

6 Hagelwiderstand von Baumaterialien

Die natürliche Endgeschwindigkeit eines auf einer Gebäudehülle aufschlagenden Hagelkorns hängt unter anderem von dessen Grösse ab. Es handelt sich dabei bei Kugeldurchmessern von 20–50 mm um Geschwindigkeiten in der Grössenordnung von 8–30 m/s. Um ein grösseres Spektrum an Daten zu erhalten und einen allgemeinen Schadenverlauf abschätzen zu können, wurden die Proben in der Regel mit sieben Einzelschüssen von 5–35 m/s beschossen. Die verschiedenen Geschwindigkeiten werden mittels verschieden grosser Druckeinstellungen erreicht. Die Kugelgrössen wurden so gewählt, dass bei Eintritt eines Schadens die Geschwindigkeit im Bereich der natürlichen Endgeschwindigkeit der entsprechenden Kugelgrösse liegt. Da eine grössere Kugel in der Regel einen grösseren Schaden anrichtet, wird folgendermassen vorgegangen: tritt beispielsweise bei einer Kugel mit Durchmesser 40 mm (natürliche Endgeschwindigkeit ca. 28 m/s) bis 35 m/s kein Schaden auf, wird mit der Kugel mit Durchmesser 50 mm geschossen. Andererseits tritt schon bei 15 m/s ein Schaden auf, wird mit der Kugel mit Durchmesser 30 mm weitergeschossen.

Es wurde versucht, die Geschwindigkeit, bei der ein Schaden zum ersten Mal auftritt, auf 1 m/s genau einzugrenzen. Das Augenmerk richtete sich hauptsächlich auf das Verhalten der Materialien bei Beschuss mit Eiskugeln. Zum Vergleich wurden mit der gleichen Kugelgrösse und Geschwindigkeit auch Beschussversuche mit der Polyamidkugel durchgeführt. So konnte jeweils ein Faktor errechnet werden, mit dem Rückschlüsse auf Resultate durch Beschüsse mit der Polyamidkugel gezogen werden können.



Abbildung 6.19: Hagelkanone mit aufgebauten Ziegeln, Foto Empa.

6.2.3 Auswertungen

Grundsätzlich wird zwischen dem allgemeinen Schadenverlauf und dem ersten Eintreten einer relevanten Schädigung unterschieden. Typischerweise verursacht ein Stoss mit einer Kugel eine Delle; bei Erhöhung der Geschwindigkeit wird die Delle flächenmässig grösser und tiefer. Dieses sich vergrössernde Volumen einer Delle ist ein genereller Schadenverlauf. Beim 1. Auftreten eines Schadens kann es sich um einen Riss, einen Bruch, ein Loch, eine Delle, eine Abplatzung von Material und vieles mehr handeln. Durch einen solchen Schaden kann eine wichtige Funktion des Bauteils, wie zum Beispiel Wasserdichtheit, beeinträchtigt werden. Die Geschwindigkeit, bei der dieser Schaden zum ersten Mal auftritt, ist die Schädigungsgeschwindigkeit (v_s). Nach den Beschüssen wurden die Schäden analysiert, ausgemessen und fotografiert.

Die Resultate wurden jeweils in Bezug auf die kinetische Energie (in Joule) dargestellt. Diese lässt sich nach der Formel $E_{kin} = mv^2/2$ mit der Masse der Kugel (m) und der Geschwindigkeit (v) berechnen und wird als Schädigungsarbeit (w_s) bezeichnet.

Es wurden insgesamt 48 neue Produkte eingeteilt in elf Bauteilkategorien untersucht. Die Versuche fanden an neuen Materialien statt. Anhand der Resultate konnten fünf Hagelwiderstandsklassen unterschieden und die Baumaterialien entsprechend klassifiziert werden (siehe Kapitel 7 & Tabelle 7.3). Bisher wurden für die Hageltests Standardkugeln aus Polyamid verwendet; dies ist so verankert in der Norm SIA 280 Kunststoffdichtungsbahnen. Nun wurden nach einem wiederholbaren Verfahren hagelähnliche Eiskugeln hergestellt. Aufgrund der verschiedenen Eigenschaften von Eis und Polyamid (Dichte, Temperatur, Bruchverhalten etc.) unterscheiden sich die Resultate wesentlich. Bei biegesteifen, hochmoduligen und massigen Baumaterialien wie zum Beispiel Ziegel, Faserzement etc. verursacht die Eiskugel erst bei wesentlich höherer Energie den gleichen Schaden wie die Polyamidkugel. Beim Vergleich mit den Schäden in der Natur zeigen sich vergleichbare Schadenbilder mit dem Eiskugelbeschuss, währenddem der Polyamidkugelbeschuss je nach Material zu realitätsfernen Resultaten führt.

