

Vorteile durch bildanalytisches Messen der Spandicken

Neue Technik zur Überwachung der Spangeometrie vereinfacht Steuerung und Optimierung des Spanplattenprozesses

Von Jan T. Benthien, Sabrina Heldner und Dr. Jan Lütke*, Hamburg

Der Spangeometrie wird ein bedeutender Einfluss auf die Eigenschaften von Spanplatten zugeschrieben. Deren Ermittlung war bislang jedoch unvollständig, zeitaufwändig und wenig reproduzierbar. Mittels Laser-Profilscan-Technik ist nun jedoch die bildanalytische Erfassung der Spandicke (z-Richtung) und somit die Berechnung von Spanoberfläche und -volumen möglich geworden. Aufgrund dieser Zusatzinformationen kann die bildanalytische Spanvermessung eine wichtige Rolle bei der Überwachung, Steuerung und Optimierung der Spanplattenproduktion spielen.

Ziele der messtechnischen Überwachung industrieller Produktionsprozesse sind die Sicherung der Produktqualität, die Optimierung von Verfahrensabläufen und die Steigerung der Kosteneffizienz. Dies gilt sowohl für den Gesamtprozess als auch für Teilprozesse, wie beispielsweise die Spanerzeugung und -trennung in der Spanplattenproduktion. Bei der Spanerzeugung wird

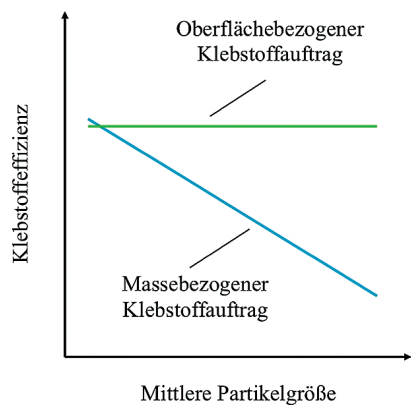


Abbildung 1 Schematische Darstellung der Klebstoffeffizienz in Abhängigkeit der mittleren Partikelgröße bei oberfläche- bzw. massebezogenem Klebstoffauftrag

unter Nutzung verschiedener Techniken sowie Variation von Holzart und Holzqualität ein Gemisch aus Spänen unterschiedlicher Geometrie, d. h. Abmessungen (Länge, Breite, Dicke) und Form (Gestalt oder Morphologie) produziert. Dieses Gemisch wird – im Anschluss an seine Trocknung – für die Weiterverarbeitung zu Spanplatten in Deck- bzw. Mittelschichtspäne fraktioniert. Analysen zur Bestimmung der Partikelgrößenzusammensetzung werden derzeit mit Methoden vorgenommen, die unvollständige Informationen liefern (Siebanalyse, 2D-Bildanalyse) oder zeitaufwändig und wenig reproduzierbar sind (händische Messschiebermessung).

Da der Spangeometrie gemeinhin ein bedeutender Einfluss auf die Platteneigenschaften zugeschrieben wird, ist der Partikelgrößenanalyse mit dem Ziel einer effizienten Plattenproduktion eine große Bedeutung zuzuordnen. Vor diesem Hintergrund entwickelten der Messtechnikhersteller Fagus-Grecon GmbH & Co. KG, Alfeld, und das Thünen-Institut für Holzforschung,

* Die Autoren sind Mitarbeiter am Thünen-Institut für Holzforschung in Hamburg (jan.benthien@thuenen.de).

** Das Forschungsvorhaben wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand gefördert.

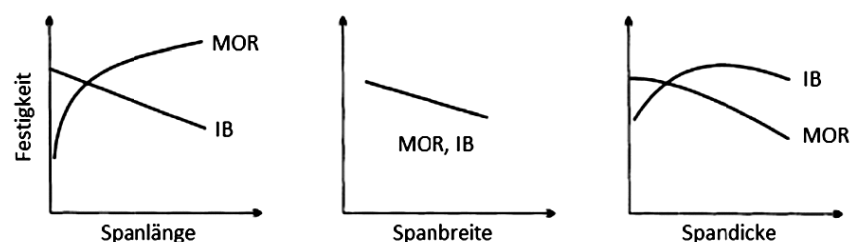


Abbildung 2 Schematische Darstellung der Wirkung der Spanabmessungen auf ausgewählte Eigenschaften (MOR = Biegefestigkeit und IB = Querkzugfestigkeit) von Spanplatte (verändert nach Niemz 1993)

Hamburg, das Messsystem „3D Particleview“ zur dreidimensionalen Spanvermessung (vgl. HZ Nr. 38 vom 20. September, S. 800). Dessen Potenzial für die Überwachung, Steuerung und Optimierung des Spanplattenprozesses wird im Folgenden diskutiert und Beispiele für die Ergebnisauswertung präsentiert. An einem Zahlenbeispiel wird dargestellt, für welche Spandicken sich bei oberflächenbezogenem Klebstoffauftrag Einsparungen von 5 bzw. 10 % der auf die Spanmasse bezogenen Klebstoffmenge ergeben würden. Bei einem Vergleich von Siebanalyse und dreidimensionaler Spanvermessung wird deutlich, dass die Verteilung des Spanvolumens über die Spanbreite (3D-Bildanalyse) das Ergebnis der Siebanalyse (Verteilung der Spanmasse über die Spangröße) wiedergibt.

Spangeometrie und Platteneigenschaften

In Kollmann (1966) führt Teichgräber die geometrischen Verhältnisse der verleimten Späne als Einflussgröße auf die Eigenschaften von Spanplatten auf und belegt dies mit Arbeiten von Turner (1954), Kitahara und Kasagi (1955), Post (1958) und Brumbaugh (1960). Dunky und Niemz (2002) stellten die Ergebnisse verschiedener Studien zum Zusammenhang von Spangeometrie und Platteneigenschaften tabellarisch zusammen (Tabelle 1). Ergebnisse von Turner (1954), Kitahara und Kasagi (1955) lassen sich wie folgt zusammenfassen: maximale Biegefestigkeit bei einer Spandicke von 0,46 mm (0,018 Inch), Anstieg der Biegefestigkeit für Platten mit einem Klebstoffanteil von 4 % bei steigender Spanlänge (Turner) und Absinken der Biegefestigkeit bei gleichzeitiger Vergrößerung von Spanlänge, -breite und -dicke (Kitahara und Kasagi). Niemz (1993) stellte die qualitative Wirkung verschiedener Strukturparameter auf die Eigenschaften von Spanplatten schematisch dar (Abbildung 2).

Die Geometrie von Spänen zur Herstellung von Spanplatten resultiert aus Art und Eigenschaften des eingesetzten Rohmaterials, der zur Anwendung kommenden Zerspanspanntechnik sowie den gesetzten Prozessparametern. Bei der Messringzerspannung gibt beispielweise die Hackschnitzzelllänge die maximale Spanlänge vor. Bei Messerblock-, Langholz-Messerring- oder Messerscheibenzerspannung bestimmt hingegen die Position der Vorritzmesser die Spanlänge. Die Spandicke ist über den Messerüberstand definiert. Die Spanbreite stellt sich im Zuge des Transportes der Späne durch Brechen quer zur Faser ein und hängt auch von der Spandicke ab. Hasener (2019) und Marhenke und Hasener (2019) zeigten, dass sowohl Spandicke als auch Spanbreite von der Abnutzung der Zerspanspannmesser abhängen. So nimmt im Mittel die Spandicke als auch die Spanstirnfläche (aus Spandicke und Spanbreite abgeleitete Größe) mit zunehmender Nutzungsdauer der Messer ab.

