

Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage

Fahrzeug Teil IV Trag- / Führtechnik

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

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.....	7
4.1	Zweck und Anwendungsbereich.....	7
4.2	Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlagen.....	7
4.3	Abkürzungen und Definitionen.....	8
4.4	Gesetze, Verordnungen, Normen und Richtlinien.....	8
4.5	Kennzeichnung und Verbindlichkeit von Anforderungen.....	8
5	Definitionen (fahrzeugspezifisch).....	9
6	Generelle Anforderungen an die Trag- / Führtechnik.....	12
6.1	Funktion.....	12
6.2	Bemessung.....	12
6.3	Sicherheitsanforderungen.....	13
6.3.1	Allgemeines.....	13
6.3.2	Anforderungen an die Bordenergieversorgung.....	13
6.3.3	Anforderungen an die Ausführung eines Absetzbefehles.....	15
6.3.4	Systematische Fehler in den Magnetregleinrichtungen.....	15
6.3.5	Erhalt der sicherheitsrelevanten Eigenschaft von Magnetregelkreisen.....	15
6.3.6	Blitzübertritt.....	16
6.3.7	ESD.....	16
7	Anforderungen an die Baugruppen des Trag- / Führsystems.....	17
7.1	Strukturbaugruppen des Trag- / Führsystems.....	17
7.1.1	Gestellstruktur und Gestellverkleidung.....	17
7.1.2	Wagenkastenanlenkung / Sekundärfederung.....	17
7.1.3	Magnetanlenkung.....	19
7.1.4	Tragkufe.....	19
7.2	Funktionsbaugruppen des Trag- / Führsystems.....	20
7.2.1	Tragfunktion.....	20
7.2.2	Führfunktion.....	22
7.2.3	Bordenergieversorgung.....	23
7.2.4	Sicherheitsrelevante Steuerung / Überwachung.....	25
8	Einwirkungen des Trag- / Führsystems auf den Fahrweg.....	26

Ausführungsgrundlage

Fahrzeug

8.1	Allgemein	26
8.2	Einwirkungsarten und Einwirkungskombinationen.....	26
8.3	Charakteristische Werte und Lastbilder	27
8.3.1	Allgemeines	27
8.3.2	Eigengewicht und Nutzlast des Fahrzeugs	28
8.3.3	Quasistatische Lasten aus Fahrdynamik	29
8.3.4	Quasistatische Lasten aus Seitenwind (ohne Auftrieb).....	29
8.3.5	Quasistatische Lasten aus Rückstellkräften bei kleinem Kurvenradius	30
8.3.6	Lasten aus Antreiben und Bremsen mit dem Langstator	31
8.3.7	Maximale Lasten an der Nahtstelle Tragmagnet – Statorpaket	32
8.3.8	Maximale Lasten an der Nahtstelle Führungsmagnet – Seitenführschiene.....	35
8.3.9	Maximale Lasten an der Nahtstelle Tragkufe – Gleitebene	38

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Seitenansicht und Querschnitt (Prinzipdarstellung).....	9
Abb. 2: Magnetmodul (Ausführungsbeispiel)	10
Abb. 3: Trag- / Führungsmagnet (Ausführungsbeispiel)	10
Abb. 4: Tragkufe (Ausführungsbeispiel).....	11
Abb. 5: Typische Verlauf von stat $p_z \pm \Delta$ stat p_z	28
Abb. 6: Typischer Verlauf von $p_{y, SW}$ bei $v_{Fzg} = 400$ km/h und $SW = 37$ m/s.....	30
Abb. 7: Typischer Verlauf von $p_{y, ZWG}$	31
Abb. 8: Typisches Lastbild Tragmagnet ohne technische Störungen und Ausfälle (Beispiel)	33
Abb. 9: Typisches Lastbild Tragmagnet bei Ausfall Magnetregelkreis Tragen (Beispiel)	34
Abb. 10: Typische Lastbilder von Führungsmagneten (Beispiel)	37
Abb. 11: Lastbilder Tragkufe (Beispiel).....	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenstellung der Beladungszustände des Fahrzeugs	27
Tabelle 2: Charakteristische statische Streckenlasten des Fahrzeugs (gemittelt).....	28
Tabelle 3: Einwirkungen infolge Seitenwind auf Fahrzeug	29
Tabelle 4: Maximale lokale Zwangskraft.....	30
Tabelle 5: Antriebs- / Bremskräfte mit dem Langstator.....	31
Tabelle 6: Maximale Tragmagnetlasten.....	32
Tabelle 7: Maximale Streckenlasten	35
Tabelle 8: Maximale Stoßkraft	36
Tabelle 9: Maximale Tragkufenkräfte.....	38

4 Allgemeines

4.1 Zweck und Anwendungsbereich

Die vorliegende „Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage Fahrzeug Teil IV - Trag- / Führtechnik“ legt die Anforderungen an die Trag- / Führtechnik der MSB-Fahrzeuge projektunabhängig fest.

Die vorliegende Ausführungsgrundlage gilt für eine Magnetschnellbahn gemäß Allgemeinem Magnetschwebbahngesetz /AMbG/.

Der Teil IV ist bei der Spezifikation, Ausführung und Nachweisführung des Trag-/Führsystems von MSB-Fahrzeugen anzuwenden und umfasst:

- Definition des Trag- / Führsystems,
- Anforderungen an die Funktionen des Trag- / Führsystems,
- Einwirkungen des Trag- / Führsystems auf den Fahrweg.

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:

- 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.

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.

4.5 Kennzeichnung und Verbindlichkeit von Anforderungen

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

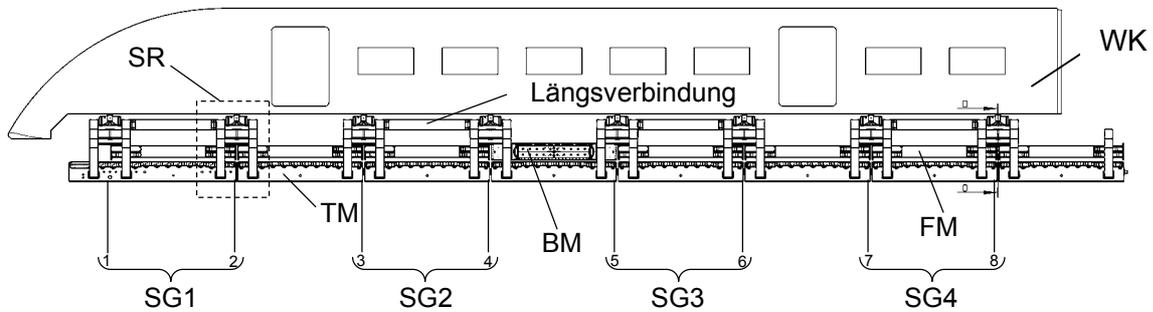
In den nachfolgenden Kapiteln und in den Anlagen dieses Dokuments sind

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

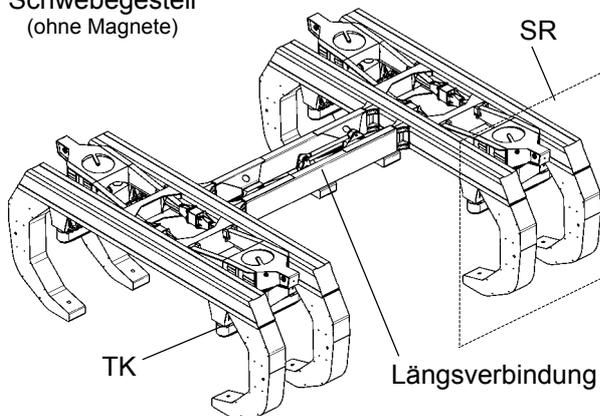
gekennzeichnet.

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)



Schwebegestell
(ohne Magnete)



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

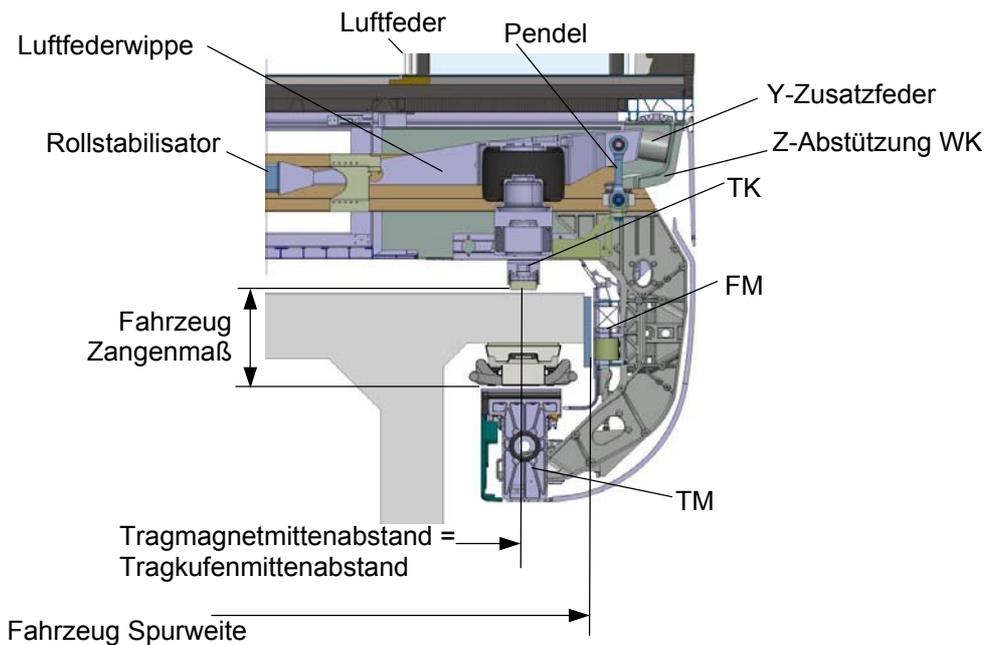


Abb. 1: Seitenansicht und Querschnitt (Prinzipdarstellung)

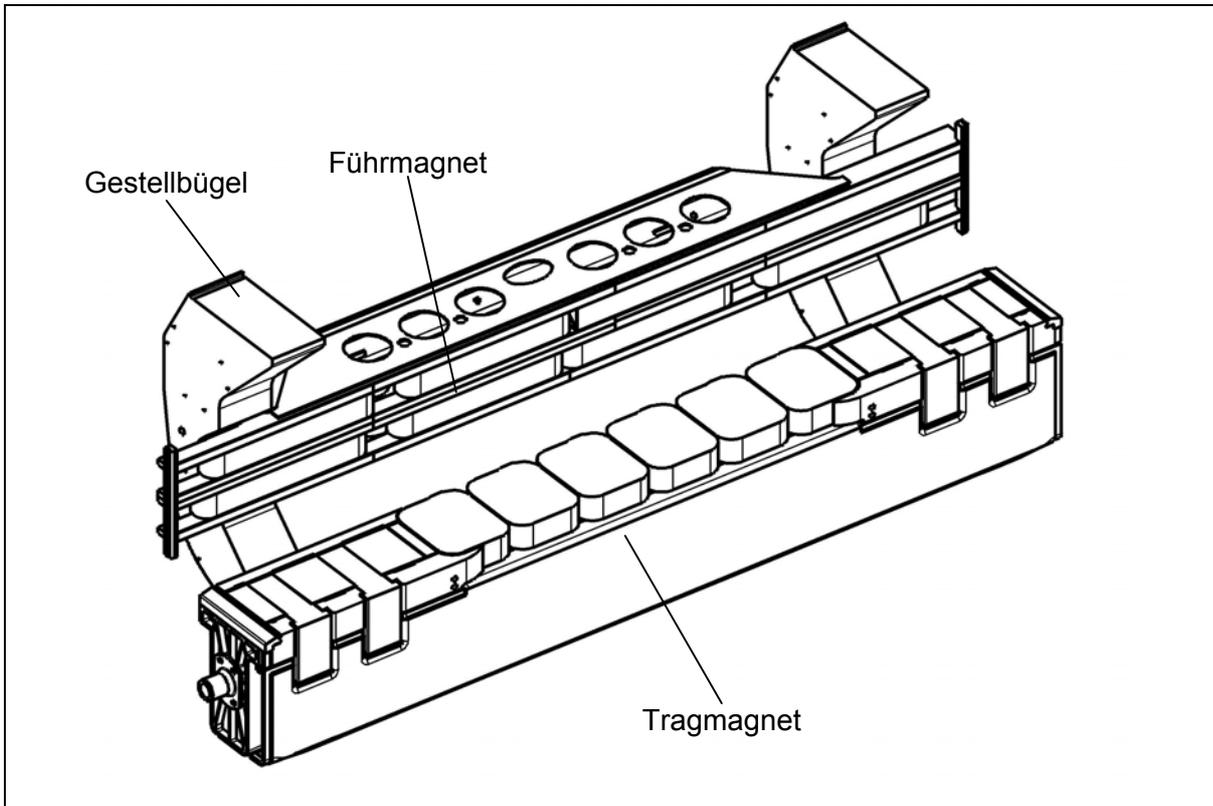


Abb. 2: Magnetmodul (Ausführungsbeispiel)

