

Schienerfahrweg für das 21. Jahrhundert

Teil I
Lärmreduktion
beim Fahren auf kontinuierlich gelagerter Schiene
System INFUNDO®



Abschlussbericht

Forschungsgemeinschaft „Schienerfahrweg für das 21. Jahrhundert“
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Eberhard Hohnecker, Karlsruhe

Mai 2004

Autor / Herausgeber

Forschungsgemeinschaft „Schienenfahrweg für das 21. Jahrhundert“,
vertreten durch

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Eberhard Hohnecker

c/o Universität Karlsruhe (TH)

Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen

Abteilung Eisenbahnwesen

Kaiserstraße 12

76128 Karlsruhe

Tel. (+49)721/608-2248

Förderung

gemäß Forschungs- und Entwicklungsvertrag des Landes Baden–Württemberg,
Ministerium für Umwelt und Verkehr, vom 12. August 1999

O.Nr.: U33-99.01

Projektlaufzeit 12. August 1999 – 30. Juni 2003

Vorwort

Verminderung und Vermeidung von Lärm im Stadtverkehr sind erklärte Ziele der Landesregierung Baden–Württemberg. Dies hat sie unter anderem 1998 durch die Ausschreibung des Forschungswettbewerbs „Lärm“ unterstrichen.

Im Rahmen dieses Forschungswettbewerbs hatten die Projektpartner ihre Ideen zu dem Forschungskomplex „Schienenfahrweg für das 21. Jahrhundert“ erstmals formuliert.

Die Projektpartner haben in Stuttgart in der Schmidener Straße zwischen Viaduktstraße und Gnesener Straße eine Teststrecke mit INFUNDO®-Oberbau errichtet. An dieser Strecke und an Vergleichsstrecken wurden Luft- und Körperschallmessungen in situ durchgeführt und untereinander, mit theoretischen Betrachtungen und Simulationsrechnungen sowie mit Messergebnissen anderer Standorte verglichen. Für die Simulationsrechnungen wurde ein eigenes Tool, M³Rail, erstellt.

Auf diesem Weg wurden Grundsatzkenntnisse über das Emissionsverhalten des INFUNDO®-Oberbaus erlangt. Mehrere Weiterentwicklungsschritte dieser Oberbauart sind ein greifbares Ergebnis des Projekts.

Der vorliegende Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben U33-99.01 des Umwelt- und Verkehrsministeriums Baden–Württemberg, welches den „Teil 1“ des Forschungskomplexes bearbeitete, stellt den im Projekt beschrittenen Weg und die Ergebnisse des Projekts vor und zeigt die sich daraus ergebenden Perspektiven auf. Dem Leser sollen sich dabei die wesentlichen Faktoren des Schienenverkehrslärms erschließen und die durch das Forschungsprojekt erreichten Fortschritte fassbar werden.

Der Bericht strebt einerseits an, in sich geschlossen zu sein. Deswegen enthält er ein ausführliches einführendes Kapitel, in dem Grundbegriffe erläutert werden, soweit sie zum weiteren Verständnis notwendig sind. Außerdem sind in den anschließenden Hauptkapiteln die wesentlichen Inhalte der Zwischenberichte eingearbeitet.

Zugleich soll der Bericht jedoch die Übersicht bewahren; darunter leidet jedoch die Vollständigkeit. Wie in wissenschaftlichen Texten üblich, wird daher auf einschlägige Fachliteratur verwiesen. Details zum Projektinhalt, die in diesem Abschlussbericht keinen Platz mehr fanden, können bei Bedarf beim Autor erfragt werden.

Das erste Kapitel erläutert die Aufgabenstellung und diskutiert die Vor- und Nachteile der für das Projekt ausgewählten Methoden im Vergleich zu den alternativen Lösungswegen. Nach einer Einführung in die für das Forschungsvorhaben wesentlichen Grundlagen – physikalisch/physiologische Grundlagen, eisenbahntechnische Grundlagen und ausgewählte Kapitel der Simulationstechnik – werden die Schwerpunktaufgaben des Projekts in jeweils einem eigenen Hauptkapitel vorgestellt. Eine zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse und der Ausblick

schließen den Hauptteil des Berichts ab. Zur besseren Orientierung wurden die Verzeichnisse von Abkürzungen, Abbildungen, Tabellen und Listen dem Hauptteil vorangestellt. Umfangreichere informative Ergänzungen gelangten wie in wissenschaftlichen Abhandlungen üblich in den Anhang, gefolgt von der Liste der Literaturangaben.

Dank gebührt an dieser Stelle dem Ministerium für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg für die Förderung und die geduldige Begleitung des Projekts, was die Durchführung und den erfolgreichen Abschluss des ersten Teils des Gesamtthemas ermöglicht hat.

Karlsruhe, im Mai 2004

für die Forschungsgemeinschaft „Schienenfahrweg für das 21. Jahrhundert“

Universitätsprofessor
Dr.-Ing. E. Hohnecker

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XII
1. Aufgabenstellung und Projektablauf	1
1.1. Bedeutung	2
1.2. Zielsetzung	3
1.3. Stand von Technik und Forschung	3
1.4. Projektpartner	5
1.5. Arbeitsaufteilung	6
1.6. Projektablauf	7
2. Einführung	11
2.1. Schall	12
2.1.1. Grundbegriffe	13
2.1.2. Schallpegel	14
2.2. Physiologische Grundlagen	15
2.2.1. Lärm	15
2.2.2. Körperschallwahrnehmung	16
2.3. Eisenbahntechnische Grundlagen	19
2.3.1. Der Bahnkörper	20
2.3.2. Oberbaukomponenten	21
2.3.3. Oberbauarten	22
2.3.4. Fahrzeuglauf	31
2.3.5. Biegelinie der Schiene	32
2.3.6. Schallemission im Schienenverkehr	34
2.3.7. Luftschallausbreitung: SCHALL 03	38
2.3.8. Körperschallausbreitung	38
2.3.9. Erfahrungen aus früheren in-situ-Messungen	40
2.4. Strukturdynamik	43
2.4.1. ODE und DAE	45
2.4.2. Runge-Kutta-Methoden	46
2.5. Geometrische Akustik	47

3. Feste Fahrbahn Bauart INFUNDO®	51
3.1. Bauartbeschreibung	51
3.2. Bauablauf	53
3.3. Instandsetzung und Erneuerung	54
3.4. Schwingungs- und schalltechnische Eigenschaften	54
3.5. Sonstige Eigenschaften	56
4. Simulationsrechnungen	59
4.1. Vorgehensweise	59
4.2. Ergebnisse	63
4.3. Diskussion	67
5. Schallausbreitungsberechnungen	69
5.1. Vorgehensweise	69
5.2. Ergebnisse	70
5.3. Diskussion	71
6. in-situ-Messungen	79
6.1. Überblick	79
6.2. Messorte	81
6.2.1. Standorte Stuttgart	81
6.2.2. Standort Waghäusel	81
6.3. Ausrüstung	85
6.4. Luftschallmessungen	87
6.4.1. Vorgehensweise	87
6.4.2. Ergebnisse	88
6.5. Körperschallmessungen	93
6.5.1. Vorgehensweise	93
6.5.2. Ergebnisse	94
6.6. Diskussion	95
7. Bau und Entwicklung des Fahrwegsystems INFUNDO®	99
7.1. Bau der Teststrecke	99
7.2. Weiterentwicklungen	103
7.3. Diskussion	104
8. Diskussion und Vergleich des erreichten Standes	109
9. Ausblick	113

Anhang	114
A. Tätigkeitsbericht 1999 – 2003	115
A.1. Sicherung des Projektablaufs	115
A.2. Beschaffungen	116
A.3. Teilnahme an Kongressen und Messen, Konferenzen und Seminaren	116
A.4. Ausgerichtete Veranstaltungen	120
A.4.1. Gemeinsame Veranstaltung der Projektpartner Abteilung Eisenbahnwesen (Prof. Hohnecker) und der Firma LEONHARD WEISS GmbH	120
A.4.2. Veranstaltungen an der Abteilung Eisenbahnwesen	120
B. Ausstellung Erde 2.0	123
C. MKS-Modellierung	127
C.1. Dynamik starrer Körper	127
C.2. Mehr-Körper-Systeme	128
C.2.1. Zwangsbedingungen	128
C.3. Kinematik deformierbarer Körper	129
C.4. Lineare Elastizität	130
C.5. Bewegungsgleichungen deformierbarer Körper	131
D. Schwingungen und Wellen	133
E. Referenzliste INFUNDO®	135
Literatur	139

Abkürzungsverzeichnis

DAE	Differential-Algebraic Equation System mathematischer Gleichungen, das sowohl algebraische als auch gewöhnliche Differentialgleichungen enthält.	LSM	Luftschallmessung
ERS	Embedded Rail System (Fahrweg mit eingebetteter Schiene)	MKS	Mehr-Körper-System (multibody system), Art mechanischer Modellierung
FE	Finite Elemente (Art mechanischer Modellierung)	NBS	Neubaustrecke
FF	Feste Fahrbahn (im Gegensatz zu Schotteroberbau)	NGI	Norges Geoteknisk Institut (geotechnisches Institut Norwegen)
HGV	Hochgeschwindigkeitsverkehr	NS	Nederlandse Spoorwegen (Niederländische Eisenbahngesellschaft)
INFUNDO®	Oberbauart mit kontinuierlich eingebetteter und vergossener Schiene; die Bezeichnung ist abgeleitet von infundere (lat.): eingießen.	ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ISE	Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen, Universität Karlsruhe	SchO	Schotteroberbau
KS	Körperschall	SOK	Schienen-Oberkante
KSM	Körperschallmessung	SPNV	Schienenpersonennahverkehr (Teil des ÖPNV)
LS	Luftschall	SSB	Stuttgarter Straßenbahnen AG
		UVM	Ministerium für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg

Abbildungsverzeichnis

1.1. Messort Stuttgart Schmidener Straße	7
1.2. Messort Stuttgart Schmidener Straße	9
2.1. Begriffe zu Luft- und Körperschall	12
2.2. Wellenlänge und Amplitude einer Schallwelle	14
2.3. Luftschall-Bewertungskurven	17
2.4. KB-Bewertung	19
2.5. Querschnitt des Bahnkörpers einer Vollbahn	21
2.6. Phasen der Oberbauentwicklung: Steinblöcke, Längsschwellen	26
2.7. Phasen der Oberbauentwicklung: Schotteroberbau	27
2.8. Phasen der Oberbauentwicklung: Feste Fahrbahn	28
2.9. Phasen der Oberbauentwicklung: Systeme mit naturierter Oberfläche	29
2.10. Bezeichnungen am Eisenbahnrad	33
2.11. Sinuslauf des Eisenbahnradratsatzes	33
2.12. vertikale Biegelinie des Gleises	34
2.13. dreidimensionale Biegelinie des Gleises	35
2.14. Frequenzband	35
2.15. Schallabstrahlung im Rad–Schiene–Bereich	37
2.16. Absorptionskoeffizient verschiedener Oberbauarten	37
2.17. Anwendungsbereich verschiedener Simulationsmethoden.	45
4.1. Module zur Schwingungsberechnung von M ³ Rail	61
4.2. Module von M ³ Rail (schwingungstechnischer und akustischer Gesamtkomplex)	62
4.3. M ³ Rail: Klassenstruktur des MKS-Moduls	64
4.4. Konfiguration eines Modells in M ³ Rail	67
4.5. Ergebnis einer Schwingungsberechnung mit M ³ Rail	68
5.1. Berechnungsbeispiel der Schallabstrahlung eines Eisenbahnfahrzeugs	73
5.2. Einfluss der Absorption auf die Luftschallabstrahlung, Berechnung mit RAYNOISE®	74
5.3. berechneter Schallpegel (Beton)	75
5.4. berechneter Schallpegel (Schotter)	76
5.5. berechneter Schallpegel (Gras)	77
6.1. Messort Stuttgart–Plieningen	81
6.2. DB-Teststrecke Waghäusel – INFUNDO® und SchO	83
6.3. Messort DB-Teststrecke Waghäusel	84
6.4. Messort Stuttgart Schmidener Straße	86
6.5. Messanordnung für eine Luftschallmessung an der DB-Teststrecke Waghäusel	86
6.6. DB-Teststrecke Waghäusel – Luftschallpegel von INFUNDO® und SchO	89

6.7.	Vergleich INFUNDO® und SchO, Stuttgart, Luft- und Körperschallpegel	90
6.8.	Vergleich INFUNDO® und SchO, Stuttgart, Luft- und Körperschallpegel	96
6.9.	Vergleich Körperschallpegel INFUNDO® und SchO, Stuttgart	97
6.10.	Vergleich Körperschallpegel INFUNDO® und SchO, Stuttgart	98
7.1.	Messort Schmidener Straße (Rasengleis)	101
7.2.	Querschnitt INFUNDO®-Halbfertigteil (Skizze)	105
7.3.	Querschnitt INFUNDO®-Halbfertigteil (Skizze Fugenschnitt)	105
7.4.	INFUNDO®-Halbfertigteil (Ansicht)	107
7.5.	INFUNDO®-Halbfertigteil (Bildokumentation Bauverfahren)	108
A.1.	OFFERTA Karlsruhe, Messestand mit Präsentation des Projekts	121
B.1.	ERDE 2.0. Messestand – Frontansicht	123
B.2.	ERDE 2.0 Messestand – Aussicht	124
B.3.	ERDE 2.0 Messestand – detaillierte Frontansicht	124
B.4.	ERDE 2.0 Messestand – Seitenansicht	125
B.5.	ERDE 2.0 Messestand – Hörbox	126
D.1.	Körperschallwellenarten	133

Tabellenverzeichnis

1.1. Arbeitsaufteilung im Projekt „Schienenfahrweg für das 21. Jahrhundert, Teil I“ . . .	6
2.1. A-bewertete Schallpegel verschiedener Geräusche	16
2.2. VDI 2057 B13	18
2.3. Schallimmissionsberechnung nach SCHALL 03	42
6.1. Luft- und Körperschallmessungen der Abtl. Eisenbahnwesen	79
Liste der Veröffentlichungen zum Thema	144
Liste der Diplom- und Vertieferarbeiten an der Abtl. Eisenbahnwesen zum Thema	146

1. Aufgabenstellung und Projektablauf

Der umweltfreundliche Verkehrsträger „Schiene“ besitzt ein hohes Lärminderungspotenzial. Im Interesse einer drastischen Reduzierung der sekundären Schallschutzmaßnahmen – beispielsweise Schallschutzfenster, Schallschutzwände – und der Erhöhung der Akzeptanz bei SPNV-Nutzern sowie Anliegern ist der Weiterentwicklung der Fahrwegtechnik im Rad–Schiene–System Priorität einzuräumen.

Kernpunkt des Forschungs- und Entwicklungs-Projekts „Schienenfahrweg für das 21. Jahrhundert“ ist die Produktentwicklung des Oberbausystems INFUNDO[®], wobei anhand einer Erprobungsstrecke dieses Oberbausystem im Netz der Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB) mit der Möglichkeit des Vergleichs vor Ort vorhandener Oberbauvarianten durchgeführt werden soll.

Das Konzept des Forschungsvorhabens sieht drei Teile vor:

Teil I Lärmreduktion beim Fahren auf kontinuierlich gelagerter Schiene / System INFUNDO[®]
Bau einer Erprobungsstrecke, Entwicklung eines Modells, Messungen (vor allem Luftschall)

- Erarbeitung eines prognostizierenden analytischen Verfahrens zur Erfassung und Abschätzung möglicher fördernder bzw. reduzierender relevanter Elemente der Schallabstrahlung innerhalb des Systemverbundes Rad–Schiene
- Erstellung eines modularen mathematischen Modells zur ständig reproduzierbaren Ermittlung der Schallabstrahlung eines schienengebundenen Fahrwegs System INFUNDO[®]
- Bau einer Erprobungsstrecke mit Messeinrichtungen
- Durchführung der Lärmmessungen, Abgleich der Modell-Simulation durch Überprüfung anhand von Lärmmessungen

Teil II Fahrzeugtechnische Optimierungsmaßnahmen, witterungsabhängige Lärmentwicklung, lärmtechnische Optimierung, Körperschall (Ursachen und Reduktion), Untersuchung einzelner Komponenten

Teil III Benchmarking (Fahrweg–Fahrzeug–Wechselwirkungen, Unterhaltung, Ökologie, Ökonomie)

Damit ordnet es sich in den Themenkomplex „Reduktion des durch den Rad-Schiene-Kontakt hervorgerufenen Lärms“ ein.

Teil I dieses Forschungskomplexes hat das Umwelt- und Verkehrsministerium im Nachgang zu dem Forschungswettbewerb „Lärm“ gefördert [1].

1.1. Bedeutung

Lärm und Körperschallemissionen von Schienenfahrwegen sind ein grundlegendes Umweltproblem, denn

- Lärm und Vibrationen stören Nutzer und Anlieger,
- durch Lärmeinwirkung kann die Gesundheit beeinträchtigt werden,
- die Straßenbahn-Verkehrsinfrastruktur ist in der Regel dort konzentriert, wo die Wohnungsdichte sehr hoch ist; daher sind viele Menschen als Anlieger betroffen.

Die Wichtigkeit aller mit Straßen- und Stadtbahnssystemen zusammenhängenden Fragen steigt zur Zeit weltweit, da immer mehr Städte solche Systeme (wieder-)einführen, um

- bequemen und schnellen Personennahverkehr anzubieten,
- Luftverschmutzung und Lärmpegel zu reduzieren, indem der motorisierte Individualverkehr (Straßenverkehr) auf den weniger belastenden Verkehrsträger Schiene umgeschichtet wird,
- die Lebensqualität zu erhöhen.

Eine über den Fahrweg zu erzielende deutliche Minderung der Schallemissionen wird zu einer drastischen Reduzierung der sekundären Schallschutzmaßnahmen führen. Gleichzeitig führt dies zu einer höheren Akzeptanz des umweltfreundlichen Verkehrsträgers Bahn bei den Bürgern — den Nutzern und Anliegern.

Das große Potenzial an Kostenreduzierung beim Luftschallschutz durch Verzicht auf sekundäre Schallminderungsmaßnahmen sowie beim Erschütterungsschutz der mögliche Verzicht auf teure Masse–Feder–Systeme rechtfertigen den bezogen auf die Investitionen im einstelligen Prozentbereich auftretenden Forschungs- und Entwicklungsaufwand nachhaltig.

1.2. Zielsetzung

Das Ziel der Reduktion von Luft- und Körperschallemissionen wird mit der Weiterentwicklung des Systems INFUNDO® verfolgt. Ziele der Weiterentwicklung des Festen-Fahrbahn-Systems INFUNDO® sind:

- Erhöhung der Akzeptanz bei Betreibern und Bürgern durch weitere Minimierung der Schallemission im täglichen Verkehr, bei der Herstellung und bei der Instandhaltung
- Erhöhung der nationalen und internationalen Marktkompetenz
- Wissenschaftliche Begleitung aller Entwicklungen durch Verifizierung der Betreiberforderungen nach höherer Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit
- Wettbewerbsvorsprung durch Innovation
- Sicherung der Arbeitsplätze durch Know-how-Vorsprung
- Stärkung des Wirtschaftsstandorts Baden-Württemberg

Die Forschungsgemeinschaft „Schienenfahrweg für das 21. Jahrhundert“ hat sich daher in ihrem Teil I: „Lärmreduktion beim Fahren auf kontinuierlich gelagerter Schiene/System INFUNDO®“ gemäß § 1 des Forschungs- und Entwicklungsvertrags folgendes zum Ziel gesetzt:

„Entwicklung von Maßnahmen zur Verhinderung und Verminderung der Schwingungen an einem kontinuierlich gelagerten Fahrwegsystem unter Beachtung der Wechselwirkungen mit dem Fahrzeug im Personenverkehr. Vorrangiges Ziel ist eine drastische Reduzierung der Schallemissionen gegenüber heutigen Oberbausystemen. Ein weiteres Ziel ist die Lärmvermeidung bei Bau und Unterhaltung, Umbau und Ausbau von Schienenstrecken. Mit dem Forschungsvorhaben sollen Optimierungsmöglichkeiten bei den Bau- und Instandhaltungsverfahren sowie Auswirkungen dieser Optimierungen auf die Langlebigkeit der Fahrbahn untersucht werden.“

Die Forschungsmaßnahmen des darin enthaltenen Unterziels „Fördernde/reduzierende Elemente der Schallabstrahlung“ beziehen sich auf Arbeitspakete zu den Einzelthemen Fahrzeug mit Radsatz und Rad, Schiene, Rad-Schiene-Rollkontakt, Schienenbefestigung, Schwelle und Schotter.

1.3. Stand von Technik und Forschung

Schallschutzmaßnahmen

Alternativ zu dem im vorliegenden Projekt angestrebten primären Schallschutz (Reduzierung der Schallentstehung) steht erstens natürlich die Palette der bekannten sekundären Schallschutzmaßnahmen zur Verfügung:

- Schallschutzwände
- Schallschutzwälle
- Bepflanzung
- Schienenabsorber (Gummi- oder Kunststoffabsorber)

1. Aufgabenstellung und Projektablauf

Diese sind in ihrer Wirksamkeit sehr begrenzt, wenn sie nicht mit fahrzeugseitigen Maßnahmen (z. B. Schallschürzen an den Radkästen) einhergehen. Sie stellen einen Versuch dar, der Schallquelle möglichst nahe zu kommen und weisen daher als Entwicklungsschritt auf den eigentlich gebotenen primären Schallschutz hin.

- Schallschutzfenster

Diese sind am weitesten vom Gleis entfernt. Sie wirken nur bei geschlossenem Fenster.

Schallschutzwände mindern die Luftschallimmission um 8 bis 12 dB(A), müssen aber i. d. R. mehrere Meter hoch sein, um eine Wirkung zu gewährleisten. Da sie außerhalb des Lichtraumprofils angebracht werden müssen, greifen sie in die den Verkehrsweg umgebende Fläche ein. Mit Niedrigschallschutzwänden erzielt man im innerstädtischen Bereich noch spürbare Pegelreduktionen.

Bei Wällen und Bepflanzungen gilt, dass die Maßnahmen vor allem dann wirksam sind, wenn sie großflächig und hoch ausgeführt werden.

Im innerstädtischen Bereich werden auch Niedrigschallschutzwände eingesetzt, die in Abhängigkeit des Fahrzeugprofils nahe am Gleis angebracht sind. Hinsichtlich des Rollgeräusches – das hier im Vergleich zu den mit höherer Geschwindigkeit verkehrenden Vollbahnen dominant ist – bewirken Niedrigschallschutzwände deutliche Pegelreduktionen. Niedrigschallschutzwände erhöhen als Querungshindernisse die Trennwirkung der Straßenbahnstrecke, auch optisch, beträchtlich.

Sekundäre Schallschutzmaßnahmen sind grundsätzlich großräumiger und voluminöser und dadurch aufwändiger als entsprechende Maßnahmen des primären Schallschutzes.

Außer den sekundären Schallschutzmaßnahmen stehen zweitens auch die bekannten konventionellen Methoden zur schwingungstechnischen Optimierung des Fahrwegs (Körperschallreduzierung) als primäre Schallschutzmaßnahmen zur Verfügung:

- Unterschottermatten
- Schwellenbesohlung
- Masse–Feder–System
- elastische Schienenunterlage
- ummantelte Schiene

Masse–Feder–Systeme (federnd gedämpfte Lagerung der kompletten Tragplatte von FF) sind sehr aufwändig und i. d. R. in ihrer Ausführung gegenüber ungefederten FF-Systemen mehrfach teurer. Sie werden daher vor allem im Tunnel angewandt, wo Körperschalldämmung bei nahegelegenen Gebäuden zwingend geboten ist.

Die elastische Schienenunterlage wurde entwickelt, um die im Vergleich zur Holzschwelle zu geringe Elastizität der Betonschwelle auszugleichen. Im Sinne einer Dämpfung der Körperschallabstrahlung ist sie als erster Schritt hin zu einer ummantelten Schiene zu sehen.

Systeme mit ummantelten Schienen (geklebte oder geklemmte Gummipolster) sind erhältlich, haben sich aber nicht durchgesetzt. so müssen z. B. die Übergangsstellen zwischen den Gummipolstern gesondert bearbeitet werden, um Schallbrücken und auch Streuströmen vorzubeugen.

Unter den primären Schallschutzmaßnahmen ist das System INFUNDO® ein System, das der Schallursache „schwingende Schiene“ besonders direkt entgegenwirkt und dabei das Prinzip der gleichmäßigen kontinuierlichen Bettung in besonders hohem Maße verwirklicht.

Drittens wären Antischallmaßnahmen zu erwähnen. Antischallmaßnahmen haben im Eisenbahnverkehr noch keine technische Anwendung gefunden, da der Antischall phasengenau den zu bekämpfenden Schall auslöschen soll. Günstig für Antischallmaßnahmen ist eine definierte Kavität, aus der gerichteter Schall austritt, also etwa die Triebwerksdüse eines Flugzeugs. Im Zusammenhang mit Schallschürzen und Niedrigstschallschutzwänden könnten solche Kavitäten geschaffen werden. Eine Förderung wäre vorteilhaft in Teil II des Forschungsvorhabens vorzusehen.

Untersuchungen für das Fahrweg–Fahrzeug–Gesamtsystem

Untersuchungen für das Fahrweg–Fahrzeug–Gesamtsystem wurden bisher vor allem für spezielle Einzelfälle durchgeführt, so zum Beispiel 1990 von AUERSCH [4] für den ICE oder von DIANA und CHELI [11] für Brücken. Mit der Erschütterungsausbreitung im Rad–Schiene–System hat sich insbesondere auch HUBER [44] befasst. Die hochfrequente Gleisdynamik wurde von RIPKE [64] untersucht. Von SELVADURAI [66] liegt eine Untersuchung der Unterbau–Untergrund–Interaktion vor.

Mit dem Aufkommen neuer Rechnergenerationen werden Simulationen der hier zu betrachtenden komplexeren Systeme möglich und finden daher bereits in jüngerer Zeit vermehrt Anwendung.

1.4. Projektpartner

Um den bewilligten Teil I Forschungsvorhaben durchzuführen, haben sich folgende Partner als Team zur „Forschungsgemeinschaft Schienenfahrweg für das 21. Jahrhundert“ zusammengeschlossen:

Forschungspartner: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Hohnerker
c/o Abteilung Eisenbahnwesen
Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen
Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstraße 12
76128 Karlsruhe

Leonhard Weiss GmbH & Co,
Niederlassung München
Pasteurstraße 7
80999 München

Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB)
Technische Unternehmensplanung
Schockenriedstraße 50
70565 Stuttgart–Möhringen

1.5. Arbeitsaufteilung

Die Projektpartner haben sich zu Beginn des Projekts die folgenden, in Tabelle 1.1 nach Ablauf gegliederten Aufgaben zur Bearbeitung vorgenommen:

- Bei Professor Hohnecker, Universität Karlsruhe, ISE, Abteilung Eisenbahnwesen, werden das Fahrzeug–Fahrweg–Modell erstellt und die Messungen geplant.
- Als Partner aus der Bauindustrie stellte sich die Firma LEONHARD WEISS zur Verfügung, die mit ihrer Tochterfirma INFUNDO®¹ den Vertrieb des innovativen FF-Systems vornimmt. Sie selbst stellt neben unterschiedlichen herkömmlichen und FF-Konstruktionen u. a. auch die FF mit kontinuierlich gelagerten und kontinuierlich eingebetteten Schienen her. Die zu untersuchenden Fahrwegkonstruktionen werden nach Vorgabe variiert und schließlich auch bautechnisch optimiert.
- Für die Versuche und Messungen stellt die Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB) als Projektpartner kostenneutral eine Versuchsstrecke zur Verfügung.
- Die Gesamtleitung (Planung, Organisation des Projektablaufs, Koordination und Abstimmung) des Projekts lag bei Professor Hohnecker.

Tabelle 1.1.: Arbeitsaufteilung im Projekt „Schienenfahrweg für das 21. Jahrhundert, Teil I“

Jahr	Prof. Hohnecker	INFUNDO® GmbH	SSB
1	Detaillierte Konzeption des mathematischen Modells und seiner Module und Programmieren des Rohgerüsts	Umsetzung der Grundlagenergebnisse in ein praxistaugliches System und Bau einer Versuchsstrecke	Vorbereitung des Bauabschnittes und Begleitung der Entwicklungs- und Umsetzungsarbeiten der Partner
2	Testläufe, Vergleiche gerechneter und gemessener Daten, Parameterstudien, Modellverfeinerung	Begleitung der Versuchsphase und iterative Optimierung	
3	Auswertung: Bewertung der Aussagefähigkeit des Modells und Folgerungen für Lärmentwicklung	Auswertung der Praxistests und Bewertung des Optimierungspotenzials	Inbetriebnahme und Durchführung von Praxistests im standardisierten Normalbetrieb und Bewertung der Ergebnisse aus der Sicht eines Verkehrsunternehmens

¹ Die 50 %-ige Beteiligung der Firma LEONHARD WEISS wurde inzwischen vom zweiten Anteilseigner EDILON übernommen. Die Tochterfirma EDILON GmbH residiert in der Joergstr. 23 in München.

1.6. Projektablauf

In der Schmidener Straße in Stuttgart wurde zwischen Viaduktstraße und Gnesener Straße (Abbildung 1.1) eine Teststrecke mit INFUNDO®-Oberbau errichtet (Ansicht: Abbildung 1.2). Die statische Dimensionierung der Betontragplatte wurde beim Ingenieurbüro Prof. Dr. ZILCH und Dr. MÜLLER durchgeführt. Sowohl an dieser Strecke als auch an Vergleichsstrecken wurden in situ Messungen durchgeführt und untereinander, mit theoretischen Betrachtungen und Simulationsrechnungen sowie mit Messergebnissen anderer Standorte verglichen. Ziel ist es, die gemessenen Pegel mit Hilfe von Simulationsrechnungen und anhand geeigneter einfacher Modelle zu reproduzieren und zu verifizieren.



Abbildung 1.1:
Lage des Messortes Stuttgart, Schmidener Straße

Der Messort – zwischen Gnesener Straße und Viadukt – ist mit einem schwarzen Punkt gekennzeichnet.
Quelle: ELBERT [15], Karte: ADAC-Stadtplan

Ferner wurden umfangreiche Prüfstandversuche zur Entwicklung einer hochelastischen Schienenbefestigung für das System INFUNDO® durchgeführt. Über deren Ergebnisse gibt der Projektpartner EDILON GmbH, München, Auskunft. Die Prüfstandversuche wurden von den dafür zugelassenen Stellen durchgeführt.

Bedauerlicherweise enthielt der Kostenrahmen des Projekts nicht die Möglichkeit für Rauheitsmessungen der Schienenoberfläche.

Verzögerung in der Zeitplanung Bei der Realisierung der Erprobungsstrecke erfolgte wegen rechtlicher Bedenken zum planfestgestellten Abschnitt eine Änderung: Im Gegensatz zur ursprünglich vorgesehenen Stadtbahnneubaustrecke auf den Fildern wurde eine zum Umbau anstehende Straßenbahnstrecke verwendet. Dadurch verzögerte sich der Bau der als Teststrecke vorgesehenen Stadtbahnstrecke².

Während der Laufzeit des Projekts wurden weitere Straßenbahnstreckenabschnitte in Oslo und München von Schotteroberbau (bzw. System Oslo) in das FF-System INFUNDO® umgebaut. Diese konnten zu weiteren Vergleichsmessungen herangezogen werden.

Zusätzliche Messungen Zusätzlich zu den vorgesehenen Luftschallmessungen konnten Körperschallmessungen in Oslo (Teresgate) und in Stuttgart (Schmidener Straße) durchgeführt werden.

² vgl. Schreiben von Herrn Regierungsbaumeister Manfred Bonz, Senator E.h., Vorstandssprecher Technischer Vorstand, Stuttgarter Straßenbahn AG, an Herrn Ministerialdirektor Otto Finkenbeiner vom 29. Juli 1999

1. Aufgabenstellung und Projektablauf



Abbildung 1.2: Ansicht Messort Stuttgart, Schmidener Straße

Diese Strecke ist seit Juni 2002 mit der Oberbauart INFUNDO® mit Raseneindeckung in Betrieb.

1. Aufgabenstellung und Projektablauf

2. Einführung

Da im niedrigen und mittleren Geschwindigkeitsbereich das Rad–Schiene–Rollgeräusch dominant ist, strebt das Umweltbundesamt aus Anlass der Tendenz aktueller Fahrzeugentwicklungen hin zu potenziell niedrigeren Luftschallemissionspegeln¹ an, als zukünftigen Zulassungsgrenzwert 79 dB(A) bei optimalem Gleiszustand zu empfehlen (vgl. in diesem Zusammenhang ergänzend auch die EU-Richtlinie „Grenzen der Lärmschutzwerte“ für den Hochgeschwindigkeitsverkehr [19] und das Grünbuch „Künftige Lärmschutzpolitik“ der Europäischen Kommission [20]). Um die geforderten Werte bei der Zulassung neuer Fahrzeuggenerationen zu erreichen, sind daher im Rad–Schiene–Bereich weitergehende Schalloptimierungen notwendig.

Eine nachhaltige Lärmreduktion, nicht nur im Neubauzustand, sondern über Betriebsjahre hinweg, wird nur dann erreicht werden können, wenn auch auf der Fahrwegseite mit der technischen Entwicklung Schritt gehalten und eine Schalloptimierung der Fahrwege eingeleitet wird.

Die Schienenfahrbahn hat einen großen Einfluss auf die Frequenz und Amplitude des abgestrahlten Luftschalls und der ins Erdreich eingeleiteten Körperschallwellen. Die verschiedenen Oberbauarten unterscheiden sich durch ihre unterschiedliche Anregbarkeit zu Schwingungen, durch die am Rad-Schiene Kontaktpunkt wirksamen Anregungskräfte sowie durch ihre Luft- und Körperschallemissionseigenschaften.

Von Interesse ist die Frage, welche Frequenzen in dem Schallereignis einer Zugüberfahrt enthalten sind und wie groß die Schallpegel bei diesen Frequenzen sind.

Um dies etwas näher zu betrachten, führen die folgenden Abschnitte dieses Kapitels

- zunächst in die physikalischen Grundlagen ein („Was ist Schall“),
- dann in die physiologischen Grundlagen („Was ist Lärm?“)
- und schließlich in die eisenbahntechnischen Grundlagen („Warum erzeugt eine Zugfahrt Lärm?“).

Auf die theoretischen Grundlagen der Strukturmechanik sowie der geometrischen Akustik möchten wir nur allgemein und sehr knapp eingehen, da hierzu ausreichend Lehrmaterial zur Verfügung steht.

Eine sehr gute und praxisorientierte Einführung in das gesamte Thema findet sich z. B. in dem Handbuch von KRÜGER [48]. Etwas älter ist das Taschenbuch von HECKL und MÜLLER [34].

¹ vgl. Abschnitt 2.3.9

2.1. Schall

Dieses Kapitel macht den Leser kurz mit denjenigen Grundbegriffen vertraut, die für das Verständnis der Schallphänomene, die in den weiteren Kapiteln dieses Berichts behandelt werden, notwendig sind. Grundlegende Begriffe sind Luftschall, Körperschall, Luftschallausbreitung, Körperschallausbreitung und Sekundärschall. Ihr Zusammenhang ist in Abbildung 2.1 veranschaulicht. Die Begriffe werden im Laufe dieses Abschnitts nach und nach erläutert.

Eine Zugüberfahrt regt Schiene, Rad und Wagenkasten zu Schwingungen (z. B. Biegeschwingungen der Schiene) an. Schwingungen, welche sich in einem festen Körper ausbreiten, nennt man *Körperschall*. Wenn sie sich auf das umgebende Medium Luft übertragen, spricht man von *Luftschall*. Die Körperschallschwingungen werden üblicherweise durch die Schall- oder Schwinggeschwindigkeit v , d. h. die Schwinggeschwindigkeit der Körperteilchen beschrieben. Diese besitzen im allgemeinen keine scharfe Frequenz, sondern ein von der Geometrie, Masse und Material der schwingenden Körper bestimmtes Spektrum von charakteristischen Frequenzen f_n , den sogenannten *Eigenfrequenzen*.

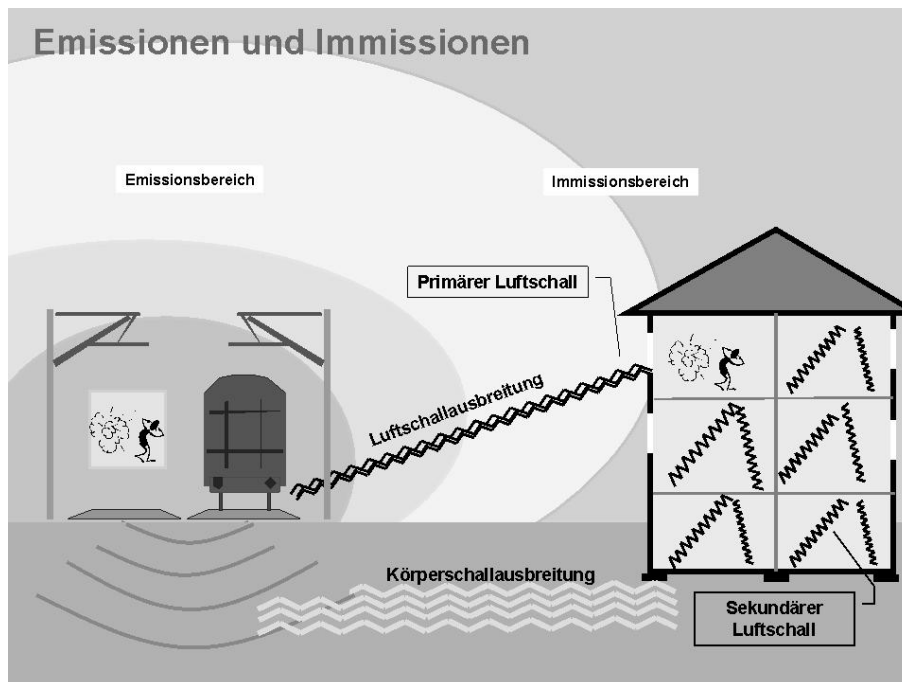


Abbildung 2.1.: Zusammenhang verschiedener definierter Begriffe zu Luft- und Körperschall (weitere Erläuterungen im Text)

Außer den Kapiteln zu Schwingungen und Schall der allgemeinen Lehrbücher der Physik (z. B. GERTHSEN, KNESER, VOGEL [24]) und den speziellen Lehrbüchern zum Thema Körperschall (z. B. das Buch von FRÝBA [22]) und zum Luftschall (z. B. das Kompendium von SKUDRZYK [68]) seien an dieser Stelle zur weiterführenden Information auch die auf den sich mit Akustik befassenden Bauingenieur zugeschnittenen Werke empfohlen, etwa das Buch „Ingenieurakustik“ von JENN, SINAMBARI und FALLEN [36] oder der Beitrag von WETTSCHURECK und HAUCK im Taschenbuch der Technischen Akustik [74]. Eine sehr kurze Einführung, die eine erste Orientierung zum Thema Schwingungen und Wellen geben kann, findet sich in Anhang D.

2.1.1. Grundbegriffe

Die mechanischen Schwingungen eines Mediums bezeichnet man als *Schall*.

Ist das Medium Luft, so spricht man von *Luftschall*, ist das Medium ein fester Körper, so spricht man von *Körperschall*. Flüssige Medien sind in diesem Projekt nicht relevant und werden daher auch nicht mehr weiter betrachtet. In Luft breiten sich – wie in allen Gasen – Schallwellen nur als Longitudinalwellen aus. Zu den Körperschallwellen gehören dagegen nicht nur Druckwellen (reine Längswellen), sondern auch Scherwellen und Biege­wellen – das sind Querwellen – sowie Oberflächenwellen. Letztere haben transversale und longitudinale Anteile, sie heißen auch RAYLEIGH-Wellen (vgl. Anhang D).

Zwischen Frequenz f , Wellenlänge λ und Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Schallwelle besteht folgender, für alle Wellen grundlegender Zusammenhang:

$$c = \lambda f. \quad (2.1)$$

Eine ebene Druckwelle, die sich in Form einer harmonischen Schwingung entlang der x -Achse ausbreitet, wird wie folgt beschrieben:

$$p(x, t) = \hat{p} \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - ft \right) \right], \quad (2.2)$$

wobei \hat{p} die Amplitude der Schallwelle, d. h. der Maximaldruck ist, der an einem bestimmten Punkt im Raum erreicht werden kann. Die Amplitude der Schwingung ist ein Maß für die Stärke der Schallwelle. Abbildung 2.2 veranschaulicht die Definitionen von λ und \hat{p} .

Schall ist daher charakterisiert durch

- die Schallgeschwindigkeit c [m/s] (Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schallwelle),
- Wellenlänge λ [m] der Schallwelle,
- Frequenz f [Hz] der Schallwelle,
- Druckverteilung p [N/m²] der Welle in Raum und Zeit,
- Amplitude \hat{p} [N/m²] (Maximaldruck, der an einem bestimmten Punkt im Raum erreicht wird),
- die Schwinggeschwindigkeit v [m/s] der schwingenden Partikel,
- Beschleunigung a [m/s²] der schwingenden Partikel.

Ausbreitungsgeschwindigkeit

Längswellen Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_L von Längswellen beträgt

$$c_L = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (2.3)$$

wobei K der Kompressionsmodul und ρ die Dichte des Mediums sind.

2. Einführung

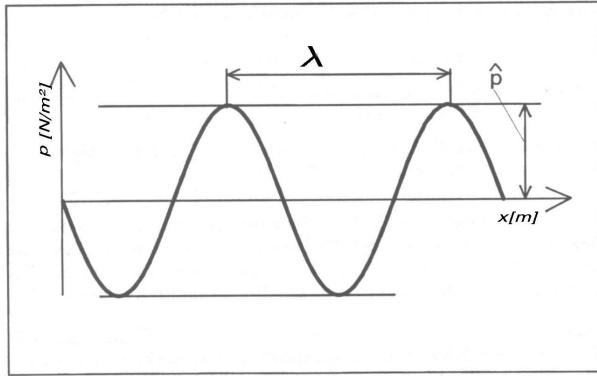


Abbildung 2.2:
Zur Definition von Wellenlänge λ und Amplitude \hat{p} einer Schallwelle

Abszisse: Ausbreitungsrichtung x
Ordinate: Schalldruckpegel p

Querwellen Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_T von Querwellen beträgt

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (2.4)$$

wobei G der Schermodul ist.

Biegewellen Biegewellen breiten sich mit einer Geschwindigkeit aus, die von der Frequenz abhängig ist.

2.1.2. Schallpegel

Da der mögliche Schalldruck \hat{p} des wahrnehmbaren Schalls viele Größenordnungen umfasst, ist er nicht direkt als Maß für die Stärke von Schall geeignet. Gebräuchlich ist daher ein logarithmisches Maß, der *Schalldruckpegel* L_p . Es gilt:

$$L_p = 10 \lg \frac{\hat{p}^2}{p_0^2} \text{ [dB]} \quad (2.5)$$

Für die Einheit dB (Dezi-Bel) wurde als Bezugsgröße ein Schalldruck p_0 festgelegt, welcher der menschlichen Hörschwelle entspricht:

$$p_0 = 20 \mu\text{N/m}^2 = 20 \mu\text{Pa} \quad (2.6)$$

Auch andere Größen, die wie der Schalldruck eine Schallwelle charakterisieren, werden häufig als Pegel angegeben, so zum Beispiel der zur Schwingungszahl ν gehörende Schnellepegel L_ν :

$$L_\nu = 10 \lg \frac{\nu}{\nu_0} \quad \text{mit} \quad \nu_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s} \quad (2.7)$$

oder der Schalleistungspegel L_W :

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad \text{mit} \quad W_0 = 1 \text{ pW}. \quad (2.8)$$

Man berechnet alle Pegel in der in Gleichung 2.5 angegebenen Form. Die Bezugsgrößen werden immer so gewählt, dass ein Schallereignis an der menschlichen Hörschwelle den Pegel 0 dB hat.

Wegen seiner Bedeutung bezeichnet man den Schalldruckpegel auch kurz als *Schallpegel*.

Soll aus den Schallpegeln zweier Schallquellen der Gesamtpegel bestimmt werden, muss zunächst bekannt sein, ob die beiden Schallquellen kohärent sind (d.h. eine gleichbleibende Phasenlage der Schwingungen haben). Falls ja, sind die Wellenbilder zu überlagern. Es kann dann zur destruktiven Interferenz zweier Schallwellen kommen, d.h. durch die Überlagerung von Wellenberg und Wellental wird der Gesamt-Schallpegel niedriger sein als der jeder einzelnen Schallquelle. Dieses Prinzip wird in kleinen geschlossenen Räumen (zum Beispiel Düsentriebwerk, Kopfhörer) bereits technisch nutzbringend zur Schallminderung angewandt, indem eine gegebene Schallwelle mit einer zu diesem Zweck erzeugten zweiten Schallwelle gezielt annulliert wird (vgl. die Ausführungen zum Antischall in Kapitel 1.3). In die Berechnung des gesamten Schalldrucks geht die Phasenlage mit ein.

Sind die Schallquellen unabhängig voneinander (nicht kohärent), wird der Gesamtpegel durch Addition der effektiven Schalleistungspegel berechnet (Mittelwertbildung).

Durch das Logarithmieren bewirkt die Überlagerung zweier gleicher Schallquellen eine Erhöhung um zirka 3 dB. Eine Verzehnfachung der Schallquellen führt zu einer Erhöhung des Pegels um 10 dB.

2.2. Physiologische Grundlagen

2.2.1. Lärm

Luftschall, der vom Menschen gehört werden kann, heißt *Geräusch*.
Geräusche, die nur aus einer bis wenigen Frequenzen bestehen, heißen *Töne*.
Ein Geräusch, das vom Menschen als störend empfunden wird, heißt *Lärm*.

Es gibt eine Vielzahl von Kriterien, die beeinflussen, ob ein Geräusch als Lärm empfunden wird oder nicht. Eine unvollständige Liste umfasst zumindest folgende Charakteristika des Geräuschs:

- die vorherrschende Frequenz,
- den weiteren Frequenzinhalt,
- den Schallpegel,
- die Tonhaltigkeit (tonhaltig oder rauschend).

Faktoren, die vom Geräusch unabhängig sind, sind beispielsweise:

- Bekanntheit des Geräuschs (Gewohnheit),
- Assoziation des Geräuschs mit angenehmen oder unangenehmen Ereignissen (Prägung),
- Interpretation und Bewertung des Informationsgehalts des Geräuschs.

Hier ist eine sehr große Bandbreite möglich. Geräusche dienen als Signale zum Warnen und Bestätigen; als solche können sie erwartet werden oder überraschend eintreffen. Als Musik, Stimmen oder Sprache können sie Sachinformation übertragen und Emotionen auslösen usw.

Das menschliche Ohr nimmt Geräusche je nach Frequenzinhalt unterschiedlich stark wahr. Der

2. Einführung

gehörte Schallpegelwert, die subjektiv empfundene *Lautstärke*, ist zudem von Person zu Person verschieden.

Es gibt daher verschiedene Tabellen, die Schallpegelwerte frequenzabhängig in „mittlere Lautstärkewerte“ umrechnen und dabei weitere situative Umstände berücksichtigen, siehe beispielsweise Abbildung 2.3. In Deutschland ist für den Fall „Verkehrslärm“ die *A-Bewertung* maßgebend. Die Bewertungskurven sind so normiert, dass der A-bewertete Schallpegel bei 1.000 Hz gleich dem Wert des unbewerteten Schallpegels ist. Oberhalb schließt sich ein Bereich bis etwa 10.000 Hz an, der mit einem Zuschlag bewertet wird – das menschliche Ohr ist hier besonders empfindlich – unterhalb von 1.000 Hz sind in der Regel Abschläge vorgesehen.

Eine Erhöhung um 10 dB(A) wird als „doppelt so laut“ empfunden. Wie in Abschnitt 2.1.2 dargestellt, entspricht das einer Verzehnfachung der Schallquelle.

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über gängige A-bewertete Pegel. Informationen über die Auswirkungen von Emissionen finden sich beispielsweise im „Handbuch des Umweltschutzes“ [5] oder in entsprechenden Schriften des Bundesumweltministeriums [6]. Über das Empfinden als Störung hinausgehende Auswirkungen sind beispielsweise Konzentrations- und Schlafstörungen; weitere, gesundheitsbeeinträchtigende Auswirkungen werden zumindest vermutet (vgl. ergänzend auch den UPI-Bericht von TEUFEL [71]).

