Luftschalldämmung von zweischaligen Bauteilen

Autor(en): **Blaich, Jürgen**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **97 (1979)**

Heft 12

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-85432

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

mehr auf seiner Höhe gehalten und springt hinter auf das unterste Blatt von M, das durch minimen Realisierungsgrad gekennzeichnet ist. Hier wäre es nun wichtig, dass die Gegner am Ball bleiben, sonst gerät der Punkt in die Gefahrenzone des anderen Falts, und er könnte unversehens wieder nach oben springen. Im ganzen ist ein stabiler Ausgang der Geschichte erst möglich, wenn eine der Parteien aufgibt (dann wird der Konfliktpunkt am Schluss oben oder unten vorne sein) oder wenn beide «aufgeben» und kompromissbereit sind: In diesem Fall kommt der Konfliktpunkt hinten aus der Kuspe heraus, und es gibt hinsichtlich der Realisierung eine mittlere Lösung.

Man sieht, dass verschiedene Effekte, die in derartigen Situationen oft zu beobachten sind, durch das Modell tatsächlich vernünftig wiedergegeben werden. Wie ernst er das allerdings nehmen will, mag der Leser selbst entscheiden.

Adresse des Verfassers: Dr. *Ch. Blatter*, Professor für Mathematik an der ETHZ, ETH-Zentrum, 8092 Zürich

Luftschalldämmung von zweischaligen Bauteilen

Von Jürgen Blaich, Zürich

Mit zweischaligen Bauteilen lassen sich zum Teil erheblich *bessere Dämmleistungen* erzielen als dies mit gleichschweren einschaligen Konstruktionen der Fall ist. Theoretische Betrachtungen führen zu der Schlussfolgerung, dass es, ähnlich wie für einschalige Bauteile, auch für zweischalige Bauteile eine Art «Massengesetz» geben muss, also eine Beziehung zwischen dem Gewicht des Bauteils und dem erreichbaren Luftschallisolationsindex. In Bild 1 wurde aufgrund der theoretischen Gesetzmässigkeiten, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, der Rahmen für ein derartiges «Massengesetz» abgeleitet. Auf der Abszisse wurde das Flächengewicht des Bauteils in Form der flächenbezogenen Masse, auf der Ordinate wurde der Luftschallisolationsindex aufgetragen. Das Diagramm zeigt als sogenannte «Massengerade» die Dämmwerte, die sich aus dem theoretischen, *Bergerschen Massengesetz* ergeben. Darunter befindet sich die praxisbezogene *Kurve von Gösele* für einschalige Bauteile.

Parallel zur Massengeraden, jedoch insgesamt günstiger, verläuft der abgeleitete Bereich für *zweischalige, schalltechnisch richtig aufgebaute Bauteile*. Auf der rechten Bildhälfte sind Messergebnisse zur Überprüfung der beiden Kurvenäste eingetragen: helle Kreise: Messungen von einschaligen, dunkle Kreise: Messungen von zweischaligen Bauteilen.

Die, mit 10 dB, relativ grosse Bandbreite des zweischaligen Bereichs erklärt sich aus den gewählten Randbedingungen. Im vorliegenden Fall tolerieren die Randbedingungen zweischalige Bauteile mit Resonanzfrequenzen f_R zwischen 71 Hz und 125 Hz. Toleriert werden ausserdem Schallbrücken zwischen den Schalen, sofern die Grenzfrequenz f_g mindestens einer der beiden Schalen über 2000 Hz liegt. Berücksichtigt man, dass, nach der Theorie, die Erhöhung der Resonanzfrequenz eines zweischaligen Bauteils von 71 Hz auf 125 Hz eine Reduktion des Isolationsindexes um 6 dB zur Folge hat, so wird deutlich, dass der hier abgesteckte Bereich, durch Einengung der Randbedingungen, in weitere Unterbereiche mit entsprechend geringer Bandbreite unterteilt werden kann.

Es muss betont werden, dass die Schalldämmung zweischaliger Bauteile keineswegs automatisch in dem abgesteckten Rahmen zu liegen kommt. Voraussetzung ist, neben einer ausreichenden Dämmung von Schallnebenwegen, ein schalltechnisch richtiger Aufbau des zweischaligen Bauteils nach bestimmten Regeln. Ziel der folgenden Ausführungen ist es, diese Regeln aufzuzeigen, in der Absicht, dem Mann in der Praxis Richtlinien darüber zur Verfügung zu stellen, was er bei der Konstruktion zweischaliger Bauteile tun muss, bzw. nicht tun darf, um die Dämmleistung des in Bild 1 aufgezeigten Bereiches zu erreichen.

