

Realisierung eines multisensorischen Ansatzes zur Oberflächeninspektion von Holz

Dipl.-Ing. R. Nestler, Privatdozent Dr.-Ing. habil. K.-H. Franke
Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V.
Gustav-Kirchhoff-Straße 5
D-98693 Ilmenau
rico.nestler@zbs-ilmenau.de

Zusammenfassung: Auf dem Gebiet der Oberflächeninspektion von Holz, insbesondere von gesägtem bzw. gehobeltem Rohmaterial, ist man sich seit mehreren Jahren darüber einig, daß sich nur durch gleichzeitige orts aufgelöste Erfassung von verschiedenen physikalischen und geometrischen Eigenschaften des Untersuchungsobjektes die gestellten Anforderungen an Defektsensitivität, Defektselektivität und Datendurchsatz des bildverarbeitenden Systems erfüllen lassen. Der hier vorgestellte Ansatz hebt sich von bekannten Realisierungen und Prinzipstudien [1] insofern ab, als daß hier auf der Grundlage handelsüblicher Sensor- und Beleuchtungskomponenten ein möglichst kompakter Aufbau realisiert wurde. Das Ergebnis ist ein Sensormodul, das zur Gewinnung der wichtigsten auf optischem Wege erfassbaren Informationen von Holzoberflächen, wie Remission im sichtbaren Teil des Lichtspektrums (VIS), Leitvermögen der oberflächennahen Schichten (Tracheide-Effekt) und orts aufgelöste Höheninformation, geeignet ist. Es berücksichtigt daher vor allem die Bedürfnisse der primären und sekundären holzverarbeitenden Industrie. Eine Anwendung in anderen Branchen außerhalb der Holzindustrie ist jedoch auch denkbar.

1 Einleitung

Die Holzindustrie zeichnet sich in fast allen Verarbeitungsstufen vom Rohstoff bis zum Endprodukt durch einen hohen Automatisierungsgrad aus. Eine Ausnahme bildet hierbei auch heute noch die Vielzahl der notwendigen Inspektions- und Bewertungsprozesse. Da der holzverarbeitende Prozeß im Allgemeinen aus einer Kette unabhängiger Einheiten gebildet wird, besteht das Ziel einerseits darin, an der Schnittstelle vom jeweiligen Anbieter zum nächsten Kunden durch das Garantieren bestimmter Qualitätsmerkmale einen möglichst hohen Preis zu erzielen. Andererseits muß innerhalb der Einheiten das vorhandene Ausgangsmaterial unter dem Gesichtspunkt der weiteren Verwendung vor der Verarbeitung sortiert werden.

Eine wichtige Voraussetzung zur Erfüllung der zum Teil strengen Anforderungen der potentiellen Anwender ist allerdings, daß bereits durch die Sensorik aussagekräftige (ausreichende), wenig redundante und robuste Informationen zum inspizierten Objekt bereitgestellt werden. Weitere, die Akzeptanz eines Inspektionssystems bestimmende Kriterien, wie Datendurchsatz, Integrierbarkeit, Robustheit des Aufbaus oder Adaptierbarkeit, sind aus heutiger Sicht im Wesentlichen erfüllbar.

Der Beitrag beschäftigt sich mit der Realisierung eines Sensor- und Beleuchtungsmoduls, das als Bestandteil eines automatischen Inspektionssystems zur Beurteilung von gehobelten bzw. gesägten Rohmaterial aber auch zur Qualitätsbewertung von Halbfabrikaten verwendet werden kann.

2 Integration holzrelevanter Merkmale

Qualitätsbestimmende Eigenschaften von Holzoberflächen lassen sich sowohl durch durchleuchtende Verfahren (Röntgenstrahlen, Mikrowellen, Ultraschall) als auch durch Auflichtverfahren (optisches Abbilden von Oberflächenmerkmalen) gewinnen.

Die nachfolgend beschriebene Umsetzung eines Multisensorkonzeptes für die Holzinspektion läßt sich in die zuletzt genannte Gruppe einordnen. Es werden Merkmale integriert, die sich entweder direkt aus Eigenschaften der Oberfläche bzw. der oberflächennahen Schichten ergeben (Remission und Tracheide-Effekt) oder unter Zuhilfenahme einer besonderen geometrischen Anordnung von Sensorik und Beleuchtung ableitbar sind (orts aufgelöste Höheninformation).