Tabelle 2.1.: A-bewertete Luftschallpegel verschiedener Geräusche.

Quelle: MAUE, J. H.; HOFFMANN, H.; VON LÜPKE, A. [55]

Schallquelle	Schalldruckpegel L_p [dB(A)]
Düsetriebwerk (nahe)	130
Schmerzgrenze	120
Luftdruckhammer	110
Schlagbohrer	100
Rockkonzert	100
Fahrradglocke (1 m Abstand)	90–80
Staubsauger	70
Hauptverkehrsstraße	70
angeregte Unterhaltung	60
Geschirrspülmaschine	50
Klimaanlage	40
Flüstern	30
Wecker (1 m Abstand)	20
Hörschwelle	0

2.2.2. Körperschallwahrnehmung

Mechanische Schwingungen, die von außen auf den menschlichen Körper einwirken, können zu physiologischen Reaktionen wie z.B. verstärkte Muskelaktivität und Veränderung der peripheren Durchblutung führen und somit die geistige und körperliche Leistungsfähigkeit vermindern.

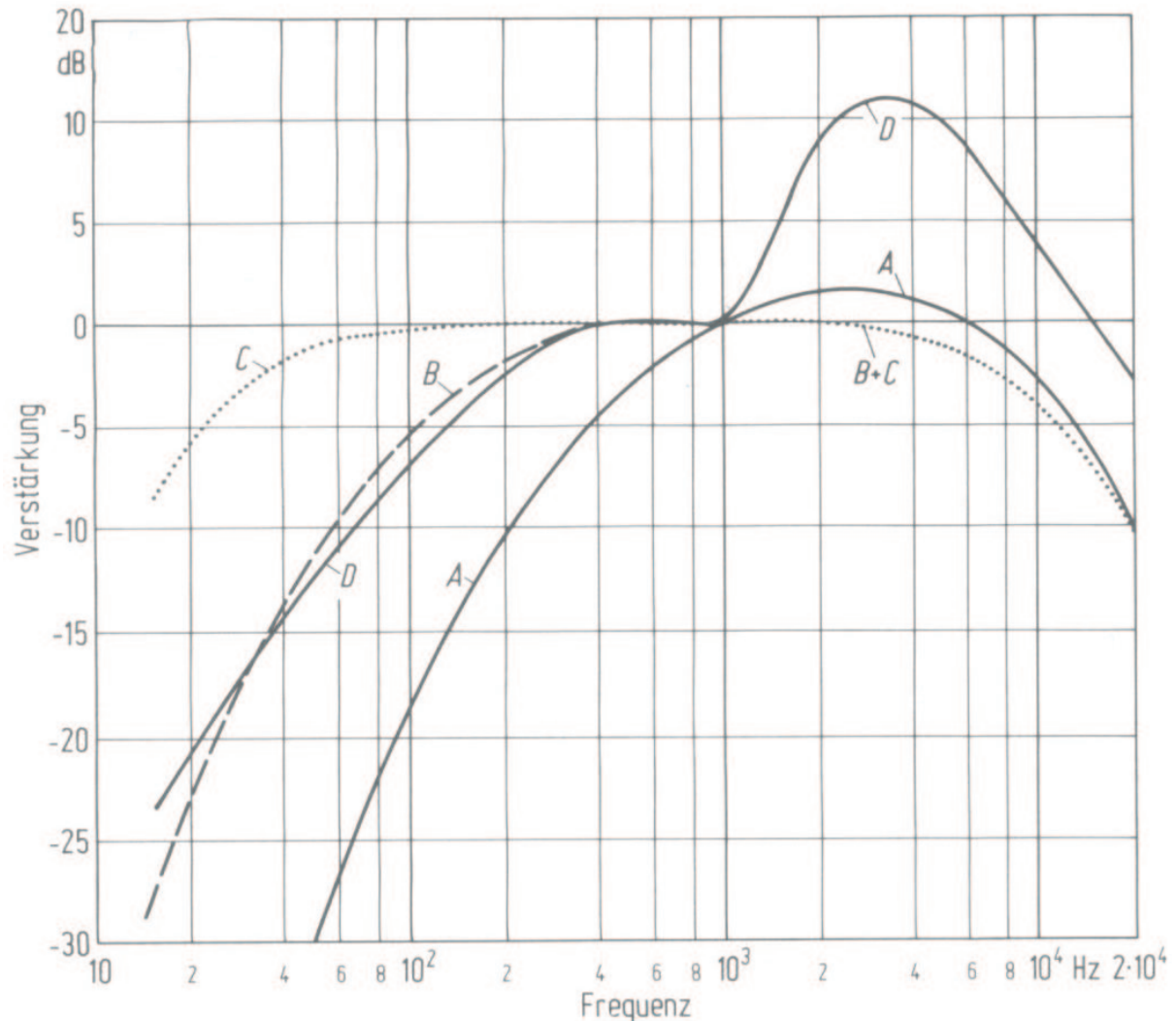


Abbildung 2.3: Frequenzbewertungskurven A, B, C, D für Luftschallpegel

Die A-, B- und C-Bewertung (nach DIN IEC 651) stellen Annäherungen an die frequenzabhängige Empfindlichkeit des Gehörs bei verschiedenen Lautstärkepegeln dar. Im Immissionsschutz und im Arbeitsschutz wird in der Regel die A-Bewertung verwendet. Bei der Bewertung von Kraftfahrzeug-Innengeräuschen wird ergänzend die B-Bewertung eingesetzt. Die C-Bewertung wird zur Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmission benutzt. Die D-Bewertung (nach ISO 3891) wird ausschließlich für Fluglärm verwendet.

Quelle: nach HECKL, MÜLLER [35]

2. Einführung

Körperschallemissionen im Schienenverkehr werden vom Menschen als niederfrequente Schwingungen mit dem ganzen Körper wahrgenommen, wobei die Empfindlichkeit der Wahrnehmung von der Körperhaltung (stehend oder sitzend) abhängt. Insbesondere Schwingungen mit Frequenzen zwischen 1-80 Hz, die man gemäß DIN 4150-2 als Erschütterungen bezeichnet, spielen in der subjektiven Wahrnehmung durch den Menschen eine große Rolle. In diesem Frequenzbereich liegen auch das Maximum des vom Schienenverkehr emittierten Körperschalls sowie die Resonanzfrequenzen von Gebäuden und Gebäudeteilen (Decken, Böden). Es kann daher in ungünstigen Fällen zu einer Resonanzverstärkung der Erschütterungen und einer starken Beeinträchtigung der Bewohner kommen.

Die physikalische Körperschallschwingungsgeschwindigkeit am Immissionsort v wird gemäß DIN 4150 wie folgt frequenzbewertet (KB-Bewertung):

$$KB(f) = v(f) \frac{1}{\sqrt{1 + (f_0/f)^2}} \quad (2.9)$$

Hierin bedeutet

- $KB(f)$ [m/s] frequenzbewertete Schwingschnelle $v(f)$ [m/s]
- $v(f)$ [m/s] am Immissionsort ermittelte Schwingschnelle
- f_0 [Hz] Grenzfrequenz des Hochpasses
- f [Hz] Frequenz der Schwingung

Die KB-Bewertung berücksichtigt die unterschiedliche Einwirkung der Schwingungen bei unterschiedlicher Körperhaltung. Durch die KB-Bewertung werden Frequenzen unterhalb von zirka 20 Hz mit einem Abschlag versehen. Die Bewertungskurve ist in Abbildung 2.4 zu sehen.

Der Zusammenhang zwischen KB-bewerteter Schwingschnelle und subjektiver Wahrnehmung kann Tabelle 2.2 entnommen werden.

Tabelle 2.2.: Zusammenhang zwischen bewerteter Schwingschnelle und subjektiver Wahrnehmung. Quelle: VDI 2057 B13 [49]

<u>bewertete Schwingschnelle</u>	<u>Beschreibung der Wahrnehmung</u>
< 0,1	nicht spürbar
0,1	Fühlschwelle
0,1-0,4	gerade spürbar
0,4-1,6	gut spürbar
1,6-6,3	stark spürbar
> 6,3	sehr stark spürbar

Für das Eisenbahnwesen ist Körperschall außerdem als Ursache von Sekundärschall relevant: Gebäude, Gebäudeteile oder Gebäudeeinrichtungen können durch Körperschall, der sich vom Eisenbahnoberbau aus ins Erdreich fortpflanzt, zu Schwingungen angeregt werden und dabei Luftschall abstrahlen. Dieser heißt Sekundärschall – im Gegensatz zum direkt vom Eisenbahnkörper abgestrahlten Luftschall. Der relevante Frequenzbereich erstreckt sich von zirka 20 Hz bis 300 Hz.

Im sehr niederfrequenten Bereich (einige Hz) gehen die Schwingungen in den Bereich über, der für das Komfortempfinden des Fahrgastes relevant ist (0,1 Hz bis zirka 5 Hz). Dieser Bereich wurde u. a. bereits von HOHNECKER [39, 40, 41, 42] untersucht. Er ist nicht Teil dieses Projektes.

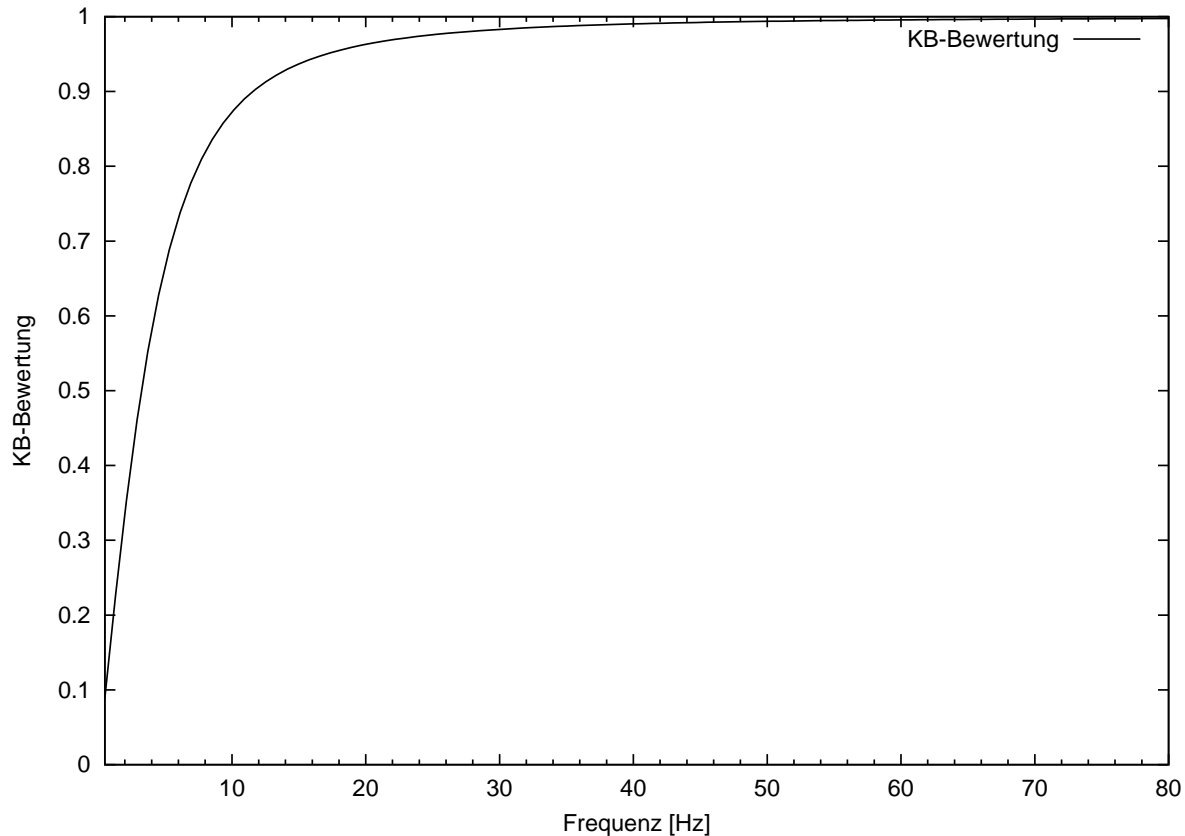


Abbildung 2.4: KB-Bewertung gemäß DIN 4150-2

2.3. Eisenbahntechnische Grundlagen

Schienenbahnen gehören in die Kategorie der spurgeführten Bahnen. Anders als etwa bei Magnet-, Seil- und Zahnradbahnen sind sie als Adhäsionsbahn ausgeführt, d. h. die Antriebs- und Bremskräfte werden durch Reibung zwischen Rad und Schiene übertragen.

Das allgemeine Eisenbahngesetz (AEG) unterscheidet die Schienenbahnen in Deutschland nach *Eisenbahnen*, auch *Vollbahnen* genannt, und *Straßenbahnen*, ferner nach Bergbahnen und nach Bahnen besonderer Bauart.

Rechtsgrundlagen für den Bau der Infrastruktur und der Fahrzeuge des öffentlichen Schienenverkehrs sind für Vollbahnen mit Regelspur die Eisenbahnbau- und -betriebsordnung (EBO) und für Straßenbahnen die Bau- und Betriebsordnung für Straßenbahnen (BOStrab). Eisen- und Straßenbahnen unterscheiden sich daher grundsätzlich in den Vorschriften, zum Beispiel für die Spurweite, die Sicherheit (Bremsweg, Stabilität gegen Längsdruck, Signalwesen) etc.

Dieses Kapitel stellt zunächst den Fahrweg von Schienenbahnen – den Bahnkörper – vor und geht dabei im Detail auf die verschiedenen Oberbauarten ein. Am Ende des Abschnitts 2.3.3 (Oberbauarten) werden dann die heute aktuellen Oberbauarten – SchO und FF – mit ihren Vor- und

2. Einführung

Nachteilen vergleichend diskutiert. Die Bauart INFUNDO® wird hier nur kurz erwähnt, um sie in die Systematik einzuordnen. Wegen ihrer hervorgehobenen Bedeutung für dieses Forschungsprojekt wird sie in einem eigenen Kapitel (Kapitel 3) ausführlich besprochen.

Es schließen sich zwei Abschnitte an, die den Grundlagen zum Lauf des Fahrzeuges im Gleis gewidmet sind. Denn zum einen ist ein Eisenbahnfahrzeug keineswegs so konstruiert, dass es immer genau entlang der mathematischen Gleismitte (zentriert im Spurkanal) läuft; die Radsätze sind vielmehr auf einen Wellenlauf hin ausgerichtet, der den Lauf auch bei Stößen stabilisiert und das Fahrzeug im Spurkanal hält. Zum anderen ist der Fahrweg keineswegs so konstruiert, dass er möglichst starr der Last des Fahrzeugs trotzt, sondern er soll zum Zwecke der Materialschonung in definierter Weise nachgeben. Unter dem Einfluss der Radsätze ergibt sich eine Biegelinie, die mit dem Fahrzeug „mitläuft“.

Nach diesen Vorbereitungen folgt ein Abschnitt, der sich mit dem Phänomen der Schallemission im Schienenverkehr befasst.

Das Kapitel schließt mit Erfahrungen aus bisherigen in-situ-Messungen, die den Stand der Wissenschaft zu Projektbeginn widerspiegeln, wobei die Literaturangaben hier bewusst knapp gehalten wurden.

Als weiterführende Literatur zu diesem Kapitel sei auf einen entsprechenden Aufsatz von HOHNECKER verwiesen, der 2002 in dem Standardwerk „Handbuch für Bauingenieure“, herausgegeben von ZILCH, K.; DIETRICH, C. J. und KATZENBACH, R., erschienen ist [37].

2.3.1. Der Bahnkörper

Der Schienenfahrweg ist der sog. *Bahnkörper*. Sein Aufbau gliedert sich – von unten nach oben – in Untergrund, Unterbau und Oberbau. Eine prinzipielle Darstellung des Querschnitts des Bahnkörpers einer Eisenbahn² zeigt Abbildung 2.5.

Der anstehende gewachsene Boden ohne Mutterbodenschicht bildet den *Untergrund*. Die oberflächennahen Schichten werden ggf. so behandelt, dass die notwendigen Trageigenschaften – wie z. B. Proctordichte und Elastizitätsmodul – gewährleistet sind. Nichttragfähige Bodenarten auch in beanspruchten tiefergelegenen Zonen müssen verbessert oder ausgetauscht werden.

Der *Unterbau* umfasst Erdbauwerke (Anschnitte, Böschungen, Einschnitte, Dämme usw.), Kunstbauwerke (Brücken, Durchlässe, Stützmauern, Tunnel) und Entwässerungsanlagen (Gräben und Mulden, Tiefentwässerungen).

Den oberen Abschluss der Erdbauwerke bildet das *Planum* mit der *Planumsschutzschicht* aus Kiessand. Teilweise wird sie durch eingelagerte Folien oder Geotextilien unterstützt. Die Planumsschutzschicht dient

- zur Lastverteilung,
- zur Entwässerung,
- als Sperrfilter gegen Aufsteigen des Erdreichs in den Oberbau (besonders relevant bei SchO),
- als Frostschutzschicht.

Auf dieses Planum setzt der *Oberbau* auf.

² Vollbahn gemäß Eisenbahnbau- und Betriebsordnung (EBO)

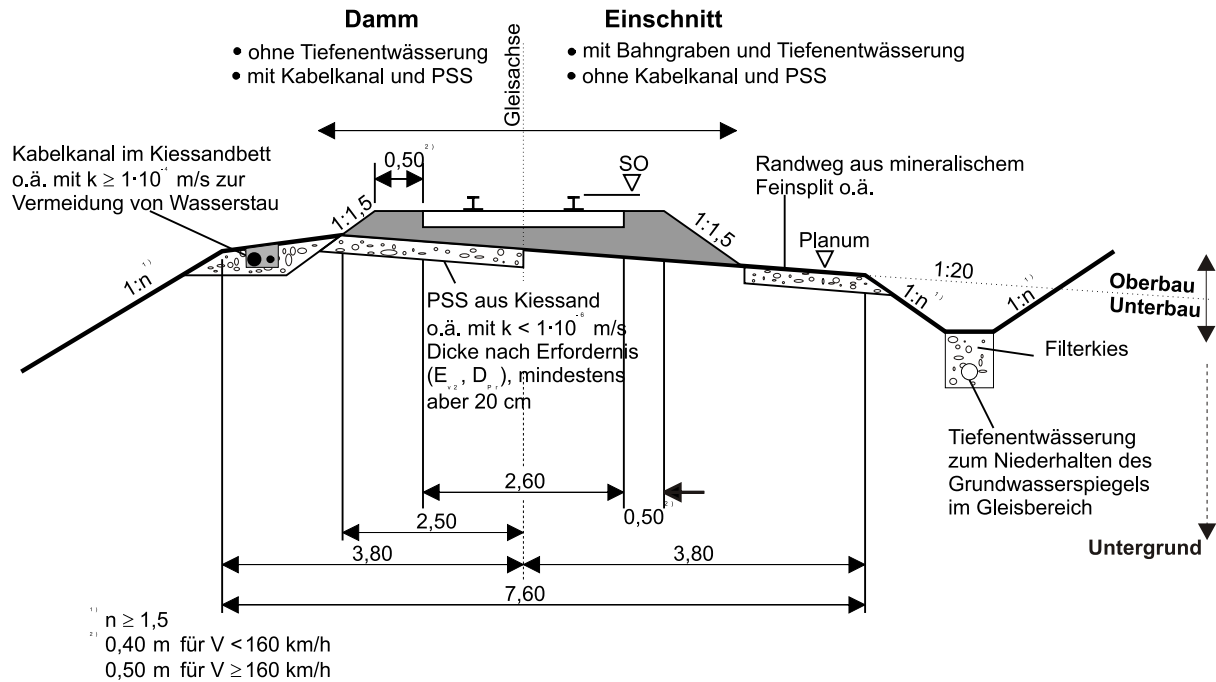


Abbildung 2.5: Querschnitt des Bahnkörpers einer Vollbahn

Aufbau und Maße in Anlehnung an die Richtlinien der Deutschen Bundesbahn [9]

2.3.2. Oberbaukomponenten

Beim Oberbau unterscheidet man die Komponenten

- Gleis oder Gleisverbindung (Weiche, Kreuzung),
- Bettung.

Das *Gleis* besteht aus den Schienen mit den Schienenbefestigungsmitteln und den verbindenden Abstandhaltern (i. d. R. Schwellen).

Die *Bettung* verteilt die Last vom Gleis auf das Planum und fixiert die Gleislage.

Die Aufgabe des Oberbaus besteht in der sicheren Spurführung und in der Aufnahme der Gewicht-, Seitenführungs-, Antriebs- und Bremskräfte einschließlich der Fliehkraftwirkung im Bogen, der thermischen Kräfte sowie der dynamischen Einflüsse durch das Gleis und der – gedämpften und verteilten – Weiterleitung dieser Kräfte über die Bettung in den Unterbau. Seine Elemente unterliegen besonders der Abnutzung aufgrund des Eisenbahnbetriebs und müssen daher nicht nur haltbar – wie etwa bei Unterbau und Untergrund – sondern auch austauschbar und nachjustierbar sein. Eine wirtschaftliche Herstellung und Instandhaltung muss zur Senkung der Lebenszykluskosten (LCC) gewährleistet werden.

Jede für den Einbau vorgesehene Oberbauart muss vom Eisenbahnbundesamt (EBA) zugelassen sein.

2. Einführung

Schienen Allen Oberbauarten gemeinsam sind Schienen aus Walzstahl – Vignol- bzw. Rillenschienen unterschiedlicher Maße (maßgebend für die Belastbarkeit) und Härte (maßgebend für den Verschleiß).

Rillenschienen werden dort eingebaut, wo Bahnen innerhalb des Straßenraumes verkehren bzw. ihn queren (Bahnübergänge, Ladestraßen, Werkshöfe). In den übrigen Bereichen werden Vignolschienen verwendet.

Vignolschienen werden i. d. R. der Kegelform der Radlaufflächen entsprechend nach innen geneigt eingebaut (Neigung 1 : 20 bis 1 : 40). Rillenschienen werden dagegen wegen der Anpassung an die Straßenoberfläche i. d. R. lotrecht eingesetzt.

Die Einbauneigung der Vignolschienen entspricht der Konizität der Räder. Die Laufflächen der Räder sind konisch. Der Radius nimmt zur Radinnenseite hin zu, weil dies bei starren Radsätzen den Lauf stabilisiert (sog. Sinuslauf, vgl. Abschnitt 2.3.4).

2.3.3. Oberbauarten

Es folgt ein Überblick, der die technische Entwicklung des Oberbaus aufzeigt. Diese korreliert mit der chronologischen Entwicklung, ist aber nicht notwendigerweise mit ihr identisch; auch haben sich die Eisenbahnnetze auf der Erde unterschiedlich schnell entwickelt bzw. befinden sich noch heute in unterschiedlichen Stadien der Entwicklung.

1. diskrete Lagerung

Die technische Entwicklung der Oberbaus beginnt bei einer einfachen Lagerung der Schiene auf einzelnen Steinblöcken (siehe Abbildung 2.6 oben).

2. Längsschwelle

Danach wurde die kontinuierliche Lagerung auf Längsschwellen entwickelt, die die lotrechte Last gleichmäßiger abtragen (Abbildung 2.6 unten).

3. Schotteroberbau: Querschwellengleis mit Schotterbett

Die nächste Entwicklungsstufe ist das Querschwellengleis, das die lastverteilende Fläche in Ebene der Schwellenunterkante in Querrichtung vergrößert und außerdem zur Spurstabilität beiträgt.

Querschwellen können als Holz-, Spannbeton-, kunstfaserbewehrte Beton-, Stahl- oder Kunststoffschwelle ausgeführt sein. Der Schwellenabstand beträgt 60 cm bis 70 cm. Querschwellen finden als monolithische Schwelle (Monoblockschwelle), jedoch auch als Zweiblockschwelle (Biblockschwelle) Verwendung. Bei Biblockschwellen dienen deren beide Betonblöcke als Schienenlager, die mit einem Stahlstab zur Aufnahme der Seitenkräfte und zur Spurstabilität verbunden sind. Die Auflagerfläche der Schwelle muss so groß sein, dass die maximale Schotterpressung den zulässigen Wert nicht überschreitet.

Die Spannbetonchwelle hat – in Verbindung mit geeignet elastischen Schienenunterlagen und ggf. Schwellenbesohlung – als wirtschaftlicheres Baumaterial die Holzschwelle heute in vielen Bereichen abgelöst.

Die Bettung besteht aus *Gleis-Schotter*, einem gebrochenen Hartgestein mit einer Kantenlänge zwischen 25 mm und 60 mm und den darunterliegenden Schichten, beispielweise einer Unterschottermatte. Eine Bettung aus gebrochenem Hartgestein (Schotter) führt im Vergleich zur Bettung auf Kies oder Sand, wie sie in vielen Ländern der dritten Welt gelegentlich noch vorkommt, zu deutlich erhöhter Lagestabilität.

Die Kombination aus Schotterbett und Querschwellengleis heißt Schotteroberbau (SchO). Es ist der weltweit zur Zeit meistverbreitete Standardoberbau der Eisenbahnen. Abbildung 2.7 zeigt den Schotteroberbau mit Holzschwellen bzw. mit Betonschwellen.

Beim SchO besteht das Gleis i. d. R. aus einem *Gleisrost* (Schienen und Querschwellen), die Schienen sind mit den sog. *Kleineisen* befestigt³.

Neben der Querschwelle wird z. Zt. in Deutschland nur noch bei untergeordneten Bahnen auch die kontinuierliche Längsschwelle als Schienenaufleger verwendet.

Sonderbauart: das Breitschwellengleis Bei dieser Sonderbauart, die bereits als Übergangsform zur FF eingeordnet werden kann, wird die gesamte Schotteroberfläche durch die Schwelle bedeckt. Dadurch wird die Last aus der Schiene nahezu auf die ganze Schotteroberfläche verteilt. Gegenüber dem herkömmlichen Schwellengleis weist diese Bauform einen höheren Querverschiebewiderstand auf. Die Vorteile des SchO gegenüber der FF werden weitgehend beibehalten, die Nachteile verringert.

4. Feste Fahrbahn

Zur Bettung zählen bei der FF die Tragplatte aus Beton oder Asphalt und die hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT).

Es wird unterschieden zwischen kontinuierlicher Lagerung der Schiene (direkt auf der Tragplatte befestigte Schienen) und den auf der Tragplatte aufliegenden diskret gelagerten Schienen (i. d. R. Gleisrost mit Schwellen bzw. auf Fragmente reduziert, der nach dem Ausrichten bis zur Schwellenoberkante im Beton vergossen wird). Bei einigen Bauarten wird ein spezieller Gleisrost aus Befestigungspunkten und Abstandhaltern (Zweiblockschwellen) lage- und höhengenaue in den feuchten Beton eingerüttelt. FSS und HGT werden vergleichbar den im Straßenbau üblichen Verfahren hergestellt; die Tragplatte aus Asphalt oder Beton mit Fertigern, in Gleitschalung oder als Fertigteile.

Der Übergang zur FF bedeutet einen beachtlichen Entwicklungssprung. Die Bettung wird hier mit einer Lagestabilität hergestellt, wie sie bei hoher dynamischer Belastung das lose Haufwerk Schotter nicht erreichen kann. Die notwendigen Elastizitäten sind verstärkt in den Schienenbefestigungselementen oder unter der Tragplatte unterzubringen. Bauarten der FF werden insbesondere bei hochbelasteten Strecken (hohen Geschwindigkeiten und/oder hohen Achslasten) eingesetzt sowie ferner auf Brücken und im Tunnel, wo es auf die im Vergleich zum SchO geringere Bauhöhe ankommt. Strecken nach BOStrab, welche straßenseitig mit Lkw-Verkehr befahrbar sein müssen, werden in der Regel schotterlos ausgeführt. Abbildung 2.8 zeigt typische Formen der FF.

³ Kleineisen sind Schienenbefestigungsmittel aus Schmiede- bzw. Federstahl (Federnägel mit und ohne Rippenplatte, Hakenschrauben mit Federring und Klemmplatte auf Rippenplatte, Spannbügel auf Rippenplatte) und elastischen Zwischenlagen aus Kunststoff (früher Pappelholz). Die Schienenbefestigungsmittel müssen die Zwängungen infolge Schienendurchbiegung und einseitiger, außermittiger Belastung ohne Kippen der Schwellen ausgleichen können und zusammen mit den Schwellen oder Tragplatten eine sichere Spurhaltung gewährleisten. In Längsrichtung müssen alle Längskräfte aus Temperatur, Bremsen etc. aufgenommen werden.

2. Einführung

Alle schotterlosen Oberbauarten im Geltungsbereich von EBO und BOStrab sind ausnahmslos Bauarten der FF. Oft wird daher auch der Begriff „schotterloser Oberbau“ synonym für FF verwendet.

5. Schwellenlose FF

Zukunftsweisend sind Varianten der Festen Fahrbahn, die ohne Schwellen auskommen. Wenn die Tragplatte die Last der Schiene direkt aufnehmen kann und die Spurstabilität sicherstellt, kann auf diese Bauteile verzichtet werden.

Abbildung 2.8 (oben) zeigt hier die Oberbauform INFUNDO[®], die diesem Typus entspricht. Durch die kontinuierliche Einbettung ist eine konstant gleiche Einsenkung beim Befahren sowie eine kontinuierliche seitliche Aufnahme der Horizontalkräfte gegeben. Im Gegensatz dazu stellen beim Querschwellengleis die Schwellen Hochpunkte der Fahrbahn dar.

Die oberste Schicht des Oberbaus, auf Höhe der Schiene, sowohl zwischen den Schienen als auch im Außenbereich, trägt nicht zur Lastverteilung bei. Man bezeichnet diese Schicht als *Eindeckung*. Beim SchO ist keine Eindeckung üblich. Die FF kann nach Belieben eingedeckt werden. Für Straßenbahnstrecken, die vom Individualverkehr mitbenutzt werden, wird oft Asphalt oder Beton verwendet. Spezielle – zum Beispiel schall- und emissionsmindernde – Schichten sind möglich.

Wegen seiner Bedeutung für das vorliegende Forschungsvorhaben wird die Oberbauart INFUNDO[®] in einem eigenen Kapitel (Kapitel 3) ausführlich vorgestellt.

6. Rasengleis

Rasengleise (Abbildung 2.9) sind FF mit einer Rasenschicht als Eindeckung. Mit Rasen eingedeckte Schottergleise sind eine seltene Ausnahme, da der Schotter trotz aufgelegter Schutzfolie leicht verschmutzt. Rasengleise werden in der Nähe von bewohnten Gebieten wegen der Optik, der Luftschallminderung und zunehmend auch wegen des positiven Effektes auf das Mikroklima (lokaler Feuchtigkeitshaushalt einer Straßenschlucht) bevorzugt eingesetzt. Nachteilig bei Rasengleisen ist die aufwändige Pflege (schneiden, bewässern), die im Sommer zum Teil mehrmals täglich durchgeführt werden muss.

- Beim traditionellen Rasengleis tragen Stahlbetonbalken als Längsschwellen die Schienen. Die darunterliegende zirka 30 cm dicke Dränbetonschicht sorgt für ausreichende Entwässerung. Der Zwischenraum zwischen den Balken wird mit Erde oder Substrat ausgefüllt und mit Magerrasen o. ä. bepflanzt. Die Dicke der Pflanzschicht ist so zu bemessen, dass die Vegetation nicht zu üppig und zu hoch wird. Rasengleise finden beim Bau von Straßenbahnlinien ihren überwiegenden Einsatzbereich, es sind jedoch auch Zulassungen für Vollbahnen erteilt.
- Bei der Oberbauart INFUNDO[®] liegen die Schienen (alle Typen möglich) kontinuierlich gelagert in einem speziellen Kunststoff eingegossen längs in Betontrögen (vergleichbar mit Längsschwellen). Auch bei dieser Konstruktion lässt sich durch trogförmige Aussparungen zwischen den Schienen und deren Ausfüllen mit einem Kies-Substrat-Gemisch problemlos ein Rasengleis herstellen.

- Rasengleis beim Einbau von Rillenschienengleisen:
Die Rillenschienen liegen entsprechend der vorhandenen Oberbauform auf Schwellen oder Fahrbahnplatten. Als Straßenbelag werden zwischen den Schienen Betonplatten, Pflaster oder Asphalt eingebaut. In nicht mit Straßenfahrzeugen befahrenen Abschnitten wird die Fahrbahn häufig begrünt. Der Bereich zwischen den Schienen wird dabei bis kurz unter die Oberkante mit Boden eingedeckt. Eine ausreichende Entwässerung muss gewährleistet sein.

7. Ausblick

Eine Weiterentwicklung des Naturierungsgedankens ist die Eindeckung mit technischen Naturierungsprodukten wie etwa die Sedum-basierten Schichten des IASP an der Humboldt-Universität zu Berlin. Ziel ist es, damit die mikroklimatische, optische und schall- bzw. emissionsmindernde Wirkung des Rasens mit solchen Pflanzen zu erreichen, die sehr wenig der Pflege bedürfen. Ein Schema ist in Abbildung 2.9 (unten) zu sehen.

Aufgrund der allseitigen Ummantelung und der kontinuierlichen Auflagerung kann das Schienenprofil reduziert werden. Eine Schiene SA 42, bei der materialsparend auf den Schienensteg weitgehend verzichtet wurde, wurde in den Niederlanden erprobt und in Deutschland in der Agnes–Bernauer–Straße in München erstmals eingebaut. Weitere reduzierte Schienenprofile sind zur Zeit in der Entwicklung.

2. Einführung

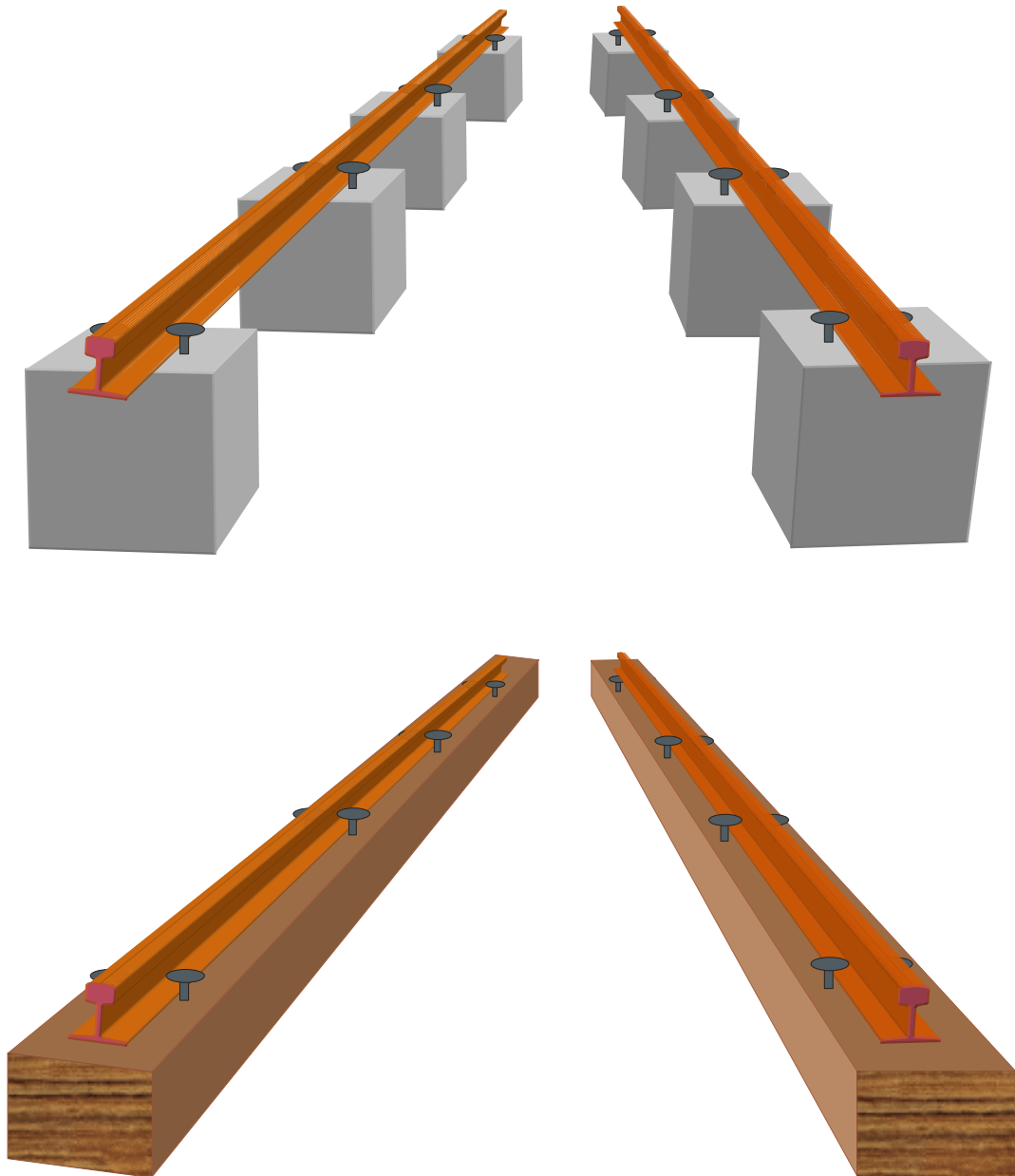


Abbildung 2.6: Oberbauentwicklung 1 und 2 – frühe Stadien

oben: diskrete Lagerung auf Einzel-Steinblöcken
unten: kontinuierliche Lagerung auf Längsschwellen.
Diese verteilen die Last gleichmäßiger.

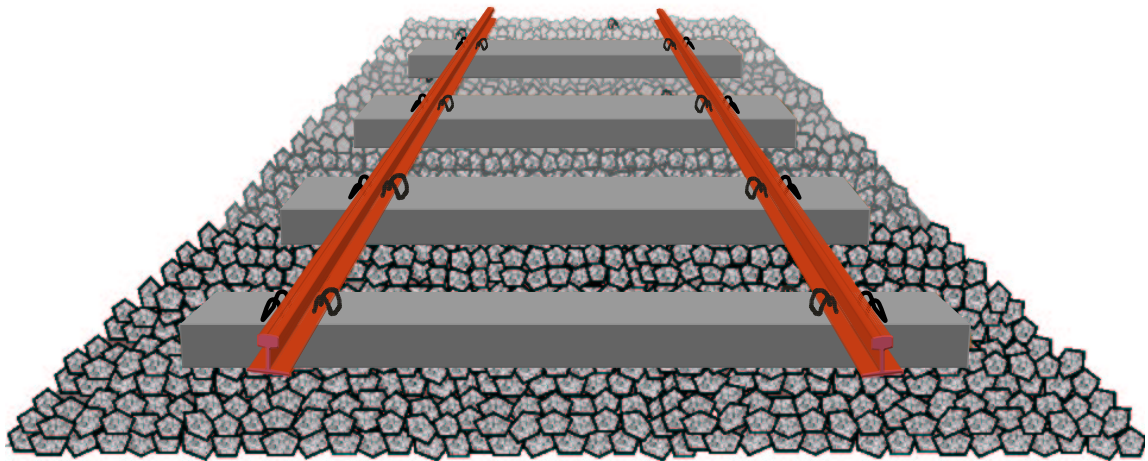
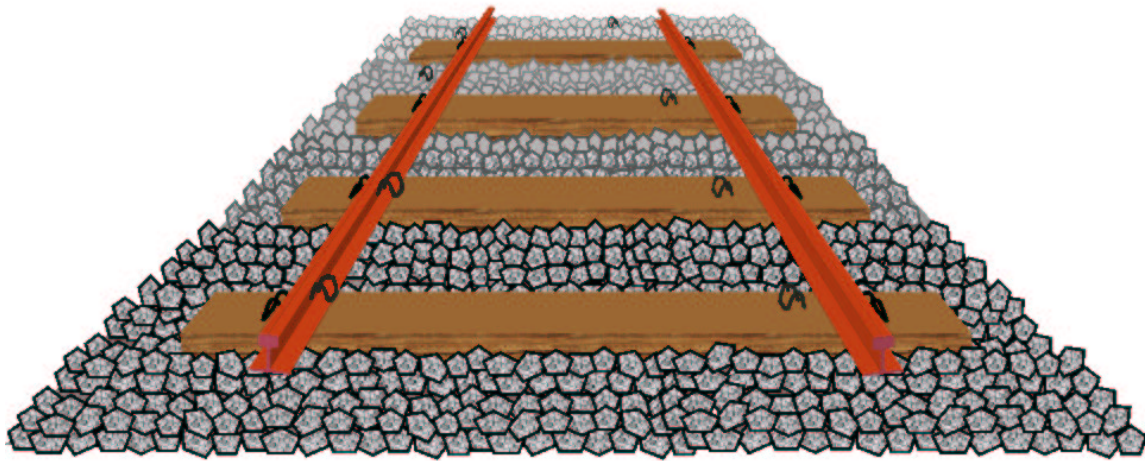


Abbildung 2.7: Oberbauentwicklung 3 – Schotteroberbau, bestehend aus Querschwellengleis und Schotterbettung

oben: klassische Ausführung mit Holzschwellen
unten: modernere Ausführung mit Betonschwellen

2. Einführung

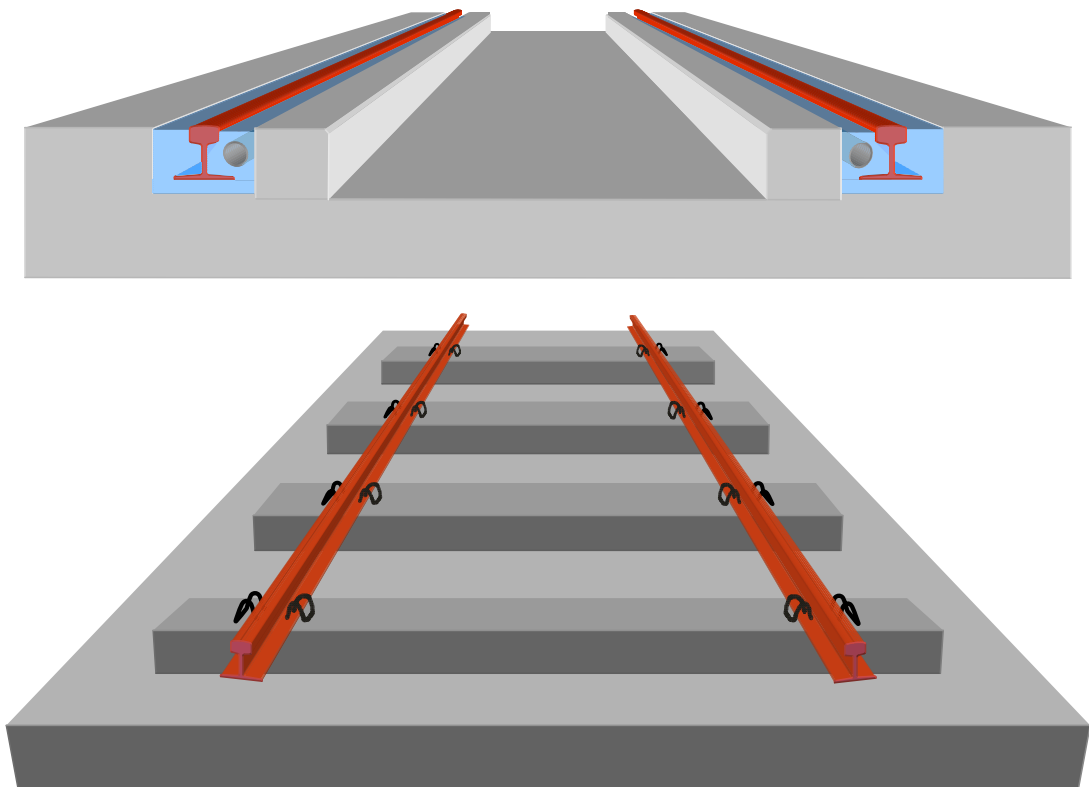


Abbildung 2.8: Oberbauentwicklung 4 und 5 – Feste Fahrbahn

oben: Variante ohne Schwellen (hier: INFUNDO®)

unten: klassische Variante mit Schwellen

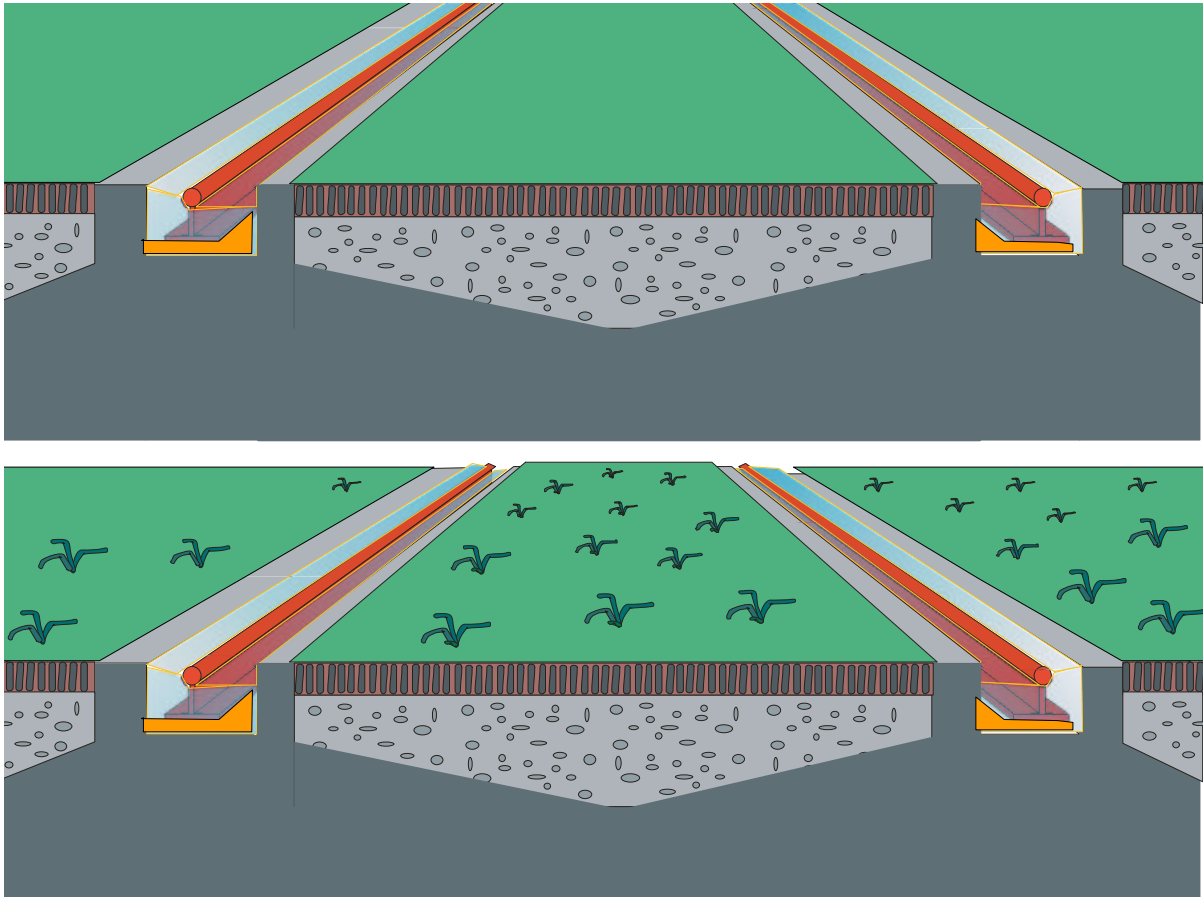


Abbildung 2.9: Oberbauentwicklung 6 und 7 – eindeckter schwellenloser Oberbau INFUNDO®

oben: Rasengleis

unten: technische Naturierung

2. Einführung

FF und SchO im Vergleich

Als Vorteile des SchO im Vergleich zur FF gelten heute die relativ billige, problemlose und hochmechanisierte Erstellung und Instandhaltung, die leichte Korrigierbarkeit der Lagegenauigkeit bei Fertigungsfehlern, Seitenverschiebungen und Setzungen oder Abnutzungen im Betrieb sowie die geringere Schallabstrahlung.

Als Nachteile gelten der relativ niedrige Querverschiebewiderstand (muss teilweise durch Einbau von sogenannten Sicherungskappen erhöht werden), rheologische Effekte (Schotterfließen), der zunehmende Materialverschleiß des Schotters bei höheren Geschwindigkeiten infolge hoher Schwingungsübertragung und kurze Überwachungs- und Instandhaltungsintervalle. Bei schwer belasteten Strecken (statisch und/oder dynamisch, z. B. HGV-Strecken) ist die Liegedauer deutlich geringer als der auf wenig belasteten Strecken erreichbare Standard von vierzig Jahren.

