

MÜLLER-BBM

HOCHSCHULE  
MITTWEIDA  
UNIVERSITY OF  
APPLIED SCIENCES



---

# BACHELORARBEIT

---

Herr  
Jan Louis Geerken

**Einfluss der Luftfeuchtigkeit  
auf die Raumakustik  
von großen Sälen  
bei Musikdarbietungen.**

2018

# **BACHELORARBEIT**

---

## **Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Raumakustik von großen Sälen bei Musikdarbietungen**

**Herausforderungen und Chancen in  
Kombination mit elektronischen  
Raumakustiksystemen**

Autor:  
**Jan Louis Geerken**

Studiengang:  
**Media And Acoustical Engineering**

Seminargruppe:  
**MG14wC**

Erstprüfer:  
**Prof. Dr. Jörn Hübelt**

Zweitprüfer:  
**Dipl. Ing. Elmar Schröder**

Einreichung:  
Mittweida, 01.07.2018

**BACHELOR THESIS**

---

**Influence of air humidity  
on room acoustics  
in large venues  
during musical performances**

**Challenges and opportunities in combination  
with electronical room acoustics systems**

author:

**Jan Louis Geerken**

course of studies:

**Media And Acoustical Engineering**

seminar group:

**MG14wC**

first examiner:

**Prof. Dr. Jörn Hübelt**

second examiner:

**Dipl. Ing. Elmar Schröder**

submission:

Mittweida, 01.07.2018

---

## **Bibliografische Angaben**

Nachname, Vorname: Geerken, Jan Louis

Thema der Bachelorarbeit:

Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Raumakustik von großen Sälen bei Musikdarbietungen.  
Herausforderungen und Chancen in Kombination mit elektronischen Raumakustiksystemen.

Topic of thesis:

Influence of air humidity on room acoustics in large venues during musical performances.  
Challenges and opportunities in combination with electronical room acoustics systems.

68 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,  
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2018

## **Abstract**

In vorliegender Arbeit werden die Auswirkungen der Luftdissipation auf die raumakustischen Eigenschaften von großen Sälen untersucht. Die physikalischen Grundlagen der Dissipationsmechanismen, Möglichkeiten zur Prognostizierung von Nachhallzeitänderungen bei schwankender Luftfeuchte und einige praktische Anwendungen werden erläutert bzw. aufgezeigt. Zuletzt werden mögliche Wechselwirkungen mit elektronischen Raumakustiksystemen untersucht.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>X</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Physikalische Grundlagen .....</b>	<b>2</b>
2.1 Luftfeuchtigkeit, Klimatechnik und Hygrothermik .....	2
2.2 Schallausbreitung im Freien .....	11
2.3 Luftdissipation .....	13
2.4 Schallabsorption und Nachhallzeit in großen Sälen .....	17
<b>3 Prognose.....</b>	<b>22</b>
3.1 ISO 9613-1: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien; Teil 1: Berechnung der Schallabsorption durch die Luft.....	22
3.2 DIN 354: Messung der Nachhallzeit in Hallräumen.....	27
3.3 DIN 3382: Messung von Parametern in der Raumakustik.....	28
3.4 Werkzeuge zur Prognostizierung der Nachhallzeitänderung durch variierende Luftfeuchtigkeit .....	29
3.5 Implikationen aufgrund der Luftdissipation .....	30
<b>4 Praktischer Teil.....</b>	<b>34</b>
4.1 Messungen .....	34
4.1.1 Hallraum .....	34
4.1.2 Konzerthaus Berlin (Großer Saal).....	37
4.1.3 Mercedes Benz Arena Berlin .....	39
4.1.4 Müller-BBM GmbH Hörsaal Planegg .....	43
4.2 Zusammenfassung.....	45
<b>5 Psychoakustik.....</b>	<b>46</b>
5.1 Schallwahrnehmung des Menschen.....	46
5.2 Bedeutung der Luftfeuchtigkeit für das Hörerlebnis.....	48

---

<b>6</b>	<b>Elektronische Raumakustiksysteme .....</b>	<b>50</b>
6.1	Vivace .....	50
6.2	Auswirkung der Luftfeuchtigkeit .....	51
6.3	Lösungsansätze.....	52
<b>7</b>	<b>Schlusswort und Ausblick .....</b>	<b>53</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>XII</b>
	<b>Anlagen .....</b>	<b>XIV</b>
	<b>Eigenständigkeitserklärung .....</b>	<b>XV</b>

---

## Formelverzeichnis

Gl. (1) Relative Luftfeuchtigkeit .....	2
Gl. (2) Absolute Luftfeuchtigkeit .....	3
Gl. (3) Schalldruck im Freifeld .....	11
Gl. (4) Schalldruck im Halbraum.....	12
Gl. (5) Korrekturterm für Luftdissipation bei freier Schallausbreitung.....	12
Gl. (6) Sabinesche Nachhallzeit .....	17
Gl. (7) Äquivalente Absorptionsfläche .....	18
Gl. (8) Schallreflexionsgrad .....	18
Gl. (9) Schallabsorptionsgrad .....	18
Gl. (10) Nachhallzeit mit Korrekturterm für Luftdissipation .....	20
Gl. (11) Dämpfungskoeffizient nach Evans und Bazley .....	21
Gl. (12) Absorptionskoeffizient nach ISO 9613-1 .....	22
Gl. (13) Relaxationsfrequenz von Stickstoff .....	22
Gl. (14) Relaxationsfrequenz von Sauerstoff .....	22
Gl. (15) Zusammensetzung des Absorptionskoeffizienten .....	23
Gl. (16) Korrigierte Äquivalente Absorptionsfläche .....	27
Gl. (17) Korrekturterm nach DIN 354.....	27
Gl. (18) Äquivalente Absorptionsfläche durch Luftdissipation allgemein.....	27
Gl. (19) Nachhallzeit unter Berücksichtigung der Luftdisipation .....	29
Gl. (20) Äquivalente Absorptionsfläche durch Flächen am Fallbeispiel.....	29
Gl. (21) Äquivalente Absorptionsfläche durch Luftdissipation am Fallbeispiel .....	30

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Thermische Behaglichkeit und Luftfeuchtigkeit [Becker 2000], S. 52 .....	3
Abbildung 2: Wärmeabgabe des Menschen mit der Temperatur [Becker 2000], S. 94 .....	5
Abbildung 3: Hygrothermisches Verhalten verschiedener Betonflächen [Künzel 2009], S.104... 7	
Abbildung 4: Ausgewählte absolute Luftfeuchtigkeiten in Sälen während Messungen .....	10
Abbildung 5: Dissipationsmaxima bei verschiedenen Frequenzen [Harris 1967], S. 25 .....	17
Abbildung 6: Quantitative Untersuchung der Dissipationsursachen bei 12 500 Hz, 20°C, 100 kPa .....	24
Abbildung 7: Luftdissipation für reine Sinustöne bei 20 °C .....	26
Abbildung 8: Anpassung der Nachhallzeit im Praxisfall [Nies] .....	31
Abbildung 9: Versuchsaufbau Hallraum .....	35
Abbildung 10: Vergleich Prognose und Messung der Nachhallzeitänderung .....	36
Abbildung 11: Prognostizierte Nachhallzeitänderung im Konzerthaus Berlin .....	38
Abbildung 12: Relative Änderung der Nachhallzeit für verschiedene Raumzustände (Konzerthaus Berlin) .....	39
Abbildung 13: Ansicht der Mercedes Benz Arena (während der Vorher-Messung) .....	40
Abbildung 14: Vergleich der Nachhallzeit vor und nach einer Veranstaltung in der Mercedes Benz Arena .....	41
Abbildung 15: Prognostizierte Nachhallzeitänderung in der Berliner Mercedes Benz Arena ....	42
Abbildung 16: Relative Änderung der Nachhallzeit für verschiedene Raumzustände (Mercedes Benz Arena Berlin) .....	43
Abbildung 17: Vergleich der Raumstadien im Hörsaal Planegg .....	44
Abbildung 18: Hörschwelle eines gesunden Menschen [mh33.de 2018] .....	46
Abbildung 19: Altersbedingte Schwerhörigkeit nach Geschlecht (Frauen links, Männer rechts) [Deutsche Apotheker Zeitung 2018] .....	47
Abbildung 20: Toleranzbereich der Nachhallzeit für die Nutzungsarten A1 bis A5 [DIN 18041:2016-03], S. 14 .....	49



---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wärme- und Wasserabgabe des Menschen mit der Temperatur.....	6
Tabelle 2: Wasserdampfabsorptionskoeffizient unterschiedlicher Materialien .....	8
Tabelle 3: Dämpfung von Sinustönen in Abhängigkeit zur relativen Luftfeuchte bei 20°C.....	25

# Abkürzungsverzeichnis

## Abkürzungen

r.F.	relative Luftfeuchtigkeit
a.F.	absolute Luftfeuchtigkeit

## Formelzeichen

A	äquivalente Absorptionsfläche	m <sup>2</sup>
A <sub>atm</sub>	Dämpfung aufgrund von Luftabsorption	dB
A <sub>Dis</sub>	Absorption durch Luft	m <sup>3</sup>
A <sub>Mat</sub>	Absorption durch Materialien	m <sup>3</sup>
c	Schallgeschwindigkeit	m/s
d	Wasserdampfabsorptionskoeffizient	kg /m <sup>2</sup> * h <sup>0,5</sup> * 10 <sup>-3</sup>
f <sub>rN</sub>	Relaxationsfrequenz des Stickstoffs	Hz
f <sub>rO</sub>	Relaxationsfrequenz des Sauerstoffs	Hz
h	molare Konzentration des Wassers	%
L <sub>p</sub>	Schalldruck	dB
L <sub>w</sub>	Schalleistung	dB
m	Dämpfungskoeffizient	Np/m
ṁ <sub>D</sub>	Wasserdampfabgabe	g/h
p	Atmosphärendruck	kPa
p <sub>a</sub>	Umgebungsdruck	kPa
p <sub>D</sub>	Partialdruck des Wasserdampfes	kPa
p <sub>L</sub>	Partialdruck der Luft	kPa
p <sub>r</sub>	Referenzdruck	kPa
p <sub>s</sub>	Sättigungsdampfdruck	kPa
S <sub>i</sub>	absorbierende Teilflächen	m <sup>2</sup>
T	Nachhallzeit	s
T	Umgebungstemperatur	K
T <sub>0</sub>	Referenztemperatur	K
V	Raumvolumen	m <sup>3</sup>
W <sub>1</sub>	gesamte Schalleistung	W
W <sub>abs</sub>	absorbierte Schalleistung	W
W <sub>refl</sub>	reflektierte Schalleistung	W
α	Absorptionskoeffizient	dB/Km
α <sub>cl</sub>	Absorption aufgrund der Effekte der klassischen Physik	dB

---

$\alpha_i$	Absorptionsgrad der Teilflächen	
$\alpha_{\text{rot}}$	Absorption durch Molekülrotation	dB
$\alpha_{\text{vib,N}}$	Absorption durch Molekülschwingung des Stickstoffs	dB
$\alpha_{\text{vib,O}}$	Absorption durch Molekülschwingung des Sauerstoffs	dB
$\mu$	Dämpfungskoeffizient	Np/m
$\rho$	Schallreflexionsgrad	
$\rho_w$	absolute Luftfeuchtigkeit	$\text{g/m}^3$
$\varphi$	relative Luftfeuchtigkeit	

# 1 Einleitung

Der wahrscheinlich wichtigste Aspekt der raumakustischen Planung von Sälen ist die strategische Reflektion und Absorption von Schallenergie. Bei der raumakustischen Planung werden reflektierende oder absorbierende Flächen auf eine Weise verteilt, die an jedem Zuhörerplatz eine optimale Versorgung mit Schallenergie im richtigen Verhältnis gewährleisten soll. Die absorbierenden Flächen im Raum und deren Verteilung bestimmen die wichtigste Größe der statistischen Raumakustik: die Nachhallzeit.

In Abhängigkeit der im Raum befindlichen Materialien lässt sich die Nachhallzeit schon in der Planungsphase berechnen. Für verschiedene Nutzungsarten gibt es jeweils optimale Nachhallzeiten, die eine optimale Nutzung des Raumes gewährleisten. Während einer Vorstellung, beispielsweise in einem Konzertsaal oder einer Oper, spielt neben der raumeigenen Absorption auch das Publikum eine signifikante Rolle. Dieses stellt eine beträchtliche Summe zusätzlicher Absorptionsfläche dar und ist bei der Planung zu berücksichtigen. Der dritte Anteil der Schallabsorption in Räumen unterscheidet sich von den ersten beiden in zwei wichtigen Punkten. Die Schallenergie wird nicht nur durch Raumbegrenzungsflächen und deren Oberflächen absorbiert, sondern auch bei der Fortbewegung durch das Übertragungsmedium selbst. Die Dissipation durch die Luft gewinnt vor allem bei der Ausbreitung über große Entfernungen an Bedeutung. Demnach kann sie bei der Raumakustik in großen Sälen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss haben. Sie sinkt und steigt zusammen mit der Luftfeuchtigkeit, so dass die Nachhallzeit und somit die Raumakustik von den meteorologischen Bedingungen im Saal abhängig sind. Dieser Umstand macht die Dissipation der Luft so bedeutsam und soll in der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

Zunächst werden wichtige Begriffe und theoretische Grundlagen anhand von Literaturquellen und Normen geklärt. Anschließend werden die erarbeiteten Zusammenhänge und Werkzeuge im Rahmen praktischer Messungen angewandt. Mit den Ergebnissen dieser Messungen soll das Phänomen der Luftdissipation und insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Luftdissipation und elektronischen Raumakustiksystemen untersucht und zuletzt bewertet werden. Für letztere dient das von der Müller-BBM GmbH entwickelte System *Vivace* als Versuchs- und Untersuchungsobjekt. Zielstellung der Arbeit ist die Beantwortung der Frage, ob und inwiefern die Funktion in das *Vivace* System implementiert werden sollte, den raumakustischen Änderungen durch variierende Luftfeuchtigkeit entgegen zu wirken.

## 2 Physikalische Grundlagen

In diesem Kapitel soll eine Übersicht über das zu untersuchende Thema erarbeitet werden. Bei der Klärung der physikalischen Grundlagen sollen die Mechanismen hinter der Luftdissipation an sich, aber auch tangierende Themenbereiche wie Raumklimatechnik, Raumakustik und Schallausbreitung im Allgemeinen abgehandelt werden.

### 2.1 Luftfeuchtigkeit, Klimatechnik und Hygrothermik

Die atmosphärische Luft umgibt uns ständig und ist das Übertragungsmedium für den in der Raumakustik zu untersuchenden Luftschall. Sie ist zunächst eine Zusammensetzung aus gasförmigen Komponenten, welche als trockene Luft bezeichnet werden kann. Die beiden größten Anteile der trockenen Luft sind Stickstoff (durchschnittlich 78,08 %) und Sauerstoff (durchschnittlich 20,95 %). Die restlichen Anteile sind Stoffe mit einer Konzentration < 1 %.<sup>1</sup>

Im Praxisfall kommt rein trockene Luft nicht vor. In einem betrachteten Luftvolumen ist weiterhin immer eine gewisse Menge Wasserdampf enthalten. Die Luft hat in Abhängigkeit von Temperatur und Druck eine maximale Kapazität an Wasserdampf, welche sie pro Volumeneinheit aufnehmen kann. Ist die Kapazität zu einem Zeitpunkt voll ausgelastet, bezeichnet man die Luft als gesättigt. Der Gesamtdruck der Luft setzt sich aus der Summe der Partialdrücke der Luft  $p_L$  und des Wasserdampfes  $p_D$  zusammen. Unter Einführung des Sättigungsdampfdruckes  $p_S$ , bei welchem die Luft voll mit Wasserdampf gesättigt ist, lässt sich die relative Luftfeuchtigkeit definieren.<sup>2</sup>

$$\varphi = \frac{p_D}{p_S} * 100\% \quad \text{Gl. (1)}$$

---

<sup>1</sup> Vgl. [Reinmuth 1996], S. 31.

<sup>2</sup> Vgl. ebd. S. 34 f.

Ein weiterer Ausdruck ist die absolute Luftfeuchtigkeit, welche die Masse des Wasserdampfes in einem Luftvolumen beschreibt und in  $\text{g}/\text{m}^3$  angegeben wird.

$$\rho_w = 0,622 * \frac{\varphi * p_s}{p - \varphi * p_s} \frac{g}{m^3} \quad \text{Gl. (2)}$$

$p$  ist hier der Atmosphärendruck von 101,325 kPa.

Die relative Luftfeuchtigkeit ist die Größe, in der Daten über Luftfeuchtigkeit meist angegeben werden. Sie ist neben der Temperatur und in geringerem Maße der Luftgeschwindigkeit bzw. Turbulenz für die thermische Behaglichkeit im Raum maßgeblich und in der Raumklimatechnik von großer Bedeutung.

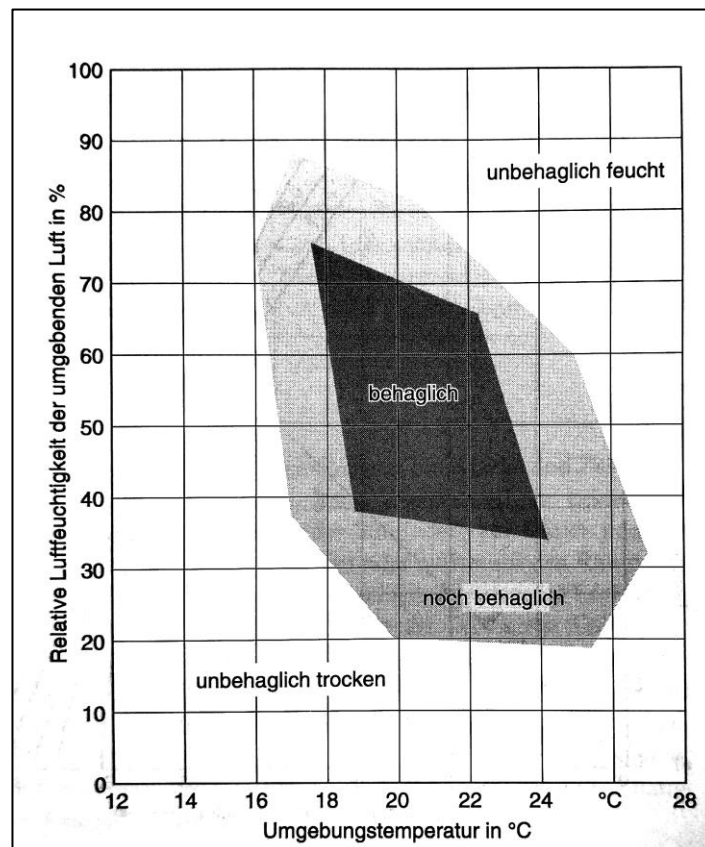


Abbildung 1: Thermische Behaglichkeit und Luftfeuchtigkeit [Becker 2000], S. 52

Um das Raumklima innerhalb des Bereichs der thermischen Behaglichkeit zu halten, können die klimatischen Bedingungen in großen Aufenthaltsräumen wie Konzertsälen auf verschiedene Arten reguliert werden. So werden in großen Sälen, Büros und ähnlichem beispielsweise Lüftungsanlagen verbaut, denn eine gewisse Zufuhr von Frischluft pro Person ist schon allein für die Versorgung mit Sauerstoff notwendig. In [DIN 1946-2] wird der nötige Außenluftvolumenstrom, der dem Raum zugeführt werden muss, für Theater und Konzertsäle auf mindestens  $20 \text{ m}^3$  pro Stunde pro Person festgelegt. Diese Menge an Außenluft wird dem Raum durch die Belüftungsanlage zugeführt und währenddessen gegebenenfalls erwärmt, abgekühlt, befeuchtet oder entfeuchtet. Wenn neben der Temperatur auch die Luftfeuchtigkeit in einem Raum geregelt ist, nennt man ihn klimatisiert.<sup>3</sup> Es gibt eine große Anzahl unterschiedlicher Funktionsweisen, mit denen Lüftungsanlagen die Luft optimieren können. Üblicherweise sind Lüftungsanlagen, in diesem Falle Klimaanlagen, in der Lage, sowohl Temperatur als auch Luftfeuchtigkeit zu verändern.<sup>4</sup> Die Anpassung der Luftfeuchtigkeit bei der Zufuhr von Außenluft ist unter bestimmten Bedingungen dringend zu empfehlen. Dies wird rasch klar, wenn man die möglichen Temperaturdifferenzen zwischen Außenluft und Raumluft im Zusammenhang mit der jeweiligen Feuchtigkeitskapazität vergleicht. An einem warmen Sommertag können beispielsweise Temperaturen von  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  mit einer zugehörigen relativen Luftfeuchtigkeit von 60 % oder mehr zustande kommen. Dies entspricht einer absoluten Luftfeuchtigkeit von  $18,21 \text{ g/m}^3$ . Kühlt man diese Luft vor der Zufuhr in ein Gebäude auf  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  herunter, erhält man bei gleichbleibender Wassermenge eine relative Luftfeuchtigkeit von knapp 100 % und ist somit fast beim Taupunkt angekommen. Beim Taupunkt ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt. Der Dampfdruck  $p_D$  ist dabei gleich dem Sättigungsdampfdruck der jeweiligen Temperatur. Bei weiterer Abkühlung der Luft, wechselt das überschüssige Wasser in den flüssigen Aggregatzustand und schlägt sich in Form von Kondensat oder Nebel nieder. Im Gegensatz dazu liegt bei einer Außentemperatur von  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % die absolute Luftfeuchte bei  $1,89 \text{ g/m}^3$ , was einem Wert von 9,7 % relativer Luftfeuchte bei  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  entspricht. Beim Blick auf den Behaglichkeitsbereich wird deutlich, dass die Luft in beiden Fällen dringend jeweils be- beziehungsweise entfeuchtet werden sollte. Eine weitere Quelle von zusätzlicher Luftfeuchtigkeit ist die anwesende Menge an Personen. Der Mensch ist ein endothermes Lebewesen, dessen Körperkerntemperatur mit sehr kleinem Toleranzbereich

---

<sup>3</sup> Vgl. [Reinmuth 1996], S. 102.

