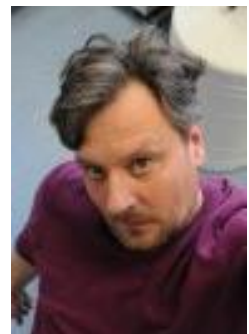


Schnellaushärtung im Holzbau: die 5-Minuten-Verbindung

Fast curing in wood construction:
the 5-minute connection

La prise rapide dans la construction bois :
L'assemblage de 5 minutes

Till Vallée
Adhesive Bonding Technology | Adhesive Bonding in Construction
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte
Materialforschung IFAM | Adhesive Bonding Technology and Surfaces
Bremen, Germany



Schnellaushärtung im Holzbau: Die 5-Minuten-Verbindung

1. Einführung

Geklebte Anschlüsse im Holzbau stellen eine materialgerechte Alternative zu traditionellen Anschlüssen auf der Basis von mechanischen Verbindungsmitteln (Dübel, Nägel, Stifte etc.) dar. Sie sind nicht nur deutlich steifer, sondern in den allermeisten Fällen auch tragfähiger; darüber hinaus erlaubt häufig nur das Kleben die stoffschlüssige Verbindung von verschiedenen Werkstoffen. Im Ingenieurholzbau werden seit vielen Jahren eingeklebte Stahlstangen erfolgreich als Verbindungsmittel für Nadelholzprodukte genutzt. Sie eignen sich zur Kraftübertragung und Verstärkung in Anschlüssen und Stößen und besitzen zahlreiche Vorteile gegenüber mechanischen Verbindungsmitteln.

Innovative Stangen aus Glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) stehen nach Jahren der Entwicklung derzeit u.a. im Massivbau im Fokus des Interesses. Sie bieten als Faserverbundwerkstoffe Anwendungsmöglichkeiten, wo nicht-metallische, dauerhafte und korrosionsbeständige Bewehrungs-anteile gefordert sind. Der Verbindungsansatz eingeklebter Stangen ist für Nadelholz mit Stahlstangen weitgehend erforscht und normativ geregelt; Neuland sind Stangen aus GFK in Laubholz.

Ogleich das Kleben im Holzbau ein sehr großes Potential besitzt, ist der Klebprozess sehr zeitintensiv: die üblicherweise eingesetzten 2-Komponentigen Polyurethan- oder Epoxidharzklebstoffe brauchen unter Produktions- oder Baustellenbedingungen mehrere Stunden oder Tage zum Aushärten. Außerdem sind Mindesttemperaturen einzuhalten, die auf der Baustelle nicht immer vorliegen. Zusätzlich liegt die Glasübergangstemperatur (T_g) durch die Kalthärtung in einem für Bauwerke durchaus kritischen Bereich (40–50 °C), da diese Temperaturen auch ohne Brandeinwirkung durchaus vorkommen.

Eine Möglichkeit den Klebprozess zu beschleunigen und gleichzeitig T_g zu erhöhen, besteht in der Aushärtung des Klebstoffs durch Erwärmung. Während in anderen Industrien (wie z.B. der Automobilindustrie) ganze Bauteile oder Baugruppen erwärmt werden, ist dies i.d.R. im Bauwesen nicht möglich. Deshalb konzentriert sich die aktuelle Forschung auf die gezielte und lokale Erwärmung der Klebfuge.

