobachtung des Grundprinzips sowie die Formulierung des Technologiekonzeptes. Bis zum TRL sieben handelt es sich um Systemprototypen in einer betrieblichen Umgebung. TRL acht gilt durch Tests und Demonstrationen in einer operativen Umgebung als „mission qualified“ und Level neun gilt als „mission proven“, indem das tatsächliche System durch erfolgreiche Einsätze einsatzgeprüft ist. (NASA, 1988)

Komponente

Der Kategorie der Komponente werden mögliche Materialmodifikationen der Reibpaarung in der Bremse durch Materialveredelung oder alternative Werkstoffe für Scheibe und Bremsbeläge zugeordnet, wie beispielsweise die Hartmetallbeschichtung einer Bremscheibe.

Insgesamt 25 gefundene Quellen enthalten Informationen zur Beschichtung oder dem Beschichtungsverfahren in Form von Patenten, sowie Herstellerbeschreibungen und Ergebnisse aus Studien. (Autohaus, 2022; Backhaus, 2024; Baumann, 2020; Bondorf et al., 2023; Bosch, 2019; Brembo, 2020, 2023, 2024a, 2024b; Christophorus, 2017; Farrow & Oueslati, 2020a; Fisita, 2024; Fornasier and Anguillara Sabazia, 2021; Fuchslocher, 2023; GOTECH Brake Disc Coating GmbH, 2023; Haute Innovation, 2021; Hesse et al., 2021; Impact Innovations, 2024; Kroher, 2024a; Nagel Maschinen- u. Werkzeugfabrik GmbH, 2024; OECD, 2020; Singh, 2023; Trumpf, 2024; Utsch, 2021; Utsch & Schleifenbaum, 2024). Zwei der nach aktuellem Stand der Technik verwendeten Verfahren zur Hartmetallbeschichtung von Bremscheiben sind das Laserauftragschweißen, auch High Speed-Laser Metal Deposition (LMD) genannt, und das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen, auch High-Velocity-Oxy-Fuel (HVOF) genannt. (Fuchslocher, 2023) Ein Vorteil des LMD-Verfahrens gegenüber dem HVOF ist der geringere Werkstoffverlust im Beschichtungsprozess. U.a. ist es in der Nachbearbeitung beider Beschichtungs-Verfahren notwendig, die beschichtete Bremscheibe zu schleifen. (Nagel Maschinen- u. Werkzeugfabrik GmbH, 2024) Dieser Mehraufwand und die damit verbundenen Kosten sind Gründe dafür, dass die beschichtete Bremscheibe aktuell nur im höherpreisigen Fahrzeugsegment, z.B. beim Porsche Taycan als Ausstattungsoption erhältlich ist (Kroher, 2024b). Neuste Veröffentlichungen präsentieren eine zwei-Schicht beschichtete Bremscheibe, die mehrere Anforderungen erfüllen soll.

Die auf die konventionelle Graugussbremsscheibe aufgetragene Zwischenschicht dient beispielsweise vorrangig dem Korrosionsschutz. Die zweite Schicht bestehend aus harten Karbiden wie Wolframkarbid oder Titankarbid ermöglicht eine harte Oberfläche und reduziert den Bremsscheibenverschleiß und die Bremspartikelemission. (Fisita, 2024; Impact Innovations, 2024; Trumpf, 2024) Bosch gibt auf der Firmenwebseite ohne weitere Angaben eine Partikelemissionsreduzierung von 90 % an (Bosch, 2019). Die Impact Innovations GmbH gibt einem um circa 95 % reduzierten Verschleiß im SAE J2522-Test an, welcher ein Prüfverfahren auf dem Trägheitsdynamometer beschreibt. (Singh, 2023) Im EU-Projekt „LOWBRASYS“ aus 2020 werden verschiedene Technologien und Ansätze untersucht, welche die nicht-abgasbezogenen Partikel reduzieren sollen. Hierzu zählt auch die Änderung der Materialien der Reibpartner. (Rosso, 2019) Im „LOWBRASYS“ Projekt wird für die beschichtete Bremsscheibe ein Emissionseinsparpotential für die Partikelmasse PM10 von 32 bis 65 % abhängig von den verwendeten Bremsbelägen angegeben (OECD, 2020). Im Zero Emission Drive Unit (ZEDU-) Projekt des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) soll eine vollständige Bremsemissionsreduzierung erzielt werden. Unter anderem wird eine beschichtete Bremsscheibe an einem BMW i3 getestet und mit dem Referenzfahrzeug verglichen. Unter den Testbedingungen eines WLTC 3b, WLTC Brake und bei Realfahrten werden für alle kombinierten Maßnahmen Partikelmassenreduzierungen für PM10 von bis zu 92 % und PM2,5 um bis zu 90 % ermittelt. Als Messtechnik werden Rasterelektronenmikroskope (REM) und Optical Particle Sizer (OPS) eingesetzt. Für die beschichtete Bremsscheibe werden Reduktionen der Partikelmassen PM10 im Durchschnitt von 57 % und PM2,5 um 60 % angegeben. (Phillips, 2023)

Eine weitere Technologie auf Komponentenebene ist die Carbon-Keramik als alternativer Scheibenwerkstoff anstelle von Grauguss, zu der vier Quellen herangezogen werden. (Farrow & Oueslati, 2020b; Giechaskiel et al., 2024; Hesse et al., 2021; OECD, 2020) Im Projekt „LOWBRASYS“, bei dem Bremssysteme mit niedrigen Emissionen getestet werden, wird die Carbon-Keramik Bremse als vielversprechend bezüglich der Emissionsminderung bezeichnet (OECD, 2020). Jedoch sind der Herstellungsaufwand und die Kosten trotz des bereits betriebenen Aufwands zur Reduzierung der Kosten sehr hoch und liegen bei etwa 400 bis 600 Euro pro Bremsscheibe. (OECD, 2020) Im Projekt MODALES aus 2021 ergibt sich für eine Carbon-Keramik Bremsscheibe eine Partikelmasse PM10 von 1,4 mg/km/Bremse gegenüber 4,7 mg/km/Bremse bei Grauguss und für PM2,5 0,9 mg/km/Bremse gegenüber 2,4 mg/km/Bremse bei Grauguss (Domingo et al., 2020). Im bereits genannten „LOWBRASYS“ Projekt ist die Gesamtmasse an Feinstaub im 3-stündigen Los Angeles City Traffic (LACT) um 60 bis 90 % (abhängig von den verwendeten Belägen) reduziert. (OECD, 2020) Das JRC gibt für den Vergleich verschiedener Messungen eine Partikelreduktion bei einer Carbon-Keramik Bremsscheibe von 81 % PM10 und 74 % PM2,5 gegenüber einer Grauguss Bremsscheibe an. (Giechaskiel et al., 2024) Unter der Technologie Reibmaterial Bremsbelag ist die veränderte Materialzusammensetzung der Bremsbeläge zu verstehen, zu der sechs Quellen gefunden wurden. (ATE, 2024; Farrow & Oueslati, 2020a; Forvia Hella, 2023; Fraunhofer IFAM, 2020; Giechaskiel et al., 2024; OECD, 2020) In Europa werden standardmäßig metallische Bremsbeläge verwendet, bekannt als ECE-Beläge, die in low-metallic (LM) und semi-metallic (SM) unterteilt sind. Ziel der Non-Asbestos Organic (NAO) Bremsbeläge ist es, den metallischen Anteil durch organische Anteile zu ersetzen. (Giechaskiel et al., 2024) Diese Beläge sind asbest- und kupferfrei, wobei bereits eine Menge kleiner fünf Prozent als kupferfrei bezeichnet wird. Hierdurch soll die Abgabe von Kupfer in die Umwelt (Kupfer gilt als hochgiftig für im Wasser lebende Arten) reduziert und somit eine Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit verhindert werden. (Fraunhofer IFAM, 2020) Das JRC gibt an, dass durch NAO-Beläge

verglichen zu den in Europa standardmäßig verwendeten metallischen Bremsbelägen im Schnitt 60 % der PM10 Partikelemissionen reduziert werden. (Giechaskiel et al., 2024)

Subsystem

Auf der Ebene der Subsysteme wird sowohl die unabhängig von der Reibpaarung optimierte konventionelle Scheibenbremse als auch die Trommelbremse gruppiert. Des Weiteren zählen zu den Subsystemen sekundäre Maßnahmen zur Emissionsminderung wie passive Filtereinheiten, Absaugsysteme und Kapselungen.

Unter der Technologie einer optimierten konventionellen Scheibenbremse wird die Optimierung des Luftspalts zwischen Brems Scheibe und Bremsbelägen beschrieben, welche das Restbremsmoment verringert. Das JRC gibt an, dass durch die Minimierung des ungewollten Kontaktes zwischen Scheiben und Belägen bei nicht-Betätigten der Bremse die Partikelemissionen PM10 um bis zu 40 % bis 50 % reduziert werden können. Es wird jedoch erwähnt, dass weitere Messungen und Untersuchungen zur Bestätigung der Aussage durchgeführt werden müssen. (Giechaskiel et al., 2024) Zu dieser Technologie wurden sechs Quellen gefunden. (Backhaus, 2024; Baumann, 2020; Brembo, 2022; Continental, 2022a, 2022b; Giechaskiel et al., 2024) Brembo gibt für das ENESYS ENERGY SAVING SYSTEM an, das Restbremsmoment über eine Rückstellfeder im Bremsattel zu verringern. (Baumann, 2020; Brembo, 2022) Continental realisiert dies zum einen mit einem optimierten Bremsatteldesign durch ein neues Führungsprinzip und reibungsarme Gleitclips. Zum anderen wird eine Funktion für ein aktives Zurückziehen der Beläge zur Verbesserung des Restbremsmoments implementiert. Speziell für batterieelektrische Fahrzeuge gibt Continental zusätzlich eine angepasste, reduzierte Bremsdimensionierung an, da diese Fahrzeuge aufgrund der Rekuperation tendenziell seltener bremsen. (Continental, 2022a, 2022b)

Zur Technologie der Trommelbremse wurden 12 Quellen identifiziert. (2023; Continental, 2022b, 2024; Djukić, 2020; Haag, Mathias, Dr., et al., 2021; HL Mando Corporation, 2023; Kraft and Stebner, 2019; Link, 2021, 2022; Senger, 2023; Shahin, 2022; Volz, et al., 2019) In den gefundenen Quellen sind Patente enthalten, die eine konventionelle Trommelbremse um eine Filtereinheit (Kraft and Stebner, 2019; Volz, et al., 2019), eine Magneteinrichtung (HL Mando Corporation, 2023; Link, 2022) oder eine Absaugeinheit (Djukić, 2020) erweitern. Diese Erweiterungen der Trommelbremse haben die Aufgabe, die innerhalb der Trommelbremse entstehenden Partikel gezielt zu binden und das anschließende Abführen der Partikel bei einer Wartung zu erleichtern, sodass möglichst wenige Partikel in die Umwelt gelangen. Das JRC berichtet, dass auf Fahrzeugebene mit einem Fahrzeuggewicht von 2.250 kg das Ersetzen der Scheibenbremse aus Grauguss mit ECE-Bremsbelägen durch eine Trommelbremse auf der Hinterachse bei gleichbleibender Ausstattung an der Vorderachse die Gesamtemissionen PM10 um 23 % reduziert werden konnten (Giechaskiel et al., 2024). Dies ist unter anderem auf die Bremskraftverteilung eines Fahrzeugs zurückzuführen, da die Hinterachse mit etwa 1/3 nur einen geringen Anteil der gesamten Bremsleistung eines Fahrzeugs erbringt. Continental gibt auf ihrer Webseite an, dass „kaum Partikelemissionen“ entstehen (Continental, 2024). Trommelbremsen sind nicht vollständig emissionsfrei, da zur Abdichtung eine Labyrinth-Dichtung verwendet wird und somit keine vollständige Abdichtung vorliegt. Die bereits erwähnten Lösungen zur Optimierung der Trommelbremse bezüglich des Emissionsverhaltens lassen darauf schließen, dass künftige Trommelbremsen eine nahezu 100 %-ige Emissionsminderung ermöglichen werden. (2023; Djukić, 2020; HL Mando Corporation, 2023; Kraft and Stebner, 2019; Link, 2022; Volz, et al., 2019)

Eine weitere Technologie ist eine eingekapselte konventionelle Scheibenbremse, welche

das konventionelle Bremssystem um eine Einhausung erweitert, bei der die gesamte Scheibenbremse inklusive des Reibkontakts zu den Bremsbelägen umschlossen sind, so dass die Freisetzung der Partikel in die Umwelt unterbunden wird. (Giechaskiel et al., 2024)

Bei der Technologie einer passiven Filtereinheit befindet sich innerhalb einer (teilweisen) Einhausung ein Filter aus Metallfaservlies. Es wurden elf Quellen hierzu gefunden. (Backhaus, 2024; Continental, 2024; Farrow & Oueslati, 2020b; Giechaskiel et al., 2024; Hengst Filtration, 2024; Kohl, et al., 2019; Mann+Hummel, 2024; OECD, 2020; Utsch & Schleifenbaum, 2024; Wörz, et al., 20.12.2021; Wörz, et al., 2022). Das passive Filtersystem, nach aktuellem Literaturstand, umhüllt nicht den gesamten Umfang der Scheibenbremse, sondern ist in Rotationsrichtung hinter der Reibkontaktfläche zwischen Scheibe und Belägen platziert (Hengst Filtration, 2024; Mann+Hummel, 2024). Das JRC berichtet, dass im Rahmen einer GTR 24 Testprozedur ein passives Filtersystem eine Partikelemissionsreduzierung von ungefähr 50 % erreicht (Giechaskiel et al., 2024).

Ein aktives Filtersystem erweitert das passive System um eine Absaugeinheit, die beispielsweise bei Betätigung der Bremse aktiviert wird. Es wurden 12 Quellen zu dieser Technologie gefunden. (Autohaus, 2022; Backhaus, 2024; Giechaskiel et al., 2024; Klinge, Falk, Prof. Dr., 2019; Mackovic, Mirza, Dr., 2021, 2023; Mann+Hummel, 2024; Phillips, 2023; Tallano Technologies, 2023; Utsch & Schleifenbaum, 2024). Das Unternehmen Tallano gibt eine Partikelreduzierung von etwa 70 % bei angewendeten Euro 7 Testbedingungen an. Je nach Bremsmanöver soll auch eine 90 %-ige Emissionsreduzierung erreicht werden (Tallano Technologies, 2023). Das JRC geht von einer durchschnittlichen Partikelmassereduzierung von 75 % im WLTP Brake Zyklus aus. Dies liegt unter anderem daran, dass die aktiven Systeme nur bei Betätigung der Bremse aktiviert werden. Das JRC hat festgestellt, dass ein gewisser Anteil der Partikelemissionen bei nicht-Betätigen der Bremse durch den ungewollten Kontakt zwischen Scheiben und Belägen aufgrund axialer Schwingungen freigesetzt werden. (Giechaskiel et al., 2024)

Gesamtsystem

Auf Gesamtsystemebene werden die Rückwirkungen sekundärer Bremssysteme wie beispielsweise der Einsatz rekuperativen Bremsens sowie die elektromechanische Bremsbetätigung und neuartige technische Lösungen wie die Lamellenbremse, die Induktionsbremse und der Radnabenantrieb betrachtet.

Unter der elektromechanischen Bremsbetätigung (EMB) ist die mechanische Betätigung des Bremspedals und die elektrische Aktuierung der Bremse zu verstehen, wobei die hydraulische Bremsaktuierung ersetzt wird. Hierzu wurden 6 Quellen gefunden. (Breuer, 2017; Continental, 2021a, 2021b, 2022b, 2022c; Hella Pagid, 2024). Continental bietet mit ihren Future Brake Systems (FBS) verschiedene Lösungen mit unterschiedlichen Ausbaustufen an. Während die Ausbaustufen null bis eins eine hydraulische Rückfallebene besitzen, soll in den höheren Ausbaustufen das System halbtrocken, beispielsweise durch elektromechanische Bremsaktuierung an der Hinterachse und hydraulische Bremsbetätigung an der Vorderachse, ausgeführt sein. In der höchsten Ausbaustufe ist ein vollständig trockenes System ohne Hydraulik geplant. (Continental, 2021a, 2021b, 2022c) Eine Partikelreduktion durch eine derartige Technologie lässt sich in Kombination mit anderen Technologien, wie der Rekuperation erreichen, da sich aufgrund der elektromechanischen Betätigung eine bessere Regelbarkeit des Brake Blending realisieren lässt und die Rekuperation in größerem Umfang ausgenutzt werden kann. Dadurch wird die mechanische Bremse seltener benötigt. (Hella Pagid, 2024) In der Standardliteratur (Breuer, 2017) wird der elektromechanisch betätigten Bremse durch die Reduzierung des Restbremsmoments ein

weiteres Potenzial zur Emissionsreduzierung zugeschrieben, da es möglich ist die Bremsbeläge aktiv zurückzuziehen. Es wird jedoch auch beschrieben, dass der zusätzlich entstehende Luftspalt zu einer Verschlechterung des Bremsen-Ansprechverhaltens führt, so dass hierdurch ein Zielkonflikt zwischen dem Ansprechverhalten und der Emissionsminderung entsteht (Breuer, 2017).

Zur Rekuperation wurden 12 Quellen gefunden. (Backhaus, 2024; Bondorf et al., 2023; Bosch, 2024; Damköhler, 2023; Giechaskiel et al., 2024; Grigoratos & Giechaskiel, 2023; Halvorson, 2022; Hesse et al., 2021; Phillips, 2023; Senger, 2023; Utsch & Schleifenbaum, 2024; VW, 2024). In Bezug auf die Euro 7 Gesetzgebung ist das Ziel der bereits in elektrischen Fahrzeugen etablierten Technologie die Steigerung der Ausnutzung der Rekuperation. Porsche stellt in diesem Zusammenhang eine optimierte Bremskraftverteilung vor und nennt eine maximale Verzögerungsleistung von 290 kW in einem Porsche Taycan Turbo S. (Damköhler, 2023) Ein Prototyp von Stellantis, basierend auf der Formel E Technik, soll eine Verzögerungsleistung von 600 kW durch Rekuperation bereitstellen und das Fahrzeug bis in den Stillstand verzögern (Halvorson, 2022). Dies soll ohne Einbußen bei der Sicherheit erfolgen. Die mechanischen Bremsen eines durchschnittlichen Fahrzeugs in der Kompaktklasse müssen für eine Vollbremsung von 100 km/h auf 0 km/h etwa 340 kW und von 200 km/h auf 0 km/h etwa 600 kW Bremsleistung aufbringen (Breuer, 2017). Die maximale Verzögerung der Rekuperation auf der Hinterachse ist aufgrund der dynamischen Achslastverlagerung limitiert, um die Fahrstabilität zu gewährleisten (Breuer, 2017; Damköhler, 2023). Neben der Erhöhung der maximalen Verzögerung kann das Ziel der Optimierung der Rekuperation durch die Verbesserung des Brake-Blendings erreicht werden. Darunter wird das Zusammenspiel der Rekuperation mit der hydraulischen Bremse verstanden, ohne dass beim Verzögerungsverhalten oder im Bremspedal ein Übergang zu spüren ist. (Damköhler, 2023) Zur Berücksichtigung der Hybrid- und Elektrofahrzeuge mit Rekuperation im Rahmen der GTR 24 sind Emissionsfaktoren definiert worden. Hiermit wird die Bremse eines elektrisch angetriebenen Fahrzeugs unter den gleichen Bedingungen wie die eines verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugs anhand der GTR 24 Prüfbedingungen im WLTP Brake Cycle getestet. Die daraus resultierende Emissionsgröße PM10 in mg/km wird im Anschluss mit einem Emissionsfaktor kleiner eins, abhängig von der Höhe der möglichen Rekuperation je nach Antriebskonfiguration, verrechnet. Dabei soll erwähnt werden, dass es sich bei den Emissionsfaktoren laut dem JRC um Worst-Case Werte handelt. Für ein batterieelektrisch angetriebenes Fahrzeug wird ein Emissionsfaktor von 0,17 und für einen Plug-in Hybrid-Antrieb ein Emissionsfaktor von 0,34 angenommen. (Grigoratos & Giechaskiel, 2023) Die für dieses Projekt abgeleitete Emissionsreduzierung durch die Rekuperation beträgt demnach 83 % für ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug. Die Gewichtsreduzierung des Fahrzeugs ist ein weiterer möglicher Lösungsansatz auf Gesamtsystemebene zur Emissionsminderung.

Die Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) hat in ihrem Bericht „Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport“ mehrere Studien zusammengefasst, die eine Korrelation zwischen der Fahrzeugmasse und den Partikelemissionen untersuchen. Es werden die Fahrzeugklassen Passenger Car (PC), Sport Utility Vehicle (SUV) und Light Commercial Vehicle (LCV < 3,5 t) miteinander verglichen. Für diese drei Fahrzeugklassen wird gegenübergestellt, welche Bremspartikelemissionen bei unterschiedlichen Antriebsarten entstehen. Es wird zwischen verbrennungsmotorischen Antrieben und elektrischen Antrieben mit einer elektrischen Reichweite von 100 und 300 Meilen unterschieden. Die durch die Elektrifizierung ermöglichte Rekuperation führt über alle drei Fahrzeugklassen hinweg gemittelt zu einer Reduktion der Bremspartikelemissionen PM2,5 von 77 % (100 Meilen Reichweite) und 66 % (300 Meilen Reichweite) und der

Bremspartikelemissionen PM10 von 74 % (100 Meilen Reichweite) und 63 % (300 Meilen Reichweite). Für identische Antriebsarten steigen die Partikelemissionen durch die steigende Fahrzeugmasse von PC über SUV zu LCV um bis zu ca. 70 %. (OECD, 2020)

Ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug ist im Schnitt etwa 300 kg schwerer als das vergleichbare verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeug (Autohaus, 2020). Gleichzeitig zeigt das Kraftfahrtbundesamt in der aktuellen Statistik, dass das durchschnittliche Leergewicht neu zugelassener Personenkraftwagen in Deutschland seit 2013 steigt (KBA, 2024b). Eine weitere gefundene Technologie auf Systemebene ist die Lamellenbremse. In der Recherche wurden zwei unterschiedliche Varianten einer Lamellenbremse gefunden. Im ersten Fall wird die Lamellenbremse zentral im Antriebssystem angeordnet, wie dies im Zero Emission Drive Unit (ZEDU-) Projekt dargestellt ist (Phillips, 2023). Eine weitere Ausführung findet sich in einem Patent von Continental (Schulitz, et al., 2020). Im ZEDU-Projekt besteht die zentrale Antriebseinheit aus zwei Elektromotoren und zwei einstufigen Planetengetrieben. Die Lamellenbremse ist in die Planetenstufe integriert. Die Lamellen sind mit dem Planetenträger verbunden und rotieren mit der Drehzahl des Abtriebs. Die Bremscheiben stehen still, sind mit dem Hohlrad verbunden und stützen sich am Gehäuse ab. Es wird ein Bremspaket pro Rad vorgesehen. Bei der im ZEDU-Projekt vorgestellten Lamellenbremse handelt es sich um einen Prototyp auf dem Technology Readiness Level (TRL) 7. (Phillips, 2023) Im Patent von Continental wird ein konventioneller elektrischer Antriebsstrang bestehend aus einem Elektromotor, einer Getriebestufe und einem Differential vorgesehen, wobei ein Lamellenpaket pro Rad am Differentialausgang als Bremse vorgesehen ist (Schulitz, et al., 2020).

In der zweiten Ausführung substituiert eine Lamellenbremse die konventionelle Bremse im Radhaus. Das Unternehmen BRL stellte in der 54. Ausgabe des Particle Measurement Programme (PMP) dem Joint Research Centre (JRC) ein Bremskonzept vor, bei dem die Radbremse einer Lamellenkupplung nachempfunden ist. Eine mit dem Rad verbundene Belagscheibe rotiert zwischen zwei feststehenden Bremscheiben (Jose maria Gómez, 2024). Der Hersteller verspricht durch die feststehenden Bremscheiben, dass diese entweder über außenliegende Kühlrippen oder durch Innenkanäle mittels Wasserkühlung gekühlt werden können. Die Wasserkühlung soll über eine Anbindung der Bremse an den Wasserkühlkreislauf des Fahrzeugs erfolgen. Durch diese zusätzliche Kühlung gibt der Hersteller an, dass die Bremse eingehaust werden kann und die Bremspartikel mithilfe eines außenliegenden Filters abgefangen werden können, ohne dass ein thermisches Problem der Bremse zu erwarten ist (BRL, 2024). In einem Vortrag des Particle Measurement Programme (PMP) gibt BRL ohne Bestätigung durch Messwerte eine 100 %-ige Bindung der Bremspartikel PM10 und PM2,5 an. Weiterhin wird erwähnt, dass „Dyno Certified Results of Emissions“ Messungen in Q3 2024 erwartet werden. (Jose maria Gómez, 2024).

Im bereits erwähnten ZEDU-Projekt wird eine Induktionsbremse vorgestellt, wobei das Wirkprinzip dem einer Wirbelstrombremse gleicht. Es handelt sich dabei um eine verschleißfreie Bremse bei der ein relativ zum äußeren Magnetfeld rotierender metallischer Körper Wirbelströme und somit ein Bremsmoment erzeugt (Phillips, 2023).

Die letzte Technologie auf Systemebene ist der Radnabenantrieb ohne oder mit integrierter Bremse. Diverse Ansätze für die Umsetzung eines Radnabenantriebs wurden in der Vergangenheit vorgestellt (AT-RS, 2013; Hommen, 2023). Continental stellt in Kooperation mit DeepDrive einen Radnabenantrieb vor, der einer Kombination aus Antriebs- und Bremskomponenten entspricht. Die Umsetzung der Bremse entspricht in diesem Ansatz einer Trommelbremse (Continental, 2023). Im März 2023 wird bekannt, dass BMW und Continental in DeepDrive investieren (Werwitzke, 2023) und Anfang Juli 2024 werden erste Bilder eines BMW-Prototypen Sportwagencoupé öffentlich, bei dem aufgrund der

fehlenden Bremsscheibe vermutet wird, dass es sich um Radnabenantriebe auf der Vorder- und Hinterachse handelt (Wagner, 2024). DeepDrive gibt an, dass sie ihren Radnabenantrieb bereits 2026 in Großserie auf den Markt bringen wollen (Werwitzke, 2023).

