

Werkbild: TBT

# Weniger Ausschuß

Mittenverlauf beeinflussen  
mit Druckpulsationen  
beim Einlippen-Tiefbohren

*Uwe Heisel und Klaus Enderle*

**Das Auslenken des Bohrwerkzeugs und damit der Bohrungslage ist von vielen Parametern abhängig. Korrigiert man den Mittenverlauf mit Hilfe von Druckpulsationen, so gelingt es, alle negativen Einflüsse – mit Ausnahme des Maschinenzustandes – zu kompensieren. Voraussetzung weiterhin jedoch ist die hochgenaue Flucht aller am Bohrvorgang beteiligter Maschinenteile.**



Der beim Tiefbohren auftretende Mittenverlauf ist in manchen Fällen nicht tolerierbar. Beaufschlagt man den Kühlschmierstoff mit Druckpulsationen, so läßt sich die auftretende Abweichung korrigieren. Zusammen mit einer im Prozeß arbeitenden Ultraschall-Wanddickenmessung kann man den Mittenverlauf regeln. Mit einer Pulsationseinrichtung lassen sich die Materialkosten und darüber hinaus die Gefahr von Bohrerbrüchen vermindern.

Aufgrund der hohen erreichbaren Oberflächengüte und der geringen Formabweichung von Bohrungen, die mit Tiefbohrverfahren hergestellt wurden, spricht man beim Tiefbohren auch vom „Präzisionsbohren“ [1]. Eines der größten Probleme beim Tiefbohren ist der zwar geringe, jedoch oft nur schwer beherrschbare Mittenverlauf (Bild 1). Vor allem bei großen Längen-/Durchmesserverhältnissen kann er zu nicht tolerierbaren Abweichungen führen und teure Werkstücke zu Ausschuß werden lassen. Besonders schwierig zu beherrschen sind Bohrungen nahe der Werkstückoberfläche oder Werkstücke aus inhomogenem Werkstoff, wie oberflächengehärtete oder geschmiedete Teile.

In der Praxis hat sich herausgestellt, daß sich bei gegenläufigem Bearbeiten, wenn also Werkzeug und Werkstück die Schnittbewegungen ausführen, besonders kleine Abweichungen von der Bohrungsideallage realisieren lassen (Bild 2). Es ist jedoch nicht immer möglich, auch die Werkstücke anzutreiben, weil die Maschine nicht mit einem angetriebenen Reitstock ausgerüstet ist oder die Werkstücke sich nicht für einen solchen Bearbeitungsfall eignen. Dann muß man zu anderen Mitteln greifen. Besonders beim Einlippen-Tiefbohrverfahren kann man eine Verbesserung erzielen, wenn der asymmetrische Querschnitt des Werkzeugschaftes so weit wie möglich mit einem zylindrischen Teil ausgestattet wird (Bild 3). Dies führt zu einer höheren Biegesteifigkeit des Werkzeugs und wirkt deshalb den Abweichen der Bohrungslage von der Ideallage entgegen.

o. Prof. Dr.-Ing. Uwe Heisel leitet den Lehrstuhl für spanende Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart. Dipl.-Ing. Klaus Enderle ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Leiter der Verfahrensoptimierung am selben Institut. Die dem Beitrag zugrundeliegenden Forschungen werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Aus einschlägigem Schrifttum sind einige Methoden zur Mittenverlaufskorrektur bekannt. Diese Verfahren behandeln jedoch nur den Bohrungsdurchmesserbereich von 80 mm und darüber und wurden demzufolge für BTA-Bohroperationen entwickelt [3]. Außerdem ist es überwiegend das Aufbohren, bei dem man nachträglich versucht, eine bereits vorbearbeitete Bohrung in ihrer Flucht zu verbessern [4, 5, 6].

