

**Akustik**

Jean Marc Wunderli

**Quellenseparation bei fahrenden Zügen mit  
Hilfe von Schalldruck- und Schallschnelle-  
messungen**

Dissertation TU Berlin



Berichte aus der Akustik

**Jean Marc Wunderli**

**Quellenseparation bei fahrenden Zügen  
mit Hilfe von Schalldruck- und  
Schallschnellemessungen**

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7009-4

ISSN 1611-1303

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407/95 96 - 0 • Telefax: 02407/95 96 - 9

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

# Quellenseparation bei fahrenden Zügen mit Hilfe von Schalldruck- und Schallschnellemessungen

vorgelegt von  
Dipl. Kult. Ing. ETH  
Jean Marc Wunderli  
aus Uster / Schweiz

Von der Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme (Fak V)  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael Möser  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht  
Gutachter: Prof. Dr. Ulrich Weidmann (ETH Zürich)  
Gutachter: Dr. Kurt Heutschi (Empa Dübendorf)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 21. Dezember 2007



# Verdankung

Das Zustandekommen dieser Arbeit wäre ohne Unterstützung von verschiedener Seite nicht möglich gewesen. Ich möchte mich deshalb an dieser Stelle bei allen involvierten Stellen und Personen bedanken. Namentlich erwähnen möchte ich:

- Meinen Arbeitgeber, die Empa, welche mir die Möglichkeit gegeben hat, während zweier Jahre einen Teil meiner Arbeitszeit in dieses Projekt zu investieren.
- Die Abteilung Lärmbekämpfung des Schweizerischen Bundesamtes für Umwelt BAFU, welche die Arbeit finanziell unterstützt hat.
- Dr. Kurt Heutschi für die fachliche Beratung und für das zur Verfügung stellen vieler Grundlagen zu Kapitel 2.
- Markus Studer, der durch seine messtechnische Erfahrung die verschiedenen Feldmessungen erst möglich gemacht hat.
- Prof. Dr. Weidmann für die Übernahme des Korreferats.
- Prof. Dr.-Ing. Hecht, der mich zu diesem Schritt motiviert und mir die Möglichkeit gegeben hat, das Thema bei ihm zu bearbeiten.

# Zusammenfassung

Schienenfahrzeuge weisen im Betrieb je nach Fahrzeug und Betriebszustand verschiedene Schallquellen mit unterschiedlichen Eigenschaften auf. Im Hinblick auf eine Steigerung der Genauigkeit von Schallausbreitungsrechnungen bei Eisenbahnen kommt einer differenzierten Quellenbeschreibung grosse Bedeutung zu. Entscheidend ist dabei eine separate Erfassung der Schallabstrahlung von Teilquellen auf unterschiedlichen Höhen. Als einziges Messverfahren war bisher die Array-Messtechnik in der Lage, eine räumliche Trennung von Teilschallquellen zu gewährleisten. Dieses Verfahren, welches auf einer simultanen Erfassung des Schalldrucks mit einer Vielzahl an Mikrofonen basiert, stellt jedoch sowohl bezüglich der technischen Ausrüstung als auch der Auswertung der Messdaten hohe Anforderungen. Im Rahmen dieser Dissertation wird ein alternatives Verfahren vorgestellt, welches mit dem Ziel entwickelt wurde, Emissionsmessungen mit einer getrennten Erfassung von Teilquellen bei deutlich reduziertem Aufwand und entsprechend tieferen Kosten zu ermöglichen. Die Messmethode wurde im Hinblick auf eine Anwendung bei fahrenden Eisenbahnen erarbeitet und auch bei umfangreichen Feldmessungen getestet; sie kann jedoch grundsätzlich auch bei anderen komplexen Schallquellen, stationär oder in Bewegung, angewendet werden.

