



Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Hänsel

studierte Verarbeitungs- und Verfahrenstechnik an der TU Dresden. Er promovierte 1987 zu einem Thema der Holzwerkstoffentwicklung, 1991 folgte die Habilitation. Seit 2003 ist er Honorarprofessor an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung in Eberswalde. Nach langjähriger Tätigkeit in der Wirtschaft in den Bereichen Forschung und Entwicklung, Produktionsleitung sowie als Geschäftsführer ist er seit 2007 an der Studienakademie Dresden (seit 2012 als Direktor) beschäftigt. Zu den Schwerpunkten seiner wissenschaftlichen Tätigkeit gehört u.a. der Bereich der Qualitätssicherung.

KONTAKT: Staatliche Studienakademie Dresden | andreas.haensel@ba-dresden.de



Dr. Wolfgang Schultz

studierte Maschinenbau an der Universität der Bundeswehr in Hamburg, wo er auf dem Fachgebiet Strömungsmechanik zum Dr.-Ing. promovierte. Er verfügt über die Qualifikationen Qualitätsfachingenieur und -manager, Instruktor, Auditor und EFQM-Assessor der Deutschen Gesellschaft für Qualität (DGQ). Dr. Schultz war über lange Jahre als Offizier im Bereich der Technischen Truppe Instandsetzung eingesetzt. Nach seinem Ausscheiden aus der Bundeswehr nahm er 10 Jahre lang Führungsaufgaben im Qualitätsmanagement wahr. Seit 2008 ist er Geschäftsführer der TEQ Training & Consulting GmbH.

KONTAKT: TEQ Training & Consulting GmbH | wolfgang.schultz@q-das.de

Statistische Prozessregelung (SPC) für kleine Losgrößen – Ansätze und Erfahrungen

Andreas Hänsel und Wolfgang Schultz

Die Voraussetzungen für die Anwendung der statistischen Prozessregelung sind für kleine Losgrößen nicht gegeben. Es werden neue Herangehensweisen für dieses Problem vorgestellt. Die Methoden werden auf die Fertigung von Möbelbauteilen angewandt und die Anwendbarkeit nachgewiesen.

The assumptions made by statistical process control are not met in small batch sizes. We will introduce new approaches to solve this problem. In a second step, we will apply the methods to manufacturing furniture components and show their applicability.

Das Problem, geeignete Methoden für eine SPC bei kleinen Stückzahlen zu finden, ist von zunehmender Bedeutung. Aufgrund der Komplexität erfolgte die Bearbeitung in einer interdisziplinären Arbeitsgruppe. Die Anwendbarkeit der Ergebnisse wurde für verschiedene Aufgaben und Industriezweige nachgewiesen. Nachstehenden Ausführungen beziehen sich auf die Möbelindustrie. Die Datenerhebungen wurden im Rahmen studentischer Arbeiten mit Praxispartnern durchgeführt.

1 Einleitung

Die Analyse des Streuverhaltens und die Ermittlung zugehöriger Fähigkeitskenngrößen sind für Prozesse der Serienfertigung in vielen Branchen unabdingbar. Dabei werden typischerweise Stichprobengrößen von 50 für die Ermittlung der Maschinenfähigkeit und 125 für die Ermittlung der Prozessfähigkeit genutzt. In einigen Firmenrichtlinien sind weiterhin Ansätze beschrieben, wie und unter welchen Bedingungen diese Werte unterschritten werden können. In vielen Fällen der Kleinserien- bis hin zur Einzelfertigung sind jedoch auch diese Modelle nicht einsetzbar. Benötigt werden daher geeignete Methoden, um auch Prozesse zur Fertigung kleiner und kleinster Stückzahlen auf statistischer Grundlage zu analysieren, zu überwachen und gegebenenfalls zu lenken. Nachstehend werden Herangehensweisen zur Lösung dieser Problemstellung vorgestellt und beispielhaft auf den Bereich der industriellen Möbelproduktion angewandt.

2 Lösungsansätze

a) Toleranzausnutzung

Bei diesem Lösungsansatz wird auf Basis des Prozesswissens aus ähnlichen Produkten bzw. Prozessen eine Annahme oder Forderung für C_p (Prozessfähigkeit) vorgegeben und deren Nicht-Verletzung oder eine Abweichung davon mit einer speziell angepassten Qualitätsregelkarte (QRK) dokumentiert. Diese wird aus den Vorgaben berechnet und damit der Prozess überwacht – allerdings zu Beginn noch als 100-Prozent-Prüfung.

