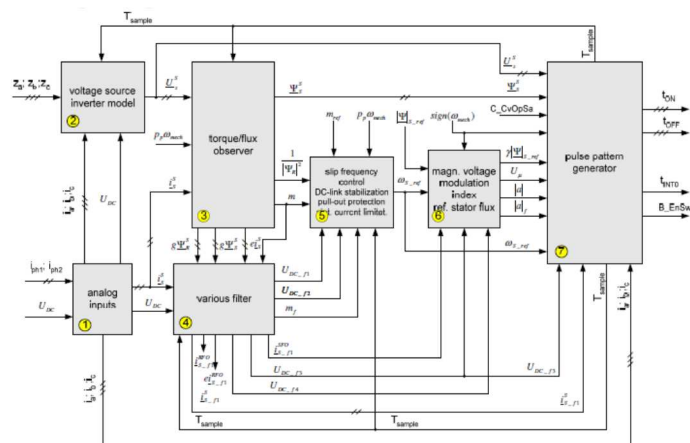
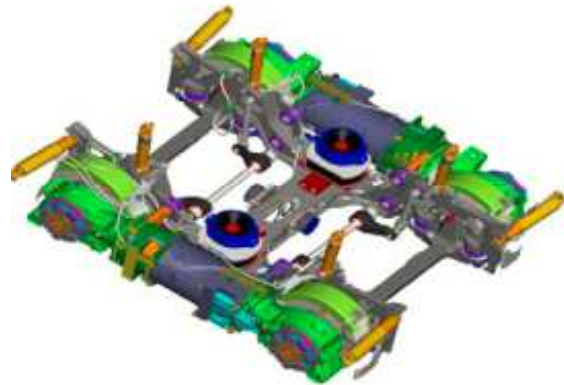


Lehrbrief

Elektrische Bahnfahrzeuge

Masterstudiengang



Referenten:
 Prof. Dr. Hans-Peter Bauer
 Dipl. Ing. (FH) Michael Ruffer

1	GRUNDLEGENDES	4
2	HISTORIE	4
3	REGELWERKE	6
4	FAHRDYNAMIK	8
5	EINSATZBEDINGUNGEN	11
5.1	STRECKENTOPOLOGIE	11
5.2	UMGRENZUNG DES LICHTEN RAUMES / LICHTRAUMBEDARF	11
5.3	FAHRWEG	12
5.4	SONSTIGE KOMPATIBILITÄTEN ZUR INFRASTRUKTUR	12
5.5	UMGEBUNGSBEDINGUNGEN	12
6	DER MECHANISCHE TEIL	13
6.1	WAGENKASTEN	13
6.1.1	Anforderungen	13
6.1.2	Materialien	14
6.1.3	Bauweisen	16
6.1.4	Einbautechnik	18
6.1.5	Innenraumausbau	18
6.2	LAUFWERKE	19
6.2.1	Laufruhe	20
6.2.2	Achsfolgekennzeichnung	21
6.2.3	Anforderungen	20
6.2.4	Spurführung, Radsatz	21
6.2.5	Fahrwerke	23
6.2.6	Drehgestelle	24
6.3	ANTRIEBSBAUFORMEN	25
6.4	BREMSE	27
6.4.1	Druckluftbremse	30
6.4.2	Elektrodynamische Bremse	31
6.4.3	Scheibenbremse	32
6.4.4	Magnetschienenbremse	32
6.4.5	Wirbelstrombremse	32
6.5	FAHRGASTTÜRSYSTEME	33
6.6	KUPPLUNGSEINRICHTUNGEN	34
7	DER ELEKTRISCHE TEIL	35
7.1	SPEISESPANNUNG, SPANNUNGSEBENEN	35
7.2	SCHUTZMASSNAHMEN	35
7.3	KÜHLUNG	36
7.4	HAUPTSTROMKREIS	37
7.5	STROMZUFÜHRUNG	38
7.5.1	Stromabnehmer	38
7.5.2	Stromschiene	39
7.5.3	Stromschleifer im Fahrweg	40
7.5.4	Induktive Leistungsübertragung (Primove)	41
7.5.5	Fahrzeuginterne Energiespeicher	42
7.5.6	Mehrsystemkonzepte	44
7.5.6.1	15kV-Einspeisung	44
7.5.6.2	Dieselektrischer Betrieb	45
7.6	ÜBERSPANNUNGSABLEITER	47
7.7	LEISTUNGSSCHALTER, LEISTUNGSSICHERUNG	47
7.8	TRANSFORMATOR	49
7.9	ANTRIEBSSYSTEM	49
7.9.1	Einteilung nach Art der Einspeisespannung	49
7.9.2	Direkteinspeisung	51