Das Messverfahren basiert auf der Kombination eines Schalldruckaufnehmers mit zwei Schallschnellesensoren, welche alle an einem Punkt angeordnet werden. Die Schnellesensoren werden dabei als Richtmikrofone eingesetzt, welche aufgrund ihrer richtungsabhängigen Empfindlichkeiten eine Fokussierung auf ausgesuchte Quellenbereiche erlauben. Aus den drei Messsignalen lassen sich sechs voneinander unabhängige Pegelgrössen, neben dem Schalldruckpegel zwei Schallintensitäts- sowie drei Schallschnellepegel, ableiten. Die Pegeldifferenzen zwischen den abgeleiteten Grössen sind dabei als Zeiger auf den Schwerpunkt der Schallabstrahlung zu interpretieren und erlauben in einer zeitlichen Darstellung die Lokalisierung von Schallquellen auf unterschiedlichen Höhen entlang der Fahrzeugoberfläche. Bei der Auswertung von Messdaten wird eine Integration der Signale über ausgesuchte Zeitabschnitte der Vorbeifahrt vorgenommen. Diese fliessen in ein System von Ausbreitungsgleichungen ein, welche die Vorbeifahrt rechnerisch nachbilden. Wie Simulationsrechnungen unter Berücksichtigung von Messunsicherheiten zeigen, kann dieses überbestimmte Gleichungssystem erfolgreich für Situationen mit bis zu 15 dB(A) Pegeldifferenz zwischen zwei Teilquellen gelöst werden. Die Quellenleistung der lauterer Primärquelle kann dabei mit einer Standardunsicherheit von 0.4 dB(A) und diejenige der Sekundärquelle mit einer Unsicherheit von 1.6 dB(A) bestimmt werden. Die Identifikation der Quellenposition gelingt mit Standardunsicherheiten von 0.2 resp. 0.9 m. Von einer Separation von drei und mehr Quellen ist aufgrund der deutlich zunehmenden Resultatunsicherheiten abzusehen. Immerhin haben aber Testrechnungen ergeben, dass auch bei solch komplexen Situationen sowohl die Gesamtleistung als auch die Schwerpunkte der Schallabstrahlung bei einer Modellierung mit nur zwei Teilquellen korrekt wiedergegeben werden.

Bei einer Trennung von zwei Quellenbereichen gelingt die Bestimmung der Schallleistungen mit einer Genauigkeit und einem Auflösungsvermögen, welches mit Resultaten nach dem Array-Messverfahren vergleichbar ist. Die Einschränkung auf lediglich zwei Teilquellen erscheint bei der vorliegenden Anwendung verkraftbar, da zumeist eine Unterscheidung der Quellen im Dachbereich vom dominierenden Rollgeräusch im Vordergrund steht. Eine exakte Quellenlokalisierung gelingt mit dem vorliegenden Messverfahren weniger gut als bei der Array-Methode. Im Vergleich zu den Abmessungen der Fahrzeuge verbleibt namentlich bei den leiseren Quellen ein vergleichsweise grosser Streubereich. Ein erfolgreicher Einsatz des Verfahrens setzt somit schon Kenntnisse über die Lage der in Frage kommenden Schallquellen voraus, welche jedoch gerade bei Schienenfahrzeugen in aller Regel gegeben sind. Das vorgestellte Quellenseparationsverfahren kann somit die Array-Messtechnik nicht vollständig ersetzen. Es bietet jedoch für eine Vielzahl von Fragestellungen und Aufgaben eine valable Alternative.

# Abstract

Tracked vehicles give rise to various sound sources with differing characteristics, depending on the particular vehicle and its condition. In order to improve the accuracy of sound propagation predictions of railroad cars, a differentiated description of these sources is of great importance. In this respect, it is essential to be able to assess the individual partial sources as a function of height. Until now, the only method of separating the sources geometrically has been with the array technique. Here, the sound pressure is determined simultaneously with multiple microphones. The technique is quite demanding with respect to technical equipment as well as the data analysis. Within the framework of this dissertation an alternative method is presented. The method was developed with a goal of being able to measure the partial sources with reduced effort, respectively lower costs. The method was developed with a view of applying it to moving railroad cars and was tested with numerous field measurements; however it may also be employed to measure other complex sound sources, whether stationary or in motion.

