

Kurzbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19 499 N

M. Voß², T. Vallée², M. Adam², N. Ratsch¹, M. Burnett-Barking¹ und S. Böhm¹

iCurie

Thema

Baustellenoptimierte Schnellaushärtung im Holzbau

Forschungsvereinigung

Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. – iVTH

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. — DVS

Forschungseinrichtung(en)

1. Institut für trennende und fügende Fertigungsverfahren (ttf), Universität Kassel
2. Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen

Induktiv gestützte Schnellhärtung mit Curie-Partikeln

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das Potential der induktiven Schnellhärtung von geklebten Verbindungen im konstruktiven Holzbau ausgelotet. Insbesondere standen zwei konkrete baupraktische Anwendungen im Fokus der Untersuchungen: 1. in Holz eingeklebte Stäbe aus Glasfaserverbundwerkstoffen (GFK) und 2. Holz-Glas Klebungen. Die beschleunigte Aushärtung sollte mithilfe der elektromagnetischen (EM) Induktion vollzogen werden, wobei hierzu sog. Curie-Partikel verwendet wurden.

Im Prinzip lassen sich Curie-Partikel nur bis zu einer bestimmten Temperatur (T_C) induktiv erwärmen, bei Temperaturen oberhalb T_C interagieren diese nicht mehr mit dem EM-Wechselfeld (vgl. Abbildung 1 bzw. Abbildung 2). Durch dieses Temperaturverhalten der Partikel entfällt die sonst erforderliche und aufwändige Regelung des induktiven Aufheizprozesses.

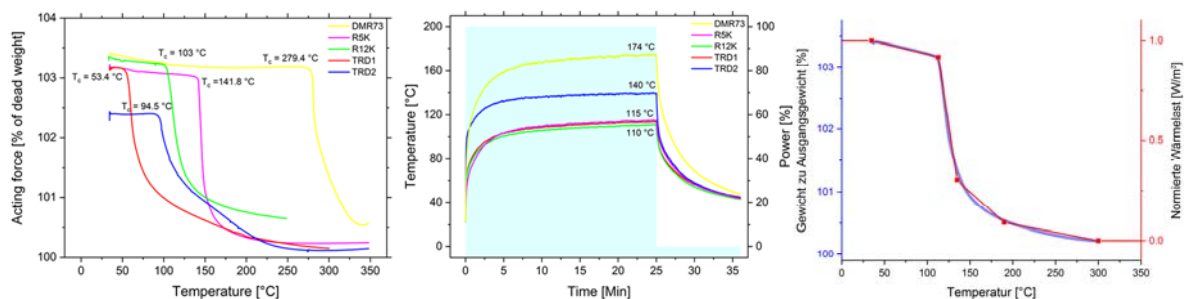


Abbildung 1: Ergebnis der modifizierten TGA-Analyse für verschiedene MnZn-Ferritpartikeltypen (links), induktive Erwärmung der verschiedenen Partikelsorten auf Füge teil aus Glas mit einer Dicke von 0,6 mm (Mitte); Annahme für das numerische Modell (rechts)

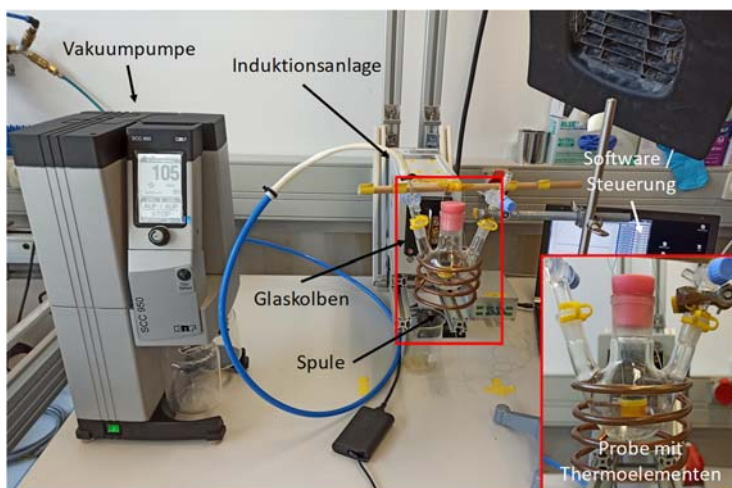


Abbildung 2: Experimenteller Aufbau zur induktiven Erwärmung der Curie-Partikel sowie zur Bestimmung des Curie-Effekts