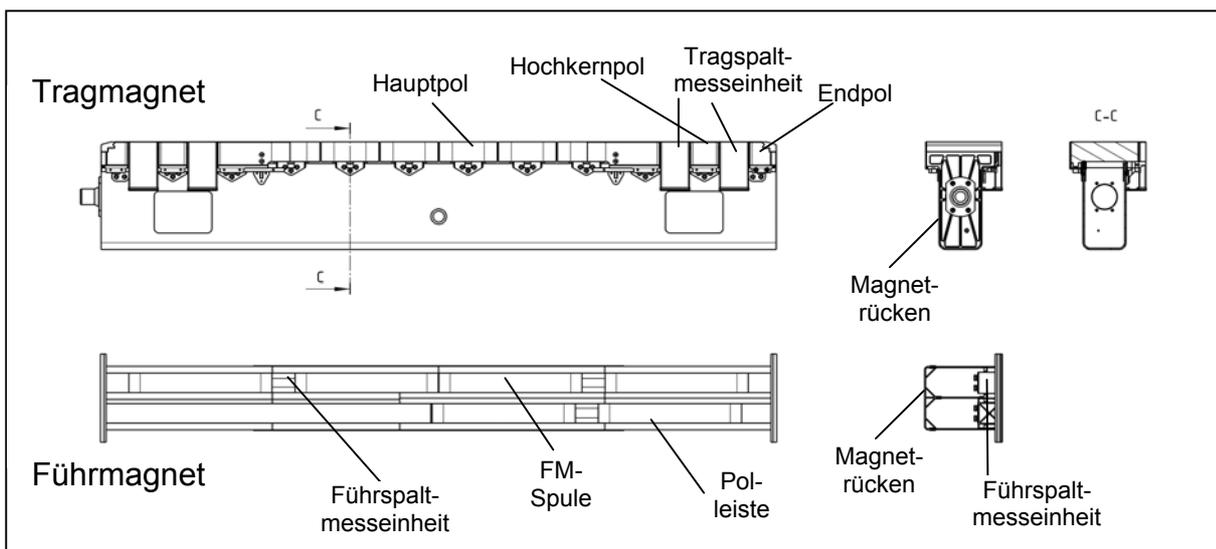


Abb. 3: Trag- / Führmagnet (Ausführungsbeispiel)

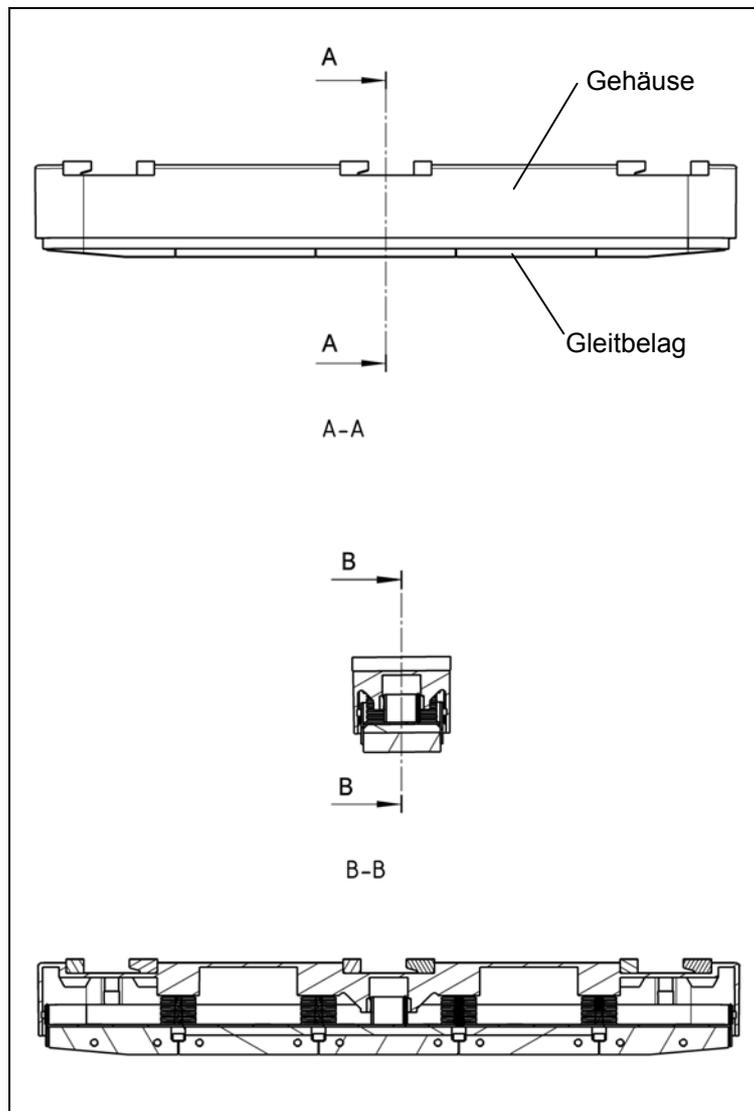


Abb. 4: Tragkufe (Ausführungsbeispiel)

6 Generelle Anforderungen an die Trag- / Führtechnik

6.1 Funktion

Siehe Beschreibung in /MSB AG-GESAMTSYS/.

Die Trag-/Führtechnik der MSB-Fahrzeuge muss im gesamten spezifizierten Geschwindigkeits- und Trassierungsbereich folgende Funktionen erbringen:

- Magnetisches Tragen und Führen mittels geregelt gespeister Trag- und Führungsmagnete.
- Mechanisches Tragen mittels Tragkufen bei außergewöhnlichen Situationen oder Ausfällen und bei stehendem (abgesetztem) Fahrzeug, Häufigkeit vgl. /MSB AG-FZ BEM/, Kap. 8.
- Mechanisches Führen z. B. mittels Gleitelementen an den Führungsmagneten bei seltenen technischen Störungen oder Ausfällen und bei außergewöhnlichen Betriebssituationen (Überlagerung der Einwirkungen von extremen betrieblichen Situationen).
Bei engen Radien ($R_H < 600$ m) ist gegebenenfalls eine Begrenzung der Geschwindigkeit zur Erreichung der Berührungsfreiheit erforderlich.

6.2 Bemessung

Unter Anwendung von /MSB AG-FZ BEM/ müssen die Lasten, die über die Strukturbauteile und Anlenkungen der Trag-/Führtechnik übertragen werden, ermittelt und bei deren Bemessung berücksichtigt werden.

Die Lasten müssen in einem Lastenheft (Bemessungslasten) dokumentiert werden.

Für die Last übertragenden Bauteile ist der Nachweis der Lastaufnahmefähigkeit (allgemeiner Spannungsnachweis) und der Ermüdungsfestigkeit entsprechend den Vorgaben in /MSB AG-FZ BEM/ zu erbringen.

Die Spalte zwischen Tragmagneten und Statorpaket, zwischen Führungsmagneten und Seitenführschiene und zwischen Tragkufen und Gleitebene müssen unter Berücksichtigung von Baulerlangen, belastungsabhängiger Verformung, relevanten betrieblichen Einflussgrößen (z.B. Trassierung, Geschwindigkeit, Gleitbelagverschleiß, etc.) und Umweltbedingungen ermittelt und in einer Spaltbilanz dokumentiert werden.

6.3 Sicherheitsanforderungen

Für das Trag- / Führsystem, bestehend aus den magnetischen und mechanischen Einrichtungen, sind die Sicherheitsanforderungen gem. § 19, /MbBO/ zu beachten.

6.3.1 Allgemeines

Die Trag- / Führfunktion ist lebensdauersicher auszuführen.

Diese Eigenschaft muss durch einen Sicherheitsnachweis gemäß /EN 50126/ nachgewiesen werden. Grundlage des Sicherheitsnachweises ist eine Risikoanalyse. Die Risikoanalyse muss folgende Elemente enthalten:

- Beschreibung des Trag- / Führsystems und der Schutzfunktionen,
- Beschreibung der am Trag- / Führsystem beteiligten Baugruppen, deren Funktionen, Verknüpfungen und wechselseitigen Einflüsse,
- Identifikation von Baugruppen und Funktionen, die Sicherheitsverantwortung übernehmen.

Methodische Hinweise zur Durchführung der Risikoanalyse finden sich in /prEN 50126-2/ und /prR009-004/.

Die Anforderungen und Nachweise zu den Strukturbaugruppen des Trag- / Führsystems werden in Kap.7.1 angegeben.

Die Anforderungen und Nachweise zu den Funktionalen Baugruppen des Trag- / Führsystems werden in Kap.7.2 angegeben.

Auf Grundlage der Risikoanalyse muss für die elektronischen Einrichtungen des Trag- / Führsystems die SIL-Stufe gemäß /EN 50129/ festgelegt und bei der Nachweisführung für die Hardware berücksichtigt werden.

Für Software im Trag- / Führsystem muss die auf Grundlage der Risikoanalyse festgelegte Software-Sicherheitsanforderungsstufe bei der Nachweisführung gemäß /EN 50128/ berücksichtigt werden.

Fehlermöglichkeiten sind durch eine geeignete Analyse zu identifizieren und beim Sicherheitsnachweis zu berücksichtigen.

Mindestens nachfolgende Fehler sind in einer geeigneten Analyse zu berücksichtigen:

- Fehler in der Bordenergieversorgung,
- Unzeitiges Ausführen eines Absetzbefehles,
- Systematische Fehler (Software, Hardware).

Der Nachweis der lebensdauersicheren Trag- / Führeigenschaft ist vor der Inbetriebnahme des Systems anhand einer geeigneten Analyse zu führen. Der theoretische Nachweis ist nach Betriebsaufnahme mittels Auswertung der Lebenslaufdaten der Baugruppen zu verifizieren.

6.3.2 Anforderungen an die Bordenergieversorgung

Die Anforderungen an die Bordenergieversorgung ergeben sich insbesondere aus den Anforderungen des Trag- / Führsystems und der sicheren Bremse und der übrigen sicherheitsrelevanten Fahrzeugsysteme. Nachfolgende Ausführungen beziehen sich auf das Trag- / Führsystem.

Es muss sichergestellt sein, dass die Verfügbarkeit der Bordenergieversorgung als Ganzes den Anforderungen des Sicherheitskonzepts entspricht (z.B. *Ausfall der Sammelschienenspannung von mehr als einem Teilnetz*), wenn als Folge hieraus das Fahrzeug ganz oder teilweise absetzen würde oder die sichere Bremse versagen würde.

Da einzelne Fehler in elektrischen Systemen nicht mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden können, ergibt sich zwangsläufig die Forderung nach Redundanz, d.h. es ist je Sektion eine hinreichende Anzahl voneinander unabhängiger und elektrisch / mechanisch getrennter Netze vorzusehen, so dass ein fehlerbehaftetes Netz die verbleibenden Netze nicht beeinträchtigt und die Trag- / Führungsfunktion erhalten bleibt.