The measurement technique is based on the combination of a sound pressure microphone and two sound velocity transducers, all of which are positioned at one point. The velocity transducers are thus employed as directional microphones. Thanks to their directional characteristics they allow a focusing toward the region of the desired source. From the three measurement signals six independent acoustical quantities may be obtained, namely the sound pressure level, two sound intensities and three sound velocity levels. Based on the level differences between these quantities the center of sound radiation may be derived and in a temporal diagram the sound sources may be localized at various heights along the vehicle surface. In the data analysis the signals are integrated over a selected time segment of the pass-by and are then applied to a system of propagation equations which simulate the pass-by numerically. Considering the measurement uncertainties, simulation calculations show that this overdetermined equation system can be solved successfully for situations having up to 15 dB(A) difference between the partial sources. The source strength of the stronger primary source can thus be determined with a standard deviation of 0.4 dB(A) and the secondary source with a standard deviation of 1.6 dB(A). The source positions can be identified with standard deviations of 0.2 respectively 0.9 m. The method is not recommended for separating three or more sources as the uncertainty increases notably. Nevertheless, the test calculations show that even in such complex situations the total sound power as well as the center of radiation can be modelled correctly by assuming only two sources.

With a separation into two source regions, the respective sound powers can be determined with accuracy and a resolution comparable to that obtained by the array method. The separation into only two partial sources appears acceptable for the present application, since a separation of the sources in the top region from that of the dominating rolling noise is usually sufficient. An exact source localization is less successful with the present method than with the array method. Compared to the dimensions of the vehicle, a relatively large zone of uncertainty remains for the weaker source. Therefore, the successful application of the method requires an a priori knowledge of the position of the sound sources under investigation, which however is normally the case for tracked vehicles. The method presented here thus cannot fully replace the array method but offers a viable alternative for many problems.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Akustische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Akustische Basisgrößen	3
2.1.1 Schalldruck und Schallschnelle	3
2.1.2 Schallintensität und Schalleistung	3
2.2 Pegelgrößen	4
2.3 Entstehung und Abstrahlung von Schall	5
2.3.1 Akustische Elementarstrahler	5
2.3.2 Nahfeld - Fernfeld	6
2.3.3 Quellentypen und Abstandsgesetze	8
2.4 Phänomene der Schallausbreitung im Freien	9
2.4.1 Luftabsorption	9
2.4.2 Bodeneffekt	10
2.5 Durch Zugvorbeifahrten induzierte Mediumsbewegungen	11
<b>3 Grundlagen zum Eisenbahnlärm</b>	<b>15</b>
3.1 Eisenbahnen und ihre Komponenten	15
3.2 Eisenbahnlärmquellen und ihre Eigenschaften	15
3.3 Berechnungsmodelle	20
3.4 Emissionsmess-Verfahren	21
3.5 Schlussfolgerungen	24
3.5.1 Modellierung des Rollgeräuschs als primäre Schallquelle	25
3.5.2 Modellierung der sekundären Schallquellen	25
3.5.3 Anforderungen an ein Messverfahren	26
<b>4 Messtechnik</b>	<b>27</b>
4.1 Schalldruckmikrofone	27
4.2 Schallschnellesensoren nach dem Schalldruck-Gradienten-Prinzip	28
4.3 Schallschnellemessung mittels Microflow-Methode	30
4.4 Tests und Abklärungen im Hinblick auf Feldmessungen	32
4.4.1 Sensorempfindlichkeiten in Abhängigkeit des Einfallswinkels	32
4.4.2 Phasenlage zwischen Schalldruck und Schallschnelle	33
4.4.3 Einfluss der atmosphärischen Bedingungen	34
4.4.4 Einfluss von Mediumsbewegungen	35
<b>5 Messkonzept</b>	<b>37</b>
5.1 Sensorkombinationen und Messgrößen	37
5.2 Lage der Schallquellen im Fahrzeugquerschnitt	38
5.3 Anforderungen an die Sensorpositionierung und -ausrichtung	38
5.4 Zur Unabhängigkeit der resultierenden Messgrößen	42
5.5 Festlegung des Auswertbereiches	42
5.6 Messunsicherheit	43