Ein Vorteil einiger FF liegt darin, dass sie zur Not (bei Straßenbahnen: im Regelfall) auch durch Straßenfahrzeuge im Rettungsfall befahrbar sind.

Ein Nachteil der FF ist die schwierige Überwachung des Unterbaus.

Für die künftige Entwicklung ist festzustellen: Viele FF-Bauarten ließen sich, wenn sie auf langen Streckenabschnitten eingebaut werden, ebenfalls weitgehend mechanisiert herstellen, was die Herstellungskosten senken würde. Für die Instandhaltung, wenn sie einmal erforderlich wird, wird jedoch die Mechanisierung schwierig.

Hinsichtlich der Verringerung der Schallabstrahlung und der Verbesserung der Regulierbarkeit konnten in der neueren Forschung Lösungen gefunden werden, welche die FF mit dem SchO vergleichbar oder sogar günstiger machen.

Einsatzfelder der verschiedenen Oberbauarten

FF auf Kunstbauwerken werden im HGV-Bereich der japanischen Eisenbahnen schon seit den 1960er Jahren eingebaut. Im Netz der DB AG liegen derzeit etwa 690 km Gleis mit FF: seit Anfang der 1990er Jahre in Tunnel der HGV-Strecken, seit Mitte der 1990er Jahre in größerem Umfang auch auf Erdplanum. Letztere weisen seit mehreren Jahren auch unter starker Belastung eine stabile Gleislage und daraus folgend einen hohen Fahrkomfort auf. Im Schnellfahr- und Hochgeschwindigkeitsbereich werden wegen der dynamischen Kräfte sehr hohe Anforderungen an den Oberbau gestellt. Deshalb wurden in jüngster Zeit NBS-Abschnitte verstärkt mit FF ausgerüstet, da nur sie dauerhaft der hohen Beanspruchung gewachsen ist.

Straßenbahnen haben heute oft eine Betontragplatte, auf der die Schienen mittels Abstandhaltern (Spurstangen) und Unterlagen in Neigung, Lage und Höhe ausgerichtet und anschließend dauerhaft vergossen werden.

In den übrigen Fällen bildet der Schotteroberbau als Stand der Technik einen Standard.

2.3.4. Fahrzeuglauf

Das Standard-Bauelement für Eisenbahnfahrzeuge ist der *Eisenbahn-Radsatz*. Er besteht aus einer starren Achse mit zwei aufgeschrumpften Rädern. Wie bereits auf Seite 22 erwähnt, ist die Lauffläche der Räder konisch, der Radius der Räder nimmt zur Radinnenseite hin zu. Von der Lauffläche zu unterscheiden ist der *Spurkranz* (vgl. Abbildung 2.10), der sich radinnenseitig an die Lauffläche anschließt und der vor allem zum Führen und der Entgleisungssicherheit (z. B. in

2. Einführung

engen Bögen oder – angesichts der unvermeidbaren Imperfektionen von Rad- und Schienenprofil – bei starker dynamischer Anregung) dient.

Für den Fall der Einpunktberührung⁴ lässt sich der Eisenbahnradsatz von EBO-Bahnen als Doppelkegel idealisieren. Es ergibt sich eine Oszillation des Radsatzes um die Mittellage mit einem Freiheitsgrad und mit der Wellenlänge λ (sog. KLINGELSche⁵ Formel) von

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{rL}{\tan \delta}} \quad , \quad (2.10)$$

in welche der Radius r des Rades, die Spurweite $2L$ und die Kegelneigung δ eingehen.

Die Oszillation entspricht angenähert einem sinusförmigen Lauf des Radsatzes im Spurkanal. Zu den Eigenschaften der Oszillation gehören: Der Schwerpunkt ändert seine Höhenlage nicht; die Drehung um die Hochachse verschwindet in erster Ordnung. Schwerpunktschwindigkeit und -winkelgeschwindigkeit hängen zusammen wie beim Einzelrad. Kleine laterale Auslenkungen entsprechen mathematisch kleinen Drehungen um einen Momentanpol. Der Sinuslauf ist in Abbildung 2.11 veranschaulicht.

Der Vorteil des Sinuslaufs ist die Selbstzentrierung des Radsatzes. Nach einer Auslenkung aus der Mittellage – etwa aufgrund einer lokalen Störung oder einer dynamischen Einwirkung – richtet sich der Radsatz wieder zentriert zum Spurkanal aus. Im normalen freien Geradeauslauf läuft der Radsatz nicht mit dem Spurkranz an der Schiene an. Der Lauf ist sehr ruhig. Radsätze mit einer Achse und zwei aufgeschrumpften Rädern mit konischem Profil sind daher das Standard-Bauelement für Eisenbahnfahrzeuge.

Von Nachteil ist die permanente niederfrequente dynamische Anregung z. B. des Wagenkastens – je nach Fahrgeschwindigkeit einige Hertz – die mit dem Sinuslauf einhergeht.

2.3.5. Biegelinie der Schiene

Unter senkrechter Last biegt sich die Schiene nach unten durch. Diese Biegelinie wird bei der Fahrt „mitgeführt“ und erzeugt somit eine Welle, die unter der abgetragenen Kraft der Schiene entlangwandert.

Das bekannte Bettungsmodell von WINKLER [75] nimmt an, dass sich die Schiene auf einer Bettung befindet, diese elastisch ist und die Reaktionskraft $p(x)$ der Bettung an jeder Stelle x entlang der Schiene proportional zur dort vorhandenen Einsenkung $z(x)$ der Schiene ist (HOOKESches Gesetz):

$$p(x) = Cz(x) \quad (2.11)$$

wobei $C \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right]$ das Bettungsmodul der elastischen Bettung ist.

Die Schiene werde nun als einfacher elastischer Balken (BERNOULLI-Balken) betrachtet, der auf der WINKLER-Bettung aufliegt. Die Lösung dieses Problems ist seit langem bekannt (siehe

⁴ Einpunktberührung ist der klassische Berührfall bei neu abgedrehten Rädern und frisch geschliffenen Schienen. Davon unterschieden wird einerseits die Linienberührung, die sich bei verschlissenen Rädern einstellt, und die Zweipunktberührung mit einem zusätzlichen Kontaktpunkt am Spurkranz, die an Weichen oder in engen Bögen auftritt.

⁵ Prof. KLINGEL, 1883

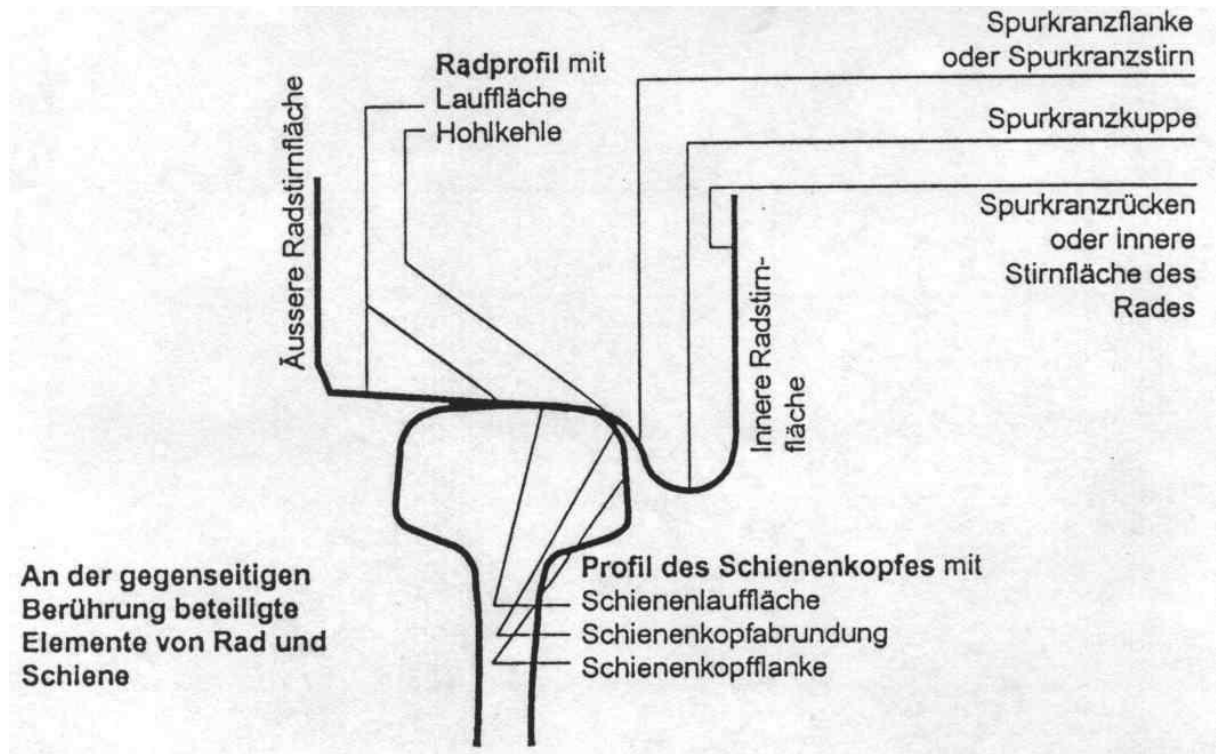


Abbildung 2.10: Bezeichnungen am Eisenbahnrad Darstellung: MÜLLER [60]

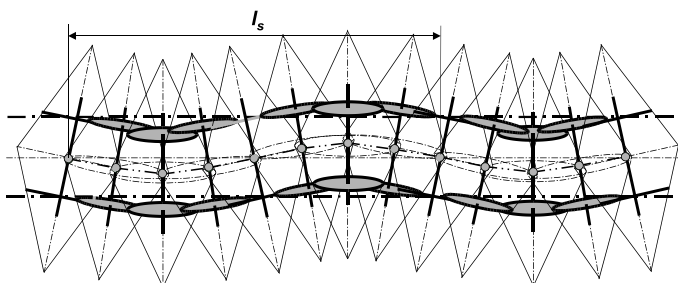


Abbildung 2.11: Veranschaulichung zum Sinuslauf des Eisenbahnradsetzes

2. Einführung

z. B. das Lehrbuch von FÜHRER [23]) und führt auf die Biegelinie der Form

$$z(x) = \underbrace{\frac{Q}{2bCL}}_{z_0} \frac{\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L}}{e^{\frac{x}{L}}} \quad (2.12)$$

mit der Last Q , der Balkenbreite (Schienenbreite) b und einer elastischen Länge L , die sowohl von Geometrie und Material der Schiene als auch von der Steifigkeit der Bettung abhängig ist. Es gilt

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{bC}} \quad (2.13)$$

mit dem Elastizitätsmodul E des Schienenstahls und dem Flächenträgheitsmoment I der Schiene.

Die Biegelinie ist eine Kurve der Form $z_0 e^{-x} \sin x$. Sie hat ein Tal mit einem Minimum bei $x = 0$, wo sie den Wert z_0 erreicht, weiterhin zwei Berge mit Maxima bei $\pm\pi L$, und die Amplitude der Oszillation fällt nach außen hin zu Null ab.

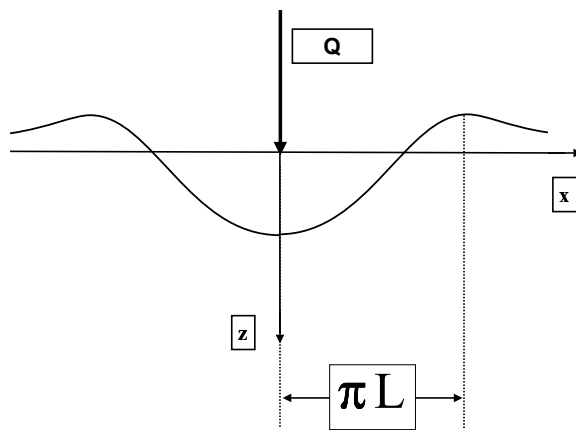


Abbildung 2.12:
Vertikale Biegelinie $z(x)$ des Gleises

z : vertikale Einsenkung
 x : Ort entlang des Gleises

Der Aufstandspunkt des Rades liegt bei $x = 0$.

In den meisten Fahrwegmodellen wird nur die vertikale Durchbiegung der Schiene berücksichtigt. Da die tatsächlich auf die Schiene wirkende Radkraft eine Horizontalkomponente besitzt, kommt es jedoch auch zu einer Durchbiegung der Schiene in horizontaler Richtung (orthogonal zur Gleisachse). Die Horizontalkraft beträgt im Regelfall nur bis zirka 30 % der Vertikalkraft. Andererseits ist die Biegesteifigkeit der Schiene in horizontaler Richtung um den Faktor 6 kleiner als in vertikaler Richtung. Bei gleichbleibendem Bettungsmodul erhält man somit eine horizontale Durchbiegung von der gleichen Größenordnung wie in vertikaler Richtung. Diese dreidimensionale Biegelinie ist in Abbildung 2.13 dargestellt.

Der im Rahmen dieses Projekts untersuchte Oberbau INFUNDO® unterscheidet sich vom konventionellen SchO auch durch sein elastisches Verhalten in horizontaler Richtung. Es wurde deshalb der horizontalen Biegelinie und der Überlagerung von vertikaler und horizontaler Biegelinie einige Aufmerksamkeit gewidmet.

2.3.6. Schallemission im Schienenverkehr

Geräuschquellen Zu Schallabstrahlung im Schienenverkehr kommt es, wenn Bauteile des Fahrweg-Fahrzeug-Systems zu Schwingungen senkrecht zu ihrer Oberfläche angeregt werden. Abbildung 2.14 zeigt hierzu die relevanten Frequenzbereiche.

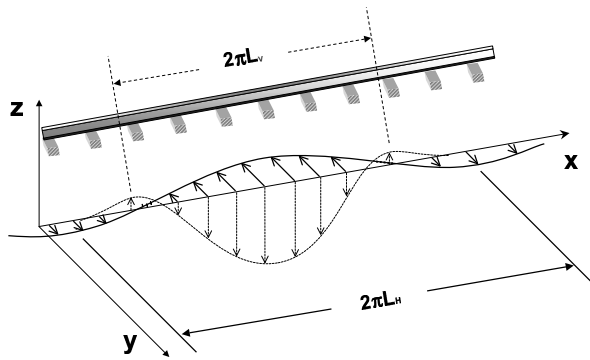


Abbildung 2.13:
überlagerte (dreidimensionale) Biegelinie des Gleises

L_v : Wellenlänge der vertikalen Biegelinie
 L_h : Wellenlänge der horizontalen Biegelinie

Je nach Geschwindigkeit und Fahrzustand des Schienenfahrzeugs sind verschiedene Geräuschquellen von Bedeutung:

- im Stand bzw. beim Anfahren:
Motoren, Klimaanlage, ggf. sonstige elektrische Verbraucher,
- beim Anhalten (letzte Phase des Bremsvorgangs vor dem Stillstand):
bei Bremsen, die auf Reibung beruhen: Bremsgeräusche aus dem reibenden Kontakt;
bei Druckluftbremsen: Bremsluftventile,
- bei mittlerer Geschwindigkeit:
Rad-Schiene-Geräusche;
bei Wagen ungünstiger Bauart (z. B. hochwandige Güterwagen, Kesselwagen): Geräusche der Wagenkasten,
- bei hoher Geschwindigkeit: aerodynamische Geräusche.

Das vorliegende Forschungsprojekt betrachtet nur die Geräusche aus dem Rad-Schiene-Bereich.

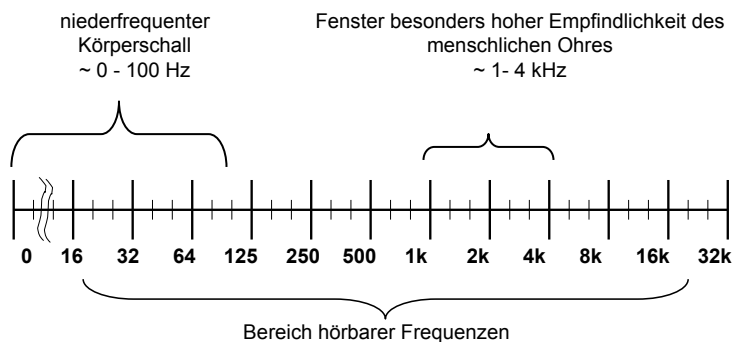


Abbildung 2.14:
Frequenzband

Eingezeichnet sind:

- der hörbare Bereich, darin das Fenster des Bereiches, in dem das menschliche Ohr besonders empfindlich ist,
- der Bereich niederfrequenten Körperschalls

2. Einführung

Rad–Schiene–Geräusch Im Rad–Schiene–Bereich tragen mehrere Bauelemente zur Schall-emission bei, insbesondere Radscheiben, Spurkränze, Schienenstege und Schwellen (vgl. Abbildung 2.15). Unter den angeregten Schwingungen sind die Biegeschwingungen für die meiste Schallabstrahlung verantwortlich, da die Schwingungsrichtung hier senkrecht zur Oberfläche steht.

Bereits in dem theoretischen Falle ideal glatter und runder Rad- sowie glatter und ebener Schienenprofile wird der Rad–Schiene–Bereich durch den Sinuslauf zu vertikalen und horizontalen Schwingungen angeregt. Nur Obertöne dieser niederfrequenten Anregung sind aber für die Schallabstrahlung bedeutsam.

Höherfrequente Anregungen ergeben sich durch die dynamische elastische Verformung von Rad und Schiene im Bereich der Kontaktzone.

Bei Oberbauarten mit Schwellen führt die unterschiedliche Steifigkeit auf und zwischen den Schwellen bei der Überfahrt zwangsläufig zu einer periodischen Anregung⁶.

Durch die unvermeidbare Rauigkeit und Unrundheit des Rades sowie Rauigkeit der Schiene (vgl. hierzu z. B. MÜLLER [59]) entstehen darüberhinaus ständige höherfrequente *vertikale* Anregungen. Diese sind für die Schallabstrahlung besonders relevant. GROSS hat bei Rauigkeiten mit einer Frequenz zwischen 315 und 800 Hz – das entspricht Wellenlängen im Bereich von 3 bis 100 mm – eine nahezu lineare Abhängigkeit zwischen der mittleren Rauigkeit und dem erzeugten Luftschall gemessen. Die Amplituden der Rauigkeiten liegen dabei in der Größenordnung von 1 μm . Frequenzen oberhalb von 800 Hz tragen nach GROSS nicht mehr in demselben Maße zur Luftschallabstrahlung bei, da sie insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten von den Rädern nicht mehr voll ausgefahren, sondern eher „überflogen“ werden.

Stoßartige vertikale Anregungen mit hochfrequenten Anteilen ergeben sich schließlich durch lokale Schienenstöße (Schweißnähte, Isolierstöße, gelaschte Stöße usw.) sowie durch Fehler an den Rädern (beispielsweise Flachstellen).

Im Falle einer Schienenverriffelung (periodische Störung mit einer Wellenlänge im Bereich ein bis einige Zentimeter; Amplituden bis 0,4 mm treten auf) kann die Anregung durch Rauigkeit 15 bis 20 dB Schallpegelerhöhung bewirken.

Höher- bis hochfrequente *horizontale* Anregungen ergeben sich in engen Kurven, wenn die Radsätze mit dem Spurkranz an die Schiene anlaufen. Stoßartige horizontale Anregungen kann das System zum Beispiel im Bereich von Weichen erfahren.

Im Rad–Schiene–Bereich unterscheidet man nach Anregungsart

- das Rollgeräusch aufgrund von Sinuslauf, Rauigkeiten einschließlich ggf. Verriffelung,
- Stoßgeräusche: aufgrund lokaler Stöße oder aufgrund von Flachstellen,
- Kurvengeräusche.

Der vorliegende Teil 1 des Forschungskomplexes beschränkt sich auf das reine Rollgeräusch, betrachtet also vertikale Anregung im nieder- und mittelfrequenten Bereich.

⁶ Diese Art von Anregung, aufgrund einer sich entlang des Wegs ändernden Steifigkeit (Materialeigenschaft), wird in der Literatur oft als *Parameteranregung* bezeichnet, im Unterschied zur Anregung aufgrund von geometrischen Verhältnissen.

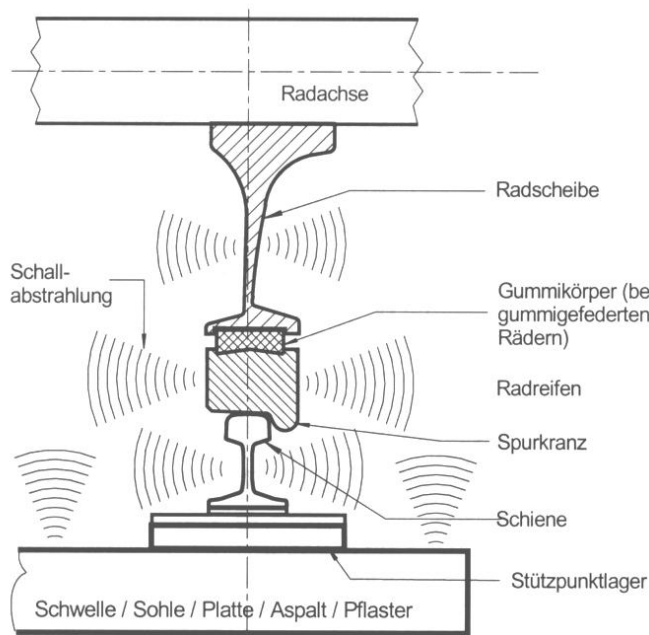


Abbildung 2.15:
Wichtige Schallabstrahler im Rad-Schiene-Bereich

Quelle: KRÜGER [50]

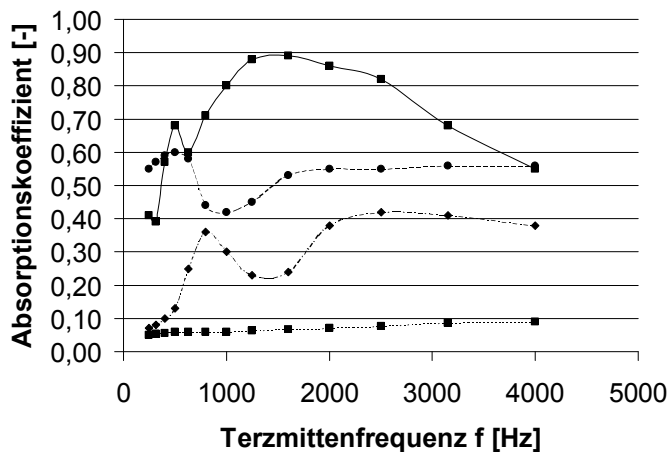


Abbildung 2.16:
Absorptionskoeffizient verschiedener Oberbauarten als Funktion der Frequenz

von oben nach unten: Schotter 35 cm, Gras, Schotter 12 cm, Beton
Daten: ACKVA, DECKER, 1995 [3]

Absorption des Oberbaus Der effektive, nach außen wirksame Schallemissionspegel wird um den Schallanteil verringert, der vom Eisenbahnsystem selbst absorbiert wird. Diese Absorption ist beim SchO besonders ausgeprägt. Als Grund für die sehr gute Schallabsorption von Schotter zeigt sich vor allem, dass die Schallwellenlänge von ähnlicher Größenordnung ist wie die Hohlräume zwischen den Schottersteinen, so dass der auf den Schotter abgestrahlte Schall darin häufig reflektiert wird und dabei seine Energie verliert. Auch Gras hat einen günstigen Absorptionskoeffizient. Am ungünstigsten sind blankliegende schallharte Betonoberflächen. ACKVA und DECKER haben 1995 die Schallabsorptionskoeffizienten verschiedener Oberbauarten ermittelt und dargestellt (vgl. Abb. 2.16).

2.3.7. Luftschallausbreitung: SCHALL 03

Wegen der Eigenschaften des Luftschalls

- homogenes Medium (Luft),
- nur Longitudinalwellen (z. B. keine Oberflächenwellen),
- keine Dispersion (Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Frequenz),

lässt sich die Ausbreitung von Luftschall im freien Raum relativ leicht berechnen. Ein vereinfachtes Standardverfahren dazu ist in der Richtlinie SCHALL 03 [8] gegeben. Die SCHALL 03 antwortet auf die Frage:

Welcher Luftschall-Immissions-Pegel L_I ist an einem bestimmten Punkt in der Nähe einer Eisenbahnstrecke zu erwarten, wenn ein bestimmter Zug vorbeifährt?

in zwei Schritten:

1. Berechnung des Luftschall-Emissions-Pegels L_E , ausgehend von einem Standardzug auf einem Standardgleis
2. Berechnung des Immissionspegels L_I , mit Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren

Der zugrundegelegte Standardzug ist 100 m lang und fährt 100 km/h schnell. Die Standard-Eisenbahnstrecke ist gerade, eben und hat ein Schottergleis mit Betonschwellen.

Der Rechenweg ist in Tabelle 2.3 kurz geschildert.

Der Einfachheit und Bequemlichkeit der Berechnungsmethode, die verschiedene Streckenabschnitte individuell zu bewerten erlaubt, steht als Nachteil gegenüber, dass die spektrale Zusammensetzung des abgestrahlten Lärms nicht berücksichtigt wird und dass die einzelnen schallabstrahlenden Elemente (Rad, Schiene, Motor, Fahrtwind) nicht identifiziert werden. Die Richtlinie unterscheidet zwischen SchO und FF, indem sie die FF – wegen der geringeren Schallabsorption von Beton im Vergleich zu Schotter – generell mit +5 dB(A) beaufschlagt. Sie unterscheidet aber weder die Schotterhöhe noch die Schwellenart noch die Bauarten der FF.

2.3.8. Körperschallausbreitung

Die Ausbreitung des Schalls in einem festen homogenen Medium ist – selbst wenn das Medium als homogen, isotrop und linear-elastisch angenommen wird – mathematisch schwieriger zu beschreiben als die Schallfortpflanzung in Luft. Dies hat verschiedene Gründe. Im Unterschied zum Luftschall, wo wir es nur mit *longitudinalen* Schwingungen (längs der Fortpflanzungsrichtung) und den daraus resultierenden Druckwellen zu tun haben, können sich in einem festen Medium zusätzliche Schwingungstypen – wie sie z. B. in Anhang D als Biege-, Scher- und Torsionsschwingungen dargestellt sind – ausbilden und sich als Biege-, Scher-, und Torsionswellen im Festkörper fortpflanzen. Bei den letztgenannten Wellentypen finden die Schwingungen der Körperteilchen vorwiegend in *transversaler* Richtung (orthogonal zur Fortpflanzungsrichtung) statt. Die Möglichkeit der Festkörperpartikel, transversale Schwingungen auszuführen, liegt darin begründet, dass Festkörper im Unterschied zu (idealen) Flüssigkeiten und Gasen auch Schubspannungen aufnehmen können. An freien Oberflächen – z. B. an der Grenzfläche Boden-Luft – können auch Oberflächenwellen, die sogenannten RAYLEIGH-Wellen, entstehen. Bei

der Verteilung der gesamten Körperschallenergie auf die einzelnen Wellentypen spielen die transversalen RAYLEIGH-Wellen eine herausragende Rolle, da sie einen Großteil der Energie des Schallereignisses transportieren.

Verschiedene Körperschallwellentypen pflanzen sich verschieden schnell fort. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit für longitudinale Druckwellen in einem unendlich ausgedehnten, homogenen, isotropen, linear-elastischen Medium ist

$$c_P = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (2.14)$$

wobei K den Kompressionsmodul und ρ die Dichte des Mediums bezeichnen. Der Kompressionsmodul K kann durch den Elastizitätsmodul E und die Querkontraktionszahl μ des Mediums wie folgt ausgedrückt werden:

$$K = \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} E. \quad (2.15)$$

Die Phasengeschwindigkeit für transversale Scherwellen in demselben Medium beträgt

$$c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (2.16)$$

wobei $G = E/(2 + 2\mu)$ dessen Schubmodul ist. Für beide Wellentypen ist das Quadrat der Körperschallgeschwindigkeit dem Quotient aus E -Modul und Dichte ρ des Mediums proportional. Die Schallgeschwindigkeit in einem festen Körper variiert demnach über einen großen Bereich und reicht von $c_K = 5000$ m/s bei Stahl bis $c_K = 50$ m/s bei Gummi (vgl. HECKL [34]).

Außerdem ist die Körperschallgeschwindigkeit i.a. von der Frequenz (Wellenlänge) abhängig, d. h. bei Körperschall ist der funktionale Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge (Dispersionsrelation) komplizierter als für Luftschall. Für Luftschall gilt folgende einfache Beziehung zwischen der konstanten Schallgeschwindigkeit c_L , Kreisfrequenz⁷ ω und Wellenzahl k :

$$\omega = c_L k. \quad (2.18)$$

Hervorzuheben ist, dass die Luftschallgeschwindigkeit $c_L = \omega/k$ für alle Frequenzen (Wellenzahlen) konstant ist. Mit anderen Worten, die Schallausbreitung zeigt im homogenen Medium Luft (fast) keine Dispersion. Im Gegensatz dazu hängt die Schallgeschwindigkeit in einem festen homogenen Medium i. a. von der Wellenzahl k ab. Zum Beispiel ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von BiegeWellen c_B in einem Stab proportional zur Wellenzahl k : $c_B \propto k$, d. h. langwellige BiegeWellen (kleine Wellenzahl) breiten sich langsamer aus als solche mit kleiner Wellenlänge (großer Wellenzahl).

Man hat es also im Unterschied zu Luftschall, wo nur Longitudinalwellen möglich sind und ein einfacher Zusammenhang zwischen Kreisfrequenz und Wellenzahl gemäß Gl.(2.18) besteht, beim

⁷Die Kreisfrequenz ω wird mit Hilfe der Frequenz f definiert durch

$$\omega = 2\pi f. \quad (2.17)$$

2. Einführung

Körperschall mit unterschiedlichen Wellentypen und mit komplizierteren Dispersionsrelationen zu tun. Hinzu kommt, dass Medien wie „Schotter“ oder „Boden“ in der Regel *inhomogen* sind und *nichtlineare* Deformations- und Dämpfungseigenschaften aufweisen. Die Ausbreitung von Körperschallwellen in inhomogenen Medien ist aufgrund von Reflexion und Brechung an Grenzschichten (z. B. zwischen Schotter und der darunter liegenden Tragschicht) und der damit verbundenen Umwandlung von Longitudinal- in Transversalwellen bzw. Transversal- in Longitudinalwellen wesentlich schwieriger zu beschreiben als die Schallausbreitung im homogenen Medium Luft.

Diese Schwierigkeiten erklären, warum der Fortschritt in der theoretischen Beschreibung der „Körperschallemission von Schienenfahrzeugen“ relativ langsam ist. Bislang werden die Körperschallpegel für jeden Fahrwegtyp und in jedem Einzelfall gemessen. Im Gegensatz zum Luftschall, wo mit Hilfe des standardisierten Rechenverfahrens SCHALL 03 [8] die Schalldruckpegel verschiedener Fahrzeuge und Fahrwege verglichen werden können, gibt es zur Zeit noch kein standardisiertes Rechenverfahren für die Abstrahlung und Ausbreitung von Körperschall. Dies wäre aber sinnvoll, damit schon in der Planungs- und Konstruktionsphase der Fahrweg hinsichtlich seines Schallabstrahlungsverhaltens optimiert werden kann.

Fazit Zur Prognose von Körperschallimmission aus dem Eisenbahnverkehr gibt es bislang kein vereinfachtes Schema analog der SCHALL 03. Ursachen dafür sind:

- Das Medium (Erdreich) ist in der Regel inhomogen.
- Längswellen (Druckwellen) und Querwellen (Scherwellen) treten auf; diese haben unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit. Mithin gibt es keine einheitliche, definierte Schallgeschwindigkeit.
- Die Dispersion (Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Frequenz) ist nicht mehr zu vernachlässigen.
- Reflexion an Grenzschichten sowie die Umwandlung von Longitudinal- in Transversalwellen und umgekehrt treten auf.

Die Körperschallprognose erfordert in der Regel eine Reihe von Messungen in situ und ist trotzdem weniger genau als die Luftschallprognose nach SCHALL 03.

2.3.9. Erfahrungen aus früheren in-situ-Messungen

Aus verschiedenen Studien des Nahverkehrs (z. B. von GIESLER [29, 28], DE GRAF, NICKEL und ZEHETNER [7], EISENMANN [18], GRÖTZ [21], GOHLKE [30], HAUCK [33], HÖLZL [43], KRÜGER (Handbuch) [47], LANGE [51] oder MÖHLER [56]), die dem Forschungsprojekt zugrundeliegen, kann beispielhaft die Situation bei den Emissionen Lärm und Erschütterungen erläutert werden. Dabei muss zwischen verschiedenen FF-Typen und dem herkömmlichen Schotteroberbau unterschieden werden. Als Zusammenfassung von deren Ergebnissen kann für den Luftschall zunächst festgehalten werden, dass im bundesweiten Durchschnitt ein auf Schotteroberbau fahrendes

- Straßen- oder Stadtbahnfahrzeug 87 dB(A)
- Niederflurfahrzeug 84 dB(A)

als Lärmpegel hervorruft. Vergleicht man den Lärmpegel dieser Fahrzeugbauarten auf der FF mit dem des Schotteroberbaus, so muss ein um 5–6 dB(A) höherer Wert festgestellt werden. Dies bedeutet: die FF weist zwar betriebliche, ökonomische und technische Vorteile auf, bei der Schwingungsumsetzung in Schallabstrahlung schneidet sie jedoch bis heute schlecht ab.

Neuentwicklungen von Nahverkehrsfahrzeugen weisen bereits einen Lärmpegel deutlich unterhalb dieses status quo auf. Als Vergleich wird der Lärmpegel von Niederflurfahrzeugen auf Schotteroberbau herangezogen. So ist z. B. die neue Niederflurstadtbahn in Mannheim um 3 dB(A) leiser als der bundesweite Durchschnitt. Auch die neue U-Bahn Baureihe DT 4 der Hamburger Hochbahn AG liegt in diesem Bereich.

Der Schotteroberbau zeigt eine sehr gute Schallabsorption, jede bekannte Bauart von FF strahlt ohne lärmmindernde Eindeckung / Oberflächenstruktur deutlich mehr Luftschall ab.

Tabelle 2.3.: Schallimmissionsberechnung nach SCHALL 03

Frage Welcher Luftschallimmissionspegel L_I ist an einem bestimmten Punkt in der Nähe einer Eisenbahnstrecke zu erwarten, wenn ein bestimmter Zug vorbeifährt?

Schritt 1 Der Schallemissionspegel L_E ergibt sich zu

$$L_E = 10 \lg \left[10^{0,1(51+D_{FZ}+D_D+D_{TL}+D_V)} \right] + D_{FB} + D_{BR} + D_B + D_{RA} \quad (2.19)$$

Schritt 2 Der Schallimmissionspegel L_I ergibt sich zu

$$L_I = L_E + 19,2 + 10 \lg L + D_I + D_S + D_L + D_{BM} + D_{korr} + s \quad (2.20)$$

mit folgenden Zu- oder Abschlägen:

<i>Schritt 1</i>	<i>Schritt 2</i>
D_{FZ} Zugart (z. B. Güterzug, Schnellzug)	L Länge der Strecke
D_D Bremsart (z. B. Klotzbrem- sen, Scheibenbremsen)	D_I gerichtete Strahlung
D_{TL} Zuglänge	D_S Abstand
D_V Geschwindigkeit des Zuges	D_L Absorption durch die Luft
F_{FB} Oberbauart (SchO oder FF)	F_{BM} Bodenbeschaffenheit und Witterung
F_{BR} Unterbau: ist eine Brücke	F_{korr} Hindernisse (z. B. Schall- schutzwand, Gebäude)
F_B Oberbau-Eindeckung: ist ein Bahnübergang	s Schienenbonus -5 dB(A)
D_{RA} Kurvenradius	

Werte für die Zu- und Abschläge sind in der SCHALL 03 [8] angegeben.

2.4. Strukturdynamik

Dieser Abschnitt gibt einen groben Überblick über die grundsätzlichen Möglichkeiten zu Modellierung der Strukturdynamik (Schwingungen) eines mechanischen Systems. Mathematisch konkretere Angaben zum theoretischen Hintergrund der MKS-Modellierung, wie sie in diesem Projekt umgesetzt wurde, findet sich im Anhang C. Dort werden Mehrkörpersysteme, auch mit Zwangsbedingungen, kurz eingeführt, die Dynamik starrer und deformierbarer Körper wird vorgestellt, zusammen mit der Beschreibung linear-elastischer Eigenschaften.

Die hier vorgestellten Aspekte der Mehr-Körper-Dynamik findet man in verschiedenen Lehrbüchern, etwa im Lehrbuch von SHABANA [67].

Die Grundannahme für die Anwendbarkeit strukturdynamischer Methoden in diesem Projekt ist, dass diese Schwingungen die Hauptursache von Luftschallabstrahlung von Zügen in dem untersuchten Bereich niedriger bis mittlerer Fahrgeschwindigkeit sind.

Stellt man sich die Frage, welche Simulationsverfahren für eine gegebene mechanische Berechnungsaufgabe geeignet erscheinen, so kann man sich an dem *Würfel der Simulationsmethoden* orientieren. Dieser berücksichtigt die drei Parameter geometrische/mechanische Komplexität des Problems, interessierender Frequenzbereich und Begrenztheit im Raum. Wie in Abbildung 2.17 zu sehen ist, kann man nur sehr einfache Probleme analytisch lösen. Werden die geometrischen Verhältnisse oder die Randbedingungen komplizierter, sind numerische Verfahren anzuwenden.

Bereich niedriger Frequenzen Unter den numerischen Verfahren ist die Dynamik der *Mehr-Körper-Systeme* (MKS)⁸, auch Mehrmassenschwingersysteme genannt, das Verfahren der Wahl im Bereich niedriger Frequenzen. Hier wird das mechanische System als ein System von starren Körpern modelliert, die untereinander mit Federn und Dämpfern verbunden sind. In einer Zeitschrittintegration werden zu einem gegebenen Systemzustand – dieser enthält vor allem Lage und Momentangeschwindigkeit aller beteiligten Massen – die Kräfte zwischen den einzelnen Körpern berechnet, daraus ergeben sich die Beschleunigungen und daraus eine Bewegung. Somit ändert sich der Systemzustand. Im nächsten Zeitschritt werden die Kräfte aufgrund des neuen Systemzustands neu berechnet.

Die Frequenz der Schwingungen, die verfolgt werden können, umfasst ein Intervall, das nach oben durch den gewählten Zeitschritt und nach unten durch die zur Verfügung gestellte Rechenzeit begrenzt ist. Um etwa den Sinuslauf mit 17 m Wellenlänge und die Verriffelung mit 1,7 cm Wellenlänge in einem Rechengang zu erfassen, sind mehr als drei Zehnerpotenzen an Genauigkeit erforderlich. Wird der Zeitschritt so klein gewählt, dass die Verriffelung noch gut (zum Beispiel in 10 Einzelschritten) verfolgt wird, benötigt man 10^4 Rechenschritte, um eine Periode des Sinuslaufs abzutasten. Wollte man zusätzlich die elastischen Schwingungen des Rades erfassen, mit dem dem Material Stahl entsprechenden Elastizitätsmoduln, würde der benötigte Zeitschritt rasch so klein, dass die Anzahl der benötigten Rechenschritte unpraktikabel groß würde. Das Intervall der zu berücksichtigenden Frequenzen ist ein Maß für die sog. *Steifigkeit* des MKS.

Es gibt MKS-Varianten, die außer den Starrkörperschwingungen für jeden Körper des Systems auch eine vorgegebene Anzahl Eigenmoden berücksichtigen können. Diese Methoden sind in der Regel nur bei schwach gekoppelten Systemen aussagefähig, da sich durch die Koppelung die Eigenmoden ja verändern.

⁸ engl.: multi-body system (MBS)

2. Einführung

Der Umgang mit MKS-Systemen wird durch ein *MKS-Programm* deutlich vereinfacht.

Ein MKS-Programm dient der numerischen Integration gekoppelter Differentialgleichungen zweiter Ordnung, die das MKS-System (starre, durch Feder-Dämpfer-Elemente verbundene Körper) beschreiben. Kennzeichnend ist, dass die Bewegungsgleichungen nicht vom Benutzer eingegeben werden müssen; dieser hat lediglich eine detaillierte Beschreibung des Systems (d. h. Angaben über die Körper und die Verbindungselemente) zu machen, die Bewegungsgleichungen ermittelt das MKS-Programm daraufhin eigenständig anhand der zugrundeliegenden physikalischen Gesetze. Da schon bei relativ kleinen Systemen die Bewegungsgleichungen recht umfangreich werden bzw. deren Herleitung unübersichtlich und daher fehleranfällig ist, bedeutet die Entlastung des Benutzers von dieser Aufgabe, dass mit Hilfe des MKS-Programms auch umfangreiche MKS-Probleme modelliert und untersucht werden können.

Hinzu kommt, dass die meiste verfügbare Software dem Wissenschaftler aus Lizenzgründen nicht im Quelltext zugänglich ist, sondern dass man mit fertigen Produkten umgehen muss, die man lediglich anwenden darf, ohne Einsicht zu nehmen.

Bereich höherer Frequenzen Im höherfrequenten Bereich⁹ stehen die – rechenintensivere – *Finite-Elemente-Methode* (FEM) bzw. die Randelementemethode¹⁰ zur Verfügung. Bei der FEM wird die Geometrie der mechanischen Struktur auf ein Gitternetz abgebildet. Die Flächenelemente des Gitters werden mit einfachen mechanischen Eigenschaften ausgestattet. Dadurch können die Spannungen (Kräfte) innerhalb der Struktur gut angenähert werden. Einige zehntausend Elemente sind in einem aufwändigen FE-Modell keine Seltenheit.

Finite Elemente greifen in der Regel nicht unbegrenzt in den Raum hinaus; für die Schallabstrahlung werden daher teilweise spezielle „infinite finite Elemente“ eingesetzt, also Elemente, die nach einer Seite hin offen sind.

Bereich hoher Frequenzen Zum hochfrequenten Bereich hin liegen die Moden (mögliche Schwingungen des Systems) immer dichter. Man wird mit einer bestimmten Frequenz kaum noch eine einzelne Mode gezielt anregen können; interessant bleibt vielmehr, einen Mischzustand mit vielen Moden aus einem bestimmten Frequenzbereich zu betrachten, auf die sich die Schwingungsenergie des Systems verteilt. Dies leistet die *statische Energie-Analyse* (SEA).

Mischformen zwischen den Modellen sind möglich (hybride Verfahren); es werden insbesondere dann Mischformen eingesetzt, wenn nur spezielle Klassen mechanischer Systeme betrachtet werden.

⁹ Der höherfrequente Bereich grenzt sich vom niederfrequenten Bereich dadurch ab, dass die Körper nicht mehr als Ganzes starr schwingen, sondern Eigenmoden der Körper eine Rolle spielen. Im Rad-Schiene-Bereich treten bereits ab 80 Hz Schwingungen der Radsatzwelle auf. Eigenfrequenzen der Räder (zum Beispiel Regenschirmschwingung) treten ab zirka 250 Hz auf. Die Eigenfrequenzen der Schiene beginnen bei zirka 1000 Hz.

¹⁰ engl.: boundary element method (BEM)

Die Schwingungsberechnungen in diesem Projekt fallen in den Bereich räumlich begrenzte, geometrisch komplizierte Berechnungen im nieder- bis mittelfrequenten Bereich. Im Würfel der Simulationsmethoden (Abbildung 2.17) ist dies der vordere rechte Bereich. Daher wurden

- analytische bzw. semianalytische Lösungen und
- MKS-Modelle

eingesetzt. Der Einsatz von FE-Teilsystemen wird im weiteren angestrebt.

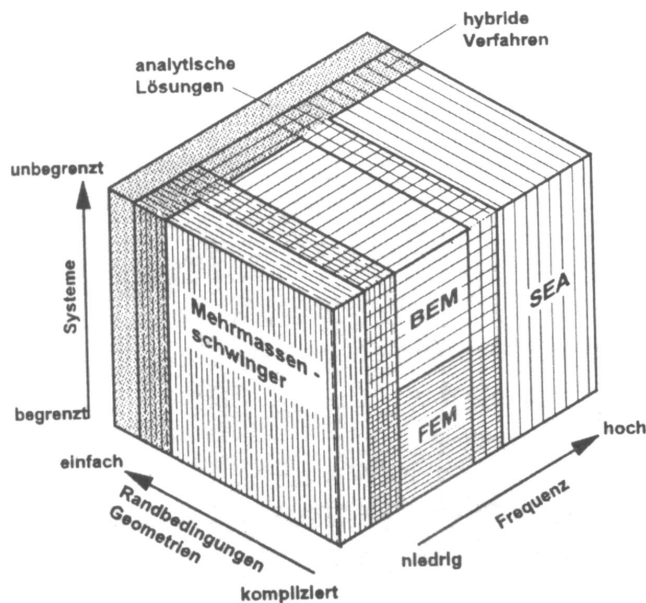


Abbildung 2.17: Anwendungsbereich verschiedener Simulationsmethoden

Das Projekt ist im Übergangsbereich zwischen Mehrmassenschwinger (MKS) und Finiten Elementen angesiedelt (vorne unten rechts).

Quelle: MÜLLER [58]

2.4.1. ODE und DAE

Ein Anfangswertproblem für ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen (ODE¹¹) kann so formuliert werden: Finde den Vektor \mathbf{y} , so dass

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{y}) \quad \mathbf{y}, \mathbf{f} \in \mathbb{R}^n, t \in [t_0, t_L] \quad (2.21)$$

$$\mathbf{y}(t_0) = \mathbf{y}_0 \quad \text{wobei } \mathbf{y}_0 \in \mathbb{R}^n. \quad (2.22)$$

Der Lösungsvektor \mathbf{y} heißt Zustandsvektor des Systems.

Wenn das Gleichungssystem zusätzlich algebraische Gleichungen enthält, betrachten wir es als System von Differential- und algebraischen Gleichungen (DAE¹²):

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{D}\mathbf{v} \\ \mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{f}(t, \mathbf{q}, \mathbf{v}) - \lambda \mathbf{C}_q^T \\ \mathbf{C}(\mathbf{q}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (2.23)$$

und von den Anfangsbedingungen wird vorausgesetzt, dass sie die m Randbedingungen erfüllen.

¹¹ ODE = ordinary differential equations (engl.: gewöhnliche Differentialgleichungen)

¹² DAE = differential-algebraic equations (engl.: Differential- und algebraische Gleichungen)

2. Einführung

Diese Form der Gleichungen heißt Index-3-Form¹³. Es gibt nur einige wenige numerische Methoden, die direkt auf ein Index-3-System angewandt werden können, darunter der Code Radau5 von HAIRER und WANNER [32]; außerdem wurden einige vielversprechende Ergebnisse von WENSCH, STREHMEL und WEINE [73] berichtet¹⁴.

Jedoch ist es auch möglich, den Index des Problems zu verringern, indem die Randbedingungen differenziert werden und eine geeignete Projektion eingeführt wird, um die Methode numerisch zu stabilisieren.

2.4.2. Runge-Kutta-Methoden

Numerische Methoden zur Lösung von Systeme gewöhnlicher Differentialgleichungen teilt man ein in Einschritt- und Mehrschrittverfahren. Ein Mehrschrittverfahren nutzt Information aus mehreren vorangegangenen Zeitschritten, um die Lösung einen Zeitschritt weiter voranzubringen, wohingegen Einschrittverfahren nur die jeweils letzte Lösung nutzen. Wir betrachten im folgenden nur Einschrittverfahren.

