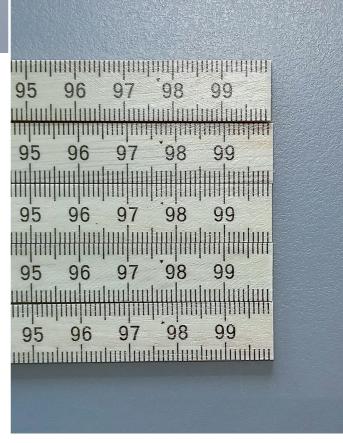


Nachweislich Fahig?!

Qualifikation von Inline-Mess- und Inspektionssystemen in der Holzwerkstoffindustrie



Von Konrad Solbrig, Leiter Technologie Holzwerkstoffe der Electronic Wood Systems (EWS) GmbH, Hameln

ie Electronic Wood Systems (EWS) GmbH, Hameln, entwickelt und fertigt ein umfassendes Programm an Mess- und Inspektionssystemen für den Einsatz in der Holzwerkstoffindustrie sowie Funkenlöschanlagen. Die Technologien der Systeme sind durch die gezielte Auswahl und Anwendung der physikalischen Prinzi-

pien auf die vielfältigen Mess- und Inspektionsaufgaben bei MDF & Co. individuell zugeschnitten. Für den Nachweis der jeweiligen Leistungsmerkmale werden nachvollziehbare und praxistaugliche Methoden benötigt, deren Entwicklung sich **Konrad Solbrig (Leiter Tech**nologie Holzwerkstoffe bei EWS) verschrieben hat. Die Inhalte seines für das abgesagte EPF-Symposium 2020 geplanten Vortrages bilden die Grundlage für den nachfolgenden Artikel. Manche Aspekte mögen hier naheliegend erscheinen, führen in der Praxis aber häufig zu Missverständnissen, denn der Teufel steckt bekanntlich im Detail. Deshalb möchte der Autor sowohl zur Klärung beitragen als auch zur branchenweiten Diskussion anregen.

In der Holzwerkstoffindustrie – und nicht nur hier – streben Maschinen- und Anlagenbauer nach höchster Leistung und Präzision, ob auf Basis innovativer Technologien oder auch wagemutiger Zusagen, sei dahingestellt. Die gestiegenen Anforderungen

der Plattenhersteller sowie von deren Kunden in der Möbelproduktion und anderen Bereichen werden gleichfalls an die Messtechnikhersteller weitergegeben. Aber wie werden diese Anforderungen und Leistungsparameter der Systeme definiert und wie wird deren Einhaltung nachgewiesen?

Prozessqualifikation: Nachholbedarf in der Holzbranche

In anderen Branchen wie der Automobilindustrie sind im Prozessmanagement statisti-



Abb. 1: Selbst vergleichbare Messmittel liefern keine identischen Ergebnisse – variierende Längen von handelsüblichen Gliedermaßstäben der Genauigkeitsklasse III mit +/- 1 mm zulässiger Abweichung auf 1 m (Fotos, Charts: EWS)

Figure 1: Even comparable measuring devices do not provide identical results – varying lengths of customary metersticks with +/- 1 mm tolerance acc. to the accuracy class

sche Methoden zur Fähigkeits- und Leistungsanalyse gängige Praxis und in internationalen branchenübergreifenden Richtlinien und Standards (VDA, VDMA, VDI, DIN/ISO) definiert. Insbesondere die überarbeitete Reihe der ISO 22514 wird als breit akzeptierte Norm für die statistischen Analysemethoden erachtet. Einschlägige Fachliteratur (z. B. Dietrich & Schulze (2014)) liefert Grundlagen und Beispiele für die Umsetzung. Die Methoden finden Anwendung bei der Abnahme von Maschinen und Fertigungseinrichtung, der Prozessqualifikation und der kontinuierlichen Prozessüberwachung.

In der Holz- und Möbelindustrie findet diese Art der Prozessqualifikation auf Basis vorher genannter allgemein etablierter Methoden kaum Anwendung, wozu Kortüm & Riegel (2017) mögliche Gründe aufführen, beispielsweise die Schwierigkeit bei der Überwachung geometrischer Toleranzen im Zusammenhang mit Quellen und Schwinden (vgl. Riegel &Solbrig (2010)), breit gefächerte Qualitätsmerkmale, teils keine Richtlinien für Prüfmethoden, ein Mangel an wissenschaftlicher und statistischer Kompetenz sowie die Einschätzung von Aufwand und Kosten von statistisch abgesicherten Unter-

suchungen als zu hoch im Vergleich zum Nutzen. In der Holzwerkstoffindustrie sind unveröffentlichten Quellen zufolge statistische Analysemethoden nicht mehr unbekannt und kommen in einzelnen Unternehmen(sgruppen) zum Einsatz - jedoch mit individuell verschiedener und über die gesamte Branche höchst heterogener Ausprägung (wenn überhaupt und erst recht weltweit). Trotz alledem bilden Fähigkeitsuntersuchungen zur Qualifikation von Maschinen und Prozessen eine wichtige Basis für die statistische Prozessregelung (SPC) und sollten generell bei neuen Fertigungslinien in der Großserienproduktion auch für Maschinenabnahmen herangezogen werden. Sowohl Prozessanalysen und Abnahmen als auch SPC erfolgen in der Holzwerkstoffindustrie vornehmlich auf Basis von Laborergebnissen mit vergleichsweise kleinen Stichprobenumfängen, wobei die Werte in Abhängigkeit des Prüfverfahrens teils erheblich verzögert vorliegen und es für die Prozesssteuerung eines validen Modells bedarf. Abgesehen von einfachen Sensordaten entlang der Linie und Feuchtemesswerten, werden die Daten der an Matte und Platte messenden Systeme weder für SPC (Modellierung) noch für Prozess-

qualifikationen und Abnahmen herangezogen.

