

# **Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage**

## **Fahrzeug Teil V Bremstechnik**

Das Urheberrecht an diesem Dokument und sämtlichen Beilagen verbleibt beim Ersteller.  
Alle Rechte vorbehalten

---

**Titel**      Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage  
                 Fahrzeug, Teil V, Bremstechnik

**Dok.-Nr.:**    73389    Version    Weißdruck    Ausg. Datum    15.02.2007

Seite 1 von 26

## 1 Verteiler

Dieses Dokument wurde vom Fachausschuss Fahrzeug zur Veröffentlichung freigegeben.

## 2 Änderungsübersicht

Datum der Freigabe: 15.02.2007; Weißdruck, Fachausschuss Fahrzeug.

**3 Inhaltsverzeichnis**

1	Verteiler.....	2
2	Änderungsübersicht: .....	3
3	Inhaltsverzeichnis.....	4
4	Allgemeines .....	6
4.1	Zweck und Anwendungsbereich .....	6
4.2	Magnetschnellbahn-Ausführungsgrundlagen.....	6
4.3	Abkürzungen und Definitionen .....	7
4.4	Gesetze, Verordnungen, Normen und Richtlinien.....	7
4.5	Kennzeichnung und Verbindlichkeit von Anforderungen .....	8
5	Definitionen (fahrzeugspezifisch).....	9
6	Generelle Anforderungen an die Bremstechnik .....	12
6.1	Teilsysteme und Einrichtungen .....	12
6.2	Funktion .....	14
6.3	Bemessung .....	16
6.4	Sicherheitsanforderungen .....	16
6.4.1	Anforderungen an die Bordenergieversorgung .....	17
6.4.2	Anforderungen an die Ausführung eines Absetzbefehles .....	17
6.4.3	Systematische Fehler in den Bremseinrichtungen.....	17
6.5	Berücksichtigung der Reibpaarungen .....	18
6.5.1	Bremsmagnet / Seitenführschiene .....	18
6.5.2	Tragkufen / Gleitebene.....	18
7	Anforderungen an die Bremseinrichtungen.....	19
7.1	Bremskrafterzeugung.....	19
7.1.1	Funktionen und Eigenschaften.....	19
7.1.2	Ausfallauswirkung .....	19
7.1.3	Ausfalloffenbarung .....	19
7.1.4	Nachweise .....	20
7.2	Steuerung und Überwachung der Bremswirkung .....	21
7.2.1	Funktionen und Eigenschaften.....	21
7.2.2	Ausfallverhalten .....	21
7.2.3	Nachweise .....	21
8	Einwirkungen der Bremseinrichtungen auf den Fahrweg .....	22
8.1	Allgemein .....	22

**Ausführungsgrundlage**

Fahrzeug

8.2	Einwirkungsarten und Einwirkungskombinationen.....	22
8.3	Kräfte und Lastbilder.....	23
8.3.1	Globale Einwirkungen auf den Fahrweg.....	23
8.3.2	Nahtstelle Bremsmagnet – Seitenführschiene.....	23
8.3.3	Nahtstelle Tragkufe – Gleitebene.....	24

**Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1:	<i>Seitenansicht und Querschnitt eines Fahrzeugs mit Kennzeichnung der Bremsseinrichtungen (Prinzipdarstellung).....</i>	9
Abb. 2:	<i>Magnetmodul (Ausführungsbeispiel).....</i>	10
Abb. 3:	<i>Ansicht eines Bremsmagneten (Ausführungsbeispiel), Definition der wesentlichen Bauteile.....</i>	10
Abb. 4:	<i>Tragkufe (Ausführungsbeispiel).....</i>	11
Abb. 5:	<i>An der Sicheren Bremse beteiligte Teilsysteme und Einrichtungen (Ausführungsbeispiel).....</i>	13
Abb. 6:	<i>Bremskennlinie Sichere Bremse für eine Fahrzeugsektion (Abbildung 10 aus /MSB AG-GESAMTSYS/, Kapitel 8.5).....</i>	15
Abb. 7:	<i>Struktur der Projektierung sicherheitstechnisch relevanter Systeme (Teil I / projektspezifisches Beispiel).....</i>	25
Abb. 8:	<i>Struktur der Projektierung sicherheitstechnisch relevanter Systeme (Teil II / projektspezifisches Beispiel).....</i>	26

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1:	Charakteristische Werte für die maximalen quasistatischen Lasten durch einen einzelnen Bremsmagneten.....	23
Tabelle 2:	Charakteristische Werte für die maximalen quasistatischen Lasten durch eine einzelne Tragkufe.....	24

## 4 Allgemeines

### 4.1 Zweck und Anwendungsbereich

Die vorliegende „Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage Fahrzeug Teil V - Bremstechnik“ legt die Anforderungen an die im Fahrzeug installierten sicheren Bremseinrichtungen fest.

Sie gilt für eine Magnetschnellbahn gemäß Allgemeinem Magnetschwebbahngesetz /AMbG/.

Das Regelbremssystem „Langstator“ ist nicht Inhalt dieses Dokuments (siehe hierzu /MSB AG-GESAMTSYS/).

Teil V ist bei der Spezifikation, Ausführung und Nachweisführung der Bremseinrichtungen von MSB-Fahrzeugen anzuwenden.

Abweichungen von den Anforderungen und Festlegungen in diesem Dokument bedürfen gemäß /MbBO/ des Nachweises gleicher Sicherheit.

Teil V der „MSB- Ausführungsgrundlagen Fahrzeug“ umfasst:

- Definition der Bremseinrichtungen;
- Anforderungen an die Bremseinrichtungen;
- Einwirkungen der Bremseinrichtungen auf den Fahrweg;
- Beschreibung der Schnittstellen zu anderen Systemen (BLT, Bordenergieversorgung).

Es werden die Anforderungen an die sichere Bremstechnik des Fahrzeugs zusammengestellt. Das Dokument enthält keine Beschreibung der Bremssteuerung und Bremsüberwachung durch die BLT. Diese ist in /MSB AG-BLT/ enthalten.

### 4.2 Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlagen

Dieses Dokument ist Bestandteil einer Dokumentation für Magnetschnellbahnen bestehend aus mehreren Ausführungsgrundlagen. Der Dokumentationsbaum ist in Abbildung 1 /MSB AG-GESAMTSYS/ dargestellt.

Die übergeordnete Ausführungsgrundlage Gesamtsystem und seine Anlagen gelten einheitlich für die gesamte Dokumentation:

- Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage Gesamtsystem, Dok.-Nr: 50630, /MSB AG-GESAMTSYS/, mit den Anlagen:
  - Anlage 1: Abkürzungen und Definitionen, Dok.-Nr: 67536, /MSB AG-ABK&DEF/
  - Anlage 2: Gesetze, Verordnungen, Normen und Richtlinien, Dok.-Nr: 67539, /MSB AG-NORM&RILI/
  - Anlage 3: Umweltbedingungen, Dok.-Nr: 67285, /MSB AG-UMWELT/
  - Anlage 4: Regeln Betrieb (Fahrbetrieb und Instandhaltung), Dok.-Nr: 69061, /MSB AG-BTR/
  - Anlage 5: Schall, Dok.-Nr: 72963, /MSB AG-SCHALL/

Die Dokumentation zum Fahrzeug beinhaltet folgende Unterlagen:

---

Titel	Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage Fahrzeug, Teil V, Bremstechnik
-------	--

Dok.-Nr.:	73389	Version	Weißdruck	Ausg. Datum	15.02.2007
-----------	-------	---------	-----------	-------------	------------

Seite 6 von 26

**Ausführungsgrundlage**

Fahrzeug

- Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage Fahrzeug, Teil I: Generelle Anforderungen, Dok.-Nr: 67698, /MSB AG-FZ GEN/
- Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage Fahrzeug, Teil II: Bemessung, Dok.-Nr: 67694, /MSB AG-FZ BEM/
- Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage Fahrzeug, Teil III: Kinematische Begrenzungslinie, Dok.-Nr: 67650, /MSB AG-FZ KIN/
- Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage Fahrzeug, Teil IV: Trag- /Führtechnik, Dok.-Nr: 73388, /MSB AG-FZ TRAFÜ/
- Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage Fahrzeug, Teil V: Bremstechnik, Dok.-Nr: 73389, /MSB AG-FZ BREMS/

**4.3 Abkürzungen und Definitionen**

Es gelten die in /MSB AG-ABK&DEF/ angegebenen Abkürzungen und Definitionen.