2.1 VIS¹-Remission

Waren es bis vor einigen Jahren ausschließlich Grauwertkameras, die auf dem Gebiet der Holzinspektionstechnik zum Einsatz gekommen sind, so wird heute vornehmlich auf RGB-Farbkameras zurückgegriffen, da damit insbesondere bei Farbbesonderheiten bessere Erkennungsleistungen erzielt werden können [2].

Grundlage für den hier verfolgten Ansatz ist eine auf dichroitischer Strahlteilung beruhende RGB-Zeilenkamera, die entsprechend den Bedürfnissen der Holzinspektion modifiziert wurde. Eine Möglichkeit zur Variation der resultierenden Sensorempfindlichkeit besteht in der kanalbezogenen Beeinflussung der dichroitischen Strahlteilung durch das Hinzufügen zusätzlicher Filter. Vorab ist zu klären, ob die RGB-typische Aufteilung des VIS für den Anwendungsfall Holz ausreichend ist oder ob durch Modifikation sowohl der Sensorempfindlichkeit als auch der Beleuchtung die Erkennung und Trennung von Farbbesonderheiten verbessert werden kann.

Den Ausgangspunkt bildet die spektralradiometrische Vermessung von Nadelholzproben (Fichte). Hierbei wurde das Remissionsspektrum eines 50 mm² großen runden Meßflecks im Bereich von 400-850 nm erfaßt. Die Proben beinhalteten neben merkmalsfreiem Holz Farbbesonderheiten, die sowohl während des normalen Baumwachses auftreten, wie Astfäule, Rotfäule, Harzgallen, Farbkerne und Druckholz, als auch auf die Behandlung und Lagerung des gefällten Baumes bzw. bearbeiteten Holzes zurückzuführen sind, wie Rotstreifigkeit oder Bläue. Zu erwähnen ist, daß Farbbesonderheiten nicht über größere Bereiche homogen auftreten, sich gegenseitig überlagern und von weiteren Verfärbungen nicht natürlicher Herkunft (UV-Erosion) beeinflusst werden können. Dieser Umstand ist bei der Begutachtung der Spektren zu beachten. Die Remissionskurven wurden zu Gruppen ähnlich farbiger Regionen (rötlich, bläulich und merkmalsfrei) zusammengefaßt und zum Erzielen einer Trendaussage gemittelt (siehe Abb. 1).

Es fällt folgendes auf:

1. Die Remissionskurven **aller** Holzregionen folgen im untersuchten Wellenlängenbereich **einer** "holztypischen" spektralen Charakteristik (Abb. 1, gestrichelte Linie). Die natürliche Variation innerhalb der Gruppen ist groß.
2. Alle auffälligen Bereiche weisen bezüglich des merkmalsfreien Umgebungsholzes im **gesamten** untersuchten Bereich eine geringere Remission auf. Bläuregionen besitzen keine auffallend ausgeprägte Remission im kurzwelligen Teil des VIS-Spektrums, sondern eher eine verstärkte Absorption im Bereich größerer Wellenlängen.
3. Zur Trennung der Farbgruppen (merkmalsfrei, bläulich und rötlich) sind mit Blick auf die zugehörigen **mittleren** Remissionskurven spektrale Bänder an den Grenzen des VIS zum UV und IR geeignet.
4. Für ausgewählte Vertreter der Farbgruppen, wie z.B. Buchs innerhalb der rötlichen Gruppe, ist aufgrund der natürlichen Variabilität kein gesicherter Zusammenhang zwischen dem Auftreten der Region und einer spektral begrenzten Auffälligkeiten der Remission beschreibbar. Eine schmalbandige Optimierung der Sensorempfindlichkeit und/oder der Eigenschaften der Beleuchtung erscheint zur Realisierung eines Nutzholz-

¹ bezeichnet den sichtbaren Teil des Lichtspektrums von 400-750 nm

scanners mit breitem Anwendungsgebiet aus diesem Grund nicht erfolgversprechend (siehe auch Punkt 1).

