

Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlage

Fahrzeug Teil II Bemessung

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.....	8
4.3	Abkürzungen und Definitionen.....	9
4.4	Gesetze, Verordnungen, Normen und Richtlinien.....	9
4.5	Kennzeichnung und Verbindlichkeit der Anforderungen	9
4.6	Referenzen	9
5	Definitionen (Teilsystemspezifisch).....	10
5.1	Koordinatensystem	10
5.2	Anlenkungskräfte	11
5.3	Allgemeines	12
5.4	Fahrzeuggewichte bei Personentransport	12
5.4.1	Fahrzeugeigengewicht.....	12
5.4.2	Nutzlast bei Personenfahrzeugen	12
5.4.3	Fahrzeuggewicht mit Nutzlast.....	13
5.4.4	Maximales Fahrzeuggewicht.....	13
5.5	Fahrzeuggewichte bei Gütertransport.....	13
6	Konstruktionsfreigabe	14
7	Festigkeitsanforderungen.....	15
7.1	Allgemeines	15
7.2	Einflussparameter auf MSB-Fahrzeuge	16
7.2.1	Lastannahmen	16
7.2.2	Werkstoffe	16
7.2.3	Unsicherheiten	17
7.3	Nachweis der statischen Festigkeit und strukturellen Stabilität	18
7.3.1	Nachweis der Lastaufnahmefähigkeit	18
7.3.2	Nachweis der Steifigkeit.....	20
7.3.3	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit.....	21
7.3.4	Experimentelle Festigkeitsnachweise	22
8	Lastfälle.....	26
8.1	A-Lasten (Lastfälle für Ermüdungsfestigkeitsnachweis)	26

Ausführungsgrundlage

Fahrzeug

8.1.1	Massenkräfte.....	26
8.1.2	Zwangskräfte infolge Trassierung.....	30
8.1.3	Vorspannung infolge Führungsmagnetlasten.....	30
8.1.4	Aerodynamische Lasten.....	30
8.1.5	Lasten infolge Temperaturänderungen.....	34
8.2	S-Lasten im ausfallfreien Systemzustand für den Lastaufnahmefähigkeitsnachweis.....	35
8.2.1	Massenkräfte.....	35
8.2.2	Zwangskräfte infolge Trassierung.....	38
8.2.3	Vorspannung infolge Führungsmagnetlasten.....	38
8.2.4	Aerodynamische Lasten.....	38
8.2.5	Lasten infolge Temperaturänderungen.....	39
8.3	S-Lasten bei Betrieb mit Ausfällen für den Lastaufnahmefähigkeitsnachweis.....	39
8.3.1	Zwangsbremung mit sicherer Bremse bei Ausfall eines Bremsregelkreises.....	39
8.3.2	Ausfall eines Bordnetzes.....	40
8.3.3	Lokales mechanisches Führen.....	40
8.3.4	Lokales mechanisches Tragen.....	41
8.3.5	Einseitig ungeregeltes Absetzen von Tragkufen.....	42
8.3.6	Schlupf/Pendeln.....	42
8.3.7	Reibwertänderung bei gleitendem, abgesetzten MSB-Fahrzeug.....	43
8.3.8	Halteruck bei Zwangsbremung mit der Sicherer Bremse.....	43
8.3.9	Nutzlastüberschreitung in außergewöhnlichen Betriebsituationen.....	43
8.3.10	Überschreiten der Streckenhöchstgeschwindigkeit.....	43
8.3.11	Schubkraftüberschreitung infolge Antriebsfehler.....	44
8.3.12	Einfahren in die Kurzschlusswicklung.....	44
8.3.13	Stand des MSB-Fahrzeugs mit maximaler Querneigung.....	44
8.3.14	Anheben MSB-Fahrzeug bei angefrorenen Tragkufen.....	44
8.3.15	Ausfall Bugluftfeder.....	45
8.4	Kollisionsfälle.....	45
8.5	Transport.....	45
9	Überlagerung der Lastfälle.....	46
9.1	Lastaufnahmefähigkeitsnachweis.....	46
9.2	Ermüdungsfestigkeitsnachweis.....	48
9.2.1	Dauerfestigkeitsnachweis.....	48
9.2.2	Betriebsfestigkeitsnachweis.....	48
10	Anlage Beanspruchung von Einbau- und Anbauteilen.....	49
10.1	Definition der Umwelträume.....	49
10.2	Prüfpegel.....	51

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Anlenkungskräfte an der Gestellstruktur	11
Abbildung 2: Zoneneinteilung der Endsektion in Bezug auf aerodynamische Einwirkungen	31
Abbildung 3: Wechseldruckwelle Bug-/Heckeinwirkung	33
Abbildung 4: Umwelträume aus /MSB AG-UMWELT/	49
Abbildung 5: Umwelträume (Kategorien) aus /DIN EN 61373/	50

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Bezeichnung der Anlenkungskräfte	11
Tabelle 2: Beispiel für Druckamplituden bei Zugbegegnung	33
Tabelle 3: Schneedichten für unterschiedliche Aggregatzustände	35
Tabelle 4: Überlagerung der S-Lasten aus Betrieb im ausfallfreien Zustand.....	46
Tabelle 5: S-Lasten aus Lastfällen bei Ausfall bzw. außergewöhnlicher Einwirkung.....	47
Tabelle 6: Überlagerung der A-Lasten aus Betrieb im ausfallfreien Zustand.....	48
Tabelle 7: Gegenüberstellung der Einbauräume	50
Tabelle 8: Prüfpegel Schwingen/Schocken	51

4 Allgemeines

4.1 Zweck und Anwendungsbereich

Das vorliegende Dokument enthält die projektunabhängigen Anforderungen zur Bemessung von MSB-Fahrzeugen.

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

Teil II der „Magnetschnellbahn Ausführungsgrundlagen Fahrzeug“ umfasst die

- Festlegung der Betriebsbedingungen, Lastfälle und Lastfallkombinationen,
- Nachweisführung der Lastaufnahmefähigkeit (statischen Festigkeit, Stabilität und Steifigkeit) und Ermüdungsfestigkeit,
- Festlegung der Sicherheitsfaktoren für die zu verwendenden Werkstoffkennwerte,
- sowie die Prinzipien zur Absicherung der Konstruktion durch Versuche.

Die Grundlagen zur Ermittlung der charakteristischen und repräsentativen Werte der Lasten sind übergeordnet in /MSB AG-GESAMTSYS/ enthalten. Die angegebenen Werte basieren auf Betriebserfahrungen bzw. sind Vorgaben gemäß /MbBO/ zur Dimensionierung und zum Nachweis von MSB-Fahrzeugen. Die Vorgaben in diesem Dokument stellen den aktuellen Kenntnisstand dar und müssen projektspezifisch bestätigt bzw. geändert und verifiziert werden. Geänderte Werte sind in der projektspezifischen Dokumentation (Lieferspezifikation, Technische Berichte) anzugeben. Wird keine explizite Vereinbarung getroffen, gelten die Werte dieses Dokumentes.

Die diesem Dokument zu Grunde liegenden Betriebserfahrungen beziehen sich auf die MSB-Fahrzeuge TR07 und TR08 auf der TVE sowie auf das Transrapid-Projekt Shanghai. Durch diese Betriebserfahrungen wurde verifiziert, dass bei Bemessung nach den in diesem Dokument enthaltenen Vorgaben die im Betrieb auftretenden Beanspruchungen mit ausreichender Reserve die zulässige Beanspruchbarkeit der Bauteile nicht überschreiten.

Die vorliegende Ausführungsgrundlage wurde in Anlehnung an die bestehenden Normen der Rad-Schiene-Technik /DIN EN 12663/ und /DIN EN 13749/ erstellt. Weitgehend übernommen wurden die Vorgehensweise der Nachweisführung, bestehend aus theoretischem Nachweis und Versuch, sowie die allgemeinen Anforderungen zur Festigkeit mit den Inhalten Werkstoffe, Sicherheitsfaktoren usw. MSB-spezifisch und damit abweichend von diesen Normen wurden die Einzellastfälle und die Lastfallkombinationen definiert.

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 der Anforderungen

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

In den nachfolgenden Kapiteln dieses Dokuments sind gemäß /MSB AG-FZGEN/

- Anforderungen / Vorgaben in Standardschriftart
- 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.

4.6 Referenzen

Dokument	Beschreibung
/DIN EN 12663/	Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen, Oktober 2000
/DIN EN 13749/	Spezifikationsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen, Juli 2005

5 Definitionen (Teilsystemspezifisch)

5.1 Koordinatensystem

- x-Richtung : in Fahrtrichtung des Fahrzeugs
- y-Richtung : quer zur Fahrtrichtung,
positive Achse in Fahrtrichtung nach rechts gerichtet
- z-Richtung : vertikal zur Fahrtrichtung, positive Achse nach unten gerichtet

Ursprung des Koordinatensystems ist der Schnittpunkt aus Mittelsenkrechter und Gleitebene des Fahrwegs.

5.2 Anlenkungskräfte

Es gelten die in Abbildung 1 skizzierten Richtungen der Kräfte, die über die Anlenkungen der Trag- und Führungsmagnete an der Gestellstruktur eingeleitet werden.

Die Bezeichnung der Kräfte ist in Tabelle 1 erläutert.

F_{xTM}, F_{zTM}	Anlenkungskräfte der Tragsmagnete
F_{yFM}	Anlenkungskräfte der Führungsmagnete

Tabelle 1: Bezeichnung der Anlenkungskräfte

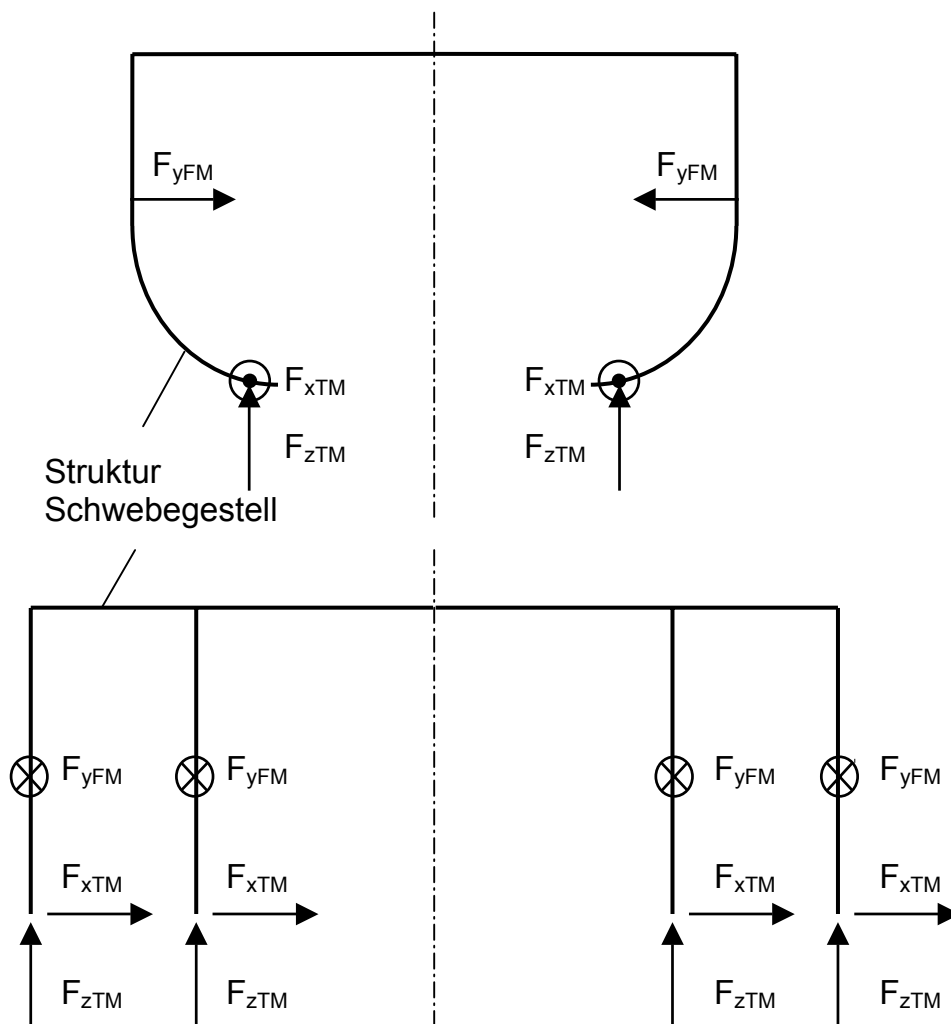


Abbildung 1: Anlenkungskräfte an der Gestellstruktur

5.3 Allgemeines

A-Lasten	Lasten aus Betrieb im ausfallfreien Zustand für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit
S-Lasten	Maximal mögliche Lasten bei Betrieb im ausfallfreien Zustand bzw. unter außergewöhnlichen Einwirkungen für Nachweis der Lastaufnahmefähigkeit

5.4 Fahrzeuggewichte bei Personentransport

Das Gewicht der MSB-Fahrzeuge und die zu berücksichtigenden Nutzlasten sind projektspezifisch festzulegen.

Fahrzeugsektionen für Personentransport schließen Gepäckräume (z.B. für Gepäck der Fahrgäste) mit ein.

5.4.1 Fahrzeugeigengewicht

Definition des Fahrzeugeigengewichts, siehe /MSB AG-ABK&DEF/ Anlage 1: Gewicht des Fahrzeugs inkl. Ausstattung (z.B. Bestuhlung) ohne Nutzlast.

Eingeschlossen sind – soweit vorhanden – die Gesamtmassen des Betriebspersonals und Betriebsvorräte.

5.4.2 Nutzlast bei Personenfahrzeugen

Typische Fahrgastmassen

- Fernverkehr 80 kg je Fahrgast mit Gepäck
- Regionalverkehr 70 kg je Fahrgast
- Flughafenbinder 90 kg je Fahrgast mit Gepäck

Typische Fahrgastdichten in Stehplatzbereichen

- Fernverkehr keine Stehplätze
- Regionalverkehr 320 kg/m²
- Flughafenbinder 1 Person / m² (80 % der Fahrten)
2 Personen / m² (15 % der Fahrten)
320 kg/m² (5 % der Fahrten)

Typische Massenbelegung im Gepäckraumbereich:

300 kg/m²

Die anzusetzenden Massen sind projektspezifisch zu bestätigen oder abweichend festzulegen.

5.4.3 Fahrzeuggewicht mit Nutzlast

Gewicht des komplett ausgestatteten Fahrzeugs mit Nutzlast

Mittleres Fahrzeuggewicht: 80% Nutzlast

Zulässiges Fahrzeuggewicht: 100% Nutzlast

Die Nutzlast für Fahrzeugsektionen für den Personentransport hängt von der Anzahl der Fahrgast-sitze und in Stehplatzbereichen von der Anzahl der Fahrgäste je m² ab. Diese Werte werden vom Betreiber unter Berücksichtigung diesbezüglicher Rechtsvorschriften festgelegt und ergeben die Masse der Zuladung bzw. der Fahrgäste, die in dem MSB-Zug transportiert werden darf.

5.4.4 Maximales Fahrzeuggewicht

Gewicht des komplett ausgestatteten Fahrzeugs unter außergewöhnlicher Einwirkung.

Das maximale Fahrzeuggewicht einer Sektion ergibt sich bei außergewöhnlichen Betriebssituatio-nen (Evakuierung in benachbarte Sektionen).

Typischer Wert für Stehplatzbereich: siehe Kapitel 8.3.9

5.5 Fahrzeuggewichte bei Gütertransport

Die Nutzlast für Gütersektionen ist projektspezifisch festzulegen und ergibt das Gewicht der Zula-dung, die in dem MSB-Zug transportiert werden darf.