Messtechnik zunehmend integriert, aber nicht umfassend genutzt

Inline-Mess- und Inspektionssysteme von der Flächengewichtsmessung und Fremdkörpererkennung über Plattendicken und -rohdichtemessung bis hin zur Spaltererkennung dienen in der Holzwerkstoffindustrie (bisher) vornehmlich der Anzeige und Visualisierung der jeweiligen Messgrößen und Ergebnisse – sind dennoch bei der Prozessüberwachung nicht mehr wegzudenken. Sie erfahren heute zunehmende Einbindung in die Prozessautomatisierung unter Nutzung der über Schnittstellen (z.B. OPC) bereitgestellten Daten und dienen der Qualitätssicherung. Die EWS Dickenmessanlage ist als "Sico Scan-System" (Abb. 3, S.56) über die Dickenrückführung bereits fest integrierter Istwertgeber in der Siempelkamp-Pressensteuerung. Aber auch die Messung weiterer Prozessparameter wie Flächengewichtsverteilung mittels traversierender Röntgensysteme wie "Mass-Scan X ME" (Abb. 5) oder "Eco Scan FLY" (Abb. 6) erfahren zunehmende Integration in die Regelkreise der Formstraßen, um direkt die gewünschte Matte zu streuen ohne spätere Eingriffe. Inspektionssysteme wie Fremdkörperscanner "Eco Scan FBD" an der Matte (Abb. 7, S. 60) und Spaltererkennung "Blow-Scan" an der Platte (Abb. 8) können einfach unter Nutzung von Digitalsignalen in die Automatisierung zur Ausschleusung des unerwünschten Materials eingebunden werden. Die Darstellung der Daten als Trend in der Messsystem-Visualisierung oder anderweitig mit Anzeige von Toleranzen (meist zwei Level als Warn-, Eingriffs- oder Spezifikationsgrenzen) zur Prozessüberwachung kommt der im Qualitätswesen bekannten Regelkartentechnik nah und erlaubt bei Grenzwertverletzung eine manuelle oder automatisierte Reaktion (= Materialausschleusung). Über die Automatisierung und Grenzwertbetrachtung hinaus erfolgt die Nutzung der visualisierten Messdaten zur manuellen Beeinflussung des Herstellungsprozesses nach Ermessen und Vermögen des Personals.

Im Vergleich zur Prozessregelung und Qualitätssicherung aber auch Abnahme auf Basis von Labordaten liefern die Inline-Mess- und Inspektionssysteme zwar (noch) keine direkte Aussage zu den normativ oder vertraglich geforderten Platteneigenschaften,

Effiziente Technologie

Efficient Technology



Abb. 5: Traversierendes Flächengewichtsmesssystem "Mass-Scan X ME" erfordert besondere Maßnahmen für den Fähigkeitsnachweis hinsichtlich Messgut und Prozessbedingungen

Figure 5: Traversing area weight gauge "Mass-Scan X ME" requires special actions for the capability analysis considering material and process conditions

bieten aber ein weitaus umfassenderes Prozessabbild und das in Echtzeit ohne Verzögerung. Es ist weiterhin festzustellen, dass die Ergebnisse der Systeme oft unbegründet in Frage gestellt, andererseits aber auch in ihrer Aussagekraft überschätzt werden, was in beiden Fällen mit der persönlichen Einschätzung zur dahinterstehenden Physik und Datenauswertung zusammenhängen kann. Sobald die Anlagen in Betrieb genommen wurden, hängt das Vertrauen der Anwender in die Richtigkeit der Messwerte meist von der angenommenen Zuverlässigkeit der Systeme oder der subjektiven Alltagserfahrung (häufig vermeintlich negativ) ab und basiert selten auf klar definierten Analysen.

Messsysteme und -prozesse -Grundlagen der Bewertung

Die Analyse von Messeinrichtungen ist wichtig für den Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher Herkunft, wie das einfache Beispiel in Abb. 1 verdeutlicht. Gleiches gilt für die Einschätzung der Eignung des gewählten Systems zur Überwachung des jeweiligen Qualitätsmerkmals (Toleranz) und damit zur Bewertung der Fähigkeit für die Erfüllung der Messund Inspektionsaufgabe. Die Qualifikation von Mess- und Prüfmitteln anhand der Bewertung ihrer Genauigkeit im Vergleich zur geforderten Toleranz des Prozesses oder Merkmals ist wiederum eine wichtige Voraussetzung für die Prozessqualifikation. Auch dafür existieren allgemein bekannte statistische Methoden (vgl. VDA 5 und ISO 22514-7:2012), deren Anwendung auf Inline-Messund Inspektionssysteme in der Holzwerkstoffindustrie jedoch nicht trivial und damit keinesfalls in der Branche etabliert ist. Bei den Holzwerkstoffherstellern erfolgt allenfalls eine Qualifikation der erforderlichen Laborgeräte im Rahmen des Qualitätsmanagements und für den zuverlässigen Konformitätsnachweis – zumindest iedoch eine Prüfmittelüberwachung.

Der grundlegende Ansatz für die Analyse von Messsystemen und -prozessen im Sinne eines Fähigkeitsnachweises ist die Auswertung des Verhältnisses zwischen Messunsicherheit und Variationsbreite (Toleranz) des zu messenden Merkmals (Abb. 2, S. 58). Durch Wiederholmessungen (typisch 50, mindestens 25, vgl. Dietrich & Conrad (2015)) an einem Referenzobjekt oder Normal werden Mittelwert und Standardabweichung des Messmittels bestimmt. Daraus wird beispielsweise der Messmittelfähigkeitsindex (gauge capability index)

$$c_{\rm g} = \frac{n\% \cdot T}{2 \cdot u \cdot s_{\rm g}}$$

als bisher gebräuchliche Kenngröße berechnet, die ein Vielfaches der Messmittelstandardabweichung s_g (Quantile der Normalverteilung) als Bruchteil der prozentualen Prozess- oder Merkmalstoleranz T beinhaltet. Heute gewinnen die Qualitätsindizes Q nach ISO 22514-7:2012 an Bedeutung, wenngleich der Berechnungsansatz ähnlich ist. Demnach wird die Kennzahl Q_{MS} für die Fähigkeit des Messsystems (MS) anhand $Q_{\rm MS} = \frac{2 \cdot U_{\rm MS}}{T} \cdot 100 \, [\%]$

$$Q_{\rm MS} = \frac{2 \cdot U_{\rm MS}}{T} \cdot 100 \, [\%]$$

mit der Prozess- oder Merkmalstoleranz T und der erweiterten Unsicherheit des Messsystems

$$U_{\rm MS} = k \cdot u_{\rm MS}$$

als ein Vielfaches der kombi-

Abb. 3: "Sico Scan"-Systeme ausgestattet mit EWS-Technologie für Dickenmessung, Spaltererkennung und berührungslose Plattenwage

Figure 3: SicoScan panel evaluation systems powered by EWS technology with thickness gauge, blow detection, and non-contact panel

nach der Diagonalsägeneinheit von Siempelkamp

scale downstream of Siempelkamp's diagonal saw section

nierten Standardunsicherheit u_{MS} berechnet, wobei k das gewünschte Vertrauensniveau repräsentiert mit

