



Paul Unterhuber

# Wideband Train-to-Train Channel Model



Technische  
Universität  
Braunschweig



Institut für Nachrichtentechnik

# Wideband Train-to-Train Channel Model

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines Doktors

der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von Paul Unterhuber

aus St.Pölten

eingereicht am: 10.01.2022

mündliche Prüfung am: 05.07.2022

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Kürner
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Reiner S. Thomä
3. Referent: Prof. Dr.-Ing. Uwe-Carsten Fiebig

Druckjahr: 2023

**Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig,  
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik**

Mitteilungen aus dem Institut für Nachrichtentechnik der  
Technischen Universität Braunschweig

Band 73

**Paul Unterhuber**

**Wideband Train-to-Train Channel Model**

Shaker Verlag  
Düren 2023

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8921-9

ISSN 1865-2484

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Diese Promotion basiert auf meiner Forschungstätigkeit am Institut für Kommunikation und Navigation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). Als weltweit erste Forschungseinrichtung haben wir im Rahmen des Roll2Rail Projektes die Wellenausbreitungsbedingungen der drahtlosen Kommunikation zwischen zwei fahrenden Hochgeschwindigkeitszügen gemessen. Als Leiter dieser Zug-zu-Zug Kommunikationsmesskampagne hatte ich die Chance Einzigartiges zu gestalten, Verantwortung zu übernehmen und basierend auf den Messdaten Neues zu erforschen. Für diese Chance, für das in mich gesetzte Vertrauen und für jegliche Unterstützung in den letzten Jahren möchte ich mich herzlichst bedanken.

Als allererstes möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Thomas Kürner für die universitäre Betreuung als externer Doktorrand am Institut für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Braunschweig bedanken. Prof. Kürner war von Beginn an von dem Thema der Zug-zu-Zug Kommunikation begeistert, hat mir durch den gemeinsamen Dialog vor Ort, per Video oder bei Konferenzen immer wieder neue Fragestellungen aufgezeigt und hat mich auf meinem Weg als Forscher stark beeinflusst. Herzlichst bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Eduard A. Jorswieck für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Dankenswerterweise übernahm Prof. Dr.-Ing. Reiner S. Thomä die Rolle des zweiten Referenten. Unsere vorangegangenen Diskussionen im Rahmen der EuCAP Konferenzen und der Tagungen der COST Action CA15104 werden mir in sehr guter Erinnerung bleiben.

Großer Dank gebührt Prof. Dr.-Ing. Uwe-Carsten Fiebig, der als dritter Referent dieser Dissertation zur Verfügung stand und vor allem als Abteilungsleiter gemeinsam mit den Gruppenleitenden der Abteilung Nachrichtensysteme am Institut für Kommunikation und Navigation des DLR ein sehr förderliches Arbeitsumfeld für wissenschaftlich tätige und promovierende Personen geschaffen hat. Darüber hinaus möchte ich die vielen konstruktiven Diskussionen mit und das regelmäßige Feedback von Uwe in den letzten Jahren hervorheben. Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Gruppenleiter Dr.-Ing. Stephan Sand bedanken. Stephan war immer für Diskussionen und fachlichen Austausch zu haben, hielt uns jungen Forschenden in der Forschungsgruppe Vehicular Applications den Rücken frei und bot uns Raum zur Entfaltung und Weiterentwicklung unserer Forschungstätigkeit und Persönlichkeit. Ein herzliches Dankeschön richte ich an mein Kollegium der Forschungsgruppe Vehicular Applications. Der Wille stets zu helfen und Probleme zu diskutieren, die offene und freundliche Kommunikation, und der kollegiale Zusammenhalt, der über die berufliche Beziehung hinaus zu sehr guten Fre-

undschaften geführt hat, ist unbezahlbar. Danke! Dr.-Ing. Michael Walter möchte ich für den fachlichen Austausch, die unzähligen Diskussionen über Kanalmessungen und Modellierung und für sein stets offenes Ohr herzlichst danken. Für die Unterstützung im Bereich Kanalmessung und Modellierung gilt mein Dank auch meinen ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Thomas Jost, Prof. Dr. Wei Wang und Dr.-Ing. Nicolas Schneckenburger. Für die herausragende Unterstützung, die schönen Stunden und die unvergesslichen Momente der Zug-zu-Zug Kommunikationsmesskampagne in Neapel möchte ich mich nochmals bei meinen Kollegen Stephan, Thomas, Wei, Michael, Ibrahim, Benjamin, Dina, Mohammad, Andreas, Thomas, und den Kollegen und Kolleginnen der Projektpartner von Trenitalia, Universität Salzburg und Université Gustave Eiffel bedanken.

Meiner Frau Ira danke ich von ganzem Herzen. Sie hat in den Jahren dieser Doktorarbeit alle Höhen mit mir gefeiert und mich durch alle Tiefen begleitet. Zu guter Letzt danke ich meinen Eltern, meinem Bruder und meinen Freunden für die unentwegte Unterstützung auf meinem bisherigen Lebensweg.