Einfluss der Resonanzfrequenz

Die Resonanzfrequenz des zweischaligen Bauteils muss richtig gewählt werden. Bild 2 zeigt die Dämmleistung von zwei zweischaligen Bauteilen, die sich nur durch die Lage der Resonanzfrequenz unterscheiden. Konstruktion Nr. 1 mit einer Resonanzfrequenz von 120 Hz hat einen sehr günstigen Dämmkurvenverlauf, ebenfalls einen guten Luftschallisolationsindex, der um 8 dB über dem Massengesetz liegt. Konstruktion Nr. 2, mit einer sehr steifen Zwischenschicht und einer Resonanz-

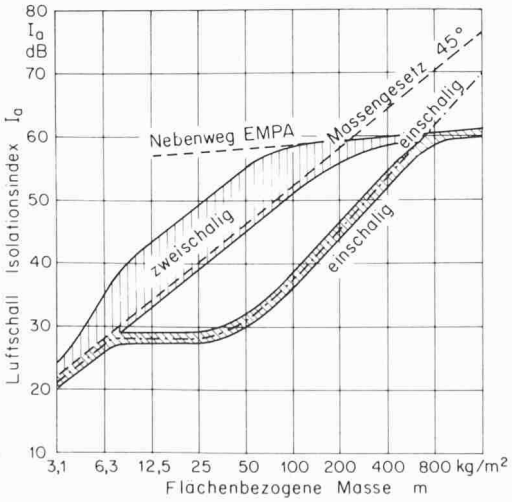
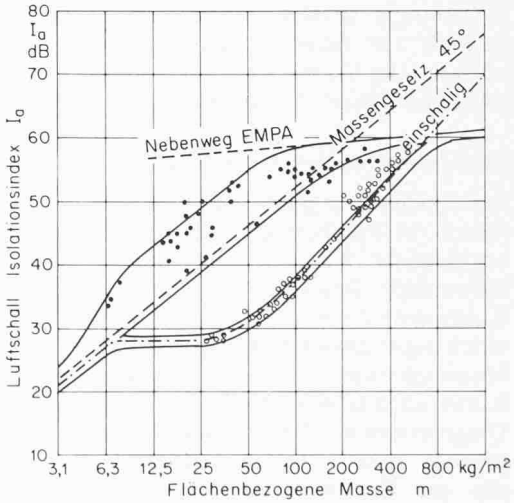


Bild 1. Luftschallisolationsindex von ein- und zweischaligen Bauteilen in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse. Randbedingungen: Resonanzfrequenz f_R zwischen 71 und 125 Hz, Grenzfrequenz f_g bei Schallbrükken über 200 Hz



frequenz von 1000 Hz, hat einen Index, der noch unter dem eines einschaligen Bauteils zu liegen kommt.
Es ist offensichtlich, dass die Resonanzfrequenz so tief als möglich liegen soll. Für schalltechnisch richtig konstruierte Bauteile bedeutet die konkret: Ideal ist eine Resonanzfrequenz von 71 Hz oder tiefer. Tolerierbar ist eine Resonanzfrequenz zwischen 71 und 125 Hz. Resonanzfrequenzen über 125 Hz sind zu vermeiden.
Die aus dieser Forderung resultierenden Auswirkungen auf Materialwahl und Bemessung des Schalenabstandes können Bild 3 entnommen werden. Es gelten folgende *Regeln:*

- Steife Materialien sind für die Zwischenschicht auszuschliessen. Möglich sind Materialien mit einem dynamischen E-Modul unter $2 \cdot 10^5$ N/m². In Frage kommt Luft, bei Fenstern, mit einem dynamischen E-Modul von $1{,}4 \cdot 10^5$ N/m², sowie, bei undurchsichtigen Bauteilen: Faserdämmstoff mit Dichten bis 100 kg/m³.
- Der Schalenabstand darf einen bestimmten Mindestwert nicht unterschreiten. Dieser kann mit Hilfe der in Bild 3 angegebenen Formeln, für die massgebenden Grenzwerte von 71 bzw. 125 Hz, aus den Schalengewichten berechnet werden.

Einfluss der Schalen des Bauteils

Die zweite Voraussetzung für einen schalltechnisch richtigen Aufbau bezieht sich auf die Schalen des Bauteils. Hier sind zwei Gesichtspunkte wichtig: Die *Masse* und die *Steifigkeit*.

Einfluss der Masse

Die Masse bestimmt die Höhenlage der Dämmkurve (Bild 4). Sie bestimmt neben der Höhenlage die Dämmqualität im tiefen Frequenzbereich, da sie den Ausgangspunkt bei 100 Hz festlegt. Bild 5 zeigt drei zweischalige Bauteile, deren flächenbezogene Masse von 1 über 2 nach 3 zunimmt. In derselben Reihenfolge steigert sich die Dämmqualität im tiefen Frequenzbereich, während die Unterschiede im mittleren und oberen Bereich gering sind.