Nachfolgende Abkürzungen gelten ergänzend zu /MSB AG-ABK&DEF/:

a	Bremsverzögerung (Momentanwert)
$F_G$	Bremskraft des Fahrzeugs
$F_{\text{Brems}}$	Bremskraft des Fahrzeugs durch Wirkung der Bremseinrichtungen
$F_W$	Fahrwiderstand des Fahrzeugs
$F_H$	Haltebremskraft
m	Fahrzeugmasse
$m_b$	abgesetzter Anteil der Fahrzeugmasse
s	Ortsvariable
v	Geschwindigkeit (Momentanwert)
$v_0$	Bremsausgangsgeschwindigkeit
$\mu_H$	Reibbeiwert für die Haltebremsfunktion
$\mu_{H \text{ min}}$	Minimaler Reibbeiwert für die Haltebremsfunktion auf vereistem Fahrweg

**4.4 Gesetze, Verordnungen, Normen und Richtlinien**

Die in /MSB AG-NORM&RILI/ aufgeführten normativen Dokumente enthalten Festlegungen, die durch Verweisung in den Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlagen zum Bestandteil der Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlagen werden. Bei datierten normativen Dokumenten in /MSB AG-NORM&RILI/ gelten spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nicht. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen normativen Dokuments.

Der Stand der in einem MSB-Projekt zu berücksichtigenden Normen und Richtlinien muss projektspezifisch verbindlich festgelegt werden.

---

Titel	Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage Fahrzeug, Teil V, Bremstechnik
-------	--

Dok.-Nr.:	73389	Version	Weißdruck	Ausg. Datum	15.02.2007
-----------	-------	---------	-----------	-------------	------------

Seite 7 von 26

#### 4.5 Kennzeichnung und Verbindlichkeit von Anforderungen

Bei der Erstellung des vorliegenden Dokuments wurden die Regelungen gemäß /DIN 820/ im Wesentlichen angewendet.

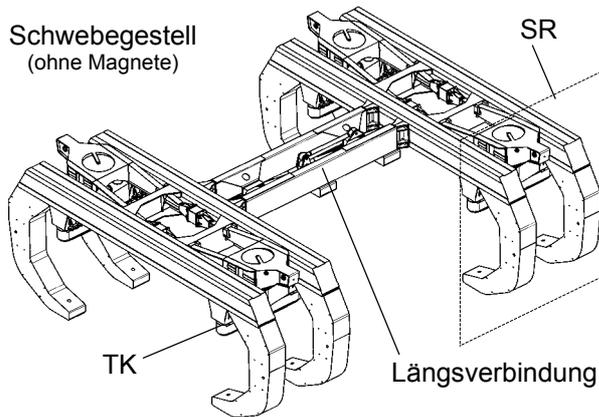
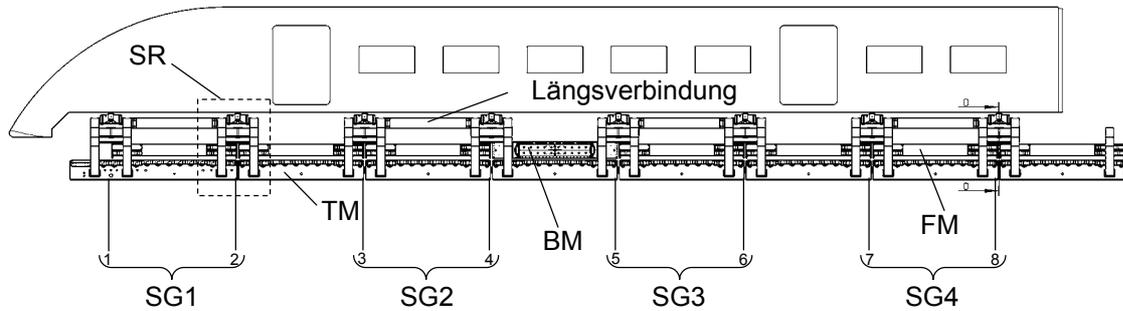
In den nachfolgenden Kapiteln und in den Anlagen dieses Dokuments sind

- Anforderungen in Standard-Schrift
- Erläuterungen, Richtwerte und Beispiele in *Kursiv-Schrift*

gekennzeichnet.

Werden in diesem Dokument Hinweise auf projektspezifische Regelungen im Einzelfall gegeben, bedeutet dies, dass eine Vereinbarung zwischen Hersteller und Unternehmer (z.B. *in einem Lastenheft bzw. einer vertraglichen Regelung*) unter Hinzuziehung der Genehmigungsbehörde zu treffen ist.

5 Definitionen (fahrzeugspezifisch)



- SG = Schwebegestell
- SR = Schweberrahmen (2 Gestellbügel + Verbindungsteile)
- TM = Tragemagnet
- FM = Führungsmagnet
- BM = Bremsmagnet
- TK = Tragkufe
- WK = Wagenkasten

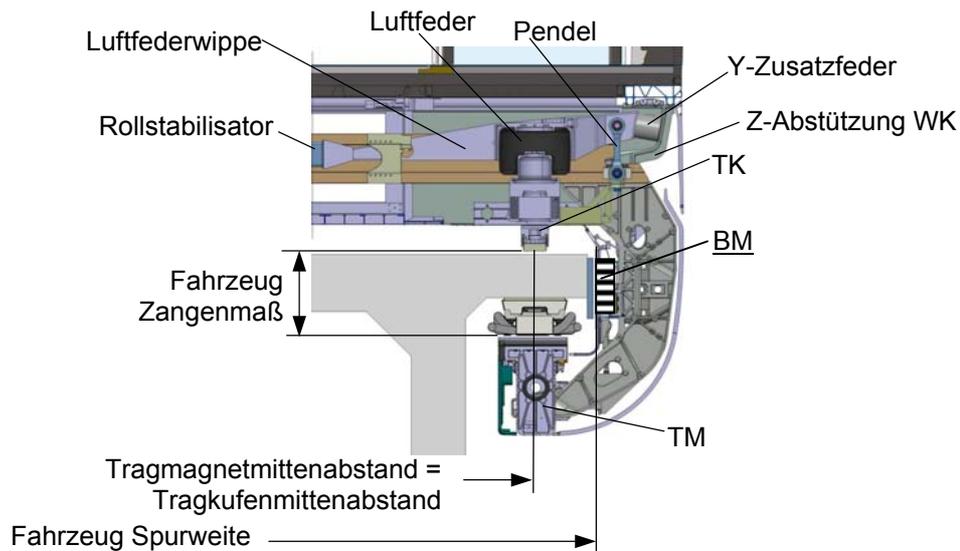


Abb. 1: Seitenansicht und Querschnitt eines Fahrzeugs mit Kennzeichnung der Bremseinrichtungen (Prinzipdarstellung)

Titel Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage  
Fahrzeug, Teil V, Bremstechnik