1.1. Induktive Erwärmung

Neben Ofenhärtung, Wärmeeintrag über IR-Strahlung, Wärmematten o.ä. bietet die induktive Erwärmung eine berührungslose Methode der kontrollierten Erwärmung. Der Wärmeeintrag wird bei elektrisch leitfähigen Materialien über induzierte Wirbelströme oder bei magnetischen Materialien über Hystereseverluste erzielt. Sind die Bauteile selbst nicht per Induktion erwärmbar, so z.B. bei Holz, GFK und Glas, werden Suszeptoren direkt in den Klebstoff eingebracht. Dafür können Metallnetze in die Klebschicht eingelegt, aber auch Partikel direkt untergemischt werden. Letzteres bietet den Vorteil, dass der Prozess der Klebstoffapplikation sich nicht von den herkömmlicheren Klebstoffen unterscheidet und es keine Einschränkungen durch die Klebspaltgeometrie gibt. Da sich ab einer bestimmten Größe der Partikel keine Wirbelströme mehr ausbilden, werden als Suszeptoren typischerweise magnetische Partikel wie Magnetit (Fe_3O_4), Maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) oder MagSilica verwendet. Viele Autoren [1–3] haben die Schwierigkeit hervorgehoben gleichförmige Temperaturen im Klebstoff zu erzielen. Trotz dieser Schwierigkeiten konnte gezeigt werden, dass auch große Bauteile (GFK-Rohrverbindungen, $\varnothing 92\text{mm}$, [3]) beschleunigt ausgehärtet werden konnten. Bei sachgerechter Anwendung sind ofengehärtete und induktive ausgehärtete Klebungen nicht zu unterscheiden [4–5].

Ein konzeptueller Ausweg aus der Problematik der Temperaturkontrolle besteht in der Verwendung von Partikeln aus Curie-Materialien. Diese sind nur unterhalb einer gewissen Temperatur (der Curie-Temperatur T_C) induktiv erwärmbar. Werden dem Klebstoff Curie-Partikel zugesetzt, dann «schalten» diese den induktiv erzeugten Wärmeeintrag oberhalb T_C einfach ab und stellen somit eine sehr effektive, und vor allem robuste Steuerung und Regelung des Induktionsprozesses dar.

Im Rahmen dieses Artikels werden die Ergebnisse von zwei Jahren Forschung auf dem Gebiet der induktiven Aushärtung eingeklebter Stangen in Holz dargestellt. Insbesondere werden Erfolge, Schwierigkeiten, aber auch mögliche Auswege dargestellt.

2. Eingeklebte Gewindestangen in Buche

2.1. Versuche

In einer ersten Versuchsreihe wurden M5–8.8 Gewindestangen 80 mm tief in 30 mm x 30 mm Buchenholz (*Fagus sylvatica*) einklebt. Als Klebstoff wurde ein 1K-Epoxyd gewählt, welcher (laut Datenblatt) bei +180 °C in 10 min., bzw. bei +220 °C in 5 min. vollständig aushärtet; die Scherfestigkeit (auf Aluminium) wird mit knapp 27 MPa angegeben. Die Stange wurde in ein vorgebohrtes (Stangen- \varnothing +1mm), mit Druckluft entstaubtes und anschließend mit Aceton gereinigtes Loch eingelassen.

Die Induktion wurde mit einem spulenförmig (\varnothing 50 mm) um den Holzquerschnitt gewickelten, wassergekühlten Kupferrohr (\varnothing = 5.8 mm, t = 0.9 mm) umgesetzt. Der Wechselstrom wurde über eine STS260 6 kW-Hochfrequenzanlage erzeugt; weitere Parameter (Frequenz von 210 kHz und eine Spannung von 3.4 V) wurden in Vorversuchen ermittelt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Eine ausführlichere Darstellung dieser Versuche ist in [6] dargestellt.

Eine der größten Schwierigkeiten bei der induktiven Erwärmung ist die Kontrolle der Wärmeentwicklung, welche zum einen sehr (sehr) schnell ($> 100\text{K/s}$) erfolgen kann, zum anderen aber auch heterogen über die induzierte Domäne verteilt ist. Die Dauer des Induktionsprozesses sowie der Nachweis, dass die induzierten Temperaturen (annähernd) konstant über die Höhe des Stabes verteilt sind, wurden in Vorversuchen ermittelt, bzw. erbracht. Zu diesem Zweck wurden vier Thermolemente entlang der Stablänge angebracht, um die Temperatur während der Aufheizung experimentell zu ermitteln.

2.2. Ergebnisse

Das Ergebnis der induktiven Erwärmung, dargestellt in Abbildung 1, zeigt neben dem rapiden Anstieg der Temperatur (auf +150 °C in knapp 30 sec., auf +200 °C in 2 min.), dass diese entlang der Stablänge relativ konstant erwärmt wird und u. A. auch, dass es möglich ist, die Erwärmung zu regeln – insgesamt erfolgte die Aushärtung in 5 Minuten. Allerdings machte die Temperaturregelung den Einbau von Thermolementen in die Klebfuge erforderlich – ein für praktische Anwendungen erheblicher Nachteil.