### Mittenverlauf beeinflussen bei kleinen Durchmessern

Einen anderen Weg, den Mittenverlauf bei kleinen Durchmessern und hier besonders beim Einlippen-Tiefbohren zu verringern, ermöglicht der asymmetrische Druckverlauf des Kühlschmiermittels um den Bohrkopf des Werkzeugs. Der durch den Werkzeugschaft zum Bohrkopf geführte Kühlschmierstoff steht beim Verlassen des Bohrkopfes durch Bohrungen hinter der Wirkstelle noch unter relativ hohem Druck. In der Schaftsicke fällt der Druck rasch auf Umgebungsniveau ab. Diese

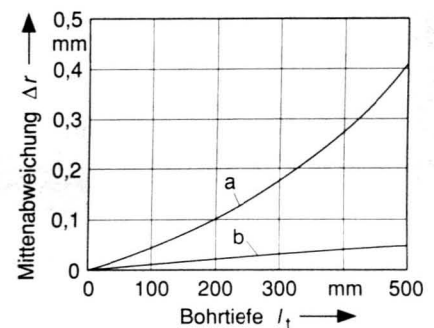
Druckunterschiede am Bohrkopfumfang und in Bohrerlängsrichtung (Bild 4) bewirken eine radiale Kraft (Ölkraft) auf den Bohrkopf, die relativ zum Bohrkopf ortsfest umläuft. Bei einem konstanten Kühlschmiermitteldruck ändert sich die Ölkraft auf den Bohrkopf nicht und hat demzufolge keinen Einfluß auf den Mittenverlauf der Bohrung. Überlagert man dem konstanten Druck einen dynamischen mit der Drehbewegung des Bohrwerkzeugs synchronisierten Druckanteil, so wird eine schwelende Ölkraft auf den Bohrkopf induziert. Diese versucht, den Bohrkopf in eine bestimmte Richtung auszu lenken. Kann man diese Kraft so steuern, daß sie dem zu erwartenden Mittenverlauf entgegenwirkt, so ist es möglich, den Mittenverlauf zu minimieren bzw. zu eliminieren. Zum Erzeugen von Druckpulsationen im Kühlschmiermittelkreislauf einer Tiefbohrmaschine eignen sich Servoventile, Pumpen mit nicht konstantem Förderstrom (Kolbenpumpen), Blenden nach dem Drehschieberprinzip oder mechanisch gekoppelte

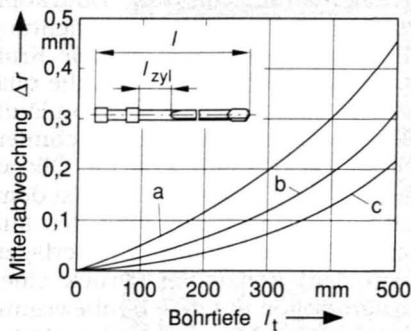
**Bild 1:**  
Einflußgrößen hinsichtlich des Mittenverlaufs [2].  
Die Auslenkung des Bohrwerkzeugs und der Bohrungslage ist von vielen Parametern abhängig.



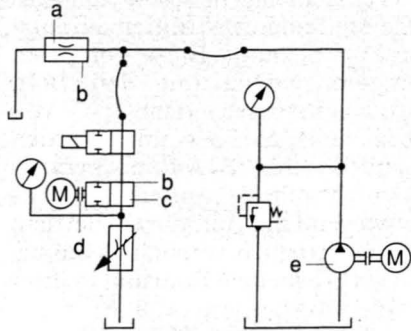
**Bild 2:**  
Mittenverlauf in Abhängigkeit von der Arbeitsweise [2] am Beispiel C 45 und d 16 mm, l 1000 mm  $v_c$  100 m · min<sup>-1</sup>, f 0,03 mm

