



Gemeinsamer Abschlußbericht zum Verbundvorhaben

Fkz 19 U 9929

**„Low Emission Railway System (LERM)“
Grundlagenforschung und Weiterentwicklung von
Schienenfahrwegen für den regionalen Personenverkehr**

Laufzeit:

01.10.1999 bis 30.06.2003

Forschungspartner:



**Institut für Agrar- u. Stadtökologische Projekte
an der Humboldt-Universität zu Berlin**

Herr Dr. Wolfgang Rudolf
Geschäftsführer
Invalidenstraße 42
10115 Berlin



**Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE)
Universität Karlsruhe (TH)**

Universitätsprofessor Herr Dr.-Ing. E. Hohnecker
Leiter der Abteilung Eisenbahnwesen
Wissenschaftlicher Leiter des Forschungsprojektes
Kaiserstraße 12
76128 Karlsruhe



Stadtwerke München GmbH

Unternehmensbereich Verkehr
Herr Dr.-Ing. Jürgen Stieber
Emmy-Noether-Straße 2
80287 München



LEONHARD WEISS GmbH & Co., Bauunternehmung

Projektleiter
Herr Dipl.-Ing. Carsten Wolf
Fabrikstraße 40
73037 Göppingen

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
2.1	Problemstellung	5
2.2	Profil der Forschungspartner	6
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	8
3.1	Arbeitsaufteilung	8
3.2	Koordination des Forschungsteams	8
3.3	Projekttreffen und Öffentlichkeitsarbeit	10
3.4	Verlauf aus Sicht der wissenschaftlichen Institute	11
3.5	Auswahl Teststrecke	12
3.6	Messungen	13
3.7	Grundlegende Untersuchungen im Bereich Gleisbettnaturierung	14
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	18
4.1	Grundlagenforschung	18
4.2	anwendungsorientierte Forschung (Vegetationskontrolle)	19
4.3	Gleisbettnaturierung – Innovation und Stand der Technik	19
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	21
6	Erzielte Ergebnisse	22
6.1	Grundlagenforschung Gesamtmodellierung	22
6.2	Grundlegende Untersuchungen im Bereich Gleisbettnaturierung	25
6.3	Durchführung der Prüfstandsuntersuchungen	31
6.4	Entwicklung einer kontinuierlichen elastischen Schienenlagerung für den Schienennahverkehr	31
6.5	Untersuchung und Realisierung eines optimalen Betontragplattenkonzepts	34
6.5.1	Gleitschalungsfertiger	34
6.5.2	Ortbeton mit „konventioneller“ Schalung	34
6.5.3	Einsatz von Fertigteilen	35
6.5.4	Aufbau eines Qualitätssicherungsmanagements	36
6.5.5	Systemkonzeption	36
6.5.6	Bauartgenehmigung	37
6.6	Realisierung der Teststrecke	37
6.7	Meßergebnisse	39
6.7.1	Beweissicherungsmessungen	40

6.7.2	Körperschallmessungen PP ISE	43
6.7.3	Luftschallmessungen PP ISE	44
6.8	Erfahrungen aus Bau und Betrieb der Teststrecke	45
6.8.1	Baukosten	46
6.8.2	Betriebskosten	46
6.9	Systemeigenschaften	46
7	Voraussichtlicher Nutzen/Verwertbarkeit der Ergebnisse	49
7.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	49
7.2	Wissenschaftlicher und technischer Erfolg	50
8	Ergebnisse Dritter	51
9	Veröffentlichung der Ergebnisse	52
	Literatur	60
Anhänge		
	A Abbildungen	
	B Bau der Teststrecke Agnes–Bernauer–Straße	
	C Ausstellung Erde 2.0 — Messestand Projekt LERM	

1 Aufgabenstellung

Ziel der anwendungsorientierten Forschung des Projektes war die Entwicklung von Komponenten zur Minimierung der Emissionen (akustische, stoffliche, thermische und radiative) an der Systemkomponente Fahrweg unter Beachtung der Fahrzeugeinwirkungen. Die sich daraus ergebenden Marktchancen in internationaler Dimension für Fahrweg- wie Fahrzeughersteller sollten gezielt genutzt werden.

Als Ergebnis der Grundlagenforschung wurden insbesondere Grundsatzkenntnisse über die vibro-akustische Modellierung des Fahrweg–Fahrzeug–Systems erwartet sowie die Erarbeitung des integrativen Prognosemodells [ANIRAIL] (animatives Visualisierungsmodul Schiene) zur ökonomisch–ökologisch optimierten Fahrweggestaltung.

Für die Projektlaufzeit 01.10.1999 bis 30.06.2003 hatten sich die Forschungspartner verschiedene Ziele gesetzt: Das Hauptinteresse galt dabei der Entwicklung von Komponenten zur Minimierung der Emissionen (akustische, stoffliche, thermische und radiative) und der Systemkomponente Fahrweg unter Beachtung der Fahrzeugwirkungen.

Im Rahmen des Verbundprojektes „LERM“ stand die Entwicklung eines emissionsminimierten Fahrwegs für den Schienenpersonennahverkehr auf Basis der kontinuierlich gelagerten, eingegossenen Schiene sowie der Bau einer Versuchsstrecke im Vordergrund.

Folgende Ergebnisse waren durch eine solche Schienenlagerung und den Einsatz neuer Schienenprofile zu erwarten:

- Schwingungsimmissionen werden verringert, damit wird die Akzeptanz erhöht.
- Die Umweltfreundlichkeit wird weiter gesteigert.
- Eine kontinuierliche Schienenlagerung ist im Vergleich zu anderen Oberbauformen mit gleicher emissionsmindernder Wirkung relativ preisgünstig (Zielsetzung).
- Die Unterhaltungskosten für den Betreiber sollen drastisch reduziert werden.

Die vier Projektpartner hatten sich zum Ziel gesetzt, grundlagenorientiert auf Basis des Ansatzes „kontinuierlich gelagerter Fahrwegsysteme“ Berechnungsmodelle zu entwickeln und im Rahmen des Projektes Lösungsansätze für ein optimiertes System zu erarbeiten.

Für das Ziel „Stadt- und siedlungsnahe Emissionsminderung des schienengebundenen Verkehrs durch ökologisch-ökonomisch optimierte Fahrweggestaltung auf der Basis von Gleisbettnaturierungen (vegetativen Absorbern) sowie die Erarbeitung des integrativen Prognose Modells ANIRAIL (animatives Visualisierungsmodul Schiene) zur ökologisch-ökonomisch optimierten Fahrweggestaltung“ standen zum einen die emissions-/immissionsdämmenden und -dämpfenden Eigenschaften der dispersen Vegetationstragschichten sowie deren Wechselwirkung zum jeweiligen Oberbau und zu den Schienenbefestigungen und -lagerungen im Vordergrund; andererseits waren die quantitativen und qualitativen Wechselwirkungen zwischen dem Naturierungsaufbau und dem Schienenfahrzeug hinsichtlich der Emissions- und Immissionswirkungen zu bestimmen.

Darüber hinaus waren die Emissionsminderungseffekte der naturierten schienengebundene Verkehrssysteme in unterschiedlichen Stadt- und Bebauungsstrukturen zu quantifizieren und als gewichtete verallgemeinerbare Parameter zu qualifizieren.

Die im Verlauf der Modellbildung digitalisierten Parameter sollten rasterorientiert zugeordnet werden. Diese Parameter sollten einer modell- und meßwertgestützten Optimierung unterzogen werden, um hieraus die Daten zu generieren, die für das interaktive graphische Arbeitstool (ANIRAIL) für Naturierungsmaßnahmen in Schienenverkehrsräumen Anwendung finden sollen.

ANIRAIL sollte an Hand des jeweiligen Fahrweges sowie der verschiedenen Emissions-/Immissionswirkungen oder wirtschaftlicher Merkmale die Präferenz-Naturierungssysteme ermitteln, welche besonders für schienengebundene Verkehrsflächen geeignet waren. Des weiteren sollten aus den berechneten Präferenzsystemen die wirtschaftlichen und ökologischen Eckdaten abgeleitet werden.

Ein Ziel bestand in einem ökologisch-ökonomisch optimierten naturierten Fahrwegesystem mit emissionsmindernder und quasi entsiegelter Fahrwegoberfläche als eigenständiger Oberbauart im Sinne der 16. BImSchV.

Ein Ziel der Schallmessungen war es, den Einfluß der Oberbauart auf die Luftschallemissionspegel zu bestimmen. Insbesondere wird die Schallemission der beiden Oberbauarten Schotteroberbau (SchO) mit diskreter Schienenlagerung und Feste Fahrbahn (FF) INFUNDO® mit kontinuierlicher Lagerung und Einbettung der Schienen in einer elastischen Vergußmasse (Embedded Rail System (ERS)) gemessen und miteinander verglichen.

Ein weiteres Ziel der Schallmessungen war die Überprüfung der Vorhersagen des im Rahmen von LERM entwickelten dreidimensionalen Schwingungsmodells M³Rail.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Auf Basis des vom Bundesministeriums für Bildung und Forschung (bmb+f) initiierten Projektnetzwerks „Auf dem Weg zur Minimalemission“ haben sich 1999 vier Projektpartner zum Forschungsprojekt LERM – Low Emission Railway System – zusammengeschlossen:

- IASP – Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt Universität zu Berlin (PP IASP),
- ISE – Abteilung Eisenbahnwesen, Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen, Universität Karlsruhe, Prof. Hohnacker (PP ISE),
- Stadtwerke München GmbH (PP SWM) und
- Bauunternehmung Leonhard Weiss GmbH & Co. (PP LW).

Die vorliegende Zusammensetzung der Forschungspartner bildete eine einmalige Voraussetzung, um die Ergebnisse wissenschaftlicher Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung mit dem auf Produkt- und Verfahrensentwicklung ausgerichteten Industriepartner sowie dem Betreiber von schienengebundenen Fahrwegen des ÖPNV in die Praxis umzusetzen.

2.1 Problemstellung

Dem Schienenverkehr als Teil des öffentlichen Verkehrs kam und kommt heute noch eine hohe Bedeutung für eine nachhaltige Verkehrsentwicklung zu. Im Rahmen eines OECD-Projektes sehen zum Beispiel deutsche Fallstudien eine starke Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) auf die öffentlichen Transportmittel vor, um die für die Stabilisierung des Klimas erforderliche CO₂-Emission um 80 % von 1999 bis 2030 in den Industrieländern zu erreichen. Angesichts der heute schon gegebenen hohen Verkehrsbelastungen durch den Schienenverkehr erscheint eine solche Verlagerung allerdings nur akzeptabel, wenn die Geräuschemissionen des Schienenverkehrs (Fahrzeug und -weg) deutlich vermindert werden.

Straßenbahnen im Straßenraum sind bei gleicher Verkehrsleistung zirka 3 dB(A) lauter als PKW und nur unter Berücksichtigung des gesetzlich festgelegten Schienenbonus ergibt sich eine positive Bilanz für den Schienenverkehr. Auf der anderen Seite werden jedoch noch längst nicht alle Potenziale zur Minimierung der Geräuschemission im Schienenverkehr genutzt.

Ursache der Geräuschemissionen ist unter anderem die Zugüberfahrt. Sie regt Schiene, Rad und Wagenkasten zu Schwingungen (z.B. Biegeschwingungen der Schiene) an. Falls sich diese Schwingungen in einem festen Körper ausbreiten, spricht man von 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.

Von besonderem Interesse ist die Frage welche Frequenzen f_n in dem Schalleignis einer Zugüberfahrt enthalten sind und wie groß die Schallpegel bei diesen Frequenzen sind. 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. Die Schienenfahrbahn hat einen großen Einfluß auf die Frequenz und Amplitude des abgestrahlten Luftschalls und der ins Erdreich eingeleiteten Körperschallwellen. Verschiedene Oberbauarten unterscheiden sich durch ihre unterschiedliche Anregbarkeit zu Schwingungen, die am Rad-Schiene Kontaktpunkt wirksamen Anregungskräfte sowie ihre Luft- und Körperschallemissionseigenschaften.

2.2 Profil der Forschungspartner

- PP IASP Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität Berlin

Das Wissenschaftlerteam des Instituts für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität Berlin unter der Leitung von Dr. Henze setzt sich aus Naturwissenschaftlern, Landschaftsplanern, Wirtschaftswissenschaftlern, Agrar- und Wirtschaftsingenieuren, Verkehrs- und Patentingenieuren, Juristen und Technikern zusammen. Sie arbeiten satzungsgemäß und entsprechend des Hochschulrahmengesetzes als An-Institut an der Überführung wissenschaftlicher Erkenntnisse in die Praxis. Der rechtliche Träger des An-Institutes ist der Verein zur Förderung agrar- und stadtökologischer Projekte e. V. Insbesondere arbeitet das IASP an der Entwicklung und am Innovationstransfer spezieller integrativer Produkt- und Verfahrenslösungen zur vegetativen Behandlung von Bauwerksflächen. Neben Dächern, Fassaden, Mauern und Lärmschutzbauten befaßt sich das Institut insbesondere mit Gleiskörpern, Böschungen sowie ausgewählten Verkehrs- und Verkehrs-

begleitflächen mit standortangepaßter pflegearmer bis pflegeloser Vegetation im Rahmen einer stadt- und siedlungsökologisch relevanten Bauwerksgroßflächennaturierung bis zur Anwendungsreife.

In den letzten Jahren war das Institut für die Vielzahl von acht Pilotvorhaben im Bereich der vegetativen Behandlung von unterschiedlichen Gleisoberbauformen federführend.

- PP ISE Abteilung Eisenbahnwesen des Instituts für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Prof. Hohnecker

Die Abteilung Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe setzt sich aus einem interfakultativen Team (Bauingenieurwesen, Maschinenbau, Physik, Informatik, Ökonomie) unter der Leitung von Prof. Hohnecker zusammen. Sie hat sich u. a. intensiv mit der Physik der Rad-Schiene-Wechselwirkung beschäftigt. Hier stehen verschiedene Simulationsmodelle (u. a. für die nichtlineare Dynamik der Bewegung eines Eisenbahnradsatzes auf geradem Gleis im niederfrequenten Bereich) zur Verfügung.

- PP LW Bauunternehmung Leonhard Weiss GmbH & Co.

Die Bauunternehmung Leonhard Weiss GmbH & Co. ist als mittelständisches Unternehmen seit 98 Jahren national und international im Gleisbau engagiert und für innovative Eigenentwicklungen in allen Bausparten bekannt. War bis Mitte der 80er Jahre der Schotteroberbau (SchO) Stand der Technik, ist es heutzutage zunehmend die Feste Fahrbahn (FF). Neben der Weiterentwicklung des SchO betreibt sie intensiv die Entwicklung von FF-Systemen mit diskreter und kontinuierlicher Lagerung.

Die Entwicklung der Oberbauform FF mit kontinuierlicher Lagerung für den Nahverkehr setzt auf die Akzeptanz eines attraktiven wirtschaftlichen und umweltschonenden Konzepts bei Betreibern, Nutzern und Anliegern.

- PP SWM Stadtwerke München GmbH

Die Stadtwerke München GmbH – Unternehmensbereich Verkehr ist als Betreiber eines Straßenbahnnetzes von 71 km Streckenlänge mit dem Problem des beim Betrieb von Straßenbahnen auftretenden Lärms vertraut. Das Gleisnetz, welches verschiedenste Oberbauformen aufweist, bietet ideale Voraussetzungen für die Durchführung des Forschungsvorhabens.

Die Projektstruktur ist in Abbildung A-1 graphisch verdeutlicht.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

3.1 Arbeitsaufteilung

Zur Sicherung eines straffen und effizienten Projektablaufes wurden die Arbeitsschwerpunkte zwischen den Projektpartnern aufgeteilt wie in Tabelle 1 ersichtlich.

Die auf der Basis modell- und meßwertgestützter Analysen erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse sollten top-down in die Praxis (Pilotvorhaben) implementiert, validiert und evaluiert werden, um von dort bottom-up als Grundlage zur Absicherung der Datengrundlagen für das integrative ökologisch-ökonomisch optimierte Prognosemodell zur Fahrweggestaltung genutzt zu werden.

Das Projektteam wurde von Prof. Hohnecker (ISE) wissenschaftlich geführt.

Das IASP war mit seinem rechtlichen Träger juristisch für das wissenschaftliche Teilprojekt verantwortlich und war diesbezüglicher Vertragspartner des Fördermittelgebers, es administrierte das Projekt und war für die Überführung der Ergebnisse aus der Grundlagenforschung in anwendungsorientierte Forschung verantwortlich.

Der Projektleiter des Industrieforschungspartners Leonhard Weiss GmbH & Co. war Dipl.-Ing. C. Wolf von der Bauunternehmung Leonhard Weiss GmbH & Co. Er war für die Implementierung der anwendungsorientierten Forschungsergebnisse im Rahmen der Produkt- und Verfahrensentwicklung verantwortlich, koordinierte die Zusammenarbeit und die Bauprozesse verantwortlich und koordinierte die Zusammenarbeit des PP LW für das Pilotvorhaben mit dem Betreiber PP SWM.

Die Stadtwerke München GmbH testete als Verkehrsbetrieb die Produkt- und Verfahrensentwicklungen im Rahmen der Pilot- und Versuchsstrecke unter Betriebsbedingungen. Die Industriepartner waren jeweils Vertragspartner des Fördermittelgebers.

3.2 Koordination des Forschungsteams

Innerhalb der ersten sechs Monate erfolgten monatliche Arbeitsseminare, die darauf folgend mit etwa sechswöchigem Abstand weitergeführt wurden. Neben unmittelbaren Treffen wurden Seminare und Statustreffen durchgeführt. Die Arbeitsseminare dienten der Vorstellung der Teilergebnisse, ihrer Diskussion und Bewertung mit dem Ziel eines Konsenses und der strategischen Besprechung der nächsten gemeinsamen Teilziele.

Tabelle 1: Zuteilung der Arbeitsschwerpunkte

Arbeitsschwerpunkt / Aufgabe	SWM	ISE	IASP	LW
Erstellung eines prognostizierenden analytischen Verfahrens zur Erfassung und Abschätzung möglicher relevanter fördernder bzw. reduzierender Elemente der Schallabstrahlung innerhalb des Systemverbundes Rad/Schiene	I	S	M	I
Erstellung eines modularen mathematischen Modells zur ständig reproduzierbaren Ermittlung der Schallabstrahlung eines schienengebundenen Fahrwegs		S	M	I
Stadt- und siedlungsnahe Emissionsminderung des schienengebundenen Verkehrs durch ökologisch-ökonomisch optimierte Fahrweggestaltung auf der Basis von Gleisbettnaturierungen (vegetativen Absorbieren)	M	I	S	M
Erarbeitung des integrativen Prognose-Modells ANIRAIL (animatives Visualisierungsmodul Schiene) zur ökologisch-ökonomisch optimierten Fahrweggestaltung	M	I	S	M
Weiterentwicklung von Bau- und Instandhaltungsverfahren von FF-Systemen	M	I	I	S
Emissionsminimierter Fahrweg: FF – Betontragplattenkonzept – System „eingegossene Schiene“ – Optimierung Schienenbefestigung – naturiertes Gleis	M	I	M	S
Praxiserprobung, Bau einer Teststrecke	S	S	S	S
Entwicklung von Kundenzufriedenheitskonzepten	S		M	I
Öffentlichkeitsarbeit und Ergebnisverbreitung	S	S	S	S

S	Schwerpunktthema, wird federführend bearbeitet
M	Mitarbeit
I	informeller Austausch

Ein gemeinsames Projekt Netzwerk wurde während der Laufzeit des Vorhabens aufgebaut und diente der regelmäßigen gegenseitigen Information und Kommunikation sowie der Archivierung und dem schnellen Zugriff auf die gemeinsam erarbeiteten Texte.

Die vier Projektpartner des Forschungsteams hatten unterschiedliche disziplinäre Perspektiven auf das gemeinsame Forschungsziel. Die wissenschaftliche Verknüpfung und Zusammenarbeit der Projektpartner wurde von Prof. Hohnecker, dem Leiter der Abteilung Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, geleitet und unter rechtlicher Verantwortung des IASP administrativ koordiniert.

Ziel der arbeitsteiligen Zusammenarbeit war einerseits die Verbesserung der disziplinären Ergebnisse durch gegenseitige methodische Synergien und zum anderen die gemeinsame Formulierung von Zwischenergebnissen im Konsens.

Der Methoden- und Ergebnistransfer zwischen den einzelnen Teilprojekten wurde durch die etwa gleichzeitige Bearbeitung der vier Teilprojekte ermöglicht. Die Teilschritte wurden jeweils durch Projekttreffen methodisch und strategisch im Forschungsteam eingeleitet, mit einer Teilergebnisvorstellung und Schwachstellenanalyse fortgeführt und einem Gespräch über die gemeinsamen Ergebnisse beendet. Auf diese Weise war die gemeinsame Abfolge von Teilschritten sichergestellt.

Zwischen den Arbeitsseminaren stellte die Kommunikation innerhalb der Projektpartner die gegenseitige Information der Teilprojekte im Projektnetz und die gemeinsame Außendarstellung im Internetz und in Printmedien sicher und koordinierte die Zusammenarbeit mit den wirtschaftlichen Partnern der Forschergruppe.

3.3 Projekttreffen und Öffentlichkeitsarbeit

Für die Projektdurchführung wurden zur internen Information der Projektpartner und Abstimmung anfallender, das Gesamtprojekt betreffender Fragestellungen, regelmäßig Projekttreffen mit der Teilnahme der industriellen Projektpartner PP LW und PP SWM sowie der Universitätsinstitute PP IASP und PP ISE durchgeführt:

21.12.1999 in München,
18.01.2000 in Berlin,
21.03.2000 in München,
06.06.2000 in Karlsruhe,
12.09.2000 in Berlin,
14.11.2000 in München,
30.01.2001 in München,
24.04.2001 in Karlsruhe,
26.06.2001 in München,
25.09.2001 in Berlin,
12.03.2002 in München,
11.06.2002 in München,
12.12.2002 in München,
23.09.2003 in Karlsruhe.

Zusätzlich zum internen Informationsaustausch zwischen den Projektpartnern wurde der Projektträger regelmäßig durch Zwischenberichte über den aktuellen Projektstand und den Projektfortschritt informiert.

