

Akustisch optimierte Polymerwerkstoffe, Komponenten und Geometrien für Kunststoffgehäuse

Jens Rohlfing¹, Yohko Aoki¹, Roman Wack¹ und Jan Diemert²

¹Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 70569 Stuttgart, E-Mail: jens.rohlfing@ibp.fraunhofer.de

²Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, 76327 Pfinztal, E-Mail: jan.diemert@ict.fraunhofer.de

Einleitung

Lärmemissionen von Anlagen und Geräten stellen im Alltag und am Arbeitsplatz eine erhebliche Belästigung und Belastung dar. Akustisch optimierte Produkte sorgen für mehr Komfort und Sicherheit. Kunststoffe sind ideale Werkstoffe für Gehäuse und andere Geräte-Komponenten: leicht, meist preiswert und komplex in 3D formbar und vielfach großserientauglich, weswegen sie in vielfältiger Form zum Einsatz kommen. Allerdings ist gerade das geringe Gewicht und oftmals geringe innere Dämpfung von Kunststoff-Compounds aus akustischer Sicht nicht ideal. Umso wichtiger ist es, die Potentiale einer akustischen Optimierung dieser Werkstoffe sowie einer akustisch optimierten konstruktiven Ausgestaltung und Fertigungstechniken auszuschöpfen, um so eine deutliche Reduzierung der Geräuschemissionen von Geräten zu erzielen. Im Rahmen des Fraunhofer-Forschungsprojektes »PolymerAkustik« ist hierzu ein umfassendes Technologieangebot entstanden. Dieser Beitrag fasst ausgewählte Ergebnisse aus diesem Forschungsvorhaben zusammen. Dazu gehört die Nutzung weiterentwickelter (hybrider) Kunststoffverarbeitungsverfahren für Schichtstrukturen aus Polymeren mit hoher innerer Dämpfung und akustisch optimierte Polymerschäume. Außerdem werden Konzepte für eine akustisch optimierte Ausgestaltung von Geräteöffnungen und elastische Lagerelemente vorgestellt.

Charakterisierung von Polymerproben

Am Anfang des Projektes stellte die Charakterisierung der strukturdynamischen und akustischen Eigenschaften kleinformatiger Materialproben über einen weiten Frequenzbereich eine Herausforderung dar. Im Rahmen des Projektes wurden daher Charakterisierungsmethoden neu entwickelt bzw. kombiniert. Für die Charakterisierung der strukturdynamischen Materialeigenschaften wurden DMA und Modalanalysen an Norm-Zugstäben kombiniert [1, 2].

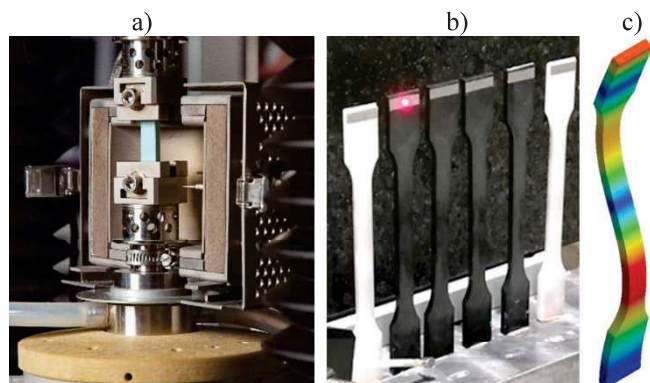


Abbildung 1: Messaufbau für a) die DMA und b) die experimentelle Modalanalyse sowie c) Visualisierung der FE-Simulation einer Probe.

Abbildung 1 zeigt den Messaufbau der DMA und der experimentellen Modalanalyse. Die Ergebnisse der Modalanalyse wurden mit Finite-Elemente (FE) Modellen abgeglichen um die frequenzabhängigen Materialparameter zu bestimmen. Durch die Überlappung der Frequenzbereiche der DMA von 0.1 Hz bis 100 Hz und der mit FE Simulationen abgeglichen Modalanalyse von ca. 20 Hz (abhängig von der ersten Strukturresonanz der Probe) bis 10 kHz, konnten die dynamischen Materialeigenschaften, insbesondere das Dämpfungsverhalten, über den gesamten interessierenden Frequenzbereich bestimmt werden.