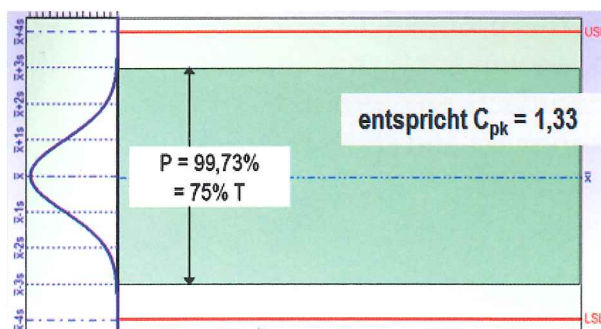


Abb. 1: Der Ansatz der Toleranzausnutzung (Quelle: Hänsel, A.; Schultz, W. (2016))

Dazu ist es sinnvoll, zusätzliche Eingriffskriterien anzuwenden, die im Normalfall zu häufigen Fehlalarmen führen würden. Als geeignet erweisen sich die Kriterien nach Wheeler, die in Tabelle 1 dargestellt sind (Wheeler, D. J.). Mithilfe dieser werden verschiedene Abweichungen der Wertehäufigkeit vom jeweiligen Erwartungswert innerhalb verschiedener Quantile bewertet. In Verbindung mit einer sogenannten dynamischen Range haben sich diese Kriterien bei den bisher untersuchten Anwendungen als sehr wirksam erwiesen. Dieser Ansatz ist von sehr kleinen bis hin zu kleinen Losgrößen anwendbar. Unter bestimmten Voraussetzungen (wiederholte Fertigung kleiner Lose) kann von diesem Ausgangspunkt auf die normale Führung von QRK übergegangen werden. Der Übergang ist fließend. In jedem Falle sollten die hier vorgeschlagenen zusätzlichen Eingriffskriterien etwa ab dem 20. Messwert nicht mehr angewandt werden, da die Wahrscheinlichkeit eines Fehlalarms dann auf über 30 Prozent steigt.

Kriterium	Beschreibung
1	1 Wert befindet sich außerhalb der 3σ Grenzen
2	2 von 3 aufeinanderfolgenden Werten oberhalb von $+2\sigma$ oder unterhalb von -2σ
3	4 von 5 aufeinanderfolgenden Werten oberhalb von $+1\sigma$ oder unterhalb von -1σ
4	8 aufeinanderfolgende Werte auf einer Seite der Mittellinie

Tabelle 1: Kriterien nach Wheeler (Quelle: Wheeler, D. J., 1991)

b) Gruppierung von Merkmalen bei Einzelfertigung

Ein noch weitergehender Ansatz bezieht sich auf die Einzelfertigung. In bestimmten Fällen können unterschiedliche Merkmale (Zielwerte und Toleranzen) gruppiert werden. Durch die Abkehr vom Messwert und die Hinwendung zur Abweichung des Messwertes vom Sollwert sowie geeignete Normierung können die Messwerte der unterschiedlichen Merkmale in ein und dieselbe Regelkarte eingetragen und somit der Prozess überwacht werden. Der Fokus verschiebt sich dabei vom einzelnen Merkmal auf den zugehörigen Prozess.

Hierzu wurde unter Berücksichtigung eines ISO Normentwurfs ein Konzept erarbeitet, das derzeit in der Praxis erprobt und weiterentwickelt wird (Hänsel, A., Schultz, W.). Im Normentwurf wird als Faktor für die Normierung der Erwartungswert für den sogenannten moving range aus $n=2$ (oder auch 3) vorgeschlagen. Da der Vertrauensbereich (die Unsicherheit) für die Standardabweichung in diesem Fall noch sehr groß ist, wird im vorgestellten Ansatz die Toleranz selbst als Normierungsfaktor genutzt. Damit liegen die normierten Toleranzgrenzen grundsätzlich bei $\pm 0,5$, was im Sin-

