

Einfluss der modalen Kopplung von Prüfräumen und Prüfobjekten auf Messungen des Schalldämm-Maßes einer Brettsperrholzplatte im tieffrequenten Bereich

Wolfgang Hauer¹, Blasius Buchegger², Heinz Ferk³

¹ LKI Konstruktiver Ingenieurbau - Labor für Bauphysik, 8010 Graz, E-Mail:w.hauer@tugraz.at

² LKI Konstruktiver Ingenieurbau - Labor für Bauphysik, 8010 Graz, E-Mail:buchegger@tugraz.at

³ LKI Konstruktiver Ingenieurbau - Labor für Bauphysik, 8010 Graz, E-Mail:ferk@tugraz.at

Kurzfassung

Bei der Bestimmung des Schalldämm-Maßes von Bauteilen nach ISO 10140-2 oder ISO 15186-1 wird in Prüfräumen ein diffuses Schallfeld vorausgesetzt. Die Qualität der Diffusität bzw. der Energiegleichverteilung eines Schallfeldes nimmt im Allgemeinen jedoch mit sinkender Frequenz ab und weicht zunehmend einem modalen Verhalten. Während sich bei mittleren und hohen Frequenzen aufgrund der hohen Modendichte im Senderraum ein annähernd diffuses Schallfeld einstellt und den Prüfkörper damit gleichmäßig aus allen Richtungen anregt, ergibt sich zu tiefen Frequenzen hin eine steigende Ortsabhängigkeit der Anregung. Daraus resultiert wiederum eine sinkende Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zwischen verschiedenen Prüfraumgeometrien hin zu tiefen Frequenzen, da das ermittelte Schalldämm-Maß zunehmend von der jeweiligen Anordnung des Prüfkörpers in den Prüfräumen bzw. der örtlichen Modenverteilung des Luftschallfeldes abhängt.

Dieser Beitrag untersucht den Zusammenhang zwischen der örtlichen Verteilung von Raummoden und dem modalen Verhalten eines Prüfkörpers am Beispiel eines Brettsperrholzelementes. Dazu wird das Schallfeld eines realen Prüfraumes bei tiefen Frequenzen mittels Finite-Elemente-Methode berechnet. Anschließend werden die Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen einer experimentellen Modalanalyse am Brettsperrholzelement verglichen. Ein besonderes Augenmerk wird auf die örtliche Übereinstimmung zwischen Raum- und Körperschallmoden ähnlicher Frequenzen gelegt und der dadurch entstehende Einfluss auf das gemessene Schalldämm-Maß untersucht.

Einleitung

Die Qualität der Schalldämmung von Bauteilen bei tiefen Frequenzen gewinnt immer mehr an Bedeutung. Bei Baumaterialien geringer Dichte, wie z.B. Brettsperrholz (BSP), kommt es bei tiefen Frequenzen jedoch aufgrund ihres geringen Gewichtes und ihrer hohen Steifigkeit oft zu einer erhöhten Schalltransmission [1] [2]. Um hier zielgerichtete Optimierungsmaßnahmen durchführen zu können, muss auf präzise und reproduzierbare Messwerte der Schalldämmung zurückgegriffen werden können. Die normgemäße Ermittlung des Schalldämm-Maßes von Bauteilen basiert unter anderem auf der Annahme, dass sich die Luft- und Körperschallfelder im betrachteten Frequenzbereich statistisch verhalten [3]. Zu tieferen Frequenzen hin weicht dieses statistische Verhalten im

Allgemeinen jedoch einem modalen Verhalten, bei dem einzelne Raum- bzw. Körperschallmoden verstärkt in den Vordergrund treten. Das gemessene Schalldämm-Maß eines Bauteils hängt dadurch zunehmend von örtlichen Gegebenheiten wie dem Volumen oder der Geometrie von Prüfräumen ab. In diesem Beitrag wird das nach ÖNORM EN ISO 15186-3 [4] gemessene Intensitäts-Schalldämm-Maß eines Prüfkörpers bei tiefen Frequenzen analysiert und der Einfluss der örtlichen Übereinstimmung von Körper- und Luftschallfeldern untersucht. Als Prüfobjekt diente hierbei ein dreilagiges Brettsperrholzelement. Die Schwingungsformen des Prüfkörpers wurden mittels experimenteller Modalanalyse (EMA) ermittelt und anschließend der FEM-basierten Berechnungen der Schalldruckverteilung im Prüfraum gegenübergestellt. Die Auswirkungen auf das gemessene Schalldämm-Maß werden abschließend diskutiert.