Wirtschaftsgrundlage der Spanplattenindustrie ist die kostenoptimierte Massenherstellung von Platten unterschiedlichen Typs, gleichbleibender Qualität und garantierter Mindesteigenschaften. Für eine möglichst effiziente Plattenproduktion ist die Erzeugung bekannter, homogener Spanqualitäten sicherzustellen. Voraussetzung hierfür ist die Verfügbarkeit und der Einsatz geeigneter Messtechnik zur Prozessüberwa-



Abbildung 3 Spanvereinzelnung mittels Vibrationsrinnen, Platzierung der Späne für die Vermessung auf einem Förderband
Fotos: Jürgen Bartels

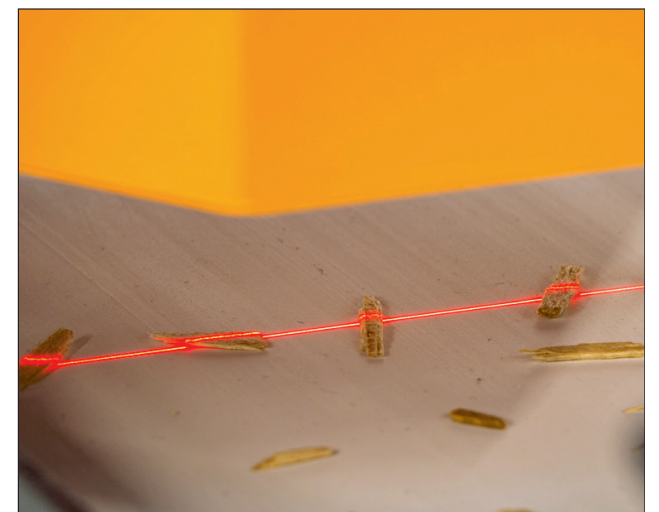


Abbildung 4 Auf Förderband und Späne projizierte Laserlinie zur dreidimensionalen Erfassung

chung. Auf Basis so gewonnener Informationen kann steuernd auf den Prozess eingewirkt und dieser letztendlich optimiert werden. Schlüsselpositionen für die Überwachung der Spanqualität sind die Spanerzeugung sowie die Spanfraktionierung.

Über die messtechnische Erfassung von Veränderungen der Spanqualität bei der Spanerzeugung könnte der Zeitpunkt für den Austausch des Messerrings und das anschließende Schärfen der Zerspanspannmesser bedarfsbasiert festgelegt werden und müsste sich nicht länger nur am Schichtplanorientieren. Da mit zunehmender Nutzungsdauer der Messer eine Reduktion der Spangröße stattfindet, dürfte sich mit dem Austausch des Messerrings auf Basis der Spanqualität das Ergebnis der Spanntrennung verbessern: Sowohl der Staubanteil als auch die Schwankungsbreite (Varianz) der mittleren Spangröße innerhalb der Gutfractionen ließen sich so reduzieren.

Neben dem Erkennen und Reagieren auf Qualitätsveränderungen könnte der Einsatz geeigneter Messtechnik hier weiter eine aktive Veränderung von Prozessparametern mit dem Ziel ermöglichen, Späne bestimmter Geometrie für Platten bestimmter Eigenschaften herzustellen. Ein Beispiel hierfür wären Leichtspanplatten, die trotz reduzierten Holzeinsatzes und folglich geringerer Dichte die Eigenschaften konventioneller Platten erreichen.

Der Einsatz von Technik zur Spanvermessung im Kontext der Spanntrennung kann zum einen zur Beurteilung des Ergebnisses der Siebung herangezogen werden. Zum anderen kann die Klebstoffdosierung an die jeweils aktuelle Spangrößenverteilung der Deck- und Mittelschichtfraktion angepasst werden. Relevant hierfür ist die Spanoberfläche, da für eine optimale Verklebung die flächenspezifische Auftragsmenge maßgeblich ist. Üblich ist hingegen eine massebezogene Berechnung der Klebstoffmenge. Vorwiegend dürfte es daher zu einer Überdosierung kommen, da der Klebstoffauftrag auf die ungünstigste Spangrößenverteilung innerhalb der prozessbedingten Schwankungsbreite eingestellt sein muss.

Wird die Klebstoffmenge auf Basis der ermittelten Spanoberfläche berechnet, so kann bei steigender Spangröße der Klebstoffeinsatz reduziert werden, ohne dass sich die oberflächenspezifische Klebstoffmenge verändert (Abbildung 1). Dieser Zusammenhang wird in Tabelle 2 anhand von drei Modellspänen veranschaulicht. Ausgehend von einem Klebstoffanteil von 8 % für den kleinsten Modellspan und einer einheitlichen oberflächenspezifischen Klebstoffmenge wurde die Spandicke so gewählt, dass sich Klebstoffeinsparungen von 5 bzw. 10 % ergeben.

Ergänzend zum dynamisch angepassten Klebstoffeinsatz ist eine weitere Klebstoffeinsparung denkbar, wenn sich die prozessbedingte Schwankung der Spangrößenverteilung im Zuge der messtechnischen Überwachung der Zerspanspannung begrenzen lässt.

Ein Messsystem, mit dem die Spanabmessungen objektiv und umfassend zu

bestimmen sind, kann neben der Prozesskontrolle auch für die Überprüfung von Leistungsmerkmalen von Maschinen herangezogen werden, die zwischen Maschinen- und Anlagenherstellern sowie Plattenproduzenten vereinbart wurden.

Siebung

Die Trennung des erzeugten Spangutes in die Sortimente Staub, Deckschichtspan, Mittelschichtspan und Grobmateriale wird im Spanplattenprozess vornehmlich über Siebe vorgenommen. Naheliegender ist daher, dass die Qualitätsüberwachung im Labor in der Regel mit einem ähnlichen Verfahren – nämlich der Siebanalyse – durchgeführt wird. Als Ergebnis liefert die Siebanalyse die Massenanteile der unterschiedlichen Spangrößen entsprechend des verwendeten Siebaufbaus bzw. aus dieser Verteilung abgeleitete Kennwerte. Eine greifbare Kennzahl ist beispielsweise diejenige Spangröße (50 %-Quantil), die von 50 % der Probemasse unterschritten und 50 % überschritten wird.

Charakteristisches Merkmal bei der Siebanalyse ist die Spangröße, die ein kombiniertes Merkmal aus Spanabmessungen und Spanform ist. Grund hierfür ist, dass die Späne beim Sieben mechanisch über Drahtgewebe in Fraktionen getrennt werden. Kriterium für die Klassierung ist, ob ein Span einen Siebboden passieren kann oder nicht. So werden Späne einem Größenintervall (Maschenweite des feineren Siebbodens bis Maschenweite des größeren Siebbodens) zugeordnet, die den oberen, größeren Siebboden passieren, vom feineren, darunter liegenden Siebboden jedoch zurück gehalten werden. Ein Siebboden wird passiert, wenn sowohl zwei der drei Spanhauptachsen kleiner als die Maschenweite sind und die Spanform ein Passieren zulässt. Damit handelt es sich bei Spänen einer Spangröße um ein Spektrum unterschiedlich geformter Späne.