Die Aufgabenverteilung im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit wurde schrittweise entsprechend des Projektfortschritts bearbeitet. Ergebnisse hiervon waren mehrere Newsletter, verschiedene Veröffentlichungen – vor allem durch die wissenschaftlichen Projektpartner – in Fachzeitschriften, ein Symposium unter Federführung des Projektpartners Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin (PP IASP) sowie Fernseh- und Messeauftritte.

Kapitel 9 listet die Veröffentlichungen im Zusammenhang mit dem Projekt auf.

3.4 Verlauf aus Sicht der wissenschaftlichen Institute

In der Anfangsphase des Projektes war erwartungsgemäß überdurchschnittlich viel Zeit für Planung, Beschaffungen, Einarbeitung, Öffentlichkeitsarbeit und für die Abstimmung der Projektpartner (Protokollwesen) benötigt worden.

Der Arbeitsplan des PP ISE konnte nur unter Hinzuziehung sämtlicher Planmitarbeiter der Abteilung Eisenbahnwesen (5 Personen) in den wesentlichen Punkten eingehalten werden. Zwei Arbeitspakete mußten dort neu in das Arbeitspaket „Rad-Schiene-Rollkontakt“ eingepaßt werden.

Zur Absicherung der Arbeiten des IASP wurde ein Zusatzpaket ins Arbeitsprogramm aufgenommen: Nach endgültiger Absage des Baus der Lerchenfeldstraße

wurde ein INFUNDO®-Gleismodell in der Versuchsstation des IASP aufgebaut und mit den für München vorgesehenen Naturierungsaufbauten versehen.

Auch die entwickelte Mustergleisometerstation wurde an diesem Modell installiert. Leider konnte diese Musteranlage durch das Fehlen der Straßenbahnvorbei- und -überfahrten nicht ausreichend praxisgerecht geprüft werden. Damit fehlten für die Prognosemodelle ANIRAIL und M³Rail wichtige reale Parameter (z.B. Vegetationsentwicklung und Praxisbedingungen).

Bei den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen war der Arbeitsstand hinsichtlich der Erfassung der Lebenszykluskosten bei den ausgewählten Gleisoberbauformen insgesamt, insbesondere aber in den Bereichen Instandsetzung, Pflege und Wartung sowie Rückbau einschließlich Recycling noch unbefriedigend. Die Kosten für die Gleisbettnaturierung wurden weitgehend erfaßt.

3.5 Auswahl Teststrecke

Für die Anwendung des Testoberbaus wurde durch die Stadtwerke München GmbH zu Beginn des Forschungsprojektes LERM im Jahr 1999 in Abstimmung mit den beteiligten Projektpartnern eine Testabschnitt in der Lerchenfeldstraße nahe des Englischen Gartens ausgewählt. Die Bauausführung dieses Streckenabschnittes war entsprechend dem Bauprogramm der Stadtwerke München GmbH für das Kalenderjahr 2001 vorgesehen.

Ziel war, das vorgesehene Gleis im Rahmen der Testanwendung in allen vorkommenden Konfigurationen testen zu können: Bahnkörper als besonderem Bahnkörper (mit Naturierungssystem) oder straßenbündiger Bahnkörper jeweils

- ohne seitliche Bebauung,
- mit vorhandener Bebauung (einseitig) oder
- mit vorhandener Bebauung (zweiseitig).

Die Auswahl der Teststrecke ließ aus Sicht des damals gültigen Projektzeitplans ausreichend Zeit sowohl für die bauvorbereitende Planung als auch die anstehenden Zulassungsverfahren erwarten.

Aufgrund der Eigenschaften der Strecke (Lage im Bogen, Abstand zu vorhandenen Grünflächen, ungünstige Beschattung des Planums durch vorhandenen Bewuchs etc.) wurde die ursprüngliche Auswahl (u. a. auf Anraten durch das um eine Stellungnahme gebetene Landesamt für Umweltschutz (LfU)) fallen gelassen. Da jedoch im Kalenderjahr 2001 keine weitere Gleisbaumaßnahme mit Gleiserneuerung oder Neubau als Ausweichstrecke mit den gewünschten Eigenschaften verfügbar war, mußte u. a. aus diesem Grunde die bauliche Ausführung der Teststrecke vom Kalenderjahr 2001 auf das Kalenderjahr 2002 verschoben werden.

Als weiterer Grund für eine Verschiebung von 2001 auf 2002 hatte sich zudem die Abarbeitung der verschiedenen Schritte der Zulassung der neuen Bauart ergeben, worauf im Abschnitt Bauartgenehmigung (6.5.6) eingegangen wird.

Als Teststrecke wurde in München ein Abschnitt der Agnes–Bernauer–Straße zwischen Fröbelplatz und Fürstenrieder Straße gewählt. Dieser Abschnitt zeichnet sich durch dichte Bebauung mit unterschiedlichen Bauwerkskörpern aus.

3.6 Messungen

Am 24.04.2002 hat PP ISE am FF-Versuchsabschnitt der DB AG in Waghäusel vergleichende Luftschallmessungen durchgeführt. An der zweigleisigen Strecke wurden die Oberbauarten FF „INFUNDO®“ und SchO verglichen.

Mit Kamera und Mikrophon wurden insgesamt mehr als 25 Zugvorbeifahrten aufgezeichnet, so daß ein differenzierter Vergleich zwischen Personen- und Güterzügen, Oberbauarten und Mikrophonpositionen (Höhe über Grund und Entfernung zum Gleis) möglich ist.

Am 7.05.2002 hat PP ISE am Straßenbahnnetz des PP SWM in München Luftschallmessungen durchgeführt. Es wurden folgende Standorte gewählt:

- Agnes–Bernauer–Straße, SchO; siehe Abbildung A 10
- Siglstraße, Oberbau System Eisenmann
- Westendstraße, Oberbau INFUNDO®

Abbildung A-10 zeigt die Agnes–Bernauer–Straße vor dem Umbau mit dem Meßpunkt für die Luftschallmessungen des PP ISE.

Mit Kamera und Mikrophon wurden mehr als 30 Zugvorbeifahrten aufgezeichnet, so daß ein differenzierter Vergleich zwischen den Oberbauarten möglich ist.

Am 18.09.2002 hat PP ISE am Straßenbahnnetz der Stuttgarter Straßenbahn AG (SSB) Luft- und Körperschallmessungen durchgeführt. Es wurden folgende Standorte gewählt: Schmidener Straße (FF) und Plieningen (SchO)

Schmidener Straße, Oberbau FF Die hier eingebaute Variante der Oberbauart INFUNDO® ist zur Verringerung der Luftschallabstrahlung insofern optimiert als die schallreflektierende schallharte Oberfläche gegenüber vorhergehenden Varianten verringert wurde. Dazu wurden die Betontragwangen an den jeweiligen Außenseiten in einem Winkel von 45 Grad abgeschrägt und von 19,1 auf 10,0 cm verjüngt. Dadurch konnte die Rasenfläche vergrößert und die Betonfläche verkleinert werden, was auch optisch Vorteile bringt.

Abbildung A-11 zeigt den Meßort Stuttgart Schmidener Straße; diese Strecke ist seit Juni 2002 mit der Oberbauart INFUNDO® mit Raseneindeckung in Betrieb. Auf der einen Seite der Strecke befindet sich eine Straße, gesäumt von Bebauung. 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.

Die Luftschallmessungen wurden nach DIN 45637 im Abstand von 7,5 m von der Gleisachse und in einer Höhe von 1,20 m über Schienenoberkante ausgeführt. Das Mikrophon wurde auf der straßen- und bebauungsabgewandten Seite platziert. Die Messungen wurden direkt vor Ort ausgewertet. Zusätzlich wurden die Daten, zusammen mit einem 93,8-dB-und-1000-Hz-Referenzton, auf DAT gespeichert.

Zwei triaxiale Meßaufnehmer wurden nahe am Gleis positioniert. Aus dem Lichtraumprofil der Straßenbahnen ergab sich ein Mindestabstand von 70 cm zum nächstgelegenen Gleis. Die Aufnehmer befanden sich dort 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.

Abbildung A-12 zeigt vergleichend die Meßergebnisse SchO (Plieningen) und FF (INFUNDO®, Stuttgart Schmidener Straße) sowohl für den Luftschall als für den Körperschall.

Am 31.10.2002 hat PP ISE am Straßenbahnnetz des PP SWM in München Luftschallmessungen durchgeführt. Es wurde der Standort Agnes-Bernauer-Straße (Oberbau: FF, Typ INFUNDO®) gewählt. Um eine möglichst zuverlässige Vergleichbarkeit zu den Messungen vom Mai zu gewährleisten, wurde dieselbe Meßausrüstung benutzt. Zusätzlich wurde auch mit einem kalibrierten Mikrophon gemessen, und die Daten wurden vor Ort direkt mit einem Frequenzanalysator ausgewertet und mit einem DAT-Rekorder aufgezeichnet.

3.7 Grundlegende Untersuchungen im Bereich Gleisbettnaturierung

Wesentlicher Projektbestandteil war, Naturierungssysteme für das Gleisbett zu entwickeln, die eine schnelle und nachhaltige Vegetationsansiedelung gewährleisten, die pflegearm sind, sich für den Einsatz in modernen Oberbauformen eignen und gleichzeitig durch ihre Gestaltung zu einer Emissionsminderung führen. Ausgehend von der Minimierung der Immissionspotentiale und der Kostenreduzierung bestehender Vegetationssysteme beschränkte sich die Entwicklung des Naturierungssystems für Gleisbettungen auf dünnsschichtige Vegetationssysteme mit ex-

tensivem Charakter. Diese zeichnen sich vor allem durch einfache technische Systemaufbauten und insbesondere durch geringe Aufwendungen für Pflegemaßnahmen aus.

In Auswertung der im Rahmen dieses Projektes vorgenommenen vegetations-technischen Untersuchungen zu unterschiedlichen Naturierungsverfahren wurde ein innovatives substratbasiertes Naturierungssystem mit Sprossenaßansaat auf einem Extensivspezialsubstrat für das Gleisbett entwickelt. Dabei wurden Festlegungen für die Naßansaatmasse, für den technischen Systemaufbau, für den Sedumeinsatz und für agrotechnisch günstige Termine der Ausführung einer hydraulischen Ansaat getroffen. Unter den festgelegten optimierten Parametern konnte in Freilandversuchen im Zeitraum von sieben Monaten ein abnahmefähiger Zustand der Vegetation (60% Bedeckung) erreicht werden. Damit ermöglicht dieses neu entwickelte innovative Gleisbettnaturierungssystem auf der Basis einer optimierten Naßansaat erstmalig

- eine kostengünstige extensive Naturierung von Gleisbettungen, die sich insbesondere durch ihre Trockenstreßtoleranz, Anspruchslosigkeit hinsichtlich Pflege und Robustheit auszeichnet,
- eine schnelle und nachhaltige Pflanzenentwicklung auf extrem dünnschichtigem Substrat.

Alternative Versuche auf der Basis von Festsubstraten wurden wegen geringer Erfolgsaussichten abgebrochen.

Die positiven Ergebnisse aus Freilandversuchen und Vegetationsuntersuchungen in Berliner Betriebsgleisen in den Jahren 2001 und 2002 konnten in der Münchener Teststrecke unter den extrem schwierigen Witterungsbedingungen im Jahre 2003 nicht mit gleichem Erfolg wiederholt werden. Vor allem ist es nicht vollflächig gelungen, den projektiven Deckungsgrad innerhalb einer Vegetationsperiode zu erreichen. Dem kann mit einer weiteren Optimierung der artlichen Zusammensetzung der Pflanzengesellschaft entgegengewirkt werden.

Dennoch kann davon ausgegangen werden, daß im Rahmen des Forschungsprojektes ein Naturierungsverfahren entwickelt und erprobt wurde, das aus wissenschaftlicher Sicht bereits eine weitgehende Praxisreife erreicht hat. Abbildung A-13 zeigt hierzu ein Foto der Agnes-Bernauer-Straße mit dem Stand der Naturierung vom Juni 2003 in den am günstigsten entwickelten Bereichen.

Darüberhinaus wurde hinsichtlich der Akzeptanz der Gleisbettnaturierung als Bestandteil des Stadtgrüns in der Teststrecke in der Agnes-Bernauer-Straße in München erkannt, daß sich das Querungsverhalten der Passanten nach Einbau eines Vegetationssystems, welches nicht innerhalb kurzer Zeit bereits erkennbare

Wachstumsfortschritte zeigt, wesentlich verändert.

Die neu entstehenden Grünflächen werden in Gegenüberstellung zum Schottergleis unter anderem aufgrund der nun plan gestalteten Oberfläche massiv für die Abkürzung von Fußwegen genutzt. Dies kann, wie im vorliegenden Fall, zu erheblichen Trittschäden führen.

Das Naturierungssystem wurde speziell für den Einsatz in der modernen Oberbauform INFUNDO® entwickelt, ist aber auch für den Einbau in beliebige Bauformen von FF-Systemen geeignet. Gleichzeitig öffnet dieses innovative System mit seiner extrem dünn-schichtigen Bauweise den Weg für weiterführende über das Projekt hinausgehende Optimierungspotentiale für die Gestaltung des INFUNDO®-Oberbaues selbst, die zu einer spürbaren Verringerung der Höhe des Gesamtsystems und weiterer Vereinfachung des Naturierungsaufbaus führen können.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen zur Emissionsminderung durch Gleisbett-naturierungen stand die Untersuchung des Luftschallminderungspotentials „grüner Gleise“. Im Hallraum wurde der Luftschallabsorptionsgrad unterschiedlicher Bauweisen von Naturierungssystemen untersucht und in Gegenüberstellung zum traditionellen Schottergleis bewertet. Die Ergebnisse wurden durch Messungen in Betriebsgleisen mit unterschiedlichen Oberbauweisen untersetzt. Die Ergebnisse haben einen hohen Neuheitswert. Sie wurden umgehend veröffentlicht und sind auch dem Bundesumweltamt für seine Arbeit bei der Neufassung des Normenwerkes „Schall 03“ vorgestellt worden.

Die Auswirkungen eines Naturierungssystems im Gleisbett auf die Minderung der Emissionsbelastung in Innenstadträumen mit hoher Verkehrsdichte wurden in Langzeitversuchen mit einer sogenannten „Gleisometerstation“ erfaßt. Mittels dieser Gleisometerstationen wurden an unterschiedlichen Standorten zeit- und flächenbezogenen Meßwerte ermittelt, die Aufschluß über qualitative und quantitative stadttökologische Effekte von Gleisbettnaturierungen geben.

Insbesondere wurde der Einfluß von Gleisbettnaturierungen auf das Regenwassermanagement untersucht. Der Abflußbeiwert (Regenwasserrückhaltevermögen in Relation zu den Niederschlagsmengen) sowie die Abflußverzögerung bei Starkregen wurden ermittelt. Die Meßdaten wurden den in den jeweiligen Straßenschluchten ermittelten Daten zur Evapotranspiration gegenübergestellt und daraus modellhafte Vorstellungen zu mesoklimatischen Effekten in straßenräumlichen Dimensionen abgeleitet. An Hand der Schadstoffbelastungen des aus dem System abfließenden Regenwassers wurde die Wirksamkeit des Naturierungssystems als Schadstoffsенke in der Straßenschlucht qualitativ und quantitativ nachgewiesen.

Mit diesen Untersuchungen wurde die allgemeine Feststellung, daß naturierte Gleise zu einer Emissionsminderung im Stadtraum beitragen, erstmalig durch meßtechnische Untersuchungen in Betriebsgleisen des öffentlichen Nahverkehrs untermauert. Die Meßdaten sind Grundvoraussetzung für eine Quantifizierbarkeit

der Emissionsminderung bei großflächigen Gleisbettnaturierungen.

Durch die ökologisch-ökonomisch optimierte Fahrweggestaltung des schienen- gebundenen Nahverkehrs mit Hilfe von technischen Vegetationssystemen werden Emissionsminderungen erreicht, die sich u. a. in einer Reduzierung der Lärm- und Staubbelastung, in der Wasser- und Schadstoffrückhaltung und allgemein in einer Verbesserung der klimatischen Situation im betroffenen Straßenraum ausdrücken.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Beim innerstädtischen Schienenverkehr kommt es zur Anregung niederfrequenter Schwingungen, die in Anliegergebäude übertragen werden können (Körperschall) oder als starke, vertikal fokussierte Wellenfronten vor und hinter dem Schienenfahrzeug als Bug- und Heckwellen (Luftschall) die Umwelt als Lärm belasten. Unrundheiten der Räder (Abbildung A-2) führen darüber hinaus zum Dröhnen des Wagenkastens, zur Zerrüttung des Oberbaues, zur Lockerung der Schienenbefestigungselemente und zu Überbeanspruchung und Schädigung der Fahrwerksbauteile.

Mit zunehmender Sensibilisierung der Bevölkerung und steigenden Ansprüchen an den Umweltschutz kommt auch der Lärminderung bei Schienenbahnen erhöhte Bedeutung zu. Das Rad-Schiene-System erlebt weltweit einen regelrechten Boom. Der Individualverkehr mit seinen erheblichen Umweltbelastungen stößt in den Ballungsräumen und Großstädten an seine Grenzen. Allein in Deutschland planen die Städte den Neubau von 250 km Stadtbahnstrecken und schätzen den Erneuerungsbedarf auf 170 km jährlich bis zum Jahr 2005.

International besteht ein enormer Nachholbedarf im Bereich wirtschaftlicher, umweltgerechter Fahrwegtechnik, der einige 10er Potenzen über dem von Deutschland und Europa liegt. Beide Komponenten des Rad-Schiene-Systems wirken dabei zusammen, wobei nicht eindeutig geklärt ist, auf welche von ihnen der überwiegende Anteil entfällt.

Auch die Zusammenhänge zwischen konstruktiven Maßnahmen am Fahrzeug oder am Gleis und ihren akustischen Auswirkungen sind sehr komplex. Bei der Suche nach lärmindernden Maßnahmen müssen deshalb Wissenschaft und Praxis in enger Wechselwirkung stehen.

4.1 Grundlagenforschung

Aus Sicht der Grundlagenforschung wurden Verbesserungen der Modellierung der Kurzzeitdynamik des Rad-Schiene-Systems im Hinblick auf die Auswirkungen auf den Fahrkomfort und das Langzeitverhalten des Oberbaus angestrebt, indem das nichtlineare Gesamtsystem mit allen relevanten Elementen bis hin zu den Reflexionen durch den Untergrund beschrieben wird. Dabei sollten nicht nur die Vertikaldynamik, sondern alle drei Raumdimensionen erfaßt werden. Hier kann nur ein von Anfang an nichtlinear konzipiertes Modell die Dynamik realistisch abbilden.

4.2 anwendungsorientierte Forschung (Vegetationskontrolle)

Die anwendungsorientierte Forschung im Bereich von Vegetation auf schienengebundenen Fahrwegen befaßte sich bisher schwerpunktmäßig mit Fragen der Vegetationskontrolle unter dem Gesichtspunkt der Minimierung von mechanischen, thermischen und chemischen Entkrautungsmaßnahmen.

Integrierte Vegetationskontrolle wurde forschungsseitig vom Freiburger Institut für Ökologie mit der DB AG und UIC betrieben. Andere Forschungen, die sich mit dem Thema Vegetation auf Gleiskörpern befaßten, stammten aus den deskriptiven Wissenschaften mit dem Ziel der Florenbestimmung auf Gleiskörpern wie z. B. GILBERT 1989, SARGENT 1984, MCNAB und PRICE 1985, WITTIG 1993. Forschungen zu Rasengleisen wurden insbesondere von BETTE 1990 unter dem Blickwinkel der Streustrom-Korrosionsproblematik durchgeführt.

Der vom IASP seit 1994 forcierte integrative Forschung und Entwicklungsansatz veränderte die bisherigen Forschungsziele. Bestand bisher in der Vegetationsfreiheit von Gleisanlagen das Ziel, lag nunmehr die Zielsetzung darin, die Fähigkeit technischer Naturierungssysteme mit Wuchshöhen < 15 cm (Gleisbettnaturierung) zu nutzen, um unerwünschte Fremdvegetation > 15 cm im Gleiskörper zu autoselektieren (HENZE, KRAMER, SIEMSEN und RUDOLF 1995-98).

4.3 Gleisbettnaturierung – Innovation und Stand der Technik

Aus der jüngeren Technikgeschichte sind die Systeme GROSSE-WILDE (DE-OS 3936067), ORTWEIN und GEIS (DE-OS 4029519) sowie FRENZEL (DE-PS 3930498) beim Patentamt registriert. Aus Gründen mangelnder gleisbautechnischer und wirtschaftlicher Durchdringung konnten sich letztgenannte Systeme am Markt nicht durchsetzen. Mit den Patenten des IASP zur Naturierung von schienengebundenen Verkehrswegen von 1995 und 1996 wurde der Weg gegangen, gleisbau-, elektro- und vegetationstechnische sowie Probleme der Betreiber integrierende Lösungen auf der Basis von dünn-schichtigen technischen Vegetationssystemen zu schaffen, die als Berliner-Systeme den neuesten Stand der Technikgeschichte einnehmen.

Gleisbettnaturierung ist die vegetative Auf- und Einbringung von hochporigen Naturierungssystemen in den Gleisoberbau und dessen horizontalen und vertikalen Begleitflächen für Geschwindigkeitsbereiche bis 160 km/h, die vom allgemeinen Fahrzeugverkehr abgetrennt sind.

Es werden Pflanzen auf hochporigen Substraten eingesetzt, die den extremen Anforderungen dieses Standortes gewachsen sind, die einen hohen Bedeckungs-

grad bei geringer Wuchshöhe erreichen und nach einer Fertigstellungs- und Entwicklungspflege keinen weiteren Aufwand in Form von Bewässerung, Düngung und Schnitt erfordern (extremophile Xerophyten). Die Naturierung erfolgt im Gegensatz zu Rasengleisen mit pflegeärmsten standortangepaßten flachwurzelnden niedrigwüchsigen xeromorphen (sich gegen Austrocknung schützenden), sukkulenten (wasserspeichernden) Pflanzenarten aus den Pflanzenfamilien der Dickblatt- und Steinbrechgewächse (Crassulaceae/Saxifragaceae) sowie Moosen (mit durchschnittlich <15 cm Wuchshöhe).