7.9.3	Einspeisung über Umformer.....	52
7.9.3.1	Halbleiterventile	55
7.9.3.2	Stromrichterregelung	56
7.9.3.3	Stromrichterschutz	58
7.9.4	Antriebseinheit.....	58
7.10	BORDNETZ	59
7.10.1	Bordnetztopologie.....	60
7.10.2	Hilfsbetriebeumformer	61
7.10.3	Batterie	61
7.10.4	Bordnetzenergiebilanz.....	62
7.11	HILFSBETRIEBE.....	62
7.12	LEITTECHNIK.....	62
7.13	SICHERHEITSEINRICHTUNGEN.....	65
7.13.1	Sicherheitsfahrerschaltung (SIFA).....	65
7.13.2	Zugsicherungseinrichtungen	65
7.13.2.1	Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB)	65
7.13.2.2	Linienzugbeeinflussung (LZB).....	66
7.13.2.3	European Train Control System (ETCS).....	67
7.14	HEIZUNG / KLIMA / LÜFTUNGSANLAGE (HKL).....	67
7.15	NACHRICHTENTECHNIK	68
7.15.1	Kommunikation Fahrzeug / Leitstelle	69
7.15.2	Kommunikation Fahrzeug / Fahrweg.....	69
7.15.3	Fahrgastinformation.....	69
7.15.4	Fahrzeug-IT	70
7.16	STROMRÜCKFÜHRUNG	71
7.16.1	Betriebserdung	72
7.16.2	Schutzerdung.....	72
8	GERÄUSCHE.....	73
9	BRANDSCHUTZ	74
10	ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKET (EMV).....	74
11	SICHERHEITSANFORDERUNGEN.....	74
12	ÖKOBILANZ UND RECYCLEBARKEIT	76
13	INSTANDHALTUNG	76
14	SONDERTHEMEN.....	78
14.1	FAHREN OHNE FAHRZEUGFÜHRER.....	78
14.2	ZWEISYSTEMBETRIEB	80
14.3	FAHRERASSISTENZSYSTEME.....	82
15	BEISPIELE ELEKTRISCHER SCHIENENFAHRZEUGE	84
15.1	STRAßENBAHN AVENIO.....	84
15.2	ZWEISYSTEMFAHRZEUG EBO / BOSTRAB ET 2010 KARLSRUHE.....	87
15.3	E-LOK BR 189.....	89
15.4	ELEKTRISCHER HOCHGESCHWINDIGKEITSTRIEBZUG BR 403 / 406.....	94
16	LITERATURVERZEICHNIS.....	98
17	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	99

1 GRUNDLEGENDES

Dieser Lehrbrief soll Ihnen aufbauend auf der Wahlpflicht-Vorlesung „Elektrische Bahnen“ des Bachelorstudienganges „Elektrotechnik / Informationstechnik“ an der Hochschule Darmstadt ein vertieftes Wissen zum Schwerpunkt „Elektrische Bahnfahrzeuge“ vermitteln.

