

Zuverlässiger Einsatz quantitativer Röntgenmesstechnik zur Prozess- und Qualitätskontrolle in der Holzwerkstoffindustrie¹

Konrad SOLBRIG¹, Matthias FUCHS², Katja FRÜHWALD¹, Jörg B. RESSEL³

¹ Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Labor für Holzbauprodukte und Holzbauproduktion, Lemgo

² Electronic Wood Systems GmbH, Hameln

³ Universität Hamburg, Zentrum für Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Mechanische Holztechnologie, Hamburg

Kurzfassung. Die Anwendung von Röntgensystemen in der Holzwerkstoffindustrie zeichnet sich vornehmlich durch die quantitative Messsignalauswertung aus, während ausschließlich bildgebende Durchstrahlungsverfahren eine untergeordnete Rolle spielen. Es werden absolute Messwerte in Form der Flächengewichtsverteilung über Länge und Breite der produzierten Holzwerkstoffplatten ausgegeben. Holzwerkstoffe wie Span- oder Faserplatten werden aus beleimten Holzpartikeln industriell hergestellt. Eine homogene Flächengewichtsverteilung in Plattenebene gilt als wichtiges Qualitätskriterium, weil zahlreiche mechanisch-physikalische Eigenschaften und damit deren gleichmäßige Ausprägung davon abhängen. Folglich ist eine Kontrolle der Verteilung des Flächengewichts als Prozessparameter unabdingbar. Der Einsatz von Röntgenmesssystemen zur Inline-Flächengewichtsbestimmung ist Stand der Technik und in der Holzwerkstoffindustrie verbreitet. Die Messsystemfähigkeit derzeitiger Geräte wird jedoch überschätzt. Die Messergebnisse von Inline-Systemen liefern bei unscharfen Toleranzangaben eher Vergleichs- als zuverlässige Absolutwerte und erlauben bestenfalls die Abschätzung relativer Tendenzen im Verlauf des Fertigungsvorgangs. Die Nichtbeachtung strahlungsphysikalischer Effekte bei Geräteaufbau, Kalibrierung und Datenauswertung führt zu Abweichungen in den Messergebnissen.

Auf Basis einer statistischen Messsignalanalyse für das vorliegende, optimierte Röntgenmesssystem wurde ein erster Ansatz zum Nachweis dessen Eignung und Fähigkeit nach üblichen Methoden anderer Branchen verfolgt. Die Ergebnisse zeigen die rechnerische Abschätzung der minimal messtechnisch möglichen Toleranz in der Größenordnung $T_{\min} = 62 - 125 \text{ g/m}^2$ (für $c_g \geq 1,0$). Derartig optimierte Messtechnik liefert folglich zuverlässige Messwerte zur Prozesssteuerung und Qualitätssicherung. Der zweckmäßige Einsatz valider Röntgenmesstechnik in der Holzwerkstoffproduktion bietet Potential zur Effizienzsteigerung und Holzwerkstoffoptimierung, sofern eine konsequente Datenimplementierung in die Prozessregelkreise, eine entsprechende Erhöhung des Anlagenautomatisierungsgrades sowie die zielgerichtete Schulung und Sensibilisierung der Anwender gewährleistet werden wird.

¹ Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen des Projektes „Erforschung und Adaptierung von radiometrischen Verfahren zur Messung von Materialdichte und -feuchte an Holzwerkstoffen unter Berücksichtigung des strukturellen Aufbaus“ (Förderkennzeichen: KF2970301NT2, KF2237402NT2) gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages über den Projektträger AiF Projekt GmbH.

1 Einführung

Der Europäische Verband der Holzwerkstoffindustrie (European Panel Federation EPF) verzeichnet für das Jahr 2013 ein Produktionsvolumen von 43,3 Millionen m³ der gebräuchlichsten plattenförmigen Holzwerkstoffe – MDF (Medium Density Fibreboard), Spanplatte und OSB (Oriented Strand Board) – in den Mitgliedstaaten (ohne Russland und Türkei, [1]). Holzwerkstoffe (HWS) sind industriell hergestellte Platten basierend auf harzbeimten Holzpartikeln definierter, plattentypabhängiger Geometrie. Eine mit vordefiniertem Flächengewicht geformte Partikelmatte (< 9 ft breit) wird in einem heute meist kontinuierlichen Prozess nach kalter Vorverdichtung in einer Heißpresse auf Zieldicke verdichtet und ausgehärtet. Die HWS-Industrie befindet sich nach dem „survival mode“ [2] der vergangenen Jahre gegenwärtig in einer optimistischeren Verfassung. Trotz alledem sind die täglichen Herausforderungen durch die fortwährend zunehmende Rohholzverknappung und -preiserhöhung, die dem Konkurrenzdruck des Sektors der erneuerbaren Energien geschuldet sind, und durch Preissteigerungen bei harnstoff- und melaminbasierten Formaldehydklebharzen [3] geprägt. In Zentral- und Westeuropa sind Überkapazitäten vorherrschend [4], als deren Konsequenz erste Werke bereits geschlossen wurden [5, 6] und fortan mit weiteren Stilllegungen zu rechnen ist. Seit Mitte 2014 stellt sich wiederum zunehmend Optimismus ein [7]. Zeitweise können die Verkaufspreise der Rohplatten erhöht werden [8] und die großen Holzwerkstoffkonzerne expandieren nach Osteuropa. Ähnlich gestaltet sich die Situation auf Seiten der zugehörigen Maschinen- und Anlagenbauer, wo nunmehr die Auftragsbücher der deutschen Marktführer sowohl mit Neuanlageninstallationen (Osteuropa und weltweit) als auch Modernisierungen (Europa) gut gefüllt sind [9].

Die gegenwärtige Branchensituation in Zentraleuropa motiviert eine Überarbeitung des sachgerechten Einsatzes zerstörungsfreier Messtechnik in der HWS-Industrie – nicht nur im Hinblick auf Rohstoff- und Energieeffizienz, sondern auch zur Qualitätsverbesserung, Verringerung von Eigenschaftsschwankungen sowie Fertigungs- und Werkstoffoptimierung generell. Messtechnik, deren Eignung und Fähigkeit, wie in anderen Branchen üblich, mittels entsprechender Methoden nachgewiesen ist, und ihr bedarfsorientierter, zielgerichteter Einsatz zur Prozesssteuerung und Qualitätssicherung sind in der Holzwerkstoffindustrie bisher unterrepräsentiert. Der vorliegende Beitrag widmet sich vornehmlich Röntgenmesssystemen zur Bestimmung des Flächengewichts in der Plattenebene der produzierten Holzwerkstoffe. Eine kontrollierte, gleichmäßige Flächengewichtsverteilung ist primäres Ziel. Die resultierende Rohdichte der fertigen Platte als wesentliches Qualitätskriterium bedingt alle mechanisch-physikalischen Eigenschaften und damit deren homogene Ausprägung über die Plattenfläche. Neben elasto-mechanischen Vorgängen innerhalb der heißverdichteten Partikelmatte (z. B. Querdehnung mit resultierendem Rohdichteabfall im Randbereich) zeichnet sich die initiale Mattenformung für das Erreichen der gleichmäßigen Eigenschaftsausprägung verantwortlich. Das mittlere Flächengewicht bzw. die Rohdichte der fertigen Platte als eine zentrale Zielgröße der Prozesssteuerung kann nur mittels genauer, regelbarer Materialdosierung in engen Grenzen gehalten werden, um mögliche Einsparungen zu erzielen. Folglich ist eine valide Überwachung und Einbindung dieser Parameter in die Prozesssteuerung unabdingbar.