Sonstige

Zur breiteren Erfassung des Lösungsraums wird hier eine weitere alternative Lösung, die Beeinflussung des Fahrerverhaltens, zur Bremsemissionsminderung aufgeführt, da diese in der Literatur erwähnt wird. Im bereits beschriebenen Projekt LOWBRASYS wurde unter anderem das System Predictive Efficiency Assistant (PEA) entwickelt, das GPS Daten in Form von Topografie und Abbiegungen mit Geschwindigkeitslimits und der durch Fahrzeugsensoren ermittelten aktuellen Fahrsituation kombiniert, um den Fahrer im Voraus auf ein Bremsereignis aufmerksam zu machen (Rosso, 2019). Dies soll das umweltfreundliche Fahren fördern. In einem dreistündigen Los Angeles City Traffic (LACT) wurde im Rahmen dieses Projektes mithilfe des Systems eine Bremsemissionsminderung von bis zu 30 % erreicht (OECD, 2020). Im Rahmen des Projekt MODALES wurde eine App entwickelt, die zu einem umweltbewussten Fahren motivieren soll, wobei Trainings zur Änderung des Fahrverhaltens bezüglich Fahrsituationen Segeln, Schalten, Bremsen und Beschleunigen in der App enthalten sind. Die Wirksamkeit des umweltbewussten Fahrens wurde mithilfe eines angepassten WLTP-Brake Cycles ermittelt. Die klassische WLTP-Brake Cycle Prozedur sieht vor, dass das Fahrzeug einer vorgegebenen Sollgeschwindigkeit folgt. Dieser im Projekt angepasste Zyklus beschreibt das Folgen der Sollgeschwindigkeit durch einen vorausschauenden Fahrer, der schwächer beschleunigt, bei einer notwendigen Verzögerung vorzeitig vom Gas geht und milder verzögert. Das dadurch resultierende Einsparpotential liegt bei einem um 20 % reduzierten Kraftstoffverbrauch. Ohne dazugehörige Messungen wird darauf eingegangen, dass eine prozentual höhere Emissionsminderung der Bremspartikel zu erwarten ist, da durch die geringere Verzögerung auch die Temperatur der Bremse niedriger ist, die einen nennenswerten Einfluss auf die entstehenden Partikelemissionen haben soll. (Domingo et al., 2020; Laurikko Juhani et al., 2021)

3 Bewertung der Emissionsminderungstechnologien für Bremsstaub

3.1 Systematik der Technologiebewertung

In diesem Abschnitt soll die Vorgehensweise, zur Bewertung der Emissionsminderungstechnologien auf Basis der in Kapitel 2 gezeigten Ergebnisse erläutert werden. Zunächst wird in diesem Kapitel die Systematik der Technologiebewertung und der damit verbundene Prozess der Nutzwertanalyse erläutert. Im Kapitel 3.2 wird auf die Umsetzung der Nutzwertanalyse eingegangen.

3.1.1 Prozess der Nutzwertanalyse

Die Bewertung der Technologievarianten erfolgt anhand einer Nutzwertanalyse. Die gewichtete Gesamtbewertung T_{ges} einer Technologievariante ergibt sich wie folgt:

$$T_{ges} = \sum_{i=1}^n T_i(a_i) * G_S * P$$

Dies entspricht der Summe der ungewichteten Technologiebewertungen T_i abhängig einer Skalierung a_i der n Bewertungskriterien, wobei anschließend eine Gewichtung der Bewertungskriterien nach Fahrzeugsegmenten G_S und eine Plausibilisierung P erfolgt.

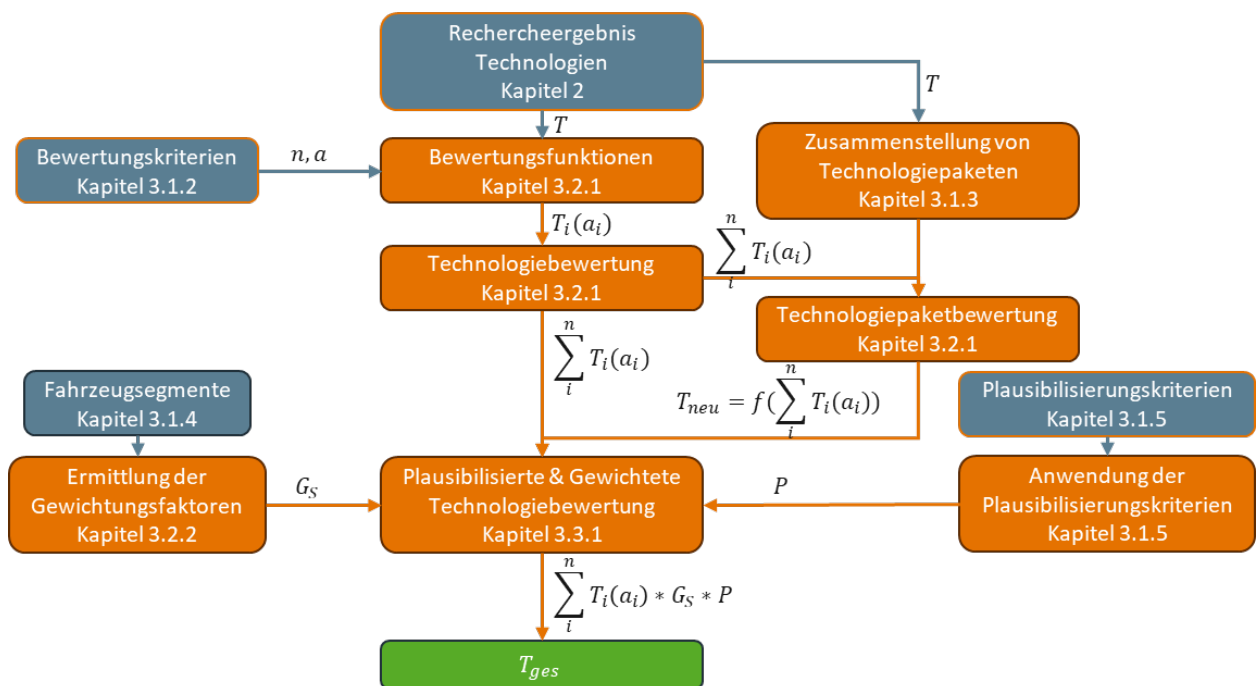


Bild 3-1: Vorgehensweise für die Bewertung der Bremsstaubemissionsminderungstechnologien

Bild 3-1 zeigt den Prozess der Technologiebewertung, wobei die farbliche Markierung zur besseren Übersicht dient: Bei den blauen Boxen handelt es sich um Eingabeparameter, welche, mit Ausnahme der Fahrzeugsegmente, im Projekt definiert werden. Die orangefarbenen Boxen stellen die einzelnen Arbeitsumfänge des Projekts dar. Das Endergebnis wird durch die grüne Box repräsentiert.

An dieser Stelle wird kurz der in Bild 3-1 gezeigte Ablauf der Technologiebewertung erläutert, auf den in nachfolgenden Abschnitten näher eingegangen wird. Ausgehend von den Rechercheergebnissen zum Stand der Technik und den Bewertungskriterien werden Bewertungsfunktionen für jedes Kriterium ermittelt. Die Unterteilung der Bewertungskriterien in Basis- und erweiterten Anforderungen sowie die dazugehörigen Attribute sind dabei durch den Auftraggeber vorgegeben und werden durch den Auftragnehmer basierend auf Standardliteratur ergänzt (Breuer, 2017). Die ermittelten Bewertungsfunktionen ermöglichen eine qualitative oder quantitative ungewichtete Technologiebewertung $0 < T_i < 1$ abhängig von den Eigenschaften der jeweiligen Technologie. Innerhalb der Bewertungsskalen dient der aktuelle Stand der Technik, definiert als eine hydraulisch betätigte, konventionelle Scheibenbremse mit ECE-Bremsbelägen, als Referenz. Die Technologiebewertung ergibt sich als die Summe der Einzelbewertungen der Bewertungskriterien. Als Ergänzung der Betrachtung von Einzeltechnologien werden parallel zusätzlich Technologiepakete bestehend aus einer Kombination einzelner Technologien erstellt. Die Technologiepakete werden in Kapitel 3.1.3 genauer erläutert, wobei auf die Bewertung der Technologiepakete $0 < T_{neu} < 1$ mittels Formelbezügen in 3.2.1 eingegangen wird. Da nicht jedes Bewertungskriterium gleich relevant ist, werden im nächsten Schritt Gewichtungsfaktoren $0 < G_S < 1$ gesondert für jedes Fahrzeugsegment ermittelt. Die Ermittlung der Gewichtung der Bewertungskriterien erfolgt dabei durch einen paarweisen Vergleich, wobei die erhaltene Summenwertigkeit zu 100 % normiert wird. Im letzten Schritt erfolgt eine begründete Plausibilisierung $P = \{0,1\}$, wobei P ein binärer Wert ist. Nicht umsetzbare oder auf dem Markt nicht akzeptierte Technologievarianten werden ausgeschlossen und erhalten den Wert Null. Ein Beispiel für eine nicht umsetzbare Variante ist die Rekuperation bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen.

3.1.2 Definition und Erläuterung der Bewertungskriterien

Während in der Vergangenheit der hauptsächlichste Entwicklungsaufwand für das Bremssystem in die Erreichung der erforderlichen Bremsleistung und Bauteilsicherheit geflossen ist, wird heutzutage ein Großteil des Entwicklungsaufwands für die Optimierung des Bremskomforts aufgewendet. Darunter sind die Bremspedalcharakteristik (auch Bremsgefühl genannt) sowie das Geräusch- und Schwingungsverhalten (Noise Vibration Harshness NVH) zu verstehen. Die für dieses Projekt herangezogenen Bewertungskriterien sind eine Kombination der vom Auftraggeber vorgeschlagenen Attribute, der in der Standardliteratur (Breuer, 2017) zu findenden Basisanforderungen sowie weiterer Anforderungen.

- Basisanforderungen
 - Thermische Bremsleistung
 - Maximale Verzögerung
 - Bremspedalcharakteristik
 - Noise Vibration Harshness (NVH)
 - Schädlichkeit der Emissionen
 - Korrosionsabrieb
- Weitere Anforderungen
 - Aufwand zur technischen Machbarkeit
 - Systemkosten

- Qualitative Einschätzung der Kosten
- Technology Readiness Level (TRL)
- Emissionsminderungspotential
- Reparaturaufwand und Ersatzteilbeschaffung
- Prüfbarkeit bei den technischen Diensten im Rahmen der periodischen, technischen Inspektion (PTI)
- Lebensdauer
- Kompatibilität zu bestehenden Fahrzeugsystemen (ABS, ESP, Fahrerassistenzsysteme)
- Empfindlichkeit der Wirksamkeit der Emissionsminderung durch äußere Einflüsse oder im Realbetrieb

Erläuterung der Bewertungskriterien

Unter der thermischen Bremsleistung ist das Verhalten und Nachlassen der Bremswirkung bei höheren Temperaturen zu verstehen, was ebenfalls unter dem Begriff Fading bekannt ist. Während eine Carbon-Keramik Bremse einerseits durch die Fahrtwind-Anströmung eine Kühlwirkung erfährt und andererseits ein stabiles Reibwertverhalten auch bei hohen Temperaturen aufweist, ist eine Trommelbremse aufgrund der geschlossenen Bauweise eingeschränkt in der Kühlung. Zusätzlich ist das Reibwertverhalten der Trommelbremse abhängig von der Temperatur und nimmt bei hohen Temperaturen ab. (Breuer, 2017) Die Carbon-Keramik Bremse wird bezüglich dieses Bewertungskriteriums besser bewertet als eine Trommelbremse.

Das Bewertungskriterium maximale Verzögerung bezieht sich auf den Bremsweg bei einer Vollbremsung, der unter anderem auch in der ECE R13 definiert ist. Darin ist beispielsweise enthalten, dass eine Service Brake, definiert als primäres Bremssystem, in der Lage sein muss, das Fahrzeug unter gegebenen Randbedingungen von 80 % der Höchstgeschwindigkeit bis in den Stillstand abzubremsen. Die mittlere Verzögerung darf dabei eine Mindestverzögerung nicht unterschreiten.

Die Bremspedalcharakteristik beschreibt die Rückmeldung der Bremse über das Bremspedal. Diese Eigenschaft wird oft auch als Bremsgefühl beschrieben.

Mit dem Bewertungskriterium Noise Vibration Harshness (NVH) wird das Geräusch- und Schwingungsverhalten des Bremssystems bewertet, wobei sowohl hörbare als auch spürbare Anregungen gemeint sind.

Das Bewertungskriterium Schädlichkeit der Emissionen bezieht sich auf den Typ der an die Umwelt abgegebenen Partikel. Die Anforderung berücksichtigt, ob Literaturangaben zur Reduzierung des Kupfer- und schwermetallischen Anteils in den Reibpaarungen und Ersatz dieser durch organische Materialien gegeben sind.

Mit Korrosionsabrieb ist die Beständigkeit gegen Korrosion gemeint. Technologien wie eine beschichtete Brems Scheibe zielen unter anderem auf eine höhere Korrosionsresistenz. Andere Technologien wie beispielsweise die Rekuperation sind korrosionsfrei, da die Komponenten durch ein Gehäuse geschützt sind. Die Rekuperation wird bezüglich der Korrosionsresistenz besser bewertet als die beschichtete Brems Scheibe, wobei beide Technologien besser bewertet werden als der Stand der Technik einer Grauguss-Brems Scheibe.

Unter Aufwand zur technischen Machbarkeit ist der Entwicklungs- und Fertigungsaufwand gemeint. Eine konventionelle Brems Scheibe aus Grauguss ist einfacher zu fertigen als eine beschichtete Brems Scheibe, bei der zusätzliche Arbeitsschritte wie die Vorbereitung für die Beschichtung, das Beschichten und die Nachbearbeitung durch beispielsweise Schleifen und Polieren, anfallen. Die beschichtete Brems Scheibe wird somit bezüglich der technischen Machbarkeit schlechter bewertet als die konventionelle Grauguss-Brems Scheibe. Die beiden Bewertungskriterien Systemkosten und qualitative Einschätzung der Kosten

bewerten die Technologien hinsichtlich ihrer Kosten. Sind keine Quellenangaben zu exakten Kosten durch Zulieferer oder Hersteller bekannt, werden die Kosten qualitativ geschätzt, um eine Bewertung dieser Technologien ebenfalls zu ermöglichen.

Die von der NASA entwickelte (TRL)-Skala wird herangezogen, um die Marktreife neuartiger Technologien bewerten zu können.

Das Bewertungskriterium Emissionsminderungspotential fasst die vorhandene Literatur bezüglich ihrer Emissionsreduzierung zusammen, die bereits in Kapitel 2.2.2 dokumentiert sind.

Unter Reparaturaufwand und Ersatzteilbeschaffung wird der Umfang der Wartung und der damit verbundene Arbeitsaufwand, sowie die Verfügbarkeit von Ersatzteilen eingeordnet. Eine zentral im Antrieb integrierte Bremse hat je nach Konstruktion und Integration ins Fahrzeug den Mehraufwand, dass ggf. die gesamte Traktionseinheit ausgebaut werden muss, um die Bremse zu warten oder auszutauschen und wird deshalb mit hohem Aufwand bewertet. Im Gegensatz hierzu umfasst die Wartung einer konventionellen Bremse, die Demontage eines Rades und des Bremssystems aus Scheibe und Bremsattel mit Belägen, die getauscht werden können, was einem geringeren Aufwand entspricht und somit besser bewertet wird als die zentral im Antrieb angeordnete Bremse.

Das Bewertungskriterium Prüfbarkeit im Rahmen der periodisch, technischen Inspektion berücksichtigt, ob und wie die Wirksamkeit der Technologie im Betrieb prüfbar ist und welcher Aufwand damit verbunden ist. Eine konventionelle Scheibenbremse lässt sich durch den Bremstest und die anschließende Sichtprüfung auf ihre Funktionstüchtigkeit und ihren Verschleißzustand kontrollieren. Bei einer Trommelbremse ist die Sichtprüfung eingeschränkt, da von außen nicht auf den Zustand der Reibpaarung geschlossen werden kann. Bei einer aktiven Absaugeinheit wäre die Prüfprozedur ggf. zu erweitern, da zum einen die Funktion der Absaugung sichergestellt werden muss und zudem auch der Zustand des Filters kontrolliert werden muss. Ähnlich der Abgasuntersuchung, bei der überprüft wird, ob die Abgasnachbehandlung funktionstüchtig ist, wäre zusätzliche Messtechnik erforderlich. Sowohl die Trommelbremse als auch die aktive Absaugeinheit werden hinsichtlich ihrer Prüfbarkeit schlechter bewertet als die Scheibenbremse, wobei die Absaugeinheit aufgrund des beschriebenen höheren Aufwands schlechter bewertet wird als die Trommelbremse.

Das Bewertungskriterium Lebensdauer zieht Literaturangaben heran und soll eine Einschätzung der Haltbarkeit ermöglichen. In der Literatur finden sich Angaben zur Lebensdauer einer konventionellen Scheibenbremse von 80.000-100.000 km. Technologien wie beispielsweise die Rekuperation werden als Lebensdauerbauteile ausgelegt, die ihre Funktion über den gesamten Zeitraum der Fahrzeugnutzung erfüllen und nicht ersetzt werden müssen. Für andere Technologien wie beispielsweise Filtersysteme werden hingegen Serviceintervalle für den Filterwechsel angegeben. Die Rekuperation wird bezüglich der Lebensdauer besser bewertet als die konventionelle Scheibenbremse, wohingegen die Filtersysteme schlechter bewertet werden.

Unter dem Bewertungskriterium der Kompatibilität werden die Technologien dahingehend bewertet, ob diese ohne nennenswerten Aufwand kompatibel zu bestehenden Fahrzeugsystemen, wie beispielsweise dem ABS-, ESP-System oder Fahrassistenzsystemen sind. Bremsen zentral im Antrieb lassen sich nicht ohne weiteres im Grenzbereich (ABS, ESP) regeln, da der Abstand zwischen dem aufgebrauchten Bremsmoment und dem Reifenlatsch (Kontakt zwischen Fahrbahn und Reifen) groß und die Verbindung durch die Antriebswelle ein elastisches System ist. Die Strecke zwischen dem genauen Zustand des Reifen-Fahrbahnkontakts und der notwendigen Stellgröße des Bremsmoments ist größer, was die Regelbarkeit herabsetzt. Es wird somit von einer geringeren Kompatibilität

ausgegangen und damit die Technologie in diesem Kriterium schlechter bewertet. Mit dem Bewertungskriterium Empfindlichkeit der Wirksamkeit der Emissionsminderung wird bewertet, wie stark äußere Einflüsse im Realbetrieb einen Einfluss auf die Emissionsreduzierung durch die Technologie haben. Diese Anforderung trägt dem Effekt Rechnung, dass die Wirksamkeit einer Technologie unter Prüfbedingungen und unter realen Bedingungen abweichen kann. Technologien wie eine Carbon-Keramik Bremse sind diesbezüglich unempfindlich, da die Bremsscheibe aus einem Vollmaterial besteht und auch kurz vor der Verschleißgrenze die gleiche Materialpaarung in Kontakt ist. Ein Gegenbeispiel sind voll beladene und nicht gewartete Filtersysteme. Diese können nicht die unter Prüfbedingungen erreichte Emissionsreduzierung gewährleisten und werden bezüglich des Bewertungskriteriums Empfindlichkeit schlechter bewertet.

3.1.3 Auswahl von betrachteten Technologien und Technologiepaketen

Nachfolgend erfolgt die Definition der im Weiteren bewerteten Technologien. Hierzu wird zunächst eine Auswahl relevanter Technologien getroffen und folglich andere Technologien von der weiteren Betrachtung begründet ausgeschlossen. Anschließend erfolgt die Zusammenstellung von Technologiepaketen.

Aussortierte Bremsemissions-Minderungstechnologien

Die im Kapitel 2.2 aufgezählten Bremsemissions-Minderungstechnologien resultieren aus der recherchierten Literatur. Folgende Maßnahmen oder Technologien werden für die Bewertung unter den nachfolgenden beschriebenen Gründen nicht weiter berücksichtigt:

- Einkapselte Scheibenbremse
- Lamellenbremse zentral im Antrieb
- Lamellenbremse im Radhaus
- Induktionsbremse
- Radnabenantrieb
- Gewichtsreduzierung Fahrzeug (Leichtbau)
- Beeinflussung des Fahrerverhaltens

Technologien mit einem Technology Readiness Level (TRL) von 7 und geringer werden in der Bewertung nicht berücksichtigt, da es sich bis zu diesem Level um einen Prototyp handelt. Für die zeitnahe Einführung der Euro 7 Gesetzgebung werden nur Technologien berücksichtigt, welche bereits einen Reifegrad nahe des Serieneinsatzes aufweisen, was bei Prototypen nicht der Fall ist.

Darunter fallen Technologien wie die eingekapselte Bremsscheibe, zu der keine veröffentlichten Angaben zur Umsetzung oder durchgeführten Erprobungstests in einem Fahrzeug gefunden werden konnten und damit ein geringes TRL unterstellt wird.

Zur Lamellenbremse im Radhaus konnten ebenfalls keine Informationen zu durchgeführten Tests gefunden werden. Für die Lamellenbremse zentral im Antrieb im ZEDU-Projekt wird ein TRL von 7 angegeben, da es prototypisch demonstriert wurde. Informationen zu weiteren Tests auf dem Weg zur Marktreife, wie etwa einer Lebensdauererprobung sind nicht aufgeführt.

Für die im ZEDU-Projekt realisierte alternative Lösung der Induktionsbremse wurde ein TRL 6 angegeben und folglich wird diese ebenfalls nicht berücksichtigt.

Es gab in der Vergangenheit bereits mehrere Ansätze den Radnabenantrieb in Serie zu bringen, die aus diversen Gründen nicht umgesetzt wurden (Hommen, 2023). Es wäre denkbar, dass die Euro 7 Gesetzgebung ein Treiber für die Weiterentwicklung des Radnabenantriebs ist, wie dies die Partnerschaft zwischen Continental und DeepDrive zeigt

(Continental, 2023). Die gefundenen Informationen geben Auskunft über Prototypenstände, sodass die Einführung des Radnabenantriebs zu einem späteren Zeitpunkt zu erwarten ist und nicht unmittelbar nach der Einführung der Euro 7 Gesetzgebung.

Es wurden Quellen zur Maßnahme Gewichtsreduzierung des Fahrzeugs gefunden in denen Fahrzeuge unterschiedlicher Gewichtsklassen und unterschiedlichen Antriebsarten miteinander verglichen werden (OECD, 2020; Tallano Technologies, 2024). Es wurde festgestellt, dass die Bremspartikelemissionen durch die Rekuperation stark reduziert werden und zu schwereren Fahrzeugklassen hin ansteigen. Innerhalb einer Fahrzeugklasse sind allerdings Leichtbaumaßnahmen mit erheblichem Aufwand und Kosten verbunden, die nur zu einer relativ geringen Partikelemissionsreduktion führen. Aus diesen Gründen wird die Gewichtsreduzierung in der Bewertung nicht berücksichtigt.

Wie im Stand der Technik (Kapitel 2.2.2) beschrieben, gibt es Ansätze den/die Fahrer/in zu einem umweltbewussten Fahrverhalten zu motivieren. Es kann jedoch nicht gewährleistet werden, dass der Nutzer diesen Aufforderungen Folge leistet, sodass diese Maßnahme im weiteren Verlauf dieses Vorhabens nicht berücksichtigt werden kann.

Berücksichtigte Bremsemissions-Minderungstechnologien

Folgende Technologien werden in der Bewertung berücksichtigt:

- Hartmetallbeschichtung der Bremsscheibe (HMC)
- Alternativer Werkstoff Bremsscheibe Carbon-Keramik (CC)
- Alternatives Reibmaterial Bremsbelag
- Optimierte konventionelle Scheibenbremse
- Trommelbremse
- Passive Filtereinheit
- Aktive Absaugtechnik
- Elektromechanische Bremsbetätigung
- Rekuperation

Einführung von Technologiepaketen

Über die Betrachtung der im vorigen Abschnitt berücksichtigten Einzeltechnologien hinaus erweist sich die Bündelung verschiedener Maßnahmen als wahrscheinliches Szenario, welches hier berücksichtigt werden soll.

Die Rekuperation als alleinige Verzögerungstechnologie in einem Fahrzeug ist nach aktuellem Stand der Technik nicht zulässig, da es die Anforderungen an die Betriebsbremse (Service Brake) des Fahrzeugs nicht erfüllt (*Addendum 12-H: UN Regulation No. 13-H*. United Nations, 2018). Aus diesem Grund werden Technologiepakete aus der Kombination von Rekuperation und mechanischen Bremsen erstellt.

