



Berichte  
des Deutschen Zentrums  
für  
Schienenverkehrsforschung

Bericht 1 (2020)

# Untersuchung der Bedingungen für einen flächendeckenden Einsatz von Wirbelstrombremsen



Berichte des Deutschen Zentrums  
für Schienenverkehrsforschung, Nr. 1 (2019)  
Projektnummer 2018-I-2-1217

# Untersuchung der Bedingungen für einen flächendeckenden Einsatz von Wirbelstrom- bremsen

von

Dr. Stefan Dörsch / Silvia Eickstädt  
Bremstechnik, Tür- und Einstiegssysteme / DB Systemtechnik GmbH, Minden

Dr. Wilhelm Baldauf  
EMV, LST, ETCS und Übertragungstechnik / DB Systemtechnik GmbH, München

Im Auftrag des Eisenbahn-Bundesamtes

# Impressum

## HERAUSGEBER

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

August-Bebel-Straße 10  
01219 Dresden

[www.dzsf.bund.de](http://www.dzsf.bund.de)

## DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

DB Systemtechnik GmbH  
Pionierstraße 10  
32423 Minden (Westfalen)

## ABSCHLUSS DER STUDIE

September 2019

## REDAKTION

DZSF  
Philipp Streek

## BILDNACHWEIS

DB Systemtechnik GmbH/alle

## PUBLIKATION ALS PDF

<https://www.dzsf.bund.de/Forschungsergebnisse/Forschungsberichte>

ISSN 2629-7973

[doi: 10.48755/dzsf.210017.01](https://doi.org/10.48755/dzsf.210017.01)

Dresden, Januar 2020

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzbeschreibung / Abstract.....</b>	<b>7</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>10</b>
<b>2 Arbeitspaket 1: Erfassung und Bewertung der Chancen und Risiken durch eine Ausweitung des Einsatzes der linearen Wirbelstrombremse.....</b>	<b>11</b>
2.1 Aktuelle Situation .....	11
2.2 Maßnahmen vor Inbetriebnahme des ICE 3 – Komponenten der Leit- und Sicherungstechnik .....	12
2.3 Maßnahmen bezogen auf die Streckeninfrastruktur .....	14
2.3.1 Schienenerwärmung .....	14
2.3.2 Magnetische Anzugskräfte .....	18
2.4 Maßnahmen am Fahrzeug.....	19
2.5 Vorgaben in einschlägigen Normen und Regelwerken .....	20
2.5.1 Zusammenstellung der Vorgaben .....	20
2.5.2 Zusammenfassung und Bewertung.....	24
2.6 Nutzen und Vorbehalte.....	24
2.6.1 Schienentemperaturerhöhung durch LWB .....	25
2.6.2 Wechselwirkung zwischen LWB und Komponenten der LST .....	25
2.6.3 Zulassung einer linearen Wirbelstrombremse.....	26
2.6.4 Zuverlässigkeit der LWB .....	26
2.6.5 Wirtschaftlichkeit der LWB.....	26
<b>3 Arbeitspaket 2: Analyse der veränderten Einflüsse auf die Schieneninfrastruktur .....</b>	<b>28</b>
3.1 Einfluss der LWB auf die Streckeninfrastruktur .....	28
3.2 Wärmeeintrag in die Schiene und damit verbundene Bauteile .....	28
3.3 Verträgliche Schienentemperaturen und Definition eines Temperaturprofils.....	31
3.4 Lufttemperaturen in Deutschland .....	35
3.5 Alternative Freigabeverfahren .....	37
3.5.1 Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen auf Strecken mit Fester Fahrbahn.....	37
3.5.2 Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen auf Strecken mit Schotteroberbau.....	37
3.5.3 Überlegungen zur Sicherheit .....	41
3.5.4 Sonstige Maßnahmen.....	42
3.5.5 Überlegungen zu einer leistungsreduzierten Wirbelstrombremse .....	42

---

<b>4</b>	<b>Arbeitspaket 3: Untersuchung der Elektromagnetischen Verträglichkeit der LST</b> .....	<b>43</b>
4.1	Bestimmung der relevanten Beeinflussungsmechanismen sowie der betroffenen Komponenten der LST .....	43
4.1.1	Design- und Betriebsparameter der LWB.....	43
4.1.2	Relevante Beeinflussungsmechanismen.....	48
4.1.3	Beeinflussung von Komponenten der Signal- und Leittechnik.....	53
4.1.4	Anzugskraft der aktiven LWB auf metallische Teile / Abdeckungen.....	58
4.1.5	Einfluss der Schienentemperatur auf Komponenten der LST .....	58
4.2	Ableitung von Vorgaben für die Wirbelstrombremse sowie signaltechnische Komponenten im Gleisbereich.....	60
4.2.1	Vorgaben für die LWB .....	61
4.2.2	Vorgaben für signaltechnische Komponenten im Gleisbereich (Zählpunkte/Radsensoren)	63
4.2.3	Übertragbarkeit einzelner Ergebnisse auf die Magnetschienenbremsen .....	64
<b>5</b>	<b>Arbeitspaket 4: Abschließende Bewertung sowie Sammlung eventuell notwendiger Maßnahmen zur Ermöglichung der Nutzung der LWB als Standardssystem</b> .....	<b>66</b>
5.1	Fazit aus den Arbeitspaketen 1-3 .....	66
5.2	Weitere Maßnahmen und Lösungsansätze .....	67
5.2.1	Vorschläge für Normen und Regelwerke.....	67
5.2.2	Weitere Maßnahmen und Untersuchungen.....	69
5.2.3	Empfohlene Vorgehensweisen.....	69
5.3	Resümee.....	70
<b>6</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>74</b>

---

# Kurzbeschreibung / Abstract

Im Auftrag des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung (DZSF) beim Eisenbahn-Bundesamt wird im Forschungsprojekt „Untersuchung der Bedingungen für einen flächendeckenden Einsatz von Wirbelstrombremsen“ ermittelt, welche Handlungsfelder bearbeitet werden müssen, um eine Erweiterung des Einsatzes von Wirbelstrombremsen im Schienenverkehr zu erreichen.

Ziel dieser Untersuchungen ist, die allgemeingültigen Auswirkungen der Verwendung einer linearen Wirbelstrombremse auf die Ausrüstung der Leit- und Sicherungstechnik, sowie die Infrastruktur zu beschreiben. Auf Basis dieser Untersuchungen kann danach zwischen denjenigen Wechselwirkungen, die aufgrund ihrer Relevanz grundsätzliche Maßnahmen erforderlich machen, und denjenigen Wechselwirkungen, die nach einer eingehenden Untersuchung als vernachlässigbar eingestuft werden können, unterschieden werden.

Durch generelle Maßnahmen und geeignete Vorgaben für Infrastruktur und zukünftige LWB sollen die Voraussetzungen für eine umfassendere Nutzung der LWB geschaffen werden. Aufwändige Tests und Nachweise bei neuen Fahrzeug- oder Streckeninbetriebnahmen könnten damit der Vergangenheit angehören.

Im ersten Arbeitspaket werden dazu die Erfahrungen mit der linearen Wirbelstrombremse des ICE 3 zusammengetragen. Beginnend mit den Maßnahmen vor Betriebsaufnahme über die ersten Betriebserfahrungen bis zur aktuellen Situation werden die behandelten Themen und relevanten Erkenntnisse aufgelistet. Eine Analyse der Vorgaben in den einschlägigen Regelwerken und Normen vervollständigt die Betrachtung. Schließlich werden die Handlungsfelder konkret benannt, die für die Erreichung des oben genannten Ziels bearbeitet werden müssen.

Im zweiten Arbeitspaket werden der durch die lineare Wirbelstrombremse verursachte Wärmeeintrag in die Schiene und damit verbundene Bauteile angegeben. Unterschiedliche Betriebssituationen werden dazu betrachtet. In Abhängigkeit vom jeweiligen Oberbau wird untersucht, welche Schienentemperatur als Grenzwert vorgegeben werden muss und welchen Einfluss dies auf die gewünschte Nutzung der linearen Wirbelstrombremse für Betriebsbremsungen hat. Auf dieser Basis wird dann untersucht, welche Freigabebedingungen geeignet sind, einen temperaturabhängigen Einsatz der linearen Wirbelstrombremse für Betriebsbremse zu ermöglichen.

Im dritten Arbeitspaket werden - nach einer kurzen Darstellung beeinflussungsrelevanter Design und Betriebsparameter der LWB - die Beeinflussungsmechanismen mit Bezug auf die aktuelle Auslegung von Wirbelstrombremsen beschrieben und deren Einflüsse auf die Elemente der Leit- und Sicherungstechnik - unter Berücksichtigung der technischen Merkmale und Betriebsweise der LWB - aufgezeigt und bewertet. Basierend auf den dargestellten Erkenntnissen werden Vorgaben für die zukünftige Auslegung von Wirbelstrombremsen sowie signaltechnischen Komponenten im Gleisbereich abgeleitet.

Abschließend erfolgt eine Bewertung aller Ergebnisse und es werden Handlungsempfehlungen zu eventuell notwendigen Maßnahmen zur Ermöglichung der Nutzung der LWB als Standardsystem gegeben.

Es werden in diesem Zusammenhang ggf. weitere Untersuchungen empfohlen oder alternative Vorgehensweisen vorgeschlagen und relevante Grenzwerte benannt.

---

On behalf of the Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) at the Federal Railway Authority, the research project "Investigation of the conditions for a widespread use of eddy current brakes" determines which fields of action must be worked on to achieve an expansion of the use of eddy current brakes in rail traffic.

The aim of these investigations is to describe the general effects of the use of a linear eddy current brake on the equipment of the control and safety technology as well as on the infrastructure. Based on these investigations, a distinction can then be made between those interactions which, due to their relevance, require fundamental measures and those which can be classified as negligible after an in-depth investigation.

General measures and suitable specifications for infrastructure and future linear eddy current brakes should create the prerequisites for a more comprehensive use of the linear eddy current brake. Complex tests and proofs for new vehicle or line commissioning could thus be a thing of the past. In the first work package the experiences with the linear eddy current brake of the ICE 3 are compiled. Starting with the measures before the start of operation, the first operating experiences up to the current situation, the topics dealt with and relevant findings are listed. An analysis of the requirements in the relevant regulations and standards completes the analysis.

Finally, the fields of action that have to be worked on in order to achieve the above-mentioned objective are specifically identified.

In the second work package, the heat input into the rail and associated components caused by the linear eddy current brake is specified. Different operating situations are considered. Depending on the respective superstructure, it is investigated which rail temperature has to be specified as the limit value and what influence this has on the desired use of the linear eddy current brake for service braking.

In the third work package - after a short description of the influence-relevant design and operating parameters of the eddy current brake - the influencing mechanisms with reference to the current design of eddy current brakes are described. Their influences on the elements of the control and signaling technology - under consideration of the technical characteristics and mode of operation of the LWB - are pointed out and evaluated. Based on the findings presented, specifications are derived for the future design of eddy current brakes and signaling components in the track area.

Finally, an evaluation of all results is carried out and recommendations for action are given for any measures that may be necessary to enable the use of the LWB as a standard system. In this context, further investigations are recommended or alternative procedures are proposed and relevant limit values are specified.



---

# Abkürzungen

AA	Arbeitsanweisung
Az	Achszähler
BB	Betriebsbremsung
BÜ	Bahnübergang
DMK	Doppelmagnetschienenkontakt
DT	Doppeltraktion
ET	Einfachtraktion
ETCS	European Train Control System
FF	Feste Fahrbahn
GPE	Geschwindigkeitsprüfeinrichtung
GNT	Geschwindigkeitsprüfeinrichtung NeiTech-Züge
GÜ	Geschwindigkeitsüberwachungseinrichtung
HOA	Heißläuferortungsanlage
ICE	Intercity Express
Indusi	Induktive Zugsicherung
LGV	Ligne à grande vitesse (Hochgeschwindigkeitsstrecke)
LST	Leit- und Sicherungstechnik
LZB	Linienförmige Zugbeeinflussung
LWB	lineare Wirbelstrombremse
MK	Magnetschienenkontakt
NBS	Neubaustrecke
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung
Ril	Richtlinie
SB	Schnellbremsung
SFS	Schnellfahrstrecke
Sk	Schienenkontakt
SO	Schienenoberkante
Tf	Triebfahrzeugführer
Tz	Triebfahrzeug
VB	Vollbremsung
WB	Wirbelstrombremse (wird in verschiedenen Dokumenten anstatt LWB verwendet)
Zp	Zählpunkt

# 1 Einleitung

Die lineare Wirbelstrombremse (LWB) wird derzeit nur im ICE 3 (Baureihen 403, 406 und 407) als verschleißfreies, angerechnetes Bremssystem bei Schnellbremsungen eingesetzt.

Grundsätzlich muss vor Freigabe einer Strecke für den Betrieb der Wirbelstrombremse für Schnellbremsungen die elektromagnetische Verträglichkeit zwischen Wirbelstrombremse und streckenseitigen Komponenten der Leit- und Sicherungstechnik (LST) nachgewiesen werden.

Bei Verwendung der linearen Wirbelstrombremse für Betriebsbremsungen ist darüber hinaus der Energieeintrag in die Schiene und die daraus resultierende Erwärmung der Schiene zu untersuchen. Eine Betrachtung der Erwärmung bei Schnellbremsungen ist aufgrund der Zufälligkeit von Schnellbremsungen nicht erforderlich, da kein Kumulationseffekt auftritt.

Die Verwendung der Wirbelstrombremse des ICE 3 für Betriebsbremsungen ist derzeit in Deutschland nur auf ausgewählten Strecken zulässig. Freigaben liegen lediglich für die Schnellfahrstrecken Köln-Rhein/Main, Nürnberg-Ingolstadt und VDE8.1 und 8.2 vor. Für diese Strecken erfolgten jeweils streckenbezogene Untersuchungen, um mögliche Störungen und Schäden durch von der Wirbelstrombremse verursachte Schienentemperaturerhöhungen auszuschließen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sollen u. a. die derzeit vorherrschenden Argumente gegen einen flächendeckenden Einsatz der LWB untersucht werden.

Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Auswirkungen der Verwendung einer LWB auf die Ausrüstung der Leit- und Sicherungstechnik sowie die Infrastruktur zu beschreiben. Auf Basis dieser Untersuchungen kann danach zwischen denjenigen Wechselwirkungen, die aufgrund ihrer Relevanz grundsätzliche Maßnahmen erforderlich machen, und denjenigen Wechselwirkungen, die nach einer eingehenden Untersuchung als vernachlässigbar eingestuft werden können, unterschieden werden.

Durch geeignete Vorgaben für Infrastruktur und zukünftige LWB sollen die Voraussetzungen für eine umfassendere Nutzung der LWB geschaffen werden. Aufwändige und umfängliche Tests oder Nachweise bei neuen Fahrzeug- oder Streckeninbetriebnahmen sollten damit der Vergangenheit angehören und die Akzeptanz für einen verbreiteten Einsatz der LWB erhöht werden.

## 2 Arbeitspaket 1: Erfassung und Bewertung der Chancen und Risiken durch eine Ausweitung des Einsatzes der linearen Wirbelstrombremse

### 2.1 Aktuelle Situation

Aufgrund der Einschätzung, dass das Magnetfeld und die Bremsenergie der linearen Wirbelstrombremse manche Elemente der Infrastruktur und LST beeinflussen oder sogar schädigen, müssen zurzeit umfassende Untersuchungen vor dem Einsatz der LWB erfolgen.

Die notwendigen Untersuchungen lassen sich wie folgt unterteilen:

- Nachweise über die Integration der LWB im Fahrzeug
- Nachweise über die Verträglichkeit der LWB mit der Streckeninfrastruktur in Bezug auf die elektromagnetische Verträglichkeit
- Nachweise über die Verträglichkeit der LWB mit der Streckeninfrastruktur in Bezug auf die eingebrachte Wärmeenergie und Bremskraft

Da die Vorgaben aus Normen und Gesetzen nur sehr allgemein gehalten sind, müssen individuell an das jeweilige Projekt angepasste Vorgehensweisen abgestimmt werden.

In der zweiten Hälfte der 1990er Jahre erfolgte der Bau und die Zulassung des ICE 3 mit den Baureihen 403 und 406. Dieser Triebzug ist der erste Serienzug, der mit einer linearen Wirbelstrombremse ausgestattet wurde.

Die folgende Zusammenstellung aller Aktivitäten im Zusammenhang mit der Zulassung dieser LWB ermöglicht einen guten Überblick über die betroffenen Handlungsfelder und Komponenten.

Weiterhin wird dargestellt, welche Maßnahmen und Untersuchungen seit Betriebsaufnahme des ICE 3 vor Freigabe neu gebauter Strecken bezüglich der LWB unternommen wurden.

Es ist zu beachten, dass in diesem Kapitel die Vergangenheit beschrieben wird. Bei zukünftigen Projekten können und sollen die hier dargestellten Punkte und Erfahrungen bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden.

Schließlich werden die aktuell gültigen Vorgaben bezüglich der LWB in einschlägigen Normen und Regelwerken vorgestellt.

## 2.2 Maßnahmen vor Inbetriebnahme des ICE 3 – Komponenten der Leit- und Sicherungstechnik

Durch die LWB können Komponenten der Leit- und Sicherungstechnik, z.B. Achszähler, Einschaltkontakte für Bahnübergänge oder ähnliches, in ihrer Funktion beeinträchtigt oder sogar zerstört werden. EMV-bedingte Störungen müssen auf allen Strecken, auf denen eine LWB eingesetzt werden soll, ausgeschlossen werden.

Vor Inbetriebnahme des ICE 3 wurden alle Komponenten der Leit- und Sicherungstechnik, die auf den ICE 3-Regelstrecken und allen für den ICE 3 vorgesehenen Umleitungsstrecken vorhanden waren, auf ihre WB-Tauglichkeit überprüft [1], [2], [4]. In der Folge mussten umfangreiche Umrüstungen auf WB-feste Komponenten vorgenommen werden [3]. Insgesamt wurden auf den Bestandstrecken 70 Umbauprojekte durchgeführt, um diese Strecken für den ICE 3 zu ertüchtigen. Neue Strecken, die von Fahrzeugen mit LWB genutzt werden sollen, werden – sofern erforderlich – mit WB-fester Technik ausgerüstet. Da die modernen Komponenten der Leit- und Sicherungstechnik grundsätzlich WB-fest sind, beschränken sich Umrüstungsmaßnahmen auf die ggf. dort noch vorhandenen beeinflussungsrelevanten nicht WB-festen Alttechniken.

Im Folgenden werden die verschiedenen betroffenen Komponentengruppen aufgeführt (die Tabelle 1 ist als Auszug bzw. zusammenfassende Darstellung zu verstehen; nicht aufgeführte Komponenten bedingten auch keine Maßnahmen):

### Komponenten der Leit- und Sicherungstechnik

	Fehlerbild/Ursache	Maßnahme(n)
<b>Magnetkontakte (MK, DMK)</b>	(Zer-)Störung durch LWB	Ersatz durch WB-feste Komponenten
<b>Achszähler (Az)</b>	Der Achszähler ermittelt nicht die korrekte Achszahl des Zuges, dadurch entsteht eine sogenannte „Rotausleuchtung“. In der Folge muss geprüft werden, ob der betroffene Gleisabschnitt wieder freigegeben werden darf. Durch diese Betriebsstörung entstehen Verspätungen.	Ersatz durch WB-feste Komponenten  Vorgabe an Auslegung der LWB: Resonanzfrequenz der WB darf nicht im Arbeitsfrequenzbereich der Az liegen
<b>Radsensoren, Gleisschaltmittel</b>	(Zer-)Störung durch LWB	Ersatz durch WB-feste Komponenten
<b>Geschwindigkeits-Prüfeinrichtungen (GÜ)</b>	Störung durch LWB	Modifikation
<b>Heißläuferortungsanlage (HOA)</b>	Durch die LWB können Fehldetektionen der Heißläuferortungsanlage entstehen	Ersatz durch WB-feste Komponenten

Tabelle 1: Maßnahmen bei Komponenten der Leit- und Sicherungstechnik in Zusammenhang mit der LWB (Zusammenfassung)

Über diese streckenseitigen Maßnahmen hinaus wurden auch Veränderungen am Fahrzeug vorgenommen, die einerseits eine Reduzierung der EMV-bedingten Störungen, andererseits aber auch eine Optimierung zwischen Bremsleistung und EMV zum Inhalt hatten (*Anmerkung: Basierend auf den vorhandenen Erkenntnissen können bei Fahrzeugneubau EMV-relevante Faktoren bereits beim Design berücksichtigt werden*). Die fahrzeugseitigen Maßnahmen, siehe [1], sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

### Fahrzeugseitige Maßnahmen

	Fehlerbild/Ursache	Maßnahme(n)
<b>Energieversorgung der LWB</b>	Energieversorgung aus dem Traktionskreis führt zu vermehrten EMV-Beeinflussungen.	Die Versorgungsquelle ist so zu wählen, dass hierüber keine relevante EMV-Beeinflussung hergerufen wird. Energieversorgung der WB erfolgt direkt aus dem Gleichspannungszwischenkreis der Traktion
<b>Polspulenzahl</b>	Anzahl der Polspulen beeinflusst EMV	Ein Kompromiss für die Polspulenzahl (Einzelpole) zwischen Bremsleistung und EMV-Beeinflussung muss gefunden werden: Erhöhung der Polspulenzahl auf acht zur Erhöhung der Bremsleistung
<b>Laminierung der Polspulen</b>	Fahrzeuge mit 5-fach laminierten WB-Polspulen verursachen Störungen bei Az	Ausschließliche Verwendung 3-fach laminiertes WB-Polspulen
<b>Zusatzbeschaltung Vorschalt-drossel</b>	Die Anschlussimpedanz der LWB beeinflusst den Az ZP 43. Eine Erhöhung der Anschlussimpedanz verringert die Beeinflussung.	Die Vorschalt-drossel der LWB wird mit Beschaltungskondensatoren versehen. Diese Maßnahme erhöht die Anschlussimpedanz und reduziert gleichzeitig die Beeinflussung des ZP43 (siehe hierzu auch Kapitel 4.1.1.3)

Tabelle 2: Maßnahmen am Fahrzeug mit Einfluss auf die EMV

## 2.3 Maßnahmen bezogen auf die Streckeninfrastruktur

Bezüglich der Infrastruktur (ohne die Komponenten der LST, die im vorausgehenden Abschnitt dargestellt sind) gibt es zwei wesentliche Einflüsse der LWB.

Zum einen verursacht die LWB eine **Erwärmung der Schienen** und zum anderen wirken **magnetische Anzugskräfte** auf alle ferromagnetischen Teile der Infrastruktur.

### 2.3.1 Schienenerwärmung

Die Bewegungsenergie des Fahrzeugs wird bei einer Bremsung mit der LWB in Wärmeenergie umgewandelt. Daraus resultiert eine Erwärmung der Schiene. Eine Erhöhung der Schientemperatur kann zu Problemen in der Gleislagestabilität führen, im Extremfall sogar zu Gleisverdrückungen oder -verwerfungen. Deshalb muss das Maß der Schientemperaturerhöhung durch die LWB bestimmt und dessen Auswirkungen untersucht werden.

Bei der Betrachtung der Schienenerwärmung durch die LWB muss zwischen sporadisch auftretenden Schnellbremsungen (SB) und häufig wiederkehrenden Betriebsbremsungen (BB) in einem bestimmten bzw. vorhersagbaren Streckenabschnitt (z.B. bei Bahnhofseinfahrt) unterschieden werden. Solange die LWB nur für Schnellbremsungen eingesetzt wird, kann auf eine Untersuchung der Schientemperaturerhöhung durch die LWB verzichtet werden. Erst wenn sich bei wiederkehrenden Betriebsbremsungen der Temperatureintrag in die Schiene kumuliert, ist eine Untersuchung der maximal zu erwartenden Schientemperaturerhöhung notwendig. Die zulässige maximale Schientemperatur ist von der Oberbauform abhängig. Strecken, die als Feste Fahrbahn ausgeführt sind, erlauben deutlich höhere Schientemperaturen als Strecken mit Schotteroberbau.

Nach Ermittlung der maximal zu erwartenden Schientemperatur wird dann unter Berücksichtigung der Oberbauverhältnisse entschieden, ob und in welchem Maß der Einsatz der LWB für Betriebsbremsungen zugelassen werden kann.

Das Maß der Schienenerwärmung pro Bremsung mit der LWB wurde in der Vergangenheit verschiedentlich untersucht. Alle Untersuchungen beziehen sich auf das UIC 60-Schienenprofil. Im September 2000 wurde eine Messkampagne durchgeführt [10], um die Angaben des LWB-Herstellers ver- suchstechnisch zu überprüfen. Es wurde ermittelt, dass eine Bremsung mit einer LWB-Bremskraft von 89 kN eine Schientemperaturerhöhung um 2,8 K (gemittelt über den Schienenquerschnitt) verursacht.

Im Rahmen des EU-Projekts ECUC wurde die letzte Ermittlung der Schientemperaturerhöhung durch die LWB vorgenommen [13]. Hier wurde als Temperaturerhöhung pro maximaler Betriebsbremsung (Bremskraft der LWB von 180kN) ein Wert von 5,6 K festgestellt. Die Wärmeverteilung über dem Schienenprofil zeigt Kapitel 4.1.5 auf.

Damit wurden die vormals ermittelten Werte bestätigt.

Für die Freigabe der LWB auf der Strecke Köln / Rhein-Main wurde die erste streckenbezogene Untersuchung der Schientemperaturerhöhung durch die LWB bei Einsatz für Betriebsbremsungen vorgenommen [14], [15]. Diese Untersuchung erfolgte als Worst-Case-Betrachtung.

Das bedeutet, dass für die Bestimmung der maximalen Wirbelstrombremskräfte unterstellt wurde, dass über den gesamten Bremsverlauf das höchste auf der untersuchten Strecke vorliegende Gefälle herrscht.

Für dieses Gefälle wurde die Bremskraft der LWB bei regulären Betriebsbremsungen unter LZB-Führung gemäß Bremsberechnung und Bremsmanagement des ICE 3 ermittelt.

Verschärfend wurde zusätzlich eine einstündige Betriebsstörung im Moment der höchsten, allein durch die Sonneneinstrahlung entstandenen Schienentemperatur von 58 °C unterstellt. Der daraus folgende Aufstau der Züge sollte dann im 3-Minuten-Takt abgefahren werden.

Unter Verwendung der ermittelten Bremskraft der LWB wurde die maximal im Tagesverlauf zu erwartende Schienentemperatur berechnet und die Zugfolge (Anzahl Triebzüge ICE 3 in Doppeltraktion pro Stunde) solange erhöht, wie die durch den Oberbau vorgegebene Grenztemperatur dies ermöglichte.

Darüber hinaus wurde die Strecke außerdem dahingehend analysiert, ob wiederkehrende Betriebsbremsungen im Bereich von Oberbauänderungen (z.B. Wechsel von Fester Fahrbahn auf Schotteroberbau bei Überholgleisen) oder Streckenabschnitten mit geringerer Temperaturfestigkeit (z.B. auf Brückenbauwerken) zu erwarten sind. Danach wurde die Bremskraft der LWB auch an diesen Streckenpunkten bei regulären Betriebsbremsungen unter LZB-Führung gemäß Bremsberechnung und Bremsmanagement des ICE 3 ermittelt. Für diese Fälle wurde nun ebenfalls die maximal im Tagesverlauf zu erwartende Schienentemperatur berechnet und die maximal zulässige Zugfolge in der oben beschriebenen Weise ermittelt.

Die unterstellte Schienentemperaturerhöhung bei einer Vollbremsung mit 180 kN Bremskraft der LWB betrug hierbei 5,6 K. Bei der Berechnung der maximalen Schienentemperatur wurde die Abkühlung der Schiene gemäß [13] zwischen den Bremsungen berücksichtigt.

Die unter diesen Randbedingungen ermittelte Zugfolge (Anzahl Triebzüge ICE 3 in Doppeltraktion pro Stunde) bei der die streckenbezogene, zulässige Schienenhöchsttemperatur noch nicht überschritten wurde, diente als Maß für die Streckenzulassung. Die LWB wurde schließlich erstmals für die Strecke Köln / Rhein-Main für Betriebs- und Schnellbremsungen zugelassen.