Wesentlich für die Weiterentwicklung und Internationalisierung der bestehenden Gleisbettnaturierungen war nunmehr die ökologisch-wirtschaftliche Optimierung der Gleisoberbauformen beim Gleisunterbau beginnend unter dem Gesichtspunkt der integrativen Emissionsminderung. Hier bestand ein beträchtlicher Fehlbedarf, der nur über forcierte wirtschaftsorientierte Forschung auf allen Ebenen, die Gegenstand des Antrages waren, geschlossen werden sollte.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine Mitarbeit nachstehender Firmen und Institutionen wurde wie vorgesehen umgesetzt. Die dafür notwendigen Arbeits- und Abstimmungsgespräche wurden durchgeführt.

national

- BVG – Berliner Verkehrsgesellschaft
- DB AG – Deutsche Bahn AG
- EBA – Eisenbahnbundesamt
- SSB AG – Stuttgarter Straßenbahnen AG
- UBA – Umwelt Bundesamt
- VDV – Verband deutscher Verkehrsunternehmen

international

- Danske Tekniske Universitet DTU – Dänemark
- Grøner AS – Norwegen
- Kungliga Tekniska högskolan KTH – Schweden
- Forskningsinstitut SINTEF – Norwegen

6 Erzielte Ergebnisse

Aus Platzgründen haben die wissenschaftlichen Projektpartner ihre Ergebnisse in jeweils eigenen Abschlußberichten ausführlich dargestellt. Der folgende Text gibt einen Überblick über die Ergebnisse.

6.1 Grundlagenforschung Gesamtmodellierung

Aus wissenschaftlicher Sicht konnten bis zum Ende des Verlängerungszeitraums die Ziele im wesentlichen erreicht werden. Einige Arbeitspakete sind durch neuere Erkenntnisse umfangreicher geworden. Dadurch konnten jedoch erhebliche Fortschritte im Bereich der Grundlagen- und angewandten Forschung auch hinsichtlich der Reproduzierbarkeit erreicht werden. Dies war bereits im 2. Meilensteinbericht dargestellt worden. Beispielhaft werden durch das verbesserte Rad-Schiene-Kontakt-Modul die Ergebnisse deutlich präziser, da Verriffelung und unrunde Räder besser erfaßt werden.

Es steht nun ein dreidimensionales Berechnungsmodell M^3 Rail für die Fahrzeug-Rad/Schiene-Fahrweg-Dynamik zur Verfügung, das bereits im Vorfeld bei Planung und Konstruktion von Eisenbahnstrecken mit Hilfe einer mathematisch-physikalischen Modellanalyse für den schwingungs- und lebensdaueroptimierten Fahrweg Hilfestellung leisten kann.

Die Entwicklung des Rechenmodells ist insoweit abgeschlossen als damit Schritte auf dem Weg zur erschütterungs- und schalloptimierten Bauart einer FF vorliegen, welche die schienenverkehrsbedingten Immissionen in Luft und Gebäuden zunächst im Straßenbahnbetrieb und Nahverkehr deutlich reduzieren.

Ein Verfahren für eine schwingungsreduzierte, stadtklima- und ressourcenschonende Naturierung des Gleises liegt vor.

Das dreidimensionale Berechnungsmodell der Fahrzeug-Rad/Schiene-Fahrweg-Dynamik leistet bereits im Vorfeld bei Planung und Konstruktion von Eisenbahnstrecken mit Hilfe einer mathematisch-physikalischen Modellanalyse für den schwingungs- und lebensdaueroptimierten Fahrweg Hilfestellung. Das Rechenmodell hebt sich in seinem folgendem Oberziel von früheren Modellen ab:

- modulares dreidimensionales nichtlineares Gesamtmodell

Das Ziel *Prognosemodell erstellen* wurde erreicht. Das entwickelte Simulationstool M^3 Rail ist

- individuell anwendbar,
- modular,

- drei-dimensional,
- nichtlinear,
- ein Gesamtmodell,
- und als Rechenmodell auf einer Standard-Hardware- und Software-Plattform (PC unter Linux) lauffähig.

M³Rail enthält ein Modul für die Dynamik von Mehr-Körper-Systemen (MKS). Starre Körper, verschiedene Federn und Dämpferelemente können kombiniert werden. Das Programm leistet die automatische Erstellung der Bewegungsgleichungen aufgrund einer Systembeschreibung. Der Aufbau ist modular, die Schachtelung einzelner MKS-Systeme ist möglich. M³Rail arbeitet drei-dimensional und rechnet nichtlinear.

Das Ziel *Verbesserung der Kurzzeitdynamik hinsichtlich Auswirkungen auf Fahrkomfort und Langzeitverhalten des Oberbaus* wurde voll erreicht durch M³Rail. Mehrere Diplomarbeiten zum Thema wurden vergeben. Ein Modul Rad-Schiene-Rollkontakt wurde erstellt.

Im Rahmen der Gesamtmodellierung konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Eine Programmierumgebung mit aktueller Dokumentation wurde bereitgestellt.
- 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.
- Ein Handbuch (für interne Zwecke) zum erreichten Stand von M³Rail wurde erstellt und bis zum Projektende aktuell gehalten.

Die Dokumentation zur Software M³Rail wurde in Abständen aktualisiert. 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 M^3 Rail entstanden.
- Erstellung und Implementierung eines MKS-Programms, mit der Drehgestelle berechnet wurden.
- Beispielberechnungen zum bisher erreichten Stand.
- Formulierung generischer MKS-Elemente in einem eigenen MKS-Programm. Systeme, die aus starren Körpern und elastischen Federn aufgebaut sind, können berechnet werden.
- Formulierung generischer MKS-Elemente in einem MKS-Modul. Systeme, die aus starren Körpern, elastischen Federn und Dämpferelementen aufgebaut sind, können damit berechnet werden. Einige Tests wurden durchgeführt.

Das MKS-Modul dient der numerischen Integration gekoppelter Differentialgleichungen zweiter Ordnung, wie sie typisch für Systeme starrer, durch Feder-Dämpfer-Elemente verbundener Körper sind. Kennzeichnend für das Modul 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 Modul eigenständig anhand der zugrundeliegenden physikalischen Gesetze. Da schon bei relativ kleinen, unkomplizierten Systemen die beschreibenden Gleichungen recht umfangreich werden bzw. deren Herleitung unübersichtlich und daher fehleranfällig ist, bedeutet die Entlastung des Benutzers von dieser Aufgabe, daß mit dem Modul auch umfangreiche MKS-Probleme modelliert und untersucht werden können. Aufgrund der verwendeten Klassenstruktur läßt das Modul auch

die Modellierung von Systemen zu, die aus mehreren untereinander gekoppelten MKS bestehen.

Es werden folgende Funktionsgruppen unterschieden:

1. Modellbeschreibung der MKS-Komponenten
 2. Modellbeschreibung des MKS-Systems
 3. Integrationsalgorithmen
 4. Koordinaten
 5. Ablaufsteuerung
 6. Hilfsfunktionen
- Radsatz und Fahrzeug lassen sich mit M³Rail als MKS 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 zurückgegriffen.
 - Für die MKS-Systeme gibt es eine Visualisierung.

6.2 Grundlegende Untersuchungen im Bereich Gleisbettnaturierung

Die wichtigsten Ergebnisse und Schlußfolgerungen sind:

1. Vegetationssysteme im Gleisbett und die Vegetation selbst haben nachweislich einen beachtlichen Schallabsorptionsgrad, der entsprechend der Bauweise des Gesamtsystems und der Ausgestaltung der Elemente des Naturierungssystems in unterschiedlichem Maße ausgeschöpft wird. Dabei beeinflusst der Zustand der Vegetation selbst (Deckungsgrad, Bestandsdichte, Wuchshöhe) unmittelbar das Schallabsorptionsvermögen des Naturierungssystems. Der nachhaltigen Entwicklung eines stabilen Vegetationsbestandes mit hoher Bestandsdichte ist deshalb stets die erforderliche Aufmerksamkeit zu schenken. Wasserhaushalt und Nährstoffvorrat der Vegetationstragschichten sind darauf auszurichten. Mit der Entwicklung eines an die Bedingungen im Gleisbett angepaßten Naturierungssystems wurden hierfür die Voraussetzungen geschaffen.

Im Hallraum wurde für das extrem dünn-schichtige Naturierungssystem (Substratbauhöhe: 45 mm, Höhe der Vegetation: < 100 mm,) ein Schallabsorptionsgrad frequenzabhängig bis über 0,9 gemessen (Abbildung A-14). Damit wird der Schallabsorptionsgrad des Schottergleises in wesentlichen Frequenzbereichen übertroffen. Es wurde nachgewiesen, daß mit dem Einbau dünn-schichtiger Vegetationssysteme in FF-Oberbauformen deren schalltechnische Nachteile weitgehend eliminiert werden können.

Hinsichtlich ihrer Bauweise wurde aus schalltechnischen Untersuchungen in Betriebsgleisen abgeleitet, daß „hochliegende“ Naturierungssysteme die günstigsten Schallabsorptionsgrade aufweisen. Die Einhausung der Schallquelle „Schiene“ und der erhöhte Anteil schallabsorbierender „grüner Oberflächen“ am Trassenquerschnitt im Vergleich zu den schallharten „technischen Oberflächen“ verbessert das Schallminderungspotential am wirksamsten.

Dem wird das INFUNDO®-System in komplexer Weise gerecht. Dabei ist dem Naturierungsverfahren Sprossenaßansaat auf Spezialsubstrat wegen seiner Robustheit und Strapazierfähigkeit der Vorzug zu geben.

Die schallabsorbierenden/-reflektierenden Oberflächeneigenschaften des Gesamtsystems in unmittelbarer Schienennähe haben maßgeblichen Einfluß auf die Ausschöpfung des Schallminderungspotentials von Naturierungssystemen. Mit dem FuE-Ergebnis zu INFUNDO® liegt eine gleisbautechnische Lösung vor, die diese Erkenntnis umsetzt. Es wurde ein innovatives Gleisprofil abgeleitet, bei dem die schallharte Oberfläche gegenüber dem Ausgangssystem um 25 % reduziert wurde. Mit dem neu entwickelten INFUNDO®-Profil wird eine weitere Schallabsorption nicht nur durch das hochliegende Naturierungssystem, sondern auch durch die technische Veränderung des Gleisquerschnittes selbst erreicht. Diese FuE-Ergebnisse wurden erstmalig in der Gleisbettnaturierung in der Münchener Agnes-Bernauer-Straße umgesetzt.

Die vor Ablauf der Projektlaufzeit durchgeführten Luftschallpegelmessungen widerspiegeln noch nicht das maximal mögliche Luftschallminderungspotential. Das Optimum wird erst mit dem vollen Deckungsgrad und der partiellen Besiedelung der Betonflächen durch Sedum erreicht.

2. Durch die Realisierung von Bauwerks-Naturierungen kann ein nachhaltiger Einfluß auf das Regenwassermanagement ausgeübt werden. In diesem Kontext stellt das Gleisbett eine bedeutsame, aber bisher unbeachtete stadtökologische Ressource dar. Naturierungssysteme sind in der Lage, durch eine Wasserrückhaltung im System eine Minderung des Regenwasserabflusses

ses und der Schadstoffeinträge ins Kanalisationssystem zu erreichen. Auch bei den extrem dünn-schichtigen Gleisbettnaturierungssystemen bleiben 50% der Jahresniederschlagsmenge im Naturierungssystem gebunden und gelangen nicht in die Kanalisation. Neben der dadurch erreichten Entlastung der Kanalisation werden die von Verkehrsbetrieben zu zahlenden Regenwasserreinleitungsgebühren deutlich reduziert werden.

Wesentlich ist die stadtoökologische Bedeutung von Gleisbettnaturierungssystemen in den Sommermonaten. Das wurde sowohl in einem extrem trockenen als auch in einem extrem feuchten Sommer nachgewiesen. Dabei ist die Höhe der Regenwasserrückhaltung durch das Naturierungssystem generell insbesondere vom Vorsättigungsgrad des Vegetationssystems mit Wasser abhängig. Es wurde nachgewiesen, daß die Zeit bis zum Abflußbeginn, die Abflußdauer und die maximalen Abflußspitzen sich nach der Intensität des Niederschlagsereignisses und dem Vorsättigungsgrad des Naturierungssystems richten. Je geringer der Vorsättigungsgrad ist, desto größer ist das Speichervermögen und der damit im Zusammenhang stehende Einfluß auf die Abflußverzögerung.

Besondere Bedeutung für das Regenwassermanagement hat die Wirkungsweise von Gleisbettnaturierungen bei Starkniederschlagsereignissen. Eine hohe Intensität des Niederschlages bzw. langandauernder starker Regen führen zu einer enormen Überlastung der Kanalisation und der Vorfluter. Damit gelangen in kurzer Zeit große Wassermassen in die Vorfluter. Naturierungssysteme im Gleisbett können diese negativen Vorgänge wesentlich dämpfen. Neben der Abflußverzögerung erfolgt das Abfließen dieses Niederschlagswassers mit einer wesentlich geringeren Intensität als von einer nicht naturierten Fläche. Die Abflußdauer wird verlängert. Diese durch eine Naturierung verursachten Wirkungen führen zu einer wesentlich gleichmäßigeren Belastung der Kanalisation auf geringem Niveau (Abbildung A-15). Die Belastung der Kanalisation durch Niederschlagsspitzen mit ihren kurzzeitig in großen Mengen anfallenden Wassermengen kann damit durch großflächige Naturierungen reduziert werden. Ausgeprägt sind diese Wirkungen eines Naturierungssystems insbesondere während der Vegetationsperiode. In der Winterperiode insbesondere bei Frost und Schnee ist die Wasserrückhaltung von untergeordneter Bedeutung.

Je nach Niederschlagsintensität und –menge wurden in den Sommermonaten bis zu 91% der Regenwassermenge im Naturierungssystem gebunden. Dieses zurückbehaltene Regenwasser entlastet die Kanalisation erheblich und bewirkt bei Verdunstung dieser Mengen (etwa 120 l/m² allein in der Sommerperiode) eine Verbesserung des Stadtklimas durch die Anhebung der

Luftfeuchte sowie durch die Verdunstungskühlung in straßenräumlichen Dimensionen. Dies führt in durch Schienenverkehr belasteten Straßenzügen zu einer spürbaren stadtoökologischen Aufwertung.

3. Vegetationssysteme sind in der Lage, den mit der Luft mitgeführten Staub, der oft durch eine hohe Schadstoffkonzentration gekennzeichnet ist, auszukämmen und im Vegetationssystem zu deponieren. Im Gleisbett verstärkt die Oberflächenstruktur der Pflanzendecke und die durch die Blattmasse um ein Vielfaches erhöhte Kontaktfläche die Wirkung als Schadstoffsенke. Dieser Effekt tritt insbesondere bei einem hohen Deckungsgrad der Vegetation auf. Gleichzeitig verhindert eine dichte Pflanzendecke verstärkt das Aufwirbeln des Staubes durch Straßenbahnüberfahrten bzw. durch Windeinwirkung und vermindert somit Sekundäremissionen.

Vegetationssysteme sind gleichzeitig dazu in der Lage, die ausgekämmten Schadstoffe zumindest temporär zu deponieren. Damit stellt das Vegetationssystem insgesamt eine bedeutende Schadstoffsенke dar. Die Vegetation nimmt in der Vegetationsperiode die einzelnen Schadstoffe unterschiedlich auf und bindet sie mit einer unterschiedlichen Intensität in der Pflanze oder auf deren Oberfläche bzw. im Vegetationssystem. Insbesondere Moosen kommt eine hohe Bedeutung bei der Schadstoffrückhaltung zu. Die Schadstoffrückhaltung ist dabei an die Vegetationsperiode gebunden. Während der Vegetationsruhe werden die Schadstoffe durch den Rückgang der Blattmasse mit anschließender Mineralisierung wieder freigesetzt.

Im Winterhalbjahr werden die einzelnen Schadstoffe wieder unterschiedlich intensiv ausgewaschen. Festgestellt wurde, daß sich einige Schadstoffe im Vegetationssystem über die Jahre anreichern können, wie z. B. Kupfer und Blei. Eine Fixierung erfolgt dabei v. a. durch die Moose.

Trotz höherer Schadstoffbelastung des Eluats in den Wintermonaten ist nach bisherigen Erkenntnissen kurzfristig keine akute Gefährdung des Untergrundes und insbesondere des Grundwassers durch Schadstoffe zu erwarten. Es kann jedoch keine Aussage zur Langzeitwirkung des Vegetationssystems im Gleisbett als Schadstofffilter getroffen werden. Es ist davon auszugehen, daß längerfristig eine Schadstoffanreicherung im Vegetationssystem erfolgen wird.

Die Schadstoffbelastung des Abfließwassers in den Wintermonaten macht deutlich, daß die Pufferkapazität des extrem dünn-schichtigen Vegetationssystems für Schadstoffe nicht ausreichend ist. Die aus vegetationstechnischer Sicht bedingte Dimensionierung der Vegetationstragschicht bietet keine Möglichkeit, die Speicherkapazität des Systems für Schadstoffe zu er-

höhen. Daraus ergibt sich die Schlußfolgerung, das Naturierungssystem mit einem in Modulbauweise zu gestaltenden Schadstoffspeicher zu ergänzen, dessen Speicherkapazität den Lebenszyklus-Zeiträumen von Gleisbettungen angepaßt ist.

Mit den Ergebnissen des Forschungsprojektes wurde erstmalig der Nachweis erbracht, daß Gleisbettnaturierungen wichtige stadtklimatische und ökologische Effekte bewirken, deren Auswirkungen für die Stadt mit wachsendem Anteil „grüner“ Gleise immer deutlicher zum Tragen kommen. Gleisbettnaturierungen sollten insbesondere dort installiert werden, wo die stadtklimatischen Probleme am größten sind und der Erfolg der positiven Veränderungen am deutlichsten ist. Das betrifft insbesondere die dichtbesiedelten, hochversiegelten Innenstadträume mit hoher Verkehrsdichte.

Die ökonomische Bewertung der Vielzahl von positiven Effekten einer Gleisbettnaturierung wie die Verringerung der Lärmbelastung für den Menschen, der positive Einfluß auf das Mesoklima in der betreffenden Straßenschlucht, die Verminderung der Schadstoffbelastung des abfließenden Wassers, eine Senkung der Staubbelastung der Luft, der Einfluß auf die Regenwasserrückhaltung und nicht zuletzt die ästhetische Aufwertung des Straßenraumes als Wohn- und Arbeitsumfeld kann nicht in einer monetären Kennziffer zusammen gefaßt werden. Hierfür gibt es keine ökonomischen Bewertungsmaßstäbe. Die Komplexität stadtoökologischer Effekte der Gleisbettnaturierung erfordert, daß Kommune und Verkehrsbetrieb die Verantwortung für das Thema gemeinsam wahrnehmen und deshalb Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen auch nicht allein aus der engen Sicht des Verkehrsbetriebes angestellt werden dürfen. Die mit einer Gleisbettnaturierung verbundenen Mehrkosten sollten im Interesse einer perspektivischen Erweiterung der Naturierungen auf Straßenbahngleisen nicht allein die Betreiber der Strecken belasten.

Auf Grund des Naturraumverlustes insbesondere in den hochverdichteten Stadtinnenbereichen und der fehlenden Möglichkeiten, diesen durch Ausgleichsmaßnahmen zu begegnen, stellt die Naturierung von Gleisbettungen oft die einzige Möglichkeit dar, größere Grünflächen mit ihren positiven Effekten auf das Stadtklima im Innenstadtbereich zu schaffen. Es ist in Zukunft zu erwarten, daß zunehmend restriktive Maßnahmen getroffen werden, um den Naturraumverlust einzuschränken. Damit kommt der Gleisbettnaturierung für eine nachhaltige Stadtentwicklung eine wachsende Bedeutung zu.

Von besonderer Bedeutung ist dabei, daß in urbanen Agglomerationen auf 2 km Doppelgleis alternativlos und ohne zusätzliche Erschließungskosten ein Hektar Grünfläche neu geschaffen werden kann.

Die Entscheidung, welcher Oberbauform bei Neubauten von Gleistrassen der Vorrang gegeben wird, ist von einer Vielzahl von Faktoren und standortbedingten

Anforderungen abhängig. FF-Systeme haben sich bewährt und ersetzen in zunehmenden Maße die preiswerteren Schottergleise. Sie sind qualitativ hochwertig und genügen modernsten Ansprüchen an einen Gleisoberbau wie hohe Lebensdauer, geringer Wartungsaufwand und Gewährleistung einer hohen Betriebssicherheit im Gleis. Gleichzeitig sind sie aber auch mit hohen Baukosten verbunden.

Einzusetzende Naturierungssysteme sind an die jeweilige Oberbauform anzupassen. Aus finanzieller Sicht sind die Baukosten von naturierten Gleisen sowohl von der Oberbauform, der Art des Naturierungssystems als auch davon abhängig, ob zur Freihaltung der Schienen von Vegetation Kammerfüllkörper eingesetzt werden müssen.

Innerhalb der betrachteten Oberbauformen zeichnet sich die Variante mit hydraulischer Ansaat auf Schüttsubstrat als die kostengünstigste aus. Geringfügig preiswerter hinsichtlich der Naturierungskosten ist jeweils nur das Rasengleis (zirka 10 Euro pro laufenden Meter Gleis). Auf Grund der hohen Kosten für Pflege, Wartung und Instandhaltung beim Rasengleis ist schon nach vier Jahren das Sedumgleis mit Anspritzung die kostengünstigste Variante.

Der Einsatz von vorkultivierten Vegetationsmatten sichert zwar eine sofortige „Begrünung“ des Gleisbettes ab, ist aber hinsichtlich der Baukosten als auch des Pflegeaufwandes kostenaufwendiger. Nicht in den Kosten berücksichtigt sind die bei Havarien/Störungen erheblich höheren Reparaturaufwendungen beim Naturierungssystem auf Basis von Vegetationsmatten.

Es wird erwartet, daß sich die Baukosten durch die Entwicklung des innovativen Naturierungssystems (innovative Oberbauform INFUNDO® und an diese optimal angepaßtes Vegetationssystem) minimieren lassen.

