Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
Technische Universität Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. J. Hesselbach

Abschlußbericht

Automatisierte Bestimmung der Jointintervalle beim Hobeln durch Online-Messung der Messerschlagsweiten

Forschungsvorhaben-Nr.: AiF 11539

Forschungsthema: Automatisierte Bestimmung der Jointintervalle beim Hobeln durch Online-Messung der Messerschlagsweiten

Antragsteller: Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (DGfH)
Bayerstraße 57-59
80335 München
Tel.: 089 / 538957

Forschungsstelle: Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
Technische Universität Braunschweig
Langer Kamp 19b
38106 Braunschweig
Tel.: 0531 / 391-7601
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. J. Hesselbach
Oberingenieur: Dr.-Ing. H.-W. Hoffmeister

Forschungszeitraum: 1.5.1998 - 31.1.2000

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3
1.1 wissenschaftliche Problemstellung . . . 3
1.2 Stand der Technik . . . 6
1.2.1 Kenngrößen in der Rauheitsmessung . . . 6
1.2.2 Meßverfahren . . . 7
1.2.3 Bildverarbeitung in der Qualitätkontrolle . . . 12

2 Zielsetzung 14

3 Aufbau des Meßsystems 16
3.1 mechanischer Aufbau . . . 16
3.1.1 Meßprinzip . . . 16
3.1.2 Aufbau der Beleuchtungseinheit . . . 19
3.1.3 Aufbau des Meßportals . . . 21
3.2 Bildanalysestrategien . . . 22
3.2.1 Segmentierung und Objektbildung . . . 22
3.2.2 Summierung der Grauwerte . . . 24
3.3 Bildanalysesoftware . . . 26
3.3.1 Aufbau des Programms . . . 26
3.3.2 Analyse und Bewertung des Profils . . . 27
3.3.3 Einrichtung und Bedienung des Meßsystems . . . 31

4 Test des Meßsystems 35
4.1 Bildschärfe der CCD-Kamera . . . 35
4.2 Verifikation des Meßergebnisses . . . 37
4.3 Wiedergabe unterschiedlicher Messerschlagsmuster . . . 39
4.4 Variation der Werkstoff- und Maschinenparameter . . . 41
4.4.1 Messerschlagsweite . . . 41
4.4.2 Schneidenverschleiß . . . 43
4.4.3 Holzfeuchte . . . 45
4.4.4 Unwuchtschwingungen . . . 47

5 Zusammenfassung 50

Literatur 52

Formelzeichen 55

1 Einleitung

1.1 wissenschaftliche Problemstellung

Qualitätsbildendes Merkmal einer gehobelten Massivholzoberfläche sind die sogenannten Messerschläge, die sich aus der Überlagerung von Vorschubbewegung und rotierendem Werkzeug ergeben. Relativ zum Werkstück beschreibt das Werkzeug eine Zykloide, von der ein Teil auf der Holzoberfläche abgebildet wird. Die exakte mathematische Beschreibung der dadurch entstehenden Eingriffsverhältnisse beim Gegen- und Gleichlauffräsen stellt Boratynski [4] auf. Ettelt [7] ersetzt die exakten, trigonometrischen Beziehungen durch Näherungslösungen, nach denen sich die Messerschlagsweite f_z und die Messerschlagstiefe t aus dem Schneidenflugkreis D, der Anzahl der Hobelmesser z, der Drehzahl des Werkzeugs n und der Vorschubgeschwindigkeit v_f berechnen lassen:

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} \quad \text{und} \tag{1}$$

$$t = 0{,}5 \cdot D \cdot \left(1 - \cos\left(\arcsin\left(\frac{f_z}{D}\right)\right)\right) \tag{2}$$

Wichtig ist die aus den Gleichungen (1) und (2) folgende Wahl der richtigen Prozeßparameter. Aus wirtschaftlichen Gründen wird die Bearbeitung bei einer möglichst hohen Vorschubgeschwindigkeit angestrebt, um die hohen Investitionskosten für eine Kehlmaschine auf eine große Werkstückzahl umlegen zu können. Gleichzeitig soll durch die Hobelmaschine Endqualität gefertigt werden, so daß die Werkstücke nicht mehr nachgeschliffen werden müssen. Dies ist auch in Hinblick auf den nachfolgenden Prozeßschritt „Lackieren" von Bedeutung, da unter einer Lackschicht die Messerschläge häufig noch deutlicher hervortreten. Aber selbst bei qualitativ sehr hochwertigen Produkten, bei denen sowohl vor als auch nach

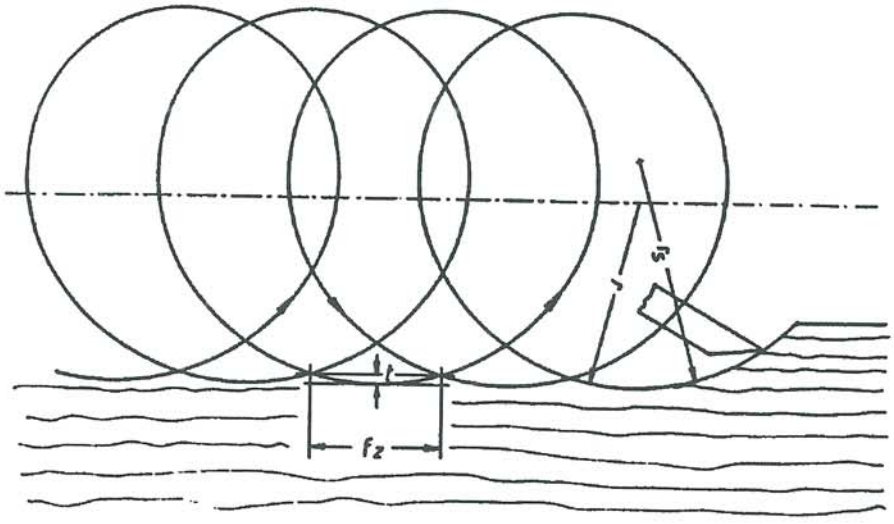

Bild 1: Entstehung der Oberfläche beim Hobeln im Gegenlauf [7]

dem ersten Lackieren ein Schleifprozeß durchgeführt wird, ist die Größe der Messerschläge von Bedeutung. Durch sie werden die Dauer und damit auch die Kosten des Schleifprozesses maßgeblich beeinflußt. Die Messerschlagsweite und ganz besonders auch die Messerschlagstiefe bestimmen den optischen Eindruck der Oberfläche und damit auch die Qualität des Gesamtprodukts. Das ist zum Beispiel von Bedeutung im Fenster- und Türbau, wenn nach dem letzten Hobelprozeß nicht noch nachgeschliffen werden soll. Aber auch bei Funktionsflächen kann die Größe der Messerschläge von Bedeutung sein, wenn durch sie z.B. wie bei Leimholz die Verleimeigenschaften mitbestimmt werden.

Wenn bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten mit mehreren Messern gehobelt wird, ist es deshalb wichtig, daß alle Schneiden auf einem gemeinsamen Schneidenflugkreis liegen. So bald eine oder mehrere Schneiden um ein Stück zurückversetzt sind, bilden sich die Schneiden mit dem größeren Schneidenflugkreis verstärkt auf der Holzoberfläche ab, so daß das Messerschlagsmuster ungleichmäßiger wird. Ist der Schneidenversatz größer als die theoretische Messerschlagstiefe, dann bildet sich nur noch das Messer mit dem größten Schneidenflugkreis auf der Oberfläche ab und für die Werte von Messerschlagsweite und -tiefe muß man mit einem Werkzeug mit $z = 1$ rechnen. Da laut Tröger und Lang [25] Messerschläge schon ab einer Tiefe von 6 μm auch mit dem Auge problemlos erkannt werden können, ist vor allem bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten der Einsatz von Werkzeugen mit bis zu 12 Messern notwendig. Nur so kann auch bei Vorschubgeschwindigkeiten von $v_f = 60$ m/min und mehr ein Oberflächenbild erzielt werden, das vom Kunden nicht als störend wahrgenommen wird. Die Wahrscheinlichkeit für eine auftretende Schneidenflugkreisdifferenz steigt mir der Anzahl der eingesetzten Schneiden. Bild 2 zeigt ein Werkzeug mit vier Schneiden, bei dem allein Schneide Nr. 1 auf dem ursprünglichen Flugkreis liegt. Die Schneiden 2 bis 4 weisen dagegen eine Flugkreisdifferenz auf. Die Messerschläge bei einheitlichem

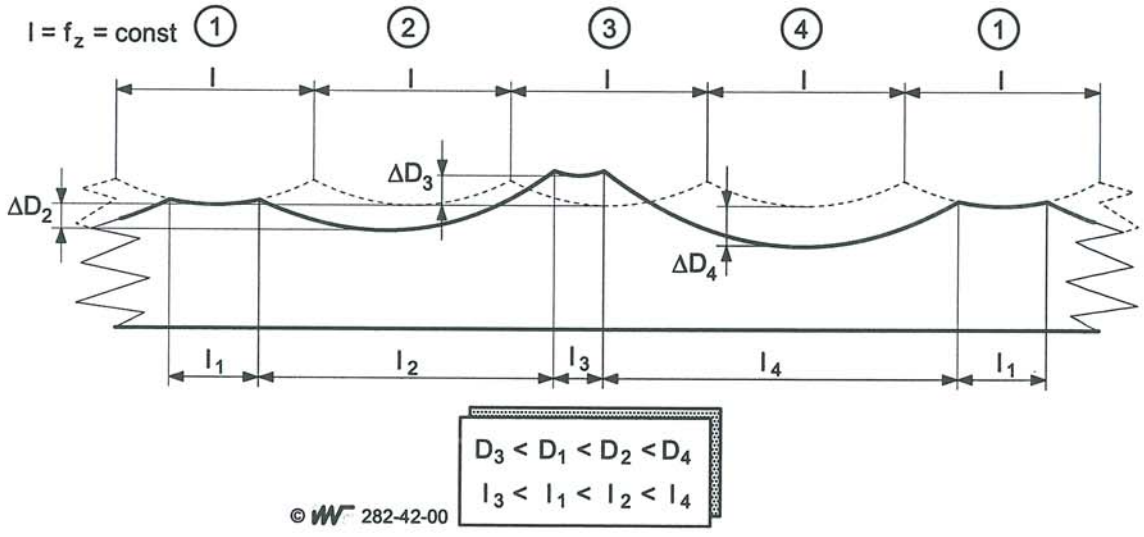

Bild 2: Gestaltabweichungen 3. Ordnung infolge unterschiedlicher Flugkreisdurchmesser (Schneidenanzahl $z = 4$).

Schneidenflugkreis sind als gestrichelte Linie dargestellt. Durch die Abweichungen kommt es zu unterschiedlichen Messerschlagsweiten und -tiefen auf der bearbeiteten Oberfläche, die sich auf die optischen Eigenschaften bzw. die spätere Verleimbarkeit negativ auswirken.

Um einen gleichmäßigen Schneidenflugkreis und damit ein gleichmäßiges und feines Messerschlagsmuster zu gewährleisten, sind verschiedene Voraussetzungen erforderlich. Neben einer steifen Maschinenkonstruktion, Spindeln mit einem möglichst geringen Lagerspiel und hydraulisch gespannten Hobelmesserköpfen benötigt man die Möglichkeit, die Messer auf einer Schleifmaschine mit einer Abweichung von nur wenigen Mikrometern schon auf einen einheitlichen Schneidenflugkreis schleifen zu können. Die restliche Schneidenflugkreisdifferenz wird nach Einbau des Hobelmesserkopfes in der Maschine bei Betriebsdrehzahl beseitigt. Durch die hohe Rotationsfrequenz und die großen Massen spielen dynamische Effekte eine wesentliche Rolle, so daß dies nicht im Ruhezustand erfolgen kann. Deshalb wird bei Betriebsdrehzahl ein Jointstein an das Messer gefahren. Dabei gibt es grundsätzlich zwei unterschiedliche Varianten. Bei einem Geradjointer wird der Jointstein hydraulisch oder manuell entlang der Messerkante gezogen. Pro Jointvorgang wird der Jointstein um jeweils zwei bis drei Mikrometer zugestellt, so daß die Messer auf einen gemeinsamen Flugkreis abgeschliffen werden. Problematisch bei dem Geradjointer ist die Tatsache, das der Jointstein bei dem ersten Kontakt mit der Schneide besonders viel abträgt und dann mit zunehmender Wegstrecke an Wirkung verliert. Bei profilierten Messern ist ein Geradjointer nicht mehr einsetzbar. In diesem Fall muß der sogenannte Profiljointer eingesetzt werden, bei dem der Jointstein entsprechend vorprofiliert ist. Dieser Jointstein wird nun senkrecht an die Schneidkante herangefahren und ebenfalls je Jointvorgang um zwei bis drei Mikrometern zugestellt. Da bei einem Profiljointer der Abtrag gleichmäßiger ist und der Jointvorgang insgesamt kontrollierter abläuft, ist er auch bei unprofilierten Messern dem Geradjointer vorzuziehen. Ein solcher Jointvorgang wird direkt nach dem Einbau der Messer durchgeführt und muß wiederholt werden, wenn sich durch unterschiedlichen Verschleiß der einzelnen Hobelmesser wieder eine Schneidenflugkreisdifferenz eingestellt hat.

Durch den Jointvorgang werden an den Spitzen der Messer Fasen angeschliffen. Da durch diese Fasen ab einer bestimmten Jointfasebreite die Bearbeitungsqualität sinkt, kann der Jointvorgang nicht beliebig häufig wiederholt werden. Deshalb ist die Wahl des Zeitpunkts zum Jointen ausgesprochen wichtig. In der Praxis werden die Abweichungen der Ist-Oberfläche von der Soll-Oberfläche durch eine erfahrenen Fachkraft subjektiv erfaßt, die anschließend entscheidet, ob durch einen Jointvorgang die entstandene Schneidenflugkreisdifferenz beseitigt werden kann, oder ob ein Schneidenwechsel stattfinden muß. Immer weiter steigende Vorschubgeschwindigkeiten einerseits und eine schnelle Ermüdung des Prüfpersonals durch die hohe physische und psychische Belastung an einem solchen Prüfplatz andererseits bewirken, daß die manuelle Kontrolle nicht gründlich genug durchgeführt werden kann bzw. nicht mehr zumutbar ist. Werden die Jointintervalle dann zu kurz gewählt, erhöhen sich die Werkzeugkosten und die Stillstandszeiten der Maschine, weil auch häufiger ein Ausbau und Nachschleifen der Messer erforderlich wird. Wird dagegen zu spät gejoin-

tet, läuft man Gefahr Ausschuß zu produzieren. Dadurch erhöhen sich die Rohstoffkosten und es werden eventuell teure Ausbesserungsarbeiten an Halbzeugen erforderlich.

Ein Meßsystem, daß die Messerschläge im Durchlauf erfassen und bewerten kann, würde deshalb an dieser Stelle einen großen Fortschritt in der Automatisierung und Qualitätssicherung bedeuten. Nachdem ein solches System auf den gewünschten Qualitätsstandard angelernt worden ist, werden Abweichungen zuverlässig detektiert und eine entsprechende Fehlermeldung ausgegeben. Eine Abhängigkeit der Bewertungsergebnisse von Tagesform und Einsatzdauer ist bei einer maschinellen Kontrolle nicht gegeben, so daß die Qualität nach objektiven Kriterien bewertet und zum richtigen Zeitpunkt das Signal für einen Jointvorgang gegeben werden kann. Besonders die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, bei der Vorschubgeschwindigkeiten von $v_f = 100$ m/min und mehr gefahren werden sollen, ist ohne den Einsatz eines Online-Meßsystems nicht denkbar.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Kenngrößen in der Rauheitsmessung

Die Begriffe zur Beschreibung des Oberflächencharakters sind in DIN 4761 genormt. Im Gegensatz zu dem in der Holzbearbeitung eingeführten Begriff Messerschläge spricht die Norm allgemeiner von Rillen. Folgende Begriffsbestimmungen sind festgelegt:

- Rillenabstand *a*
- Rillenbreite *b*
- Rillentiefe *c*

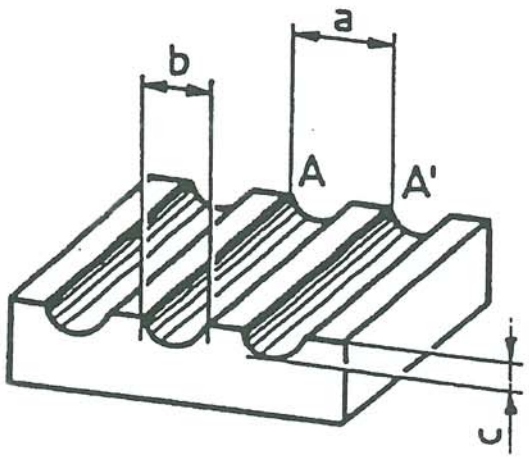

Bild 3: Rillige Oberfläche nach DIN 4761

Gemäß DIN 4760 wird bei der Klassifizierung von Oberflächenunebenheiten von Gestaltabweichungen 1. bis 6. Ordnung gesprochen. Mit Gestaltabweichungen 1. Ordnung sind For-

mabweichungen gemeint, die auf Fehler in den Maschinenführungen oder falsche Einspannung des Werkstücks zurückzuführen sind. Gestaltabweichungen 2. Ordnung bezeichnen Welligkeiten in der Oberfläche, die beispielsweise durch Maschinenschwingungen hervorgerufen werden. Als eigentliche Rauheiten gelten die Gestaltabweichungen 3. und 4. Ordnung, wobei die Messerschläge zu den Formabweichungen 3. Ordnung zählen, während die Abweichung 4. Ordnung Riefen und Schuppen auf der Oberfläche kennzeichnet. Die Formabweichungen 5. und 6. Ordnung gehen in die Gefüge- und Gitterstruktur der Werkstoffe, sind optisch und mit Oberflächenmeßtechnik nicht mehr erfaßbar und damit irrelevant.

Nach DIN 4761 sind Messerschläge gleichmäßige oder ungleichmäßige, spitzkämmige Rillenprofile. Die Rillenschar ist gleichgerichtet, geordnet und parallel mit gleichem oder ungleichem Rillenabstand a. Diese Beschreibung bezieht sich auf die ideale Form einer gehobelten Oberfläche. Zusätzlich wird diese Fläche bzw. das Profil überlagert durch:

- Längs- und Querrauheiten aufgrund der Werkstoffstruktur und infolge des Schneidenverschleisses
- Fasern aufgrund der Vorspaltung und des Schneidenverschleisses
- Querrauheiten und Welligkeiten durch Schwingungen und Schneidenflugkreisdifferenzen

Es sind noch weitere Attribute denkbar, z.B. porig, furchig, maserig u.a.. In der Literatur [3] wird daher zwischen Struktur- und Bearbeitungsrauhigkeit unterschieden. Die Strukturrauhigkeit bezeichnet den Anteil der Oberflächenrauheit, der von der Struktur der Werkstoffe, nicht jedoch von der Bearbeitung herrührt. Eine weitere Unterscheidung ergibt sich aus der üblichen Erfassung der Oberfläche in Form von Profilschnitten. Die DIN 4762 unterscheidet je nach Abtastrichtung zwischen Quer- und Längsrauheit. Die Darstellung der Oberflächentopografie in Form von Konturbildern, d.h. flächigen Oberflächenprofilen, die aus mehreren äquidistanten Profilschrieben gewonnen worden sind, ist in der gängigen Praxis noch nicht üblich. Örtliche Erhebungen innerhalb des Profils werden laut DIN 4762 als Profilkuppen bezeichnet, im umgekehrten Fall als Profiltal.

1.2.2 Meßverfahren

Mechanische Tastschnittgeräte

Bei mechanisch abtastenden Sensoren wird eine Diamant-Tastspitze mit Hilfe eines Vorschubgeräts über die Oberfläche geführt. Die durch die Oberflächentopographie bedingte vertikale Lageänderung der Tastspitze wird durch ein induktives Wegmeßsystem erfaßt. Solche mechanischen Tastschnittgeräte sind in der Oberflächenmeßtechnik der metallverarbeitenden Industrie weit verbreitet. Das Profil, das von dem Tastschnittgerät erfaßt wird, ist stets ein Hüllprofil der tatsächlichen Oberfläche. Durch den Tastspitzenradius t_r und

den Spitzenwinkel γ_r der Tastspitze können Profilöffnungen, die kleiner als der Tastspitzenradius sind oder die einen geringeren Öffnungswinkel besitzen, nur unzureichend erfaßt werden. Ebenso können Hinterschneidungen, wie sie häufig bei angeschnittenen Poren in der Holzoberfläche vorkommen, nicht erfaßt werden. Deshalb wirkt eine Tastspitze mit einem großen Tastspitzenradius wie ein mechanischer Filter, der kurzwellige Anteile aus dem Oberflächenprofil herausnimmt. Die Auswertung und Berechnung von Kennwerten bezieht sich immer auf das Ist-Profil, das von dem Taster erfaßt worden ist. In den Normen DIN 4762, 4771 und 4776 sind eine Reihe von Kennwerten definiert, die in der Metallbearbeitung verwendet werden und dort zur Definition von bestimmten Eigenschaften einer Oberfläche benutzt werden können. Eine Übertragung dieser Kennwerte in die Holzbearbeitung ist allerdings schwierig, da sich dort Struktur- und Bearbeitungsrauhigkeit überlagern. Die Kennwerte enthalten dann auch eine Komponente, die von der Werkstoffstruktur abhängt und werden deshalb materialabhängig. Bei der Betrachtung von Meßergebnissen ist deshalb die genaue Kenntnis der Versuchs- und Auswertebedingungen erforderlich.

