



Abb. 1: Mit speziellen Sensoren lassen sich Zerspanprozesse genau überwachen. Der Detailgrad der Daten hängt dabei allerdings von der konkreten Anwendung und dem verwendeten Messprinzip ab.

Piezoelektrische Sensoren und Dehnmessstreifen im Vergleich

Die richtige Technologie, um Zerspanprozesse zu überwachen

Es gibt viele Einsatzbereiche, in denen man Zerspanungsprozesse genauestens im Blick behalten will. In der Forschung und der Entwicklung von Zerspanungswerkzeugen sind spezielle Sensoren, die Kräfte während des Zerspanprozesses messen, schon lange essenziell. Mit Industrie 4.0 hält diese Messtechnik nun auch mehr und mehr Einzug in die Fertigung selbst. Sensoren, die sich direkt in der Maschine einbauen lassen, liefern die nötigen Daten, um Prozessparameter exakt anzupassen. Doch auch wenn Sensoren oftmals ähnlich aussehen: die Technologie, die dahintersteckt, kann sich grundlegend unterscheiden. Bei den sensorischen Werkzeugaufnahmen, die in die Normschnittstellen von Werkzeugspindeln eingesetzt werden, haben sich in den letzten zwei Jahren zwei unterschiedliche Technologien etabliert. Um bei der Auswahl dieser Messsysteme am Ende die richtige Wahl zu treffen, muss man die Unterschiede kennen und verstehen, welches Messprinzip sich für welchen Einsatz eignet.

Genauer, stabiler, schneller und effizienter – mit dem Wunsch nach immer besseren Prozessen geht auch ein steigender Bedarf an zuverlässigen Daten zur Bewertung ebendieser einher. Im Allgemeinen findet sich dieses Verbesserungspotenzial in der Werkzeugauslegung und -entwicklung, der Zerspanungsstrategie und Parameterwahl. Die Zerspankraft ist eine geeignete Messgröße, um diese Einflussfaktoren zu bewerten und den Prozess zu optimieren. Sie gibt Aufschluss darüber, ob ein Prozess stabil verläuft. Zerspankräfte lassen sich mittels entsprechend spezialisierter Sensorik messen. In den sensorischen Werkzeugaufnahmen kommen zwei unterschiedliche Technologien zur Anwendung, welche exakte Ergebnisse

versprechen: Die bereits seit einigen Jahrzehnten in der Zerspanung etablierte piezoelektrische Messtechnik und die erst seit einigen Jahren in diesem Bereich zu findende Sensorik auf Basis von Dehnmessstreifen (DMS). Beide Systeme liefern Daten zu den auf die Werkzeuge wirkenden Kräfte und Momente. Doch die Funktionsprinzipien unterscheiden sich grundlegend.

Mit einem Kristall Einblicke in die Zerspankraft gewinnen

Das Herzstück des piezoelektrischen Sensors ist ein spezieller Quarzkristall. Die unscheinbare Kristallscheibe gibt bei Krafteinwirkung eine elektrische Ladung ab, die in direkter Relation zur Kraft steht. Mithilfe eines Ladungsverstärkers lassen sich diese Ladungen in messbare Signale wandeln und so exakte Daten gewinnen. Der Vorteil beim Quarz liegt darin, dass er durch seine enorme Steifigkeit eine sehr hohe Eigenfrequenz besitzt. Hierdurch können hochdynamische Prozesse im quasi linearen Bereich des Messsystems erfasst werden. Folglich sind die Messwerte auch aus unterschiedlichen Frequenzbereichen, wie sie zum Beispiel aufgrund unterschiedlicher Zahneingriffsfrequenzen auftreten, miteinander vergleichbar. Bedingt durch den Einbau der Quarzkristalle im Kraftfluss der Werkzeugaufnahme lassen sich die Kräfte in den drei Richtungen x , y und z sowie das Drehmoment M_z direkt messen. Ein weiterer Vorteil liegt in der elektronischen Anpassung der Messbereiche, die sich je nach Messaufgabe individuell einstellen lassen. Dadurch ist die Sensorik sehr flexibel und ohne verstärktes Hintergrundrauschen aufgrund der Elektronik einsetzbar.

