

Forschungsarbeiten
des Verkehrswissenschaftlichen Instituts
an der Universität Stuttgart

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. G. Heimerl
Bericht 19

Dr.-Ing. Eberhard Hohnecker

**Zukunftssichere Trassierung
von
Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsstrecken**

1993

ISBN 3-922203-19-1

Inhaltsverzeichnis	Seite
Titel	1
Vorwort des Herausgebers	3
Vorwort des Verfassers	4
Inhaltsverzeichnis	5
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	11
1. Aufgabenstellung/Ziele	13
1.1 Einführung	13
1.2 Ziel der Untersuchung	15
1.3 Durchführung der Untersuchung	17
2. Bisherige Entwicklungen von Fahrweg und Fahrzeug	19
2.1 Entwicklung bis 1970	19
2.2 Entwicklungen in der Bundesrepublik Deutschland ab 1970	20
2.3 Internationale Hochgeschwindigkeitsverkehrs-Planung	22
3. Grundlagen für die integrierte Betrachtung von Fahrweg und Fahrzeug	25
3.1 Fahrweg	27
3.1.1 Oberbau	27
3.1.1.1 Schotteroberbau	27
3.1.1.2 Feste Fahrbahn	29
3.1.2 Kräfteeinwirkungen auf den Oberbau	31
3.1.3 Quasistatische Betrachtung der dynamischen Einwirkungen bei der Fahrt durch einen Gleisbogen	32
3.1.3.1 Quasistatische Betrachtung der dynamischen Einflußfaktoren der Gleis- und Fahrzeugparameter	32
3.1.3.2 Quasistatische Betrachtung der dynamischen Einflußfaktoren der Gleis- und Fahrzeugparameter bei GSt-Fahrzeugen	35
3.1.3.3 Dynamische Einflußfaktoren auf den Fahrgast	36
3.1.3.4 Quasistatische Betrachtung der dynamischen Einflüsse im Kreisbogen sowie der Unstetigkeiten in der Gleislage	37
3.1.3.5 Subjektives Empfinden der Querb beschleunigung im Kreisbogen sowie der Unstetigkeiten in der Gleislage durch den Fahrgast	38
3.1.3.6 Quasistatische Betrachtung der dynamischen Einflüsse im Übergangsbogen	42
3.1.3.7 Subjektives Empfinden der Querb beschleunigung im Übergangsbogen durch den Fahrgast	44
3.1.3.8 Subjektives Empfinden der Querb beschleunigung im Übergangsbogen bei GSt-Fahrzeugen durch den Fahrgast	46
3.1.4 Quasistatische Betrachtung der dynamischen Einwirkungen auf den Fahrgast in Wannen bzw. Kuppen	48
3.1.4.1 Allgemeines	48
3.1.4.2 Subjektives Empfinden der Vertikalbeschleunigung in Wannen bzw. Kuppen durch den Fahrgast	49
3.1.5 Streckenwiderstände	51
3.1.6 Folgerungen für die Fahrweggestaltung	52
3.2 Fahrzeug	53