<b>6</b>	<b>Auswertkonzepte</b>	<b>49</b>
6.1	Beziehung zwischen Messgrößen und Quellenleistung	49
6.1.1	Stationäre ungerichtete Quellen unter Vernachlässigung von Bodeneffekt und Luftdämpfung	49
6.1.2	Bewegte Quellen unter Vernachlässigung von Bodeneffekt und Luftdämpfung	49
6.1.3	Stationäre Quellen unter Berücksichtigung von Bodeneffekt und Luftdämpfung	51
6.1.4	Bewegte Quellen unter Berücksichtigung von Bodeneffekt und Luftdämpfung	52
6.1.5	Berücksichtigung einer gerichteten Abstrahlung	52
6.2	Ansätze zur Quellenseparation	53
6.2.1	Analytische Lösung des Gleichungssystems	54
6.2.2	Näherungsverfahren für 2 und 3 Quellen	54
6.2.3	Optimierungsverfahren zur Bestimmung der Quellenpositionen	56
6.2.4	Zusammenfassung von Flächen- und Linienquellen zu Punktquellen	56
6.3	Auswirkungen von Modellvereinfachungen und unberücksichtigten Effekten	57
6.3.1	Einfluss des Dopplereffekts auf die erfassten Schallleistungsspektren	57
6.3.2	Konzentration der Schallenergie auf eine Quelle pro Höhe	57
6.3.3	Einfluss benachbarter Wagen auf die Messpegel	59
6.3.4	Unsicherheiten bei der Berechnung von Bodeneffekt und Luftdämpfung	60
6.4	Numerische Tests mit den Auswertverfahren	61
6.4.1	Allgemeine Funktionsweise	61
6.4.2	Auswirkung falsch angenommener Quellenpositionen	61
6.4.3	Berücksichtigung von Flächenquellen	62
6.4.4	Einfluss angrenzender Wagen	62
6.4.5	Bedeutung der Richtwirkung auf die Quellenseparation	64
6.4.6	Auswirkung falscher Annahmen zur Anzahl an Teilschallquellen	64
6.5	Numerische Tests unter Einbezug von Messunsicherheiten	65
6.5.1	Vergleich der Quellenseparationsverfahren	65
6.5.2	Vergleich der Sensortypen GRAS und Microflown	65
6.5.3	Einfluss der Teilunsicherheiten auf die Unsicherheit der Resultate	66
6.5.4	Auswirkung der im Gleichungssystem berücksichtigten Messsignale	66
6.5.5	Auswirkung der Messgeometrie auf die Resultatunsicherheit	67
6.5.6	Quantifizierung der Unsicherheit der resultierenden Quellenleistungen und -positionen	69
6.5.7	Auswirkung falscher Annahmen zur Anzahl an Teilschallquellen in Gegenwart von Messunsicherheiten	71
6.5.8	Schlussfolgerungen	71
<b>7</b>	<b>Feldmessungen</b>	<b>75</b>
7.1	Abklärungen zum Bodeneffekt	75
7.1.1	Lautsprechermessungen	75
7.1.2	Erkenntnisse im Hinblick auf die Berechnung des Bodeneffektes	77
7.1.3	Vergleich mit Vorbeifahrtsmessungen	80
7.2	Vertikale und horizontale Abstrahlcharakteristiken	83
7.3	Turbulenzbildung und ihr Einfluss auf die Messung	88
7.4	Auswirkung von Phasenfehlern bei Vorbeifahrtsmessungen	88
7.5	Identifikation einer bekannten Schallquelle bei unterschiedlichen Nutz-/Störschall-Verhältnissen	89
7.6	Antriebsgeräusche bei Lokomotiven vom Typ Re 465 bei 50 km/h	92
7.7	Aerodynamische Geräusche bei einer Lokomotive vom Typ Re 460 bei Fahrgeschwindigkeiten zwischen 160 und 220 km/h	94
7.8	Aerodynamische Geräusche am ICE3 bei Fahrgeschwindigkeiten zwischen 200 und 250 km/h	96
<b>8</b>	<b>Diskussion</b>	<b>103</b>
8.1	Messgrößen	103
8.2	Vergleich der Schnellesensoren	104
8.3	Messgeometrie und Sensorausrichtung	104
8.4	Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Verfahrens	105