Kraft über Dehnung: Dehnmessstreifen

Seit etwa zehn Jahren gibt es für die sensorischen Werkzeugaufnahmen eine Alternative zum Quarz: Dehnmessstreifen nutzen zur Messung die Verformung der Werkzeugaufnahme. Man kann sich das etwa so vorstellen: Jede Kraft, die auf eine Werkzeugschneide wirkt, verformt das Werkzeug und die Aufnahme minimal. Auf die Oberfläche der Werkzeugaufnahme geklebte Dehnmessstreifen messen diese Verformungen. Das Messprinzip basiert hierbei auf der Widerstandsmessung von Leiterbahnen, welche aufgrund der Dehnung und Stauchung ihren Widerstand ändern. Im Vergleich zum Quarz, dessen Einbau im Kraftfluss liegen muss, sind die Sensoren relativ einfach auf den Oberflächen der Werkzeugaufnahmen zu montieren und liegen preislich deutlich unter den Anschaffungskosten einer Quarz-basierten Messtechnik. Aus der Einbausituation ergibt sich aber auch noch ein weiterer wesentlicher Unterschied für die Messung in x- und y-Richtung. Die mit den Dehnmessstreifen gemessene Durchbiegung der Werkzeugaufnahme ist nicht direkt von den Kräften, sondern von den Biegemomenten abhängig. Um also auf die Kräfte in diese Richtungen zu schließen, muss der Anwender genau wissen, wie groß der Abstand zwischen Kraftangriffspunkt

und Messort der Dehnung ist. Zur Bestimmung der absoluten Kräfte oder einem Vergleich von Messungen mit unterschiedlichen Werkzeuglängen muss diese Entfernung bei der Auswertung berücksichtigt werden. Ein weiterer Nachteil ist, dass der Messbereich aufgrund der spezifischen Nachgiebigkeit der Werkzeugaufnahme festgelegt und nicht veränderlich ist. Zudem ist die Steifigkeit und damit zusammenhängend auch die Eigenfrequenz eines solchen Systems bedingt durch das dehnungsbasierte Messprinzip kleiner. Entsprechend neigen Messsignale im höherfrequenten Messbereich dazu, nicht richtig skaliert abgebildet und Details im Signal ungewollt ausgefiltert zu werden.

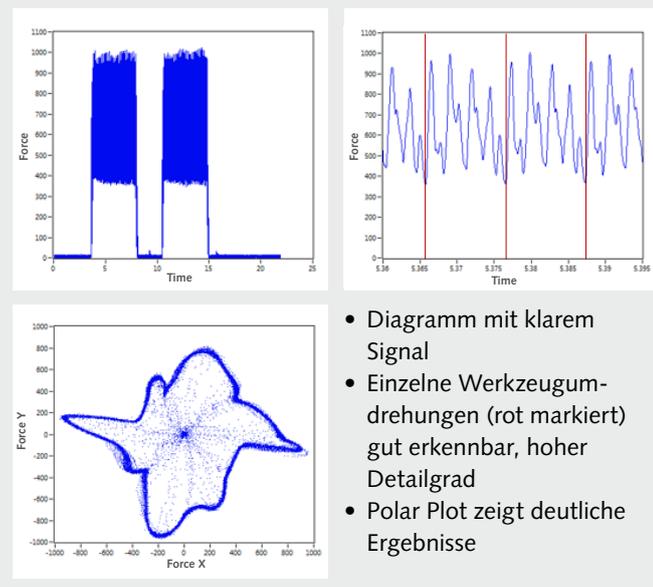
Piezo-Sensor und DMS in Vergleichstest

Die genauen Stärken und Schwächen der beiden Systeme lassen sich im konkreten Praxistest ermitteln: Beide Systeme sollen die jeweiligen Kräfte beim Fräsen erfassen. Getestet wird dabei einmal mit einem Werkzeug von zehn Millimetern Durchmesser und einmal mit einem Sechs-Millimeter-Fräser. Die Grafiken stellen die jeweiligen Ergebnisse dar, sodass Unterschiede in der Messung direkt sichtbar werden.