6 Konstruktionsfreigabe

Zur Freigabe der Konstruktion ist vom Hersteller des Fahrzeugs ein Freigabeprogramm durchzuführen.

Das Ziel des Freigabeprogramms ist der Nachweis, dass die Konstruktion des Wagenkastens und des Magnetfahrwerks die in der technischen Spezifikation festgelegten Bedingungen erfüllt.

Das Freigabeprogramm muss zeigen, dass das Verhalten der nach Konstruktionsvorgaben hergestellten Fahrzeugbaugruppen einen geeigneten Betrieb erlaubt ohne das Eintreten von Versagen oder Bruch, bleibender Verformung oder Ermüdungsrissen. Es muss außerdem nachweisen, dass weitere Bauteile oder Unter-Baugruppen nicht ungünstig beeinflusst werden.

Das Freigabeprogramm muss detaillierte Informationen darüber enthalten, wie die Freigabe der Konstruktion zu erfolgen hat, und muss die zur Anwendung der verschiedenen Teile des Verfahrens erforderlichen Parameter angeben. Diese Parameter müssen in drei Stufen festgelegt werden:

- das Freigabeverfahren (z. B. Kombination von Lastfällen für Berechnungen und statische Versuche, Programme für Dauerversuche, Strecken für Streckenversuche);
- die Werte der unterschiedlichen Lastfälle;
- die Freigabekriterien (Behandlung der gemessenen oder berechneten Werte, Beanspruchungsgrenzwerte, Kriterien zur Durchführung von Dauerversuchen).

Die Details zu dem Freigabeprogramm sind in dem folgenden Abschnitt 7 ausgeführt.

7 Festigkeitsanforderungen

7.1 Allgemeines

Die MSB-Fahrzeuge der Magnetschwebbahn müssen den maximalen Belastungen entsprechend den Betriebsanforderungen standhalten und die geforderte Lebensdauer unter normalen Betriebsbedingungen mit angemessener Überlebenswahrscheinlichkeit erreichen.

Die Fähigkeit des MSB-Fahrzeugs, bleibenden Verformungen und Bruch zu widerstehen, muss durch Berechnung und/oder Versuch nachgewiesen werden.

Die Bewertung der Fahrzeugfestigkeit hat unter folgenden Kriterien zu erfolgen:

- Ansatz der außergewöhnlichen Belastungen, d.h. der maximalen Beanspruchungen, denen unter Aufrechterhaltung der vollen Betriebsfähigkeit standgehalten werden muss (S-Lasten).
- Einhaltung einer ausreichenden Sicherheit, so dass Unsicherheiten im Nachweis abgedeckt werden und bei Überschreitung der spezifizierten Lasten keine Gefahren für Fahrgäste oder Dritte entstehen.
- Nachweis einer ausreichenden Steifigkeit, so dass die Verformungen unter spezifizierten Belastungen und die Eigenfrequenzen der Konstruktionen den durch die Betriebsanforderungen bestimmten Grenzen entsprechen.
- Ertragbarkeit von Betriebs- oder zyklischen Belastungen, so dass während der festgelegten Lebensdauer keine Beeinträchtigung der Strukturfestigkeit auftritt (A-Lasten).

Der rechnerische Nachweis der obigen Anforderungen erfolgt gemäß Kapitel 7.3.1 durch den Lastaufnahmefähigkeitsnachweis bzw. gemäß Kapitel 7.3.3 durch den Ermüdungsfestigkeitsnachweis.

Der Betreiber muss alle Daten, die die erwarteten Betriebsbedingungen bestimmen, bereitstellen („projektspezifische Festlegung“). In Zusammenarbeit mit dem Betreiber ist es die Aufgabe des Herstellers, alle maßgeblichen Lastfälle in einer aussagefähigen Weise aus diesen Daten abzuleiten und sicherzustellen, dass die Konstruktion ihnen entspricht.

Bei der Weiterentwicklung von Konstruktionen bestehender Fahrzeuge, für die die Sicherheit bereits nachgewiesen wurde, können bei Vorliegen gleicher Betriebsbedingungen frühere Daten für einen vergleichenden Nachweis verwendet werden. Änderungen an Baugruppen müssen generell angezeigt werden. Sind bemessungsrelevante Änderungen vorgesehen, müssen die Bauteile nach Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde ggf. erneut berechnet und/oder versuchs-technisch geprüft werden. Der Fahrzeughersteller bzw. dessen Unterlieferanten müssen bei Verwendung von Konstruktionswerkstoffen sicherstellen, dass sie geeignete Daten zur Erfüllung der Werkstoffanforderungen besitzen. Diese Daten (Normen usw.) müssen dem aktuellen Stand der Technik entsprechen.

7.2 Einflussparameter auf MSB-Fahrzeuge

7.2.1 Lastannahmen

Alle Lastannahmen, die als Grundlage für den Fahrzeugentwurf eingesetzt werden, müssen alle notwendigen Toleranzen für Unsicherheiten in ihren Werten enthalten. Die in Kapitel 8 festgelegten Lastannahmen schließen diese Toleranzen ein.

7.2.2 Werkstoffe

7.2.2.1 Allgemeines

Zur Auslegung der Fahrzeugstruktur müssen die Mindestwerte der Werkstoffeigenschaften entsprechend den Spezifikationen für die eingesetzten Werkstoffe verwendet werden. Falls die Werkstoffeigenschaften zum Beispiel durch

- Beanspruchungsgeschwindigkeit,
- Zeit (z.B. Alterung),
- Umgebung (Feuchtigkeitsaufnahme, Temperatur usw.),
- Schweißen oder andere Herstellungsprozesse

beeinflusst werden, müssen geeignete Mindestwerkstoffkennwerte verwendet werden.

7.2.2.2 Zugelassene Werkstoffkennwerte

7.2.2.2.1 Statische Festigkeit

Die zugrunde liegenden statischen Werkstoffkennwerte müssen, sofern verfügbar, den minimalen Streck- bzw. Dehngrenzen und der Zugfestigkeit der Werkstoffangaben entsprechen. Die verwendeten Werte sollten den entsprechenden europäischen oder nationalen Normen entnommen werden. Sind solche Normen nicht vorhanden, müssen projektspezifisch die am besten geeigneten alternativen Datenquellen verwendet werden.

7.2.2.2.2 Ermüdungsfestigkeit

Das Festigkeitsverhalten der Werkstoffe unter schwingender Belastung muss den aktuellen europäischen oder nationalen Normen entnommen werden. Sind solche Normen nicht vorhanden, müssen die am besten geeigneten alternativen Datenquellen verwendet werden. Dazu können projektspezifisch auch alternative Datenquellen entsprechenden Rangs herangezogen werden. Der Hersteller muss abgesicherte Werkstoffdaten bestimmen. Solche Werkstoffdaten können im Hinblick auf die Anwendung durch geeignete Versuche ermittelt werden.

Geeignete Werkstoffdaten müssen im Allgemeinen den folgenden Anforderungen genügen:

- Verwendung der Ermüdungsfestigkeitsdaten anerkannter Normen wie /Eurocode 3/ für Stahlwerkstoffe und /Eurocode 9/ für Aluminiumwerkstoffe.
- Eine zu bevorzugende Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5%, mindestens 95%.
- Für nicht in anerkannten Normen enthaltenen Werkstoffe, für die die Werte aus anderen belastbaren Quellen bzw. aus Versuchen ermittelt werden:
 - Eine Mindestanzahl von $2 \cdot 10^6$ Zyklen mit konstanter Amplitude für Stahlwerkstoffe, entsprechend der Dauerschwingfestigkeit,
 - Eine Mindestanzahl von $1 \cdot 10^7$ Zyklen mit konstanter Amplitude für Aluminiumwerkstoffe, entsprechend der Dauerschwingfestigkeit.
- Klassifizierung der Bauformen (einschließlich der Spannungskonzentrationen) in Bezug auf Kerbfälle.
- An kleinen stabförmigen Prüfbjekten gewonnene Daten der Beanspruchbarkeit sind hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf reale Bauteile zu prüfen.
- Die Wöhlerkurve, die zur Darstellung des Werkstoffermüdungsverhaltens verwendet wird, muss die unter Kapitel 7.2.2.1 genannten Einflüsse und die untere Grenze des vorangehend definierten Streubereichs darstellen.

Die Herstellungs- und Qualitätssicherungsverfahren müssen Produktqualitäten hervorbringen, die den Konstruktionsdaten entsprechen.

7.2.3 Unsicherheiten

Die folgenden Einflüsse bringen Unsicherheiten in die Konstruktion und müssen berücksichtigt werden:

a) Maßtoleranzen

Im Allgemeinen ist es annehmbar, dass die Berechnungen auf der Grundlage der Komponenten-nennmaße basieren. Mindestmaße müssen nur berücksichtigt werden, wenn erhebliche Verringerungen der Dicke (aufgrund von Verschleiß usw.) typisch für den Betrieb des Bauteils sind. Ein angemessener Schutz gegen Korrosion ist integraler Bestandteil der Fahrzeugspezifikation. Der hierdurch bedingte Materialverlust kann üblicherweise vernachlässigt werden.

b) Herstellungsverfahren

Die Kennwerte, die der Werkstoff in einem realen Bauteil aufweist, dürfen von den aus Prüfmustern abgeleiteten abweichen. Solche Abweichungen sind auf Schwankungen im Herstellungsverfahren und auf die Güte der Bearbeitung, die in keinem praktikablen Qualitätskontrollverfahren festgestellt werden können, zurückzuführen.

c) Berechnungsgenauigkeit

Jedes Berechnungsverfahren umfasst Näherungswerte und Vereinfachungen. Es obliegt dem Hersteller, das Berechnungsverfahren bewusst konservativ auf die Konstruktion anzuwenden. Die in a) und b) beschriebenen Unsicherheiten müssen durch einen Faktor im Berechnungsverfahren berücksichtigt werden. Dieser mit S bezeichnete „Sicherheitsfaktor“ muss verwendet werden, wenn die berechnete Spannung mit dem Werkstoffgrenzwert verglichen wird.

7.3 Nachweis der statischen Festigkeit und strukturellen Stabilität

Die folgenden Ausführungen stellen die Mindestanforderungen für metallische Werkstoffe dar und müssen berücksichtigt werden. Für nichtmetallische Werkstoffe sind die Sicherheitsfaktoren zwischen Betreiber, Hersteller und Aufsichtsbehörde abzustimmen.

7.3.1 Nachweis der Lastaufnahmefähigkeit

Durch Berechnung und Prüfung (siehe Kapitel 7.3.4) ist nachzuweisen, dass unter den vorgeschriebenen Lastfällen nach Kapitel 8 und den Lastfallkombinationen nach Kapitel 9 keine bleibende Verformung oder kein Bruch der gesamten Konstruktion bzw. einzelner Teile auftreten wird. Diese Anforderungen müssen durch die Einhaltung von Kapitel 7.2.2 erreicht werden. Wird die Konstruktion auch durch die Bedingungen in Kapitel 7.2.3 und Kapitel 7.3.1.1.2 eingegrenzt, so müssen auch diese eingehalten werden.

7.3.1.1 Allgemeiner Spannungsnachweis

7.3.1.1.1 Streck- bzw. Dehngrenze

Wenn die Festigkeit der Konstruktion ausschließlich durch Berechnung nachgewiesen wird, muss für metallische Werkstoffe für jeden individuellen Lastfall $S_1 = 1,15$ sein. Projektspezifisch kann S_1 zu 1,0 angenommen werden, wenn:

- die Lastfälle durch Versuche überprüft werden oder
- gezeigt werden kann, dass die in Kapitel 7.2.3 erwähnten Unsicherheiten sehr klein sind, oder
- die Überlagerung der Lastfälle durch Berechnung nachgewiesen wird (siehe Kapitel 9.1) und
- eine ausreichende Betriebserfahrung vorliegt. Dies ist nachvollziehbar zu begründen.

Unter den statischen Lastfällen, wie in Kapitel 8 festgelegt, muss das Verhältnis der zulässigen zur berechneten Spannung größer oder gleich S_1 sein:

$$\frac{R}{\sigma_{be}} \geq S_1$$

Dabei ist:

- R die Werkstoffstreckgrenze (R_{ei}) bzw. 0,2% - Dehngrenze ($R_{p0.2}$), in N/mm².
 σ_{be} die errechnete Spannung in N/mm²

Bei der Bestimmung der Spannungshöhen von duktilen Werkstoffen ist es nicht notwendig, Merkmale zu berücksichtigen, die eine lokale Spannungskonzentration erzeugen. Wenn die Berechnung dennoch lokale Spannungskonzentrationen umfasst, so darf die theoretische Spannung die Werkstoffstreck- bzw. 0,2% -Dehngrenze übersteigen. Diese Bereiche lokaler plastischer Verformung in Verbindung mit Spannungskonzentrationen müssen so klein sein, dass sie keine signifikante bleibende Verformung hervorrufen, wenn die Belastung entfernt wird.

7.3.1.1.2 Zugfestigkeit

Es ist notwendig, einen Sicherheitsabstand zwischen der maximalen Beanspruchung und der Beanspruchbarkeit vorzusehen. Dieses wird durch die Einführung eines Sicherheitsfaktors S_2 erreicht, wobei das Verhältnis zwischen Zugfestigkeit und berechneter Spannung größer oder gleich S_2 sein muss. (S_2 beinhaltet den Sicherheitsfaktor S_1)

$$\frac{R_m}{\sigma_{be}} \geq S_2$$

Dabei ist:

R_m die Zugfestigkeit des Werkstoffs in N/mm^2 ,

σ_{be} die errechnete Spannung in N/mm^2 .

In der Regel ist $S_2 = 1,5$, aber der Faktor kann vermindert werden, wenn mindestens eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

- Es existieren alternative, ausreichend tragfähige Elemente;
- Teile der Struktur sind derart konstruiert, dass diese in kontrollierter Weise versagt;
- die Berechnungen sind so genau, dass ein großes Vertrauen in die Tragfähigkeit der kritischen Strukturbereiche gegeben ist.

Die in Kapitel 7.3.1.1.1 beschriebene Behandlung von Spannungskonzentrationen findet auch für diesen Fall Anwendung. Für spröde Werkstoffe muss die Wirkung von Spannungskonzentrationen eingehender berücksichtigt werden, falls diese Spannungen nicht durch lokale plastische Verformungen abgebaut werden können.

Ein vermindertes Wert für S_2 muss projektspezifisch festgelegt werden.

7.3.1.2 Stabilitätsversagen

Lokale Instabilität in Form von elastischem Beulen ist unter der Voraussetzung zugelassen, dass alternative, ausreichend tragfähige Elemente vorhanden sind und das Streck- bzw. Dehnungsgrenzkriterium eingehalten wird.

Die Fahrzeugkonstruktion muss eine Sicherheit gegenüber einem globalen Versagen infolge Instabilität besitzen. Diese wird erreicht, indem sichergestellt wird, dass das Verhältnis zwischen kritischer Knick- oder Beulspannung und berechneter Spannung größer oder gleich S_3 ist:

$$\frac{\sigma_{kKB}}{\sigma_{be}} \geq S_3$$

Dabei ist:

σ_{kKB} die kritische Knick- oder Beulspannung in N/mm^2 ,

σ_{be} die errechnete Spannung in N/mm^2 .

In der Regel ist $S_3 = 1,5$. Der Faktor kann vermindert werden, wenn die Struktur so konstruiert ist, dass sie in kontrollierter Weise versagt. Ein vermindertes Wert für S_3 muss projektspezifisch festgelegt werden.