<sup>4</sup> Vgl. ebd., S. 110.

immer circa 37 °C betragen muss.<sup>5</sup> Daher muss der Körper stets die Wärmeproduktion mit der Wärmeabgabe ausgleichen, wobei ihm verschiedene Werkzeuge zur Verfügung stehen. Neben der möglichen Abgabe durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung, gibt der Mensch auch Wärme durch Atmung und Transpiration von Schweiß auf der Körperoberfläche ab. Bei diesem Vorgang wird dem Körper Verdunstungswärme entzogen. Verdunstung ist der Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand, welcher nur möglich ist, wenn dem umgebenden Medium Energie entzogen wird. Der Massenstrom der Wassermoleküle, welche in die Luft abgegeben werden, ist dabei proportional zur Differenz des Feuchtegehalts des Luftvolumens in der Grenzschicht direkt an der Wasseroberfläche zum Feuchtegehalt des umgebenden Luftvolumens. Die Verdunstung wird also einerseits durch einen geringen Feuchtegehalt der angrenzenden Luft und andererseits durch eine hohe Fluktuation ebendieser begünstigt. Durch letzteres wird die befeuchtete Luft schneller hinfert bewegt und macht Platz für trockenere Umgebungsluft. Mit dem Feuchtegehalt wird die absolute Luftfeuchtigkeit bezeichnet. Da während des Vorgangs Wasserdampf an die umgebende Luft abgegeben wird, bezeichnet man ihn als feuchte Wärme.<sup>6</sup>

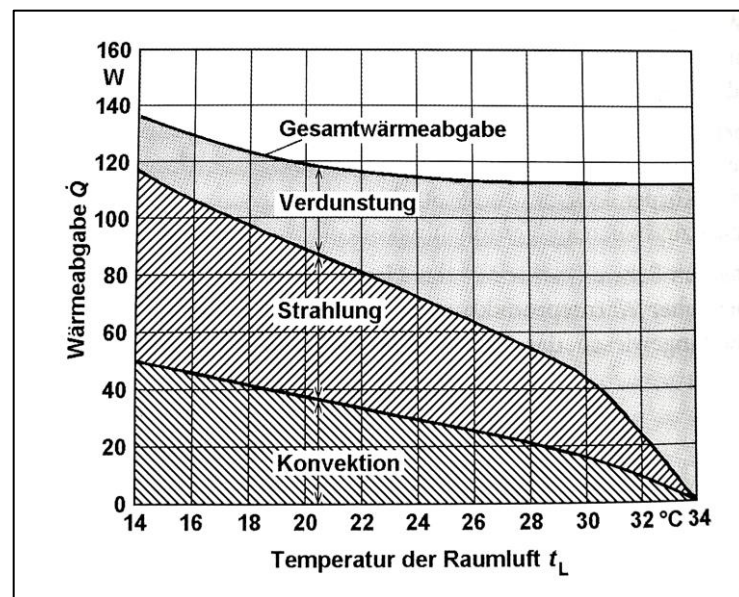


Abbildung 2: Wärmeabgabe des Menschen mit der Temperatur [Becker 2000], S. 94

<sup>5</sup> Vgl. [Hörner ; Casties 2015], S. 14.

<sup>6</sup> Vgl. [Hörner ; Casties 2015], S. 258 f.



Von den genannten Vorgängen ist letzterer der einzige vom Körper aktiv steuerbare Prozess und somit ein wichtiger Mechanismus für die körpereigene Wärmeregulierung. In gewisser Hinsicht können auch Wärmestrahlung und -leitung gesteuert werden, namentlich durch das Ablegen von Kleidung. Jedoch ist die Kleidung Teil der äußeren Bedingungen und somit nicht vom Körper, der hier als geschlossenes System betrachtet wird, beeinflussbar.

Die Menge der abgegebenen Energie sowie die Menge der abgegebenen Feuchtigkeit, hängen von der Umgebungstemperatur und Feuchte sowie von der Schwere der Tätigkeit der entsprechenden Person ab. Bei einer Raumtemperatur von 22 °C sind die Anteile der drei Arten der Wärmeabgabe durch den Menschen bei sitzender Tätigkeit durchschnittlich in etwa gleich groß. Bei der Untersuchung der klimatischen Verhältnisse bei musikalischen Darbietungen, ist der für uns interessante Bereich innerhalb der thermischen Behaglichkeit für eine nicht tätige Person. Die Feuchtigkeitsabgabe ist bei dieser Betrachtung nur noch abhängig von der Lufttemperatur.

Tabelle 1: Wärme- und Wasserabgabe des Menschen mit der Temperatur [Becker 2000], S.89

Lufttemperatur		°C	18	20	22	23	24	25	26
physisch nicht tätiger Mensch	$\dot{Q}_{tr}$ (trocken)	W	100	95	90	85	75	75	70
	$\dot{Q}_f$ (feucht)	W	25	25	30	35	40	40	45
	$\dot{Q}_{ges}$	W	125	120	120	120	115	115	115
	Wasserdampfabgabe $\dot{m}_D$	g/h	35	35	40	50	60	60	65
mittelschwere Arbeit	$\dot{Q}_{ges}$	W	270	270	270	270	270	270	270
	$\dot{Q}_{tr}$	W	155	140	120	115	110	105	95

Der Mensch hat kein Sinnesorgan, um die Luftfeuchtigkeit direkt wahrzunehmen. Jedoch ist er trotzdem in der Lage zu spüren, wenn sich die Luftfeuchtigkeit außerhalb bestimmter Grenzwerte bewegt. Steigt die Luftfeuchtigkeit über den Bereich der thermischen Behaglichkeit hinaus an, bezeichnet man die Luft als schwül. Maßgeblich für empfundene Schwüle ist die absolute Luftfeuchte, welche in diesem Fall über 13,5 g/m<sup>3</sup> liegt.<sup>7</sup> Die Wärmeabgabe über Verdunstung wird dann durch den hohen Wassergehalt der Luft gestört. Da, wie bereits erwähnt, der Massenstrom der Wassermoleküle und somit die Verdunstungsenergie proportional zur

<sup>7</sup> Vgl. [Hörner ; Casties 2015], S. 109.

Partialdruckdifferenz des Wasserdampfes ist, kann eine zu hohe Luftfeuchtigkeit den Vorgang der Wärmeregulierung behindern.

Jeder Festkörper ist in der Lage, eine gewisse Menge an Wasserdampf zu speichern und wieder an seine Umgebung abzugeben. Diese Vorgänge der Absorption und Desorption von Wasserdampf werden als Wasserdampf-Sorption zusammengefasst. Zunächst haben unterschiedliche Materialien deutlich unterschiedliche Wasserkapazitäten. Je poröser ein Stoff, desto eher ist er geneigt schnell und viel Wasser aufzunehmen. Glatte Oberflächen hingegen neigen dazu weniger Wasser mit geringerer Geschwindigkeit aufzunehmen.<sup>8</sup> Wie viel Wasser zu einem bestimmten Zeitpunkt tatsächlich gespeichert ist, hängt wiederum von der Luftfeuchte der umgebenden Luft ab.

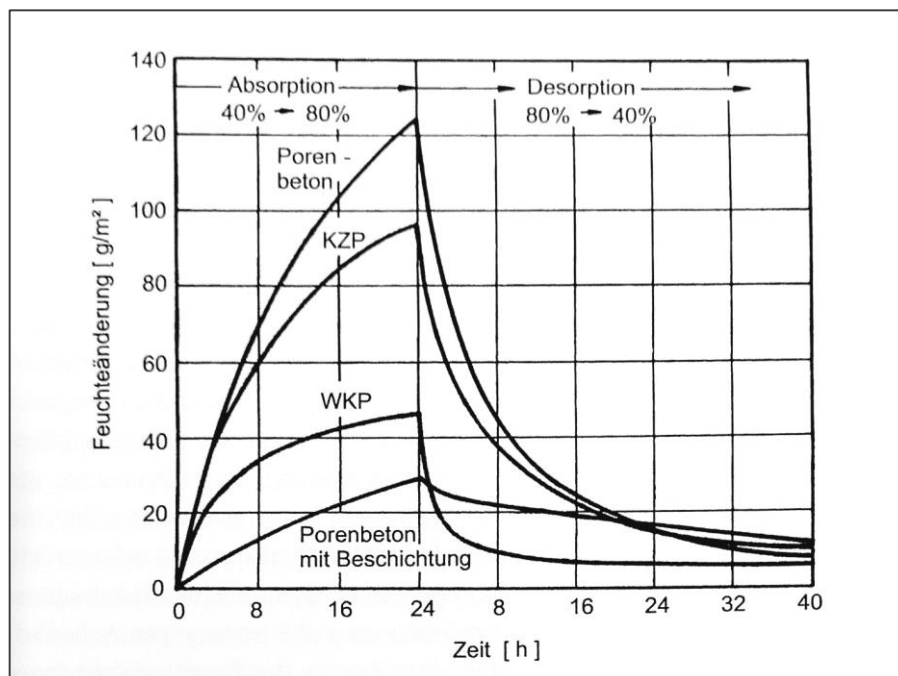


Abbildung 3: Hygrothermisches Verhalten verschiedener Betonflächen [Künzel 2009], S.104

Bei einer bestimmten relativen Feuchte der umgebenden Luft stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein. In Abb. 3 ist das hygrothermische Verhalten einiger Betonflächen bei einer schlagartigen Erhöhung der relativen Luftfeuchte von 40 % auf 80 % dargestellt. Die Annäherung an

<sup>8</sup> Vgl. [Künzel 2009], S. 104.

den neuen Gleichgewichtszustand geht nur sehr langsam vonstatten. Nach 24 Stunden ist zwar ein Steigungsabfall zu erkennen, jedoch sind alle Graphen noch weit vom Erreichen eines konstanten Wertes entfernt. Ist der Gleichgewichtszustand einmal erreicht, ist der Massenstrom an Wassermolekülen zwischen der Fläche und der Luft nur sehr klein. Wird der Luft zusätzlicher Wasserdampf zugeführt oder wird die Temperatur im Raum gesenkt und somit die relative Luftfeuchte gesteigert, wird der Gleichgewichtszustand gestört und ein Teil der zugeführten Feuchte wird von den Raumflächen absorbiert. Wird der Luft umgekehrt Feuchte entzogen oder ihre Temperatur erhöht, werden die Flächen wiederum Wasserdampf in die Luft abgeben.<sup>9</sup> Unterschiedliche Materialien werden in ihrer Fähigkeit Wasser zu absorbieren durch den Wasserdampfabsorptionskoeffizienten  $d$  gekennzeichnet. Er beschreibt, wieviel Wasserdampf ein bestimmtes Material pro Quadratmeter in einer Zeiteinheit aufnimmt.

Tabelle 2: Wasserdampfabsorptionskoeffizient unterschiedlicher Materialien [Künzel 2009], S.26

Material	Wasserdampf-Absorptionskoeffizient $d$ [kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> ] · 10 <sup>-3</sup>
<b>Innenputze, Beton</b>	
Weißkalkputz, Gipsputz	7-12
Kalkzementputz	14-16
Beton (B15, B25, B45)	7-9
Innenputze mit Papiertapete	10-20
<b>Holz</b>	
Fichte, Kiefer, Buche, natur	20-25
Eiche, natur	12
Eiche, gewachst (Fußboden)	3
<b>Textilien</b>	
Vorhangstoff aus natürlichen Fasern 0,15-0,3 kg/m <sup>2</sup>	5-15
Teppiche aus natürlichen Fasern	30-36
Teppiche aus synthetischen Fasern	15

In Tab. 2 werden diesbezüglich einige Materialien aufgeführt. Poröse Stoffe aus organischem Material sind bekannt für ihre hohe Absorptionsfähigkeit. Die Absorptionsfähigkeit anderer Materialien hingegen, beispielsweise Glas, geht gegen null. In einem durchschnittlichen Raum, in welchem sich Oberflächen aus Holz, Stoffen, und anderen absorptionsfähigen Materialien

<sup>9</sup> Vgl. [Künzel 2009], S. 25 ff.

befinden, ist der Anteil der von Flächen absorbierten Feuchtigkeit sehr groß.<sup>10</sup> Problematische Extremfälle stellen zum Beispiel komplett geflieste Räume dar. Hier sind kaum feuchtigkeitsabsorbierende Oberflächen vorhanden, weswegen bereits bei geringfügiger Feuchtezufuhr mit Nebel und Kondenswasser zu rechnen ist. Das hygrotherme Verhalten unterschiedlicher und vor allem mehrschichtiger Bauteile sowie ganzer Räume kann mit einschlägiger Software berechnet werden. Für die Berechnung werden Klimadaten, darunter die Feuchtelast, Konstruktionsdaten und präzise Baustoffdaten benötigt.<sup>11</sup>

Den Raumbooberflächen kommt folglich eine regulierende Rolle des Raumklimas zu. Kurzzeitige Spitzen und Täler im Feuchtehaushalt werden in ihrer Wirkung auf die Luftfeuchte abgeschwächt. Neben der Speicherung von Feuchte sind Raumbooberflächen auch in der Lage auf analoge Weise Wärme vorübergehend zu speichern und gegebenenfalls wieder in den Raum freizugeben. Kommt es zu vorübergehenden Spitzenwerten bei Temperatur und Feuchte der Luft, können überschüssige Mengen an Wärme und Wasserdampf gespeichert werden. Welcher Anteil der zusätzlichen Feuchte von den Flächen aufgenommen wird, entscheidet sich anhand einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren. Die hygrothermischen Eigenschaften der im Raum verbauten Oberflächen sind von ihnen der wichtigste.

Wie hoch die Luftfeuchtigkeit ist und inwiefern sie sich ändert, ist von Saal zu Saal und von Vorstellung zu Vorstellung unterschiedlich. Um einige Orientierungswerte zu erhalten, wurden beispielhaft zehn firmeninterne Messberichte ausgewertet. Es handelt sich um Räume, die für Darbietungen unverstärkter Musik geplant und genutzt wurden. Zum Zeitpunkt der Messungen wurde vom verantwortlichen Mitarbeiter stets die Temperatur und relative Luftfeuchte ermittelt und notiert. Diese Daten sind daher nachträglich einsehbar. Die Messungen wurden im unbesetzten Zustand absolviert.

---

<sup>10</sup> Vgl. ebd. S. 104.

<sup>11</sup> Vgl. [Künzel 2009] S. 219.

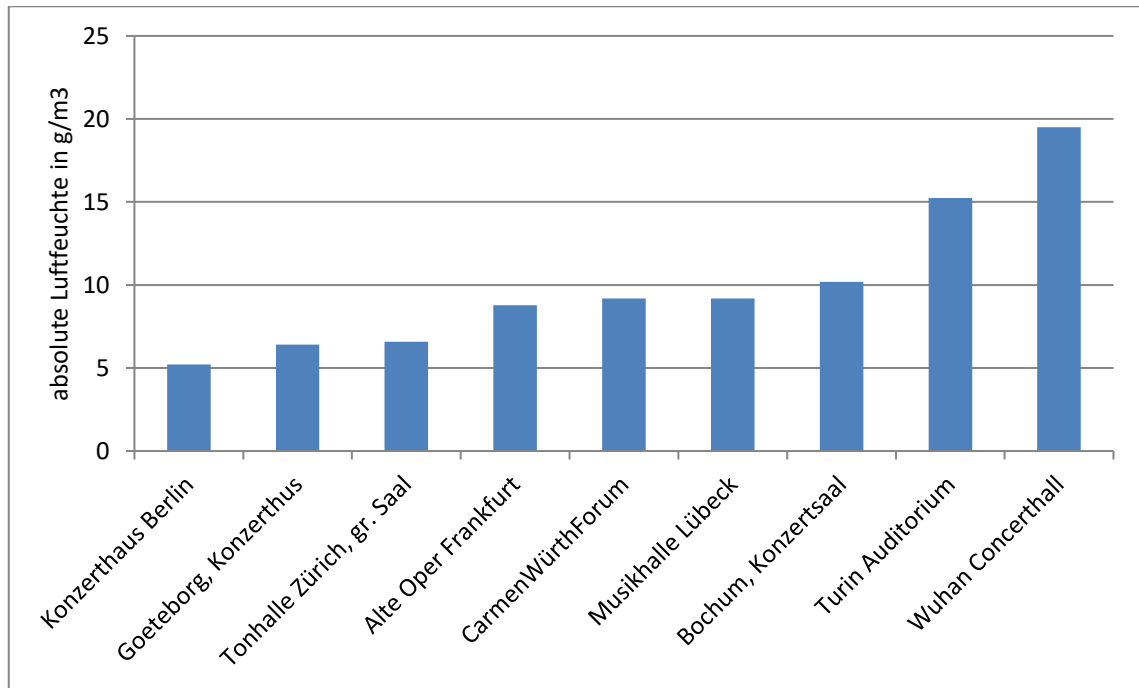


Abbildung 4: Ausgewählte absolute Luftfeuchtigkeiten in Sälen während Messungen

Die Werte zeigen eine deutliche Differenzierung untereinander. Die durchschnittlich gemessene Luftfeuchte beträgt rechnerisch ca.  $10 \text{ g/m}^3$ . Das untere Ende stellt die Messung aus dem Konzerthaus Berlin aus 2006 dar, mit einer relativen Luftfeuchte von 26 % bei einer Temperatur von  $22,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dem gegenüber steht die Messung in der Wuhan Concerthall in China aus 2009. Dort wurde eine relative Luftfeuchte von 70 % bei einer Temperatur von  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  verzeichnet. Aus den Daten ist nicht nachvollziehbar, inwiefern sich die Luftfeuchte während der Vorstellung durch die Anwesenheit des Publikums verändert. Jedoch sind die Informationen über meteorologische Zustände in den Sälen wertvoll. Wie sich in späteren Kapiteln herausstellen wird, sind trockenere Räume empfindlicher gegenüber geringen Feuchtigkeitsänderungen.

Der letzte und diffizilste Aspekt bei der Betrachtung der Luftfeuchtigkeit in Räumen ist die Inhomogenität von Temperatur und Feuchte. Zunächst ergibt sich aus den Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik die Tatsache, dass wärmere Luft mit seiner geringeren Dichte leichter ist

als kalte. Dasselbe gilt für feuchte Luft gegenüber trockener Luft.<sup>12</sup> Somit ergeben sich vor allem in Räumen mit großer Deckenhöhe unterschiedliche Luftschichten mit Temperatur- und Feuchtegradienten zwischen Decke und Boden. Des Weiteren ist mit Luftströmungen im Raum zu rechnen. Zum einen sind diese auf die Lüftungsanlage zurückzuführen, zum anderen stellen die im Raum verteilten Energiequellen, im zu untersuchenden Falle das Publikum, einen sehr bedeutenden Faktor auf die sich einstellende Raumströmung dar. Von ihnen steigen aufgewärmte und angefeuchtete Luftmassen in Richtung der Decke auf, wo sie andere Luftmassen verdrängen, welche wiederum in Richtung des Bodens bewegt werden.<sup>13</sup>

Genau genommen ist es, vor allem in großen Räumen, nicht möglich die meteorologischen Bedingungen im Raum an einem Punkt zu messen und das Ergebnis auf die gesamte Luftmasse zu übertragen. Um bei Simulationen, Messungen und Berechnungen ein realitätsgetreues Bild zu schaffen, sollte versucht werden, meteorologische Daten sowohl in Boden- als auch Deckennähe zu erhalten.

## 2.2 Schallausbreitung im Freien

Strahlt eine Kugelschallquelle mit konstanter Leistung Schallenergie ab, ergeben sich in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schallquelle unterschiedliche Schalldruckpegel. Je größer die Entfernung ist, desto kleiner ist die einwirkende Schallintensität. Dieser Effekt ist vor allem in kleiner und mittlerer Entfernung zunächst auf die räumliche Energieverteilung zurückzuführen. Bei gleichbleibender Gesamtenergie wird die Fläche, auf welche sie sich verteilt, bei zunehmendem Abstand zur Quelle immer größer. Bei einer Punktquelle im Vollraum lässt sich dieser Zusammenhang im Fernfeld der Quelle beschreiben durch:<sup>14</sup>

$$L_p = L_W - 11 \text{ dB} - 20 * \lg\left(\frac{r}{m}\right) \text{ dB} \quad \text{Gl. (3)}$$

---

<sup>12</sup> Vgl. [Hörner ; Schmidt 2011], S. 57.

<sup>13</sup> Vgl. edb. S. 142.

<sup>14</sup> Vgl. [Sinambari ; Sempali 2014], S. 238 ff.

$L_p$  = Schalldruckpegel

$L_W$  = Schallleistungspegel

$r$  = Abstand zur Quelle in m

Im in der Praxis deutlich relevanteren Fall des Halbraums, ändert sich in der Gleichung lediglich ein Term.

$$L_p = L_W - 8 \text{ dB} - 20 * \lg\left(\frac{r}{m}\right) \text{ dB} \quad \text{Gl. (4)}$$

Für einen Viertelraum verringert sich der Korrekturfaktor von -8 dB um weitere 3 dB auf -5 dB.

