

Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten – Modellierung, numerische Simulation, Validierung – Teilprojekt 4: Bauteilprüfung, FEM-Modellierung und Validierung

Andreas Rabold, Markus Schramm, Camille Châteaueux-Hellwig,

Forschungsstelle: ift Rosenheim GmbH, Theodor-Gietl-Straße 7-9, 83026 Rosenheim

IGF-Vorhaben 17329 N

Einleitung

Verglichen mit Gebäuden in Mauerwerks- und Betonbauweise ist die Planung eines Bauobjektes in Holzbauweise eine deutlich größere Herausforderung. Geeignete computergestützte Planungshilfen, die eine Simulation bereits im frühen Planungsentwurf für das gesamte Bauwerk ermöglichen, könnten den Planungsaufwand drastisch reduzieren. Eine Möglichkeit der Simulation stellt die Verwendung eines SEA- und FEM-basierten Berechnungsmodells für die Luft- und Trittschalldämmung in der Bausituation dar, das sowohl die direkte Übertragung der Trennbauteile als auch die Übertragung der Flankenbauteile berücksichtigt. Für die SEA basierte Berechnung nach EN 12354 werden als Eingangsdaten die Stoßstellendämm-Maße der Bauteilstöße benötigt.

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf den Ergebnissen des ersten Teils eines aktuellen Gemeinschafts-Forschungsvorhabens zwischen der TU München, der Hochschule Rosenheim und dem ift Rosenheim [1]. Zur Ermittlung der Eingangsdaten wurden zunächst die Richtungsabhängigkeit der Schnellepegeldifferenzen und der Einfluss des Masseverhältnisses der Bauteile untersucht. Die so ermittelten Planungsdaten wurden durch den Vergleich der Berechnung nach EN 12354 mit Messwerten der Flankendämm-Maße validiert.

Richtungsabhängigkeit der Schnellepegeldifferenzen

Nach ISO 10848 wird das Stoßstellendämm-Maß von der richtungsgemittelten Schnellepegeldifferenz abgeleitet. Um diese zu bestimmen, wird die Messrichtung (angeregtes \Rightarrow abstrahlendes Bauteil) nach der Messung getauscht und die Pegeldifferenz erneut gemessen. Hierbei tritt bei sehr unterschiedlichen Bauteilmassen der Effekt auf, dass der Energiefluss vom schweren in das leichte Bauteil deutlich größer ist als anders herum. Das schwerere Bauteil regt auf Grund des günstigeren Impedanz-Verhältnisses das leichte stärker an (siehe Abbildung 1, unten).

Dieser Effekt lässt sich anhand der SEA-Theorie nachvollziehen. Wird die Schnellepegeldifferenz $D_{v,12}$ zwischen Bauteil 1 und Bauteil 2 betrachtet, so ergibt sich zunächst für die Messgleichung:

$$D_{v,12} = L_{v,1} - L_{v,2} = 10 \cdot \log\left(\frac{\tilde{v}_1^2}{\tilde{v}_2^2}\right) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