Dok.-Nr.: 73389 Version Weißdruck Ausg. Datum 15.02.2007

Seite 9 von 26

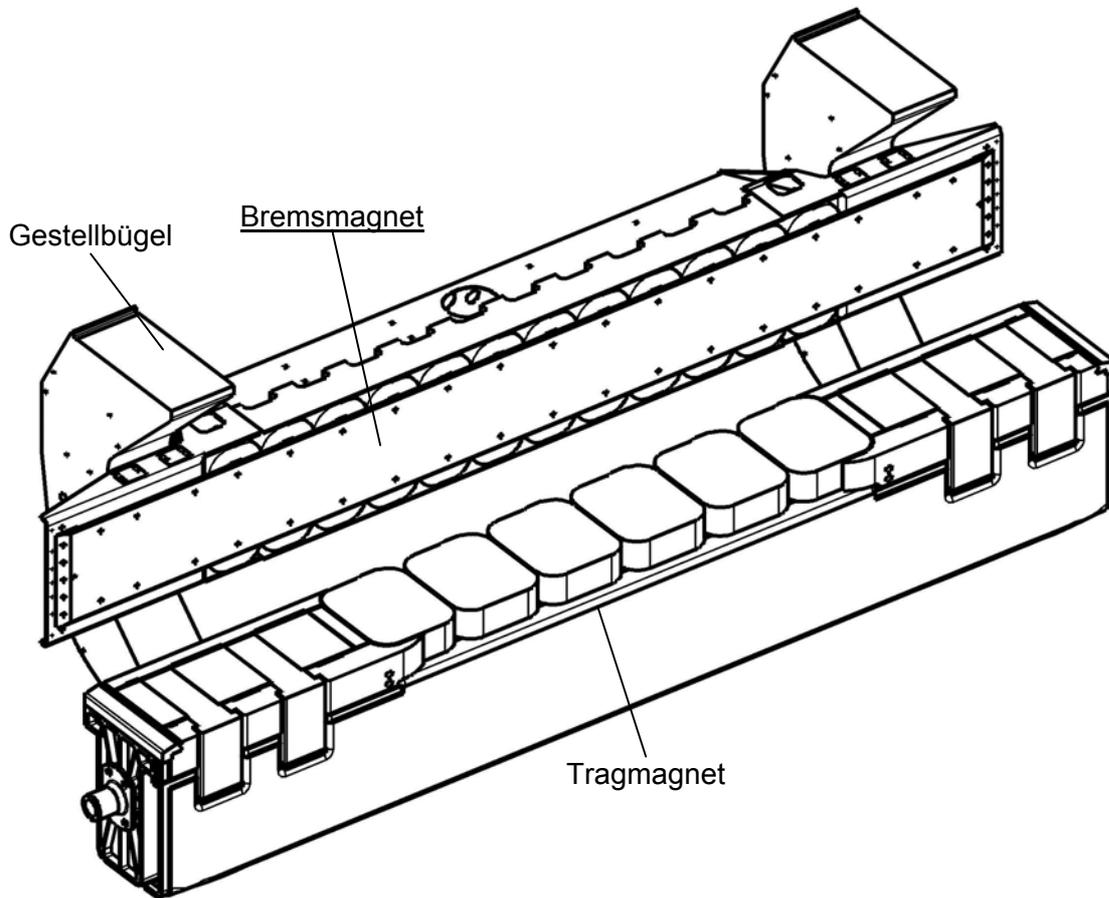


Abb. 2: Magnetmodul (Ausführungsbeispiel)

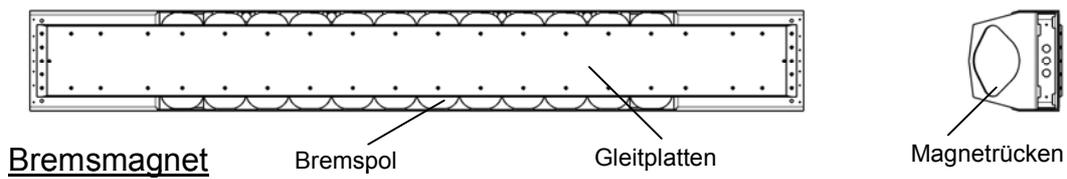


Abb. 3: Ansicht eines Bremsmagneten (Ausführungsbeispiel), Definition der wesentlichen Bauteile

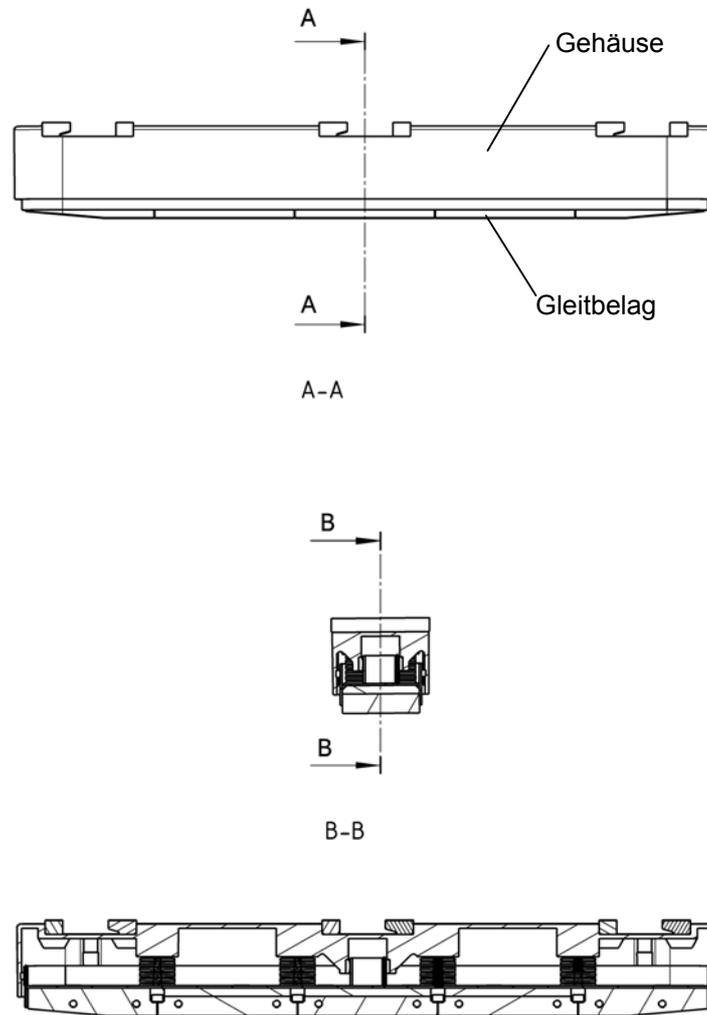


Abb. 4: Tragkufe (Ausführungsbeispiel)

## 6 Generelle Anforderungen an die Bremstechnik

### 6.1 Teilsysteme und Einrichtungen

*Es gilt die Beschreibung in /MSB AG-GESAMTSYS/.*

*Für das Fahrzeug stehen folgende Bremsen zur Verfügung:*

- *Bremsfunktion des Langstatorantriebs, eingesetzt im ausfallfreien Zustand (Betriebsbremse);*
- *Sichere Bremse, gesteuert durch fahrzeugseitige Einrichtungen der BLT.*

*Die Bremsfunktion des Langstatorantriebs ist nicht Inhalt dieses Dokuments (siehe hierzu /MSB AG-GESAMTSYS/).*

*Diese Ausführungsgrundlage regelt die Anforderungen an die Bremseinrichtungen des Fahrzeuges (Sichere Bremse) und deren Einwirkungen auf den Fahrweg. Die Ansteuerung der Antriebsabschaltung und der fahrzeugeigenen Bremseinrichtungen sowie die Vermeidung von unzulässigen Überlagerungseffekten erfolgt durch die Betriebsleittechnik und ist nicht Gegenstand dieser Ausführungsgrundlage<sup>1</sup>.*

*Die an der Sicheren Bremse beteiligten Teilsysteme und Einrichtungen sind in Abb. 5 beispielhaft definiert. Die Umsetzung der durch die BLT zu realisierenden Steuerung und Überwachung der Sicheren Bremse erfolgt in diesem Ausführungsbeispiel fahrzeugseitig unter Einbindung folgender Teilsysteme und Einrichtungen:*