<b>Anhang</b>	<b>107</b>
<b>A Eigenschaften der Messsonden</b>	<b>107</b>
A.1 Spezifikationen . . . . .	107
A.2 Kalibration . . . . .	108
A.3 Datenaufbereitung . . . . .	109
A.4 Labormessung der Empfindlichkeit der Messsonden in Funktion des Schalleinfallswinkels	111
A.5 Bestimmung der Messunsicherheit als Folge von Abweichungen zwischen effektiven und theoretischen Empfindlichkeiten in Funktion des Schalleinfallswinkels . . . . .	116
<b>B Numerische Tests mit dem Quellenseparationsverfahren</b>	<b>121</b>
B.1 Testresultate für 2 und 3 Teilquellen unter Verwendung von 6 Messsignalen, Sensortyp GRAS . . . . .	123
B.2 Testresultate für 2 und 3 Teilquellen unter Verwendung von 6 Messsignalen, Sensortyp Microflown . . . . .	125
B.3 Repetition der Testrechnungen für 2 und 3 Teilquellen unter Verwendung von 5 Messsignalen, ohne Schalldruckpegel, Sensortyp GRAS . . . . .	127
B.4 Repetition der Testrechnungen für 2 und 3 Teilquellen unter Verwendung von 5 Messsignalen, ohne Schalldruckpegel, Sensortyp Microflown . . . . .	128
B.5 Zusammenstellung der Standardunsicherheiten der Quellenleistungen . . . . .	129
<b>C Lautsprechermessungen zur Charakterisierung des Bodeneffektes</b>	<b>131</b>
C.1 Kiesen-Oberwichttrach und Steinen, April und Juni 2003 . . . . .	131
C.2 Mattstetten-Rothrist, Oktober 2005 . . . . .	141
C.3 Bäretswil, September 2006 . . . . .	144
<b>D Messungen an der Strecke Kerzers-Müntschemier September 2003</b>	<b>153</b>
D.1 Situation . . . . .	153
D.2 Identifikation von Sekundärquellen anhand von Pegel-Zeit-Verläufen . . . . .	154
<b>E Messungen an der Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist Juni 2005</b>	<b>161</b>
E.1 Situation . . . . .	161
E.2 Identifikation von Sekundärquellen anhand von Pegel-Zeit-Verläufen . . . . .	163
E.3 Einfluss von Turbulenzen . . . . .	167
E.4 Diskussion der Phasenlage . . . . .	174
E.5 Vergleich von Messdaten der GRAS- und der Microflown-Sonden . . . . .	179
<b>F Messungen an der Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist Oktober 2005</b>	<b>183</b>
F.1 Situation . . . . .	183
F.2 Einfluss von Turbulenzen . . . . .	185
<b>G Messungen an der ICE-Strecke Köln-Rhein/Main April 2006</b>	<b>197</b>
G.1 Situation . . . . .	197
G.2 Identifikation von Sekundärquellen anhand von Pegel-Zeit-Verläufen . . . . .	199
G.3 Einfluss von Turbulenzen . . . . .	206
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>212</b>