Alle meßtechnischen Ergebnisse zu den Auswirkungen eines Naturierungssystems auf die Verminderung der im hochversiegelten Innenstadtraum auftretenden Emissionsbelastung wurden in das Prognosemodell ANIRAIL aufgenommen. Auf verschiedenen Ebenen sind hier die wichtigsten Informationen zu einzelnen Naturierungsvarianten und Meßstandorten aufgenommen worden. Durch den Einbau von zusätzlichen Berechnungsmodellen können Simulationen stadtklimatischer Effekte, die mit der Gleisbettnaturierung verbunden sind, angestellt werden. Mit Hilfe des Modells ANIRAIL wird dargestellt, daß durch Gleisbettnaturierungen wesentliche Effekte wie z.B. Lärmemissionsminderungen, eine Verbesserung des urbanen Klimas in der engeren Umgebung des Naturierungssystems und eine alternative Regenwasserbewirtschaftung Stadtraum bezogen erreicht werden.

Mit dem Forschungsvorhaben wurden grundlegende wissenschaftliche Erkenntnisse, Zusammenhänge und Daten zur Emissionsminderung (Lärminderung, Schadstoffrückhaltung, Regenwasserrückhaltung) durch Maßnahmen der Gleisbettnaturierung gewonnen, die erstmals die ökologischen Wirkungen einer Naturierung im Gleisbett bewerten. Bei Umbau- und Neubaumaßnahmen von innerstädtischen Gleis-

bettungen können den Kommunen bzw. den Bahnbetreibern diese grundlegenden Erkenntnisse und Zusammenhänge zur Reduzierung von Emissionsbelastungen zur Verfügung gestellt werden, auf deren Basis die Entscheidungsfindung zu naturierten Gleisen unterstützt werden kann.

Es wurde der Nachweis erbracht, daß naturierte Gleisbettungen den wachsenden Ansprüchen an den Umweltschutz gerecht werden. Der insbesondere im Innenstadtbereich im Mittelpunkt stehenden Forderung nach Lärmreduzierung kann durch Gleisbettnaturierungssysteme entsprochen werden. Das Forschungsprojekt LERM leistet damit einen Beitrag, der voll den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms „Auf dem Weg zur Minimalemission“ des Fördergebietes Mobilität und Verkehr des BMBF entspricht.

6.3 Durchführung der Prüfstandsuntersuchungen

Das Prüfamnt für den Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München erhielt den Auftrag das Elastizitätsverhalten des für die Teststrecke gewählten Systems zu ermitteln und die Betriebssicherheit für den Einbau ins Betriebsnetz der SWM festzustellen.

6.4 Entwicklung einer kontinuierlichen elastischen Schienenlagerung für den Schienennahverkehr

Am Lehrstuhl und Prüfamnt für den Bau von Landverkehrswegen der TU München wurde die Eignung für Nahverkehrssysteme überprüft. Dazu wurden folgende Laborversuche durchgeführt:

- Scherenhebelschwingversuch
- Abhebeversuch
- Statisches und dynamisches Verformungsverhalten des Systems bei unterschiedlichen Temperaturen und Frequenzen
- Gestaltfestigkeit der Schiene SA42

Hierbei wurden folgende wesentlichen Ergebnisse gewonnen:

- Die mittlere statische Federziffer ergab sich zu 14,5 kN/mm (bezogen auf 650 mm), dabei wurde einer geringe Temperaturabhängigkeit festgestellt.
- Die dynamische Federziffer wurde wie folgt ermittelt:

Frequenz	Dyn. Federziffer (kN/mm) bezogen auf 400 mm	Dyn. Federziffer (kN/mm) bezogen auf 650 mm
1 Hz	13,6	22,1 (100 %)
10 Hz	15,2	24,7 (122 %)
20 Hz	15,4	25,0 (113 %)

- Der gemessene Durchschubwiderstand ergab sich zu 15,5 N/mm; somit liegt im Vergleich zum SchO bei 2 mm Verschiebung ein zirka 4,4-fach größerer Wert vor.
- Bei einer eingeleiteten Abhebekraft von 74 kN wurde der seitliche Verbund Vergußmasse/Beton auch bei 10 mm Abhebung nicht gelöst!

Abbildung A-5 zeigt den SA42-Probekörper unter dem Scherenhebelschwinger.

Obwohl es beim Probekörper unter Dauerschwingbelastung zu geringfügigen Verbundablösungen zwischen der Vergußmasse und dem Betonkanal kam, konnte die Tauglichkeit des neuen Oberbausystems festgestellt werden, da die Ablösungen keinerlei Auswirkungen auf die Prüfergebnisse hatten.

Im Prüfbericht TUM Nr. 1886 von LEYKAUF sind die hierbei erzielten Ergebnisse dokumentiert [10].

Die Entwicklung einer „hochelastischen“ Schienenbefestigung wurde abgeschlossen.

Am Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der TU München wurden umfangreiche Untersuchungen zum Nachweis der Betriebssicherheit der Lagerung durchgeführt (siehe Prüfbericht TUM Nr. 1848 [9]).

Im wesentlichen waren folgende Einzelfunktionen zu prüfen:

- Vertikale und horizontale Steifigkeit
- Betriebsfestigkeit der Schienenlagerung
- Dauerschwingversuch
- Künstliche Alterung
- Dynamisches Verhalten des Systems

Hierzu wurden mehrere Versuchsreihen u. a. mit dem Scherenhebelschwinger durchgeführt. Im Prüfbericht 1848 von LEYKAUF [9] und in der ergänzenden Stellungnahme[8] sind die hierbei erzielten Ergebnisse dokumentiert.

In der zusammenfassenden Beurteilung werden folgende Ergebnisse genannt:

- Die mittlere statische Federziffer ergab sich zu 9,3 kN/mm (bezogen auf 1000 mm)
- Die dynamische Federziffer wurde wie folgt ermittelt:

Frequenz	Dyn. Federziffer (kN/mm) bezogen auf 395 mm	Dyn. Federziffer (kN/mm) bezogen auf 1000 mm
1 Hz	5,92	15,0 (100 %)
10 Hz	6,40	16,2 (108 %)
20 Hz	6,60	16,7 (111 %)

- Der gemessene Durchschubwiderstand ergab sich zu 15,5 N/mm; somit liegt im Vergleich zum SchO bei 2 mm Verschiebung ein zirka 4,4-fach größerer Wert vor.
- Bei einer eingeleiteten Abhebekraft von 74 kN wurde der seitliche Verbund Verfußmasse/Beton auch bei 10 mm Abhebung nicht gelöst!

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- Eine Einfederung von 4,1 mm wurde schadlos aufgenommen.
- Die Schienenkopfauslenkung von ≤ 2 mm wurde eingehalten.
- Während des gesamten Dauerschwingversuches wurde kein Lösen des Verbundes zwischen Verfußmaterial und Schiene bzw. Tragwand festgestellt.
- Bei der künstlichen Alterung wurde ein leichter Anstieg der Steifigkeiten (24% statisch, 14% dynamisch) festgestellt

Neuartige Werkstoffe und Komponenten ermöglichen eine statische, vertikale Einfederung von 4,1 mm der Schiene S49. Durch hohe Dämpfungseigenschaften dieses Systems wird dabei eine weitere Reduktion der Vibrationen erreicht, die einem leichten Masse–Feder–System ähneln.

Abbildung A-6 zeigt das Detail der Schienenlagerung für das Schienenprofil S49.

6.5 Untersuchung und Realisierung eines optimalen Betontragplattenkonzepts

Das Betontragplattenkonzept wurde den Erfordernissen sowohl hinsichtlich des neuen Schienenprofils als auch einer weiteren Reduzierung der schallabstrahlenden Reflektionsfläche angepaßt. Dabei wurde die „schallharte Oberfläche“ um zirka 25 % reduziert (Oberbauquerschnitt siehe Abbildung A-9). Die statische Dimensionierung wurde durch das Ingenieurbüro Prof. Dr. ZILCH und Dr. MÜLLER, München, durchgeführt.

Abbildung A-8 zeigt eine Darstellung der Hauptzugspannungen aus einer FEM-Berechnung der Betontragplatte.

Mehrere Bauverfahren wurden hinsichtlich Ihrer Wirtschaftlichkeit, Bauzeit, Praxistauglichkeit und Qualitätserfordernissen untersucht und für den konkreten Einsatzfall bewertet.

6.5.1 Gleitschalungsfertiger

Gleitschalungsfertiger erfüllen drei Grundfunktionen, mit denen auf das Endprodukt, den profilgenauen Einbau des Betons, hingearbeitet wird. Dem Verteilen und Dosieren des Betons folgt die Verdichtung im Inneren des Gerätes. Selbstverständlich ist auch beim Einbau mit dem Gleitschalungsfertiger auf eine entsprechende Betonnachbehandlung zu achten, um Schwindrisse während der Aushärtung zu vermeiden.

Leitdrahtlose Nivelliersysteme erlauben es in jüngster Zeit, auf die anfälligen Leitseile zu verzichten, was zu erhöhter Sicherheit, erweitertem Einsatzspektrum und Kostenreduzierung führt. Gleitschalungsarbeiten, bei denen die leitdrahtlose Steuerung zum Einsatz kam, ergaben eine sehr gute Betonqualität innerhalb der erlaubten Toleranzen.

Tagesleistungen von 300 bis 400 m Gleis sind möglich und haben entsprechende Bauzeitverkürzungen zur Folge.

Abbildung A-7 zeigt einen Gleitschalungsfertiger beim Herstellen der Betontragplatte.

6.5.2 Ortbeton mit „konventioneller“ Schalung

Die Herstellung der Betontragplatte in Ortbeton mit konventioneller Systemschalung ist eine preiswerte Alternative zum Gleitschalungsfertiger. Dabei werden in

zwei Arbeitsschritten zunächst die Grundplatte und danach die Schienentröge hergestellt.

Die erforderliche Maßgenauigkeit der Schienentröge ist bei fachgerechter Ausführung kein Problem. Tagesleistungen von bis zu 100 m Gleis sind möglich.

6.5.3 Einsatz von Fertigteilen

Bei PAHNKE [12] werden die qualitativen Vorteile

- Hohe Herstellungsqualität und Maßhaltigkeit unter witterungsunabhängiger Produktion
- Exakte Positionierung der Schienenbefestigungen
- Stark mechanisierte Herstellung der FF und
- durch hohe Verlegegenauigkeit und Qualität geringe Dynamik, mit daraus folgender langer Lebensdauer

sowie die zeitlichen Vorteile

- Keine Verzögerung in der Bauzeit und bei der Instandsetzung durch Unabhängigkeit von Abbindezeiten
- Verlegbarkeit zu jeder Jahreszeit
- Übergabe der Strecke an den Betrieb wesentlich früher, als bei allen Ortbeton-Konstruktionen
- Dauerhafte Erhaltung der Gleislage
- Reparatur im Schadensfall ähnlich schnell wie beim Schottergleis

und die Vorteile bzgl. der Regulierbarkeit und Nachregulierbarkeit

- Feinregulierung der Gleislage mittels Lagekorrektur der FT
- Einfache Möglichkeit der Nachregulierung durch Hebung und Seitenverschiebung der FT
- Durch Befahrbarkeit des Gleises während des Bauzustandes kann die optimale Gleislage durch mechanisiertes Spindeln erzielt werden.

genannt. Tagesleistungen von bis zu 500 m Gleis sind möglich.

6.5.4 Aufbau eines Qualitätssicherungsmanagements

Ein umfassendes Qualitätsmanagement zur Sicherstellung der hohen Anforderungen an Dauerhaftigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Maßgenauigkeit, Praxistauglichkeit etc. wurde aufgestellt und dokumentiert.

Qualitätssicherungssysteme für die exakte Gleislage werden derzeit gefertigt und erprobt. Ein durchgängiges Reparatur- und Instandsetzungskonzept ist erarbeitet und dokumentiert.

6.5.5 Systemkonzeption

Im Rahmen der Entwicklung des bei der LERM-Teststrecke in München angewendeten Oberbaus wurde insbesondere durch den PP SWM, als Betreiber der Straßenbahninfrastruktur in der Landeshauptstadt München, Wert auf die sinnvolle und effiziente Kombination von bereits erprobten Bauteilen gelegt. Aus diesem Grunde wurde die bereits im Straßenbahnnetz der Stadtwerke München GmbH mehrfach angewendete Bauart INFUNDO[®] mit S41 als Grundlage für die Entwicklung des neuen Testoberbaus herangezogen.

Aufbauend auf den Erfahrungen mit dem vorgenannten Oberbausystem wurden folgende Anforderungen an die neue Konstruktion formuliert:

- Verringerung der Luftschallabstrahlung,
- Verringerung der Körperschallabstrahlung,
- Verringerung der Bauhöhe,
- Verbesserung der optischen Qualität,
- Verkleinerung der schallharten Oberfläche,
- Verringerung der Bau- und Betriebskosten,
- Verringerung der baubedingten Sperrzeit,
- Verringerung der systembedingten Anwendungseinschränkungen,

wobei die Reihenfolge der Nennung keine Wertung bezüglich der Priorisierung einzelner Ziele durch den PP SWM darstellt.

Basis für die Bewertung der einzelnen Teilergebnisse und Ausgangszustände sind dabei sowohl die betriebsinternen Erfahrungen der Stadtwerke München GmbH (baubedingte Sperrzeiten, Anwendungseinschränkungen, etc.) als auch bundesweit einheitlich zu beurteilende Merkmale und Forschungsergebnisse (Luftschall, Körperschall, etc.).

6.5.6 Bauartgenehmigung

Für die Anwendung der neuen Bauart im Straßenbahnnetz der Stadtwerke München GmbH waren bei der zuständigen Technischen Aufsichtsbehörde die für Bau und Abnahme nötigen Genehmigungsanträge zu stellen. Die hierfür erforderlichen Gutachten wurden im Auftrag des Projektpartners Leonhard Weiss GmbH & Co. (PP LW) bei dem dafür zugelassenen Lehrstuhl und Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der TU München durchgeführt. Die Versuche dienten dabei der Untersuchung von Einzelkomponenten als auch des Gesamtsystems im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit.

Das Versuchsprogramm,

- Ermittlung der statischen Federziffer (großer Prüfkörper),
- Scherenhebelschwingversuch (großer Prüfkörper),
- Durchschubversuch (großer Prüfkörper),
- Abhebeversuch (großer Prüfkörper),
- Ermittlung der statischen Federziffer bei Raumtemperatur, -10 °C und $+50\text{ °C}$ (kleiner Prüfkörper),
- Ermittlung der dynamischen Federziffer bei 1 Hz, 10 Hz und 20 Hz (kleiner Prüfkörper),

wurde dabei an zwei verschiedenen Prüfkörpern durchgeführt, einer davon in den vollen Dimensionen des späteren Gleiskörpers (großer Prüfkörper), ein zweiter nur aus einer kurzen vergossenen Einzelschiene bestehend (kleiner Prüfkörper).

Das Ergebnis der Laborversuche der TU München liegt als Bericht Nr. 1886 vom 25.04.2001, ergänzt durch eine zusätzliche Stellungnahme vom 11.06.2001 vor [9].

6.6 Realisierung der Teststrecke

Als Teststrecke wurde in München ein Abschnitt der Agnes–Bernauer–Straße zwischen Fröbelplatz und Fürstenrieder Straße gewählt. Dieser Abschnitt zeichnet sich durch dichte Bebauung mit unterschiedlichen Bauwerkskörpern aus. Geplant wurde ein besonderer Bahnkörper in Mittellage in Gleisausführung mit Naturierung.

Die Bauvorbereitungen der Teststrecke Agnes–Bernauer–Straße wurden durch einen kontinuierlich laufenden Abstimmungsprozeß mit verschiedenen städtischen

Referaten (u. a. Baureferat, Planungsreferat, Kreisverwaltungsreferat) und Gremien (u. a. Bezirksausschuß Stadtbezirk 25 Laim) vorangetrieben. Da zeitgleich zu den Gleiserneuerungsarbeiten (angrenzende Baulose 1 und 3 sowie der Testgleisabschnitt Los 2 selbst) umfangreiche Umbauten an den Haltestellen und den Lichtsignalanlagen stattfanden, um die Straßenbahnlinie 19 West mit der ÖPNV-Bevorrechtigung („Beschleunigung“) auszustatten, war gerade im Hinblick auf diese Vorhaben eine intensive Koordinierung der Planungen der PP SWM mit der Landeshauptstadt München nötig.

Für die Erstellung des Testgleises wurde vom PP SWM ein Generalunternehmer beauftragt, der intensiv mit PP LW zusammenarbeitete, um eine möglichst optimale Umsetzung der Projektziele zu erreichen. Für die Vereinbarungen zwischen der Stadtwerke München GmbH und dem Generalunternehmer ARGE LERM wird auf das Schreiben des PP SWM vom 17.06.2002 an den PT TÜV verwiesen, mit dem Bauvertrag als Anlage.

Mit Baubeginn 12.06.2002 wurde in dem Testgleisabschnitt die im Rahmen des Forschungsvorhabens LERM festgelegte Oberbauform INFUNDO® mit SA42 auf einem zirka 200 m langen Abschnitt in der Agnes-Bernauer-Straße in München eingebaut.

Der Rückbau der vorhandenen alten Gleisanlagen des als Teststrecke vorgesehenen Bauloses 2 wurde im Verbund mit dem Nachbarlos 1 durchgeführt, d. h. der Bauablauf wurde über die Gesamtlänge der beiden für einen Vergleich möglichen Baulose 1 und 2 nahezu gleichzeitig begonnen.

Als Teilschritte des Einbaus des Gleiskörpers seien hier u. a. genannt:

- Erstellung und Verdichtung Planum
- Aufbau und Ausrichten Seitenschalung Tragplatte
- Einbau und Ausrichten Bewehrung Tragplatte
- Betonieren der Tragplatte
- Einsetzen und Ausrichten Systemschalung Schienentröge
- Betonieren der Schienentröge
- Ausschalen
- Nachbearbeitung Betontragkörper
- Einkleben der Unterlegplatten in den Schienentrögen

- Auslegen und Verschweißen der Schienen
- Ausrichten der Schienen
- Vollverguß der Schienen
- Einbau des Grobplanums der Begrünung
- Einbau des Feinplanums der Begrünung
- Aufbringung Sedum-Begrünung im Spritzverfahren
- Abnahme durch die Technische Aufsichtsbehörde

Aufgrund der Ausnutzung des Betontragkörpers bis an dessen statische Grenzen war bei der Bauausführung auf die plangemäße Ausführung der Arbeiten mit Einhaltung der zulässigen Toleranzen zu achten. Der Bauablauf wurde daher durch den Auftraggeber PP SWM mit großer Aufmerksamkeit und hohem Personaleinsatz begleitet.

In der Zeit vom 10.06.2002 bis 12.09.2002 wurde von der ARGE LERM die Teststrecke in der Agnes–Bernauer–Straße fertiggestellt.

Zu Beginn des Vorhabens befand sich ein Schotter–Querschwellengleis mit Holzschwellen und R6-Schiene im Einsatz. Nach Rückbau des vorhandenen alten Gleiskörpers und Einbau der ungebundenen Tragschicht konnte mit der Herstellung des Betontragkörpers begonnen werden.

Die Bauausführung konnte trotz der aufgetretenen Detailprobleme (siehe hierzu Erfahrungen aus Bau und Betrieb) termingerecht am 12.09.2002 vollendet werden.

Eine kommentierte Bilddokumentation des Arbeitsfortschritts findet sich in Anhang B dieses Dokuments.

6.7 Meßergebnisse

Zur Beweissicherung und zur Beurteilung des Emissionsminderungspotenzials des neuartigen Fahrwegs wurden an zwei gegenüberliegenden Gebäuden in der Agnes–Bernauer–Straße die Immissionen der Erschütterungen und des Luftschalls vor und nach dem Umbau der Teststrecke gemessen.

Mit der Durchführung der Beweissicherungs- und der Schall- und Erschütterungsmessungen nach Umbau der Teststrecke wurde das Ingenieurbüro MÖHLER+PARTNER (München) beauftragt. Der vollständige Meßbericht ist als Bericht Nr. 800-1113-B erschienen [11].

6.7.1 Beweissicherungsmessungen

Die Tabellen 2 und 3 zeigen die Ergebnisse der Messungen an den einzelnen Meßpunkten in den beiden Gebäuden.

Erschütterungen

Die Beurteilung der Erschütterungsimmissionen erfolgt nach DIN 4150, Teil 2, Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkung auf Menschen in Gebäuden. Die Anforderungen der Norm gelten als erfüllt, wenn ein unterer Anhaltswert für KB_{Fmax} im Beurteilungszeitraum für ein allgemeines Wohngebiet in Wohnungen nicht überschritten wird:

Tag	(6.00 – 22.00 Uhr)	von	$KB_{Fmax} = 0,225$
Nacht	(22.00 – 6.00 Uhr)	von	$KB_{Fmax} = 0,15$

Diese Werte gelten für oberirdische Schienenwege des ÖPNV.

Zur weiteren Abschätzung der Situation wird gem. DIN 4150, Teil 2 als weiteres Beurteilungskriterium die Beurteilungs-Schwingstärke KB_{FTr} gebildet. In allgemeinen Wohngebieten soll dieser Wert

$$KB_{FTr}(\text{Tag}) = 0,105$$

im Zeitraum Tag und

$$KB_{FTr}(\text{Nacht}) = 0,075$$

im Zeitraum Nacht nicht überschreiten.

Luftschall

In Tabelle 3 sind die Mittelungspegel vor beiden Gebäuden Agnes–Bernauer–Str. 65 bzw. 74a in einem Abstand von 2 m von der Fassade dargestellt.