3.2.1	Einflüsse auf die Leistung	53
3.2.2	Haftreibung	54
3.2.2.1	Reibungsmodell	55
3.2.2.2	Ergebnisse experimenteller Untersuchungen	56
3.2.2.2.1	Schlupfverlauf	56
3.2.2.2.2	Witterungsbedingte Schwankungen	57
3.2.2.2.3	Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter Haftreibungswerte	58
3.2.2.2.4	Betrachtung der Einflußfaktoren auf den Haftreibungsbeiwert	60
3.2.2.3	Haftreibungsabhängige Bremsen	65
3.2.3	Fahrwiderstand	65
3.2.4	Zugkraftüberschuß	67
3.2.5	Übertragbare Leistung	67
3.2.6	Beschleunigungsvermögen	68
3.2.6.1	Allgemeines	68
3.2.6.2	Subjektives Empfinden der horizontalen Längsbeschleunigung bzw. -verzögerung des Fahrzeugs durch den Fahrgast	70
3.2.7	Kinetische Energiehöhe i	72
3.2.8	Antriebsvarianten für Hochgeschwindigkeits-Züge	74
3.2.8.1	Lokbespannte Züge	74
3.2.8.2	Triebkopfzüge	74
3.2.8.3	Triebwagen	75
3.2.9	GSt-Hochgeschwindigkeits-Fahrzeuge	75
3.2.10	Leistungsbedingte Grenzgeschwindigkeit	76
3.2.10.1	Ungefederte Massen	77
3.2.10.2	Fahrmotoren - spezifisches Leistungsgewicht	77
3.2.11	Vergleich der technischen Entwicklungen elektrischer Triebfahrzeuge und Antriebseinheiten	78
3.2.12	Laufwerke für Hochgeschwindigkeits-Fahrzeuge	79
3.2.12.1	Konventioneller Radsatz	79
3.2.12.2	Radial einstellbare Räder	80
3.2.13	Bremssysteme	81
3.2.13.1	Allgemeines	81
3.2.13.2	Bremssysteme für Hochgeschwindigkeits-Züge	82
3.2.14	Güterverkehr auf Neubaustrecken	84
3.2.14.1	Laufwerke für den schnellen Güterverkehr	84
3.2.14.2	Bremstechnik für schnelle Güterzüge	85
3.2.14.3	Anhängelasten im schnellen Güterverkehr	85
3.2.15	Folgerungen aus den Fahrzeugeinflüssen auf die Fahrweggestaltung	86
3.3	Wechselwirkungen zwischen Fahrweg und Fahrzeug	88
3.3.1	Überlagerte Beschleunigungen	88
3.3.1.1	Zweidimensionale Betrachtung	89
3.3.1.2	Dreidimensionale Betrachtung	90
3.3.2	Wechselwirkungen aus Neigung und Haftreibung	91
3.3.2.1	Optimierung des Reibungs-/Gesamtmasse-Verhältnisse	91
3.3.2.2	Einflüsse auf die installierte Leistung	92
3.3.2.3	Beschleunigungsvermögen	93
3.3.3	Sicherheit des Fahrzeuglaufs im Gleis	94
3.3.3.1	Kippsicherheit	95
3.3.3.2	Entgleisungssicherheit	95
3.3.3.3	Überhöhungsüberschuß	96

3.3.4	Beschleunigungsabhängiger Bogenverlauf im Lageplan	96
3.4	Fahrdynamische Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Fahrweg und Fahrzeug	99
3.4.1	Geschwindigkeit/Weg-Diagramm	100
3.4.2	Langsamkeit/Weg-Diagramm	102
3.4.3	Kinetische Energiehöhe	103
3.5	Streckenspezifische Leistungsoptimierung	104
3.6	Folgerungen aus den Wechselwirkungen zwischen Fahrweg und Fahrzeug auf die Fahrweggestaltung	106
4.	- Analyse des Status Quo - Darstellung des heute angewandten Standes der Technik von Fahrweg und Fahrzeug	108
4.1	Fahrweg	108
4.1.1	Schotteroberbau	108
4.1.2	Trassierungs- und Gleisparameter	110
4.1.2.1	Entwurfsgeschwindigkeit	110
4.1.2.2	Gleisparameter	110
4.1.2.3	Längsneigung	113
4.1.2.4	Ausrundungshalbmesser für Wannen und Kuppen	114
4.2	Fahrzeug	116
4.2.1	Antriebsvarianten für den Hochgeschwindigkeitsverkehr	116
4.2.2	GSt-Fahrzeuge für den Hochgeschwindigkeitsverkehr	118
4.2.3	Installierte Leistung	119
4.2.3.1	Fahrwiderstand	119
4.2.3.2	Beschleunigungsvermögen	119
4.2.4	Laufwerke	120
4.2.5	Bremssysteme	121
4.2.6	Fahrzeugspezifische Daten von Hochgeschwindigkeits-Fahrzeugen	122
4.2.7	Güterverkehr auf Neubaustrecken	124
4.3	Wechselwirkungen zwischen Fahrweg und Fahrzeug	125
4.3.1	Sicherheit des Fahrzeuglaufs im Gleis	125
4.3.2	Zulässige Geschwindigkeit im Gleisbogen	126
4.3.3	Mehrdimensionale Beschleunigung	128
4.3.4	Beschleunigungsabhängiger Bogenverlauf in Lageplan	129
4.3.5	Reibungs-/Gesamtmasse-Verhältnis	129
4.3.5.1	Reibungsmasse	130
4.3.5.2	Gesamtmasse	130
4.4	Fahrdynamische Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Fahrweg und Fahrzeug	131
4.4.1	Geschwindigkeit/Weg-Diagramm	132
4.4.2	Langsamkeit/Weg-Diagramm	133
4.4.3	Kinetische Energiehöhe	135
4.4.4	Geleistete Arbeit	136
4.4.5	Aufgebrachte Leistung	137
4.4.6	Komfortabhängige Beschleunigungen	139
4.5	Streckenspezifische Leistungsoptimierung	143
4.6	Grundsätzliche Folgerungen für die zukunftssichere Trassierung von Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsstrecken aus der Analyse des Status quo in Verbindung mit dem 3. Kapitel	145

