

Messunsicherheit von Build-Up Systemen – Eine Betrachtung von Einflüssen und Methoden

Dipl.-Ing. Michael Wagner¹, Florian Ries²

¹PTB Braunschweig, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

²PTB Braunschweig, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Zusammenfassung

Sogenannte Build-Up Systeme (BU-Systeme) sind Parallelschaltungen von Kraftaufnehmern. Sie werden als Transfornormale oberhalb der rückgeführten Kraftskala verwendet um eine Erweiterung dieser Kraftskala zu ermöglichen. Eine besondere Herausforderung ist, die Messunsicherheit des BU-Systems zu bestimmen und dabei die vielfältigen Einflüsse auf das Messergebnis zu berücksichtigen.

Die vorliegende Arbeit soll zeigen, welchen Einfluss Konstruktionsparameter eines BU-Systems auf die resultierende Messunsicherheit haben. In diesem Zusammenhang wird dargestellt, wie im Hinblick auf die Erweiterung der rückgeführten Kraftskala der PTB in den hohen Meganewton-Bereich die Messunsicherheit des BU-Systems bestimmt werden kann, insbesondere wenn die rückgeführte Kalibrierung des Gesamtsystems bis in den Nennlastbereich nicht möglich ist.

Keywords: mechanische Größen, große Kräfte, Build-Up Systeme, Messunsicherheit, Rückführung

Konstruktive Merkmale von BU-Systemen

Anwendungen von BU-Systemen finden über einen sehr großen Kraftbereich statt. Die verwendeten Kraftmessgeräte weisen daher eine Vielzahl an konstruktiven Lösungen für verschiedene Anforderungen auf.

Die zahlreichen Einzellösungen, die in einem BU-System realisiert werden, beeinflussen dessen Messunsicherheit. In dem Bestreben, eine allgemeingültige Methode zur Bestimmung der Messunsicherheit von BU-Systemen zu entwickeln, müssen diese Beiträge erfasst werden und bei der Erstellung von Unsicherheitsbudgets Berücksichtigung finden.

Einzelanzeigeabweichung von BU-Systemen

Ein einzelner, kalibrierter Kraftaufnehmer liefert ein Messsignal, das nach [1] ausgewertet werden kann. So entsteht ein Polynom als Beziehung zwischen Kraft- und Anzeigewert, mit dessen Hilfe eine Kraft in der späteren Anwendung aus dem Messsignal berechnet werden kann. Für diese Kraft wird die Bezeichnung „Einzel-aufnehmer-Anzeige-kraft“ vereinbart, vgl. [2].

BU-Systeme liefern, neben weiteren in [2] beschriebenen Methoden, auf die folgende Art eine Kraftanzeige. Bereits vorhandene Kalibrierergebnisse der Einzelaufnehmer können verwendet werden, um drei individuelle Kraftsignale zu bestimmen. Diese werden anschließend summiert.

Dieser Weg ist beispielsweise dann angezeigt, wenn das BU-System nicht im Nennlastbereich kalibriert werden kann, weil seine Nennlast die

rückgeführte Kraft überschreitet. Für diese Kraft wird die Bezeichnung „summierte BUS-Kraft“ oder „Summenkraft“ verwendet, da es sich um eine rechnerisch durch Summenbildung ermittelte Kraft des BU-Systems handelt. Als Formelzeichen wird F_S verwendet.

Zwischen der von der Maschine aufgebrachten Kraft F_{LS} und der Summenkraft besteht eine Abweichung, die als Einzelanzeigeabweichung bezeichnet wird. Sie ist definiert als die relative Abweichung der genannten Größen nach dem Zusammenhang

$$d_L = \frac{F_S - F_{LS}}{F_{LS}} \quad (1)$$

Die Ursache der Abweichung liegt in der Kinematik des BU-Systems, sowie der Querkraftempfindlichkeit der einzelnen Aufnehmer. Grundsätzlich erfahren die Komponenten im BU-System eine elastische Verformung. Durch die Verformung der Lasteinleitungsteile entsteht eine Winkeländerung an der Stelle der Krafteinleitung in den Kraftaufnehmer, wodurch sich der Kraftvektor verändert. Es entsteht eine Querkraft, welche die Kennlinie des Aufnehmers verschiebt. Dadurch zeigt der Kraftaufnehmer bei nominell derselben Last ein anderes Signal, als bei einer Einzelkalibrierung unter kinematisch idealen Bedingungen. Da die so entstehende Abweichung, auf die lineare Elastizität der Komponenten zurückzuführen ist, muss zunächst von einem systematischen Einfluss ausgegangen werden.

Die Definition der Größe beinhaltet ebenfalls die Maschinenkraft. Letztlich hängt die gemessene

Abweichung damit von zahlreichen weiteren Randbedingungen während der Messung ab und kann so eine relevante zufällige Komponente erhalten, vgl. [3]. Bei der Bestimmung der Einzelanzeigeabweichung zusammen mit ihrer Unsicherheit und der Frage, ob sie als Korrekturfaktor oder als zufälliger Fehler in der Darstellung der Kalibrierkraft F_{cal} des BU-Systems in Betracht gezogen wird, sind die individuellen Messergebnisse der Systeme in Abhängigkeit der Messbedingungen zu berücksichtigen.

