

# Holzbearbeitung mit Überlagerung einer Ultraschall-Wechselbeanspruchung

H. Mayer, G. Sinn, B. Zettl,  
G. Pfersmann, P. Rosenkranz, P. Beer

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**14/2005**

## **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>  
oder unter:

Projektfabrik Waldhör  
Nedergasse 23, 1190 Wien  
Email: [versand@projektfabrik.at](mailto:versand@projektfabrik.at)

# Holzbearbeitung mit Überlagerung einer Ultraschall-Wechselbeanspruchung

Projektleiter:  
Ao. Univ. Prof. Dr. Herwig Mayer

Projektpartner:  
Dipl. Ing. Gerhard Sinn  
Dipl. Ing. Bernhard Zettl  
Gerd Pfersmann  
Dr. Peter Rosenkranz  
Dr. Piotr Beer

UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR  
INST. FÜR PHYSIK UND MATERIALWISSENSCHAFTEN  
DEPARTMENT FÜR MATERIALWISSENSCHAFTEN UND  
PROZESSTECHNIK

Wien, Februar 2004

**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. Durch die Homepage [www.FABRIKderZukunft.at](http://www.FABRIKderZukunft.at) und die **Schriftenreihe "Nachhaltig Wirtschaften konkret"** soll dies gewährleistet werden.

Dipl. Ing. Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie



# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>3</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG- TEIL A</b> .....	<b>7</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG- TEIL B</b> .....	<b>8</b>
<b>SUMMARY - PART A</b> .....	<b>9</b>
<b>SUMMARY - PART B</b> .....	<b>10</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>11</b>
1.1 <b>Literatur</b> .....	<b>12</b>
<b>2 ARBEITEN ZUR PROJEKTPHASE I: ENTWICKLUNG UND OPTIMIERUNG DER EINRICHTUNG ZUR HOLZBEARBEITUNG MIT ULTRASCHALLÜBERLAGERUNG</b> .....	<b>16</b>
2.1 <b>Entwurf und Bau der elektronischen Regeleinheit und des Ultraschallverstärkers</b> .....	<b>16</b>
2.2 <b>Messaufbau für Bestimmung der Regel- und Messgrößen</b> .....	<b>21</b>
2.3 <b>Softwareentwicklung zur Datenerfassung und Verarbeitung der Messgrößen</b> .....	<b>23</b>
2.4 <b>Optimierung und Dimensionierung der Ultraschallwerkzeuge / Aufbau der mechanischen Versuchsteile</b> .....	<b>25</b>
<b>3 ARBEITEN ZUR PROJEKTPHASE II: VERFAHRESENTWICKLUNG UND -OPTIMIERUNG DER HOLZBEARBEITUNG MIT ULTRASCHALLÜBERLAGERUNG</b> .....	<b>28</b>
3.1 <b>Bestimmung der Trennkräfte</b> .....	<b>28</b>
3.2 <b>Charakterisierung des Bruchbildes der Holztrennflächen und Bestimmung der Oberflächenrauigkeit</b> .....	<b>37</b>
3.3 <b>Bestimmung der Oberflächenenergie</b> .....	<b>41</b>
3.4 <b>Optimierung der Versuchsparameter</b> .....	<b>43</b>
3.5 <b>Bemühungen zur Einbindung von Industriepartnern in das Projekt „Holzbearbeitung mit einer Ultraschall-Wechselbeanspruchung“</b> .....	<b>43</b>
<b>4 ASPEKTE DER NACHHALTIGKEIT</b> .....	<b>44</b>
<b>5 AUSBLICK / EMPFEHLUNGEN</b> .....	<b>46</b>
<b>6 LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>47</b>

<b>7</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>BEILAGE 1: ULTRASONIC-ASSISTED CUTTING OF WOOD .....</b>	<b>53</b>
	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>53</b>
	<b>KEYWORDS .....</b>	<b>53</b>
	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>53</b>
	<b>MATERIALS AND METHODS.....</b>	<b>54</b>
	Wood species.....	54
	Ultrasonic cutting device .....	55
	Cutting experiments.....	56
	<b>RESULTS.....</b>	<b>56</b>
	Influence of Chip Thickness on Normalized Forces in CC and UC .....	57
	Influence of Ultrasonic Vibration Amplitudes on Normalized Cutting Forces.....	58
	<b>DISCUSSION .....</b>	<b>58</b>
	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>61</b>
	<b>ACKNOWLEDGEMENTS.....</b>	<b>61</b>
	<b>REFERENCES .....</b>	<b>61</b>
	<b>TABLES .....</b>	<b>64</b>
	<b>FIGURES .....</b>	<b>66</b>
<b>9</b>	<b>BEILAGE 2: SURFACE PROPERTIES OF WOOD AND MDF .....</b>	<b>73</b>
	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>73</b>
	<b>KEYWORDS .....</b>	<b>73</b>
	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>74</b>
	<b>MATERIALS AND METHODS.....</b>	<b>75</b>
	Materials .....	75
	Ultrasonic-assisted cutting.....	75



<b>Surface Topography Analysis .....</b>	<b>76</b>
<b>Contact angle measurements.....</b>	<b>76</b>
<b>RESULTS.....</b>	<b>77</b>
<b>DISCUSSION .....</b>	<b>78</b>
<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>80</b>
<b>ACKNOWLEDGEMENTS.....</b>	<b>81</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>81</b>
<b>TABLES .....</b>	<b>84</b>
<b>FIGURES .....</b>	<b>86</b>



## Zusammenfassung- Teil A

Produkte aus Holz erfreuen sich stetig steigender Beliebtheit auf einem ökologisch sensibilisierten Markt. Holz ist ein natürlicher Rohstoff und die ökologische Bedeutung des Waldes als natürliche Lunge unbestritten. Eine ökonomische Verwertung von Holz sichert die Existenz forstwirtschaftlicher Betriebe, wirkt der Überalterung des Baumbestandes und dem Verlust seiner Schutzfunktion entgegen und erhält eine lebenswerte, auch für den Tourismus attraktive Umwelt.

Auf dem Weg vom Baum zu einem fertigen Produkt, z.B. einem Möbelstück erfährt das Material Holz verschiedene Bearbeitungsprozesse. Diese Bearbeitungen bestehen zu einem großen Teil aus Zerkleinerungs- oder Trennprozessen (z.B. Sägen, Hobeln, Fräsen, Schleifen) und eventuell nachfolgenden Oberflächenbehandlungen. Oft entstehen durch die Bearbeitung nur mehr thermisch nutzbare Nebenprodukte wie Säge- oder Hobelspäne, aber auch mikroskopische Partikel wie z.B. gesundheitsschädlicher Staub. Es ist daher wünschenswert diese Prozesse dahingehend zu verändern, dass möglichst wenige und große Späne anfallen. Weniger Abfall bedeutet auch eine bessere Verwertung des Rohstoffes und damit eine gesteigerte Wertschöpfung.

Auf einem globalisierten Markt in einem verstärktem Wettbewerb mit Billigproduktionsländern ist es für Österreich wichtig, hochqualitative Holzprodukte bei wenig Abfall zu erzeugen. Innovative Bearbeitungsprozesse im Bereich der Holzbearbeitung sind deshalb ein Beitrag zum aktiven Umwelt- und Naturschutz. Verbesserte Holzbearbeitungsverfahren sichern die Konkurrenzfähigkeit österreichischer Qualitätsprodukte, sie schaffen und sichern Arbeitsplätze und unterstützen dadurch eine nachhaltige Entwicklung.

Im Rahmen des „Fabrik der Zukunft“ - Projektes „Holzbearbeitung mit Überlagerung einer Ultraschall-Wechselbeanspruchung“ wurde am Institut für Physik und Materialwissenschaften, Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik, der Universität für Bodenkultur der Prototyp einer neuartigen Holzbearbeitungsanlage entwickelt. Diese Anlage beruht auf dem Prinzip einer feststehenden Klinge, ähnlich wie sie in einem „Handhobel“ oder dem „Drehmeißel einer Drehbank“ verwendet wird. Das Werkstück wird an der Klinge vorbeigeführt und dadurch bearbeitet. Der wesentliche Unterschied zwischen konventioneller Bearbeitung und jener mit überlagerter Ultraschall-Wechselbeanspruchung besteht darin, dass der feststehenden Klinge zusätzlich eine hochfrequente, harmonische Schwingung in Schnittrichtung (oder in kleinem Winkel dazu geneigt) überlagert wird. Die Werkzeugspitze führt etwa 20 000 Schwingungen pro Sekunde aus, wobei diese Schwingungsfrequenz oberhalb des hörbaren Bereiches liegt, die Schwingung also keinen Lärm verursacht. Die Bewegungsamplitude selbst ist relativ klein und liegt im Bereich von hundertstel Millimetern.

## Zusammenfassung- Teil B

Beim Bau der Anlage wurde großen Wert auf den Aspekt der Energieeffizienz gelegt. Der mechanische Aufbau nützt das Resonanzprinzip aus, d.h. die geeignete Dimensionierung der mechanischen Teile führt dazu, dass sie eine Resonanzschwingung ausführen können. Dadurch kann die notwendige Schwingungsamplitude bei geringer Energiezufuhr aufrecht erhalten werden. Eine hohe Effizienz der elektrischen Ansteuerung wurde durch die Entwicklung einer robusten, getakteten Schaltendstufe erreicht, welche einen Betrieb mit hohem Wirkungsgrad erlaubt. Eine Regelungseinheit ermöglicht eine Nachführung der Schwingungsfrequenz auf die aktuelle Belastung und einen weit gehend automatischen Betrieb der Anlage.

Mit der für das „Fabrik der Zukunft“ - Projekt neu entwickelten Ultraschallschneideanlage wurden verschiedene Holz und Holzwerkstoffe bearbeitet, darunter Fichte, Buche und MDF. Der wesentliche Vorteil der Ultraschall - überlagerten Holzbearbeitung ist dabei die deutliche Verminderung der auftretenden Kräfte. Die zusätzlich auf das Messer aufgeprägte Kinematik führt dazu, dass sich die notwendigen Schnittkräfte im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung auf weniger als die Hälfte reduzieren lassen. So konnten bei hohen Schwingungsamplituden und langsamen Schnittgeschwindigkeiten Schnittkräfte gemessen werden, die bei Buche nur mehr 20 % des Wertes ohne Ultraschallüberlagerung und bei Fichte nur mehr 30 % betragen. Bereits bei technisch relativ einfach realisierbaren Schwingungsamplituden von etwas mehr als 10 Mikrometern reduziert sich die notwendige Schnittkraft auf etwa 50 % des ohne Ultraschall-Vibrationen notwendigen Wertes. Die Verminderung der Schnittkraft ist allerdings wesentlich von der Schnittgeschwindigkeit abhängig. Schneidversuche mit MDF zeigen, dass die Schwingungsamplitude (in Mikrometer) etwa 25 mal die Schnittgeschwindigkeit (in Meter pro Sekunde) sein sollte, damit sich die Schnittkraft etwa halbiert. Bedeutung kommt auch den Hauptschnittrichtungen bei Holz zu. Im Falle von Fichte wurde sowohl bei Längs- und Tangentialschnitten eine Kraftreduktion festgestellt, jedoch war sie im Fall des Längsschnitts ausgeprägter.

Die mittels Ultraschall - überlagerter Bearbeitung gewonnenen Oberflächen sind in weiten Bereichen ähnlich zu jenen nach konventioneller Bearbeitung. So war im Rahmen der statistischen Streuung die Oberflächenrauigkeit nach dem Schneiden mit einem scharfen Messer ähnlich und die Benetzbarkeit vergleichbar. Erst bei hoher Vergrößerung lassen sich kleine Eindrücke und mikroskopische kleine Röllchen auf den mit Ultraschallüberlagerung geschnittenen Oberflächen erkennen. Messungen der Oberflächenenergie zeigen eine Änderung der basischen Komponente woraus sich Einflüsse auf die Oberflächenchemie folgern lassen.

Die Überlagerung von Ultraschallschwingungen auf Werkzeuge ist somit eine viel versprechende neue und technisch machbare Methode zur Holzbearbeitung. Die Anwendung dieses Verfahrens ist energieeffizient und betriebssicher möglich. Sowohl eine Verwendung in ähnlicher Konfiguration wie die Pilotanlage als auch eine Anpassung an eine bestehende Holzbearbeitungsmaschine ist realisierbar. In beiden Fällen kann auf das im vorliegenden Projekt gewonnenen Know-How aufgebaut werden.

## Summary - Part A

Wood products enjoy constantly rising popularity on an ecologically sensitised market. Wood is a natural material and the ecological importance of forests as natural lungs is unquestioned. An economic utilization of wood secures the existence of forest enterprises, counteracts obsolescence and loss of protective function of trees, and conserves an environment worth living and attractive for the tourism.

On the way from the tree to a finished product, e.g. a piece of furniture the material wood experiences different processes. Processing mainly consists of cutting or separation (e.g. sawing, planing, milling, sanding) and possible successive surface treatments. By-products like chips and microscopic particles like health-injuring dust are frequently produced, which can solely be thermally utilized in most cases. Desirably these processes are improved to produce fewer and larger chips. In addition, less waste means a better utilization of the raw material and thus an increased creation of value.

In a global market with intensified competition with cheap production countries, it is important for Austria to produce high-quality wood products with little waste. Innovative wood processing techniques are therefore a contribution for active environment and nature protection. Improved wood processing procedures secure the competitive power of Austrian quality products. They create and secure jobs and support thereby a sustainable development.

In the "Fabrik der Zukunft" - project "Wood processing with superimposed ultrasonic vibrations" the prototype of a new wood processing equipment has been developed at the Institute of physics and material sciences, department of material sciences and process technique at the university of natural resources and applied life sciences in Vienna. This equipment is based on the principle of a fixed blade, similarly to the tool in a hand held planer or a turning lathe. The workpiece passing the blade and is processed. The substantial difference of conventional and ultrasonic processing is the blade, which performs a harmonic oscillation at ultrasonic frequency in (or somewhat inclined to) the cutting direction. The knife performs about 20,000 oscillations per second, which is above the audible range and the vibrations cause no noise therefore. The vibration amplitude is relatively small and lies within the range of several ten micrometers.

## Summary - Part B

The equipment was built considering the aspect of energy efficiency. The mechanical structure is based on resonance principles, i.e. appropriate shape of the mechanical parts allows the generation of resonance vibrations. The necessary vibration amplitudes are obtained with small power input. High efficiency use of electric power was realized using a switching amplifier. A control unit adjusts the oscillating frequency depending on the actual loading conditions and makes semi-automatic operation possible.

The ultrasonic equipment developed within the "Fabrik der Zukunft" - project served to cut different woods and wood composites including spruce, beech and MDF. The substantial advantage of ultrasonic assisted cutting is the pronounced reduction of forces. The additional kinetics of the knife may reduce the necessary cutting forces to less than half compared with conventional cutting. At large vibration amplitudes and slow cutting speeds, the measured cutting forces in beech and spruce were 20 % and 30 %, respectively of the values measured without superimposed ultrasonic vibrations. At vibration amplitudes of somewhat more than 10 micrometers, which may be realized easily, the necessary cutting force decreases to approximately 50 % of the initial value. However, the reduction of cutting forces depends substantially on the cutting velocity. Cutting experiments with MDF show that the vibration amplitude (in micrometers) should be about 25 times the cutting velocity (in meters per second), to approximately halve the cutting force. The cutting direction additionally influences the obtained results. Cutting spruce in longitudinal and in tangential direction, reduced cutting forces were found, however, the effect was larger for longitudinal cutting.

Surfaces produced with ultrasonic assisted cutting are in general similar to the surfaces produced with conventional cutting. Surface roughness and wettability were comparable after cutting with a sharp knife. At large magnifications, however, small impacts of the knife and micro-reels are visible on surfaces produced by ultrasonic cutting. Measurements of the surface free energy show changed base component and surface chemistry affected by ultrasonic cutting may be concluded therefore.

Superimposing ultrasonic vibrations on tools is a promising new and technically feasible method for wood processing. The application of this technique is energy efficient and reliable. Layout similar to the developed equipment may be used or it can be adapted to already existing wood processing equipment. In both cases, knowledge accumulated within this project may be used.

# 1 Einleitung

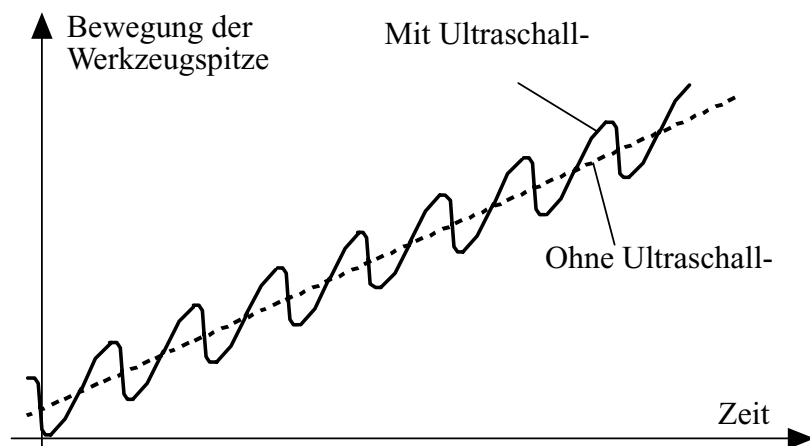
In Rahmen dieses Projekts wurde ein innovatives Holzbearbeitungsverfahren entwickelt, welches zu einer sparsamen Nutzung natürlicher Ressourcen beiträgt. Es werden Ultraschall-Resonanzschwingungen für die Holzbearbeitung eingesetzt werden, um die notwendigen Trennkräfte beim Schneiden und Spalten von Holz und Holzwerkstoffen markant zu reduzieren, definierte Trennflächen zu erhalten und die Trennenergie zu minimieren. Das zu bearbeitende Holzstück erfährt eine kombinierte statische und dynamische Belastung. Verminderte Kräfte führen zu kleineren Deformationen der Holzoberfläche, wodurch in einem technischen Prozess eine entscheidende Verbesserung der Oberflächenqualität der entstehenden Holzprodukte auch bei dünnen Schnitten möglich ist. Weitere damit verbundene Vorteile sind die Reduktion der Abfälle (Holz), die Verminderung der Abnutzung der Maschine / der Werkzeuge und folglich die Erhöhung der Maschinenlebensdauer.

Die Idee der Überlagerung von Ultraschallschwingungen ist am Institut für Physik und Materialwissenschaften seit vielen Jahren bei verschiedenen wissenschaftlichen Untersuchungen verwendet worden. Das Projekt gliedert sich in 2 Phasen. In Projektphase I wurde die Entwicklung und Optimierung der Einrichtung zur Holzbearbeitung mit Ultraschallüberlagerung durchgeführt. In Projektphase II erfolgte eine Anwendung derselben zur Optimierung der Holzbearbeitung mit Ultraschallüberlagerung sowie eine Grundlagenforschung über die Verformungsmechanismen. Parallel dazu wurde laufend sowohl der mechanische als auch der elektronische Aufbau optimiert und den Notwendigkeiten angepasst.

Der Einsatz des in diesem Projekt gewonnenen Wissens über eine optimale Möglichkeit der Holzbearbeitung kann der österreichischen Holz bearbeitenden und Werkzeug herstellenden Industrie zugute kommen. Dadurch wird die Zusammenarbeit und Kooperation zwischen universitärer Forschung und Industrie verstärkt. Die Ultraschallüberlagerung bei der Holzbearbeitung eröffnet eine neue Anwendungsmöglichkeit dieses Verfahrens und kann Österreich eine führende Rolle auf diesem Gebiet sichern. Das Verfahren stellt eine nachhaltige, innovative Technologie dar, bei der ein nachwachsender Rohstoff bearbeitet wird.

## 1.1 Literatur

Trennverfahren unterstützt durch Überlagerung von leistungsstarken Ultraschallschwingungen stellen eine der ältesten Anwendungen der Ultraschalltechnik dar. Dabei wird ein Werkzeug in Schwingung bei Ultraschallfrequenz versetzt und diese Schwingung der eigentlichen Trennbewegung überlagert. Abb. 1.1.1 zeigt im Prinzip die Bewegung der Werkzeugspitze als Funktion der Zeit. Die Gesamtbewegung setzt sich aus einer linearen Bewegung (dem Vorschub) und der harmonisch überlagerten Ultraschallschwingung zusammen.



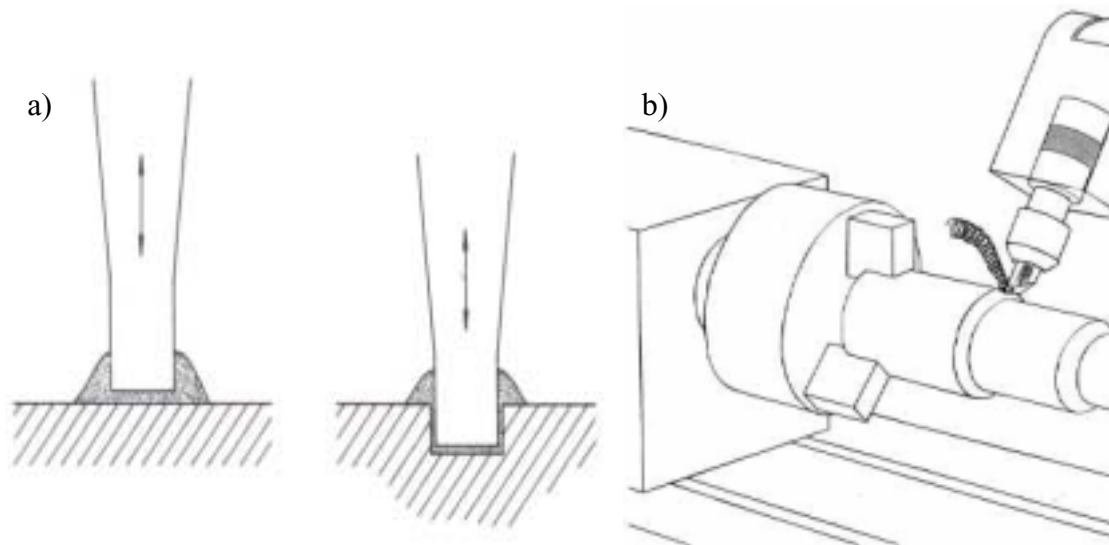
**Abb. 1.1.1: Bewegung der Werkzeugspitze mit und ohne Ultraschallüberlagerung**

Typische Kennwerte für Ultraschallschwingungen sind: Frequenzen um 20 kHz, Schwingungsamplituden bis etwa 50  $\mu\text{m}$ , Geschwindigkeitsamplituden bis etwa 6,3 m/s.

Hauptsächlich sind zwei Trennverfahren unter Überlagerung von Ultraschallschwingungen in Verwendung:

1. Zwischen der Werkzeugspitze und der Oberfläche des Werkstücks befindet sich eine Schleifsuspension. Die Schleifmittelkörner werden durch die Vibration des Werkzeugs in schnelle Bewegungen versetzt und tragen so das Material unter dem Werkzeug ab (Abb. 1.1.2a). Diese Methode eignet sich gut für die Bearbeitung von harten und spröden Materialien wie etwa Glas, Keramik oder Edelsteine, da ein Absplittern des Materials während der Bearbeitung weit gehend vermieden wird [1-3].
2. Die Werkzeugspitze befindet sich in (zumindest zeitweiligem) Kontakt mit der Oberfläche des Werkstücks, und es wird auf den Einsatz eines Schleifmittels verzichtet. Die Ultraschallvibration des Werkzeugs dient vor allem der Reduktion der aufzubringenden Schnittkräfte (Abb. 1.1.2b).





**Abb. 1.1.2: Zwei grundlegende Ultraschall-Trennverfahren: a) mit und b) ohne Schleifsuspension**

Eine mögliche Erklärung für den Einfluss des Ultraschalls auf die Materialbearbeitung ist die Schädigung und Trennung des Materials durch die periodische Krafeinwirkung. Anstelle einer statischen Kraft, die zur Durchführung desselben Trennprozesses ohne Ultraschall notwendig wäre, tritt eine rasche Abfolge von Mikrokollisionen verursacht durch die Ultraschallüberlagerung. Wird das Werkzeug an das zu bearbeitende Material gedrückt, so hebt sich aufgrund der Ultraschallvibration die Spitze des Werkzeugs periodisch vom Werkstück ab, um folgend mit einer Frequenz von 20 kHz gegen das Werkstück zu schlagen. Der Impuls- und Energieübertrag führt dazu, dass mit dem vibrierenden Werkzeug unter wesentlich geringerem Kraftaufwand gearbeitet werden kann [4].

Eine andere mögliche Erklärung für die Reduktion der Schnittkraft basiert darauf, dass Schnittkräfte zu einem wesentlichen Teil auf Reibungskräfte zwischen Werkzeug und Werkstück zurückzuführen sind. Das durch die Ultraschallvibration bedingte Abheben des Werkzeugs während des Schnitts führt zu einem verringerten Kontakt mit dem zu schneidenden Material und die verminderte Reibung zu einer Verringerung der notwendigen Schnittkräfte [5, 6].

Der hauptsächliche Effekt der Ultraschallschwingung ist in jedem Fall eine Verminderung der Trennkraft, die zum Abtragen, Spalten oder Schneiden des Materials notwendig ist. Diese Verminderung kann mehrere positive Auswirkungen haben, wie beispielsweise eine höhere Oberflächengüte des bearbeiteten Werkstückes und eine Verminderung des Werkzeugverschleißes [4].

Schneiden mit Ultraschallüberlagerung wird technisch u.a. in der Lebensmittelindustrie eingesetzt, wobei die hohe Beschleunigung der Schneide (mehrere  $100.000 \text{ ms}^{-2}$ ) ein Anhaften des Lebensmittels an der Schneide verhindert. Die Verminderung der Schnittkraft reduziert die Verformung beim Schnitt. Verminderungen in der Schneidkraft liegen im Bereich zwischen 20 und 90 % [7]. In der Textilindustrie werden Ultraschallschwingungen zum Schneiden von Textilien verwendet. Die einzelnen Teile werden von einem Messer durchtrennt und gleichzeitig an den Trennflächen erwärmt. Ultraschallschneiden führt bei Naturfasern zu einem fusselfreien Trennen und bei Mischgeweben und rein synthetischen Geweben zum Verschmelzen der Schnittkanten, welche dabei abgeschlossen und versiegelt werden. Schließlich findet die Methode Anwendung in der Zahnmedizin als präzisere Alternative zum landläufig bekannten Bohren [8, 9].

Die Methode der Ultraschallüberlagerung bei der Holzbearbeitung wurde in der Vergangenheit nur vereinzelt untersucht. In der Literatur existiert nur eine Studie über das Schneiden von Buche und Zypresse mit Ultraschallüberlagerung [10]. Eine systematische Erforschung des Einflusses der Ultraschallüberlagerung auf Trennkraft und Oberflächenqualität ist nicht zu finden.

Für konventionelle Holzbearbeitungsmethoden sind hingegen eine Vielzahl von Studien über die Reduktion der Trennkraft und die Optimierung der Oberflächen- und Bearbeitungsqualität vorhanden. Einflussgrößen beim Schneiden und Spalten, welche die notwendige Trennkraft [11] und die Oberflächenqualität [12, 13] mitbestimmen, sind in der Literatur dokumentiert. Diese Einflussfaktoren sind Verformungsgeschwindigkeit, Form und Material der Schneide und des Messers [14] sowie Schneidrichtung relativ zur Faserrichtung des Holzstückes. Andererseits spielt Holzart, Mikrostruktur [15], Feuchtigkeitsgehalt [16], Bruchenergie [17], Oberflächenbeschaffenheit, Oberflächenenergie [18, 19] und Oberflächenrauigkeit eine wichtige Rolle [20].