Von Dunky und Niemz (2002) wird auf die Möglichkeit zur korrelativen Abschätzung der Spanabmessungen aus der Spangröße hingewiesen. Grundlage dafür ist, dass die Klassierung bei der Siebanalyse vorwiegend nach Spanlänge und -breite erfolgt (May 1973). Eine Auftrennung des Spanmaterials nach der Spandicke erfolgt laut May hingegen vorwiegend bei der Windsichtung.

Vermessung einzelner Späne

Vom Messprinzip der Siebanalyse unterscheiden sich die händische Spanvermessung mittels Messschieber sowie die bildanalytische Vermessung ruhender oder bewegter Späne fundamental. Diesen Methoden ist gemein, dass die individuellen Spanabmessungen festgestellt werden und die Klassierung der Späne nicht mechanisch im Zuge der Analyse, sondern datenbasiert im Anschluss an die Vermessung erfolgt. Die Zuordnung der Späne in Klassen für die Erstellung einer Eigenschaftsverteilung kann hierbei nach den aufgenommenen Merkmalen (Abmessungen) oder hier-

aus abgeleiteten Größen (Oberfläche, Volumen, Formfaktoren) erfolgen.

Anders als bei der Siebanalyse werden die Mengenanteile der Klassen nicht über die Spanmasse, sondern über die Anzahl oder eine Späneigenschaft abgebildet. Sollen die Ergebnisse von Siebanalyse und Abmessungsanalyse miteinander verglichen werden, so sind Spanmasse und Spanvolumen einander gleichzusetzen (vgl. Abbildung 9). Dieses Vorgehen erscheint legitim, da Spanmasse und Spanvolumen bei gleicher Dichte in direkter Beziehung zueinander stehen.

Die händische Spanvermessung mittels Messschieber ist arbeits- und zeitintensiv. Darüberhinaus sind die Messergebnisse nur begrenzt reproduzierbar. Dies gilt erfahrungsgemäß insbesondere dann, wenn die Datenaufnahme von wechselnden Personen durchgeführt wird. Ein weiterer Grund ist die nicht definierte Ausrichtung der Längenmessungen zueinander, sodass eine tatsächliche Messwiederholung nur zufällig erfolgt. Dem Umstand, dass in Abhängigkeit der Ausrichtung der Längenmessungen zueinander unterschiedliche Messwerte erhalten werden, wird bei der Bildanalyse mit der Angabe verschiedener Längen- und Breitenmaße (maximaler bzw. minimaler Feret-Durchmesser vs. Länge und Breite des kleinsten, partikelumschließenden Rechtecks) Rechnung getragen. Grundsätzlich ist die Vermessung mittels Messschieber zudem auf solche Späne begrenzt, die von handhabbarer Größe sind. Folglich sind Feinanteil und Deckschichtspäne nicht mit dem Messschieber zu vermessen.

Herkömmliche Bildanalysemethoden weisen Nachteile hinsichtlich ihres Messumfangs bzw. ihrer Messpräzision auf. Die zweidimensionale, bildanalytische Spanvermessung ist grundsätzlich auf Spanlänge und -breite begrenzt, da keine Höheninformation erfasst wird. Bei Vermessung von Spänen im freien Fall (willkürliche Ausrichtung der Partikel zur Kamera [2D] bzw. den Kameras [3D]), sind die Längenmaße in Abhängigkeit ihrer Verhältnisse zueinander und Ausrichtung zur Kamera unterschiedlich präzise. Dies zeigten Versuche von Benthien et al. (2018) mit Musterprüfkörpern unterschiedlicher Abmessungen und einem 3D-Messsystem. Hierbei war die Längsrichtung der Musterprüfkörper vornehmlich in Fallrichtung, die Prüfkörperbreite und -dicke hingegen willkürlich ausgerichtet. Ein Auszug der Messergebnisse wird in Tabelle 2 gegeben.

Ungeachtet der Begrenzungen der unterschiedlichen bildanalytischen Methoden zur Partikelvermessung sind diese der händischen Spanvermessung in Bezug auf die Anzahl der vermessenen Partikel, der Messdauer sowie der objektivierten Datenaufnahme überlegen.

Laser-Profilscan-Technik

In Konsequenz der Beschränkungen verfügbarer Spanvermessungssysteme wurde anknüpfend an Erfahrungen vor-

Vorteile durch bildanalytisches Messen der Spandicken

Fortsetzung von Seite 1101

heriger Messgerätekombinationen für die MDF-Industrie („Fiber View“ und „Fibre Cube“) im Forschungsprojekt „3D-Span“ ein System zur dreidimensionalen, automatisierten, bildanalytischen Spanvermessung entwickelt: der „3D Particleview“. Die Entwicklung erfolgte im Hinblick auf die unter den Begriffen „Digitalisierung“, „Big Data“ und „Industrie 4.0“ zusammengefassten Veränderungsprozesse in der industriellen Produktion. Unter „Digitalisierung“ ist hierbei die Aufbereitung von Informationen zu verstehen, sodass diese mithilfe elektronischer Datenverarbeitungssysteme verwendet, bearbeitet, wiedergegeben, gespeichert und verteilt werden können. „Big Data“ ist der Begriff für die aus Prozesskontrolle und Qualitätsüberwachung vorliegenden (polystrukturierten) Massendaten und deren Auswertung. „Industrie 4.0“ beschreibt die angestrebte Vernetzung mit dem Ziel einer selbstorganisierten, flexiblen und individualisierten Produktion und Optimierung der gesamten Wertschöpfungskette.

Innovatives Element des auf der „Ligna“ 2019 vorgestellten Messsystems

(vgl. HZ Nr. 29 vom 19. Juli, S. 647-653) ist der Einsatz laserbasierter Profilschneidern zur Spanvermessung. Die Spanvermessung und Platzierung für die Vermessung erfolgt auf Basis bewährter Technik (Abbildung 3). Mithilfe von Vibrationsrinnen werden die Späne einzeln, für die Vermessung sind die Späne auf einem Förderband platziert und werden so unter dem Scanner hindurchgeführt (Abbildung 4). Die Verwendung eines Laserscanners ermöglicht neben der Aufnahme von Spanlänge und Spanbreite (in Bandebene orientiert) die Aufnahme der Partikel-Höheninformation, was in der Regel der Spandicke entspricht. Durch die Ablage der Späne auf einem Förderband wird anders als im freien Fall – die willkürliche Positionierung im Moment der Vermessung unterbunden und die Ausrichtung von Längen-, Breiten- und Dickeninformation zueinander ist definiert. Ergänzend zur Spandickenmessung (Maximalwert) kann über die Auswertung aller Höhenkoordinaten die Gestalt der oberen Partikelhälfte rekonstruiert werden. Durch Spiegeln dieser Gestalt auf die untere Partikelhälfte lassen sich Par-

tikelvolumen und -oberfläche realitätsnah abbilden. Gegenüber der zweidimensionalen Spanvermessung können aufgrund der Dickenmessung zusätzlich zum Breitenverhältnis (Länge/Breite) auch die Formfaktoren Schlankheitsgrad (Länge/Dicke) und Platttheit (Breite/Dicke) (nach Niemz und Wenk 1989) berechnet und für Auswertungen herangezogen werden.