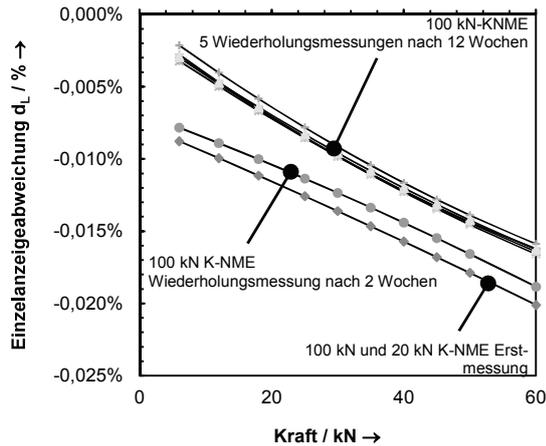


Abb. 1: Einzelanzeigeabweichung 3 x 20 kN BU-System, Reproduzierbarkeit

Das Diagramm in Abbildung 1 zeigt die Auswertung der Einzelanzeigeabweichung für ein 3 x 20 kN BU-System. Die beiden unteren Kurven zeigen deutlich die Drift der Empfindlichkeit des Aufnehmersystems über die Zeit. Nach einem Zeitraum von ca. 12 Wochen zeigt das Aufnehmersystem ein stabiles Verhalten, was es erlaubt, Messungen mit veränderter Geometrie durchzuführen. Die Diagramme in Abbildung 2 zeigen die Auswertung der Einzelanzeigeabweichung für verschiedene Lasteinleitungsgeometrien. Der Ausschluss der im originalen BU-System verbauten Pendelstützen führt zu einer Verschiebung der Einzelanzeigeabweichung von ca. $3 \cdot 10^{-6} \cdot \text{kN}^{-1}$. Eine Veränderung der Momentenentkopplung durch die Verwendung unterschiedlich großer Kugelkalotten verursacht eine umgekehrt proportionale Verschiebung der Kennlinie von unter $1 \cdot 10^{-6} \cdot \text{kN}^{-1}$.

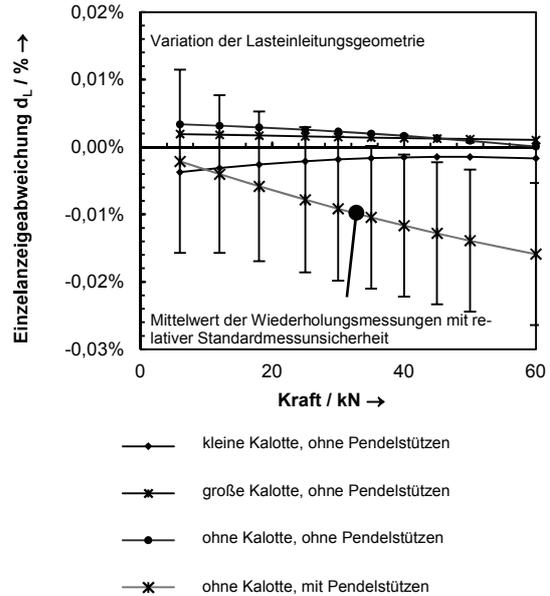


Abb. 2: Einzelanzeigeabweichung 3 x 20 kN BU-System, Kinematik

Wie bereits beschrieben, ist es in der Praxis möglich, dass zahlreiche weitere Einflussfaktoren in die Einzelanzeigeabweichung mit eingehen. In diesen Fällen ist eine Systematik nur schwer erkennbar und damit die Möglichkeit einer Korrektur der Kalibrierkraft des jeweiligen BU-Systems nicht möglich.

Die Kennlinien in Abbildung 3 zeigen dieses Verhalten am Beispiel eines 3 x 10 MN BU-Systems. Während die Kurven 2, 3 und 4 einen sehr gleichmäßigen Verlauf aufweisen, zeigt die Kennlinie 5 eine bislang nicht aufgeklärte Abweichung. Die Kurve 1 wurde in einer Materialprüfmaschine aufgezeichnet, deren Kraftregelung nicht für eine Kalibrierung nach [1] ausgelegt worden ist. Der Einfluss der Regelung ist deutlich in der Streuung des Messsignals zu sehen, ein Trend hin zu den Kurven 2, 3 und 4 ist jedoch vorhanden. Lediglich bei der Messung von Kurve 6 ist nicht ableitbar, wodurch sich die Absolutwerte genauso wie die Linearität der Kurve derart verändert haben.

Da in diesem Fall eine Systematik in der Einzelanzeigeabweichung nicht begründbar ist, muss bei der Bestimmung der Kalibrierkraft auf statistische Methoden zur Behandlung zufälliger Fehler zurückgegriffen werden.