Zur tatsächlichen Berechnung des Schalldruckpegels, vor allem in großer Entfernung zur Quelle, müssen darüber hinaus jedoch einige Korrekturterme beachtet werden. Diese werden in [DIN 9613-2] definiert:

$A_{\text{div}}$ : die Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung

$A_{\text{atm}}$ : die Dämpfung aufgrund von Luftabsorption

$A_{\text{gr}}$ : die Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts

$A_{\text{bar}}$ : die Dämpfung aufgrund von Abschirmung

$A_{\text{misc}}$ : die Dämpfung aufgrund verschiedener anderer Effekte

Im Korrekturterm  $A_{\text{atm}}$  wird die Dissipation von Schallenergie bei der Ausbreitung durch Luft berücksichtigt. Der Term setzt sich zusammen aus <sup>[3]</sup>:

$$A_{\text{atm}} = \frac{\alpha * d}{1000} \quad \text{Gl. (5)}$$

$\alpha$  = Absorptionskoeffizient der Luft in dB/Km

$d$  = Abstand in Meter

Der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  wird entsprechend den Vorgaben aus [ISO 9613-1] berechnet. Auf die genaue Vorgehensweise wird im Kapitel Prognose eingegangen. Bereits an dieser Stelle

wird angemerkt, dass der Absorptionskoeffizient stark von der Frequenz und Luftfeuchte abhängt. Auf die physikalischen Effekte hinter der Luftdissipation wird im folgenden Kapitel eingegangen.

## 2.3 Luftdissipation

Die Dissipation von Schall bei der Ausbreitung in Luft ist auf verschiedene physikalische Phänomene zurückzuführen. Sie lassen sich sinngemäß in zwei Unterkategorien aufteilen.

### Effekte der klassischen Physik

An einer starren Begrenzungsfläche verschwindet, bedingt durch Reibung an dieser Fläche, jede zur Wand senkrechte oder tangentielle Schnellekomponente einer Schallwelle. Jedoch nimmt die Schnelle bereits in kleinem Abstand zur Wand den Wert einer ungestörten ebenen Welle an. Dies hat zur Folge, dass senkrecht zu der Begrenzungsfläche ein starkes Geschwindigkeitsgefälle zu erwarten ist, durch welches die sonst bei freier Schallausbreitung unwesentliche Zähigkeit der Luft an Bedeutung gewinnt, indem neben den Druck- nun auch Schubspannungen auftreten, die diesem Geschwindigkeitsgefälle proportional sind.<sup>15</sup> Die auf diese Weise zu erwartenden Verluste sind abhängig von der dynamischen Viskosität des Gases. Dieser Effekt führt zu höheren Verlusten, je öfter sich eine Schallwelle in die Nähe einer Begrenzungsfläche bewegt und ist vor allem bei porösen Absorbern der Grund für die hohe Absorption ebenjener.

Nun ist die Auswirkung dieses Effektes bei der Raumakustik durch die durchschnittlich hohen Abstände zu den Begrenzungsflächen eher marginal. Die innere Reibung verliert hier an Bedeutung, ist jedoch nicht völlig vernachlässigbar.

---

<sup>15</sup> Vgl. [Cremer ; Müller 1976b], S. 69.



Bei den sogenannten Verlusten durch Wärmeleitung wird

*„dem Schallfeld, das bei seinen adiabatischen Druckschwankungen und Verdichtungen notwendigerweise auch zu Temperaturschwankungen führt und somit zu einer periodischen Erhöhung und Erniedrigung des Wärmeinhalts der einzelnen Volumenelemente der schwingenden Luft, unmittelbar Wärmeenergie entzogen [...]“.*<sup>16</sup>

Bei adiabatischen Prozessen wird keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht. Die Energie innerhalb des Systems bleibt dementsprechend konstant. Unter dieser Bedingung würde die bei der Kompression des Luftvolumens verrichtete Arbeit mit jeder Periode verlustfrei wieder in potentielle Energie der Schallwelle zurückgewandelt werden. Jedoch sind die einzelnen Luftvolumina nicht gänzlich adiabatisch und der Schalldruck ist mit der Verdichtung nicht immer phasengleich. So ist im Realfall bei jeder Periode der Schwingung mit einem gewissen Verlust von Schallenergie zu rechnen.

Die Effekte der klassischen Physik sind seit langem bekannt. Erst jüngere Experimente lieferten hingegen Hinweise für weitere Dissipationsmechaniken. 1929 wies *P.E. Sabine* darauf hin, dass bei hohen Frequenzen eine Verringerung der Luftdissipation mit steigender Luftfeuchtigkeit zu beobachten ist.<sup>17</sup> Daraufhin näherte sich die Wissenschaft durch weitere Experimente an diese unbekannte Dissipationsursache an. Einige Jahre später konnte *Knudsen* durch Nachhallzeitmessungen in zwei Räumen mit unterschiedlichen Volumina aber gleichem Absorptionsgrad der Wände nachweisen, dass es sich um einen Effekt handelt, der sich innerhalb des Mediums, der Luft abspielt.<sup>18</sup> Weiterhin konnte bereits zu diesem Zeitpunkt messtechnisch nachgewiesen werden, dass die feuchtigkeitsabhängige Dissipation ausschließlich vom Sauerstoffanteil der Luft herrührt.<sup>19</sup>

### **Effekte auf molekularer Ebene / innere Verluste**

In der Thermodynamik, bzw. Wärmelehre, wird zwischen der inneren und der äußeren Energie eines Systems unterschieden. Zur Beschreibung der potentiellen und kinetischen Energie eines

---

<sup>16</sup> Ebd., S. 72.

<sup>17</sup> Vgl. [Sabine 1929], S. 341.

<sup>18</sup> Vgl. [Knudsen 1931], S.126.

<sup>19</sup> Vgl. [Cremer 1971], S. 227 ff.

Systems als Ganzem muss, wie bei allen anderen Objekten, stets ein Bezugspunkt außerhalb des Systems gewählt werden. Anschließend wird die Position und Bewegung relativ zu diesem Bezugspunkt als äußere Energie zusammengefasst. Die Energie der individuellen Atome eines Systems hingegen, welche sich bewegen (Translation) oder als Atomverbindungen ebenfalls zueinander rotieren und vibrieren können, wird auf einen Bezugspunkt innerhalb des Systems bezogen und daher sinngemäß als innere Energie bezeichnet. Bewegt sich das ganze System an einen anderen Ort, nimmt es diesen Bezugspunkt mit, wodurch sich die äußere Energie nicht ändert.<sup>20</sup>

Bei der Untersuchung der Luftdissipation ist es sinnvoll, nicht das ganze Luftvolumen im Raum als System zu betrachten, sondern die einzelnen Luftmoleküle jeweils in getrennte Systeme zu unterteilen. In diesem Fall kann die Translation der Moleküle, also die Temperatur, als äußere Energie und lediglich die molekulare Vibration und Rotation als innere Energie betrachtet werden. Während also im vergangenen Abschnitt Verluste zugunsten der äußeren Energie des Mediums untersucht wurden, wird im diesem Abschnitt die innere Energie betrachtet. Die Luft ist ein mehratomiges Gasgemisch und kann daher kinetische Energie in Form von Molekülrotation und Molekülschwingung aufnehmen. Zur mathematischen Beschreibung dieser Effekte kommen die Werkzeuge der Quantenmechanik in Gebrauch. Jedoch reicht es, da in dieser Arbeit lediglich die Ausbreitung von Schallwellen behandelt wird, aus, das mittlere Verhalten zu erfassen und die Vorgänge in den einzelnen Molekülen nicht weiter mathematisch zu betrachten. Zur Visualisierung ist das von *Cremer* und *Müller* benutzte Hantelmodell<sup>21</sup> eines Atompaares sehr geeignet. Hierbei werden die beiden Atome jeweils als massenbehaftete Kugeln abstrahiert, welche durch eine Hantel miteinander fixiert werden. Durch Drehung um die Achse senkrecht zum Mittelpunkt dieser Hantel, kann jedes Molekül eine bestimmte Rotationsenergie aufnehmen. Zusätzlich ist der Abstand der zwei Atome des Moleküls zueinander nicht unveränderlich. Statt der Hantel seien sie also nun durch eine Feder miteinander verbunden. Somit können sie nach einer äußeren Anregung neben der potentiellen Energie im Ruhezustand wieder kinetische Energie aufnehmen, welche sich genau wie die Rotationsenergie nicht in einer schwankenden Temperatur bemerkbar macht.

---

<sup>20</sup> Vgl. [Nickel 2011], S. 3.

<sup>21</sup> Vgl. [Cremer ; Müller 1976b], S. 334.

*„Die Unterscheidung zwischen äußerer und innerer Energie gewinnt erst dadurch Bedeutung, dass bei einer plötzlichen Verdichtung prinzipiell zunächst nur die Translationsenergie der Moleküle beeinflusst wird, die sich dabei in einer für uns unerheblichen, sehr kurzen Zeit durch die fortgesetzten Zusammenstöße der Moleküle auf alle Richtungen verteilt, woraus sich die allseitige Gleichheit des Druckes ergibt. Dagegen kann das Erreichen der neuen Gleichgewichtszustände für die anderen Energieformen eine Zeit einfordern, die möglicherweise mit den Periodendauern von Schallvorgängen vergleichbar, oder womöglich groß gegen diese ist.“<sup>22</sup>*

Die oben genannten Rotationen und Schwingungen der Moleküle werden durch schwankende Temperaturen angeregt. Bei jeder Periode der durchlaufenden Schallwelle nähern sich die Moleküle ihrem neuen Gleichgewichtszustand an, wobei Energie aus der Schallwelle in die innere Energie der Moleküle übertragen wird. Dieser Vorgang der exponentiellen Annäherung an den neuen Gleichgewichtszustand heißt Relaxation und erfordert abhängig vom entsprechenden Gas eine bestimmte Zeit, die Relaxationszeit. Die Veränderung der Luftfeuchtigkeit, also die Menge der anwesenden Wassermoleküle in der Luft selbst, führt nicht zu Dissipationsverlusten. Jedoch haben diese Wassermoleküle einen Einfluss auf die Relaxationszeit des Sauerstoffs und begünstigen seine Schwingungsanregung.<sup>23</sup> Bei erhöhter Luftfeuchtigkeit verkürzt sich die Relaxationszeit und erhöht sich somit die Relaxationsfrequenz. An dieser Stelle sei vorweggenommen, dass sich für jede Schallfrequenz ein Dissipationsmaximum bei derjenigen Feuchtigkeit einstellt, bei welcher die Relaxationsfrequenz der Sauerstoffmoleküle gleich der Frequenz der durchlaufenden Schallwelle ist.

---

<sup>22</sup> [Cremer ; Müller 1976b], S. 335.

<sup>23</sup> Vgl. [Cremer 1971], S. 230.

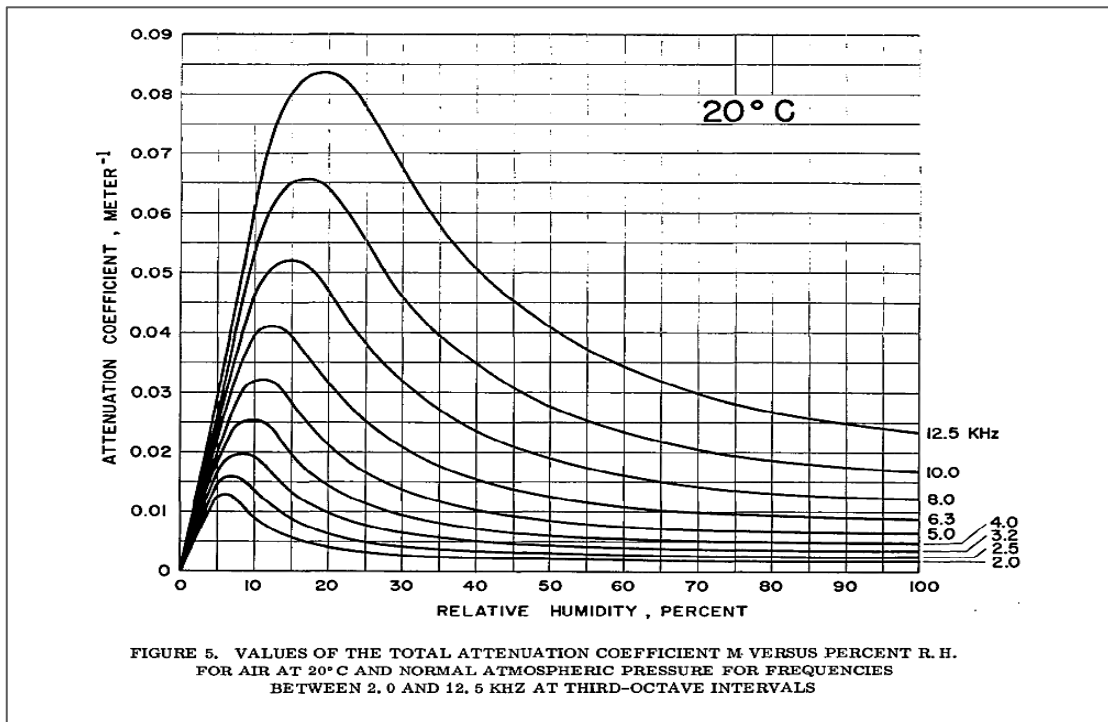


Abbildung 5: Dissipationsmaxima bei verschiedenen Frequenzen [Harris 1967], S. 25

## 2.4 Schallabsorption und Nachhallzeit in großen Sälen

Die Nachhallzeit ist eine Größe zur Beschreibung akustischer Eigenschaften eines Raumes. Sie ist Grundlage der statistischen Raumakustik und vermittelt einen akustischen Gesamteindruck eines Raumes. Neben anderen Größen bei der raumakustischen Betrachtung ist sie also in der Lage, schon als Einzahlwert eine sinnvolle Einschätzung eines Raumes zu ermöglichen. Die vom amerikanischen Physiker *Wallace Clement Sabine* erstmals definierte Sabinesche Nachhallzeit, beschreibt den Abfall der Schallenergie in einem Raum auf ein millionstel der ursprünglichen Menge nach Abschalten einer Schallquelle und lässt sich berechnen durch:<sup>24</sup>

$$T = 0,163 * \frac{V}{A} \quad \text{Gl. (6)}$$

$V$  = Raumvolumen

$A$  = äquivalente Absorptionsfläche

<sup>24</sup> Vgl. [Cremer ; Müller 1976a], S. 160.

Die Nachhallzeit ist also lediglich von zwei dem Raum zugehörigen Größen abhängig. Die erste von ihnen ist das Raumvolumen. Ein größeres Volumen führt zu einer höheren Nachhallzeit. Die zweite Größe ist die äquivalente Absorptionsfläche. Diese repräsentiert die vorhandenen absorbierenden Materialien im Raum und wird gebildet durch die Summe aller Produkte der Teilflächen  $s$ , multipliziert mit dem jeweiligen Absorptionsgrad  $\alpha$ .

$$A_{ges} = \sum s_i \alpha_i \quad \text{Gl. (7)}$$

Will man bei der Planung Einfluss auf die Nachhallzeit nehmen, kann man folglich das Volumen des Raumes variieren oder absorbierende Materialien in den Raum einbringen, bzw. entfernen.

Trifft eine Schallwelle auf eine Oberfläche, wird ein Teil der Schalleistung reflektiert. Der Anteil der reflektierten Leistung  $W_{refl}$  zur Gesamtleistung  $W_1$  wird durch den Schallreflexionsgrad  $\rho$  gekennzeichnet.

$$\rho = \frac{W_{refl}}{W_1} \quad \text{Gl. (8)}$$

Der nicht reflektierte Teil der Schalleistung  $W_{abs}$  dringt in die Oberfläche ein und wird dort absorbiert.

$$\alpha = \frac{W_{abs}}{W_1} \quad \text{Gl. (9)}$$

Diese absorbierte Energie wird wiederum aufgeteilt in die Dissipation, also die Umwandlung in Wärme und die Transmission, bei welcher die Schallwelle durch das Bauteil in den Nachbarraum oder ins Freie gelangt. Schallreflexionsgrad und Schallabsorptionsgrad können jeweils Werte zwischen null und eins annehmen, wobei jedoch immer gilt:  $\rho + \alpha = 1$ . Das Absorptionsvermögen von Materialien wird in der Raumakustik üblicherweise durch den Schallabsorptionsgrad gekennzeichnet. Dieser Wert und der Schallreflexionsgrad sind gleichermaßen

frequenzabhängig und werden daher für Terz- oder Oktavbänder im jeweils relevanten Frequenzbereich einzeln angegeben.<sup>25</sup>

Bei der Planung eines Raumes ist es die Aufgabe des Raumakustikers das passende akustische Gleichgewicht im Raum herzustellen. Je nach Raumgröße und Nutzungsart hat jeder Raum eine optimale Nachhallzeit, um wünschenswerte Sprachverständlichkeit, Hörerlebnis und/oder Komfort zu gewährleisten. Orientierungswerte für die Planung werden in einschlägigen Normen wie zum Beispiel [DIN 18041] bereitgestellt. Oft ist es bei Räumen lediglich erforderlich, nach einer Betrachtung der statistischen Raumakustik eine durch Simulation oder Messung ermittelte, geeignete Menge an absorbierendem Material einzubauen. Dabei sollte darauf geachtet werden, das Material an Orten zu platzieren, an denen es seine Wirkung optimal entfalten kann. Beispiele für Räume dieser Art sind Kantinen, Warteräume, Einzelbüros und dergleichen.

Eine komplexere Betrachtung wird notwendig, wenn Räume für Sprachübertragung über große Entfernung genutzt werden sollen. In diesem Fall spielt nicht nur die Nachhallzeit eine Rolle, es kommen auch Energiekriterien hinzu, wie beispielsweise das Verhältnis von früh zu spät eintreffender Schallenergie an einem Zuschauerplatz. Der wichtigste Unterschied zur statistischen Raumakustik ist, dass diese Energiekriterien für jedes Paar von Sende- und Empfangsposition im Raum gesondert betrachtet werden können.<sup>26</sup> Ein relevantes Energiekriterium für die Sprachverständlichkeit ist beispielsweise das Deutlichkeitsmaß  $D_{50}$ . Es beschreibt das Verhältnis von früh (<50ms) zu spät (>50ms) beim Hörer eintreffender Schallleistung. Ein hohes Deutlichkeitsmaß ist neben einer kurzen Nachhallzeit und einem geringen Störgeräuschpegel wichtig für die Hörsamkeit von Sprache über mittlere und hohe Entfernungen in einem Raum.<sup>27</sup>

Die größte Herausforderung in der Raumakustik stellen Räume dar, die für musikalische Darbietungen optimiert werden sollen. Die erste Schwierigkeit bei der Suche nach dem „perfekten“ Raum ist die eingeschränkte Objektivität, mit der akustische Eigenschaften eingeschätzt werden können. Obgleich es eine Vielzahl messbarer Kriterien gibt, die an jedem Zuschauer-

---

<sup>25</sup> Vgl. [Fasold ; Veres 2003], S. 66.

<sup>26</sup> Vgl. ebd. S. 135 ff.

<sup>27</sup> Vgl. ebd. S. 150.

platz gemessen werden können, ist die Vorstellung optimaler Akustik für musikalische Darbietungen Geschmacksache und von einer Vielzahl subjektiver Faktoren abhängig.<sup>28</sup> Für musikalische Darbietungen optimierte Räume sind weiterhin unterteilbar in jene, in denen eine Beschallungsanlage verwendet wird und solche, in denen die Musik auf keine Weise elektronisch verstärkt wird. Räume ohne elektronische Verstärkung stellen hierbei die größere Herausforderung dar. Stellt sich zum Beispiel heraus, dass in einem Raum einige Zuschauer keine ausreichende Direktschallversorgung und daraus ein eingeschränktes Hörerlebnis oder eine eingeschränkte Sprachverständlichkeit erleiden, können nachträglich Lautsprecher am richtigen Ort angebracht werden um die Mängel zu beheben. In Räumen hingegen, in denen auf eine künstliche Beschallung verzichtet wird und sich die Schallquelle(n) ausschließlich auf der Bühne befinden, muss die akustische Qualität für jeden Zuschauer im Raum durch ausschließlich raumakustische Maßnahmen gesichert werden. Zu diesem Zweck müssen auf geschickte Weise schallabsorbierende oder schallreflektierende Flächen eingebaut werden, um die Schallenergie im richtigen Verhältnis von der Bühne zu jedem Punkt im Raum zu lenken. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit muss die geometrische Raumakustik jedoch nicht weiter betrachtet werden. Stattdessen wird, da der Einfluss der Luftdissipation auf die Nachhallzeit untersucht werden soll, lediglich die statistische Raumakustik und die Summe der Absorption im Raum behandelt.

Bei musikalischen Darbietungen in großen Sälen gibt es neben der vorangegangenen Betrachtung noch zwei weitere Einflussfaktoren auf die Nachhallzeit. Zum einen wird durch gegebenenfalls anwesendes Publikum Schall absorbiert. Um diesen Effekt auszugleichen, werden in Konzerthäusern Stühle verbaut, die in ihren absorbierenden Eigenschaften denen einer Person möglichst ähnlich sind. Zum anderen wird, wie im letzten Kapitel gezeigt wurde, Schallenergie durch die Luft selbst absorbiert. Die Nachhallzeit verändert sich daher mit variierenden meteorologischen Bedingungen innerhalb des Raumes, welche ebenfalls durch das Publikum verändert werden können. Dieser Effekt kann ebenfalls berechnet und in Gl. (6) ergänzt werden.<sup>29</sup>

$$T = 0,163 \frac{V}{\sum S_i \alpha_i + 8 \mu V} \quad \text{Gl. (10)}$$

---

<sup>28</sup> Vgl. [Fasold ; Veres 2003], S. 133.

<sup>29</sup> Vgl. [Cremer ; Müller 1976a], S.164.