Auch in den Untersuchungen für die Neubaustrecken Nürnberg – Ingolstadt und VDE 8.1/2, siehe [16], [17], wurden gleichartige Worst-Case-Betrachtungen vorgenommen. Das jeweilige Vorgehen entsprach dabei dem bei der Untersuchung für Köln / Rhein-Main gewählten.



Abbildung 1: Freigabe der LWB in D (grün = BB+SB; rot = nur SB, blau = keine)

In Abbildung 1 ist das Eisenbahn-Streckennetz in Deutschland dargestellt. Die LWB darf auf „grün“ gezeichneten Strecken für Schnell- und Betriebsbremsungen genutzt werden. Auf allen „rot“ gezeichneten Strecken darf die LWB für Schnellbremsungen genutzt werden. Die Beschränkung auf Schnellbremsungen resultiert hier nur aus Schienentemperaturerwägungen. Die LWB muss auf allen „blau“ gezeichneten Strecken gesperrt werden. Die farbliche Unterscheidung bezieht sich hier auf die zulässige betriebliche Nutzung der LWB. Es wird hier keine Aussage über die „LWB-feste“ Ausrüstung der einzelnen Strecken oder Streckenabschnitte gemacht.

Die Zulassung der LWB für Schnell- und Betriebsbremsungen auf den drei deutschen Neubaustrecken wurde jeweils für eine in der Zulassung genannte maximal zulässige Anzahl von ICE 3 in Doppeltraktion pro Stunde erteilt. Es besteht in Deutschland keine darüber hinausgehende Einschränkung. In Abbildung 1 ist im deutschen Streckennetz durch verschiedene Farben für die einzelnen Strecken gekennzeichnet, ob und welche Art von Freigabe für die lineare Wirbelstrombremse besteht [21].



In Frankreich ist die LWB auf der Strecke LGV Est zwischen Beaudrecourt and Vaires-sur-Marne für Betriebsbremsungen zugelassen.

In Frankreich wurde ein Vorgehen gewählt, das die Freigabe der LWB von der tagesbezogen zu erwartenden Schienentemperatur abhängig macht [20]. Im Zeitraum vom 1. April bis 15. Oktober wird abhängig von der zu erwartenden Schienenhöchsttemperatur entschieden, ob der Einsatz von Wirbelstrombremsen für diesen Tag begrenzt werden muss und ggf. dies entsprechend veranlasst.

#### Vorgehen bezüglich der Schienenerwärmung durch die LWB

	Maßnahme	Freigabe oder Sperre der LWB
<b>Deutschland</b>	Untersuchung der zu erwartenden maximalen Schienentemperatur bezogen auf eine spezifische Strecke	grundsätzlich
<b>Frankreich</b>	Zwischen 1. April und 15. Oktober wird die LWB abhängig von der zu erwartenden Schienentemperatur freigegeben [20]	tagesbezogen und temperaturabhängig

Tabelle 3: Schienenerwärmung durch die LWB

## 2.3.2 Magnetische Anzugskräfte

Je langsamer das Fahrzeug fährt, umso größer werden die vertikalen, magnetischen Anzugskräfte zwischen linearer Wirbelstrombremse und ferromagnetischen Teilen im Schienenbereich. Es ist daher zu prüfen, ob sich dadurch bewegliche bzw. nicht festsitzende ferromagnetische Teile aus ihrer vorgesehenen Position bewegen.

Zu untersuchen ist der Einfluss auf

- Weichenzungen
- Herzstücke
- sonstige ferromagnetische Komponenten in relativer Nähe zur abgesenkten LWB

Im Jahr 1995 wurde dazu eine Versuchskampagne durchgeführt, deren Ergebnisse in [18] zusammengefasst sind. Im Rahmen dieser Versuchskampagne wurden die Bewegungen von Herzstück und Weichenzunge bei Überfahrt eines Zuges mit und ohne aktiver LWB verglichen. Es wurde festgestellt, dass durch die LWB „die Bewegungen geringfügig vergrößert wurden“ (Zitat: Kapitel 6 „Zusammenfassung“ aus [18]). Ein besonderer Handlungsbedarf wurde nicht abgeleitet.

Im Jahr 2004 wurde bei Fahrten mit dem ICE 3 in Frankreich eine Weichenabdeckung durch die Einwirkung der LWB aus ihrer Lage entfernt. Es wurde daraufhin eine Ursachenuntersuchung durchgeführt und als Abhilfemaßnahme eine Verbesserung der Befestigung dieser Weichenabdeckungsbauf orm vorgenommen. Die bisherige Fixierung durch Federn wurde gegen eine Verschraubung ersetzt.

Grundsätzlich ergibt sich aus diesem Vorfall, dass alle ferromagnetischen Teile im Einflussbereich der LWB durch eine sichere Befestigung (in der Regel eine Verschraubung) gegen unerwünschte Bewegungen gesichert werden müssen.

### Magnetische Anzugskräfte

	Fehlerbild/Ursache	Maßnahme(n)
<b>Magnetische Anziehung beweglicher Teile in Weichen (Weichenzunge und Herzstück)</b>	Klärung, ob durch die magnetische Anziehungskraft unzulässig große Bewegungen entstehen	Fahrversuche mit Bewegungsmessung
<b>Magnetische Anziehung bei Weichenabdeckung in Frankreich</b>	Weichenabdeckung wurde aus ihrer Lage entfernt	Verbesserung der Befestigung

Tabelle 4: Maßnahmen bezüglich magnetischer Anzugskräfte

## 2.4 Maßnahmen am Fahrzeug

Die LWB des ICE 3 wurde zunächst nur für Schnellbremsungen zugelassen und eingesetzt. Mit dem Fahrplanwechsel am 15.12.2002 und der vollständigen Betriebsaufnahme der Neubaustrecke Köln / Rhein-Main wurde die LWB auch für Betriebsbremsungen freigegeben.

Bereits kurze Zeit später traten vermehrt Störungen und Ausfälle der LWB auf, die auf Erdschlüsse im Ansteuerkreis der LWB zurückzuführen waren.

Um schnelle Abhilfe zu erzielen, wurde eine Arbeitsgruppe, die sogenannte „Taskforce Erdschluss“ gegründet. Im Rahmen dieser Taskforce wurde eine Schadensanalyse durchgeführt. Auf dieser Basis wurden dann die Fehlerursachen eingegrenzt und schließlich Maßnahmen zur Erreichung und Sicherung eines störungsfreien Betriebs definiert und eingeleitet, siehe [5] und [9]. In [5] sind die Ergebnisse dieser Arbeiten zusammengefasst und in diesem Bericht in Tabelle 5 aufgeführt.

### Erdschlüsse

	<b>Fehlerbild/Ursache</b>	<b>Maßnahme(n)</b>
<b>Ansprechschwelle in Erdschlusserkennungssoftware</b>	Erdschluss wird durch Software erkannt und WB wird gesperrt	Verringerung der Ansprechschwelle der Software
<b>Vorschaltdrosselkästen</b>	Mangelhafte, nicht zeichnungsge- rechte Ausführung der Kabelein- führung am Vorschaltdrossel- kasten	Herstellung des zeichnungsge- rechten Zustands Sanierung der Vorschaltdrossel- kästen
<b>Steinschlagschäden an Kabeln</b>	Zu tief hängende Kabel werden durch Steinschlag beschädigt	Verbesserung der Anbindung Maßnahmen zum Steinschlag- schutz
<b>Schäden an Polspulen</b>	Beschädigungen der Polspulen durch fliegende Objekte	Analyse der Beschädigungen, um Verursacher festzustellen; Ergebnis: es handelt sich um me- tallische Kollisionspartner  Instandsetzung der Polspulen der Wirbelstrombremsen ICE 3 am Fahrzeug (AA 5600.9997) [6]  Konservierung der Polspulen der Wirbelstrombremsen ICE 3 (AA 5600.9998) [7]  Schulung des Instandhaltungs- personals

<b>Schäden an Polspulen</b>	Beschädigungen der Polspulen durch Berührung mit der Schienenoberkante	Überprüfung der Arbeitsanweisungen zur Luftspalteinstellung Schulung des Instandhaltungspersonals zur Luftspalteinstellung Untersuchung, ob der Luftspalt im Betrieb nachhaltig beeinflusst wird Ausrüstung der Polspulenunterseite mit Schutzplatten
<b>Erdschlussursache außerhalb LWB-Kreis</b>	Isolationsfehler an Fahrmotor oder Netzfilterdrossel	Rollkur an Fahrmotor und Netzfilterdrossel
<b>Zerstörung von LWB-Spulen durch Doppelerdschluss</b>	Doppelerdschluss an Netzfilterdrossel und Wirbelstrombremse	Änderung der Erdschlusserkennung dahingehend, dass dieser Doppelerdschluss erkannt wird und zum Schutz der Hauptschalter geöffnet wird
<b>Erdschluss unklarer Ursache</b>	Erdschlussmeldung steht in der Diagnose an, ohne dass ein offensichtlicher Schaden vorliegt	Fehlersuche gemäß „Erdschlussermittlung an der Wirbelstrombremse ICE 3“ (AA 5600.9999) [8]

Tabelle 5: Aktivitäten zur Vermeidung von Erdschlüssen und deren Auswirkungen

## 2.5 Vorgaben in einschlägigen Normen und Regelwerken

Die Vorgaben für lineare Wirbelstrombremsen, die in einschlägigen Normen und Regelwerken enthalten sind, werden im Folgenden zusammengestellt.

### 2.5.1 Zusammenstellung der Vorgaben

Die für die Wirbelstrombremse relevanten Punkte der Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 (TSI LocPas) [22] sind im Folgenden zusammengestellt.

In Abschnitt 4.2.3.3.1.2. „Kompatibilität der Fahrzeugmerkmale mit Zugortungsanlagen mit Achszählern“ steht:

„Die Grenzwerte in Bezug auf elektromagnetische Störungen aufgrund der Verwendung von Wirbelstrom- oder Magnetschienenbremsen sind in Abschnitt 3.2.3 der in Anlage J-2 Ziffer 1 genannten Spezifikation festgelegt.“ (Zitat: 4.2.3.3.1.2 aus [22])

In Anlage J-2 der TSI LocPas [22] findet sich unter Ziffer 2 der Verweis, dass bezüglich der Schnittstelle zwischen streckenseitiger ZZS-Ausrüstung und anderen Teilsystemen die Abschnitte 3.1 und 3.2 aus ERA/ERTMS/033281 Rev. 2.0 zu beachten sind.

In ERA/ERTMS/033281 [28] wird in Abschnitt 3.1 „Vehicle design and operation“ unter 3.1.3.5 gefordert, dass die Wirbelstrombremse in ihrer Ruheposition mindestens 40 mm Abstand zur Schienenoberkante aufweisen muss.

In Abschnitt 3.2 „Electromagnetic compatibility“ wird verlangt, dass die Wirbelstrombremse eine Möglichkeit zur Aktivierung und Deaktivierung besitzen muss.

In Abschnitt 4.2.4.8.3. „Wirbelstrombremse“ der TSI LocPas [22] steht Folgendes:

- „(1) Dieser Abschnitt beschreibt Wirbelstrombremsen, die eine Bremskraft zwischen dem Fahrzeug und der Schiene entwickeln.
- (2) Abschnitt 4.2.3.3.1 dieser TSI verweist auf die Anforderungen an Wirbelstrombremsen, die für das Teilsystem „Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung“ festgelegt wurden.
- (3) Die Bedingungen für den Einsatz von Wirbelstrombremsen sind (hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Erwärmung der Gleise und auf vertikale Kräfte) nicht harmonisiert. Daher gelten die Anforderungen, die Wirbelstrombremsen erfüllen müssen, als offener Punkt.
- (4) Bis zur Klärung des offenen Punkts wird davon ausgegangen, dass die Werte der von der Wirbelstrombremse des Zuges in Längsrichtung auf das Gleis ausgeübten maximalen Bremskraft, die in Abschnitt 4.2.4.5 der TSI „Fahrzeuge HS“ von 2008 festgelegt sind und für Geschwindigkeiten  $\geq 50$  km/h gelten, mit Hochgeschwindigkeitsstrecken kompatibel sind.“ (Zitat: 4.2.4.8.3. aus [22])

In der TSI „Fahrzeuge HS“ von 2008 [23] in Abschnitt 4.2.4.5 „Wirbelstrombremsen“ stehen folgende Anforderungen:

„Dieser Abschnitt behandelt die für Wirbelstrombremsen erforderlichen Schnittstellen mit dem Teilsystem „Infrastruktur“.

Wie in der TSI 2006 für das Teilsystem „Infrastruktur“ des Hochgeschwindigkeitsbahnsystems dargestellt, ist die Verwendung dieser Art von vom Kraftschluss Rad/Schiene unabhängigen Bremsen auf den (zu bauenden oder auszubauenden) Strecken des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnnetzes wie folgt zulässig:

- für Schnellbremsungen auf allen Strecken, außer bestimmten Anschlussstrecken, die im Infrastrukturregister aufgeführt sind;
- für Voll- oder Normalbremsungen auf den Streckenabschnitten, auf denen der Infrastrukturbetreiber dies zulässt. In diesem Fall müssen die Nutzungsbedingungen im Infrastrukturregister eingetragen sein.

Züge mit diesem Bremstyp müssen folgende Spezifikationen erfüllen:

- Vom Kraftschluss Rad/Schiene unabhängige Bremsen dürfen von der maximalen Betriebsgeschwindigkeit bis hinunter zu 50 km/h eingesetzt werden: ( $v_{\max} \geq v \geq 50$  km/h).
- Die maximale durchschnittliche Verzögerung muss weniger als  $2,5 \text{ m/s}^2$  betragen (dieser Wert, der in Relation zur Längsfestigkeit des Gleises steht, muss bei gleichzeitigem Einsatz aller Bremsen eingehalten werden).

- Im ungünstigsten Fall, das heißt bei mehreren zusammengekuppelten Triebzuginheiten und maximal zulässiger Zuglänge, muss die von der Wirbelstrombremse des Zuges in Längsrichtung auf das Gleis ausgeübte maximale Bremskraft folgende Werte einhalten:
  - 105 kN bei Bremsungen mit einer Kraft unter 2/3 der vollen Betriebsbremsung;
  - linear zwischen 105 kN und 180 kN bei Bremsungen mit einer Kraft zwischen 2/3 und voller Betriebsbremsung;
  - 180 kN bei voller Betriebsbremsung;
  - 360 kN bei Schnellbremsungen.

Der Beitrag der vom Kraftschluss Rad/Schiene unabhängigen Bremsen darf in die in Abschnitt 4.2.4.1 definierte Bremsleistung eingerechnet werden. Dies setzt voraus, dass der sichere Betrieb dieses Bremstyps nachgewiesen ist und nicht durch einen Einzelfehler beeinflusst wird.“ (Zitat: 4.2.4.5 aus [23])

In der konsolidierten Ausgabe der TSI Loc&Pas aus dem Jahr 2019 [30] beschäftigt sich Abschnitt 4.2.4.8.3 mit der Wirbelstrombremse:

„(1) Dieser Abschnitt beschreibt Wirbelstrombremsen, die eine Bremskraft zwischen der Einheit und der Schiene entwickeln.

(2) In Abschnitt 4.2.3.3.1.2 Nummer 10 dieser TSI wird auf die Anforderungen an Wirbelstrombremsen für die Kompatibilität mit Zugortungs-/Gleisfreimeldeanlagen mit Achszählern, Gleisstromkreisen, Rad-detektoren und Fahrzeugdetektoren mit Kabelschleifen verwiesen.

(3) Wenn bei der Betätigung der Wirbelstrombremse eine Verschiebung von dessen Magneten erforderlich ist, ist die ungehinderte Bewegung dieser Magneten zwischen den Positionen „gelöste Bremse“ und „betätigte Bremse“ durch Berechnung gemäß der in Anlage J-1 Ziffer 14 genannten Spezifikation nachzuweisen.

(4) Der Höchstabstand zwischen der Wirbelstrombremse und der Schiene, der der Position „gelöste Bremse“ entspricht, wird in der in Abschnitt 4.2.12 dieser TSI beschriebenen technischen Dokumentation angegeben.

(5) Unter einem festen Geschwindigkeitsschwellenwert ist die Wirbelstrombremse nicht einsetzbar.

(6) Die Bedingungen für den Einsatz von Wirbelstrombremsen sind im Hinblick auf die technische Kompatibilität mit dem Gleis (insbesondere hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Erwärmung der Schienen und auf vertikale Kräfte) nicht harmonisiert; sie sind ein offener Punkt.

(7) Das Infrastrukturregister enthält für jeden Streckenabschnitt die Information, ob der Einsatz zulässig ist und es werden gegebenenfalls die Bedingungen für den Einsatz angegeben.

- Der in Nummer 4 genannte Höchstabstand zwischen der Wirbelstrombremse und der Schiene, der der Position „gelöste Bremse“ entspricht,
- der feste Geschwindigkeitsschwellenwert gemäß Nummer 5,
- vertikale Kräfte als Funktion der Geschwindigkeit des Zuges im Falle der vollständigen Betätigung der Wirbelstrombremse (Schnellbremsung) und der teilweisen Betätigung der Wirbelstrombremse (Betriebsbremsung),
- Bremskraft als Funktion der Geschwindigkeit des Zuges im Falle der vollständigen Betätigung der Wirbelstrombremse (Schnellbremsung) und der teilweisen Betätigung der Wirbelstrombremse (Betriebsbremsung).

(8) Das in Abschnitt 4.2.4.5.2 und 4.2.4.5.3 dieser TSI spezifizierte Bremsvermögen der Einheit ist mit und ohne Verwendung der Wirbelstrombremsen zu bestimmen.“

Die Richtlinie (EU) 2016/797 [25] über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union und die Richtlinie (EU) 2016/798 [26] über Eisenbahnsicherheit regeln

a) das Inverkehrbringen der Subsysteme des Fahrzeugs auf der Grundlage der EG-Prüferklärung;

b) die technische Kompatibilität der zugseitigen Subsysteme;

c) die sichere Integration der Subsysteme (CSMs) im Sinne von Art. 6 Richtlinie 2016/798/EG

d) die technische Kompatibilität des Fahrzeugs mit dem Netz in dem Gebiet der Nutzung.

Konkrete, mess- oder prüfbare Anforderungen für die lineare Wirbelstrombremse sind hier nicht beinhaltet.

In der Liste der notifizierten nationalen technischen Regeln (NNTR) [24] gibt es einen Punkt, der sich direkt auf die Wirbelstrombremse bezieht. Im Checklistenpunkt 6.10 wird für die Wirbelstrombremse als Regelwerk für zusätzliche nationale Prüfung folgendes genannt:

- UIC 544-1
- DIN EN 16207
- "Regelungen für die bremstechnische Beurteilung von Eisenbahnfahrzeugen".  
In Abhängigkeit vom zu prüfenden Fahrzeug sind die folgenden Prüfverfahren anzuwenden:
  - für Hochgeschwindigkeitszüge DIN EN 15734-2
  - für Triebzüge DIN EN 16185-2
  - für Reisezugwagen gemäß "Anhang II zu den Regelungen für die bremstechnische Beurteilung von Eisenbahnfahrzeugen - Prüfmodul: Bremstechnische Prüfung von Reisezugwagen (Typprüfung für Einzelfahrzeuge)"
  - für Güterwagen gemäß "Anhang III zu den Regelungen für die bremstechnische Beurteilung von Eisenbahnfahrzeugen - Prüfmodul: Bremstechnische Prüfung von Güterwagen (Typprüfung für Einzelfahrzeuge)"
  - für Lokomotiven DIN EN 16185-2, soweit anwendbar
- "Laufende Beschlussliste des Arbeitskreises Bremse zu verschiedenen, die Bremse betreffenden Einzelthemen", Punkte 1, 7, 9, 31, 36, 49 [27] (Zitat aus 6.10 [24])

Darüber hinaus hat der Checklistenpunkt 12.3 aus den notifizierten nationalen technischen Regeln (NNTR) [23] eine Relevanz für die Wirbelstrombremse. Im Punkt 12.3 zum Thema „Verträglichkeit mit Gleisschaltmitteln MK, DMK, WSSB-Impulsgeber“, Nachweis der Kompatibilität von Schienenfahrzeugen mit Gleisschaltmitteln, wird als Regelwerk für zusätzliche nationale Prüfung folgendes genannt:

„Technische Regelung für den Nachweis der elektromagnetischen Verträglichkeit zwischen Schienenfahrzeugen und der Infrastruktur im Geltungsbereich der EBO (TR-EMV)

Teil 1 – Allgemeines

Teil 3 – Sensorik“ (Zitat aus 12.3 [24])

In der „Technischen Regelung für den Nachweis der elektromagnetischen Verträglichkeit zwischen Schienenfahrzeugen und der Infrastruktur im Geltungsbereich der EBO“ (TR EMV), Teil 3 – Sensorik [29] gibt es die nachfolgend ausgeführten Anforderungen an die Wirbelstrombremse.

In Kapitel 3.3 „Wirbelstrombremsen“ steht

„Fahrzeuge mit der aktiven (abgesenkt und bestromt) Wirbelstrombremse bedürfen einer besonderen Prüfung (gesondertes Messprogramm), da die WB durch mehrere, zum Teil gleichzeitig auftretende Beeinflussungswirkungen gekennzeichnet ist (Magnetfelder, Eisenmasse und passive Beeinflussungseffekte).

Der Prüfumfang, das Messprogramm sowie die Bewertungskriterien sind zwischen dem Fahrzeughersteller und den Gleisschaltmittelherstellern, dem Betreiber des Fahrzeugs (EVU), dem oder den Infra-

strukturbetreiber(n) (EIU) sowie den zuständigen Aufsichtsbehörden (z.B. dem Eisenbahn-Bundesamt) über den EMV-Plan abzustimmen.“ (Zitat aus 3.3 [29])

Außerdem sind in „Anhang B – Gruppierung Gleisschaltmittel“ der TR EMV [29] Gleisschaltmittel aufgelistet, die als WB-fest deklariert sind. Die Eigenschaft „WB-fest“ wurde für Wirbelstrombremsen des Typs EWB 154 R, die im ICE 3 eingesetzt werden, nachgewiesen. Daher enthält die Anlage B der TR EMV den folgenden Hinweis:

„Neue Fahrzeugbaureihen mit WB bzw. neue WB-Typen müssen gegenüber den mit (WB) gekennzeichneten LST-Komponenten die beeinflussungstechnischen Forderungen einhalten und dürfen damit diese LST-Komponenten nicht störend beeinflussen.“ (Zitat aus Anhang B [29])

## 2.5.2 Zusammenfassung und Bewertung

Alle genannten Regelwerke und Normen beinhalten Vorgaben für die Ermittlung des nominalen Bremsvermögens der Wirbelstrombremse sowie für die Prüfung des spezifikationsgemäßen Zustands.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass aktuell konkrete Vorgaben fehlen, die Randbedingungen und/oder Grenzwerte beschreiben, die dazu geeignet sind, eine LWB zu konstruieren und in Fahrzeug und Infrastruktur zu integrieren. Die in der TSI von 2008 [23] vorgegebenen Grenzwerte können heute lediglich als Orientierung dienen, da in der aktuell gültigen TSI [30] keine feste Vorgabe mehr enthalten ist.

Die erforderlichen Maßnahmen und Aufwände eine neu konstruierte LWB zuzulassen oder neue Strecken für LWB geeignet zu planen, sind daher vorab nur vage abschätzbar. Daher ergibt sich gegenwärtig eine große Unsicherheit für Komponenten- und Fahrzeughersteller sowie Betreiber das System LWB zu wählen und infolgedessen wird oft davon abgesehen, eine Verwendung der LWB vorzusehen.

## 2.6 Nutzen und Vorbehalte

Unabhängig von den beschriebenen Maßnahmen gibt es Meinungen bzw. Diskussionspunkte zum Einsatz der LWB, die Einfluss darauf nehmen, ob eine lineare Wirbelstrombremse als Bremssystem für ein (neues) Fahrzeug in Betracht gezogen wird.

Die häufigsten Argumente für die LWB sind:

- + Die LWB ist kraftschlussunabhängig.
- + Die LWB ist anrechenbar.
- + Die LWB ist zuverlässig.
- + Die LWB kann bei Schnell- und Betriebsbremsungen eingesetzt werden.
- + Die LWB verringert den Verschleiß der Reibungsbremse erheblich.
- + Die LWB lässt sich sehr präzise regeln.
- + Die LWB ist wartungsarm.
- + Die LWB ist frei von Schall- und Geruchsemissionen.
- + Die LWB erzeugt keinen Feinstaub.



- + Die LWB stellt vor allem auch bei hohen Geschwindigkeiten eine hohe Bremsleistung zur Verfügung.

Die häufigsten Argumente gegen die LWB sind:

- Die LWB führt zu einer unzulässig hohen Schienentemperatur und kann diesbezüglich sogar betriebsgefährdende Zustände verursachen.
- Die LWB beeinflusst Komponenten der LST und kann dadurch Betriebsstörungen verursachen.
- Die LWB kann Komponenten der LST zerstören und verursacht so unter Umständen betriebsgefährdende Zustände.
- Die LWB ist empfindlich und fällt oft aus, deshalb können die betroffenen Fahrzeuge oft nur mit eingeschränkter Bremsleistung (reduzierte Bremshundertstel) eingesetzt werden.
- Die LWB ist kompliziert in der Zulassung. Mangels konkreter Anforderungen und Vorgaben zur Systemauslegung sowie zur Kompatibilität mit der Infrastruktur ist der Zulassungsprozess nur schwer planbar und beinhaltet ein zeitliches und wirtschaftliches Risiko.
- Die LWB lässt sich nicht freizügig grenzüberschreitend einsetzen, da die Zulassung im Ausland ungewiss ist.
- Die LWB ist teuer in Anschaffung und Wartung.

Eine detaillierte Analyse jedes einzelnen Arguments gegen die lineare Wirbelstrombremse ermöglicht die Identifikation der Handlungsfelder, die zu bearbeiten sind, um eine Ausweitung des Einsatzes der LWB zu erreichen. In den folgenden Abschnitten wird eine erste Betrachtung der Argumente gegen die Wirbelstrombremse durchgeführt.

## 2.6.1 Schienentemperaturerhöhung durch LWB

*„Die LWB verursacht unzulässig hohe Schienentemperaturen mit der Gefahr betriebsgefährdender Zustände.“*

Die bisherige Vorgehensweise für die durch den Einsatz der LWB zu erwartende Erhöhung der Schienentemperatur eine Worst-Case-Betrachtung vorzunehmen, führt zu strengen Restriktionen für den Einsatz der LWB. Diese Restriktionen schränken die Verwendung der LWB oft auch dann ein, wenn z.B. aufgrund geringer Außentemperaturen keine Einschränkungen erforderlich wären.

Eine differenzierte Vorgehensweise kann die Zulassung des Einsatzes der LWB für Betriebsbremsungen erleichtern und erweitern, ohne die Anforderungen an die Betriebssicherheit zu vernachlässigen.

Im nächsten Kapitel werden verschiedene alternative Möglichkeiten geprüft und bewertet.

## 2.6.2 Wechselwirkung zwischen LWB und Komponenten der LST

*„Die LWB beeinflusst Komponenten der LST und verursacht dadurch Betriebsstörungen. Im Extremfall zerstört die LWB Komponenten der LST und verursacht so u. U. betriebsgefährdende Zustände.“*

Die Einflussmechanismen der LWB sind bekannt und beschrieben. Im Projekt ECUC und in verschiedenen Arbeitsgruppen wurden die gesammelten Erkenntnisse zusammengetragen und weiterentwickelt. Darauf basierend werden normative Anforderungen sowohl an die LWB als auch an LST-Komponenten formuliert.

Die Bearbeitung wird im Rahmen des Arbeitspakets 3, siehe Kapitel 4, durchgeführt.