Einfluss der Steifigkeit der Schalen

Bei einschaligen Bauteilen ist die Steifigkeit für den bei der Grenzfrequenz beginnenden Koinzidenzeinbruch verantwortlich. Bekanntlich liegt in der Koinzidenz auch die Ursache der Abweichungen zwischen der Berger'schen Massengeraden und der empirischen Kurve nach Gösele, die jeweils in den Diagrammen als Orientierungshilfe angegeben sind. Die Koinzidenzeinbrüche der Einzelschalen spiegeln sich

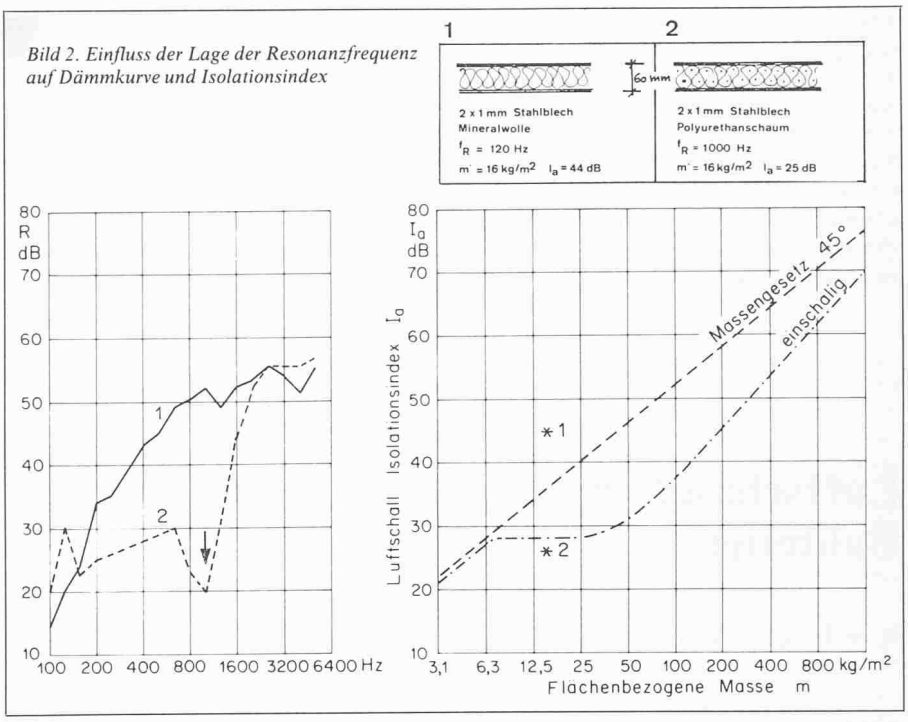


Bild 2. Einfluss der Lage der Resonanzfrequenz auf Dämmkurve und Isolationsindex

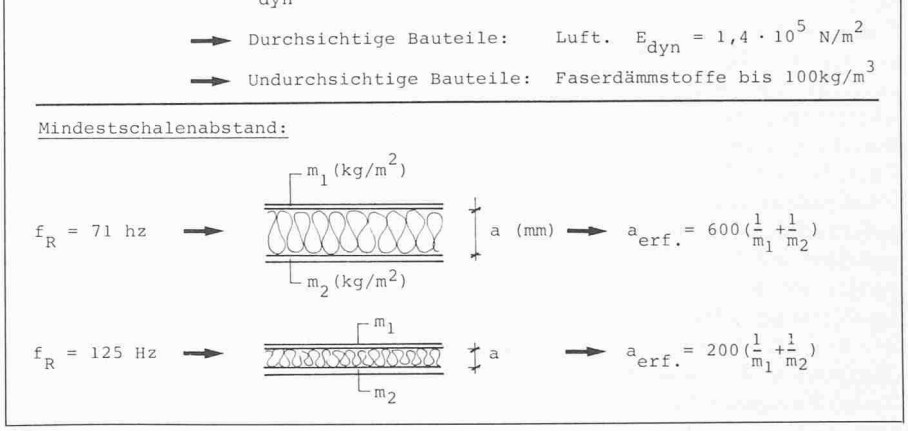


Bild 3. Materialien für die Zwischenschicht und Schalenabstand für eine Resonanzfrequenz von 71 bzw. 125 Hz