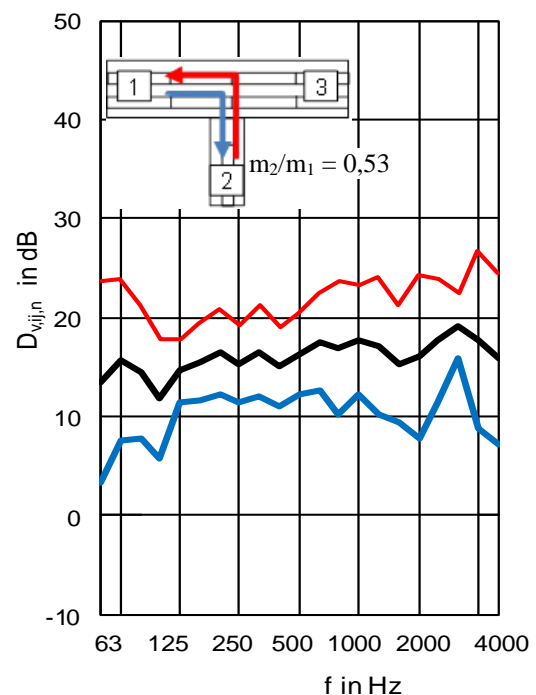
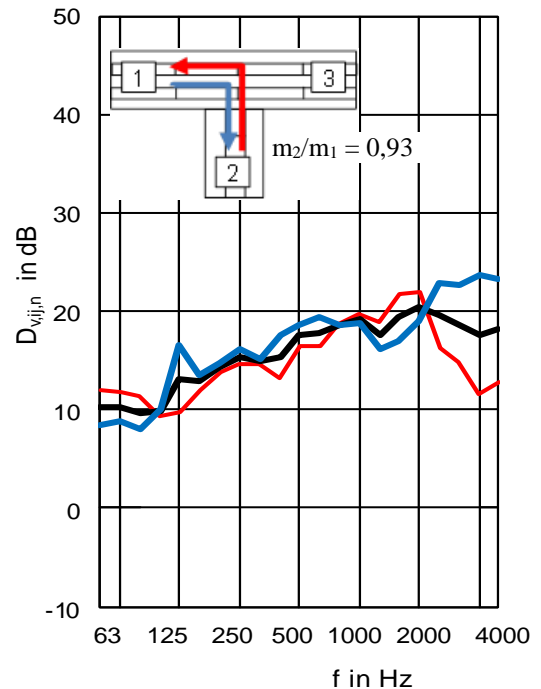


Abbildung 1: Richtungsabhängigkeit der Schnellepegeldifferenzen bei unterschiedlichen Masseverhältnissen zwischen angeregtem und abstrahlendem Bauteil. Oben: $m_2/m_1 = 0,93$. Unten: $m_2/m_1 = 0,53$.

Die Schnellepegeldifferenz wird also direkt aus dem Verhältnis der Schwingungsschnellen (Quadrat des Effektivwertes) in Bauteil 1 und 2 gebildet. Wird nun anhand der SEA Theorie [4] die Energiebilanz für Bauteil 2 aufgestellt, die den Energiefluss von Bauteil 1 in Bauteil 2 durch den Kopplungsverlustfaktor η_{12} beschreibt und gleichsetzt mit dem Rückfluss aus Bauteil 2, sowie den Verlusten im Bauteil 2 (beschrieben durch $\eta_{2,int}$) so folgt:

$$E_1 \omega \eta_{12} = E_2 \omega \eta_{21} + E_2 \omega \eta_{2,int} \quad [W] \quad (2)$$

bzw. mit : $E = m \tilde{v}^2$

$$\tilde{v}_2^2 = \frac{m_1 \tilde{v}_1^2 \eta_{12}}{m_2 (\eta_{21} + \eta_{2,int})} \quad [m^2/s^2] \quad (3)$$

Werden die Verluste im Bauteil 2 zunächst vernachlässigt kann v_2 direkt durch das Verhältnis der Massen und der Kopplungsverlustfaktoren dargestellt werden.

$$\tilde{v}_2^2 \approx \frac{m_1}{m_2} \frac{\eta_{12}}{\eta_{21}} \tilde{v}_1^2 \quad [m^2/s^2] \quad (4)$$

Somit erhält man bei einem Masseverhältnis von 2:1 eine Parallelverschiebung um je 3 dB pro Messrichtung.

Weitere 6 dB resultieren aus dem Verhältnis der Kopplungsverlustfaktoren, wenn nach [4] die modale Dichte n als Symmetriebedingung herangezogen wird:

$$n_1 \eta_{12} = n_2 \eta_{21} \quad \text{mit:} \quad n = \frac{\pi S f_c}{c_0^2} = \frac{\pi S K}{c_0^2 t} \quad [1/Hz] \quad (5)$$

