

# Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 316

**bast**

# Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände

von

Paul Lindner  
Benedikt Hartmann  
Christian Schulze  
Jörn Hübelt

Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 316

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A -Allgemeines  
B -Brücken- und Ingenieurbau  
F -Fahrzeugtechnik  
M-Mensch und Sicherheit  
S -Straßenbau  
V -Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt: FE 02.0385/2015/IRB:**  
Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände

**Fachbetreuung:**  
Michael Chudalla

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9331  
ISBN 978-3-95606-442-5  
Bergisch Gladbach, Mai 2019



## Kurzfassung – Abstract

### Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände

Im Laufe des Lebenszyklus von Lärmschutzwänden (Lsw) können diverse Schadensbilder auftreten. Diese reichen von Löchern und Schlitten zwischen abschirmenden Wandelementen durch Unfallschäden oder Montagemängel bis hin zu Witterungs- und Verschmutzungserscheinungen von Absorptionsmaterialien. Die Auswirkung dieser Schäden auf die akustischen Eigenschaften des Schallschirms ist bisher nicht detailliert untersucht.

Das Vorhaben soll diese Lücke schließen und stellt einen Katalog bereit, auf dessen Basis konkrete Angaben zum Einfluss spezifischer Schäden insbesondere auf die Reduzierung der Schalldämmung und damit die Abschirmwirkung des Schallschirms gemacht werden können. Auf Basis dieser Angaben lassen sich ggf. gezielte und kosteneffiziente Maßnahmen ergreifen, um den Schallschutz von Immissionsorten dauerhaft zu gewährleisten.

Zur Erstellung des Schadenskatalogs wird das bestehende nationale Schallausbreitungsmodell der RLS 90 um eine Beschreibung der Schalltransmission durch die Lsw sowie die geometrische Berücksichtigung von runden und schlitzförmigen Leckagen erweitert. Simulationen zeigen, dass hinter der Leckage in der Lsw ein akustisch kritischer Bereich entsteht. Die Grenze dieses Bereichs kann innerhalb des Schadenskatalogs für eine Vielzahl geometrisch abstrahierter Schäden abgelesen und mit einem Bebauungsplan abgeglichen werden. Katalogparameter sind insbesondere die Wirkfläche (Produkt aus Transmissionsgrad und Fläche runder Leckagen) und die Wirkbreite (Produkt aus Transmissionsgrad und Breite schlitzförmiger Leckagen).

Es wird gezeigt, dass der Transmissionsgrad von Leckagen zuverlässig durch Berechnung nach MECHEL sowie durch Messung an Lsw in situ bestimmt werden kann. Letztere dienen zudem der erfolgreichen Validierung der verwendeten Modelle zur Beschreibung des Transmissionsgrads von Leckagen sowie der Schallausbreitung an Lsw mit Berücksichtigung der Transmission.

### Acoustic effectivity of old noise barriers

Over time, different kinds of defects can appear at noise barriers. For example, this includes holes and slits between screening elements due to accidental destruction and faults during assembly or effects of weather and clogging on absorbing materials. The effect of those defects on the acoustic properties of noise barriers has not been examined in detail yet.

The project is meant to close this gap and to provide a catalog which allows to predict the influence of specific defects especially on the sound insulation of the noise barrier and thus on its screening effectivity. Based on the information contained in the catalog, it is possible to take cost efficient action to permanently ensure the protection of immission sites.

To compile the catalog, the nationally standardized sound propagation model of the RLS 90 is extended by the description of the sound transmission through the noise barrier together with the geometrical consideration of leakages in the shape of holes and slits. Simulations show the formation of an acoustically critical area behind the leakage in the noise barrier. The boundary of this area can be taken from the catalog for a multitude of geometrically abstracted damages for further comparison to a zoning map. The catalog parameters taken into account are particularly the effective area (product of the transmission coefficient and the area of round leakages) or the effective width (product of the transmission coefficient and the width of leakages in the shape of slits).

It is shown that the transmission coefficient of leakages can be predicted reliably by means of the calculation according to MECHEL as well as by measurements at noise barriers in situ. Furthermore, the latter ones are used to successfully validate the models applied to describe the sound transmission coefficient of leakages and the sound propagation behind noise barriers in consideration of the transmission.

## Summary

### Acoustic effectivity of old noise barriers

#### 1 Introduction

Noise barriers are used to shield immission sites like industrial or residential areas from unwanted noise. That is why it is of highest importance to be able to predicate the influence of defects at noise barriers on their acoustic effectivity at the relevant immission sites quickly and straightforward. Therefore, within the present project a method was developed that serves this purpose.

#### 2 Review of literature

Due to the absence of overall investigations of this topic, already existing publications regarding the determination of the impact of constructional and aging defects on the acoustic effectivity of noise barriers were reviewed and discussed. It appeared that a multitude of references exist, which address subtasks of the project goal. The reviewed information deals with the possible compilation of a catalog of defects, with the acoustic description of such defects as well as with various methods to measure the transmission loss and the insertion loss of noise barriers with or without defects in situ and in the laboratory. It became apparent that the majority of previous investigations were carried out with satisfying accuracy at leakages that can be geometrically simply described, especially leakages in the shape of round holes and horizontally or vertically oriented slits.

#### 3 Simulation of sound field

At noise barriers with assigned impedance being installed over ground with impedance discontinuity, very detailed sound field simulations can be carried out by applying a complex sound propagation model. In view of a future integration of the transmission characterizations into the nationally standardized propagation model of the RLS, the present model of the RLS 90 was implemented and extended to consider an additional transmission path through the noise barrier. Thereby, the incident cylindrical sound wave from the traffic flow (line source, see Figure 3.1) is transformed into a spherical wave behind the leakage within the noise barrier (point source) whose sound power is reduced due to the transmission through the noise barrier.

The resulting model enables the calculation of the power of the sound wave transmitted through the leakage compared to the power of the sound wave diffracted around the top edge of the noise barrier. As a result, the influence of the leakage on the insertion loss of the noise barrier can be determined for arbitrary immission sites. Furthermore, by comparison of the power of the transmitted and the diffracted part of the sound wave, a simple criterion was defined that can be applied to get a fast and simple statement regarding the influence of the considered leakage behind the noise barrier.

The results of the sound field simulations showed the formation of an acoustically critical area behind the leakage. Within this area, the leakage has a relevant influence on the acoustic effectivity of the noise barrier, meaning that the immission sound pressure level increases by the presence of the defect in comparison to the immission sound pressure level behind the intact noise barrier. For

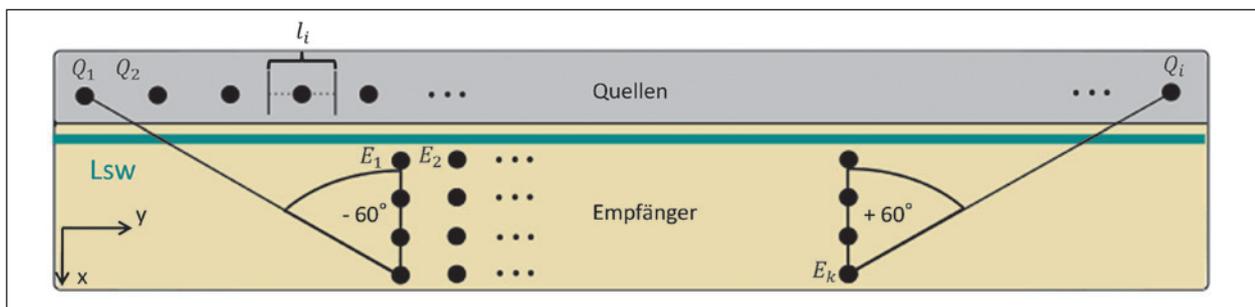


Fig. 3.1: Principle sketch of source and receiver positions considered within the simulations of the sound field along the noise barrier in top view; grey: road with source positions  $Q_i$ ; green: noise barrier; beige: area with receiver positions  $E_k$

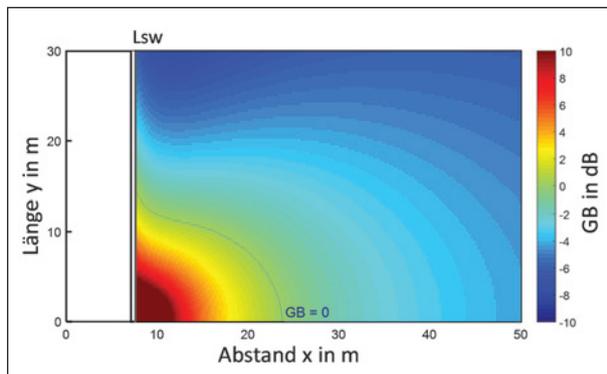


Fig. 3.2: Overall condition  $GB$  calculated in a height of 2,8 m above ground in top view of noise barrier with a height of 9 m and a leakage of 0,5 m<sup>2</sup> with  $\tau = 0,4$ ; blue: boundary of acoustically critical area with  $GB = 0$  symmetrical around leakage behind the noise barrier

this purpose, an analytical description of this overall condition  $GB$  was defined on the basis of the difference between the noise transmitted through the noise barrier and the noise diffracted around the top edge. Exemplarily, Figure 3.2 shows the calculated overall condition in a height of 2,8 m above ground in top view of a noise barrier with a height of 9 m and a leakage of 0,5 m<sup>2</sup> with a transmission coefficient of 0,4. In addition, the boundary of the acoustically critical area ( $GB = 0$ ) that lies symmetrically around the leakage behind the noise barrier is marked in blue.

It turns out that the influence radius of the leakage increases, the higher the noise barrier is, the closer the leakage is located to the ground and the higher the effective area (product of area and transmission coefficient) of the leakage is. By comparing the calculated influence radius to a zoning map, it is possible to prioritize the repairs of defects at noise barriers based on their acoustic properties.

#### 4 Analysis of defects

An extensive analysis of defects at real noise barriers was performed. Afterwards, the different types of defects were classified concerning their acoustic relevance and were assigned to leakages that can be geometrically simply described, such as round holes and horizontally or vertically oriented slits. In Figure 4.1 typical defects at noise barriers are shown exemplarily.

In order to analytically describe the effect of such leakages on the acoustic properties of noise barriers, the implementation of the calculation model according to [MECHEL, 1986] was validated.



Fig. 4.1: Diverse defects at noise barriers; from top left to bottom right: absent aluminum element of noise barrier, leakage in the shape of a slit due to absent ground sealing, slit due to absent sealing between concrete elements of noise barrier, holes in insulating material of a wooden noise barrier due to mechanical impact (sources: BMVI; Walloon Road Administration, Belgium)

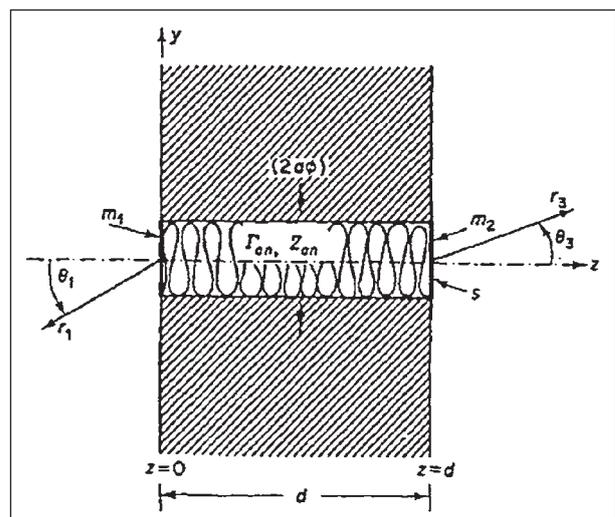


Fig. 4.2: Sketch of cross section of noise barrier with round leakage from [MECHEL, 1986]

By means of this model, the transmission coefficient of leakages in the shape of round holes and slits can be reliably predicted and further integrated into the propagation model developed above.

The geometry to determine the transmission coefficient of round leakages according to [MECHEL, 1986] is sketched in Figure 4.2 in lateral cross section. Thereby, a leakage with the diameter  $2a$  and the length  $d$  is sealed on the front and the rear side by covering caps featuring the surface-related masses  $m_1$  and  $m_2$ . Inside the leakage, a homogeneous, isotropic porous absorber is located characterized by the normalized propagation constant  $\Gamma_{an}$  and the normalized characteristic impedance  $Z_{an}$ .

## 5 Measurement of transmission loss and sound absorption in situ

Within the project, measurements were performed in situ to determine the acoustic properties of noise barriers based on the Adrienne Procedure described in DIN EN ISO 1793-5 and DIN EN ISO 1793-6. In the first step, a test noise barrier was installed, in which geometrical exact leakages in the shape of round holes and slits were integrated. Figure 5.1 exemplarily shows the measurement setup for a leakage in the shape of a horizontally oriented slit in the test noise barrier.

The primary goal of the measurements in situ was to validate the calculation model of [MECHEL, 1986]. Figure 5.2 exemplarily shows the comparison of the transmission loss index  $ST$  of a horizontal slit and the simulated transmission loss according to [MECHEL, 1986]. A good agreement between the



Fig. 5.1: Setup for measurements at test noise barrier with geometrical exact leakages

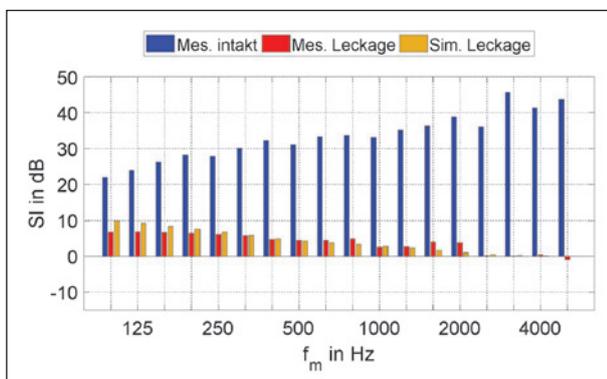


Fig. 5.2: Transmission loss of investigated noise barrier; blue: measurement result of intact noise barrier; red: measurement result of noise barrier with horizontally oriented slit; orange: simulation result of noise barrier with horizontally oriented slit

results of the measurement and the simulation is noticeable.

This requires the application of a defined correction function that considers the frequency-dependent illuminated area of the source-receiver geometry (see Figure 5.3) that is effective during the measurement in situ. This correction function defines the surface ratio of the leakage and the intact noise barrier within the total area that is illuminated during the measurement (Fresnel zone, see Figure 5.4).

Based on this correction function, it is possible to import values of the transmission loss of defect noise barriers measured in situ into the extended sound propagation model to further calculate the influence of defects on the immission sites behind the noise barrier. It was shown that for leakages that are very large compared to the illuminated area, a correction function of the transmission coefficient measured in situ is not necessary. By means of measurements in situ in greater distance to the noise barrier, the propagation model could be validated as well. In the range of the accuracy of measurement and model, a good accordance between the results of the measurement in situ and the sound field simulations was shown.

In a second step, measurements were performed in situ at chosen real noise barriers with real defects

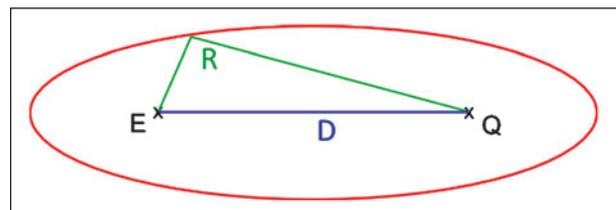


Fig. 5.3: Rotational ellipsoid with the focal points coinciding with the receiver (E) and the source (Q); D: distance between source and receiver; R: distance between source and receiver via circumference of ellipse

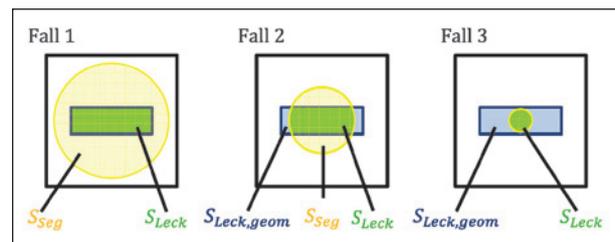


Fig. 5.4: Illuminated area  $S_{Seg}$ , geometrical area of leakage  $S_{Leck,geom}$  and area of leakage to be considered  $S_{Leck}$  for three different cases at a leakage in the shape of a slit

near motorways in the Free State of Saxony. Exemplarily, Figure 5.5 shows the setup for the measurement at a noise barrier with an approximately round leakage caused by mechanical impact. Here again, the calculation model according to [MECHEL, 1986] could be applied successfully to reproduce the results of the measurement in situ by means of simulation. Figure 5.6 shows a very good accordance between the transmission loss of the investigated glass noise barrier determined by measurement and by simulation.

However, it became apparent that the correct determination of the material-specific and the geometrical parameters of the leakages required for modelling the acoustic behaviour (e.g. airflow resistivity of the absorber material, surface-related mass of rear covers, residues of interlayers, dimensions of unshaped defects) cannot be sufficiently achieved in all cases.



Fig. 5.5: Test setup for measurement of transmission loss of noise barrier with defect in situ

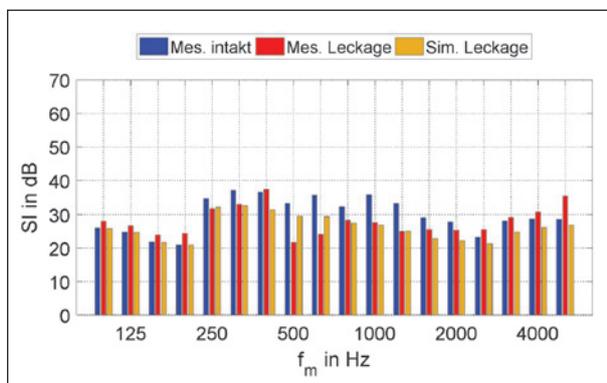


Fig. 5.6: Transmission loss of investigated glass noise barrier; blue: measurement result of intact noise barrier in situ; red: measurement result of noise barrier with leakage in situ; orange: simulation result of noise barrier with leakage; simulation parameters:  $r_{Leck} = 45 \text{ mm}$ ,  $\rho_{AK} = 1,0 \text{ g/cm}^3$ ,  $d_{AK} = 0,5 \text{ mm}$

## 6 Catalog of defects

Based on the extended sound propagation model, a catalog of defects at noise barriers was provided. For this, leakages in the shape of holes and slits were considered as basic geometrical shapes for describing usual defects at noise barriers. As before, it was distinguished between horizontally and vertically oriented slits. In order to be able to evaluate a high multitude of defects, for round leakages an effective area (product of area and transmission coefficient), for slits an effective width (product of width of slit and transmission coefficient) was introduced as catalog parameter. Besides, the boundary of the acoustically critical area is visualized for different heights of the noise barrier from 3 m to 9 m as well as for varying heights of the leakage above ground. Exemplarily, Figure 6.1 shows the influence radius of a leakage in the shape of a horizontally oriented slit with a length of 4 m with different effective widths  $\tau_L \cdot b_L$  in a noise barrier with a height of 5 m (in top view).

From now on, by applying this catalog, it is possible to evaluate the effect of existing leakages at noise barriers on the immission sound pressure level behind noise barriers based on their geometrical shape and position at the noise barrier. This allows the prioritization of repairs of defects at noise barriers based exclusively on the acoustic assessment. Furthermore, by means of the calculation model of [MECHEL, 1986], it is possible

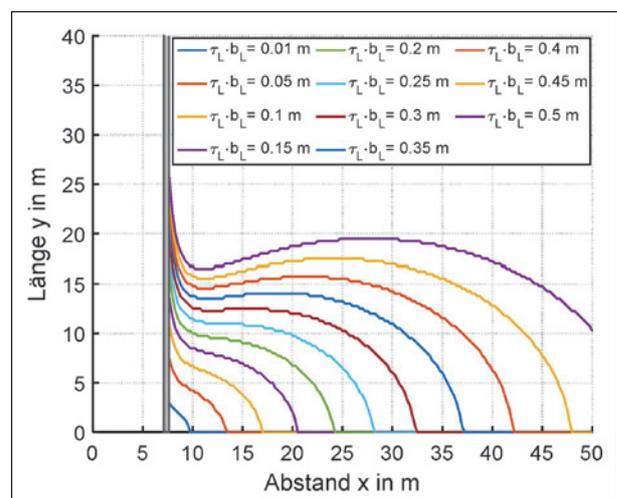


Fig. 6.1: Calculated effective radius of a leakage in the shape of a horizontally oriented slit with a length of 4 m and a varying effective width  $\tau_L \cdot b_L$  in a noise barrier of 5 m height (in top view) for an average height of the leakage of 2,5 m

to predict the transmission coefficient of leakages in the shape of round holes and slits. Alternatively, especially in the case of complex leakages that are difficult to simplify regarding their geometry, measurements of the transmission coefficient at the defect area of the noise barrier can be carried out in situ. By means of the developed correction function regarding the illuminated area, the results of measurements in situ can be converted into an exclusive transmission coefficient of the leakage. For leakages whose dimensions exceed the diameter of the illuminated area, a correction of the transmission coefficient measured in situ is not required. The transmission coefficient obtained this way can be used to read the acoustical relevance of the considered leakage out of the catalog, by taking the effective area or the effective width of the leakage, respectively, into account.

## References

MECHEL, F., P.: The acoustic sealing of holes and slits in walls. *Journal of Sound and Vibration*, 1986

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	11	<b>4</b>	<b>Schadensbildanalyse</b> .....	35
<b>2</b>	<b>Literaturstudie</b> .....	12	4.1	Statistik zu Lärmschutzwänden .....	35
2.1	Schallfeldsimulationen .....	12	4.2	Typspezifische Schadensbilder .....	36
2.2	Systematisierung von Schadens- bildern an Lärmschutzwänden .....	13	4.2.1	Aluminium-Lsw .....	36
2.3	Modelle zur akustischen Abbildung von Schadensbildern .....	15	4.2.2	Holz Ls w .....	38
2.3.1	Randelemente-Methode (BEM) .....	15	4.2.3	Beton-Ls w .....	39
2.3.2	Geometrischer Ansatz .....	16	4.2.4	Transparente Lsw .....	40
2.3.3	Traffic Noise Model .....	17	4.2.5	Gabionen .....	41
2.3.4	Ermittlung des Transmissions- grads über Integralansatz .....	18	4.2.6	Zusammenfassung Schadens- analyse .....	41
2.3.5	Akustische Optimierung von Lärm- schutzwänden in Leichtbauweise .....	19	4.3	Kategorisierung der Schäden und Schadenskatalog .....	41
2.4	Messung der akustischen Kenn- werte von Lärmschutzwänden in situ .....	21	4.4	Modell zur Beschreibung des Transmissionsgrads von Schäden .....	44
2.4.1	Messung des Schallreflexionsindex gemäß [DIN EN 1793-5] .....	21	4.4.1	Runde Leckagen .....	44
2.4.2	Messung des Schalldämmungsindex gemäß [DIN EN 1793-6] .....	21	4.4.2	Schlitzförmige Leckagen .....	47
2.4.3	Erfahrungen aus In-situ-Messungen an Lsw mit Adrienne-Verfahren .....	23	<b>5</b>	<b>Messung von Schalldämmung und Schallabsorption in situ</b> .....	48
2.4.4	Alternative Messmethoden zur Bestimmung der Wirkung von Leckagen in Lsw .....	25	5.1	Messungen an einer Test-Lsw .....	49
<b>3</b>	<b>Schallfeldsimulationen</b> .....	27	5.1.1	Aufbau von Test-Lsw .....	49
3.1	Quell-Empfänger-Geometrie .....	27	5.1.2	Messergebnisse .....	51
3.2	Schallausbreitung an Lsw ohne Transmission .....	28	5.1.3	Simulationsergebnisse und Bewertung über Korrekturfunktion .....	53
3.2.1	Schallausbreitungsmodell .....	28	5.1.4	Simulation im Ausbreitungsmodell .....	56
3.2.2	Simulationsergebnisse .....	30	5.2	Messungen in situ .....	60
3.3	Schallausbreitung an Lsw mit Transmission .....	31	5.2.1	untersuchte Schäden an Lsw .....	60
3.3.1	Schallausbreitungsmodell .....	31	5.2.2	Messergebnisse .....	61
3.3.2	Simulationsergebnisse .....	33	5.2.3	Simulationsergebnisse und Bewertung über Korrekturfunktion .....	63
			<b>6</b>	<b>Schadenskatalog</b> .....	66
			6.1	Runde Leckagen .....	67
			6.2	Horizontale schlitzförmige Leckagen .....	69
			6.3	Vertikale schlitzförmige Leckagen .....	82
			6.4	Zusammenfassung Schadenskatalog .....	82

<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	83
	<b>Literatur</b> .....	85
	<b>Bilder</b> .....	87
	<b>Tabellen</b> .....	97

## 1 Einleitung

Im Laufe des Lebenszyklus von Lärmschutzwänden (Lsw) können diverse Schadensbilder auftreten. Diese reichen von Löchern und Schlitzen zwischen abschirmenden Wandelementen durch Unfallschäden oder Montagemängel bis hin zu Witterungs- und Verschmutzungserscheinungen von Absorptionsmaterialien. Die Auswirkung dieser Schäden auf die akustischen Eigenschaften des Schallschirms ist bisher nicht detailliert untersucht.

Das Vorhaben soll diese Lücke schließen und stellt einen Katalog bereit, auf dessen Basis konkrete Angaben zum Einfluss spezifischer Schäden insbesondere auf die Reduzierung der Schalldämmung und damit die Abschirmwirkung des Schallschirms gemacht werden können. Auf Basis dieser Angaben lassen sich ggf. gezielte und kosteneffiziente Maßnahmen ergreifen, um den Schallschutz von Immissionsorten dauerhaft zu gewährleisten.

Im ersten Kapitel werden bisherige Erkenntnisse bestehender Publikationen zur Berücksichtigung von Auswirkungen von Bau- bzw. Alterungsschäden auf die Schalldämmung und die Schallabsorption von Lsw zusammengefasst. Beginnend mit einem Überblick über die Simulation der Schallausbreitung an Lsw erfolgt eine Vorstellung möglicher Vorlagen für die Erstellung eines Schadenskatalogs sowie die Diskussion vorhandener Modelle zur akustischen Beschreibung von Schadensbildern. Abschließend werden verschiedene standardisierte und nicht-standardisierte Methoden für die messtechnische In-situ-Prüfung der akustischen Eigenschaften von Lsw vorgestellt.

Das darauf folgende Kapitel 3 behandelt die Durchführung von Schallfeldsimulationen an Lsw. Ausgehend von der typischerweise betrachteten Schallausbreitung an Lsw ohne Berücksichtigung der Schalltransmission durch die Lsw erfolgt die Erweiterung des eigensetzten Schallausbreitungsmodells um die Beschreibung von Ausbreitungspfaden durch die Wand hindurch. Dabei lassen sich Schadstellen auf Basis eines vorgegebenen Transmissionsgrads und einer Geometrie in das Modell der Lsw integrieren. Durch die Integration der Schadstellen entsteht ein Bereich hinter der Lsw, in dem sich der Immissionsschalldruckpegel gegenüber der intakten Lsw erhöht. Dieser akustisch kritische Bereich befindet sich in unmittelbarer Nähe der Schadstellen. Außerhalb des Bereiches bleibt die schalltechnische Wirksamkeit der Lsw (Schirmwir-

kung) durch die Schadstellen unbeeinflusst. Innerhalb von Kapitel 3 wird eine analytische Grenze des akustischen Einflussbereiches der Schadstellen definiert. Durch Abgleich dieser Grenze mit einem Bauungsplan hinter der betrachteten Lsw kann folglich aufgezeigt werden, ob Instandsetzungsmaßnahmen aus schalltechnischer Sicht erforderlich sind oder nicht.

Das bis dahin angewendete erweiterte Schallausbreitungsmodell bietet noch keine Möglichkeit, eventuell auftretende Leckagen näher zu definieren und muss erst durch ein weiteres Modell zur Beschreibung des Transmissionsgrads von spezifischen Leckagen ergänzt werden. Dazu erfolgt in Kapitel 4 zunächst eine umfangreiche Schadensbilddanalyse an Lsw in Verbindung mit einer systematischen Kategorisierung von Leckagen. Darin zeigt sich, dass eine Vielzahl möglicher Schäden an Lsw auf zwei Geometrien – kreisrunde Löcher und schlitzförmige Leckagen – reduziert werden können. Anschließend wird ein zuverlässiges Modell zur Transmissionsgradbestimmung von Aperturen in Wänden aus [MECHEL, 1986] betrachtet. Damit kann die spektrale Schalltransmission von kreis- und schlitzförmigen Leckagen in Abhängigkeit von deren Größe berechnet werden. Dabei können sowohl eine Füllung der Leckage mit einem offenzelligen Absorbermaterial als auch eventuell vorhandene Abschlusskappen berücksichtigt werden.

Kapitel 5 behandelt In-situ-Messungen der Schalldämmung und des Schallabsorptionsgrads an Lsw. Die ersten Untersuchungen wurden an einem Testaufbau eines Schallschirms durchgeführt, in den gezielt Schadstellen eingebracht wurden, die geometrisch einfach zu beschreiben sind. Die erzielten Messergebnisse dienen der Validierung des in Kapitel 4 vorgestellten Modells nach [MECHEL, 1986] sowie des erweiterten Schallausbreitungsmodells aus Kapitel 3. Insbesondere die Betrachtung einer beleuchteten Fläche durch Einführung einer In-situ-Korrektur steht dabei im Vordergrund. Weitere durchgeführte In-situ-Messungen an realen Schadstellen an Lsw dienen der Überprüfung der Praktikabilität der Modellierung der akustischen Wirksamkeit von Schadstellen auf Basis von materialspezifischen und geometrischen Vorgaben, den Eingangsparametern für das Modell nach [MECHEL, 1986].

Kapitel 6 beinhaltet einen Katalog zur Angabe des akustischen Einflussbereiches von typischen Schadstellen an Lsw. Um diesen zu bestimmen, erfolgten Schallfeldsimulationen auf Basis des erwei-

terten Schallausbreitungsmodells aus Kapitel 3. Die gezeigten Kartierungen markieren die Grenze des akustisch kritischen Bereichs in Abhängigkeit von der Wirkfläche runder Leckagen bzw. der Wirkbreite schlitzförmiger Leckagen mit horizontaler oder vertikaler Ausrichtung.

## 2 Literaturstudie

### 2.1 Schallfeldsimulationen

Die in der Praxis am weitesten verbreitete analytische Beschreibung der schalltechnischen Wirkung von Schallschirmen ist die Methode nach [MAEKAWA, 1968]. MAEKAWA führte Modellmessungen für das Abschirmmaß an einem dünnen festen Schirm durch. Er wiederholte diese Versuche für verschiedene Frequenzen und eine Vielzahl geometrischer Anordnungen von Schallschirm, Quelle und Immissionsort. Die Messwerte wurden mit den nach der Kirchhoffschen Beugungstheorie berechneten Werten verglichen und als approximierte Kurve, auch bezeichnet als Maekawa's Chart, aufgetragen.

Im Unterschied zur Berechnungsmethode von MAEKAWA wird bei der Lösung von [LAM, 1994] der Schalldruck der einzelnen am Empfangsort eintreffenden Schallstrahlen als Feldgröße summiert. Dadurch können durch Laufzeitunterschiede hervorgerufene Interferenzen der Schalldruckwerte berücksichtigt werden, die einen bedeutenden Einfluss auf das Einfügungsdämmungsmaß von Schallschirmen haben. Die anhand dieser Methode gewonnenen Berechnungsergebnisse stimmen mit denen aus Modellmessungen von LAM gewonnenen Messwerten in befriedigendem Maße überein.

Wie in den nationalen Regelwerken der [RLS 90] und der [VDI 2720] wird in den Beschreibungen von MAEKAWA und LAM jedoch nicht zwischen reflektierenden und absorbierenden Oberflächen unterschieden. Insbesondere durch den nichtberücksichtigten positiven Einfluss schallabsorbierender Oberflächen auf die Schallbeugung wird die abschirmende Wirkung von Lsw oft zu niedrig vorhergesagt, was zur planungstechnischen Erhöhung der Lsw und somit zu höheren Baukosten führen kann.

Basierend auf den Überlegungen von HADDEN in [HADDEN, 1981] entwickelte L'ESPERANCE in [L'ESPERANCE, 1989] eine Schallfeldbeschreibung, die die absorbierenden Eigenschaften eines

keilförmigen Schallschirmes, sowohl auf der Empfänger-, als auch auf der Quellseite berücksichtigt. Hierbei gelingt dem Autor in Ergänzung mit Modellmessungen der Nachweis, dass der Einsatz von Schallabsorbieren auf der Quellseite und auf der Empfängerseite des Schallschirmes zur deutlichen Erhöhung der Einfügungsdämpfung führt.

Die Bestimmung des Einflusses der Schallbeugung am Schallschirm nach Nord 2.000 [PLOVSING, 2001] basiert ebenfalls auf den Lösungen der Berechnungen am Modell des keilförmigen Schallschirms aus [HADDEN, 1981]. Der Empfangsschalldruck der am keilförmigen Schallschirm gebeugten Schallwelle setzt sich dabei aus vier verschiedenen Anteilen zusammen, die als Beiträge der verschiedenen Ausbreitungspfade von Quelle oder Spiegelquelle zum Empfänger oder Spiegelempfänger interpretiert werden können. Neu gegenüber den Berechnungen nach [HADDEN, 1981] ist die Einführung von wirksamen Reflexionsfaktoren, die sich aus den komplexen Reflexionsfaktoren der quell- und empfängerseitigen Schirmoberfläche zusammensetzen. Zur Verringerung des intensiven Berechnungsaufwands wird in [PLOVSING, 2001] ähnlich der Vorgehensweise in [PIERCE, 1974] auf die Substitution der Beschreibung von HADDEN zugrunde liegenden Fresnel-Integrale durch Potenzreihen zurückgegriffen.

Die beschriebenen Modelle setzen isotrope Absorbereigenschaften sowie eine ausreichend hohe Schalldämmung der Lsw voraus. Im Gegensatz dazu wird in [TBA HAMBURG] die erreichbare Abschirmwirkung einer Lsw pauschal gemindert, um, neben dem Einfluss der Schallbeugung um die Seitenkanten des Schallschirms, den durch die Abschirmeinrichtung hindurchgehenden Schall zu berücksichtigen. Die pauschale Minderung des Abschirmmaßes nimmt dabei mit steigendem Schirmwert zu. Das bedeutet, dass der Einfluss der Schalldämmung der Lsw auf den Immissionsschalldruckpegel am Empfänger erwartungsgemäß größer wird, wenn die akustische Wirksamkeit des Schallschirms steigt. Anisotrope Absorbereigenschaften als Folge von örtlich begrenzten Schadstellen oder Leckagen finden jedoch auch in [TBA HAMBURG] keine Berücksichtigung.

Auf der Basis der Kombination von parametrisierten Absorbermodellen und elastischen Modellen (BIOT-Theorie) lässt sich der Einfluss von Materialkennwerten (Strömungswiderstand, Porosität, Elastizitätsmodul) von Mehrschichtsystemen (poröse

Werkstoffe in Verbindung mit Festkörpern und perforierten Platten) auf die akustischen Eigenschaften von schallabsorbierenden und schalldämmenden Bauteilen vorhersagen. Dieses Verfahren kann in modifizierter Form auf die Untersuchung des akustischen Einflusses von Schadensbildern von Lsw übertragen werden.

## 2.2 Systematisierung von Schadensbildern an Lärmschutzwänden

Da bei der Konstruktion von Lsw an nationalen Straßen verschiedene Materialien und Bauformen mit unterschiedlichen Eigenschaften zum Einsatz kommen, ergibt sich eine Vielzahl an Schadensbildern. Während z. B. Holz-Lsw eher zu thermischer und

witterungsbedingter Verformung neigen, sind bei Beton-Lsw eher Risse in der Struktur oder bröckelnde Oberflächen zu erwarten. Daher ist es für eine allgemeingültige Bewertung der Schäden sinnvoll, die Schadenstypen zu kategorisieren.

Eine mögliche Katalogisierung von Schäden an Lsw ist in [MARCOCCI, 2016] zu finden. Darin ist die Systematisierung nach Bauteilen vorgenommen. Tabelle 2.1 zeigt die vorgenommene Gliederung der Schäden in die Kategorien

- Pfosten/vertikaler Träger,
- Paneele,
- Absorbermaterial,
- Fundament,

N°	Name	Comments	Fig.
<b>1 Pole/Column</b>			
110	Coating degradation	Spalls, ...	
120	Rust		
130	Deformation		
140	Impact		
150	Degradated settings	Bottom of the column	
160	Lacked or moved lateral joint		
170	Degradated joint		
1900	Other defects		
<b>2 Caissons, Pannels</b>			
210	Rust		
220	Impact		
230	Lacked or degraded settings	Identify moving caisson	
240	Végétation		
250	Moisture	Dark patch, ...	
260	Lacked element	Face of NRD, whole element	
270	Soiling of the face	Including graffities	
2900	Other defects		
<b>3 Absorbing material</b>			
310	Moisture		
320	Degradated material	Pieces, ...	
330	Lacked material		
340	Apparent material		
350	Degradated geotextile		
3900	Other defects		

Tab. 2.1: Gliederung von Schäden an Lsw aus [MARCOCCI, 2016]

N°	Name	Comments	Fig.
<b>4 Foundation</b>			
41	Concrete foundation		
411	Cracks		
412	Rust		
413	Spall		
414	Apparent frames		
415	Moved joint	Junction Caisson/Slab	
416	Degradated joint		
4190	Other defects		
42	With concrete retaining structure		
421	Cracks		
422	Rust		
423	Apparent frames		
424	Spall		
425	Degradated neoprene joint	Including settings	
426	Lack of neoprene joint		
4290	Other defects		
<b>5 Environment</b>			
510	Vegetation		
520	Soiling		
530	Uninspected		
5900	Other defects		
<b>6 Other element</b>			
610	Defect to define		
620	No defect		

Tab. 2.1: Fortsetzung

- Umgebung und
- sonstige Bauteile.

Jedem Schadenstyp sind eine eindeutige Nummer und eine farbliche Kodierung zugeordnet. So hat beispielsweise ein durch Feuchtigkeit beschädigtes Paneel (Moisture) den Code 250 und wird durch die Farbe Orange dargestellt. Mithilfe dieser Zuordnung von Nummern und Farben strukturiert MARCOCCI ein Verfahren zur Inspektion und Bewertung alter Lsw.

Im Anschluss an eine Bestandsaufnahme, in der sämtliche Lsw der Region nach Länge und Material geordnet erfasst werden, wird in [MARCOCCI, 2016] die Inspektion durchgeführt. Dabei kommen neben der Gliederung von Schäden aus Tabelle 2.1 ein Katalog mit Beispielfotografien von typischen Schäden und ein tabellarischer Erfassungsbogen zum Einsatz.

Nach der Aufnahme der Schäden vor Ort wird in [MARCOCCI, 2016] ein Bericht über die Schäden der Lsw erstellt. Darin sind sämtliche Schäden in der tabellarischen Statistik in Bild 2.1 nach Position und Typ gelistet. Die Häufigkeit der einzelnen Schadenstypen ist für Vorder- und Rückseite der inspeziierten Lsw getrennt angegeben und positionsbezogen in einer Skizze dargestellt.

Die statistische Darstellung hat den Vorteil, dass systematische Defekte an Lsw schnell aus der Statistik abgelesen werden können. Eine schriftliche

Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse der Inspektion ergänzt den Bericht.

Des Weiteren enthält der Bericht in [MARCOCCI, 2016] ein Schema der Lsw, in dem jedem Schaden das zugehörige Bauteil zugeordnet wird. Bild 2.2 zeigt beispielhaft die vereinfachte Darstellung eines Abschnitts der Lsw. Darin ist z. B. für das Paneel 2C der Schaden 210 vermerkt, der für Korrosion steht. Dieser Abschnitt des Berichts ist insbesondere für die Reparatur der Schäden hilfreich. Er wird ergänzt durch einen fotografischen Katalog aller Schäden vor Ort.

Abschließend wird für das gesamte Bauwerk ein Einzahlwert erstellt, der die Priorität der Reparatur der Lsw angeben soll. Jedoch stellt MARCOCCI fest, dass die Richtlinien zur Ermittlung des Einzahlwerts sehr vage und damit verbesserungswürdig sind. Es werden die Struktur und Stabilität der Lsw, akustische und visuelle Aspekte, sowie die Installation der Elemente bei der Vergabe des Einzahlwerts berücksichtigt. Jedoch scheint es dabei kein fest vorgegebenes Verfahren zu geben.

Alternativ listet ein Inspektionsbericht für Lsw des [Wisconsin Department of Transportation] eine Vielzahl an möglichen Schadensbildern für verschiedene Typen von Lsw auf (vgl. Bild 2.3). Dieser Inspektionsbericht beinhaltet jedoch, wie auch der aus [MARCOCCI, 2016], nicht nur akustisch relevante Schäden, sondern auch ausschließlich visuell relevante Schäden, wie z. B. den Verfall durch UV-Licht oder Graffiti.

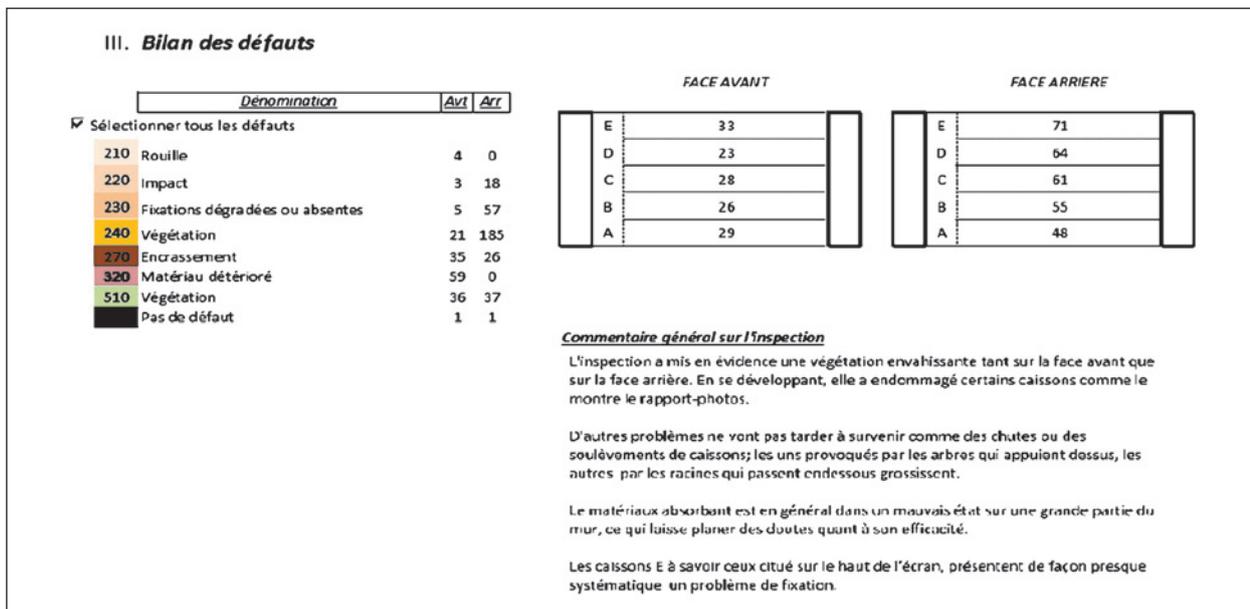


Bild 2.1: Statistik der Schäden gelistet nach Position und Typ aus [MARCOCCI, 2016]

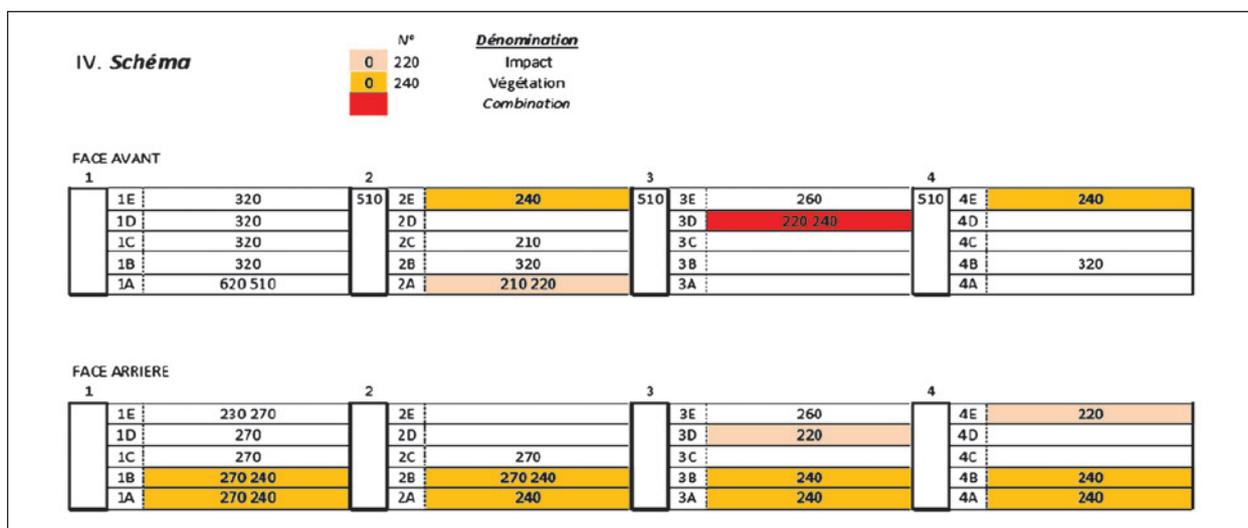


Bild 2.2: Räumliche Zuordnung der Schäden aus [MARCOCCI, 2016]

Structure Number					
<b>General</b>					
Date	Location	County	Municipality		
<b>Structure Material</b>					
<input type="checkbox"/> Concrete Masonry <input type="checkbox"/> Concrete <input type="checkbox"/> Timber <input type="checkbox"/> Steel <input type="checkbox"/> Other					
<b>Geometry</b>					
Max. Exp. Ht.	Max. Tot. Ht.	Min. Ht.	Thickness	Length	Cut or Fill
<b>Material Defects</b>					
Weathering	Issue – Y/N	Comments			
Spalling					
Cracking					
Splitting					
Mortar Cracking					
Exposed Joint Reinforcement					
Scaling					
Crushing					
Decay					
Warping					
Insect Infestation					
Vermitt Damage					
Fire Damage					
Ultraviolet Deterioration					
Material Incompatibility					
Corrosion Damage					
Overstress Damage					
<b>Noise Barrier Movement</b>					
Vertical					
Lateral					
Rotational					
<b>Maintenance Recommendations:</b>					
<b>Equipment Required</b>					
Traffic Control					
Access Equipment					
Testing Equipment					
Other					

Bild 2.3: Inspektionsbericht für Lsw des Straßenverkehrsamts von Wisconsin, USA [Wisconsin Report]

In [DELEO, 2016] ist eine Auflistung und Kategorisierung möglicher Schadenstypen und Schadstellen gegeben, die jedoch nicht vollständig ist. Es wird jedoch empfohlen, eine systematische Überprüfung direkt nach Errichtung der Lsw sowie in regelmäßigen Zeitabständen durchzuführen.

Grundsätzlich bilden die Quellen [MARCOCCI, 2016], [Wisconsin Department of Transportation] und [DELEO, 2016] eine gute Grundlage zur Erstellung eines systematischen Katalogs von Schadensbildern an Lsw. Jedoch muss der Katalog noch auf die akustisch relevanten Schadenstypen reduziert und gegebenenfalls um zusätzliche Schadenstypen erweitert werden, die für Lsw an nationalen Straßen typisch sind.

## 2.3 Modelle zur akustischen Abbildung von Schadensbildern

Die relevanten Ausbreitungspfade bei der Schallausbreitung an beschädigten Lsw betreffen die Beugung über die Lsw, die Transmission durch die intakte Lsw sowie die Transmission durch die Leckage. Für die Beschreibung der Transmissionspfade essentiell ist die Bestimmung der Schalleistung, die durch die Leckage in der Lsw propagiert, respektive die Bestimmung des Transmissionsgrads der Leckage. In der Literatur finden sich dafür verschiedene Ansätze, die im Folgenden dargestellt werden.

### 2.3.1 Randelemente-Methode (BEM)

Die Grundlage der BEM ist die Diskretisierung aller Oberflächen. Die unbekanntes Zustandsgrößen werden durch numerisches Lösen von Integralgleichungen ermittelt.

In [HARRISON, 1994] wird diese kohärente Methode verwendet, um die ortsabhängige spektrale Einfügungsdämmung einer 3 m hohen isotropen Lsw zu simulieren. Der Emissionsort liegt dabei in 0,5 m Höhe über dem Boden und im Abstand von 15 m vor der Lsw. Die Immissionsorte befinden sich in 1,5 m Höhe über dem Boden und im Abstand zwischen 4 m und 100 m hinter der Lsw. Bild 2.4 zeigt, dass die berechnete Einfügungsdämmung Werte zwischen 5 dB und 40 dB annimmt. Eine Betrachtung von Leckagen wurde in [HARRISON, 1994] nicht vorgenommen.

In [WATTS, 1999] finden BEM-Simulationen der Einfügungsdämmung an 3 m und 6 m hohen Lsw

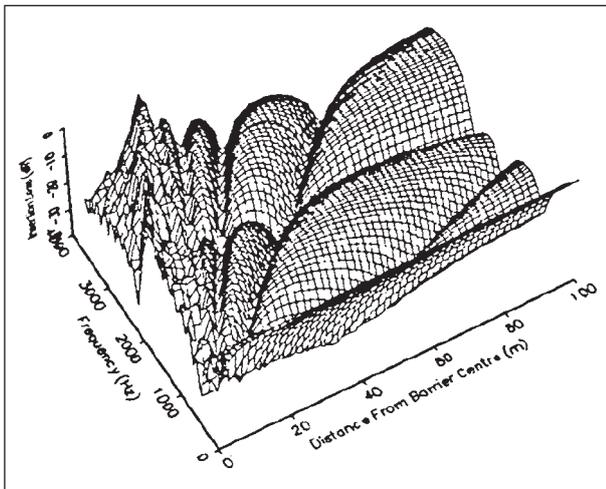


Bild 2.4: Einfügungsdämmung einer Lsw in Abhängigkeit von Frequenz und Abstand des Immissionsorts zur Lsw aus [HARRISON, 1994]

zunächst ohne Leckagen statt. Die Emissionsorte liegen dabei im Abstand von 8,3 m und 26,3 m vor der Lsw. Die Immissionsorte befinden sich in 1,5 m bzw. 4,5 m Höhe über dem Boden und im Abstand zwischen 5 m und 1.250 m hinter der Lsw. Im Anschluss werden periodisch horizontale Schlitzte der Breite 0,01 m, 0,015 m und 0,03 m im Abstand von 0,5 m hinzugefügt und die Simulationen wiederholt.

Zusätzlich zu den BEM-Simulationen wurde die Einfügungsdämmung der defekten Lsw anhand der Schallintensität berechnet, ohne dabei Phaseninformationen zu berücksichtigen (inkohärente Berechnung). Bild 2.5 zeigt beispielhaft die Verschlechterung der Einfügungsdämmung der 3 m und der 6 m hohen Lsw infolge der Integration der 0,03 m breiten Schlitzte. Die durchgezogenen Linien kennzeichnen die Ergebnisse der BEM-Simulationen, die gestrichelten Linien die Ergebnisse der Intensitätsberechnungen.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der inkohärenten Intensitätsberechnung zeigt sich, dass der Einfluss der Leckagen auf die schalltechnische Wirksamkeit der Lsw sinkt, wenn sich die Höhe der Lsw verringert oder sich der Abstand des Immissionsorts zur Lsw vergrößert. Bei kohärenter BEM-Simulation ergeben sich, durch die periodische Anordnung der Schlitzte in der Lsw begünstigt, Interferenzen, die die schalltechnische Wirkung der Schlitzte teilweise verstärken oder vermindern.

Grundsätzlich haben Schallfeldsimulationen an Lsw mit Leckagen auf Basis der BEM den Vorteil, dass Phasenbeziehungen zwischen einzelnen Schall-

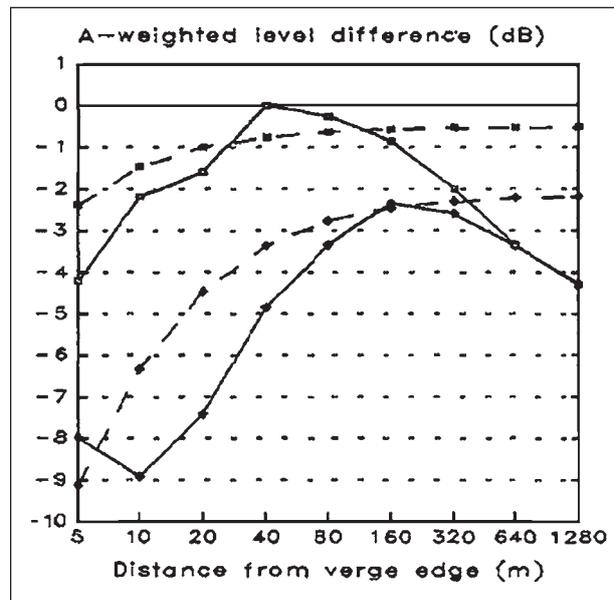


Bild 2.5: Verschlechterung der Einfügungsdämmung einer schallharten Lsw in Abhängigkeit vom Abstand des Immissionsorts zur Lsw aus [WATTS, 1999]; durchgezogene Linien: Ergebnisse von BEM-Simulationen; gestrichelte Linien: Ergebnisse von Intensitätsberechnungen; obere Kurven: 3 m hohe Lsw; untere Kurven: 6 m hohe Lsw

ausbreitungspfaden berücksichtigt werden. Um Rechenaufwand zu sparen, werden dabei meist 2D-Berechnungen durchgeführt. Dadurch lassen sich jedoch ausschließlich Leckagen mit unendlicher horizontaler Ausdehnung simulieren.

### 2.3.2 Geometrischer Ansatz

Eine anschauliche Methode zur Beschreibung des Schallfeldes hinter einer Lsw mit Leckage bietet die geometrische Akustik. In [WONG, 2000] wird die Transmission durch einen horizontalen Schlitz in einer Lsw als Summe gebeugter Schallfelder betrachtet. Dafür wird die Lsw durch drei Teilwände unterschiedlicher Höhe dargestellt (vgl. Bild 2.6)

- vom Boden bis zur Unterkante des Schlitzes (Höhe  $h_1$ ),
- vom Boden bis zur Oberkante des Schlitzes (Höhe  $h_2$ ),
- vom Boden bis zur Oberkante der Lsw (Höhe  $H$ )

und für jede Wand separat das gebeugte Schallfeld ermittelt. Die jeweils zugehörigen Schallfelder ergeben sich aus der Berechnung des Beugungsintegrals für alle vier Ausbreitungspfade gemäß Bild 2.7.

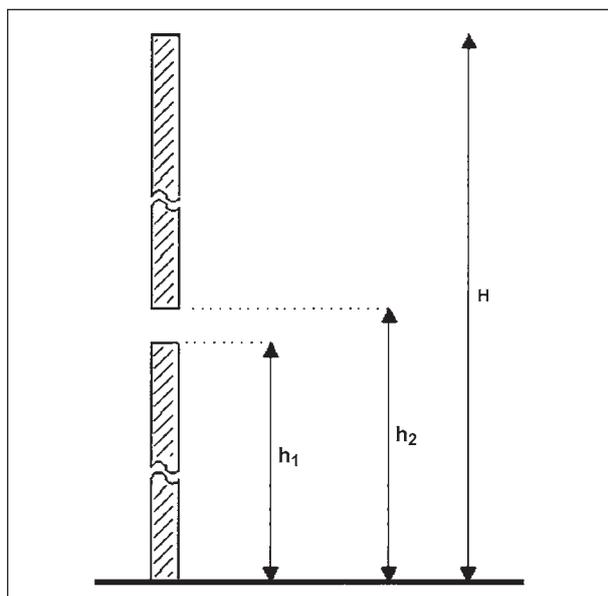


Bild 2.6: Unterteilung der Lsw mit horizontalem Schlitz in drei Teilwände zur Berechnung des gebeugten Schallfelds mittels geometrischer Akustik aus [WONG, 2000]

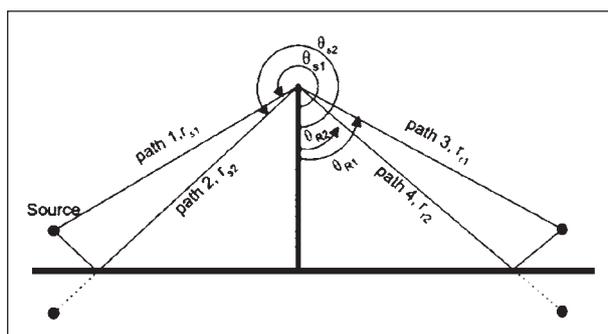


Bild 2.7: Berücksichtigung von vier möglichen Ausbreitungspfaden über die Lsw durch Bodenreflexion vor und hinter der Lsw aus [WONG, 2000]

Abschließend berechnet sich das gesamte Schallfeld  $\Phi_T(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_r)$  hinter der Lsw mit horizontalem Schlitz durch Superposition der Schallfelder der drei Teilwände  $P_T(H)$ ,  $P_T(h_1)$  und  $P_T(h_2)$  anhand von

$$\Phi_T(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_r) = P_T(H) + P_T(h_1) - P_T(h_2) \quad (2.1)$$

Die numerische Lösung ist für dieses Modell wenig rechenintensiv und die Ergebnisse der Berechnung stimmen laut [WONG, 2000] gut mit Messergebnissen überein. Der Nachteil dieser Methode ist, dass sich damit ausschließlich Leckagen mit unendlicher horizontaler Ausdehnung berechnen lassen.