Messtechnische Untersuchungen

Um einen Zusammenhang zwischen dem Schalldämm-Maß, den Schwingungsformen der Platte und der örtlichen Verteilung des Schalldruckes aufzeigen zu können, wurden drei Mess- bzw. Berechnungsmethoden angewendet:

- Messung des Intensitäts-Schalldämm-Maßes
- Experimentelle Modalanalyse
- FEM-basierte Berechnungen

Das Intensitäts-Schalldämm-Maß wurde nach EN ISO 15186-3 gemessen. Der Prüfkörper wurde dazu in die Außenwand eines Prüfraumes mit einem Volumen von ca. 200 m³ eingebaut (Abbildung 1).

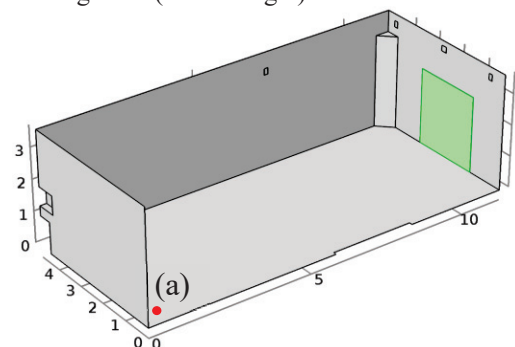


Abbildung 1: Prüfanordnung, Die grüne Fläche kennzeichnet den in die Außenwand des Prüfraumes eingebauten Prüfkörper, der rote Punkt markiert den in einer gegenüberliegenden Raumecke (a) positionierten Lautsprecher

Die Schallabstrahlung erfolgte nach außen ins Halb-Freifeld, um eine mögliche Rückwirkung von Raummoden eines Empfangsraumes auf den Prüfkörper zu verhindern. Zur Darstellung des modalen Verhaltens des Prüfkörpers wurde eine experimentelle Modalanalyse entlang dreier Messpfade durchgeführt. Die Schalldruckverteilung im Prüfraum wurde mittels Finiter-Elemente-Methode (FEM) berechnet

Intensitäts-Schalldämm-Maß

Als Prüfkörper diente eine dreilagige Brettsperrholzplatte (2,5 x 2,0 x 0,1 m). Die Dicke der äußeren, vertikalen Lagen betrug 30 mm, die Dicke der mittleren Lage 40 mm. Um die Ableitung von Schallenergie in den Prüfstand zu verringern wurde der Prüfkörper auf Elastomeren gelagert. Die Fugen zwischen Prüfkörper und Prüfraumöffnung wurden mit Mineralwolle gestopft und mit Leinölkitt verschlossen. Dadurch wurde die Ankopplung an den Prüfraum und damit der Schallenergieabfluss verringert und gleichzeitig die Luftschalldämmung der Fugen erhöht (Abbildung 2).



Abbildung 2: Der eingebaute Prüfkörper vom Senderaum aus gesehen. Die roten Kreise markieren jene Punkte, an denen der Schalldruckpegel zur Ermittlung des Intensitäts-Schalldämm-Maßes nach EN ISO 15186-3 gemessen wurde.

Das Luftschallfeld im Senderaum wurde mittels Dodekaeder-Lautsprecher angeregt, welcher in einer Raumecke gegenüber dem Prüfkörper positioniert wurde. Die Messung der abgestrahlten Schallintensität erfolgte an der außen liegenden Seite des Prüfkörpers nach den in Abbildung 3 gezeigten Abtastschemata.