Zur Untersuchung der luftschalldämmenden Eigenschaften standen aus herstellungstechnischen Gründen ebenfalls nur kleinformatige Polymerplatten zur Verfügung. Zur experimentellen Charakterisierung dieser Probenplatten und praxisüblicher Gehäuseschalen, wurde der in Abbildung 2 dargestellte Experimentaldemonstrator entwickelt [2, 3]. Die experimentellen Ergebnisse wurden ebenfalls mit FE-Simulationen abgeglichen. Im späteren Verlauf des Projektes wurden an diesem Aufbau auch Untersuchungen an Elektrogeräten und Gerätekomponenten durchgeführt. Eine Erweiterung um eine Luftzuführung ermöglicht die Untersuchung des Schalldurchgangs durch Lüftungsöffnungen. Der Frequenzbereich, in dem die Messergebnisse mit einer Genauigkeit von weniger als 1 dB reproduzierbar sind, beträgt 800 Hz bis 10 kHz für geschlossene Proben und 160 Hz bis 10 kHz für Proben mit Öffnungen.

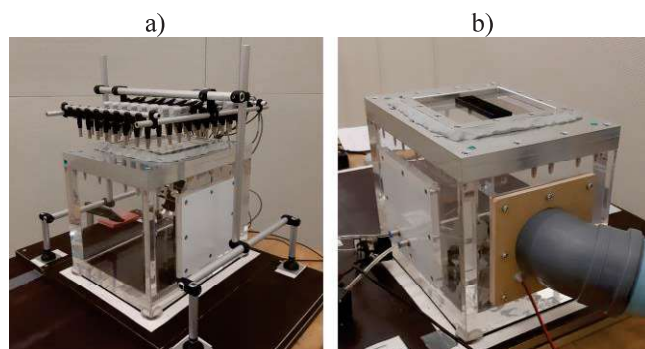


Abbildung 2: Experimentaldemonstrator a) mit Mikrofon-Array zur Charakterisierung der Schalltransmission durch Probenplatten und b) mit Luftzuführung zur Charakterisierung der Durchstrahlung von Lüftungsöffnungen.

Ein weiterer Fokus des Projektes lag auf der Entwicklung von Methoden und Modellen zur simulativen Charakterisierung und Bewertung von Polymer-Compounds, die unterschiedliche Zuschlagsstoffe enthalten und von Polymer-Blends. Abbildung 3 zeigt beispielhaft das FE-Modell der Polymer-Matrix und Einschlüssen (Zuschläge) eines repräsentativen Volumenelements und das Prinzip der Dämpfungsanalyse [3, 4].

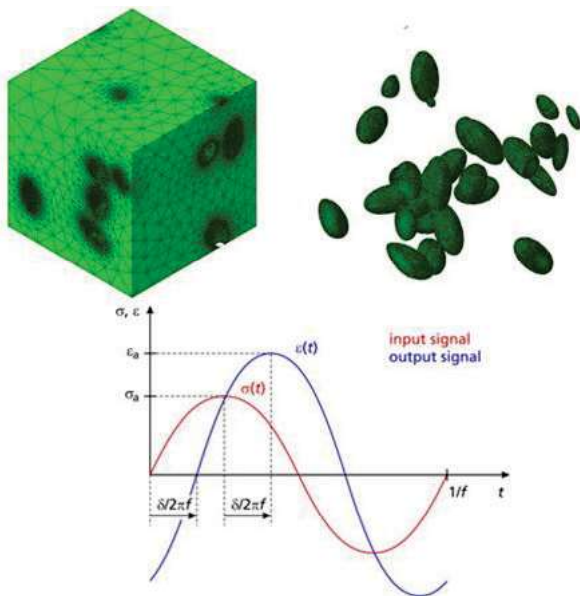


Abbildung 3: Matrix und Einschlüsse eines repräsentativen Volumenelements und Prinzip der Dämpfungsanalyse (hier spannungs- statt dehnungsgesteuert).

