Institut für Angewandte Bauforschung
Weimar gemeinnützige GmbH

Massereduzierte Betonschallhauben mit Absorbern aus haufwerksporigem Leichtbeton zum technischen Schallschutz von Blockheizkraftwerken

Dipl.-Ing. René Tatarin (IAB Weimar gGmbH)

Kooperationsprojekt

Projektpartner

IAB Institut für Angewandte Bauforschung Weimar

Büscher

Büscher GmbH & Co.KG, Heek

Akustikbüro Krämer+Stegmaier

Eschenröder & Osenberg GbR
Ingenieurbüro für Baustatik und Baukonstruktion
Gronau-Epe

AIS Kursawe
Anlagenbau & Industrieservice
Kemberg

Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand ZIM

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

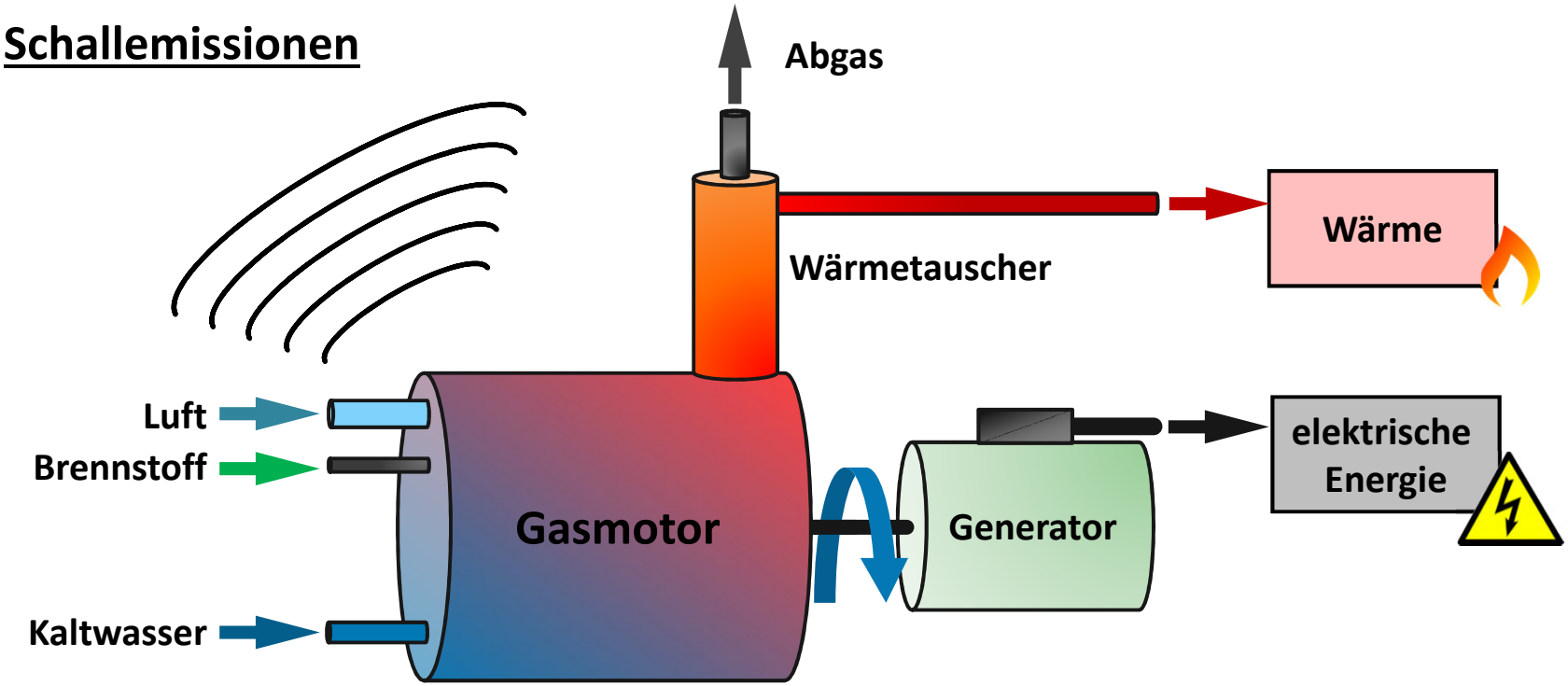
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Problemstellung

Blockheizkraftwerke – BHKW

- modulare Anlagen
- Kraft-Wärme-Kopplung → größerer Gesamtnutzungsgrad
- dezentrale Aufstellung → erfordert Schallschutz der Umgebung!

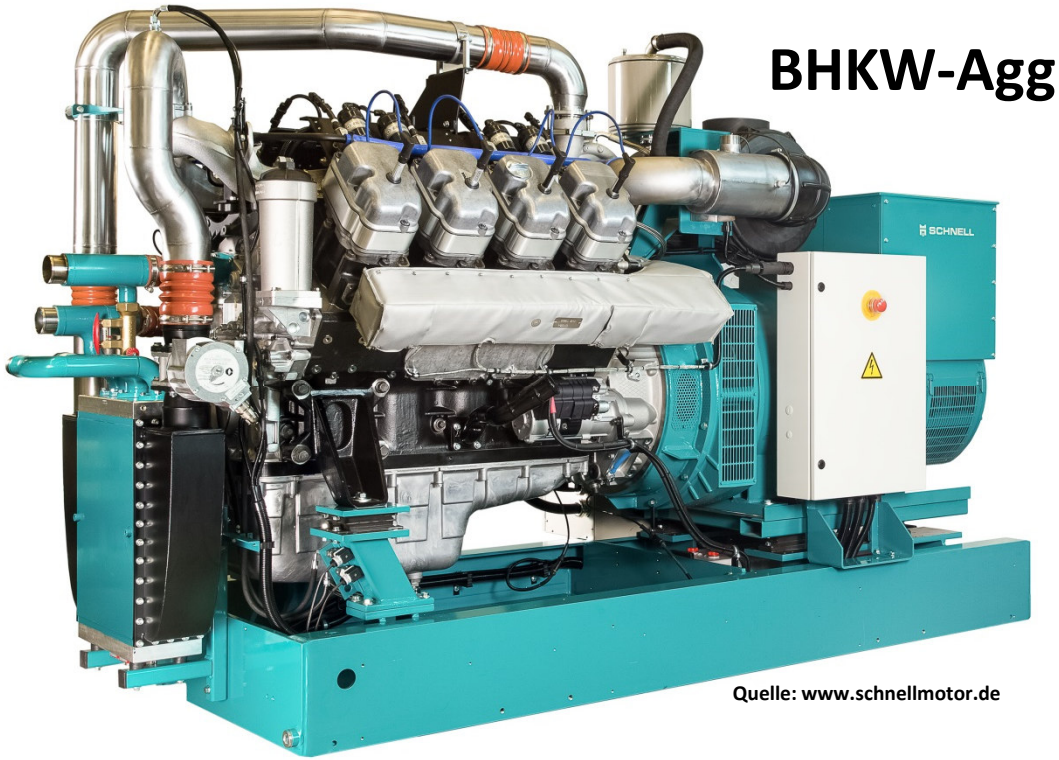
Schallemissionen



Problemstellung

Blockheizkraftwerke – BHKW

- modulare Anlagen
- Kraft-Wärme-Kopplung → größerer Gesamtnutzungsgrad
- dezentrale Aufstellung → erfordert Schallschutz der Umgebung!



BHKW-Aggregat

Quelle: www.schnellmotor.de

Problemstellung

Lärmminderung von BHKW

Stahlblech-Container

- P = 200 – 500 $kW_{el.}$
- 👍 dezentrale Aufstellung
- 👍 geringe Masse (~9 t) → Anlagen-technik werkseitig integrierbar
- 👎 R'_W = 20 ... 28 dB
- 👎 tieffrequente Schallabstrahlung

Betonschallhauben

- P = 200 – 500 $kW_{el.}$
- 👍 dezentrale Aufstellung
- 👍 R'_W = 44 ... 58 dB
- 👍 dauerhaft
- 👍 Gestaltung der Außenhülle
- 👎 hohe Masse (50 ... 60 t)

Maschinenhäuser

- P > 800 $kW_{el.}$
- 👍 R'_W = 60 ... 66 dB
- 👎 zentrale Aufstellung (HKW)

Betonschallhaube 2.0

Zielstellung

- Massereduzierung
  → werkseitige Integration der Anlagentechnik
  → gemeinsamer Transport zum Standort
- Verbesserung Schalldämmmaß

Lösungsansatz

- Bewerten der Ausgangssituation
- Entwicklungen: - akustisches Konzept
  - statisch-konstruktives Konzept
  - Werkstoff
  - Formenbau
- Funktionsmuster

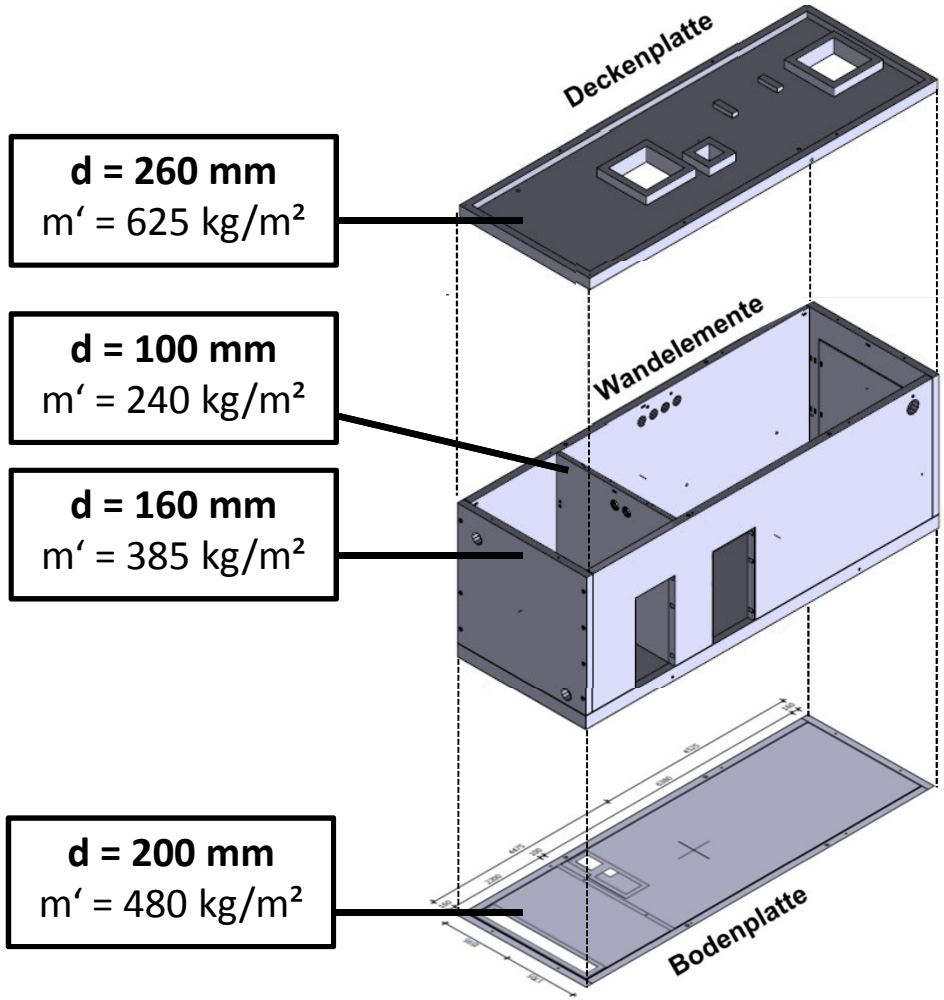
Ausgangssituation

Fertigteile

- C35/45, BSt500, XF1, XC4
- BHKW-Aggregate bis ca. 500 kW_{el}
- ca. 9,00/3,30/3,50 m (l/b/h)
- ca. 50 ... 60 t + Anlagentechnik

Büscher

Büscher GmbH & Co.KG, Heek

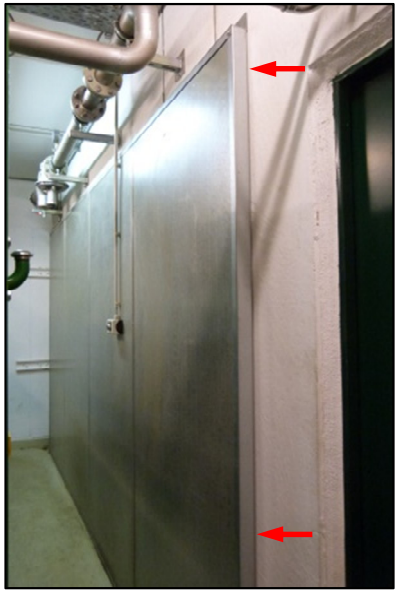


Akustische Ausgangssituation

BHKW im Bestand

- Geriatrische Tagesklinik
- Hersteller: 2G Energy AG, Bj. 2012
- TA-Lärm: IRW_N = 40 dB(A) Gebietsnutzung WA
- BSH: Auslegung auf 35 dB(A)/10 m

Aggregat MAN E2842 LE322
400 kW_{el} (stromgeführt)
L_{WA} 105 dB(A)



Plattenabsorber
-5 … -7 dB

Akustische Ausgangssituation

Schalldruckpegel-Messungen

- Aggregat: Volllast/~1500 min^{-1}/~395 kW_{el}
- L_{AFeq} – zeitlich gemittelter äquivalenter Dauerschallpegel
- Innenraum: 95,4 dB(A)