Zur Erhöhung der Verfügbarkeit sollten diese Netze potentialfrei, d.h. nicht mit der Fahrzeugmasse direkt galvanisch verbunden sein, damit sie bei einem Masseschluss nicht abgeschaltet werden.

Es sind weiterhin Einrichtungen vorzusehen, durch welche die erforderliche Leistungsfähigkeit der Netze zum Aufrechterhalten der Trag-/Führungsfunktion gewährleistet wird (z. B. Batterien) und nach Abfahrt eines Fahrzeugs das Schweben und das Sichere Bremsen eines Fahrzeugs gewährleistet ist (s. auch /MSB AG-BLT/, Kap. 6.3.3.1 und Kap. 6.3.3.3).

Die Möglichkeit der unzeitigen Abschaltung aller Netze, die zur Aufrechterhaltung der Trag-/ Führungsfunktion und Bremsfunktion während einer Mission erforderlich sind, z.B. durch Auslösung eines zentralen Abrüstbefehls, muss durch eine geeignete technische Einrichtung verhindert werden. Ein Abrüstbefehl darf nur bei stehendem und abgesetztem Fahrzeug wirksam werden.

Fehler bzw. Ausfälle in der Abrüstansteuerung dürfen nicht zu einer ungewollten Abrüstung führen. Falls durch einen Fehler oder Ausfall die Abrüststeuerung nicht mehr wirksam ist, muss trotzdem ein Abrüsten möglich sein. Der Zugang zu den entsprechenden Abrüsteinrichtungen muss derart erschwert sein, dass nur eingewiesene Betriebsbedienstete die Auslösung bewirken können.

Es ist folgendes zu berücksichtigen:

Der Nachweis, dass ein Ausfall der Bordenergieversorgung hinreichend unwahrscheinlich ist, gilt dann als erbracht, wenn für die Bordenergieversorgung die Nachweise gemäß Kap. 7.2.3 erbracht worden sind und die folgenden Nachweise vorliegen:

1) Hinreichende Redundanz

Hinreichende Redundanz bedeutet, dass die Zahl der voneinander unabhängigen, elektrisch und mechanisch getrennten Netze so groß ist, dass trotz anzunehmender Netzausfälle immer noch soviel Bordenergie zur Verfügung steht, dass die Funktionen Tragen und Führen entsprechend den Anforderungen aus dem Sicherheitskonzept aufrecht erhalten bleiben.

2) Elektrische und mechanische Trennung der Netze

Die elektrische und mechanische Trennung der Netze gilt dann als nachgewiesen, wenn die Einhaltung der Anforderungen nach /EN 50124-1/ "Bahnanwendungen-Isolationskoordination" nachgewiesen ist. Zum Nachweis müssen Typprüfungen der Baugruppen, Fertigungsprüfungen beim Bau des Fahrzeuges und Inbetriebnahmeprüfungen an einem Fahrzeug durchgeführt werden.

3) Leistungsfähigkeit der Netze

Durch rechnerischen und praktischen Nachweis ist zu belegen, dass die vorgesehenen und vorhandenen Einrichtungen zur Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit der Netze bei teilweisem oder vollständigem Ausfall der externen Bordenergieversorgung ihre Aufgabe erfüllen. Der Nachweis ist für die unter den projektspezifischen Einsatzbedingungen repräsentativen Fahrprofile zu führen.

4) Abrüstung

Anhand der Schaltungsunterlagen und durch praktische Versuche ist nachzuweisen, dass der zentrale Abrüstbefehl nur bei stehendem und abgesetztem Fahrzeug wirksam wird.

Für die Abrüstansteuerung ist ein Sicherheitsnachweis auf Basis einer geeigneten Analyse zu führen. Es ist nachzuweisen, dass jeder anzunehmende Ausfall zur sicheren Seite, d.h. zum Nicht-Auslösen der Abrüstung führt.

Weiterhin ist durch Überprüfung der Konstruktionspläne und der Bedieneinrichtungen der Fahrzeuge der Nachweis zu führen, dass der Zugang zu manuell bedienbaren Abrüsteinrichtungen derart erschwert ist, dass nur eingewiesene Betriebsbedienstete die Auslösung des Abrüstbefehls bewirken können.

6.3.3 Anforderungen an die Ausführung eines Absetzbefehles

Der zentrale 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.

6.3.4 Systematische Fehler in den Magnetregleinrichtungen

Es ist der Nachweis nach EN 50128 und 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 hinreichend unwahrscheinlich sind.

Diagnose- und Regeleinrichtungen sollten hardwareseitig getrennt ausgeführt werden.

6.3.5 Erhalt der sicherheitsrelevanten Eigenschaft von Magnetregelkreisen

Das elektromagnetische Schweben stellt einen geregelten Zustand dar, bei dem ein vorgegebener Luftspalt zwischen Statorpaket bzw. Seitenführschiene und den Trag- bzw. Führungsmagneten mit definierten Toleranzen gemäß einer projektspezifischen Spaltbilanz eingehalten wird.

Durch Ausfälle im Leistungsteil oder in der Einrichtung zum Messen, Steuern, Regeln und Überwachen der Magnetregelkreise kann sich die Magnetkraft derartig vergrößern, dass der Spalt zu Null wird und unzulässige Kräfte auf die Fahrzeug- und Fahrwegstruktur einwirken. Diese Ausfallart muss daher durch eine geeignete fail-safe - Überwachungseinrichtung mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden.

Tritt ein dauerhafter Ausfall in der Überwachungseinrichtung auf, so muss dies ebenfalls zum Aufheben des Magnetfeldes führen. Die Überwachungseinrichtung ist autonom jedem Magnetregelkreis zuzuordnen.

Für die in fail-safe – Technik auszuführenden Überwachungseinrichtungen der Magnetregelkreise ist der Nachweis durch Ausfalleffektanalyse zu führen, dass diese bei Ausfällen mit hinreichender Wahrscheinlichkeit unmittelbar den Abschaltvorgang einleiten.

Durch Prüfung der Schaltpläne und praktische Prüfung an den kompletten Magnetregelkreisen ist nachzuweisen, dass die Überwachungseinrichtungen zwangsläufig mit dem Einschalten der Magnetpaltregelung aktiviert werden und von außen unbeeinflussbar sind.

6.3.6 Blitzübertritt

Für den Blitzübertritt sind fahrzeugseitig für schwebende Fahrzeugsektionen Pfade und Blitzübertrittsstellen zum Fahrweg zu definieren.

6.3.7 ESD

Elektrostatische Aufladungen des Fahrzeugs müssen in allen Betriebszuständen abgeleitet werden, in denen ein Berühren des Fahrzeugs durch mit dem Erdpotential verbundene Personen möglich ist.

Es gilt /MbBO/, §17 Absatz 4.

7 Anforderungen an die Baugruppen des Trag- / Führsystems

7.1 Strukturbaugruppen des Trag- / Führsystems

Die Strukturbaugruppen des Trag- / Führsystems sind nach /MSB AG-FZ BEM/ zu bemessen.

7.1.1 Gestellstruktur und Gestellverkleidung

7.1.1.1 Gestellstruktur

Die für die Fahrdynamik und Fahrt in Kurven, Kuppen und Wannen erforderliche Funktionalität von Bauteilen und die entsprechenden Freiräume sind so zu gestalten, dass keine Beeinträchtigung des Fahrverhaltens des Fahrzeugs bei gem. /MSB AG-UMWELT/ oder projektspezifisch definierten Umweltbedingungen eintritt.

Befestigungen und Verbindungen müssen für Inspektionen zugänglich sein.

Es sind Maßnahmen gegen das Verlieren von Teilen vorzusehen.

Die Gestellstruktur ist so auszuführen, dass der Ausfall eines Bauteils keinen sicherheitskritischen Zustand auslöst. Diese Eigenschaft ist mit Hilfe einer Ausfalleffektanalyse (FMEA) nachzuweisen.

Die Gestellstruktur ist so auszuführen, dass das spezifizierte Verhalten bei den in Kap.8.4, /MSB AG-FZ BEM/ beschriebenen Kollisionsfällen gewährleistet ist.

7.1.1.2 Gestellverkleidung

Die Verkleidungsteile müssen unter Berücksichtigung der dimensionierenden Lasten gem. /MSB AG-FZ BEM/ und unter Berücksichtigung von Eigenschwingungsformen und Resonanzverhalten sowie unter Berücksichtigung der Beanspruchungen aus der Handhabung bei der Instandhaltung betriebsfest bemessen werden.

Sofern Teile der Außenverkleidungen zwecks Zugänglichkeit der Einbauräume im Unterflurbereich für die Instandhaltung entfernbar sein müssen, sind Verschlüsse vorzusehen, die den betätigten, aber noch verriegelten und den nicht verriegelten Zustand offenbaren (z.B. optisch).

7.1.2 Wagenkastenanlenkung / Sekundärfederung

7.1.2.1 Z-Federung

Die Abstützung der Wagenkästen ist statisch bestimmt und gegenüber dem Trag-/ Führsystem dynamisch entkoppelt (*vorzugsweise durch Luftfedern*) auszuführen.

Der Federweg zwischen Schwebegestellen und Wagenkasten nach oben und unten ist zu begrenzen.

7.1.2.2 Niveauregelung / Luftfedersteuerung

Luftzufuhr und Luftabfuhr im Luftfederbalg darf nur bei aktiv angesteuerter Steuereinheit möglich sein.

Eine einstellbare, teilweise Absenkung des Drucks im Luftfederbalg muss möglich sein.

Es ist eine Überwachung der Drücke in den Verteilerleitungen und den einzelnen Luftfedern vorzusehen. Ein Ausfall sollte durch die Fahrzeugdiagnose zum Zweck der Instandsetzung offenbart werden. Die Diagnoseinformation sollte die betroffene Baugruppe eindeutig identifizieren und lokalisieren. Eine Systemreaktion ist projektspezifisch festzulegen.

7.1.2.3 Y-Federung

Auslenkungen in Y-Richtung müssen in /MSB AG-FZ KIN/ berücksichtigt werden.

7.1.2.4 Rollstabilisator

Die mögliche Wagenkastenverrollung muss in /MSB AG-FZ KIN/ berücksichtigt werden.

Aus Komfortgründen muss die Wagenkastenverrollung gegenüber dem Schweberrahmen begrenzt und projektspezifisch festgelegt werden.

Bei Seitenwind oder max. Seitenbeschleunigung ist als Vorgabe für die Wagenkastenverrollung ein Wert von max. $1,5^\circ$ zu berücksichtigen.

7.1.2.5 Ausfallverhalten

Ausfälle einzelner pneumatischer und elektrischer Baugruppen der Z-Federung im Zusammenwirken mit den mechanischen Baugruppen der Sekundärfederung dürfen nicht zu einer Fahrtunterbrechung führen. Diese Eigenschaft ist mit Hilfe einer geeigneten Analyse nachzuweisen, siehe Kap. 6.3.1.

Die Funktion und das Ausfallverhalten der pneumatischen und elektrischen Baugruppen der Z-Federung im Zusammenwirken mit den mechanischen Baugruppen der Sekundärfederung müssen im Rahmen der Inbetriebnahme des Fahrzeugs verifiziert werden.

Bei Unterschreiten eines definierten Druckwertes der Luftfedern muss eine Abtrennung des betroffenen Luftfederbalgs von der Sammelleitung erfolgen.

7.1.3 Magnetanlenkung

Die Magnetanlenkung ist so auszuführen, dass das Versagen eines Einzelteils nicht die Sicherheit und Verfügbarkeit der Trag- / Föhrfunktion beeinträchtigt. Diese Eigenschaft ist mit einer geeigneten Analyse nachzuweisen.

Das heißt, dass bei einem Ausfall der Betrieb fortgesetzt werden kann und der sichere Zustand beibehalten wird.