Publikationen über Ultraschallbearbeitung beschäftigen sich einerseits mit der abrasiven Ultraschallzerspannung unter Zuhilfenahme einer Schleifsuspension [2, 3, 21], andererseits mit der Schnittkraftverringerung bei herkömmlicher Bearbeitung. So wurde die Schnittkraftreduktion durch Ultraschallvibrationen bereits anhand der Bearbeitung von Metallen [22-24], Keramiken oder Gläsern [25-27] und optischen Kunststoffen [28] erforscht. Die positiven Resultate legen die Vermutung nahe, dass weitere industrielle Anwendungen dieser Methode bald realisiert werden können.

## **Möglichkeiten für die Holzbearbeitung**

Für die ultraschallüberlagerte Holzbearbeitung ist ein wesentlicher Effekt die Verminderung der Schnittkraft. Dadurch lassen sich günstige Auswirkungen erwarten, wie beispielsweise:

- Qualitativ hochwertigere Schnittflächen (beispielsweise Vermeidung von Kantenausbrüchen und glattere Oberflächen, möglicherweise Vermeidung einer Nachbearbeitung)
- Verminderung von Werkzeugverschleiß und Holzabfall
- Definierte Schnittführung, insbesondere bei dünnen Schnitten
- In bestimmten Fällen ersetzen von Fräsen durch lineares Schneiden
- Verbesserung der Bearbeitungsmöglichkeit von Holz zur Verbesserung seiner Stellung im Vergleich mit anderen Werkstoffen

Randbedingungen für die Entwicklung einer ökonomisch und ökologisch interessanten Anlage sind:

- Hohe Energieeffizienz
- Definierte und kontrollierte Bewegungen des Werkzeuges zum Erhalt reproduzierbarer Bearbeitungsergebnisse
- Niedrige Herstellungs- und Betriebskosten
- Hohe Robustheit, sowohl des mechanischen als auch des elektrischen Systems
- Einfache Bedienung

Die Arbeiten des Projektes zielen unter anderem darauf ab, den nachhaltigen Werkstoff Holz energieeffizient und ökonomisch rentabel zu bearbeiten und die günstigen Auswirkungen der Ultraschallüberlagerung in einem technischen Prozess zu nützen. Die Beachtung der Randbedingungen ist notwendig, damit die Bearbeitungsmethode in der industriellen Anwendung konkurrenzfähig ist.

## **2 Arbeiten zur Projektphase I: Entwicklung und Optimierung der Einrichtung zur Holzbearbeitung mit Ultraschallüberlagerung**

### **2.1 Entwurf und Bau der elektronischen Regeleinheit und des Ultraschallverstärkers**

Eine wichtige Erkenntnis der ersten Versuche war, dass ein elektrischer Aufbau analog zu dem in Materialprüfanlagen verwendeten zu erheblichen Schwierigkeiten und Problemen führt. Die wesentlichen Probleme im elektrischen und elektronischen Bereich sind:

- ⚡ Mit den für die Materialprüfung verwendeten Ultraschallverstärkern ist die Forderung einer energieeffizienten Bearbeitungsmethode nicht im gewünschten Maße zu erfüllen. Insbesondere ist der Wirkungsgrad dieser Verstärker stark vom mechanischen Belastungszustand abhängig. Auch diverse Änderungen an diesen Verstärkern brachten keine wesentliche Verbesserung. Es muss ein Verstärkerkonzept mit hohem Wirkungsgrad für variierende Belastungen entwickelt werden.
- ⚡ Die Anlagen für die Materialprüfung sind komplex, in der Herstellung teuer und es müssen umfangreiche Schutzmaßnahmen vorgesehen werden. Für den beabsichtigten Verwendungszweck sollte die Anlage wesentlich einfacher, automatisiert und betriebssicher ausgelegt werden. Andererseits sollen verschiedene Messwerte, die für die Materialprüfung unerheblich sind (beispielsweise die aufgewendete Wirkleistung) einer Messung zugänglich gemacht werden.
- ⚡ Die exakte Bestimmung der Ultraschall-Schwingungsamplitude erfordert die Messung der Bewegungsamplitude mit einer entsprechenden Sonde. Das Anbringen einer Sonde nahe der Schneide ist bei der Materialbearbeitung störend und soll entfallen.
- ⚡ Das Signal der Sonde wird in Materialprüfanlagen für die Regelung der Schwingungsamplitude und der Resonanzfrequenz verwendet. Die Steuerung von Ultraschallamplitude und Ultraschallfrequenz soll durch ein stabiles, von einer Bewegungsmessung mit einer Messsonde unabhängiges System ersetzt werden.

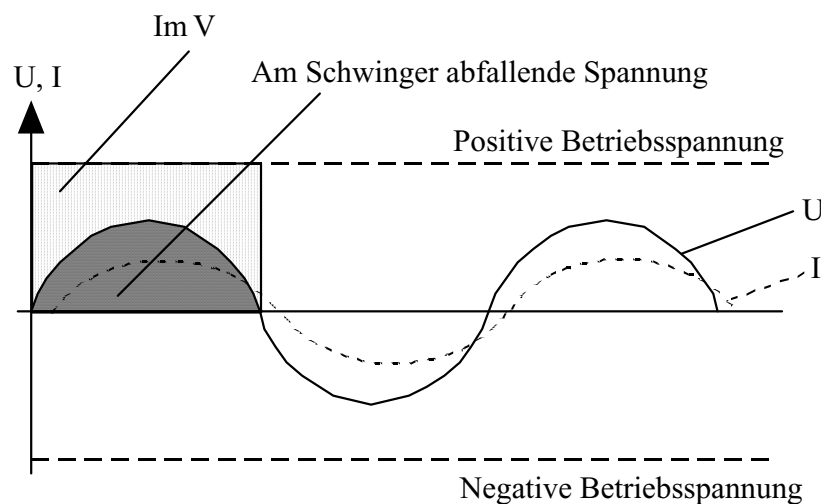
Nachfolgend sind die Probleme mit dem ursprünglich verwendeten Aufbau, der Hintergrund zu deren Lösung und die Wirkungsweise der neu entwickelten elektronischen und elektrischen Komponenten beschrieben.

## Ultraschallverstärker

### Sinusverstärker

Für die Materialprüfung mit Ultraschall wird ein Leistungsverstärker analog einem Audio-Verstärker (Sinusverstärker) verwendet. Das ist notwendig, um die für diesen Verwendungszweck notwendige hohe Präzision bei kleinem Klirrfaktor zu garantieren. Was die Leistungsabgabe des Verstärkers betrifft, funktionieren diese, kurz und vereinfachend zusammengefasst, folgendermaßen:

Die Verstärker haben eine interne Betriebsspannung (z.B.  $\pm 65$  Volt). Eine geeignete Regelung erzeugt ein sinusförmiges Signal in richtiger Phasenlage und richtiger Frequenz, um damit den Ultraschallkonverter in Resonanz anzuspiesen. Proportional zum Eingangssignal gibt der Verstärker ein niederohmiges Sinussignal ab, das maximal einen Spitzenwert von etwa  $\pm 65$  Volt (bzw. eine Effektivspannung von ca. 46 Volt) erreichen kann. Das Ausgangssignal wird erzeugt, indem jeweils die verbleibende Spannung zur Betriebsspannung im Verstärker abfällt - siehe Abb. 2.1.1.



**Abb. 2.1.1: Prinzip von Spannung und Strom bei einem Sinusverstärker: Die im Verstärker abfallende Spannung ist gleich der Ausgangsspannung minus der Betriebsspannung. Die im Verstärker in Wärme umgewandelte elektrische Leistung ergibt sich aus der abfallenden Spannung und dem fließenden Strom.**

Ist beispielsweise der Widerstand des Ultraschallkonverters 13 Ohm, dann fließt bei einer maximalen Effektivspannung von 46 Volt ein Strom von effektiv 3,5 Ampere und es wird eine Leistung von ca. 160 Watt übertragen - das ist etwa die Leistung eines Ultraschallverstärkers für die Materialprüfung. (Es ist vereinfachend angenommen, dass die Impedanz eine rein ohmsche Last ist.) Ist die Impedanz des Ultraschallkonverters höher, wie beispielsweise 50 Ohm, dann wird bei effektiv 46 Volt nur 42 W übertragen. Um die Nennleistung des Verstärkers von 160 W zu erreichen, muss die Ausgangsspannung des Verstärkers auf 89 Volt effektiv transformiert werden. Man nennt die richtige Wahl der Ausgangsspannung Leistungsanpassung.

Die Anpassung der Ausgangsspannung an die Impedanz des Ultraschallkonverters erfolgt über einen Transformator - bei Ultraschallfrequenz ist das ein Ferrit-Transformator. In Abb. 2.1.1 ist die an die Primärseite des Anpassungstransformators abgegebene Spannung, die im Verstärker abfallende Spannung und der im Verstärker (und auf der Primärseite des Transformators) fließende Strom gezeigt. Bei günstiger Anpassung an die Impedanz des Ultraschallkonverters ist die übertragene Leistung (welche sich aus Strom, Spannung und der Phase zwischen Strom und Spannung ergibt) etwa 50 % der aufzuwendenden Leistung. Die restliche Leistung wird im Verstärker in Wärme umgewandelt.

Ein Wirkungsgrad von 50 % wäre akzeptabel, wird allerdings nur dann erreicht, wenn die Leistungsanpassung optimal ist. Eine Schwierigkeit ist allerdings, dass sich die Impedanz des Systems sehr stark ändern kann. So wurden für die Impedanz je nach Messer im freischwingenden Zustand Werte zwischen 15 und 120 Ohm und unter Belastung Werte zwischen 30 und 300 Ohm gemessen.

Eine Leistungsanpassung an unterschiedliche Impedanzen kann durch einen Transformator mit mehreren Anzapfungen prinzipiell bewerkstelligt werden. Allerdings ergibt sich durch die Variation der Impedanz ohne und mit Belastung ein weiteres Problem: Wird die Leistungsanpassung für den frei schwingenden Zustand (wenn das System niederohmig ist) vorgenommen, dann ist ein Ultraschallverstärker mit hoher Nennleistung notwendig, um die erforderliche Spannung während des Bearbeitungsvorganges (wenn das System hochohmig ist) bereitzustellen.

Wird die Leistungsanpassung für den belasteten Zustand ausgelegt, die Spannung also entsprechend hoch transformiert, dann ergeben sich Probleme, sobald das Werkzeug den Kontakt zur Holzoberfläche verliert. In diesem Fall wird das System niederohmig und die

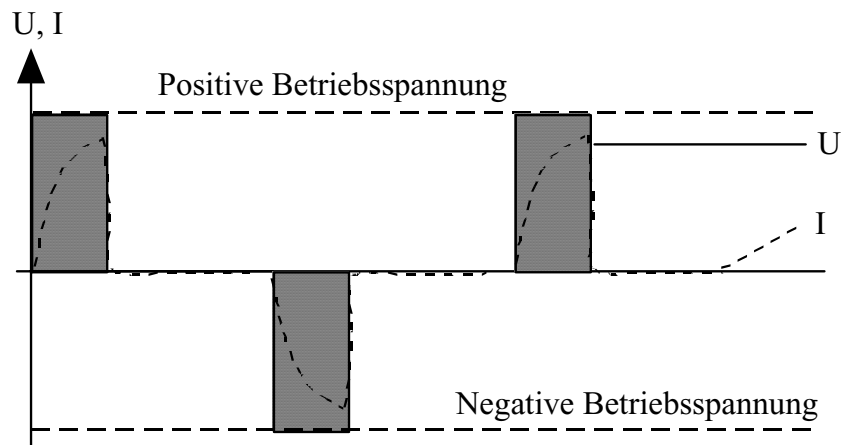
Spannung muss sehr schnell reduziert werden, damit die hohen Ströme (und die daher im Verstärker anfallende hohe thermische Belastung) den Verstärker und den Ultraschallkonverter nicht überlasten.

Diese Probleme lassen sich durch Kontrollschaltungen prinzipiell beheben. So wäre es beispielsweise möglich, die Betriebsspannung der aktuellen Impedanz nachzuführen. Allerdings ist in jedem Fall mit recht komplexen Adaptionen und einem letztendlich komplexen und teuren Aufbau zu rechnen. Außerdem ist der maximale Wirkungsgrad mit ca. 50 % begrenzt, wobei dieser Wirkungsgrad nur bei sehr günstigen, wenig veränderlichen Impedanzen erreicht wird. Ein niedriger Wirkungsgrad widerspricht der in den Randbedingungen geforderten Energieeffizienz. Aufgrund dieser Überlegungen wurde letztendlich dieses Verstärkerkonzept verworfen.

#### Getaktete Schaltendstufe

Ein Verstärkerprinzip, das prinzipiell einen sehr hohen Wirkungsgrad hat, ist eine getaktete Schaltendstufe. Im Rahmen des Projektes wurde ein derartiger Verstärker entwickelt und es zeigt sich, dass er für die Anwendung zur ultraschallüberlagerten Holzbearbeitung gut geeignet ist. Der Verstärker entspricht dem Prinzip der Energieeffizienz, da der Wirkungsgrad 90 % (oder mehr) beträgt. Er ist bezogen auf die Ausgangsleistung klein, leicht, preisgünstig und kann auf einfache Weise Kurzschluss- und Überlast-geschützt werden.

Das Prinzip der Spannungen und Ströme einer getakteten Schaltendstufe ist in Abb. 2.1.2. gezeigt. Im Gegensatz zum Sinusverstärker wird dabei nicht ein vorgegebenes Signal verstärkt, sondern die Primärseite des Anpassungstransformators direkt mit der Betriebsspannung des Verstärkers angesteuert. Dadurch fällt im Verstärker keine nennenswerte Spannung ab. Der Strom auf der Primärseite des Anpassungstransformators (und im Verstärker) ist ebenfalls in Abb. 2.1.2 gezeigt. Es fließt nur während des Taktes Strom, sodass in den Pausen zwischen den Takten keine Leistung verbraucht wird. Sekundärseitig - also im Ultraschallkonverter - kann während dieser Zeit Strom fließen, sodass das System nicht gedämpft wird.



**Abb. 2.1.2: Prinzip von Spannung und Strom bei einer getakteten Schaltendstufe: Die ausgegebene Spannung ist gleich der Betriebsspannung, sodass im Verstärker (fast) keine Spannung abfällt und dementsprechend (fast) keine Wärme anfällt. Die Leistungssteuerung erfolgt über die Pulsbreite. Zwischen den Pulsen ist der Verstärker offen, sodass im Verstärker kein Strom fließen kann.**

Anfänglich bestanden aufgrund des bei rechteckigen Signalen sehr hohen Anteils an Oberwellen Befürchtungen. Allerdings werden diese Oberwellen - wegen der hohen mechanischen Güte des Systems - fast vollständig gedämpft. Auch erwiesen sich die verwendeten Ultraschallkonverter als standfest gegenüber dieser harten Form der Ansteuerung. Allerdings resultierte aus der Verwendung einer neuen Art von Verstärkern die Notwendigkeit zur vollständigen Neukonstruktion der Resonanzregelung.

Bei der Konstruktion der Verstärker wurde ein weiteres technisch und ökonomisch sehr interessantes Detail berücksichtigt, nämlich der Verzicht auf einen Netztransformator. Es wird die Stromversorgung direkt dem Netz entnommen, d.h.: nach einem HF-Filter (Entstörung) werden die 230 VAC gleichgerichtet und geglättet, wodurch man 320V erhält. Durch in Serie geschaltete Elektrolytkondensatoren wird ein "schwebender Mittelpunkt" erzeugt, sodass sich im Leerlauf ca.  $\pm 160V$  zur Versorgung der eigentlichen Schaltstufe ergeben. Die Entkopplung der Ausgangsspannung von der Netzspannung erfolgt über den Ferrit-Transformator, welcher (bei 20 kHz) etwa 1/5 der Größe und des Gewichtes eines Netztransformators (bei 50 Hz) hat und in jedem Fall für die Leistungsanpassung notwendig wäre und daher vorhanden ist.

Als messtechnisches Problem bei der Verwendung des Schaltverstärkers erwiesen sich allerdings die in den Aufbau eingebrachten Störungen, da diese zu zusätzlichem Rauschen



und Störsignalen beispielsweise in den Messaufnehmern führten. In einem verbesserten Aufbau des Verstärkers wurden diese Probleme durch zwei Erweiterungen deutlich vermindert: Einerseits wurde in den Ausgang eine Induktivität geschaltet, welche keine elektrische Leistung verbraucht, allerdings die Spannung wesentlich glättet. Andererseits wurde eine Wahl der Spannung (niedrig oder hoch) durch Anzapfungen am Ferrit-Transformator vorgesehen, sodass sich auch bei niedrigen Leistungen relativ breite Pulse realisieren lassen. Derart konnten insbesondere die Probleme, welche bei kurzen Pulsbreiten auftraten im wesentlichen behoben werden, wobei der prinzipielle Vorteil der hohen Energieeffizienz des Schaltverstärker unberührt bleibt.

## 2.2 Messaufbau für Bestimmung der Regel- und Messgrößen

Um das System möglichst robust zu gestalten, wurde auf eine Rückkoppelung der Zielgröße, d.h. der Schwingungsamplitude am Messer verzichtet. Stattdessen erfolgt die Regelung über eine Strom- und Spannungsrückkopplung des Konverters, während über die Pulsbreite die Leistungsaufnahme bei Resonanz und damit die Amplitude gesteuert wird.

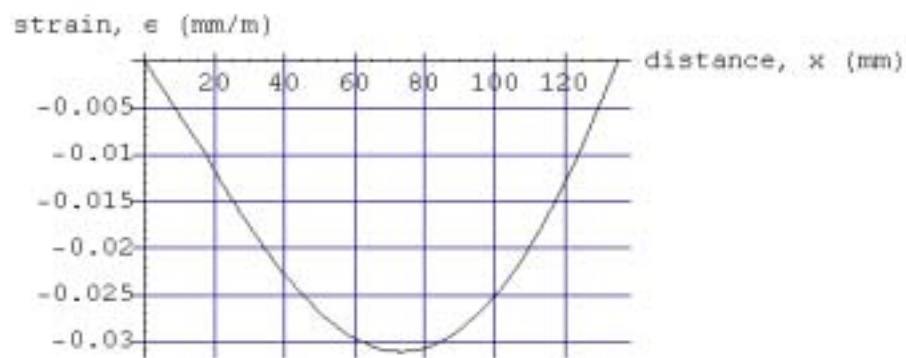
Zur Messung der Schwingungsamplitude am Messer wurde ein Dehnungsmessstreifen DMS an einem Schwingungsknoten am Messerhalter befestigt und die zeitunabhängige Bewegungsamplitude mit Hilfe von Formel 1 entlang des Messerhalters berechnet (Bewegungsamplitude  $u(x)$  entlang der Länge  $x$ , variabler Querschnitt  $A(x)$ , Schwingungskreisfrequenz  $\omega$ , Schallgeschwindigkeit  $c$  des schwingenden Materials).

$$\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d \ln A(x)}{dx} \frac{du}{dx} + \frac{\omega^2}{c^2} u = 0$$

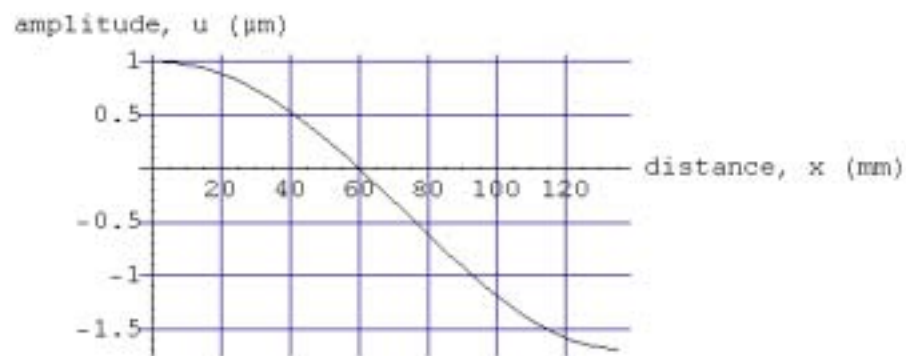
**Formel 1: Differentialgleichung der Schwingungsamplitude  $u(x)$  als Funktion der Länge  $x$  einer zeitlich harmonischen Schwingung [29]**



a)



b)



c)

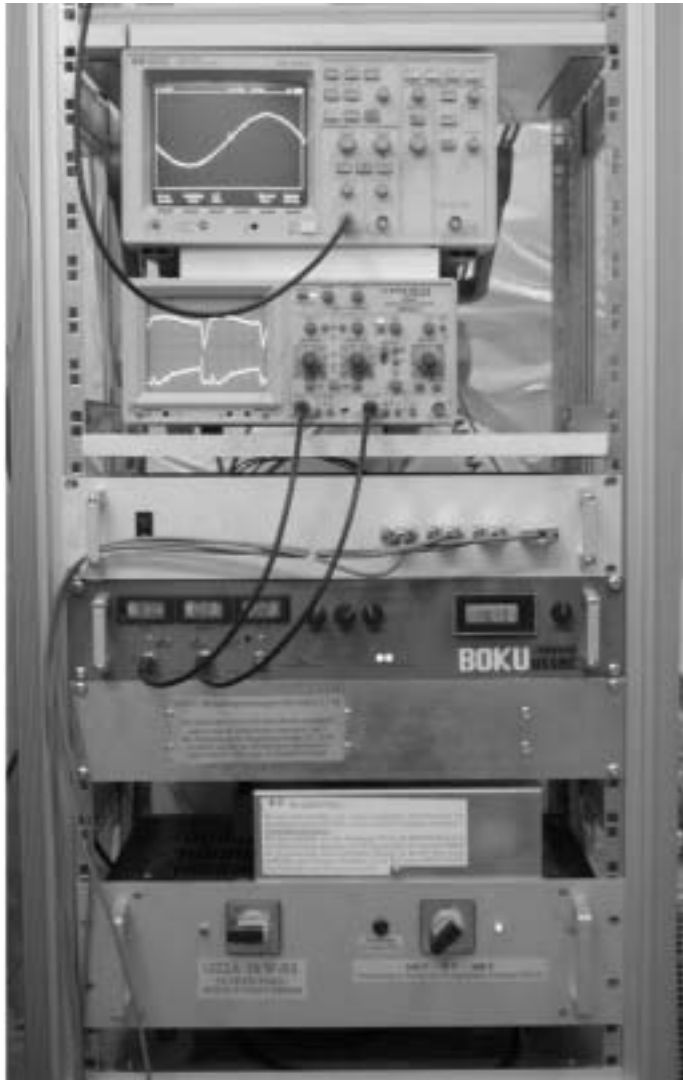
**Abb. 2.2.1:** a) Fotografie des zylindrischen Messerhalters mit Verminderung des Querschnittes entlang der Länge  
b) Dehnungsverlauf  
c) Amplitudenverlauf

In Abb. 2.2.1 sind die Ergebnisse einer solchen numerischen Berechnung für einen Messerhalter mit einem Amplitudenverstärkungsfaktor von ca. 1,7 dargestellt. Abbildung 2.2.1a zeigt einen zylinderförmigen Messerhalter, mit symmetrisch um die Mittelachse sich zweiseitig, linear verjüngenden Radius. In Abbildung 2.2.1b ist der Dehnungsverlauf entlang des Messerhalters zu sehen. Die maximale Dehnung wird bei ca. 75 mm erreicht, während die beiden Enden dehnungsfrei sind. In Abbildung 2.2.1c ist der korrespondierende Amplitudenverlauf dargestellt. Die Bewegungsamplitude ist an den Enden maximal und verschwindet beim Dehnungsmaximum. Durch die Querschnittsreduktion ergibt sich vom linken Ende zum rechten Ende eine Amplitudenverstärkung um den Faktor 1,7.

Der in Abb. 2.2.1 gezeigte Messerhalter ist eine von mehreren Formen, die im Rahmen dieses Projektes entwickelt wurde. Insbesondere die Massenverteilung entlang der Länge ist wesentlich für die elektrische Impedanz und die Stabilität der mechanischen Schwingung. Es wurden daher, je nach messtechnischem Aufbau, unterschiedliche Messerhalter verwendet.

### **2.3 Softwareentwicklung zur Datenerfassung und Verarbeitung der Messgrößen**

Die während der verschiedenen Experimente gemessenen Kräfte wurden mit einem Paar von 3-Richtungs-Piezosensoren gemessen, die mechanisch an den Ultraschallaufbau angekoppelt sind. Die Sensoren liefern ein elektrisches Signal, welches verstärkt und über einen Analog-Digital-Wandler (AD-Wandler) computerunterstützt erfasst und verarbeitet wird. Zu diesem Zweck wurde ein LabVIEW<sup>®</sup>-Programm entwickelt, welches die kraftproportionalen Spannungssignale aus dem AD-Wandler ausliest und in Kraftwerte übersetzt. Das Programm arbeitet mit einstellbarer Abtastrate; je nach Anzahl benötigter Messkanäle lassen sich damit bis zu 200.000 Messwerte pro Sekunde abtasten (1 Kanal). Zusätzlich zu den Kraftsignalen wurde die Aufzeichnung der gleichgerichteten und gemittelten Dehnungsamplitude zeitsynchron mit dem Kraftsignal implementiert. Aufgrund des „Nyquist Sampling Theorems“ lassen sich unter Verwendung von 7 Kanälen damit Frequenzanteile bis 14.286 Hz messen, was noch deutlich über der Eigenresonanz des Sensoraufbaus bei ca. 3000 Hz und unter der Schwingungsfrequenz des Ultraschallkonverters liegt. Um Signalverfälschungen durch Aliasing zu verhindern wurde ein digitaler Butterworth-Tiefpassfilter sechster Ordnung dem LabVIEW<sup>®</sup>-Programm hinzugefügt. Dieser Filter wurde mit einstellbarer Grenzfrequenz programmiert und stellt einen Kompromiss zu einem elektronisch realisierten Filter dar.