### 2.3.3 Traffic Noise Model

Das Traffic Noise Model (TNM) der Federal Highway Administration (FHWA) stellt ein mächtiges Werk-

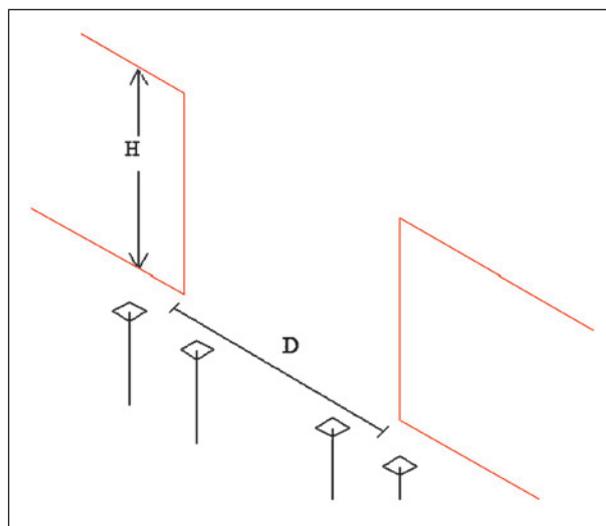


Bild 2.8: Modellierung einer Leckage der Breite D innerhalb einer Lsw der Höhe H aus [LIU, 2006] durch Unterbrechung der Lsw

zeug zur Berechnung von Schallfeldern an Straßen dar. Messdaten von ca. 6.000 Fahrzeugen verschiedener Größe auf verschiedenen Fahrbahnbelägen bilden laut [FHWA, 1998] die Grundlage für die Ermittlung des Emissionspegels. Jedoch liegen den Messdaten US-amerikanische Verkehrsbedingungen zugrunde, was nach [LIU, 2006] dazu führt, dass die Emissionspegel der Software von den tatsächlichen Messwerten in anderen Ländern abweichen.

Innerhalb des TNM wird die Schallausbreitung durch ein Abschnittsverfahren vereinfacht und Divergenz, Dämmung und Reflexion durch verschiedene Untergründe und Bebauung, Bewuchs, etc. werden durch Dämpfungsterme, Beugung, Reflexion, etc. berücksichtigt. Wie die [RLS 90] beinhaltet das TNM keine direkte Option zur Simulation von Defekten in Lsw. Jedoch lässt die Methode die Möglichkeit zu, zur Berechnung des Einflusses von Leckagen, eine Lsw mit Unterbrechung zu modellieren (vgl. Bild 2.8).

In [LIU, 2006] wurden Berechnungen der Einfügdämmung an Lsw verschiedener Höhe und Leckagen variierender Breite mithilfe des TNM durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit Ergebnissen von In-situ-Messungen. In Bild 2.9 ist beispielhaft die Einfügdämmung einer Lsw (Höhe der Lsw und Abstand zwischen Immissionsort und Lsw nicht angegeben) für Leckagen unterschiedlicher Breite D in m in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand zwischen Immissionsort und Leckage in Richtung der Lsw dargestellt (Abstand von 0 m entspricht Mitte der Leckage).

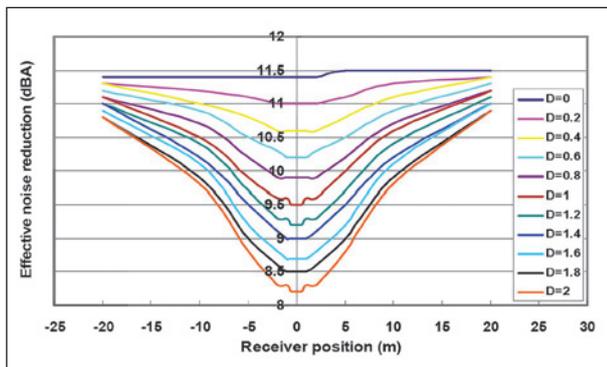


Bild 2.9: Einfügungsdämmung einer Lsw mit Leakage für verschiedene Breiten  $D$  der Leakage in m in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand zwischen Immissionsort und Leakage in Richtung der Lsw (Abstand von 0 m entspricht Mitte der Leakage) aus [LIU, 2006]

Der Nachteil dieser Methode ist, dass sich damit ausschließlich Leckagen berechnen lassen, deren vertikale Ausdehnung der der Lsw entspricht. Des Weiteren ist zu vermuten, dass die Berechnung der Schalltransmission für Schlitzbreiten kleiner der Schallwellenlänge  $D < \lambda$  keine korrekten Ergebnisse liefert.

### 2.3.4 Ermittlung des Transmissionsgrads über Integralansatz

In [SGARD, 2007] ist die lange Entwicklung der mathematischen Modellierung des Transmissionsgrads von Durchlässen in schallharten Wänden zusammengefasst dargestellt. Demnach wird in [GOMPERTS, 1964] eine Lösung für runde sowie für rechteckige Öffnungen endlicher Wandstärke über Geschwindigkeitspotenziale hergeleitet. Die berechneten Transmissionsgrade werden mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Für runde Öffnungen zeigt sich dabei eine gute Übereinstimmung von Experiment und Berechnung. Die rechteckigen Durchlässe werden vom Berechnungsmodell vor allem im Resonanzbereich falsch bewertet.

In [WILSON, 1965] wird das Schallfeld an den Öffnungen eines runden Durchlasses durch unendlich dünne masselose Kolben modelliert. Die Ausbreitung im Durchlass wird für ebene Wellen berechnet, was eine maximal zulässige Grenzfrequenz des Modells in Abhängigkeit vom Durchmesser der Öffnung zur Folge hat. Dieses Modell wird durch [SAUTER, 1970] um die Lösung für rechteckige Öffnungen erweitert. In beiden Fällen zeigen die Lösungen im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen gute Übereinstimmung, sogar über die Grenzfrequenz hinaus.

MECHEL beschreibt in [MECHEL, 1986] über einen ähnlichen Ansatz die Transmission durch runde und rechteckige Leckagen, die mit absorbierendem Material gefüllt und an den Öffnungen durch starre Massen abgeschlossen sind. Es zeigt sich, dass die Schalldämmung bei diffusem Schallfeld gleich  $\pi$ -mal der Schalldämmung bei flächennormalem Schalleinfall ist. Zudem stellt MECHEL einen analytischen Ausdruck für die Berechnung des Transmissionsgrades von Schlitzten bei schrägem Schalleinfall bereit.

Weiterführend wird in [SGARD, 2007] eine Reihe anderer Publikationen erläutert, z. B. [CHEN, 1995], [PARK, 1997], [SERIZAWA, 2002], die jeweils verschiedene Lösungen zur Berechnung des Transmissionsgrades von Öffnungen diskutieren. Doch keine der erläuterten Veröffentlichungen beschreibt laut [SGARD, 2007] die Durchgangsdämpfung von Leckagen für diffuse Schallfelder zufriedenstellend. Deshalb gibt SGARD eigene Lösungen zur Berechnung der Durchgangsdämpfung von rechteckigen und runden Leckagen für diffuse und zur Lsw flächennormale Schallfelder an. Dabei zeigen die Lösungen sehr gute Übereinstimmungen mit Ergebnissen früherer Publikationen.

In [PEUTZ, 1978] wird der Transmissionsfaktor von Schlitzten über eine Wellengleichung unter Annahme konstanter Schallschnelle im Öffnungsquerschnitt hergeleitet. PEUTZ berücksichtigt dabei sowohl einen winkelabhängigen als auch einen diffusen Schalleinfall. Berechnungen an Schlitzten weisen im Bereich um die  $\lambda/2$ -Resonanz stets Transmissionsfaktoren von  $t > 1$  auf. Messungen an Schlitzten ergeben eine gute Übereinstimmung mit den Berechnungen nach [PEUTZ, 1978].

Zusätzlich zu dem in Kapitel 2.3.2 beschriebenen geometrischen Verfahren erläutert WONG in [WONG, 2000] einen Integral-Ansatz. Dabei wird das Schallfeld hinter der Lsw über die Rayleigh-Lösung des Helmholtz-Integralansatzes ermittelt. Die Grenzen des Integrals definieren die Leakage, wodurch das Modell auf schlitzförmige Geometrien beschränkt ist. Auch dieses Modell zeigt eine gute Übereinstimmung mit entsprechenden Experimenten.

Das Modell in [BRAVO, 2008] betrachtet runde Öffnungen in doppelschaligen Trockenbauwänden, deren Hohlraum mit Dämmwolle gefüllt ist. Dabei setzt sich der Gesamttransmissionsgrad der Wand aus den flächengewichteten Transmissionsgraden der Öffnung und der intakten Wand zusammen. Der

Transmissionsgrad der Öffnung wird weiter in einen Transmissionsgrad der vorderen Öffnung, des Dämmmaterials und der hinteren Öffnung unterteilt. Die mathematische Berechnung der jeweiligen Transmissionsgrade erfolgt dabei nach [WILSON, 1965]. Ein Vergleich mit Ergebnissen von Messungen an einem Teststand zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Modellberechnungen.

Eine systematische Untersuchung in [ISELE, 2009] nutzt das Berechnungsmodell für schlitzförmige Leckagen aus [MECHEL, 1986] in Kombination mit dem Massengesetz nach Berger zur Bestimmung des Schalldämmungsindex von Lsw bestehend aus Gabionen. Es werden bei der Simulation Wände ohne durchgängigen Betonkern betrachtet, deren Übergänge mit Dichtband abgedichtet sind. Es ergeben sich drei Parameter, über die der Schalldämmungsindex variiert werden kann. Neben der Dicke und dem Strömungswiderstand des Dichtbandes zwischen den Gabionen-Elementen kann im Modell die Dicke des Betonkerns im Gabionen-Element verändert werden. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass eine Vergrößerung der Dicke des Betonkerns in den Gabionen nur geringen Einfluss auf den Schalldämmungsindex hat, da der größte Anteil der transmittierten Schalleistung durch die Fuge zwischen den Elementen propagiert. Die Erhöhung des Strömungswiderstandes und die Vergrößerung der Schichtdicke des Dichtbandes in den Fugen haben eine vergleichbare Wirkung auf den Schalldämmungsindex und können diesen im hochfrequenten Bereich erheblich vergrößern.

Zwar beinhaltet die Publikation [DEGAN, 2003] keine Betrachtung von Schäden in Lsw, jedoch wird ein Modell zur Berechnung der Schallausbreitung unter Berücksichtigung der Beugung an der Oberkante der Lsw auf Basis des Huygens-Fresnelschen Prinzips dargelegt. Der direkte Vergleich mit Ergebnissen von Messungen an Lsw zeigt eine gute Übereinstimmung im mittleren Frequenzbereich.

### 2.3.5 Akustische Optimierung von Lärmschutzwänden in Leichtbauweise

Zur akustischen Optimierung von Lsw in Leichtbauweise setzt die Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH hybride Verfahren ein. Die Modellierung des Biegeverhaltens und der daraus resultierenden Eigenfrequenzen von Lsw-Elementen komplexer Geometrie (vgl. Bild 2.10) erfolgt auf Basis

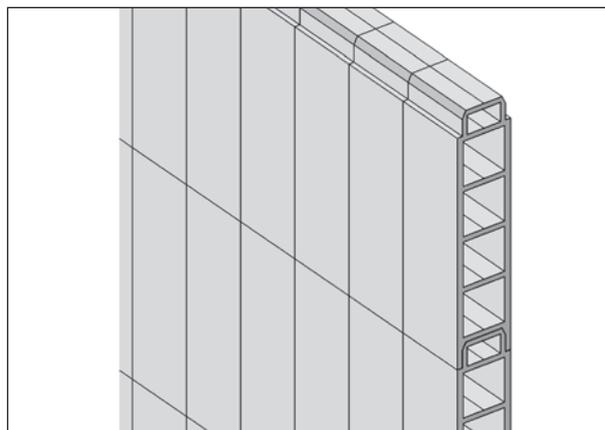


Bild 2.10: Prinzipdarstellung eines Lsw-Elements in Leichtbauweise

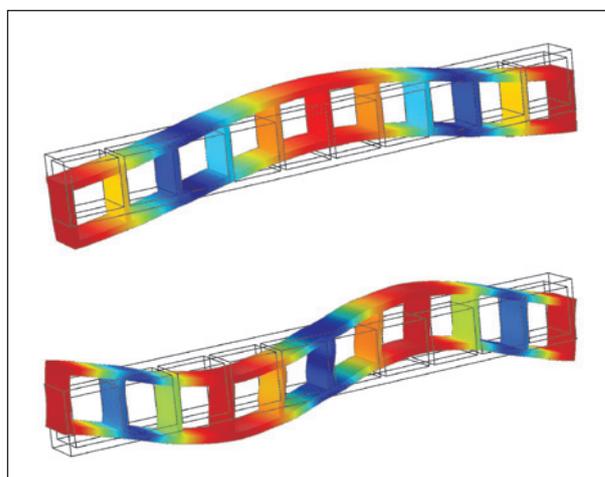


Bild 2.11: Numerische Modellierung des Biegeverhaltens von Lsw-Elementen als Basis für die Bestimmung der spektralen Schalldämmung der Lsw; Darstellung der ersten und zweiten Eigenfrequenz

der Finite-Elemente-Methode (FEM). Bild 2.11 zeigt beispielhaft die numerisch berechneten ersten beiden Eigenfrequenzen eines Lsw-Elements in Leichtbauweise. Der dynamische Biege-E-Modul stellt die Eingangsgröße für die anschließend Berechnung des Transmissionsgrads der gesamten Lsw dar.

Der ermittelte spektrale Transmissionsgrad dient anschließend der Berechnung der Einfügungsdämmung der Lsw auf Basis eines komplexen Schallausbreitungsmodells (vgl. [SCHULZE, 2015], Bild 2.12, Bild 2.13). Das Ausbreitungsmodell bei vorhandener Lsw beschreibt analog zu [WONG, 2000] vier verschiedene Ausbreitungspfade über die Oberkante der Lsw (Beugungspfade, vgl. Bild 2.13, Rot) sowie zusätzlich einen fünften Ausbreitungspfad durch die Lsw hindurch (Transmissionspfad, vgl. Bild 2.13, Blau). Innerhalb der fünf Ausbreitungspfade werden verschiedene Schallausbreitungseffekte

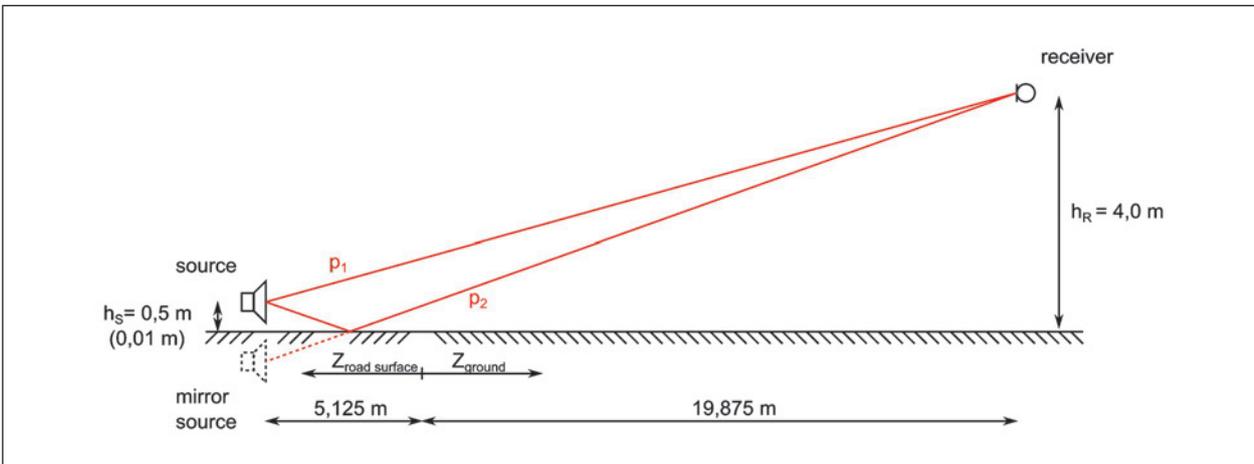


Bild 2.12: Geometrie der Berechnung der Schallausbreitung ohne Lsw

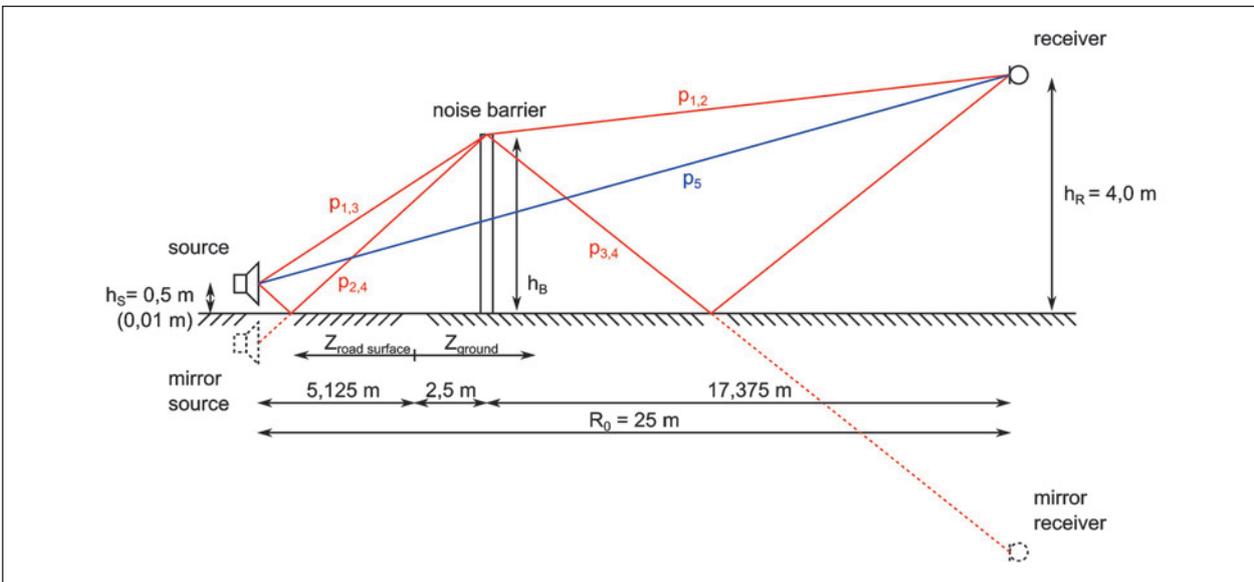


Bild 2.13: Geometrie zur Berechnung der Schallausbreitung an der Lsw mit zusätzlicher Berücksichtigung der Schalltransmission durch die Lsw

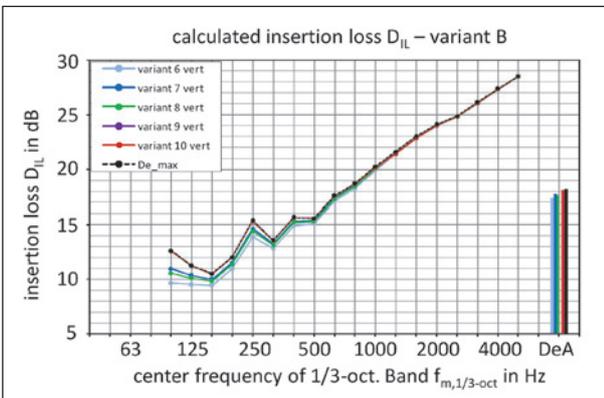


Bild 2.14: Simulationsergebnisse der spektralen Einfügungsdämmung für verschiedene Geometrien von Lsw in Leichtbauweise mit Berücksichtigung der Schalltransmission sowie maximal erreichbare Einfügungsdämmung ohne Berücksichtigung der Schalltransmission (schwarze Kurve)

berücksichtigt. Dazu zählen neben der geometrischen Divergenz und der Luftabsorption insbesondere die Reflexion von Kugelwellen am Boden mit Impedanzdiskontinuität, die Schallbeugung an der Schirmkrone mit impedanzbelegten Flächen sowie eine partiell kohärente Addition der Wirkung der einzelnen Ausbreitungspfade.

Durch direkten Vergleich der Einfügungsdämmung der Lsw ohne Berücksichtigung des Transmissionspfads kann im Umkehrschluss eine maximal erreichbare Einfügungsdämmung (vgl. Bild 2.14) und damit eine anzustrebende Mindest-Schalldämmung der Lsw ermittelt werden (vgl. Bild 2.15), die sicherstellen soll, dass die Schalltransmission durch die Lsw einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Immissions-schalldruckpegel am Empfänger aufweist.

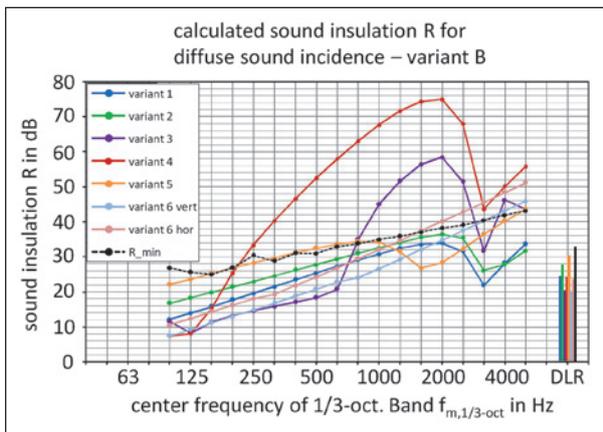


Bild 2.15: Simulationsergebnisse der spektralen Schalldämmung für verschiedene Geometrien von Lsw in Leichtbauweise sowie anzustrebende Mindestschalldämmung (schwarze Kurve)

Im vorliegenden Beispiel zeigte sich, dass eine Mindest-Schalldämmung der Lsw in Leichtbauweise von ca. 30 dB für dieses angestrebte Ziel ausreichend ist.

## 2.4 Messung der akustischen Kennwerte von Lärmschutzwänden in situ

Wie in [GARAI, 2000] durch Messungen an Lsw in situ und im Labor belegt, ist das sogenannte Adrienne-Verfahren sehr gut geeignet, um die akustischen Kennwerte an Lsw zerstörungsfrei zu bewerten. Das Verfahren basiert auf der messtechnischen Bestimmung der Impulsantwort einer gerichtet abstrahlenden Testschallquelle an definierten Immissionsorten. Die Testschallquelle emittiert dabei ein spezielles Testsignal mit hohem Signal-Rausch-Abstand (MLS-Folge = maximum length sequence). Um störende Einflüsse der Messumgebung auszublenden, kommt das sogenannte Adrienne-Zeitfenster zum Einsatz, das die Impulse infolge von z. B. Schallreflexionen am Boden oder anderen reflektierenden Objekten ausschneidet. Durch Integration über die gefensterte Impulsantwort erhält man die interessierende leistungsproportionale Größe. Um die Quellstärke der eingesetzten Testschallquelle herausrechnen zu können, erfolgt neben der eigentlichen Messung an der Lsw stets eine Freifeldmessung bei gleicher Geometrie von Testschallquelle und Immissionsort.

Die Bestimmung des Schallreflexionsindex  $RI$  (entspricht dem Schallreflexionsgrad) und des Schalldämmungsindex  $SI$  (entspricht der Schalldämmung)

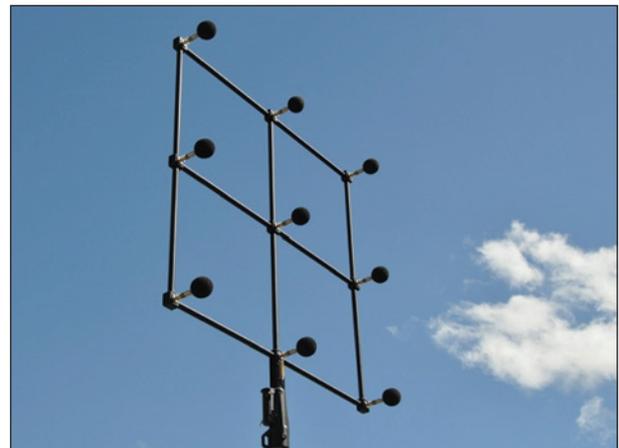


Bild 2.16: Mikrofonanordnung zur standardisierten messtechnischen Bestimmung des Schallreflexionsindex  $RI$  und des Schalldämmungsindex  $SI$  an Lsw in situ gemäß [DIN EN 1793-5] und [DIN EN 1793-6]

ist in den letzten Jahren innerhalb von [DIN EN 1793-5] und [DIN EN 1793-6] standardisiert worden. Zur Definition der Immissionsorte kommt darin eine neun-elementige Mikrofonanordnung zum Einsatz (vgl. Bild 2.16).

### 2.4.1 Messung des Schallreflexionsindex gemäß [DIN EN 1793-5]

Um den Schallreflexionsindex  $RI$  zu bestimmen, werden die Testschallquelle und die neun-elementige Mikrofonanordnung analog zu Bild 2.17 und Bild 2.18 auf der Vorderseite der zu untersuchenden Lsw positioniert.

Die Freifeldmessung ohne Lsw findet zeitnah zur Messung mit Lsw in genügendem Abstand zur Lsw statt (vgl. Bild 2.19).

### 2.4.2 Messung des Schalldämmungsindex gemäß [DIN EN 1793-6]

Um den Schalldämmungsindex  $SI$  zu bestimmen, wird die Testschallquelle analog zu Bild 2.20 auf der Vorderseite der zu untersuchenden Lsw positioniert. Die neun-elementige Mikrofonanordnung befindet sich analog zu Bild 2.21 auf der Rückseite der zu untersuchenden Lsw. Durch das Adrienne-Zeitfenster wird der transmittierte Schallanteil vom über die Oberkante der Lsw gebeugten Schallanteil getrennt.

Die Freifeldmessung ohne Lsw findet wiederum zeitnah zur Messung mit Lsw in genügendem Abstand zur Lsw statt (vgl. Bild 2.22).

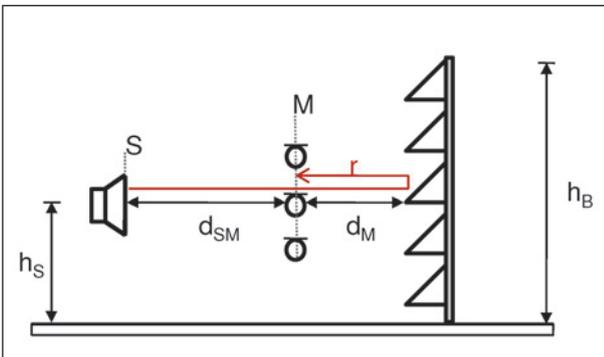


Bild 2.17: Prinzipskizze des Messaufbaus zur In-situ-Bestimmung des Schallreflexionsindex von Lsw gemäß [DIN EN 1793-5]; Messung mit Lsw;  $d_{SM} = 1,25$  m;  $d_M = 0,25$  m

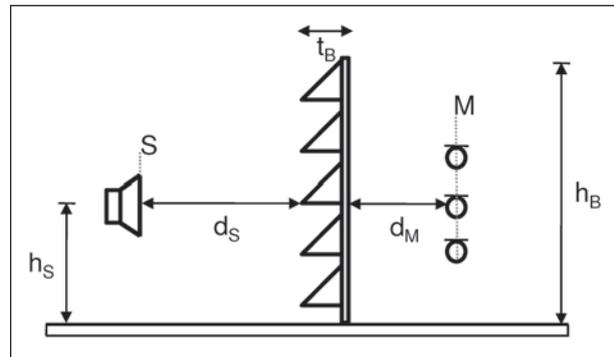


Bild 2.20: Prinzipskizze des Messaufbaus zur In-situ-Bestimmung des Schalldämmungsindex von Lsw gemäß [DIN EN 1793-6]; Messung mit Lsw



Bild 2.18: Messaufbau zur In-situ-Bestimmung des Schallreflexionsindex von Lsw durch Einsatz des Messsystems AcoustiAdrienne der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH gemäß [DIN EN 1793-5]



Bild 2.21: Rückseitiger Messaufbau zur In-situ-Bestimmung des Schalldämmungsindex von Lsw durch Einsatz des Messsystems AcoustiAdrienne der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH gemäß [DIN EN 1793-6]

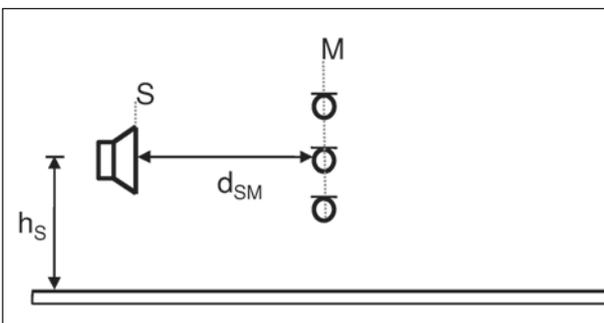


Bild 2.19: Prinzipskizze des Messaufbaus zur In-situ-Bestimmung des Schallreflexionsindex von Lsw gemäß [DIN EN 1793-5]; Messung ohne Lsw (Freifeldmessung)

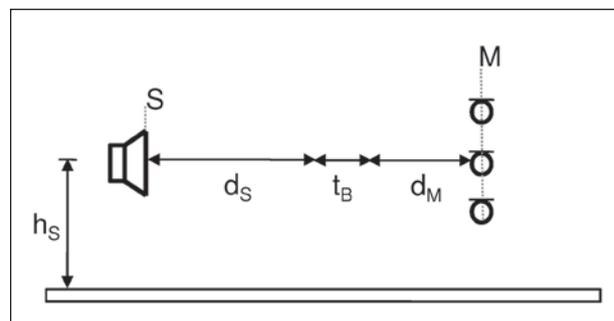


Bild 2.22: Prinzipskizze des Messaufbaus zur In-situ-Bestimmung des Schalldämmungsindex von Lsw gemäß [DIN EN 1793-6]; Messung ohne Lsw (Freifeldmessung)

### 2.4.3 Erfahrungen aus In-situ-Messungen an Lsw mit Adrienne-Verfahren

In-situ-Messungen an Lsw mit Leckagen auf Basis des Adrienne-Verfahrens in [WATTS, 2003] zeigten, dass der ermittelte Schalldämmungsindex stark vom Abstand zwischen der Leckage und Immissionsort abhängt. In Bild 2.23 ist beispielhaft die in [WATTS, 2003] gemessene Einfügungsdämmung einer Lsw mit einer 25 cm<sup>2</sup> großen Leckage für Abstände zwischen der Leckage und dem Immissionsort von 0,125 m, 0,25 m und 0,5 m dargestellt.

Je größer dieser Abstand ist, desto geringer fällt der Einfluss der Leckage auf den Schalldämmungsindex aus. Dieser Effekt ist dadurch deutbar, dass eine Art Beleuchtungsfläche existiert, durch die sich die maßgebliche Schallenergie von der Testschallquelle zum Immissionsort ausbreitet. Diese Beleuchtungsfläche beinhaltet sowohl Flächenanteile der Leckage als auch der intakten Lsw. Je größer der Abstand zwischen der Leckage und dem Immissionsort ist, desto größer wird die Beleuchtungsfläche und desto größer wird der Flächenanteil der intakten Lsw. Dadurch nimmt der in situ bestimmte Schalldämmungsindex zu. Das Messergebnis verkörpert daher im Allgemeinen stets die akustischen Eigenschaften einer Kombination von Leckage und Lsw. Dies soll in Kapitel 5.1.3 weiter betrachtet werden.

Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommen die Autoren in [GARAI, 2010]. Eine systematische Messreihe an einer Lsw mit einem 11 mm breiten Schlitz ergibt für verschiedene Abstände zwischen Leckage und Immissionsort den in Bild 2.24 dargestellten spektralen Schalldämmungsindex.

Je größer der Abstand zwischen der Leckage und dem Immissionsort ist, desto größer fällt auch hier der Schalldämmungsindex aus. Jedoch bleibt die gemessene akustische Wirksamkeit der Lsw mit Leckage selbst bei einem Abstand von 2 m zur Lsw weit unterhalb der Wirksamkeit der intakten Wand. In unmittelbarer Nähe zur Lsw bewirkt die Leckage eine Verringerung des spektralen Schalldämmungsindex um bis zu 35 dB. Besonders Frequenzen oberhalb von ca. 800 Hz werden gut durch den Schlitz transmittiert.

In einer zweiten Messreihe ermittelten die Autoren in [GARAI, 2010] den Einfluss der Schlitzgröße auf den in situ gemessenen Schalldämmungsindex. Dabei wurde der Abstand zwischen der Leckage und dem Immissionsort auf 250 mm festgehalten.

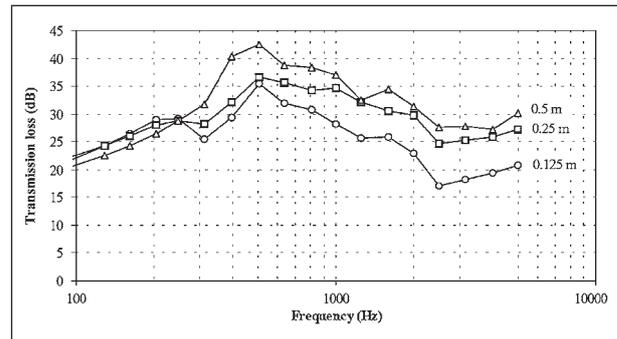


Bild 2.23: Auf Basis des Adrienne-Verfahrens in situ bestimmte Einfügungsdämmung einer Lsw mit einer 25 cm<sup>2</sup> großen Leckage für verschieden Abstände zwischen Leckage und Immissionsort aus [WATTS, 2003]

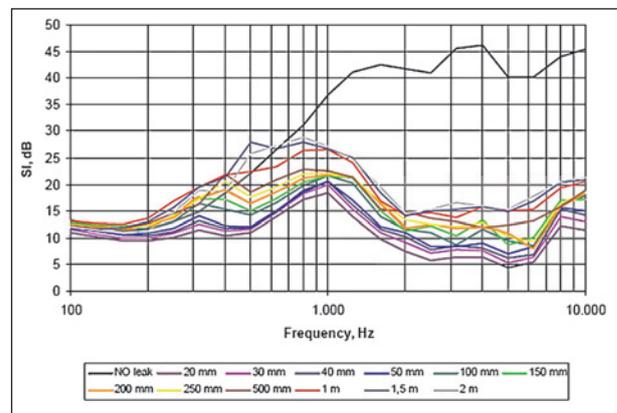


Bild 2.24: Auf Basis des Adrienne-Verfahrens in situ bestimmter spektraler Schalldämmungsindex einer intakten Lsw und einer Lsw mit einem 11 mm breiten Schlitz für verschieden Abstände zwischen Leckage und Immissionsort aus [GARAI, 2010]

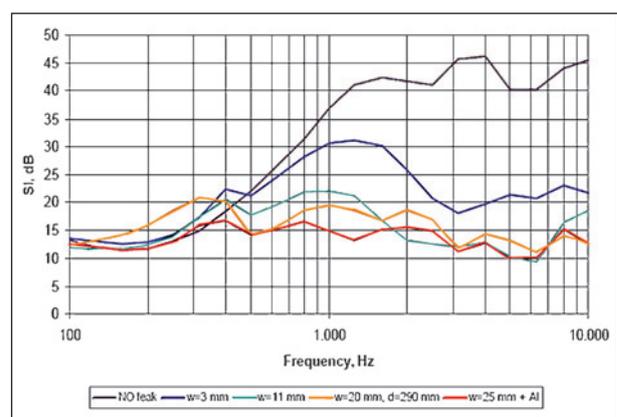


Bild 2.25: Auf Basis des Adrienne-Verfahrens in situ bestimmter spektraler Schalldämmungsindex einer intakten Lsw und einer Lsw mit einem Schlitz für verschiedene Schlitzbreiten aus [GARAI, 2010]; Abstand zwischen Leckage und Immissionsort 250 mm

Bild 2.25 zeigt, dass sich die Schalldämmung erwartungsgemäß verringert, wenn sich die Schlitzbreite vergrößert.

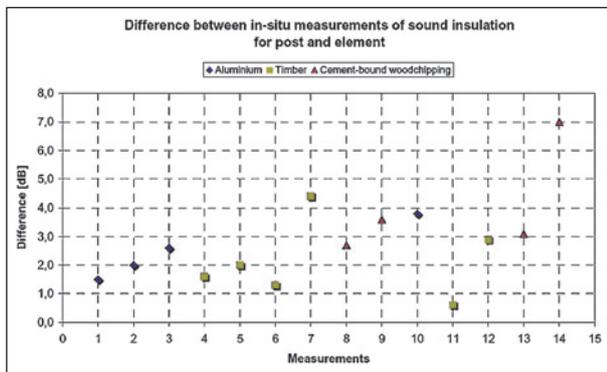


Bild 2.26: Differenz des auf Basis des Adrienne-Verfahrens in situ bestimmten Schalldämmungsindex verschiedener Lsw aus Holz, Holz-Beton und Aluminium gemessen in der Mitte des Panels und am Übergang zwischen vertikalem Träger und Paneel aus [CONTER, 2008]

Eine österreichische Studie [CONTER, 2008] beschreibt In-situ-Tests auf Basis des Adrienne-Verfahrens an einer Gruppe von 14 verschiedenen Typen von Lsw aus Holz, Holz-Beton und Aluminium zur Ermittlung des Einflusses von Leckagen zwischen den vertikalen Trägern und den Paneelen der Lsw. Der Fokus dieser Tests liegt auf dem direkten Vergleich des Schalldämmungsindex, der zum einen in der Mitte des Panels, zum anderen direkt am Übergang zwischen vertikalem Träger und Paneel gemessen wurde. Der Abstand zwischen Immissionsort und Lsw betrug 0,25 m.

In Bild 2.26 ist die daraus berechnete Differenz des gemessenen Schalldämmungsindex für die untersuchten Lsw aus [CONTER, 2008] dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Schlitz am Übergang zwischen vertikalem Träger und Paneel den Schalldämmungsindex um bis zu 7 dB verringert. Die Ergebnisse von [CONTER, 2008] verdeutlichen die Bedeutung einer akustischen Abdichtung an den Übergängen zwischen einzelnen Elementen der Lsw im Nahbereich der Lsw.

Inhalt der Studie [MORGAN, 2010] ist der Vergleich des auf Basis des Adrienne-Verfahrens in situ bestimmten Schalldämmungsindex einer großen Gruppe von Holz-Lsw. Die Messungen fanden unmittelbar nach Fertigung der Lsw (Neuzustand) statt und wurden in definierten Zeitintervallen wiederholt.

Innerhalb der Studie zeigt sich, dass sich die Schalldämmung der untersuchten Holz-Lsw innerhalb der ersten drei bis vier Wochen nach Fertigung um bis zu 10 dB verringert. Dies wird damit begründet, dass Lösungsmittel ausdampfen, die zur Imprägnierung des Holzes verwendet werden, was einen

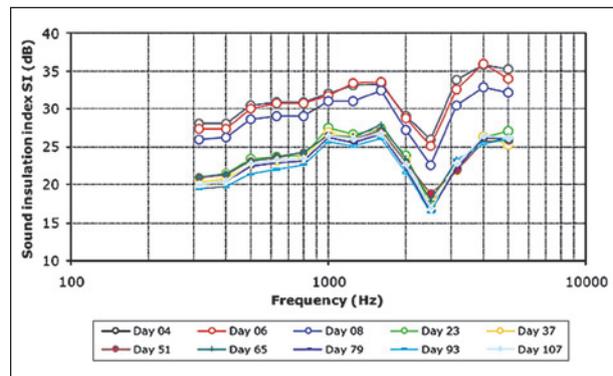


Bild 2.27: Auf Basis des Adrienne-Verfahrens in situ bestimmter spektraler Schalldämmungsindex einer 3 m hohen Holz-Lsw unmittelbar sowie in definierten Zeitintervallen nach Fertigung der Lsw aus [MORGAN, 2010]

deutlichen Masseverlust der Holz-Lsw nach sich zieht. Bild 2.27 visualisiert eine deutliche sprunghafte Veränderung des spektralen Schalldämmungsindex im Verlauf des Trocknungsprozesses einer der untersuchten Holz-Lsw zwischen Tag 8 und Tag 23 nach der Fertigung der Lsw. Nach Tag 23 bleibt der Schalldämmungsindex weitestgehend konstant. In [MORGAN, 2010] wird daher empfohlen, akustische Abnahme-Messungen an installierten Holz-Lsw erst vier Wochen nach Fertigung der Lsw durchzuführen. Um statistisch basierte Aussagen zum altersbedingten Verhalten der akustischen Wirksamkeit von Lsw verschiedenen Typs treffen zu können, empfiehlt MORGAN eine umfangreiche Datenbankgrundlage zu erstellen.

In [NZTA, 2013] wurde das In-situ-Messverfahren gemäß [DIN EN 1793-6, Stand 2012] zur Bestimmung des Schalldämmungsindex an acht verschiedenen Lsw unterschiedlichen Materials mit und ohne Leckagen getestet. Der Autor hebt dabei die klaren Vorteile des In-situ-Verfahrens gegenüber dem Labor-Verfahren (Hallraum-Messung) hervor. So können Veränderungen der akustischen Wirksamkeit von Lsw durch natürliche Alterung in definierten Zeitintervallen zerstörungsfrei überprüft werden.

Bild 2.28 zeigt beispielhaft den direkten Vergleich des Schalldämmungsindex einer Acryl-Lsw, der an einem intakten vertikalen Träger der Lsw und an einem vertikalen Träger mit schlitzförmiger Leckage gemessen wurde. Es ist zu erkennen, dass der Schalldämmungsindex im Bereich der schlitzförmigen Leckage über das gesamte Spektrum um ca. 10 dB niedriger ausfällt als im Bereich des intakten Trägers der Lsw.

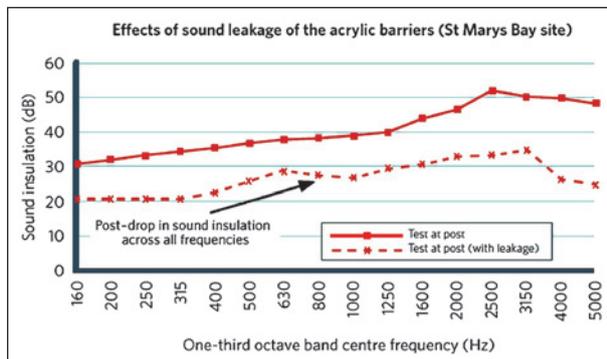


Bild 2.28: Auf Basis des Adrienne-Verfahrens in situ bestimmter spektraler Schalldämmungsindex einer Acryl-Lsw im Bereich eines intakten vertikalen Trägers der Lsw sowie an einem vertikalen Träger mit schlitzförmiger Leckage aus [NZTA, 2013]

#### 2.4.4 Alternative Messmethoden zur Bestimmung der Wirkung von Leckagen in Lsw

In [WATTS, 1997] ist die In-situ-Bewertung der spektralen Schalldämmung einer Lsw durch zeitgleiche messtechnische Bestimmung des Schallintensitätspegels vor und hinter der Lsw bei fließendem Straßenverkehr beschrieben. Dazu wird auf der dem Verkehr zugewandten Seite der Lsw eine schallharte Platte installiert. Unmittelbar vor dieser Platte positionierte Mikrofone messen den Schalldruckpegel  $L_{p,i}$  innerhalb des  $i$ -ten Terzbands. Anhand von

$$L_{l,0,i} = L_{p,i} - 8 \text{ db} \quad (2.2)$$

wird anschließend der Terzband-Schallintensitätspegel  $L_{l,0,i}$  auf der Vorderseite der Lsw geschätzt. Die Bestimmung des Terzband-Schallintensitätspegels  $L_{l,i}$  auf der Rückseite der Lsw erfolgt durch Messung mittels Intensitätssonde im Abstand von 100 mm zur Lsw. Das Terzband-Schalldämmmaß  $R_i$  der Lsw ergibt sich schließlich aus der Differenz der beiden Schallintensitätspegel zu

$$R_i = L_{l,0,i} - L_{l,i} \quad (2.3)$$

Nach der Durchführung des beschriebenen Messverfahrens für eine Reihe von Messpunkten in einem zuvor festgelegten Raster entlang der Lsw werden die Ergebnisse der bestimmten Schalldämmung gemittelt.

Zusätzlich erfolgt die Bewertung der Schalldämmung der untersuchten Lsw durch Messungen im Labor, bei denen das Hallraum-Verfahren zum Einsatz kommt. In Bild 2.29 ist die durch In-situ-Messung und Labormessung (Raumtemperatur) ermit-

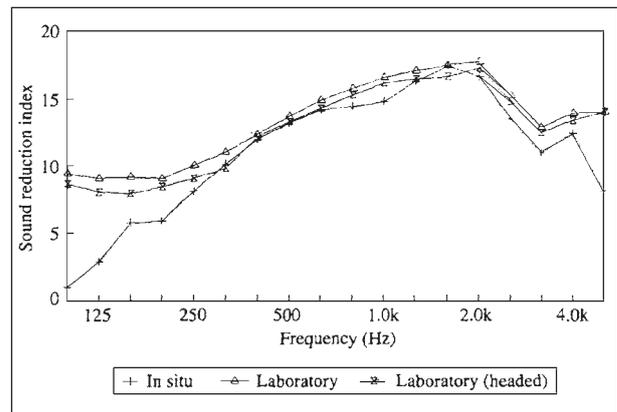


Bild 2.29: Gegenüberstellung der durch In-situ-Messung (Intensitätsverfahren) und Labormessung (Hallraum-Verfahren bei Raumtemperatur und bei 40 °C) ermittelten spektralen Schalldämmung einer Lsw aus [WATTS, 1997]

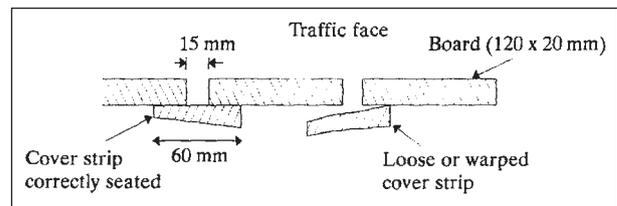


Bild 2.30: Skizze der fixierten und gelockerten vertikalen Verbindungsleisten an einer Lsw aus [WATTS, 1997]

telte spektrale Schalldämmung gegenübergestellt. Es zeigt sich über einen weiten Frequenzbereich eine gute Überstimmung der Ergebnisse. Unterhalb von 250 Hz und oberhalb von 2.500 Hz treten größere Abweichungen der Schalldämmung auf. Diese resultieren aus der Genauigkeit der beiden Messverfahren.

Eine zusätzliche Erhöhung der Raumtemperatur auf ca. 40 °C während der Labormessungen führt zu einer geringfügigen Minderung der Schalldämmung. Der Autor vermutet, dass dies durch thermische Expansion der Paneele der Lsw begründet ist.

In einem zweiten Laborversuch werden vertikale Verbindungsleisten der Lsw gelöst, woraus bis zu 15 mm breite Schlitze in der Lsw resultieren (vgl. Bild 2.30).

Bild 2.31 zeigt die im Labor ermittelte spektrale Schalldämmung der Lsw mit und ohne vertikale Schlitze. Es ist erkennbar, dass der Einfluss der vertikalen Schlitze auf die Schalldämmung mit steigender Frequenz wächst.

In [BROWN, 1994] wurde eine Messmethode zur Bestimmung der relativen Einfügungsdämmung ei-

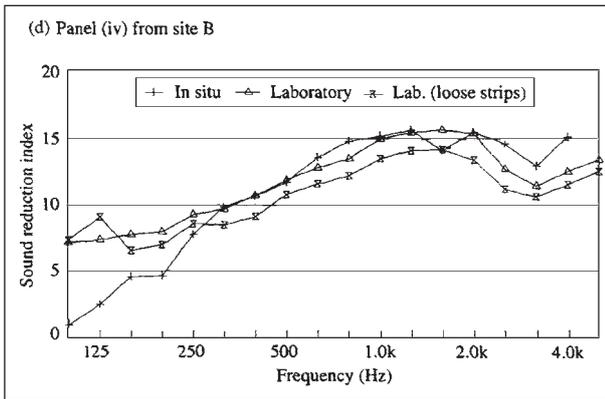


Bild 2.31: Vergleich des In-situ-Messverfahrens mit Messungen im Labor mit intakter Lsw und vertikalen Schlitzten aus [WATTS, 1997]

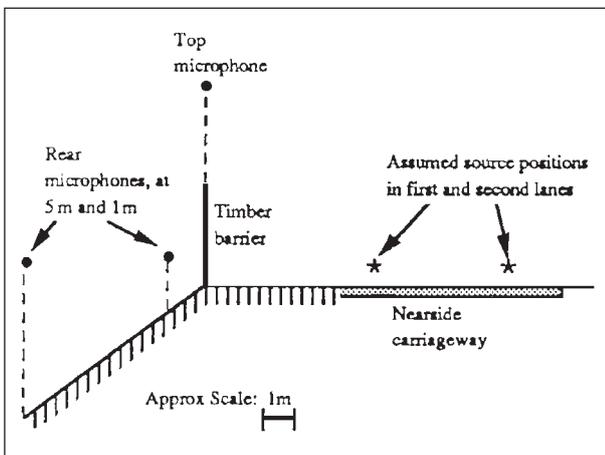


Bild 2.32: Anordnung der Mikrofone für Messung der Schalldämmung in [BROWN, 1994]

ner Holz-Lsw gewählt. Auch innerhalb dieser Untersuchungen stellt der fließende Verkehr die eigentliche Testschallquelle dar. Zur Erfassung einer Größe, die der Schallintensität vor der zu untersuchenden Lsw proportional ist, kommt ein einzelnes Mikrofon (Referenzmikrofon) oberhalb der Oberkante der Lsw zum Einsatz (vgl. Bild 2.32). Die Wahl dieser Position erfolgte im Hinblick darauf, die Einflüsse von Wind und Strömung des Verkehrsflusses auf das Schallfeld zu minimieren.

Die eigentlichen Immissionsorte (Messmikrofone) befinden sich im Abstand von 1 m und von 5 m hinter der Lsw. Die immissionsortbezogene relative Einfügungsdämmung ergibt sich schließlich durch Subtraktion der gemessenen Schalldruckpegel von Referenz- und Messmikrofon.

Für die Messung wurde eine Holz-Lsw gewählt, die Schlitzte zwischen den Paneelen aufweist. Zunächst wurde die Schalldämmung für die defekte Lsw gemessen. Im Anschluss wurden die Schlitzte in der

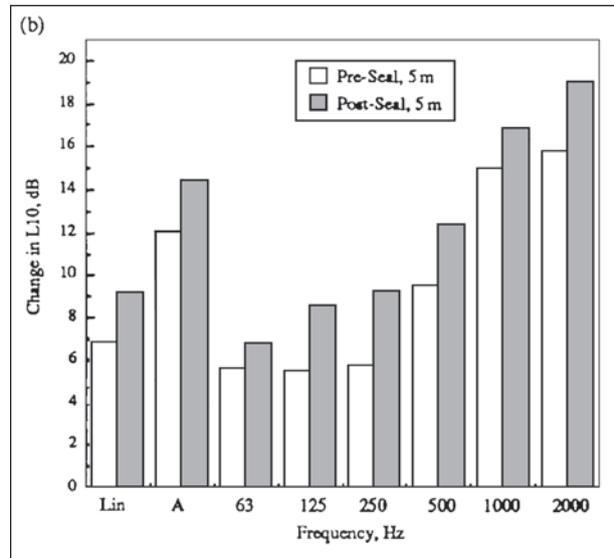


Bild 2.33: Messtechnisch ermittelte spektrale Schalldämmung der Holz-Lsw vor und nach Versiegelung der Fugen der Lsw aus [BROWN, 1994]

Lsw mit einer elastischen Masse versiegelt und die Schalldämmung erneut bestimmt.

In Bild 2.33 ist die ermittelte spektrale Schalldämmung der Holz-Lsw vor und nach Versiegelung der Fugen der Lsw dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Versiegelung der Fugen im gesamten betrachteten Frequenzbereich eine Erhöhung der Schalldämmung von ca. 1 dB bis 2,5 dB bewirkt.

In [URIS, 2004] wurde der Einfluss von Schlitzten auf die Schalldämmung einer Leichtbauwand in Gebäuden bestimmt in Abhängigkeit von der Ausdehnung der Schlitzte. Im ersten Schritt erfolgten Simulationen der spektralen Schalldämmung mithilfe des Berechnungsmodells aus [GOMPERTS, 1964]. Die Simulationsergebnisse sind exemplarisch in Bild 2.34 dargestellt. Im zweiten Schritt wurden die Untersuchungen der Schalldämmung auf bauakustische Messungen (Hallraum-Verfahren) an der Leichtbauwand ausgedehnt. Die dazugehörigen Messergebnisse zeigt Bild 2.35.

Es zeigte sich, dass der Einfluss der Länge des Schlitzes auf die akustische Wirksamkeit der Wand unter Diffusfeld-Bedingungen begrenzt ist. Bei sukzessiver Erhöhung der Schlitzlänge bewirkt das erstmalige Auftreten eines Schlitzes die größte Minderung der Schalldämmung gegenüber intaktem Wandzustand. Ist der Schlitz erst mal vorhanden, spielt die Länge des Schlitzes unter Diffusfeld-Bedingungen eine untergeordnete Rolle bei der Schalldämmung der Wand. Der Vergleich von Simulations- und Messergebnissen der Schalldämmung

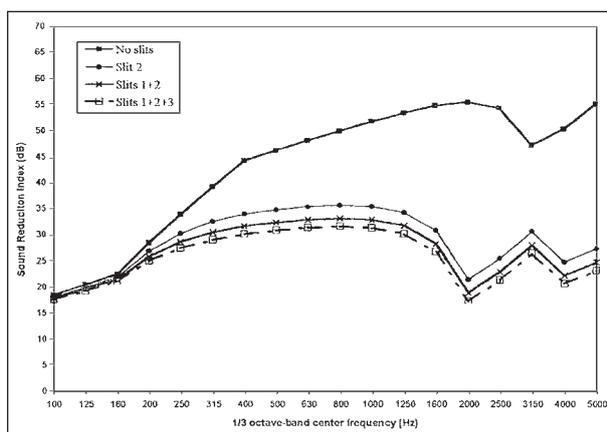


Bild 2.34: Simulationsergebnisse der spektralen Schalldämmung einer Leichtbauwand ohne Schlitz und mit Schlitzern verschiedener Länge nach dem Berechnungsmodell aus [GOMPERTS, 1964] aus [URIS, 2004]

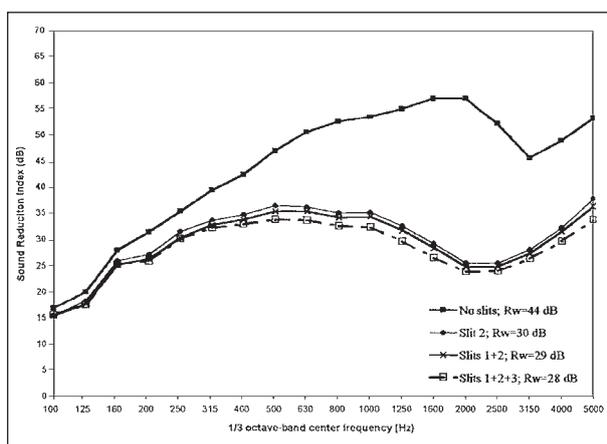


Bild 2.35: Bauakustische Messergebnisse der spektralen Schalldämmung einer Leichtbauwand ohne Schlitz und mit Schlitzern verschiedener Länge aus [URIS, 2004]

zeigt, dass das Modell nach [GOMPERTS, 1964] eine gute Vorhersage der bauakustischen Wirksamkeit (Diffusfeld-Bedingungen) für schlitzförmige Leckagen in Wandelementen liefert.

In [FINNRA, 1997] wurden Immissionsmessungen in verschiedenen Abständen hinter der Lsw an drei verschiedenen Orten durchgeführt. Die Messungen erfolgten bei fließendem Verkehr, wobei die untersuchten Lsw im ersten Fall einen Schlitz verschiedener Länge und Breite an der Unterkante aufwies, der im zweiten Fall abgedichtet wurde. Zur Korrektur der Verkehrssituation kam ein Referenzmikrofon oberhalb der Oberkante der Lsw zum Einsatz.