- *Die Steuersignale der BLT zur Aktivierung der Bremsfunktion und zur Steuerung der Bremswirkung werden an die Magnetregleinrichtungen Bremsen übertragen.*
- *Die Magnetregleinrichtungen Bremsen regeln den Strom der Bremsmagnete und überwachen dezentral die jeweiligen Bremseinrichtungen.*
- *Die Überwachungssignale der Magnetregleinrichtungen Bremsen werden an die BLT übertragen.*
- *Die Bremsmagnete erzeugen in den Seitenführschiene des Fahrwegs geschwindigkeitsabhängig Wirbelströme, die verzögernde Kräfte auf die Bremsmagnete zur Folge haben. Zusätzlich erzeugen die Bremsmagnete anziehende Kräfte auf die Seitenführschiene. Im unteren Geschwindigkeitsbereich legen sich die Bremsmagnete aufgrund der anziehenden Kräfte an die Seitenführschiene an und erzeugen Reibkräfte zwischen den Gleitplatten der Bremsmagnete und der Seitenführschiene.*
- *Die an der Bremse wirkenden Kräfte werden über die Anlenk- und Strukturteile der Bremse in das Fahrzeug geleitet.*
- *Unmittelbar vor Erreichen des Stillstandes des Fahrzeugs wird die Bremse durch die BLT abgeschaltet und das Fahrzeug durch Steuersignale der BLT an die Magnetregleinrichtungen Tragen über die Tragkufen auf die Gleitebene abgesetzt.*
- *Die Tragkufen übernehmen die Haltebremsfunktion.*
- *Die Überwachungssignale der Bordnetze und der Magnetregleinrichtungen Tragen werden an die BLT übertragen.*

---

<sup>1</sup> Die Ausführungsgrundlage beschreibt auf Basis ausführungsspezifischer Merkmale des Transrapids projektunabhängige Ausführungsanforderungen an die Sichere Bremse.

Die

- Bremskrafterzeugung gemäß Kap. 7.1 (in Abb. 5 Bremsmagnet, Struktur-Anlenkteile Bremse, Magnetregel-einrichtungen Bremsen und die
- Steuerung und Überwachung der Bremswirkung gemäß Kap. 7.2 (in Abb. 5 Übertragung der Steuersignale und Überwachungssignale der Bremse von und zur BLT, Generierung sicherheitsrelevanter Statusinformationen in den Magnetregel-einrichtungen)

sind Bestandteil dieser Ausführungsgrundlage (/MSB AG-FZ BREMS/).

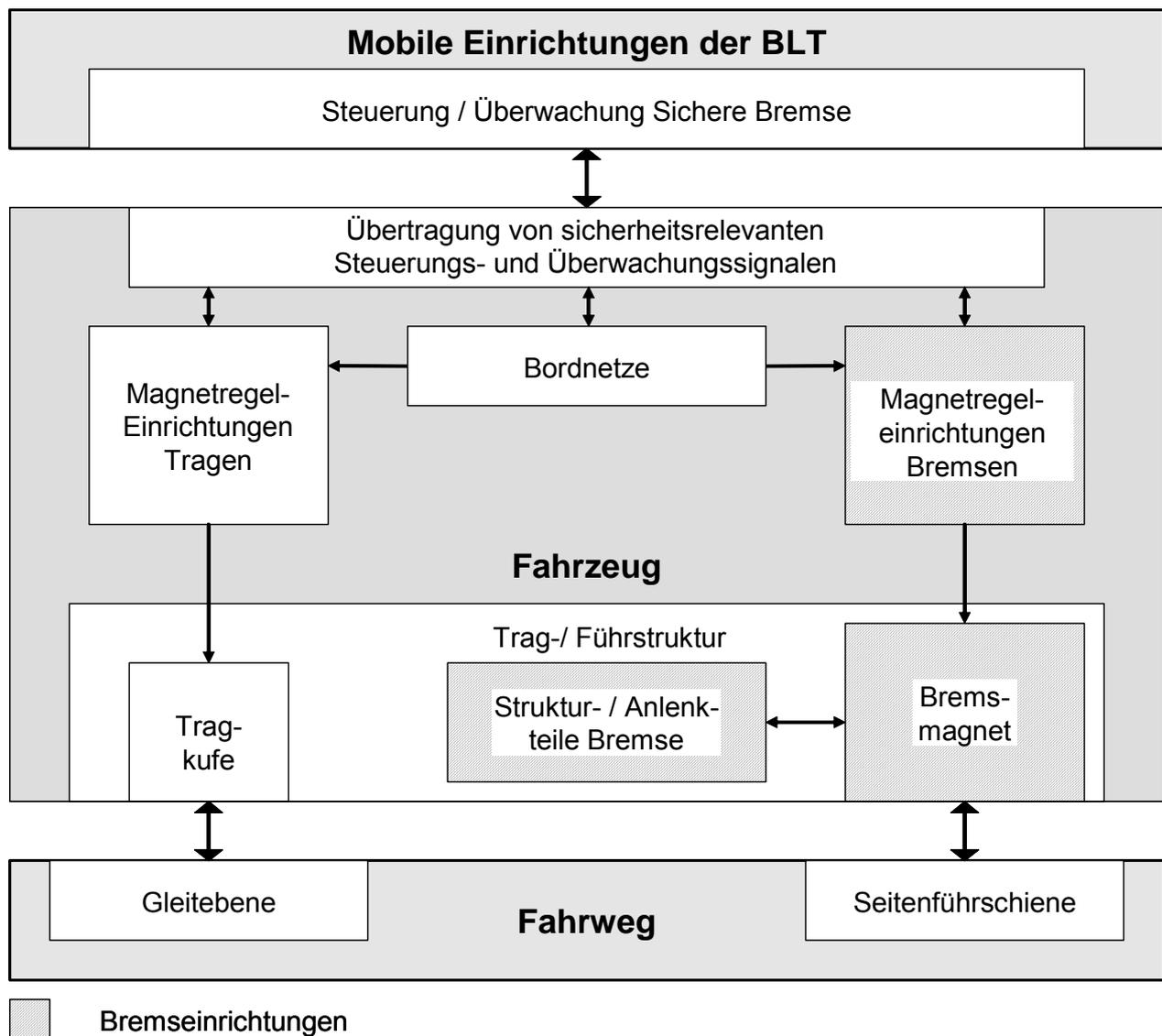


Abb. 5: An der Sicheren Bremse beteiligte Teilsysteme und Einrichtungen (Ausführungsbeispiel)

Die für den Einsatz der Sicheren Bremse erforderlichen Funktionen der BLT

- Steuerung und Überwachung der Bremsprüfung,
- Steuerung und Überwachung Sichere Bremse,
- Überwachung Maximalprofil,
- Überwachung Minimalprofil,
- Sichere Ortung,
- Sichere Antriebsabschaltung,

sind Bestandteile der Ausführungsgrundlage BLT (/MSB AG-BLT/).

Die Trag-/Führstruktur sowie die Magnetregleinrichtungen Tragen und Führen sind Bestandteile der Ausführungsgrundlage Trag-/Führtechnik (/MSB AG-FZ TRAFÜ/).

Die Bemessung der Strukturteile Bremse ist in /MSB AG-FZ BEM/ enthalten.

## 6.2 Funktion

Die fahrzeugeigene Sichere Bremse muss so ausgeführt werden, dass das Fahrzeug mit den in ihm eingebauten Einrichtungen der Betriebsleittechnik autark eine Bremsung zu einem definierten Halteplatz durchführen kann.

Die fahrzeugeigene sichere Bremse muss folgende Funktionen aufweisen:

- durch die BLT jederzeit aktivierbare Bremswirkung,
- durch die BLT steuerbare Höhe der Bremswirkung,
- Haltebremsfunktion.