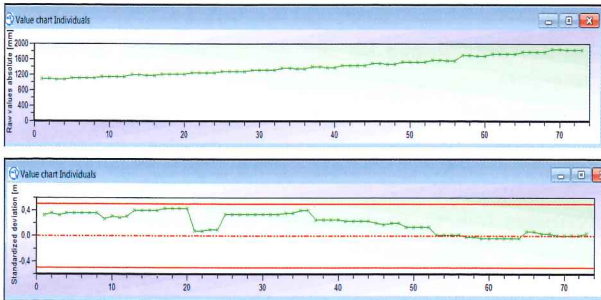


Abb. 2: Messwerte an einer Rotorwelle im Bereich von 1100 bis 1800 mm und unterschiedlichen Toleranzen; oberes Bild – absolute Werte; unteres Bild – normierte Abweichung vom Sollwert. (Quelle: Hänsel, A.; Schultz, W. (2016))

ne einer Normierung eine allgemeingültige und eindeutige Variante darstellt. Für die Berechnung der Eingriffsgrenzen wird – alternativ zum Entwurf – das vorstehend vorgestellte Modell der Toleranzausnutzung herangezogen. Für den gewählten Cpk-Wert ist die zugehörige Standardabweichung zu verwenden, also für $Cpk=1,67$ gilt $s=T/10$.

3 Anwendungsbeispiele

3.1 Kaschieren von Möbelfolien

Die Beschichtung der Breitfläche von Möbelbauteilen auf Folienkaschieranlagen erfolgt in der Regel beidseitig. Der Prozess setzt sich dabei aus mehreren Schritten zusammen, die auf verschiedenen Maschinen in folgender Reihenfolge durchgeführt werden:

Schleifen → Reinigung → Vorheizen → Leimauftrag → Kaschieren → Glätten

Nachfolgend wird der Prozessschritt „Leimauftrag“ näher untersucht. Abweichungen von der optimalen Leimauftragsmenge können hier in erheblichen Umfang Ausschuss und Nacharbeit nach sich ziehen. Die Funktionsweise einer Leimauftragsmaschine ist in Bild 3 dargestellt. Die auf das Bauteil transferierte Leimmenge ist von verschiedenen stofflichen Parametern (z.B. Saugverhalten des Substrats/Bauteils) und technisch-technologischen Parametern (z.B. Vorschubgeschwindigkeit, Anpressdrücke der Walzen) abhängig. Die Messung der Leimauftragsmenge erfolgt über ein Wiegeverfahren, das zeitlich aufwendig und fehleranfällig ist,

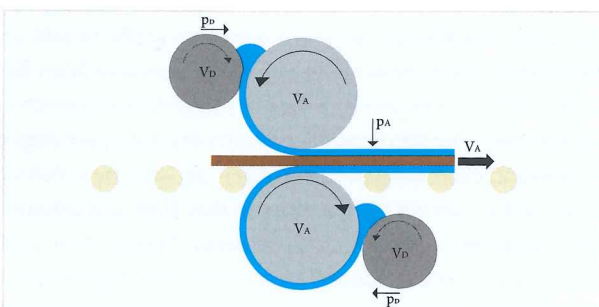


Abb. 3: Wirkungsweise und Einflussgrößen an einer Leimauftragsmaschine (Quelle: Adam, C., S. 33)

da sich die eigentliche Auftragsmenge über eine Einlaufkurve einstellt. Die Datenerfassung erfolgte über einen längeren Zeitraum, wobei auf die in der Qualitätssicherung vorliegenden Werte zurückgegriffen wurde (Adam, C.).

Die Untersuchungen ergaben zunächst, dass die vorgegebenen Sollwerte der Leimauftragsmenge zu hoch angesetzt waren, was einen Einsparungseffekt nach sich zieht. Die Auswertung der erfassten Daten in einer Qualitätsregelkarte (QRK) ist in Bild 4 dargestellt. Zur Berechnung wurde die Differenz von Soll- und Istwert auf die Toleranz normiert sowie die Spezifikations- und Eingriffsgrenzen berechnet. Die Normierung wäre im Anwendungsfall nicht erforderlich gewesen, da alle Teile mit der gleichen Toleranz gefertigt wurden. Für die Berechnung der Eingriffsgrenzen erfolgte eine Multiplikation des Abmaßes mit dem Wert der 75-Percent-Toleranzausnutzung (s. Abb. 1). Damit wurden die absoluten Abweichungen so aufbereitet, dass sie für unterschiedliche Maße und Fertigungszeitpunkte vergleichbar wurden. Die Streuungsspur der Regelkarte enthält den Range über die kumulierten Werte des fiktiven Löses, der aus der Differenz der bis dahin gemessenen normierten maximalen und minimalen Messwerte berechnet wird.