Tabelle 2: oben: gemessene KB_{Fmax} -Werte und KB_{FT_r} -Werte im Gebäude Agnes–Bernauer–Straße 65. unten: entsprechende Werte im Gebäude Agnes–Bernauer–Str. 74a

	Gleis 1			Gleis 2		
	P-Wagen	R2-Wagen	R3-Wagen	P-Wagen	R2-Wagen	R3-Wagen
Kellergeschoß						
KB_{Fmax}	0,20	0,08	0,08	0,06	0,09	0,06
KB_{FT_r} tags /nachts	0,02 / 0,01					
Erdgeschoß						
KB_{Fmax}	0,04	0,10	0,08	0,05	0,10	0,05
KB_{FT_r} tags /nachts	0,02 / 0,01					
1. Obergeschoß						
KB_{Fmax}	0,24	0,18	0,13	0,20	0,12	0,17
KB_{FT_r} tags /nachts	0,04 / 0,03					

	Gleis 1			Gleis 2		
	P-Wagen	R2-Wagen	R3-Wagen	P-Wagen	R2-Wagen	R3-Wagen
Kellergeschoß						
KB_{Fmax}	0,03	0,06	0,05	0,04	0,05	0,06
KB_{FT_r} tags /nachts	0,01 / 0,01					
Erdgeschoß						
KB_{Fmax}	0,11	0,12	0,10	0,16	0,10	0,12
KB_{FT_r} tags /nachts	0,03 / 0,02					
1. Obergeschoß						
KB_{Fmax}	0,06	0,13	0,06	0,08	0,05	0,08
KB_{FT_r} tags /nachts	0,02 / 0,01					

Tabelle 3: Meßergebnisse der Schallmessungen Agnes-Bernauer-Str. 65 bzw.74a

Meßpunkt	Mittelungspegel L_{Aeq} [dB(A)]	
	06 – 22 Uhr	22 – 06 Uhr
Immissionspunkt A-B-Str. 65	57,2	53,9
Immissionspunkt A-B-Str. 74a	57,4	54,1

6.7.2 Körperschallmessungen PP ISE

Da an allen drei INFUNDO®-Teststrecken (Oslo, Stuttgart, München) das Hauptmaximum des emittierten Körperschalls bei ca. 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 eine INFUNDO®-Oberbau spezifische Eigenschaft handelt. Wir halten als Ergebnis der Körperschallmessungen fest:

Die Oberbauart INFUNDO® besitzt bei ca. $f(\text{Infundo}) = 63 \text{ Hz}$ eine System-Eigenfrequenz.

Die Körperschallmessungen ergaben, daß beim INFUNDO®-System im Frequenzbereich um ca. 30 Hz ein lokales Maximum existiert. Die vertikalen Schwingungsschnellen 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 Schwingungsschnellen 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 jedoch auf ein zugrundeliegendes Maximum hindeutet. 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.

Neben den Maxima bei 30 und 63 Hz konnte an allen drei Standorten bei ca. 12 Hz ein weiteres lokales Maximum nachgewiesen werden. Die Schwingungsschnellen 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 ca. 10 Hz liegen, sollte die Körperschallemission des Fahrwegs in diesen Frequenzbereich möglichst gering sein.

Der Vergleich des Systems INFUNDO® mit den jeweiligen Referenzfahrbahnen (System Oslo, SchO-Stuttgart, Standard Feste Fahrbahn München) zeigt in allen Fällen, daß die INFUNDO®-Fahrbahn weniger Körperschall in die Umgebung emittiert. Die Körperschallpegelreduktionen liegen zwischen 0 und 20 dB_v. Die größten Pegelreduktionen durch das System INFUNDO® ergeben sich oberhalb dessen Eigenfrequenz $f(\text{Infundo}) = 63 \text{ Hz}$ im Bereich zwischen 100 Hz und 300 Hz.

Für Frequenzen oberhalb von 300 Hz liegen nur für Oslo Meßergebnisse (bis 1000 Hz) als Rohdaten vor.

6.7.3 Luftschallmessungen PP ISE

Luftschallmessungen wurden von der Abteilung Eisenbahnwesen an den INFUNDO[®]-Teststrecken in Waghäusel, München und Stuttgart durchgeführt. 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 + Videokamera bzw. hochempfindliches kalibriertes Mikro + DAT-Rekorder, verwendet.

Die Auswertung der Luftschalldruckspektren zeigt an allen drei Meßorten, daß die Luftschallemission der Oberbauart INFUNDO[®] zwischen 400 Hz und 1200 Hz ein absolutes Maximum besitzt. Das Maximum liegt bei ca. $f(\text{Infundo}) = 600$ Hz.

Abbildung A-16 zeigt den Vergleich der gemessenen Luftschalldruckpegel an der umgebauten Teststrecke in München, Agnes-Bernauer-Straße.

Die Messungen aus Stuttgart zeigen das gleiche charakteristische Spektrum, nämlich eine Spitze bei etwa 500 Hz und reduzierte Emissionspegel im Bereich hoher Frequenzen [54].

Abbildung A-17 zeigt beispielhaft einen Vergleich der Luftschalldruckpegel zweier Güterzüge auf Fester Fahrbahn bzw. Schotteroberbau, aufgenommen an der Teststrecke bei Waghäusel.

Die vergleichenden Messungen an SchO und ERS ergaben, daß die Pegelwerte des INFUNDO[®] Systems im Bereich um $f(\text{Infundo}) = 600$ Hz um ca. 5-10 dB oberhalb denen des SchO liegen. Andererseits zeigen die Messungen, dass sie 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 ca. 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.

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 und Einbettung der Schiene zu einer geringeren Schwingungsanregung des Fahrzeug-Fahrweg-Systems führt und damit verbunden zu einer Reduktion der Schallabstrahlung von hochfrequenten Radschwingungen führt. Da das menschliche Gehör seine größte Empfindlichkeit im Bereich zwischen 2000-6000 Hz hat wird die Schallemission des ERS INFUNDO[®] subjektiv als weniger störend empfunden als

die vom SchO, obwohl der Gesamtschalldruckpegel des ERS über dem des SchO liegt.

6.8 Erfahrungen aus Bau und Betrieb der Teststrecke

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

Durch die von der ARGE LERM gewählte Fertigungstechnik war die vom Auftraggeber Stadtwerke München GmbH gewünschte – und aus Sicherheitsgründen uneingeschränkt benötigte – Fertigungsgenauigkeit des Betontragkörpers zunächst nicht befriedigend. Die Anfangsschwierigkeiten zu Beginn der Bauausführung (Einbau und Ausrichtung Bewehrung, Betonverdichtung etc.) wurden mit fortschreitendem Bauverlauf behoben.

Wegen der als filigran einzustufenden Abmessungen des Schienentroges gestaltete sich das Einbringen und Verdichten des Betons als sehr diffizil. Die Betonierleistung war sehr gering, so daß die Vorhaltung einer ausreichend weichen und über die gesamte Verarbeitungszeit einheitlichen Konsistenz (aufwendigere Baustellenlogistik der BII-Baustelle der Teststrecke im Vergleich zur als Standard anzusehenden Oberbauform aus dem Baulos 1) aufwendig war. Mit dem Abbinden des Betons verschlechterte sich dessen Verdichtbarkeit, d.h. Betoniermängel in Form von Hohlräumen oder nicht ausreichend verdichteten Stellen sind die Folge. Der durch die ARGE LERM gewählte Bauablauf ist als empfindlich gegenüber klimatischen Einflüssen anzusehen.

Messungen der Spurweite bei der Abnahme, kurz nach der Inbetriebnahme, sowie zirka ein Jahr nach der Inbetriebnahme haben bisher keine Abweichungen von der Sollage erkennen lassen. Aufgrund der auch bei den schon erwähnten anderen Streckenabschnitten nur geringen Liegedauer von derzeit 5 bis 6 Jahren (Einbau 1997 und 1998) kann dabei naturgemäß noch nicht von Langzeiterfahrungen gesprochen werden. Die Bauart INFUNDO® mit S41 ist bisher noch nirgendwo in der Realität an die Grenze der Lebensdauer angekommen.

Aufgrund des spärlichen Wachstumsfortschrittes der Sedum-Begrünung war die ursprünglich für das 3. Quartal 2002 geplante Nachher-Messung nach Einbau der neuen Oberbauform für einen Vorher-Nachher-Vergleich erst Ende des 2. Quartals 2003 und nicht unter optimalen Bedingungen möglich.

6.8.1 Baukosten

Voraussetzung der Teilnahme der Stadtwerke München GmbH am Forschungsprojekt LERM war eine Kopplung der für die Bauausführung zu entrichtenden Vergütung an die Ergebnisse der Ausschreibung eines angrenzenden Bauleses gleicher Eigenschaft (Referenzlos 1). Da diese Kosten aufgrund der vertraglichen Bedingungen nicht darzustellen sind, kann über diese Ergebnisse keine Aussage getroffen werden.

6.8.2 Betriebskosten

Ebenso wie die Baukosten sind die Betriebskosten nicht darstellbar. Während die Baukosten durch die vertragliche Koppelung mit den Auftragnehmern nicht detailliert quantifizierbar sind, können u. a. aufgrund der kurzen Zeit seit der Inbetriebnahme der Oberbauform INFUNDO® mit SA42 auch über die realen Betriebskosten noch keine Angaben gemacht werden.

Der Pflegeaufwand des als Begrünung angewendeten Sedum-Bewuchses wird durch den Projektpartner PP IASP als minimal oder vernachlässigbar dargestellt. Im Fall von Schäden sind ggf. Ausbesserungen oder Ersatzmaßnahmen fällig, die in eine ganzheitliche Betrachtung der anfallenden Kosten einfließen müßten.

Diese sog. Life-Cycle-Kosten, die neben den Baukosten auch die durchschnittlich anfallenden Betriebskosten berücksichtigen, können erst nach entsprechenden Langzeiterfahrungen ermittelt und dargestellt werden.

6.9 Systemeigenschaften

Entsprechend der bereits zuvor gemachten Erfahrungen mit der Bauart INFUNDO® mit S41 wurde sowohl der Betontraggkörper als auch die Schiene einer Verkleinerung im Sinne der Gewichtsersparnis und damit Kostenreduktion unterzogen. Betrachtet man die dem System INFUNDO® mit SA42 anhaftenden besonderen Eigenschaften, läßt sich aus Sicht der Stadtwerke München GmbH derzeit die Anwendbarkeit dieser Oberbauform unter baulichen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten differenziert beurteilen:

- Im Vergleich zur Eisenbahn, wo die Bauart INFUNDO® mit SA42 schon einmal versuchsweise auf einer Eisenbahnstrecke in den Niederlanden zum Einsatz gekommen ist, zeichnet sich das Netz eines Straßenbahnbetriebes durch einen hohen Prozentsatz von in engen Bögen liegenden Strecken- und Gleisabschnitten ab. Die aufgrund der Laborversuche und Stellungnahme der TU München gemachten Einschränkungen grenzen die Anwendung der Oberbauform INFUNDO® mit SA42 entsprechend ein.

- Radien von unter 500 m Radius, wie sie auch als Grundlage für das Versuchsprogramm verwendet wurden, lassen nur sehr wenige Streckenabschnitte überhaupt zur Anwendung kommen. Durch Bereiche, die aufgrund von Steigungs- oder Gefälleabschnitten eine Kuppenausrundung besitzen (was ebenso als kritisch angesehen wurde), wird der mögliche Anwendungsbereich weiter verkleinert. Ein übriges ergibt sich durch die punktuellen Unterbrechungen der nur auf lange, freie Abschnitte auf besonderem Bahnkörper ausgerichteten Bauart durch Weichen oder Überfahrtsbereiche.
- Wendeschleifen mit geringen Radien bis hinunter zu 20 m sind mit der Bauart aus fertigungstechnischen Gründen in der vorgesehenen Qualität mit den herkömmlichen Verfahren zur Zeit nicht zu realisieren. Während Gleitschalungsfertiger aufgrund der geringen Bogenradien und der erzielbaren Fertigungsgenauigkeit nicht sinnvoll eingesetzt werden können, ist auch die verwendete Schalungstechnik (ob mit Ortbeton oder einer möglichen Weiterentwicklung in Richtung von Halbfertigteilen) als kritisch anzusehen. Die Verwendung gerader Schalungsabschnitte, d. h. der Nachbildung des Gleisverlaufes durch polygonale Tröge, schafft ungleichmäßig breite Tröge, die aufgrund der damit ungleichmäßigen Eigenschaften des Schienenvollvergusses als nicht wünschenswert anzusehen sind.
- Weichenkonstruktionen sind bisher weder in der Bauform INFUNDO® mit S41 noch in der Bauform INFUNDO® mit SA42 in München ausgeführt worden. Die Anwendung des Systems INFUNDO® beschränkt sich bisher auf den Einbau in Streckenbereichen.
- Die Schienenbauform SA42 stellt mit der Kopfausrundung von 10 mm eine Sonderbauform dar, die nicht jederzeit ab Werk direkt lieferbar ist. Entsprechende Wartezeiten oder den tatsächlichen Bedarf übersteigende Mindestbestellmengen lassen einen mit der Standardschiene Ri60 vergleichbaren Beschaffungspreis nicht erwarten.
- Neben den Beschaffungspreis für die Schienen treten die Kosten für die Erstellung der Übergangsschienen von der Bauart SA42 auf die Bauart S41 oder Ri60, die nicht als sog. Baustellenstöße ausgeführt werden können.
- Neben der Schiene ist auch die kompliziertere Bauausführung des Betontragkörpers der Bauart INFUNDO® im Vergleich zu der in München als Standard anzusehenden Bauart Ri60 auf Betontragplatte zu berücksichtigen.
- Im Vergleich zu den als Komplex anzusehenden Betonarbeiten der Bauart INFUNDO® (Bewehrung, BII-Baustelle, Fertigungstoleranz, Einzelausrich-

tung jeder Schiene), ist die Erstellung der Betontragplatte als bautechnisch einfach einzustufen (unbewehrter Beton, BI-Baustelle, geringere Fertigungstoleranz, Ausrichtung von Gleisjochen statt Einzelschienen). Die Oberbauform, wie sie im Referenzlos 1 ausgeführt wurde, deutet sich in der Realität als einfacher und preisgünstiger herzustellen als der Testoberbau. Auch die Erfahrungen der Baumaßnahme in der Agnes–Bernauer–Straße stützte diese Erfahrungen, wurden hier doch 480 m Doppelgleis mit 2 Überfahrten zirka 5 Wochen früher fertiggestellt, wie der nur zirka 200 m Doppelgleis lange Testgleisabschnitt.

Im Sinne der Gleisausfächung (Rasengleis, Überfahrtsbereich, Pflasterbereich etc.) und der Einbindung in ein Streckennetz mit vielen Weichen und Wendeschleifen ist die Bauart der Betontragplatte den Bauarten INFUNDO® mit S41 oder INFUNDO® mit SA42 zur Zeit eindeutig überlegen.

7 Voraussichtlicher Nutzen/Verwertbarkeit der Ergebnisse

7.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Es besteht eine enge Verzahnung des beschriebenen Forschungsprojektes LERM mit den anderen Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen im Haus der Leonhard Weiss GmbH & Co. Bereits seit mehreren Jahren wird an Problemlösungen im Bereich FF gearbeitet. Das Projekt bündelte im Projektteam die Spezialisten verschiedener Abteilungen, mit dem Ziel, erstmals das System FF grundlegend bezüglich Emissionsminimierung zu untersuchen und gemeinsam mit den Forschungspartnern die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Überführung in die Praxis zu schaffen.

Es kann davon ausgegangen werden, daß künftig

- das öffentliche Interesse an den Ergebnissen von besonderer Bedeutung ist, da mit zunehmender Sensibilisierung der Bevölkerung und gestiegenem Umweltbewußtsein auch der Lärminderung beim schienengebundenen Verkehr eine erhöhte Bedeutung zukommt.
- das neuartige Fahrwegsystem mittelfristig einen innovativen, wirtschaftlichen und ökonomischen Nutzen für den Fahrweghersteller haben wird, mit dem Aspekt höherer Beschäftigungssicherheit, Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und Öffnung neuer Märkte.
- durch ein optimiertes Zusammenspiel von Fahrweg und Fahrzeug eine deutliche Verringerung der Luft- und Körperschallemission erzielt werden kann, die zu einer erhöhten Akzeptanz bei den SPNV-Nutzern und Anliegern führen wird.
- die Anwendung des optimierten Fahrwegsystems zunächst in Deutschland sowie im europäischen Raum verwertet wird.
- als Ergebnis der Grundlagenforschungen Erkenntnisse über die vibro-akustische Modellierung des Fahrweg-Fahrzeug-Systems erwartet werden, die auch Einfluß auf technische Normen, wie beispielsweise die „Schall 03“ nehmen können. Ein intensiver Austausch mit den Normungsgremien ist projektbegleitend vorgesehen. Außerdem werden diese Themen im einzurichtenden Industrie/Anwenderarbeitskreis eingebracht.

Wenn es gelingt die anspruchsvollen Ziele zu erreichen, erwarten wir einen großen Erfolg am Markt. Es muß erreicht werden, daß durch eine intelligente

Bau/Verfahrenstechnik sowie den optimalen Einsatz von Dämpfungsmaterialien (falls möglich aus dem Bereich der Recyclingmaterialien), der Preis für das zukünftige System nur unwesentlich über dem derzeitiger FF-Systeme liegt. Dann öffnet sich ein sehr großer Markt für das neuartige FF-System. Die Entwicklungsergebnisse sollen sukzessive in das Produkt INFUNDO® eingearbeitet werden, so daß zukünftig die vorhandenen Vertriebswege genutzt werden können.

Der wichtigste Marktvorteil bei einem erfolgreichen Entwicklungsabschluß ist jedoch darin zu sehen, daß durch das neue System auf Schallschutzmaßnahmen wie Schallschutzwände etc. weitgehend verzichtet werden kann.

7.2 Wissenschaftlicher und technischer Erfolg

Verschiedene Maßnahmen sind geplant, um

- das Praxiswissen der Anwender und Multiplikatoren wie Verkehrsbetriebe, Gleis Hersteller und Fahrzeughersteller bereits in die Projektstrategie einfließen zu lassen,
- die Öffentlichkeit auf die neue Technologie vorzubereiten und
- Anwendern die Möglichkeiten zu geben, neue Konzepte zu diskutieren und frühzeitig bei ihren Planungen zu berücksichtigen.

Neben der projektbegleitenden Veröffentlichung von Ergebnissen und Erfahrungen – insbesondere durch die wissenschaftlichen Partner – ist es geplant, einen Industriearbeitskreis einzurichten. Darin sollen die o. g. Gruppen die Ergebnisse mit den Partnern diskutieren und neue Ideen und Erfahrungen mit dem Ziel der Realisierung emissionsarmer Fahrwege einbringen. Dieses Forum hat weiterhin dazu zu dienen, eine Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und vorzubereiten.

Außerdem wird ein weiterer LERM - Newsletter erscheinen, der Projektergebnisse verbreiten und deren Übertragung sichern soll.

Die wissenschaftlichen Ausblicke mit weiterführenden fachlichen Fragestellungen sind jeweils in den einzelnen Berichten der Projektpartner enthalten.

8 Ergebnisse Dritter

- Für den PP ISE war die Dissertation von Jakob Birkedal NIELSEN [13], als Grundlage für ein zu entwickelndes dreidimensionales Kontaktsystem relevant für das Arbeitspaket „Rad-Schiene-Rollkontakt“.
- Das von LINDAHL [14] vorgestellte Simulationsprogramm GENSYS leistet möglicherweise ähnliches wie das Vibrationsmodul innerhalb von M³Rail.
- Die Lärminderung im Schienenverkehr ist weiterhin ein aktuelles und vielschichtiges Problem. Die DB AG hat dazu ein Innovationsprogramm aufgestellt (vgl. SCHULTE-WERNING et alii [15]). Hier wurde auch die Notwendigkeit erkannt, sowohl Luftschall als auch Körperschall zu betrachten.
- Auf der Schienenfahrzeugtagung in Graz [16] wurden einige Lärmminde-rungsprojekte vorgestellt:
 - Ein aktives fahrzeugseitiges Schallminderungssystem für den ICE 1 wurde auf dem Rollprüfstand der DB AG getestet.
 - Das Forschungsprojekt „Leichtes und lärmarmes Güterwagen-Drehgestell LEILA – DG“ wurde vorgestellt.
 - Die Arbeitsgemeinschaft ARGE LNT (Arbeitsgemeinschaft Low Noise Train) der staatlichen Eisenbahngesellschaften aus der Schweiz, Österreich und Italien berichtet über ihren Arbeitsfortschritt beim Ersatz von Graugußbremsen für Güterwagen. Einigkeit besteht darüber, daß eine der Hauptursachen für das Rollgeräusch die Gesamtrauhigkeit von Rad- und Schienenprofil ist. Der im Projekt LERM verfolgte Ansatz, das Gesamtsystem zu betrachten, sowohl fahrzeug- als auch fahrwegseitig, ist daher weiterhin der im Bereich der Forschung am besten zielführende Ansatz. Viele Hersteller scheuen jedoch nach wie vor die hohen Kosten einer Umstellung der Fahrzeugflotte bei gleichzeitigen Maßnahmen entlang der Strecke und beschränken sich daher auf rein fahrzeugseitige Maßnahmen.

9 Veröffentlichung der Ergebnisse

Ausrichtung von Seminarveranstaltungen, Workshops, Symposium

- Workshops unter Beteiligung wissenschaftlicher Einrichtungen, Unternehmen, Betreibern und Kommunen mit je max. fünfzig Fachleuten
- ein Symposium unter Federführung des PP IASP

Teilnahme an Kongressen und Messen Messen wie die New Earth 1999, InnoTrans 2000, UITP-Kongreß 2001 und die Oberbaufachtagungen 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 Konferenzen, Tagungen, Seminaren und Messen teilgenommen:

- 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 präsentiert wurde, im Vergleich zum Schotteroberbau. Es wurden selbstablaufende Kurzpräsentationen (auf PC) gezeigt und ein Hörbeispiel, das die unterschiedliche Schall-Charakteristik eindrucksvoll demonstriert (siehe Abbildung A-18).

Über den Messestand erscheint ein Artikel der Zeitung UNIKATH der Universität Karlsruhe.

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.

- World Congress on Railway Research (WCRR 2003), Edinburgh, 28.09.2003-1.10.2003, Vortrag Prof. Hohnecker: „Acoustic properties of railway superstructures“ [24]
- 17th International Conference Informatics for Environmental Protection, 24.-26.09.2003 Brandenburg University of Technology, Cottbus. Vortrag: TAPIA

SILVA, F.O.; MODEL, N.; HENZE, H.J.: Measurement and model supported alternative rain water management in urban areas of Berlin using Track-bed Naturation for Railway Tracks. [43]

- XI International Conference on Rainwater Catchment, 25.-26.8.2003, Mexiko. Vortrag: TAPIA SILVA, F.O.; MODEL, N.: Development of one measurement and model supported alternative rain water management using Track-bed Naturation for Railway Tracks. [44]
- 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“ [23]
- BMBF Statusseminar „Leiser Verkehr“, Lärmforschung im Forschungsprogramm Mobilität und Verkehr, Tagung des Projektträgers TÜV, Bonn, 15.06.2003, Vorträge von HENZE und HOHNECKER sowie Beiträge zum Tagungsband [20]
- Railway Engineering Conference, London, 30.04.2003-1.05.2003, Vortrag Prof. Hohnecker: „Towards a low noise railway system“ [22]
- „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?
- Konferenz „Mobilität und Medizin“, Fürstenfeldbruck, September 2002
- „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 präsentiert wurde, im Vergleich zum Schotteroberbau. 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 Bildokumentation des Messestands findet sich als Anhang C am Ende dieses Dokuments.