-
$$k = 1 \triangleq 68,27 \%$$
,

-
$$k = 2 \triangleq 95,45 \%$$
 und

$$k = 3 \triangleq 99,73 \%.$$

Sofern die Messunsicherheit u_{MS} nicht direkt, z.B. anhand der oben genannten Wiederholmessungen, bestimmt werden kann, ist deren Schätzung auch durch

$$u_{\rm MS} = \sqrt{\sum u_{{\rm MS}_i}^2}$$
 als Summe der in einer vo-

rausgehenden Analyse ermittelten Einzelstandardunsicherheiten u_{MS_i} möglich, die die Messanwendung beeinflussen und deren Überlagerung dem Abweichungsfortpflanzungsgesetz folgend die Gesamtvarianz aus der Summe der Einzelvarianzen ergibt. Das gleiche Vorgehen findet bei der Ermittlung der Kennzahl Q_{MP} für die Fähigkeit des Messprozesses (MP) Anwendung anhand

$$Q_{\mathrm{MP}} = \frac{2 \cdot U_{\mathrm{MP}}}{T} \cdot 100 \, [\%],$$
 wobei weitere Einflusspara-

meter des Messprozesses berücksichtigt werden, die typischerweise zu einer Vergrö-Berung der Unsicherheit UMP führen. Eine Untersuchung

Figure 6: Traversing area weight gauge "Eco Scan FLY" with equivalently high relative measuring sensitivity along a wide area weight range via appropriate X-ray energy selection (MultiEnergy technology)



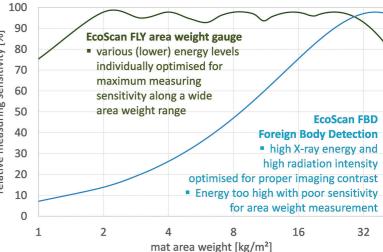


Abb. 6: Traversierendes Flächengewichtsmesssystem "Eco Scan FLY" mit gleichbleibend hoher relativer Empfindlichkeit

der Fähigkeit von Messsystem und -prozess auf Basis statistischer Methoden betrachtet die mögliche Beeinflussung des Messergebnisses durch systematische und zufällige Faktoren. Die zugrunde liegende analytische Vorgehensweise liefert gleichzeitig Ansätze zur Optimierung hinsichtlich Eliminierung der systematischen und Minimierung der zufälligen Einflüsse. Zur abschließenden Qualifikation des Messsystems bzw. -prozesses werden die berechneten Kennzahlen vordefinierten Grenzwerten gegenübergestellt. Durch Umstellung der Gleichungen kann bei festgelegten Qualitätsindizes aber auch die minimal messtechnisch überwachbare Toleranz berechnet und damit die Eignung von Messsystemen für mögliche Anwendungen evaluiert werden. Während in der allgemeinen Praxis sowohl ISO 22514-7:2012 als auch andere Standards (z. B. VDA 5) einen Grenzwert von $Q_{MS} \le 15\%$ empfehlen, erscheint für Anwendungen in der Holzbeund -verarbeitung $O_{MS} \leq$ 20% als zureichend für die Bewertung der Fähigkeit des Messsystems. Für den Messprozess steigt der Grenzwert

- z. B. auf Q_{MS} ≤ 30 % gemäß ISO 22514-7:2012 – generell und sollte für Messprozesse an Holz und Holzwerkstoffen weiter vergrößert werden, entsprechend der jeweils zusätzlich wirkenden Einflussfaktoren. Für weitere Details und ausführliche Grundlagen sei an dieser Stelle auf ISO 22514-7:2012 und einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Im Vorfeld dieser Berechnungen ist die Auflösung des Messsystems zu prüfen. Dabei handelt es sich definitionsgemäß (DIN 1319-1:1995) um eine Angabe zu einem Messgerät, über dessen Vermögen, zwischen zwei nah beieinanderliegenden Messwerten eindeutig zu unterscheiden. Dies mag bei manchen Messmitteln der Skalenteilung entsprechenden, meint jedoch insbesondere bei Systemen mit komplexerer Auswertung nur die eindeutig unterscheidbare Änderung der Messgröße. Die Auflösung ist also nicht alles und sagt noch lange nichts über die Messgenauigkeit aus. Oft wird in der Holz- und Möbelindustrie ausschließlich anhand der Auflösung - zudem meist fälschlicherweise mit der Skalenteilung gleichgesetzt - im Vergleich zur Toleranz des zu messenden Merkmals bewertet und untereinander verglichen, welche Messsysteme für bestimmte Aufgaben eingesetzt werden können. Das führt in der Praxis zu Fehlinterpretationen und meist Überschätzung der Systeme, da bei digitalen Anzeigen die Skalenteilung und damit die vermeintliche Auflösung ad absurdum getrieben werden kann. Bei Inline-Mess- und Inspektionssystemen bedarf es weiterhin der Unterscheidung zwischen geometrischer Auflösung (und dabei der Differenzierung der Werte quer und längs zur Produktionsrichtung) und Erkennungs- bzw. Messwertauflösung (d. h. Signal- oder Bildkontrast).

Bewertung von Inline-Messund Inspektionssystemen in der Holzwerkstoffproduktion

Die geringe Verbreitung und Anwendung statistischer Methoden zur Qualifikation von Fertigungsprozessen sowie Messsystemen in der Holzund Möbelindustrie wurde bereits erwähnt, wobei die Gründe meist auf die Besonderheiten sowohl des Materials (Holz) als auch der jeweiligen Prozesse zurückzuführen ist. Erste Ansätze liefern Riegel, Kortüm, Solbrig (2015) für die Prozessqualifikation in der Holzindustrie, Solbrig, Fuchs, Frühwald, Ressel (2015) für die Analyse von Inline-Röntgenmesstechnik in der Holzwerkstoffindustrie oder Ullrich (2018) am Beispiel der Küchenmöbelindustrie. Die zurzeit im FA102 Holzbe- und -verarbeitung des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) erarbeitete Richtlinie VDI 3415-2 soll entsprechende Handlungsempfehlungen insbesondere für Maschinenabnahmen liefern. Die Fähigkeitsanalyse von In-