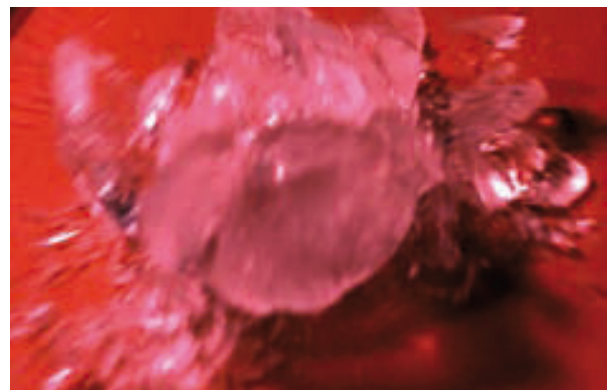


Abbildung 6.20: Zerspringendes Eiskorn auf Ziegel, Foto Empa.

6.2.4 Resultate

Die im Rahmen des Projekts ermittelten Widerstandswerte sind Richtwerte. Die ausgewählten Materialien stammen von typischen, marktüblichen Produzenten oder Vertreibern. Sie liefern daher Anhaltspunkte für die entsprechende Bauteil-

kategorie. Je nach Materialart, Ausführung, Oberflächen-gestaltung und Verbindungsart können die Widerstandswerte über einen breiten Bereich streuen. In der nachfolgenden Grafik sind die Schädigungsarbeiten in Joule aufgeführt, bei denen der erste Schaden aufgetreten ist.

