

# Hohe Stabilität

Torsionsschwingungen vermindern  
beim Tiefbohren mit Einlappenwerkzeugen

*Uwe Heisel und Rudolf Hauger*



Bild: Verfasser

**MM**  
Maschinenmarkt

Instabilitäten im Zerspanungsprozeß, hervorgerufen von Nachgiebigkeiten im Kraftfluß, führen zu höherem Verschleiß und verhindern vielfach eine höhere Produktivität spanabhebender Verfahren. Insbesondere langschäftige Werkzeuge zeigen aufgrund ihrer geringen Torsions- und Biegesteifigkeit eine hohe Schwingunganfälligkeit. Zum Herstellen und Bearbeiten tiefer Bohrungen aber müssen Werkzeuge verwendet werden, deren Längen/Durchmesserverhältnis das üblicher Werkzeuge bei weitem übersteigt.

Das Einlippenbohrverfahren (Bild 1) zählt neben dem BTA- und Ejektorbohrverfahren zu den drei klassischen Tiefbohrverfahren, mit denen in Extremfällen Längen/Durchmesserverhältnisse bis zu 250 erreicht werden können. Kennzeichnend für alle Tiefbohrverfahren ist die kontinuierliche Spanabfuhr und eine hohe Bohrungsqualität bis zu IT 7, die ein Nachbearbeiten in vielen Fällen überflüssig macht. Dank der hohen Zerspanleistung und Bohrungsqualität wendet man das Einlippenbohrverfahren zunehmend auch für kurze Bohrungen an. Zusätzlich eröffnet die zentrale Kühlschmierstoffzuführung dem Einlippenbohrverfahren attraktive Anwendungsmöglichkeiten auf Bearbeitungszentren. Der Durchmesserbereich des Einlippenbohrverfahrens erstreckt sich von 0,9 mm bis etwa 32 mm.

### Werkzeugschwingungen führen zu Verschleiß

Bei den Werkzeugschwingungen handelt es sich vorwiegend um selbsterregte Torsionsschwingungen [1]. Bei ungenügend radialer Abstützung des Bohrerchaftes in den Lütteneinsätzen kann es aber auch zu einer Überlagerung mit Biegeschwingungen kommen. Das von den Torsionsschwingungen hervorgerufene dynamische Bohrmoment bewirkt eine schlagende Beanspruchung der beiden Hauptschneiden und führt letztlich zu höherem Verschleiß oder gar Schneidenausbruch an der Innenschneide. Ausbrüche an Innen- und Außenschneide und die vollständige Zerstörung des Bohrerkopfes bei längerer Einwirkung sind die Folge der zu hohen dynamischen Beanspruchung, die ab einer bestimm-

ten Vorschubgeschwindigkeit auftreten kann.

Neben schlechteren Bohrungsflächen führen Torsionsschwingungen auch zu veränderten Spanformen. Kurze, mit Rippen versehene Späne resultieren aus instabilen Bohrvorgängen, während für den stabilen Bohrvorgang längere, gefaltete Späne charakteristisch sind (Bild 2). Diese Tatsache trifft aber vorwiegend nur für Werkstoffe mit höherer Festigkeit zu, wie zum Beispiel für den 42CrMo4 V. Bei leicht zerspanbaren Werkstoffen hingegen sind kürzere Späne infolge der Torsionsschwingungen nicht unbedingt feststellbar. Der eingestellte Vorschub bzw. Zerspanungsdicke spielen in diesem Zusammenhang eine grundlegende Rolle.

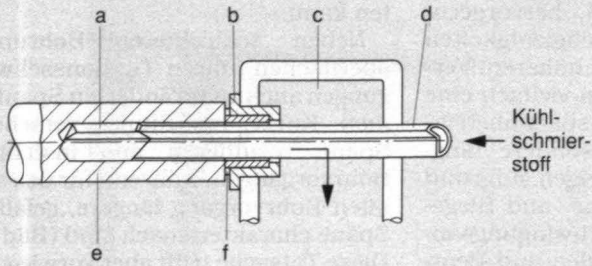
### Schalldruckpegel steigt beim instabilen Bohren