Oszilloskop 2

Oszilloskop 1

Messverstärker

Regelung und Anzeige

Messeinheit

Induktivität

Schaltverstärker

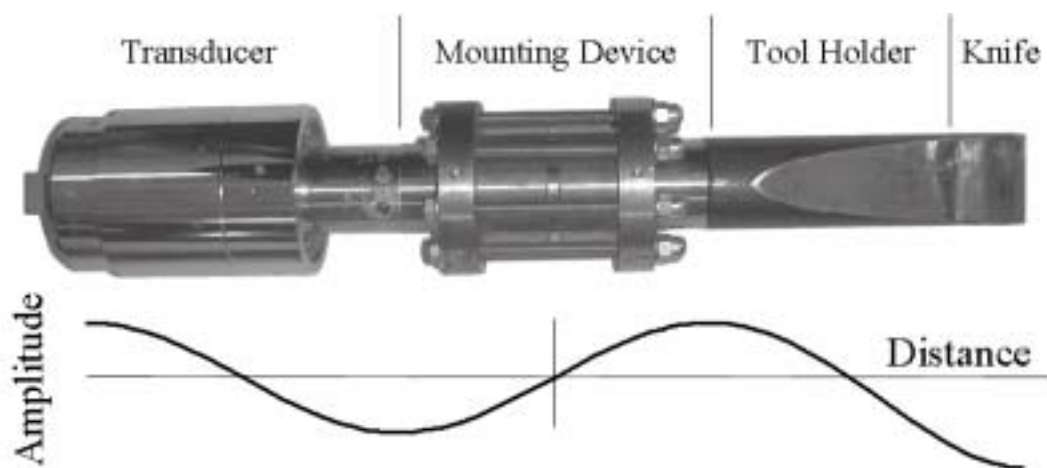
**Abb. 2.3.1:** Elektrischer Aufbau (von unten) - Schaltverstärker mit wählbarem Leistungsbereich, Anpassungs-Induktivität, Messeinheit für Strom- und Spannung und Überlastschutz, Regel- und Anzeigeeinheit, Messverstärker für Kraftsensoren, Oszilloskop 1 zur Anzeige von Strom und Spannung, Oszilloskop 2 zur Anzeige der Schwingungsamplitude

Ein Bild des aktuell verwendeten Aufbaus zeigt Abb. 2.3.1. Ganz unten ist der Schaltverstärker (Maximalleistung ca. 1000 W) sichtbar, bei welchem zwischen zwei Bereichen für die Ausgangsspannung gewählt werden kann. Die Induktivität ist gleichzeitig ein Schwingkreis mit dem Ultraschallkonverter und außerdem wird die auf dem Konverter anliegende Spannung verschliffen. Die Messeinheit für Strom- und Spannung dient zur Bestimmung der Phasenlage und zur Kurzschlusselsicherung. Die Regelung und Anzeige dient einerseits zur Regelung der Frequenz und andererseits zur Einstellung und Anzeige von Prozessparametern. Die Frequenzregelung basiert auf einer Phasenrückkoppelung zwischen Strom und Spannung. Anzeigen (Spannung, Strom, Wirkleistung, Frequenz) und

Einstellpotentiometer (Pulsbreite zur Einstellung der Leistung, Rückkoppelungsstärke für Frequenzregelung und Leistungsabgabe, Startfrequenz für die Resonanzregelung) sind sichtbar. Der Messverstärker für die Kraftsensoren dient zur Verstärkung der Signale, wobei im gezeigten Fall 4 Kraftsensoren angeschlossen sind. Am Oszilloskop 2 ist die Schwingungsamplitude sichtbar. Auf dem darunter befindlichen Oszilloskop 1 ist das Spannungssignal und der fließende Strom sekundärseitig gezeigt.

## 2.4 Optimierung und Dimensionierung der Ultraschallwerkzeuge / Aufbau der mechanischen Versuchsteile

Die Anforderungen an den mechanischen Aufbau der Ultraschall-Schneidanlage richten sich nach Wirtschaftlichkeit, Verfügbarkeit und Eignung des verwendeten Werkstoffes, nach einer guten mechanischen Stabilität, guten Schwingungseigenschaften und einer ausreichenden Verstärkung der vom Ultraschallkonverter erzeugten Schwingungen. Wirtschaftlichkeit bedeutet beispielsweise, dass der Preis des Materials etwa vergleichbar mit jenem konventioneller Anlagen zur Holzbearbeitung sein muss. Zudem sollen die Werkzeughalter leicht gefertigt und montiert werden können. Gute Schwingungseigenschaften bei geringer Dämpfung weisen vor allem hochfeste Aluminiumlegierungen und Titanlegierungen auf, welche auch meist für Ultraschallanwendungen verwendet werden.



**Abb. 2.4.1:** Mechanischer Aufbau - Ultraschallkonverter (Transducer), Halterung für die Einleitung der statischen Schnittkräfte (Mounting Device), Werkzeughalter (Tool Holder) und angelötete Klinge (Knife). Die Bewegungsamplitude entlang der Länge ist gezeigt.

In der vorgesehenen Anwendung zur Holzbearbeitung haben Aluminiumlegierungen hauptsächlich drei Nachteile, nämlich die geringe Korrosionsresistenz, die relativ starke Temperaturempfindlichkeit (ab ca. 150 °C) und die geringe Abriebfestigkeit. Im aktuellen Aufbau wurde deshalb - mit Ausnahme des Ultraschallkonverters - auf die Verwendung von

hochfesten Aluminiumlegierungen verzichtet, auch wenn dieser Werkstoff für mechanische Teile mit Ausnahme des Messers geeignet ist (und sich bei einigen Versuchen bewährt hat).

Titanlegierungen haben als hauptsächlichen Nachteil die problematische Fügbarkeit. In ersten Versuchen wurde dieser Werkstoff für die Herstellung von Messern mit gutem Erfolg verwendet. Das Schneidplättchen oder das Messer muss allerdings mit dem Werkzeughalter fest verbunden sein. Das wurde durch eine Schraubverbindung mit zusätzlicher Verklebung realisiert. Auch wenn diese Methode für Laborversuche geeignet ist, so dürften im praktischen Betrieb möglicherweise Probleme auftreten, wenn sich die Schneide stärker erwärmt und die Verklebung schadhafte wird.

Als geeigneter Werkstoff für den Werkzeughalter erwiesen sich einige höherfeste Stähle, insbesondere wärmebehandelte Werkzeugstähle. Insbesondere lassen sich mit diesen Werkstoffen Schneidplättchen und Messer durch Löten sehr fest und temperaturresistent befestigen. Allerdings sind die Schwingungseigenschaften auch der am besten geeigneten Stähle schlechter als von Titan- oder Aluminiumlegierungen. Der Aufbau erfolgte deshalb unter Verwendung verschiedener Werkstoffe (Aluminium beim Ultraschallkonverter, Titanlegierung bei der Halterung und Stahl beim Werkzeughalter). Da der Ultraschallkonverter und die Halterung keine Verschleißteile sind, ist auch der höhere Preis dieser Werkstoffe ökonomisch vertretbar.

Die Forderung nach einer hohen Schwingungsamplitude lässt sich durch Verstärkung der Schwingung realisieren. Dabei ist die Amplitudenverstärkung weitgehend vom Design, insbesondere von der Änderung des tragenden Querschnittes entlang der Länge, abhängig. Es wurden verschiedene Messerformen entworfen, mit unterschiedlich breiten Klingen und Verstärkungsfaktoren. Die Längen der Messerhalter entsprechen dabei in etwa der halben Wellenlänge der Ultraschallschwingung in einem zylinderförmigen Stück aus demselben Material. Durch Veränderungen der Geometrie konnten Verstärkungsfaktoren von ca. 1,7 – 5 erreicht werden. Geht man von einer maximalen Amplitude des Piezokristalls von ca.  $10 \sigma_m$  aus, ohne weiterer Verstärkung durch andere Teile außer dem Messerhalter, so entspricht das einer maximal erreichbaren Amplitude an der Klinge von ca.  $50 \sigma_m$ . Dies ergibt eine theoretische maximale Schnittgeschwindigkeit, ab der permanenter Kontakt zwischen Klinge und Material besteht, von  $v=6,28 \text{ m/s}$ . Diese Geschwindigkeit ist größer als die technisch relevanter Vorschubgeschwindigkeiten.

Die Halterung der kompletten Anordnung erfolgt an einem Schwingungsknoten des Mittelstücks ("Mounting Device" in Abb. 2.4.1). Diese Halterung ist so aufgebaut, dass sie das in Schwingung befindliche System möglichst wenig dämpft und gleichzeitig die statischen Kräfte einleiten kann. Dieser Teil wurde dahingehend optimiert, dass das Teil möglichst kompakt und steif gehalten werden kann, um unerwünschtes Verbiegen zu unterdrücken. Die Schwingungsübertragung erfolgt dabei durch Kraftschluss vom Ultraschallkonverter zum Werkzeughalter.

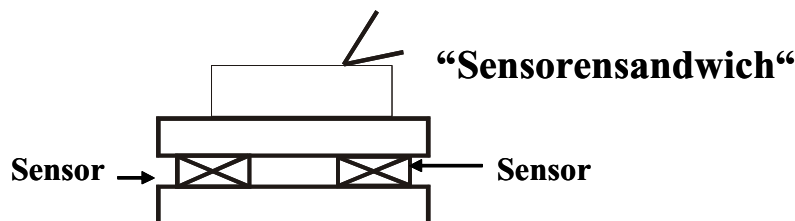
### 3 Arbeiten zur Projektphase II: Verfahrensentwicklung und -optimierung der Holzbearbeitung mit Ultraschallüberlagerung

In der zweiten Projektphase wurden die Eigenschaften der neu entwickelten Ultraschallanlage beim Schneiden von Holz untersucht. Entsprechend den Leistungsvereinbarungen wurden die in den nachfolgenden Kapiteln näher beschriebenen Arbeiten durchgeführt.

#### 3.1 Bestimmung der Trennkräfte

Die Trennkräfte stellen einen wesentlichen Parameter bei der Bearbeitung von Holz dar. Die auftretenden Kräfte haben direkten Einfluss auf die mechanische Beanspruchung der Maschine (und damit auf die notwendige Dimensionierung derselben) und auch auf die Endqualität des bearbeiteten Werkstückes.

Die Trennkräfte wurden mit einem Sensorensandwich (Abb. 3.1.1) bestehend aus zwei Piezosensoren der Fa. PCB Piezotronics gemessen. Es handelt sich dabei um Sensoren vom Typ 260A01 mit einem Messbereich von: 0–4500 N in vertikaler z-Richtung und 2200 N in horizontaler x- und y-Richtung.



**Abb. 3.1.1: Symbolbild Kraftmessung**

Um Schnittkraft und Schnittnormalkraft unter definierten Bedingungen messen zu können, wurden die Schnittkraftmessungen an einem Mikrotom durchgeführt. Das Mikrotom erlaubt es, Späne mit einer genau definierten Dicke zu schneiden und die Kräfte in Abhängigkeit von der Spandicke zu bestimmen.

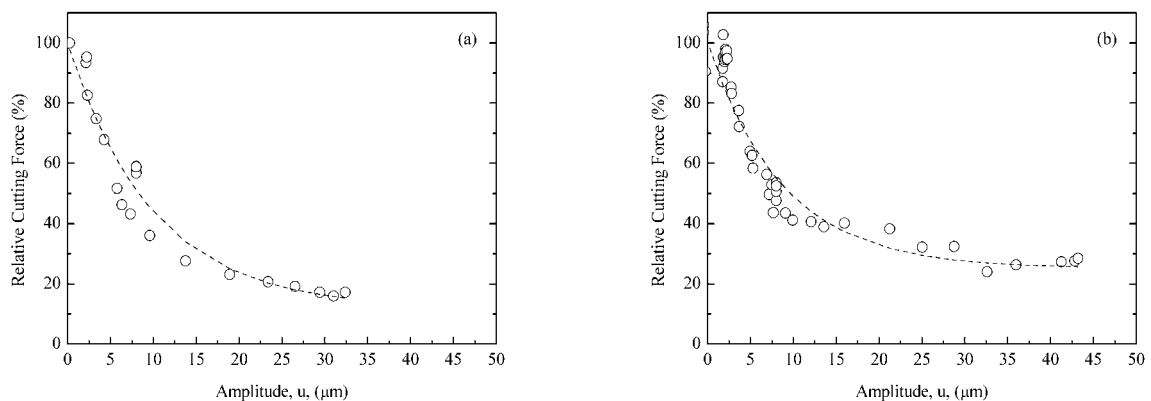
Zwei fundamentale Experimentserien wurden gemacht. Zum einen wurde der Einfluss der Ultraschallamplitude auf die Schnittkraft bestimmt und zum anderen die Kräfte als Funktion der Spandicke ermittelt. Beim verwendeten Verfahren zur Kraftmessung handelt es sich um quasistatische Messungen, da die hochfrequenten Anteile, verursacht durch die Ultraschallbewegung, außerhalb des mit dieser Sensorenanordnung auflösbaren Bereichs liegen. Die Ergebnisse wurden in Form eines Konferenzbeitrages [30] auf dem „16th



International Wood Seminar“ in Matsue, Japan einem Fachpublikum vorgestellt und ergänzt um Messungen an Buche zur Veröffentlichung in einer Zeitschrift eingereicht [30].

### **Einfluss der Schwingungsamplitude**

Die erzielten Ergebnisse zur Untersuchung des Einflusses der Ultraschallamplitude auf die gemessenen Schnittkräfte bei konstanter Spandicke von 200  $\mu\text{m}$  und Schnittgeschwindigkeit von 170 mm/s zeigen eine deutliche Kraftreduktion mit zunehmender Schwingungsamplitude. Dabei tritt die wesentliche Wirkung bereits bei kleinen Amplituden auf (bis 10  $\mu\text{m}$ ). Wird die Schwingungsamplitude weiter erhöht, dann vermindert sich die Schnittkraft nicht mehr im selben Maße (Abb. 3.1.2).



a)

b)

**Abb. 3.1.2: Normierte Schnittkraft als Funktion der Ultraschallamplitude für a) Fichte und b) Buche**

Die gemessene, auf die Spanbreite normierte Schnittkraft als Funktion der Ultraschallamplitude  $f_c(\text{UC})$  lässt sich dabei ad hoc relativ gut mit Hilfe einer abfallenden Exponentialfunktion beschreiben.

$$f_c(\text{UC}) = f_c(\text{CC}) \cdot \left( 1 - \frac{f_{\text{vibr}}}{f_c(\text{CC})} \right) \cdot \exp\left(-\frac{u}{u_0}\right)$$

**Formel 2: Schnittkraft als Funktion der Ultraschallamplitude  $f_c(\text{UC})$ ;  $f_c(\text{CC})$  statische Schnittkraft; maximaler Gewinn an Schnittkraftreduktion durch Ultraschallüberlagerung  $f_{\text{vibr}}$ ;  $u_0$  Ultraschallamplitude bei der die Schnittkraftreduktion 63 % ihres Maximalwertes erreicht hat**

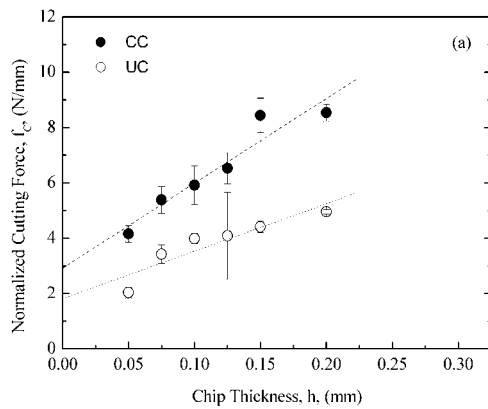
Der maximale Gewinn an Schnittkraftreduktion unterscheidet sich dabei etwas bei beiden untersuchten Holzarten und beträgt zwischen 70 % (Buche) und 80 % (Fichte) der

gemessenen Kräfte ohne Ultraschallüberlagerung. Die Schwingungsamplitude, bei der 63 % des prinzipiell möglichen Ultraschalleffektes gefunden wird, liegt für beide Hölzer etwa bei  $10 \sigma_m$ . Diese Schwingungsamplitude ist von großer Bedeutung, da mit steigender Schwingungsamplitude die aufgenommene elektrische Leistung etwa quadratisch ansteigt. Ein günstiges Verhältnis von möglichst geringer notwendiger Ultraschallleistung bei gleichzeitig gutem Ultraschalleffekt ist diesen Messungen zufolge bereits bei (technisch gesehen) relativ kleinen und einfach zu realisierenden Schwingungsamplituden vorhanden.

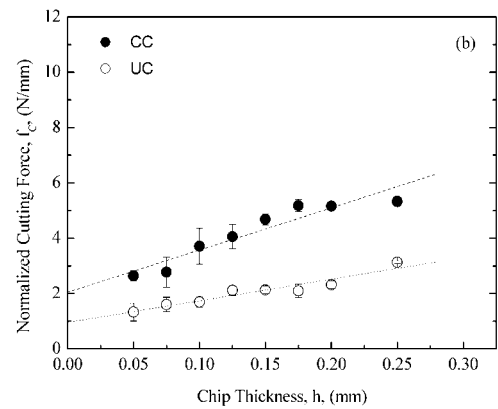
### **Einfluss der Spandicke**

Die Experimente mit unterschiedlichen Spandicken wurden durchgeführt, um den Mechanismus der Ultraschallüberlagerung auf die Schnittkräfte genauer zu untersuchen. Es wurden Experimente an Fichte und Buche im trockenen und feuchten Zustand durchgeführt, wobei die Schnittgeschwindigkeit bei 170 mm/s und die Ultraschallamplitude bei  $8 \sigma_m$  konstant gehalten wurden. In allen Fällen wurde sowohl eine absolute Reduktion der normierten Schnittkraft festgestellt, als auch geringere Steigungen der Schnittkraft als Funktion der Spandicke (Abb. 3.1.3).

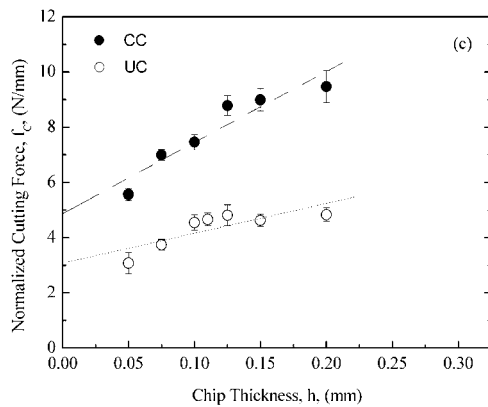
Ein bekannter Effekt der Ultraschallüberlagerung auf die Kontaktkräfte zweier Körper ist die Reduktion der dynamischen Reibung zwischen diesen [31, 5, 6]. Eine aus dieser Reibungsreduktion resultierende Kraftreduktion beim Schneiden stellt einen möglichen Erklärungsansatz für einen Teil der niedrigeren Schnittkräfte im Fall des ultraschallüberlagerten Schneidens dar. Aufgrund der großen Schnittkraftreduktion bei hohen Amplituden (Abb. 3.1.2) werden allerdings noch zusätzliche Effekte vermutet. Theoretische Modelle zum reibungsfreien Schneiden [32] interpretieren den Achsabschnitt der Ausgleichsgeraden als „reine Trennenergie“ und die Steigung als zusätzliche Energie, die in die Spanverformung geht. Eine geringere Steigung im Falle der linearen Ausgleichsgeraden beim Ultraschallschneiden im Vergleich zum konventionellen Schneiden legt deshalb die Annahme einer leichteren Spanverformung nahe. Diese Vermutung kann aber zum gegenwärtigen Zeitpunkt weder bestätigt noch abgelehnt werden, da unter Einfluss der Reibung theoretisch auch eine geänderte Steigung auftreten kann [33].



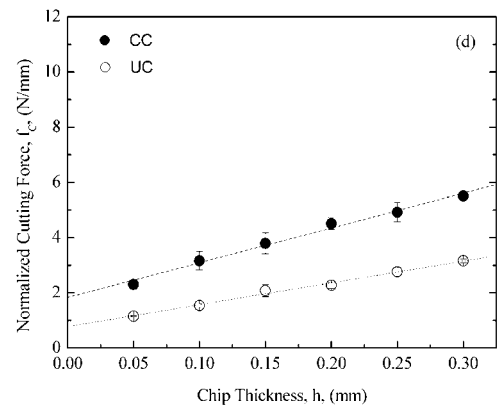
a)



b)



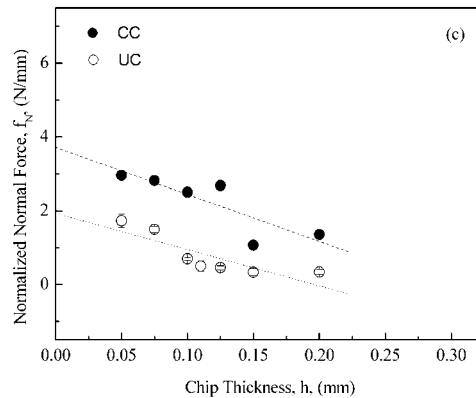
c)



d)

**Abb. 3.1.3: Normierte Schnittkräfte als Funktion der Spandicke: a) trockene, b) feuchte Fichte; c) trockene, d) feuchte Buche (offene Kreise mit Ultraschallüberlagerung, geschlossene ohne Überlagerung).**

Der Einfluss der Ultraschallüberlagerung auf die Normalkräfte besteht hingegen nur in einer Parallelverschiebung, zu niedrigeren Werten im gemessenen Bereich, verglichen mit jenen Werten, welche bei konventionellem Schneiden erhaltenen wurden. In diesem Fall kann deshalb nicht von einer eigentlichen Reduktion gesprochen werden, sehr wohl reduziert sich die Kraft welche die Messerunterseite auf die bearbeitete Oberfläche ausübt (siehe Abb. 3.1.4) normierte Normalkräfte bei trockener Buche als Beispiel), d.h. der Span hebt die Probe mehr an und die Kraft auf die Sensoren verringert sich. Hier sollte allerdings darauf hingewiesen werden, dass für die notwendige Schneidenergie die Schnittkräfte und nicht die Normalkräfte entscheidend sind.



**Abb. 3.1.4: Normierte Normalkräfte als Funktion der Spandicke bei trockener Buche (offene Kreise mit Ultraschallüberlagerung, geschlossene ohne solche).**

Schlussfolgernd lässt sich feststellen, dass eine deutliche Schnittkraftreduktion durch Ultraschallüberlagerung stattfindet und die statischen Schnittkräfte deutlich reduziert werden können. Der Wert einer solchen Schnittkraftreduktion für den praktischen Einsatz liegt unter anderem in der Möglichkeit einer materialsparenderen Maschinenbauweise und bei einem handgeführten Gerät z.B. in einer geringeren Belastung des betroffenen Arbeiters. Zusätzlich tragen geringere statische Kräfte bei gleicher Dimensionierung zu einer Stabilisierung des Schnittprozesses bei.

Für den praktischen Einsatz ist allerdings noch einiges an Feineinstellung notwendig, da die Eigenschaften des Bearbeitungssystems sehr stark von den jeweils geforderten Prozessparametern abhängen. So ist es z.B. positiv, dass der Ultraschalleffekt bereits bei kleinen Amplituden einen großen Effekt erzielt, da damit eine Materialschädigung der mechanischen Teile durch Ermüdung verringert und die Wartungszeiten des Werkzeughalters erhöht werden können. Andererseits erfordern höhere Schnittgeschwindigkeiten entsprechend hohe Amplituden, um den positiven Effekt der Ultraschallüberlagerung nicht zu verlieren [22].

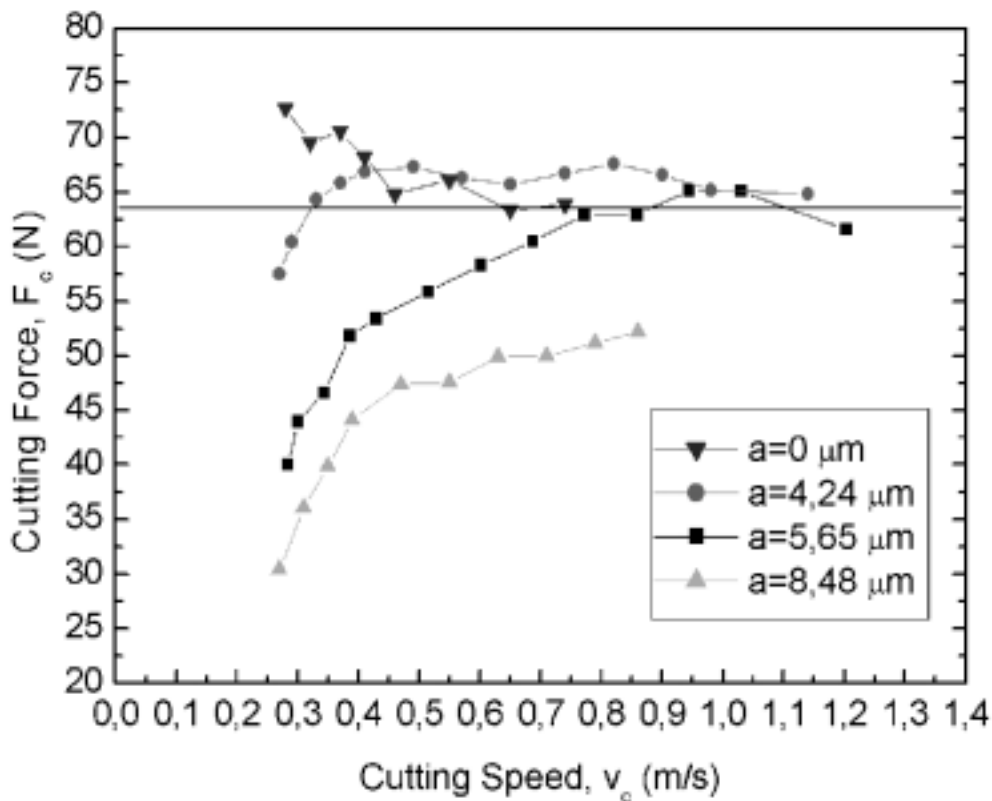
### **Einfluss der Schnittgeschwindigkeit**

Zum Studium des Einflusses der Schnittgeschwindigkeit auf die Schnittkraft wurden Messungen an einer Drehbank mit MDF durchgeführt. Den dazugehörigen Versuchsaufbau zeigt Abbildung 3.1.5. Zu sehen ist die beschichtete kreisrunde MDF-Platte in der Bildmitte, links daneben sichtbar der Messerhalter, darüber die Halterung (dreieckiger Teil) und ganz oben der Ultraschallkonverter mit dem Stromversorgungskabel.



**Abb. 3.1.5: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Geschwindigkeitseinflusses beim ultraschallüberlagerten Schneiden.**

Die Ergebnisse über den Einfluss der Schnittgeschwindigkeit bei verschiedenen Ultraschallamplituden zeigt Abb. 3.1.6. Prinzipiell ist die Verminderung der Schnittkraft durch die Ultraschallüberlagerung umso größer, je kleiner die Schnittgeschwindigkeit  $v_C$  und je größer die Ultraschallamplitude  $a$ . Zudem ist als Vergleich die Schnittkraft in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit ohne Ultraschallüberlagerung ( $a=0$ ) gezeigt.

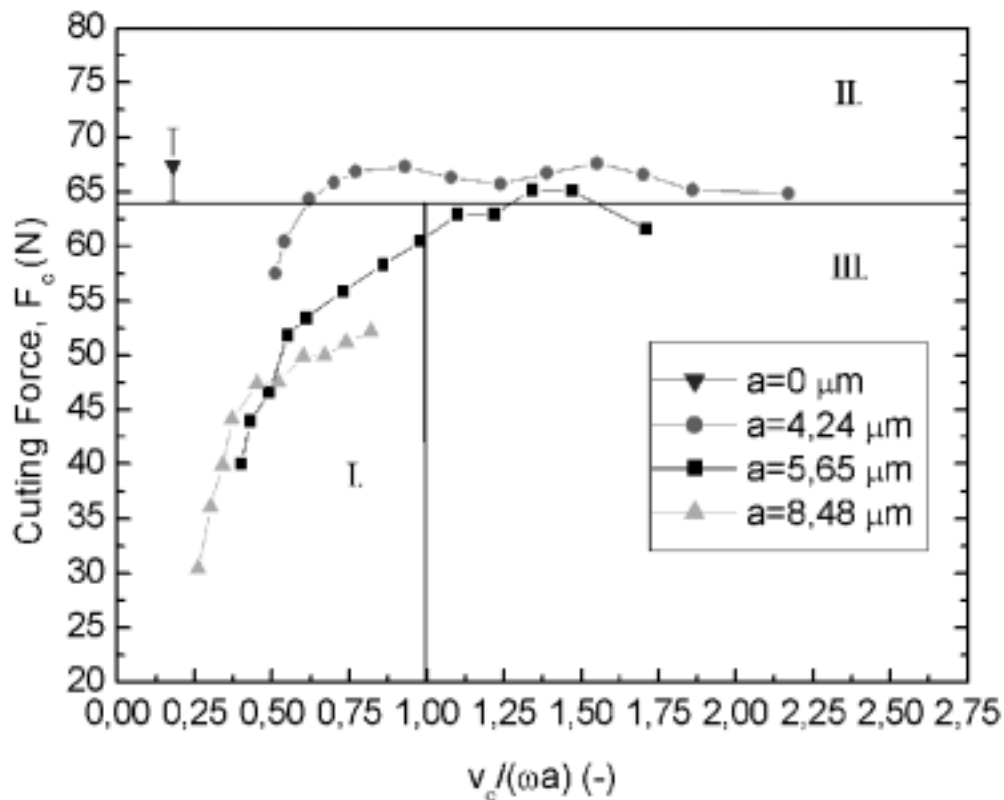


**Abb. 3.1.6: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  auf die statische Schnittkraft bei unterschiedlich hoher Ultraschallamplitude  $a$ .**

Aus Abb. 3.1.6 ist ersichtlich, dass eine Verringerung der Ultraschallwirkung mit zunehmender Geschwindigkeit zu beobachten ist. Bei einer Schwingungsamplitude von ca.  $8,5 \mu\text{m}$  ist ein Ultraschalleffekt noch bei Schnittgeschwindigkeiten um  $1 \text{ m/s}$  sichtbar, während für eine Ultraschallamplitude von ca.  $4 \mu\text{m}$  bereits bei Schnittgeschwindigkeiten um  $0,3 \text{ m/s}$  der positive Effekt verschwindet.