Ausfälle müssen durch Inspektionen erkannt werden.

7.1.4 Tragkufe

Die Grenzwerte für statische und dynamische Kräfte sind projektspezifisch zu verifizieren.

Die Tragkufen und ihre Aufhängungen müssen so gefedert und gedämpft ausgeführt sein, dass die Grenzlasten beim unregelmäßigen Absetzen nicht überschritten werden.

Beschädigungen des Gleitbelags oder der Tragkufenabfederung dürfen nicht zum Verlust der mechanischen Tragfähigkeit führen.

Beschädigungen oder Verschleiß müssen durch Inspektionen erkannt werden.

Das Ausfallverhalten ist mit Hilfe einer geeigneten Analyse nachzuweisen, siehe Kap.6.3.1.

Das Gleitverhalten ist in Bezug auf die Kriterien Verschleiß und Erwärmung mit Prototypen und/oder in einem repräsentativen Fahrzeug nachzuweisen.

Das Stoßlastverhalten ist durch Versuche oder numerische Simulationen nachzuweisen.

7.2 Funktionsbaugruppen des Trag- / Führsystems

7.2.1 Tragfunktion

7.2.1.1 Tragregelung

Es ist eine dezentrale Regelung des Tragspalts in autonomen, redundanten Baugruppen zu realisieren. Bei Verletzen von projektspezifischen Grenzwerten (z.B. Minimalspalt) muss der Regelkreis so schnell abschalten, dass eine Überschreitung der projektspezifischen Auslegungslasten für Fahrzeug und Fahrweg ausgeschlossen ist. Dieser Vorgang muss reversibel sein.

7.2.1.2 Tragspaltmessung

Der Tragspalt zwischen der Poloberfläche der Tragsmagnete und der dem Tragsmagnet zugewandten Fläche der Statorpakete muss durch ein Tragspaltmesssystem berührungsfrei gemessen werden.

Bei der Auslegung des Tragspaltmesssystems sind die Dehnspalte an den Enden der Fahrwegträger, Spurwechseleinrichtungen, Übergängen von Trägern auf Primärtragwerke sowie zwischen benachbarten Statorpaketen zu berücksichtigen.

Einflüsse auf die Messgenauigkeit der Tragspaltmessung sind zu berücksichtigen.

Anforderungen der Tragspaltmessung an die Eigenschaften der Statorpakete sind projektspezifisch festzulegen, siehe /MSB AG-FW ÜBG/.

7.2.1.3 Krafterzeugung

Die Ausrüstung der Schwebegestelle mit Tragsmagneten ist beispielhaft in Abb. 2 dargestellt.

Eine Verrollung des Tragsmagneten um die X-Achse im schwebenden Zustand ist projektspezifisch zu begrenzen. Der Einfluss einer möglichen Verrollung auf die Kraftverteilung und die Spaltmessung ist zu berücksichtigen.

Es muss eine elektrische Aufteilung der Pole eines Tragsmagneten auf mindestens zwei unabhängige Regelkreise möglich sein.

Die Regelkreise sollten eine translatorische Bewegung in z-Richtung und eine Drehung um die y-Achse ermöglichen.

7.2.1.4 Ausfallverhalten

Die Tragregelkreise müssen Überwachungseinrichtungen aufweisen, die bei Ausfall eines funktionsrelevanten Bauteils mit Redundanzverlust den Regelkreis so schnell abschalten, dass eine Überschreitung der projektspezifischen Auslegungslasten für Fahrzeug und Fahrweg ausgeschlossen ist.

Bei Ausfall eines einzelnen Tragregelkreises muss die Tragfunktion des Schweberahmens durch einen redundanten Tragregelkreis aufrechterhalten werden.

Bei Ausfällen, die den Ausfall der magnetischen Tragfunktion an einem Schweberahmen zur Folge haben, muss die Fahrstrecke nach Maßgabe des zulässigen Gleitwegs von Tragkufe / Gleitebene automatisch durch die Betriebsleittechnik begrenzt werden. Die Tragfunktion des Schweberah-

mens muss in diesem Fall durch eine Tragkufe übernommen werden. Betriebliche Reaktion und Instandsetzung sind projektspezifisch festzulegen.

Bei Kurzschluss der Langstatorwicklung an einer Seite des Fahrwegträgers kann toleriert werden, dass die magnetische Tragfunktion der entsprechenden Fahrzeuglängsseite reversibel ausfällt und das Fahrzeug einseitig ungeregelt absetzt. Die magnetische Tragfunktion muss sich selbsttätig wiederherstellen, wenn das Fahrzeug den Bereich der kurzgeschlossenen Wicklung verlassen hat.

Die Schwebefunktion muss bei Blitzeinschlag ins Fahrzeug gewährleistet sein. Dabei dürfen einzelne Regelkreise kurzzeitig abschalten, es dürfen jedoch keine bleibenden Ausfälle an den einzelnen Baugruppen der Regelkreise auftreten. Danach müssen sich die abgeschalteten Regelkreise selbsttätig reaktivieren.

7.2.1.5 Ausfaltoffenbarung, Diagnose

Zum Zweck der Instandsetzung muss ein Redundanzverlust wegen Baugruppenausfall durch die Fahrzeugdiagnose erkannt und offenbart werden.

Die Diagnoseinformation sollte die betroffene Baugruppe eindeutig identifizieren und lokalisieren.

Bei sicherheitsrelevanten Einrichtungen, die keine selbsttätige Ausfaltoffenbarung aufweisen, muss die Offenbarung von Ausfällen durch periodisch durchzuführende Funktionsprüfungen / Inspektionen erfolgen. Die Prüfkriterien und Intervalle sind mittels geeigneter Analyse zu ermitteln.

7.2.1.6 Nachweise

Für die Baugruppen des Magnetregelkreises muss eine Qualifikationsprüfung mit Prototypen erbracht werden, mit denen die Merkmale Funktion, Ausfallverhalten, Ausfaltoffenbarung, Umweltbeständigkeit nachgewiesen werden.

Zum Nachweis der lebensdauersicheren Trag- / Führfunktion ist eine geeignete Analyse durchzuführen, siehe. Kap. 6.3.1.

Das Ausfallverhalten muss durch stimulierte Bauteilausfälle an einzelnen Schweberahmen an einem Prüfstand und im Fahrbetrieb versuchstechnisch nachgewiesen werden.

Die Zuverlässigkeit der elektronischen Baugruppen des Magnetregelkreises muss durch Ermittlung der MTBF aus der Auswertung von Lebenslaufdaten mit repräsentativen Baugruppen nach Betriebsaufnahme verifiziert werden.

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

Die stabile Funktion der Magnetregelkreise bei statischer und dynamischer Nennbeanspruchung ist an einem Prüfstand nachzuweisen.

7.2.2 Führungsfunktion

7.2.2.1 Führregelung

Es ist eine dezentrale Regelung des Führspalts in autonomen, redundanten Baugruppen zu realisieren.

7.2.2.2 Führspaltnessung

Der Führspalt zwischen der Poloberfläche der Führungsmagnete und der Oberfläche der Seitenführschiene muss durch ein Führspaltnesssystem berührungsfrei gemessen werden.

Bei der Auslegung des Führspaltnesssystems sind die Dehnspalte an den Enden der Fahrwegträger, Spurwechseleinrichtungen und Übergängen von Trägern auf Primärtragwerke sowie zwischen benachbarten Führschienelementen zu berücksichtigen.

Einflüsse auf die Messgenauigkeit der Führspaltnessung sind zu berücksichtigen.

Anforderungen der Führspaltnessung an die Eigenschaften der Seitenführschienen sind projektspezifisch festzulegen.

7.2.2.3 Krafterzeugung

Die Ausrüstung der Schwebegestelle mit Führungsmagneten ist beispielhaft in Abb. 2 dargestellt.

Eine Verrollung der Führungsmagneten um die X-Achse im schwebenden Zustand ist projektspezifisch zu begrenzen. Der Einfluss einer möglichen Verrollung auf die Kraftverteilung und die Spaltnessung ist zu berücksichtigen.

Es muss eine elektrische Aufteilung der Spulen eines Führungsmagneten auf mindestens zwei unabhängige Regelkreise möglich sein.

Die Regelkreise sollten eine translatorische Bewegung in y-Richtung und eine Drehung um die z-Achse ermöglichen.

7.2.2.4 Ausfallverhalten

Die einzelnen Führregelkreise müssen über Überwachungseinrichtungen verfügen, die bei Ausfall eines funktionsrelevanten Bauteils den Regelkreis sicher abschalten.

Bei Ausfall eines einzelnen Führregelkreises muss die Führungsfunktion des Schweberahmens durch einen redundanten Führregelkreis aufrechterhalten werden.

Bei Ausfällen, die zu einem Verlust der elektromagnetischen Führung eines Schweberahmens führen, muss die Fahrstrecke nach Maßgabe des zulässigen Gleitwegs der mechanischen Gleitelemente auf der Seitenführschiene automatisch durch die Betriebsleittechnik begrenzt werden. Die Führungsfunktion ist nach Ausfall der magnetischen Führungsfunktion an einem Schweberahmen durch ein mechanisches Führelement zu realisieren. Grenzwerte der dabei auftretenden Lasten sowie der zulässige Verschleiß müssen projektspezifisch festgelegt werden.

Die Reaktionen bei Blitzeinschlag müssen analog Kap. 7.2.1.4 erfolgen.

7.2.2.5 Ausfaltoffenbarung, Diagnose

Die Ausfaltoffenbarung muss sinngemäß wie Kap. 7.2.1.5 erfolgen.

7.2.2.6 Nachweise

Die Nachweisführung muss analog Kap. 7.2.1.6 gemäß Kap. 6.3.1 erfolgen.

7.2.3 Bordenergieversorgung

7.2.3.1 Funktionen und Eigenschaften

Zur Realisierung der lebensdauersicheren Funktionen „Tragen und Führen“ sowie „Sichere Bremse“ und der übrigen sicherheitsrelevanten Fahrzeugsysteme ist eine lebensdauersichere Bordenergieversorgung vorzusehen.

Umweltbedingungen sind gemäß /MSB AG-UMWELT/ oder projektspezifisch zu berücksichtigen.

Die lebensdauersichere Funktion muss auch bei/nach Blitzeinwirkung vorhanden sein.

Die Bordnetze müssen so ausgeführt sein, dass das Fahrzeug dauernd aufgerüstet abgestellt werden kann, ohne dass eine sicherheitsgerichtete Überwachung durch Personal erforderlich ist.

7.2.3.2 Elektrische Sicherheit

Die Einrichtungen zur Bordenergieversorgung müssen die Anforderungen

- Schutz gegen gefährliche Körperströme,
- Herstellen und Sicherstellen des spannungsfreien Zustands in der Instandhaltung,
- Überlast- und Kurzschlussschutz,

gemäß Bestimmungen /EN 50153/ und /EN 50207/ erfüllen.

7.2.3.3 Unterbrechungsfreie Stromversorgung

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.

Es muss eine zusätzliche projektspezifische Bordenergiereserve im Störbetrieb vorhanden sein.

Projektspezifisch muss eine ausreichende gespeicherte Bordenergiemenge für den Betrieb der Notbeleuchtung, Notbelüftung und Kommunikationseinrichtungen nach einem Halt infolge Störung festgelegt werden.

Bei Einsatz von Batterien müssen in Abhängigkeit vom Batterietyp und in Übereinstimmung mit dem Sicherheitskonzept Maßnahmen zum Explosionsschutz realisiert werden (*z.B. Batteriebelüftung mit Ausfaltoffenbarung sowie Temperaturüberwachung und Lüfternachlauf nach dem Abrüsten*).

7.2.3.4 Steuerungs- und Überwachungsfunktionen

Bei Ausfall eines oder mehrerer für den sicheren Zustand des Fahrzeugs relevanten Einrichtungen (z.B. Bordnetze oder Batteriebelüftung) in einer Fahrzeugsektion muss eine automatische sicherheitsgerichtete Systemreaktion erfolgen.