Der Lehrstoff wird zuerst nach Fachthemen allgemein zugeordnet, bevor er anhand von Beispielen aktueller elektrischer Bahnfahrzeuge in der praktischen Anwendung dargestellt wird.

Kenntnisse in den Bereichen elektrische Maschinen und Leistungselektronik werden vorausgesetzt.

2 HISTORIE

Die Geschichte der Eisenbahn ist stark mit dem elektrischen Antrieb verbunden. Die erste Elektrolok wurde 1879 von Werner von Siemens für die Berliner Gewerbeausstellung gebaut und dort betrieben. Sie erreichte mit drei Wagen immerhin eine Geschwindigkeit von 7 km/h und einer Leistung von 2,2 kW.



Abbildung 2.1: Die erste Elektrolok im Jahre 1879 (Quelle: Wikipedia)

Der Weg zum Elektroantrieb war allerdings nicht selbstverständlich. Eisenbahnen entwickelten sich nach ihrer Einführung im Jahre 1825 zuerst komplett in Richtung Dampftraktion, innerstädtisch wurden Bahnen von Pferden gezogen. Der Elektroantrieb war aber aufgrund seiner spezifischen Leistungsfähigkeit und Emissionsfreiheit von Beginn an für den Antrieb von Schienenbahnen erstrebenswert.

Nach der erwähnten ersten Elektrolok im Jahre 1879 folgte 1881 die erste elektrische Straßenbahn, 1895 die erste Eisenbahn-Lokomotive.

Innerstädtisch mussten nur kurze Entfernungen überbrückt werden, zudem sollten die Fahrzeuge aufgrund der Erfordernisse des Straßenverkehrs möglichst leicht (Verzicht z.B. auf einen Trafo) und einfach sein. Es setzte sich die bis heute angewendete Gleichspannungsversorgung durch.

Bei Eisenbahnen mussten von Beginn an weite Entfernungen überbrückt und elektrisch versorgt werden, was bei Gleichspannungsspeisung schwieriger als bei Wechsellspannungsspeisung ist, da keine Spannungstransformation möglich ist

(Leitungsverluste). Daher setzte sich hier langsam die Wechselspannungsspeisung mit reduzierter Landesnetzfrequenz durch, Neubaunetze werden heute mit Landesnetzfrequenz elektrifiziert.

Einen Abriss der Meilensteine, die die Bahnentwicklung beeinflussten, gibt die folgende Zusammenstellung:

Altertum	Rillen in Granitplatten - erste Anwendungen der Zwangsführung der Wagen durch eine Spurbahn
16. Jahrhundert	Hölzerne Schienen in englischen Bergwerken, Spurkranz
18. Jahrhundert	Eiserner Schienenstrang in englischen Bergwerken, Pferdeisenbahn
1825	Erste Eisenbahnlinie des öffentlichen Verkehrs, Stockton-Darlington (England), von Stephenson gebaut. Spurweite: 4' 8½" (1435 mm) noch heute als "Normalspur" gebräuchlich
1835	Erste Eisenbahn in Deutschland eröffnet: Nürnberg - Fürth
1872...1882	Bau der Gotthardbahn (Schweiz) als Alpentransversale mit 15 km langem doppelspurigen Tunnel
1879	Erste elektrische Lokomotive von Werner von Siemens für die Berliner Gewerbeausstellung gebaut: Geschwindigkeit mit 3 Wagen: 7 km/h, 2,2 kW, Speisung: 150V (DC)
1881	Erste elektrische Bahn: Straßenbahn in Berlin von Werner von Siemens gebaut.
1895	Erste elektrische Vollbahn-Lokomotive von General Electric Co. für Baltimore & Ohio Railroad, USA
1899	Erste drehstromgespeiste Vollbahn-Lokomotive von Brown, Boveri & Cie für die Burgdorf-Thun-Bahn, Schweiz
1903	Schnellfahrversuche in Deutschland mit Drehstrom-Triebwagen von AEG und Siemens. 210 km/h erreicht,
1905...1909	Versuche mit Einphasen-Wechselstrom verminderter Frequenz in der Schweiz und Deutschland, Entwicklung des Einphasen-Bahnmotors für Wechselstrom 16 2/3 Hz durch die Maschinenfabrik Oerlikon (Schweiz)
1908	Erste Diesellokomotive, entwickelt von Rudolf Diesel
1918	Beschluss der allgemeinen Elektrifizierung der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB), maßgeblich durch Kohleknappheit im ersten Weltkrieg beeinflusst
1936	Versuche mit verschiedenen Lokomotiven für Einphasen-Wechselstrom unverminderter Frequenz (50 Hz) auf der Höllentalbahn (Deutschland)
1952	Beginn der Elektrifizierung mit Einphasen-Wechselstrom von 50 Hz in Frankreich (Strecke Valenciennes-Thionville)
1960	Vollelektrifizierung der SBB abgeschlossen: Über 99% der Strecken auf elektrischen Betrieb umgestellt.
1964	Die Japanischen Eisenbahnen fahren fahrplanmäßig zwischen Tokio und Osaka mit 210 km/h
1972...1991	Entwicklung einer Magnetschnellbahn mit Linearantrieb für Geschwindigkeiten bis 500 km/h in Deutschland
1987...1994	Bau des Ärmelkanal-Tunnels mit zwei Einspurröhren Länge: 50 km
2007	Geschwindigkeitsrekord für konventionelle Schienenfahrzeuge: 574,79 km/h (modifizierter TGV V150, Frankreich)

Zusammengefaßt hat die Elektrotraktion für den Betrieb von Schienenbahnen signifikante betriebliche und wirtschaftliche Vorteile, die sie insbesondere in der heutigen Zeit unverzichtbar machen:

- Große Transportleistung bei verhältnismäßig geringem Gewicht, da Energievorräte nicht mitgeführt werden müssen (Fahrleitung)
- Hohe Überlastbarkeit des Elektroantriebs, hohe Maximalleistung (bis ca. 10 MW)

- Große Zugkräfte, damit verbunden große Anfahrbeschleunigung, höhere Geschwindigkeit und schwerere Züge möglich.
- Folge: Fahrplanverdichtung, Steigerung der Streckenbelastung
- Geringe Stillstandszeiten für Wartung und Bevorratung
- Wirtschaftliche Langläufe
- Hohe Zuverlässigkeit: große störungsfreie Laufleistung
- Mögliche Verminderung des Fahrparks
- Mögliche Personalverminderung (Unterhalt und Führer)
- Geringere Unterhaltskosten

Energie und Umwelt:

- Elektrische Bremse ist möglich
- Energierückgewinnung beim Bremsen ist möglich
- Geringerer spezifischer Energieverbrauch (Verhältnis vor Ort von Dampf/Diesel/Elektrizität: 12/3/1)
- Alle Primärenergieformen verwendbar. Damit unabhängig vom Öl
- Keine Schadstoffemission vor Ort. Bei Wärmegroßkraftwerken Einsatz von Filtern möglich. Keine Emissionen bei Verwenden regenerativer Energie (z.B. Wasserkraft)
- Geringere Lärmemissionen

3 REGELWERKE

Bahnfahrzeuge unterliegen Regelwerken, die sich an ihrem Einsatzzweck orientieren. Daher ist es sinnvoll, zuerst nach ihrem Verwendungszweck zu unterscheiden:

- Voll - oder Eisenbahnen
 - S-Bahn
 - Regionalverkehr
 - Fernverkehr
 - Hochgeschwindigkeitsverkehr
 - Güterverkehr
- Nahverkehrsbahnen
 - Straßen- oder Stadtbahnen
 - U- oder Hochbahnen
 - Schwebbahnen
 - Vollautomatische Zubringerbahnen z.B. an Flughäfen (People-Mover)

Nahezu überall auf der Welt bildet das Eisenbahnregelwerk der Fernbahnen auch die Basis des Nahverkehrsregelwerkes, das dann bedarfsgerecht z.B. an Straßenbahnanforderungen angepasst wird.

