

Entwicklung von geschweißten Vollholz-Parkettelementen

D. Harms, E. Thoma

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

25/2008

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Entwicklung von geschweißten Vollholz-Parkettelementen

DI Dirk HARMS
Ing. Erwin THOMA
Thoma & Harms Holz GmbH

Goldegg, Juni 2008

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT. Sie wurde im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT sollen durch Forschung und Technologieentwicklung innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential initiiert und realisiert werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in FABRIK DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse – seien es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.FABRIKderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Zusammenfassung

Holzverbindungen können mittels Reibschweißtechnologie sehr effizient hergestellt werden. Der unmittelbare Vorteil dieses innovativen Verfahrens liegt darin, dass vor, während oder nach dem Fügeprozess keine dem Holz fremden Materialien wie beispielsweise Leim beigegeben werden müssen. Es wird eine so genannte „stoffreine Holzverbindung“ geschaffen, die vor allem ökologische Vorteile gegenüber herkömmlichen Holzverbindungstechniken aufweist.

Der Ursprung der Technik des stoffreinen Holzschweißens leitet sich von der Kunststoffreibschweißtechnologie ab, die heutiger industrieller Standard ist. Herkömmliche Kunststoffreibschweißmaschinen sind für die Herstellung von Holzprodukten nach der Holzschweißtechnologie im Allgemeinen nicht geeignet. Die im Kunststoffbereich verschweißten Elemente weisen zumeist eine kleinere Fügefläche auf als dies bei Anwendungen mit Holz der Fall ist.

Die Tendenz zu natürlichen Produkten, welcher unter anderem in den „grüne Linie“-Produkten in beinahe allen Sparten zu finden ist, war auch hier die Hauptmotivation, in weiterer Folge ein Produkt zu entwickeln, welches nach dem Verfahren des stoffreinen Holzschweißens hergestellt wird. Als Produkt wurde ein zweilagiges Parkettelement gewählt, weil der Wohnraum als ein Raum gilt, für welchen Konsumenten besonders sensibel Kaufentscheidungen treffen.

Das Ziel dieses Forschungs- und Entwicklungsprojektes war es ein dem Industriestandard nahes, kontinuierliches Verfahren sowie halbtechnische Anlage zu entwickeln. In Kooperation mit Anlagenbauern (Sondermaschinenbau, Hersteller von Schwingsystemen) konnte eine solche Anlage entwickelt werden, mit welcher wirtschaftlich nach dem Verfahren des stoffreinen Holzschweißens Parkettelemente hergestellt werden können.

Die hergestellten Probekörper, insbesondere die Festigkeiten der hergestellten Schweißverbindung wurden in Anlehnung an die einschlägigen Normen geprüft. Die Holzschweißfuge erfüllt die Anforderungen gemäß Norm.

Diese Entwicklung baut sehr stark auf die Erkenntnisse des Autors während seiner Studienzeit an der ETH Lausanne auf. Für Grundlagenversuche wurden damals Probekörper auf herkömmlichen Kunststoffreibschweißmaschinen (diskontinuierliches Verfahren) hergestellt und untersucht. In dem hier diskutierten Projekt wurden diese Erfahrungen auf die gestellten Herausforderungen umgelegt.

Summary

The appliance of vibration welding technology allows the efficient production of wooden joints. Due to its pure origin fused wooden joints bare a high ecological advantage. No foreign materials are added before, during or after the fusing process.

There is a big demand of today's consumers for natural or "green line" products in almost all business areas. People became very sensitive about chemical-based products in interior areas. For this reason the product of parquet elements was chosen to be a first application for the wood fusing process.

The wood fusing technology is based on polymer welding which is today's industrial standard. As only small areas are welded within polymer technology, vibration welding machines do not meet the requirements of a production of pure wooden products e.g. parquet elements.

The aim of the described research project was the development of a continuous production process and production unit for parquet elements. In contrast to discontinuous process of standard polymer vibration welding machines, the wood fusing process was aimed to be a continuous one (likewise to today's standard wood production).

All steps of development of the discussed research project are based on the experiences of basic research by the author during his studies at EPF Lausanne.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	6
1.1.	Allgemeine Einführung in die Thematik.....	6
1.2.	Beschreibung der Vorarbeiten zu diesem Thema	6
1.3.	Fokus/Schwerpunkte der Arbeit im Rahmen des FdZ-Projektes	7
1.4.	Einpassung in die Programmlinie	7
1.5.	Kurzbeschreibung des Aufbaus (Kapitel) des Endberichts.....	7
2.	Stand der Technik vor Projekt Fabrik der Zukunft	8
2.1.	Technik des Schweißens	8
2.2.	Beschreibung des Verfahrens des stoffreinen Holzschweißens, Patentanmeldung Harms (LIT[10]).....	10
3.	Beschreibung der Projektergebnisse	14
3.1.	Halbtechnische Anlage.....	14
3.2.	Vergleich des kontinuierlichen und diskontinuierlichen Verfahrens.....	16
3.3.	Inbetriebnahme der halbtechnischen Anlage	17
3.4.	Prüfung der Probekörper	19
3.5.	Diskussion der Ergebnisse	20
4.	Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie	21
4.1.	Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale.....	21
4.2.	Literaturverzeichnis.....	22

1. Einleitung

1.1. Allgemeine Einführung in die Thematik



Abbildung 1: Holzschweißfuge, hergestellt nach dem Verfahren des stoffreinen Holzschweißens

Die Verbindungstechnik ist in der Holzwirtschaft von entscheidender Bedeutung für den Einsatz von Holz. Solche Verbindungen werden heute mittels Klebstoffen, Nägeln, Schrauben, Dübeln usw. hergestellt. Neuerdings werden auch Thermoplaste als Schweißverbindungen zwischen Holzfügeteile eingesetzt und durch eine gezielte Energiezufuhr verschmolzen, sodass eine Verbindung zwischen dem Thermoplast und dem porösen Werkstoff Holz entsteht.

All diese Verbindungstechniken haben jedoch den entscheidenden Nachteil, dass unterschiedliche Werkstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften kombiniert werden. Dies hat zur Folge, dass immer der in Bezug auf eine oder mehrere Anforderungen am wenigsten geeignete Werkstoff als das schwächste Glied der Kette der Schwachpunkt für die ganze Verbindung ist. Durch diesen Umstand werden die positiven Eigenschaften der Kombinationspartner nur zu einem geringen Teil oder bis gar nicht genutzt. Darüber hinaus können die negativen Eigenschaften eines Werkstoffes die Verbindung als Ganzes negativ beeinflussen, beispielsweise können Spannungen aufgebaut werden. Ein wesentlicher weiterer Aspekt ist, dass holzfremde Stoffe oder Materialien wie beispielsweise Leime oder Thermoplaste die Umweltverträglichkeit einer Holzplatte als Ganzes deutlich herabsetzen.

Der Grundgedanke des stoffreinen Holzschweißens besteht darin, Verbindungen ohne die Zugabe von fremdartigen Materialien oder chemischen Stoffen zu schaffen. Eine reine Holzverbindung ist beispielsweise einer Holz-Leimverbindung in ökologischer Hinsicht deutlich überlegen.