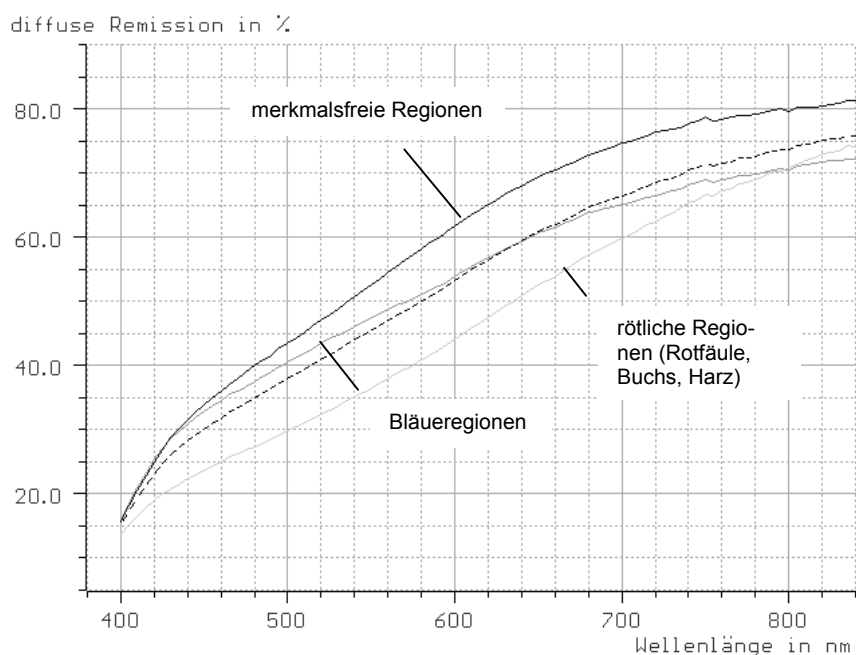


Abb. 1: Mittlere Remissionskurven für typische Farbregionen von Fichtenholz

Für den Entwurf der Systemempfindlichkeit² ist nunmehr ableitbar:

1. Aus energetischer Sicht sollte die Systemcharakteristik den VIS **breitbandig** abdecken.
2. Bezüglich des Sensors ist eine Reduktion auf **zwei** integrale Farbwerte (Kanäle), die sowohl den kurzwelligen als auch den langwelligen Bereich abdecken, ausreichend. Im Falle der untersuchten holztypischen spektralen Charakteristiken ist ein Farbmerkmal aus dem mittleren Bereich des VIS (G-Kanal) daraus rekonstruierbar und somit **redundant**.
3. Sperrt man den nicht benötigten G-Kanal im VIS und öffnet ihn im Infraroten, so wird das gesamte Band der CCD-Empfindlichkeit von 400 bis 1000 nm mit drei nicht überlappenden Bereichen spektral abgedeckt. Damit steht ein vielseitig nutzbarer, breitbandiger Infrarotkanal zur Verfügung. Für die aktuelle Anwendung wird der Kanal genutzt, um den in der Holzinspektion bekannten Tracheide-Effekt parallel und mit gleicher Auflösung wie die Remissions-Information aufzuzeichnen.

Zur Realisierung erfolgte zunächst das Entfernen des für alle Kanäle gemeinsamen IR-Cut-Filters, um den Sensor insgesamt für das Infrarote zu öffnen. Die Strahlengänge zu den einzelnen CCD-Sensoren wurden mit speziellen dichroitischen, d.h. verlustarmen Filtern versehen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Realisierung und die so erzielte angepasste Sensorempfindlichkeit des hier verwendeten dreikanaligen Zeilensensors.

² Der Begriff der Systemempfindlichkeit (-charakteristik) kennzeichnet die spektralen Eigenschaften des Sensors als aufzeichnende Systemkomponente **und** der Beleuchtung als anregende Komponente.