Die gemäß dem oben beschriebenen Protokoll induktiv ausgehärteten Probekörper wurden, nach Abkühlung (30 min.) unmittelbar mechanisch getestet. Zu diesem Zweck wurden sie, wie in Abbildung 2 dargestellt, in einer Universalprüfmaschine bis zum Bruch belastet (wegeregelt 2mm/min).

Das Versagen fand in allen Fällen durch plastische Verformung der Gewindestangen statt, bei Lasten von $10,30 \pm 0,18$ kN; denen auf die über die Stablänge gemittelten Schubspannungen am Holz $5,85 \pm 0,10$ MPa entsprechen, bzw. an der Gewindestange $8,19 \pm 0,14$ MPa – beide deutlich unterhalb der vom Datenblatt ausgewiesenen Schubfestigkeit von knapp 27 MPa.

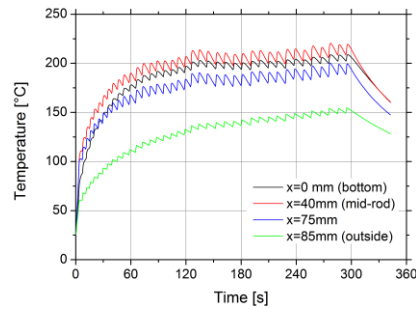
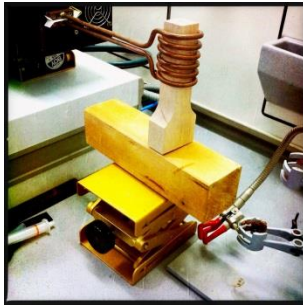


Abbildung 1: (links) Induktive Erhärting von in Buchenholz eingeklebter Gewindestange; (rechts) Entwicklung der Temperatur während der Induktion entlang der Stablänge

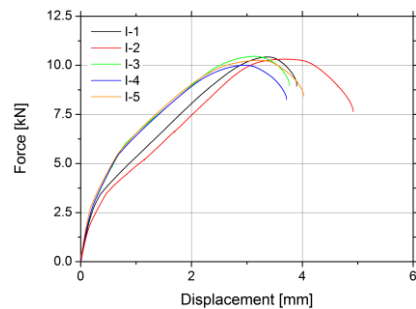
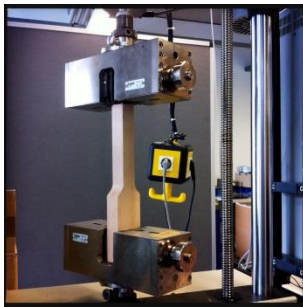


Abbildung 2: Zugversuch an induktiv ausgehärteten Probekörpern; (rechts) Probekörper in der Zugmaschine, (links) gemessene Last-Verformungskurven

3. Mit PASA® eingeklebte GFK-Stäbe in Buche

3.1. Versuche

In einer zweiten Versuchsreihe wurden wiederum in Buche eingeklebte GFK-Stäbe induktiv ausgehärtet. Da es sich bei allen beteiligten Werkstoffen (Holz, GFK und Klebstoff) um Nicht-Metalle handelt, wurden dem Klebstoff Magnetit-Partikel (Fe_3O_4) beigemischt. Eine Besonderheit dieser Testreihe war die Verwendung eines vorapplizierten Klebstoffs, der in zwei Stufen härtet (erst bei ca. 80 °C, dann vollständig bei ca. 140 °C). Dadurch wurde es möglich die GFK-Stäbe mit dem partikelversetzten Klebstoff vorab zu beschichten (Klebschichtdicke 0,9 mm), und danach in das vorgebohrte Loch (Stangen- $\text{Ø}+2\text{mm}$) einzufügen.