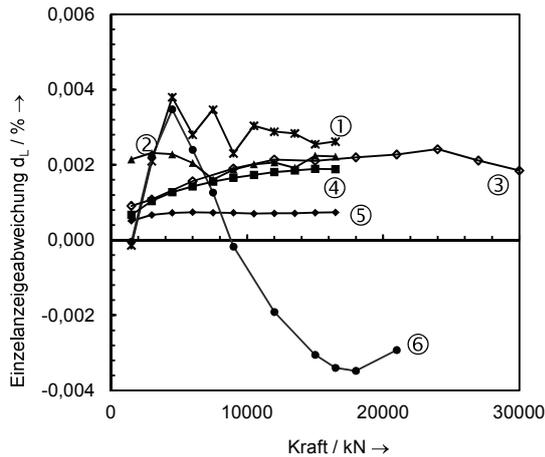


Abb. 3: Einzelanzeigeabweichung 3 x 10 MN BU-System

Messunsicherheit

Die Grundlage des Unsicherheitsmodells nach [4] bildet die Vorstellung, dass zwischen der summierten Kraft F_S des BU-Systems und der Maschinenkraft F_{LS} eine systematische Abweichung d_L besteht, für die ihrerseits eine Unsicherheit angebar ist. In diesem Fall ist eine Korrektur der durch das BU-System wiedergegebenen Kraft F_{cal} vorzunehmen [6]. Da die Einzelanzeigeabweichung d_L ausschließlich von Kräften abhängt, wird sie als messbare, physikalische Größe aufgefasst.

Unter der alternativen Annahme, dass die Einzelanzeigeabweichung statistischen Schwankungen unterliegt, die aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren nicht vollständig aufgeklärt werden können, vgl. Abbildung 3, liegt es nahe, die Streuung um den Erwartungswert von d_L mittels seiner Standardabweichung zu bestimmen.

Damit besteht die primäre Aufgabe bei der Kalibrierung von BU-Systemen darin, die Einzelanzeigeabweichung zusammen mit ihrer Unsicherheit zu bestimmen.

Die Kalibrierung von BU-Systemen und deren Einsatz als Transfornormal sind zwei grundlegend verschiedene Vorgänge. Die Grafiken in den Abbildungen 4a und 4b sollen diesen Unterschied verdeutlichen. Aus diesem Grund wird für die Kalibrierkraft des BU-Systems F_{cal} ein eigenes Unsicherheitsbudget erstellt.

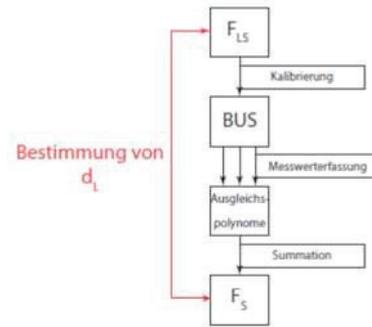


Abb. 4a: Prinzipbild der Messungen mit BU-Systemen

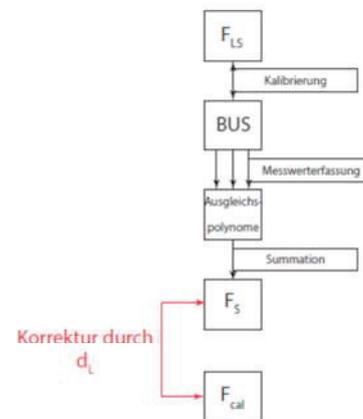


Abb. 4b: Prinzipbild der Messungen mit BU-Systemen

Modellgleichung und Messunsicherheit der Einzelanzeigeabweichung

Wird d_L als physikalische Größe und ihre Schwankung als zufälliger Messfehler aufgefasst, so ist eine gaußsche Verteilung der Messwerte anzunehmen. Damit ergibt sich dessen empirische Standardabweichung zu

$$s_{d_L} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\bar{d}_L - d_{L,k})^2 \quad \text{mit} \quad \bar{d}_L = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d_{L,k} \quad (2)$$

mit n als der Anzahl der aufgezeichneten Messwerte. [7]

Ebenso kann, sofern eine ausreichende Datenbasis für die Bestimmung einer empirischen Varianz nicht vorliegt, ein eigenes Messunsicherheitsbudget für die Einzelanzeigeabweichung d_L erstellt werden. Nach [4] wird die Messunsicherheit allgemein durch die geometrische Summe der Produkte der individuellen Unsicherheitsbeiträge mit ihren Sensitivitätskoeffizienten jeder physikalischen Größe aus der Modellgleichung bestimmt,

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f(X_i)}{\partial X_i} \cdot u(X_i) \right]^2 \quad (3)$$