line-Mess- und Inspektionssystemen in der Holzwerkstoffproduktion unterliegt vielfältigen Besonderheiten im Vergleich zu den Prozessen anderen Industrien. Neben Materialparametern, veränderlichen Eigenschaften insbesondere der frischen Platten nach der Probenahme (z.B. Dickenschrumpfung) und Prozessbedingungen an der jeweiligen Position ist es auch die Problematik der inline in den Fertigungsprozess integrierten Systeme selbst, die entsprechende Anpassungen der Vorgehensweisen erfordert. Abgesehen von Endmaßen bei der Dickenmessung existieren keine Prüfnormale oder definierte Referenzkörper, die zudem nicht ohne Weiteres in den Prozess eingebracht werden könnten. Die Probenahme für Referenzmessungen ist meist nicht trivial wegen der Größe ganzer Platten sowie der Geschwindigkeit und Zugänglichkeit in der Fertigungslinie (hier jedoch Ausschleusung von Laborschnitten möglich) bzw. dem losen Zustand des Messgutes in der Formstraße (hier keine definierte Ausschleusung eines Mattenabschnitts möglich). Für die jeweiligen (offline) Referenzmessungen an entnommenen Proben existieren keine einheitlichen Festlegungen hinsichtlich Messmittel, Durchführung, Anzahl Probekörper bzw. Wiederholungen, statistischer Auswertung und Vergleichstoleranzen. Der Stand der Technik bei der Überprüfung von Mess- und Inspektionssystemen in der Holzwerkstoffindustrie ist offensichtlich vielschichtig. Es existiert in der Praxis eine große Spanne von gänzlicher Vernachlässigung der Systeme über gelegentliche Kontrollen auf Basis einzelner Vergleichsmessungen bis hin zum mitunter auch vorzufindenden Fall* der umfassenden Einbindung ins Prüfmittelmanagement des QM-Systems, in die Prozessqualifikation und SPC.

Komplexe Analytik, diverse Einflussfaktoren

Aufgrund der heterogenen Ausgangssituation und bisherigen Nichtberücksichtigung in Normen und Richtlinien sind einheitliche Vorgehensweisen für alle Beteiligten vom Messsystemhersteller über den Maschinen- und Anlagenbauer bis hin zum Holzwerkstoffproduzenten oder Endverarbeiter erforderlich und hilfreich. Der Fähigkeitsnachweis zur Qualifikation und Abnahme der Systeme sollte unter Anwendung etablierter statistischer Methoden mit individueller Auswahl und Anpassung dieser an die jeweilige Mess- und Prüfaufgabe unter besonderer Berücksichtigung der Pro-

sichtigung finden. Diese statistische Toleranzrechnung unter Anwendung des Abweichungsfortpflanzungsgesetzes erfordert wiederum genaue Kenntnisse über die Verteilungen der betrachteten Parameter. Liegen diese nicht vor, sind empirische Abschätzungen möglich, wobei hinsichtlich unbekannter Verteilungsformen eher Gleichverteilungen als Normalverteilungen anzunehmen sind, um die Toleranzen nicht unnötig einzuengen.

Bei der Analyse ist weiterhin

chengewicht von Platte und Matte. Aber auch die Prüfoder Inspektionsverfahren wie Fremdkörpererkennung in der Matte oder Spaltererkennung in der Platte sind so zu behandeln, wobei es sich jedoch guasi um Systeme zur Bestimmung attributiver Merkmale handelt, die zwar auf Basis von Messsignalen (Röntgenstrahlungsintensität bzw. Ultraschallamplitude) beruhen, aber durch Auswertung der relativierten Signale und den Vergleich mit Schwellwerten meist zu

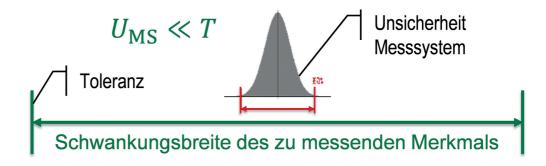


Abb. 2: Bewertung der Fähigkeit eines Messsystems Qms bzw. Messprozesses Qmp anhand des Verhältnisses von Messunsicherheit zur Merkmalstoleranz Figure 2: Capability analysis of a measuring system or process (with the indices Qms or Qmp) by means of the ratio of measuring uncertainty and tolerance of the property to be measured

zessbedingungen erfolgen. Wenn Prüfnormale fehlen oder im Prozess nicht zum Einsatz kommen können, wird die Bewertung der Mess- und Inspektionssysteme vornehmlich auf Basis von Referenzmessungen mit einem weiteren Verfahren an entnommenen Stichproben stattfinden. Dementsprechend bedarf es der individuellen Festlegung von erzielbaren Vergleichstoleranzen auf Basis von expliziten Berechnungen anhand der gewichteten Summierung der zuvor ermittelten Messunsicherheiten von Inline-System und Labor-Referenz. Dabei sollten auch weitere Einflussfaktoren wie Toleranz der Lage der Messpunkte oder veränderlicher Materialeigenschaften statistische Berück-

zwischen dem Inline-System selbst und dessen Einsatz im Prozess zu unterscheiden und mit separatem Vorgehen Sorge zu tragen. Ein als fähig qualifiziertes Mess- bzw. Inspektionssystem liefert nicht automatisch valide Ergebnisse beim regulären Einsatz im Prozess. Dies erfolgt, wie oben bei den Grundlagen verdeutlicht, durch aufeinander aufbauende Betrachtungen der Qualifikation von Messsystem mit Q_{MS} und Messprozess mit OMP unter Anwendung der jeweiligen Unsicherheiten U_{MS} bzw. U_{MP}. Dies gilt für die Messung variabler Merkmale also für mit physikalischen Einheiten messbare Größen wie Plattendicke, Feuchtegehalt des Ausgangsmaterials (roh oder beleimt) oder Flädichotomen (gut/schlecht) oder mehrstufigen attributiven Merkmalen (unter/zwischen/über den Grenzwerten) werden. Dabei hängt das Ergebnis zwar grundlegend von der Fähigkeit der installierten Systeme ab, wird aber schließlich durch die gewählten Betriebsparameter sowie der vorgegebenen Art und Geometrie der zu erkennenden Fremdkörper bzw. Spalter massiv beeinflusst.