Für die Partikelgrößenanalyse wird eine repräsentative Stichprobe von 5 bis 8 g Spanmaterial eingesetzt. Zur Vorbeugung feuchtebedingter Spanagglomerate sind vorzugsweise trockene Späne (Holzfeuchte $\leq 30\%$) zu verwenden. Ideal ist die Vermessung von Spänen definierter Feuchte, um so die massenspezifische Oberfläche und weiter die oberflächenspezifische Klebstoffmenge (Masse Klebstoff pro Masse Späne durch Summe der Spanoberfläche pro Masse Späne) exakt berechnen zu können. Über das Verhältnis der klimatisierten Spanmasse zur Summe des Spanvolumens ist auf die Rohdichte des eingesetzten Holzes zu schließen. Beides ist möglich, da stets die gesamte Stichprobe vermessen wird. Die Vermessung klimatisierter Späne ist weiter vor dem Hintergrund der feuchteabhängigen Dimensionsänderung von Holz in Bezug auf die Vergleichbarkeit verschiedener Messungen erstrebenswert. In Tabelle 4 wird beispielhaft eine Übersicht der zu erwartenden Abmessungen eines Musterspans bei verschiedener Holzfeuchte gegeben.

Mit Blick auf eine aussagekräftige Statistik (Anzahl), ist die Masse der zu vermessenden Spanprobe in Abhängigkeit der Partikelgröße zu wählen. Prinzipiell erfordern kleine Späne eine geringere Probenmasse, größere hingegen eine umfangreichere Probe, um eine angemessene Partikelanzahl zu vermessen. Bei der Vermessung von fünf konditionierten Proben ($\bar{a} 8 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ bei einem Umgebungsklima von 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit) eines industriellen Mittelschichtspans wurden zwischen 4100 und 5400 Einzelspanen vermessen, wobei nur Späne mit einer Projektionsfläche von größer als 1 mm^2 berücksichtigt wurden. Im System lassen sich auch kleinere Projektionsflächen, z. B. $0,2 \text{ mm}^2$ einstellen.

Auswertung einzelspanbasierter Datensätze

Als Ergebnis der Partikelgrößenanalyse mit dem „3D Particleview“ wird von Prinzip eine Urliste erhalten, in der für jeden Span die Länge, Breite, Dicke sowie das Volumen und die Oberfläche angegeben sind. Diese Daten lassen sich grafisch oder über Kennwerte auswerten. Eine Möglichkeit der grafischen Auswertung ist die Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Spanabmessungen in Form eines Histogramms bzw. eines hieraus abgeleiteten Liniendiagramms oder die Darstellung der Summenhäufigkeit (Abbildung 5).

Hierfür werden die Späne zunächst Größenklassen zugeordnet und die Anzahl der Späne je Größenklasse auf die Gesamtanzahl aller Späne bezogen. Für die Erstellung des Histogramms wird die relative Spananzahl weiter auf die Breite der jeweiligen Größenklasse normiert. Die Darstellung der Häufigkeitsverteilung von Spanoberfläche und Spanvolumen erfolgt analog, wobei die Größenklassen jeweils auf Basis des Kugeläquivalenzdurchmessers (Durchmesser einer oberflächen- bzw. volumengleichen Kugel) definiert werden. Ergänzend zur Häufigkeitsverteilung einer Späneigenschaft lassen sich weiter verschiedene andere Verteilungen darstellen. Beispiele hierfür sind die in Abbildung 9 dargestellte Verteilungen des Spanvolumens (Anteil des aufsummierten Spanvolumens innerhalb einer Größenklasse in Bezug auf die Summe des Volumens aller Späne) über die Spandicke, -breite und -länge. Weiter ist in Abbildung 9 die Verteilung des Spanvolumens über den Stirnflächen-Äquivalenzdurchmesser dargestellt. Da es sich bei der Stirnfläche um die Projektionsfläche (2D) und nicht die Oberfläche des (dreidimensionalen) Spans handelt, wurde als Basis der Durchmesser eines flächenäquivalenten Kreises und nicht der einer flächenäquivalenten Kugel herangezogen.

Wie die aufgeführten Beispiele zei-

Vergrößerte Abmessung/ Platteneigenschaft	Veränderung	Quelle
Spanlänge		
Biegefestigkeit	steigt	Liiri et al. (1977), Niemz (1982)
Elastizitätsmodul	steigt	Niemz (1982)
Querkzugfestigkeit	Minimum bei mittlerer Spanlänge; steigt bei kürzeren Spänen stark an	Liiri et al. (1977)
Dickenquellung	sinkt	Niemz (1982)
Spandicke		
Biegefestigkeit	(1) Minimum bei mittlerer Spandicke, abhängig von der Spanlänge (2) sinkt (3) abhängig von der Spanlänge, keine eindeutigen Korrelationen	Liiri et al. (1977) Niemz (1982), Niemz und Schweizer (1990), Post (1958) Brumbaugh (1960)
Elastizitätsmodul	Maximum bei mittlerer Spandicke	Niemz und Bauer (1991)
Querkzugfestigkeit	(1) steigt (2) Maximum bei mittlerer Spandicke	Liiri et al. (1977) Niemz (1982)
Dickenquellung	(1) steigt (2) steigt leicht	Liiri et al. (1977) Niemz (1982)

Tabelle 1 Einfluss der vergrößerten Spanabmessung (Länge oder Dicke) auf die Eigenschaften einschichtiger Laborspanplatten (verändert nach Dunky und Niemz 2002).

		Modellspan		
		„Dünn“	„Mittel“	„Dick“
Span				
Länge	mm	4,66	4,66	4,66
Breite	mm	1,32	1,32	1,32
Dicke	mm	0,41	0,44	0,47
Volumen ¹⁾	mm ³	1,33	1,42	1,51
Masse ²⁾	mg	0,65	0,69	0,73
Oberfläche ¹⁾	mm ²	10,77	10,87	10,99
spez. Oberfl. ³⁾	mm ² /g _{Holz}	16.653	15.819	14.990
Klebstoff				
Anteil ⁴⁾	%	8	7,6	7,2
Masse ³⁾	mg/g _{Holz}	80	76	72
Oberflächenspez. Klebstoffmenge	g/m ²	4,80	4,80	4,80
Klebstoffeinsparung	%	0	5	10

Tabelle 2 Zahlenbeispiel für die Berechnung der potenziellen Klebstoffeinsparung unter Variation der Spandicke und konstanter oberflächenspezifischer Klebstoffmenge. ¹⁾ berechnet auf Basis des Ellipsoid-Modells nach Knud Thomsen, ²⁾ unter Annahme einer Dichte von 485 kg/m^3 für absolut trockenes (atro) Kiefernholz, ³⁾ Holzatro, ⁴⁾ Masse Feststoff pro Masse atro Holz

Prüfkörpernummer	Nominelle Prüfkörperabmessungen			Abweichung zwischen Messchieber- und Messsystemmessung		
	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Länge (%)	Breite (%)	Dicke (%)
Einfluss der Partikellänge						
1	10	5	1	2	7	120
2	15	5	1	1	8	120
3	20	5	1	0	9	121
Einfluss der Partikelbreite						
4	15	1	1	0	52	40
5	15	2,5	1	1	13	61
(2)	15	5	1	1	8	120
6	15	10	1	0	2	187
Einfluss der Partikeldicke						
7	15	5	0,5	0	5	243
(2)	15	5	1	1	8	120
8	15	5	1,5	1	9	66
9	15	5	2	1	11	51