1.2. Beschreibung der Vorarbeiten zu diesem Thema

Die hier beschriebene Forschungsarbeit schließt an die vom Autor durchgeführte Grundlagenforschung zum Thema Holzschweißen an der ETH Lausanne an. Während der Studienzeit des Autors wurde das Verfahren des Holzschweißens so entscheidend verbessert, dass ein Patent beim österreichischen Patentamt angemeldet wurde.

Unter anderem wurde hierbei der Effekt des Verdichtens der Zellenstruktur des Holzwerkstoffes als ein wichtiger Teil des Verfahrens sowie zerstörungsfreie Qualitätskontrolle mittels CT und Ultraschall entwickelt. Die zerstörungsfreie Qualitätskontrolle war zum einen bei der Entwicklung des Verfahrens wichtig. Bei der Durchführung des Fabrik-der-Zukunft-Projektes wurden diese nicht angewandt, da die zerstörungsfreie Analyse der Fuge mit Laborgeräten personalintensiv und teuer ist. Es bleibt die Frage offen, ob beim späteren Aufbau einer Produktion zur permanenten Kontrolle der Qualität des hergestellten Produktes die Möglichkeiten der zerstörungsfreien Qualitätskontrolle eingesetzt werden soll.

In Bezug auf die hier beschriebene Forschungsarbeit waren die Parameterstudien – insgesamt wurden circa 2500 Probekörper verschweißt – von entscheidender Bedeutung für den Erfolg dieses Forschungsprojektes.

1.3. Fokus/Schwerpunkte der Arbeit im Rahmen des FdZ-Projektes

Der Schwerpunkt dieser Forschungsarbeit und Ziel des FdZ-Projektes war die Entwicklung der halbtechnischen Anlage. Herkömmliche Reibschweißmaschinen, die für das Verschweißen von Kunststoffteilen, nicht aber zur Herstellung von Holzplatten geeignet sind, erlauben das Verschweißen von Werkstücken in einem diskontinuierlichen Prozess. Herstellungsprozesse von plattenförmigen Holzwerkstücken wie eben die Herstellung von Parkettelement laufen in der Regel wegen Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit in kontinuierlichen Prozessen ab.

Weiters war die Entwicklung des kontinuierlichen Schweißprozesses von entscheidender Bedeutung. Wie im Folgenden diskutiert wurden die Verfahrensparameter dadurch grundlegend geändert.

1.4. Einpassung in die Programmlinie

Das hier beschriebene Forschungsprojekt beschäftigt sich mit der Verwertung einer der in Österreich der am weit verbreitetsten, aber nicht zur Gänze des möglichen Potentials ausgenutzten Ressource Holz beziehungsweise dessen Verarbeitung. Die Verarbeitung des Holzwerkstoffes basiert im Gegensatz zu den heute verbreiteten Technologien ohne die Verwendung von Chemie, Erdölprodukten et cetera.

Weiters konnte das Wissen und die Kompetenz über das innovative Verfahren des stoffreinen Holzschweißens in der österreichischen Holzindustrie angesiedelt werden.

1.5. Kurzbeschreibung des Aufbaus (Kapitel) des Endberichts

Dieser Bericht gliedert sich in folgende Teile:

- Beschreibung des Verfahrens des stoffreinen Holzschweißens (Kapitel 2, insbesondere Kapitel 2.2),
- Beschreibung der entwickelten Anlage zur Herstellung von Parkett (Kapitel 3.1),
- Prüfen und Analyse der Probekörper (Kapitel 3.4).

Das Ziel des hier beschriebenen Projektes war die Entwicklung eines Produktionsverfahrens für die Herstellung von Parkettelementen nach der innovativen Technologie des Holzschweißens. Diese Aufgabe beinhaltet die Entwicklung einer geeigneten Anlage sowie die Entwicklung des Produktionsprozesses.

2. Stand der Technik vor Projekt Fabrik der Zukunft

2.1. Technik des Schweißens

Die Verfahren, die zum Fügen zweier Werkstoffe mittels „Schweißen durch Bewegung“ möglich sind, sind das sogenannte Reibschweißen (RS) und Ultraschallschweißen (US).

2.1.1. Ultraschallschweißen

Das Ultraschallverfahren ist für das stoffreine Verschweißen von Holz nach heutigem Wissens- bzw. Entwicklungsstand nicht geeignet. Die mit Hilfe von Ultraschalltechnik erzeugbaren Schwingungen (Schwingweite $\sim 90\mu\text{m}$) sind für das Verschweißen Holzwerkstücken mit einer Dicke größer 1,0mm zu gering. Ebenso ist die benötigte Energie bei dünnen Werkstücken zu hoch.

2.1.2. Reibschweißen

Das RS gliedert sich dabei noch einmal in vier weitere Fügeverfahren auf: das Vibrationschweißen oder Linearschweißen (VIB), das Rotationsschweißen (ROT), das Orbitalschweißen (ORB) und das Zirkularschweißen (ZS). Diese Verfahren kommen aus der Metall- und Kunststofftechnik.

Die folgende Abbildung 2 zeigt eine graphische Darstellung der Verfahren, die zum Schweißen durch Bewegung möglich sind, und vergleicht diese Verfahren in Bezugnahme auf die Form der Relativbewegung zwischen den Werkstücken (dritte Zeile von unten), Relativgeschwindigkeit (zweite Zeile von unten) und Frequenz der Schwingung (letzte Zeile).

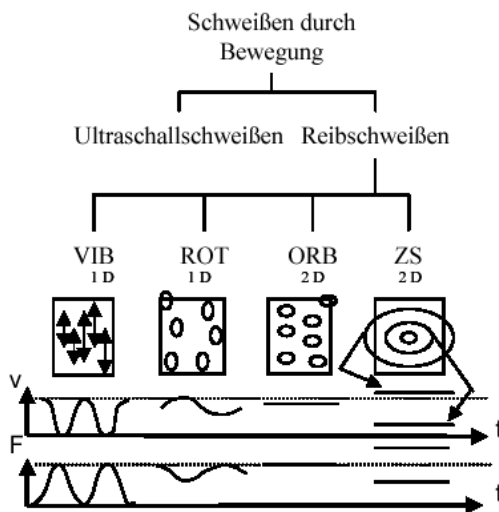


Abbildung 2: Systematik Reibschweißen

Beim Reibschweißen wird unter einer Fügekraft eine Reibbewegung der Fügeteile relativ zueinander ausgeführt. Dabei werden die beiden zu fügenden Teile bis zur Schmelztemperatur erwärmt und unter einer bestimmter Fügekraft zusammengehalten, bis die Teile unter die Schmelztemperatur wieder abgekühlt sind. Die Fügekraft ergibt sich aus dem erforderlichen Fügedruck des Materials und der Fügefläche der Teile. Eine Verbindung, welche nach dem Prinzip des Reibschweißens hergestellt wird, eignet sich für hohe Stückzahlen, da der Schweißvorgang nur wenige Sekunden dauert. Ein weiterer Vorteil ist das selbstständige Entfernen von Verunreinigungen von den Fügeoberflächen, da durch die Plastifizierung des Werkstoffes diese aus der Fügezone herausgedrückt werden, bevor es zur Verbindung kommt.