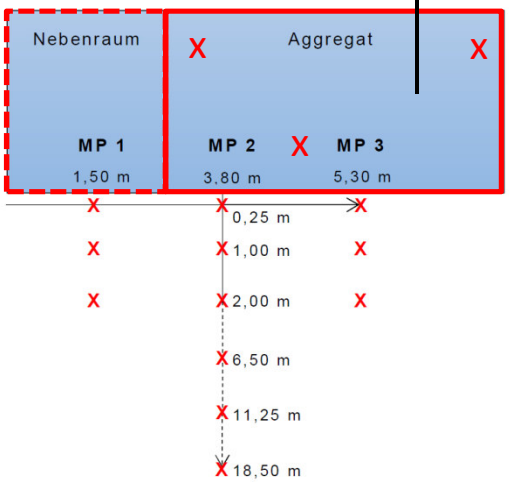
  → ‚laut' & niederfrequent
  → f_{max} = 60 ... 250 Hz

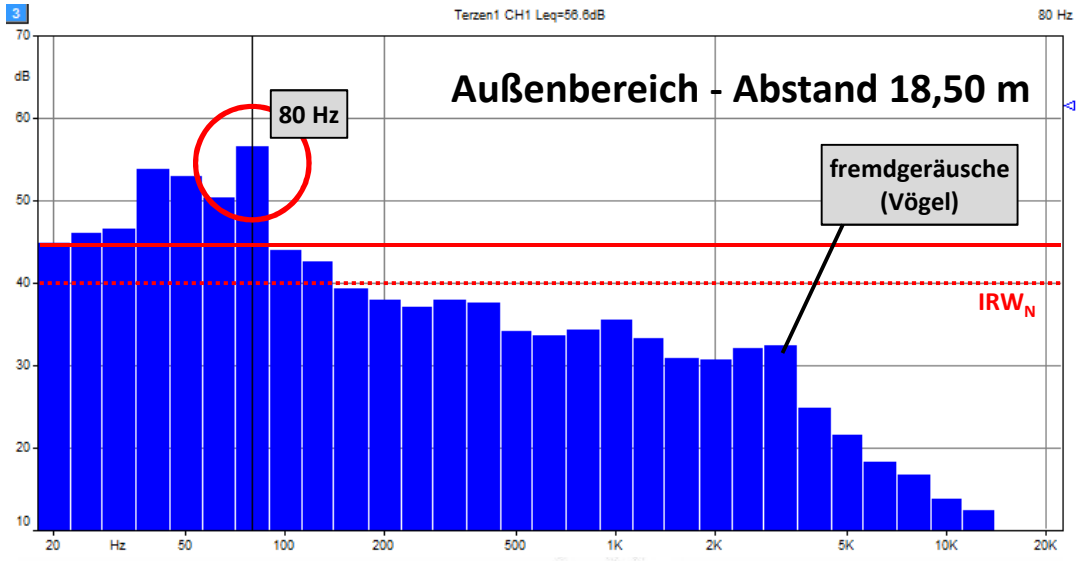
- Außenbereich:
  - 0,25 m: 53,5 dB(A)
  - 10,00 m: 45,0 dB(A)
  - 18,50 m: 44,3 dB(A)

  → > IRW_N = 40 dB(A)
  → f_{max} = 80 Hz
  → niederfrequent & zu laut

Mikrofon & kalibrierter Schallpegelmesser

BHKW

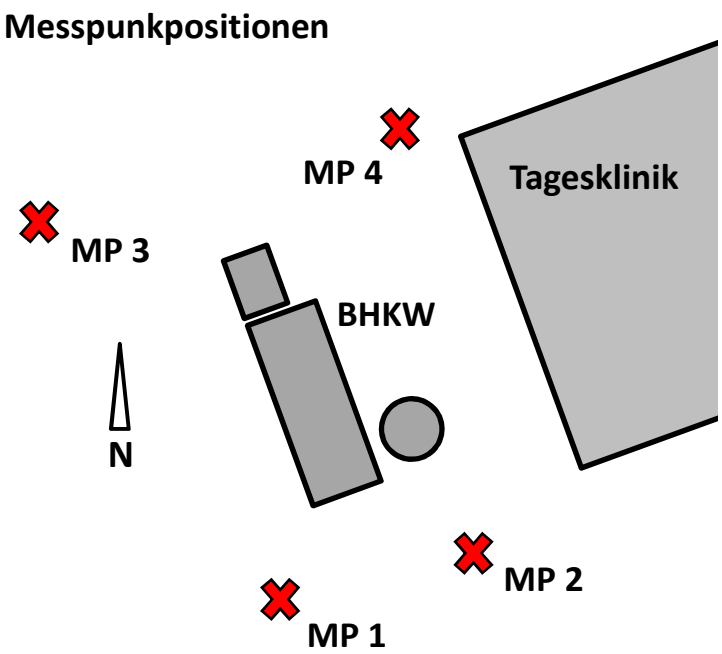




Akustische Ausgangssituation

Akustische Kamera (IAB)

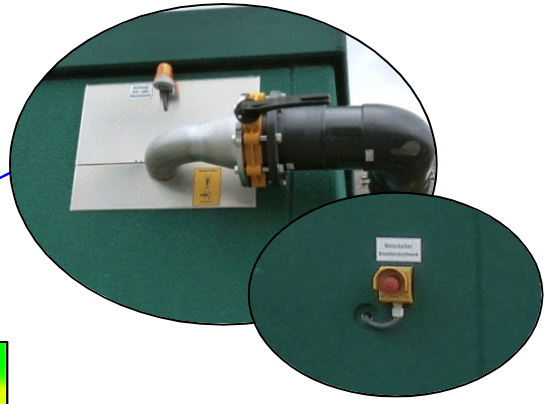
- Emissionen der Betonschallhaube ↔ weitere Hauptschallquellen?
- sternförmiges Array aus 36 Messmikrofonen
- bildgebende Schallquellenortung (f = 0,1 - 6 kHz)
- Aggregat: Volllast/~1500 min^{-1}/~395 kW_{el}

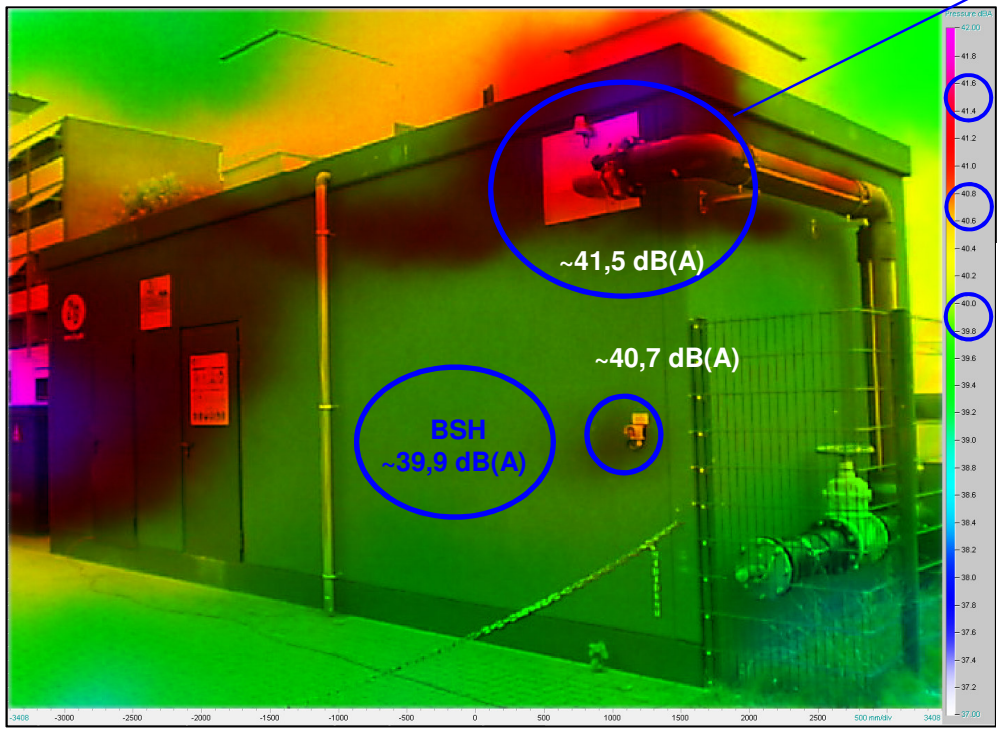


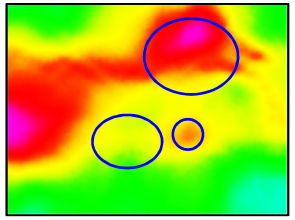
Akustische Ausgangssituation

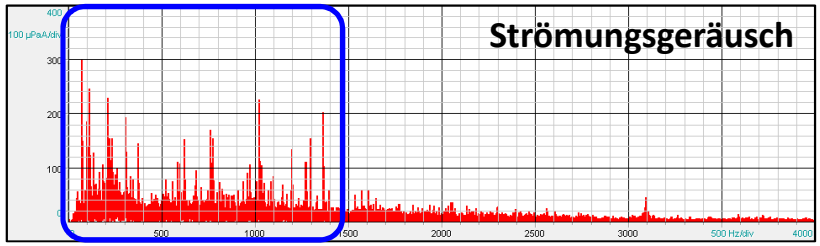
Akustische Kamera (IAB)

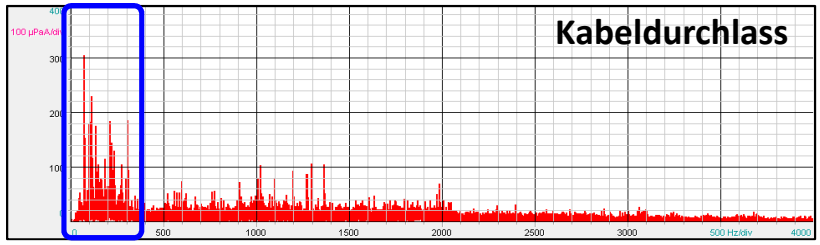
- **Betonschallhaube** 39,9 dB(A)/MP1
- Strömungsgeräusch 41,5 dB(A)
- Kabeldurchlass 40,7 dB(A)







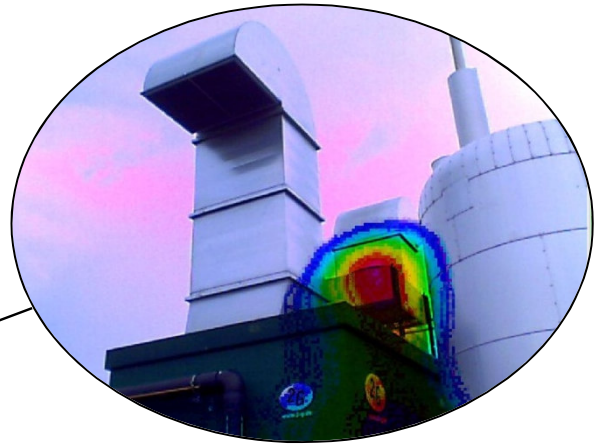


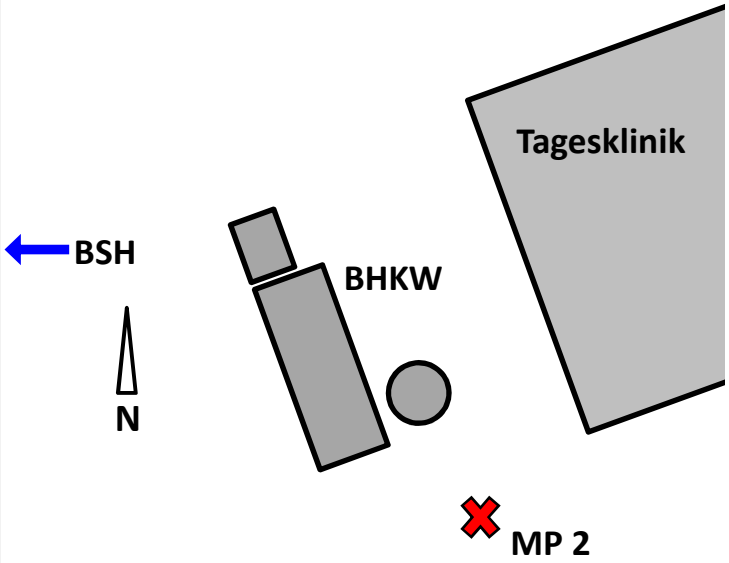


Akustische Ausgangssituation

Akustische Kamera (IAB)

- **Betonschallhaube** 39,9 dB(A)/MP1
- Strömungsgeräusch 41,5 dB(A)
- Kabeldurchlass 40,7 dB(A)
- Gemischkühler 40,9 dB(A)/MP2
- Rohrsegment 40,0 dB(A)