Messergebnisse

Werkzeug $\varnothing 10/z = 4 - vc 175 - fz 0,06 - ap 10 - ae 3$

XY-Kräfte/Piezo



Biegemoment/DMS

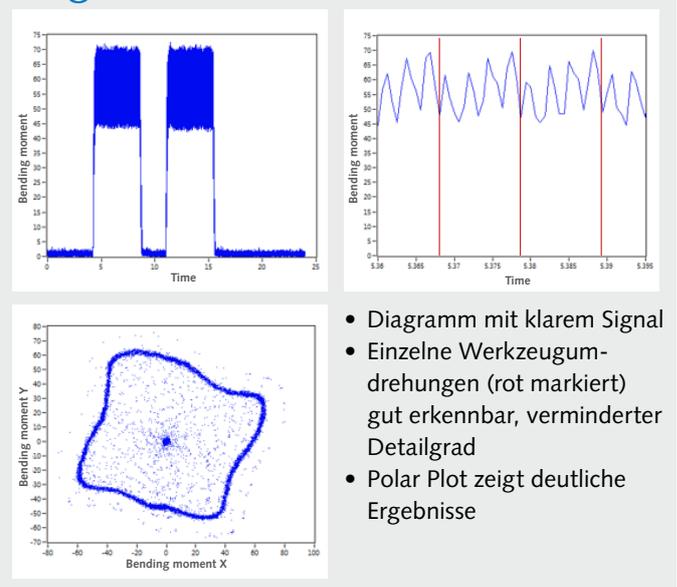


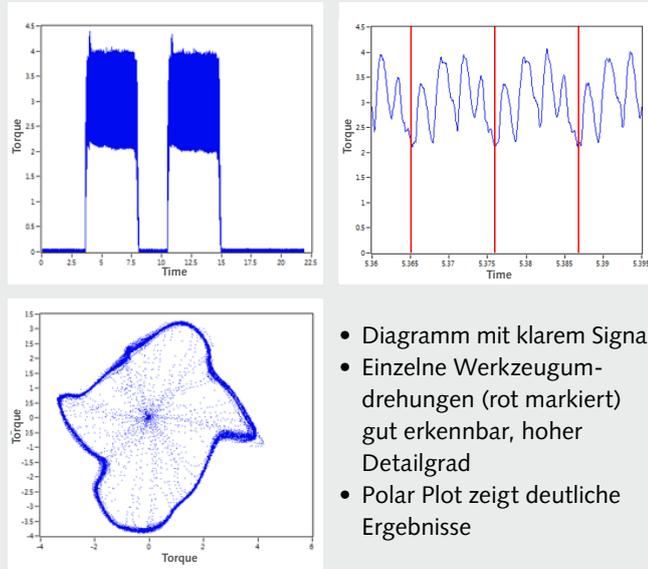
Abb. 2: Vergleichswerte zur Kräfteinwirkung in X/Y-Richtung, bzw. dem Biegemoment bei einem Werkzeugdurchmesser von 10 mm

Beim Vergleich der Messungen in x- und y-Richtung mit einem Werkzeugdurchmesser von zehn Millimetern (Abbildung 2) zeigen sich beide Systeme von ihrer besten Seite. Aufgrund der höheren Abtastrate sind die Daten des piezoelektrischen Sensors detailgenauer, jedoch stellen beide Systeme den Prozessverlauf zuverlässig dar. Die einzelnen Werkzeugumdrehungen (markiert mit roten Linien) lassen sich in beiden Fällen reproduzieren.

Messergebnisse

Werkzeug $\varnothing 10/z = 4 - vc 175 - fz 0,06 - ap 10 - ae 3$

Drehmoment M_z /Piezo



Drehmoment M_z /DMS

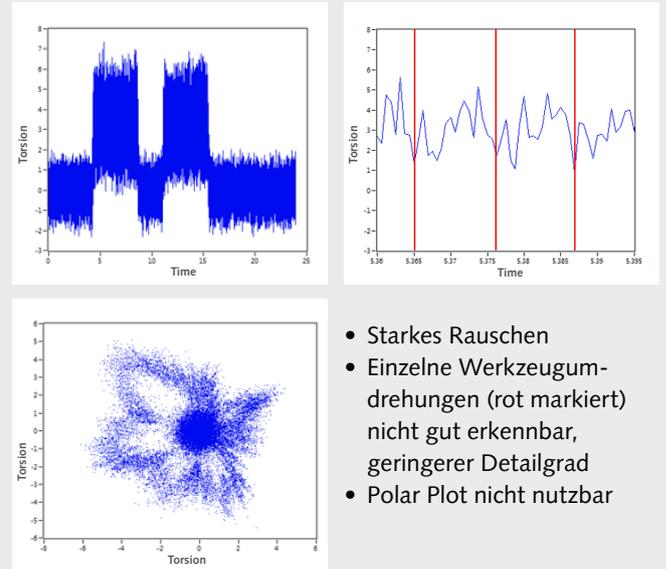


Abb. 3: Vergleichswerte aus der Drehmomentmessung bei einem Werkzeugdurchmesser von 10 mm