Beispiele für die praxisgerechte Durchführung von Analysen

Sowohl für variable als auch attributive Material- und Prozessparameter sollen im Folgenden Beispiele für die praxisgerechte Durchführung der Qualifikation von Inline-

^{*}Dieser Fall ist zugegebenermaßen frei erfunden, der Autor hofft aber, dass es ihn gibt und freut sich über entsprechende Rückmeldung und ggf. sogar Korrektur der empirischen Einschätzung

Mess- und Inspektionssystemen in der Holzwerkstoffindustrie aufgeführt werden, die zugleich als Vorschläge für einheitliche Methoden in der Branche dienen sollen. Deshalb steht hier die generelle Kurzbeschreibung der jeweiligen Procedere mit Ansatz und praktischen Herausforderungen im Vordergrund. Statistische Details werden an anderer Stelle geregelt. Auf Kennwerte der exemplarischen Systeme und Zahlenbeispiele wird verzichtet, da diese anwendungsspezifisch

zu berechnen sind. Als erstes und einfaches Beispiel für variable Merkmale wird die Messung der Plattendicke nach der Heißpresse oder in der Schleifstraße betrachtet, die tastend (Rollen, Abb. 3) oder berührungslos (Laser, vornehmlich für Dämmstoffe) an verschiedenen Positionen über die Breite der Platte meist in Spuren entlang der Transportrichtung erfolgt. Dabei ähneln sowohl die Messgröße als auch Qualifizierungsmethoden noch recht gut der allgemeinen

Praxis bei vergleichbaren Prozessen in anderen Branchen.

Die Auflösung wird durch die interne Wegmesseinrichtung bestimmt (gemäß Datenblatt des Herstellers) – unabhängig davon, wie viele Nachkommastellen in der Messdatenvisualisierung anzeigt werden. Bei der Qualifikation des Messsystems wird zwischen statischer Eigengenauigkeit *Q*_{MS} und dynamischer Messgenauigkeit unter Prozessbedingungen *Q*_{MP} unterschieden. Zur Ei-

gengenauigkeit können generelle Angaben in technischen Daten des Systems gemacht werden. Die Analyse erfolgt durch Wiederholmessungen an Keramikendmaßen verschiedener Dicken zur Bestimmung von U_{MS} mit gleichzeitiger Ermittlung der Linearität über den spezifizierten Messbereich (Abb. 4). Das Verfahren kann als Endkontrolle vor Auslieferung beim Hersteller und bei Inbetriebnahme sowie für die Abnahme des Messsystems in der Produktionslinie beim Kunden dienen, wozu ein Stillstand und entsprechender Zugang erforderlich ist. Allgemeine Angaben zur Fähig des Dickenmesssystems im Prozess sind nur bedingt möglich, da die aus den wirkenden Einflussfaktoren resultierende Unsicherheit UMP individuell größer ist. Zudem können systematische Abweichungen im Prozess auftreten, die nicht dem Messsystem zuzuschreiben sind. worauf aber nach erfolgter Analyse durch bauliche oder andere Maßnahmen (z. B. Offset) zu reagieren ist, um valide Messwerte zu erzielen. Die Bestimmung der Messgenauigkeit unter Prozessbedingungen erfolgt durch die Entnahme von Laborschnitten und spurgleiche Vergleichsmessung mit geeignetem Handmessmittel (z. B. Bügelmessschraube mit definiertem Andruck in Anlehnung an EN 325, aber separater Fähigkeitsnachweis erforderlich). Für diese Referenzmessung wird eine hinreichend große Anzahl von



Abb. 4: Analyse der statischen Eigengenauigkeit eines Dickenmesssystems durch Wiederholmessungen an Keramikendmaßen Figure 4: Analysis (static) of the intrinsic accuracy and precision of a thickness measuring system by means of repeat measurements on ceramic gauge blocks

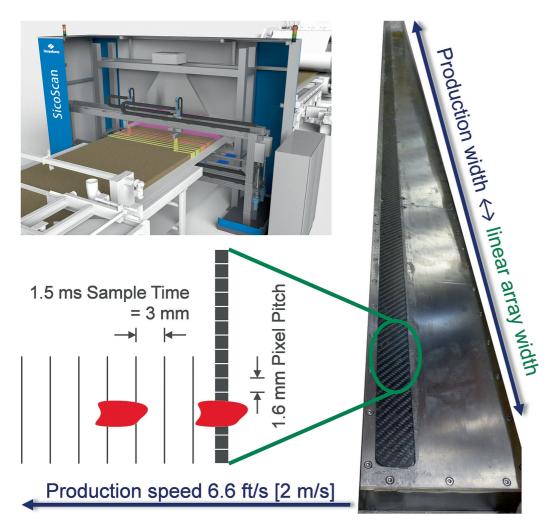


Abb. 7: Röntgenscanner "Eco Scan FBD" zur Fremdkörpererkennung in der Matte mit geometrischer Auflösung quer und längs in Abhängigkeit von Detektor- und Prozessparametern

Figure 7: X-ray foreign body detection system "Eco Scan FBD" with spatial resolution values along and across the mat depending on detector and process parameters

mindestens n = 5 aufeinanderfolgenden Laborplatten mit je zwei Messungen an Vorder- und Hinterkante analog zu den Spurpositionen des Inline-Dickenmesssystems empfohlen. Die Daten des Inline-Systems werden entsprechend zwischen erstem und letztem Laborschnitt ausgewertet. Beim Vergleich der Spurmittelwerte von Inline- und Handmessung sowie der Toleranzberechnung ist neben allen methodischen Faktoren insbesondere die aus der zeitlichen Differenz resultierende Dickenschrumpfung zu berücksich-

tigen. Vereinbarungsgemäß müssen dann beispielsweise 95 % der Werte innerhalb der vordefinierten Vergleichstoleranz liegen. Weitere statistische Vergleichstests sind auch für die Praxis denkbar. Dieses Verfahren dient vornehmlich der laufenden Überprüfung der Messwerte im Betrieb ohne besondere Anforderungen an selbigen.

Flächengewichtsmessung im Fokus

Ein weiteres messbares (variables) Merkmal ist das Flächengewicht und dessen Ver-

teilung in der Matte bzw. in der Platte, wobei für letztere in Kombination mit den spurgleichen Dickenmesswerten oft auch die Rohdichte berechnet und ausgegeben wird. Zur Qualifikation der Messsysteme für diese im Holzwerkstoffprozess wichtigen Größen bedürfen die allgemeinen Methoden jedoch spezifischer Anpassungen. Bei der traversierenden Flächengewichtsmessung in der Formstraße (Abb. 5) steht die Messwertauflösung im Vordergrund, die die technologische Basis für die Genauigkeit der Messanlage im Sinne

der zuverlässig wahrnehmbaren Unterscheidung geringer Flächengewichtsänderungen über eine breite Anwendungsspanne darstellt. Nach Solbrig, Fuchs, Frühwald, Ressel (2015) wird diese Messwertauflösung rechnerisch durch die Überlagerung der statistischen Schwankungen von Leer- und Materialmessung bestimmt, was wiederum von der Integrationszeit der Sensorik abhängig ist. Zur röntgentechnischen Realisierung und Erzielung einer gleichbleibend hohen relativen Empfindlichkeit des Messsystems durch Wahl passender Röntgenenergien ("Multi Energy Technologie", Abb. 6) wurde schon anderweitig umfassend berichtet. Weiterhin kann anhand von Q_{MS} auf Basis der kombinierten Standardunsicherheit U_{MS} die minimal messtechnisch mögliche Toleranz T des betrachteten Merkmals oder Prozesses abgeschätzt werden. Gleiches gilt für die Flächengewichts- und Rohdichtemessung an der Platte nach der Mehrfachdiagonalsäge, wobei hier jedoch neben der Messwertauflösung die Größe des Sensors je Spur quasi der geometrischen Auflösung entspricht und deren Anzahl die Abdeckung der Platte bestimmt.