Tabelle 3 Auszug von Ergebnissen von Versuchen von Benthien et al. (2018) mit Musterprüfkörpern unterschiedlicher Abmessungen an einem Messsystem zur dreidimensionalen Abmessungsbestimmung von freifallenden Partikeln (kursiv: variierte Abmessung)

	Schwindmaß ¹⁾ $u_{fs} = 30\% \rightarrow u_{atro}$ (%)	Prozentuales Quellmaß ¹⁾ (%/ Δu)	Spanabmessung (mm) bei Holzfeuchte					
			30%	20%	12%	8%	4%	0%
Länge	0,27	0,01 ²⁾	4,67	4,66	4,66	4,66	4,66	4,65
Breite	10,39	0,35	1,41	1,36	1,32	1,30	1,28	1,27
Dicke	10,39	0,35	0,47	0,45	0,44	0,43	0,43	0,42

Tabelle 4 Auf Basis des Schwindmaßes und des prozentualen Quellmaßes von Kiefer (Nopens et al. 2019) beispielhaft berechnete Abmessungen eines Musterspans. ¹⁾ longitudinal (Spanlänge) bzw. tangential (Spanbreite und -dicke), ²⁾ Schwindmaß/FS = $0,27\%/30\%$, u = Holzfeuchte, fs = Fasersättigung, atro = absolut trocken

gen, lassen sich für die grafische Auswertung einzelspanbasierter Datensätze, sowohl für die Mengenanteile als auch für die Partikelgröße nach der klassiert wird, alle Späneigenschaften heranziehen. Folglich lässt sich eine Vielzahl inhaltlich verschiedenartiger Darstellungen erzeugen. Damit die Partikelgrößenanalyse einen Beitrag zur Prozessüberwachung, -steuerung und -optimierung leistet, ist eine geeignete Wahl der Basis für Mengenanteile und Partikelgröße zu treffen. Neben der Darstellung der Häufigkeitsverteilung einer Eigenschaft (Abbildung 5) oder der Verteilung des Spanvolumens über die Spanabmessungen bzw. den Stirnflächen-Äquivalenzdurchmesser (Abbildung 9), kann auch die Darstellung der Verteilung des Spanvolumens über den Kugel-Äquivalenzdurchmesser der Spanoberfläche (Abbildung 8) eine hilf-

reiche Aussage liefern. So zeigt sie die Bedeutung der Späne der jeweiligen Volumengrößenklasse am gesamten Spanvolumen oder – mit anderen Worten – welche Späne vornehmlich zum Volumen des Spanmaterials bzw. der Spanmatte beitragen. Im Vergleich zur Darstellung der Häufigkeit über das Spanvolumen (d.h. über den Kugel-Äquivalenzdurchmesser) ist diese Information von deutlich praktischerer Bedeutung. Es ist schließlich von geringem Interesse, zu welchem Anteil Späne bestimmten Volumens im Spankuchen vorkommen, sondern vielmehr, welchen Beitrag Späne bestimmten Volumens zum Volumen des Spankuchens leisten.

Mit Hilfe einer Häufigkeits- bzw. Mengenverteilung kann allgemein ein

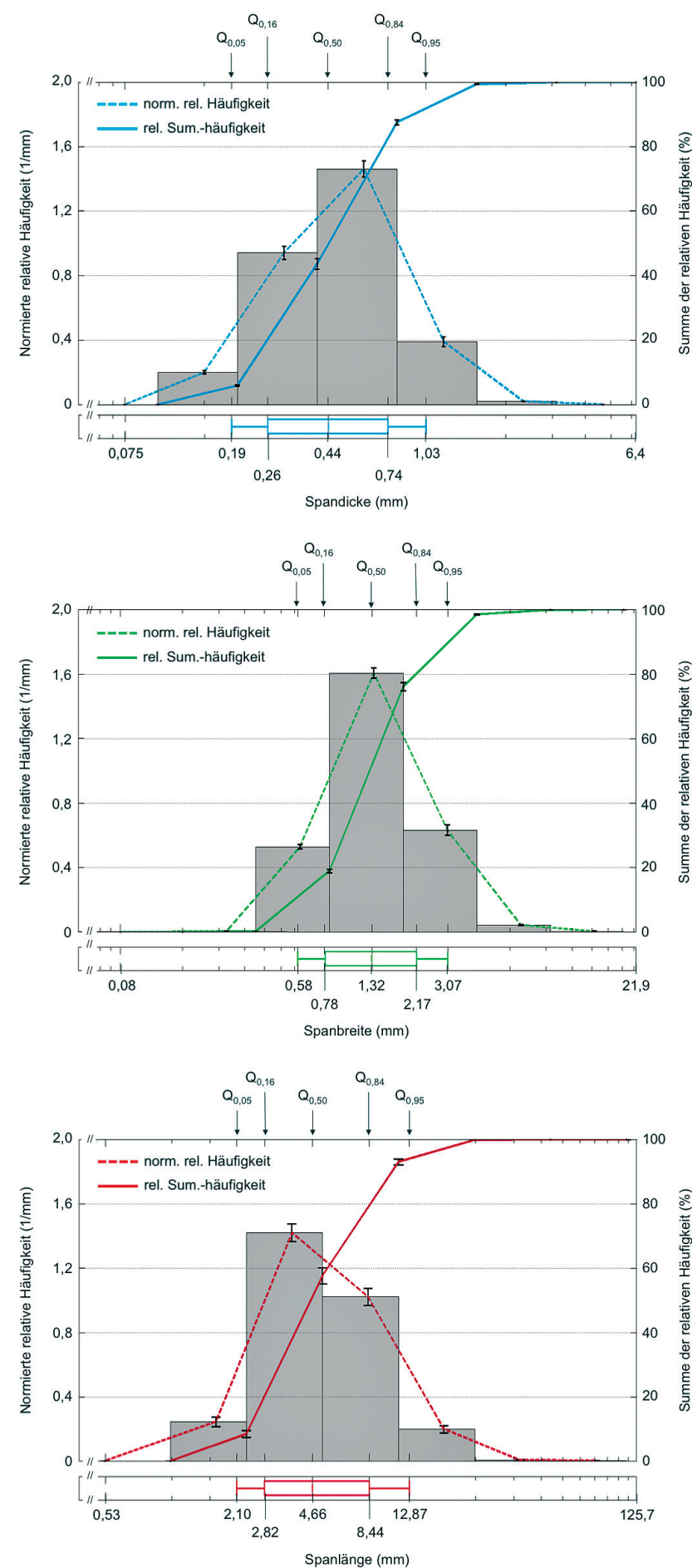


Abbildung 5 Grafische Darstellung der anzahlbasierten Verteilung der Spandicke, -breite und -länge (logarithmisch skalierte Abszisse) sowie Box-Whisker-Darstellung der Verteilungsquantile, mit insbesondere dem 50%-Quantil (Q0,50, Median) als charakteristische Spandicke, -breite bzw. -länge.