Falls im Energiespeicher für die unterbrechungsfreie Stromversorgung die für die Durchführung eines Zwangshalts mit der Sicherer Bremse und anschließende Mindestbetriebsdauer der im Stillstand notwendigen sicherheitsrelevanten Verbraucher (z.B. *Notbeleuchtung, Notbelüftung, Kommunikation*) erforderliche Mindestenergiemenge unterschritten wird, muss eine automatische sicherheitsgerichtete Systemreaktion erfolgen.

7.2.3.5 Ausfallverhalten

Der Ausfall von einzelnen Bordnetzbaugruppen bzw. der Ausfall eines einzelnen Bordnetzes darf keine betriebliche Auswirkung haben. Es muss eine Fahrtfortsetzung zur nächsten planmäßigen Station möglich sein.

Eine Fehlertoleranz gegen Erdschlüsse muss z.B. durch IT-Netze mit Isolationsüberwachung realisiert werden, s. auch Kap. 6.3.2.

7.2.3.6 Ausfalloffenbarung, Diagnose

Ein Redundanzverlust durch Baugruppenausfall muss durch die Fahrzeugdiagnose zum Zweck der Instandsetzung offenbart werden.

Die Diagnoseinformation sollte die betroffene Baugruppe eindeutig identifizieren und lokalisieren.

7.2.3.7 Nachweise

Für die MSB-spezifischen Baugruppen der Bordenergieversorgung muss eine Qualifikationsprüfung mit Prototypen erbracht werden, mit denen die Funktion, das Ausfallverhalten, die Ausfalloffenbarung und die Umweltbeständigkeit nachgewiesen werden.

Zum Nachweis der lebensdauersicheren Funktion ist eine geeignete Analyse durchzuführen, siehe Kap. 6.3.1.

Das Ausfallverhalten muss z.B. durch stimulierte Bauteilausfälle an einem repräsentativen Fahrzeug versuchstechnisch nachgewiesen werden.

Die Zuverlässigkeit der elektronischen Baugruppen für die Versorgung sicherheitsrelevanter Funktionen muss durch Ermittlung der MTBF aus der Auswertung von Lebenslaufdaten mit repräsentativen Baugruppen nach Betriebsaufnahme verifiziert werden.

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

7.2.4 Sicherheitsrelevante Steuerung / Überwachung

7.2.4.1 Allgemeines

Sicherheitsrelevante Steuerungsfunktionen des Trag- / Führsystems umfassen:

- Übertragung von Steuerkommandos der Betriebsleittechnik an Einrichtungen zur Regelung, Steuerung und Überwachung der Trag- / Führfunktion und der Bordenergieversorgung,
- Generierung sicherheitsrelevanter Statusinformationen der Trag-/ Führfunktion und der Bordenergieversorgung und Übergabe an die Betriebsleittechnik.

7.2.4.2 Ausfallverhalten

Die sicherheitsrelevante Steuerung- und Überwachung ist redundant auszuführen.

Ein Einzelausfall darf nicht zum Verlust oder zu einer Einschränkung der Steuerungs- / Überwachungsfunktionen führen. Bei Ausfall der Steuerungs- und Überwachungsfunktionen muss eine automatische Reaktion zur sicheren Seite erfolgen.

7.2.4.3 Ausfaltoffenbarung, Diagnose

Ein Redundanzverlust muss durch die Fahrzeugdiagnose zum Zweck der Instandsetzung offenbart werden.

Die Diagnoseinformation sollte die betroffene Baugruppe eindeutig identifizieren und lokalisieren.

7.2.4.4 Nachweise

Eine Qualifikation der Steuerungs- und Überwachungseinrichtungen ist mit Prototypen oder mit einem repräsentativen Fahrzeug durchzuführen.

Der Sicherheitsnachweis der Steuerung und Überwachung für die Trag/Führfunktion und Bordenergieversorgung muss gemäß Kap. 6.3.1 durchgeführt werden.

8 Einwirkungen des Trag- / Führsystems auf den Fahrweg

8.1 Allgemein

Die nachfolgend angegebenen Kräfte entsprechen den charakteristischen Werten¹ der fahrzeugseitigen Einwirkungen an den Schnittstellen Fahrzeug-Fahrweg auf den Fahrweg.

8.2 Einwirkungsarten und Einwirkungskombinationen

Die Einwirkungen des Trag-/Führsystems auf den Fahrweg treten an folgenden Nahtstellen auf:

- *Tragmagnet – Statorpaket,*
- *Führmagnet – Seitenführschiene,*
- *Tragkufe – Gleitebene.*

Die auf den Fahrweg einwirkenden Kräfte entstehen aus den Funktionen:

- *Magnetisches und mechanisches Tragen,*
- *Magnetisches und mechanisches Führen,*
- *Antreiben und Bremsen mit dem Langstatorantrieb.*

Die Kräfte werden beeinflusst aus den folgenden Einwirkungen:

- *Betrieb mit variierender Nutzlast und variierenden Umweltbedingungen,*
- *Betrieb in Folge von Ausfallsituationen und außergewöhnlichen Betriebssituationen,*
- *Betrieb bei Einsatz der „Sicheren Bremse“ mit den hieraus wirkenden Lasten.*

Die Einwirkungen auf die Struktur des Trag-/Führsystems müssen gemäß Kap. 6.2 bei der Bemessung der Baugruppen berücksichtigt werden.

Die veränderlichen Einwirkungen des Fahrzeugs auf den Fahrweg müssen bei der Bemessung des Fahrwegs auf Basis /MSB AG-FW BEM/ berücksichtigt werden.

Damit die in /MSB AG-FW BEM/ unterstellten charakteristischen Werte der Einwirkungen aus dem Betrieb des Fahrzeugs mit den tatsächlich auftretenden Einwirkungen hinreichend übereinstimmen, dürfen die in Kap. 8.3 genannten Werte der fahrzeugseitig in den Fahrweg eingeleiteten 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 angegebenen Größen der charakteristischen Werte der Einwirkungen sind durch Messung mit einem repräsentativen Fahrzeug zu verifizieren.

¹⁾ Wichtigster repräsentativer Wert einer Einwirkung, von dem angenommen wird, dass er mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit im Bezugszeitraum unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer des Tragwerks und der entsprechenden Bemessungssituation nicht überschritten oder unterschritten wird. Bei einer veränderlichen Einwirkung entspricht der charakteristische Wert entweder einem oberen Wert, der während der festgelegten Bezugsdauer mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird, oder einem festgelegten Nennwert, wenn eine Wahrscheinlichkeitsverteilung unbekannt ist (Siehe auch DIN EN 1990).

8.3 Charakteristische Werte und Lastbilder

8.3.1 Allgemeines

Als Bezugsgröße für die über die Tragsmagnete und Führungsmagnete in den Fahrweg eingeleiteten globalen Einwirkungen in x-, y- und z-Richtung ist die typische Systemlänge einer Fahrzeugsektion (Mittelsektion) $L_{MS} = 24,768 \text{ m}$ (Tragsmagnetbelegungslänge) anzusetzen.

Bei der Ermittlung der Bezugsgröße für die über die Tragsmagnete und Führungsmagnete in den Fahrweg eingeleiteten lokalen Einwirkungen in x-, y- und z- Richtung ist die halbe Tragsmagnetsystemlänge $L_{SYS, TM} / 2$ zu berücksichtigen.

Für die Nachweisführung sind die in der nachfolgenden Tabelle 1 angegebenen maßgebenden Beladungszustände zu definieren. Projektspezifisch ist ggf. eine Erhöhung des Fahrzeuggewichts infolge einer Schneeansammlung in der Fahrzeugstruktur zusätzlich zu berücksichtigen.

Größe	Definition
Fahrzeugeigengewicht	Gewicht der Fahrzeugsektion ohne Nutzlast ¹⁾
Mittleres Fahrzeuggewicht	Gewicht der Fahrzeugsektion bei Normalauslastung ²⁾
Zulässiges Fahrzeuggewicht	Gewicht der Fahrzeugsektion bei Maximalauslastung ³⁾
Maximales Fahrzeuggewicht	Gewicht der Fahrzeugsektion bei außergewöhnlichen Betriebssituationen ⁴⁾
1) Die Nutzlast ist das Gewicht der Fahrgäste mit Gepäck bzw. Fracht / Frachtbehälter 2) Das mittlere Gewicht kann z.B. definiert werden für eine Nutzlast, die in 80 % der Fahrten nicht überschritten wird. Die Festlegung muss projektspezifisch erfolgen. 3) Nutzlast bei maximaler geplanter Auslastung, die nur in außergewöhnlichen Betriebssituationen überschritten wird; diese muss projektspezifisch festgelegt werden, z. B. alle Sitzplätze besetzt mit 90 kg pro Fahrgast plus 320 kg pro m ² Stehplatzfläche 4) In außergewöhnlichen Betriebssituationen maximal mögliche Nutzlast; diese muss projektspezifisch festgelegt werden, z. B. alle Sitzplätze besetzt mit 90 kg pro Fahrgast plus 500 kg pro m ² Stehplatzfläche	

Tabelle 1: Zusammenstellung der Beladungszustände des Fahrzeugs

8.3.2 Eigengewicht und Nutzlast des Fahrzeugs

Die charakteristischen Werte der statischen Einwirkungen infolge der Beladungszustände des Fahrzeugs sind als über die Fahrzeuglänge gemittelte Streckenlasten in Tabelle 2 angegeben.

Die in Tabelle 2 angegebenen statischen Streckenlasten sind als Basis für die Ermittlung der charakteristischen Werte der fahrzeugseitigen Einwirkungen anzuwenden.

Statische Streckenlast je m Fahrzeuglänge (Tragmagnetbelegungslänge) ohne Schnee in [kN/m]	Fahrzeugeigengewicht	Mittleres Fahrzeuggewicht	Zulässiges Fahrzeuggewicht	Maximales Fahrzeuggewicht
stat p_z	19 ¹ (21)	26	29	31
¹ gilt für leichte Güterfahrzeuge, bei Personenzügen kann eine mittlere Streckenlast von 21 kN/m angenommen werden.				

Tabelle 2: Charakteristische statische Streckenlasten des Fahrzeugs (gemittelt)

Das zulässige Gewicht $G_{\text{Sekt zul}}$ einer Fahrzeugsektion ist mit Hilfe nachfolgender Gleichung zu berechnen:

$$G_{\text{Sekt zul}} = \text{stat } p_z \cdot L_{\text{MS}} / g \text{ mit } g = 9,81 \text{ m/s}^2.$$

Eine mögliche lokale Erhöhung der Streckenlast $\Delta \text{stat } p_z$ infolge einer Ungleichverteilung des Fahrzeuggewichtes über die Fahrzeuglänge ist zu minimieren.

Ein typischer Verlauf von $\text{stat } p_z \pm \Delta \text{stat } p_z$ ist in Abb. 5 dargestellt.