7.3.2 Nachweis der Steifigkeit

Die Steifigkeiten der Fahrzeugbaugruppen müssen die Übertragung der spezifizierten Lasten unter Einhaltung der erforderlichen Begrenzungslinien gewährleisten und unzulässige dynamische Reaktionen verhindern.

Die erforderliche Steifigkeit darf als maximale Verformung unter einer vorgeschriebenen Belastung oder als Mindesteigenfrequenz festgelegt werden. Die Anforderungen gelten für den kompletten Wagenkasten bzw. das Magnetfahrwerk, sowie für einzelne Komponenten oder Baugruppen.

Die erforderliche Wagenkastensteifigkeit wird durch die Mindesteigenfrequenz (Biegeeigenfrequenz) festgelegt.

Die erste Biegeeigenfrequenz für den voll ausgerüsteten, als frei schwebend angenommenen Wagenkasten muss bei betrieblicher Höchstgeschwindigkeit 500 km/h mindestens 7 Hz betragen (Erfahrungswert).

Dieser Wert resultiert aus dem Quotient der Fahrzeug-Höchstgeschwindigkeit 500 km/h und der Fahrweg - Trägerlänge 25 m zuzüglich Reserve.

Bei betrieblicher Höchstgeschwindigkeit kleiner als 500 km/h kann die Eigenfrequenz im linearen Verhältnis der betrieblichen Höchstgeschwindigkeit zu 500 km/h reduziert werden.

Bei betrieblicher Höchstgeschwindigkeit 400 km/h ist eine Biegeeigenfrequenz von 5,6 Hz ausreichend.

Die Anforderung gilt auch bei Verwendung von Fahrweg - Trägern mit einer Trägerlänge > 25 m.

Der Nachweis der Eigenfrequenz ist theoretisch zu führen.

Jede darüber hinausgehende Anforderung muss projektspezifisch festgelegt werden.

7.3.3 Nachweis der Ermüdungsfestigkeit

Durch Berechnung und Prüfung (siehe Kapitel 7.3.4) ist die geforderte Lebensdauer bzw. Dauerfestigkeit der Konstruktion unter den vorgeschriebenen Lastfällen nach Kapitel 8 und den Lastfallkombinationen nach Kapitel 9 nachzuweisen. Die Nachweise müssen die Anforderungen aus Kapitel 7.2.2 und Kapitel 7.2.3 erfüllen.

7.3.3.1 Allgemeines

Es muss berücksichtigt werden, dass der Wagenkasten des MSB-Fahrzeugs sowie das Magnetfahrwerk während ihrer Betriebslebensdauer einer sehr großen Anzahl von dynamischen Belastungen mit wechselnder Größe ausgesetzt wird.

Die Wirkung dieser Belastung wird am offensichtlichsten in kritischen Bereichen der Konstruktion. Beispiele für solche Bereiche sind:

- *Krafteinleitungsstellen (einschließlich Halterungen für Ausrüstungsgegenstände),*
- *Bauteilverbindungen (z.B. Schweißnähte, Schraubenverbindungen),*
- *Geometrieänderungen, die zu Spannungskonzentrationen führen (z.B. Tür- und Fensterecken).*

Diese kritischen Bereiche müssen ermittelt werden. Hierbei sind die Erfahrungen der Hersteller im Zusammenhang mit den Ergebnissen aus Berechnung und Versuch zu berücksichtigen. Eingehende Untersuchungen der lokalen Bereiche können notwendig werden.

Der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit kann mit zwei verschiedenen Berechnungsverfahren durchgeführt werden:

- Dauerfestigkeitsnachweis (siehe Kapitel 7.3.3.2.1),
- Betriebsfestigkeitsnachweis (siehe Kapitel 7.3.3.2.2).

Es muss berücksichtigt werden, dass die Art und Qualität der verfügbaren Daten die Wahl der in Kapitel 7.3.3.2 beschriebenen Verfahren beeinflussen. Das angewandte Verfahren muss projektspezifisch festgelegt werden.

Sofern die untersuchten dynamischen Lastfälle in der Ermüdungsberechnung bereits Toleranzen für Unsicherheiten beinhalten, und unter der Voraussetzung, dass die minimalen Werkstoffkennwerte wie in Kapitel 7.2.2.2 beschrieben verwendet werden, ist kein weiterer Sicherheitsfaktor in dieser Berechnung notwendig.

Verfahren zum experimentellen Nachweis des Ermüdungsverhaltens oder zur Überprüfung der Rechenergebnisse werden in Kapitel 7.3.4.2 beschrieben.

7.3.3.2 Berechnungsverfahren

7.3.3.2.1 Dauerfestigkeitsnachweis

Dieser Nachweis ist zulässig, wenn die Werkstoffdaten zeigen, dass eine Dauerfestigkeitsgrenze vorhanden ist. Die Dauerfestigkeitsgrenze ist die Spannung, bei der keine Ermüdungsschäden eintreten werden, vorausgesetzt, dass alle dynamischen Belastungszyklen darunter bleiben.

Die erforderliche Ermüdungsfestigkeit ist nachgewiesen, wenn die Spannungen auf Grund aller geeigneten Kombinationen von Dauerbelastungsfällen, die in Kapitel 9.2.1 festgelegt sind, unter der Dauerfestigkeitsgrenze bleiben.

7.3.3.2.2 Betriebsfestigkeitsnachweis

Dieser Nachweis sollte verwendet werden, wenn es unzweckmäßig ist, die Beanspruchungshöhe für alle wesentlichen Belastungskombinationen unter der Dauerfestigkeit zu halten, oder wenn für den Werkstoff keine Dauerfestigkeit festgelegt werden kann.

Jeder in Kapitel 9.2 definierte Lastfall muss in Hinblick auf Amplitude und Zyklenzahl durch repräsentative Verläufe dargestellt werden. Gleichzeitig wirkende Belastungskombinationen müssen gebührend berücksichtigt werden. Die Schädigung auf Grund jedes derartigen Falles wird dann wiederum unter Verwendung eines geeigneten Werkstoff- S-N-Diagrammes (Wöhlerkurve) bewertet. Die Gesamtschädigung wird in Übereinstimmung mit einer bewährten Schadensakkumulationshypothese (wie z.B. Palmgren-Miner) bestimmt.

Belastungsverläufe und -kombinationen dürfen unter der Voraussetzung vereinfacht werden, dass dies in geeigneter Weise zu auf der sicheren Seite liegenden Resultaten führt.

7.3.4 Experimentelle Festigkeitsnachweise

Das Freigabeverfahren für die Festigkeit von Fahrzeugbaugruppen sieht neben den rechnerischen Nachweisen experimentelle Nachweise vor:

- statische Versuche,
- Dauerversuche,
- Streckenversuche.

Im Normalfall müssen Versuche durchgeführt werden, um einen vollständigen Nachweis der Festigkeit und der Stabilität nach den Anforderungen von Kapitel 6 zu führen. Es ist nicht notwendig, Versuche durchzuführen, wenn geprüfte Daten von früheren Versuchen an ähnlichen Strukturen zur Verfügung stehen und eine Übereinstimmung von Versuch und Berechnung gegeben ist. Sind dagegen signifikante Änderungen der Konstruktion oder der Betriebsbedingungen gegeben, müssen Versuche durchgeführt werden.

Das Versuchsprogramm muss projektspezifisch festgelegt werden.

Die spezifischen Ziele der statischen Versuche und Dauerversuche sind:

- Prüfung der Festigkeit der Konstruktion, wenn diese der maximalen Belastung ausgesetzt ist,
- Prüfung, dass keine bleibende Verformung nach Entfernen der maximalen Belastung vorhanden ist,
- Nachweis der Festigkeit der Konstruktion unter den Betriebslastfällen,
- Bestimmung des dynamischen Verhaltens der Konstruktion.

Die Versuche müssen, falls notwendig, siehe oben, folgendes umfassen:

- statische Simulation ausgewählter Lastfälle,
- Messung von Beanspruchungen mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen oder sonstigen geeigneten Verfahren,
- Messung der strukturellen Verformung unter Belastung,
- Messung des Eigenfrequenzverhaltens.

Die geprüften Bauteile bzw. Baugruppen müssen gleicher Art und Herstellung sein wie die danach im Betrieb verwendeten. Die Prüfstandausrüstung muss in einem vernünftigen und praktikablen Maß in der Lage sein, die gleiche Belastung aufzubringen, denen die Bauteile bzw. Baugruppen im späteren Betrieb im eingebauten Zustand ausgesetzt sind.

7.3.4.1 Statische Versuche

Der allgemeine Zweck von statischen Versuchen ist festzustellen, dass Bauteile bzw. Baugruppen bei außergewöhnlichen Lasten nicht dem Risiko übermäßiger Durchbiegungen oder bleibender Verformung ausgesetzt sind.

Versuche können zur Verifikation der rechnerischen Nachweise durchgeführt werden.

Im Allgemeinen werden bei den Versuchen Dehnungsmessungen in den stark beanspruchten Bereichen der Bauteile bzw. Baugruppen mit Hilfe von Widerstandsdehnungsmessstreifen durchgeführt, die bei Punkten, an denen die Beanspruchung nur in eine Richtung wirkt, in eine Richtung, bei allen anderen Punkten jedoch in mindestens zwei Richtungen messen.

Das Versuchsprogramm für statische Versuche muss folgende Angaben enthalten:

- Größe und Lage der anzuwendenden Kräfte,
- Kombination der anzuwendenden Kräfte,
- Bewertungs- und Interpretationsverfahren für die gemessenen Beanspruchungen,
- Beanspruchungsgrenzwerte,
- alle weiteren Freigabekriterien,
- Messstellenplan für Dehnungsmessungen.

Die durchzuführenden Messungen des gesamten Versuchs müssen so aufgezeichnet werden, dass eine Analyse aller Messpunkte bei jedem Lastfall möglich ist, d.h. die Bestimmung der minimalen und maximalen Spannung muss mindestens gewährleistet sein.

Der Maximalwert der Hauptspannung σ_{\max} und der Minimalwert der Hauptspannung σ_{\min} definieren den Mittelwert σ_m und die Amplitude σ_a .

Mittelwerte und Amplituden der Hauptspannung entsprechend nachfolgender Beziehung sind mit der Beanspruchbarkeit (z.B. Dauerfestigkeitsgrenzen) des Werkstoffes zu vergleichen und zu bewerten.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

Dabei ist:

- σ_m Mittelwert der Hauptspannung
- σ_a Amplitude der Hauptspannung
- σ_{\max} Maximalwert der Hauptspannung
- σ_{\min} Minimalwert der Hauptspannung

7.3.4.2 Betriebsfestigkeits- und Dauerfestigkeitsversuche

Dauerversuche bestehen aus einem Hauptversuch und möglicherweise zusätzlichen spezifischen Versuchen.

Ziel des Hauptversuchs ist die Bestätigung, dass die Festigkeit der Baugruppen bzw. -teile hinsichtlich der in ihnen wirkenden Hauptlasten ausreichend ist. Hauptlasten sind Lasten, die Beanspruchungen in der gesamten Konstruktion auslösen.

Weitere Versuche können, falls notwendig, durchgeführt werden, besonders hinsichtlich der Ergebnisse von Berechnungen oder statischen Versuchen. Diese Versuche beziehen sich auf Kräfte, die nur lokal wirken.

Ermüdungsprüfungen müssen an Fahrzeugteilen des primären Krachflusses, die dynamischen Belastungen ausgesetzt sind, durchgeführt werden, falls die Berechnung Unsicherheiten beinhaltet oder Messergebnisse aus dem Betrieb für diese Detailart nicht vorliegen.

Für Bauteile des Magnetfahrwerks (Schwebegestelle und Sekundärfederung) sind Ermüdungsprüfungen durchzuführen. Für die Zelle des Wagenkastens muss mindestens die Verifikation der Rechenmodelle durch statische Versuche erfolgen.

Die folgenden Prüfarten können verwendet werden:

- Laborermüdungsprüfungen, in denen geeignete Belastungsverläufe für die gesamte Lebensdauer auf die Fahrzeugbaugruppen aufgebracht werden. Es dürfen keine Risse auftreten, welche die Sicherheit oder Verfügbarkeit der Konstruktion nachteilig beeinflussen würden;
- Ermüdungsberechnung auf Basis von Dehnungsmessungen unter Verwendung der Daten aus dem Versuch oder anderer statischer Prüfungen;
- Ermüdungsberechnung auf Basis von Dehnungsmessungen unter Verwendung der Daten repräsentativer Betriebsbedingungen.

Das Versuchsprogramm für Dauerversuche muss folgende Angaben enthalten:

- anzuwendende Kräfte und deren Lage (statische Grundlasten und dynamische Anteile),
- Kombination der verschiedenen Kräfte unter Berücksichtigung der Phasenbeziehungen unterschiedlicher zyklischer Kräfte und ihrer relativen Häufigkeit,
- Anzahl der Zyklen (Lastwechsel),
- Bewertungsverfahren,

- Freigabekriterien,
- Messstellenplan für Dehnungsmessungen.

Im Allgemeinen wird aus Kosten- und Zeitgründen nur eine Baugruppe bzw. ein Bauteil im Dauer- versuch untersucht. Sobald nachgewiesen ist, dass die Probe den anfänglichen Anforderungen entspricht, können die Versuchslasten schrittweise erhöht werden. Damit kann der Sicherheits- spielraum bestimmt werden, der die Streuung der Dauerfestigkeitswerte abdeckt.

Für Werkstoffe, die ähnliche Streuungen der Beanspruchbarkeiten aufweisen wie Schweißnähte an Stahlkonstruktionen, kann das Prüfverfahren und das Entscheidungskriterium in Anlehnung an /DIN EN 13749/, Anhang G angewendet werden.

7.3.4.3 Streckenversuche

Zum Nachweis der betrieblichen Anforderungen an das Fahrzeug sowie der Lastannahmen und Beanspruchungen im Fahrbetrieb sind Streckenversuche durchzuführen.

Sie werden in der Regel im Rahmen der Fahrzeuginbetriebnahme durchgeführt und sind projekt- spezifisch festzulegen.

Das Programm für Streckenversuche muss mindestens folgende Angaben enthalten:

- das zu verwendende Fahrzeug sowie Fahrweg - Trägertypen,
- Beschreibung der auszuführenden Fahrten (Lastfälle, Geschwindigkeiten usw.),
- Belastungsbedingungen des Fahrzeugs,
- Bewertungs- und Interpretationsverfahren für die Beanspruchungen,
- zulässige Belastungsgrenzwerte,
- alle weiteren Freigabekriterien,
- Messstellenplan für z.B. Weg-, Beschleunigungs-, Kraft und Dehnungsmessungen.

8 Lastfälle

Dieser Abschnitt legt die Lastfälle fest, die bei der Auslegung von MSB-Fahrzeugstrukturen (Wagenkästen, Magnetfahrwerk, Verkleidungsteile usw.) heranzuziehen sind. Er enthält die mindestens zu berücksichtigenden Lastfälle für den Nachweis der Lastaufnahmefähigkeit und der Ermüdungsfestigkeit.

Die zu den Lastfällen angegebenen Vorgaben repräsentieren Mindestanforderungen. Falls ein Betreiber höhere Werte zur Erzielung eines sicheren Betriebs für notwendig erachtet, muss er die Anforderung festlegen. Für bestimmte Betriebsbedingungen oder Konstruktionsmerkmale ist ein niedrigerer Wert annehmbar, wenn eine technische Begründung dieses nachweist. Zusätzlich zu den festgelegten Lastfällen und allen weiteren durch den Betreiber bestimmten Anforderungen oder Abweichungen liegt es in der Verantwortung des Herstellers, sicherzustellen, dass die Konstruktion jeder anderen relevanten statischen oder dynamischen Belastung, die beim Betrieb des MSB-Fahrzeugs auftritt, standhalten kann.