a rotierendes Werkzeug, b Bohren im Gegenlauf



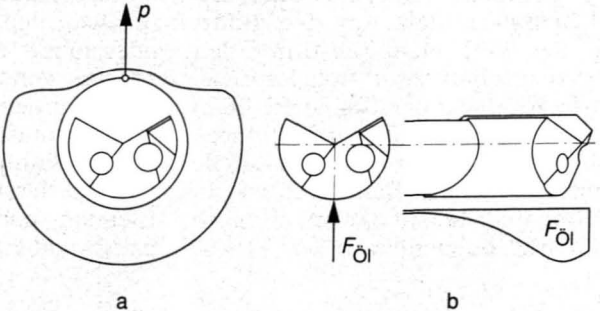


**Bild 3: Reduzierter Mittenverlauf bei Erhöhen der zylindrischen Länge des Bohrschafts am Beispiel 32 Cr Mo 5 (d 12 mm, l 1000 mm, v<sub>c</sub> 80 m · min<sup>-1</sup>, f 0,04 mm)**  
a l<sub>zyl</sub> 0 mm, b l<sub>zyl</sub> 100 mm, c l<sub>zyl</sub> 200 mm

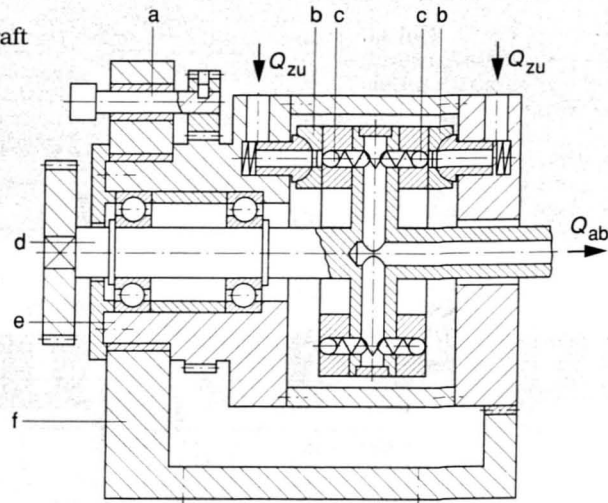


**Bild 5: Erweiterter Kühlschmierstoffkreislauf einer Tiefbohrmaschine zum Erzeugen von Druckpulsationen [7]**  
a Einlippenbohrer, b Lagesensor, c Pulsator, d Kupplung, e Konstantpumpe

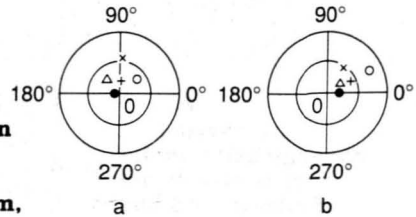
**Bild 4: Druckunterschiede an Bohrkopfumfang und in Bohrerlängsrichtung bewirken eine resultierende Ölkraft am Bohrkopf eines Einlippenbohrers [7]**  
a schematischer Druckverlauf, b resultierende Ölkraft



**Bild 6: Aufbau der Pulsationseinrichtung (Pulsator) [7]**  
a Schwenkeinrichtung, b Gleitschuhe, c Ventile, d Rotor, e Schwenkteil, f Gestell



**Bild 7: Einflüsse auf die Bohrungslage aufgrund von Druckpulsationen beim Zerspanen verschiedener Werkstoffe [3] bei (d 12 mm, v<sub>c</sub> 100m/min, f 0,04 mm)**  
a 32 Cr Mo 5, b Ck 45



- + ohne Pulsation
- Pulsatorstellung φ 0°
- Pulsatorstellung φ 90°
- △ Pulsatorstellung φ 180°
- × Pulsatorstellung φ 270°

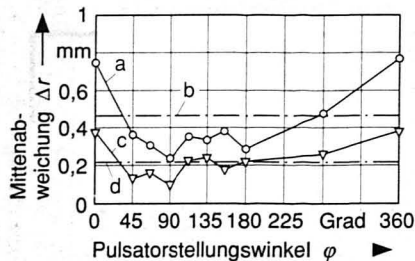
Ventile. Prinzipielle Möglichkeiten sind zusätzlich pulsierender Kühlmitteldruck und periodisches Absenken des Kühlmitteldrucks.