Erarbeitete Werkstoffkonzepte

Im Rahmen des Projektes wurden unterschiedliche Werkstoffkonzepte entwickelt und anhand der oben genannten Simulations- und Charakterisierungsmethoden untersucht und validiert. Ausgewählte Konzepte werden im Folgenden dargestellt.

Hochdämpfende Werkstoffformulierungen

Kunststoffgehäuse werden üblicherweise aus thermoplastischen, spritzgießfähigen Polymeren hergestellt, wobei die Materialwahl sowohl aus technischen und bei Sichtbauteilen auch aus optischen Gründen erfolgt. Übliche Werkstoffe hierfür sind Acrylnitril-Butadien-Styrol ABS, Polypropylen PP und Polyamide PA in unverstärkter, mit Mineralien gefüllter oder mit Glasfasern verstärkter Form. Im Projekt sind in umfangreichen Untersuchungen Strategien zur Optimierung von Werkstoffformulierungen hinsichtlich einer Verbesserung der inneren Dämpfung entwickelt und verifiziert worden. Als besonders vielversprechend haben sich Mischungen aus Kunststoffen mit deutlich unterschiedlicher Glasübergangstemperatur T_G herausgestellt. Da üblicherweise im Bereich der Glasübergangstemperatur T_G das Dämpfungsvermögen eines Kunststoffes sein Maximum erreicht, kann durch geschickte Wahl der Mischungspartner ein breiterer Temperaturbereich guter Dämpfung realisiert werden oder die bei hygroskopischen Werkstoffen häufig zu beobachtende Abhängigkeit der Lage des T_G -Maximums vom Feuchtegrad reduziert werden. Beispielhaft zeigt Abbildung 4 den Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur auf das Dämpfungsvermögen $\tan \delta$ eines hygroskopischen PA 6, eines nicht hygroskopischen PP und eines 50:50 Blends aus beiden. Auch wenn das Werkstoffverhalten des Blends weiterhin vom Temperatureinfluss auf das Dämpfungsverhalten geprägt ist, so zeigt sich doch ein stark ausgleichender Effekt von PP.

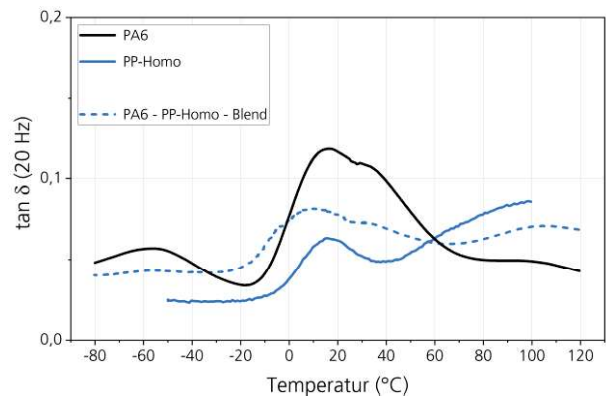


Abbildung 4: Einfluss der Temperatur auf die Dämpfung von reinem PA 6, PP-Copolymer und einem 50:50 Blend aus PA 6 und PP-Copolymer.

Hochdämpfende, thermoplastische Faserverbund-Sandwichstrukturen

Hochsteife Faserverbundstrukturen, insbesondere auf der Basis von Kohlenstofffasern zeigen häufig ein ungünstiges, fast schon metallisch anmutendes vibroakustische Verhalten. Insbesondere im Mobilitätsbereich müssen diese Strukturen bedämpft werden um akustischen Komfort zu gewährleisten. Für duomere Systeme wurde daher das Prinzip des „Constrained Layer Damping“, welches für metallische Strukturen schon länger bekannt und kommerzialisiert ist, angewandt. Eine elastomere, viskoelastische Zwischenschicht vernetzt hierbei während des temperaturinduzierten Aushärtvorgangs der duomeren Decklagen (vgl. Abb. 5). Im Projekt ist dieses Prinzip auf thermoplastische Faserverbundstrukturen, aufgebaut aus gestapelten Tapestrukturen, übertragen worden.