# Abkürzungsverzeichnis

$\alpha$ :	Vertikaler Abstrahlwinkel [Radians] <b>oder</b> Absorptionskoeffizient der Luftdämpfung [dB/km]
$\beta$ :	Horizontaler Abstrahlwinkel [Radians]
$\gamma$ :	Ausrichtung der Schnelle- bzw. Intensitätssonde relativ zur Horizontalen [Radians]
$\delta$ :	Grenzschichtdicke [m]
$\zeta$ :	Azimuthwinkel [Radians]
$\eta$ :	Elevationswinkel [Radians]
$\lambda$ :	Wellenlänge [m]
$\mu$ :	Mittlere Differenz der Quellenleistungen [dB]
$\pi$ :	Kreiszahl = 3.1416
$\rho$ :	Dichte [g/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$ :	Strömungswiderstand [Ray] <b>oder</b> Abstrahlgrad [ ] <b>oder</b> Standardabweichung der Quellenleistungen [dB]
$\sigma'$ :	Abstrahlmass [ ]
$\omega$ :	Kreisfrequenz = $2\pi f$ [Hz]
$\theta$ :	Winkel zwischen der Sondenausrichtung und dem Vektor von der Sonden- zur Quellenposition [Radians]
$\psi$ :	Winkel zwischen dem Vektor von der Quellen zur Sondenposition und der Horizontalen quer zur Fahrtrichtung (Achsrichtung $y$ ) [Radians]
$\Delta h$ :	Horizontaler Abstand zwischen Quellenposition und Mikrofon [m]
$\Delta t$ :	Dauer einer Vorbeifahrt vom Fahrzeugbeginn bis zur Mitte des ersten Drehgestells [s]
$\Delta v$ :	Vertikaler Abstand zwischen Quellenposition und Mikrofon [m]
$\vec{a}_1$ :	Einheitsvektor relativ zur Orientierung der Schnelle- bzw. Intensitätssonde = $\begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{bmatrix}$
$\vec{a}_2$ :	Vektor vom Messpunkt zur Quellenposition = $\begin{bmatrix} ut \\ \Delta h \\ \Delta v \end{bmatrix}$
$a$ :	Fahrzeugdurchmesser [m]
$A_{atm}$ :	Luftdämpfung [dB]
$c$ :	Schallgeschwindigkeit [m/s]
$d$ :	Kürzester Abstand zwischen Quellenposition und Messpunkt [m] = $\sqrt{\Delta v^2 + \Delta h^2}$
$D_{gr}$ :	Bodeneffekt [dB]
$f$ :	Frequenz [Hz]
$h_s$ :	Quellenhöhe über Boden [m]
$h_r$ :	Empfängerhöhe über Boden [m]
$I$ :	Schallintensität [W/m <sup>2</sup> ]
$I_0$ :	Referenz-Schallintensität = $10^{-12}$ W/m <sup>2</sup>
$k$ :	Wellenzahl = $\frac{2\pi}{\lambda}$ [m <sup>-1</sup> ]
$L_{eq}$ :	Mittelungspegel bzw. äquivalenter Dauerschallpegel [dB]
$L_E$ :	Schallexpositionspegel bzw. Schallenergiepegel [dB]
$L_I$ :	Schallintensitätspegel [dB]
$L_p$ :	Schalldruckpegel [dB]
$L_v$ :	Schallschnellepegel [dB]
$L_w$ :	Schallleistungspegel [dB]
$N$ :	Anzahl ausgewertete Fahrzeuge
$p$ :	Schalldruck [Pa]
$p_0$ :	Referenz-Schalldruck = $2 \cdot 10^{-5}$ Pa
$p_{eff}$ :	Effektivwert des Schalldrucks [Pa]

$Q$ :	Kugelwellenreflexionskoeffizient [ ]
$r$ :	Abstand zwischen Quellenposition und Messpunkt [m] = $\sqrt{\Delta v^2 + (ut)^2 + \Delta h^2}$
$r_0$ :	Referenzabstand von 1 m
$r_p$ :	Reflexionskoeffizient der ebenen Welle [ ]
$R_1$ :	Abstand Quelle - Empfänger [m]
$R_2$ :	Abstand Quelle - Reflexionspunkt - Empfänger [m]
$RC$ :	Zeitkonstante für die gleitende Mittelung [s]
$S$ :	Fläche [m <sup>2</sup> ]
$t$ :	Zeit [s]
$T$ :	Integrationszeit, Messperiode [s]
$T_0$ :	Referenz-Zeit = 1 s
$u$ :	Fahrgeschwindigkeit des Zuges [m/s]
$U$ :	Standardunsicherheit der Quellenleistungen [dB]
$v$ :	Schallschnelle [m/s]
$v_{eff}$ :	Effektivwert der Schallschnelle [m/s]
$W$ :	Schalleistung [W]
$x$ :	Koordinate in Richtung der Schiene
$y$ :	Koordinate quer zur Schienenrichtung
$z$ :	Koordinate in vertikaler Richtung
$Z$ :	Akustische Impedanz [Ns/m <sup>3</sup> ]