Die modale Dichte kann also durch die Materialkonstante K und die Bauteildicke t ausgedrückt werden, wodurch auch das Verhältnis der Kopplungsverlustfaktoren zur Parallelverschiebung beiträgt. Für $t_1 = 2t_2$ gilt:

$$\eta_{12} = \frac{n_2}{n_1} \eta_{21} = 2\eta_{21} \quad [-] \quad (6)$$

Im letzten Schritt kann noch der Einfluss der bisher vernachlässigten Verluste im Bauteil 2 betrachtet werden. Der Verlustfaktor $\eta_{2,int}$ setzt sich aus den Abstrahlverlusten, den Verlusten durch innere Reibung und den Randverlusten im Fußpunkt von Bauteil 2 zusammen. Detailliertere Untersuchungen zum Anteil dieser Komponenten zeigten, dass die Randverluste maßgeblich sind [3]. Setzt man für diese Randverluste die Näherung nach [2] an,

$$\eta_{tot} = \eta_{int} + \frac{m'}{485 \sqrt{f}} \quad [-] \quad (7)$$

so erhält man auch hier eine Massenabhängigkeit, die zur Parallelverschiebung beiträgt. Würde sich diese Parallelverschiebung auch bei der Messung der Flankendämm-Maße zeigen, wäre das Berechnungsmodell zu überdenken. Dort wird die Richtungsabhängigkeit jedoch dadurch ausgeglichen, dass das schwerere Bauteil eine geringere Anregung durch den Schalldruckpegel im Senderaum erfährt.

Einfluss des Masseverhältnisses

Im nächsten Schritt war der Einfluss des Masseverhältnisses zwischen Deckenelement und Wandelement auf die Planungswerte zu untersuchen. Wie Abbildung 2 zeigt, wirkt sich das Verhältnis je nach Ausführung des Stoßes sehr unterschiedlich aus.

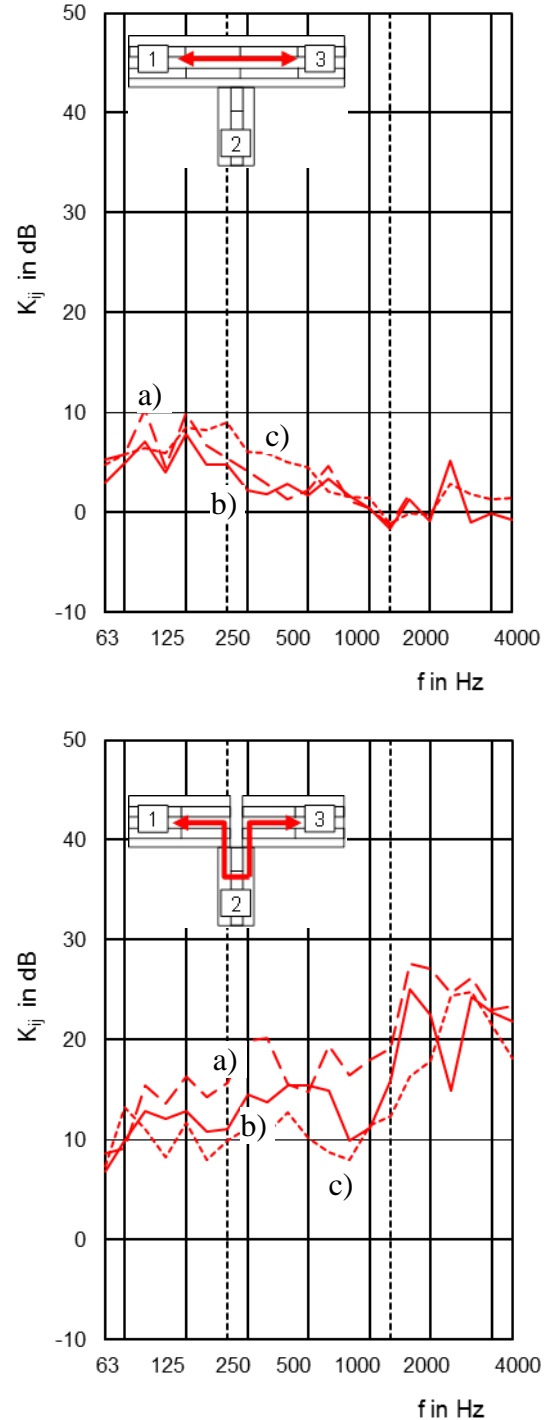


Abbildung 2: Einfluss des Masseverhältnisses m_2 / m_1 auf das Stoßstellendämm-Maß K_{FF} (K_{13}).