Die Lastfälle für mechanische Baugruppen werden entsprechend ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit folgendermaßen zugeordnet:

- Betrieb im ausfallfreien Zustand: ständiges Auftreten,
- außergewöhnliche Lasten (Betrieb mit Ausfällen bzw. unter außergewöhnlichen Einwirkungen): Auftretenshäufigkeit 10 pro Jahr je Bauteil bzw. 100 pro Jahr je Sektion.

Diese Werte stellen den aktuellen Kenntnisstand dar und sind durch Erfassung von Befundungen an mechanischen Baugruppen im Rahmen der Instandhaltung zu verifizieren. Basierend auf diesen Erfassungen sind ggf. die Nachweise anzupassen.

Entsprechend /MSB AG-GESAMTSYS/ werden Lastfälle aus Fehlfunktionen oder Störfällen, deren Auftretenswahrscheinlichkeit kleiner 10^{-6} pro Jahr ist, nicht nachgewiesen.

8.1 A-Lasten (Lastfälle für Ermüdungsfestigkeitsnachweis)

Die Angaben zu den A-Lasten gelten für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit als Dauerfestigkeitsnachweis. Für die Fälle, in denen ein Nachweis der Betriebsfestigkeit sinnvoller oder notwendig ist, sind Belastungskollektive, basierend auf den folgenden Angaben, abzuleiten.

8.1.1 Massenkräfte

8.1.1.1 Fahrzeuggewicht

Es sind die möglichen Beladungszustände (Fahrzeugeigengewicht, Fahrzeuggewicht mit Nutzlast) zu betrachten.

Für Fernverkehrsfahrzeuge mit Zugangsbeschränkung (keine Stehplätze) wird das mittlere Fahrzeuggewicht angesetzt. Lastungleichverteilungen infolge Nutzlastschwankungen (ungleiche Verteilung der Nutzlast in x- und y-Richtung) werden durch die Erhöhung der Tragmagnetkräfte abgedeckt. Als Erfahrungswert wird eine Erhöhung der mittleren Traglast je Tragmagnetanlenkung um 5 % angesetzt.

Für Fahrzeuge als Flughafenabfahrbahnen mit Zugangsbeschränkung auf Anzahl Sitzplätze und 320 kg/m² Stehplatzfläche gelten folgende typischen Beladungszustände als *Richtwerte*:

Fall 1: 80 % der Fahrten mit vollständig belegten Sitzplätzen und einer Stehplatzdichte von einer Person/m² (Normalauslastung)

Fall 2: 15 % der Fahrten mit vollständig belegten Sitzplätzen und einer Stehplatzdichte von zwei Person/m² (Vollauslastung)

Fall 3: 5 % der Fahrten mit vollständig belegten Sitzplätzen und einer maximalen Stehplatzdichte von 320 kg/m² (Maximalauslastung).

Der Dauerfestigkeitsnachweis ist mit dem Beladungszustand Vollauslastung gemäß Fall 2 zu führen. Schneeansammlungen sind projektspezifisch nach Kapitel 8.1.1.3 zu berücksichtigen.

Bei Betrieb ohne Zugangsbeschränkung sind die Fahrgastzahlen betriebsbegleitend zu erfassen (z. B. statistische Auswertung) und ggf. geeignete Maßnahmen zu ergreifen.

Wird mit dem Betreiber keine anders lautende Vereinbarung getroffen, werden für den Regionalverkehr die Angaben für Flughafenabfahrbahnen verwendet.

8.1.1.2 Wannen- bzw. Kuppenfahrt

Die Massenkräfte beim Durchfahren der Trassierungselemente Wanne/Kuppe sind durch Ansatz der Vorgabe für die maximale freie Vertikalbeschleunigung zu berücksichtigen.

Vorgabe:

$$a_{z\max} (\text{Kuppe}) = -0,6 \text{ m/s}^2$$

$$a_{z\max} (\text{Wanne}) = 1,2 \text{ m/s}^2$$

8.1.1.3 Betriebliche Schneeansammlungen

Lasten aus Schneeansammlungen sind für den Wagenkasten und die Sekundärfederung nicht relevant.

Für die Nachweisführung müssen betrieblich erwartete Schneeansammlungen in Hohlräumen des Magnetfahrwerks berücksichtigt werden. Durch Schnee- und Eisbelag an der Verkleidung des Magnetfahrwerks - innen und außen - kann es zu einer Erhöhung der Massen im Magnetfahrwerk kommen. Zusätzliche Zwangskräfte durch Einschränkung der MSB-Fahrzeugkinematik oder eine Veränderung der MSB-Fahrzeugaerodynamik treten wegen der Verkleidung des Magnetfahrwerks nicht auf. Gegebenenfalls sind bis zum Vorliegen projektspezifischer Betriebserfahrungen ergänzende Maßnahmen mit dem Betreiber abzustimmen.

Die betrieblich anzusetzenden Schneemengen für den Lastfall Schneeansammlung im MSB-Fahrzeug richten sich nach der Klimazone der Anwendung und sind projektspezifisch festzulegen.

Wird keine abweichende Vereinbarung getroffen, erfolgt die Massenberechnung mit dem Zustand Nassschnee gem. Tabelle 3.

8.1.1.4 Beschleunigen / Bremsen mit Wechselschrittverfahren des Antriebs

Die Schubkräfte werden als quasistatische Kräfte zwischen Langstator und Tragsmagnet durch Wechselwirkung von Tragsmagnetfeld und synchronem Langstatorstrom übertragen.

Die beim Beschleunigen/ Bremsen mit dem Langstatorantrieb entstehenden Massenkräfte sind zu berücksichtigen.

Für den Motorabschnittwechsel stehen unterschiedliche, projektspezifische Verfahren zur Verfügung: Wechselschritt- (WSV), Dreischritt- (DSV), Bocksprung- und Zeitversatzverfahren.

Die folgenden Punkte müssen berücksichtigt werden:

- Während des Motorabschnittwechsels wirkt auf das MSB-Fahrzeug eine auf beiden MSB-Fahrzeug-Längsseiten unterschiedliche, orts- und zeitabhängige Schubkraftänderung ein. Um den Schubkräfteinbruch zu minimieren, kann die Antriebskraft der aktiven Motorseite erhöht werden. Die gegenüberliegende Seite ist zu diesem Zeitpunkt ohne Schubkraft.
- Für die Ableitung der Massenkräfte wird ausschließlich das Wechselschrittverfahren zum Zeitpunkt des Abschnittwechsels berücksichtigt, da die Beanspruchungen durch die unsymmetrische Lasteinleitung beim Wechselschrittverfahren am größten sind und dieses alle anderen Verfahren mit abdeckt.
- Projektspezifisch kann nach Vereinbarung mit dem Betreiber auch das Dreischrittverfahren (DSV) berücksichtigt werden, da in diesem Falle durch die symmetrische Krafteinleitung die Lasten niedriger sind.
- Die anzusetzende x-Kraft beim WSV entspricht der halben Schubkraft auf eine MSB-Fahrzeugsektion und wird auf einer Fahrzeugseite aufgebracht. Für den Betrieb im ausfallfreien Zustand wird die mittlere Antriebsbeschleunigung $a_{x\text{mitt}}$ angesetzt.

Vorgabe (Erfahrungswert TVE):

Beschleunigung:

$$a_{x\text{mitt}} = \pm 0,8 \text{ m/s}^2$$

Schubkraft der aktiven Motorseite:

73 % der Antriebskraft je Sektion

8.1.1.5 Beharrungsfahrt mit Wechselschrittverfahren des Antriebs

Es ist zu berücksichtigen, dass Kräfte aus Beharrungsfahrt abgedeckt werden, siehe Kapitel 8.1.1.4. Wird anstelle eines Dauerfestigkeitsnachweises ein Betriebsfestigkeitsnachweis geführt, ist die Fahrzeugschubkraft abhängig von den aerodynamischen Lasten und der Trassierung für $a_x = 0 \text{ m/s}^2$ zu ermitteln.

8.1.1.6 Freie Seitenbeschleunigung

Die Massenkräfte aus unausgeglichenen Seitenbeschleunigungen können durch Ansatz der maximalen betrieblichen freien Seitenbeschleunigung berücksichtigt werden.

Das heißt, konservativ wird vereinfachend angenommen, dass Kurven $\geq 1000 \text{ m}$ ausschließlich mit maximaler freier betrieblicher Seitenbeschleunigung durchfahren werden.

Maximalwert für Kurvenfahrt:

$$a_{y\text{max}} = \pm 1,5 \text{ m/s}^2.$$

8.1.1.7 Fahrdynamik

Die aus den langwelligen Lagetoleranzen der Funktionsflächen von Langstator und Seitenführschiene resultierenden dynamische Kräfte und Momente (Fahrdynamik) sind mit den statischen Reaktionskräften an den Schnittstellen zu überlagern.

Wechselkräfte, die aus der magnetische Wirkung der Langstatornuten auf die Tragsmagnete und aus kurzwelligen Lagetoleranzen bzw. Versätzen von Statorpaketen und Seitenführschiene resultieren, wirken als hochfrequentes Rauschen und können in den Nachweisen vernachlässigt werden. Bei der Bewertung des Eigenschwingungs- und Resonanzverhaltens sind diese Wechselkräfte zu berücksichtigen und als mechanische Schwingungsbeanspruchung in den Umwelträumen des MSB-Fahrzeugs projektspezifisch festzuschreiben.

Wird die Fahrdynamik über Kräfte berücksichtigt, muss kein zusätzlicher Schwingfaktor angewendet werden.

8.1.1.7.1 Wagenkasten

Für die Bemessung der Wagenkästen ist als Vorgabe ein Schwingfaktor von $f = 1,0 \pm 0,12$ (Verifizierter Wert für Wagenkasten mit Luftfederungen) anzusetzen.

8.1.1.7.2 Struktur Trag-/Führsystem

Dynamische Lastanteile aus der Fahrdynamik sind für jedes Schwebegestell als quasistatisch wirkende Lasten ungünstigst auf die vorhandene Grundlast aus Antreiben / Bremsen, Tragen und Führen aufzuaddieren. Eine zusätzliche Korrektur über einen Schwingfaktor muss nicht berücksichtigt werden.

Vorgabe je Anlenkung: (verifizierte Werte für die Struktur des Trag- / Führsystems):

$\Delta F_{xTMA} = \pm 1,0 \text{ kN}$ Antreiben/Bremsen (beinhaltet WSV)

$\Delta F_{yFMA} = \pm 9,0 \text{ kN}$ Führen

$\Delta F_{zTMA} = \pm 4,0 \text{ kN}$ Tragen

8.1.1.7.3 Verkleidungen

Für die **Gestellaussen- und Gestellinnenverkleidungen** sind als Vorgaben folgende Beschleunigungswerte für den Umweltraum Schweberrahmen anzusetzen (Maximalwerte aus TVE-Erfahrungen):

$a_x = \pm 2,0 \text{ m/s}^2$

$a_y = \pm 15 \text{ m/s}^2$

$a_z = \pm 15 \text{ m/s}^2$

Vorgabe für die **gestellfeste Bugverkleidung**:

$a_x = \pm 8,0 \text{ m/s}^2$

$a_y = \pm 15,0 \text{ m/s}^2$

$a_z = +15,0 \text{ m/s}^2 / -10,0 \text{ m/s}^2$

Vorgabe für die Wagenkastenüberbrückungsblende:

$$a_x = \pm 3,5 \text{ m/s}^2$$

$$a_y = \pm 10,0 \text{ m/s}^2$$

$$a_z = \pm 3,2 \text{ m/s}^2$$

Für andere Fahrzeugkonfigurationen bzw. Federungseigenschaften sind entsprechend angepasste Schwingfaktoren oder dynamische Lasten abzuschätzen und bei Inbetriebnahme zu verifizieren.

8.1.1.8 Abgesetztes MSB-Fahrzeug

Anheben/Absetzen bei $v_{FZG} = 0 \text{ km/h}$ an Stationen und Betriebshalteplätzen.

Lasten für das abgesetzte Fahrzeug sind in der Regel nur für das Magnetfahrwerk zu betrachten (Belastungsumkehr an den Tragsmagnetanlenkungen). Für den Wagenkasten können betriebliche Lasten vernachlässigt werden.

8.1.2 Zwangskräfte infolge Trassierung

Es ist zu berücksichtigen, dass bei einem Horizontalradius $R_H < 2000 \text{ m}$ und einer Fahrwegverwindung α' größer $0,1^\circ/\text{m}$ Rückstellkräfte im Magnetfahrwerk entstehen.

Für die Nachweisführung sind, sofern die projektspezifischen Parameter hiervon nicht abweichen, folgende Trassierungsparameter zu verwenden:

Die betrieblich relevanten Zwangskräfte können durch Überlagerung des Kurvenradius $R_H = 1000 \text{ m}$, der betrieblich trassierten Fahrwegneigung $\alpha = 12^\circ$ und der Fahrwegverwindung $\alpha' = 0,1^\circ/\text{m}$ berücksichtigt werden.

8.1.3 Vorspannung infolge Fühmagnetlasten

Liegen keine projektspezifischen Angaben vor, ist eine Vorspannkraft an den Fühmagnetanlenkungen zu berücksichtigen.

Vorgabe:

$$F_{yFM0} = 4,5 \text{ kN (ca. 50\% der Fahrdynamik)}$$

8.1.4 Aerodynamische Lasten

Aerodynamische Lasten sind für die einzelnen MSB-Fahrzeugbereiche (Wagenkastenbug, zylindrischer Bereich Wagenkasten, Bugeinläufe, Fahrzeugunterseite, Gestellverkleidungen) differenziert zu betrachten.

Folgende Punkte sind zu berücksichtigen:

- Bei der vorauslaufenden und nachlaufenden Sektion ergibt sich an der Oberfläche des Bugbereichs eine ortsabhängige, ungleichmäßige Druckverteilung.
- Im zylindrischen Bereich des MSB-Fahrzeugs sind die Drucklasten weitgehend konstant.

Daher kann die Endsektion in zwei Zonen aufgeteilt werden. Die Aufteilung der Zonen kann nachfolgender beispielhafter Abbildung entnommen werden.

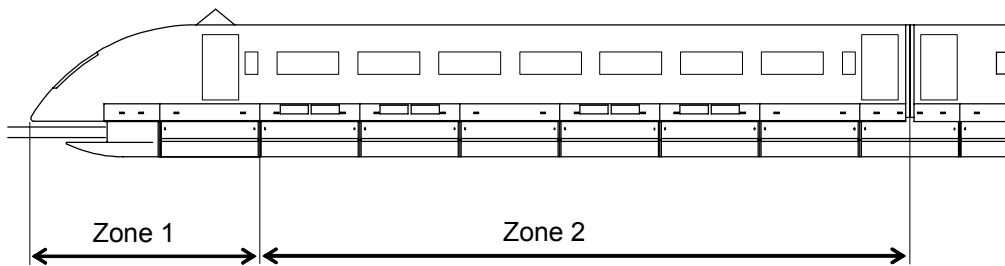


Abbildung 2: Zoneneinteilung der Endsektion in Bezug auf aerodynamische Einwirkungen

Zone 1 umfasst den Bugbereich bis zum Übergang zylindrischer Bereich Wagenkasten. Die Klappe der Gestellaussenverkleidung am Übergang Zone 1 zu Zone 2 wird noch komplett der Zone 1 zugeschlagen. Mittelsektionen werden mit Lasten der Zone 2 berechnet.