Verstanden werden kann dieser Einfluss durch die Verhältnisse von Schnittgeschwindigkeit ( $v_c$ ) und Geschwindigkeitsamplitude der Ultraschallschwingung (=Schwingungsamplitude  $a$  mal Kreisfrequenz  $\omega$ ). Sobald die Geschwindigkeitsamplitude  $a\omega$  gleich der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  ist, ist die Klinge in permanentem Kontakt mit dem zu bearbeitenden Material. Modellüberlegungen zur Größe der statischen Kräfte unter Einfluss vom Ultraschallaufschlagen von Astashev und Babitsky [22] für ein ideal elastisch plastisches Material sagen eine Grenzfrequenz für die Wirksamkeit von  $v_c=a\omega$  voraus. Außerdem sagt

das Modell einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen der mit der kritischen Geschwindigkeit normierten Geschwindigkeit und der mit der Kraft bei konventioneller Bearbeitung normierten statischen Kraft, voraus. Dieser Zusammenhang ist für die Bearbeitung mit MDF in Abb. 3.1.7 ersichtlich.



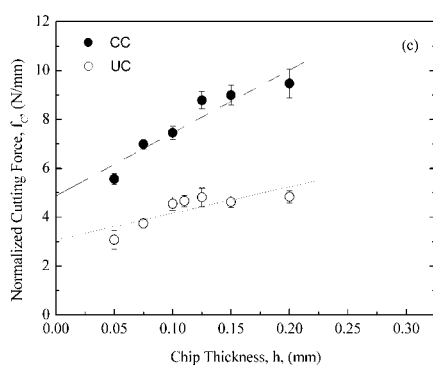
**Abb. 3.1.7: Einfluss der normierten Schnittgeschwindigkeit auf die statische Schnittkraft bei unterschiedlich hoher Ultraschallamplitude.**

Die Abbildung 3.1.7 ist in 3 Sektoren gegliedert. Sektor I zeigt den Bereich in welchem ein eindeutiger Effekt des Ultraschalls auf die Schnittkräfte festgestellt wurde. Sektor II umfasst den Bereich konventioneller Bearbeitung, bzw. zu geringer Ultraschallamplituden, um zu einer Reduktion der Schnittkraft zu führen. Sektor III ist (nahezu) leer. In erster Näherung ist der Ultraschalleffekt umso größer, je kleiner der Faktor  $v_c/a\omega$  ist. Allerdings ist bei niedrigen Amplituden ( $4 \mu\text{m}$ ) ein kleinerer Faktor  $v_c/a\omega$  für eine bestimmte Reduktion der Schnittkraft notwendig als bei höheren Amplituden ( $8,5 \mu\text{m}$ ). Der Effekt ist also nicht linear.

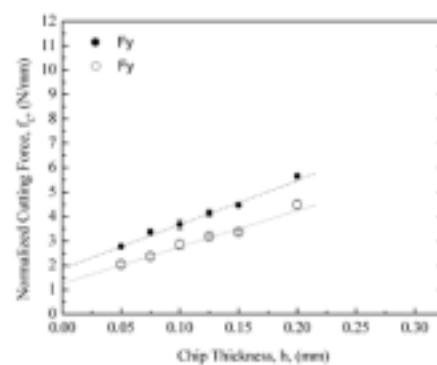
Für eine erste Abschätzung für die notwendigen Ultraschallamplituden in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit können die Versuche mit Schwingungsamplitude  $8,5 \sigma_m$  herangezogen werden. Wenn der Faktor  $v_c/a\omega$  etwa im Bereich 0,3 liegt, dann wird die Schnittkraft bei der Bearbeitung von MDF etwa auf 50 % reduziert. Wird die Schnittgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde angegeben und die Ultraschallamplitude in Mikrometer, dann sollte die Ultraschallamplitude etwa 25 mal so groß wie die Schnittgeschwindigkeit sein, damit ein deutlicher Ultraschalleffekt (die Halbierung der Kräfte) eintritt. Bei Schnittgeschwindigkeiten um 2 m/s sollte daher die Ultraschallamplitude um etwa  $50 \sigma_m$  liegen. Diese Ultraschallamplituden sind prinzipiell machbar (und wurden beispielsweise bei den Messungen im Mikrotom auch verwendet).

### Einfluss der Schnittrichtung

Der Schnittrichtungseinfluss wurde anhand von Buche in zwei Hauptschnittrichtungen [20] längs und tangential untersucht. Bei den Versuchen wurde die Ultraschallamplitude konstant bei  $8 \sigma_m$  festgehalten und eine Schnittdickenvariation durchgeführt. Wie zu erwarten war verhalten sich die beiden Schnittrichtungen, was den Absolutbetrag der gemessenen Kräfte anbelangt, unterschiedlich. In beiden Fällen tritt eine Reduktion der Schnittkräfte durch die Überlagerung von Ultraschall ein (Abb. 3.1.8). Durch die relativ kurzen, zerfallenden Späne im Fall des Tangentialschnitts liegen die Kurven für die Schnittkräfte jedoch nur parallel und haben nicht, wie im Falle des Längsschnitts auch eine unterschiedliche Steigung.



a)



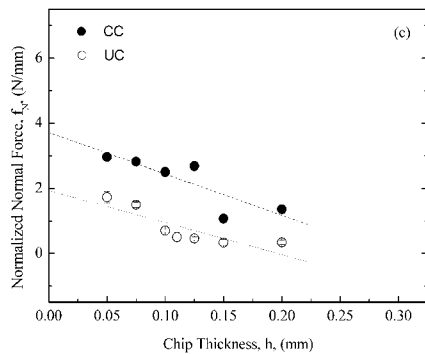
b)

**Abb. 3.1.8: Schnittkraft für Buche als Funktion der Spandicke für a) Längs- und b) Tangentialschnitte.**

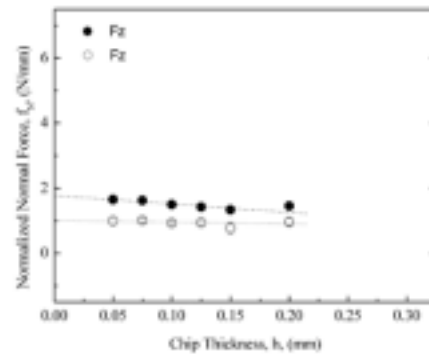
Die Bildung eines zerbröselnden Spans im Vergleich zur Bildung eines kontinuierlichen Spans hat auch Auswirkungen auf die gemessenen Normalkräfte. Im Fall des Tangentialschnittes ist nahezu kein Spandickeneinfluss auf die gemessene Kraft zu finden und



die Reduktion der Normalkraft durch den Ultraschalleinfluss ist nur ca. halb so groß wie im Falle der Längsschnitte (Abb. 3.1.9). Ausgewählte Teile der Ergebnisse zur Schnittkraftmessung in Längsrichtung wurden in [30, 34] veröffentlicht.



a)

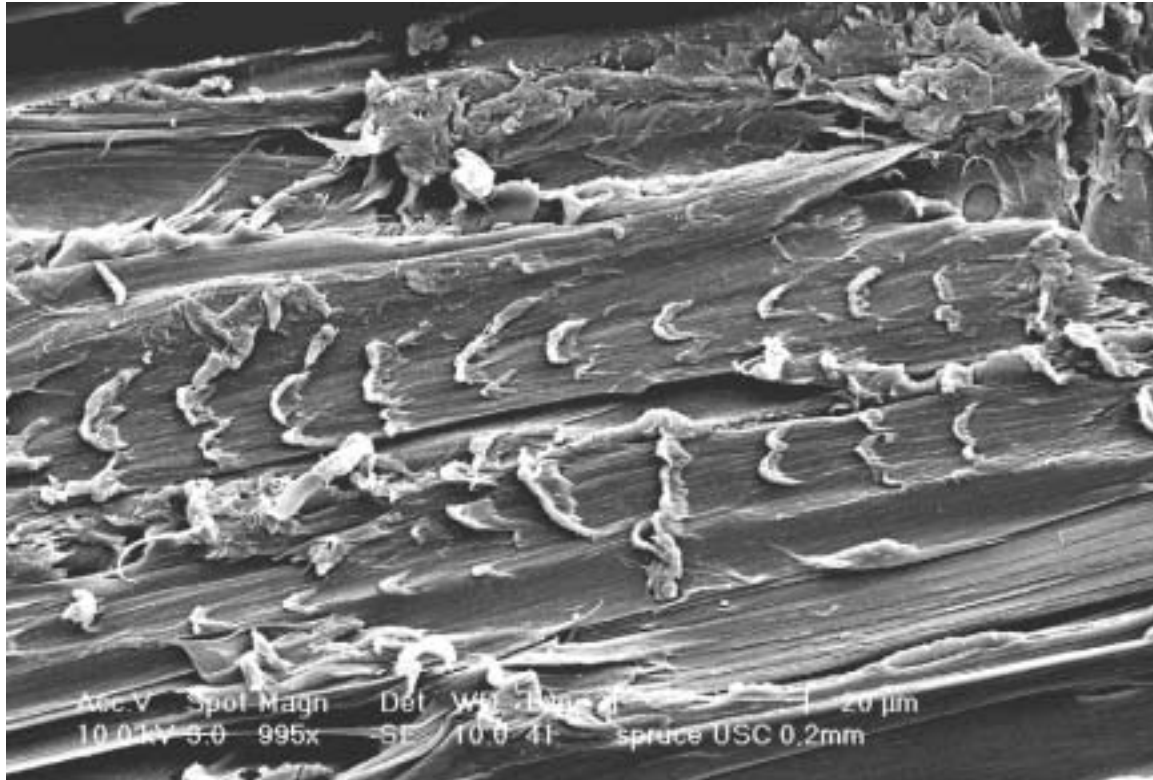


b)

**Abb. 3.1.9:** Normalkraft für Buche als Funktion der Spandicke für a) Längs- und b) Tangentialschnitte.

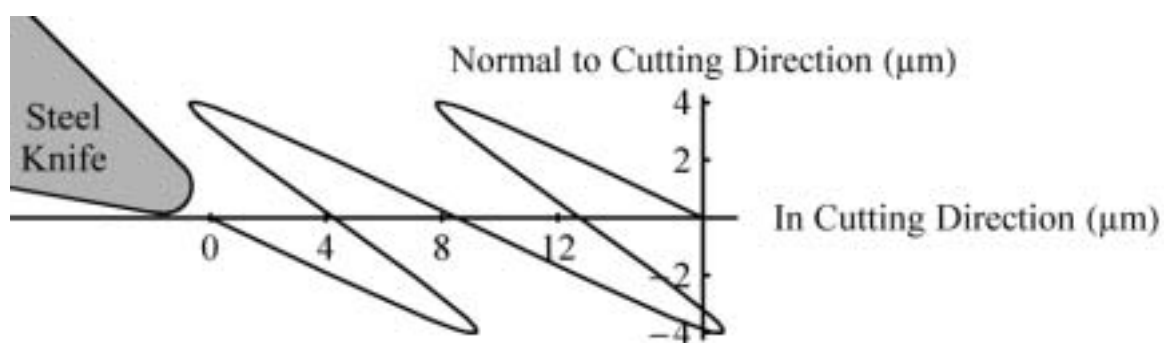
### 3.2 Charakterisierung des Bruchbildes der Holztrennflächen und Bestimmung der Oberflächenrauigkeit

Die Schnittflächen der Holztrennflächen unterscheiden sich unter optimalen Bedingungen kaum von jenen durch konventionelles Schneiden erzielten (siehe auch [35]). Hier gilt aber, dass eine generelle Aussage schwierig ist. Die mit Ultraschall erzeugten Oberflächen von Fichte hinterlassen den subjektiven Eindruck, dass sie generell etwas gleichmäßiger sind als konventionell bearbeitete Oberflächen [30]. Eine Quantifizierung dieses Eindrucks mittels ausgewählter Rauheitsparameter konnte allerdings keinen solchen Beweis erbringen. In der Literatur werden jedoch immer wieder Verbesserungen betreffend Gleichmäßigkeit [23] und verringerter Schädigung [36] der mit Ultraschall bearbeiteten Oberflächen, von verschiedenen im allgemeinen spröden oder schwer zu bearbeitenden Materialien berichtet. Aufgrund der großen Effekte bei der Reduktion der Schnittkräfte war ein solcher Effekt auch bei Holz zu erwarten, konnte aber nicht verifiziert werden.



**Abb. 3.2.1: Messerschläge auf der Oberfläche von Fichte (Schnittrichtung von links nach rechts)**

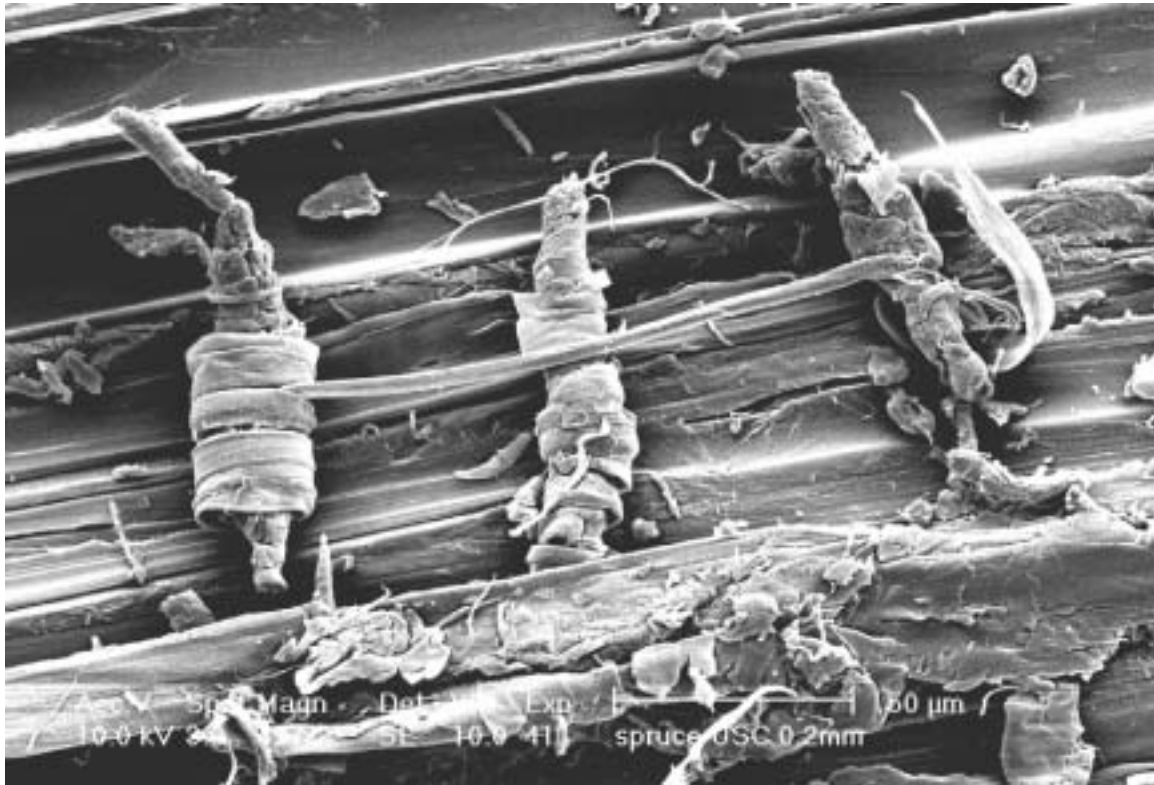
An manchen Stellen unterscheiden sich die mittels Ultraschallüberlagerung erzielten Oberflächen sehr wohl von jenen durch konventionelles Schneiden erzielten. Auf den Oberflächen von Fichte und Buche wurden mancherorts in regelmäßigem Abstand Impacts oder Messerschläge gefunden Abb. 3.2.1.



**Abb. 3.2.2: Theoretische Bahnbewegung der Messerspitze auf der Probe für eine Ultraschallamplitude von  $8 \sigma_m$  und 170 mm/s Vorschubgeschwindigkeit.**

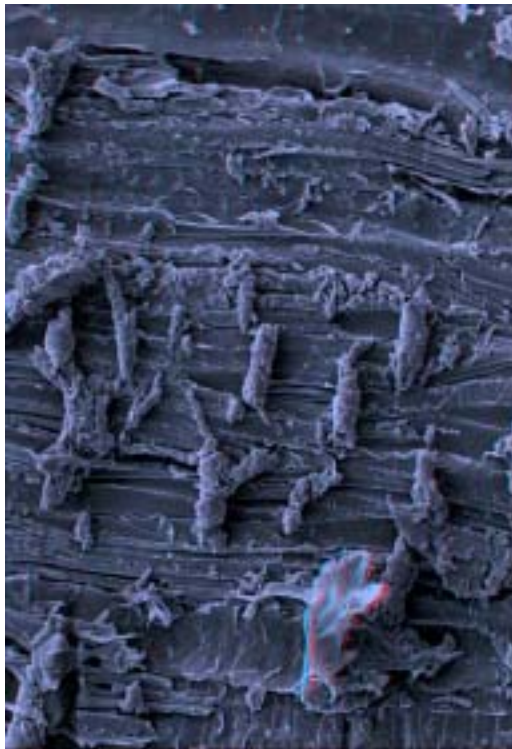
Der Abstand dieser mikroskopisch kleinen Schnitte passt sehr genau mit dem vorhergesagten Muster eines sich harmonisch bewegenden Messers zusammen (Abb. 3.2.2) und kann nur auftreten, da die Schwingungsamplitude beim untersuchten System gegenüber der Schnittrichtung um einen bestimmten Winkel geneigt ist.

Eine weitere Besonderheit welche nur auf Ultraschall bearbeiteten Oberflächen auftrat war die Beobachtung von Mikro-Röllchen. Diese Mikro-Röllchen entstehen wahrscheinlich durch den endlichen Klingradius, welcher an manchen Stellen Material mitführt und einrollt (Abb. 3.2.3) [35].

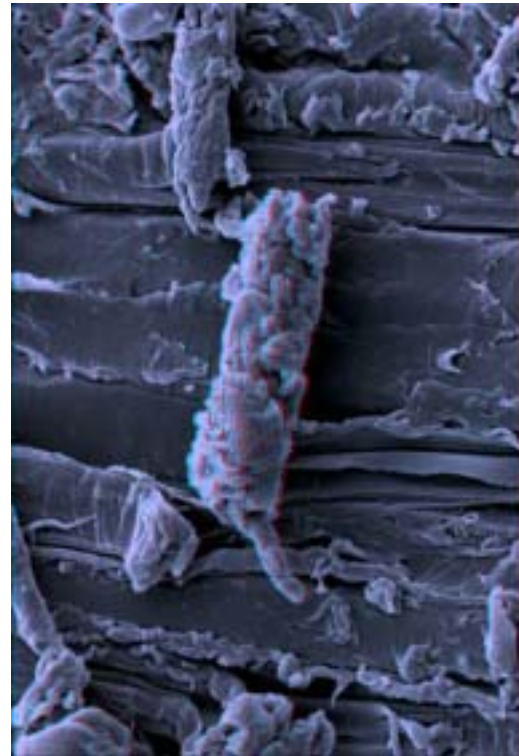


**Abb. 3.2.3: Mikroröllchen auf mit Ultraschall bearbeiteter Fichtenoberfläche. Schnittrichtung von links nach rechts.**

Ausgewählte Oberflächen wurden mit der 3d-Rekonstruktionssoftware, MEX ausgewertet. Diese Software wurde speziell für die Auswertung von Höheninformationen im Rasterelektronenmikroskop entwickelt und erlaubt es unter anderem einen plastischen Eindruck von Mikroskopiebildern zu gewinnen. In Abb. 3.2.4 sind zwei Anaglyphbilder zu sehen, die unter Verwendung von rot-blau- Gläsern als dreidimensionale Gebilde sichtbar werden.



100  $\sigma$ m



20  $\sigma$ m

**Abb. 3.2.4: Anaglyphbilder von Mikro-Röllchen auf Fichte in unterschiedlicher Vergrößerung.**

Auf eine systematische Auswertung der Anaglyphbilder in Bezug auf Rauigkeitsparameter wurde verzichtet, da die makroskopischen Rauigkeiten keinerlei Unterschied zeigten und die Mikroskopieaufnahmen nur einen vorher selektierten Ausschnitt darstellen können. Hinzu kommt, dass es sich auf Mikroebene nicht mehr um ein Standardverfahren handelt und damit die Cut-off Länge des Filters wesentlich die Messergebnisse beeinflusst. Ein Versuch einer solchen Auswertung an Buchenoberflächen mit einer Cut-off Wellenlänge von 20  $\sigma$ m ergab jedoch keine Unterschiede in den Rauheitskennwerten  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$  und  $R_{SM}$  zwischen konventionell und Ultraschall unterstützt bearbeiteten Oberflächen. Die Grenzwellenlänge lag dabei mit 20  $\sigma$ m ca. doppelt so hoch wie die durch die Messerbewegung induzierte harmonische Oberflächenbeschaffenheit. Letztere wurde damit zu den kurzwelligeren Anteilen des Rauigkeitsprofils geschlagen.

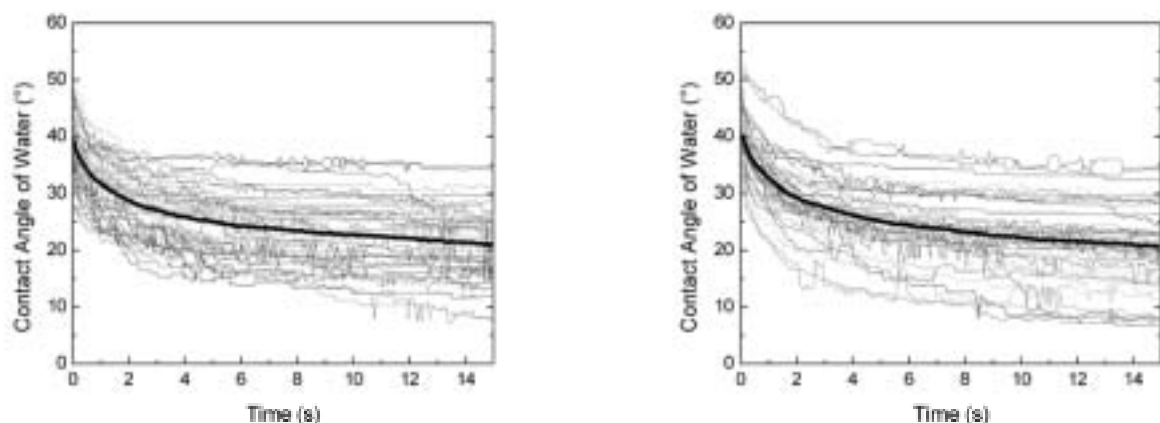
Eine systematische Untersuchung der Oberflächenrauigkeit mit dem Tastschnittverfahren und einer Cut-off Wellenlänge von 2,5 mm anhand von vier Rauheitsparametern  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$  und  $R_{SM}$  ergab keinerlei Unterschiede in den Mittelwerten von konventionell und Ultraschall unterstützt bearbeiteten Oberflächen von Fichte, Buche und MDF. Sehr wohl wurden jedoch Unterschiede beim Vergleich korrespondierender Varianzen festgestellt, allerdings

uneinheitlich [35]. Bei Fichte wurde die Streubreite erhöht, während sie bei Buche verringert wurde und keinen Unterschied beim Vergleich von MDF zeigte.

Auch hier ist offensichtlich, dass die Prozessparameter sehr großen Einfluss auf die zu messenden Rauheitsparameter ausüben. Im betrachteten Fall wurde für alle Versuche ein scharfes Messer verwendet und relativ kleine Amplituden, als auch Neigungswinkel der Ultraschallschwingung gegenüber der Holzoberfläche verwendet. Eine Vergrößerung des Anstellwinkels hätte z.B. direkten Einfluss auf die zu erwartende Welligkeit.

### 3.3 Bestimmung der Oberflächenenergie

Die Oberflächenenergie stellt ein Maß für die Reaktivität von Oberflächen dar. Hohe Werte für die Oberflächenenergie bedeuten im Allgemeinen gute Benetzbarkeit, während niedrigere Werte z.B. Tropfenbildung der Benetzungsflüssigkeit (z.B. Wasser) auf der Oberfläche bedeuten können. Je nach Anwendung wird dementsprechend eine hohe Oberflächenenergie (gute Lackierbarkeit) oder eine niedrigere (Flüssigkeit soll abperlen) gefordert.



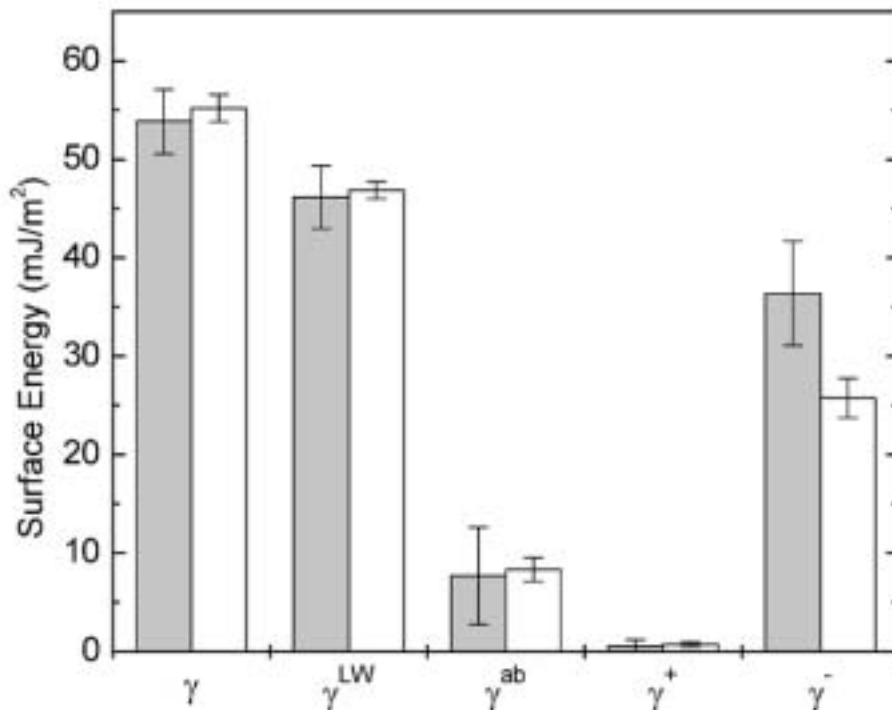
a)

b)

**Abb. 3.3.1: Änderung des Kontaktwinkels als Funktion der Zeit: a) konventionelle Bearbeitung und b) Ultraschall überlagerte Bearbeitung**

Um die Reaktivität von mit Ultraschall bearbeiteten Oberflächen mit jenen von konventionell bearbeiteten Oberflächen zu vergleichen wurden sowohl Benetzungsversuche mit Wasser durchgeführt, als auch die Oberflächenenergie nach der Säure-Base Theorie an Buche ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ultraschallbearbeitung die Benetzbarkeit mit Wasser nicht verändert, wobei in beiden Fällen relativ große Streuungen gemessen wurden (Abb. 3.3.1).