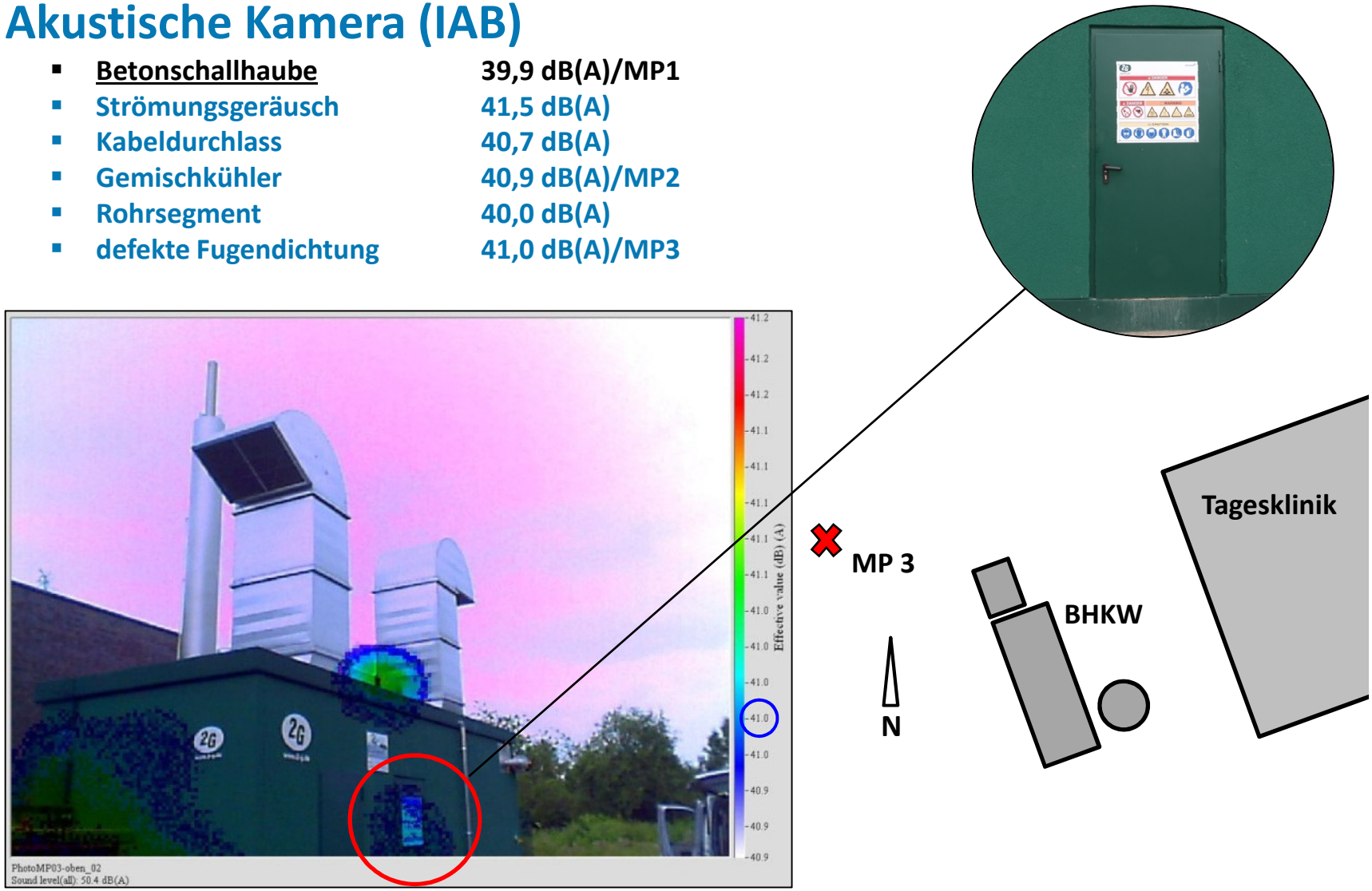




Akustische Ausgangssituation

Akustische Kamera (IAB)

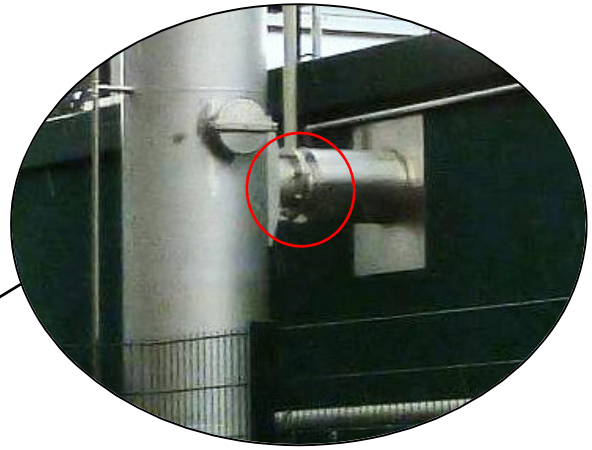
- **Betonschallhaube** 39,9 dB(A)/MP1
- Strömungsgeräusch 41,5 dB(A)
- Kabeldurchlass 40,7 dB(A)
- Gemischkühler 40,9 dB(A)/MP2
- Rohrsegment 40,0 dB(A)
- defekte Fugendichtung 41,0 dB(A)/MP3

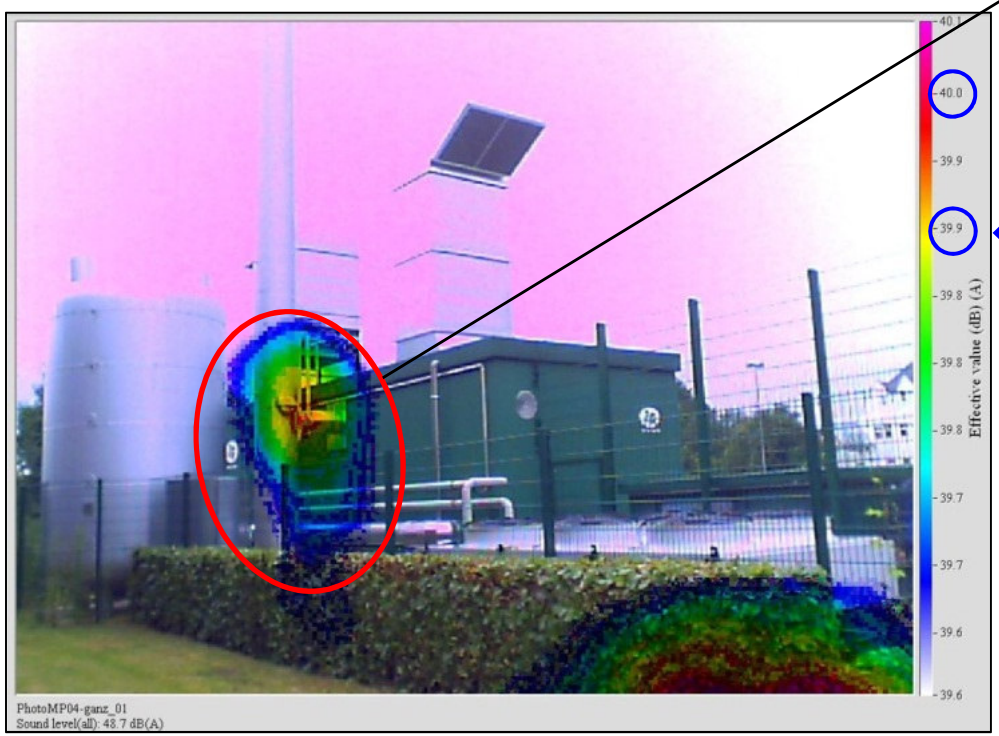


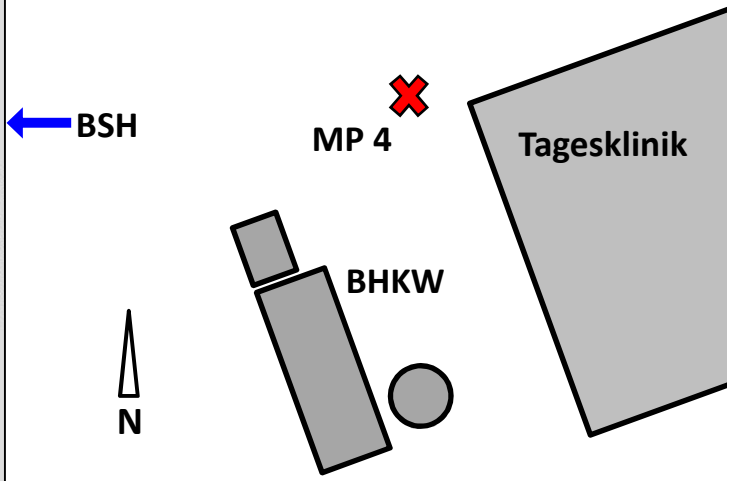
Akustische Ausgangssituation

Akustische Kamera (IAB)

Betonschallhaube	**39,9 dB(A)/MP1**
Strömungsgeräusch	41,5 dB(A)
Kabeldurchlass	40,7 dB(A)
Gemischkühler	40,9 dB(A)/MP2
Rohrsegment	40,0 dB(A)
defekte Fugendichtung	41,0 dB(A)/MP3
Abgasrohr	40,0 dB(A)/MP4







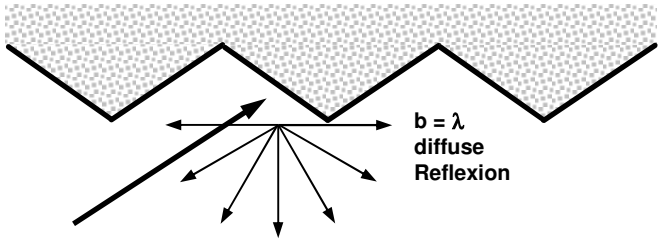
Akustisches Konzept

Randbedingungen

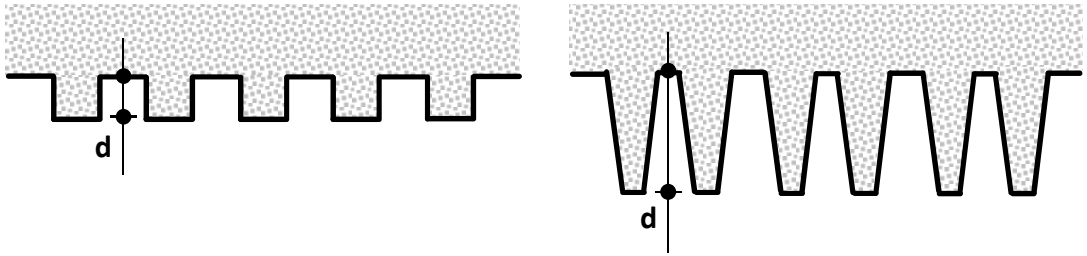
- breitbandige & niederfrequente (!) Wirksamkeit
- Mineralische Ausgangsstoffe & Bindemittel → Fertigung im Betonwerk
- Aufbauhöhe ≤ 100 mm

Profilierte, poröse Absorber-Schicht?

Konventioneller Diffusor



Oberflächenvergrößerung/Profilierung

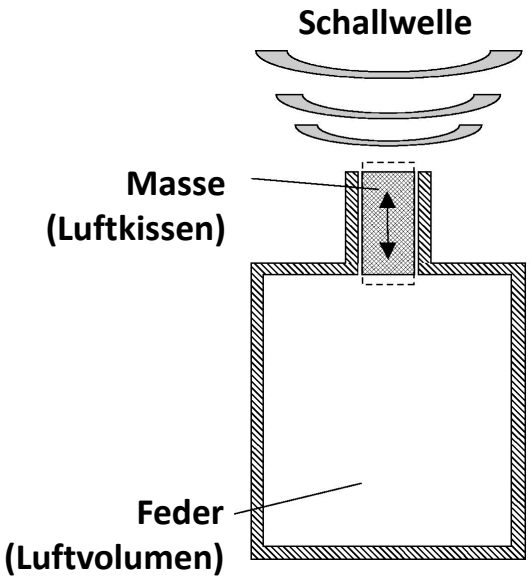


- Strukturtiefe: d_{max} = 100 mm → f_u = 850 Hz (λ/4) ... 1700 Hz (λ/2)
- Grenzfrequenz: f_u = 100 Hz → d_{max} = 1,70 m (λ/2) ... 3,40 m (λ)
- für <u>tiefe</u> Frequenzkomponenten <u>ungeeignet</u>

Akustisches Konzept

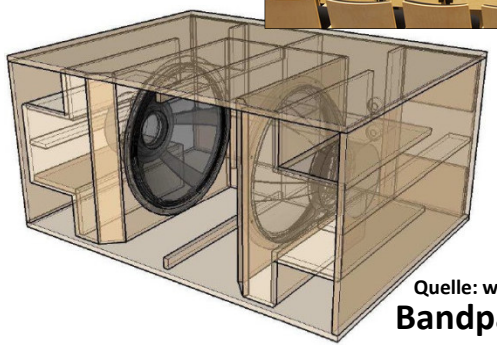
Resonanzabsorber?

- Helmholtzresonator → Feder-Masse Schwinger
- frequenzselektiv:
  - Absorption bei <u>tiefen</u> Frequenzen
  - schmalbandig → Auswahl geeigneter Volumina & Öffnungsgeometrien
    → Kombination mit porösen Absorbern



Helmholtz-Resonator

Resonanzabsorber (Raumakustik)

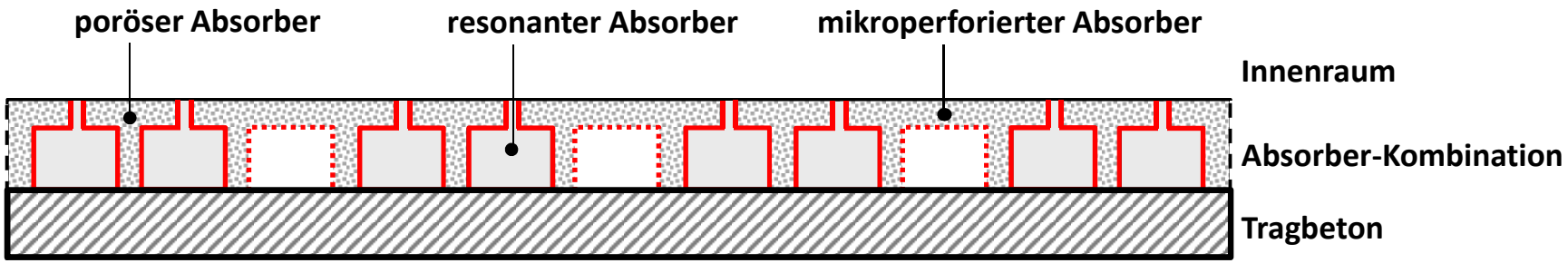


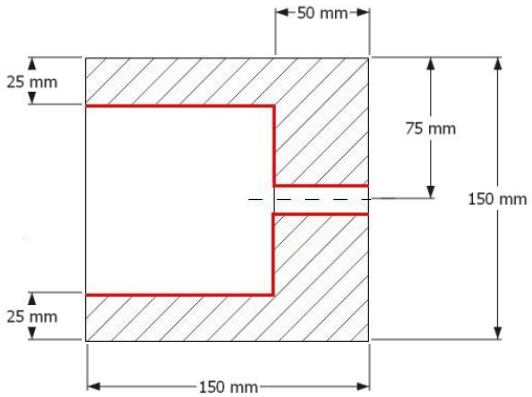
Quelle: www.lautsprecher-technik.de
Bandpass-Subwoofer

Akustisches Konzept

Absorber-Kombination!