Es zeigte sich, dass der Einfluss der Leckage auf die relative Einfügungsdämmung der Lsw mit größer werdendem Abstand vernachlässigbar ist. So

ist die gemessene Reduktion der Wirksamkeit durch eine Apertur stark vom Abstand zur Lsw abhängig. Dieser Tatsache wird bei einer standardisierten Messung der Schalldämmung von Lsw gemäß [DIN EN 1793-2] keine Rechnung getragen, sodass Hallraum-Ergebnisse zu einer Überschätzung der tatsächlichen akustischen Relevanz von Leckagen auf die Schalldämmung führen. Jedoch erwähnen die Autoren von [FINNRA, 1997] den psychologischen Effekt, den Öffnungen in Lsw auf Anwohner haben können. So ist der subjektive Eindruck von der Wirksamkeit von Lsw mit Leckagen unverhältnismäßig stark durch den Schaden beeinträchtigt.

### 3 Schallfeldsimulationen

#### 3.1 Quell-Empfänger-Geometrie

Ausgangspunkt für die Definition der im Folgenden betrachteten Quell-Empfänger-Geometrie ist der Regelquerschnitt RQ 36 aus den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen [RAA]. In Bild 3.1 ist die bemaßte Prinzipskizze einer 6-spurigen Autobahn dargestellt, die um vier Quellpositionen ( $Q_1$  ist primäre Quellposition), eine Lsw und zwei primäre Empfängerpositionen ergänzt wurde.

Die vier Quellpositionen  $Q_1$  bis  $Q_4$  liegen jeweils in 0,5 m Höhe über der Mitte der jeweils äußeren Fahrstreifen der beiden Richtungsfahrbahnen. Dies entspricht den innerhalb der Schallausbreitungsberechnungen nach [RLS 90] zu berücksichtigten Quellpositionen. In horizontalem Abstand von 7,625 m zur Mitte des ersten Fahrstreifens befindet sich die zu betrachtende Lsw mit einer Höhe von 3 m, 5 m, 7 m bzw. 9 m. Die zu berücksichtigenden Empfänger befinden sich in einer Höhe von 2,8 m über dem Boden und in horizontalem Abstand von 25 m und 50 m zur Mitte des ersten Fahrstreifens hinter der Lsw.

Die Linienschallquelle der Straße wird gemäß dem in den [RLS 90] beschriebenen Teilstückverfahren durch einzelne Punktschallquellen diskretisiert. Bild 3.2 zeigt eine Prinzipskizze der innerhalb der Schallfeldsimulationen berücksichtigten Quell- und Empfängerpositionen entlang der Lsw in Draufsicht. Hinter der Lsw (grüne Linie) befindet sich die Fläche mit den Empfängerpositionen  $E_k$ .

Die Anzahl der Quellpositionen definiert sich nach [RLS 90] über die Abstände zwischen den Quellpositionen

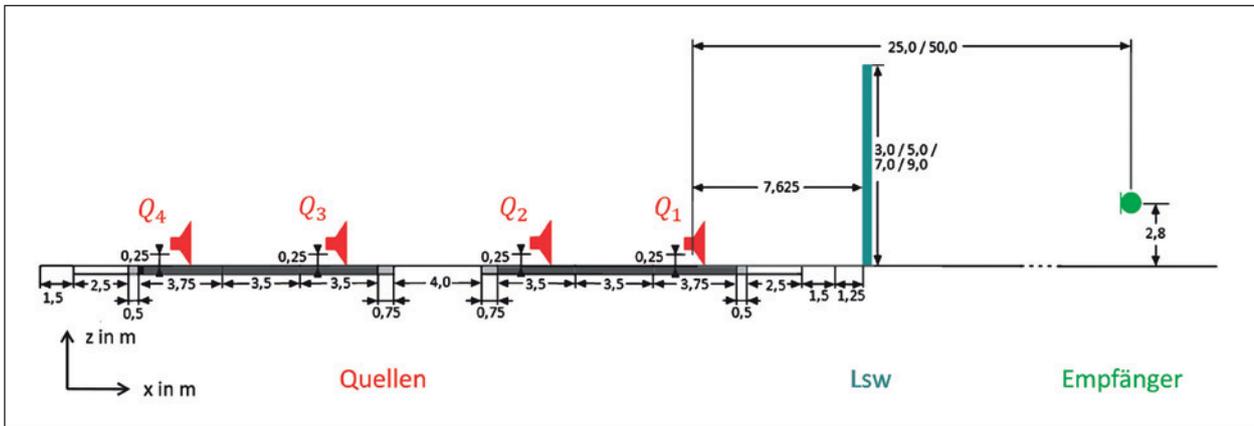


Bild 3.1: Prinzipische Skizze einer Fahrbahn nach dem Regelquerschnitt RQ 36 aus den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen [RAA] ergänzt um vier Quellpositionen ( $Q_1$  ist primäre Quellposition), eine Lsw und zwei primäre Empfängerpositionen

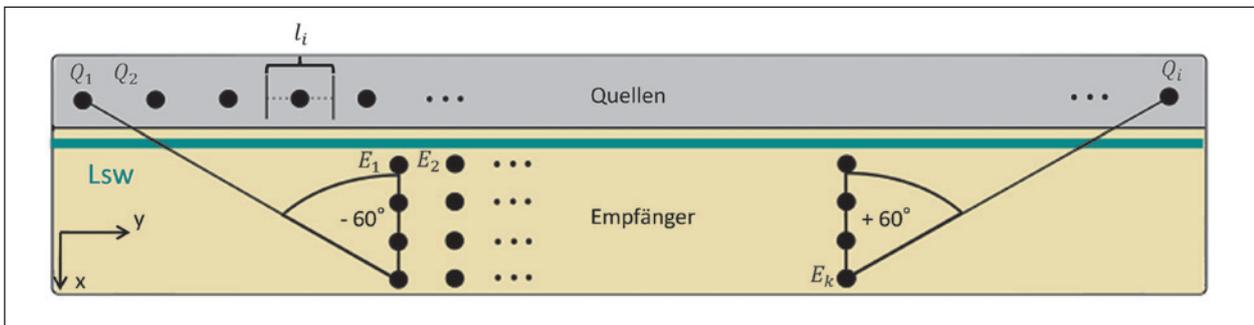


Bild 3.2: Prinzipische Skizze der innerhalb der Schallfeldsimulationen berücksichtigten Quell- und Empfängerpositionen entlang der Lsw in Draufsicht; Grau: Straße mit Quellpositionen  $Q_i$ ; Grün: Lsw; Beige: Fläche mit Empfängerpositionen  $E_k$

$$l_i \leq \frac{s_{i,kmin}}{2} \tag{3.1}$$

( $s_{i,kmin}$  entspricht dem kleinsten Abstand zwischen Quelle  $Q_i$  und Empfänger  $E_k$ ) sowie über die Position der entferntesten, äußersten Empfänger. Innerhalb der Schallfeldsimulationen wird sichergestellt, dass an jedem Empfänger ein quellseitiger Schalleinfall aus einem Winkelbereich von mindestens  $\pm 60^\circ$  Berücksichtigung findet.

### 3.2 Schallausbreitung an Lsw ohne Transmission

#### 3.2.1 Schallausbreitungsmodell

Zunächst wird die Schallausbreitung über eine unendlich lange Lsw mit Beugung über die Schirmoberkante und ohne Transmission durch die Lsw modelliert. Das Teilstück-Verfahren aus [RLS 90] sieht für jeden Immissionsort  $E_k$  eine Berechnung des Mittelungspegels  $L_{m,i}$  für  $i$  Teilstücke bzw. Quellen vor, die anschließend durch energetische Addition zu einem Gesamtimmisionspegel

$$L_{m,k} = 10 \lg \left( \sum_i 10^{\frac{L_{m,i,k}}{10} \text{ dB}} \right) \text{ dB} \tag{3.2}$$

zusammengefasst werden. Der von der Quelle  $Q_i$  am Immissionsort  $E_k$  verursachte Mittelungspegel

$$L_{m,i,k} = L_{m,E} + D_l + D_{s_{i,k}} + D_{BM,i,k} + D_B \tag{3.3}$$

setzt sich dabei zusammen aus:

- dem Emissionspegel  $L_{m,E}$  des Teilstücks,
- der Korrektur

$$D_l = 10 \lg \left( \frac{l}{1 \text{ m}} \right) \text{ dB} \tag{3.4}$$

zur Berücksichtigung der Teilstück-Länge  $l$ ,

- der Pegeländerung

$$D_{s_{i,k}} = \left( 11,2 - 20 \lg \left( \frac{s_{i,k}}{1 \text{ m}} \right) - \frac{s_{i,k}}{200 \text{ m}} \right) \text{ dB} \tag{3.5}$$

zur Berücksichtigung der Luftabsorption und des Abstandes  $s_{i,k}$  zwischen Quelle  $Q_i$  und Empfänger  $E_k$ ,

- der Pegeländerung zur Berücksichtigung der Boden- und Meteorologiedämpfung

$$D_{BM,i,k} = \left( \frac{h_m}{s_{i,k}} \cdot \left( 34 + \frac{600 \text{ m}}{s_{i,k}} \right) - 4,8 \right) \text{ dB} \quad (3.6)$$

$$\leq 0 \text{ dB}$$

mit der mittleren Höhe der direkten Verbindung zwischen Quelle  $Q_i$  und Empfänger  $E_k$

$$h_m = \frac{h_Q + h_E}{2} \quad (3.7)$$

sowie

- der Pegeländerung durch topografische und bauliche Gegebenheiten

$$D_B = D_{refl} - D_{z_{i,k}} \quad (3.8)$$

Bei Abschirmung entfällt der Term  $D_{BM,i,k}$ . Da die Quell-Empfänger-Geometrie gemäß Bild 3.1 neben der Lsw keine weiteren baulichen Strukturen vorsieht, kann die Pegelerhöhung durch Mehrfachreflexionen  $D_{refl}$  ebenfalls vernachlässigt werden. Somit vereinfacht sich der Mittelungspegel eines Teilstücks bei vorhandener Lsw zu

$$L_{m,i,k}^{Lsw} = L_{m,E} + D_l + D_{s_{i,k}} - D_{z_{i,k}} \quad (3.9)$$

Darin beschreibt

$$D_{z_{i,k}} = 10 \lg(3 + 80z_{i,k} \cdot K_{w,i,k}) \text{ dB} \quad (3.10)$$

das Abschirmmaß der Lsw zwischen Quelle  $Q_i$  und Empfänger  $E_k$  mit dem Schirmwert

$$z_{i,k} = A_{i,k} + B_{i,k} + C - s_{i,k} \quad (3.11)$$

und der Witterungskorrektur  $K_{w,i,k}$ . Für Abstände zwischen Quelle und Immissionsort von weniger als 100 m kann  $K_{w,i,k}$  [VDI 2720] gleich 1 gesetzt werden.

Wie Bild 3.3 zu entnehmen ist, wird die Strecke von der Quelle  $Q_i$  zur Schirmoberkante mit  $A_{i,k}$  und die Strecke von der Oberkante der Lsw zum Immissionsort  $E_k$  mit  $B_{i,k}$  bezeichnet. Die Dicke  $C$  der Lsw findet in der Simulation keine Berücksichtigung.

Die Beugung an der Schirmkante ist frequenzabhängig, jedoch wird die Berechnung des Abschirmmaßes in [RLS 90] scheinbar ohne Berücksichtigung einer Frequenz durchgeführt. Anhand der Definition des Abschirmmaßes gemäß [VDI 2720] zu

$$D_{z_{i,k}} = 10 \lg \left( 3 + \frac{C_2}{\lambda} \cdot z_{i,k} \cdot K_{w,i,k} \right) \text{ dB} \quad (3.12)$$

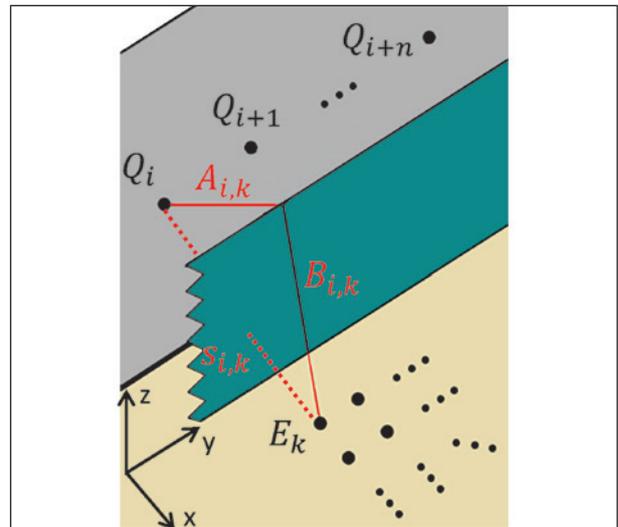


Bild 3.3: Skizze zur Beschreibung der geometrischen Größen zur Ermittlung des Schirmwerts  $z_{i,k}$  der Lsw zwischen Quelle  $Q_i$  und Empfänger  $E_k$

und direktem Vergleich mit Gleichung (3.10) lässt sich die Schwerpunktfrequenz

$$f = \frac{c_0}{\lambda} = \frac{c_0 \cdot 80}{C_2} \quad (3.13)$$

berechnen, die der Definition des Abschirmmaßes in den [RLS 90] zugrunde liegt. Gemäß [VDI 2720] nimmt der Koeffizient  $C_2$  Werte zwischen 20 und 40 an. Bei einer Schallgeschwindigkeit  $c_0$  von 343 m/s resultieren daraus Werte für  $f$  zwischen 686 Hz und 1.372 Hz. Diese markieren den Frequenzbereich des energetischen Schwerpunkts des standardisierten Verkehrslärmspektrums aus [DIN EN 1793-3].

Analog zu Gleichung (3.9) berechnet sich der Mittelungspegel eines Teilstücks bei freier Schallausbreitung zu

$$L_{m,i,k}^{Frei} = L_{m,E} + D_l + D_{s_{i,k}} + D_{BM,i,k} \quad (3.14)$$

Auf Basis von Gleichung (3.2) ergibt sich die Einfügdämpfung der Lsw ohne Berücksichtigung von Transmission durch Subtraktion der Gesamtimmisionspegel bei freier Schallausbreitung und bei Abschirmung zu

$$D_E = 10 \lg \left( \sum_i 10^{\frac{L_{m,i,k}^{Frei}}{10 \text{ dB}}} \right) - 10 \lg \left( \sum_i 10^{\frac{L_{m,i,k}^{Lsw}}{10 \text{ dB}}} \right)$$

$$= L_{m_k}^{Frei} - L_{m_k}^{Lsw} \quad (3.15)$$

### 3.2.2 Simulationsergebnisse

Im ersten Schritt fanden Simulationen an einer 300 m langen und 9 m hohen Lsw statt. Grundlage war die in Bild 3.1 dargestellte Quelle-Empfänger-Geometrie bei ausschließlicher Berücksichtigung der primären Quellposition  $Q_1$  und Empfängerpositionen  $E_k$  im Abstand von bis zu 50 m zur Quelle. Bild 3.4 zeigt die in 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Einfügungsdämmung der Lsw in der Draufsicht der Lsw sowie einen Gelb markierten Bereich. Innerhalb dieses gültigen Bereichs der Immissionsorte findet an jedem Empfänger ein quellseitiger Schalleinfall aus einem Winkelbereich von mindestens  $\pm 60^\circ$  Berücksichtigung. Es ist zu erkennen, dass sich ausschließlich im gültigen Bereich der Immissionsorte die über die Oberkante der Lsw gebeugte Schallwelle als Schallwelle mit einer zur Lsw nahezu parallelen Wellenfront (ebene Welle) ausbreitet. Alle folgenden Bilder berücksichtigen daher ausschließlich Immissionsorte des gültigen Bereichs.

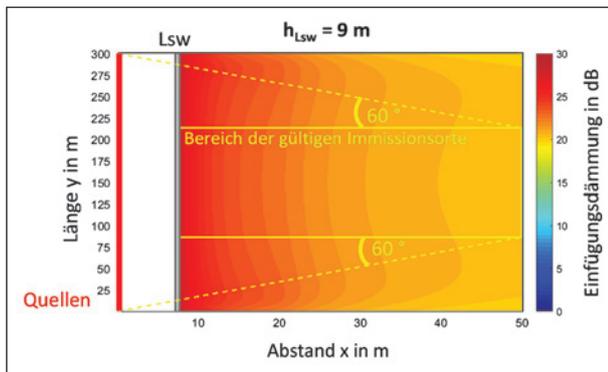


Bild 3.4: Nach [RLS 90] berechnete Einfügungsdämmung einer 9 m hohen Lsw ohne Transmission in 2,8 m Höhe über dem Boden in der Draufsicht; gelbe Markierung: gültiger Bereich der Immissionsorte

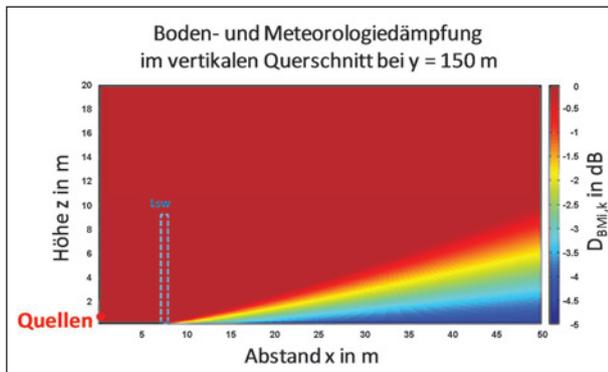


Bild 3.5: Nach [RLS 90] berechnete Boden- und Meteorologiedämmung in der Seitenansicht einer gedachten 9 m hohen Lsw

In Bild 3.6 ist die in 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Einfügungsdämmung der Lsw in der

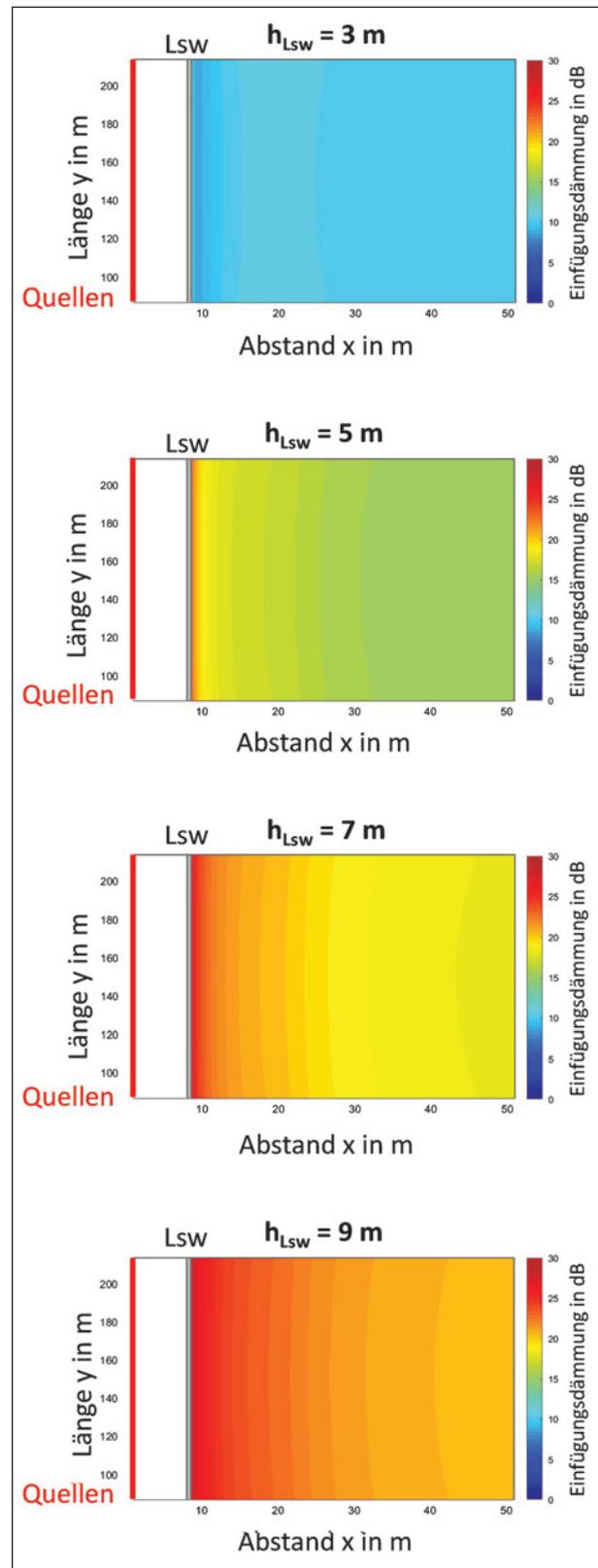


Bild 3.6: Nach [RLS 90] berechnete Einfügungsdämmung einer 3 m bis 9 m hohen Lsw ohne Transmission in 2,8 m Höhe über dem Boden in der Draufsicht der Lsw

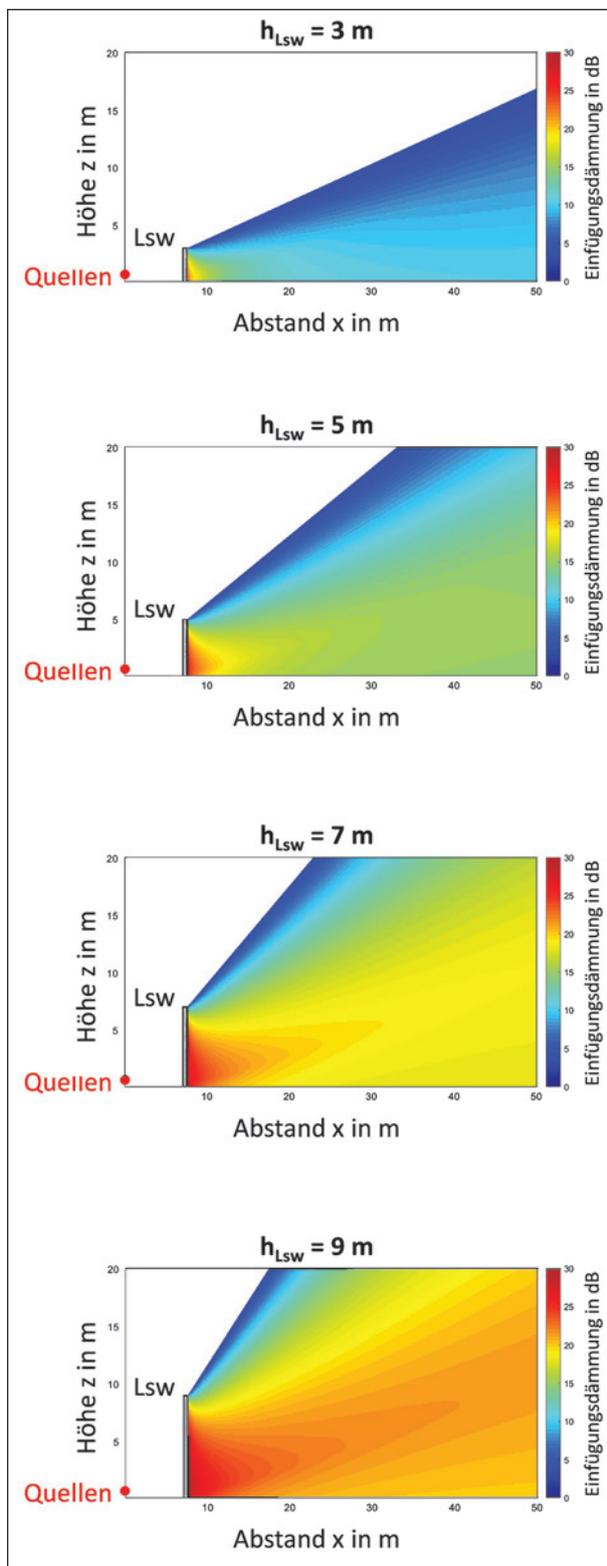


Bild 3.7: Nach [RLS 90] berechnete Einfügungsdämmung einer 3 m bis 9 m hohen Lsw ohne Transmission in der Seitenansicht der Lsw

Draufsicht für Lsw der Höhe von 3 m bis 9 m gegenübergestellt. Analog dazu zeigt Bild 3.7 die Simulationsergebnisse der verschiedenen Wandhöhen in der Seitenansicht der Lsw. In beiden Abbildungen

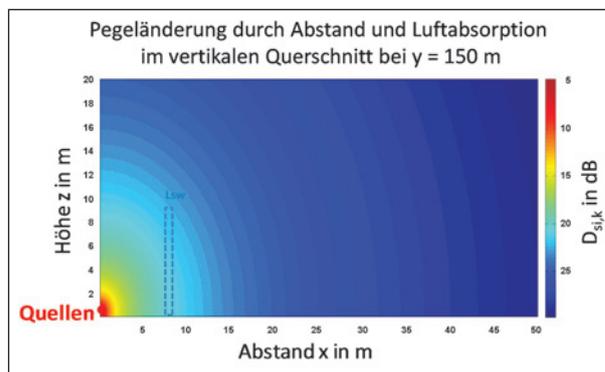


Bild 3.8: Nach [RLS 90] berechnete Pegeländerung durch Abstand und Luftabsorption in der Seitenansicht einer gedachten 9 m hohen Lsw

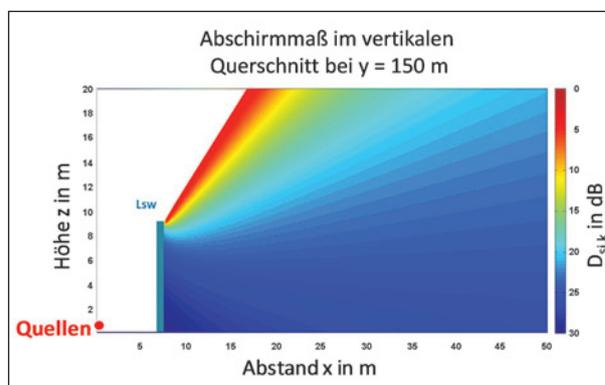


Bild 3.9: Nach [RLS 90] berechnetes Abschirmmaß einer 9 m hohen Lsw in der Seitenansicht der Lsw

ist zu erkennen, dass die Einfügungsdämmung der Lsw erwartungsgemäß mit zunehmender Höhe der Lsw ansteigt. Des Weiteren ist der Einfluss der Boden- und Meteorologiedämpfung auf die Einfügungsdämmung hinter der Lsw zu erkennen. Zur Veranschaulichung der energetischen Beiträge der einzelnen Terme der [RLS 90] zur Einfügungsdämmung der Lsw zeigen Bild 3.5 und Bild 3.8 bis Bild 3.9 exemplarisch die Boden- und Meteorologiedämpfung, die Pegeländerung durch Abstand und Luftabsorption sowie das Abschirmmaß der 9 m hohen Lsw in der Seitenansicht der Lsw.

### 3.3 Schallausbreitung an Lsw mit Transmission

#### 3.3.1 Schallausbreitungsmodell

Für die Berechnung des Immissionspegels hinter der Lsw unter Berücksichtigung der Transmission durch die Lsw ist das Modell aus Kapitel 3.2 um eine Vielzahl an Ausbreitungspfaden zu erweitern. Dazu wird die Lsw in Segmente gleicher Fläche auf-

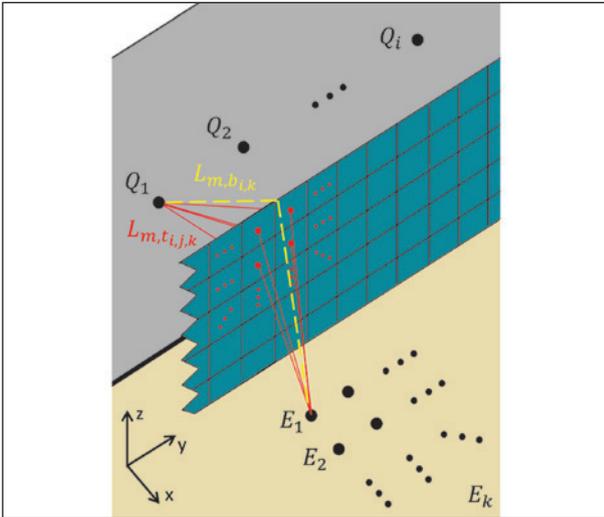


Bild 3.10: Skizze der berücksichtigten Pfade bei der Beschreibung der Schallausbreitung von Quelle  $Q_i$  zum Empfänger  $E_k$ ; Gelb: Schallausbreitung durch Schallbeugung über die Oberkante der Lsw; Rot: Schallausbreitung durch Transmission durch jedes  $j$ -te Segment der Lsw

geteilt (vgl. Bild 3.10). Durch jedes dieser Segmente verläuft ein Schallausbreitungspfad je Quell-Empfängerpaar. Der von  $Q_i$  am Immissionsort  $E_k$  verursachte Mittelungspegel  $L_{m,k,i}$  setzt sich damit zusammen aus dem Immissionspegel infolge der Schallbeugung über die Oberkante der Lsw  $L_{m,b,i,k}$  (gelber Pfad) und je einem Immissionspegel  $L_{m,t,i,j,k}$  infolge der Schalltransmission durch jedes  $j$ -te Segment der Lsw (rote Pfade).

Der Gesamtimmisionspegel am Empfänger  $E_k$  für  $i$  Teilstücke bzw. Quellen ergibt sich anschließend zu

$$L_{m_k}^{Lsw} = 10 \lg \left[ \sum_i \left( 10^{\frac{L_{m,b,i,k}}{10 \text{ dB}}} + \sum_j 10^{\frac{L_{m,t,i,j,k}}{10 \text{ dB}}} \right) \right] \text{ dB} \quad (3.16)$$

Der Beugungsanteil  $L_{m,b,i,k}$  am Gesamtimmisionspegel berechnet sich gemäß Gleichung (3.9) zu

$$L_{m,b,i,k} = L_{m,E} + D_l + D_{s_{i,k}} - D_{z_{i,k}} \quad (3.17)$$

Für die Transmission durch die Lsw wird der Schallausbreitungspfad in drei Abschnitte unterteilt (vgl. Bild 3.11).

- die Strecke  $s_{i,j}$  von der Quelle  $Q_i$  zur Mitte der Vorderseite des  $j$ -ten Segments der Lsw,
- der Abschnitt der Transmission durch das  $j$ -te Segment der Lsw mit der Fläche  $S_{Seg}$  und
- die Strecke  $s_{j,k}$  von der Mitte der Rückseite des  $j$ -ten Segments der Lsw zum Empfänger  $E_k$ .

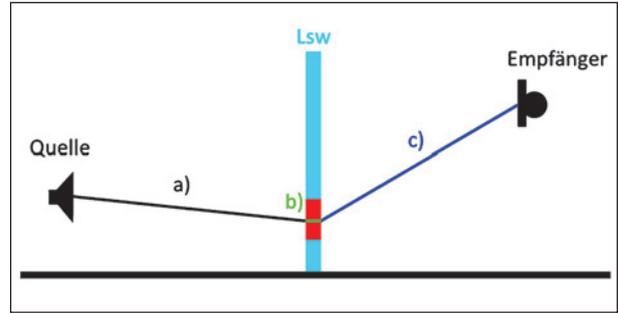


Bild 3.11: Skizze zur Unterteilung des Schallausbreitungspfads mit Transmission durch die Lsw (in Seitenansicht) in drei Abschnitte; a) Strecke von der Quelle zur Mitte der Vorderseite des  $j$ -ten Segments der Lsw; b) Abschnitt der Transmission durch das  $j$ -te Segment der Lsw; c) Strecke von der Mitte der Rückseite des  $j$ -ten Segments der Lsw zum Empfänger

Der von der Quelle  $Q_i$  am Immissionsort  $E_k$  durch Transmission durch das  $j$ -te Segment der Lsw verursachte Mittelungspegel

$$L_{m,t,i,j,k} = L_{m,E} + D_l + D_{s_{i,j}} + D_{s_j} - R_j + D_{s_{j,k}} \quad (3.18)$$

setzt sich dabei zusammen aus:

- dem Emissionspegel  $L_{m,E}$  des Teilstücks,
- der Korrektur

$$D_l = 10 \lg \left( \frac{l}{1 \text{ m}} \right) \text{ dB} \quad (3.19)$$

zur Berücksichtigung der Teilstück-Länge  $l$ ,

- der Pegeländerung

$$D_{s_{i,j}} = \left( 11,2 - 20 \lg \left( \frac{s_{i,j}}{1 \text{ m}} \right) - \frac{s_{i,j}}{200 \text{ m}} \right) \text{ dB} \quad (3.20)$$

zur Berücksichtigung der Luftabsorption und des Abstandes  $s_{i,j}$  zwischen Quelle  $Q_i$  und der Mitte der Vorderseite des  $j$ -ten Segments der Lsw,

- der Pegeländerung

$$D_{s_j} = 10 \lg \left( \frac{S_{Seg}}{1 \text{ m}^2} \right) \text{ dB} \quad (3.21)$$

zur Berechnung der Schallleistung an der Vorderseite des  $j$ -ten Segments der Lsw mit der Fläche  $S_{Seg}$ ,

- der Schalldämmung des  $j$ -ten Segments der Lsw

$$R_j = 10 \lg \left( \frac{1}{\tau} \right) \text{ dB} \quad (3.22)$$

mit dem Transmissionsgrad  $\tau$  zur Berechnung der Schallleistung an der Rückseite des  $j$ -ten Segments der Lsw und

- der Pegeländerung

$$D_{s_{j,k}} = 10 \lg \left( \frac{2\pi \cdot s_{j,k}^2}{1 \text{ m}^2} \right) \text{ dB} \quad (3.23)$$

zur Berücksichtigung der Luftabsorption und des Abstandes  $s_{j,k}$  zwischen der Mitte der Rückseite des  $j$ -ten Segments der Lsw und Empfänger  $E_k$ .

Im Gegensatz zur Schallausbreitung von der Schallquelle  $Q_i$  zur Vorderseite des  $j$ -ten Segments der Lsw breitet sich der Schall von der Rückseite des  $j$ -ten Segments der Lsw nicht durch die gedachte Hüllfläche einer Vollkugel sondern durch die Hüllfläche einer Halbkugel aus.

Analog zu Gleichung (3.15) ergibt sich die Einfügedämpfung der Lsw mit Berücksichtigung von Transmission durch Subtraktion der Gesamtimmisionspegel bei freier Schallausbreitung und bei Abschirmung zu

$$D_E = L_{m_k}^{\text{Frei}} - L_{m_k}^{\text{Lsw}} \quad (3.24)$$

Der Einfluss einer Leckage innerhalb der Lsw auf den Gesamtimmisionspegel hinter der intakten Lsw berechnet sich durch Subtraktion der Einfügedämpfung  $D_E^I$  der intakten Lsw und der Einfügedämpfung  $D_E^D$  der defekten Lsw zu

$$\Delta D_E = D_E^I - D_E^D \quad (3.25)$$

In Verbindung mit Gleichung (3.24) kann Gleichung (3.25) in

$$\Delta D_E = L_{m_k}^D - L_{m_k}^I \quad (3.26)$$

umgeformt werden. Darin beschreiben  $L_{m_k}^I$  und  $L_{m_k}^D$  den Gesamtimmisionspegel hinter der intakten und hinter der defekten Lsw.

### 3.3.2 Simulationsergebnisse

Anstatt den Einfluss eines Schadens auf die Wirksamkeit der Lsw wie zuvor beschrieben zu berechnen, kann anhand des definierten Kriteriums

$$L_{m,t} \leq L_{m,b} - 10 \text{ dB} \quad (3.27)$$

ein akustisch kritischer Bereich hinter der Lsw mit der Gesamtbedingung

$$GB = L_{m,t} - L_{m,b} + 10 \text{ dB} \quad (3.28)$$

bestimmt werden. Dabei beschreibt

$$L_{m,b} = 10 \lg \left[ \sum_i \left( 10^{\frac{L_{m,b_{i,k}}}{10 \text{ dB}}} \right) \right] \text{ dB} \quad (3.29)$$

den Gesamtimmisionspegel am Empfänger  $E_k$  infolge der Schallbeugung über die Oberkante der Lsw und

$$L_{m,t} = 10 \lg \left[ \sum_i \sum_j 10^{\frac{L_{m,t_{i,j,k}}}{10 \text{ dB}}} \right] \text{ dB} \quad (3.30)$$

den Gesamtimmisionspegel am Empfänger  $E_k$  infolge der Schalltransmission durch die Lsw.

Für eine Leckage der Größe eines einzelnen Segments der Lsw kann Gleichung (3.28) in

$$GB = 10 \lg \frac{Z}{N} \text{ dB} + 10 \text{ dB} \quad (3.31)$$

mit

$$Z = \frac{S_L \cdot \tau}{2\pi \cdot s_{L,k}^2} \sum_i \left( s_{i,L}^{-2} \cdot 10^{1,12 - \frac{s_{i,L}}{2000 \text{ m}}} \right) \quad (3.32)$$

und

$$N = \sum_i \left( 10^{1,12 - \frac{s_{i,k}}{2000 \text{ m}}} \left( s_{i,k}^2 (3 + 80(A_{i,k} + B_{i,k} + C - s_{i,k})) K_{w,i,k} \right)^{-1} \right) \quad (3.33)$$

umgeformt werden. Dabei wird, unter der Annahme, dass der Transmissionsgrad der intakten Lsw gegen Null geht, der bisher verwendete laufende Index  $j$  für die Lsw-Segmente durch den festen Index  $L$  des Lsw-Segments mit der Leckage ersetzt. Somit beschreiben

- $S_L$  die Fläche des Lsw-Segments mit Leckage,
- $s_{i,L}$  die Strecke von der Quelle  $Q_i$  zur Mitte der Vorderseite des Lsw-Segments mit Leckage und
- $s_{L,k}$  die Strecke von der Mitte der Rückseite des Lsw-Segments mit Leckage zum Empfänger  $E_k$ .

Alle Immissionsorte für die  $GB > 0 \text{ dB}$  gilt, liegen im akustisch kritischen Bereich, in dem der Einfluss der Leckage dominant ist und somit die Lsw nicht ausreichend Schalldämmung aufweist. Alle Immissionsorte für die  $GB < 0 \text{ dB}$  gilt, befinden sich im akustisch unkritischen Bereich (vgl. Bild 3.12). Die Grenze bzw. der Einflussradius des kritischen Bereichs ergibt sich für  $GB = 0 \text{ dB}$ .

Bild 3.13 bis Bild 3.15 zeigen die in 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Gesamtbedingung  $GB$  in der Draufsicht der Lsw der Höhe 9 m mit einer 0,5 m<sup>2</sup> großen Leckage, der ein Transmissionsgrad  $\tau$  von 0,4 bis 1,0 zugewiesen wurde. Die Leckage befand sich jeweils bei

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \\ 2,5 \text{ m} \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

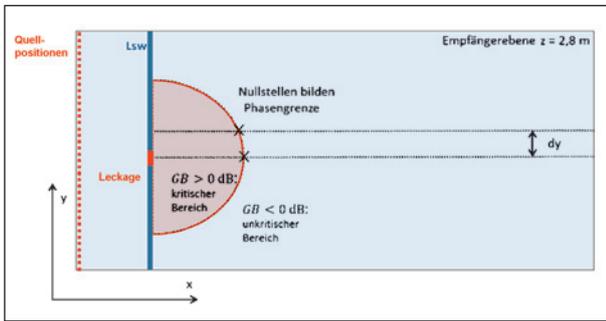


Bild 3.12: Definition des akustisch kritischen Bereichs hinter der Leckage innerhalb der Lsw

Ergänzend wurde in Bild 3.13 bis Bild 3.15 die Grenze des kritischen Bereichs mit  $GB = 0$  in Blau gekennzeichnet.

Es zeigt sich, dass der kritische Bereich axialsymmetrisch hinter der Leckage liegt. Er weist infolge der Superposition von gebeugtem und transmittiertem Schallfeld eher eine elliptische Form auf, und besitzt nicht, wie in Bild 3.12 dargestellt, eine radialsymmetrische Form. Mit zunehmendem Transmissionsgrad  $\tau$  der Leckage vergrößert sich der Einflussradius des akustisch kritischen Bereichs. Reicht der Einfluss der Leckage mit einem Transmissionsgrad von  $\tau = 0,4$  nur bis zu einer Entfernung zur Lsw von ca. 18 m, so wächst er für  $\tau = 1$  auf etwa 40 m an.

Aus der Definition von  $GB$  geht hervor, dass eine Änderung der Fläche der Leckage den gleichen Einfluss auf  $GB$  nimmt, wie die Erhöhung des Transmissionsgrads. Deshalb wird im Folgenden der Term  $\tau_L \cdot S_L$  als Wirkfläche runder Leckagen als Katalogparameter verwendet.

Bild 3.16 bis Bild 3.17 zeigen die in 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Gesamtbedingung  $GB$  in der Draufsicht der Lsw der Höhe 3 m und 6 m mit einer  $0,5 \text{ m}^2$  großen Leckage, der ein Transmissionsgrad  $\tau$  von 1,0 zugewiesen wurde. Die Leckage befand sich wieder jeweils an der in Gleichung (3.34) angegebenen Position. Für die 3 m hohe Lsw dominiert der über die Lsw gebeugte Schallanteil das Schallfeld hinter der Lsw. Dadurch beträgt der Einflussradius der Leckage nur ca. 3 m. Mit zunehmender Höhe der Lsw vergrößert sich der Einflussradius des akustisch kritischen Bereichs.

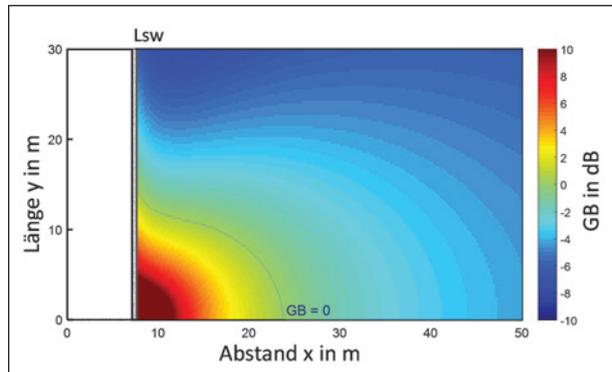


Bild 3.13: In 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Gesamtbedingung  $GB$  in der Draufsicht von 9 m hoher Lsw mit  $0,5 \text{ m}^2$  großer Leckage mit  $\tau = 0,4$ ; Blau: Grenze des kritischen Bereichs mit  $GB = 0$  symmetrisch um Leckage hinter Lsw

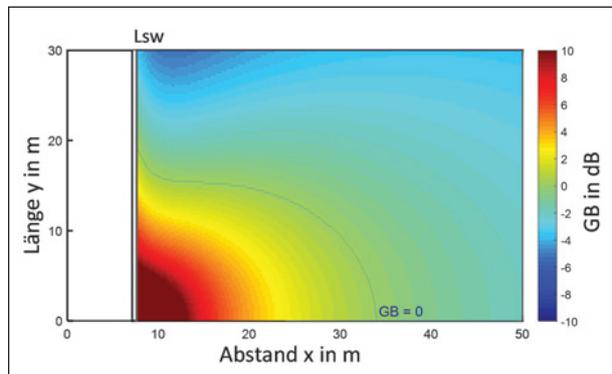


Bild 3.14: In 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Gesamtbedingung  $GB$  in der Draufsicht von 9 m hoher Lsw mit  $0,5 \text{ m}^2$  großer Leckage mit  $\tau = 0,7$ ; Blau: Grenze des kritischen Bereichs mit  $GB = 0$  symmetrisch um Leckage hinter Lsw

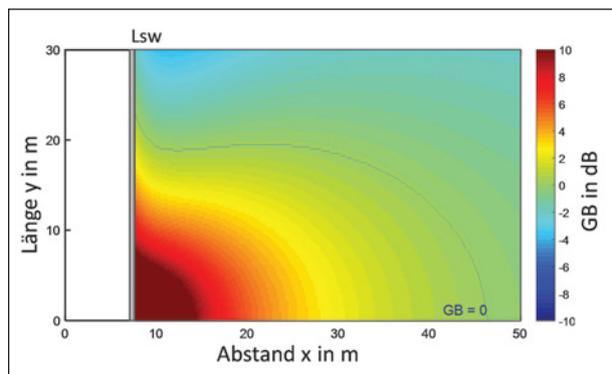


Bild 3.15: In 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Gesamtbedingung  $GB$  in der Draufsicht von 9 m hoher Lsw mit  $0,5 \text{ m}^2$  großer Leckage mit  $\tau = 1,0$ ; Blau: Grenze des kritischen Bereichs mit  $GB = 0$  symmetrisch um Leckage hinter Lsw

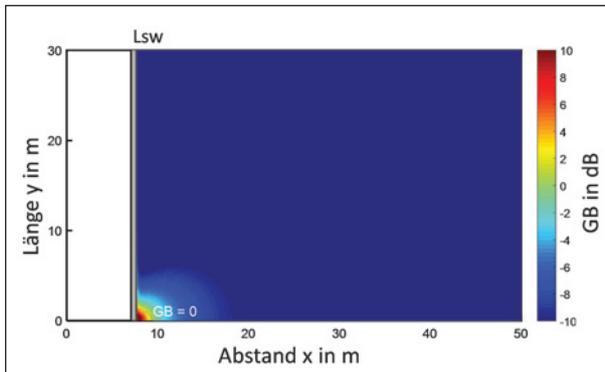


Bild 3.16 In 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Gesamtbedingung  $GB$  in der Draufsicht von 3 m hoher Lsw mit  $0,5 \text{ m}^2$  großer Leckage mit  $\tau = 1,0$ ; Blau: Grenze des kritischen Bereichs mit  $GB = 0$  symmetrisch um Leckage hinter Lsw

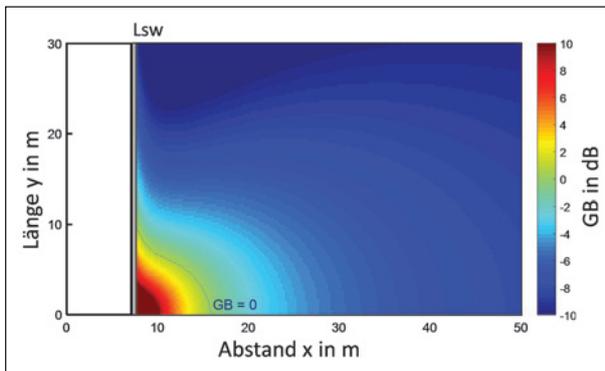


Bild 3.17: In 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Gesamtbedingung  $GB$  in der Draufsicht von 6 m hoher Lsw mit  $0,5 \text{ m}^2$  großer Leckage mit  $\tau = 1,0$ ; Blau: Grenze des kritischen Bereichs mit  $GB = 0$  symmetrisch um Leckage hinter Lsw

## 4 Schadensbildanalyse

### 4.1 Statistik zu Lärmschutzwänden

Die Grundlage für die angestrebte systematische Kategorisierung von Lsw bildet eine statische Analyse von Lsw-Typen an deutschen Straßen.

Bild 4.1 zeigt die prozentualen Verkaufszahlen eines einzelnen Herstellers von Lsw in den Jahren 2007 bis 2016 aufgeschlüsselt nach Material:

- Aluminium,
- Beton,
- transparenten Materialien,
- Holz,

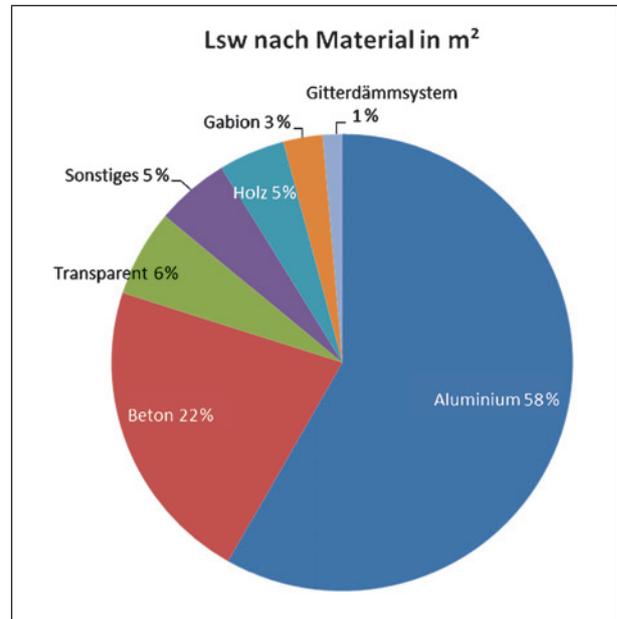


Bild 4.1: Prozentuale Verkaufszahlen eines einzelnen Herstellers von Lsw in den Jahren 2007 bis 2016 aufgeschlüsselt nach Material

- Gabionen,
- Gitterdämmsystem,
- sonstigen Materialien.

Da die Daten ausschließlich von einem einzelnen Hersteller stammen, dienen diese nur der Orientierung und können diese nicht als repräsentativ angesehen werden. Die Statistik der verwendeten Materialien für den Bau von Lsw aus [BMVBS, 2005] umfasst hingegen alle neugebauten Lsw aus den Jahren 1978 bis 2005 in Deutschland (s. Tabelle 4.1). Darin wird zwischen Lsw aus

- Aluminium,
- Beton,
- Holz,
- Kunststoff,
- transparenten Materialien und
- sonstigen Materialien

unterschieden. Gemäß der Zahlen aus [BMVBS, 2005] bilden Lsw aus Beton mit 37,3 % und Wände aus Aluminium mit 31,5 % den Großteil des Lsw-Bestandes in Deutschland, wobei die Tendenz immer mehr in Richtung Lsw aus Beton geht. So wurden im Jahr 2005 59 % der Lsw aus Beton gebaut und 19,9 % aus Aluminium.

Jahr	Aluminium		Beton		Holz		Kunststoff		Transparente Materialien		Sonstige Materialien		Jährliche Zunahme km	Gesamt- länge %
	Länge km	Anteil %	Länge km	Anteil %	Länge km	Anteil %	Länge km	Anteil %	Länge km	Anteil %	Länge km	Anteil %		
bis 1997	524,59	34,7	492,26	32,5	195,86	12,9	89,05	5,9	99,27	6,6	112,35	7,4	–	1.513,38
1998	23,89	29,7	34,67	43,1	13,85	17,2	–	–	6,40	8,0	1,61	2,0	80,42	1.593,80
1999	13,82	15,8	41,43	47,4	25,68	29,4	–	–	6,06	6,9	0,46	0,5	87,45	1.681,25
2000	19,09	33,0	26,22	45,3	7,66	13,2	–	–	4,22	7,3	0,71	1,2	57,90	1.739,15
2001	16,16	28,6	25,01	44,4	8,39	14,9	–	–	6,55	11,6	0,28	0,5	56,38	1.795,53
2002	7,04	18,7	17,24	45,9	6,78	18,1	–	–	6,31	16,8	0,19	0,5	37,56	1.833,09
2003	8,63	16,1	28,94	54,1	6,89	12,9	–	–	8,99	16,8	0,04	0,1	53,49	1.886,58
2004	10,26	19,7	29,02	55,6	5,82	11,1	–	–	6,64	12,7	0,45	0,9	52,19	1.938,76
2005	14,91	19,9	44,32	59,0	7,82	10,4	–	–	8,05	10,7	–	–	75,09	2.013,85
Gesamt	638,40	31,7	739,10	36,7	278,74	13,8	89,05	4,4	152,50	7,6	116,07	5,8	–	2.013,85
Abriss*	17,04	38,4	3,64	8,2	3,61	8,1	14,24	32,1	1,35	3,0	4,54	10,2	–	44,41
Bestand	621,36	31,5	735,46	37,3	275,13	14,0	74,81	3,8	151,16	7,7	111,53	5,7	–	1.969,44

Tab. 4.1: Statistik der verwendeten Materialien für den Bau neuer Lsw in Deutschland von 1978 bis 2005 aus [BMVBS, 2005]



Bild 4.2: Aufprall-Unfallschaden an Aluminium-Lsw (Quelle: BMVI)



Bild 4.3: Unfallschaden mit Brand an Aluminium-Lsw (Quelle: BMVI)

## 4.2 Typspezifische Schadensbilder

### 4.2.1 Aluminium-Lsw

An Aluminium-Kassetten-Lsw treten neben flächigen Leckagen und Verformungen an den Aluminium-Paneele durch Aufprall-Unfälle (vgl. Bild 4.2 bis Bild 4.4) zum Großteil schlitzförmige Leckagen auf. Diese haben ihren Ursprung oft in einer mangelhaften Montage oder sind durch Alterungsprozesse entstanden (vgl. Bild 4.5 bis Bild 4.12).



Bild 4.4: Großflächige Leckage durch fehlende Kassetten in Aluminium-Lsw (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)



Bild 4.5: Schlitzförmige Leckage durch Korrosion an Aluminium-Lsw (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)



Bild 4.8: Schlitzförmige Leckagen zwischen Aluminium-Lsw und Fundament (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)



Bild 4.6: Schlitzförmige Leckage unterhalb des Fundaments von Aluminium-Lsw durch Erdbauschaden (Quelle: BMVI)



Bild 4.9: Schlitzförmige Leckagen zwischen Aluminium-Lsw und Fundament (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)



Bild 4.7: Schlitzförmige Leckage zwischen Aluminium-Lsw und Fundament durch fehlende Bodenabschlussleiste (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)

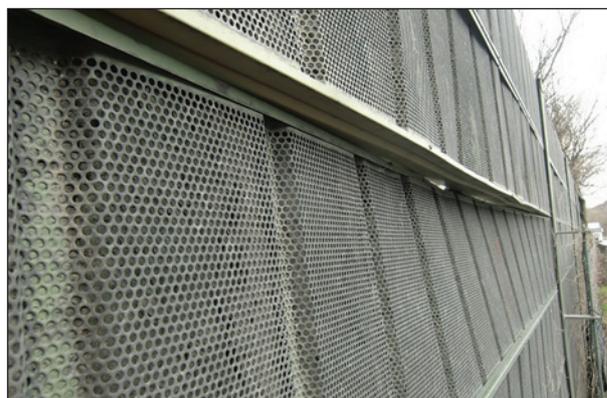


Bild 4.10: Schlitzförmige Leckage zwischen einzelnen Kassetten einer Aluminium-Lsw (Quelle: BMVI)



Bild 4.11: Vertikale schlitzförmige Leckage an Aluminium-Lsw durch lose Abdeckung (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)



Bild 4.12: Vertikale Undichtheit durch thermische Verformung an Aluminium-Lsw (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)

#### 4.2.2 Holz-Lsw

Bei Holz-Lsw wird im Allgemeinen zwischen zwei Bauformen unterschieden. Zur ersten Kategorie zählen Wände, die ausschließlich aus Holz-Panellen und einer tragenden Konstruktion bestehen. An diesen Lsw treten zum Großteil schlitzförmige Schäden auf, z. B. wenn durch mangelhafte Montage oder thermische Verformung infolge von Witterungsprozessen Spalte zwischen den Holzelementen auftreten (vgl. Bild 4.13 bis Bild 4.14).