Für die Charakterisierung bandgeschliffener Hölzer schlägt Pahlitzsch [17] die Rauhtiefe R_t, die Glättungstiefe R_p und den Profiltraganteil t_p entpsprechend DIN 4768 vor. 1966 stellt Sieminski [23] systematische Untersuchungen der Gestalt von Oberflächen verschiedener Holzarten vor, die mit unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren hergestellt wurden. Als Kenngrößen verwendet er die mittlere Rauhtiefe R_m. Der Mittenrauhwert R_a und die maximale Rauhtiefe R_{max} werden als nicht empfehlenswert zur Beurteilung von Holzoberflächen eingeschätzt. Westkämper und Riegel [26] benutzen die Kenngrößen der Abott-Kurve zur Beurteilung geschliffener Massivholzoberflächen. Unterschiedliche Holzarten sind Gegenstand der Untersuchungen. Ansatz bei der Verwendung dieser Kenngrößen ist es, einzelne

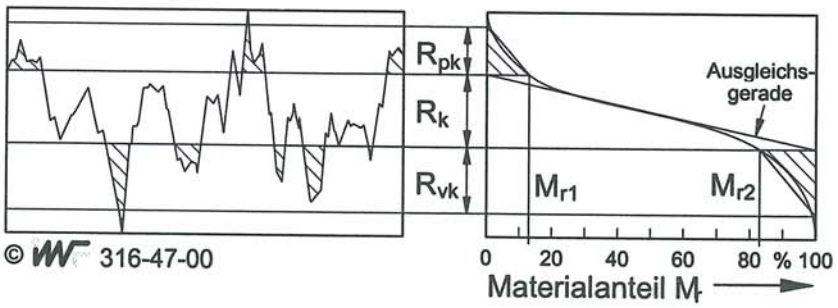

Bild 4: Gewinnung der Kenngrößen R_{pk}, R_k und R_{vk} aus der Abott-Kurve.

Profilbereiche getrennt zu bewerten. Anstelle eines einzelnen Kennwerts werden drei Kenngrößen, die aus der Abottkurve berechnet werden, bestimmten Oberflächenbereichen zugeordnet. Demnach werden

- die angeschnittenen Gefäße überwiegend der reduzierten Riefentiefe R_{vk} zugeordnet,
- der mittlere Profilbereich wird der Kernrauhtiefe R_k zugeordnet und

- die Profilspitzen, die durch Fasern verursacht werden, werden der reduzierten Spitzenhöhe R_{pk} zugeordnet.

Zur Messung der kinematischen Rauheit beim Hobeln setzen Heisel und Krondorfer [10] ein Tastschnittgerät ein, bei dem gezielt die Breite der Tastschneide und die Tastkraft variiert worden sind. Da die Tiefe der Messerschläge deutlich geringer als die Tiefe der Poren bzw. die Höhe der aufstehenden Fasern ist, dominiert in dem Tastschrieb die Strukturrauhigkeit des Holzes und das Profil der Messerschläge kann nicht zuverlässig erfaßt werden. Durch eine Erhöhung der Tastkraft von $F_t = 1,5$ mN auf $F_t = 70...195$ mN ließ sich der Einfluß aufstehender Fasern deutlich verringern. Gleichzeitig wurde der Einfluß der Poren in der Holzoberfläche durch die Verwendung einer breiteren Tastschneide vermindert. Die Tastschriebe der Holzoberflächen wurden jeweils mit einem Tastschrieb einer Kunststoffoberfläche verglichen, die bei den gleichen Bearbeitungsparametern gehobelt wurde. Im Gegensatz zum Holz handelt es sich bei dem Kunststoff um einen homogenen Werkstoff ohne Poren und einer gegenüber den Messerschlägen zu vernachlässigenden Bearbeitungsrauhigkeit. Bei einer Tastkraft $F_t = 195$ mN und einer Tastschneidenbreite $T_b = 1,6$ mm wurde eine gute Übereinstimmung zwischen den Tastschrieben der Refernzoberfläche im Kunststoff und der Holzoberfläche erzielt. Für die Bewertung der Meßergebnisse wurde die mittlere Abweichung zwischen dem auf der Holzoberfläche gemessenen Profil und dem

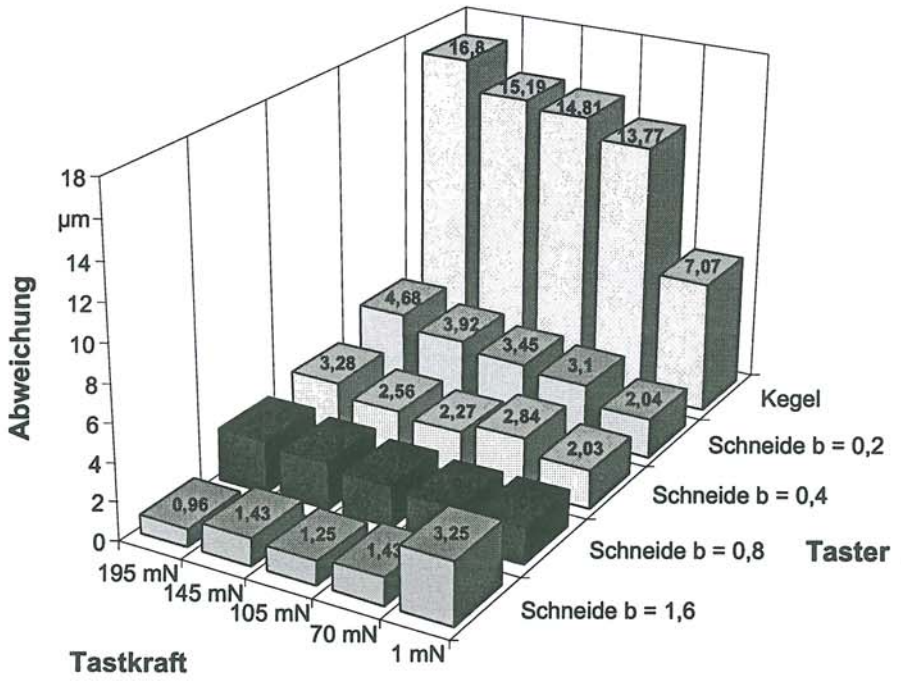

Bild 5: Bewertung der Meßergebnisse bei Variation der Abtastbedingungen anhand der Profilabweichungen zwischen Buchen- und Referenzprofil (ABS). [10]

Referenzprofil berechnet.

$$\Delta_{Profil} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{k} |z_{iHolz} - z_{iABS}|, \text{ wobei} \tag{3}$$

k: Anzahl der Meßpunkte

$z_{iHolz}; z_{iABS}$: Einzelmeßwerte

Die ermittelten Profilabweichungen zwischen dem Profil einer Buchenoberfläche und dem Profil des Kunststoffs werden im Bild 5 dargestellt.

Laserfokussensor

Bei einem Laserfokussensor wird die Höheninformation der zu vermessenden Oberfläche nicht mehr durch ein mechanisches Tastsystem aufgenommen, sondern durch einen Laserstrahl, der über die Oberfläche geführt wird. Der Vorteil eines solchen optischen Meßsystems ist, das keine massebehaftete Tastnadel mehr vorhanden ist, die durch die Bewegung über die Oberfläche in Schwingungen geraten kann. Damit sind prizipiell höhere Abtastgeschwindigkeiten möglich. Abbildung 6 zeigt das Funktionsprinzip eines Laserfokussensors.

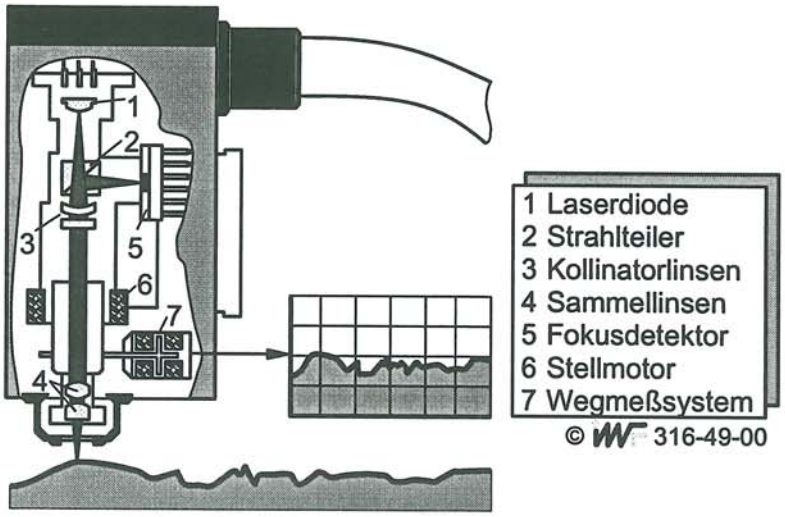

Bild 6: Funktionsprinzip eines Laserfokussensors.

Das Licht einer Laserdiode fällt durch einen halbdurchlässige Spiegel auf eine Kollimatorlinse, die den Strahl parallelisiert. Über eine Sammellinse wird der Strahl auf die Oberfläche fokussiert. Der beleuchtete Oberflächenpunkt wird über die Sammellinse, die Kollimatorlinse und den halbdurchlässigen Spiegel auf den Fokusdetektor abgebildet. Dieser steuert einen Motor an, der die Sammellinse entsprechend dem Oberflächenprofil nachführt, so daß der Laserstrahl immer auf der Oberfläche fokussiert wird. Die Lage der Sammellinse wird von einem induktiven Wegmeßsystem aufgenommen. Die Auflösung des Systems wird wird durch die Größe des Fokusdurchmessers bestimmt, der typischerweise bei $d_f = 2\ \mu$m liegt.

Dem Vorteil der berührungslosen Abtastung stehen mögliche undefinierte Zustände entgegen. An steilen Flanken z.B. am Rand von Poren kann der Fokuspunkt nicht eindeutig bestimmbar sein. Je nach Regelprinzip des Sensors können dann Fehlmessungen auftreten oder der Meßvorgang beendet werden. Auch in einer halbkugelförmigen Pore können Meßfehler auftreten, wenn jeder Strahl in sich selbst zurückgeworfen wird und somit der Fokuspunkt auch nicht mehr eindeutig bestimmbar ist. Ein weiterer Nachteil ergibt sich durch die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von verschiedenen Hölzern bzw. von Früh- und Spätholzzonen, die einen zusätzlichen Einfluß auf das Meßergebnis haben können.

Lasertriangulationssensor

Eine noch schnellere Messung des Oberflächenprofils ermöglicht der Lasertriangulationssensor. Da in dem Lasertriangulationssensor keine bewegten Teile enthalten sind, hängt die mögliche Vorschubgeschwindigkeit der Sensoreinheit nur noch von der Wiederholrate des CCD-Elements ab, das in dem Sensor eingebaut ist. Zudem werden in modernen Lasertriangulationssensoren ringförmige Fotodioden verwendet, bei denen die oben beschriebenen Nachteile des Laserfokussensors weitestgehendst vermieden werden. Wie bei dem Laserfokussensor wird der Strahl einer Laserdiode auf die Holzoberfläche gerichtet. Ein Linsensystem sorgt dafür, daß der Laserstrahl gebündelt und parallelisiert wird, so daß unabhängig vom Abstand zur Holzoberfläche ein gleichmäßig kleiner Meßfleck auf der Oberfläche abgebildet wird. Das von der Holzoberfläche diffus reflekierte Licht wird durch ein zweites Linsensystem auf das ringförmige CCD-Element projiziert. Dabei bestimmt der Abstand des Sensors von der Holzoberfläche, bei welchem Radius vom Sensormittelpunkt das Licht auf das CCD-Element trifft. Aus der Position der Intensitätsspitze auf dem Sensor kann somit ein Abstandswert gebildet werden. Durch den ringförmigen Aufbau des Sensors werden Abschattungs- und Neigungsfehler durch Mittelung kompensiert.

EQUAM

Während die bisher vorgestellten Meßsysteme für die Messung des Oberflächenprofils bestimmt sind, ist das am IWF entwickelte EQUAM (Edge Quality Measurement Device) für die Messung der Kantenqualität bestimmt. Das Meßprinzip basiert auf einer Abtastung des Kantenprofils unter einem Anstellwinkel von 45° mit einer viskoelastischen Blattfeder. Dabei wird die Auslenkung der Blattfeder mittels Dehnungsmeßstreifen gemessen und über einen speziellen Bewertungsalgorithmus von einem PC ausgewertet. Das ausgewertete Signal wird als Kantenschartigkeitskennwert S_a dem Maschinenbediener zur Verfügung gestellt. Für eine praxisnahe Beurteilung der Werkstückqualität ist es erforderlich, das Kantenprofil zu bewerten, d.h. auf seine wesentlichen Merkmale zu reduzieren und diese in Form eines diskreten Kennwerts zu quantifizieren. Im Fall der Kantenqualität wiegt ein großer, deutlich sichtbarer Ausbruch wesentlich stärker, als mehrere kleine Ausbrüche, die mit dem Auge nicht erfaßt werden können. Daher sind die aus der Oberflächenmeßtechnik bekannten Kenngrößen zur Bewertung von Kantenausbrüchen kaum geeignet. Durch die Berücksichtigung der Ausbruchstiefe bei der Bewertung der Ausbrüche korrelliert der Kantenschartigkeitskennwert S_a besser mit dem subjektiven Qualitätsempfinden.

1.2.3 Bildverarbeitung in der Qualitätkontrolle

Vor allem im Bereich der Durchlaufmaschinen und Beabeitungsstraßen haben Qualitätskontrollsysteme auf der Basis der Bildverarbeitung Einzug erhalten. Besonders im Bereich der Plattenherstellung, der Laminat- und Fußbodenproduktion sowie der Fehlererkennung an Funieren sind solche Systeme von großer Bedeutung, da in diesen Bereichen sehr hohe Vorschubgeschwindigkeiten gefahren werden und eine Kontrolle durch den Menschen nicht mehr möglicht ist. Müssigmann stellt in [16] die für solche Qualitätskontrollen eingesetzte Technik vor. Heute sind CCD-Kameras Standard, die je nach Anwendungszweck als Matrix- oder als Zeilenkamera ausgeführt sein können. Durch Fortschritte in der Rechnertechnologie ist es heute ebenfalls möglich, Farbkamerasysteme einzusetzen, da moderne Rechnersysteme heute die gegenüber einer S/W-Kamera dreimal höhere Datenmenge verarbeiten können. Bei komplexen Bewertungsaufgaben besteht ein Trend zum Einsatz von neuronalen Netzen, die sich flexibel auf die jeweiligen Bewertungsaufgaben anlernen lassen und die fehlertolerant gegenüber schwankenden Umgebungsbedingungen sind. In [18], [8], [24], [13], [2] und [14] werden Systeme vorgestellt, die die Bearbeitungsqualität von Holzwerkstücken kontrollieren und alle auf dem Einsatz von CCD-Kameras basieren. Einige Systeme sollen exemplarisch näher vorgestellt werden:

In [2] wird ein System vorgestellt, mit dem eine Oberflächeninspektion roh geschliffener Spanplatten in einer Schleifstraße durchgeführt wird. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von maximal 120 m/min erkennt das System eingeschliffene Bereiche, unausgeschliffene Bereiche, Ausbläser, Staub-, Öl- und Leimflecken, Formbandkleber und grobe Späne. Das Meßsystem ist zwischen Schleifmaschine und Sortierung installiert und kann mittels verschiedener Datensätze einfach an ein gewünschtes Kommisionsprofil angepaßt werden. Das Meßprinzip beruht auf CCD-Kameras, die senkrecht zur Plattenoberfläche angeordnet sind und die Plattenoberfläche quer zur Vorschubrichtung abtasten.

Mammel stellt in [14] ein Qualitätskontrollsystem für die Bodenpaneelfertigung vor, das in eine Fertigungslinie integriert werden soll. Das System besteht aus vier Inspektionsmodulen, und zwar je eins für die Profilkontrolle, Kantenkontrolle, Oberflächeninspektion und Eckeninspektion. Die Module Profil- und Kantenkontrolle sind sowohl in der Längs- als auch in der Querbearbeitung vorhanden. Das System ist ausgelegt für eine maximale Vorschubgeschwindigkeit von 150 m/min. In der Profilkontrolle wird der Nut- und Federbereich auf Maßhaltigkeit überprüft. Dazu wird ein Laser in einem Winkel von 45° auf die Oberfläche projiziert und das Bild der Kante von einer Kamera erfaßt. Die Kantenkontrolle erfolgt in diesem System, in dem ein Laserstrahl auf die Kante gerichtet und die Änderung der Lichtstreuung registriert wird. Auf diese Weise sind Ausbrüche mit 0,2 mm Länge und Tiefe detektierbar. Allerdings erfordert dieses System eine sehr genaue Justierung in der Maschine, außerdem muß die Paneele genau geführt werden, damit der Laser immer an der gleichen Stelle auf die Kante trifft. Nach Anwenderaussagen ist zudem der Grenzwert, ab dem das System die Fehler erkennen kann, für Werkstücke der Möbelproduktion zu

grob. Ausbrüche mit 0,2 mm Breite und Tiefe lassen eine Kante im sichtbaren Bereich eines Möbelstücks unbedingt zu Ausschuß werden. Bei der Ecken- und Oberflächeninspektion wird dann wieder mit CCD-Matrixkameras gearbeitet, deren Bilder durch Segmentierung und Objektbildung ausgewertet werden.

Am Wilhelm-Klauditz Institut in Braunschweig wurde ein Sichtprüfsystem entwickelt [20], daß die Oberfläche von Holz z.B. bei der Schnittholzsortierung unter anderem nach den Fehlerarten Ast, Riß und Harzgalle untersucht. Dabei wird eine CCD-Zeilenkamera mit 2000 Bildpunkten und eine modulationsfreie Beleuchtung verwendet, die eine Inspektion in Echtzeit bei einer Vorschubgeschwindigkeit bis $v_f = 100$ m/min erlaubt. Die Prüflinge (Bretter oder Abschnitte von Holzwerkstoffplatten) werden im Durchlauf von einer CCD-Kamera mit hoher Auflösung von maximal 1 mm in Transportrichtung und 0,1 mm quer dazu erfaßt und digitalisiert. Die Bilddaten werden danach gefiltert und segmentiert. Bei der Segmentierung wird das Oberflächenbild mit Hilfe einer Grauwertschwelle, die dynamisch aus dem Bild bestimmt werden kann, in ein Binärbild umgewandelt, d.h. allen Grauwerte die unter der Schwelle liegen wird der Wert „schwarz" und allen anderen der Wert „weiß" zugeordnet. Zusammenhängende Flächen werden nach der Segmentierung dann zu Objekten zusammengefaßt und können nach Lage, Form und Größe vermessen werden. Ein lernfähiger Fuzzy-Algorithmus vergleicht die Objekte mit hinterlegten Fehlermerkmalen und kann auf diese Weise die Oberfläche bewerten. Anwendungsspezifische Auswertungen wie z.B. die Steuerung einer Fehlstellenkappanlage oder Sortierung in bestimmte Qualitätsklassen können integriert werden. Mögliche und geplante Anwendungen sind die Fehlererkennung und Erscheinungssortierung von Schnittholz, sowie Entwicklungen zur Inspektion von Spanplatten, Parkettholz und Funieren. Westkämper und Schadoffsky [27] gelang es 1995 mit Hilfe der Bildverarbeitung eine Trennung zwischen werkstoffbedingter Strukturrauhigkeit und Bearbeitungsmerkmalen vorzunehmen. Fotografien von geschliffenen Eichenholzproben wurden nach dem einscannen mit verschiedenen Verfahren der Bildanalyse bearbeitet, wobei im einfachsten Fall über eine Auswertung der Graustufenverteilung im Bild eine Schwellwertsetzung erfolgte. Die anschließend zum Einsatz kommenden Kennwertslgorithmen bewerten lediglich die Oberflächenbereiche, die durch maschinelle Bearbeitung entstanden sind.

2 Zielsetzung

Die im Stand der Technik vorgestellten Meßverfahren sind für eine In-Prozeßmessung der Messerschlagsweite nicht geeignet. Mechanisch tastende Systeme besitzen den Nachteil, daß die Taster aufgrund ihrer Masse nur sehr begrenzte Vorschubgeschwindigkeiten erlauben. Bei höheren Geschwindigkeiten gerät das Tastsystem in Schwingungen und somit ist keine Messung mehr möglich. Aber auch optisch arbeitende Tastsysteme sind für die Messung der Messerschlagsweite nur bedingt geeignet, da sie nur eine schmale Spur auf der Oberfläche aufnehmen können. Damit werden sie anfällig gegenüber Meßfehlern, die z.B. aus Oberflächenmerkmalen wie Rissen, großen Poren und Unterschieden zwischen den Früh- und Spätholzbereichen resultieren können. Aufgrund der hohen optischen Qualität, die von der Oberfläche von Fenstern und Türen gefordert wird, muß die Größe der Messerschläge deutlich kleiner als die natürliche Strukturrauhigkeit sein. Daher werden die Messerschläge im Profilschrieb von der Strukturrauhigkeit überdeckt und eine Auswertung ist nur für relativ grobe Messerschlagsmuster möglich. Außerdem bieten die heute am Markt verfügbaren optisch arbeitenden Tastschnittsysteme keine hinreichend hohe Meßfrequenz, um bei einer Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 200$ m/min noch die Oberfläche vermessen zu können. Deshalb soll die In-Prozeßmessung der Messerschlagsweite mit Hilfe eines Bildverarbeitungssystems aufgebaut werden.