Eingeklebte Stäbe

Gemeinsam mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) wurde eine Reihe von baupraktisch relevanten Zweikomponenten-Klebstoffen (2K) ausgewählt: drei 2K-Epoxide sowie ein 2K-Polyurethan (vgl. Abbildung 3). Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen, dass die Klebstoffe hinsichtlich der Schnellhärtung auf verschiedenen Ebenen untersucht und charakterisiert

wurden. Hierzu wurden obere Grenzen für Temperaturrampen sowie maximale Aushärtetemperaturen bestimmt. Diese Werte wurden anschließend als Grundlage für die Auswahl von geeigneten CP verwendet. Nach erfolgter Auswahl geeigneter CP, wurden diese mit verschiedenen Methoden analysiert.

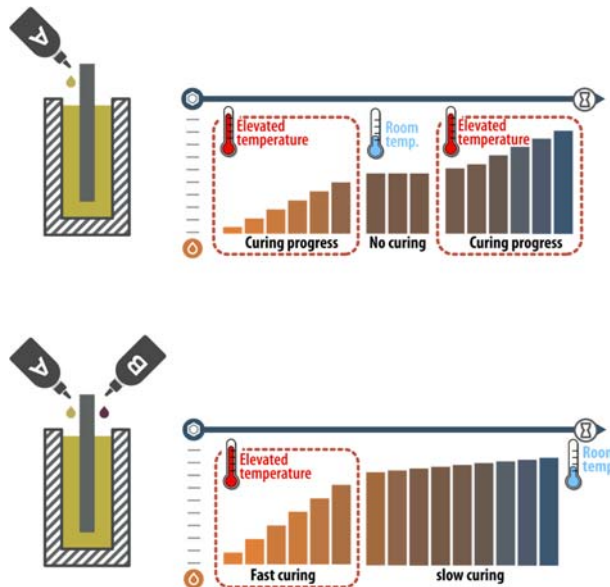


Abbildung 3: Aushärtung von 1K-Klebstoff (oben) und von 2K-Klebstoff (unten) je nach Wärmezufuhr. Sowohl bei 1K- als auch bei 2K-Klebstoffen stehen Aushärtungszeiten und Aushärtungstemperaturen in umgekehrter Relation zueinander. Bei zu niedrigen Temperaturen wird die Aushärtung fast vollständig gestoppt, bei zu hohen Temperaturen zersetzt sich der Klebstoff. Die meisten kommerziell erhältlichen strukturellen 2K-EPX- und PUR-Klebstoffe benötigen mindestens 10 bis 20 °C zur Aushärtung, was den Standardbedingungen in Werkstätten und Laboren entspricht, und umgangssprachlich als "kalt" bezeichnet werden. Für ihre 1K-Gegenstücke hingegen müssen die genannten Temperaturen mindestens um 100 °C angehoben werden, unterhalb derer fast keine Reaktion mehr stattfindet.

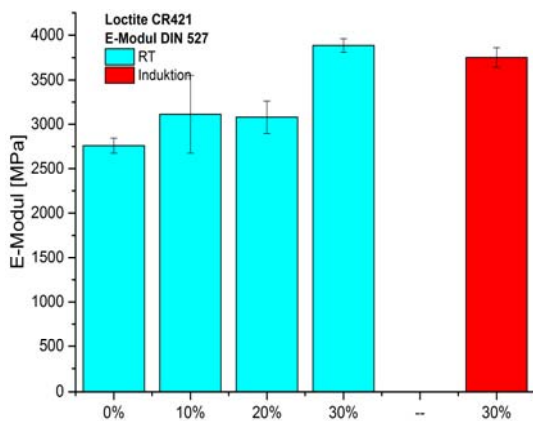


Abbildung 4: E-Modul von CR 421 abhängig von Partikelgehalt im Vergleich zwischen RT ausgehärteten Proben und induktiv erwärmten Proben

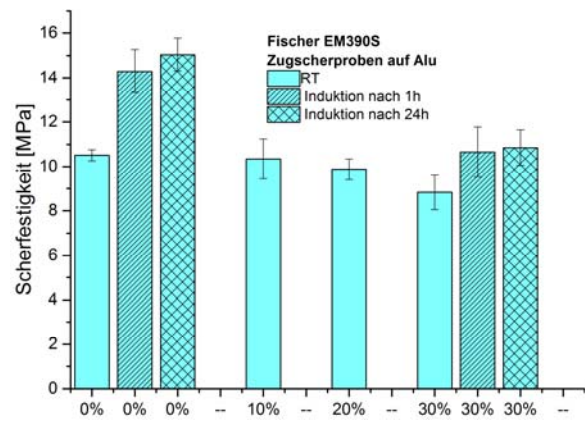


Abbildung 5: Scherfestigkeit von EM 390 S Proben in Zusammenhang zu steigendem Partikelgehalt und Induktion