Der zweiten Kategorie können Holzkonstruktionen zugeordnet werden, die einen Kern aus Mineralwolle oder Holzfaserverbundstoffen aufweisen. An die-



Bild 4.13: Horizontale schlitzförmige Leckage durch fehlende Bodenabschlussleiste an Holz-Lsw (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)



Bild 4.14: Vertikale schlitzförmige Leckage mangelhafte Montage oder thermische Verformung infolge von Witterungsprozessen an Holz-Lsw (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)

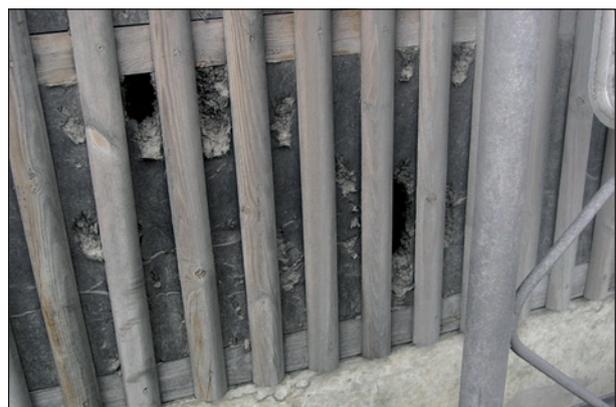


Bild 4.15: Löcher in Dämmmaterialplatte an Holz-Lsw infolge von mechanischer Krafteinwirkung (Quelle: BMVI)

sen Lsw treten eher flächige Schäden auf. So treten z. B. runde Leckagen innerhalb der zur Füllung der Lsw verwendeten Dämmmaterialien auf, die auf mechanische Krafteinwirkung, z. B. durch Schneepflüge oder durch Tiere, zurückzuführen sind (siehe Bild 4.15 bis Bild 4.16)

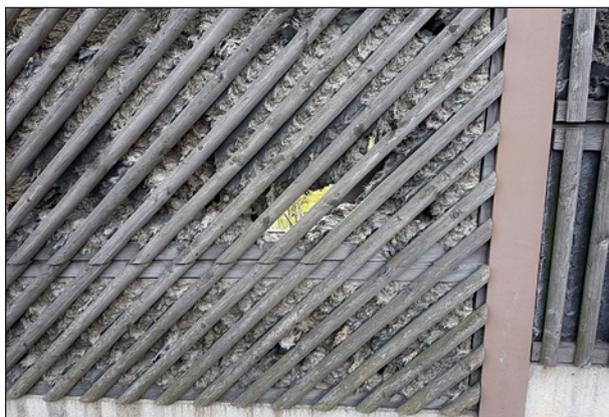


Bild 4.16: Löcher in Dämmmaterialplatte an Holz-Lsw infolge von mechanischer Krafteinwirkung

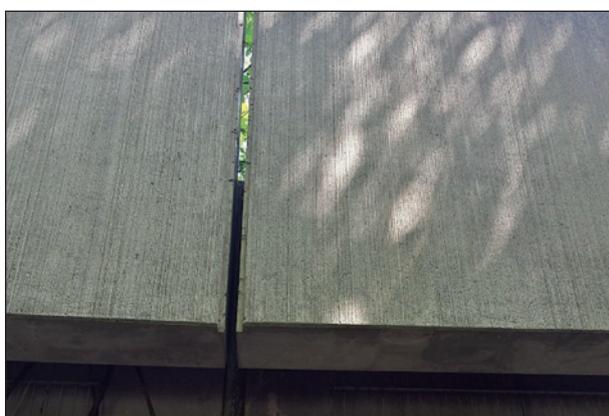


Bild 4.17: Fehlende Dichtung zwischen Elementen von Beton-Lsw (Quelle: BMVI)

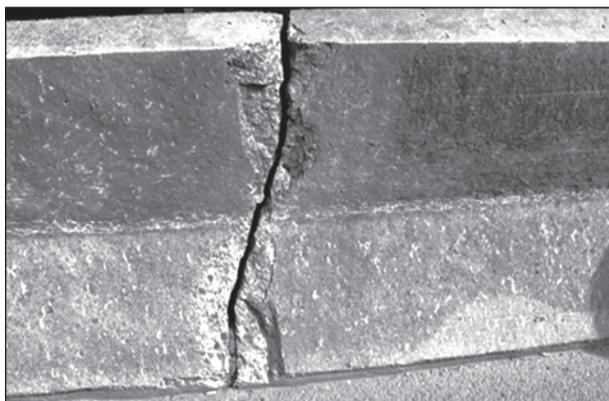


Bild 4.18: Riss in Fundament von Beton-Lsw (akustische Signifikant eher vernachlässigbar) (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)

#### 4.2.3 Beton-Lsw

Da Beton-Lsw baulich die massivste Gruppe an Lsw darstellen, finden sich hier nur sehr selten flächige Leckagen. Den Großteil der auftretenden Schadstellen, die zu einer Beeinflussung der schalldämmenden Eigenschaften der Lsw führen kann,



Bild 4.19: Alterungsbedingter Verfall an Beton-Lsw (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)



Bild 4.20: Schäden an Vorsatzschale von Beton-Lsw (aus Einkornbeton) infolge von Witterungsprozessen oder mechanischer Krafteinwirkung (Quelle: BMVI)



Bild 4.21: Schäden an Vorsatzschale von Beton-Lsw infolge von Witterungsprozessen oder mechanischer Krafteinwirkung (Quelle: BMVI)

stellen entweder Schlitze zwischen den Lsw-Elementen, z. B. infolge fehlender Dichtungen (vgl. Bild 4.17) oder altersbedingte Risse oder Löcher (vgl. Bild 4.18 bis Bild 4.25) dar. Schäden, die pri-



Bild 4.22: Schäden an Vorsatzschale von Beton-Lsw infolge von Witterungsprozessen oder mechanischer Krafteinwirkung (Quelle: www.tageblatt.de)



Bild 4.23: Schäden an Vorsatzschale von Beton-Lsw infolge von Witterungsprozessen oder mechanischer Krafteinwirkung

mär die schallabsorbierenden Eigenschaften von Beton-Lsw beeinflussen, betreffen weitestgehend Schäden an Vorsatzschalen von Beton-Lsw infolge von Witterungsprozessen oder mechanischer Krafteinwirkung (vgl. Bild 4.20 bis Bild 4.23).

#### 4.2.4 Transparente Lsw

In transparenten Lsw aus Glas oder Kunststoff finden sich zumeist Schäden durch mechanische Krafteinwirkung (z. B. Steinschlag), die sich je nach Material in einzelnen langgestreckten Rissen (vgl. Bild 4.24) in netzartigen, flächigen Rissen ohne oder mit Loch (siehe Bild 4.25) äußern. Des Weiteren können sich auch durch fehlende Dichtungen Schlitz zwischen den Elementen oder an der Unterseite der Lsw bilden (siehe Bild 4.26). Großflächige Schäden an transparenten Lsw sind selten und werden zumeist aus Gründen der Sicherheit (werden oft auf Brücken eingesetzt) in wenigen Tagen repariert.



Bild 4.24: Langgestreckter Riss an transparenter Lsw



Bild 4.25: Netzartige Risse mit Loch in transparenter Lsw



Bild 4.26: Schlitzförmige Leckage zwischen transparenter Lsw und Fahrweg auf Brücke durch fehlende Bodenabschlussleiste

#### 4.2.5 Gabionen

Wie in [ISELE, 2009] dargelegt, eignen sich Gabionen nur dann für den Bau von Lsw, wenn sie einen Kern aus Beton haben. Ist dieser Kern nicht durchgängig, so müssen die Übergänge zwischen den Gabionen für ein ausreichend hohes Schalldämmmaß mit Dichtband abgedichtet werden (s. Bild 4.27).

#### 4.2.6 Zusammenfassung Schadensanalyse

Es hat sich gezeigt, dass der Großteil der Leckagen an Lsw unabhängig vom Material der Lsw schlitzfö-

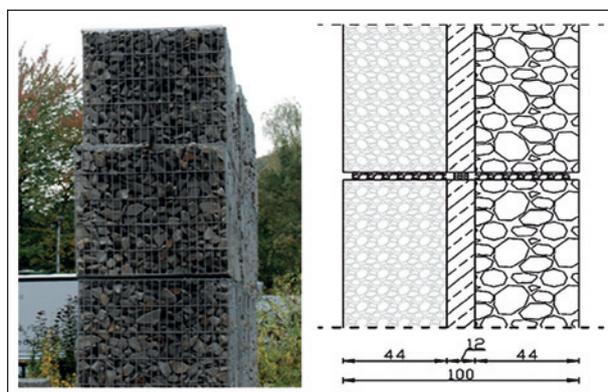


Bild 4.27: Schlitzförmige Leckage zwischen Gabionen aus [ISELE, 2009]; zwischen Stein-Schüttungen muss sich für ausreichend hohes Schalldämmmaß ein Kern aus Beton befinden (schraffierte Fläche)

mig ist. Flächige Schäden, durch z. B. Unfälle oder flächige Korrosion, können näherungsweise durch runde Öffnungen dargestellt werden. Nicht alle Schäden erzeugen eine durchgängige Öffnung in der Lsw. Jedoch können auch Schadstellen mit einer partiellen Zerstörung der Lsw-Struktur zu einer Beeinträchtigung der akustischen Wirksamkeit des Schallschirms führen.

#### 4.3 Kategorisierung der Schäden und Schadenskatalog

Innerhalb dieses Kapitels soll eine akustische Klassifizierung der Leckagen vorgenommen werden. Eine sinnvoll strukturierte Ordnung der Schäden findet sich, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, in [MARCOCCI, 2016]. Der darin vorgestellte Schadenskatalog soll Prüfengeuren als Grundlage für Bauwerksprüfungen vor Ort dienen. Innerhalb des Katalogs erfolgt die Auflistung der möglichen Schäden für verschiedene Typen von Lsw und getrennt für die einzelnen Lsw-Elemente bzw. Bauteile (s. Tabelle 4.3).

Jedes Bauteil erhält eine einstellige Nummer, die sich später als erste Stelle der Schadensnummer wiederfindet und zusätzlich eine farbliche Codierung. Die Liste an Schäden aus [MARCOCCI,

Schaden	Metall	Beton	Transparent	Holz	Gabione
Risse im Fundament	x	x	x	x	x
Spalt zwischen Fundament und Paneel	x	x	x	x	
Beschädigte Bodenabschlussleiste	x	x	x	x	
Spalt zwischen Paneelen/Elementen	x	x	x	x	x
Spalt zwischen vert. Träger und Paneel	x	x	x	x	
Beschädigte Abdeckung oben	x	x	x	x	
Beschädigte Abdeckung zwischen Paneelen	x	x	x	x	
Beschädigte Abdeckung zwischen Paneel und vert. Träger	x	x	x	x	
Beschädigtes Absorbererelement	x	x		x	
Fehlendes Absorbererelement	x	x		x	
Deformation vert. Träger	x	x	x	x	
Deformation Paneel	x	x		x	
Rost	x				
Fehlendes Paneel	x	x	x	x	
Loch in Paneel	x	x	x	x	
Fehlende Dichtung	x	x	x	x	
Fehlendes Absorbermaterial	x	x		x	
Austretendes Absorbermaterial	x	x		x	
Schäden durch Bewuchs	x	x	x	x	x
Große Poren					x

Tab. 4.2: Übersicht der möglichen Schäden in den verschiedenen Typen von Lsw

Bauteil	Code	Name	Beispiel-bilder
<b>Träger</b>	<b>1</b>		
	110	Verfall der Beschichtung	
	120	Rost	
	130	Deformation	
	140	Unfallschaden	
	150	Verfall der Halterung	
	160	Fehlende/verborgene Vertikalverbindung	
	170	Beschädigte Verbindung	
	1900	Sonstige Schäden	
<b>Kassette</b>	<b>2</b>		
	210	Rost	
	220	Unfallschaden	
	230	Beschädigte Verbindung	
	240	Bewuchs	
	250	Schaden durch Feuchtigkeit	
	260	Fehlende Kassette	
	270	Verschmutzung der Oberfläche	
	2900	Sonstige Schäden	
<b>Absorbermaterial</b>	<b>3</b>		
	310	Schaden durch Feuchtigkeit	
	320	Beschädigtes Absorbermaterial	
	330	Abwesenheit von Absorbermaterial	
	340	Austritt von Absorbermaterial	
	350	Beschädigte Materialwolle	
	3900	Sonstige Schäden	

Tab. 4.3: Übersetzter Schadenskatalog für Metall-Lsw aus [MARCOCCI, 2016]

2016] enthält jedoch nicht nur akustisch relevante Schäden, sondern auch Schäden (z. B. Graffiti, leichter Bewuchs) die keinen relevanten Einfluss auf die Schalldämmung der Lsw haben. Eine auf akustisch relevante Schäden reduzierte tabellarische Schadensübersicht ist in Tabelle 4.2 dargestellt. Die Tabelle gibt eine Übersicht darüber, welche Schäden in den verschiedenen Typen von Lsw auftreten können.

In Tabelle 4.4 ist jedem der Schadenstypen eine abstrahierte Geometrie zugeordnet. Dabei wird, bis auf wenige Ausnahmen, zwischen schlitzförmigen und runden Leckagen unterschieden. Diese Vereinfachung der geometrischen Form von Leckagen erleichtert die folgende mathematische Beschreibung

Bauteil	Code	Name	Beispiel-bilder
<b>Fundament</b>	<b>4</b>		
Betonfundament	41		
	411	Risse	
	412	Rost	
	413	Abbröckelndes Material	
	414	Heraustretende Rahmen	
	415	Verschobene Verbindung	
	416	Beschädigte Verbindung	
	4190	Sonstige Schäden	
Vom Beton getragene Struktur	42		
	421	Risse	
	422	Rost	
	423	Heraustretende Rahmen	
	424	Abbröckelndes Material	
	425	Verfall der Neoprenverbindung	
	426	Fehlende Neoprenverbindung	
	4290	Sonstige Schäden	
<b>Umgebung</b>	<b>5</b>		
	510	Bewuchs	
	520	Verschmutzung	
	530	Nicht inspiziert	
	5900	Sonstige Schäden	
<b>Sonstiges</b>	<b>6</b>		
	610	Neudefinierter Schaden	
	620	Kein Schaden	

Tab. 4.3: Fortsetzung

der akustischen Wirkung von Schäden innerhalb eines Schadensmodells (s. Kapitel 4.4).

Tabelle 4.5 zeigt beispielhaft einen in Anlehnung an [MARCOCCI, 2016] erstellten Schadenskatalog zur Dokumentation akustisch relevanter Schäden an Aluminium-Lsw. Neben der Bezeichnung des Schadenstyps finden sich ein numerischer Code und verschiedene Spalten, die für die Angabe von Abmaßen und Geometrie des Schadens sowie sonstige Notizen vorgesehen ist. Ein Bauwerksprüfer könnte vor Ort in die Tabelle alle Daten eintragen, die später für die Berechnung des Einflusses der Leckage auf die akustische Wirksamkeit der Lsw benötigt werden.

Schaden	Geometrie
Risse im Fundament	Schlitz
Spalt zwischen Fundament und Paneel	Schlitz
Beschädigte Bodenabschlussleiste	Schlitz
Spalt zwischen Paneelen/Elementen	Schlitz
Spalt zwischen vert. Träger und Paneel	Schlitz
Beschädigte Abdeckung oben	–
Beschädigte Abdeckung zwischen Paneelen	Schlitz
Beschädigte Abdeckung zwischen Paneel und vert. Träger	Schlitz
Beschädigtes Absorberelement	Rundes Loch mit Füllung
Fehlendes Absorberelement	Rundes Loch mit Füllung
Deformation vert. Träger	Schlitz
Deformation Paneel	Schlitz
Rost	Rundes Loch oder Schlitz mit Füllung
Fehlendes Paneel	Rechteckiges Loch
Loch in Paneel	Rundes Loch
Fehlende Dichtung	Schlitz
Fehlendes Absorbermaterial	Rundes Loch mit Füllung
Austretendes Absorbermaterial	Rundes Loch mit Füllung
Schäden durch Bewuchs	Rundes Loch oder Schlitz mit Füllung
Große Poren	Poröser Absorber

Tab. 4.4: Abstrahierung der Geometrie der möglichen Schäden in den verschiedenen Typen von Lsw

Schaden	Code	Maße (mm x mm)	Geometrie	Notiz
Risse im Fundament	101			
Spalt zwischen Fundament und Paneel	102			
Beschädigte Bodenabschlussleiste	103			
Spalt zwischen Paneelen/Elementen	104			
Spalt zwischen vert. Träger und Paneel	105			
Beschädigte Abdeckung oben	106			
Beschädigte Abdeckung zwischen Paneelen	107			
Beschädigte Abdeckung zwischen Paneel und vert. Träger	108			
Beschädigtes Absorberelement	109			
Fehlendes Absorberelement	110			
Deformation vert. Träger	111			
Deformation Paneel	112			
Rost	113			
Fehlendes Paneel	114			
Loch in Paneel	115			
Fehlende Dichtung	116			
Fehlendes Absorbermaterial	117			
Austretendes Absorbermaterial	118			
Schäden durch Bewuchs	119			

Tab. 4.5: Beispiel für Schadenskatalog zur Dokumentation akustisch relevanter Schäden an Aluminium-Lsw in Anlehnung an [MARCOCCI, 2016]

### 4.4 Modell zur Beschreibung des Transmissionsgrads von Schäden

Aus der Vielzahl an Berechnungsmodellen, die in Kapitel 2.3 vorgestellt werden, erweist sich die Bestimmung des Transmissionsgrads nach [MECHEL, 1986] als am geeignetsten. Zum einen wird dieses Modell in einer Vielzahl an Publikationen übernommen und dabei dessen Exaktheit nachgewiesen, zum anderen erlaubt es durch ein Set an Parametern die Modellierung von Leckagen mit Absorberfüllung und Abschlusskappen an den Öffnungen der Leckage in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel und für diffuse Schallfelder. Damit lassen sich sowohl durchgängige Öffnungen in Lsw als auch partielle Schäden abbilden. Des Weiteren ist das Modell nach [MECHEL, 1986] für runde Leckagen und für Schlitze definiert.

#### 4.4.1 Runde Leckagen

##### Berechnungsmodell

Die Geometrie für die Transmissionsgradbestimmung von runden Leckagen ist in Bild 4.28 skizziert. Der seitliche Querschnitt zeigt eine Leckage des Durchmessers  $2a$  und der Länge  $d$ . Die Schallausbreitungsrichtung verläuft dabei parallel zur  $z$ -Achse des Koordinatensystems, wobei die Vorderseite der Wand bei  $z = 0$  und die Rückseite der Wand bei  $z = d$  liegt. Die Vorderseite der Leckage ist mit einer Abdeckkappe der flächenbezogenen Masse  $m_1$  und die Rückseite mit einer Kappe der flächenbezogenen Masse  $m_2$  versiegelt. Innerhalb der Apertur befindet sich ein homogener, isotroper poröser Absorber mit der normierten Fortpflanzungskonstante  $\Gamma_{an}$  und der normierten Schallkennimpedanz  $Z_{an}$ .

Zur Vereinfachung der analytischen Herleitung werden in [MECHEL, 1986] folgende Vereinfachungen getroffen:

- Die Ausbreitung innerhalb der Leckage ist eindimensional.
- Die Abschlusskappen bewegen sich kolbenartig.
- Die Abschlusskappen verhalten sich wie unelastische Massen.

In Bild 4.29 wird das Schallfeld in seine Komponenten aufgeschlüsselt. Eine unter dem Winkel  $\theta_i$  einfallende ebene Schallwelle  $p_e$  wird an der Vorderseite der Leckage partiell reflektiert ( $p_r$ ) und partiell gestreut ( $p_s$ ).

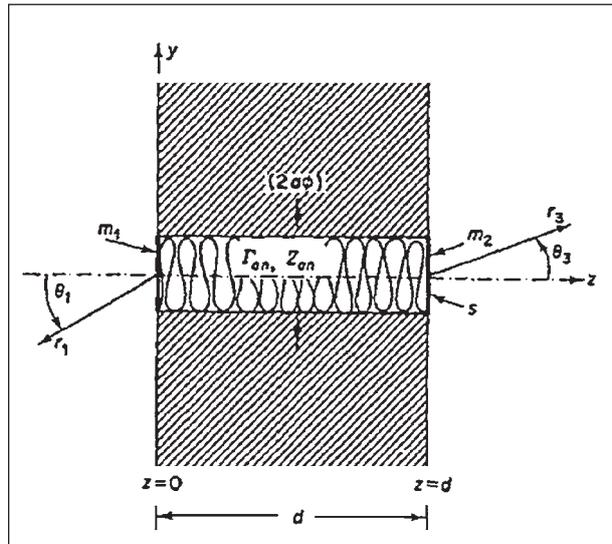


Bild 4.28: Skizzierter Querschnitt einer Wand mit runder Leckage aus [MECHEL, 1986]; Leckage mit der Länge  $d$  und dem Durchmesser  $2a$  ist mit isotropem und homogenem Absorbermaterial mit Fortpflanzungskonstante  $\Gamma_{an}$  und Schallkennimpedanz  $Z_{an}$  gefüllt; Leckage ist mit zwei Abschlusskappen mit den flächenbezogenen Massen  $m_1$  und  $m_2$  verschlossen

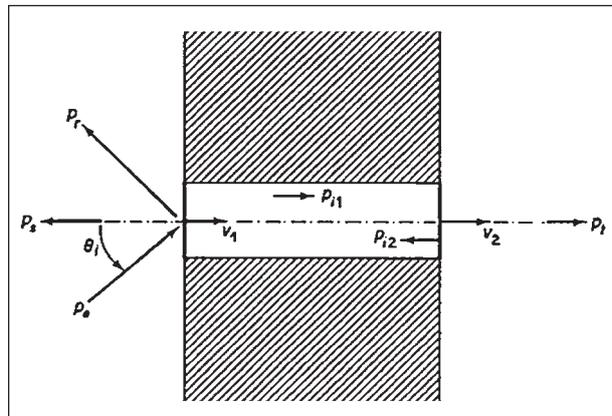


Bild 4.29: Skizzierter Querschnitt einer Wand mit runder Leckage aus [MECHEL, 1986]; Unterteilung des Schallfelds in einzelne Schallfeldkomponenten

Die innerhalb der Leckage auftretenden Schallfeldanteile können in eine hinlaufende ebene Schallwelle  $p_{i1}$  und eine an der rückseitigen Abschlusskappe reflektierte, rücklaufende Schallwelle  $p_{i2}$  getrennt werden. Auf der Empfängerseite ist nur der transmittierte Schallfeldanteil  $p_t$  wahrnehmbar. Die Schwingenschnellen der Abschlusskappen an den Öffnungen der Leckage mit der Querschnittsfläche  $S$  sind mit  $v_1$  und  $v_2$  eingetragenen.

Da für die Schwingenschnelle des Schallfeldes an der Oberfläche der schallharten Wand  $v_z$  ( $z = 0, r_1 > a$ ) = 0 gilt, kann folgende Kräftegleichung aufgestellt werden:

$$(p_e + p_r + p_s - p_{i_1} - p_{i_2})_{z=0} \cdot S = j\omega m_1 S v_1 \quad (4.1)$$

Die Gleichung kann weiter vereinfacht werden, indem die Zeitabhängigkeit der Wellengleichungen gekürzt und der Zusammenhang  $\hat{p}_e = \hat{p}_r$  an schallharten Wänden genutzt wird:

$$2\hat{p}_e - \hat{p}_{i_1} - \hat{p}_{i_2} = v_1(j\omega m_1 + Z_{r_1}) \quad (4.2)$$

Der Term für gestreute Schallfeldanteile wird dabei durch die spezifische Strahlungsimpedanz  $Z_{r_1}$  ersetzt.

Ein weiteres Kriterium ergibt sich nach [MECHEL, 1986] aus der durchschnittlichen Schwingschnelle an der Oberfläche der Leckageöffnung ( $z = 0, r_1 \leq a$ )

$$\frac{(\hat{p}_{i_1} - \hat{p}_{i_2})}{Z_a} = v_1 \quad (4.3)$$

Die beiden Bedingungen, Kontinuität der Geschwindigkeit und Kräftegleichgewicht, können ebenfalls für die rückseitige Leckageseite bei  $z = d$  aufgestellt werden zu

$$(\hat{p}_{i_1} e^{-\Gamma_a d} - \hat{p}_{i_2} e^{+\Gamma_a d})/Z_a = v_2 \quad (4.4)$$

und

$$\hat{p}_{i_1} e^{-\Gamma_a d} + \hat{p}_{i_2} e^{+\Gamma_a d} = v_2(j\omega m_2 + Z_{r_2}) \quad (4.5)$$

Durch die Definition  $\hat{p}_e = 1$  und

$$Z_i = j\omega m_i + Z_{r_i}, \quad i \in \{1, 2\} \quad (4.6)$$

lässt sich folgendes Gleichungssystem aufstellen:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & Z_1 & 0 \\ 1 & -1 & -Z_a & 0 \\ e^{-\Gamma_a d} & -e^{\Gamma_a d} & 0 & -Z_a \\ e^{-\Gamma_a d} & e^{\Gamma_a d} & 0 & -Z_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_{i_1} \\ p_{i_2} \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Über die Determinante der Koeffizientenmatrix

$$D = 2[Z_a(Z_1 + Z_2) \cosh(\Gamma_a d) + (Z_a^2 + Z_1 Z_2) \sinh(\Gamma_a d)] \quad (4.8)$$

lassen sich mithilfe der crammerschen Regel die Lösungen des Gleichungssystems finden:

$$p_{i_1} = \frac{2p_e Z_a (Z_a + Z_2) e^{\Gamma_a d}}{D} \quad (4.9)$$

$$p_{i_2} = \frac{2p_e Z_a (Z_a - Z_2) e^{-\Gamma_a d}}{D} \quad (4.10)$$

$$v_1 = \frac{4p_e (Z_a \cosh(\Gamma_a d) + Z_2 \sinh(\Gamma_a d))}{D} \quad (4.11)$$

$$v_2 = \frac{4p_e Z_a}{D} \quad (4.12)$$

Mit der an der Fläche  $S$  anliegenden Schallleistung

$$\Pi_e(\theta_i) = \frac{1}{2} S \cdot \cos \theta_i \cdot |\hat{p}_e|^2 / Z_0 \quad (4.13)$$

und durch Einsetzen der Lösung für  $v_2$  in die Gleichungen für die transmittierte Schallleistung

$$\Pi_t = \frac{1}{2} S \cdot \Re e(Z_{r_2}) \cdot |v_2|^2 \quad (4.14)$$

ergibt sich der einfallswinkelabhängige Transmissionsgrad zu

$$\tau(\theta) = \frac{\Pi_t}{\Pi_e(\theta)} = \left( \frac{Z_0}{\cos(\theta)} \right) \Re e(Z_{r_2}) \cdot \left| \frac{2Z_a}{Z_a(Z_1 + Z_2) \cosh(\Gamma_a d) + (Z_a^2 + Z_1 Z_2) \sinh(\Gamma_a d)} \right|^2 \quad (4.15)$$

In den Simulationen aus [MECHEL, 1986] wird die Betrachtung auf vier dimensionslose Größen reduziert:

- Die Frequenz  $f$  wird mit der Dicke der Wand  $d$  und der Schallgeschwindigkeit  $c_0$  in Luft zu

$$F = \frac{fd}{c_0} \quad (4.16)$$

- Aus dem Durchmesser der Leckage  $2a$  und der Dicke der Wand  $d$  wird der Geometriefaktor

$$A = \frac{2a}{d} \quad (4.17)$$

- Die Absorberfüllung in der Leckage wird über den längenbezogenen Strömungswiderstand  $\Xi$ , die Dicke der Wand  $d$  und die charakteristische Impedanz von Luft  $Z_0$  beschrieben mit

$$X = \frac{\Xi d}{Z_0} \quad (4.18)$$

- Die Charakterisierung der Abschlusskappen ist über die flächenbezogene Masse  $m$  der Kappen, die Dichte der Luft  $\rho_0$  und die Dicke der Wand  $d$  möglich:

$$M = \frac{m}{\rho_0 d} \quad (4.19)$$

### Validierung der korrekten Modellimplementierung

In [MECHEL, 1986] wird eine Reihe an Berechnungsergebnissen für die spektrale Schalldämmung von runden Leckagen gezeigt. Aus dem in Kapitel 4.4.1 berechneten Transmissionsgrad  $\tau$  folgt über Gleichung (3.22) die Schalldämmung, die

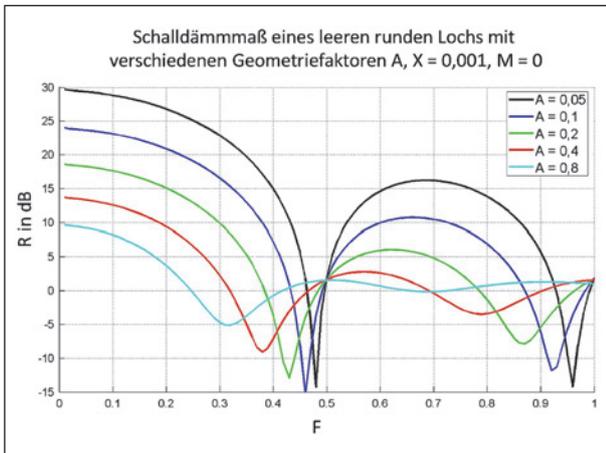


Bild 4.30: Spektrale Schalldämmung für runde Leckage ohne Absorberfüllung und ohne Abschlusskappe für verschiedene Geometriefaktoren  $A$  berechnet nach [MECHEL, 1986]

abhängig von den drei Größen  $A, X, M$  als Funktion von  $F$  dargestellt wird. Dabei werden je zwei der Variablen fixiert und für die dritte Variable eine Kurvenschar gebildet. In Bild 4.30 ist die berechnete Schalldämmung runder Leckagen für fünf Lsw unterschiedlicher Dicke abgebildet. Die fixierten Parameter  $M = 0$  und  $X = 0$  entsprechen einer offenen Leckage ohne Absorberfüllung und ohne Abschlusskappen. Es wird zudem der Durchmesser der Leckagen mit  $2a = 0.01$  m festgehalten.

Die Schalldämmung in Bild 4.30 zeigt durch negative Werte ein klares Resonanzverhalten nahe der Vielfachen von  $\lambda_0/2$ , was einer Verstärkung der einfallenden Schalleistung durch die Leckage entspricht. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Transmissionsgrad im niedrigen Frequenzbereich sehr klein wird und dass die Vergrößerung der Leckage zu einer Vergrößerung des Transmissionsgrades führt.

Gegenüber Bild 4.30 wurde bei der Simulation der Schalldämmung in Bild 4.31 die Leckage um eine Abschlusskappe mit  $M = 4$  und einer Absorberfüllung mit  $X = 1$  ergänzt. Dabei ist eine Verschiebung des Resonanzminimums hin zu tieferen Frequenzen zu erkennen. Mit zunehmendem Geometriefaktor sinkt das Schalldämmmaß der Leckage.

In Bild 4.32 wurde eine feste Geometrie von  $A = 0,01$  ohne Abschlusskappen angenommen und im Anschluss die Schalldämmung für verschiedene Absorberfüllungen berechnet. Bei Absorbieren mit geringem Strömungswiderstand treten deutliche Resonanzminima auf. Erhöht sich der Strömungswiderstand verschwinden diese stetig.

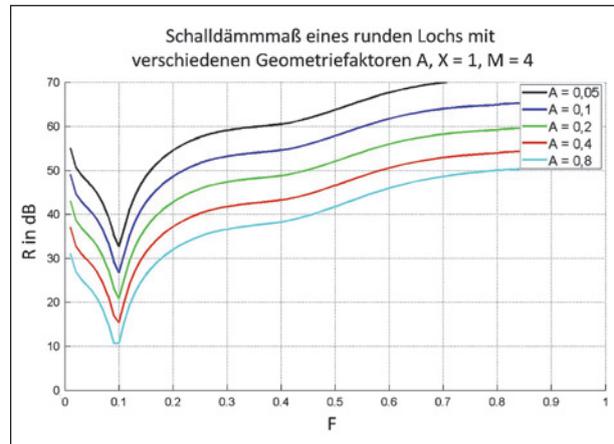


Bild 4.31: Spektrale Schalldämmung für runde Leckage mit Absorberfüllung ( $X = 1$ ) und mit Abschlusskappe ( $M = 4$ ) für verschiedene Geometriefaktoren  $A$  berechnet nach [MECHEL, 1986]

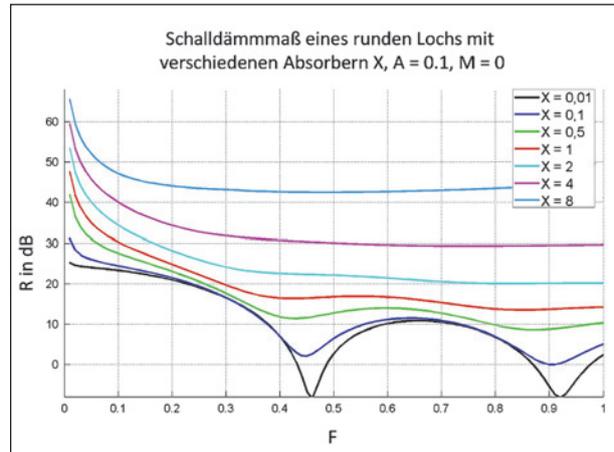


Bild 4.32: Spektrale Schalldämmung für runde Leckage mit fester Geometrie ( $A = 0,1$ ) und ohne Abschlusskappe für verschiedene Absorbermaterialien  $X$  berechnet nach [MECHEL, 1986]

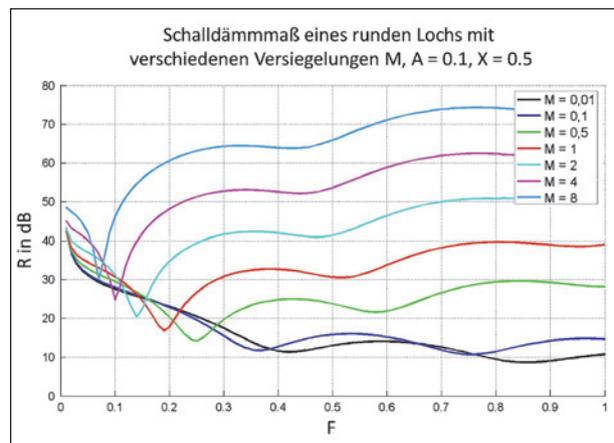


Bild 4.33: Spektrale Schalldämmung für runde Leckage mit fester Geometrie ( $A = 0,1$ ) und mit Absorberfüllung ( $X = 0,5$ ) für Abschlusskappen mit verschiedener flächenbezogener Masse  $M$  berechnet nach [MECHEL, 1986]

Bild 4.33 zeigt die Schalldämmung für konstante Geometrie  $A = 0,1$  und konstanten Absorber  $X = 0,5$ . Der Massefaktor der Abschlusskappe nimmt Werte zwischen  $M = 0,01$  und  $M = 8$  an. Die Erhöhung der flächenbezogenen Masse der Abschlusskappen, die mit der Vergrößerung des Massefaktors  $M$  einhergeht, verschiebt zum einen die Resonanzminima zu niedrigeren Frequenzen hin, zum anderen erhöht sich die Schalldämmung dadurch signifikant.

#### 4.4.2 Schlitzförmige Leckagen

##### Berechnungsmodell

Ist infolge der Rotationssymmetrie der runden Leckage ein Schalleinfallswinkel ausreichend, muss die Beschreibung der Schallausbreitung im Bereich schlitzförmiger Leckagen anhand von zwei Schalleinfallswinkeln erfolgen.

Wie in Bild 4.34 skizziert wird, beschreiben  $\theta_i$  und  $\Phi_i$  den Schalleinfallswinkel bezogen auf die z-Achse und die x-Achse. Auch die Ausbreitung innerhalb der Leckage kann nicht mehr eindimensional über ebene Wellen erfolgen, sondern muss zweidimensional berechnet werden. Somit ergibt sich eine bandförmige Schalldruckpegelverteilung an den Oberflächen der Schlitzes, wobei die Drücke entlang

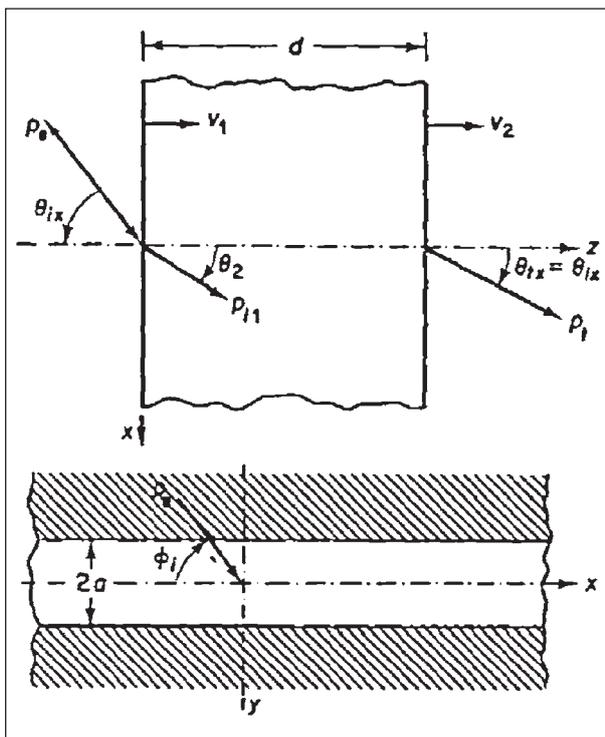


Bild 4.34: Skizzierte Querschnitte einer Wand mit schlitzförmiger Leckage aus [MECHEL, 1986]; Schalleinfallswinkel  $\theta_i$  und  $\phi_i$

der x-Achse variabel und entlang der y-Achse konstant sind.

Entsprechend der Herleitung des Transmissionsgrades von runden Leckagen wird in [MECHEL, 1986] der Transmissionsgrad von Schlitzes über die Kontinuität der Schwingschnelle an den Öffnungen der Leckage und die Kräftegleichungen gelöst.

Dabei ergibt sich der winkelabhängige Transmissionsgrad zu:

$$\tau(\theta_i, \Phi_i) = \frac{Z_0}{\cos \theta_i} \cdot \Re(Z_{r2}) \cdot \left| \frac{Z}{N} \right|^2 \quad (4.20)$$

mit

$$Z = 2 \left( \frac{Z_a}{\cos(\theta_2)} \right) si(k_0 a \cdot \sin(\theta_i) \sin(\Phi_i)) \quad (4.21)$$

und

$$N = \left( \frac{Z_a}{\cos(\theta_2)} \right) (Z_1 + Z_2) \cosh(\Gamma_a d \cdot \cos(\theta_2)) + \left[ \left( \frac{Z_a}{\cos(\theta_2)} \right)^2 + Z_1 Z_2 \right] \sinh(\Gamma_a d \cdot \cos \theta_2) \quad (4.22)$$

Dabei sind  $si = \sin(\alpha)/\alpha$  die sinc-Funktion und  $\theta_2$  der Brechungswinkel innerhalb der Leckage in der x-z-Ebene (s. Bild 4.34).

##### Validierung der korrekten Modellimplementierung

Analog zu Kapitel 4.4.1 werden im Folgenden Ergebnisse der Berechnung an schlitzförmigen Leckagen nach [MECHEL, 1986] diskutiert.

Die Ergebnisse in Bild 4.35 beziehen sich auf einen offenen Schlitz ohne Abschlusskappen und ohne Absorberfüllung für orthogonalen Schalleinfall ( $\theta = 0^\circ$ ) und verschiedene Geometriefaktoren. Die Schalldämmung nimmt nahe der Vielfachen von  $\lambda_0/2$  Resonanzminima an, was schon zuvor bei runden Leckagen ohne Absorberfüllung und ohne Abschlusskappe beobachtet werden konnte. Diese Minima nehmen Werte kleiner null an, was eine Verstärkung der einfallenden Schalleistung durch die Leckage bewirkt. Je größer die Schlitzweite ist, desto geringer ist die Schalldämmung.

Die Berechnungsergebnisse in Bild 4.36 zeigen die Schalldämmung für Schlitzes unterschiedlicher Geometrie ohne Abschlusskappe und mit einer Absorberfüllung mit  $X = 2$  bei senkrechtem Schalleinfall. Durch die Dämpfung der Absorberfüllung innerhalb der Leckage reduziert sich die Ausprägung der

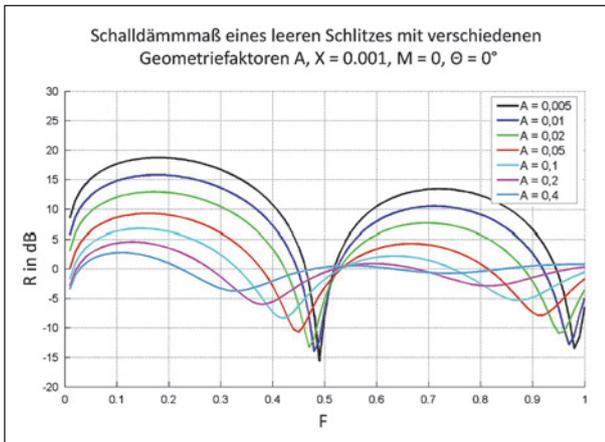


Bild 4.35: Spektrale Schalldämmung für schlitzförmige Leckage ohne Absorberfüllung und ohne Abschlusskappe für senkrechten Schalleinfall für verschiedene Geometriefaktoren  $A$  berechnet nach [MECHEL, 1986]

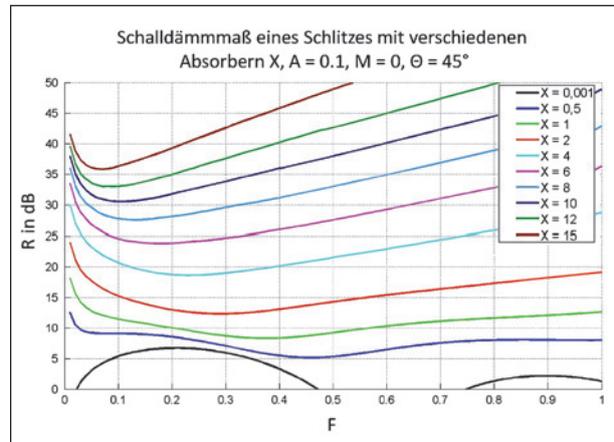


Bild 4.37: Spektrale Schalldämmung für schlitzförmige Leckage mit festem Geometriefaktor ( $A = 0,1$ ) und ohne Abschlusskappe für schrägen Schalleinfall unter Winkel von  $45^\circ$  für verschiedene Absorberfüllungen  $X$  berechnet nach [MECHEL, 1986]

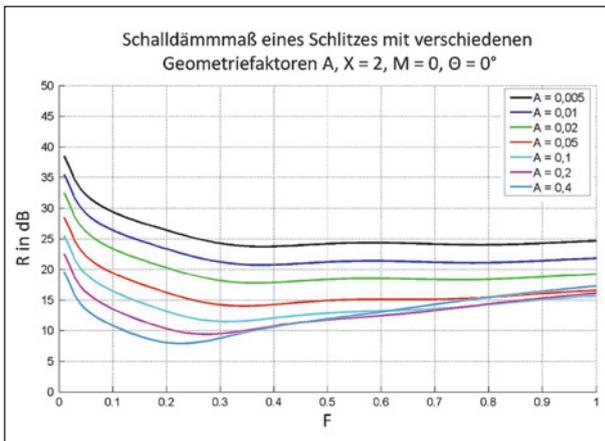


Bild 4.36: Spektrale Schalldämmung für schlitzförmige Leckage mit Absorberfüllung ( $X = 2$ ) und ohne Abschlusskappe für senkrechten Schalleinfall für verschiedene Geometriefaktoren  $A$  berechnet nach [MECHEL, 1986]

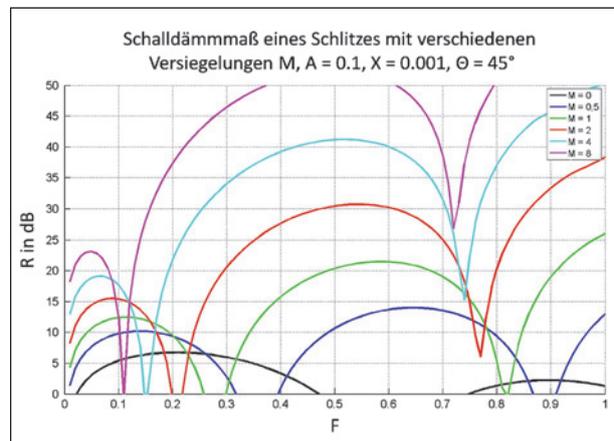


Bild 4.38: Spektrale Schalldämmung für schlitzförmige Leckage mit festem Geometriefaktor ( $A = 0,1$ ) und ohne Absorberfüllung für schrägen Schalleinfall unter Winkel von  $45^\circ$  für Abschlusskappen mit verschiedener flächenbezogener Masse  $M$  berechnet nach [MECHEL, 1986]

Resonanzminima der spektralen Schalldämmung sehr stark bei gleichzeitiger Verschiebung der Minima zu niedrigen Frequenzen. Gegenüber den Ergebnissen in Bild 4.35 nimmt die Schalldämmung breitbandig deutlich zu.

Bild 4.37 zeigt die Schalldämmung für unterschiedliche Absorberfüllungen in schlitzförmigen Leckagen ohne Abschlusskappen und konstanter Geometrie bei schrägem Schalleinfall unter einem Winkel von  $\theta = 45^\circ$ . Analog zu Bild 4.37 nimmt die Schalldämmung für größere Werte  $X$  zu.

In Bild 4.38 wird der Einfluss der Abschlusskappe bei fester Geometrie  $A = 0,1$  und ohne Absorberfüllung für einen schrägen Schalleinfallswinkel betrachtet. Die resonanzbedingten Einbrüche des Schalldämmmaßes liegen für größer werdende Massefaktoren  $M$  bei höheren Schalldämmmaß-

werten und verschieben sich zudem von Vielfachen von  $\lambda_0/2$  zu tieferen Frequenzen. Generell steigt das mittlere Schalldämmmaß für größer werdende flächenbezogene Massen der Abschlusskappen.

## 5 Messung von Schalldämmung und Schallabsorption in situ

Das Ziel dieses Arbeitspakets besteht darin, In-situ-Messungen des Schallabsorptionsgrads und der Schalldämmung an real auftretenden Schäden durchzuführen, um die Ergebnisse in das Ausbreitungsmodell integrieren zu können. Dazu sollen die In-situ-Verfahren aus DIN EN 1793-5

und DIN EN 1793-6 Anwendung finden. Da Leckagen in einer Höhe auftreten können, die von der normseitig geforderten Höhe des Messaufbaus abweichen kann, ist zu überprüfen, ob die genormten Verfahren für die Messung an Leckagen anzupassen sind. Des Weiteren muss eine Korrektur definiert werden, die es ermöglicht, aus dem In-situ-Messergebnis die akustischen Eigenschaften der Leckage ohne Beeinflussung durch die intakte Wand zu ermitteln. Dazu erfolgen im ersten Schritt Messungen an einer Test-Lsw mit Schäden klar definierter Geometrie. Im zweiten Schritt wird das korrigierte Messverfahren an real auftretenden Schäden validiert.

## 5.1 Messungen an einer Test-Lsw

### 5.1.1 Aufbau von Test-Lsw

Die Geometrie der Test-Lsw ist in Bild 5.1 skizziert. Die Höhe  $h_{Lsw}$  der Lsw beträgt 3,30 m bei einer Dicke  $d_{Lsw}$  von 22 mm. Durch die Breite  $b_{Lsw}$  der Lsw von 7,50 m konnte sichergestellt werden, dass die Schallbeugung um die Seiten der Lsw die Messergebnisse nicht beeinflusst. Die Leckagefenster der Ausdehnung  $b_{Leck} \times h_{Leck} = 0,59 \times 0,59 \text{ m}^2$  befanden sich in den Höhen  $h_1 = 0,47 \text{ m}$ ,  $h_2 = 1,67 \text{ m}$  und  $h_3 = 2,77 \text{ m}$ .

In die Leckagefenster wurden Schäden unterschiedlicher Geometrie installiert. Dazu kamen Masken mit runder Leckage und mit schlitzförmiger Leckage zum Einsatz (s. Bild 5.2). Die schlitzförmigen

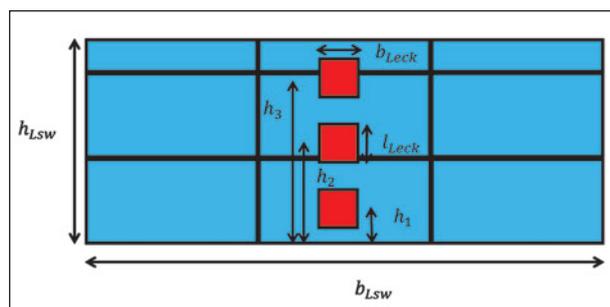


Bild 5.1: Skizze der Test-Lsw mit Leckagefenstern (Rot) in drei unterschiedlichen Höhen

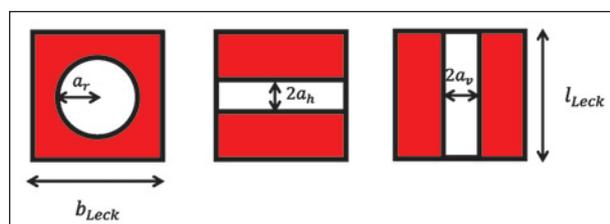


Bild 5.2: Skizze der eingesetzten Masken mit Leckagen

ge Leckage wurde sowohl als horizontaler als auch als vertikaler Schlitz genutzt. Zum Zwecke der besseren Vergleichbarkeit wurden die Abmessungen der Leckagen so gewählt, dass die Flächen von runder und schlitzförmiger Leckage gleich groß sind. Daraus ergeben sich ein Lochradius von  $a_r = 0,156 \text{ m}$  und eine Schlitzweite von  $2a_h = 2a_v = 0,15 \text{ m}$  bei einer Schlitzlänge von  $l_h = l_v = 0,5 \text{ m}$ .

Sämtliche Koppelstellen zwischen den verschiedenen Elementen der Test-Lsw wurden akustisch abgedichtet. In Bild 5.3 ist die intakte Test-Lsw mit geschlossenen Leckagefenstern dargestellt. Bild 5.4 zeigt die eingesetzten Masken mit Leckagen.

Mithilfe dieses Aufbaus konnten Messungen in Anlehnung an das Verfahren nach DIN EN 1793-6 (vgl. Kapitel 2.4.2) durchgeführt werden. Zusätzlich zum normseitig definierten Mikrofongitter wurden dabei im Abstand von 2 m und 4 m hinter der Test-Lsw einzelne Mikrofone positioniert, die als Wieder-



Bild 5.3: Aufgebaute intakte Test-Lsw mit geschlossenen Leckagefenstern



Bild 5.4: Masken mit Leckagen

holungen des zentralen Mikrofons M5 des Mikrofongitters in größerer Entfernung zur Lsw dienen. Dabei befanden sich der Lautsprecher, das zentrale Mikrofon M5 des Mikrofongitters, die beiden Einzelmikrofone und die Mitte der Leckage auf einer Achse konstanter Höhe. Der Abstand zwischen der Vorderseite des Lautsprechers und dem Mikrofongitter betrug normgerecht 1,25 m zuzüglich der Dicke der Test-Lsw.

Zu Beginn der Untersuchungen an der Test-Lsw wurde die in Bild 5.5 dargestellte Referenzmessung ohne Lsw (Freifeld) durchgeführt. Dabei befand sich die Testschallquelle und Mikrofone in derselben Anordnung wie bei den Messungen mit Lsw.

Im Anschluss an die Freifeldmessung folgte die Messung an der Lsw. Dazu wurde der Lautsprecher im Abstand von 1 m zur Vorderseite der Test-Lsw positioniert (s. Bild 5.6). Rückseitig zur Lsw befand sich das Mikrofongitter in 0,25 m Abstand und die Einzelmikrofone in 2 m und 4 m Abstand zur Lsw (s. Bild 5.7).



Bild 5.5: Messaufbau für Freifeldmessung bestehend aus Quelle, Mikrofongitter und zwei Einzelmikrofonen



Bild 5.6: Vorderseitiger Prüfaufbau für Messung an Test-Lsw mit Quelle



Bild 5.7: Rückseitiger Prüfaufbau für Messung an Test-Lsw mit Mikrofongitter und zwei Einzelmikrofonen

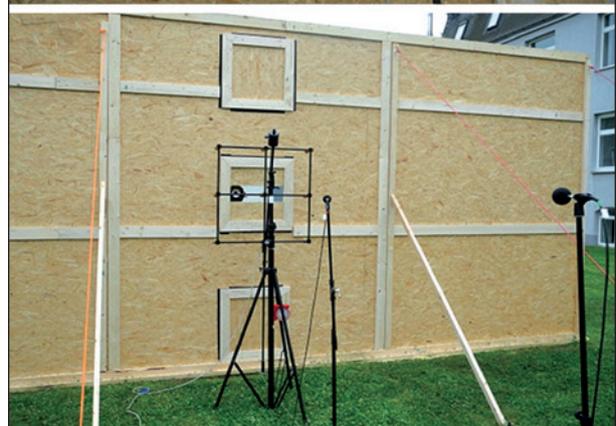


Bild 5.8: Rückseitiger Prüfaufbau für Messung an Test-Lsw mit Mikrofongitter in drei unterschiedlichen Höhen

Die Messungen sowohl im Freifeld als auch mit Lsw wurden in den drei verschiedenen Höhen der Leckagefenster durchgeführt (s. Bild 5.8). Für jede Höhe wurde die Schalldämmung für fünf unterschiedliche Fälle gemessen:

- geschlossenes Leckagefenster (intakte Lsw),
- runde Leckage,
- schlitzförmige Leckage (horizontaler Einbau),
- schlitzförmige Leckage (vertikaler Einbau),
- offenes Leckagefenster (ohne Leckagemaske).

### 5.1.2 Messergebnisse

Für eine korrekte messtechnische Bestimmung des Schalldämmungsindex ist es notwendig, die über die Lsw gebeugten Schallanteile aus der Betrachtung auszuschließen. Zu diesem Zweck wird in [DIN EN 1793-6] das Adrienne-Zeitfenster definiert, welches auf Grundlage des Zeitversatzes zwischen Direkt- und Beugungsimpuls ausschließlich die Impulsantwort bis 7,4 ms nach dem Beginn des Direktimpulses in die Berechnung einschließt. Die daraus resultierende Länge des Adrienne-Zeitfensters von 7,9 ms (inkl. 0,5 ms Einblenden vor dem Direktimpuls) entstammt der Messnorm und hat eine Gültigkeit für Messhöhen mit einem Mindestabstand zur Oberkante der Lsw von 2 m. Somit wäre für eine normgerechte Ermittlung des Schalldämmungsindex in der mittleren und oberen Position des Leckagefensters eine Anpassung der Länge des Adrienne-Zeitfensters erforderlich. Dies soll jedoch in einer ersten Betrachtung der Ergebnisse vernachlässigt werden.

Nach [MÖSER, 2004] berechnet sich die Schalldämmung  $R$  einer einschaligen Platte unterhalb ihrer Koizidenzfrequenz

$$f_c = \frac{6,4 \cdot 10^4}{d_{Lsw}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Platte}}{E}} \quad (5.1)$$

zu

$$R = \left( 20 \cdot \lg \left( \frac{\pi f m'}{\rho_0 c_0} \right) - 3 \right) \text{ dB}, \quad (5.2)$$

wobei  $m'$  die flächenbezogene Masse der Platte sowie  $\rho_0$  und  $c_0$  die Dichte und die Schallgeschwindigkeit der Luft beschreiben. Mit einer Dichte des Wandmaterials von  $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$  und einem Elastizitätsmodul von  $E = 3.500 \text{ N/mm}^2$  ergibt sich hier die Koizidenzfrequenz zu  $f_c \approx 1.300 \text{ Hz}$ .

Oberhalb der Koizidenzfrequenz berechnet sich die Schalldämmung einer einschaligen Platte nach [MÖSER, 2004] zu

$$R = \left( 20 \cdot \lg \left( \frac{\pi f m'}{\rho_0 c_0} \right) + 10 \cdot \lg \left( \frac{2\eta}{\pi} \cdot \frac{f}{f_c} \right) \right) \text{ dB} \quad (5.3)$$

Darin stellt  $\eta$  den Gesamtverlustfaktor der Platte dar.

In Bild 5.9 ist die gemessene Schalldämmung der intakten Wand der berechneten Schalldämmung der Lsw gegenübergestellt. Dabei wurde innerhalb der Berechnung die zusätzliche Masse durch akustische Abdichtungsmaßnahmen im Bereich der Leckagefenster vernachlässigt.

Oberhalb der Koizidenzfrequenz ist die Berechnung aufgrund der fehlenden Kenntnis des Eigenverlustfaktors  $\eta$  der Platte nicht ohne weiteres möglich. Unterhalb von  $f_c$  stimmen Mess- und Berechnungsergebnisse sehr gut überein. Die Verringerung des Schalldämmindex im Frequenzbereich nahe der Koizidenzfrequenz ist im Messergebnis deutlich zu erkennen.

Das Balkendiagramm in Bild 5.10 stellt den zuvor betrachteten, in der mittleren Höhe gemessenen Schalldämmindex der intakten Test-Lsw (Blau) den beiden Kurven für den Schalldämmindex, der an der oberen Messposition (Rot) und an der unteren Messposition (Grün) gemessen wurden, gegenüber.