Von einem gegebenen Anfangszustand \mathbf{y}_0 ausgehend berechnet eine RUNGE-KUTTA-Methode die Näherung für den nächsten Zeitschritt mit Hilfe einer gewichteten Summe aus Hilfsgrößen. Wir können einen Schritt der RUNGE-KUTTA-Methode nach dem BUTCHER-Feld definieren:

$$\begin{array}{c|cccc}
 c_1 & a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1s} \\
 c_2 & a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2s} \\
 & \vdots & \vdots & & \vdots \\
 c_4 & a_{s1} & a_{s2} & \cdots & a_{s4} \\
 \hline
 & b_1 & b_2 & \cdots & b_s \\
 & \hat{b}_1 & \hat{b}_2 & \cdots & \hat{b}_s
 \end{array} . \quad (2.24)$$

Ein Schritt ist dann definiert als

$$\begin{aligned}
 \mathbf{k}_1 &= \mathbf{f}(t^n, \mathbf{y}^n + \Delta t(a_{11}\mathbf{k}_1 + \cdots + a_{1s}\mathbf{k}_s)) \\
 \mathbf{k}_2 &= \mathbf{f}(t^n + c_2\Delta t, \mathbf{y}^n + \Delta t(a_{21}\mathbf{k}_1 + \cdots + a_{2s}\mathbf{k}_s)) \\
 &\dots \\
 \mathbf{y}^{n+1} &= \mathbf{y}^n + \Delta t(b_1\mathbf{k}_1 + \cdots + b_s\mathbf{k}_s).
 \end{aligned} \quad (2.25)$$

Die Methode heißt *explizit*, falls $a_{ij} = 0$ für $i \leq j$.

Eine eingebettete Näherung (niedriger Ordnung) erhält man, indem man die Werte \hat{b}_i anstelle der b_i benutzt. Das erweist sich als praktisch bei der Konstruktion automatischer Zeitschrittanpassungs-Prozeduren.

Vollständig *implizite* RUNGE-KUTTA-Methoden für s Stufen und n Gleichungen erfordern im allgemeinen, $s \cdot n$ nichtlineare algebraische Gleichungen pro Zeitschritt zu lösen.

Eine weitverbreitete Implementierung einer Drei-Stufen-Methode ist die Methode Radau5 von HAIRER und WANNER [32]. Diese Methode heißt A-stabil in dem Sinne, dass, angewandt auf den Fall

$$\dot{y} = \beta y, \quad \operatorname{Re} \beta < 0, \quad (2.26)$$

¹³ Es gibt mehrere Definitionsmöglichkeiten für den Index eines DAE, hier ist der Ableitungsindex gemeint: Die Zahl der Ableitungen der Randbedingungen, die notwendig ist, um die Gleichungen in eine Zustandsraum-Form zu bringen (das sogenannte darunterliegende ODE).

¹⁴ Warnung: Die Ordnung der Methode kann degeneriert sein.

die Lösung für alle Schrittweiten $h > 0$ nach Null strebt. Wie offensichtlich zu erkennen ist, kann eine explizite Methode nicht A-stabil sein.

Eine eigene Klasse impliziter RUNGE-KUTTA-Methoden, die *diagonal impliziten* RUNGE-KUTTA-Methoden, ergibt sich, indem man alle Einträge a_{ij} oberhalb der Diagonale im BUTCHER-Feld zu Null setzt. Dann können die Stufenableitungen \mathbf{k}_i sequentiell (aber immer noch implizit) bestimmt werden.

Ein möglicher und sehr einfacher Weg, einen numerischen Löser für DAE zu entwickeln, ist es, zunächst das System

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{y}, \lambda) \quad (2.27)$$

$$\varepsilon \dot{\lambda} = \mathbf{C}(\mathbf{y}) \quad (2.28)$$

zu betrachten.

Wenn $\varepsilon \rightarrow 0$, erhalten wir das DAE. Setzt man dies in die Formeln für die Hilfsgrößen einer RUNGE-KUTTA-Methode ein und eliminiert ε , erhält man ein nichtlineares System von Gleichungen, welches die Randbedingungen enthält (vgl. HAIRER und WANNER[32]).

2.5. Geometrische Akustik

Geometrische Akustik ist derjenige Zweig der Akustik, der sich mit Schallstrahlen befasst. Strahlen breiten sich innerhalb eines Mediums gradlinig aus und zeigen an Grenzflächen zu anderen Medien Reflexion, Absorption und Transmission. Strahlen durchdringen sich gegenseitig störungsfrei.

Wie bei der geometrischen Optik, die eine Vereinfachung der Wellenoptik für den Sonderfall kleiner Wellenlängen und Betrachtung nur innerhalb von Medien darstellt, so ist auch die geometrische Akustik eine Vereinfachung der wellenakustischen Betrachtung und daher rechentechnisch oft günstiger.

Der Wellencharakter der Schallwellen, der sich in Interferenz und Beugung äußert, wird vernachlässigt. Dies ist – wie in der Optik – nur zulässig für Aussagen, bei denen die Wellenlänge klein ist im Vergleich zu den Ausmaßen der betrachteten Objekte und für Punkte im Raum, die nicht zu nahe an einer Grenzfläche liegen, wo das Medium (Luft) aufhört.

Bei einer Schallausbreitungsgeschwindigkeit in der Luft von 340 m/s hat eine Schallwelle von 340 Hz die Wellenlänge 1 m. Bei einer Frequenz von 3400 Hz beträgt die Wellenlänge 10 cm. Will man den Schallpegel an zwei verschiedenen Orten, die 1 m Abstand voneinander haben, berechnen, ist das bei einer Frequenz von 3400 Hz sicher mit der Methode der geometrischen Akustik möglich, bei einer Frequenz von 340 Hz schon fragwürdig.

Ähnliches gilt für den Abstand von einer Schallschutzwand. Interessiert man sich für den Schallpegel im Abstand 1 m von der Schallschutzwand, ist bei einer Frequenz von 3400 Hz die geometrische Akustik sicher ausreichend, bei einer Frequenz von 340 Hz oder darunter ist eine Kontrollrechnung mittels Wellenakustik anzuraten.

Eigenschaften eines Schallstrahls sind sein Ursprung, seine Richtung und seine Intensität. Bei Reflexion ändert sich nicht nur die Richtung, wegen Absorption und Transmission nimmt auch die Intensität ab.

2. Einführung

Die folgenden Abschnitte zu theoretischen Grundlagen zur Schallabstrahlung dienen dem Verständnis des verwendeten Programms RAYNOISE® [52].

Spiegelquellenmethode Es wird ein Schallstrahl betrachtet, der von einer Schallquelle ausgeht und an einer Wand einmal reflektiert wird, bevor er auf einen Empfänger trifft. Der Schallstrahl ist für den Empfänger in Intensität und Richtung äquivalent zu einem Schallstrahl, der nicht reflektiert wurde und von einer virtuellen Schallquelle stammt, die sich hinter der Wand befindet, in gleichem Abstand von der Wand wie die echte Schallquelle.

Nun wird eine Schallquelle innerhalb einer Umgebung mit mehreren Wänden betrachtet. Zu berechnen sei wieder die Intensität, die an einem Empfängerpunkt im Raum ankommt. Einfach, doppelt und n-fach reflektierte Schallstrahlen werden durch ihre Spiegelquellen ersetzt. Das hat rechentechnische Vorteile, denn anstatt Schallstrahlen mit sehr vielen Reflexionen zu verfolgen, wird mit äquivalenten Schallstrahlen gearbeitet, die zwar von verschiedenen Punkten im Raum ausgehen (Spiegelquellen), den Empfänger aber direkt erreichen.

Schallstrahlenverfahren Das sogenannte *Ray Tracing*-Verfahren modelliert die Emission einer Schallquelle, die unter einem bestimmten Raumwinkel abstrahlt, als das Abstrahlen einer festen Anzahl von Schallstrahlen innerhalb dieses Raumwinkels. Die gesamte abgestrahlte Energie entspricht der summierten Energie aller Schallstrahlen. Die Energiedichte entspricht der Dichte der Schallstrahlen im Raum.

Die Ausbreitung eines Strahls wird so lange verfolgt, bis die Intensität aufgrund von mehrfacher Reflexion unter eine Geringfügigkeitsgrenze gefallen ist.

Liegt das Interesse für den Schallpegel an einem bestimmten Punkt im Raum vor, werden alle Schallstrahlen in einer Umgebung dieses Punktes ermittelt, aus ihrer Dichte und Intensität ergibt sich der Pegelwert.

Diese Art, Immissionspegel zu berechnen, kann bei Ausdünnung der Schallstrahlen schnell sehr ungenau werden.

Schallkegelverfahren Dieses Verfahren modelliert die Emission einer Schallquelle, die unter einem bestimmten Raumwinkel abstrahlt, als abgestrahlte Kegel. Die Kegelspitze liegt am Ort der Schallquelle. Die Achse des Kegels ist ein Schallstrahl wie im Schallstrahlenverfahren. Die Intensitätsverteilung innerhalb des Kegels wird durch eine Gewichtsfunktion beschrieben, geeignet ist zum Beispiel eine Glockenkurve.

Trifft der Schallkegel auf eine Ecke oder auf den Rand einer Wand, wird er nur zum Teil reflektiert, der Radius verjüngt sich dadurch.

Immissionswerte können nun an einem Punkt berechnet werden, indem die Anteile aus allen den Punkt berührenden Schallkegeln addiert werden.

Schallstrahlen mit dreieckiger Grundfläche Dieses Verfahren modelliert die Emission einer Schallquelle, die unter einem bestimmten Raumwinkel abstrahlt, als abgestrahlte Pyramiden spitzen. Die Grundfläche jeder Pyramide ist ein Dreieck. Damit lässt sich der Raumwinkel, in den abgestrahlt wird, vollständig bedecken.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass keine Gewichtungsfunktion benötigt wird und das Modell daher mit weniger rein rechentechnisch bedingten Zusatzannahmen auskommt. Die numerische Konvergenz ist allerdings nicht so hoch wie bei der Schallkegelmethode.

2. Einführung

3. Feste Fahrbahn Bauart INFUNDO®

Das Fahrwegsystem INFUNDO® wurde durch die INFUNDO® GmbH¹, München, in Zusammenarbeit mit deren Mutterfirmen LEONHARD WEISS GmbH & Co., Göppingen, und EDILON B.V., Haarlem (Niederlande), entwickelt. Die FF Bauart INFUNDO® basiert auf den Entwicklungen zu einer kontinuierlichen Schienenlagerung, die seit Anfang der siebziger Jahre gemeinsam von der Niederländischen Staatsbahn (NS) mit der Firma EDILON B.V. vorangetrieben wird.

Für einen Einsatz im Netz der Deutschen Bahn AG ist von der EDILON GmbH München das EDILON-ERS² mit einer Betontragplatte nach deutschen Normalien zur *Festen Fahrbahn Bauart INFUNDO®* erweitert worden. Dazu wurden im Vorfeld je eine Variante mit längs und quer vorgespannten sowie untereinander gekoppelten Betonfertigteilen (System INFUNDO®-HR-FT [Bögl]) sowie mit monolithischer Ortcontragplatte Typ INFUNDO®-HR-MTP entwickelt. Beide INFUNDO®-Hauptsysteme sind vom Eisenbahnbundesamt zur Betriebserprobung auf Hochgeschwindigkeitsstrecken zugelassen. Das EDILON-ERS wird im Vollbahnbereich zur Zeit vor allem in Holland und in Spanien sowie auf drei niederländischen FF-Versuchsstrecken in Deurne, Best und Rotterdam sowie seit kurzem auch in Tunnel und auf Brücken (RENFE) eingesetzt.

Die FF Bauart INFUNDO® ist – vgl. edilon-report [86] – im Netz der Deutschen Bahn AG die erste FF-Bauart mit kontinuierlich elastischer Schienenlagerung. Die Betriebserprobung begann im Oktober 2001 auf der FF-Teststrecke der Deutschen Bahn AG in Waghäusel.

In Deutschland finden sich bereits seit 1997 Anwendungen in München, Bremen und Chemnitz mit insgesamt rund 9 km Gleislänge. Weitere Referenzstrecken gibt es in vielen Ländern Europas, etwa auf zirka 700 Bahnübergängen und auf einem 3 km langen Abschnitt der NS bei Best. Eine Referenzliste befindet sich im Anhang E). Das System INFUNDO® kann auf mehr als 25 Jahre Liegeerfahrung zurückgreifen.

3.1. Bauartbeschreibung

Die FF Bauart INFUNDO® setzte in Waghäusel als erstes Vollbahnsystem mit kontinuierlicher Schienenlagerung und als komplett wartungsfreie Konstruktion neue Maßstäbe in ihrem Anwendungsbereich. Für diesen auch bei der Deutschen Bahn AG neuartigen Oberbau wird – entsprechend den Erfahrungen mit den niederländischen Teststrecken, eine Verringerung von Körperschallemissionen sowie eine Verminderung des Schienenkopfverschleißes (inklusive verringerte Neigung zur Riffelbildung) bei gleichzeitig nochmals verbessertem Fahrkomfort erwartet. Ein weiterer wichtiger Vorteil besteht zudem in der einfachen Überfahrbarkeit mit Straßen-Rettungsfahrzeugen ohne zusätzliche Eindeckplatten. Die Bauart bietet sich damit – auch wegen ihrer geringen Bauhöhe – für den Einsatz in Tunnelanlagen an.

¹ heute: EDILON GmbH, München

² ERS (engl.) Embedded Rail System: System mit eingebetteter Schiene

3. Feste Fahrbahn Bauart INFUNDO®

Das ERS unterscheidet sich von anderen Schienenbefestigungssystemen durch den vollständigen Verzicht auf alle traditionellen Schienenfixierungen wie etwa Spannklemmen oder Schrauben. Diese Aufgabe wird im ERS durch eine Verklebung der Schienen in einer Beton- oder Stahltraggkonstruktion mittels Polyurethanverguss übernommen. Der dauerelastische langlebige Verguss mit EDILON-Corkelast® gewährleistet, dass die Schienen auf der gesamten Länge homogen aufliegen und auch an jeder Stelle fixiert sind (siehe Abbildung 2.8 (oben)). Zusätzliche Bauelemente zur Spursicherung sind nicht notwendig. Es entsteht dadurch ein kontinuierlich gelagertes und quasi durchgehend gelaschtes Gleis. Die Schiene ist auf ihrer gesamten Länge ummantelt. Das hat Vorteile in Bezug auf das Kraft-Verformungs-Verhalten für Schiene, Schienenaufleger und Tragplattenkonstruktion. Besonders vorteilhaft im Hinblick auf das Körperschallverhalten und die Schienenkopfabnutzung ist der Entfall der Stützpunktfrequenz f im Vergleich zu den üblichen diskreten Schienenbefestigungen.

f ist gegeben durch

$$f = \frac{a}{v} \quad (3.1)$$

wobei a der Stützpunktabstand (Schwellenabstand) und v die Fahrzeuggeschwindigkeit sind.

Als Tragkonstruktion wird eine durchgehend bewehrte Betontragplatte mit zwei U-förmigen Längsaussparungen (Schienentröge) zur Aufnahme der Schienen verwendet. Die Schienentrogböden werden standardmäßig mit einer Neigung von 1:40 zur Gleismitte hin hergestellt (vgl. Abschnitte 2.3.2 bzw. 2.3.4). Andere Neigungen können durch zusätzliche keilförmige Unterlagplatten aus Kunststoff (sog. *Shims*) realisiert werden.

Die Steuerung der notwendigen Einfederung der Schienen erfolgt im ERS durch eine zuvor kontinuierlich in den Schienentrögen verklebte „Einfederungsmatte“ mit einer je nach Anforderung (erwartete Achslasten und dabei gewünschte Einfederungstiefe) unterschiedlichen Dicke.

Das Vergussmaterial EDILON-Corkelast® übernimmt im Wesentlichen die seitliche Fixierung der Schienen und die Begrenzung der Kopfauslenkung auf das zulässige Maß. Dieses seit über 25 Jahren bewährte Material kombiniert die Eigenschaften natürlichen Korks mit denen speziell entwickelter Polymere.

Füllrohre auf beiden Seiten des Schienenstegs dienen der Materialersparnis und können bei Bedarf zu unterschiedlichen Zwecken verwendet werden.

Eine Entwässerung in Gleis- und Trassenachse mittels Drainage-Rinne und Ableitungsrohren ist im Abstand von 10 bis 25 m vorzusehen.

Der Verguss der Schienen erfolgt über eine vollautomatische Vergussmaschine, welche einerseits das exakte Mischungsverhältnis der Zwei-Komponenten-Vergussmasse garantiert und dokumentiert und andererseits beim Verguss von Vignolschienen eine Schichtleistung von zirka 300 m Einzelgleis ermöglicht.

Die Einfederung wird durch die auf der gesamten Länge in den Schienentrögen verklebten Einfederungsmatten Typ EDILON Strip 2000 gesteuert.

Für die Bauart INFUNDO®-Rasengleis ist eine durchgehend bewehrte monolithische Gleistragplatte vom Typ INFUNDO®-LR-MTP, geeignet zur Herstellung mittels Gleitschalungsfertiger, die Grundlage.

Die Ortbetonvariante ist kostengünstiger, die Abbindezeit des Betons verursacht jedoch längere Bauzeit.

Zur Erleichterung des Schleifens (Reprofilierung) der Schienen, auch zum Beispiel mit Schleifzügen, liegen die Schienenköpfe komplett frei, d. h. der Verguss reicht auf der Schienenaußenseite bei Radien über 700 m bis 40 mm unter Schienenoberkante (SOK), bei Radien darunter zur Begrenzung der Kopfauslenkung bis 20 mm unter SOK. auf der jeweiligen Innenseite der Schienen ist zwischen Oberkante des Vergusses und SOK ein Freiraum von 80 mm die Regel.

3.2. Bauablauf

Unterbau Als Unterbau wird ein erdbautechnisch abgesichertes System aus tragfähigem Boden und Frostschuttschicht entsprechend den Anforderungen aus dem Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn der DB AG mit flächendeckend nachgewiesenen Eigenschaften vorausgesetzt. Für Hochgeschwindigkeitsstrecken ist eine hydraulisch gebundene Tragschicht mit einer Dicke von 30 cm und einem E_{v2} -Wert³ von mindestens 80 MN/m² notwendig.

1. Auf dem bereits vorab hergestellten und tragfähigen Unterbau wird die monolithische Gleis-tragplatte mit den beiden Schienentrogabmessungen 180 mm x 180 mm hergestellt. Bei Normalspur beträgt das Maß von Gleisachse zu den beiden Schienentrögen 537 mm. Die zulässige Toleranz bezüglich Höhe und Richtung beträgt ± 8 mm. Gleismitten- und Seitenentwässerung sind in den Unterbau integriert.
2. Die Schienen werden angefahren und – z. B. in Längen von 180 m – über den Schienentrögen ausgelegt. Anschließend werden die Schienen verschweißt und abgenommen. Alle Schluss-Schweißungen werden im Schienentrog ausgeführt, wofür Aussparungen in den Trogwänden vorzusehen sind.
3. Schmutz und loser Rost werden von den Schienen entfernt.
4. Vor dem Einbau der Schienen werden die Tröge gereinigt (z. B. mit Pressluft).
5. Die elastischen Unterlagsmatten werden entsprechend der definierten Einfederung in den Schienentrog eingeklebt. Unterlagplättchen zur Höhenjustierung entsprechend der Vermessung werden ausgelegt.

³ Der E_{v2} -Wert ist der zentrale Kennwert für die Bestimmung der Tragfähigkeit von Erdstoffen und Tragschichten unter Verkehrswegen. Der Verformungsmodul E_v des Bodens wird aus der Steigung der Sekanten zwischen $0,3 \sigma_{max}$ und $0,7 \sigma_{max}$ der Druck–Setzungs–Kurve $z(\sigma)$ gemäß der Gleichung

$$E_v = 1,5r \frac{\Delta r}{\Delta z} \quad (3.2)$$

ermittelt. Dabei sind r der Radius der Platte, die Druckdifferenz ist $\Delta \sigma = (0,7 - 0,3) \sigma_{max}$ und die Setzungsdifferenz ist $\Delta z = z(\sigma = 0,7 \sigma_{max}) - z(\sigma = 0,3 \sigma_{max})$. E_{v1} bezieht sich auf die Erstbelastung, E_{v2} auf die Wiederholungsbelastung. Bei der Erstbelastung sind die Verformungen meist noch plastisch. Zur Ermittlung der elastischen Verformung wird der Boden schrittweise entlastet und dann wiederbelastet, jedoch nur bis $0,9 \sigma_{max}$. Quelle: DIN 18 134, zitiert nach SCHNEIDER (Hrsg.) Bautabellen [65].

6. An den noch aufliegenden Schienen werden Füllrohre und Abstandshalter montiert. Letztere werden zur Richtungsfixierung verwendet.
7. Die Schienenkanaltröge werden in Lage und Richtung vermessen und dokumentiert. Korrekturen werden gegebenenfalls durch Zugabe und Austausch der unterschiedlich starken Unterlagplättchen vorgenommen.
8. Die Schienen sind nun exakt in Bezug auf Höhe (Unterlagplättchen) und Richtung (Fixierkeile) eingebaut.
9. Vor dem Verguss werden die Schienen und die Trogwände mit einem Haftkleber-Voranstrich (Primer) behandelt. Dieser stellt die Haftung des Corkelast® mit Schiene und Betontrog sicher.
10. Schlusskontrolle der Gleislage vor dem anschließenden Verguss der Schienen mit Corkelast®.

Nach einer Aushärtezeit von zwei Stunden ist das Gleis befahrbar.

3.3. Instandsetzung und Erneuerung

Schienenwechsel Mit einer Spaltsäge wird der Verguss von der Schienentrogwand gelöst. Anschließend wird die Schiene mittels einer an einem Zwei-Wege-Bagger befestigten Rollenzange aus dem Schienentrog entfernt. Nachdem der Trog sandgestrahlt und erneut mit Haftkleber eingesprüht wurde, kann der Schieneneinbau entsprechend den im Abschnitt Bauablauf (S. 53) beschriebenen Arbeitsschritten fortgesetzt werden.

Schienenbruch Durch die kontinuierliche Auflagerung ist dies sehr selten zu erwarten. Aufgrund des hohen Durchschubwiderstands ist es ferner möglich, die Bruchstelle mit reduzierter Geschwindigkeit vorübergehend weiter zu befahren.

Es wird ein 10 m langes Passstück eingebaut. Links und rechts der Bruchstelle wird je eine Aussparung in die Wangen der Betontragplatte geschnitten, die schadhafte Schiene getrennt und ausgebaut. Danach wird das Passstück eingesetzt, verschweißt, die Aussparungen in den Wangen werden ausbetoniert. Schließlich wird mit Haftkleber eingesprüht und der fehlende Schienenverguss erneuert.

3.4. Schwingungs- und schalltechnische Eigenschaften

- Die Schiene ist eingebettet und kontinuierlich gelagert; daher ergibt sich *keine periodische Anregung* mit der Stützpunktfrequenz (Gleichung 3.1) wie bei den Oberbauarten mit Schwellen.
- Die Schienen sind ummantelt. Das führt zu einer Lärmreduzierung durch *verminderte Luftschallabstrahlung* von Schiensteg und Schienenfuß.
- Fahrverhalten: Komfort und Verschleiß

Mit dem Einsatz der kontinuierlich elastischen Schienenlagerung des Systems INFUNDO® ist eine spürbare Verbesserung des Fahrkomforts für die Fahrgäste verbunden.

Im Zuge von Messungen durch das Forschungs- und Technologiezentrum der Deutschen Bahn AG im Netz der Münchener Straßenbahn [10] konnten für das System INFUNDO® deutlich bessere Werte sowohl in z-Richtung (rms-Wert⁴ der Wagenkastenbeschleunigung 0,06 bis 0,08 m/s²) als auch in y-Richtung (0,04 bis 0,06 m/s²) gegenüber dem Rasengleissystem Eisenmann ermittelt werden (z: 0,1 bis 0,11 m/s², y: 0,09 bis 0,11 m/s²), welches beispielsweise auf der Teststrecke der DB AG in Waghäusel zur Ausführung kam.

Hinweise auf eine deutliche Verschleißminderung am Schienenkopf durch die kontinuierlich elastische Lagerung kommen aus den Niederlanden. 1995 wurde beim Austausch der 1976 errichteten Versuchsstrecke bei Deurne eine um 7 mm geringere Schienenkopfabnutzung festgestellt als im vor- und nachlaufenden Schotteroberbau. Riffelverschleiß war nicht zu ermitteln. Die genannte Versuchsstrecke im Netz der NS ist mit 35.000 Lasttonnen pro Tag belastet und wird mit maximal 160 km/h und mit Achslasten von 22,5 t befahren.

- Durch die veränderbare Einfederung der Schienen kann sehr flexibel auf den umgebenden städtebaulichen Kontext reagiert werden, und die Körperschallemissionen können partiell gezielt vermindert werden.
- In Verbindung mit schalldämmenden Matten (ähnlich Unterschottermatten) kann das System INFUNDO® zu einem leichten und somit vergleichsweise kostengünstigen Masse–Feder–System aufgerüstet werden.

Untersuchungsergebnisse aus München (MÜLLER-BBM [62]) bestätigen die Wirksamkeit des Systems INFUNDO® bei einer Einfederung von 1,9 bis 2,1 mm und einer Achslast von 10 t.

Für Frequenzbereiche oberhalb der 63–Hz–Terz hat MÜLLER-BBM dort eine Körperschallminderung von bis zu 20 dB_v (A) dokumentiert.

Die Ausführung als Rasengleis bewirkt eine weitere Reduktion der Luftschallemissionen.

⁴ rms: root mean square, engl.: Standardabweichung. Angegeben ist jeweils nicht der Wert x , sondern die Grenzen eines zwei σ (d. h. in jede Richtung eine Standardabweichung) breiten Intervalls um diesen Wert, $x - \sigma$ bis $x + \sigma$.)

3.5. Sonstige Eigenschaften

Nachteile Nachteile des INFUNDO®-Systems sind vor allem die gegenüber SchO hohen Meterpreise. Sie resultieren daraus, dass bisher nur sehr kurze Abschnitte mit INFUNDO® ausgerüstet worden sind.

Vorteile Als Vorteile der Bauart INFUNDO® seien in diesem Abschnitt erwähnt:

1. INFUNDO® ist eine Bauart FF:

- Die im Vergleich zu SchO niedrige Bauhöhe spart Kosten auf Brücken und in Tunnel.
- Die exakte Linienführung ermöglicht verschleißarmen Betrieb und erlaubt hohe Geschwindigkeiten.
 - Ein hoher Fahrkomfort ist durch die verringerten dynamischen Belastungen auf den Fahrgast gewährleistet.
- Die eingebaute äquivalente Konizität wird exakt eingehalten.
- Die Fahrkante lässt sich millimetergenau ausrichten.
- Pumperscheinungen werden ausgeschlossen.

Bei dem üblichen Bewehrungsprozentsatz von zirka 0,8 % (bezogen auf den Querschnitt der Betontragplatte) erreicht der INFUNDO®-Oberbau einen mittleren Rissabstand von zirka 2 m und eine maximale Rissöffnung von i. a. weniger als 0,5 mm. Damit wird die angestrebte Wirkung der Bewehrung als Dübel (Querkraftübertragung) und als Anker (Rissbegrenzung) aktiviert, und Pumperscheinungen, wie sie bei Betondecken mit Querschnitten üblich sind, werden ausgeschlossen. Dies stellt eine gute Voraussetzung für eine Langlebigkeit des Oberbaus dar.

2. INFUNDO® lagert die Schiene kontinuierlich schwellenlos auf:

- Horizontale und vertikale Schienenkräfte verringern sich erheblich.
 - Die Schiene verschleißt weniger.
 - Die Schiene bleibt länger nutzbar.
- Das Gleis ist mit Straßenfahrzeugen (zum Beispiel Rettungsfahrzeuge), auch in Tunnel und auf Brücken, gut befahrbar.
- Im Nahverkehr ist ein Systemvorteil der Bauart INFUNDO® die kostengünstige Art der Reinigung der Gleisanlagen im Gleisbereich. Auch die Verletzungsgefahr beim Sturz von Fußgängern ist geringer. „Stolperfallen“ wie beim Schotteroberbau gibt es nicht.

3. INFUNDO® ummantelt die Schiene bis an den Schienenkopf:

- Temperatureinflüsse wirken sich nur noch auf den Schienenkopf aus
- Streuströme werden vermieden.

Streuströme, auch vagabundierende Ströme genannt, führen bei allen Gleichstrombahnen, welche die Fahrschienen als Rückleiter zum Unterwerk benutzen, zu Korrosionsschäden am Gleis und auch an erdverlegten Sparten wie Gas-, Strom- und Wasserleitungen. Auch können Beeinträchtigungen von Signalkreisen auftreten. Vor allem Straßen- und Stadtbahnen sind im Falle der Bauform Rasengleis von diesem Problem betroffen, Aber auch andere Oberbauformen mit Gleiseindeckungen bis SOK (Pflaster, Asphalt o. ä.) sind bei mangelnder Isolation von Schiene und Schienenbefestigung (und bei Straßenbahnen ggf. Spurstangen) Ausgangspunkte von Streuströmen.

Das System INFUNDO® bietet hier den systembedingten Vorteil der vollständigen Isolation der Schienen gegenüber der Betontragplatte durch die vollständige Einbettung der Schienen in der Vergussmasse. Zufallsverbindungen werden dadurch ausgeschlossen. Entsprechende Ergebnisse liegen aus Messungen eines Straßenbahnprojekts in Chemnitz vor. Neben einem Erdausbreitungswiderstand der Betonkonstruktion von $0,7 \Omega$ konnte ein maximaler Ableitbelag trotz zusätzlicher Einbauten zur Schienenentwässerung von lediglich $0,0018 \text{ S/km}$ nachgewiesen werden. Der zulässige Grenzwert nach EN 5011 von $2,5 \text{ Siemens/km}$ wird im System INFUNDO® also auch im ungünstigsten Fall deutlich unterschritten.

4. INFUNDO® benutzt eine Vergussmasse:

- Das Bauverfahren vereinfacht sich.

Die *Endgenauigkeit der Gleislage* muss im INFUNDO®-System *erst am Schienenkopf* erreicht werden und nicht schon am Stützpunkt.

Das erweist sich im Vergleich zu konventionellen FF-Systemen ebenfalls als Vorteil, denn die Betontragplatte kann zügiger und mit vergleichsweise geringerem Aufwand hergestellt werden. Dagegen sind bei anderen FF-Systemen Schwierigkeiten bei der Einhaltung der zulässigen Toleranzen am Schienenstützpunkt und letztendlich der endgültigen Gleislage bekannt.

5. INFUNDO® lagert die Schiene kontinuierlich in einem Schienentrog:

- Eine niedrige Verspanntemperatur ist möglich.

Infolge der Einbettung der Schiene im Betontrog ist eine horizontale Schienenverwerfung im System INFUNDO® nahezu unmöglich. Dementsprechend kann im Gegensatz zum Schotteroberbau eine höhere Schienen-Druckkraft aufgenommen werden. Die neutrale Verspanntemperatur bei der DB AG liegt je nach Klimazone bei $+17^\circ\text{C}$ bis $+23^\circ\text{C}$. Gegen eine niedrige Vergusstemperatur bis herab zur materialspezifischen Ausführungs-Grenztemperatur von $+5^\circ\text{C}$ bestehen seitens des Herstellers keine sicherheitsrelevanten Bedenken.

- Niedrigere und kleinere Schienenprofile sind möglich.

3. Feste Fahrbahn Bauart INFUNDO®

Alle gängigen Schienenprofile können verwendet werden. Durch die vollflächige Auflagerung des Schienenfußes entfällt die tragende Funktion des Schienensteges zwischen den Einzelstützpunkten in Systemen mit herkömmlicher Befestigung. Dies wirkt sich in einer drastischen Verringerung des Widerstandmoments mit der Folge aus, dass bei kontinuierlicher Lagerung entweder auf ein kleineres Profil (zum Beispiel UIC 54 anstelle von UIC 60) oder gar auf Schienenformen ohne Schienensteg übergegangen werden kann. Das daraus entstandene SA 42-Profil, mit einem der UIC 60 entsprechenden Kopf, ist bereits im Zuge der Vollbahn-Versuchsstrecke bei Best in den Niederlanden ebenso wie bei der Stadtbahn in München zu ersten Tests eingebaut worden.

6. INFUNDO® lagert die Schiene kontinuierlich *und* ummantelt die Schiene bis an den Schienenkopf:

- Die elastische Niederhaltekraft übersteigt deutlich den geforderten Wert.
- Das Entstehen einer Vor- und Nachlaufwelle wird unterdrückt.
- Der erforderliche Durchschubwiderstand wird um den Faktor 7 überschritten; er ist um diesen Faktor 7 höher als bei herkömmlicher Schienenbefestigung.
 - Das verringert die Gefahr von Schienenbrüchen.
Im sehr unwahrscheinlichen Fall eines Schienenbruches wird die Bruchlücke wesentlich kleiner sein als üblich, und aufgrund der seitlichen Stabilisierung durch die Vergussmasse wird die Entgleisungsgefahr deutlich reduziert.

7. INFUNDO® hat nur wenige Konstruktionsteile:

- Damit ergeben sich weniger Fehlerquellen.
- Die Konstruktion ist insgesamt wartungsfrei.

8. Für INFUNDO® gibt es ein mechanisiertes Bauverfahren.

Der Bau der FF System INFUNDO® ist durch eine *weitgehende Mechanisierung* gekennzeichnet. Neben den üblichen Großmaschinen zur Herstellung von Erdbau und Frostschuttschicht kommt im System INFUNDO® zur Herstellung der monolithischen Betontragplatte ein Gleitschalungsfertiger zum Einsatz. Hiermit sind Schichtleistungen bis zu 400 m und Genauigkeiten in Richtung und Höhe von ± 5 mm über eine Basislänge von 10 m zu erzielen.

9. Statische und dynamische Federziffer können den Anforderungen angepasst werden.

10. Neben der Herstellung der Betontragplatte mittels Gleitschalungsfertiger können auch Betonfertigteile Verwendung finden.

Die technischen Fakten aller in diesem Abschnitt aufgeführten Vorteile entstammen Unterlagen der Zulassungsbehörden (Eisenbahnbundesamt bzw. Landes-Zulassungsbehörden).

4. Simulationsrechnungen

Simulationsrechnungen können theoretische Betrachtungen nicht ersetzen; Ergebnisse theoretischer Betrachtungen machen Simulationsrechnungen in der Regel erst produktiv. Simulationsrechnungen können aber unter bestimmten Bedingungen an die Stelle von Feldversuchen (in-situ-Messungen) oder Laborversuchen (Prototypen) treten. Ihr Vorteil ist hier die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und die relativ einfache Möglichkeit zur Variation von Parametern. Im Simulationsmodell einen Parameter zu ändern ist einfach und bedingt lediglich einen neuen Rechengang; in einem Feldversuch einen Parameter zu ändern erfordert einen neuen Versuchsaufbau und eine neue Messreihe. Das ist ungleich aufwändiger. Dem steht natürlich der einmalige Aufwand entgegen, ein geeignetes Simulationsprogramm zu erstellen, das die zuvor gemachten theoretischen Annahmen sowie realitätsnahe Parameter enthält.

4.1. Vorgehensweise

Zur Erreichung der Ziele der Berechnung der Strukturodynamik wurde ein mathematisches Modell erstellt (von Grund auf in C++ implementiert), welches den gesamten Fahrweg abbildet und dabei die mehrdimensionalen Kräfteinwirkungen durch ein ebenfalls modulares mathematisches (Teil-)Fahrzeugmodell beachtet. Ausgehend vom Idealzustand waren Schwingungen niedriger (< 50 Hz), mittlerer und höherer Frequenz (> 500 Hz) zu betrachten.

Von Anfang an war klar, dass durch die Imperfektionen des Rad-Schiene-Systems die Einwirkungen auf bzw. die Wirkungen innerhalb des Gesamtsystems nicht nur aus der gängigen Sicht des statischen Lastkollektivs gesehen werden können. Auch die dynamischen Einwirkungen erfordern eingehende Betrachtung. Die Überlagerung aller in situ ermittelten Einwirkungen/Wirkungen sollten sich sowohl im Fahrweg- als auch im Fahrzeug-(Teil-)Modell widerspiegeln.

Deshalb wurde ein Fahrweg-Modell mit modularem Aufbau angestrebt, das die einzelnen Schichten bzw. Elemente des Fahrwegs innerhalb des Ober- und Unterbaus sowie des Untergrundes darstellen kann, in welchem die systemdynamischen Vorgänge von der Schwingungseintragung bis zur eventuellen Reflexion von Körperschallwellen an Grenzschichten abgebildet werden können.

Für die einzelnen Elemente (z. B. für SchO: Schiene, Schienenbefestigung, elastische Zwischenlage, Schwelle, Schotter, Planumsschutzschicht, Frostschutzschicht, verbesserte Dammschüttung, verbesserter Untergrund) war dabei wichtig, deren Eigenschaften und Merkmale individuell und auch spezifisch nachbilden zu können.

4. Simulationsrechnungen

So muss die Modellierung u. a. folgendes berücksichtigen:

- Unendlichkeit der Schiene
- Fälle diskreter und Fälle stetiger Lagerung der Schiene
- elastische und dämpfende Eigenschaften der Schienenbefestigung und -lagerung
- dämpfende und rheologische Eigenschaften der granularen Schichten
- Reflexionen von Körperschall, z. B. aus Tragplatte, aus hydraulisch gebundener Tragschicht bei FF oder aus zu steifem Unterbau oder Untergrund

Wegen der Nichtlinearitäten – aufgrund z. B. von Trockenreibung im Rad–Schiene–Bereich und in verschiedenen Dämpferelementen – wurde zur Berechnung ein Zeitbereichsmodell gegenüber einem Frequenzbereichsmodell bevorzugt. Die Ergebnisse können jedoch im Anschluss an die Berechnung im Frequenzbereich dargestellt werden, um sie mit Messergebnissen vergleichbar zu machen oder um die Interpretation zu erleichtern.

Abbildung 4.1 illustriert das Berechnungskonzept für die Schwingungsberechnungen im Simulationsmodell M³Rail. Ausgegangen wird von einem MKS-Modell. Im hochsensiblen Rad–Schiene–Bereich war zunächst eine Einflechtung eines Finite-Elemente-Teilmodells geplant. Nach unten hin sollte das Modell an ein dreidimensionales Schottermodell anschließen, welches die Struktur des Schotters als granulares Medium besonders gut abbildet.

Den Abschluss des Modells nach unten bildet ein linear-elastischer Halbraum, in den der Körperschall abgestrahlt wird.

Im Laufe des vorliegenden Projekts („Teil I“) wurde der MKS-Teil erstellt. Anstelle der Einbindung eines FE-Teilsystems ist der Rad–Schiene–Rollkontakt als besonderes Kraftkoppelglied vorgesehen. In Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Dänemark (DTU) konnte dazu im Verlauf des Projekts eine neue Theorie entwickelt werden.

Für die schwingungstechnischen Module von M³Rail wird eine gemeinsame Zeitschrittintegration durchgeführt. So ergeben sich die Bewegungen des Fahrzeugs. Da dies der rechenzeitaufwändigste Teil ist, wurden die Berechnungen von M³Rail soweit modularisiert, dass alle weiteren Berechnungen als Nachlaufrechnungen durchgeführt werden können.

Aufgrund der Schwingungen – durch die Schwingschnelle $v(f)$ beschrieben – kann die Schallabstrahlung am Emissionsort berechnet werden. Die abgestrahlte Schalleistung berechnet sich wie folgt:

$$P(f) = (\rho c) S v^2(f) \sigma(f) \quad (4.1)$$

mit der Dichte ρ des Mediums, der Schallgeschwindigkeit c im Medium, der schallabstrahlenden Fläche S , der Schwinggeschwindigkeit v der Körperteilchen, dem Abstrahlgrad σ und der Frequenz f . Schließlich wird daraus die Schallausbreitung mit dem Programm RAYNOISE[®] berechnet. In einfachen Fällen (z. B. kein Sekundärschall) genügt dies für eine Prognose des Schalls an einem gewählten Immissionsort.

Der schwingungstechnische und akustische Gesamtkomplex ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Dazu gehören auch noch weitere theoretische Vorbetrachtungen.

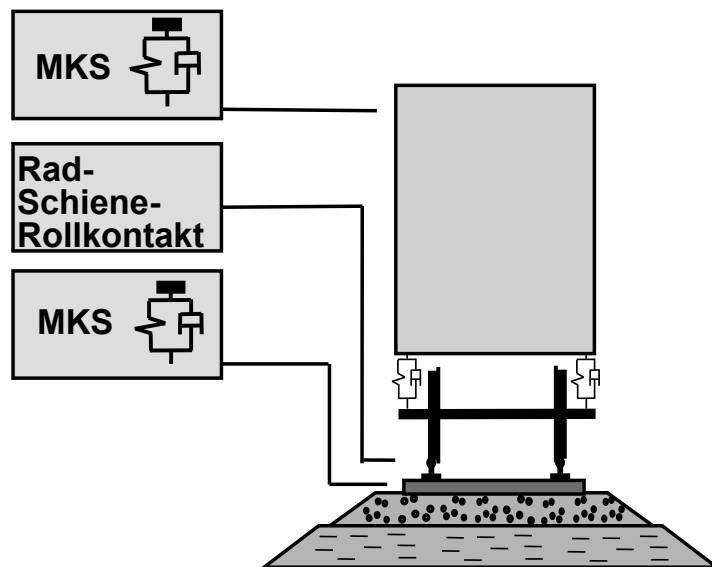
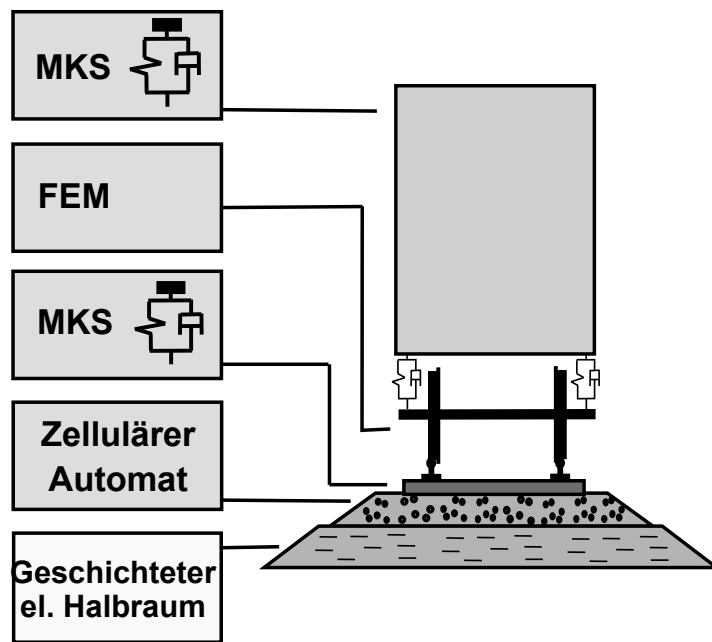


Abbildung 4.1: Module zur Schwingungsberechnung von M³Rail

oben: angestrebt

unten: zum Projektschlussstand (Teil I) erreicht

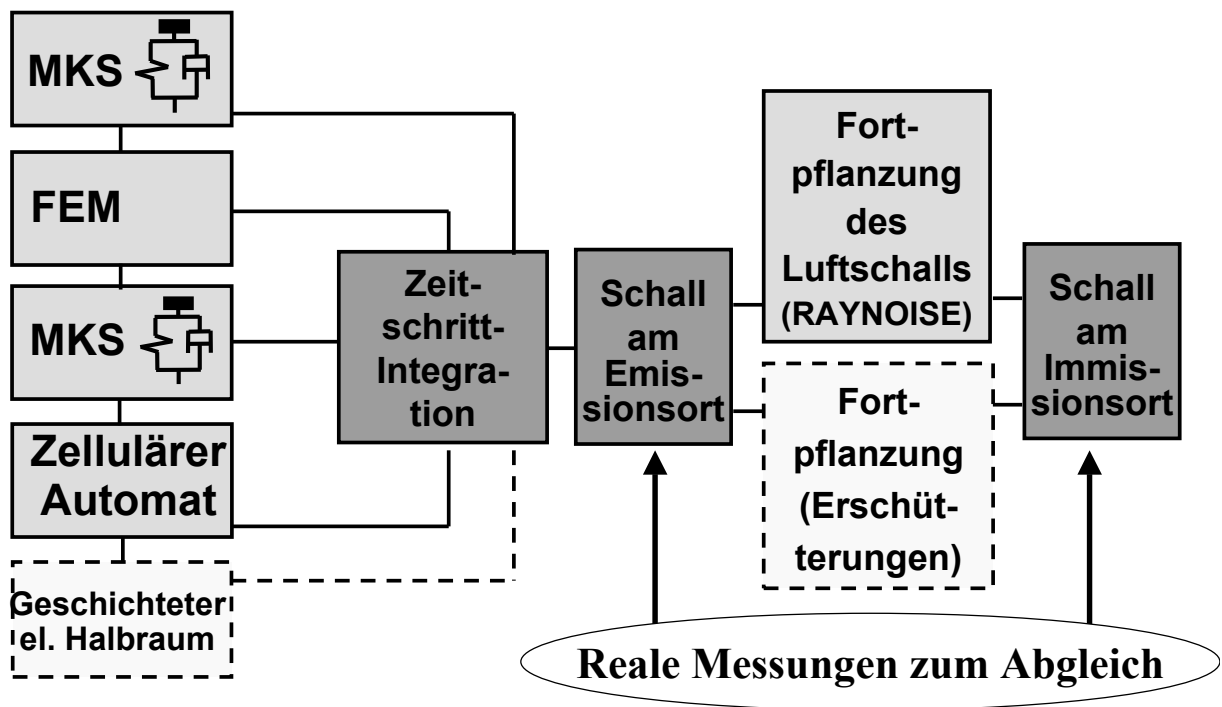


Abbildung 4.2.: Module von M³Rail (schwingungstechnischer und akustischer Gesamtkomplex)

Von einem MKS, das nur starre Körper berücksichtigt, kann man nur im Bereich relativ niedriger Frequenzen präzise Ergebnisse erwarten. Finite-Elemente-Berechnungen berechnen die Spannungen und Moden von Bauteilen auch in höheren Frequenzen. Dem steht der hohe Rechenzeitbedarf von Finite-Elemente-Verfahren gegenüber, der es vor allem erlaubt, einzelne Spannungszustände genau zu berechnen. Eine Zeitschrittintegration, die in jedem Zeitschritt auf eine FE-Berechnung zurückgreift, gerät bei großen Modellen schnell an die Grenze vertretbarer Rechenzeit. MKS-Modelle können dagegen eher so erstellt werden, dass eine Zeitschrittintegration relativ zügig fortschreitet, so dass die Bewegung des Fahrzeugs auf dem Gleis rechnerisch verfolgt werden kann. Für die Berechnung der Schallabstrahlung von schwingenden Körpern ist die Kenntnis der elastischen Moden jedoch notwendig. Das von uns entwickelte Programm M³Rail muss daher auf elastische Körper ausgedehnt werden.

4.2. Ergebnisse

Dieser Abschnitt schildert die Implementierung des Starrkörper-MKS-Algorithmus.

Die Klassenstruktur ist in Abbildung 4.3 zu sehen. Die Abbildung gibt einen Überblick über die im Modul definierten Klassen und ihre Beziehungen untereinander. Es werden folgende Funktionsgruppen unterschieden:

1. Modellbeschreibung der MKS-Komponenten
2. Modellbeschreibung des MKS-Systems
3. Integrationsalgorithmen
4. Koordinaten
5. Ablaufsteuerung
6. Hilfsfunktionen

Die zentralen Klassen sind `Multibody`, `RigidBody` und `Joint`.

Die Klasse `Multibody` hat Zeiger zu allen Körpern und Koppellementen¹ eines gegebenen Körpers des MKS. Die Klasse `RigidBody` enthält den Zustandsvektor eines gegebenen Körpers und die Funktionalität, um die Ableitungen des Zustandsvektors auszurechnen.

Die Gesamtheit der Bewegungsgleichungen eines jeden Körpers ergibt die Bewegungsgleichungen des Mehr-Körper-(Teil-)Systems. Die Ableitungen des Zustandsvektors werden nach folgendem Schema ausgewertet:

1. alle Körper mit den neuen Zustandsgrößen und davon abgeleiteten Größen auffrischen
2. für alle Verbindungen die Kräfte und Momente an jedem Körper berechnen
3. für alle Körper die Ableitungen der Zustandsvariablen mit Hilfe der Bewegungsgleichungen berechnen

Das Gesamtsystem wird durch die Klasse `Multibodies` konstruiert, das die Teilsysteme mittels zusätzlicher Koppellemente zusammenbringt. Grund für die Einführung von Teilsystemen war, die Körper dadurch in Kategorien gruppieren zu können. Die Teilsysteme können separat berechnet und getestet werden. Wenn die Teilsysteme sich zufriedenstellend verhalten, kann das Gesamtsystem durch die Klasse `Multibodies` erstellt werden.