Eine elektromechanische Bremsbetätigung als Ersatz für eine hydraulische Bremsbetätigung reduziert nicht zwangsläufig die Partikelemissionen, sofern der Rest des Bremssystems unverändert bleibt. Wie in Kapitel 2.2.2 erläutert gibt es zwar den Ansatz, die Bremsbeläge aktiv zurückzuziehen und das Restbremsmoment zu reduzieren. Dies erfordert jedoch einen Kompromiss mit dem Ansprechverhalten der Bremse. Die Kombination der elektromechanischen Bremsbetätigung mit der Rekuperation bei einem elektrischen Fahrzeug ermöglicht, dass ein höherer Anteil der Verzögerungsleistung rekuperiert werden kann und dadurch eine höhere Partikel-Emissionsreduzierung zu erwarten ist. Der dadurch entstehende Vorteil macht sich vor allem bei stärkeren Verzögerungen bemerkbar, bei denen die Rekuperation und die mechanische Bremse gleichzeitig aktiv sind. Es wäre auch bei einer Vollbremsung möglich, die Rekuperation je nach Batteriezustand und

thermischen Gegebenheiten des elektrischen Triebstrangs vollständig auszunutzen, wobei die mechanischen Bremsen ein geringeres Bremsmoment stellen müssten und demnach entlastet werden (Continental, 2021a). Zwar sind im WLTP Brake Cycle keine Vollbremsungen vorgesehen, eine derart verbesserte Rekuperation ermöglicht aber ggf. die Anwendung einer Trommelbremse an der Vorderachse. Die mechanische Bremse wird in dieser Ausführung hauptsächlich für die Verzögerung bei niedrigerer Geschwindigkeit bis in den Stillstand benötigt. (Damköhler, 2023)

Eine weitere Motivation der Technologiepakete ist, dass Einzeltechnologien die Euro 7 Gesetzgebung nicht erfüllen, wie beispielsweise die optimierte konventionelle Scheibenbremse. Wie bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben, ist das Ziel dieser Technologie, das Restbremsmoment zwischen der Brems Scheibe und den Bremsbelägen durch ein optimiertes Bremsattel design zu minimieren. Die in der Literatur erreichten Partikelreduzierungen dieser Technologie als alleinige Maßnahme würde nicht die notwendige Emissionsreduzierung erreichen und demnach nicht weiter berücksichtigt werden. In Kombination mit einer weiteren Maßnahme, beispielsweise alternative Reibmaterialien der Bremsbeläge, könnten aber die Grenzwerte eingehalten werden.

Technologiepakete

Im Rahmen dieser Studie werden realistische und erwartbare Technologiepakete aufgrund der Euro 7 Gesetzgebung erstellt und bewertet, die im Folgenden aufgelistet sind:

- Optimierte konventionelle Scheibenbremse mit alternativem Reibmaterial Bremsbelag an der Vorderachse und Trommelbremse an der Hinterachse
- Optimierte konventionelle Scheibenbremse mit alternativem Reibmaterial Bremsbelag an der Vorder- und Hinterachse
- Optimierte konventionelle Scheibenbremse mit alternativem Reibmaterial Bremsbelag und passivem Filter an der Vorder- und Hinterachse
- Standardbremssystem Elektrofahrzeug (Rekuperation auf einer Achse und konventionelle Scheibenbremse an der Vorder- und Hinterachse)
- Rekuperation auf einer Achse und optimierte konventionelle Scheibenbremse mit alternativem Reibmaterial Bremsbelag an der Vorderachse und Trommelbremse an der Hinterachse
- Rekuperation auf einer Achse und Hartmetallbeschichtung der Brems Scheibe (HMC) an der Vorder- und Hinterachse
- Rekuperation auf einer Achse und Trommelbremse mit elektromechanischer Bremsbetätigung an der Vorder- und Hinterachse

3.1.4 Betrachtung verschiedener Fahrzeugzeugsegmentgruppen

Die vorliegende Studie betrachtet Technologien zur Reduktion der Partikelemissionen von Reibbremsen in Pkw. Die Kundenerwartung an unterschiedliche Fahrzeugklassen und die Preisbereitschaft unterscheiden sich stark, sodass es erforderlich ist, unterschiedliche Fahrzeugsegmente zu betrachten, wobei jene mit ähnlichen Kunden-Anforderungsprofilen gruppiert werden können.

Einführung von Fahrzeugsegmentgruppen

Es werden die Fahrzeugsegmente verwendet, die seitens des Kraftfahrtbundesamtes unterschieden werden. Diese werden soweit zusammen betrachtet, wie sie mit Bezug auf das Bremssystem ähnliche Anforderungen aufweisen. In Tab. 3-1 sind die zusammengefassten Gruppen gelistet:

Fahrzeugsegmentgruppe	Bezeichnung nach KBA
A & B	Kleinstwagen & Kleinwagen
C & M & J	Kompaktklasse, Van & SUV
D & E & J	Mittelklasse, Obere Mittelklasse & Geländewagen
F	Oberklasse
S	Sportwagen

Tab. 3-1: Gruppierung von Fahrzeugsegmenten mit vergleichbaren Anforderungen an das Bremssystem (Bezeichnung nach Kraftfahrtbundesamt (KBA, 2024a))

Das A- und B-Segment umfasst leichte und schwach motorisierte Fahrzeuge mit geringeren Leistungs-Anforderungen an das Bremssystem, bei denen geringe Kosten im Vordergrund stehen.

Fahrzeuge aus der C-, M- und J-Segmentgruppe weisen ein höheres zulässiges Gesamtgewicht und eine höhere Motorleistung auf. Dementsprechend sind hier die Anforderungen an das Bremssystem höher. Vans und SUVs werden ebenfalls dieser Gruppe zugeordnet, da sie in der Regel dieselbe Fahrzeugplattform verwenden.

Die Fahrzeuge aus der D-, E- und J-Segmentgruppe werden häufig als Langstreckenfahrzeuge verwendet. Fortschrittliche Technologien werden hier eingesetzt, wenn sie sich unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten rechtfertigen lassen. Geländewagen werden ebenfalls dieser Gruppe zugeordnet, da eine ähnliche Dimensionierung der Bremse (trotz anderen Anforderungsprofils) verwendet wird.

Fahrzeuge im F-Segment der Oberklasse zeichnen sich durch eine hohe Akzeptanz für neue Technologien insbesondere zur Komfortsteigerung aus. Kosten und Aufwand sind eher unwichtig.

Im S-Segment werden Fahrzeuge auf hohe Fahrleistungen ausgelegt. Auch hier sind Kosten und Aufwand weniger relevant.

3.1.5 Plausibilisierung der Technischen Anwendung je Fahrzeugsegmentgruppe

Die Plausibilisierungsmatrix, dargestellt in Tab. 3-2, wird angewendet, da es externe Randbedingungen gibt, die dazu führen, dass Technologievarianten auf dem Markt in einzelnen Fahrzeugsegmenten nicht akzeptiert werden. Diese Varianten werden durch den Auftragnehmer mit einer begründeten Plausibilisierung ausgeschlossen.

Plausibilisierung von Ausstattungsvarianten		Einzelne Technologien					Technologiepakete						
		Hartmetallbeschichtung Bremssscheibe (HMC)	Alternativer Werkstoff Bremssscheibe Carbon-Keramik (CC)	Reibmaterial Bremsbelag	Passive Filtereinheit	Aktive Absaugtechnik	Optimierte Scheibenbremse mit Reibmaterial Bremsbelag VA & Trommelbremse HA	Optimierte Scheibenbremse mit Reibmaterial Bremsbelag VA & HA	Optimierte Scheibenbremse mit Reibmaterial Bremsbelag mit passiver Filtereinheit VA & HA	Standardbremssystem Elektro (Rekuperation, Scheibenbremse VA & Scheibenbremse HA)	Rekuperation mit Optimierte Scheibenbremse mit Reibbelag VA & Trommelbremse HA	Rekuperation mit Beschichtete Bremssscheibe (HMC) VA & Beschichtete Bremssscheibe (HMC) HA	Rekuperation mit elektromechanischer Bremsbetätigung mit Trommelbremse VA & Trommelbremse HA
A-&B-Segment	Verbrenner	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
	Hybrid	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
	Elektro	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
C-&M-&J-Segment	Verbrenner	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	Hybrid	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
	Elektro	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
D-&E-&J-Segment	Verbrenner	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
	Hybrid	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
	Elektro	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
F-Segment	Verbrenner	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	Hybrid	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
	Elektro	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
S-Segment	Verbrenner	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Hybrid	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
	Elektro	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0

Legende	Bedeutung
Blau	Aus Kostengründen ist diese Technologie/ Technologiepaket in diesen Segmenten nicht zu erwarten
Orange	Es wird erwartet, dass die Technologie in dem Segment nicht die Euro 7 Gesetzgebung erfüllt
Grau	Die thermische Bremsleistung ist nicht ausreichend
Grün	Die Technologie ist in einem verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeug nicht möglich
Gelb	Bei Elektro- und Hybridfahrzeugen werden nur Technologien in Kombination mit Rekuperation bewertet

Tab. 3-2: Plausibilisierungsmatrix inklusive der dazugehörigen Legende

In den Zeilen werden die Fahrzeugsegmentgruppen und die jeweiligen Triebstrangvarianten aufgelistet. In den Spalten sind sowohl die in der Bewertung berücksichtigten Einzeltechnologien als auch die Technologiepakete dargestellt, wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben. Die Plausibilisierungsmatrix unterscheidet sich zu den in Kapitel 3.1.3 vorgestellten Ausschlusskriterien dahingehend, dass bei den Ausschlusskriterien Technologien aufgrund der in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Gründe in dieser Bewertung für alle Fahrzeugsegmente nicht berücksichtigt werden. Bei der Plausibilisierung geht es um die Differenzierung nach

Fahrzeugsegmenten, sodass eine Technologie aufgrund der folgenden Begründungen für gewisse Fahrzeugsegmente nicht berücksichtigt wird:

1. Technische Realisierbarkeit im Triebstrang
 - a) Bsp. 1: Die Rekuperation bei einem Verbrennerfahrzeug ist nicht möglich.
 - b) Bsp. 2: Alle Elektro- und Hybridfahrzeuge können rekuperieren, sodass bei diesen Fahrzeugen nur Technologievarianten in Kombination mit der Rekuperation berücksichtigt werden
2. Erfüllungsgrad der Euro 7 Gesetzgebung
 - a) Bsp.: Die Elektromechanische Bremsbetätigung (EMB) als Einzeltechnologie erfüllt nicht die Euro 7 Gesetzgebung, ermöglicht jedoch in Kombination mit der Rekuperation eine höhere Ausnutzung der verschleißfreien Verzögerung.
3. Ein spezifisches Kriterium im jeweiligen Segment wird gänzlich nicht erfüllt
 - a) Bsp. 1: Eine Trommelbremse im Sportwagensegment erfüllt nicht die thermischen Anforderungen
 - b) Bsp. 2: Eine Carbon-Keramik Bremse im Kleinwagensegment übersteigt den erwarteten Kostenrahmen

Die in der Auflistung gezeigten Punkte eins und zwei sind objektive Ausschlusskriterien, wie die Beispiele bestätigen. Der dritte Punkt ist nicht objektiv quantifizierbar, da die spezifischen Anforderungen eines Segmentes, beispielsweise zum Kostenrahmen nicht öffentlich zugänglich sind, sodass hierauf im Projekt nicht zugegriffen werden kann. Sofern hierzu zukünftig Informationen vorhanden sind, kann die Bewertung an die neuen Erkenntnisse angepasst werden. Beispielhaft ist hier die beschichtete Brems Scheibe zu nennen, die wie in Tab. 3-2 gezeigt im Rahmen dieses Projektes für das A- & B- Segment ausgeschlossen wird. Aktuelle Kosteninformationen lassen vermuten, dass diese Technologie den Kostenrahmen im Kleinwagensegment übersteigt. Sollte künftig belegbar sein, dass die Beschichtungsverfahren inklusive Vor- und Nachbearbeitung aufgrund des Skalierungseffektes höherer Stückzahlen günstiger werden, ist eine beschichtete Brems Scheibe auch im Kleinwagensegment denkbar.

3.2 Elemente der Nutzwertanalyse

3.2.1 Einführung und Quantifizierung der Bewertungsfunktionen

Bewertung der Technologievarianten

Die Bewertungsfunktionen skalieren die Ausprägungen jedes Bewertungskriteriums zwischen dem Minimalwert Null und dem Maximalwert Eins. Null bedeutet keine Erfüllung des Bewertungskriteriums und Eins eine ideale Erfüllung. Dabei hat jedes Bewertungskriterium eine eigenständige und angepasste Skalierung a_i , auf die im Folgenden eingegangen wird. Der Stand der Technik, charakterisiert durch eine hydraulisch betätigte Scheibenbremse aus Grauguss mit ECE-Bremsbelägen, dient als Referenz, wobei der erzielte Wert der Bewertungsfunktion für den Stand der Technik je nach Bewertungskriterium unterschiedlich ausfällt.

Am Beispiel der thermischen Bremsleistung soll das Vorgehen zur Erstellung der Bewertungsfunktionen verdeutlicht werden.

Skalierung a_i thermische Bremsleistung	Zahlenwert T_i (Linear)
Unzureichend	0
Deutlich schlechter	0,2
Geringfügig schlechter	0,4
Stand der Technik	0,6
Besser	0,8
Keine Abhängigkeit	1

Tab. 3-3: Bewertungsskalierung der thermischen Bremsleistung

Nachfolgend ist die lineare Bewertungsfunktion für die thermische Bremsleistung in Bild 3-2 dargestellt:

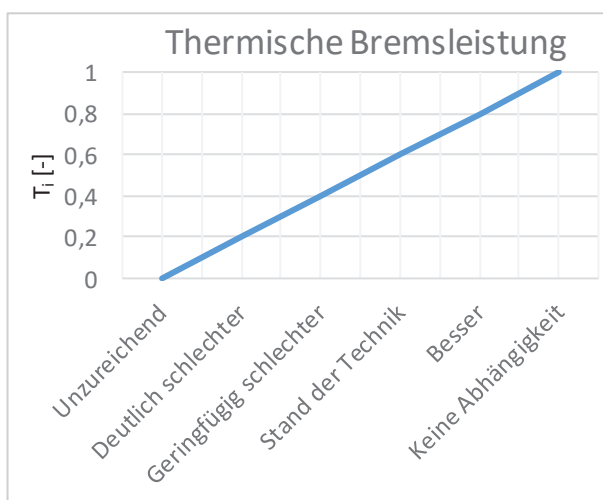


Bild 3-2: Bewertungsfunktion der Basisanforderung thermische Bremsleistung, wobei die y-Achse der Technologiebewertung entspricht

Die Carbon-Keramik Bremse ist, wie zuvor in Kapitel 3.1.2 beschrieben, aufgrund des stabilen Reibwertverhaltens nicht abhängig von der Temperatur und erhält für die thermische Bremsleistung den Zahlenwert $T_i = 1$. Eine Trommelbremse erhält die Bewertung „Deutlich schlechter“ als der Stand der Technik und hat dadurch den Zahlenwert $T_i = 0,2$.

Im Folgenden sind in Tab. 3-4 die Skalierung sowie der Zahlenwert für die zwei Bewertungsattribute Systemkosten und die qualitative Einschätzung Kosten dargestellt.

Systemkosten a_i [Euro]	Qualitative Einschätzung Kosten a_i	Zahlenwert T_i
>3.000	Sehr teuer	0
2.500-2.000	Deutlich teurer	0,1
2.000-1.000		0,2
1.000-750	Teurer	0,3
750-500		0,4
500-250	Minimal teurer	0,5
250-100	Stand der Technik	0,6
100-50		
50-25	Etwas günstiger	0,8
25-10		
0	Deutlich günstiger	1

Tab. 3-4: Skalierung der Bewertungsfunktionen beider Bewertungskriterien Systemkosten und qualitative Einschätzung Kosten auf einen gemeinsamen Zahlenwert

In Bild 3-3 sind die dazugehörigen Bewertungsfunktionen der Kosten dargestellt:

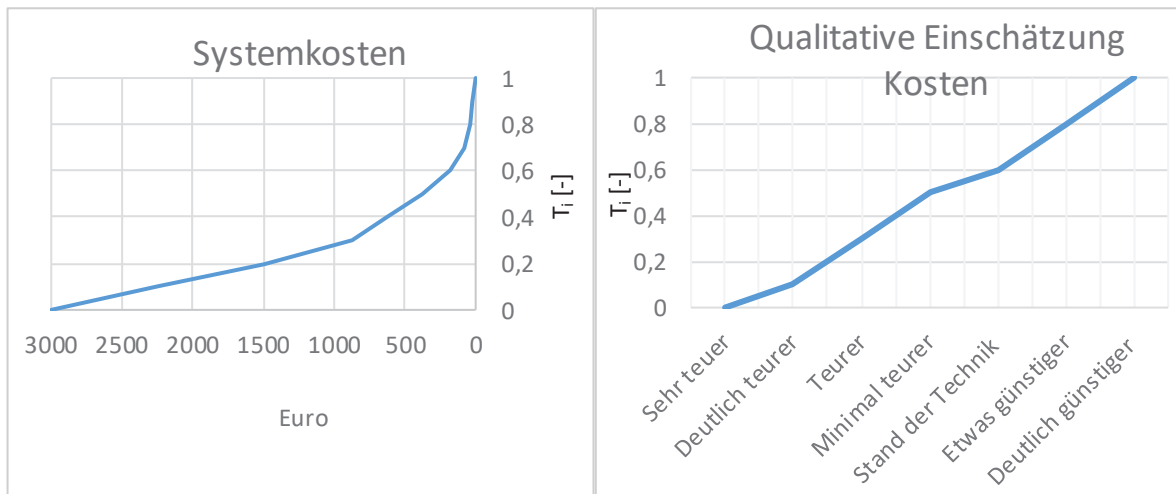


Bild 3-3: Bewertungsfunktionen der erweiterten Anforderungen Systemkosten und qualitative Einschätzung Kosten, wobei die y-Achse der Technologiebewertung entspricht

Es werden kurz die unterschiedlichen Kostenverläufe erläutert. Zunächst wird die Funktion Systemkosten, wie in Tab. 3-4 dargestellt, erstellt. Technologien ohne Mehrkosten werden mit einer Eins bewertet. Übersteigen die Mehrkosten eine Grenze von 3.000 € werden diese Technologien mit einer Null bewertet. 3.000 € ergibt sich durch die Carbon-Keramik Bremse als kostenintensivste Option, die sich wie folgt zusammensetzt: Im Stand der Technik (Kapitel 2.2.2) wird davon ausgegangen, dass eine Carbon-Keramik Bremsscheibe bis zu 600 € kostet, wobei vier verwendet werden. Zusätzlich werden Bremsbeläge, Bremsattel und die Aktuierung benötigt. Dazwischen ergeben sich Bewertungen abhängig von definierten Kostenbereichen. Beispielsweise wird dem Bereich 250 - 500 € eine Bewertung von $T_i = 0,5$ zugeordnet. Technologien ohne exakte Kostenangaben in der Literatur werden qualitativ geschätzt. Die dazugehörige Skalierung ist in Tab. 3-4 unter Qualitative Einschätzung Kosten dargestellt.

Der Referenzpunkt beider Kurven ist der Stand der Technik, der Hersteller-Kosten von ca. 100 - 250 Euro für alle vier Reibpaarungen inklusive der hydraulischen Komponenten aufweist. Die Kosten werden mit $T_i = 0,6$ bewertet. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die beiden in Bild 3-3 dargestellten Kostenfunktionen zu einer Funktion Systemkosten zusammengefasst, aufgrund dessen die in Tab. 3-4 gezeigten Zahlenwerte T_i identisch für beide Funktionen sein müssen.

Die Bewertungsfunktionen der anderen Basis- und erweiterten Anforderungen sind im Anhang in Bild 1 und in Bild 2 dargestellt.

Bewertung der Technologiepakete

Die Bewertung der Technologiepakete T_{neu} erfolgt durch Kombination der Bewertungen in den Bewertungskriterien der Einzeltechnologien aufgrund fehlender Informationen aus der Literatur. Hierzu werden Formeln II – VII definiert, um jedes Bewertungskriterium und jedes Technologiepaket abzudecken.

Formel II entspricht einer Minimum-Funktion

$$T_{neu} = \text{Min}(T_i) \quad \text{II}$$

aller Bewertungsergebnisse T_i , sodass die Bewertung durch die Technologie der Kombination bestimmt wird, welche das geringste Ergebnis erzielt. Diese wird beispielsweise für das Bewertungskriterium Emissionsschädlichkeit angewendet, da die am schlechtesten bewertete Technologie die dominierende Technologie ist.

Formel III entspricht einer Maximum-Funktion

$$T_{neu} = \text{Max}(T_i) \quad \text{III}$$

aller Bewertungsergebnisse und wird zum Beispiel bei dem Bewertungskriterium maximale Verzögerung angewendet. Wenn mehr als ein nicht miteinander kombinierbares Verzögerungssystem vorhanden ist, beispielsweise die Kombination aus Rekuperation und Scheibenbremse, dann ist aufgrund der zuvor genannten Gründe, die für dieses Bewertungskriterium höher bewertete Scheibenbremse die dominierende Technologie. Formel IV entspricht dem Durchschnitt unter Berücksichtigung der Bremskraftverteilung und bildet sich nach Folgendem Zusammenhang:

$$T_{neu} = \frac{\sum T_{i_VA}}{\text{Anzahl } T_{i_VA}} * FBrem_{s_{VA}} + \frac{\sum T_{i_HA}}{\text{Anzahl } T_{i_HA}} * FBrem_{s_{HA}} \quad \text{IV}$$

Dabei entspricht an der Vorderachse $FBrem_{s_{VA}} = 2/3$ der gesamten Bremskraft und an der Hinterachse $FBrem_{s_{HA}} = 1/3$ der gesamten Bremskraft. $\text{Anzahl } T_{i_VA}$ entspricht der Anzahl der eingesetzten Technologien auf der Vorderachse und $\text{Anzahl } T_{i_HA}$ auf der Hinterachse. T_{i_VA} entspricht der jeweiligen Technologiebewertung der Einzeltechnologie an der Vorderachse und T_{i_HA} an der Hinterachse. Ein Beispiel für die Anwendung dieser Formel ist die Bewertung der Kombination aus Scheibenbremse an der Vorderachse und Trommelbremse an der Hinterachse in Bezug auf die thermische Bremsleistung. Die Werte ergeben sich wie folgt:

- T_{i_VA} = Bewertung *thermische Bremsleistung (Scheibenbremse)*
- $\text{Anzahl } T_{i_VA} = \text{Anzahl } T_{i_HA} = 1$
- T_{i_HA} = Bewertung *thermische Bremsleistung (Trommelbremse)*

Für das thermische Verhalten des Gesamtsystems Brems macht es einen Unterschied, ob die Scheibenbremse oder die Trommelbremse an der Vorderachse ist.

Die Formel V entspricht einer Addition unter Berücksichtigung der Bremskraftverteilung und lautet:

$$T_{neu} = T_1 + \left(\frac{\sum T_{i_VA}}{\text{Anzahl } T_{i_VA}} * FBrem_{s_{VA}} + \frac{\sum T_{i_HA}}{\text{Anzahl } T_{i_HA}} * FBrem_{s_{HA}} \right) * (1 - T_1) \quad \text{V}$$

Dabei entspricht T_1 der entlastenden Technologie, beispielsweise der Rekuperation. Die Formel kommt bei der thermischen Bremsleistung zum Einsatz, wenn mindestens zwei Verzögerungssysteme, die sich gegenseitig beeinflussen, vorhanden sind. Dies ist der Fall bei der Kombination von Rekuperation mit einer mechanischen Bremse, da die Rekuperation die mechanische Bremse thermisch entlastet. Die Bewertung der thermischen Bremsleistung für das genannte Technologiepaket ist demnach höher als bei alleiniger Verwendung der mechanischen Bremse.

Die Formel VI entspricht einer Multiplikation der Emissionsminderung und ist wie folgt definiert:

$$T_{neu} = 1 - [(1 - Red_1) * (1 - Red_2) * (1 - Red_i)] \quad \text{VI}$$

Red_i entspricht der prozentualen Emissionsreduzierung einer Technologie. Diese Formel wird angewendet, wenn die Kombination aus Technologien eine höhere Emissionsreduzierung ermöglicht. Hierfür gibt es zwei Fälle:

- Es sind zwei Technologien auf einer Achse verbaut, z.B. die Kombination aus optimierter konventioneller Scheibenbremse mit alternativen Reibbelägen.
- Eine Kombination aus zwei separaten Bremssystemen, wobei die Emissionsreduzierung durch den zeitlichen Anteil gegeben ist. Dies trifft zu, wenn die Rekuperation mit einer Hartmetallbeschichteten Brems Scheibe kombiniert wird.

Im zweiten Fall übernimmt die Rekuperation einen prozentualen Anteil der Verzögerungsenergie, sodass die mechanische Bremse seltener zum Einsatz kommt. In diesem Fall reduziert die Hartmetallbeschichtung die Partikel um ihr Emissionsminderungspotential entsprechend dem verringerten Einsatzprofil.

Um eine Kostenbewertung der Technologiepakete zu ermöglichen, wird die Formel VII herangezogen:

$$T_{neu}(k_{neu} = \sum k_i) \quad \text{VII}$$

Mehrere Technologien auf einer Achse werden auf Basis dieser Formel in den Kosten zusammengefasst. Dadurch entsteht eine neue Technologiebewertung T_{neu} , wobei sich die Gesamtkosten in Euro k_{neu} aus der Summe der Kosten der Einzeltechnologien k_i ergibt. Die Definition aller weiteren Bewertungskriterien inklusive der Fallunterscheidungen und der dazugehörigen Erläuterungen für die Verwendung einer Formel sind im Anhang in Tab. 2 beschrieben.

3.2.2 Einführung und Ermittlung der Gewichtungsfaktoren nach Segmenten

Da die in Kapitel 3.1.4 eingeführten Fahrzeugsegmentgruppen unterschiedliche Anforderungen an die dort eingesetzten Bremssysteme aufweisen, ist es erforderlich, die in der Studie verwendeten Bewertungskriterien gemäß Kapitel 3.1.2 unterschiedlich stark zu gewichten und somit eine für das jeweilige Fahrzeugsegment konsistente Bewertung zu erhalten.