### 2.6.3 Zulassung einer linearen Wirbelstrombremse

*„Die Zulassung einer linearen Wirbelstrombremse ist kompliziert. Deshalb ist der Zulassungsprozess schwer planbar und beinhaltet ein zeitliches und wirtschaftliches Risiko. Außerdem ist kein freizügig grenzüberschreitender Einsatz möglich, da die Zulassung im Ausland ungewiss ist.“*

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden Vorschläge für normative Regelungen formuliert.

Wenn diese Eingang in die relevanten Normen und Regelwerke gefunden haben, wird die Zulassung einer LWB in Deutschland und Europa planbar.

Eine zusammenfassende Darstellung der Vorschläge wird im Rahmen des Arbeitspakets 4, siehe Kapitel 5, erfolgen.

### 2.6.4 Zuverlässigkeit der LWB

*„Die LWB ist empfindlich und unzuverlässig.“*

Dieser Vorbehalt lässt sich nur indirekt beeinflussen.

Grundsätzlich wirken sich klare Vorgaben für die LWB in einschlägigen Normen und Regelwerken dahingehend aus, dass eine Entscheidung für eine LWB leichter getroffen wird bzw. werden kann. Einen ähnlichen Effekt wird eine vereinfachte und klar definierte Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen haben. Eine daraus resultierende Erhöhung der Stückzahl der LWB wird einen positiven Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Systems haben.

### 2.6.5 Wirtschaftlichkeit der LWB

*„Die LWB teuer in Anschaffung und Wartung.“*

Dieser Vorbehalt lässt sich nur indirekt beeinflussen.

Grundsätzlich wirken sich klare Vorgaben für die LWB in den einschlägigen Normen und Regelwerken dahingehend aus, dass eine Entscheidung für eine LWB leichter getroffen wird bzw. werden kann. Einen ähnlichen Effekt wird eine vereinfachte und klar definierte Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen haben. Beides könnte zu einer größeren Verbreitung der LWB führen. Eine daraus resultierende Erhöhung der Stückzahl der LWB hätte dann auch einen positiven Einfluss auf die Kosten und damit auf die Wirtschaftlichkeit der LWB.

Die Wartungskosten sind aufgrund des Konzeptes der Wirbelstrombremse als gering einzuschätzen. Durch Störungen und Beschädigungen der LWB vor allem in den ersten Betriebsjahren, hat sich der Eindruck ergeben, dass die laufenden Kosten für die LWB hoch seien. Eine konkrete Betrachtung der Lebenszykluskosten der LWB bei BR 407 wäre hier geeignet, um eine realistische Einschätzung zu ermöglichen.

## 3 Arbeitspaket 2: Analyse der veränderten Einflüsse auf die Schieneninfrastruktur

### 3.1 Einfluss der LWB auf die Streckeninfrastruktur

In Kapitel 2.3 wurden die zwei verschiedenen Einflüsse der LWB, **Erwärmung der Schienen** und **magnetische Anzugskräfte**, auf die Schieneninfrastruktur erläutert.

Inhalt des Arbeitspakets 2 ist die Analyse der **Erwärmung der Schienen** und die Entwicklung von Vorschlägen zu einem veränderten Umgang mit dieser.

### 3.2 Wärmeeintrag in die Schiene und damit verbundene Bauteile

Auf Basis von

- Messungen mit dem ICE 3,
- Ergebnissen aus dem Projekt ECUC,
- Simulationen auf Basis der Bremsberechnung des ICE 3

wurde in 2.3.1 die Energiemenge, die in die Schienen eingeleitet wird, spezifiziert und die resultierende Wärmebelastung durch den Einsatz der LWB angegeben.

In [11] wurden Untersuchungen zur Temperaturerhöhung durch den Einsatz der LWB dokumentiert. Die wesentlichen Erkenntnisse und Formeln werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

Die Energie, die der Zug bei Bremsung mit der LWB in ein Schienenstück der Länge  $s$  einbringt ist

$$E = F_{WB} \cdot s$$

Dabei ist  $F_{WB}$  die Bremskraft der linearen Wirbelstrombremse. Diese Energie tritt in der Schiene als Wärme auf. Dafür gilt:

$$\begin{aligned} E &= c_{Fe} \cdot m \cdot \Delta T \\ &= c_{Fe} \cdot \rho \cdot s \cdot A \cdot \Delta T \\ &= 460 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \cdot 7800 \frac{kg}{m^3} \cdot 7,69 \cdot 10^{-3} m^2 \cdot s \cdot \Delta T \\ &= 27,6 \cdot 10^{-3} \frac{J}{m \cdot ^\circ C} \cdot s \cdot \Delta T \end{aligned}$$

mit  $c_{Fe}$  Wärmekapazität von Eisen = 460 J/(kg °C)

$\Delta T$	Temperaturerhöhung gegenüber der Umgebungstemperatur
$m$	Masse der Schiene
$\rho$	Dichte von Stahl = 7800 kg/m <sup>3</sup>
$A$	Querschnittsfläche der Schiene = 7,69 * 10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup>
$s$	betrachtete Strecke

Die Wärmekapazität besagt, wie viel Energie einem Kilogramm Eisen zugeführt werden muss, damit seine Temperatur um ein Grad steigt.

Teilt man die Energie durch die Strecke  $s$ , so erhält man wieder die Bremskraft der LWB:

$$\frac{E}{s} = F_{WB} = c_{Fe} \cdot \rho \cdot A \cdot \Delta T = 27,6 \cdot 10^{-3} \frac{J}{m \cdot ^\circ C} \cdot \Delta T$$

Nach einer hohen großen Anzahl von Bremsungen wird ein stationärer Zustand erreicht.

$$\Delta T_{max} = \frac{\Delta T}{1 - e^{-\alpha \Delta t}}$$

Die Erwärmung nach  $i$  Bremsungen lässt sich beschreiben durch

$$\Delta T_{n,max} = \Delta T \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (e^{-\alpha \Delta t})^i = \Delta T \frac{(e^{-\alpha \Delta t})^n - 1}{e^{-\alpha \Delta t} - 1}$$

Für folgende Szenarien werden in Tabelle 6 auf dieser Basis die Werte für für  $\Delta T$  angegeben:

- Typische Bremsung unter ETCS in Einfachtraktion und in Doppeltraktion
- Betriebsbremsung (ca. 2/3 der maximalen Betriebsbremsung) eines ICE 3 in Einfachtraktion und in Doppeltraktion
- Maximale Betriebsbremsung (Vollbremsung) eines ICE 3 in Einfachtraktion und in Doppeltraktion
- Schnellbremsung eines ICE 3 in Einfachtraktion und in Doppeltraktion

	<b>Bremskraft der LWB</b>			
	ETCS-Bremmung 90 kN	$\frac{2}{3}$ VB 100 kN	VB 150 kN	SB 180 kN
<b>Einfachtraktion (ET)</b>	1,4 K	1,6 K	2,3 K	2,8 K
<b>Doppeltraktion (DT)</b>	2,8 K	3,1 K	4,7 K	5,6 K

Tabelle 6: Schienentemperaturerhöhung pro Bremsung in Abhängigkeit von der Bremskraft der LWB

Im Rahmen des Projektes ECUC wurde unter anderem die Temperaturverteilung über den Querschnitt der Schiene untersucht, vergleiche Kapitel 8.1 aus [13]. Es ist in diesem Zusammenhang festzustellen, dass eine Stunde nach einer Einzelbremsung eine annähernde Gleichverteilung des Temperatureintrags über den Schienenquerschnitt stattgefunden hat.

Abhängig von Zugfolge und Bremskraft wird nun die maximal zu erwartende Schienentemperaturerhöhung  $\Delta T_{n,max}$  berechnet. In Tabelle 7 wird diese Schienentemperaturerhöhung abhängig von Zugfolge und Bremskraft für einen Betriebstag dargestellt.

Die angegebene Temperaturerhöhung bezieht sich stets auf den Schienenabschnitt auf dem wiederholend gebremst wird. Für Betriebsbremsungen kann das z.B. eine Bahnhofseinfahrt sein. Schnellbremsungen finden zufällig statt, deshalb berechnet man für diese keine kumulierte Temperaturerhöhung.

Betriebsbremsungen zum Halt werden ebenso wie Bremsungen zur Geschwindigkeitsregulierung üblicherweise mit einer moderaten Verzögerung ausgeführt. Der Triebfahrzeugführer fährt vorausschauend und vermeidet höhere Verzögerungen.

Es ist daher ebenfalls nicht sinnvoll eine Kumulation für die Vollbremsung zu betrachten.

<b>Anzahl Tz pro Stunde</b>	<b>Bremskraft der LWB</b>	
	ETCS-Bremmung 90 kN	$\frac{2}{3}$ Vollbremsung (VB) 100 kN
3Tz in ET/h	5,0 °C	5,7 °C
4Tz in ET/h	6,4 °C	7,3 °C
5Tz in ET/h	7,8 °C	8,9 °C
6Tz in ET/h	9,2 °C	10,5 °C
3Tz in DT/h	10,0 °C	11,0 °C
4Tz in DT/h	12,8 °C	14,1 °C
5Tz in DT/h	15,6 °C	17,3 °C
6Tz in DT/h	18,4 °C	20,4 °C

Tabelle 7: Schienentemperaturerhöhung an einem Betriebstag in Abhängigkeit von Bremskraft und Anzahl der Tz pro Stunde

Der angegebene Temperaturwert wird jeweils im Querschnitt einer Schiene mit UIC 60-Profil erreicht.

Für weitere Überlegungen ist es sinnvoll, diejenigen Betriebsfälle herauszugreifen, die typisch sind. Um eine Abschätzung vornehmen zu können, wie viele Tz pro Stunde realistisch sind, wurde die Anzahl von ankommenden ICE pro Stunde in großen Fernbahnhöfen in Deutschland, wie z.B. Frankfurt (Main) Hbf, Hannover Hbf oder Nürnberg Hbf, untersucht. In der Regel treffen Ost-West- und Nord-Süd-Strecken in derartigen Bahnhöfen zusammen. Daraus ergibt sich, dass in der Regel mindestens vier verschiedene Zufahrtsmöglichkeiten bestehen, die in unterschiedlicher Entfernung zum Bahnhof zusammengeführt werden. Die Gesamtzahl der ankommenden Züge teilt sich auf die unterschiedlichen Strecken auf.

Der Hauptbahnhof in Frankfurt (Main) weist die höchste Anzahl an ICE-Abfahrten und -Ankünften auf. Hier verkehren aktuell (August 2019) bis zu 15 Hochgeschwindigkeitszüge pro Stunde. Bei drei Hauptzufahrtstrecken wäre damit eine Frequenz von 5 Tz pro Stunde zu unterstellen.

Die gewählten Werte für die „Anzahl Tz pro Stunde“ aus Tabelle 7 stellen demnach geeignete Betriebs-szenarien dar.

### 3.3 Verträgliche Schienentemperaturen und Definition eines Temperaturprofils

Den Untersuchungen zur Schienentemperaturerhöhung durch die LWB in Zusammenhang mit neugebauten Strecken lassen sich Grenztemperaturen für verschiedene Oberbauformen entnehmen. In Tabelle 8 werden diese zusammengestellt.

#### Oberbauformen und zulässige Temperaturen

Schiene	Schwelle	Zulässige Schienentemperatur (Schienengrenztemperatur)	Bemerkungen / Referenz
UIC 60	FF	85 °C	[16]
UIC 60	B70W	65 °C – 78 °C	[14] 72 °C – 78 °C [17] 71 °C [45] 65 °C
S54	B70W	65 °C - 76 °C	[14] 73 °C [16] 66 °C und 76 °C [45] 65 °C

Tabelle 8: Oberbauformen und zulässige Temperaturen

Die Schienengrenztemperatur wird mittels FEM-Berechnungsverfahren bei DB Netz AG ermittelt.

Für streckunabhängige Betrachtungen sind jeweils die niedrigsten Temperaturen zu nutzen. Deshalb werden im Folgenden für Strecken mit Fester Fahrbahn 85 °C als maximal zulässige Schienentemperatur und für Strecken mit Schotteroberbau 65 °C als maximal zulässige Schienentemperatur verwendet. Für Kunstbauwerke, wie z.B. Brücken, wird dieselbe Grenztemperatur unterstellt.

Die Erfahrungen von DB Netz zeigen, dass auf Strecken mit Schotteroberbau bereits Temperaturen von 60 °C kritisch sein können, deshalb wird bei allen Betrachtungen von Strecken mit Schotteroberbau zusätzlich eine Aussage zu 60 °C als maximal zulässige Schienentemperatur getroffen.

Die in Kapitel 3.2 angegebenen Werte der Schientemperaturerhöhung sind für eine Schiene mit UIC 60-Profil berechnet. Daher muss bei Vorliegen des Schienenprofils S54 die Temperaturerhöhung um 11,1 % erhöht werden, um das geringere Metervolumen auszugleichen.

Die Temperatur der Schiene überträgt sich auch auf alle Komponenten, die Kontakt zur Schiene haben. Daher ist es notwendig, zusammenzustellen, welche Bauteile an der Schiene oder mit Kontakt zur Schiene montiert sind und deren zulässige Maximaltemperatur zu ermitteln, siehe Tabelle 9.

#### Bauteile an der Schiene und zulässige Temperaturen

Komponente	Zulässige Temperatur der Komponente	Zulässige Schientemperatur	Bemerkungen
Achszähler ZP 43 E	80 °C	110 °C	Siemens
Achszähler ZP 43 M	80 °C	110 °C	Siemens
Achszähler ZP 30	80 °C	100 °C	Alcatel
Achszähler ZP 30C-NT	80 °C	100 °C	Alcatel
Radsensor RSE	70 °C	95 °C	Siemens
Radsensor RSL	80 °C	100 °C	Alcatel
Radsensor RSR122	80 °C	100 °C	Frauscher
Radsensor FEW-IG	80 °C	100 °C	
Bü-Fahrzeugsensorschleife FSS	70 °C	100 °C	Siemens
Bü-Fahrzeugsensorschleife FSSB	80 °C	100 °C	S & B
Bü-Fahrzeugsensorschleife FSP	80 °C	100 °C	Pintsch-Bamag
Gleisstromkreis FTGS	70 °C <sup>1</sup>	100 °C	
Gleisstromkreis NF-GSK	70 °C <sup>2</sup>	100 °C	

<sup>1</sup> Komponente hat keinen direkten Schienenkontakt, nur Kabelanschluss an Schiene

<sup>2</sup> Komponente hat keinen direkten Schienenkontakt, nur Kabelanschluss an Schiene



Gleisstromkreis GLS	70 °C <sup>2</sup>	100 °C	
Signalkabel, LZB/PZB-Leitungen	80 °C	100 °C	
LZB-Linienleiter	80 °C	100 °C	
Erdungskabel, Schienenkontaktsysteme	85 °C	100 °C	
Weichenheizung	80 °C	100 °C	
Versuchs- und Prüfeinrichtungen (z.B. Dafur)	85 °C	85 °C	DB Systemtechnik

Tabelle 9: Bauteile an der Schiene und zulässige Temperaturen

Bei einem Vergleich der Temperaturgrenzwerte zwischen Schiene und an der Schiene befindlichen Komponenten erkennt man, dass die Schiene das begrenzende Bauteil ist.

Unter Nutzung der Ergebnisse aus Tabelle 7 lässt sich ermitteln, welche Temperaturreserve für die verschiedenen Oberbauformen besteht.

Die Werte in der Spalte „Temperaturreserve“ der Tabelle 10 lassen eine Prognose zu, ob eine einschränkungsfreie Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen erreichbar ist.

#### Temperaturzuwachs und Bremskraft der LWB

Anzahl Tz auf Oberbauart	Zulässige Schienentemperatur	Temperaturerhöhung durch LWB	Temperaturreserve entspricht Mögliche Schienentemperatur aus Umwelt
3 Tz in ET auf UIC 60 mit Fester Fahrbahn	85 °C	5,7 °C	79,3 °C
6 Tz in ET auf UIC 60 mit Fester Fahrbahn	85 °C	10,5 °C	74,5 °C
3 Tz in DT auf UIC 60 mit Fester Fahrbahn	85 °C	11,0 °C	74,0 °C
6 Tz in DT auf UIC 60 mit Fester Fahrbahn	85 °C	20,4 °C	64,6 °C

3 Tz in ET auf UIC 60 mit Schotteroberbau	65 °C (60 °C)	5,7 °C	59,3 °C (54,3 °C)
6 Tz in ET auf UIC 60 mit Schotteroberbau	65 °C (60 °C)	10,5 °C	54,5 °C (49,5 °C)
3 Tz in DT auf UIC 60 mit Schotteroberbau	65 °C (60 °C)	11,0 °C	54,0 °C (59,0 °C)
6 Tz in DT auf UIC 60 mit Schotteroberbau	65 °C (60 °C)	20,4 °C	44,6 °C (39,6 °C)
3 Tz in ET auf S54 mit Schotteroberbau	65 °C (60 °C)	6,3 °C	58,7 °C (53,7 °C)
6 Tz in ET auf S54 mit Schotteroberbau	65 °C (60 °C)	11,7 °C	53,3 °C (48,3 °C)
3 Tz in DT auf S54 mit Schotteroberbau	65 °C (60 °C)	12,2 °C	52,8 °C (47,8 °C)
6 Tz in DT auf S54 mit Schotteroberbau	65 °C (60 °C)	22,7 °C	42,3 °C (37,3 °C)

Tabelle 10: Temperaturzuwachs in Abhängigkeit zur Bremskraft der LWB

In Tabelle 10 lässt sich erkennen, dass bei Fester Fahrbahn unter der Annahme, dass auf der Strecken über den gesamten Betriebstag 6 Tz in Doppeltraktion pro Stunde verkehren, einen Temperaturreserve von 64,6 °C besteht. Das bedeutet, dass eine Erwärmung der Schiene aus Umweltbedingungen heraus bis zu einer Temperatur von 64,6 °C erfolgen könnte, bevor die zulässige Schienengrenztemperatur von 85 °C erreicht wird.

Diese Temperaturreserve liegt bei demselben Betriebsszenario für eine Strecke mit UIC 60-Profil und Schotteroberbau nur bei 39,6 °C und bei einer Strecke mit S54-Profil und Schotteroberbau bei nur noch 37,3 °C.

### 3.4 Lufttemperaturen in Deutschland

Aus langjährigen Wetteraufzeichnungen lassen sich die Wochen im Jahr ermitteln, in denen keine temperaturbasierten Einschränkungen des Einsatzes der linearen Wirbelstrombremse für Betriebsbremsungen notwendig sind.

Eine Analyse der langjährigen Wetterdaten von 1961 - 2010 des Deutschen Wetterdienstes (DWD) lässt Aussagen darüber zu, in welchen Monaten als kritische anzusehende Lufttemperaturen auftreten [40].

Besonders beachtet werden hierbei die Monate mit „Sommertagen“ oder „Heißen Tagen“. Als „Sommertage“ werden Tage eingestuft, an denen ein Tagestemperaturmaximum von 25 °C erreicht wird. Als „heiße Tage“ gelten Tage mit einem Tagestemperaturmaximum von 30°C oder mehr.

In den nachfolgenden Abbildungen wird jeweils die Anzahl der Tage angegeben, an denen pro Monat an Messstationen des DWD ein Sommertag oder ein Heißer Tag beobachtet wurde. Es ist dabei zu beachten, dass in der Anzahl der Sommertage die Anzahl der Heißen Tage enthalten ist.

In den Monaten Januar, Februar, November und Dezember wurden keine Sommertage beobachtet. Im März wurden im Verlauf von 50 Jahren lediglich 51 Sommertage beobachtet.

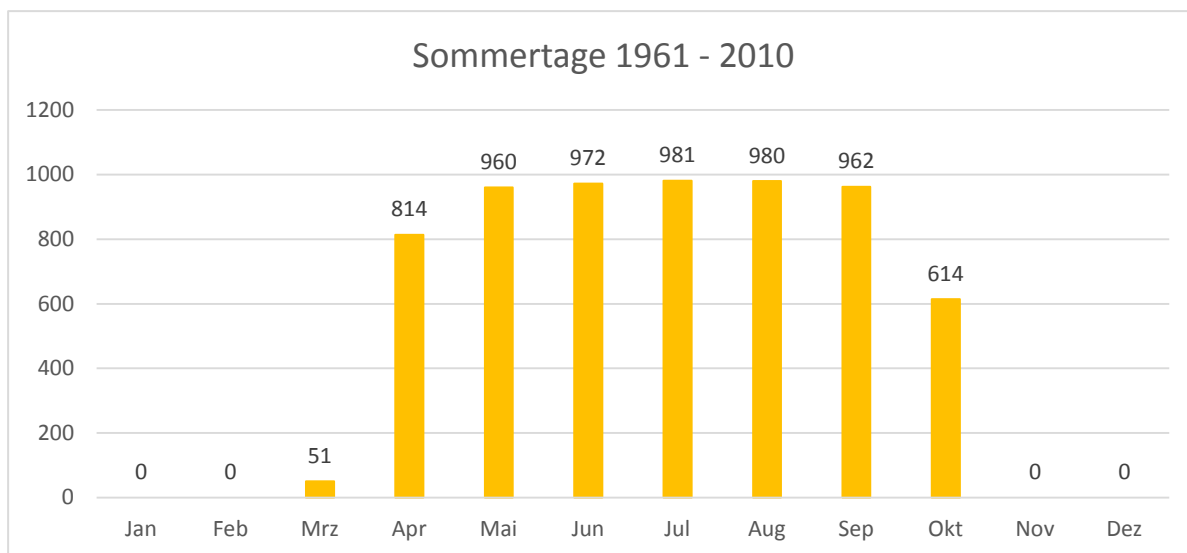


Abbildung 2: Sommertage in Deutschland (1961 – 2010) Quelle: Deutscher Wetterdienst

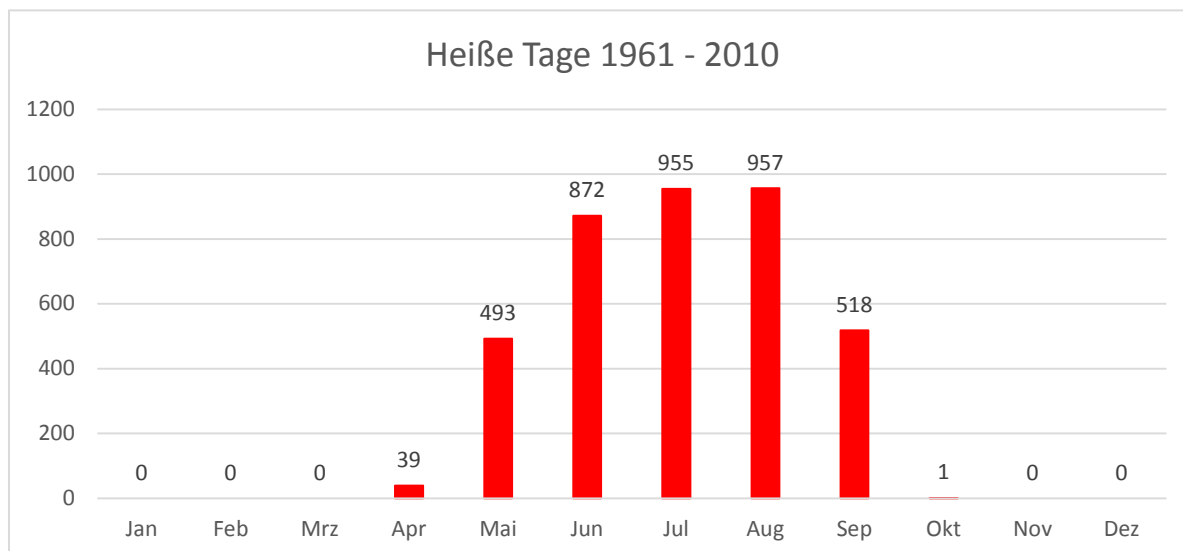


Abbildung 3: Heiße Tage in Deutschland (1961 – 2010) Quelle: Deutscher Wetterdienst

Bei der DB Netz AG liegen zusätzlich Messergebnisse aus dem Jahr 2017 von Schienen- und Lufttemperaturen von den Orten Giften, Orxhausen, Nörten, Jühnde und Almstedt vor [47]. Alle Orte befinden sich an der Schnellfahrstrecke Hannover – Würzburg. Im Jahr 2017 wurden in den Monaten Mai bis August die höchsten Temperaturen gemessen, diese lagen bei bis zu 48 °C Schienentemperatur. Die zusätzlich gemessene Lufttemperatur lag in der Regel 8 – 16 °C unter der Schienentemperatur.

Im Juli 2019 wurde mit der Messung von 42,6 °C ein neuer deutscher Lufttemperaturrekord aufgestellt [46]. Wenn man berücksichtigt, dass die Schienentemperatur durchaus 16 °C oberhalb der Lufttemperatur liegen kann (z.B. durch die Wirkung der direkten Sonneneinstrahlung), ergibt sich, dass eine Schienentemperatur von ca. 60 °C rein aus Umwelteinflüssen eine realistische Annahme ist.

Dies entspricht auch der Erfahrungen der DB Netz AG, nach denen lediglich durch Umwelteinflüsse Schienentemperaturen bis 60 °C erreicht wurden. In der Konsequenz muss die Temperaturreserve für eine einschränkungsfreie Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen größer als 60 °C sein.

Eine Auswertung der Tabelle 10 ergibt, dass für Strecken mit Fester Fahrbahn eine Temperaturreserve von mindestens 64,6 °C besteht. Gemäß Tabelle 7 sind durch den Einsatz der LWB für Betriebsbremsungen Temperaturerhöhungen von maximal 20,4 °C zu erwarten. Damit ist eine **ganzjährige Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen auf Strecken mit Fester Fahrbahn** möglich.

Für Strecken mit **Schotteroberbau** kann eine Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen nur **temperaturabhängig** erteilt werden. Welche Möglichkeiten hierzu bestehen, wird im folgenden Abschnitt untersucht.

## 3.5 Alternative Freigabeverfahren

Die Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen wird abhängig vom Oberbau der Strecke unterschiedlich gehandhabt.

### 3.5.1 Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen auf Strecken mit Fester Fahrbahn

Die Schienengrenztemperaturen der Festen Fahrbahn lassen einen Einsatz der linearen Wirbelstrombremse für Betriebsbremsungen zu. Die Untersuchungen für die SFS Köln – Rhein/Main, Nürnberg – Ingolstadt und VDE 8.1/2 und die Erkenntnisse dieses Forschungsprojektes bestätigen dies.

Bis Ende 2019 soll die lineare Wirbelstrombremse in das Regelwerk 820.2020 aufgenommen werden. Damit ist eine Einzelfalluntersuchung zukünftig nicht mehr erforderlich, die bislang erforderliche streckenbezogene Untersuchung der Schienentemperatur wird obsolet.

### 3.5.2 Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen auf Strecken mit Schotteroberbau

Eine einschränkungsfreie Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen auf Strecken mit Schotteroberbau ist aus Sicht der Schienentemperatur nicht erreichbar.

In den Sommermonaten werden bereits heute rein aus Umwelteinflüssen Schienentemperaturen bis zu 60 °C und damit kritische Temperaturen erreicht.

Ziel ist daher, Freigabekriterien zu definieren, die eine zeitweise Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen ermöglichen und gleichzeitig eine Einhaltung der Temperaturgrenzwerte sicherstellen.

Die Information über die Freigabe der linearen Wirbelstrombremse wird dem Fahrzeug durch das Zugsicherungssystem übermittelt. Sowohl LZB CEII also auch ETCS stellen diese Möglichkeit zur Verfügung [44]. Bislang wird die Freigabeinformation streckenbezogen fest im Zugsicherungssystem hinterlegt. Für eine bedingte Freigabe ist es erforderlich, dass eine von vorgegebenen Eingangsgrößen (z.B. Datumsinformation oder Temperaturmesswert) abhängige Freigabe erfolgt. Die Grundvoraussetzungen sind hierzu in den Systemen vorhanden, sie müssen allerdings durch an die Freigabemethode angepasste Verfahren ergänzt werden.

Fahrzeugseitig ist ein Wechsel zwischen einer Freigabe „LWB für BB und SB“, „LWB nur für SB“ und „LWB gesperrt“ abhängig von der Vorgabe durch das Zugsicherungssystem bereits implementiert.