Von der Klasse `Joint` ist die Klasse `KinJoint` abgeleitet. Typischerweise werden algebraische Randbedingungen durch diese Klasse spezifiziert, wohingegen Kräfte durch die Klassen `Spring` und `Damper` spezifiziert werden.

¹ engl.: joints

4. Simulationsrechnungen

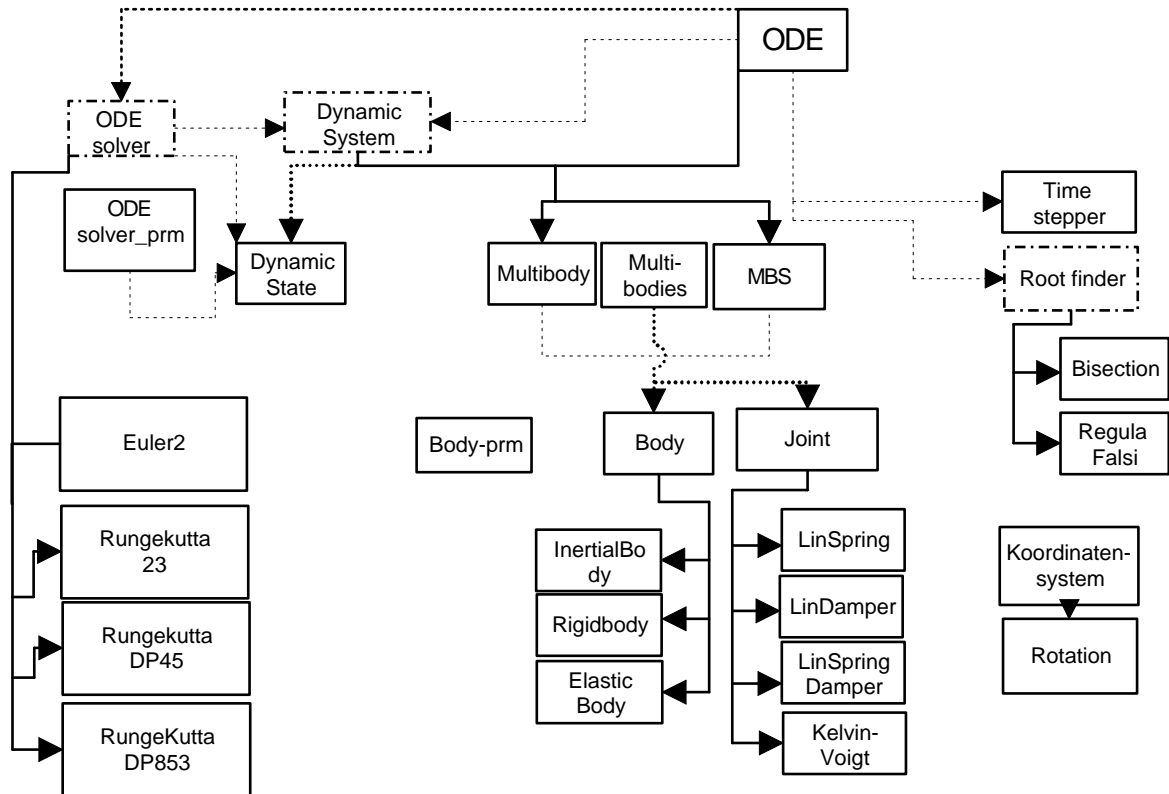


Abbildung 4.3: Klassenstruktur des MKS-Moduls

Durchgezogen: Vererbung
 gestrichelt: „wird benutzt in“
 strichpunktiert: abstrakte Basisklasse
 ODEsolver_prm und Body_prm: Parameterklassen

Im Rahmen der Modellentwicklung konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Das Konzept für die Programmstruktur von M³Rail wurde entwickelt und umgesetzt. Das zugrundeliegende Applikationsobjekt bietet für das Programmiererteam plattformunabhängig standardisierte Funktionen wie Fehlerbehandlung, Eingabe/Ausgabe etc. Diese Routinen wurden beständig an die wachsenden Anforderungen angepasst.
- Eine darauf abgestimmte mathematische Bibliothek mit Vektor- und Matrizenrechnung wurde fertiggestellt und getestet. Ein Benchmarking wurde durchgeführt.
- Mehrere explizite Standard-RUNGE-KUTTA-Methoden (Einschrittmethoden) wurden implementiert, so zum Beispiel die modifizierte EULER-Methode, eine Methode dritter Ordnung, eine Methode fünfter Ordnung und eine Methode achter Ordnung.
- Ein Handbuch (für interne Zwecke) zu M³Rail wurde erstellt und bis zum Projektende aktuell gehalten.

Alle Dokumente sind einheitlich als pdf-Datei abrufbar. Es gibt eine praxistaugliche Dokumentationsrichtlinie, um die gleichmäßige und vollständige Verfügbarkeit der Dokumentation zu gewährleisten.

- Die von uns erstellten LMakefiles erlauben das effiziente Übersetzen und Binden von Programmen, deren Quelltext nicht mehr übersichtlich komplett in einem Ordner untergebracht werden kann. Sie sind wie gewöhnliche Makefiles mit einem make-Kommando zu verwenden. Sie funktionieren plattformunabhängig und sind damit flexibler als make-Konzepte, die in eine bestimmte Entwicklungsumgebung integriert sind und daher nur dort anzuwenden sind, wo diese Entwicklungsumgebung installiert ist. Die Aufteilung eines Software-Projekts auf verschiedene Ordner wird nicht eingeschränkt und kann auch nachträglich noch bequem geändert werden.
- Erstellung, Implementierung und Berechnung von eigenständigen kleinen Systemen gewöhnlicher Differentialgleichungen. Dadurch ist eine Beispielsammlung für die Behandlung von Systemen gewöhnlicher DGLn mit M³Rail entstanden.
- Erstellung und Implementierung eines MKS-Programms, mit dem Drehgestelle berechnet wurden.
- Beispielberechnungen zum bisher erreichten Stand.
- Formulierung generischer MKS-Elemente in einem MKS-Modul. Systeme, die aus starren Körpern, elastischen Federn und Dämpferelementen aufgebaut sind, können damit berechnet werden. Tests wurden durchgeführt.
- Aufgrund der verwendeten Klassenstruktur lässt das Modul auch die Modellierung von Systemen zu, die aus mehreren untereinander gekoppelten MKS bestehen.
- Radsatz und Fahrzeug lassen sich in dem MKS-Modell M³Rail abbilden.
- Erstellung, Implementierung und Berechnung von eigenständigen kleinen MKS-Systemen.
- Teile einer graphischen Oberfläche wurden erstellt. Dabei wurde, um den Arbeitsaufwand gering zu halten, nach Möglichkeit auf Teile des Programmpakets diffpack des NGI (NORGES GEOTEKNISK INSTITUT) zurückgegriffen.
- Für die MKS-Systeme gibt es eine Visualisierung. Das System kann als Graphik dargestellt werden, die eine zuvor berechnete Bewegung durchläuft.

4. Simulationsrechnungen

- Die theoretische Modellbildung zur Schiene ist insoweit fertig, dass Simulationsrechnungen stattfinden können. Folgende Untersuchungen sind ausgearbeitet worden:
 - Berechnung der horizontalen Biegelinie der Schiene (statische Last, WINKLER-Bettung)
 - Berechnung des Bettungsmoduls für horizontale Bettung (SchO) anhand des Schubmodells
 - Berechnung der vertikalen und horizontalen Schienenauslenkung unter einer bewegten Last
 - Überlagerung der horizontalen und der vertikalen Biegelinie: Gleichung der neutralen Faser
Zur Visualisierung wurde hierzu eine animierte graphische Darstellung angefertigt.
 - Bestimmung der horizontalen Biegewellenlänge für SchO und FF-Systeme
- Das erstellte Schwellenmodell (MKS-Modell) kann auf bis zu dreißig diskreten Punkten (z. B. Schottersteinen) aufgelagert werden.

Modellierungsbeispiel

Die Mehr-Körper-Beschreibung für ein Eisenbahnsystem bestehe aus den folgenden Teilen:

- Wagenkasten
Diese Fahrzeugkomponente besteht aus einem starren Körper.
- Drehgestell
Dieser Teil ist die tragende Struktur des Wagenkastens und kann in mehrere starre Körper aufgeteilt sein. Wir betrachten hier einen starren Körper als Drehgestellrahmen, der Wagenkasten und Radsätze verbindet (zwei Drehgestelle und vier Radsätze pro Wagen).
- Radsatz
Es werden mehrere Arten von Radsätzen betrachtet, sowohl starr als auch elastisch. Zunächst wurden jedoch nur starre Radsätze implementiert.
- Schiene
Die Schiene wird im Programm noch als starrer Balken abgebildet. Verschiedene analytische Ansätze wurden untersucht, welche die Abbildung der Schienenkomponente betrifft. Da die Schiene keine Ganzkörperbewegung durchführt², haben wir hier nur das strukturelle Problem elastischer Biegeschwingungen zu betrachten.
- Schwellen
Dies ist die Verbindung zwischen Schiene und Bettung/Untergrund. Zur Zeit werden Starrkörperschwellen verwendet.
- Untergrund
Der Untergrund kann als kontinuierlicher elastischer Körper ausreichenden Ausmaßes modelliert werden, mit möglicherweise unterschiedlichen Materialeigenschaften in unterschiedlichen Schichten.

Abbildung 4.4 zeigt eine solche mögliche Konfiguration.

² Das Phänomen des Schienenkriechens sei hier vernachlässigt.

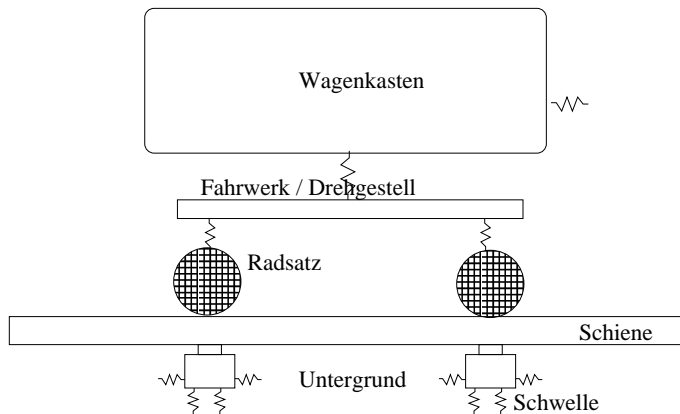


Abbildung 4.4:

Die Abbildung zeigt eine mögliche, bereits implementierte Konfiguration eines Modells für die Schwingungsanalyse von M³Rail, mit Wagenkasten, Drehgestell, Schiene, Schwellen und Untergrund.

Berechnungsbeispiel

Ein Modell von vier Körpern und 26 Verbindungen wird berechnet. Die Körper sind: ein Wagenkasten, ein Drehgestell und zwei Radsätze.

Die Eingabedaten für das Modell stammen aus den Manchester Benchmarks für Eisenbahnfahrzeugsimulation [53]. Wir betrachten hier jedoch nur einen halben Eisenbahnwaggon und ein Drehgestell. Die Räder sind mit dem Untergrund durch eine steife Feder und einen Dämpfer verbunden (Steifigkeit 999999 kN/m, Dämpfung 15 kN/m).

Einer der Radsätze wird aus der Gleichgewichtsposition um 0,005 m angehoben (entspricht der Fahrt über eine Fehlstelle). Die z-Komponenten der Lösung für die vier Körper sind in Abbildung 4.5 zu sehen. Die dargestellten Lösungen wurden mit einer impliziten RUNGE-KUTTA-Methode Radau5 berechnet; als Toleranzkriterium galt dabei, dass der relative Fehler pro Zeitschritt kleiner sein sollte als 10^{-5} .

4.3. Diskussion

Die mit dem bisher erstellten MKS-Modul berechneten Schwingungen betreffen nur den Bereich niedriger Frequenzen (0 bis zirka 20 Hz) und sind auch nur dort gültig.

Eine Erweiterung auf elastische Körper ist auch aus diesem Grunde notwendig (vgl. S. 62).

4. Simulationsrechnungen

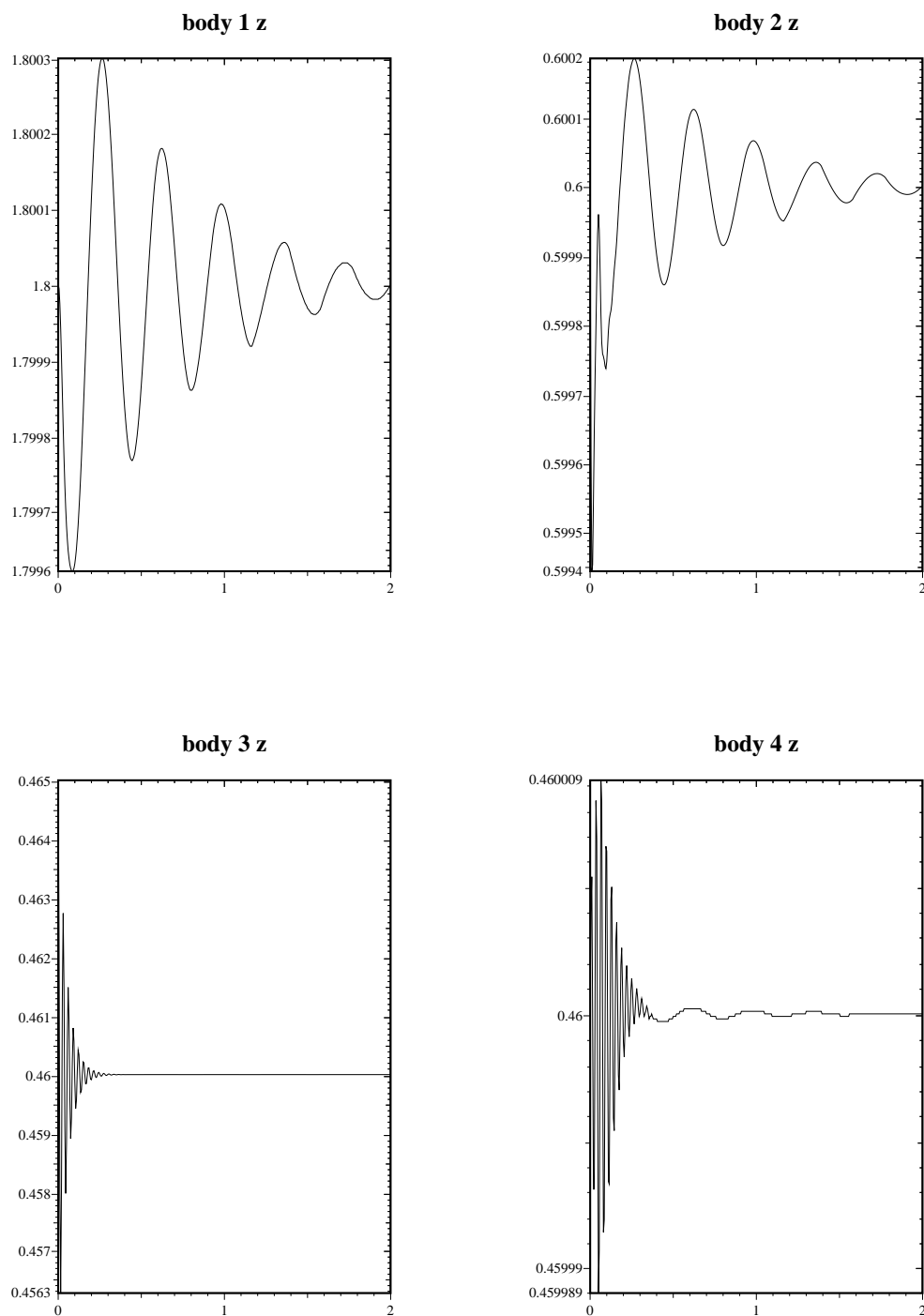


Abbildung 4.5: Beispiel einer Schwingungsberechnung mit M³Rail

Dargestellt ist die z-Komponente [m] der Schwingungsamplitude der vier gekoppelten Körper als Funktion der Zeit [s].

Körper 1: Wagenkasten

Körper 2: Drehgestellrahmen

Körper 3 und 4: die beiden Radsätze

5. Schallausbreitungsberechnungen

5.1. Vorgehensweise

Die Schallausbreitung wurde als Nachlaufrechnung zur Schwingungssimulation mit dem Programm RAYNOISE® durchgeführt. RAYNOISE® stellt verschiedene Methoden aus der geometrischen Akustik zur Verfügung (Schallstrahlen, Schallkegel etc.), wie sie im Abschnitt 2.5 vorgestellt worden sind. Es werden Schallpegel an Immissionsorten berechnet, die Ergebnisse werden graphisch und tabellarisch dargestellt.

Die Schallquellen, die in RAYNOISE® verarbeitet werden, sind grundsätzlich Punktquellen, die in einen bestimmten Raumwinkel hinein abstrahlen. Vorkonfiguriert sind auch linien- und flächenförmige Schallquellen. Diese sind in geeigneter Weise aus Punktquellen zusammengesetzt. Der Anwender kann weitere, individuell geformte Schallquellen aus Gitterelementen zusammensetzen. Für die Zwecke des vorliegenden Projekts wurden die Schiene als linienförmige Schallquelle und die Radsätze als punktförmige Schallquellen modelliert.

Für jede Schallquelle werden eine Abstrahl-Intensität, ein Abstrahl-Raumwinkel und ein Frequenzspektrum berücksichtigt.

In der geometrischen Akustik wird die Beugung – ein Wellenphänomen – vernachlässigt. RAYNOISE® enthält aber ein Näherungsverfahren zur Berechnung der Beugung erster Ordnung. Dabei wird ein Schallstrahl, der auf eine (Umgebung einer) Beugungskante trifft, so umgelenkt, als würde er an einer Wand reflektiert werden, die senkrecht auf der Beugungskante steht. Die Intensität des gebeugten Schalls wird nach einer Formel von KURZE und ANDERSON berechnet [52].

Die Größe der relevanten abstrahlenden Fläche an der Schiene wurde dabei einerseits mit dem Modell der statischen Biegelinie und andererseits mit einer emissionsseitigen Schalleistungsbilanz [98] abgeschätzt.

Es wurden sowohl Berechnungen durchgeführt, die keine Kohärenz zwischen den Rädern innerhalb eines Drehgestells als Annahme vorausgesetzt haben als auch Berechnungen, in denen eine Kohärenz angenommen wurde.

Es wurden sowohl Berechnungen ohne Beugung als auch mit „Beugung in erster Näherung“ durchgeführt.

Auch der Einfluss der Absorption auf die Luftschallabstrahlung wurde bei verschiedenen Frequenzen untersucht. Der Fahrweg wurde in drei Streifen aufgeteilt (siehe Abbildung 5.2 (oben)). Jedem Streifen konnte eine andere Materialeigenschaft und ein unterschiedlicher Absorptionskoeffizient zugeordnet werden. Für die Unterseite des Wagens wurde eine Stahlplatte mit dem Koeffizient $\alpha = 0$ (volle Reflexion) in 50 cm über dem Boden angenommen. Es wurden die Strahlengänge und die Immissionspegel an einer gedachten Wand in gegebenem Abstand von der

5. Schallausbreitungsberechnungen

Gleisachse untersucht. Die punktförmige Emissionsquelle war in 10 cm Höhe über dem Boden angebracht. Eine AutoCAD®-Zeichnung¹ des Oberbauquerschnitts wurde als alternative oder zusätzliche Eingabedatei für RAYNOISE® erstellt.

Vor- und Nachteile Die geometrische Akustik ist als Näherung für die Schallabstrahlung vertretbar, wenn nicht zu viele Hindernisse im abstrahlenden Raum vorhanden sind und die Pegel nicht in unmittelbarer Nähe zu den Hindernissen berechnet werden müssen. Für die Zwecke des Projekts, nämlich den Vergleich von SchO und FF INFUNDO®, reicht die geometrische Akustik daher auf jeden Fall aus. Für die Auslegung sekundärer Schallschutzmaßnahmen müssen Interferenz- und Beugungserscheinungen jedoch im Prinzip berücksichtigt werden.

Ein entsprechendes Auswerteprogramm (RAYNOISE®) war in der Version 3.0 auf dem Markt erhältlich. Es hat dem Forschungsteam Entwicklungsarbeit erspart und es ihm ermöglicht, sich auf seine Kernkompetenzen zu konzentrieren.

5.2. Ergebnisse

Die angestrebte automatische Kopplung der Schwingungssimulation an die Schallausbreitungsberechnung in der Form, dass die Ausgabe der Schwingungssimulation direkt als Eingabedatei in RAYNOISE® verwendet werden kann, wurde im Rahmen der Förderung nicht erreicht. Die Schallausbreitungsberechnung erfordert eine manuelle Eingabe der Eingabegrößen.

Bei den im folgenden beschriebenen Schallausbreitungsberechnungen wurde von am Schienenkopf gemessenen Beschleunigungspegeln ausgegangen. Diese wurden zunächst gemäß Gleichung 4.1 in Schalleistungs-Emissionspegel umgerechnet.

Bei den Schallausbreitungsberechnungen konnte ein Unterschied zwischen den Resultaten der verschiedenen Varianten (mit/ohne Beugung, mit/ohne Kohärenzannahme) festgestellt werden, der sich jedoch nicht auf die Vergleichsaussagen zwischen SchO und FF INFUNDO® auswirkt.

Eine typische Berechnung ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Das geometrische Modell für Fahrweg und Fahrzeug wurde mit dem Programm AutoCAD® erzeugt und in RAYNOISE® eingelesen. Kanten, an denen Beugung in erster Näherung berücksichtigt werden soll, werden dann als solche gekennzeichnet. Schallabstrahlende Elemente werden als Schallquellen ausgestattet. Der Dopplereffekt bleibt bei diesem Verfahren unberücksichtigt, jedoch kann eine dem Fahrzustand entsprechende Schallquellenanordnung (zum Beispiel Schallquellen nicht nur am Motor, sondern auch im Rad-Schiene-Bereich) gewählt werden.

Die Rechenergebnisse, nämlich die berechneten Schallpegel, sind farblich kodiert dargestellt.

Die der AutoCAD®-Zeichnung entstammenden, in Abbildung 5.1 dargestellten Oberleitungsmasten sind für die akustische Berechnung ohne Relevanz.

Zum Vergleich mit SCHALL 03 wurden verschiedene in dieser Richtlinie vorgesehene Standard-situationen mit RAYNOISE® simuliert und die Ergebnisse beider Rechenverfahren verglichen (vgl. die Diskussion hierzu im Abschnitt 5.3).

¹ AutoCAD® 2000

Berechnungsbeispiel: Schallabsorption durch Mehrfachreflexion an der Fahrbahnoberfläche

In Abbildung 5.2 (unten) ist ein einzelner Schallstrahl aufgezeichnet, der den Verlauf und den dadurch verlängerten Weg zum Immissionsort darstellt.

Ein Schallstrahl wird am Wagenkasten und der Fahrbahnoberfläche (verschiedene Materialien) mehrfach reflektiert. Dadurch wird seine Intensität jeweils verringert, da der Strahl an der Unterseite durch die Absorption der verwendeten Materialien an Leistung verliert.

Dies ist in Abbildung 5.2 (unten) gut zu erkennen.

Berechnungsbeispiel: Vergleich verschiedener Oberflächen

Abbildung 5.3 zeigt eine RAYNOISE[®]-Simulation des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit auf den abgestrahlten Schalldruckpegel in der Umgebung der Schienen. Rote (blaue) Gebiete entsprechen hohen (niedrigen) Schalldruckpegeln.

Die Schalldruckpegel sind bei Beton (schallharte Oberfläche) im Vergleich zum Schotter sehr hoch. Die Schalldruckpegel bei Gras sind deutlich niedriger als bei Beton und fallen zusätzlich nach außen hin viel steiler ab.

Dies ist in Abbildung 5.3 gut zu erkennen und wurde auch durch die Vergleichsmessungen qualitativ bestätigt.

Es wurden weiterhin Untersuchungen zur Frequenzabhängigkeit der Schallabsorption an der Fahrbahnoberfläche durchgeführt (vgl. hierzu nochmals Abbildung 2.16).

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass das Frequenzspektrum des von Schienenfahrbahnen emittierten Luftschalls entscheidend vom Material der Gleiseindeckung beeinflusst wird. So hat bei sonst gleichbleibenden Bedingungen eine Gleiseindeckung aus Gras erst ab Frequenzen oberhalb von 4000 Hz akustische Vorteile verglichen mit einer 35 cm hohen Schotter-schicht [98].

Im Falle geringer Schichtdicken (12 cm), wie sie bei Straßenbahnen verwendet werden, ist eine Graseindeckung im gesamten Frequenzbereich vorteilhafter.

5.3. Diskussion

Beurteilung des Programms Raynoise[®] Das Programm RAYNOISE[®] unterscheidet sich grundlegend von der herkömmlichen Bemessungsmethode gemäß der bei Schienenverkehrswegen üblichen Richtlinie SCHALL 03. Es basiert auf physikalischen Prinzipien und stellt die Pegel zunächst ohne Bewertung dar. Die Berechnung der Schallpegel in einer bestimmten Entfernung zur Schallquelle erfolgt unter Berücksichtigung der Absorption, Reflexion und Beugung des Schalls an Hindernissen im Ausbreitungsweg. Boni und Mali wie bei SCHALL 03 werden nicht berücksichtigt.

Die Leistungsfähigkeit der verwendeten Version 3.0 des Programmes RAYNOISE[®] ist begrenzt. Eine einfache Portierung auf einen neueren Rechner war zum Ende des Projekts nicht möglich. Komplexe Modelle zu berechnen wird in Zukunft ein Upgrade erfordern.

Die wesentlichen Aspekte der Emission, Ausbreitung, Reflexion und Beugung von Luftschall können betrachtet werden.

Um relative Ergebnisse zu bekommen, wie sie beim Vergleich Feste Fahrbahn INFUNDO[®] vs. Schotteroberbau im Rahmen dieses Projekts benötigt wurden, stellt das Programm eine gute Grundlage dar.

RAYNOISE® ist im Projekt „Schienenfahrweg für das 21. Jahrhundert, Teil I“ ein praktikables und ausbaufähiges Werkzeug.

Das Programmpaket RAYNOISE® berechnet die Schalldruckpegel für einfache Geometriefälle korrekt. Die errechneten Pegelwerte stimmen mit den Vorgaben aus der Richtlinie SCHALL 03 überein. Im Falle der Schallausbreitung mit Hindernissen (Schallschutzwand, Gebäude) traten Abweichungen von bis zu 5 dB in den absoluten Pegelwerten auf. Es ist mit diesem Programm möglich, die relevanten Schallpegel auf ganzen Flächen zu prognostizieren. Auch bei verschiedenen überlagerten Quellen und bei Fragestellungen, die das Frequenzspektrum des Schalls betreffen, arbeitet das Programm zufriedenstellend.

Ein grundsätzlicher Nachteil von RAYNOISE®, der von der zugrundeliegenden geometrischen Akustik herrührt, liegt in der unvollständigen Erfassung von Beugungsphänomenen. Bei sekundärem Schallschutz aller Art treten Beugungskanten auf. Schall gelangt so über eine Schallschutzwand hinweg in den dahinterliegenden Schallschattenbereich. Diese Effekte kann RAYNOISE® nur näherungsweise erfassen. Bei weiterführenden Projekten, die sekundären Schallschutz bearbeiten, muss man diese Einschränkung berücksichtigen.

Verwendet man viele Beugungskanten, die zur Berücksichtigung der Beugung erster Näherung herangezogen werden sollen, werden die Ergebnisse von RAYNOISE® zuweilen schwer durchschaubar. Schallstrahlen „dringen“ dann rechnerisch in die Materie ein und erscheinen zum Beispiel innerhalb des Bahndamms oder der Schallschutzwand (equivalent screen approach [52]). Das Programm verbietet die Eingabe mehrerer Beugungskanten nicht, die Anleitung empfiehlt aber, mehrere hintereinanderliegende Beugungskanten zu einer äquivalenten Kante zusammenzufassen.

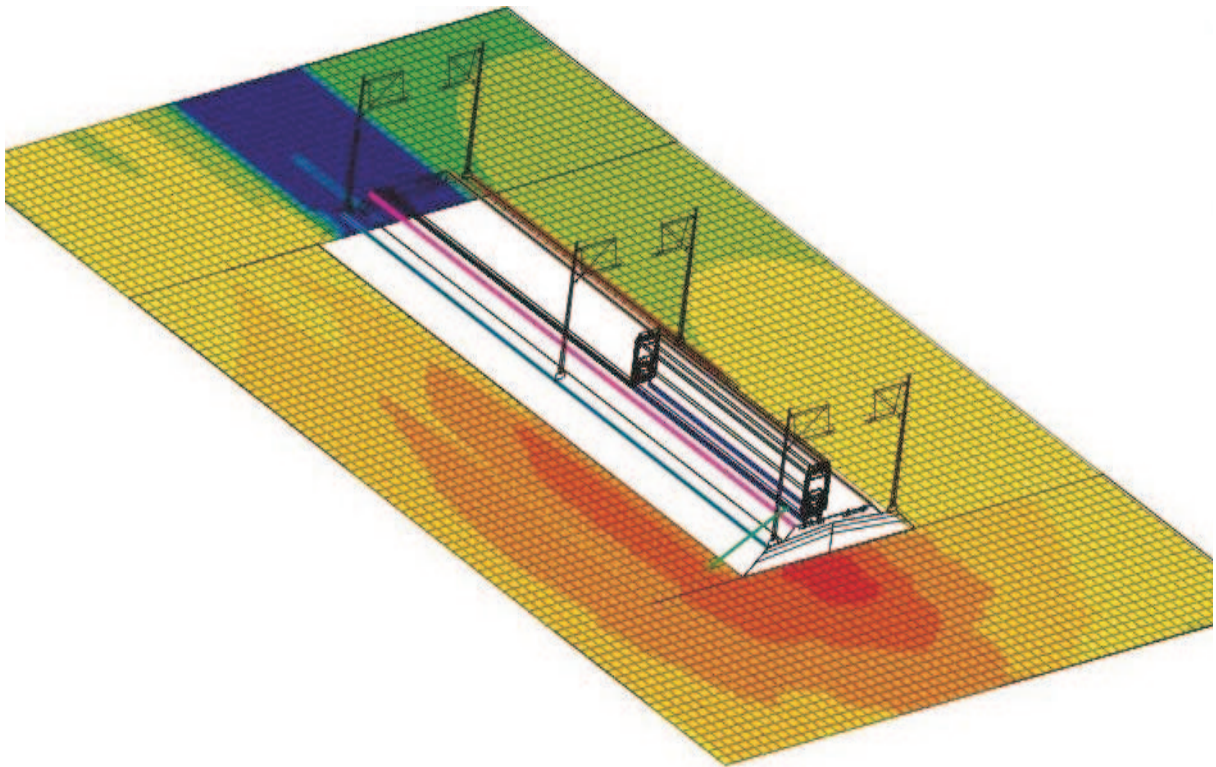


Abbildung 5.1: Berechnungsbeispiel der Schallabstrahlung eines Eisenbahnfahrzeugs auf Eisenbahnoberbau

Die farbig eingezeichneten Kanten des Bahndamms sind als Beugungskanten ausgewiesen. Zu sehen ist die Schallpegelverteilung.

rot: laute Bereiche

grün: weniger laute Bereiche

5. Schallausbreitungsberechnungen

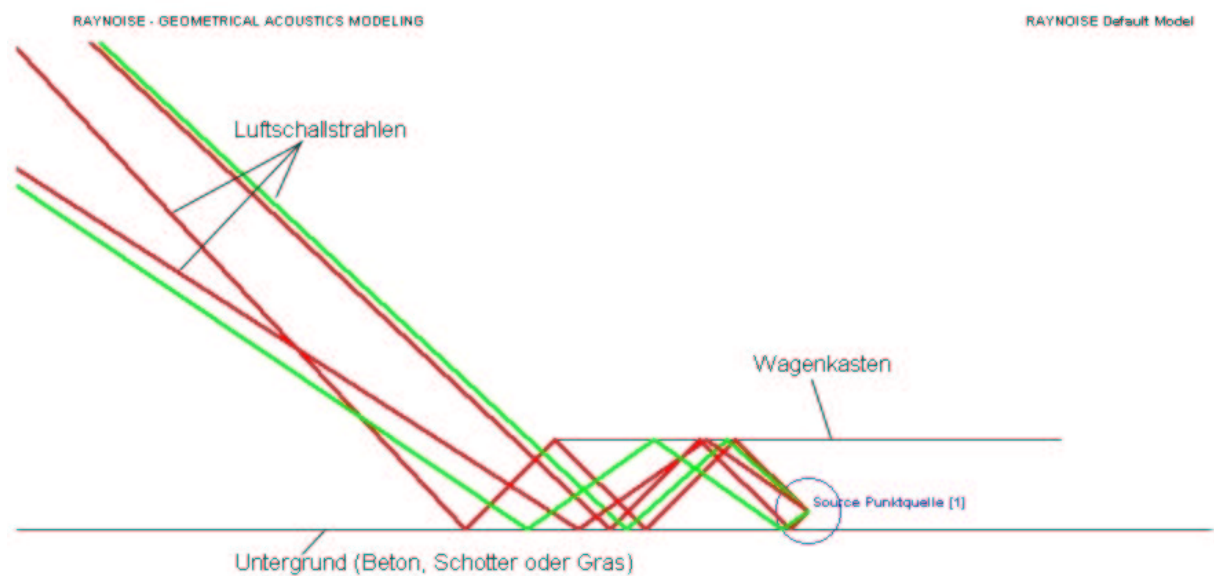


Abbildung 5.2: Berechnung des Einflusses der Absorption an der Fahrhahnoberflache auf die Luftschallabstrahlung

oben: Aufteilung des Fahrweges und der Umgebung in drei Streifen

unten: Strahlengang bei der Reflexion am Wagenkasten

Quelle: GOTTSCHANG [31]

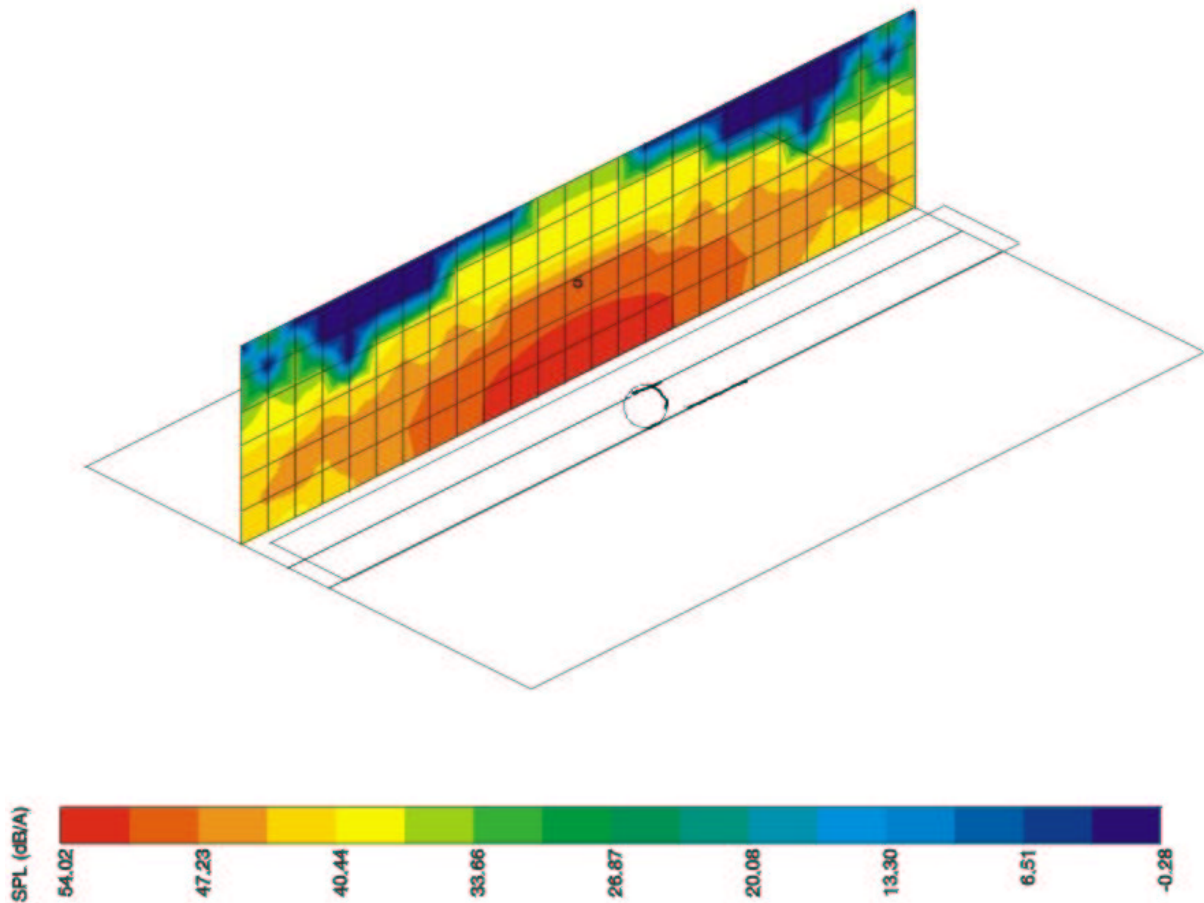


Abbildung 5.3: Schalldruckpegel einer Punktquelle bei 1000 Hz an einer gedachten Wand (6×25 m) in 2,50 m Abstand zur Schiene mit Beton als absorbierender Oberfläche in der horizontalen Ebene

Die Punktquelle befindet sich in 10 cm Höhe über der horizontalen Ebene. In 50 cm Höhe befindet sich als Modell des Wagenkastenbodens ein 2,80 m breites, reflektierendes, nicht absorbierendes Band. Die modellierte Wand misst 6×25 m.

5. Schallausbreitungsberechnungen

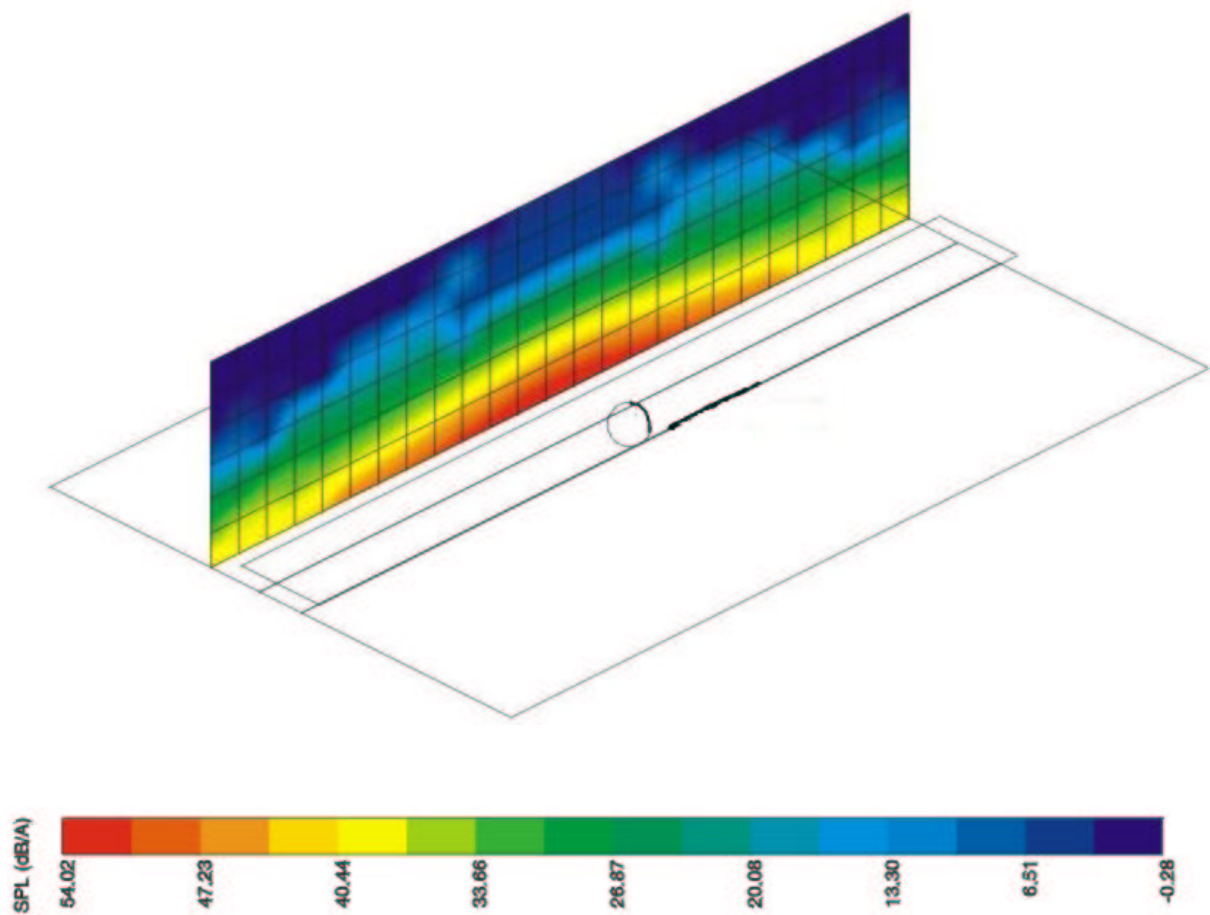


Abbildung 5.4: Berechnung des Schalldruckpegels mit Schotter als absorbierender Oberfläche, sonst wie in Abbildung 5.3

Zu sehen ist die im Vergleich zu Beton insgesamt wesentlich erhöhte Schallpegelminderung.

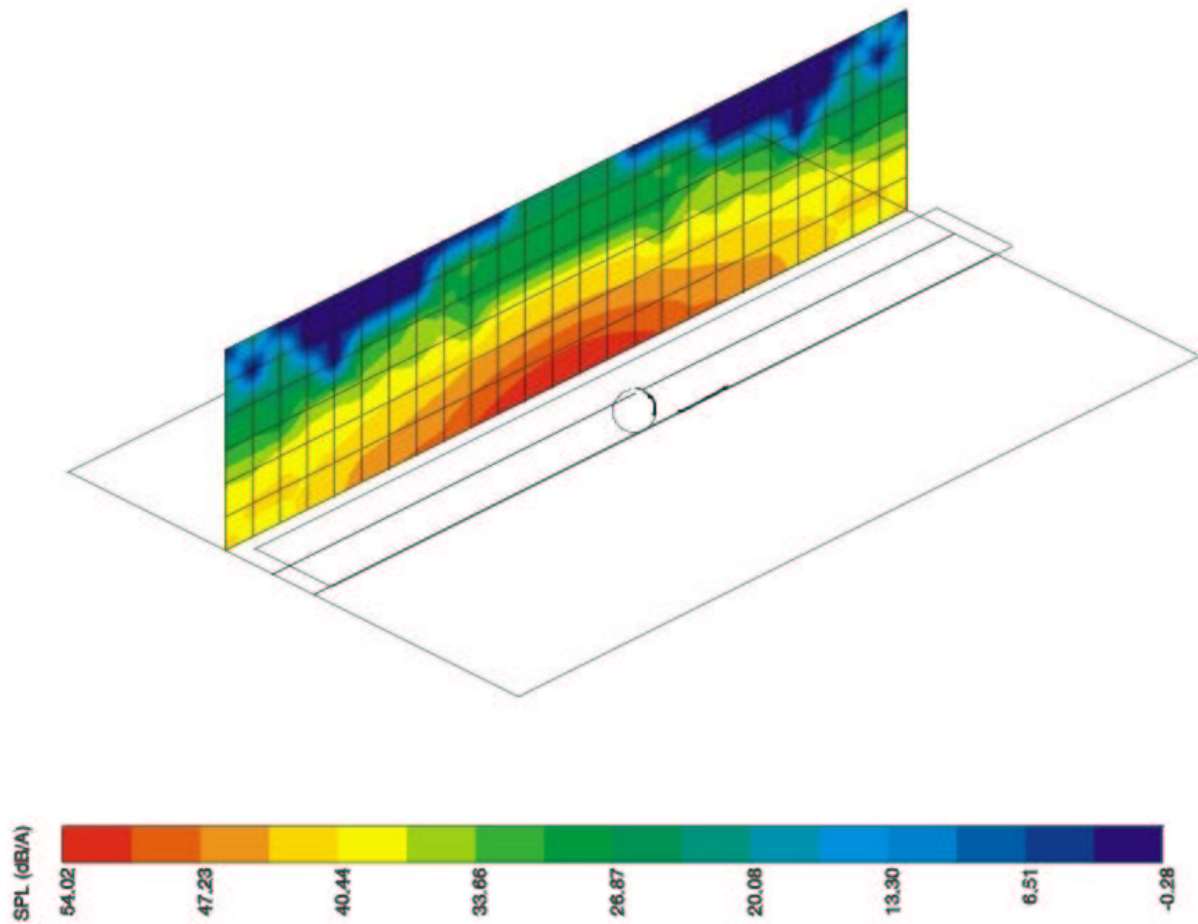


Abbildung 5.5: Berechnung des Schalldruckpegels mit Gras als absorbierender Oberfläche, sonst wie in Abbildung 5.3

Zu sehen ist die im Vergleich zu Beton stark erhöhte Schallpegelminderung und das nach außen hin schnellere Abfallen des Pegels.

5. Schallausbreitungsberechnungen

6. in-situ-Messungen

6.1. Überblick

Im Rahmen des Forschungsprojekts hat die Abteilung Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe in den Jahren 2001 bis 2003 vergleichende Luft- und Körperschallmessungen an verschiedenen Schienenfahrbahnsystemen durchgeführt.

Tabelle 6.1 enthält eine chronologisch geordnete Übersicht über die von der Abteilung Eisenbahnwesen im Zeitraum 2001-2003 durchgeführten Messungen mit Angaben zum Messort, Datum, Oberbauart, Fahrzeugart und Art der Messung.

Tabelle 6.1.: Von der Abteilung Eisenbahnwesen vorgenommene Luft- und Körperschallmessungen an Schienenfahrwegen mit unterschiedlicher Oberbauweise, chronologisch geordnet. KF: Kamera + Funkmikro, DK: DAT-Rekorder + kalibriertes Mikrofon

Standort	Datum	Oberbauart	Fahrzeugart	Art der Messung
Oslo Teresgate	16.08.01	System Oslo	Straßenbahn	Körperschall
Oslo Teresgate	18.12.01	Infundo	Straßenbahn	Körperschall
Waghäusel	24.04.02	Schotter	Vollbahn	Luftschall (KF)
Waghäusel	24.04.02	Infundo	Vollbahn	Luftschall (KF)
München Agnes-Bernauer-Str.	07.05.02	Schotter	Straßenbahn	Luftschall (KF)
München Siglstr.	07.05.02	Sedum	Straßenbahn	Luftschall (KF)
München Westendstr.	07.05.02	Infundo	Straßenbahn	Luftschall (KF)
München (Andere)	07.05.02	Rasen	Straßenbahn	Luftschall (KF)
Stuttgart Schmidener Str.	18.09.02	Infundo	Straßenbahn	Luftschall (DK)
Stuttgart Plieningen	18.09.02	Schotter	Straßenbahn	Luftschall (DK)
Stuttgart Schmidener Str.	18.09.02	Infundo	Straßenbahn	Körperschall
Stuttgart Plieningen	18.09.02	Schotter	Straßenbahn	Körperschall
München Agnes-Bernauer-Str.	31.10.02	Infundo	Straßenbahn	Luftschall (KF)
München Agnes-Bernauer-Str.	31.10.02	Infundo	Straßenbahn	Luftschall (DK)
Waghäusel	09.04.03	Schotter	Vollbahn	Luftschall (KF)
Waghäusel	09.04.03	Infundo	Vollbahn	Luftschall (KF)
Waghäusel	09.04.03	Schotter	Vollbahn	Luftschall (DK)
Waghäusel	09.04.03	Infundo	Vollbahn	Luftschall (DK)

6. *in-situ*-Messungen

Es wurde darauf geachtet, möglichst gut vergleichbare Standorte und Messsituationen ausfindig zu machen. Wichtige Kriterien dafür sind u. a.

- gleicher Standort (Vorher / Nachher-Messung nach einer Umbaumaßnahme) oder
- gleicher Oberbau bei verschiedenem Standort,
- gleiche Schienenrauigkeit,
- gleiche Fahrgeschwindigkeit,
- gleiche Fahrzeuge,
- gleiche Bebauung (Straßenschlucht oder Freigelände)

Hauptsächlich wegen Planfeststellungsproblemen und deren Folgen hat sich das Projekt zeitlich gegenüber der ursprünglichen Planung verzögert.