Plattenwaage

Die Analyse der kontinuierlichen Röntgenplattenwaage "Conti-Scale X" (Abb. 3) erfolgt sowohl für die Abnahme als auch regelmäßige Überwachung durch Ausschleusung ganzer Platten (mit Stichprobenumfang n festzulegen in Abhängigkeit der Prozessstabilität) nach der Inline-Messung, die spurgleiche Entnahme von Probekörpern (100 mm entsprechend Detektorbreite x Plattenlänge) und anschließende gravimetrische Flächengewichts- bzw. Rohdichtebestimmung mit nachweislich fähigen Verfahren im Labor. Die statistisch zu berechnende Vergleichstoleranz entspricht der Gesamtunsicherheit hier unter Berücksichtigung der Unsicherheiten von Inline-Messprozess *U*_{MP} und Labor-Referenz sowie Toleranzen bei der Probenahme und Feuchteänderungen zwischen den jeweiligen Messungen.

Traversierende Flächengewichtsmessung

Bei der traversierenden Flächengewichtsmessung in der Formstraße (Abb.5, Abb. 6) gestaltet sich die positionstreue Materialentnahme aus dem Prozess ungleich schwieriger - sie ist an einer gestreuten und ggf. vorverdichteten Matte praktisch unmöglich. Deshalb müssen hier für die Analyse entweder entsprechende Referenzmuster bei Stillstand in den Prozess für Vergleichsmessungen eingebracht oder während der Produktion die Messergebnisse an der Matte durch Probenahme an der Platte mit Nachverfolgung der Messwerte und Berücksichtigung von deren Veränderung im Prozess evaluiert werden. Für die direkte Gegenüberstellung der Messwerte an eingebrachten Referenzmustern ist bezüglich der gravimetrischen Messungen ein hinreichend festes Material zu wählen, das wiederum hinsichtlich der Röntgenmessungen eine ähnliche Zusammensetzung und Struktur (Verdichtung) wie das eigentliche Messgut aufweist, weil von Solbrig (2019) entsprechende Abhängigkeiten der Röntgenmessergerbnisse nachgewiesen wurden. Demnach können sich beispielsweise die Flächengewichtsmessergebnisse zwischen einer Platte und der äquivalen-

ten Matte um bis zu 14% unterscheiden, da die Kalibrierung des Systems nur für die Messung an der Platte oder der vorverdichteten Matte gültig sein kann. In der Praxis haben sich deshalb insbesondere für MDF aber auch Spanplatte und OSB Streifen aus Holzfaserdämmstoffen als Referenzmuster bewährt, die auf das stehende Formband gelegt und woraus nach der traversierenden Röntgenmessung problemlos Probekörper entsprechend des Messrasters für die gravimetrischen Referenzmessungen im Labor geschnitten werden können. Dieses Vorgehen erfordert jedoch einen Stillstand mit leerem Formband, weshalb die eher aufwändige Variante vornehmlich der einmaligen Durchführung im Rahmen der Abnahme vorbehalten ist. Für die regelmäßige Analyse des an der Matte traversierenden Flächenge-

wichtsmesssystems während der Produktion hat sich die gezielte Entnahme von Laborschnitten unter Beachtung einiger Rahmenbedingungen bewährt. Die Methode bietet einen qualitativen Vergleich des relativen Querprofils und erlaubt bei hinreichender Kenntnis der Feuchteverteilung in Matte und Platte sowie der Mattenquerdehnung in der Heißpresse eine Gegenüberstellung der absoluten Flächengewichtsmessergebnisse in gewissen Grenzen. Dabei ist jedoch der Versuch zur Entnahme eines Laborschnittes in Übereinstimmung mit dem Mattenbereich der Traversierung in Produktionsrichtung nicht zielführend, da dieser trotz genauer Nachverfolgung meist gar nicht exakt getroffen werden kann oder im Zweifelsfall innerhalb einer aufwändig auszuschleusenden ganzen Platte liegt und

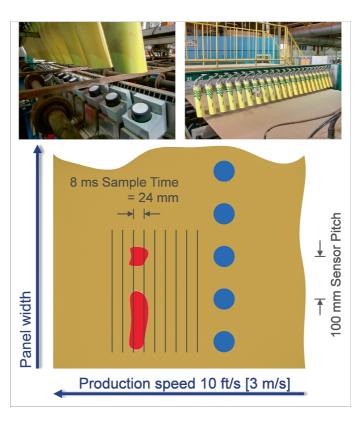


Abb. 8: Spaltererkennung "Blow-Scan" mit exemplarischer Konfiguration für 150 x 50 mm² sicher erkennbarer Fehlstellengröße (unterer roter Fleck)

Figure 8: "Blow-Scan" for delamination detection with exemplary configuration for 150 x 50 mm² guaranteed detectable defect size (lower red dot)

sich zudem die Größe des schmalen Laborstreifens von der Länge des Traversierbereiches in Abhängigkeit der Geschwindigkeiten unterschiedet. Deshalb wird eine Analyse unter Zuhilfenahme der Statistik empfohlen. Hierzu werden mindestens n = 5Laborschnitte entnommen und die Zeitpunkte vom ersten und letzten zur Position des Flächengewichtsmesssystems in der Formstraße zurückverfolgt. Die Messdaten der in diesem Zeitraum erfolgten Traversierungen werden spurweise den gravimetrisch ermittelten Flächengewichten der mit äquivalentem Schnittplan aufgeteilten Laborplatten anhand der Spurmittelwerte gegenübergestellt. Auch hier berücksichtigt die Berechnung der jeweiligen Vergleichstoleranzen die vielfältig wirkenden und unter statistischen Gesichtspunkten analysierten Einflussfaktoren. Die insbesondere bei der Herstellung von Spanplatten bisher üblichen Methoden mittels Streukasten oder Einlage von Papieren in der Formstraße zur Trennung der Schichten nach der Presse mit anschließender gravimetrischer Dichtebestimmung sind aufwändig und als Vergleichsmethoden ungeeignet, da sie den erzielbaren Genauigkeiten moderner Inline-Röntgenmesssystemen nicht gerecht werden. Die Streukastenmethode erlaubt zwar die direkte Bestimmung der Flächengewichtsquerverteilung einzelner Schichten oder der gesamten Matte im üblichen 100 mm Spurraster, stellt aber einen massiven Eingriff in den Prozess dar, mit dessen Unterbrechung und weiterem Störpotential (z. B. Streukasten verklemmt). Zudem erlauben die Streukästen keinen direkten Vergleich mit den Messungen des traversierenden Röntgensystems an

identischen Bereichen und zeigen mit ihrer kurzen Länge nur einen einmalig kleinen Ausschnitt aus dem kontinuierlichen Prozess.