Der neue Korrekturterm enthält neben dem Raumvolumen den Dämpfungskoeffizienten  $\mu$ . Für eine raumtypische Temperatur von 20 °C kann der er nach *Evans* und *Bazley*<sup>30</sup> durch eine experimentell ermittelte Näherungsformel bestimmt werden.

$$\mu = \frac{85}{\varphi/\%} \left( \frac{f}{k\text{ Hz}} \right)^2 * 10^{-4} \text{ Np/m} \quad \text{Gl. (11)}$$

Dabei ist für  $\varphi$  die relative Luftfeuchtigkeit entsprechend (1) einzusetzen. Die Formel beschränkt sich auf eine relative Luftfeuchtigkeit zwischen 30 % und 80 %, sowie auf den Frequenzbereich unterhalb 10 kHz.

Eine deutlich komplizierteres, jedoch auch weniger eingeschränktes und präziseres Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Absorptionskoeffizienten ist in [ISO 9613-1] zu finden.

---

<sup>30</sup> [Evans ; Bazley 1956], S. 238.



### 3 Prognose

Um eine Prognose über die Auswirkung variierender meteorologischer Bedingungen treffen zu können, werden in diesem Kapitel betroffene Normen auf nutzbare Werkzeuge untersucht.

#### 3.1 ISO 9613-1: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien; Teil 1: Berechnung der Schallabsorption durch die Luft

In [ISO 9613-1] werden Rechenvorschriften zur Berechnung der Luftdissipation im Freien definiert. Der Absorptionskoeffizient gibt an, um wieviel Dezibel ein Sinuston bei einer bestimmten Entfernung durch Luftdissipation gedämpft wird. Die Berechnung des Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  erfolgt danach wie folgt:

$$\alpha = 8,686f^2 \left( \left[ 1,84 \times 10^{-11} \left( \frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1/2} \right] + \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \times \left\{ 0,01275 \left[ \exp\left( \frac{-2239,1}{T} \right) \right] \left[ f_{rO} + \left( \frac{f^2}{f_{rO}} \right) \right]^{-1} + 0,1068 \left[ \exp\left( \frac{-3352,0}{T} \right) \right] \left[ f_{rN} + \left( \frac{f^2}{f_{rN}} \right) \right]^{-1} \right\} \right) \quad \text{Gl. (12)}$$

$$f_{rN} = \frac{p_a}{p_r} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-1/2} \times \left( 9 + 280h \exp\left\{ -4,170 \left[ \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-1/3} - 1 \right] \right\} \right) \quad \text{Gl. (13)}$$

$$f_{rO} = \frac{p_a}{p_r} \left( 24 + 4,04 \times 10^4 h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \right) \quad \text{Gl. (14)}$$

Mit:  $T_0 = 293,15$  K und  $p_r = 101,325$  kPa

Weiterhin sind einzusetzen: für  $f$  die Frequenz des zu betrachtenden Sinustons, für  $T$  die Umgebungstemperatur, für  $p_a$  der Umgebungsdruck und für  $h$  die „molare Konzentration“ des Wasserdampfes in der umgebenden Luft. Die molare Konzentration kennzeichnet das Verhält-

nis der Anzahl vorhandener Kilomol an Wasserdampf zu der Summe der Anzahl vorhandener Kilomol an Wasserdampf plus der Anzahl vorhandener Kilomol an Luft in einem Volumen<sup>31</sup> und ist somit sowohl von der Temperatur als auch vom Druck abhängig. Die Luftfeuchtigkeit wird gemeinhin als relative Luftfeuchtigkeit angegeben und ist, wie aus (1) hervorging, ohne die entsprechende Umgebungstemperatur wenig aussagekräftig über den absoluten Feuchtegehalt. Es ist zunächst notwendig, den Wert für die molare Konzentration zu ermitteln. Zu diesem Zweck werden in [ISO 9613-1] Anhang B Formeln angeboten.  $f_{rO}$  und  $f_{rN}$  sind jeweils die Relaxationsfrequenzen von Sauerstoff (Qxygen) und Stickstoff (Nitrogen).

Die obige Berechnung des Absorptionskoeffizienten wurde hinsichtlich der Kompaktheit und Benutzbarkeit der Formel optimiert. Die einzelnen physikalischen Mechanismen, wie sie bei der Dissipation durch Luft zum Tragen kommen, wurden dabei vermischt. In [ISO 9613-1] Anhang A wird  $\alpha$  auf alternativem Weg berechnet, diesmal als Summe der auf die unterschiedlichen Mechanismen zurückzuführenden Teilkomponenten. Dies ermöglicht den quantitativen Vergleich der verschiedenen Komponenten unter verschiedenen Bedingungen.

$$\alpha = \alpha_{cl} + \alpha_{rot} + \alpha_{vib,O} + \alpha_{vib,N}$$

Gl. (15)

$\alpha_{cl}$  = Absorption aufgrund der Effekte der klassischen Physik

$\alpha_{rot}$  = Absorption durch Molekülrotation

$\alpha_{vib,O}$  = Absorption durch Molekülschwingung des Sauerstoffs

$\alpha_{vib,N}$  = Absorption durch Molekülschwingung des Stickstoffs

Unter üblichen Bedingungen sind die klassische Absorption und die Absorption durch Molekülrotation lediglich vom Umgebungsdruck abhängig und werden bei der Berechnung daher als ein Term zusammengefasst. Statt die umfangreichen Gleichungen aufzulisten, wird an dieser Stelle die Aufteilung der Gesamtdissipation an einem Fallbeispiel untersucht.

---

<sup>31</sup> [ISO 9613-1], S. 2.

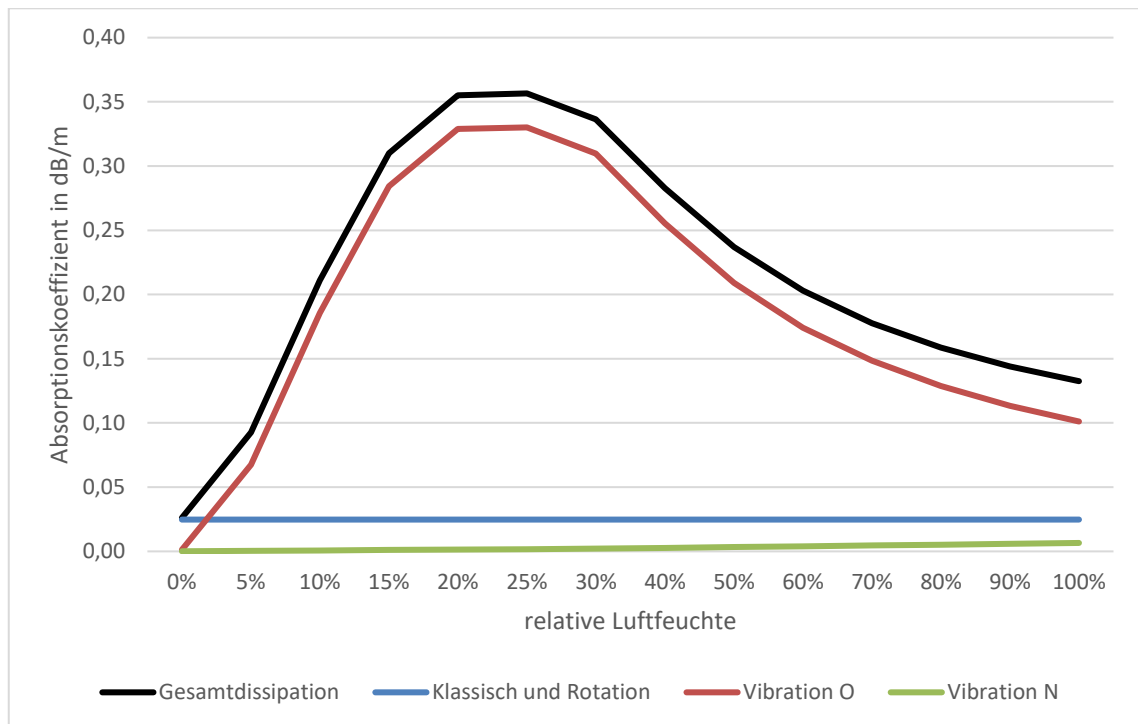


Abbildung 6: Quantitative Untersuchung der Dissipationsursachen bei 12 500 Hz, 20°C, 100 kPa

Bei den gegebenen Randbedingungen sind die Werte für klassische Absorption, molekulare Rotation und molekulare Vibration der Stickstoffmoleküle über die gesamte relative Luftfeuchtigkeit nahezu konstant. Während  $\alpha_{cl}$  und  $\alpha_{rot}$  bis auf den Fall sehr trockener Luft eher klein zu  $\alpha_{vib,O}$  sind, bewegt sich  $\alpha_{vib,N}$  unterhalb 35 % relativer Feuchte gegen null und steigt oberhalb leicht an, bleibt jedoch im Vergleich zu den anderen Größen irrelevant. Den größten Anteil an der Gesamtsumme, vor allem im Bereich üblicher Luftfeuchtigkeiten, stellt die Absorption durch Vibration der Sauerstoffmoleküle. Darüber hinaus lässt sich beobachten, dass sich bei ca. 25 % relativer Luftfeuchte ein Maximalwert einstellt, sowohl für  $\alpha_{vib,O}$ , als auch für die Gesamtsumme. An dieser Stelle, bei 22,5 % relativer Luftfeuchtigkeit, beträgt die Relaxationsfrequenz der Sauerstoffmoleküle genau 12500 Hz und ist somit gleich der Schallfrequenz. In diesem Fall kann in jeder Periode der Schallwelle genau ein Relaxationsprozess abgeschlossen werden, was den Dissipationsverlust maximiert. Wie in Abb. 3 gezeigt wurde, steigt  $f_{rO}$  mit der Luftfeuchtigkeit. Da sie bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 22,5 % bereits den Wert von 12500 Hz erreicht hat, man sich in der Raumakustik mit noch höheren Frequenzen kaum mehr auseinandersetzt und trockenere Luft als die oben genannte selten vorkommt, kann festgehalten werden, dass die Luftdissipation innerhalb üblicher Randbedingungen immer mit höherer Luftfeuchte sinkt.

Damit für eine schnelle Einschätzung der Luftdissipation unter verschiedenen Bedingungen die umfangreichen Formeln vermieden werden können, wird eine große Anzahl möglicher Konstellationen in Tabellen aufgelistet. Die für unsere Untersuchungen zweckmäßige Tabelle zeigt Werte bei einer Temperatur von 20 °C.

(i) Air temperature: 20 °C											
Preferred frequency Hz	Relative humidity, %										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
50	$2,70 \times 10^{-1}$	$2,14 \times 10^{-1}$	$1,74 \times 10^{-1}$	$1,25 \times 10^{-1}$	$9,65 \times 10^{-2}$	$7,84 \times 10^{-2}$	$6,60 \times 10^{-2}$	$5,70 \times 10^{-2}$	$5,01 \times 10^{-2}$	$4,47 \times 10^{-2}$	$4,03 \times 10^{-2}$
63	$3,70 \times 10^{-1}$	$3,10 \times 10^{-1}$	$2,60 \times 10^{-1}$	$1,92 \times 10^{-1}$	$1,50 \times 10^{-1}$	$1,23 \times 10^{-1}$	$1,04 \times 10^{-1}$	$8,97 \times 10^{-2}$	$7,90 \times 10^{-2}$	$7,05 \times 10^{-2}$	$6,37 \times 10^{-2}$
80	$4,87 \times 10^{-1}$	$4,32 \times 10^{-1}$	$3,77 \times 10^{-1}$	$2,90 \times 10^{-1}$	$2,31 \times 10^{-1}$	$1,91 \times 10^{-1}$	$1,62 \times 10^{-1}$	$1,41 \times 10^{-1}$	$1,24 \times 10^{-1}$	$1,11 \times 10^{-1}$	$1,00 \times 10^{-1}$
100	$6,22 \times 10^{-1}$	$5,79 \times 10^{-1}$	$5,29 \times 10^{-1}$	$4,29 \times 10^{-1}$	$3,51 \times 10^{-1}$	$2,94 \times 10^{-1}$	$2,52 \times 10^{-1}$	$2,20 \times 10^{-1}$	$1,94 \times 10^{-1}$	$1,74 \times 10^{-1}$	$1,58 \times 10^{-1}$
125	$7,76 \times 10^{-1}$	$7,46 \times 10^{-1}$	$7,12 \times 10^{-1}$	$6,15 \times 10^{-1}$	$5,21 \times 10^{-1}$	$4,45 \times 10^{-1}$	$3,86 \times 10^{-1}$	$3,39 \times 10^{-1}$	$3,02 \times 10^{-1}$	$2,72 \times 10^{-1}$	$2,47 \times 10^{-1}$
160	$9,65 \times 10^{-1}$	$9,31 \times 10^{-1}$	$9,19 \times 10^{-1}$	$8,49 \times 10^{-1}$	$7,52 \times 10^{-1}$	$6,60 \times 10^{-1}$	$5,82 \times 10^{-1}$	$5,18 \times 10^{-1}$	$4,65 \times 10^{-1}$	$4,21 \times 10^{-1}$	$3,84 \times 10^{-1}$
200	1,22	1,14	1,14	1,12	1,05	$9,50 \times 10^{-1}$	$8,58 \times 10^{-1}$	$7,76 \times 10^{-1}$	$7,05 \times 10^{-1}$	$6,44 \times 10^{-1}$	$5,91 \times 10^{-1}$
250	1,58	1,39	1,39	1,42	1,39	1,32	1,23	1,13	1,04	$9,66 \times 10^{-1}$	$8,95 \times 10^{-1}$
315	2,12	1,74	1,69	1,75	1,78	1,75	1,68	1,60	1,50	1,41	1,33
400	2,95	2,23	2,06	2,10	2,19	2,23	2,21	2,16	2,08	2,00	1,90
500	4,25	2,97	2,60	2,52	2,63	2,73	2,79	2,80	2,77	2,71	2,63
630	6,26	4,12	3,39	3,06	3,13	3,27	3,40	3,48	3,52	3,52	3,49
800	9,36	5,92	4,62	3,84	3,77	3,89	4,05	4,19	4,31	4,39	4,43
1 000	$1,41 \times 10$	8,72	6,53	5,01	4,65	4,66	4,80	4,98	5,15	5,30	5,42
1 250	$2,11 \times 10$	$1,31 \times 10$	9,53	6,81	5,97	5,75	5,78	5,92	6,10	6,29	6,48
1 600	$3,13 \times 10$	$1,98 \times 10$	$1,42 \times 10$	9,63	8,00	7,37	7,17	7,18	7,31	7,48	7,68
2 000	$4,53 \times 10$	$2,99 \times 10$	$2,15 \times 10$	$1,41 \times 10$	$1,12 \times 10$	9,86	9,25	9,02	8,98	9,06	9,21
2 500	$6,35 \times 10$	$4,48 \times 10$	$3,26 \times 10$	$2,10 \times 10$	$1,61 \times 10$	$1,37 \times 10$	$1,25 \times 10$	$1,18 \times 10$	$1,15 \times 10$	$1,13 \times 10$	$1,13 \times 10$
3 150	$8,54 \times 10$	$6,62 \times 10$	$4,94 \times 10$	$3,18 \times 10$	$2,39 \times 10$	$1,98 \times 10$	$1,75 \times 10$	$1,61 \times 10$	$1,53 \times 10$	$1,48 \times 10$	$1,45 \times 10$
4 000	$1,09 \times 10^2$	$9,51 \times 10$	$7,41 \times 10$	$4,85 \times 10$	$3,61 \times 10$	$2,94 \times 10$	$2,54 \times 10$	$2,29 \times 10$	$2,13 \times 10$	$2,02 \times 10$	$1,94 \times 10$
5 000	$1,33 \times 10^2$	$1,32 \times 10^2$	$1,09 \times 10^2$	$7,39 \times 10$	$5,51 \times 10$	$4,44 \times 10$	$3,79 \times 10$	$3,36 \times 10$	$3,06 \times 10$	$2,86 \times 10$	$2,71 \times 10$
6 300	$1,56 \times 10^2$	$1,75 \times 10^2$	$1,56 \times 10^2$	$1,12 \times 10^2$	$8,42 \times 10$	$6,78 \times 10$	$5,74 \times 10$	$5,04 \times 10$	$4,54 \times 10$	$4,18 \times 10$	$3,91 \times 10$
8 000	$1,75 \times 10^2$	$2,21 \times 10^2$	$2,15 \times 10^2$	$1,66 \times 10^2$	$1,28 \times 10^2$	$1,04 \times 10^2$	$8,78 \times 10$	$7,66 \times 10$	$6,86 \times 10$	$6,26 \times 10$	$5,81 \times 10$
10 000	$1,93 \times 10^2$	$2,67 \times 10^2$	$2,84 \times 10^2$	$2,42 \times 10^2$	$1,94 \times 10^2$	$1,59 \times 10^2$	$1,35 \times 10^2$	$1,18 \times 10^2$	$1,05 \times 10^2$	$9,53 \times 10$	$8,79 \times 10$

Tabelle 3: Dämpfung von Sinustönen in Abhängigkeit zur relativen Luftfeuchte bei 20°C<sup>32</sup>

Um die Zusammenhänge übersichtlicher zu gestalten, kann der Absorptionskoeffizient aus (12) in einem Diagramm über der Frequenz aufgetragen werden.

<sup>32</sup> [ISO 9613-1] S. 9.

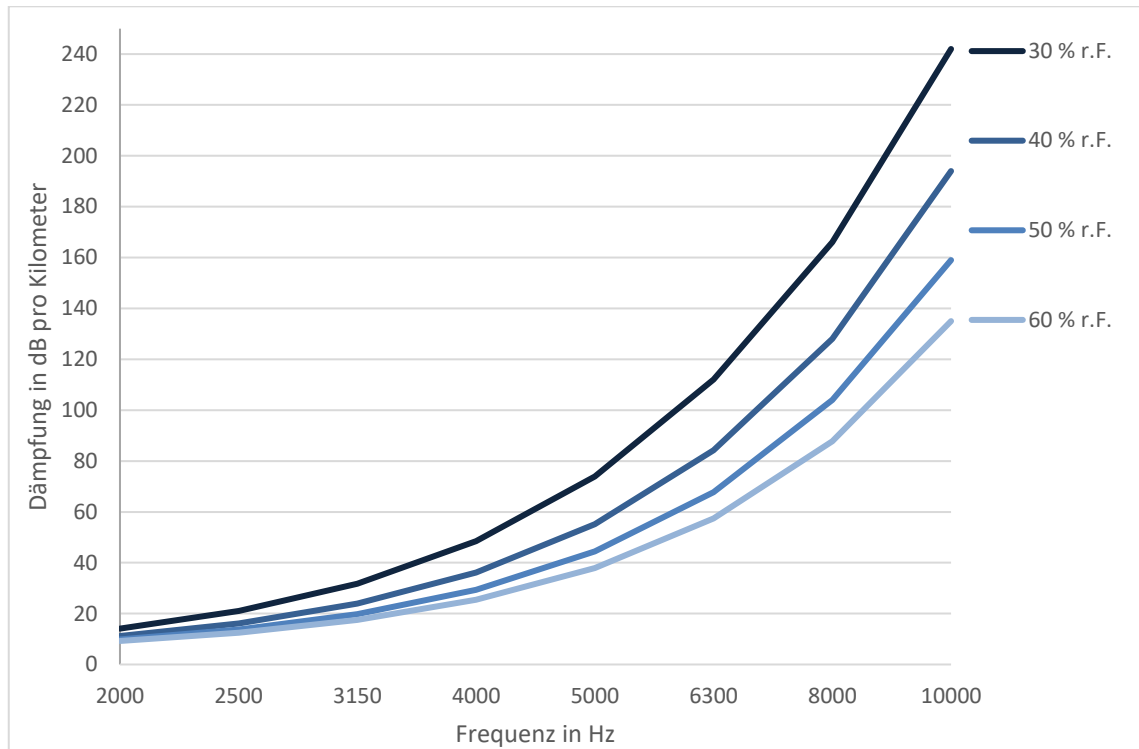


Abbildung 7: Luftdissipation für reine Sinustöne bei 20 °C

Generell ist der Effekt bei tiefen Frequenzen zu vernachlässigen. Erst bei Frequenzen oberhalb 2000 Hz kommt es zu einer wirksamen Absorption der Schallenergie. Ebenfalls erst oberhalb dieser Frequenz macht es einen Unterschied, wie hoch die relative Luftfeuchtigkeit ist. Je höher die betrachtete Frequenz, desto größer ist der Effekt der schwankenden Luftfeuchtigkeit. Außerdem ist die Änderung des Absorptionskoeffizienten größer, wenn sich die Schwankungen der Luftfeuchtigkeit im trockeneren Bereich abspielen. So führt ein Zuwachs der relativen Luftfeuchtigkeit von 30 % auf 40 % zu einem deutlich höheren Zuwachs des Absorptionskoeffizienten als eine Änderung von 40 % auf 50 %. Wie stark sich die relative Luftfeuchtigkeit während einer Vorstellung ändert und in welchem Bereich, bleibt an dieser Stelle noch offen. Nimmt man als Beispiel an, sie wachse von 30 % auf 50 %, lassen sich jedoch bereits jetzt einige Aussagen machen. Bei 10000 Hz beispielsweise, sinkt die Dämpfung von 242 dB/Km auf 159 dB/Km pro Kilometer. Wie stark sich diese Änderung auf die Nachhallzeit im Raum auswirkt, hängt davon ab wie groß der Anteil der durch Luftdissipation absorbierten Schallenergie im Verhältnis zu der durch absorbierende Flächen absorbierten Schallenergie ist. Dieses Verhältnis unterscheidet sich von Raum zu Raum und ist jeweils zu betrachten. Je größer das Raumvolumen und je kleiner der Absorptionsgrad der Begrenzungsflächen, desto länger ist die

Weglänge der einzelnen Schallstrahlen und desto größer wird der Anteil der durch Luftdissipation absorbierten Energie.