Im Folgenden werden verschiedene Ansätze für bedingte Freigabeverfahren zusammengestellt:

#### 1. Datumsabhängige Freigabe durch betriebliche Maßnahmen

In den Monaten Januar – März und November – Dezember herrschen Temperaturen, die so gering sind, dass durch die Erwärmung durch Nutzung der LWB keine kritischen Schienentemperaturen erreicht werden [40]. In diesen Monaten wird eine Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen erteilt, in den übrigen Monaten ist die Nutzung der LWB nur für Schnellbremsungen zulässig.

Die datumsabhängige Freigabe wird durch eine betriebliche Anweisung an die Triebfahrzeugführer erteilt. Die Wirbelstrombremse ist grundsätzlich für Schnellbremsungen und Betriebsbremsungen freigegeben und wird durch den Triebfahrzeugführer abhängig von der betrieblichen Anweisung für Betriebsbremsungen gesperrt.

## 2. Datumsabhängige Freigabe durch das Zugsicherungssystem

In den Monaten Januar – März und November – Dezember herrschen Temperaturen, die so gering sind, dass durch die Erwärmung durch Nutzung der LWB keine kritischen Schienentemperaturen erreicht werden [40]. In diesen Monaten wird eine Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen erteilt, in den übrigen Monaten ist die Nutzung der LWB nur für Schnellbremsungen zulässig.

Die datumsabhängige Freigabe wird durch ETCS bzw. LZB CEII umgesetzt.

Für die Monate April – Oktober kann ergänzend eine der weiteren alternativen Verfahrensweisen genutzt werden, um die Freigabezeiten zu vergrößern.

## 3. Schienentemperaturabhängige Freigabe

Für jede Strecke, für die eine Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen erfolgen soll, werden Anzahl und Ort von Temperaturmessstellen an der Schiene festgelegt und installiert. Außerdem wird ein streckenabhängiger Freigabegrenzwert für die Schienentemperatur festgelegt. Solange die Messwerte unterhalb des vorgegebenen Freigabegrenzwertes liegen, erfolgt die Freigabe der LWB für Betriebsbremsungen.

Die Erfassung der Messwerte erfolgt durch geeignete Sensoren und die Freigabeentscheidung durch eine Auswertesoftware, die die Freigabeinformation an ETCS bzw. LZB CEII übergibt.

Der Temperaturgrenzwert für die Freigabe muss so gewählt werden, dass die zulässige Schienengrenztemperatur eingehalten wird.

*Beispiel:*

*Die Schienengrenztemperatur beträgt 60°C. Die Strecke ist mit UIC60-Profilen ausgerüstet.*

*Die zu erwartende maximale Schienentemperaturerhöhung durch die LWB beträgt 20,4 °C.*

*Die Temperaturreserve beträgt damit 39,6 °C.*

*Als Temperaturgrenzwert für die Freigabe wäre ein Wert von 35°C geeignet.*

## 4. Freigabe der LWB abhängig von der Anzahl der Fahrzeuge auf der Strecke

Auf Strecken mit ETCS gibt es eine weitere Option für eine bedingte Freigabe. Für jeden Zug liegt in ETCS die Information vor, ob dieser mit einer linearen Wirbelstrombremse ausgerüstet ist. Damit kann für jeden Betriebstag laufend die bereits entstandene Schienentemperaturerhöhung berechnet werden.

Die schienentemperaturgesteuerte Freigabe kann mit dieser Vorgehensweise kombiniert werden und würde so eine weitere Erhöhung der Nutzung der LWB für Betriebsbremsungen ermöglichen.

Für jedes bedingte Freigabeverfahren gibt es Risiken, die untersucht werden müssen. Die Details sind im Folgenden zusammengestellt:

**1. Datumsabhängige Freigabe durch betriebliche Maßnahmen**

Ein Bedienfehler durch den Triebfahrzeugführer könnte im betroffenen Zug zu einer Freigabe an einem Tag in den gesperrten Monaten führen. Wenn an diesem Tag eine hohe Schienentemperatur herrscht, könnte eine weitere Temperaturerhöhung durch Nutzung der LWB zu einer Überschreitung der Schienengrenztemperatur führen.

Eine Risikountersuchung ist für diesem Fall durchzuführen.

**2. Datumsabhängige Freigabe durch das Zugsicherungssystem**

Ein Datumsfehler könnte zu einer Freigabe an einem Tag in den gesperrten Monaten führen. Wenn an diesem Tag eine hohe Schienentemperatur herrscht, könnte eine weitere Temperaturerhöhung durch Nutzung der LWB zu einer Überschreitung der Schienengrenztemperatur führen.

Eine Risikountersuchung für diesem Fall ist unter Berücksichtigung der Freigabemethodik /-software durchzuführen.

Grundsätzlich sind in regelmäßigen Abständen (Vorschlag: 10-Jahres-Zeitraum) die jahreszeitlichen Verteilungen von heißen Tagen und Sommertagen auf Veränderungen gegenüber der in diesem Forschungsvorhaben beschriebenen Situation zu überprüfen und ggf. die Freigabezeiträume anzupassen.

**3. Schienentemperaturabhängige Freigabe**

Ein Messfehler könnte zu einer Freigabe führen, obwohl eine hohe Schienentemperatur herrscht und damit durch eine weitere LWB-bedingte Temperaturerhöhung die Schienengrenztemperatur überschritten werden.

Eine Risikountersuchung für diesem Fall ist unter Berücksichtigung der Messwerverfassung, der Messkette und Messwertverarbeitung sowie der Freigabemethodik /-software durchzuführen.

Eine Fehlfunktion der Auswertesoftware könnte zu einer Freigabe führen, obwohl eine hohe Schienentemperatur herrscht und damit durch eine weitere Temperaturerhöhung durch Nutzung der LWB die Schienengrenztemperatur überschritten werden. Ein Ausfall der Temperaturerfassung muss sicher erkannt werden und eine geeignete Ersatzwertbildung implementiert sein, um unzulässige Freigaben zu unterbinden.

Risikountersuchungen für diese Fälle sind unter Berücksichtigung der einschlägigen Sicherheitsvorgaben für die Freigabemethodik /-software durchzuführen.

**4. Freigabe der LWB abhängig von der Anzahl der Fahrzeuge auf der Strecke**

Eine fehlerhafte Ermittlung der Anzahl der LWB-Bremungen könnte zu einer unzulässigen Freigabe führen und damit durch eine weitere Temperaturerhöhung zu einer Überschreitung der Schienengrenztemperatur führen.

Eine Risikountersuchung für diesem Fall ist unter Berücksichtigung der einschlägigen Sicherheitsvorgaben für die Freigabemethodik /-software durchzuführen.

Zusätzliche betriebliche Anweisungen können die Auswirkungen von fehlerhaften Freigaben mildern. Es wird in diesem Zusammenhang folgendes Vorgehen empfohlen:

Es wird eine betriebliche Anweisung in Kraft gesetzt, dass das Betriebspersonal, insbesondere die Triebfahrzeugführer die Nutzung der LWB beobachten müssen. Dazu werden diesen Personen Kriterien zur Verfügung gestellt, die eine Identifikation einer unzulässig verwendeten LWB ermöglichen. Eine Meldung einer vermeintlich unzulässigen Nutzung der LWB an die Betriebszentrale ermöglicht ggf. die Einleitung von Korrekturmaßnahmen und vermeidet oder begrenzt so einen eventuellen Schaden.

In Tabelle 11 sind die verschiedenen Freigabeverfahren in einer Entscheidungsmatrix gegenübergestellt. Welches Verfahren sich als das am besten geeignete Verfahren erweist, hängt von den jeweiligen Randbedingungen ab. Die Bewertung ist so gestaltet, dass die beste Bewertung mit „10“ und die schlechteste Bewertung mit „1“ erfolgt. Die größte Summe der (gewichteten) Einzelbewertungen kennzeichnet dann das beste Verfahren.

**Alternative Freigabeverfahren - Entscheidungsmatrix**

	<b>Datumsabhängige Freigabe durch betriebliche Maßnahmen</b>	<b>Datumsabhängige Freigabe durch das Zug-sicherungssystem</b>	<b>Freigabe nach Schie-nentemperaturmes-sung</b>	<b>Freigabe nach Schie-nentemperaturmes-sung + Anzahl der Bremsungen am Be-triebstag</b>
Umsetzungs-aufwand	9	6	4	2
Zeitbedarf für Umsetzung	9	7	5	3
Erhöhung der LWB-Nutzung	4	4	8	9
Störungsanfälligkeit	5	9	8	7
Streckenabhän-gigkeit	5	5	1	1
Summe (ohne Gewichtung)	27	31	26	22
Summe (mit dreifacher Ge-wichtung von „Erhö-hung der LWB-Nutzung“)	35	39	42	40

Tabelle 11: Alternative Freigabeverfahren - Entscheidungsmatrix



Umsetzungsaufwand:	1 – sehr aufwendig	bis	10 – gering
Zeitbedarf für Umsetzung:	1 – mehrere Jahre	bis	10 – weniger als ein Jahr
Erhöhung der LWB-Nutzung:	1 – geringfügig	bis	10 – maximal mögliches Maß
Störungsanfälligkeit:	1 – häufige Störungen zu erwarten bis 10 – sehr stabiler Betrieb		
Streckenabhängigkeit:	1 – ja = Installationen an der Strecke erforderlich oder 5 – nein = keine Installationen an der Strecke erforderlich		

Die Matrix ist als Hilfsmittel für die Entscheidung zwischen den möglichen Freigabeverfahren gedacht. Eine Gewichtung der einzelnen Kriterien sollte abhängig von den vorliegenden Prioritäten (z.B. möglichst schnelle Umsetzung) vorgenommen werden. Darüber hinaus lassen sich weitere Kriterien ergänzen, um eine größere Differenzierung zwischen den Verfahren zu erreichen.

### 3.5.3 Überlegungen zur Sicherheit

Von einer Überschreitung der kritischen Schienentemperatur geht die Gefahr von Gleisverdrückungen aus. Diese wiederum können zu Entgleisungen führen und schwere Schäden nach sich ziehen.

Die Anwendung der Normen DIN EN 50126, 50128 und 50129 ist erforderlich und für das gewählte technische Freigabeverfahren durchzuführen.

Folgende Einschätzungen sind im Sicherheitsbewertungsverfahren zu berücksichtigen.

Das Schadensausmaß ist zwischen „Tod mehrerer Personen“ und „katastrophale Auswirkung mit mehreren Toten“ einzustufen, da eine Entgleisung durch eine Gleisverdrückung einen schweren Unfall nach sich ziehen kann.

Die Möglichkeit zur Vermeidung / Begrenzung des Schadens ist „möglich“, da jeder Triebfahrzeugführer die Bremsungen seines Fahrzeugs beobachtet und somit Betriebsbremsungen mit der LWB an heißen Tagen durch eine manuelle Sperre der LWB im Tz unterbinden kann. Darüber hinaus muss bei einer vermeintlich fehlerhaften Freigabe der LWB Betriebsleitung informiert werden, um ggf. weitere Maßnahmen zu veranlassen.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist als „sehr gering“ einzustufen, da ein Freigabefehler nur dann Folgen hat, wenn dieser an einem heißen Tag auftritt.

### 3.5.4 Sonstige Maßnahmen

Eine Erhöhung der Schienengrenztemperatur könnte zusätzlich die Freigabehäufigkeit der LWB für Betriebsbremsungen verbessern. Hier sind folgende Maßnahmen denkbar:

- Anhebung der Temperatur des verspannungsfreien Zustands der Schiene  
Dies ist nur sinnvoll, wenn die Klimaänderungen dazu führen, dass die Mindesttemperaturen im Winter im selben Maße ansteigen wie die sommerlichen Maximaltemperaturen.
- Veränderungen am Oberbau, wie z.B. Schotterverklebungen

Die Erwärmung der Schienen durch die Sonneneinstrahlung kann durch ein Anstreichen der Schienen mit weißer Farbe um einige Grad reduziert werden. In Österreich, der Schweiz und Italien gibt es hierzu Erfahrungen, die eine Verringerung der Schientemperatur um bis zu 8°C zeigen. Ein Versuch in Deutschland ist geplant.

Eine fahrzeugseitige Erfassung der Temperatur könnte als zusätzliche Maßnahme die Sicherheit für das System erhöhen. Wenn durch das Fahrzeug eine berührungslose Messung der Schientemperatur erfolgt, dann kann bei Überschreitung eines Schientemperaturgrenzwertes die Nutzung der LWB für Betriebsbremsungen direkt im Fahrzeug gesperrt werden. Wenn darüber hinaus ein Datenaustausch zwischen den Triebzügen ermöglicht wird, ließe sich die LWB im nachfolgenden Triebzug bereits vorsorglich für Betriebsbremsungen sperren.

### 3.5.5 Überlegungen zu einer leistungsreduzierten Wirbelstrombremse

In der Vergangenheit gab es Überlegungen, dass eventuell eine leistungsreduzierte Wirbelstrombremse Möglichkeiten für einen erweiterten Einsatz eröffnen würde.

Für die Ermittlung von geeigneten Vorgaben für die mögliche maximale Bremskraft einer leistungsreduzierten Wirbelstrombremse muss die Schienengrenztemperatur und die maximal zu erwartende Temperatur rein aus Umwelteinflüssen berücksichtigt werden.

Da bereits heute in den Sommermonaten ohne die lineare Wirbelstrombremse Schientemperaturen bis zu 60 °C erreicht werden, muss festgestellt werden, dass für Strecken mit Schotteroberbau keine ganzjährige Temperaturreserve besteht.

Das bedeutet, dass mit einer leistungsreduzierten Wirbelstrombremse keine Verlängerung des Einsatzzeitraums im Kalenderjahr erreichbar ist.

Durch eine leistungsreduzierte Wirbelstrombremse würde das Maß der Schientemperaturerhöhung pro Bremsung verringert werden. Dadurch könnte eine höhere Anzahl an Fahrzeugen pro Stunde auf einer Strecke fahren, ohne dass die maximal zulässige Schientemperaturerhöhung überschritten wird.

Eine leistungsreduzierte Wirbelstrombremse würde verglichen mit der im ICE 3 installierten LWB eine kleinere Bauform aufweisen. Dies böte die Möglichkeit, die leistungsreduzierte Wirbelstrombremse besser gegen mechanische Beschädigungen zu schützen.

## 4 Arbeitspaket 3: Untersuchung der Elektromagnetischen Verträglichkeit der LST

Die lineare Wirbelstrombremse (LWB) erzeugt beim Bremsen ein magnetisches Feld, welches auf Komponenten der Leit- und Sicherungstechnik (LST), die an den Schienen oder im nahen Gleisbereich verbaut sind, einwirkt. Durch den Einfluss der starken Streufelder der aktiven LWB im Nahbereich der Schiene können Komponenten und Systeme gestört und ggf. sogar zerstört werden. Auch im passiven Zustand der LWB kann es durch elektromagnetische Kopplungen zwischen Komponenten der LST mit den Metallmassen der LWB sowie möglichen – meist parasitären elektrischen Schwingkreisen der LWB – zu störenden Beeinflussungen der LST kommen.

Unter Kapitel 4.1 werden – nach einer kurzen Darstellung beeinflussungsrelevanter Design und Betriebsparameter der LWB – die Beeinflussungsmechanismen mit Bezug auf die aktuelle Auslegung von Wirbelstrombremsen beschrieben und deren Einflüsse auf die Elemente der Leit- und Sicherungstechnik – unter Berücksichtigung der technischen Merkmale und Betriebsweise der LWB – aufgezeigt und bewertet. Aufbauend auf den in Kapitel 4.1 dargestellten Erkenntnissen sowie den Ergebnissen aus den Arbeitspaketen 1 und 2 werden in Kapitel 4.2 Vorgaben für die zukünftige Auslegung von Wirbelstrombremsen sowie signaltechnischen Komponenten im Gleisbereich abgeleitet.

### 4.1 Bestimmung der relevanten Beeinflussungsmechanismen sowie der betroffenen Komponenten der LST

#### 4.1.1 Design- und Betriebsparameter der LWB

Grundlage für die nachfolgenden Ausführungen bildet die derzeit in den ICE 3-Zügen der DB Fernverkehr AG verbaute lineare Wirbelstrombremse vom Typ EWB 154 R/L4 bzw. R/L6 (siehe schematische Darstellung unten).

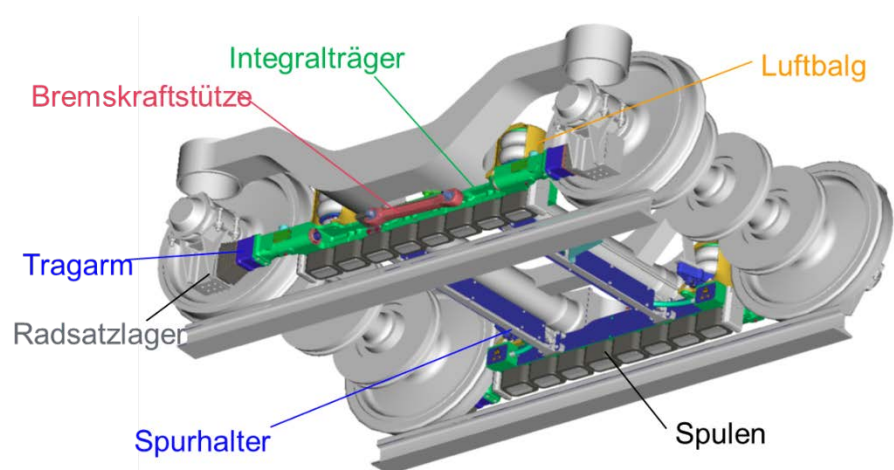


Abbildung 4: Lineare Wirbelstrombremse, schematische Darstellung [48]

### 4.1.1.1 Konstruktive Parameter

Die LWB ist im Drehgestell zwischen den beiden Radsätzen angeordnet. Die aktuelle Version der LWB besteht aus 8 Magnetspulen (Polen), die im aktivierten Zustand eine wechselnde magnetische Polarität in Schienenlängsrichtung aufweisen. Im aktivierten Zustand befinden sich die Magnetspulen in einem Abstand von etwa 5-7mm über der Schiene. [49] gibt einen Überblick über die relevanten Design- und Leistungsparameter einer LWB.

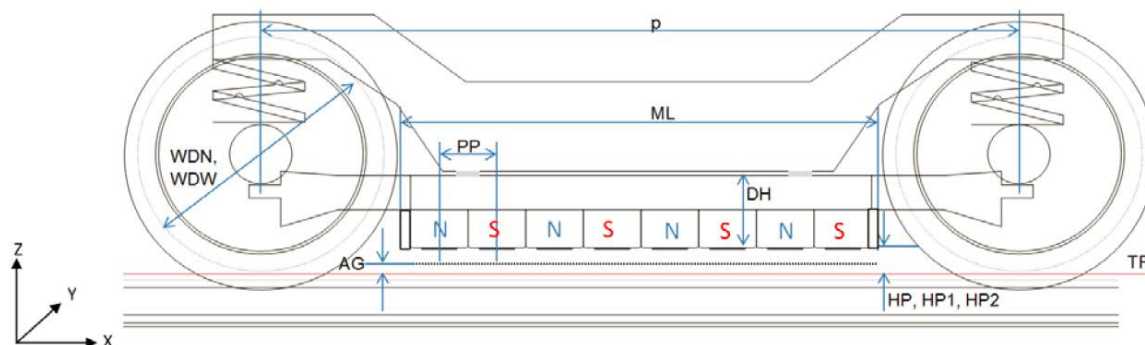


Abbildung 5: Lineare Wirbelstrombremse, Seitenansicht [48]

In Tabelle 12 sind wesentliche konstruktive Parameter der LWB, unter anderem in Bezug auf die Darstellung in Abbildung 5, angegeben.

Abkürzung	Bezeichnung		Wert / Wertebereich	Anmerkung
AG	Luftspalt (aktiv)		5 – 9 mm	Nominal: 7 mm
PP	Abstand zwischen den einzelnen Polen		80 bis 200 mm	
	Breite der Magnete (lateral)		130 – 135 mm	
NP	Anzahl der Pole		2 bis 10	
HP	Ruheposition		87,5 mm	eingefedert: 37,5 mm

Tabelle 12: Wesentliche konstruktive Parameter [49]

### 4.1.1.2 Energieversorgung

Die elektrische Energieversorgung einer LWB kann entweder über eine Batterie (z.B. 110 V) oder über einen Abgriff der Zwischenkreisspannung (DC-Link-Voltage) der Fahrzeugtraktionseinheit erfolgen. Der Stromfluss (DC) durch die Spulen der LWB beträgt dabei zwischen ca. 10 und 95 A (u.a. abhängig von der erforderlichen Bremsleistung).

Während bei der Energieversorgung über die Batterie normalerweise keine oder nur wenige harmonische Signalanteile (Spannungsschwankungen) auftreten, weist die Energieversorgung über die Zwischenkreisspannung der Fahrzeugtraktionseinrichtung typischerweise harmonische, höherfrequente Signalanteile auf, die u.a. aus den Schaltvorgängen der Stromrichter sowie der Motorstromrichter der Traktionseinheit resultieren. Höherfrequente harmonische Spannungsschwankungen haben äquivalente höherfrequente Schwankungen des Stromes durch die Spulen der LWB und damit entsprechende Schwankungen der magnetischen Feldemission (Streifelder) der LWB zur Folge. Abhängig von den spektralen Anteilen dieser magnetischen Feldemissionen können einzelne signaltechnische Komponenten beeinflusst bzw. gestört werden (siehe auch Kapitel 4.1.2.3).

### 4.1.1.3 Verkabelung, elektrische Ankopplung

Tests und der Betrieb der LWB haben gezeigt, dass die Verkabelung und elektrische Ankopplung der LWB an die Energieversorgung (z.B. Traktionszwischenkreis) sowie die Verbindung zwischen den zwei LWB eines Drehgestells einen signifikanten Einfluss auf die Beeinflussung einzelner Achszählerbauarten (z.B. ZP 43) haben (u.a. [52]).

So können parasitäre Kabelkapazitäten in Verbindung mit den Induktivitäten der LWB-Spulen elektrische Resonanzkreise bilden, deren Resonanzfrequenzen im Arbeitsfrequenzbereich einzelner Achszählerbauarten liegen. Durch die Installation zusätzlicher Drosseln/Induktivitäten oder Bandsperrfiltern in den Verbindungspfaden der LWB bzw. durch eine gezielte Führung/Abschirmung des magnetischen Flusses im Bereich der LWB-Magnete können derartige Beeinflussungen verhindert oder reduziert werden. Um derartige Beeinflussungen gering zu halten sollten parasitäre Kabelkapazitäten so klein als möglich gehalten werden. Resultierende Resonanzfrequenzen sollten nicht in den Arbeitsfrequenzbereichen von Achszähler liegen (siehe z.B. TR EMV – Teil 3 [29] sowie das in ERA/ERTMS/033281, Interface Dokument [51] definierte Frequenzmanagement für Achszähler).

### 4.1.1.4 Feldverteilung der aktiven LWB im Bereich der Schiene

Die magnetischen Felder der LWB werden von Gleichstrom durchflossenen Magnetspulen (Polen) erzeugt. Die magnetischen Felder schließen jeweils den Magneten und die darunter liegende Schiene ein. Die von der LWB erzeugten magnetischen Felder können in zwei Bereiche eingeteilt werden:

- a) Nutzfeld: Bildet sich in x-z-Ebene zwischen den Polschuhen und dem Schienenkopf aus. Die magnetische Flussdichte kann in diesem Bereich – unmittelbar unterhalb der Polschuhe – bis über 2 T erreichen. Die hohen magnetischen Felder führen zu einer Sättigung des vom magnetischen Fluss durchdrungenen ferromagnetischen Materials (Schiene).
- b) Streufeld: Bildet sich in x-, y- und z-Richtung um die gesamte Schiene und den Magneten der LWB aus und hängt von der Güte der magnetischen Kopplung zwischen den Polschuhen und dem Schienenkopf ab. Ein größerer Luftspalt und die damit einhergehende geringere magnetischen Kopplung zwischen Schienenkopf und Polschuh führt zu höheren Streufeldern. Ebenso führt die auf Grund des Skin-Effekts mit zunehmender Überfahrtgeschwindigkeit der Magnetpole über die Schiene resultierende Abnahme der magnetischen Kopplung zwischen Schienenkopf und Polschuh zu einer Zunahme des Streufeldes.

Messergebnisse der Fa. Knorr-Bremse für die LWB vom Typ EWB 154 R [55] kommen bei einem Strom von 95 A, einem Abstand von 4 mm zur Schienenoberkante und einer Hochrechnung auf eine Geschwindigkeit von 400 km/h auf ein Streufeld von etwa 135 mT (Betrag des magnetischen Flusses ermittelt aus der Wurzel der Summe der quadratischen Streufeldanteile in x-, y- und z-Richtung). Aus den Diagrammen in [55] lassen sich im Bereich der Montageposition der Messantenne nach [51] folgende Magnetfeldanteile ableiten.

Maximales Magnetfeld (Betrag):	135 mT
Anteil x-Richtung:	120 mT
Anteil y-Richtung:	28 mT (ca. 25% des Feldanteils in x-Richtung)
Anteil z-Richtung:	34 mT (ca. 30% des Feldanteils in x-Richtung)

Mit der Bewegung des Zuges resultieren, bezogen auf einen ortsfesten Punkt an der Schiene (z.B. Montageposition eines Achszählers), aus den Streufeldern der aktiven LWB – abhängig vom Abstand der Magnetpole der LWB (z.B. 0,18m) und der Geschwindigkeit – niederfrequente, sinusförmige Magnetfeldänderungen, die typischerweise im Frequenzbereich von etwa 40 bis 300 Hz liegen ( $f = v / (3,6 \times 2 \times \text{Polabstand})$ ); siehe auch Kapitel 4.1.2.2).

	26	21	16	11	in cm
B - Feld in	4	10	29	102	-2 (3)
mT	4	9	24	75	-7
	2	6	10	21	-12
	1	3	4	6	-17

Abbildung 6: Magnetfeldverteilung einer aktiven LWB im Nahbereich der Schiene [54]

*Typ EWB 154 R; Strom 95 A, Abstand zur Schiene 4 mm, Geschwindigkeit 0 km/h;  
Blau umrandeter Bereich kennzeichnet in etwa den Bereich der Magnetfeldsonden nach [50];  
Nullpunkt bezogen auf Schienenoberkante und Schienenkopfmittle (Koordinaten in y-/z-Richtung)*

#### 4.1.1.5 Betriebszustände

In Verbindung mit der Beeinflussung der LST sind folgende drei Betriebszustände der LWB relevant:

- Ruhelage: LWB mehr als 40 mm über SO, nicht bestromt  
*Keine Beeinflussung durch Streufelder sowie Metallmasse/elektr. Ankopplung der LWB*
- Absenklage, passiv („Bremsbereit“): LWB typischer Weise ca. 5-7 mm über SO, nicht bestromt  
*Keine Beeinflussung durch Streufelder; Metallmasse/elektrisch Ankopplung der LWB kann gegebenenfalls bei unmittelbar an der Schiene montierten Komponenten zu Beeinflussungen führen*
- Absenklage, aktiv: LWB typischer Weise ca. 5-7 mm über SO, bestromt  
*Die aus der Sättigung der Schiene herrührende Veränderung der Magnetfeldkopplung (über Schiene bzw. zum Spurkranz der Räder) sowie höherfrequente Magnetfeldanteile über die Energieversorgung der linearen LWB sind zu berücksichtigen (getrennte Bewertung für niederfrequente / hochfrequente Felder)*

In Abbildung 7 sind die Betriebszustände der LWB dargestellt. Die angegebenen Nummern (1-9) beziehen sich auf den in Abbildung 8 dargestellten typischen Verlauf eines Achszählerausgangssignals (Pegel) bei den jeweiligen Betriebszuständen.