Ein weiterer großer Nachteil der Torsionsschwingungen ist die damit verbundene Geräusentwicklung. Messungen nach DIN 45635 ergaben, daß sich beim stabilen Bohren der Schalldruckpegel nur geringfügig vom Grundgeräusch der Maschine abhebt, das im wesentlichen von der Hochdruckpumpe und dem Hauptspindelmotor hervorgerufen wird. Im Gegensatz dazu nimmt beim instabilen Bohrvorgang der Schalldruckpegel erheblich zu. Die Differenz zwischen stabilem und instabilem Bohrvorgang vergrößert sich mit zunehmendem Bohrerdurchmesser und beträgt bei  $d_N$  14 mm bereits 9 dB. Die am Ohrpunkt gemessenen Werte liegen im Mittel noch um 5 dB höher. Eine Zunahme von bereits 10 dB aber wird vom menschlichen Gehör als eine Verdopplung der Lautstärke registriert.

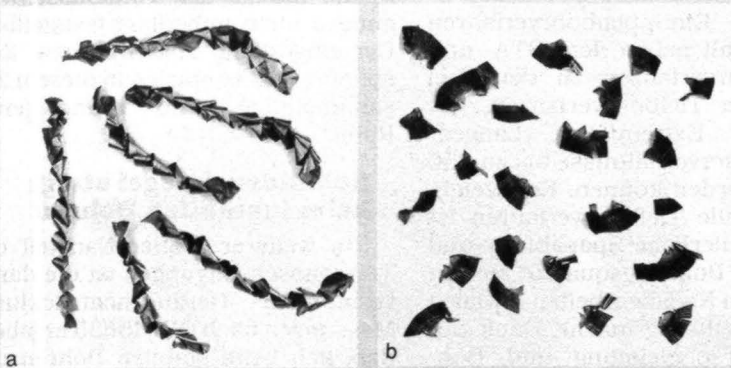
Viele konstruktive Maßnahmen zur Erhöhung der Stabilität von Einlippenbohrwerkzeugen jedoch brachten bislang keinen durchschlagenden Erfolg. Im Prinzip hat sich bis zum jetzigen Zeitpunkt nur ein besonderer Dämpfer beim BTA-Bohrverfahren durchsetzen können. Er wandelt die Schwingungsenergie durch Reibung, die infolge einer Relativgeschwindigkeit zwischen einer konstant umlaufenden Masse und dem schwingenden Bohrerchaft entsteht, in Wärmeenergie um. Für das BTA-Verfahren wurde ein automatisch arbeitendes System zur Verringerung der Torsionsschwingungen entwickelt, das die Torsionsschwingungen sensorisch erfaßt und den Dämpfer an die Stelle größter Amplitude positioniert

Prof. Dr.-Ing. Uwe Heisel ist Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart. Dipl.-Ing. Rudolf Hauger ist Mitarbeiter bei einem Süßwarenhersteller in Lörrach.

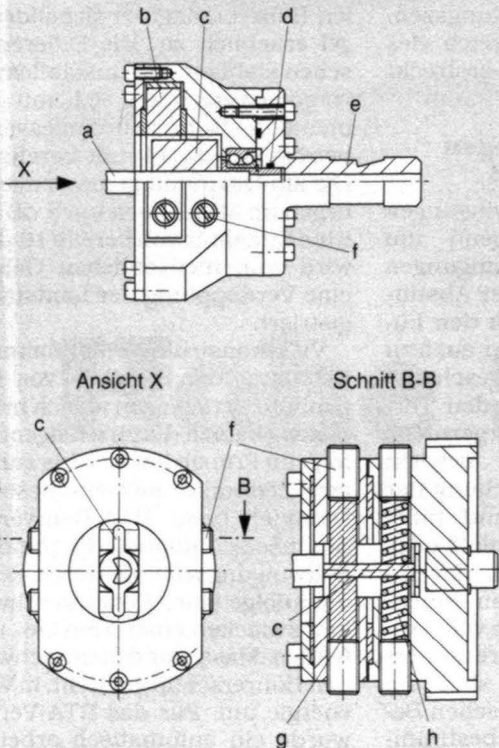
**Die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit beim Einlippenbohren wird aufgrund von auftretenden Torsionsschwingungen begrenzt. Mit einer torsionselastischen und zugleich dämpfenden Einspannung jedoch läßt sich die Vorschubgeschwindigkeit erheblich steigern. Voraussetzung allerdings ist das genaue Anpassen der Einspannparameter an die konstruktiven Auslegungsrichtlinien. Diese wurden inzwischen untersucht und bestätigt.**