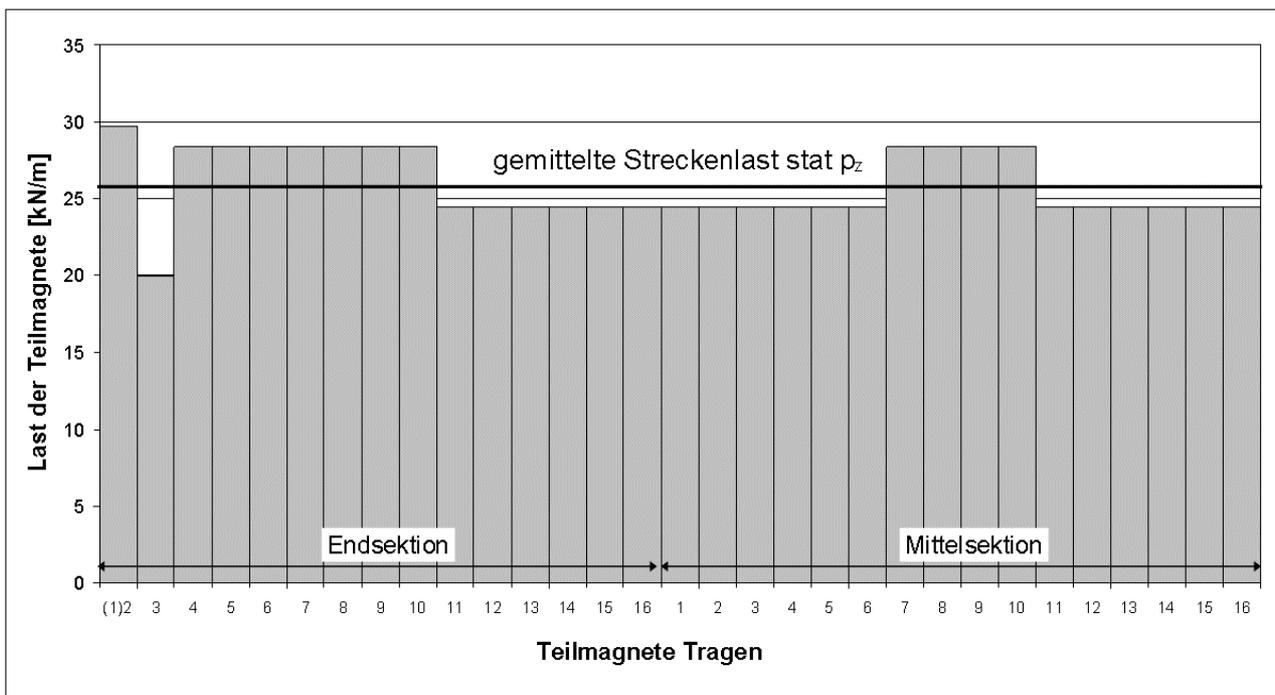


Abb. 5: Typische Verlauf von $\text{stat } p_z \pm \Delta \text{stat } p_z$

Ausführungsgrundlage

Der Nachweis von $\text{stat } p_z$ und $\Delta \text{ stat } p_z$ für die maßgebenden Beladungszustände muss durch Wägung erfolgen. Die Werte von $\text{stat } p_z$ und $\Delta \text{ stat } p_z$ für das Fahrzeug mit Nutzlast können dabei ggf. auf Grundlage der Wägung im unbeladenen Zustand berechnet werden.

8.3.3 Quasistatische Lasten aus Fahrdynamik

Durch die bei Fahrt über die Trassierungselemente Kurven, Kuppen und Wannen entstehenden Beschleunigungen in y- und z-Richtung sowie durch Antreiben und Bremsen des Fahrzeugs treten zeitlich veränderliche quasistatische Lasten in x-, y- und z-Richtung sowie Momente um die x-, y und z-Achse auf, die durch die Lage des Schwerpunkts der Fahrzeugsektionen in z-Richtung beeinflusst werden.

Diese Einwirkungen sind als Massenkräfte in x-, y- und z-Richtung gemäß /MSB AG-FW BEM/ fahrwegseitig zu berücksichtigen.

Der Schwerpunkt einer Fahrzeugsektion in z-Richtung darf folgende Werte nicht überschreiten²⁾:

- bei Fahrzeug-Eigengewicht: 600 mm über Gleitebene,
- bei mittlerem Fahrzeuggewicht: 700 mm über Gleitebene,
- bei zulässigem Fahrzeuggewicht: 850 mm über Gleitebene,
- bei maximalem Fahrzeuggewicht: 950 mm über Gleitebene.

8.3.4 Quasistatische Lasten aus Seitenwind (ohne Auftrieb)

In Folge quasistationärer Einwirkung von Seitenwind (Mittelwert über 5 s gemäß /MSB AG-UMWELT/) auf das Fahrzeug überträgt das Fahrzeug quasistatische Lasten auf den Fahrweg. Die Höhe der Lasten wird bestimmt durch die Höhe der Seitenwindgeschwindigkeit, die Höhe der Fahrzeuggeschwindigkeit und durch die Höhe und Geometrie des Fahrzeugbugs.

Diese Einwirkungen infolge Seitenwind auf Fahrzeug sind gemäß /MSB AG-FW BEM/ fahrwegseitig zu berücksichtigen.

Die in den Bemessungsgrundlagen Fahrweg angegebenen Einwirkungen und die zugehörige Verteilung über die Fahrzeuglänge werden eingehalten, wenn die maximale lokale Streckenlast durch Seitenwind in y-Richtung $p_{y, SW}$ die in Tabelle 3 angegebenen Werte nicht überschreitet.

Maximale lokale Streckenlast aus Seitenwind in [kN/m]	Fahrzeuggeschwindigkeit			
	200 km/h	300 km/h	400 km/h	500 km/h
$p_{y, SW}$	11,0	14,1	24,4	32,4
$p_{z, SW}$	± 5,4	± 6,4	± 6,9	± 7,4
Die Lasten gelten für eine Seitenwindgeschwindigkeit von 37 m/s gemäß Windlastzone II in 20 m Höhe über Grund.				

Tabelle 3: Einwirkungen infolge Seitenwind auf Fahrzeug

Der Nachweis der Lasten kann durch Berechnung und Simulation des Strömungsverhaltens mit einem verifizierten Simulationsmodell erfolgen.

²⁾ Die Angaben sind in dieser Form für die Bemessung des Fahrwegs erforderlich.

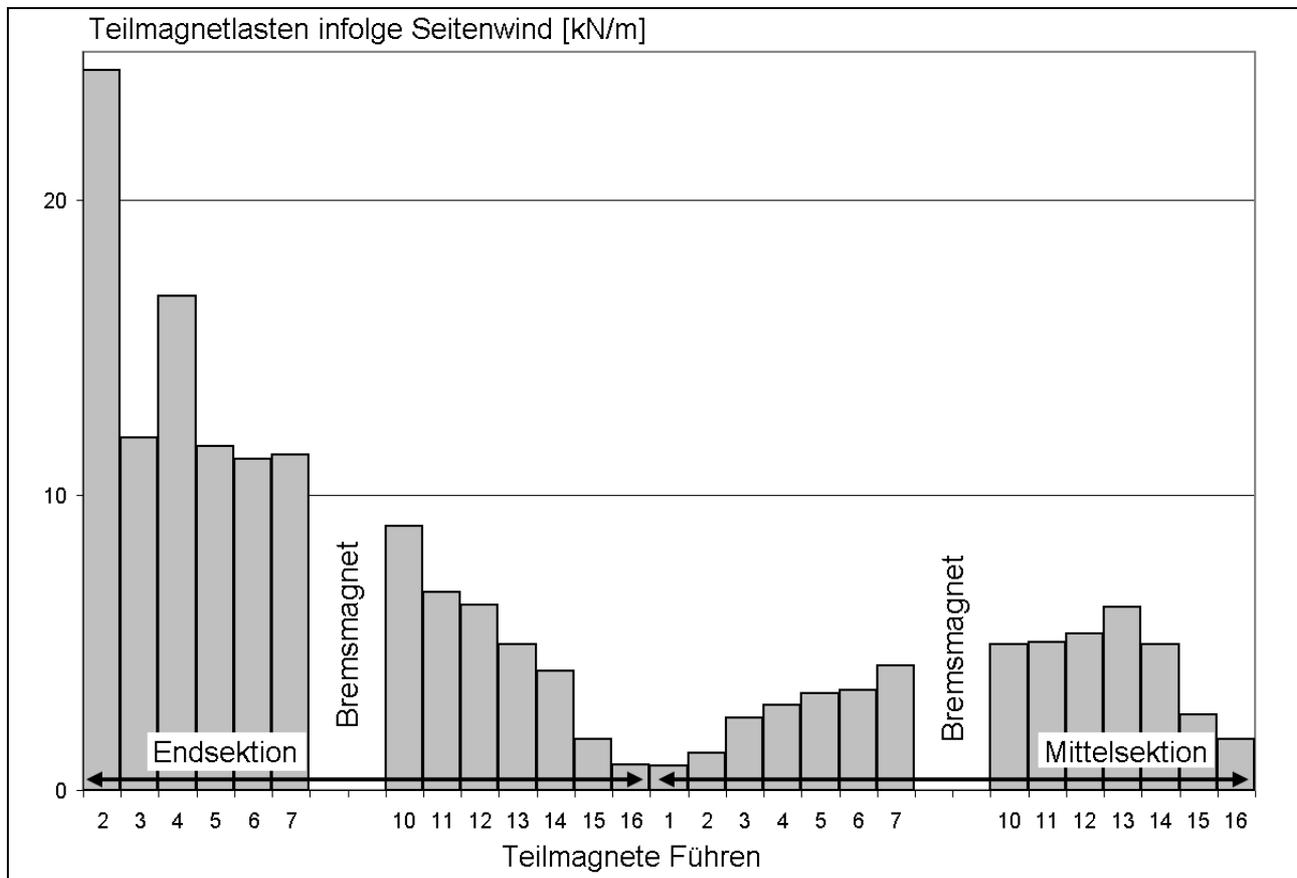


Abb. 6: Typischer Verlauf von $p_{y, SW}$ bei $v_{Fzg} = 400 \text{ km/h}$ und $SW = 37 \text{ m/s}$

8.3.5 Quasistatische Lasten aus Rückstellkräften bei kleinem Kurvenradius

In Kurven mit kleinem Kurvenradius entstehen Rückstellkräfte zwischen den Schwebegestellen des Trag-/Führsystems und dem Wagenkasten (Zwangskräfte), die als quasistatische Lasten in y -Richtung auf den Fahrweg übertragen werden. Die maximalen Lasten werden jeweils von den Führmagneten an den Enden und im Bereich der Sektionsmitte übertragen.

Die in den Bemessungsgrundlagen Fahrweg angegebenen Einwirkungen und deren Verteilung über die Fahrzeuglänge (siehe Abb. 7) werden eingehalten, wenn die maximale lokale Zwangskraft in y -Richtung $p_{y, ZWG}$ die in Tabelle 4 enthaltenen Werte nicht überschreitet.

Charakteristische Werte der maximalen Kraft aus Zwang in Kurven in [kN/m]	Kurvenradius $R_H = 350 \text{ m}$	Kurvenradius $R_H = 1000 \text{ m}$	Kurvenradius $R_H \geq 2000 \text{ m}$
$p_{y, ZWG}$	21	7	0

Tabelle 4: Maximale lokale Zwangskraft

Die Bestimmung der Kräfte kann durch Berechnung erfolgen.

Die Berechnung muss durch Messung einzelner Werte der Rückstellkraft in einem repräsentativen Fahrzeug und Kurvenabschnitt verifiziert werden.