Das Bildverarbeitungssystem muß in der Lage sein, auch bis Vorschubgeschwindigkeiten $v_f = 200$ m/min noch ein scharfes Bild von der Oberfläche aufzunehmen und dieses bezüglich der Messerschlagsweite auswerten zu können. Durch die Kenntnis der Messerschlagsweite kann auf die Anzahl der Messer geschlossen werden, die an der Oberflächenbildung beteiligt sind und damit auch auf eine eventuelle Schneidenflugkreisdifferenz. Dabei dürfen Faktoren wie wechselnde Werkstoffparameter sowie Maschinenschwingungen, die auf den Meßaufbau übertragen werden und eine Belastung durch Staub und Späne, die sich in der Holzverarbeitung niemals vollkommen ausschliessen läßt, keinen Einfluß auf das Meßergebnis besitzen. Deshalb muß ein Bildanalysealgorithmus gefunden werden, der in der Lage ist, zwischen der natürlichen Strukturrauhigkeit und der Bearbeitungsrauhigkeit, die in diesem Fall durch die Messerschläge geprägt wird, zu unterscheiden und Störungen aus dem Oberflächenbild herauszufiltern. Um den Erfordernissen der Produktion gewachsen zu sein, muß das System einfach zu bedienen und zu warten sein. Die notwendigen Einstellungen für die Messung müssen auf ein Minimum beschränkt werden, damit nicht zusätzliche Rüstzeiten anfallen. Das schließt auch die Bedienoberfläche des Bildanalyseprogramms mit ein, die sich an bestehende Windows-Konventionen anlehnen soll und damit intuitiv zu bedienen ist.

Im Rahmen des Forschungsprojekts müssen die Grenzen des Meßsystems bestimmt werden, damit ein Anwender für sich entscheiden kann, ob das System seinen Anforderungen genügt. Als wichtigster Punkt muß die minimale Messerschlagsweite bestimmt werden, ab der eine zuverlässige und reproduzierbare Messung möglich ist. Dazu werden sowohl ver-

schiedene Werkstoffkenngrößen wie z.B. Holzart und Holzfeuchte als auch Maschinenparameter wie z.B. Maschinenschwingungen und Schneidenverschleiß untersucht.

Ziel ist, dem Maschinenbediener nicht nur visuell in Form des aktuellen Oberflächenbildes und in Form numerischer Messerschlagsweiten über den Zustand der produzierten Oberfläche zu informieren, sondern ein Signal zum Jointvorgang zu geben, wenn dieser wirklich erforderlich ist. Erst damit wird eine wirkliche Kosteneinsparung erzielt, wenn zu häufiges Jointen, was die Standzeit der Werkszeuge vermindert und zu spätes Jointen, was die Produktion von Ausschuß bedeutet, vermieden wird. Der Zeitpunkt zum Jointen wird dann nicht mehr durch Prüfpersonal bestimmt, das wechselnden Tagesformen und der Ermüdung durch die hohen Anforderugnen am Prüfplatz unterliegt, sondern durch einen Algorithmus, der vorab auf die gewünschte Oberflächenqualität eingestellt worden ist. Das Signal zum Jointen kann entweder in Form eines optischen oder akustischen Alarms ausgelöst werden oder im halbautomatischen Betrieb direkt die Jointeinrichtung ansteuern. Gleichzeitig muß das Meßsystem aber auch so fehlertolerant sein, daß eine einmalige (geringfügige) Abweichung vom gewünschten Messerschlagsbild nicht automatisch zu einem Alarm führt. Fehlalarme erhöhen unnötig die Stillstandszeiten der Maschinen und würden deshalb auf eine sehr geringe Akzeptanz beim Anwender stoßen.

Mit der Realisation des Meßsystems steht erstmalig eine durchgängig automatisierte Bearbeitungskette zur Verfügung. Die Prozeßgenauigkeit kann an Hand des bearbeiteten Werkstücks untersucht werden, ohne daß dieses aus dem Produktionsprozeß entnommen werden muß. Die Beurteilung der Oberflächenqualität erfolgt nach objektiven Kriterien und ist nicht mehr interpretierbar. Die Durchlaufzeiten der Werkstücke werden verkürzt und somit die Rentabilität der Maschinen erhöht.

3 Aufbau des Meßsystems

3.1 mechanischer Aufbau

3.1.1 Meßprinzip

Das Meßsystem wurde auf der Basis der Dunkelfeldbeleuchtung realisiert, bei der eine CCD-Kamera das Bild einer beleuchteten Holzoberfläche aufnimmt. Bild 7 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Eine Beleuchtungseinheit wird unter einem sehr flachen Winkel parallel zur Vorschubrichtung auf die Holzoberfläche gerichtet. Dabei wird der Strahlengang durch einen Doppelkondensor gebündelt, eine Streuscheibe sorgt für eine gleichmäßige Ausleuchtung. Die Beleuchtung unter dem flachen Einfallswinkel erzeugt Schatten der Messerschlagsberge

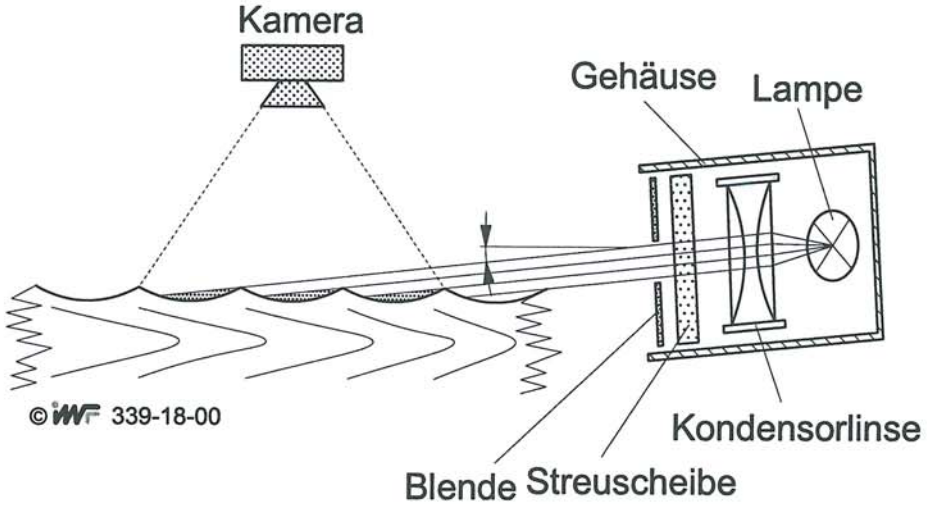

Bild 7: Funktionsprinzip der Dunkelfeldbeleuchtung.

in den Messerschlagstälern. Das Bild der Holzoberfläche wird dann von einer CCD-Kamera aufgenommen und digitalisiert. Wichtig für die spätere Auswertung der Hell-/ Dunkelzonen ist, daß aussschließlich die Messerschläge senkrecht zur Vorschubrichtung verlaufen. Die Schnittaufteilung des Baumstamms wird aber grundsätzlich so erfolgen, daß die Jahrringe in Längsrichtung der Werkstücke liegen. Bei einer anderen Art der Stammaufteilung wären nicht genügend lange Werkstücke zu erzielen und außerdem würde die Oberfläche beim Hobeln dann im Hirnschnitt erzeugt, was eine sehr schlechte Oberflächenqualität bedeuten würde. Die Messerschläge und die durch sie verursachten Hell-/ Dunkelzonen sind somit die einzigen Objekte, die senkrecht zur Vorschubrichtung liegen.

Die in der Praxis hohen Vorschubgeschwindigkeiten stellen hohe Anforderungen an das Bildverarbeitungssystem. Um die bewegte Oberfläche scharf aufnehmen zu können, sind kurze Verschlußzeiten bei dem Kamerasystem erforderlich. Zusätzlich darf die Kamera nicht wie in der Fernsehtechnik üblich Halbbilder erzeugen, sondern muß im sogenannten non-

interlaced Mode arbeiten, bei dem ein Bild komplett mit allen Zeilen an das Bildverarbeitungssystem übertragen wird. Im interlaced Mode liegt zwischen der Aufnahme des ersten Halbbilds mit den geraden Zeilen und des zweiten Halbbilds mit den ungeraden Zeilen ein Zeitversatz von 1/50 Sekunde. Durch die Vorschubbewegungen verschieben sich die beiden Bilder gegeneinander. Deshalb ist es in diesem Fall nicht mehr möglich, eine Information aus dem Bild zu erhalten. Für die Untersuchungen wurde eine CCD-Kamera vom Typ Sony XC-55 verwendet, deren wichtigste technische Daten in Tabelle 1 wiedergegeben sind.

Sony XC-55	
Aufnahmesystem	Interline-transfer CCD
Chipgröße	659 × 494
Pixelgröße	7,4 × 7,4 μm
Signalsystem	EIA
Verschlußzeiten (intern)	1/100, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/4000, 1/8000 sek.
Verschlußzeiten (extern)	bis 1/100.000 sek. extern getriggert
Signal-/ Rauschverhältnis	56 dB
Signalvestärkung	manuell / automatisch / fest
Shutter mode	interlaced, non-interlaced E-DONPISHA II

Tabelle 1: Technische Daten der CCD-Kamera.

Durch diese Anordnung können die Messerschläge aufgrund ihrer Höhe und der daraus resultierenden Schattenwürfe in der Dunkelfeldbeleuchtung erfaßt werden.

Daneben existiert noch eine zweite Möglichkeit, die Messerschläge sichtbar zu machen. Wenn in der Fertigung die Werkstücke durch Prüfpersonal kontrolliert werden, dann werden sie schräg gegen das Licht gehalten und der Kontrolleur sieht senkrecht zur Vorschubrichtung über das Werkstück hinweg. Dabei lassen sich Messerschlagsberge und Messerschlagstäler unterscheiden, weil sie einen unterschiedlichen Glanz auf der Oberfläche haben. Diese Art der Kontrolle wird in einem alternativen Versuchsaufbau nachgeahmt, der in Bild 8 dargestellt ist. Dabei wird eine Lampe mit relativ geringer Helligkeit so auf die Holzoberfläche gerichtet, daß ihr Licht streifend und senkrecht zur Vorschubrichtung auf die Holzoberfläche fällt. In der optischen Achse der Lampe, allerdings mit einem Winkel von 45° zur Holzoberfläche, nimmt die CCD-Kamera das Bild der Oberfläche auf. Da bei der Dunkelfeldbeleuchtung hauptsächlich die Messerschlagstiefe der begrenzende Faktor für die Auflösung ist, die Glanzunterschiede aber weitgehend unabhängig von der Messerschlagsweite und -tiefe auftreten, kann man bei dieser Anordnung eine bessere Auflösung erwarten. Außerdem ergibt sich durch die Anordnung der Lampe senkrecht zur Vorschubrichtung eine Möglichkeit, Fäden auf der Oberfläche zu detektieren, die durch Ausbrüche in den Schneiden hervorgerufen worden sind. Der Faden auf der Oberfläche wirft bei dieser Anordnung einen Schatten, der parallel zur Vorschubrichtung verläuft.

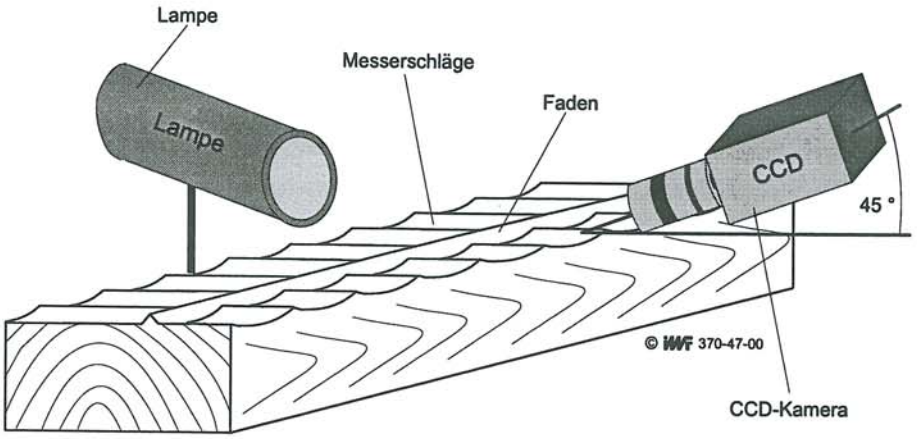

Bild 8: Alternative Anordnung von Lampe und Kamera zur Onlinemessung der Messerschlagsweiten.

Die Wahl des Betrachtungswinkels der Kamera stellt einen Kompromiß zwischen deutlich hervortretenden Messerschlägen und einer minimalen Verzerrung des Oberflächenbilds dar. Bei sehr flacher Betrachtung der Oberfläche treten die Messerschläge zwar deutlicher als Zonen unterschiedlicher Reflexion hervor, allerdings fällt dann auch ein großer Teil des Lichts der Lampe direkt in die CCD-Kamera, so daß das Bild der Oberfläche überblendet wird. Zusätzlich wird das Bild der Oberfläche durch die Betrachtung unter dem flachen Winkel stark verzerrt. Die einzelnen Messerschläge laufen dann im Bild nicht parallel zueinander, sondern laufen perspektivisch bedingt von vorne nach hinten zusammen. Dadurch wird die Auswertung des Messerschlagsmusters erschwert. Die Bildanalysestrategie, die in Abschnit 3.2.2 vorgestellt wird, beruht auf einer zeilenweisen Summierung der einzelnen Grauwerte. Durch die perspektivische Verzerrung der Oberfläche läuft die Summation bei dieser Anordnung über Messerschlagsberge und -täler hinweg, so daß diese sich in der Wirkung in der Bildanalyse aufheben. Einschränkend wirkt zusätzlich, daß der Tiefenschärfebereich der Kamera aufgrund der Makrofotografie begrenzt ist. Bei dieser alternativen Anordnung der Kamera wird nur ein bestimmter, sehr begrenzter Bildausschnitt scharf abgebildet wird, was die Auflösung ebenfalls einschränkt. Zusätzlich ist bei dieser Anordnung das Meßergebnis und seine Wiederholbarkeit sehr stark von der genauen Ausrichtung der Kamera und der Lampe abhängig. Geringste Veränderungen in der Position der Lampe oder der Kamera haben einen großen Einfluß, weil die Reflektivität der Oberfläche stark vom Betrachtungswinkel abhängt.

Unter Berücksichtigung der aufgeführten Einschränkungen läßt sich dann im Vergleich zu der Dunkelfeldbeleuchtung mit senkrechter Anordnung der Kamera und Beleuchtung in Vorschubrichtung leider keine Verbesserung der Auflösung erreichen. Besonders durch die Verzerrung des Oberflächenbilds ist bei sehr kleinen Messerschlagsweiten die Analyse nicht mehr möglich, weil sich die hellen und dunklen Zonen der Messerschlagsberge und Täler gegeneinander aufheben. Auch die bei dieser Anordnung theoretisch mögliche Detektion

von Fäden auf der Oberfläche des Werkstücks durch Schneidenausbrüche am Werkzeug ist nicht praktikabel. Durch die Aufteilung des Baumstamms entlang der Stammachse liegen die Jahrringe im wesentlichen parallel zur Vorschubrichtung. Die Helligkeitsunterschiede zwischen den Früh- und Spätholzbereichen rufen dann in der Bildanalyse ein wesentliches stärkeres Signal hervor, als der Schattenwurf des Fadens auf der Oberfläche. Aufgrund der nicht vorhandenen Verzerrung des Oberflächenbilds, so daß auch gleich am Monitor die Oberfläche optisch durch den Maschinenbediener beurteilt werden kann, der durchgängig scharfen Darstellung der Oberfläche und der einfacheren Einstellung wurde die Realisation des Meßsystems in Form der Dunkelfeldbeleuchtung gewählt.

3.1.2 Aufbau der Beleuchtungseinheit

Um einen möglichst hohen Kontrast auf der Oberfläche zu erzielen, muß die Oberfläche unter einem sehr flachen Beleuchtungswinkel, am besten streifend beleuchtet werden. Gleichzeitig ist für sehr kurze Kameraverschlußzeiten aber auch eine entsprechend hohe Beleuchtungsintensität erforderlich. Deshalb wurde ein Beleuchtungssystem gewählt, das auf einer Halogenlampe aufbaut. Diese Halogenlampe ist in einem Gehäuse untergebracht, das die Umgebung vor Streulicht abschirmt und besitzt eine Leistung von 50 W. Ein Sammelspiegel an der Rückwand des Gehäuses sorgt dabei noch für eine bessere Lichtausbeute. Die Lampe wird zusammen mit weiteren optischen Elementen wie Sammellinsen, einer Streuscheibe und einem schwenkbaren Spiegel auf einem Stangensystem montiert, das eine flexible Ausrichtung der einzelnen optischen Elemente ermöglicht. Die Sammellinsen sorgen für eine Bündelung des Strahlengangs, damit das Licht möglichst parallel auf die Oberfläche trifft

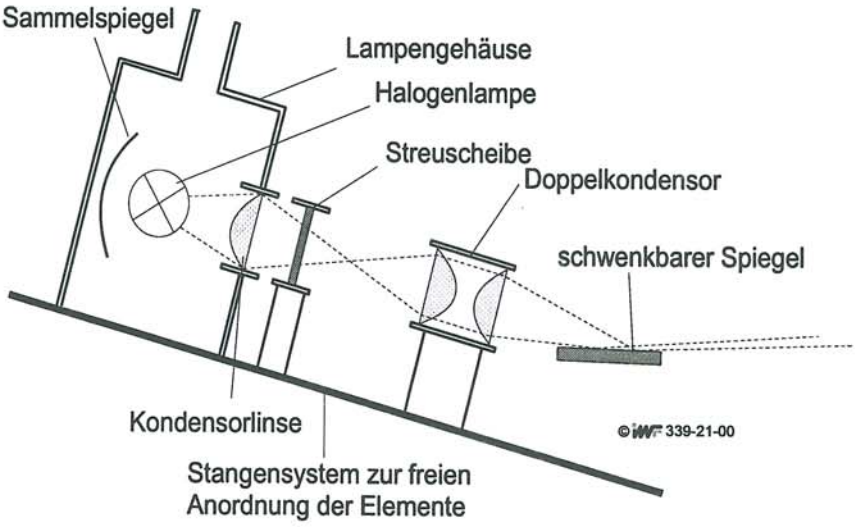

Bild 9: Aufbau des Beleuchtungssystems. Auf die Verwendung des Doppelkondensors und des schwenkbaren Spiegels wurde letztendlich verzichtet, da durch sie zu viel Lichtintensität verloren gegangen ist.

und somit eine gleichmäßige Ausleuchtung erzielt wird. Dabei ist eine Streuscheibe erforderlich, weil ansonsten die Glühwendel der Halogenlampe auf der Holzoberfläche abgebildet wird. Zusätzlich wurden noch Versuche mit einem schwenkbaren Spiegel durchgeführt, der den Strahlengang einmal umlenkt und somit den Einfallswinkel des Lichts auf der Oberfläche noch einmal halbiert. Den Aufbau des Beleuchtungssystems zeigt Bild 9. Anschließend wurden Versuche durchgeführt, um die optimale Konfiguration des Beleuchtungssystems und des Beleuchtungswinkles zu ermitteln. Dabei stand im Vordergrund, einen optimalen Kontrast zwischen den einzelnen Dunkelfeldern bei ausreichender Beleuchtungsintensität auf der Holzoberfläche zu erzielen. Als Bewertungskriterium wurde dabei die mittlere Differenz zwischen benachbarten Grauwertmaxima und -minima in Abhängigkeit vom Beleuchtungswinkel herangezogen. Damit eine Streuung durch Intensitätsschwankun-

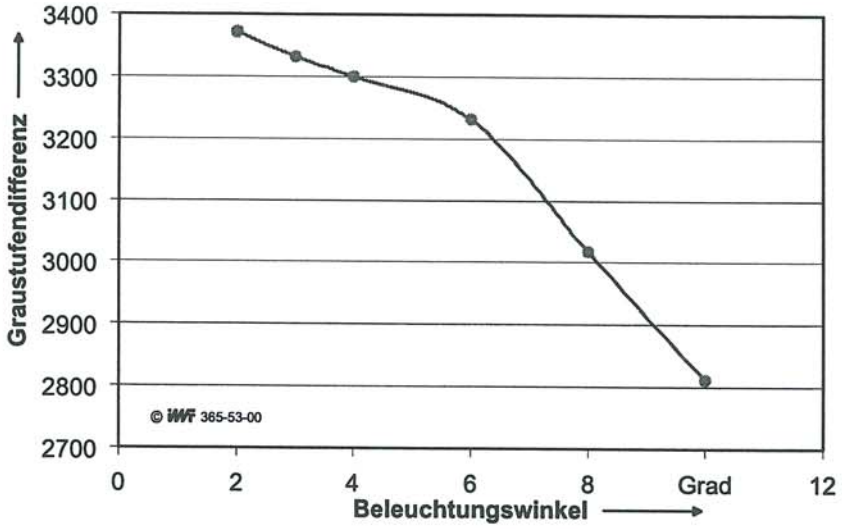

Bild 10: Abhängigkeit des Kontrasts vom Beleuchtungswinkel gemessen an der Differenz der Graustufensummen benachbarter Minima und Maxima im Oberflächenbild.

gen der Kamera ausgeglichen wird, wird über jeweils fünf Bilder gemittelt. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Bild 10 dargestellt. Man kann erkennen, daß bei kleinen Winkeln der Einfluß des Beleuchtungswinkels relativ gering ist, während der Kontrast ab einem Beleuchtungswinkel von 6° deutlich abnimmt. Das bedeutet auch, daß der Einsatz des Umlenkspiegels nicht erforderlich ist, zudem er einen großen Teil der Lichtintensität schluckt. Aus dem gleichen Grund wird auch auf den Einsatz des Doppelkondensors verzichtet.