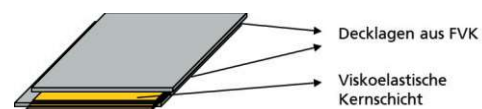


Abbildung 5: Sandwichstruktur aus viskoelastischer Kernschicht und faserverstärkten Decklagen.

Abbildung 6 zeigt die ermittelte Körperschall-dämpfung für die beiden Materialsysteme Polypropylen-Glasfaser PP-GF und Polyphenylensulfid-Kohlenstofffaser PPS-CF. Als elastische Kernlage kam im dargestellten Beispiel sowohl für PP- als auch für PPS-Composite eine kommerzielle Elastomerfolie (Kraiburg Kraibon) zum Einsatz.

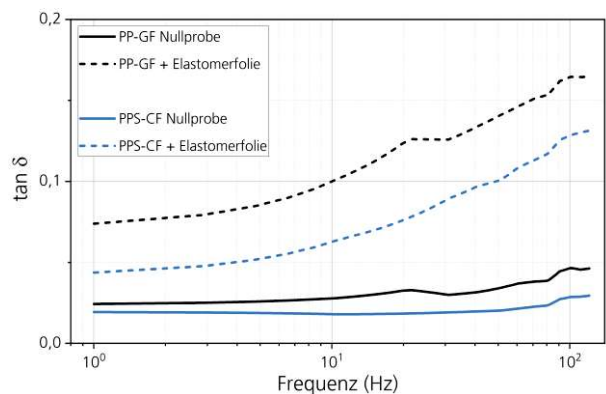


Abbildung 6: Einfluss elastomerer Kernschichten auf die Dämpfung von thermoplastischen Faserverbundstrukturen.

Der stark dämpfungserhöhende Effekt der Elastomerkernschichten, vor allem bei steigender Frequenz, ist deutlich wahrnehmbar. In der Praxis führt dies zu einer deutlichen Veränderung des Klangbildes von metallisch hell zu dumpf. Die in Abbildung 7 dargestellten experimentellen Ergebnisse für die Schallabstrahlung von dämpfungsoptimierten, thermoplastischen, faserverstärkte Sandwichplatten mit voll- und teilflächiger dämpfenden Zwischenlagen, bestätigen die Ergebnisse aus der DMA-Analyse. Für Demonstrationszwecke wurde ein »Polymer-Gong« Demonstrator aufgebaut der auf der DAGA 2022 vor Ort vorgestellte wurde.

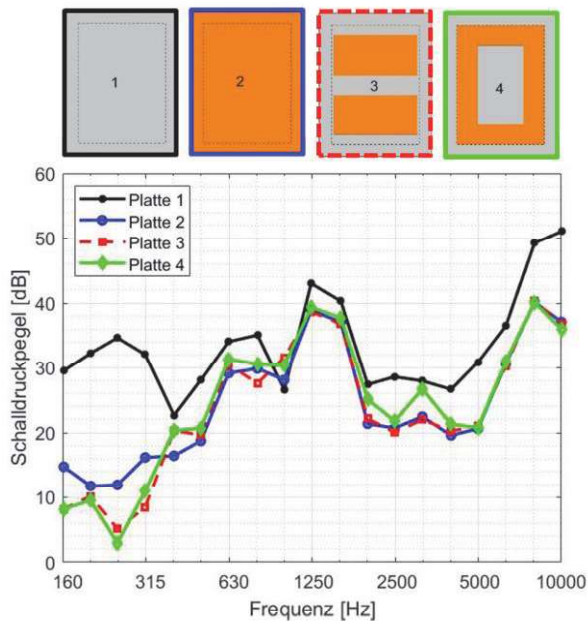


Abbildung 7: Abgestrahlter Schalldruckpegel unterschiedlicher Probeplatten, 1: homogen, 2: vollflächig geschichtet, 2 und 3: mit Teilbelegung.