Wird obige Regel auf die Modellgleichung für die Einzelanzeigeabweichung, Gl. (1) angewendet, so folgt der Ausdruck

$$u_c^2(d_L) = \left(-\frac{F_S}{F_{LS}^2} \cdot u(F_{LS}) \right)^2 + \left(\frac{u(F_S)}{F_{LS}} \right)^2 \quad (4)$$

Die summierte Kraft F_S folgt aus der Summe der Einzelanzeigekräfte F_{IS} der Kraftaufnehmer,

$$F_S = \sum_{i=1}^n F_{IS,i} \quad (5)$$

Mit dem Zusammenhang $w(X) = \frac{u(X)}{X}$ unter Berücksichtigung von (4) folgt

$$w_c^2(d_L) = \left(-\frac{\sum_{i=1}^n F_{IS,i}}{d_L^2 \cdot F_{LS}^2} \cdot u(F_{LS}) \right)^2 + \left(\frac{\sum_{i=1}^n F_{IS,i} u(F_{IS,i})}{d_L \cdot F_{LS}} \right)^2 \quad (6)$$

Die Werte für d_L sind rein messtechnisch gewonnene Werte. Naturgemäß liegen diese in hohen Kraftbereichen nicht vor.

Bei Kraftmessgeräten mit Nennlasten oberhalb von 16,5 MN sind keine Informationen über die Kennlinien der Einzelaufnehmer bei Verwendung innerhalb eines BU-Systems bis in den Nennlastbereich zu erhalten. Zwar können diese Kennlinien in den geforderten Lastbereich durch Regression extrapoliert werden, jedoch liegt keine Information über die Unsicherheit der Extrapolation vor. Eine kubische Regression beispielsweise kann im Nennlastbereich völlig andere Verläufe aufweisen, als die tatsächliche, nicht bekannte Kennlinie. Die Berechnung der Unsicherheit von d_L nach Gl. (6) ist darüber hinaus nur für tatsächlich gemessene Werte zulässig.

Kenntnis über das Verhalten im Nennlastbereich oberhalb von 16,5 MN zu erhalten ist also die eigentliche Herausforderung. Hierzu können Kalibrierungen im Nennlastbereich mit großskaligen Referenzmaschinen, also solchen Maschinen mit Nennlasten oberhalb von 16,5 MN erfolgen. Für diese sind in der Regel relativ große Maschinenunsicherheiten im Bereich einiger 10^{-3} angegeben. Durch Einmessen der genannten Maschinen mit Transfernormalen der PTB können die Unsicherheiten im Bereich bis 15 MN ermittelt werden.

Eine Kalibrierung eines 30 MN BU-Systems kann also beispielsweise im Bereich 16,5 MN bis 30 MN in der 30 MN Referenzmeseinrichtung des National Physical Laboratory (NPL) sowie in der 30 MN Prüfmaschine der Material-

prüfanstalt Braunschweig (MPA-BS) durchgeführt werden. Diese Daten können verwendet werden, um die Kennlinie desselben Systems aus einer PTB-Kalibrierung zu erweitern. Letztlich wird also angenommen, dass die Linearitätsabweichung der Kennlinie des untersuchten BU-Systems nur in zu vernachlässigender Weise von der verwendeten Maschine abhängt und es erlaubt ist, durch eine Korrektur der Kennlinie anhand der Abweichung im Bereich bis 16,5 MN zwischen PTB und dem jeweiligen Labor die PTB-Kennlinie bis in den Nennlastbereich zu erweitern.

Eine Kennlinie für die Einzelanzeigeabweichung des BU-System bis in den jeweiligen Nennlastbereich kann dann mit den Einzelkalibrierergebnissen und dieser BU-System-Kennlinie berechnet werden.

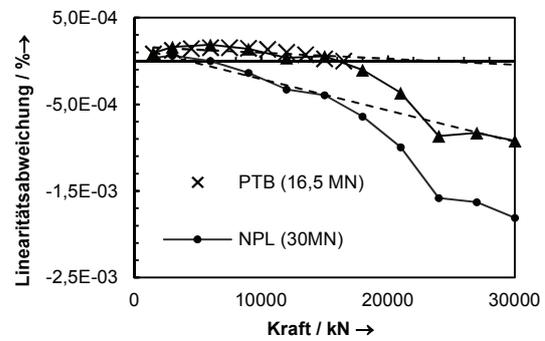


Abb. 5: Erweiterung der PTB-Kennlinie

Das Diagramm in Abbildung 5 zeigt die Kennlinie des Summensignals des 30 MN BU-Systems, wie sie im NPL aufgenommen wurde. Mit Kreuzen markiert sind die Ergebnisse der Messung im PTB Kraftnormal bis 16,5 MN. Durch eine Bestimmung des linearen Versatzes beider Kurven bis 16,5 MN kann die NPL-Kurve korrigiert werden (dreieckige Markierung).