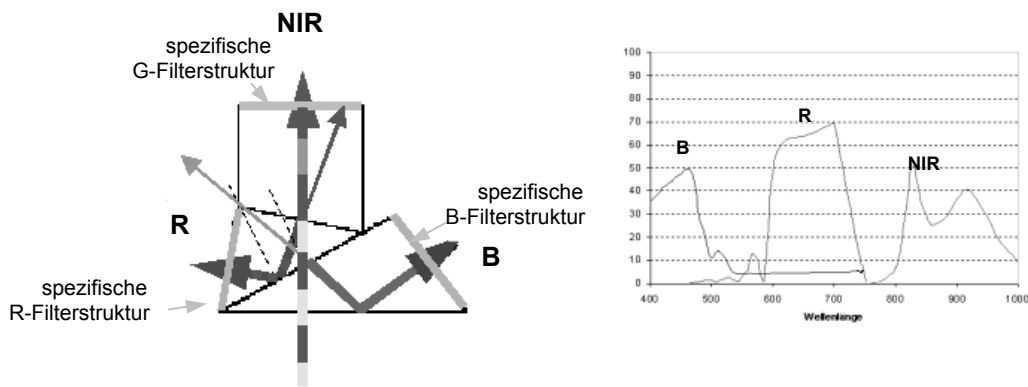


Abb. 2: Realisierung der Sensorempfindlichkeit durch Modifikation des Strahlteilers

Diese Modifikation ist mit jeder auf dichroitischer Strahlteilung basierenden Kamera möglich und durch Verwendung handelsüblicher Filter auch preislich attraktiv.

Als VIS-Beleuchtung kommen Halogen-Kaltlichtquellen jeweils mit faseroptischem Linienlicht zum Einsatz. Die geometrische Anordnung, symmetrisch im spitzen Winkel zur Oberflächennormalen, bewirkt die Hervorhebung von kleineren Oberflächenrauigkeiten und die Auskopplung von Glanzeffekten (siehe Abb. 4). Zum Ausgleich der geringeren CCD-Empfindlichkeit und der schwachen Remission von Holz im kurzwelligen Teil des Spektrums hat sich die Verwendung einer Korrekturfilterung bewährt. Ein wichtiger Grund für die Verwendung dieses Lichtquellentyps ist auch, daß keine infrarote Strahlung in die Faseroptik eingekoppelt wird und der Infrarotkanal des Sensors somit unbeeinflusst zur unabhängigen Nutzung des Tracheide-Effektes bleibt.

2.2 Tracheide-Effekt

Beim Tracheide-Effekt, dem anisotropen Lichtleitvermögen oberflächennaher Schichten, handelt es sich um eine physikalische Eigenschaft insbesondere fasrig aufgebauter Materialien.

Nach dem Eindringen von Strahlung in das Material kommt es durch mehrfache Absorption und Leitung infolge wiederholter Reflexion und Brechung zu einer von der Zellwuchsrichtung abhängigen Emission in der Umgebung der Anregungsstelle (siehe Abb. 3). Wesentlich für die Stärke des beobachteten Effektes ist die Zellorientierung, der Zellzustand sowie das Absorptionsvermögen des Materials an der Anregungsstelle. Ersteres ermöglicht die Segmentierung von Astregionen, die im Auflicht schlecht oder nicht zu detektieren sind, durch letzteres wird das (fortgeschrittene) Wirken zellzerstörender Pilze, wie Bläue, erkennbar. Da die Tracheide-Remission ein energetisch schwaches Signal ist, muß sie von der direkten Remission getrennt werden. Detaillierte Darstellungen zu den Grundlagen und zu praktischen Anwendungen im Zusammenhang mit der Inspektion von Holz finden sich in [3][4][5][6].

Zum Messen dieser Eigenschaft bedarf es einer örtlich eng begrenzten Anregung und eines Versatzes zwischen Anregungs- und Beobachtungsort, der durch die Holzart (Länge der Holzzellen) bestimmt wird. Im Gegensatz zu Verfahren, wo die Messung punktwise scannend erfolgt [7], wird hier durch die Verwendung einer Linienanregung und eines Zeilensensors gleichzeitig die gesamte erfaßte Objektbreite ausgewertet. Die Anregungsquelle muß in der Lage sein, eine geometrisch schmale, energetisch homogene Linie mit ausreichender Tiefenschärfe auf das Objekt zu projizieren. Diese Aufgabe wird von handelsüblichen Laserdiodenmodulen übernommen, die mit einer zusätzlichen Fokussierungs- und Linienoptik ausgestattet sind. Diese sind in verschiedenen Wellenlängen und Leistungsstufen sowie für unterschiedliche Liniengeometrien erhältlich.