Sind die aerodynamischen Lasten nicht projektspezifisch angegeben, können bei vergleichbaren Kopfformen Daten ausgeführter Fahrzeuge verwendet werden.

Wird mit dem Betreiber keine abweichende Vereinbarung getroffen, können die Dauerfestigkeitsnachweise gegen aerodynamische Lasten für die Fahrzeughöchstgeschwindigkeit und für die Tunnelhöchstgeschwindigkeit geführt werden.

8.1.4.1 Aerodynamische Lasten aus Fahrtwind

Die geschwindigkeitsabhängige lokale Druckverteilung im Bugbereich (Zone 1) und die konstante Druckverteilung im zylindrischen Bereich des MSB-Fahrzeugs (Zone 2) sind als quasistatische, auf die MSB-Fahrzeugoberfläche wirkende Lasten zu berücksichtigen.

Lasten aus Fahrtwind auf die Gestellinnenverkleidungen und Wagenkastenunterbodenverkleidungen können ebenfalls als quasistatische Lasten angesetzt werden.

Die Lasten aus Fahrtwind decken die Einwirkungen aus Gegenwind mit ab. Der für A-Lasten zu berücksichtigende Wert der Windgeschwindigkeit $v_w = 10 \text{ m/s}$ ist kleiner 10 % der Fahrzeughöchstgeschwindigkeit.

8.1.4.2 Aerodynamische Lasten aus Seitenwind

Werden keine abweichenden Festlegungen getroffen, gelten folgende Vorgaben (siehe auch /MSB AG-Umwelt/, Kapitel 5.1.5):

Als statisch anzusetzende Last wird ein permanent wirkender betrieblicher Seitenwind mit $v_w = 10 \text{ m/s}$ angenommen.

Abgeleitet aus bisherigen Erfahrungen beträgt die Einwirkdauer eines 10-Min.-Mittelwertes für Wind $> 10 \text{ m/s}$ in 10 m Höhe Fahrweg 74 h pro Jahr. Das bedeutet, dass in 99 % der jährlichen Betriebszeit ein Wind $\leq 10 \text{ m/s}$ zu erwarten ist.

Als maßgebliche Höhe bei der Ermittlung von Seitenwindkräften ist die Gesamthöhe des Fahrzeugs ohne Antenne anzusetzen.

8.1.4.2.1 Kräfte auf den Wagenkasten

Bei dem Wagenkasten ist die Wagenkastenüberbrückungsblende mit zu berücksichtigen (siehe Darstellung in /MSB AG-FZ GEN/).

Die resultierende Kraft aus dem Seitenwind kann als quasistatische, auf den Wagenkasten wirkende Flächenkraft berücksichtigt werden.

Diese Last wird vom Trag-/Führsystem abgetragen.

Es ist zu berücksichtigen, dass auf die vorlaufende Bugsektion bei Seitenwind wesentlich höhere aerodynamische Lasten wirken als auf die nachlaufende Bugsektion und dass diese somit bestimmend für die Ermittlung der Schnittstellenlasten sind.

8.1.4.2.2 Kräfte auf die Gestellaußenverkleidung

Es ist zu berücksichtigen, dass auf die Gestellaußenverkleidung der Zone 1 die maximalen Lasten wirken. Die resultierenden Kräfte auf die Gestellaußenverkleidung sind daher aus der Druckverteilung in Zone 1 abzuleiten und als quasistatische Last zu berücksichtigen.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Gestellinnenverkleidung und der Wagenkastenunterboden keine relevanten Belastungen durch Seitenwind erfahren.

8.1.4.3 Aerodynamische Lasten aus Zugbegegnung

Die Amplituden der Druckeinwirkung auf den Wagenkasten im Freifeld sind in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, des Spurmittenabstands und der Fahrwegquerneigung projektspezifisch abzuleiten.

Für jede Zugbegegnung ist die bei der Fahrzeuggeschwindigkeit und der projizierten Fahrwegquerneigung einwirkende Druckamplitude anzusetzen.

Eine entsprechende Funktion ist in /MSB AG-GESAMTSYS/ enthalten.

Liegen keine abweichend spezifizierten Daten vor, kann mit dieser Funktion ein Nachweis geführt werden. Im Rahmen der Abnahme gemäß /MbBO/ sind diese Daten zu verifizieren.

Für die globalen und lokalen Beanspruchungen der Struktur bzw. einzelner Baugruppen ist beim Nachweis gegen Betriebslasten die maximale Amplitude der Wechseldruckwelle für die Fahrzeughöchstgeschwindigkeit v_{\max} anzuwenden.

Die Wechseldruckwelle kann als Treppenfunktion konservativ idealisiert werden. Es kann angenommen werden, dass die Lasten als quasistatische Wechselgrößen auf eine Fahrzeugseite wirken, wobei für eine Zugbegegnung zwei Wechseldruckwellen zu berücksichtigen sind (Einwirkung von Bug und Heck).

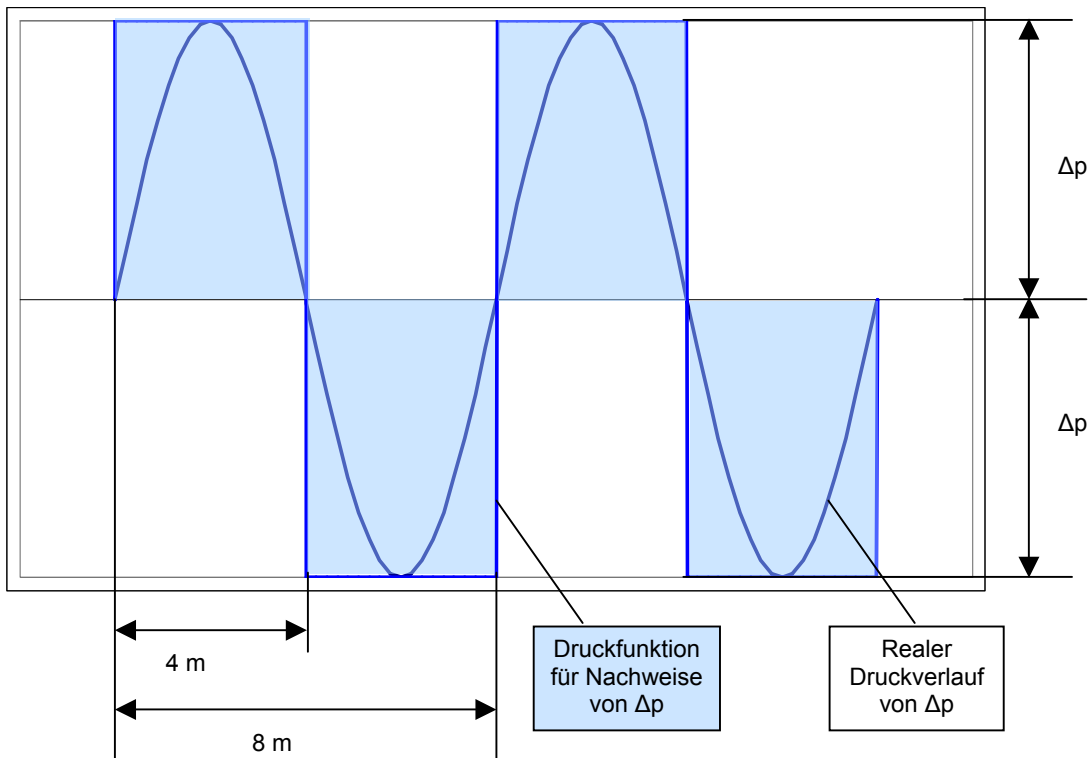


Abbildung 3: Wechseldruckwelle Bug-/Heckeinwirkung

Die folgenden Punkte sind zu berücksichtigen:

- Die Länge der nach Abbildung 3 angesetzten Druck/Soglast beträgt jeweils 4 m, die beider Druck/Sogamplituden 8 m.
- Die Wechseldruckwellen laufen entlang des gesamten Zuges.

Für die Nachweise sind die ungünstigsten Positionen in Fahrzeuglängsrichtung zu betrachten.

Zur Berücksichtigung der Strukturodynamik ist ein Schwingfaktor von 1,15 zu berücksichtigen. Die Annahmen sind im Rahmen der Inbetriebnahme zu verifizieren.

Bei der Bemessung des Führsystems sind zusätzliche Lasten infolge Zugbegegnung nicht zu berücksichtigen.

Für die A-Lasten ist die Fahrzeughöchstgeschwindigkeit v_{\max} anzusetzen.

Beispiel für die Ableitung der Wechseldruckamplitude gemäß /MSB AG-GESAMTSYS/:

	Zylindrischer Teil WK	Bug / Heck WK
Zugbegegnung ($v_{\max} = 400 \text{ km/h}$)	$\Delta p = \pm 1900 \cdot 1,15$	$\Delta p = p(x, y, z) \pm 1900 \cdot 1,15$
Δp Druckänderung in [Pa] $p(x, y, z)$ Druck am Bug infolge c_p -Verteilung Abstand der Seitenwände sich begegnender Fahrzeuge 1,1 m Fahrwegquerneigung $\alpha = 12^\circ$		

Tabelle 2: Beispiel für Druckamplituden bei Zugbegegnung

Die Gestellverkleidungen können - soweit projektspezifisch keine anderen Vereinbarungen getroffen werden - wie der zylindrische Teil Wagenkasten behandelt werden.

8.1.4.4 Aerodynamische Lasten bei Tunnelfahrt und Fahrt in Trögen

Druckbeanspruchungen aus Tunnelfahrt mit / ohne Zugbegegnung in Einzel- und Doppelröhren sind projektspezifisch zu berücksichtigen.

Zugbegegnungen sind nur bei entsprechender Trassierung oder entsprechenden Betriebskonzepten zu berücksichtigen.

Für die A-Lasten ist die planmäßige Fahrzeuggeschwindigkeit $v_{\max(\text{Tunnel})}$ im Tunnel anzusetzen.

Infolge des Druckunterschiedes zwischen Außen- und Innendruck kommt es zu wechselnden Belastungen des druckdichten Wagenkastens. Die Amplitude und die Anzahl der relevanten Druckänderungen (Lastwechsel), die von der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Tunnellänge, dem Versperrungsmaß und dem Druckdichtigkeitsbeiwert des Wagenkastens abhängen, sind projektspezifisch zu ermitteln bzw. können von vergleichbaren Anwendungen übernommen werden.

Es ist das Folgende zu berücksichtigen:

Bemessend ist der Differenzdruck zwischen „druckdichtem“ Innenraum und Fahrzeugaußenbereich. Dabei wird der stationäre maximale Differenzdruck für die Fahrzeughöchstgeschwindigkeit im Tunnel angesetzt. Die Druck-/Soglasten werden als konstante Größe auf den gesamten Wagenkasten aufgebracht. Die nicht druckdicht ausgeführten Bereiche des Magnetfahrwerks erfahren infolge des Druckausgleichs keine relevanten Beanspruchungen.

Die anzusetzenden Innen- und Außendruckwerte sind projektspezifisch durch geeignete Simulations- und Messverfahren zu ermitteln und anzusetzen.

Die Δp - Werte sind mit einem Dynamikfaktor 1,15 zu multiplizieren.

Die Druckwerte für die Zone 1 sind der Druckverteilung aus stationärer Fahrt außerhalb des Tunnels (Freifeldfahrt) zu überlagern.

Bei Vorliegen projektspezifischer Druckverläufe können diese verwendet werden.

Für die Berücksichtigung von Fahrten in Trögen gelten sinngemäß die Ansätze für Tunnelfahrten.

Die Annahmen zur Tunnelfahrt und Fahrten in Trögen sind projektspezifisch im Rahmen der Abnahme durch geeignete Messungen zu verifizieren.

8.1.4.5 Aerodynamische Lasten aus Auftrieb

Der aerodynamische Auftrieb des Wagenkastens ist der Schwerkraft entgegengerichtet und kann bei der Dimensionierung des Wagenkastens unberücksichtigt bleiben. Für das Magnetfahrwerk werden die Lasten über die Fahrdynamik, siehe Kapitel 8.1.4, erfasst.

8.1.5 Lasten infolge Temperaturänderungen

Beanspruchungen von Strukturen (z.B. Wagenkasten) infolge Temperaturänderungen sind zu berücksichtigen.

Einflüsse einer möglichen temperaturbedingten Längendehnung langer Fahrzeuge (*mehr als 8 Sektionen*) auf die Schubkraft des Antriebs sind projektspezifisch mit dem Teilsystem Antrieb abzustimmen.

8.2 S-Lasten im ausfallfreien Systemzustand für den Lastaufnahmefähigkeitsnachweis

Grundsätzlich gelten die Ausführungen nach Kapitel 8.1. Abweichungen, die vor allem die Berücksichtigung maximaler Betriebslasten betreffen, sind nachfolgend beschrieben.

8.2.1 Massenkräfte

8.2.1.1 Fahrzeuggewicht

Es ist das Gewicht bei 100 % Nutzlast (zulässiges Fahrzeuggewicht, siehe Kapitel 5.4.3) zu betrachten.

8.2.1.2 Wannen- bzw. Kuppenfahrt

Die Massenkräfte beim Durchfahren der Trassierungselemente Wanne/Kuppe sind mit den Beschleunigungen gemäß Kapitel 8.1.1.2 zu berücksichtigen.

8.2.1.3 Maximale Schneeanstimmungen

Für die Nachweisführung müssen die maximal zu erwartenden Schneeanstimmungen in Hohlräumen des Magnetfahrwerks berücksichtigt werden.

Durch geeignete Maßnahmen ist auszuschließen, dass unzulässige Zwangskräfte durch Einschränkung der Kinematik des Fahrzeugs infolge Schneeanstimmungen im Inneren des Magnetfahrwerks auftreten. Gegebenenfalls sind bei extremen Winterbedingungen betriebliche Maßnahmen vorzusehen und bis zum Vorliegen projektspezifischer Betriebserfahrungen die anzusetzenden Schneelasten und die ergänzenden Maßnahmen festzulegen.

Die maximal anzusetzenden Schneemengen für den Lastfall Schneeanstimmung im Fahrzeug richten sich nach der Klimazone der Anwendung und sind projektspezifisch festzulegen.

Für den Lastaufnahmefähigkeitsnachweis werden die Schneeanstimmungen durch das maximal mögliche Füllvolumen des Magnetfahrwerks bestimmt. Der Hersteller hat für das mögliche Füllvolumen und die Schneedichte realistische Annahmen zu treffen. Gegebenenfalls sind - bis zum Vorliegen projektspezifischer Betriebserfahrungen - ergänzende Maßnahmen festzulegen.

Für die Berechnung des Schneegewichtes sind die in Tabelle 3 angegebenen Schneedichten anzusetzen. Wird keine abweichende Vereinbarung getroffen, muss die Massenberechnung mit dem Zustand Nassschnee durchgeführt werden.

Schneezustand	Dichte Schnee [kg/m ³]
Neuschnee	100
Altschnee	300
Nassschnee	500

Tabelle 3: Schneedichten für unterschiedliche Aggregatzustände

8.2.1.4 Beschleunigen / Bremsen mit Wechselschrittverfahren des Antriebs

Wie unter Kapitel 8.1.1.4 ausgeführt, ist das Wechselschrittverfahren im Moment des Motorabschnittwechsels zum Nachweis der Beschleunigungs-/Bremslasten zu berücksichtigen.

Für den Betrieb im ausfallfreien Zustand mit S-Lasten ist die maximale Antriebsbeschleunigung gemäß /MSB AG-GESAMTSYS/ $a_{x\max}$ anzusetzen.