Offenporige, Schäume aus Thermoplasten

Für die effektive Bedämpfung von Luftschall sind offenporige Strukturen, wie sie in faser- oder schwammartigen porösen Strukturen vorkommen notwendig. Offenzellige Schäume aus Kunststoffen werden typischerweise aus vernetzten Materialsystemen durch mehrstufige Schäumprozesse erzeugt. Typische Materialsysteme sind hier Polyurethane oder Melaminharze. Es entsteht ein sehr hoher Anteil offener Poren/Zellen und somit meist sehr gute Schallabsorptionseigenschaften. Aus Sicht der Recycelbarkeit wäre ein Monomaterialdesign aus Thermoplasten vorteilhaft, jedoch sind Schäume aus Thermoplasten in den meisten Fällen geschlossen zellig. Offenzelligkeit ist meist nur ein ‚unerwünschter‘ Nebeneffekt ungünstiger Prozessführung und in räumlich engen Teilbereichen des geschäumten Produktes zu beobachten. Im Projekt ist ein Verfahren entstanden, um aus Polyamid PA eine überwiegend offenzellige Schaumstruktur zu erzeugen. Diese bisher nur im kleinen Labormaßstab hergestellten Schäume zeigen in Rasterelektronen-Mikroskop-Aufnahmen einen hohen Anteil offener oder zumindest aufgerissener Zellen (siehe Abb. 8).

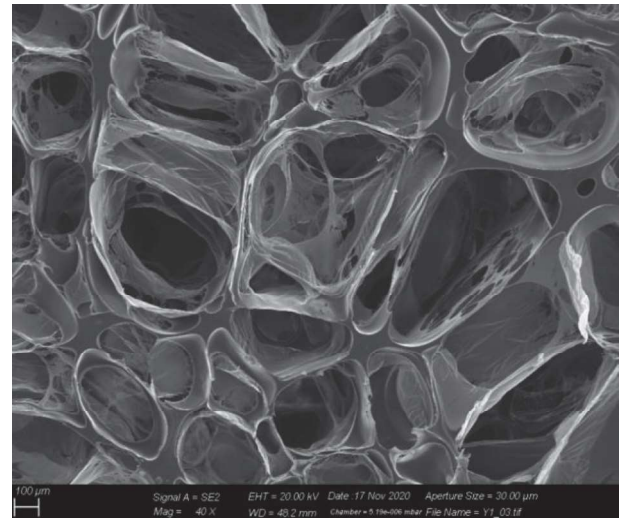


Abbildung 8: Rasterelektronen-Mikroskop-Aufnahme eines offenzelligen Schaumes aus Polyamid PA.

In weiteren Untersuchungen soll die Herstellung dieser Schäume skaliert, und experimentell akustisch charakterisierbare Proben hergestellt werden.

Erarbeitete konstruktive Konzepte

Neben den Werkstoffkonzepten wurden im Rahmen des Projektes »PolymerAkustik« auch konstruktive Lösungen für Kunststoffgehäuse und -Komponenten erarbeitet. Im Folgenden werden Konzepte für die akustisch optimierte Gestaltung von Lüftungsöffnungen, für die gezielte Reduzierung hochfrequenter tonaler Geräuschemissionen und Elastomerlager mit richtungsabhängigen dynamischen Eigenschaften vorgestellt.