Die Vergleichsmessungen zur Oberflächenenergie zeigen, dass die gesamte Oberflächenenergie  $\gamma$ , die dispersen  $\gamma^{LW}$  als auch die polaren Anteile  $\gamma^P$  unbeeinflusst von der Bearbeitungsmethode sind. Die Base Anteile  $\gamma^B$  hingegen sind im Fall der Ultraschallbearbeitung gegenüber dem Konventionellen Schneiden signifikant um ca. 1/3 reduziert (Abb. 3.3.2) [35].



**Abb. 3.3.2: Oberflächenenergie von konventionell (graue Balken) und mit Ultraschallüberlagerung bearbeitete Oberfläche (weiße Balken)**

Eine Interpretation dieses Resultats könnte in einer durch die Ultraschallschwingung induzierten, beschleunigten Alterung liegen. Der Effekt der Alterung von Holzoberflächen beinhaltet unter anderem die Reorientierung von Molekülen an der Oberfläche hin zu einer energetisch günstigeren Lage, die Migration von Extraktstoffen an die Oberfläche, Oxidation der Oberfläche und Anlagerung von Molekülen aus der Umgebungsluft. Bei all diesen Phänomenen handelt es sich um thermisch aktivierte Prozesse. Messungen an gealterten mikrotomierten Buchenoberflächen zeigen eine Verringerung der Base-Anteile der Oberflächenenergie [37] und passen gut mit der Annahme zusammen, dass die beim Ultraschallschneiden zusätzlich durch die Schwingung eingebrachte Energie die Alterung beschleunigt hat.

### **3.4 Optimierung der Versuchsparameter**

Die Optimierung der Versuchsparameter ist ein kontinuierlicher Prozess. Im Verlaufe des Projektes wurden verschiedenste Optimierungen an Aufbau, Materialauswahl und Prozessparametern sowie in der elektronischen Steuerung, im Leistungsteil und in der Leistungsanpassung vorgenommen. So wurden Messerhalter entwickelt, welche Schwingungsamplituden von nur 10  $\sigma$ m erlauben und solche, mit denen 50  $\sigma$ m erreichbar sind (mit deren jeweiligen Vor- und Nachteilen). Je nach Versuch wurden Stahlmesser oder Hartmetall-Wendeplatten verwendet, wobei ein geeigneter Stahl für die Messerhalter ein festes Auflöten erlaubt. Basierend auf dem Prinzip eines Schaltverstärkers dienten verschiedene Verbesserungen zur stabilen Aufrechterhaltung der Schwingung, zur Verminderung der Störwirkung und zur Verminderung der Verlustleistung. Es wurden - basierend auf dem Prinzip einer dämpfungsfreien Halterung in Schwingungsknoten - unterschiedliche Aufbauten realisiert und letztendlich eine einfache und vielfach einsetzbare Halterung entwickelt. Erste Versuche wurden an einer Materialprüfmaschine durchgeführt, welche allerdings mangels Steifigkeit einige Messergebnisse verfälschte. In weiterer Folge wurden deshalb wesentlich stabilere Aufbauten in einem Mikrotom und an einer Drehbank verwendet. Die Regelung der Resonanz wurde mehrfach verbessert, sodass nun ein (nahezu) automatischer Betrieb möglich ist. Die Optimierungen im Versuchsaufbau und in der Versuchsdurchführung war daher ein kontinuierlicher, das Projekt begleitender Prozess.

### **3.5 Bemühungen zur Einbindung von Industriepartnern in das Projekt „Holzbearbeitung mit einer Ultraschall-Wechselbeanspruchung“**

Um die Überleitung des Grundlagenprojektes in die praktische Anwendung vorzubereiten, wurden die Ergebnisse in öffentlichen und Fachvorträgen vorgestellt, sowie durch verschiedene Tätigkeiten Kontakt mit Industrievertretern gesucht. Diese Aktivitäten sind detailliert im beiliegenden Tätigkeitsbericht zusammengefasst. Weiters wurden 2 Publikationen vorbereitet, die - das Einverständnis des BMVIT und ein positiver Review-Prozess vorausgesetzt - in Fachjournalen publiziert werden.

## 4 Aspekte der Nachhaltigkeit

Das System wurde im Rahmen des „Fabrik der Zukunft Projektes“ in Hinblick auf die Leitprinzipien der Nachhaltigkeit entworfen, auf die im weitem kurz eingegangen werden soll.

- €# **Prinzip der Dienstleistungs-, Service- und Nutzenorientierung:** Bei dem entwickelten Prototyp handelt es sich um ein handliches und transportables System, das für verschiedene Prozesse adaptiert werden kann. Die reinen Materialkosten sind gering, während der Gehalt an Know-How groß ist. Der Betrieb ist energieeffizient über lange Zeit möglich. Der bearbeitete Werkstoff Holz ist in Österreich verfügbar.
- €# **Prinzip der Nutzung erneuerbarer Ressourcen:** Das Projekt beschäftigt sich mit einer verbesserten Methode zur Holzbearbeitung, einem natürlichen Werkstoff. Die Anlage erweitert die Möglichkeiten der Holzbearbeitung und verbessert dadurch die Stellung von Holz in Konkurrenz zu anderen Werkstoffen.
- €# **Effizienzprinzip:** Die Ausnützung des Resonanzprinzips als Kernstück der Ultraschallschneideanlage spiegelt die konsequente Nutzung von Energie wieder. Es wird mit möglichst geringer Leistung ein Maximum an Wirkung erreicht. Die Ansteuerung erfolgt durch ein robustes elektrisches System mit hohem Wirkungsgrad. Die elektrischen und der Großteil der mechanischen Bauteile sind keiner wesentlichen Abnutzung unterworfen. Als Verbrauchsmaterialien (Schneiden) werden bereits technisch verwendete Teile verwendet.
- €# **Prinzip der Rezyklierungsfähigkeit:** Die für die mechanischen Teile der Anlage verwendeten Werkstoffe sind recyclingfähige Metalle. Die elektrischen Teile sind robust, sodass ein langer Betrieb möglich ist.
- €# **Prinzip der Einpassung, Flexibilität, Adaptionfähigkeit und Lernfähigkeit:** Das System wurde bewusst flexibel gestaltet und kann an verschiedene Anforderungen angepasst werden. Es ist transportabel und relativ leicht. Eine Ankopplung an bereits bestehende Anlagen zur Holzbearbeitung ist über geeignete mechanische Teile möglich. Es ist auch denkbar, die Anlage für andere Anwendungen im Bereich des Leistungs-Ultraschall zu verwenden.



€# **Prinzip der Fehlertoleranz und Risikovorsorge:** Das System und die mit dem System bearbeiteten Werkstoffe (Holz und Holzwerkstoffe) sind risikoarm. Es sind keine schnell drehenden Teile (wie bei Fräsern) oder Maschinenteile vorhanden. Die elektrischen Spannungen sind i.a. kleiner als die Netzspannung. Durch die lineare Spannbildung wird die Bildung von kleinen Partikeln und damit schädlichem Holzstaub weitestgehend unterbunden und so ein Beitrag zur Gesundheitsvorsorge geleistet. Die Technologie stellt damit keine wesentliche Gefahr für die Umwelt dar und ist risikoärmer als bereits bestehende Systeme.

€# **Prinzip der Sicherung von Arbeit, Einkommen und Lebensqualität:** Verbesserte Bearbeitungsmethoden erhöhen die Wertschöpfung und verbessern die Konkurrenzfähigkeit. Als neue Technologie kann die Ultraschallbearbeitung der heimischen Holzindustrie einen Innovationsvorteil verschaffen, um auf einem globalen Markt besser bestehen zu können.

## 5 Ausblick / Empfehlungen

Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass die Überlagerung von Ultraschallschwingungen auf Werkzeuge eine viel versprechende neue und technisch machbare Methode zur Holzbearbeitung ist. Das Verfahren ist energieeffizient und betriebssicher, und eine technische Anwendung ist aufgrund der dargestellten Vorteile wünschenswert. Für die praktische Anwendung und eine eventuelle Weiterentwicklung muss unterschieden werden, ob das Werkzeug wie in den vorliegenden Untersuchungen mit nur einem Ultraschallkonverter zum Schwingen angeregt werden kann oder ob dazu mehrere Ultraschallkonverter notwendig sind.

Ist die Anregung mit nur einem Konverter möglich (z.B. wenn Messer mit einer Schneidenbreite bis ca. 150 mm verwendet werden), dann kann dazu ein Aufbau ähnlich dem vorgestellten dienen. Gegebenenfalls müssen die elektrischen und elektronischen Komponenten bei handgeführten Maschinen miniaturisiert werden.

Sind dagegen massive Bearbeitungswerkzeuge (z.B. Furniermesser) anzuregen, dann sind dafür mehrere parallel arbeitende Ultraschallkonverter notwendig, da die Dauerleistung der einzelnen kommerziell erhältlichen Konverter etwa mit 2 - 4 kW begrenzt ist. In diesem Fall muss weiterführend das Problem der elektrischen Ansteuerung von mehreren Convertern in gleicher Phasenlage in Resonanz gelöst werden. Die geeignete Ankopplung und Fixierung muss garantieren, dass alle Konverter unabhängig von der Belastung dieselbe mechanische Resonanz haben, sodass eine Leistungsabgabe von allen in gleichem Maße gegeben ist. Die im Projekt dargestellten Vorteile der Ultraschallüberlagerung sind sowohl bei Ein- als auch Mehrkonvertersystemen vorhanden.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] H. Kuttruff, Physik und Technik des Ultraschalls, Hirzel, Stuttgart, 1988.
- [2] T. B. Thoe, D. K. Aspinawall, M. L. H. Wise, Review on Ultrasonic Machining, Int. J. Mach. Tools Manufact. 38 (1998), 239-255.
- [3] M. Wiercigroch, R. D. Neilson, M. A. Player, Material removal rate prediction for ultrasonic drilling of hard materials using an impact oscillator approach, Physics Letters A. 259 (1999), 91-96.
- [4] V. I. Babitsky, Theory of Vibro-Impact Systems and Applications, Foundations of engineering mechanics, V. I. Babitsky, Ed., Springer, Berlin, Heidelberg, New York,, 1998.
- [5] W. Littmann, H. Storck, J. Wallaschek, Sliding friction in the presence of ultrasonic oscillations: superposition of longitudinal oscillations, Archive of Applied Mechanics 71 (2001), 549-554.
- [6] H. Storck, W. Littmann, J. Wallaschek, M. Mracek, The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motors, Ultrasonics 40 (2002), 379-383.
- [7] S. Zahn, Y. Frehser, L. Linke, Minimale Deformation - Mit Ultraschall schonender Schneiden, Lebensmitteltechnik 31 (1999), 66-67.
- [8] B. S. Khambay, A. D. Walmsley, Investigations into the use of an ultrasonic chisel to cut bone. Part 1: forces applied by clinicians, Journal of Dentistry 28 (2000), 31-37.
- [9] M. Waplington, L. Blunt, A. D. Walmsley, P. J. Lumley, Dental Hard Tissue Cutting Characteristics of an Ultrasonic Drill, Int. J. Mach. Tools Manufact. 35 (1995), 339-343.
- [10] K. Kato, K. Tsuzuki, I. Asano, Studies on Vibration Cutting of Wood. I, Mokuzaei Gakkaishi 17 (1971), 57-65.
- [11] O. Doi, M. Yokoyama, Cutting Force Analysis of Wood (Lst. Report. Orthogonal Cutting accompanied with split ahead of the tool), Bulletin of the JSME 18 (1975), 905-912.
- [12] C. C. Peters, A. F. Mergen, H. R. Panzer, Thick Sclicing of Wood: Effects of Wood and Knife Inclination Angle, Forest Products Journal 22 (1972), 84-90.

- [13] R. Fischer, W. Knüpfner, K. Regensburger, Orientierende Versuche beim Schneiden von Holz, *Holztechnologie* 21 (1980), 49-54.
- [14] T. A. Martin, McCallion, Knife Slicing of wood across the grain, *Wood Science and Technology* 30 (1996), 397-410.
- [15] A. Reiterer, H. Lichtenegger, S. Tschegg, P. Fratzl, Experimental evidence for a mechanical function of the cellulose microfibril angle cell walls, *Philosophical Magazine A* 79 (1999), 2173-2184.
- [16] S. Stanzl-Tschegg, E., E. Tschegg, K., A. Teischinger, Fracture Energy of Spruce Wood After Different Drying Procedures, *Wood and Fiber Science* 26 (1994), 467-478.
- [17] S. E. Stanzl-Tschegg, D. M. Tan, E. K. Tschegg, New Splitting method for wood fracture characterization, *Wood Science and Technology* 29 (1995), 31-50.
- [18] E. Liptáková, J. Kúdela, Z. Bastl, I. Spirovová, Influence of mechanical surface treatment of wood on the wetting process, *Holzforschung* 49 (1995), 369-375.
- [19] M. Gindl, G. Sinn, A. Reiterer, S. Tschegg, Wood surface Energy and Time Dependence of Wettability: A Comparison of Different Wood Surfaces Using an Acid-Base Approach, *Holzforschung* 55 (2001), 433-440.
- [20] E. Kivimaa, Die Schnittkraft in der Holzbearbeitung, *Holz als Roh- und Werkstoff* 10 (1952), 94-108.
- [21] Z. J. Pei, P. M. Feirreira, An experimental investigation of rotary ultrasonic face milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39 (1999), 1327-1344.
- [22] V. K. Astashev, V. I. Babitsky, Ultrasonic cutting as a nonlinear (vibro-impact) process, *Ultrasonics* 36 (1998), 89-96.
- [23] M. Jin, M. Murakawa, Development of a practical ultrasonic vibration cutting tool system, *Journal of Materials Processing Technology* 113 (2001), 342-347.
- [24] S. Karube, W. Hoshino, T. Soutome, K. Sato, The non-linear phenomena in vibration cutting system. The establishment of dynamic model, *International Journal of Non-Linear Mechanics* 37 (2002), 541-564.
- [25] Z. Bo, L. Chuanshao, G. Guofu, J. Feng, Surface Characteristics in the Ultrasonic Ductile Honing of ZrO<sub>2</sub> Ceramics Using Coarse Grits, *Journal of Materials Processing Technology* 123 (2002), 54-60.

- [26] M. Zhou, X. J. Wang, B. K. A. Ngoi, J. G. K. Gan, Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration, *Journal of Materials Processing Technology* 121 (2002), 243-251.
- [27] T. C. Lee, C. W. Chan, Mechanism of the ultrasonic machining of ceramic composites, *Journal of Materials Processing Technology* 71 (1997), 195-201.
- [28] J.-D. Kim, I.-H. Choi, Micro surface phenomenon of ductile cutting in the ultrasonic vibration cutting of optical plastics, *Journal of Materials Processing Technology* 68 (1997), 89-98.
- [29] S. G. Amin, M. H. M. Ahmed, H. Youssef, A., Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis, *Journal of Materials Processing Technology* 55 (1995), 254-260.
- [30] G. Sinn, P. Beer, B. Zettl, H. Mayer, Influence of Ultrasonic Vibrations on Low Speed Cutting of Spruce Wood, Proc. 16<sup>th</sup> International Wood Machining Seminar, Matsue, Japan, 24.-30.08.2003, Organizing Committee of the 16 IWMS. Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue, Japan, 1 (2003), pp. 203-209.
- [31] K. Fujiwara, M. Noguchi, H. Sugihara, Effects of Ultrasonic Vibration on Kinetic Friction. Based on a Standpoint of Ultrasonic Vibratory Cutting of Wood, *Mokuzai Gakkaishi* 22 (1976), 76-81.
- [32] X. Huang, G. Jeronimidis, J. F. V. Vincent, The Instrumented Microtome Cutting Tests on Wood from Transgenic Tobacco Plants with Modified Lignification, Proc. Blant Biomechanics, Freiburg-Badenweiler, Georg Thieme Verlag (2000), pp. 475-482.
- [33] J. G. Williams, Friction and plasticity effects in wedge splitting and cutting fracture tests, *Journal of Materials Science* 33 (1998), 1998.
- [34] G. Sinn, B. Zettl, H. Mayer, P. Beer, S. Stanzl-Tschegg, Ultrasonic-Assisted Cutting of Wood, *Journal of Materials Processing Technology* in review (2003).
- [35] G. Sinn, H. Mayer, S. Stanzl-Tschegg, Surface Properties of Wood and MDF after Ultrasonic-Assisted Cutting, *Journal of Materials Science* in review (2004).
- [36] G. F. Gao, B. Zhao, F. Jiao, C. S. Liu, Research on the influence of the cutting conditions on the surface microstructure of ultra-thin wall parts in ultrasonic vibration cutting, *Journal of Materials Processing Technology* 129 (2002), 66-70.

[37] M. Gindl, A. Reiterer, G. Sinn, S. E. Stanzl-Tschegg, Effects of surface ageing on wettability, surface chemistry, and adhesion of wood, Holz als Roh- und Werkstoff (2001), in press.

## 7 Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1.1.1: Bewegung der Werkzeugspitze mit und ohne Ultraschallüberlagerung
- Abb. 1.1.2: Zwei grundlegende Ultraschall-Trennverfahren: a) mit und b) ohne Schleifsuspension
- Abb. 2.1.1: Prinzip von Spannung und Strom bei einem Sinusverstärker: Die im Verstärker abfallende Spannung ist gleich der Ausgangsspannung minus der Betriebsspannung. Die im Verstärker in Wärme umgewandelte elektrische Leistung ergibt sich aus der abfallenden Spannung und dem fließenden Strom.
- Abb. 2.1.2: Prinzip von Spannung und Strom bei einer getakteten Schaltendstufe: Die ausgegebene Spannung ist gleich der Betriebsspannung, sodass im Verstärker (fast) keine Spannung abfällt und dementsprechend (fast) keine Wärme anfällt. Die Leistungssteuerung erfolgt über die Pulsbreite. Zwischen den Pulsen ist der Verstärker offen, sodass im Verstärker kein Strom fließen kann.
- Abb. 2.2.1: a) Fotografie des zylindrischen Messerhalters mit Verminderung des Querschnittes entlang der Länge, b) Dehnungsverlauf, c) Amplitudenverlauf
- Abb. 2.3.1: Elektrischer Aufbau (von unten) - Schaltverstärker mit wählbarem Leistungsbereich, Anpassungs-Induktivität, Messeinheit für Strom- und Spannung und Überlastschutz, Regel- und Anzeigeeinheit, Messverstärker für Kraftsensoren, Oszilloskop 1 zur Anzeige von Strom und Spannung, Oszilloskop 2 zur Anzeige der Schwingungsamplitude
- Abb. 2.4.1: Mechanischer Aufbau - Ultraschallkonverter (Transducer), Halterung für die Einleitung der statischen Schnittkräfte (Mounting Device), Werkzeughalter (Tool Holder) und angelötete Klinge (Knive). Die Bewegungsamplitude entlang der Länge ist gezeigt.
- Abb. 3.1.1: Symbolbild Kraftmessung
- Abb. 3.1.2: Normierte Schnittkraft als Funktion der Ultraschallamplitude für a) Fichte und b) Buche
- Abb. 3.1.3: Normierte Schnittkräfte als Funktion der Spandicke: a) trockene, b) feuchte Fichte; c) trockene, d) feuchte Buche (offene Kreise mit Ultraschallüberlagerung, geschlossene ohne Überlagerung).

- Abb. 3.1.4: Normierte Normalkräfte als Funktion der Spandicke bei trockener Buche (offene Kreise mit Ultraschallüberlagerung, geschlossene ohne solche).
- Abb. 3.1.5: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Geschwindigkeitseinflusses beim ultraschallüberlagerten Schneiden.
- Abb. 3.1.6: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit  $v_C$  auf die statische Schnittkraft bei unterschiedlich hoher Ultraschallamplitude  $a$ .
- Abb. 3.1.7: Einfluss der normierten Schnittgeschwindigkeit auf die statische Schnittkraft bei unterschiedlich hoher Ultraschallamplitude.
- Abb. 3.1.8: Schnittkraft für Buche als Funktion der Spandicke für a) Längs- und b) Tangentialschnitte.
- Abb. 3.1.9: Normalkraft für Buche als Funktion der Spandicke für a) Längs- und b) Tangentialschnitte.
- Abb. 3.2.1: Messerschläge auf der Oberfläche von Fichte (Schnittrichtung von links nach rechts)
- Abb. 3.2.2: Theoretische Bahnbewegung der Messerspitze auf der Probe für eine Ultraschallamplitude von  $8 \sigma_m$  und 170 mm/s Vorschubgeschwindigkeit.
- Abb. 3.2.3: Mikroröllchen auf mit Ultraschall bearbeiteter Fichtenoberfläche. Schnittrichtung von links nach rechts.
- Abb. 3.2.4: Anaglyphbilder von Mikro-Röllchen auf Fichte in unterschiedlicher Vergrößerung.
- Abb. 3.3.1: Änderung des Kontaktwinkels als Funktion der Zeit: a) konventionelle Bearbeitung und b) Ultraschall überlagerte Bearbeitung
- Abb. 3.3.2: Oberflächenenergie von konventionell (graue Balken) und mit Ultraschallüberlagerung bearbeitete Oberfläche (weiße Balken)



# **8 Beilage 1: Ultrasonic-Assisted Cutting of Wood**

**submitted to Journal of Materials Processing Technology**

G. Sinn<sup>1</sup>, B. Zettl<sup>1</sup>, H. Mayer<sup>1\*</sup>, P. Beer<sup>2</sup>, S. Stanzl-Tschegg<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Meteorology and Physics, BOKU, Tuerkenschanzstr. 18, A-1180 Vienna, Austria

<sup>2</sup> Christian-Doppler-Laboratory for Fundamentals of Wood Machining, BOKU, Tuerkenschanzstr. 18, A-1180 Vienna, Austria

\* Corresponding author: e-mail address: herwig.mayer@boku.ac.at,  
Tel.: +43 1 470 58 20 10, Fax.: +43 1 470 58 20 10

## **Abstract**

Ultrasonic-assisted cutting experiments have been performed on two wood species, spruce and beech in dry and wet state. Cutting forces and normal forces are measured and analysed with respect to uncut chip thickness, and linear correlation is found. Compared to conventional cutting reduction of cutting forces in the order of 50 % are achieved at relatively small vibration amplitudes of 8  $\mu$ m. The results are interpreted in terms of reduced friction forces caused by ultrasonic vibration of the cutting knife.

## **Keywords**

Wood, spruce, beech, ultrasonic cutting, ultrasonic processing, cutting force

## **Introduction**

Cutting is the most important process in machining wood and wood composites. Many machining processes, like sawing, planing or milling, are based on cutting processes. The surface quality obtained, the quantity of waste, the service life of the used tools or the energy consumption for the separation process are measures for the applicability and efficiency of certain cutting processes. Due to the importance of cutting for wood machining, improvements are of great technical as well as economical interest.

A promising technology to enhance cutting processes is ultrasonic-assisted cutting (UC). With this technique, the cutting tool is stimulated to vibrations at frequencies of typically 20 kHz. The cutting knife, which machines the material, performs periodic oscillations at amplitudes in the order of several micrometers, with beneficial influences on the cutting process. One effect of UC is to reduce cutting forces compared to conventional cutting (CC). This could be demonstrated turning different materials including aluminium, bronze copper, carbon and stainless steel [1] as well as metal matrix composite (SiC particle reinforced aluminium) [2]. New processes are possible using UC, like the turning of ultra thin wall cylinders [3], where the surface quality could be improved and the surface roughness reduced. In machining of optical plastics to mirror-surface, which is a multi-step process of grinding and polishing, UC could be used as substitute for both processes [4]. The roundness of the working piece turning hardened steel could be significantly improved by UC [5]. Improved surface finish by UC is also described for ultra-precision machining of glasses [6].

Reduction of cutting forces and improved surface quality are important goals for wood cutting processes, however, few studies exist on this subject. Kato [7] studied the application of ultrasonic vibrations on cutting tools in two basic cases: longitudinal vibration (i.e. vibration in cutting direction) and lateral vibration (i.e. vibration normal to the cutting direction). UC led to lower cutting forces and improved quality of the machined surfaces compared to CC. Chips formed during cutting were affected by ultrasonic vibrations, i.e. break type chips dominate in CC whereas flow type chips prevail in UC.

The present study serves to investigate ultrasonic-assisted cutting for machining of spruce (*Picea abies* L.) and beech (*Fagus sylvatica* L.), which are two of the most important commercial wood species in Europe. Knife setting parameters are chosen similarly to conventional cutting, and commercially available cutting blades are used. This allows direct comparison of UC and CC for commonly used geometries. Cutting forces were measured with respect to uncut chip thickness and amplitude of the ultrasonic vibration. To include variations of mechanical properties with moisture content, both wood species have been investigated in dry and wet condition.

## **Materials and Methods**

### **Wood species**

Two different wood species were used in this study: spruce (*Picea abies* L.) as representative for European softwood and beech (*Fagus sylvatica* L.) as representative of European

hardwood. Blocks of wet and dry wood were prepared. The sample size was: length 100 mm, width 10 mm and height 25 mm. Moisture content of wet wood was above fibre saturation point. The dry wood samples were stored in a climate chamber of 65% relative humidity (RH) and 20°C until equilibrium moisture content was reached. Mean raw density determined for dry spruce was  $415 \pm 23 \text{ kg/m}^3$  and the raw density of dry beech was  $723 \pm 39 \text{ kg/m}^3$ .

### **Ultrasonic cutting device**

The mechanical components of the ultrasonic cutting system, which is used in the present investigation, are shown in Fig. 1. Ultrasonic longitudinal vibrations of approximately 20 kHz are generated with a piezoelectric transducer. In order to achieve maximum vibration amplitudes at minimum power consumption the system vibrates in resonance. Vibration nodes form approximately in the centre of each mechanical part, and the node in the mounting part serves to clamp the system. This allows superimposing static cutting forces to the ultrasonic systems without damping the vibrations. Cross section area of the ultrasonic tool holder decreases along its length, which serves to magnify the vibration amplitude at the free end, where the cutting knife is mounted by soldering. A commercially available steel knife is used in the experiments. Conventional cutting experiments are performed using the same equipment and turning off the ultrasonic vibration.

The cutting geometry was as follows: The whole mechanical equipment was mounted in an angle of 40° with respect to the surface of the wood blocks. Due to the decreasing diameter of the ultrasonic tool holder, clearance angle of 20° of the knife resulted. The wedge angle of the steel blade was 45°. The ultrasonic cutting device was mounted on an instrumented microtome in order to cut slices with well-defined chip thickness.

The amplitude of the cutting knife was measured in two ways: Ultrasonic vibration gauges (induction coils used in ultrasonic material testing equipment [8]) served to determine the vibration amplitudes along the length of the tool holder and of the cutting knife. However, these vibration gauges are unhandy and may be damaged during cutting. Strain gauges mounted on the tool holder serve to additionally determine the vibration amplitudes in an indirect way. Strain amplitude at the place of the node and vibration amplitude of the knife are linearly dependent. Thus, the strain gauge signal served to keep the vibration amplitude constant at a pre-selected value (accuracy approximately  $\pm 5\%$ ). Numerical modelling of resonance vibration of the tool holder (based on the equilibrium of an infinitesimal element under elastic stresses [9]) served to optimise the design and to calculate strain amplitudes and vibration amplitudes along the length of the tool holder.