Die Eignung eines Verfahrens für eine bestimmte Verbindungsaufgabe richtet sich nach den funktionsbedingten Anforderungen an das Bauteil und wird in folgenden Anlagen mit ihren

Techniken durch RS zweier Fügeteile eingesetzt. Die in Abbildung 2 dargestellten Verfahren unterscheiden sich vor allem durch die Form der Relativbewegung zwischen den Fügeteilen.

2.1.2.1. Vibrationsschweißen (VIB)

Das Vibrationsschweißen ist ein junges (10-15 Jahre) und aufgrund seiner kurzen Zykluszeiten ein sehr verbreitetes und in der Serienfertigung häufig anzutreffendes Verfahren.

Beim Vibrationsschweißen wird wie bei den anderen Reibschweißverfahren folgende Phasen durchlaufen:

1. Phase: Erreichen der Solldrehzahl-Temperaturerhöhung durch Kontakt der Fügeflächen
2. Phase: Erreichen der Kristallitschmelztemperatur
3. Phase: stationärer Reibvorgang
4. Phase: Abkühlung

Beim Vibrationsschweißen werden die zu fügenden Teile durch eine oszillierende - translatorische Relativbewegung gegeneinander gerieben. Durch entsprechende Parameterwerte bei Fügedruck, Frequenz, Amplitude und Schweißzeit kommt es zur Erwärmung der Teile, bis eine Plastifizierung des Materials in der Fügeflächen stattfindet. Zusätzliche Werkstoffe sind für diese Verbundtechnik nicht notwendig. Während der Vibrationsphase werden drei zeitliche Stadien, die Feststoffreibung, die instationäre Schmelzebildung und der stationäre Schmelzfluss durchlaufen. Danach setzt die Abkühlungsphase des Schmelzefilms ein. Die heutigen Standardmaschinen zum VIB arbeiten mit elektromagnetischen, hydraulischen sowie mechanischen Antriebssystemen und ihre Maschinenregelung ist herstellerabhängig. Einige arbeiten nur mit Variation der Amplitude bei konstanter Frequenz, andere mit Amplituden- und Frequenzregelung in einem Frequenzbereich von 100-300 Hz.

Die Schweizer Firma DuPONT entwickelte 1971 einen ersten Prototyp einer Vibrationsschweißmaschine. Bei dieser wird die Schwingung durch einen Motor erzeugt, in weiterer Folge die Schwingung über einen Schwinghebel auf die oberhalb- und unterhalb angebrachten Werkzeuge übertragen.

Die amerikanische Firma BRANSON entwickelte ein Konzept der elektromagnetischen Schwingungserzeugung. Die linearen Schwingungen werden dabei über eine seitliche horizontale Auslenkung des Schwingers gegen die Kraft von Federn zwischen Magnetspulen erzeugt. Neben der Firma BRANSON bieten auch die Firmen KLN (www.kln.de) und DUKANE solche Schwingsysteme an.

Das Verfahren des stoffreinen Holzschweißens wurde an den oben beschriebenen Standardanlagen entwickelt. Für die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Anlage wurde ein Vibrationsantrieb der Firma KLN eingesetzt.

2.1.2.2. Zirkular- oder Linearschweißen (ZS)

Das Zirkular- oder Linearschweißen (ZS) gehört zu den meist verbreiteten Verfahren. Aufgrund der kurzen Schweißzeiten findet dieses Verfahren insbesondere in der Automobil- und Zuliefererindustrie, aber auch in der Medizinaltechnik und bei der Haushaltsgeräteindustrie Anwendung. Die zum thermischen Verbund benötigte Schwingbewegung wird durch eine elektromotorisch angetriebene Spindel mit Fliehkraftkupplung erzeugt. Die Schwingweite wird durch einen austauschbaren Stellanschlag bestimmt und ermöglicht, dass die Schweißaufnahmeplatte um das Zentrum der Schweißspindel schwingt. Das System arbeitet im Vergleich zu einem elektromagnetischen und hydraulischen Antrieb, wie es vom Orbitalschweißen oder vom Linearschweißen bekannt ist, ohne ein Federsystem, und so wird gewährleistet, dass ein Nachschwingen der Massen nicht möglich ist. Die Werkzeuggewichte sind frei wählbar und es

wird durch das vorliegende 2-dimensionale System ein großes Arbeits- und Einsatzgebiet gewährleistet. Beim ZS werden die zwei zu fügenden Teil durch die zirkulierende Kinematik relativ zueinander bewegt und unter Druck miteinander verschweißt, wobei der Bewegungsabstand die Schwingweite und der Ausgangspunkt vor und nach dem Schweißprozess die Maschinenmitte ist. Bei entsprechenden Parametern erwärmen sich die Teile in der Fügezone bis zur Plastifizierung der Fügeflächen und kristallisieren wieder unter dem weiter anstehenden Fügedruck zu einer festen Verbindung. Dabei werden in der Schweißfuge die Stadien Feststoffreibung, instationäre und stationäre Schmelzbildung (siehe VIB) durchlaufen.

Dieses Schweißverfahren wurde für die Grundlagenentwicklung an der ETH-Lausanne angewandt. Für das kontinuierliche Verschweißen von Holz ist gemäß Konzept der unten diskutierten Anlage notwendig, dass die Schwingung der nur in eine Richtung erfolgt. Das Zirkularschweißen konnte somit nicht angewandt werden. Wegen der Partnerschaft mit KLN - Hersteller von VIB-Anlagen – wurde das Linearreibschweißen nicht eingesetzt.

2.2. Beschreibung des Verfahrens des stoffreinen Holzschweißens, Patentanmeldung Harms (LIT^[10])

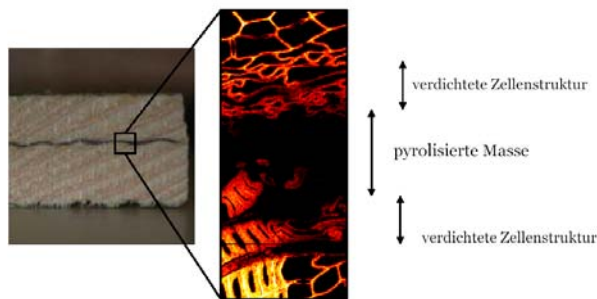


Abbildung 3 Aufbau einer Schweißfuge

Abbildung 3 zeigt eine Fotografie und ein Mikroskopiebild der Schweißfuge. Im Mikroskopiebild sind die Teilbereiche der Holzschweißnaht (verdichtete Zellenstruktur, pyrolisierte Masse) erkennbar.

Die zu verbindenden Holzwerkstücke werden unter Aufbringung eines geringen Druckes relativ zu einander gerieben. Durch die reibende Relativbewegung (Energieeintrag) werden die Holzwerkstücke in der Fuge auf eine Temperatur von über 300°C erwärmt und die Zellenstruktur im Fügebereich mechanisch zerstört. Durch dieses Öffnen der Zellenstruktur und die thermische Erwärmung wird das Lignin („Holzklebstoff“) aus dem Holzwerkstoff gelöst und geschmolzen. Anschließend werden die Holzwerkstücke im Stillstand (kein weiterer Energieeintrag in Form einer Relativbewegung) unter Ausübung eines Verdichtungsdruckes gefügt. Das Verdichten der Zellenstruktur wird durch ein Imprägnieren als auch durch ein Komprimieren der Zellenstruktur im Fugenbereich bewerkstelligt.