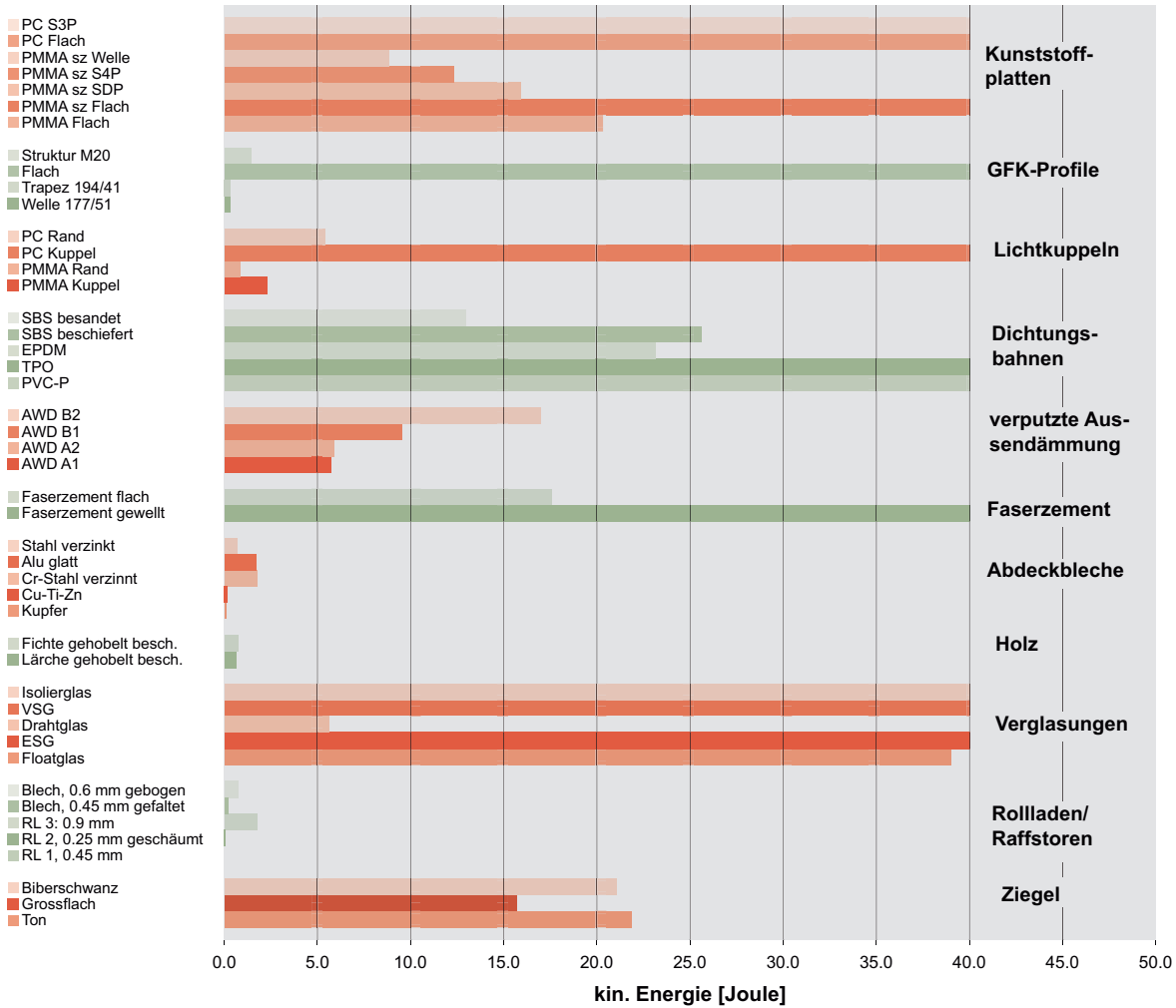


Abbildung 6.21: Schädigungsarbeiten mit Eiskugeln 20–50 mm und Beschusswinkeln 45° oder 90°.

7 Elementarschutzregister Hagel

7.1 Klassierung der Bauprodukte

Das Elementarschutzregister bietet ein Instrument zur Klassierung von Bauteilen in Bezug auf ihre Hagelwiderstandsfähigkeit. Die Klassierung erfolgt durch ein standardisiertes Prüfverfahren. Die Resultate der im vorhergehenden Kapitel erläuterten Laboruntersuchungen wurden entsprechend ausgewertet. Eine wichtige Kenngrösse für die Einordnung eines Bauteils in eine Widerstandsklasse ist der Schaden. Dazu muss der Schadensbeginn definiert werden (Schadenskriterium). Da ein Bauteil mehrere Funktionen erfüllen kann und jede Funktion wieder verschiedene Schadenskriterien hat, wird ein Bauteil in Bezug auf seine Funktionen mehrfach klassiert. Damit die Hagelbeschussversuche einheitlich und wiederholbar sind, wurden die Prüfungen standardisiert; neben einem allgemeinen Standardprüfversuch wurden für jedes einzelne Bauteil spezifische Bedingungen festgelegt.

7.2 Hagelwiderstandsklassen

Es wurden fünf Hagelwiderstandsklassen (HW 1–5) definiert, wobei 1 einem sehr schwachen und 5 einem sehr hohen Hagelwiderstand entspricht. Die Klassierung wurde aufgrund der kinetischen Energie eines Hagelkorns einer bestimmten Grösse beim Auftreffen auf die Gebäudehülle vorgenommen: in die schwächste Klasse HW 1 werden beispielsweise Bauteile eingeordnet, die beim Aufprall eines Kornes mit 10 mm Durchmesser noch schadenfrei bleiben, bei einem 20 mm Korn aber beschädigt werden. Bauteile, die erst beim Aufprall eines Kornes mit 30 mm Durchmesser beschädigt werden, werden in die Klasse HW 2 eingeordnet. Bauteile mit

HW 5 werden auch durch ein Hagelkorn mit 50 mm nicht beschädigt. Die Hagelwiderstandsklasse definiert also die Energie, bei der das Bauteil noch schadenfrei bleibt. Das Hagelkorn wird zur Berechnung der Masse und der Geschwindigkeit als kugelförmig angenommen. Die Dichte des Eises beträgt für die Berechnungen 870 kg/m^3 ; dieser Wert wird sowohl bei natürlichem Hagel sowie bei den im Labor hergestellten, künstlichen Eiskugeln erreicht. Die Masse kann somit mit der Dichte und dem Volumen der Kugel mit dem entsprechenden Durchmesser berechnet werden. Die Geschwindigkeit beim Auftreffen eines Hagelkorns einer bestimmten Grösse auf die Erdoberfläche wird nach folgender Formel berechnet:

$$v_A = \sqrt{\frac{4 \cdot \rho_{\text{Eis}} \cdot d_H \cdot g}{3 \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot c_w}}$$

v_A : Aufprallgeschwindigkeit [m/s]
 ρ_{Eis} : Eisdichte $870 \text{ [kg/m}^3]$
 ρ_{Luft} : Luftdichte $1.2 \text{ [kg/m}^3]$
 d_H : Durchmesser des Hagelkorns [m]
 g : Gravitationsbeschleunigung $\text{[m/s}^2]$
 c_w : Luftwiderstandsbeiwert 0.50 [-]

Die jeweiligen Korndurchmesser, Massen, Fallgeschwindigkeiten und kinetischen Energien der fünf Hagelwiderstandsklassen sind in Tabelle 7.1. zusammengestellt. Bei den Energiewerten handelt es sich jeweils um die obere Grenze. Wird also ein Bauteil bei 3.4 Joule beschädigt, wird es der HW 2 zugeordnet, bei 3.6 Joule gehört es in HW 3. Da es sich bei den Klassen um grosse Energiebereiche handelt, soll der genaue Energiewert bei Schädigung jeweils nach der Klasse in Klammern angegeben werden, zum Beispiel HW 3 (3.6).

Hagelwiderstand	Durchmesser [mm]	Masse [g]	Geschwindigkeit [m/s]	Klassengrenze [J]
HW 1	10	0.5	13.8	0.04
HW 2	20	3.6	19.5	0.7
HW 3	30	12.3	23.9	3.5
HW 4	40	29.2	27.5	11.1
HW 5	50	56.9	30.8	27.0

Tabelle 7.1: Hagelwiderstandsklassen 1–5.

7.3 Schadensdefinition

Wann ein Schaden eintritt muss für jedes Bauteil einzeln bestimmt werden. Dies ist deshalb schwierig, weil ein Bauteil meist mehrere Funktionen erfüllt. Von den elf untersuchten Typen konnten folgende elementaren Funktionen zusammengetragen werden:

- Wasserdichtheit das Bauteil schützt vor dem Eindringen von Wasser;
- Lichtdurchlässigkeit das Bauteil erlaubt die Lichttransmission;

- Lichtabschirmung das Bauteil schützt vor Lichteinstrahlung;
 - Mechanik das Bauteil besitzt einen Mechanismus;
 - Aussehen das Bauteil hat eine ästhetische Funktion.
- Die Grenze zwischen einem unbeschädigten und einem beschädigten Bauteil wird als Schadenskriterium bezeichnet. Da bei mehreren Funktionen die Schadenskriterien verschieden sind, kann ein Bauteil verschiedene HW-Klassen haben. Die jeweiligen Funktionen der Bauteile sowie die Schadenskriterien und Messmethoden sind in Tabelle 7.2 aufgelistet.

Bauteil	Funktion	Schadenskriterium	Messmethode
Ziegel	Wasserdichtheit	Riss	Klangprobe
	Aussehen	Absplitterung > 1 cm ²	Visuell
Rollläden	Lichtabschirmung	Lichtspalten > 1 mm	Längenmessung
	Mechanik	Versagen des Aufzugs-systems	5x Aus- und Einfahren
	Aussehen	Delle	Visuell im Schräglicht
Raffstoren	Lichtabschirmung	Lichtspalten > 1 mm	Längenmessung
	Mechanik	Versagen des Aufzugs-systems und Versagen der Lamellensteuerung	5x Aus- und Einfahren und 5x Kippen der Lamellen
	Aussehen	Delle	Visuell im Schräglicht
Verglasung	Wasserdichtheit	Bruch	Visuell
	Aussehen	Oberflächenänderung	Visuell im Schräglicht
Blech	Wasserdichtheit	innerhalb 1 h leck	Beschussort in horizontaler Lage fluten mit 10 mm Wassertiefe
	Aussehen	Delle	Visuell im Schräglicht
Faserzement	Wasserdichtheit	Riss > 0.02 mm, Bruch	Mit Lupe (6-fache Vergrößerung)
	Aussehen	Delle	Visuell im Schräglicht
Putz	Wasserdichtheit	Riss	Im Frontlicht mit Lupe (6-fach)
	Aussehen	Delle, Oberflächenänderung	Visuell im Schräglicht
Holz	Wasserdichtheit	unbeschichtet: Riss > 0.5 mm beschichtet: Riss	Messen Visuell im Schräglicht
	Aussehen	unbeschichtet: Delle > 0.5 mm beschichtet: Delle	Messen Visuell im Schräglicht
Dichtungsbahn	Wasserdichtheit	Perforation	Norm EN 13583
Kunststoffplatte	Wasserdichtheit	Perforation, Riss	Norm EN 13583
	Lichtdurchlässigkeit	Weissbruch, innerer Materialdefekt	Visuell im Gegenlicht
	Aussehen	Oberflächenänderung	Visuell im Schräglicht
Lichtkuppel	Wasserdichtheit	Riss, Bruch	Visuell
	Lichtdurchlässigkeit	Weissbruch	Visuell im Gegenlicht
	Mechanik	Schliesssystem versagt	5 x Öffnen und Schliessen
	Aussehen	Oberflächenänderung, Bruch oder Riss der unterliegenden Schale	Visuell im Schräglicht