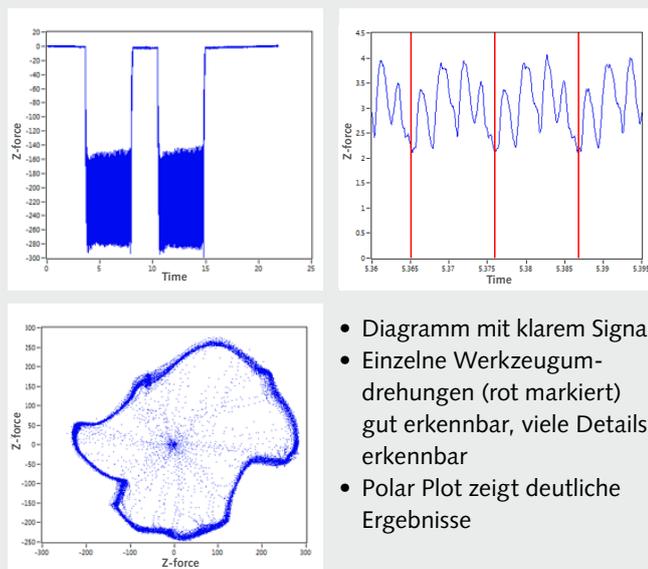
Beim Drehmoment jedoch schwächelt die DMS-Technik (Abbildung 3). Während die piezoelektrische Messung noch ein klar reproduziertes Muster für jede Werkzeugumdrehung zeigt, sind bei der DMS-Technologie keine Details mehr zu erkennen. Abtastrate und Signalstärke sind zu gering, um ein reproduzierbares Muster zu erhalten. Das Signal des DMS-Sensors muss stark verstärkt werden,

denn die geringen Kräfte wirken sich nur in sehr kleinem Maße auf die Torsion des Werkzeugs aus. Dies führt allerdings zu deutlichem Rauschen und einem signifikanten Verlust an Messgenauigkeit. Die einzelnen Werkzeugumdrehungen sind, im Gegensatz zu den Messungen der Quarzsensoren, nicht mehr zu unterscheiden.

Messergebnisse

Werkzeug $\varnothing 10/z = 4 - vc 175 - fz 0,06 - ap 10 - ae 3$

Z-Kraft/Piezo



Z-Kraft/DMS

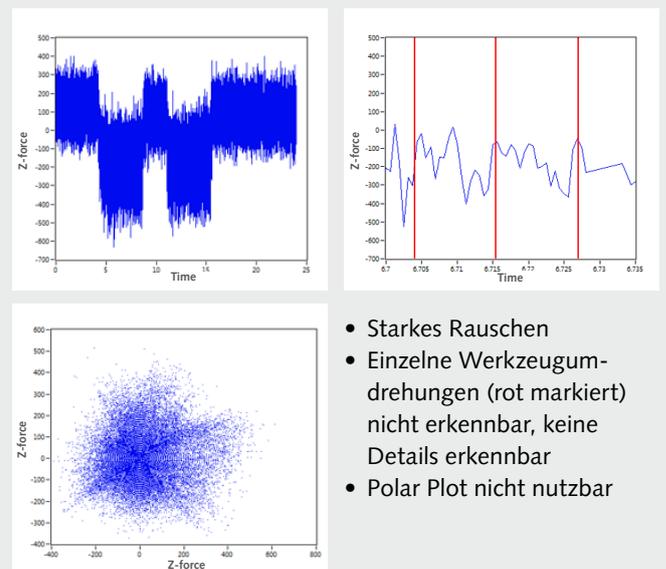


Abb. 4: Vergleichswerte zur Kräfteinwirkung in Z-Richtung bei einem Werkzeugdurchmesser von 10 mm

Auch die Messergebnisse bei der Z-Kraft schmeicheln dem günstigeren Sensor nicht (Abbildung 4). Während der Quarz ein deutliches Signal mit klar reproduzierbaren Kräften bei den einzelnen Werkzeugumdrehungen abgibt, gehen die Daten der DMS-Sensoren in Störsignalen unter. Besonders deutlich lässt sich dies an den Polarkoordinaten erkennen: Vom Signal bleibt nurmehr eine Punktwolke übrig.