To study ultrasonic-assisted cutting, prototype equipment with 1000 W electric power has been developed. This system is in principal similar to commercially available equipment, which is used for ultrasonic welding, for example and is based on the principle of auto-resonant systems [10, 11]. However, for the purpose of wood processing it was adapted to obtain good energy efficiency. Controls of resonance frequency and vibration amplitudes are performed in closed loop circuits.

## **Cutting experiments**

Orthogonal cutting tests ( $\zeta=0^\circ$ ) in longitudinal direction [12] with a sharp tool were performed. Cutting speed,  $v_C$  was held constant at  $v_C=170$  mm/s in all experiments. Conventional cutting (CC) and ultrasonic-assisted cutting (UC) experiments were accomplished.

Forces were measured by means of two three-dimensional piezoelectric force sensors fixed below the specimens. Two forces were evaluated: cutting force and normal force. Positive normal forces indicate compression forces on specimen fixture whereas negative normal forces correlate to tension forces. Cutting force and normal force have been sampled with a frequency of 28 kHz and filtered with 6<sup>th</sup> order Butterworth low-pass filter (cut-off frequency 10 kHz). Measurements were recorded by computer and mean forces have been calculated numerically.

Two series of experiments were carried out:

To investigate the influence of chip thickness on UC, the vibration amplitude was kept constant at 8  $\sigma$ m and forces were measured as a function of uncut chip thickness. Uncut chip thickness is the thickness of the removed material before cutting, i.e. the infeed of material. CC experiments served for comparison. All experiments have been repeated 5 times to include statistical scatter in the evaluations.

To investigate the influence of ultrasonic vibrations on cutting forces, experiments at different vibration amplitudes of the cutting knife have been performed. In these experiments, the uncut chip thickness was kept constant at 200  $\sigma$ m.

## **Results**

In CC as well as UC experiments, continuous chips were formed. No fracture of chips within the measurement length of 100 mm was observed and chip deformation appeared similarly in

CC and UC tests. Cutting forces (forces acting in cutting direction) and normal forces (normal to cutting direction) are measured. Both forces are normalized with the specimen thickness of 10 mm (cutting width) in the following, and will be presented in unit of N/mm.

### **Influence of Chip Thickness on Normalized Forces in CC and UC**

In Fig. 2, the measured cutting forces in CC and UC experiments are shown for dry spruce (a), wet spruce (b), dry beech (c) and wet beech (d). Error bars indicate standard deviation of normalized forces measured in 5 consecutive experiments using the same experimental parameters.

The normalized cutting force,  $f_C$  increases with increasing uncut chip thickness,  $h$  for both materials in dry and wet condition. Data may be reasonably well approximated by linear regression using

$$f_C = f_{C0} + k_C h \quad (1)$$

where  $f_{C0}$  is the hypothetical normalized cutting force for zero chip thickness, and  $k_C$  is the increase of normalized cutting force with increasing chip thickness. The minimum correlation coefficient,  $r$  was 0.80 in UC tests of dry beech (Table 1). Cutting forces for zero chip thickness and the slope of the linear regression function are smaller in UC than in CC experiments with the same material (Fig. 2). UC and CC tests of wet spruce and beech deliver generally lower cutting forces than the respective tests in dry wood.

In Fig. 3, the normalized normal forces,  $f_N$  are shown for both species and both moisture contents with respect to uncut chip thickness,  $h$ . Similar to above, linear correlation may be used to approximate data.

$$f_N = f_{N0} + k_N h \quad (2)$$

$f_{N0}$  is the hypothetical normalized normal force for zero chip thickness, and  $k_N$  considers the variation of normal force with cutting thickness. In Table 2, the parameters as well as the correlation coefficients are shown. Scatter of normal forces is larger than scatter of cutting forces, and the absolute values of the correlation coefficients are smaller. Minimum correlation coefficient was -0.71 for UC of wet spruce. Parameters  $k_N$  and correlation coefficients are negative which means that normal forces decrease with increasing chip thickness. These forces even may become negative for large chip thickness, as observed in wet beech (Fig. 3 (d)). Additionally, the parameter  $k_N$  is similar whether the materials were cut in CC or UC experiments. Normal forces in UC are smaller than in CC tests of spruce and

dry beech, whereas approximately similar values were found in wet beech. Water content of wood samples has different influences on normal forces. Normal forces for CC of wet spruce are slightly higher than for dry spruce whereas no difference is found in UC experiments. CC of dry beech leads to greater normal forces than CC of wet beech, whereas similar normal forces were found in UC experiments for both moisture contents.

### **Influence of Ultrasonic Vibration Amplitudes on Normalized Cutting Forces**

Cutting forces at different ultrasonic vibration amplitudes of the steel knife are presented in Fig. 4. Results are shown relative to the mean cutting force measured in CC experiments (vibration amplitude zero) with the same equipment. In dry spruce (Fig. 4(a)) as well as dry beech (Fig. 4(b)), ultrasonic vibrations significantly reduce the cutting forces, and vibration amplitudes of 10  $\sigma_m$  lead to cutting forces, which are in the order of 40 % of the respective values found in CC experiments. At vibration amplitudes of 30  $\sigma_m$ , the cutting forces are approximately 20 % (spruce) or 30 % (beech) of the respective values found in CC tests.

## **Discussion**

The results presented above show, that ultrasonic vibrations of the cutting knife significantly affect forces cutting wood. Several influences, including wood species, moisture content, chip thickness and ultrasonic vibration amplitude have been found and will be discussed in the following.

The influence of wood species on the measured cutting forces may be mainly attributed to the different mass density [12]. Comparing normalized cutting forces of dry spruce and dry beech, larger values are found for wood with the larger density whereas normal forces are almost similar. Besides mass density, the moisture content has great effects on the mechanical properties of wood and thus on cutting forces. Cutting forces are reported to decrease with increasing moisture content from 10% RH to fibre saturation [12, 13]. This general behaviour was reproduced in this study, and lower cutting forces were found in wet instead of dry spruce and beech. One reason is the decreasing strength and stiffness of wood with increasing moisture content below fibre saturation, whereas at higher moisture contents these mechanical properties remain almost constant [14-18]. This implies that continuous chips formed during cutting are bent and inelastically deformed at lower forces at the higher moisture content, which additionally reduces the necessary cutting force. From fracture mechanics point of view, the fracture toughness of wood decreases with increasing moisture content [19, 20].

This may be similarly used to account for lower cutting forces found in the wet samples. Moisture affected cutting forces in beech more pronounced than in spruce. While greater cutting forces were measured for dry beech than dry spruce, forces were approximately similar in the wet condition.

For both species and both moisture contents, the cutting forces show linear dependence on uncut chip thickness. The regression line has a finite slope, which intersects the ordinate at positive cutting force for hypothetical zero chip thickness. According to Kivimaa [12] the non-zero axis intersection indicates, that the cutting force consists of two different contributions: one is the force needed to actually cut the material and the second accounts for the deformation of the separated chip. More recent studies regarding fracture mechanical modelling of cutting [21] assign the axis intersection at zero chip thickness to the work of fracture (energy associated with separation of the material) and the slope of the regression line to plastic work consumed by deforming unit volume. Refined cutting models include friction on the rake face of the tool and predict deviations from linear behaviour to lower cutting forces at small chip thickness [22, 23]. Additionally, friction on rake face may influence the slope of the linear correlation of normalized cutting force and chip thickness [23].

Ultrasonic vibrations of the knife significantly reduce cutting forces. The intersection with the ordinate at zero chip thickness is at lower cutting forces in both species and both moisture contents, and the gradients of the linear approximation lines are smaller. Kato [7] reports similar findings in ultrasonic cutting of wood using different tool geometry and at a factor of 65 lower cutting speed. Friction forces are prominent contributions to cutting forces, which are significantly reduced by superimposed ultrasonic vibrations. Friction of the cutting tool is caused by the contact of the clearance face with the cut surface and of the rake face with the chip.

The experiments show that extrapolation of normal force to zero chip thickness does not intercept at zero force, i.e. at zero chip thickness the cutting tool is pushed on the cutting surface and friction on the clearance face results. Analysis of knife movement with respect to the specimen for the investigated cutting speed shows (Fig. 5) that the cutting tool performs an inclined sinusoidal trajectory, since the ultrasonic cutting system is inclined by 40°. Following the trajectory from zero position, the tool penetrates into the material until maximum depth. Then the tool moves back, compression forces on the wood surface release and the tool starts moving forward again. The effect of forward and backward moving of the tool reduces by mean the sliding friction forces. Studies of ultrasonically vibrating tools on

wood surfaces give experimental evidence for reduced friction forces [24] and can be accounted for in Coulomb friction models [25, 26]. Reduced normal forces in UC experiments were found in spruce and dry beech, whereas wet beech showed similar forces in UC and CC experiments. Besides positive compression forces on the cut surface from the clearance face, bending of the chip causes negative contributions to the measured normal force, and the respective contributions are obviously different, depending on the material.

The effect of ultrasonic vibrations to reduce cutting forces is the more pronounced the larger the vibration amplitudes (Fig. 4). Normalized cutting forces in ultrasonic experiments,  $f_C(UC)$  depend on the vibration amplitude,  $u$  and may be approximated using the following equation:

$$f_C(UC) = f_C(CC) - f_{vibr} \left( 1 - \exp\left(-\frac{u}{u_0}\right) \right) \quad (3)$$

$f_C(CC)$  is the normalized cutting force found in conventional cutting experiments (vibration amplitude,  $u$  is zero) and  $f_{vibr}$  and  $u_0$  are experimental constants, as shown in Table 3. The vibration force,  $f_{vibr}$  is understood as the principally possible reduction of cutting force by ultrasonic vibrations, and  $u_0$  is the vibration amplitude, where 37 % of this reduction is actually found. This vibration amplitude  $u_0$  is in the range of 10  $\mu\text{m}$  for dry spruce and dry beech.

Considering possible applications of ultrasonic-assisted cutting in wood processing, it is most interesting, that reduction of cutting force is considerable already at vibration amplitudes of 10  $\mu\text{m}$ . It should be noted, however, that the cutting velocity investigated was far below the cutting speed in technical applications. Theoretical considerations predict, that the ultrasonic amplitude must be increased to obtain significant effects as the cutting speed increases [1]. Increase of vibration amplitude is possible by several methods, including mechanical design of the components and different types of ultrasonic transducers. Cyclic stresses at large amplitudes, however, may damage the mechanical components due to material fatigue and additionally the power requirement typically increases by an exponent of 2 or more with increasing vibration amplitude. The present investigation shows that cutting forces are reduced already at relatively small amplitudes, which makes ultrasonic cutting a promising technology in the field of wood processing.



## Conclusions

Ultrasonic vibrations of the cutting knife reduce cutting forces processing dry and wet softwood and hardwood. Reduced friction forces acting at the cutting knife mainly cause this effect.

Linear correlation of cutting and normal force, respectively, and uncut chip thickness is observed in ultrasonic-assisted cutting and conventional cutting experiments. Ultrasonic vibrations change the necessary forces for hypothetical zero chip thickness as well as the increase (cutting force) or decrease (normal force), respectively with increasing chip thickness.

Cutting forces decrease as the ultrasonic vibration amplitudes increase and are 20 - 30 % of the cutting forces found in conventional cutting tests at vibration amplitudes of in the range of 30  $\mu$ m. Ultrasonic cutting forces may be described as exponential decay of cutting forces with vibration amplitude from cutting force in conventional tests to minimum cutting force at high amplitudes.

## Acknowledgements

This work is financed by the Austrian Federal Ministry of Transport, Innovation, and Technology (BMVIT), Subprogram "Factory of Tomorrow", which is gratefully acknowledged.

## References

- [1] V. K. Astashev, V. I. Babitsky, Ultrasonic cutting as a nonlinear (vibro-impact) process, *Ultrasonics* 36 (1998), 89-96.
- [2] C. S. Liu, B. Zhao, G. F. Gao, F. Jiao, Research on the characteristics of the cutting force in the vibration cutting of a particle-reinforced metal matrix composites SiCp/Al, *Journal of Materials Processing Technology* 129 (2002), 196-199.
- [3] G. F. Gao, B. Zhao, F. Jiao, C. S. Liu, Research on the influence of the cutting conditions on the surface microstructure of ultra-thin wall parts in ultrasonic vibration cutting, *Journal of Materials Processing Technology* 129 (2002), 66-70.

- [4] J.-D. Kim, I.-H. Choi, Micro surface phenomenon of ductile cutting in the ultrasonic vibration cutting of optical plastics, *Journal of Materials Processing Technology* 68 (1997), 89-98.
- [5] M. Jin, M. Murakawa, Development of a practical ultrasonic vibration cutting tool system, *Journal of Materials Processing Technology* 113 (2001), 342-347.
- [6] M. Zhou, X. J. Wang, B. K. A. Ngoi, J. G. K. Gan, Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration, *Journal of Materials Processing Technology* 121 (2002), 243-251.
- [7] K. Kato, K. Tsuzuki, I. Asano, Studies on Vibration Cutting of Wood. I, *Mokuzai Gakkaishi* 17 (1971), 57-65.
- [8] H. Mayer, Fatigue crack growth and threshold measurements at very high frequencies, *Int. Mater. Rev.* 44 (1999), 1-34.
- [9] S. G. Amin, M. H. M. Ahmed, H. Youssef, A., Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis, *Journal of Materials Processing Technology* 55 (1995), 254-260.
- [10] V. I. Babitsky, Autoresonant Mechatronic Systems, *Mechatronics* 5 (1995), 483-495.
- [11] V. I. Babitsky, A. N. Kalashnikov, F. V. Molodtsov, Autoresonant control of ultrasonically assisted cutting, *Mechatronics* 14 (2003), 91-114.
- [12] E. Kivimaa, Die Schnittkraft in der Holzbearbeitung, *Holz als Roh- und Werkstoff* 10 (1952), 94-108.
- [13] G. Maier, Holzspanungslehre und werkzeugtechnische Grundlagen, 1. Auflage, Vogel Verlag und Druck GmbH & Co. KG, Würzburg, 2000.
- [14] F. Kollmann, Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Erster Band, Zweite Auflage/Erster Band, Springer, Berlin, 1951.
- [15] C. Skaar, Wood-Water Relations, Springer Series in Wood Science, T. E. Timell, Ed., Springer, Berlin, 1988.
- [16] P. Niemz, Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & CO., Leinfelden-Echterdingen, 1993.

- [17] Wood Handbook: Wood as an Engineering Material, Forest Products Society, Madison, Wis, 1999.
- [18] J. M. Dinwoodie, Wood: Nature's Cellular, Polymeric Fibre-Composite, The Institute of Metals, London, 1989.
- [19] L. Boström, The stress displacement relation of wood perpendicular to the grain. Part 1. Experimental determination of the stress-displacement relation, Wood Science and Technology (1994), 309-317.
- [20] A. Reiterer, S. Tschegg, The influence of moisture content on the mode I fracture behaviour of sprucewood, Journal of Materials Science 37 (2002), 4487-7791.
- [21] X. Huang, G. Jeronimidis, J. F. V. Vincent, The Instrumented Microtome Cutting Tests on Wood from Transgenic Tobacco Plants with Modified Lignification, Proc. Blant Biomechanics, Freiburg-Badenweiler, Georg Thieme Verlag (2000), pp. 475-482.
- [22] A. G. Atkins, Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some longstanding problems, International Journal of Mechanical Sciences in press (2003).
- [23] J. G. Williams, Friction and plasticity effects in wedge splitting and cutting fracture tests, Journal of Materials Science 33 (1998), 1998.
- [24] K. Fujiwara, M. Noguchi, H. Sugihara, Effects of Ultrasonic Vibration on Kinetic Friction. Based on a Standpoint of Ultrasonic Vibratory Cutting of Wood, Mokuzai Gakkaishi 22 (1976), 76-81.
- [25] W. Littmann, H. Storck, J. Wallaschek, Sliding friction in the presence of ultrasonic oscillations: superposition of longitudinal oscillations, Archive of Applied Mechanics 71 (2001), 549-554.
- [26] H. Storck, W. Littmann, J. Wallaschek, M. Mracek, The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motors, Ultrasonics 40 (2002), 379-383.

## Tables

Table 1: Linear regression analysis of normalized cutting forces  $f_C$  as a function of chip thickness  $h$  (eqn. 1).  $f_{C0}$  is the hypothetical normalized cutting force for zero chip thickness;  $k_C$  is slope of regression line;  $r$  is the correlation coefficient.

Wood	Condition	Methodology	$f_{C0}$ (N/mm)	$k_C$ (N/mm <sup>2</sup> )	$r$
Spruce	Dry	CC	2,92±0,59	30,62±4,68	0,96
		UC	1,82±0,47	17,14±3,74	0,92
	Wet	CC	2,05±0,33	15,25±2,15	0,95
		UC	0,95±0,15	7,85±0,98	0,96
Beech	Dry	CC	4,87±0,58	25,74±4,61	0,94
		UC	3,08±0,45	10,84±3,59	0,80
	Wet	CC	1,83±0,13	12,59±0,66	0,99
		UC	0,78±0,07	7,93±0,36	1,00

Table 2: Linear regression analysis of normalized normal forces,  $f_N$  as a function of chip thickness,  $h$  (eqn. 2).  $f_{N0}$  is the hypothetical normalized normal force for zero chip thickness;  $k_N$  is slope of regression line;  $r$  is the correlation coefficient.

Wood	Condition	Methodology	$f_{N0}$ (N/mm)	$k_N$ (N/mm <sup>2</sup> )	$r$
Spruce	Dry	CC	3,28±0,41	-6,87±3,27	-0,72
		UC	2,16±0,25	-6,69±2,00	-0,86
	Wet	CC	3,77±0,18	-6,12±0,80	-0,95
		UC	2,10±0,33	-5,03±2,05	-0,71
Beech	Dry	CC	3,72±0,50	-12,70±3,95	-0,85
		UC	1,94±0,35	-9,86±2,79	-0,84
	Wet	CC	1,45±0,19	-5,99±0,96	-0,95
		UC	1,25±0,16	-4,47±0,82	-0,94

Table 3: Parameter of regression analysis according to eqn. 3:  $f_{vibr}/f_C(CC)$  is the principally possible reduction of cutting force at high vibration amplitudes with respect to the conventional cutting force, and  $u_0$  is the ultrasonic vibration amplitude, where 37 % of this reduction is reached.

	$f_{vibr}/f_C(CC)$ , (%)	$u_0$ , (σm)
Dry Spruce	88.0±4.6	9.9±1.2
Dry Beech	74.8±3.2	8.7±0.9

# Figures

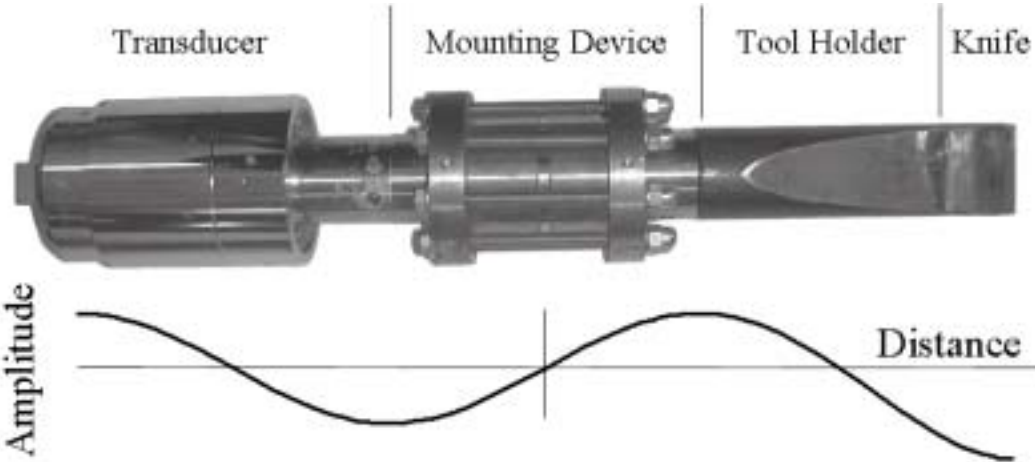
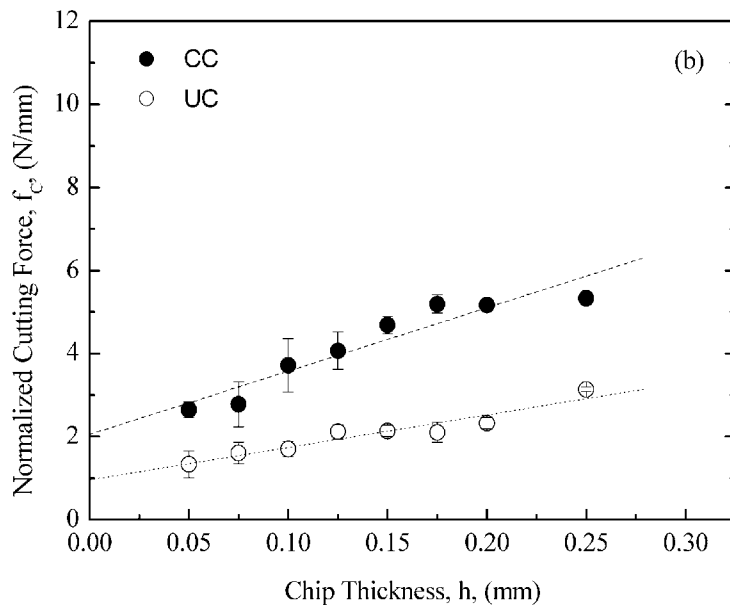
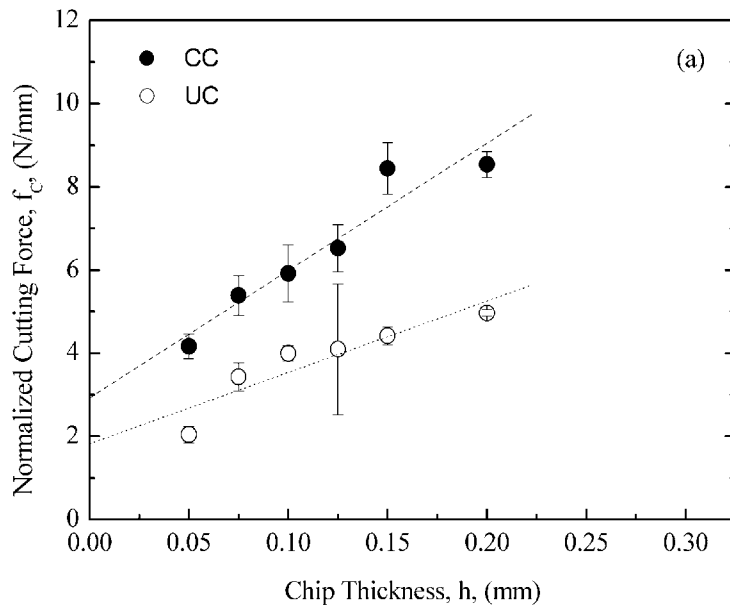


Fig. 1: Mechanical components of the ultrasonic cutting system. Vibration amplitude varies along the length of the mechanical parts and is maximal at the cutting knife's edge. Node in the mounting device is used to clamp the whole system.



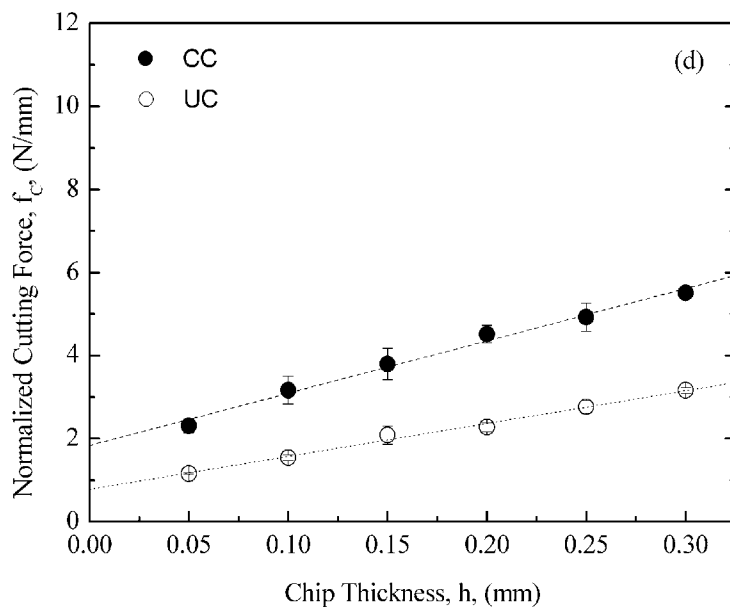
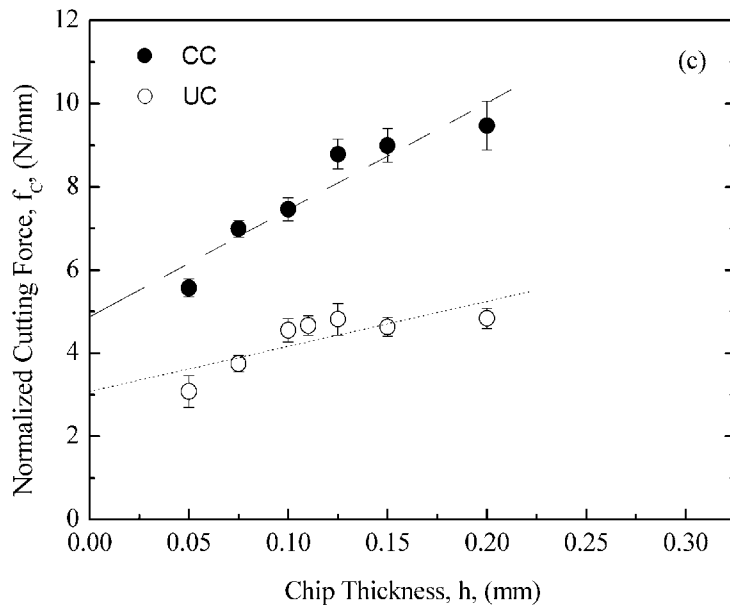
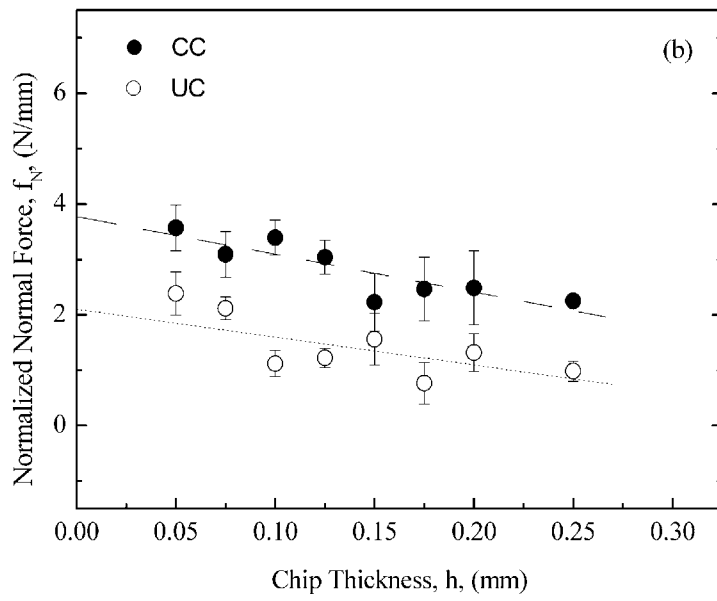
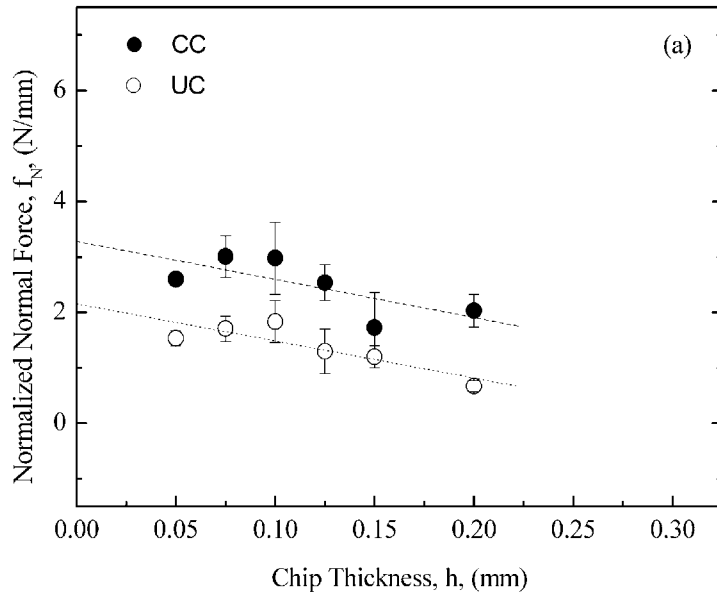


Fig. 2: Normalized cutting forces (forces per unit thickness) depending on chip thickness measured in CC (closed circles) and UC experiments (open circles) for dry spruce (a), wet spruce (b), dry beech (c) and wet beech (d).