Maximalwert: $a_{x\max} = \pm 1,5 \text{ m/s}^2$

Vorgabe:

Schubkraft der aktiven Motorseite: 73 % der Antriebskraft je Sektion

Dynamische Überhöhungen können unberücksichtigt bleiben, da mit der maximalen Schubkraft gerechnet wird.

8.2.1.5 Beharrungsfahrt mit Wechselschrittverfahren des Antriebs

Es ist zu berücksichtigen, dass die Massenkräfte den A-Lasten aus Kapitel 8.1.1.5 entsprechen und für den Nachweis der Lastaufnahmefähigkeit durch die Lasten aus Kapitel 8.2.1.4 abgedeckt sind.

8.2.1.6 Freie Seitenbeschleunigung

Zur Erfassung der maximalen betrieblichen Massenkräfte aus nicht ausgeglichenen Seitenbeschleunigungen ist die maximal spezifizierte freie Seitenbeschleunigung anzusetzen.

Maximalwert für Weichenfahrt:

$a_{y\max} = \pm 2,0 \text{ m/s}^2$

8.2.1.7 Fahrdynamik

8.2.1.7.1 Wagenkasten

Für die Bemessung gegen S-Lasten werden die gleichen Schwingfaktoren wie bei den A-Lasten nach Kapitel 8.1.1.7.1 angesetzt.

8.2.1.7.2 Magnetfahrwerk

Dynamische Lastanteile aus der Fahrdynamik sind für das Magnetfahrwerk als quasistatisch wirkende Lasten auf die vorhandene Grundlast aus Antreiben/Bremsen, Tragen und Führen aufzuaddieren. Eine zusätzliche Korrektur über einen Schwingfaktor ist nicht notwendig.

Vorgabe (verifizierte Werte für Magnetfahrwerk TR08):

$\Delta F_{xTMA} = \pm 1,2$ kN Antreiben/Bremsen (beinhaltet WSB)

$\Delta F_{yFMA} = \pm 9$ kN Führen

$\Delta F_{zTMA} = \pm 5$ kN Tragen

8.2.1.7.3 Verkleidungen

Für die Bemessung der **Gestellaußen- und Gestellinnenverkleidungen** werden die gleichen Werte wie bei den A-Lasten nach Kapitel 8.1.1.7.3 angesetzt.

Vorgabe für die **gestellfeste Bugverkleidung**:

$a_x = \pm 16,0$ m/s²

$a_y = \pm 25,0$ m/s²

$a_z = +21,0$ m/s² / $-10,0$ m/s²

Für die Bemessung der Wagenkastenüberbrückungsblende werden die gleichen Werte wie bei den A-Lasten nach Kapitel 8.1.1.7.3 angesetzt.

Für andere Fahrzeugkonfigurationen bzw. Federungseigenschaften sind analog zu Kapitel 8.1.1.7 entsprechend angepasste Schwingfaktoren oder dynamische Lasten abzuschätzen und bei Inbetriebnahme zu verifizieren.

8.2.1.8 Abgesetztes MSB-Fahrzeug

Für die Bemessung der Fahrzeugbaugruppen gegen S-Lasten werden die gleichen Werte wie bei den A-Lasten nach 8.1.1.8 angesetzt. Der Nachweis der Massenkräfte ist durch Kapitel 8.2.1.1 abgedeckt.

8.2.2 Zwangskräfte infolge Trassierung

Für die Ermittlung der maximalen betrieblichen Zwangskräfte sind die beiden Fälle „minimaler Horizontalradius ohne Fahrwegquerneigung“ sowie „max. Fahrwegverwindung“ zu berücksichtigen.

Werden zwischen Betreiber und Hersteller keine abweichenden Festlegungen getroffen, sind für die Nachweisführung folgende Trassierungsparameter zu verwenden:

Fall 1: Minimaler Horizontalradius Radius $R_H = 350 \text{ m}$, $\alpha = 0^\circ$ ($v_{Fzg} = 100 \text{ km/h}$)

Fall 2: Maximale Fahrwegverwindung Radius $R_H = R_V = \infty$, $\alpha' = 0,15^\circ/\text{m}$

8.2.3 Vorspannung infolge Führomagnetlasten

Für die Bemessung der Fahrzeugbaugruppen gegen S-Lasten sind die gleichen Werte wie bei den A-Lasten nach Kapitel 8.1.3 zu verwenden.

8.2.4 Aerodynamische Lasten

Die Ausführungen nach Kapitel 8.1.4 sind sinngemäß mit folgenden Vorgaben für die Fahrzeuggeschwindigkeit anzuwenden:

Streckenfahrt ohne Tunnel:

v_{grenz} = Fahrzeuggrenzgeschwindigkeit

Tunnelfahrt:

$v_{\text{grenz}}(\text{Tunnel})$ = spezifizierte Tunnelgrenzgeschwindigkeit des Fahrzeugs

8.2.4.1 Aerodynamische Lasten aus Fahrtwind

Es gelten die Ausführungen nach Kapitel 8.1.4.1. Abweichend von den A-Lasten ist die Fahrzeuggrenzgeschwindigkeit anzusetzen.

8.2.4.2 Aerodynamische Lasten aus Seitenwind

Es gelten die Ausführungen nach Kapitel 8.1.4.2.

Zur Berücksichtigung der maximalen Betriebslasten können folgende Lastfälle angesetzt werden, siehe auch /MSB AG-Umwelt/, Kapitel 5.1.5:

Fall 1: Permanent wirkender maximaler Seitenwind mit $v_W = 37,3 \text{ m/s}$ bei v_{mitt}

Fall 2: Permanent wirkender maximaler Seitenwind mit $v_W = 37,3 \text{ m/s}$ bei v_{max}

Fall 3: Permanent wirkender betrieblicher Seitenwind mit $v_W = 10,0 \text{ m/s}$ bei v_{max}

Die alle 10 Jahre auftretende 5-Sekunden-Böe mit $v_W = 37,3 \text{ m/s}$ in 20 m Höhe wird bei den Einwirkungskombinationen als Maximallast behandelt. Bei höheren Fahrwegabschnitten sind Primärtragwerke vorgesehen, die gegebenenfalls mit zusätzlichem Windschutz ausgeführt werden.

Bei den Fällen 2 und 3 wird als Fahrzeuggeschwindigkeit die Fahrzeughöchstgeschwindigkeit angesetzt.

8.2.4.3 Aerodynamische Lasten aus Zugbegegnung

Es gelten die Ausführungen nach Kapitel 8.1.4.3

Abweichend von den A-Lasten ist zur Festlegung der Druckwechselamplitude die Fahrzeuggrenzgeschwindigkeit anzusetzen.

8.2.4.4 Aerodynamische Lasten aus Tunnelfahrt

Es gelten die Ausführungen nach Kapitel 8.1.4.4.

Der Nachweis ist gegen die maximale statische Druckdifferenz bei Tunnelfahrt zu führen.

Maximalwert: $\Delta p = \pm 5500 \text{ Pa}$.

Für die Auslegung ist der Nachweis gegen einen Druck $\pm 6000 \text{ Pa}$ zu führen (Sicherheitszuschlag 500 Pa).

Die Berücksichtigung von Zugbegegnungen kann zu höheren Druck/Soglasten führen. Diese sind projektspezifisch festzulegen.

8.2.4.5 Aerodynamische Lasten aus Auftrieb

Siehe Kapitel 8.1.4.5.

8.2.5 Lasten infolge Temperaturänderungen

Siehe Kapitel 8.1.5.

8.3 S-Lasten bei Betrieb mit Ausfällen für den Lastaufnahmefähigkeitsnachweis

Aufgrund der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit der außergewöhnlichen Lastfälle und der entsprechenden Lastfallkombinationen nach Kapitel 9.1 kann für die Nachweise mit einem Sicherheitsfaktor $S = 1,0$ gerechnet werden.

8.3.1 Zwangsbremmung mit sicherer Bremse bei Ausfall eines Bremsregelkreises

Bei Zwangsbremmung mit der Sicheren Bremse (Wirbelstrombremse) und abgeschaltetem Langstatorantrieb setzt das Fahrzeug mit der spezifizierten Absetzgeschwindigkeit geregelt ab. Der Lastfallgemäß Kapitel 8.3.1 behandelt den Zustand vor dem Absetzen. Lasten aus dem Zustand „abgesetztes Fahrzeug“ werden durch eigens spezifizierte Sonderlastfälle erfasst.

Für den Lastfall Zwangsbremmung mit der Sicheren Bremse (Wirbelstrombremse) mit Ausfall eines Bremskreises sind folgende Einflüsse zu berücksichtigen:

- Magnetische Brems- und Anzugskräfte sowie mechanische Druck- und Reibkräfte an der Schnittstelle zwischen Bremsmagnet und Seitenführschiene.
- Der unterstellte gleichzeitige Ausfall eines Bremsregelkreises bewirkt infolge der ungleichen Bremskraft der einzelnen MSB-Fahrzeugsektionen zusätzlich eine quasistatische Übertragung von Bremskräften zwischen den MSB-Fahrzeugsektionen.
- Ungleiche Bremskräfte der einzelnen MSB-Fahrzeugsektionen entstehen ebenfalls bei lokaler Fahrwegvereisung (unterschiedlichen Reibwerten der an den Seitenführschienen anliegenden Bremsmagnete).

- Die unsymmetrischen Bremsmagnet-Anzugskräfte infolge des Ausfalls eines Bremskreises werden auf beiden Fahrwegseiten durch die benachbarten Führregelkreise abgetragen.

Projektspezifisch sind, soweit zutreffend, die Überlagerung der Antriebs- und Wirbelstrombremse und die Überlagerung der Wirbelstrom- und Kufenbremse (abgesetzte Kufe) zu betrachten, falls deren Auftretenswahrscheinlichkeit $> 10^{-6}$ pro Jahr ist.

Als Gegenstand weiterer Betriebsfälle unter außergewöhnlichen Einwirkungen sind folgende Einflüsse aus der Sicherer Bremse zu berücksichtigen:

- Ausgleiten des Fahrzeugs auf Tragkufen mit Fahrzeuggeschwindigkeit \leq Absetzgeschwindigkeit inklusive Halteruck (siehe Kapitel 8.3.4, 8.3.8),
- ungleiche Bremskräfte der einzelnen MSB-Fahrzeugsektionen infolge lokaler Fahrwegvereinerung (unterschiedliche Reibwerte an den Tragkufen beim Ausgleiten des Fahrzeugs, siehe Kapitel 8.3.7).

Die maximalen auftretenden Verzögerungen und die Kräfte an der Schnittstelle Fahrzeug/Fahrweg (Reibkräfte) sind projektspezifisch festzulegen und zu berücksichtigen.

8.3.2 Ausfall eines Bordnetzes

Mit dem Lastfall wird der Betrieb bei abgeschalteten Trag-/Führregelkreisen, einzeln oder in Kombination miteinander, erfasst. Der Ausfall eines Bordnetzes bewirkt den Ausfall einzelner Trag- und Führregelkreise, die über mehrere Schweberahmen verteilt sind. Die Trag-/Führregelkreise sind dabei nicht benachbart.

Der Lastfall betrachtet das berührungslos schwebende Fahrzeug, da Trag- und Führregelkreise redundant vorhanden sind und die Funktion Tragen/Führen erhalten bleibt. Die Lasten an den Schnittstellen zwischen Tragmagnet und Langstator sowie zwischen Führungsmagnet und Seitenführschiene werden entsprechend der Vorgabe der Magnetregelkreise übertragen.

Doppelausfälle benachbarter Trag- bzw. Führregelkreise führen zu einem mechanischen Lastabtrag über Kontaktkräfte (siehe mechanisches Tragen, Kapitel 8.3.4 bzw. mechanisches Führen, Kapitel 8.3.3.

Infolge des Ausfalls eines Tragregelkreises entstehen erhöhte magnetische quasistatische und dynamische Kräfte an der Schnittstelle Tragmagnet - Langstator, infolge des Ausfalls eines Führregelkreises an der Schnittstelle Führungsmagnet - Seitenführschiene.

Für Tragregelkreise ist der Augenblick des Ausfalls bis einschließlich Teilentlüftung der Luftfedern zu betrachten.

Die maximal auftretenden Verzögerungen sind projektspezifisch festzulegen und zu berücksichtigen.

8.3.3 Lokales mechanisches Führen

Beim lokalen mechanischen Führen werden die Führlasten durch mechanischen Kontakt des Führungsmagneten mit der Fahrweg- Seitenführschiene abgetragen.

Die an der Schnittstelle zwischen Führungsmagnet und Seitenführschiene entstehenden mechanischen Druckkräfte sind zu berücksichtigen.

Beim lokalen mechanischen Führen ist zu unterscheiden in:

- Anlaufen an die Seitenführschiene infolge Ausfalls zweier benachbarter Führregelkreise und Betrieb mit mechanisch geführtem Schweberahmen über eine projektspezifisch mit dem Betreiber festzulegende Strecke.
- Auflaufen auf lokale Eisschichten:
Die maximale Stoßlast ist projektspezifisch festzulegen. Liegen übertragbare Daten vergleichbarer Konstruktionen vor, können diese angesetzt werden. Ansonsten sind die Lasten und Beanspruchungen durch eine numerische Simulation oder/und einen experimentellen Nachweis zu ermitteln.

Die maximalen auftretenden Verzögerungen und die Kräfte an der Schnittstelle Fahrzeug- Fahrweg (Reibkräfte) sind projektspezifisch mit dem Betreiber festzulegen und zu berücksichtigen.

Das Auflaufen auf Eisschichten, deren Dicken die zulässigen Werte überschreiten, ist als Kollision mit einem Hindernis zu behandeln. Die dabei auftretenden Lasten sind nicht für die Dimensionierung zur Lastaufnahmefähigkeit heranzuziehen, es muss aber sichergestellt sein, dass keine Teile abreißen und das MSB-Fahrzeug verlassen können.

Die dynamischen Lasten beim Anlaufen Seitenführschiene sind mit einem Schwingbeiwert von 1,15 zu berücksichtigen. Ansonsten können dynamische Kräfte auf den Führungsmagnet, die beim Gleiten aus den Lagetoleranzen und Versätzen der Seitenführschiene resultieren und als hochfrequentes Rauschen wirken, in den Nachweisen vernachlässigt werden.

Der Nachweis der mechanischen Führungsfunktion über die spezifizierte Strecke und die Größenordnung des Schwingfaktors kann durch Erfahrungswerte mit ausgeführten Fahrzeugen erbracht werden. Kann nicht auf Erfahrungen ausgeführter Fahrzeuge und realisierter Gleitpaarungen zurückgegriffen werden, sind im Rahmen der Inbetriebnahme mit dem Betreiber abgestimmte versuchs-technische Überprüfungen durchzuführen.

8.3.4 Lokales mechanisches Tragen

Beim lokalen mechanischen Tragen werden die Tragkräfte an den Tragkufen durch mechanischen Kontakt mit der Fahrweg-Gleitebene abgetragen.

Die an der Schnittstelle zwischen Tragmagnet- und Gleitleiste entstehenden mechanischen Kräfte sind zu berücksichtigen.

Beim lokalen mechanischen Tragen ist zu unterscheiden:

- Absetzen einer Tragkufe infolge Doppelausfall zweier benachbarter Tragregelkreise mit/ohne Entlüftung der Luftfeder.
Anschließend Betrieb mit mechanisch getragenen Schweberahmen über eine projektspezifische, mit dem Betreiber abgestimmte Strecke unter Berücksichtigung des Mechanischen Tragens mit nicht-, teil- oder vollentlüfteten Luftfedern.
Die Kräfte bei geregelter Absetzen sind als statische Kräfte zu berücksichtigen.
Der Stoßfaktor für das geregelte Absetzen Fahrzeug beträgt 1,0 (Erfahrungswert).
- Auflaufen einer Tragkufe auf eine lokale, spezifizierte Eisschicht:
Die entstehenden Lasten in x- und z-Richtung sind über den Lastfall „ungeregeltes Absetzen“ (siehe 8.3.5) abgedeckt und werden nicht gesondert nachgewiesen.