- poröser Absorber → haufwerksporiger Akustikbeton
- sel., resonanter Absorber → <u>geschlossener</u> Hohlraum + Resonanzöffnungen
- mikroperforierter Absorber → <u>offener</u> Hohlraum <u>ohne</u> Resonanzöffnungen
- Tragbeton → Mindestdicke (Statik)



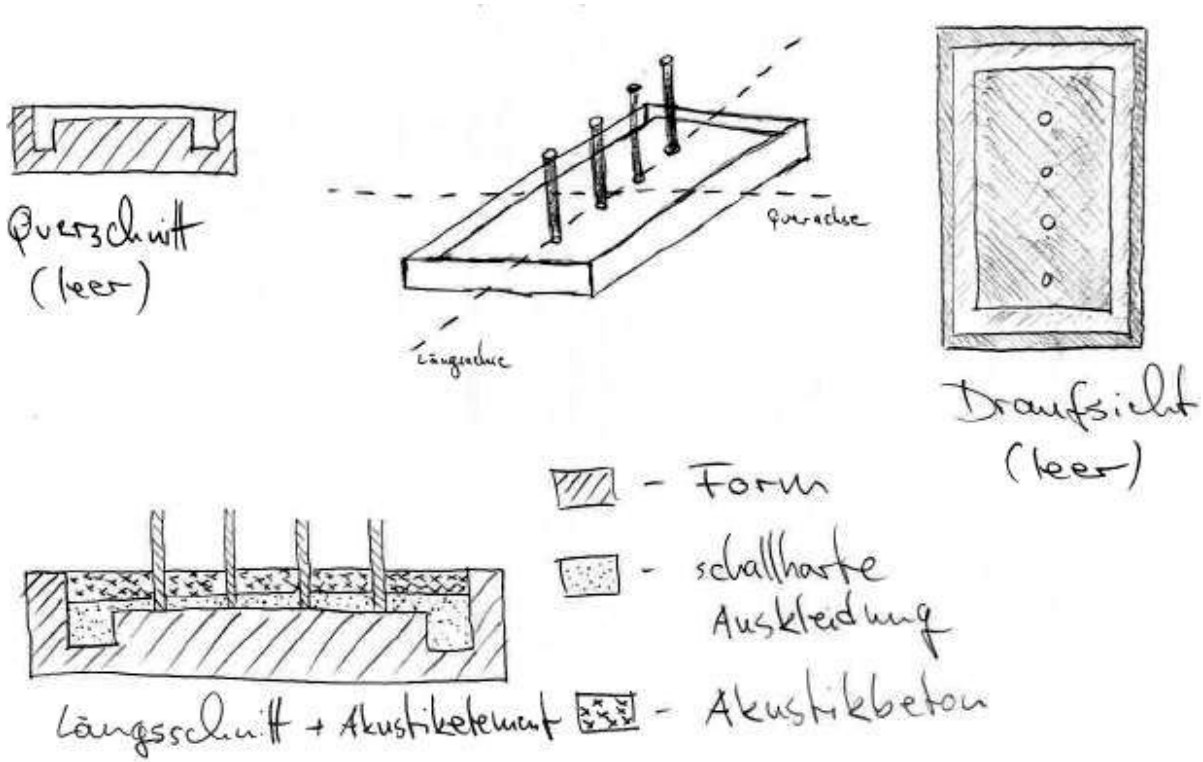


Resonanzfrequenz [Hz]	Höhe [cm]	Breite [cm]	Tiefe [cm]	Schlitzlänge [cm]	Schlitzbreite [cm]	Schlitzanzahl
60	270	10	10	40	0,5	1
90	270	10	10	100	0,2	2
180	270	10	10	50	1,0	4

Akustisches Konzept

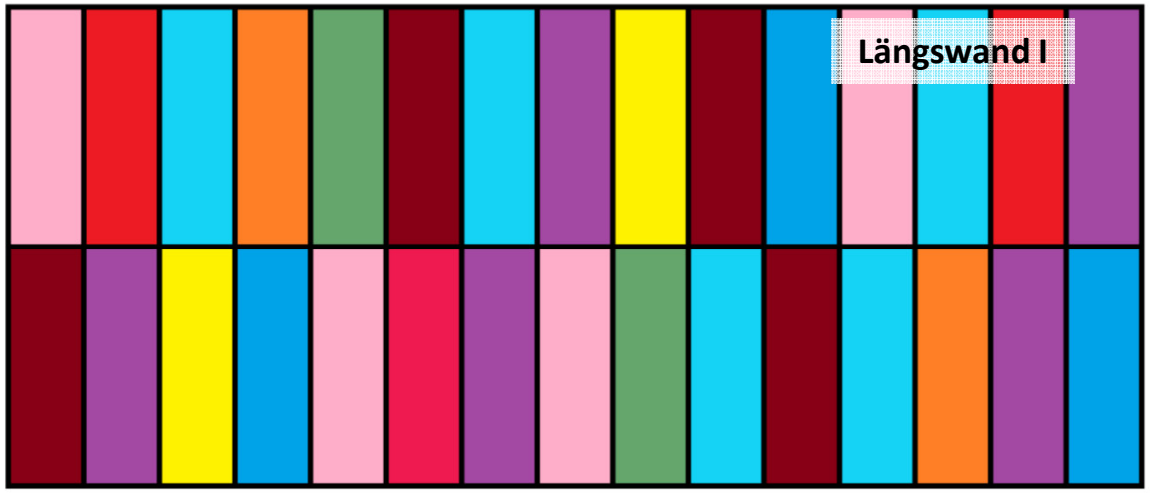
Absorber-Kombination!

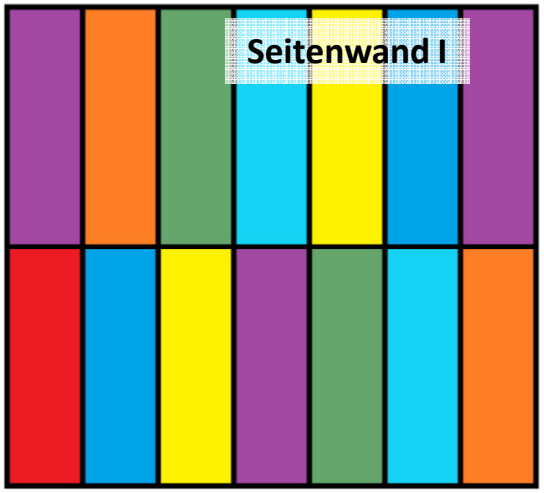
- poröser Absorber → haufwerksporiger Akustikbeton
- sel., resonanter Absorber → <u>geschlossener</u> Hohlraum + Resonanzöffnungen
- mikroperforierter Absorber → <u>offener</u> Hohlraum <u>ohne</u> Resonanzöffnungen
- Tragbeton → Mindestdicke (Statik)



Akustisches Konzept

Absorber-Kombination





Farbe	Frequenz [Hz]	HHR	poröse Absorber	mikroperforierte Absorber	Lochdurchmesser [mm]	Elementanzahl
	60 / >250	x	x	-	15	16
	75 / >250	x	x	-	20	14
	90 / >250	x	x	-	25	10
	105 / >250	x	x	-	30	8
	125 / >250	x	x	-	35	8
	140 / >250	x	x	-	40	8
	155 / >250	x	x	-	45	8
	170 / >250	x	x	-	50	8
	~250	-	-	x	-	8

Statisch-konstruktives Konzept

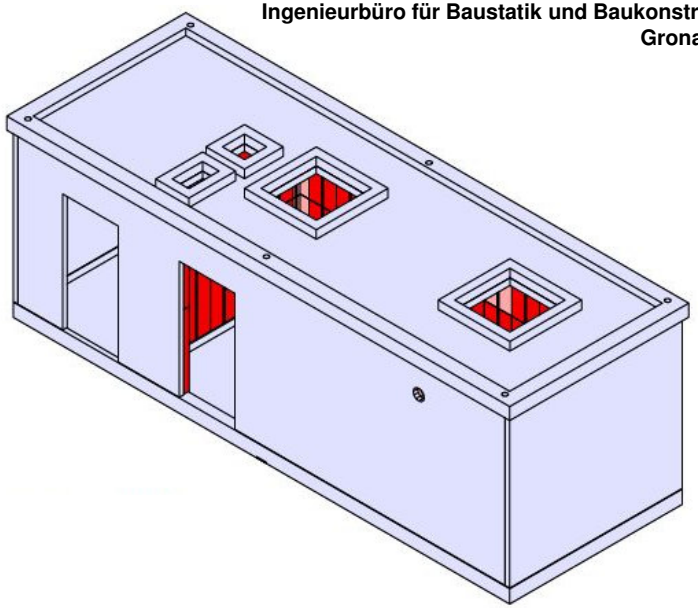
Eschenröder & Osenberg GbR
Ingenieurbüro für Baustatik und Baukonstruktion
Gronau-Epe

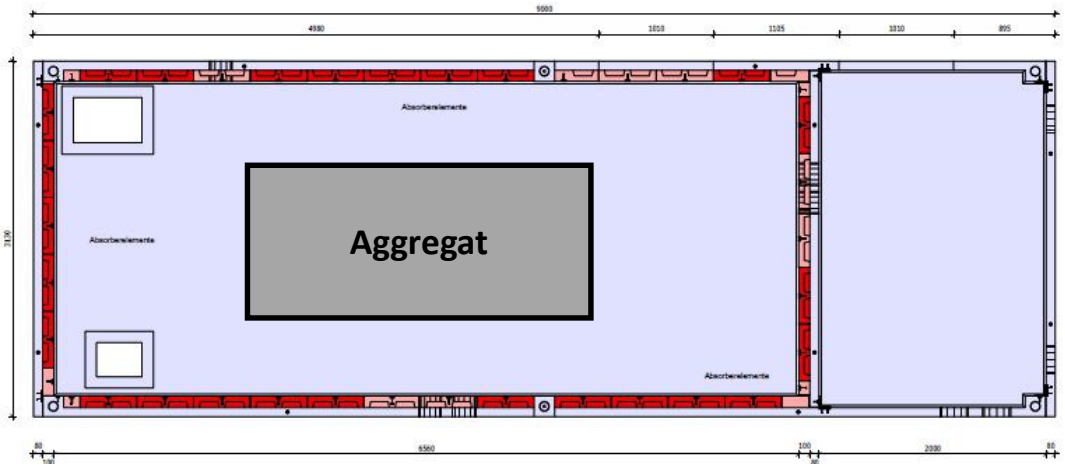
Randbedingungen

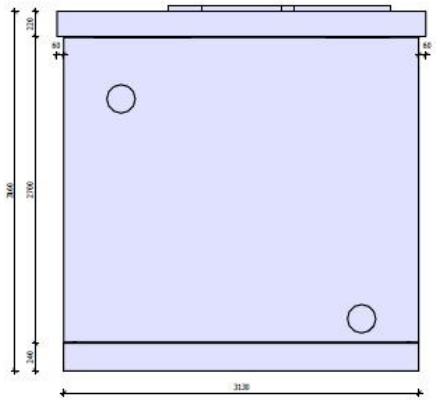
- Massereduzierung!
- variabel (BSH-Varianten)

Umsetzung

- Innenraum-Auskleidung (Absorber)
- Ankerschienen (technische Anbauten)
- Wanddicke (80 mm)
- 6 x Zugstützen im Baukörper
- modifizierte Boden-/Deckenplatte







Statisch-konstruktives Konzept

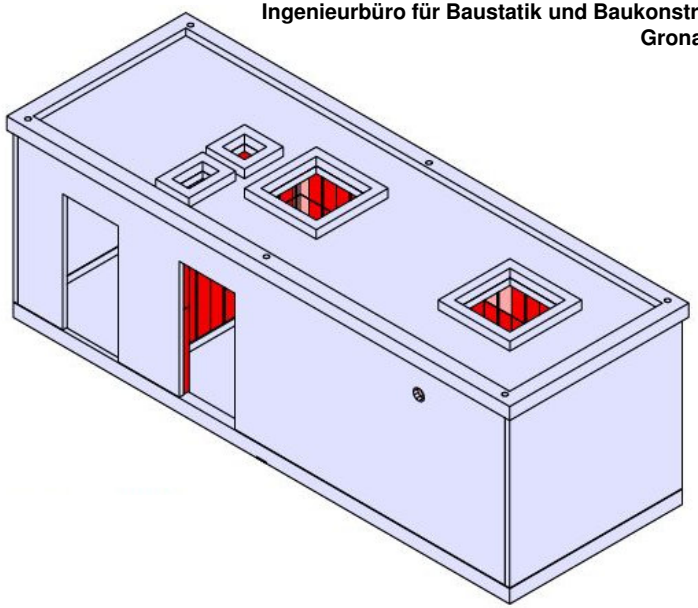
Eschenröder & Osenberg GbR
Ingenieurbüro für Baustatik und Baukonstruktion
Gronau-Epe

Randbedingungen

- Massereduzierung!
- variabel (BSH-Varianten)