Röntgenscanner zur Fremdkörpererkennung

Bei der Analyse eines Röntgenscanners zur Fremdkörpererkennung wie dem "Eco Scan FBD" (Abb. 7) sind repräsentative Ergebnisse vergleichsweise unaufwändig und leichter nachvollziehbar zu erhalten. Vordefinierte Fremdkörper werden bei entsprechenden Prozessbedingungen an beliebigen Positionen über die Mattenbreite nach der Vorpresse in die Produktionslinie eingebracht. Die erkannten Fremdkörper werden in der Visualisierung des Systems angezeigt. Damit durch einen möglichst großen und vielfältigen Probenumfang der Produktionsprozess nicht mehrfach gestört wird, können bei Unterdrückung des Digitalsignals zur Fehlschüttung die Fremdkörper auf einem Blatt Papier fixiert unter Beachtung aller Sicherheitsvorkehrungen einfach nach dem Röntgenscanner wieder entnommen werden. Da es sich im Vergleich zu den vorher betrachteten Prozessmessdaten um ein System zum Schutz der Heißpresse handelt, müssen 100 % der vordefinierten Fremdkörper beim Test erkannt werden. Garantiewerte werden für verschiedene Plattendicken unter Berücksichtigung der jeweiligen Prozessparameter (maßgeblich Geschwindigkeit und Streuverteilung) sowie des Fremdkörpermaterials (z. B. Stahl oder Kunststoff) definiert. Neben den Prozessbedingungen richten sich die erzielbaren Werte nach der Fähigkeit des Röntgenscanners hinsichtlich Erkennungs-

auflösung (Bildkontrast) und geometrischer Auflösung (Abb. 7). Letztere wird guer zur Produktionsrichtung durch Pixelgröße und -abstand in der Detektorzeile bestimmt und resultiert in Längsrichtung aus der Integrationszeit (Bildaufnahmerate pro Zeile) in Relation zur Formbandgeschwindigkeit. Daraus ergibt sich die wichtige Unterscheidung zwischen kleinstmöglich erkennbarem Fremdkörper (unter statischen Bedingungen = Pixelgröße) und sicher erkennbaren Fremdkörpern (unter den spezifischen Produktionsbedingungen mit der erforderlichen Überabtastung).

Spaltererkennung

Ähnliche Prinzipien hinsichtlich praktisch erzielbarer Erkennungsleistung gelten für die Spaltererkennung – also das Auffinden von Delaminierungen oder ähnlichen Fehlstellen innerhalb oder auf der Oberfläche der fertigen Platte nach der Mehrfachdiagonalsäge (Abb. 3) mittels Ultraschalltechnologie. Neben der Visualisierung der von vielfältigen Plattenqualitäts- und Prozessparametern abhängigen relativen Signalverteilung basiert das Inspektionsprinzip auf einem signifikanten Abfall der Ultraschalltransmissionsamplitude bei einer entsprechenden Fehlstelle. Also ist wiederum bei der Bewertung der Systeme zwischen Erkennungsauflösung (Signalkontrast) und geometrischer Auflösung zu unterscheiden (Abb. 8), wobei letztere analog zur Fremdkörpererkennung von Sensordurchmesser und -abstand (quer) sowie der Ausleserate (Sample Time) in Relation zur Transportgeschwindigkeit der Platte (längs) abhängt. Eine hier erforderliche mehrfache Überabtastung

bestimmt in Längsrichtung die kleinste und auch gleichzeitig sicher erkennbare Fehlstelle bei maximaler Geschwindigkeit. Über die Plattenbreite entspricht der kleinstmögliche Spalter dem Sensordurchmesser, wobei beide direkt übereinander liegen müssen. Die unabhängig zu den Sensorpositionen sicher erkennbare Fehlstelle ergibt sich quer aus Sensordurchmesser plus Abstand zum Nachbarkanal (Mitte-Mitte). Deshalb ist auch bei dicht an dicht sitzenden Ultraschallkanälen nur eine gewisse Spaltergröße sicher erkennbar. Die Analyse der Spaltererkennung erfolgt analog zur Fremdkörpererkennung anhand gezielt eingebrachter Fehlstellen durch entsprechende Modifikation der (Mittellage der) Matte vor der Heißpresse. Dies ist aber nur bedingt eindeutig und kaum geometrisch scharf abgrenzbar möglich sowie keineswegs unaufwändig. Alternativ und deutlich praktikabler hat sich die Nachbildung des Effekts einer Fehlstelle durch Unterbrechung des Ultraschallsignals mithilfe von in Länge und Breite vordefinierter Pappstreifen bewährt, die auf der Plattenoberseite vor dem Inspektionssystem aufgelegt werden. Das Vorgehen dient damit vornehmlich der Analyse der Fähigkeit hinsichtlich der geometrischen Auflösung und der zugehörigen zuverlässigen Signalverarbeitung.