- IFV Bahntechnik: Workshop Leiser Verkehr, Berlin, 29.11.2001
- World Congress of Railway Research (WCRR), Köln, 26.-29.11.2001 Teilnahme mit Poster und Messestand
- 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
- 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“ [36]
- 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
- Railway Engineering Conference, London, 30.04.2001-1.05.2001 Vortrag Prof. Dr.-Ing. E. Hohnacker: “Comparison of forces on discretely and continuously embedded track systems - Effects on the track, vehicle user and environment“ [31]
- „CZ-Intermodal 2000“, Tagung in Pardubice, Tschechische Republik, 6.-7.11.2000, Vortrag Prof. Hohnacker “M³Rail: Fahrwegoptimierung zur Emissionsminderung und Vorstellung des Forschungsprojekts LERM“ [32]
- „InnoTrans2000“, Fachmesse in Berlin, 12.-15.09.2000
- „Mensch-Fahrweg-Fahrzeug“, Veranstaltung an der Humboldt-Universität zu Berlin, 11.09.2000, Vortrag Prof. Hohnacker “Entwicklung und Perspektiven eines umweltfreundlichen Fahrwegs für das 21. Jahrhundert“ [35]
- „Railway Engineering 3rd Annual International Conference“, London, 5.-6.07.2000, Vortrag Prof. Hohnacker “A Non-Linear Three-Dimensional Model for Track/Vehicle System“ [34]

- „Mobilitätsforschung für das 21. Jahrhundert“, BMBF Tagung in Göttingen, 4.-5.05.2000
- „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“ [33]

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

Veranstaltungen an der Abteilung Eisenbahnwesen unter der Leitung von Prof. Hohnecker:

- 12.02.2001, Vertiefervortrag von Herrn Dipl.-Ing. Mund zum Thema Schwelle im Simulationsmodell für den Eisenbahnoberbau.
- 13.03.2001, Vertiefervortrag von Herrn Dipl.-Ing. Engelskirchen zum Thema Fahrweg/Oberbau
- 13.03.2001, Gastvortrag von Herrn cand.-Ing. Sigurn Vandenbrande (KU Leuven) zum Thema „Active Noise Control“.
- Schulung am 5.10.2000 für das Simulations-Programm “Raynoise®“. Das Programm dient zur numerischen Schallabstrahlungs-Berechnung.
- Seminarveranstaltungen an der Abteilung Eisenbahnwesen
 - „Zur Mechanik des Rad-Schiene-Rollkontakts“, 6.11.2001
 - „Körperschall im Rad-Schiene-System“, 13.11.2001
 - „Radsatzlauf im Gleis“, 18.12.2001
- Schulung der Mitarbeiter der Abteilung Eisenbahnwesen für die bislang fertiggestellten Module der im Rahmen dieses Projektes entwickelten Software M³Rail, August 2001

Dissertation, Vertiefer- und Diplomarbeiten Es konnten eine Reihe von Vertieferarbeiten und Diplomarbeiten und Disserationen vergeben werden, die die Bearbeitung des Projekts direkt unterstützen:

- TAPIA SILVA, F. O.: Rechner-, modell- und messwertgestützte Untersuchungen zur Wasserhaushaltsbestimmung am Beispiel von Gleisbett-Naturierungen in urbanen Teilräumen Berlins. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin. 2002 [40]
- WEHRMANN, A.: Geographische Analysen Berliner und Münchner Standorte von Gleisbett-Naturierungen unter Berücksichtigung der urbanen Effekte (wie Wasserbilanz, Reduktion von verkehrsinduziertem Lärm) mit Hilfe von ArcView. Magisterarbeit Humboldt-Universität zu Berlin. 2002 [41]
- SCHWARZ, M.: Abschätzung ausgewählter stadtoökologischer Funktionen begrünter Gleisbetten. Diplomarbeit, Universität Rostock, FB Landeskultur und Umweltschutz. 2002 [42]
- ELBERT, M.: Experimentelle Überprüfung eines Körperschall-Prognosemodells, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2002 [54]
- SCHÖBINGER, F.: Life-Span-Costs (LSC) – ein neuer Ansatz zur Bewertung langlebiger Investitionsgüter des Eisenbahnverkehrs, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2002 [55]
- 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 [56]
- RÖTHLINGSHÖFER, FL.: Erschütterungstechnische Analyse eines Straßenbahnoberbaus – Fallstudie Thereses gate, Oslo. Vertieferarbeit, Universität Karlsruhe, 2002 [57]
- GOTTSCHANG, M.: Berechnung von Luftschallspektren in der Nähe spurgeführter Systeme, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2002 [58]
- ENGELSKIRCHEN, M.: Dimensionierung des Schienenfahrwegs 'Linha do Norte, Portugal', Vertieferarbeit, Universität Karlsruhe, 2001 [59]
- KENDZIORA, CHR.: Die Schienenbefestigung im Simulationsmodell für den Eisenbahnoberbau, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2001 [60]

- MUND, CHR.: Die Schwelle im Simulationsmodell für den Eisenbahnbau, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2000 [61]
- SCHURRER, M.: Programm zur Berechnung von Schallimmissionspegeln nach Schall03, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2000 [62]
- JAMBRICH, R.: Beurteilung der heute verwendeten Formen von Schotteroberbau und Fester Fahrbahn hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Einsatzgebieten, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1999 [63]

Veröffentlichung in Fachzeitschriften und auf Vorträgen Die Ergebnisse des Projekts wurden – vor allem durch die wissenschaftlichen Projektpartner – in verschiedenen Vorträgen und Artikeln veröffentlicht:

- HOHNECKER, E.: Abschlußbericht LERM-Projekt, Universität Karlsruhe, 2003 [37]
- HENZE, H.-J.: Beitrag zum BMBF Statusseminar „Leiser Verkehr“, Lärmforschung im Forschungsprogramm Mobilität und Verkehr, Bonn, Juni 2003 [20]
- HENZE, H.-J.; SIEMSEN, M.: Aktuelle Ergebnisse zum Schallminderungspotenzial von Gleisbett-Naturierungen, EI - Eisenbahningenieur 54 Heft 4 (2003), S.58-61 [21]
- 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.-24.08.2001. in: Vehicle System Dynamics 37 Suppl., S.690-701, 2003 [36]
- HOHNECKER, E.: Low Emission Railway System, Beitrag zum BMBF Statusseminar „Leiser Verkehr“, Lärmforschung im Forschungsprogramm Mobilität und Verkehr, Bonn, 17.-18.06.2003 [26]
- HOHNECKER, E.: Towards a low noise railway system, Railway Engineering Conference, London, 30.04.-1.05.2003 [22]
- HOHNECKER, E.: Low Emission Railway System, International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003(STECH03), Tokyo, 19.-22.08.2003 [23]
- HOHNECKER, E.: Acoustic properties of railway superstructures, Proceedings of the World Congress on Railway Research (WCRR 2003), Edinburgh, 28.09.-1.10.2003 [24]

- HOHNECKER, E.: Lärmarme Schienenfahrwege, CDROM zur Fachmesse „transport + logistic“, München 20.-24.05.2003 [25]
- WEHRMANN, A. ; MODEL, N.: Berechnung der Luftzustandsverbesserung über der Verdunstungsfläche eines Berliner Standortes von Gleisbett-Naturierungen und ihre Darstellung in ArcView, arcaktuell 3/2002, S. 54-55 [39]
- HOHNECKER, E.: Diskret gelagerte oder kontinuierlich eingebettete Schienenfahrsysteme?, EI - Eisenbahningenieur 53, S. 45-49, 2002 [27]
- Fa. EDILON (Hrsg.): Waghäusel: Feste Fahrbahn Bauart im Betriebstest, Edilon report Ausgabe 04/2002 [30]
- HOHNECKER, E.: How to calculate noise and vibration, Tram conference environmental noise and vibrations from tram infrastructure, Göteborg (Schweden), 12.-13.11.2002 [29]
- HOHNECKER, E.: INFUNDO-Schienenoberbau, Beitrag zur Ausstellung ERDE 2.0 (50 Jahre Baden-Württemberg), Stuttgart, 15.6.-28.7.02 [28]
- HOHNECKER, E.: Comparison of forces on discretely and continuously embedded track system - effects on track, vehicle user and environment, Railway Engineering Conference, London, 30.04.-1.05.2001 [31]
- World Congress for Railway Research (WCRR), Köln, 26.-29.11.2001. Teilnahme mit Poster und Messestand.
- HOHNECKER, E.: Wave 2000, Entwurf für einen Vortrag, unveröffentlicht, 2000 [38]
- HOHNECKER, E.: M³Rail – Fahrwegoptimierung zur Emissionsminderung und Vorstellung des Forschungsprojekt LERM, CZ-Intermodal 2000 – Intermodal Transport in the Third Millenary, 6.-7.11.2000, Pardubice, Tschechische Republik [32]
- 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, 16.-17.03.2000 [33]
- 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 [34]

- 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 [35]
- HOHNECKER, E. (Hrsg.): Newsletter der Forschungspartner Projekt LERM, Heft 1/2000. Bezug: Universität Karlsruhe, Abtl. Eisenbahnwesen [17]
- HOHNECKER, E. (Hrsg.): Newsletter der Forschungspartner Projekt LERM, Heft 2/2000. Bezug: Universität Karlsruhe, Abtl. Eisenbahnwesen [18]
- HOHNECKER, E. (Hrsg.): Newsletter der Forschungspartner Projekt LERM, Heft 1/2002. Bezug: Universität Karlsruhe, Abtl. Eisenbahnwesen [19]

Newsletter Neben einer bis zum Redaktionsschluß dieses Abschlußberichts dreimaligen Veröffentlichung einer mehrsprachigen Informationsschrift von je zirka zwei bis vier Seiten zum Stand der Forschung – siehe dazu auch die Seiten des LERM-Projektes im Internet – wurden wissenschaftliche Aufsätze in den Fachzeitschriften publiziert.

Die thematischen Schwerpunkte der einzelnen Newsletter waren:

- Newsletter 1/2000
Schwerpunkt dieses Newsletters war die Vorstellung der am Forschungsvorhaben LERM beteiligten Projektpartner.
- Newsletter 2/2000
Schwerpunkt dieses Newsletters war die Darstellung der geplanten Meßtechnik sowie die Beschreibung der örtlich zur Aufstellung vorgesehenen Gleisometerstation.
- Newsletter 1/2002
Schwerpunkt dieses Newsletters war die Beschreibung des für die Teststrecke vorgesehenen Schienenprofils wie auch der geplanten Begrünung.

Fernsehauftritte

- Ein Bericht über Messungen im Rahmen des Forschungsprojekts LERM wurde vom SWR aufgezeichnet und am 6.11.2003 als Beitrag in der Sendung „NANO“ ausgestrahlt.
- 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.

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

Pressemitteilungen verschiedene Pressemitteilungen, z. B. vom 13.09.2002

Internetzseite Zur Bekanntmachung der wichtigsten Ereignisse wurde bereits 2000 eine Internetz-Seite (Deutsch und Englisch) für das LERM-Projekt erstellt.

Literatur

- [1] AUERSCH, L.; HEBENER, H.; RÜCKER, W.: Erschütterungen infolge Schienennahverkehr: Theoretische und messtechnische Untersuchungen zur Emission, zur Ausbreitung durch den Boden und zur Übertragung in Gebäude, Bericht 191) März 1986; Projektleitung: Rücker, W.
- [2] EISENMANN, J.; DUWE, B.; STEINBEISSER L .; HILLIGES D.; UHLMANN, W.: Dynamisches Verhalten der festen Fahrbahn - Beispiel Rheda-Oberbau; VDI - Berichte 510 (1984), S. 239 - 246
- [3] EISENMANN, J.; REINFELDER, R.: Theoretische Studie über die Ermittlung der Sekundärdurchbiegung der Schiene; ZEV-Glas. Ann. 99, Nr. 11/1975, S. 301-303.
- [4] ESVELD, C.: Modern Railway Track, Second Edition, TU Delft, Delft 2001
- [5] KRÜGER, F.: Neue kontinuierliche Schienenlagerungen zur Erschütterungsminderung – Prüfstandsuntersuchungen und FEM Berechnungen; ZEV + DET Glas. Ann. 124 (2000) Heft 5 Mai
- [6] KRÜGER, F.: Grundlagen zur Entwicklung einer kontinuierlich elastischen Schienenlagerung für den Schienennahverkehr Teil 1; Verkehr und Technik, 1999, Heft 4, S. 142
- [7] KRÜGER, F.: Grundlagen zur Entwicklung einer kontinuierlich elastischen Schienenlagerung für den Schienennahverkehr Teil 2; Verkehr und Technik, 1999, Heft 5, S. 200

- [8] LEYKAUF, G.: Stellungnahme zur Anwendung des Systems INFUNDO mit kontinuierlich eingebetteter Schiene SA42 bei den Stadtwerken München, 11.06.2001
- [9] LEYKAUF, G.: Prüfung des Systems Infundo mit kontinuierlich eingebetteter Schiene SA42 für Nahverkehrssysteme. Forschungsbericht Nr. 1886, 25.04.2001
- [10] LEYKAUF, G.: Prüfung des Systems Infundo mit kontinuierlich eingebetteter Schiene S49 für Nahverkehrssysteme. Forschungsbericht Nr. 1848, 19.09.2000
- [11] MÖHLER+PARTNER, Beratende Ingenieure für Schallschutz und Bauphysik, Schall- und Erschütterungstechnische Untersuchung (Hrsg.): F + E Projekt LERM Teststrecke Agnes-Bernauer Straße Beweissicherungsmessungen, Bericht Nr. 800-1113-B
- [12] PAHNKE, U. DR.: Verwendung von Fertigteileplatten bei der Festen Fahrbahn, Eisenbahningenieur 49 (1998) Heft 4
- [13] NIELSEN, J. B.: New Developments in the Theory of Wheel/Rail Contact Mechanics (1998), Danske tekniske Universitet (DTU), Lyngby (Dänemark)
- [14] LINDAHL, M.: Track geometry for high-speed railways, TRITA-FKT Report 2001:54, ISSN 1103-470X, ISRN KTH/FKT/EX-01/54-SE, KTH, Stockholm, 2001
- [15] SCHULTE-WERNING, B. et alii: auf dem Weg zur leisen Bahn: Das DB-Innovationsprogramm zur Lärminderung im Schienenverkehr, Eisenbahntechnische Rundschau 52 (2003) Heft 1/2, S. 39ff.
- [16] Tagungsband SFT Graz 2002, ZEVrail Glasers Annalen 126 (2002), Sonderheft

eigene Veröffentlichungen im Projekt LERM

- [17] HOHNECKER, E. (Hrsg.): Newsletter der Forschungspartner Projekt LERM, Heft 1/2000. Bezug: Universität Karlsruhe, Abtl. Eisenbahnwesen
- [18] HOHNECKER, E. (Hrsg.): Newsletter der Forschungspartner Projekt LERM, Heft 2/2000. Bezug: Universität Karlsruhe, Abtl. Eisenbahnwesen

- [19] HOHNECKER, E. (Hrsg.): Newsletter der Forschungspartner Projekt LERM, Heft 1/2002. Bezug: Universität Karlsruhe, Abtl. Eisenbahnwesen
- [20] HENZE, H.-J., Beitrag zum Tagungsband, Tagung Leiser Verkehr des Projektträgers TÜV, Schall, Bonn, 15.06.2003
- [21] HENZE, H.-J.; SIEMSEN, M.: Aktuelle Ergebnisse zum Schallminderungspotenzial von Gleisbett-Naturierungen, EI - Eisenbahningenieur 54 Heft 4 (2003), S.58-61
- [22] HOHNECKER, E.: Towards a low noise railway system, Proceedings of the Railway Engineering Conference, London, 30.04.2003-1.05.2003
- [23] 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.-22.08.2003
- [24] HOHNECKER, E.: Acoustic properties of railway superstructures, Proceedings of the World Congress on Railway Research (WCRR 2003), Edinburgh, 28.09.-1.10.2003
- [25] HOHNECKER, E.: Lärmarme Schienenfahrwege, Broschüre anlässlich der Fachmesse „transport logistic“, München 20.-24.05.2003, Universität Karlsruhe Abtl. Eisenbahnwesen, 2003
- [26] HOHNECKER, E.: Low Emission Railway System, Beitrag zum BMBF Statusseminar „Leiser Verkehr“, Lärmforschung im Forschungsprogramm Mobilität und Verkehr, Bonn, 17.-18.06.2003
- [27] HOHNECKER, E.: Diskret gelagerte oder kontinuierlich eingebettete Schienenfahrbahnssysteme?, EI - Eisenbahningenieur 53, S. 45-49, 2002
- [28] „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
- [29] HOHNECKER, E.: How to calculate noise and vibration, Proceedings of the Tram conference environmental noise and vibrations from tram infrastructure, Göteborg (Schweden), 12.-13.11.2002
- [30] Fa. EDILON (Hrsg.): Waghäusel: Feste Fahrbahn Bauart im Betriebstest, Edilon report 04/2002, Fa. Edilon, Jörgstraße 23, 80689 München, 2002

- [31] 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.-1.05.2001
- [32] HOHNECKER, E.: M³Rail – Fahrwegoptimierung zur Emissionsminderung und Vorstellung des Forschungsprojekt LERM, CZ-Intermodal 2000 – Intermodal Transport in the Third Millenary, 6.-7.11.2000, Pardubice, Tschechische Republik
- [33] 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
- [34] 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
- [35] 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, 11.09.2000
- [36] 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.-24.08.2001. in: Vehicle System Dynamics 37 Suppl., S. 690-701, 2003
- [37] HOHNECKER, E.; N. N.: LERM project final report, University of Karlsruhe, 2003
- [38] HOHNECKER, E.: Wave 2000, Entwurf für einen Vortrag, unveröffentlicht, 2000
- [39] WEHRMANN, A. ; MODEL, N.: Berechnung der Luftzustandsverbesserung über der Verdunstungsfläche eines Berliner Standortes von Gleisbett-Naturierungen und ihre Darstellung in ArcView. In: arcaktuell 3/2002, S. 54-55
- [40] TAPIA SILVA, F. O.: Rechner-, modell- und messwertgestützte Untersuchungen zur Wasserhaushaltsbestimmung am Beispiel von Gleisbett-Naturierungen in urbanen Teilräumen Berlins. Dissertation. Humboldt- Universität zu Berlin. 2002

- [41] WEHRMANN, A.: Geographische Analysen Berliner und Münchner Standorte von Gleisbett-Naturierungen unter Berücksichtigung der urbanen Effekte (wie Wasserbilanz, Reduktion von verkehrsinduziertem Lärm) mit Hilfe von ArcView. Magisterarbeit Humboldt-Universität zu Berlin.2002
- [42] SCHWARZ, M.: Abschätzung ausgewählter stadtoökologischer Funktionen begrünter Gleisbetten. Diplomarbeit, Universität Rostock, FB Landeskultur und Umweltschutz. 2002
- [43] TAPIA SILVA, F.O.; MODEL, N.; HENZE, H.J.: Measurement and model supported alternative rain water management in urban areas of Berlin using Trackbed Naturation for Railway Tracks. 17th International Conference Informatics for Environmental Protection September 24-26, 2003 Brandenburg University of Technology of Cottbus, Germany, Metropolis Verlag 2003
- [44] TAPIA SILVA, F.O.; MODEL, N.: Development of one measurement and model supported alternative rain water management using Trackbed Naturation for Railway Tracks. XI International Conference on Rainwater Catchment in August (25. bis 26.), 2003, Mexiko
- [45] TAPIA SILVA, F. O.: Poster: Encreasing Evapotranspiration and Reducing Runoff of Railways in Sealed Urban Areas meliorated with Naturation , Paris 2003
- [46] HENZE, H. J.; KAPPIS, C.: Poster Emissionsminderungen von schienengebundenen Fahrwegen unter Nutzung von Gleisbett- Naturierungen im Rahmen der Langen Nacht der Wissenschaften , Berlin. 2003
- [47] HENZE, H.J.: Vorstellung der Projektergebnisse mit Posterausstellung im Rahmen des BMBF Statusseminars Leiser Verkehr Lärmforschung im Forschungsprogramm Mobilität und Verkehr, 17. - 18.6.03
- [48] HENZE, H.J.: Die stadtoökologische Bedeutung des Grünen Gleises Vortrag im Rahmen des Symposiums Das Grüne Gleis , Juli 2003

Veröffentlichungen Dritter über unsere Forschungsergebnisse (Auswahl)

- [49] HENNECKE, M.: Halbfertigteillösung für die Feste Fahrbahn Bauart INFUNDO-LR, Verkehr und Technik, Heft 11 (2003), S. 436-438

- [50] Überwachungsgemeinschaft Gleis (ÜGG) e. V.; Interdisziplinärer Forschungsverbund Bahntechnik (IFV) (Hrsg.): Das grüne Gleis – Technik und System, zweisprachige Ausgabe deutsch–englisch, Media-Network, Funkstadt, 2003

unveröffentliche Arbeiten des PP ISE

- [51] HOHNECKER, E.: Luft- und Körperschallmessungen im Rahmen des Forschungsprojektes „Low Emission Railway System“ Universität Karlsruhe, ISE, Abteilung Eisenbahnwesen. Überblick über die Meßberichte. Universität Karlsruhe Abtl. Eisenbahnwesen, Oktober 2003, unveröffentlicht
- [52] BUCHMANN, A.: Messbericht zu den Luftschallmessungen an der DB-Teststrecke Waghäusel vom 24.04.2003 und 9.04.2003, Universität Karlsruhe Abtl. Eisenbahnwesen, Oktober 2003, unveröffentlicht
- [53] LITZENBURGER, J.; BERGE, J.; SCHÖBINGER, F.; KOBER, S.: Dokumentation M³Rail, Artikelsammlung, Universität Karlsruhe Abtl. Eisenbahnwesen, 2002, unveröffentlicht
- [54] ELBERT, M.: Experimentelle Überprüfung eines Körperschall-Prognosemodells, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2002
- [55] SCHÖBINGER, F.: Life-Span-Costs (LSC) – ein neuer Ansatz zur Bewertung langlebiger Investitionsgüter des Eisenbahnverkehrs, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2002
- [56] 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
- [57] RÖTHLINGSHÖFER, FL.: Erschütterungstechnische Analyse eines Straßenbahnoberbaus – Fallstudie Thereses gate, Oslo. Vertieferarbeit, Universität Karlsruhe, 2002
- [58] GOTTSCHANG, M.: Berechnung von Luftschallspektren in der Nähe spurgeführter Systeme, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2002
- [59] ENGELSKIRCHEN, M.: Dimensionierung des Schienenfahrwegs 'Linha do Norte, Portugal', Vertieferarbeit, Universität Karlsruhe, 2001