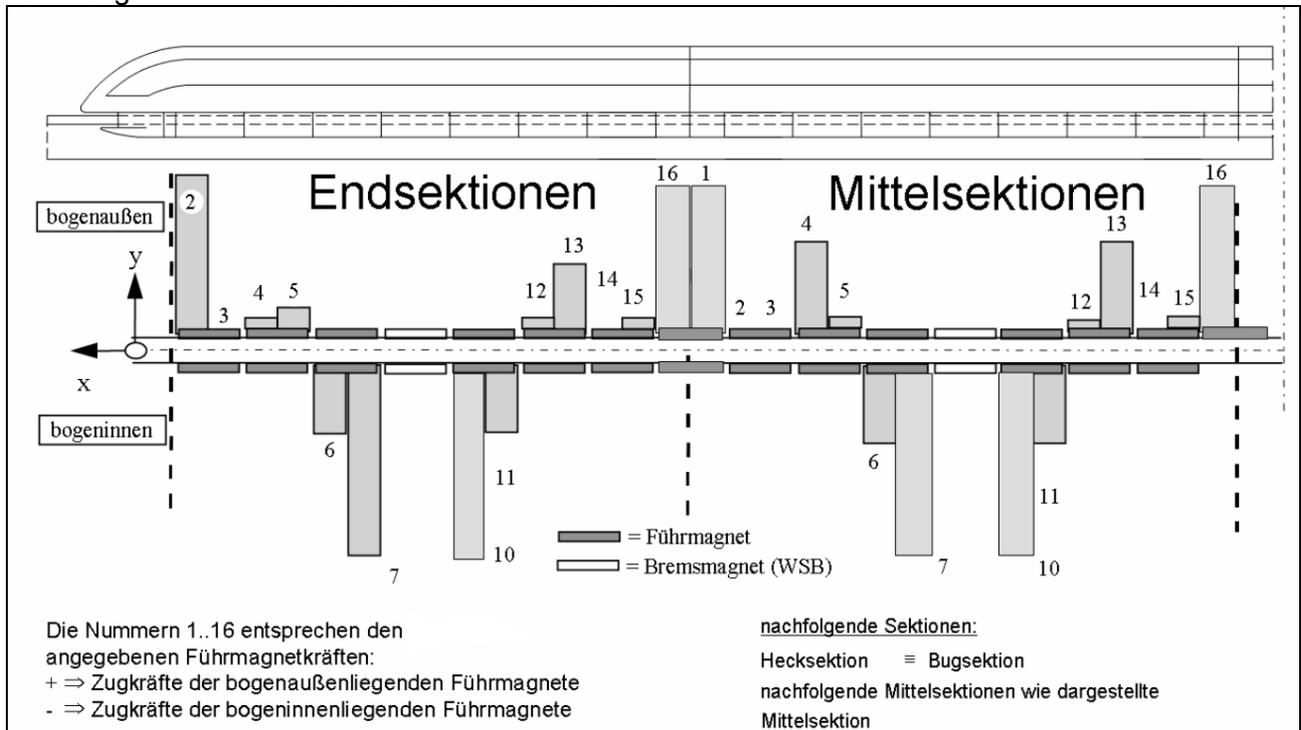


Abb. 7: Typischer Verlauf von p_y, zWG

8.3.6 Lasten aus Antreiben und Bremsen mit dem Langstator

Für die maximale globale Einwirkung einer Fahrzeugsektion auf den Fahrweg ist als regelmäßig wiederkehrende Einwirkung eine maximale Kraft in x-Richtung anzusetzen, die sich aus dem Produkt des zulässigen Fahrzeuggewichts mit der maximal zulässigen Beschleunigung bzw. Bremsverzögerung von ($a_x = 1,5 \text{ m/s}^2$) ergibt (siehe Tabelle 5).

Dieser deckt auch die Situationen Antreiben/Bremsen in Steigungs-/Gefällebereichen ab.

Für die maximale globale Einwirkung einer Fahrzeugsektion auf den Fahrweg ist als außergewöhnliche Einwirkung eine maximale Kraft in x-Richtung von 250 kN / Sektion anzusetzen (siehe Tabelle 5).

Charakteristische Werte der maximalen Kräfte infolge Antreiben und Bremsen mit dem Antrieb	
Regelmäßig wiederkehrende Einwirkung bei zulässigem Fahrzeuggewicht ($a_x \leq 1,5 \text{ m/s}^2$)	$F_x = 110 \text{ kN / Sektion}$
Außergewöhnliche Einwirkung z.B. bei fehlerhafter Antriebsfunktion	Fall 1: $F_x = 185 \text{ kN / Sektion}$ (Verteilungsverhältnis von 0,73 / 0,27 auf rechte und linke Fahrzeugseite)
	Fall 2: $F_x = 250 \text{ kN / Sektion}$ (gleichmäßige Verteilung auf rechte und linke Fahrzeugseite)

Tabelle 5: Antriebs- / Bremskräfte mit dem Langstator

Es ist folgender Zusammenhang zwischen der lokalen Einwirkung in z-Richtung p_z und der lokalen Einwirkung in x-Richtung p_x zu beachten:

$$p_x \pm \Delta p_x = (p_z \pm \Delta p) \cdot a_x / g$$

8.3.7 Maximale Lasten an der Nahtstelle Tragmagnet – Statorpaket

8.3.7.1 Eingeleitete Lasten

An der Nahtstelle zwischen Tragmagnet (TM) und Statorebene erfolgt eine magnetische Übertragung von quasistatischen und dynamischen Zugkräften in z-Richtung und über die Antriebfunction des Langstators eine magnetische Übertragung von Schubkräften in x-Richtung.

Als charakteristische Werte für die maximalen Lasten je m Halbmagnetlänge sind zu berücksichtigen:

Bemessungssituationen	Richtung der Einwirkung	Last je m Tragmagnet
Max. statische Zugkraft aus - zulässigem Gesamtgewicht	z-Richtung	16 kN/m
Max. dynamische Zugkraft infolge - zulässigem Gesamtgewicht - $a_y = 1,5\text{m/s}^2$, $a_z = 1,2\text{m/s}^2$, Seitenwind 10m/s bei 400 km/h	z-Richtung	20 kN/m
Max. lokale Zugkraft bei Teilmagnetbetrieb und - zulässigem Gesamtgewicht - $a_y = 1,5\text{m/s}^2$, $a_z = 1,2\text{m/s}^2$, - Seitenwind 37m/s bei 400 km/h, $F_{z_dyn_max}$	z-Richtung	45 kN/m
Max. Schubkraft des Antriebs ohne technische Ausfälle oder Störungen (max $a_x = 1,5\text{ m/s}^2$) aus - zulässigem Gesamtgewicht (inkl. Ungleichverteilung)	x-Richtung	2,25 kN/m
Max. Schubkraft im Fehlerfall des Antriebs (siehe Tabelle 5)	x-Richtung	Fall 1: 5,5 kN/m
		Fall 2: 5,0 kN/m
Max. lokale Schubkraft bei Ausfall einer Tragregel- einrichtung	x-Richtung	4 kN/m

Die maximale Tragkraft des Tragemagneten ist auf 45 kN/m zu begrenzen.

Tabelle 6: Maximale Tragemagnetlasten

Lokale Lastverteilung siehe Abb. 8 und Abb. 9.

8.3.7.2 Dynamische Anregungen

Die lokale Kraftverteilung der Tragemagnete in x-Richtung weist eine Periodizität der Polteilung auf, die auf den Fahrweg als Kraftwelle einwirkt, welche sich mit der Fahrzeuggeschwindigkeit v entlang des Fahrwegs bewegt. Im Fahrweg wirkt die vom Fahrzeug ausgehende Kraftwelle als lokale pulsierende Gleichkraft mit einer Einwirkungsfrequenz f_e , die von der Wellenlänge der Kraft λ_e bzw. deren Harmonische und der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängt.

$$f_e = v / \lambda_e$$

Ausführungsgrundlage

Die folgenden Einwirkungen müssen in Bezug auf dynamische Anregung des Fahrwegs berücksichtigt werden:

Bei Fahrzeugüberfahrt ständig wirkende veränderliche Kräfte:

- Geometrie der Tragmagnetpole
magnetische Wirkung der Polgeometrie an der Polfläche, z. B. aus Nuten für Lineargeneratoren
- Geometrie der Anordnung der Tragmagnetpole im Verlauf eines Tragmagneten,
lokaler Verlauf des Kraft entlang der Tragmagnete
- Geometrie der Anordnung der Tragmagnetpole an den Enden eines Tragmagneten,
lokaler Verlauf des Kraft im Bereich zwischen zwei Tragmagneten, resultierend aus einer im Endbereich vom Mittelbereich abweichenden Geometrie der Magnetpole
- Kraft in Folge Nicken des Tragmagneten aufgrund der übertragenen Antriebskräfte,
Verdrehung der einzelnen Tragmagnete um die y-Achse, „Schiefstellung“ (Abb. 8)

Bei Fahrzeugüberfahrt selten wirkende veränderliche Kräfte:

- Kräfte im Bereich zweier Tragmagnete nach Ausfall einer Magnetregelrichtung (Abb. 9)

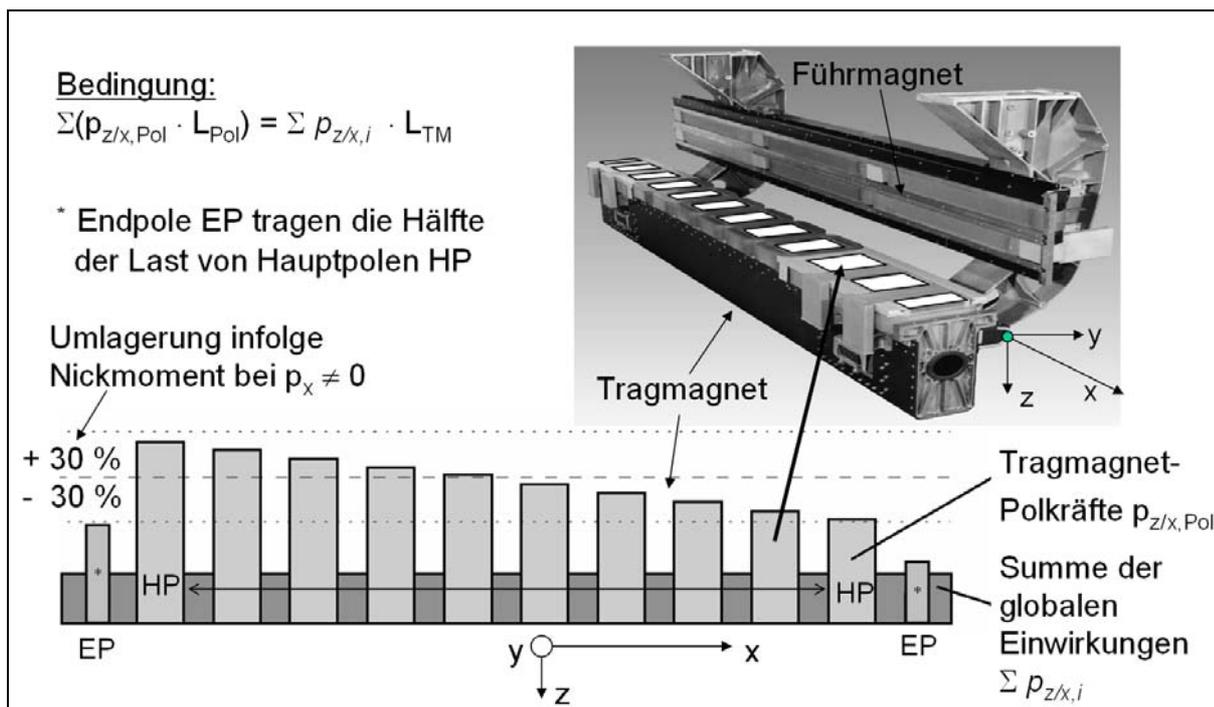


Abb. 8: Typisches Lastbild Tragmagnet ohne technische Störungen und Ausfälle (Beispiel)