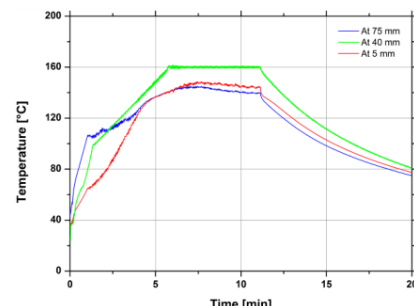
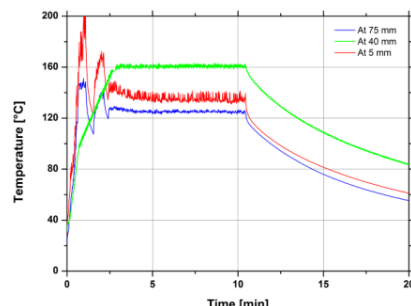
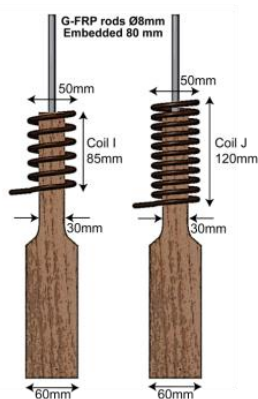


Abbildung 3: Mit PASA® eingeklebte GFK-Stäbe in Buche (links) Geometrie der Probekörper und der Induktoren, (mittig) Temperaturentwicklung entlang des Stabes bei Induktor 1, (rechts) bei Induktor 2

Zur Erwärmung wurden zwei verschiedene Induktionsspulen verwendet (siehe Abbildung 3-links). Wie in der ersten Versuchsreihe wurde die Temperatur über in den Klebstoff eingebettete Thermolemente geregelt. Zum Vergleich wurden identische Probekörper in einem Ofen ausgehärtet (2 Stunden bei 140 °C). Ausführliche Details zu dieser Versuchsreihe sind in [7] zusammengefasst.

3.2. Ergebnisse

Die induktiv erzeugten Temperaturen sind für beide Induktor-Geometrien in Abbildung 3 dargestellt. Erst durch die Verwendung der zweiten Induktionsspule konnten die für eine ausreichende Aushärtung erforderlichen Temperaturen relativ gleichmäßig über die Stablänge erzielt werden. Aber auch hier gelang dies nur durch ständige Regelung des Prozesses. Die eigentliche Aushärtung dauerte dann in etwa 5 Minuten. Die so hergestellten Probekörper wurden (wie zuvor) auf Zug getestet. Dabei ergaben sich bei Verwendung der zweiten Induktionsspule gemittelte Schubfestigkeiten von 9.15 ± 0.85 MPa am GFK-Stab, bzw. 7.32 ± 0.85 MPa an der Holz-Klebstoffuge, was in etwa den Werten der ofengehärteten Probekörper entsprach. Die Werte, die für die suboptimale 1. Induktionsspulen Geometrie erzielt wurden, lagen um ein knappes Drittel darunter.

Das Fazit dieser zweiten Versuchsreihe ist: die Verwendung von vorapplizierten Klebstoffen vereinfacht durch die Trennung der Klebstoffapplikation den Herstellungsprozess signifikant; die induktive Klebstoffaushärtung erfordert unter Umständen die Anpassung des Induktors, und in jedem Fall die Regelung der Leistung durch eingebettete Thermoelemente.

4. Eingeklebte GFK-Stäbe in Buche mit Curie-Partikeln

4.1. Versuche

In der dritten Versuchsreihe ging es darum, einen wesentlichen Nachteil der induktiven Erwärmung zu beseitigen: die aufwendige Regelung der Induktionsleistung während des Prozesses. Zu diesem Zweck wurden anstelle des Magnetits Partikel bestehend aus einem Curie-Material verwendet. Der prinzipiell gleiche Versuchsaufbau, inklusive der Geometrien, wie in den zwei ersten Serien wurde verwendet: in Buche eingeklebte GFK-Stäbe. Diesmal kam ein 1K-Epoxidharz, Delo-Monopox AD066, zum Einsatz.