Die relative Abweichung der so gewonnenen Kennlinie bis 30 MN zur PTB-Kurve bis 16,5 MN ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: relative Abweichung der erweiterten Kennlinie zur PTB-Messung

F_{LS} / kN	Relative Abweichung / %
1500	0,001%
3000	0,004%
6000	0,003%
9000	-0,001%
12000	-0,007%
15000	0,003%

Dieselbe Kennlinienverschiebung kann auf die Signale der Einzelaufnehmer angewendet werden. Dadurch resultieren BU-System-Kennlinien bis in den Nennlastbereich der Aufnehmer, welche die kinematischen Einflüsse des BU-Systems beinhalten. Mit diesen Daten ist es

möglich, die Einzelanzeigeabweichung für das untersuchte BU-System bis in den Nennlastbereich des Geräts zu bestimmen. An dieser Stelle muss die Frage nach der Messunsicherheit der Maschine gestellt werden. Wie die folgenden Abschnitte zeigen, geht diese mit in die Unsicherheit des betrachteten BU-Systems mit ein.

Modellgleichung und Messunsicherheit der Kalibrierkraft

Die summierte Kraft F_S aus Gl. (5) kann aus den Einzelanzeigekräften der Kraftaufnehmer berechnet werden und wird mit Hilfe von d_L zur Kalibrierkraft F_{cal} korrigiert. Es gilt der Zusammenhang zwischen der Kalibrierkraft F_{cal} und F_S analog zu Gl. (1),

$$F_{cal} = F_S \cdot \frac{1}{1 + d_L} \quad (7)$$

Für die Unsicherheit der Kalibrierkraft kann dann anhand Gl. (3) der folgende Term abgeleitet werden:

$$w_c^2(F_{cal}) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{1 + d_L} \cdot u(F_{IS,i}) \right]^2 + \left[\left(-\frac{1}{(1 + d_L)^2} \sum_{i=1}^n F_{IS,i} \right) \cdot u(d_L) \right]^2 \quad (8)$$

Mit dem Zusammenhang $w(X) = \frac{u(X)}{X}$ folgt analog zu oben

$$w_c^2(F_{cal}) = \sum_{i=1}^n \frac{[F_{IS,i} \cdot w^2(F_{IS,i})]}{(\sum_{i=1}^n F_{IS,i})^2} + \frac{d_L^2 \cdot w^2(d_L)}{(1 + d_L)^2} \quad (9)$$

Für den Fall, dass nicht alle relevanten Einflussfaktoren auf die Einzelanzeigeabweichung eines individuellen BU-Systems aufgeklärt werden können, ist die Korrektur der Kalibrierkraft F_{cal} nicht mehr zulässig. Daher muss unter diesen Umständen die folgende Berechnung der Unsicherheit angewendet werden.

Wird die Standardabweichung einer Reihe von Messwerten y_i um eine zusätzliche Abweichung b erweitert, so folgt der Ausdruck

$$s_c^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y} + b)^2 \quad (10)$$

Durch Ausmultiplizieren des Binoms und durch Vereinfachen folgt

$$s_c^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 + b^2 \quad \text{mit} \quad \frac{n}{n-1} \approx 1 \quad (11)$$

Damit kann für den vorliegenden Fall eines BU-Systems mit drei Kraftaufnehmern der Ausdruck

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^3 (F_{IS,i})^2 + d_L^2 \quad (12)$$

geschrieben werden [6].

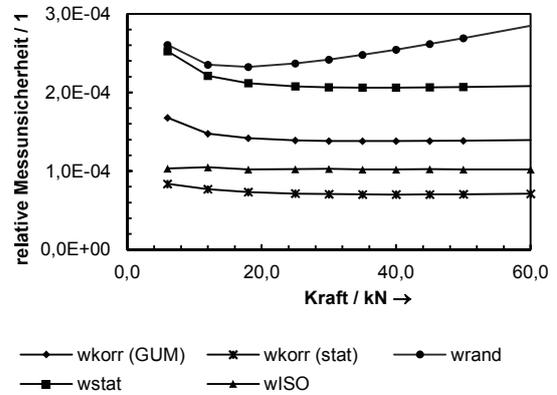


Abb. 6: Messunsicherheit

Tab. 1: Messunsicherheiten nach ISO376 und nach neuem Modell (Auszug)

F_{LS} / kN	Relative Unsicherheit / %	
	Nach ISO376	Neues Modell, mit Korrektur, mehrere Messreihen
	wISO	wkor (stat)
6	1,03E-04	8,37E-05
12	1,05E-04	7,70E-05
25	1,02E-04	7,14E-05
30	1,03E-04	7,07E-05
40	1,02E-04	7,02E-05
50	1,02E-04	7,04E-05
60	1,02E-04	7,11E-05

Das Diagramm in Abbildung 6 zeigt beispielhaft, dass durch die Anwendung des neuen Unsicherheitsmodells für die korrigierte Kalibrierkraft des BU-Systems eine geringere Unsicherheit erreicht werden kann, als nach einer Kalibrierung nach [1], insbesondere kann mit den gezeigten Methoden eine Angabe der Unsicherheit bis in den Nennlastbereich eines großskaligen BU-Systems durchgeführt werden.