2 Inline-Röntgenmesstechnik in der Holzwerkstoffindustrie

2.1 Einsatzgebiet und -zweck

Messsysteme zur Bestimmung des Flächengewichts (< 40 kg/m²) und, bei anderweitig gemessener Dicke, der Rohdichte mittels ionisierender Strahlung, wie Röntgen- und

Gammastrahlung, befinden sich seit Jahrzehnten im industriellen Einsatz. Erste wissenschaftliche Ausführungen [10] über Messverfahren an Faser- und Spanplatten schlussfolgern eine zweckmäßige Anwendung der technologisch wichtigen Flächengewichtsverteilung zur Prozesssteuerung. Daraufhin zeigen praxisorientierte Untersuchungen, vgl. [11, 12], die Notwendigkeit adäquater Messsysteme, um Kosteneinsparungen zu erzielen. Heute ist der Einsatz von Röntgenmesstechnik zur zerstörungsfreien und kontinuierlichen Bestimmung der Flächengewichtsverteilung inline während des Produktionsprozesses – insbesondere vor der Heißpresse – Stand der Technik und üblich in der HWS-Industrie. Die Systeme sind typischerweise nach der Vorpresse installiert (Abbildung 1), um die gesamte Partikelmatte zu überwachen, können aber auch bei der Spanplattenherstellung in den jeweiligen Mattenformstationen integriert sein, um zwischen den Flächengewichten der einzelnen Schichten der Partikelmatte zu unterscheiden. Weitere radiometrische Geräte kommen bedingt nach der Heißpresse für Messungen an der fertigen Platte zum Einsatz. Deren von den traversierenden Systemen (Abbildung 1) teils abweichende Aufbau ist beispielsweise durch spurweise angeordnete, feststehende Detektoren gekennzeichnet. Die im Folgenden dargestellten strahlungsphysikalischen Überlegungen sind jedoch ähnlich. Inline-Röntgenmesssysteme sind erhältlich bei folgenden Herstellern:

- Electronic Wood Systems GmbH, Hameln, Deutschland (EWS),
- Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG, Alfeld, Deutschland (GreCon),
- IMAL S. r. l., San Damaso (Modena), Italien (IMAL).

Alle Inline-Systemarten und deren Messergebnisse erfahren eine unterschiedlich tiefe Integration in die jeweiligen Prozesssteuerungs- und Qualitätssicherungssysteme der HWS-Hersteller abhängig vom HWS-Typ, der Produktionskapazität sowie dem Anlagenmodernisierungsgrad. Dessen ungeachtet wird die Gültigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse bisheriger Messsysteme überschätzt, wie schon [13] für die laborseitige Rohdichteprofilbestimmung aufzeigen. Die heute im Fertigungsleitstand dargestellten Messgrößen und grafisch aufbereiteten Verteilungen von Flächengewicht und Rohdichte liefern eher Vergleichs- als verlässliche Absolutwerte und erlauben bestenfalls eine Abschätzung relativer Tendenzen im Herstellungsprozess.

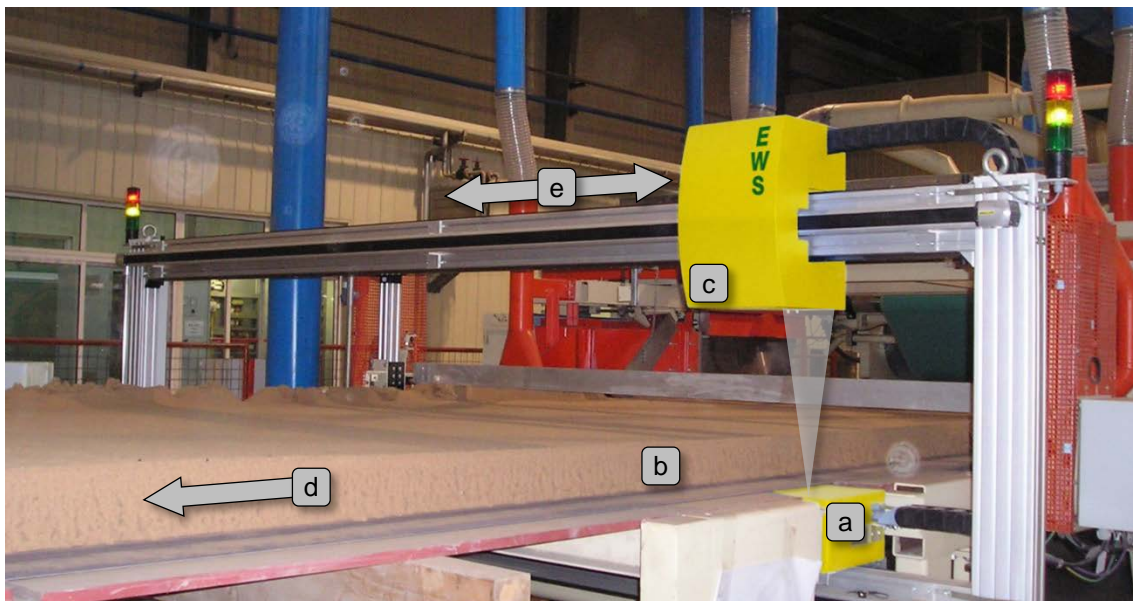


Abbildung 1: Flächengewichtsmesssystem an typischer Position zwischen Vor- und Heißpresse, mit (a) Röntgenquelle mit Kegelstrahl, (b) Faserplatte (MDF) auf dem Formband, (c) Detektor, (d) Produktionsrichtung, (e) Traversierung über die produzierte Breite (Quelle und Detektor synchronisiert), nach [14] modifiziert mit Beschriftung.

2.2 Aufbau, Eigenschaften und strahlungsphysikalische Anforderungen

Zwar zeigen die verschiedenen Inline-Röntgenmesssysteme der jeweiligen Hersteller einzelne Unterschiede in der Umsetzung, der grundlegende Aufbau der traversierenden Systeme ähnelt sich jedoch. Unterhalb des Formbandes mit der gestreuten Partikelmatte (siehe (b) in Abbildung 1) befindet sich die Strahlungsquelle (a) – häufig eine Röntgenröhre mit W-Target und enger Kegelstrahlgeometrie – darüber der Detektor (c). Die Schwächung der ionisierenden Strahlung innerhalb der Partikelmatte folgt dem exponentiellen Zusammenhang des Beer'schen Gesetzes

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} t \rho} \quad (1)$$

mit Durchgangsintensität I [cpp], Ausgangsintensität I_0 [cpp], Massenschwächungskoeffizient μ/ρ [m²/kg], Materialdicke t [m] und Dichte² ρ [kg/m³]. Der materialspezifische Massenschwächungskoeffizient μ/ρ beschreibt die energie- und dichteabhängige Schwächung der Strahlungsintensität. Unter Anwendung des Zusammenhanges zwischen Dichte ρ , Dicke t und Flächengewicht ρ_A [kg/m²]

$$\rho_A = \rho \cdot t \quad (2)$$

wird die Abhängigkeit der Intensität der das Material durchdringenden Strahlung vom Flächengewicht im Schwächungsgesetz