Die Schalldämmungsindices, die an der unteren und der mittleren Messposition gemessen wurden, weisen bis auf kleine Messabweichungen sehr ähnliche Verläufe auf. So liegt der Schalldämmungsindex der Test-Lsw im niedrigen Frequenzbereich bei  $SI \approx 20 \text{ dB}$  und steigt bis zur 5.000 Hz-Terz auf

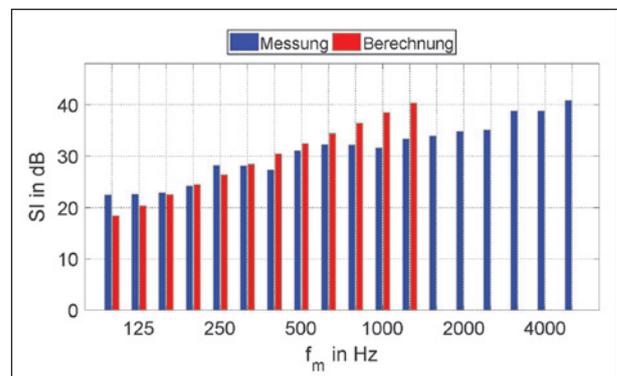


Bild 5.9: Schalldämmungsindex der intakten Wand als Funktion der Terzmittenfrequenz; Blau: aus Messung; Rot: aus Berechnung unterhalb der Koizidenzfrequenz  $f_c \approx 1.300 \text{ Hz}$

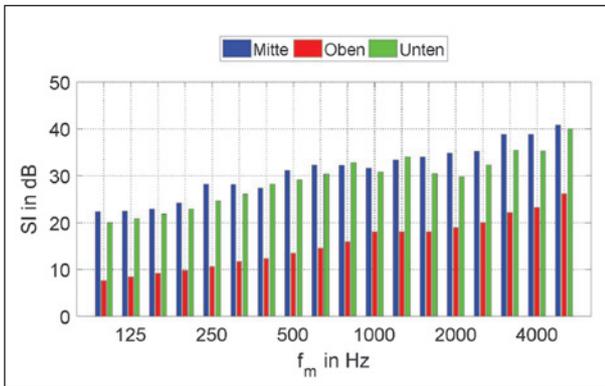


Bild 5.10: Gemessener Schalldämmungsindex der intakten Test-Lsw als Funktion der Terzmittenfrequenz; mit Adrienne-Zeitfenster von 7,9 ms bewertet und über alle Mikrofone des Mikrofonrasters gemittelt; Rot: obere Messposition; Blau: mittlere Messposition; Grün: untere Messposition

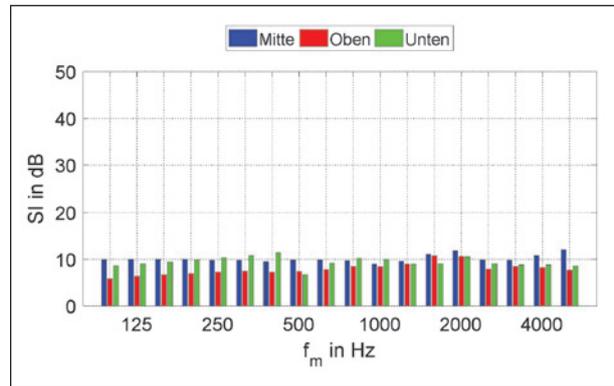


Bild 5.12: Gemessener Schalldämmungsindex der Test-Lsw mit vertikalem Schlitz als Funktion der Terzmittenfrequenz; mit Adrienne-Zeitfenster von 7,9 ms bewertet und über alle Mikrofone des Mikrofonrasters gemittelt; Rot: obere Messposition; Blau: mittlere Messposition; Grün: untere Messposition

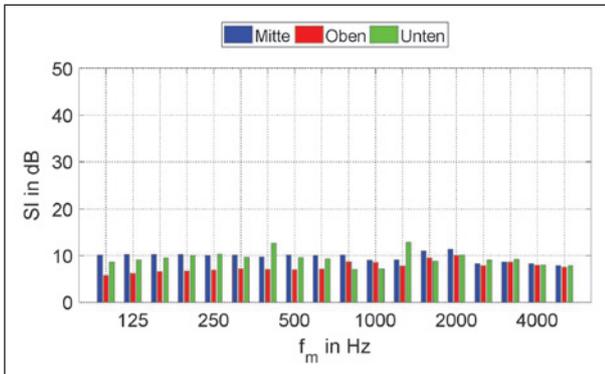


Bild 5.11: Gemessener Schalldämmungsindex der Test-Lsw mit horizontalem Schlitz als Funktion der Terzmittenfrequenz; mit Adrienne-Zeitfenster von 7,9 ms bewertet und über alle Mikrofone des Mikrofonrasters gemittelt; Rot: obere Messposition; Blau: mittlere Messposition; Grün: untere Messposition

einen Schalldämmungsindex von mehr als 40 dB. Die in der oberen Messposition bestimmten Schalldämmungsindizes liegen hingegen alle ca. 12 dB bis 18 dB unter den in der Mitte oder unten bestimmten Werten, da an der oberen Messposition die über die Oberkante der Test-Lsw gebeugten Schallanteile innerhalb des Adrienne-Zeitfensters liegen. Für weitere Berechnungen werden die an der mittleren Position bestimmten Schalldämmungsindizes (blaue Balken) als Referenzwert für die intakte Lsw verwendet.

Bild 5.11 zeigt analog zu Bild 5.10 den gemessenen  $SI$  für die Lsw mit dem horizontalen Schlitz in der mittleren (Blau), oberen (Rot) und unteren (Grün) Position. Der Vergleich der Messergebnisse der oberen Messposition mit den Werten der mittleren bzw. unteren Messposition zeigt, dass der Einfluss

der Beugung über die Oberkante der Lsw für Frequenzen unterhalb von 800 Hz gegenüber den Transmissionsanteilen durch die Leckage weiterhin dominant ist. Das zeigt sich dadurch, dass in diesem Frequenzbereich der an der oberen Position ermittelte  $SI$  wie zuvor bei der intakten Wand, geringer ausfällt als an der mittleren und unteren Position. Die Ergebnisse der Messungen in der unteren und der mittleren Messposition hingegen verlaufen nahezu gleich. Unterhalb von 2.000 Hz beträgt der  $SI$  ca. 10 dB. Oberhalb von 2.000 Hz nehmen die Schalldämmungsindizes mit zunehmender Frequenz leicht ab.

Die Messungen an der Test-Lsw mit vertikalem Schlitz aus Bild 5.12 zeigen bis auf kleine Abweichungen die gleichen Ergebnisse wie die Messungen am horizontalen Schlitz. Auch hier ist der Einfluss der Beugung an der Oberkante der Test-Lsw im niedrigen Frequenzbereich auf die Messergebnisse in der oberen Position erkennbar.

Für die Messergebnisse an der Test-Lsw mit runder Leckage (siehe Bild 5.13) entspricht der Verlauf der Schalldämmungsindizes unterhalb der 1.000 Hz-Terz jenen mit schlitzförmigen Leckagen. Für  $f_m \geq 1.000$  Hz zeigen die Schalldämmungsindizes ein Resonanzverhalten mit einem Minimum bei  $f \approx 2.200$  Hz. Die Wellenlänge bei dieser Frequenz entspricht dem Lochradius der Leckage  $a_r = 0,156 \text{ m} = \lambda_0$ . Somit kann der Kurvenverlauf an dieser Stelle einer Querresonanzmode in der Leckage zugeordnet werden.

In Bild 5.14 werden die Messergebnisse der drei Messpositionen mit denen der Test-Lsw ohne Leckagemaske verglichen. Im niederfrequenten Be-

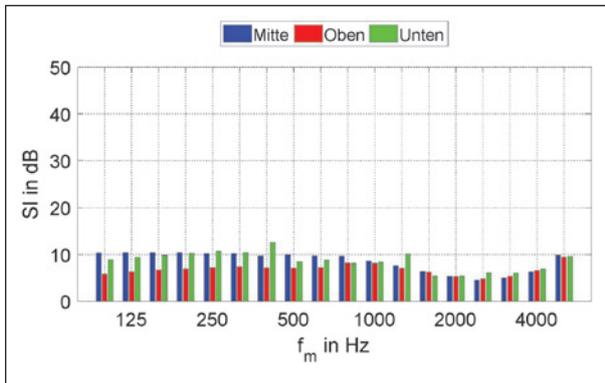


Bild 5.13: Gemessener Schalldämmungsindex der Test-Lsw mit rundem Loch als Funktion der Terzmittenfrequenz; mit Adrienne-Zeitfenster von 7,9 ms bewertet und über alle Mikrofone des Mikrofonrasters gemittelt; Rot: obere Messposition; Blau: mittlere Messposition; Grün: untere Messposition

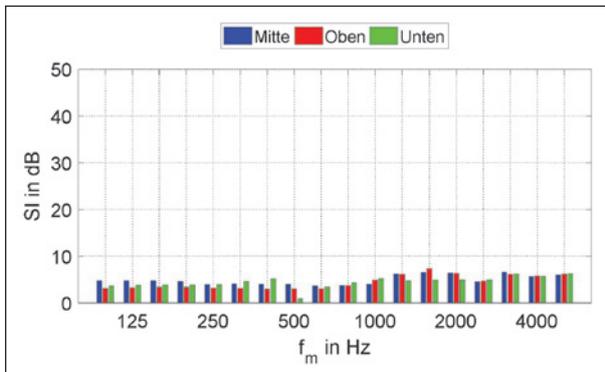


Bild 5.14: Gemessener Schalldämmungsindex der Test-Lsw ohne Leckage-Einsatz als Funktion der Terzmittenfrequenz; mit Adrienne-Zeitfenster von 7,9 ms bewertet und über alle Mikrofone des Mikrofonrasters gemittelt; Rot: obere Messposition; Blau: mittlere Messposition; Grün: untere Messposition

reich unterhalb von 630 Hz zeigt sich erneut eine systematische Abweichung des  $SI$  der oberen Messposition gegenüber jenem der mittleren und der unteren Position, wobei diese Abweichung aufgrund der zunehmenden Dominanz des Transmissionspfads durch die Leckage gegenüber dem Beugungspfad über die Oberkante wesentlich geringer ausfällt als bei den bisher gezeigten Messergebnissen.

### 5.1.3 Simulationsergebnisse und Bewertung über Korrekturfunktion

Um die gemessenen Schalldämmungsindices direkt mit Simulationsergebnissen vergleichen zu können, muss eine Korrektur vorgenommen werden. Dies hat die Ursache, dass im Versuch nicht immer die gesamte Leckage Einfluss auf die Messergebnisse nehmen muss, sondern nur ein von der

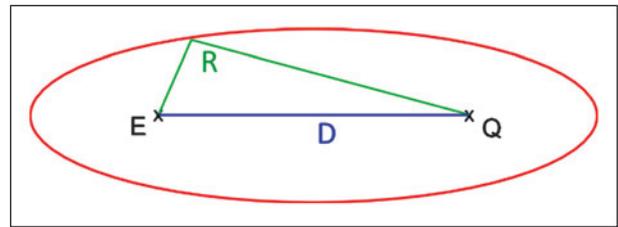


Bild 5.15: Rotationsellipsoid mit Empfänger (E) und Quelle (Q) in dessen Brennpunkten; D: Distanz zwischen Quelle und Empfänger; R: Entfernung zwischen Quelle und Empfänger über Umfang der Ellipse

Quelle schalltechnisch beleuchteter Bereich. Um dies abzubilden, soll hier das Fresnelzonen-Modell herangezogen werden. Dieses basiert auf einem gedachten Rotations-Ellipsoid, in dessen Brennpunkten sich die Schallquelle und der Empfänger befinden, wie in Bild 5.15 gezeigt.

Dabei ergibt sich die Entfernung  $R$  zwischen der Quelle und dem Empfänger über den Umfang der Ellipse zu

$$R = D + \Delta D \quad (5.4)$$

wobei  $D$  die Distanz zwischen Quelle und Empfänger ist und  $\Delta D$  den Umweg darstellt. In der Literatur werden für  $\Delta D$  verschiedene von der Wellenlänge  $\lambda$  abhängige Werte von  $\lambda/16$  in [PLOVING, 2000] bis  $\lambda/3$  in [HOTHERSALL, 1993] angegeben.

Durch die Überschneidung von Rotations-Ellipsoid und Lsw ergibt sich eine elliptische Beleuchtungsfläche, die zum gemessenen Ergebnis beiträgt, die sogenannte Fresnelzone. Um Simulationsergebnisse zu erhalten, die mit den Messwerten direkt vergleichbar sind, wird der Transmissionsgrad der Leckage aus der Berechnung nach [MECHEL, 1986] flächenbezogen mit dem der intakten Wand gewichtet:

$$\tau_{Seg} = \frac{\tau_{Leck} \cdot S_{Leck} + \tau_{Lsw} \cdot (S_{Seg} - S_{Leck})}{S_{Seg}} \quad (5.5)$$

Hierbei bedeuten  $\tau_{Seg}$  und  $S_{Seg}$  den Gesamt-Transmissionsgrad und die Fläche des beleuchteten Bereichs (Segments),  $\tau_{Leck}$  und  $\tau_{Lsw}$  den Transmissionsgrad von Leckage und intakter Wand sowie  $S_{Leck}$  die Fläche der Leckage selbst. Für den Fall, dass wie bei den hier beschriebenen Versuchen die Höhe von Schallquelle, Leckage und Empfänger gleich sind und die Lsw orthogonal zur Ausbreitungsrichtung des Schalls von der Quelle zum Empfänger steht, ergibt sich eine runde Beleuchtungsfläche auf der Lsw zwischen Schallquelle und dem mittleren Array-Mikrofon M5.

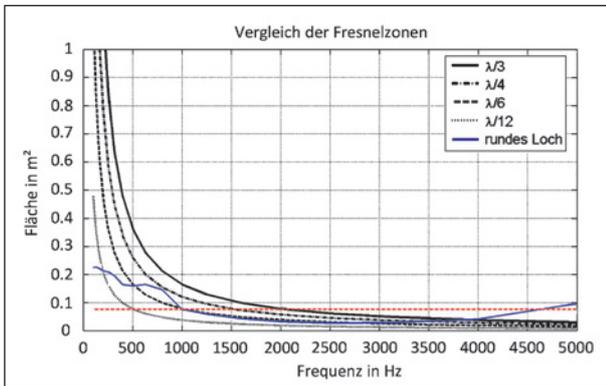


Bild 5.16: Beleuchtungsfläche auf Basis des Fresnelzonenmodells; schwarz: berechnet mit verschiedenen  $\Delta D$  von  $\lambda/12$  bis  $\lambda/3$ ; Blau: aus Messung

Da sich die Beleuchtungsfläche mit steigender Frequenz verringert und sich dadurch das Verhältnis der beleuchteten Fläche der intakten Wand zur beleuchteten Leckagefläche verändert, kann aus den Messergebnissen die sich ergebende Beleuchtungsfläche berechnet werden. Hierzu wird Gleichung (5.5) nach  $S_{Seg}$  aufgelöst. Anschließend wird für  $\tau_{Leck}$  das Berechnungsergebnis aus [MECHEL, 1986] und für  $S_{Leck}$  die geometrische Fläche der runden Leckage eingesetzt. Für  $\tau_{Lsw}$  bzw.  $\tau_{Seg}$  werden die Messergebnisse der intakten Wand bzw. der Wand mit Leckage eingesetzt.

In Bild 5.16 ist die Beleuchtungsfläche in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  dargestellt. Die blaue Kurve stellt die aus dem Messergebnis an der Test-Lsw mit runder Leckage gewonnene Beleuchtungsfläche dar. In Rot ist zur Veranschaulichung die geometrische Fläche der Leckage selbst eingezeichnet, um den Frequenzbereich ab ca. 1.000 Hz zu markieren, oberhalb dessen die Beleuchtungsfläche vollständig innerhalb der Leckage liegt. Die schwarzen Kurven enthalten die Ergebnisse der geometrischen Berechnung für verschiedene  $\Delta D$  gemäß Bild 5.15.

Wie zu erkennen ist, ergibt sich eine gute Übereinstimmung im Bereich von 500 Hz bis 4.000 Hz zwischen der analytischen Kurve mit  $\Delta D = \lambda/6$  und jener auf Grundlage der Messergebnisse. Daher wird im Folgenden die Korrektur mittels der Beleuchtungsfläche für  $\Delta D = \lambda/6$  durchgeführt.

Es entstehen für runde Leckagen die beiden in Bild 5.17 gezeigten Fälle. Für Fall 1 muss in Gleichung (5.5)  $S_{Leck} = S_{Leck,geom}$  gesetzt werden. Im Fall 2 wird  $S_{Leck} = S_{Seg}$  die Überschneidung aus geometrischer Leckagefläche und Beleuchtungsfläche, wodurch sich  $\tau_{Seg} = \tau_{Leck}$  ergibt.

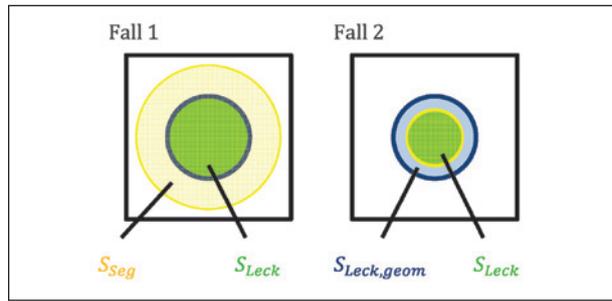


Bild 5.17: Beleuchtungsfläche  $S_{Seg}$ , geometrische Leckagefläche  $S_{Leck,geom}$  und zu betrachtende Leckagefläche  $S_{Leck}$  für zwei Fälle bei runden Leckagen

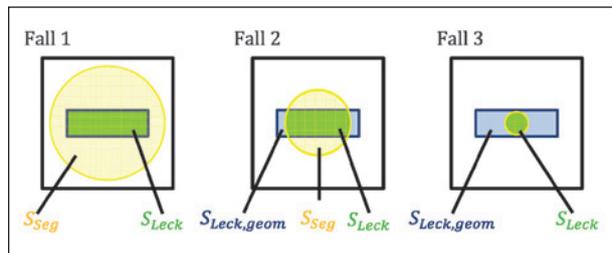


Bild 5.18: Beleuchtungsfläche  $S_{Seg}$ , geometrische Leckagefläche  $S_{Leck,geom}$  und zu betrachtende Leckagefläche  $S_{Leck}$  für drei Fälle bei schlitzförmigen Leckagen

Für schlitzförmige Leckagen existieren die in Bild 5.18 gezeigten drei verschiedenen Fälle. In Fall 1 befindet sich wie zuvor bei den runden Leckagen die gesamte Leckagefläche innerhalb der Beleuchtungsfläche. Somit ist der Transmissionsgrad der Fläche berechenbar nach Gleichung (5.5) mit  $S_{Leck} = S_{Leck,geom}$ . Im zweiten Fall wird die Leckage nicht mehr vollständig beleuchtet, innerhalb der Beleuchtungsfläche befindet sich aber noch immer ein Teil der intakten Wand. Hier muss in Gleichung (5.5) für die Fläche  $S_{Leck}$  die Überschneidung aus Beleuchtungs- und geometrischer Leckagefläche eingesetzt werden. Der dritte Fall entspricht Fall 2 bei runden Leckagen. Die Beleuchtungsfläche befindet sich komplett innerhalb der Leckage. Es ergibt sich wiederum  $\tau_{Seg} = \tau_{Leck}$ .

Es kann nun in Gleichung (5.5) für  $\tau_{Lsw}$  der Wert der Schalldämmung aus der Messung an der intakten Wand eingesetzt werden und für die Flächen  $S_{Leck}$  und  $S_{Seg}$  die sich entsprechend den Definitionen der zwei beziehungsweise drei Fälle ergebenden Flächen. Wird nun für  $\tau_{Leck}$  der nach [MECHEL, 1986] berechnete Wert des Transmissionsgrad der Leckage eingesetzt, ergibt sich der Transmissionsgrad  $\tau_{Seg}$ , der über die Beziehung

$$SI = 10 \lg \frac{1}{\tau} \text{ dB} \tag{5.6}$$

in einen Schalldämmindex umgerechnet und mit den Messergebnissen verglichen werden kann.

In Bild 5.19 ist der gemessene Schalldämmindex der intakten Wand (Blau) und der Wand mit runder Leckage (Rot) sowie der simulierte Schalldämmindex (Orange) dargestellt. Violett markiert ist der Frequenzbereich, in dem die Beleuchtungsfläche vollständig innerhalb der Leckagefläche liegt. Es ist erkennbar, dass im Frequenzbereich von etwa 400 Hz bis etwa 1.000 Hz sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulations- und Messergebnissen herrscht. Außerhalb dieses Frequenzbereichs fällt der simulierte Schalldämmindex höher aus als der gemessene.

Analog zu Bild 5.19 zeigt Bild 5.20 den gemessenen und den simulierten Schalldämmindex der intakten Wand und der Wand mit horizontalem Schlitz. Aufgrund der geringen vertikalen Ausdehnung des Schlitzes liegt hier die Grenze für den in Bild 5.18 dargestellten Fall 3 oberhalb des betrachteten Frequenzbereichs. Es zeigt sich eine sehr gute Überein-

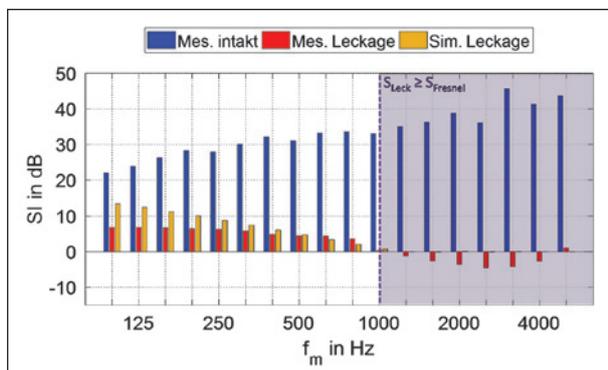


Bild 5.19: Schalldämmindex mit und ohne runder Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung in mittlerer Position; Rot: Wand mit Leckage aus Messung in mittlerer Position; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation

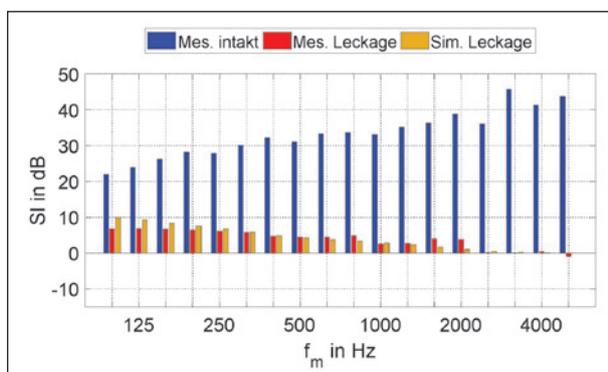


Bild 5.20: Schalldämmindex der Wand mit und ohne horizontaler schlitzförmiger Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung in mittlerer Position; Rot: Wand mit Leckage aus Messung in mittlerer Position; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation

stimmung zwischen Mess- und Simulationsergebnissen im Frequenzbereich von 200 Hz bis 5.000 Hz. Unterhalb dieses Bereichs ist die Gültigkeit der Messergebnisse aufgrund der Länge des Adrienne-Zeitfensters von 7,9 ms nicht mehr gegeben.

Da Leckagen an realen Lsw nicht nur in der Höhe auftreten, in der nach standardisiertem Verfahren gemessen werden muss, sollen im Folgenden die Simulationsergebnisse den Messergebnissen an den unteren und oberen Messpositionen gegenübergestellt werden. Zu diesem Zweck ist in Bild 5.21 entsprechend den vorherigen Darstellungen der auf der unteren Position gemessene Schalldämmindex der intakten Wand und der Wand mit Leckage abgebildet sowie dem simulierten Schalldämmindex der Wand mit Leckage gegenübergestellt. Wie auch bei Betrachtung der mittleren Position zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Mess- und Simulationsergebnissen im Frequenzbereich von etwa 400 Hz bis etwa 1.000 Hz.

Auch für den in Bild 5.22 dargestellten Schalldämmindex der Lsw mit horizontaler schlitzförmiger Leckage in unterer Messposition ist eine gute Übereinstimmung zwischen Mess- und Simulationsergebnissen im Frequenzbereich von ca. 160 Hz bis 5.000 Hz erkennbar. Es kann demnach angenommen werden, dass Messergebnisse des Transmissionsgrads von Leckagen, die sich nahe dem Boden befinden, gleichermaßen gültig sind wie Messergebnisse an Leckagen nahe der Mitte der Lsw.

In Bild 5.23 ist das Ergebnis der Messung für die runde Leckage an der oberen Messposition jenem der Simulation gegenübergestellt. Selbst in dieser Position sehr nah an der Oberkante zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulations- und Messergebnis im Frequenzbereich von etwa 200 Hz

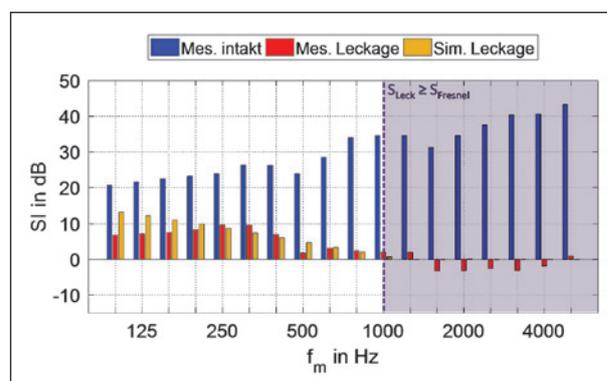


Bild 5.21: Schalldämmindex mit und ohne runder Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung in unterer Position; Rot: Wand mit Leckage aus Messung in unterer Position; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation

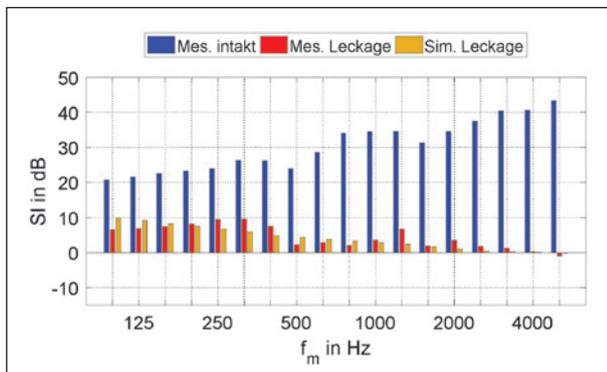


Bild 5.22: Schalldämmindex mit und ohne horizontaler schlitzförmiger Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung in unterer Position; Rot: Wand mit Leckage aus Messung in unterer Position; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation

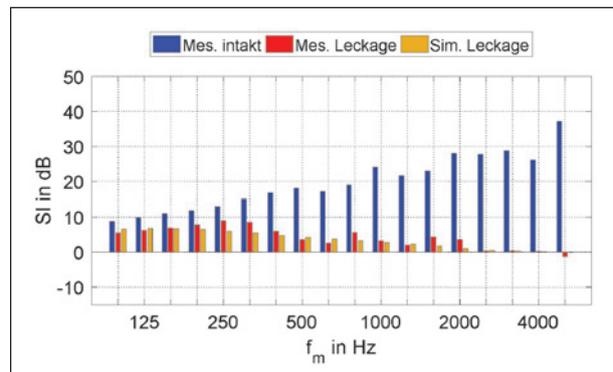


Bild 5.24: Schalldämmindex mit und ohne horizontaler schlitzförmiger Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung in oberer Position; Rot: Wand mit Leckage aus Messung in oberer Position; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation

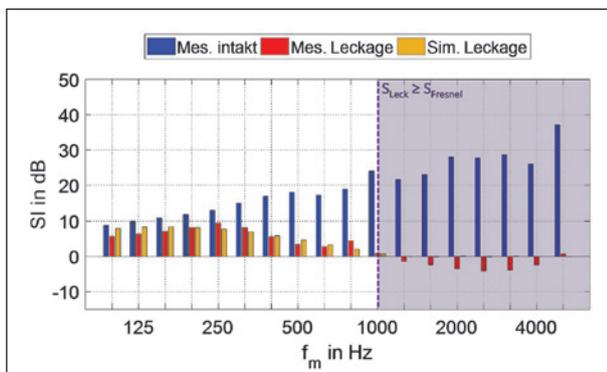


Bild 5.23: Schalldämmindex mit und ohne runder Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung in oberer Position; Rot: Wand mit Leckage aus Messung in oberer Position; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation

bis etwa 1.000 Hz. Es ist jedoch ebenfalls erkennbar, dass, wie zuvor beschrieben, die Messergebnisse an der intakten Wand wesentlich geringer ausfallen als an den anderen beiden Messpositionen. Die Dominanz des Transmissionspfades gegenüber dem Beugungspfad über die Lsw-Oberkante ist demnach auch auf die hier verhältnismäßig große Fläche der Leckage zurückzuführen. Für Leckagen geringerer Fläche kann bei Messungen nahe der Oberkante der Beugungspfad dominant und das Messergebnis verfälscht werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Simulationsergebnisse für den Transmissionsgrad von Leckagen vor allem im Bereich um 1.000 Hz sehr gut mit den Messergebnissen am Prüfstand übereinstimmen. Zudem ist es unproblematisch, Messungen unterhalb der nach Norm geforderten Höhe vorzunehmen. Selbst Messungen nahe der Oberkante können gute Ergebnisse liefern, jedoch besteht hier die Gefahr, dass die Messergebnisse aufgrund des geringen Zeitversatzes zwischen

Direkt- und Beugungsimpuls verfälscht werden. Tendenziell ist von Messungen in geringer Entfernung zur Oberkante der Lsw abzusehen.

Aufgrund der Ungewissheit über die tatsächlichen geometrischen und akustischen Eigenschaften der Materialien wie Dicke des Absorbers, Strömungswiderstand, Porosität etc., kann es im Einsatzfall schwer fallen, den Transmissionsgrad einer Leckage sicher zu modellieren. In diesem Fall kann es zielführender sein, den Transmissionsgrad der Leckage mittels des In-situ-Verfahrens messtechnisch zu bestimmen. Dies setzt die oben beschriebene Korrektur mittels der Beleuchtungsfläche voraus, es sei denn, die Leckagefläche ist wesentlich größer als die Beleuchtungsfläche. Der auf diesem Weg bestimmte Transmissionsgrad kann zur Bestimmung des Einflussradius ebenso wie der berechnete Transmissionsgrad in das Ausbreitungsmodell implementiert werden.

Gleichermaßen verhält es sich mit den Mess- und Simulationsergebnissen der horizontalen schlitzförmigen Leckage, die in Bild 5.24 dargestellt sind.

#### 5.1.4 Simulation im Ausbreitungsmodell

Zur messtechnischen Validierung des in Kapitel 3 definierten Ausbreitungsmodells können die Messergebnisse mittels der beiden im Abstand von 2 m und 4 m von der Lsw aufgestellten Mikrofone herangezogen werden. Da die Versuchsbedingungen nicht vollständig den Modellbedingungen entsprechen, mussten bei der modelltechnischen Nachbildung des Versuchs folgende Umstrukturierungen vorgenommen werden:

Anstelle einer Linienquelle wurde im Versuch eine einzelne Punktschallquelle verwendet. Diese befand sich nicht auf einer Höhe von 0,5 m über dem Boden, sondern in Höhe der Mitte der jeweils untersuchten Leckage. Zudem betrug der Abstand zwischen Quelle und Lsw in x-Richtung nicht 7,625 m, sondern nur 1 m. Auch befanden sich die Mikrofone nicht in einer Höhe von 2,80 m, sondern wie die Quelle auf der jeweiligen Höhe der betrachteten Leckage. Die Lsw hatte eine Höhe von 3,30 m.

Die Punktstrahler-Charakteristik der Quelle findet durch die kugelförmige Divergenz auf dem Direktpfad von der Quelle zum Empfänger in Form von

$$D_{ik} = -10 \cdot \lg\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot s_{i,k}^2}{1 \text{ m}^2}\right) \text{ dB} \quad (5.7)$$

Beachtung. Hierbei stellt  $s_{i,k}$  die Distanz zwischen Quelle und Empfänger dar. Es sei angemerkt, dass die in den Bildern 5.25 bis 5.28 dargestellten Mittelungspegel lediglich dem qualitativen Vergleich der verschiedenen Pegel sowie der Veranschaulichung dienen sollen, da sich die Quellgröße, also die Leistung des Punktstrahlers, ohnehin aus den Betrachtungen der Einfügungsdämpfung  $D_E$  sowie der Gesamtbedingung  $GB$  herauskürzt.

Es ergibt sich eine Ausbreitung im Freifeld (also ohne Lsw), wie sie in der Draufsicht in Bild 5.25 dargestellt ist. Es ist deutlich die kugelförmige Abstrahlcharakteristik zu erkennen, die zu einer Verringerung des Pegels um 6 dB pro Abstandsverdopplung führt.

Wird nun eine unendlich lange Lsw mit einem Transmissionsgrad von null in das Modell eingepflegt, verringern sich die Pegel im Wirkungsbereich der Lsw durch deren abschirmende Wirkung. Der daraus resultierende Mittelungspegel ist in Bild 5.26 dargestellt. Der Unterschied, der sich durch das Verwenden einer Punktquelle anstelle einer Linienquelle ergibt, ist deutlich daran zu erkennen, dass sich hinter der Lsw, anders als in Bild 3.6, kein über  $y$  nahezu unverändertes Schallfeld ergibt.

Anschließend wird nun anstelle des Beugungspfades über die Oberkante der Lsw der Transmissionspfad betrachtet, der sich durch eine Leckage in der Lsw ergibt. Hinter der Lsw ist eine halbkugelförmige Ausbreitung beobachtbar, welche mithilfe von Gleichung (3.23) beschrieben werden kann. In Bild 5.27 ist exemplarisch der Mittelungspegel dargestellt, der sich durch die Transmission durch die im Ver-

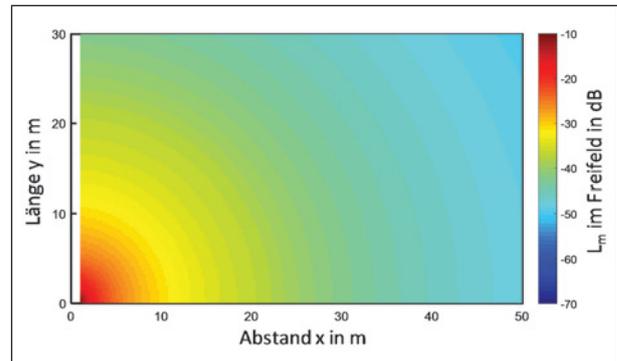


Bild 5.25: Mittelungspegel bei Freifeldausbreitung ausgehend von einer Punktschallquelle in Draufsicht

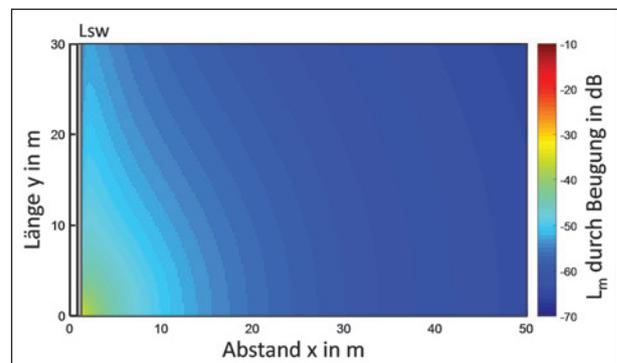


Bild 5.26: Mittelungspegel durch Beugung über die Oberkante einer 3,30 m hohen Lsw ohne Transmission in Draufsicht mit Punktschallquelle

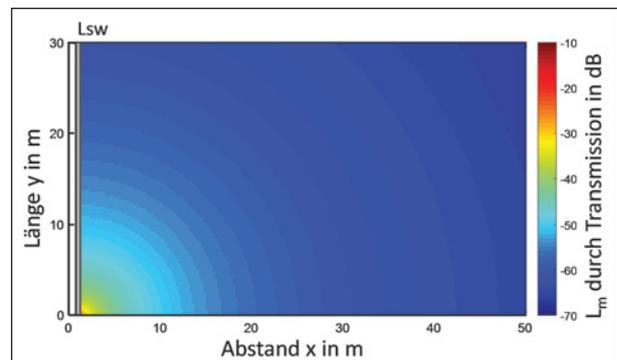


Bild 5.27: Mittelungspegel durch Transmission durch runde Leckage in Lsw unendlicher Ausdehnung in Draufsicht mit Punktschallquelle

suchsstand verwendete runde Leckage (siehe Bild 5.4, links unten) ergibt.

Durch die Verwendung einer Lsw begrenzter Höhe wie in Bild 5.26 mit der runden Leckage aus Bild 5.27 ergibt sich eine Überlagerung von Beugungs- und Transmissionspfad. Der daraus resultierende Mittelungspegel ist in Bild 5.28 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Einfluss der Leckage zwar vergleichsweise gering ist, dass dieser jedoch sehr weit reicht.

Deutlicher wird die Änderung der Wirksamkeit der Lsw durch die Leckage durch Betrachtung der nach Gleichung (3.28) definierten Gesamtbedingung (siehe Bild 5.29). Es ist erkennbar, dass die Berechnung des Einflussradius mit  $GB = 0$  für diese Leckage kein sinnvolles Ergebnis liefert.

Eine noch anschaulichere Darstellung ist Bild 5.30 und Bild 5.31 zu entnehmen. Hier ist die Einfügungsdämmung von intakter Wand  $D_{E,intakt}$  und Wand mit Leckage  $D_{E,Leck}$  abgebildet. Es zeigt sich ein großflächiger Einfluss der Leckage vor allem in x-, aber auch in y-Richtung.

Aus der Einfügungsdämmung der intakten Wand und der Wand mit Leckage lässt sich die Änderung der Einfügungsdämmung durch die Leckage  $\Delta D_E$  berechnen. Diese ist in Bild 5.32 abgebildet. Es ist deutlich erkennbar, dass die Beeinflussung der Wirksamkeit der Lsw durch die Leckage in unmittelbarer Nähe zu dieser mit steigendem Abstand schnell abnimmt, jedoch innerhalb der dargestellten 50 m in x-Richtung nicht unter die 0,4 dB fällt, die sich bei  $GB = 0$  dB ergeben.

Die Berechnung nach [RLS 90] liefert kein frequenzabhängiges, sondern lediglich ein Einzahlwertergebnis. Um die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen vergleichen zu können, muss die Frequenz bekannt sein, für welche die Berechnung nach [RLS 90] gilt. Da die Wiese, auf der die Versuche an der Test-Lsw durchgeführt wurden, einen verhältnismäßig geringen Reflexionsgrad aufweist, ergibt sich das in Gleichung (3.13) verwendete  $C_2$  nach [VDI 2720] zu 40. Daraus resultiert, dass

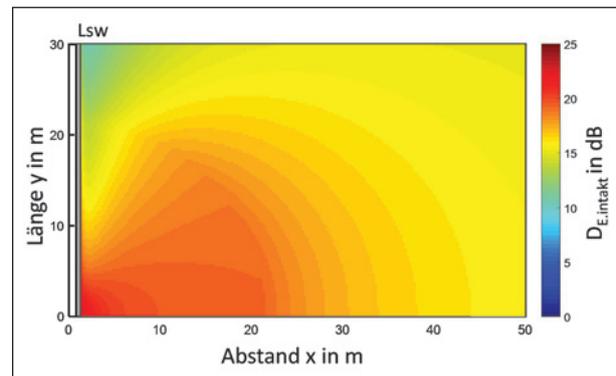


Bild 5.30: Einfügungsdämmung  $D_E$  der intakten Wand mit Punktschallquelle

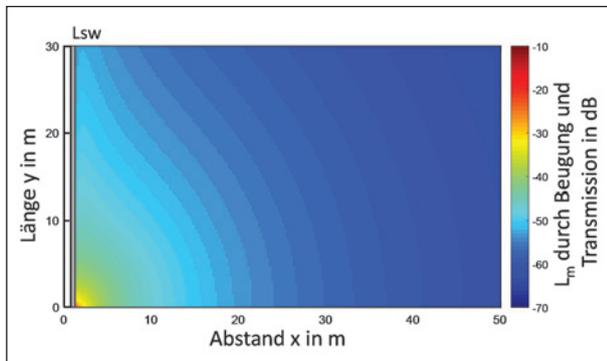


Bild 5.28: Mittelungspegel durch Überlagerung von Beugung über Oberkante der Lsw und Transmission durch runde Leckage mit Punktschallquelle

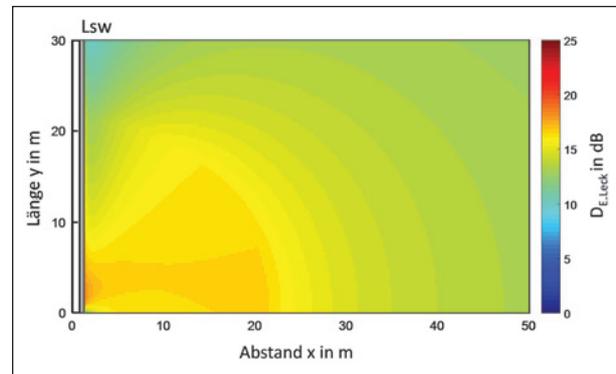


Bild 5.31: Einfügungsdämmung  $D_E$  der Wand mit Leckage mit Punktschallquelle

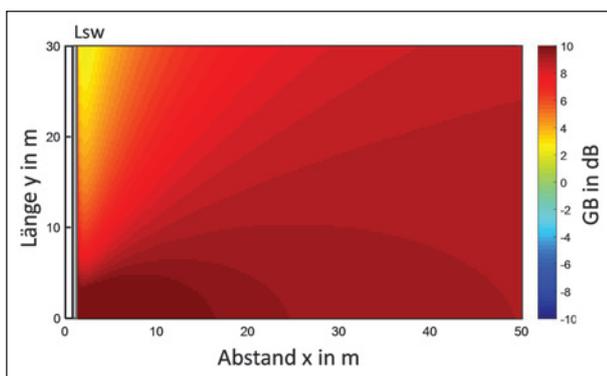


Bild 5.29: Gesamtbedingung  $GB$  für runde Leckage in Test-Lsw mit Punktschallquelle

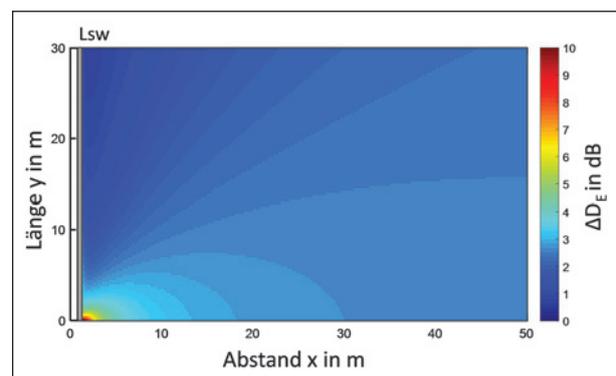


Bild 5.32: Einfluss der runden Leckage auf das Einfügungsdämmungsmaß  $\Delta D_E$

$\lambda = \frac{1}{2}$  m ist, was bei  $c_0 = 343$  m/s eine Frequenz  $f$  von 686 Hz ergibt. Somit muss zum Vergleich der Simulations- mit den Messergebnissen die Terz um 630 Hz herangezogen werden. Es sei hier angemerkt, dass diese Frequenz ausschließlich für den speziellen Fall unter den beim Versuch am Prüfstand gegebenen Bedingungen gilt.

In Bild 5.33 und Bild 5.34 sind die Messergebnisse des Einfügungsdämmungsmaßes  $D_{E,2m}$  in 2 m und  $D_{E,4m}$  in 4 m Abstand zur Wand gezeigt. Es ergibt sich erwartungsgemäß an beiden Messpunkten

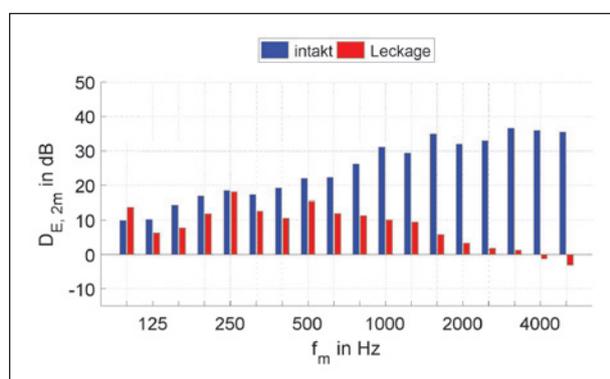


Bild 5.33: Gemessenes Einfügungsdämmungsmaß der Test-Lsw in einem Abstand von 2 m; Blau: intakte Wand; Rot: Wand mit runder Leckage

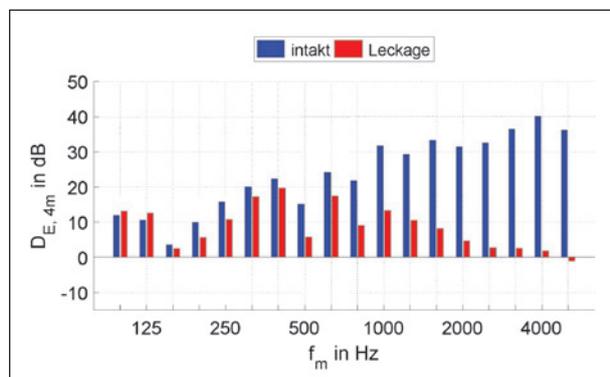


Bild 5.34: Gemessenes Einfügungsdämmungsmaß der Test-Lsw in einem Abstand von 4 m; Blau: intakte Wand; Rot: Wand mit runder Leckage

	$s_{j,k}$	Messung ( $f_m = 630$ Hz)	Simulation
$D_{E,intakt}$ in dB	2 m	22,2	20,8
	4 m	24,1	20,1
$D_{E,Leck}$ in dB	2 m	11,9	15,9
	4 m	17,4	16,4

Tab. 5.1: Einfügungsdämmungsmaß  $D_E$  mit und ohne Leckage aus Messung und Simulation in Entfernung zur Wand  $s_{j,k}$  von 2 m und 4 m

eine deutliche Verringerung der Wirksamkeit der Lsw durch die Leckage.

Aus den Mess- und Simulationsergebnissen können die in Tabelle 5.1 angegebenen Werte extrahiert werden. Es ist erkennbar, dass die simulierten Werte für die intakte Wand in 2 m bzw. 4 m um ca. 2 dB bzw. 4 dB abweichen, wobei die Einfügungsdämmung durch die Simulation unterschätzt wird. Für die Wand mit Leckage ist der simulierte Wert in 2 m Entfernung etwa 4 dB zu hoch, während in 4 m Entfernung ein um 1 dB zu niedriger Wert berechnet wird.

Zur Validierung der Ausbreitungsberechnung nach [RLS 90] mittels der Messungen an der Test-Lsw wurden, wie zuvor beschrieben, an dem Modell zur Prognose der Wirksamkeit von Lsw verhältnismäßig große Änderungen vorgenommen, um dem realen Versuchsaufbau zu entsprechen. Diese grundlegenden Veränderungen im Simulationsmodell sind weder in [RLS 90], noch in [VDI 2720] vorgesehen und können deshalb zu größeren Abweichungen führen. Zudem sind die Messungen Unsicherheiten durch beispielsweise Temperaturschwankungen und Ungenauigkeiten bei der Ausrichtung der Mikrofone sowie bei der Montage der Leckagefenster ausgesetzt, welche ebenfalls zu Abweichungen in den Ergebnissen führen können. In Anbetracht dessen kann die Abweichung zwischen Mess- und Simulationsergebnis als verhältnismäßig gering angesehen und das Messergebnis als Validierung des Ausbreitungsmodells betrachtet werden.

Zur Verdeutlichung der erheblichen Einflüsse der durchgeführten Modifikationen auf die Simulationsergebnisse soll im Folgenden das Modell wieder dem eigentlichen Simulationsmodell angeglichen werden. Im ersten Schritt wird die Punktschallquelle durch eine Linienschallquelle ersetzt, die sich aber dennoch auf Höhe der Leckage befindet. Zudem bleibt die Lsw bei  $x = 1$  m. Das sich dadurch ergebende  $GB$  ist in Bild 5.35 dargestellt.

Es ist ein deutlicher Unterschied gegenüber der Darstellung in Bild 5.29 zu erkennen, der die Ausbreitung ausgehend von einer Punktschallquelle zugrunde liegt. Es ergibt sich ein vergleichsweise kleiner Einflussradius der Leckage. Bei Annahme einer Punktschallquelle befand sich dieser außerhalb des betrachteten Auswertebereichs.

Anschließend wird die Lsw verschoben, um dem im Ausbreitungsmodell vorgesehenen  $x$ -Abstand von

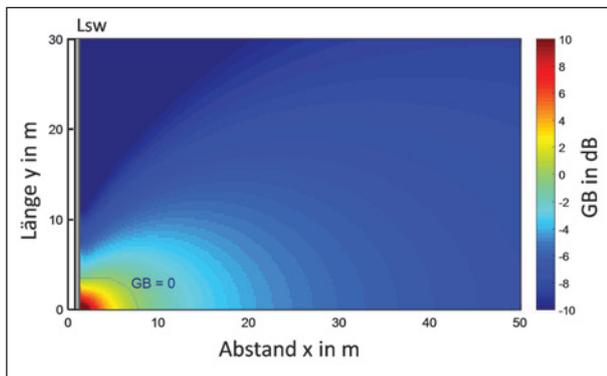


Bild 5.35: Gesamtbedingung  $GB$  für runde Leckage in Test-Lsw mit Linienschallquelle in Höhe der Leckage; Lsw bei  $x = 1$  m

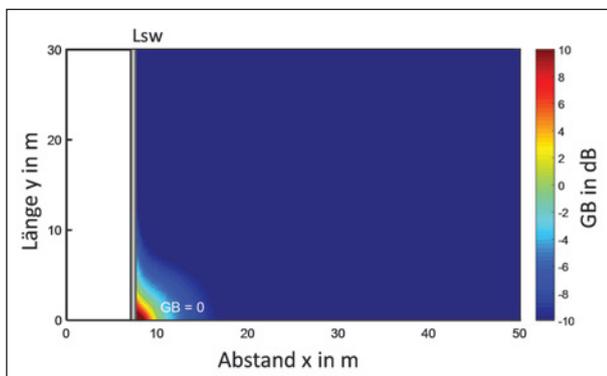


Bild 5.36: Gesamtbedingung  $GB$  für runde Leckage in Lsw mit Linienschallquelle im ursprünglichen Ausbreitungsmodell

7,625 m zwischen Quelle und Lsw zu entsprechen. Zusätzlich wird die Höhe der Quelle auf modellkonforme 0,5 m reduziert. Die runde Leckage ist somit in das ursprüngliche Ausbreitungsmodell eingepflegt. Das Ergebnis ist in Bild 5.36 dargestellt.

Es zeigt sich erneut eine wesentliche Verringerung des Einflussradius der Leckage gegenüber der vorherigen Betrachtung. Ebenfalls ist erkennbar, dass  $GB$  sich bei der Linienschallquelle mit steigender Entfernung von der Leckage schneller ändert als bei der Punktschallquelle. Das heißt, der Einfluss der Leckage fällt mit steigender Entfernung schneller ab als dies bei einer Punktschallquelle der Fall wäre.

Mithilfe der Messungen konnte das Modell zur Bestimmung des Transmissionsgrads nach [MECHEL, 1986] verifiziert werden. Außerdem wurde gezeigt, dass das Modell zur Simulation der Schallausbreitung hinter einer Lsw mit Transmission durch eine Leckage unter Zuhilfenahme einiger Anpassungen in erster Näherung messtechnisch nachbildbar ist.

## 5.2 Messungen in situ

Zur Verifikation der Simulationsergebnisse sowie der Ergebnisse der Messungen am Prüfstand fanden weitere Untersuchungen an real auftretenden Schäden an Lsw statt. Es wurden vier beschädigte Lsw ausgewählt und an diesen In-situ-Messungen an intakten Segmenten und an Segmenten mit Leckagen vorgenommen.

### 5.2.1 untersuchte Schäden an Lsw

Die folgenden Messpunkte (MP) wurden untersucht:

- MP 1: Loch mit Rissen in Glas-Lsw (vgl. Bild 5.37);
  - Wanddicke  $t_{Lsw} \approx 15$  mm,
  - Lochradius  $r_{Leck} \approx 45$  mm,
  - Folie in Leckage noch teilweise vorhanden.
- MP 2: Risse in Glas-Lsw (vgl. Bild 5.38);
  - Wanddicke  $t_{Lsw} \approx 15$  mm,
  - Risslänge  $l_{Leck,ges} \approx 4,40$  m.
- MP 3: Spalt in Rückwand von Holz-Lsw (vgl. Bild 5.39);
  - Wanddicke  $t_{Lsw} \approx 0,2$  m,
  - durchgehende Holzverkleidung auf der Rückseite der Lsw,
  - Spalt in Rückwand durch abstehendes Brett.
- MP 4: Schäden an Aluminium-Lsw infolge von Unfall mit Brandschaden (vgl. Bild 5.40 bis Bild 5.43);
  - Wanddicke  $t_{Lsw} \approx 0,125$  m,
  - Aluminium verbrannt,
  - Rückwand zu großen Teilen intakt,
  - teilweise großflächig fehlender Absorber; in Randbereichen Absorber teilweise noch vorhanden.
- MP 4-1: Verbrannte Vorderseite, fehlender Absorber und horizontaler Spalt in Rückwand (vgl. Bild 5.40);
  - Spaltlänge  $l_{Leck} \approx 1.800$  mm,
  - Spaltbreite  $b_{Leck} \approx 1$  mm.

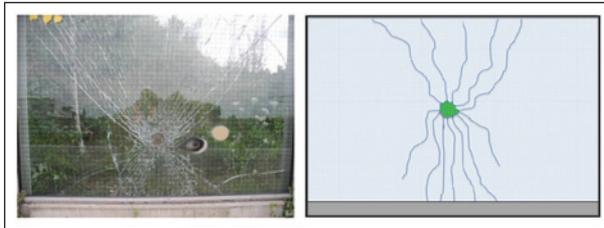


Bild 5.37: MP 1: Loch mit Rissen in Glas-Lsw

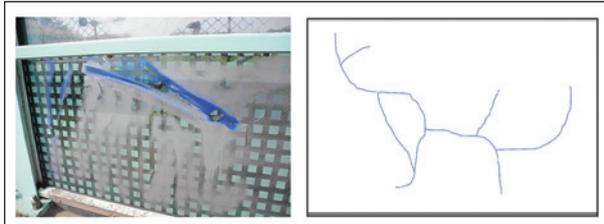


Bild 5.38: MP 2: Risse in Glas-Lsw



Bild 5.39: MP 3: Spalt in Rückwand von Holz-Lsw

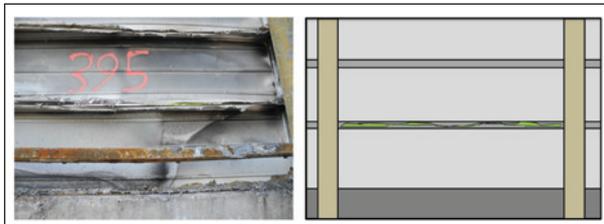


Bild 5.40: MP 4-1: Verbrannte Vorderseite, fehlender Absorber und horizontaler Spalt in Rückwand von Aluminium-Lsw



Bild 5.41: MP 4-2: Verbrannte Vorderseite, fehlender Absorber und Rückseite von Aluminium-Lsw intakt

- MP4-2: Verbrannte Vorderseite, fehlender Absorber und Rückwand intakt (vgl. Bild 5.41).

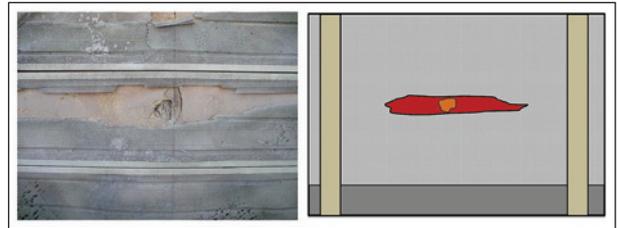


Bild 5.42: MP 4-3: Teilweise fehlende vorderseitige Aluminium-Schale, beschädigter Absorber und Rückwand von Aluminium-Lsw intakt



Bild 5.43: MP 4-4: Teilweise fehlende vorderseitige Aluminium-Schale, teilweise fehlender Absorber und Rückwand von Aluminium-Lsw intakt

- MP 4-3: Teilweise fehlende vorderseitige Aluminium-Schale, beschädigter Absorber und Rückwand intakt (vgl. Bild 5.42);
  - Absorber beschädigt auf einer näherungsweise rechteckigen Leckage-Fläche,
  - Leckbreite  $b_{Leck}$  ca. 160 mm,
  - Leckhöhe  $h_{Leck}$  ca. 180 mm.
- MP 4-4: Teilweise fehlende vorderseitige Aluminium-Schale, teilweise fehlender Absorber und Rückwand intakt (vgl. Bild 5.43).

## 5.2.2 Messergebnisse

Es soll nun zunächst der Einfluss der Leckagen auf den mittels des In-situ-Verfahrens gemessenen Schalldämmindex  $SI$  der Lsw betrachtet werden. In Bild 5.44 ist das Messergebnis an der Glas-Lsw (MP 1) dargestellt. Die blaue Kurve zeigt den  $SI$  der intakten Wand, die rote Kurve stellt den gemessenen  $SI$  an der Wand mit Leckage dar. Es wurde hierbei trotz der verhältnismäßig geringen Entfernung zum Boden genau wie bei allen anderen Messpunkten das Adrienne-Zeitfenster nach standardisiertem Verfahren mit  $t_{Adrienne} = 7,9$  ms beibehalten. Der Bildunterschrift ist die Einzahlangabe zur Luftschalldämmung  $DL_{SI,intakt}$  der intakten Lsw bzw.  $DL_{SI,Leck}$  der Lsw mit Leckage nach DIN EN 1793-6 zu entnehmen.