*Anmerkung: Radsensoren/Achszähler arbeiten nach dem Prinzip der magnetischen Kopplung zwischen den unmittelbar an der Schiene montierten Sende- und Empfangseinrichtungen und weisen damit ein hohes Beeinflussungspotential durch die LWB auf. Da hier alle relevanten Beeinflussungssituationen auftreten („worst case“), werden im Folgenden meist die Auswirkungen auf Achszähler beschrieben.*

Die Bremssteuerung einer LWB kann folgende Basis-Modus einnehmen:

- LWB gesperrt
- LWB nur für Schnellbremsung freigegeben
- LWB für Betriebsbremsung und Schnellbremsung freigegeben (hier u.a. ab  $v \geq 50$  km/h)

*Anmerkung: Typischerweise wird die LWB zur Geschwindigkeitsreduzierung von hoher Geschwindigkeit bis zu einer Minimalgeschwindigkeit von 50 km/h eingesetzt.*

Die Auswahl bzw. Festlegung des jeweiligen Basis-Modus erfolgt in der Regel in Abhängigkeit vom streckenseitigen Ausrüstungsstand. So ist auf dem Schienennetz der DB Netz AG der Einsatz der LWB für Betriebsbremsung nur auf ausgewählten Streckenabschnitten erlaubt, bei denen u.a. keine signaltechnischen Einrichtungen/Komponenten verbaut sind, die durch eine aktive LWB beeinflusst bzw. gestört werden können.

Sobald die LWB für eine Bremsung freigegeben ist, wird sie bei einer Bremsung auch abgesenkt (-> passive Arbeitsposition). Der Abstand der LWB zur Schienenoberkante wird in der passiven Arbeitsposition durch einen mechanischen Anschlag fixiert (z.B. 5 mm). Die elektrische Aktivierung der LWB erfolgt dann über das Bremsmanagement. Im aktiven Zustand wird bei Bedarf - abhängig von Geschwindigkeit und Bremskraft - mittels einer pneumatischen Gegendrucksteuerung das Durchbiegen der LWB durch die hohen Anzugskräfte zur Schiene - kompensiert (Balkenanordnung, Durchbiegung bei hohen Kräften um einige mm möglich).

Im Status Bremsbereitschaft verbleibt die passive LWB in der abgesenkten Arbeitsposition und wird abhängig vom Bremsbedarf über das Bremsmanagement elektrisch aktiviert oder deaktiviert.

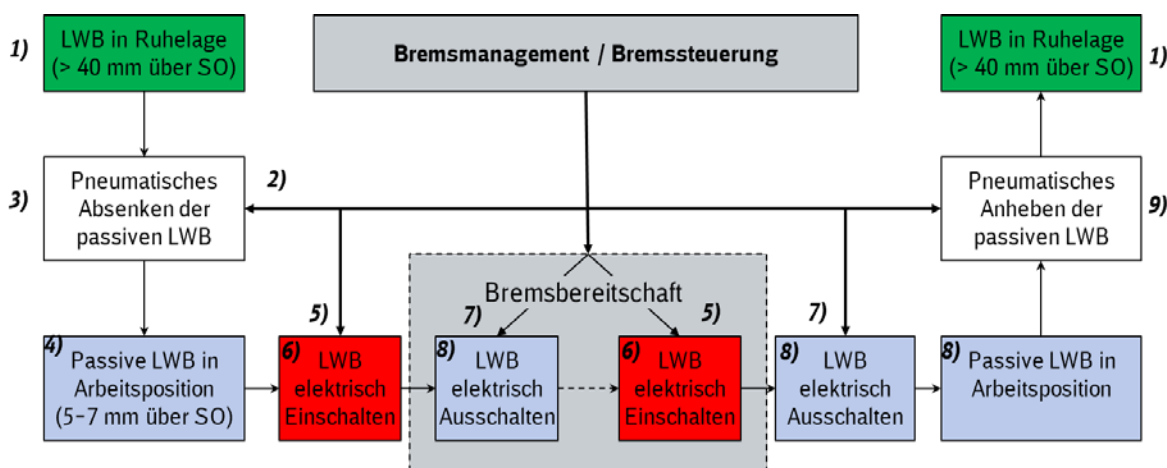


Abbildung 7: Betriebszustände der LWB

Abbildung 8 zeigt beispielhafte den Signalverlauf (Pegel des Ausgangssignals) eines Achszählers für die verschiedenen Betriebszustände einer LWB. Die Ausprägung und Richtung der Signaländerungen hängen u.a. vom Design und Layout der jeweiligen Achszählertypen ab und können variieren.

Anmerkung: Der prinzipielle Verlauf und das typische Verhalten wurden so von den verschiedenen Achszählerherstellern bestätigt.

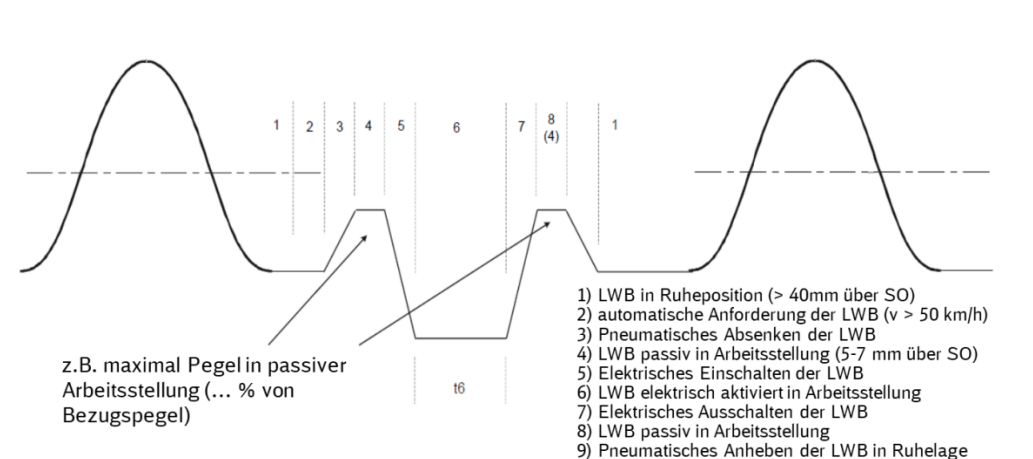


Abbildung 8: Beispielhafter Signalverlauf eines Achszählers für verschiedene Betriebszustände der LWB

Entscheidend für eine eindeutige und sichere Identifikation der jeweiligen Betriebszustände der LWB ist im Wesentlichen die für die Achszähler/Radsensoren in den einzelnen Betriebszuständen wirksame, detektierbare Metallmasse der LWB.

In der Ruheposition (1), 40 mm über Schienenoberkante, zeigt die passive LWB keine Beeinflussung des Achszählerausgangssignals. Labormessungen zur Beeinflussung von Achszählern durch passive Magnetschienenbremsen ergaben, dass Radsensoren/Achszähler auch durch größere Metallmassen, die mehr als 40 mm von der Schienenoberkante entfernt angeordnet sind, nicht gestört werden können.

Mit Anforderung der Bremse wird die elektrisch nicht aktivierte LWB von der Ruheposition in die Arbeitsstellung (5-7mm über SO) gebracht. Die Metallmasse der passiven LWB wird vom Achszähler in Arbeitsstellung (Zustand (4)) erkannt. In dieser Position darf sich der Pegel des Achszählerausgangssignals durch die Metallmasse der LWB nur soweit ändern (hier Zunahme), dass noch eine ausreichende Detektionsreserve zur eindeutigen Raderkennung (Sinusbögen am Anfang und Ende des Signaldiagramms) gegeben ist. Mit elektrischer Aktivierung der LWB (Stromfluss durch die Magnetpole) ändert sich - auf Grund der Sättigung der Schiene sowie der Feldverdrängung durch das einhergehende Streufeld der LWB - die magnetische Kopplung zwischen dem Sender und Empfänger des Achszählers über die Schiene (Zustand (6), hier deutliche Abnahme des Pegels). Die Ausprägung dieser Pegeländerung ist bei einzelnen Achszählerbauarten unterschiedlich. Bei Radsensoren, die mit Sender-/Empfängeranordnungen beidseits der Schiene arbeiten, ist eine deutlichere Abhängigkeit von Schienensättigung und Feldverdrängung erkennbar. Bei Spurkranzsensoren ist dieser Effekt weit weniger ausgeprägt.

Mit elektrischer Deaktivierung (7) geht die LWB wieder in den Zustand der passiven LWB in Arbeitsstellung (Zustand (4) bzw. (8)) über.

### 4.1.2 Relevante Beeinflussungsmechanismen

Bezüglich der Beeinflussung von Komponenten der Leit- und Sicherungstechnik sind die nachfolgend aufgeführten drei Beeinflussungsmechanismen - passive Beeinflussung, aktive Beeinflussung im niederfrequenten Bereich, aktive Beeinflussung im höherfrequenten Bereich - von Bedeutung.

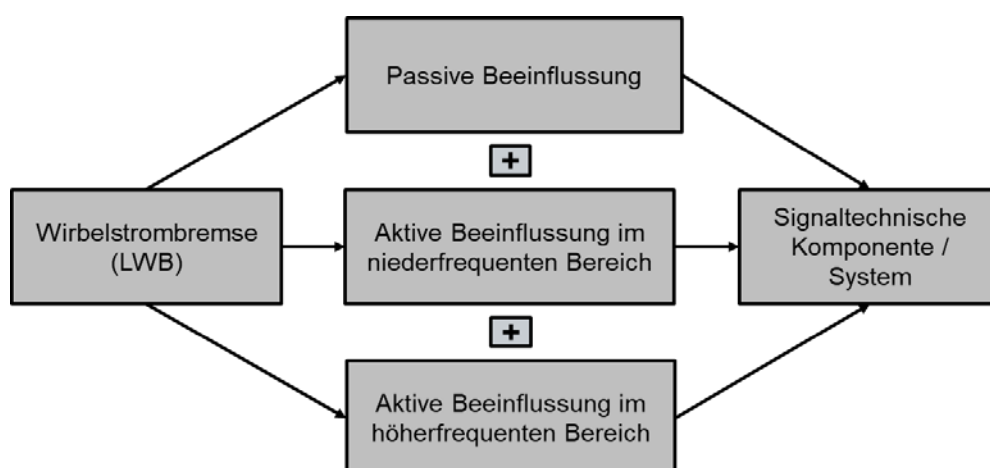


Abbildung 9: Beeinflussungsmechanismen



### 4.1.2.1 Passive Beeinflussung

Die passive Beeinflussung tritt bei nicht aktiver, unbestromter LWB auf. Bei der passiven Beeinflussung werden die von Signaleinrichtungen (z.B. Zählpunkten) erzeugten magnetischen Felder auf Grund der kompakten Metallmasse der LWB sowie deren magnetischen Verkopplung mit ggf. vorhanden parasitären elektrischen Schwingkreisen der LWB verändert.

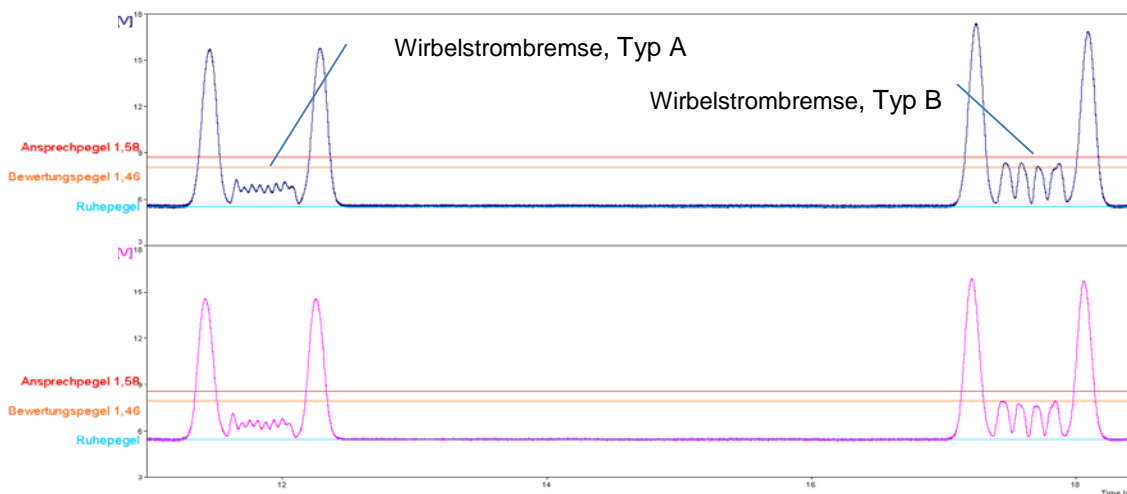


Abbildung 10: Achszählerausgangssignale mit geringer (links) und ausgeprägter (rechts) passiver Beeinflussung

So können z.B. die parasitären Kabelkapazitäten der LWB in Verbindung mit der Induktivität der LWB-Spulen elektrische Resonanzkreise bilden, deren Resonanzfrequenzen im Arbeitsfrequenzbereich einzelner Achszählerbaureihen liegen und hier zu entsprechenden Beeinflussungen führen können (siehe Abbildung 10). Abhängig von der mechanischen sowie elektrischen Auslegung der LWB (u.a. elektrische Ankopplung) und der damit verbunden magnetischen Verkopplung können z.B. die Ausgangssignale von Achszähler mehr oder weniger stark beeinflusst werden.

Während bei der Wirbelstrombremse vom Typ A (siehe Abbildung 10) nur eine geringe Beeinflussung durch die passive LWB zu erkennen ist (die einzelnen Pole der LWB sind zwischen den beiden Radimpulsen zu erkennen), zeigt die Wirbelstrombremse vom Typ B eine starke Beeinflussung, die bei noch deutlicherer Ausprägung auch zu einer Störung des Achszählers (z.B. durch Detektion eines „fälschlichen Rades“ im Bereich der LWB) und damit im realen Einsatz zu einer betrieblichen Störung führen könnte.

Die in Abbildung 10 dargestellten Effekte lassen sich auch durch Ermittlung der Beeinflussung der magnetischen Kopplung zwischen einer magnetischen Sender- und Empfangseinrichtung (Magnetfeldspulen zur Feldgenerierung sowie zu Feldmessung; Aufbau und Anordnung z.B. gemäß den Vorgaben aus [51]) ableiten (siehe hierzu auch Kapitel 4.2, Abbildung 17).

Abbildung 11 zeigt – für unterschiedliche Frequenzen – die magnetische Kopplung zwischen Send- und Empfangsspulen bei Überfahrt mit einer passiven LWB (Hin-/Rückfahrt in etwa 8 s; Messung am Prüfstand der Fa. Knorr-Bremse in Mödling [53]). Es ist zu erkennen, dass sich im Frequenzbereich ab 40 kHz der prinzipielle Verlauf ändert und eine ausgeprägte Abbildung der Endstücke der LWB auftritt. Diese Art der Beeinflussung kann – je nach Art und Intensität der Ausprägung – zu einer Beeinflussung und Störung einer unmittelbar an der Schiene montierten Komponente, die in diesem Frequenzbereich nach dem Sender-/Empfängerprinzip (Magnetfelder) arbeitet, führen.

Die für das Verhalten der Achszähler relevante Metallmasse (siehe Kapitel 4.1.3) kann aus dem Übertragungsverhalten der LWB abgeleitet und bewertet werden.

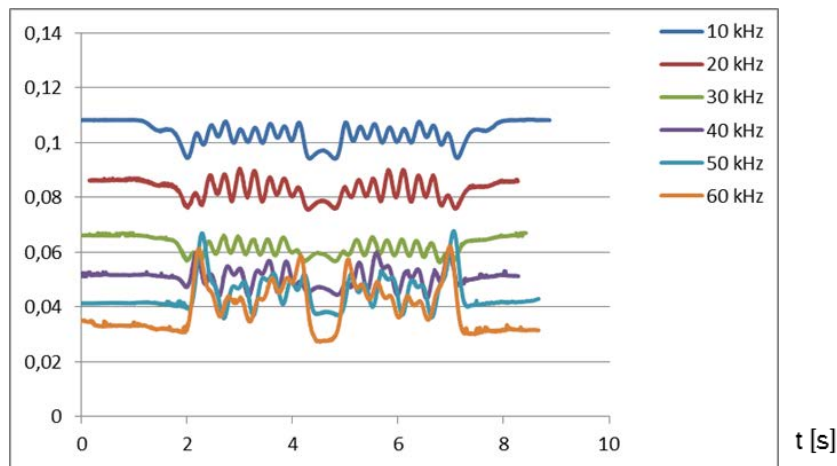


Abbildung 11: Magnetfeldkopplung über die Schiene, passive LWB

Beeinflussungen durch den passiven Effekt sind bei signaltechnischen Systemen/Komponenten möglich,

- die per magnetischer Kopplung nach dem Sender-/Empfängerprinzip arbeiten und
- deren Arbeitsfrequenzen im Bereich ausgeprägter Koppelfrequenzen der LWB liegen (siehe z.B. Abbildung 11, dort z.B. Frequenzen über 40 kHz) und
- die sehr nahe oder unmittelbar an der Schiene angeordnet sind

*Anmerkung: Magnetischer Widerstand ist in Luft deutlich größer als in ferromagnetischen Materialien (z.B. Schiene) und nimmt linear mit der Länge des Magnetfeldes zu.*

Bis dato sind störende Beeinflussungen durch den passiven Effekt nur bei einer Achszählerbauart aufgetreten, die an der Schiene montiert nach dem Sender-/Empfängerprinzip über die Schiene arbeitet. Durch konstruktive Maßnahmen an der LWB konnte diese Beeinflussung so geringgehalten werden, dass es zu keinen diesbezüglichen Störungen kommt.

#### 4.1.2.2 Aktive niederfrequente Beeinflussung

Niederfrequente Beeinflussungen werden durch die sehr starken magnetischen Nutz- und Streufelder hervorgerufen, die von der aktiven LWB beim Aufbringen der Bremsleistung bei gleichzeitiger Bewegung der Pole (wechselnde magnetische Polarität) über die Schiene erzeugt werden [59]. Abhängig vom Abstand der Pole zu einander und der Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs können niederfrequente Feldanteile von einigen hundert Hertz resultieren. Die sehr starken magnetischen DC-Felder der einzelnen LWB-Pole führen zu einer magnetischen Sättigung der Schiene sowie zu einer Änderung (Ablenkung) des magnetischen Koppelfeldes zwischen Sende- und Empfangsspule von Achszähler und Radsensoren. Im Ergebnis resultieren – mit dem Wechsel der Pole – niederfrequente Beeinflussungen, die zu einer entsprechenden niederfrequenten Modulation der Ausgangssignale von Achszähler bzw. Radsensoren führen (siehe Abbildung 12).

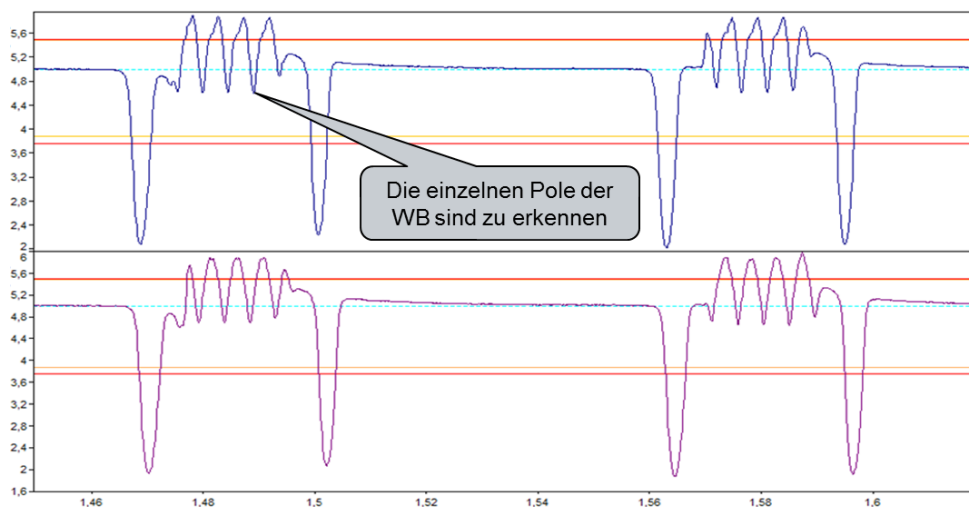


Abbildung 12: Niederfrequente Beeinflussung

Nach den Ergebnissen der Messungen der Fa. Knorr-Bremse (siehe [55]) nimmt das Streufeld sehr schnell mit dem Abstand zur Schiene ab. In Abbildung 13 sind die Streufeldwerte (Betrag) aus Abbildung 6 auf Höhe Schienenoberkante sowie Schienenfuß dargestellt. Die Feldverläufe lassen sich sehr gut durch exponentielle Kurven approximieren (Trendlinien, gestrichelte Darstellung). Bei einem Abstand von 50 cm betragen die Streufeldwerte bereits deutlich weniger als  $100 \mu T$ .

Anmerkung: Eine magnetische Flussdichte von  $100 \mu T$  wird in einem Abstand von 50 cm von der Schiene bei einem Schienenstrom von etwa 250 A erreicht.

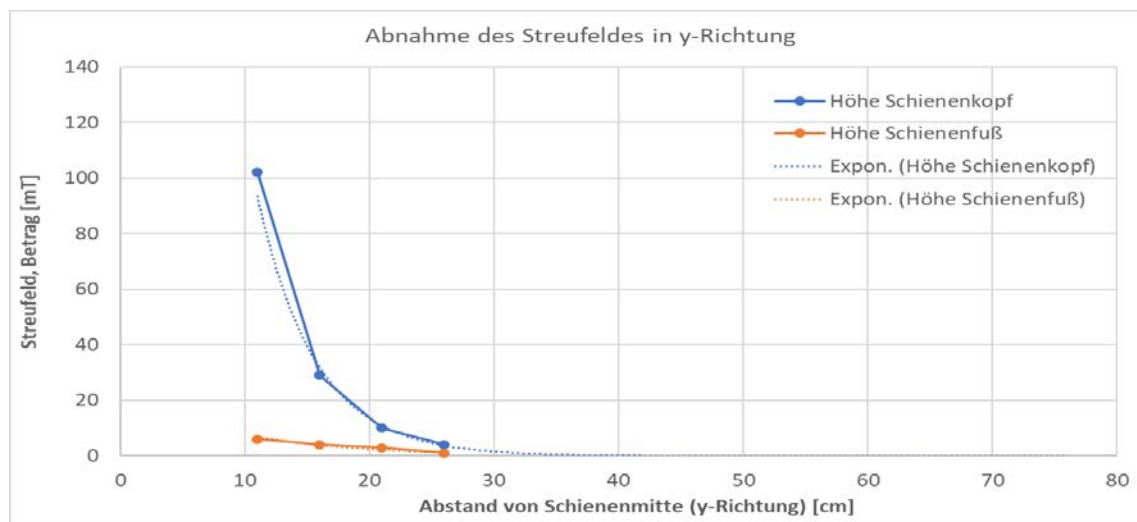


Abbildung 13: Abnahme des Streufeldes in y-Richtung (Bezug: Schienenkopfmittle)

### 4.1.2.3 Aktive hochfrequente Beeinflussung

Höherfrequente Beeinflussungen werden durch höherfrequente magnetische Feldanteile erzeugt, die u.a. von der elektrischen Energieversorgung der LWB herrühren (siehe Kapitel 4.1.1). Zudem können entsprechende Effekte auch durch schnelle Veränderungen der magnetischen Kopplung zwischen LWB und Schiene (z.B. Rauheit der Oberfläche) entstehen. Entsprechende Beeinflussungen treten in einem Frequenzbereich von etwa 10 kHz bis über 1 MHz auf.

Im Vergleich zur aktiven niederfrequenten Beeinflussung sind die höherfrequenten Magnetfeldanteile deutlich geringer und damit nur unmittelbar an der Schiene von Bedeutung.

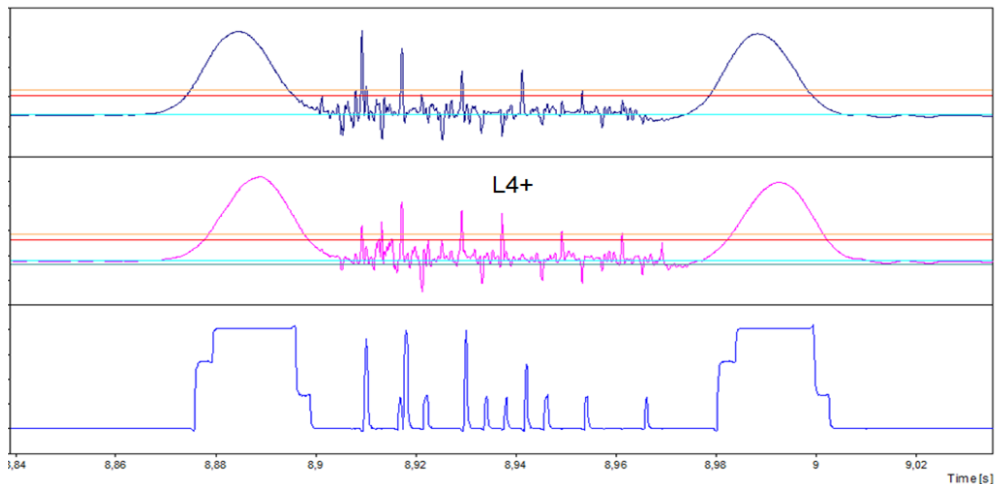


Abbildung 14: Beeinflussung durch höherfrequente magnetische Felder im Arbeitsfrequenzbereich eines Achszählers (Achszählerausgangssignale)

Störende Beeinflussungen durch höherfrequente magnetische Felder sind dann zu erwarten, wenn entsprechende Magnetfeldschwankungen im Arbeitsfrequenzbereich der betroffenen Komponenten auftreten und die relevanten Feldanteile so groß und auch lange andauern, dass sie zu einer Detektion führen. Für Achszähler bedeutet dies z.B., dass die höherfrequenten Magnetfelder die Grenzwertvorgaben nach [51] oder [29] verletzen.

#### 4.1.2.4 Zuschreibung der Beeinflussungsmechanismen zu den Betriebszuständen einer LWB

In Tabelle 13 sind den einzelnen Betriebszuständen der LWB (siehe Kapitel 4.1.1) die jeweils relevanten Beeinflussungsmechanismen zugeordnet.

Betriebszustand LWB	Beeinflussungsmechanismus			Anmerkungen
	passiver Effekt	niederfreq. Beeinflussung	hochfreq. Beeinflussung	
(1) Ruhelage, min. 40 mm über SO	x	-	-	Elektrische Anschaltung "AUS", Position oben
(3) Pneumatisches Absenken der passiven LWB	x	-	-	Elektrische Anschaltung "AUS", Position variiert
(4) LWB passiv in Arbeitsstellung (5-7 mm über SO)	x	-	-	Elektrische Anschaltung "AUS", Position unten
(5) LWB elektrisch Einschalten	x	x	x	Elektrische Anschaltung "Einschaltvorgang", Position unten
(6) LWB aktiv	x	x	x	Elektrische Anschaltung "EIN", Position unten
(7) LWB elektrisch Ausschalten	x	x	x	Elektrische Anschaltung "Ausschaltvorgang", Position unten
(8) = (4) LWB passiv in Arbeitsstellung	x	-	-	Elektrische Anschaltung "AUS", Position unten
(9) Pneumatisches Anheben der passiven LWB	x	-	-	Elektrische Anschaltung "AUS", Position variiert
(1) Ruhelage, min. 40 mm über SO	x	-	-	Elektrische Anschaltung "AUS", Position oben

Tabelle 13: Zuordnung der Beeinflussungsmechanismen zu den Betriebszuständen der LWB

Unter Anmerkung sind weitere Informationen zum jeweiligen Zustand der LWB angegeben, so z.B. das in den Zuständen (3) und (9) die Höhenlage der passiven LWB variiert bzw. in den Zuständen (5) und (7) in der Arbeitsstellung die LWB aktiviert/deaktiviert wird.

### 4.1.3 Beeinflussung von Komponenten der Signal- und Leittechnik

Systeme der Signal- und Leittechnik können unter anderem durch die Magnetfeldemissionen der LWB beeinflusst werden. Abhängig von den im Bereich der Schiene installierten bzw. angeordneten Komponenten wirken unterschiedliche Beeinflussungsmechanismen (siehe Kapitel 4.1.2).