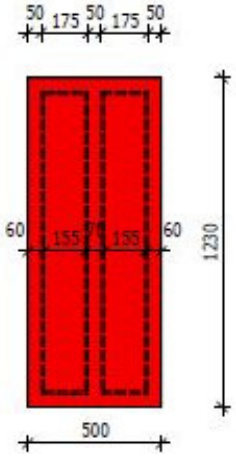
Umsetzung

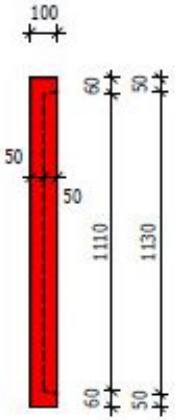
- Innenraum-Auskleidung (Absorber)
- Ankerschienen (technische Anbauten)
- Wanddicke (80 mm)
- 6 x Zugstützen im Baukörper
- modifizierte Boden-/Deckenplatte



Standard Absorber-Elemente

1230/500/100 mm (l/b/h)





Werkstoffentwicklung

Randbedingungen

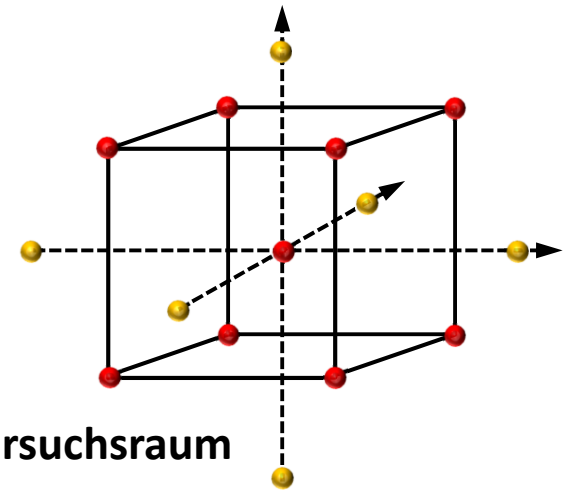
- Massereduzierung!
- poröse Struktur → hoher Schallabsorptionsgrad α

Umsetzung

- haufwerksporiger Leichtbeton (LAC)
- Druckfestigkeit: ≥ LAC 2 (DIN EN 1520), Einbettung Ankerschienen
- Brennbarkeitsklasse: A1 (DIN EN 13501-1), feuerbeständig, nicht brennbar

DOE – Design of Experiments

- Statistische Versuchspläne
  → Stufenkombinationen der Einflussfaktoren
- Varianzanalyse (ANOVA)
  → empirische mathematische Modelle
- numerische Optimierung



Versuchsraum

Werkstoffentwicklung

Versuchsprogramm DOE

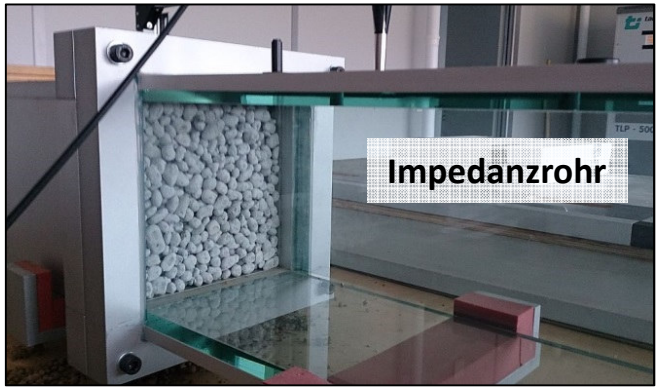
- **Einflussfaktoren**
  - leichte Gesteinskörnung → Blähglas / Blähton
  - Zementgehalt: → 150 … 350 kg/m³
  - w/z-Wert: → konst. 0,40 (+ 70% WA_{1h})
  - Quarzsand 0 – 0,5 mm: → 0 … 100 kg/m³
- **Antwortgrößen**
  - Frischbeton-/Trockenrohdichte
  - Verdichtungsmaß
  - Druck-/Biegezugfestigkeiten
  - Schallabsorptionsgrad α
  - Resonanzfrequenz f_{Res1}
  - kum. Schallabsorptionsgrad α*Hz
  - FWHM
- **RSM Versuchspläne**
  - 2 x 11 Rezepturen (CCD)

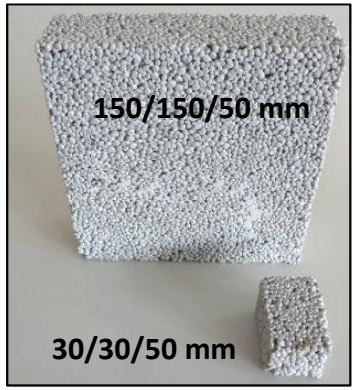
Liaver 2/4 mm:

ρ_R = 207 kg/m³
KF = 2,16 MPa
WA_{1h} = 7,6 M.-%

Liapor R 1/4 mm:

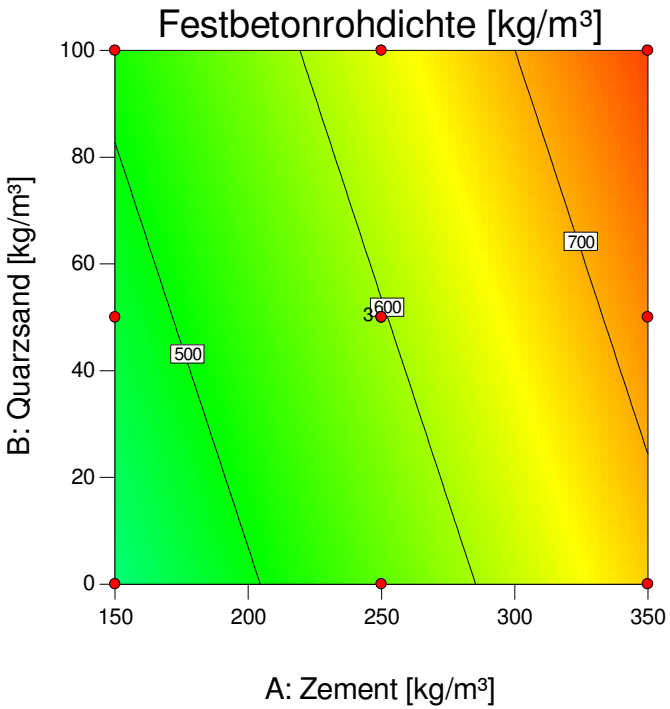
ρ_R = 519 kg/m³
KF = 3,17 MPa
WA_{1h} = 9,1 M.-%



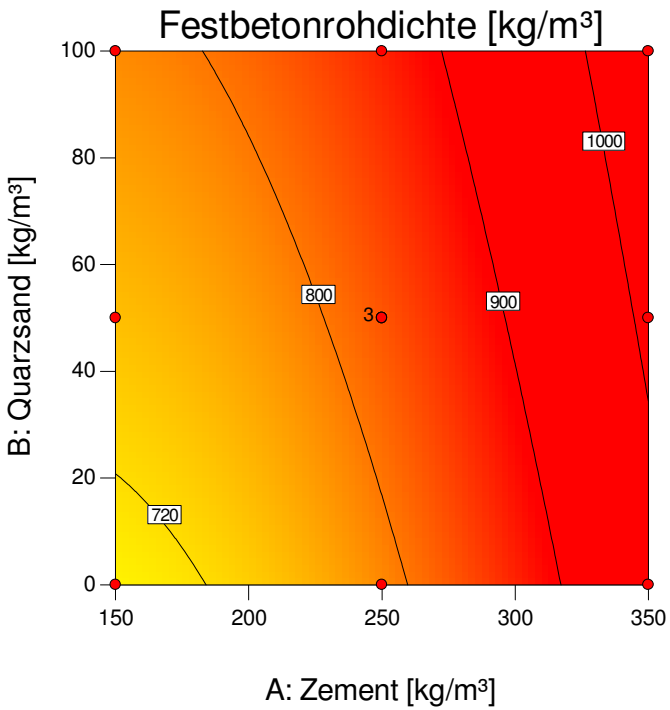


Werkstoffentwicklung

Trockenrohdichte [kg/m³]



Blähglas Liaver 2/4 mm



Blähton Liapor R 1/4 mm

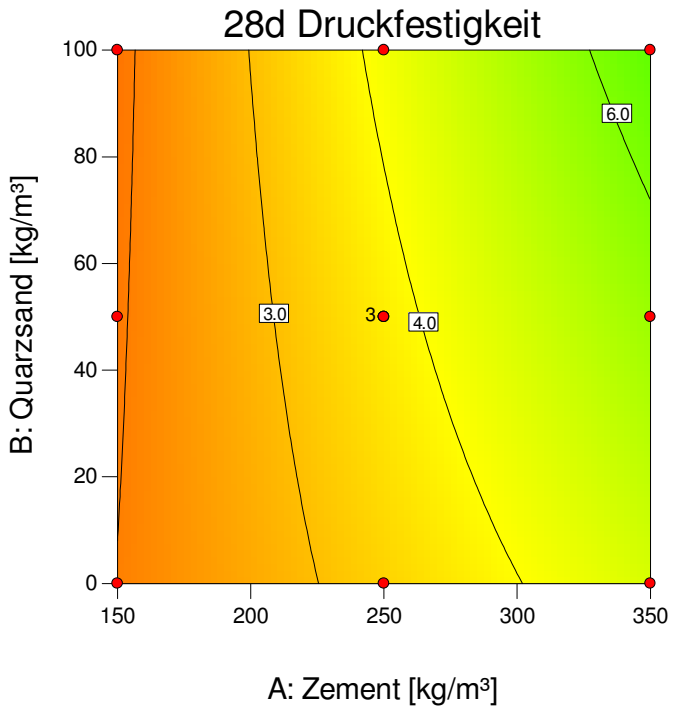
Mögliche LAC-Rohdichteklassen (DIN EN 1520:2011-06):

- **LAC 0,5** (≥ 400 … ≤ 500 kg/m³)
- **LAC 0,8** (> 700 … ≤ 800 kg/m³)

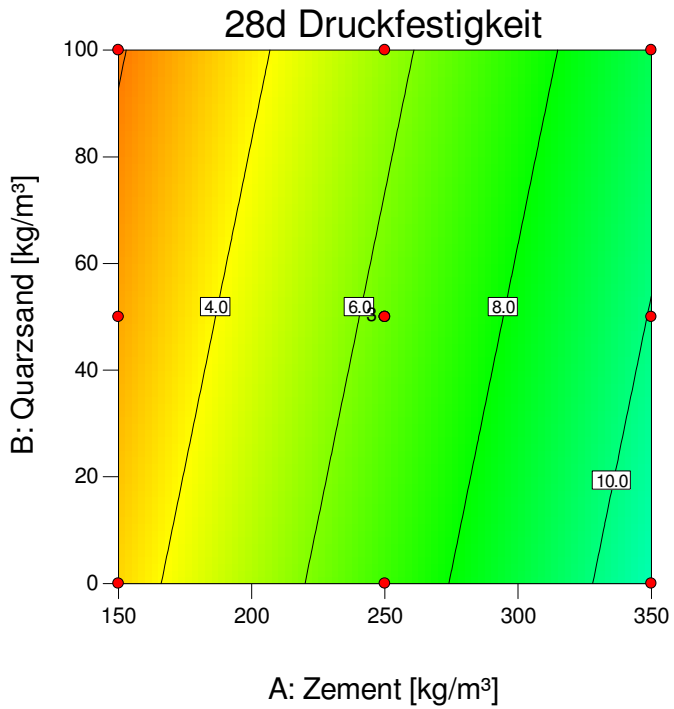
- **LAC 0,8** (> 700 … ≤ 800 kg/m³)
- **LAC 1,2** (> 1000 … ≤ 1200 kg/m³)

Werkstoffentwicklung

Druckfestigkeiten [N/mm²]



Blähglas Liaver 2/4 mm



Blähton Liapor R 1/4 mm

Mögliche LAC-Festigkeitsklassen (DIN EN 1520:2011-06):

LAC 2

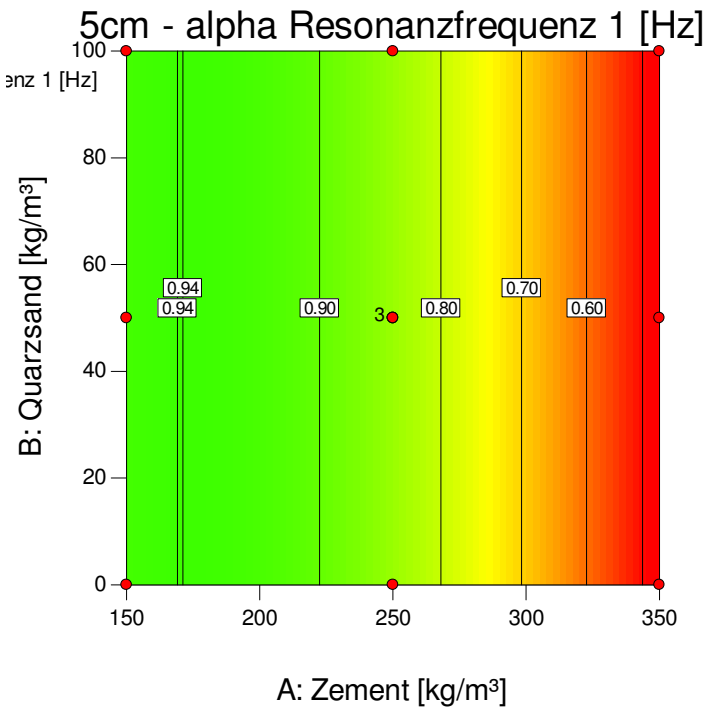
(f_{ck} = 2 N/mm², $f_{c,3}$ = > 4 N/mm²)