Klebstoff-Curie-Partikel Mischungen

Im nächsten Schritt wurde der Einfluss der CP auf die ausgewählten Klebstoffe ermittelt (vgl. Abbildung 6). Der Einfluss des CP-Gehaltes auf die Eigenschaften der Klebstoffe waren u. a. Zugfestigkeit, Steifigkeit, Zugscherfestigkeit, Glasübergangstemperatur sowie die prinzipielle Erwärmbarkeit im EM-Feld. Insbesondere kleinmaßstäbliche Verbundproben lieferten wertvolle Erkenntnisse für die nachfolgenden Versuche an den eingeklebten GFK-Stäben sowie den Holz-Glas Klebungen. Daneben erfolgte die Bestimmung der Aushärtekinetik aller

Klebstoffe, inklusive dem Effekt der eingebetteten CP auf diese mit entsprechenden thermoanalytischen Verfahren.

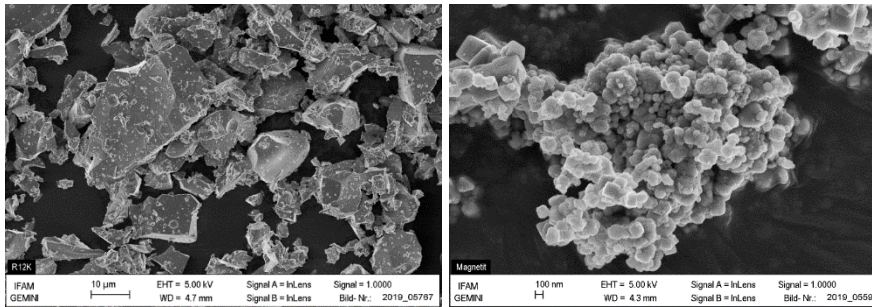


Abbildung 6: REM-Aufnahmen von R12K (links) und Magnetit (rechts)



Abbildung 7: Herstellungsprozess eingeklebter GFK-Stangen in Fichtenholz im großen Probenmaßstab, (1) Probekörper mit angebrachten Thermoelementen, (2) Klebstoff-Partikelgemisch in Einwegkartusche, (3) Applikation Klebstoff-Partikelgemisch über Zuführbohrung, (4) Platzierung eines Probekörpers in der Induktionsspule

In Holz eingeklebte Glasfaserstäbe

Basierend auf den bis zu diesem Zeitpunkt gesammelten Erkenntnisse wurde eine sehr umfangreiche Reihe von Versuchen an Großbauteilen bestehend aus in $120 \times 120 \text{ mm}^2$ Fichtenholzquerschnitten eingeklebte $\text{Ø}16\text{mm}$ GFK Stäben durchgeführt (vgl.

Abbildung 7). In diesen Versuchsreihen wurden sowohl die Klebstoffe, die CP, deren Massenanteile sowie die Aufheizregime variiert. Daneben wurden die beschleunigt ausgehärteten eingeklebten Stäbe an verschiedenen Zeitpunkten nach der EM-Induktion zerstörend geprüft. Zur Abschätzung des Einflusses der Schnellhärtung bzw. der CP auf die Leistungsfähigkeit der untersuchten Probekörper, wurden verschiedene Referenzreihen untersucht, u.a. Aushärtung bei Raumtemperatur (RT) gemäß den Vorgaben der technischen Datenblätter (TDB) ohne und mit Partikeln, sowie vereinzelt auch ofengehärtet (ohne und mit CP). Es konnte gezeigt werden, dass das dem Forschungsvorhaben zugrundeliegende Prinzip der Curie-Partikel umsetzbar ist, denn die Temperaturentwicklung in den unregelmäßig induktiv erwärmten untersuchten Klebstoff-CP Mischungen verhielten sich wie gedacht. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen, dass die EM-Induktion den Aushärteprozess signifikant beschleunigt und die Prozessdauer deutlich verkürzt, ohne die mechanischen Eigenschaften negativ zu beeinflussen.