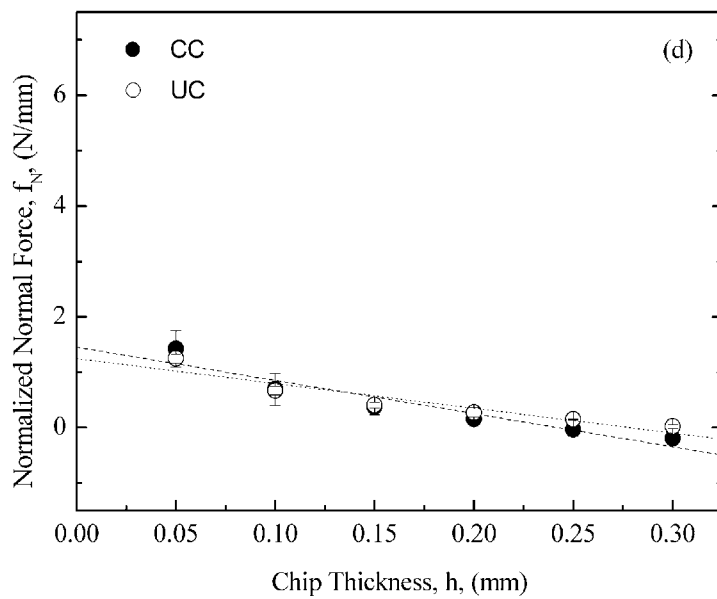
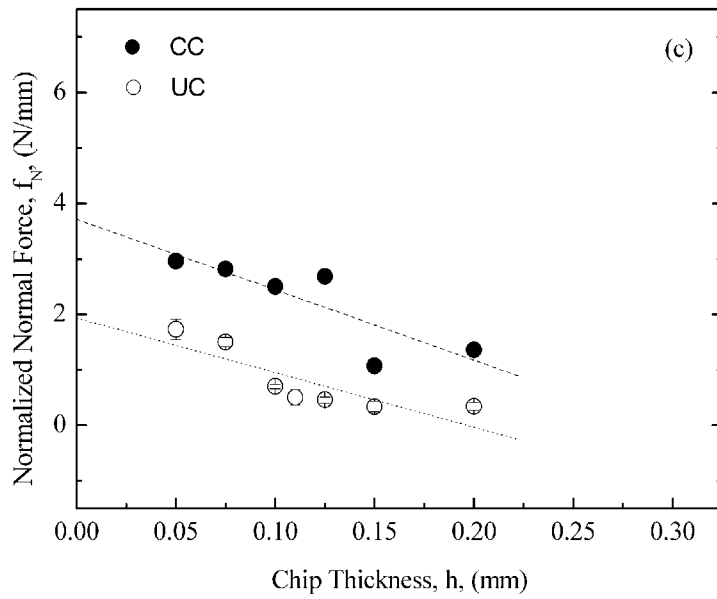


Fig. 3: Normalized normal forces depending on chip thickness measured in CC (closed circles) and UC experiments (open circles) for dry spruce (a), wet spruce (b), dry beech (c) and wet beech (d).

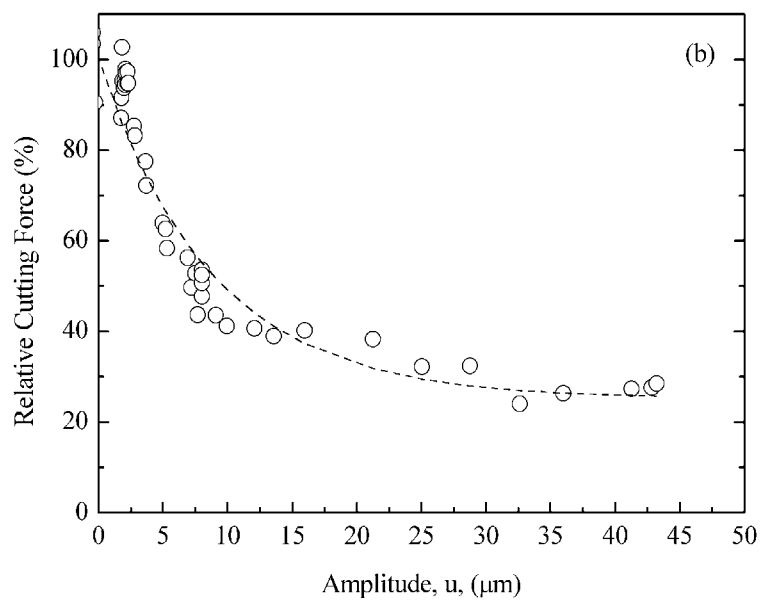
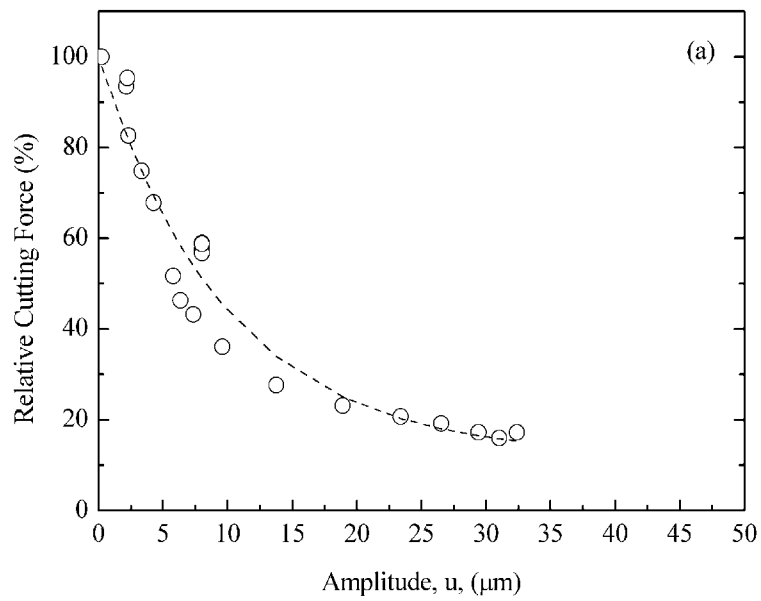


Fig. 4: Influence of ultrasonic vibration amplitudes of steel knife on cutting forces for chip thickness  $200 \mu\text{m}$  in dry spruce (a) and dry beech (b). Cutting forces at vibration amplitude zero (=100 %) determined with CC experiments serve for comparison.

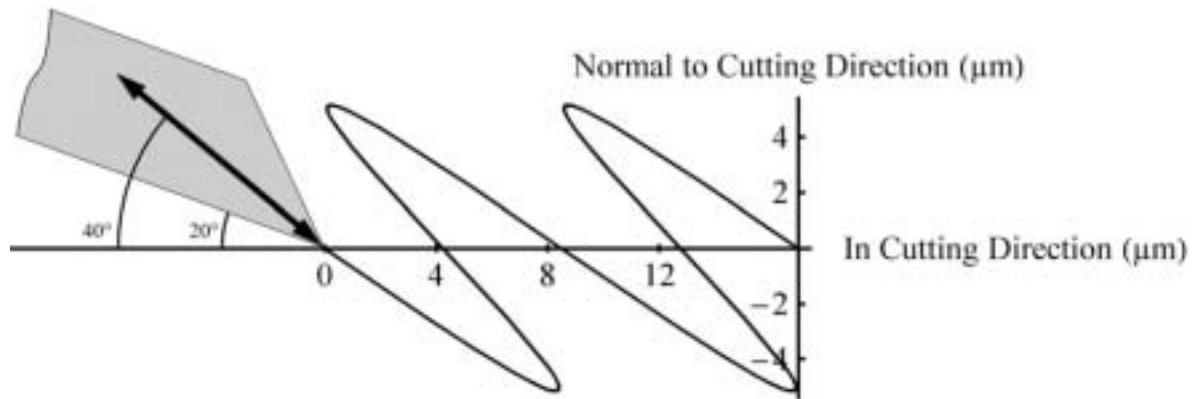


Fig. 5: Movement of the knife at vibration amplitude,  $u=8 \mu\text{m}$ , cutting speed,  $v_c=170 \text{ mm/s}$ , and mounting the equipment  $40^\circ$  inclined to the cutting direction.

# 9 Beilage 2: Surface Properties of Wood and MDF

submitted to Journal of Materials Science

Gerhard Sinn<sup>1</sup>, Herwig Mayer<sup>1\*</sup>, Stefanie Stanzl-Tschegg<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics and Material Science, BOKU - University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Türkenschanzstr. 18, A-1180 Vienna, Austria

<sup>2</sup> Christian Doppler- Laboratory for Fundamentals of Wood Machining, BOKU - University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Türkenschanzstr. 18, A-1180 Vienna, Austria

\* Corresponding author: herwig.mayer@boku.ac.at

## Abstract

Surfaces created by ultrasonic-assisted cutting (UC) of beech and spruce and of medium density fibreboard (MDF) are compared to surfaces obtained by conventional linear cutting (CC) using a sharp tool. Topography is evaluated performing roughness measurements and scanning electron microscopy. No effect of UC procedure on mean roughness is found. Surface of MDF and large areas of the surfaces of the woods appear similar after UC and CC, whereas other regions show impact marks and microscopic reels produced by the periodic oscillation of the tool in UC. Wettability of surfaces produced with both wood processing techniques is similar. Surface free energy measurements indicate accelerated ageing caused by UC, probably due to heating.

## Keywords

Ultrasonic Cutting, Surface Energy, Wettability, Roughness, Wood, MDF

## Introduction

Ultrasonic assisted cutting is a promising material processing technology. With this method, the cutting tool is excited to ultrasonic vibrations at amplitudes of several micrometers and frequencies in the range of 20 kHz. Beneficial influences on the cutting process are the reduction of cutting forces as reported for cutting metals [1] and metal matrix composites [2] and improved surface finish which is observed processing metals [3, 4], optical plastics [5] and glasses [6].

Few investigations exist on ultrasonic assisted cutting of wood. Kato [7] found reduced cutting forces caused by ultrasonic excitation of the cutting knife in experiments with Hinoki (*Chamecyparis obtusa* ENDL.) and Buna (*Fagus crenata* Blume) wood. Fujiwara [8] showed that the kinetic friction coefficient could be reduced by 80 % superimposing ultrasonic vibrations on the movement of the cutting tool. Our investigations performed with spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) confirm the positive influence of ultrasonic vibrations on the cutting process. Superimposing oscillations of 8  $\sigma$ m to the linear movement of the knife reduced the cutting forces necessary to produce chips with thickness 100  $\sigma$ m by approximately 33 % [9].

One of the most important factors processing wood is the quality of the obtained surfaces. A new machining process should be able to create better or at least similar surface quality to existing systems. No systematic investigation, however, on wood surfaces produced by ultrasonic assisted cutting is found in the literature. Surface properties influence the subsequent technological steps, i.e. large surface roughness often makes additional sanding necessary; better wetting behaviour improves penetration and adhesion of coatings [10] and adhesive bonds may be weakened by layers of compressed and crashed wood cells [11-13].

The obtained wood surfaces after processing may be considered as a complex combination of the biological structure [14], the influence of the separation process to produce the surface [15] and time dependent organic chemical processes on the newly created surface [16]. In order to study the influence of ultrasonic cutting on surfaces of wood based materials (beech, spruce and MDF), resultant surfaces were analysed and compared to those obtained for the same materials and cutting geometry without superimposed vibration (conventional cutting). The investigated materials are commonly used in the furniture industry where high quality of surfaces is required. Scanning electron microscopy (SEM) and surface roughness measurements were performed to analyse the surface topography after conventional and

ultrasonic-assisted cutting procedures. Wettability measurements and contact angle investigations served to quantify chemical modifications.

## **Materials and Methods**

### **Materials**

Ultrasonic-assisted cutting (UC) and conventional cutting (CC) experiments were performed with softwood Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.), with measured raw density of  $415.4 \pm 23.2 \text{ kg/m}^3$  and with hardwood, beech (*Fagus sylvatica* L.) with density  $722.0 \pm 38.7 \text{ kg/m}^3$ . Coated medium density fibre board (MDF) with raw density of  $828.2 \pm 5.5 \text{ kg/m}^3$  served as representative for wood composites. MDF is an artificial product based on wood fibres with adhesive content of maximum 12 % [17].

Both woods were cut in longitudinal direction and parallel to the fibres creating an LR-plane [18]. Length of samples was 100 mm and width was 10 mm (spruce and beech) and 19 mm (MDF), respectively. All specimens were stored in a climate chamber with standard climate of 20 °C and 65 % relative humidity until equilibrium moisture content was reached.

### **Ultrasonic-assisted cutting**

The arrangement used in the cutting experiments is shown in Fig. 1. The sharp cutting knife (steel blade) with wedge angle,  $\eta$  of 45° is fixed by soldering at the tip of the tool holder. The tool holder is rigid in order to minimise undesirable movement of the knife due to forces acting during the cutting experiments. The clearance angle of the cutting knife,  $\zeta$  is 10°. The device is mounted on an instrumented microtome to cut slices at constant cutting speed 170 mm/s and constant thickness of the uncut chip of 100  $\mu\text{m}$ .

The whole device comprising the ultrasonic transducer to generate ultrasonic vibrations, components to mount the equipment and the cutting tool with the attached steel knife is mounted in an angle  $\tau$  of 30 ° with respect to the specimen's surfaces. Longitudinal ultrasonic vibrations at vibration amplitude of 8  $\mu\text{m}$  at the place of the steel knife are generated and the frequency is approximately 20 kHz. This frequency is the resonance frequency of the mechanical system. In ultrasonic assisted cutting experiments, the movement of the steel blade thus may be considered as the superposition of the harmonic vibration in direction 30 ° with respect to the specimen surface and of the linear movement of the load train with constant cutting speed parallel to the specimen surface.

## **Surface Topography Analysis**

Surface roughness is one of the most considered factors regarding surface quality. Within this work 4 roughness parameters were evaluated using stylus type system, Mahr surface Perthometer M2. Surface roughness of the cut surface was measured in cutting direction (growth direction of the wood) with cut-off length 2.5 mm. Three roughness height parameters were evaluated: The average deviation of the profile from the mean line,  $R_a$ , the root mean square roughness,  $R_q$ , and the average of 5 peak-to-valley heights,  $R_z$  [19, 20] according to norm ISO 4287. To include one roughness spacing parameter in the evaluation, the mean spacing of profile irregularities,  $R_{Sm}$  (ISO 4287) was evaluated.

The roughness height and spacing parameters served to evaluate potential differences of surface profiles obtained by conventional and ultrasonic assisted cutting. Additionally, cut specimens of the three materials have been analysed by scanning electron microscopy in high vacuum to compare surfaces obtained with both techniques.

## **Contact angle measurements**

Semiautomatic measurement equipment Digidrop from GBX Company was used to perform contact angle measurements. All experiments were performed within five hours after cutting in order to avoid substantial surface inactivation. Two kinds of experiments were performed with beech:

The first series of experiments served to analyse the time dependent wettability of water droplets placed on the different surfaces. Drops of specified volume are dosed automatically by an auto syringe and are picked up by the specimen lying on a movable sample table [21]. Two-dimensional shape of the droplet as observed from the tangential direction was recorded in a movie file with 15.5 pictures per second, and left and right contact angles were evaluated. 42 experiments have been performed for both CC and UC surfaces of beech.

The second experimental series was advancing contact angle measurements, which served to determine the surface free energy by using the acid-base approach [22-25]. Contact angles of expanding droplets, i.e. advancing contact angles of test liquids were measured on the cut surfaces as observed from tangential direction. For these experiments, the syringe stays in the droplet continuously adding fluid from the top. This enables to perform measurements in dynamic equilibrium where the three-phase boundary moves on the surface. Thus, the size of the droplet increases and continuously wets new areas of the surface. In advancing contact angle measurements experimental difficulties due to penetration of fluid into the wood can be



overcome. Diiodomethane, formamide and water with surface energy parameters taken from Ref. [26] and shown in Tab. 1 were used to evaluate the measurements. Total of 25 contact angles were evaluated for CC and UC surfaces, respectively.

## Results

Results of roughness measurements (mean values and standard deviation) are summarized in Tab. 2. For beech and MDF mean roughness height parameters of UC surfaces were slightly lower than for CC surfaces, whereas the opposite was found for spruce. Considering standard deviations of the measured values, however, scatter ranges of roughness parameters measured on CC and UC surfaces overlap.

In order to statistically analyse the measured data in more detail, two sided T-Tests ( $P=5\%$ ) were performed. The hypothesis for these T-Tests is that for the same material the mean surface roughness produced with UC and CC are equal. Table 2 shows the results of these T-tests. The hypothesis could not be rejected in all cases, which means that mean values of  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$  and  $R_{Sm}$  were not significantly different for UC and CC surfaces.

Single sided F-Tests ( $P=5\%$ ) served to compare variances of roughness parameters measured on UC and on CC surfaces for the same material. Two hypotheses were tested, i.e. the variance measured in UC tests is larger than the respective value measured in CC tests, and the variance in CC tests is smaller than in UC tests. Table 3 shows that both hypotheses were rejected for MDF. This means that variances of surface roughness parameters were similar for both cutting procedures. Similarly, no influence of the cutting procedure on roughness parameter  $R_{Sm}$  was found for spruce and beech. Variance of the other roughness parameters  $R_a$ ,  $R_q$  and  $R_z$ , however, may be larger (spruce) or smaller (beech), respectively, for UC than for CC.

Scanning electron microscope investigations have been used to detect possible differences in the appearance of surfaces produced by UC and CC cutting. In spruce and beech, the cut surface shows longitudinal cells oriented in cutting direction, partially sliced with visible middle lamellae and open cell lumina. In large areas, the surfaces produced with both cutting techniques do not show any differences. In other regions, however specific features could be found on UC surfaces but not on CC surfaces. Periodic impact marks produced by the ultrasonically vibrating knife are visible in some areas of the cut surface of beech (Fig. 2(a)) and spruce (Fig. 2(b)). Other features are microscopically small reels with diameter 10 –

20  $\sigma\text{m}$  and length in the order of 50  $\sigma\text{m}$ , which could be occasionally found on UC surfaces. Fig. 3 shows such reels on the cut surface of beech (Fig. 3(a)) and spruce (Fig. 3(b)).

In contrast to wood, the structure of medium density fibreboard consists of irregularly oriented wood fibres embedded in the matrix. The cut surface shown in Fig. 4 reflects this structure, and cells oriented approximately normal as well as parallel to the cutting direction are visible. No reels or impact marks are found, and the surfaces produced by UC and CC do not show obvious differences. Conventional and ultrasonic cutting of MDF produces particles and some debris are visible on the cut surfaces in contrast to wood, which leads to the formation of continuous chips in CC as well as in UC experiments.

Contact angle measurements were performed with beech. In experiments with beech and spruce, the testing fluid rapidly penetrated into the surface, which made evaluations impossible. Wettability tests with testing liquid water served to evaluate the surface reactivity of beech. The results for surfaces produced by CC are shown in Fig. 5(a) and Fig. 5(b) for UC. The measured data show pronounced scatter, mainly due to the inhomogeneous structure of wood. Thick lines represent mean curves, which are similar for UC and CC. This means that the wettability is not influenced by the cutting procedure, within the ranges of scatter.

Surface energy measurements and evaluations were performed using the acid-base approach. In Fig. 6, the surface energy components evaluated for CC and UC beech surfaces are presented. Data of the entire surface free energy,  $\gamma$ , the Lifshitz van der Waals component,  $\gamma^{\text{LW}}$  and the polar component,  $\gamma^{\text{ab}}$  with the constituents' acid component,  $\gamma^{\text{a}}$  and base component,  $\gamma^{\text{b}}$  are shown. Surface free energy, components and constituents are correlated according to eqn (1).

$$\gamma = \gamma^{\text{LW}} + \gamma^{\text{ab}} \quad | \quad \gamma^{\text{LW}} = 2\sqrt{\gamma^{\text{a}}\gamma^{\text{b}}} \quad (1)$$

Entire surface free energies, Lifshitz van der Waals components and the polar components of beech surfaces produced by CC coincide with the respective values of surfaces produced by UC, within the ranges of scatter. The base component,  $\gamma^{\text{b}}$ , however, is larger for CC surfaces than for UC.

## Discussion

In this study, the woods beech and spruce and the wood based fibre material MDF was cut with a sharp tool. In MDF, UC as well as CC produced small particles, whereas continuous

chips were formed in both procedures cutting wood in longitudinal direction. For this process and cutting direction it is known that a sharp tool produces reasonably good surfaces even for low cutting speeds, like 170 mm/s as used in this study [27].

Roughness parameters investigated here, i.e. three roughness height parameters,  $R_a$ ,  $R_q$  and  $R_z$  and one spacing parameter,  $R_{Sm}$  delivered similar mean values for UC and CC surfaces. For homogeneous materials, these roughness parameters could be used reasonably well to characterise the influence of the processing technique on the obtained surfaces. In porous materials like woods, however, the measured roughness is influenced by both, the material's structure and the material's processing technique [27, 28]. There exists no generally accepted rule how to divide structural roughness from roughness caused by processing. UC may influence the surface profile; however, the considered roughness parameters could be too insensitive to account for these variations.

Additional information on surface structure caused by UC is available from the SEM surface studies. Two surface features of wood, which were found only on surfaces produced by UC and not on those created by CC were periodic impact marks (Fig. 2) and microscopic reels (Fig. 3). Both microscopic features can be rationalised with the kinematics of the steel blade with respect to the cutting surface, as shown in Fig. 7. The steel blade vibrates at 20 kHz and vibration amplitude  $8 \text{ }\mu\text{m}$  and is inclined by  $30^\circ$  to the cutting surface. The whole system moves forward with constant speed in cutting direction. Moving the blade with 170 mm/s for 50 ms (duration of one oscillation), the blade has the same vertical position and moving direction within a periodic distance of  $8.5 \text{ }\mu\text{m}$  in cutting direction.

The sinusoidal movement of the steel blade means that the blade penetrates the material in forward direction, creates new surfaces and then moves back und upward before it reverses and penetrates the material again. Periodic impact marks shown in Fig. 2 reflect the oscillation of the steel blade and distances between two marks are in the range  $8.5 \text{ }\mu\text{m}$ . Although sharp blades were used in the experiments, the cutting edge has certain roundness (the radius of the sharp blade is less than  $1 \text{ }\mu\text{m}$  and progressively increases with increasing in-service time). Besides material separation, the material below the blade is compressed and deformed and some adhesion of material may occur. Adhesion of loose material may lead to the microscopic reels, which are observed in some regions of the cutting surfaces of both woods (Fig. 3).

Changes in surface chemistry were evaluated by wettability tests and surface free energy measurements. Wettability tests performed on beech showed, that spreading and penetration of the water drops are similar on surfaces produced by UC and CC. The main parameter besides surface chemistry, which determines wettability, is the surface structure. Except some specific features, which were found in certain areas of UC surfaces, surface appearance was similar after both cutting procedures and no influence on the measured mean roughness was found. Compression of cells and the creation of weak boundary layers of destroyed material [13] were rare in both cases since sharp tools have been used.

Surface energy is sensitive to variations of surface chemistry. Measurements performed on beech surfaces revealed similar values of entire surface free energy, the Lifshitz van der Waals component, the polar component and the acid component, within the ranges of scatter. The base component, however, was reduced by approximately 30 % on UC surfaces compared with surfaces produced by CC. Investigations on microtomed beech samples showed reductions of the base component of aged wood [24, 29], and thermal loading accelerates ageing [30, 31]. Heat may be generated on the cutting surfaces in UC experiments due to the high frequency movement of the steel blade. This could explain accelerated ageing and thus the lowered base components on UC surfaces.

## Conclusions

Cut surfaces of beech and spruce in longitudinal fibre direction and of MDF have been studied after conventional cutting (CC) and ultrasonic-assisted cutting (UC). UC experiments have been performed superimposing ultrasonic vibrations of 8  $\mu\text{m}$  and frequency 20 kHz to the linear movement of the cutting knife. The following conclusions may be drawn.

1. Mean roughness obtained after UC and CC were similar, whereas variances of the roughness parameters  $R_a$ ,  $R_q$  and  $R_z$  were larger (beech) or smaller (spruce), respectively for conventionally cut surfaces.
2. Electron microscopy revealed similar cutting surfaces produced in MDF for UC and CC and reflect the structure of randomly oriented fibres embedded in adhesive. Large areas of the surfaces of both woods appear similar after both cutting procedures and show (partially sliced) cells. Compression of cells and the creation of weak boundary layers of destroyed material were rare since sharp tools were used. Periodic impact marks and microscopic reels were found only on UC surfaces.

3. Wettability of beech with water was similar after UC and CC.
4. Surface reactivity investigations of beech surfaces showed influences of cutting procedure on the base component of the surface free energy, which was lower for UC surfaces. Possible explanation is accelerated ageing due to thermal loading of the cutting surface.

## Acknowledgements

This work was financed by the Austrian Federal Ministry of Transport, Innovation, and Technology (BMVIT), Subprogram "Factory of Tomorrow", which is gratefully acknowledged.

## References

1. V.K. ASTASHEV and V.I. BABITSKY, *Ultrasonics* **36** (1998) 89-96.
2. C.S. LIU, B. ZHAO, G.F. GAO and F. JIAO, *J Mater Process Technol* **129** (2002) 196-199.
3. G.F. GAO, B. ZHAO, F. JIAO and C.S. LIU, *J Mater Process Technol* **129** (2002) 66-70.
4. M. JIN and M. MURAKAWA, *J Mater Process Technol* **113** (2001) 342-347.
5. J.-D. KIM and I.-H. CHOI, *J Mater Process Technol* **68** (1997) 89-98.
6. M. ZHOU, X.J. WANG, B.K.A. NGOI and J.G.K. GAN, *J Mater Process Technol* **121** (2002) 243-251.
7. K. KATO, K. TSUZUKI and I. ASANO, *Mokuzai Gakkaishi* **17** (1971) 57-65.
8. K. FUJIWARA, M. NOGUCHI and H. SUGHIHARA, *Mokuzai Gakkaishi* **22** (1976) 76-81.
9. G. SINN, P. BEER, B. ZETTL and H. MAYER, in Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Wood Machining Seminar, Matsue, Japan, 2003, edited by P.C. Tanaka, (Organizing Committee of the 16 IWMS. Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue, Japan) p. 203-209.
10. M. DE MEIJER and H. MILITZ, *Progress in Organic Coatings* **38** (2000) 223-240.