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho_A} \quad (3)$$

deutlich. Die kontinuierlich nach vordefinierter Integrationszeit vom Detektor ausgegebene Durchgangsintensität I wird zur Intensität der Leermessung I_0 , die in definierten Intervallen neben der Partikelmatte aufgenommen wird, ins Verhältnis gesetzt und als Messsignal I/I_0 [-] weiterverarbeitet. Die logisch folgende Berechnung des Flächengewichtes ρ_A anhand Gleichung (3) bedarf einer Kalibrierung mittels einer Probe bekannter Abmessungen und Masse unter Berücksichtigung des stets durchstrahlten Formbandes. Das derzeit noch praxisübliche Procedere bedient sich einer – idealerweise der gleichen Produktion entstammenden – fertig gepressten Holzwerkstoffplatte (typenabhängig 500 - 1000 kg/m³) zur messtechnischen Ermittlung des Massenschwächungskoeffizienten. Untersuchungen von [15] belegen jedoch die Ungültigkeit dieser Vorgehensweise bei Flächengewichtsmessungen an lediglich kalt vorverdichteten Partikelmatte (typenabhängig 100 - 300 kg/m³) – also dem Einsatzzweck der hier betrachteten Messanlagen. Weiterhin können Gleichung (1) und (3) bei Einsatz polychromatischer Strahlung aufgrund der Energieabhängigkeit des Massenschwächungskoeffizienten nicht unmittelbar Anwendung finden. Infolgedessen und wegen weiterer strahlungsphysikalischer Effekte (z. B. Comptonstreuung, Strahlaufhärtung, Aufbaustrahlung), die bei der Durchstrahlung inhomogener, poröser Medien mittels ausgedehnter, polyenergetischer Strahlenbündel von messtechnischer Relevanz sind, treten Abweichungen vom erwarteten Schwächungsverhalten auf, die sich schlussendlich in den Messergebnissen widerspiegeln. Die elementare Zusammensetzung aller Holzarten ist nahezu identisch (H \approx 6 %, C $<$ 50 %, O $<$ 44 %, N + Spurenelemente ad 100 %) und verschiebt sich durch Zugabe der meisten organischen Bindemittel (z. B. Harnstoffformaldehydharz) strahlungsphysikalisch zu vernachlässigend in Richtung des im Periodensystem der Elemente dazwischenliegenden Stickstoffs. Dennoch hat sich eine Abschätzung des Massenschwächungskoeffizienten anhand

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i \omega_i \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (4)$$

nach [16] unter Verwendung von Tabellenwerten nach [17] und Einbeziehung des Feuchtegehaltes selbst bei Berücksichtigung der tatsächlichen Energieverteilung des eingesetzten Röntgenspektrums als unzureichend genau und nicht allgemeingültig erwiesen.

² Bei Holz und Holzwerkstoffen als poröse Materialien ist bei der Dichte zwischen der die Poren einschließenden und praxisrelevanten Rohdichte sowie der Reindichte, die bei allen Holzarten \approx 1500 kg/m³ beträgt, zu differenzieren..

Soweit bekannt, arbeiten die aktuellen Systeme in einem Energiebereich < 50 keV. Die individuelle Wahl der geeigneten Strahlungsenergie wird in ähnlicher Weise von [10] und [18] zur Reduzierung der Messfehler und Steigerung der -empfindlichkeit empfohlen. Hiernach sind die Strahlungseigenschaften an das tatsächlich vorliegende Flächengewicht ρ_A anzupassen, um die Bedingung

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{-1} = 1 \dots 1,5 \cdot \rho_A \quad (5)$$

zu erfüllen. Die erforderliche Kenntnis über das Röntgenspektrum und dessen mittlere Energie kann auf Erfahrungswerten, Abschätzungen (vgl. [19]), Simulationen (vgl. [20]) oder Messungen (vgl. [21]) basieren. Umfassend energieabhängig tabellierte Massenschwächungskoeffizienten sind hinreichend bekannt bei [17]. Darüber hinaus bedarf es weiterer Überlegungen zum eingesetzten Röntgenspektrum gemäß [22], die schlussendlich eine lineare Steigung des Zusammenhangs zwischen $\ln(I_0/I)$ und ρ_A beobachten, was mit gleichbleibendem μ/ρ korrespondiert. Aufgrund der inhomogenen und porösen Struktur von HWS sowie des vorliegenden Geräteaufbaus ist dieser Zusammenhang nicht direkt auf die Flächengewichtsmessung an HWS übertragbar. Detektorseitig wird die Messaufgabe üblicherweise entweder von Szintillatoren mit nachgelagerten Photomultipliern bzw. digitalen Bildsensoren oder von Halbleiterdetektoren (vgl. [23]) erfüllt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich Empfindlichkeit (insbesondere gegenüber geringen Energien und Intensitäten) und Signalverarbeitungsleistung. Die tatsächliche herstellereigenspezifische Berücksichtigung der strahlungsphysikalischen Anforderungen bei der Auslegung der vertriebenen Röntgenmesssysteme ist unklar.

Zu nichtradiometrischen Parametern liegen meist nur mehrdeutige Herstellerangaben vor. Angaben in den Datenblättern zur Auflösung beziehen sich meist auf geometrische Spezifikationen der Detektoren. Teils wird hohe räumliche Auflösung in der Größenordnung weniger Millimeter beworben, wohingegen, kritisch begutachtet, 50 - 100 mm breite Segmente in Plattenbreite (2700 mm) vollkommen ausreichend sind und keine messtechnische Herausforderung darstellen. Die Auflösung des Messergebnisses, also die Unterscheidbarkeit zwischen zu messenden Flächengewichtswerten und deren absolute Genauigkeit, ist bedeutender aber selten klar definiert. Darüber hinaus sind bisher keine konkreten Angaben und Kenngrößen der Messsystemfähigkeit (z. B. c_g , c_{gk}) zu verzeichnen.

3 Evaluierung eines optimierten Flächengewichtsmesssystems

3.1 Kalibrierung und Messdatenauswertung

Das erste Umdenken in der Handhabung von Röntgenmesssystemen zur Flächengewichtsbestimmung war bei [15] festzustellen. Er erzielt eine erhöhte Messgenauigkeit, indem er die Kalibrierung an handgestreuten Partikelmatten anstelle der bisher gebräuchlichen fertigen HWS-Platten durchführt. Den Ausführungen von [13] folgend müssen Art und Weise der Kalibrierung und Messdatenauswertung den durch Aufeinandertreffen von Material- und Strahlungseigenschaften vorliegenden Anforderungen gerecht werden und folgerichtig die Messsituation widerspiegeln.

Aufbauend auf diesen Erfahrungen und in anderen Fachgebieten verbreiteten Ansätzen (vgl. [22]) zur radiometrischen Flächengewichtsbestimmung wurde im Vorfeld der vorliegenden Untersuchungen unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2 verdeutlichten Unzulänglichkeiten bestehender Messanlagen ein optimiertes Röntgenmesssystem entwickelt. Das Multi-Energy-System erlaubt eine (automatisierte) Wahl der Röntgenenergiespanne und des -spektrums entsprechend des zu überwachenden Flächengewichtsbereiches. Eine energieselektive Detektierung hingegen erfolgt zugunsten eines schlanken

Gesamtsystems nicht. Die jeweiligen Kalibrierdaten und Messdatenauswertalgorithmen sind im zugehörigen Steuerungsrechner hinterlegt. Die Daten wurden an Stapeln eigens hergestellter und vorfixierter dünner Partikelmatten mit definierter Zusammensetzung und Rohdichte sowie bekanntem Flächengewicht und Feuchtegehalt aufgenommen. Alle Untersuchungen wurden mittels folgendem Messaufbau durchgeführt:

- Röntgenröhre bis 65 kV, 40 W mit Wolfram-Target,
- bedarfsgerechter Vorfiltereinsatz,
- praxisübliches Formband als Träger der Partikelmatten,
- Szintillator mit Photomultiplier als Detektor.