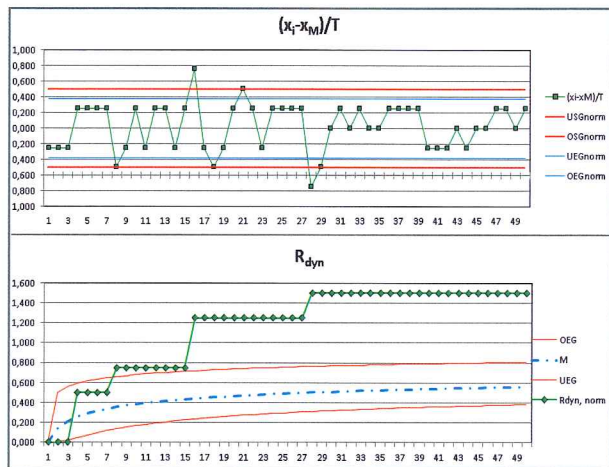


Bild 4: Regelkarte für den Leimauftrag an einer Kaschieranlage

Zunächst wird daraus ersichtlich, dass keine Unterteilung der QRK in Bereiche (Blöcken) erforderlich ist. Gut erkennbar ist jedoch auch, dass die Prozessstreuung zu hoch ist (Bild 4 unten) und das angewandte Messverfahren über eine zu geringe Auflösung verfügt. Letzteres wird durch das Unternehmen durch Einführung eines geeigneten Inline-Messsystems gelöst werden, das die Leimverteilung auch in Produktionsrichtung und senkrecht dazu erfasst. Ziel ist eine 100-Prozent-Prüfung. Unabhängig davon ist es notwendig, die Prozessstreuung durch Aufbau tieferer Prozesskenntnis (z.B. mittels Prozessanalyse unter Nutzung der Methoden der statistischen Versuchsplanung DoE) zu reduzieren, um eine ausreichende Prozessfähigkeit zu erreichen.

3.2 Beschichtung von Schmalflächen mittels Laser-Verfahren → 3.2.1 Technologische Grundlagen

Die Untersuchungen wurden im Bereich der Frontenfertigung eines kommissionsweise fertigenden Möbelherstellers durchgeführt. Diese Fertigungsart verlangt zumindest in bestimmten Prozessabschnitten die Produktion sehr kleiner Losgrößen (< 25 Bauteile). Dabei werden im interessierenden Bereich die einzelnen Bauteile zunächst auf einer Plattensäge vorkonfektioniert. Im Anschluss erfolgt im Durchlaufverfahren die Bearbeitung auf ein konstruktiv vorgegebenes Soll-Maß sowie in einem weiteren Arbeitsschritt die Beschichtung mit Schmalflächenband. Die für die Untersuchung herangezogene Durchlaufmaschine Novimat 1/R75/490/R3 der Fa. IMA Klessmann kann Ungenauigkeiten der vorgelagerten Plattensäge ausgleichen, sodass die Maßhaltigkeit und Rechtwinkligkeit nach diesem Bearbeitungsschritt gemessen wurden. Weiterhin erlaubt die Maschine sowohl ein Fügen unter Verwendung von PUR-Schmelzklebstoffen oder der sogenannten Lasertechnologie. Die Grundlage des letztgenannten Verfahrens besteht in der Verarbeitung koextrudierter Schmalflächenbänder, die einen Verbund zwischen einer chemisch hinsichtlich der Haftung auf Holzwerkstoffen optimierten polymeren Funktionsschicht und dem eigentlichen Dekor darstellen. Infolge von Adhäsionskräften entstehen an der Grenzfläche zum Trägerwerkstoff feste Verbindungen. Durch die für den Schmalflächenbeschichtungsprozess typischen Andruckrollen erfolgt weiterhin das Ausfüllen zwischenpartikulärer Hohlräume des Trägerwerkstoffs, wodurch eine hohe Beständigkeit gegenüber der Einwirkung von Wasserdampf (DIN 68930-2009) erreicht wird. Die auf dem Markt befindlichen Lasersysteme verwenden zum Reaktivieren der Klebstoffschicht Diodenlaser. Bei der für die Untersuchungen genutzten Maschine wird mithilfe einer festen Spiegeloptik ein etwa balkenförmiger Brennfleck erzeugt, der das Schmalflächenmaterial an der Wirkstelle über die Breite aufschmilzt.

Die Untersuchungen zur Anwendbarkeit der vorgestellten Konzepte der SPC für kleine Losgrößen konzentrierten sich auf die Maßhaltigkeit und Rechtwinkligkeit der Bauteile (Toleranzausnutzung) sowie die Rollschälfestigkeit (systematische Gruppierung von Prozessen).