LAC 2 bis LAC 8

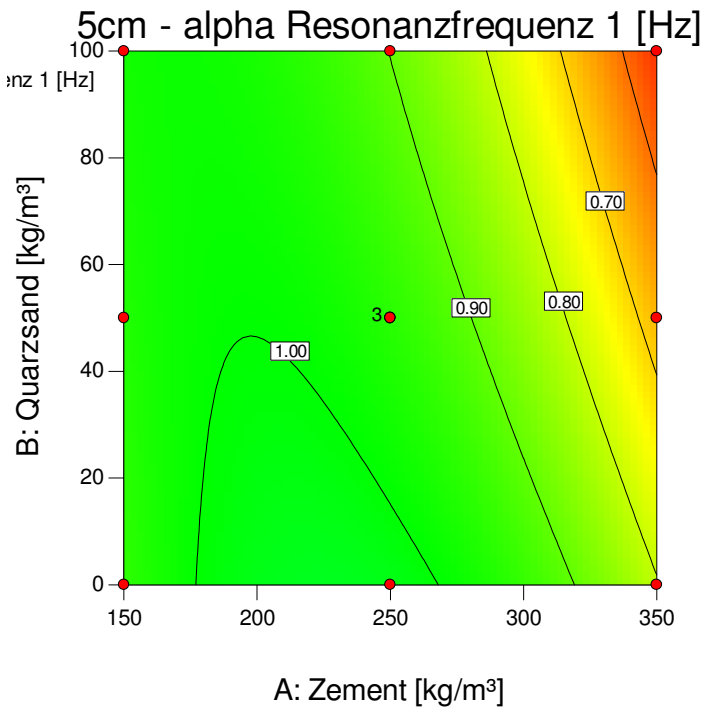
(f_{ck} = 8 N/mm², $f_{c,3}$ = > 11 N/mm²)

Werkstoffentwicklung

Schallabsorptionsgrad a [-]



Blähglas Liaver 2/4 mm



Blähton Liapor R 1/4 mm

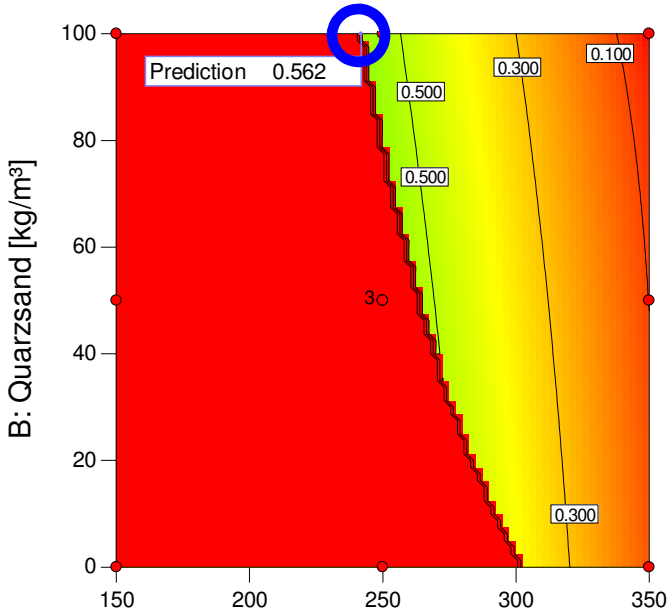
vergleichbare Absorptionsgrade bis 1,00 (100 %)

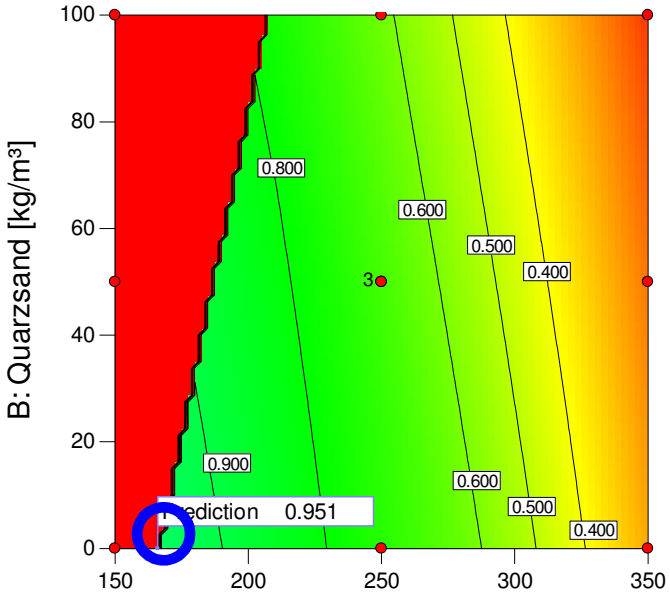
zunehmende Zementgehalte → abnehmende Haufwerksporosität

Werkstoffentwicklung

Numerische Optimierung

Trockenrohdichte: Minimum
Druckfestigkeit: > 4 N/mm²
Absorptionsgrad: Maximum
kum. Absorptionsgrad: Maximum





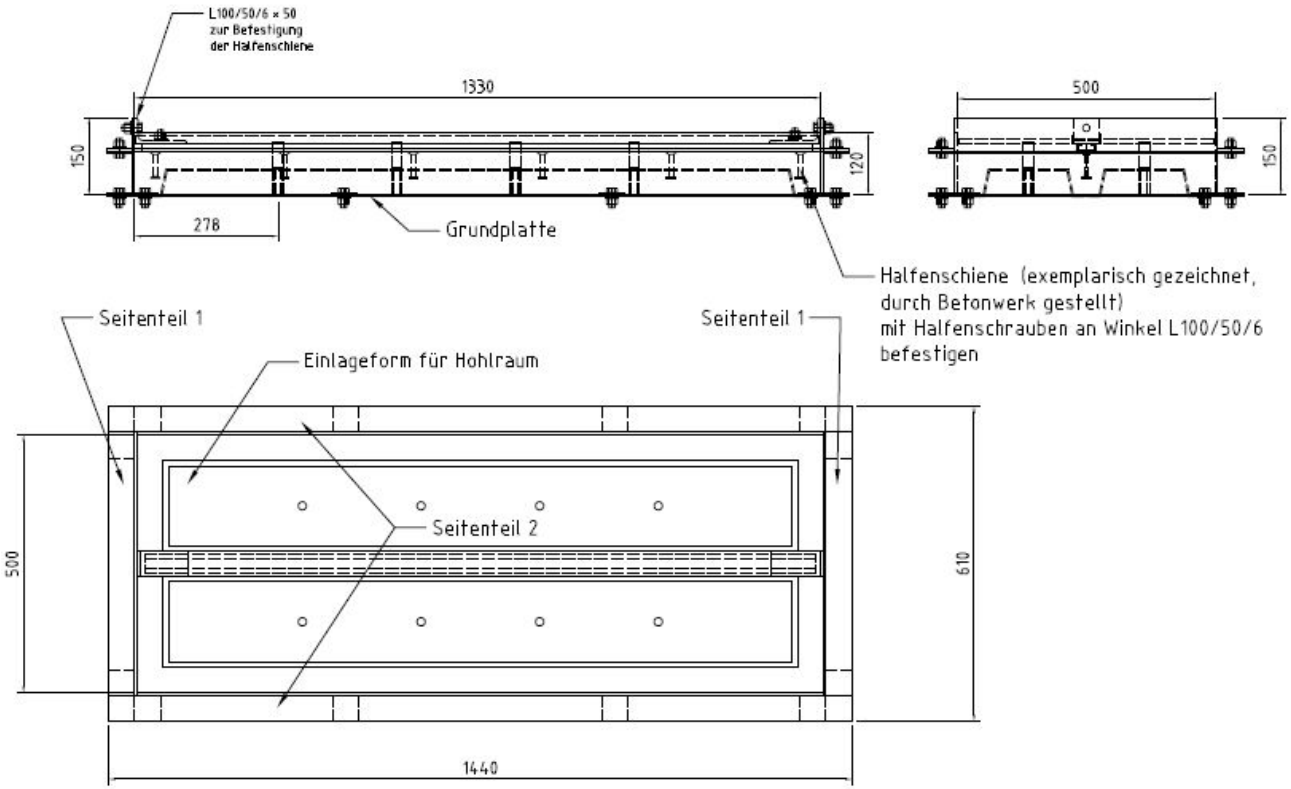
Zement	**242**	kg/m³	**166**	kg/m³
Quarzsand	**100**	kg/m³	**0**	kg/m³
Trockenrohdichte	**628 (0,7)**	kg/m³	**710 (0,8)**	kg/m³
28d Druckfestigkeit	**4,0 ± 0,2**	N/mm²	**4,0 ± 1,1**	N/mm²
Schallabsorptionsgrad α	**0,86**	-	**0,98**	-

Werksfertigung

AIS Kursawe
Anlagenbau & Industrieservice

Stahlformen für Absorber-Elemente

- Integration von Halfenschienen
- Verdichtung mit Auflastplatte



Werksfertigung

AIS Kursawe
Anlagenbau & Industrieservice

Stahlformen für Absorber-Elemente

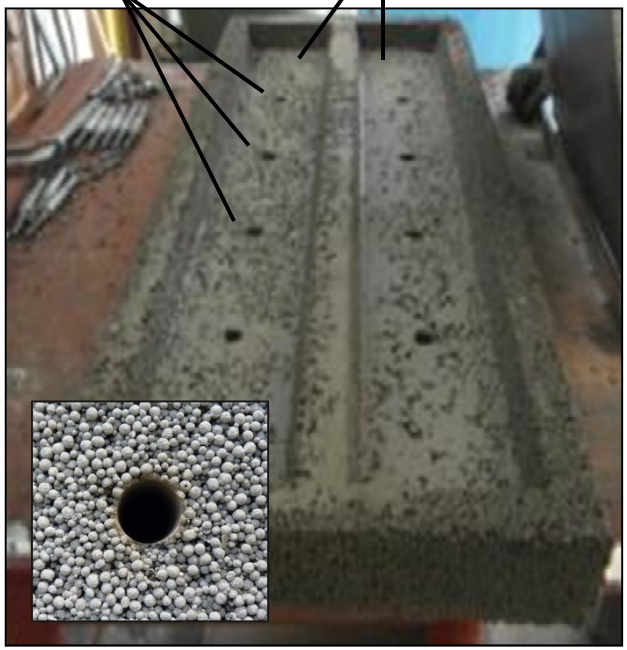
- Integration von Halfenschienen
- Verdichtung mit Auflastplatte

Absorber-Element in Stahlform

Absorber-Element entschalt

Resonanzöffnungen

Resonanzraum



Funktionsmuster

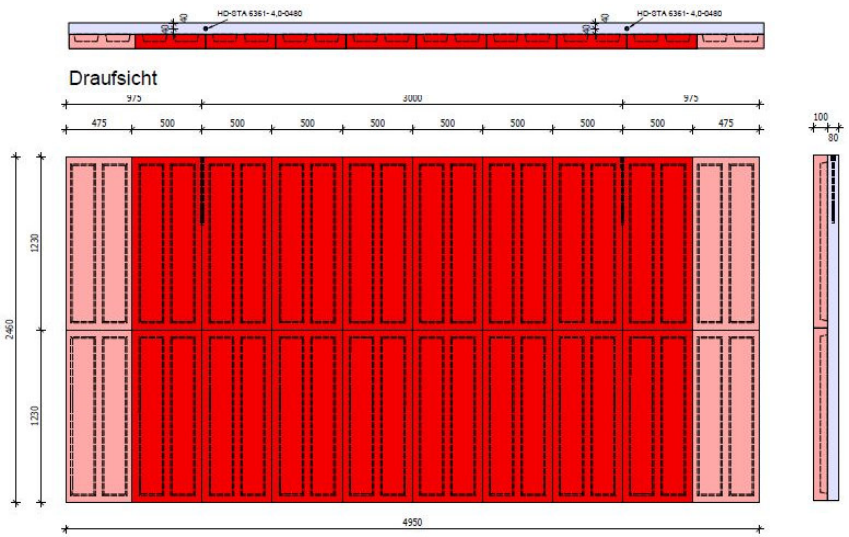
Wand-Element

- 4,95/2,46/0,18 m (b/h/d)
- Tragbeton (80 mm) + 16 x Absorber (100 mm)
- Flächenmasse m‘: **242 kg/m² (-37 %)**

Büscher

Büscher GmbH & Co.KG, Heek

Akustikbüro Krämer+Stegmaier



Wand-Funktionsmuster

Funktionsmuster

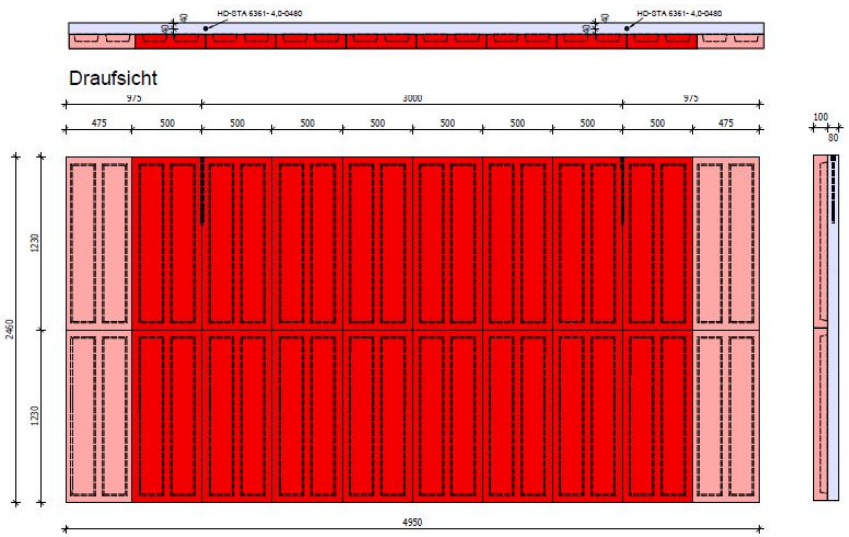
Wand-Element

- 4,95/2,46/0,18 m (b/h/d)
- Tragbeton (80 mm) + 16 x Absorber (100 mm)
- Flächenmasse m‘: 242 kg/m² (-37 %)