3.2 Statistische Messsignalanalyse

Bei zFP-Verfahren, die sich der Untersuchung von Fehlstellen im Bauteil widmen, kann die Qualität der Ergebnisse und damit die Zuverlässigkeit der Methode durch die Defektauffindwahrscheinlichkeit (POD) und die Wahrscheinlichkeit für eine Falschindikation (PFI) charakterisiert werden. In der Holzwerkstoffindustrie können diese Kenngrößen beispielsweise auf Messanlagen zur Spaltererkennung (Delaminierungen im Platteninneren, vgl. [24, 25]) mittels luftgekoppeltem Ultraschall übertragen werden. Bei zFP-Verfahren zur quantitativen Aufnahme von Messgrößen hingegen – wie der vorliegenden Röntgenmesstechnik – ist deren Zuverlässigkeit durch Kenngrößen zum Nachweis der Prüfprozesseignung (z. B. Fähigkeit, Wiederholgenauigkeit) zu beschreiben. Es sind also die systematischen und zufallsbedingten Messabweichungen vom wahren Wert der betrachteten Messgröße von Interesse – insbesondere unter wahrscheinlichkeitstheoretischen Gesichtspunkten.

Um die erreichbare Genauigkeit und messbare Auflösung im Sinne unterscheidbarer Flächengewichtswerte zu bestimmen, bedarf es der Unsicherheit bzw. Konfidenzgrenzen der Messungen. Zu diesem Zweck wurde die Streuung des Messsignals (Zählratenschwankung) bei einer Integrationszeit von 3000 ms über das gesamte Einsatzspektrum des Multi-Energy-Systems evaluiert. Ergebnisse werden exemplarisch für das Energieniveau < 25 keV vorgestellt. Bei dieser Einstellung liefert der beschriebene Versuchsaufbau ein schmalbandiges Röntgenspektrum mit einer gemessenen Peak-Energie von 13 keV resultierend in einem nach Gleichung (4) theoretisch abgeschätzten Massenschwächungskoeffizienten in der Größenordnung $\mu/\rho \approx 0,2$ m²/kg für das untersuchte Fasermaterial. Folglich ist dieser Energiebereich gemäß Gleichung (5) für die Flächengewichtsbestimmung im Bereich $\rho_A = 3 - 5$ kg/m² geeignet.

Nach dem üblichen Start- und Einrichtungsprocedere des Röntgenmesssystems wurden in Messreihen Durchgangs- und Ausgangsintensitäten I und I_0 bestimmt – bei im Vergleich zur Betriebspraxis störungsarmen Umgebungsbedingungen. Hierbei kam als Messgut eine Probe aus eigens im Labor hergestellten Holzwerkstoffplatten (MDF, homogenes Rohdichteprofil über die Plattendicke, UF-Harz) mit $\rho_A = 4,5$ kg/m² und $\rho = 400$ kg/m³ zum Einsatz. Die Zählraten wurden nacheinander am Steuerungsrechner abgelesen (jeweils $n = 30$), während die Probe für I in ein und derselben Position verblieb. Abbildung 2 zeigt für das exemplarische Energieniveau die Histogramme der gemessenen Zählraten und deren erwartete Normalverteilung. Tabelle 1 liefert die Zusammenfassung der Messdaten. Bei einem χ^2 -Test mit dem Signifikanzniveau $\alpha = 1\%$ unter Annahme der Normalverteilung mit den Parametern der Messdaten (\bar{x} , s) wird die Nullhypothese für I und I_0 nicht abgelehnt. Die Messdaten sind also mit einer statistischen Sicherheit von $P = 99\%$ normalverteilt mit den in Tabelle 1 gelisteten empirischen Parametern.

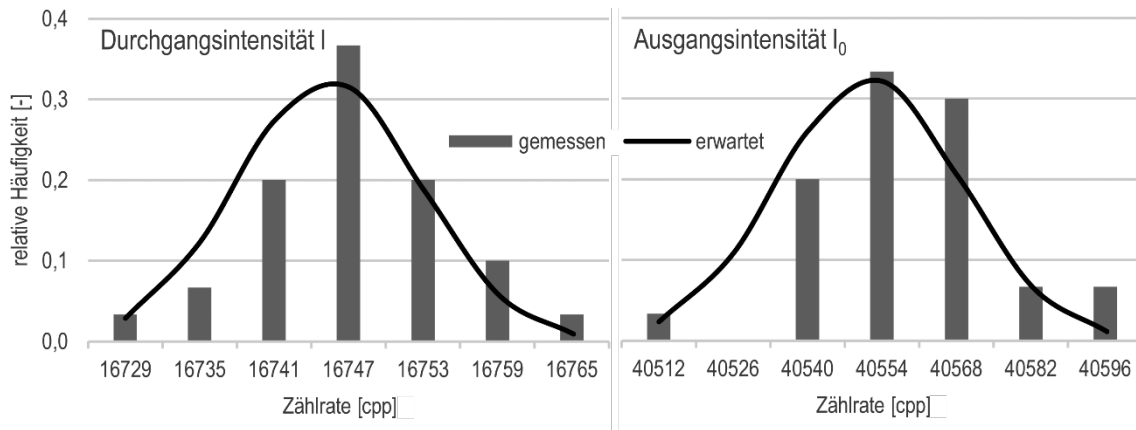


Abbildung 2: Histogramm (n = 30) und erwartete Normalverteilung der Zählraten von Durchgangs- und Ausgangsintensität des Energieniveaus < 25 kV.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Messdaten der Zählraten (counts per period) von Durchgangs- und Ausgangsintensität des Energieniveaus < 25 kV.

n = 30	Minimum [cpp]	Mittelwert \bar{x} [cpp]	Maximum [cpp]	Spanne [cpp]	s [cpp]	CV [%]	$\pm 3s$ -Spanne [cpp]
I	16729	16745,3	16762	33	7,4	0,044	44,4
I ₀	40512	40551,6	40589	77	17,3	0,043	103,8

Bei jeder Flächengewichtsmessung treffen die Streuungen der beiden unabhängig aufgenommenen Messgrößen I und I₀ zusammen und ergeben die Gesamtunsicherheit. Im Falle der beobachteten Normalverteilungen ist das Auftreten von Grenzwerten (Min., Max. Tabelle 1) höchst unwahrscheinlich, weshalb ein statistischer Ansatz, der sonst bei anspruchsvollen Toleranzanalysen Verwendung findet, folgendermaßen herangezogen wird.