### 3.2 DIN 354: Messung der Nachhallzeit in Hallräumen

Gemäß [DIN 354] wird die äquivalente Absorptionsfläche des Hallraumes berechnet durch:

$$A_{\text{korrigiert}} = A_{\text{Mat}} - A_{\text{Dis}} = 55,3 \frac{V}{c T} - 4 V m \quad \text{Gl. (16)}$$

Bei dieser Gleichung handelt es sich um die Sabinesche Formel (Gl. 4), welche für die Anwendung auf einen Hallraum um die Schallgeschwindigkeit ( $c$ ) und einen Korrekturterm für Luftdissipation  $A_{\text{Dis}}$  ( $4 V m$ ) erweitert wurde.  $m$  ist hierbei der Dämpfungskoeffizient und zu berechnen durch:

$$m = \frac{\alpha}{10 \lg(e)} \quad \text{Gl. (17)}$$

Wobei der Wert für  $\alpha$  entsprechend den klimatischen Bedingungen und der Frequenz aus [ISO 9613-1] zu entnehmen ist. Die Berechnung der auf Luftdissipation zurückzuführenden äquivalenten Absorptionsfläche geschieht also mit:

$$A_{\text{Dis}} = 4 V \frac{\alpha}{10 \lg(e)} \quad \text{Gl. (18)}$$

Da das Raumvolumen im Korrekturterm aus (18) als Faktor steht, steigt die Absorption durch Luft erwartungsgemäß linear mit dem Volumen. Die Änderung des Verhältnisses von  $A_{\text{Dis}}$  zur gesamten äquivalenten Absorptionsfläche ist jedoch abhängig von der Nachhallzeit und steigt zusammen mit dieser. Die Auswirkung der Luftdissipation ist folglich besonders prägnant bei wenig bedämpften Räumen mit einer hohen Nachhallzeit und bei hohen Frequenzen. Hallräume stellen in dieser Hinsicht einen Extremfall dar, jedoch kann der Effekt, wie sich im praktischen Teil herausstellen wird, auch in Sälen mit langer Nachhallzeit von großer Bedeutung sein.

### 3.3 DIN 3382: Messung von Parametern in der Raumakustik

In [DIN 3382-1] werden Messverfahren zur Ermittlung der Nachhallzeit und anderer raumakustischer Größen in Aufführungsräumen definiert und erklärt. Es werden außerdem Hinweise zu Messbedingungen und Vorgehensweise gegeben, mit dem Ziel, Ergebnisse von Nachhallzeitmessungen zu standardisieren und vergleichbar zu machen. Als Aufführungsräume im Sinne der Norm sind große Säle mit Zuschauerplätzen wie Philharmonien, Opern, Konzertsäle zu verstehen. Die Temperatur und relative Luftfeuchte werden in dieser Norm an zwei Stellen erwähnt:

*„Die Temperatur und relative Luftfeuchte im Raum sollten mit einer Grenzabweichung von  $\pm 1$  °C und  $\pm 5$  % gemessen werden“*<sup>33</sup>

*„Der Prüfbericht muss folgende Angaben enthalten: [...], Temperatur und relative Luftfeuchte im Raum während der Messung“*<sup>34</sup>

Eine Korrektur der Messwerte für verschiedene klimatische Bedingungen wie in [DIN 354], wird bei den Messverfahren für Aufführungsräume nach [DIN 3382-1] nicht genannt oder gefordert. Die Temperatur und dazugehörige Luftfeuchte sollen lediglich mit einer bestimmten Genauigkeit gemessen und die Daten dem Prüfbericht angefügt werden. Was weiterhin mit den Informationen geschieht, oder was diese aussagen, findet in [DIN 3382-1] zunächst keine Beachtung. Es bleibt dem Raumakustiker überlassen, eine Einschätzung zu treffen, ob und inwiefern Messergebnisse durch klimatische Bedingungen beeinträchtigt sind. Es ist jedoch nicht trivial eine schnelle Einschätzung zu geben, da der relative Einfluss der Luftdissipation, wie bereits gezeigt, von Volumen, Nachhallzeit, Temperatur und relativer Luftfeuchte abhängt. In Abhängigkeit der anderen Größen verändert sich der Schwellenwert für eine bedenkliche Luftfeuchte stets.

---

<sup>33</sup> [DIN 3382-1] S. 7.

<sup>34</sup> Ebd. S. 13.

In [DIN 3382-2] wird die Luftfeuchte ebenfalls erwähnt. In Abschnitt 4: Messbedingungen wird darauf hingewiesen, dass die Dämpfung durch Luft bei hohen Frequenzen wesentlich zur Schallabsorption beiträgt und das bei „Präzisionsverfahren“ normalerweise die Temperatur und relative Feuchte der Luft im Raum gemessen werden muss. Weiterhin sei der Beitrag durch Luftabsorption vernachlässigbar, wenn die Nachhallzeit bei 2 kHz kürzer als 1,5 s und bei 4 kHz kürzer als 0,8 s ist. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass die Luftdissipation in jedem Raum, in dem die Nachhallzeit über den genannten Werten liegt, einzubeziehen ist. In Anbetracht der kurzen Nachhallzeiten von 1,5 s und 0,8 s fallen die meisten Aufführungsräume in diese Kategorie. Die Betrachtung von Temperatur und Luftfeuchte beschränkt sich allerdings auf das sogenannte Präzisionsverfahren, welches im Sinne der Norm durch eine höhere Anzahl an Messpunkten eine höhere Messgenauigkeit gegenüber dem Kurz- oder dem Standardverfahren liefert.

Hinweise, ob die gemessenen Werte hinsichtlich der dazugehörigen Temperatur und Luftfeuchte rechnerisch korrigiert werden müssen und wie dies zu bewerkstelligen ist, sind in beiden Teilen der Norm nicht zu finden.

### 3.4 Werkzeuge zur Prognostizierung der Nachhallzeitänderung durch variierende Luftfeuchtigkeit

Mit den aus [DIN 354] und [ISO 9613-1] entnommenen Werkzeugen lassen sich für beliebige Zusammensetzungen aus Nachhallzeit, Raumvolumina und meteorologischen Eigenschaften Prognosen über den Betrag der Luftdissipation im Raum machen. Sind für einen Raum die gemessene Nachhallzeit und die äquivalente Absorptionsfläche durch Materialien ( $A_{Mat}$ ) bekannt, lässt sich die äquivalente Absorptionsfläche durch Luftdissipation ( $A_{Dis}$ ) bei den meteorologischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Messung bestimmen. Auf dieser Grundlage können verschiedene Raumzustände durch Modifizierung von  $A_{Dis}$  berechnet werden. Durch Umstellen von (16) erhält man:

$$T = 55,3 * \frac{V}{c (A_{Mat} + A_{Dis})} \quad \text{Gl. (19)}$$

$$A_{Mat} = 55,3 * \frac{V}{c T} - A_{Dis} \quad \text{Gl. (20)}$$



$$A_{Dis} = 55,3 * \frac{V}{c T} - A_{Mat} \quad \text{Gl. (21)}$$

Diese Werkzeuge werden im praktischen Teil der Arbeit ihre Anwendung finden.

### 3.5 Implikationen aufgrund der Luftdissipation

Durch die schwankende Luftdissipation bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten ergeben sich mehrschichtige Herausforderungen. Wie bereits dargelegt wurde, kann sich die Nachhallzeit, vor allem in halligen Räumen, durch den Einfluss der Luftfeuchte mitunter stark verändern. Dadurch ergeben sich Schwierigkeiten bei der Reproduzierbarkeit von raumakustischen Messungen. Ein Beispiel aus der Praxis liefert ein firmeninterner Messbericht. Die raumakustischen Eigenschaften eines Saales, der für musikalische Darbietungen und Kongresse genutzt wird, sollten vor und nach einer Sanierung messtechnisch erfasst werden. Dies ist eine weit verbreitete Vorgehensweise, um bauliche Maßnahmen und ihren Einfluss auf die Raumakustik nachweisen zu können. Die Art der baulichen Maßnahmen und andere Details können aus Gründen der Geheimhaltung nicht weiter spezifiziert werden. Bei der Bestandsmessung wurde die Luft im Raum mit 30 % relativer Feuchte bei einer Temperatur von 20 °C gemessen. Bei der Vergleichsmessung hingegen wurde eine relative Feuchte von 46 % bei einer Temperatur von 22 °C gemessen. Die äquivalenten Absolutwerte der Luftfeuchte von jeweils 5,18 g/m<sup>3</sup> und 8,93 g/m<sup>3</sup> unterscheiden demnach sich deutlich. Obgleich die Nachhallzeit nur im typischen Bereich von 125 Hz bis 4000 Hz betrachtet wurde und der bezogen auf die Luftdissipation besonders kritische Frequenzbereich oberhalb 4000 Hz demnach nicht in die Betrachtung einfluss, war es dringend notwendig, eine Korrektur der Werte vorzunehmen. Um zwei vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden die Werte aus der zweiten Messung rechnerisch für die meteorologischen Gegebenheiten der ersten Messung angepasst. Aus Abbildung 10 wird erkenntlich, wie der Nachhallzeitverlauf der Vergleichsmessung ohne die Korrektur aussehen würde. Bereits bei einer Frequenz von 4000 Hz liegen die Vergleichswerte deutlich unter denen aus der Bestandsmessung. Unter Nichtbetrachtung der Luftdissipation würde der Vergleich beider Zustände zu irreführenden und falschen Ergebnissen führen. Die geplante Steigerung der Nachhallzeit nach Durchführung der baulichen Maßnahmen würde nicht nur zu gering, sondern gegenteilig ausgefallen.

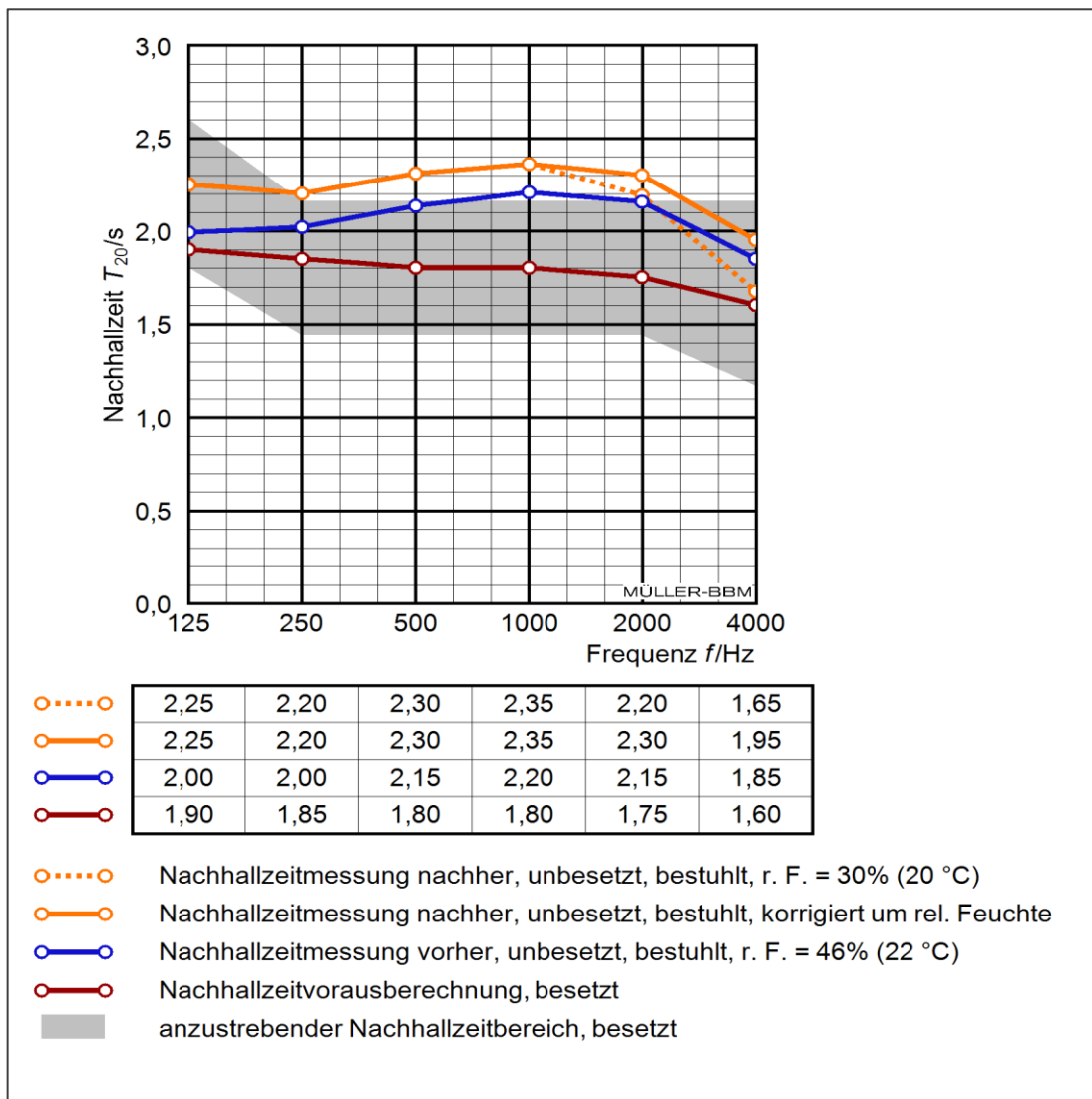


Abbildung 8: Anpassung der Nachhallzeit im Praxisfall [Nies]

Unter Anbetracht dieses Beispiels wird nachvollziehbar, dass vor allem bei stark vom Durchschnitt abweichenden Feuchtigkeiten immer eine Korrektur vorgenommen werden sollte. Selbst wenn die Messergebnisse nicht als Referenzwerte für eine spätere Vergleichsmessung genutzt werden, kann gegebenenfalls keine Aussage über die Raumakustik bei stark unterschiedlichen Luftfeuchten geschlossen werden. Der geographische Aspekt sollte ebenfalls beachtet werden. In Abbildung 4 wurden einige Beispiele für meteorologische Daten während raumakustischer Messungen aufgeführt. Das obere Ende des Spektrums stellte die Messung in Wuhan, China dar, mit einer relativen Luftfeuchte von 70 % bei 30 °C. Solcherlei Werte sind in

Südostasien keine Seltenheit. So sind in Wuhan in den Sommermonaten mittlere Temperaturen von knapp 30 °C bei durchschnittlichen Luftfeuchten von bis zu 80 % üblich.<sup>35</sup> In Berlin hingegen, finden sich im selben Zeitraum Durchschnittstemperaturen von 19 °C bei 64 % relativer Luftfeuchte.<sup>36</sup>

Bei der Planung sollte der durchschnittliche Feuchtegehalt der Außenluft durchaus berücksichtigt werden. Der gleiche Saal kann, je nachdem ob er in durchschnittlich trockener oder feuchter Umgebung gebaut wird, unterschiedliche Mengen an ergänzender hochfrequenter Absorption benötigen. Normalerweise sind Säle in Ländern mit extremen Bedingungen während einer Vorstellung klimatisiert. Jedoch darf nicht vernachlässigt werden, dass, sollte die feuchteregulierende Klimaanlage aus nicht vorhersehbaren Gründen ausfallen, mit möglicherweise schwerwiegenden Differenzen in der Raumakustik des Raumes zu rechnen ist.

Neben der möglichen Diskrepanz der Luftfeuchte an unterschiedlichen Tagen, unterschiedlichen Orten oder zu unterschiedlichen Jahreszeiten, muss auch die Möglichkeit der Änderung während einer einzigen Vorstellung in Betracht gezogen werden. Aus Tabelle 1 lässt sich für einen Menschen bei sitzender Tätigkeit und einer Raumtemperatur von 20 °C eine Feuchtigkeitsabgabe in die umgebende Luft von 35 g/h ablesen. Anhand dieser Information lässt sich ein generelles Rechenbeispiel konstruieren. Räume werden in der Raumakustik gerne durch ihre Volumen Kennzahl charakterisiert. Sie beschreibt das Verhältnis von Raumvolumen und Zuschauerplätzen und wird für den Zweck dieser Beispielrechnung mit einem typischen Wert von 10 m<sup>3</sup>/Platz angenommen.<sup>37</sup> Jeder Zuschauer gibt bei einer zweistündigen Vorstellung zusätzlichen Wasserdampf von 7 g/m<sup>3</sup> in den Raum ab, was bei 20 °C nach (2) einer Steigerung der relativen Luftfeuchtigkeit von 40 % entspricht. Der Feuchtigkeitsabgabe des Publikums steht, neben einer gegebenenfalls verbauten Klimaanlage, die Eigenschaft der Materialien im Raum entgegen, Feuchtigkeit zu absorbieren und die Feuchte so zu regulieren. Die Menge der absorbierten Feuchtigkeit ist vom Material und einer Reihe anderer Einflüsse abhängig. Eine Prognose, wie sich das Gleichgewicht der Luftfeuchte in einem Raum verhält, ist nicht ohne weiteres durchzuführen. Bei der Betrachtung eines konkreten Raumes ist entweder bei der Planung die Hilfe eines Klimatechnik-Experten hinzu zu ziehen oder der Luftfeuchteverlauf

---

<sup>35</sup> [D. Wetterdienst a]

<sup>36</sup> [D. Wetterdienst b]

<sup>37</sup> Vgl. [Fasold, ; Veres 2003], S. 198.

während einer Vorstellung im fertigen Raum zu messen. Auf Grundlage der Feuchtedaten kann anschließend eine Prognose der Nachhallzeitänderung vorgenommen und durch Messungen vor und nach einer Vorstellung bestätigt werden.

## 4 Praktischer Teil

### 4.1 Messungen

In diesem Teil der Arbeit sollen die erarbeiteten Erkenntnisse Anwendung finden. Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit vier Messungen vorgenommen. Ziel der ersten Messung war der Nachweis der Funktionstüchtigkeit der in Kapitel 3 erarbeiteten Prognosewerkzeuge. Anschließend wurden zwei Messungen in Konzertsälen vorgenommen, um die tatsächliche Auswirkung der Luftfeuchteänderung, auch während einer Vorstellung, zu untersuchen. Zuletzt wurden bei einer Messung mit verbautem elektronischen Raumakustiksystem die Wechselwirkungen zwischen System und Luftfeuchte untersucht.

Alle Messungen wurden über das Verfahren der integrierten Impulsantwort gemäß [DIN 3382-1] S. 11 bis S. 13 realisiert. Als Signal wurde stets ein Sinus-Sweep verwendet.

#### 4.1.1 Hallraum

Im ersten Schritt wurde die Überprüfung der erarbeiteten Methoden zur Nachhallzeitänderungsprognose durch eine reproduzierbare und möglichst unter laborähnlichen Bedingungen durchführbare Messung durchgeführt. Als geeigneter Ort zur Durchführung dieser Messungen wurde der Hallraum der Müller-BBM GmbH in Planegg gewählt.

Hallräume dienen üblicherweise der Bestimmung des Absorptionsgrads eines zu prüfenden Materials. Dabei wird eine Probe des Materials in den Hallraum installiert, wodurch über die messtechnisch ermittelte Änderung der äquivalenten Absorptionsfläche im Raum, mit und ohne Probe, der Absorptionsgrad berechnet werden kann. Hallräume sollen laut [DIN 354] über ein Volumen von mindestens  $200 \text{ m}^3$  verfügen, außerdem eine möglichst hohe und über das Frequenzspektrum gleichmäßige Nachhallzeit bieten und zudem ein annähernd diffuses Schallfeld vorweisen können. Abgesehen vom eigentlichen Zweck dieser Hallräume, sind sie wegen ihrer laborähnlichen Eigenschaften sehr gut zur Untersuchung der Luftdissipation geeignet.



Abbildung 9: Versuchsaufbau Hallraum

Um den Einfluss der Luftdissipation nachzuweisen, wurde eine Reihe von Messungen durchgeführt. Zunächst wurde die Luftfeuchte im Raum mit einem Luftbefeuchter stark erhöht, wobei der Spitzenwert zum Zeitpunkt der ersten Messreihe 76,8 % r.F. bei 22,7 °C betrug. Anschließend wurde die Luftfeuchte nach jedem Messdurchlauf durch Belüften des Raumes schrittweise wieder gesenkt. Darüber hinaus waren im Raum drei Ventilatoren verteilt, um eine homogene Verteilung der Feuchte zu gewährleisten. Zum Zeitpunkt jeder Messung wurde die entsprechende Luftfeuchtigkeit notiert. Auf Grundlage dieser Daten kann nun der prognostizierte Einfluss der Luftdissipation experimentell nachgewiesen und auf Genauigkeit überprüft werden. Zur Untersuchung der Ergebnisse werden von insgesamt sechs Messreihen an dieser Stelle nur drei dargestellt. Darunter sind die Messung beim höchsten Feuchtegehalt als Referenzmessung, von der aus die Prognosen errechnet wurden, die Messung beim geringsten Feuchtegehalt und eine weitere Messung, die in ihrem Feuchtegehalt ungefähr in der Mitte der ersten beiden Messungen liegt.