Ziel des Fügeprozesses beim Kunststoff- als auch bei Holzschweißen ist die Verfestigung des thermoplastischen Materials in der Fuge durch Abkühlung. Im Unterschied zum Kunststoffschweißen sind für ein kraftschlüssiges Fügen beim Holzschweißen ein Erstarren der Klebmasse sowie eine Verfestigung der Zellenstruktur unabdingbar. Die Klebmasse erhärtet bei einer Temperatur von ca. 200°C, die Verfestigung der Zellenstruktur tritt bei Raumtemperatur, max. 50-70°C ein. Wegen der charakteristischen Eigenschaften von Holz (Wärmespeicherung, Wärmeleitfähigkeit) findet im Vergleich zu Kunststoff nur eine sehr langsame Abkühlung statt. In Bezugnahme auf die einschlägige Literatur wird angenommen, dass durch ein nur kurzzeitiges Aufbringen eines Fügedruckes, keine vollständige plastische Verformung der Zellenstruktur stattfindet. Findet keine vollständige Aushärtung in der Fuge statt, ist das Auftreten von

lokalen Brüchen durch eine Redeformation der Zellen oder durch geringe Belastungen (Temperaturschwankungen, Feuchteänderung) zu beobachten.

Die Patentanmeldung Harms (LIT^[10]) hat das Verdichten zum Inhalt. Die Tatsache, dass Holz ohne die Zugabe von fremden Materialien, sondern durch das Verflüssigen von Holzbestandteilen mittels Reibschweißtechnologie verschweißt werden kann, war durch die Patentanmeldung Sutthoff (LIT^[11], ^[12]) bekannt. Das Verdichten der Zellenstruktur nahe der Schweißnaht als ein Teil des Holzschweißprozesses sowie der Einfluss der Verdichtung auf die Eigenschaften der Fuge war vor der oben genannten Patentanmeldung Harms (LIT^[10]) nicht bekannt.

Das Verdichten der Zellenstruktur ist nach heutigem Wissensstand wichtig für das Verschweißen von Holz. Eine Umgehung des Schutzrechtes ist somit nicht möglich.

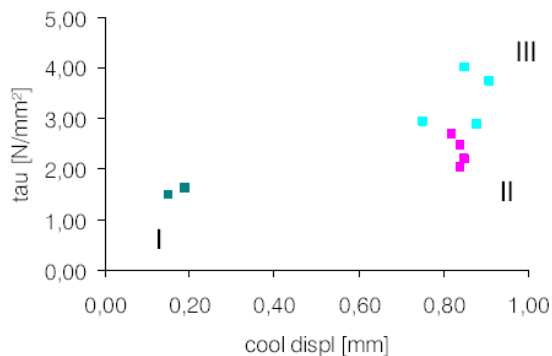


Abbildung 4: Einfluss des Verdichtens auf die Festigkeiten der Schweißfuge

Bei den Versuchen an ETH Lausanne konnte eine Steigerung der Zugscherfestigkeit bei einer Erhöhung des Fügedruckes und der Fügezeit festgestellt werden. Abbildung 4 zeigt den Einfluss der Verdichtung (Maschineneinstellungen I, II, III) auf die Zugscherfestigkeit: von I zu II wurde die Fügezeit von 15,0sec auf 90,0sec, von II auf III der Fügedruck von circa 0,60 N/mm² auf circa 1,50 N/mm² erhöht.

In von der F&E Arbeit unabhängigen Publikationen wurde die oben beschriebene Verdichtung als Neuigkeit sowie die positiven Auswirkungen auf die Eigenschaften der Fuge beschrieben (siehe u.a. LIT^[9]). Damit wurde bestätigt, dass der Inhalt des Patents eine Innovation darstellt und keineswegs dem Stand der Technik entspricht.

2.2.1. Zerstörungsfreie Qualitätskontrolle (NDT):

Die zerstörungsfreie Prüfung der Schweißfuge baut auf die oben beschriebene verfahrensrelevante Verdichtung auf. Die Messungen (Computertomographie, Ultraschall) erfolgen auf Basis des Unterschieds in der spezifischen Dichte, der physikalischen Eigenschaft der verdichteten Zellenstruktur der Klebmasse und etwaiger Diskontinuitäten. Letztere sind Ascheinseln und Anhäufungen von Holzstaub, die während des Energieeintrages entstehen können.

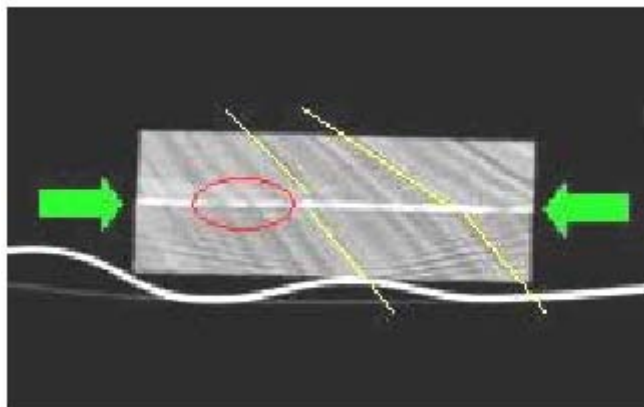


Abbildung 5: virtuelles Schnittbild

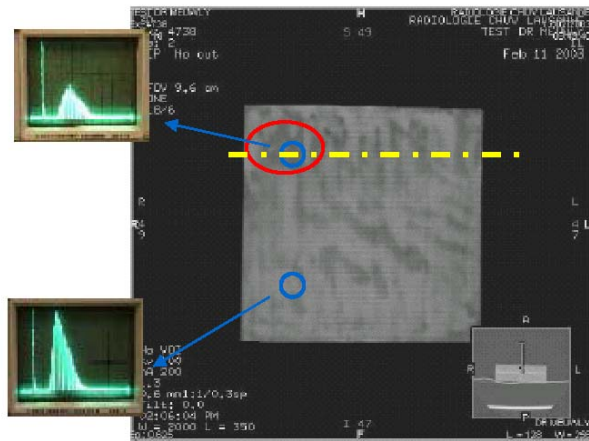


Abbildung 6: virtuelle Fügefläche. Die gelbe strichpunktete Linie gibt die ungefähre Position des virtuellen Schnittes Abbildung 5 an.