In Deutschland liegt die weltweit einzigartige Situation vor, dass jeweils eigenständige Regelwerke für beide Systeme existieren. Sie sind national wie folgt gegliedert:

- Eisenbahnen → „Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG)“ mit unterlagerter Rechtsverordnung „Eisenbahnbau- und Betriebsordnung (EBO)“
- Nahverkehrsbahnen → „Personenbeförderungsgesetz (PBefG)“ mit unterlagerter Rechtsverordnung „Bau- und Betriebsordnung für Straßenbahnen (BOStrab)“

EBO und BOStrab geben national die exekutiven Vorgaben zur Erbringung eines sicheren Betriebes mit Schienenfahrzeugen, die von den jeweiligen Verkehrsunternehmen umgesetzt werden müssen.

Die Einhaltung der Vorschriften wird von sogenannten „Aufsichtsbehörden“ überwacht, die bei der Eisenbahn entweder beim Bund oder beim Bundesland und bei Nahverkehrsbahnen immer beim Bundesland angeordnet sind.

Insbesondere bei den Eisenbahnen findet in den letzten Jahrzehnten eine immer stärkere internationale Verknüpfung statt (siehe durchgängige Güterzüge von Deutschland nach China oder auch den Kanaltunnel von Frankreich nach Großbritannien). Man nennt dies „Interoperabilität“.

Insbesondere die Europäische Union (EU) spielt hier mit ihren Vorgaben zum interoperablen Eisenbahnverkehr innerhalb ihrer Binnengrenzen eine Vorreiterrolle, die Vorgaben hierzu werden in sogenannte „technische Spezifikationen zur Interoperabilität (TSI)“ gefasst und sind auf „interoperablen Trassen“ (Hauptstrecken des grenzüberschreitenden Verkehrs) verbindlich. Die Vorgaben können betrieblicher und technischer Natur sein.

Grundsätzlich liegen technische Vorgaben zur Dimensionierung von elektrischen Schienenfahrzeugen rudimentär in den genannten Rechtsvorschriften EBO und BOStrab vor. Die ingenieurstechnische Detaildefinition der Fahrzeugkomponenten erfolgt auf Basis nationaler oder internationaler Normen, wobei hier in Europa folgende Normenkreise zu beachten sind:

- Nationale Normen wie z.B. „Deutsche Industrienorm (DIN)“ oder „Norm Francaise (NF)“
- Europäische Normen (EN)
- Normen des internationalen Eisenbahnverbandes (UIC)

Die folgende Abbildung zeigt die Zusammenhänge und Hierarchie zwischen den verschiedenen Regelwerken auf.