Bei den zur Verfügung stehenden Ausweichstrecken wurde wenn möglich die Schallemission an dem selben Messquerschnitt vor und nach dem Umbau gemessen. Somit konnten die in Tabelle 6.1 aufgeführten Messungen hinterlegt werden.

Für jeden Messort (Stuttgart, Oslo, Waghäusel und München) war ein Messbericht zu erstellen. Die Messberichte enthalten Angaben zu den beteiligten Personen, den verwendeten Messgeräten, zum Versuchsaufbau, zur Durchführung der Messung, zu den Messergebnissen und deren Auswertung. Die Messberichte sind in gesonderten Dokumenten enthalten.

Vor- und Nachteile Vorteil der Messungen *in situ* sind die für die gegebene Messsituation in besonderem Maße zutreffenden Ergebnisse. Simulationsrechnungen enthalten Ungenauigkeiten, die von vereinfachenden theoretischen Annahmen, numerischen Kompromissen und von nur ungenau bekannten Eingangsgrößen der Simulationsrechnung herrühren. Die Genauigkeit der *in-situ*-Messung ist – vorausgesetzt, es sind keine weiteren Störeinflüsse wie Wind oder Individualverkehr vorhanden – nur von der Genauigkeit der Messausrüstung begrenzt. Dem steht als Nachteil gegenüber, dass die Messergebnisse nicht ohne weiteres verallgemeinerbar sind. Ohne eine praktikable Theorie (und wenn es „nur“ die Annahme ist, dass die gemessenen Ergebnisse in einem gewissen Bereich extra- oder intrapoliert werden können), ist eine aussagekräftige Verallgemeinerung nicht möglich. Praktikable Theorien sind nicht für alle Probleme verfügbar. Dann sind für jeden interessierenden Messort eigene Messungen *in situ* erforderlich. Das ist im Eisenbahnwesen beispielsweise im Bereich der Körperschallprognose der Fall; für den Luftschall ist dies nicht der Fall, hier gibt es mit der Richtlinie SCHALL 03 eine anerkannt gute Möglichkeit, ohne *in-situ*-Messungen den Luftschall eines Zuges zu prognostizieren, alleine aufgrund von einigen leicht zu beschaffenden Parametern (z. B. Zuglänge, -geschwindigkeit, Abstand des Hörers vom Gleis).

6.2. Messorte

6.2.1. Standorte Stuttgart

- Schmidener Straße, Oberbau Feste Fahrbahn INFUNDO® (Abbildungen 1.1, 1.2 und 7.1)

Auf der einen Seite der Strecke befindet sich eine Straße, gesäumt von Bebauung mit dreigeschossigen Wohnhäusern. Auf der anderen Seite befindet sich keine Bebauung, hier fällt das Gelände steil ab.

Aufgrund des tagsüber starken Autoverkehrs wurde mit den Messungen erst ab 21 Uhr begonnen.

- S-Plieningen, Schotteroberbau (Abbildung 6.1)

Die Strecke in Plieningen ist eben und gerade. Sie verläuft im Messbereich über freies Feld. Das Gleis liegt auf einem konventionellen Schotteroberbau. Seitlich der Straße verläuft ein asphaltierter Feldweg ungefähr 70 cm unter Schienenoberkante.

Auf der Strecke verkehren die gleichen Fahrzeugtypen wie in der Schmidener Straße.

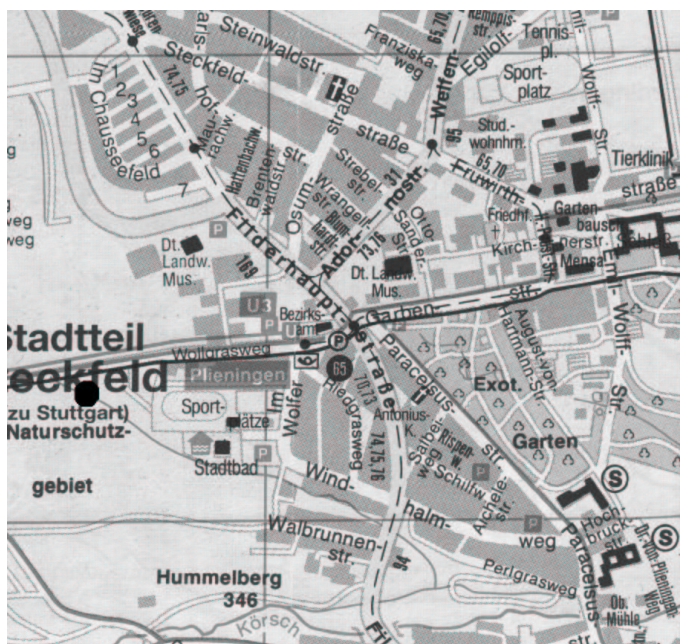


Abbildung 6.1:
Lage des Messortes Stuttgart–Plieningen

Der Messort ist mit einem schwarzen Punkt gekennzeichnet.

Quelle: ELBERT [16], Karte: ADAC-Stadtplan

6.2.2. Standort Waghäusel

Auf der Teststrecke der Deutschen Bahn AG bei Waghäusel werden zur Zeit sieben verschiedene Oberbauarten der FF unter Betriebsbedingungen getestet.

Der INFUNDO®-Abschnitt innerhalb der FF-Teststrecke der Deutschen Bahn AG in Waghäusel ist 390 m lang. Als Teil der Gütermagistrale Mannheim Richtung Schweiz (Gotthard) ist der Abschnitt mit zirka 110.000 Lasttonnen pro Tag stark belastet. Der Testabschnitt liegt im Vollbogen mit Radius 1.203 m und ist mit einer baulichen Überhöhung von 150 mm für eine Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h ausgelegt. Eine Gradientenneigung ist nicht vorhanden.

6. *in-situ*-Messungen

Abbildung 6.2 , S. 83, zeigt, dass das Schottergleis und die Feste Fahrbahn in Waghäusel parallel angeordnet sind, so dass für den jeweils festgehaltenen Querschnitt der Unterschied im gemessenen Schallpegel vergleichbarer Züge auf einen Unterschied im Oberbau zurückgeführt werden kann.



Abbildung 6.2: Messort DB-Teststrecke Waghäusel bei Karlsruhe

Schotteroberbau (rechtes Gleis) und Feste Fahrbahn Bauart INFUNDO® (linkes Gleis) verlaufen auf diesem Abschnitt der zweigleisigen Strecke parallel. Quelle: edilon-report [86]

6. in-situ-Messungen



Abbildung 6.3: Luftschallmessung am 09.04.2003 an der DB Teststrecke Waghäusel bei Karlsruhe

oben: Aufbau der Messapparatur

unten: Messposition bei 2,50 m von der äußeren Schiene

6.3. Ausrüstung

Zum Einsatz kamen u. a. eine digitale Videokamera¹, ein Funkmikrofon², ein kalibriertes hochempfindliches Mikrofon, ein DAT-Rekorder und ein Frequenzspektrometer³, für die Körperschallmessungen ferner die Videokamera Panasonic NV-DS 5, zwei triaxiale⁴ und drei monoaxiale⁵ Schwingschnellenaufnehmer, Erdspeieße, Verstärker⁶, Messrechner⁷ sowie ein Rüttler⁸.

Es wurde die an den verschiedenen Instituten der Universität vorhandene Messausrüstung jeweils leihweise benutzt. Abbildung 6.4 zeigt die Messanordnung der Körperschallmessungen am Beispiel des Standortes Schmidener Straße. Abbildung 6.5 zeigt die Messanordnung der Luftschallmessungen am Beispiel eines Messtags in Waghäusel.

Vor- und Nachteile Mit Hilfe einer Frequenzanalyse, in der der emittierte Körper- und Luftschall als Summe von harmonischen Schwingungen mit verschiedenen Frequenzen f_n und Amplituden A_n dargestellt wird, lässt sich der Zusammenhang zwischen dem gemessenen Körper- und Luftschalldruckfeld und den Schwingungen der einzelnen Körper, die dieses Schalldruckfeld erzeugen, deutlich machen.

Eine eigene Messausrüstung hätte es ermöglicht, einen Schwachpunkt der Luft- und Körperschallmessungen auszuschalten: So hätten auch zeitlich auseinanderliegende Messungen mit jeweils der genau gleichen Ausrüstung zur differenzierten Auflösung der Schallquellen (z. B. Motor, Rad, Rad-Schiene-Berührungspunkt, Schiene etc.) durchgeführt werden können, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erhöht hätte. Beispielhaft sei nur erwähnt, dass während des Projekts z. B. nicht für jede Messung das kalibrierte Mikrofon zur Verfügung stand. Ein ortsauflösendes Schallmessgerät – wie etwa eine akustische Kamera – stand ebenfalls nicht zur Verfügung.

¹ Sony DCR-VX900E

² Sennheiser bodypack 300

³ Norsonic Realtime-Analyzer 830

⁴ Lennartz Electronic 223-0036 LE – 3D, DIN 45669 – A1V 80/1, DIN

⁵ Lennartz Electronic 223-0037 LE 1D/V, DIN 45669 – A1V 80/1, DIN

⁶ Wölfel Type WM SC400 und Wölfel Type WMS-PS 4001

⁷ Pentium II mit spezieller A/D-Karte und Software Meda 3.10

⁸ Wacker BVPN 50, zirka 5400 Schwingungen pro Minute (90 Hz), zirka 9,8 kN Zentrifugalkraft, zirka 62 kg Betriebsgewicht, bis 25 cm Tiefenwirkung

6. in-situ-Messungen

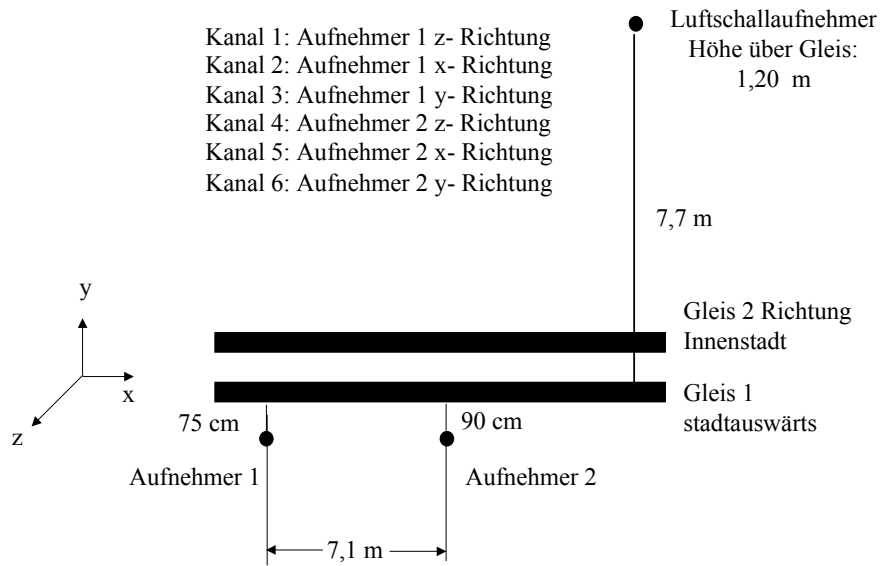


Abbildung 6.4: Messanordnung am Messort Stuttgart, Schmidener Straße
 Quelle: ELBERT [13]

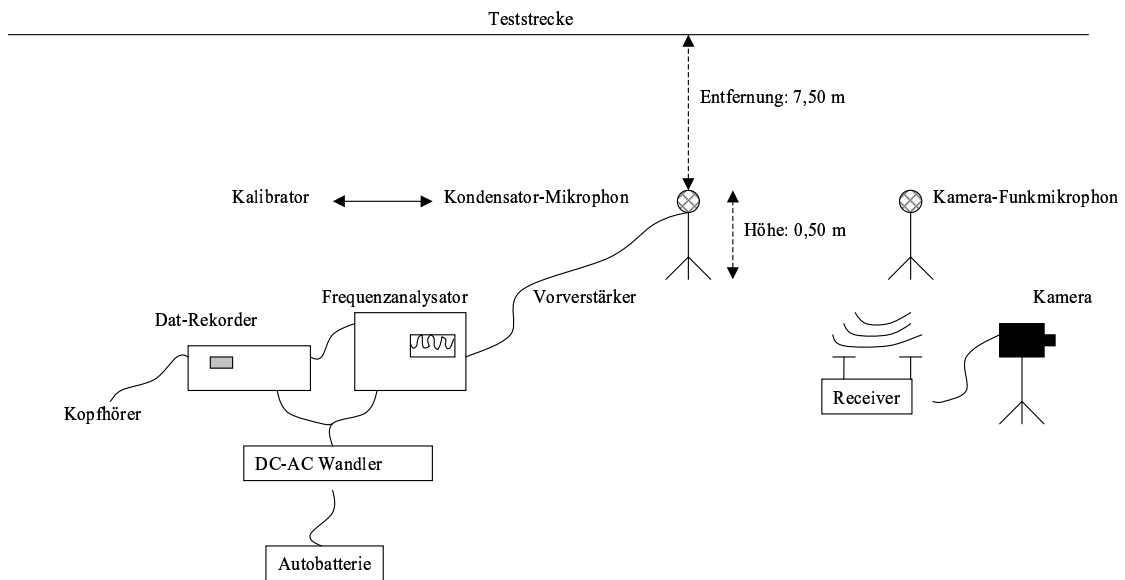


Abbildung 6.5.: Schematische Messanordnung der Luftschallmessung der Universität Karlsruhe, Abteilung Eisenbahnwesen (Prof. Hohnecker) in Waghäusel vom 09.04.2003

6.4. Luftschallmessungen

6.4.1. Vorgehensweise

Luftschallmessungen wurden von der Abteilung Eisenbahnwesen an den INFUNDO®-Teststrecken in Stuttgart, Waghäusel und München durchgeführt. Je vollem Messtag wurden mehr als 25 Zugvorbeifahrten aufgezeichnet, so dass ein differenzierter Vergleich, aufgeschlüsselt etwa nach Personen- und Güterzügen, Oberbauart und Mikrofonposition, möglich ist. Die Messergebnisse wurden in der Form $L_p(f)$ [dB] – d. h. Luftschalldruckpegel als Funktion der Frequenz f [Hz] – dargestellt und ausgewertet. Bei den Luftschallaufnahmen wurden zwei verschiedene Mikrophone mit den jeweils dazugehörigen Speichermedien, nämlich Funkmikro plus Videokamera bzw. hochempfindliches kalibriertes Mikro plus DAT-Rekorder, verwendet.

Die Zeitverläufe der Schallpegel (Audiodaten) von den Vorbeifahrten der Züge und Straßenbahnen an einem definierten Messquerschnitt sind auf DAT oder digitaler Videokassette gespeichert. Das an der Abteilung Eisenbahnwesen benutzte Frequenzspektrometer⁹ kann diese Daten in einem Bereich von 20 bis 20.000 Hz auslesen.

Bei der Frequenzanalyse wurde folgendermaßen vorgegangen:

1. Die Pegel werden in Form von Terzspektren (d. h. Diagramme, die den Schallpegel als Funktion der Frequenz zeigen) ausgegeben.
2. Das Frequenzspektrometer wird mit dem Referenzton kalibriert, der sich jeweils auf den DAT-Aufzeichnungen befindet. Vor Beginn der Messung wird das Referenzsignal mit dem DAT-Rekorder aufgenommen.
3. Dazu wird zunächst ein geeigneter Zeitraum als Ausschnitt aus der Vorbeifahrt gewählt. Es werden jeweils solche Zeitfenster von 10 bis 20 Sekunden Länge betrachtet, in denen der Schallpegel der Überfahrt konstant ist und keine Nebengeräusche auftreten.
4. In diesem Zeitfenster werden die unbewerteten Schalldruckpegel ermittelt. Mit einer FAST FOURIER TRANSFORMATION erhält man Spektren, mit konstanter Absolutbandbreite.
5. Die Messdaten werden dann in Form von Excel-Tabellen übernommen.
6. Vergleichbare Terzspektren wurden schließlich in Übersichtdiagrammen gemeinsam dargestellt.

Es hat sich angeboten, mehrere vergleichbare Überfahrten (gleicher Tag und Ort, gleicher Fahrzeugtyp, gleiche Fahrtrichtung, gleiche Mikrophoneinstellungen) zu mitteln, um die Vergleichbarkeit der Oberbauformen zu erhöhen. Zufällige Störeinflüsse werden dabei herausgemittelt.

Die relativen Schallpegel und die spektrale Zusammensetzung des abgestrahlten Schalls sind so zuverlässig gemessen worden, dass ein aussagekräftiger Vergleich gezogen werden kann.

Abweichungen

Frequenzanalyse der in Waghäusel gemessenen Luftschallpegel Das Mikrofon war in einer Höhe von 50 cm über Grund und in einer Entfernung von 150 cm von der äußeren Schiene angebracht worden.

In der E DIN EN ISO 3095 wird für Luftschallmessungen der Mikrofonabstand auf 7,5 m von der Gleisachse und die Mikrofonhöhe auf 1,5 m bzw. 3,5 m über Schienenoberkante (SOK)

⁹ Norsonic Realtime Analyser 830-2

festgelegt. Im Unterschied dazu wurde bei vielen unserer Messungen das Funkmikro in der Höhe von 0,50 m über Grund (0,43 m über SOK) und in einer Entfernung von 1,5 m (einige der Messungen vom 24.4.2002) bzw. 2,5 m (einige der Messungen vom 9.4.2003) zur Schienenkopfmittle der äußeren Schiene an einem Oberleitungsmast befestigt, d.h. es wurde möglichst nahe am Rad-Schiene-Kontaktbereich gemessen. Das Kondensator-Mikrofon wurde im Abstand 2,5 m zur äußeren Schiene, 0,70 m über Grund und zirka 0,2 m seitlich versetzt am gleichen Oberleitungsmast befestigt.

Für die Fälle, bei denen die Mikrophone nahe dem Rad-Schiene-Kontaktbereich aufgestellt waren, gehen wir davon aus, daß die Rad-Schiene-Schwingungen den größten Anteil am gemessenen Luftschalldruckpegel haben und daß die Schallabstrahlung vom Wagenkasten die Messergebnisse nur wenig beeinflusst. Da die Frequenz und Amplitude der Schiene-Rad-Schwingungen in entscheidendem Maße von der Oberbauart abhängen, sollte bei der nahen Mikrofonposition die unterschiedliche Oberbauform in den gemessenen Luftschallspektren besonders gut zu erkennen sein. Wie schon in Kapitel 6.3 ausgeführt, stand uns leider kein Equipment zur Verfügung, das übereinander die unterschiedlichen Schallquellen aufzeigte.

Frequenzanalyse der in Stuttgart Schmidener Straße und in Stuttgart-Plieningen gemessenen Luftschallpegel Vor Ort wurden die Messungen direkt mit dem Modular Precision Sound Level Meter¹⁰ ausgewertet, denn hiermit können vor Ort die Mittelungspegel L_{eq} nach DIN IEC 804 und der maximale Schallpegel abgelesen werden. Die Frequenzanalyse wurde mit dem Norsonic Realtime Analyzer 830-2 durchgeführt.

Luftschallmessungen in Stuttgart Die Luftschallmessungen in Stuttgart Schmidener Straße und in Stuttgart-Plieningen wurden nach DIN 45637 im Abstand von 7,5 m von der Gleisachse ausgeführt und in einer Höhe von 1,20 m über Schienenoberkante. Das Mikrofon wurde auf der straßen- und bebauungsabgewandten Seite platziert. Die Messungen wurden direkt vor Ort ausgewertet. Zusätzlich wurden die Zugvorbeifahrten auf ein DAT-Band aufgenommen, vor jeder Messung wurde jeweils ein Referenzton von 93,8 dB bei 1000 Hz aufgenommen.

6.4.2. Ergebnisse

Die Auswertung der Luftschalldruckspektren, die an verschiedenen Meßorten (Stuttgart, München, Waghäusel) aufgenommen wurden, zeigen übereinstimmend, dass die Luftschallemission der Oberbauart INFUNDO® zwischen 400 Hz und 1200 Hz ein absolutes Maximum besitzt. Das Maximum liegt bei zirka 600 Hz.

Abbildung 6.6 zeigt einen Vergleich der Luftschalldruckpegel zweier Güterzüge auf FF INFUNDO® bzw. SchO, aufgenommen an der Teststrecke bei Waghäusel.

Die Messungen aus Stuttgart zeigen das gleiche charakteristische Spektrum, nämlich eine Spitze bei etwa 500 Hz und reduzierte Emissionspegel im Bereich hoher Frequenzen [94]. Abbildung 6.7 zeigt Ergebnisse der Luftschallmessungen aus Stuttgart. Weitere Messungen in Waghäusel haben dies bestätigt.

Die vergleichenden Messungen an SchO und eingebetteten Systemen (ERS) ergaben, dass die Pegelwerte des INFUNDO®-Systems im Bereich um 600 Hz um zirka 5-10 dB oberhalb

¹⁰ Modular Precision Sound Level Meter Brüel & Kjaer Type 2231 „Taktmaximal“ Module BZ 7102 Ser. Nr. 1680137

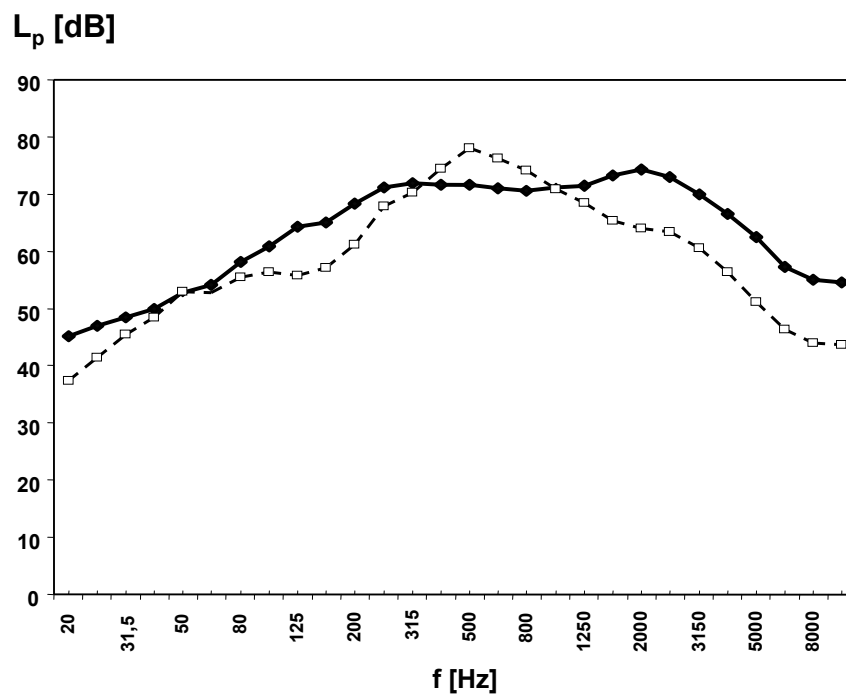


Abbildung 6.6: Vergleich der Luftschalldruckpegel [dB] der Oberbauarten FF INFUNDO® und SchO als Funktion der Frequenz [Hz], Messort DB-Teststrecke Waghäusel bei Karlsruhe

durchgezogene fette Linie: Schotter

gestrichelte feine Linie: INFUNDO®

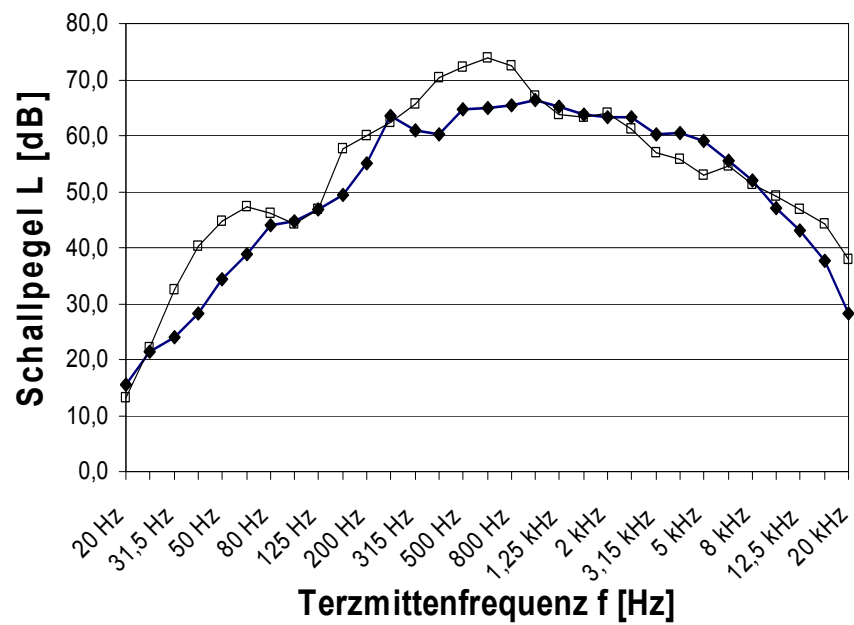


Abbildung 6.7: Luftschallpegel SchO (Plieningen, fette Kurve) gegenüber FF (feine Kurve)

Vergleich der Messungen SchO (Plieningen) und FF (INFUNDO[®], Stuttgart
Schmidener Straße)

Quelle: ELBERT [14]

denen des SchO liegen. Andererseits zeigen die Messungen, dass die Emissionspegel der Oberbauart INFUNDO® für $f > 2000$ Hz unterhalb denen des SchO liegen. Wir halten als Ergebnis fest:

Die Luftschallemission der Oberbauart INFUNDO® besitzt bei zirka 600 Hz ein absolutes Maximum. Die Emissionspegel liegen dort um 5-10 dB höher als beim SchO. Oberhalb von 2000 Hz emittiert das System INFUNDO® weniger Luftschall in die Umgebung als der konventionelle SchO.

Vergleicht man die Abbildungen 6.6 bzw. 6.7 mit dem in Abbildung 2.14 dargestellten Frequenzband, so ist zu erkennen, dass hohe Schallanteile von SchO in dem Bereich von 1000 Hz bis 4000 Hz liegen, wo das menschliche Ohr besonders empfindlich ist. Die Oberbauart INFUNDO® hat dagegen ihre maximalen Schallanteile deutlich unter 100 Hz. Durch einen Wechsel von SchO zur FF INFUNDO® lassen sich also Frequenzanteile des Luftschalls hin zu solchen niedrigeren Frequenzen verschieben, für die das menschliche Ohr nicht so empfindlich ist und die daher subjektiv als leiser und somit als angenehmer empfunden werden.

Geht man von SchO zur FF INFUNDO® über, verschieben sich Frequenzanteile des Luftschalls hin zu Frequenzen, die als leiser und angenehmer empfunden werden.

6. *in-situ*-Messungen

6.5. Körperschallmessungen

6.5.1. Vorgehensweise

Körperschall wird nach DIN 4150–2 bis zu 80 Hz ausgewertet, die messtechnische Grenze der Körperschallaufnahmen in Stuttgart lag bei 315 Hz. Das Frequenzspektrometer arbeitet prinzipiell im Bereich von 20 Hz bis 7000 Hz.

Um die schalltechnischen Eigenschaften der untersuchten Oberbauarten zu bestimmen, wurden die Messaufnehmer in Stuttgart Schmidener Straße und in Stuttgart–Plieningen jeweils in unmittelbarer Nähe des Gleises im Abstand von etwa 0,5 bis 1,0 m von der äußeren Schiene positioniert. Die an diesen Stellen gemessenen Schwingschnellen können als das Emissionsspektrum des Fahrwegs betrachtet werden. Bei weiter entfernt liegenden Messpunkten (z. B. bei Immissionsmessungen in den am Schienenfahrweg gelegenen Gebäuden) haben Unterschiede in der Bodenbeschaffenheit einen großen Einfluss auf das Messergebnis. Dies hat zur Folge, dass im Immissionsspektrum fahrwegspezifische und ausbreitungsspezifische Aspekte des vom Schienenverkehr verursachten Körperschalls nicht eindeutig voneinander getrennt werden können. Unsere Messungen wurden daher möglichst nahe am Emissionsort durchgeführt.

Die beiden Messgeräte¹¹ hatten in Stuttgart (Schmidener Straße) etwa 1 m Abstand von der Schiene und etwa 10 m Abstand voneinander. Wegen der Nähe der Geophone zueinander und zur Schallquelle gingen wir davon aus, dass der Einfluss des Untergrunds ungefähr gleichbleibend ist und dass die gemessenen Unterschiede in den Schwingschnellen daher ein Indiz für die Eigenschaften des Oberbaus darstellen (Emissionsspektrum). Aus dem Lichtraumprofil der Straßenbahnen ergab sich ein Mindestabstand von 70 cm zum nächstgelegenen Gleis. Die Aufnehmer befanden sich noch im Gleisbett.

Erdspieße wurden in definierten Abständen vom Gleis eingeschlagen, um die Körperschallausbreitung zu erfassen. Die Position der Erdspieße ist nicht zentimetergenau, die Ungenauigkeit der Positionierung ist jedoch gering und nicht von signifikantem Einfluss auf die Messergebnisse. Zur Kontrolle wurde ein zweiter Schwingungsaufnehmer verwendet.

Die Messergebnisse der Körperschallmessungen wurden in der Form $v(f)$, d. h. Schwinggeschwindigkeit v [mm/s] als Funktion der Frequenz f [Hz] dargestellt und diskutiert. Zur Ergänzung und zum Vergleich werden auch die Messungen des Ingenieurbüros Müller BBM in München (Steinstraße) citeantrag:33 und die Messergebnisse aus Oslo (Teresesgate) herangezogen, wo ebenfalls ein INFUNDO®-Oberbau, in einem vergleichbaren Abstand (0,6 m von der äußeren Schiene), gemessen wurde.

Abweichungen

Anzumerken ist, dass im Unterschied zu Stuttgart und München, wo Max–Hold–Spektren dargestellt sind, in Oslo Terzmittelwerte aufgenommen wurden. Die Terzmittelwerte sind in der Regel kleiner als die Max–Hold–Werte.

¹¹ Geophone Lennartz Electronic 223-0036 LE-3D

6.5.2. Ergebnisse

Die Körperschallmessungen in Stuttgart und Oslo zeigen übereinstimmend, dass die Schall-emission der Oberbauart INFUNDO® bei einer Frequenz von zirka 63 Hz ein absolutes Maximum besitzt. Die vertikalen Schwingschnellen betragen im Maximum $v(63\text{Hz}) = 0,15 \text{ mm/s}$ (Oslo) und $v(63\text{Hz}) = 0,18 \text{ mm/s}$ (Stuttgart). Die Breite des Peaks ist etwa $\Delta f = 40 \text{ Hz}$. Diese Ergebnisse stimmen bezüglich der Lage, Höhe, und Breite des Peaks mit den Resultaten des Berichts [62] des Ingenieurbüros Müller BBM am System INFUNDO® in München ($v(63\text{Hz}) = 0.25 \text{ mm/s}$) überein¹².

Die Abbildungen 6.8 (S. 96), 6.9 (S. 97) und 6.10 (S. 98) zeigen Messergebnisse aus Stuttgart. Zu sehen ist eine vergleichende Darstellung von Körperschallmessungen an der INFUNDO®-Teststrecke in der Schmidener Straße und an der Vergleichsstrecke in Stuttgart-Plieningen [94]. Die dünne Kurve zeigt die Schwingschnellen des INFUNDO®-Oberbaus; die fettgedruckten Kurven zeigen Aufnahmen der Schwingschnellen des Schotter-Oberbaus.

Es ist zu erkennen: Das INFUNDO®-System emittiert weniger Körperschall als der SchO, und seine Schallschnellen-Spitze ist zu niedrigeren Frequenzen hin verschoben.

Da an allen drei INFUNDO®-Teststrecken¹³ (Stuttgart, München, Oslo) das Hauptmaximum des emittierten Körperschalls bei zirka 63 Hz liegt und da die Lage des Maximums annähernd unabhängig von der Art und Geschwindigkeit des Fahrzeugs ist, liegt der Schluss nahe, dass es sich hierbei um INFUNDO®-Oberbau-spezifische Eigenschaft handelt. Wir halten als ein Ergebnis der Körperschallmessungen fest:

Die Oberbauart INFUNDO® besitzt bei zirka 63 Hz eine System-Eigenfrequenz.

Die Körperschallmessungen ergaben, dass beim INFUNDO®-System im Frequenzbereich um zirka 30 Hz ein lokales Maximum existiert. Die vertikalen Schwingschnellen betragen dort $v(32\text{Hz}) = 0,01 \text{ mm/s}$ (Oslo), $v(40\text{Hz}) = 0,09 \text{ mm/s}$ (Stuttgart) und $v(31\text{Hz}) = 0,05 \text{ mm/s}$ (Steinstraße München) und sind somit deutlich niedriger als die Schwingschnellen im Hauptmaximum bei 63 Hz. Während bei der Messung in Oslo das 30-Hz-Maximum deutlich getrennt von dem Hauptmaximum ist, zeigen die Messungen in Stuttgart und München bei den entsprechenden Frequenzen lediglich eine „Schulter“, was zumindest auf ein zugrundeliegendes Maximum hindeutet, jedoch auch das unterschiedliche Messequipment und die im Rahmen dieser Förderung nicht mögliche Messung der Rauigkeit von Rad und Schiene sowie der Lagegenauigkeit der Schienen aufzeigt.

Neben den Maxima bei 30 und 63 Hz konnte an allen drei Standorten bei zirka 12 Hz ein weiteres lokales Maximum nachgewiesen werden. Die Schwingschnellen liegen bei $v(12\text{Hz}) = 0,007 \text{ mm/s}$ (Oslo), $v(12\text{Hz}) = 0,015 \text{ mm/s}$ (Stuttgart) und $v(12\text{Hz}) = 0,015 \text{ mm/s}$ (München). Sie sind somit eine Größenordnung kleiner als im Hauptmaximum bei 63 Hz. Da die Eigenfrequenzen von Gebäuden bei zirka 10 Hz liegen, sollte die Körperschallemission des Fahrwegs in diesen Frequenzbereich möglichst gering sein.

¹² [62], Seite 9-10

¹³ Die umgebauten Streckenabschnitte werden als Teststrecken bezeichnet.

Der Vergleich des Systems INFUNDO® mit den jeweiligen Referenzfahrbahnen (System Oslo, SchO-Stuttgart, Standard FF München) zeigt in allen Fällen, dass die INFUNDO®-Fahrbahn weniger Körperschall in die Umgebung emittiert. Die Körperschallpegelreduktionen betragen bis zu 20 dB_v. Die größten Pegelreduktionen durch das System INFUNDO® ergeben sich oberhalb dessen Eigenfrequenz von 63 Hz im Bereich zwischen 100 Hz und 300 Hz.

6.6. Diskussion

Alle Messergebnisse unterliegen der Einschränkung, dass Lage- und Rauigkeitsmessungen der Schienenoberfläche und der Radlauffläche in dem vorliegenden Projekt nicht möglich waren. Dies war im Rahmen dieser Förderung nicht leistbar.

Das wirkt sich grundsätzlich auch auf die aus den Messergebnissen abgeleiteten Aussagen aus. Die Frequenzverteilungen (Schallcharakteristiken) sind zwar zuverlässig, die absolute Höhe der gemessenen Pegel ist aber nicht ohne weiteres verallgemeinerbar. Für den Zweck des grundsätzlichen Vergleichs der Schallcharakteristiken ist diese Einschränkung zunächst hinnehmbar.

Stuttgart Schmidener Straße und Plieningen Die Messaufnehmer wurden bei den Messungen in Stuttgart–Plieningen gleich wie in der Schmidener Straße angeordnet, um die Messdaten möglichst einfach vergleichen zu können. Im Schotter war es schwieriger, die Erdspieße exakt zu positionieren. Daher streut deren Abstand vom SchO-Gleis etwas breiter um den Sollwert als in der Schmidener Straße. Die Ungenauigkeit der Positionierung ist jedoch nicht von signifikantem Einfluss auf die Messergebnisse. Zur Kontrolle wurde ein zweiter Schwingungsaufnehmer verwendet.

Beispielhaft zeigen die Abbildungen 6.8 (S. 96), 6.9 (S. 97) und 6.10 (S. 98) vergleichende Darstellungen von Körperschallmessungen an der INFUNDO®-Teststrecke und an der Vergleichsstrecke in Stuttgart [94].

Gültigkeit quantitativer Aussagen Quantitative Aussagen lassen sich ableiten, da das Frequenzspektrometer mit einem Referenzton kalibriert wurde, der sich jeweils bei den DAT-Aufzeichnungen befindet.

Aufgrund der Wahl des Zeitfensters (ausgewerteter Ausschnitt) ergibt sich bereits eine Mindestungenauigkeit von 1 dB. Wählt man ein 10 bis 20 Sekunden langes Zeitfenster (Ganzzugwert), ist von 2 dB bis (in ungünstigen Fällen) 3 dB Unsicherheit auszugehen. Wählt man ein kurzes Zeitfenster (3 bis 5 Sekunden, Waggonwert), sinkt die Ungenauigkeit auf 1 dB. Innerhalb eines Zuges, besonders innerhalb eines Güterzuges, variieren die Pegel der einzelnen Waggons jedoch auch bei gleicher Bauart, je nach Verschleiß- und Beladungszustand.

Ein Zeitfenster von drei Sekunden genügt schon, um einen gesicherten Pegelwert zu ermitteln. Es lassen sich daher auch Überfahrten, die kein sehr langes Zeitfenster konstanten Schallpegels enthalten, noch gut auswerten. Auch die Vorbeifahrt schnellfahrender kurzer Einheiten sowie Aufnahmen mit einem gewissen Maß an kurzzeitigen Störungen, etwa durch Pkw-Verkehr, sind auswertbar.

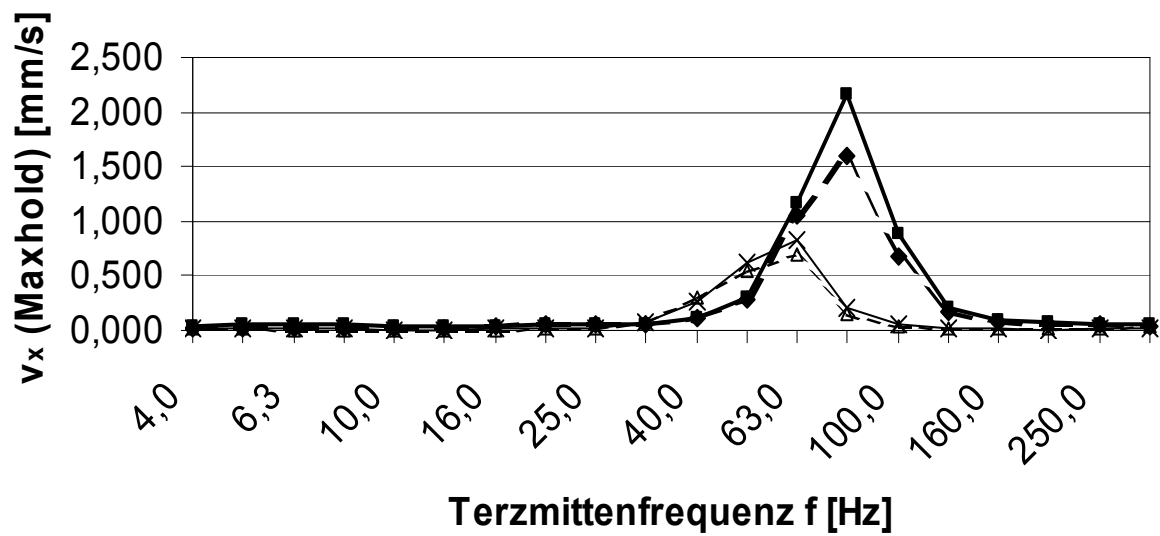


Abbildung 6.8: Vergleich der Körperschall-Emissionspegel

Vergleich der Messungen SchO (Plieningen) und FF INFUNDO[®] (Stuttgart Schmidener Straße)
fette Kurven: SchO (Plieningen)
feine Kurven: FF INFUNDO[®] (Stuttgart Schmidener Straße)
Schwingschnelle v_x [mm/s] in Längsrichtung als Funktion der Frequenz [Hz]
Quelle: ELBERT [17]

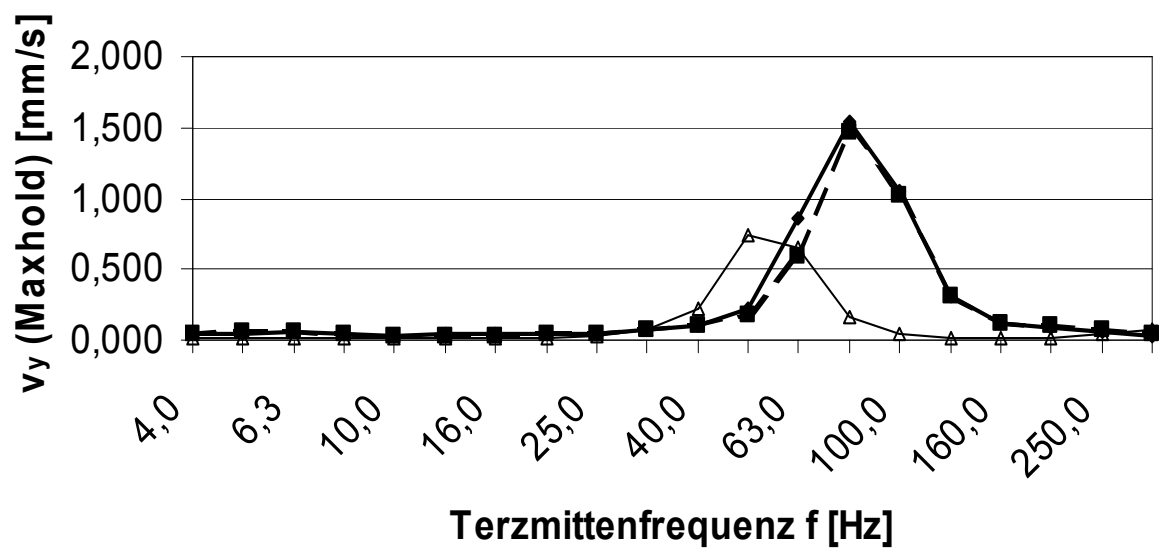


Abbildung 6.9: Vergleich der Körperschall-Emissionspegel

fette Kurven: SchO (Plieningen)

feine Kurve: FF INFUNDO® (Stuttgart Schmidener Straße)

Schwingschnelle v_y [mm/s] in horizontaler Richtung orthogonal zum Gleis
als Funktion der Frequenz [Hz]

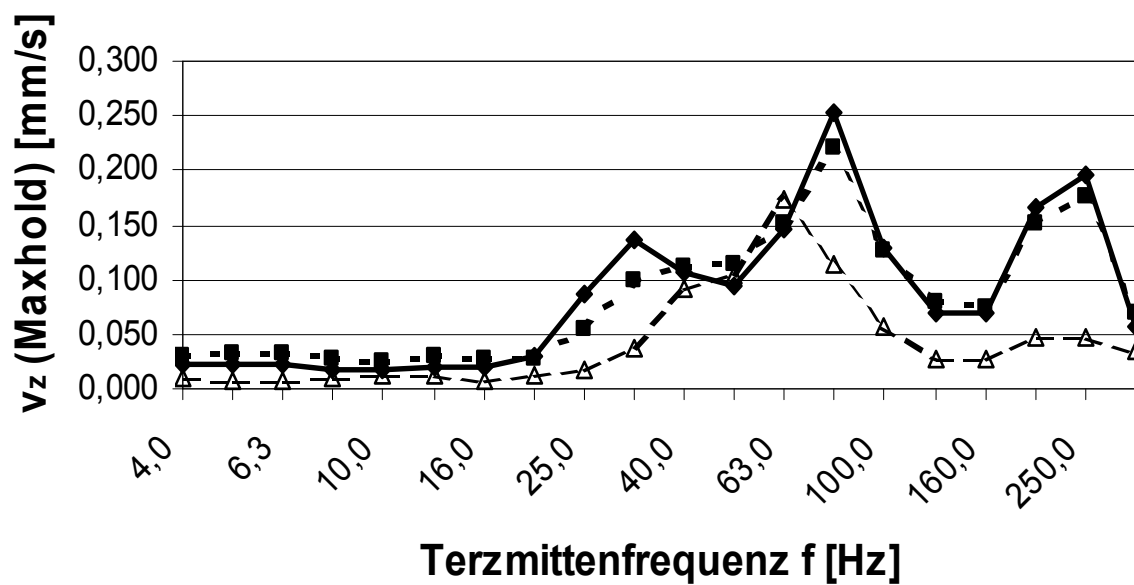


Abbildung 6.10: Vergleich der Körperschall-Emissionspegel

fette Kurven: SchO (Plieningen)

feine Kurven: FF INFUNDO® (Stuttgart Schmidener Straße)

Schwingschnelle v_z [mm/s] in vertikaler Richtung als Funktion der Frequenz [Hz]

7. Bau und Entwicklung des Fahrwegsystems INFUNDO®

Inhalt dieses Kapitels ist die anwendungsorientierte Forschung im Rahmen des Projekts. Das Kapitel ist grob unterteilt in eine Schilderung des Baus der Teststrecke, der ein wesentliches Ziel des Projekts war und in einen Abschnitt zu den Weiterentwicklungen. Die Weiterentwicklungen haben sich aus den intensiven Gesprächen der Projektpartner ergeben, worin im Lauf des Projekts bereits Zwischenergebnisse aus Messungen und Modellierung sowie aus den Erfahrungen mit Bau und Betrieb der Teststrecke einfließen konnten.

7.1. Bau der Teststrecke

Im Vorfeld der Bauarbeiten wurde ein umfassendes Qualitätsmanagement zur Sicherstellung der hohen Anforderungen an Dauerhaftigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Maßgenauigkeit, Praxistauglichkeit etc. für die ausgewählte Erprobungsstrecke in der Schmidener Straße in Stuttgart aufgestellt und dokumentiert. Ein durchgängiges Reparatur- und Instandsetzungskonzept wurde ebenfalls erarbeitet und dokumentiert.

Das Betontragplattenkonzept wurde den Erfordernissen sowohl hinsichtlich des Schienenprofils als auch einer weiteren Reduzierung der schallabstrahlenden Reflexionsfläche angepasst.

Der Umbau der Straßenbahnlinie 2 der SBB zur Stadtbahnlinie U2 zwischen Bad Cannstatt und der bisherigen Endhaltestelle Obere Ziegelei war, wie in Stuttgart üblich, mit einem kompletten Umbau der Gleisanlagen von Meterspur auf die Regel-Spurweite 1435 mm verbunden. Im Zuge dieser Arbeiten sollte im Bereich des Streckenabschnitts in der Schmidener Straße (zwischen den Haltestellen Kursaal und Gnesener Straße) ein besonderer Bahnkörper in Seitenlage mit Raseneindeckung geschaffen werden. An lokalen Besonderheiten waren die Gradientenneigung um 40 Promille, die Lage am Hang und die räumliche Nähe zur umgebenden Bebauung zu berücksichtigen.

Als Teststrecke für das Forschungsprojekt „Schienenfahrweg für das 21. Jahrhundert“ fand sich mit diesem 2×242 m langen Streckenabschnitt ein geeignetes Erprobungsfeld [87].

Die Erprobungsstrecke wurde im Jahr 2002 fertiggestellt. Die Gleisbauarbeiten fanden im Zeitraum von Juli bis Oktober 2001 statt.

Die Trassierungselemente (Gerade, Bogen mit Radius über 800 m) ließen den Einbau der Tragplatte mit Handschalung zu. Vorbereitend kam auf dem Erdplanum eine Mineraltragschicht mit einem E_{v2} -Modul (S. 53) von 80 MN/m^2 zum Einbau. Nach dem Betonieren der Grundplatte mit üblichen Standardschalungen wurde für das Aufsetzen der Trogwangen eine mobile Holzschalung verwendet. Der Verbund von Tragplatte und Wangen erfolgte über Anschlusseisen, welche bereits bei der Herstellung der Grundplatte eingeflochten und beim Betoniervorgang ausgespart worden

7. Bau und Entwicklung des Fahrwegsystems INFUNDO®

sind. Um die Drainage der späteren Raseneindeckung zu ermöglichen, befinden sich in der Grundplatte im Abstand von 20 m Entwässerungsöffnungen mit einem Durchmesser von 20 cm.