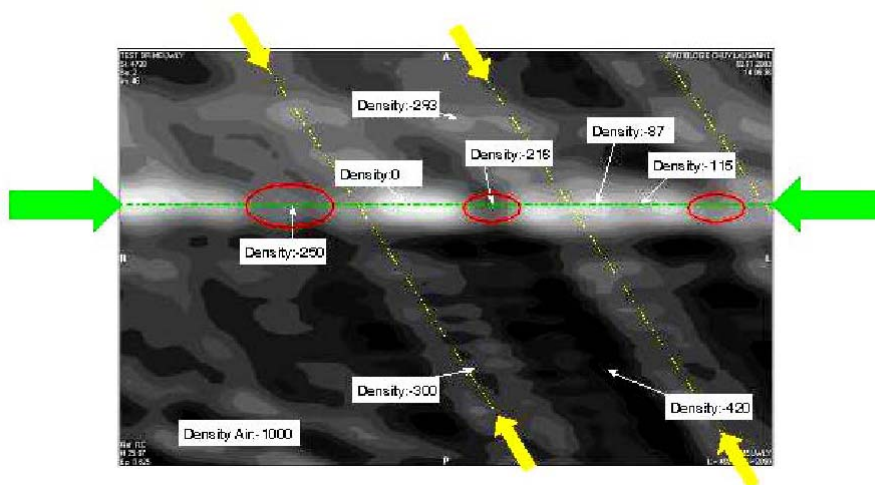


Abbildung 7: Detail aus Abbildung 5 mit Angabe der zur Umgebungsluft (Dichte Luft: -1000) relativen Dichte.

Die Computertomographie dient als visuelle, zerstörungsfreie Qualitätskontrolle. Ein verschweißtes Holzstück wurde virtuell in Scheiben geschnitten. Aus den Schnittbildern wurde ein dreidimensionales Modell und ein Bild der Fügefläche (siehe Abbildung 5) berechnet. Anhand der Helligkeitsunterschiede (hellere Zonen bedeuten eine höhere spezifische Dichte) und der Messung der spezifischen Dichte in Abhängigkeit zur Umgebungsluft mittels Computerprogramm sind Diskontinuitäten (rote Kreise) eindeutig erkennbar.

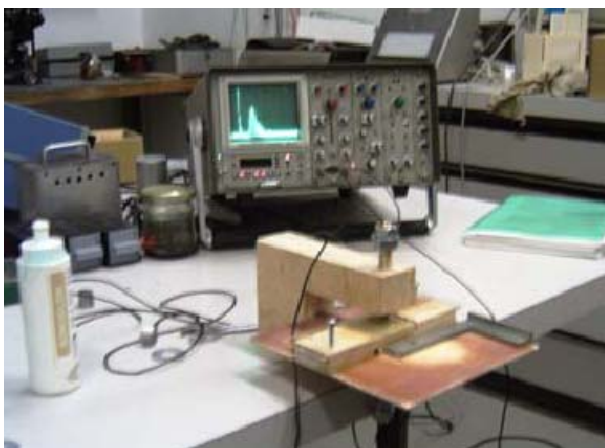


Abbildung 8: Versuchsaufbau NDT Ultraschall

Ein ähnliches Prinzip gilt bei einer Messung mittels Ultraschall (Trough-Transmission-Prinzip). Anhand der unterschiedlichen spezifischen Dichte, der damit verbundenen unterschiedlichen akustischen Schnelle können unterschiedliche Schallpegel (transmittierte Energie) gemessen und somit Rückschlüsse auf das Vorkommen von Diskontinuitäten gezogen werden (siehe Abbildung 6). Die spezifischen Dichteunterschiede im unbehandelten Holz (Früh-, Spätholz) sind im Vergleich dazu sehr gering und beeinflussen die Messung nicht. Die Messwerte wurden mit Hilfe von abschätzenden Berechnungen kontrolliert.

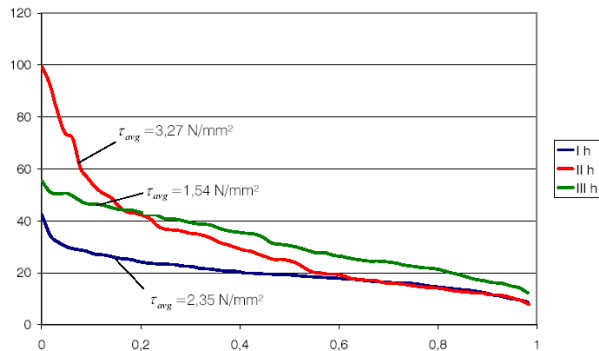


Abbildung 9: Einfluss der Qualität auf die Festigkeit der Schweißfuge

Die Festigkeit der Schweißverbindung (Zugscherversuche) steht im eindeutigen Zusammenhang zu der Häufigkeit der Diskontinuitäten. Die beobachtete Streuung der Festigkeiten kann mit der Häufigkeit der Diskontinuitäten erklärt werden. Der prozentuelle Anteil der Messpunkte (nach der Höhe der transmittierten Energie geordnet) ist auf der Ordinate, die lokale Qualität (transmittierte Schallenergie am Messpunkt) auf der Abszisse aufgetragen. Die Graphen sind die gemittelten Werte von Probekörper, die mit drei unterschiedlichen Maschineneinstellungen hergestellt wurden (siehe Abbildung 9).

2.2.2. Abgrenzung vom Stand der Technik, weiteren Publikationen

2.2.2.1. Patent Sutthoff (LIT^[1], LIT^[2])

Der Prozess des stoffreinen Verschweißens von Holz ist seit der Anmeldung eines Gebrauchsmusters durch Prof. Sutthoff im Jahr 1998 in den Grundzügen bekannt. Es wird in diesem Verfahren das stirnseitige Verschweißen von Holzstücken beschrieben. Das oben diskutierte Verdichten im Fugenbereich ist nicht erwähnt. Das Fügen wird auf die Aufbringung eines Stauchdruckes beschränkt.

2.2.2.2. Forschungstätigkeit der Berner Fachhochschule (LIT^[11]-LIT^[20])

Die Frage nach der Neuerung im Vergleich zu der Forschungstätigkeit der Berner Fachhochschule ist gleich der Frage nach der Abgrenzung der Patentanmeldung von Dirk Harms (LIT^[10]) zum Stand der Technik (siehe 2.2). Das Verdichten der Zellenstruktur wird in den Publikationen nicht erwähnt.

Prof. Sutthoff und die Forschergruppe der Berner Fachhochschule leiten das Verfahren vom Kunststoff- und Metallreischweißen ab, die (vor allem ersteres) heute als industrieller Standard gelten. Eine direkte Übertragung des Reischweißverfahrens von Kunststoff auf Holz – wie verschiedenen Publikationen der Berner Fachhochschule vorgeschlagen – eine Beschränkung auf eine Analyse der chemischen Modifikationen des Holzes während des Schweißverfahrens ist nicht zielführend. Es gilt vielmehr das Verfahren an die charakteristischen Eigenschaften des natürlichen Werkstoffes Holz, an das herzustellende Produkt anzupassen. Die Herausforderung beziehungsweise die im Folgenden beschriebene Innovation im Bereich des stoffreinen Verschweißens von Holz betreffen den speziellen Umgang mit dem natürlichen Werkstoff Holz und in einem außerordentlichen Ausmaß den Maschinenbau.

3. Beschreibung der Projektergebnisse

Im folgenden wird die im Rahmen des Fabrik der Zukunft Projektes geleistete Entwicklungsarbeit, im speziellen die Entwicklung der halbtechnischen Anlage beschrieben.