Die maximalen auftretenden Verzögerungen und die Kräfte an der Schnittstelle Fahrzeug- Fahrweg (Reibkräfte) sind projektspezifisch festzulegen und zu berücksichtigen.

Dynamische Kräfte auf die Tragkufen, die beim Gleiten aus den Lagetoleranzen und Versätzen Gleitleiste resultieren, sind durch einen Schwingfaktor von 1,15 zu berücksichtigen.

Der Nachweis der mechanischen Tragfunktion eines Schweberahmens über die spezifizierte Strecke und der Nachweis des Schwingfaktors kann durch Erfahrungswerte mit ausgeführten Fahrzeugen erbracht werden. Kann nicht auf Erfahrungen ausgeführter Fahrzeuge und realisierter Gleitpaarungen zurückgegriffen werden, sind im Rahmen der Inbetriebnahme mit dem Betreiber abgestimmte versuchstechnische Überprüfungen durchzuführen.

Vorgabe für die maximal zulässige Stoßlast:

$F_z = 100 \text{ kN}$ (entspricht einem Stoßfaktor von ca. 2).

Zulässige Eisbelagdicken sind projektspezifisch mit dem Betreiber festzulegen.

Das Auflaufen auf Eisschichten, deren Dicken die zulässigen Werte überschreiten, ist als Kollision mit einem Hindernis zu behandeln. Liegen übertragbare Daten vergleichbarer Konstruktionen vor, können diese angesetzt werden. Ansonsten sind die Lasten und Beanspruchungen durch eine numerische Simulation und/oder einen experimentellen Nachweis zu ermitteln. Die bei Kollision auftretenden Lasten sind nicht für die Dimensionierung zur Lastaufnahmefähigkeit heranzuziehen.

8.3.5 Einseitig ungeregeltes Absetzen von Tragkufen

Der Lastfall behandelt das einseitig ungeregelte Absetzen des MSB-Fahrzeugs auf die Tragkufen (einer Fahrzeugseite) infolge fehlerhaften Kurzschlusses eines Langstator-Motorabschnitts. Die magnetische Rückwirkung der Kurzschlussströme im Langstator führen zu einer reversibel ausgelösten Abschaltung der Tragregelkreise.

Für die maximale Stoßlast / Tragkufe ist die Angabe in Kapitel 8.3.4 zu verwenden.

Vorgabe für den Reibbeiwert:

$\mu_R = 0,3$.

Für die Simulation des einseitig ungeregelten Absetzens sind die Fahrzeughöchstgeschwindigkeit und der maximale Tragkufenspalt (bei Absetzgeschwindigkeit) anzusetzen.

Der Tragkufenspalt setzt sich aus dem statischen Nominalwert und einer Spaltvarianz – resultierend aus der Regeldynamik und den Bauteiltoleranzen – zusammen.

Für die Verteilung der einzelnen Kufenspalt über das Fahrzeug ist ein Gleichzeitigkeitsfaktor von $\psi = 0,8$ anzusetzen.

8.3.6 Schlupf/Pendeln

Schlupf/Pendeln (nicht synchrone Bewegung des MSB-Fahrzeugs mit dem magnetischen Langstator-Wanderfeld) bedingt erhöhte magnetische quasistatische und dynamische Kräfte an der Schnittstelle Tragmagnet-Langstator.

Schlupf / Pendeln ist als Einwirkung zu berücksichtigen.

Vorgabe für Magnetkräfte:

$F_{zTM} = \pm 2,5 \text{ kN/m}$

$F_{xTM} = \pm 2,0 \text{ kN/m}$

Maximale Frequenz 538 Hz.

Der Nachweis des Lastfalls wird durch den Nachweis zum Wechselschrittverfahren gemäß Kapitel 8.2.1.4 abgedeckt.

8.3.7 Reibwertänderung bei gleitendem, abgesetzten MSB-Fahrzeug

Bei umweltbedingten Reibwertänderungen (Fahrwegvereisungen, nasse Fahrbahn usw.) sind lokale Reibwertunterschiede entsprechend der projektspezifisch festgelegten minimalen bzw. maximalen Reibbeiwerte zu berücksichtigen. Die durch die Ungleichverteilung der Schnittstellenlasten eingeleiteten Beanspruchungen sind zu berücksichtigen.

Die unterschiedlichen Reibwerte an den Tragkufen bzw. an den Bremsmagnetgleitplatten haben ungleiche Bremskräfte der einzelnen MSB-Fahrzeugsektionen zur Folge.

Vorgabe für die Reibbeiwertänderung:

$$\Delta\mu_R = 0,3.$$

8.3.8 Halteruck bei Zwangsbremung mit der Sicheren Bremse

Der Halteruck bei Ausgleiten des Fahrzeugs infolge Übergang Gleit- zu Haftreibung an der Schnittstelle Tragkufe / Gleitleiste ist zu berücksichtigen.

Vorgabe für Gleiten Tragkufe:

$$\mu_R = 0,3.$$

Vorgabe für Übergang Gleit- zu Haftreibung:

$$\mu_{TK-GL \rightarrow Haft} = 0,5.$$

Der Reibwert deckt die kurzzeitigen Kraftspitzen des Halteruckes (ca. 100 - 200 ms) ab.

8.3.9 Nutzlastüberschreitung in außergewöhnlichen Betriebssituationen

Stellvertretend für die Nutzlastüberschreitung im Falle außergewöhnlicher Betriebssituationen ist die Evakuierung einer Sektion im Brandfall zu betrachten.

Die Passagiere der zu evakuierenden Sektion werden in die benachbarte Sektion geleitet, so dass die maximale Nutzlast überschritten wird.

Die nachzuweisende erhöhte Gewichtskraft kann infolge der hohen Personendichte als gleichmäßig verteilt angenommen werden.

Vorgabe für MSB-Fahrzeuge:

Alle Sitzplätze belegt, Stehplatzdichte 500 kg/m².

Die Gewichtsvorgaben sind mit dem Betreiber abzustimmen.

8.3.10 Überschreiten der Streckenhöchstgeschwindigkeit

Der Lastfall berücksichtigt das fehlerhafte Überschreiten der Fahrweghöchstgeschwindigkeit durch einen Fehler der Antriebsregelung/-steuerung.

Zum Nachweis des Lastfalls sind die Werte der Beschleunigungen für Kurven- und Wannenfahrt zu erhöhen.

Vorgabe:

Erhöhung Beschleunigungen um 20 %.

Der Einfluss der aerodynamischen Lasten ist separat (keine Lastfallüberlagerung) zu untersuchen.

8.3.11 Schubkraftüberschreitung infolge Antriebsfehler

Folgende Fehler des Antriebs sind zu berücksichtigen:

- Ausfall der Antriebsfunktion einer Fahrwegseite (einseitiger Antrieb), Lasteinleitung in das Fahrzeug auf der gegenüberliegenden Seite; dieser Fehler wirkt wie der Antrieb über Wechselschrittverfahren im Moment des Motorabschnittwechsels.
- Überschreiten der Schubkraft durch den Langstatorantrieb infolge fehlerhafter Steuerung des Langstatorstroms bei gleichmäßiger Verteilung auf die linke und rechte Fahrzeugseite.

Vorgabe: Schubkraft $F_x = 250 \text{ kN}$ je MSB-Fahrzeug (siehe /MSB AG-GESAMTSYS/, Kapitel 9, Punkt 7).

Das infolge der einseitigen Schubkräfteinleitung entstehende Gierrmoment bewirkt eine erhöhte magnetische Kraft an der Schnittstelle Führungsmagnet – Seitenführschiene.

Wegen der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit kann bei diesem Lastfall mit einem Sicherheitsfaktor $S = 1,0$ gerechnet werden.

8.3.12 Einfahren in die Kurzschlusswicklung

Bremsen des MSB-Fahrzeugs durch Einfahren in Bereiche des Langstatorsystems mit Kurzschlusswicklung am Streckenende.

Der Lastfall wird durch die anderen Lastfälle bei Betrieb mit Ausfall bzw. außergewöhnlicher Einwirkung bei Antrieb und Bremsen abgedeckt.

8.3.13 Stand des MSB-Fahrzeugs mit maximaler Querneigung

Zu berücksichtigen ist der Lastfall Anheben / Absetzen / Stehen des MSB-Fahrzeugs nach Worst-Case-Halt in Fahrweg mit maximaler Querneigung.

Der Lastfall „Stand des MSB-Fahrzeugs bei maximaler zu berücksichtigende Windgeschwindigkeit von 37,3 m/s (100-Jahreshöchstwert)“ wird nicht betrachtet. Lasten aus dieser Einwirkung sind für die Dimensionierung der MSB-Fahrzeugstruktur nicht maßgebend, da aus Erfahrung der seitenwindbedingte Staudruck für den 100-Jahre-Höchstwert in 20 m Höhe bei Windlastzone III deutlich unter dem statischen und dynamischen Auslegungsdruck des Wagenkastens liegt. Die je m auf den Fahrweg übertragene Kraft aus dem Staudruck auf das Magnetfahrwerk liegt bei einer betrachteten MSB-Fahrzeughöhe 4,16 m unter der Kraft, die bei stehendem MSB-Fahrzeug bei 16° Fahrwegquerneigung quer zur Längsachse übertragen wird.

Die Haltekräfte in x- und y-Richtung bei längs- und quergeneigtem Fahrweg sind als statische Kräfte zu berücksichtigen.

Maximalwerte: $\alpha = 16^\circ$

8.3.14 Anheben MSB-Fahrzeug bei angefrorenen Tragkufen

Der Lastfall ist nachzuweisen, wenn mit dem Betreiber keine spezifischen Vereinbarungen über zusätzliche Maßnahmen getroffen werden (beheizter Halteplatz usw.).

Die x- und z-Lasten beim Ablösen einer auf der Gleitleiste angefrorenen Tragkufe sind bei den Nachweisen der im Kraftfluss befindlichen Bauteile zu berücksichtigen.

Vorgabe je Tragkufe:

Zugkraft in z-Richtung $F_z = 50,0 \text{ kN}$,

Schubkraft in x-Richtung $F_x = 25,0 \text{ kN}$.

8.3.15 Ausfall Bugluftfeder

Im Betrieb im ausfallfreien Zustand wird der Wagenkasten über alle z-Abstützungen des Wagenkastens gelagert.

Die Lasten an der z-Abstützung (Pendel) ergeben sich aus dem Druck der zugehörigen Luftfeder. Nach Entlüftung einer Luftfeder werden von dem zugeordneten Pendel bei Teilentlüftung reduzierte Lasten, bei Vollentlüftung keine Lasten abgetragen. Die Differenzkräfte werden von den anderen Pendeln durch Lastumlagerung anteilig übernommen.

Für die Dimensionierung des Wagenkastens mit Einbaustruktur ist der Fall Vollentlüftung bei der Bugluftfedern (kraftlose Pendel am Bug) als ungünstigster Lastfall nachzuweisen.

8.4 Kollisionsfälle

Die repräsentativen Kollisionsfälle nach /MSB AG-GESAMTSYS/ bzw. /MSB AG-FZ GEN/ sind numerisch nachzuweisen.

Die Kollisionsfälle sind in den entsprechenden Spezifikationen der Baugruppen zu definieren, sie sind nicht bemessungsrelevant im Sinne dieses Dokumentes.

Zur Auslegung der kollisionsrelevanten Baugruppen ist ein gesondertes Nachweisdokument mit folgenden Zielen zu erstellen:

- Einhalten der in /MSB AG-GESAMTSYS/ genannten Beschleunigungswerte im Wagenkasten,
- keine Gefährdung der Spurführung oder der Standsicherheit des Fahrwegs,
- Fortsetzung der Fahrt nach Kollisionsereignis (kein „Verkeilen“ des Fahrzeugs), Beenden der Passagierfahrt und Fahrt in die Instandhaltung zur Inspektion und Reparatur / Tausch der betroffenen Bauteile,
- Deformationen des Wagenkastens müssen soweit begrenzt bleiben, dass Personen im Fahrgastraum nicht eingeklemmt werden,
- fallbezogene Bewertung wegfliegender Bauteile über eine Risikobetrachtung.

8.5 Transport

Berücksichtigt wird der Transport des MSB-Fahrzeugs ohne Magnetmodule, mit statischen Trag-/ Hebelasten und Stoßlastanteil beim Transport und Montage.

Folgende Einwirkungen sind für die zu transportierenden Fahrzeugkonfigurationen nachzuweisen:

- Anheben mit speziellen Hebevorrichtungen.
- Für den Nachweis Anheben ist ein Faktor 1,1 zu berücksichtigen. Die tatsächlich angehobenen Massen sind zu berücksichtigen.

Die Fahrzeugstruktur muss ohne Magnetmodule (Schweberahmen mit Trag- / Führ- / Bremsmagneten) transportiert werden können.

9 Überlagerung der Lastfälle

9.1 Lastaufnahmefähigkeitsnachweis

Die Lastfälle aus S-Lasten sind für die Nachweise entsprechend Tabelle 4 zu überlagern. Nachzuweisen sind nur die ungünstigsten Kombinationen:

Lasten aus Fahrbetrieb (S-Lasten)	Lastfallkombinationen S								
	1	2	3	4	5	6			
Massenkräfte aus: <ul style="list-style-type: none"> Fahrzeuggewicht aus Kapitel 8.2.1.1 Beschleunigen/Bremsen mit Wechselschrittverfahren mit $a_{x\max} = 1,5 \text{ m/s}^2$ Wannen- bzw. Kuppenfahrt mit $a_{z\max} = + 1,2 \text{ m/s}^2 / -0,6 \text{ m/s}^2$ Freie Seitenbeschleunigung mit $a_{y\max} = 2,0 \text{ m/s}^2$ Fahrdynamik Abgesetztes MSB-Fahrzeug 	X	X	X	X	X	X			
Zwangskräfte infolge Trassierung <ul style="list-style-type: none"> Radius $R_H = 350 \text{ m}$, $\alpha = 0^\circ$ ($v_{Fzg} \leq 100 \text{ km/h}$) Radius $R_H = R_V = \infty$, $\alpha' = 0,15^\circ/\text{m}$ 	X	X	X		X				
Vorspannung infolge Führomagnetlasten	X	X	X	X	X				
Aerodynamische Lasten aus <ul style="list-style-type: none"> Fahrtwind v_{grenz} Fahrtwind v_{max} Seitenwind $v_W = 10,0 \text{ m/s}$ $v_W = 37,3 \text{ m/s}$ Zugbegegnung, Druckbelastung bei v_{grenz} Tunnelfahrt, Druckbelastung bei v_{grenz} (Tunnel) 	X	X			X				
Temperatur	X	X	X	X	X	X			
Schneeansammlung MSB-Fahrzeug (maximal)	X	X	X	X	X	X			

Tabelle 4: Überlagerung der S-Lasten aus Betrieb im ausfallfreien Zustand

Anmerkungen zu Tabelle 4:

Zugbegegnung und Seitenwind werden wegen des Abschattungseffektes nicht überlagert. Der Lastfall Beharrungsfahrt wird in der Überlagerungstabelle nicht berücksichtigt, da die Beanspruchungen aus den Lastfällen Antreiben/Bremsen mit Wechselschrittverfahren größer sind. Bei Fahrgeschwindigkeit $v < 100 \text{ km/h}$ bleiben die Fahrdynamik und die Einwirkungen aus Aerodynamik wegen des vernachlässigbaren Einflusses unberücksichtigt. Falls projektspezifisch relevant, sind Tunnelfahrt und Zugbegegnung zu überlagern.