Durch mathematische Überlagerung der Zählratenverteilungen von I und I₀ wird mittels Faltungsintegral die resultierende statistische Verteilung der Messergebnisse berechnet und als Flächengewichtsspanne ausgegeben. Diese Methode untersucht nach [26] das Zusammenwirken von Einzeltoleranzen in einer geometrischen Maßkette und kann analog gemäß [27] allgemein bei Messgrößen angewendet werden. Beispielsweise adaptieren [28] den Ansatz für die explizite Einbeziehung des Quell- und Schwindverhaltens – also von Werkstoffparametern – bei Toleranzberechnungen an Holz und HWS. Die generelle Methode bedient sich keiner grenzwertbasierten Worst-Case-Betrachtung, sondern bezieht die tatsächlichen Merkmalsverteilungen in die Berechnungen ein. Die Lösung des Faltungsintegrals zur genauen Berechnung der resultierenden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion erfolgt computergestützt. Die resultierende Gesamtstreuung kann mittels Gaußschem Abweichungsfortpflanzungsgesetz

$$s_{tot}^2 = \sum_i s_i^2 \quad (6)$$

mit der empirischen Gesamtvarianz s_{tot}^2 gleich der Summe der empirischen Einzelvarianzen s_i^2 berechnet werden. Im Falle eines, hier gleichfalls vorliegenden, nichtlinearen funktionellen Ansatzes f ist das totale Differential zur Linearisierung von Gleichung (6) in der Form

$$s_{tot}^2 = \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Big|_{\bar{x}_i} \right)^2 \cdot s_i^2 \quad (7)$$

mittels der jeweiligen partiellen Ableitungen heranzuziehen. Neben der Übertragung des Ansatzes der Toleranzanalyse auf den vorliegenden Fall ist es ebenso in der allgemeinen Messtheorie geläufig, Messfehler, die aufgrund mehrerer Einflussfaktoren entstehen, mittels

Abweichungsfortpflanzungsberechnungen zu bewerten (vgl. [29] und entsprechende Regelwerke [30, 31]). Auch bei der Bestimmung von Standardunsicherheiten eines Messprozesses nach [32] wird die hier beschriebene Fortpflanzung von Messunsicherheiten mathematisch herangezogen, wobei der Fokus auf dem als Sonderfall bezeichneten und hier nicht vorliegendem linearen Fall liegt. Das Messsignal als logarithmiertes Verhältnis der Intensitäten wird hier definiert als funktioneller Ansatz

$$f = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (8)$$

in Bezug auf Gleichungen (1) und (3). Dessen partielle Ableitungen lauten

$$\frac{\partial f}{\partial I_0} = \frac{1}{I_0} \quad \text{und} \quad \frac{\partial f}{\partial I} = -\frac{1}{I}.$$

Nach Gleichung (7) unter Einsatz der Mittelwerte und Standardabweichungen aus Tabelle 1 beträgt die resultierende Gesamtstandardabweichung s_{tot} [-] des Messsignals für das untersuchte Energieniveau $< 25 \text{ keV}$ $s_{\text{tot}} = 0,00061$ und der Gesamtvariationskoeffizient $CV_{\text{tot}} = 0,069 \%$ bei einem Mittelwert [-] von $0,88446$. Unter Anwendung von Gleichung (3) und Einsatz eines bei der Kalibrierung vorab bestimmten μ/ρ wird die Gesamtstreuung in den korrespondierenden Flächengewichtswert $0,00314 \text{ kg/m}^2$ umgerechnet. Für eine Wahrscheinlichkeit von $99,73 \%$ ($\pm 3s$) beträgt das Konfidenzintervall der Messungen $\rho_A = (4,5 \pm 0,00941) \text{ kg/m}^2$. Also führt die Überlagerung der Zählratenschwankungen bei Flächengewichtsmessungen auf dem betrachteten Energieniveau zu einer Schwankungsbreite der Messwerte in der $\pm 3s$ -Spanne von $\pm 9,4 \text{ g/m}^2$ bzw. $\pm 0,208 \%$. Eine Verringerung der Integrationszeit um Faktor 5 auf 600 ms bedingt eine Erhöhung der Schwankungsbreite der Messwerte in der $\pm 3s$ -Spanne auf $\pm 21 \text{ g/m}^2$ bzw. $\pm 0,5 \%$.

3.3 Ansatz zum Eignungsnachweis

Die berechnete Schwankungsbreite wurde auf Basis der Standardabweichung einer Messwertreihe ($n = 30$) an ein und demselben Probekörper bestimmt und entspricht somit nach [33] der Wiederholpräzision des Messsystems mit $\pm 0,2 \%$ bei 3000 ms und $\pm 0,5 \%$ bei 600 ms Integrationszeit³ ($\pm 3s$ -Spanne der Normalverteilung um den Messbereichsmittelwert). Darüber hinaus würde eine Reduzierung der Sicherheit auf beispielsweise noch vertretbare $95,45 \%$ ($\pm 2s$) die Schwankungsbreite auf $\pm 6,3 \text{ g/m}^2$ bzw. $\pm 0,139 \%$ schmälern. Abbildung 3 zeigt für die exemplarischen Messungen die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der resultierenden Normalverteilung der Flächengewichtsmessergebnisse und die Spannweiten bei einer Fehlerquote von $0,27 \%$ bzw. $4,55 \%$ für außerhalb liegende Werte.

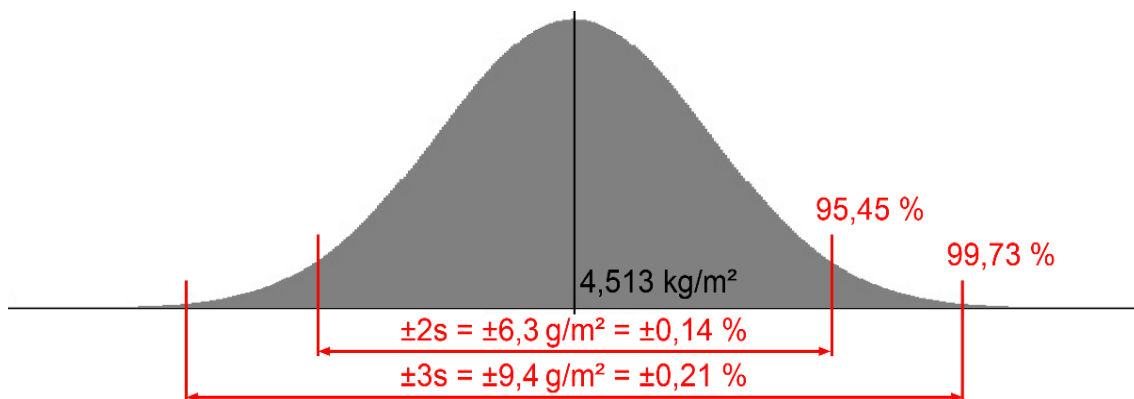


Abbildung 3: Diagramm der resultierenden Normalverteilung der Ergebnisse des Flächengewichts, mit Mittelwert und Spannweiten bei $99,73 \%$ bzw. $95,45 \%$ Vertrauensniveau; Wiederholpräzision des Messsystems mit $\pm 0,21 \%$ bzw. $\pm 0,14 \%$ bei 3000 ms Integrationszeit.

³ Alle folgenden Berechnungen erfolgen auf Basis der Standardabweichung bei 3000 ms Integrationszeit.

Die hier nur scheinbare Auflösung der Messergebnisse im Sinne der Skalenteilung könnte theoretisch ad infinitum durch Erweiterung der Nachkommastellen der angezeigten Flächengewichtswerte gesteigert werden, weil die Werte aus dem Messsignal mittels der hinterlegten Kalibrierfunktion berechnet werden. Dabei handelt es sich aber nicht um die definitionsgemäße Auflösung nach [34] als kleinste Änderung der Messgröße, die zu einer wahrnehmbaren Änderung der Anzeige führt. Die zuverlässige Unterscheidbarkeit zwischen Flächengewichtswerten liegt vielmehr über der durch das Messsystem hervorgerufenen Unsicherheit der angezeigten Größe. Folglich muss die erzielbare Auflösung ein Vielfaches der ermittelten Standardabweichungen mit der korrespondierenden Sicherheit betragen – hierfür wird die erweiterte Messunsicherheit nach [32] auf dem empfohlenen Vertrauensniveau von 95,45 % mit 6,3 g/m² herangezogen. Eine unter diesem Wert angezeigte Flächengewichtsänderung ist zwar technisch wahrnehmbar aber mitunter zufallsbedingt und deshalb nicht als zuverlässig einzuschätzen. Die für den Eignungsnachweis von Messsystemen erforderliche Auflösung des betrachteten Systems muss bei den meisten Verfahren kleiner als 5 % der Merkmalstoleranz sein. Eine folgerichtig abgeleitete minimale Toleranz des zu bestimmenden Flächengewichts von 126 g/m² liegt in einer praxisrelevanten Größenordnung. Diese erste, annahmebasierte Abschätzung der Auflösung des betrachteten Röntgenmesssystems bedarf der experimentellen Verifizierung.