3.1. Halbtechnische Anlage

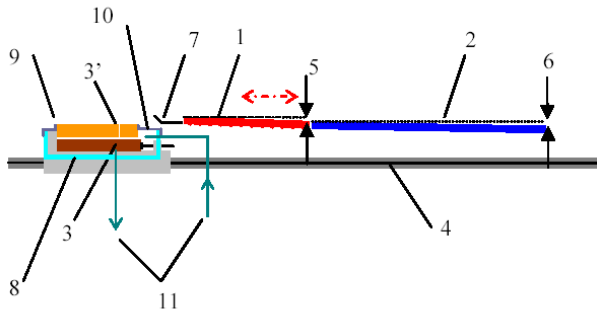


Abbildung 10: schematische Darstellung der halbtechnischen Anlage

- 1 Energieeinheit, Schwingplatte
- 2 Kühleinheit
- 3, 3' Holzstücke
- 4 Transporteinheit
- 5 Reduktion Spalt in Energieeinheit
- 6 Reduktion Spalt in Kühleinheit
- 7 Einlaufeinheit
- 8 Formiergaseinheit
- 9 Werkstückaufnahme



Abbildung 11: halbtechnische Anlage

Die halbtechnische Anlage (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11) dient als Demonstrationsanlage für eine mögliche Herstellung von Parkettelementen. Die Holzstücke (3, 3') werden mittels einer Transporteinheit (8) zur Energieeinheit (1), in weiterer Folge von dieser zur Kühleinheit befördert (2). Die Energieeinheit (1) besteht aus einer schwingenden Fördereinrichtung – hier eine Platte mit schräger Zahnung –, welche in Produktionsrichtung mit einer Frequenz von bis zu 200 Hz und einer Amplitude von 1,0 mm, d.h. mit einer Schwingweite 2,0 mm in Produktionsrichtung schwingt. Durch die Schiefstellung der Schwingplatte beziehungsweise fortschreitende Reduktion des Spaltes um 1,5 mm (5) in Produktionsrichtung ist der notwendige Druck beziehungsweise Flächenschluss während des Energieeintrages gegeben. Die Schrägstellung der Schwingplatte kann nicht geändert werden.

Unmittelbar an die Energieeinheit schließt die Fügeinheit (2), die als Verpress- und Kühleinheit ausgebildet ist, an. Wiederum wird durch die stetige Reduktion des Spaltes (6) der für das Komprimieren der Zellen notwendige Druck bewerkstelligt.

Die halbtechnische Anlage stellt in allen Belangen eine Neuentwicklung im Maschinenbau dar. Es wurden insgesamt zwei halbtechnische Anlagen gebaut. Die erste Anlage wurde im ersten Forschungsjahr gebaut, brach jedoch bei den Versuchen. Die zweite, hier diskutierte Anlage wurde im zweiten Jahr auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse entwickelt und gebaut.

3.2. Vergleich des kontinuierlichen und diskontinuierlichen Verfahrens

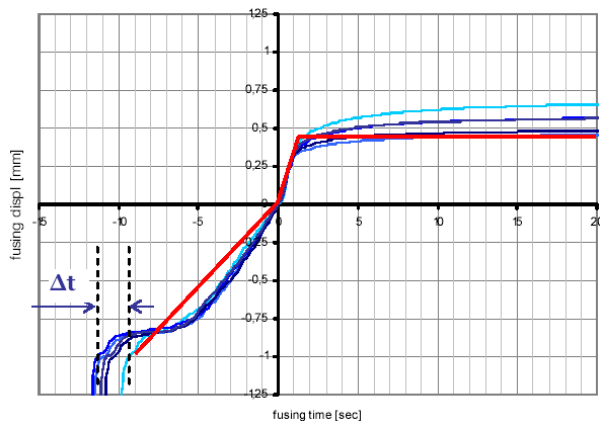


Abbildung 12: Vergleich kontinuierlicher - diskontinuierlicher Fügeprozess

Abbildung 12 vergleicht die Schweißkurve (x-Achse Schweißzeit, y-Achse Schweißweg, Nullpunkt ist der Übergang vom Energieeintrag zum Fügeprozess) des stationären Verfahrens (Standard-Reibschweißanlage, blaue Graphen) mit jener der halbtechnischen Anlage (rote Linie).

Beim stationären Verfahren beeinflussen variierenden Materialeigenschaften des Werkstoffes Holzes in Abhängigkeit der gesetzten Schweißparameter die Schweißzeit oder –weg. Um konstante Festigkeitswerte zu erreichen, ist der Schweißweg, bei einer starken Varianz der Schweißzeit t (hier $\pm 15,0\%$, maximale Dauer des Energieeintrages circa 11,5 sec, minimal circa 9,0 sec) vorzugeben. In Hinblick auf eine spätere Produktion, die vom Streben nach einer konstanten und guten Mengenleistung geprägt ist, ist eine durch die unterschiedlichen Schweißzeiten hervorgerufenen Produktionsschwankung von $\pm 15,0\%$ nur bedingt akzeptierbar.

Das Konzept der Energieeinheit der halbtechnischen Anlage verändert den Prozess des Energieeintrages grundlegend, da Schweißweg und –zeit durch die Reduktion des Spaltes (5) beziehungsweise die Produktionsgeschwindigkeit (Abbildung 12 200,0 cm/min) vorgegeben ist. Der Schweißdruck ist in erster Linie durch die materialtechnischen Eigenschaften des Holzes vorgegeben. Die damit verbundenen Schwankungen sind in Hinblick auf die maschinenbauliche Aufgabenstellung beherrschbar.

Die halbtechnische Anlage (Länge der Energieeinheit beziehungsweise Länge der Fügefläche 300,0 mm) ist für eine Leistung von 3,0 m/min ausgelegt; bei bisherigen Versuchen konnte eine Produktionsgeschwindigkeit von 2,5 m/min erreicht werden. Bei einer stationären Produktion müssen 2,5 m lange Stücke in einem Produktionsgang verschweißt werden, um bei Gesamtprozessdauer von etwa einer Minute (Werkstückaufgabe 2,0 Sekunden⁴, Energieeintrag 4,0 Sekunden, Kühlung 50,0 Sekunden, Werkstückabnahme 2,0 Sekunden) vergleichbare Produktionskapazitäten wie bei der halbtechnischen kontinuierlichen Anlage zu erreichen.

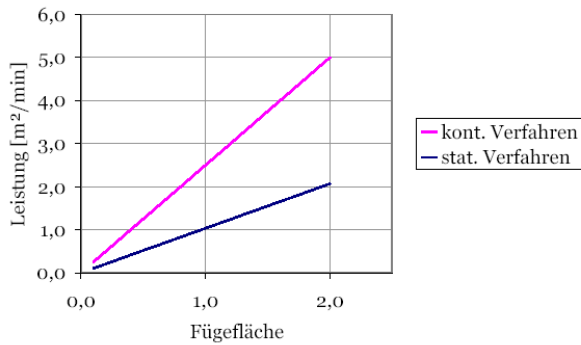


Abbildung 13: Vergleich kontinuierlicher - diskontinuierlicher Fügeprozess

Die Größe der Fügefläche beziehungsweise der Leistung der Schwingeinheit ist der bestimmende Kostenfaktor von Reibschweißmaschinen; im Allgemeinen gilt, dass die Investitionskosten exponentiell mit der benötigten Reibleistung steigen. Durch den obigen Vergleich wird klar, dass die halbtechnische Anlage im derzeitigen Entwicklungsstand eine Standard-Reibschweißmaschine in der Produktionsleistung eindeutig übertrifft. Das Diagramm in Abbildung 13 zeigt einen Vergleich der Produktionsleistung der diskutierten Verfahren in Abhängigkeit der Größe der Fügefläche. Für diese Berechnung wurde die Herstellung eines 20,0 cm breiten Werkstückes (beispielsweise Parkettelement) herangezogen.