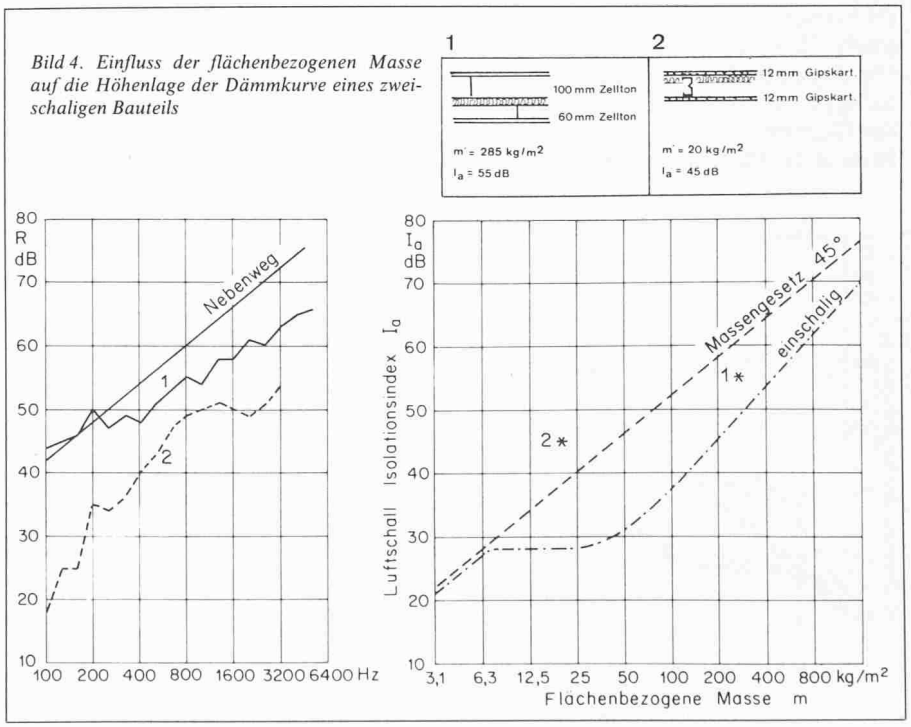


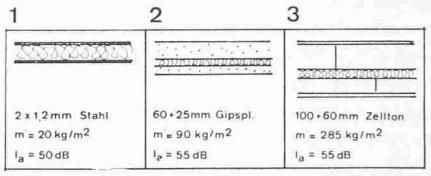
Bild 4. Einfluss der flächenbezogenen Masse auf die Höhenlage der Dämmkurve eines zweischaligen Bauteils

zwangsläufig in der Dämmkurve des zweischaligen Bauteils.
Bild 6 zeigt drei Konstruktionen, deren Grenzfrequenz von 1 über 2 nach 3 abnimmt. Die Grenzfrequenz von Konstruktion Nr. 1 liegt bei 10 000 Hz. Ein Koinzidenzeinbruch ist demzufolge in der Dämmkurve nicht erkennbar. Die Grenzfrequenz von Konstruktion Nr. 2 liegt bei 2500 Hz. Die Dämmkurve zeigt einen entsprechenden Einbruch.
Schwerwiegend ist der Koinzidenzeinbruch bei Konstruktion Nr. 3 mit einer Grenzfrequenz der Einzelschalen von 500 Hz. Der Index dieser Konstruktion liegt nur gering über dem eines einschaligen Bauteils gleicher Masse, d. h. hier liegt mit Sicherheit ein schalltechnisch falscher Aufbau vor. Hingegen liegen die Messergebnisse 1 und 2 über der Massengeraden. Diese Konstruktionen sind also schalltechnisch in Ordnung.
Für den *schalltechnisch richtigen Aufbau* erweist sich eine *Grenzfrequenz von 2000 Hz als wichtige Schlüsselzahl bei zweischaligen Bauteilen*. Konkret ergeben sich folgende *Richtlinien:* Sind, wie im vorliegenden Fall, zweischalige Bauteile aus gleichen Schalen aufgebaut, dann sind sie schalltechnisch in Ordnung, wenn die Grenzfrequenzen der Einzelschalen über 2000 Hz liegen.
Werden Wandschalen mit Koinzidenzeinbrüchen unter 2000 Hz eingesetzt, dann sind zwei identische Schalen ausgeschlossen. Die Schalen müssen unterschiedlich sein, damit die Einbrüche der einen Schale durch die an dieser Stelle gute Qualität der anderen Schale ausgeglichen werden können. Anzustreben sind unterschiedliche Grenzfrequenzen im Verhältnis von mindestens 1:2, d. h. bei gleichem Material für beide Schalen ergibt sich ein Dickenverhältnis von ebenfalls mindestens 1:2.