**Bild 1: Eines der drei klassischen Tiefbohrverfahren ist das Einlippenbohrverfahren**  
 a Bohrerkopf, b Bohrbuchsenträger, c Späneschacht, d Bohrerschaft, e Werkstück, f Bohrbuchse



**Bild 2: Spanbildung bei stabilem (a) und instabilem (b) Bohrvorgang**



**Bild 3: Modular aufgebaute torsionselastische Einspannung**  
 a Bohrerschaft, b Rundschnurhalterung, c Flügel, d Lageranpassungsstück, e Spindelanpassungsstück, f Gewindestift, g Rundschnur, h Druckfeder

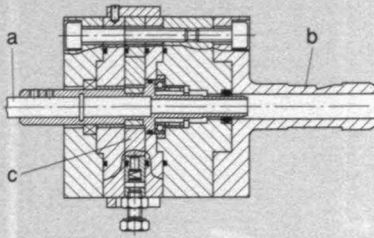
[2 und 3]. Während sich in der Praxis der oben genannte Dämpfer beim BTA-Verfahren durchsetzen konnte, findet er beim Einlippenbohren kaum Anwendung, weil er mit zunehmender Bohrtiefe wegen der zur Spindel oder Einspannung hin abnehmenden Amplitude nicht mehr ausreichend dämpfen kann. Dies führte zur Entwicklung der torsionselastischen Einspannung des Bohrerschafts in der Spindel [1].

**Torsionsschwingungen wirksam reduzieren**

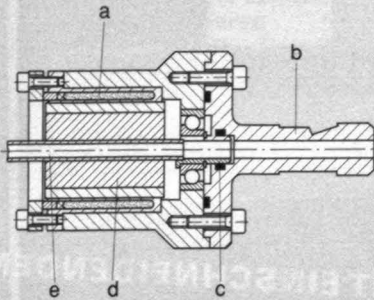
Weil es noch keine Richtlinien für das Auslegen einer torsionselastischen Einspannung gibt, hat sie sich in der Praxis bisher noch nicht durchsetzen können, obwohl erste Versuche die Richtigkeit des Ansatzes bestätigten [1]. Deshalb bestand zunächst die Notwendigkeit, Auslegungsrichtlinien zu erstellen, um ein optimales Anwenden der torsionselastischen Einspannung zu gewährleisten.

Auf der Basis eines Softwareprogramms, das das Berechnen von gekoppelten Mehrmassensystemen erlaubt, wurden die Einspannparameter Steifigkeit, Dämpfung und Massenträgheitsmoment analysiert und ihre Wirkung auf das Dämpfungsverhalten der gewählten Struktur untersucht. Die Modellierung des Einlippenbohrwerkzeugs mit torsionselastischer Einspannung als ein Schwingungssystem mit drei Einzelmassen war dabei hinreichend genau. Vergleichsrechnungen mit einem Acht-Massen-Modell zeigten nur geringfügige Unterschiede. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Parameterstudie:

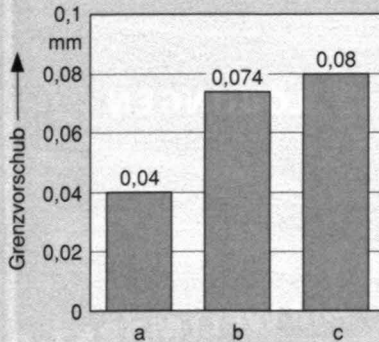
- ▶ Die Torsionssteifigkeit der Einspannung ist gleich der Bohrerschaftstorsionssteifigkeit zu wählen.
- ▶ Das zusätzliche Massenträgheitsmoment der torsionselastischen Einspannung soll so klein wie möglich sein. Das Massenträgheitsmoment des Werkzeugs darf nicht überschritten werden.
- ▶ Das Dämpfungsmoment in der Einspannung darf nicht größer sein als das dynamische Bohrmoment. Kennzeichnend für eine modular aufgebaute torsionselastische Einspannung ist die hohe Flexibilität gegenüber der Einstellung der Einspannparameter (Bild 3). Damit lassen sich die Torsionssteifigkeit sowie die Dämpfung problemlos auf das jeweilige Werkzeug abstimmen. Die Steifigkeit wird mittels zylindrischer Druckfedern eingestellt, die das Bohrmoment über einen auf dem