Akustische optimierte Öffnungsgeometrien auf der Basis akustischer Resonatoren

Die Gehäuse der meisten Elektrogeräte und -Werkzeuge verfügen über Lüftungsöffnungen über die Abwärme abgeführt wird. Untersuchungen an verschiedenen Geräten haben gezeigt, dass die emittierten Geräuspektren stationäre tonale Anteile im kHz Bereich aufweisen, entweder durch eine fix gesteuerte Motordrehzahl oder die Pulsweitenmodulation (PWM) der Leistungselektronik. Abhängig vom Gerätetyp werden diese stationären tonalen Geräuschanteile dominant über die Lüftungsöffnungen nach außen transmittiert. Im Rahmen des Projektes wurden Konzepte für akustisch optimierte Geometrien für Lüftungsöffnungen auf Basis von akustischen Resonatoren entwickelt. Abbildung 9 zeigt beispielhaft eine schematische Anordnung von akustischen Resonatoren um eine Lüftungsöffnung und die Ergebnisse von FE-Simulationen zur resultierenden Schalldämmung. Die Resonatoren sind nebeneinander zwischen den Öffnungen angeordnet. Dabei formieren die Wände der Resonatoren einen kurzen Kanal, der über einen weiten Frequenzbereich zur Schalldämmung beiträgt. Durch ein geschicktes Design der Resonatoren kann die Schalltransmission durch die Lüftungsöffnung schmalbandig gezielt, signifikant reduziert werden.

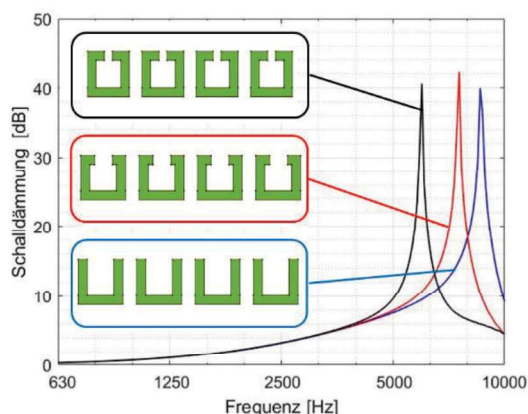


Abbildung 9: Konzepte zur Ausgestaltung von Lüftungsöffnungen mit abgestimmten Resonatoren und Simulationsergebnisse für die Schalldämmung über der Frequenz.

Abbildung 10 zeigt den gemessenen Schalldruckpegel außerhalb des Experimentaldemonstrators, mit Lautsprecheranregung im Innern, mit breitbandigem Rauschen + Ton bei 3,9 kHz (vgl. Messaufbau in Abb. 2 b); für Probenplatten mit einfacher Lüftungsöffnung und mit angepasster Resonator-Geometrie. Die Ergebnisse zeigen, dass die angepasste Resonator-Geometrie den abgestrahlten Schall im Terzband um die Resonanzfrequenz der Resonatoren um mehr als 10 dB reduzieren kann.

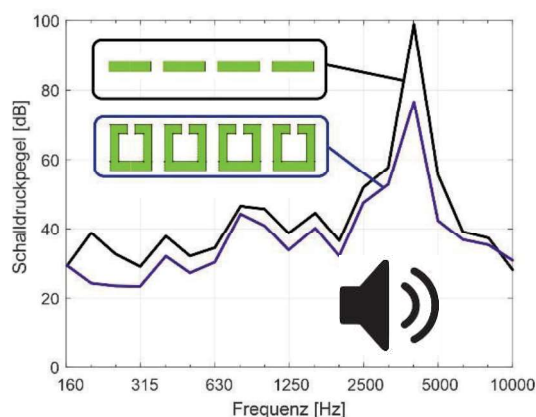


Abbildung 10: Schalldruckpegel außerhalb des Demonstrators bei Lautsprecheranregung innen; für Platte mit einfacher Lüftungsöffnung (schwarze Linie) und für Platte mit akustisch optimierter Lüftungsöffnung (blaue Linie).