Einfluss von Schallbrücken:

Schallbrücken zwischen den Schalen sind die dritte wichtige Einflussgrösse. Als Regel gilt, dass die Dämmverluste durch Schallbrücken in erster Linie von der Steifigkeit der Schalen abhängen. Je steifer die Schalen, desto grösser ist der negative Einfluss von starren Schallbrücken. Bild 7 zeigt zwei Konstruktionen, die in der «A-Variante» jeweils ohne Schallbrücken, in der «B-Variante» jeweils mit Schallbrücken ausgeführt wurden.
Bei Konstruktion Nr. 1A und 1B, mit Grenzfrequenzen von 2500 Hz ergibt sich durch die Schallbrücke der Unterkonstruktion ein Verlust von 4 dB, bei Konstruktion Nr. 2A und 2B, mit steiferen Schalen, beträgt der Verlust hingegen 16 dB.
Auch inbezug auf Schallbrücken erweist sich eine Grenzfrequenz von 2000 Hz als Schlüsselzahl.
Als *Regel* für einen *akustisch richtigen*

Bild 5. Einfluss der flächenbezogenen Masse eines zweischaligen Bauteils auf die Dämmleistung bei tiefen Frequenzen



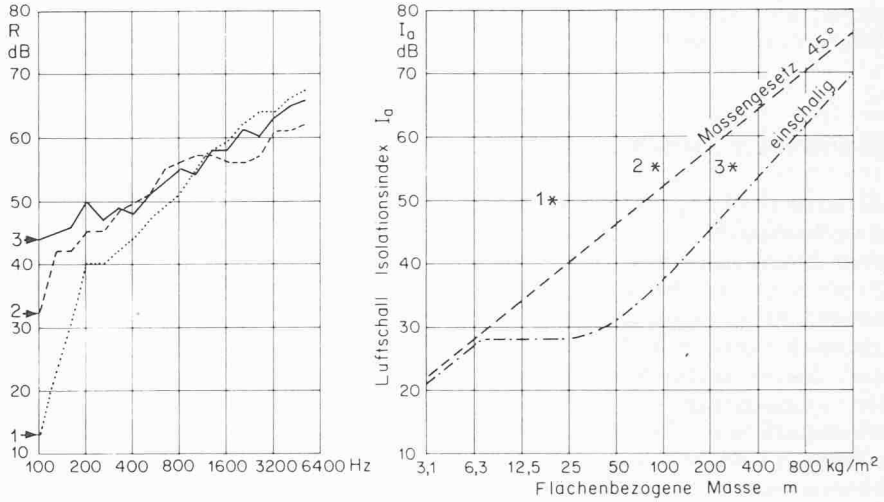
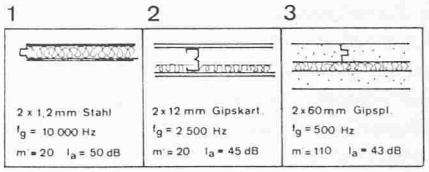
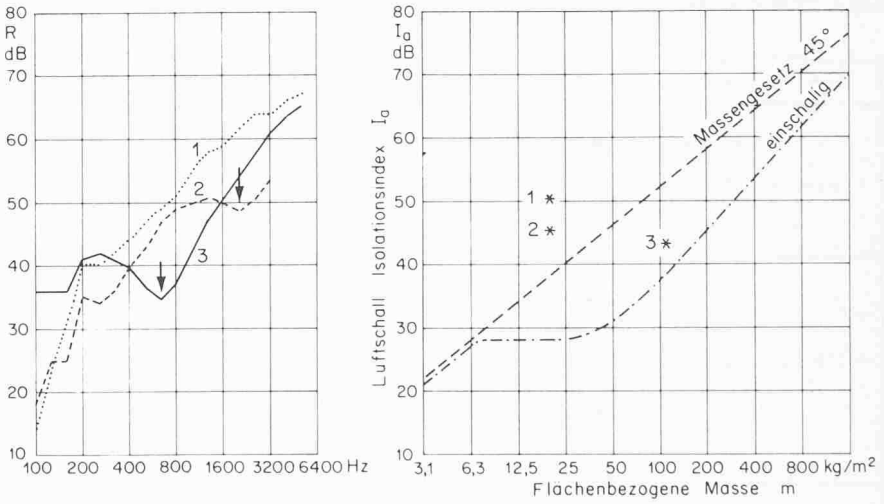


Bild 6. Einfluss der Grenzfrequenz der Schalen auf die Dämmkurve von zweischaligen Bauteilen