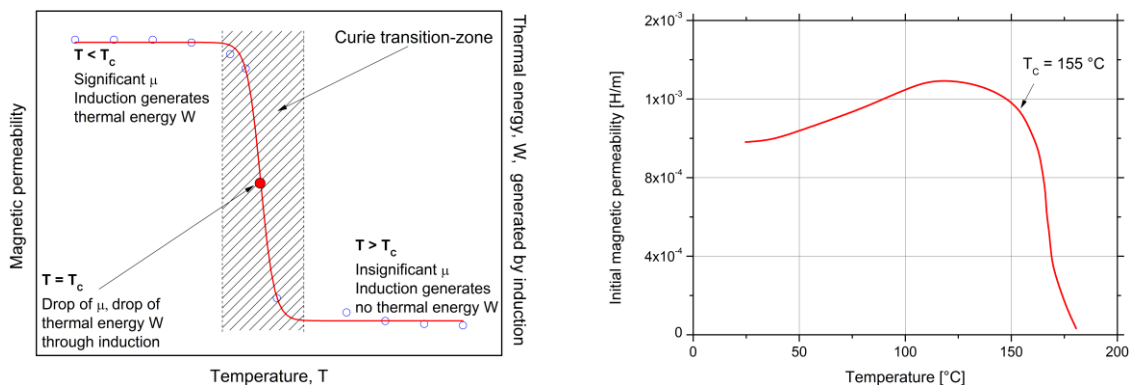


Abbildung 4: Prinzipielle Wirkungsweise der Curie-Partikel (links); Bestimmung der Curie-Temperatur (rechts)

Dem Klebstoff wurden 40m-% Partikel aus Mn-Zn-Ferrit (nachfolgend Curie-Partikel genannt) beigemischt. Die prinzipielle Wirkungsweise der Curie-Partikel ist in Abb. 4–links dargestellt; die Bestimmung der Curie-Temperatur des verwendeten Materials in Abb. 4–rechts. Gemäß dem Datenblatt der Curie-Partikel, bestätigt durch eigene Messungen, lag die Curie-Temperatur bei rund 155 $^\circ C$. Ergänzend zu den Curie-Partikeln wurden in weiteren Reihen kleine Mengen (4%, 8% und 12%) der Curie-Partikel durch Magnetit substituiert.

Um die Aushärtungsdynamik bei der geplanten Temperatur von 155 $^\circ C$, insbesondere die erforderliche Aushärtungszeit abzuschätzen, wurde eine Reihe von Dynamische Differenzkalorimetrie-Versuchen am Klebstoff durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 zusammengefasst, aus denen hervorgeht, dass bereits nach zwei Minuten über 90% des Klebstoffes umgesetzt wurden, bzw. dass dieser dann fast vollständig ausgehärtet ist.

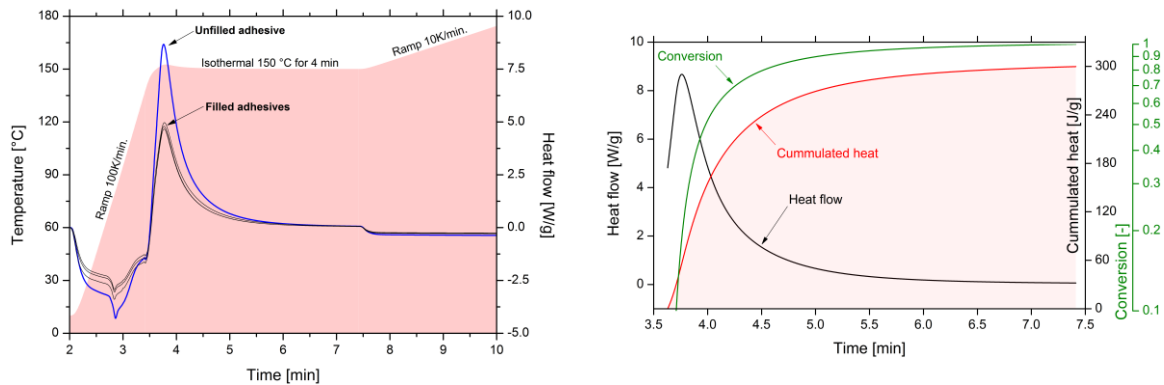


Abbildung 5: Ergebnis der am Klebstoff Delo-Monopox AD066 durchgeführten Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) — Nach weniger als 2 Minuten bei $> 150\text{ °C}$ hat bereits $> 90\%$ des Umsatzes stattgefunden, bzw. der Klebstoff ist fast vollständig ausgehärtet

Die Erwärmung erfolgte induktiv, wobei keine Regelung stattgefunden hat: es wurde in jedem Versuch die volle Induktionsleistung eingestellt. Die in den Klebstoff eingebetteten Thermolemente dienten somit nur zur Messung der Temperaturen, und nicht der Regelung des Prozesses. Alle darüberhinausgehenden Informationen zu den Versuchen finden sich in [8].