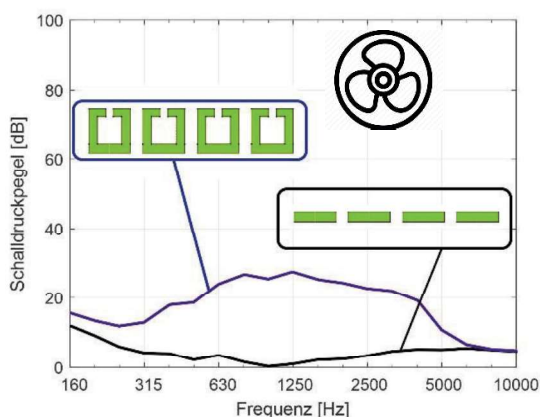


Abbildung 11: Schalldruckpegel außerhalb des Demonstrators für Strömungsanregung; für Platte mit einfacher Lüftungsöffnung (schwarze Linie) und für Platte mit akustisch optimierter Lüftungsöffnung (blaue Linie).

Abbildung 11 zeigt die Schalldruckpegel außerhalb des Demonstrators für reine Strömungsanregung bei einem ein Elektrowerkzeug üblichen Volumenstrom (ca. 8l/s). Die Ergebnisse zeigen, dass die akustisch optimierte Öffnungsgeometrie unter Strömung ein höheres Eigengeräusch erzeugt als die einfache Öffnungsgeometrie. Allerdings ist das erzeugte Eigengeräusch bei üblichen Volumenströmen recht gering und breitbandig, ohne auffällige tonale Anteile.

Elastomerlager mit richtungsabhängigen Eigenschaften

Die elastische Entkopplung von z. B. elektrischen Antrieben von äußern Gehäuse ist ein wichtiger Aspekt für die vibroakustisch optimierte Konstruktion. Dabei ist es oft wünschenswert, dass Lagerelemente unterschiedliche Eigenschaften in unterschiedlichen Raumrichtungen aufweisen. Im Rahmen des Projektes wurden daher Konzepte für Lagerelemente aus Polymeren mit richtungsabhängigen Steifigkeiten entwickelt und prototypisch umgesetzt. Abbildung 12 zeigt die Skizze eines solchen Lagers und den Versuchsaufbau für die 6D Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in [5] detailliert dargestellt.

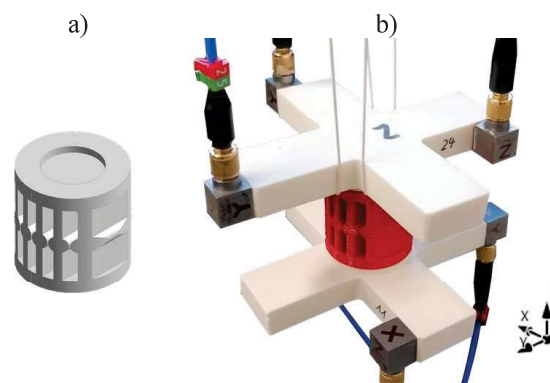


Abbildung 12: Lagerelement aus Polymerwerkstoffen mit richtungsabhängigen Steifigkeiten, a) Skizze und b) Versuchsaufbau zur 6D Charakterisierung.

Danksagung

Das Projekt »PolymerAkustik« wird gefördert im Rahmen der internen Programme der Fraunhofer-Gesellschaft, Fördernummer MAVO 836 974.

Literatur

- [1] Georgi, T.; et al: Messtechnische Charakterisierung und dynamische Simulation von Kunststoffbauteilen; Tagungsband der DAGA 2020.
- [2] Rohlfig, J.; et al.: Vibroacoustic characterisation methods for polymer materials and components; Proceedings of ISMA 2020, Leuven, Belgium.
- [3] Busse, T.; Aoki, Y; Rohlfig, J.: Experimenteller Aufbau zur akustischen Charakterisierung von Polymerbauteilen; Tagungsband der DAGA 2020.
- [4] Hohe, J.; et al.: Numerical and experimental design of graded cellular sandwich cores for multi-functional aerospace applications, Mat. Des. 39 (2012) 20-32.
- [5] Troge, J.; et al.: Characterization of 3D printed polymer mounts in translational and rotational DOF; eingereicht für ISMA 2022, Leuven, Belgium.