Während der Kalibrierung der einzelnen Aufnehmer wird eine Rotation vorgenommen. Da die Kraftmessgeräte im BU-System üblicherweise stets in derselben Position eingebaut werden, ist es für zukünftige Untersuchungen zu erwägen, ob der Unsicherheitsbeitrag der mittleren Vergleichspräzision nach [1] durch einen Beitrag aus der Querkraftempfindlichkeit ersetzt wird. Dazu müsste ein Kalibrierverfahren für die Querkraftempfindlichkeit entwickelt werden.

Reduzierung der Einzelanzeigeabweichung

Eine Ursache für eine Änderung der Einzelanzeigeabweichung liegt in der Ausrichtung des Systems in der Maschine. Eine zu stark außermittige Ausrichtung führt zu einer Verschiebung der Lastverteilung. Je nach der individuellen Gestaltung des BU-System wird dadurch eine Verschiebung in der Kennlinie der einzelnen Aufnehmer bei ansonsten gleicher Laststufe erreicht.

Die Ausrichtung des BU-Systems in der Maschine ist messbar. Wird ein Kalibrierergebnis der Kraftaufnehmer auf deren Verformungsmesswerte angewendet, kann die Kraftverteilung im BU-System bestimmt werden. Aus den Einzelkräften der Kraftaufnehmer kann über eine Momentenbilanz der Kraftangriffspunkt der Maschine auf das BU-System nach Gl. (15) bestimmt werden.

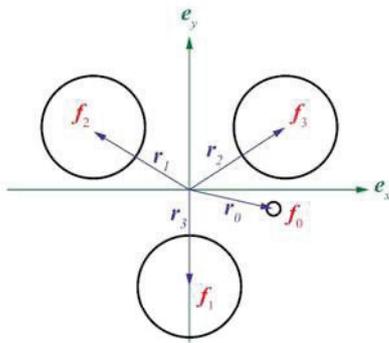


Abb. 7: Kräfte am BU-System

In Abbildung 7 ist für die Summe der wirkenden Momente abzulesen

$$\sum_{i=0}^3 \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_i = 0 \quad (13)$$

bzw.

$$\mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_i = \mathbf{f}_0 \times \mathbf{r}_0 \quad (14)$$

damit folgt für den Kraftangriffspunkt [5]

$$\mathbf{r}_0 = \begin{pmatrix} \left(\frac{-\sqrt{3}-f_{2,z}+f_{3,z}}{2} \cdot \frac{f_{0,z}}{f_{0,z}} \right) \cdot \mathbf{e}_x \\ \left(\frac{1}{2} \frac{f_{2,z}+f_{3,z}}{f_{0,z}} - \frac{f_{1,z}}{f_{0,z}} \right) \cdot \mathbf{e}_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Abbildung 8 zeigt das Ergebnis einer Messung, in deren Verlauf definierte, außermittige Positionen eingestellt worden sind. Dabei stellen die einzelnen Punkte mittels Längenmaß festgestellte Positionen in der Maschine dar, die Kur-

ven sind die nach Gl. (15) berechneten Positionen jeweils für verschiedene Kraftstufen. Deutlich zu sehen ist, dass zwischen den auf der Momentenmessung beruhenden und den geometrisch gemessenen Positionen eine Abweichung mit systematischem Charakter liegt. Außerdem wird im hier untersuchten Fall die Positionierung sehr gut aufgelöst.

Durch die Anwendung einer Korrekturfunktion kann also die Position des Messgeräts in der Maschine mit großer Genauigkeit bestimmt werden.

Weitere Untersuchungen in dieser Richtung sollen künftig aufklären, in welcher Größenordnung die Anzeigeabweichung reduziert kann, wenn die Positionierung des BU-Systems in der Maschine berücksichtigt wird.

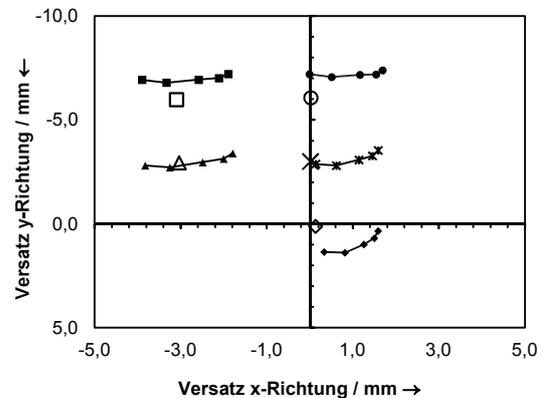


Abb. 8: Versatzmessung

Darüber hinaus kann die Einzelanzeigeabweichung durch konstruktive Maßnahmen reduziert werden. Druckplatten auf BU-Systemen erfahren naturgemäß eine Durchbiegung, die mit zunehmender Last wächst, das zudem oft geometrisch nichtlinear. Abbildung 9 zeigt die verformte Gestalt eines BU-Systems schematisch. Reale Verformungen sind sehr viel kleiner.