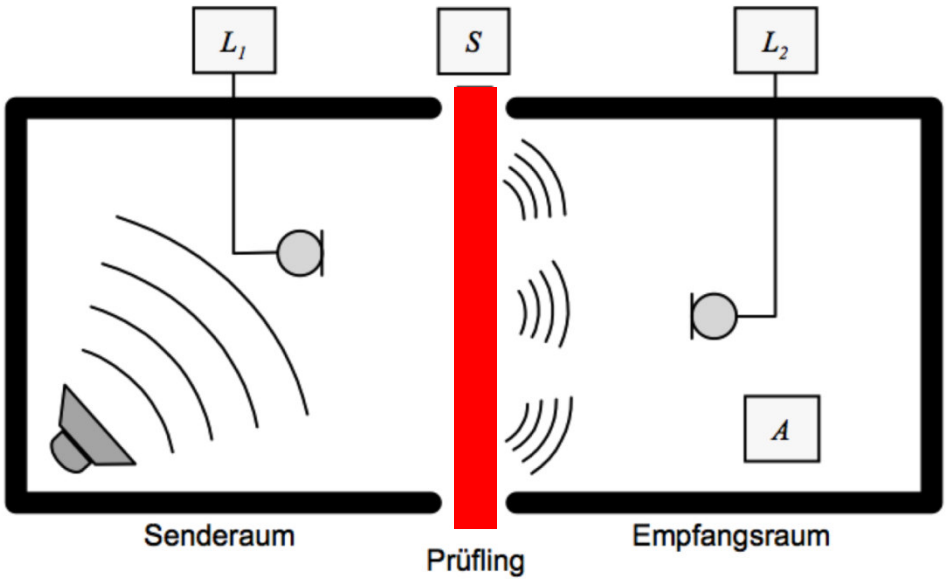
Büscher

Büscher GmbH & Co.KG, Heek

Akustikbüro Krämer+Stegmaier



Wand-Funktionsmuster



Mobiler Wandprüfstand (IAB)

Funktionsmuster

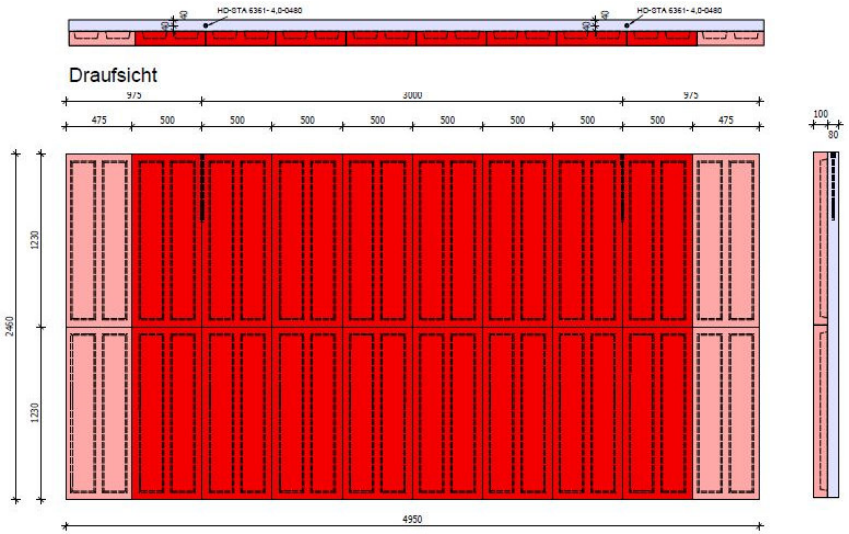
Wand-Element

- 4,95/2,46/0,18 m (b/h/d)
- Tragbeton (80 mm) + 16 x Absorber (100 mm)
- Flächenmasse m‘: **242 kg/m² (-37 %)**

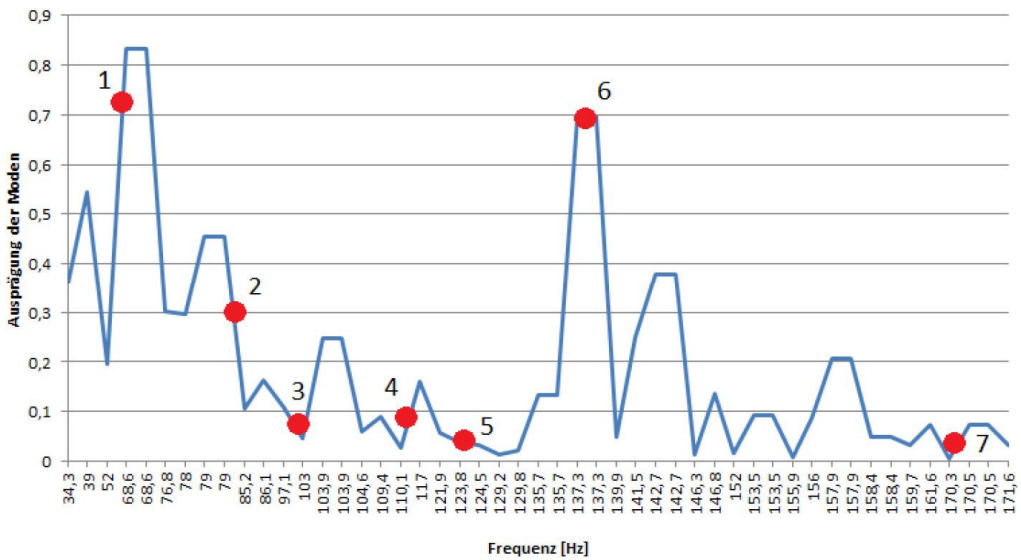
Büscher

Büscher GmbH & Co.KG, Heek

Akustikbüro Krämer+Stegmaier



Wand-Funktionsmuster



Resonanzfrequenzen der Absorber-Elemente

Funktionsmuster

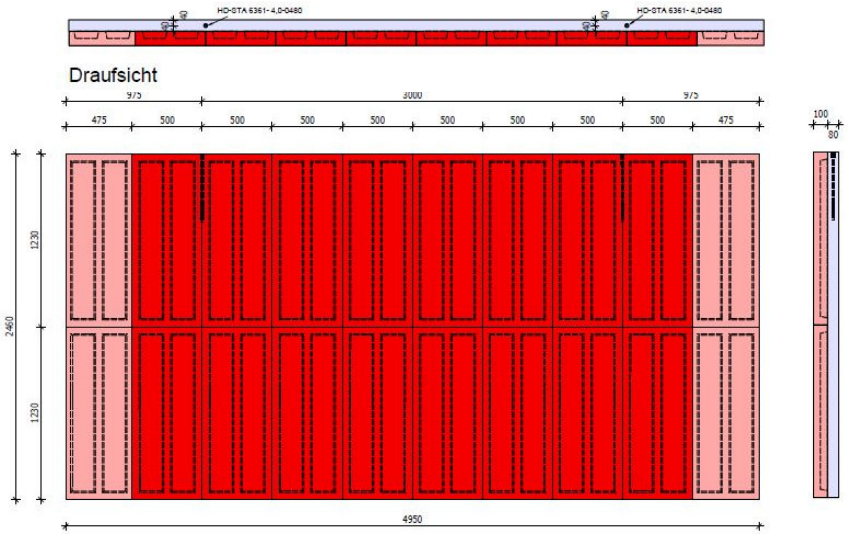
Wand-Element

- 4,95/2,46/0,18 m (b/h/d)
- Tragbeton (80 mm) + 16 x Absorber (100 mm)
- Flächenmasse m‘: 242 kg/m² (-37 %)
- Schalldämmmaß R_W: 53 dB (+9 dB)

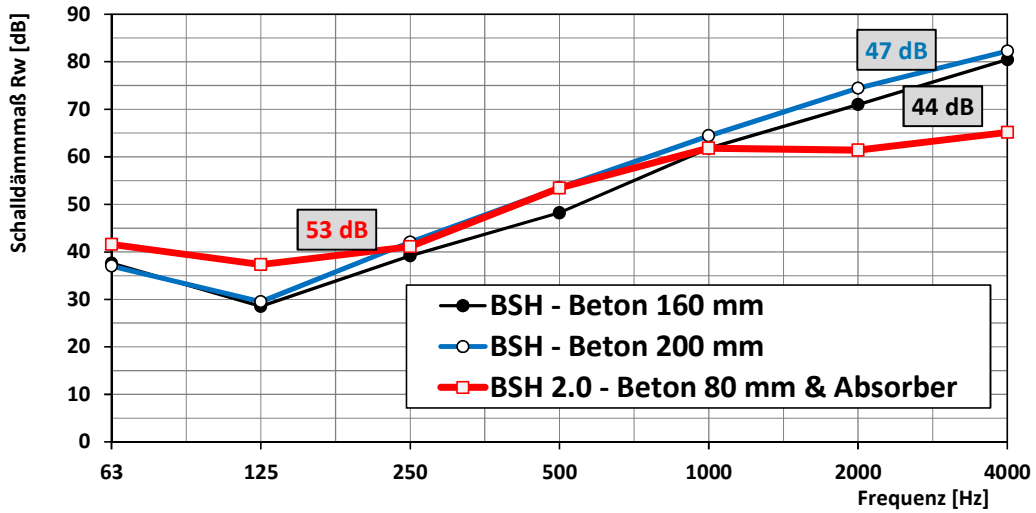
Büscher

Büscher GmbH & Co.KG, Heek

Akustikbüro Krämer+Stegmaier



Wand-Funktionsmuster



bestimmte Schalldämmmaße R_w

Funktionsmuster

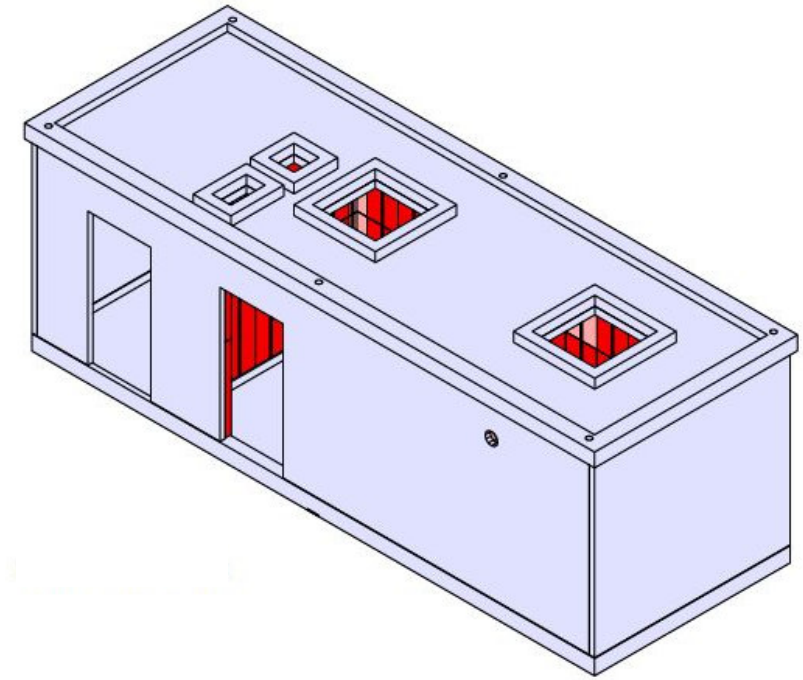
BSH 2.0

- 9,00/3,1/3,5 m (l/b/h)
- Tragbeton (80 mm) + 60 x Absorber (100 mm)
- Leermasse/mit Anlagentechnik: **38,5/46,5 t (-35 %)**

Büscher

Büscher GmbH & Co.KG, Heek

Akustikbüro Krämer+Stegmaier



BSH 2.0 – Funktionsmuster

Akustische Untersuchungen

Funktionsmuster

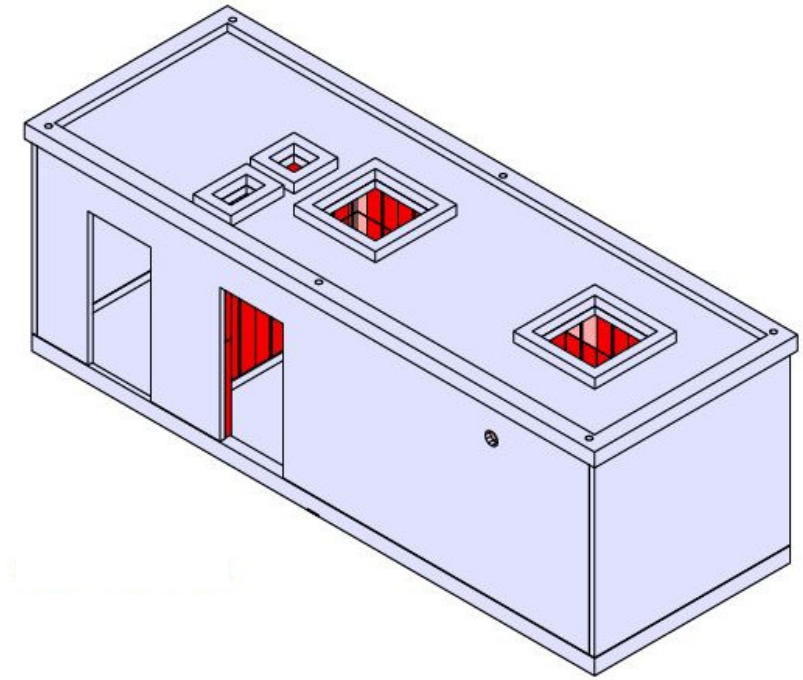
BSH 2.0

- 9,00/3,1/3,5 m (l/b/h)
- Tragbeton (80 mm) + 60 x Absorber (100 mm)
- Leermasse/mit Anlagentechnik: **38,5/46,5 t (-35 %)**