Sehr starke Magnetfelder können zudem zu einer permanenten Schädigung oder Zerstörung einzelner signaltechnischer Komponenten – z.B. Radsensoren und Achszähler wie MK und DMK, die nach dem permanentmagnetischen Prinzip arbeiten – führen.

Basierend auf den Ergebnissen aus zahlreichen Versuchen und Untersuchungen im Rahmen der Zulassung der LWB vom Typ EWB 154 R für den ICE 3 wurde eine „Maßnahmenliste Wirbelstrombremse“ [3] erstellt. Die Liste beschreibt Maßnahmen, die an streckenseitigen Einrichtungen der LST umgesetzt werden müssen, bevor von Seiten der DB Netz AG und dem EBA der Einsatz der LWB auf einer Strecke freigegeben werden kann.

Den in der Liste geführten LST-Komponenten sind – abhängig von den erforderlichen Maßnahmen zur Gewährleistung der Kompatibilität mit der LWB (Typ EWB 154 R) – jeweils folgende Kategorien zugeordnet:

- **Kategorie 0:** Für diese LST-Komponenten sind keine Infrastrukturmaßnahmen erforderlich, da nachgewiesen werden konnte, dass bei Einsatz der LWB keine störenden Beeinflussungen erzeugt werden bzw. ein ausreichender Stör-/Nutzsignalabstand eingehalten wird.
- **Kategorie 1:** Für diese LST-Komponenten ist nur ein geringer Änderungsaufwand in der LST-Außenanlage erforderlich (z.B. Ersatz einzelner Baugruppen oder eines Schienenkontakts bei Zählpunkten).
- **Kategorie 2:** Für diese LST-Komponenten ist in der Regel der Ersatz einer kompletten Komponente der LST-Außenanlage erforderlich (z.B. Ersatz eines Zählpunktes durch einen WB-festen Zählpunkt-Typ) und ggf. eine einzelne Baugruppe der LST-Innenanlage zu wechseln. Es sind keine Umprojektierungen und PT 1- und/oder PT 2-Planungen erforderlich.
- **Kategorie 3:** Für diese LST-Komponenten sind umfangreich Änderungen und Umbauten bei der LST-Technik im Innen- und Außenbereich erforderlich. Teilweise sind hier Umprojektierungen, PT 1- und/oder PT 2-Planungen sowie Abnahmen durch das Eisenbahn-Bundesamt erforderlich.

Die Liste wird gemäß neuen Erkenntnissen (Betrieb) bzw. bei Installation neuer signaltechnischer Komponenten im Kreis Infrastruktur (DB Netz AG) und EBA fortgeschrieben und zur Umsetzung freigegeben.

Anhand der Maßnahmenliste [3] lässt sich folgende Klassifizierung der LST-Komponenten durchführen:

- a) LST-Komponenten, die durch die LWB beeinflusst werden können (siehe Kapitel 4.1.3.1); Komponenten, denen gemäß [3] Maßnahmen der Kategorien 1, 2 oder 3 zu geschieden wurden.
- b) LST-Komponenten, die durch die LWB nicht beeinflusst werden (siehe Kapitel 4.1.3.2); Komponenten, denen gemäß [3] Maßnahmen der Kategorie 0 zu geschieden wurden.

#### 4.1.3.1 LST-Komponenten die durch die LWB beeinflusst werden können

Als besonders beeinflussungsrelevant sind die Komponenten zu sehen, die unmittelbar an der Schiene montiert werden und deren Funktion auf der magnetischen Kopplung zwischen den an der Schiene montierten Sende- und Empfangseinrichtungen basiert wie z.B. Radsensoren/Zählpunkte oder Geschwindigkeitsüberwachungseinrichtungen.

Maßnahmen der Kategorie 3 sind in [3] den folgenden Zählpunkten zugeordnet (Klammerwert gibt die Größenordnung der Anzahl der in der Infrastruktur installierten Komponenten an):

- MK: Magnetschienenkontakt, Zählpunkt (ca. 23.720, davon etwa 22.910 in BÜ-Anlagen)
- DMK: Doppelmagnetschienenkontakt, Achszähler (ca. 1.250)
- S 44: Schienenkontakt S 44, Zählpunkt (ca. 2.140)
- Sk11: Schienenkontakt Sk11, Zählpunkt (ca. 1.765)

Zählpunkte und Achszähler, die mit Permanentmagneten arbeiten (MK, DMK), können durch sehr hohe Magnetfelder dauerhaft gestört/zerstört werden (Entmagnetisierung der Permanentmagnet). Die pneumatischen Druckkontakte des S 44 können ebenso wie die Zählpunkte vom Typ Sk11 durch die hohen Magnetfelder der LWB gestört werden. Derzeit sind in Summe noch ca. 28.900 Zählpunkte/Achszähler, die in [3] der Kategorie 3 zugeordnet sind, im Netz verbaut.

Den Maßnahmenkategorien 1 und 2 sind die nachfolgend aufgeführten Zählpunkte, Impulsgeber sowie Geschwindigkeitsüberwachungseinrichtungen zugeordnet:

- ZP 70 M, ZP 70 E: Zählpunkte ZP 70 M / ZP 70 E (in Summe ca. 8.210)
- ZP 43 M, ZP 43 E: Zählpunkte ZP 43 M / ZP 43 E (ZP 43 M ca. 2.120; ZP 43 E ca. 14.300)
- Zp 30 / Zp 30 C mit Sk 30 bzw. Sk 30 H: Zählpunkte Zp 30 / Zp 30 C mit Schienenkontakt Sk 30 bzw. Sk 30 H (in Summe ca. 8.165 Zählpunkte)
- WSSB-IG: WSSB-Impulsgeber (ca. 3.310)
- FEW-IG: FEW-Impulsgeber (ca. 2.850)
- Tiefenbach: Schaltkontakte der Fa. Tiefenbach, eingesetzt in Verbindung mit Heißläuferortungsanlagen
- GÜ 60, GÜ PZ 80: Geschwindigkeitsüberwachungseinrichtungen GÜ 60 bzw. GÜ PZ 80 als Komponenten der Geschwindigkeitsprüfeinrichtung der PZB

Derzeit sind in Summe noch ca. 39.000 Zählpunkte/Impulsgeber, die in [3] den Kategorien 1 und/oder 2 zugeordnet sind, im Netz verbaut. Von den in [3] adressierten Geschwindigkeitsüberwachungseinrichtungen (GÜ 60 bzw. GÜ PZ 80) sind ca. 4.170 Komponenten im Netz verbaut (in Summe ca. 6.530 Überwachungseinrichtungen).

*Anmerkung 1: Zu den Zählpunktfamilien ZP 43 E der Fa. Siemens sowie Zp 30 der Fa. Thales existieren zwischenzeitlich Wirbelstrombremsen-taugliche Weiterentwicklungen; In den Jahren 1999 und 2000 wurden auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke Fulda-Würzburg zahlreiche Versuche mit verschiedenen LWB-ertüchtigten Achszählern und Radsensoren (u.a. Zp 30 mit Sk30 H-WB, ZP 43 M/E-WB) durchgeführt [54]. Die Versuche zeigten, dass die Achszähler zwar sehr stark – bis nahe an die jeweiligen Detektionsgrenzwerte – beeinflusst wurden, jedoch keiner der ertüchtigten Achszähler von der aktiven LWB so stark gestört wurde, dass z.B. Fehlzählungen auftraten oder Grenzwerte überschritten wurden.*

*Anmerkung 2: Die Geschwindigkeitsprüfeinrichtung nutzt die Ausgangssignale von an den Schienen installierten Balisen (Gleismagnete/Indusi mit Arbeitsfrequenzen von 500 Hz, 1000 Hz,*

2000 Hz) zur Ermittlung der aktuellen Geschwindigkeit eines Fahrzeugs; Versuche, die in 1999 auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke Fulda-Würzburg durchgeführt wurden, zeigten, dass durch die LWB einzelne sporadische Störungen (Transiente/Peaks) induziert werden können. Aufgrund der speziellen Anforderungen des GPE-Systems wie z.B. minimale Zeit zwischen einzelnen Pulsen, erforderliche Anzahl relevanter Pulse innerhalb eines bestimmten Zeitfensters – konnte das GPE-System nicht in unerlaubter Weise gestört werden [54]. Dennoch wurde vorsorglich ein Austausch der streckenseitigen Schaltkästen der GÜ 60 bzw. GÜ PZ 80 veranlasst.

Bei den unter Kapitel 4.1.3.1 aufgeführten Komponenten (in Summe ca. 72.000 signaltechnische Komponenten) handelt es sich fast ausnahmslos um nicht WB-feste Alttechniken, die in den oben aufgeführten Bauformen/Ausführungen nicht mehr neu verbaut werden (Trend: Zahl dieser verbauten Komponenten deutlich abnehmend). Es ist davon auszugehen, dass die adressierten LST-Komponenten im gesamten Netz verbaut sind.

Die LWB darf auf Strecken, auf denen die oben aufgeführten Zählpunkte, Schaltkontakte, Impulsgeber bzw. Geschwindigkeitsüberwachungseinrichtungen in der in der Maßnahmenliste [3] geführten Ausführung installiert sind, nicht genutzt werden

#### 4.1.3.2 LST-Komponenten die nicht durch die LWB beeinflusst werden

Für die nachfolgend aufgeführten LST-Komponenten konnte - u.a. während der Zulassung des ICE 3 mit der LWB vom Typ EWB 154 R [54] bzw. mit der Einführung als neue LST-Komponente - nachgewiesen werden, dass bei Einsatz der LWB (Typ EWB 154 R) keine störenden Beeinflussungen erzeugt werden bzw. ein ausreichender Stör-/Nutzsicherheitsabstand eingehalten wird. Den Komponenten ist - sofern in der Maßnahmenliste [3] geführt - dort die Maßnahmenkategorie 0 zugeordnet.

##### ▪ Zählpunkte / Radsensoren

Folgenden Zählpunkten bzw. Radsensoren wurden nach [3] die Maßnahmenkategorie 0 zugeordnet und/oder sie werden in der aktuellen Technischen Regel TR-EMV - Teil 3 (Sensorik) [29], Anhang B als Wirbelstrombremsentaugliche Komponente (gilt für EWB 154 R) geführt:

- RSE 45	Radsensor (Fa. Siemens)
- RSL	Radsensor (Fa. Thales)
- Zp 30 C-NT / Zp 30 H / Zp 30 K	Zählpunkte (Fa. Thales)
- ZP 43 M-WB / ZP 43 E-WB / ZP D43 / ZP D43 ISDN	Zählpunkte (Fa. Siemens)
- WSD	Zählpunkt (Fa. Siemens)
- RSR 122 / RSR 123	Zählpunkte (Fa. Frauscher)
- AZSB 300	Achssensor (Fa. Scheidt&Bachmann)
- WSR, WSS	Radsensoren (Fa. Siemens)

Derzeit sind in Summe ca. 60.700 Zählpunkte/Radsensoren, die in [3] der Kategorie 0 zugeordnet sind, im Netz verbaut (Tendenz steigend).

*Anmerkung: Moderne Radsensoren und Achszähler - im wesentlichen Class-A-Systeme – sind in der Lage, die in Kapitel 4.1.1.5 aufgeführten Betriebszustände einer LWB zu identifizieren (Pegel, Zeitverhältnisse) und zur eindeutigen Raddetektion heran zu ziehen.*

*Anhang B der Technischen Regel TR-EMV - Teil 3 (Sensorik) [29] enthält zudem einen Hinweis, dass neue Fahrzeugbaureihen mit WB (Typ EWB 154 R) bzw. mit einem neuen WB-Typ die im Anhang mit (WB) gekennzeichneten LST-Komponenten nicht störend beeinflussen dürfen.*

Zur Gewährleistung der Kompatibilität mit der LWB sind Anforderungen an Zählpunkte / Radsensoren / Achszähler sowie an die LWB zu definieren (siehe Kapitel 4.2); Unter Beachtung dieser Vorgaben sollten zukünftig keine Beeinträchtigungen durch die LWB auftreten.

#### ▪ **Gleisstromkreise**

In [54] wird u.a. aufgeführt, dass linienförmige signaltechnische Einrichtungen – und hiermit auch Gleisstromkreise - bis 25 kHz durch die LWB nicht unzulässig beeinflusst werden.

Diese Aussagen wurden durch die Ergebnisse entsprechender Messungen im Projekt ECUC an 100 Hz-Gleisstromkreisen [56] bestätigt. Messungen die im Rahmen der Zulassung des ICE 3 mit tonfrequenten Gleisstromkreisen vom Typ FTGS 917 auf dem Schienennetz der DB Netz AG absolviert wurden, zeigten ebenfalls, dass durch den Einsatz der LWB im Arbeitsfrequenzbereich der FTGS 917-Gleisstromkreise (9,5 kHz bis 16,5 kHz) keine störenden Beeinflussungen auftreten [54].

Relevante Gleisstromkreise nach [57]:

- NF-Gleisstromkreise: 42 Hz, 50 Hz, 100 Hz
- Tonfrequente Gleisstromkreise: GLS 9/15, FTGS 46, FTGS 917, EON 7

*Anmerkung: Weitere Daten zu den aufgeführten Gleisstromkreisen können der TR EMV - Teil 2 [57] entnommen werden.*

Zur Gewährleistung der Kompatibilität mit der LWB sind keine gesonderten Anforderungen an Gleisstromkreise zu definieren. Es sind keine Beeinträchtigungen durch die LWB zu erwarten.

#### ▪ **Bahnübergangsschleifen**

Im Jahr 1999 wurden von der DB AG im Rahmen der Zulassungsmessungen des mit einer LWB (Typ EWB 154 R) ausgerüsteten ICE 3 umfangreiche Tests zur Untersuchung der Beeinflussung von Bahnübergangsschleifen durch eine LWB absolviert. Im Ergebnis sind bei den Messungen keine relevanten Beeinflussungen festgestellt worden [54].

Relevante BÜ-Schleifen nach [29]:

- FSSB 60 kHz, 70 kHz, 80 kHz (Fa. Scheidt&Bachmann)
- BÜBM 1, BÜBM 2 (Fa. Scheidt&Bachmann)
- FSP 12-19 kHz, FSP 22-35 kHz (Fa. Pintsch Bamag / Tiefenbach)
- FS S1-K (Fa. Siemens)

Zur Gewährleistung der Kompatibilität mit der LWB sind keine gesonderten Anforderungen an BÜ-Schleifen zu definieren. Es sind keine Beeinträchtigungen durch die LWB zu erwarten.

#### ▪ **Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB)**

Die PZB nutzt Gleismagnete (INDUSI) als passive Einrichtungen im Gleisbereich (Balisen mit Arbeitsfrequenzen von 500 Hz, 1000 Hz sowie 2000 Hz). Nur wenn sich eine Fahrzeugmagnet in ihrem Kopfbereich (ca. 2,5m) befindet, führen sie ihre Funktion aus. Nach [54] waren bei den zum Nachweis der Kompatibilität der LWB mit der PZB durchgeführten Versuchen an den PZB-Gleismagneten nur sehr geringe, von der LWB verursachte Beeinflussungen erkennbar, die zu keiner Störung der PZB-Funktion führten.

Zur Gewährleistung der Kompatibilität mit der LWB sind keine gesonderten Anforderungen an die PZB (Gleismagnete) zu definieren. Es sind keine Beeinträchtigungen durch die LWB zu erwarten.

#### ▪ **Linienförmige Zugbeeinflussung (LZB)**

In 1999 wurden auf einem Abschnitt der Hochgeschwindigkeitsstrecke Fulda-Würzburg Versuche zum Nachweis der Kompatibilität der LWB des ICE 3 mit dem LZB-System durchgeführt [54]. Bewer-



tet wurde die Fehlerrate der übertragenen LZB-Telegramme. Da keine Fehler in den übertragenen Telegrammen festgestellt werden konnten, gab es auch keinen Anlass für infrastrukturseitige Korrekturmaßnahmen.

Zur Gewährleistung der Kompatibilität mit der LWB sind keine gesonderten Anforderungen an die LZB zu definieren. Es sind keine Beeinträchtigungen durch die LWB zu erwarten.

- **Eurobalise** (Punktförmiges Datenübertragungssystem)

Tests und Untersuchungen, die im Jahr 2000 von der Fa. Siemens auf einem Streckenabschnitt der Hochgeschwindigkeitsstrecke Fulda-Würzburg durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass die Eurobalise auch bei aktiver LWB sicher und zuverlässig arbeitet [54].

Zur Gewährleistung der Kompatibilität mit der LWB sind keine gesonderten Anforderungen an die Eurobalise zu definieren. Es sind keine Beeinträchtigungen durch die LWB zu erwarten.

- **Geschwindigkeitsüberwachung (GPE) der PZB**

Versuche, die in 1999 auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke Fulda-Würzburg durchgeführt wurden, zeigten, dass durch die LWB einzelne sporadische Störungen (Transiente/Peaks) induziert werden können. Aufgrund der speziellen Anforderungen des GPE-Systems wie z.B. minimale Zeit zwischen einzelnen Pulsen, erforderliche Anzahl detektierbarer Pulse innerhalb eines bestimmten Zeitfensters – konnte das GPE-System jedoch nicht in unerlaubter Weise gestört werden [54].

Zur Gewährleistung der Kompatibilität mit der LWB sind keine gesonderten Anforderungen an die GPE zu definieren. Es sind keine Beeinträchtigungen durch die LWB zu erwarten.

- **Geschwindigkeitsüberwachung für NeiTech-Züge (GNT)**

Die GNT wird als Ergänzung der punktförmigen Zugbeeinflussung (PZB) zur Geschwindigkeitsüberwachung für Neigetechnik-Züge genutzt. Gleisseitig sind – zur Datenkommunikation mit dem Fahrzeug – entweder spezielle Gleiskoppelpulen (rechts neben der rechten Schiene) oder Eurobalisen verlegt. Die Gleiskoppelpulen sind etwas schmaler als PZB-Magnete, liegen aber geometrisch an der gleichen Stelle im Gleis. In der WB-Maßnahmenliste [3] wurde der GNT die Maßnahmenkategorie 0 zugeordnet.

Zur Gewährleistung der Kompatibilität mit der LWB sind keine gesonderten Anforderungen an die GNT zu definieren. Es sind keine Beeinträchtigungen durch die LWB zu erwarten.

- **Kabel**

Von der DB AG wurden 1999 auf einem Streckenabschnitt der Schnellfahrstrecke Fulda-Würzburg umfangreiche Messungen zur Untersuchung des Einflusses der LWB (Typ EWB 154 R) auf Signalkabel (unterschiedliche Kabeltypen, ohne Schirmung, montiert am Schienenfuß sowie in einem Abstand von ca. 1 m zur Schiene, verschiedene Fehlersituationen, ... ) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass im Frequenzbereich bis 25 kHz nur geringe, unbedeutende Beeinflussungen durch die LWB auftreten und die Beeinflussungen auch über 25 kHz sehr gering sind [54].

Zur Gewährleistung der Kompatibilität mit der LWB sind keine gesonderten Anforderungen an die Kabel zu definieren. Es sind keine Beeinträchtigungen durch die LWB zu erwarten.

#### 4.1.4 Anzugskraft der aktiven LWB auf metallische Teile / Abdeckungen

Aufgrund des Streufelds der aktiven LWB ist es möglich, dass lose ferromagnetische Teile nahe der Schiene von der LWB angezogen werden. Vor und während der ersten Monate des ICE 3-Betriebs wurden alle ferromagnetischen Teile nahe der Schiene fixiert und deren korrekte Position bzgl. der Schiene überprüft. Besonders die Gehäuse von Weichenantrieben (können noch im Einwirkungsbereich der aktiven LWB liegen) waren des Öfteren auffällig und mussten nachträglich nochmals befestigt werden.

Abbildung 15 zeigt die magnetischen Kräfte einer aktiven LWB, die auf ferromagnetische Teile im Nahbereich der Schiene einwirken können. Die angegebenen Kräfte  $[N/m^2]$  und die dargestellten Feldprofile beziehen sich auf die Mitte zwischen zwei Polschuhen (lokales Kraftmaximum). Vorgaben zur möglichen Krafteinwirkung auf ferromagnetische Teile in unmittelbarer Nähe zur Schiene sollten zukünftig in der EN 50617-2 [60] sowie in den Standards zu Auslegung von Weichenantrieben aufgenommen werden.

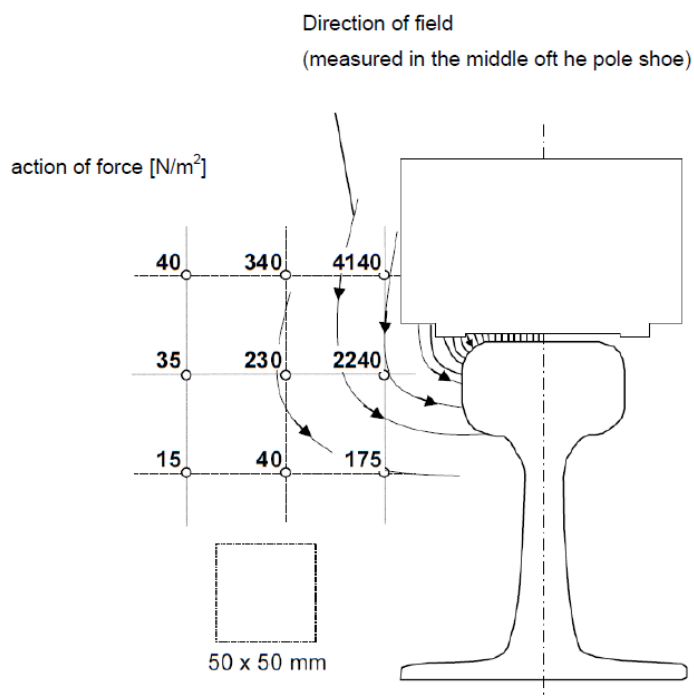


Abbildung 15: Kräfte (Streufeld) einer LWB (Typ EWB 154 R) die unter normalen Betriebsbedingungen an der Oberfläche von magnetisierbaren Objekten angreifen können [48]

#### 4.1.5 Einfluss der Schientemperatur auf Komponenten der LST

Aufgrund des Energieeintrags der aktiven LWB in die Schiene erhöht sich beim Bremsen mit der LWB die Schienenkopftemperatur (siehe Kapitel 3, Arbeitspaket 2). Entscheidend für die im Gleisbereich bzw. an der Schiene montierten LST-Komponenten ist die maximale im Bereich der Komponente auftretende bzw. zu erwartende (Schiene-)Temperatur. Von besonderer Bedeutung ist die mit der Nutzung der LWB einhergehende Temperaturerhöhung der Schiene vor allen für die direkt an der Schiene montierten und auch sehr nahe am Schienenkopf befindlichen LST-Komponenten (Zählpunkte, Radsensoren).

Temperature evolution in cross-section

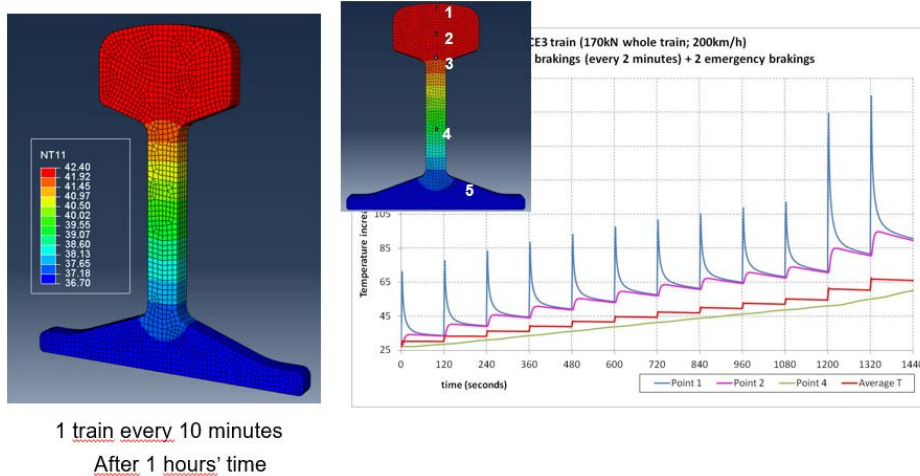


Abbildung 16: Verteilung der Temperatur über den Schienenquerschnitt bei aktiver LWB [58]

Abbildung 16 zeigt ein Ergebnis der im EU-Projekt ECUC durchgeführten umfangreichen Simulationsrechnungen zur Temperaturerhöhung der Schiene durch den Einsatz der aktiven LWB [58]. Die Simulationsergebnisse wurden auch an Hand von Messdaten validiert.

Es wird ersichtlich, dass auch bei intensiver Nutzung der LWB (Abbildung 16, rechtes Diagramm) an einer Stelle – alle 2 Minuten eine Bremsung mit 170 kN (gesamter Zug) inkl. zweier Schnellbremsungen nach 10 Bremsungen – sich zwar die Schienenkopftemperatur gegenüber der Ausgangstemperatur von 25 °C um über 60 K erhöht (Temperaturspitze nicht bewertet), in dem für die Zählpunktmontage relevanten mittleren Bereich des Schienenstegs die Temperaturerhöhung aber nur etwa 30 K beträgt (etwa die Hälfte). Im Bereich des Schienenfußpunktes (z.B. Montagebereich für Schienenfußkabel) fällt die Temperaturerhöhung sogar noch deutlich geringer aus (ca. 15 K).

Aus den Ergebnissen aus dem Projekt ECUC lassen sich keine gesonderten Temperaturanforderungen für die direkt am Schienensteg bzw. Schienenfuß montierten LST-Komponenten ableiten.

Vorgaben zur Schienentemperatur bei Einsatz der LWB sollten zukünftig in der EN 50617-2 [60] aufgenommen werden (u.a. maximale Temperaturzunahme im Bereich Schienensteg und Schienenfuß).

## 4.2 Ableitung von Vorgaben für die Wirbelstrombremse sowie signaltechnische Komponenten im Gleisbereich

Wie die Ausführungen unter Kapitel 4.1.3 zeigen, sind relevante Beeinflussungen nur bei Zählpunkten, Radsensoren, Achszählern und Schaltkontakten/Impulsgebern, die direkt an der Schiene angeordnet sind, zu erwarten.

Bei der Ableitung der nachfolgend aufgeführten Vorgaben werden Komponenten der Alttechnik wie z.B. WSSB-IG, MK, DMK, Sk11, ZP 70 (siehe Kapitel 4.1.3.1) nicht berücksichtigt. Die Vorgaben basieren vielmehr auf den Erkenntnissen zur Kompatibilität von Class-A Komponenten - Zählpunkte, Radsensoren und Achszähler systeme gemäß Kapitel 4.1.3.2 - mit der aktuell im Einsatz befindlichen LWB vom Typ EWB 154 R.

Zur Gewährleistung der Kompatibilität dürfen Zählpunkte, Radsensoren und Achszähler systeme in keinem Betriebszustand der LWB (siehe Kapitel 4.1.1.5) von der LWB störend beeinflusst werden. Die einzelnen relevanten Betriebszustände der LWB müssen von den Zählpunkten/Radsensoren eindeutig und sicher identifiziert werden. Entscheidend hierfür ist im Wesentlichen die für die Zählpunkte/Radsensoren in den einzelnen Betriebszuständen wirksame, detektierbare Metallmasse der LWB. Diese Metallmasse kann aus dem Übertragungsverhalten der LWB abgeleitet und bewertet werden (siehe Kapitel 4.1.2.1, Passive Beeinflussung).

Abbildung 17 zeigt eine Messanordnung zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens zwischen den beidseitig an einer Schiene angeordneten Sende- und Empfangsantennen bei Überfahrt einer LWB [53].