- [60] KENDZIORA, CHR.: Die Schienenbefestigung im Simulationsmodell für den Eisenbahnoberbau, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2001
- [61] MUND, CHR.: Die Schwelle im Simulationsmodell für den Eisenbahnoberbau, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2000
- [62] SCHURRER, M.: Programm zur Berechnung von Schallimmissionspegeln nach Schall03, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2000
- [63] JAMBRICH, R.: Beurteilung der heute verwendeten Formen von Schotteroberbau und Fester Fahrbahn hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Einsatzgebieten, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1999

Anhang A

Abbildungen

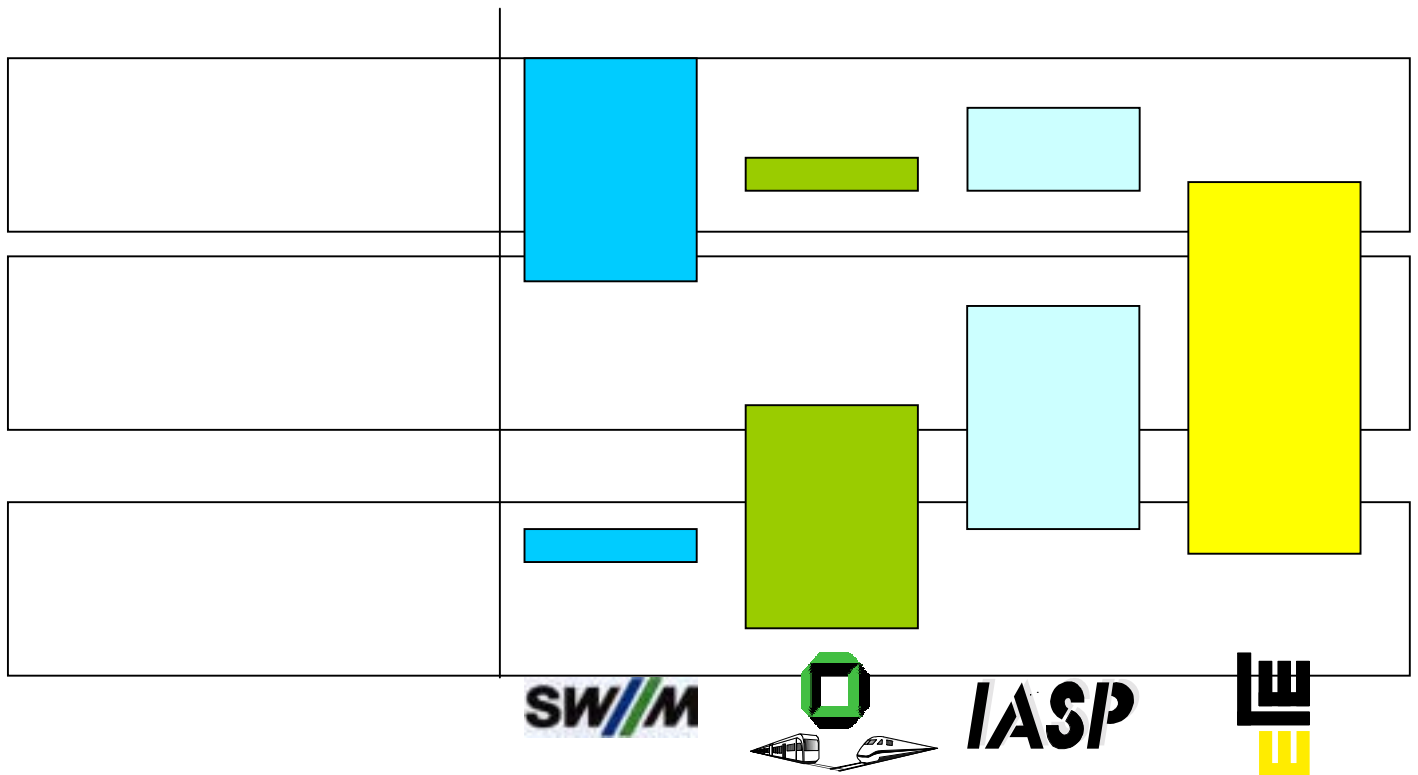


Abbildung A-1: Projektstruktur – Schwerpunkte der Partner

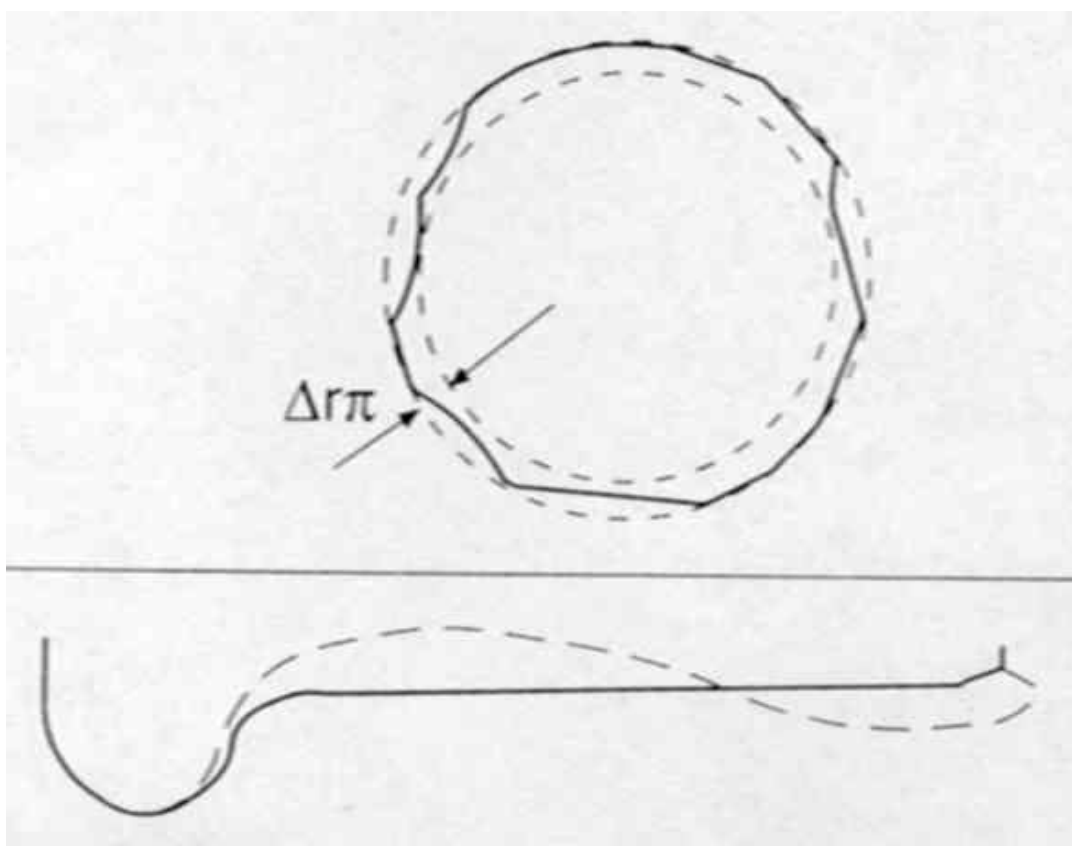
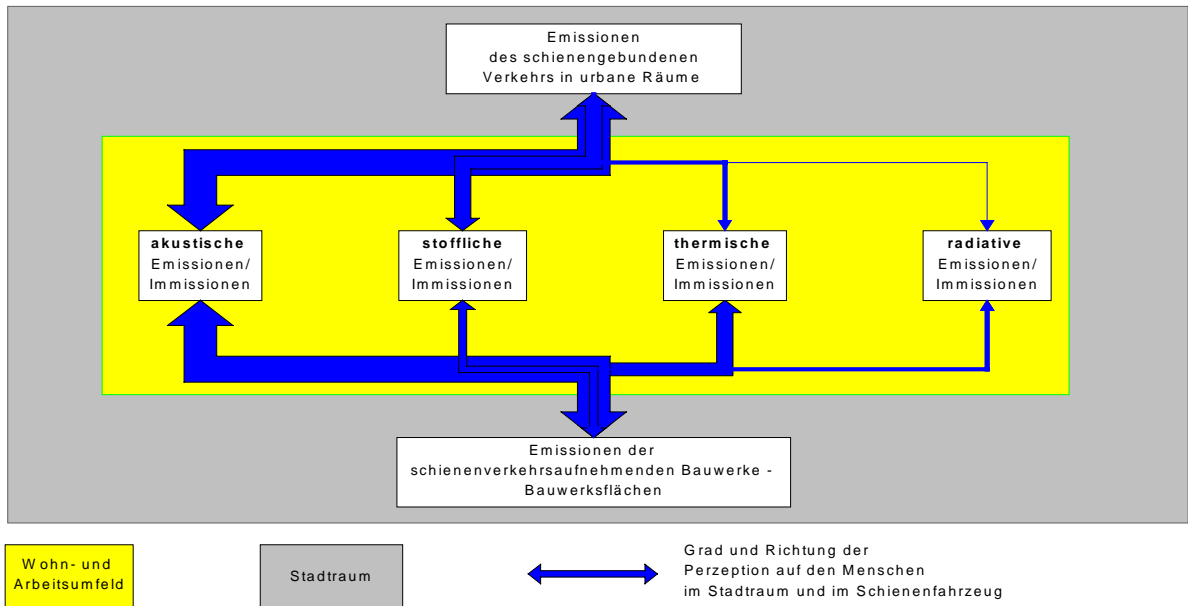


Abbildung A-2: Unrundheitsmaß infolge Verformungsverschleißes (oben) und plastische Verformung (unten) des Eisenbahnrades¹.

¹ Bild: MÜLLER, R.: Veränderungen von Radlauflächen im Betriebseinsatz und deren Auswirkungen auf das Fahrzeugverhalten /Teil 1). Vortrag auf der 2. Schienenfahrzeugtagung „rad ,97“ in Dresden am 18.09.1997, Glasers annalen 122 (1986) Heft 11, S. 675–688



IASP* Rudolf 99

Abbildung A-3: anwendungsorientierte Forschungsziele IASP

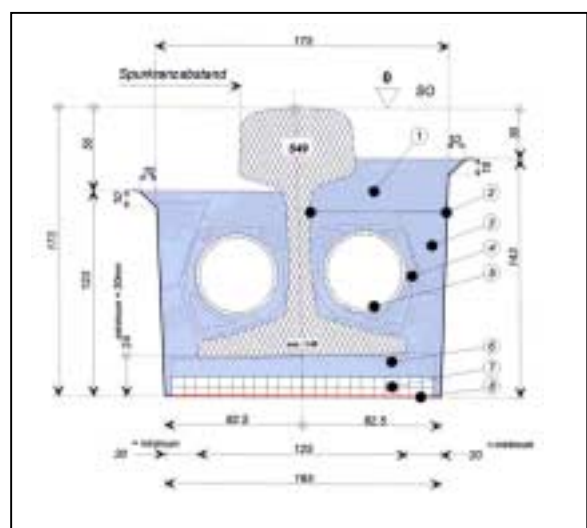
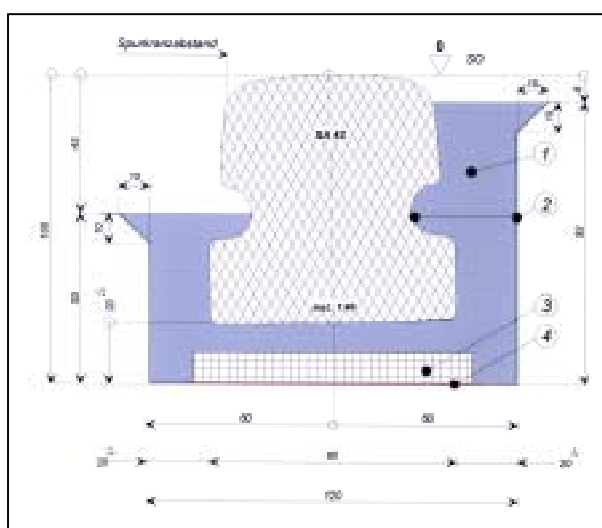


Abbildung A-4: Maßzeichnungen der Schienenprofile SA42 und S49, jeweils mit Einbettung



Abbildung A-5: Probekörper unter dem Scherenhebelschwinger

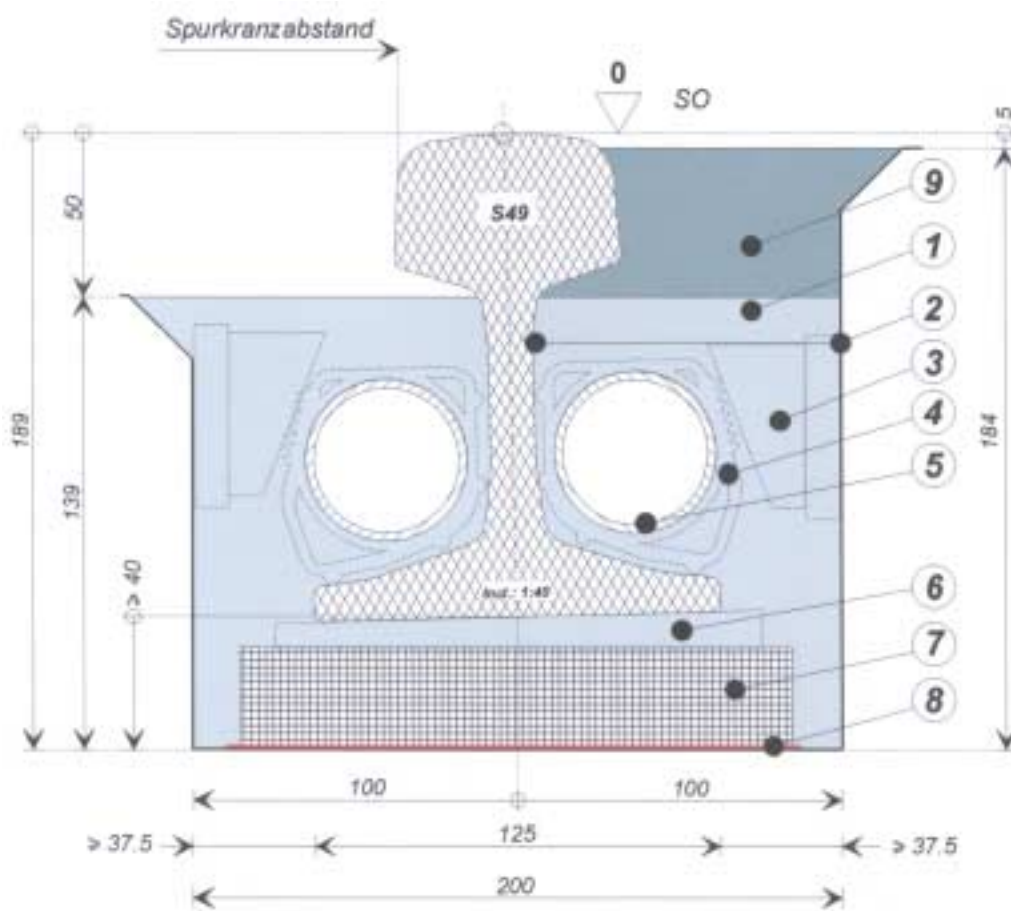


Abbildung A-6: Detail der Schienenlagerung für das Schienenprofil S49



Abbildung A-7: Gleitschalffertiger beim Herstellen der Betontragplatte

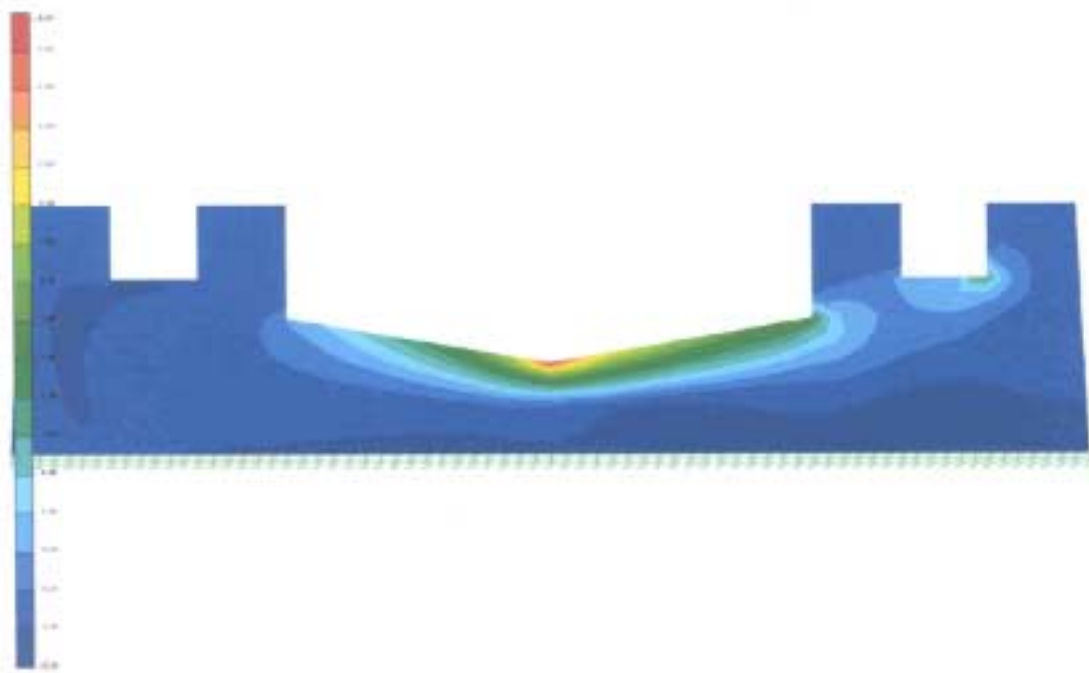


Abbildung A-8: Darstellung der Hauptzugspannungen aus FEM – Berechnung der Betontragplatte

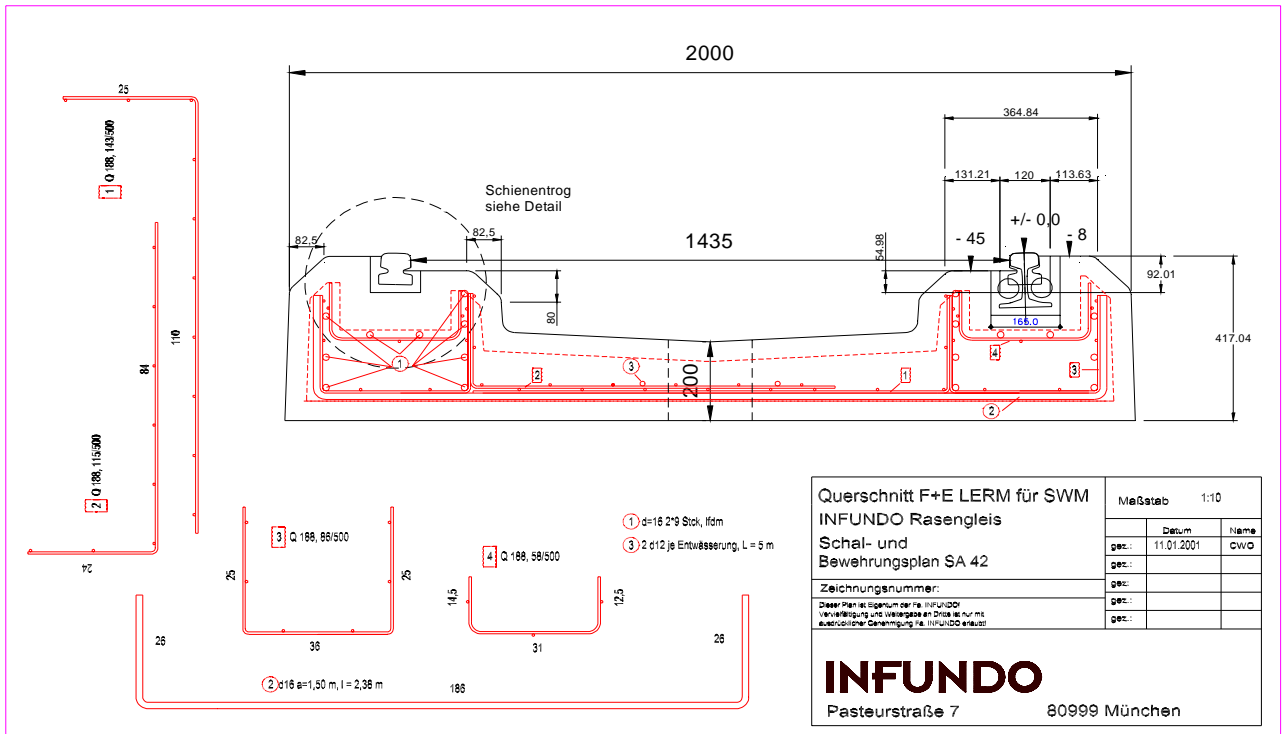


Abbildung A-9: Querschnitt für die Teststrecke Agnes—Bernauer—Straße, München



Abbildung A-10: Agnes–Bernauer–Straße vor dem Umbau. Der Meßpunkt befand sich auf der im Bild linken Straßenseite bei den Personen.