Zur Erzielung der gewünschten freien Rissbildung der monolithischen Betontragplatte (Rissabstand im Mittel 2,0 m, Rissbreite max. 0,5 mm) wurde ein Bewehrungsprozentsatz von 0,8 % des Tragplattenquerschnitts entsprechend den Empfehlungen der TU München gewählt. Der Beton entspricht der Klasse B 35 bei einem Mindestzementgehalt von 340 kg/m^3 . Die Aufgabe der durchgehenden Längsbewehrung (BSt 500S) besteht darin, für eine ausreichende Querkraftübertragung und eine Begrenzung der Rissöffnungen zu sorgen (Dübel- und Ankerwirkung); sie muss keine Schnittkräfte aufnehmen. Hervorzuheben ist, dass durch die eingegossene Schiene im ERS ein zusätzlicher Beitrag zur Querkraftübertragung im Rissbereich geleistet wird. Zur Erdung der beiden Gleistragplatten wurde die Bewehrung über Erdungsstäbe durchgehend verbunden und mit Erico-Verbindern alle 50 m geerdet.

Entsprechend dem SSB-Standard kamen in der Schmidener Straße Vignolschienen S 49 in Lieferlängen von 15 m und mit einer Mindestzugfestigkeit von 880 g/mm^2 zum Einsatz.

Nach dem Auflegen der Schienen auf Kanthölzern über den Trögen konnten das Verschweißen und die Montage der Leerrohre (mit Abstandshalter) durchgeführt werden. Vor dem endgültigen fixierenden Verguss sind zum exakten Positionieren der Schienen in Bezug auf Richtung, Höhe, gegenseitige Höhenlage und Schienenneigung von der bauausführenden Firma LEONHARD WEISS Richtrahmen verwendet worden. Kombiniert mit dem ebenfalls neu entwickelten Schienenneigungsmesssystem der EDILON GmbH (München) konnten hiermit die hohen Toleranzanforderungen einer Hochleistungs- und Hochgeschwindigkeitsstrecke erstmals im Stadtbahnbereich umgesetzt werden.

Um weitere Vergleichsdaten zu erhalten, wurde gegenüber den Ausführungen der FF-Bauart INFUNDO® in München (dort weicher) und Bremen (dort härter) eine mittlere Steifigkeit des Systems mit einer Einfederung von 1,0 bis 1,5 mm unter 10 t Achslast der Stuttgarter DT 8-Fahrzeuge gewählt. Dieses neu entwickelte Standardsystem trägt die Bezeichnung Typ EDILON ERS-LR- \bar{o} 1,5-S-S 49.

Die Einfederungsmatten haben in Stuttgart die Stärke 12 mm.

Um ein Auflaufen der Spurkränze auf der Vergussmasse auch bei abgefahrenen Schienen zu vermeiden, ist die Vergusshöhe in der Gleisinnenseite auf 50 mm und auf der Außenseite 30 mm unter SOK festgelegt worden. Beim Verguss der Schienen aus der vollautomatischen EDILON Misch- und Vergussmaschine mussten die Steigungsverhältnisse von 42,9 und 47,5 Promille durch abschnittsweises Arbeiten und dem Auftragen einer Finish-Schicht berücksichtigt werden. Damit wurde auch der Einsatz im Steilbereich nachgewiesen.

Den Abschluss der Bauarbeiten bildete das Auffüllen der Gleiszwischenräume mit Ziegelsplitt zur späteren Rasenansaat, das Einfassen der Übergänge zu den angrenzenden Gleisabschnitten mit Randsteinen, der Einbau und Verguss von Gleisanschlusskästen in vorbereitete Ausparungen sowie am Eisenbahnviadukt die Herstellung eines Fußgängerüberwegs. Für letzteren wurden Stahlwinkel im gewünschten Spurrillenabstand auf die Trogwangen gedübelt, die betreffenden Gleiszwischenräume aufbetoniert und anschließend eine Asphaltsschicht als Gehwegbelag aufgebracht.



Abbildung 7.1: Rasengleis Schmidener Straße nach dem Umbau

Photo: edilon-Report [87]

7. Bau und Entwicklung des Fahrwegsystems INFUNDO®

7.2. Weiterentwicklungen

Die Entwicklung einer hochelastischen Schienenbefestigung für das System INFUNDO® wurde 2000 abgeschlossen. Neuartige Werkstoffe und Komponenten ermöglichen eine vertikale Einfederung der Schiene von bis zu zirka 4 mm (Stand der Technik zuvor: 1 mm – 1,5 mm), ohne dass dabei die Spurweite das zulässige Maß dauerhaft überschreitet.

Die in der Schmidener Straße in Stuttgart eingebaute Variante der Oberbauart INFUNDO® ist zur Verringerung der Luftschallabstrahlung insofern optimiert als die schallreflektierende schallharte Oberfläche gegenüber vorhergehenden Varianten verringert wurde.

Im Rahmen der Begleitung der Versuchsphase und der iterativen Optimierung wurden fahrwegseitig folgende Optimierungsschritte vorgenommen:

- abgeschrägter Betontrog

Der die Schiene umfassende Betontrog wurde oben angephast. Dies vermindert die schallhart abstrahlende Oberfläche zugunsten des begrünten (naturierten) Anteils, was akustisch wie optisch eine Verbesserung darstellt und auf die Betriebssicherheit, das Bauverfahren sowie die Langlebigkeit keinen negativen Einfluss hat.

Die Betontraggangen wurden an den jeweiligen Außenseiten in einem Winkel von 45 Grad angephast und von 19,1 cm auf 10,0 cm verjüngt. Dadurch konnten die Rasenfläche vergrößert und die Betonfläche verkleinert werden, was die schallharte Oberfläche im Vergleich zu den bislang verwendeten INFUNDO®-Fahrbahnen um 23% verringert und neben der Optik auch akustische Vorteile bringt.

- Halbfertigteilbauweise

Bei der Herstellung des Oberbaus INFUNDO® müssen im Bereich der Tröge sehr geringe Fertigungstoleranzen eingehalten werden. Das erfordert beim Betonieren vor Ort aufwändige Schalungen.

Durch die Zusammenarbeit der Projektpartner wurde im Laufe des Projekts die Halbfertigteilbauweise entwickelt.

Bei der Halbfertigteilbauweise werden die Schienentröge im Werk vorab gefertigt und als Fertigelemente zur Baustelle gebracht. Die Tragplatte wird vor Ort vergossen.

Die Halbfertigteilbauweise wurde im Bereich der Liederhalle in Stuttgart zum ersten Mal verwirklicht.

Bei diesem alternativen Bauverfahren „INFUNDO®-Fertigteilbauweise“ wird die Betontragplatte mitsamt Trögen in einige Meter langen Blöcken angeliefert und per Kran auf Stützpunkte abgeladen werden. Das Hantieren mit den Fertigteilblöcken ist relativ aufwändig.

7. Bau und Entwicklung des Fahrwegsystems INFUNDO®

Die Abbildungen 7.2 und 7.3 zeigen Querschnitte der Bauart INFUNDO®-HFT, Abbildung 7.4 zeigt Baustellen-Aufnahmen der dazugehörigen Halbfertigteilbauweise INFUNDO®.

Die Bilddokumentation Abbildung 7.5 illustriert die Arbeitsschritte dieses Bauverfahrens.

7.3. Diskussion

Wendeschleifen mit geringen Radien (bis zu $r = 20$ m) sind mit der Bauart aus fertigungstechnischen Gründen in der vorgesehenen Qualität mit den herkömmlichen Verfahren zur Zeit nicht zu realisieren. Gleitschalungsfertiger können aufgrund der geringen Bogenradien und der gewünschten Fertigungsgenauigkeit nicht sinnvoll eingesetzt werden.

Im Vergleich zu den als komplex anzusehenden Betonarbeiten der Bauart INFUNDO® (Bewehrung, B II–Baustelle, Fertigungstoleranz, Einzelausrichtung jeder Schiene) ist die Erstellung einer Betontragplatte für einen einfachen Oberbau nach BOStrab (wie z. B. in München) als bautechnisch einfacher einzustufen (unbewehrter Beton, B I–Baustelle, geringere Fertigungstoleranz, Ausrichtung von Gleisjochen statt Einzelschienen).

Aufgrund der anspruchsvollen Querschnittsgestaltung und der erhöhten Anforderungen an die Herstellungstoleranzen des INFUNDO®-Oberbaus kommt der Bauausführung der Betontragplatte eine herausragende Bedeutung zu. Für die Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Betontragkörpers sind dabei eine exakte Einhaltung der Bewehrungsüberdeckung und eine gute Betonverdichtung entscheidend.

Der Bauablauf ist als empfindlich gegenüber klimatischen Einflüssen anzusehen.

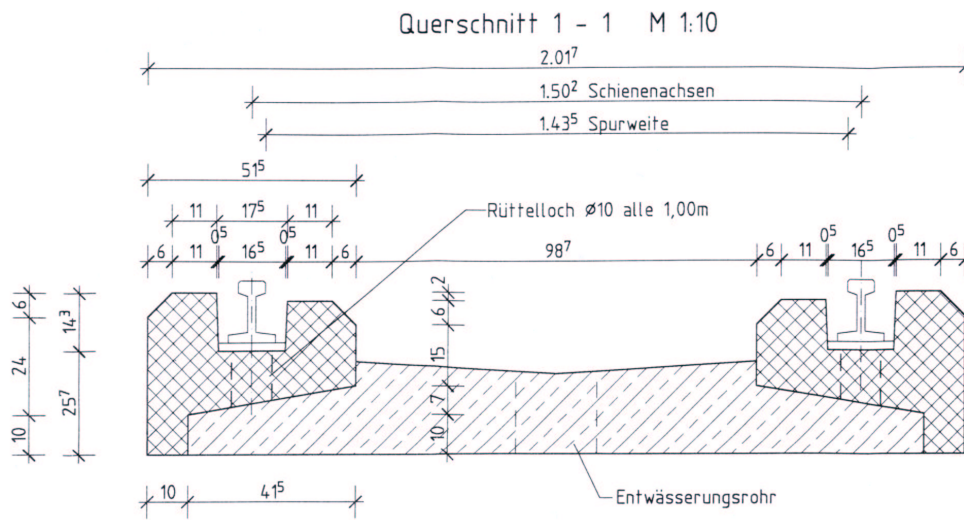


Abbildung 7.2: Querschnitt INFUNDO[®]-Halbfertigteil

kariert: Fertigteil
 gestrichelt schraffiert: Ortbeton
 (Darstellung gegenüber dem angegebenen Maßstab stark verkleinert)

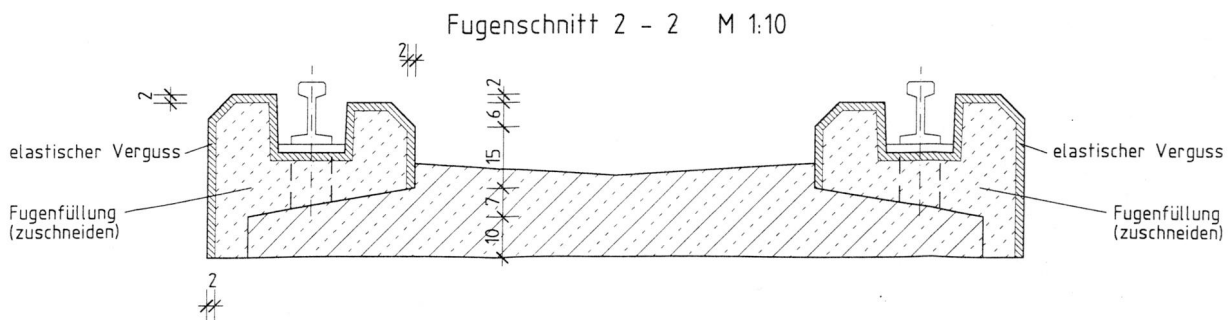


Abbildung 7.3: Querschnitt INFUNDO[®]-Halbfertigteil – Fugenschnitt

(Darstellung gegenüber dem angegebenen Maßstab stark verkleinert)

7. Bau und Entwicklung des Fahrwegsystems INFUNDO®



Abbildung 7.4: INFUNDO®-Halbfertigteil

oben: Plattenanfang der in Ortbeton hergestellten Tragplatte mit anbetonierten, als Fertigteile hergestellten Trögen; die elastische Schienenunterlage ist hier bereits in die Tröge eingelegt.

unten: Plattenfuge

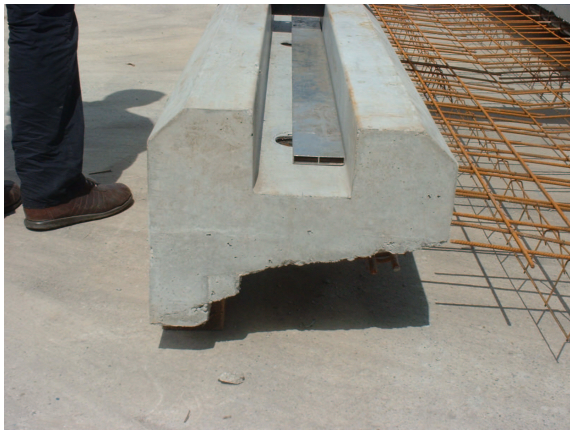
7. Bau und Entwicklung des Fahrwegsystems INFUNDO®



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Abbildung 7.5: Bilddokumentation zum Bauverfahren INFUNDO®-HFT

- a) Herstellung der Tröge in eigener Schalung
- b) Vorbereitung zum Transport der Tröge. Die Bewehrung für den Ortbeton ist bereits angebracht.
- c) Frontansicht des Betontrogs
- d) Einbringen des Ortbetons
- e) Einbringen des Ortbetons (Detail)
- f) fertiger Zustand, bereit zur Aufnahme der Schienen

8. Diskussion und Vergleich des erreichten Standes

Die Mehrzahl der in Kapitel 1.2 angesprochenen Oberziele wurden durch das Projekt erreicht. Wirtschaftlich wurde durch die innovativen Weiterentwicklungen der Oberbauart INFUNDO® die nationale und internationale Marktkompetenz erhöht. Der Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg wurde durch das erfolgreich zu vermarktende Produkt INFUNDO® weiter gestärkt, wie auch aus der Referenzliste INFUNDO® zu sehen ist.

Die Schallabstrahlung des Fahrwegs im täglichen Verkehr wird vermindert. Der Baulärm wird durch die Halbfertigteilbauweise insofern verringert als die Bauzeiten verringert werden. Auf die Langlebigkeit des Oberbaus hat die Halbfertigteilbauweise nach den vorliegenden Erkenntnissen bisher keinen Einfluss.

In den folgenden Abschnitten werden Ergebnisse und Entwicklungsstufen des Projekts, die für den erreichten wissenschaftlichen und technischen Stand relevant sind, einzeln diskutiert.

Diplom- und Vertieferarbeiten Es konnten eine Reihe von Vertiefer- und Diplomarbeiten vergeben werden, die die Bearbeitung des Projekts direkt unterstützen [93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103]. Eine Auflistung befindet sich im Literaturverzeichnis (Seite 146).

Veröffentlichungen Die Ergebnisse des Projekts wurden – vor allem durch den wissenschaftlichen Projektpartner Professor Hohnecker – in Vorträgen und Artikeln veröffentlicht [77, 78, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 91]. Eine Auflistung befindet sich im Literaturverzeichnis (Seite 144).

Literaturdatenbank Eine Literaturdatenbank wurde – unter MS Access – erstellt, um die für das Projekt relevante/interessierende Literatur zentral zu erfassen und Recherchen nach tatsächlich benötigter Literatur zu ermöglichen bzw. zu vereinfachen. Die Datensätze wurden z. T. aus bisher schon in der Abteilung Eisenbahnwesen vorhandenen Sammlungen (Excel-Tabellen, Kopiensammlungen) in die Datenbank eingegeben. Die Abfragemöglichkeiten der Datenbank wurden dem Bedarf angepasst.

Die Literaturdatenbank wurde fortlaufend gepflegt, insbesondere wurde der Inhalt ständig aktuell gehalten. Er wird dabei auch Literatur, die nur in elektronischer Form vorliegt, erfasst.

Schalleigenschaften der Oberbauart INFUNDO® Obwohl die Ursachen der gemessenen Luftschallreduktion des INFUNDO®-Gleises oberhalb von 2000 Hz im Vergleich zum Schotteroberbau noch nicht vollständig verstanden sind, liegt der Schluss nahe, dass die kontinuierliche Lagerung

8. Diskussion und Vergleich des erreichten Standes

und Einbettung der Schiene zu einer geringeren Schwingungsanregung des Fahrzeug–Fahrweg–Systems führt und damit verbunden eine Reduktion der Schallabstrahlung von hochfrequenten Radschwingungen bewirkt. Da das menschliche Gehör seine größte Empfindlichkeit im Bereich zwischen 2000-6000 Hz hat, folgern wir:

Die Schallemission vom INFUNDO®-ERS wird subjektiv als weniger störend empfunden als die vom SchO, obwohl der Gesamtschalldruckpegel des ERS über dem des SchO liegt.

Mit der Verringerung „schallharter“ Reflexionsflächen konnten durch den Projektpartner EDILON GmbH signifikante Verbesserungen des entstehenden Luft- und Körperschallverhaltens gegenüber dem Schotteroberbau mit Standardschienenbefestigung festgestellt werden.

Erstellung eines modularen mathematischen Modells Aus Sicht der Projektpartner konnten wesentliche Ziele des Projekts erreicht werden. Einige wissenschaftliche Arbeitspakete sind durch neuere Erkenntnisse umfangreicher geworden. Dadurch konnten erhebliche Fortschritte im Bereich der Grundlagenforschung und angewandten Forschung auch hinsichtlich der Reproduzierbarkeit erreicht werden. Beispielsweise werden durch das verbesserte Rad–Schiene–Kontakt–Modul die Ergebnisse deutlich präziser, da Verriffelung und unrunde Räder besser erfasst werden.

Das Rechenmodell hebt sich in seinem folgendem Oberziel von vorhandenen früheren Modellen ab:

- modulares dreidimensionales nichtlineares Gesamtmodell

Das Ziel „Prognosemodell erstellen“ wurde erreicht. Das entwickelte Simulations-Tool M³Rail ist wie angestrebt individuell anwendbar, modular aufgebaut, dreidimensional, nichtlinear, als ein Gesamtmodell für Fahrweg und Fahrzeug anwendbar und als Rechenmodell auf einer Standard-Hardware- und Software-Plattform (PC unter Linux 2.2) lauffähig.

Das Modell enthält ein MKS-Modul. Starre Körper, verschiedene Federn und Dämpferelemente können kombiniert werden. Das Programm leistet die automatische Erstellung der Bewegungsgleichungen aufgrund einer Systembeschreibung. Die Schachtelung einzelner MKS-Systeme ist möglich.

An der Abteilung Eisenbahnwesen steht nun eine wesentliche Komponente von M³Rail zur Verfügung, nämlich ein dreidimensionales Berechnungsmodell für die Fahrzeug–Rad/Schiene–Fahrweg–Dynamik. Dieses kann bereits im Vorfeld bei Planung und Konstruktion von Eisenbahnstrecken mit Hilfe einer mathematisch–physikalischen Modellanalyse für den schwingungs- und lebensdaueroptimierten Fahrweg Hilfestellung leisten.

Die Entwicklung dieses Rechenmodells ist insoweit abgeschlossen als damit Schritte auf dem Weg zur erschütterungs- und schalloptimierten Bauart einer FF vorliegen, welche die schienenverkehrsbedingten Immissionen in der Luft und in Gebäuden zunächst im Straßenbahnbetrieb und Nahverkehr deutlich reduzieren. Bevor das Modell zur Konstruktion eines lärmarmen Schienenfahrwegs eingesetzt werden kann, muss es auf elastische Körper erweitert werden.

Das Ziel des Arbeitspakets „Schallabstrahlung“ als Unterziel des Ziels „Erstellung eines modularen mathematischen Modells“ ist mit Einschränkungen erreicht. Die Schallabstrahlung

kann berechnet werden, aber nur als eigenständiger Rechengang. Eine Integration als Modul in das Programm M³Rail ist noch nicht erfolgt. Für die Schallabstrahlung sind in erster Linie die Eigenschwingungen der einzelnen Körper (Rad, Schiene) aufgrund ihrer elastischen Deformierbarkeit verantwortlich.

Messtechnik Eine über einzelne Mikrophonaufnahmen hinausgehende, ortsauflösende Messung, wie sie etwa mit der akustischen Kamera (vgl. [25, 26, 27]) des GFAI erreicht werden kann, wäre wünschenswert gewesen und hätte die Ergebnisse aussagekräftiger gemacht, da dadurch die von Rad bzw. Schiene ausgehenden Schallanteile getrennt erfasst werden können. Solche Aufnahmen sollten nachgeholt werden und sind – neben den Lagemessungen ebenso wie Rauigkeitsmessungen an Schiene und Rad – spätestens dann zur Verifizierung der Simulationsrechnung unabdingbar, wenn die FE-Modellierungsstufe von M³Rail erreicht wird.

Fahrwegentwicklung Dieses Ziel wurde voll erreicht. Mit den im Kapitel 7 angesprochenen Neuerungen stehen innovative Weiterentwicklungen aus Baden–Württemberg dem Markt zur Verfügung.

Vergleich zwischen Messungen und Schwingungsberechnung Ohne Erweiterung von M³Rail auf elastische Körper ist ein Vergleich zwischen Messungen und Schwingungsberechnung nicht so möglich wie es sinnvoll wäre.

Vergleich Messungen und Schallabstrahlungsberechnungen Die Vergleichsmessungen und die Berechnungen mit RAYNOISE[®] ergaben übereinstimmend die Aussage des auf Seite 71 angegebenen Berechnungsbeispiels: Die Schalldruckpegel sind bei Schotter und bei naturierter Oberfläche insgesamt niedriger, und sie fallen nach außen hin steiler ab.

8. *Diskussion und Vergleich des erreichten Standes*

9. Ausblick

Aus Sicht der Projektpartner regen die Ergebnisse des Forschungsprojekts weitere Fragen für künftige Forschung und Entwicklung an. Die wichtigsten davon sind in diesem Ausblick kurz aufgeführt.

Weiterentwicklung INFUNDO®

- Fortentwicklung der Bau- und Bauüberwachungsverfahren, insbesondere im Hinblick auf eine ausreichende Verdichtung des Betons, die optische Oberflächenverbesserung bei Ort-betonfertigung, den ordnungsgemäßen Einbau der Bewehrung und der Schalungsmethoden sowie die Fertigungsgenauigkeit der als filigran einzustufenden Abmessungen des Schienentrogs
- Entwicklung von angepassten Portalträgern oder andere Maßnahmen zur Effizienzsteigerung der Ausrichtung der Schienen mit der gewünschten Einbaugenauigkeit
- Langzeitbeobachtung der Gleislageentwicklung
- Langzeitbeobachtung des Schienenverschleißes
- Fortentwicklung des INFUNDO®-Oberbaus hin zu verstärkter Eignung auch in engen Bögen (bis hin zu Wendeschleifen), Weichen, Überfahrtsbereichen und Kuppenausrundungen.
- Weitere Senkung der schallharten System-Oberfläche bei INFUNDO® zugunsten der schallabsorbierenden Vegetationsoberfläche.
- Weiterentwicklung der Vergussmasse, so dass sie verschiedene Elastizitäten in vertikaler und horizontaler Richtung besitzt.
- Weiterentwicklung zum befahrbaren schallreduzierenden Fahrwegsystem für straßenbündigen Betrieb, im Bahnhofs- und Haltestellenbereich sowie im Tunnel
- Höhenreduktion des INFUNDO®-Fahrwegsystems.
- Erweiterung des Einsatzbereichs: Austausch der Fahrwegsysteme ohne Eingriff in die städtische Systemtechnik

Weiterentwicklung M³Rail

- Die angestrebte automatische Kopplung der Schwingungssimulation an die Schallausbreitungsberechnung in der Form, dass die Ausgabe der Schwingungssimulation direkt als Eingabedatei in RAYNOISE[®] verwendet werden kann, wurde nicht erreicht. Die Schallausbreitungsberechnung erfordert eine manuelle Eingabe der Eingabegrößen. Die Schallabstrahlung sollte daher als Modul in M³Rail integriert werden, um die zur Zeit noch umständliche manuelle Aufbereitung der Daten als Eingabe für RAYNOISE[®] zu automatisieren.
- Bevor M³Rail zur Konstruktion eines lärmarmen Schienenfahrwegs eingesetzt werden kann, muss es auf elastische Körper erweitert werden.
- Überlegungen, M³Rail mit einem Lösungsalgorithmus für Differential–Algebraic Equations (DAE) zu erweitern, wurden bereits angestellt.
- Mit den Bibliotheken openCascade bzw. Salome der Firma DATAVISION CIS stehen seit neuestem leistungsfähige Bibliotheken für Mehrkörpersysteme und für die Integration von Finite-Elemente-Teilmodellen in Mehrkörpersysteme frei im Quelltext zur Verfügung. Eine weiterentwickelte Version von M³Rail sollte diese Bibliotheken nutzen können.
- Entwicklung neuer Tools:
 - Linienführung und Trassierung
 - inverse Kapazität
 - Komfort
 - Körperschallausbreitung im Untergrund und im Fahrzeug

A. Tätigkeitsbericht 1999 – 2003

Der folgende Tätigkeitsbericht informiert über die Aktivitäten der Forschungsgemeinschaft „Schienenfahrweg für das 21. Jahrhundert“ während des Projekts, soweit sie für die Zwischenberichte berichtspflichtig waren und in den vorangegangenen Kapiteln dieses Abschlussberichts keinen Platz fanden. Dazu gehören einerseits projektorganisatorische bzw. -verwaltende Tätigkeiten, nämlich die Sicherung des Projektablaufs durch regelmäßige Besprechungen (Projekttreffen, Statustreffen) und die Beschaffungen. Andererseits gehört dazu der Bericht über die Teilnahme an Veranstaltungen sowie der Bericht über die Veranstaltungen, welche die Projektpartner selbst ausgerichtet haben. Auf die Liste der Veröffentlichungen (Seite 144) und die Liste der Diplom- und Vertiefearbeiten (Seite 146), die Bestandteil des Literaturverzeichnisses sind, wurde bereits in Kapitel 8 hingewiesen.

A.1. Sicherung des Projektablaufs

- Projekttreffen der Projektpartner

Zum einen waren Treffen mehrheitlich zwischen den Projektpartnern Professor Hohnecker, Abteilung Eisenbahnwesen, und LEONHARD WEISS / EDILON GmbH zum Ablauf sowie zur Koordination der Weiterentwicklung und Forschung notwendig. Zum anderen waren Treffen wegen der Planung / Planungssicherheit und Ausführung zusätzlich mit dem Projektpartner SSB erforderlich.

- Projekttreffen der Projektpartner Professor Hohnecker, Abteilung Eisenbahnwesen, und LEONHARD WEISS / EDILON GmbH

10.-11.11.1999, 15.12.1999, 21.12.1999, 18.1.2000, 21.03.2000, 6.06.2000,
12.09.2000, 30.01.2001, 24.4.2001, 26.6.2001, 25.9.2001, 11.6.2002,
12.12.2002, 12.3.2003, 23.9.2003

- Projekttreffen der Projektpartner Professor Hohnecker, Abteilung Eisenbahnwesen, LEONHARD WEISS / EDILON GmbH und Stuttgarter Straßenbahnen AG

21.12.1999, 26.6.2001, 11.6.2002, 12.12.2002

- Statustreffen (Projekttreffen unter Einbeziehung des Projektträgers UVM) in Stuttgart

- 30.05.2000, 08.05.2001, 05.11.2003

- In Vorbereitung für die Messaktivitäten wurden Gespräche mit der Fa. Möhler & Partner, München – 15.05.2000 – und der Fa. Grötz, Gaggenau, – 25.09.2000 – durchgeführt. Ebenso wurden Gespräche mit NGI, Oslo, zum Thema Körperschall, mit Statkraft Grøner A/S, Lysaker (Norwegen), zum Thema Akustik und mit Odegaard & Danneskiold-Samsøe A/S Consulting Engineers, Kopenhagen, zum Thema Akustik und Messtechnik durchgeführt.

A.2. Beschaffungen

Messausrüstung Die Ausrüstung wurde von zwei Einrichtungen der Universität Karlsruhe¹ sowie vom Ingenieurbüro Klaus Fischer, Karlsruhe, leihweise zur Verfügung gestellt.

EDV

- Softwarelizenz
Die Einrichtung der Programme RAYNOISE[®] und AutoCAD[®] wurde zu Beginn des Jahres 2000 vorbereitet. Die Einrichtung von RAYNOISE[®] konnte aufgrund von Lieferschwierigkeiten (Version, Dongle) erst im Juni 2000 abgeschlossen werden.
- Es wurde eine Übersicht über die am Markt und in der Wissenschaft verfügbaren MKS- und Finite-Elemente-Programme erstellt. Die Verwendbarkeit (evtl. Kauf) des MKS-Simulationsprogrammes SIMPACK, das sich als offen für die Anbindung von FE-Programmen bezeichnet, wurde geprüft. Wir mussten uns nach Rücksprache wegen der für unsere Zwecke eingeschränkten Flexibilität für eine Eigenentwicklung entscheiden.
- Für das Dynamik-Modul MKS (Mehr-Körper-System) wurden verschiedene externe Bibliotheken – etwa der Integrationsalgorithmus `radau5` oder das von dem Spin-Off SINTEF der Universität Oslo herausgegebene Ein-Ausgabe-Modul `diffpack` – beschafft und in M³Rail eingebunden.

A.3. Teilnahme an Kongressen und Messen, Konferenzen und Seminaren

Messen wie die New Earth 1999, InnoTrans 2000, UITP-Kongress 2001 und die Oberbau-fachtagungen 2000 und 2001 wurden gezielt beschickt, um die Ergebnisse der Forschung vorzustellen, zu diskutieren und zu vermarkten.

Zur weiteren Bekanntmachung bzw. zur Ergebnispräsentation wurde an den folgenden Veranstaltungen teilgenommen.

¹ (1) Institut für Höchsthfrequenztechnik, (2) Rechenzentrum

Konferenzen, Tagungen und Seminare – Teilnahme mit eigenem Vortrag

- World Congress on Railway Research (WCRR 2003), Edinburgh, 28.09.2003-1.10.2003
Vortrag Prof. Hohnecker: „Acoustic properties of railway superstructures“ [79]
- International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003 (STECH03), Tokyo, 19.-22.08.2003
Vortrag Prof. Hohnecker: „Low Emission Railway System“ [78]
- Railway Engineering Conference, London, 30.04.2003-1.05.2003
Vortrag Prof. Hohnecker: „Towards a low noise railway system“ [77]
- „Development Conference on the issue of Noise and Vibration from Tram / Light Rail / Train systems (Tram conference)“, Göteborgs Spårvägar Banteknik, Göteborg (Schweden), 12.-13.11.2002

zwei Vorträge von Prof. Dr.-Ing. E. Hohnecker:
 - Environmental Noise and Vibrations from Tram Infrastructure
 - How do we calculate noise?
- World Congress of Railway Research (WCRR), Köln, 26.-29.11.2001
Teilnahme mit Poster und Messestand
- International Association of Vehicle System Dynamics (IAVSD): 17th IAVSD Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Lyngby (Dänemark), 20.-24.08.2001
Vortrag Dipl.-Phys. J. Litzenburger: „A Polynomial Approach For The Three-Dimensional Wheel-Rail Rolling Contact“ [82]
- Railway Engineering Conference, London, 30.04.2001-1.05.2001
Vortrag Prof. Dr.-Ing. E. Hohnecker: „Comparison of forces on discretely and continuously embedded track systems - Effects on the track, vehicle user and environment“ [88]
- „Mensch-Fahrweg-Fahrzeug“, Veranstaltung an der Humboldt-Universität zu Berlin, 11.09.2000
Vortrag Prof. Hohnecker „Entwicklung und Perspektiven eines umweltfreundlichen Fahrwegs für das 21. Jahrhundert“ [91]
- „Railway Engineering 3rd Annual International Conference“, London, 5.-6.07.2000
Vortrag Prof. Hohnecker „A Non-Linear Three-Dimensional Model for Track/Vehicle System“ [90]
- „Ground-Born Vibrations“, Banverket (Schwedische Bahn) Seminar in Göteborg, 16.-17.03.2000.
Vortrag Prof. Hohnecker „Noise Reduction in Wheel/Rail Systems: Avoidance and Damping of Vibrations and Variation of Natural Frequencies“ [89]

Konferenzen und Tagungen – Teilnahme ohne eigenen Vortrag

- Fachtagung lärm- und erschütterungsarmer Oberbau, TU Wien, 06.03.2003
- Konferenz „Mobilität und Medizin“, Fürstenfeldbruck, September 2002
- IFV Bahntechnik: Workshop Leiser Verkehr, Berlin, 29.11.2001
- DMG: „Produktion und Produktionsmittel Schienenverkehr“, Einführungsseminar, Salzgitter, 21.-23.11.2001, mit Vortrag von Prof. Hecht zum Thema „Zusammenwirken Fahrzeug/Gleis“
- KIT Congress Incentives GmbH: 18. Verkehrswissenschaftliche Tage, Dresden, 17.-18.09.2001
- Fachtagung bei der Getzner Werkstoffe GmbH: Einsatz von elastischen Komponenten im Eisenbahnoberbau, Bludenz (Vorarlberg), 17.-18.05.2001
- BMBF: Forschung System Schiene 2010, Tagung, München, 16.05.2001
- „Wave 2000“, Kongress, Bochum, 13.-15.12.2000
- „Noise and Vibration Engineering“, Kongress an der Universität Leuven (Belgien), 13.-15.09.2000
- „Mobilitätsforschung für das 21. Jahrhundert“, BMBF Tagung in Göttingen, 4.-5.05.2000

Seminare und Forschungsaufenthalte – Teilnahme

- dreimonatiger Forschungsaufenthalt am Institut für mathematisches Modellieren der Technischen Universität Dänemark (DTU) in Lyngby (Dänemark)
- „Applied and Numerical Acoustics“, Seminar an der Universität Leuven (Belgien), 11.-12.09.2000
- „Feste Fahrbahn“, Seminar, TU Berlin, Lehrstuhl für Schienenfahrwege und Bahnbetrieb (Professor Siegmann), 04.-05.11.1999
- Nederlandse Spoorwegen, Fachinformation, Utrecht, Oktober 1999

Messen

- OFFERTA, Verbrauchermesse, Karlsruhe, 31.10.2003 bis 9.11.2003. Teilnahme mit Messestand. Die Forschungsgemeinschaft hat an der Messe mit einem Messestand teilgenommen, wo ein 1:1-Modell der Oberbauart INFUNDO® mit technischer Naturierung der Oberfläche im Vergleich zum Schotteroberbau präsentiert wurde. Es wurden selbstlaufende Kurzpräsentationen (auf PC) gezeigt und ein Hörbeispiel, das die unterschiedliche Schall-Charakteristik eindrucksvoll demonstriert (siehe Abbildung A.1).

Über den Messestand ist ein Artikel der Zeitung UNIKATH der Universität Karlsruhe erschienen [76].

Für die Messeteilnahme wurden ein 1:1-Oberbaumodell der FF System INFUNDO® eingesetzt.

Das INFUNDO®-Modell mit Begrünung bedarf permanenter Pflege. Es kann nicht außerhalb vom Gebäude aufbewahrt werden, weil es nicht rostfrei ist, und es kann nicht im Raum aufbewahrt werden, weil das Sedum, welches die technische Begrünung konstituiert, auf den Morgentau oder entsprechenden Niederschlag sowie auf Sonnenlicht angewiesen ist. Die Lösung, die gefunden wurde, besteht aus einer Aufbewahrung im Raum mit besonderer Tageslicht-Beleuchtung und täglichem Besprühen. Bei längerfristiger Lagerung wird die Sedumschicht vom restlichen Modell getrennt, und beides wird getrennt gelagert.

- Messe transport+logistik, München, 20.-24.05.03, Teilnahme mit INFUNDO®-Modell, Messestand und Tagungsbandbeitrag
- „Erde 2.0“, Ausstellung des Landes Baden–Württemberg, Stuttgart, 15.06.2002-28.07.2002

Die Projektpartner haben an der Messe mit einem Messestand teilgenommen, wo ein 1:1-Modell der Oberbauart INFUNDO® mit technischer Naturierung der Oberfläche im Vergleich zum Schotteroberbau präsentiert wurde. Es wurde ein Hörbeispiel gezeigt, das die unterschiedliche Schall-Charakteristik eindrucksvoll demonstriert.

Von den auf der Messe gezeigten Exponaten hat die Abteilung Eisenbahnwesen eine CDROM-Dokumentation angefertigt. Exemplare davon können bei Bedarf an der Abteilung Eisenbahnwesen angefordert werden. Eine Bilddokumentation des Messestands findet sich als Anhang B dieses Dokuments.

Für die Messeteilnahme wurden zwei 1:1-Oberbaumodelle von SchO und FF System INFUNDO® angefertigt und transportiert. Die Teilnahme an der Messe ist vom Land Baden–Württemberg finanziell unterstützt worden.

- „InnoTrans2000“, Fachmesse in Berlin, 12.-15.09.2000

Fernsehauftritte

- Ein Bericht über Messungen im Rahmen des Forschungsprojekts – am Beispiel von Luftschallmessungen an der DB-Teststrecke bei Waghäusel und an einer ICE-Strecke – wurde vom SWR aufgezeichnet und am 6.11.2003 als Beitrag in der Sendung „NANO“ ausgestrahlt. Die Aufnahmen entstanden bei Außenaufnahmen an den Messorten.
- Eine weitere Fassung dieses Berichts wurde am 10.12.2003 als Beitrag durch 3Sat ausgestrahlt.
- Ein Bericht über das auf der Messe *Erde 2.0* gezeigte Exponat wurde vom Sender B.TV. am 10.05.2002 (19:50 Uhr bis 19:53 Uhr) ausgestrahlt. Die Aufnahmen entstanden in den Räumen der Abteilung Eisenbahnwesen.

Im Rahmen des Fernsehauftritts wurde für das Kamera-Team des B.TV Informationsmaterial beschafft und zusammengestellt. Die Interviews wurden sowohl von Mitarbeitern der Abteilung Eisenbahnwesen / Prof. Hohnecker als auch von LEONHARD WEISS bzw. EDILON GmbH gegeben.

Jeweils eine CDROM mit Aufzeichnungen der ausgestrahlten Sendungen sind bei der Abteilung Eisenbahnwesen erhältlich.

A.4. Ausgerichtete Veranstaltungen

A.4.1. Gemeinsame Veranstaltung der Projektpartner Abteilung Eisenbahnwesen (Prof. Hohnecker) und der Firma LEONHARD WEISS GmbH

- Exkursion nach Stuttgart zur Baustelle “Schmidener Straße“ in Stuttgart: Anschauung des Vor-Ort-Vergusses des INFUNDO®-Korkelastomers als kontinuierliche Bettung um die Schiene, 11.10.2001

A.4.2. Veranstaltungen an der Abteilung Eisenbahnwesen

a) unter der Leitung von Prof. Hohnecker:

- 15.02.2002 Diplomvortrag von Herrn Markus Gottschang: Berechnung von Luftschallspektren in der Nähe spurgeführter Systeme
- 15.02.2002 Diplomvortrag von Herrn Florian Röthlingshöfer: Erschütterungstechnische Analyse eines Straßenbahnoberbaus – Fallstudie Theresesgate Oslo
- 18.12.2001 Seminarveranstaltung: Radsatzlauf im Gleis
- 13.11.2001 Seminarveranstaltung: Körperschall im Rad-Schiene-System
- 06.11.2001 Seminarveranstaltung: Zur Mechanik des Rad-Schiene-Rollkontakts
- Aug. 2001 Schulung der Mitarbeiter der Abteilung Eisenbahnwesen für die bislang fertiggestellten Module der im Rahmen dieses Projektes entwickelten Software M³Rail
- 13.03.2001 Vertiefervortrag von Herrn cand.-Ing. Engelskirchen: Fahrweg/Oberbau
- 13.03.2001 Gastvortrag von Herrn cand.-Ing. Sigurn Vandenbrande (KU Leuven): Active Noise Control
- 12.02.2001 Vertiefervortrag von Herrn cand.-Ing. Mund: Schwelle im Simulationsmodell für den Eisenbahnoberbau
- 25.01.2000 Vortrag Herr Dr.-Ing. Michael Löffler: Lärmarmes Rad

b) sonstige:

- 05.10.2000 Schulung für das Simulations-Programm RAYNOISE® durch die Herstellerfirma LMS

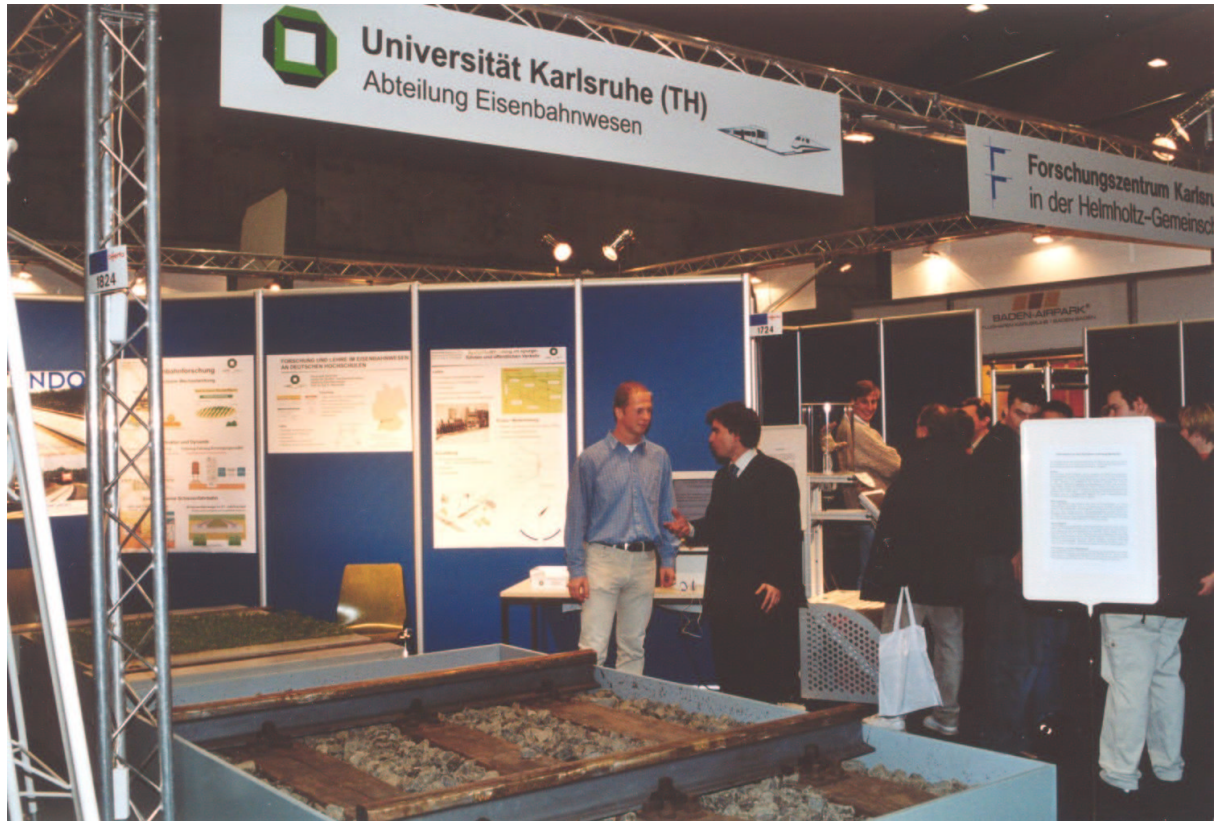


Abbildung A.1: Messestand der Abteilung Eisenbahnwesen (Universität Karlsruhe, ISE) auf der OFFERTA in Karlsruhe, 31.10.2003 bis 9.11.2003.

Präsentiert wurden:

- ein 1:1-Modell der Oberbauart INFUNDO® mit technischer Naturierung der Oberfläche,
- ein 1:1-Modell von Schotteroberbau,
- ein Hörbeispiel, welches die unterschiedliche Schall-Charakteristik bei der Vorbeifahrt von Güterzügen demonstriert,
- selbstablaufende Kurzpräsentationen (auf PC).

Der Stand wurde täglich durchgehend mit Personal betreut. Die Naturierung musste täglich gepflegt werden.

B. Ausstellung Erde 2.0 — Messestand der Forschungsgemeinschaft

Diese Bilddokumentation zeigt den Messestand der Projektpartner.



Abbildung B.1: Frontansicht des kompletten Messestands

Zu sehen sind:

- links die beiden Oberbaumodelle,
- rechts die Box zum Anhören des Hörbeispiels.

Eine Dekoration des Hintergrunds oder Plakatierung ließ das Gestaltungskonzept der Messe nicht zu.



Abbildung B.2: Blick über den Messestand



Abbildung B.3: Oberbaumodelle im Maßstab 1:1 – Frontalansicht

links: Schotteroberbau

rechts: Feste Fahrbahn INFUNDO® mit technischer Begrünung



Abbildung B.4: Oberbaumodelle im Maßstab 1:1 – Seitenansicht



Abbildung B.5: Hörbox zum Anhören des Hörbeispiels

In die horizontale Platte ist ein Bildschirm eingelassen. Mittels einer Präsentation aus Bildern, Texten, Video und dem eigentlichen Hörbeispiel „Vergleich der Schallcharakteristiken von Schotteroberbau und Fester Fahrbahn Bauart INFUNDO®“ wird das Exponat erläutert.

C. MKS-Modellierung

Die folgenden Abschnitte führen kurz in den theoretischen Hintergrund ein, welcher der Mehrkörper-Modellierung zugrundeliegt. Es handelt sich um Ausschnitte aus der Dokumentation zu M³Rail.

Vektoren im dreidimensionalen Raum und 3x3-Matrizen sind in diesem Abschnitt als fettgedruckte Größen notiert.

C.1. Dynamik starrer Körper

Wir betrachten die Bewegungsgleichungen in der NEWTON–EULER–Form.

Ein Körper i mit Masse m^i habe ein Koordinatensystem \mathcal{K}^i , das dem Massenmittelpunkt entspringt. Sei $\mathbf{F}^i(t)$ die Summe aller externen Kräfte, die am Massenmittelpunkt von i angreifen. Sei ferner $\mathbf{r}^i(t)$ der Ortsvektor zum Massenmittelpunkt, gemessen bezüglich dem Inertialsystem \mathcal{K} .

NEWTON's zweites Gesetz liefert

$$m^i \dot{\mathbf{r}}^i(t) = \mathbf{F}^i(t) \quad (\text{C.1})$$

Darüberhinaus enthält die Starrkörperbewegung Rotation, was in obiger Gleichung nicht enthalten ist. Sei $\boldsymbol{\omega}^i$ die Winkelgeschwindigkeit und $\mathbf{F}_\theta^i(t)$ das gesamte Drehmoment, das auf den Körper aufgebracht wird. Diese Größen werden relativ zu einem Koordinatensystem \mathcal{K} ausgedrückt, welches nicht rotiert. Die rotatorische Bewegungsgleichung lautet dann

$$\mathbf{F}_\theta^i(t) = \frac{d}{dt} [\mathbf{I}^i(t) \boldsymbol{\omega}^i(t)], \quad (\text{C.2})$$

wobei $\mathbf{I}^i(t)$ der Trägheitstensor ist. Letzteres beschreibt, wie die Masse innerhalb des Körpers verteilt ist.

Wir möchten die Gleichung in körperfesten Koordinaten ausdrücken, da wir in diesem Falle eine zeitlich konstante Trägheitsmatrix für \mathbf{I}^i bekommen. Eine Basistransformation liefert

$$\bar{\mathbf{I}}^i \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}}^i + \bar{\boldsymbol{\omega}}^i \times \bar{\mathbf{I}}^i \bar{\boldsymbol{\omega}}^i = \bar{\mathbf{F}}_\theta^i(t). \quad (\text{C.3})$$

Die Gleichungen (C.1) und (C.3) beschreiben die Dynamik eines starren Körpers vollständig.

Ohne Einschränkung wird die allgemeine Bewegung eines starren Körpers daher durch Integration von zwölf gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung bestimmt: Sechs für die Position (Translation und Rotation), sechs für die Geschwindigkeit (translatorische und Winkelgeschwindigkeit).