4.2. Ergebnisse

Durch die entlang der Stäbe eingebetteten Thermolemente konnte die Temperatur während des Induktionsprozesses gemessen werden. Die Ergebnisse für die vier verschiedenen Partikelmischungen sind in Abbildung 4 dargestellt. Es zeigte sich, dass Curie-Partikel allein nicht ausreichen, um eine schnelle Erwärmung zu gewährleisten; dies gelingt erst durch den Zusatz von Magnetit.

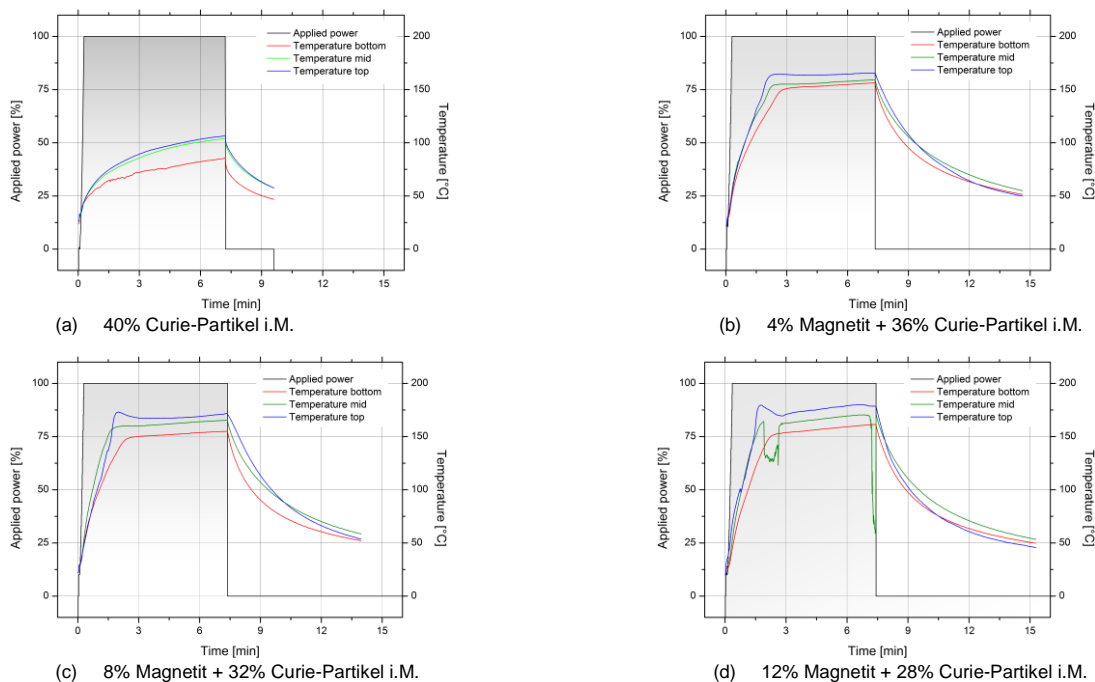


Abbildung 6: Temperaturentwicklung (jeweils rechte Achse) entlang der eingeklebten Stäbe bei Verwendung von Curie-Partikeln—Man beachte, dass stets die volle Induktorleistung aufgebracht (jeweils linke Achse) wurde.