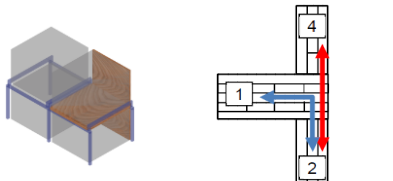
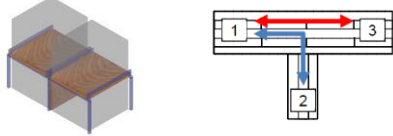
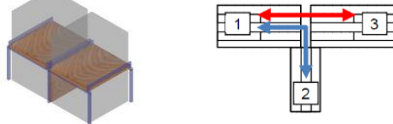
Oben: Decke durchlaufend Unten: Decke getrennt
a) $m_2/m_1 = 2,14$, $K_{13} = 2,3$ dB $m_2/m_1 = 2,14$, $K_{13} = 17,7$ dB
b) $m_2/m_1 = 0,93$, $K_{13} = 1,9$ dB $m_2/m_1 = 0,93$, $K_{13} = 13,6$ dB
c) $m_2/m_1 = 0,53$, $K_{13} = 3,8$ dB $m_2/m_1 = 0,53$, $K_{13} = 10,6$ dB

Beim horizontalen T-Stoß (Decke flankierend) zeigt das Stoßstellendämm-Maß eine starke Abhängigkeit von der angeschlossenen Trennwandmasse, sobald die Decke auf der Trennwand getrennt ist (Abbildung 2, unten). Je höher die flächenbezogene Masse der Wand desto größer das Stoßstellendämm-Maß. Die Trennwand wirkt hier wie eine Sperrmasse auf die Schallübertragung. Läuft die Decke über der Trennwand durch, ist diese Abhängigkeit nicht zu beobachten (Abbildung 2, oben).

Planungsdaten

Eine Zusammenstellung von Planungsdaten für das Stoßstellendämm-Maß von Massivholzelementen ist in Tabelle 1 dargestellt. Neben den Projektergebnissen [1] wurde auch die Streubreite vergleichbarer Daten aus der Literatur dargestellt [5] - [9]. Die frequenzabhängigen Ergebnisse für unterschiedliche Massenverhältnisse werden in Abbildung 3 und Abbildung 4 gezeigt.

Tabelle 1: Stoßstellendämm-Maß K_{ij} von Massivholzelementen ($t = 80 - 160$ mm), Stoß verschraubt oder mit winkeln montiert.

Stoßstellentyp	K_{ij} [1]	Literaturdaten [1],[5],[6],[7],[8],[9]
	$K_{24} = 20$ dB $K_{12} = 13$ dB $K_{14} = 13$ dB	$K_{24} = 17 \dots 23$ dB $K_{12} = 12 \dots 15$ dB $K_{14} = 12 \dots 15$ dB
	$K_{13} = 3$ dB $K_{12} = 14$ dB $K_{23} = 14$ dB	$K_{13} = 3 \dots 5$ dB $K_{12} = 14 \dots 15$ dB $K_{23} = 14 \dots 15$ dB
	$K_{13} = 12 + 10 \log(m_2/m_1)$ $K_{12} = 14$ dB $K_{23} = 14$ dB	

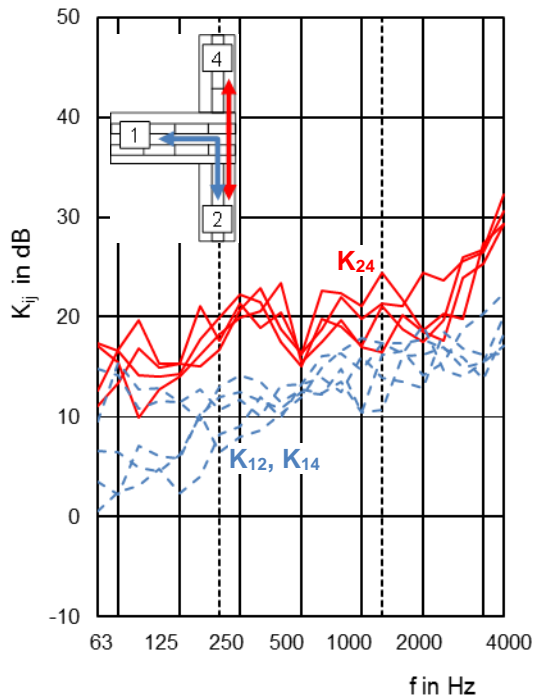


Abbildung 3: Messdaten für das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} von vertikalen T-Stößen mit unterschiedlichen Masseverhältnissen.