Periodisches Absenken des Kühlschmierstoffdrucks läßt sich mit geringerem technischen Aufwand mit Hilfe eines zwangsweise öffnenden Bypaß-Ventils erreichen. Bild 5 zeigt einen modifizierten hydraulischen Schaltplan für eine Kühlschmiermittelversorgung einer Tiefbohrmaschine nach dem Einlippen-Tiefbohrverfahren. Parallel zur Versorgungsleitung des Bohrwerkzeugs zweigt ein zweiter Ast über ein Sperrventil und ein von der Arbeitsspindel aus angetriebenes Ventil ab. Bei diesem Ventil handelt es sich um eine rein mechanisch wirkende Pulsationseinrichtung, den sogenannten Pulsator (Bild 6). Zur Korrektur des Mittenverlaufs einer Bohrung muß der Pulsator in der Lage sein, zu jedem beliebigen Zeitpunkt, bezogen auf eine Bohrerumdrehung, einen Druckimpuls erzeugen zu können. Dazu muß jede beliebige Phasenlage einstellbar sein. Am Pulsator wird dies mit einer Schwenkeinrichtung erreicht, die eine Winkelverschiebung des Druckimpulses relativ zur Werkzeugschneide von 0 bis 360° ermöglicht. Über Druckbegrenzungsventile im Kühlschmiermittelkreislauf vor und nach dem Pulsator lassen sich unterschiedliche Druckniveaus und Druckdifferenzen einstellen.

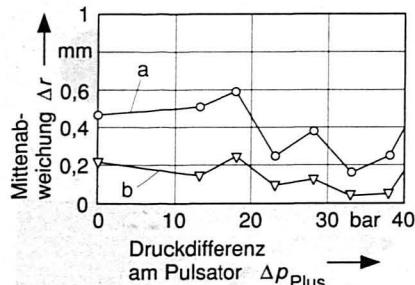
**Einfluß der Phasenlage auf die Mittengenauigkeit**

Beispielhaft durchgeführte Versuchsbohrungen in 32 Cr Mo 5 und Ck 45 beweisen den Einfluß der Druckpulsationen auf die Lage der Bohrungen im Werkstück (Bild 7). Ändert man die Phasenlage der Pulsation zur Stellung der Werkzeugschneide, läßt sich die Bohrungslage gut beherrschen. Bei einem Bohrungsdurchmesser von 12 mm und einer Bohrungslänge von 500 mm sind Mittenabweichungen bis unter 0,1 mm erzielbar. Der Einfluß der Phasenlage auf die Mittengenauigkeit wird auch in Bild 8 deutlich. Es zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Mittenabweichung gegenüber dem üblichen Bohren bei Phasenlagen um 90°.

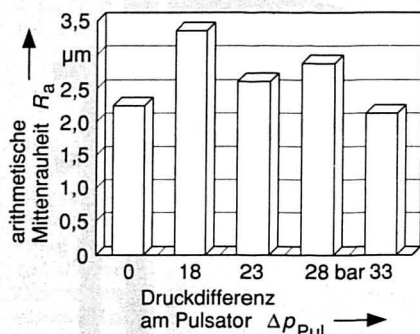
Die Laufzeit eines Druckimpulses im hydraulischen System und damit die Phasenlage der Druckpulsationen ist abhängig vom Werkstück, von Schnittgeschwindigkeit und Vorschub, weil diese