Köln, Dezember 2022

Paul Unterhuber

# Kurzfassung

Durch den steigenden Bedarf an Personen- und Gütertransport und den gleichzeitigen Bemühungen den weltweiten Treibhausgasausstoß zu verringern, setzen viele Staaten auf den Eisenbahnverkehr. Um die Effizienz zu steigern und weiterhin die Sicherheit zu gewährleisten, werden neuartige betriebliche Konzepte wie die virtuelle Zugkupplung oder autonom fahrende Züge entwickelt. Diese Konzepte erfordern zuverlässige und verzögerungsarme Kommunikation. Künftige Kommunikationsstandards werden bestehende Zugfunksysteme verbessern und zuverlässige und verzögerungsarme Zug-zu-Zug (T2T) Kommunikation ermöglichen. Um die erforderliche Zuverlässigkeit zu erreichen, müssen bei der Konzeptionierung der Funksysteme die Ausbreitungsbedingungen berücksichtigt werden. Für sicherheitskritische Anwendungen ist die Untersuchung von korrelierten Fehlerereignissen von großem Interesse. Daher muss ein Kanalmodell das zeitvariante Verhalten der Wellenausbreitungsverhältnisse widerspiegeln. Geeignete Kanalmodelle für die T2T-Kommunikation waren bisher nicht vorhanden.

In dieser Dissertation wird ein breitbandiges T2T-Kanalmodell präsentiert. Das Kanalmodell basiert auf der weltweit ersten T2T-Kanalmesskampagne im C-Band. Aufgrund der sich ändernden Umgebung und der sich bewegenden Sender und Empfänger kann der Übertragungskanal nicht als schwachstationär im Zeit- und Frequenzbereich angenommen werden. Daher werden die zeit- und frequenzvarianten Messdaten analysiert, Stationaritätsregionen abgeleitet und die zeitvariante Streufunktion ermittelt. Basierend auf der Streufunktion werden alle relevanten Parameter der Wellenausbreitung für typische Eisenbahnumgebungen geschätzt. Ausgeprägte Mehrwegekomponenten werden isoliert, analysiert und Objekten entlang der Bahnstrecke zugeordnet. Die neue Metrik der Streuverluste beschreibt den Einfluss eines Objektes auf den Leistungsschwund der Mehrwegekomponente.

Um das zeitvariante Verhalten des Kanals und die typische Geometrie von Eisenbahnumgebungen widerzuspiegeln, verwenden wir ein geometriebasiertes, stochastisches Kanalmodell (GSCM). In diesem Modell können verschiedene Eisenbahnmanöver abgespielt und typische Objekte in der Simulationsumgebung platziert werden. Das GSCM wird für ein offenes und ein hügeliges Gelände parametrisiert, die zeitvariante Streufunktion ausgegeben und anhand von Messdaten validiert. Die Qualität des GSCM wird mittels qualitativen und quantitativen Verfahren beurteilt und zeigt eine hervorragende Modellabbildung der Ausbreitungsbedingungen für T2T-Kommunikation in typischen Eisenbahnumgebungen. Dieses T2T GSCM steht nun für die Entwicklung zukünftiger Funkstandards im Bahnbereich zur Verfügung.



# Abstract

Due to the continuous growth of passenger and freight transport and the simultaneous effort to reduce global greenhouse gas emissions, many countries are relying on railways. To increase efficiency and to ensure safety, novel operational concepts such as virtual coupling or autonomously driving trains are being developed. These concepts require reliable and low-latency communication. Future communication standards will improve existing railway communications and enable highly reliable and low-latency train-to-train (T2T) communication. In order to achieve the required reliability, the propagation conditions must be taken into account when designing the radio systems. For safety critical applications, the investigation of correlated error events is of great interest. Hence, the channel model has to reflect the time-variant behaviour of the propagation channel. Suitable channel models for T2T communications were not available until now.

In this dissertation a wideband T2T channel model is proposed. The channel model is based on C-band measurements. For this reason, the worldwide first wideband T2T channel sounding measurement campaign was conducted. Due to the changing environment and the moving transmitter and moving receiver the propagation channel is shown to exhibit non-wide-sense stationary uncorrelated scattering. The time-frequency-variant measurement data is analysed, the quasi-stationarity region is evaluated and the time-variant spreading function is derived. Based on the spreading function stochastic channel parameters for typical railway environments are estimated. Pronounced multipath components are isolated, tracked and assigned to elements along the railway track. A new metric called scattering loss is introduced to describe the influence of an element on the fading of the multipath component.

To reflect the time-variant behaviour of the channel and the typical geometry of railway environments a geometry-based stochastic channel model (GSCM) for T2T communications is introduced. The GSCM considers all relevant propagation phenomena and various railway manoeuvres. The GSCM is parametrized for an open field and a hilly terrain with cutting environment, and validated against measurement data. The quality of the channel model is accessed by qualitative and quantitative methods and shows an excellent representation of the propagation conditions for T2T communications in typical railway environments. This T2T GSCM is now available for the development of future railway communication standards.



# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Wireless Communications for Railways . . . . .	1
1.2	Channel Models for V2X Communication . . . . .	4
1.3	Signal Processing for V2X Channel Models . . . . .	6
1.4	Aim and Contribution of this Thesis . . . . .	7
1.5	Structure of this Thesis . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Channel Model Fundamentals</b>	<b>11</b>
2.1	Wireless Propagation . . . . .	11
2.1.1	Path Loss and Shadowing . . . . .	11
2.1.2	Multipath Propagation . . . . .	13
2.2	The WSSUS Channel Description . . . . .	15
2.2.1	Stationarity and Correlation Assumptions . . . . .	15
2.2.2	Deterministic Channel Description . . . . .	15
2.2.3	Stochastic Channel Description . . . . .	17
2.3	Channel Sounding . . . . .	18
2.3.1	Combined Transmitter and Receiver Setup . . . . .	18
2.3.2	Separated Transmitter and Receiver Setup . . . . .	18
2.3.3	General Constraints . . . . .	19
2.4	Channel Models . . . . .	21
2.4.1	Deterministic Channel Models . . . . .	21
2.4.2	Stochastic Channel Models . . . . .	22
2.4.3	Geometry-Based Stochastic Channel Models . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Channel Model Architecture</b>	<b>25</b>
3.1	Environments . . . . .	25
3.2	Geometric Elements . . . . .	27
3.3	Stochastic Elements . . . . .	28

<b>4</b>	<b>Propagation Measurement Campaign</b>	<b>31</b>
4.1	Scenarios . . . . .	31
4.1.1	Environments . . . . .	31
4.1.2	Manoeuvres . . . . .	32
4.1.3	Scenario Overview . . . . .	34
4.2	Measurement Setup . . . . .	35
4.2.1	High Speed Trains . . . . .	35
4.2.2	Antennas . . . . .	37
4.2.3	Localization and Environment Tracking . . . . .	37
4.3	Measurement Systems . . . . .	38
4.3.1	DLR RUSK Channel Sounder . . . . .	39
4.3.2	Intelligent Transport System ITS-G5 . . . . .	39
4.3.3	Railway Collision Avoidance System . . . . .	41
4.4	Involved Partners and Participants . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Measurement Results</b>	<b>43</b>
5.1	Position, Distance and Velocity Estimation . . . . .	43
5.2	Clock Drift and Timestamp Correction . . . . .	44
5.3	The LSF for non-WSSUS Channels . . . . .	44
5.4	Stationarity Analysis . . . . .	49
5.5	PDP and DSD . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Channel Characteristics for Typical Railway Environments</b>	<b>59</b>
6.1	Path Loss and Shadow Fading Statistics . . . . .	60
6.2	Multipath Channel Statistics . . . . .	64
6.2.1	Rice Factor . . . . .	64
6.2.2	RMS Delay Spread and RMS Doppler Frequency Spread . . . . .	67
6.2.3	Number of Received Signal Components . . . . .	71
<b>7</b>	<b>Channel Characteristics for Typical Railway Elements</b>	<b>75</b>
7.1	Channel Parameter Estimation . . . . .	75
7.2	Scatterer Position Estimation . . . . .	81
7.3	Fading Statistics . . . . .	83
7.3.1	Overhead Line Masts . . . . .	85
7.3.2	Cross Bridges . . . . .	86
7.3.3	Buildings . . . . .	86
7.3.4	Vegetation . . . . .	89

---

<b>8</b>	<b>Train-to-Train Channel Model</b>	<b>91</b>
8.1	Geometry-based Stochastic Channel Model . . . . .	91
8.1.1	Environments . . . . .	92
8.1.2	Manoeuvres . . . . .	95
8.1.3	Channel Characteristics . . . . .	95
8.2	Implementation . . . . .	99
8.2.1	Delay . . . . .	99
8.2.2	Doppler Frequency . . . . .	100
8.2.3	Complex Weight . . . . .	100
8.2.4	Combined Representation . . . . .	101
8.3	Validation . . . . .	102
8.3.1	Qualitative Validation . . . . .	102
8.3.2	Quantitative Validation . . . . .	108
<b>9</b>	<b>Concluding Remarks</b>	<b>115</b>
9.1	Summary and Conclusion . . . . .	115
9.2	Outlook . . . . .	117
<b>A</b>	<b>GSCM Parameters</b>	<b>119</b>
<b>B</b>	<b>Railway Terminology</b>	<b>121</b>
	<b>Abbreviations</b>	<b>123</b>
	<b>Symbols</b>	<b>127</b>
	<b>List of Publications as First Author</b>	<b>133</b>
	<b>List of Publications as Co-Author</b>	<b>135</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>137</b>
	<b>Web-Links</b>	<b>145</b>