Tabelle 7.2: Bauteile mit den Funktionen, den Schadenskriterien und den Messmethoden.

7.4 Prüfung des Hagelwiderstandes

7.4.1 Allgemeine Prüfbedingungen

Um eine einheitliche Ausgangslage zu schaffen, wurde ein Standardprüfversuch festgelegt. Mit dessen Hilfe können in Zukunft Bauteile geprüft und in Hagelwiderstandsklassen eingeteilt werden. Neben den allgemeinen Prüfbedingungen wurden für jedes Bauteil weitere spezifische Prüfbedingungen definiert, die Angaben über den Versuchsaufbau, den Beschusswinkel etc. enthalten. Die allgemeinen Prüfbedingungen beinhalten die folgenden Voraussetzungen:

- **Prüfprinzip:** Simulation der natürlichen Hageleinwirkung durch Einzelbeschuss von Fassaden- und Bedachungsmaterialien mit künstlich hergestelltem Hageleis;
- **Prüfgerät:** beschleunigt das Projektil auf die gewünschte Geschwindigkeit, wobei die Beschussrichtung beliebig gewählt werden kann, der bauteilspezifische Beschusswinkel jedoch eingehalten werden muss. Es erfolgt ein kontrollierter Einzelschuss auf die bauteilspezifisch aufgebaute Probe;
- **Beschusswinkel:** Winkel zwischen Beschussrichtung und Auflageebene des Probekörpers. Grundsätzlich werden Bedachungsmaterialien im 90° Winkel und Fassadenmaterialien im 45° Winkel beschossen;
- **Beschussort:** ist abhängig vom Bauteil und Einsatzbereich und stellt die schwächste Stelle dar;
- **Projektil:** rissfreie und porenarme Eiskugel nach speziellem Verfahren hergestellt und bei -20° C gelagert, Durchmesser von 10 bis maximal 50 mm. Von der Kugel abweichende Formen sind möglich, müssen aber im Prüfbericht detailliert beschrieben werden;
- **Prüfklima:** Raumtemperatur von 23° C \pm 2° und relative Luftfeuchtigkeit von 50% \pm 10%;
- **Vorlagerung der Probe:** bauteilspezifisch festgelegt, regelt die langfristige Lagerung der Probe vor der Prüfung;
- **Vorbereitung der Probe:** bauteilspezifisch festgelegt, regelt die Handhabung der Probe unmittelbar vor der Prüfung;
- **Messgrösse:** gemessen werden die Masse und die Geschwindigkeit des Projektils. Die Masse wird innerhalb von 2 Minuten vor dem Schuss bestimmt, die Geschwindigkeit wird 300 mm vom Probekörper entfernt gemessen. Beide Grössen dienen zur Bestimmung der kinetischen Energie und damit zur Bestimmung der Hagelwiderstandsklasse;
- **Messtoleranz:** beträgt für die Masse des Projektils \pm 2% und für die Geschwindigkeit \pm 1%;
- **Versuchsdurchführung:** Um die Probe auf einen bestimmten Hagelwiderstand zu testen, wird der Probekörper mit der kinetischen Energie der entsprechenden Hagelwiderstandsklasse beschossen (Tabelle 6.2). Damit der Energiewert der Klassengrenze auch sicher erreicht wird, empfiehlt es sich, den Beschuss mit einer leicht höheren Energie durchzuführen. Das kann erreicht werden, indem die Geschwindigkeit des Beschusses über der entsprechenden