Die Eignung von Messsystemen und -prozessen lässt sich mittels verschiedener Verfahren nachweisen und entsprechender Kennwerte quantifizieren (vgl. [33] z. B. nach [32, 35, 36]), wobei keine einheitliche Vorgehensweise definiert ist. Ein gemeinhin übliches, grundlegendes Procedere besteht jedoch in Form von:

1. Auswahl eines Messsystems mit zu bestimmenden (Streu-)Parametern,
2. Vorgabe von Toleranzen durch Prozess- oder Messgutspezifikationen,
3. Berechnung der Kenngrößen zur Beurteilung der Eignung und Fähigkeit.

Mangels belastbarer Toleranzvorgaben erfolgt hier mittels verschiedener Verfahren eine Klassifizierung des exemplarischen Messsystems nach angepasstem Vorgehen:

1. Anwendung des vorliegenden Messsystems mit gegebenen (Streu-)Parametern,
2. Vorgabe von Grenzwerten der Kenngrößen zur Beurteilung der Eignung und Fähigkeit,
3. Berechnung der min. messtechnisch möglichen Toleranzen von Prozess oder Messgut.

Neben den gewählten toleranzbezogenen Auswertungen können selbige auch in Bezug auf die Prozessstreuung erfolgen. Die Variante nach [32] führt den Fähigkeitsnachweis auf Basis der Erweiterten Messunsicherheit

$$U = k \cdot u_c \quad (9)$$

mit der kombinierten Standardunsicherheit $u_c = s_{\text{tot}}$ (hier) und dem Erweiterungsfaktor $k=2$ (Vertrauensniveau 95,45 %, empfohlen nach [31]), womit forderungsgemäß eine Berücksichtigung der Messunsicherheit an den Spezifikationsgrenzen erfolgt. Zur Beurteilung des Messsystems wird der Eignungskennwert

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U}{T} \cdot 100 \% \quad (10)$$

berechnet, der die zweifache Erweiterte Messunsicherheit zur Toleranz T der untersuchten Spezifikation ins prozentuale Verhältnis setzt und die Bedingung

$$Q_{MS} \leq Q_{MS_{\text{max}}} \quad (11)$$

erfüllen muss. Der Grenzwert $Q_{MS_{\text{max}}} = 15 \%$ wird von [32] für Messsysteme empfohlen, ist jedoch im Einzelfall unter Berücksichtigung der tatsächlichen Einflussfaktoren und in Absprache festzulegen. Durch Umstellen von Gleichung (10) kann unter Einbeziehung von Gleichung (11) zur Klassifizierung des Messsystems die minimal messtechnisch mögliche Toleranz $T_{\text{min-UMS}}$, bei der es gerade noch geeignet ist, berechnet werden und beträgt für den exemplarisch vorliegenden Fall $T_{\text{min-UMS}} \geq 84 \text{ g/m}^2$.

Der Qualitätssicherung vertrauter sind die in Analogie zu den Qualitätsfähigkeitskenngrößen bei der Prozessfähigkeit definierte Messsystemfähigkeit c_g (gage potential index) und kritische Messsystemfähigkeit c_{gk} (gage capability index). Letztere spiegelt die systematische Messabweichung wider und wird hier zunächst nicht weiter betrachtet, da die erforderliche Analyse der Abweichungen vom wahren Wert gesonderter Untersuchungen bedarf. Der Vergleichswert des benötigten Normals bzw. Referenzteils ist aufgrund der Inhomogenität der HWS und der teils bedingten Eignung der gravimetrischen Rohdichtebestimmung selbst fehlerbehaftet und durch die Kalibrierung systematisch beeinflussbar. Es soll vornehmlich c_g als Kennwert der Gerätestreuung und Wiederholpräzision Gegenstand der folgenden Herleitungen sein und entsprechend der vorherigen Betrachtung zur Abschätzung der minimal messtechnisch möglichen Toleranz $T_{\min-cg}$ auf dessen Basis dienen. Zur Bestimmung der Messsystemfähigkeitskenngrößen liegen laut [33] keine einheitlichen Formeln vor, da die Berechnungsvorschriften bei verschiedenen Unternehmen entstanden sind. Adaptiert an die ermittelte Gesamtstandardabweichung s_{tot} erfolgt die Berechnung nach [35] zu

$$c_{g(6s)} = \frac{0,2 \cdot T}{6 \cdot s_{tot}} \quad (12)$$

und nach [36] zu

$$c_{g(4s)} = \frac{0,2 \cdot T}{4 \cdot s_{tot}} \quad (13)$$

jeweils mit 20 % der Merkmalstoleranz T als Bezugsgröße, wobei sich der Streubereich unterscheidet. Bei beiden gewählten Berechnungsvorschriften beträgt der wiederum unternehmensspezifische Grenzwert für die Beurteilung der Eignung $c_g \geq 1,33$. Folglich beträgt nach Gleichung (12) $T_{\min-cg1,33(6s)} \geq 125 \text{ g/m}^2$ und nach Gleichung (13) $T_{\min-cg1,33(4s)} \geq 84 \text{ g/m}^2$, wobei letztere Klassifizierung äquivalent zu Vorgehensweise und Ergebnis anhand der Erweiterten Messunsicherheit ist. Eine für die HWS-Industrie suffizient erscheinende Reduzierung des Fähigkeitsgrenzwertes auf $c_g \geq 1,0$ verkleinert die Toleranzen auf 75 % der berechneten Werte – also $T_{\min-cg1,0(6s)} \geq 94 \text{ g/m}^2$ und $T_{\min-cg1,0(4s)} \geq 62 \text{ g/m}^2$.

4 Schlussbetrachtungen – Anforderungen und Nutzen

Die durchgeführten Berechnungen der minimal messtechnisch möglichen Toleranzen auf Basis der Streuparameter des Messsystems stellen einen ersten Ansatz zum Eignungsnachweis von Röntgenmesssystemen in der HWS-Industrie dar. Künftig bedarf es der Erweiterung der Betrachtungen auf den gesamten Messprozess unter Einbeziehung der betriebspraktischen Einflussfaktoren. Neben den gewählten existieren noch weitere, sinnvoll adaptierbare Verfahrensweisen zur Beurteilung der Messsystem- und -prozesseignung. Da sich die Handlungsempfehlungen, Berechnungsvorschriften und Vergleichswerte nach [32, 35, 36] vornehmlich auf Geometrische Produktspezifikationen (GPS) beziehen und darüber hinaus Branchen entstammen, die weniger schwankungsbehaftete Werkstoffe verarbeiten, sind die Methoden, Kenngrößen und Grenzwerte zur praxisorientierten Verwendung in der HWS-Industrie an die herrschenden Material- und Prozessbedingungen anzupassen.