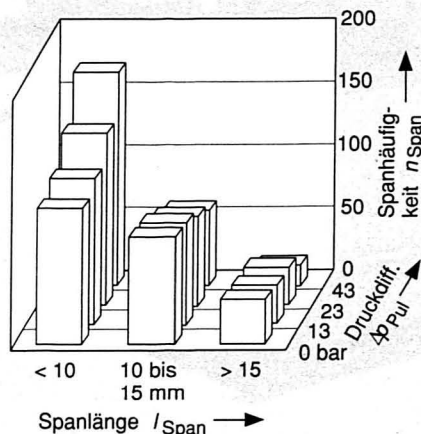
**Bild 8: Mittengenaugkeit in Abhängigkeit von der Phasenlage der Druckpulsationen (Werkstoff Ck 45, Schnittdaten wie Bild 8)**  
a  $l_t$  500 mm, b  $l_t$  500 mm ohne Pulsation, c  $l_t$  250 mm, d  $l_t$  250 mm ohne Pulsation



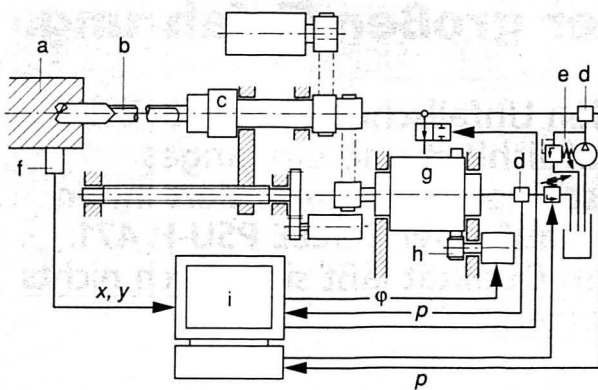
**Bild 9: Mittengenaugkeit in Abhängigkeit von der Druckdifferenz der Druckpulsation ( $\varphi$  90°, Werkstoff Ck 45, Schnittdaten wie Bild 8)**  
a  $l_t$  500 mm, b  $l_t$  250 mm



**Bild 10: Einfluß der Pulsationen auf die Oberflächengüte (Werkstoff Ck 45, Schnittdaten wie Bild 8)**



**Bild 11: Verbessertes Spanbruchverhalten (Werkstoff Ck 45, Schnittdaten wie Bild 8)**



**Bild 12: ACO-Regelsystem für die Mittengenaugkeit**  
a Werkstück, b Werkzeug, c Tiefbohrereinheit, d Drucksensor, e Kühlschmierstoffversorgung, f Abweichungsmessung, g Pulsator, h Schwenkeinrichtung, i Rechner

jedoch um einen konstanten, maschinenbedingten Wert, der einmalig zu ermitteln ist.

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Beeinflussbarkeit der Bohrungslage stellt der Pulsationsdruck und hierbei besonders die Druckdifferenz dar. Für den oben beschriebenen Bearbeitungsfall erweisen sich Druckdifferenzen von 30 bar als besonders geeignet. Zu kleine oder zu große Druckdifferenzen führen zu ungenügender oder einer zu großen Korrektur der Bohrungslage (Bild 9).

## Kürzere Späne infolge Druckpulsationen

Pulsationen im Kühlschmiermittelsystem können die Oberflächenqualität der erzeugten Bohrungen beeinflussen. Die Qualitätseinbußen hierbei jedoch sind gering. Der arithmetische Mittenrauhwert von Bohrungen, die unter Zuhilfenahme von Druckpulsationen gefertigt wurden, steigt je nach Druckdifferenz um maximal 50 Prozent an (Bild 10).

Alle Tiefbohrverfahren neigen in hohem Maße zum Bilden von Fließspan. Frühere Untersuchungen weisen nach, daß man die Spancharakteristik verbessern kann, wenn man den Kühlschmierstoffstrom inhomogenisiert [7]. Kürzere Späne ergeben sich bei Druckpulsationen zur Mittenverlaufskorrektur als Nebeneffekt (Bild 11). Mit zunehmender Druckdifferenz der Pulsationen steigt die Anzahl der Späne, die eine Länge von 10 mm nicht überschreiten, an, während gleichzeitig die Zahl der Späne größerer Längen deutlich abnimmt. Dieser Effekt wird von den Druckpulsationen ausgelöst, die den Bohrer zu Längsschwingungen anregen. Die Späne brechen leichter, weil sie quasi Sollbruchstellen bekommen. Die so verkürzten Späne lassen sich leichter aus der Bohrung ausspülen und bilden deshalb weniger Wirspspäne beziehungsweise Spänestaubs. Der Fertigungsprozeß gewinnt mit dieser Maßnahme an Sicherheit und senkt somit die Kosten für Werkzeuge und Werkstoffe.