Klassengrenze gewählt wird. Zu jedem Hagelwiderstand muss der passende Projektildurchmesser verwendet werden: Die Prüfung für die Hagelwiderstandsklasse 1 (HW 1) verlangt einen Durchmesser von 10 mm, für HW 2 20 mm Projektildurchmesser, für ein HW 3 30 mm Durchmesser, für HW 4 40 mm Durchmesser und für HW 5 50 mm Durchmesser. Wird die Probe durch den Beschuss beschädigt, wird ein neuer Probekörper mit der Geschwindigkeit der nächst tieferen Klassengrenze beschossen. Bleibt der Probekörper unbeschädigt, wird der Versuch auf mindestens vier weitere Probekörper ausgeweitet (total mindestens fünf Proben). Bleibt die Probe nach dem Beschuss unbeschädigt, kann das Bauteil der entsprechenden Hagelwiderstandsklasse zugeordnet werden. Dabei muss beachtet werden:

- o Die Proben müssen hintereinander beschossen werden.
- o Ein mehrmaliger Beschuss derselben Probe ist möglich, wenn die bauteilspezifischen Angaben zum Beschussort berücksichtigt werden können und eine ungünstige Beeinflussung durch den vorgängigen Beschuss ausgeschlossen werden kann.
- o Die Masse der Projektile darf im Bereich der Massentoleranz schwanken.
- o Die Geschwindigkeiten der mindestens fünf Schüsse müssen im Variationsbereich von 1 m/s sein, das heisst die Spanne zwischen dem kleinsten und dem grössten Geschwindigkeitswert ist maximal 1 m/s.

- **Versuchsauswertung:** Der Energiewert aller fünf oder mehr Proben wird gemittelt und auf die erste Dezimalstelle gerundet. Dieser gemittelte Energiewert wird der Widerstandsklasse in Klammern beigeführt.
- **Bauteilfunktion:** Das Bauteil erfüllt mehrere Funktionen. Diese können durch den Beschuss direkt beeinträchtigt werden. Die Projektilenergie, welche zur Schädigung nötig ist, hängt vom Bauteil und der Funktion ab.
- **Schadenskriterium:** setzt die Schwelle fest, bei welcher im Falle eines Erreichens oder Überschreitens die Bauteilfunktion nicht mehr erfüllt werden kann und das Bauteil in Bezug auf diese Funktion beschädigt ist.
- **Messmethode:** beschreibt den Weg, wie die Bauteilfunktion überprüft werden soll. Erfüllt das Bauteil mehrere Funktionen, werden entsprechend mehrere Messmethoden angewendet.
- **Prüfbericht:** muss Angaben zu Gerät, Bauteil, Versuchsaufbau, Projektil, Durchführung und Ergebnisse enthalten.

7.4.2 Bauteilspezifische Prüfbedingungen

In den bauteilspezifischen Prüfbedingungen sind alle zusätzlichen, nicht in den allgemeinen Prüfbedingungen vorhandenen Angaben zu finden. Dies sind genaue Angaben zu Art und Grösse des Bauteils, Versuchsaufbau, falls erforderlich spezielle Vorlagerung und Vorbereitung der Probe, Beschussorte, Funktionen des Bauteils, sowie das Schadenskriterium und dessen Messmethode.

7.5 Resultate

Aufgrund der Laborresultate im Teilprojekt Hagelwiderstand wurden die elf typischen Gebäudehüllen in Hagelwiderstandsklassen eingeteilt; in Tabelle 7.3 sind die Resultate zusammengestellt. Die getesteten Objekte sind Stichproben aus einer

grossen Produktpalette und die Prüfung erfolgte im Wesentlichen nach den im Bericht «Elementarschutzregister» vorgeschlagenen Prüfverfahren, das nach den Laborversuchen erstellt wurde. Die Resultate sind orientierende Richtwerte für die Bauteilkategorie. Sie variieren je nach Ausführung, Qualität und Hersteller.