Zwei weitere Faktoren sind für die Beleuchtung von Bedeutung. Die Spannungsversorgung für die Halogenlampe muß ein Gleichspannungsnetzgerät sein. Bei einer modernen Wechselspannungsversorgung werden die 12 V Versorgungsspannung für die Lampe mit Hilfe einer Phasenanschnittsteuerung aus der Netzspannung erzeugt, bei der nur bestimmte Zeitanteile aus dem Wechselstromsignal ausgeschnitten werden. Das führt zu einer periodischen Helligkeitsschwankung der Lampe mit der doppelten Netzfrequenz (100 Hz). Für den Menschen ist diese Schwankung nicht sichtbar, da das Auge dafür zu träge ist. Die Kamera,

die die Bilder mit einer Frequenz von 30 Hz aufnimmt, besitzt allerdings eine so kurze Belichtungszeit, daß es einen Unterschied macht, ob das Bild erzeugt wird, wenn die Lampe mit Spannung versorgt wird oder nicht. Deshalb ergibt sich in dem Bild der Kamera eine periodische Änderung der Grundhelligkeit, wodurch die Bildanalyse beeinträchtigt wird. Außerdem hat es sich als vorteilhaft erwiesen, wenn in Vorschubrichtung und nicht gegen die Vorschubrichtung beleuchtet wird.

3.1.3 Aufbau des Meßportals

Das Meßsystem ist in Form eines Portals realisiert worden. Das Portal besteht aus einer Grundplatten und zwei Seitenwänden, zwischen denen die Werkstücke hindurch laufen. Die Kamera wird über dem Portal auf einer Brücke befestigt, die in der Höhe verstellbar ist. Damit ist eine flexible Wahl des Bildausschnitts möglich. Die Beleuchtungseinheit ist an einem schwenkbaren Arm befestigt, der die Einstellung eines geeigneten Beleuchtungswinkels ermöglicht. Durch diese Bauform wird eine große Stabilität des Aufbaus erreicht, so daß sich Maschinenschwingungen nicht oder nur in sehr geringem Maß auf das Meßsystem übertragen. Zu Erhöhung des Kontrasts wird die gesamte Meßeinrichtung mit einem Kasten abgedeckt, der das umgebende Streulicht abschirmt. Auch wenn das Meßsystem gegenüber Staub nicht allzu anfällig ist, kann bei größerer Staub- oder Spänebelastung die Stelle, die von der Kamera aufgenommen wird, von einem Preßluftschleier freigeblasen werden. Bild 11 zeigt den kompletten Meßaufbau. Die Beleuchtungseinheit ist in dem schwarzen Kasten an dem schwenkbaren Arm untergebracht. Die Abschirmung vermindert Streulicht und läßt das Licht nur gezielt nach vorne auf die Holzoberfläche austreten.

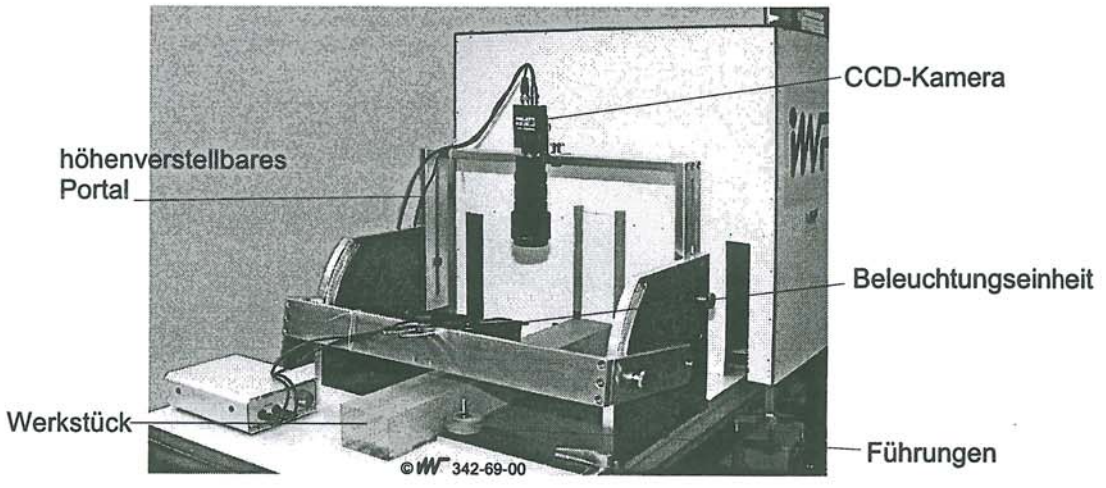

Bild 11: Meßaufbau der Dunkelfeldbeleuchtung mit Kamera und Beleuchtungseinheit.

3.2 Bildanalysestrategien

Nachdem das Bild der Oberfläche von der CCD-Kamera aufgenommen wurde, wird es mit Hilfe einer Framegrabberkarte im PC digitalisiert. Bild 12 zeigt das Prinzip der Bilddigitalisierung. Dabei wird deutlich, daß die räumliche Auflösung von der Größe und der Anzahl der einzelnen Bildelemente der Kamera und die Auflösung der Hell-/ Dunkelkontraste von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Graustufen abhängen. Das Bild liegt im Rechner dann als Graustufentabelle vor. Dabei sind nicht nur die Hell-/ Dunkelzonen der Dunkelfeldbeleuchtung erfaßt worden, sondern auch Jahrringe, Markstrahlen, Staub und aufstehende Fasern, die ebenfalls einen Schatten werfen. Um aus dieser Graustufeninformation auf die Messerschlagsweite schließen zu können, muß eine Bildverarbeitungssoftware die Struktur des Holzes von der Bearbeitungsrauhigkeit trennen können. Dazu gibt es zwei unterschiedliche Vorgehensweisen.

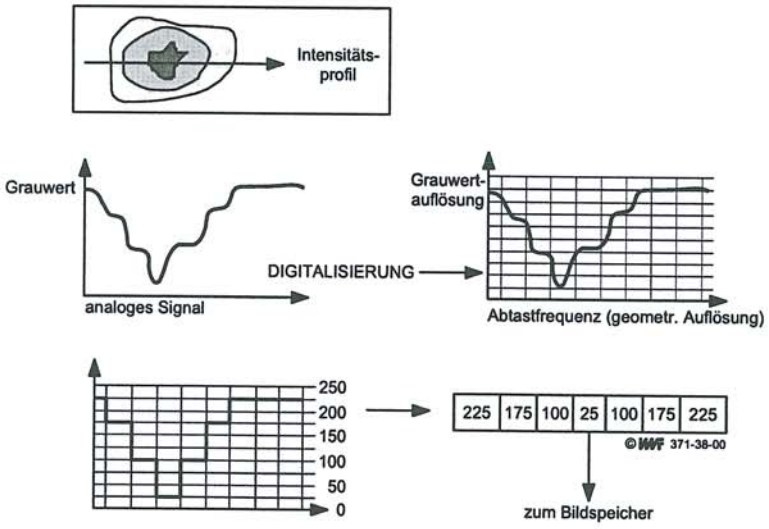

Bild 12: Umwandlung des analogen Oberflächenbilds in digitale Bilddaten. Die Größe der Pixel und die Anzahl der Graustufen bestimmen dabei die Auflösung. ([12])

3.2.1 Segmentierung und Objektbildung

Bei dem Verfahren der Segmentierung und Objektbildung werden die Messerschläge bestimmt, indem man Hell- und Dunkelzonen zu Objekten zusammenfaßt. Dazu wird zuerst eine Shadingkorrektur durchgeführt, bei der eine nicht ganz gleichmäßige Beleuchtung ausgeglichen wird. Bei der Shadingkorrektur filtert ein Tiefpaßfilter die niederfrequenten Bildanteile heraus und eliminiert sie. Anschließend können noch weitere Filter auf das Originalbild angewendet werden, z.B. um den Kontrast zu erhöhen oder das Rauschen zu minimieren. Als nächster Schritt erfolgt die Segmentierung. Bei der Segmentierung werden die Objekte im Bild vom Hintergrund getrennt. Im Fall der Messerschlagsweitenmessung

handelt es sich bei den hellen Messerschlagsbergen um die Objekte, die von den dunklen Messerschlagstälern als Hintergrund getrennt werden müssen. Die am weitesten verbreitete Methode der Segmentierung ist die Unterteilung nach Grauwerten bzw. Grauwertbereichen. [12] Dabei kann mit einem einfachen Schwellwert gearbeitet werden, der einmal zu Beginn der Meßserie ermittelt und dann für die restlichen Bilder beibehalten wird. Das setzt voraus, daß sich die Beschaffenheit der Oberfläche nicht ändert und die Kamera und die Lampe gut stabilisiert sind. Zuverlässiger ist deshalb die automatische Ermittlung einer Grauwertschwelle oder eines Grauwertbereichs, in dem die zu bestimmenden Objekte liegen. Diese automatische Segmentierung erfolgt mit Hilfe der Analyse des Grauwerthistogramms. Alle Bildpunkte, deren Wert über der Grauwertschwelle bzw. in dem Grauwertbereich liegt, wer-

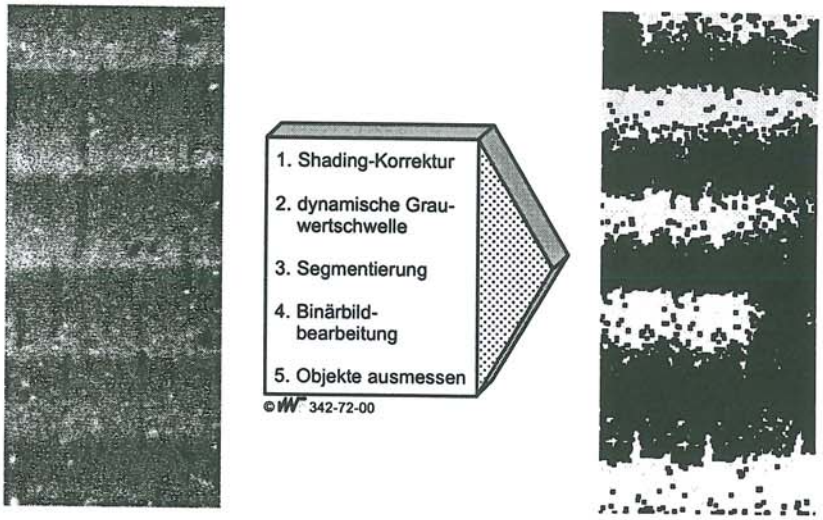

Bild 13: Bild einer Buchenoberfläche und das durch Segmentierung gewonnene Binärbild. Die einzelnen Streifen in dem Binärbild werden vom Rechner als Objekte verstanden, deren Abstände ausgemessen werden können.

den weiß dargestellt, die restlichen Bildpunkte schwarz. Danach werden die weißen Bildpunkte zu Objekten zusammengefaßt. Dadurch werden aus den einzelnen Pixeln, die bisher für die Bildverarbeitungssoftware nur diskrete Bildpunkte waren, zusammenhängende Flächen, denen auch geometrische Eigenschaften zugeordnet werden können. Insbesondere kann man nun den Abstand zwischen den einzelnen Messerschlägen, die durch längliche Objekte repräsentiert werden, ausmessen. Bild 13 zeigt einen Ausschnitt aus einem Oberflächenbild sowie das durch Segmentierung erzeugt Binärbild.

Der Vorteil dieses Verfahrens ist, daß die zweidimensionale Bildinformation über die Holzoberfläche erhalten bleibt. Damit ist eine Aussage über die Oberflächenqualität nicht nur in Vorschubrichtung, sondern auch senkrecht dazu möglich. Allerdings ist erfordert dieses Verfahren einen sehr hohen Rechenaufwand. Markstrahlen und Risse in der Holzoberfläche werden in dem Oberflächenbild deutlich dunkler abgebildet, als die hellen Kanten der Messerschlagsberge, so daß an diesen Stellen bei der Segmentierung das Objekt „Messerschlags-

berg" unterbrochen wird und bei der Bildnachbearbeitung erst wieder zusammengefügt werden muß. Gleichzeitig müssen z.B. aufstehende Fasern wieder aus dem Binärbild eliminiert werden, da sie in dem Oberflächenbild eine ähliche Helligkeit erreichen, wie die Messerschlagsberge und somit auch als Objekte erfaßt werden. Die Bewertung, welche Objekte zusammenzufassen und welche zu löschen sind, kann mit Hilfe der Form (z.B. dem Verhältnis der Längen der Schwerpunktachsen) und der Größe erfolgen. Da sehr viele Objekte diese Bewertung durchlaufen müssen und ein Endzustand in aller Regel auch nur iterativ erreicht werden kann, ist dieses Verfahren rechen- und zeitintensiv.

3.2.2 Summierung der Grauwerte

Durch die Digitalisierung wird das Bild der Holzoberfläche in einzelne Pixel zerlegt, die mit ihrem Grauwert einen bestimmten (kleinen) Teil der Oberfläche repräsentieren. Durch den Aufbau der Meßeinrichtung wird gewährleistet, daß die Pixelzeilen parallel zu den Messerschlägen liegen, die fertigungsbedingt eine Richtung senkrecht zur Vorschubrichtung aufweisen müssen. Wenn jetzt alle Grauwerte einer Zeile aufsummiert werden, erhält man eine Information über die Helligkeit in einem schmalen Streifen auf der Holzoberfläche. Führt man dieses Verfahren für alle Zeilen des Oberflächenbildes aus, so erhält man ein Hell-/Dunkelprofil für den gesamten fotografierten Bereich. Durch das Aufsummieren über sehr viele Pixelspalten wird bei diesem Verfahren über Jahrringe, Markstrahlen, Harzeinschlüsse usw. gemittelt, da diese Merkmale statistisch verteilt auftreten. Lediglich die Messerschläge besitzen eine Vorzugsrichtung und werden deshalb in dem Hell-/Dunkelprofil erfaßt. Auf diese Weise wird die Bearbeitungsrauhigkeit von der Strukturrauhigkeit getrennt. Zusätzlich erfordert dieses Verfahren nur eine geringe Rechenleistung, so daß mit einer hohen Wiederholrate die Oberfläche vermessen werden kann. Mit Hilfe einer Regressionsanalyse kann man unterschiedliche Grundhelligkeiten, die z.B. durch eine nicht ganz gleichmäßige Ausleuchtung entstanden sind, ausgleichen.

Das Profil, das hieraus gewonnen wird, kann dem Maschinenbediener schon einen ersten optischen Eindruck von der Regelmäßigkeit bzw. Unregelmäßigkeit der Messerschläge vermitteln. Gleichzeitig ermittelt ein Algorithmus die lokalen Minima und Maxima in dem Profil und bestimmt die Abstände zwischen den einzelnen Maxima. Wenn zu Beginn der Messung einmal die Größe des gewählten Bildausschnitts bestimmt wurde, dann kann ein Umrechnungsfaktor von Pixelzeilen in Millimeter angegeben werden und für die Einzelmesserschlagsweiten ein numerischer Wert berechnet werden. Das Verfahren wird im Bild 14 am Beispiel von drei Zeilen schematisch dargestellt.

Dieses Verfahren besitzt den Vorteil, daß es nur sehr wenig Rechenleistung benötigt und dementsprechend kurze Bildanalysezeiten erreicht werden. Die Versuche wurden mit einem Pentiumrechner mit 200 MHz CPU-Takt durchgeführt und es wurde eine Bildwiederholrate von knapp einem Bild pro Sekunde erreicht. Mit aktuellen Rechnersystemen ist eine weitere deutliche Leistungssteigerung zu erwarten. Da das Verfahren wie beschrieben die

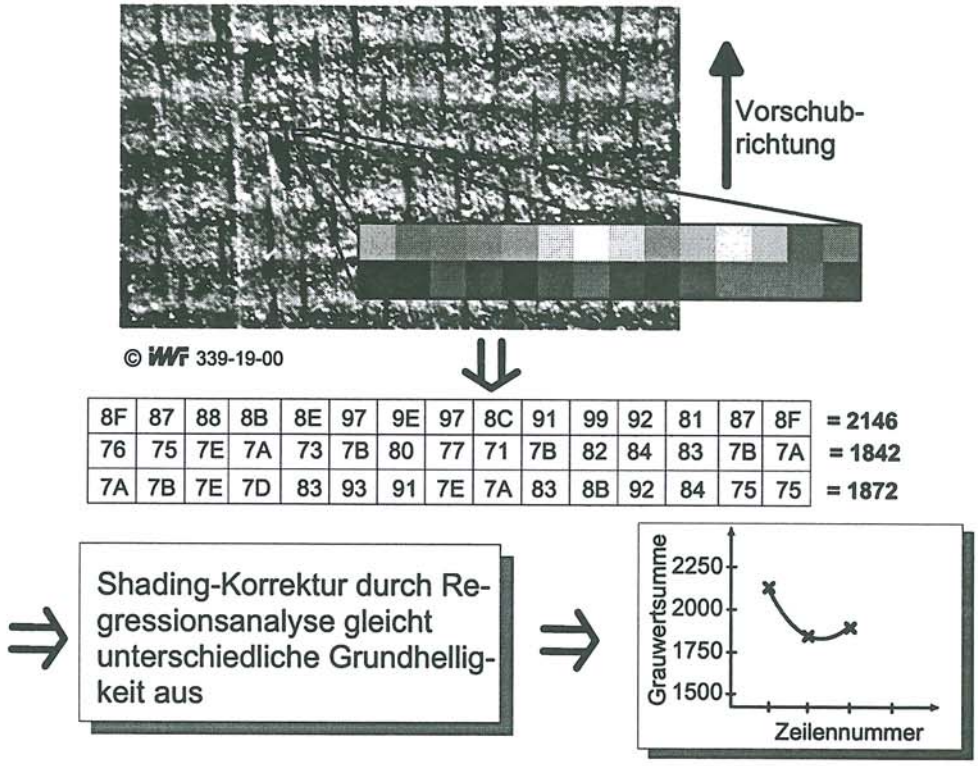

Bild 14: Die Bildanalyse erfolgt durch zeilenweise Summierung der Grauwerte. Das daraus gewonnene Profil wird einer Regressionsanalyse unterzogen, um unterschiedliche Grundhelligkeiten auszugleichen. Anschließend kann die Profilkurve der Oberfläche bezüglich der Maxima und Minima ausgewertet werden.

Orientierung der Messerschläge nutzt, wird schon durch das Meßprinzip eine Trennung von Struktur- und Bearbeitungsrauhigkeit erreicht, die dann nicht mehr durch das Bildanalysesystem zu leisten ist. Durch die Mittelung über viele Pixelspalten wird das Verfahren außerdem sehr robust gegenüber einer sich ändernder Holzstruktur sowie Störeinflüssen von außen, wie z.B. Holzstaub auf der bearbeiteten Oberfläche. Damit wird auch unter sich änderden Bearbeitungsbedingungen ein zuverlässiges und reproduzierbares Ergebnis erreicht.

Einziger Nachteil der zeilenweisen Summierung der Grauwerte ist, daß es nicht möglich ist, eine Information über die Ausprägung der Messerschläge quer zu Vorschubrichtung zu erlangen. Sollten die Messerschläge z.B. durch einen fehlerhaft durchgeführten Jointvorgang auf der einen Seite der Kantel tiefer und breiter sein, als auf der anderen Seite, so kann daß von dem Meßsystem nicht erfaßt werden. In diesem Fall würde von dem Meßsystem der Mittelwert der beiden Extremwerte bestimmt werden. Dieser Nachteil gegenüber dem Prinzip der Segmentierung und Objektbildung wird allerdings bei weiten durch die dargestellten Vorteile aufgewogen. Deshalb wurde bei der Umsetzung der Bildanalysesoftware das Verfahren der zeilenweisen Summierung der Grauwerte angewendet.

3.3 Bildanalysesoftware

3.3.1 Aufbau des Programms

Damit die Einarbeitung in das Bildanalyseprogramm möglichst leicht fällt und damit sich das Programm möglichst einfach in bestehende Rechnerkonfigurationen integrieren läßt, wurde eine Windowsoberfläche gewählt, die sich an den Standards bestehender Windowsprogramme orientiert. Zudem bieten aktuelle Rechnerkonfigurationen genügend Rechenleistung, um einmal pro Sekunde ein Bild von der Holzoberfläche aufnehmen und auswerten zu können. Damit läßt sich bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 60 m/min ein Bild je Vorschubmeter aufnehmen. Da eine Flugkreisdifferenz und damit unterschiedliche Messerschlagsweiten sich nicht schlagartig einstellen, sondern langsam durch Abrasviverschleiß verursacht werden, ist eine Wiederholrate von einem Bild pro Sekunde ausreichend, um schnell genug auf einen sich einstellenden Fehler reagieren zu können.