Die Gewichtungsfaktoren werden ermittelt, indem für jede der gezeigten Fahrzeugsegmentgruppen eine Matrix der Bewertungskriterien erstellt wird. In der Matrix wird ein paarweiser Vergleich jedes einzelnen Kriteriums mit allen anderen vorgenommen und notiert, ob dieses unwichtig (-1), weniger wichtig (-0,5), gleich wichtig (0), wichtiger (0,5), viel wichtiger (1) ist. Tab. 3-5 zeigt exemplarisch die Gewichtungsmatrix für die A- und B- Fahrzeugsegmentgruppe.

Die Bewertungskriterien sind für den Vergleich in den Zeilen und den Spalten der Matrix gelistet. Farblich unterschieden sind Basis- und „erweiterte“ Bewertungskriterien. Die in der Tabelle exemplarisch orangefarben markierte „-1“ bedeutet, dass in diesem Fall für das A- und B- Fahrzeugsegment die thermische Bremsleistung unwichtig im Vergleich zu den Systemkosten ist. Nach diesem Vorgehen werden alle Vergleiche ausgeführt. Im Anschluss wird in jeder Zeile die Summe der erreichten Punkte ermittelt (in der Tab. 3-5 hellblau) und schließlich anhand der insgesamt erteilten Punkteanzahl auf 100 % normiert (in der Tabelle dunkelblau dargestellt).

Gewichtung der Anforderungen für das A- & B-Segment (Kleinstwagen & Kleinwagen)	Basisanforderungen						Erweiterte Anforderungen									Normiert Relativ
	Th. Bremsleistung	Max. Verzögerung	Bremspedalchar.	NVH	Emissionsschädlichkeit	Korrosionsabrieb	Aufwand	Systemkosten	TRL	Emissionsminderung	Reparaturaufwand	PTI	Lebensdauer	Kompatibilität	Empfindlichkeit	
Th. Bremsleistung	0	0	0,5	0	-1	0,5	-1	-1	-1	-0,5	0	0	-0,5	-1	0	4,58
Max. Verzögerung	0	0	0,5	0,5	-1	1	-1	-1	-1	-0,5	0	0,5	0	-1	0	5,42
Bremspedalchar.	-0,5	-0,5	0	0	-1	0	-1	-1	-1	-0,5	-0,5	0	-0,5	-1	0	3,54
NVH	0	-0,5	0	0	-1	0,5	-1	-1	-1	0	-0,5	0	-0,5	-1	0	4,17
Emissionsschädlichkeit	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12,50
Korrosionsabrieb	-0,5	-1	0	-0,5	-1	0	-1	-1	-1	-0,5	0	0	0	-1	0	3,54
Aufwand	1	1	1	1	-1	1	0	-0,5	-0,5	1	1	1	1	0	0	9,58
Systemkosten	1	1	1	1	-1	1	0,5	0	0	1	1	1	1	0	0	10,21
TRL	1	1	1	1	-1	1	0,5	0	0	1	0,5	0,5	0,5	0	0	9,58
Emissionsminderung	0,5	0,5	0,5	0	-1	0,5	-1	-1	-1	0	0,5	0,5	0	-1	0	5,83
Reparaturaufwand	0	0	0,5	0,5	-1	0	-1	-1	-0,5	-0,5	0	0	0	-1	0	5,00
PTI	0	-0,5	0	0	-1	0	-1	-1	-0,5	-0,5	0	0	0	-1	0	4,38
Lebensdauer	0,5	0	0,5	0,5	-1	0	-1	-1	-0,5	0	0	0	0	-1	0	5,42
Kompatibilität	1	1	1	1	-1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	10,00
Empfindlichkeit	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,25
																100

Tab. 3-5: Gewichtungsmatrix der Bewertungskriterien für das A- und B- Segment (Legende: unwichtig = -1; weniger wichtig = -0,5; gleich wichtig = 0; wichtiger = 0,5; viel wichtiger = 1)

Für die thermische Bremsleistung ergibt sich z.B. ein Gewichtungsfaktor von 4,58 % für das A- und B- Segment. Die Gewichtungsmatrix der anderen Fahrzeugsegmente ist im Anhang in Tab. 3 bis Tab. 6 zu finden. Mithilfe dieser Methode lassen sich die Bewertungsprofile der einzelnen Fahrzeugsegmente erstellen.

Bei der Ermittlung der Gewichtungsfaktoren werden zwei Zusatzbedingungen eingeführt:

- Die Emissionsschädlichkeit erhält unabhängig vom Fahrzeugsegment die höchste Wichtigkeit, da es eine Projektanforderung ist, die Technologien hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens zu bewerten.
- Die Empfindlichkeit der Wirksamkeit der Emissionsminderung durch äußere Einflüsse oder im Realbetrieb wird unabhängig von der Fahrzeugsegmentgruppe neutral bewertet, da hier ausschließlich der technische Zustand berücksichtigt werden soll, der für die Typzulassung relevant ist. Eine potenzielle Alterung oder technische Fehler fließen hier nicht ein.

Das folgende Diagramm zeigt eine Gegenüberstellung der Gewichtungsfaktoren der jeweiligen Bewertungskriterien für die zuvor definierten Fahrzeugsegmentgruppen.

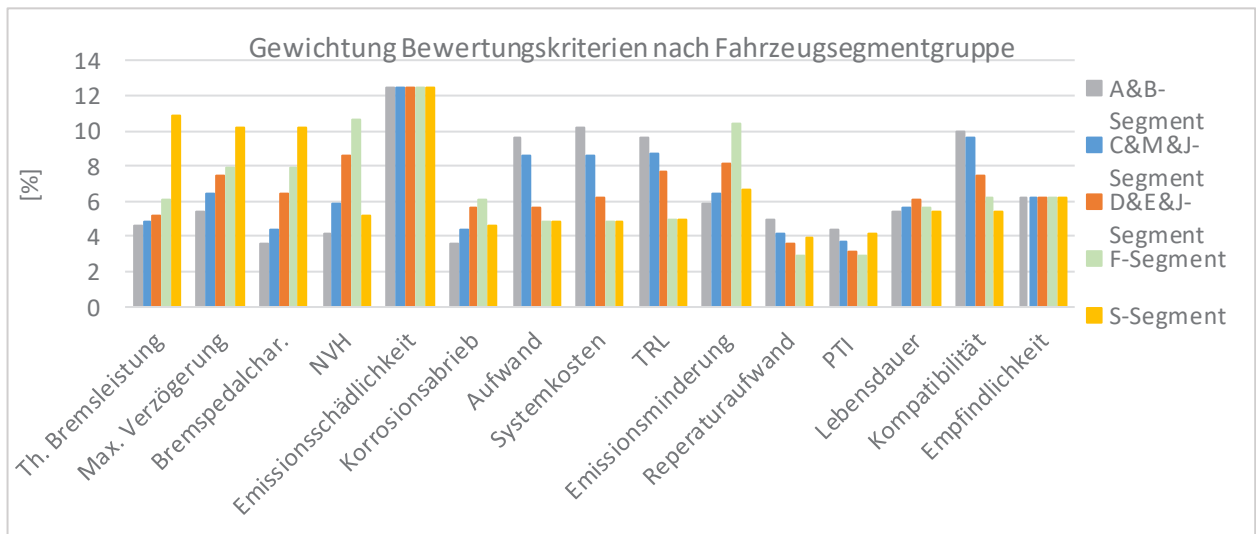


Bild 3-4: Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien nach Fahrzeugsegmentgruppe

In Bild 3-4 sind je Fahrzeugsegmentgruppe die Unterschiede der Gewichtungsfaktoren in den jeweiligen Bewertungskriterien gut zu erkennen.

Zum Beispiel werden die Systemkosten im A- und B- Segment mit ca. 10 % doppelt so stark gewichtet wie im F- und S- Segment, bei denen der Faktor ca. 5 % beträgt. Der Gewichtungsfaktor für die thermische Bremsleistung nimmt mit steigendem Fahrzeuggewicht in den Segmenten zu. Der sprunghafte Anstieg für das S-Segment ergibt sich aus den sehr hohen Leistungsanforderungen von Sportfahrzeugen.

Die absolute, geforderte Emissionsminderung ist abhängig vom Fahrzeuggewicht, da, wie zuvor in Kapitel 2.2.2 beschrieben, das JRC von einem Partikelmasseausstoß von 3 mg/km/Bremse pro Tonne Fahrzeuggewicht für eine gemessene Vorderradbremse ausgeht (Grigoratos & Giechaskiel, 2023). Ein leichteres Fahrzeug erfordert aufgrund der geringeren Partikelemission eine geringere Emissionsminderung, um die Euro 7 Gesetzgebung zu erfüllen.

3.2.3 Erläuterung des Tabellendokuments zum Bericht

In diesem Bericht beigefügten Tabellendokument sind folgende Tabellenblätter enthalten, die der in Kapitel 3 und 3.2 beschriebenen Systematik und dem in Bild 3-1 dargestellten Ablauf folgen:

- Rechercheergebnis
- Bewertungsfunktionen
- Technologiebewertung
- Gewichtung Fahrzeugsegmente
- Plausibilisierung
- Bewertungsergebnis

Die Inhalte der Literaturrecherche sind im ersten Tabellenblatt Rechercheergebnis in einer Matrix zusammengefasst. Die dazugehörige Struktur der Rechercheergebnismatrix ist in folgender Tabelle dargestellt.

Firma/Ver-antwortlicher	Quelle	Bild/Skizze	Kommentar	Datum	Kategorie			Emissionen			Basis-anforderungen		Erweiterte Anforderungen	
					Komponente	Subsystem	Gesamtsystem	Testbedingungen	Messgröße	Eingesetzte Messtechnik	Basisanforderung 1	Basisanforderung 2	Erweiterte Anforderung 1	Erweiterte Anforderung 2
Technologie 1														
Quelle 1					X						Inhalt Quelle 1			
Quelle 2					X						Inhalt Quelle 2	Inhalt Quelle 2		
Technologie 2														
⋮							X							

Tab. 3-6: Struktur der Rechercheergebnismatrix

Die gefundenen Quellen werden den einzelnen Technologien und die Inhalte der Quellen den entsprechenden Bewertungskriterien zugeordnet, so dass in den Spalten Informationen aus der betreffenden Quelle bezüglich der einzelnen Anforderung zu finden sind. Die aufgespannte Matrix ermöglicht einen schnellen Überblick, welche Quelle Informationen bezüglich eines bestimmten Bewertungskriteriums einer Technologievariante bereitstellt. Mit den Informationen aus der Recherche und der Strukturierung der Informationen mittels der in Tab. 3-6 gezeigten Rechercheergebnismatrix ist es möglich, für die in Kapitel 3.1.2 definierten Bewertungskriterien die in Kapitel 3.2.1 gezeigten Bewertungsfunktionen zu erstellen. Diese Funktionen sind im Tabellenblatt Bewertungsfunktionen dokumentiert. Die Struktur des Tabellenblatts Technologiebewertung ist in Tab. 3-7 zu sehen. In den Zeilen sind untereinander die Technologievarianten gelistet, wobei für jede Technologie die quantifizierte technische Eigenschaft (x-Wert), die absolute Bewertung (y-Wert) und eine Begründung in Folgezeilen aufgeführt sind.

		Basisanforderungen		Erweiterte Anforderungen	
		Thermische Bremsleistung	...	Systemkosten	...
Technologie 1	Bewertung	x-Wert der Bewertungsfunktion thermische Bremsleistung			
	Zahlenwert	y-Wert der Bewertungsfunktion thermische Bremsleistung			
	Begründung	Begründung auf Basis von Literaturangaben und Eigenexpertise			
	Literaturquelle 1 zu Technologie 1	Inhalt der Quelle			
	Literaturquelle 2 zu Technologie 1			Inhalt der Quelle	
Technologie 2					
⋮					

Tab. 3-7: Struktur der Technologiebewertungsmatrix

In den Spalten werden alle Bewertungskriterien der Basisanforderungen und der erweiterten Anforderungen aufgelistet. In den Zeilen finden sich alle Technologien wieder. Anhand des Bewertungskriteriums Aufwand zur technischen Machbarkeit soll am Beispiel der beschichteten Bremsscheibe das Bewertungsvorgehen verdeutlicht werden.

		Aufwand zur technischen Machbarkeit
Hartmetallbeschichtung Bremsscheibe (HMC)	Bewertung	$a_i = \text{Mäßig}$
	Zahlenwert	$T_i = 0,6$
	Begründung	<ul style="list-style-type: none"> - Aufwendige Beschichtungsverfahren (LMD, HVOF, Kaltgasspritzen) - Derzeit Nachbearbeitung der beschichteten Bremsscheibe in Form von Schleifen und Polieren notwendig (Ankündigungen vorhanden, in denen keine Nachbearbeitung notwendig ist) - Ggf. muss das Fahrwerk aufgrund des höheren Temperaturniveau der beschichteten Bremsscheibe gegenüber einer Grauguss Bremsscheibe an die höhere thermische Stabilität angepasst werden

Tab. 3-8: Beispielhafter Ausschnitt der Technologiebewertungsmatrix für den Aufwand zur technischen Machbarkeit einer Hartmetallbeschichteten Bremsscheibe

Die Zeile Begründung entspricht der stichpunktartigen Zusammenfassung der Literaturangaben zu der jeweiligen Technologie und dem jeweiligen Bewertungskriterium. Die Begründungen sind durch die Quellenangaben sowie bei fehlenden Informationen durch die Expertise des Auftragnehmers gestützt. Durch weitere Studien, Quellenangaben oder Expertise lassen sich die Bewertungen zukünftig präzisieren. Die Begründungen dienen als Referenz für die ausgewählte Bewertung der Technologie, die mittels Drop-Down Menü abhängig von der Bewertungsfunktion ausgewählt wird, sodass im Anschluss automatisch der Zahlenwert der Bewertungsfunktion ausgegeben wird. Dieser Zahlenwert wird für die weitere Berechnungen verwendet. So ergibt sich für jede Technologie und jedes Bewertungskriterium ein Zahlenwert und damit eine ungewichtete Gesamtbewertung. Im nächsten Schritt erfolgt die Gewichtung nach den Fahrzeugsegmenten, wobei die Gewichtungsmatrix jeder in Kapitel 3.1.4 vorgestellten Fahrzeugsegmentgruppe in einem eigenen Tabellenblatt steht und der Tab. 3-5 gleicht. Im Tabellenblatt Plausibilisierung ist die in Tab. 3-2 gezeigte Plausibilisierungsmatrix definiert. Im letzten Tabellenblatt Bewertungsergebnis werden alle Technologievarianten und Technologiepakete inklusive der Bewertungsergebnisse in folgender Struktur aufgelistet:

Technologie	Fahrzeugsegment	Triebstrang	Basisanforderung		Erweiterte Anforderung		Gesamtbewertung
			Bewertung Basisanforderung 1	...	Bewertung erweiterte Anforderung 1	...	
Technologie 1	Segment 1	Triebstrang 1	$T_1(a_1) * G_{S1} * P_{T1,S1,T1}$		$T_7(a_7) * G_{S1} * P_{T1,S1,T1}$		T_{ges1}
		Triebstrang 2					
		Triebstrang 3					
	Segment 2	Triebstrang 1					
	⋮	⋮					
Technologie 2	Segment 1	Triebstrang 1					

Tab. 3-9: Struktur der Bewertungsergebnismatrix

Der erzielte Gesamtwert T_{ges1} berechnet sich aus dem in Kapitel 3.1.1 gezeigten Formelzusammenhang und ist die Addition der gewichteten Bewertung der einzelnen Bewertungskriterien. Mithilfe dieser Matrix, die alle Bewertungsergebnisse jeder Technologievariante für alle Fahrzeugsegmente und Triebstränge beinhaltet, werden die im nachfolgenden Kapitel vorgestellten Ergebnisse erzeugt. Dies ist, wie in Tab. 3-9 zu sehen, durch die drei erstellten Filter Technologie, Fahrzeugsegment und Triebstrang gegeben, mit denen die Diagramme dynamisch angepasst werden können. So ist es möglich, weitere individuelle Ergebnisdiagramme auszugeben. Im Rahmen dieser Studie werden zwei Schnitte durch die Ergebnismatrix demonstriert:

- Fahrzeugsegment und Triebstrang werden fixiert, sodass für ein ausgewähltes Fahrzeugsegment und einen Triebstrang alle Technologiebewertungen aufgezeigt und verglichen werden können.
- Technologie und Triebstrang wird fixiert, sodass für eine ausgewählte Technologievariante gezeigt werden kann, in welchen Fahrzeugsegmenten diese am besten abschneidet oder welche Tendenzen für diese abgeleitet werden können

3.3 Anwendung der Nutzwertanalyse und Ergebnisse

3.3.1 Übersicht der ermittelten Nutzwerte

Die zuvor aufgezeigte Methodik ermöglicht die Bewertung der Technologien auf Basis der Informationen aus dem Stand der Technik in Kapitel 2.2. Die Ergebnisse werden in Bild 3-5 und Bild 3-6 am Beispiel der C-, M- und J- Segmentgruppe vorgestellt. Die Ergebnisse der anderen Fahrzeugsegmentgruppen sind im Anhang enthalten.

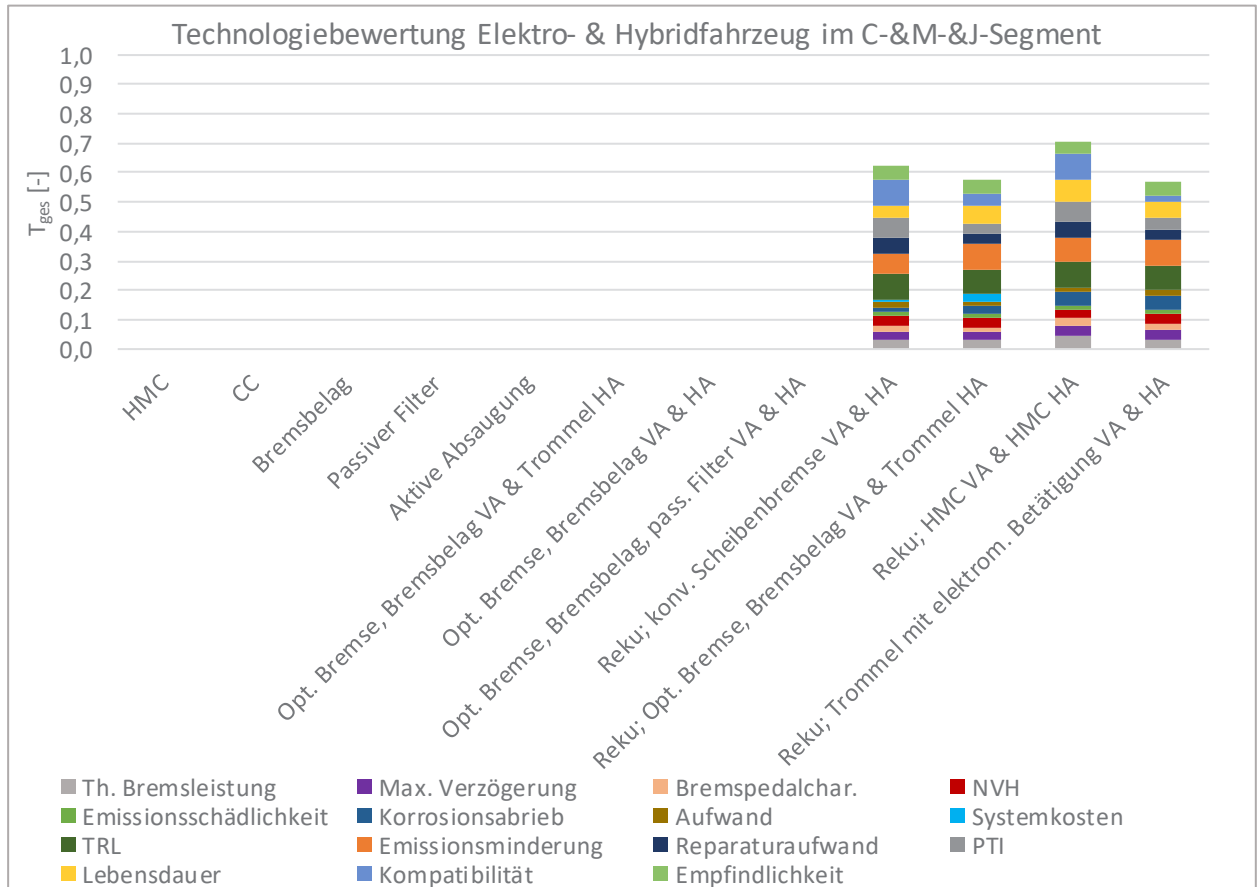


Bild 3-5: Gewichtete Technologiebewertung eines Elektro- und Hybridfahrzeugs im C- & M- & J-Segment

Auf der x-Achse sind alle in der Bewertung berücksichtigten Einzeltechnologien und Technologiepakete dargestellt. Die Legende umfasst alle definierten Bewertungskriterien. Der Abbildung kann sowohl die gewichtete Gesamtbewertung T_{ges} der einzelnen Technologien und Technologiepakete durch die Höhe der Balken entnommen werden. Zusätzlich zeigt sich, wie sich der Gesamtwert mithilfe der Formel I zusammensetzt.

Durch die begründete Plausibilisierung werden Technologievarianten für einzelne Fahrzeugsegmente und Triebstränge ausgeschlossen. Dadurch, dass alle Elektro- und Hybridfahrzeuge rekuperieren können, werden alle Technologievarianten, die keine Rekuperation enthalten, in der Bewertung nicht berücksichtigt.

Die Kombination aus Rekuperation auf einer Achse und Scheibenbremsen aus Grauguss auf der Vorder- und Hinterachse beschreiben das Referenz-Bremssystem aktueller Elektrofahrzeuge. Die oben dargestellte Bewertung geht davon aus, dass die Grenzwerte der Euro

7 Gesetzgebung nur mit Modifikationen dieses Referenzsystems erreichbar sind. Hält das Elektrofahrzeug ohne Modifikationen die Euro 7 Gesetzgebung ein, ist eine Alternative zum Referenzsystem nicht erforderlich.

Die in Bild 3-5 dargestellten alternativen Ausführungen der mechanischen Bremse in Kombination mit der Rekuperation, beispielsweise das optimierte Bremssatteldesign in Kombination mit alternativen Bremsbelägen an der Vorderachse und eine Trommelbremse an der Hinterachse oder die hartmetallbeschichtete Bremsscheibe an der Vorder- und Hinterachse werden ähnlich wie die modifizierte Rekuperation mit standardmäßigen Brems-scheiben bewertet, da die hohen Kosten und der Aufwand aufgrund der modifizierten Re-kuperation bei der Bewertung eine hohe Gewichtung haben.

Die Rekuperation in Kombination mit hartmetallbeschichteten Bremsscheiben zeigt sich in diesem Segment bei Elektro- und Hybridfahrzeugen als favorisierte Technologie. Die hartmetallbeschichtete Bremsscheibe (HMC) schneidet zwar schlecht bei den Systemkosten und dem Mehraufwand der Produktion ab. Dennoch sorgen die vielen Vorteile wie die im Vergleich zur konventionellen Grauguss Bremsscheibe verbesserte Korrosionsresistenz und die thermische Bremsleistung, sowie die gute Kompatibilität zu bestehenden Systemen wie ABS und ESP, die einfache Integrierbarkeit in das Bremssystem und die hohe Emissionsminderung für eine hohe Gesamtbewertung T_{ges} . Die genannte höhere Korrosionsresistenz der hartmetallbeschichteten Bremsscheibe ist ein wichtiger Aspekt für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, da die mechanischen Bremsen aufgrund der Rekuperation seltener genutzt werden und stärker dazu neigen zu korrodieren.

Die Kombination aus Rekuperation mit dem optimierten Bremssatteldesign und alternativen Bremsbelägen an der Vorderachse und eine Trommelbremse an der Hinterachse ist eine mögliche Alternative, die trotz höheren Emissionsminderungspotentials schlechter bewertet ist als das Bremssystem bestehend aus Rekuperation in Kombination mit Scheibenbremsen an der Vorder- und Hinterachse. Das liegt unter anderem am höheren Reparaturaufwand, an der aufwendigeren Prüfbarkeit im Rahmen einer technischen Untersuchung und der schlechteren Kompatibilität zu bestehenden Fahrzeugsystemen.