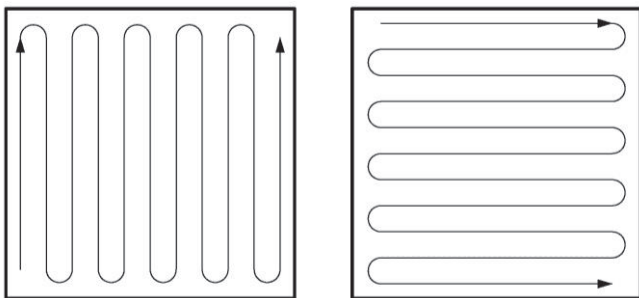


Abbildung 3: Abtastschema zur Messung der über die Messfläche gemittelten Schallintensität nach ÖN EN ISO 15186-3.

Der über die Messfläche gemittelte Schalldruckpegel im Senderaum wurde an zwölf Positionen gemessen

(Abbildung 2). Der Abstand zwischen Mikrofon und Prüfkörper war dabei jeweils kleiner als 50 mm. Die Ermittlung des Intensitäts-Schalldämm-Maßes R_I erfolgte nach Gleichung (1). L_{pS} ist dabei der über die Oberfläche des Prüfgegenstandes gemittelte Schalldruckpegel im Senderaum, L_{In} der über die Messfläche gemittelte Schallintensitätspegel im Empfangsraum, S_m der Gesamtflächeninhalt der Messfläche und S der Flächeninhalt des zu prüfenden Bauteils.

$$R_I = L_{pS} - 9 - \left[L_{In} + 10 \lg \left(\frac{S_m}{S} \right) \right] \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Zusätzlich zur der in der Norm vorgeschrieben Auswertung der Messergebnisse in Terzbändern wurden die Messdaten mittels schneller Fourier-Transformation (FFT) mit einer Frequenzauflösung von 0,313 Hz ausgewertet. Dies erlaubte die Zuordnung modaler Erscheinung zu bestimmten Frequenzen.

Experimentelle Modalanalyse (EMA)

Zur Darstellung der Modenformen und deren Frequenzen wurde die Inertanz des Prüfkörpers an einem horizontalen, einem vertikalen und einem diagonalen Messpfad ermittelt (Abbildung 4).

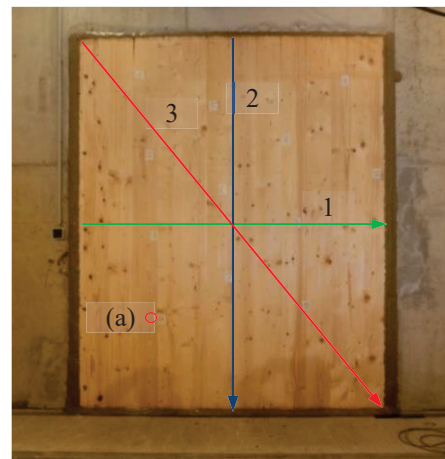


Abbildung 4: Experimentelle Modalanalyse des Prüfkörpers: horizontaler (1), vertikaler (2) und diagonal (3) Messpfad, Beschleunigungssensor (a)

Die Betrachtung des Prüfkörpers als lineares, zeitinvariantes System erlaubte die Anwendung des Prinzips der Reziprozität und damit eine Verringerung des Messaufwandes [5].

Die Anregung des Prüfkörpers mittels Krafthammer erfolgte entlang der Messpfade in einem Abstand von 20 mm, während die Position des Beschleunigungssensors (a) unverändert blieb. Der horizontale Pfad wurde so von links nach rechts, der vertikale Pfad von oben nach unten und der diagonale Pfad von links oben nach rechts unten abgetastet. Durch anschließendes Übereinanderschichten der einzelnen Übertragungsfunktionen konnte so das Schwingverhalten des Prüfkörpers visualisiert werden (Abbildung 7).

Numerische Untersuchungen

Das dreidimensionale FEM-Modell des Prüfraumes wurde mit COMSOL Multiphysics Version 5.2 erstellt [6]. Die

Vernetzung der akustischen Domäne erfolgte unter Verwendung von Tetraederelementen mit quadratischer Ansatzfunktion.