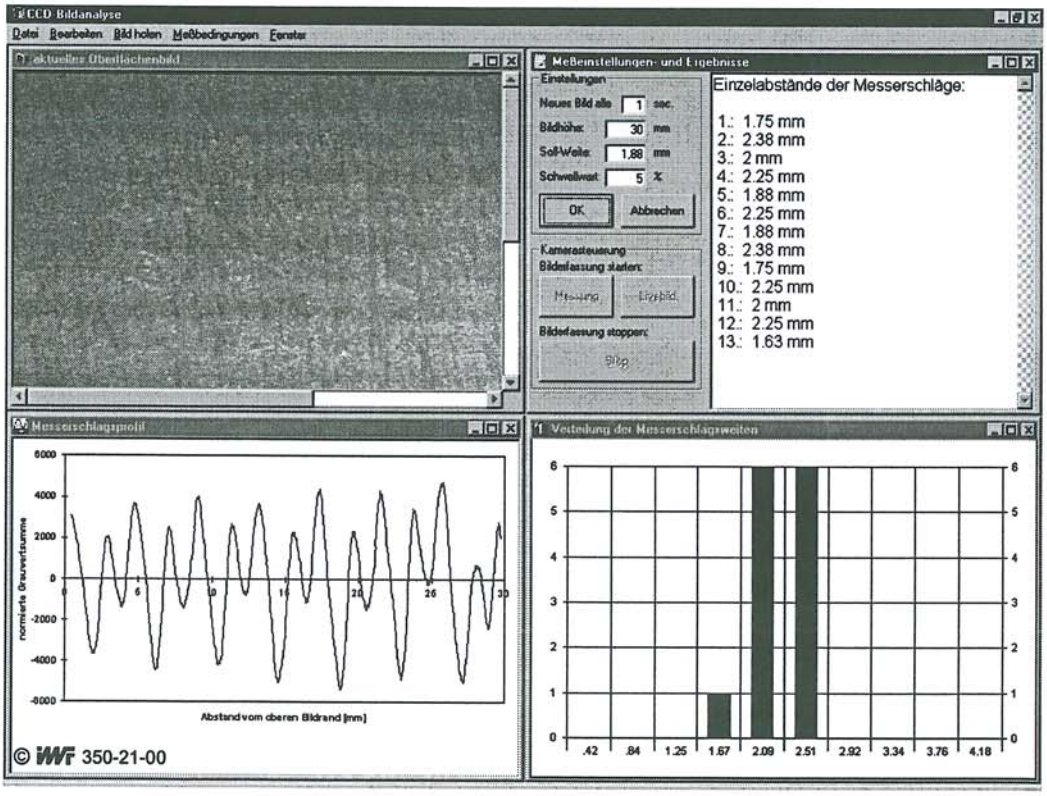

Bild 15: Benutzeroberfläche der Bildanalysesoftware

Bild 15 zeigt die Benutzeroberfläche, die sich aus insgesamt vier Teilfenstern zusammensetzt. Oben links wird das aktuelle Oberflächenbild dargestellt. Gröbere Fehler lassen sich schon in diesem Bild gut erkennen und geben einen ersten Eindruck von der Holzoberfläche. Darunter wird das Profil der Holzoberfläche angezeigt, das wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben gewonnen wurde. Die x-Achse läuft in diesem Profil von $x = 0$ mm am obe-

ren Bildrand im Oberflächenbild bis $x = 30$ mm am unteren Bildrand im Oberflächenbild. In dem vorliegenden Beispiel kann man erkennen, daß die Messerschlagsweiten nicht ganz gleichmäßig verteilt sind. Auf einen größeren Messerschlag folgt jeweil ein etwas kleinerer, d.h. die Oberfläche ist mit einem zweischneidigen Werkzeug erstellt worden, das eine leichte Schneidenflugkreisdifferenz aufgewiesen hat. In dem Fenster obern rechts wird die Weite der einzelnen Messerschläge numerisch angegeben. Außerdem müssen in diesem Fenster vor Beginn der Messung einige wenige Einstellungen vorgenommen werden. Damit das System die Bildzeilen der Kamera in ein Längenmaß umrechnen kann, muß zu Beginn die Bildhöhe gemessen und eingegeben werden. Außerdem kann noch die Bildwiederholrate, die Sollweite der Messerschläge und ein Schwellwert vorgegeben werden. Der Schwellwert dient dazu, die Empfindlichkeit des Systems einzustellen. Er gibt an, ab wieviel Prozent der gesamten Profilhöhe ein Peak in einem Diagramm wirklich als Messerschlag und nicht nur als Rauschen gewertet wird. In Abhängigkeit von den vorhandenen Kontrastverhältnissen kann damit das Analyseergebnis noch weiter verbessert werden. Die Sollweite ergibt sich nach Gleichung 1 aus den gewählten Bearbeitungsparametern wie Vorschubgeschwindigkeit, Drehzahl des Werkzeugs und der Anzahl der Hobelmesser. Mit Hilfe der Sollweite wird das Histogramm der Messerschlagsweiten ausgerichtet, das in dem Fenster unten rechts dargestellt wird. Das Histogramm zeigt, welche Messerschlagsweiten wie häufig vorkommen. Das Histogramm besteht aus 10 Klassen, wobei die Anzahl der Messerschläge mit der kleinsten Messerschlagsweite in Klasse 1 und die Anzahl mit der größten Messerschlagsweite in Klasse 10 dargestellt werden. Die Einteilung der Klassen erfolgt immer so, daß die Anzahl der Messerschläge mit der Sollmesserschlagsweite in Klasse 5 dargestellt wird. In dem dargestellten Beispiel liegen 6 Messerschläge im Bereich zwischen 1,67 mm und 2,09 mm, also genau in der Größenordnung des Sollwerts, der auf 1,88 mm eingestellt war. Die Peaks rechts und links davon im Histogramm entsprechen einer Abweichung von der Sollmesserschlagsweite.

Das Bildanalysesystem wurde unter Visual Basic 6.0 programmiert. Für die Benutzung der Software wird eine Runtimelizenz der Matrox Imaging Library (MIL) benötigt. Die MIL stellt die erforderlichen Bibliotheken für die Benutzung der Framegrabberkarte zur Verfügung, mit der die Kamera gesteuert und die Bilder digitalisiert werden. Diese Bibliotheken werden als ActiveX-Komponenten in die Visual Basic-Programmierumgebung eingebunden und ermöglichen auch nachträglich die Wahl eines anderen Framegrabbertyps oder einer anderen Kamera.

3.3.2 Analyse und Bewertung des Profils

Bestimmung der lokalen Maxima

Bevor das Bildanalysesystem die Messerschlagsweiten numerisch ausmessen und bewerten kann, müssen die Maxima in dem Profil bestimmt werden. Da bei der Bestimmung des Profils nicht nur die hellen Messerschlagsberge Maxima bilden, sondern durch Bildrauschen

weitere lokale Maxima entstehen können oder ein Maximum in dem Profil durch ein lokales Minimum zweigeteilt sein kann, müssen die Extremstellen bewertet werden und in „echte" und „unechte" Maxima unterteilt werden. Dazu geht das Bildanalysesystem nach folgendem Schema vor:

1. Alle Extrema bestimmen.
2. Bestimme die Maxima, deren vertikaler Abstand zum nächst niedrigeren Minimum mehr als n % der Gesamthöhe des Profils beträgt („echte" Maxima).
3. Überprüfe für die restlichen Maxima, ob zu der Seite, zu der der Schwellwert unterschritten wird, ein weiteres „unechtes Maximum" liegt, das ebenfalls diesen Schwellwert unterschreitet. Von diesen beiden Maxima verbleibt nur das höhere von beiden in der Berechnung. Beginne wieder mit Schritt 2.
4. Wenn in Schritt 3 keine weiteren „unechten" Maxima gefunden werden, die einen entsprechenden „unechten" Partner vorfinden, dann werden diese als Rauschen identifiziert und ebenfalls aus der Berechnung herausgenommen.

Der Parameter n ist der Schwellwert, der durch den Benutzer in der Benutzeroberfläche eingegeben werden kann. Als Vorgabewert hat sich $n = 5$ % als brauchbar erwiesen. Dieser Wert stellt einen guten Kompromiß zwischen einer hohen Empfindlichkeit des Meßsystems gegenüber einer sich einstellenden Flugkreisdifferenz und andererseits einer geringen Anfälligkeit gegenüber durch Rauschen verursachte Schwankungen im Meßsignal dar.

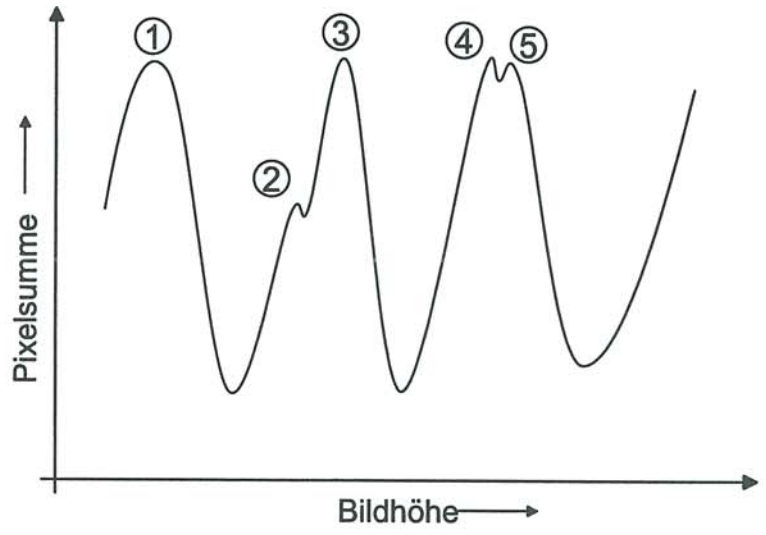

Bild 16: Bestimmung der „echten" Maxima im Messerschlagsprofil.

Bild 16 zeigt die möglichen Fälle, die bei der Identifikation der Maxima auftreten können. Die Peaks 1 und 3 sind so hoch, daß ihr vertikaler Abstand zum nächst niedrigeren Minimum $> n$ % ist und sie somit in Schritt 2 als „echte" Maxima identifiziert werden. Die Peaks

2, 4 und 5 besitzen allerdings ein lokales Minimum in ihrer Nähe, so daß sie im Schritt 1 nicht als „echte" Maxima identifiziert werden. Deshalb wird in Schritt 3 für diese Maxima geprüft, ob es zu der Seite, auf der sie den Schwellwert unterschreiten, ein weiteres Maximum gibt, das ebenfalls den Schwellwert unterschreitet. Peak 2 unterschreitet auf der rechten Seite den Schwellwert und das nächste Maximum (Peak 3) ist schon in Schritt 2 als „echtes" Maximum identifiziert worden. Peak 2 wird deshalb zum Schluß in Schritt 4 gelöscht werden. Peak 4 unterschreitet ebenfalls auf der rechten Seite den Schwellwert und dort befindet sich Peak 5, der ebenfalls in Schritt 2 nicht als „echtes" Maximum identifiziert worden ist. Da Peak 4 von beiden das höhere Maximum ist, verbleibt es in der Berechnung, während Peak 5 gelöscht wird. Damit wird bei nochmaliger Durchführung von Schritt 2 Peak 4 nun als „echtes" Maximum identifiziert, so daß in diesem Beispiel die Peaks 1, 3, und 4 in die Berechnung der Messerschlagsweiten eingehen würden.

Bewertung der Messerschlagsweiten

Nachdem die einzelnen Maxima des Profils bestimmt sind, die mit Messerschlagsbergen identifiziert werden, können die Zeilennummern dieser Maxima mit Hilfe der Bildhöhe, die durch den Benutzer eingegeben worden ist, in eine Längenangabe umgerechnet werden. Die Differenzen zwischen diesen Längen ergibt den Abstand in Millimetern zwischen den einzelnen Maxima und damit die Messerschlagsweite. Das in Bild 17 gezeigte Histogramm gibt das Ergebnis einer Oberflächenmessung wieder, bei der 4 Messerschläge mit einer Messerschlagsweite zwischen 1,23 mm und 1,53 mm, 3 Messerschläge mit einer Messerschlagsweite

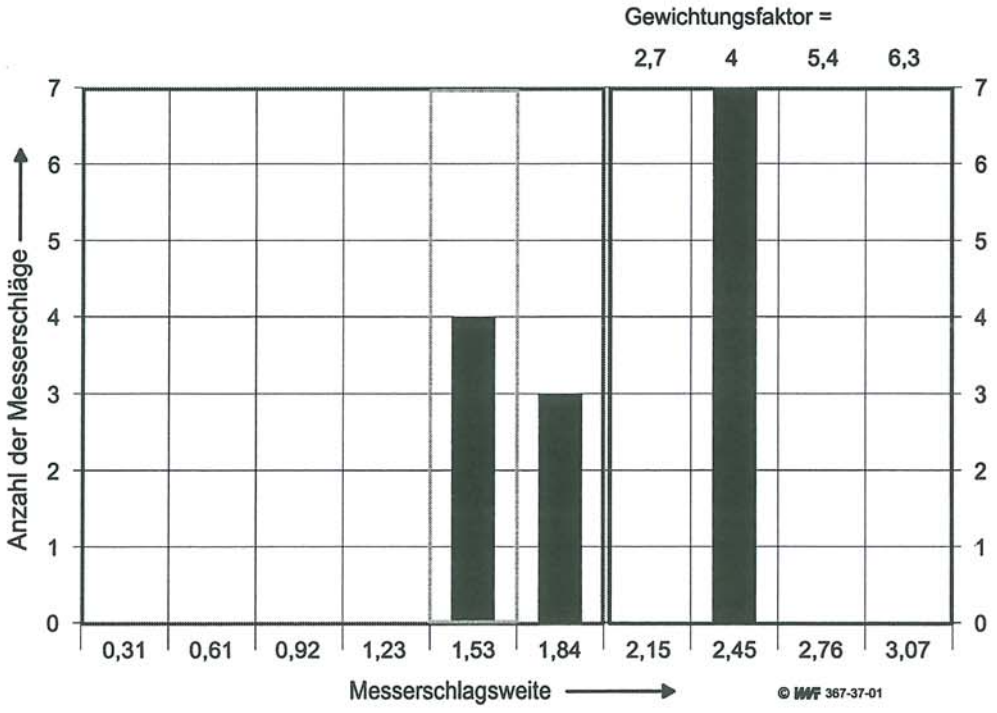

Bild 17: Bewertung des Histogramms.

zwischen 1,53 mm und 1,84 mm und dann noch 7 Messerschläge mit einer Messerschlagsweite zwischen 2,15 mm und 2,45 mm gemessen worden sind. Das Histogramm besitzt zwei ausgeprägte Peaks und damit liegt ein unregelmäßiges Messerschlagsmuster vor. Die Oberfläche ist also mit einem Werkzeug gefertigt worden, daß eine deutliche Schneidenflugkreisdifferenz aufweist.

Das Histogramm wird an Hand des Werts für die Soll-Messerschlagsweite immer so ausgerichtet, daß die Anzahl der Messerschläge, die in der Nähe der Soll-Messerschlagsweite liegen in der fünften Klasse des Histogramms dargestellt werden. In diesem Beispiel liegen also vier Messerschläge mit einer Weite von 1,23 mm bis 1,53 mm in der Nähe der Soll-Messerschlagsweite, die auf 1,38 mm eingestellt war. Messerschläge, die kürzer als die Sollweite sind, werden im Histogramm links dargestellt und sind für die qualitative Bewertung der Oberfläche nicht von Bedeutung. Wenn die Messerschlagsweite allerdings größer als der Sollwert ist, dann steigt die Wahrscheinlichkeit, daß die Messerschläge vom Kunden wahrgenommen werden können und das Werkstück somit Ausschuß ist. Deshalb muß auf die Abweichung in Richtung größerer Messerschläge reagiert werden.

Damit das Ergebnis nicht mehr interpretierbar ist und um durchgängig das gleiche Qualitätsniveau zu erzielen, wird die Bewertung nicht von dem Maschinenbediener vorgenommen, der das Oberflächenprofil und das Histogramm betrachtet, sondern durch das Meßsystem selber. Erst damit wird auch der Effekt der Standzeitverlängerung des Werkzeugs und damit auch die Kostensenkung erreicht. Andererseits muß das System auch in gewissen Maß fehlertolerant sein, damit Fehlalarme und unnötige Stillstandszeiten vermieden werden. Dazu wird von der Bildanalysesoftware nach

$$\text{Fehlerindikator} = \left(\sum_{i=7}^{10} \frac{n_i}{n_{gesamt}} \cdot \text{Gewichtungsfaktor} \right) - 1 \qquad (4)$$

ein Fehlerindikator berechnet, der sowohl die Anzahl der Messerschläge, als auch die Größe der Abweichung berücksichtigt. n_i ist dabei die Anzahl der Messerschläge in der Klasse i, während n_{gesamt} die Gesamtanzahl der Messerschläge im aktuellen Oberflächenbild ist. Der Gewichtungsfaktor ist abhängig von der Nummer der Klasse und besitzt folgenden Wert:

Klassennr.	Wert
1-6	0
7	2,7
8	4
9	5,4
10	6,3

Tabelle 2: Wert des Gewichtungsfaktors.

Damit wird berücksichtigt, daß eine große Abweichung von einigen wenigen Messerschlägen eine Oberfläche genau so schnell zu Ausschuß werden läßt, wie eine kleine Abweichung vom Sollwert vieler Messerschläge.

Das Meßsystem löst dann einen Alarm aus, wenn der Fehlerindikator größer eins ist und wenn dreimal nacheinander Messerschläge in einer der Klassen 7-10 registriert worden sind. Damit wird sichergestellt, daß eine zufällige Abweichung z.B. durch einen Meßfehler nicht gleich zu einem Alarm führt, obwohl noch keine fehlerhaften Werkstücke produziert werden. Dieser Alarm ist zur Zeit als Fehlermeldung auf dem Bildschirm des Bildanalysesystems realisiert, allerdings kann auch über eine Schnittstellenkarte einfach ein optisches oder akustisches Signal angesteuert werden. Wenn aufgrund von bestimmten Anwenderanforderungen eine stärkere (schwächere) Einhaltung des Sollwerts gewünscht sein sollte, so kann das auf einfache Weise durch eine entsprechende Anpassung der Gewichtungsfaktoren der einzelnen Histogrammklassen erfolgen.

3.3.3 Einrichtung und Bedienung des Meßsystems

Vor der Benutzung des Meßsystems müssen einige wenige Einstellungen vorgenommen werden. Nachdem die Kamera und die Beleuchtungseinheit montiert worden sind, müssen das Bild der Kamera scharf gestellt und entweder durch Verändern der Höhe der Kamera oder der Brennweite des Objektivs ein passender Bildausschnitt gewählt werden. Dazu kann das Kamera-Livebild verwendet werden, das entweder über den Button *Livebild* im Ergebnisfenster oder den Menueintrag *Kamera-Livebild* im Menu *Bild holen* eingeschaltet werden kann. Für die Versuche wurde ein Bildausschnitt mit einer Bildhöhe von 30 mm gewählt. Das stellt einen guten Kompromiß zwischen einer hohen Auflösung der Messerschlagsweite und einer ausreichenden Anzahl von Messerschlägen pro Oberflächenbild dar, um eine befriedigende statistische Sicherheit zu erzielen. Anschließend muß die Kamera mit ihren Pixelzeilen exakt parallel zu den Messerschlägen ausgerichtet werden. Für diese Arbeiten hat sich ein Blatt Millimeterpapier bewährt, das unter eine Plexiglasscheibe geklebt wurde. Dazu wird eine Linie des Millimeterpapiers an der Kante des Werkstücks ausgerichtet und die Kamera kann dann so eingestellt werden, daß die Bildränder parallel zu den Linien auf dem Millimeterpapier liegen. Damit wird sichergestellt, daß die Summierung entlang der Bildzeilen erfolgt. Da von der Exaktheit der Ausrichtung die Auflösung des Meßsystems abhängt, ist eine sehr sorgfältige Justage erforderlich.

Als nächstes wird die Bildhöhe anhand des Millimeterpapiers bestimmt und dieser Wert in die Textbox *Bildhöhe* im Ergebnisfenster eingegeben. Das Programm benutzt die Bildhöhe, um aus der Zeilennummer z.B. eines Peaks den Abstand in Millimetern vom oberen Rand des Kamerabildes ausrechnen zu können. Als letztes muß noch die Soll-Messerschlagsweite, die sich aus der Vorschubgeschwindigkeit v_f, der Anzahl der Messer z und der Drehzahl des Werkzeugs n ergibt, in die Textbox *Soll-Weite* eingetragen werden. Nach dem das Fenster mit dem Livebild der CCD-Kamera geschlossen wurde, kann die Bildanalyse mit einem Klick auf den Button *Messung* gestartet werden. Solange sich die Werkstückhöhe und damit der Objektabstand nicht ändern, sind keine weiteren Einstellungen an dem Meßsystem erforderlich.

Da die Kamera zwischen Bildhöhe und Bildweite ein Verhältnis von 4:3 besitzt, wird bei einer Bildhöhe von 30 mm ein 40 mm breiter Bildausschnitt aufgenommen. Sollte das Werkstück schmaler als 40 mm sein, dann würde an den Seiten des Bildes ein Streifen aufgenommen, der nicht zur Bildanalyse beitragen kann, weil er keine Information enthält. Wenn dieser Streifen einen homogenen, dunklen Hintergrund bildet, stört er allerdings auch nicht die Bildanalyse und es sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich. Um jedoch auch im Fall von schmalen, leistenförmigen Werkstücken die volle Größe des CCD-Chips für die Bildanalyse ausnutzen zu können, ist eine zweite Version der Bildanalysesoftware geschrieben worden, bei der die Summation nicht entlang der Bildzeilen, sondern der Bildspalten erfolgt. Dazu muß die Kamera so ausgerichtet werden, daß die Messerschläge parallel zu den Bildspalten liegen. Dadurch erhält man eine Bildweite von 30 mm und eine Bildhöhe von 40 mm, die auch dementsprechend in die Textbox *Bildhöhe* eingetragen werden muß. Im übrigen unterscheiden sich die beiden Versionen der Bildanalysesoftware nicht voneinander.