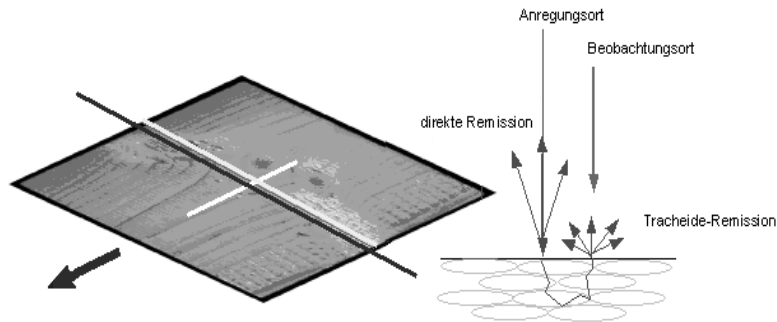


Abb. 3: Erfassen des Tracheide-Effektes (rechts: Querschnitt entlang weißer Linie)

Im konkreten Fall wurden zwei Lasermodule zur Projektion einer energetisch ausreichenden gemeinsamen Linie verwendet. Die gewählte Wellenlänge wurde entsprechend der Empfindlichkeit des realisierten NIR-Kanals festgelegt. Die geometrische Anordnung der Laser erfolgt symmetrisch im Winkel zur Oberflächennormalen, so daß die Laser-Lichtfächer und die Sensorblickebene parallel sind (siehe Abb. 4). Diese Anordnung garantiert das Auskoppeln von Glanzeffekten des im Vergleich zur Tracheide-Remission starken direkten Remissionsanteils.

2.3 Ortsaufgelöste Höheninformation

Bezüglich der Fülle der in der Holzinspektion denkbaren Aufgabenstellungen ist Höheninformation mit ausreichender Ortsauflösung in erheblichen Maße relevant. Dies gilt sowohl bezüglich **Maßhaltigkeit und Form**, z.B. durch Prüfung auf Einhaltung der dreidimensionalen Objektmessungen oder eines bestimmten Profils, als auch in der **Defektoskopie**, z.B. zur Erkennung grober dimensioneller Defekte, wie Kantenausbrüche, Risse, Astlöcher, oder von Lagerdeformationen, wie Verdrehung, Wölbung, Durchbiegung, sowie in der **Prozeßkontrolle**, durch Rückschluß auf den Zustand des Bearbeitungswerkzeuges durch Bewertung von Oberflächenrauigkeiten.

In Hinblick auf die multivalente Nutzbarkeit des Moduls soll die Gewinnung der Tiefeninformation nach dem Lichtschnittprinzip erfolgen [8]. Im Sensormodul wird hierzu die Schnittlinie, die beide obengenannte Linienlaser erzeugen, genutzt³. Zur Auskopplung der VIS-Beleuchtung im Blickfeld des verwendeten Flächensensors ist dieser mit einem breitbandigen IR-Durchlaßfilter versehen.

Eine ausreichende Auflösung der Tiefenkarte in Bewegungsrichtung (je nach Anwendung < 5mm/Pixel bei 3000 mm/s Objektbewegung) kann mit herkömmlichen Standardkameras, die im Videotaktregime arbeiten, nicht realisiert werden. Auch besonders schnelle Realisierungen mit partieller Auslesung des Sensors kommen nicht über einige hundert Hertz hinaus, wobei in diesem Fall auch die Auswertalgorithmik an ihre Grenzen gelangt. Statt dessen kommt hier eine intelligente Flächenkamera (MAPP-Smart Camera, IVP AB) zum Einsatz, die durch sensornahe parallele Signalverarbeitung sämtliche Algorithmik zur Segmentierung der auf dem Sensor abgebildeten Schnittlinie und zur Ermittlung ihrer subpixelgenauen Position direkt in der Kamera ausführt [9][10]. Damit stehen parallel zum Bildeinzug des Zeilensensors Höhendaten mit Frequenzen von bis zu 2000 Profilen/s in ausreichender Auflösung zur Verfügung (siehe Abb. 6).

Um eine exakte geometrische Korrelation sowohl der radiometrischen als auch der geometrischen Pixeldaten zu erreichen, ist es notwendig, die Rohdaten der Sensoren gegeneinander zu registrieren⁴. Durch die gesonderten Faktoren, die den Auflösungsunterschied in horizontaler (perspektivische Verzerrung durch unterschiedliche Abbildungsmaßstäbe