Für die Haltebremsfunktion gilt § 13 und § 20 der MbBO. Die Umsetzung muss projektspezifisch nachgewiesen werden. Dabei sind die Anforderungen aus /MSB AG-GESAMTSYS/ zu berücksichtigen. Eine eingenommene Halteposition muss beibehalten werden.

Das Bremsvermögen wird bestimmt durch die geschwindigkeitsabhängig wirksame Bremskraft des Fahrzeugs  $F_G$  bei abgeschaltetem Langstatorantrieb und durch die Bremsentwicklungszeit  $t_e$  nach Aktivierung durch die BLT.

Allgemein gilt für  $F_G$ :

$$F_G = F_{Brems} + F_W$$

mit  $F_{Brems}$ : Bremskraft des Fahrzeugs durch Wirkung der Bremseinrichtungen

$F_W$ : Fahrwiderstand des Fahrzeugs

Das Bremsvermögen ist versuchstechnisch zur verifizieren.

Die geschwindigkeitsabhängige Bremskraft berechnet sich bei gegebener Fahrzeugmasse  $m$  zu

$$F_G(v) = a(v) \cdot m.$$

Der Fahrwiderstand  $F_W$  muss versuchstechnisch durch geeignete Ausschwebeversuche mit dem nicht angetriebenen und nicht gebremsten Fahrzeug in gleicher Weise wie  $F_G$  verifiziert werden.

**Ausführungsgrundlage**

Fahrzeug

Die Haltebremsfunktion kann durch das Absetzen des Fahrzeugs auf Tragkufen realisiert werden.

Die Haltebremskraft  $F_H$  wird bestimmt durch den abgesetzten Anteil der Fahrzeugmasse  $m_b$  und den Reibbeiwert  $\mu_H$ , der auf der Kontaktfläche zwischen dem Fahrweg und dem Fahrzeug wirksam ist.

Die Haltebremsfunktion ist gegeben, wenn die Haltebremskraft höher ist als die auf das stehende Fahrzeug einwirkende Kraft in x-Richtung. Diese besteht aus der Hangabtriebskraft bei Längsneigung und aus der aerodynamischen Kraft durch Wind in x-Richtung.

Beim Nachweis der Haltebremsfunktion ist projektspezifisch ein Sicherheitsfaktor  $> 1$  zu berücksichtigen.

Die mit der Sicheren Bremse erreichbare maximale und minimale Bremskennlinie ist für eine Fahrzeugsektion beispielhaft in Abb. 6 dargestellt.

Die Grenzwerte müssen projektspezifisch mit den Anforderungen der BLT und der Bemessung Fahrweg abgestimmt werden. Die projektspezifisch festgelegten Werte müssen eingehalten werden.

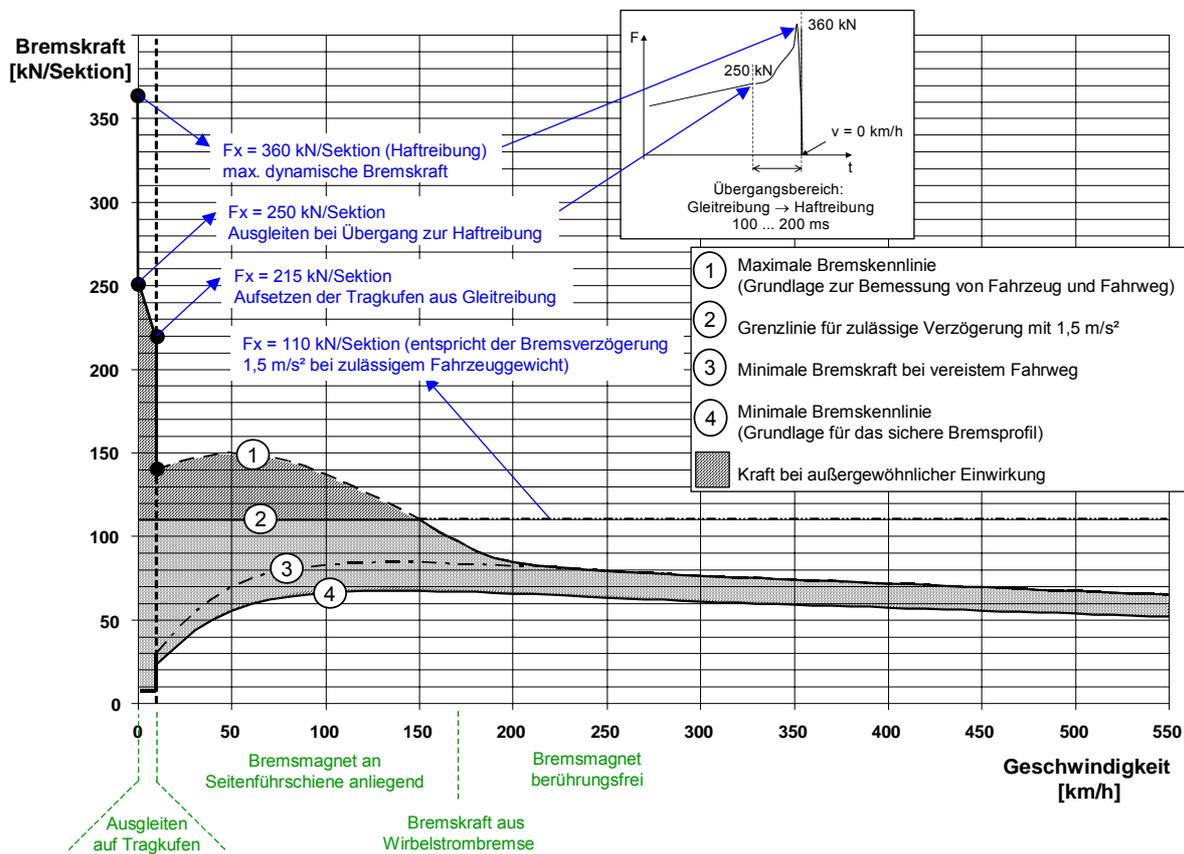


Abb. 6: Bremskennlinie Sichere Bremse für eine Fahrzeugsektion (Abbildung 10 aus /MSB AG-GESAMTSYS/, Kapitel 8.5)

### 6.3 Bemessung

Unter Anwendung der Ausführungsgrundlagen Fahrzeug Teil II (/MSB AG-FW BEM/) müssen die Lasten, die über die Strukturbauteile und Anlenkungen der die Bremskraft erzeugenden Einrichtungen übertragen werden, bei der Bemessung berücksichtigt werden.

Die Lasten müssen projektspezifisch dokumentiert werden.

Für die lastübertragenden Bauteile ist der Nachweis der Lastaufnahmefähigkeit (allgemeiner Spannungsnachweis) und der Ermüdung entsprechend den Vorgaben in Teil II (/MSB AG-FW BEM/) zu erbringen.

Die Bremsen müssen die geometrischen Randbedingungen gemäß /MSB AG-FW GEO/ vollumfänglich berücksichtigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die zugelassenen Oberflächenabweichungen die Bremswirkung nicht systemkritisch beeinflussen dürfen.

### 6.4 Sicherheitsanforderungen

Die sicherheitstechnisch relevanten Systeme sind im Allgemeinen gemäß /DIN EN 50126/ zu projektieren und nachzuweisen.

*Eine Struktur der Aufgabe wird in Abb. 7 und Abb. 8 beispielhaft dargestellt.*

Die Steuerung und Funktion der sicheren Bremse mit Zielbremsung muss im gesamten Geschwindigkeitsbereich über ihre Lebensdauer sicher (Safe-Life) sein. Die zulässige Ausfallrate der sicheren Bremse in einer angenommenen Betriebszeit (Fahrbetrieb und Stillstand) ist durch eine Risikoanalyse zu bestimmen.