Die folgende Übersicht erläutert die einzelnen Funktionen in den Menüs des Programms:

Menü Datei

- *Neu:* Setzt das Programm in den den Ausgangszustand zurück. Der Bildspeicher wird gelöscht und die Vorgabewerte für Bildwiederholrate und Schwellwert werden geladen.
- *Speichern:* Solange mit dem Befehl *Speichern unter* noch kein Name ausgewählt wurde, bleibt der Befehl *Speichern* inaktiv und kann nicht ausgeführt werden. Sobald einmal ein Name gewählt wurde, wird das Bild, das im Bildfenster angezeigt wird, unter diesem Namen abgespeichert.
- *Speichern unter:* Speichert das Bild, das gerade im Bildfenster angezeigt wird, unter einem Namen, der vom Benutzer gewählt werden kann.
- *Drucker Setup:* Öffnet ein Dialogfeld, mit dem ein lokaler Drucker oder ein Drucker im Netzwerk ausgewählt und eingerichtet werden kann.
- *Drucken:* Druckt den Inhalt des Bild-, Profil- und Verteilungsfensters sowie die Liste der einzelnen Messerschlagsweiten und die Meßeinstellungen auf dem ausgewählten Drucker aus.
- *Beenden:* Stoppt die Messung und beendet das Programm.

Menü Bearbeiten

- *Kopieren:* Kopiert den Inhalt des aktiven Fensters in die Zwischenablage. Fall das Ergebnisfenster das aktive Fenster ist, werden die einzelnen Messerschlagsweiten in die Zwischenablage kopiert.

Menü Bild holen

- *Kamera-Livebild:* Öffnet ein Fenster mit dem unbearbeiteten Bild der Kamera. Dieser Befehl ist identisch zu dem Button *Livebild* im Ergebnisfenster. Mit Hilfe des Livebilds können die Bildschärfe, der Bildausschnitt und die Ausrichtung der Kamera kontrolliert werden.

- *aus Framegrabber:* Startet den Bildanalysevorgang. Die Bilder werden mit der gewählten Bildwiederholrate in das Bildfenster geladen und analysiert. Wenn ein Wert für die Bildhöhe eingegeben wurde, dann werden das Profil im Profilfenster dargestellt und die numerischen Messerschlagsweiten im Ergebnisfenster ausgegeben. Wenn zusätzlich noch die Soll-Messerschlagsweite eingegeben worden ist, dann wird auch das Histogramm im Verteilungsfenster erzeugt, so daß die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Messerschlagsweiten abgelesen werden kann.

- *aus Datei:* Dieser Befehl öffnet eine Datei mit einem Oberflächenbild und führt die Bildanalyse durch. Mit dieser Funktion können auch Bilder analysiert werden, die aus zurückliegenden Messungen stammen, um z.B. die Ursache für eine Fehlermeldung zu analysieren. Dabei ist darauf zu achten, daß die Bilder die gleiche Anzahl an Zeilen und Spalten haben müssen, wie die zur Zeit verwendete Kamera.

- *aus ASCII-Datensatz:* Zum Vergleich zwischen dem Profil, das mit Hilfe der Dunkelfeldbeleuchtung gewonnen wurde und dem Profil, das aus einer Messung mit dem Tastschnittgerät stammt, wurde auch die Möglichkeit implementiert, einen Datensatz des Perthen Profilmanagers zu laden. Diese Daten werden wie eine Grauwertsumme behandelt, d.h. es ist nur ein Profilschrieb der Oberfläche erforderlich. Um zu einer korrekten Messerschlagsweite zu gelangen, wird für die Bildhöhe der Wert der Tastschrieblänge eingesetzt. Die weitere Analyse erfolgt analog zu der Auswertung eines Kamerabildes.

Menü Meßbedingungen

- *Bildwiederholrate eingeben, Bildhöhe eingeben, Sollweite eingeben* und *Schwellwert eingeben* löschen den Inhalt der jeweiligen Textbox im Ergebnisfenster und setzten den Cursor in diese Textbox. Das Programm überprüft, ob die Eingabe für das jeweilige Feld zugelassen ist (z.B. muß die Soll-Weite größer null sein). Wird der Vorgang durch den Button *Abbrechen* im Ergebnisfenster beendet, dann wird der vorherige Wert wieder eingesetzt.

Menü Fenster

- *Fenster anordnen:* Ordnet die Fenster wieder so an, wie sie beim Start des Programms angeordnet waren. Wenn das Bedürfnis besteht, während des Meßvorgangs einzelne

Fenster zu vergrößern (verkleinern), dann ist das problemlos über die Schaltflächen Minimieren und Maximieren sowie durch Ziehen an den Rahmen der Fenster möglich

- *Bild-, Ergebnis-, Profil-, Verteilungsfenster:* Bringt das jeweilige Fenster in den Vordergrund oder öffnet es, wenn es vorher geschlossen worden war.

4 Test des Meßsystems

4.1 Bildschärfe der CCD-Kamera

Um die Bildanalyse auch bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten zuverlässig und reproduzierbar durchführen zu können, ist es erforderlich, daß die Kamera ein scharfes Bild von der Oberfläche liefert. Dazu muß es sich bei der Kamera zum einen, wie schon in Abschnitt 3.1.1 geschildert wurde, um ein non-interlaced System handeln, das sowohl das gerade als auch das ungerade Halbbild auf einmal aus dem CCD-Chip ausliest. Zum anderen muß die Verschlußzeit der Kamera so kurz sein, daß sich während der Öffnungszeit der Bildausschnitt der Oberfläche nur um ein zu vernachlässigendes Stück weiterbewegt. Aus einer theoretischen Überlegung kann man ableiten, wie groß dieses Stück sein darf und dementsprechend auch, welche Verschlußzeit für eine bestimmte Vorschubgeschwindigkeit an der Kamera zu wählen ist.

Die Kamera, die für den Aufbau des Meßsystems benutzt wurde, besitzt einen CCD-Chip mit einer Größe von 4,9 x 3,7 mm bei 659 x 494 Pixeln. Wie schon in Abschnitt 3.3.3 beschrieben wurde, wurde für die Messungen ein Bildausschnitt mit einer Höhe von 30 mm gewählt, weil man damit einen guten Kompromiß zwischen einer hohen Auflösung einerseits und einer ausreichenden Anzahl von Messerschlägen in einem Bild andererseits erzielt.

Vorschubgeschwindigkeit / Belichtungszeit	10 $\frac{m}{min}$	20 $\frac{m}{min}$	40 $\frac{m}{min}$	60 $\frac{m}{min}$	100 $\frac{m}{min}$
1/250 s	0,67 mm	1,33 mm	2,67 mm	4,00 mm	6,67 mm
1/500 s	0,33 mm	0,67 mm	1,33 mm	2,00 mm	3,33 mm
1/1000 s	0,17 mm	0,33 mm	0,67 mm	1,00 mm	1,67 mm
1/5000 s	0,03 mm	0,07 mm	0,13 mm	0,20 mm	0,33 mm
1/10000 s	0,02 mm	0,03 mm	0,07 mm	0,10 mm	0,17 mm
1/15000 s	0,01 mm	0,02 mm	0,04 mm	0,07 mm	0,11 mm

©IWF 350-11-00

Bild 18: Verschiebung der Oberfläche während der Belichtungszeit der Kamera in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit.

Das heißt, es werden auf 3,7 mm Chiphöhe 30 mm Bildhöhe abgebildet, was einem Abbildungsverhältnis von 1:8 entspricht. Außerdem nehmen wir an, daß in diesem Bild 20 Messerschläge mit einer Messerschlagsweite von jeweils 1,5 mm abgebildet werden sollen. Wie im folgenden gezeigt werden wird, stellt eine Messerschlagsweite von 1,5 mm eine untere Grenze dar, die von dem System unter günstigen Umständen noch erkannt werden kann. Deshalb handelt es sich bei dieser Annahme um den ungünstigsten Fall, der auftreten kann. Um einen einzelnen Messerschlag auflösen zu können, darf sich die Holzoberfläche durch die Vorschubbewegung maximal um 1/4 der Messerschlagsweite während der Belichtungszeit verschieben. Anderenfalls würde während der Belichtung ein heller Messerschlagsberg in ein dunkles Messerschlagstal wandern, so daß für die Kamera, die die Grauwerte über die Belichtungszeit mittelt, kein Unterschied mehr erkennbar ist. Unter Berücksichtigung des Abbildungsmaßstabes ergibt sich damit eine Strecke von 0,74 mm, die das Werkstück während der Öffnungszeit der Kamera fortbewegt werden darf.

Bild 18 gibt die Strecke an, die die Holzoberfläche wärend der Belichtung des CCD-Chips in Abhängigkeit von der Verschlußzeit und der Vorschubgeschwindigkeit weitergeschoben

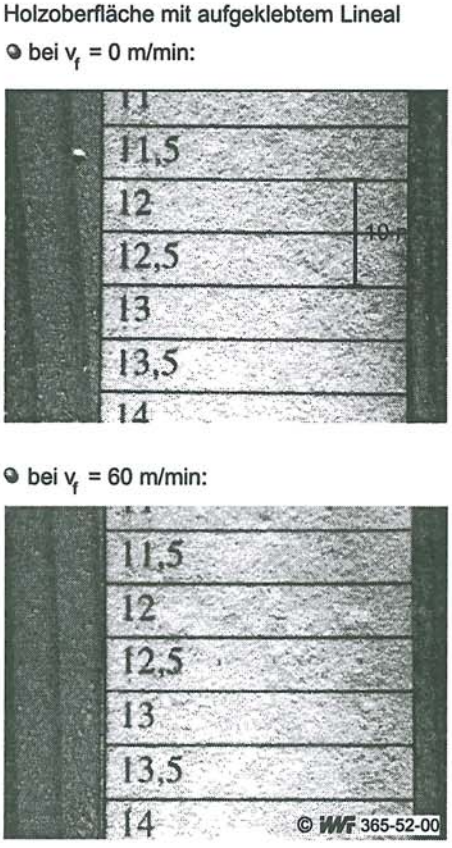

Bild 19: Aufnahmen einer Holzoberfläche einmal bei 0 m/min und einmal bei 60 m/min Vorschubgeschwindigkeit. Der Vergleich zeigt, daß nur eine minimale Bewegungsunschärfe zu erkennen ist und daß die CCD-Kamera deshalb sehr gut geeignet ist, das bewegte Werkstück aufzunehmen.

wird. Für eine bestimmte Vorschubgeschwindigkeit muß die Verschlußzeit also so gewählt werden, daß die Holzoberfläche weniger als 0,72 mm weiterwandert. Diese Grenze wird durch die getrichelte Linie im Bild 18 gekennzeichnet. Wie man erkennen kann, ist es kein Problem, auch für hohe Vorschubgeschwindigkeiten eine Verschlußzeit zu finden, die eine ausreichende Bildschärfe garantiert. Die Versuche wurden alle mit einer Verschlußzeit von 1/8.000 sek. durchgeführt, das ist die kürzeste Zeit die sich intern in der Kamera einstellen läßt. Wie sich der Tabelle entnehmen läßt, ist dies für Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 100 m/min ausreichend. Bei noch höheren Vorschubgeschwindigkeiten besteht die Möglichkeit, die Kamera extern über einen Funktionsgenerator zu triggern. Die Länge des Rechteckimpulses bestimmt dann die Öffnungszeit des Kameraverschlusses. Damit sind Öffnungszeiten bis zu 1/100.000 sek. möglich.

Um diese theoretischen Überlegungen mit einem Versuch zu untermauern, ist auf einen Holzbalken ein Papier mit einem aufgedruckten Lineal aufgeklebt worden. Dieses Lineal wurde einmal bei $v_f = 0$ m/min und einmal bei $v_f = 60$ m/min aufgenommen. Wie man in Bild 19 erkennen kann, ist auch bei 60 m/min praktisch keine Bewegungsunschärfe zu erkennen. Das zeigt, daß eine CCD-Kamera sehr gut dazu geeignet ist, eine schnell bewegte Werkstückoberfläche scharf aufnehmen zu können, um sie anschließend zu untersuchen. Deshalb konnte auch auf die im Forschungsantrag in den Arbeitspunkten 4.2 und 4.3 vorgeschlagene vorübergehende Verwendung einer herkömmlichen Spiegelreflexkamera völlig verzichtet werden und stattdessen gleich von Anfang an auf die CCD-Kamera zurückgegriffen werden.

4.2 Verifikation des Meßergebnisses

Bevor in mehreren Versuchsreihen die meßtechnischen Grenzen durch eine Variation der Werkstoff- und Maschinenparameter bestimmt werden konnten, war zu überprüfen, ob die von dem System bestimmten numerischen Messerschlagsweiten mit denen übereinstimmen, die von einem Tastschnittgerät gemessen werden. Da bei der Messung von Messerschlagsweiten mit dem Tastschnittgerät direkt auf der Holzoberfläche das Problem auftrat, daß die Bearbeitungsrauhigkeit von der Strukturrauhigkeit überlagert wird, und damit eine Messung der einzelnen Messerschlagsweiten sehr schwierig ist, wurde ein Referenzwerkstoff verwendet. Dieser Referenzwerkstoff ist porenfrei und besitzt nach der Bearbeitung keine aufstehenden Fasern, so daß nur die Messerschläge in dem Profilschrieb aufgezeichnet werden. Als geeignet hat sich POM (Polyoximethylen) erwiesen, da dieser Werkstoff für eine Hobelbearbeitung ausreichend hart und temperaturbeständig ist. Ein Quader von etwa 10 x 10 cm wurde für diesen Versuch in eine Holzkantel eingelassen und von der Unterseite festgeschraubt. Die Oberfläche wurde mit einer Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 9{,}6$ m/min und einer Drehzahl des Werkzeugs $n = 5700$ 1/min erzeugt. Bei dem Werkzeug war eine Schneide um einen Zahn in der Aufnahme zurückgesetzt, so daß nur ein Messer an der Oberflächenbildung beteiligt war. Daraus folgt eine theoretische Messerschlagsweite $f_z =$

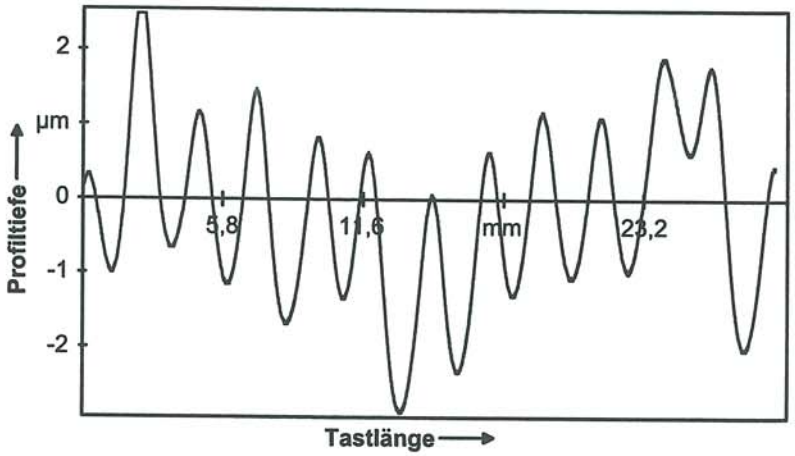

Bild 20: Profil der Referenzoberflächen, abgetastet auf einem POM-Kunststoffblock, der in das Holzwerkstück eingelassen wurde.

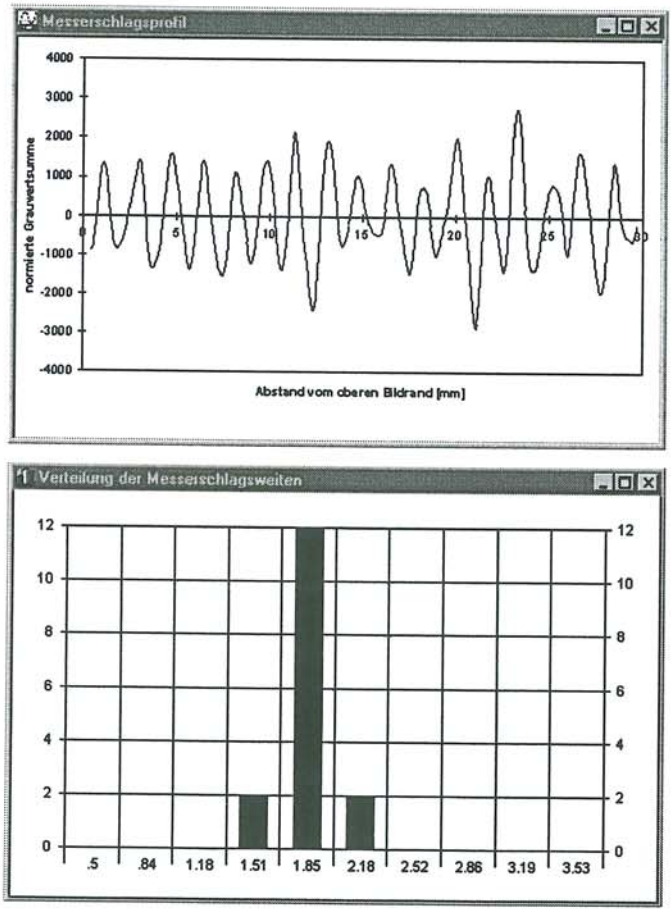

Bild 21: Die gleiche Oberfläche wie in Bild 20, diesmal gemessen mit Hilfe der Dunkelfeldbeleuchtung. Das obere Bild zeigt das Messerschlagsprofil, das untere die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Messerschlagsweiten.

1,7 mm. Die Ergebnisse der Messungen sind in Bild 20 und Bild 21 wiedergegeben. Bild 20 zeigt das Oberflächenprofil, das mit dem Tastschnittgerät gemessen wurde. Dargestellt wird das W-Profil mit Grenzwellenlänge $\lambda_c = 1$ mm. Bild 21 gibt das Profil der Messerschlagsweitenmessung mit Hilfe der Dunkelfeldbeleuchtung sowie das zugehörige Histogramm wieder. Anhand des Histogramms kann man erkennen, das die Verteilung einen ausgeprägten Peak besitzt, d.h. das Messerschlagsmuster ist wie bei einem einschneidigen Werkzeug zu erwarten sehr regelmäßig.

Bei der Auswertung ergibt sich aus dem mit dem Tastschnittgerät gemessenen Profil eine durchschnittliche Messerschlagsweite $f_z = 1{,}74$ mm und aus der Dunkelfeldbeleuchtung eine durchschnittliche Messerschlagsweite $f_z = 1{,}71$ mm. Die Übereinstimmung der Meßwerte aus der Dunkelfeldbeleuchtung mit den Meßwerten vom Tastschnittgerät und der theoretischen Messerschlagsweite ist sehr gut. Die in Bild 20 zu erkennende Schwankung des Profilverlaufs um die Nullinie, die durch die zufällige Lage der Meßstrecke bestimmt wird, wird bei der Dunkelfeldbeleuchtung durch die Mittelung über viele Pixelspalten ausgeglichen. Das Profil aus der optischen Messung der Oberfläche ist deshalb insgesamt besser geglättet. Das ist besonders von Bedeutung, wenn nicht ein an sich glatter Referenzwerkstoff gemessen wird, sondern eine reale Holzoberfläche. Damit ist bewiesen, daß das Meßsystem Messerschlagsweiten messen kann und auch numerisch korrekte Werte ausgibt.

4.3 Wiedergabe unterschiedlicher Messerschlagsmuster

Bild 22 zeigt, wie unterschiedliche Messerschlagsmuster durch das Meßsystem wiedergegeben werden. Beide Oberflächen sind mit einem zweischneidigen Werkzeug erstellt worden, wobei bei Kantel 1 eine deutliche Schneidenflugkreisdifferenz vorgelegen hat, während bei Kantel 2 die beiden Messer gejointet waren und sich auf einem einheitlichen Schneidenflugkreis befanden. Im Fall der Oberfläche mit der unregelmäßigen Messerschlagsweite wurde mit einer Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 20$ m/min gearbeitet, bei Kantel 2 betrug die Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 40$ m/min. Da im ersten Fall beide Messer an der Oberflächenbildung beteiligt waren, während sich im zweiten Fall nur ein Messer auf der Oberfläche abbildet, ergibt sich bei beiden Kanteln eine theoretische Messerschlagsweite $f_z = 3{,}3$ mm.