Obwohl im vorliegenden Beitrag nur Teilaspekte der teils umfangreichen Vorgehensweisen und Verfahren zum Eignungsnachweis von Messprozessen aufgegriffen werden, erlauben die berechneten Kennwerte (T_{\min}) eine erste konkrete Quantifizierung der Messsystemfähigkeit. Eine folgerichtige Gegenüberstellung zur Prozessstreuung und resultierenden Toleranz der Flächengewichtsverteilung bei der Partikelmattenformung ist ausstehend. Anforderungen an diesen Prozess sind lediglich in älteren Quellen [37, 38] mit $CV < 4\%$ zu verzeichnen. Also soll bei exemplarischem $\rho_A = 4,5 \text{ kg/m}^2$ $T < 720 \text{ g/m}^2$ ($\pm 2s$) bzw. $T < 1080 \text{ g/m}^2$ ($\pm 3s$) betragen, während laut [38] Abweichungen von $\pm 4\%$ (hier $T = 180 \text{ g/m}^2$) für die Flächengewichtsquerverteilung zugesichert wurden. Bei unveränderten

Bedingungen mangelt es heute weiterhin an verlässlichen Anforderungswerten. Es liegen lediglich inoffizielle Informationen der Maschinen- und Anlagenhersteller vor, wonach die Genauigkeit der Mattenformung in der Größenordnung

$$\frac{10}{\sqrt{\text{Plattendicke}}} \text{ bis } \frac{14}{\sqrt{\text{Plattendicke}}} \quad [\% \text{ Streugewicht}] \quad (14)$$

liegen soll. Folglich können für eine Platte mit $\rho_A = 4,5 \text{ kg/m}^2$ bei einer realitätsnahen Dicke von 7 mm Schwankungsbreiten $T = 171 - 239 \text{ g/m}^2$ (= 3,8 - 5,3 % Streugewicht, Vertrauensniveau unbekannt) entstehen.

Hinsichtlich des Messprozesses ist die Datenlage ähnlich zu beschreiben. Wenn unter der von [24] für die Spanplattenherstellung geforderten Messgenauigkeit von $\pm 1 \%$ für die berührungslose, kontinuierliche Flächengewichtsbestimmung deren Wiederholgenauigkeit zu verstehen ist, beträgt diese demnach für $\rho_A = 4,5 \text{ kg/m}^2$ $T = 90 \text{ g/m}^2$ (Vertrauensniveau unbekannt). Die Genauigkeit und Auflösung radiometrischer Messgeräte wird von [39] bei $\rho_A = 2,4 \text{ kg/m}^2$ mit $T = 108 \text{ g/m}^2$ (Vertrauensniveau unbekannt) quantifiziert, was für den damaligen Stand der Technik (1993) unter Einsatz von Isotopenstrahlern zweifelhaft erscheint. Neben radiometrischen Messsystemen sind nach wie vor elektromechanische Waagen zur Bestimmung des Flächengewichts der ganzen Platte bzw. Partikelmatte (keine Verteilung) im industriellen Einsatz, die insbesondere wegen ihrer vergleichsweise hohen Leermasse keine Eignung für gewöhnliche Flächengewichtsbereiche aufweisen. Aus den Angaben von [39] lässt sich für $\rho_A = 4,5 \text{ kg/m}^2$ $T = 1177 \text{ g/m}^2$ (Vertrauensniveau unbekannt) ableiten.

Bezogen auf alle aufgeführten, teils besonnen zu hinterfragenden Toleranzen und Prozessstrebereiten ist die Eignung und Fähigkeit des untersuchten Messsystems mittels aller verwendeten Berechnungs- und Grenzwertvarianten nachgewiesen. Derartig optimierte Röntgenmesstechnik ist also in der Lage, zuverlässige Messwerte über bestehende Anforderungen hinaus für die Prozesssteuerung zu liefern. Das Multi-Energy-System kann beispielsweise zur messtechnischen Überwachung der einzelnen Schichten bei der Spanplattenherstellung oder für ein breites, auf einer Produktionslinie gefertigtes Flächengewichtsspektrum spezifisch eingesetzt werden. Folgerichtig müssen die Messdaten in die Anlagenregelkreise implementiert werden, zu deren maschinenbaulicher Umsetzung es aber einer deutlichen Optimierung der eingesetzten Automatisierungstechnik bedarf. Insbesondere für die Spanplattenherstellung, wo viele Anpassungen oft noch handbetrieben mechanisch erfolgen, sind von den Maschinen- und Anlagenherstellern die entsprechenden technischen Voraussetzungen zu schaffen. Für die MDF-Herstellung existieren erste Ansätze beispielsweise in Form des segmentierten Scalpers (vgl. [40]), der die Mattenhöhe und damit das Flächengewicht statt bisher einheitlich über die Mattenbreite in vordefinierten Segmenten regulieren kann. Darüber hinaus ist die Entwicklung fähiger, praxistauglicher gravimetrischer Referenzverfahren zur Bestimmung der Flächengewichtsverteilung erforderlich.

Die je nach HWS-Typ verschiedenen Mattenformmaschinen sind maßgeblich für eine genaue Dosierung und vordefinierte Verteilung der beleimten Holzpartikel auf dem Formband verantwortlich. Prozess- und materialbedingte Schwankungen, die mit Sicherheitszuschlägen oft individuell durch den Anlagenbediener kompensiert werden, lassen effektive Materialeinverluste entstehen. Die zuverlässige Integration fähiger Flächengewichtsmesstechnik bildet die Basis zur Optimierung dieses Prozesses. Folglich sind gleichmäßigere Eigenschaftsausprägungen der HWS-Platte, entsprechend gesteigerte Kundenzufriedenheit sowie generelle Einsparungen bei Rohmaterial- (Holz und Klebharz) und Energieeinsatz realisierbar. Um das Potential fähiger Messtechnik auszuschöpfen bedarf es hinsichtlich der Betriebspraxis der Schulung und Sensibilisierung der Anwender in der HWS-Industrie. Gleichzeitig sollen die vorliegenden Messsystemanalysen zu Qualifizierungsuntersuchungen der Produktionsprozesse anregen, was jedoch bei den Vorreitern der Branche unternehmensintern durchaus bereits praktiziert wird.