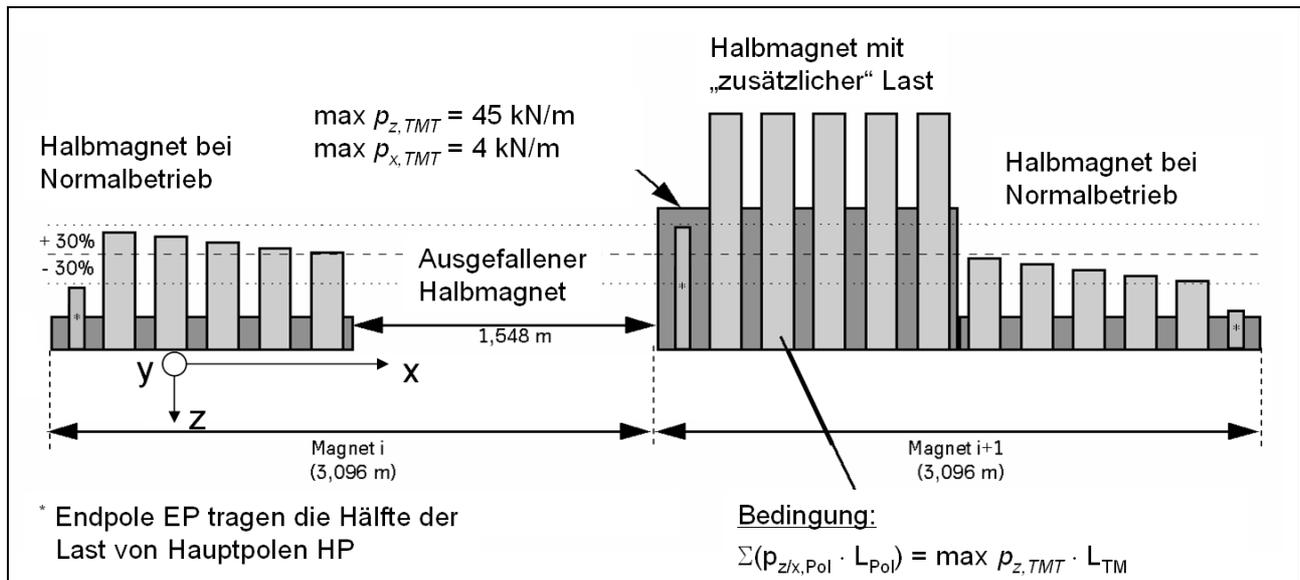


Abb. 9: Typisches Lastbild Tragmagnet bei Ausfall Magnetregelkreis Tragen (Beispiel)

8.3.8 Maximale Lasten an der Nahtstelle Führungsmagnet – Seitenführschiene

8.3.8.1 Eingeleitete Lasten

An der Nahtstelle zwischen Führungsmagnet (FM) und Seitenführschiene (SFS) erfolgt eine Übertragung folgender Lasten:

- magnetische quasistatische und dynamische Zugkräfte in y-Richtung bei Betrieb ohne technische Ausfälle oder Störungen,
- mechanische quasistatische und dynamische Druckkräfte in y-Richtung bei Betrieb mit technischen Ausfällen oder Störungen,
- Reibkräfte in x-Richtung in Folge mechanischer Druckkräfte im Sonderbetrieb.

Als charakteristische Werte für die maximalen Lasten je m Teilmagnetlänge sind zu berücksichtigen:

Bemessungssituationen	Richtung der Einwirkung	Last je m Führungsmagnet
Max. Zugkraft aus - zulässigem Gesamtgewicht - $a_y = 1,5 \text{ m/s}^2$, $a_x = 1,1 \text{ m/s}^2$ (WSV), - Seitenwind 10 m/s bei 400 km/h, $R_H = 1000 \text{ m}$	y-Richtung	25 kN/m
Max. Zugkraft bei Teilmagnetbetrieb und - zulässigem Gesamtgewicht - $a_y = 1,5 \text{ m/s}^2$, $a_x = 1,1 \text{ m/s}^2$ (WSV), $R_H = 1000 \text{ m}$ - Seitenwind 37 m/s bei 400 km/h, $F_{z_dyn_mittel}$	y-Richtung	32 kN/m ³
- Max. quasistationäre Druckkraft bei ausgefallener magnetischer Führungsfunktion an einem einzelnen Schweberahmen	y-Richtung	25 kN/m
- Reibkraft aus quasistationärer Druckkraft	x-Richtung	7,5 kN/m
<i>Der Schwerpunkt der Lasteinleitung in z-Richtung variiert mit Ausführung des Führungsmagneten und bei Ausfall von Führgeleinrichtungen</i>		

Die maximale Führkraft eines Führungsmagneten ist beim Einzelpol auf 16 kN/m, beim Doppelpol auf 32 kN/m zu begrenzen.

Tabelle 7: Maximale Streckenlasten

Lokale Lastverteilung und Definition Einzelpol / Doppelpol siehe Abb. 10.

³⁾ Die Überschreitung der maximalen Führkraft von 32 kN/m führt zu einer mechanischen Seitenführung (siehe Kap. 6.1).

Als charakteristische Werte für die maximale Stoßkraft sind zu berücksichtigen:

Bemessungssituationen	Richtung der Einwirkung	Last je Führmagnet
- Max. dynamische Stosskraft bei Ausfall der magnetischen Fühfunktion an einem einzelnen Schweberahmen und bei Seitenwindböe	y-Richtung	115 kN
- Reibkraft aus dynamische Stoßkraft	x-Richtung	34,5 kN
<i>Der Schwerpunkt der Lasteinleitung in z-Richtung variiert mit Ausführung des Fühmagneten und bei Ausfall von Führregeleinrichtungen</i>		

Tabelle 8: Maximale Stoßkraft

8.3.8.2 Dynamische Anregung

Fahrwegseitig sind mögliche Anregungen aus der Anordnung der Führungsmagnete zu berücksichtigen.

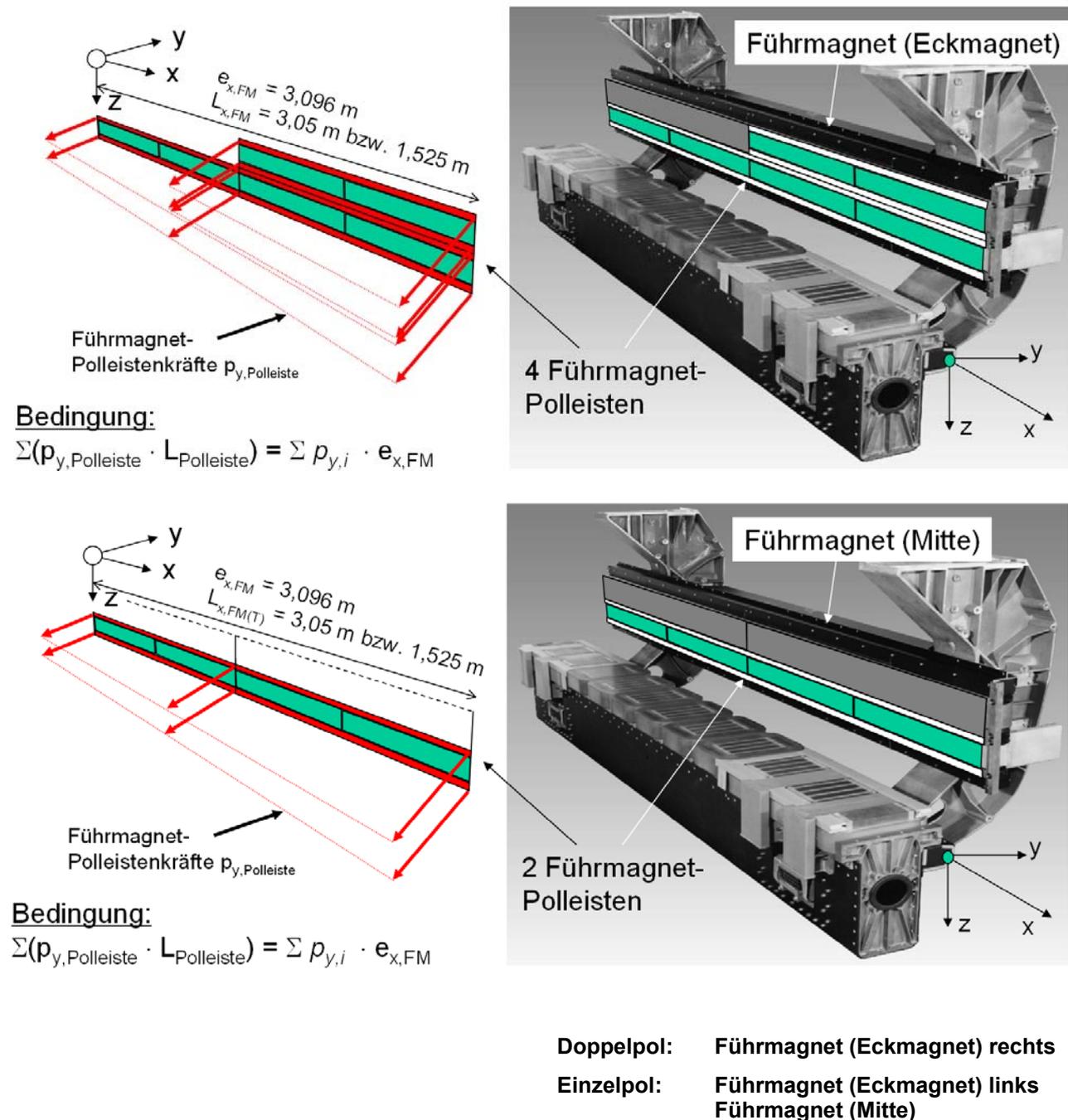


Abb. 10: Typische Lastbilder von Führungsmagneten (Beispiel)

8.3.9 Maximale Lasten an der Nahtstelle Tragkufe – Gleitebene

8.3.9.1 Eingeleitete Lasten

An der Nahtstelle zwischen Tragkufe und Gleitebene (GL) erfolgt bei Ausfällen des Tragsystems eine Beanspruchung der Gleitebene mit folgenden Lasten:

in z-Richtung (Druckbeanspruchung):

- anteilige quasistatische und dynamische Last eines gleitenden Schweberahmens
- transiente Stoßlast eines ungeregelt absetzenden Schweberahmens

in x-Richtung:

- aus Last in z-Richtung und Reibbeiwert resultierende Kraft.

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

Charakteristische Werte der maximalen Kufenkräfte in [kN]		Richtung der Einwirkung	Last je Tragkufe
Stehendes Fahrzeug bei 16° Querneigung		y	14
Schwebendes Fahrzeug	quasistatische und dynamische Druckkraft	z	50
		x	15 bzw. 25 bei Haftreibung
	Grenzwert der Stoßkraft	z	100
		x	30
Angefrorene Tragkufen		z	-50
		x	25

Tabelle 9: Maximale Tragkufenkräfte

Lokale Lastverteilung siehe Abb. 11.

8.3.9.2 Dynamische Anregung

Anregungen in Folge der lokalen Einwirkungen der Tragkufen sind fahrwegseitig vernachlässigbar.

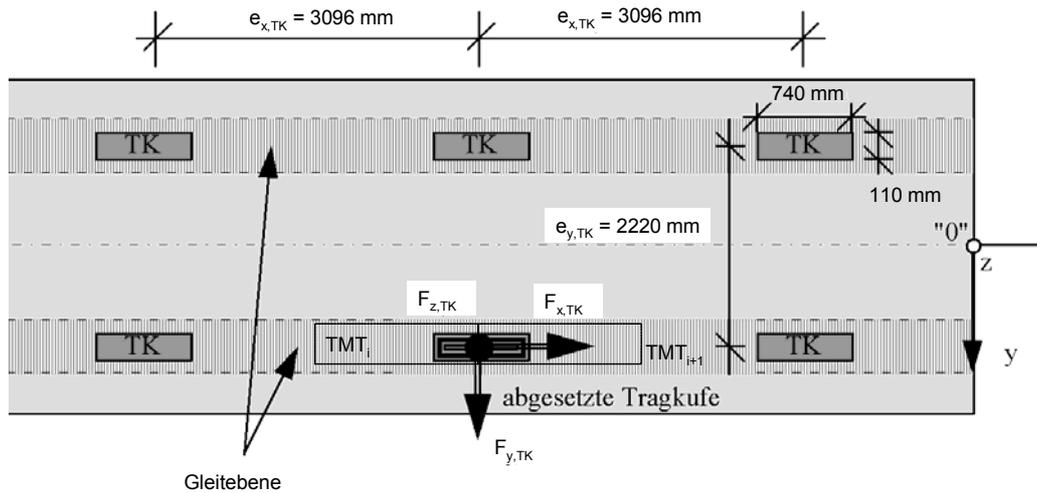


Abb. 11: Lastbilder Tragkufe (Beispiel)