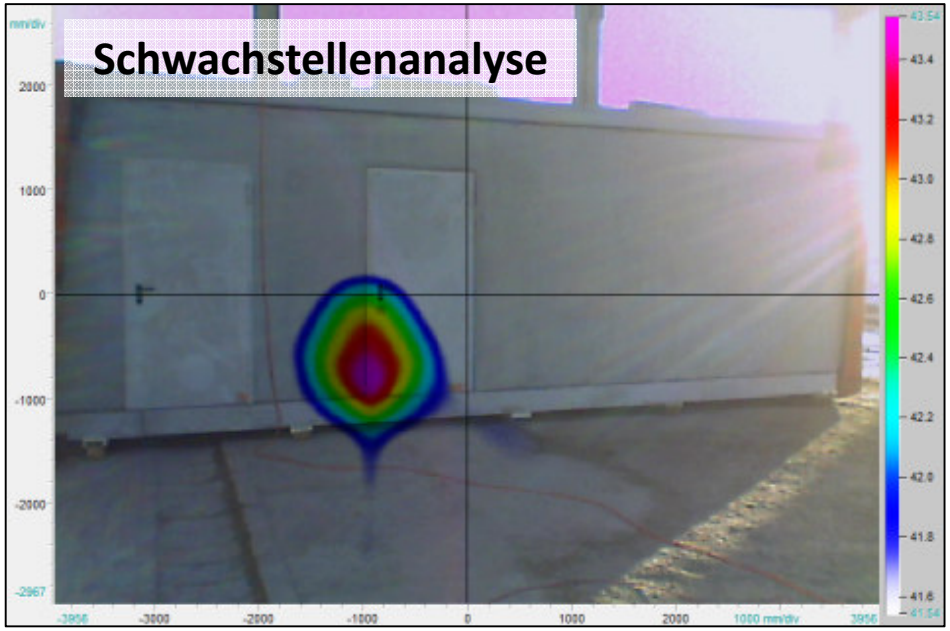
Büscher

Büscher GmbH & Co.KG, Heek

Akustikbüro Krämer+Stegmaier



BSH 2.0 – Funktionsmuster



Akustische Kamera (IAB)

Funktionsmuster

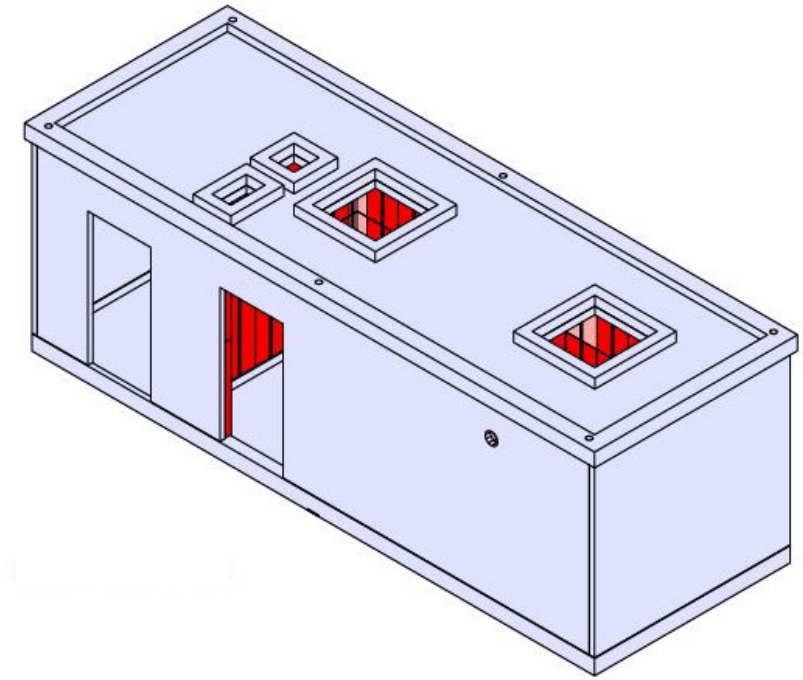
BSH 2.0

- 9,00/3,1/3,5 m (l/b/h)
- Tragbeton (80 mm) + 60 x Absorber (100 mm)
- Leermasse/mit Anlagentechnik: **38,5/46,5 t (-35 %)**

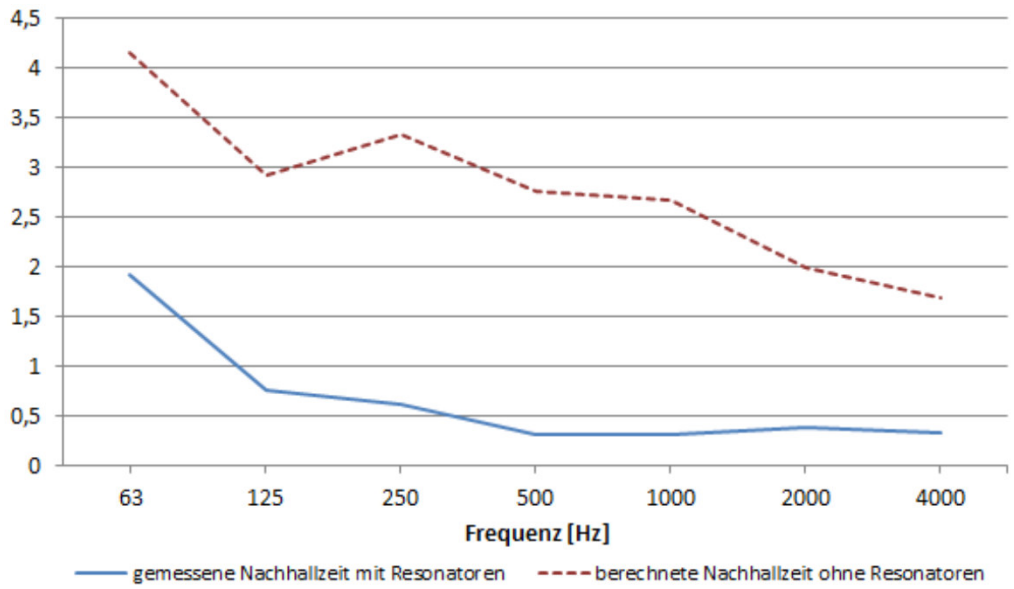
Büscher

Büscher GmbH & Co.KG, Heek

Akustikbüro Krämer+Stegmaier



BSH 2.0 – Funktionsmuster



frequenzabhängige Nachhallzeiten (AKS)

Funktionsmuster

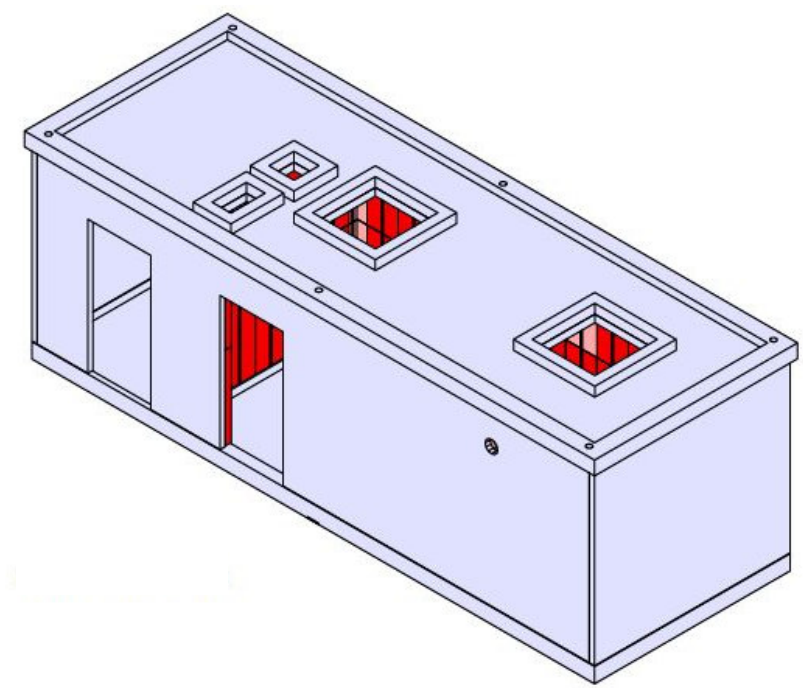
BSH 2.0

- 9,00/3,1/3,5 m (l/b/h)
- Tragbeton (80 mm) + 60 x Absorber (100 mm)
- Leermasse/mit Anlagentechnik: **38,5/46,5 t (-35 %)**

Büscher

Büscher GmbH & Co.KG, Heek

Akustikbüro Krämer+Stegmaier



BSH 2.0 – Funktionsmuster

Vorfertigung Anlagentechnik (2G Energy AG)

Funktionsmuster

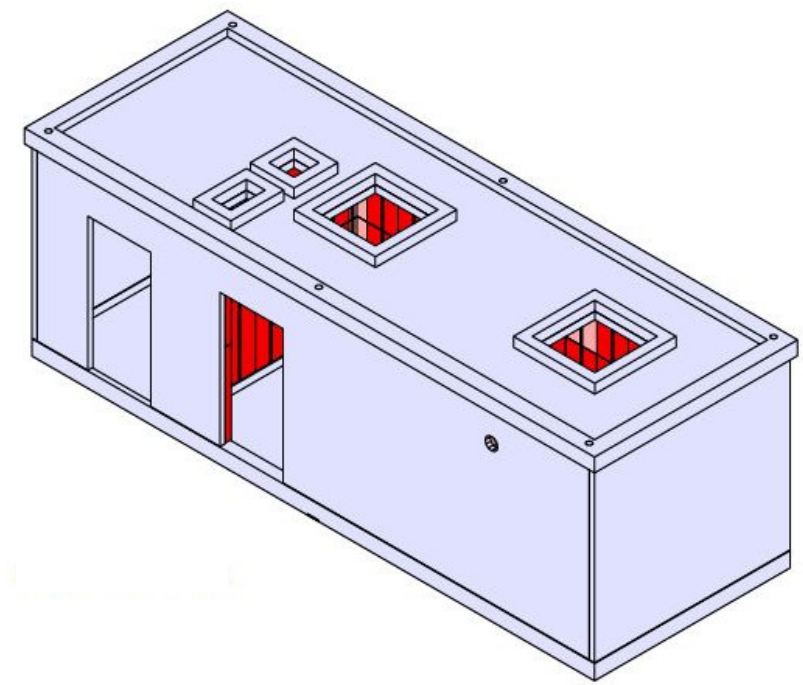
BSH 2.0

- 9,00/3,1/3,5 m (l/b/h)
- Tragbeton (80 mm) + 60 x Absorber (100 mm)
- Leermasse/mit Anlagentechnik: **38,5/46,5 t (-35 %)**

Büscher

Büscher GmbH & Co.KG, Heek

Akustikbüro Krämer+Stegmaier

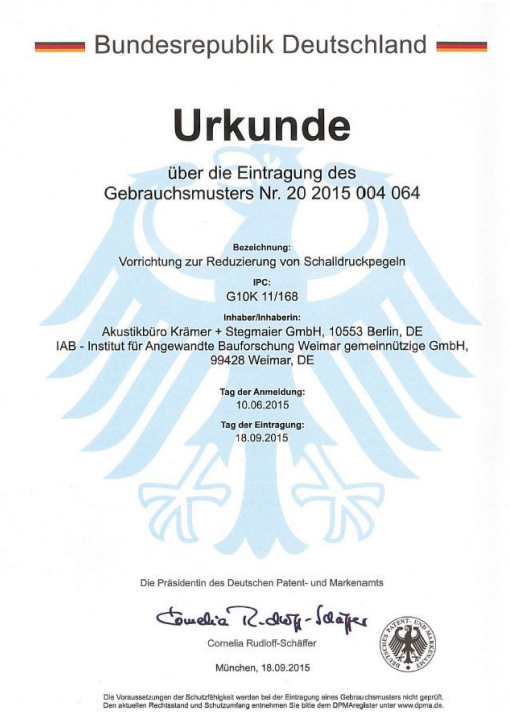


BSH 2.0 – Funktionsmuster

Transport inkl. Aggregat/Anlagentechnik

Zusammenfassung

- **Betonschallhauben:**
  - sehr gute Lärmminderung für dezentrale BHKW-Anlagen
  - dauerhaft, optisch anpassbar
- **BSH 2.0:**
  - Kombination poröser, mikroperforierter & selektiver resonanter Absorber
    → Massereduzierung um 35 %
    → werkseitige Integration der Anlagentechnik
    → Senkung des Innenraumpegels
    → Schalldämmmaß R_w 53 dB (+9 dB)
- **Potentiale:**
  - BSH-Varianten für untersch. Immissionsrichtwerte (BImSchG/TA-Lärm)
  - weitere Anwendungen des passiven Lärmschutzes (Innenraumakustik, Schallschutzwände ...)



Bundesrepublik Deutschland

Urkunde

über die Eintragung des
Gebrauchsmusters Nr. 20 2015 004 064

Bezeichnung:
Vorrichtung zur Reduzierung von Schalldruckpegeln

IPC:
G10K 11/168

Inhaber/Inhaberin:
Akustikbüro Krämer + Stegmaier GmbH, 10553 Berlin, DE
IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH, 99428 Weimar, DE

Tag der Anmeldung:
10.06.2015

Tag der Eintragung:
18.09.2015

Die Präsidentin des Deutschen Patent- und Markenamts

Cornelia Rudloff-Schäffer

München, 18.09.2015

Die Voraussetzungen der Schutzfähigkeit werden bei der Eintragung eines Gebrauchsmusters nicht geprüft. Den aktuellen Rechtsstand und Schutzumfang entnehmen Sie bitte dem DPMAregister unter www.dpma.de.

Kontakt

r.tatarin@iab-weimar.de
www.iab-weimar.de

IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH
Über der Nonnenwiese 1, D-99428 Weimar