Referenzen

- [1] Wijnendaele, K. (Hrsg.) – EPF Annual Report 2013 - 2014. European Panel Federation: Brussels, 2014. 268 Seiten.
- [2] Anon. – Wenig Hoffnung auf Wachstum - Holzwerkstoffhersteller treffen sich in Bordeaux. Holz-Zentralblatt 138 (2012) 29. S. 745.
- [3] Anon. – BASF wants to offset higher resin costs. EUWID Wood Products and Panels (2014) TS28.
- [4] Hasch, J. – Die Holzwerkstoffindustrie zwischen Wirtschaft, Forschung und Behörden In: IHD (Hrsg.) Holzwerkstoffkolloquium. Dresden. 2013. S. 30-34.
- [5] Anon. – Particleboard manufacturing to end in Horn. EUWID Wood Products and Panels (2014) TS39.
- [6] Anon. – Binder closing MDF mill in Hallein at the end of March. EUWID Wood Products and Panels (2014) TS05.
- [7] Anon. – Positive Entwicklung bei Holzwerkstoffen - Jahrestagung des VHI bei Grecon in Alfeld mit positiver Grundstimmung. Holz-Zentralblatt 140 (2014) 30. S. 722.
- [8] Anon. – Holzwerkstoffindustrie erhöht im Juni ihre Verkaufspreise - Preise für Hackschnitzel und Pellets bleiben weiter unter Druck. Holz-Zentralblatt 140 (2014) 31. S. 744.
- [9] Anon. – Siempelkamp und Dieffenbacher haben 2013 zusammen 27 Holzwerkstoffanlagen verkauft. EUWID Holz und Holzwerkstoffe 88 (2014) 12. S. 1, 14.
- [10] Walter, F.; Wiechmann, H. – Dichteuntersuchungen an Faser- und Spanplatten. Holztechnologie 2 (1961) 2. S. 172-178.
- [11] Greten, E. – Der Einsatz der Meß- und Regeltechnik zur Kosteneinsparung in Spanplattenwerken. European Journal of Wood and Wood Products 40 (1982) 10. S. 377-380.
- [12] Kleinschmidt, H.-P.; Hänsch, G. – Gleichmäßiges Spänevlies durch flexiblen Rechen für die Formstation in Verbindung mit einer On-Line-Messung des Querprofils. European Journal of Wood and Wood Products 43 (1985) 10. S. 429-431.
- [13] Solbrig, K.; Fuchs, M.; Frühwald, K.; Ressel, J. B. – Accuracy of the radiometric determination of raw density gradients on wood-based composites. holztechnologie 55 (2014) 6. S. 27-34.
- [14] Anon. – Weight per Unit Area Gauges "MASS-SCAN X" und "MASS-SCAN X Dual Energy" for MDF, Particleboard and others, 2014. Internet: http://www.electronic-wood-systems.com/products/weight_per_unit_area_gauge/Travelling_Area_Weight_System/Weight_per_Unit_Area_Gauges.htm. Abruf am 27.04.2015.
- [15] Fuchs, M. – Neues Kalibrierverfahren an MDF-Matten vor dem Pressvorgang. Holztechnologie 51 (2010) 1. S. 42-45.
- [16] Jackson, D. F.; Hawkes, D. J. – X-ray attenuation coefficients of elements and mixtures. Physics Reports 70 (1981) 3. S. 169-233.
- [17] Hubbell, J. H.; Seltzer, S. M. – Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, 1996. Internet: <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>. Abruf am 17.02.2011.
- [18] Rózsa, S. – Radiometrische Messungen in der Industrie - Grundlagen und Meßmethoden. Franzis: München, 1987. 292 Seiten.
- [19] Ruth, C.; Joseph, P. M. – Estimation of a photon energy spectrum for a computed tomography scanner. Medical Physics 24 (1997) 5. S. 695-702.
- [20] Deresch, A.; Jaenisch, G. R.; Bellon, C.; Warrikhoff, A. – Simulation and Experimental Verification of X-Ray Spectra. In: Thompson, D. O.; Chimenti, D. E. (Hrsg.) Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, volume 29, AIP Conference Proceedings. Kingston (Rhode Island). AIP, 2010. S. 535-540.
- [21] Matscheko, G.; Carlsson, G. A. – Measurement of absolute energy spectra from a clinical CT machine under working conditions using a Compton spectrometer. Physics in Medicine and Biology 34 (1989) 2. S. 209-222.
- [22] Mincong, C.; Hongmei, L.; Ziyu, C.; Ji, S. – An examination of mass thickness measurements with X-ray sources. Applied Radiation and Isotopes 66 (2008) 10. S. 1387-1391.
- [23] Profos, P.; Pfeifer, T. – Handbuch der industriellen Meßtechnik. 6., durchges. und korr. Auflage. Oldenbourg: München, 1994. 1230 Seiten.
- [24] Niemz, P.; Sander, D. (Hrsg.) – Prozeßmeßtechnik in der Holzindustrie. 1. Auflage. Fachbuchverlag: Leipzig, 1990. 288 Seiten.
- [25] Lohmann, U. (Hrsg.) – Holzlexikon. 4. völlig neu bearbeitete Auflage. Nikol Verlag: Hamburg, 2010. 1423 Seiten.
- [26] Mannewitz, F. – Prozeßfähige Tolerierung von Bauteilen und Baugruppen - ein Lösungsansatz zur Optimierung der Werkstattfertigung im Informationsverbund zwischen CAD und CAQ. Diss. Universität Gesamthochschule, Fachgebiet für Leichtbau-Konstruktion, Kassel, 1997. 210 Seiten.

- [27] DIN 7186-1:1974 – Statistische Tolerierung – Teil 1: Begriffe, Anwendungsrichtlinien und Zeichnungsangaben. Beuth Verlag: Berlin, 4 Seiten. - zurückgezogen -
- [28] Solbrig, K.; Riegel, A. – How to consider about swelling and shrinkage explicitly in case of tolerance analysis within wood working. In: Grönlund, A.; Cristóvão, L. (Hrsg.) Proceedings of the 20th International Wood Machining Seminar (IWMS 20). Skellefteå, Sweden. 2011. S. 535-542.
- [29] Profos, P. – Meßfehler - Eine Einführung in die Meßtheorie. Teubner: Stuttgart, 1984. 140 Seiten.
- [30] DIN 1319-4:1999 – Grundlagen der Meßtechnik – Teil 4: Auswertung von Messungen; Meßunsicherheit. Beuth Verlag: Berlin, 36 Seiten.
- [31] DIN EN ISO 14253-2:2011 – Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 2: Anleitung zur Schätzung der Unsicherheit bei GPS-Messungen, bei der Kalibrierung von Messgeräten und bei der Produktprüfung. Beuth Verlag: Berlin, 83 Seiten.
- [32] VDA 5 (Hrsg.) – Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie 5 - Prüfprozesseignung, Eignung von Messsystemen, Eignung von Mess- und Prüfprozessen, erweiterte Messunsicherheit, Konformitätsbewertung. 2., vollst. überarb. Aufl. Auflage. Verband der Automobilindustrie: Berlin, 2010. 168 Seiten.
- [33] Dietrich, E.; Schulze, A. – Eignungsnachweis von Prüfprozessen Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Auflage. Hanser: München, 2007. 337 Seiten.
- [34] Brinkmann, B. – Internationales Wörterbuch der Metrologie grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM); deutsch-englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007. 4., überarbeitete Auflage. Beuth Verlag GmbH: Berlin, 2012. 80 Seiten.
- [35] Robert Bosch GmbH (Hrsg.) – Schriftenreihe Qualitätssicherung in der Bosch-Gruppe Heft 10 - Fähigkeit von Mess- und Prüfprozessen. Stuttgart: 2003.
- [36] Dietrich, E. (Hrsg.) – Leitfaden zum "Fähigkeitsnachweis von Messsystemen" – "Measurement System Capability" Reference Manual. Q-DAS GmbH: Weinheim, 2002. 109 Seiten.
- [37] Autorenkollektiv – Lexikon der Holztechnik. 3., Neubearb. Auflage Auflage. Fachbuchverlag: Leipzig, 1988. 928 Seiten.
- [38] Soiné, H. – Holzwerkstoffe Herstellung und Verarbeitung - Platten, Beschichtungsstoffe, Formteile, Türen, Möbel. DRW-Verlag: Leinfelden-Echterdingen, 1995. 368 Seiten.
- [39] Maloney, T. M. – Modern particleboard & dry-process fiberboard manufacturing. Updated edition Auflage. Miller Freeman: San Francisco, 1993. 688 Seiten.
- [40] Anon. – Dosiert reduziert-Binos neue Scalper-Technologier steuert MDF Flächengewichte. MDF & Co. Magazin 19 (2013) S. 44-45.