**Bild 4: Torsionselastische Einspannung mit Flüssigkeitsreibung**  
a Bohrschaft, b Spindel Anpassungsstück, c Flügel



**Bild 5: Aufnahmevorrichtung für größere Hülsendurchmesser**  
a hydraulische Hohlmantelspannbuchse, b Spindel Anpassungsstück, c Lager Anpassungsstück, d Elastomer, e Bohrschaft



**Bild 6: Stabilität verschiedener Einspannungen im Hinblick auf den Grenzvorschub am Beispiel eines 42CrMo4 V und einem Bohrerdurchmesser von 12 mm**  
a feste Einspannung, b Einspannung mit Flüssigkeitsreibung, c einvulkanisierter Bohrschaft

dungsbereich von torsionselastischen Einspannungen mit zusätzlichem Massenträgheitsmoment in Bezug auf kleinere Bohrer Durchmesser begrenzt.

Der Nachteil des zusätzlichen Massenträgheitsmoments ist bei einvulkanisiertem Bohrer in die Einspannhülse nicht mehr gegeben. Lediglich das Lager Anpassungsstück trägt einen kleinen Teil dazu bei (Bild 5). Dieses aber wird nur bei einem Schaftdurchmesser von mehr als 10 mm nötig, um die höhere Vorschubkraft sicher abzustützen. Das Massenträgheitsmoment des Anpassungsstücks ist auf jeden Fall kleiner als das der Werkzeuge. Bei den kleineren Durchmessern kann die Vorschubkraft hingegen aufgrund ihrer geringen Größe direkt von der Elastomerschicht aufgefangen werden. Die Konstruktion ist einfach. Für Werkzeugdurchmesser unter 10 mm genügt die handelsübliche Einspannhülse, was das Handhaben auch im Hinblick auf eine Automation des Verfahrens wesentlich erleichtert. Wegen der Auslegungsrichtlinien sowie aus gießtechnischen Gründen ist für größere Durchmesser eine Einspannhülse zu verwenden, deren Außendurchmesser eine besondere Aufnahmevorrichtung verlangt. Übertragen wird das Bohrmoment mit Hilfe einer hydraulischen Hohlmantelspannbuchse, die unterschiedliche Spannhülslängen erlaubt. Das Anpassungsstück für die Spindel der Tiefbohrmaschine ist für alle realisierten torsionselastischen Einspannungen geeignet.

Bohrerschaft befestigten Flügel übertragen. Die Vorschubkraft fängt das Schrägkugellager auf. Gedämpft werden die Torsionsschwingungen über Elastomerrundschnüre, die ebenfalls über den Flügel auf das Schwingungssystem einwirken. Die Halterung der Rundschnüre ist in dem Gehäuse drehbar gelagert, um eine Vorspannung infolge des statischen Bohrmoments zu vermeiden. Mit Gewindestiften lassen sich sowohl die Druckfedern als auch die Rundschnurteile spielfrei einpassen.

### Torsionssteifigkeit dem Werkzeug anpassen

Die Torsionssteifigkeit der torsionselastischen Einspannung mit Flüssigkeitsreibung als Wirkprinzip kann man in einem bestimmten Bereich an die Torsionssteifigkeit der Bohrwerkzeuge anpassen, wenn man die zylindrischen Druckfedern austauscht (Bild 4). Die Dämpfung rekrutiert sich aus der oszillierenden

Drehbewegung des Flügels während den Torsionsschwingungen. Dabei wird über eine am Kopf der einzelnen Flügelsegmente befindliche Drossel die Flüssigkeit von einer Kammer in die andere gepumpt und so dem System Energie entzogen. Ändern läßt sich die Dämpfung zum einen über Drosselstifte, zum anderen über unterschiedliche Viskositäten der Flüssigkeit. Nachteilig wirkt sich aber bei diesen beiden Konstruktionen das zusätzliche Massenträgheitsmoment aus, das sich nur zu einem Teil minimieren läßt. Damit ist der Anwen-