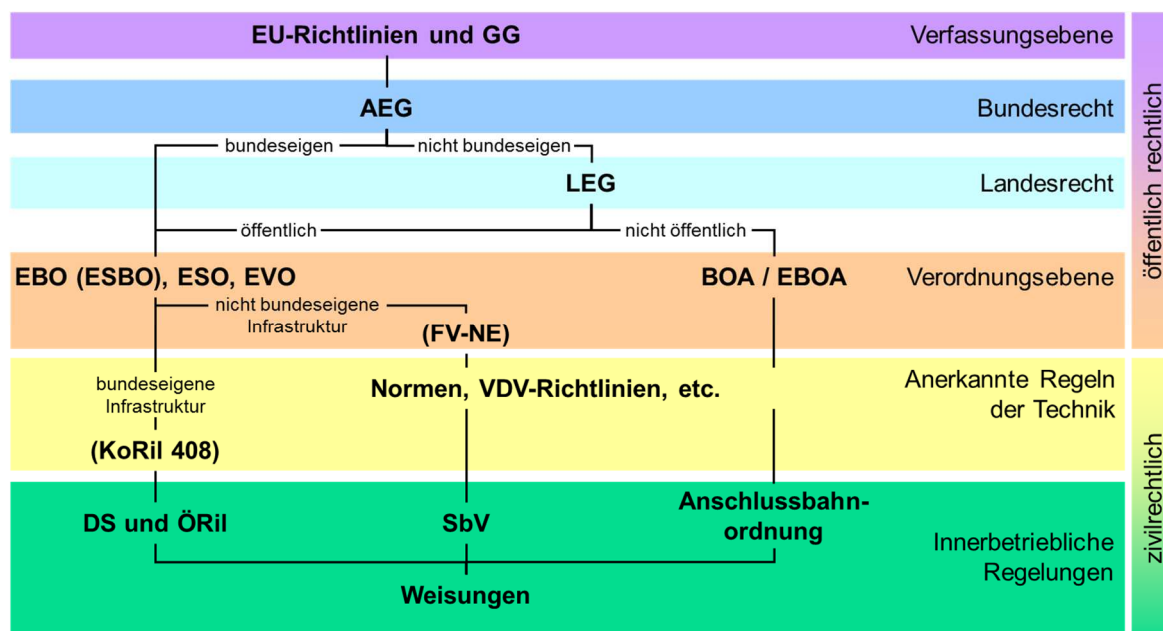


Abbildung 3.1: Regelwerkshierarchie (Quelle: DB)

4 FAHRDYNAMIK

Wie jedes andere Fahrzeug auch müssen Schienenfahrzeuge an ihre jeweilige Traktionsaufgabe angepasst sein, z.B.

- Güterlokomotive: Hohe Anfahrzugkraft, geringe Endgeschwindigkeit
- ICE: Moderate Beschleunigung / Verzögerung a [m/s^2], hohe Endgeschwindigkeit
- U-Bahn: Hohe Beschleunigung / Verzögerung a [m/s^2], moderate Endgeschwindigkeit

Diese fahrdynamischen Anforderungen an die jeweils zu konstruierenden Schienenfahrzeuge werden in der Projektierungsphase vom Hersteller aus dem Kundenlastenheft entnommen. Auf dieser Basis werden nach

$$F = m * a$$

F = Zug- / oder Bremskraft F [kN]
 a = Beschleunigung / Verzögerung a [m/s^2]
 m = Masse [t]

Zug- und Bremskräfte projiziert, die das Schienenfahrzeug gemäß Anforderung beschleunigen oder verzögern. Diese Zug- und Bremskräfte müssen das Schienenfahrzeug beschleunigen oder abbremsen, aber auch die immer vorhandenen Fahrwiderstände überwinden:

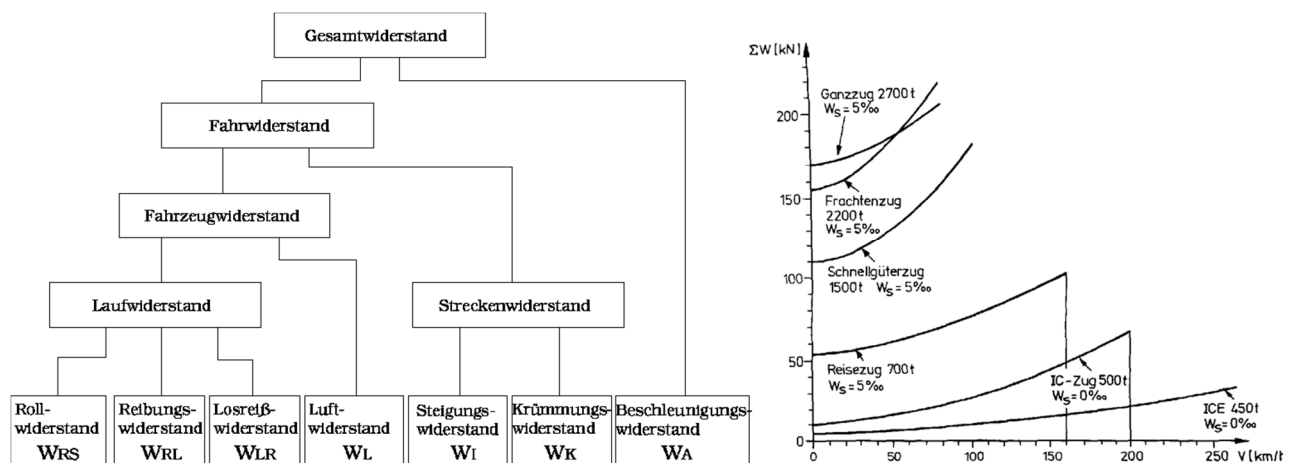


Abbildung 4.1: Bewegungswiderstände (Quelle: Script Elektrische Bahnen h_da)

Zu beachten ist dabei, dass nach

$$\mu_{\text{Benötigt}} = \frac{F}{m * g}$$

g = Erdbeschleunigung $9,81 \text{ m/s}^2$

der jeweils benötigte Kraftschlussbeiwert $\mu_{\text{Benötigt}}$ stets unter den örtlich zu erwartenden Kraftschlussbeiwerten μ projiziert wird, da es sonst im Betrieb zu nicht zulässigen Gleit- oder Schleudervorgängen kommen wird. Es soll daher für einen ordnungsgemäßen Betrieb immer gelten:

$$\mu_{\text{Benötigt}} \ll \mu$$

Dabei sind folgende grundlegenden Gesetzmäßigkeiten zu beachten: Der erzielbare Kraftschlussbeiwert ist abhängig von der

- Fahrgeschwindigkeit (Versuchsergebnisse von Curtius / Kniffler)

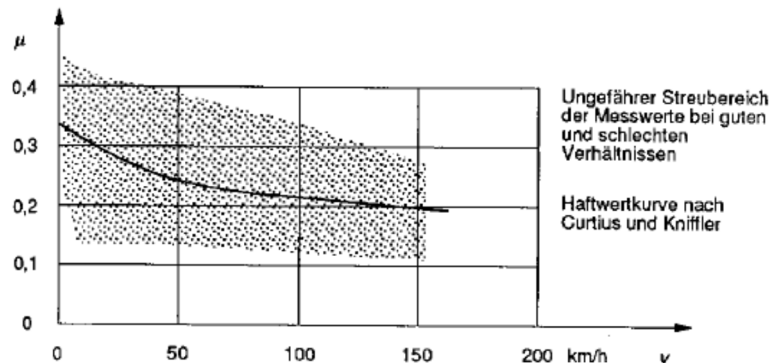


Abbildung 4.2: Kraftschluss über Geschwindigkeit nach Curtius / Kniffler
(Quelle: Script Elektrische Bahnen h_da)

- Differenzgeschwindigkeit w_x zwischen Fahrzeug und Radumfang (Schlupf)

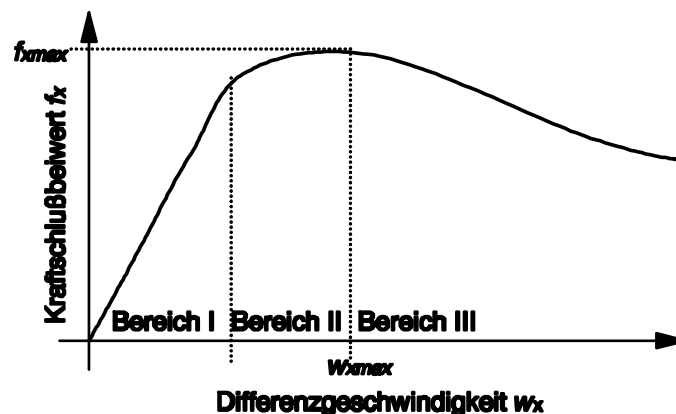


Abbildung 4.3: Kraftschluss / Schlupf-Kurve (Quelle: Script Elektrische Bahnen h_da)