Wird in kleinen Mengen Magnetit beigemischt, erfolgt eine rasche Erwärmung. Die Erwärmung vollzieht sich dabei unter voller und unregelter Leistung des Induktors, bis die Curie-Temperatur der Partikel erreicht wird. Bei Erreichen von T_C stoppt die Erwärmung fast schlagartig, und obwohl die Induktionsanlage immer noch 100% Leistung erbringt, bleibt die Temperatur annähernd konstant über die Dauer des Induktionsprozesses. Des

Weiteren ist klar erkennbar, dass die Temperatur über die gesamte Stablänge konstant verteilt ist, was eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu den zwei ersten Versuchsreihen darstellt.

Nach abkühlen der Probekörper wurden diese, analog zu den anderen Versuchen, zerstörend geprüft. Die Versuche ergaben über die Stablänge und am Holz gemittelte Schubspannungen bei Bruch von 11.80 ± 0.78 MPa; dieser Wert wurde unabhängig von der betrachteten Curie-Partikel/Magnetit Mischung erreicht.

5. Zusammenfassung

Eingeklebte Stangen haben sich im Holzbau als ein sehr leistungsfähiges Verbindungsmittel erwiesen. Allerdings bringt die aktuelle Praxis, mit der Verwendung von kalthärtenden 2K-Klebstoffen, eine Reihe von Nachteilen mit sich. Die Zeit zur vollständigen Aushärtung wird in Stunden, wenn nicht in Tagen gezählt. Außerdem erfordert sie Mindesttemperaturen auf der Baustelle, die nicht immer vorliegen.

Einen Ausweg aus dieser Situation bietet die hier vorgestellte induktive Erwärmung, bei der in mehreren Schritten gezeigt werden konnte, dass sie die Aushärtung in fünf Minuten gewährleisten kann. Durch die Verwendung von speziellen Partikeln, hier auf der Basis von Curie-Material, konnte gezeigt werden, dass die induktive Erwärmung frei von aktiver Regelung zu tragfähigen Anschlüssen in einem reproduzierbaren Prozess durchgeführt werden kann.

Bevor die induktive Erwärmung zum Stand der Technik wird müssen jedoch noch Fragen zum Einfluss der Partikel auf die Festigkeit und Dauerhaftigkeit der entsprechenden Klebverbindungen beantwortet werden, aber auch eine auf die Baupraxis zugeschnittene technische Umsetzung erfolgen. An beiden Fragen arbeitet das Fraunhofer IFAM zurzeit intensiv.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Tay TE, Fink BK, McKnight SH, Yarlagadda S, Gillespie JW. Accelerated Curing of Adhesives in Bonded Joints by Induction Heating. *J Compos Mater* 1999;33:1643–64. doi:10.1177/002199839903301704.
- [2] Maurer A, Lammel C. Rapid bonding of non-metallic materials. *Adhes Adhes* 2014;11:26–9. doi:10.1365/s35784-014-0261-2.
- [3] Wetzel ED, Spurgeon WA, Yungwirth CJ. Induction Bonding for Structural Composite Tubes. *Army Res Lab Aberdeen Proving Gr Md Weapons Mater Res Dir* 2002.
- [4] Suwanwatana W, Yarlagadda S, Gillespie JW. Hysteresis heating based induction bonding of thermoplastic composites. *Compos Sci Technol* 2006;66:1713–23. doi:10.1016/j.compscitech.2005.11.009.
- [5] Mahdi S, Kim H-J, Gama BA, Yarlagadda S, Gillespie JW. A Comparison of Oven-cured and Induction-cured Adhesively Bonded Composite Joints. *J Compos Mater* 2003;37:519–42. doi:10.1177/0021998303037006776.
- [6] Vallée T, Kohl D, Vorholt F, Böhm S. Die Fünf-Minuten-Gewindestange. *adhäsion Kleb Dicht* 2015;59:36–9. doi:10.1007/s35145-015-0534-1.
- [7] Adam M, Lühring A, Popp M, Fecht S, Vallée T. Pre-Applicable Structural Adhesives for Timber Engineering: Glued-in G-FRP Rods. *Int J Adhes Adhes* 2015;67:1–19. doi:10.1016/j.ijadhadh.2015.12.034.
- [8] Vallée, T., Adam, M. Inductively cured glued-in rods in timber using Curie particles (2016) *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 70, pp. 37-45. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2016.05.005.