Ein weiteres Bewertungsergebnis in Bild 3-5 ist die Integration einer elektromechanischen Bremsbetätigung in Kombination mit der Rekuperation, sodass Trommelbremsen an der Vorder- und Hinterachse verwendet werden können. Die Realisierung einer Trommelbremse an der Vorderachse ergibt sich durch die geringere thermische Anforderung aufgrund des selteneren Einsatzes der mechanischen Bremse, da die Rekuperation durch die elektromechanische Bremsbetätigung besser ausgenutzt werden kann, wie im Stand der Technik unter Kapitel 2.2.2 beschrieben. Wie das Ergebnis in Bild 3-5 zeigt, bietet sich im Vergleich zu den anderen, dargestellten Technologievarianten das höchste Emissionsminderungspotential. Aufgrund der hohen Systemkosten, des hohen technischen Aufwands und der geringen Kompatibilität zu bestehenden Fahrzeugsystemen ist dieses Technologiepaket jedoch schlechter bewertet als die anderen dargestellten Technologievarianten. Als zweites exemplarisches Ergebnis der Bewertung des C-, M- und J-Fahrzeugsegments wird auf die Kategorie der verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeuge eingegangen. In Bild 3-6 ist die entsprechend gewichtete Technologiebewertung dargestellt:

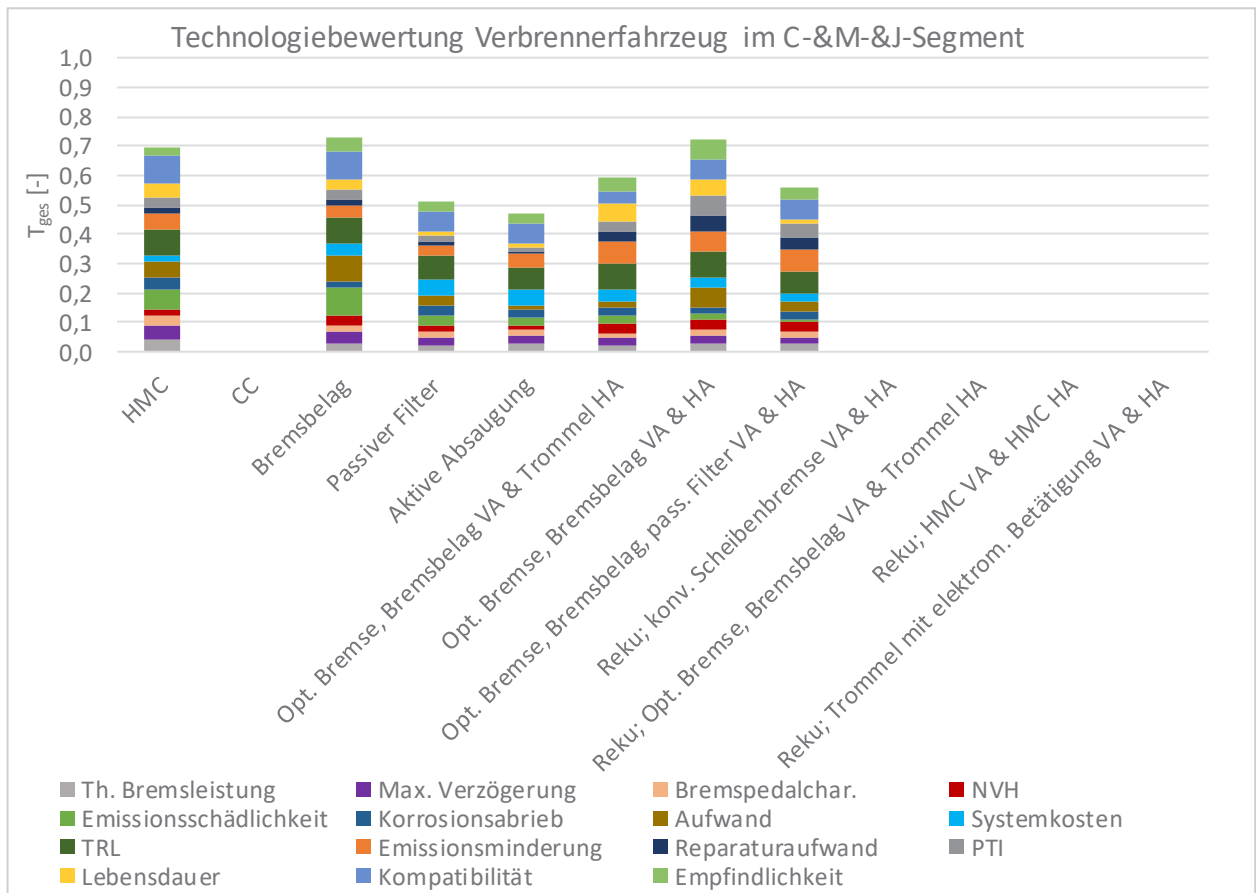


Bild 3-6: Gewichtete Technologiebewertung eines verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugs im C- & M- & J-Segment

Die Carbon-Keramik (CC) Bremse wird durch die in Kapitel 3.1.5 vorgestellte Plausibilisierung in dieser Segmentgruppe aufgrund der hohen Kosten nicht berücksichtigt. Zusätzlich werden die Technologiepakete in Kombination mit der Rekuperation in der Bewertung für verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge nicht berücksichtigt, da eine Rekuperation bei diesen Fahrzeugen nicht möglich ist.

Für den Triebstrang Verbrennungsmotor im C-, M- und J-Segment erweisen sich die Technologien hartmetallbeschichtete Brems Scheibe, alternative Bremsbeläge und das Technologiepaket bestehend aus einem optimierten Brems sattel design in Kombination mit alternativen Bremsbelägen an der Vorder- und Hinterachse als die drei am besten bewerteten Varianten.

Alternative Bremsbeläge zeigen einen großen Vorteil im Bezug auf das Kriterium Schädlichkeit der Emissionen, da die metallischen Anteile in den Belägen durch organische Anteile ersetzt werden. Dabei wird der Kupferanteil sowie die metallischen Anteile und damit die Belastung für Umwelt und Menschen reduziert. Zusätzliche Anforderungen wie der geringe Aufwand zur technischen Machbarkeit und die einfache Integration der Beläge sorgen ebenfalls für eine gute Bewertung. Die Emissionsminderung durch alternative Bremsbeläge hängt stark von der verwendeten Belagszusammensetzung ab, wie in Kapitel 2.2.2 anhand der verschiedenen Partikelreduzierungsangaben gezeigt. Je nach Zusammensetzung kann trotz der geringen Emissionsminderung die Kombination der alternativen Bremsbeläge mit einem optimierten Brems sattel design dafür sorgen, dass die in der Euro 7 Gesetzgebung geforderte Emissionsminderung erreicht wird.

Die Begründung für die hohe Bewertung der hartmetallbeschichteten Bremsscheibe bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen ist identisch mit derjenigen für die Elektro- und Hybridfahrzeuge.

Filtersysteme, sowohl passiv als auch aktiv, sind in diesem Segment für verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge eine Option, da sie nach aktuellem Stand die Emissionsminderung zur Erfüllung der Euro 7 Gesetzgebung ermöglichen. Die geringere Lebensdauer durch regelmäßige Filterwechsel, die reduzierte thermische Bremsleistung durch die teilweise Ummantelung der Bremsscheibe sowie der Mehraufwand bei der periodisch technischen Inspektion führen dazu, dass Filtersysteme in dieser Bewertung schlechter abschneiden als die Änderung der Reibpaarung wie beispielsweise die beschichtete Bremsscheibe, wie in Bild 3-6 zu sehen.

Ein optimiertes Bremssatteldesign in Kombination mit alternativen Bremsbelägen an der Vorderachse und eine Trommelbremse an der Hinterachse sind nach technischen Gesichtspunkten eine mögliche Variante für die C-, M- und J- Segmentgruppe. Die Erweiterung des Technologiepakets eines optimierten Bremssatteldesigns in Kombination mit alternativen Bremsbelägen und passiven Filtereinheiten an der Vorder- und Hinterachse ermöglicht zwar eine stärkere Bremspartikelemissionsminderung, wie in Bild 3-5 dargestellt. Jedoch verschlechtert sich die Gesamtbewertung des Technologiepakets im Vergleich zum Technologiepaket ohne die passiven Filter aufgrund der höheren Kosten und des höheren Aufwands zur technischen Machbarkeit, sowie der geringeren Lebensdauer aufgrund der notwendigen Filterwechsel. Außerdem ergibt sich eine hohe Empfindlichkeit der Emissionsminderung bei einem beladenen Filter bei nicht-Einhalten der Serviceintervalle.

Die Ergebnisse in diesem Kapitel wurden beispielhaft für die C-, M- und J- Fahrzeugsegmentgruppe für Elektro- und Hybridfahrzeuge und verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge betrachtet und diskutiert. Weitere Ergebnisse der anderen, in Kapitel 3.1.4 definierten Fahrzeugsegmentgruppen, sind dem Anhang in Bild 3 bis Bild 6 beigelegt. Alternativ zum Vergleich der Bewertung verschiedener Technologien für ein Fahrzeugsegment ist die Auswertung einer Technologie für verschiedene Segmente möglich, wie dies im nachfolgenden Bild 3-7 dargestellt ist:

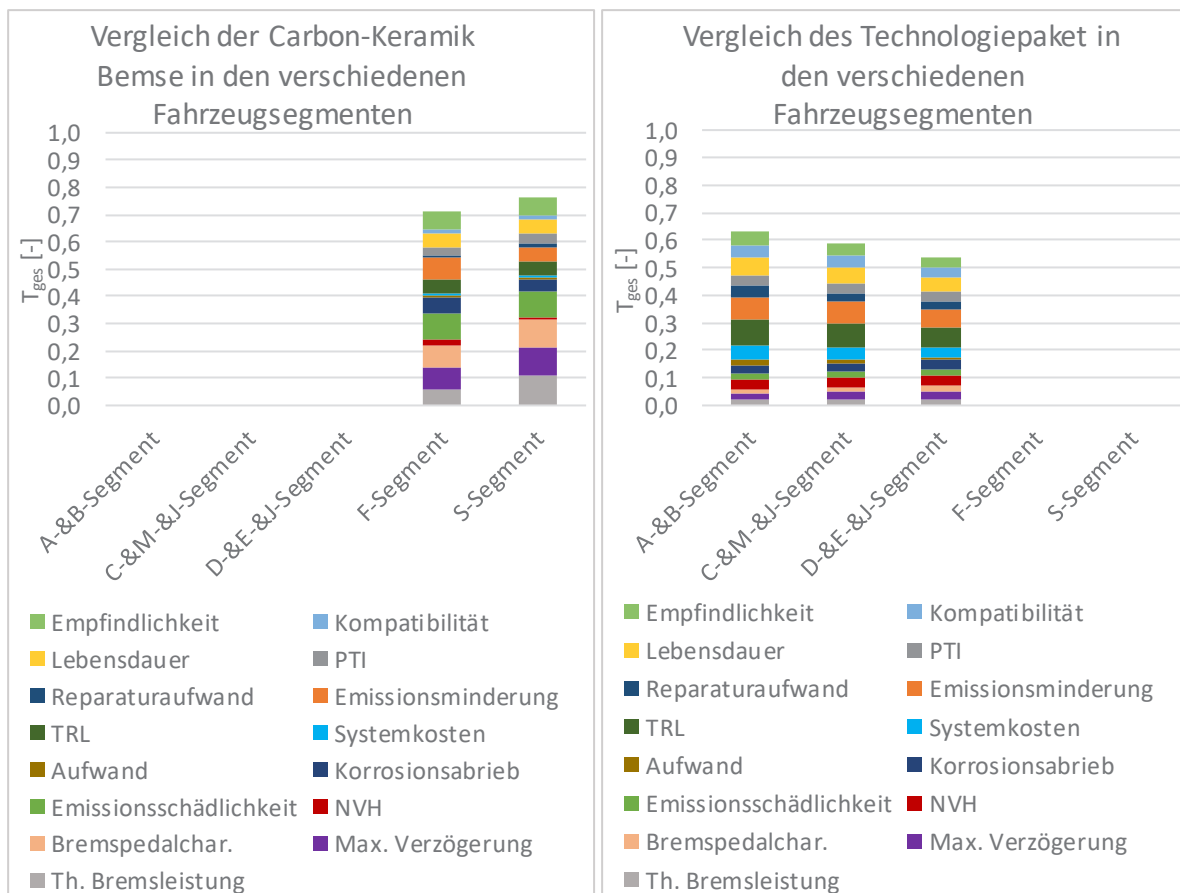


Bild 3-7: Gewichtete Bewertung einer Carbon-Keramik Bremse (links) und Gewichtete Bewertung des Technologiepaket bestehend aus optimiertem Bremssatteldesign, alternativen Bremsbelägen an der Vorderachse und einer Trommelbremse an der Hinterachse (rechts) jeweils für ein verbrennungsmotorisch angetriebenes Fahrzeug

Als Beispiel wird die Carbon-Keramik Bremse links im Bild 3-7 aufgezeigt, die aufgrund der hohen Kosten in den höherpreisigen Fahrzeugsegmenten zu erwarten ist und im Sportwagensegment aufgrund der thermischen Leistungsfähigkeit, der maximalen Verzögerung und der Bremspedalcharakteristik besser bewertet ist. Ein weiteres Beispiel ist das Technologiepaket bestehend aus einem optimierten Bremssatteldesign in Kombination mit alternativen Bremsbelägen an der Vorderachse und einer Trommelbremse an der Hinterachse rechts in Bild 3-7 dargestellt. Dieses Technologiepaket eignet sich tendenziell nur in den kleineren Fahrzeugsegmenten aufgrund der Trommelbremse an der Hinterachse.

3.3.2 Interpretation der Ergebnisse

In Kapitel 3.3.1 wurde beispielhaft auf die Ergebnisse der C-, M- und J- Fahrzeugsegmentgruppe eingegangen.

Es wird nachfolgend kurz auf die Ergebnisse der anderen Fahrzeugsegmentgruppen eingegangen. Die dazugehörigen Bewertungsergebnisse sind im Anhang zu finden.

Bei den Elektro- und Hybridfahrzeugen aller Fahrzeugsegmente ist die Rekuperation die favorisierte Technologie. Sollte die Rekuperation zur Erfüllung der Euro 7 Gesetzgebung nicht ausreichen, ist es zielführend die Rekuperation in Form eines Technologiepakets mit anderen erwartbaren Technologien zu kombinieren. Im A- und B- Segment ist die bevorzugte Kombination der Rekuperation mit einer optimierten konventionellen

Scheibenbremse und alternativen Bremsbelägen an der Vorderachse und eine Trommelbremse an der Hinterachse. Bei den verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen im A- und B- Segment erweist sich das Technologiepaket aus optimierter konventioneller Scheibenbremse und alternativen Bremsbelägen auf der Vorder- und Hinterachse als favorisierte Technologievariante. Gegebenenfalls sind für die notwendige Emissionsminderung zur Erfüllung der Euro 7 Gesetzgebung alternative Bremsbeläge auf der Vorder- und Hinterachse ausreichend. Die hartmetallbeschichtete Bremscheibe wird in diesem Segment durch die begründete Plausibilisierung, die in Kapitel 3.1.5 erläutert wird, ausgeschlossen. Sowohl bei den Elektro- und Hybridfahrzeugen als auch bei den Verbrennerfahrzeugen in der D-, E- und J- Segmentgruppe ist die hartmetallbeschichtete Bremscheibe die bestbewertete Technologievariante, wobei bei den elektrifizierten Fahrzeugen die Technologievariante mit der Rekuperation kombiniert ist. Die positiven Eigenschaften der beschichteten Bremscheibe wie die maximale Verzögerung, die hohe Emissionsminderung und die hohe Lebensdauer sind wichtig für die vergleichsweise schweren Fahrzeuge, sowie für Fahrzeuge, bei denen die Bremspedalcharakteristik für ein gut bewertetes Bremsgefühl stark gewichtet wird. Die Lebensdauer ist für dieses Fahrzeugsegment ein entscheidender Aspekt, da es sich um Langstreckenfahrzeuge handelt. Die Kombination aus optimierter konventioneller Scheibenbremse mit alternativen Bremsbelägen auf der Vorder- und Hinterachse ist für diese Segmentgruppe eine gut bewertete Alternative.

Im F- und im S- Segment ist die Carbon-Keramik Bremse die bestbewertete Technologie, gefolgt von der hartmetallbeschichteten Bremscheibe. Im S- Segment ist der Abstand zwischen den beiden Technologien größer. Wie in Kapitel 2.2.2 konnte mithilfe durchgeführter Messungen aus vorigen Studien gezeigt werden, dass die Carbon-Keramik Bremse eine hohe Partikelemissionsreduzierung erreicht. Die hohe Partikelemissionsreduzierung ist aufgrund des hohen Fahrzeuggewichts wichtig für das F-Segment. Zudem sind die hohen Kosten der Carbon-Keramik Bremscheibe in diesen Segmenten am ehesten vertretbar. Wie der aktuelle Markt zeigt, ist zu erwarten, dass die Carbon-Keramik Bremse nicht in allen Fahrzeugen in diesen Fahrzeugsegmenten verbaut wird. Dahingehend ist eine hartmetallbeschichtete Bremscheibe eine Alternative mit ebenfalls guten Eigenschaften, wie beispielsweise einer hohen thermischen Bremsleistung. Die thermische Bremsleistung ist ein wichtiger Faktor für die Performance-Anforderungen im Sportwagensegment bei schweren Oberklassefahrzeugen.

Im Allgemeinen zeigen die Bewertungsergebnisse, dass eine Änderung der Reibpaarung beispielsweise durch eine hartmetallbeschichtete Bremscheibe oder alternativen Reibmaterialien der Bremsbeläge favorisiert werden. Diese Aussage wird durch die Anzahl der gefundenen Veröffentlichungen über diese Technologievarianten sowie die Themenwahl einschlägiger Fachkonferenzen z.B. „Eurobrake 2024“, (Fisita, 2024) bestätigt.

Mit Ausnahme des Kleinwagensegmentes zeigt sich die hartmetallbeschichtete Bremscheibe als eine der favorisierten Technologien für alle Fahrzeugsegmente. Die Hauptgründe hierfür sind die ausreichende Partikelemissionsminderung, die vertretbaren Zusatzkosten und die einfache Integration der Technologie in die bestehenden Fahrzeugsysteme.

Die Carbon-Keramik Bremscheibe hat ein hohes Partikelemissionsminderungspotential und gute technische Eigenschaften. Jedoch ist diese Technologie eher in hochpreisigen Segmenten als Ausstattungsvariante zu erwarten.

Alternative Materialien der Bremsbeläge sind eine favorisierte Technologie für leichte Fahrzeuge. Die Bremspartikelreduzierung ist abhängig von der Zusammensetzung des Bremsbelagmaterials. Bei schweren Fahrzeugen ist zu erwarten, dass die Euro 7 Grenzwerte nur als Technologiepaket erreicht werden.

Bei der optimierten konventionellen Scheibenbremse ist die Erfüllung der Euro 7 Gesetzgebung nur in Kombination als Technologiepaket realisierbar.

Die Einführung der elektromechanischen Bremsbetätigung für die Partikelemissionsminderung als Einzeltechnologie ist nicht zu erwarten, da das Einsparpotential zu gering ist. Der Hauptvorteil dieser Technologie bezüglich der Partikelreduzierung ergibt sich als Technologiepaket in Kombination mit der Rekuperation.

Obwohl die modifizierte Rekuperation hinsichtlich der technischen Bewertung einiger Kriterien (Systemkosten, Aufwand zur technischen Machbarkeit) im Vergleich zu anderen Technologien z.B. alternative Bremsbeläge schlechter bewertet ist, ist es naheliegend, bei batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen die Rekuperation zu nutzen und somit hohe Partikelemissionsminderungen zu erreichen. Je nach Ausbaustufe des Bremssystems ist in einigen Fällen davon auszugehen, dass durch den heutigen Stand der Rekuperation die Euro 7 Gesetzgebung in allen Fahrzeugsegmenten erfüllt wird. Bei Fahrzeugen im F-Segment ist es jedoch möglich, dass die Grenzwerte nicht eingehalten werden, da diese Fahrzeuge im Vergleich zum D-Segment zwar ähnlich stark motorisiert sind aber ein höheres Fahrzeuggewicht aufweisen. Sollte die Rekuperation bei Elektrofahrzeugen die gesetzlichen Grenzwerte nicht erfüllen, ist es naheliegend die Rekuperation mit anderen erwartbaren Technologien, wie der hartmetallbeschichteten Brems Scheibe oder alternativen Reibmaterialien der Bremsbeläge zu kombinieren.

Weitere mögliche Technologien zur Einhaltung der Euro 7 Grenzwerte sind die Trommelbremse an der Hinterachse kleiner Fahrzeugsegmente als Teil eines Technologiepakets sowie aktive und passive Filtersysteme. Die Ausführung der Trommelbremse ist ebenso an der Vorderachse in Kombination mit Rekuperation und elektromechanischer Bremsbetätigung bei leichten Fahrzeugen denkbar.

Im Vergleich zu alternativen Reibmaterialien schneiden Filtersysteme, bei denen Partikel aufgefangen werden, sodass diese nicht in die Umwelt gelangen, schlechter ab. Filtersysteme erfordern einen höheren Aufwand, somit entstehen höhere Kosten. Zusätzlich weisen sie eine geringere Lebensdauer aufgrund des erforderlichen Filterwechsels auf. Diese Technologien schneiden in der vorliegenden Bewertung schlechter ab als die zuvor beschriebenen Optionen.

Mit fortschreitender Entwicklung, anderen oder anders gewichteten Bewertungskriterien oder z.B. einer weiteren Verschärfung der Gesetzgebung könnten diese Optionen in zukünftigen Betrachtungen aber eine höhere Bewertung erzielen. Darüber hinaus existieren Lösungen mit geringerer Realisierungswahrscheinlichkeit, welche teilweise in der Betrachtung ausgenommen wurden.

Andere Zero-Emission Technologien, die im Stand der Technik (Kapitel 2.2) vorgestellt und zusammengefasst sind und beispielsweise aufgrund des niedrigen TRL in Kapitel 3.1.3 ausgeschlossen werden, sind nach aktueller Einschätzung erst bei einer Verschärfung der Gesetzgebung und / oder nach Abschluss der nächsten Entwicklungsschritte in Richtung einer Serienanwendung zu erwarten.

3.4 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie „Recherche zu Bremsstaubemissionen im Rahmen von EURO 7“ wurde eine Literaturrecherche zum Stand der Technik von Bremsstaubemissionen durchgeführt. Im Anschluss wurde ein Bewertungssystem erarbeitet und die heute zur Verfügung stehenden Technologien zur Bremsstaub-Reduktion bei der Anwendung in unterschiedlichen Pkw-Segmenten und verschiedenen Antriebsarten betrachtet und gegenübergestellt.

Im ersten Schritt wurde eine Übersicht zum Stand der Technik im Bereich der Bremssysteme mit dem Fokus auf Bremsstaubemissionen erarbeitet. Die in der Recherche gefundenen Technologien zur Minderung der Bremsstaubemissionen wurden systematisch aufgelistet und die zugehörigen technischen Eigenschaften aufbereitet. Es wurden insgesamt 112 Quellen identifiziert. Diese Quellen teilen sich auf Webseiten der Hersteller und Zulieferer, diverse Veröffentlichungen zu den Technologien, sowie Patente und unabhängig bereits durchgeführter Meta-Studien bezüglich des Emissionseinsparpotentials auf. Darüber hinaus lag ein weiterer Fokus der Recherchearbeit darin, Informationen zu den gefundenen Technologien bezüglich der in dieser Arbeit definierten Bewertungskriterien zu klassieren, um die Technologien miteinander vergleichen zu können.

Im zweiten Schritt wurde ein Bewertungssystem entwickelt, das es erlaubt, die Technologien bezüglich ihres Bremsstaubemissionsminderungspotentials sowie weiterer allgemeiner Anforderungen an ein Bremssystem zu vergleichen. Hierbei wurde auch berücksichtigt, dass verschiedene Fahrzeugsegmente und Antriebsvarianten betrachtet werden können. Zunächst wurden die zu bewertenden Technologien sowie sinnvolle Kombinationen mehrerer Technologien (Technologiepakete) definiert und Fahrzeugsegmentgruppen gebildet, bei denen mehrere Fahrzeugkategorien zusammengefasst wurden. Die Bewertungskriterien für ein Bremssystem wurden definiert und es wurden Bewertungsfunktionen abgeleitet, mit denen technische Eigenschaften in einen Nutzwert überführt werden können. Mithilfe einer Plausibilisierung der technischen Anwendung je Fahrzeugsegmentgruppe wurden Technologievarianten begründet ausgeschlossen, die entweder die technischen Anforderungen des betreffenden Segments nicht erfüllen oder aus wirtschaftlichen Gründen kein Marktpotenzial haben. Schließlich wurden Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Bewertungskriterien eingeführt, so dass die unterschiedliche Wichtigkeit der Kriterien in den einzelnen Pkw-Segmenten berücksichtigt werden können. Unter Verwendung dieser Komponenten wurde ein EXCEL-basiertes Dokument erstellt, in das die Technologien, die zugehörigen technischen Eigenschaften, die Bewertungskriterien und die Gewichtungsfaktoren eingepflegt werden können und mit dem ein Vergleich in Form einer Nutzwertanalyse durchgeführt werden kann. Es ist für den Nutzer möglich, durch Auswahl verschiedener Filter einzelne Aspekte der Technologien, einzelne Fahrzeugsegmente oder auch einzelne Antriebsvarianten zu betrachten und die Reduktionstechnologien zu analysieren.

Exemplarisch wurden die resultierenden Ergebnisse in zwei verschiedenen Varianten präsentiert und diskutiert. Die erste Betrachtung erfolgt nach Fahrzeugsegment und Triebstrang und zeigt alle Technologievarianten sowie die favorisierte Technologie auf, die bei Anwendung der Nutzwertanalyse am besten bewertet wird. Die zweite Betrachtung erfolgt nach Technologie und Triebstrang und ermöglicht den Vergleich einer Technologie für verschiedene Fahrzeugsegmente.

Es lassen sich Aussagen über vielversprechende Technologievarianten für die einzelnen Fahrzeugsegmente treffen. Auch wenn verschiedene Technologien bezüglich einzelner Eigenschaften Vorteile aufweisen, kann basierend auf den gefundenen Literaturquellen zusammengefasst werden, dass abgewandelte konventionelle Bremssysteme in Bezug auf die Materialauswahl aussichtsreiche Kandidaten für den Markteintritt sind. Diese Technologien kennzeichnen sich durch veränderte Reibpaarungen in Form von hartmetallbeschichteten Brems scheiben sowie alternative Materialzusammensetzungen der Reibbeläge aus. Technologien mit tiefgreifenderen Änderungen gegenüber dem Stand der Technik sind auf Basis der vorliegenden Bewertung für die Euro 7 Einführung nicht zu erwarten. Den Projektergebnissen liegt eine transparente Implementierung der entworfenen Methode bei. Aufgrund der aktuell hohen Dynamik im Bereich der Entwicklung der

Bremsentechnologie, getrieben durch die Euro 7 Gesetzgebung, lässt sich die Bewertung und Einschätzung folglich auf neue, zukünftige Technologien erweitern oder die Bewertungskriterien an geänderte Rahmenbedingungen anpassen. Ebenso kann mit dem Vorliegen neuer Veröffentlichungen die Datenbasis verbessert werden und der Einfluss von getroffenen Annahmen und Einschätzungen auf das Bewertungsergebnis verringert werden. Es ist zum einen zu erwarten, dass Technologien, die in dieser Bewertung aufgrund der Kosten schlechter abschneiden, in den nächsten Jahren günstiger werden und dadurch anders bewertet werden. Zum anderen können neuartige Technologien, die aktuell einen prototypischen Entwicklungsstand aufweisen und im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden, aufgrund von Weiterentwicklungen oder Einführung in die Serienentwicklung in den nächsten Jahren ebenfalls eine technische Alternative sein.

Literatur

- ATE (2024) *Gewinner wirbeln keinen Staub auf* [Online]. Verfügbar unter <https://www.ate.de/produkte/scheibenbremsen/ate-ceramic-bremsbelaege/> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- AT-RS (Hg.) (2013) *Radnabenantrieb und neue Technologien* [Online]. Verfügbar unter <https://www.at-rs.de/beitrag/items/radnabenantrieb-und-neue-bremstechnologien.html> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Autohaus (2020) *Fahrzeugentwicklung: E-Autos lassen Durchschnittsgewicht steigen* [Online]. Verfügbar unter <https://www.autohaus.de/nachrichten/autohandel/fahrzeugentwicklung-e-autos-lassen-durchschnittsgewicht-steigen-2703831> (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- Autohaus (2022) *Kampf gegen den Feinstaub: Selbstreinigende Stopper* [Online]. Verfügbar unter <https://www.autohaus.de/nachrichten/autohersteller/kampf-gegen-den-feinstaub-selbstreinigende-stopper-3126152> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Backhaus, R. (2024) "Messung von Brems- und Reifenpartikeln auf dem Prüfstand", *ATZ*, 2024, 8-13 [Online]. Verfügbar unter <https://www.springerprofessional.de/atz-automobiltechnische-zeitschrift-4-2024/26916226> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Baumann, U. (2020) *Im Spiegel-Look emissionsärmer bremsen: Der italienische Bremsenhersteller Brembo will Bremsvorgänge emissionsärmer gestalten und bringt dazu neue Bremsscheiben sowie weitere Technikfeatures* [Online], *Auto Motor Sport*. Verfügbar unter <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/brembo-greentive-und-enesys-emissionsaermer-bremsen/> (Abgerufen am 10 Juni 2024).
- Bondorf, L., Köhler, L., Grein, T., Epple, F., Philipps, F., Aigner, M. & Schripp, T. (2023) "Airborne Brake Wear Emissions from a Battery Electric Vehicle", *Atmosphere*, Vol. 14, No. 3, S. 488.
- Bosch (2019) *iDisc* [Online]. Verfügbar unter <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/fahrsicherheit/idisc/> (Abgerufen am 14 Mai 2024).
- Bosch (Hg.) (2024) *Modular and integrated braking systems* [Online]. Verfügbar unter <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/driving-safety/modular-and-integrated-braking-systems/> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Brembo (2020) *Greentive* [Online]. Verfügbar unter <https://www.haute-innovation.com/magazin/mobilitaet/bremsbelag-mindert-feinstaub/> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Brembo (2022) *Die neue Lösung für leichte Nutzfahrzeuge trägt entscheidend zur Reduzierung von CO2-Emissionen und Kraftstoffverbrauch bei* [Online]. Verfügbar unter <https://www.brembo.com/de/company/news/enesys-den-aftermarket> (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- Brembo (2023) *Freie Fahrt in eine grünere Zukunft* [Online]. Verfügbar unter <https://www.bremboparts.com/europe/de/produkte/beyond/produkte-beyond-greenance-kit> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Brembo (2024a) *Greenance* [Online]. Verfügbar unter <https://www.brembo.com/de/company/news/greenance> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Brembo (2024b) *Partnerships to improve the environmental impact of products* [Online]. Verfügbar unter <https://www.brembo.com/en/sustainability/esg/environment/innovation> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Breuer, B. (2017) *Bremsenhandbuch*, 5. Aufl., Springer Fachmedien Wiesbaden.
- BRL (2024) *Next generation of brakes with zero mobility emissions* [Online]. Verfügbar unter <https://www.brlbrakes.com/> (Abgerufen am 1 Juli 2024).

- Christophorus, T. E. (2017) *Hart wie Diamant* [Online]. Verfügbar unter <https://christophorus.porsche.com/de/2017/384/porsche-surface-coated-brake-cayenne-turbo-development-center-weissach-diamond-14479.html> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Continental (2021a) *Die Zukunft der Bremse - Bremssysteme der Zukunft* [Online]. Verfügbar unter <https://www.continental.com/de/presse/studien-publikationen/technologie-dossiers/bremssysteme-der-zukunft/> (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- Continental (2021b) *MK C2 von Continental schafft die Grundlage für Bremssysteme in zukünftigen Fahrzeugarchitekturen* [Online]. Verfügbar unter <https://www.continental.com/de/presse/pressemitteilungen/20211116-mk-c2-von-continental/> (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- Continental (2022a) *Green Caliper* [Online]. Verfügbar unter <https://www.continental.com/de/presse/studien-publikationen/technologie-dossiers/green-caliper/> (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- Continental (2022b) *Hydraulische Bremssysteme für die Mobilität der Zukunft - Radbremsen werden nachhaltiger* [Online]. Verfügbar unter <https://www.continental.com/de/presse/studien-publikationen/technologie-dossiers/hydraulische-bremssysteme/> (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- Continental (2022c) *Continental erhält Großauftrag für halbtrockenes Bremssystem im Wert von über zwei Milliarden Euro* [Online]. Verfügbar unter <https://www.continental.com/de/presse/pressemitteilungen/future-brake-system/> (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- Continental (2023) *Strategische Partnerschaft: Continental und DeepDrive entwickeln Radnabenantrieb mit integrierter Bremse* [Online], Frankfurt/München. Verfügbar unter <https://www.continental.com/de/presse/pressemitteilungen/20231005-deepdrive/> (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- Continental (2024) *Continental setzt auf die Zukunft der Trommelbremse* [Online]. Verfügbar unter <https://www.continental.com/de/presse/studien-publikationen/technologie-dossiers/trommelbremse/> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Damköhler, F. (2023) *Braking for more* [Online]. Verfügbar unter <https://newsroom.porsche.com/en/2023/innovation/porsche-engineering-brake-force-distribution-recovery-30953.html> (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- Djukić, R. (2020) *Reibungsbremse* DE202020100665U1.
- Domingo, J., Faye, S. & Saint-Pierre, G. (2020) "Modales D5.1.: Guidelines for low-emission driving".
- EUROPEAN COMMISSION (2022) "ANNEXES to the Proposal for a Regulation of the European Parliament and the Council on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009".
- Farrow, K. & Oueslati, W. (2020) "Non-exhaust emissions from road transport: Causes, consequences and policy responses".
- Fisita (Hg.) (2024) *EuroBrake 2024: Europe's braking technology conference & exhibition* [Online]. Verfügbar unter https://events.fisita.com/event/EuroBrake2024/summary?_gl=1*vdorvh*_ga*NzlyMzg4NTg2LjE3MTM0Mzk4OTQ.*_ga_QT8EQB4XME*MTcyNDgzMzIzMy4xLjEuMTcyNDgzMzIzNy4wLjAuMA. (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Fornasier, J. & Anguillara Sabazia (2021) *Reibelement für eine Bremse, sowie ein Verfahren zum Diffusionsbeschichten eines Trägerkörpers aus einer metallischen Legierung* DE 10 2021 208 612 A1.

- Forvia Hella (2023) *Hella Pagid feier zehnjähriges Jubiläum* [Online]. Verfügbar unter <https://www.hella.com/hella-com/de/press/Unternehmen-24-04-2023-21026.html> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Fraunhofer IFAM (2020) *Lösung für saubere Mobilität: Bremsbeläge ohne Kupfer oder Nickel* [Online]. Verfügbar unter https://www.ifam.fraunhofer.de/de/Presse/Archiv/2020/Loesung_fuer_saubere_Mobilitaet-Bremsbelaege_ohne_Kupfer_oder_Nickel.html.
- Fuchslocher, G. (2023) *So reduzieren kluge Produktionsmethoden den Bremsstaub* [Online]. Verfügbar unter <https://www.automobil-produktion.de/technologie/so-reduzieren-kluge-produktionsmethoden-den-bremsstaub-164.html> (Abgerufen am 10 Juni 2024).
- Giechaskiel, B., Grigoratos, T., Dilara, P., Karageorgiou, T., Ntziachristos, L. & Samaras, Z. (2024) "Light-Duty Vehicle Brake Emission Factors", *Atmosphere*, Vol. 15, No. 1, S. 97.
- GOTEC Brake Disc Coating GmbH (2023) *Hartstoffbeschichtung für Bremsscheiben* [Online]. Verfügbar unter <https://gotec-group.com/leistungen/hartstoffbeschichtung/> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Grigoratos, T. & Giechaskiel, B. (2023) *JRC update on brake-related topics* [Online]. Verfügbar unter <https://wiki.unece.org/display/trans/PMP+Web+Conference+22.11.2023> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Haag, Mathias, Dr., Hoffmann, Jens, Dr. & Schulitz, Matthias, Dr. (2021) *PKW-Kraftfahrzeugradbremse mit Partikelemissionsschutzvorrichtung*.
- Halvorson, B. (2022) *No brakes! Will the EVs of the future omit friction pads entirely?* [Online]. Verfügbar unter https://www.greencarreports.com/news/1135796_no-brakes-will-the-evs-of-the-future-omit-friction-pads-entirely (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- Haute Innovation (Hg.) (2021) *Bremsscheibe mit vermindertem Feinstaub: Tribokonditionierung reduziert Partikelabrieb im Straßen- und Schienenverkehr* [Online]. Verfügbar unter <https://www.haute-innovation.com/magazin/mobilitaet/bremsbelag-mindert-feinstaub/> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Hella Pagid (2024) *Brakes in electric cars are full of technology* [Online]. Verfügbar unter <https://www.hella.com/techworld/au/Lounge/Brakes-electric-cars-86757/> (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- Hengst Filtration (2024) *Bremsenstaub Partikelfilter: Effektive Filtration von Bremsenstaub* [Online]. Verfügbar unter <https://www.hengst.com/de/produkte/1356-bremsenstaub-partikelfilter> (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- Hesse, D., Hamatschek, C., Augsburg, K., Weigelt, T., Prahst, A. & Gramstat, S. (2021) "Testing of Alternative Disc Brakes and Friction Materials Regarding Brake Wear Particle Emissions and Temperature Behavior", *Atmosphere*, Vol. 12, No. 4, S. 436.
- HL Mando Corporation (2023) *Trommelbremse für ein Fahrzeug und Fahrzeug* DE202023106919U1.
- Hommen, M. (2023) *Neue Elektroantriebe: Das Rad wird zum Motorraum* [Online], Autohaus. Verfügbar unter <https://www.autohaus.de/nachrichten/autohersteller/neue-elektroantriebe-das-rad-wird-zum-motorraum-3405764> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Impact Innovations (Hg.) (2024) *Die innovative Bremsscheiben-Beschichtungstechnologie von der BMW Group für die BMW M-Serie bevorzugt!* [Online]. Verfügbar unter <https://impact-innovations.com/portfolio-item/die-perfekte-kombination-impact-hybrid-brake-disc-coating/> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Jose maria Gómez (2024) "Introduction to BRL brake technology: Environmental sustainable Braking Systems" [Online]. Verfügbar unter <https://wiki.unece.org/display/trans/PMP+54rd+session+-+Geneva+09.01.2024> (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- KBA (2024a) *Fahrzeugzulassungen (FZ): Bestand an Personenkraftwagen nach Segmenten und Modellreihen am 1. Januar 2024 gegenüber 1. Januar 2023* [Online]. Verfügbar unter <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=>

- https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/FSstatistik/Fahrzeuge/FFZ12/FFz12_2024.xlsx (Abgerufen am 21 Mai 2024).
- KBA (2024b) *Durchschnittliches Leergewicht neu zugelassener Personenkraftwagen in Deutschland von 2013 bis 2023: (in Kilogramm)* [Online], verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12944/umfrage/entwicklung-des-leergewichts-von-neuwagen/> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Klinge, Falk, Prof. Dr. (2019) *Fahrzeug-Feinstaubsaugabsaugung und Fahrzeug* DE 10 2019 133 794 B4.
- Kohl, B., Eichner, G., Westerteicher, D., Leicht, R. & Lammel, K. (2019) *Vorrichtung und Reibbremse zur Reduzierung der Menge an Feinstaub* WO 2019//228854 A1.
- Kraft, K. & Stebner, F. (2019) *Trommelbremse und Fahrzeug mit einer Trommelbremse* DE102019210997A1.
- Kroher, T. (2024a) *Euro-7-Abgasnorm: Anforderungen, Grenzwerte, Einführungsfristen* [Online], ADAC. Verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/abgasnormen/euro-7/> (Abgerufen am 15 Mai 2024).
- Kroher, T. (2024b) *Feinstaub durch Bremsenabrieb: Sind die Euro-7-Grenzwerte machbar?* [Online], ADAC. Verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/abgasnormen/bremsstaub-emissionen-euro-7/> (Abgerufen am 10 Juni 2024).
- Laurikko Juhani, Andrew Winder, PATELLI Mauro & FEDERICI MATTEO (2021) "Modales D3.1 Emission measurements".
- Link, D. (2021) *Trommelbremse für ein Fahrzeug* DE 10 2021 204 132 A1.
- Link, D. (2022) *Trommelbremse für ein Fahrzeug* DE102022203672A1.
- Mackovic, Mirza, Dr. (2021) *Bremsstaubfilterhaube mit Wirbelgenerator und Endabscheider* [Online]. Verfügbar unter <https://sciencebridge.de/de/bremsstaubfilterhaube.html> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Mackovic, Mirza, Dr. (2023) *Absaugsystem für Bremsstaub und Reifenabrieb* [Online]. Verfügbar unter <https://sciencebridge.de/de/bremsstaubabsaugung.html> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Mann+Hummel (2024) *Bremsstaubpartikelfilter* [Online]. Verfügbar unter <https://oem.mann-hummel.com/de/oem-produkte/feinstaubfilter/bremsstaubpartikelfilter.html> (Abgerufen am 11 Juni 2024).
- Nagel Maschinen- u. Werkzeugfabrik GmbH (2024) *Hartstoffbeschichtete Bremscheiben - Alles aus einer Hand* [Online]. Verfügbar unter <https://www.nagel.com/brakedisc> (Abgerufen am 10 Juni 2024).
- NASA (1988) *Definition Of Technology Readiness Levels* [Online].
- OECD (2020) *Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport*, Paris, OECD.
- Phillips, F. (2023) "Zero Emission Drive Unit Generation 1: Abschlussbericht".
- Rosso, K. (2019) *LOWBRASYS, SAUBERE TECHNOLOGIE FÜR DIE BREMSEN VON MORGEN*.
- Schulitz, M., Hoffmann, J., Messner, A. & Meyer, U. (2020) *Antriebseinheit mit einem Elektromotor* DE102020214433A1.
- Senger, A. (2023) "Rekuperation und Feinstaub", *Auto Inside*, S. 36–38.
- Shahin, H. (2022) *Bremstrommel mit Staubsammlung über Durchgangslöcher* DE 10 2022 205 550 B4.
- Singh, R. (2023) *Hochleistungs-Kaltbeschichten etabliert sich* [Online]. Verfügbar unter https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2023/05/29_gts_kaltgas_05j2023/29_gts_kaltgas_05j2023.php (Abgerufen am 12 Juni 2024).
- Tallano Technologies (2023) *Putting the brakes on air pollution: Getting to grips with the tamic solution to combat fine particle emissions* [Online]. Verfügbar unter <https://www.tallano-technologies.com/en/tamic-pollution-brake/> (Abgerufen am 12 Juni 2024).

- Tallano Technologies (Hg.) (2024) *Wie verschmutzen Elektrofahrzeuge die Umwelt?* [Online]. Verfügbar unter <https://www.tallano-technologies.com/de/faq/umweltverschmutzungselektrofahrzeug/> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- (2023) *Trommelbremse für ein Fahrzeug und Fahrzeug* DE 20 2023 106 919 U1.
- Trumpf (Hg.) (2024) *HS-LMD auf Brems scheiben* [Online]. Verfügbar unter https://www.trumpf.com/de_DE/loesungen/beispielteile/vorlage/hs-lmd-auf-brems-scheiben/ (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- UN (2023) *Laboratory Measurement of Brake Emissions for Light-Duty Vehicles*.
- United Nations (2018) *Addendum 12-H: UN Regulation No. 13-H*.
- Utsch, P. & Schleifenbaum, J. H. (2024) "Beschichtungsverfahren zur drastischen Reduktion der Feinstaubemissionen von Brems scheiben", *ATZ*, 03.2024, S. 42–46 [Online]. Verfügbar unter <https://www.springerprofessional.de/atz-automobiltechnische-zeitschrift-2-3-2024/26769214> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Utsch, T. P. (2021) *Werkstück zum Beschichten mit einer Veredelungsschicht, sowie ein Einmessverfahren für ein Werkstück* DE 10 2021 208 965 A1.
- Volz, C., Teske, A. & Heinz, S. (2019) *Trommelbremse für ein Fahrzeug* DE102019209518A1.
- VW (Hg.) (2024) *Regenerative braking: what is it and how does it impact range?* [Online]. Verfügbar unter <https://www.volkswagen.co.uk/en/electric-and-hybrid/charging-and-range/range/brake-energy-recuperation.html> (Abgerufen am 1 Juli 2024).
- Wagner, S. (2024) *BMW 4er-Schock? Irres Neue Klasse-Coupé aufgetaucht* [Online]. Verfügbar unter <https://de.motor1.com/news/725626/bmw-neue-klasse-coupe-4er/> (Abgerufen am 11 Juli 2024).
- Werwitzke, C. (2023) *DeepDrive kündigt Doppelrotor-Radialfluss-Zentralsmotor an* [Online] (Abgerufen am 11 Juli 2024).
- Wörz, T., Weller, B., Bock, L., Pricken, F., Pfannkuch, S., Rockinger, T., Aigner, A., Bammer sperger, L., Plenk, P., Gehwolf, K., Reiners, O. & Mack, K. (2022) *Bremsstaubpartikelfilter mit einem Filtereinsatz* EP 4 105 511 A1.
- Wörz, T., Weller, B., Mack, K., Gehwolf, K., Rockinger, T., Pfannkuch, S., Bock, L. & Kaufmann, K.-F. (20.12.2021) *Scheibenbremsanordnung und Bremsstaubpartikelfilter* WO002022152517A1.

Tabellen

Tab. 2-1: Betrachtete Quellen und Datenbanken sowie der dazugehörigen Schlagworte

Tab. 2-2: In der Recherche gefundene Emissionsminderungstechnologien aufgeteilt nach den Ebenen Komponente, Subsystem, Gesamtsystem und Sonstige

Tab. 3-1: Gruppierung von Fahrzeugsegmenten mit vergleichbaren Anforderungen an das Bremssystem (Bezeichnung nach Kraftfahrtbundesamt (KBA, 2024a))

Tab. 3-2: Plausibilisierungsmatrix inklusive der dazugehörigen Legende

Tab. 3-3: Bewertungsskalierung der thermischen Bremsleistung

Tab. 3-4: Skalierung der Bewertungsfunktionen beider Bewertungskriterien Systemkosten und qualitative Einschätzung Kosten auf einen gemeinsamen Zahlenwert

Tab. 3-5: Gewichtungsmatrix der Bewertungskriterien für das A- und B- Segment (Legende: unwichtig = -1; weniger wichtig = -0,5; gleich wichtig = 0; wichtiger = 0,5; viel wichtiger = 1)

Tab. 3-6: Struktur der Rechercheergebnismatrix

Tab. 3-7: Struktur der Technologiebewertungsmatrix

Tab. 3-8: Beispielhafter Ausschnitt der Technologiebewertungsmatrix für den Aufwand zur technischen Machbarkeit einer Hartmetallbeschichteten Bremsscheibe

Tab. 3-9: Struktur der Bewertungsergebnismatrix

Bilder

Bild 3-1: Vorgehensweise für die Bewertung der Bremsstaubemissionsminderungstechnologien

Bild 3-2: Bewertungsfunktion der Basisanforderung thermische Bremsleistung, wobei die y-Achse der Technologiebewertung entspricht

Bild 3-3: Bewertungsfunktionen der erweiterten Anforderungen Systemkosten und qualitative Einschätzung Kosten, wobei die y-Achse der Technologiebewertung entspricht

Bild 3-4: Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien nach Fahrzeugsegmentgruppe

Bild 3-5: Gewichtete Technologiebewertung eines Elektro- und Hybridfahrzeugs im C- & M- & J-Segment

Bild 3-6: Gewichtete Technologiebewertung eines verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugs im C- & M- & J-Segment

Bild 3-7: Gewichtete Bewertung einer Carbon-Keramik Bremse (links) und Gewichtete Bewertung des Technologiepakets bestehend aus optimiertem Bremssatteldesign, alternativen Bremsbelägen an der Vorderachse und einer Trommelbremse an der Hinterachse (rechts) jeweils für ein verbrennungsmotorisch angetriebenes Fahrzeug

Anhang

Fahrzeugklasse	Bezeichnung Kraftfahrtbundesamt	Beispiel
A	Minis	VW Up
B	Kleinwagen	VW Polo
C	Kompaktklasse	VW ID 3
D	Mittelklasse	BMW 3er Reihe
E	Obere Mittelklasse	Audi A6
F	Oberklasse	Mercedes-Benz S-Klasse
J	SUVs	BMW X-Reihe
J	Geländewagen	Mercedes-Benz G-Klasse
S	Sportwagen	Porsche 911
M	Mini-Vans	Ford C-Max
M	Grossraum-Vans	VW Touran

Tab. 1: Vom Kraftfahrtbundesamt definierte Fahrzeugsegmente mit dazugehörigen Fahrzeugbeispielen (KBA, 2024a)

Bewertungskriterium	Erläuterung	Formel
Emissionsschädlichkeit, Aufwand zur technischen Machbarkeit, TRL, Reparaturaufwand, PTI, Lebensdauer, Empfindlichkeit	Die auf das Bewertungskriterium bezogene schlechteste Technologie entspricht der dominierenden Technologie	II
Bremspedalcharakteristik, NVH	Die Kombination von Technologien ermöglicht ein gegenseitiges ausgleichen des Bewertungskriteriums	IV
Thermische Bremsleistung	Die Technologien beeinflussen sich nicht gegenseitig (z.B. Scheibenbremse Vorderachse und Trommelbremse Hinterachse)	IV
	Mehr als ein Verzögerungssystem, das sich gegenseitig beeinflusst (z.B. Rekuperation in Kombination mit einem mechanischen Bremssystem)	V
Maximale Verzögerung	Kombinierbares Gesamtverzögerungssystem (z.B. Scheibenbremse Vorderachse und Trommelbremse Hinterachse)	IV
	Mehr als ein Verzögerungssystem, das nicht kombinierbar ist (z.B. Rekuperation und Scheibenbremse)	III
	Mehr als ein Verzögerungssystem, das kombinierbar ist (z.B. Rekuperation mit elektromechanischer Bremsbetätigung und Scheibenbremse)	V
Korrosionsabrieb	Die Technologien hängen nicht voneinander ab (z.B. Scheibenbremse und Trommelbremse)	IV
	Aufgrund einer Technologie wird die andere seltener benutzt und neigt mehr zur Korrosion (z.B. Rekuperation in Kombination mit Scheibenbremse) In der Formel werden für T_i die korrosionsfreien Technologien nicht berücksichtigt	IV
	Alle verwendeten Technologien sind unabhängig von der Korrosion	III
Systemkosten	Es werden getrennte Technologien auf unterschiedlichen Achsen verwendet (z.B. Vorderachse Technologie 1 & Hinterachse Technologie 2)	IV
	Mehrere Technologien auf einer Achse, wobei die zweite Achse eine Technologie enthält, die auch auf der ersten Achse verbaut ist. Die Gesamtkosten der Vorderachse entsprechen den Gesamtkosten des Fahrzeugs (z.B. Rekuperation und Scheibenbremse auf der Vorderachse und Scheibenbremse auf der Hinterachse)	VII
	Mehrere Technologien auf einer Achse, wobei die zweite Achse eine Technologie enthält, die nicht auf der ersten Achse verbaut ist (z.B. Rekuperation und Scheibenbremse an der Vorderachse und Trommelbremse auf der Hinterachse)	VII & IV
Emissionsminderungspotential	Jeweils eine Technologie pro Achse (z.B. Scheibenbremse Vorderachse und Trommelbremse Hinterachse)	IV
	Kombinierte Technologien auf einer Achse reduzieren mehr Partikel als die alleinige Technologie (z.B. Optimierte Scheibenbremse mit Reibbelag auf einer Achse)	VI
	Es existieren zwei separate Bremssysteme, wobei die Emissionsreduzierung durch den zeitlichen Anteil gegeben ist (z.B. Rekuperation mit beschichtete Bremscheibe). Erklärung: Annahme, dass in 80 % der Zeit rekuperiert wird, somit erfolgt die Emissionsreduzierung durch die beschichtete Bremscheibe in den übrig gebliebenen 20 % in der diese im Einsatz ist	VI
Kompatibilität	Kombinierbares Gesamtverzögerungssystem (z.B. Scheibenbremse vorne und Trommelbremse hinten)	II
	Mehr als ein Verzögerungssystem, das nicht kombinierbar ist (z.B. Rekuperation und Scheibenbremse)	III & II

Tab. 2: Beschreibung der Anwendung zur Bewertung der jeweiligen Bewertungskriterien für die Technologiepakete mithilfe von entsprechenden Formeln inklusive der dazugehörigen Erläuterungen