3.3. Inbetriebnahme der halbtechnischen Anlage

Die Qualität der Verschweißung wird durch folgende Parameter beeinflusst:

- Vorschubgeschwindigkeit
- Höhenposition der oberen Werkstückaufnahme
- Neigung der Werkstückaufnahme

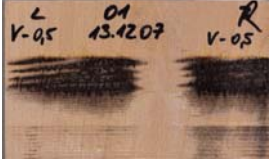
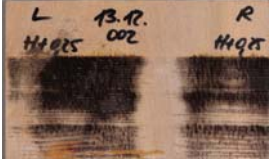


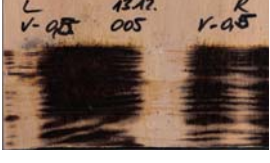


Besonders deutlich ist dieser Einfluss anhand der Probekörper der ersten Inbetriebnahme zu erkennen, wobei hier eine zu schwache Reibschweißanlage verwendet wurde. Die Inbetriebnahme der Anlage stellte sich als äußerst schwierig und langwierig heraus, da erste Erfahrungen zum kontinuierlichen Verschweißen gesammelt werden mussten.

In der unten stehenden Tabelle wird die Schwierigkeit bei der beziehungsweise die Komplexität der schrittweisen Inbetriebnahme dargestellt. Abbildung 1 zeigt eine Fotografie eines verschweißten Holzwerkstückes: die Schweißfuge ist wegen des hohen Ligninanteils bräunlich bis schwarz.

In der unten angeführten Tabelle sind die zum Teil geöffneten Probekörper dargestellt. An den schwarzen bzw. bräunlichen Flächen fand eine Verschweißung statt. An den Stellen, wo unbehandeltes Holz zu sehen ist, konnte keine Verbindung hergestellt werden.

Ziel der Inbetriebsetzung war es vollflächige Verbindungen herzustellen. In Bezugnahme auf die unten angeführten Probekörper bedeutet dies, dass ein komplett schwarzer bzw. bräunlicher Probekörper ein positives Ergebnis darstellt.

Das Problem der Inbetriebsetzung war, dass mehrere Parameter verändert werden mussten, um ein Verschweißen der Probekörper sicher zu stellen. War zumindest ein Parameter falsch gewählt, traten zum Beispiel zu hohe Kräfte auf und die Vibrationseinheit war überlastet. Es wurde dann keine Verschweißung erzielt.

	Probe Nr.	Datum	Fügefläche [mm ²]	Vorschub ¹ [cm/sec]	Veränderung ²			
					Vorne		Hinten	
					L	R	L	R
	001	13.12.07	9600,0	1,25	-0,5	-0,5		
	002	13.12.07	9600,0	1,25			+0,25	+0,25
	003	13.12.07	9600,0	1,25				
	004	13.12.07	9600,0	1,25				
	005	13.12.07	9600,0	1,25	-0,5	-0,5		
	006	13.12.07	9600,0	1,25	-0,25	-0,25		
	007	13.12.07	9600,0	1,25	-0,25	-0,25		

¹ 40Hz=5,0cm/sec

² 1 Umdrehung=



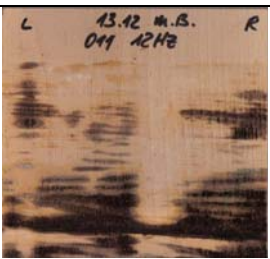
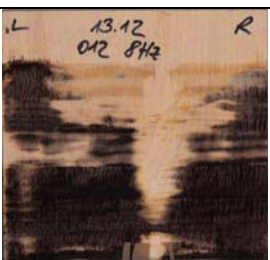
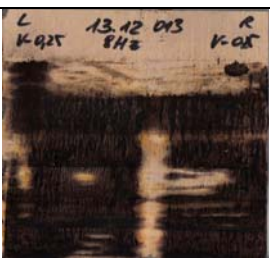
	008	13.12.07	35200,0	1,25				
	009	13.12.07	9600,0	0,875				
	011	13.12.07	19200,0	1,5				
	012	13.12.07	19200,0	1,0				
	013	13.12.07	19200,0	1,0	-0,25	-0,25		

Tabelle 1: Probekörper Inbetriebsetzung

3.4. Prüfung der Probekörper

Die an der halbertechnischen Anlage verschweißten Probekörper wurden mittels Zugscherprüfung getestet. Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an die einschlägigen Normen [3] bis [8]. Die ermittelten Festigkeitswerte lagen bei 4,0 – 5,0 N/mm² bei einem Vorschub von 25,0mm/sec.

3.5. Diskussion der Ergebnisse³

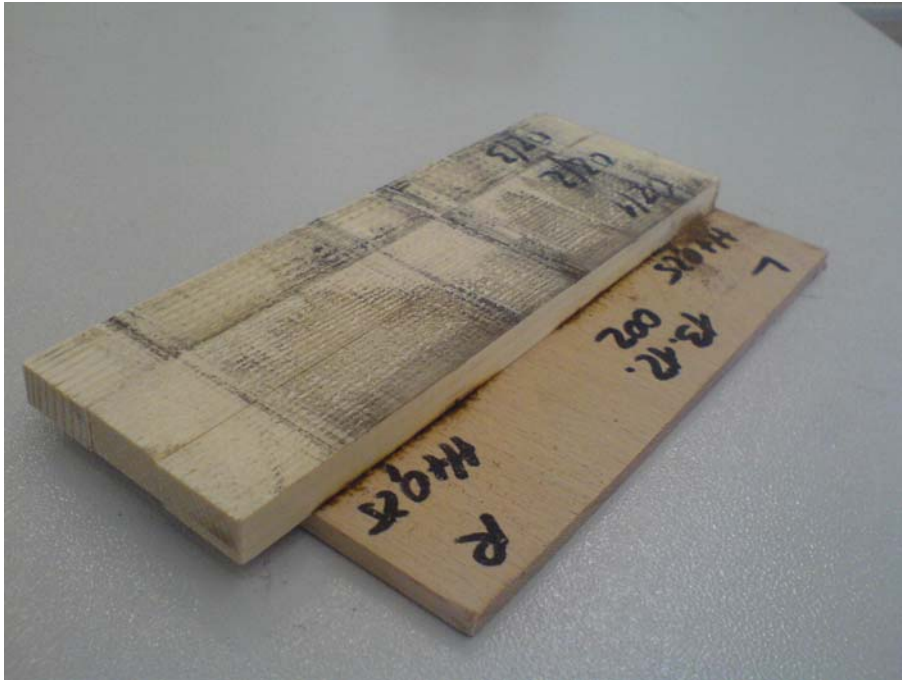


Abbildung 14: Foto eines Probekörpers: Fichtenleisten wurden auf Buchenplatte geschweißt.