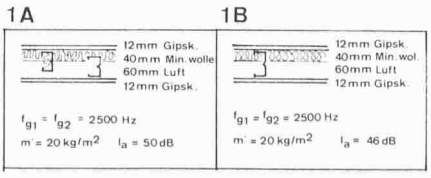
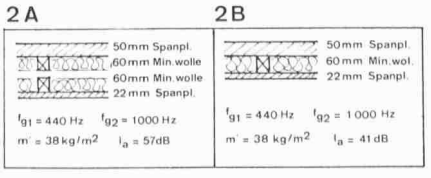
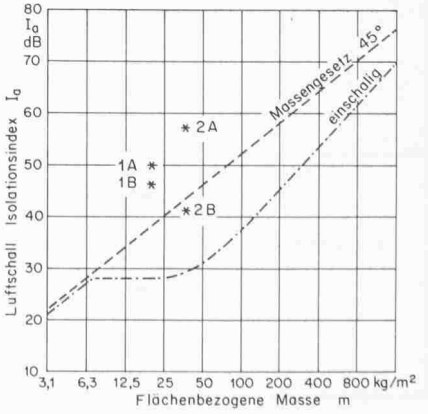


Bild 7. Negativer Einfluss von Schallbrücken, abhängig von der Steifigkeit der Schalen



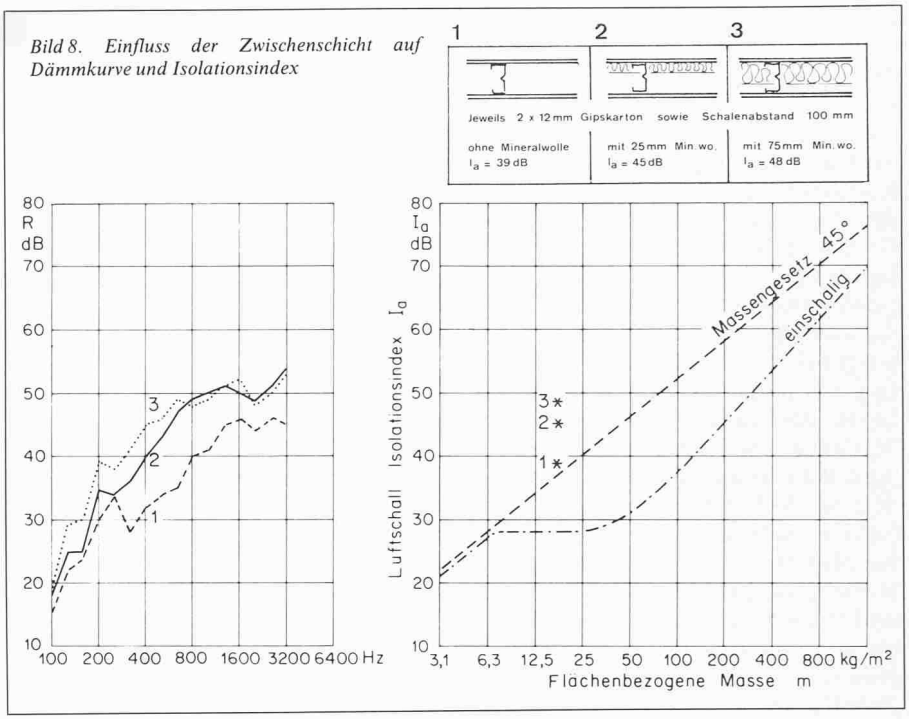


Aufbau gilt: Schallbrücken sind zulässig, wenn beide Schalen eine Grenzfrequenz über 2000 Hz aufweisen. Sie sind tolerierbar, wenn die Grenzfrequenz der einen Schale über 2000 Hz liegt, die der anderen Schale unter 2000 Hz. Schallbrücken sind auszuschliessen, wenn die Grenzfrequenzen beider Schalen unter 2000 Hz liegen.

Einfluss der Zwischenschicht

Als letzte Einflussgrösse erweist sich die Zwischenschicht. Auf den erforderlichen dynamischen E-Modul von unter $2 \cdot 10^5$ N/m² ist bereits hingewiesen worden. Als Konstruktionsregel für den akustisch richtigen Aufbau gilt ausserdem, dass bei undurchsichtigen Bauteilen grundsätzlich 20–30 mm Faserdämmstoffe in die Zwischenschicht einzubringen sind. Mit dieser Massnahme können kleinere lokale Unregelmässigkeiten, vor allem Undichtigkeiten, wirksam korrigiert werden. Darüberhinaus kann der Strömungswiderstand des Zwischenschichtmaterials dazu benützt werden, um die Dämmung insgesamt zu verbessern. Als Faustregel kann angenommen werden, dass je 10 mm Dämmschichtdicke die Dämmung des Bauteils um 1–1,5 dB verbessert werden kann. Bild 8 zeigt, wie mit zunehmender Dicke der Mineralwollefüllung von 1 über 2 nach 3, Dämmkurve und Isolationsindex in positiver Richtung verschoben werden.