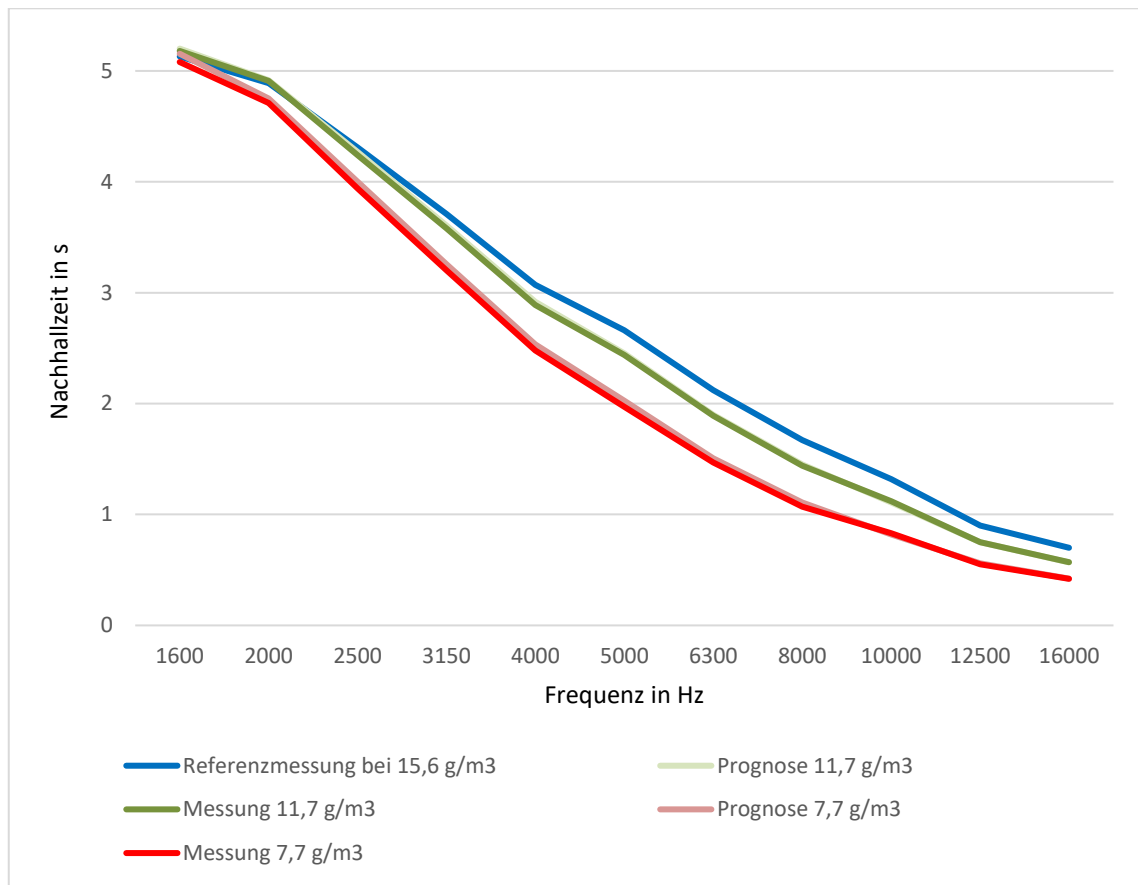


Abbildung 10: Vergleich Prognose und Messung der Nachhallzeitänderung

In Abb. 10 wird erkennbar, dass die Prognosen sehr gut mit den Messungen übereinstimmen. Allerdings weichen Prognose und Messung mehr voneinander ab, je höher die Differenz im Feuchtegehalt zwischen beiden Messungen ist. Die größte Abweichung einer einzelnen Terz liegt bei 3,47 % bei 8000 Hz. Tendenziell fällt die bei den Messungen festgestellte Änderung im Vergleich zum prognostizierten Wert leicht höher aus, unterschiedliche Gründe haben kann. In Kapitel 7 von [ISO 9613-1] wird die Genauigkeit der berechneten Dämpfungskoeffizienten bei den gemessenen meteorologischen Bedingungen mit  $\pm 10\%$  angegeben. Auch die verwendeten Messgeräte, die Schallpegelmesser, die Hygrometer, weisen immer gewisse Messungenauigkeiten auf. Unter den gegebenen Bedingungen liegen nun alle Werkzeuge bereit, um rechnerische Prognosen für die Nachhallzeitänderung bei schwankender Luftfeuchte treffen zu können. Die Anwendung im Praxisfall wird mehr Ungenauigkeiten mit sich bringen. Messungenauigkeiten und Inhomogenität der Luftfeuchte werden die Präzision der Prognosen senken. Jedoch können auf Grundlage des Experiments generelle Fehler bei der Vorgehensweise ausgeschlossen werden.

### 4.1.2 Konzerthaus Berlin (Großer Saal)

Der im Jahre 1820 erbaute und 1984 erneuerte große Saal des Konzerthaus Berlins wird in der Literatur mit einer durchschnittlichen Nachhallzeit von ca. 2 Sekunden bei einem Volumen von 15 000 m<sup>3</sup> angegeben.<sup>38</sup>

Die Luftfeuchte zum Zeitpunkt der Messung wurde mit einem tragbaren Hygrometer an 17 im Raum verteilten Messpunkten gemessen und anschließend gemittelt. Die Messpunkte befanden sich im Zuschauerbereich unten und in den Rängen, einige Meter erhöht. Es war organisatorisch nicht möglich, die Luftfeuchte in Deckennähe zu ermitteln, wo sie vermutlich etwas höher ausfallen würde.

Ursprünglich war geplant, eine Messung vor und eine Messung nach der Vorstellung durchzuführen. Es wurde erwartet, dass durch die Feuchtigkeitsabgabe des Publikums die Luftfeuchte während der Vorstellung so stark steigt, dass eine Änderung der Nachhallzeit festgestellt werden kann. Durch Messungen mit Hygrometern während der Vorstellung stellte sich allerdings heraus, dass sich die absolute Luftfeuchte nicht änderte, was entweder auf die Klimaanlage, die Feuchtesorption der Materialien im Raum oder eine Mischung aus beidem zurückzuführen ist. Alternativ zum ursprünglichen Plan wurde stattdessen eine Prognose der Nachhallzeitänderung für verschiedenen Luftfeuchten auf Grundlage der Messung nach der Vorstellung gemacht.

Anhand der Nachhallzeit und der meteorologischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Messung (22,5 °C / 42 % r.F.) lassen sich unter Benutzung von (19), (20) und (21) für jede Terzmittenfrequenz Werte für  $A_{Mat}$  und  $A_{Dis}$  ermitteln. Anschließend kann  $A_{Dis}$  mit (21) für variierende Luftfeuchten modifiziert werden. Die bereits ermittelten Werte für  $A_{Mat}$  bleiben jedoch in jedem Fall gleich. Auf diese Weise können die möglichen Auswirkungen stark schwankender Luftfeuchte untersucht werden. Ausgehend von der Messung wurden so zwei Nachhallzeitverläufe in Abhängigkeit stark schwankender Luftfeuchte errechnet und in Abb. 11 dargestellt.

---

<sup>38</sup> Vgl. [Fasold ; Veres 2003], S. 198.



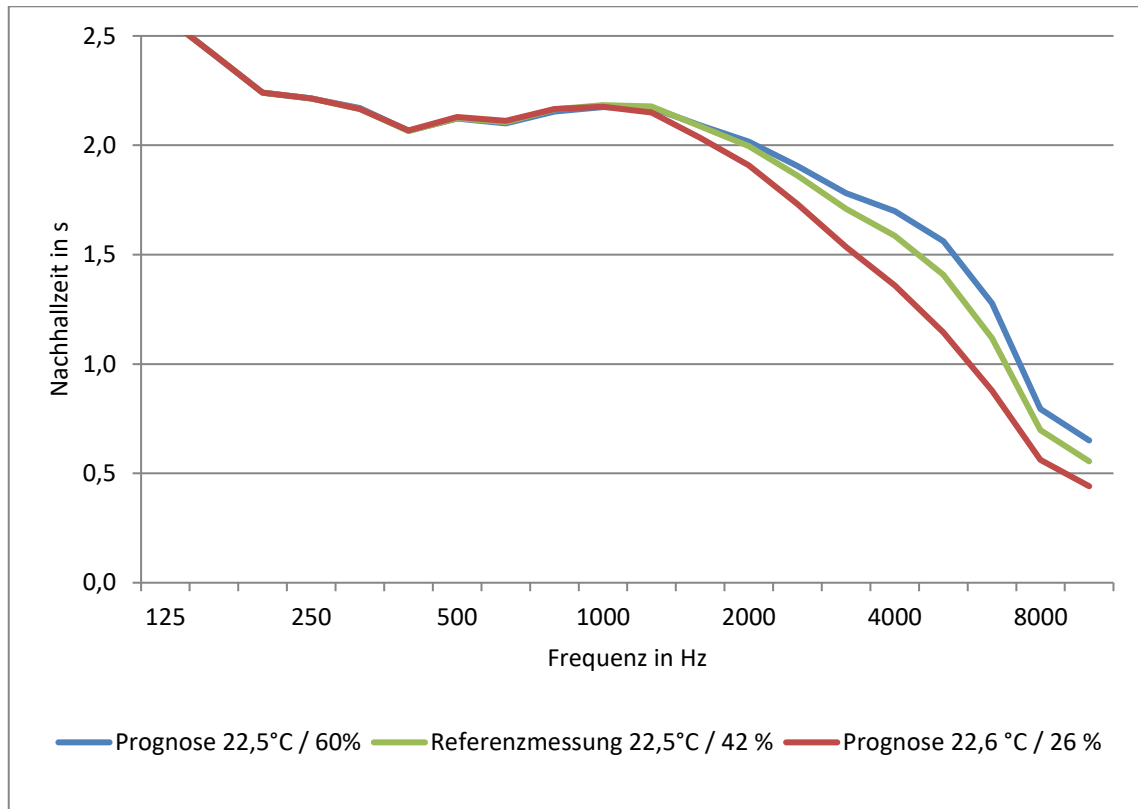


Abbildung 11: Prognostizierte Nachhallzeitänderung im Konzerthaus Berlin

Die Änderungen spielen sich erwartungsgemäß nur im Bereich oberhalb 1000 Hz ab. Die Rechenwerte wurden mit jeweils 22,6 °C / 26 % (trocken) und 22,5 °C / 60 % (feucht) als realistische Extremwerte angenommen. Eine noch höhere bzw. niedrigere Luftfeuchtigkeit ist, wie in Kapitel 2.1 erläutert wurde, sehr unangenehm und kommt in Räumen üblicherweise nicht vor. Wie in Abb. 4 gezeigt wurde, haben Kollegen bei einer Messung 2006 im Konzerthaus allerdings eine Luftfeuchte von 26 % bei einer Temperatur von 22,6 °C verzeichnen können. Um die Auswirkungen der Raumzustände besser abschätzen zu können, wurde in einem weiteren Diagramm das Verhältnis der beiden Größen über der Frequenz aufgetragen.

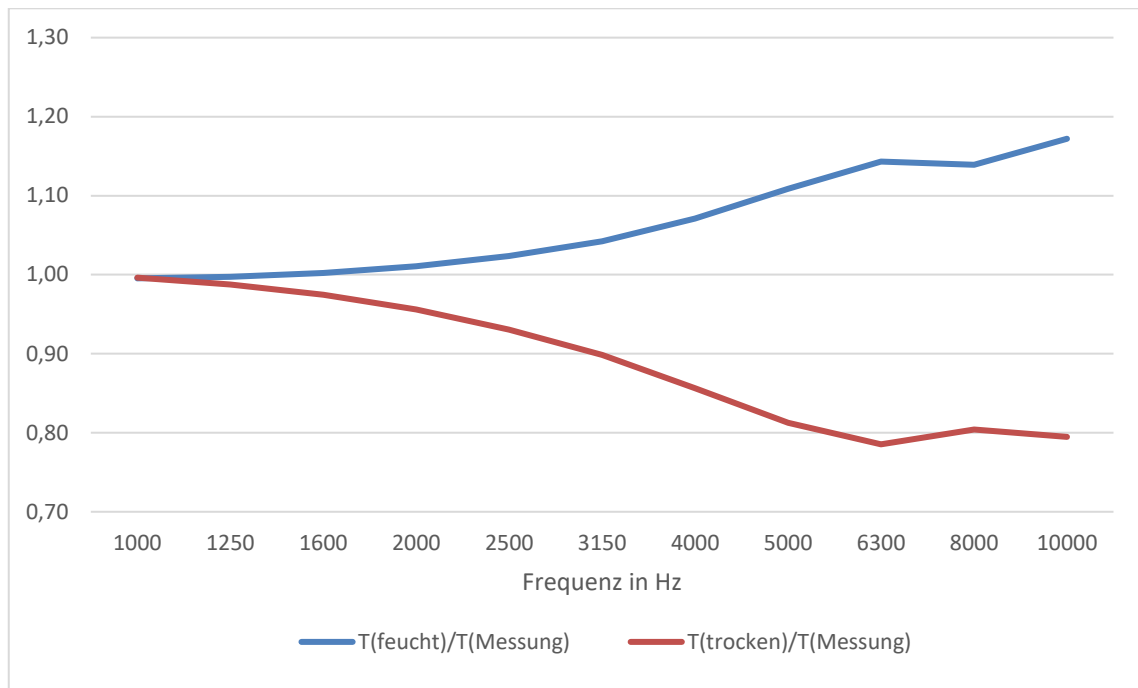


Abbildung 12: Relative Änderung der Nachhallzeit für verschiedene Raumzustände (Konzerthaus Berlin)

Die Luftdissipation steigt entsprechend Abb. 4 exponentiell mit der Frequenz. Beginnend mit ca. 1250 Hz lässt sich in Abb. 12 im Nachhallzeitverlauf ebenfalls ein Unterschied zwischen trockenem und feuchtem Raumzustand ausmachen. Wie die Luftdissipation an sich, steigt und sinkt auch das Verhältnis von Referenzmessung und prognostizierter Nachhallzeit exponentiell mit der Frequenz. Bei 8000 Hz ist ein Einbruch bei der Nachhallzeitänderung zu erkennen, welcher entweder an einer überhöhten Absorptionsfähigkeit der Materialien im Raum oder auf Messungenauigkeiten, die sich in die Prognoserechnung fortgepflanzt haben, zurückzuführen ist.

### 4.1.3 Mercedes Benz Arena Berlin

Die Mercedes Benz Arena Berlin wurde 2008 als O<sub>2</sub> Arena eröffnet und erst 2015 zum aktuellen Namen umgetauft. Mit einem Raumvolumen von 500 000 m<sup>3</sup> ist sie der größte Veranstaltungsraum der Stadt und beispielsweise 25-mal so groß wie die Berliner Philharmonie. Da die Absorption durch Dissipation gemäß (16) linear mit dem Volumen steigt, ist es interessant zu untersuchen, wie sie sich in einem Raum dieser Größe auswirkt. Die Mercedes Benz Arena ist eine Multifunktionsarena und Heimspielstätte der Eisbären Berlin sowie Alba Berlin. Jedoch werden auch oft Konzerte aufgeführt, darunter regelmäßig sinfonische Musik wie zum Beispiel

die Veranstaltungen „The World of Hans Zimmer“ am 29.04.2018 oder „Game of Thrones – Live Concert Experience“ am 14.05.2018.

Aus organisatorischen Gründen war es nicht möglich, eine fachgerechte Messung der Nachhallzeit vor und nach einer Veranstaltung vorzunehmen. Wie es für Multifunktionsräume üblich ist, sind Umbau und sonstige Vorbereitungen für jede Veranstaltung oft sehr aufwendig und werden erst am Tag der Veranstaltung vorgenommen. Dennoch wurde mir gestattet, vor und nach einer organisatorisch unproblematischen Veranstaltung eine kurze Messung in den Zeitplan einzubauen. Bei der Veranstaltung handelte es sich um ein Basketballspiel am 12.05.2018 von Alba Berlin. Veranstaltungen dieser Art sind nicht das ursprüngliche Ziel der Untersuchung, jedoch können von der Messung Rückschlüsse auf den Raum gezogen werden, die auch für jede andere Veranstaltung nicht ihre Gültigkeit verlieren.

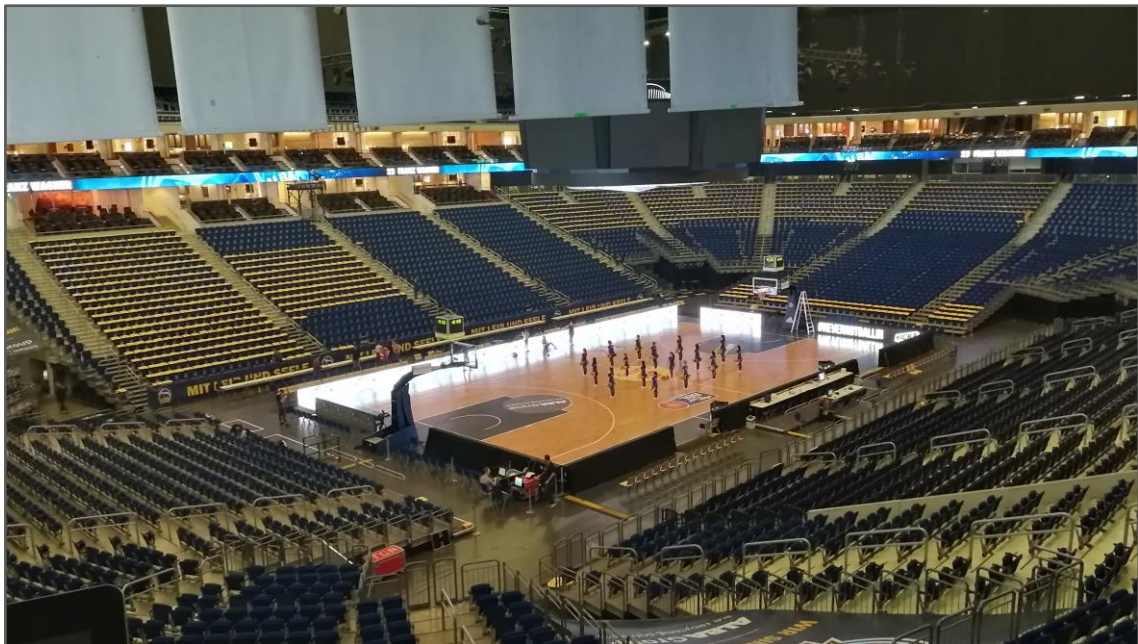


Abbildung 13: Ansicht der Mercedes Benz Arena (während der Vorher-Messung)

Zunächst wurden zwei unveränderliche Messpositionen gewählt, damit während der Messung keine Umbauarbeiten nötig waren, die zu Zeitaufschub geführt hätten. Die Verwendung zweier Mikrofonpositionen erfüllt nach [DIN 3382-2] die Anforderungen einer Messung der Kategorie „kurz“. Zwar kann gerade bei einem Raum dieser Größe durch zwei Messpositionen keine fundierte Aussage über den gesamten Raum gemacht werden, jedoch kann die erhoffte Änderung der Nachhallzeit theoretisch erfasst werden, da sich die Nachhallzeit an den beiden Messpunkten zwischen den Messungen bei gleichbleibenden Bedingungen bis auf den Einfluss der Luft-

dissipation nicht weiter ändern sollte. Als Signalquelle wurde zum einen der mitgebrachte, normgerechte Dodekaeder genutzt. Zusätzlich gab es einen weiteren Messdurchlauf, bei dem das Testsignal über die in der Arena verbaute Beschallungsanlage wiedergegeben wurde. Zwar liefert diese Methode ebenfalls keine vergleichbaren Werte für den Raum, jedoch sind die Ergebnisse für den angestrebten Vorher-Nachher Vergleich geeignet. Die Idee, die Beschallungsanlage zu nutzen, basierte auf der Sorge, der Dodekaeder liefere keine ausreichende Schallenergie, um den großen Raum ausreichend anzuregen. Da sowohl bei der Vorher-Messung als auch bei der Nachher-Messung mehrere Personen im Raum anwesend waren, musste der Pegel des Signaltons außerdem auf ein ungefährliches, nicht gehörschädigendes Maß begrenzt werden. Die Luftfeuchtigkeit hat sich während der Veranstaltung lediglich leicht geändert. Es war bereits vor der Messung bekannt, dass die Klimaanlage die relative Luftfeuchtigkeit im Saal konstant hält. Jedoch steigt die Temperatur im Raum während der Vorstellung mitunter stark an, was bei gleichbleibender relativer Luftfeuchte zu einer Steigerung der relevanten absoluten Luftfeuchte führt. Am Tag der Messung stieg die Temperatur von durchschnittlich 23 °C auf 26 °C, was bei 49 % relativer Luftfeuchtigkeit einer Änderung von 10,07 g/m<sup>3</sup> auf 11,93 g/m<sup>3</sup> absoluter Luftfeuchte entspricht. Bei einer aufwendigeren Messung unter guten Messbedingungen wäre der Einfluss der Luftfeuchtigkeit an dieser Stelle vermutlich messbar gewesen.