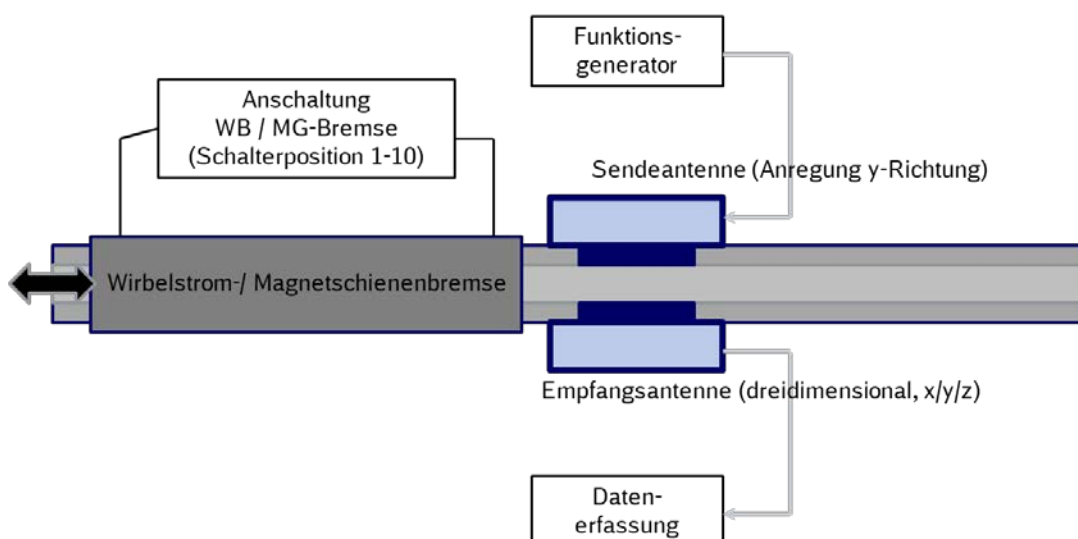


Abbildung 17: Anordnung zur Ermittlung der detektierbaren Metallmasse (passiver Effekt)

Bei den Sende- und Empfangsantennen handelt es sich um dreidimensionale Messantennen, wie sie auch zur Erfassung der von Fahrzeugen in den Gleisbereich emittierten Magnetfeldern, z.B. nach [51], eingesetzt werden. Die Antennen sind – sich gegenüber liegende - an der Schiene an den definierten Montagepositionen angebracht. In Verbindung mit einem Funktionsgenerator wird von der Sendeantenne ein Magnetfeld fester Frequenz und Amplitude abgestrahlt (Abstrahlung in y-

Richtung). Über die Empfangsantenne wird der über die Schiene greifende Feldanteil erfasst. Mit Überfahrt der passiven LWB über die Antennenanordnung wird die Feldverkopplung zwischen Sende- und Empfangsantenne - abhängig von den Koppelleigenschaften der LWB („detektierbare LWB Metallmasse“) - verändert. Ein Übertragungsfaktor größer 1 bedeutet eine bessere Kopplung zwischen Sende- und Empfangsantenne als bei reiner „Luftkopplung“ über die Schiene. Ein Übertragungsfaktor kleiner 1 bedeutet eine höhere Dämpfung als bei reiner „Luftkopplung“.

Nachfolgende Abbildungen zeigen die detektierbaren Metallmassen zweier unterschiedlicher LWB-Konstruktionen. Zum einen eine aktuelle LWB vom Typ EWB 154 R inkl. elektrischer Anschaltung gemäß ICE 3 (Abbildung 18 links) sowie eine neue LWB-Konstruktion [52], die mit einem speziellen magnetfeldabschirmenden Aufnahmegehäuse für die Magnetpol ausgerüstet wurde (Abbildung 18 rechts). Bei der LWB mit dem modifizierten Gehäuse ist der passive Effekt weit weniger stark ausgeprägt (Überhöhung um Faktor 1,2 an Stelle von 1,45 bei Bestandskonstruktion). Des Weiteren haben zahlreiche Laborversuche mit unterschiedlichen elektrischen Anschaltvarianten gezeigt, dass durch die verbesserte Abschirmung keine bzw. eine nur noch vernachlässigbare Abhängigkeit der detektierbaren Metallmasse von der elektrischen Beschaltung der LWB gegeben ist.

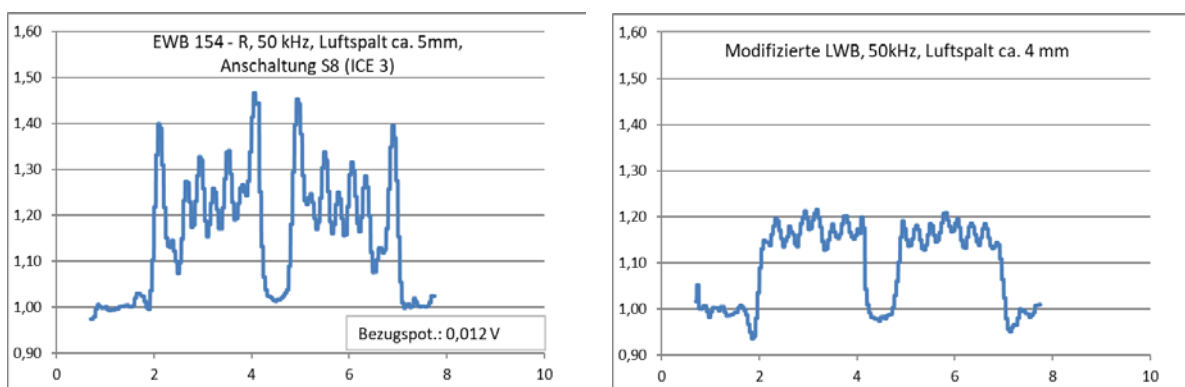


Abbildung 18: Detektierbare Metallmasse (passiver Effekt) für Bestands LWB (Typ EW 154 R) sowie für modifizierte LWB

Bei der LWB vom Typ EWB 154 R nimmt die detektierbare Metallmasse von 10 kHz mit einem Wert von 1,05 auf nahezu einen Wert von ca. 2,0 bei 75 kHz zu und von diesem hohen Wert bis 350 kHz wieder auf etwa 1,1 ab. Bei der modifizierten LWB sind die Änderungen weit weniger ausgeprägt. Hier nimmt die detektierbare Metallmasse von 10 kHz mit einem Wert von 1,1 auf etwa 1,25 bei 75 kHz und 1,3 bei 175 kHz zu und von diesem Wert wieder auf 1,15 bei 350 kHz ab.

Dieses positive Verhalten der modifizierten LWB hat sich auch bei den im Projekt ECUC durchgeführten Streckenversuchen gezeigt (siehe hierzu z.B. Abbildung 10 in Kapitel 4.1.2.1).

## 4.2.1 Vorgaben für die LWB

Aus den vorherigen Ausführungen lassen sich nachfolgende Vorgaben für die Konstruktion und den Einbau der LWB ableiten.

- a) Die detektierbare Metallmasse einer LWB sollte im Arbeitsfrequenzbereich für Achszähler (siehe [51] sowie [29]) möglichst gering sein und unter allen Betriebszuständen keine bzw. eine nur vernachlässigbare Abhängigkeit von der jeweiligen elektrischen Anschaltung der LWB aufweisen.

Basis für Grenzwertableitung: existierende LWB vom Typ EWB 154 R/L6

- b) Ruhelage der LWB mindestens 40 mm über SO, auch unter Beachtung betrieblicher Worst-Case Situationen wie z.B. Abnutzung der Räder oder Einfederung [51]
- c) Einbau der LWB immer zwischen den beiden Radsätzen eines Drehgestells
- d) Einhaltung eines minimalen Abstands zwischen Rad und LWB  
Begründung: Achszähler benötigen eine (kurze) „Detektionspause“ zwischen Raderkennung und der Detektion der Metallmasse der LWB  
-> Mindestabstand der LWB zum Rad  
-> Minimale Einsatzgeschwindigkeit der LWB  
Basis zur Ableitung einer Vorgabe: Anordnung der LWB vom Typ EWB 154 R im ICE 3
- e) Minimale Geschwindigkeit, bis zu der die LWB eingesetzt werden darf: 50 km/h  
Ggf. ist auch eine geringere Minimalgeschwindigkeit möglich.  
Minimalwert ist mit Achszählerherstellern abzustimmen
- f) Das Streufeld einer LWB sollte unter allen Betriebsbedingungen so gering wie möglich sein und nur im Nahbereich der Schiene auftreten (siehe Kapitel 4.1.1.4)  
Basis für Grenzwertableitung: Streufeld der existierenden LWB vom Typ EWB 154 R
- g) Die Speisung der LWB sollte aus einer stabilen, oberwellenfreien Spannungsquelle erfolgen (z.B. Batterie oder einer eigenen Umrichtereinheit). Wenn möglich sollte eine Speisung aus dem Traktionszwischenkreis auf Grund der damit verbunden möglichen hochfrequenten Beeinflussungen (siehe Kapitel 4.1.2.3) vermieden werden.

Durch Einhaltung der zulässigen (noch zu definierenden) Übertragungseigenschaften der passiven LWB in den verschiedenen Betriebszustände (Position/elektr. Beschaltung,..) wird sichergestellt, dass die zur Identifikation relevanten Zustände einer LWB zu den entsprechend bewertbaren Pegeln der Achszählerausgangssignale führen und von diesen auch eindeutig und sicher erkannt werden!

Unter Bezug auf die in Kapitel 4.1.1.5 aufgeführten Betriebszustände sind bei den einzelnen Zuständen von der LWB folgende Vorgaben einzuhalten (Nachweis kann - in Verbindung mit der elektrischen Anschaltung - im Labor erbracht werden):

**Zustand (1):** Ruhelage, LWB mehr als 40 mm über SO, nicht bestromt

- Einhaltung der Vorgaben zur detektierbaren Metallmasse unter Berücksichtigung der zugehörigen elektrischen Anschaltung („AUS“) sowie der Höhenposition der LWB in Ruhelage  
*Ableitung der konkreten Vorgaben zur detektierbaren Metallmasse ist noch ausstehend; Vorgaben basierend auf Radsensoren, die nach dem Sender-/Empfängerprinzip arbeiten; Spurkranzsensoren dürften bzgl. des passiven Effekts unempfindlicher reagieren*
- Einhaltung der Vorgaben zum „metal free space“ in ERA/ERTMS/033281 [51]

**Zustände (3) und (4):** Absenken der passiven LWB aus Ruhelage in Arbeitslage

(Absenklage, 5-7mm über SO) und passive LWB in Arbeitslage

- Einhaltung der Vorgaben zur detektierbaren Metallmasse unter Berücksichtigung der zugehörigen elektrischen Anschaltung („AUS“) sowie der geänderten Höhenpositionen der LWB (Nachweis z.B. in Schritten von 10 mm von Ruhe- bis zur Absenklage)
- Einhaltung von Mindestvorgaben an die LWB-Konstruktion/-Anordnung/-Betrieb (siehe oben) um eine eindeutige Identifikation des Absenkvorgangs sowie der Arbeitslage durch den Achszähler zu gewährleisten

**Zustände (5) und (6):** „LWB elektrisch Einschalten“ und „LWB aktiv“

- Einhaltung der Vorgaben zur detektierbaren Metallmasse unter Berücksichtigung der zugehörigen elektrischen Anschaltung („EIN“, jedoch ohne Stromfluss) sowie der Höhenpositionen der LWB in Arbeitslage
- Einhaltung von Mindestvorgaben an LWB-Konstruktion/-Anordnung/-Betrieb gem. (3) und (4)

**Fahrzeug**

- Einhaltung der Vorgaben der Magnetfeldgrenzwerte gem. ERA/ERTMS/033281 [51] sowie TR-EMV Teil 3 [29] bei passiver **und** aktiver LWB

*Mit diesem Prüfschritt wird u.a. ein möglicher Einfluss höherfrequenter Spannungsschwankungen der LWB-Energieversorgung auf die Magnetfeldausprägung im Arbeitsfrequenzbereich der Achszähler überprüft („höherfrequente Beeinflussung“).*

## 4.2.2 Vorgaben für signaltechnische Komponenten im Gleisbereich (Zählpunkte/Radsensoren)

Aus den vorherigen Ausführungen lassen sich nachfolgende Vorgaben für Zählpunkt/Radsensoren ableiten.

- a) Ordnungsgemäße Funktion bezüglich der in ERA/ERTMS/033281 [51] definierten Anforderungen
- b) Einhaltung einer ausreichenden Detektionsreserve zwischen dem Detektionspegel des Achszählers zur Raderkennung und dem resultierenden Signalpegel des Achszählers unter Einwirkung/Berücksichtigung der definierten maximalen detektierbaren Metallmasse der LWB im Arbeitsfrequenzbereich des Achszählers (detektierbare Metallmasse größer 1 wirkt verstärkend).  
Basis für Festlegung einer minimal erforderlichen Detektionsreserve:  
existierende LWB vom Typ EWB 154 R/L6 in Verbindung mit aktuellen WB-tauglichen Zählpunkten/Radsensoren (siehe Kapitel 4.1.3.2)
- c) Keine störende Beeinflussung durch Metallmassen (maximale detektierbare Metallmasse), die 40 mm über SO angeordnet sind.
- d) Sichere und zuverlässige Detektion der Metallmasse einer LWB unter Berücksichtigung der definierten minimalen „Detektionspause“ zwischen Rad und LWB (minimaler Abstand Rad – LWB)  
Basis zur Ableitung einer minimalen Detektionspause:  
existierende LWB vom Typ EWB 154 R/L6 in Verbindung mit aktuellen WB-tauglichen Zählpunkten/Radsensoren (siehe Kapitel 4.1.3.2)
- e) Sichere und zuverlässige Detektion der Metallmasse einer LWB im Geschwindigkeitsbereich von 50 km/h bis 400 km/h (ggf. ist auch eine geringere Minimalgeschwindigkeit möglich).
- f) Keine Beeinflussung/Störung der Detektion durch die ausgeprägten niederfrequente Streufelder der aktiven LWB im Nahbereich der Schiene sowie durch die Sättigung der Schiene  
Basis für Grenzwertableitung: existierende LWB vom Typ EWB 154 R

Unter Bezug auf die in Kapitel 4.1.1.5 aufgeführten Betriebszustände sind in den einzelnen Betriebszuständen von Zählpunkten/Radsensoren folgende Vorgaben einzuhalten:

**Zustand (1):** Ruhelage, LWB mehr als 40 mm über SO, nicht bestromt

- Ordnungsgemäße Funktion bezüglich der in [51] definierten Anforderungen;  
Hier u.a. Anforderungen zu „metal free space“, d.h. keine Detektion von Metallmassen im Abstand von  $\geq 40$  mm über SO durch Achszähler;
- Keine Raddetektion unter Einwirkung der maximal definierten detektierbaren Metallmasse der LWB in Ruhelage im Arbeitsfrequenzbereich der Zählpunkte/Radsensoren  
Es ist eine ausreichende Detektionsreserve zur Raddetektionsgrenze einzuhalten (z.B. 3 dB)

**Zustände (3) und (4):** Absenken der passiven LWB aus Ruhelage in Arbeitslage

(Absenklage, 5-7mm über SO) und passive LWB in Arbeitslage

- Ordnungsgemäße Funktion bezüglich der in [51] definierten Anforderungen;
- Keine Raddetektion unter Einwirkung der maximal definierten detektierbaren Metallmasse der LWB in Absenklage im Arbeitsfrequenzbereich der Zählpunkte/Radsensoren  
Es ist eine ausreichende Detektionsreserve zur Raddetektionsgrenze einzuhalten (z.B. 3 dB)

**Zustände (5) und (6):** „LWB elektrisch Einschalten“ und „LWB aktiv“

- Ordnungsgemäße Funktion bezüglich der in [51] definierten Anforderungen;
- Keine Raddetektion unter Einwirkung der maximal definierten detektierbaren Metallmasse der LWB in Absenklage im Arbeitsfrequenzbereich der Zählpunkte/Radsensoren  
Es ist eine ausreichende Detektionsreserve zur Raddetektionsgrenze einzuhalten (z.B. 3 dB)
- Keine Beeinflussung/Störung der Detektion durch hohe niederfrequente Streufelder der aktiven LWB im Nahbereich der Schiene sowie durch die Sättigung der Schiene.

## 4.2.3 Übertragbarkeit einzelner Ergebnisse auf die Magnetschienenbremsen

Während die LWB bis dato nur auf einzelnen Fahrzeugbaureihen des Fernverkehrs eingesetzt wird, sind Magnetschienenbremsen – als eine weitere Variante der Schienenbremsen – schon über viele Jahrzehnte auf zahlreichen Fahrzeugen im Nah-, Fern- und Güterverkehr im Einsatz.

Als Schienenbremsen zeichnen sich beide Bremsvarianten dadurch aus, dass sie ihre Bremsleistung unabhängig vom Adhäsionszustand der Schiene aufbringen können. Während die Bremskraft der Magnetschienenbremse über die Reibkraft zwischen der auf der Schiene aufsitzenden und durch die magnetische Kraftwirkung der aktiven, von der Schiene angezogenen Magnetschienenbremse und dem Schienenkopf erzeugt wird, resultiert die Bremskraft der Wirbelstrombremse aus den im Schienenkopf induzierten Wirbelströmen der berührungslos über den Schiene bewegten Magnetpole unterschiedlicher Polarität (Nord-/Südpol) der Wirbelstrombremse.

Die Nutzung der Magnetschienenbremse ist stets mit Verschleiß (Abrieb Schiene, Abrieb Magnetschienenpole) verbunden und ihr Einsatz nur als Schnellbremse (nicht Betriebsbremse!) im Notfall erlaubt. Zur Abwehr einer Gefahr wird – im Notfall – ggf. auch eine verfügbarkeitsrelevante Störung der Signaltechnik (z.B. Rotausleuchtung) durch eine aktive Magnetschienenbremse in Kauf genommen. Während



die neueren Zählpunkte/Radsensoren (siehe Kapitel 4.1.3.2) sowohl von der passiven (Ruhelage wie LWB 40 mm über SO) als auch der aktiven Magnetschienenbremse nicht störend beeinflusst werden (Beeinflussungsszenario der aktiven Magnetschienenbremse ist vergleichbar mit den in Kapitel 4.1.2.4 beschriebenen Betriebszuständen der LWB), kann es bei älteren Zählpunkten/Impulsgebern (siehe Kapitel 4.1.3.1 sowie Auflistung in Anhang B der Technischen Regel TR-EMV - Teil 3 (Sensorik) [29]) zu Störungen durch die aktive Magnetschienenbremse kommen.

[55] gibt einen Überblick zu den Streufeldern von Magnetschienenbremse und Wirbelstrombremse. Die Streufelder liegen in etwa in der gleichen Größenordnung. Während bei der Magnetschienenbremse der Hauptfeldanteil in der y-/z-Ebene auftritt, liegt dieser bei der Wirbelstrombremse in x-Richtung.

Bezüglich der Beeinflussungsmechanismen sind bei der Magnetschienenbremse sowohl die passive Beeinflussung - die wie bei der LWB von der detektierbaren Metallmasse abhängt - wie auch die aktive niederfrequente Beeinflussung von Bedeutung. Die aktive hochfrequente Beeinflussung spielt bei Speisung der Magnetschienenbremse über die Batterie keine Rolle.

Analog zur LWB können - wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben - Vorgaben zur maximalen detektierbaren Metallmasse (passiver Effekt) der Magnetschienenbremse sowohl in Ruhelage (min. 40 mm über SO) als auch in Arbeitsstellung (aufliegend auf Schiene) vorgegeben werden. Bezüglich der aktiven niederfrequenten Beeinflussung ist vor allem die Feldverteilung im Bereich der End-/Kopfstücke der Magnetschienenbremsen (Feldüberhöhungen) von Bedeutung. Durch Konstruktion und Design der Magnetschienenbremse sind für die einzelnen Betriebszustände der Magnetschienenbremse - analog zur LWB (siehe Kapitel 4.1.1.5) - eindeutige von Zählpunkten/Radsensoren zu detektierende Signalpegel zu erzeugen.

Einzelne der unter Kapitel 4.2.1 aufgeführten Vorgaben - wie z.B. minimaler Abstand zwischen Rad und Magnetschienenbremse, Einbau der Magnetschienenbremse in Drehgestell zwischen den beiden Radsätzen - können direkt auf die Magnetschienenbremse übertragen werden.

# 5 Arbeitspaket 4: Abschließende Bewertung sowie Sammlung eventuell notwendiger Maßnahmen zur Ermöglichung der Nutzung der LWB als Standardsystem

## 5.1 Fazit aus den Arbeitspaketen 1-3

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts zur Erweiterung des Einsatzes der linearen Wirbelstrombremse für Betriebsbremsungen wurden Erkenntnisse gewonnen, die geeignet sind, die Rahmenbedingungen zur Erreichung dieses Ziels zu beschreiben.

Die Erhöhung der Schienentemperatur durch die LWB ist bekannt und lässt sich zuverlässig prognostizieren.

Die Umwelteinflüsse auf die Schienentemperatur sind beschrieben. Die oberbauabhängigen Grenzwerte für die Schienentemperaturen in Deutschland sind definiert.

Bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit sind die Beeinflussungsmechanismen - im Bezug auf die Wesentlichen beeinflussungsrelevanten signaltechnischen Komponenten (Zählpunkte/Radsensoren/Achszähler) - bekannt. Das Auftreten und die Wirkung der unterschiedlichen Beeinflussungen zu den einzelnen Betriebszuständen der LWB sind beschrieben und erlauben die Ableitung von konkreten Vorgaben für die zukünftige Auslegung von LWB und signaltechnischen Komponenten.

Der weitaus größte Teil der signaltechnischen Komponenten wird von der passiven sowie der aktiven LWB (Typ EWB 154 R) nicht beeinflusst. Lediglich ältere Schienenkontakte, Zählpunkte und Impulsgeber (nicht WB-feste Alttechnik) sowie Geschwindigkeitsüberwachungseinrichtungen können von der LWB gestört werden und bedingen daher im Zuge der Erlangung einer streckenseitigen LWB-Tauglichkeit entsprechende Umbaumaßnahmen. Da die betroffenen signaltechnischen Einrichtungen noch in größerer Stückzahl (in Summe ca. 72.000 Komponenten) im gesamten Schienennetz verbaut sind, wird die Ausweitung des LWB-tauglichen Streckennetzes auch immer mit mehr oder weniger hohen Kosten (je Ausrüstungsstand) für die streckenseitige Ertüchtigung verbunden sein. Einzig bei bereits LWB-ertüchtigten Strecken bzw. bei durchgängig mit neuer Signaltechnik ausgerüsteten Streckenabschnitten ist – aus signaltechnischer Sicht – bereits eine LWB-Tauglichkeit gegeben. Es ist davon auszugehen, dass durch Umbau- und Modernisierungsmaßnahmen (Ausrüstung mit neuer, LWB-tauglicher Technik) sowie aus Gründen der abnehmenden (Ersatzteil-)Verfügbarkeit der hier adressierten nicht LWB-konformen Alttechniken, der Anteil der LWB-tauglichen Strecken in den nächsten Jahren erkennbar zunehmen wird.

## 5.2 Weitere Maßnahmen und Lösungsansätze

Ein einschränkungsfreier Einsatz der linearen Wirbelstrombremse für Betriebsbremsungen ist für Strecken mit fester Fahrbahn möglich.

Bis Ende 2019 wird die lineare Wirbelstrombremse in das Regelwerk 820.2020 aufgenommen sein. Damit ist eine Einzelfalluntersuchung zukünftig nicht mehr erforderlich.

Für eine Erweiterung des Einsatzes der linearen Wirbelstrombremse für Betriebsbremsungen auf Strecken mit Schotteroberbau müssen Freigabeverfahren etabliert werden, die direkt oder indirekt die Schienentemperatur berücksichtigen. In Kapitel 3.5 sind verschiedene Verfahren beschrieben.

Um zukünftig die Kompatibilität von LWB und der im Gleisbereich befindlichen Signaltechnik zu gewährleisten sind für die LWB die unter Kapitel 4.2.1 und für die signaltechnischen Komponenten unter Kapitel 4.2.2 aufgeführten Anforderungen final zu definieren und in die Normung einzubringen. Der Design- und Zulassungsprozess kann so an der Schnittstelle zwischen Fahrzeug und gleisseitiger Signaltechnik transparent, eindeutig und sicher umgesetzt werden.

### 5.2.1 Vorschläge für Normen und Regelwerke

Die bislang in der TSI vorgegebenen Grenzwerte sind geeignet, um eine Nutzung der LWB auf Strecken mit fester Fahrbahn ohne Einzelfalluntersuchung zu ermöglichen. Damit sollten diese auch zukünftig verwendet werden und in entsprechendes Regelwerk übernommen werden.

Eine lineare Wirbelstrombremse sollte bzw. muss folgende Anforderungen erfüllen:

- Die lineare Wirbelstrombremse darf von der maximalen Betriebsgeschwindigkeit bis hinunter zu 50 km/h eingesetzt werden: ( $v_{\max} \geq v \geq 50$  km/h).
- Die maximale durchschnittliche Verzögerung muss weniger als  $2,5 \text{ m/s}^2$  betragen (dieser Wert, der in Relation zur Längsfestigkeit des Gleises steht, muss bei gleichzeitigem Einsatz aller Bremsen eingehalten werden).
- Im ungünstigsten Fall, das heißt bei mehreren zusammengekuppelten Triebzugeinheiten und maximal zulässiger Zuglänge, muss die von der linearen Wirbelstrombremse des Zuges in Längsrichtung auf das Gleis ausgeübte maximale Bremskraft folgende Werte einhalten:
  - 105 kN bei Bremsungen mit einer Kraft unter 2/3 der vollen Betriebsbremsung;
  - linear zwischen 105 kN und 180 kN bei Bremsungen mit einer Kraft zwischen 2/3 und voller Betriebsbremsung;
  - 180 kN bei voller Betriebsbremsung;
  - 360 kN bei Schnellbremsungen
- Die Freigabe und Sperre der linearen Wirbelstrombremse erfolgt für verschiedene Modi. Es wird unterschieden zwischen einer Freigabe für Betriebsbremsungen und Schnellbremsungen, einer Freigabe nur für Schnellbremsungen und einer Sperre. Freigaben oder Sperren erfolgen durch:
  - Bedienung des Triebfahrzeugführers;
  - Fahrzeugseitige Software;
  - das aktive Zugsicherungssystem.
- Die Ruhelage der LWB muss mindestens 40 mm über SO – auch unter Beachtung betrieblicher Worst-Case Situationen wie z.B. Abnutzung der Räder oder Einfederung – betragen.
- Die LWB ist immer zwischen den beiden Radsätzen eines Drehgestells einzubauen.

- Die detektierbare Metallmasse einer LWB (passiver Effekt) darf im Arbeitsfrequenzbereich für Achszähler (siehe [51] sowie [29]) - auch unter Berücksichtigung der elektrischen Anschaltung der LWB in den verschiedenen Betriebszuständen (z.B. auch bei elektrischer Trennung der LWB von der Speisung bei Deaktivierung, wie z.B. in Frankreich gefordert) – eine vorgegebene Grenzwertkurve nicht überschreiten;  
Handlungsbedarf: Grenzwertvorgaben für detektierbare Metallmasse sind noch festzulegen (siehe Kapitel 5.2.2)
- Es ist ein minimaler Abstand zwischen Rad und LWB einzuhalten (ausreichende Detektionspause zwischen Rad und Metallmasse).  
Handlungsbedarf: Minimaler Abstand ist noch zu definieren (siehe Kapitel 5.2.2)
- Das Streufeld der LWB muss unter allen Betriebsbedingungen möglichst gering sein und darf nur im Nahfeld der Schiene auftreten;  
Handlungsbedarf: Grenzwertvorgaben für das maximale Streufeld sind noch festzulegen (siehe Kapitel 5.2.2).
- Die Speisung der LWB sollte aus einer stabilen, möglichst oberwellen-freien Spannungsquelle erfolgen.
- Das mit der LWB ausgerüstete Fahrzeug muss mit passiver und aktiver LWB die Magnetfeldwerte für Achszähler gemäß ERA/ERTMS/033281 [51] sowie TR-EMV Teil 3 [29] einhalten.

Die oben aufgeführten Anforderungen zur Auslegung und zum Design der LWB sind in einer Norm analog der EN 16207 (Anforderungen an Funktion und Leistungsfähigkeit von Magnetschienenbremssystemen für Schienenfahrzeuge) [62] festzulegen. Hierzu ist – zu gegebener Zeit, d.h. sofern ein Satz belastbarer Grenzwertvorgaben/Definitionen vorliegt – ein „Request for Standardisation“ zu initiieren. In [51], [61] sowie [29] ist der Nachweis der Einhaltung der Magnetfeldgrenzwerte für Achszähler durch das Fahrzeug sowohl für die passive als auch die aktive LWB zu ergänzen. In [61] sowie [29] sind hierzu entsprechende zu untersuchende Betriebsparameter zu definieren.