Abb. 9: elastische Verformung eines BU-Systems

Durch diese Biegung erfährt der Kraftvektor, der in den Kraftaufnehmer eingeleitet wird, eine Winkeländerung. In diesem Fall liegen eine vertikale und eine horizontale Kraftkomponente vor. Horizontale Kräfte stellen „parasitäre“ Querkräfte am Kraftaufnehmer dar, da sie dessen Kennlinie verschieben können.

Die Messgeräte messen nur die senkrechte Komponente, die in diesem Fall stets kleiner ist, als die gesamte eingeleitete Kraft. Die horizontale Komponente verschiebt jedoch das Signal des Kraftaufnehmers. Die Größenordnung und Richtung dieser Verschiebung kann nur bei wenigen Geräten messtechnisch zu ermittelt werden. In jedem Fall sind dafür individuelle, zusätzliche Vorrichtungen herzustellen, die eine Kalibrierung der Querkraftempfindlichkeit ermöglichen. Die Ergebnisse solcher Untersuchungen sind stets mit hohen Unsicherheiten behaftet. Wird die Querkraft nicht kompensiert, stellt Ihre Wirkung auf das Messgerät einen zusätzlichen Beitrag zur Messunsicherheit dar.

Ebenso kann mit den Abbildungen 8 und 9 erklärt werden, dass ein zu großer Radius r der Kraftaufnehmerposition im BU-System die Entstehung von Querkraften begünstigt, woraus folgt, dass eine enge Bauweise letztlich die Einzelanzeigeabweichung reduzieren kann.

Bisher werden zwischen Druckplatte und Kraftaufnehmer zusätzliche Druckstücke eingesetzt. Diese sind entweder mit planparallelen Kontaktflächen versehen, oder eine oder auch beide Kontaktflächen sind in Form einer Kugelkalotte gestaltet. Diese Druckstücke können zwar eine Winkellage ausgleichen, bringen aber eine Verschiebung des Kraftangriffspunktes und damit wiederum parasitäre Kräfte sowie eine zusätzliche Kontaktfläche mit sich. In Abbildung 8 ist exemplarisch zu sehen, wie Druckstücke auf den Kugelkalotten der Aufnehmer durch eine seitwärts gerichtete Verschiebung unter Last eine zusätzliche Querkraft erzeugen können.

Das genaue Verhalten von abgerundeten Kontaktflächen unter schwelender Belastung ist mechanisch nicht exakt reproduzierbar, dieser Effekt stellt einen Beitrag zur Messunsicherheit des Geräts dar.

Im Rahmen des EMRP Projektes, das Grundlage für die vorliegende Ausarbeitung ist, ist daher eine biegeneutrale Druckverteilerplatte entwickelt worden. Diese ist so gestaltet worden, dass an der relevanten Kontaktstelle zum Kraftmessgerät kraftunabhängig ein Biegewinkel sehr nahe Null erreicht wird. Durch die Kombination einer ebenen Druckplatte über einer ringförmigen Platte mittels einer äußeren, starren Kopplung werden zwei richtungsmäßig gegenseitig verlaufende Durchbiegungen überlagert und so kompensiert. Für die Darstellung dieser Konstruktion in Abbildung 10 gilt dann die kinematische Randbedingung am Plattenrand $\varphi_u(r, \Phi_u = \Phi_o) = \varphi_o(r, \Phi_o)$.

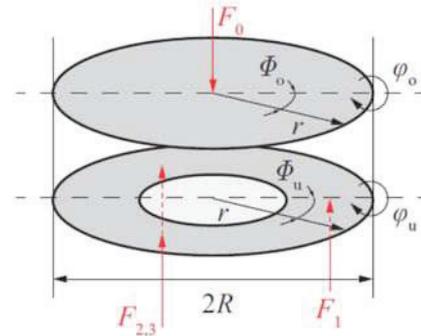


Abb. 10: Plattenmodell der biegeneutralen Lastplatte

Die resultierende Biegung an der Lasteinleitungsstelle in den Kraftaufnehmer und die damit verbundenen parasitären Kräfte werden dadurch zu Null, das bedeutet, es wird eine von der Belastung unabhängige, stets senkrechte Kraft in den Aufnehmer eingeleitet.

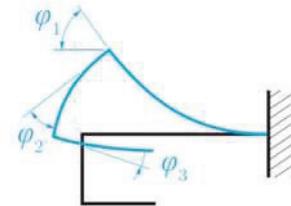


Abb. 11: Verschiebungsbild der biegeneutralen Lastplatte.