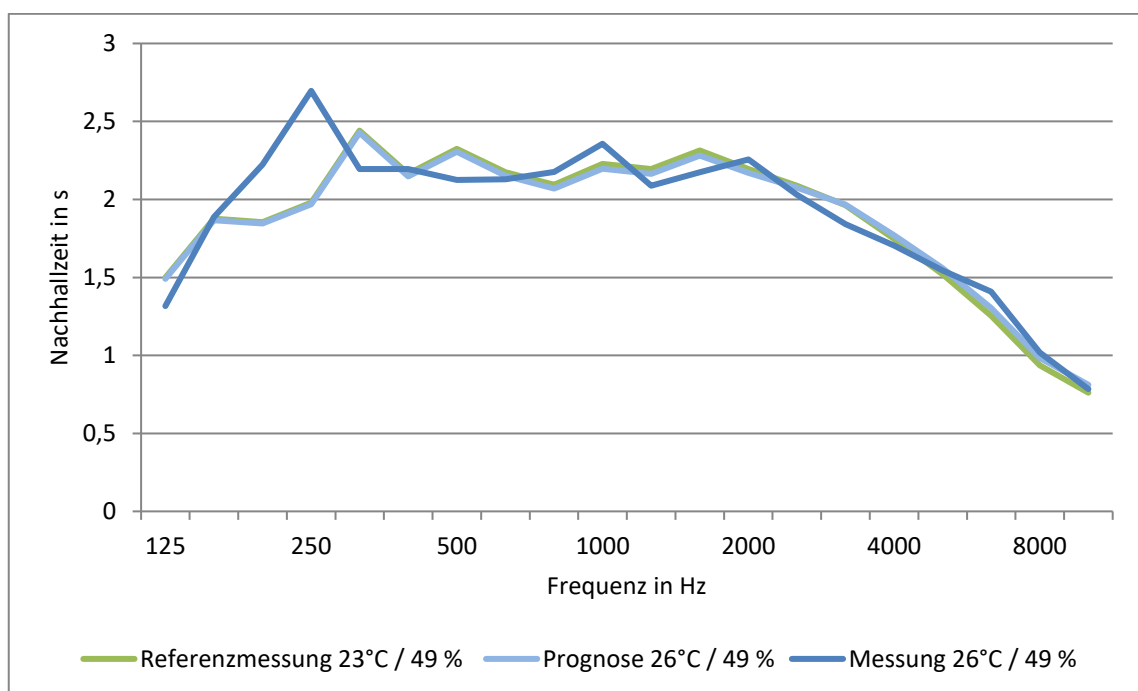


Abbildung 14: Vergleich der Nachhallzeit vor und nach einer Veranstaltung in der Mercedes Benz Arena

Das Ergebnis, welches in diesem Fall mutmaßlich zustande gekommen wäre, wurde berechnet und in Abb. 14 als Prognose eingezeichnet. Im kritischen Frequenzbereich oberhalb 4000 Hz fällt die Nachhallzeit bei der Nachher-Messung merklich höher aus, jedoch unterscheiden sich die Ergebnisse der beiden Messdurchläufe in allen anderen Frequenzbereichen derart voneinander, dass auf Grundlage dieser Beobachtung keine sicheren Schlussfolgerungen auf den Einfluss der Luftdissipation gezogen werden können.

Ungeachtet dessen kann eine Einschätzung der möglichen Nachhallzeitänderung unter bestimmten Bedingungen analog zur Vorgehensweise der vorangegangenen Betrachtungen im Konzerthaus Berlin vorgenommen werden. Zum Vergleich wurden wieder dieselben meteorologischen Bedingungen vorausgesetzt und die resultierenden Prognosen in Abb. 15 und Abb. 16 dargestellt.

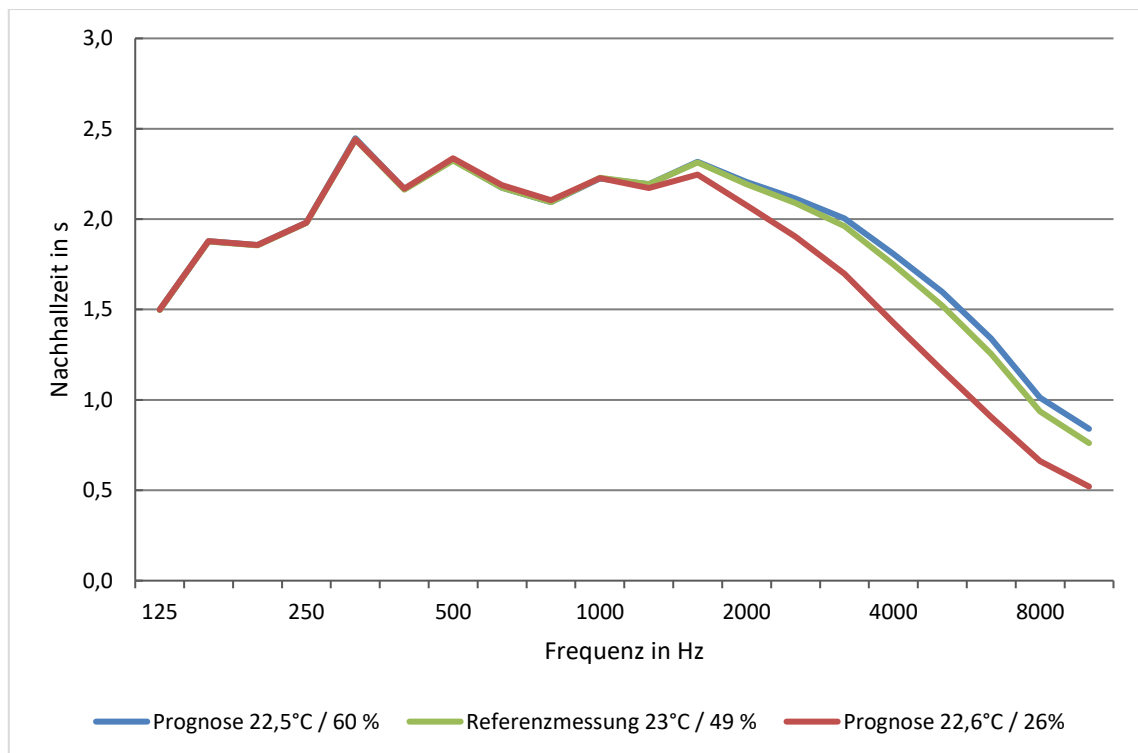


Abbildung 15: Prognostizierte Nachhallzeitänderung in der Berliner Mercedes Benz Arena

Die prognostizierten Änderungen verhalten sich, genau wie die Nachhallzeit der Referenzmessungen, in beiden Räumen ähnlich. Da bereits dargelegt wurde, dass der Einfluss der Luftdissipation von der Nachhallzeit abhängig ist, entspricht dieser Umstand den Erwartungen.

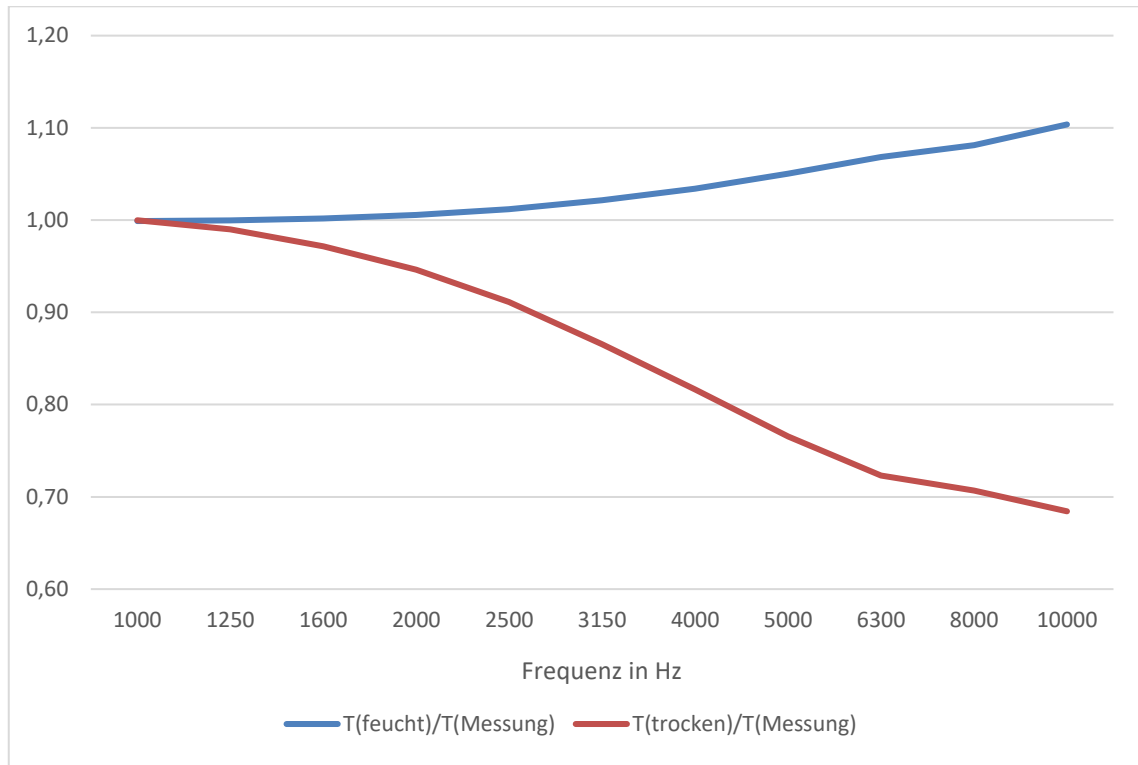


Abbildung 16: Relative Änderung der Nachhallzeit für verschiedene Raumzustände (Mercedes Benz Arena Berlin)

#### 4.1.4 Müller-BBM GmbH Hörsaal Planegg

Zur Überprüfung der Wechselwirkungen von Luftdissipation und elektronischen Raumakustiksystemen wurde zuletzt eine Messung im Hörsaal der Müller-BBM GmbH Hauptniederlassung in Planegg durchgeführt. Der ca. 700 m<sup>3</sup> große Raum verfügt über ein eingebautes Vivace System, in erster Linie für den Zweck der Produktdemonstration. Die für Sprache optimierte Nachhallzeit von 0,7 s kann bei Bedarf künstlich bis auf 2,45 s angehoben werden. Wie sich variierende Luftfeuchte auf die Nachhallzeit auswirkt, wurde anhand zweier Messungen nachgewiesen. Im Abstand von sechs Tagen wurden zwei Nachhallzeitmessungen, jeweils eine mit ein- und ausgeschaltetem System, durchgeführt. Bei der Trockenmessung betrug die a.F. 10,25 g/m<sup>3</sup>. Bei der Feuchtmessung betrug sie 16,07 g/m<sup>3</sup>.

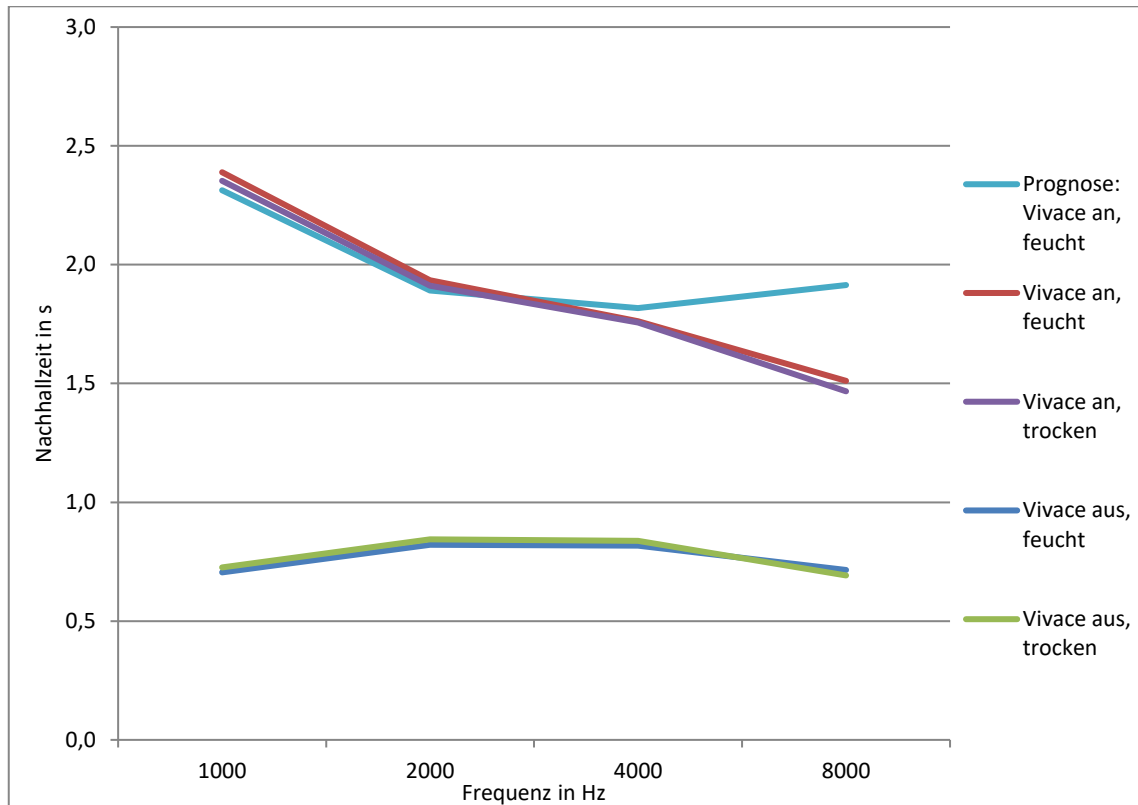


Abbildung 17: Vergleich der Raumstadien im Hörsaal Planegg

Bei der Betrachtung der in Abb. 17 dargestellten Nachhallzeit mit ausgeschaltetem System wird deutlich, dass die Absorption durch Flächen im Raum deutlich zu stark ausfällt, als dass eine Änderung der Nachhallzeit aufgrund variierender Feuchte messbar wäre. Die Nachhallzeitverläufe der beiden Raumzustände sind nahezu identisch. Die ebenfalls dargestellten Nachhallzeitverläufe mit eingeschaltetem System weisen ähnliche relative Abweichungen zwischen -2,62 % und 4,7 % auf. Solcherlei Abweichungen liegen im Rahmen der Messungenauigkeiten sowohl des verwendeten Verfahrens, als auch der verwendeten Messgeräte. Zusätzlich wurde in der Abbildung ein prognostizierter Nachhallzeitverlauf für den feuchten Raumzustand mit eingeschaltetem System eingezeichnet. Rechengrundlage für die Prognose war der Nachhallzeitverlauf des trockenen Raumzustandes mit eingeschaltetem System. Bei der rechnerischen Prognose wird davon ausgegangen, die Ausgangsnachhallzeit sei die natürliche Nachhallzeit des Raumes und nicht die durch das Vivace System künstlich verlängerte. Da auf der Grundlage dieser unrealistischen Annahmen gerechnet wurde, unterscheidet sich der Prognoseverlauf vom gemessenen oberhalb 2000 Hz deutlich. Aus dieser Diskrepanz lässt sich schlussfolgern, dass der künstlich zugespielte Nachhall unempfindlich gegenüber variierender Luftfeuchte ist. Mögliche Differenzen wären allein auf Nachhallzeitänderungen des Raumes an sich zurückzuführen, welche vom System nur weiterverarbeitet werden.

## 4.2 Zusammenfassung

Sowohl im Konzerthaus als auch in der Mercedes Benz Arena wurden schon bei einer Frequenz von 4000 Hz Steigerungen der Nachhallzeit von 25 % von sehr trockenem zu sehr feuchtem Raumzustand berechnet. Die Änderungen steigen mit der Frequenz zu jeweils 61,3 % in der Arena und 47,5 % im Konzerthaus bei 10000 Hz. Im Hallraum würde die Änderung unter denselben Bedingungen sogar bis zu 82 % betragen. Aus dem Vergleich aller Messungen geht noch einmal deutlich hervor, dass die potentielle Änderung der Nachhallzeit mit einer hohen Nachhallzeit und einem hohen Anteil der Luftdissipation im Raum einhergeht. Allerdings beschränkte sich die tatsächliche Änderung der Luftfeuchte in beiden Fällen auf ein Mindestmaß.

Aus der letzten Messung im Hörsaal Planegg gingen Erkenntnisse bezüglich der möglichen Wechselwirkungen zwischen elektronischen Raumakustiksystemen und variierender Luftdissipation hervor. So ließ sich festhalten, dass eine Nachhallzeitänderung mit eingeschaltetem System nur bei gleichzeitiger Nachhallzeitänderung mit ausgeschaltetem System zu erwarten ist. Ist bekannt, dass ein Raum hinsichtlich variierender Luftdissipation unbedenklich ist, müssen auch keine weiteren Maßnahmen beim bzw. nach dem Einbau des Systems in Betracht gezogen werden.

Ist das Vivace System hingegen in einem schwach bedämpften Raum verbaut, dessen Nachhallzeit sich bei schwankender Feuchte ändert, wird sie sich auch mit zugeschaltetem System ändern. Es bleibt offen zu untersuchen, ob der Betrag der Änderung bei eingeschaltetem System gleich oder größer der Änderung ohne das System ist. Zu diesem Zweck müsste eine weitere Messung in einem passenden Raum mit verbautem System vorgenommen und analog zur bisherigen Vorgehensweise ausgewertet werden. Dies kann in einer weiteren Forschungsarbeit erfolgen.



## 5 Psychoakustik

Die bisher untersuchten Änderungen der Raumakustik sind rechnerisch und messtechnisch nachgewiesen worden. Der letzte, jedoch nicht unwichtige Schritt, ist eine Einschätzung der Ergebnisse hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit für menschliche Zuhörer. Die Raumakustik gewinnt schließlich erst durch den Zuhörer ihre Bedeutung.

### 5.1 Schallwahrnehmung des Menschen

Das Instrument des Menschen zur Wahrnehmung von Schall ist sein Gehör. Dieses hochempfindliche Sinnesorgan ist, durch die Evolution bedingt, auf bestimmte Frequenzen spezialisiert und somit in der Lage, diese besser wahrzunehmen als andere. Passend zum Frequenzbereich der Sprache, ist der Mensch besonders gut in der Lage, Schallwellen im Frequenzbereich von ca. 200 Hz bis 5000 Hz zu hören. Dieser Zusammenhang wird quantitativ in der Hörschwelle erfasst. In Abb. 18 ist die Hörschwelle eines durchschnittlichen, gesunden Menschen dargestellt.

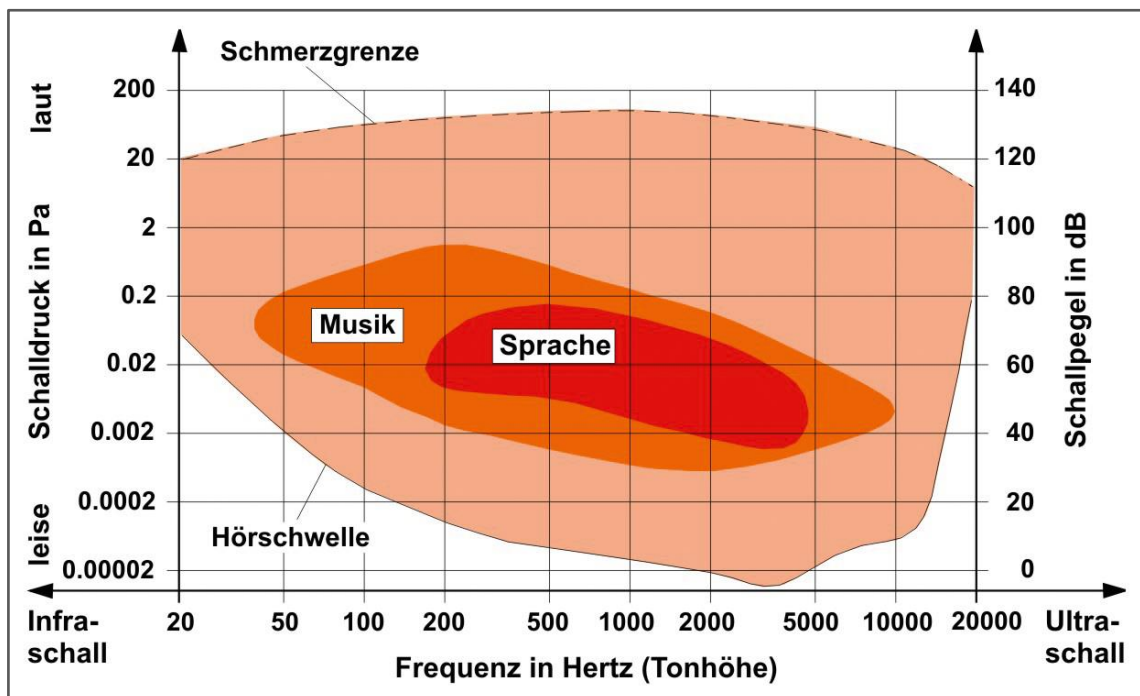


Abbildung 18: Hörschwelle eines gesunden Menschen [mh33.de 2018]

Der Frequenzbereich, in welchem sich Musik typischerweise abspielt, erweitert den der Sprache auf etwas schlechter hörbare Frequenzen. Generell lässt sich beobachten, dass Frequenzen oberhalb 5000 Hz von Menschen zunehmend schlechter wahrgenommen werden können. Der Bereich, in welchem die Luftdissipation hingegen an Bedeutung gewinnt, beläuft sich auf Frequenzen oberhalb 1000 Hz und steigt exponentiell mit der Frequenz. Diese beiden Umstände heben sich bei steigender Frequenz somit gegenseitig auf. Zwar steigt die Luftdissipation stark an, jedoch wandert die betrachtete Frequenz rasch aus dem für Menschen wahrnehmbaren Bereich heraus. Somit ist für weiterführende Untersuchungen vor allem der Frequenzbereich von ca. 1000 Hz bis maximal 10000 Hz interessant.

Hinzu kommt die altersbedingte Schwerhörigkeit. Neben einer möglichen Hörschädigung durch zu hohe Dauerbelastung oder ein Knalltrauma, welche bei manchen Menschen zu Schwerhörigkeit führen können, kommt es bei Menschen im Alter unweigerlich zu einer steigenden Hörschwelle. Die Auswirkungen dieses Hörverlusts machen sich vor allem im hochfrequenten Bereich oberhalb 1000 Hz bemerkbar. Der Verlauf typischer Hörschwellenverläufe in Abhängigkeit zum Alter wird in Abb. 19 gezeigt. Der Effekt der Luftdissipation während einer Musikdarbietung wird also für ältere Menschen tendenziell schlechter zu hören sein als für junge, da erstere im beeinflussten Frequenzbereich bereits Einbußen bei der Wahrnehmung machen mussten.