Die Vorteile der piezoelektrischen Messtechnik stechen umso stärker hervor, je geringer die Größe des Werkzeugs ist. Die Qualitätsunterschiede bei den Messungen mit einem sechs-Millimeter-Werkzeug sind frappierend (Abbildungen 5-7). Während die Messqualität des piezoelektronischen Sensors auch bei einem Werkzeugdurchmesser von sechs Millimetern unverändert bleibt, fällt die Schwachstelle der Dehnmessstreifen beim Drehmoment und der Z-Kraft bei dem kleineren Fräser noch deutlicher ins Gewicht.

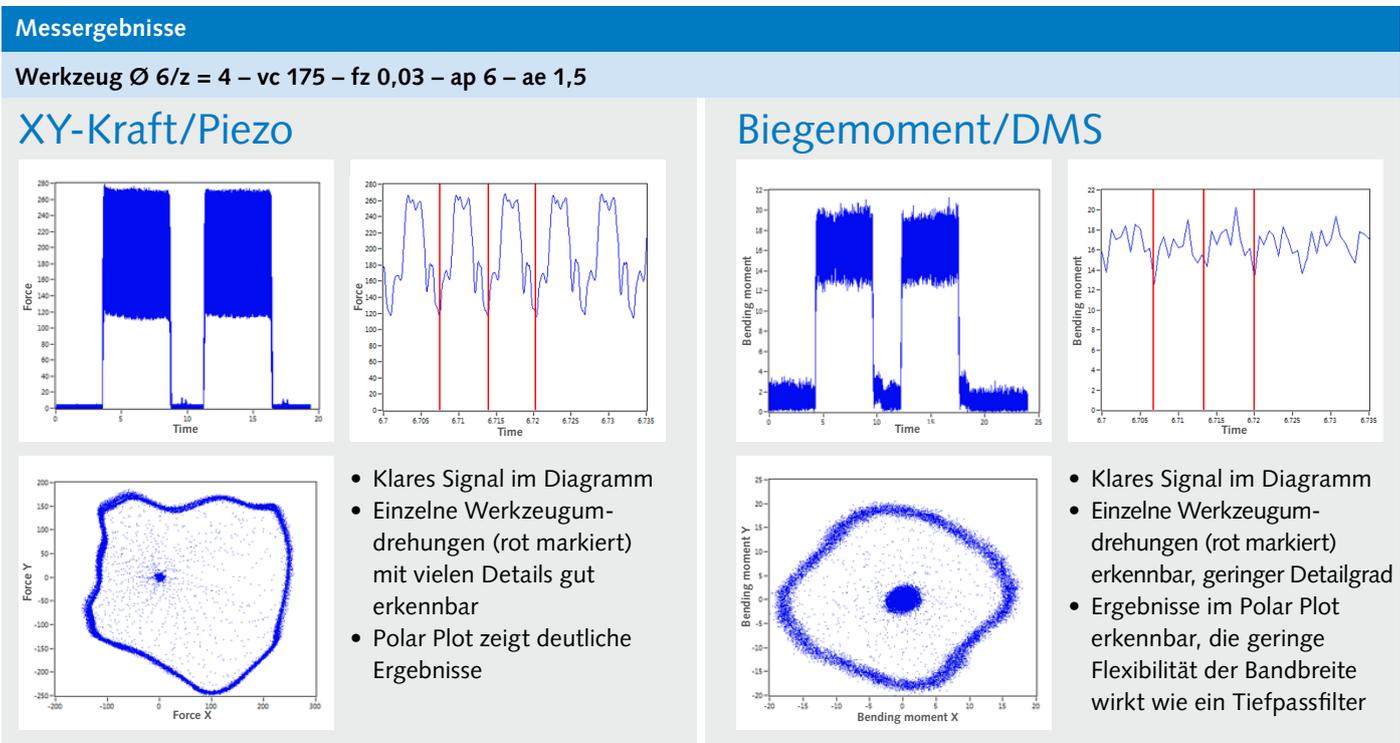


Abb. 5: Vergleichswerte zur Kraffteinwirkung in X/Y-Richtung, bzw. dem Biegemoment bei einem Werkzeugdurchmesser von 6 mm