*Methodische Hinweise zur Durchführung der Risikoanalyse finden sich in /prEN 50 126-2/ und /prR009-004/.*

Der Geschwindigkeitsbereich muss die maximal erreichbare Geschwindigkeit entsprechend dem Maximalfahrprofil bis zum Stillstand umfassen. Der Geschwindigkeitsbereich kann von einem oder mehreren Bremssystemen abgedeckt werden, z. B. ein Wirbelstrombremssystem in Verbindung mit einer Reibbremse.

Die Safe-life-Anforderung muss die ungünstigsten spezifizierten Randbedingungen, wie maximale Zuladung, Rückenwind, Gefälle, Einwirkungen aus der Primärumwelt, insbesondere winterliche Witterung und Blitz, sowie technische Störungen und Ausfälle abdecken.

Zur Erreichung der geforderten Ausfallrate kann die sichere Bremse mit redundanten Bremseinrichtungen ausgeführt werden. Ausfälle in der redundant ausgeführten Sicheren Bremse bzw. ein Rückgang der Bremskraft aufgrund technischer Störungen oder Ausfälle dürfen die Safe-life-Eigenschaften der sicheren Bremse nicht beeinflussen.

Der Nachweis der Safe-life-Eigenschaft ist vor der Inbetriebnahme des Systems anhand einer geeigneten Analyse wie z.B. einer Fehlerbaumanalyse darzulegen. Dieser theoretische Nachweis ist durch experimentelle Verifizierung der in der Analyse angenommenen Baugruppen-Ausfallraten sowie durch praktische Versuche zum Nachweis des Ausfallverhaltens bei Ausfall von Baugruppen zu ergänzen. Im Rahmen der Analyse ist eine Common-Cause-Fehleranalyse durchzuführen.

Für die Sichere Bremse muss ein Sicherheitsnachweis inkl. Risikoanalyse gemäß /DIN EN 50126/ durchgeführt werden.

*Die Anforderungen und Nachweise zu den Einrichtungen für die Bremskrafterzeugung werden in Kap. 7.1 angegeben.*

*Die Anforderungen und Nachweise zu den Einrichtungen für die Steuerung und Überwachung der Bremswirkung werden in Kap. 7.2 angegeben.*

Auf Grundlage der Risikoanalyse muss für die elektronischen Einrichtungen zur Bremskrafterzeugung sowie zur Steuerung und Überwachung der Bremswirkung die SIL-Stufe gemäß DIN EN 50129 festgelegt und bei der Nachweisführung berücksichtigt werden.

Für Software in den Bremseinrichtungen muss die auf Grundlage der Risikoanalyse festgelegte Software-Sicherheitsanforderungsstufe bei der Nachweisführung gemäß /DIN EN 50128/ berücksichtigt werden.

Mindestens nachfolgende Fehler sind in einer geeigneten Analyse zu berücksichtigen:

- Fehler in der Bordenergieversorgung,
- vorzeitiges oder verspätetes Ausführen eines Absetzbefehles,
- systematische Fehler (Hard- und Software),
- unzeitiges Anheben des Fahrzeugs.

#### **6.4.1 Anforderungen an die Bordenergieversorgung**

*Aus den Systemeigenschaften der Sicheren Bremse werden funktionale und sicherheitsrelevante Anforderung an die Bordenergieversorgung gestellt, deren Erfüllung nachgewiesen werden muss, siehe / MSB AG-FZ TRAFÜ/.*

Für die Durchführung einer Zwangsbremung mit der sicheren Bremse muss eine unterbrechungsfreie Stromversorgung vorgesehen werden. Dabei müssen die ungünstigsten spezifizierten Umwelt- und Betriebsbedingungen berücksichtigt werden.

#### **6.4.2 Anforderungen an die Ausführung eines Absetzbefehles**

Der Absetzbefehl muss so erzeugt und in jeder Trag-/Führeinheit mit der dort autark ermittelten Geschwindigkeit logisch so UND-verknüpft werden, dass erst dann, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit kleiner als die zugelassene Absetzgeschwindigkeit ist, der Befehl zum Absetzen dezentral wirksam werden kann.

Für die Absetzsteuerung ist ein Nachweis zu führen, dass der Absetzbefehl auch bei allen anzunehmenden Ausfällen mit hinreichender Wahrscheinlichkeit nur unterhalb der Absetzgeschwindigkeit wirksam werden kann.

#### **6.4.3 Systematische Fehler in den Bremseinrichtungen**

Es ist der Nachweis nach /DIN EN 50129/ zu führen, dass systematische Fehler in der Hardware und - falls vorhanden - der Software der sicherheitsrelevanten Einrichtung zum Messen, Steuern, Regeln und Überwachen der Magnetregelkreise der Sicheren Bremse hinreichend unwahrscheinlich sind oder in ihren Auswirkungen beherrscht werden.

Diagnose- und Regeleinrichtungen sollten hard- und softwareseitig getrennt ausgeführt werden.

## 6.5 Berücksichtigung der Reibpaarungen

### 6.5.1 Bremsmagnet / Seitenführschiene

*Durch die gegenseitige Krafteinwirkung der Baukomponenten Bremsmagnet und Seitenführschiene wird die Bremswirkung der Sicherer Bremsen garantiert. Die Bremswirkung wird erzeugt durch Wirbelstromwirkung und im unteren Geschwindigkeitsbereich durch mechanische Reibung.*

Die zwischen SFS und Gleitplatte wirkenden Normalkräfte, Reibeigenschaften und Flächenpressung sind bei der Dimensionierung zu berücksichtigen.

Im Instandhaltungsprogramm muss der Verschleiß der Gleitplatten berücksichtigt werden.

Die Eigenschaften der Reibpaarung Gleitplatte / Seitenführschiene sind projektspezifisch zu definieren und nachzuweisen. Hierfür können geeignete Prüfstandsnachweise erbracht werden.

### 6.5.2 Tragkufen / Gleitebene

*Tragkufen und Gleitebene kommen bei Unterbrechung der magnetischen Tragfunktion in mechanischen Kontakt.*

*Dies erfolgt*

- *beim Absetzen des Fahrzeuges,*
- *bei Notlaufeigenschaft Tragsystem,*
- *als anteilige Bremsfunktion der Sicherer Bremsen bei kleinen Geschwindigkeiten z.B.  $\leq 10$  km/h (Festlegung projektspezifisch),*
- *als Haltebremsfunktion.*

Im Instandhaltungsprogramm muss der Verschleiß der Tragkufen berücksichtigt werden.

Die Eigenschaften der Reibpaarung Tragkufen / Gleitebene sind projektspezifisch zu definieren und nachzuweisen. Hierfür können geeignete Prüfstandsnachweise erbracht werden.

## 7 Anforderungen an die Bremseinrichtungen

### 7.1 Bremskraftherzeugung

#### 7.1.1 Funktionen und Eigenschaften

Die Bremskräfte der Sicheren Bremse werden erzeugt durch:

- *Bremseinrichtungen, die Bremskräfte über die Schnittstelle zum Fahrweg hervorrufen,*
- *Bremseinrichtungen, die im Stillstand eine Haltebremskraft über die Schnittstelle zum Fahrweg hervorrufen.*

#### 7.1.2 Ausfallauswirkung

Der Ausfall einer Bremseinrichtung darf keine Beeinträchtigung der Funktion der anderen Brems-einrichtungen bewirken.

Die folgenden Ausfälle innerhalb der Bremseinrichtungen dürfen eine Eintrittswahrscheinlichkeit, deren Größe pro Jahr und pro Fahrzeug zuvor in einer Risikoanalyse zu ermitteln ist, nicht überschreiten:

- Ausfälle, die dazu führen, dass die Sichere Bremse ohne Kommando durch die BLT ganz oder teilweise aktiviert wird,
- Ausfälle, die dazu führen, dass die festgelegte maximale Bremskraft überschritten wird,
- Ausfälle, die dazu führen, dass die geforderte minimale Bremskraft unterschritten wird.