### Dynamische Stabilität läßt sich verbessern

Die mit einer modular aufgebauten torsionselastischen Einspannung durchgeführten Untersuchungen dienten dem Sammeln erster Erfahrungen bezüglich des Einflusses der Einspannparameter auf die Stabilität. Es stellte sich heraus, daß sich eine elastische und zugleich dämpfende Einspannung positiv auf die dynamische Stabilität auswirkt. Die torsionselastische Einspannung mit Flüssigkeitsreibung oder einvulkanisiertem Bohrer zeigt eine deutliche Erhöhung des stabilen Arbeitsbereichs gegenüber dem fest eingespannten Bohrwerkzeug (Bild 6). Während die Einspannung mit Flüssigkeitsreibung den Grenzvorschub um etwa 85% zu erhöhen vermag, läßt sich mit dem einvulkanisierten Bohrer der stabile Arbeitsbereich des untersuchten Werkzeugs um na-



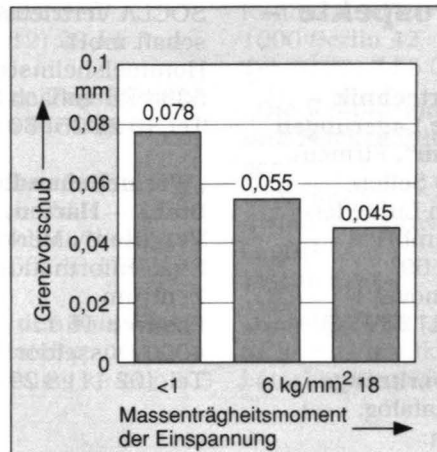
hezu 100% gegenüber dem festeinge-  
spannten steigern. Dabei wurden die  
für die jeweilige Einspannung gelten-  
den optimalen Einspannparameter  
gemäß den Auslegungsrichtlinien  
eingestellt. Als Grenzvoranschub wird  
der Vorschub bezeichnet, ab dem das  
Werkzeug Torsionsschwingungen  
ausführt.

Die bei der theoretischen Ausle-  
gung festgestellte hohe Empfindlich-  
keit gegenüber geringfügigen Parame-  
teränderungen setzte sich auch in  
den praktischen Versuchen fort. Ins-  
besondere kann ein zu großes zusätz-  
liches Massenträgheitsmoment der  
Einspannung zur Abkopplung der  
Torsionsschwingungen und folglich  
zur Wirkungslosigkeit der Einspan-  
nung (Bild 7) führen. Dies ist auch  
der Grund, warum torsionselastische  
Einspannungen mit zusätzlichem  
Massenträgheitsmoment erst für  
einen Schaftdurchmesser ab 10 mm  
geeignet sind. Im Gegensatz dazu er-  
wies sich das Vulkanisieren der Boh-  
rerschäfte aufgrund ihres vernach-  
lässigbaren kleinen Massenträgheits-  
moments besonders bei kleinen Boh-  
rerdurchmessern als einzige Mög-  
lichkeit, die dynamische Stabilität zu  
verbessern.

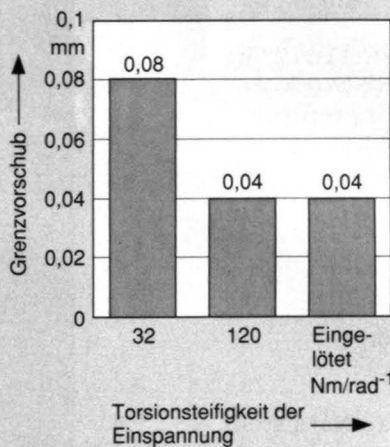
Entsprechend dem Massenträg-  
heitsmoment reduziert eine zu groß  
gewählte Torsionssteifigkeit der Ein-  
spannung die Wirkung der torsions-  
elastischen Einspannung erheblich  
(Bild 8). Der Grund ist, daß für die  
Wirksamkeit einer Dämpfung eine ge-  
wisse Elastizität Voraussetzung ist.  
Folglich kann bei zu großer Steifig-  
keit oder zu geringer Elastizität dem  
Schwingungssystem keine Energie  
mehr entzogen werden. Torsionsstei-  
figkeiten unterhalb der des Werk-  
zeugs ergeben keine weitere Verbes-  
serung. Im Gegenteil: Das Anbohren  
wird außerordentlich erschwert. Die  
hohe radiale Nachgiebigkeit des Boh-  
rerschafes verhindert ein definiertes  
Anbohren und führt zum Rattern, bis  
die Führungsleisten in die Bohrung  
eingedrungen sind.