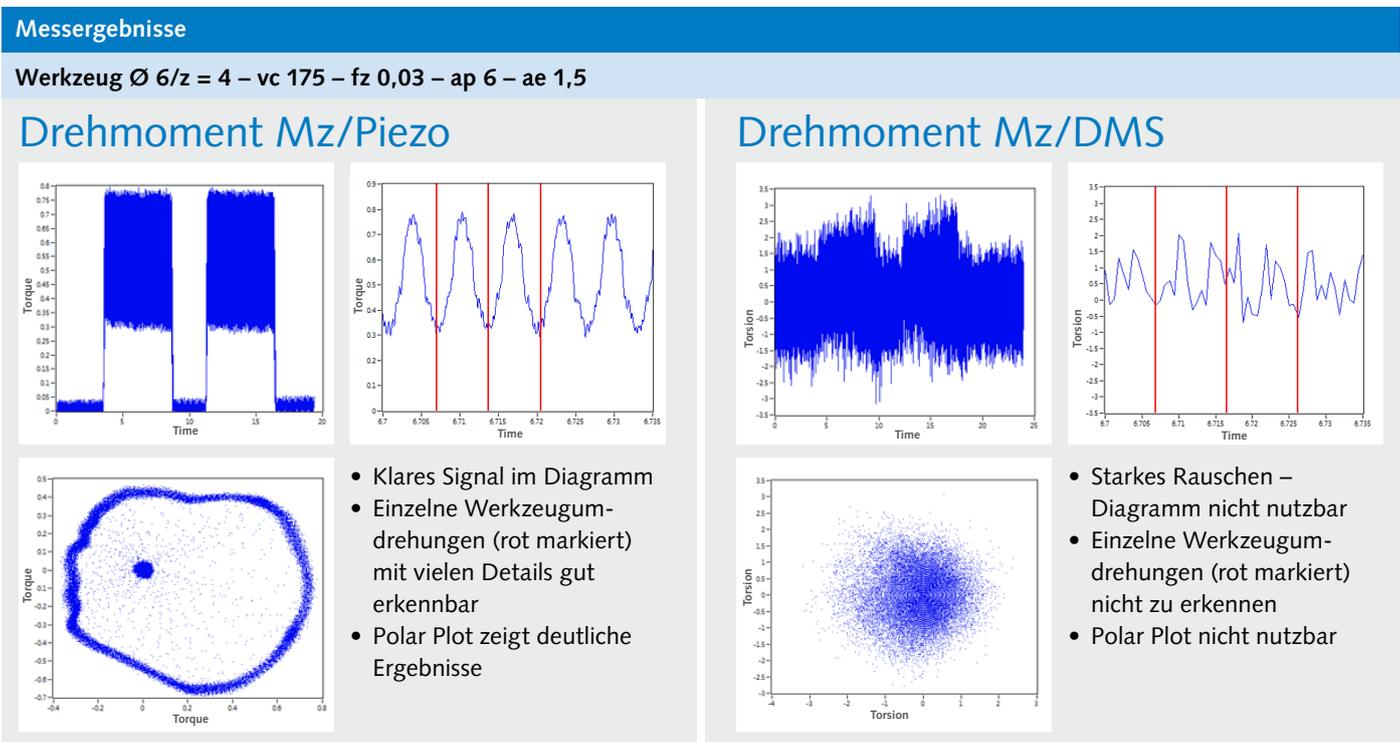
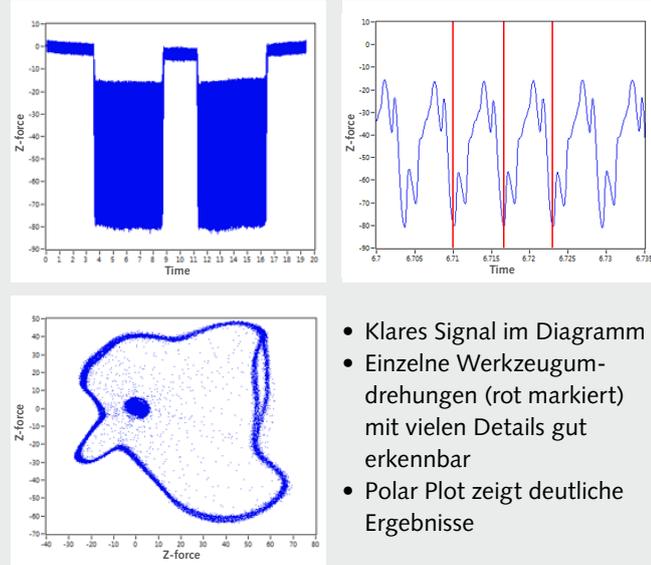