Bild 8. Einfluss der Zwischenschicht auf Dämmkurve und Isolationsindex



Zusammenfassung

Es ergeben sich folgende *Konstruktionsregeln* für zweischalige Bauteile (vgl. Bild 9):

- Die *Lage der Resonanzfrequenz* ist von entscheidender Wichtigkeit. 71 Hz oder tiefer sind ideal, 71 bis 125 Hz sind tolerierbar. Der erforderliche Schalenabstand kann mittels der angegebenen Formeln aus der flächenbezogenen Masse der Schalen berechnet werden.
- Die *Masse der Wandschalen* be-

Konstruktionsteil	akust. Kriterium	konstruktive Richtlinien
Schalen + Zwischenschicht	Resonanzfrequenz f_R	$71\,Hz < f_R < 125\,Hz$ $a \leq 600\left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right)$ $a \leq 200\left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right)$ Gültig für: $E_{dyn} < 2 \cdot 10^5$ N/m² Schalenabstand a in mm
Schalen	Masse Steifigkeit	Höhenlage der Dämmkurve. Dämmqualität bei tiefen Frequenzen. ungleiche Schalen notwendig. $fg_1 : fg_2 > 2$ gleiche Schalen möglich $fg_1 : fg_2$ = beliebig 2000 Hz fg
Unterkonstruktion	Schallbrücken	beide fg unter 2000 Hz, Schallbrücke unzulässig beide fg über 2000 Hz Schallbrücke zulässig eine fg über 2000 Hz: Schallbrücke toleriert Besser: Kleben
Zwischenschicht	Steifigkeit Strömungswiderst.	$E_{dyn} < 2 \cdot 10^5$ N/m² Faserdämmstoffe 1 dB zusätzliche Dämmung pro 10 mm Dämmschicht Korrektur von kleinen Unregelmässigkeiten: Undichtigkeiten Teilresonanzen usw. 20 - 30 mm Faserdämmstoff

Bild 9. Konstruktionsregeln für zweischalige Bauteile

stimmt die Höhenlage der Dämmkurve und die Qualität bei tiefen Frequenzen.

- Die *Steifigkeit der Wandschalen* bestimmt die Lage der Grenzfrequenz. Eine Grenzfrequenz von 2000 Hz nimmt eine Schlüsselposition ein. Gleiche Schalen sind nur möglich, wenn die Grenzfrequenz beider Schalen über 2000 Hz liegt. Ansonsten sind ungleiche Schalen im Verhältnis der Grenzfrequenzen von 1:2 erforderlich.
- Auch hinsichtlich der Zulässigkeit von *Schallbrücken* ist die Grenzfrequenz der Schalen ausschlaggebend. Schallbrücken sind zulässig, wenn beide Schalen eine Grenzfrequenz über 2000 Hz haben. Sie sind tolerierbar, wenn die Grenzfrequenz der einen Schale über 2000 Hz, die der anderen Schale unter 2000 Hz liegt. Schallbrücken sind auszuschliessen, wenn die Grenzfrequenzen beider Schalen unter 2000 Hz liegen.
- Für die *Zwischenschicht* sind elastische Materialien mit einem dynamischen E-Modul unter $2 \cdot 10^5$ N/m² erforderlich. Der *Strömungswiderstand* des Dämm-Materials verbessert die Dämmung um 1–1,5 dB je 10 mm Dämmschicht.

Wenn die hier dargestellten konstruktiven Richtlinien konsequent eingehalten werden, bestehen gute Aussichten, mit zweischaligen Bauteilen Dämmleistungen zu erreichen, die dem in Bild 1 dargestellten «Massengesetz» für schalltechnisch richtige Konstruktionen entsprechen. Wie bereits eingangs erwähnt wurde, ist am Bau dafür zu sorgen, dass durch eine *ausreichende Dämmung der Schallnebenwege,* die Dämmleistung des zweischaligen Bauteils tatsächlich zum Tragen kommt, und nicht durch Faktoren ausserhalb des Bauteils reduziert wird.

Adresse des Verfassers: Dr. J. Blaich, EMPA. Abtlg. Bauschäden, 8600 Dübendorf.