5.	- Erstes Szenario -	
	Einschätzung der zu erwartenden, demnächst den praktischen Reifegrad erlangenden Entwicklungen beim Fahrweg und Fahrzeug	147
5.1	Fahrweg	147
5.1.1	Oberbauform	147
5.1.2	Trassierungs- und Gleisparameter	149
5.1.2.1	Höchstgeschwindigkeit	149
5.1.2.2	Gleisparameter	149
5.1.2.3	Längsneigung	151
5.1.2.4	Ausrundungshalbmesser für Wannens und Kuppen	153
5.2	Fahrzeug	155
5.2.1	Fahrzeugvarianten für den zukünftigen Hochgeschwindigkeitsverkehr	155
5.2.2	GSt-Fahrzeuge für den zukünftigen Hochgeschwindigkeitsverkehr	156
5.2.3	Installierte Leistung	156
5.2.4	Fahrwiderstand	157
5.2.5	Beschleunigungsvermögen	157
5.2.6	Laufwerke	158
5.2.7	Bremssystem für einen zukünftigen Hochgeschwindigkeits-Zug	158
5.2.8	Fahrzeugspezifische Daten möglicher Hochgeschwindigkeits-Züge	159
5.2.9	Schneller Güterverkehr auf den zukünftigen Neubaustrecken	160
5.3	Wechselwirkungen zwischen Fahrweg und Fahrzeug	162
5.3.1	Sicherheit des Fahrzeuglaufs im Gleis	162
5.3.2	Zulässige Geschwindigkeit im Gleisbogen	164
5.3.3	Mehrdimensionale Beschleunigung	165
5.3.4	Beschleunigungsabhängiger Bogenverlauf im Lageplan	165
5.3.5	Reibungs-/Gesamtmasse-Verhältnis	166
5.3.5.1	Reibungsmasse	167
5.3.5.2	Gesamtmasse	167
5.4.	Ergebnisse der Fahrweg- und Fahrzeuguntersuchung, erstes Szenario	168
5.4.1	Ergebnisse Fahrweg	168
5.4.2	Ergebnisse Fahrzeuge	171
5.4.2.1	Fahrzeug des Hochgeschwindigkeits-Personenverkehrs	171
5.4.2.2	Fahrzeuge des schnellen Güterverkehrs	172
5.5	Fahrdynamische Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Fahrweg und Fahrzeug	174
5.5.1	Geschwindigkeit/Weg-Diagramm	174
5.5.2	Langsamkeit/Weg-Diagramm	177
5.5.3	Kinetische Energiehöhe	178
5.5.4	Geleistete Arbeit	180
5.5.5	Aufgebrachte Leistung	182
5.5.6	Komfortabhängige Beschleunigungen	183
5.6	Streckenspezifische Leistungsoptimierung	186