Im Frequenzbereich von 500 Hz bis 2.000 Hz ist eine Beeinflussung der Wirksamkeit der Lsw durch die Leckage von bis zu ca. 3 dB erkennbar. Mit steigender Frequenz wird die Abweichung zwischen den beiden Kurven geringer. Es zeigt sich sogar, dass der gemessene  $SI$  der Lsw mit Leckage teils höher ist als jener der intakten Wand. Dies ist in erster Linie auf mögliche Abweichungen zwischen den untersuchten Lsw-Elementen zurückzuführen, weil die Messungen an der intakten Wand und an der Wand mit Leckage nicht an demselben Segment durchgeführt werden konnten. Da jedoch nicht sichergestellt werden kann, dass an beiden Segmenten vollkommen gleichartige Grundbedingungen herrschen (Glas-Dicke, Spalte unterhalb der Lsw, Sockel-Höhe, Alter, Umgebung), können sich vor allem hochfrequent Abweichungen zwischen den akustischen Eigenschaften der verschiedenen Segmente ergeben.

Analog zu Bild 5.44 ist in Bild 5.45 das Messergebnis an MP 2 (Glaswand mit Rissen) dargestellt. Es stellen wieder die blaue Kurve den  $SI$  der intakten Wand und die rote Kurve den  $SI$  der Wand mit Leckage dar. Erkennbar ist, dass im Bereich von 400 Hz

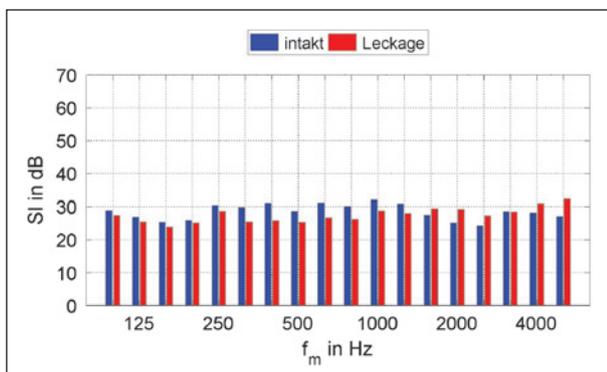


Bild 5.44: In-situ-Messergebnis an MP 1 (Glas-Lsw) mit und ohne Leckage;  $DL_{SI,intakt} = 28,5$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 27,3$  dB

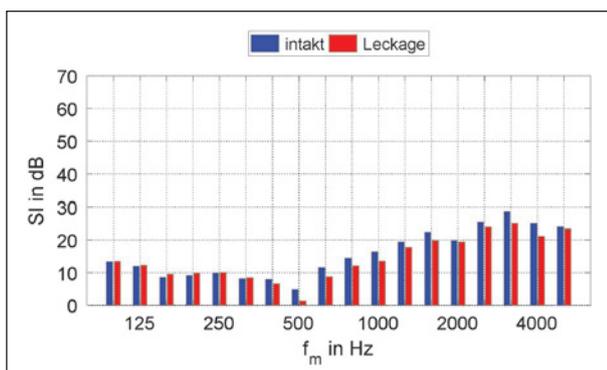


Bild 5.45: In-situ-Messergebnis an MP 2 (Glas-Lsw) mit und ohne Risse;  $DL_{SI,intakt} = 12,3$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 10,1$  dB

bis 4.000 Hz, mit Ausnahme der Terz um 2.000 Hz, eine leichte Verringerung der Wirksamkeit der Lsw durch die Risse auftritt. Allerdings sind diese Abweichungen recht gering und müssen nicht zwangsläufig ausschließlich durch die Leckage bedingt sein, sondern können auch aus den zuvor beschriebenen Unterschieden zwischen den Messungen an der intakten Wand und der Wand mit Leckage resultieren.

Wie die vorherigen Abbildungen stellt Bild 5.46 den  $SI$  der Lsw an MP 3 (Holz-Lsw) intakt (Blau) und mit Leckage (Rot) dar. Es zeigt sich eine Beeinflussung durch die Leckage im Frequenzbereich von etwa 400 Hz bis 5.000 Hz. Hierbei treten Unterschiede zwischen intakter Wand und beschädigter Wand von bis zu ca. 10 dB auf.

Eine größere Differenz zwischen dem  $SI$  der intakten Wand und der Wand mit Leckage ist in Bild 5.47 erkennbar. Hier ist das Messergebnis an MP 4-1 dargestellt. Es handelt sich um eine Aluminium-Lsw, an der das Absorbermaterial und die Vorderseite vollständig verbrannt sind und an deren Rückseite durch mechanische Einwirkung ein Spalt entstanden

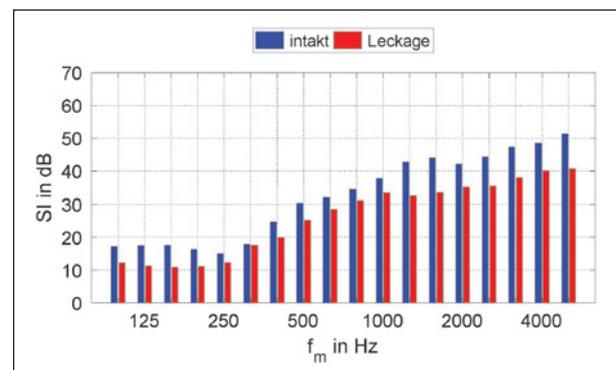


Bild 5.46: In-situ-Messergebnis an MP 3 (Holz-Lsw) mit und ohne Spalt in der Rückwand;  $DL_{SI,intakt} = 25,0$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 17,6$  dB

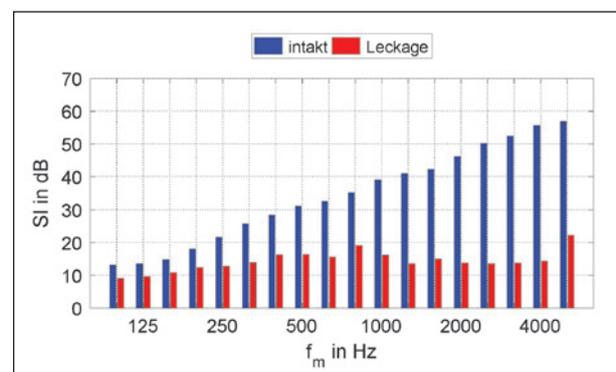


Bild 5.47: In-situ-Messergebnis an MP 4-1 (Aluminium-Lsw) mit und ohne fehlenden Absorber und Vorderseite sowie mit Spalt in der Rückwand;  $DL_{SI,intakt} = 26,3$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 14,6$  dB

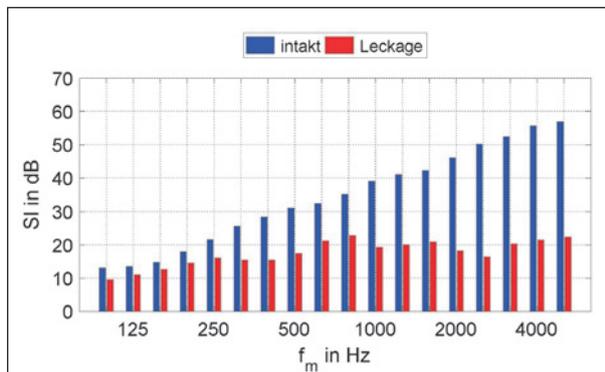


Bild 5.48: In-situ-Messergebnis an MP 4-2 (Aluminium-Lsw) mit und ohne fehlenden Absorber bei intakter Rückwand;  $DL_{SI,intakt} = 26,3$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 18,0$  dB

den ist. Es ist eine deutliche Beeinflussung der Wirksamkeit der Lsw im gesamten Frequenzbereich von 100 Hz bis 5.000 Hz von bis zu ca. 40 dB erkennbar.

Eine etwas geringere Beeinflussung entsteht durch den fehlenden Absorber bei intakter Rückwand an MP 4-2. Die Messergebnisse sind in Bild 5.48 dargestellt. Wie an MP 4-1 ist eine Minderung der Schalldämmung im gesamten messtechnisch erfassten Frequenzbereich von 100 Hz bis 5.000 Hz um bis zu ca. 33 dB erkennbar.

Die Wirksamkeit der Lsw nimmt weiter zu, wenn zusätzlich zu ihrer Rückseite auch der Absorber größtenteils intakt ist und lediglich in einem Bereich von etwa  $180 \times 160$  mm<sup>2</sup> beschädigt ist. Dies ist an MP 4-3 der Fall, an dem der in Bild 5.49 dargestellte  $SI$  gemessen wurde. Die Differenz der Schalldämmung zwischen intakter und beschädigter Wand beträgt hier bis zu ca. 15 dB.

Zur Untersuchung der Variabilität des Simulationsmodells zur Darstellung komplexer Beschädigungen wurde zusätzlich an MP 4-4 der in Bild 5.50 dargestellte  $SI$  gemessen. An diesem Messpunkt sind sowohl Vorderseite als auch Absorber in etwa zur Hälfte vorhanden, während die Rückwand vollständig intakt ist. Es ergibt sich eine Differenz zwischen dem  $SI$  der intakten und der beschädigten Wand von bis zu ca. 22 dB.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass deutlich wahrnehmbare Schäden an Lsw, wie beispielsweise ein Steinschlag in einer Glas-Lsw, ein abstehendes Brett an der Rückseite einer Holz-Lsw oder fehlendes Absorptionsmaterial und Lücken in der Rückseite an einer Aluminium-Lsw eine messbare Veränderung des Schalldämmindex mit sich bringen. Die hier betrachteten schmalen Risse in der Glas-Lsw

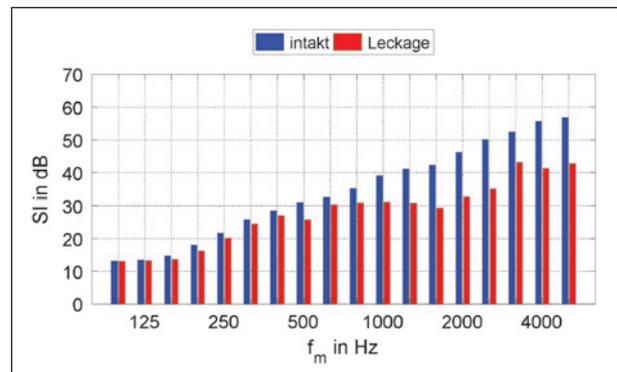


Bild 5.49: In-situ-Messergebnis an MP 4-3 (Aluminium-Lsw) mit und ohne beschädigten Absorber bei intakter Rückwand;  $DL_{SI,intakt} = 26,3$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 24,6$  dB

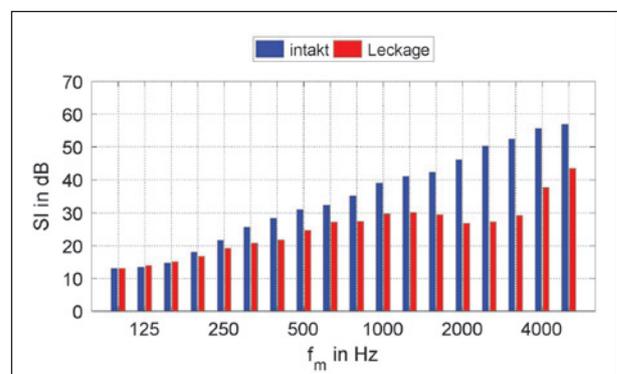


Bild 5.50: In-situ-Messergebnis an MP 4-4 (Aluminium-Lsw) mit und ohne etwa zur Hälfte fehlender Vorderseite und Absorber;  $DL_{SI,intakt} = 26,3$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 23,9$  dB

hingegen weisen keinen signifikanten messbaren Einfluss auf die Wirksamkeit der Lsw auf.

### 5.2.3 Simulationsergebnisse und Bewertung über Korrekturfunktion

Um das Simulationsmodell nach [MECHEL, 1986], das in Kapitel 4.4 beschrieben wurde, an real auftretenden Schäden an Lsw zu validieren, wurden zusätzlich zu den Leckagen an der Test-Lsw auch Simulationen bezüglich der zuvor gemessenen Schäden an realen Lsw durchgeführt. Hierzu wurde, wie im vorherigen Kapitel an der Test-Lsw, eine Korrektur der Simulationsergebnisse bezüglich der im Versuch beleuchteten Fläche durchgeführt (vgl. Kapitel 5.1.3).

Da sich an MP 2 (Glaswand mit Rissen) bereits in der Messung ein sehr geringer Einfluss der Beschädigung auf die Wirksamkeit der Lsw zeigt und die Eingangsparameter für die Simulation schwierig in ausreichender Genauigkeit zu ermitteln sind (Spaltbreite der Risse, Unsicherheit, ob die Risse durch-

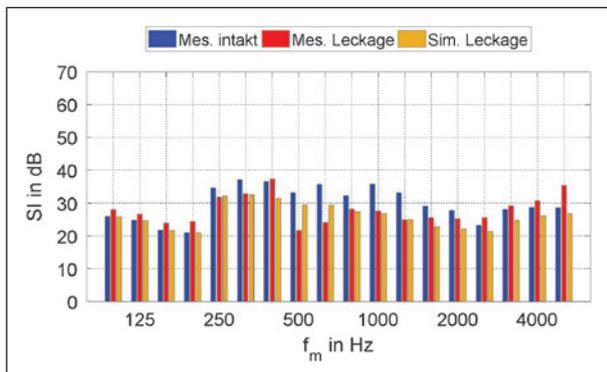


Bild 5.51: Schalldämmindex der Glas-Lsw (MP 1) mit und ohne runder Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung; Rot: Wand mit Leckage aus Messung; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation; Simulationsparameter:  $r_{Leck} = 45 \text{ mm}$ ,  $\rho_{AK} = 1,0 \text{ g/cm}^3$ ,  $d_{AK} = 0,5 \text{ mm}$

gehend sind oder sich noch intakte Folie im Innern befindet), konnte hierfür keine ausreichend detailgetreue modelltechnische Rekonstruktion der Beschädigung durchgeführt werden.

In Bild 5.51 ist das Simulationsergebnis zu MP 1 in Orange den Messergebnissen an der intakten Wand in Blau und an der Wand mit Leckage in Rot gegenübergestellt. Es wurde hierbei, ebenso wie bei den Betrachtungen am Prüfstand, ausschließlich das mittlere Array-Mikrofon M5 ausgewertet, um eine einfache Berechnung der Beleuchtungsfläche zu ermöglichen. In der Simulation wurde eine runde Leckage mit dem Radius  $r_{Leck} = 45 \text{ mm}$  in eine Lsw mit dem an der intakten Wand gemessenen  $SI$  eingesetzt. Zusätzlich wurde die Leckage nicht als offen angenommen. Stattdessen wurde, um der vorhandenen Folie im Innern der Leckage gerecht zu werden, eine Abschlusskappe (AK) mit einer Dichte  $\rho_{AK}$  von  $1,0 \text{ g/cm}^3$  und einer Dicke  $d_{AK}$  von  $0,5 \text{ mm}$  angenommen.

Es zeigt sich, dass die Simulation eine Verringerung der Wirksamkeit der Lsw prognostiziert, die im Bereich von etwa  $800 \text{ Hz}$  bis  $1.600 \text{ Hz}$  (Schwerpunkt des Verkehrslärmspektrums) nah an der gemessenen Kurve liegt. Unterhalb von  $800 \text{ Hz}$  tritt in einigen Terzen eine Unterschätzung, bei  $500 \text{ Hz}$  und  $630 \text{ Hz}$  jedoch eine Überschätzung des  $SI$  der beschädigten Wand auf. Oberhalb von  $1.600 \text{ Hz}$  unterschätzt die Simulation die Schalldämmung der beschädigten Wand, allerdings ist oberhalb von  $3.150 \text{ Hz}$  auch der zuvor gezeigte Effekt zu erkennen, dass der gemessene  $SI$  der beschädigten Wand größere Werte annimmt als jener der intakten Wand, wodurch in diesem Frequenzbereich keine sichere Aussage über die Beeinflussung der Wirksamkeit der Lsw durch die Leckage getroffen werden kann.

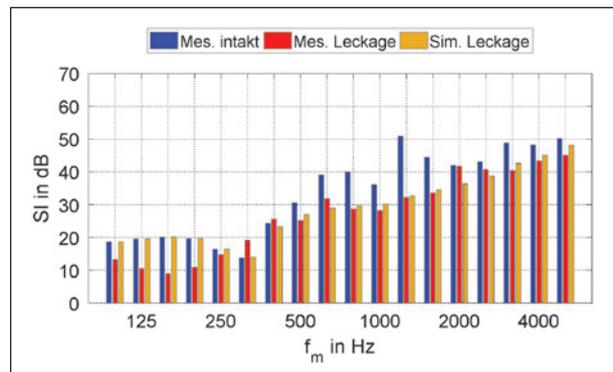


Bild 5.52: Schalldämmindex der Holz-Lsw (MP 3) mit und ohne vertikaler schlitzförmiger Leckage mit Absorptionsfüllung; Blau: intakte Wand aus Messung; Rot: Wand mit Leckage aus Messung; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation; Simulationsparameter:  $b_{Leck} = 10 \text{ mm}$ ,  $l_{Leck} = 1 \text{ m}$ ,  $\Xi_{Abs} = 10 \text{ kPa/s}^2$

Analog zu Bild 5.51 sind in Bild 5.52 die Simulationsergebnisse den Messergebnissen an MP 3 gegenübergestellt. Hier wurde eine Wand angenommen, die im intakten Zustand über den an der intakten Lsw gemessenen  $SI$  verfügt und die eine vertikale schlitzförmige Leckage mit einer Breite  $b_{Leck}$  von  $10 \text{ mm}$  und einer Länge  $l_{Leck}$  von  $1 \text{ m}$  aufweist. Zudem wurde angenommen, dass sich im Innern der Leckage Absorptionsmaterial mit einem Strömungswiderstand von  $\Xi_{Abs} = 10 \text{ kPa/s}^2$  befindet.

Im Frequenzbereich von  $500 \text{ Hz}$  bis  $4.000 \text{ Hz}$  ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulations- und Messergebnis erkennbar. Es zeigt sich auch der mit zunehmender Frequenz steigende  $SI$  der beschädigten Wand. In den Terzen um  $2.000 \text{ Hz}$  und  $3.150 \text{ Hz}$  unterschätzt die Simulation die Schalldämmung leicht, ansonsten stimmen die Kurven bis auf wenige Dezibel überein.

Wie in den zuvor gezeigten Diagrammen sind in Bild 5.53 die Simulations- und Messergebnisse zu MP 4-1 zu sehen. Der Simulation liegt ein horizontaler Spalt einer Breite  $b_{Leck}$  von  $1 \text{ mm}$  und einer Länge  $l_{Leck}$  von  $1,80 \text{ m}$  in einer Wand mit der gemessenen Schalldämmung der intakten Aluminium-Lsw zugrunde.

Wie auch die Messung bestätigt, verringert sich in der Simulation die Wirksamkeit der Wand durch den fehlenden Absorber und den Spalt in der Rückwand erheblich. Ab etwa  $500 \text{ Hz}$  zeigt sich deutlich das Resonanzverhalten des schmalen Spalts, das das Modell nach MECHSEL vorhersagt. Zwar unterschätzt die Simulation die Schalldämmung der Wand in einigen Terzen oberhalb von  $800 \text{ Hz}$ , jedoch ist die Tendenz der Messkurve in den Simulationsergebnissen

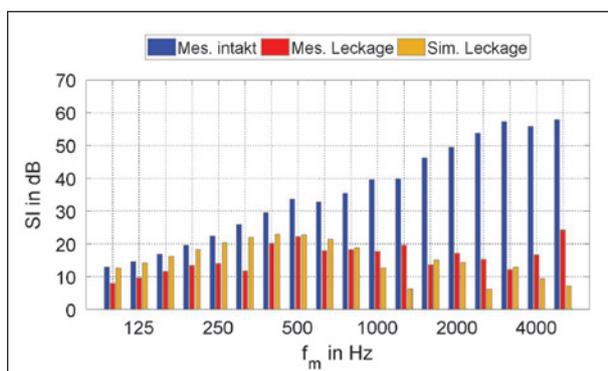


Bild 5.53: Schalldämmindex der Aluminium-Lsw (MP 4-1) mit und ohne horizontaler schlitzförmiger Leckage und fehlendem Absorptionsmaterial; Blau: intakte Wand aus Messung; Rot: Wand mit Leckage aus Messung; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation; Simulationsparameter:  $b_{Leck} = 1 \text{ mm}$ ,  $l_{Leck} = 1,8 \text{ m}$

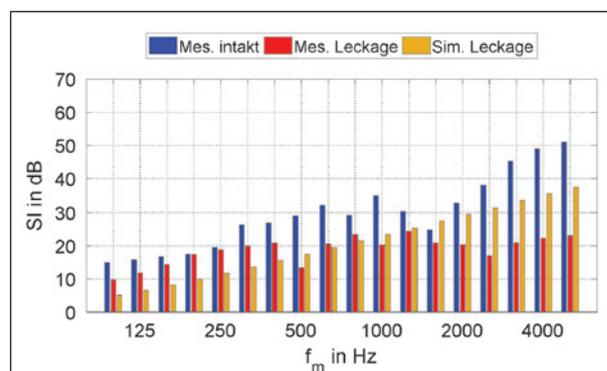


Bild 5.54: Schalldämmindex der Aluminium-Lsw (MP 4-2) mit und ohne fehlendem Absorptionsmaterial bei intakter Rückwand; Blau: intakte Wand aus Messung; Rot: Wand mit Leckage aus Messung; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation; Simulationsparameter:  $r_{Leck} > r_{Fresnel}$ ,  $p_{AK} = 7.850 \text{ kg/m}^3$ ,  $d_{AK} = 0,25 \text{ mm}$

wiederzuerkennen. Bei 1.000 Hz unterschätzt die Simulation den  $SI$  der Lsw um etwa 5 dB, jedoch ist die Verringerung der Wirksamkeit in dieser Terz unverkennbar. Das resonanzartige Verhalten mit lokalen Minima der Schalldämmung bei etwa 1.250 Hz, 2.500 Hz sowie 5.000 Hz ist in den Messergebnissen nicht in derartiger Ausprägung wiederzufinden. Zwar sind ebenfalls lokale Minima bei etwa 1.600 Hz und bei 3.150 Hz erkennbar, jedoch verringert sich der  $SI$  in der Messkurve an diesen Stellen nicht so stark wie in der Simulationskurve. Der Versatz der lokalen Minima in der Simulation gegenüber jenem in den Messergebnissen ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass der Spalt nicht vollkommen detailgetreu abgebildet werden konnte. Zum einen konnte die Spaltbreite nur sehr ungenau bestimmt werden, zum anderen war diese über die Länge des Spalts nicht konstant. Hinzu kommt, dass entsprechend dem Modell der Beleuchtungsfläche nicht die gesamte Länge des Spalts in das Messergebnis einfließt. Dadurch können Unregelmäßigkeiten in der Form der Leckage einen verstärkten Einfluss auf das Messergebnis nehmen.

In Bild 5.54 sind in Analogie zu den bisherigen Darstellungen die Simulations- und Messergebnisse an MP 4-2 gezeigt, an dem das Absorptionsmaterial der Aluminium-Lsw fehlt, die Rückseite der Wand im Gegensatz zu MP 4-1 jedoch intakt ist. In der Simulation wurde hier eine Leckage angenommen, die einen derart großen Durchmesser hat, dass stets die gesamte Beleuchtungsfläche innerhalb der Leckage liegt. Die Leckage wurde als ungefüllt angenommen und mit einer Abschlusskappe aus Stahl mit einer Dichte  $p_{AK}$  von  $7.850 \text{ kg/m}^3$  sowie einer Dicke  $d_{AK}$  von  $0,25 \text{ mm}$  versehen.

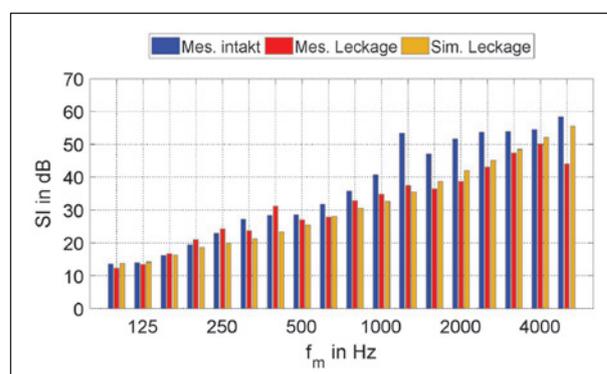


Bild 5.55: Schalldämmindex der Aluminium-Lsw (MP 4-3) mit und ohne Beschädigung des Absorptionsmaterials bei intakter Rückwand; Blau: intakte Wand aus Messung; Rot: Wand mit Leckage aus Messung; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation; Simulationsparameter:  $h_{Leck} = 180 \text{ mm}$ ,  $b_{Leck} = 160 \text{ mm}$ ,  $\sigma_{Abs} = 5 \text{ kPa/s}^2$

Es zeigt sich in den Ergebnissen eine größere Abweichung zwischen Messung und Simulation, wobei die Abweichung zwischen 500 Hz und 1.250 Hz geringer ausfällt als im restlichen Frequenzbereich. Die Simulationskurve bildet die mit steigender Frequenz zunehmenden Werte der Messkurve nach, überschätzt jedoch in jeder Terz oberhalb von 1.000 Hz den  $SI$  um mehr als ca. 6 dB. Unterhalb von 500 Hz unterschätzt die Simulation den  $SI$ . Bei 1.000 Hz stimmen Mess- und Simulationsergebnis bis auf etwa 3 dB überein.

In Bild 5.55 ist das Simulations- dem Messergebnis an MP 4-3 gegenübergestellt. Bei dieser Leckage handelt es sich um eine Beschädigung im Absorptionsmaterial der Lsw. Der Simulation liegt eine rechteckige Leckage mit den Abmaßen  $h_{Leck} \times b_{Leck} = 180 \times 160 \text{ mm}^2$  zugrunde, die mit Absorp-

tionsmaterial eines Strömungswiderstands  $\Xi_{Abs}$  von 5 kPa/s<sup>2</sup> gefüllt ist.

Es ist eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung im Frequenzbereich von 500 Hz bis 4.000 Hz erkennbar, die sich in Form des mit steigender Frequenz steigenden  $SI$  äußert. Bei 5.000 Hz fällt die Wirksamkeit der Schalldämmung im Messergebnis ab, was in der Simulation nicht der Fall ist. In den Terzen um 250 Hz und 400 Hz, in der die Übereinstimmung zwischen Simulations- und Messergebnis nicht in gleicher Form wie bei der restlichen Kurve gegeben ist, unterschätzt die Simulation den  $SI$ . Jedoch tritt hier wiederum der Fall auf, dass die gemessene Wirksamkeit der Lsw mit Leckage höher ist als ohne, wodurch keine Aussagekraft über den Einfluss der Leckage in diesen Frequenzbereichen besteht.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die an realen Lsw auftretenden Leckagen mit dem in Kapitel 4.4 beschriebenen Simulationsmodell nach [MECHEL, 1986] gut nachgebildet werden können. Hierbei ist die Korrektur über die frequenzabhängige Beleuchtungsfläche unabdingbar. Für runde Leckagen mit Abschlusskappen sowie für Schlitze mit Absorber-Füllung konnten ebenso gut mit der Messung übereinstimmende Simulationsergebnisse erzeugt werden wie für Aluminium-Lsw ohne Absorber mit einem Spalt in der Rückwand und mit beschädigtem oder gar fehlendem Absorber. Vor allem bei 1.000 Hz ist für die meisten Leckagen eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung gegeben, wodurch der aus dem Mechel-Modell resultierende Schalldämmindex bzw. Transmissionsgrad als Eingangsparameter für das in Kapitel 3 beschriebene Ausbreitungsmodell Anwendung finden kann.

## 6 Schadenskatalog

Wie zuvor gezeigt, ist die Bewertung der akustischen Relevanz von Leckagen in Lsw durch ihren Einflussradius ( $GB = 0$ ) möglich (vgl. Kapitel 3.3.2). Im Folgenden sind die nach dem zuvor definierten Modell berechneten Einflussradien für verschiedene Formen von Leckagen dargestellt (Bild 6.1 bis Bild 6.32). Hierbei wurde sich auf runde sowie vertikal und horizontal orientierte schlitzförmige Leckagen beschränkt, da mittels dieser die meisten in der Realität auftretenden Schäden an Lsw abgebildet werden können.

Beispielsweise treten annähernd runde Leckagen in Holz-Lsw durch mechanische Krafteinwirkung oder durch Tiere auf. Auch Schäden an transparenten Lsw, z. B. durch Steinschlag, können eine runde Form aufweisen. Horizontale Schlitze lassen sich zur Simulation von Leckagen heranziehen, die durch fehlende Dichtungen zwischen Elementen von Beton-Lsw oder Kassetten von Aluminium-Lsw auftreten können. Auch Undichtigkeiten im Bereich des Bodens von Lsw können horizontale Schlitze hervorrufen. Vertikale schlitzförmige Leckagen wiederum sind zwischen verschiedenen Lsw-Elementen oder zwischen vertikalen Trägern und Lsw-Kassetten beobachtbar.

Die runden Leckagen wurden unter Verwendung der Parameter Querschnittsfläche und Transmissionsgrad innerhalb der Lsw modelliert. Bei den schlitzförmigen Leckagen fand zusätzlich eine Flächenrasterung statt, um ihrer längen-, bzw. höhen-spezifischen Verteilung gerecht zu werden. Es sei hier angemerkt, dass die Transmission durch die intakten Segmente der Lsw mit einem Transmissionsgrad von Null angenommen wurde. Dadurch ergibt sich eine Worst-Case-Abschätzung für den Einflussradius einer Leckage unter den jeweiligen geometrischen Grundvoraussetzungen.

Der Schadenskatalog umfasst Simulations- und Berechnungsergebnisse auf Grundlage der folgenden Daten:

- Form der Leckage:
  - rund mit Wirkfläche  $\tau_L \cdot S_L$  von 0,01 m<sup>2</sup> bis 6 m<sup>2</sup>,
  - schlitzförmig, horizontal mit Länge  $l_{Leck}$  von 2 m bis 10 m und Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  von 0,01 m bis 0,5 m,
  - schlitzförmig, vertikal mit Länge  $l_{Leck}$  gleich der Wandhöhe  $h_{Lsw}$  und Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  von 0,01 m bis 0,5 m.
- Höhe der Lsw  $h_{Wand}$ :
  - 3 m bis 9 m in Stufen von 2 m.
- mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$ :
  - 0,5 m bis 8,5 m in Stufen von 1 m bzw. 2 m.

Dabei beschreiben  $\tau_L$ ,  $S_L$  und  $b_L$  den Transmissionsgrad, die Fläche und die Breite der Leckage.  $l_{Leck}$  und  $z_{Leck}$  definieren die Länge und die mittlere Höhe der Leckage.  $h_{Wand}$  ist die Höhe der Lsw.

Die angewendete Quell-Empfänger-Geometrie ist dem Bild 3.1 zu entnehmen bei ausschließlicher Betrachtung der primären Quellposition  $Q_1$ .

## 6.1 Runde Leckagen

Höhe Lsw 3 m, Höhe Leckage 0,5 m bis 2,5 m

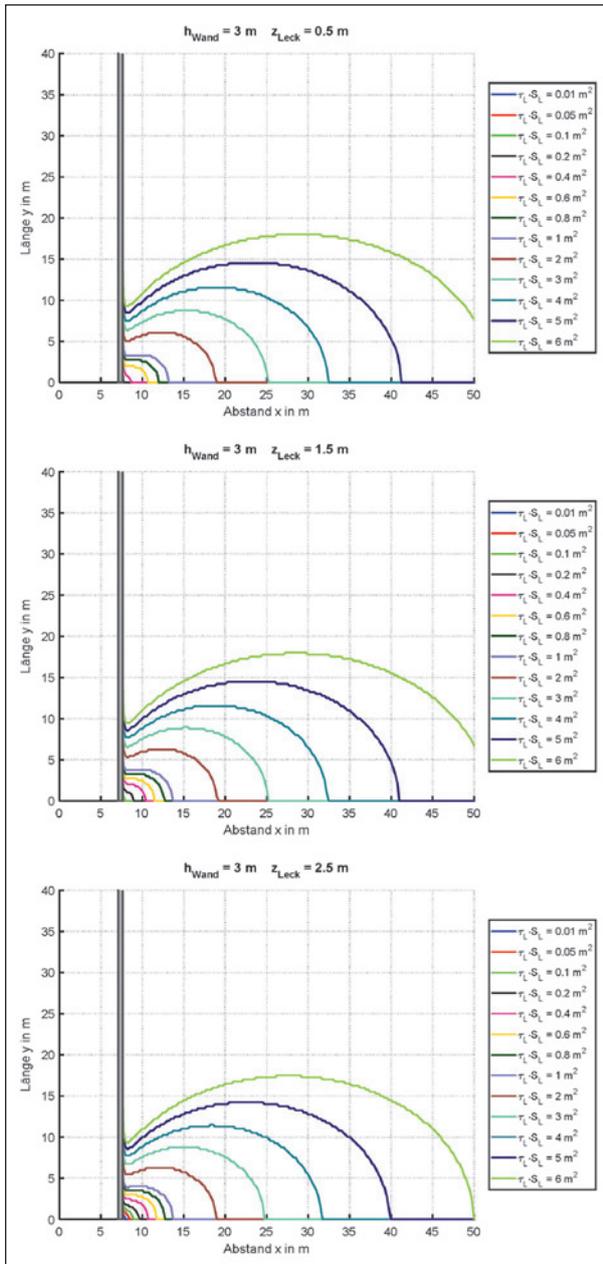


Bild 6.1: Berechneter Einflussradius runder Leckagen verschiedener Wirkfläche  $\tau_L \cdot S_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 3 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 1,5 m und 2,5 m

Höhe Lsw 5 m, Höhe Leckage 0,5 m bis 4,5 m

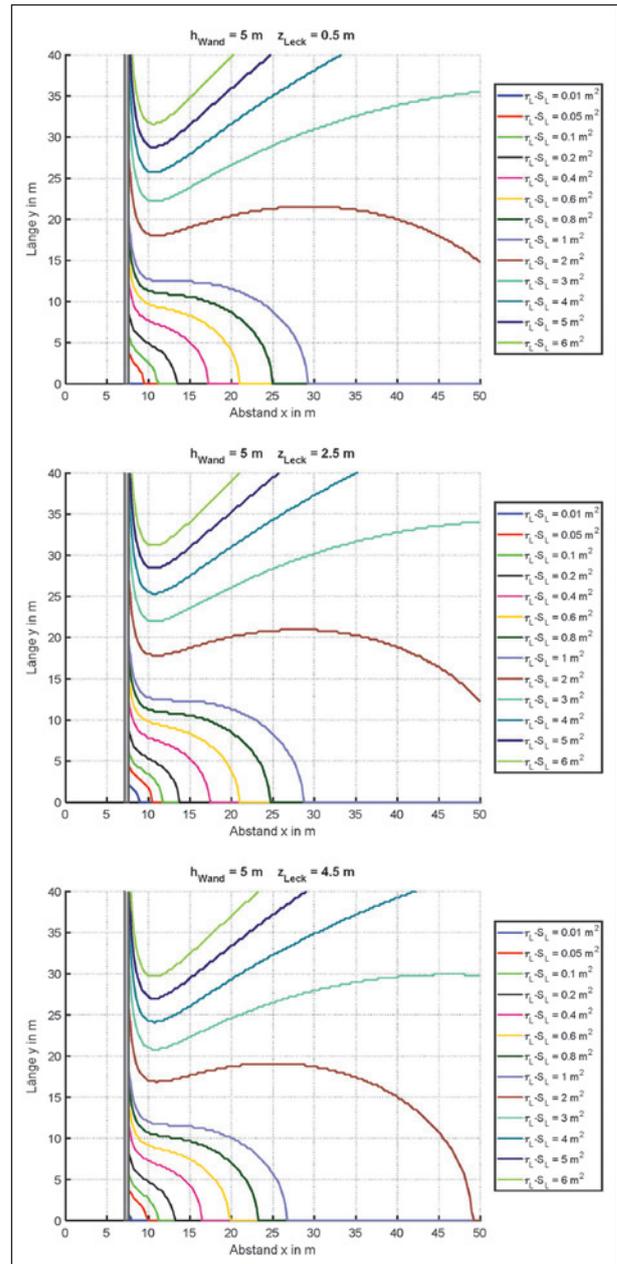


Bild 6.2: Berechneter Einflussradius runder Leckagen verschiedener Wirkfläche  $\tau_L \cdot S_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 5 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m und 4,5 m

Höhe Lsw 7 m, Höhe Leckage 0,5 m bis 6,5 m

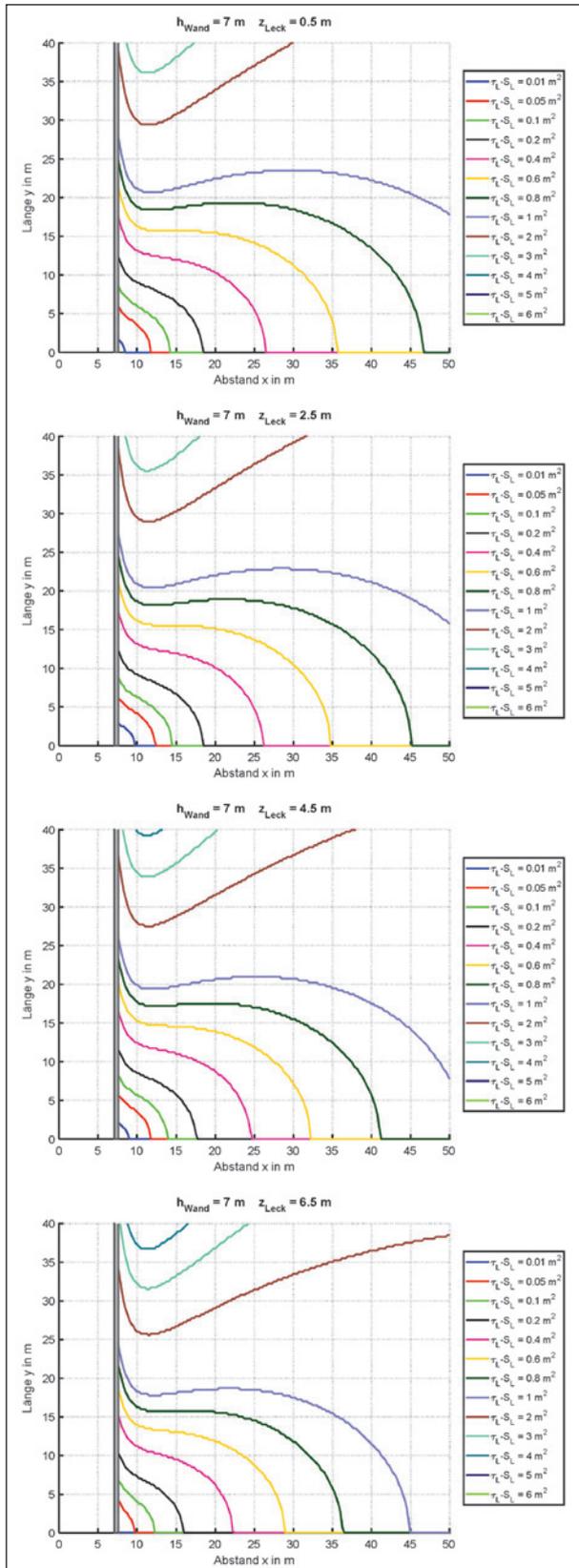


Bild 6.3: Berechneter Einflussradius runder Leckagen verschiedener Wirkfläche  $\tau_L \cdot S_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 7 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m

Höhe Lsw 9 m, Höhe Leckage 0,5 m bis 6,5 m

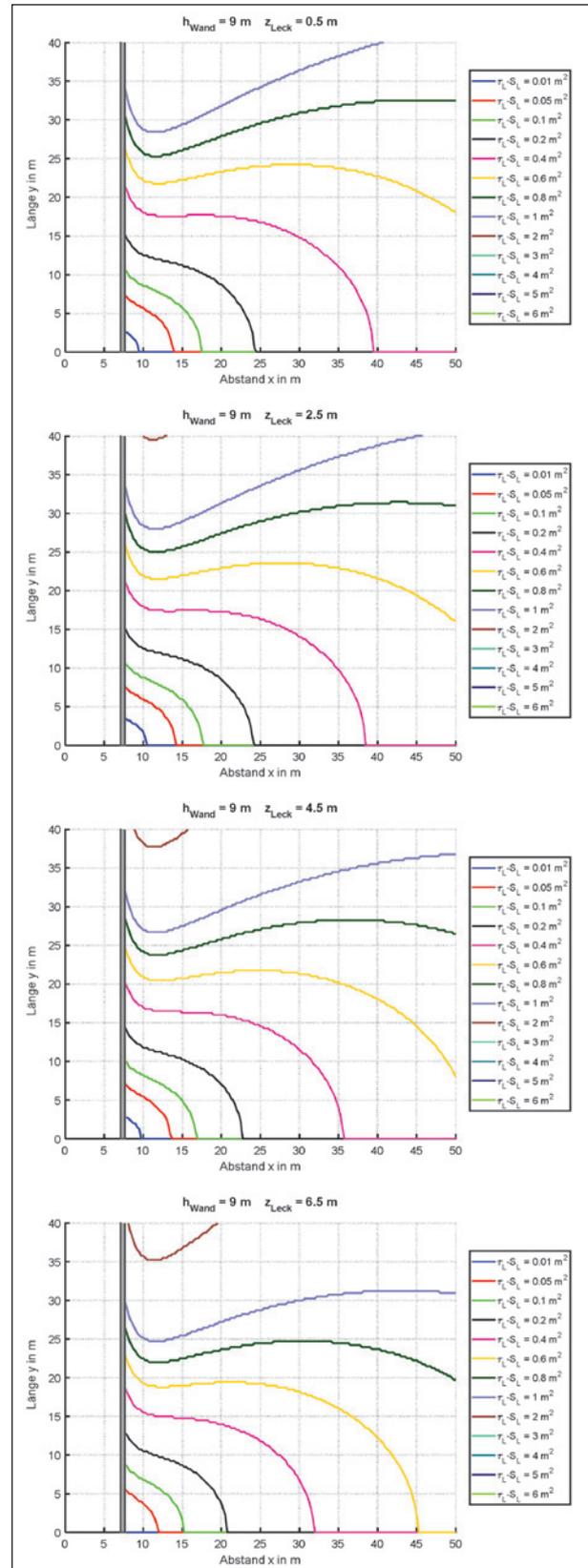


Bild 6.4: Berechneter Einflussradius runder Leckagen verschiedener Wirkfläche  $\tau_L \cdot S_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m

## Höhe Lsw 9 m, Höhe Leckage 8,5 m

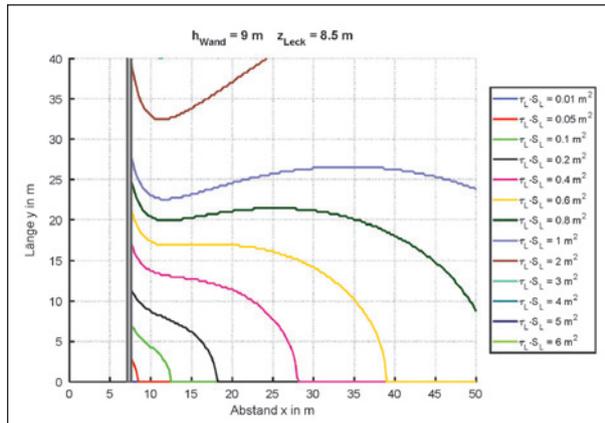


Bild 6.5: Berechneter Einflussradius runder Leckagen verschiedener Wirkfläche  $\tau_L \cdot S_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 8,5 m

## 6.2 Horizontale schlitzförmige Leckagen

### Höhe Lsw 3 m, Länge Leckage 2 m, Höhe Leckage 0,5 m bis 2,5 m

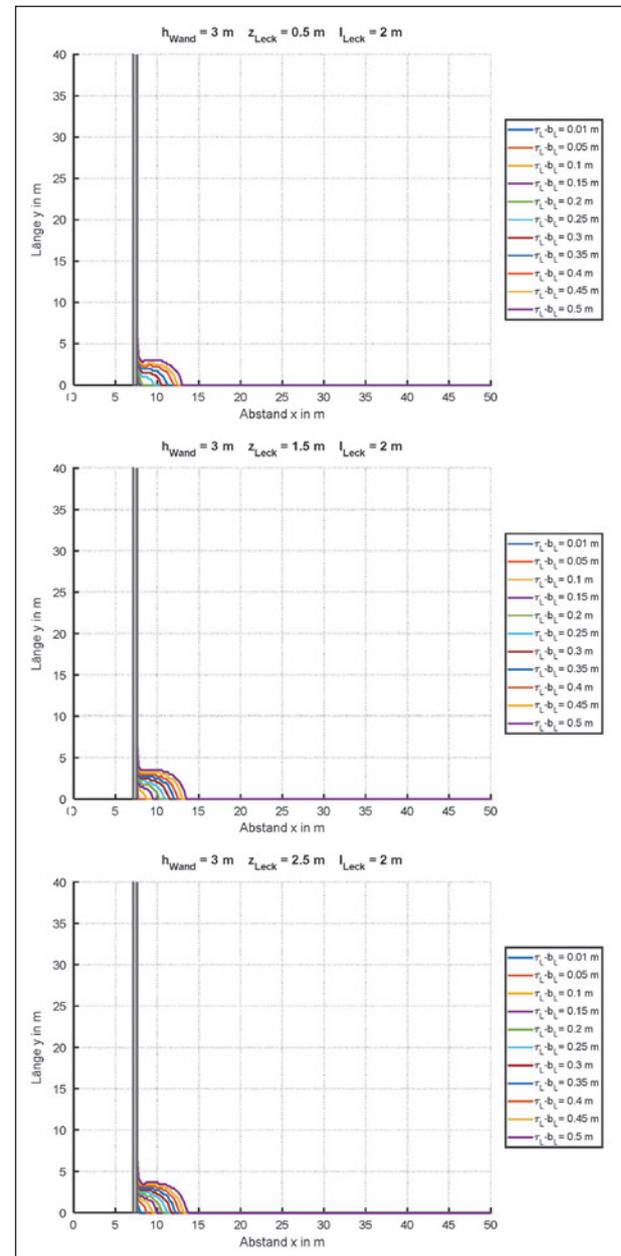


Bild 6.6: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 2 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 3 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 1,5 m und 2,5 m

Höhe Lsw 3 m, Länge Leckage 4 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 2,5 m

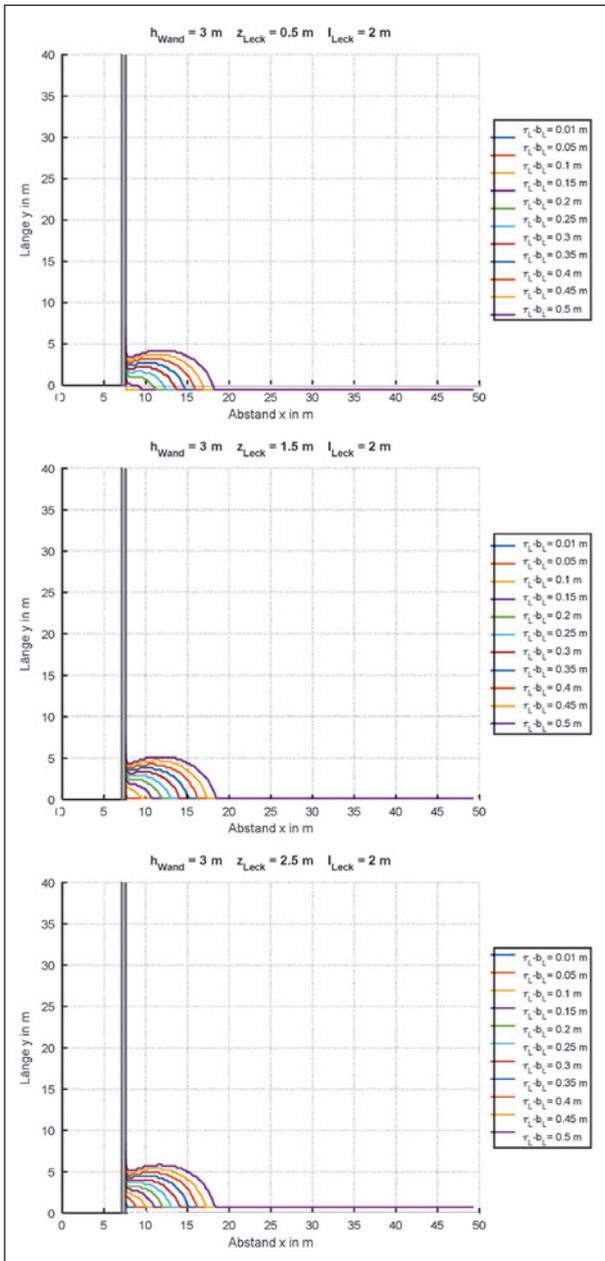


Bild 6.7: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 4 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 3 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 1,5 m und 2,5 m

Höhe Lsw 3 m, Länge Leckage 6 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 2,5 m

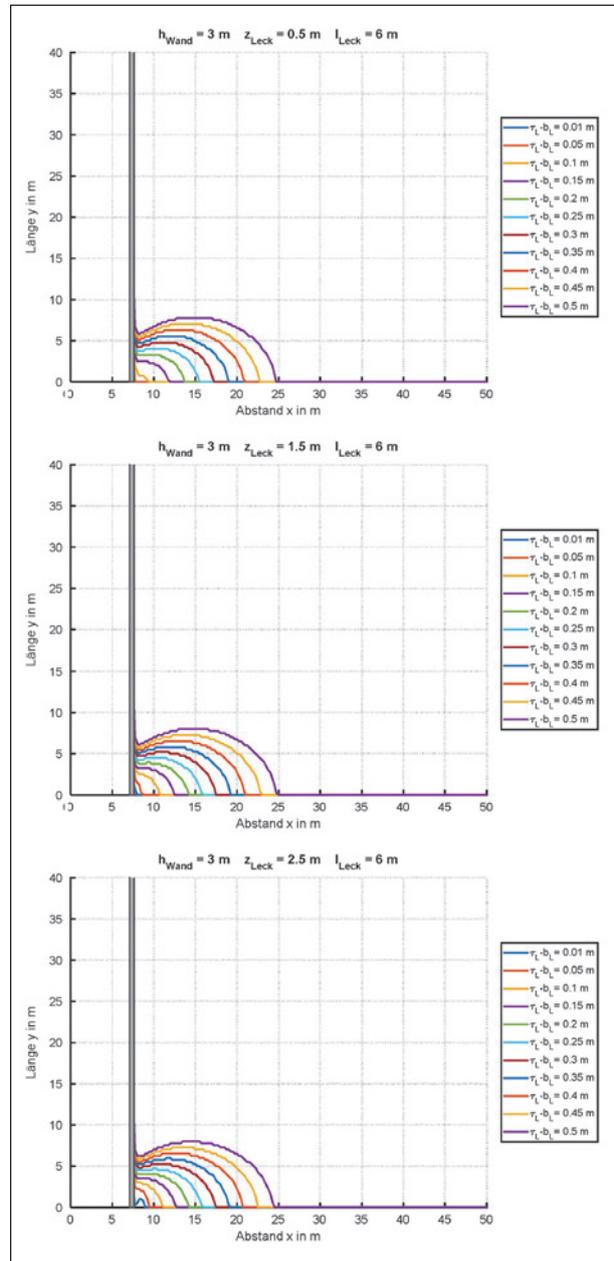


Bild 6.8: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 6 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 3 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 1,5 m und 2,5 m

Höhe Lsw 3 m, Länge Leckage 8 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 2,5 m

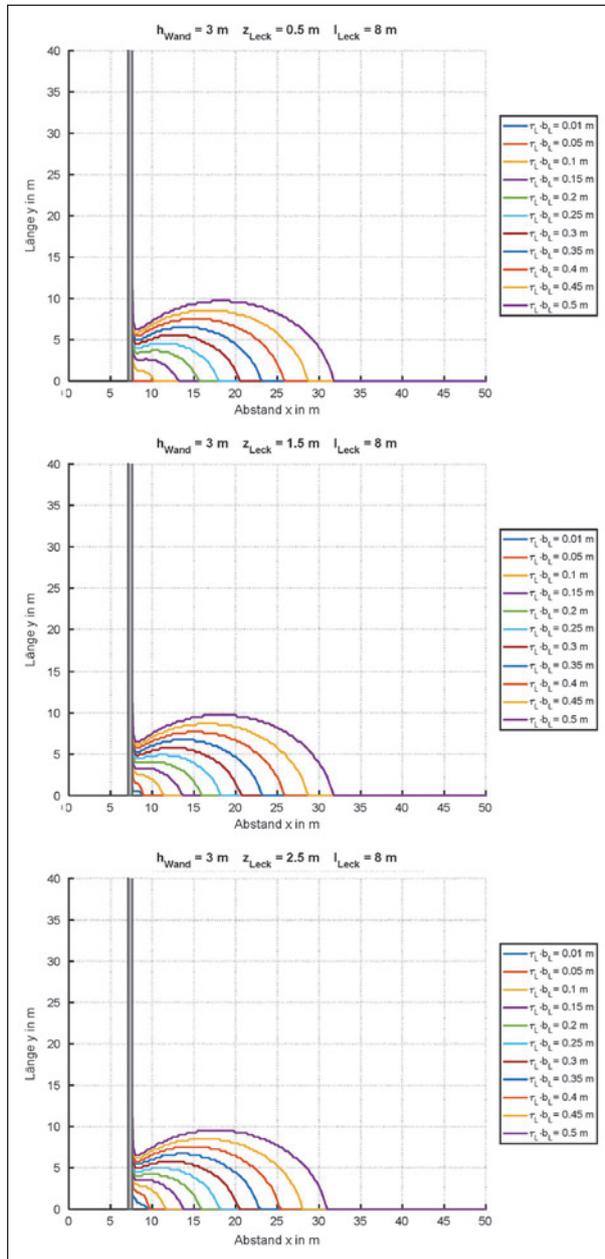


Bild 6.9: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 8 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 3 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 1,5 m und 2,5 m

Höhe Lsw 3 m, Länge Leckage 10 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 2,5 m

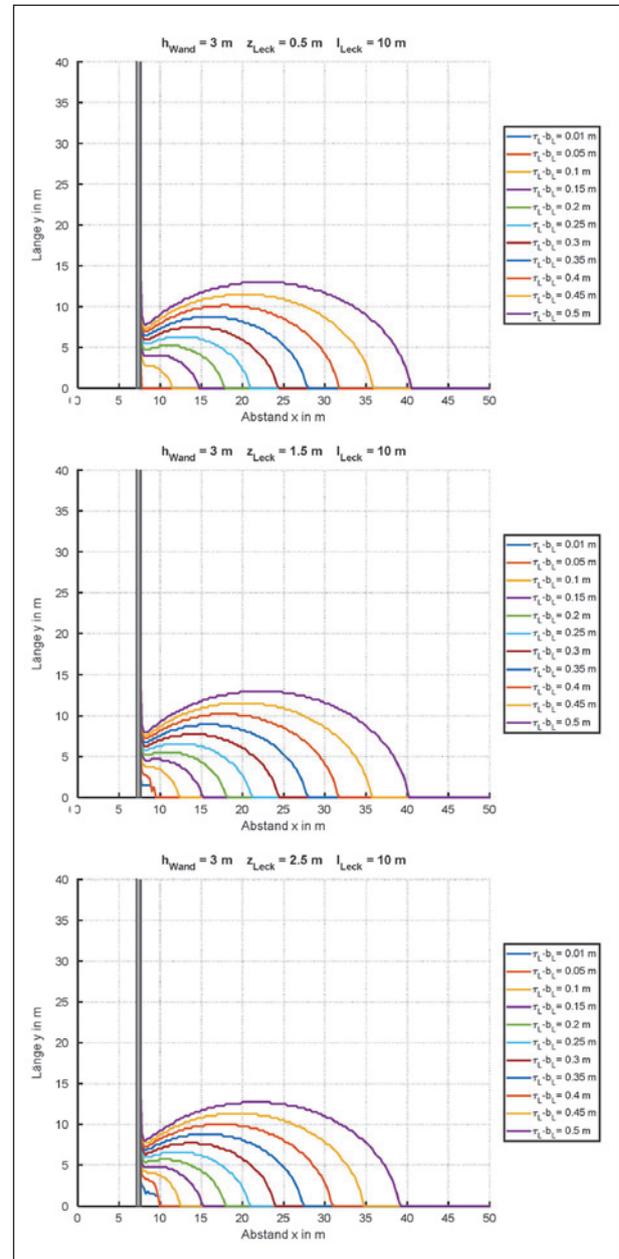


Bild 6.10: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 10 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 3 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 1,5 m und 2,5 m

Höhe Lsw 5 m, Länge Leckage 2 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 4,5 m