Die mechanische Leistung am Rad kann wie folgt errechnet werden:

$$P_{mechanisch} = F * v$$

Somit ist die für die Fahrdynamik eines Schienenfahrzeuges entscheidende Größe das sogenannte „Einsatzdiagramm“, d.h. die Darstellung der Zug- und Bremskraft über der Geschwindigkeit (daher auch als „Z-v-Diagramm“ bezeichnet).

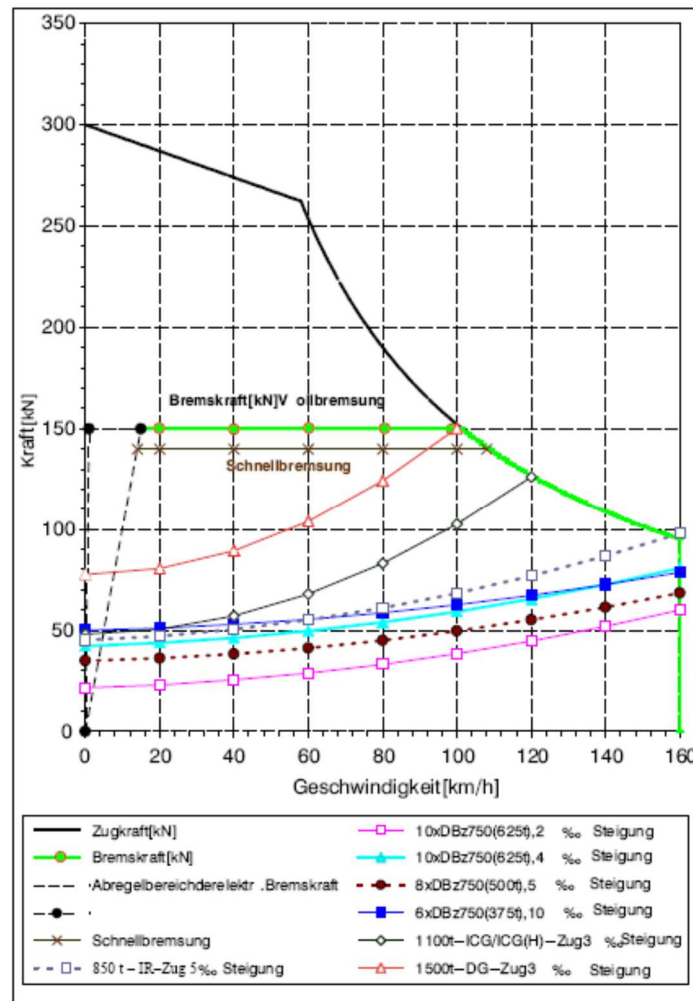


Abbildung 4.4: Einsatzdiagramm E-Lok BR 146 (Quelle: Bombardier)

Die notwendige elektrische Leistungsfähigkeit der zu projektierenden Komponenten kann wiederum direkt aus der mechanischen Leistung am Rad errechnet werden:

$$P_{elektrisch} = P_{mechanisch} * n$$

Diese Beziehung ist ausschlaggebend für Größe, Masse und Kühlungsanforderungen einer elektrischen Antriebskomponente im Schienenfahrzeug. Je größer die im elektrischen Triebfahrzeug umgesetzte elektrische Leistung, desto

- voluminöser und schwerer werden die elektrischen Unterkomponenten
- höher werden die Anforderungen an deren Kühlung
- anspruchsvoller werden die Anforderungen an ihre Ansteuerung, Regelung oder Schutzmechanismen gegen Überlastung

Im Folgenden werden wir diese Beziehungen genauer betrachten.