Für die Formulierung der Durchbiegung am Modell aus Abbildung 11,

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= -\frac{1}{EI} \left[-\frac{1}{n} F_0 (l_1 - l_3) x_1 + \frac{1}{2} F_0 \cdot x_1^2 \right] \\ \varphi_2 &= -\frac{1}{EI} \left[\frac{1}{n} F_0 l_3 x_2 + \frac{1}{2} F_0 l_1^2 \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{n} F_0 (l_1^2 - l_1 l_3) \right] \\ \varphi_3 &= -\frac{1}{EI} \left[\frac{1}{n} F_0 \left(l_3 x_3 - \frac{1}{2} x_3^2 \right) + \frac{1}{n} F_0 l_2 l_3 \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} F_0 l_1^2 - \frac{1}{n} F_0 (l_1^2 - l_1 l_3) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

zusammen mit der kinematischen Randbedingung

$$\varphi_1 - (\varphi_2 + \varphi_3) = 0 \quad (17)$$

lässt sich zeigen, dass für die Längen l_1 bis l_3 aus Abbildung 12, reale Lösungen möglich sind.

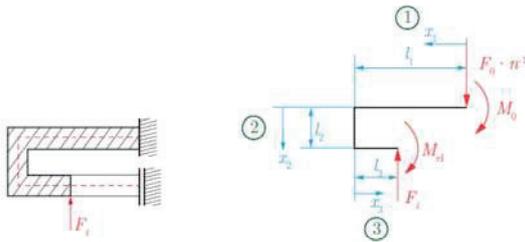


Abb. 12: Abstrahiertes Modell der Lastplatte

Die wesentliche Neuerung bei dieser Konstruktion besteht darin, die nicht vermeidbare Verformung der Lastplatte durch eine spezielle geometrische Gestaltung so zu manipulieren, dass an der gewünschten Stelle der Biegewinkel der Platte zu Null wird. Erstmals wird dadurch das elastische Verhalten der Komponenten nicht mehr als ein unerwünschter Nebeneffekt, sondern als konstruktives Merkmal des Geräts verwendet. Aus diesem Grund ist die Konstruktion zum Patent angemeldet worden.

Abbildung 13 zeigt einen fertigen Entwurf der Lastplatte.

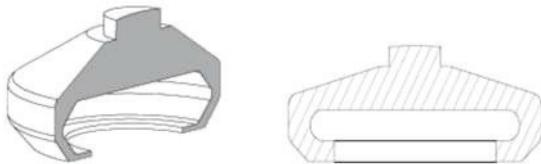


Abb. 13: Schnitt der biege-neutralen Lastplatte

Zusammenfassung

Das Verhalten von BU-Systemen zeigt grundsätzlich eine gut reproduzierbare Einzelanzeigabweichung, die eine Korrektur ermöglicht. Für die Abweichung sowie die korrigierte Kalibrierkraft ist ein Unsicherheitsmodell nach [1] erstellt worden. Durch die Anwendung der Korrektur und des Unsicherheitsmodells ist es möglich, Maschinen mit einer Unsicherheit im unteren 10^{-4} -Bereich anzuschließen.

In Abhängigkeit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Messreihen kann die Anzeigabweichung als Einzelmesswert mit einer Unsicherheit nach [1] oder als Mittelwert mit einer Standardabweichung verwendet werden.

Die Entstehung der Anzeigabweichung durch parasitäre Lasten kann durch konstruktive Maßnahmen reduziert werden. Künftige Untersuchungen mit der hier vorgestellten, konstruktiven Lösung sollen zeigen, in welchem Maße dadurch die Unsicherheit von BU-Systemen reduziert werden kann.

Danksagung

Das EMRP wird von den teilnehmenden Ländern innerhalb von EURAMET und der Europäischen Union gemeinsam finanziert.

Literaturnachweis

- [1] DIN EN ISO 376:2011: *Metallische Werkstoffe - Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung*, 2011. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- [2] M. Wagner, Falk L. Tegtmeier, *PROCESSING AND EVALUATION OF BUILD-UP SYSTEM MEASUREMENT DATA*, XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry", 30.08 - 04.09.2015, Prag, Czech R, 436-442
- [3] Falk L. Tegtmeier, M. Wagner *INVESTIGATION OF TRANSFER STANDARDS IN THE HIGHEST RANGE UP TO 50 MN WITHIN EMRP PROJECT SIB 63*, XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry", 30.08 - 04.09.2015, Prag, Czech R, 399-405
- [4] International Organisation for Standardization: ISO/IEC Guide 98-3:2008: *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement*. ISO, Genf, 2008
- [5] M. Wagner, Falk. L. Tegtmeier: *Processing and evaluation of measured data from Build-Up systems with special regard to various designs*. AMA Conferences 2015, Proceedings SENSOR 2015 A1 – Force and Torque, 39-43, Nürnberg. DOI10.5162/sensor2015/A1.2
- [6] F. Härtig: *Systematische Abweichungen – Berücksichtigung bei der Auswertung von Messergebnissen*. Interner Vortrag, PTB Braunschweig, 2016.
- [7] J. Hoffmann: *Taschenbuch der Messtechnik*. Hanser Verlag, 6. Auflage, München 2011.