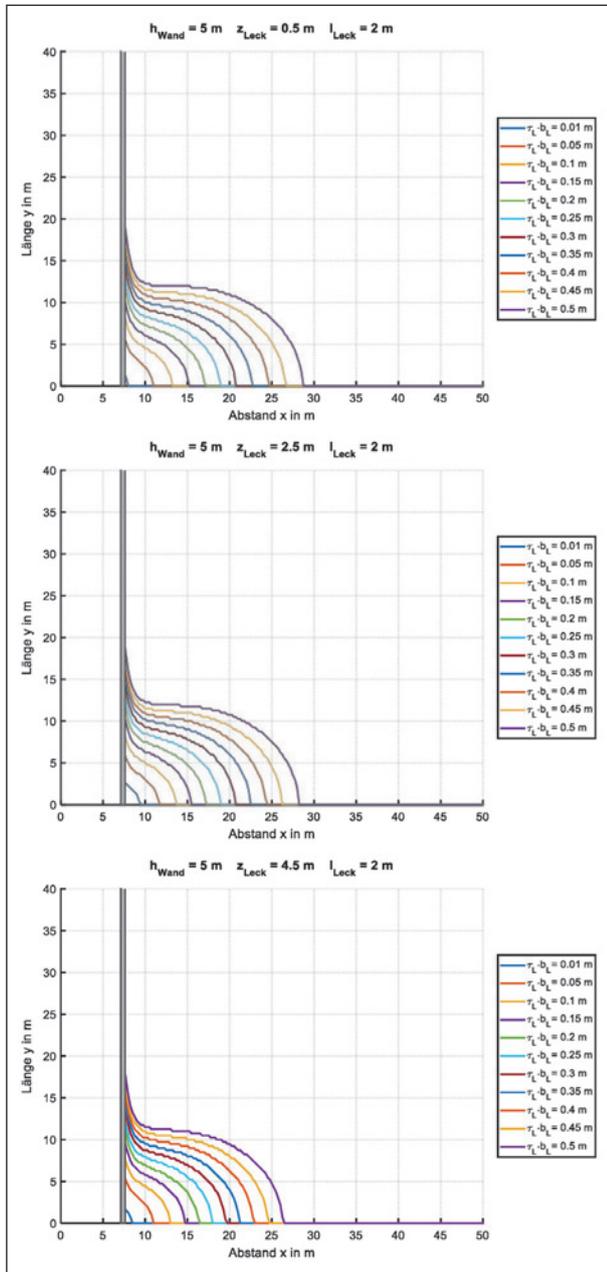


Bild 6.11: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 2 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 5 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m und 4,5 m

Höhe Lsw 5 m, Länge Leckage 4 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 4,5 m

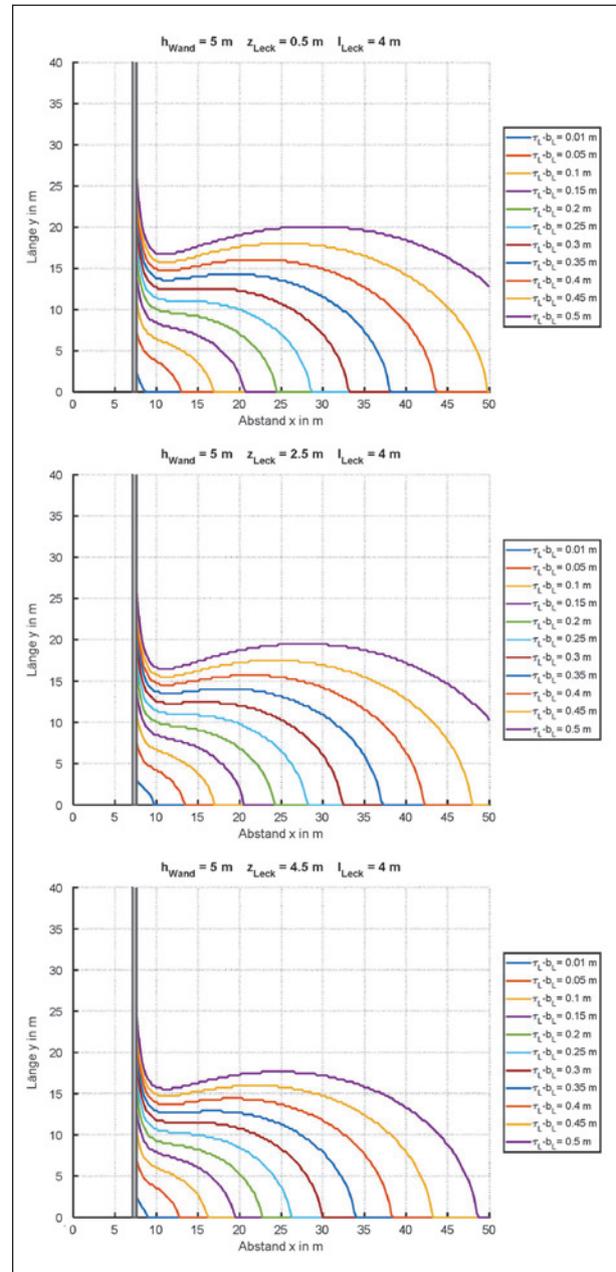


Bild 6.12: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 4 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 5 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m und 4,5 m

Höhe Lsw 5 m, Länge Leckage 6 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 4,5 m

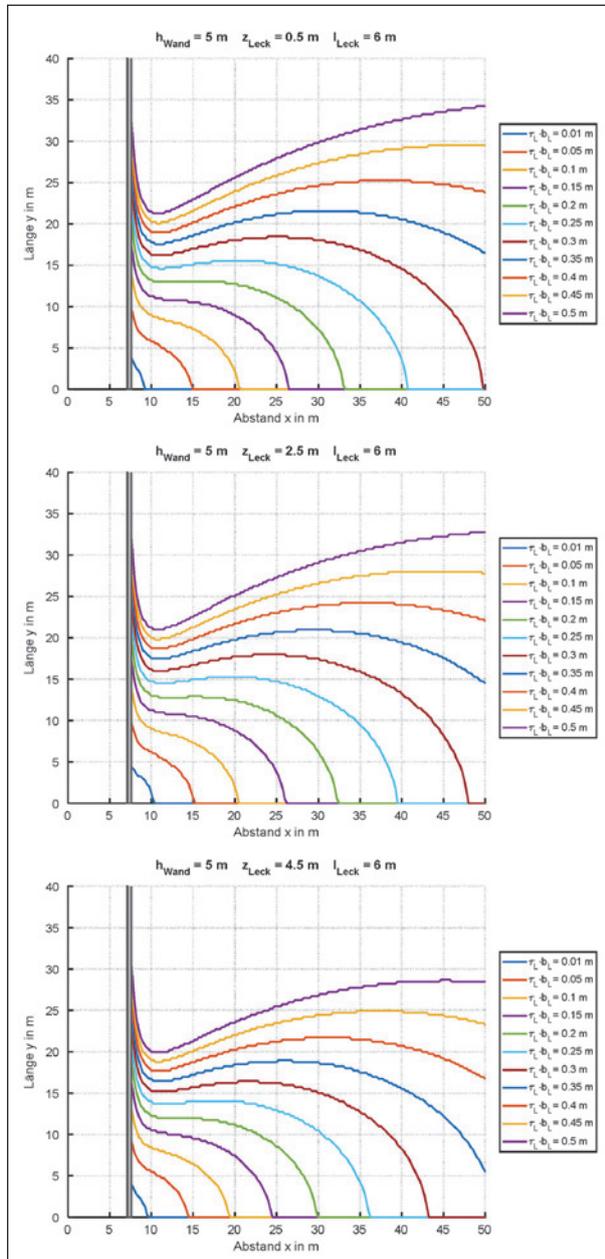


Bild 6.13: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 6 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 5 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m und 4,5 m

Höhe Lsw 5 m, Länge Leckage 8 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 4,5 m

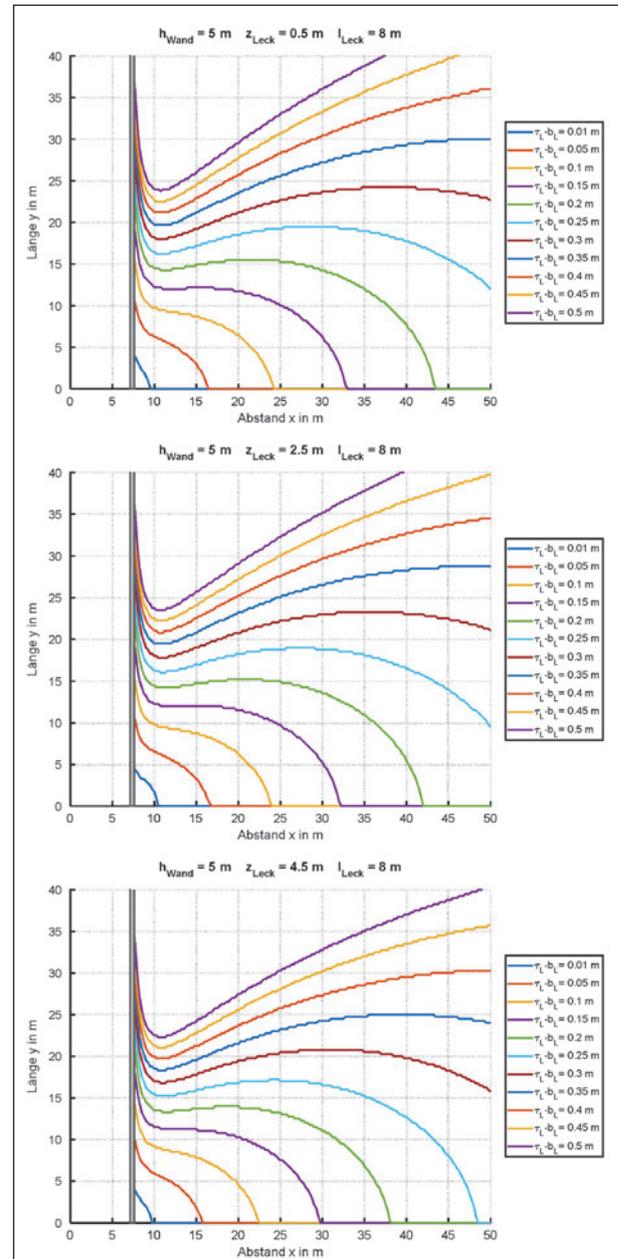


Bild 6.14: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 8 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 5 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m und 4,5 m

Höhe Lsw 5 m, Länge Leckage 10 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 4,5 m

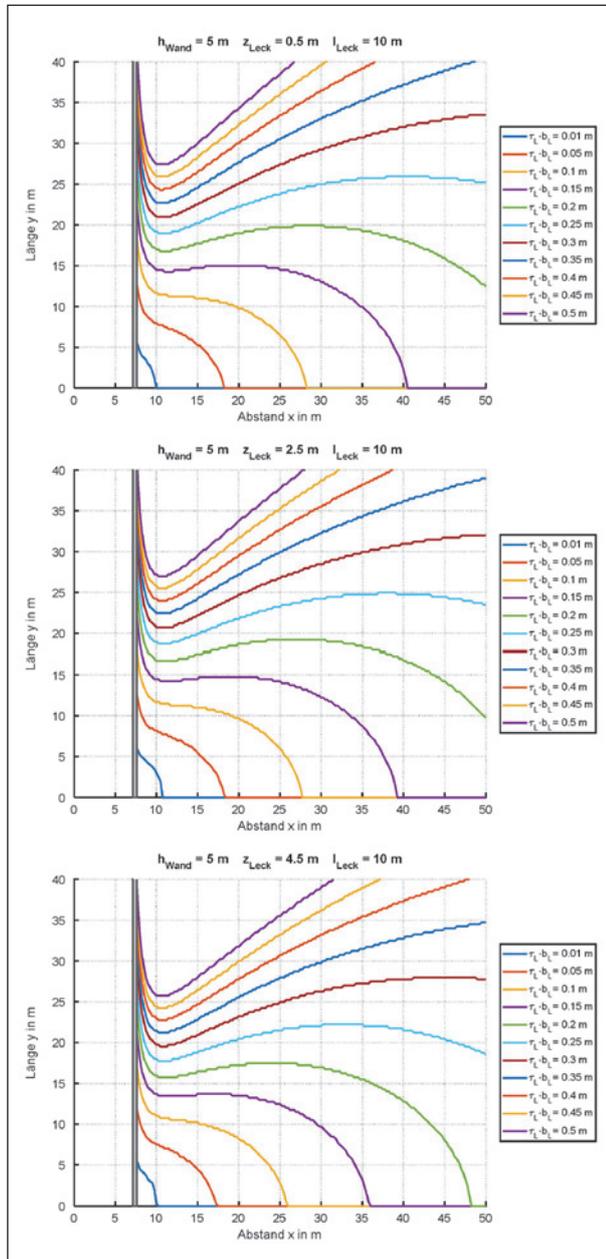


Bild 6.15: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 10 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 5 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m und 4,5 m

Höhe Lsw 7 m, Länge Leckage 2 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 6,5 m

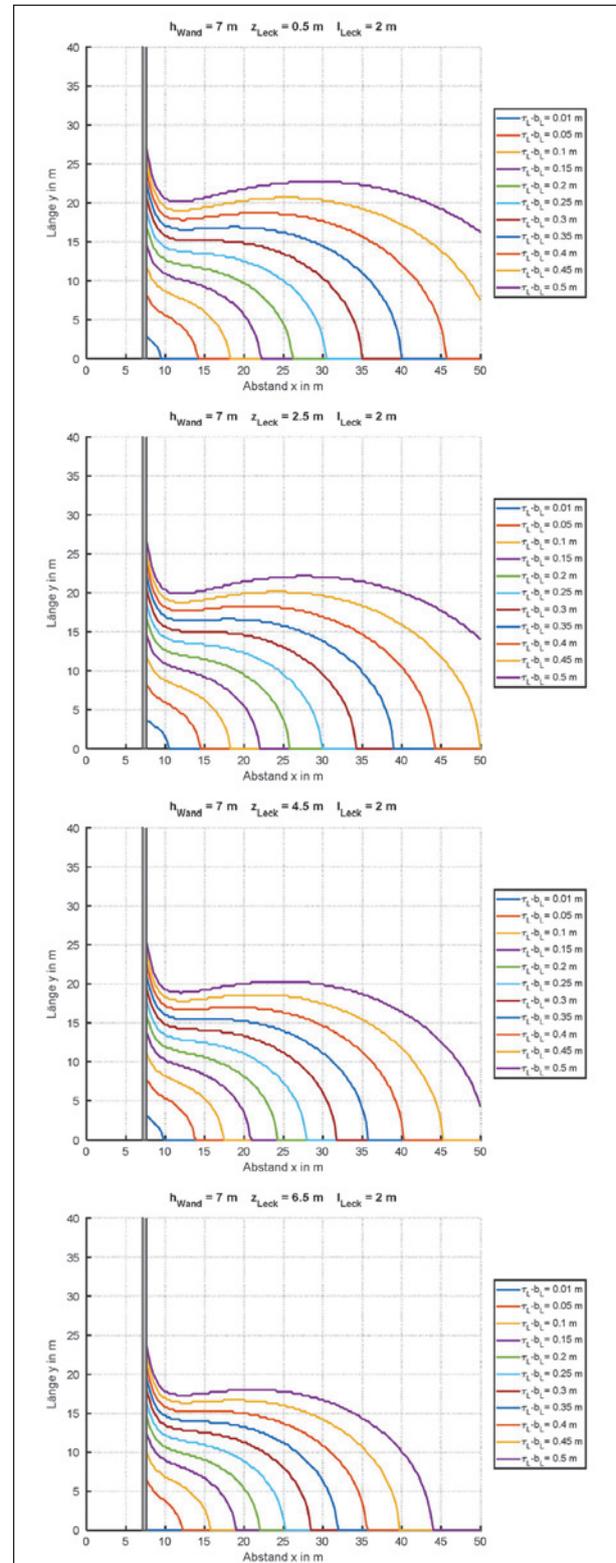


Bild 6.16: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 2 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 7 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m

Höhe Lsw 7 m, Länge Leckage 4 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 6,5 m

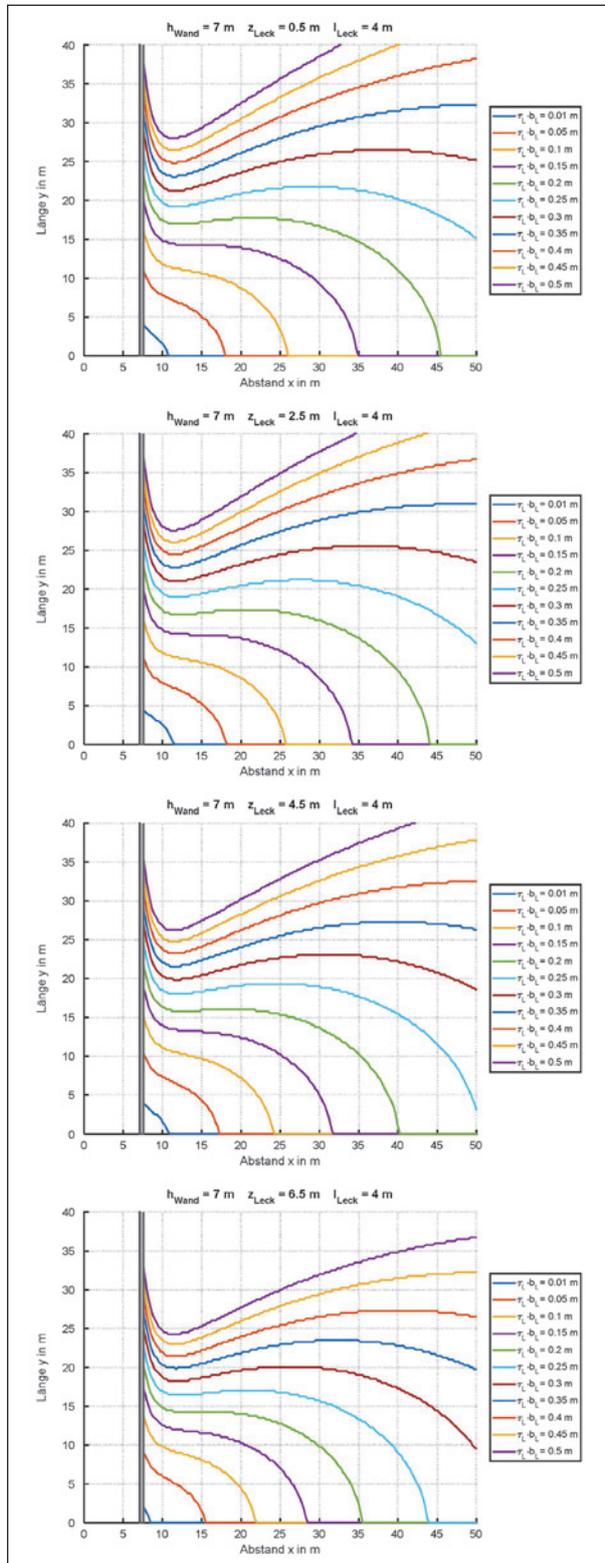


Bild 6.17: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 4 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 7 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m

Höhe Lsw 7 m, Länge Leckage 6 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 6,5 m

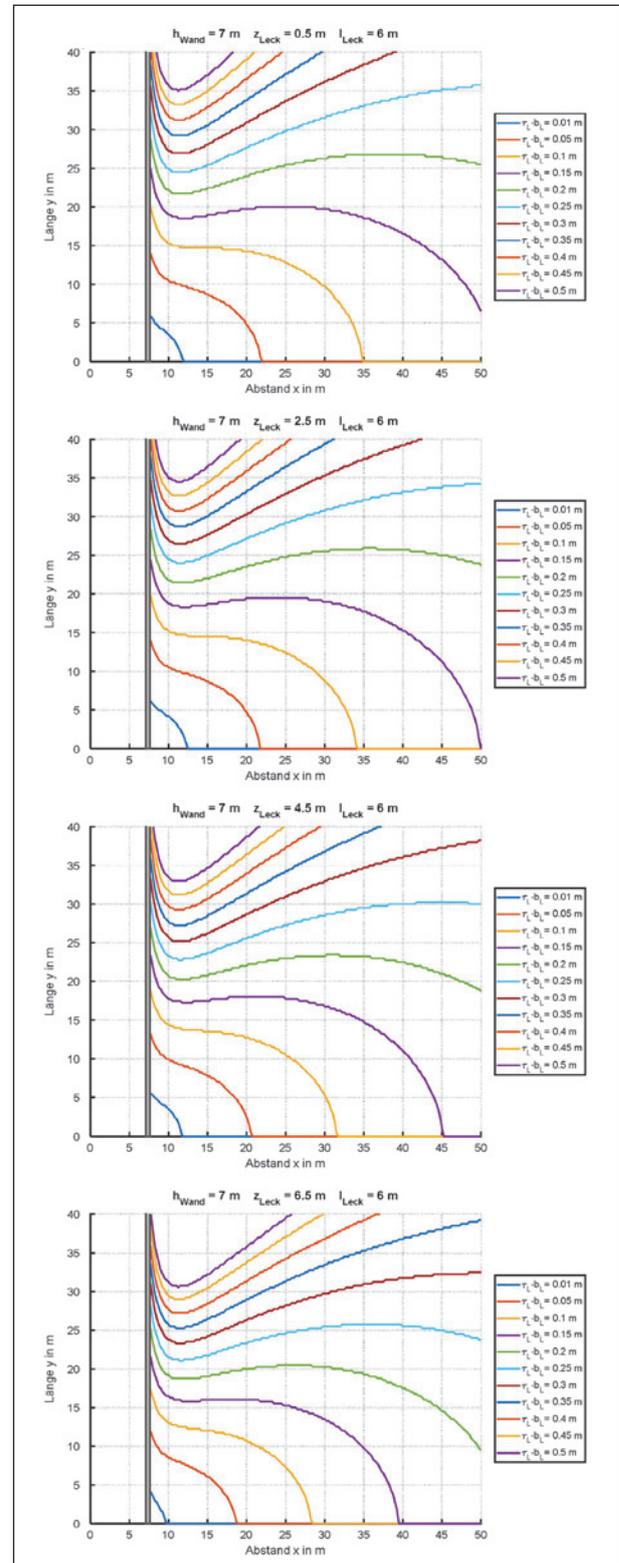


Bild 6.18: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 6 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 7 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m

Höhe Lsw 7 m, Länge Leckage 8 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 6,5 m

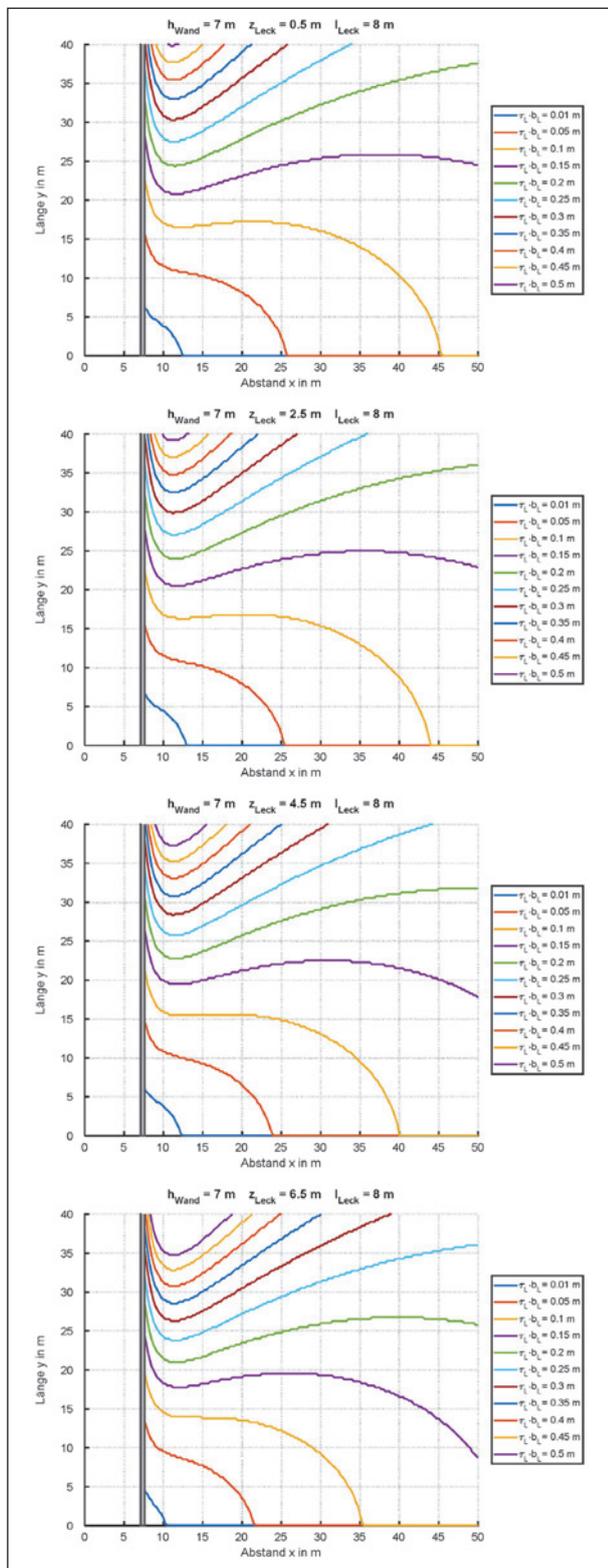


Bild 6.19: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 8 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 7 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m

Höhe Lsw 7 m, Länge Leckage 10 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 6,5 m

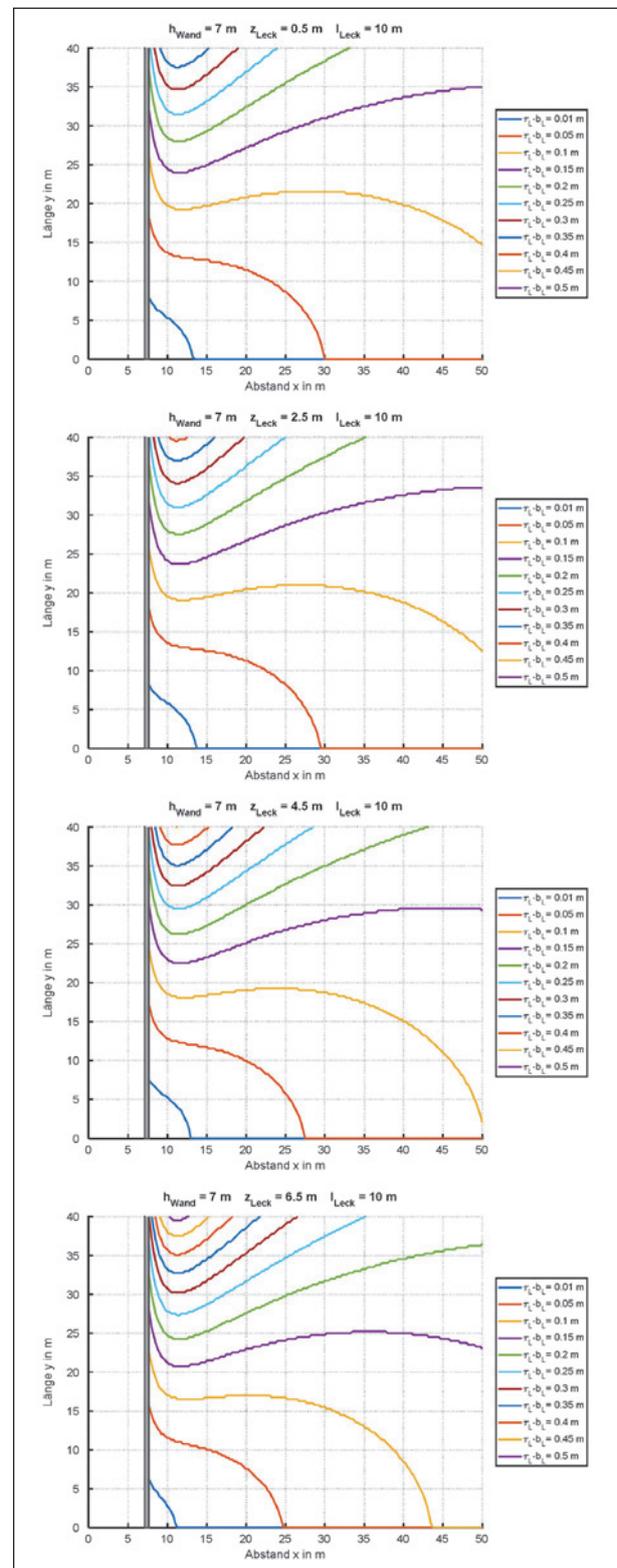


Bild 6.20: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 10 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 7 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m

Höhe Lsw 9 m, Länge Leckage 2 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 8,5 m

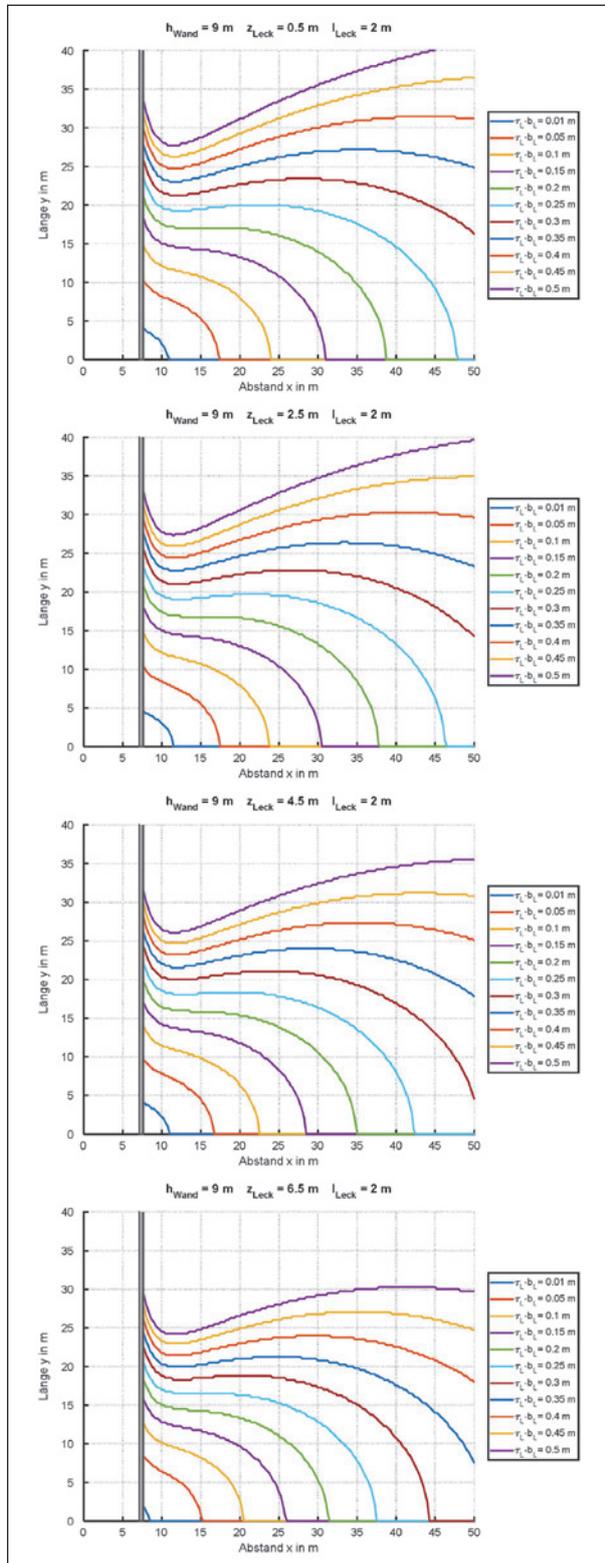


Bild 6.21: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 2 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m

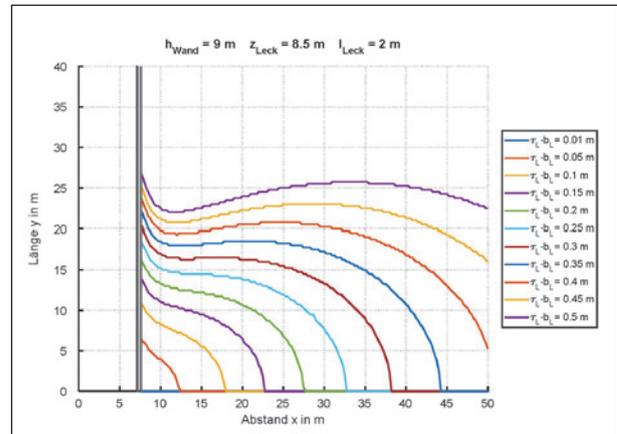


Bild 6.22: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 2 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 8,5 m

Höhe Lsw 9 m, Länge Leckage 4 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 8,5 m

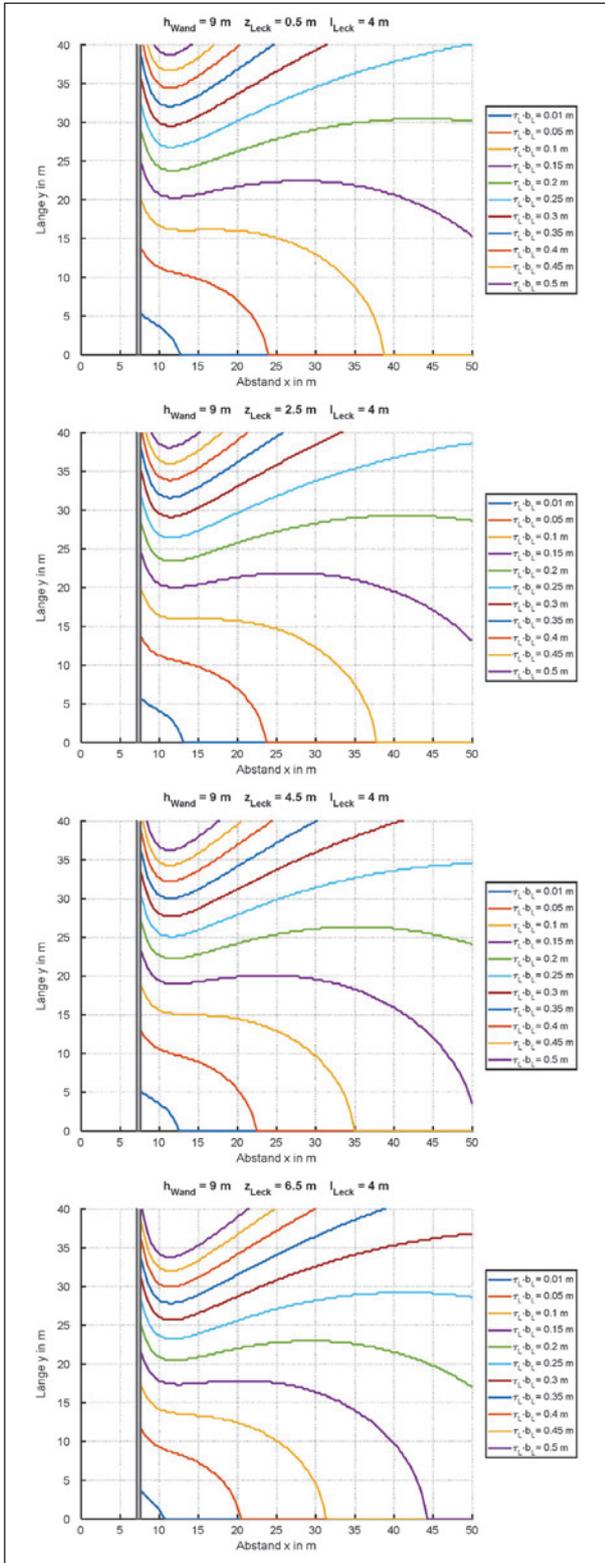


Bild 6.23: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 4 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m

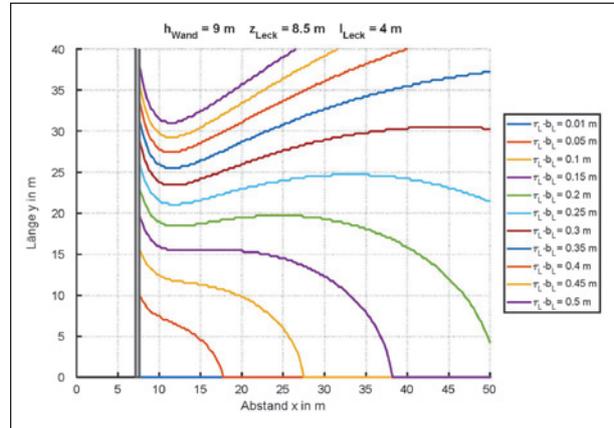


Bild 6.24: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 4 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 8,5 m

Höhe Lsw 9 m, Länge Leckage 6 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 8,5 m

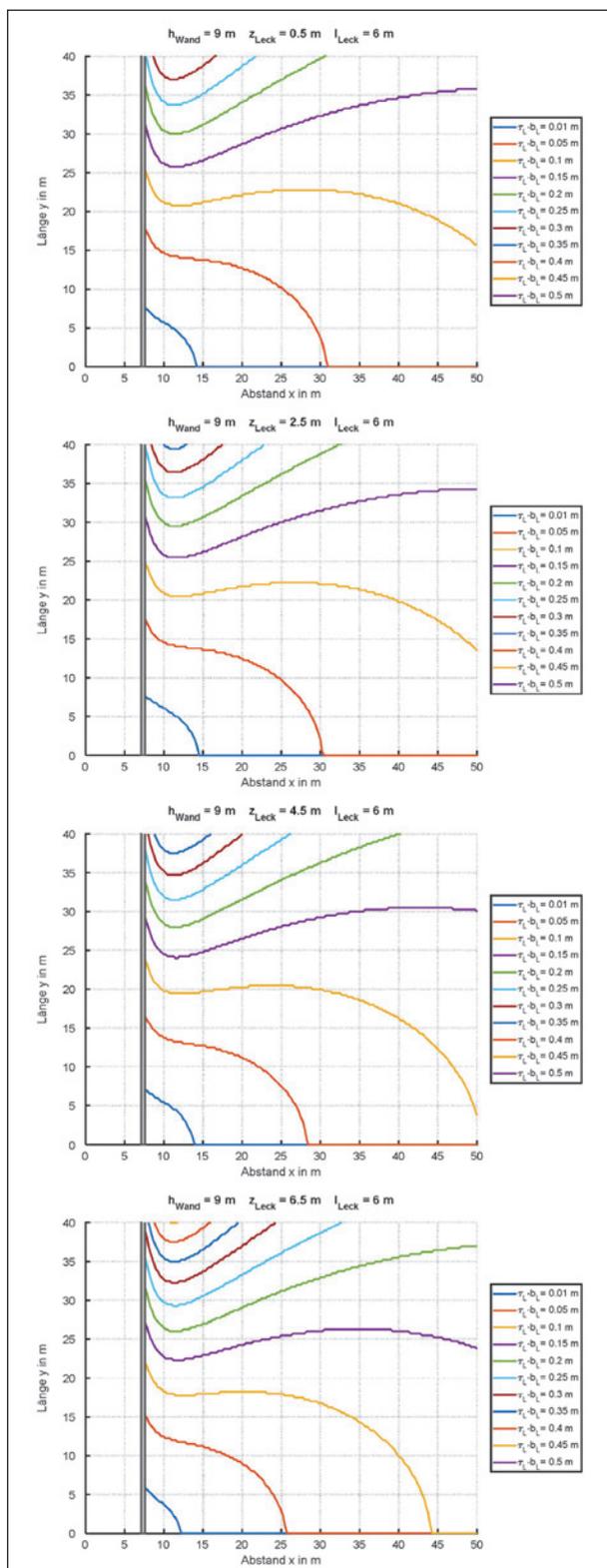


Bild 6.25: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 6 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m

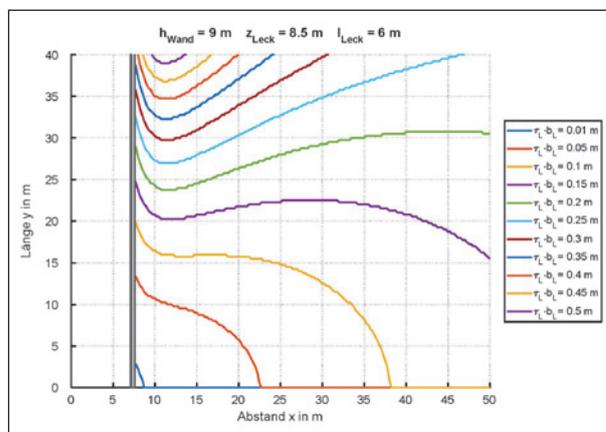


Bild 6.26: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 6 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 8,5 m

Höhe Lsw 9 m, Länge Leckage 8 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 8,5 m

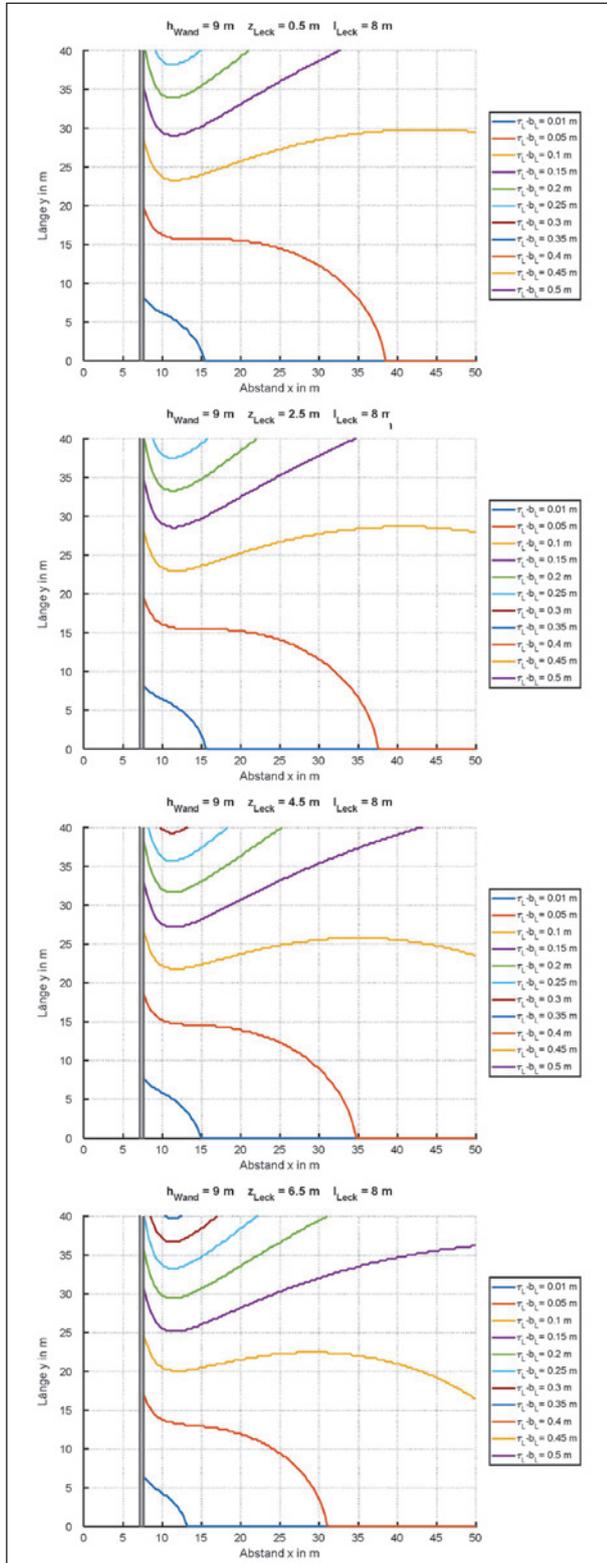


Bild 6.27: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 8 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m

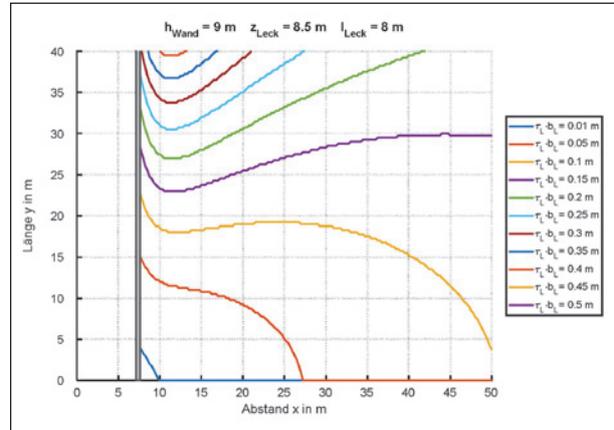


Bild 6.28: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 8 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 8,5 m

Höhe Lsw 9 m, Länge Leckage 10 m,  
Höhe Leckage 0,5 m bis 8,5 m

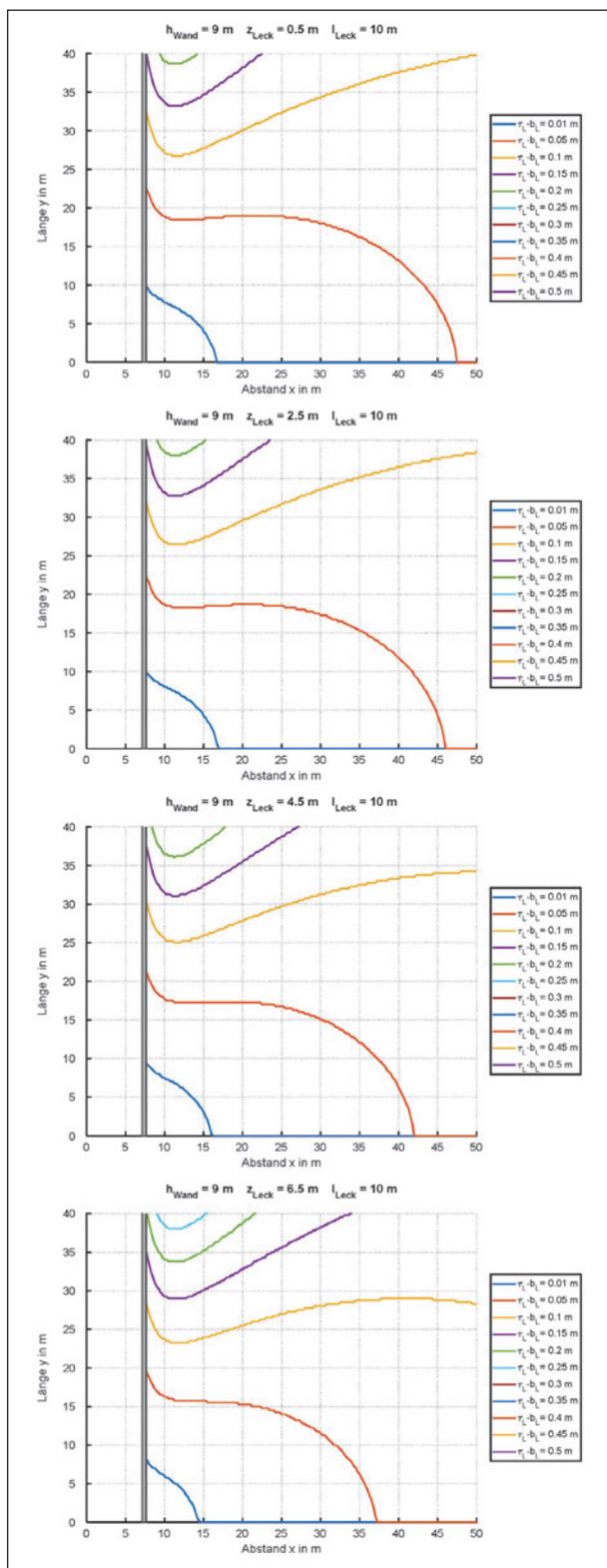


Bild 6.29: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 10 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m

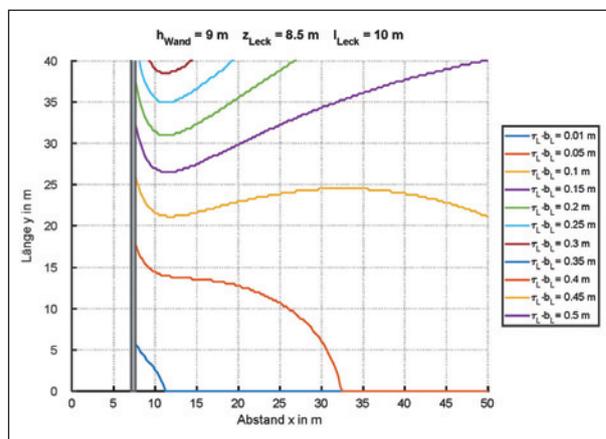


Bild 6.30: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 10 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 8,5 m

### 6.3 Vertikale schlitzförmige Leckagen

Höhe Lsw 3 m bis 9 m,  
Länge Leckage gleich Höhe Lsw

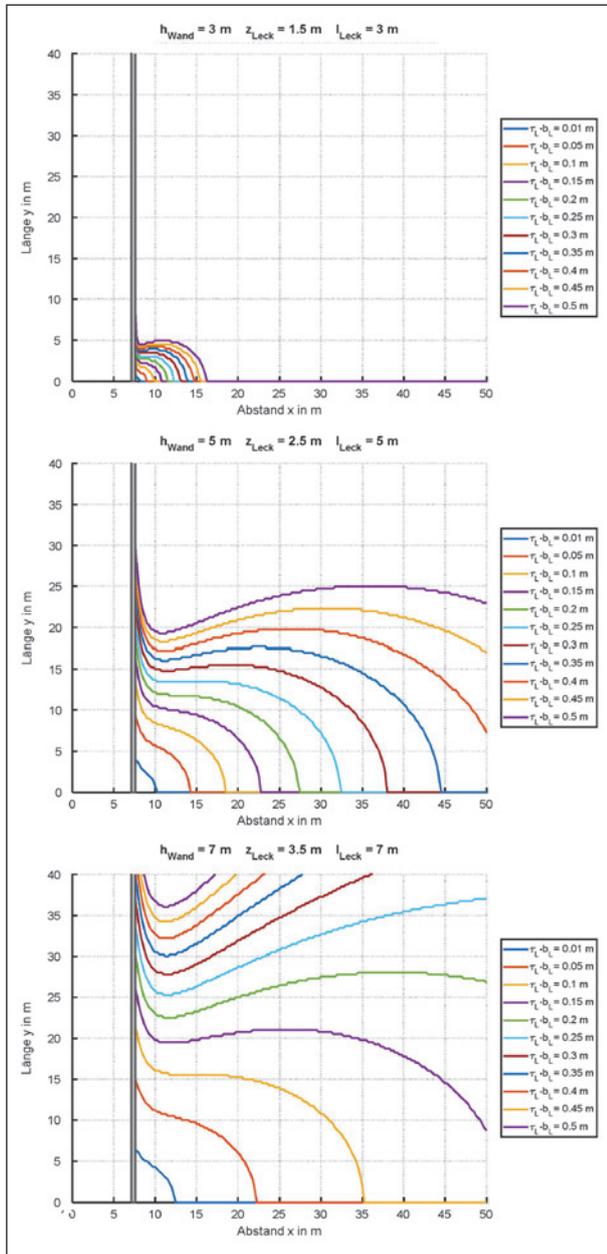


Bild 6.31: Berechneter Einflussradius vertikal über die gesamte Höhe der Lsw verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 3 m bis 7 m (in Draufsicht) und mittlerer Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von  $h_{Wand}/2$

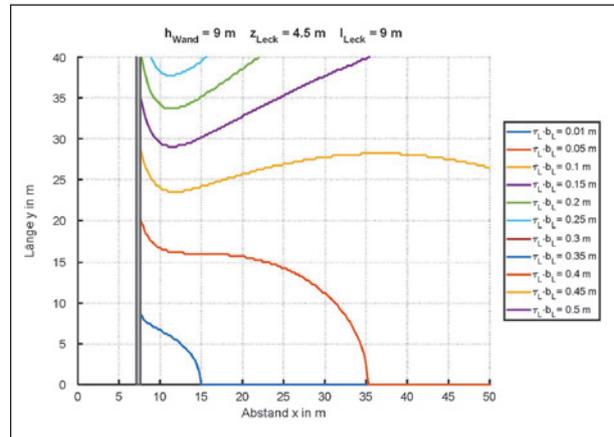


Bild 6.32: Berechneter Einflussradius vertikal über die gesamte Höhe der Lsw verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) und mittlerer Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von  $h_{Wand}/2$

### 6.4 Zusammenfassung Schadenskatalog

Anhand von Bild 6.1 bis Bild 6.32 zeigt sich, dass sich der Einflussradius der betrachteten Leckagen im Allgemeinen vergrößert, wenn sich

- der Transmissionsgrad der Leckage erhöht,
- die Querschnittsfläche der Leckage vergrößert,
- die mittlere Höhe der Leckage verringert und
- die Höhe der Lsw zunimmt.

Hierbei ist jedoch anzumerken, dass sich für Leckagen mit geringer Wirkfläche der Einflussradius vergrößern kann, wenn sich die mittlere Höhe der Leckage der Höhe des Empfängers nähert, auch wenn dies eine Erhöhung der mittleren Höhe der Leckage bedeutet.

Zwischen Leckagen verschiedener Formen sind Parallelen bezüglich ihres Einflussradius erkennbar. Beispielsweise ist der Einflussradius eines vertikalen Schlitzes ähnlich dem eines horizontalen Schlitzes gleicher Ausdehnung, gleicher mittlerer Höhe sowie gleichen Transmissionsgrads. Im Allgemeinen besitzt ein horizontaler Schlitz in x-Richtung einen geringfügig größeren Einflussradius, in

y-Richtung einen geringfügig kleineren Einflussradius als ein vertikaler Schlitz. Auch zwischen runden und schlitzförmigen Leckagen lassen sich Ähnlichkeiten des Einflussradius erkennen, sofern die Schadstellen eine gleiche Wirkfläche sowie die gleiche mittlere Höhe aufweisen.

Unter der beispielhaften Annahme, dass ein maßgeblicher Immissionsort mindestens 25 m von der Mitte des ersten Fahrstreifens entfernt ist, lassen sich folgende pauschalisierte Aussagen treffen:

- Für eine 3 m hohe Lsw kann der Einfluss runder Leckagen mit einer Wirkfläche von weniger als 3 m<sup>2</sup> vernachlässigt werden. Für eine 5 m hohe Lsw reduziert sich die zulässige Wirkfläche auf 0,8 m<sup>2</sup>. Für eine 9 m hohe Lsw darf die Wirkfläche maximal 0,2 m<sup>2</sup> betragen, um vernachlässigbar zu sein. Dies entspricht näherungsweise einem Loch in der Lsw von 0,5 m x 0,5 m.
- Für eine 3 m hohe Lsw kann der Einfluss horizontaler Schlitz einer Länge von bis zu 6 m mit einer Wirkbreite von weniger als 0,5 m vernachlässigt werden. Eine Vergrößerung der Schlitzlänge auf 10 m hat eine Reduzierung der zulässigen Wirkbreite auf 0,3 m zur Folge. Beides entspricht einer zulässigen Wirkfläche des Schlitzes von 3 m<sup>2</sup> (vgl. oben getroffene Aussage zu runden Leckagen).
- Für eine 3 m hohe Lsw kann der Einfluss vertikaler Schlitz einer Länge gleich der Höhe der Lsw mit einer Wirkbreite von weniger als ca. 1 m vernachlässigt werden. Dies entspricht einer Wirkfläche des Schlitzes von 3 m<sup>2</sup> (vgl. oben getroffene Aussage zu runden Leckagen). Eine Vergrößerung der Höhe der Lsw und damit der Schlitzlänge auf 5 m hat eine Reduzierung der zulässigen Wirkbreite auf 0,15 m zur Folge. Dies entspricht einer maximalen Wirkfläche des Schlitzes von 0,75 m<sup>2</sup> (vgl. oben getroffene Aussage zu runden Leckagen).

Unabhängig von den getroffenen pauschalisierten Aussagen, bleibt zu betonen, dass offensichtliche Beschädigungen in Lsw, insbesondere Leckagen, oft einen negativen Eindruck bezüglich der akustischen Wirksamkeit der Lärmschutzeinrichtung bei betroffenen Anwohnern hinterlassen.

## 7 Zusammenfassung

Lärmschutzwände (Lsw) dienen der Abschirmung von Immissionsorten wie beispielsweise Industrie- oder Wohnbebauungen vor unerwünschtem Schall. Von daher ist es von äußerster Wichtigkeit, bei auftretenden Schäden an Lsw unkompliziert eine schnelle Aussage über deren Einfluss auf die akustische Wirksamkeit des Schallschirms an den maßgeblichen Immissionsorten treffen zu können. Innerhalb des vorliegenden Vorhabens wurde daher eine Methode entwickelt, die diesem Zweck dient.

