

Ausgabe 2026/10

BEKAGLA - Entwicklung konsistenter Berechnungsmodelle kaltgebogener Glasscheiben für Mono-, Verbund- und Isolierverglasung bei punkt- und linienförmig gelagerten Scheiben
IGF-Nr.: 22697 N

Zusammenfassung zum Forschungsvorhaben IGF-Nr.: 22697 N

Das Trag-, Verformungs- und Festigkeitsverhalten dauerhaft kaltgebogener Verglasungen von der grundlegenden Monoglasscheibe bis zu Verbund- und Isolierglas stellt den bemessenden Ingenieur vor eine Vielzahl von Aufgabenstellungen. Ziel des Forschungsvorhabnes war ein durchgängiges Bemessungskonzept, das die während der Formgebung eingprägten Spannungen, die geometrisch nichtlineare Tragwirkung und die Beanspruchung durch äußere Lasten gemeinsam erfasst. Hierfür wurden neue Versuchstände entwickelt, umfangreiche Bauteil- und Kleinteilversuche durchgeführt und experimentell validierte Rechenmodelle aufgebaut. Die Erkenntnisse wurden abschließend in einen informativen Anhang zur EN 19100-2 überführt. Zunächst wurden zwei komplementäre Prüfverfahren entwickelt: Ein modifizierter Vierschneidenbiegeversuch erzeugt auch bei hohen Bruchlasten thermisch vorgespannter Gläser eine weitgehend gleichmäßige Kantenbeanspruchung. Ein Vierpunkttorsionsversuch bildet den in antiklastisch kaltgebogenen Scheiben auftretenden kombinierten Membran- und Biegespannungszustand ab. Die

80 Referenzversuche ermöglichten eine statistische Beschreibung der Kantenfestigkeit. Weiter wurde der Einfluss der Kaltbiegung auf Lastabtrag, Spannungsumlagerung und Stabilität von Monoglasscheiben untersucht. Es wurden Scheiben mit drei Abmessungen und zwei Dicken punktförmig und linienförmig gelagert und bei abgestuften Kaltbiegungsgraden mit Flächen- und Punktlasten beansprucht. Die Versuchskonstellationen lieferten reproduzierbare Kraft-, Verformungs- und Dehnungsverläufe. Mit zunehmender Kaltbiegung verlagerten sich die maßgebenden Zugspannungen aus der Scheibenmitte in äußere Bereiche. Die Linienlagerung erhöhte die Systemsteifigkeit und stabilisierte die Verformungsfigur deutlich. Die Versuche dienten zur Validierung geometrisch nichtlinearer FE-Modelle. Da eine geschlossene analytische Lösung der von-Kármán-Gleichungen nicht in ausreichend handhabbarer Form erreicht wurde, wurden die analytischen Erkenntnisse in ein physikalisch informiertes neuronales Netz überführt. Dieses bildet die untersuchten Geometrien mit hoher Genauigkeit ab und ermöglicht nach dem Training vollständige Feldlösungen in-

nerhalb von Millisekunden. Damit steht ein leistungsfähiges Werkzeug für Parameterstudien und Entwurfsaufgaben zur Verfügung. Ferner wurde die zeit- und temperaturabhängige Schubkopplung kaltgebogener Verbundglasscheiben untersucht. Dabei variierten Zwischenschicht, Temperatur, Kaltbiegungsgrad und Lastart. Der kombinierte Einfluss der höheren Systemsteifigkeit durch höheren Schubverbund konnte sowohl für die Kaltbiegung, als auch für die anschließende Belastung nachgewiesen werden. FE-Modelle konnten Kriechen, Relaxation, Temperatur und den tatsächlichen zeitlichen Belastungsablauf gemeinsam berücksichtigen. Außerdem wurden die Erkenntnisse auf Zweischeiben-Isolierglas übertragen. Unterschiedliche Spacerdicken und Ausführungen wurden unter Flächen- und Punktlast untersucht. Die Messungen zeigen, wie Kaltbiegung und Hohlraumgeometrie die Druckkopplung, Lastaufteilung und Lage der maßgebenden Spannungen verändern. Ergänzend wurden Randverbundproben aus fünf Materialkombinationen in Zug, Druck und Schub geprüft. Die entwickelte H-Probe ermöglichte eine reproduzierbare Ermittlung von Federkennwerten. Das validierte FE-Modell koppelt die Scheiben über eine Fluid-Cavity und diskrete, aus den Kleinteilversuchen abgeleitete Randfedern. Spannungen und Kraft-Durchbiegungs-Beziehungen werden sehr gut abgebildet und der Rechenaufwand gegenüber einer detail-

lierten Modellierung erheblich reduziert. Abschließend wurden die Ergebnisse in einem informativen Anhang zur EN 19100-2 gebündelt. Der Entwurf enthält produktspezifische Regeln für die viskoelastische Schubkopplung von Verbundglas sowie für Scheibenzwischenraum, Abstandhalter, Dichtstoffe und Gasdichtheit von Isolierglas. Er behandelt Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Bruchgrenzzustand, Lagerungen, Unterkonstruktion und Austauschzustände. Für komplexe Geometrien werden geometrisch nichtlineare FE-Berechnungen einschließlich Imperfektions- und Konvergenzuntersuchungen gefordert. Das Vorhaben hat eine geschlossene Verbindung zwischen Versuch, numerischer Modellierung und normativer Anwendung geschaffen. Die maßgebenden Mechanismen der Kaltbiegung wurden für die wichtigsten Bauglasprodukte quantifiziert und in spezifische Berechnungsanforderungen überführt.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INDUSTRIELLE
IGF
GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG

Ar
Forschungsnetzwerk
Mittelstand