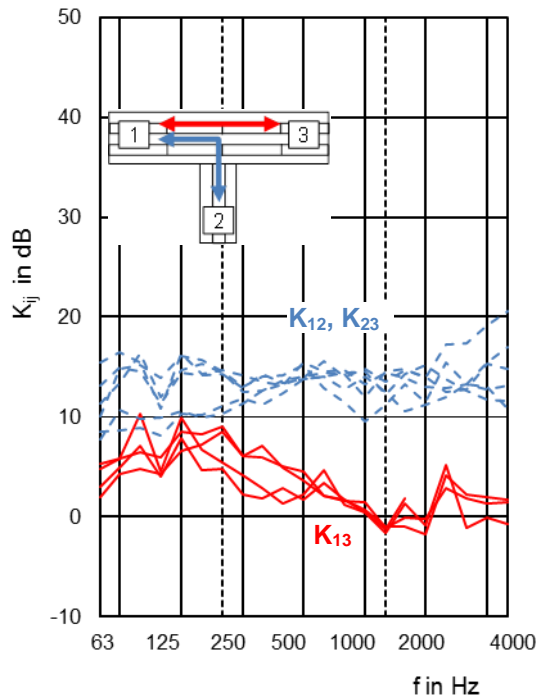


Abbildung 4: Messdaten für das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} von horizontalen T-Stößen mit unterschiedlichen Masseverhältnissen.

Validierung der Eingangsdaten

Eine Validierung der Eingangsdaten kann durch die messtechnisch bestimmten Flankendämm-Maße durchgeführt werden. Ermittelt wurden diese durch Luftschallanregung und sukzessiver Unterdrückung der Übertragungswege mittels Abschottungsmaßnahmen der Stoßbauteile. Die Berechnung der Flankendämm-Maße erfolgte nach:

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ} + R_{j,situ}}{2} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \log \left(\frac{S_{Tr}}{\sqrt{S_i S_j}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = K_{ij} - 10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,situ} a_{j,situ}}} \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

Alternativ wurde die Berechnung ohne Körperschallnachhallzeit-Korrektur nach (10) durchgeführt.

$$R_{ij} = \frac{R_i + R_j}{2} + K_{ij} + 10 \log \left(\frac{S_{Tr}}{l_0 l_{ij}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

Wie die Darstellung der Differenzen zwischen Messung und Berechnung am Beispiel des vertikalen T-Stoßes zeigt, wird mit der Berücksichtigung der Körperschallnachhallzeit-Korrektur eine bessere Genauigkeit erreicht (siehe Abbildung 5). Diese ist jedoch nicht über zu bewerten da es sich hierbei lediglich um einen Abgleich der Ergebnisse innerhalb desselben Prüfstandes handelt. Eine Aussage über die Genauigkeit des Verfahrens ist erst anhand der Validierung mit Baumessungen möglich.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurden die Richtungsabhängigkeit der Schnellepegeldifferenzen und der Einfluss des Masseverhältnisses auf das Stoßstellendämm-Maß untersucht. Die Planungsdaten wurden im Vergleich mit den gemessenen Flankendämm-Maßen validiert. Hier zeigte sich, dass es sinnvoll ist die Körperschallnachhallzeit-Korrektur zu berücksichtigen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die hilfreichen Diskussionen und die Zusammenarbeit besonders bei den Projektpartnern Barbara Wohlmuth, Ernst Rank (TU München) und Ulrich Schanda (HS Rosenheim). Sowie für die finanzielle Unterstützung durch die AiF und die DFG.