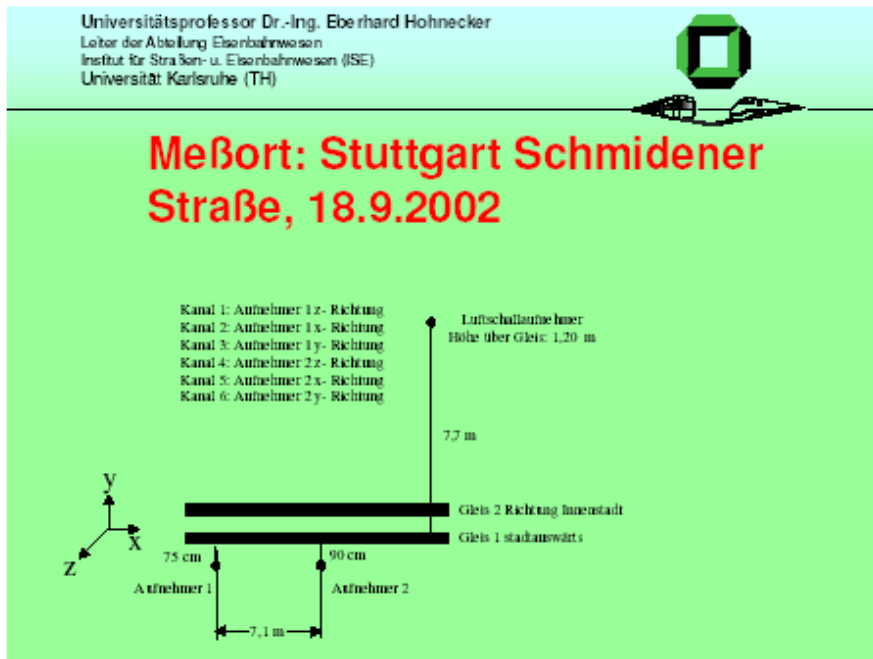


Abbildung A-11: Meßort Stuttgart, Schmidener Straße; diese Strecke ist seit Juni 2002 mit der Oberbauart INFUNDO mit Raseneindeckung in Betrieb. oben: Ansicht. unten: Meßanordnung

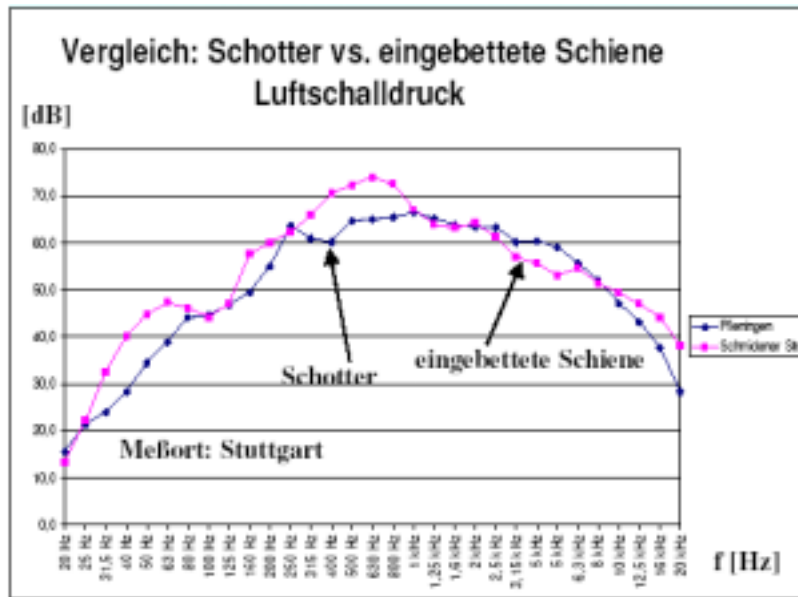


Abbildung A-12: Vergleich der Messungen Schotteroberbau (Plieningen) und Feste Fahrbahn (INFUNDO, Stuttgart Schmidener Straße). oben: Luftschallpegel Schotter (Plieningen, blaue Kurve) gegenüber Feste Fahrbahn (rosa Kurve). unten: Körperschallpegel Schotter (Plieningen, schwarze und rosa Kurve) gegenüber Feste Fahrbahn (grüne und gelbe Kurve)



Abbildung A-13: Agnes-Bernauer-Straße, München. Naturierung Stand Juni 2003.

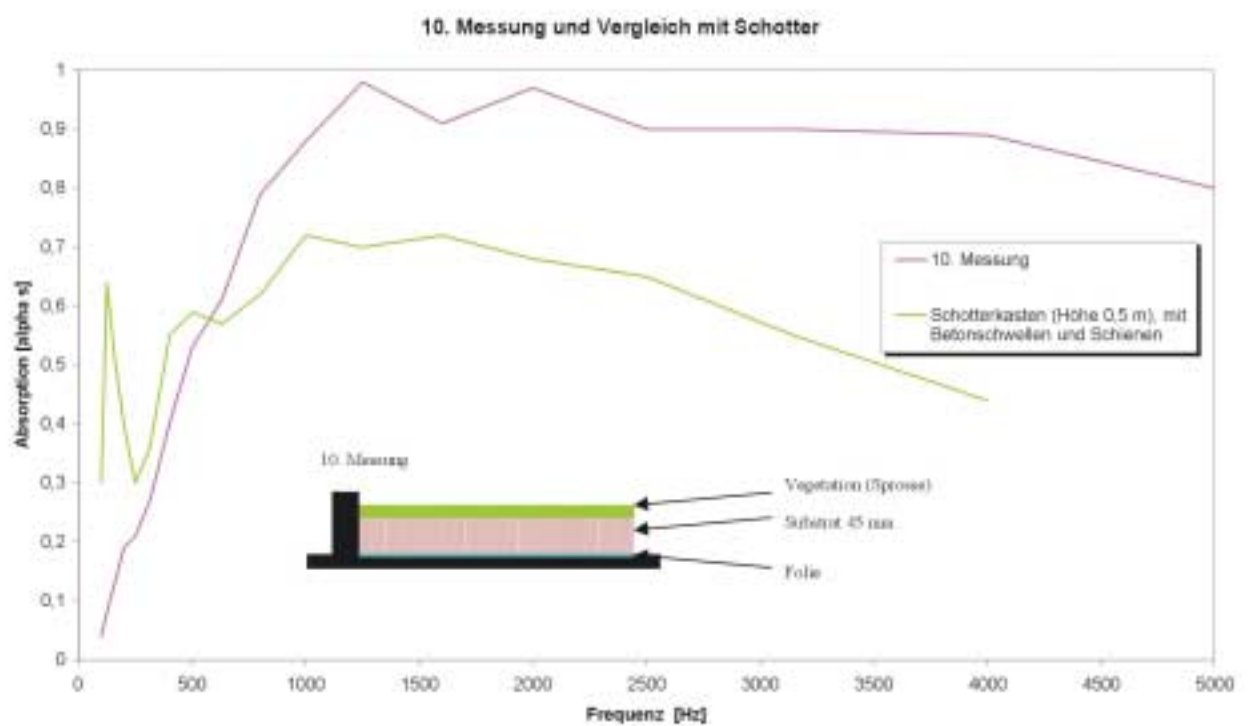


Abbildung.A-14: frequenzabhängige Darstellung des Absorptionsgrades eines substratbasierten Naturierungssystems mit einem Schottergleis (Schotterhöhe: 0,50 m)

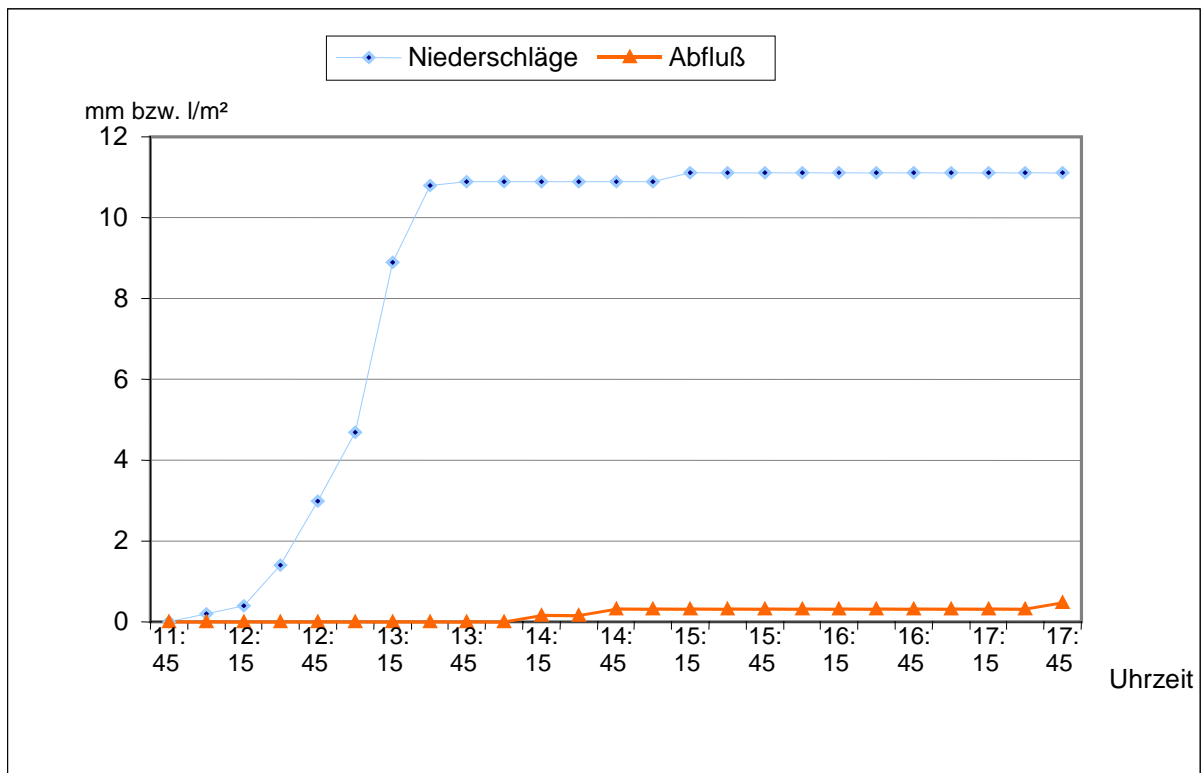


Abbildung A-15: Darstellung der Niederschlags- und Abflußentwicklung nach einem Starkniederschlagsereignis am 18.08.2001 in Berlin. Die durch eine Naturierung verursachten Wirkungen führen zu einer wesentlich gleichmäßigeren Belastung der Kanalisation auf geringem Niveau.

Anhang B

Bau der Teststrecke Agnes–Bernauer–Straße



Abbildung B-1

Abbildung B-1 zeigt den Einsatz der Systemschalung zur Erstellung der Ortbetontragplatte. Für die spätere Entwässerung der Vegetation im Mittelkern sind im Abstand von ca. 5 m Öffnungen vorgesehen.



Abbildung B-2

Abbildung B-2 zeigt den Einsatz der Systemschalung zur Herstellung der Schienenkanäle. Hierbei mußte besonderes Augenmerk auf die einzuhaltenden Toleranzen gelegt werden.



Abbildung B-3

Abbildung B-3 zeigt die fertigen Betonkörper der beiden Richtungsgleise mit aufgelegten Schienen. Auf die Betonnachbehandlung wurde mit Rücksicht auf die Minimierung von Betonrissen großer Wert gelegt. Nach Anlieferung der Neuschienen wurden diese auf den Betontragplatten verteilt und verschweißt; siehe Abbildung B-4.



Abbildung B-4

In enger Zusammenarbeit mit dem Schienenhersteller Voest Alpine Klöckner Stahlhandel GmbH wurde ein völlig neuartiges Schienenprofil unter Berücksichtigung der besonderen Art der Schienenbefestigung mit 2-Komponenten-Schienenverguß entwickelt. Abbildung B-5 zeigt ein Modell des Schientyps SA42 im Schienenkanal der Betontragkonstruktion.



Abbildung B-5

Nachdem die Schienen im Schienenkanal verlegt und fixiert waren, konnte mit dem Einbringen des Schienenvergusses begonnen werden. Aus Kostengründen wurde dabei auf die maschinelle Verarbeitung verzichtet und der Schienenverguß von Hand eingebracht.



Abbildung B-6

Da das Schienenprofil der SA42 weltweit in München erstmalig im Straßenbahnbereich zum Einsatz kam, mussten im Übergangsbereich zu den „konventionellen Systemen“ Übergangskonstruktionen erstellt werden. Hierbei war eine detaillierte Abstimmung mit den Firmen der Nachbarlose notwendig.



Abbildung B-7

Abbildung B-7 zeigt die Herstellung der Schweißverbindung im Übergang vom Schienenprofil Ri 60 auf S41.

Die ARGE LERM hat im Verlauf des Projektes die Verwendung der im Haus entwickelten Richtrahmen zum Einbau verschiedenster Schientypen im „Top down“- Verfahren auf die besonderen Belange des Schientyps SA42 abgestimmt. Hiermit war versucht worden, die strengen Anforderungen an die Schienenlage gemäß den Anforderungen der BOStrab zu erfüllen.



Abbildung B-8

Abbildung B-8 zeigt einen Bauzustand, bei dem ein Richtungsgleis bereits vergossen ist, während die Schienen des anderen Gleises noch in die Schienenkanäle verlegt werden müssen.

Nach Abschluß der Vergußarbeiten wurde die Vegetation nach Angaben des PP IASP eingebracht und das fertige Rasengleis dem PP SWM zur Inbetriebnahme übergeben.



Abbildung B-9

Abbildung B-9 zeigt das fertige Rasengleis mit eingebrachter Vegetationstragschicht.

Neben der labortechnischen Untersuchung des Oberbaus wurde parallel hierzu als Auflage und Bedingung der Stadtwerke München GmbH von einem Ingenieurbüro für Schallschutz eine schall- und erschütterungstechnische Voruntersuchung durchgeführt. Das Ergebnis der schall- und erschütterungstechnischen Voruntersuchung des Ingenieurbüros Möhler+Partner, München liegt als Bericht Nr. 800-1113 vom Juni 2001 vor.

Beide Untersuchungen (TU München sowie Ingenieurbüro Möhler+Partner) wurden von Seiten der Stadtwerke München GmbH durch Bereitstellung von Planmaterial und Vergleichsunterlagen unterstützt und personell begleitet.

Nach Abschluß der Laborversuche und der schall- und erschütterungstechnischen Voruntersuchung wurden gemeinsam mit dem Projektpartner Leonhard Weiss GmbH (PP LW) und der TU München die Ergebnisse ausgewertet, um entsprechende Konsequenzen für die Vorbereitung der Bauplanung und Bauausführung zu ziehen.

Im Rahmen der Bauvorbereitung wurde mit Hilfe der vorliegenden Unterlagen der Laborprüfung und Voruntersuchung ein Antrag für die „Genehmigung im Einzelfall“ bei der zuständigen Technischen Aufsichtsbehörde (TAB) eingereicht. Der Antrag wurde mit Schreiben der Regierung von Oberbayern vom 27.06.2001 vorläufig als grundsätzlich positiv zu bewerten beurteilt. Eine endgültige Prüfung erfolgte im Rahmen der Prüfung der Planunterlagen für Betriebsanlagen (BOStrab §60) und Abnahme (BOStrab §62) durch die TÜV BOStrab-Prüfstelle.

Aufbauend auf den Prüfbericht der TÜV BOStrab-Prüfstelle vom 17.05.2002 wurde durch die Technische Aufsichtsbehörde per 04.06.2002 ein Zustimmungsbescheid für die geplanten Gleisbaumaßnahmen erteilt. Auflagen und Empfehlungen aus dem TÜV-Prüfbericht wurden, in intensiver Zusammenarbeit mit der ARGE LERM, in die Bauausführung eingearbeitet.

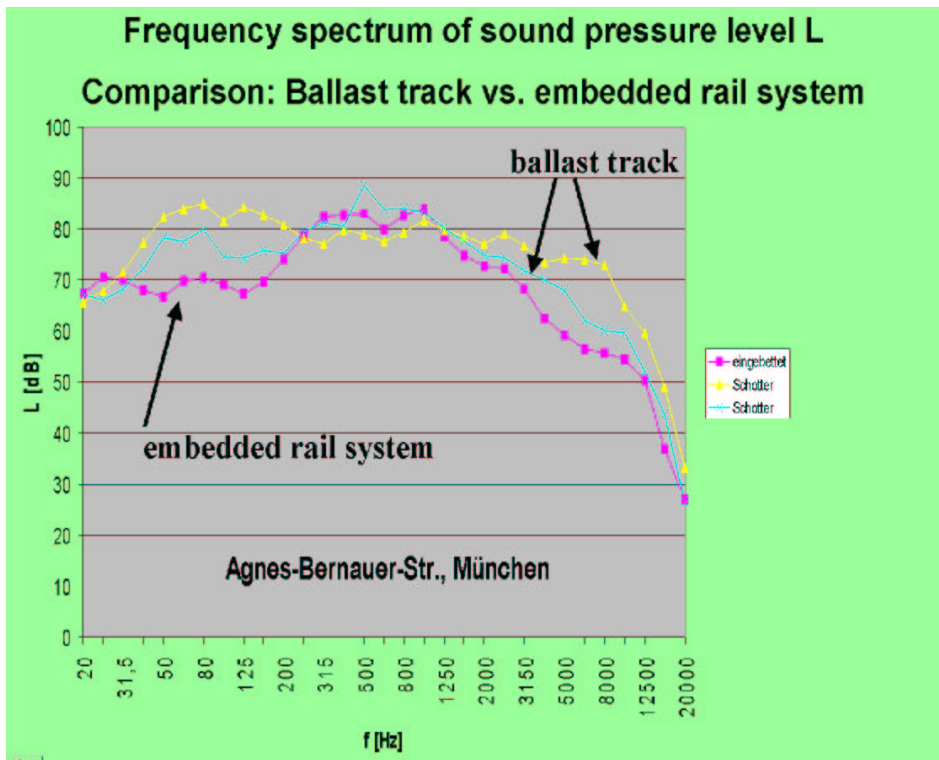
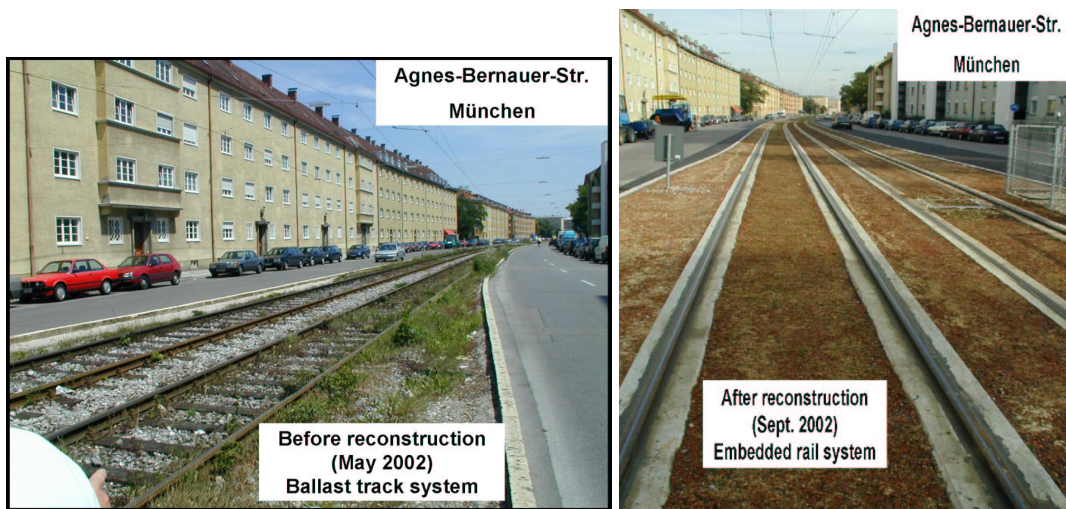


Abbildung 16: oben: Straßenbahnsystem München vor (links) und nach (rechts) dem Umbau. unten: Vergleich der Luftschallpegel von Schotteroberbau (helle, gelbe und blaue Kurven) und Fester Fahrbahn INFUNDO® (dunkle, purpurfarbene Kurve).

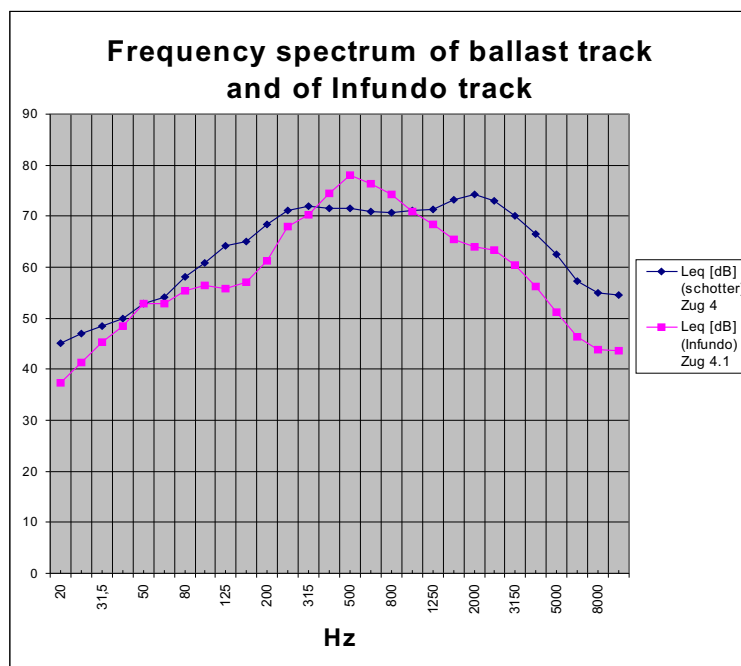


Abbildung 17: oben: DB Teststrecke Waghäusel bei Karlsruhe (Quelle: edilon-report 04/02).
 unten: Vergleich der Luftschalldruckpegel [dB] der Oberbauarten Feste Fahrbahn
 INFUNDO® und Schotteroberbau als Funktion der Frequenz [Hz]



Abbildung 18: 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, und selbstablaufende Kurzpräsentationen (auf PC). Der Stand wurde täglich durchgehend mit Personal betreut.

Anhang C

Ausstellung Erde 2.0 — Messestand Projekt LERM



Abbildung C-1: Frontansicht des kompletten Messestands. Zu sehen sind links die beiden Oberbaummodelle, rechts die Box zum Anhören des Hörbeispiels. Eine Dekoration des Hintergrunds oder Plakatierung ließ das Gestaltungskonzept der Messe nicht zu.



Abbildung C-2: Blick vom Messestand aus auf benachbarte Exponate



Abbildung C-3: Oberbaumodelle im Maßstab 1:1 – Frontalansicht.
links: Schotteroberbau, rechts: Feste Fahrbahn INFUNDO mit technischer
Begrünung



Abbildung C-4: Oberbaumodelle im Maßstab 1:1 – Seitenansicht



Abbildung C-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.