Folgende Punkte sind zu berücksichtigen:

- Die Lastfallkombinationen aus Betrieb im ausfallfreien Zustand nach Tabelle 4 können in Kombination mit bestimmten Lastfällen bei Ausfall bzw. außergewöhnlicher Einwirkung aus Tabelle 5 auftreten.
- Die Überlagerung erfolgt dabei wegen der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit immer mit höchstens einem der Lastfälle bei Ausfall bzw. außergewöhnlicher Einwirkung.

Die Überlagerungen sind projektspezifisch festzulegen.

Lasten bei Ausfall bzw. außergewöhnlicher Einwirkung (S-Lasten)	
- Zwangsbremmung mit sicherer Bremse bei unsymmetrischer Bremskräfteinleitung bei Ausfall eines Bremsregelkreises	
Ausfall eines Bordnetzes	
- Lokales mechanisches Führen	
- Lokales mechanisches Tragen	
- Einseitig unregelmäßiges Absetzen von Tragkufen	
- Schlupf/Pendeln	
- Reibwertänderung bei gleitendem, abgesetzten MSB-Fahrzeug	
- Halteruck bei Zwangsbremmung	
- Nutzlastüberschreitung in außergewöhnlichen Betriebssituationen (maximales Fahrzeuggewicht gemäß Kapitel 5.4.4)	
- Überschreiten der Streckenhöchstgeschwindigkeit	
- Schubkraftüberschreitung infolge Antriebsfehler	
- Einfahren in die Kurzschlusswicklung	
- Ausfall Bugluftfeder	
- Stand des MSB-Fahrzeugs mit Querneigung $\alpha = 16^\circ$	
- Anheben MSB-Fahrzeug bei angefrorenen Tragkufen	
- Transport/Montagezustände: MSB-Fahrzeug ausgerüstet, ohne Magnetmodule	

Tabelle 5: S-Lasten aus Lastfällen bei Ausfall bzw. außergewöhnlicher Einwirkung

Anmerkungen zu Tabelle 5:

Der Lastfall „Stand des MSB-Fahrzeugs mit Querneigung“ bei maximal trassierter Querneigung $\alpha = 16^\circ$ ist nur für die Tragkufe und ihre Befestigung, für Kräfte in y-Richtung, dimensionierend. Der Lastfall „Anheben MSB-Fahrzeug bei angefrorenen Tragkufen“ ist nur für die Befestigung der Tragkufenbeläge in x- und z-Richtung dimensionierend. Beide Einwirkungskombinationen werden daher gesondert berücksichtigt, ohne Kombination mit anderen Einwirkungen.

Die Kombination des Lastfalls „Reibwertänderung bei gleitendem, abgesetzten MSB-Fahrzeug“ mit Fahrgeschwindigkeit v_{max} tritt nicht auf, da betriebsmäßig das MSB-Fahrzeug nur bei $v_{Fzg} < \text{Absetzgeschwindigkeit}$ abgesetzt wird.

Ebenso tritt die Kombination des Lastfalls „Reibwertänderung bei gleitendem abgesetzten MSB-Fahrzeug“ mit Tunnelfahrt nicht auf, da davon ausgegangen wird, dass der Reibwert der Gleitleiste im Tunnel im Rahmen der üblichen Toleranz konstant bleibt.

9.2 Ermüdungsfestigkeitsnachweis

9.2.1 Dauerfestigkeitsnachweis

Die Lastfälle aus A-Lasten sind für die Nachweise entsprechend Tabelle 6 zu überlagern. Nachzuweisen sind nur die ungünstigsten Kombinationen:

Lasten aus Fahrbetrieb (A-Lasten)	Lastfallkombinationen A					
	1	2	3	4	5	6
Massenkräfte aus:						
• Gesamtgewicht gem. Kapitel 8.1.1.1	X	X	X	X	X	X
• Beschleunigen / Bremsen mit Wechselschrittverfahren, $a_{x\text{mitt}}$	X	X			X	
• Beharrungsfahrt mit Wechselschrittverfahren			X	X		
• Wannen- bzw. Kuppenfahrt mit $a_{z\text{max}} = + 1,2 \text{ m/s}^2 / - 0,6 \text{ m/s}^2$	X	X	X	X	X	
• Freie Seitenbeschleunigung mit $a_{y\text{max}} = 1,5 \text{ m/s}^2$	X	X	X	X	X	
• Fahrdynamik/Schwingfaktor	X	X	X	X	X	
• Abgesetztes MSB-Fahrzeug						X
Zwangskräfte infolge Trassierung						
• Radius $R_H = 1000 \text{ m}$, $\alpha = 12^\circ$, $\alpha' = 0,1^\circ/\text{m}$	X	X	X	X		
Aerodynamische Lasten aus						
• Fahrtwind mit v_{max}	X	X	X	X		
• Seitenwind $v_W = 10,0 \text{ m/s}$	X		X			
• Zugbegegnung, Druckbelastung bei v_{max}		X		X		
• Tunnelfahrt, Druckbelastung bei v_{max} (Tunnel)					X	
Schneeansammlung MSB-Fahrzeug (betrieblich)	X	X	X	X	X	X

Tabelle 6: Überlagerung der A-Lasten aus Betrieb im ausfallfreien Zustand

Anmerkungen zu Tabelle 6:

Zugbegegnung und Seitenwind werden wegen des Abschattungseffektes nicht überlagert. Die Überlagerung A3 und A4 sind durch A1 und A2 abgedeckt. Falls projektspezifisch relevant, sind Tunnelfahrt und Zugbegegnung zu überlagern.

9.2.2 Betriebsfestigkeitsnachweis

Lastkollektive für den Betriebsfestigkeitsnachweis sind - soweit keine übertragbaren Daten früherer Anwendungen zur Verfügung stehen - auf Basis der projektspezifischen Daten mit dem Betreiber bzw. der Zulassungsbehörde abzustimmen.

Der Nachweis ist für die vom Betreiber geforderte Nutzungsdauer zu führen. Dabei sind nicht in allen Fällen die Fahrzeugnutzungsdauer und die Lebensdauer einzelner Baugruppen identisch. Für Baugruppen, deren Lebensdauer geringerer ist als die Fahrzeugnutzungsdauer, sind in Abstimmung mit dem Betreiber Instandhaltungsmaßnahmen (Inspektionsintervalle, Reparatur- und Austauschmaßnahmen, Angaben zur Fehleroffenbarung) abzustimmen. Zur Beurteilung von Bauteilausfällen können bei Bedarf zusätzliche Nachweismethoden wie Ausfalleffektanalysen (FMEA) herangezogen werden.

10 Anlage Beanspruchung von Einbau- und Anbauteilen

Die Prüfkriterien für die Qualifikation der Einbau- und Anbauteile in Bezug auf die Beanspruchbarkeit gegen Einwirkungen „Schwingen/Schocken“ wird mit Bezug auf /DIN EN 61373/ und /MSB AG-UMWELT/ nachfolgend angegeben.

10.1 Definition der Umwelträume

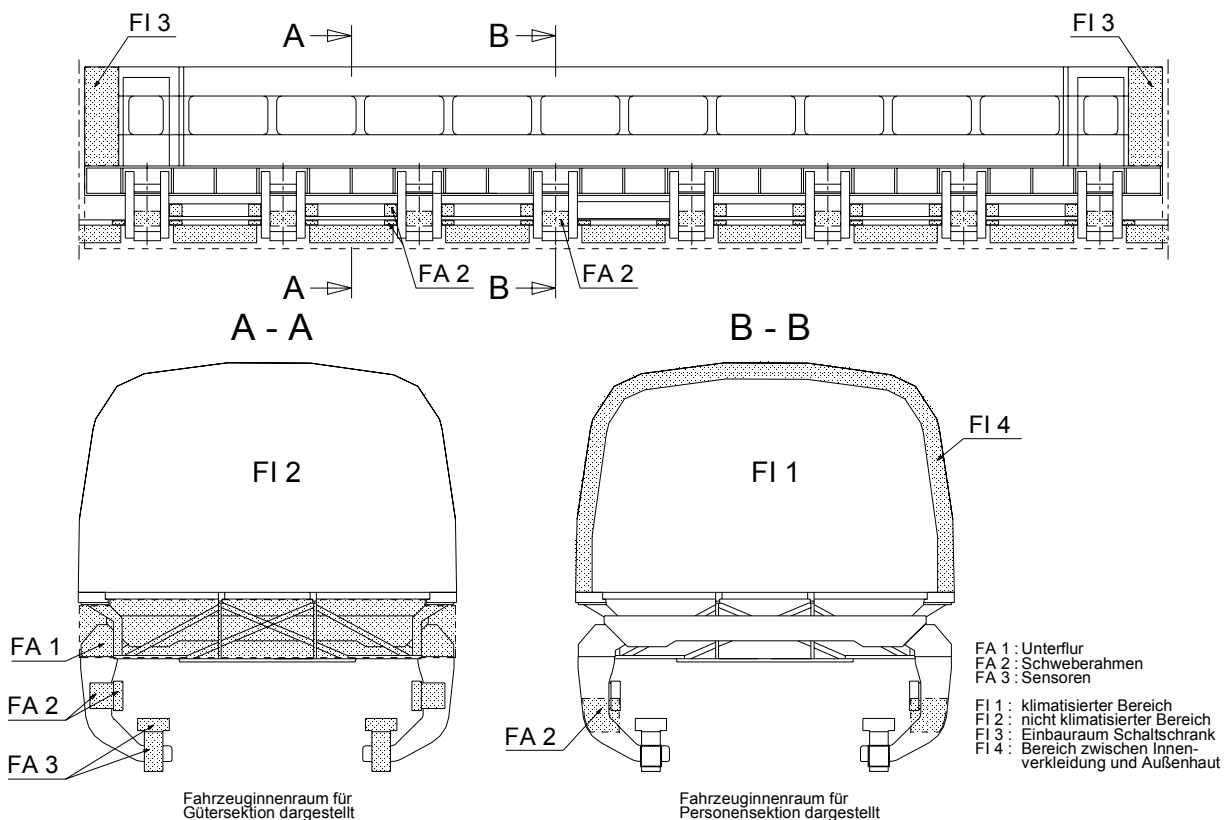
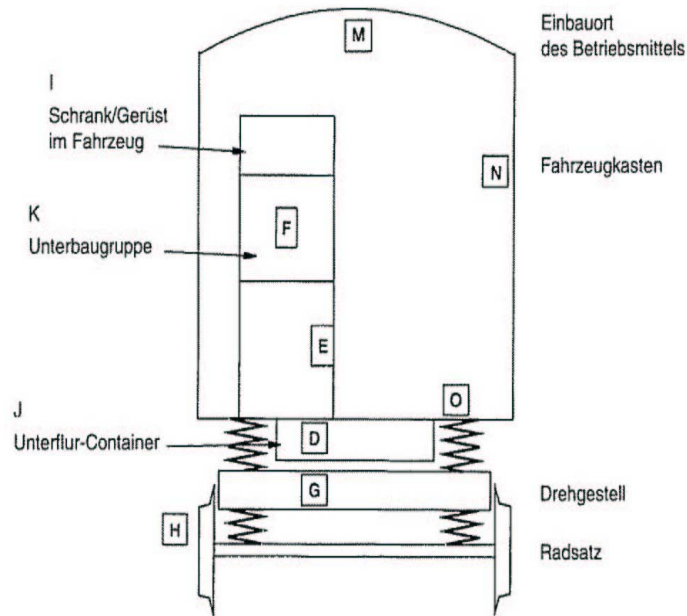


Abbildung 4: Umwelträume aus /MSB AG-UMWELT/



Kategorie	Lage	Beschreibung des Einbauortes des Betriebsmittels
1 Klasse A	M, N, O, I und J	Beschreibt Bauteile/Betriebsmittel, die unmittelbar auf oder im Fahrzeugkasten befestigt sind.
1 Klasse B	D	Beschreibt Bauteile/Betriebsmittel, eingebaut in einem Container, der im Unter- gestell am Fahrzeugkasten befestigt ist.
1 Klasse B	K und E	Beschreibt Bauteile/Betriebsmittel, eingebaut in einem großen Schrank/Gerüst, der am Fahrzeugkasten befestigt ist.
1 Klasse B	F	Beschreibt Bauteile/Betriebsmittel als Bestandteil einer Unterbaugruppe, einge- baut in einem Schrank/Gerüst, der am Fahrzeugkasten befestigt ist.
2	G	Kästen, Bauteile/Betriebsmittel, die am Drehgestell eines Bahnfahrzeuges befe- stigt sind.
3	H	Kästen, Bauteile/Betriebsmittel, die am Radsatz eines Bahnfahrzeuges befestigt sind.

Abbildung 5: Umwelträume (Kategorien) aus /DIN EN 61373/

MSB-Ausführungsgrundlage Gesamtsystem, Anlage 3 MSB – Umwelträume /MSB AG-UMWELT/	/DIN EN 61373/
Umweltraum	Kategorie
FA 3	Kategorie 3
FA 2	Kategorie 2
FA 1	Kategorie 1 Klasse B
FI 1 – FI 4	Kategorie 1 Klasse A bzw. Klasse B

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Einbauräume

10.2 Prüfpegel

Die für die Beanspruchung der Einbau- und Anbauteile durch „Schwingen/Schocken“ relevanten Einwirkungen auf den Umweltraum resultieren aus Messungen an den Fahrzeugen TR07, TR08 und Transrapid Shanghai.

Die auf Grundlage der Ergebnisse dieser Messungen ermittelten Einwirkungen sind in Tabelle 8 angegeben. Die Werte in Tabelle 8 sind als Prüfpegel für die Funktionsprüfung der Baugruppen heranzuziehen. Die Prüfpegel und die Prüfdauer für die Lebensdauerprüfung sind auf Basis der /DIN EN 61373/ abzuleiten.

Bei modifizierten Komponenten bzw. Konfigurationen der Fahrzeug- und Fahrwegtechnik sind die in der folgenden Tabelle angegebenen Werte zu verifizieren.

Umwelt- raum Kategorie	Richtung	Beschleuni- gungspegel (FRTL-Pegel gemäß /DIN EN 61373/) [m/s ²]	Prüfpegel der Lebensdauer- prüfung als Ef- fektivwert [m/s ²]	Prüf- dauer [h]	Prüf- frequenz [Hz]
FA 1 Kat 1/ KI B	Längs (x)	0,20	1,6	5	10 – 150
	Quer (y)	0,45	3,6	5	
	Vertikal (z)	0,75	6,0	5	
FA 2 Kat 2	Längs (x) ¹⁾	1,0	8	5	10 - 1600
	Quer (y) ¹⁾	4,0	32	5	
	Vertikal (z) ¹⁾	5,0	40	5	
FA 3 Kat 3	Längs (x) ¹⁾	25,0	100	73	10 – 1600
	Quer (y) ¹⁾	30,0	100	152	
	Vertikal (z) ¹⁾	30,0	100	152	
FI 1-4 Kat 1/ KI A Kat 1/ KI B	Längs (x)	0,20	1,6	5	10 -150
	Quer (y)	0,45	3,6	5	
	Vertikal (z)	0,75	6,0	5	
Spitzenbeschleunigung					
			[m/s²]	Schock- dauer [ms]	
Alle	senkrecht	300		11	
	quer	300		11	
	längs	300		11	

¹⁾ Prüffrequenz für gesamten Trag- bzw. Führmagnet entsprechend DIN EN 61373

Tabelle 8: Prüfpegel Schwingen/Schocken