Regelung der Durchführung, fairer Vergleich der Systeme

EWS hält für alle Systeme entsprechende Standardvorgehensweisen (Standard Operating Procedure, SOP) bereit, wobei die Vergleichstoleranzen und Garantiewerte individuell unter Berücksichtigung der kundenspezifischen Material- und Prozessparameter bei Anwendung statistischer Methoden rechnerisch und praxisbezogen definiert werden. Damit wird ein Vorschlag für einheitliche Vorgehensweisen beabsichtigt, die der jeweiligen Messund Inspektionsaufgabe gerecht werden, aber auch praxistauglich durchgeführt werden können, weil (noch) keine branchenspezifischen Standards existieren. Die Qualifikation von Messsystemen und Produktionsprozessen in der Holzwerkstoffindustrie werden jedoch in VDI 3415-2 explizite Berücksichtigung finden – u.a. mit einem Beispiel zur Analyse von Dickenmesssystemen im Anhang dieser Richtlinie. Darüber hinaus soll mit entsprechenden Hinweisen und Handlungsempfehlungen ein Bewusstsein für die material- und prozessbedingten Besonderheiten geschaffen werden. Festzuhalten bleibt, dass die

vorgeschlagenen Methoden erprobte Werkzeuge zur praktikablen Durchführung von Fähigkeitsnachweisen für inline-Mess- und Inspektionssysteme im Holzwerkstoffherstellungsprozess bieten. Damit erhält der Anwender ein Instrument zur Bewertung bestehender und zur Beurteilung neuer Anlagen. Die nach einheitlichem Procedere qualifizierten Inline-Messsysteme können daraufhin zur Qualifikation der Fertigungsprozesse, bei der Abnahme der Gesamtanlage sowie danach zur kontinuierlichen Prozessüberwachung und darauf aufbauend zur SPC herangezogen werden. Die kontinuierlichen Prozessmessdaten der Inline-Systeme liefern für die SPC eine deutlich größere Datenbasis als die auf kleinen Stichproben basierenden Laborwerte, wobei natürlich beides zusammen Anwendung finden muss.

Folgerichtig bedarf es der weiteren Einbindung der Inline-Messsysteme in die Prozessregelung. Mithilfe von entsprechend übergeordneter Leittechnik wie "Prod-IQ⁶ Next" von Siempelkamp kann eine weitere Optimierung der Produktion von Holzwerkstoffen durch intelligente Automatisierung gelingen. Einheitliche Vorgehensweisen und Kenngrößen erlauben allen Beteiligten einen äguivalenten, nachvollziehbaren und damit fairen Vergleich der Systeme. Der Einsatz solcher Qualifizierungsmethoden ermöglicht es der europäischen Holzwerkstoffindustrie, auf diesem Gebiet Maßstäbe zu setzen.

Literatur

Dietrich, E., Conrad, S. - Eignungsnachweis von Messsystemen. Hanser-Verlag, 4. Auflage, 2015.

Dietrich, E., Schulze, A. - Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation. Hanser-Verlag, 7. Auflage, 2014

DIN 1319-1:1995 - Grundlagen der Meßtechnik. Teil 1: Grundbegriffe.

ISO 22514 - Statistical methods in process management - Capability and performance. Part 1 - 8.

ISO 22514-7:2012 - Statistical methods in process management - Capability and performance. Part 7: Capability of measurement processes.

Kortüm, C.; Riegel, A. - Maschinenabnahmen und Prozessfähigkeitsuntersuchungen in der Holz- und Möbelindustrie. holztechnologie 58 (2017) 3. S. 31-20

Solbrig, K. - Applied investigations on wood-based composites in the context of X-ray densitometry. Dissertation, Universität Hamburg, 2019.

Solbrig, K.; Füchs, M.; Frühwald, K.; Ressel, J. B. - Zuverlässiger Einsatz quantitativer Röntgenmesstechnik zur Prozess- und Qualitätskontrolle in der Holzwerkstoffindustrie. In: DACH Jahrestagung 2015.

Ullrich, C. - Process capability and performance analysis in the kitchen furniture industry. In: 11th European Wood-Based Panel Symposium, 2018.

VDA 5 (Hrsg.) - Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie 5 - Prüfprozesseignung, Eignung von Messsystemen, Eignung von Mess- und Prüfprozessen, erweiterte Messunsicherheit, Konformitätsbewertung. Verband der Automobilindustrie: Berlin, 2. Auflage, 2010.

VDI 3415-2 - Qualifikation von Holzbearbeitungsmaschinen - Statistische Verfahren. In Bearbeitung.

Proven capability?! Qualification of inline measuring and inspection systems in the wood-based composite industry

The application of inline measuring and inspection systems for monitoring production processes is indispensable today in the wood-based composite industry. Beyond the display of results, there is an increasing integration of the measuring systems into process control and quality assurance. Here, reliable measuring systems and processes, with proven capability, serve as the basis to acquire numerous parameters. However, suitable methods for measuring system analysis are not prevalent in the wood industry. It is therefore commonplace that the results of measuring systems are questioned without foundation or, on the other hand, their qualification is over-estimated. Furthermore, there are no agreed procedures for acceptance tests. Beyond the measuring systems, the total production process capability and performance is commonly qualified on the basis of a (too) small number of samples, with tests on specimens from the lab-cuts. Here, the utilisation of inline measuring systems, and their ability to carry out comprehensive process qualification and acceptance tests, is generally under-estimated and is not currently common practice.

Statistical methods in process management for capability and performance analysis are common practice in other branches, such as the automotive industry, and defined in international cross-industry guidelines and standards (VDA, VDMA, VDI, and ISO). The same applies to capability analysis of measuring systems as a pre-condition of the process qualification. Here, for example, VDA 5 and ISO 22514-7 define the most recent methods. However, their application in the wood industry is not straightforward and requires adaptations to the special conditions of materials and processes. When evaluating inline measuring systems, corresponding references are often not available; and questionably-defined comparative measurements do not provide reliable results. Even the capability analysis of hand-held and laboratory measuring devices is not common practice in the wood industry. Therefore, the guideline VDI 3415-2 (Woodworking machinery - Statistical methods) is currently being created in order to provide suitable capability analysis methods which consider both process and material conditions. The fundamental approach of measuring system capability analysis is to evaluate the relation of measuring uncertainty and process variation (tolerance of the measured parameter). To this end, the gauge capability index $c_{\rm g}\,\text{or, more}$ importantly, the quality indices Q_{MS} and Q_{Mp} (ISO 22514-7) which consider the measuring system or the measuring process respectively, are common figures. The calculated indices, or ratios, are compared to respective reference values in order to qualify the capability.

However, inline measuring and inspection systems require further consideration: Like the devices themselves, the performance test procedures must be suited to the versatile measuring tasks and conditions. Therefore, practice-oriented procedures have been developed by EWS for capability analysis of inline measuring and inspection systems, based on statistical methods and suitable approaches from existing standards and guidelines. These are available to customers as Standard Operating Procedures (SOPs). For acceptance tests, reasonable comparison tolerances and individual guarantee values are calculated taking into consideration the uncertainties of both the measuring process and the respective reference method, as well as relevant influence parameters from the process and material. Ultimately, the user receives an instrument for evaluating existing, and assessing new, equipment. The use of such qualification methods enables the European wood-based composite industry to set standards in this field.