Aufgrund bisher fehlender detaillierter gesamtheitlicher Untersuchungen zu diesem Thema wurden im ersten Abschnitt bereits existierende Publikationen zur Bestimmung der Auswirkung von Bau- bzw. Alterungsschäden auf die akustische Wirksamkeit von Lsw gegenübergestellt und diskutiert. Es zeigte sich, dass eine Vielzahl von Quellen existiert, die sich mit Teilaufgaben des angestrebten Ziels des vorliegenden Vorhabens auseinandersetzt. Die recherchierten Informationen reichen von der möglichen Erstellung von Schadenskatalogen über die akustische Beschreibung von Schadensbildern bis hin zu Methoden zur messtechnischen Bewertung der Schalldämmung sowie der Einfügungsdämmung von Lsw ohne und mit Leckagen in situ und im Labor. Es zeigte sich, dass der Großteil bisheriger Untersuchungen an geometrisch einfach zu beschreibenden Leckageformen, insbesondere runden Löchern sowie horizontalen und vertikalen Schlitz mit zufriedenstellender Genauigkeit erfolgt ist.

Die Schallfeldsimulation an Lsw mit impedanzbelegten Flächen über Boden mit Impedanzdiskontinuität kann durch Anwendung eines komplexen Schallausbreitungsmodells sehr detailliert erfolgen (vgl. Kapitel 2.3.5, [SCHULZE, 2015]). Im Hinblick auf eine Integration der Transmissionsbeschreibung innerhalb der zukünftigen RLS wurde jedoch das bestehende nationale Schallausbreitungsmodell der [RLS 90] implementiert und um die zusätzliche Berücksichtigung eines Transmissionspfades durch die Lsw hindurch erweitert. Dabei wird die auf die Lsw einfallende Zylinderwelle des Verkehrstroms (Linienquelle) hinter der Leckage innerhalb der Lsw in eine Kugelwelle transformiert (Punktschallquelle), deren Schallleistung infolge der Transmission durch die Lsw hindurch eine Minderung erfährt. Das dadurch entwickelte Berechnungsmodell ermöglicht es, auf Basis von Ausdehnung und Transmissionsgrad der Leckage die Leis-

tung der durch die Lsw transmittierten Schallwelle im Verhältnis zur Leistung der über die Oberkante der Lsw gebeugten Schallwelle zu beschreiben. Infolgedessen kann der Einfluss der Leckage auf die immissionsortabhängige Einfügungsdämmung der Lsw ermittelt werden. Durch direkten Vergleich der Leistung von gebeugtem und transmittiertem Schallanteil wurde des Weiteren ein einfaches Kriterium definiert, anhand dessen einfach und schnell eine Aussage zum Einfluss der betrachteten Leckage hinter der Lsw getroffen werden kann.

Es zeigte sich, dass sich hinter der betrachteten Leckage ein kritischer Bereich ausbildet, in welchem die Beschädigung einen relevanten Einfluss auf die akustische Wirksamkeit der Lsw nimmt. Innerhalb dieses Bereichs erhöht sich der Immissions-schalldruckpegel durch das Vorhandensein der Schadstelle in der Lsw gegenüber dem Schalldruckpegel hinter der intakten Wand. Dabei gilt, dass der Einflussradius der Leckage umso größer ist, je höher die Lsw ist, je näher sich die Leckage am Boden befindet und je größer die Wirkfläche (Produkt aus Querschnittsfläche und Transmissionsgrad) der Leckage ist. Durch Vergleich des ermittelten Einflussradius mit einem Bebauungsplan ist es nunmehr möglich, eine Priorisierung der Reparatur von Schadstellen an Lsw auf der Grundlage akustischer Eigenschaften der Lsw vorzunehmen.

In Kapitel 4 fand zuerst eine umfangreiche Analyse der an realen Lsw auftretenden Schäden statt. Anschließend wurden die Schadenstypen hinsichtlich akustischer Relevanz klassifiziert und einer der beiden geometrisch einfach zu beschreibenden Formen rundes Loch und rechteckiger Schlitz zugeordnet. Um den Einfluss dieser Leckageformen auf die akustischen Eigenschaften von Lsw analytisch zu beschreiben, wurde das Berechnungsmodell nach [MECHEL, 1986] implementiert und dessen Umsetzung validiert. Mithilfe dieses Modells kann der spektrale Transmissionsgrad runder und schlitzförmiger Leckagen zuverlässig prognostiziert und anschließend in das zuvor entwickelte Ausbreitungsmodell integriert werden.

In Kapitel 5 erfolgten In-situ-Messungen zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften von Lsw auf Basis des in [DIN EN 1793-5] und [DIN EN 1793-6] beschriebenen Adrienne-Verfahrens. Im ersten Schritt wurde eine Testwand installiert, in die geometrisch exakte runde und schlitzförmige Leckagen eingebracht wurden. Die akustischen In-situ-Messungen der Schalldämmung dienten pri-

mär der Validierung des Berechnungsmodells nach [MECHEL, 1986]. Es zeigte sich, dass die Berechnungsergebnisse des Transmissionsgrads für die untersuchten Leckageformen gut mit den Ergebnissen der In-situ-Messungen in Einklang gebracht werden können. Voraussetzung dafür ist die Anwendung einer definierten Korrektur. Diese berücksichtigt die bei der In-situ-Messung wirkende frequenzabhängige Beleuchtungsfläche der Quell-Empfänger-Geometrie und definiert das Flächenverhältnis zwischen Leckage und intakter Lsw innerhalb der während der Messung beschallten Gesamtfläche (Fresnelzone). Auf Grundlage dieser Korrekturfunktion ist es möglich, in situ gemessene Schalldämmwerte defekter Lsw in das erweiterte Schallausbreitungsmodell zu importieren und die Beeinflussung der Immissionsorte hinter der Lsw durch die Beschädigung zu berechnen. Es wurde aufgezeigt, dass für Leckagen, die im Vergleich zur Beleuchtungsfläche sehr groß sind, keine Korrektur des in situ gemessenen Transmissionsgrads notwendig ist. Anhand von In-situ-Messungen in größerer Entfernung zur Testwand konnte auch das Ausbreitungsmodell selbst validiert werden. Im Rahmen der Mess- und Modellgenauigkeit zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus In-situ-Messung und Schallfeldsimulation.

In einem zweiten Schritt fanden In-situ-Messungen an ausgewählten realen Lsw mit realen Schäden an Autobahnen im Freistaat Sachsen statt. Auch hier konnte das Berechnungsmodell nach [MECHEL, 1986] erfolgreich angewendet werden, um die Ergebnisse der In-situ-Messungen durch Simulation nachzubilden. Jedoch zeigte sich, dass die korrekte Erfassung der materialspezifischen und geometrischen Parameter von Leckagen zur Modellierung des akustischen Verhaltens (z. B. Strömungswiderstand des Absorbermaterials, flächenbezogene Masse von Rückwänden, Folienrückstände, Abmaße unförmiger Beschädigungen) nicht immer problemlos möglich ist.

In Kapitel 6 ist auf Basis des erweiterten Schallausbreitungsmodells ein Schadenskatalog für Beschädigungen an Lsw erstellt worden. Hierbei wurde auf runde und schlitzförmige Leckagen zurückgegriffen, die als grundlegende geometrische Formen zur Beschreibung üblicher Beschädigungen an Lsw herangezogen werden können. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erfolgte die Unterscheidung zwischen horizontalen und vertikalen Schlitten. Um eine akustische Bewertung möglichst vieler Scha-

densarten vornehmen zu können, wurde für runde Leckagen eine akustische Wirkfläche (Produkt aus Querschnittsfläche und Transmissionsgrad), für Schlitzleckagen eine akustische Wirkbreite (Produkt aus Schlitzbreite und Transmissionsgrad) als Katalogparameter eingeführt. Zudem ist die Grenze des akustisch kritischen Bereichs für eine Lsw der Höhe von 3 m bis 9 m sowie variierte Höhe der Leckage visualisiert.

Unter Zuhilfenahme dieses Katalogs ist es nunmehr möglich, bestehende Schäden an Lsw auf Grundlage ihrer geometrischen Form und Position an der Lsw bezüglich ihres Einflusses auf den Immissions-schalldruckpegel hinter dem Schallschirm zu beurteilen. Dies ermöglicht es, eine Priorisierung von Reparaturen an Lsw durchzuführen, die auf einer ausschließlich akustischen Bewertung zugrunde liegt. Des Weiteren kann mittels einer Berechnung mit dem vorgestellten Modell nach [MECHEL, 1986] der Transmissionsgrad von runden und schlitzförmigen Leckagen berechnet werden. Für komplexe, geometrisch schwer zu abstrahierende Leckagen und Beschädigungen ist alternativ eine In-situ-Messung des Transmissionsgrads im Bereich der Leckage an der Lsw möglich. Mithilfe der in Kapitel 5 definierten Korrektur der Beleuchtungsfläche lassen sich die Ergebnisse der In-situ-Messungen in einen Transmissionsgrad umwandeln, der ausschließlich der Leckage zugeordnet werden kann. Ist die Ausdehnung der untersuchten Leckage größer als der Durchmesser der Beleuchtungsfläche, ist eine Korrektur des in situ gemessenen Transmissionsgrads nicht erforderlich. Der auf diesem Weg gewonnene Transmissionsgrad kann in Verbindung mit der Leckagefläche bzw. Leckagebreite unmittelbar herangezogen werden, um die akustische Relevanz der betrachteten Leckage aus dem erstellten Schadenskatalog abzulesen.

## Literatur

- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Statistik des Lärmschutzes an Bundesfernstraßen 2005
- BRAVO, J., M.; URIS, A.; LLINARES, C.; GOMEZLOZANO, V.; ESTELLES, H.: Sound insulation of lightweight partitions with circular apertures with varying overlap. *Acta Acustica united with Acustica*, 2008
- BROWN, A., L.; BURGESS, M., A.: Effect of slits on the performance of roadside timber barriers. *Acoustics Australia*, 1994
- CHEN, K., T.: Study of acoustic transmission through apertures in a wall. *Applied Acoustics*, 1995
- CONTER, M.; HAIDER, M.: Austrian investigation on the influence of sound leakage in noise reducing devices. *Acoustics*, 2008
- DEGAN, G., A.: Acoustic barriers: Performance and experimental measurements. *TecniAcustica*, 2003
- de LEO, A.; MARCOCCI, S.; VANHOOREWEDER, B.: State of the art of noise barriers in CEDR experience. *InterNoise 2016*
- DIN EN 1793-1: Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 1: Produktspezifische Merkmale der Schallabsorption in diffusen Schallfeldern. Juli 2017
- DIN EN 1793-2: Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 2: Produktspezifische Merkmale der Luftschalldämmung in diffusen Schallfeldern. April 2013
- DIN EN 1793-3: Lärmschutzeinrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum. November 1997
- DIN EN 1793-5: Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 5: Produktspezifische Merkmale – In-situ-Werte der Schallreflexion in gerichteten Schallfeldern. Oktober 2016
- DIN EN 1793-6: Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 6: Produktspezifische Merkmale – In-situ-Werte der Luftschalldämmung in gerichteten Schallfeldern. April 2013
- DOWLING, A., P.; HUGHES, I., J.: Sound absorption by a screen with a regular array of slits. *Journal of Sound and Vibration*, 1991
- FHWA, U.S. Department of Transportation: FHWA Traffic Noise Model, Technical Manual, 1998

- Finnish National Road Administration: The effect of openings on the insertion loss of a noise barrier. FinnRa Engineering News No 7, 1997
- GARAI, M.; GUIDORZI, P.: European methodology for testing the airborne sound insulation characteristics of noise barriers in situ: Experimental verification and comparison with laboratory data. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2000
- GARAI, M.; GUIDORZI, P.: Effect of slit-shaped leaks on airborne sound insulation of noise barriers. *InterNoise 2010*
- GOMPERTS, M., C.: The sound insulation of circular and slit-shaped apertures. *Acustica*, 1964
- HADDEN, W., J.; PIERCE, A., D.: Sound diffraction around screens and wedges for arbitrary point source locations. *JASA*, 1981
- HARRISON, C., C.; FYFE, K., R.; CREMERS, L., J.: Insertion loss characteristics of barriers and berms. *Journal of the Canadian Acoustical Association*, 1994
- HOTHERSALL, D., C.; HARRIOT, J., N., B.: Approximate models for sound propagation above multi-impedance plane boundaries, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, No. 2, Feb. 1995
- HUANG, C.-J.; CHEN, C. Y.: Diffracted acoustics fields about circular apertures in soft and hard baffles, *Acta Acustica united with Acustica*, 1999
- ISELE, A.; HÖFKER, G.; NOCKE, C.: In situ measurement of road barriers made of natural stones. *DAGA*, 2009
- LAM, Y., W.: Using Maekawa's chart to calculate finite length barrier insertion loss. *Applied Acoustics*, 1994
- L'ESPERANCE, A.; DAIGLE, J., N., G., A.: Insertion loss of absorbent barriers on ground. *JASA*, 1989
- LIU, P.; CHEN, S.-H.; WU, C.-Y.: Evaluation of effects of noise barrier defects on their noise reduction efficiencies. *Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, 2006
- MAEKAWA, Z.: Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*, 1968
- MARCOCCI, S.: Management of noise barriers in Wallonia. *InterNoise*, 2016
- MECHEL, F., P.: The acoustic sealing of holes and slits in walls. *Journal of Sound and Vibration*, 1986
- MORGAN, P. A.: The acoustic durability of timber noise barriers on England's strategic road network. *TRL*, 2010
- MÖSER, M., MÜLLER, G.: *Taschenbuch der Technischen Akustik*, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004
- NACHTEGAEL, J.; van EEKERT, M.; BEYENS, J.: *In situ meten van akoestische isolatie van geluidsschermen*. Thomas More, 2013
- New Zealand Transport Agency: Noise barrier case study 11. 2013
- OLDHAM, D. J.; ZHAO, X.: Measurement of the sound transmission loss of circular and slit-shaped apertures in rigid walls of finite thickness by intensimetry. *Journal of Sound and Vibration*, 1993
- PARK, H., H.; EOM, H., J.: Acoustic scattering from a rectangular aperture in a thick hard screen. *JASA*, 1997
- PEUTZ, V.; PORADA, W.: Zur Berechnung der Schalldämmung von Schlitzen unter besonderer Berücksichtigung diffuser Schallfelder. *DAGA*, 1978
- PIERCE, A., D.: Diffraction of sound around corners and over wide barriers. *JASA* 5(55), 1974
- PLOVSING, B., KRAGH, J.: *NORD2000: Comprehensive outdoor sound propagation model – Part 1: Propagation in an atmosphere without significant refraction*. *DELTA Acoustics & Vibration Report*, 2001
- RAA: *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen*, Nr. 202. 2008
- RLS 90: *Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen*. Bundesministerium für Verkehr, 1992 (Ausgabe 1990, berichtigte Fassung 1992)

- SAUTER, A.; SOROKA, W., W.: Sound transmission through rectangular slots of finite depth between reverberant rooms. JASA 1970
- SCHULZE, C: Mikrofonarrays zur Bestimmung der Einfügdämpfung an verkürzten Lärmschutzwänden. Technische Universität Dresden, Dissertation, Dezember 2015
- SERIZAWA, H.; HONGO, K.: Evaluation of an acoustic plane wave transmitted through a rectangular hole in a thick hard screen. Wave Motion, 2002
- SGARD, F.; NELISSE, H.; ATALLA, N.: On the modeling of the diffuse field sound transmission loss of finite thickness apertures. JASA, 2007
- TBA Hamburg: Berechnung von Mittelungspegeln des Straßenverkehrslärms
- URIS, A.; BRAVO, J., M.; LLINARES, J.; ESTELLES, H.: The influence of slits on sound transmission through a lightweight partition. Applied Acoustics, 2004
- VDI 2720: Schallschutz durch Abschirmung im Freien. 1997
- WATTS, G.: In situ method for determining the transmission loss of noise barriers. Applied Acoustics, 1997
- WATTS, G.: Effects of sound leakage through noise barriers on screening performance. ICSV, 1999
- WATTS, G.; MORGAN, P.: The use of MLS based methods for characterizing the effectiveness of noise barriers and absorptive road surfaces. InterNoise, 2003
- WILSON, G., P.; SOROKA, W., W.: Approximation to the diffraction of sound by a circular aperture in a rigid wall of finite thickness. JASA 1965
- Wisconsin Department of Transportation: Noise barrier inspection report
- WONG, H., Y.; LI, K., M.: Prediction models for sound leakage through noise barriers. Journal of the Acoustical Society of America, 2000
- ## Bilder
- Bild 2.1: Statistik der Schäden gelistet nach Position und Typ aus [MARCOCCI, 2016]
- Bild 2.2: Räumliche Zuordnung der Schäden aus [MARCOCCI, 2016]
- Bild 2.3: Inspektionsbericht für Lsw des Straßenverkehrsamts von Wisconsin, USA [WISCONSIN REPORT]
- Bild 2.4: Einfügdämpfung einer Lsw in Abhängigkeit von Frequenz und Abstand des Immissionsorts zur Lsw aus [HARRISON, 1994]
- Bild 2.5: Verschlechterung der Einfügdämpfung einer schallharten Lsw in Abhängigkeit vom Abstand des Immissionsorts zur Lsw aus [WATTS, 1999]; durchgezogene Linien: Ergebnisse von BEM-Simulationen; gestrichelte Linien: Ergebnisse von Intensitätsberechnungen; obere Kurven: 3 m hohe Lsw; untere Kurven: 6 m hohe Lsw
- Bild 2.6: Unterteilung der Lsw mit horizontalem Schlitz in drei Teilwände zur Berechnung des gebeugten Schallfelds mittels geometrischer Akustik aus [WONG, 2000]
- Bild 2.7: Berücksichtigung von vier möglichen Ausbreitungspfaden über die Lsw durch Bodenreflexion vor und hinter der Lsw aus [WONG, 2000]
- Bild 2.8: Modellierung einer Leckage der Breite  $D$  innerhalb einer Lsw der Höhe  $H$  aus [LIU, 2006] durch Unterbrechung der Lsw
- Bild 2.9: Einfügdämpfung einer Lsw mit Leckage für verschiedene Breiten  $D$  der Leckage in m in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand zwischen Immissionsort und Leckage in Richtung der Lsw (Abstand von 0 m entspricht Mitte der Leckage) aus [LIU, 2006]
- Bild 2.10: Prinzipdarstellung eines Lsw-Elements in Leichtbauweise

- Bild 2.11: Numerische Modellierung des Biegeverhaltens von Lsw-Elementen als Basis für die Bestimmung der spektralen Schalldämmung der Lsw; Darstellung der ersten und zweiten Eigenfrequenz
- Bild 2.12: Geometrie der Berechnung der Schallausbreitung ohne Lsw
- Bild 2.13: Geometrie zur Berechnung der Schallausbreitung an der Lsw mit zusätzlicher Berücksichtigung der Schalltransmission durch die Lsw
- Bild 2.14: Simulationsergebnisse der spektralen Einfügungsdämmung für verschiedene Geometrien von Lsw in Leichtbauweise mit Berücksichtigung der Schalltransmission sowie maximal erreichbare Einfügungsdämmung ohne Berücksichtigung der Schalltransmission (schwarze Kurve)
- Bild 2.15: Simulationsergebnisse der spektralen Schalldämmung für verschiedene Geometrien von Lsw in Leichtbauweise sowie anzustrebende Mindestschalldämmung (schwarze Kurve)
- Bild 2.16: Mikrofonanordnung zur standardisierten messtechnischen Bestimmung des Schallreflexionsindex  $RI$  und des Schalldämmungsindex  $SI$  an Lsw in situ gemäß [DIN EN 1793-5] und [DIN EN 1793-6]
- Bild 2.17: Prinzipskizze des Messaufbaus zur In-situ-Bestimmung des Schallreflexionsindex von Lsw gemäß [DIN EN 1793-5]; Messung mit Lsw;  $d_{SM} = 1,25$  m;  $d_M = 0,25$  m
- Bild 2.18: Messaufbau zur In-situ-Bestimmung des Schallreflexionsindex von Lsw durch Einsatz des Messsystems Acousti-Adrienne der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH gemäß [DIN EN 1793-5]
- Bild 2.19: Prinzipskizze des Messaufbaus zur In-situ-Bestimmung des Schallreflexionsindex von Lsw gemäß [DIN EN 1793-5]; Messung ohne Lsw (Freifeldmessung)
- Bild 2.20: Prinzipskizze des Messaufbaus zur In-situ-Bestimmung des Schalldämmungsindex von Lsw gemäß [DIN EN 1793-6]; Messung mit Lsw
- Bild 2.21: Rückseitiger Messaufbau zur In-situ-Bestimmung des Schalldämmungsindex von Lsw durch Einsatz des Messsystems AcoustiAdrienne der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH gemäß [DIN EN 1793-6]
- Bild 2.22: Prinzipskizze des Messaufbaus zur In-situ-Bestimmung des Schalldämmungsindex von Lsw gemäß [DIN EN 1793-6]; Messung ohne Lsw (Freifeldmessung)
- Bild 2.23: Auf Basis des Adrienne-Verfahrens in situ bestimmte Einfügungsdämmung einer Lsw mit einer  $25$  cm<sup>2</sup> großen Leckage für verschieden Abstände zwischen Leckage und Immissionsort aus [WATTS, 2003]
- Bild 2.24: Auf Basis des Adrienne-Verfahrens in situ bestimmter spektraler Schalldämmungsindex einer intakten Lsw und einer Lsw mit einem  $11$  mm breiten Schlitz für verschieden Abstände zwischen Leckage und Immissionsort aus [GARAI, 2010]
- Bild 2.25: Auf Basis des Adrienne-Verfahrens in situ bestimmter spektraler Schalldämmungsindex einer intakten Lsw und einer Lsw mit einem Schlitz für verschiedene Schlitzbreiten aus [GARAI, 2010]; Abstand zwischen Leckage und Immissionsort  $250$  mm
- Bild 2.26: Differenz des auf Basis des Adrienne-Verfahrens in situ bestimmten Schalldämmungsindex verschiedener Lsw aus Holz, Holz-Beton und Aluminium gemessen in der Mitte des Paneels und am Übergang zwischen vertikalem Träger und Paneel aus [CONTER, 2008]
- Bild 2.27: Auf Basis des Adrienne-Verfahrens in situ bestimmter spektraler Schalldämmungsindex einer  $3$  m hohen Holz-Lsw unmittelbar sowie in definierten Zeitintervallen nach Fertigung der Lsw aus [MORGAN, 2010]

- Bild 2.28: Auf Basis des Adrienne-Verfahrens in situ bestimmter spektraler Schalldämmungsindex einer Acryl-Lsw im Bereich eines intakten vertikalen Trägers der Lsw sowie an einem vertikalen Träger mit schlitzförmiger Leckage aus [NZTA, 2013]
- Bild 2.29: Gegenüberstellung der durch In-situ-Messung (Intensitätsverfahren) und Labormessung (Hallraum-Verfahren bei Raumtemperatur und bei 40 °C) ermittelten spektralen Schalldämmung einer Lsw aus [WATTS, 1997]
- Bild 2.30: Skizze der fixierten und gelockerten vertikalen Verbindungsleisten an einer Lsw aus [WATTS, 1997]
- Bild 2.31: Vergleich des In-situ-Messverfahrens mit Messungen im Labor mit intakter Lsw und vertikalen Schlitz aus [WATTS, 1997]
- Bild 2.32: Anordnung der Mikrofone für Messung der Schalldämmung in [BROWN, 1994]
- Bild 2.33: Messtechnisch ermittelte spektrale Schalldämmung der Holz-Lsw vor und nach Versiegelung der Fugen der Lsw aus [BROWN, 1994]
- Bild 2.34: Simulationsergebnisse der spektralen Schalldämmung einer Leichtbauwand ohne Schlitz und mit Schlitz unterschiedlicher Länge nach dem Berechnungsmodell aus [GOMPERTS, 1964] aus [URIS, 2004]
- Bild 2.35: Bauakustische Messergebnisse der spektralen Schalldämmung einer Leichtbauwand ohne Schlitz und mit Schlitz unterschiedlicher Länge aus [URIS, 2004]
- Bild 3.1: Prinzipskizze einer Fahrbahn nach dem Regelquerschnitt RQ 36 aus den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen [RAA] ergänzt um vier Quellpositionen ( $Q_1$  ist primäre Quellposition), eine Lsw und zwei primäre Empfängerpositionen
- Bild 3.2: Prinzipskizze der innerhalb der Schallfeldsimulationen berücksichtigten Quell- und Empfängerpositionen entlang der Lsw in Draufsicht; Grau: Straße mit Quellpositionen  $Q_i$ ; Grün: Lsw; beige: Fläche mit Empfängerpositionen  $E_k$
- Bild 3.3: Skizze zur Beschreibung der geometrischen Größen zur Ermittlung des Schirmwerts  $z_{i,k}$  der Lsw zwischen Quelle  $Q_i$  und Empfänger  $E_k$
- Bild 3.4: Nach [RLS 90] berechnete Einfügungsdämpfung einer 9 m hohen Lsw ohne Transmission in 2,8 m Höhe über dem Boden in der Draufsicht; gelbe Markierung: gültiger Bereich der Immissionsorte
- Bild 3.5: Nach [RLS 90] berechnete Boden- und Meteorologiedämpfung in der Seitenansicht einer gedachten 9 m hohen Lsw
- Bild 3.6: Nach [RLS 90] berechnete Einfügungsdämpfung einer 3 m bis 9 m hohen Lsw ohne Transmission in 2,8 m Höhe über dem Boden in der Draufsicht der Lsw
- Bild 3.7: Nach [RLS 90] berechnete Einfügungsdämpfung einer 3 m bis 9 m hohen Lsw ohne Transmission in der Seitenansicht der Lsw
- Bild 3.8: Nach [RLS 90] berechnete Pegeländerung durch Abstand und Luftabsorption in der Seitenansicht einer gedachten 9 m hohen Lsw
- Bild 3.9: Nach [RLS 90] berechnetes Abschirmmaß einer 9 m hohen Lsw in der Seitenansicht der Lsw
- Bild 3.10: Skizze der berücksichtigten Pfade bei der Beschreibung der Schallausbreitung von Quelle  $Q_i$  zum Empfänger  $E_k$ ; Gelb: Schallausbreitung durch Schallbeugung über die Oberkante der Lsw; Rot: Schallausbreitung durch Transmission durch jedes  $j$ -te Segment der Lsw
- Bild 3.11: Skizze zur Unterteilung des Schallausbreitungspfads mit Transmission durch die Lsw (in Seitenansicht) in drei Abschnitte; a) Strecke von der Quelle zur Mitte der Vorderseite des  $j$ -ten Segments der Lsw; b) Abschnitt der Transmission durch das  $j$ -te Segment der Lsw; c) Strecke von der Mitte der Rückseite des  $j$ -ten Segments der Lsw zum Empfänger

- Bild 3.12: Definition des akustisch kritischen Bereichs hinter der Leckage innerhalb der Lsw
- Bild 3.13: In 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Gesamtbedingung  $GB$  in der Draufsicht von 9 m hoher Lsw mit 0,5 m<sup>2</sup> großer Leckage mit  $\tau = 0,4$ ; Blau: Grenze des kritischen Bereichs mit  $GB = 0$  symmetrisch um Leckage hinter Lsw
- Bild 3.14: In 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Gesamtbedingung  $GB$  in der Draufsicht von 9 m hoher Lsw mit 0,5 m<sup>2</sup> großer Leckage mit  $\tau = 0,7$ ; Blau: Grenze des kritischen Bereichs mit  $GB = 0$  symmetrisch um Leckage hinter Lsw
- Bild 3.15: In 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Gesamtbedingung  $GB$  in der Draufsicht von 9 m hoher Lsw mit 0,5 m<sup>2</sup> großer Leckage mit  $\tau = 1,0$ ; Blau: Grenze des kritischen Bereichs mit  $GB = 0$  symmetrisch um Leckage hinter Lsw
- Bild 3.16: In 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Gesamtbedingung  $GB$  in der Draufsicht von 3 m hoher Lsw mit 0,5 m<sup>2</sup> großer Leckage mit  $\tau = 1,0$ ; Blau: Grenze des kritischen Bereichs mit  $GB = 0$  symmetrisch um Leckage hinter Lsw
- Bild 3.17: In 2,8 m Höhe über dem Boden berechnete Gesamtbedingung  $GB$  in der Draufsicht von 6 m hoher Lsw mit 0,5 m<sup>2</sup> großer Leckage mit  $\tau = 1,0$ ; Blau: Grenze des kritischen Bereichs mit  $GB = 0$  symmetrisch um Leckage hinter Lsw
- Bild 4.1: Prozentuale Verkaufszahlen eines einzelnen Herstellers von Lsw in den Jahren 2007 bis 2016 aufgeschlüsselt nach Material
- Bild 4.2: Aufprall-Unfallschaden an Aluminium-Lsw (Quelle: BMVI)
- Bild 4.3: Unfallschaden mit Brand an Aluminium-Lsw (Quelle: BMVI)
- Bild 4.4: Großflächige Leckage durch fehlende Kassetten in Aluminium-Lsw (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)
- Bild 4.5: Schlitzförmige Leckage durch Korrosion an Aluminium-Lsw (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)
- Bild 4.6: Schlitzförmige Leckage unterhalb des Fundaments von Aluminium-Lsw durch Erdbauschaden (Quelle: BMVI)
- Bild 4.7: Schlitzförmige Leckage zwischen Aluminium-Lsw und Fundament durch fehlende Bodenabschlussleiste (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)
- Bild 4.8: Schlitzförmige Leckagen zwischen Aluminium-Lsw und Fundament (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)
- Bild 4.9: Schlitzförmige Leckagen zwischen Aluminium-Lsw und Fundament (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)
- Bild 4.10: Schlitzförmige Leckage zwischen einzelnen Kassetten einer Aluminium-Lsw (Quelle: BMVI)
- Bild 4.11: Vertikale schlitzförmige Leckage an Aluminium-Lsw durch lose Abdeckung (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)
- Bild 4.12: Vertikale Undichtheit durch thermische Verformung an Aluminium-Lsw (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)
- Bild 4.13: Horizontale schlitzförmige Leckage durch fehlende Bodenabschlussleiste an Holz-Lsw (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)
- Bild 4.14: Vertikale schlitzförmige Leckage mangelhafte Montage oder thermische Verformung infolge von Witterungsprozessen an Holz-Lsw (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)
- Bild 4.15: Löcher in Dämmmaterialplatte an Holz-Lsw infolge von mechanischer Krafteinwirkung (Quelle: BMVI)
- Bild 4.16: Löcher in Dämmmaterialplatte an Holz-Lsw infolge von mechanischer Krafteinwirkung
- Bild 4.17: Fehlende Dichtung zwischen Elementen von Beton-Lsw (Quelle: BMVI)

- Bild 4.18: Riss in Fundament von Beton-Lsw (akustische Signifikant eher vernachlässigbar) (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)
- Bild 4.19: Alterungsbedingter Verfall an Beton-Lsw (Quelle: Walloon Road Administration, Belgien)
- Bild 4.20: Schäden an Vorsatzschale von Beton-Lsw (aus Einkornbeton) infolge von Witterungsprozessen oder mechanischer Krafteinwirkung (Quelle: BMVI)
- Bild 4.21: Schäden an Vorsatzschale von Beton-Lsw infolge von Witterungsprozessen oder mechanischer Krafteinwirkung (Quelle: BMVI)
- Bild 4.22: Schäden an Vorsatzschale von Beton-Lsw infolge von Witterungsprozessen oder mechanischer Krafteinwirkung (Quelle: www.tageblatt.de)
- Bild 4.23: Schäden an Vorsatzschale von Beton-Lsw infolge von Witterungsprozessen oder mechanischer Krafteinwirkung
- Bild 4.24: Langgestreckter Riss an transparenter Lsw
- Bild 4.25: Netzartige Risse mit Loch in transparenter Lsw
- Bild 4.26: Schlitzförmige Leckage zwischen transparenter Lsw und Fahrweg auf Brücke durch fehlende Bodenabschlussleiste
- Bild 4.27: Schlitzförmige Leckage zwischen Gabionen aus [ISELE, 2009]; zwischen Stein-Schüttungen muss sich für ausreichend hohes Schalldämmmaß ein Kern aus Beton befinden (schraffierte Fläche)
- Bild 4.28: Skizzierter Querschnitt einer Wand mit runder Leckage aus [MECHEL, 1986]; Leckage mit der Länge  $d$  und dem Durchmesser  $2a$  ist mit isotropem und homogenem Absorbermaterial mit Fortpflanzungskonstante  $\Gamma_{an}$  und Schallkennimpedanz  $Z_{an}$  gefüllt; Leckage ist mit zwei Abschlusskappen mit den flächenbezogenen Massen  $m_1$  und  $m_2$  verschlossen
- Bild 4.29: Skizzierter Querschnitt einer Wand mit runder Leckage aus [MECHEL, 1986]; Unterteilung des Schallfelds in einzelne Schallfeldkomponenten
- Bild 4.30: Spektrale Schalldämmung für runde Leckage ohne Absorberfüllung und ohne Abschlusskappe für verschiedene Geometriefaktoren  $A$  berechnet nach [MECHEL, 1986]
- Bild 4.31: Spektrale Schalldämmung für runde Leckage mit Absorberfüllung ( $X = 1$ ) und mit Abschlusskappe ( $M = 4$ ) für verschiedene Geometriefaktoren  $A$  berechnet nach [MECHEL, 1986]
- Bild 4.32: Spektrale Schalldämmung für runde Leckage mit fester Geometrie ( $A = 0,1$ ) und ohne Abschlusskappe für verschiedene Absorbermaterialien  $X$  berechnet nach [MECHEL, 1986]
- Bild 4.33: Spektrale Schalldämmung für runde Leckage mit fester Geometrie ( $A = 0,1$ ) und mit Absorberfüllung ( $X = 0,5$ ) für Abschlusskappen mit verschiedener flächenbezogener Masse  $M$  berechnet nach [MECHEL, 1986]
- Bild 4.34: Skizzierte Querschnitte einer Wand mit schlitzförmiger Leckage aus [MECHEL, 1986]; Schalleinfallswinkel  $\theta_i$  und  $\phi_i$
- Bild 4.35: Spektrale Schalldämmung für schlitzförmige Leckage ohne Absorberfüllung und ohne Abschlusskappe für senkrechten Schalleinfall für verschiedene Geometriefaktoren  $A$  berechnet nach [MECHEL, 1986]
- Bild 4.36: Spektrale Schalldämmung für schlitzförmige Leckage mit Absorberfüllung ( $X = 2$ ) und ohne Abschlusskappe für senkrechten Schalleinfall für verschiedene Geometriefaktoren  $A$  berechnet nach [MECHEL, 1986]
- Bild 4.37: Spektrale Schalldämmung für schlitzförmige Leckage mit festem Geometriefaktor ( $A = 0,1$ ) und ohne Abschlusskappe für schrägen Schalleinfall unter Winkel von  $45^\circ$  für verschiedene Absorberfüllungen  $X$  berechnet nach [MECHEL, 1986]

- Bild 4.38: Spektrale Schalldämmung für schlitzförmige Leckage mit festem Geometriefaktor ( $A = 0,1$ ) und ohne Absorberfüllung für schrägen Schalleinfall unter Winkel von  $45^\circ$  für Abschlusskappen mit verschiedener flächenbezogener Masse  $M$  berechnet nach [MECHEL, 1986]
- Bild 5.1: Skizze der Test-Lsw mit Leckagefenstern (Rot) in drei unterschiedlichen Höhen
- Bild 5.2: Skizze der eingesetzten Masken mit Leckagen
- Bild 5.3: Aufgebaute intakte Test-Lsw mit geschlossenen Leckagefenstern
- Bild 5.4: Masken mit Leckagen
- Bild 5.6: Vorderseitiger Prüfaufbau für Messung an Test-Lsw mit Quelle
- Bild 5.7: Rückseitiger Prüfaufbau für Messung an Test-Lsw mit Mikrofongitter und zwei Einzelmikrofonen
- Bild 5.8: Rückseitiger Prüfaufbau für Messung an Test-Lsw mit Mikrofongitter in drei unterschiedlichen Höhen
- Bild 5.9: Schalldämmungsindex der intakten Wand als Funktion der Terzmittenfrequenz; Blau: aus Messung; Rot: aus Berechnung unterhalb der Koinkidenz-frequenz  $f_c \approx 1.300$  Hz
- Bild 5.10: Gemessener Schalldämmungsindex der intakten Test-Lsw als Funktion der Terzmittenfrequenz; mit Adrienne-Zeitfenster von 7,9 ms bewertet und über alle Mikrofone des Mikrofongitters gemittelt; Rot: obere Messposition; Blau: mittlere Messposition; Grün: untere Messposition
- Bild 5.11: Gemessener Schalldämmungsindex der Test-Lsw mit horizontalem Schlitz als Funktion der Terzmittenfrequenz; mit Adrienne-Zeitfenster von 7,9 ms bewertet und über alle Mikrofone des Mikrofongitters gemittelt; Rot: obere Messposition; Blau: mittlere Messposition; Grün: untere Messposition
- Bild 5.12: Gemessener Schalldämmungsindex der Test-Lsw mit vertikalem Schlitz als Funktion der Terzmittenfrequenz; mit Adrienne-Zeitfenster von 7,9 ms bewertet und über alle Mikrofone des Mikrofongitters gemittelt; Rot: obere Messposition; Blau: mittlere Messposition; Grün: untere Messposition
- Bild 5.13: Gemessener Schalldämmungsindex der Test-Lsw mit rundem Loch als Funktion der Terzmittenfrequenz; mit Adrienne-Zeitfenster von 7,9 ms bewertet und über alle Mikrofone des Mikrofongitters gemittelt; Rot: obere Messposition; Blau: mittlere Messposition; Grün: untere Messposition
- Bild 5.14: Gemessener Schalldämmungsindex der Test-Lsw ohne Leckage-Einsatz als Funktion der Terzmittenfrequenz; mit Adrienne-Zeitfenster von 7,9 ms bewertet und über alle Mikrofone des Mikrofongitters gemittelt; Rot: obere Messposition; Blau: mittlere Messposition; Grün: untere Messposition
- Bild 5.15: Rotationsellipsoid mit Empfänger (E) und Quelle (Q) in dessen Brennpunkten; D: Distanz zwischen Quelle und Empfänger; R: Entfernung zwischen Quelle und Empfänger über Umfang der Ellipse
- Bild 5.16: Beleuchtungsfläche auf Basis des Fresnelzonenmodells; schwarz: berechnet mit verschiedenen  $\Delta D$  von  $\lambda/12$  bis  $\lambda/3$ ; Blau: aus Messung
- Bild 5.17: Beleuchtungsfläche  $S_{Seg}$ , geometrische Leckagenfläche  $S_{Leck,geom}$  und zu betrachtende Leckagenfläche  $S_{Leck}$  für zwei Fälle bei runden Leckagen
- Bild 5.18: Beleuchtungsfläche  $S_{Seg}$ , geometrische Leckagenfläche  $S_{Leck,geom}$  und zu betrachtende Leckagenfläche  $S_{Leck}$  für drei Fälle bei schlitzförmigen Leckagen
- Bild 5.19: Schalldämmindex mit und ohne runder Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung in mittlerer Position; Rot: Wand mit Leckage aus Messung in mittlerer Position; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation
- Bild 5.20: Schalldämmindex der Wand mit und ohne horizontaler schlitzförmiger Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung in mittlerer Position; Rot: Wand mit Leckage aus Messung in mittlerer Position; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation

- Bild 5.21: Schalldämmindex mit und ohne runder Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung in unterer Position; Rot: Wand mit Leckage aus Messung in unterer Position; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation
- Bild 5.22: Schalldämmindex mit und ohne horizontaler schlitzförmiger Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung in unterer Position; Rot: Wand mit Leckage aus Messung in unterer Position; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation
- Bild 5.23: Schalldämmindex mit und ohne runder Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung in oberer Position; Rot: Wand mit Leckage aus Messung in oberer Position; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation
- Bild 5.24: Schalldämmindex mit und ohne horizontaler schlitzförmiger Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung in oberer Position; Rot: Wand mit Leckage aus Messung in oberer Position; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation
- Bild 5.25: Mittelungspegel bei Freifeldausbreitung ausgehend von einer Punktschallquelle in Draufsicht
- Bild 5.26: Mittelungspegel durch Beugung über die Oberkante einer 3,30 m hohen Lsw ohne Transmission in Draufsicht mit Punktschallquelle
- Bild 5.27: Mittelungspegel durch Transmission durch runde Leckage in Lsw unendlicher Ausdehnung in Draufsicht mit Punktschallquelle
- Bild 5.28: Mittelungspegel durch Überlagerung von Beugung über Oberkante der Lsw und Transmission durch runde Leckage mit Punktschallquelle
- Bild 5.29: Gesamtbedingung  $GB$  für runde Leckage in Test-Lsw mit Punktschallquelle
- Bild 5.30: Einfügungsdämmung  $D_E$  der intakten Wand mit Punktschallquelle
- Bild 5.31: Einfügungsdämmung  $D_E$  der Wand mit Leckage mit Punktschallquelle
- Bild 5.32: Einfluss der runden Leckage auf das Einfügungsdämmungsmaß  $\Delta D_E$
- Bild 5.33: Gemessenes Einfügungsdämmungsmaß der Test-Lsw in einem Abstand von 2 m; Blau: intakte Wand; Rot: Wand mit runder Leckage
- Bild 5.34: Gemessenes Einfügungsdämmungsmaß der Test-Lsw in einem Abstand von 4 m; Blau: intakte Wand; Rot: Wand mit runder Leckage
- Bild 5.35: Gesamtbedingung  $GB$  für runde Leckage in Test-Lsw mit Linienschallquelle in Höhe der Leckage; Lsw bei  $x = 1$  m
- Bild 5.36: Gesamtbedingung  $GB$  für runde Leckage in Lsw mit Linienschallquelle im ursprünglichen Ausbreitungsmodell
- Bild 5.37: MP 1: Loch mit Rissen in Glas-Lsw
- Bild 5.38: MP 2: Risse in Glas-Lsw
- Bild 5.39: MP 3: Spalt in Rückwand von Holz-Lsw
- Bild 5.40: MP 4-1: verbrannte Vorderseite, fehlender Absorber und horizontaler Spalt in Rückwand von Aluminium-Lsw
- Bild 5.41: MP 4-2: verbrannte Vorderseite, fehlender Absorber und Rückseite von Aluminium-Lsw intakt
- Bild 5.42: MP 4-3: teilweise fehlende vorderseitige Aluminium-Schale, beschädigter Absorber und Rückwand von Aluminium-Lsw intakt
- Bild 5.43: MP 4-4: teilweise fehlende vorderseitige Aluminiumschale, teilweise fehlender Absorber und Rückwand von Aluminium-Lsw intakt
- Bild 5.44: In-situ-Messergebnis an MP 1 (Glas-Lsw) mit und ohne runde Leckage;  $DL_{SI,intakt} = 28,5$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 27,3$  dB
- Bild 5.45: In-situ-Messergebnis an MP 2 (Glas-Lsw) mit und ohne Risse;  $DL_{SI,intakt} = 12,3$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 10,1$  dB
- Bild 5.46: In-situ-Messergebnis an MP 3 (Holz-Lsw) mit und ohne Spalt in der Rückwand;  $DL_{SI,intakt} = 25,0$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 17,6$  dB

- Bild 5.47: In-situ-Messergebnis an MP 4-1 (Aluminium-Lsw) mit und ohne fehlenden Absorber und Vorderseite sowie mit Spalt in der Rückwand;  $DL_{SI,intakt} = 26,3$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 14,6$  dB
- Bild 5.48: In-situ-Messergebnis an MP 4-2 (Aluminium-Lsw) mit und ohne fehlenden Absorber bei intakter Rückwand;  $DL_{SI,intakt} = 26,3$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 18,0$  dB
- Bild 5.49: In-situ-Messergebnis an MP 4-3 (Aluminium-Lsw) mit und ohne beschädigten Absorber bei intakter Rückwand;  $DL_{SI,intakt} = 26,3$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 24,6$  dB
- Bild 5.50: In-situ-Messergebnis an MP 4-4 (Aluminium-Lsw) mit und ohne etwa zur Hälfte fehlender Vorderseite und Absorber;  $DL_{SI,intakt} = 26,3$  dB;  $DL_{SI,Leck} = 23,9$  dB
- Bild 5.51: Schalldämmindex der Glas-Lsw (MP 1) mit und ohne runder Leckage; Blau: intakte Wand aus Messung; Rot: Wand mit Leckage aus Messung; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation; Simulationsparameter:  $r_{Leck} = 45$  mm,  $\rho_{AK} = 1,0$  g/cm<sup>3</sup>,  $d_{AK} = 0,5$  mm
- Bild 5.52: Schalldämmindex der Holz-Lsw (MP 3) mit und ohne vertikaler schlitzförmiger Leckage mit Absorptionsfüllung; Blau: intakte Wand aus Messung; Rot: Wand mit Leckage aus Messung; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation; Simulationsparameter:  $b_{Leck} = 10$  mm,  $l_{Leck} = 1$  m,  $\Xi_{Abs} = 10$  kPa/s<sup>2</sup>
- Bild 5.53: Schalldämmindex der Aluminium-Lsw (MP 4-1) mit und ohne horizontaler schlitzförmiger Leckage und fehlendem Absorptionsmaterial; Blau: intakte Wand aus Messung; Rot: Wand mit Leckage aus Messung; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation; Simulationsparameter:  $b_{Leck} = 1$  mm,  $l_{Leck} = 1,8$  m
- Bild 5.54: Schalldämmindex der Aluminium-Lsw (MP 4-2) mit und ohne fehlendem Absorptionsmaterial bei intakter Rückwand; Blau: intakte Wand aus Messung; Rot: Wand mit Leckage aus Messung; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation; Simulationsparameter:  $r_{Leck} > r_{Fresnel}$ ,  $\rho_{AK} = 7.850$  kg/m<sup>3</sup>,  $d_{AK} = 0,25$  mm
- Bild 5.55: Schalldämmindex der Aluminium-Lsw (MP 4-3) mit und ohne Beschädigung des Absorptionsmaterials bei intakter Rückwand; Blau: intakte Wand aus Messung; Rot: Wand mit Leckage aus Messung; Orange: Wand mit Leckage aus Simulation; Simulationsparameter:  $h_{Leck} = 180$  mm,  $b_{Leck} = 160$  mm,  $\Xi_{Abs} = 5$  kPa/s<sup>2</sup>
- Bild 6.1: Berechneter Einflussradius runder Leckagen verschiedener Wirkfläche  $\tau_L \cdot S_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 3 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 1,5 m und 2,5 m
- Bild 6.2: Berechneter Einflussradius runder Leckagen verschiedener Wirkfläche  $\tau_L \cdot S_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 5 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m und 4,5 m
- Bild 6.3: Berechneter Einflussradius runder Leckagen verschiedener Wirkfläche  $\tau_L \cdot S_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 7 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m
- Bild 6.4: Berechneter Einflussradius runder Leckagen verschiedener Wirkfläche  $\tau_L \cdot S_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m
- Bild 6.5: Berechneter Einflussradius runder Leckagen verschiedener Wirkfläche  $\tau_L \cdot S_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 8,5 m
- Bild 6.6: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 2 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 3 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 1,5 m und 2,5 m
- Bild 6.7: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 4 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 3 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 1,5 m und 2,5 m



- Bild 6.22: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 2 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 8,5 m
- Bild 6.23: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 4 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m
- Bild 6.24: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 4 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 8,5 m
- Bild 6.25: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 6 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m
- Bild 6.26: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 6 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 8,5 m
- Bild 6.27: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 8 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m
- Bild 6.28: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 8 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 8,5 m
- Bild 6.29: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 10 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 0,5 m, 2,5 m, 4,5 m und 6,5 m
- Bild 6.30: Berechneter Einflussradius horizontal verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  von 10 m mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) für mittlere Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von 8,5 m
- Bild 6.31: Berechneter Einflussradius vertikal über die gesamte Höhe der Lsw verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 3 m bis 7 m (in Draufsicht) und mittlerer Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von  $h_{Wand}/2$
- Bild 6.32: Berechneter Einflussradius vertikal über die gesamte Höhe der Lsw verlaufender schlitzförmiger Leckagen der Länge  $l_{Leck}$  mit verschiedener Wirkbreite  $\tau_L \cdot b_L$  in Lsw der Höhe  $h_{Wand}$  von 9 m (in Draufsicht) und mittlerer Höhe der Leckage  $z_{Leck}$  von  $h_{Wand}/2$

## Tabellen

- Tab. 2.1: Gliederung von Schäden an Lsw aus [MARCOCCI, 2016]
- Tab. 2.2: Gliederung von Schäden an Lsw aus [MARCOCCI, 2016], Fortsetzung
- Tab. 4.1: Statistik der verwendeten Materialien für den Bau neuer Lsw in Deutschland von 1978 bis 2005 aus [BMVBS, 2005]
- Tab. 4.2: Übersetzter Schadenskatalog für Metall-Lsw aus [MARCOCCI, 2016]
- Tab. 4.3: Übersicht der möglichen Schäden in den verschiedenen Typen von Lsw
- Tab. 4.4: Abstrahierung der Geometrie der möglichen Schäden in den verschiedenen Typen von Lsw
- Tab. 4.5: Beispiel für Schadenskatalog zur Dokumentation akustisch relevanter Schäden an Aluminium-Lsw in Anlehnung an [MARCOCCI, 2016]
- Tab. 5.1: Einfügungsdämmungsmaß  $D_E$  mit und ohne Leckage aus Messung und Simulation in Entfernung zur Wand  $s_{j,k}$  von 2 m und 4 m

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Verkehrstechnik“

## 2015

V 261: Nutzung von Radwegen in Gegenrichtung – Sicherheitsverbesserungen

Alrutz, Bohle, Busek € 16,50

V 262: Verkehrstechnische Optimierung des Linksabbiegens vom nachgeordneten Straßennetz auf die Autobahn zur Vermeidung von Falschfahrten

Maier, Pohle, Schmotz, Nirschl, Erbsmehl € 16,00

V 263: Verkehrstechnische Bemessung von Landstraßen – Weiterentwicklung der Verfahren

Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € 16,50

V 264: Qualitätsstufenkonzepte zur anlagenübergreifenden Bewertung des Verkehrsablaufs auf Außerortsstraßen

Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € 17,00

V 265: Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken

Bark, Kutschera, Resnikow, Baier, Schuckließ  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

V 266: Verfahren zur Bewertung der Verkehrs- und Angebotsqualität von Hauptverkehrsstraßen

Baier, Hartkopf € 14,50

V 267: Analyse der Einflüsse von zusätzlichen Textanzeigen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen

Hartz, Saighani, Eng, Deml, Barby  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 268: Motorradunfälle – Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur

Hegewald, Fürneisen, Tautz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2016

V 269: Identifikation von unfallauffälligen Stellen motorisierter Zweiradfahrer innerhalb geschlossener Ortschaften

Pohle, Maier € 16,50

V 270: Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst (KliBet)

Holldorb, Rumpel, Biberach, Gerstengarbe, Österle, Hoffmann € 17,50

V 271: Verfahren zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien bei der Ausschreibung von Elementen der Straßeninfrastruktur

Offergeld, Funke, Eschenbruch, Fandrey, Röwekamp  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 272: Einsatzkriterien für Baubetriebsformen

Göttgens, Kemper, Volkenhoff, Oeser, Geistefeldt, Hohmann € 16,00

V 273: Autobahnverzeichnis 2016

Kühnen € 25,50

V 274: Liegedauer von Tausalzen auf Landstraßen

Schulz, Zimmermann, Roos € 18,00

V 275: Modellversuch für ein effizientes Störfallmanagement auf Bundesautobahnen

Grahl, Skottke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 276: Psychologische Wirkung von Arbeitsstellen auf die Verkehrsteilnehmer

Petzoldt, Mair, Krems, Roßner, Bullinger € 30,50

V 277: Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen

Kathmann, Roggendorf, Scotti  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 278: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014

Fitschen, Nordmann € 30,50

V 279: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen

Geistefeldt, Giuliani, Busch, Schendzielorz, Haug, Vortisch, Leyn, Trapp € 23,00

## 2017

V 280: Demografischer Wandel im Straßenbetriebsdienst – Analyse der möglichen Auswirkungen und Entwicklung von Lösungsstrategien

Pollack, Schulz-Ruckriegel € 15,50

V 281: Entwicklung von Maßnahmen gegen Unfallhäufungsstellen – Weiterentwicklung der Verfahren

Maier, Berger, Kollmus € 17,50

V 282: Aktualisierung des Überholmodells auf Landstraßen

Lippold, Veters, Steinert € 19,50

V 283: Bewertungsmodelle für die Verkehrssicherheit von Autobahnen und von Landstraßenknotenpunkten

Bark, Krähling, Kutschera, Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Schuckließ, Maier, Berger € 19,50

V 284: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten

Geistefeldt, Sievers  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 285: Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz

Kamptner, Thümmeler, Ohmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 286: Telematisch gesteuertes Kompaktparken – Grundlagen und Entwicklung

Kleine, Lehmann € 16,50

V 287: Werkzeuge zur Durchführung des Bestandsaudits und einer erweiterten Streckenkontrolle

Bark, Kutschera, Resnikow, Follmann, Biederbick € 21,50

V 288: Überholungen von Lang-Lkw - Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf

Roos, Zimmermann, Köhler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 289: Verkehrsqualität an verkehrsunabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen

Geistefeldt, Giuliani, Vieten, Dias Pais € 20,00

V 290: Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 19,00

V 291: Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko  
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 18,50

V 292: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw  
Burg, Schrempp, Röhling, Klaas-Wissing, Schreiner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 293: Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen  
Geistefeldt, Hohmann, Estel  
Unterauftragnehmer: Manz € 17,50

V 294: Wirtschaftlichkeitsbewertung besonderer Parkverfahren zur Lkw-Parkkapazitätserhöhung an BAB  
Maibach, Tacke, Kießig € 15,50

V 295: Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Straßenabfluss  
Grotehusmann, Lambert, Fuchs, Graf € 16,50

V 296: Parken auf Rastanlagen mit Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen mit Übergroße  
Lippold, Schemmel, Kathmann, Schroeder  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 297: Sicherheitstechnische Überprüfung von Elementen plangleicher Knotenpunkte an Landstraßen  
Zimmermann, Beeh, Schulz, Roos  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 298: Verfahren zur Zusammenführung von Informationen unterschiedlicher Netzanalysensysteme  
Balck, Schüller, Balmberger, Rossol  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 299: Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen  
Schwietering, Neumann, Volkenhoff, Fazekas, Jakobs, Oeser  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

V 300: Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoffrückhalt und Standfestigkeit von Banketten  
Werkenthin, Kluge, Wessolek  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 301: Sicherheitsbewertung von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung  
Kemper, Sümmermann, Baier, Klemps-Kohnen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 302: Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB  
Heinrich, Maier, Papageorgiou, Papamichail, Schober, Stamatakis  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 303: Psychologische Wirkungen von Arbeitsstellenlängen, -staffelung und -gestaltung auf die Verkehrsteilnehmer  
Scotti, Kemper, Oeser, Haberstroh, Welter, Jeschke, Skottke € 19,50

V 304: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2015  
Fitschen, Nordmann € 31,00  
*Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: [www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de) heruntergeladen werden.* € 15,00

V 305: Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen  
Hartmann, Londong € 16,00

V 306: Anpassung des bestehenden Straßennetzes an das Entwurfskonzept der standardisierten Straßen – Pilotprojekt zur Anwendung des M EKLBest  
Lippold, Wittig  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 307: Evaluation des Sicherheitsaudits von Straßen in der Planung  
Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Bark, Beaulieu, Theis € 17,50

V 308: Überarbeitung und Aktualisierung des Merkblattes für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 1999)  
Gerstenberger, Hösch, Listl, Schwietering  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 309: Photokatalytische Oberflächen zur Minderung von Stickoxidbelastungen an Straßen – TiO<sub>2</sub>-Pilotstudie Lärmschutzwand  
Baum, Lipke, Löffler, Metzger, Sauer € 16,50

V 310: Umweltfreundlicher Straßenbelag – photokatalytischer Stickstoffdioxidabbau unter Nutzung der Nanotechnologie  
Wang, Oeser, Steinauer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 311: Feldversuch mit Lang-Lkw  
Irzik, Kranz, Bühne, Glaeser, Limbeck, Gail, Bartolomaeus, Wolf, Sistenich, Kaundinya, Jungfeld, Ellmers, Kübler, Holte, Kaschner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 312: Sicherheitswirkung, Dauerhaftigkeit und Lärmemission von eingefrästen Rüttelstreifen  
Hegewald, Vesper, Irzik, Krautscheid, Sander, Lorenzen, Löffler, Ripke, Bommert  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2019

V 313: Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden – Modellberechnungen  
Braun, Klute, Reuter, Rubbert € 18,50

V 314: Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten  
Hartmann, Vortisch, Vieten, Chatzipanagiotidou, Haug, Spangler € 18,50

V 315: Telematisch gesteuertes Kompaktparken für das Lkw-Parkraummanagement auf Rastanlagen an BAB – Anforderungen und Praxiserprobung  
Kappich, Westermann, Holst € 15,50

V 316: Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände  
Lindner, Hartmann, Schulze, Hübel € 18,50

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.