Zählpunkte bzw. Radsensoren sollten bzw. müssen folgende Anforderungen erfüllen:

- Ordnungsgemäße Funktion bezüglich der in ERA/ERTMS/033281 definierten Anforderungen.
- Einhaltung einer ausreichenden Detektionsreserve zwischen dem Detektionspegel des Achszählers zur Raderkennung und dem resultierenden Signalpegel des Achszählers unter Einwirkung/Berücksichtigung der definierten maximalen detektierbaren Metallmasse der LWB (siehe oben) im Arbeitsfrequenzbereich des Achszählers;  
Handlungsbedarf: Grenzwertvorgaben für detektierbare Metallmasse sowie Detektionsreserve sind noch festzulegen (siehe Kapitel 5.2.2).
- Zuverlässige und eindeutige Detektion der Metallmasse einer LWB unter Berücksichtigung der definierten minimalen „Detektionspause“ zwischen Rad und LWB;  
Handlungsbedarf: Minimaler Abstand ist noch festzulegen (siehe Kapitel 5.2.2)
- Zuverlässige und eindeutige Detektion der LWB-relevanten Metallmasse in einem Geschwindigkeitsbereich von 50 km/h bis 400 km/h.
- Keine Beeinflussung/Störung der Detektion durch die ausgeprägten niederfrequenten Streufelder der aktiven LWB im Nahbereich der Schiene sowie durch die Sättigung der Schiene;  
Handlungsbedarf: Grenzwertvorgaben für das maximale Streufeld sind noch festzulegen (siehe Kapitel 5.2.2).

Die Festlegungen zur detektierbaren Metallmasse (inkl. Detektionsreserve), der maximalen Streufelder im Bereich der Schiene sowie zur minimalen Detektionspause zwischen Rad und LWB sind in der TR-EMV - Teil 3 (Sensorik) [29], der EN 50617-2 [60] sowie dem Interface Dokument der TSI CCS [51] einzubringen.

Vorgaben bzw. Hinweise zur möglichen Krafteinwirkung auf ferromagnetische Teile in unmittelbarer Nähe zur Schiene sollten in der EN 50617-2 [60] sowie in den Standards zu Auslegung von Weichenantrieben aufgenommen werden.

## 5.2.2 Weitere Maßnahmen und Untersuchungen

Die Freigabe der linearen Wirbelstrombremse durch die Zugsicherungssysteme soll zukünftig während des Betriebs auch in Abhängigkeit von veränderlichen Eingangsgrößen (im Wesentlichen Temperatur) erteilt oder entzogen werden.

Die Zugsicherungssysteme sollten daher eine geeignete Schnittstelle bieten, die beispielsweise einer Temperaturmess- und Auswerteeinheit die Übergabe der Freigabeinformation ermöglicht.

Für die Erfassung und Bewertung der Schienentemperatur werden Kriterien für die Festlegung von Ort und Anzahl von Messstellen benötigt. Bereits vorhandene Messstellen sollten katalogisiert und, wenn möglich, genutzt werden. In einer geeigneten Versuchskampagne sollten entsprechende Kriterien definiert werden.

Darüber hinaus wäre auch die Erarbeitung eines Konzepts und Untersuchungen zu einer fahrzeugeitigen Temperaturerfassung empfehlenswert.

Die Festlegungen der unter Kapitel 5.2.1 unter „Handlungsbedarf“ aufgeführten Vorgaben mit Bezug zur Signaltechnik sollten von der Arbeitsgruppe Sensorik des Arbeitskreis EMV erarbeitet werden. In dieser Gruppe sind u.a. Hersteller von Achszähler, Schienenbremsen (Fa. Knorr-Bremse) und Fahrzeugen, die DB Netz AG sowie des EBA vertreten.

Zur Festlegung der Grenzwertvorgaben zur detektierbaren Masse sind noch weitere Untersuchungen / Versuche durchzuführen. Offen ist in diesem Zusammenhang u.a. noch die Klärung der Notwendigkeit von Vorgaben für Achszähler die als Spurkranzdetektoren arbeiten.

Die Vorgaben zum minimalen Abstand zwischen Rad und LWB, zum Streufeld im Nahbereich der Schiene sowie zur Stabilität der Spannungsversorgung der LWB können auf Basis bereits vorhandener Informationen und Daten der Mitglieder der AG Sensorik abgeleitet und festgelegt werden.

Mit einer Ertüchtigung der Infrastruktur für den erweiterten Einsatz der LWB sind erhebliche finanzielle Aufwendungen verbunden. Diese Kosten fallen auf Seite des Infrastrukturbetreibers an, profitieren wird jedoch der Fahrzeugbetreiber. Hier muss eine geeignete Ausgleichsregelung gefunden werden. Dieser Aspekt geht über die technischen Betrachtungen dieses Forschungsvorhabens hinaus, ist aber im Weiteren zwingend zu berücksichtigen.

## 5.2.3 Empfohlene Vorgehensweisen

Um eine Nutzung der linearen Wirbelstrombremse für Betriebsbremsungen für Strecken zu ermöglichen, für die bis dato keine derartige Freigabe besteht, sind ggf. streckenbezogene Maßnahmen erforderlich.

Hierfür sollten folgende Fragen beantwortet werden:

1. Mit welchem Oberbau ist die Strecke ausgeführt?  
Welche Schienengrenztemperatur ist auf der Strecke einzuhalten?

Liegt die Schienengrenztemperatur unterhalb von 85 °C, sind Regelungen zu treffen, die eine temperaturabhängige Freigabe ermöglichen, vergleiche Kapitel 3.5.

2. Welches Zugsicherungssystem (PZB, LZB, ETCS, ...) ist auf der Strecke vorhanden?

Die Art des Zugsicherungssystem bestimmt die Möglichkeiten, welches temperaturabhängige Freigabeverfahren, falls erforderlich, umgesetzt werden kann.

3. Sind auf der Strecke Komponenten der Leit- und Sicherungstechnik vorhanden, die einen Einsatz der LWB nicht zulassen, vergleiche [3]?

Für die nicht LWB-festen Komponenten sind die in [3] aufgeführten Maßnahmen umzusetzen.

Wenn ein neues Fahrzeug mit einer linearen Wirbelstrombremse ausgerüstet werden soll, müssen folgende Fragen vorab beantwortet werden:

1. Welche Bremskraft wird durch die LWB aufgebracht?  
Werden die in Kapitel 5.2.1 genannten Werte eingehalten?
2. Kann die Bremssteuerung der LWB durch das Zugsicherungssystem erteilte Freigaben und Sperren jederzeit umsetzen? Sind die Freigaben und Sperren gestaffelt möglich, d.h.
  - a. komplette Sperre
  - b. Freigabe nur für Schnellbremsungen
  - c. Freigabe für Betriebs- und Schnellbremsungen
3. Hält die LWB die notwendigen EMV-Vorgaben ein, vergleiche 5.2.1[3]?
4. *Optional:* Besitzt das Fahrzeug eine Möglichkeit ein temperaturabhängiges Freigabeverfahren durch fahrzeugseitige Temperaturmessung zu implementieren?

## 5.3 Resümee

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zeigen, dass zukünftig ein flächendeckender Einsatz von Wirbelstrombremsen grundsätzlich möglich ist.

Dies gilt sowohl für den Einsatz leistungsstarker LWB in Hochgeschwindigkeitszügen als auch für den zukünftigen Einsatz kleinerer LWB in Fahrzeugen mit geringerer erforderlicher Bremsleistung im Regionalverkehr.

Die schnittstellenrelevanten Parameter von LWB und infrastrukturseitiger LST (im Wesentlichen Achszähler) sind bekannt und sind im Weiteren so festzulegen, dass ein sicheres und zuverlässiges Zusammenwirken an der Schnittstelle von Fahrzeug zur streckenseitigen LST unter den verschiedenen Betriebszuständen der LWB gegeben ist. Die Einhaltung entsprechender noch zu definierender Vorgaben kann – für zukünftige Komponenten – ohne aufwändige Nachweisverfahren durch Prüfungen im Labor

(LWB und Achszähler) sowie – final – im Rahmen der üblichen Versuche zum Nachweis der Kompatibilität der Fahrzeuge mit Gleisschaltmitteln nachgewiesen werden.

Der weitaus größte Teil der signaltechnischen Komponenten wird von der passiven sowie der aktiven LWB (Typ EWB 154 R) nicht beeinflusst. Es ist davon auszugehen, dass durch Umbau- und Modernisierungsmaßnahmen (Ausrüstung mit neuer, LWB-tauglicher Technik) sowie aus Gründen der abnehmenden (Ersatzteil-)Verfügbarkeit der nicht LWB-konformen Alttechniken, der Anteil der LWB-tauglichen Strecken in den nächsten Jahren erkennbar zunehmen wird.

Aus Sicht des Oberbaus ist schon heute ein einschränkungsfreier Einsatz der linearen Wirbelstrombremse für Betriebsbremsungen für Strecken mit fester Fahrbahn möglich.

Für eine Erweiterung des Einsatzes der linearen Wirbelstrombremse für Betriebsbremsungen auf Strecken mit Schotteroberbau kann – falls aufgrund der maximalen Bremsleistung der LWB erforderlich - im Bremsmanagement der Züge ein Freigabeverfahren etabliert werden, das direkt oder indirekt die Schienentemperatur berücksichtigt.

Im Vorfeld eines flächendeckenden Einsatzes der LWB sind – u.a. basierend auf den im Bericht dargestellten Erkenntnissen – noch folgende Punkte zu klären bzw. Aufgaben umzusetzen:

- a) Ableitung und Definition von Vorgaben an LWB sowie LST (im Wesentlichen Achszähler) zur Kompatibilität aus Sicht EMV  
(entsprechende Arbeiten laufen bereits im AK EMV)
- b) Etablieren eines Verfahrens zur Berücksichtigung der Schienentemperatur im Bremsmanagement  
(hierzu müssten theoretische Betrachtungen + praktische Untersuchungen angestoßen werden)
- c) Sukzessiver Austausch infrastruktureitiger nicht LWB-konformer LST-Alttechnik (Achszählpunkt, Impulsgeber, ...) durch moderne LWB-konforme Techniken im Rahmen von streckenseitigen Umbau-/Erneuerungsmaßnahmen. Mit einer Ertüchtigung der Infrastruktur für den erweiterten Einsatz der LWB sind u.U. erhebliche finanzielle Aufwendungen verbunden. Diese Kosten fallen auf Seite des Infrastrukturbetreibers an, profitieren wird jedoch der Fahrzeugbetreiber. Hier muss eine geeignete Ausgleichsregelung gefunden werden.

## 6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Freigabe der LWB in D (grün = BB+SB; rot = nur SB, blau = keine) .....	16
Abbildung 2: Sommertage in Deutschland (1961 – 2010) Quelle: Deutscher Wetterdienst .....	35
Abbildung 3: Heiße Tage in Deutschland (1961 – 2010) Quelle: Deutscher Wetterdienst.....	36
Abbildung 4: Lineare Wirbelstrombremse, schematische Darstellung [48] .....	43
Abbildung 5: Lineare Wirbelstrombremse, Seitenansicht [48] .....	44
Abbildung 6: Magnetfeldverteilung einer aktiven LWB im Nahbereich der Schiene [54].....	46
Abbildung 7: Betriebszustände der LWB .....	47
Abbildung 8: Beispielhafter Signalverlauf eines Achszählers für verschiedene Betriebszustände der LWB .....	47
Abbildung 9: Beeinflussungsmechanismen .....	48
Abbildung 10: Achszählerausgangssignale mit geringer (links) und ausgeprägter (rechts) passiver Beeinflussung .....	49
Abbildung 11: Magnetfeldkopplung über die Schiene, passive LWB .....	50
Abbildung 12: Niederfrequente Beeinflussung .....	51
Abbildung 13: Abnahme des Streufeldes in y-Richtung (Bezug: Schienenkopfmitte) .....	51
Abbildung 14: Beeinflussung durch höherfrequente magnetische Felder im Arbeitsfrequenz- bereich eines Achszählers (Achszählerausgangssignale) .....	52
Abbildung 15: Kräfte (Streufeld) einer LWB (Typ EWB 154 R) die unter normalen Betriebsbedin- gungen an der Oberfläche von magnetisierbaren Objekten angreifen können [48] ...	58
Abbildung 16: Verteilung der Temperatur über den Schienenquerschnitt bei aktiver LWB [58].....	59
Abbildung 17: Anordnung zur Ermittlung der detektierbaren Metallmasse (passiver Effekt).....	60
Abbildung 18: Detektierbare Metallmasse (passiver Effekt) für Bestands LWB (Typ EW 154 R) sowie für modifizierte LWB.....	61



## 7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Maßnahmen bei Komponenten der Leit- und Sicherungstechnik in Zusammenhang mit der LWB (Zusammenfassung).....	12
Tabelle 2: Maßnahmen am Fahrzeug mit Einfluss auf die EMV .....	13
Tabelle 3: Schienenerwärmung durch die LWB.....	17
Tabelle 4: Maßnahmen bezüglich magnetischer Anzugkräfte .....	18
Tabelle 5: Aktivitäten zur Vermeidung von Erdschlüssen und deren Auswirkungen .....	20
Tabelle 6: Schienentemperaturerhöhung pro Bremsung in Abhängigkeit von der Bremskraft der LWB.....	30
Tabelle 7: Schienentemperaturerhöhung an einem Betriebstag in Abhängigkeit von Bremskraft und Anzahl der Tz pro Stunde.....	30
Tabelle 8: Oberbauformen und zulässige Temperaturen .....	31
Tabelle 9: Bauteile an der Schiene und zulässige Temperaturen.....	33
Tabelle 10: Temperaturzuwachs in Abhängigkeit zur Bremskraft der LWB .....	34
Tabelle 11: Alternative Freigabeverfahren - Entscheidungsmatrix.....	40
Tabelle 12: Wesentliche konstruktive Parameter [49].....	44
Tabelle 13: Zuordnung der Beeinflussungsmechanismen zu den Betriebszuständen der LWB .....	52

## 8 Quellenverzeichnis

Quellen für Arbeitspaket 1:

- [1] **Deutsche Bahn AG**, TZF53, Lothar **Kinze**, TZF71, Dr. Michael **Kunz**: Abschlussbericht der Task Force „Rotausleuchtung“, 07.03.2003 \*
- [2] **Deutsche Bahn AG**, DB Systemtechnik, Ortsfeste Leit- und Sicherungstechnik, L. **Kinze**: Abschlussbericht „Einführung der WB“ vom 11.12.2003 \*
- [3] **DB Systemtechnik, T.TVI 34**: „Maßnahmenliste Wirbelstrombremse (WB)“ Ausgabestand Version 17 vom 12.08.2011 \*
- [4] **Deutsche Bahn AG**, Dr. Corinna **Salander-Ludwig**: „Risikoanalyse: Einsatz der Wirbelstrombremse als Teil des Schnellbremssystems auf Strecken mit nicht-WB-fest ausgerüsteter Leit- und Sicherungstechnik“, Berlin, Dezember 2002 \*
- [5] **Siemens AG**, **Budzinski**: Abschlussbericht „Erdschlüsse im WB-Kreis der ICE BR 403/406, 19.11.2003 \*
- [6] **DB Fernverkehr AG**, AA-Nr.: 5600.9997: Instandsetzung der Polspulen der Wirbelstrombremsen ICE 3 am Fahrzeug \*
- [7] **DB Fernverkehr AG**, AA-Nr.: 5600.9998: Konservierung der Polspulen der Wirbelstrombremsen ICE 3 \*
- [8] **DB Fernverkehr AG**, AA-Nr.: 5600.9999: Erdschlussermittlung an der Wirbelstrombremse ICE 3 \*
- [9] **Deutsche Bahn AG**, Prüfstelle DB Systemtechnik: Prüfbericht „WB-Schadensforschung mit ICE 3 Tz 304“ Dokument 831-PR-0002-03 vom 24.03.2003 \*
- [10] **Deutsche Bahn AG**, Ressort Technik: Vermerk „Ergebnisse der Messungen in Wildenrath und Burgsinn, September 2000“ vom 08.04.2002 \*
- [11] **Imb-dynamik**: Bericht Nr. 347.03.1 vom 20.10.2000 „Messung der Schienentemperatur unter Einsatz der linearen Wirbelstrombremse des ICE 3 – September 2000“ \*
- [12] **Technische Universität München**, Lehrstuhl und Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen, Prof. Dr.-Ing habil Günther **Leykauf**: „Stellungnahme zur Gleisstabilität bei Einsatz der Wirbelstrombremse“ vom 13.12.1999
- [13] **EU-Project ECUC - CEIT**, Nere **Gil-Negrete**: ECUC (Eddy Current brake Compatibility), Deliverable D3.2 „Thermo-mechanical domain model“ vom 31.05.2015
- [14] **Deutsche Bahn AG**, TZF 8, Minden– „Antrag auf Zusicherung des Eisenbahnbundesamtes gemäß §38 Abs. 1 VwVfG für den uneingeschränkten Einsatz der Wirbelstrombremse (WB) als Betriebsbremse (BB) auf der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main“ inkl. Anlagen vom 13.05.2002 \*

- [15] **Deutsche Bahn AG**, TZF 8, Minden– „Untersuchungsbericht NBS K-RM – Worst-Case-Betrieb mit WB und maximal erreichte Temperaturen im Übergangsbereich Feste Fahrbahn - Schotteroberbau“ vom 11.10.2005 \*
- [16] **Deutsche Bahn AG**, TZF 6 und 8, München und Minden – „Untersuchungsbericht Schienentemperaturen auf der NBS Nürnberg – Ingolstadt bei Nutzung der Wirbelstrombremse für Betriebsbremsungen“ vom 21.12.2005  
(N\_IN\_WB-05P4203-Schienentemperaturen auf N-IN) \*
- [17] **DB Systemtechnik GmbH**, Fachabteilung Bremstechnik. Fahrzeugapplikation: Bericht: „Schienentemperaturen auf der Neubaustrecke VDE 8 bei Nutzung der Wirbelstrombremse des ICE 3 für Betriebsbremsungen“ Version 1.2 vom 10.08.2017  
(16-51533-I.IVE31.1-BE-VDE8-TempWB-V1.2.pdf) \*
- [18] **Deutsche Bahn AG**, Zentralbereich Forschung und Versuche: Bericht 556 703  
„Messungen an Weichenzungen und Herzstücken im Zusammenhang mit der Erprobung der linearen Wirbelstrombremse“ Minden, 21.08.1995 \*
- [19] **DB Systemtechnik und SNCF**: Gemeinsamer Bericht: „Synthese über die Wirbelstrombremse WB“ (SNCF Registrierungsnummer: 10-9 060 038) vom 13.12.2002 \*
- [20] **SNCF Réseau**: Betriebsdokument „Fahrt von mit Wirbelstrombremse ausgestatteten Zügen auf Schnellfahrstrecken“ Version 4 vom 11.07.2017 (SNCF Réseau (CG SE 2 C n°7) RFN-CG-SE 02 C-00-n°007)
- [21] **DB Netze**: „Wirbelstrombremse in Deutschland“, GeoViewer vom 04.09.2019
- [22] **VERORDNUNG (EU) Nr. 1302/2014 DER KOMMISSION** vom 18. November 2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union
- [23] **Richtlinie 96/48/EG** – Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems Teilsystem „Fahrzeuge“ vom 21.02.2008
- [24] TSI CR LOC PAS 2011 **NNTR-Gesamtliste**, Stand: 24.05.2018
- [25] **Richtlinie (EU) 2016/797** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2016 über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union
- [26] **Richtlinie (EU) 2016/798** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2016 über Eisenbahnsicherheit
- [27] Laufende Beschlussliste des **Arbeitskreises Bremse** zu verschiedenen, die Bremse betreffenden Einzelthemen, Version 8.0 vom 07.09.2017
- [28] **EUROPEAN RAILWAY AGENCY**: ERA/ER-TMS/033281 “Interfaces between control-command and signaling trackside and other subsystems”, Version 4.0 (Entwurf) vom 20.09.2018
- [29] **Technische Regelung** für den Nachweis der elektromagnetischen Verträglichkeit zwischen Schienenfahrzeugen und der Infrastruktur im Geltungsbereich der EBO (TR EMV), Teil 3 – Sensorik, Ausgabe 2.0 vom 01.06.2017

- [30] **VERORDNUNG (EU) Nr. 1302/2014 DER KOMMISSION** vom 18. November 2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union, zuletzt geändert durch Durchführungsverordnung (EU) 2019/776 der Kommission vom 16. Mai 2019

In den folgenden Dokumenten und Veröffentlichungen finden sich allgemeine Informationen über das System lineare Wirbelstrombremse sowie über den Einsatz und die Erfahrungen mit der linearen Wirbelstrombremse des ICE 3

- [31] **DB Systemtechnik**, TZF 47: „Bericht und Bewertung: Systembeschreibung der linearen Wirbelstrombremse“ Dokument 047-UN-0004-03 vom 30.09.2003 \*
- [32] **J. Gräber**, Dr. **M. Kunz**, **L. Kinze**, Dr. **W.-D. Meier-Credner** (2003): „Experiences with the operation of the Linear Eddy-Current Brake (LEB) in the ICE 3 with respect to the interaction between LEB and infrastructure“ bei World Congress Railway Research 2003, Topic: Vehicles, Session: Train Design
- [33] **K. Heckemanns**, **J. Prem**, **S. Reinicke** (2004): „Bremsmanagement der ICE-Züge“ in Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), April 2004,
- [34] Dr. **W.-D. Meier-Credner** (2000): „Die lineare Wirbelstrombremse – Entwicklung und Einsatz im ICE 3“ in Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), Juni 2000:
- [35] **J. Prem**, **S. Haas**, **K. Heckemanns** (2004): „Wirbelstrombremse im ICE 3 als Betriebsbremssystem hoher Leistung – Teil 1“ in Elektrische Bahnen, Heft 7, 2004
- [36] **J. Prem**, **S. Haas**, **K. Heckemanns** (2004): „Wirbelstrombremse im ICE 3 als Betriebsbremssystem hoher Leistung – Teil 2“ in Elektrische Bahnen, Heft 8-9, 2004
- [37] **J. Gräber**, Dr. **W.-D. Meier-Credner** (2004): „Die lineare Wirbelstrombremse im ICE 3 – Betriebskonzept und erste Erfahrungen“ in ZEVrail Glasers Annalen – 126 Tagungsband SFT Graz 2002
- [38] Dr. **S. Dörsch**, **S. Eickstädt**, **Ch. Nowak** (2009): „Einsatz der linearen Wirbelstrombremse in Fahrzeugen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs der DB AG – Erfahrungen und Perspektiven“ in ZEVrail Oktober 2009
- [39] **S. Schubert** (2018): „Netzweiter Einsatz der linearen Wirbelstrombremse“ – Bachelor-Arbeit, FH Aachen

Quellen für Arbeitspaket 2:

- [40] Auswertung der Temperaturmaximalwertmessungen des Deutschen Wetterdienstes von 1961 – 2010 in Deutschland  
(Excel-Datei DWD - Heiße Tage - Sommertage 1961-2010 – mit Auswertung.xlsx)
- [41] **DB Netz AG**: „Richtlinie 820.2020 Ausrüstungsstandard Feste Fahrbahn für Gleise und Weichen“ inkl. Anhänge A01, A02, A03, Version 1.0 - Gültig ab 15.03.2018 \*
- [42] **EU-Project ECUC - CEIT**, Dr. **Nere Gil-Negrete**, Dr. **Daniel Valderas**: ECUC (Eddy Current brake Compatibility), Deliverable D3.3 „Complete model“ vom 31.05.2015

- [43] **DB Netz AG:** „Technische Netzzugangsbedingungen (TNB)“ gültig ab 09.12.2018
- [44] **Thales Transportation System GmbH:** „LZB L72 CE – Bedienung der LZB-Anlage“ Ausgabe 05 vom 04.12.2015 \*
- [45] **DB Netz AG:** „Richtlinie 824.5010 Lückenlose Gleise, Weichen und Stoßlückengleise herstellen“ Version 8.0 - Gültig ab 01.02.15 \*
- [46] **Deutscher Wetterdienst:** „Hitzewelle Juli 2019 in Westeuropa – neuer nationaler Rekord in Deutschland“, Stand 01.08.2019
- [47] **DB Netz AG:** Temperaturmesswerte 2017 in Giften, Orxhausen, Nörten, Jühnde und Almstedt \*

Quellen für Arbeitspaket 3:

- [48] **EU-Project ECUC,** Oliver **Stark,** Dr. Wilhelm **Baldauf:** Deliverable D2.1, Collection of previous experiences and know-how; 02/2013
- [49] **EU-Project ECUC,** Dr. Henry **Lehmann:** Deliverable D2.3, ECB design parameters; 02/2013
- [50] **EU-Project ECUC,** Dr. Daniel **Valdears,** Dr. Gavin **Lancaster,** Dr. Juan Ignacio **Sancho,** Maya **Petkova:** Deliverable D6.3, Engineering guidelines for signaling systems; 08/2015
- [51] **EUROPEAN RAILWAY AGENCY:** ERA/ERTMS/033281 “Interfaces between control-command and signaling trackside and other subsystems”, Version 4.0, 01/2019
- [52] **EU-Project ECUC,** Dr. Henry **Lehmann,** Dr. Gavin **Lancaster,** Daniel **Valderas:** Deliverable D5.3, Test report for tests in the laboratory; 04/2015
- [53] **Deutsche Bahn AG,** Dr. Wilhelm **Baldauf:** Versuche zum passiven Effekt an Wirbelstrombremsen sowie Magnetschienenbremsen, Folienpräsentation für die AG Sensorik, 06/2018
- [54] **Deutsche Bahn AG,** 000252 Gutachten Wirbelstrombremse ICE 3, Forschungs- und Technologiezentrum (FTZ), FTZ 21, Hr. Walter **Kühn,** 04/2000 \*
- [55] **Knorr-Bremse,** Streufeldauswertung – MG-Bremse – EWB – Einfluss Schienenrückstrom, Henry **Lehmann,** Präsentation in der Arbeitsgruppe Sensorik, 05/2019
- [56] **EU-Project ECUC,** Oliver **Stark,** Dr. Wilhelm **Baldauf,** Maya **Petkowa:** Deliverable D5.4, Test report for tests in the track; 08/2015
- [57] **Technische Regelung** für den Nachweis der elektromagnetischen Verträglichkeit zwischen Schienenfahrzeugen und der Infrastruktur im Geltungsbereich der EBO (TR-EMV) Teil 2 – Nachweis der Einhaltung der Störstromgrenzwerte; Ausgabestand 1.0, 10/2015
- [58] **EU-Project ECUC,** Nere **Gil-Negrete:** Track temperature increase model due to the use of ECB brake forces; ECUC Final conference, Vienna 08/2015
- [59] **Knorr-Bremse,** Theoretische Betrachtungen zu magnetischen Feldern von aktiven Schienenbremsen, Henry **Lehmann,** Präsentation in der Arbeitsgruppe Sensorik, 11/2017

- [60] **EN 50617-2**, Bahnanwendungen – Technische Parameter von Gleisfreimeldesystemen – Teil 2: Achszähler; 02/2015
- [61] **EN 50592**, Bahnanwendungen – Prüfung von Fahrzeugen auf elektromagnetische Verträglichkeit mit Achszählern; 2016
- [62] **EN 16207**, Bahnanwendungen – Bremse – Anforderungen an Funktion und Leistungsfähigkeit von Magnetschienenbremssystemen für Schienenfahrzeuge, 2014

*Hinweis: Alle Dokumente liegen den Autoren vor. Dokumente, die mit \* gekennzeichnet sind, bedürfen vor einer Einsichtnahme oder Übergabe einer Zustimmung durch den Dokumenteneigentümer, dies muss bei Bedarf veranlasst werden.*