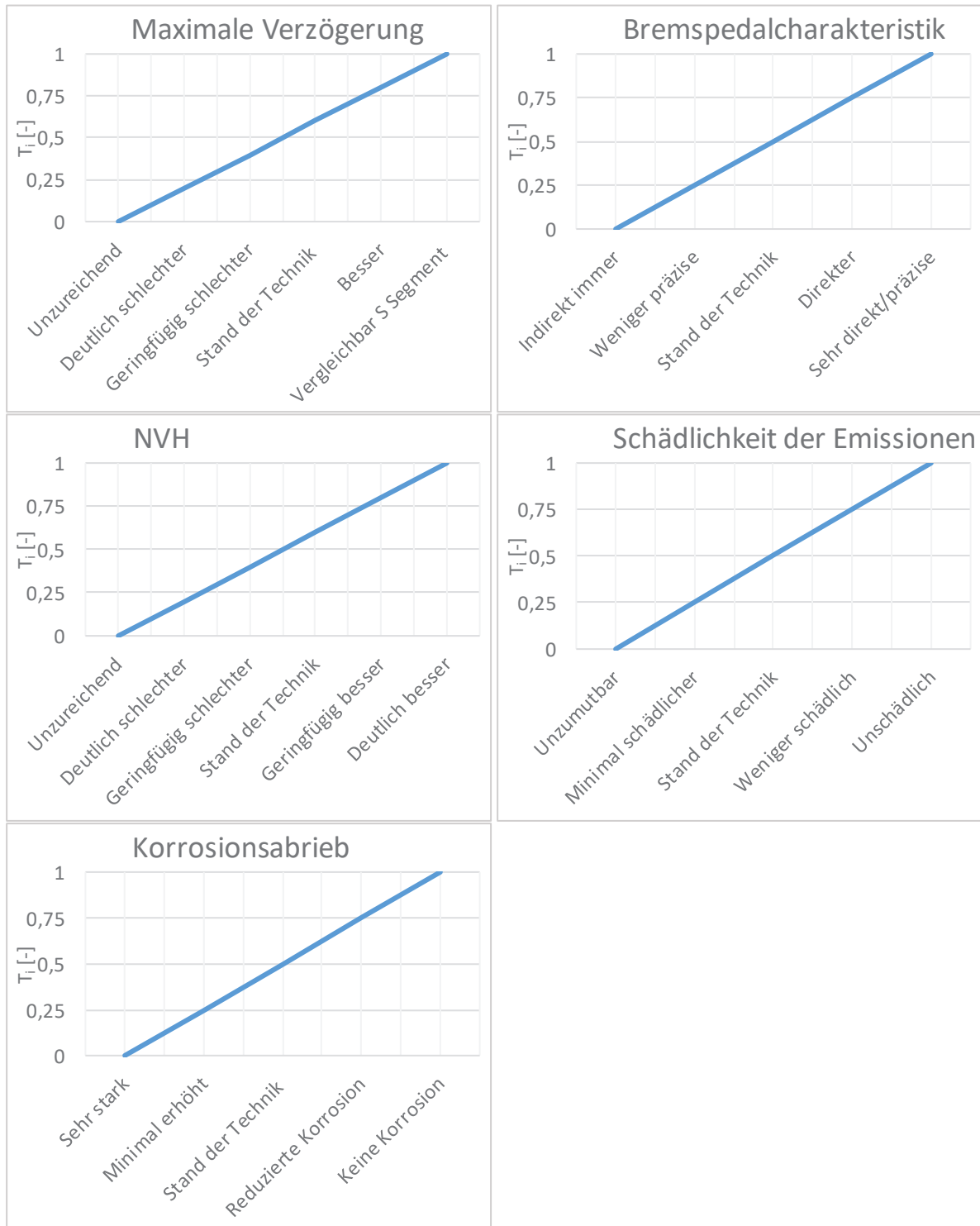
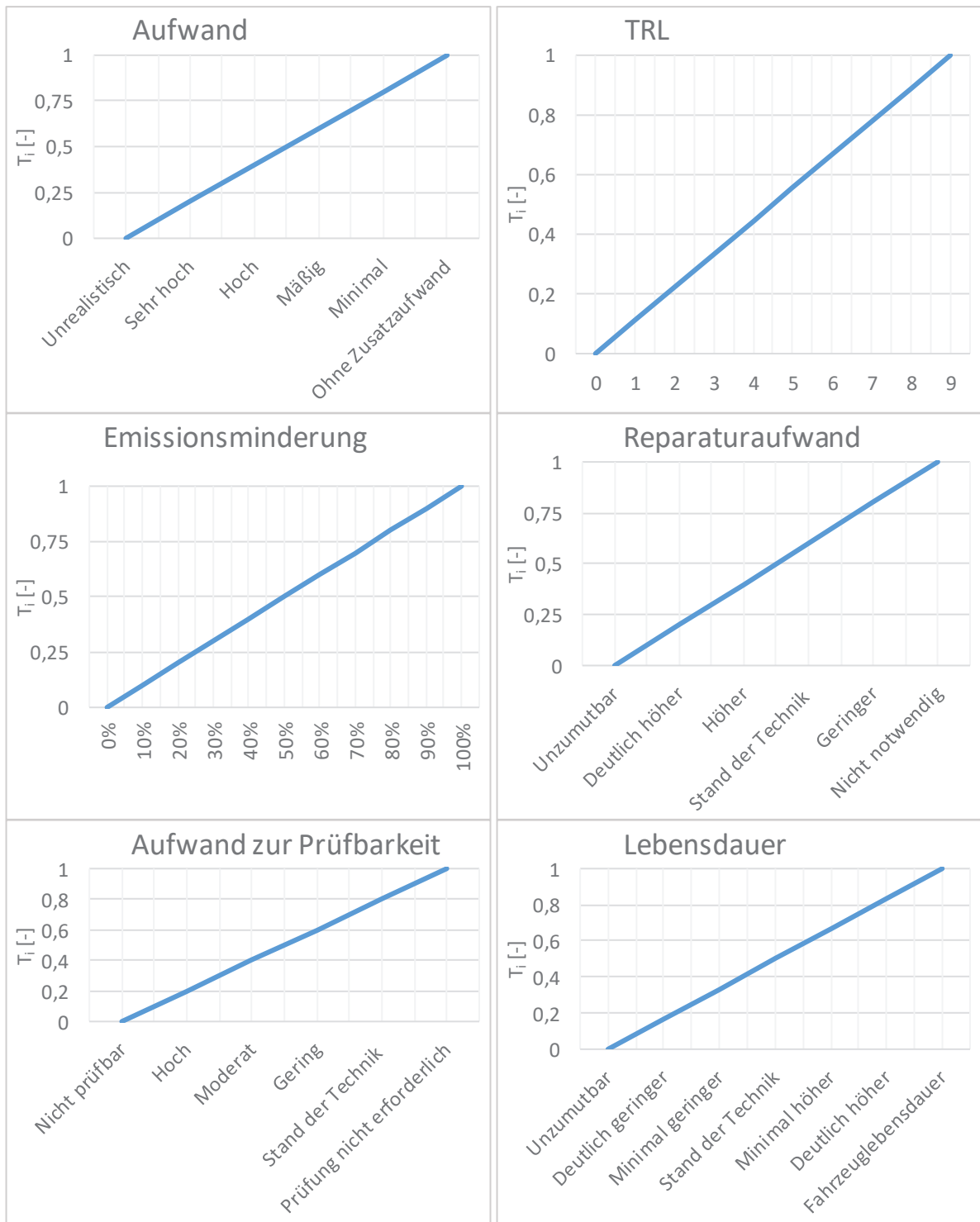


Bild 1: Bewertungsfunktionen der Basisanforderungen Maximale Verzögerung, Bremspedalcharakteristik, NVH (Noise Vibration Harshness), Schädlichkeit der Emissionen und Korrosionsabrieb, wobei die y-Achse der Technologiebewertung entspricht



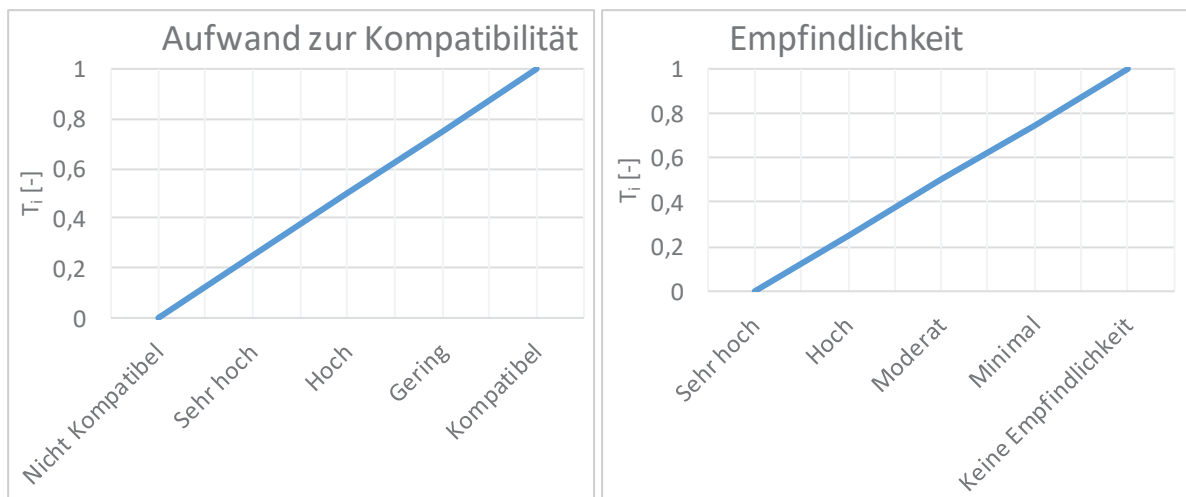


Bild 2: Bewertungsfunktionen der erweiterten Anforderungen Aufwand zur technischen Machbarkeit, Technology Readiness Level (TRL), Emissionsminderungspotential, Reparaturaufwand und Ersatzteilbeschaffung, Prüfbarkeit im Rahmen der periodisch, technischen Inspektion (PTI), Lebensdauer, Aufwand zur Kompatibilität, Empfindlichkeit der Wirksamkeit der Emissionsminderung durch äußere Einflüsse oder im Realbetrieb, wobei die y-Achse der Technologiebewertung entspricht

Gewichtung der Anforderungen für das C- & M- & J-Segment (Kompaktklasse & Van & SUV)	Basisanforderungen						Erweiterte Anforderungen									Normiert Relativ
	Th. Bremsleistung	Max. Verzögerung	Bremspedalchar.	NVH	Emissionsschädlichkeit	Korrosionsabrieb	Aufwand	Systemkosten	TRL	Emissionsminderung	Reparaturaufwand	PTI	Lebensdauer	Kompatibilität	Empfindlichkeit	
Th. Bremsleistung	0	-0,5	0	0	-1	0	-0,5	-0,5	-1	0	0,5	0	-0,5	-1	0	4,79
Max. Verzögerung	0,5	0	0,5	0	-1	1	-0,5	-0,5	-1	0	0,5	0,5	0,5	-1	0	6,46
Bremspedalchar.	0	-0,5	0	0	-1	-0,5	-1	-1	-1	0	0	0,5	0	-1	0	4,38
NVH	0	0	0	0	-1	0	0	0	-0,5	0	0	0,5	0	-1	0	5,83
Emissionsschädlichkeit	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12,50
Korrosionsabrieb	0	-1	0,5	0	-1	0	-0,5	-0,5	-1	-0,5	-0,5	0	0	-1	0	4,38
Aufwand	0,5	0,5	1	0	-1	0,5	0	0	0	0,5	1	1	0,5	0	0	8,54
Systemkosten	0,5	0,5	1	0	-1	0,5	0	0	0	0,5	1	1	0,5	0	0	8,54
TRL	1	1	1	0,5	-1	1	0	0	0	0	0,5	0,5	0,5	0	0	8,75
Emissionsminderung	0	0	0	0	-1	0,5	-0,5	-0,5	0	0	0,5	0,5	0,5	-0,5	0	6,46
Reparaturaufwand	-0,5	-0,5	0	0	-1	0,5	-1	-1	-0,5	-0,5	0	0	-0,5	-1	0	4,17
PTI	0	-0,5	-0,5	-0,5	-1	0	-1	-1	-0,5	-0,5	0	0	-0,5	-1	0	3,75
Lebensdauer	0,5	-0,5	0	0	-1	0	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0	-0,5	0	5,63
Kompatibilität	1	1	1	1	-1	1	0	0	0	0,5	1	1	0,5	0	0	9,58
Empfindlichkeit	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,25
																100

Tab. 3: Gewichtungsmatrix der Bewertungskriterien für das C-, M- und J- Segment (Legende: unwichtig = -1; weniger wichtig = -0,5; gleich wichtig = 0; wichtiger = 0,5; viel wichtiger = 1)

Gewichtung der Anforderungen für das D-, E- & J- Segment (Mittelklasse, Obere Mittelklasse & Geländewagen)	Basisanforderungen						Erweiterte Anforderungen									Normiert Relativ
	Th. Bremsleistung	Max. Verzögerung	Bremspedalchar.	NVH	Emissionsschädlichkeit	Korrosionsabrieb	Aufwand	Systemkosten	TRL	Emissionsminderung	Reparaturaufwand	PTI	Lebensdauer	Kompatibilität	Empfindlichkeit	
Th. Bremsleistung	0	-0,5	0	-1	-1	-0,5	0	0	-0,5	0	0,5	0,5	-1	0	0	5,21
Max. Verzögerung	0,5	0	-0,5	-0,5	-1	1	0,5	0	0	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0	7,50
Bremspedalchar.	0	0,5	0	-0,5	-1	0	0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0	-0,5	0	6,46
NVH	1	0,5	0,5	0	-1	0,5	0,5	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5	-0,5	0	8,54
Emissionsschädlichkeit	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12,50
Korrosionsabrieb	0,5	-1	0	-0,5	-1	0	0	0	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0	-0,5	0	5,63
Aufwand	0	-0,5	-0,5	-0,5	-1	0	0	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	5,63
Systemkosten	0	0	-0,5	-0,5	-1	0	0,5	0	-0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	6,25
TRL	0,5	0	0,5	0	-1	0,5	0,5	0,5	0	-0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	7,71
Emissionsminderung	0	-0,5	0,5	-0,5	-1	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	0	0	8,13
Reparaturaufwand	-0,5	-0,5	-0,5	-1	-1	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-1	0	0,5	-0,5	-1	0	3,54
PTI	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-1	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-1	-0,5	0	-1	-1	0	3,13
Lebensdauer	1	0	0	-0,5	-1	0	-0,5	-0,5	-0,5	-1	0,5	1	0	0	0	6,04
Kompatibilität	0	-0,5	0,5	0,5	-1	0,5	0	0	0	0	1	1	0	0	0	7,50
Empfindlichkeit	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,25
																100

Tab. 4: Gewichtungsmatrix der Bewertungskriterien für das D-, E- und J- Segment (Legende: unwichtig = -1; weniger wichtig = -0,5; gleich wichtig = 0; wichtiger = 0,5; viel wichtiger = 1)

Gewichtung der Anforderungen für das F- Segment (Oberklasse)	Basisanforderungen						Erweiterte Anforderungen									Normiert Relativ
	Th. Bremsleistung	Max. Verzögerung	Bremspedalchar.	NVH	Emissionsschädlichkeit	Korrosionsabrieb	Aufwand	Systemkosten	TRL	Emissionsminderung	Reparaturaufwand	PTI	Lebensdauer	Kompatibilität	Empfindlichkeit	
Th. Bremsleistung	0	-0,5	0	-1	-1	-0,5	0,5	0,5	0	-1	1	1	0	-0,5	0	6,04
Max. Verzögerung	0,5	0	0	-1	-1	0	1	1	1	-1	1	1	0,5	0	0	7,92
Bremspedalchar.	0	0	0	-0,5	-1	0,5	1	1	0,5	-0,5	1	1	0,5	-0,5	0	7,92
NVH	1	1	0,5	0	-1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	10,63
Emissionsschädlichkeit	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12,50
Korrosionsabrieb	0,5	0	-0,5	-1	-1	0	0	0	0	-1	0,5	0,5	0	0,5	0	6,04
Aufwand	-0,5	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	-1	0,5	0,5	0	0	0	4,79
Systemkosten	-0,5	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	-1	0,5	0,5	0	0	0	4,79
TRL	0	-1	-0,5	-1	-1	0	0	0	0	-1	0,5	0,5	-0,5	0	0	5,00
Emissionsminderung	1	1	0,5	0	-1	1	1	1	1	0	1	1	1	0,5	0	10,42
Reparaturaufwand	-1	-1	-1	-1	-1	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-1	0	0	-0,5	-0,5	0	2,92
PTI	-1	-1	-1	-1	-1	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-1	0	0	-0,5	-0,5	0	2,92
Lebensdauer	0	-0,5	-0,5	-1	-1	0	0	0	0,5	-1	0,5	0,5	0	0	0	5,63
Kompatibilität	0,5	0	0,5	-1	-1	-0,5	0	0	0	-0,5	0,5	0,5	0	0	0	6,25
Empfindlichkeit	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,25
																100

Tab. 5: Gewichtungsmatrix der Bewertungskriterien für das F- Segment (Legende: unwichtig = -1; weniger wichtig = -0,5; gleich wichtig = 0; wichtiger = 0,5; viel wichtiger = 1)

Gewichtung der Anforderungen für das S-Segment (Sportwagen)	Basisanforderungen						Erweiterte Anforderungen								Normiert Relativ	
	Th. Bremsleistung	Max. Verzögerung	Bremspedalchar.	NVH	Emissionsschädlichkeit	Korrosionsabrieb	Aufwand	Systemkosten	TRL	Emissionsminderung	Reparaturaufwand	PTI	Lebensdauer	Kompatibilität		Empfindlichkeit
Th. Bremsleistung	0	0,5	0,5	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	10,83
Max. Verzögerung	-0,5	0	0	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	10,21
Bremspedalchar.	-0,5	0	0	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	10,21
NVH	-1	-1	-1	0	-1	0	0	-0,5	0	-0,5	1	1	-0,5	0	0	5,21
Emissionsschädlichkeit	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12,50
Korrosionsabrieb	-1	-1	-1	0	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	4,58
Aufwand	-1	-1	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-0,5	0	0	4,79
Systemkosten	-1	-1	-1	0,5	-1	0	0	0	0	-0,5	0	-0,5	0	0	0	4,79
TRL	-1	-1	-1	0	-1	0	0	0	0	-0,5	0,5	0,5	-0,5	0	0	5,00
Emissionsminderung	-1	-1	-1	0,5	-1	1	0	0,5	0,5	0	0	0	1	0,5	0	6,67
Reparaturaufwand	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	-0,5	0	0	0	0	-1	0	3,96
PTI	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0,5	-0,5	0	0	0	0	-1	0	4,17
Lebensdauer	-1	-1	-1	0,5	-1	0	0,5	0	0,5	-1	0	0	0	0,5	0	5,42
Kompatibilität	-1	-1	-1	0	-1	0	0	0	0	-0,5	1	1	-0,5	0	0	5,42
Empfindlichkeit	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,25
																100

Tab. 6: Gewichtungsmatrix der Bewertungskriterien für das S- Segment (Legende: unwichtig = -1; weniger wichtig = -0,5; gleich wichtig = 0; wichtiger = 0,5; viel wichtiger = 1)

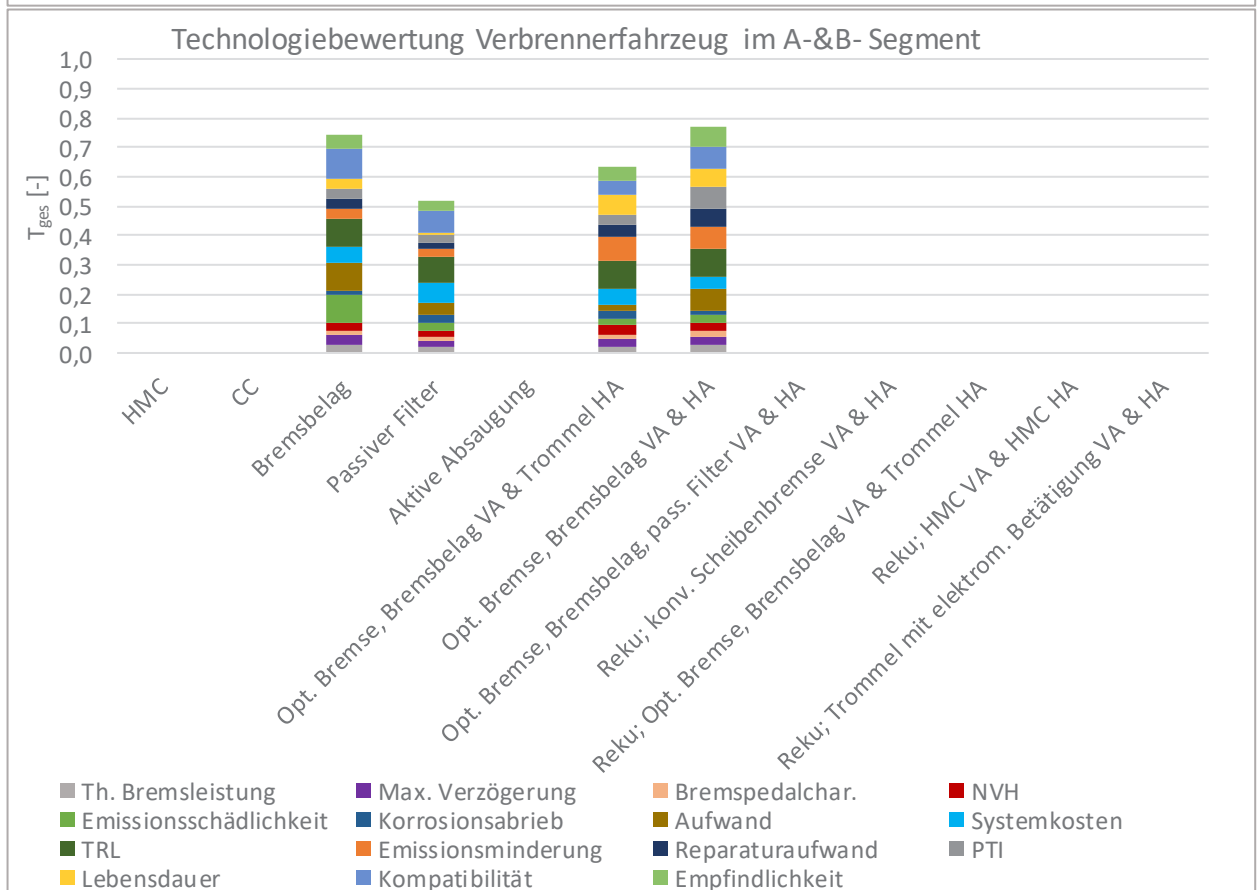
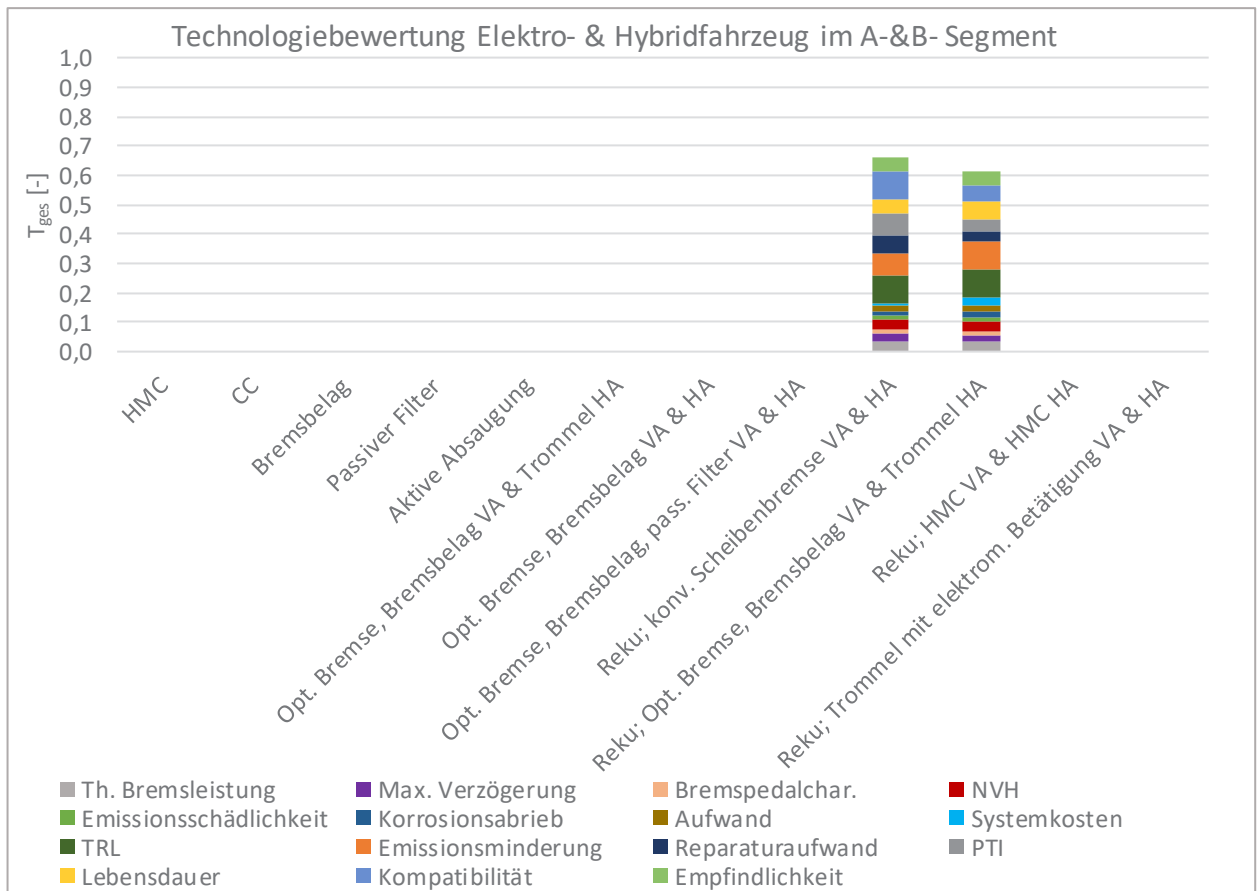