Bei Kantel 1 kann man dann im Profil auch deutlich erkennen, daß auf einen weiten, tiefen Messerschlag ein kürzerer, flacherer folgt. Dementsprechend erhält man auch im Histogramm eine deutliche Zweiteilung. Die kurzen Messerschläge bilden einen Peak im Histogramm zwischen 1,0 mm und 2,3 mm Messerschlagsweite. Dabei liegen ein Messerschlag im Bereich zwischen 1,0 mm und 1,7 mm und 8 Messerschläge im Bereich zwischen 1,7 mm und 2,3 mm. Ein zweiter ausgeprägter Peak zeigt sich zwischen 3,0 mm und 4,3 mm Messerschlagsweite, wobei sich 5 Messerschläge im Bereich zwischen 3,0 mm und 3,6 mm, sowie 3 Messerschläge im Bereich zwischen 3,6 mm und 4,3 mm befinden. Bei Kantel 2 dagegen zeigt das Profil ein sehr gleichmäßiges Bild der Oberfläche. Dementsprechend ergibt sich auch im Histogramm nur ein ausgeprägter Peak zwischen 2,3 mm und 3,6 mm Messerschlagswei-

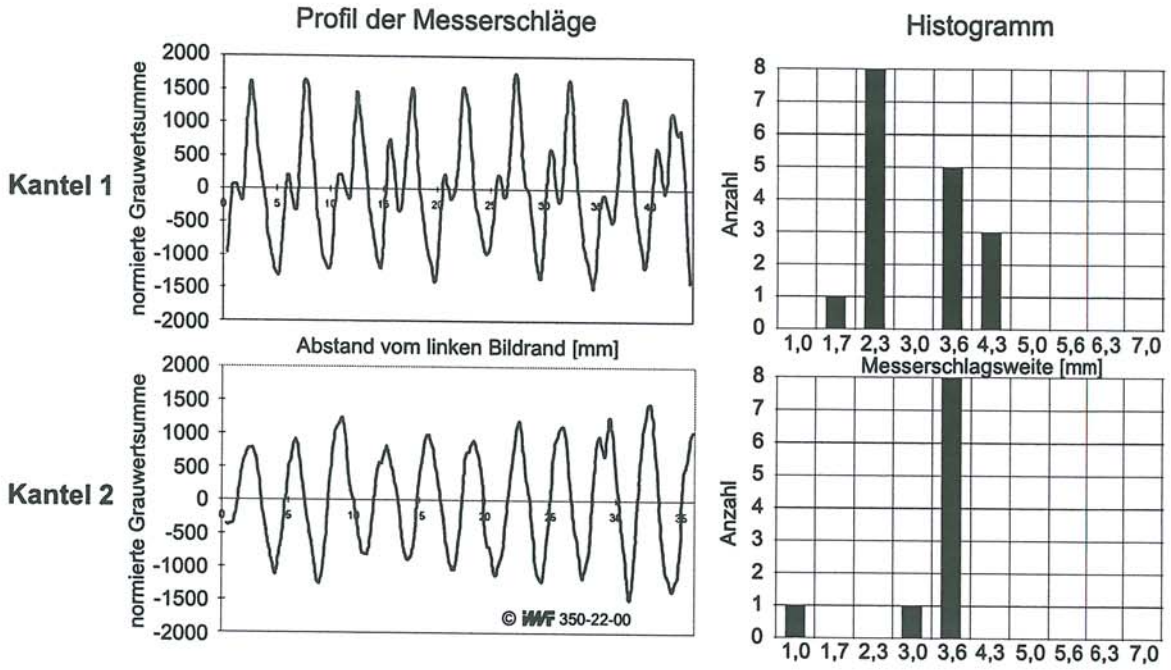

Bild 22: Vergleich zwischen einer Oberfläche mit einem regelmäßigen und einem unregelmäßigen Messerschlagsmuster.

te. Der einzelne Messerschlag im Bereich zwischen 0 mm und 1,0 mm Messerschlagsweite resultiert aus dem zweiten Maximum von rechts im Profil. Dieses Maximum ist vermutlich durch eine Störung auf der Holzoberfläche zweigeteilt, wobei das Minimum zwischen der Doppelspitze so ausgesprägt ist, daß der Bildanalysealgorithmus beide Spitzen in die Auswertung aufnimmt. Die Empfindlichkeit des Meßsystems und damit der Zeitpunkt, ab dem solche Doppelspitzen nicht nur als Störung sondern als beginnende Schneidenflugkreisdifferenz gewertet werden, kann durch die Wahl des Schwellwerts beeinflußt werden.

Bei der Interpretation der durch die Bildanalyse gewonnenen Profile muß beachtet werden, daß eine direkte Aussage über die Messerschlagstiefe nicht möglich ist. Der Kontrast zwischen der hellen Messerschlagsspitze und dem dunklen Messerschlagstal ist nicht nur von der Höhe der Messerschlagsberge, sondern auch von dem Beleuchtungswinkel, der Beleuchtungsintensität, der Reflektivität der Oberfläche sowie anderen optischen Eigenschaften abhängig. Eine Umrechnung einer Differenz der Grauwertsummen zweier Zeilen in eine Höhendifferenz zwischen den zugehörigen Bildabschnitten ist deshalb nicht durchführbar. Da die Messerschlagstiefe allerdings über den Schneidenflugkreis mit der Messerschlagsweite zusammenhängen *muß*, ist eine Berechnung der Messerschlagstiefe aus der Messerschlagsweite möglich. Wenn bei einem Anwender also das Bedürfnis besteht, neben der Messerschlagsweite auch eine Aussage über die Messerschlagstiefe zu erhalten, so kann eine entsprechende Umrechnung nach Eingabe des Schneidenflugkreises in das Programm integriert werden.

4.4 Variation der Werkstoff- und Maschinenparameter

Um eine Grenze angeben zu können, ab der das Meßsystem die Messerschlagsweite zuverlässig und reproduzierbar bestimmen kann, sind in mehreren Versuchsreihen Werkstoff- und Maschinenparameter variiert worden, um alle möglichen Fälle zu simulieren, die in der Praxis auftreten können. Dazu gehören verschiedene Holzsorten, zunehmende Oberflächenrauhigkeit durch Werkzeugverschleiß, unterschiedlicher Feuchtegehalt der Werkstücke und der Einfluß von Unwuchtschwingungen.

4.4.1 Messerschlagsweite

Als Ausgangspunkt wurde für die Holzsorten Buche, Kiefer und Meranti die Messerschlagsweite bestimmt, bei der bei scharfem Werkzeug auf trockenem Holz eine Erkennung möglich ist. Dazu wurde durch Variation der Vorschubgeschwindigkeit schrittweise die Mes-

		0 $\frac{m}{min}$	40 $\frac{m}{min}$	48 $\frac{m}{min}$	60 $\frac{m}{min}$
Buche	f_z = 1,2 mm, t = 1,4 µm	○	X	X	X
	f_z = 1,3 mm, t = 1,8 µm	✓	○	X	X
	f_z = 1,5 mm, t = 2,3 µm	✓	✓	✓	✓
	f_z = 1,7 mm, t = 2,9 µm	✓	✓	✓	✓
Kiefer	f_z = 1,3 mm, t = 1,8 µm	○	X	X	X
	f_z = 1,5 mm, t = 2,3 µm	✓	✓	✓	○
	f_z = 1,8 mm, t = 3,5 µm	✓	✓	✓	✓
	f_z = 2,0 mm, t = 4,2 µm	✓	✓	✓	✓
Meranti	f_z = 2,2 mm, t = 4,9 µm	○	X	X	X
	f_z = 2,3 mm, t = 5,7 µm	○	X	X	X
	f_z = 2,5 mm, t = 6,5 µm	✓	✓	✓	○
	f_z = 2,7 mm, t = 7,4 µm	✓	✓	✓	✓

©iWF 350-12-00

✓ : Messerschläge lassen sich reproduzierbar erkennen

○ : erste Erkennbarkeit, Meßwerte schwanken allerdings stark

X : Messerschläge nicht meßbar

Bild 23: Zur Bestimmung des Grenzwerts, ab dem eine Erkennung der Messerschlagsweite möglich ist, wurde für die Holzsorten Buche, Kiefer und Meranti die Messerschlagsweite systematisch variiert.

serschlagsweite vergrößert. Die Versuche wurden bei einer Drehzahl $n = 6000$ 1/min und einem Schneidenflugkreis $D = 240$ mm durchgeführt. Das ist der maximale Schneidenflugkreis, mit dem auf der am IWF vorhandenen Hobelmaschine „Weinig Hydromat 22 BL" gearbeitet werden kann. Gleichzeitig ist das der Fall, der für die Erkennung der Messerschlagsweiten die härteste Anforderung an das Meßsystem stellt. Da die Messerschlagstiefe bei konstanter Messerschlagsweite antiproportional zum Schneidenflugkreis ist, erhält man bei einem größeren Schneidenflugkreis einen schlechteren Kontrast zwischen Messerschlagsbergen und -tälern, als bei einem kleinen Schneidenflugkreis. Somit stellen die Ergebnisse dieser Messung den „worst case" dar und mit kleinerem Schneidenflugkreis erhält man bei gleicher Messerschlagsweite eine bessere Erkennbarkeit der Messerschläge. Bei den Versuchen wurde mit einem zweischneidigen Hobelmesserkopf gearbeitet, wobei eine Schneide um einen Zahn in der Werkzeugaufnahme zurückgesetzt war. Damit bildet sich nur eine Schneide auf der Oberfläche ab und man erhält ein definiertes Ergebnis, das unabhängig von einer eventuellen Änderung des Schneidenflugkreises während der Versuche ist. Die Messer wurden im eingebauten Zustand geschliffen und anschließend der Hobelmesserkopf ausgewuchtet. Das Meßsystem wurde bis zu einer Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 60$ m/min getestet. Dieser Wert resultiert nicht aus einer Grenze des Meßsystems, sondern daher, daß höhere Geschwindigkeiten auf Maschinen des IWF nicht realisiert werden können.

Wie man dem Bild 23 entnehmen kann, ist für Buche ab einer Messerschlagsweite $f_z = 1{,}5$ mm und bei Kiefer ab $f_z = 1{,}8$ mm eine Erkennung und Vermessung der Messerschlagsweiten reproduzierbar möglich. Bei einem Schneidenflugkreis $D = 240$ mm entspricht das bei Buche einer Messerschlagstiefe $t = 2{,}3$ μm und bei Kiefer einer Messerschlagstiefe $t = 3{,}5$ μm. Die etwas schlechtere Erkennbarkeit der Messerschläge auf Kiefer läßt sich damit begründen, daß es bei Kiefer einen ausgeprägteren Unterschied in der Härte zwischen den Früh- und Spätholzzonen gibt. Besonders wenn die Jahrringe fast senkrecht auf der Oberfläche stehen, läßt sich erkennen, daß die Messerschläge in den Frühholzzonen eine andere Ausprägung besitzen, als in den Spätholzzonen. Insgesamt verschlechtert sich dadurch das Signal-/Rauschverhältnis für die CCD-Kamera, was durch einen entsprechend breiteren und tieferen Messerschlag ausgeglichen werden muß. Ebenfall kann man dem Bild entnehmen, daß die Erkennbarkeit der Messerschläge mit Hilfe des optischen Meßsystems im wesentlichen nicht von der Vorschubgeschwindigkeit abhängt. Lediglich in den Fällen, bei denen das System sowieso schon an seinen meßtechnischen Grenzen arbeitet, zeigt sich eine Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit.

Bei der Analyse der Merantioberfläche ergibt sich ein Grenzwert $f_z = 2{,}7$ mm, ab den eine zuverlässige Erkennung der Messerschlagsweiten möglich ist. Bei einem Schneidenflugkreis von $D = 240$ mm entspricht das einer Messerrschlagstiefe $t = 7{,}4$ μm. Dieser im Vergleich zu Buche und Kiefer deutlich höhere Grenzwert läßt sich mit der Holzstruktur von Meranti erklären. Bei Meranti handelt es sich um ein sehr grobporiges Holz. Da auf der Oberfläche sehr viele und große Poren angeschnitten werden, können sich die Messerschläge nur auf den Stegen zwischen Poren abbilden. Damit ist auch der Oberflächenanteil deutlich gerin-

ger, der bei der zeilenweisen Summierung der Grauwerte einen Beitrag zum Kontrast zwischen den hellen Messerschlagsbergen und den dunklen Messerschlagstälern liefern kann. Dementsprechend ist dann erst ab einer größeren Messerschlagsweite eine Erkennung der Messerschläge auf Meranti möglich.

4.4.2 Schneidenverschleiß

Die in Abschnitt 4.4.1 angebenen Grenzwerte für die Erkennbarkeit der Messerschläge stellen den Idealfall für ein ausgewuchtetes Werkzeug mit geschliffenen Schneiden auf einer trockenen Holzoberfläche dar. Als ein wesentlicher Einfluß auf die Erkennbarkeit der Messerschläge wurde die zunehmende Rauheit der Holzoberfläche durch den Schneidenverschleiß untersucht. Dazu wurde alle 100 m Vorschubweg die oberflächenbildende Schneide ausgebaut und die Schneidkante vermessen. Zusätzlich wurde ein Werkstück aus Buche und ein Werkstück aus Kiefer bearbeitet und anschließend sowohl mit der Dunkelfeldbeleuchtung die Oberfläche bewertet, als auch mit dem Tastschnittgerät die Oberflächenrauheit gemessen. Als Kennwerte für die Oberflächenrauheit wurden die Größen R_a, R_z und R_{max} verwendet. Während des Versuchs wurde zu 1/3 Buche und zu 2/3 Meranti zerspant. Meranti ist für solche Standzeitversuche besonders geeignet, weil es sehr abrasiv ist. Damit läßt sich schon nach relativ kurzer Zeit das Standzeitende erreichen.

Für die Versuche wurden HSS-Schneiden verwendet. Um realistische Versuchsbedingungen zu erreichen, wurde der Messerkopf zu Beginn der Versuchsreihe einmal gejointet. Wenn in der Produktion ein mehrschneidiger Messerkopf eingesetzt wird, ist ein Jointvorgang vor Beginn der Produktion erforderlich. Allerdings werden die Messer durch den Jointvorgang

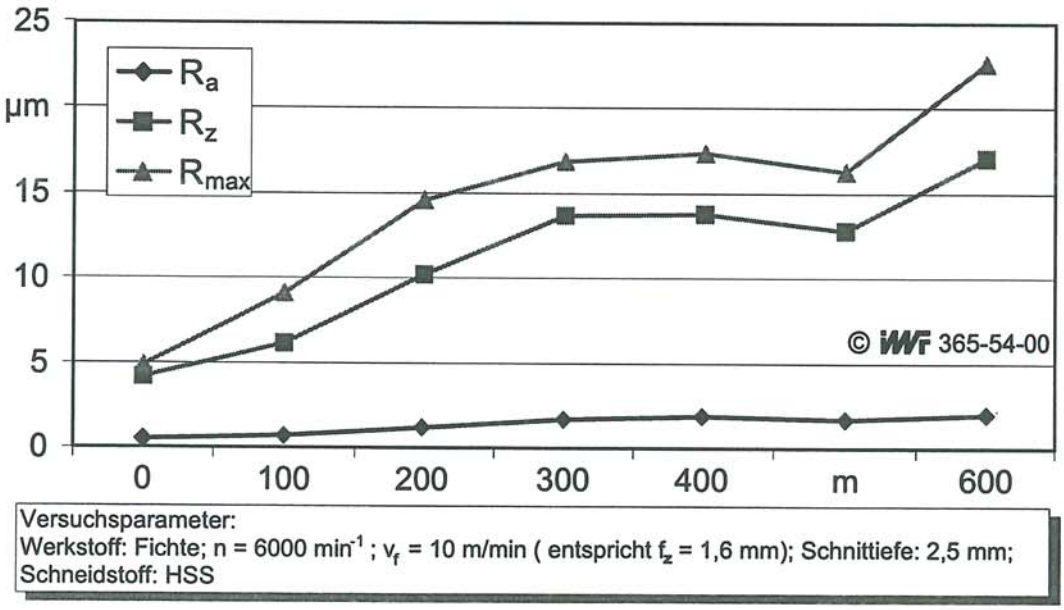

Bild 24: Rauheit der Holzoberfläche in Abhängigkeit vom Standweg.

durch das Anschleifen einer Jointfase auch abgestumpft, so daß diese Bedingung im Versuch unbedingt nachzuvollziehen war. Bei der Vermessung der Schneidkante stellte sich dann ein wesentlicher Nachteil des an der Hobelmaschine des IWF eingebauten Geradjointers heraus. Dieser Jointstein, der entlang der Schneidkante des Messers gezogen wird, trägt besonders im Einlaufbereich an den Enden des Messers besonders viel von der Schneidkante ab, während er in der Mitte schon den größten Teil seiner Wirkung verloren hat. Als Resultat sind die beiden Ecken der Schneide deutlich gegenüber der Mitte der Schneide zurückgesetzt. Deshalb empfiehlt es sich, auch für gerade Hobelmesser einen sogenannten Profiljointer einzusetzen, der senkrecht an das Messer herangefahren wird.

Das Standzeitende der eingesetzten Schneiden ließ sich sowohl über die visuell und taktil wahrnehmbare Oberflächenqualität (siehe Tabelle 3), als auch über die mit dem Tastschnittgerät gemessene Oberflächenrauheit (siehe Bild 24) bestimmen. Nach 600 m Vorschubweg hatten die Schneiden ihr Standzeitende erreicht.

0 m	Die Oberfläche fühlt sich glatt an, keine aufstehenden Fasern, keine Fäden durch Schneidenausbrüche, Früh- und Spätholz bei Kiefer gleichmäßig abgetragen; Rauheitskennwerte der Schneidkante: $R_a = 0{,}4$; $R_z = 2{,}8$; $R_{max} = 5{,}3$
100 m	Wie bei 0 Vorschubmetern fühlt sich die Oberfläche immer noch glatt an, es sind keine Schneidenausbrüche zu beobachten; Rauheitskennwerte der Schneidkante: $R_a = 0{,}8$; $R_z = 8{,}5$; $R_{max} = 10{,}3$
200 m	Einzelne Fasern stehen auf und es ist eine erste Rauheit auf der Oberfläche des Werkstücks fühlbar; Rauheitskennwerte der Schneidkante: $R_a = 0{,}9$; $R_z = 8{,}7$; $R_{max} = 10{,}7$
300 m	Wie bei 200 m Vorschubweg ist eine leichte Rauheit auf der Holzoberfläche fühlbar, durch Schneidenausbrüche lassen sich kleine Fäden auf der Oberfläche beobachten. Rauheitskennwerte der Schneidkante: $R_a = 1{,}2$; $R_z = 15{,}5$; $R_{max} = 21{,}0$
400 m	Zunehmende Rauheit der Holzoberfläche durch aufstehende und herausgerissene Fasern; Rauheitskennwerte der Schneidkante: $R_a = 1{,}2$; $R_z = 15{,}8$; $R_{max} = 22{,}1$
500 m	Mehrere deutliche Fäden durch Schneidenausbrüche auf der Oberfläche, deutlich fühlbar Rauheit; Rauheitskennwerte der Schneidkante: $R_a = 1{,}4$; $R_z = 21{,}1$; $R_{max} = 40{,}8$
600 m	Standzeitende erreicht; sehr rauhe Oberfläche; Fasern werden nicht mehr geschnitten sondern aus der Oberfläche herausgerissen; viele, deutliche Fäden; Rauheitskennwerte der Schneidkante: $R_a = 1{,}6$; $R_z = 28{,}1$; $R_{max} = 44{,}3$

Tabelle 3: Optischer Eindruck der Holzoberfläche und Rauheit der Schneidkante in Abhängigkeit vom Vorschubweg.

	f_z = 1,6 mm, t = 2,7 µm		f_z = 2,0 mm, t = 4,2 µm	
	Buche	Kiefer	Buche	Kiefer
100 m	✓	✓	✓	✓
200 m	✓	✓	✓	✓
300 m	✓	✓	✓	✓
400 m	✓	○	✓	✓
500 m	○	○	✓	✓
600 m	○	X	✓	✓

© IWF 365-54-00

Bild 25: Erkennbarkeit der Messerschläge in Abhängigkeit vom Standweg.

Parallel dazu wurde das Messerschlagsmuster der Oberfläche mit Hilfe der Dunkelfeldbeleuchtung untersucht. Dazu wurde je ein Werkstück aus Buche und aus Kiefer bei einer Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 9{,}6$ m/min und $v_f = 12$ m/min bearbeitet. Damit ergibt sich eine Messerschlagsweite $f_z = 1{,}6$ mm bzw. $f_z = 2$ mm. Während bei der Messerschlagsweite von 1,6 mm eine Messung bei Kiefer ab 400 m Vorschubweg und bei Buche ab 500 m Vorschubweg nicht mehr möglich ist, erhält man bei einer Messerschlagsweite von 2 mm über den gesamten Standweg reproduzierbare Ergebnisse.

Die Rauheit der Holzoberfläche wird vorallem durch vermehrt aufstehende Fasern bedingt. Diese Fasern zeigen sich in der Dunkelfeldbeleuchtung als sehr helle Punkte im Bild der Kamera. Dadurch verschlechtert sich das Signal-/ Rauschverhältnis für die Analyse der Messerschlagsweiten, was wiederum durch eine etwas vergrößerte Messerschlagsweite und -tiefe ausgeglichen werden muß.

4.4.3 Holzfeuchte

Um den Einfluß der Holzfeuchte auf die Erkennbarkeit der Messerschläge zu untersuchen, sind jeweils ein Buche-, Kiefer- und Merantiwerkstück in einem Becken gewässert worden. Die Werkstücke hatten über mehrere Tage Zeit, Feuchtigkeit aufzunehmen und so über den gesamten Querschnitt auf einen einheitlichen Feuchtegehalt zu kommen. Danach wurden die Werkstücke aus dem Wasser genommen und so weit getrocknet, bis 25%, 15% bzw. 8%

Bild 26: Einfluß der Holzfeuchte auf die Erkennbarkeit der Messerschläge.

Holzfeuchte wieder erreicht waren. Der Feuchtegehalt des Holzes wurde dabei mit dem Feuchtemeßgerät „Gann Hydromette HT 85" bestimmt, das Einstechelektroden besitzt und somit auch eine Feuchtigkeitsmessung unterhalb der Oberfläche des Werkstücks erlaubt.

Die Werkstücke wurden dann mit den Einstellungen gehobelt, bei denen im trockenen Zustand eine zuverlässige und reproduzierbare Messung der Messerschlagsweiten möglich war. D.h. für Buche wurde die Vorschubgeschwindigkeit so gewählt, daß sich eine Messerschlagsweite $f_z = 1{,}5$ mm ergeben hat, bei Kiefer bzw. Meranti dementsprechend $f_z = 1{,}7$ mm bzw. $f_z = 2{,}7$ mm. Das Ergebnis der Messungen ist in Bild 26 zusammengefaßt.