Vorteile durch bildanalytisches Messen der Spandicken

Fortsetzung von Seite 1102

Eindruck von der geometrischen Heterogenität eines Spangemisches gewonnen werden. Numerisch beschreiben lässt sich die Heterogenität eines Spangemisches auf Basis von Quantilen der Verteilung (z. B. 16 %- und 84 %-Quantil), die im gewählten Beispiel die Grenzen der Größenklasse definieren, die -symmetrisch um den Median - 68 % des Mengenmaßes abdecken. Für den Vergleich der Heterogenität von Spangemischen unterschiedlicher mittlerer Partikelgröße kann die Maßzahl der Spannweite herangezogen werden, bei deren Berechnung die Breite der Größenklasse (z. B. 84 %-Quantil minus 16 %-Quantil) auf den Median (50 %-Quantil) normiert wird. Eine Vorstellung zur Sicherheit der gemessenen Partikelgröße (z. B. 50 %-Quantil der Spandicke) ist über Wiederholungsmessungen zu gewinnen. In der grafischen Darstellung kann diese Information in Form eines Fehlerbalkens angegeben werden, bei tabellarischer Auflistung des Mittelwertes der Messgröße durch Angabe eines Streumaßes (z. B. Standardabweichung oder Variationskoeffizient). Die Kennwerte (Quantile) einer Verteilung lassen sich auch über einen Box-Whisker-Plot darstellen (vgl. Abbildung 5). Mit diesem wird insbesondere die Heterogenität des Spangemisches abgebildet. Für die Prozessüberwachung sowie -steuerung und letztlich die Prozessoptimierung wird voraussichtlich eine visuelle Entwicklung von Kennwerten über die Zeit zum Tragen kommen.

Rechtsschiefe Partikelgrößenverteilung

Partikelgrößenverteilungen sind häufig rechtsschief, d. h. für kleine Partikelgrößen liegen große Anteile des betrachteten Mengenmaßes vor, für große Partikelgrößen kleine Anteile des betrachteten Mengenmaßes. Das Histogramm bzw. die entsprechende Liniendarstellung der Verteilung ist zunächst durch einen steilen Anstieg, ein zügiges Erreichen des Maximalwertes und dann ein langsames Auslaufen gekennzeichnet. Im Fall einer Häufigkeitsverteilung bedeutet das, dass viele kleine Späne ähnlicher Größe vorliegen, die wenigen groben Späne deutliche Größenunterschiede aufweisen. Ein Modell, das Partikelgrößenverteilung augenscheinlich abbilden kann, ist die logarithmische Normalverteilung. Werden Messwerte logarithmiert und grafisch aufbereitet, so erscheinen die Daten normalverteilt. Der Mittelwert des logarithmierten Datensatzes entspricht nach dem Entlogarithmieren dem Median des Ausgangsdatsatzes. Wird das 16 %- und 84 %-Quantil des logarithmierten Datensatzes (Standardabweichung zum Mittelwert) als Exponent zur Basis 10 eingesetzt (entlogarithmieren), so entspricht das Ergebnis den entsprechenden

Quantilen des Ausgangsdatsatzes. Anstelle des Logarithmiers des Datensatzes können die Messdaten auch logarithmisch größer werdende Größenklassen zugeordnet und auf einer logarithmischen Abszisse dargestellt werden. So wird optisch eine Gaußsche Normalverteilung, mit um den Median symmetrischen, die Heterogenität des Spangemisches widerspiegelnden Quantilen erhalten (vgl. Abbildung 5).

Ergebnisse von Siebung und bildanalytischer Vermessung

Für den Vergleich der Ergebnisse von Siebanalyse und Spanvermessung mit dem „3D Particleview“ wurden Spanmasse und Spanvolumen einander gleichgesetzt und deren relativen Mengenanteile gegen die Klassierungsmerkmale Spangröße (Siebanalyse) bzw. Spanlänge, -breite und -dicke sowie den Stirnflächen-Äquivalenzdurchmesser (Bildanalyse) aufgetragen (Abbildung 9). Für einen industriellen Mittelschichtspan konnte so gezeigt werden, dass die Verteilung des Spanvolumens über die Spanbreite die größte Ähnlichkeit zur Verteilung der Spanmasse über die Spangröße (Maschenweite) aufweist. Die geringste Ähnlichkeit zeigt die Verteilung des Spanvolumens über die Spanlänge, gefolgt von der Verteilung des Spanvolumens über die Spandicke. Die Verteilung der Spanmasse über die Spangröße (Siebanalyse) liegt zwischen der Verteilung des Spanvolumens über die Spanbreite und der Verteilung des Spanvolumens über den Stirnflächen-Äquivalenzdurchmesser. Dies deutet darauf hin, dass die Spangröße (Maschenweite) nicht genau die Spanbreite widerspiegelt, sondern einen leicht größeren Wert. Als Grund hierfür kann - mit Rücksicht auf die Spandicke - das diagonale Passieren von Spänen der Siebmaschenöffnungen angenommen werden. Bei der Verwendung von Lochblechsieben ist zu erwarten, dass die Spangröße (Lochdurchmesser) noch klarer von der Spanbreite abgebildet wird. Der Stirnflächen-Äquivalenzdurchmesser wurde für jeden Span auf Basis der Fläche einer Ellipse berechnet, die ihrerseits über die Spandicke und Spanbreite konstruiert wur-

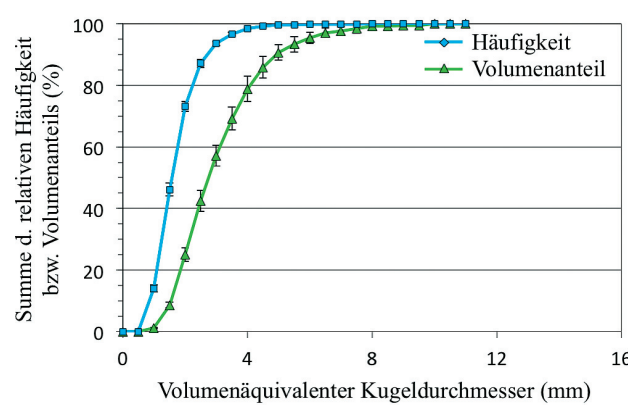


Abbildung 8 Grafische Darstellung von Häufigkeit und Volumenanteil über den volumenäquivalenten Kugeldurchmesser.

de. Insgesamt zeigt der Vergleich, dass die bildanalytische Spanvermessung in der Lage ist, die Ergebnisse der Siebanalyse nachzustellen.

Spanabmessungen der Siebfractionen

Der Vergleich der Ergebnisse von Siebanalyse und 3D-Spanvermessung legt nahe, dass die Trennung in Siebfractionen offensichtlich nach der Spanbreite erfolgt. Zur Überprüfung wurden die Spanabmessungen innerhalb der Siebfractionen bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 5 in Form ausgewählter Quantile der jeweiligen Abmessungsverteilung aufgelistet. Zu erkennen ist, dass der Median der Spanlänge stets weit größer ist, als die Obergrenze der jeweiligen Siebfraction. Für die Spandicke ist zu erkennen, dass der Median - mit Ausnahme der ersten Siebfraction - stets kleiner ist, als die Untergrenze der jeweiligen Siebfraction. Der Median der Spanbreite liegt - mit Ausnahme der letzten Siebfraction - hingegen stets mittig im Spangrößenintervall der jeweiligen Siebfraction. Dies stützt die Schlussfolgerung, dass die Spantrennung im Zuge der Siebung nach der Spanbreite erfolgt. Neben dem Median (50 %-Quantil) der jeweiligen Abmessungsverteilung werden weiter die Differenzen zwischen dem 16- und 50 %-Quantil bzw. dem 50- und 84 %-Quantil aufgeführt. Vergleichbar mit der Standardabweichung wird hierüber die Schwankungsbreite (68 % aller Werte) der Messergebnisse beschreiben.