Bild 3: Gewichtete Technologiebewertung im A- und B- Segment für verschiedene Triebstränge

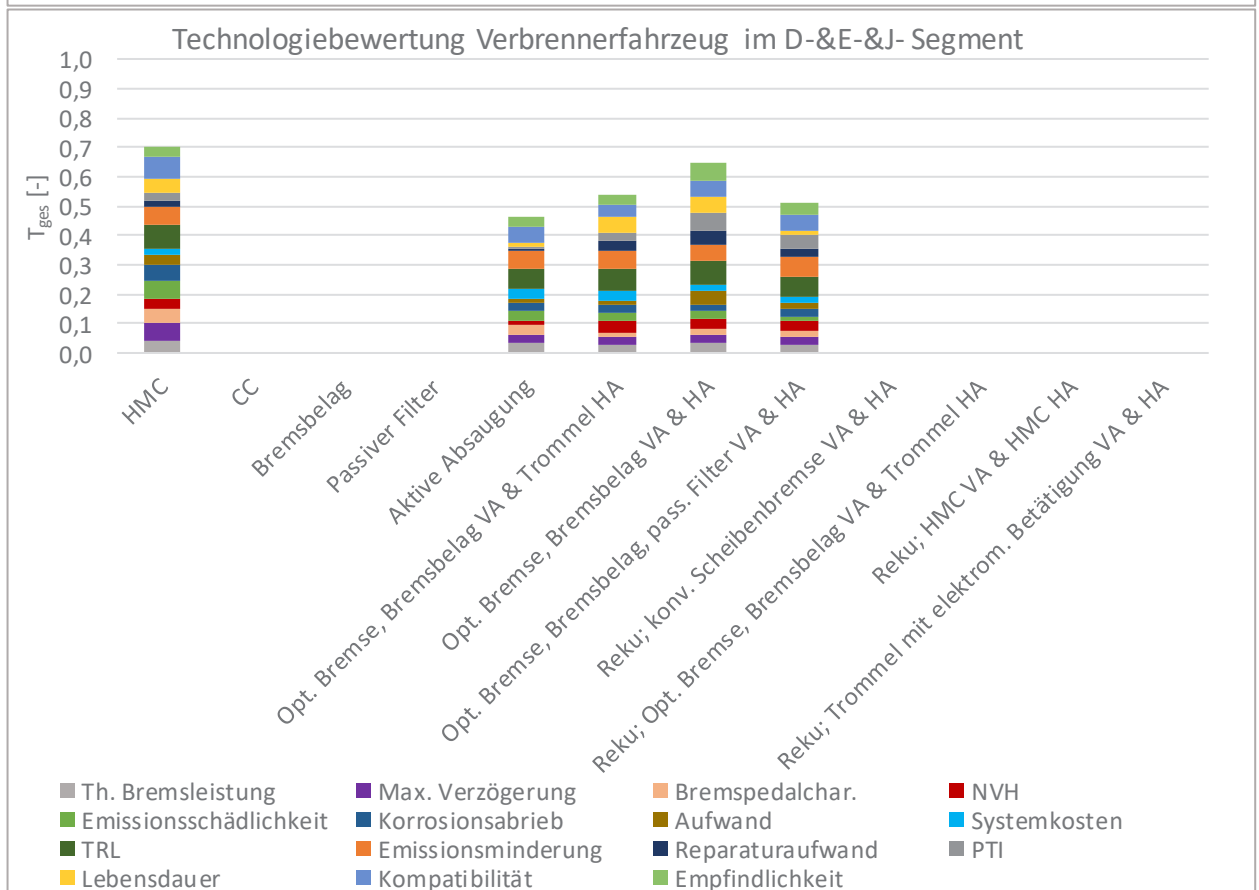
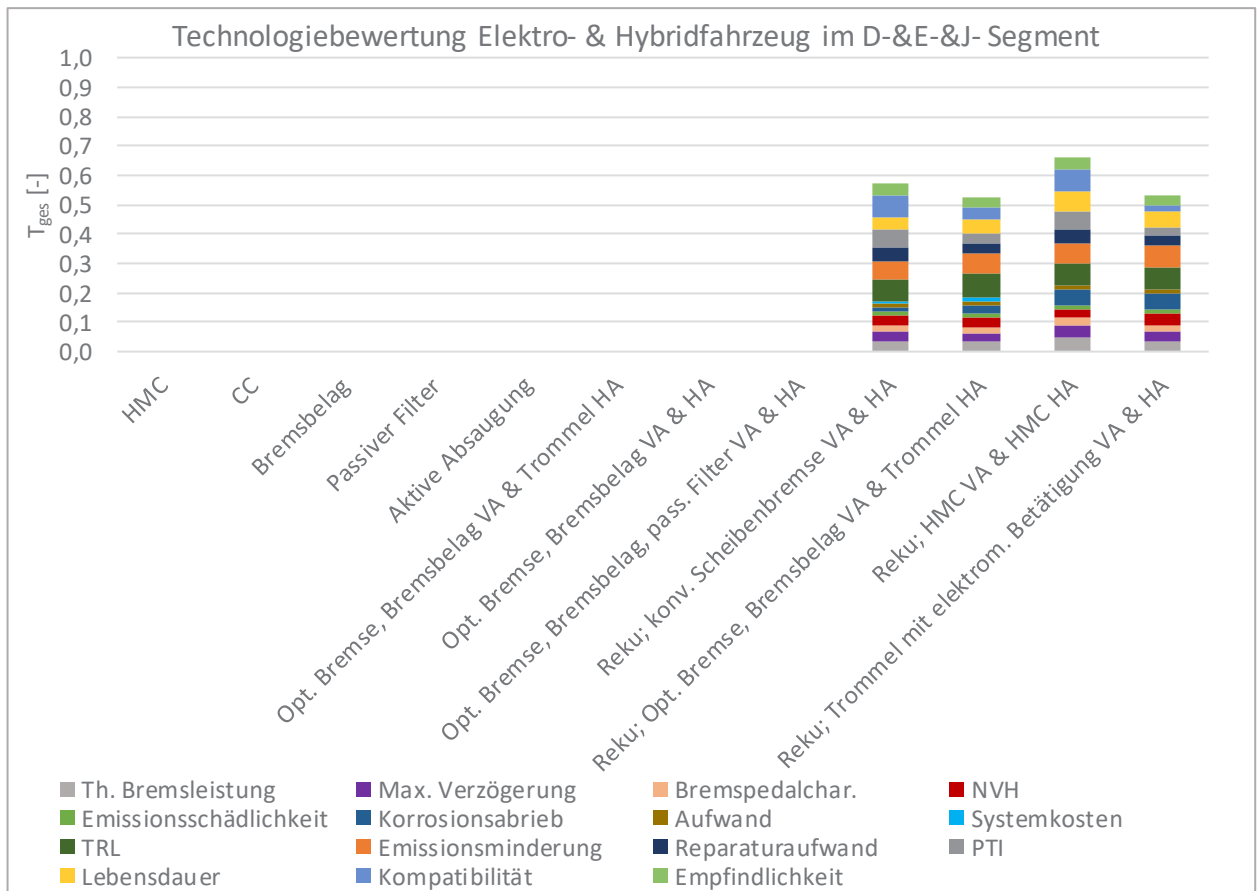


Bild 4: Gewichtete Technologiebewertung im D-, E- und J- Segment für verschiedene Triebstränge

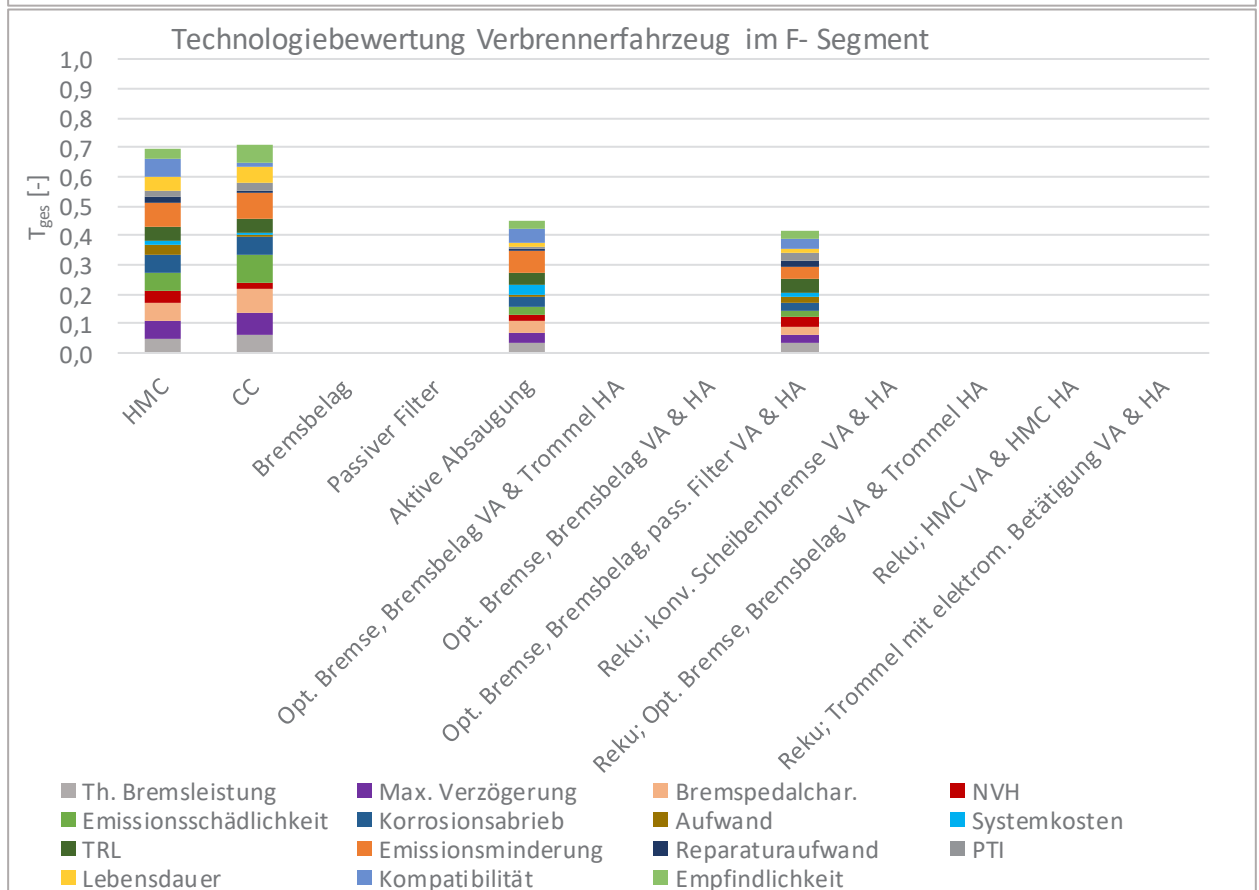
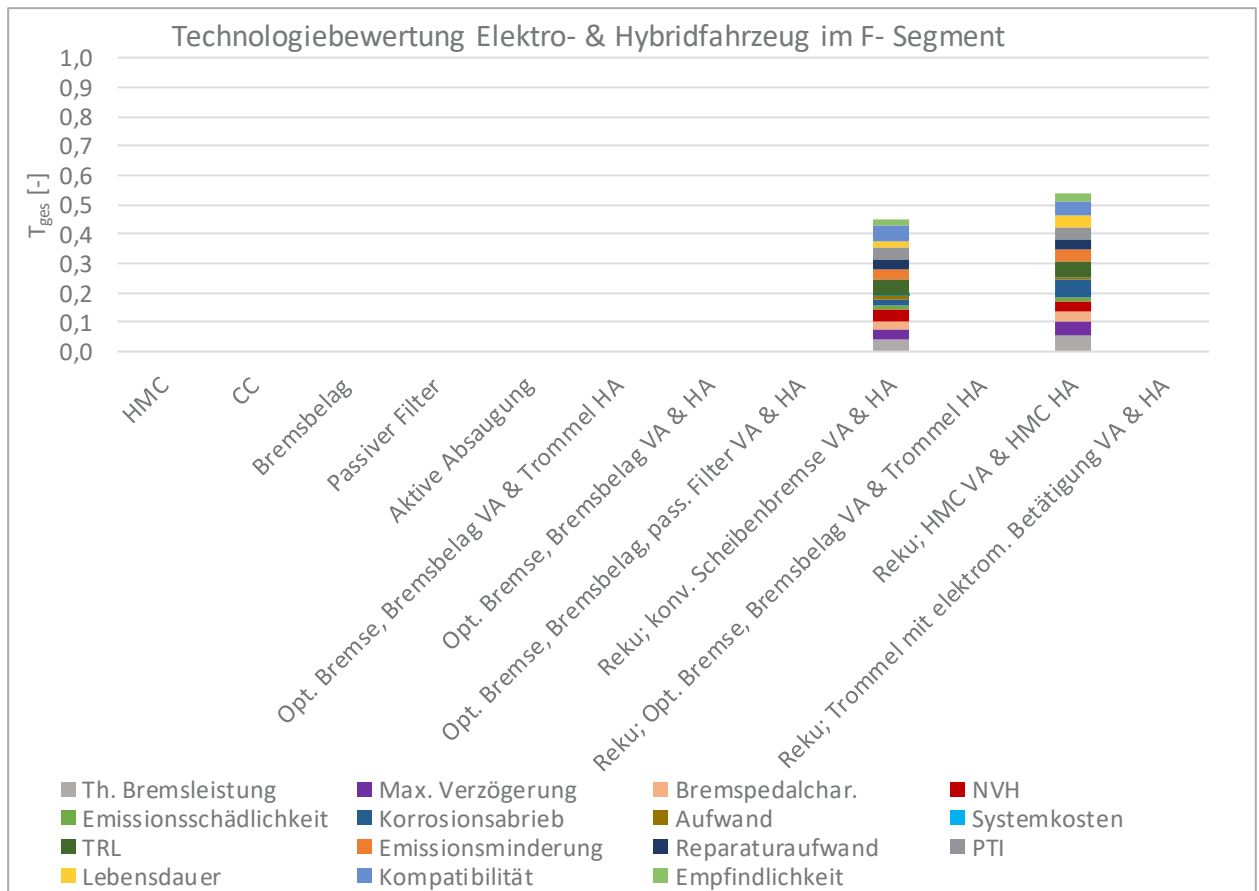


Bild 5: Gewichtete Technologiebewertung im F- Segment für verschiedene Triebstränge

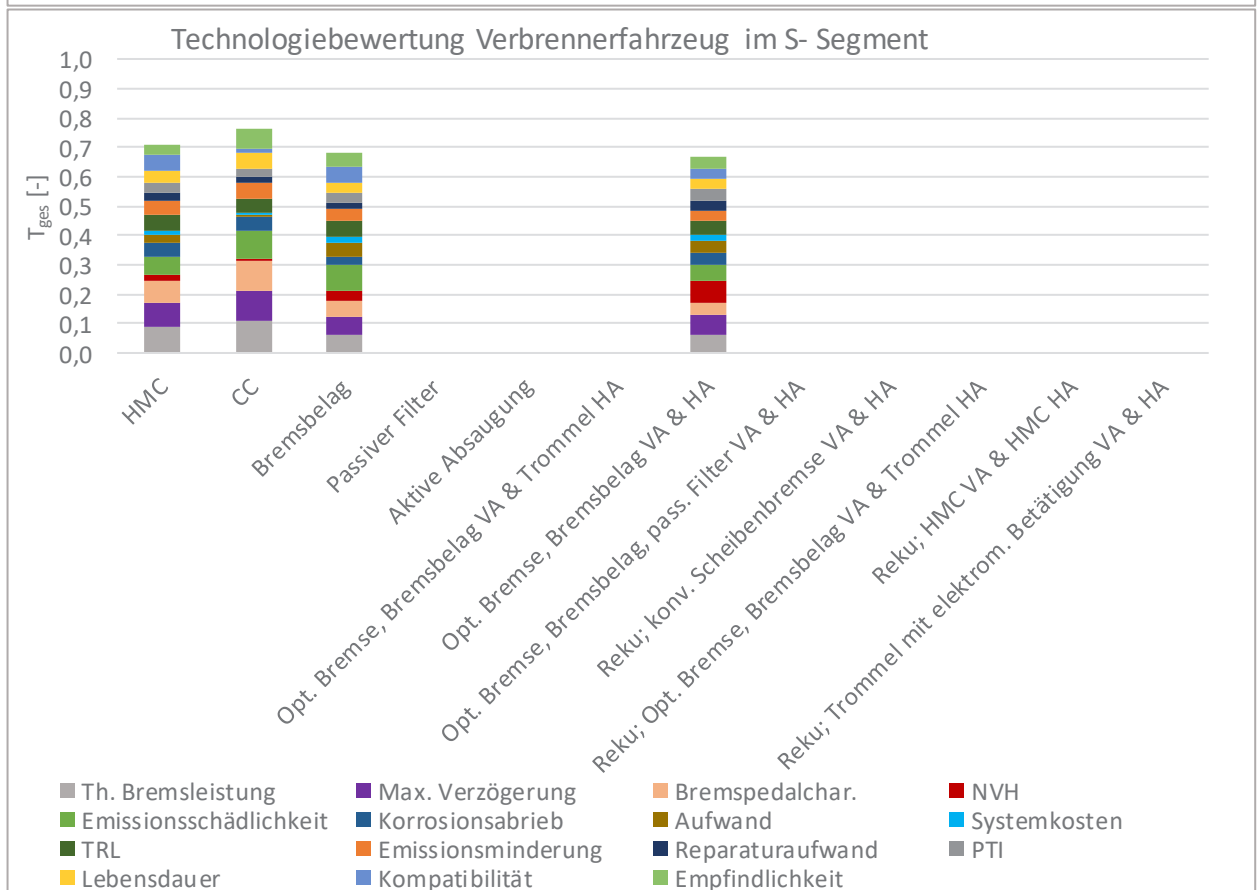
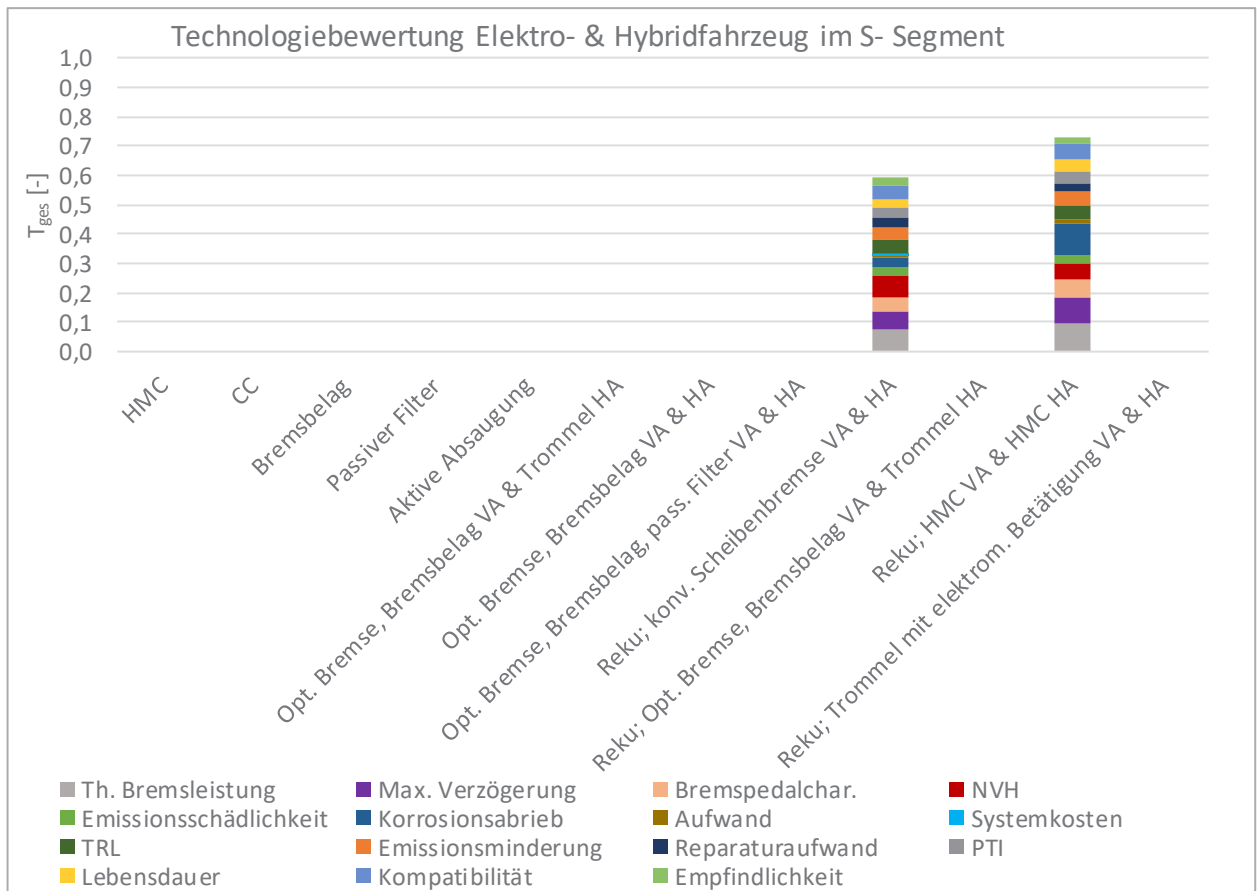


Bild 6: Gewichtete Technologiebewertung im S- Segment für verschiedene Triebstränge

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

2023

F 150: Fahrerassistenzsysteme für die Geschwindigkeitsreduzierung bei schlechten Bedingungen

Pohle, Günther, Schütze, Trautmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 151: Integration von öffentlichem und privatem Parkraummanagement

Höpping, Jonas, Becker, Krüger, Freudenstein, Krampe, Godschachner, Inninger, Scholz, Hüttner, Grötsch, Stjepanovic

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 152: On-Board-Diagnose (OBD) – Analyse der OBD in Bezug auf zukünftig verfügbare Emissionsdaten für die Periodische Technische Inspektion (PTI)

Hausberger, Matzer, Lipp, Blassnegger, Hametner, Prosenec

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2024

F 153: Zusammenstellung geeigneter Sicherheitsindikatoren für die Bewertung der Mensch-Maschine-Interaktion von Level 3 Systemen

Yan, Pichen, Schmitz, Sklorz, Baumann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 153b: Compilation of suitable safety indicators for the evaluation of Human-Machine Interaction of level 3 systems

Yan, Pichen, Schmitz, Sklorz, Baumann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 154: Systematisierung geeigneter fahrfremder Tätigkeiten für automatisiertes Fahren von schweren Güterkraftfahrzeugen

Flämig, Beck, Hoffmann, Tjaden, Höger, Brandt, Haase, Wolter, Müller, Damer, Hettich, Schnücker

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 155: Handbuch Rollstuhlbeförderung bei Ausschreibungen

Boenke, Deuster

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 156: Entwicklung eines Konzepts und Lastenheftes für eine Szenariendatenbank zur Bewertung der Sicherheitswirkung hochautomatisierter Fahrfunktionen

Klinge, Krampitz, Ehrich, Siemon, Wiegand, Lassowski, Stavesand, Simon

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 157: Statistischer und methodischer Ansatz zur Erhebung vertiefter Verkehrsunfalldaten

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 158: Wissenschaftliche Begleitung der Teilnahme von Elektrokleinstfahrzeugen am Straßenverkehr

Unger, Grosche, Rößler, Uhlenhof, Bierbach, Huster, Panwinkler, Straßgütli, Suing, Zelazny

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 159: Pilotprojekt zu Emissionsmessungen mittels Remote Sensing Devices

Hager, Kathmann, Brandt, Roggendorf, Scharrenbroich, Borken-Kleefeld

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2025

F 160: Verbesserte Unfallrekonstruktion durch zusätzliche Anknüpfungstatsachen und KI

Breitlauch, Erbsmehl, Schramm, Urban, Hauck, Sinen, Espig, Walter, Jänsch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 161: Datenverknüpfung zur Erfassung von Fahrzeugausstattungen in GIDAS

Rößler, Uhlenhof
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 162: Motorrad Kurven-ABS MOKABS

Erlinger, Kraut, Tomasch, Ausserer, Rieß, Kaufmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 163a: Anhänger mit elektrisch angetriebener Unterstützungssachse

Seiniger, Bierbach, Bartels, Gail
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 163b: Trailers with an electrically powered support axle

Seiniger, Bierbach, Bartels, Gail
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 164: Methodenstudie zur Konzeption der Fahrleistungserhebung 2026

Bäumer, Pfeiffer, Kathmann, Müller, Wyrich, Eisenmann, Nobis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 165: Prognose des Kraftschlusspotenzials bei schweren Güterkraftfahrzeugen (> 12 t zGG.)

Büteröwe, Müller
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 166a: Forschungsbedarf Teleoperation

Arbeitsgruppe „Forschungsbedarf Teleoperation“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 167: Psychologisch-technische Anforderungen an einen Teleoperatorarbeitsplatz

Gary, Maag, Merkel, Neukum
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 168: Erhebung des Informationsverhaltens der Verkehrsteilnehmer

Bäumer, Pfeiffer, Kathmann, Müller, Lammer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 169: Werbung an Fahrzeugen

Zwicker, Schulze, Petzoldt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 170: Recherche zu Bremsstaubemissionen im Rahmen von EURO 7 – Technologiebewertung verschiedener Bremssysteme zur Erfüllung der Euro 7 Bremspartikelgrenzwerte

Crampen, Vossen, Seibel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG


Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9307
ISBN 978-3-95606-882-9
<https://doi.org/10.60850/bericht-f170>

www.bast.de