### Wirksamkeit hängt ab von der Dämpfung

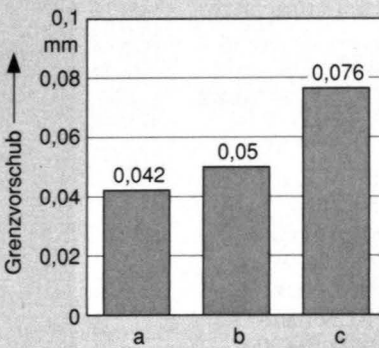
Ebenso wie die beiden anderen  
Einspannparameter hängt die Wirk-  
samkeit einer torsionselastischen  
Einspannung von der eingestellten  
Dämpfung ab. Ist in der Einspannung  
keine Dämpfung vorhanden, so trägt  
sie nur unwesentlich zur Stabilisie-  
rung des Werkzeugs bei (Bild 9).  
Überschreitet das Dämpfungsmo-  
ment das dynamische Moment der  
Werkzeugschwingungen, so verliert



**Bild 7: Einfluß des Massenträgheitsmoments der Einspannung**



**Bild 8: Einfluß der Torsionsteifigkeit der Einspannung**



**Bild 9: Einfluß der Dämpfung**  
a Standardwerkzeug, b torsions-  
elastische Einspannung ohne  
Dämpfung, c torsionselastische  
Einspannung mit Dämpfung



die Einspannung wiederum an Ein-  
fluß. Dieser Fall trat bei den Untersu-  
chungen aber nur bei der torsionsela-  
stischen Einspannung mit Flüssig-  
keitsreibung auf. Die mit Elastomer-  
werkstoffen erzielbare Dämpfung ist  
erheblich geringer. Bei zu geringer  
Dämpfung im Schwingungssystem  
oder bei torsionselastischer Einspan-  
nung kann man diese mit einem ent-  
sprechenden Dämpfer erhöhen. Des-  
sen Nachteil ist aufgrund der elasti-  
schen Einspannung aufgehoben, so  
daß er über die gesamte Bohrtiefe  
wirksam ist.

### Größerer Vorschub verbessert Bohrprozess

Die mit torsionselastischen Ein-  
spannungen erreichbare Erhöhung  
der Vorschubgeschwindigkeit von  
Einlippenbohrwerkzeugen wirkt sich  
zum einen auf die Schneiden und die  
Führungsleisten aus, zum anderen  
auch auf die jeweilige Spanlänge und  
Bohrungsgüte.

Aufgrund der möglichen höheren  
Vorschübe sind die Kräfte an Schnei-  
den und Führungsleisten höher, was  
zu früherem Verschleiß führt. Infolge  
der erreichten Stabilität aber kann  
man nun schlagempfindliche sowie  
hoch verschleißfeste Werkstoffe wie  
Cermets oder Keramik verwenden.  
Damit wird sich das Verschleißver-  
halten auch bei den nun erreichbaren  
hohen Vorschüben verbessern las-  
sen. Ein stabilerer Arbeitsbereich  
führt dazu, daß die Spanlänge mit zu-  
nehmendem Vorschub deutlich ab-  
nimmt. Aufgrund der größeren Span-  
dicke, die direkt mit dem Vorschub  
zusammenhängt, lassen sich die  
Späne nicht mehr verformen, son-  
dern brechen schneller ab und kön-  
nen somit problemlos aus der Boh-  
rung entfernt werden.

Weil die Schnittkraft vom jewei-  
ligen Vorschub abhängig ist, vergröß-  
ern sich mit dem Vorschub auch die  
an den Führungsleisten angreifenden  
Normalkräfte. Die so verursachte stär-  
kere Einglättung der Bohrungsober-  
fläche führt im Vergleich zu festeinge-  
spannten Einlippenbohrwerkzeugen  
zu kleineren Rauheiten.

### Schrifttum

- [1] Streicher, P.: Tiefbohren der Metalle. Werk-  
zeugmaschine international, Band 2. Würz-  
burg: Vogel-Verlag 1975.
- [2] Bolle, D.: Mikroprozessorsystem für die au-  
tomatische Schwingungsbekämpfung beim  
Tiefbohren. Industrie-Anzeiger 110 (1988)  
82, S. 34-35.
- [3] Buse, B.: Ein neuartiges System zur automa-  
tischen Schwingungsbekämpfung auf BTA-  
Tiefbohrmaschinen. tz für Metallbearbeitung  
81 (1987) 6, S. 29-30.

Bilder: Verfasser