Spanabmessungen und -größe

Werden die in Tabelle 5 aufgelisteten Mediane der Spanabmessungen gegen die Spangrößenintervalle der Siebanalyse aufgetragen (Abbildung 6), so zeigt sich unter Ausschluss von Ausreißern (nahezu quadratische Partikel aus Spanplattenresten, kein Holzspan im engeren Sinne), dass jede der Spanabmessungen linear mit der Spangröße (Mitte des Spangrößenintervalls) ansteigt. Ein vergleichbarer Zusammenhang von Spangröße (Siebmaschengröße) und Spanabmessungen wurde schon von May (1982) unter Angabe von Bestimmtheitsmaßen von 0,92 bis 0,97 gezeigt. Ohne zu berücksichtigen in welcher Beziehung die Abmessungen individueller Späne untereinander stehen, ist hieraus leicht zu schlussfolgern, dass zwischen Spanlänge, -breite und -dicke eine Abhängigkeit besteht. Gestützt wird diese Schlussfolgerung von Dunky und Niemz (2002), die den Spanabmessungen auf Basis der Arbeiten von Jensen und Kehr (1970), May (1982) und May und Keserü (1982) untereinander eine gute Korrelation zuschreiben.

Korrelationen

Die korrelative Beziehung zwischen den spanindividuellen Abmessungen (Dicke und Breite sowie Länge und Breite) wurden von May (1982) auf Basis „konventionell“ vermessener Deck- und Mittelschichtspäne untersucht und Bestimmtheitsmaße von 0,70 bzw. 0,95 berechnet. Eigene Ergebnisse des analogen In-Beziehung-Setzens der mit dem „3D Particleview“ ermittelten, spanindividuellen Abmessungen zeigten keine vergleichbar engen Zusammenhänge (Abbildung 7). So waren die Bestimmtheitsmaße (R^2) der korrelativen Beziehungen zwischen Spanabmessungen (Breite und Länge, Dicke und Län-

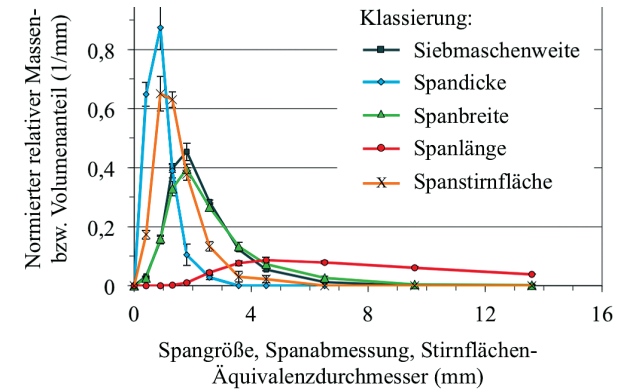


Abbildung 9 Liniendarstellungen der auf die Intervallbreite normierten relativen Massen- bzw. Volumenanteile über die nach Siebmaschenweite, Spanabmessungen (Dicke, Breite, Länge) und die Stirnfläche klassierten Mittelspäne.

Siebfraction	Spanlänge (mm)			Spanbreite (mm)			Spandicke (mm)		
	Q ₁₆ -Q ₅₀	Median	Q ₈₄ -Q ₅₀	Q ₁₆ -Q ₅₀	Median	Q ₈₄ -Q ₅₀	Q ₁₆ -Q ₅₀	Median	Q ₈₄ -Q ₅₀
0 - 0,8 mm	-1,0	3,4	+1,6	-0,2	0,7	+0,2	-0,1	0,2	+0,1
0,8 - 1 mm	-1,5	4,0	+2,1	-0,2	0,9	+0,2	-0,1	0,3	+0,1
1 - 1,6 mm	-2,3	5,6	+3,4	-0,4	1,3	+0,4	-0,1	0,4	+0,2
1,6 - 2 mm	-3,1	6,6	+4,7	-0,4	1,9	+0,4	-0,2	0,6	+0,2
2 - 3,15 mm	-4,4	9,0	+6,0	-0,6	2,6	+0,7	-0,3	0,8	+0,3
3,15 - 4 mm	-5,5	11,9	+8,3	-0,9	3,9	+0,8	-0,3	1,0	+0,5
4 - 5 mm	-5,3	12,6	+8,1	-1,0	5,0	+1,0	-0,5	1,2	+0,6
5 - 8 mm	-3,3	12,3	+8,0	-2,6	6,8	+1,6	-0,4	1,4	+0,8
8 - 11,2 mm	-7,6	20,5	+3,5	-1,5	5,4	+4,2	-0,5	1,8	+1,2

Tabelle 5 Aus den Häufigkeitsverteilungen der Spanabmessungen innerhalb der Siebfractionen abgeleitete Kennwerte. Q₁₆ = 16 %-Quantil, Q₅₀ = 50 %-Quantil (Median), Q₈₄ = 84 %-Quantil

ge sowie Dicke und Breite) deutlich kleiner als 0,5. Mit einem kleineren R^2 als 0,2 ist für die Beziehung Länge und Breite sowie Länge und Dicke von einer „sehr geringen Korrelation“, mit einem R^2 von 0,35 ist für die Beziehung zwischen Dicke und Breite von einer „geringen Korrelation“ auszugehen.

Fazit

Herkömmliche Verfahren zur Partikelgrößenbestimmung eignen sich nicht für eine gezielte Prozessüberwachung, -steuerung oder -optimierung in der Spanplattenproduktion. Sie sind entweder zu wenig präzise, zu aufwändig oder weisen eine unzureichende Messsicherheit auf. Wenngleich das Verfahren zur Spangrößenanalyse mittels Siebung im Labor eine große Ähnlichkeit zum Prinzip der Trennung des erzeugten Spangutes in die produktionsrelevanten Fraktionen aufweist, so sind die erzeugten Messdaten sowohl in ihrer Form als auch in ihrer Informationstiefe nicht geeignet, für eine vernetzte und automatisierte Prozesssteuerung im Sinne von „Industrie 4.0“ herangezogen zu werden. Bei der händischen Spanvermessung mittels Messschieber kommt weiter der hohe Zeitaufwand und die geringe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse hinzu. Im Fall der bildanalytischen Vermessung von Spanlänge und -breite (2D) fehlt die Information der Spandicke, sodass Spanvolumen und -oberfläche nicht seriös hergeleitet werden können. Die Entwicklung eines Systems auf Basis von Laser-Profilscan-Technik zur dreidimensionalen Spanvermessung ermöglicht, neben der Spanlänge und -breite auch die Spandicke zu erfassen und somit das Spanvolumen und die Spanoberfläche zu berechnen. Diese Informationen sind die Voraussetzung für eine bedarfsbasierte Festlegung von Wartungszeitpunkten der Zerspaltung, die aktive Anpassung von Prozessparametern zur Herstellung von Spänen bestimmter Geometrie sowie der Klebstoffdosierung auf Basis der jeweils vorliegenden Spangrößenverteilung. Anders als bei der auf die Span-Trockenmasse bezogenen Klebstoffdosierung ist bei der spanoberflächenspezifische Klebstoffdosierung eine dynamische Klebstoffanpassung möglich, da auf prozessbedingte Schwankungen der Spangrößenverteilung und damit auf die Veränderung der für die Verklebung relevanten Spanoberfläche reagiert werden kann. Mit der Vermessung eines industriellen Mittelschichtspans und der beispielhaften Auswertung der Messdaten wurde im vorliegenden Artikel gezeigt, dass die dreidimensionale Spanvermessung die Möglichkeiten bisheriger Methoden übersteigt. So können nicht nur die Ergebnisse der Siebanalyse nachgestellt, sondern auch darüberhinausgehende Betrachtungen anhand der vorliegenden Messdaten vorgenommen werden. In Summe ist zu erwarten, dass die Zusatzinformationen der bildanalytische

3D-Spanvermessung einen Mehrwert darstellen und die Spanvermessung in der Spanplattenproduktion zukünftig eine wichtige Rolle spielen wird.