Ausfälle von Bremseinrichtungen müssen, soweit sie eine Rückwirkung auf das Trag-/ Führsystem haben, bei der Bemessung und Ausführung des Trag-/Führsystems berücksichtigt werden.

Ausfälle im Trag-/Führsystem müssen, soweit sie eine Rückwirkung auf die Funktion der Sicheren Bremse haben, bei der Bemessung und Ausführung der Bremseinrichtungen berücksichtigt werden.

#### 7.1.3 Ausfalloffenbarung

Ausgefallene Bremseinrichtungen einschließlich Signalübertragung von / zur BLT müssen sich fail-safe offenbaren.

Bei sicherheitsrelevanten Überwachungseinrichtungen, die keine selbsttätige Ausfalloffenbarung aufweisen, muss die Offenbarung von Ausfällen durch periodisch durchzuführende Funktionsprüfungen / Inspektionen erfolgen.

Die Ausfalloffenbarungszeiten, die zur Einhaltung der gemäß Risikoanalyse vorgegebenen Rate für Ausfälle erforderlich sind, müssen eingehalten werden.

Die Prüfkriterien und Prüfintervalle sind mittels einer geeigneten Analyse, z.B. Fehlerbaumanalyse und Ausfalleffektanalyse zu ermitteln.

#### 7.1.4 Nachweise

Für die Bremseinrichtungen muss eine Qualifikationsprüfung mit Prototypen erbracht werden, mit denen die Funktion, das Ausfallverhalten, die Ausfalloffenbarung und die Umweltbeständigkeit nachgewiesen werden.

Die geschwindigkeitsabhängigen Verläufe der Bremskraft  $F_{\text{Brems}}$ , sowohl bei voller Verfügbarkeit als auch bei spezifizierter max. Anzahl ausgefallener Bremskreise, und des Fahrwiderstandes  $F_W$  müssen mit einem repräsentativen Fahrzeug unter definierten Umwelt- und Nutzlastbedingungen versuchstechnisch nachgewiesen werden.

Der geschwindigkeitsabhängige Verlauf der unter den zu berücksichtigenden ungünstigst wirkenden Umwelt-, Nutzlast- und Ausfallbedingungen mindestens wirksamen Bremskraft  $F_{\text{Brems}}$  kann durch Berechnung erfolgen.

Der Nachweis der Bremskraft muss diejenigen Ausfälle berücksichtigen, die innerhalb der akzeptablen Ausfallrate gemäß der Risikoanalyse (siehe Kap. 6.4) liegen.

Zum Nachweis der Safe-Life-Funktion ist eine geeignete Analyse, z.B. Fehlerbaumanalyse durchzuführen. Im Rahmen der Analyse ist eine Common-Cause-Fehleranalyse durchzuführen.

Mit einer geeigneten Analyse, z.B. einer Fehlerbaumanalyse, ist nachzuweisen, dass folgende Ereignisse nur mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit, deren Größe pro Jahr und pro Fahrzeug zuvor in einer Risikoanalyse zu ermitteln ist, auftreten:

- Ganz oder teilweise wirkende Bremse ohne Ansteuerung bzw. Regelung durch die BLT,
- Unterschreiten einer geforderten Bremskraft oder Überschreitung der maximal zulässigen Bremskraft im gesamten Geschwindigkeitsbereich einschließlich Stillstand.

Das Ausfallverhalten muss durch stimulierte Bauteilausfälle versuchstechnisch nachgewiesen werden.

Die Zuverlässigkeit der elektronischen Bremseinrichtungen muss durch Ermittlung der MTBF aus der Auswertung von Lebenslaufdaten mit repräsentativen Baugruppen im Betrieb verifiziert werden.

Die Kompatibilität der aus Lebenslaufdaten verifizierten MTBF mit den Prognose-Ansätzen der Analyse ist nachzuweisen.

## 7.2 Steuerung und Überwachung der Bremswirkung

### 7.2.1 Funktionen und Eigenschaften

*Die sicherheitsrelevanten Steuerungs- und Überwachungsfunktionen der sicheren Bremse umfassen:*

- *Die Übertragung von Steuerkommandos der BLT an die Bremseinrichtungen zur Aktivierung der Bremsfunktion und zur Steuerung der Bremswirkung.*
- *Die Generierung sicherheitsrelevanter Statusinformationen zur Überwachung der Bremseinrichtungen und deren Übertragung an die BLT.*

*Nichtsicherheitsrelevante Statusinformationen (z.B. Diagnosemeldungen) sind nicht Bestandteil dieser Ausführungsgrundlage.*

### 7.2.2 Ausfallverhalten

Ein Einzelausfall der Steuerungs- / Überwachungseinrichtungen darf nicht zum Verlust oder zu einer Einschränkung einer sicherheitsrelevanten Steuerungs- / Überwachungsfunktion führen.

Der Ausfall einer sicherheitsrelevanten Steuerungs- / Überwachungsfunktion durch Mehrfachausfall redundanter Baugruppen muss zu einer automatischen sicherheitsgerichteten Systemreaktion führen.

*Das Auslösen dieser sicherheitsgerichteten Systemreaktion wird durch die Betriebsleittechnik gewährleistet und ist nicht Gegenstand dieser Ausführungsgrundlage.*

### 7.2.3 Nachweise

Eine Qualifikation der Baugruppen ist mit Prototypen oder mit einem repräsentativen Fahrzeug durchzuführen.

Die Steuerungs- und Überwachungseinrichtungen müssen in der Analyse zum Nachweis der Auftretenswahrscheinlichkeit einer nicht ausreichenden oder nicht beabsichtigten Bremswirkung (siehe Kap. 6.1) berücksichtigt werden. Im Rahmen der Analyse ist eine Common-Cause-Fehleranalyse durchzuführen.

## 8 Einwirkungen der Bremseinrichtungen auf den Fahrweg

### 8.1 Allgemein

*Die nachfolgend angegebenen Kräfte entsprechen den charakteristischen Werten der fahrzeugseitigen Einwirkungen an den Schnittstellen Fahrzeug/Fahrweg auf den Fahrweg.*

### 8.2 Einwirkungsarten und Einwirkungskombinationen

*Die Einwirkungen der Bremseinrichtungen auf den Fahrweg treten an folgenden Nahtstellen auf:*

- *Bremsmagnet-Seitenführschiene,*
- *Tragkufe-Gleitebene.*

*Die auf den Fahrweg einwirkenden Kräfte resultieren aus den Funktionen:*

- *magnetische Bremswirkung durch vom Bremsmagnet in der Seitenführschiene induzierte Wirbelströme,*
- *magnetische Zugkraft auf die Seitenführschiene als Reaktionsschiene der Bremsmagnete,*
- *mechanische Bremswirkung durch Reibung zwischen Bremsmagnet und Seitenführschiene,*
- *mechanische Bremswirkung durch Reibung zwischen Tragkufe und Gleitebene.*

Die Beeinflussung der magnetischen Bremswirkung durch Witterung kann vernachlässigt werden.

*Die mechanische Bremswirkung wird über den effektiven Reibbeiwert durch variierende Umweltbedingungen beeinflusst.*

Die Einwirkungen auf die Struktur der Bremseinrichtungen und die Krafteinleitung in das Trag-/Führsystem müssen gemäß Kap. 6.3 bei der Bemessung der Baugruppen berücksichtigt werden.

Die Einwirkungen auf den Fahrweg müssen in den Bemessungsgrundlagen des Fahrwegs als veränderliche bzw. außergewöhnliche Einwirkungen aus dem Fahrzeug berücksichtigt werden.