## Bohrungslage korrigieren während des Bearbeitens

Eine erfolgreiche Korrektur der Bohrungslage während des Bearbeitens setzt eine genaue Kenntnis des Bohrerungsverlaufs im Werkstück voraus. Zum einen kann man den Mittenverlauf nach dem Fertigstellen der Bohrung messen und anschließend korrigieren. Das Bohrerergebnis wird auf diese Weise empirisch opti-

Größen das Bohrmoment und damit das Verdrillen des Bohrerschaftes beeinflussen. Diese Größe ist für jede Schnitwertkombination und jeden Werkstoff unterschiedlich und ist jeweils zu berechnen. Darüber hinaus hängt die Phasenlage der Druckpulsation von der Stellung des Werkzeugs zum Rotor des Pulsators und von der Länge der hydraulischen Leitungen zwischen Pulsator und Wirkstelle ab. Hierbei handelt es sich

miert. Zum anderen ist ein Regelsystem zur Korrektur denkbar nach Bild 12. Dazu muß die tatsächliche Lage der Bohrung im Werkstück während des Bearbeitungsvorgangs bekannt sein. Eine mögliche Methode ist das Ultraschall-Wanddickenmessen [2]. Anhand dieser Information läßt sich mit einem Rechner die Abweichung von der Ideallage bestimmen und über Druckpulsationen, von denen Phasenlage und Druckdifferenz ebenfalls im Rechner bestimmt worden sind, korrigierend eingreifen ( $\varphi$  Pulsatorstellungswinkel). Die Phasenlage läßt sich über die Schwenkeinrichtung am Pulsator

variieren. Diese wird von einem Servomotor angetrieben. Die Drücke  $p$  sind ebenfalls vom Rechner aus über Druckbegrenzungsventile einstellbar. Weil man mit diesem System den Mittenverlauf optimieren kann, spricht man in diesem Fall von einem ACO-System (Adaptive-Control-Optimization).

#### Schrifttum

- [1] Tuffentsammer, K.: Die Bearbeitung zylindrischer Innenflächen an stillstehenden Werkstücken. TZ für Metallbearbeitung 70 (1976) 9, S. 252 – 260.
- [2] Stürenburg, H. O.: Zum Mittenverlauf beim Tiefbohren. Dissertation Universität Stuttgart 1983.
- [3] Frezinsskii, L. L., und S. L. Frezinskaya:

Drilling deep holes with correction of the machined axis position. Vestnik Mashinostroeniya 64 (1984) 1, S. 45 – 48.

- [4] Prince, T. E.: Laser helps bore straight holes. American Machinist (1971) 9, S. 60 – 61.
- [5] Dipertstein, M.: Correcting the Position of the Axis of a Deep Hole in Boring. Vestnik Mashinostroeniya 64 (1984) 3, S. 56 – 59.
- [6] N. N.: Einrichtung zum Steuern eines Bohrkopfes beim Tiefbohren. USA-Patentschrift 3635108 (1972).
- [7] Enderle, K.: Beeinflussung des Mittenverlaufs beim Einlippen-Tiefbohren durch Pulsation des Kühlmittels. Umdruck zu Fachgespräch zwischen Industrie und Hochschule (Tiefbohren) an der Universität Dortmund 1990, S. 44 – 50.
- [8] Chin, J.-H.: Voraussetzungen und Konzeption eines Grenzwertregelungssystems für das Einlippen-Tiefbohren. Dissertation Universität Stuttgart 1987.