→ 3.2.2 Ergebnisse aus der mechanischen Bearbeitung von Möbelteilen

Datenerfassung

Die Daten wurden an verschiedenen Tagen erfasst, indem Bauteile im Abstand von 30 Minuten der Fertigung entnommen und in der Folge vermessen wurden. Die Sollwerte der Längen- bzw. Breitenmaße bewegten sich dabei in einem Bereich von 115 Millimeter bis 896 Millimeter.

Ergebnisse

Die Voraussetzungen für die Anwendung des Verfahrens „Toleranzausnutzung“ sind erfüllt, da die unterschiedlichen Merkmale auf einer Bearbeitungsmaschine erzeugt werden und insofern die dafür postulierte „Ähnlichkeit“ vorliegt. Eine Auswertung aller gemessenen Werte zeigte, dass eine Normalverteilung angenommen werden kann. Weiterhin wurden im Beobachtungszeitraum die vorgegebenen Toleranzen eingehalten, wobei eine Verschiebung zum unteren Toleranzbereich auffällig war. Zur Überprüfung der praktischen Anwendbarkeit des Verfahrens wurde der Metadatensatz in mehrere Untergruppen aufgeteilt. Ein typisches Ergebnis für die geometrischen Maße Länge bzw. Breite zeigt Abbildung 5.

Es ist gut zu erkennen, dass für die real unterschiedlichen Bauteile die Prozessgüte abbildbar ist. Bei Messwert 14 werden durch die nichtzentrierte Prozesslage die oben genannten Kriterien 1 und 2 nach Wheeler wirksam.

Eine Untersuchung der Abweichung von der Rechtwinkligkeit der gefertigten Bauteile erbrachte analoge Ergebnisse.

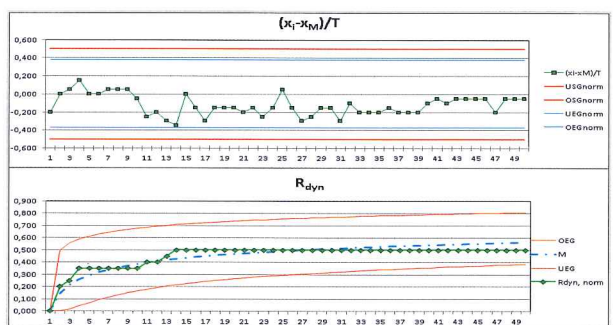


Abb. 5: Regelkarte für die Länge bzw. Breite von im Durchlaufverfahren gefertigten Bauteilen

3.3 Ergebnisse des Fügeprozesses

Die Bestimmung der Rollschälfestigkeit ist ein zerstörendes Prüfverfahren. Infolge dessen war es notwendig, die benötigten Daten über einen längeren Zeitraum zu erfassen. Dieses Verfahren zur Gewinnung einer ausreichenden Anzahl an Messwerten beschreiben Wiederhold et al. (S. 30-34) wie folgt: „Wenn...ähnliche Qualitätsmerkmale ... vom selben Prozess geschaffen werden, lassen sie sich zu Prozessgruppen zusammenfassen. So erhält man eine große Anzahl an Messdaten.“ Diese Bedingung wird für den untersuchten Bereich erfüllt. Die Kenntnis zu den Ursache-Wirkungsmechanismen des Prozesses beruhte zu Beginn der Untersuchungen im Wesentlichen auf den Erfahrungen der Maschinenführer sowie Hinweisen der Lieferanten von Maschine und Schmalflächenbändern. Mittels eines Ishikawa-Diagrammes und der Quantifizierung durch eine Intensitäts-Beziehungsmatrix (Klein, B.) erfolgte darauf aufbauend die Vorauswahl signifikanter Prozessmerkmale. Die Auswahl konnte durch

Vorversuche bestätigt werden (s. Tabelle 2). Die Einführung einer Qualitätsregelkarte kann nur dann erfolgen, wenn keine signifikanten Einflüsse auf das Prozessergebnis nachgewiesen bzw. diese prozessseitig oder anderweitig kompensiert werden können.

Testanordnung	Prüfgröße	kritischer Wert $\sigma=0,1\%$	Testergebnis
alle Prüfkörper MDF vs. Spanplatte	10,4	-3,34	Erwartungswerte unterscheiden sich
alle Prüfkörper MDF weiß vs. schwarz	4,71	-3,50	
Alle Prüfkörper Spanplatte weiß vs. schwarz	8,27	-3,79	

Tabelle 2: Ergebnisse des einseitigen t-Tests zum Einfluss von Trägermaterial und Schmalflächenband

Folgende Einflüsse wurden untersucht:

- ▶ Art des Trägerwerkstoffs
- ▶ Farbe des Schmalflächenmaterials
- ▶ Laserleistung
- ▶ Vorschubgeschwindigkeit
- ▶ Anpressdruck.