Abb. 6: Vergleichswerte aus der Drehmomentmessung bei einem Werkzeugdurchmesser von 6 mm

Z-Kraft/Piezo



Z-Kraft/DMS

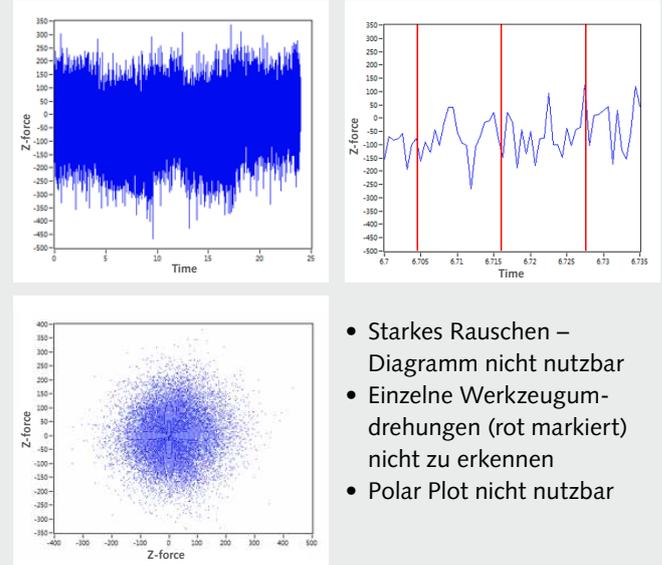


Abb. 7: Vergleichswerte zur Kräfteinwirkung in Z-Richtung bei einem Werkzeugdurchmesser von 6 mm

Piezoelektrischer Sensor: Klar die Nase vorn

Unter Verwendung von großen Werkzeugen sind für Messungen der Kräfte in xy-Richtung durchaus beide Systeme geeignet. Bei Messungen von Drehmoment und der z-Kraft hingegen zeigt sich die Grenze dessen, was Dehnmessstreifen technisch leisten können. Durch die geringere Abtastrate und das starke Hintergrundrauschen nach der nötigen Verstärkung sind die Ergebnisse hier kaum mehr verwertbar. Misst man nur die Verformung, sind die Messeigenschaften zu einem gewissen Grad durch das Werkzeug selbst vorgegeben. Je kleiner das Werkzeug, desto ungenauer ist die Messung, da hier die Oberflächendehnungen der Werkzeugaufnahme entsprechend gering sind und eine große Verstärkung nötig wird.

Beim piezoelektrischen Sensor hängt die Sensitivität rein von den elektronischen Eigenschaften ab, die über eine Software einstellbar sind. Da der Quarz selbst auf sehr geringe Kräfte empfindlich reagiert, sind Messungen des Drehmoments und der z-Kraft kein Problem. Für alle Messaufgaben, bei denen es auf einen hohen Detailgrad ankommt, empfiehlt sich ebenfalls piezoelektrische Messprinzip, da hier die hohe Abtastrate genauen Aufschluss über kleinste Veränderungen gibt. Die Kraft, welche die Schneide in den unterschiedlichen Momenten auf das Werkstück ausübt, lässt sich gut erkennbar grafisch darstellen. Der piezoelektrische Sensor bleibt somit die erste Wahl für alle, die anspruchsvolle Messungen vornehmen oder einen flexiblen Einsatzbereich bevorzugen.