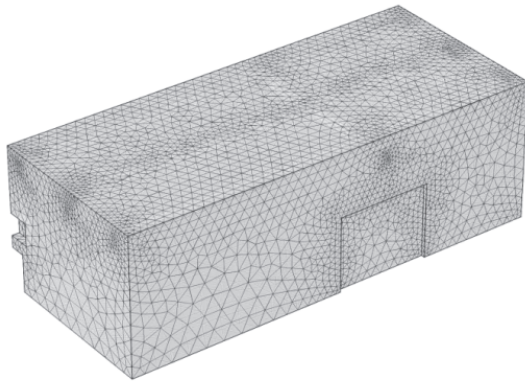


Abbildung 5: Darstellung der Vernetzung des FEM-Modelles

Die maximale Elementgröße l_{max} wurde auf ein Sechstel der kleinsten zu berechnenden Wellenlänge λ_{min} beschränkt (Gleichung (2)).

$$l_{max} = \lambda_{min} / 6 \quad [m] \quad (2)$$

Resultate

Das gemessene Intensitäts-Schalldämm-Maß im Frequenzbereich von 50-160 Hz wird in Abbildung 6 dargestellt. Von ca. 11,7 dB bei 50 Hz an steigend liegt es in einem Großteil des Messbereiches um ca. 20 dB. Auffallend ist ein starker Abfall des Schalldämm-Maßes von ca. 15,8 dB bei ca. 85 Hz und ein darauf folgender Anstieg auf ca. 20 dB bis ca. 110 Hz.

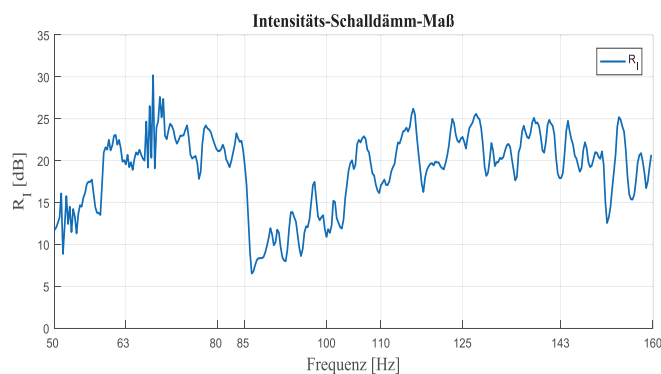


Abbildung 6: Das gemessene Intensitäts-Schalldämm-Maß von 50-160 Hz

Die im Rahmen der EMA gemessene Inertanz wird in Abbildung 7 von 50-160 Hz gezeigt (oben: horizontaler Messpfad, Mitte: vertikaler Messpfad, unten: diagonaler Messpfad). Zwei prägnante Eigenschwingungen des Prüfkörpers (bei ca. 85 Hz und 143 Hz) wurden in weiterer Folge genauer analysiert.

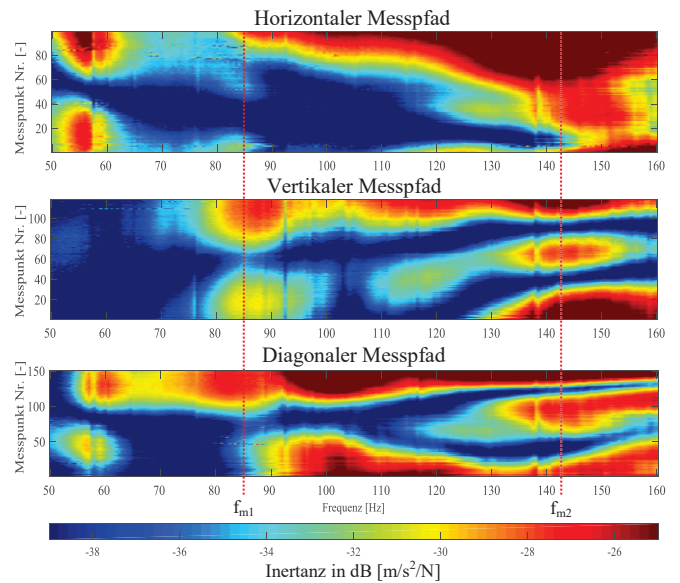


Abbildung 7: Gemessene Inertanz des eingebauten Prüfkörpers von 50-160 Hz. Die rot punktierte Linie markiert die Mittenfrequenzen der untersuchten Moden, Oben: horizontaler Messpfad, Mitte: vertikaler Messpfad, Unten: diagonaler Messpfad

Abbildung 8 zeigt die aus der EMA ablesbaren Schwingformen des Prüfkörpers mit den Mittenfrequenzen $f_{m1} = 85$ Hz und $f_{m2} = 143$ Hz.