Literatur

- [1] Wohlmuth, B., Rank, E., Kollmannsberger, S., Schanda, U., Rabold, A., Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten - Modellierung, numerische Simulation, Validierung, Kooperationsprojekt TU München, HS Rosenheim, ift Rosenheim, in Bearbeitung
- [2] EN 12354, Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of products – Part 1 and Part 2, 2000
- [3] Rabold, A., Anwendung der Finite Element Methode auf die Trittschallberechnung. Dissertation, Technische Universität München, 2010.
- [4] Craik, R. J. M., Sound Transmission Through Buildings: Using Statistical Energy Analysis, Vermont: Gower, 1996.
- [5] Holtz, F., Rabold, A., Hessinger, J., Bacher, S., Ergänzende Deckenmessungen zum laufenden Vorhaben: Integration des Holz- und Skelettbaus in die neue DIN 4109, Forschungsbericht ift Rosenheim, 2005
- [6] Schramm, M., Vertikale Flankenübertragung bei Holzmassivdecken, Diplomarbeit Fachbereich Holztechnik, HS Rosenheim 2008
- [7] Dolezal, F., Bednar, T., Teibinger, M., Flankenübertragung bei Massivholzkonstruktionen, Teil 1, Bauphysik 2008, 30, 143-151
- [8] Guigou-Carter, C., pr EN 12354-1 Annex E, proposed for rigid CLT junctions to CEN/TC126/WG2
- [9] Mecking, S., Kruse, T., Schanda, U., Measurement and calculation of sound transmission across junctions of solid timber building elements, Euronoise proceedings, 2015, Maastricht

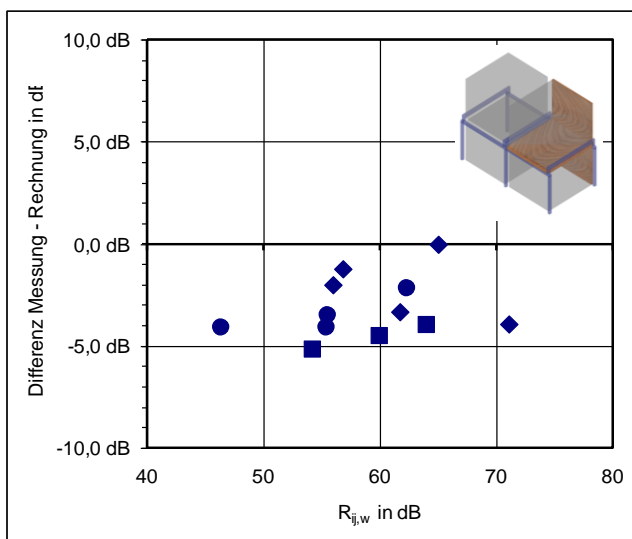
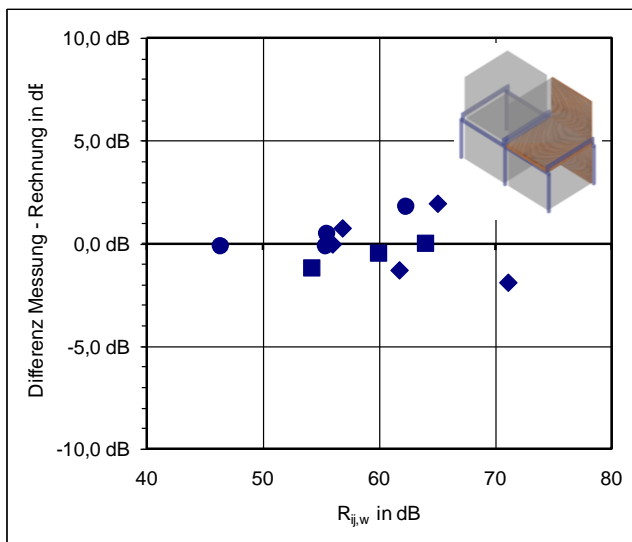


Abbildung 5: Differenz von Messung - Berechnung für $R_{Ff,w}$, $R_{Fd,w}$, $R_{Df,w}$.

Oben: Berechnung nach (8): Anzahl $n = 12$,

Mittelwert: 0 dB, Standardabweichung $\sigma = 1,2$ dB.

Unten: Berechnung nach (10): Anzahl $n = 12$,

Mittelwert: -3,2 dB, Standardabweichung $\sigma = 1,5$ dB.

Das Forschungsvorhaben 17329 N der Forschungsvereinigung Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Der vollständige Bericht kann bestellt werden bei:
Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V.
(iVTH e.V.)
Bienroder Weg 54E
38108 Braunschweig