11. M. STEHR, J. SELTMAN and I. JOHANSSON, *Holzforschung* **53** (1999) 93-103.
12. M. STEHR, *Holzforschung* **53** (1999) 1999.
13. M. STEHR and I. JOHANSSON, *J. Adhes. Sci. Technol.* **14** (2000) 1211-1224.
14. H.A. CORE, W.A. CÔTÉ and A.C. DAY, *Wood: Structure and Identification*, in "Syracuse Wood Science Series, 6", (Syracuse University Press, Syracuse, 1979) p. .
15. E. MAGOSS and G. SITKEI, in Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Wood Machining Seminar, Los Angeles, California, USA, 2001, edited by S. R. p. 584.
16. T. NGUYEN and W.E. JOHNS, *Wood Sci. Technol.* **13** (1979) 29-40.
17. M. DUNKY and P. NIEMZ, *Holzwerkstoffe und Leime. Technologie und Einflussfaktoren.*, (Springer, Berlin Heidelberg, 2002) p. .
18. J. KOPAC and S. SALI, *J Mater Process Technol* **5812** (2002) 1-9.
19. E. WESTKÄMPER and A. RIEGEL, *Holz Roh. Werk.* **50** (1992) 475-478.
20. L. MUMMERY and R. ROMETSCH, *Rauheitsmessung. Theorie und Praxis.*, (Hommelwerke, VS-Schwenningen, 1993) p. .
21. M. GINDL, G. SINN, A. REITERER and S. TSCHEGG, *Holzforschung* **55** (2001) 433-440.
22. M. GINDL, G. SINN, W. GINDL, A. REITERER and S. TSCHEGG, *Coll. Surf. A* **181** (2001) 279-287.
23. M. GINDL and S. TSCHEGG, *Langmuir* **18** (2002) 3209-3212.
24. M.E.P. WÅLINDER, *Holzforschung* **56** (2002) 363-371.
25. M. DE MEIJER, S. HAEMERS, W. COBBEN and H. MILITZ, *Langmuir* **16** (2000) 9352-9359.
26. R. GOOD, J., *Contact angle, wetting, and adhesion: a critical review*, in "Contact angle, wettability and adhesion", (VSP, Utrecht, 1993) p. 3-36.
27. B. ETTTEL, *Sägen Fräsen Hobeln Bohren: Die Spannung von Holz und ihre Werkzeuge*, (DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & CO., Leinfelden-Echterdingen, 1997) p. .

28. Y. FUJIWARA, Y. FUJII and S. OKUMURA, in Proceedings of the 16<sup>th</sup> Int. Wood Machining Seminar, Matsue, Japan, 2003, edited by T. Chiaki p. 359-365.
29. M. GINDL, A. REITERER, G. SINN and S.E. STANZL-TSCHEGG, *Holz Roh. Werk.* (2001) in press.
30. A.W. CHRISTIANSEN, *Wood Fiber Sci.* **22** (1990) 441-459.
31. W.A. CHRISTIANSEN, *Wood Fiber Sci.* **23** (1991) 69-84.

## Tables

Tab. 1: Surface energy components (in  $\text{mJ}/\text{m}^2$ ) of the test liquids used in this work [26].

Test liquid	$\nu$	$\nu^{LW}$	$\nu^{ab}$	$\nu^+$	$\nu^-$
Diiodomethane ( $\text{CH}_2\text{I}_2$ )	50.80	50.80	0.00	0.00	0.00
Formamide ( $\text{CH}_3\text{NO}$ )	58.00	39.00	19.00	2.28	39.60
Water	72.80	21.80	51.00	25.50	25.50

Tab. 2: Mean values and standard deviations (in  $\sigma\text{m}$ ) of roughness parameters  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$  and  $R_{Sm}$ .

Specimen	Repetitions	$R_a$	$R_q$	$R_z$	$R_{Sm}$
Beech CC	15	5.16±2.25	6.95±2.97	32.4±12.8	591±166
Beech UC	15	4.98±1.24	6.85±1.63	30.6±5.0	624±137
Spruce CC	15	4.63±1.31	6.10±1.73	28.4±6.8	721±163
Spruce UC	14	5.36±2.77	6.99±3.40	31.9±14.5	645±149
MDF CC	15	6.63±1.78	9.07±2.45	52.7±13.0	273±44
MDF UC	15	6.20±1.81	8.45±2.43	49.1±12.0	276±51



Tab. 3: Results of T-Tests of significance of two unknown means,  $\sigma$  with unknown standard deviations,  $\omega$ . "Yes" means that the hypothesis  $H_0: \sigma(CC) = \sigma(UC)$ ,  $P=5\%$  cannot be rejected.

	$R_a$	$R_q$	$R_z$	$R_{Sm}$
Beech	Yes	Yes	Yes	Yes
Spruce	Yes	Yes	Yes	Yes
MDF	Yes	Yes	Yes	Yes

Tab. 4: Results of F-Tests of significance of the hypotheses  $H_0: \omega^{\circ}(CC) > \omega^{\circ}(UC)$  and  $H_0: \omega^{\circ}(CC) < \omega^{\circ}(UC)$ ,  $P=5\%$ . "CC>USC" means that hypothesis  $\omega^{\circ}(CC) > \omega^{\circ}(UC)$  cannot be rejected and "CC<USC" means that hypothesis  $\omega^{\circ}(CC) < \omega^{\circ}(UC)$  cannot be rejected.

"-" means that both hypotheses are rejected.

	$R_a$	$R_q$	$R_z$	$R_{Sm}$
Beech	CC>USC	CC>USC	CC>USC	–
Spruce	USC>CC	USC>CC	USC>CC	–
MDF	–	–	–	–

## Figures



Fig. 1(a)

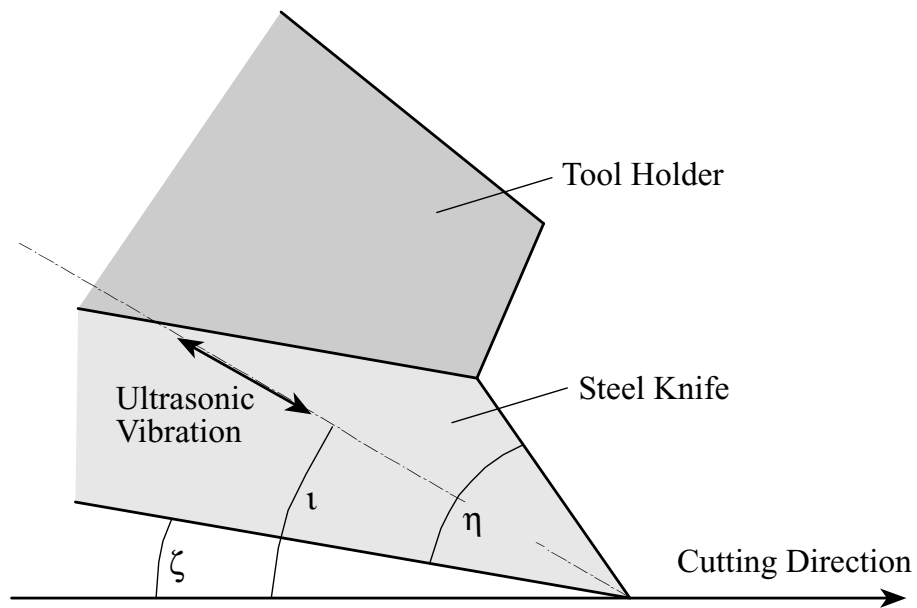


Fig 1(b)

Fig. 1: Geometric arrangement of ultrasonic-assisted cutting and conventional cutting experiments. (a), the tool tip and attached knife while cutting spruce. (b), involved angles, i.e. clearance angle  $\zeta$ , wedge angle  $\eta$  and angle of vibration axis  $\tau$  with respect to the cutting surface.

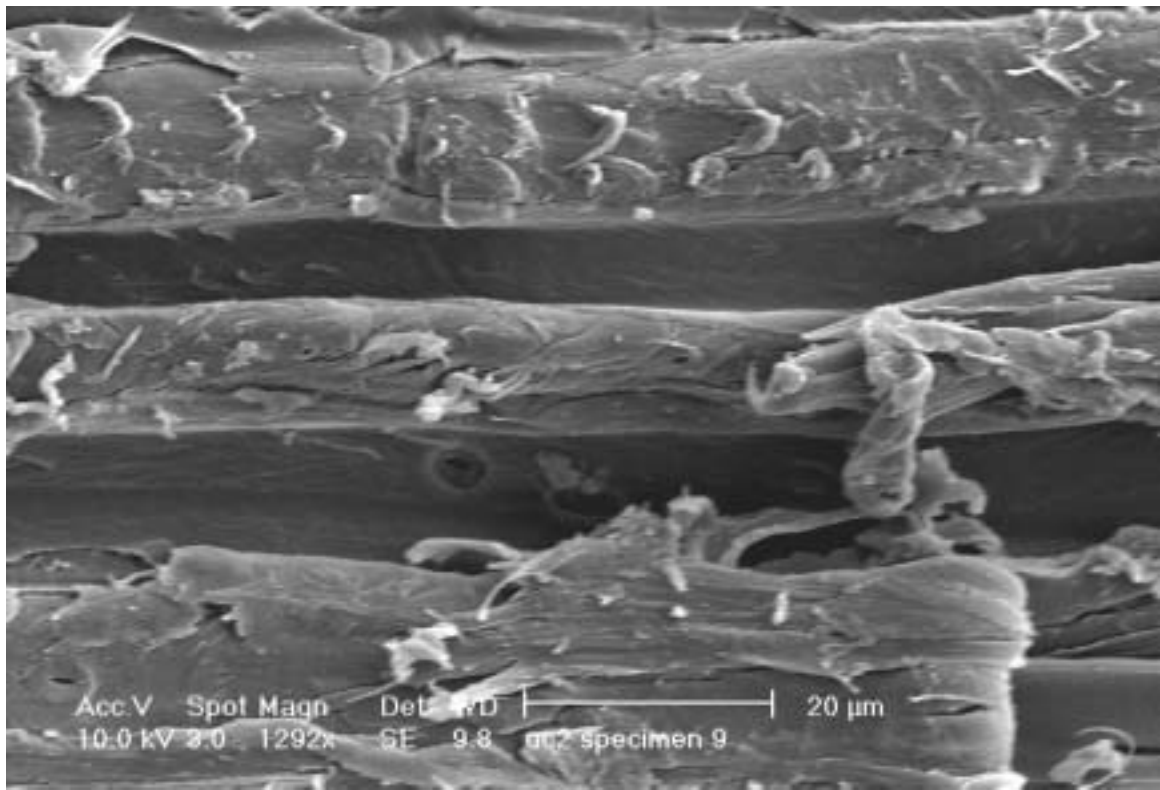


Fig. 2(a)

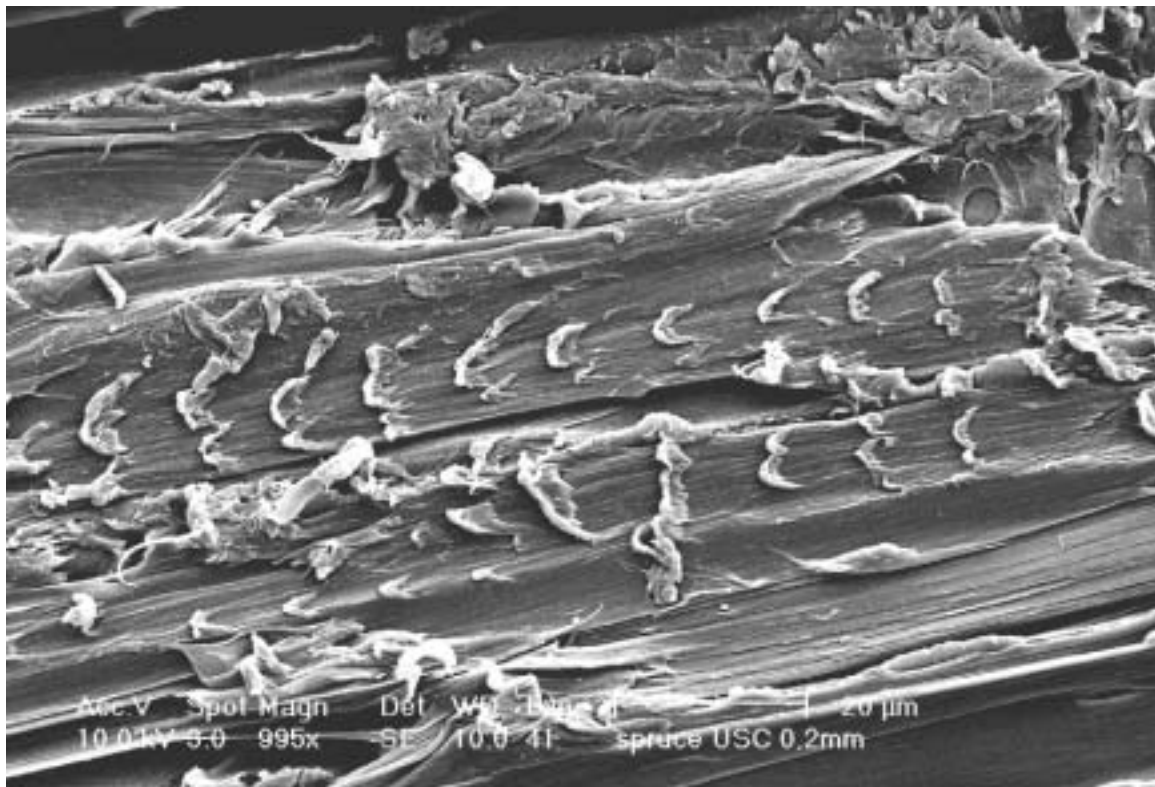


Fig. 2(b)

Fig. 2: Periodic impact marks on the surface of beech (a) and spruce (b) created by ultrasonic-assisted cutting. Cutting direction is from right to left (a) and from left to right (b), respectively.



Fig. 3(a)

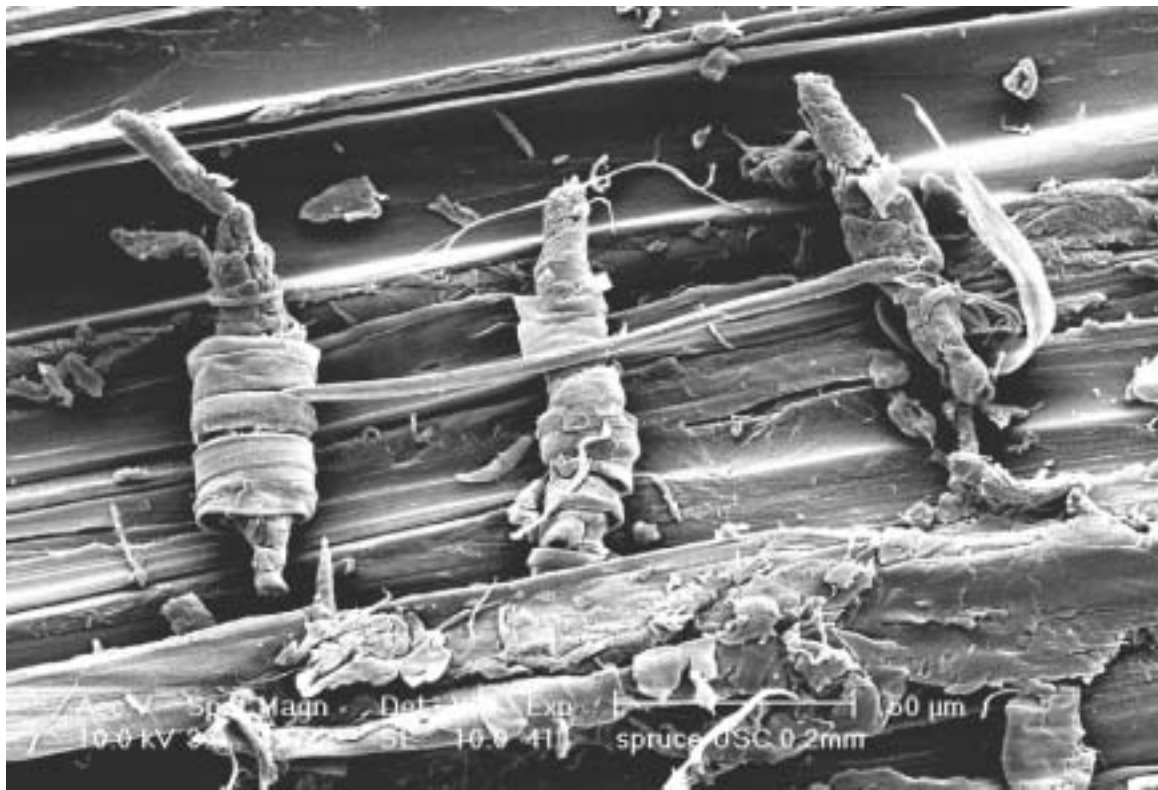


Fig. 3(b)

Fig. 3: Surfaces produced by ultrasonic-assisted cutting of beech (a) and spruce (b). Microscopically small reels were formed. Cutting direction was from bottom to top (a) and from left to right (b), respectively.

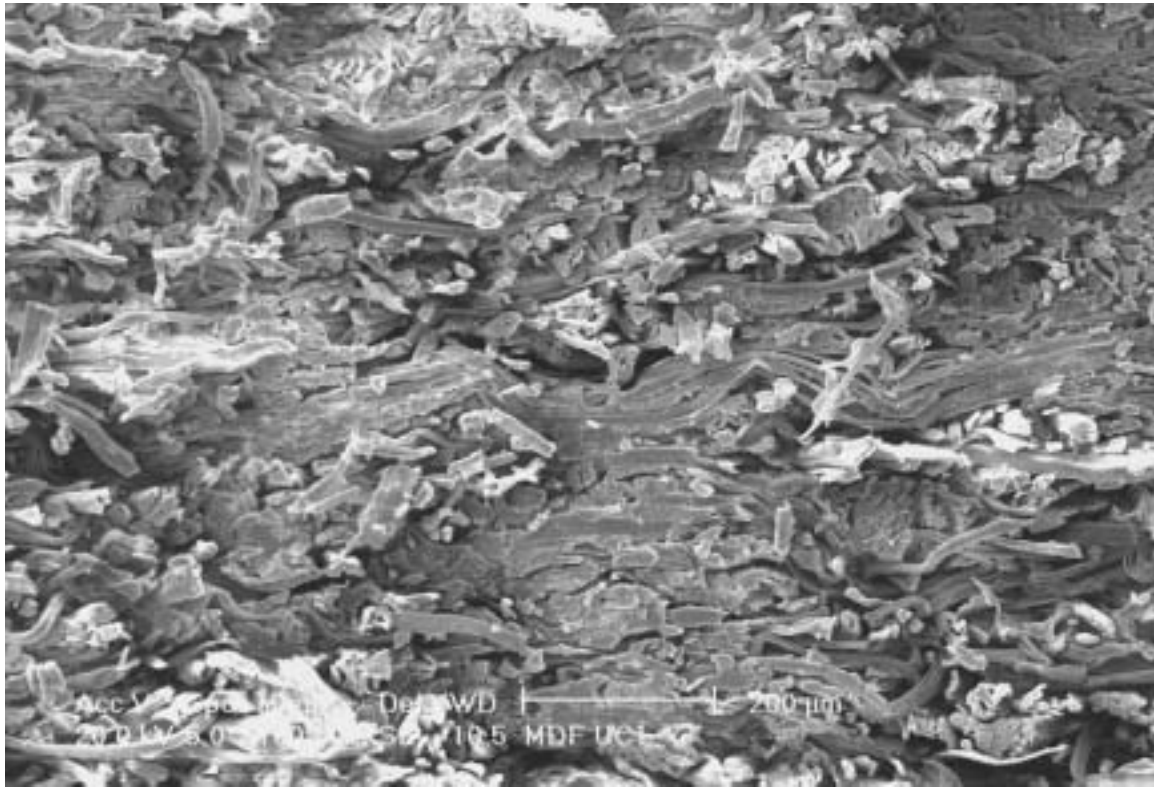
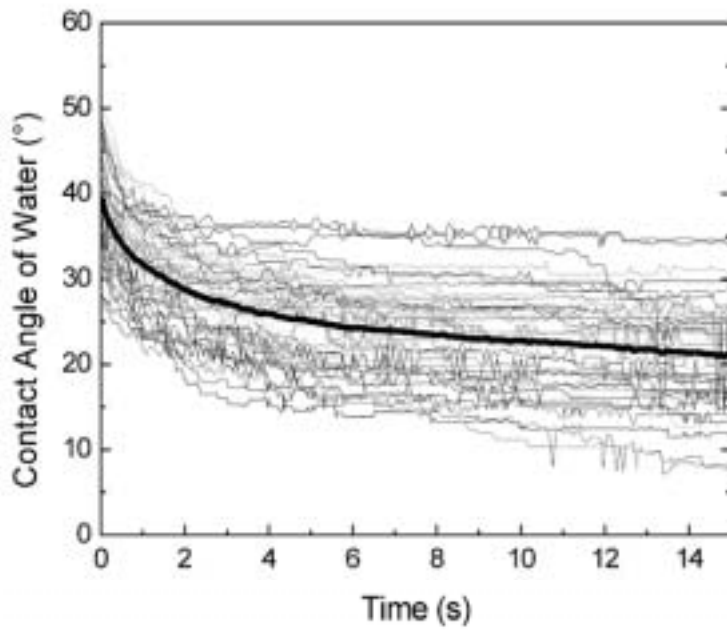
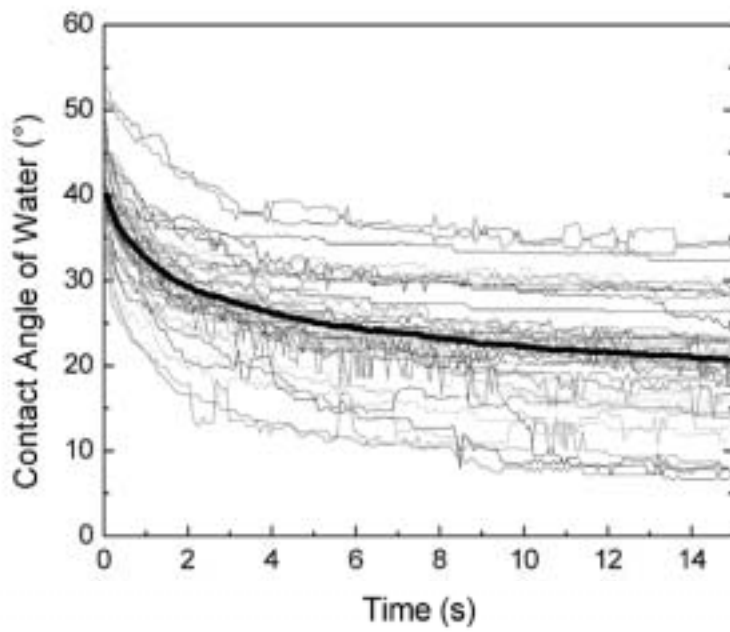


Fig. 4: Surface of MDF produced by UC. Randomly oriented fibres embedded in adhesive are visible. Cutting direction is from left to right.





(a)



(b)

Fig. 5: Contact angle of water measured on cut surfaces of beech as a function of time. Surfaces were produced by CC (a) and UC (b), respectively.

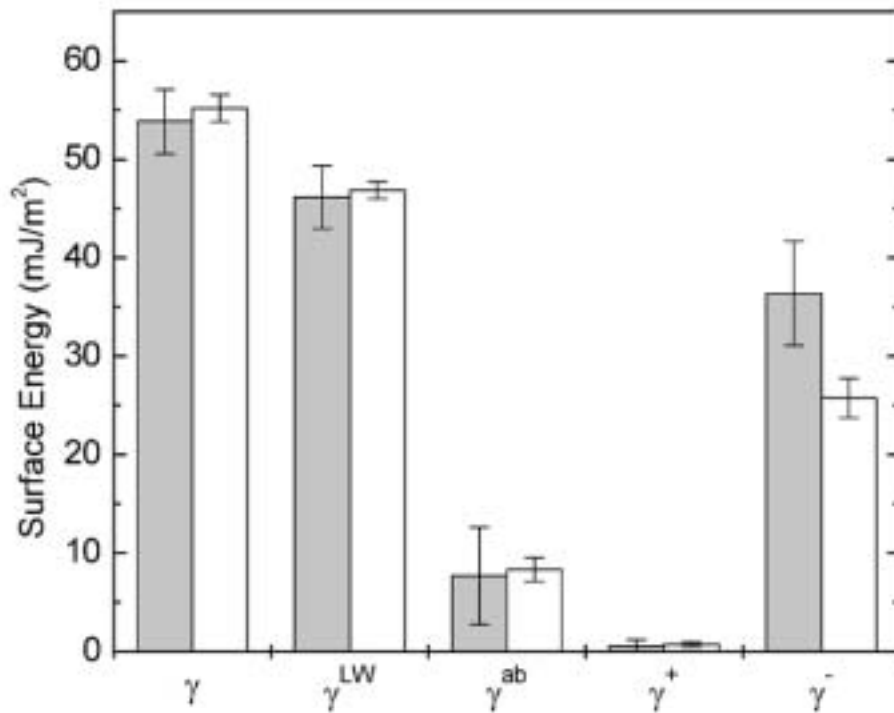


Fig. 6: Surface energies on beech surfaces produced by CC (grey columns) and UC (white columns).  $\gamma$  is the entire surface free energy,  $\gamma^{LW}$  the Lifshitz van der Waals component,  $\gamma^{ab}$  the polar component,  $\gamma^+$  the acid component, and  $\gamma^-$  the base component. Error bars indicate standard deviations.

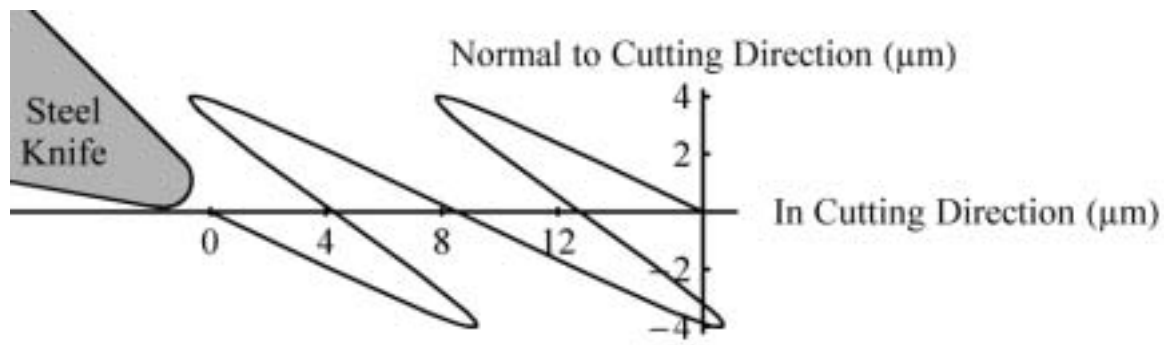


Fig. 7: Movement of the knife at vibration amplitude  $8 \mu\text{m}$ , vibration frequency 20 kHz, cutting speed 170 mm/s and angle of vibration axis  $30^\circ$ .