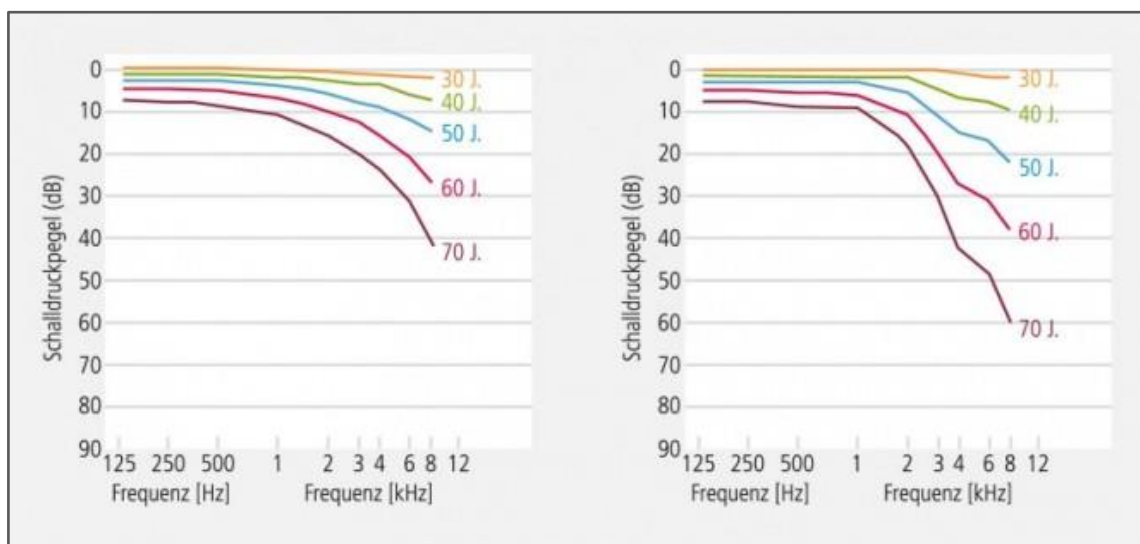


Abbildung 19: Altersbedingte Schwerhörigkeit nach Geschlecht (Frauen links, Männer rechts)

[Deutsche Apotheker Zeitung 2018]

## 5.2 Bedeutung der Luftfeuchtigkeit für das Hörerlebnis

Bei der Gestaltung eines für Musikwiedergabe gebauten Raumes, bzw. bei der Musikwiedergabe generell, ist das Ziel bis auf leichte Abweichungen Unverfälschtheit und Originaltreue. Zu diesem Zweck sollte der Nachhallzeitverlauf möglichst linear sein. Unterscheidet sich die Nachhallzeit in einem Raum innerhalb der Frequenzbänder deutlich, wird dem übertragenen Signal eine unerwünschte Klangfärbung hinzugefügt. Sind die hohen Frequenzen überbedämpft, beschreibt man den Höreindruck unter anderem als *dumpf*. Die fehlende Brillanz der Musik wird beklagt. Eine zu schwache Bedämpfung hoher Frequenzen kommt deutlich seltener vor, da diese deutlich leichter und mit geringerer Dicke der absorbierenden Flächen zu bewerkstelligen ist. Je höher der betrachtete Frequenzbereich, desto größer wird der Einfluss der Luftdissipation, welche den für zu schwache Bedämpfung kritischen Bereich nach oben hin begrenzt. Wie aus den Messungen und Prognosen der Mercedes Benz Arena Berlin und des Konzerthauses Berlin ersichtlich wurde, steigt der Nachhallzeitverlauf oberhalb des typischen Frequenzbereichs bis 4000 Hz nicht weiter an. Selbst bei den Prognosen für sehr feuchte Raumzustände sinkt die Nachhallzeit stetig. Bei den Prognosen für trockene Raumzustände hingegen, sinkt die Nachhallzeit, auch bei und unterhalb 4000 Hz, bereits stark. Bei den beiden betrachteten Räumen kommt es demnach zum Problemfall, wenn die Luft zu trocken ist. Diesem Umstand wird in [DIN 18041] Rechnung getragen, indem der Toleranzbereich um die gewünschte Nachhallzeit oberhalb 2000 Hz nach unten geöffnet wird.

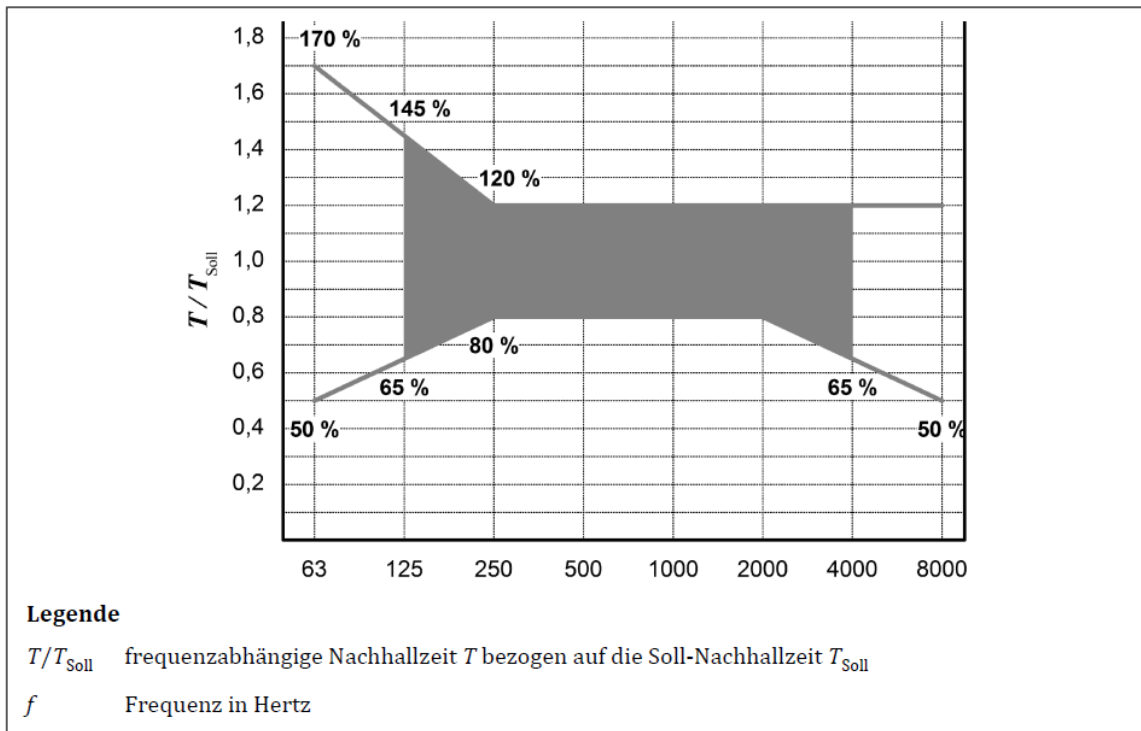


Abbildung 20: Toleranzbereich der Nachhallzeit für die Nutzungsarten A1 bis A5 [DIN 18041:2016-03], S. 14

Der Toleranzbereich ist jedoch nicht zu verwechseln mit dem Optimalwert, welcher für alle Frequenzen identisch ist und möglichst in der Mitte des Toleranzbereichs liegen sollte.

## 6 Elektronische Raumakustiksysteme

Ein Raum kann entsprechend seiner Nutzung für verschiedene Zwecke akustisch optimiert sein. Wie in Kapitel 2.4 erläutert wurde, sind zum Beispiel für eine gute Sprachverständlichkeit und ein optimales Hörerlebnis bei unverstärkter Musik unterschiedliche Nachhallzeiten wünschenswert. Oft müssen in Räumen, da sie für eine Mehrzahl verschiedener Veranstaltungen genutzt werden, Kompromisse hinsichtlich der Raumakustik gemacht werden. So ist es regelmäßig erforderlich, in einem Raum sowohl eine zufriedenstellende Sprachverständlichkeit als auch ein brauchbares musikalisches Hörerlebnis zu schaffen. Zur Lösung dieses Problems stehen dem Raumakustiker verschiedene Werkzeuge zur Verfügung. Eine beliebte und oft angewandte Möglichkeit ist der Einbau variabler absorbierender Flächen, welche bei Bedarf ausgefahren werden können, um die Nachhallzeit zu verkürzen. Beim Einsatz dieser Maßnahme kann die Nachhallzeit nachträglich lediglich verkürzt, nicht verlängert werden. Soll die Nachhallzeit in einem fertig gebauten Raum aufgrund der genannten erforderlichen Kompromisse oder akustischer Fehlplanung nachträglich verlängert werden, ist eine moderne Lösung der Einsatz elektronischer Raumakustiksysteme.<sup>39</sup>

### 6.1 Vivace

Wichtig ist zunächst die Unterteilung zwischen klassischen Beschallungsanlagen und elektronischen Raumakustiksystemen. Bei der Verwendung einer Beschallungsanlage wird das gewünschte Signal möglichst nah an der Quelle abgenommen und direkt über die Lautsprecher wiedergegeben. Die Lautsprecher befinden sich beispielsweise in Form von Line-Arrays links und rechts von der Bühne. Ziel einer solchen Beschallungsanlage ist es in erster Linie, die Schalldruckpegel an jedem Zuschauerplatz stark aber gleichmäßig zu erhöhen. Elektronische Raumakustiksysteme arbeiten zunächst ähnlich. Bei der genauen Funktionsweise gibt es jedoch eine Reihe signifikanter Unterschiede. Zur Konkretisierung wird daher im Folgenden die Funktionsweise des von Müller-BBM Acoustic Solutions entwickelten elektronischen Raumakustiksystem Vivace beispielhaft erläutert. Das System besteht aus einer auf Raum und Verwendungszweck abgestimmten Anzahl von Mikrofonen und Lautsprechern, sowie einer

---

<sup>39</sup> Vgl. [Müller ; Möser 2003], S. 354 f.

Prozessoreinheit. Die Prozessoreinheit ist in der Lage bis zu 40 unabhängige Mikrofonsignale und 192 unabhängige Ausgangssignale für die Lautsprecher aufzunehmen bzw. zu verarbeiten. Dementsprechend kann im Raum jeweils die genannte Zahl an Mikrofonen und Lautsprechern installiert werden. Zwei der Mikrofone fungieren als Hauptmikrofone und sind über der Bühne angebracht. Die restlichen Mikrofone werden gleichmäßig im Raum verteilt. Im Gegensatz zu einer klassischen Beschallung werden also nicht nur die Musiker, sondern der gesamte Raum aufgenommen und wiedergegeben. Im Prozessor werden die eingespeisten Signale mit den Impulsantworten eines vorher gemessenen, im System gespeicherten Raumes gefaltet. Bei diesem Hilfsraum handelt es sich um Räume, die für ihre ausgezeichnete Akustik bekannt sind. Neben der Faltung mit den Impulsantworten von echten Räumen, werden zusätzlich Faltungen mit synthetisch erzeugten und editierbaren Impulsantworten berechnet. Durch eine frei einstellbare Kombination von echten und synthetischen Impulsantworten ist es möglich, Dauer und Klangcharakteristik der Nachhallzeit im Raum stufenlos zu steuern.

Über die ebenfalls gleichmäßig im Raum verteilten Lautsprecher werden inkohärente, jeweils über die gefalteten Übertragungsfunktionen einzeln berechnete Signale für jeden Lautsprecher einzeln berechnet wieder ausgegeben. Der Unterschied zwischen dem System und einem einfachen Delay und/oder Hallgenerator ist die Fähigkeit der vollen Darstellung der raumakustischen Komplexität der frühen, gerichteten Reflexionen und dem späten statistischen Nachhall. Auf diese Weise kann die natürliche Raumakustik auf eine vorher nicht möglich gewesene Weise ergänzt werden. Neben der künstlich erschaffenen, jedoch natürlich klingenden Erhöhung der Nachhallzeit bietet das System ebenfalls den Vorteil, raumtypische Reflektionen ohne die normalerweise notwendigen reflektierenden Flächen an jedem Zuschauerplatz zu erzeugen. Der Zuhörer ist nach wie vor in der Lage, Schallquellen auf der Bühne zu orten und das dargebotene Stück auf unverfälschte Weise zu erleben.

## 6.2 Auswirkung der Luftfeuchtigkeit

Der Einbau und das Einmessen des Systems in einem Saal dauern mehrere Tage. Beim Einmessen werden die Musiker des entsprechenden Hauses eingeladen, um mit eingeschaltetem System zu proben. In diesem Rahmen werden am System Einstellungen getroffen, die als Presets gespeichert werden und zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgerufen werden können. Weitere Einstellungen und Änderungen am System werden nach der Einmessung nur bei besonderem Bedarf vorgenommen. Zum Zeitpunkt der Einmessung herrschen im Raum bestimmte

meteorologische Bedingungen. Die am System getroffenen Einstellungen führen exakt zum gewünschten Ergebnis, auf der Grundlage, dass die Randbedingungen gleichbleibend sind. Wird sich allerdings zu einem späteren Zeitpunkt die Raumakustik aufgrund der Luftfeuchte verändern, so ändert sich auch der vom System herbeigeführte Zustand und kann vom ursprünglich eingestellten Zustand abweichen. War die Raumluft zum Zeitpunkt der Messung außergewöhnlich trocken, kann die vom System erzeugte Nachhallzeit über die ursprünglich eingestellte und gewollte Nachhallzeit hinaussteigen. Umgekehrt kann sie bei zu trockener Luft unter die gewünschte Nachhallzeit fallen. Das Ziel des Systems sollte jedoch sein, das gewünschte Ergebnis auch unter variierenden äußeren Bedingungen zu liefern. Aus den Untersuchungen des Berliner Konzertsaals ging bereits hervor, dass sich die Luftfeuchtigkeit im Raum über die Jahre sehr deutlich ändern kann. Die verzeichneten Änderungen führten in diesem Fall zu ebenfalls deutlichen Änderungen der Nachhallzeit. Neben diesem Phänomen kann es durch den Einfluss des Publikums außerdem zur Änderung der Luftfeuchte während einer Vorstellung kommen. Wird das Vivace System in einem Raum installiert, ist es also empfehlenswert, die potentielle Änderung der Luftfeuchte in Betracht zu ziehen. Ist mit einer kritischen Änderung zu rechnen, sollten Maßnahmen getroffen werden, sie auszugleichen.

### 6.3 Lösungsansätze

Um den Auswirkungen der Luftdissipation entgegenzuwirken, muss sich das System genauso dynamisch verhalten können wie es die äußeren Bedingungen erforderlich machen. Es wäre denkbar, im entsprechenden Raum Messgeräte zu installieren, die zu jedem Zeitpunkt Informationen über Luftdruck, Temperatur und Luftfeuchte an das System senden. Auf Grundlage dieser Information wird die vom System zugeführte Schallenergie anschließend reguliert. Ändert sich die Luftfeuchte im Saal, werden die Änderungen automatisch vom System erfasst und dessen Verhalten angepasst. Um für jedes Szenario verschiedener meteorologischer Bedingungen trotzdem den raumakustischen Zielzustand zu erreichen, kann mithilfe der in dieser Arbeit aufgezeigten Prognosewerkzeuge jede denkbare Kombination durchgerechnet werden. Wird am Tag der Einmessung des Systems eine Nachhallzeitmessung des Raumes mit den dazugehörigen meteorologischen Daten gespeichert, kann für jeden anderen Raumzustand der überschüssige bzw. fehlende Nachhall im Raum selbstständig vom System korrigiert werden.

## 7 Schlusswort und Ausblick

Ziel und Aufgabe des Projektes war die Beantwortung der Frage, ob und inwiefern raumakustische Änderungen in großen Sälen, hervorgerufen durch variierende meteorologische Bedingungen, in Kombination mit elektronischen Raumakustiksystemen zu Komplikationen führen können und in welcher Form diese gehandhabt werden können. Zur Beantwortung dieser Frage wurden die theoretischen Hintergründe der Luftdissipation und anderer tangierender Themenfelder aufgearbeitet und anschließend praktische Untersuchungen zur Umsetzung der erworbenen Kenntnisse durchgeführt. Es wurde nachgewiesen, dass die Luftdissipation bei stark schwankender Luftfeuchte einen sehr signifikanten Einfluss haben kann. Dieser Einfluss kann wie erläutert berechnet werden. Anschließend wurden mögliche Wechselwirkungen mit dem elektronischen Raumakustiksystem Vivace aufgezeigt und ein Lösungsansatz präsentiert, wie man den Auswirkungen entgegenwirken kann.

Bedenkt man den Zweck elektronischer Raumakustiksysteme die Nachhallzeit künstlich zu verlängern, wird schnell deutlich, dass sie normalerweise in Räumen mit zu kurzer Nachhallzeit verbaut werden. Diese Räume sind allerdings tendenziell unempfindlich gegenüber Nachhallzeitänderungen durch variierende Luftfeuchte. Mit den erarbeiteten und nachweislich funktionstüchtigen Prognosewerkzeugen ist es möglich, anhand eines Beispiels Aussagen über die potentielle Nachhallzeitänderung bei zu erwartenden Feuchtigkeitswerten zu treffen. In zukünftigen Überlegungen kann nun eine begründete Entscheidung getroffen werden, ob und in welchem Fall Maßnahmen zur dynamischen Korrektur der Luftdissipation in das Vivace System implementiert werden sollen.

Die Änderung und Auswirkungen der Luftfeuchte *während* einer Vorstellung wären im Rahmen einer weiterführenden Forschungsarbeit denkbar. Während der Recherche war es nicht in umfangreichem Maße möglich, Daten über die Schwankungen der absoluten Luftfeuchte zu erhalten, weswegen nur in begrenztem Maße praktische Anwendungsfälle bis hin zu konkreten Aussagen über den jeweiligen Raum gemacht werden konnten. Es wurden jedoch Werkzeuge aufgezeigt, mit denen bei vorliegenden meteorologischen Daten kompetente Aussagen gemacht werden können, bis hin zu Maßnahmen, um unerwünschten Auswirkungen im richtigen Maße entgegenzuwirken.



---

## Literaturverzeichnis

- [Becker 2000] Becker, A.: Lüftungsanlagen. - 1.Aufl. Würzburg : Vogel, 2000
- [Cremer 1971] Cremer, L.: Vorlesungen über technische Akustik. - Berlin : Springer, 1971
- [Cremer ; Müller 1976a] Cremer, L. ; Müller, H. A.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. - Band 1. 1.Aufl. Stuttgart : S. Hirzel, 1976
- [Cremer ; Müller 1976b] Cremer, L. ; Müller, H. A.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. - Band 2. 1.Aufl. Stuttgart : S. Hirzel, 1976
- [D. Wetterdienst a] [https://www.dwd.de/DWD/klima/beratung/ak/ak\\_574940\\_kt.pdf](https://www.dwd.de/DWD/klima/beratung/ak/ak_574940_kt.pdf)  
entnommen am 23.05.18
- [D. Wetterdienst b] [https://www.dwd.de/DWD/klima/beratung/ak/ak\\_103840\\_kt.pdf](https://www.dwd.de/DWD/klima/beratung/ak/ak_103840_kt.pdf)  
entnommen am 23.05.18
- [DIN 18041] DIN 18041:2016-03. Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung
- [DIN 1946-2] DIN 1946-2:1994-01. Raumluftechnik; Gesundheitstechnische Anforderungen
- [DIN 3382-1] DIN EN ISO 3382-1:2009-10: Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume
- [DIN 3382-2] DIN EN ISO 3382-2:2008-09: Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen
- [DIN 354] DIN EN ISO 354:2003-12: Messung der Schallabsorption in Hallräumen
- [DIN 9613-2] DIN ISO 9613-2:1999-10: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren, 1999
- [Evans ; Bazley 1956] Evans, E.J.E. ; Bazley, E. N.: The absorption of sound in air at audiofrequencies.  
In: Acustica : (1956) Vol. 6, Stuttgart : S. Hirzel

- 
- [Fasold ; Veres] Fasold, W. ; Veres, E.: Schallschutz + Raumakustik in der Praxis. - 2. Aufl. Berlin : Huss Medien, 2003
- [Nies] Nies, P.: Firmeninterner Messbericht. Müller-BBM GmbH.
- [Harris 1967] Harris, C.M.: Absorption of sound in air versus humidity and temperature. - Columbia University, 1967
- [Hörner ; Casties 2015] Hörner, B. ; Casties, M.: Handbuch der Klimatechnik Band 1: Grundlagen. – 6.Aufl. Berlin : VDE Verlag, 2015
- [Hörner; Schmidt 2011] Hörner, B. ; Schmidt, M.: Handbuch der Klimatechnik Band 2. - 5. Aufl. Berlin : VDE Verlag, 2011
- [ISO 9613-1] ISO 9613-1:1993-06: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien; Teil 1: Berechnung der Schallabsorption durch die Luft
- [Knudsen 1931] Knudsen, V.O.: The effect of humidity upon the absorption of sound in a room, and a determination of the coefficients of absorption of sound in air.  
In: The Journal of the Acoustical Society of America : (1931) 3
- [Künzel 2009] Künzel, H.: Wohnungslüftung und Raumklima.- 2. Aufl. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2009
- [Müller ; Möser 2003] Müller, G. ; Möser, M.: Taschenbuch der Technischen Akustik - 3.Aufl. Berlin : Springer, 2003
- [Nickel 2011] Nickel, U.: Lehrbuch der Thermodynamik - 2. Aufl. Erlangen : PhysChem, 2011
- [Reinmuth 1996] Reinmuth, F.: Raumluftechnik. – 1.Aufl. Würzburg : Vogel, 1996
- [Sabine 1929] Sabine, P.E.: The measurement of sound absorption coefficients.  
In: Journal of the Franklin Institute : (1929) Volume 207, Issue 3
- [Sinambari ; Sentpali 2014] Sinambari, G.R. ; Sentpali, S.: Ingenieurakustik – Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele. - 5. Aufl. Wiesbaden : Springer, 2014

## Anlagen

Der Arbeit liegt eine DVD bei, auf welcher alle den Untersuchungen zugrunde liegenden Rechnungen aufgeführt sind.

## Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

---

Ort, Datum

Vorname Nachname