Damit die in den Bemessungsgrundlagen Fahrweg unterstellten Einwirkungen aus dem Betrieb des Fahrzeugs mit den tatsächlich auftretenden Einwirkungen hinreichend übereinstimmen, dürfen die in Kap. 8.3 genannten Werte der fahrzeugseitig übertragenen Kräfte nicht überschritten werden (zulässige Toleranz bei der Verifikation der Einwirkungsgrößen 5%).

Die angegebenen Größen der charakteristischen Werte der Einwirkungen müssen in jedem Anwendungsfall in einer projektspezifischen Spezifikation verbindlich festgelegt werden.

Die Höhe der Einwirkungen muss durch Berechnung oder durch Messung mit einem repräsentativen Fahrzeug nachgewiesen werden.

### 8.3 Kräfte und Lastbilder

#### 8.3.1 Globale Einwirkungen auf den Fahrweg

Als charakteristischer Wert für die maximale globale Bremswirkung einer Fahrzeugsektion auf den Fahrweg ist eine Kraft in x-Richtung von 250 kN bei zulässigem Gesamtgewicht gemäß /MSB AG-GESAMTSYS/, Kap. 9, und Geschwindigkeit  $v > 0$  km/h einzuhalten.

Beim Übergang von  $v > 0$  km/h auf  $v = 0$  km/h ist der Effekt des Übergangs von Gleit- auf Haftreibung zu berücksichtigen. Hierbei kann eine transiente maximale Kraft in x-Richtung von 360 kN mit einer Einwirkungsdauer in der Größenordnung von 100 ms bis 200 ms auftreten.

#### 8.3.2 Nahtstelle Bremsmagnet – Seitenführschiene

*An der Nahtstelle zwischen Bremsmagnet (BM) und Seitenführschiene (SFS) erfolgt eine magnetische Übertragung von Zugkräften in y-Richtung sowie eine magnetische und mechanische Übertragung von Bremskräften in x-Richtung.*

Das Material der Seitenführschiene muss die Anforderungen gemäß /MSB AG-GESAMTSYS/, Kap. 6.1.4.3.6, erfüllen. Zusätzlich ist auch der Energieeintrag durch die Bremsrichtungen der Sicherer Bremsen in die SFS, der in Wärme umgesetzt wird, zu berücksichtigen.

*Magnetische Bremskräfte in x-Richtung entstehen durch vom Bremsmagneten in der SFS induzierte Wirbelströme.*

*Mechanische Bremskräfte in x-Richtung entstehen durch Reibkräfte in Folge magnetischer Anzugkräfte zwischen BM und SFS.*

Als charakteristische Werte für die maximalen quasistatischen Lasten durch einen einzelnen Bremsmagneten sind zu berücksichtigen:

Art der Einwirkung	Richtung der Einwirkung	Last je Bremsmagnet	Last je m SFS
Zugkraft	y-Richtung	50 kN	25 kN/m <sup>1)</sup>
Längskraft	x-Richtung	75 kN	37,5 kN/m

<sup>1)</sup> Die Last kann lokal um 50 % höher sein

Tabelle 1: Charakteristische Werte für die maximalen quasistatischen Lasten durch einen einzelnen Bremsmagneten

### 8.3.3 Nahtstelle Tragkufe – Gleitebene

An der Nahtstelle zwischen Tragkufe und Gleitebene (GE) erfolgt eine Übertragung der quasistatischen Gewichtskraft in z-Richtung und eine aus Gewichtskraft und Reibbeiwert resultierende Kraft in x-Richtung.

Als charakteristische Werte für die maximalen quasistatischen Lasten durch eine einzelne Tragkufe sind zu berücksichtigen:

Art der Einwirkung	Richtung der Einwirkung	Last je Tragkufe
Druckkraft	z-Richtung	50 kN
Längskraft	x-Richtung	15 kN quasistationär bei $v > 0$ km/h max. 25 kN transient bei $v \rightarrow 0$ km/h

Tabelle 2: Charakteristische Werte für die maximalen quasistatischen Lasten durch eine einzelne Tragkufe



Abb. 7: Struktur der Projektierung sicherheitstechnisch relevanter Systeme (Teil I / projektspezifisches Beispiel)

<b>Magnetschwebbahn Teilsystem „Sichere Bremse“</b>	
<b>Nachweis der funktionalen und technischen Sicherheit</b>	
1.	Einleitung
1.1	Rechtliche Grundlage
1.2	Normen
1.3	Anforderungen
2.	Nachweis des korrekten funktionalen Verhaltens des Teilsystems „Sichere Bremse“
2.1	Beschreibung des Teilsystems „Sichere Bremse“ in der Systemarchitektur
2.2	Definition der Schnittstellen
2.2.1	Schnittstellen innerhalb des Teilsystems „Sichere Bremse“
2.2.2	Schnittstellen aus dem Teilsystem „Sichere Bremse“ in das System Fahrzeug/Fahrweg
2.2.3	Schnittstelle zum Betrieb
2.2.4	Schnittstellen zum Fahrzeug
2.2.5	Schnittstellen zur Regelbremse
2.3	Erfüllung der Anforderungen an das Teilsystem „Sichere Bremse“
2.3.1	Konzept, Berechnungen
2.3.2	Testspezifikationen
2.3.4	Verifikation, Validation
2.4	Erfüllung der Sicherheitsanforderung an die „Sichere Bremse“
2.4.1	Nachweis der definierten Sicherheitsziele
2.4.2	Nachweis über Sicherheitsanalysen
	- Analyse gemeinsamer Fehler
	- Fehlerausfallanalyse
	- Fehlerbaumanalyse
	- ...
2.4.3	Nachweis der Sicherheitsfunktionen
	- Testspezifikation und Testreport
2.5	Nachweis der korrekten Funktionalität der Mechanik (TK, Befestigung, Träger und Halter, GL)
2.5.1	Sicherheit
2.5.2	Zuverlässigkeit
2.5.3	Verfügbarkeit
2.5.4	Instandhaltung
2.6	Nachweis der korrekten Funktion der Leittechnik, Betriebsleitzentrale, Betriebsleittechnik
2.6.1	Erfüllung der Sicherheitsintegrität an die Software
2.6.2	Fehleroffenbarung
2.6.3	Entwicklungsprozess nach Modell mit Bewertung
2.6.4	Zusammenwirken zw. Software/Hardware und Leittechnik bzw. Mechanik
3.	Ausfall des Teilsystems „Sichere Bremse“ und deren Auswirkungen nach innen und außen
3.1	Einzelausfälle (Redundanzen, Ausfallreaktion, Unverlierbare Eigenschaften)
3.1.1	Ausfälle im Teilsystem „Sichere Bremse“
3.1.2	Ausfälle des Teilsystems „Sichere Bremse“
3.2	Unabhängigkeit der Module im Teilsystem „Sichere Bremse“
	- Physikalische und funktionale interne Einflüsse
	- Physikalische und funktionale externe Einflüsse
3.3	Offenbarung von Einzelfehlern im Teilsystem „Sichere Bremse“
3.4	Umgang und Aktionen nach der Offenbarung des Einzelfehlers
3.5	Auswirkungen von Mehrfachfehlern
	- Nachweis von safe-life
	- ...
3.6	Maßnahmen zum Schutz gegen systematische Fehler
	- Qualitätsmanagement
	- Sicherheitsmanagement
4.	Externe Einflüsse auf das Teilsystem „Sichere Bremse“
	- Physikalische und funktionale Einflüsse
	- Betriebliche Einflüsse
	- Sicherheitsrelevante Einflüsse
5.	Sicherheitsbezogene Anwendungsbedingungen aus dem Teilsystem „Sichere Bremse“ an andere Teilsysteme und Systeme, laut 2.2.
6.	Sicherheitserprobung

Abb. 8: Struktur der Projektierung sicherheitstechnisch relevanter Systeme (Teil II / projektspezifisches Beispiel)