Bei Buche ergab sich kein Einfluß der Holzfeuchte auf die Erkennbarkeit der Messerschläge. Die Proben hatten nach der Bearbeitung eine glatte Oberfläche, die sich ähnlich der trokkenen Werkstücke mit Hilfe der Dunkelfeldbeleuchtung analysieren ließ. Eine deutliche Abhängigkeit der Erkennbarkeit der Messerschläge von der Holzfeuchte ergab sich allerdings bei der Kiefer. Besonders die Frühholzbereiche waren stark von aufstehenden Fasern geprägt, die die Bildanalyse sehr erschwert bzw. sogar unmöglich gemacht haben. Der taktil festgestellte Unterschied in der Oberflächenrauhigkeit wurde durch eine Messung mit Hilfe des Tastschnittgeräts bestätigt. Tabelle 4 gibt die Rauheitskennwerte R_{vk}, R_{pk}, R_{max} und R_z der Oberfläche eines Kiefernwerkstücks mit 8% und mit 18% Holzfeuchte wieder.

Kiefer, 8% Holzfeuchte	Kiefer, 18% Holzfeuchte
$R_{vk} = 2{,}6$	$R_{vk} = 8{,}6$
$R_{pk} = 2{,}5$	$R_{pk} = 21{,}3$
$R_{max} = 15{,}6$	$R_{max} = 127{,}4$
$R_z = 13{,}8$	$R_z = 66{,}4$

Tabelle 4: Abhängigkeit der Rauhigkeit der Holzoberfläche vom Feuchtegehalt des Werkstücks.

Besonders anhand des Kennwerts R_{pk}, der die Spitzen und damit die aufstehenden Fasern

der Oberfläche wiederspiegelt, kann man erkennen, daß die Oberfläche des Werkstücks mit 18% Holzfeuchte sehr viel rauher ist, als die des Werkstücks mit 8% Holzfeuchte. Eine solche Oberfläche stellt von sich aus schon Auschuß dar bzw. muß nachgeschliffen werden, so daß eine Messerschlagsweitenmessung auch keinen Sinn ergibt. Deshalb stellt dieses Ergebnis auch keine Einschränkung für die Praxistauglichkeit des Meßsystems dar.

Bei Meranti verlief die Feuchtigkeitsaufnahme so langsam, daß nach einer Woche Liegezeit im Becken das Wasser weniger als einen Millimeter in das Holz eingedrungen war. Weil für eine sinnvolle Messung eine gleichmäßige Feuchtigkeitsverteilung wenigstens in dem zu bearbeitenden Bereich erforderlich ist, war die Messung für Meranti nicht möglich.

4.4.4 Unwuchtschwingungen

Zusätzlich wurde der Einfluß von Maschinenschwingungen auf das Meßergebnis untersucht. Bei Maschinenschwingungen muß man unterscheiden zwischen Schwingungen, die von der Maschine auf die Meßeinrichtung übertragen werden und dadurch eventuell die Messung stören könnten und Unwuchtschwingungen, die sich in einem entsprechend veränderten Messerschlagsbild auf der Holzoberfläche äußern. Im ersten Fall konnte kein Einfluß festgestellt werden. Durch die sehr kurze Kameraverschlußzeit machen sich Vibrationen des Meßstands nicht bemerkbar. Durch die sehr steife Bauweise des Meßportals sind die übertragenen Schwingungsamplituden von sich aus schon sehr klein und wirken sich durch die kurzen Verschlußzeiten noch viel geringer auf das Bild der CCD-Kamera aus. Außerdem kann das Meßportal in der Bearbeitungsstraße entkoppelt von der eigentlichen Hobelmaschine aufgestellt werden, da ein Einbau direkt in die Hobelmaschine aufgrund des begrenzten Raums dort sowieso nicht möglich ist.

Um den Einfluß von Unwuchtschwingungen und ihre Auswirkung auf die zu analysierende Holzoberfläche zu simulieren, wurden bei einem zweischneidigen Werkzeug gezielt Unwuchtmassen an der Aufnahme einer Schneide befestigt. Der Hobelmesserkopf wurde ausgewuchtet und gejointet, so daß beide Schneiden an der Oberflächenbildung beteiligt waren.

Für die Massen, die in den Hobelmesserkopf eingebaut werden müssen, kann man folgende Überlegung anstellen:

$$\begin{aligned}
\text{Zentrifugalkraft: } F_Z &= \frac{m_m \cdot v^2}{r} \\
\text{Beschleunigung: } F_T &= m_M \cdot a \\
\Rightarrow \quad m_M \cdot a &= \frac{m_m \cdot v^2}{r} \\
\Rightarrow \quad a &= \frac{m_m \cdot v^2}{m_M \cdot r}
\end{aligned}$$

m_M steht dabei für die Masse des Hobelmesserkopfes, m_m für die Testmasse, die in der Nähe einer Schneide eingebaut werden soll. r und v sind die radiale Position und die Geschwindigkeit der Testmasse. Wenn die Geschwindigkeit der Testmasse durch die Drehzahl des

Werkzeugs ersetzt wird, so erhält man letztendlich

$$a = \frac{m_m \cdot (2n\pi r)^2}{m_M \cdot r} \quad (5)$$

$$\text{bzw. } m_m = \frac{a \cdot m_M}{4n^2\pi^2 \cdot r} \quad (6)$$

Mit den Werten $m_M = 22{,}5$ kg und $r = 0{,}095$ m ergeben sich folgende Werte für die Testmasse m_m:

a	m_m
2	1,2 g
5	3 g
10	6 g
15	9 g

Um eine maximale Unwuchtamplitude zu erreichen, wird die Unwuchtmasse in der Aufnahme einer Schneide befestigt. Der Messerkopf führt dann eine Schwingung mit der Frequenz der Drehzahl aus, wobei die maximale Unwuchtamplitude an dem Punkt erreicht wird, an dem die Unwuchtmasse befestigt ist. Das Ergebnis der Messung zeigt Bild 27.

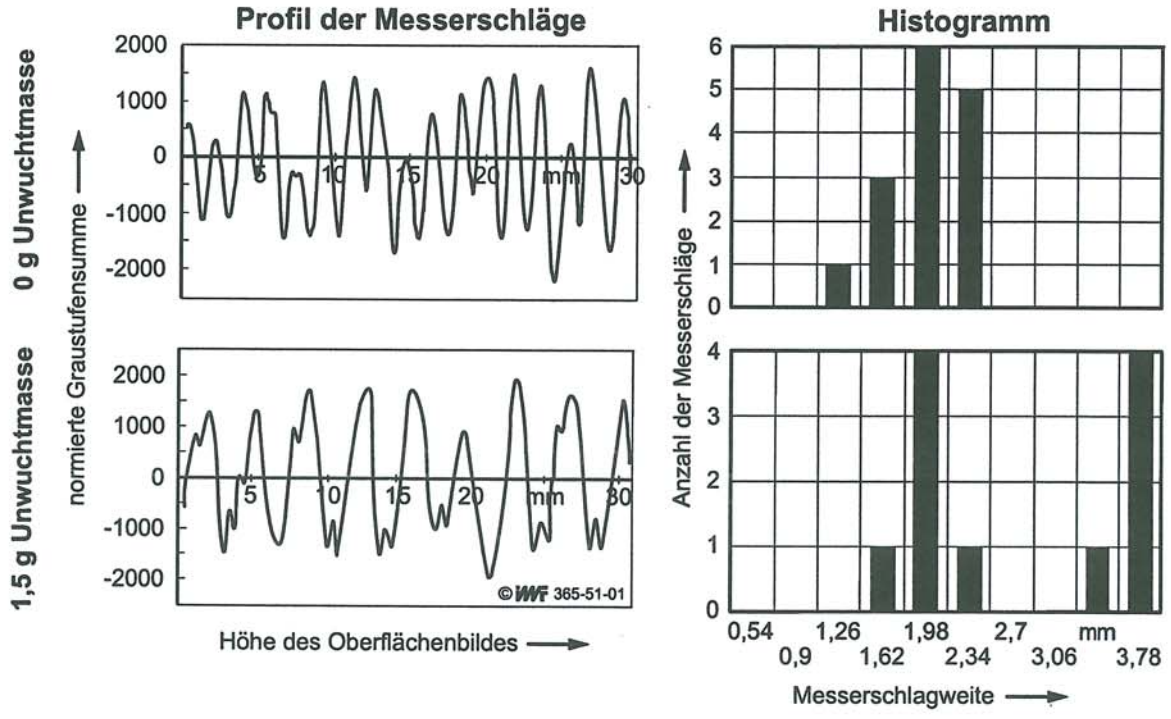

Bild 27: Einfluß von Unwuchtschwingungen auf die Erkennbarkeit der Messerschläge.

Gehobelt wurde mit einer Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 24$ m/min, d.h. man erhält die theoretische Messerschlagsweite $f_z = 2$ mm. Der ausgewuchtete Messerkopf mit 0 g Unwuchtmasse erzeugt ein sehr gleichmäßiges Messerschlagsmuster mit einer durchschnittlichen Messerschlagsweite $f_z = 2$ mm, dementsprechend erhält man in dem Histogramm

einen ausgeprägten Peak zwischen 1,62 mm und 2,34 mm. Dieses zeigt, daß wirklich beide Messer an der Oberflächenbildung beteiligt waren und der Jointvorgang erfolgreich war.

Nach dem Einbau der ersten Unwuchtmasse läßt sich die Unwuchtschwingung des Hobelmesserkopfes deutlich im Profil und im Histogramm ablesen. Am Profil der Messerschläge sieht man, daß sich die Schneide, an der die Unwuchtmasse befestigt ist, nur noch sehr schwach auf der Oberfläche abbildet. Bei fünf Messerschlägen ist ihr Bild auf der Oberfläche so schwach, daß das Meßsystem die doppelte Messerschlagsweite mißt. Damit erhält man in dem Histogramm einen zweiten Peak bei der doppelten Sollmesserschlagsweite und damit das Bild, das auch für eine Schneidenflugkreisdifferenz typisch ist. Bei den Werkstücken, bei denen die Unwuchtmasse noch weiter erhöht worden war, war die zweite Schneide überhaupt nicht mehr an der Oberflächenbildung beteiligt und von dem Meßsystem wurde nur noch die doppelte Sollmesserschlagsweite gemessen.

Unwuchtschwingungen des Werkzeugs erzeugen auf der Holzoberfläche also das gleiche Bild wie eine Schneidenflugkreisdifferenz eines ausgewuchteten Werkzeugs. Deshalb kann man sie mit dem Meßsystem auch genauso gut detektieren. Da sowohl bei einer Unwuchtschwingung als auch bei einer Schneidenflugkreisdifferenz die Oberfläche die Qualitätsanforderung nicht mehr erfüllt, muß auch nicht weiter von dem Meßsystem zwischen der Ursache der Prozeßstörung unterschieden werden. Zur Lösung des Problems wird in beiden Fällen ein Jointzyklus durchgeführt werden müssen.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Automatisierte Bestimmung der Jointintervalle beim Hobeln durch Online-Messung der Messerschlagsweite„ wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik ein Meßsystem realisiert, mit dem im Prozeß auch bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten die Messerschlagsweite gemessen und bewertet werden kann.

Die Messerschläge sind ein wichtiges Qualitätsmerkmal einer gehobelten Holzoberfläche. Die Größe der Messerschläge bestimmt sowohl das optische Erscheinungsbild als auch die funktionalen Eigenschaften der Oberfläche, wenn z.B. die gehobelten Flächen anschließend verleimt werden sollen. Bisher erfolgt die Kontrolle manuell in Form einer taktilen oder visuellen Inspektion durch Prüfpersonal. Besonders durch immer weiter steigenden Vorschubgeschwindigkeiten läßt sich eine solche Kontrolle nicht mehr gründlich genug durchführen bzw. ist für das Prüfpersonal nicht mehr zumutbar. Deshalb besteht das Bedürfnis nach einer automatischen Qualitätskontrolle, die in den Prozeß integriert werden kann.

Das Meßprinzip beruht auf der sogenannten Dunkelfeldbeleuchtung, bei der eine Lampe die Holzoberfläche unter einem sehr flachem Winkel beleuchtet. Die Messerschlagsberge werfen dann Schatten in die Messerschlagstäler. Dieser Kontrast zwischen den Messerschlagsbergen und -tälern kann mit Hilfe einer CCD-Kamera aufgenommen werden. Es wurde gezeigt, daß CCD-Kameras für diese Aufgabe sehr gut geeignet sind, da sie aufgrund ihrer sehr kurzen Belichtungszeiten auch ein schnell bewegtes Objekt scharf abbilden können. Das Bild der Kamera wird in einem Bildanalyseprogramm ausgewertet, das durch zeilenweise Summierung der Grauwerte ein Helligkeitsprofil der Oberfläche bildet. Dieses Profil wird bezüglich der Maxima ausgewertet, und aus der Differenz der Lage der Maxima kann die Messerschlagsweite errechnet werden. Durch eine Messung mit dem Tastschnittgerät wurde gezeigt, daß die mit der Dunkelfeldbeleuchtung gemessene Messerschlagsweite mit der übereinstimmt, die mit dem Tastschnittgerät auf einem Referenzwerkstoff gemessen wird. Die Häufigkeit bestimmter Messerschlagsweiten wird in einem Histogramm dargestellt, das zusammen mit dem Profil der Oberfläche einen Eindruck von der Qualität der gehobelten Oberfläche vermittelt.

In mehreren Versuchsreihen wurden die Faktoren untersucht, die die Messung der Messerschlagsweite beeinflussen können und ein Grenzwert bestimmt, ab der die Messung möglich ist. Nach der Betrachtung der Faktoren Vorschubgeschwindigkeit, Schneidenverschleiß, Holzfeuchte und Maschinenschwingungen kann festgestellt werden, daß ab einer Messerschlagsweite von 1,8 mm bei Buche und 2,0 mm bei Kiefer in jedem Fall die Messung zuverlässig und reproduzierbar durchgeführt werden kann. Außerdem erkennt das System Unwuchtschwingungen auf der Holzoberfläche, da sie auf das Oberflächenbild den gleichen Einfluß wie eine Flugkreisdifferenz haben. In beiden Fällen kann die Prozeßstörung durch einen Jointvorgang beseitigt werden.

Das Bildanalyseprogramm führt zusätzlich eine Bewertung der gemessenen Messerschlagsweiten durch. Dabei wird auch berücksichtigt, daß eine große Abweichung vom Sollwert stärker ins Gewicht fällt, als mehrere Messerschläge, die nur wenig von der Sollmesserschlagsweite abweichen. Das System berechnet einen Fehlerindikator, anhand dessen es den Zeitpunkt für einen notwendigen Jointvorgang bestimmt. Erst dadurch, daß das Ergebnis der Messung nicht mehr durch einen Maschinenbediener interpretiert werden muß, wird ein einheitliches Qualitätsniveau und gleichzeitig eine Kostensenkung sichergestellt. Zu häufiges Jointen, das die Werkzeugkosten erhöht, da ein vorzeitiges Auswechseln und Nachschleifen der Messer erforderlich wird, wird vermieden. Gleichzeitig wird aber auch erkannt, wenn die Werkstückqualität die geforderten Normen unterschreitet und somit die Gefahr der Produktion von Ausschuß droht. Da die Anschaffungskosten für eine CCD-Kamera und ein leistungsfähiges Rechnersystem in den letzten Jahren stark gefallen sind, ist mit einer frühzeitigen Amortisation der Investition zu rechnen. Die Gerätekosten (Bildverarbeitungsrechner, Kamera, Frame-Grabber, Beleuchtungseinheit, Meßaufbau) belaufen sich auf etwa 11.000,- DM, dem stehen eine verlängerte Nutzung von Werkzeugen und verkürzte Maschinenstillstandszeiten gegenüber.

Das Forschungsziel wurde erreicht.

Literatur

[1] Ahlers, R.-J.:
„Die optische Rauheitsmessung in der Qualitätstechnik - Anforderungen und Möglichkeiten aufgezeigt an der Weißlicht-Methode", Dissertation, Universität Stuttgart, 1986

[2] Bergmann, B.:
„Objektive Inspektion", Holz- und Kunststoffverarbeitung, 4 (1997), S. 50-51

[3] Berthold, K. et. al.:
„Lexikon der Holztechnik", VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1990, 4. Auflage

[4] Boratynski, M.; Staniszewska, A.; Zakrewski, W.:
„Welligkeitskennwerte beim Walzfräsen im Gleich- und Gegenlauf", Holztechnologie, Leipzig, 30(1990) 1

[5] Deppe, H.-J.; Schmidt, K.:
„Oberflächenqualität von beschichteten Holzwerkstoffen", Holz- und Kunststoffverarbeitung, 11 (1996), S. 66-68

[6] Devantier, B.:
„Automatischer Meßplatz zur Bestimmung der Oberflächenunruhe von endbehandelten Möbeloberflächen", Holztechnologie, Leipzig, 25 (1984) 2, S. 67-68

[7] Ettelt, B.:
„Sägen, Fräsen, Hobeln, Bohren", DRW-Verlag, Stuttgart, 1987

[8] n.n.
„Automatische Fehlererkennung an Holz", Holz- und Kunststoffverarbeitung, 3 (1995), S. 308-309

[9] Hättrich, W.; Tatari, S.:
„Automatische Fehlererkennung in Holzoberflächen", Informatik-Fachberichte, Berlin, 126(1986)

[10] Heisel, U.; Krondorfer, H.:
„Meßtechnik für Massivholzoberflächen", HOB, Ludwigsburg, 5 (1995), S. 207-242

[11] Hoffmeister, H.-W.; Grübler, T.:
„In-Prozeßmessung der Messerschlagsweite gehobelter Massivholzoberflächen", HOB, Ludwigsburg, 5 (1995), S. 200-204

[12] n.n.
Digitrace Referenzhandbuch, IMATEC Elektronische Bildanalysesysteme GmbH, Olching, 1999

[13] ISRA Systemtechnik
„Mit Argusaugen; Beschichtungs- und Funierfehler erkennen", Holz- und Kunststoffverarbeitung, 7-8 (1997), S. 39

[14] Mammel, R.:
„Maschinell sehen", Holz- und Kunststoffverarbeitung, 2 (1998), S. 84-87

[15] Mehlhorn, L.; Plinke,B.:
„Qualitätskontrolle in der Holzwerkstoffindustrie mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung", Holz als Roh- und Werkstoff, 43 (1985), S. 403-407

[16] Müssigmann, U.:
„Automatisierte Sichtprüfung", Holz- und Kunststoffverarbeitung, 4 (1995), S. 428-431

[17] Pahlitzsch, G.; Dziobek, K.: „Meßverfahren und Beurteilungsmethoden für bandgeschliffene Hölzer", Holz als Roh- und Werkstoff, 10/1961

[18] Paul, H.-U.:
„Optisch abtastendes Messen", Holz- und Kunststoffverarbeitung, 5 (1995), S. 575-578

[19] Plinke, B.:
„Optische Qualitätsüberprüfung von Holzoberflächen", WKI-Bericht, Braunschweig, 622/1990

[20] Plinke, B.:
„Echtzeitfähiges Sichtprüfsystem für Holzoberflächen", WKI-Kurzbericht, Braunschweig, 34/1994

[21] Saljé, E.; Drückhammer, J.:
„Qualitätskontrolle bei der Kantenbearbeitung." Holz als Roh- und Werkstoff 42 (1984), S. 187-192

[22] Scherff, B. et al:
„Produktqualität und Herstellungskosten im Visier", Holz- und Kunststoffverarbeitung, 11 (1999), S. 71-74

[23] Sieminski, P.: „Prüfen und Messen der Oberflächengestalt von Holz und Holzwerkstoffen", Holz als Roh- und Werkstoff, Springer-Verlag, 24/1966

[24] Sturm, M. et al:
„Elektronische Augen; Der Trend geht in der Bildverarbeitung zur Multisensortechnik", Holz- und Kunststoffverarbeitung, 3 (1998), S. 26-31

[25] Tröger, J.; Lang, M.:
„Hobelfräsen mit vermindertem Wellenschlag", HOB, Ludwigsburg, 11 1990, S. 43-50

[26] Westkämper, E.; Riegel, A.: „Qualitätskriterien für geschliffene Massivholzoberflächen", Holz als Roh- und Werkstoff, Springer-Verlag, 51/1993

[27] Westkämper, E.; Schadoffsky, O.:
„Oberflächentopografie von Massivholz", HOB, Ludwigsburg, Teil 1: 3 1995, S. 74 - 78, Teil 2: 4 1995. S. 50 - 54

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a	m/s^2	Beschleunigung
D	m	Schneidenflugkreis
d_f	m	Fokusdurchmesser
F_T	N	Trägheitskraft des Hobelmesserkopfes
F_t	N	Tastkraft
F_Z	N	Zentrifugalkraft der Testmasse
f_z	m	Zahnvorschub bzw. Messerschlagsweite
m_M	kg	Masse des Hobelmesserkopfs
m_m	kg	Masse der Testmasse
n	1/s	Drehzal des Werkzeugs
n_{gesamt}	1	Messerschläge im aktuellen Oberflächenbild
n_i	1	Messerschläge in einer Klasse des Histogramms
R_a	m	Mittenrauhwert
R_k	m	Kernrauhtiefe
R_m	m	mittlere Rauhtiefe
R_{max}	m	maximale Rauhtiefe
R_p	m	Glättungstiefe
R_{pk}	m	reduzierte Spitzenhöhe
R_{vk}	m	reduzierte Riefentiefe
R_t	m	Rauhtiefe
r	m	radiale Position der Testmasse
S_a	mm^2/m	Kantenschartigkeitskennwert
T_b	m	Tastschneidenbreite
t	m	Messerschlagstiefe
t_p	1	Profiltraganteil
t_r	m	Tastspitzenradius
v	m/s	Bahngeschwindigkeit der Testmasse
v_f	m/s	Vorschubgeschwindigkeit
z	1	Anzahl der Schneiden im Werkzeug