Mit der oben diskutierten halbtechnischen Anlage konnten Probekörper verschweißt werden. Die Durchlaufgeschwindigkeit lag bei circa 1,5mm/min. Die Festigkeiten der hergestellten Schweißfugen lagen deutlich über dem in der Norm [9] geforderten Wert von 0,8 N/mm² Zugscherkraft. Es konnten Zugscherfestigkeiten von min. 4,5N/mm² gemessen werden. Die Qualität der kontinuierlich geschweißten Fuge ist wegen der höheren Schweißfrequenz eindeutig besser als jene der Fugen, die bei den Grundlagenversuchen hergestellt wurden.

Die angeführte Durchlaufgeschwindigkeit liegen „auf der sicheren Seite“. Bei einer weiteren Optimierung der Anlage kann diese sicher gesteigert werden.

³ Es werden die Ergebnisse zum Zeitpunkt des Verfassens des Berichtes diskutiert. Die Optimierung der halbtechnischen Anlage sowie des Prozesses dauert an.

4. Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie

1. Prinzip der Dienstleistungs-, Service- und Nutzenorientierung:

Durch das herkömmliche Verkleben von Holzstücken, und die damit bedingte Vermengung des natürlichen Werkstoffes Holz mit dem chemischen Produkt Klebstoff wird der Werkstoff Holz stark in Bezug auf dessen ökologischen, nachhaltigen Effekte beeinträchtigt. Die hier diskutierte Entwicklung erhöht die Wertigkeit des Produktes Parkett.

2. Prinzip der Nutzung erneuerbarer Ressourcen

Klebstoffe sind Erdölprodukte. Die hier diskutierte Entwicklung basiert auf dem Grundgedanken, einen Klebstoff aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz durch den Einsatz von Reibschweißenergie herzustellen, dieses Verfahren für die industrielle Herstellung von Parkettelementen einzusetzen. Mit der erfolgreichen Entwicklung der Anlage wurde gezeigt, dass dieser Grundgedanke prinzipiell umsetzbar ist.

3. Effizienzprinzip

Die Herstellung, Lagerung und die Verwendung von Klebstoffen ist ein enormer Kostenfaktor. Dieser konnte durch das Verschweißen von Holz eliminiert werden.

4. Prinzip der Rezyklierungsfähigkeit

Die Entsorgung von reinem Holz, d.h. auch von stoffreinen Holzschweißprodukten stellt kein Problem dar. Es ist auch ein so genanntes „downscaling“, d.h. eine Verwendung von gebrauchten Parkettelementen als Rohstoff für OSB möglich.

5. Prinzip der Einpassung, Flexibilität, Adaptionsfähigkeit und Lernfähigkeit

In Bezugnahme auf die Nachhaltigkeit von stoffreinen Holzschweißprodukten ist die hier diskutierte Technologie als eine zukünftige Verbindungstechnik von Holz anzusehen.

6. Prinzip der Fehlertoleranz und Risikovorsorge,

7. Sicherung von Arbeit, Lebensqualität

Durch das Wegfallen von chemischen Produkten wie Klebstoffen steigt im Allgemeinen die Lebensqualität des Endverbrauchers.

4.1. Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale

Zum einen treffen die entwickelten Parkettelemente genau die Dynamik der „Grünen Linie“, der Nachfrage nach ökologisch wertvollen Produkten. Aus dieser Sichtweise ist eine wirtschaftliche Verwertung sichergestellt.

Zum anderen ist noch schwer abzuschätzen, wie eine derart innovative Technologie von den Konsumenten akzeptiert werden wird. Erfahrungen haben gezeigt, dass eine Erklärung der Technologie oft Skepsis hervorgerufen hat. Ein Markteintritt kann aus diesem Grund nur auf diese Weise geschehen, dass zu den Handwerkern (Bodenleger etc.) ein enger persönlicher Kontakt aufgebaut wird. Es soll eine möglichst hohe Identifikation aller Beteiligten – dies schließt auch die Kunden ein, die das Produkt weiterempfehlen – hervorgerufen werden.

4.2. Literaturverzeichnis

- [1] SUTHOFF Burkhard: Gebrauchsmuster DE 296 09 056 U 1, Reibschweißartiges Verbinden von Holz
- [2] SUTHOFF Burkhard: Offenlegungsschrift DE 107 46 782 A 1, Verfahren zum reibschweißartigen Verbinden von Holz
- [3] EN 204: Beurteilung von Klebstoffen für nichttragende Bauteile zur Verbindung von Holz und Holzwerkstoffen
- [4] EN 205: Prüfverfahren für Klebstoffe für nichttragende Bauteile. Bestimmung der Klebfestigkeit von Längsklebung im Zugversuch
- [5] EN 314-1: Sperrholz - Qualität der Verklebung. Teil1: Prüfverfahren
- [6] EN 322: Holzwerkstoffe - Bestimmung des Feuchtegehaltes
- [7] EN 323: Holzwerkstoffe - Bestimmung der Rohdichte
- [8] EN 325: Holzwerkstoffe - Bestimmung der Probenabmessungen
- [9] STAMM Bernhard; PhD Thesis at IBOIS/EPFL (in work) 2002
- [10] HARMS Dirk, Verfahren zum stoffreinen Verdichten einer Oberfläche eines Holzwerkstückes sowie Vorrichtung hierzu, WO 2005075165
- [11] GFELLER B. et al., Wood bonding by vibrational welding, J. Adhesion Sci. Technol., Vol. 17, No. 11, pp 1573-1589 (2003)
- [12] GANNE-CHÉDEVILLE Ch. et al., Parameters of wood welding: a study of infra-red thermography, Holzforschung Vol. 60, Issue 4, July 06
- [13] GFELLER B. et al., Solid wood joints by in situ welding of structural wood constituents, Holzforschung Vol. 58, pp. 45-52, January 2004
- [14] GFELLER B. et al., Wood bonding by Mechanically-Induced in Situ Welding of Polymeric Structural Wood Constituents, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 92, pp. 243-251 (2004)

- [15] GFELLER B. et al., Interior wood joints by mechanical fusion welding of wood surfaces, *Forest Products Journal*, Vol. 54, No. 7/8
- [16] PROPERZI Milena et al., Influence of grain direction in vibrational wood welding, *Holzforschung*, Vol. 59, pp. 23-27, 2005
- [17] BOONSTRA M. et al., Virbation welding of heat-treated wood, *J. Adhesion Sci. Technol.*, Vol. 20, No. 4, pp. 359-369 (2006)
- [18] GANNE-CHEDEVILLE Ch. et al., Temperature and density distribution in mechanical vibration wood welding, *Wood. Sci. Technol* (2005)
- [19] WIELAND S. et al., Vibrational welding of wood: X-Ray tomography, additives, radical concentration, *Forest Products Journal*, Vol. 55, No. 1, January 2005
- [20] GANNE-CHEDEVILLE Ch. et al., Parameter interactions in two-block welding and the wood nail concept in wood dowel welding, *J. Adhesion Sci. Technol.*, Vol. 19, No 14-14, pp 1157-1174 (2005)