Literaturverweise

Benthien JT, Lüdtko J, Friehmelt R, Schäfer M (2018) Limitations of a 3-D image analysis-based particle size measuring system for wood particle dimension measurement. Wood and Fiber Science 50(5):358-362

Brumbaugh J (1960) Effect of flake dimensions on properties of particle boards. Forest Products Journal 10(5):243-246

Dunky M, Niemz P (2002) Holzwerkstoffe und Leime : Technologie und Einflussfaktoren. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York

Hasener J (2019) Innovation: 3D Spananalyse & automatisierte Formaldehyd-Emissionsmessung. 6. Grecon Holzwerkstoffsymposium, 19.-20. September 2019, Berlin

Jensen U, Kehr E (1970) Untersuchungen zur Verarbeitung von Feingut bei der Spanplattenherstellung. Holztechnologie 11(2):97-100

Kitahara K, Kasagi K (1955) Effects of raw chip dimensions on the physical and mechanical properties of chip-board. Wood Industry 10(8):406-412 (siehe ergänzend auch Holz-Zentralblatt, 81. Jhg., Nr. 144 vom 01.12.1955, S. 1714)

Kollmann F (1966) Holzwerkstoffe - Holzspanplatten und Holzspanformlinge Rohstoffe, Herstellung, Plankosten Qualitätskontrolle usw.. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York

Liiri O, Kivistö A, Saarinen A (1977) Der Einfluss von Holzart, Spangröße und Bindemittel auf die Festigkeit und die Quellung von Spanplatten mit höheren elastomechanischen Eigenschaften. Holzforschung und Holzwertung 29(6):117-122

Marhenke T, Hasener J (2019) Späne lügen nicht. MDF Magazin, Oktober 2019, Supplement von Holz-Zentralblatt und HK, S. 78-82

May HA (1982) Zusammenhänge zwischen Eigenschaften, Rohstoffkomponenten und dem Dichteprofil von Spanplatten - Teil 2: Möglichkeiten der Anwendung industrieller Sortierverfahren zur Beurteilung von Spangemischen. Holz als Roh- und Werkstoff 40(8):503-506

May HA, Keserü G (1982) Zusammenhang zwischen Eigenschaften, Rohstoffkomponenten und dem Dichteprofil von Spanplatten - Teil 1: Sichtung von Spangemischen und Methoden zur Beurteilung ihrer Eignung für die Herstellung von Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 40(3):105-110

Niemz P (1982) Untersuchungen zum Einfluss der Struktur auf die Eigenschaften von Spanplatte - Teil I. Einfluss von Partikelformat, Rohdichte, Festharzanteil und Festparaffinanteil. Holztechnologie 23(4):206-213

Niemz P (1993) Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen

Niemz P, Bauer S (1991) Beziehung zwischen Struktur und Eigenschaften von Spanplatten. Teil 2: Schubmodul, Scherfestigkeit, Biegefestigkeit. Holzforschung und Holzwertung 43(5):68-70

Niemz P, Schweitzer F (1990) Einfluß ausgewählter Strukturparameter auf die Zug- und Druckfestigkeit von Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 48(10):361-364

Niemz P, Wenk S (1989) Kenngrößen zur Beurteilung von Spangemischen und deren Meßbarkeit. Holztechnologie 30(3):117-122

Nopens M, Riegler M, Hansmann C, Krause A (2019) Simultaneous change of wood mass and dimension caused by moisture dynamics. Scientific Reports 9:10309

Post PW (1958) Effect of particle geometry and resin content on bending strength of oak flake boards. Forest Products Journal 8(10):317-322

Turner HD (1954) Effect of particle size and shape on strength and dimensional stability of resin-bonded wood-particle panels. Forest Products Journal 4(5):210-223

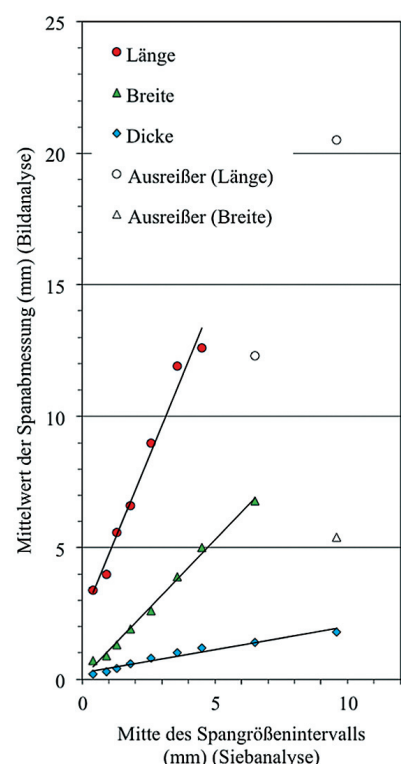


Abbildung 6 Veranschaulichung der jeweiligen Spanabmessung über die Spangrößenintervalle mit Trendlinie

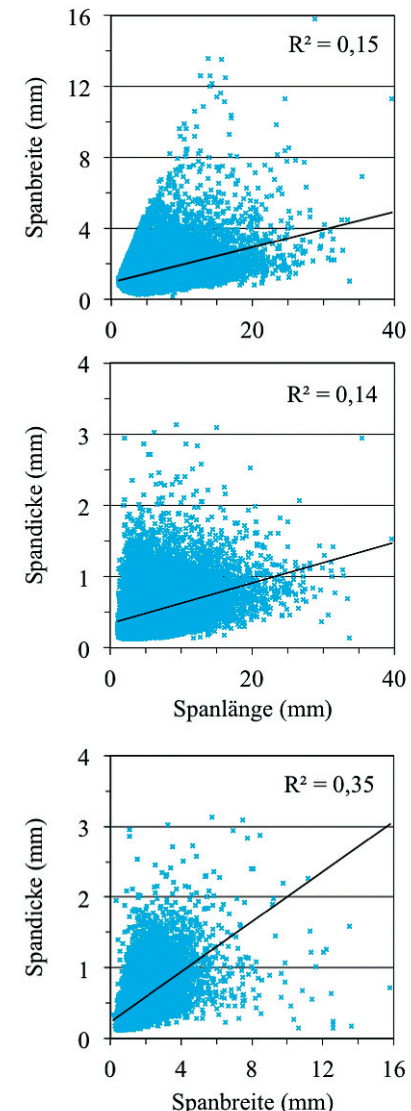


Abbildung 7 Untersuchung der korrelativen Beziehung zwischen den Spanabmessungen durch grafische Darstellung der Messdaten in Punktdiagrammen und Einfügen einer Trendlinie.