6.	- Zweites Szenario - Einschätzung der sich z.Z. noch in Entwicklung befindlichen zukünftigen technischen Möglichkeiten bei Fahrweg und Fahrzeug	188
6.1.	Fahrweg	188
6.1.1	Feste Fahrbahn	188
6.1.2	Trassierungs- und Gleisparameter	191
6.1.2.1	Höchstgeschwindigkeit	191
6.1.2.2	Gleisparameter	191
6.1.2.3	Längsneigung	192
6.1.2.4	Ausrundungshalbmesser	192
6.2	Fahrzeug	194
6.2.1	Fahrzeugvarianten für den Hochgeschwindigkeitsverkehr des zweiten Szenarios	194
6.2.2	Installierte Leistung	195
6.2.2.1	Haftwertabhängig übertragbare Leistung	195
6.2.2.2	Haftwertunabhängig übertragbare Leistung	196
6.2.3	Fahrwiderstand	197
6.2.4	Beschleunigungsvermögen	198
6.2.4.1	Haftreibungsabhängiges Beschleunigungsvermögen	198
6.2.4.2	Haftwertunabhängige Beschleunigung	199
6.2.5	Bremssysteme für einen Hochgeschwindigkeits-Zug des zweiten Szenarios	201
6.2.6	Schneller Güterverkehr auf Hochgeschwindigkeits-Strecken des zweiten Szenarios	201
6.3	Wechselwirkungen zwischen Fahrweg und Fahrzeug	202
6.3.1	Sicherheit des Fahrzeuglaufs im Gleis	202
6.3.2	Zulässige Geschwindigkeit im Gleisbogen	204
6.3.3	Mehrdimensionale Beschleunigung	205
6.3.4	Beschleunigungsabhängiger Bogenverlauf im Lageplan	205
6.3.5	Verhältnis Reibungsmasse/Gesamtmasse	206
6.3.5.1	Reibungsmasse	207
6.3.5.2	Gesamtmasse	207
6.4	Ergebnisse der Fahrweg- und Fahrzeuguntersuchungen, zweites Szenario	208
6.4.1	Ergebnisse Fahrweg	208
6.4.2	Ergebnisse Fahrzeuge	211
6.4.2.1	Fahrzeuge des Hochgeschwindigkeits-Personenverkehrs	211
6.4.2.2	Fahrzeuge des schnellen Güterverkehrs	212
6.5	Fahrdynamische Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Fahrweg und Fahrzeug	213
6.5.1	Geschwindigkeit/Weg-Diagramm	213
6.5.2	Langsamkeit/Weg-Diagramm	215
6.5.3	Kinetische Energiehöhe	216
6.5.4	Geleistete Arbeit	218
6.5.5	Aufgebrachte Leistung	220
6.5.6	Komfortabhängige Beschleunigungen	222
6.6	Streckenspezifische Leistungsoptimierung	225

7.	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse, Abschätzung der wirtschaftlichen Auswirkungen und Schlußfolgerungen	227
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse von Fahrweg und Fahrzeug	227
7.1.1	Fahrweg	227
7.1.2	Fahrzeug	233
7.1.3	Fahrdynamische Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Fahrweg und Fahrzeug	236
7.1.4	Streckenspezifische Leistungsoptimierung	242
7.2	Abschätzung der wirtschaftlichen Auswirkungen der Szenarioannahmen für die zukunftssicheren Trassierung	245
7.2.1	Grundlagen des Bewertungsverfahrens	245
7.2.2	Betriebswirtschaftliche Betrachtung	246
7.2.3	Gesamtwirtschaftliche Betrachtung	249
7.3	Schlußfolgerungen	252
	Literaturverzeichnis	256
	Anlagen	268