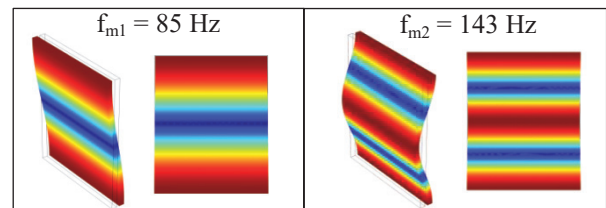


Abbildung 8: Symbolische Darstellung der Schwingformen des Prüfkörpers bei ca. 85 Hz und 143 Hz

Da sich die Eigenschwingungen des Brettsperrholzelementes und damit ihre Auswirkungen auf das Luftschallfeld nicht auf einzelne Frequenzen beschränken, wurde die berechnete Schalldruckverteilung über mehrere Frequenzen gemittelt (siehe Abbildung 9). Der Frequenzbereich von 84,1-86,3 Hz entspricht hierbei jenem Bereich, in dem der markante Einbruch des Schalldämm-Maßes von ca. 15,8 dB stattfindet. Von ca. 135-150 Hz erstreckt sich vertikal in der Mitte des Prüfkörpers ein Schwingungsbauch. Da in diesem Frequenzbereich keine unmittelbar erkennbaren Auswirkungen auf das gemessene Schalldämm-Maß erkennbar sind, wurde in weiterer Folge die von 140,0-146,0 Hz gemittelte Schalldruckverteilung als Vergleichsbasis herangezogen (Abbildung 9).

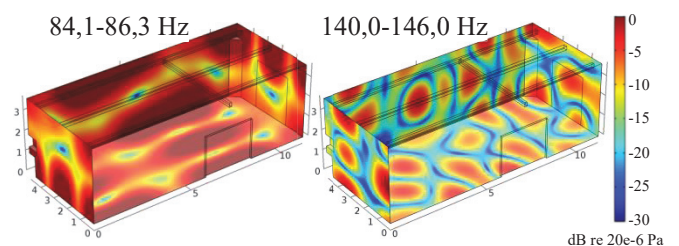


Abbildung 9: Schalldruckpegelverteilung im Prüfraum, jeweils gemittelt über den angegebenen Frequenzbereich (links: 84,1-86,3 Hz, rechts: 140,0-146,0 Hz)

Diskussion

Im Folgenden werden die ermittelten Schwingformen und die Schalldruckverteilungen gegenübergestellt. Abbildung 10 zeigt für die betrachteten Frequenzbereiche die auf das Maximum normierten, gemittelten Schalldruckverteilungen an der Prüfraum-Innenwand (rechts, der Umriss des Prüfkörpers ist schwarz markiert), und jeweils links die Schwingform des Prüfkörpers.

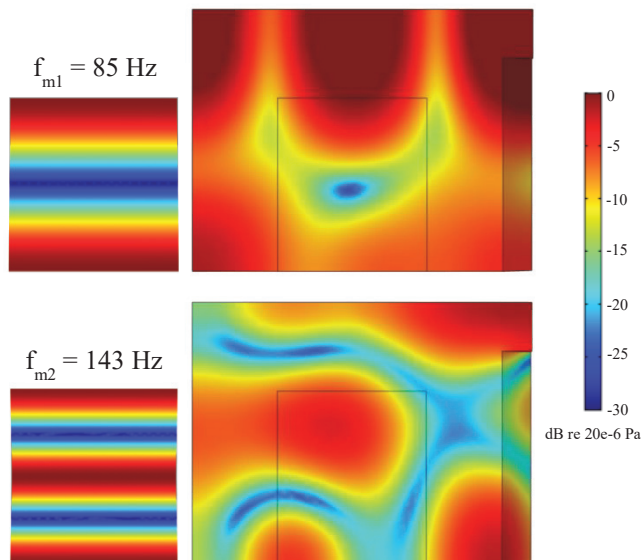


Abbildung 10: Gegenüberstellung der berechneten Schalldruckverteilung an der Prüfraum-Innenwand (rechts) mit den Modenformen des Prüfkörpers (links) bei unterschiedlichen Frequenzen (oben: 85 Hz, unten: 143 Hz).