Da eine maschineninterne Regelung den Einfluss von Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit kompensiert, wurde diese von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

Abbildung 6 stellt die nach den Kriterien Trägermaterial und Farbe des Schmalflächenbandes in Cluster unterteilten Prozessergebnisse dar. Deutlich ist zu erkennen, dass die Erfassung aller Prozessdaten in einer QRK zu falschen Schlussfolgerungen führen würde. Die Aufteilung in verschiedene Träger- und Beschichtungsmaterialien erlaubt hingegen den Prozess reproduzierbar abzubilden. Die in Tabelle 1 zusammengefassten Ergebnisse bestätigen sich in den größeren Datenreihen. Offensichtlich verfügen Bauteile mit dem Trägermaterial Spanplatte über geringere Schälfeigenschaften. In künftigen Untersuchungen ist der Einfluss der Werkstoffstruktur (vereinfacht des Herstellers) auf das Prozessergebnis ebenfalls zu berücksichtigen. Insgesamt wird jedoch deutlich, dass es in der beschriebenen Weise möglich ist, die Datenmengen zu akkumulieren, die für das Führen von Qualitätsregelkarten erforderlich sind.

4 Schlussfolgerungen

Unterschiedliche Verfahren erlauben grundsätzlich eine SPC auch für kleine Losgrößen erfolgreich durchzuführen, sofern die Voraussetzungen dafür erfüllt sind.

Die Homogenisierung der Daten von Prozessen mit engem technologischen Fenster oder komplex wirkenden Einfluss-

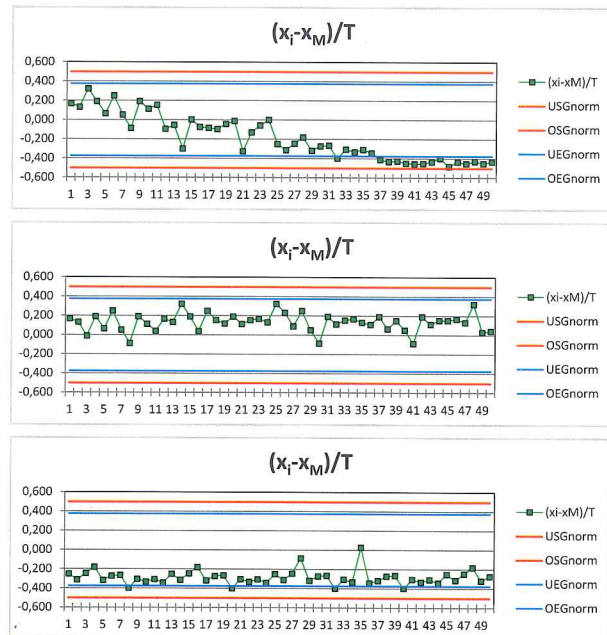


Abb. 6: oben: Messwerte der Daten der Voruntersuchungen; Mitte: Daten der Hauptversuche für das Trägermaterial MDF/Schmalflächenband weiß; unten: Daten der Hauptversuche für das Trägermaterial Spanplatte/Schmalflächenmaterial weiß

größen durch das Vorschalten einer Prozessanalyse ermöglicht den Aufbau größerer Datenbestände, die zum Führen einer QRK erforderlich sind.

LITERATUR

- Adam, C. (2016): Evaluierung eines Messsystems zur PVAC-Leimauftragsmengenbestimmung an einer Kaschieranlage, unveröffent. Bachelor-Thesis, Staatl. Studienakademie Dresden.
- Hänsel, A.; Schultz, W. (2016) SPC für kleine Losgrößen, Vortrag, 2. Interdisziplinäres Kfz-Kolloquium, Dresden
- Klein, B. (2014): Versuchsplanung- DOE, 4. Aufl., De Gruyter Oldenburg, München.
- Wheeler, Donald J. (1991): Short Run SPC, SPC Press, Knoxville, Tennessee.
- Wiederhold, M. et al. (2016): Gemeinsam sind sie stark – SPC bei kleinen Stückzahlen, Qualität und Zuverlässigkeit, München, S. 30- 34.
- Schneider, S. (2016): Einführung einer SPC für kleine Losgrößen durch Klassifizierung unter Nutzung des %Toleranz-Verfahrens, STAD, Projektarbeit. (unveröffentlicht)