³ vorteilhaft zur Vermeidung seitlicher Verdeckung

⁴ Pixel repräsentieren durch örtliche Sensorfusion gleiche Regionen der Objektoberfläche

der Sensoren) und vertikaler (unterschiedliche Zeilen- bzw. Profildfrequenz) Richtung bewirken, kann die Registrierungsoperation ebenfalls separiert erfolgen. Die Verzerrungseigenschaften der beiden Sensorsysteme werden hierbei als ausschließlich linear angenommen und sind a priori bekannt. Es existiert somit eine Resamplingvorschrift zwischen den Merkmalskarten für beide Koordinatenrichtungen. Dieses Resampling erfolgt horizontal über eine Look-Up-Tabelle und vertikal durch ein festes ganzzahliges Verhältnis der Zeilenfrequenzen über eine pyramidale Skalierungsoperation, wobei bei der Expansion Zwischenwerte jeweils bilinear interpoliert werden können. Lücken, wie sie verfahrensbedingt infolge der Verdeckung in Bewegungsrichtung oder durch lokale Remissionsunterschiede auftreten, werden nachfolgend morphologisch geschlossen. Hierbei werden bekannte Eigenschaften des Objektes und Informationen zur Art der Profildatenerfassung einbezogen.

3 Zusammenfassung

In Abb. 6 ist das realisierte Gesamtsystem als Ein-Seiten-Scanner dargestellt. Der verfügbare Merkmalsatz (siehe Abb. 4 und 5) eignet sich zur Detektion von

- Abweichungen von merkmalsfreiem Holz (helligkeitsproportionales Signal aus VIS-Kanälen),
- Farbbesonderheiten (VIS-Kanäle und Tracheide-Kanal),
- (zell)strukturellen Besonderheiten (Tracheide-Kanal) und schließlich
- zur Erkennung dimensioneller Defekte, wie im Abschnitt 2.3 erläutert (Tiefenkarte).

Die zusätzliche Kombination von Informationen unterschiedlicher physikalischer Herkunft, d.h. geometrischer, radiometrischer und struktureller Natur, führt zu robusten Aussagen über das Auftreten bestimmter Besonderheiten. Der hier vorgestellte Ansatz nutzt dazu die bestehende Redundanz der Beschreibung natürlicher Holzoberflächen im RGB-Primärraum, indem durch Projektion in eine „optimale“ Ebene und somit Reduktion auf zwei beschreibende Farbwerte ein Kanal zur Erfassung des Tracheide-Effektes freigestellt wird. Die algorithmischen Ansätze zur Verarbeitung können durch die Aussagekraft der Sensordaten einfach und daher effizient gestaltet werden.

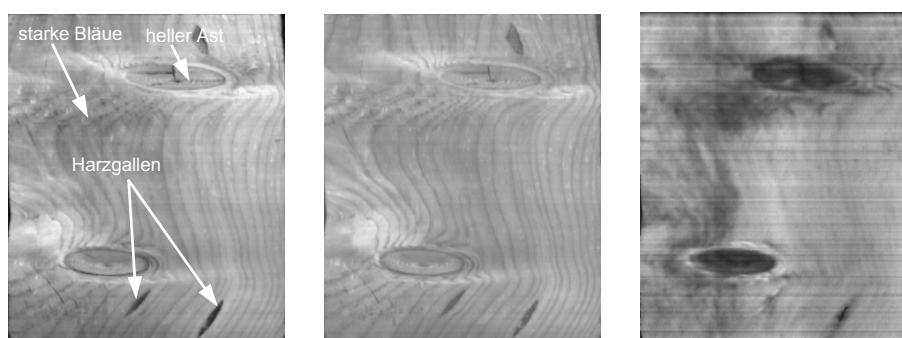


Abb. 4.: VIS-R-Kanal mit ausgewählten Besonderheiten, VIS-B-Kanal und Tracheide-Aufnahme grauwertskaliert (v.l.n.r.)

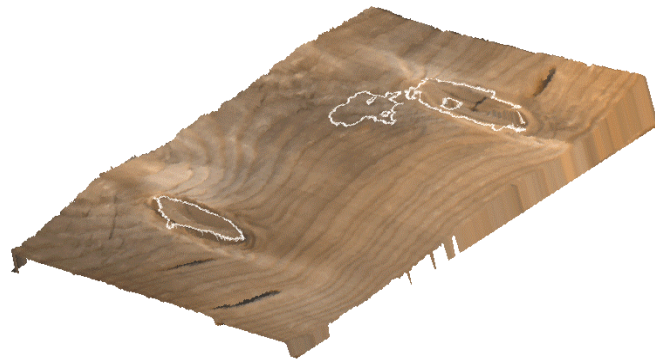
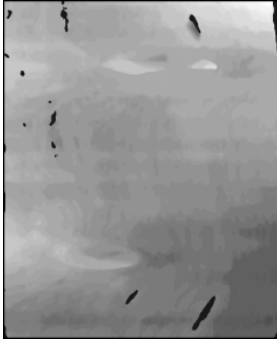