C.2. Mehr-Körper-Systeme

Zusammen mit den Parametern, die für ihre NEWTON-EULER-Bewegungsgleichungen notwendig sind, bilden alle Körper gemeinsam ein Gleichungssystem für die Gesamtbewegung eines jeden Körpers. Die Körper können durch Kraftkoppellemente verbunden sein oder durch Zwangsbedingungen auf bestimmte Bewegungen eingeschränkt werden. Das Mehr-Körper-System¹ muss deswegen die Kräfte zwischen den Körpern untereinander bestimmen können. Das kann durch Verbindungen wie Federn und Dämpfer erreicht werden, welche in einfacher Weise als Funktion von Lage und Geschwindigkeiten formuliert werden können. Wir müssen daher die Kräfte für jedes Verbindungselement des Systems berechnen; dies ergibt zusammen mit den Trägheitseigenschaften der Körper ein System von gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung der Form

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{y}). \quad (\text{C.4})$$

Weitere Gleichungen können aufgrund kinematischer Zwangsbedingungen hinzutreten.

C.2.1. Zwangsbedingungen

Bislang haben wir nur freie Körper betrachtet und sie mit allen Freiheitsgraden für jeden Körper ausgedrückt. Die Körper können jedoch Zwängen unterworfen sein, so dass sie sich nicht frei bewegen. Das wird typischerweise als algebraische Gleichung in den die Lage beschreibenden Zustandskoordinaten

$$\mathbf{q}^i = [\mathbf{r}^i \quad \theta^i] \quad (\text{C.5})$$

ausgedrückt. Wir betrachten dann Zwänge der Form

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}) = \mathbf{0}, \quad \mathbf{q} = [\mathbf{q}^1, \dots, \mathbf{q}^{nb}], \quad (\text{C.6})$$

wobei nb die Anzahl der Körper ist und $\mathbf{C}(\mathbf{q}) \in R^m$ die m Zwangsbedingungen definiert. Es gibt mehrere Möglichkeiten, solche Zwangsbedingungen zu behandeln. Üblicherweise werden die Zwangsbedingungen benutzt, um die Anzahl der Freiheitsgrade des Systems zu reduzieren und es nur für die unabhängigen Variablen zu lösen; ein zweiter Ansatz besteht darin, alle Freiheitsgrade eines jeden Körpers beizubehalten und die algebraischen Gleichungen dem System zusätzlich hinzuzufügen. Das ergibt ein System der Form

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{D}\mathbf{v} \\ \mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{f}(t, \mathbf{q}, \mathbf{v}) - \lambda\mathbf{C}_q^T \\ \mathbf{C}(\mathbf{q}) &= \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (\text{C.7})$$

Hier stehen $\lambda\mathbf{C}_q^T$ für die Zwangskräfte, mit den unbekanntem Koeffizienten λ , genannt LAGRANGE-Koeffizienten, $\mathbf{C}_q = \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{q}}$. \mathbf{M}^i ist die Massenmatrix und \mathbf{D}^i die Kopplung zwischen Geschwindigkeits- und Lagekoordinaten des Körpers:

$$\mathbf{M}^i = \begin{pmatrix} \text{diag}\{m^i\} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \bar{\mathbf{I}}^i \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D}^i = \begin{pmatrix} \text{diag}\{1\} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \bar{\mathbf{G}}^i \end{pmatrix}. \quad (\text{C.8})$$

¹ engl.: multibody system

Zu beachten ist auch, dass die Anfangswerte des Systems die Zwangsbedingungen erfüllen müssen. Durch Invertierung der Massenmatrix erhalten wir das System in der Form

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{f}(t, \mathbf{q}, \lambda) \\ \mathbf{C}(\mathbf{q}) &= \mathbf{0}.\end{aligned}\tag{C.9}$$

Beachte, dass die Massenmatrix blockdiagonal ist, daher ist die Inverse von \mathbf{M}^i schnell zu berechnen.

Typische Zwangsbedingungen können sein, dass ein Körper einer Trajektorie folgen oder sich relativ zu einem andern Körper in einer speziellen Weise bewegen soll. Betrachte beispielsweise eine Scheibe, die auf einer Oberfläche abrollt. Eine sinnvolle Zwangsbedingung ist, dass die Scheibe nicht die Oberfläche durchdringen sollte. Die Abschätzung der Kontaktkräfte sollte sicherstellen, dass die Scheibe nicht in die Oberfläche hineinrollt. Durch Auferlegung der Zwangsbedingung werden diese Kräfte durch den Term $\mathbf{C}_q^T \lambda$ in das dynamische System eingebracht. Durch Entfernen der Freiheitsgrade, die mit den Zwangsbedingungen assoziiert sind, entfernen wir auch die Zwangskräfte. Das ist nicht immer erwünscht: Die Zwangskräfte können in der Untersuchung von Spannungszuständen der Körper gebraucht werden.

Man beachte, dass viele Zwangsbedingungen als Feder- und Dämpferverbindungen angenähert werden können. Wir erhalten dann automatisch die Gleichungen in einer Phasenraumform, aber typischerweise wird das System sehr steif werden.

Wir können ein System als steif beschreiben, wenn es Komponenten in der Lösung gibt, die sich in sehr unterschiedlichen Zeitskalen verändern².

Das kann zu sehr kleinen Zeitschritten führen, wenn eine explizite Integrationsmethode benutzt wird.

C.3. Kinematik deformierbarer Körper

Wenn deformierbare Körper betrachtet werden, bleibt der Abstand zwischen zwei Punkten eines Körpers i im allgemeinen nicht konstant. Ein Punkt des Körpers i kann beschrieben werden durch

$$\bar{\mathbf{u}}^i = \bar{\mathbf{u}}_o^i + \bar{\mathbf{u}}_f^i = \bar{\mathbf{u}}_o^i + \mathbf{S}^i \bar{\mathbf{q}}_f^i,\tag{C.10}$$

wobei das Bezugs-Koordinatensystem nicht fest mit dem Körper verbunden ist. Der Ortsvektor $\bar{\mathbf{u}}_o^i$ ist die Lage in Bezug auf einen Punkt Q im undeformierten Fall, \mathbf{S}^i ist eine ortsabhängige Formmatrix, und $\bar{\mathbf{q}}_f^i$ bezeichnet die zeitabhängigen elastischen Koordinaten.

Ein beliebiger Punkt eines Körpers i wird dann dargestellt durch

$$\mathbf{r}^i = \mathbf{r}_o^i + \mathbf{A}^i \bar{\mathbf{u}}^i,\tag{C.11}$$

wobei wieder \mathbf{r}_o^i der Lagevektor vom inertialen Koordinatensystem zum Bezugskoordinatensystem des Körpers i ist.

Die Geschwindigkeit eines Punktes Q wird ermittelt, indem man den Ortsvektor \mathbf{r}^i nach der Zeit ableitet, d. h.

$$\dot{\mathbf{r}}^i = \dot{\mathbf{r}}_o^i + \dot{\mathbf{A}}^i \bar{\mathbf{u}}^i + \mathbf{A}^i \dot{\bar{\mathbf{u}}}^i.\tag{C.12}$$

² Numerische Steifigkeit hat keine präzise Definition, aber im allgemeinen nennt man ein System steif, wenn gewisse implizite Methoden tendentiell besser sind als explizite. Im Bereich der Mechanik bezieht sich der Begriff Steifigkeit auf starke elastische Kräfte.

C.4. Lineare Elastizität

Wir betrachten die Deformation eines elastischen Kontinuums $\Omega \subset R^3$. Das Gebiet repräsentiere die Bezugskonfiguration. Eine Deformation des Körpers ist einfach eine Abbildung $x \rightarrow u(x) \in R^3$, $x \in \Omega$.

Die Dehnung³ wird mit Hilfe der Verschiebungen der Punkte innerhalb des Körpers aufgrund der Deformation definiert. Spannung⁴ ist Kraft pro Flächeneinheit. Für viele Materialien gibt es keine ausgezeichnete Richtung innerhalb des Materials, und die Spannungs–Dehnungs–Beziehung vereinfacht sich auf nur zwei voneinander unabhängige Parameter, die LAMÉ-Konstanten λ und μ . Wir verwenden die Notation

$$u_{,j} = \frac{\partial u}{\partial x_j} \quad (\text{C.13})$$

und die Summenkonvention, d. h. über mehrfach auftretende Indices wird summiert:

$$\sigma_{ij,j} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}. \quad (\text{C.14})$$

Die Spannungs–Dehnungs–Beziehung kann dann geschrieben werden als

$$\sigma_{ij} = \lambda u_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (\text{C.15})$$

wobei δ_{ij} das KRONECKER-Delta und

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{C.16})$$

der Verzerrungstensor sind. Gleichung (C.15) ist die sog. kleine oder linearisierte Spannungs–Dehnungs–Beziehung.

In isotropen Materialien (gleiche mechanische Eigenschaften in allen Richtungen) werden die beiden elastischen Konstanten oft in Form von POISSON-Verhältnis ν und YOUNG-Modul E angegeben. Es gilt:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}. \quad (\text{C.17})$$

Hierbei ist E der Elastizitätsmodul (YOUNG-Modul) und ν das POISSON-Verhältnis zwischen der transversalen Kontraktion und der Längsausdehnung.

Die Gleichgewichtsbedingung ergibt

$$\rho \ddot{u}_i = \sigma_{ij,j} + f_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad \text{in } \Omega, \quad (\text{C.18})$$

wobei f_i eine Volumenkraft ist – wie beispielsweise die Schwerkraft – und ρ ist die Massendichte. Setzt man den Ausdruck für σ_{ij} ein, lautet die traditionelle Vektorgleichung

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \nabla[(\lambda + \mu) \nabla \cdot \mathbf{u}] + \nabla \cdot [\mu \nabla \mathbf{u}] + \mathbf{f}. \quad (\text{C.19})$$

³ engl.: strain

⁴ engl.: stress

C.5. Bewegungsgleichungen deformierbarer Körper

Das Haupthindernis, wenn man die Bewegungsgleichung deformierbarer Körper betrachtet, ist die Kopplung des inertialen Formintegrals mit den Koordinaten der Deformation. Dies ergibt eine Massenmatrix, welche beträchtlich komplizierter als im Falle von Bewegungsgleichungen starrer Körper ist. Wenn eine Kraft auf einen elastischen Körper wirkt, muss die Wirkung als Ausbreitung einer Welle betrachtet werden. Wir leiten die Bewegungsgleichungen eines elastischen Körpers i her aufgrund von LAGRANGES Gleichung

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T^i}{\partial \dot{\mathbf{q}}^i} \right)^T - \left(\frac{\partial T^i}{\partial \mathbf{q}^i} \right) + \mathbf{C}_{\mathbf{q}^i}^T \lambda = \mathbf{Q}^i, \quad (\text{C.20})$$

wobei $\mathbf{q}^i = [\mathbf{r}^{iT} \quad \boldsymbol{\theta}^{iT}]^T$ die Lagegrößen des Körpers bezeichnet, T^i steht für die kinetische Energie und \mathbf{Q}^i für die generalisierten Kräfte.

Eine komplette Ableitung der Bewegungsgleichungen findet man bei SHABANA [67] und bei RENTROP, SCHERF und SIMEON [63]. Wir stellen hierzu nur fest, dass das System in der Form

$$\mathbf{m}_{rr}^i \ddot{\mathbf{q}}_r^i + \mathbf{m}_{rf}^i \ddot{\mathbf{q}}_f^i = \bar{\mathbf{Q}}_r^i \quad (\text{C.21})$$

$$\mathbf{m}_{fr}^i \ddot{\mathbf{q}}_r^i + \mathbf{m}_{ff}^i \ddot{\mathbf{q}}_f^i + \mathbf{K}_{ff}^i \mathbf{q}_f^i = \bar{\mathbf{Q}}_f^i \quad (\text{C.22})$$

geschrieben werden kann, wobei nun \mathbf{q}_r^i die Bezugskoordinaten, die mit der Ganzkörperbewegung assoziiert sind, und \mathbf{q}_f^i die elastischen Koordinaten bezeichnet.

D. Schwingungen und Wellen

Eine *Schwingung* ist eine periodische Veränderung eines betrachteten Objekts, beispielsweise ein Pendel. Im Gegensatz dazu ist die Bewegung eines Blattes, das im Wind treibt, keine Schwingung, da sie ungeordnet und nicht periodisch verläuft. Bei einer *mechanischen Schwingung* ist die beobachtete Veränderung dabei die Bewegung im Raum. Es gibt auch andere Schwingungen, etwa die Ortsveränderung elektrischer Ladungen in einem elektrischen Schwingkreis.

Eine *Welle* ist die Fortpflanzung einer Schwingung durch den Raum mit einer bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeit c . Wellen entstehen, wenn

- durch die Schwingung Objekte in der Nachbarschaft zu ebendieser Schwingung mitangeregt werden und
- die Energie der Schwingung nicht dissipiert wird, sondern in die Energie der Schwingungen in der Nachbarschaft übergeht.

Man bezeichnet den Träger der Welle als *Medium* und sagt: Wellen breiten sich in einem Medium aus. Elektromagnetische Wellen (zum Beispiel Licht) breiten sich ungehindert im leeren Raum aus und benötigen kein mechanisch fassbares Medium.

Wellen gibt es als *Transversalwelle* — die Teilchen schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, wie es etwa bei einem Seil der Fall ist oder bei der Saite einer Gitarre. *Innerhalb* eines Mediums gibt es auch *Longitudinalwellen*, etwa Druckwellen, wie man sie durch eine schwingende Platte erzeugen kann. Eine Wellenform mit longitudinalen und transversalen Anteilen sind die Oberflächenwellen (Rayleigh-Wellen). Einige Wellenarten zeigt beispielhaft die Abbildung D.1.

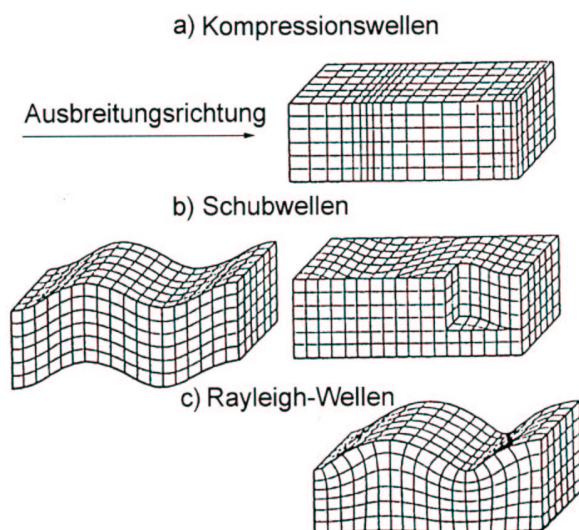


Abbildung D.1:
Körperschallwellenarten

Quelle: STUDER [70]

D. Schwingungen und Wellen

Das Grundgesetz der Wellenausbreitung (vgl. S. 13) lautet:

$$c = \lambda f \quad (2.1)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c ist demnach gleich dem Produkt aus Wellenlänge λ und Frequenz f , welche Größen sind, die die Welle charakterisieren.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt in erster Linie vom Medium ab. Innerhalb eines Mediums ist sie unter Umständen nicht konstant, sondern kann durchaus von der Wellenlänge abhängen. Dieser Effekt heißt Dispersion. Er spielt beim Luftschall keine Rolle, wohl aber beim Körperschall.

E. Referenzliste INFUNDO®

Die im folgenden abgedruckte Referenzliste der Schienenbefestigung EDILON Embedded Rail System (ERS), eingebaut in Systeme der Bauart INFUNDO®, bezieht sich auf Straßenbahn-, Stadtbahn- und Spurbus-Systeme. Der Stand ist vom 17.07.2003.

1982	Niederlande, Utrecht, Leidse Veer Tunnel, 300 m Gleis
1982	Niederlande, Utrecht, fast alle Bahnübergänge der Stadtbahn Utrecht
1984	Belgien, Zeebrugge, 4 Brücken von je 70 m Länge
1988, 1995	Niederlande, Den Haag, eingebettete Schienen auf Stahl- und Stahlbetonbrücken
1988, 1996	Niederlande, Amsterdam, diverse Brücken
1990	Großbritannien, Blackpool, 15 m Testgleis mit HUSH Schienenprofil
1991	Großbritannien, Manchester, 7.000 m Asphalt-/Pflastergleis
1991	Hong Kong, Tuen Mun, verschiedene Abschnitte, 4 km Gleis
1992	Frankreich, Paris, Straßenbahnlinie T1, Brücke und gepflastertes Gleis in St. Denis
1992-1995	Spanien, Valencia, 22,5 km eingedecktes Gleis (Pflaster/Asphalt) inkl. Weichen
1992-1995	Großbritannien, Sheffield, 34 km eingedecktes Gleis (Beton/Streetprint) inkl. Weichen
1994	Niederlande, Rotterdam, Haltestelle Blaak, Haltestelle (Betoneindeckung), 220 m Gleis
1994	Ungarn, Budapest, 300 m eingedecktes Gleis und Brücke
1995	Italien, Mailand, 250 m eingedecktes Gleis
1995/1996	Belgien, Zeebrugge, 2 Stahlbrücken
1996	Ungarn, Budapest, 1.500 m auf Donaubrücke
1996	Niederlande, Rotterdam, Erasmusbrücke, 950 m Doppelgleis
1996/1997	Niederlande, Rotterdam, Beyerlandselaan, 1.076 m eingedecktes Gleis (Betonoberfläche)

1997	Spanien, Barcelona, 750 m eingedecktes Gleis
1997	Spanien, La Coruna, 400 m eingedecktes Gleis
1997	Hong Kong, Tuen Mun, diverse Streckenverlängerungen (eingedecktes Gleis)
1997	Niederlande, Den Haag, HTM Resident, 40 m und 44 m eingedecktes Gleis
1997	Niederlande, Den Haag, 86 m ERS auf Bahnübergängen und Brücken
1997	Deutschland, München, Steinstraße, 380 m Rasengleis Bauart INFUNDO®-LR-MTP mit Körperschalldämpfung
1997/1998	Belgien, Brüssel, Teichmann Brücke, 2 x 160 m

1998	Deutschland, Bremen, Bahnübergang Autobahnzubringer Universität, 2 x 30 m
1998	Deutschland, Bremen, Uni-Linie 6, 2.400 m Rasengleis Bauart INFUNDO®-LR-MTP, Brücke und Eisenbahnunterführung
1998	Belgien, Antwerpen, Betonbrücke Blancefloerlaan, mit 2 x 110 m Gleis
1998	Belgien, Brüssel, Laken Brücke, 140 m
1998	Deutschland, Hannover, Expo-Linie, 2 x 60 m BÜ Döhrbruchstraße
1998	Deutschland, München, Schwannseestraße, 2.600 m Rasengleis Bauart INFUNDO®-LR-MTP und Bahnübergang (Stahltrug Bauart INFUNDO®-LR-ST)
1998	Deutschland, München, Eintrachtstraße, 450 m Asphaltgleis Bauart INFUNDO®-LR-MTP
1998	Deutschland, Bremen, 2 Bahnübergänge, je 2 x 60 m
1998	Deutschland, München, Westendstraße, 1.950 m Rastengleis Bauart INFUNDO®-LR-MTP
1998	Deutschland, Chemnitz, Zentralhaltestelle, 810 m Rasengleis und 390 m Asphaltgleis, beide in der Ausführung Bauart INFUNDO®-LR-MTP
1998/1999	Großbritannien, Croydon (London), 2.000 m Asphaltgleis und Weichen
<hr/>	
1999	Niederlande, Den Haag, 60 m Bahnübergang
1999	Belgien, Gent, Kortrijksesteenweg, 6 Fahrradwegunterführungen
1999	Frankreich, Orleans, alle Bahnübergänge des neuen Tram-Systems
1999	Spanien, La Coruna, 5.000 m Pflastergleis
1999	Großbritannien, Corydon (London), Fertigstellung von 5.500 m eingedecktes Gleis und aller Bahnübergänge des Croydon Tramlink Projekts
1999	Italien, Mailand, Erneuerung von 600 m eingedecktem Gleis
1999/2000	Spanien, Valencia, Streckenverlängerung 4.000 m eingedecktes Gleis (Streetprint)
<hr/>	
2000	Niederlande, Den Haag, Hobbemastraat 2 x 246 m eingedecktes Gleis
2000	Japan, Niigata, 10 m Bahnübergang und 20 m Rasengleis Bauart INFUNDO®-LR-MTP Ausführung als 3-Schienen-Gleis (Spurweiten 1.067 + 1.435 mm)
2000	Frankreich, Paris, 1,5 km eingebettete Schiene für das Spurbussystem Translohr auf der TVM
2000	Frankreich, Paris, Erneuerung von 3 km Gleis mit eingebetteter Schiene auf der Linie T1 (St. Denis—Bobigny)
2000	Deutschland, Chemnitz, Stollberger Straße, 2 x 470 m Rasengleis Bauart INFUNDO®-MTP
2000	Schweden, Göteborg, Brunsparken und Korsvägen, 2.000 m eingedecktes Gleis (Streetprint) und Weichen
2000	Niederlande, Den Haag, Ypenburg, insg. 800 m, 15 Bahnübergänge und 1 Viadukt
2000	Spanien, Valencia, Streckenverlängerung, 8.000 m eingedecktes Gleis
2000	Niederlande, Ijselstein, 24 und 48 m Bahnübergänge System STELFUNDO
2000	Deutschland, Nürnberg, 2 x 26 m Bahnübergang (System STELFUNDO)
2000	Schweden; Göteborg, Östra Hamngate, 500 m eingedecktes Gleis und 3-Richtungs-Weiche
2000/2001	Schweden, Göteborg, Korsvägen—Södra Vägen, 1,5 km eingedecktes Gleis und 3 Gleiswechsel

2001	Niederlande, Amsterdam, 200 m eingebettete Schiene
2001	Niederlande, Amsterdam, Brücke über die Hoekenesgracht, 2 x 55 m eingebettete Schiene (ERS)
2001	Niederlande, Amsterdam, De Aker, Betonbrücke mit 2 x 14 m eingebettete Schiene
2001	Niederlande, Delft (Den Haag), Reineveldsbrug, 150 m eingebettete Schiene
2001	Niederlande, Den Haag, Hoornbrug, 210 m eingebettete Schiene
2001	Niederlande, Den Haag, Rijswijkseplein, 40 m eingebettete Schiene
2001	Deutschland, Chemnitz, 2 x 10 m Brücke
2001	Deutschland, Augsburg, Linie 4 - Oberhausen, 2 x 10 m Brücke (Asphalteindeckung)
2001	Deutschland, Gelsenkirchen, U 17 – Haltestelle Fischerstraße, 2 x 120 m eingedecktes Gleis (Stahltrug mit Schiene S 49, Bauart INFUNDO®-LR-ST)
2001	Deutschland, Stuttgart, U2 Schmidener Straße, Ausbau der ehem. Straßenbahnlinie 2 zur Stadtbahn, 2 x 242 m Rasengleis Bauart INFUNDO®-LR-MTP
2001	Schweden, Stockholm, Sicla Udde, 818 m eingedecktes Gleis in körperschallmindernder Ausführung
2001	Schweden, Göteborg, Chalmers Tunnel, 2.300 m eingebettete Schiene in körperschallmindernder Ausführung
2001	Schweden, Göteborg, Annedal, 150 m Betonbrücke mit eingebetteten Schienen
2001	Norwegen, Oslo, Linien 10 und 17, Theresesgate, insg. 520 m körperschallminderndes, eingedecktes Gleis und Rasengleis
2001	Russland, St. Petersburg, 500 m eingedecktes Gleis
2001	Frankreich, Paris, Linie T1 St.-Denis—Bobigny, 1.500 m eingepflastertes Gleis, Umbau von Rippenplattensystem auf eingebettete Schiene
2001/2002	Portugal, Porto, Viaduto do Parque da Cidade, 512 und 168 m eingedecktes (gepflastertes) Gleis
<hr/>	
2002	Niederlande, Amsterdam, IJ-tram-Linie, insg. 357 m STELFUNDO Bahnübergänge
2002	Japan, Kumamoto, Kami-Kumamoto station, 282 m eingedecktes Gleis Bauart INFUNDO®-LR-MTP inklusive doppeltem Gleiswechsel und einfacher Weiche (Bauart INFUNDO®-LR-RW)
2002	Schweiz, Basel, Linie 10, Ortsdurchfahrt Arlesheim, 21 m Bahnübergang (Gleistragplatten) mit Gleisverschlingung
2002	Deutschland, Stuttgart, Berliner Platz, 2 x 80 m Rasengleis Bauart INFUNDO®-LR-HFT
2002	Deutschland, München, Agnes-Bernauer-Straße, Linie 19, 2 x 215 m schalltechnisch optimiertes, begrüntes Gleis Bauart INFUNDO®-LR-MTP. Anwendung Schienenprofil SA 42
2002	Deutschland, Augsburg, Linie 1, Perlachberg, 2 x 11 m Brücke (Pflastereindeckung)
2002/2003	Deutschland, Gelsenkirchen, U 17 / Linie 301, Haltestelle Fischerstraße bis Haltestelle Buerer Straße, 1.348 m eingedecktes Gleis (Stahltrug mit Schiene S 49, Bauart INFUNDO®-LR-ST), davon 892 m in Ausführung als 3- Schienen-Gleis (Spurweiten 1.000 mm + 1.435 mm)
2002/2003	Belgien, Küstenlinie, Oostende-Mercator, 186 m kombinierte Bus- und Tramfahrbahn
2002/2003	Spanien, Alicante, Küstenlinie, 11.000 m ERS für eingedecktes Gleis

-
- 2003 Niederlande, Amsterdam, IJburg, IJ-tram-Linie, Zuiderzeeweg, 2 x 56 m
Bahnübergang
- 2003 Niederlande, Amsterdam, Kinker Brücke, 2 x 15,5 m ERS auf Stahlbrücke
- 2003 Niederlande, Amsterdam, IJburg, IJ-tram-Linie, 2 x 100 m ERS auf Brücke über den
Oosterdocksdoorgang (Beton-Stahl-Verbundkonstruktion)
- 2003 Japan, Hiroshima, Ujina-line, Neubaustrecke Ujina Fährhafen, 2 x 103 m Rasengleis
Bauart INFUNDO® in Fertigteilausführung und eingedeckter Kreuzungsbereich
($R = 30$ m) mit Fertigteilplatten. Radienbereich mit 3-Schienen-Leitschienen-
konstruktion (J 50 N)
- 2003 Japan, Kumamoto, Rekonstruktion Karashimacho, 2 x 164 m eingedecktes Gleis
Bauart INFUNDO®-LR im Kreuzungsbereich ($r_{min} = 30$ m) mit Fertigteilplatten
(Umbau in Nacht-Sperrpausen). Insg. 76,5 m Weichenanlagen Bauart INFUNDO®-LR-RW
(Streckenabzweigung Ri. Tasakibashi)
- 2003 Japan, Fukui, Rekonstruktion Shiya Kushomae—Fukui Ekimae, 287 m eingedecktes
Gleis Bauart INFUNDO®-LR mit Fertigteilplatten und 33 m Abzweigweiche Bauart
INFUNDO®-LR-RW, ebenfalls in Betonfertigteilen
- 2003 Ägypten, Alexandria, 2 Bahnübergänge, Ibrahim Mosque Crossing (24 m) und
Hasan Rasem Crossing (48 m) mit eingebetteter Schiene
- 2003 Österreich, Wien, Strecke Wien Oper—Baden (b. Wien) der Wiener Lokalbahn AG,
Erneuerung EK Möllersdorf mit B17, 67 m + 61 m Bahnübergang im Übergangsbogen
($R = 300$ m -> $R = 8$) Bauart STELFUNDO
- 2003 Deutschland, Augsburg, Linie 3, Ausgburger Straße, 2 x 6,0 m ERS im Stahltrog
- 2003 Norwegen, Oslo,

Literaturverzeichnis

- [1] Forschungs- und Entwicklungsvertrag zwischen dem Land Baden–Württemberg, Ministerium für Umwelt und Verkehr (Auftraggeber) und der Forschungsgemeinschaft „Schienenfahweg für das 21. Jahrhundert“, vertreten durch Prof. Dr.-Ing. E. Hohnecker c/o Universität Karlsruhe (TH), Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen, Abteilung Eisenbahnwesen, Kaiserstraße 12, 76133 Karlsruhe (Auftragnehmer), über die Durchführung des Forschungsvorhabens „Schienenfahweg für das 21. Jahrhundert; Teil I: Lärmreduktion beim Fahren auf kontinuierlich gelagerter Schiene/System INFUNDO“, O.Nr.: U33-99.01, Stuttgart, 1999
- [2] ACKVA; DECKER: Vergleich von Schotteroberbau und fester Fahrbahn in emissions-technischer Hinsicht, Tagungsband 1 Schotteroberbau versus Feste Fahrbahn, Westheim, September 1995.
zitiert nach: Gottschang, M., Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2001 [98]
- [3] ACKVA; DECKER, a. a. O. zitiert nach GOTTSCHANG [98], Abb. 7.19: Luftschall-Absorptionskoeffizient bei verschiedenen Frequenzen, S. 73
- [4] AUERSCH, I.: Zur Parameteranregung des Rad–Schiene–Systems: Berechnung der Fahrzeug–Fahrweg–Untergrund-Dynamik und experimentelle Verifikation am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental, Ingenieur-Archiv 60 (1990), S. 141-156
- [5] BRAUER, H. (Hrsg.): Emissionen und ihre Wirkungen. Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik, Berlin, 1997
- [6] Bundesumweltministerium: Gesundheitsrisiken durch Lärm, Tagungsband zum Symposium: Schritte zu einer nachhaltigen Entwicklung, Bonn, 1998
- [7] DE GRAF, K; NICKEL, B; ZEHETNER, S.: Erfahrungen mit Rasengleis, Der Nahverkehr (1998) 5, S. 8-22.
- [8] Deutsche Bahn (Hrsg.): Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen – Schall 03. Deutsche Bahn AG, Ausgabe 1990
- [9] Deutsche Bahn (Hrsg.): Oberbaurichtlinien für Regelspurbahnen, DS 820/01, Deutsche Bahn Gruppe DB Netz, Frankfurt am Main, Bekanntgabe 17, 1999
- [10] Deutsche Bahn AG, Forschungs- und Technologiezentrum (FTZ): Messungen des rms-Werts der Wagenkastenbeschleunigung im Netz der Münchener Straßenbahn, unveröffentlicht. Anfragen bitte an die EDILON GmbH, Joergstraße 23, München
- [11] DIANA, G.; CHELI, F.: A numerical method to define the dynamic behaviour of a train running on a deformable structure, Meccanica 23 (1988)

- [12] DIN IEC 651: Schallpegelmesser, Beuth, Berlin, 1981
- [13] ELBERT, M., Diplomarbeit [94], Abbildung 54: Position der Messaufnehmer in der Schmidener Straße, S. 125
- [14] ELBERT, M., a. a. O., Abbildung 69: Vergleich der Luftschallemissionen der Schmidener Straße mit Plieningen, S. 139
- [15] ELBERT, M., a. a. O., Abbildung 50: Messort in der Schmidener Straße, S. 121. unter Mitverwendung der Karte: ADAC: ADAC-Stadtplan Stuttgart 1:20.000
- [16] ELBERT, M., a. a. O., Abbildung 55: Messort in Stuttgart Plieningen (SchO), S. 126. unter Mitverwendung der Karte: ADAC: ADAC-Stadtplan Stuttgart 1:20.000
- [17] Abteilung Eisenbahnwesen, in Anlehnung an ELBERT, M. [94], Abbildung 66: Vergleich der Messwerte von Plieningen und Schmidener Straße in y-Richtung, S. 133
- [18] EISENMANN, J.; MATTNER, L.; STAHL, W.: Das Rasengleis für Stadtbahnen. In: Eisenbahningenieur 47 (1996) 6, S. 48-56
- [19] Europäische Kommission (Hrsg.): Richtlinie des Rates 96/48/EG vom 23.7.1996 zu den Grenzen der Lärmschutzwerte im Hochgeschwindigkeitsbereich
- [20] Europäische Kommission Generaldirektion Umwelt, Nukleare Sicherheit und Katastrophenschutz (Hrsg.): Grünbuch Künftige Lärmschutzpolitik, Brüssel, 1996
- [21] FRANZ GRÖTZ GMBH&CO. KG: Die Systeme im Eisenbahn-Oberbau - Aktiver Erschütterungsschutz am Fahrweg Systeme Grötz BSO/MK, Gaggenau, 1999
- [22] FRÝBA, L.: Vibration of solids and structures under moving loads, Noordhoff International Publishing, Groningen (Niederlande), 1972
- [23] FÜHRER, G.: Oberbauberechnung, transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin, 1978
- [24] GERTHSEN, CHR.; KNESER, H. O.; VOGEL, H.: Physik, Springer, Berlin und Heidelberg, 13. Aufl., 1977
- [25] GFAI: Akustische Bilder der neuen Berliner U-Bahn (Auszug),
<http://www.gfai.de/www-open/perspg/g-heinz/akustik/ubahn/ubahn.htm>
- [26] GFAI: Akustische Kartierungen an Straßenbahnen der Baureihen KT4D T6A/B6A und GT6,
<http://www.gfai.de/www-open/perspg/g-heinz/akustik/tram/tram.htm>
- [27] GFAI, Internetseite <http://www.gfai.de/www-open/perspg/heinz.htm>
- [28] GIESLER, H.-J., WENDE, H.: Geräuschemissionen von Straßenbahnen, Hrsg.: DEGA, Fortschritte der Akustik, DAGA, Bonn und Oldenburg, 1996
- [29] GIESLER, H.-J.: Geräuschemissionen von Straßenbahnen – Deutschlandweite messtechnische Erhebung, Der Nahverkehr 18, 2000, Heft 4, S. 10-14
- [30] GOHLKE, U.: Vergleichende Analyse von Gleisbett-Naturierungen in ausgewählten Städten, Diplomarbeit, HUB & IASP, Berlin 1997

- [31] GOTTSCHANG, M., Diplomarbeit [98], Abbildungen 7.14: Aufteilung des Fahrweges und der Umbeugung in drei Streifen, S. 68, und 7.15: Strahlengang bei der Reflexion am Wagenkasten, S. 69
- [32] HAIRER, E.; WANNER, G.: Solving ordinary differential equations II: Stiff and Differential-Algebraic Problems, 2. Aufl., Springer, 1996
- [33] HAUCK, G.: Erkenntnisse und Fortschritte bei Minderung und Bewertung des Schienenverkehrslärms, ETR 45(1996) 1-2
- [34] HECKL, M.; MÜLLER, H.A.: Taschenbuch der technischen Akustik, Berlin, zweite Aufl., korr. Nachdruck 1995
- [35] HECKL, M.; MÜLLER, H.A., a. a. O., Bild 5.5: „Frequenzbewertungskurven A, B, C, D und U für Schallpegelmesser ...“, nach [12, 46, 45]
- [36] HENN, H.; SINAMBARI, GH.; FALLEN, M.: Ingenieurakustik, vieweg, Braunschweig und Wiesbaden, 1999
- [37] HOHNECKER, E.: Öffentliche Verkehrssysteme. In: ZILCH, K.; DIETRICH, C. J.; KATZENBACH, R. (Hrsg.): Handbuch für Bauingenieure, Springer, Berlin Heidelberg, 2002, Kapitel 7.2, S. 7-13 bis 7-68
- [38] HOHNECKER, E., a. a. O., Abb. 7.2-3: Querschnitt des Bahnkörpers einer Vollbahn, S. 7-32
- [39] HOHNECKER, E.: Comfort as a component of travel quality with tilting vehicles (Behaglichkeit als Teilkomponente des Reisekomforts mit Neitech-Fahrzeugen), WCRR '97, Florenz, November 1997
- [40] HOHNECKER, E.: Mittel- und langfristige Möglichkeiten und Grenzen der Trassierungsparameter eines zukunftsorientierten Rad/Schiene-Systems unter Beachtung des Unzufriedenheitsgrades als Komfortkriterium, WCRR'94, Les Actes du Congrès, Volume 1, S. 83-89, Imprimé en France - Jouve, 18, rue Saint-Denis, 75001 Paris, N° 222168 V, Dépôt légal: Novembre 1994
- [41] HOHNECKER, E.: Optimierung der Linienführung von Hochgeschwindigkeitsstrecken unter systemtechnischen Gesichtspunkten. in: HEIMERL, G. (Hrsg.): Untersuchungen des Instituts für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart, Stuttgart 1993
- [42] HOHNECKER, E.: Zukunftssichere Trassierung von Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsstrecken. in: HEIMERL, G. (Hrsg.): Forschungsarbeiten des Verkehrswissenschaftlichen Institutes an der Universität Stuttgart (VWI), Bericht 19, 1993
- [43] HÖLZL, G, HOLM, P., MÜLLER, G.: Akustische Vorteile der Festen Fahrbahn gegenüber dem Schotteroberbau bei tiefen Frequenzen, ETR 45(1996)1-2
- [44] HUBER, G.: Erschütterungsausbreitung beim Rad-Schiene-System. Hrsg. GUDEHUS, G.; NATAU, O.: Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 115, Karlsruhe 1988
- [45] IEC 1012: Filters for the measurement of audible sound in the presence of ultrasound, 1990

- [46] ISO 3891: Acoustics — Procedure for describing aircraft noise heard on the ground, 1978
- [47] KRÜGER, F.: Handbuch Schall und Erschütterungen beim Schienennahverkehr, STUVA, Köln, 1993 (BMFT-Förderkennzeichen TV 8817)
- [48] KRÜGER, F. et alii: Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr, export-Verlag, Renningen, 2001
- [49] VDI 2057 Bl 3. zitiert nach: KRÜGER, F. et alii, a. a. O., Tabelle 1.2: Zusammenhang zwischen Bewerteter Schwingstärke und subjektiver Wahrnehmung, S. 13
- [50] KRÜGER, F. et alii, a. a. O., Bild 6.2: Schallabstrahlung im Rad-/Schiene-Bereich, S. 158
- [51] LANGE: Schalltechnische Untersuchungen an verschiedenen Bauarten der Festen Fahrbahn, Kurzbericht, DBAG, Brandenburg-Kirchmöser, 1997
- [52] LMS international: Raynoise Revision 3.0 Users Manual, LMS Raynoise, Intreleuvenlaan 68, 3001 Leuven (Belgien), o. J.
- [53] Manchester Benchmarks for Rail Vehicle Simulations, Vehicle System Dynamics 30 , 1998, S. 295-313
- [54] MAUE, J. H.; HOFFMAN, H.; VON LÜPKE, A.: 0 Dezibel + 0 Dezibel = 3 Dezibel, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 7. Aufl., 1999
- [55] MAUE, a. a. O., Tabelle 4.2: Beispiele von Schalldruckpegeln für verschiedene Geräusche, S. 53
- [56] MÖHLER, U.: Schallemissionen von Schienennahverkehrsbahnen, Zeitschrift für Lärm-bekämpfung 45 (1998) 6
- [57] MÜLLER, G.: Die Statistische Energieanalyse — eine Methode der numerischen Akustik. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Maschinenakustik '99 — Entwicklung lärm- und schwingungsarmer Produkte, Tagung des Normenausschusses Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI und der VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (VDI-EKV) in Wiesloch, 9.-10.09.99, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999, S. 23-45
- [58] MÜLLER, G., a. a. O., Abb. 3: Einordnung der SEA, S. 25
- [59] MÜLLER, R.: Veränderungen von Radlaufflächen im Betriebseinsatz und deren Auswirkungen auf das Fahrzeugverhalten (Teil 1), Vortrag auf der 2. Schienenfahrzeugtagung rad'97 in Dresden am 18.9.1997, Glasers Annalen 122 (1998)11, S. 675-688
- [60] MÜLLER, R.: Verschleißerscheinungen an Radlaufflächen von Eisenbahnfahrzeugen, ZEV+DET Glasers Annalen 199 (1995) Heft 6, S. 177-192
- [61] MÜLLER, R., a. a. O., Bild 3: Norm- und Betriebsgrenzmaße für Spurweite und Spurmaß, Ausschnitt
- [62] MÜLLER-BBM: Oberbausystem INFUNDO - Körperschalltechnische Untersuchungen im Bereich der Straßenbahn München; Vergleich mit verschiedenen Oberbausystemen München, Berichtnr. 34389/5, 18.11.97

- [63] RENTROP, P.; SCHERF, O.; SIMEON, B.: Mechanical Multibody Systems with Deformable Components, Preprint, Technische Universität Darmstadt, 1998
- [64] RIPKE, B.; DIEHL, R.: Rechnerische Simulation der hochfrequenten Gleisdynamik und Fahrzeug-Fahrweg-Interaktionen mit verifizierten Gleismodellen. Systemdynamik der Eisenbahn, S. 137 - 146, Henningsdorf, 1994
- [65] SCHNEIDER, K.-J. (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure, Werner-Verlag, Düsseldorf, 14. Aufl., 2001, S. 11.11
- [66] SELVADURAI, A.: Elastic Analysis of Soil Foundation Interaction, Elsevier, pp.27-30 (1979)
- [67] SHABANA, A. Dynamics of Multibody Systems, Cambridge University Press, 1998
- [68] SKUDRZYK, E.: Die Grundlagen der Akustik, Springer, Wien, 1954
- [69] STUDER, J.; ZIEGLER, A.: Bodendynamik, Springer, 1. Aufl., 1986
- [70] STUDER, J.; ZIEGLER, A., a. a. O., Abb. Energieanteile von Raumwellen a) und b) und Rayleighwelle c). zitiert nach: RÖTHLINGSHÖFER, F. [97]
- [71] TEUFEL, D.; ARNOLD, A. et. al.: Externe Gesundheitskosten des Verkehrs in der Bundesrepublik Deutschland, UPI-Bericht Nr. 6, 1997
- [72] THOMPSON, D.; JANSSENS, M.; DITTRICH, M.: Rollgeräusche durch den Rad/Schiene-Kontakt — Beurteilung von Lärminderungsmaßnahmen. ZEV+DET Glasers Annalen 121 (1997) Heft 2/3 Februar/März, S. 226–233
- [73] WENSCH, J.; STREHMEL, K.; WEINE, R. A class of linearly-implicit Runge-Kutta methods for multibody system, Applied Numerical Mathematics: Transactions of IMACS 22, 1996, Heft 1–3, S. 381–398
- [74] WETTSCHURECK, R., HAUCK, G.: Geräusche und Erschütterungen aus dem Schienenverkehr. In: HECKL, M.; MÜLLER, H. (Hrsg.): Taschenbuch der Technischen Akustik, Springer-Verlag, Berlin, 1994, Kapitel 16, S. 355-417
- [75] WINKLER, E.: Vorträge über Eisenbahnbau – gehalten an verschiedenen deutschen polytechnischen Schulen, W. & S. Loewenthal, Berlin, 3. Aufl., o. J.

Veröffentlichungen im Verlauf des Projektes

- [76] SCHEDEL, F.: Neuer Eisenbahnfahrweg auf der Offerta. in: Universität Karlsruhe (Hrsg.): UniKaTH 35 (2004) Heft 1 (Februar), S. 51
- [77] HOHNECKER, E.: Towards a low noise railway system, Proceedings of the Railway Engineering Conference, London, 30 April - 1 May, 2003
- [78] HOHNECKER, E.: Low Emission Railway System, Proceedings of the International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003 (STECH03), Tokyo, 19. bis 22. Aug. 2003
- [79] HOHNECKER, E.: Acoustic properties of railway superstructures, Proceedings of the World Congress on Railway Research (WCRR 2003), Edinburgh, 28. Sept. bis 1. Okt. 2003
- [80] HOHNECKER, E.: Vergleich der Krafteinflüsse bei diskret gelagerten bzw. kontinuierlich eingebetteten Schienen, Beitrag zur DVWG-Tagung. In: Innovative Forschung und Lehre im Dienste einer nachhaltigen und integrierten Verkehrspolitik, Tagungsband (Sonderausgabe), DVWG, Berlin, 2003
- [81] HOHNECKER, E.: Lärmarme Schienenfahrwege, Broschüre anlässlich der Fachmesse „transport logistic“, München 20.-24. Mai 2003, Universität Karlsruhe Abtl. Eisenbahnwesen, 2003
- [82] LITZENBURGER, J.: A polynomial approach for the three-dimensional wheel-rail rolling contact, 17th IAVSD symposium on dynamics of vehicles on roads and tracks, Lyngby (Dänemark), 20.-24.8.2001. In: Vehicle System Dynamics 37 Suppl., S. 690-701, 2003
- [83] HOHNECKER, E.: Diskret gelagerte oder kontinuierlich eingebettete Schienenfahrbahnsysteme?, EI - Eisenbahningenieur 53, S. 45-49, 2002
- [84] „INFUNDO-Schienenoberbau“, Beitrag der Abteilung Eisenbahnwesen zur Ausstellung ERDE 2.0 (50 Jahre Baden-Württemberg), Stuttgart, 15.6.-28.7.02, CDROM, Universität Karlsruhe Abtl. Eisenbahnwesen, 2002
- [85] HOHNECKER, E.: How to calculate noise and vibration, Proceedings of the Tram conference environmental noise and vibrations from tram infrastructure, Göteborg (Schweden), 12-13 Nov. 2002
- [86] Fa. EDILON (Hrsg.): Waghäusel: Feste Fahrbahn Bauart im Betriebstest, edilon report 04/2002, EDILON GmbH, Joergstraße 23, München, 2002
- [87] Fa. EDILON (Hrsg.): edilon report 02/2002, EDILON GmbH, Joergstraße 23, München, 2002
- [88] HOHNECKER, E.: Comparison of forces on discretely and continuously embedded track system - effects on track, vehicle user and environment, Railway Engineering Conference, London, 30.4.-1.5.2001

- [89] HOHNECKER, E.: Noise Reduction in Wheel/Rail Systems: Avoidance and Damping of Vibrations and Variation of Natural Frequencies, Beitrag zum Seminar „Ground-Born Vibrations“, Banverket (Schwedische Bahn), Göteborg (Schweden), 16.-17.03.2000
- [90] HOHNECKER, E.: A Non-Linear Three-Dimensional Model for Track/Vehicle System, Vortrag auf der Railway Engineering 3rd Annual International Conference, London, 5.-6.07.2000
- [91] HOHNECKER, E.: Entwicklung und Perspektiven eines umweltfreundlichen Fahrwegs für das 21. Jahrhundert, Vortrag auf der Veranstaltung „Mensch-Fahrweg-Fahrzeug“ an der Humboldt-Universität zu Berlin, 11.9.2000
- [92] SCHNELLBÖGL, G.; HANISCH, M.: Die Bedeutung des Systems „eingebettete Schiene“ für eine kostenoptimierte Gleisinfrastruktur, Verteilschrift zur Messe InnoTrans 2000 Berlin, 12. bis 15.09.2000, INFUNDO GmbH, München, 2000

Diplom- und Vertieferarbeiten an der Abteilung Eisenbahnwesen in Zusammenhang mit dem Projekt

- [93] NAUE, M.: Messmethoden zur Bestimmung von Verschleiß und Lagegenauigkeit von Straßenbahnschienen, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2003
- [94] ELBERT, M.: Experimentelle Überprüfung eines Körperschall-Prognosemodells, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2002
- [95] SCHÖBINGER, F.: Life-Span-Costs (LSC) – ein neuer Ansatz zur Bewertung langlebiger Investitionsgüter des Eisenbahnverkehrs, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2002
- [96] CSIKÓS, CS. I.: Planung, Bau und Erhaltung der Festen Fahrbahnen, externe Diplomarbeit der Technischen und Wirtschaftswissenschaftlichen Universität Budapest, angefertigt an der Abteilung Eisenbahnwesen, ISE, Universität Karlsruhe, 2002
- [97] RÖTHLINGSHÖFER, FL.: Erschütterungstechnische Analyse eines Straßenbahnoberbaus — Fallstudie Thereses gate, Oslo. Vertieferarbeit, Universität Karlsruhe, 2002
- [98] GOTTSCHANG, M.: Berechnung von Luftschallspektren in der Nähe spurgeführter Systeme, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2002
- [99] ENGELSKIRCHEN, M.: Dimensionierung des Schienenfahrwegs 'Linha do Norte, Portugal', Vertieferarbeit, Universität Karlsruhe, 2001
- [100] KENDZIORA, CHR.: Die Schienenbefestigung im Simulationsmodell für den Eisenbahnoberbau, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2001
- [101] MUND, CHR.: Die Schwelle im Simulationsmodell für den Eisenbahnoberbau, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2000
- [102] SCHURRER, M.: Programm zur Berechnung von Schallimmissionspegeln nach Schall03, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2000
- [103] JAMBRICH, R.: Beurteilung der heute verwendeten Formen von Schotteroberbau und Fester Fahrbahn hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Einsatzgebieten, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1999