Bei $f_{m1} = 85 \text{ Hz}$ kommt es am unteren und oberen Rand des Prüfkörpers zu Schwingungsbäuchen. Gleichzeitig entsteht in der Mitte des Elementes ein horizontal verlaufender Schwingungsknoten. Die örtliche Schalldruckverteilung zeigt ein ähnliches Erscheinungsbild: am oberen und unteren Rand des Brettsperrholzelementes entsteht beinahe über die gesamte Elementbreite ein Druckmaximum, lediglich in den oberen Eckbereichen kommt es zu einer Abschwächung. In der Mitte des Elementes tritt ein Druckminimum auf, das in seiner Ausprägung einen horizontalen Verlauf einnimmt. Die Druckmaxima des Luftschallfeldes treffen somit auf Schwingungsbäuche des Prüfkörpers, während die Druckminima auf Schwingungsknoten treffen. Es kommt zu einer hohen örtlichen modalen Kopplung und einer damit verbundenen starken Anregung des Prüfkörpers. Die daraus resultierende hohe Schallabstrahlung in diesem Frequenzbereich führt infolgedessen zu einem markanten Einbruch des Schalldämm-Maßes.

Bei $f_{m2} = 143 \text{ Hz}$ kommt es am oberen und unteren Rand des Prüfkörpers ebenfalls zu Schwingungsbäuchen, sowie im Abstand von ca. $1/4$ der Prüfkörperhöhe zu zwei horizontal verlaufenden Schwingungsknoten. Die berechnete Schalldruckverteilung zeigt ein Druckmaximum im linken unteren Eckbereich sowie in der oberen Hälfte des Prüfkörpers mit quer zum Prüfkörper verlaufenden Druckminima. Es kommt damit zu einer weniger idealen Anregung des Prüfkörpers und folglich zu keinem prägnanten Einbruch des Schalldämm-Maßes in diesem Frequenzbereich.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde der Einfluss der modalen Kopplung zwischen Prüfkörper und Prüfraum auf das gemessene Schalldämm-Maß anhand eines Brettsperrholzelementes im tieffrequenten Bereich untersucht. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf eine örtliche Übereinstimmung zwischen der Schalldruckverteilung im Prüfraum und der Modenform des Prüfkörpers gelegt. Die Eigenschwingungen und -frequenzen des Prüfkörpers wurden dazu mittels experimenteller Modalanalyse ermittelt. Eine Berechnung des dreidimensionalen Luftschallfeldes auf Basis der Finiten Elemente Methode ermöglicht eine Darstellung der Schallpegelverteilung Prüfraum. Ein prägnanter Einbruch des gemessenen Schalldämm-Maßes konnte so auf eine erhöhte örtliche Übereinstimmung zwischen der Schalldruckverteilung am Prüfkörper und dessen Schwingform zurückgeführt werden. Die Reproduzierbarkeit des Effektes wird in zukünftigen Messungen in Prüfräumen mit verändertem Volumen bzw. Geometrie überprüft werden.

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch das Österreichische Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und von der Europäischen Kommission unterstützt. Besonderer Dank geht an die KLH Massivholz GmbH für die Bereitstellung von diversen Prüfkörpern.

Literatur

- [1] Van Damme B., Schoenwald S., Alvarez Blanco M. und Zemp A.: Limitations to the use of homogenized material parameters of cross laminated timber plates for vibration and sound transmission modelling, *ICSV22*, Florenz, Italien, 2015.
- [2] Hagberg K. und Bard D.: Low frequency sound transmission in multifamily wooden houses, *inter.noise 2014*, Melbourne, Australien, 2014.
- [3] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 12354-1:2000-11-01: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen, Wien, 2000.
- [4] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN ISO 15186-3:2010-11-15: Akustik - Bestimmung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen aus Schallintensitätsmessungen – Teil 3: Messungen bei niedrigen Frequenzen im Prüfstand (ISO 15186-3:2002), Wien, 2010.
- [5] Möser M.: Messtechnik der Akustik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [6] COMSOL, COMSOL official site, 2016, . URL: <http://www.comsol.com>