Abb. 5: Tiefenkarte (links) sowie 3d-Fusion der Tiefenkarte mit rekonstruiertem RGB-Bildeinzug und dem Ergebnis der Astsegmentierung (rechts)

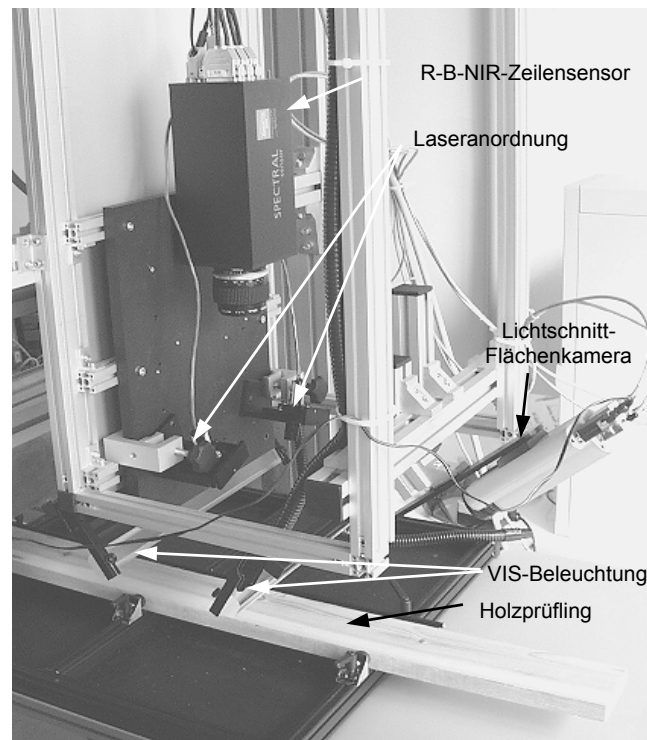


Abb. 6: Demonstrator: Sensor- und Beleuchtungsmodul

4 Literatur

- [1] R. Massen: *Verfahren und Vorrichtung zur optischen Prüfung eines Holzprüflings*, Patentschrift Nr.: DE-19609045 1997
- [2] H. Kauppinen, O. Silven: *The Effect of Illumination Variations on Color-Based Wood Defect Classification*, 13th International Conference on Pattern Recognition (13th ICPR) Vienna, Austria 1996, S. 828-832
- [3] R. Fischer, G. Wendland: *Nutzung des "Tracheide-Effektes" zur automatischen Inspektion von Holz*, Institut für Holz- und Papiertechnik TU Dresden 1999, URL: <http://www.tu-dresden.de/mw/ihp/hft/hft.html>
- [4] E. Åstrand: *Automatic Inspection of Sawn Wood*, Departement of Electrical Engineering Linköping University Sweden, Dissertation No.: 424 1996, ISSN 0345-7524
- [5] P.C. Matthews, B.H. Beech: *Method and Apparatus for Detecting Timber Defects*, US-Patent Nr.: US 3976384 1975
- [6] J.F. Soest, P.C. Matthews, B.G. Wilson: *A Simple Optical Scanner for Grain Defects*, Proceedings 5th International Conf. on Scanning Techn. & Process Control for the Wood Industry, Atlanta USA 1993
- [7] Baumer Optronic GmbH: *Vorrichtung zur Inspektion der Oberfläche eines Objektes zwecks Feststellung von Oberflächenmerkmalen sowie Verfahren zu einer derartigen Inspektion*, Offenlegungsschrift Nr.: DE-19717488 1998
- [8] B. Breuckmann: *Bildverarbeitung und optischen Meßtechnik in der industriellen Praxis*, Franzis-Verlag München 1993
- [9] Integrated Vision Products IVP AB: *Smart Camera Manual*, URL: <http://www.ivp.se>
- [10] Integrated Vision Products IVP AB: *MAPP Ranger System - User Documentation*