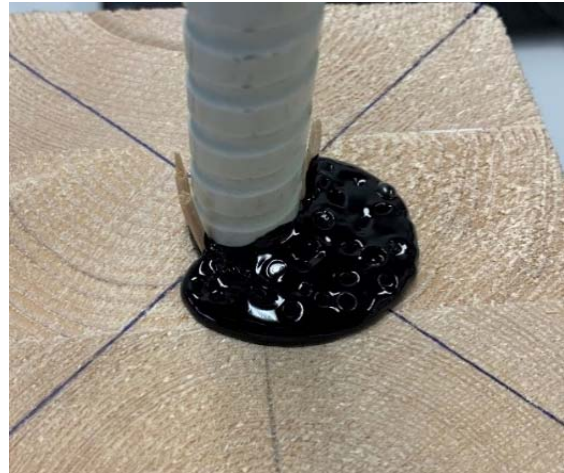
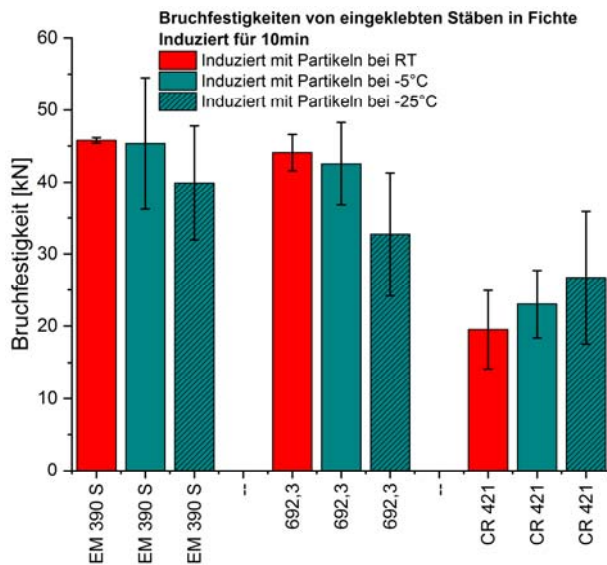


Abbildung 8: Bruchfestigkeit von eingeklebten Stäben; induziert für 10 min bei Niedrigtemperaturen

Abbildung 9: Blasenbildung von CR 421 bei induktiver Schnellhärtung

Holz-Glas-Klebungen

Als nächstes baupraktisches Beispiel wurden geklebte Holz-Glas Klebverbindungen mit dem Ziel einen Lösungsansatz für hybride Tragwerke zu schaffen untersucht. Nachdem geeignete Klebstoffe ausgewählt wurden, erfolgte die Ermittlung geeigneter Partikel. Daraufhin wurde der Einfluss des Partikelgehaltes auf die Festigkeit experimentell bestimmt, um so praxismgerechte Schnellhärtenszenarien zu validieren. Bei diesem Anwendungsfall wurde besonderes Augenmerk auf die Oberflächenanalyse gesetzt, um so den Einfluss der induktiven Erwärmung auf die Bruchflächen zu charakterisieren (Abbildung 10).

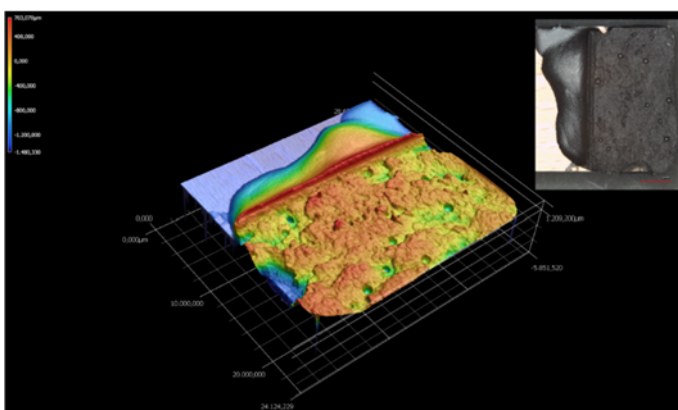


Abbildung 10: Konfokalbild einer Holz-Glas Zugscherproben Jowat 690.00 mit 40% Ferrit—man beachte die deutliche Schädigung der Klebfuge, sowie die deutlichen Luftblasen (sowohl im Bild auch im KF)

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass sich die CP-gestützte Schnellhärtung prinzipiell eignet die recht langsamen Klebstoffsysteme aus dem Bereich des Glasbaus deutlich schneller auszuhärten z. B. um schneller eine ausreichende Anfangsfestigkeit aufzubauen.