Wasserkraftwerkbau

Rheinkraftwerke Domat/Ems-Fläsch

Weiterbearbeitetes Konzessionsprojekt

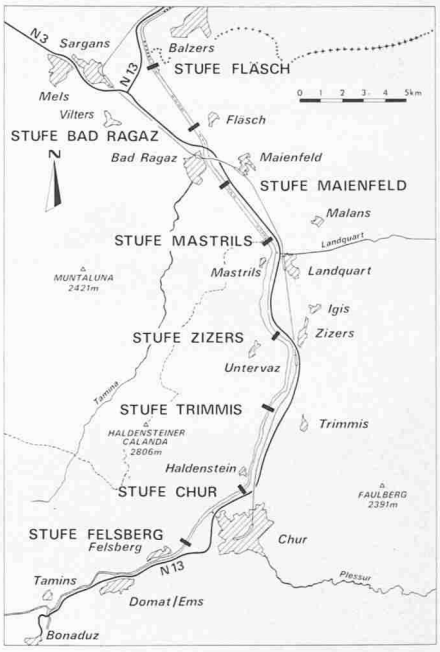
Die *Elektrowatt AG* und die *AG Bündner Kraftwerke* stellen den zuständigen Behörden und der Öffentlichkeit ein weiterbearbeitetes und verfeinertes Konzessionsprojekt für die *Nutzung des Rheins zwischen Domat/Ems und Fläsch* in *acht Kraftwerkstufen* vor. Seit der Einreichung des Elektrowatt-Projektes im Jahre 1977 sind umfangreiche Studien über die Disposition der Anlagen, den Landschaftsschutz und die Grundwasserverhältnisse durchgeführt worden.

Die Neuanordnung der Staustufen erlaubt es, durch Nutzungsverzicht den landschaftlich interessantesten Rheinabschnitt zwischen Untervaz und Mastrils auf einer Strecke von über 2 km in seinem natürlichen Zustand zu erhalten. Die Dammschüttungen können gegenüber dem alten Projekt generell reduziert werden. Auf dem grössten Teil der Strecke, insbesondere im *Erholungsgebiet Obere Au in Chur* und entlang des *Giessenparks* in *Bad Ragaz, entfallen Dammerhöhungen vollständig.* Wo Dammschüttungen nötig sind, erfolgen sie weitgehend auf der Wasserseite, so dass Waldbestand und landwirtschaftliche Nutzungsflächen nur noch in geringem Ausmass beansprucht werden.

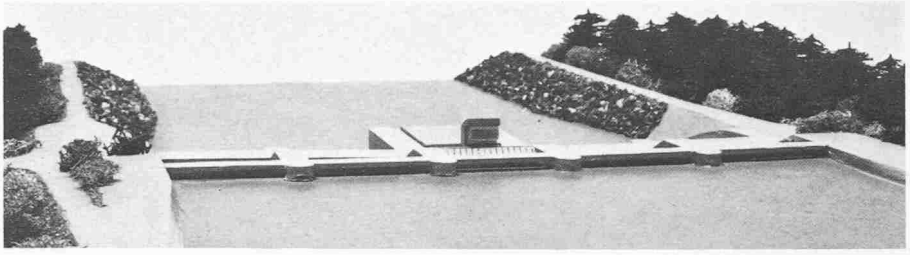
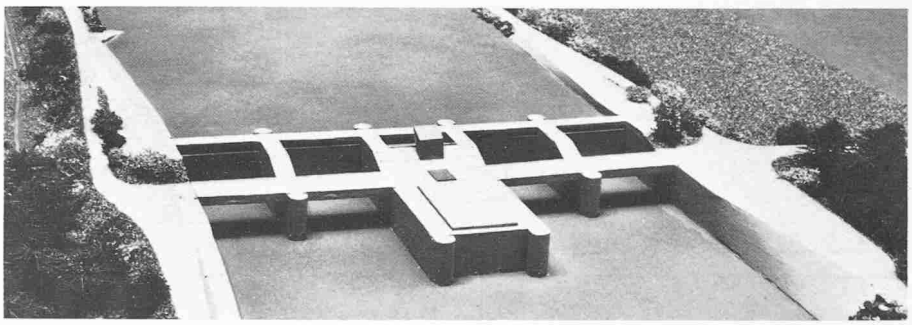
Der Rhein wird auf der ganzen Strecke in seinem heutigen Flussbett belassen. Die niedrige Bauweise des Maschinentraktes in der Flussmitte und der Verzicht auf ein Maschinenhaus gewährleisten eine bestmögliche Erhaltung des Landschaftsbildes. Durch die Verminderung der Schleppkraft kann die seit Jahren festgestellte Erosion des Flussbettes vermindert werden.

Eingehende Untersuchungen haben gezeigt, dass Grundwasserspiegel und Grundwasserqualität durch gezielte Massnahmen wie den Bau von Sickergräben, Drainageleitungen und Abdichtungen unter Kontrolle gehalten werden können. Man erhält gegenüber heute sogar den Vorteil einer besseren Regulierbarkeit des Grundwasserspiegels.

Die Gesamtleistung aller Kraftwerkanlagen beträgt 138 Megawatt und die Energieproduktion 615 Mio Kilowattstunden. Die Projektänderungen bedingen um einiges höhere Anlagekosten; sie werden auf über 500 Mio Franken geschätzt, was einem relativ hohen Energiegestehungspreis von rund



Rheinkraftwerke Ems-Fläsch. Konzessionsprojekt



Modell eines der geplanten Kraftwerke. Ansicht von der Oberwasserseite (oben). Ansicht von der Unterwasserseite (unten)