Numerische Modellierung

Zum Schluss wurde ein numerisches Modell erarbeitet und umgesetzt, das den Verlauf der CP-gestützten induktiven Aushärtung in geklebten Anschlüssen nachbildet. Dieses multiphysikalische Modell berücksichtigt die intrinsische Wärmeentwicklung in der CP-Klebstoffuge, inkl. dem Einfluss des Curie-Effektes und den Wärmefluss innerhalb des Anschlusses, um fortschreitend die Entwicklung des Aushärtgrades in Raum und Zeit abzuschätzen. Mithilfe dieses, durch experimentell ermittelte Messwerte validierten Modells, können Praktiker in Zukunft speziell auf Ihre Anwendungen zugeschnitten noch effektiver Klebstoffauswahl, Curie-Partikel und Induktionsparameter auslegen (vgl. Abbildung 11 bis Abbildung 14).

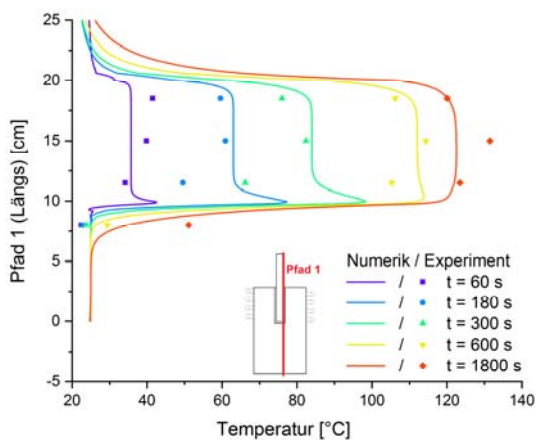


Abbildung 11: Aufwärmphase – Numerisch berechnete und experimentell gemessene Temperaturen entlang Pfad 1

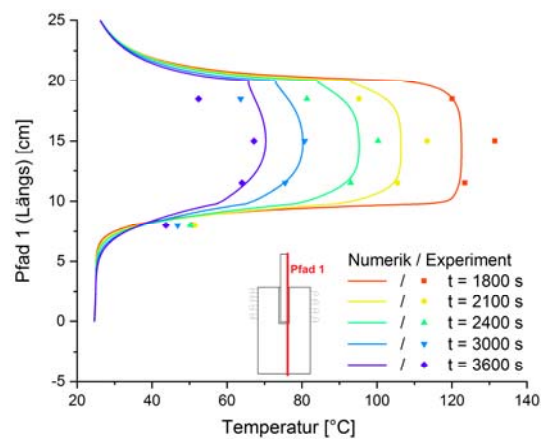


Abbildung 12: Abkühlphase – Numerisch berechnete und experimentell gemessene Temperaturen entlang Pfad 1

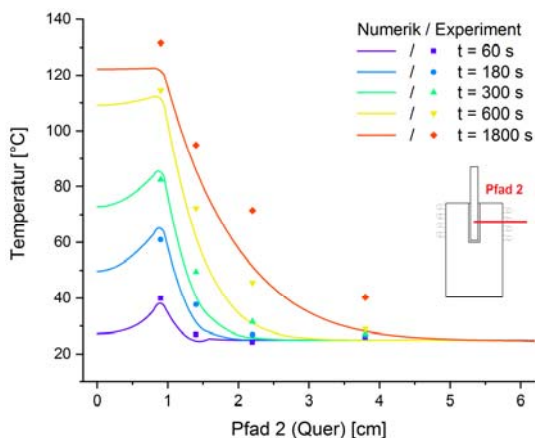


Abbildung 13: Aufwärmphase – Numerisch berechnete und experimentell gemessene Temperaturen entlang Pfad 2

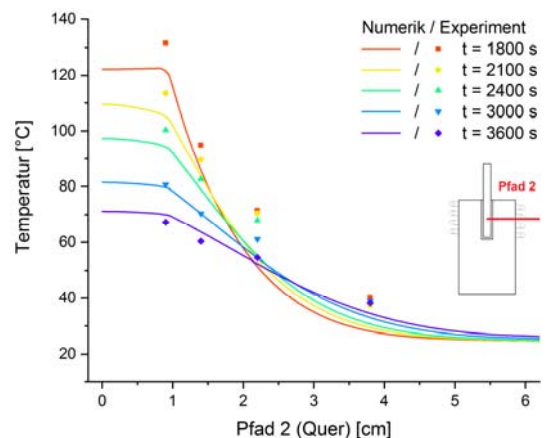


Abbildung 14: Abkühlphase – Numerisch berechnete und experimentell gemessene Temperaturen entlang Pfad 2

Das Forschungsvorhaben 19499 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:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages