Modellierung der Bohrgüte in Abhängigkeit von den Fertigungsparametern beim BTA-Tiefbohren

Winfried Theis, Oliver Webber*

18. Oktober 2002

Das BTA-Tiefbohrverfahren (Boring and Trepanning Association) wurde entwickelt, um Bohrungen mit großem Verhältnis von Bohrungstiefe zu Bohrungsdurchmesser bei gleichzeitig hoher Oberflächengüte und geringer Abweichung im Mittenverlauf zu erzeugen. In Folge notwendigerweise geringer Steifigkeiten der Werkzeuge können Prozessstörungen wie Rattern oder Drallbohren auftreten. Diese Störungen können eine erhebliche Schädigung des Werkstücks zur Folge haben. Um eine Datengrundlage für die Erforschung der Ursachen dieser Vorgänge zu schaffen, ist zunächst eine Modellierung des BTA-Tiefbohrprozesses bezüglich zweier Gütemaße für die Bohrungen durchgeführt worden. Die Versuchsplanung für diese Modellbildung und die Ergebnisse aus dem ersten Versuchsplan werden in diesem Bericht beschrieben.

1 Problemstellung

Zur Herstellung von Bohrungen mit einem großen Verhältnis von Länge zu Durchmesser ($l/D > 3$) werden Tiefbohrverfahren eingesetzt. Für Tiefbohrungen ab einem Durchmesser von ca. 20 mm findet in der Regel das BTA-Tiefbohrverfahren (<u>B</u>oring and <u>T</u>repanning <u>A</u>ssociation) Anwendung (VDI, 1974). Abbildung 1 stellt das BTA-Prinzip dar.

*SFB 475, Projekt C5, Universität Dortmund

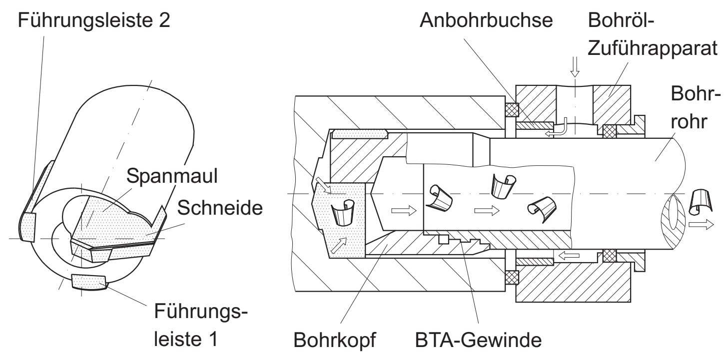

Abbildung 1: BTA-Funktionsprinzip, (VDI, 1974)

Im Gegensatz zu konventionellen Wendelbohrern weisen Tiefbohrwerkzeuge eine asymmetrische Schneidenanordnung auf. Die radialen Zerspankraftkomponenten heben sich daher nicht auf. Durch diese Radialkraft in Verbindung mit den in Abbildung 1 dargestellten Führungsleisten wird eine Selbstführung des Werkzeugs innerhalb der gerade erzeugten Bohrung erzielt. Hieraus resultieren einerseits sehr geringe Abweichungen im Mittenverlauf der Tiefbohrungen, andererseits wird durch Umformprozesse unterhalb der Führungsleisten eine hohe Oberflächenqualität der Bohrungswand erzielt. Ein weiterer Unterschied zu konventionellen Bohrverfahren besteht in der Art und Weise der Kühlschmierstoffversorgung und der Nutzung des Kühlschmierstoffs zum Abtransport der erzeugten Späne. Beim BTA-Verfahren wird der Kühlschmierstoff, das Bohröl, in den Ringraum zwischen Bohrrohr und erzeugter Bohrungswand eingespeist. Das Bohröl umspült die Schneiden und fördert anschließend die Späne durch das Bohrrohr nach außen (Cronjäger, 1974).

1.1 Störungen des BTA–Tiefbohrprozesses

Die zur Herstellung von Bohrungen mit großem (l/D)-Verhältnis notwendige schlanke Gestalt der Werkzeuge kann dynamisch Prozessstörungen zur Folge haben, welche sowohl die Qualität der erzeugten Werkstücke als auch die Lebensdauer der eingesetzten Werkzeuge beeinträchtigen können. Bei diesen Störungen wird zwischen Rattern und Drallbohren unterschieden.

Unter Rattern versteht man selbsterregte Torsionsschwingungen der Bohrrohr/Bohrkopf-Baugruppe, die sich in erster Linie in Form von radial verlaufenden Rattermarken auf dem Bohrungsgrund abbilden (siehe Abbildung 2, linke Seite). Dieser Vorgang führt zu starkem Verschleiß an Schneiden und Führungsleisten, die bis zu Werkzeugbruch und einer damit einhergehenden Gefährdung des Werkstücks führen können. Bei stark ausgeprägter Amplitude ist vereinzelt auch eine unterbrochene Vorschubrilligkeit an der Bohrungswand beobachtet worden (Bolle, 1991). Die Prozessstörung verursacht ferner eine starke Geräuschentwicklung. Darauf aufbauend, dass sich beim Rattern Torsions- und Längsschwingungen phasenverschoben mit derselben Frequenz einstellen, deutet

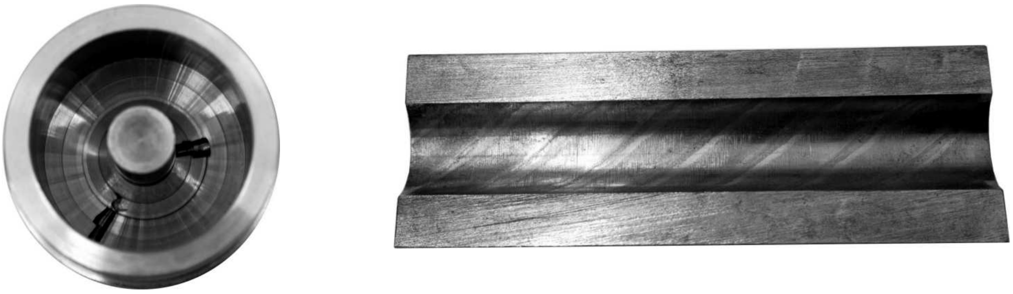

Abbildung 2: Bohrungsgrund mit Rattermarken (links) sowie Bohrungswand mit erkennbaren Drallmarken (rechts)

Thai (1983) das Rattern nach dem Prinzip der Lagekopplung. Aus dem hohen dynamischen Bohrmomentanteil kann ferner abgeleitet werden, dass die Werkzeugschneide während des Ratterns wiederholt außer Eingriff gerät.

Drall äußert sich durch Bohrungsquerschnitte in Form von Gleichdicken mit 3, 5 oder 7 Ecken. Diese Querschnittsform setzt sich wendelförmig entlang der Bohrungsachse fort, was zur Bezeichnung „Drallbohren" geführt hat (siehe Abbildung 2, rechte Seite). Drallbohren führt in der Regel zu Gestaltabweichungen der Bohrung, die außerhalb zulässiger Toleranzen liegen. Zur Erklärung dieses Phänomens wird auf Untersuchungen an geriebenen Bohrungen verwiesen, bei denen u. U. gezeigt werden konnte, dass die Zahl der Anlagepunkte des Werkzeuges an der Bohrungswand die Zahl der Ecken bestimmt (Pfleghar, 1976). In Untersuchungen von Gessesse u. a. (1994) wurde ein Zusammenhang zwischen den Biegemoden der Bohrstange und der Drallentstehung nachgewiesen.

Um Schadensrisiken zu minimieren und die auftretenden Kosten so gering wie möglich zu halten, ist eine genaue Kenntnis der den Störungen zugrunde liegenden Prozessdynamik notwendig. Da Tiefbohren häufig in der letzten Phase der Herstellung kostenintensiver Werkstücke eingesetzt wird, ist Prozesssicherheit von besonderer Bedeutung.

1.2 Versuchsanlage, Werkzeug und Werkstück

Der Aufbau der verwendeten BTA-Tiefbohranlage wird schematisch in Abbildung 3 dargestellt. Die Anlage besteht aus Werkstückantriebseinheit, Werkzeugantriebseinheit, Bohrölzuführapparat, Lanchester-Dämpfer, Bohrrohr, Bohrkopf und Maschinenbett.

Die zur Erzeugung der Schnittbewegung für den Bohrvorgang notwendige rotatorische Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück kann durch den Werkzeugantrieb, den Werkstückantrieb oder durch Verwendung beider Antriebe realisiert werden. Die Auswahl richtet sich nach der Werkstückgeometrie, der benötigten Antriebsleistung und nach den Genauigkeitsanforderungen an den Mittenverlauf der Bohrung.

Die zusätzlich notwendige axiale Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, die Vorschubbewegung, erfolgt durch den Werkzeugantrieb. Die gesamte Werkzeugan-

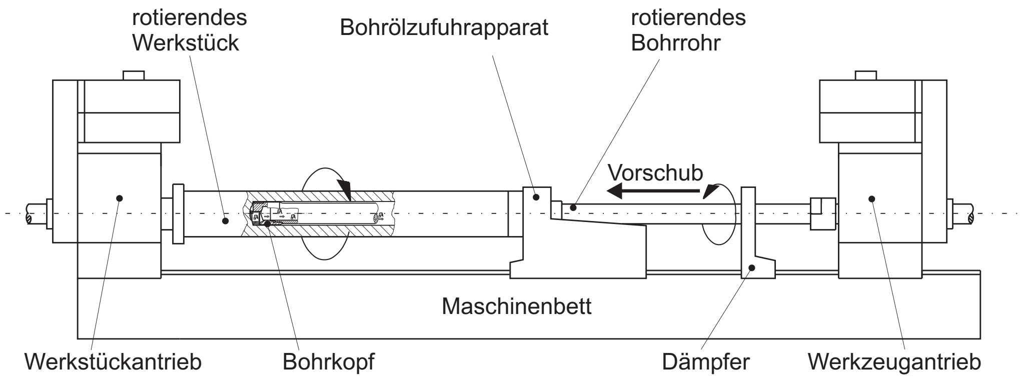

Abbildung 3: Schematischer Aufbau der verwendeten BTA-Tiefbohrmaschine

triebseinheit mitsamt Bohrrohr und Werkzeug wird zu diesem Zweck während des Prozesses auf dem Maschinenbett in Richtung Werkstück verfahren.

Der Lanchester-Dämpfer kann zur Dämpfung von Torsionsschwingungen eingesetzt werden.

Im Bohrölzuführapparat wird das Bohröl eingespeist. Das Bohrrohr dient einerseits zur Übertragung der notwendigen Kräfte und Momente von der Antriebseinheit auf den Bohrkopf sowie zur Abfuhr des Bohröl/Späne-Gemisches.

Die gesamte Einrichtung wird durch Pumpen, Tankanlagen, Filter und Auffangwagen zur Förderung und Aufbereitung des Kühlschmierstoffs sowie zur Entsorgung der anfallenden Späne komplettiert.

Abbildung 4 zeigt einen derzeit handelsüblichen Bohrkopf mit 60 mm Außendurchmesser, wie er im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen verwendet wird. Im Gegensatz zur Darstellung in Abbildung 1 weist das Werkzeug eine geteilte Schneide auf, die in Form von auswechselbaren Wendeschneidplatten realisiert wurde. Der Bohrkopf besitzt ferner eine dritte Führungsleiste zu Verbesserung der Prozesssicherheit während des instationären Anbohrvorganges. Verwendet wurden TiN-beschichtet Hartmetall-Wendeschneidplatten der Anwendungsgruppe P40 sowie unbeschichtet Führungsleisten aus Hartmetall der Anwendungsgruppe P20.

Als Versuchswerkstücke wurden zylindrische Wellen aus C60 mit einer Länge von 500 mm und einem Außendurchmesser von 83 mm eingesetzt.

1.3 Einstellgrößen

Zur Gestaltung des Prozesses lassen sich an der Maschine folgenden Parameter variieren:

- Werkstück- und Werkzeugdrehzahl,
- Vorschubgeschwindigkeit,

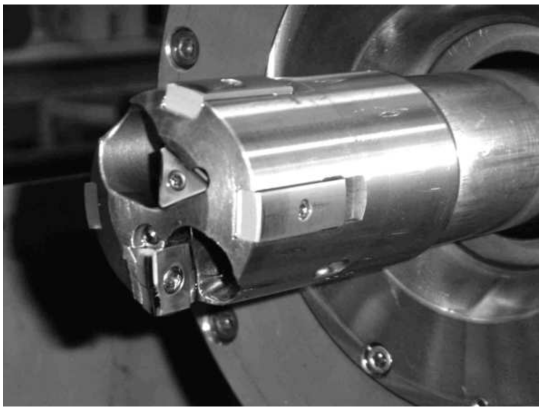

Abbildung 4: BTA-Bohrkopf botek Typ 22, 60 mm Nenndurchmesser

- Ölvolumenstrom,
- axiale Position des Dämpfers relativ zum Bohrrohr,
- Anpressdruck des Dämpfers.

Über die Drehzahlen wird die Schnittgeschwindigkeit v_c eingestellt. Bei Bohrprozessen wird als Schnittgeschwindigkeit die relative Umfangsgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück am äußeren Umfang des Werkzeuges angegeben. Die tatsächlichen Schnittgeschwindigkeiten für beliebige Punkte entlang der Schneidkanten variieren naturgemäß mit den zugehörigen Radien.

Die Vorschubgeschwindigkeit v_f bestimmt zusammen mit der Relativdrehzahl die Dicke der pro Umdrehung abzutragenden Werkstoffschicht, die Spanungsdicke. Als charakteristisches Maß wird meist der Vorschub f, der Quotient aus Vorschubgeschwindigkeit und Relativdrehzahl, verwendet. Der Vorschub entspricht dem axialen Versatz zwischen Werkstück und Werkzeug während einer Relativumdrehung.

Vorschub und Schnittgeschwindigkeit beeinflussen maßgeblich den Ablauf des Zerspanungsprozesses und somit Werkstückqualität, Verschleiß der Wirkelemente und Prozesssicherheit. Ferner ergibt sich aus Vorschub und Schnittgeschwindigkeit das Abtragsvolumen pro Zeiteinheit, das Zeitspanungsvolumen. Zeitspanungsvolumen und Verschleiß bestimmen die Prozesskosten.

Das Bohröl dient als Kühlschmierstoff und als Transportmedium für die Späne. Es konnte gezeigt werden, dass auch der Ölvolumenstrom einen Einfluss auf die Güte der erzeugten Werkstücke hat (Astakhov u. a., 1997a). Die Einflussmöglichkeiten über den Ölvolumenstrom sind jedoch deutlich geringer als über die Parameter Vorschub und Schnittgeschwindigkeit.

Die Wirkung des Dämpfers ist abhängig von der axialen Position der Ankopplungsstelle an der Bohrstange und vom Anpressdruck. Der Dämpfer lässt sich auf dem Maschinenbett verfahren. Seine Position ist relativ zum Werkzeugantrieb oder relativ zum Maschinenbett fixierbar. Position und Anpressdruck werden üblicherweise vom Maschinenbediener nach Erfahrungswissen so variiert, dass Ratterschwingungen wirksam gedämpft werden.

2 Versuchsplanung

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Informationen für die Versuchsplanung zusammengetragen und der gewählte Plan vorgestellt.

2.1 Zielgrößen

Als Gütemaße für die Bohrungen wurden die Rauheit der Bohrungswand sowie der Rundheitsfehler ausgewählt. Die Bewertung der Rauheit erfolgt über die in DIN 4768 genormten Maße gemittelte Rautiefe (R_z) und arithmetischer Mittenrauwert (R_a). Die Ermittlung des Rundheitsfehlers f_R wird in Abschnitt 3.3 genauer erläutert.

Da durch die Versuche die Datengrundlage für eine weitergehende Modellierung der Prozessdynamik geschaffen werden sollte, wurden neben den Gütemaßen im Verlauf der Bohrprozesse Zeitreihen prozessbeschreibender Messgrößen erfasst. Hierzu gehören im Einzelnen:

- Bohrmoment,
- Vorschubkraft,
- Akustiksignale (Luftschall und Körperschall).

Ferner ist die Istdrehzahl des Werkstücks kontinuierlich mit aufgezeichnet worden, da hierbei größere Abweichungen vom Sollwert zu erwarten sind.

2.2 Einflussgrößen

Abschnitt 1.3 erläuterte, welche Einflussmöglichkeiten die vorhandene BTA-Tiefbohrmaschine bietet. Aus der Liste möglicher Einflussgrößen wurde folgende Auswahl getroffen:

- Vorschub f,
- Schnittgeschwindigkeit v_c,
- Ölvolumenstrom $\dot{V}$.

Es wird nur eine Betriebsart der Maschine betrachtet, nämlich stehendes Werkzeug / rotierendes Werkstück. Die Betriebsart wird nicht als Einflussgröße im Sinne der Versuchsplanung aufgefasst, weil sie in der Praxis durch Form und Größe des Werkstücks bestimmt ist und damit unter Umständen nicht frei wählbar ist. Durch diese Festlegung wird gleichzeitig eine problemlose Signalübertragung zwischen auf dem Bohrrohr platzierten Sensoren und den zugehörigen Messverstärkern gewährleistet.

Der Dämpfer wird zunächst nicht eingesetzt, um die unbeeinflusste Entwicklung der Systemdynamik beobachten zu können.

2.3 Modell

In der statistischen Versuchsplanung zur Qualitätssicherung ist es üblich, zunächst mit faktoriellen Versuchsplänen die Wichtigkeit möglicher Einflussgrößen in einfachen linearen Modellen zu klären. Wenn dann nur wenige Einflüsse als relevant erkannt worden sind, werden quadratische Modelle angepasst, um optimale Einstellungen dieser Einflüsse zu finden. Da in Astakhov u. a. (1997b,a) bereits Modelle mit Haupteffekten und Interaktionen an Rundheit, Rauheit und Verschleiß angepasst wurden, werden hier nun quadratische Modelle angepasst. Dabei ist für jede Zielgröße, Rundheit bzw. Rauheit, ein Modell vorgesehen. Diese quadratischen Modelle ermöglichen, es eine optimale Einstellung der Einflussgrößen für möglichst glatte und runde Bohrungen zu finden.

Die Zielgröße $g(\text{Maß})$ ist dabei eine geeignete Zusammenfassung der gemessenen Rundheits- bzw. Rauheitsmaße.

$$g(\text{Maß}) = \mu + \beta_1 f + \beta_2 v_c + \beta_3 \dot{V} + \beta_{12} f v_c + \beta_{13} f \dot{V} + \beta_{23} v_c \dot{V} + \beta_{11} f^2 + \beta_{22} v_c^2 + \beta_{33} \dot{V}^2 + (\eta +)\varepsilon$$

$$\begin{aligned} f &\mathrel{\hat{=}} \text{Vorschub},\ v_c \mathrel{\hat{=}} \text{Schnittgeschwindigkeit},\ \dot{V} \mathrel{\hat{=}} \text{Volumenstrom} \\ \mu &= \text{const},\ \ \eta \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\eta^2) \text{und}\ \ \varepsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\varepsilon^2) \end{aligned}$$

Der Parameter η steht für einen möglichen zufälligen Einfluss des Verschleißes der Schneiden. μ steht für den Achsenabschnitt und ε bezeichnet den stochastischen Fehler.

2.4 Plan

Um das vorgestellte quadratische Modell anpassen zu können, wurde ein zentral-zusammengesetzter Plan durchgeführt. Dieser Plan besteht aus dem sogenannten Kubus, in dem bei drei Variablen acht Versuche enthalten sind mit allen Kombinationen der Variablen auf als „hoch“ bzw. „niedrig“ kodierten Werten der Einstellgrößen, und dem Stern, der aus dem Mittelpunkt und den Sternpunkten besteht, die auf den Hauptachsen liegen. Abbildung 5 zeigt den idealen zentral-zusammengesetzten Plan.

Der zentral-zusammengesetzte Plan mit außenliegendem Stern wurde hier gewählt, weil er neben den positiven theoretischen Eigenschaften – wie Rotierbarkeit und orthogonale Blockung (vgl. Box und Draper (1987)) – auch noch den Vorteil hat, dass die extremen

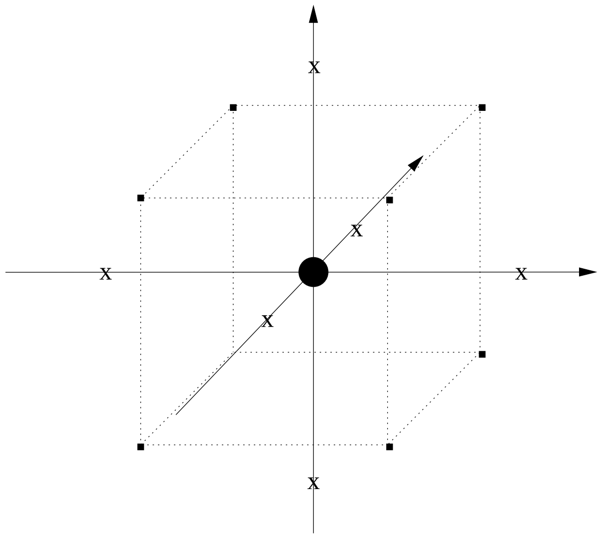

Abbildung 5: Zentral-zusammengesetzter Plan, Kubuspunkte: ■, Sternpunkte: x, Mittelpunkt: ●

Einstellungen jeweils nur in einer der Einflussgrößen auftreten. Dies ist im Zusammenhang mit den betrachteten Versuchen insofern vorteilhaft, als es eine gute Abdeckung der Einstellmöglichkeiten im vom VDI empfohlenen Bereich ermöglicht und in Richtung der Schnittgeschwindigkeit v_c auch außerhalb liegende Werte erfasst.

2.4.1 Integration des Verschleißes in den Plan

Die Güte der Schneiden nimmt im Verlauf einer Bohrung durch Verschleiß ab. Da dies auch einen Effekt auf die Güte der Bohrung haben kann, ist es notwendig, den Verschleiß bei der Planung der Versuche zu berücksichtigen. Da sich aber der tatsächliche Verschleiß nicht steuern lässt und auch nicht kontinuierlich kontrolliert werden kann, wird er hier als Blockeffekt betrachtet. Dabei bilden die ersten Versuche auf den Schneiden den ersten Block, die zweiten Versuche je Schneide den zweiten Block usw. Der Plan wurde in drei Blöcke aufgeteilt, von denen der größte der Stern mit sieben Versuchen ist. Somit werden also sieben Schneiden benötigt und die anderen Blöcke aus Teilen des Kubus werden durch Mittelpunkt-Versuche aufgefüllt. Damit ergeben sich dann insgesamt 21 Versuche.

2.4.2 Parameterwahl

Als Grenzen für die Variation der Parameter wurden die folgenden Werte gewählt:

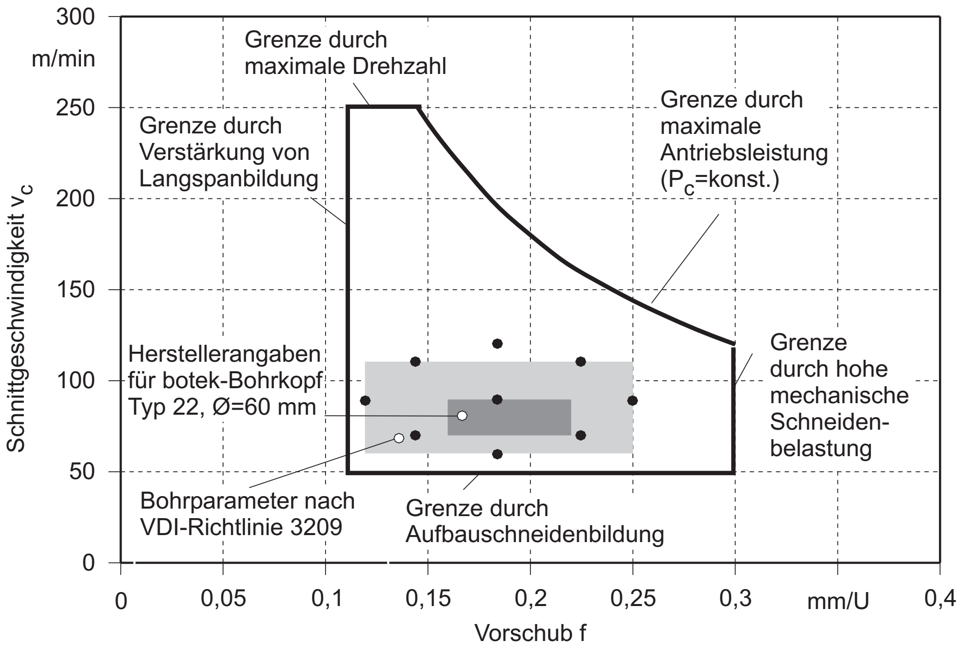

Abbildung 6: Zentral-zusammengesetzter Plan

	f in mm	v_c in m/min	$\dot{V}$ in l/min
min.	0.12	60	200
max.	0.25	120	400

Tabelle 1: Grenzen der Parameterwerte

Diese Grenzen wurden als die Extrema im Versuchsplan verwendet, d. h., dass sie nur in den Sternpunkten angenommen wurden. Die Distanz der Sternpunkte zum Mittelpunkt wurde im kodierten Plan auf $\sqrt{2}$ festgelegt, da diese Wahl zu orthogonaler Blockung in dieser Konstellation führt.

Um die gewählten Grenzen besser einordnen zu können, zeigt Abbildung 6 eine Projektion des Plans in die Ebene der Einstellgrößen Schnittgeschwindigkeit und Vorschub in Relation zu den Empfehlungen des Bohrkopf-Herstellers, der VDI-Richtlinie 3209 sowie maschinen- und prozessbedingten Grenzen.

Mit diesen Vorgaben ergibt sich insgesamt der folgende Plan:

Versuch	f in mm	v_c in m/min	$\dot{V}$ in l/min
1	0,185	90,00	300,00
2	0,185	90,00	300,00
3	0,185	90,00	300,00
4	0,139	111,21	370,71
5	0,12	90,00	300,00
6	0,231	111,21	370,71
7	0,231	68,79	370,71
8	0,185	90,00	400,00
9	0,139	68,79	370,71
10	0,231	111,21	229,29
11	0,185	60,00	300,00
12	0,139	111,21	229,29
13	0,139	68,79	229,29
14	0,185	90,00	200,00
15	0,231	68,79	229,29
16	0,185	90,00	300,00
17	0,185	120,00	300,00
18	0,185	90,00	300,00
19	0,185	90,00	300,00
20	0,25	90,00	300,00
21	0,185	90,00	300,00

Tabelle 2: Versuche der Reihe nach geordnet

Bei der Durchführung von Versuch 21 stellte sich nach Versuchsende heraus, dass eine Ecke der Außenschneide abgeplatzt war. Da dieser Versuch zu dem Block gehörte, der als erster auf den Schneiden durchgeführt wurde, wurde er als Versuch 21a wiederholt. Die Messwerte wurden allerdings in allen Auswertungen, die sich nicht auf die Blockung beziehen, von beiden Versuchen verwendet.

3 Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Versuchsplan

Die Durchführung des in Abschnitt 2 erläuterten Plans zeigte, dass der Zeitverlauf der einzelnen Versuche sich aus unterschiedlichen Phasen zusammensetzt. Während der Versuchsdurchführung konnten diese anhand charakteristischer Geräuschentwicklung und zugehöriger Maschinenvibrationen unterschieden werden. Die Phasen bilden sich an der erzeugten Bohrungswand in Form typischer Muster ab.

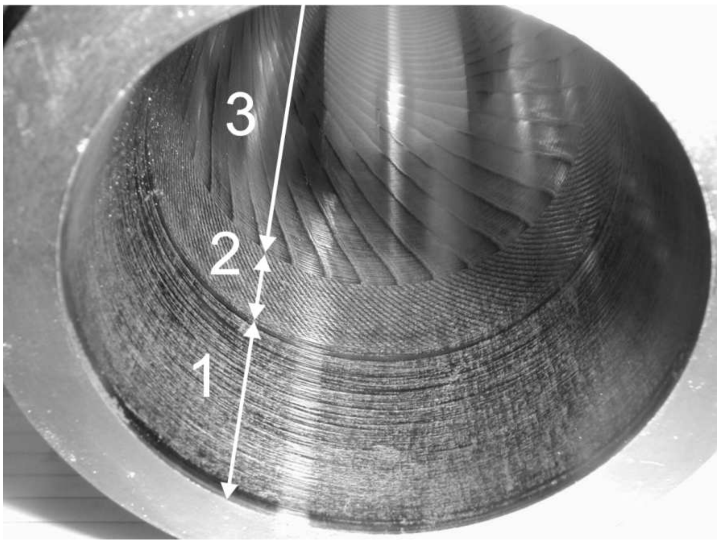

Abbildung 7: Photo einer erzeugten Bohrungswand. Der zugehörige Prozess wies drei unterschiedliche Phasen auf. Phase 1: Ungestörter Prozessverlauf. Phase 2: Rattern Typ A. Phase 3: Rattern Typ B.

Abbildung 7 stellt anhand eines Beispiels die Musterbildung an der Bohrungswand dar. Es können in diesem Beispiel drei Phasen unterschieden werden. In Phase 1 wird der Bohrkopf während des Anbohrprozesses noch in einer feststehenden Anbohrbuchse geführt. Der Prozess verläuft in diesem Abschnitt ruhig. An der Bohrungswand lässt sich lediglich die Vorschubrille, die sich als Wendel aus der Überlagerung von Vorschub und Schnittgeschwindigkeit ergibt, erkennen. In den Phasen 2 und 3 ist die Vorschubrille periodisch unterbrochen, wobei in Phase 3 die Wellenlänge des Musters länger ist und das Muster sich deutlich erkennbar wendelförmig entlang der Bohrungswand fortsetzt. Beide Phasen gingen mit einer starken Geräuschentwicklung einher. Sie unterschieden sich deutlich wahrnehmbar durch die dominierende Frequenz. Die Phasen 2 und 3 werden im weiteren Verlauf des Textes mit *Rattern Typ A* bzw. *Rattern Typ B* bezeichnet. Die einzelnen Prozessabschnitte lassen sich auch anhand der erfassten Zeitreihen charakterisieren und vorhersagen (Weinert u. a., 2002).

Während der Versuche ist zunächst der Eindruck entstanden, dass es unabhängig von den Einstellungen der Einflussgrößen zu Rattern in verschiedener Art kommt. Eine genauere Untersuchung ergab, dass es durchaus Zusammenhänge zwischen den Einstellgrößen und den verschiedenen Arten des Ratterns gibt. So lässt sich klar erkennen, dass bei geringem Vorschub und geringer Schnittgeschwindigkeit kaum Rattern auftritt. Auch ein leicht stabilisierender Einfluss des Ölvolumenstroms ließ sich bei einer explorativen Analyse erahnen. Allerdings zeigen die Wiederholungen im Mittelpunkt klar die hohe Variabilität des Prozesses, so dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Beobachtungen von wenig oder viel Störung durchaus zufällig sind.

3.1 Klassifikation nach Art des beobachteten Ratterns

Abbildungen 8 und 9 zeigen den zentral-zusammengesetzten Plan mit unterschiedlichen Symbolen nach Länge der Strecke auf der Rattern Typ A oder Rattern Typ B aufgetreten ist.

Die Abbildungen 8 und 9 legen eine Untersuchung der Diskriminanzfähigkeit nach Rattern Typ B / Rattern Typ A der Schnittgeschwindigkeit nahe. Dabei erreicht eine Lineare Diskriminanzanalyse (LDA) nur mit diesem Faktor eine kreuzvalidierte Fehlerrate von 22,7%. Die entsprechende quadratische Diskriminanzanalyse (QDA) ist etwas schlechter mit 27,3%, was einer falsch klassifizierten Beobachtung entspricht. Eine Hinzunahme des Ölvolumenstroms führt in der QDA zum selben Ergebnis, alle anderen Faktorkombinationen führen durchweg zur Verschlechterung der Fehlerrate.

Bei näherer Untersuchung, bei welchen Beobachtungen Fehler auftreten, stellt sich heraus, dass es in erster Linie die Mittelpunktsversuche sind. Weitere Fehler sind die Beobachtung in der vorderen, oberen linken Ecke des Kubus im Bild (Versuch Nr. 4) und der Sternpunkt mit dem niedrigsten Vorschub (Versuch Nr. 5), wenn nur die Schnittgeschwindigkeit beachtet wird. Der zusätzliche Fehler bei QDA ist Versuch Nr. 17, der Sternpunkt mit maximaler Schnittgeschwindigkeit. Dies ist recht überraschend und lässt sich nur dadurch erklären, dass durch das Herauslassen dieses Punktes sich eine extrem spitze Verteilung für die Gruppe mit Rattern Typ B und für die Gruppe ohne Rattern Typ B eine extrem flache Verteilung ergibt.

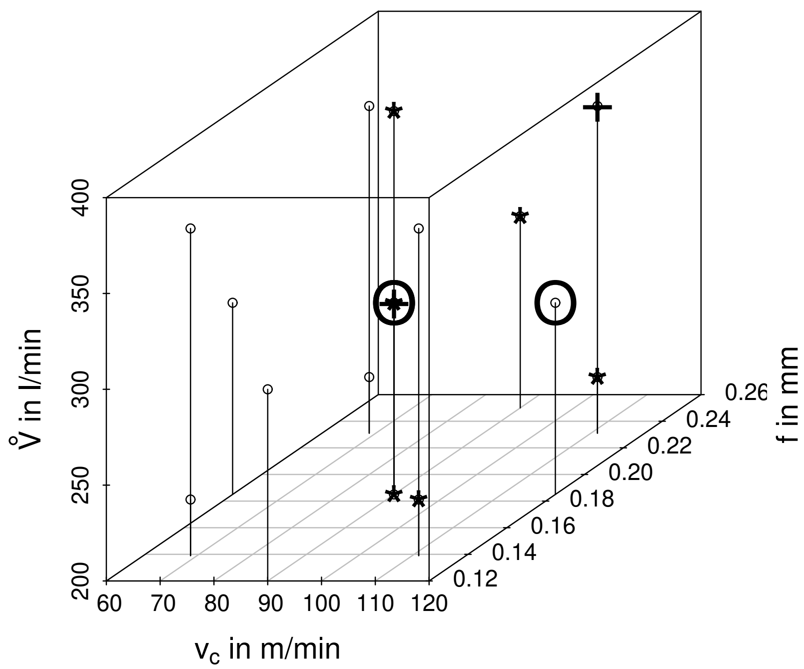

Abbildung 8: Versuche, bei denen Rattern Typ B beobachtet wurde, nach Beginn des Ratterns Typ B markiert; $+ \hat{=}$ Rattern Typ B erst nach 15 cm Bohrtiefe, $* \hat{=}$ Rattern Typ B ab 6–15 cm und O $\hat{=}$ Rattern Typ B ab 3.5-6 cm

Wenn der Ölvolumenstrom als weitere erklärende Variable bei QDA hinzugenommen wird, verschwinden die Fehler bei Versuch 4 und 5, dafür werden Versuch 8 und Versuch 14 falsch klassifiziert, dies ist einmal ein Versuch mit extrem hohem Ölvolumenstrom und mit extrem niedrigem Ölvolumenstrom, in beiden Fällen erwartet die Diskriminanzregel kein Rattern Typ B.

Thai (1983) zeigte, dass die Stabilitätsgrenze des Prozesses mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit sinkt. Hierzu führte er Bohrversuche durch, bei denen die Schnittgeschwindigkeit konstant gehalten und der Vorschub langsam erhöht wurde. Zur Ermittlung der Stabilitätsgrenze bestimmte er den jeweiligen Vorschub, bei dem selbsterregte Schwingungen einsetzten.

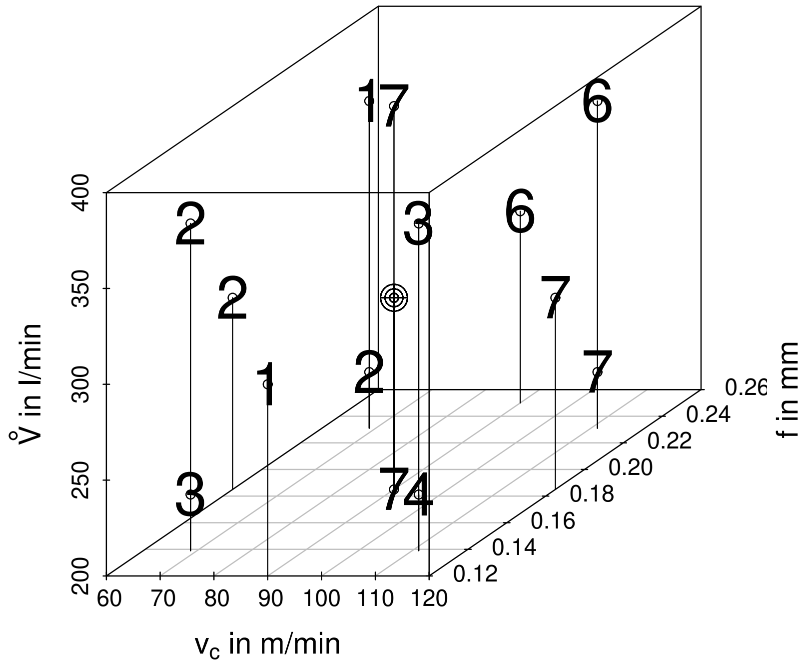

Abbildung 9: Versuche nach grobem Gütemaß ($Guete = Laenge\,Rattern\,Typ\,A + 3 * Laenge\,Rattern\,Typ\,B$) eingeteilt; $1 \mathrel{\hat{=}} 0 \leq Guete \leq 20$,$2 \mathrel{\hat{=}} 20 < Guete \leq 40$, $3 \mathrel{\hat{=}} 40 < Guete \leq 60$, $4 \mathrel{\hat{=}} 60 < Guete \leq 80$, $5 \mathrel{\hat{=}} 80 < Guete \leq 100$, $6 \mathrel{\hat{=}} 100 < Guete \leq 120$, $7 \mathrel{\hat{=}} 120 < Guete \leq 140$; Der Mittelpunkt ist gesondert gekennzeichnet, weil sich die Versuche in den Intervallen 4–7 realisiert haben.

Die eingangs beschriebenen Prozessergebnisse belegen, dass kein derart eindeutiger Zusammenhang zwischen den Einstellgrößen und der Prozessdynamik besteht. Wie insbesondere an den Mittelpunktsversuchen ersichtlich wird, kann bei konstant gehaltenen Einstellgrößen die Dynamik stark variieren. Die Abbildungen 8 und 9 im Zusammenhang mit der Diskriminanzanalyse zeigen jedoch, dass auch bei den beobachteten instationären Prozessverläufen die Ausprägung der Ratterphasen in erster Linie von der Schnittgeschwindigkeit beeinflusst wird. Der Prozess neigt bei erhöhter Schnittgeschwindigkeit zunehmend zur Instabilität.

3.2 Rauheitsmessungen

Bei der Auswertung der Rauheitsmessungen wurde ein gewichtetes Mittel der Messwerte gebildet, wobei je homogenem Eindruck der Oberfläche ein Mittel aus drei Einzelmessungen verwendet wurde und dieses mit dem Anteil der zugehörigen Strecke an der Gesamtbohrtiefe von 50 cm gewichtet wurde. Dabei wurde der Anbohrbereich jeweils als eigenständig betrachtet. Somit ergeben sich die Werte der Güte g – z. B. für die gemittelte Rautiefe R_z– wie folgt:

$$g(R_z) = \frac{l_{Anbohr}}{l_{gesamt}} R_z(Anbohr) + \frac{l_{gut}}{l_{gesamt}} R_z(gut) + \frac{l_{Ratt.-A}}{l_{gesamt}} R_z(Ratt.-A) + \frac{l_{Ratt.-B}}{l_{gesamt}} R_z(Ratt.-B)$$

An die so erhaltenen Messwerte wurde dann wie geplant ein quadratisches Modell angepasst. Um zu klären, ob das vollständige quadratische Modell tatsächlich die beste Anpassung – gemessen am adjustierten R^2 oder dem Akaike Informationskriterium (AIC) – liefert, wurde mit einer schrittweisen Regression bzgl. des AIC ein Modell selektiert.

Während das R^2 ein direktes Maß für den Zusammenhang zwischen den beobachteten Werten und den durch das Modell sich ergebenden Werten ist, wird im adjustierten R^2 (kurz R^2_{adj}) die Anzahl Terme im Modell mitbewertet. Entsprechend bewertet das AIC die Likelihood-Funktion (L) und enthält einen Strafterm für die Anzahl zu schätzender Parameter (p):

$$AIC = -2\log L + 2p$$

Da die Likelihoodfunktion maximal ist, wenn das Modell gut angepasst ist, ist ein gutes AIC möglichst klein. Das R^2_{adj} hingegen sollte möglichst nah bei 1 liegen.

Die automatische Selektionsroutine `step` im Programmpaket **R** (Ihaka und Gentleman, 1996) liefert folgende Auswahl an Modellen:

- Für die gemittelte Rautiefe ($g(R_z)$):

  $$3.89 - 0.53f^2 + 0.77v_c^2 - 0.29\dot{V}^2 + 0.29f + 0.49v_c - 0.18\dot{V} + 0.26fv_c - 0.37f\dot{V} + 0.20v_c\dot{V}$$

  mit einem $R^2_{adj} = 0.77$ und einem AIC $= -32.19$

- Für den Mittenrauwert ($g(R_a)$):

  $$0.69 - 0.12f^2 + 0.27v_c^2 - 0.10\dot{V}^2 + 0.09f + 0.16v_c - 0.04\dot{V} + 0.08fv_c - 0.08f\dot{V}$$

  mit einem $R^2_{adj} = 0.83$ und einem AIC $= -90.84$

Die oben angegebenen Werte für die Koeffizienten in den Funktionen sind für kodierte Einflussgrößen ermittelt, d. h. dass die Variablen jeweils so transformiert wurden, dass der Mittelwert des Einstellungsbereiches 0 entspricht und die Randpunkte jeweils $-\sqrt{2}$ bzw. $+\sqrt{2}$ entsprechen.

Für diese Modelle finden sich in den Abbildungen 10 und 11 die zugehörigen Diagnosegrafiken. Bei $g(R_a)$ (Abb. 11) weist der Residualplot noch einen minimalen Rest an Struktur auf, die sich dann auch entsprechend im Quantilplot findet. Allerdings deutet sie darauf hin, dass der Versuch 17 einen sehr großen Einfluss darauf hat. Deshalb wurde das Modell noch einmal ohne diesen Versuch angepasst und wie in Abbildung

13 zu erkennen ist, behebt dies tatsächlich das Problem. Abbildung 12 zeigt das entsprechende Ergebnis für $g(R_z)$. Der Versuch 17 ist der Versuch mit der extrem hohen Schnittgeschwindigkeit und es trat hier Rattern Typ B direkt nach dem Anbohrbereich auf.

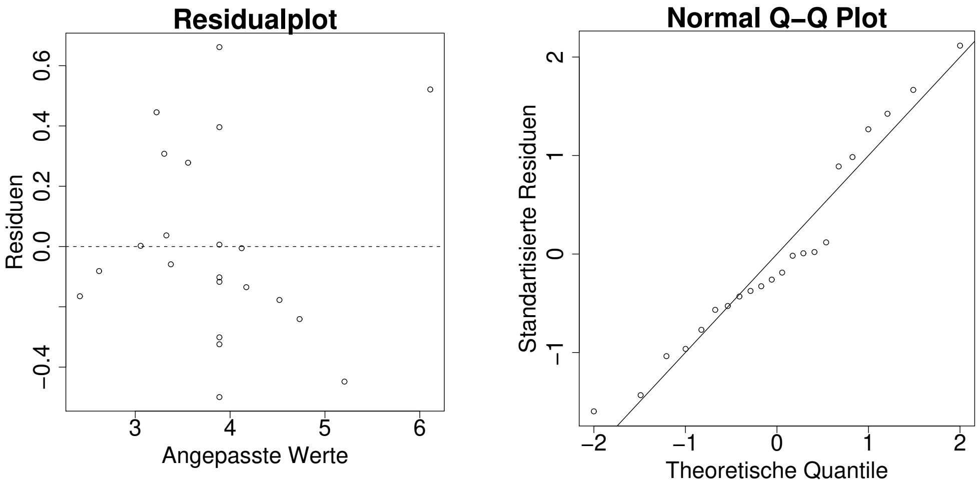

Abbildung 10: Residual- und Normalplot für das Modell für die gemittelte Rautiefe ($g(R_z)$).

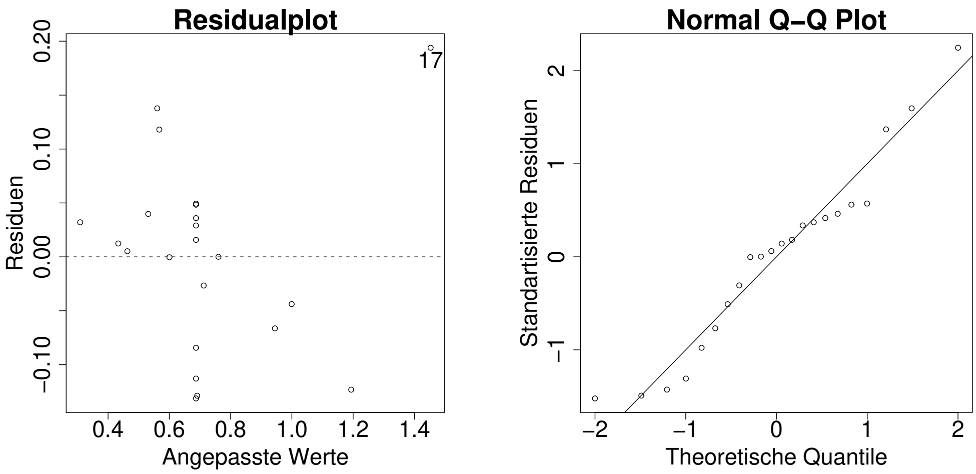

Abbildung 11: Residual- und Normalplot für das Modell für den arithmetischen Mittenrauwert ($g(R_a)$)

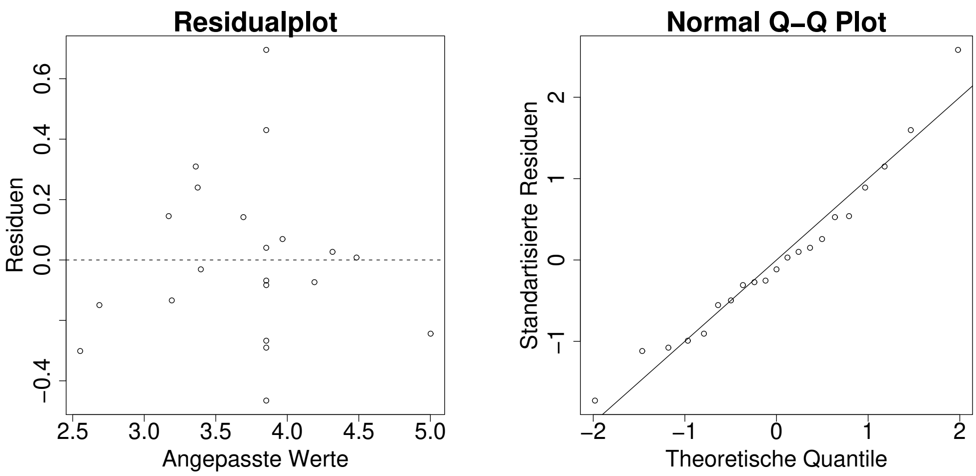

Abbildung 12: Residual- und Normalplot für das Modell für die gemittelte Rautiefe ($g(R_z)$) ohne Versuch Nummer 17

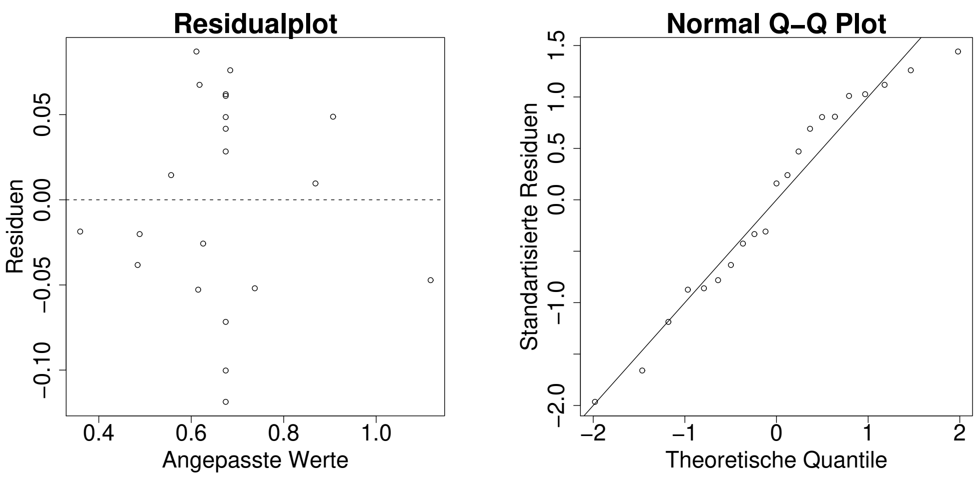

Abbildung 13: Residual- und Normalplot für das Modell für den arithmetischen Mittenrauwert ($g(R_a)$) ohne Versuch Nummer 17

Die Verwendung des Verschleißes als zufällige Einflussgröße führte zu keinerlei Modellverbesserungen – im Gegenteil: Die wesentlich höhere Anzahl zu schätzender Parameter verschlechterten das AIC bei Verwendung der gleichen Modelle erheblich. Da auch keine Reduktion der Varianz im Residualplot erkennbar war, wird auf eine eingehendere Betrachtung hier verzichtet.

Ziel der Verwendung eines zentral-zusammengesetzten Plans und eines quadratischen Modells ist die Bestimmung optimaler Einstellungen der Einflussgrößen. Innerhalb des Planbereichs ließ sich kein Optimum finden, deshalb wurde nach dem Optimum auf dem Rand der Kugel mit Radius $\alpha = \sqrt{2}$, der Distanz der Sternpunkte vom Mittelpunkt in unserem Plan, gesucht. Diese Wahl wurde getroffen, um eine zu starke Extrapolation aus dem Bereich der beobachteten Einstellungen zu vermeiden. In den Abbildungen 15 und 14 sind jeweils Konturplots über Schnittebenen des Raums der Einflussgrößen mit der Lage des gefundenen Optimums aufgetragen. Dabei wurde jeweils eine der Einflussgrößen auf den gefundenen optimalen Wert gesetzt. Die Werte der optimalen Einstellungen sind angegeben und die geschätzten Werte für $g(R_z)$ bzw. $g(R_a)$ jeweils mit einem zugehörigen Konfidenzbereich.

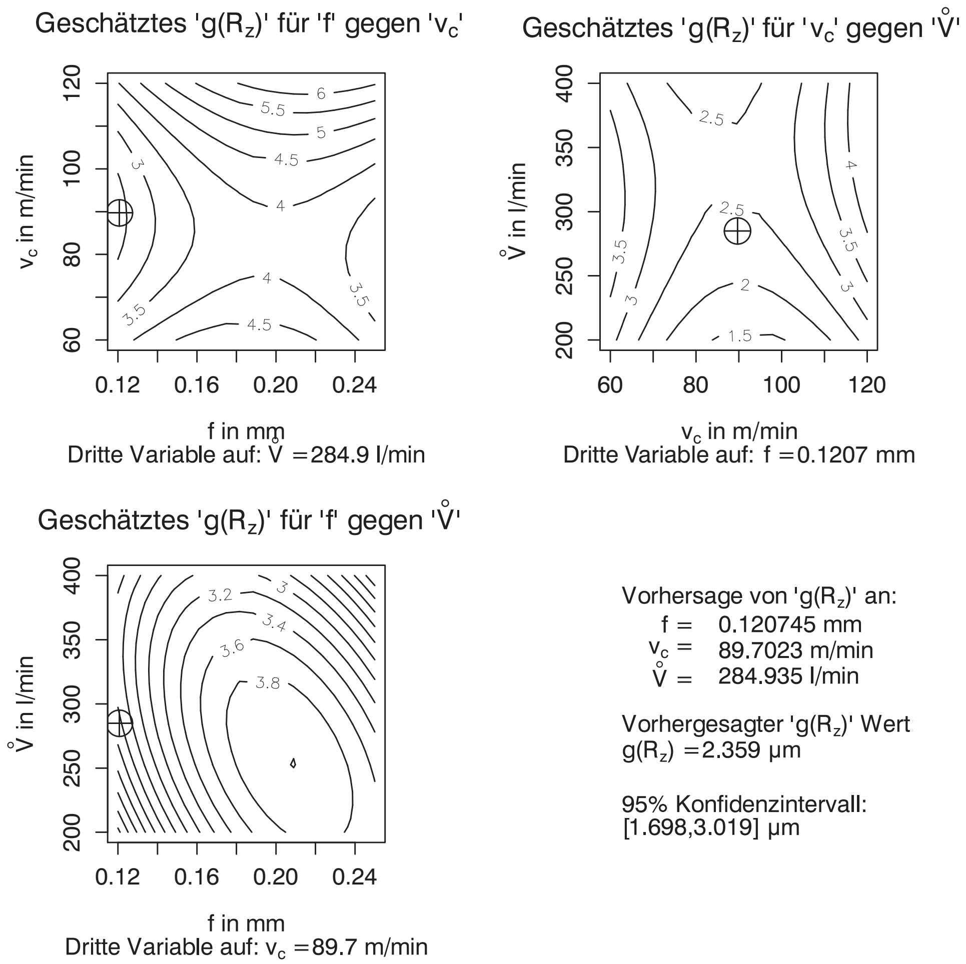

Abbildung 14: Konturplots mit Optimum für die gewichteten Mittelwerte der gemessenen gemittelten Rautiefen ($g(R_z)$)

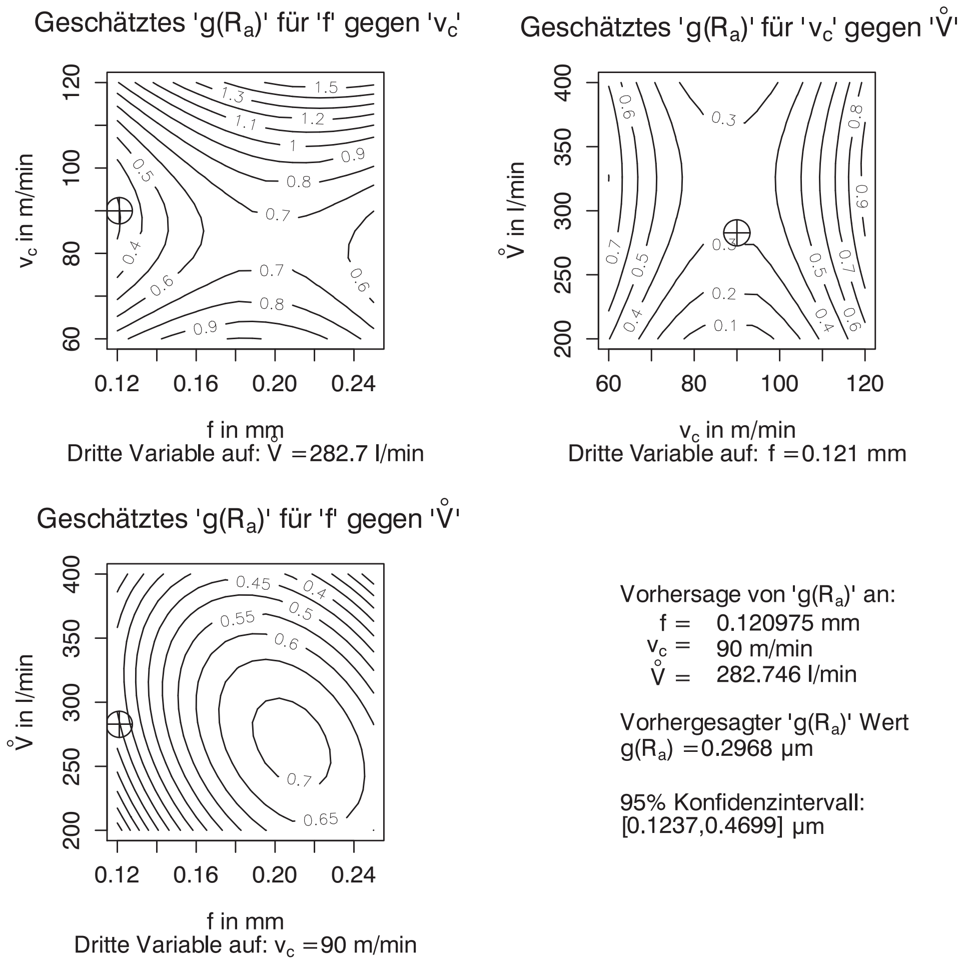

Abbildung 15: Konturplots mit Optimum für die gewichteten Mittelwerte der gemessenen arithmetischen Mittenrauwerte ($g(R_a)$)

Die gefundenen optimalen Einstellungen unterscheiden sich kaum voneinander und in Anbetracht der möglichen Genauigkeit der Maschineneinstellungen praktisch gar nicht.

Ein übliches Vorgehen wäre es, den Planbereich so zu verschieben, dass das gefundene Optimum in der Mitte liegt und dort nach einer möglichen weiteren Verbesserung zu forschen. Da die Randwerte für den Versuchsbereich schon relativ extrem gewählt waren, erscheint es wenig sinnvoll den Versuchsbereich nun in Richtung des gefundenen Optimums zu verschieben. Diese Verschiebung würde zu einer Suche in der Nähe des minimal möglichen Vorschubs führen. Aufgrund der hieraus resultierenden langen Prozessdauer ist dieser Bereich unökonomisch. Ferner ist bei geringem Vorschub mit der Bildung besonders langer Späne zu rechnen, die die Gefahr eines Spänestaus im Bohrrohr erhöhen. Auch wird in der Praxis vornehmlich mit einem Dämpfer gearbeitet, der in der Lage ist, bei gut gewählter Positionierung Rattern zu unterbinden. Deshalb soll der Dämpfer in weiteren Untersuchungen mit berücksichtigt werden.

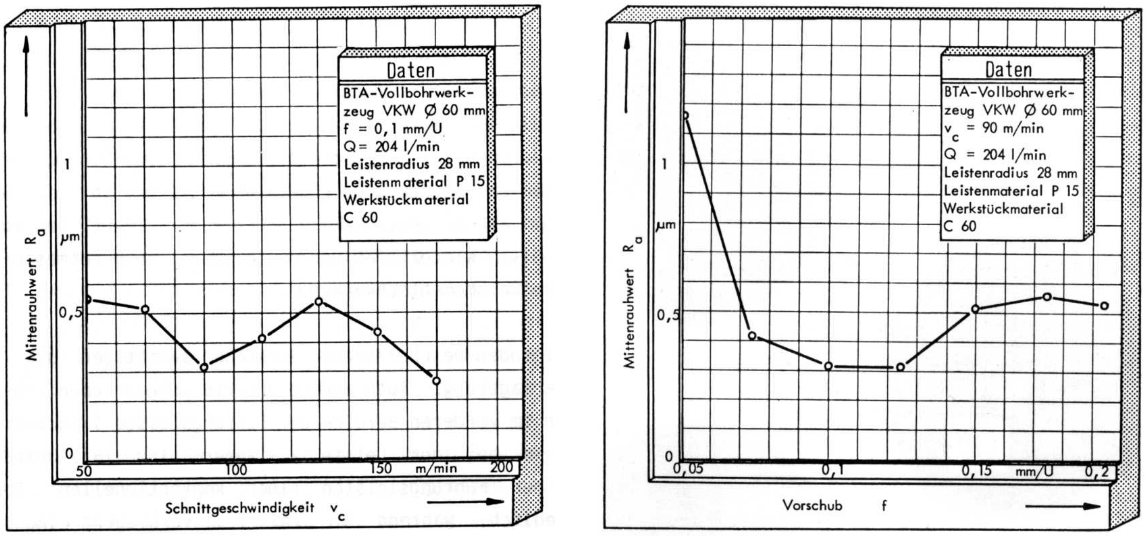

Abbildung 16: Einfluss von Schnittgeschwindigkeit (linke Seite) und Vorschub (rechte Seite) auf den arithmetischen Mittenrauwert R_a der Bohrungswand nach Fuß (1986)

Die gemessenen Rauheiten stimmen innerhalb des überlappenden Parameterbereichs gut mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen überein, die in Abbildung 16 zusammengefasst dargestellt wurden. Den Anstieg der Rauheitswerte für niedrige Vorschübe führte Fuß (1986) auf die damit einhergehende Reduktion der Führungsleistennormalkräfte zurück, den Anstieg bei hohen Vorschubwerten auf eine verstärkte Anschweißneigung von Werkstückmaterial an die Führungsleisten in Folge erhöhter Flächenpressung.

Die gute Übereinstimmung der Ergebnisse deutet darauf hin, dass die beobachtete Prozessdynamik keinen signifikanten Einfluss auf die ermittelten Rauheitskenngrößen hat. Zur Überprüfung dieser Vermutung wurde getestet, ob ein Zusammenhang zwischen dem in Abschnitt 3.1 eingeführten groben Gütemaß und den Rauheitsmaßen in den acht Versuchen im Mittelpunkt existiert. Ein Zusammenhang zwischen der Dauer des Ratterns und der Realisation der gewichteten Rauheitsmaße ließ sich nicht nachweisen.

3.3 Rundheitsmessungen

Die erzeugten Werkstücke mussten zur Bestimmung des Rundheitsfehlers f_R auf halber Länge getrennt werden, um die interessierenden Segmente für die erforderlich taktile Messung zugänglich zu machen. Erste Messungen ergaben, dass die Rohre beim Trennen einerseits gequetscht worden waren und andererseits eine Schädigung der Oberfläche erfahren hatten, die zur einer hohen Anzahl von Ausreißern in den Messdaten führte. Standardverfahren zur Bestimmung der Abweichung des gemessenen Profils von der idealen Kreisform ließen sich daher nicht anwenden.

Zur Beseitigung des Einflusses der Quetschung sind die Messdaten mit einem Bandpass mit einem Durchlassbereich von 15 – 500 Wellen/360° gefiltert worden. Die Rundheitsfehler f_R wurden daraufhin als Standardabweichungen der gefilterten Abtastreihen ermittelt.

Die Ermittlung der Rundheitsfehler erfolgte für dieselben Teilstücke, wie bei den Rauheitsmessungen. Auf die Einzelmessungen ist die bei den Rauheiten beschriebene Form eines gewichteten Mittels angewandt worden. An die so ermittelten mittleren Rundheitsfehler wurde ebenfalls ein quadratisches Modell mit allen Interaktionen angepasst und wiederum nach dem Akaike-Informationskriterium und einer Kontrolle des Residualplots ein Modell ausgewählt.

Es ergab sich, dass ein Modell, das die Einflussgrößen nur als lineare Terme enthält und die Wechselwirkung $v_c\dot{V}$ berücksichtigt die beste Anpassung mit einem R^2_{adj} von 0.53 und einem AIC von -41.49 erreicht. Das Modell in den kodierten Einflussgrößen (zur Kodierung siehe Modelle im Abschnitt 3.2) lautet:

$$g(f_R) = 1.05 + 0.32f + 0.38v_c + 0.11\dot{V} + 0.18v_c\dot{V}$$

Also haben f und v_c in etwa einen gleich starken Einfluss auf die Rundheit, während sich der Ölvolumenstrom $\dot{V}$ deutlich schwächer auf die Rundheit auswirkt.

Auch der Residual- und der Normalplot weisen keine klaren Strukturen auf, die auf fehlende Terme im Modell hinweisen würden (vergl. Abb. 17).

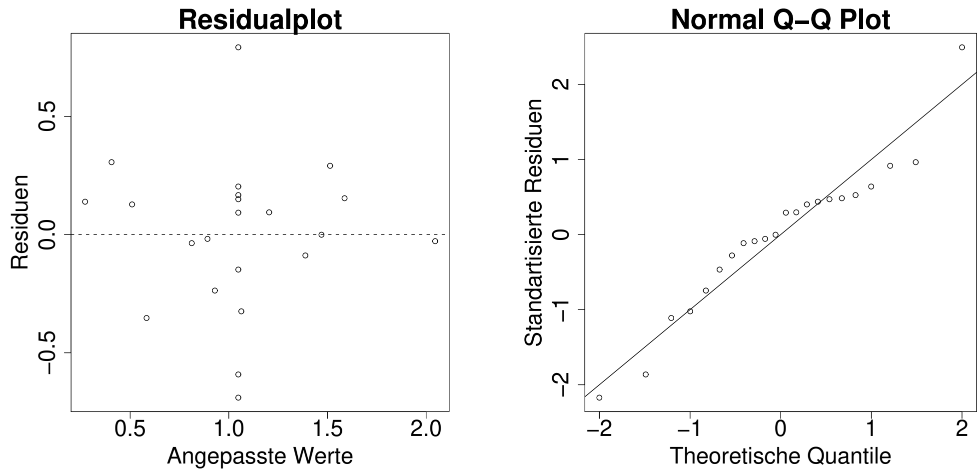

Abbildung 17: Residual- und Normalplot des Modells zu den Rundheiten

Führt man mit dem so gefundenen Modell eine Suche nach optimalen Einstellungen durch so erhält man $f = 0.145\,mm$, $v_c = 66.67\,m/min$ und $\dot{V} = 315\,l/min$ und als Vorhersage $g(f_R) = 0.33\,\mu m$ mit 95 %-Konfidenzintervall $[-0.0213, 0.6765]\,\mu m$. In der Größe des Konfidenzintervalls schlägt sich wiederum die schlechte Anpassung nieder.

Die rein lineare Struktur der angepassten Funktion könnte den Unterschied in den empfohlenen Werten der Einstellgrößen erklären, verglichen mit den Modellen bei den Rauheiten. Die Grundtendenz hin zu niedrigem Vorschub und mittlerem Ölvolumenstrom wird bestätigt, nur für die Schnittgeschwindigkeit ergibt sich hier ein anderes Bild.

Zum Vergleich: der vorhergesagte Wert von $g(f_R)$ an den optimalen Einstellungen für $g(R_z)$ ist $g(f_R) = 0.56\mu$ mit Konfidenzbereich $[0.217, 0.903]\mu$, überlappt also 2/3 des Konfidenzbereichs an der optimalen Stelle. Damit ist zu erwarten, dass mit den optimalen Einstellungen für die Rauheitsmaße auch eine gute Rundheit des Werkstücks erzielt werden kann.

Im Gegensatz zu den Rauheitsmaßen, lässt sich für die Rundheit ein linearer schwacher Zusammenhang zum groben Gütemaß aus Abschnitt 3.1 erkennen ($R^2_{adj} = 0.22$). Dieser tritt klarer hervor, wenn zwei herausfallende Versuche, Versuch 1 und 21, herausgenommen werden ($R^2_{adj} = 0.79$).

4 Untersuchung von Online-Daten

Ungünstige dynamische Eigenschaften von Werkzeugmaschinen können zu Prozessstörungen in Form von Schwingungsvorgängen führen. Zu den Folgen dieser Störungen zählen u. a. erhöhter Werkzeugverschleiß bis -bruch sowie Beeinträchtigungen der Werkstückqualität. Bei den Schwingungserscheinungen unterscheidet man zwischen fremderregten und selbsterregten Schwingungen.

Bei fremderregten Schwingungen handelt es sich um erzwungene Schwingungen in Folge externer Anregung der Maschine oder Anregung durch ungenau gefertigte bzw. schadhafte Komponenten der verwendeten Antriebe. Das System schwingt in diesem Fall mit der Frequenz der Anregung.

Im Fall selbsterregter Schwingungen schwingt das System grundsätzlich in seinen Eigenfrequenzen. Ausgehend von einem stochastischen Anteil der Prozesskräfte und der dynamischen Nachgiebigkeit der Werkzeugmaschine können selbsterregte Schwingungen als Folge des Regenerativeffektes, des Prinzips der Lagekopplung oder einer mit steigender Schnittgeschwindigkeit fallenden Schnittkraft entstehen (Weck, 2001).

In bisherigen Untersuchungen ist gezeigt worden, dass Rattern beim Tiefbohren mit Torsionsschwingungen in den Eigenfrequenzen des Werkzeuges einhergeht (Streicher, 1975; Thai, 1983).

Für die Geometrie- und Werkstoffeigenschaften der verwendeten Bohrstange sowie einer idealisiert angenommenen fest-lose-Lagerung können die ersten sechs Torsionseigenfrequenzen wie folgt berechnet werden:

```
247 Hz,  740 Hz,  1234 Hz,  1727 Hz,  2221 Hz,  2714 Hz
```

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse einer explorativen Analyse der Online-Daten zur Ermittlung der beobachteten signifikanten Frequenzen innerhalb der Zeitreihen präsentiert. Genauere Betrachtungen der Online-Daten finden sich in Busse u. a. (2001). Bei diesen Untersuchungen erwies sich das Bohrmoment als die aussagekräftigste Messgröße unter den Online-Messungen.

4.1 Signifikante Frequenzen

Die im Rahmen des Versuchsplans erhobenen Online-Daten aus dem Bohrmoment zeigen in den Ratterphasen klar, dass nur einige wenige Frequenzen signifikant sind (teilweise sogar nur eine einzige). Aber auch in den ungestörten Bereichen treten diese Frequenzen signifikant hervor. Diese Beobachtung führte zu der Frage, welche Frequenzen dies genauer sind. Als Kriterium für die Bestimmung der Signifikanz wurden die Amplituden der Frequenzen gegen das 95 %-Quantil der Standard-Exponentialverteilung getestet, da die Amplituden des Periodogramms eines standard-normalverteilten weißen Rauschens standard-exponentialverteilt sind (vgl. z. B. Schlittgen und Streitberg (1999)). In den folgenden Abbildungen sind Histogramme über diese Frequenzen gebildet worden, die sich nur auf Daten aus Bereichen beziehen in denen die Anzahl der signifikanten Frequenzen kleiner als der Median der Anzahlen signifikanter Frequenzen im Periodogramm von Zeitabschnitten von 4096 Beobachtungen sind. Diese Einschränkung dient dazu, Datenpunkte auszuschließen, die zeitlich außerhalb des eigentlichen Bohrprozesses liegen.

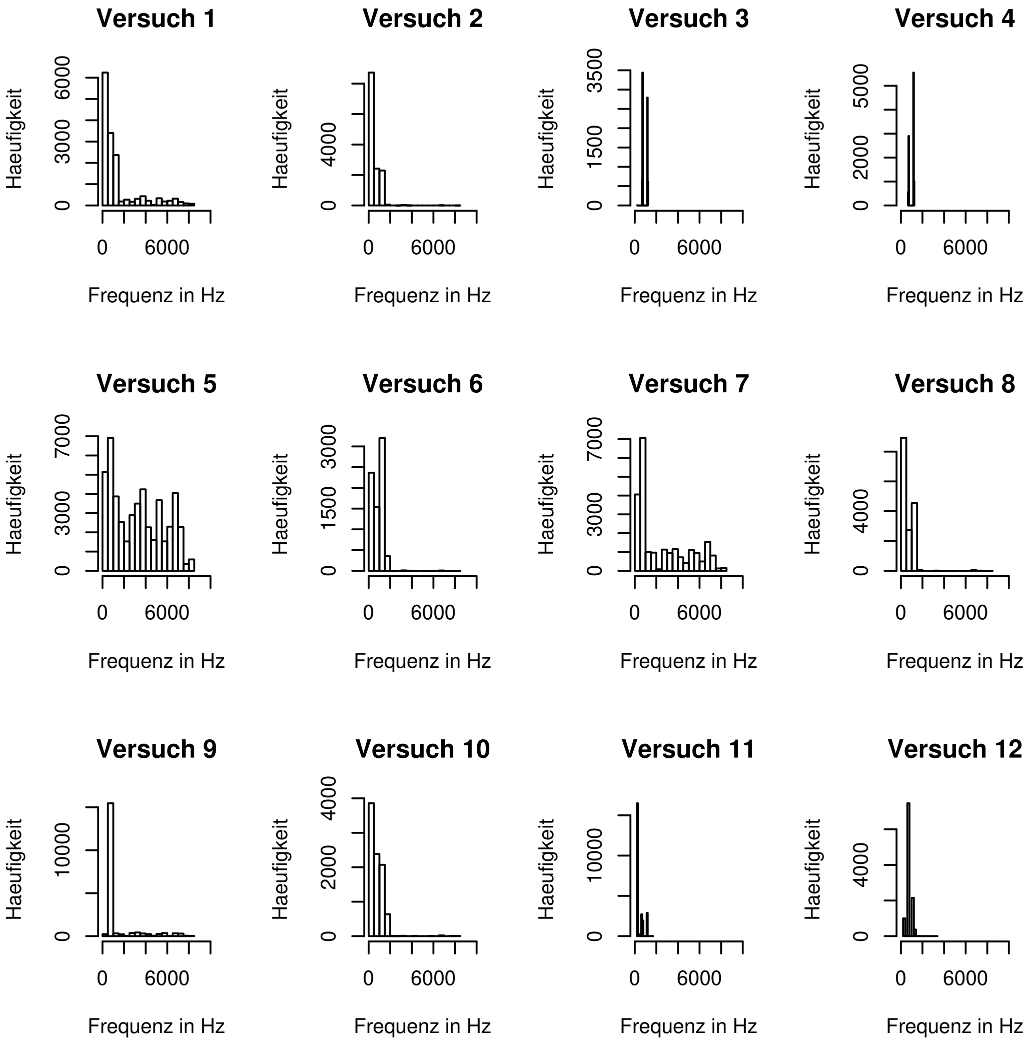

Abbildung 18: Histogramme zu den signifikanten Frequenzen der Versuche 1 bis 12

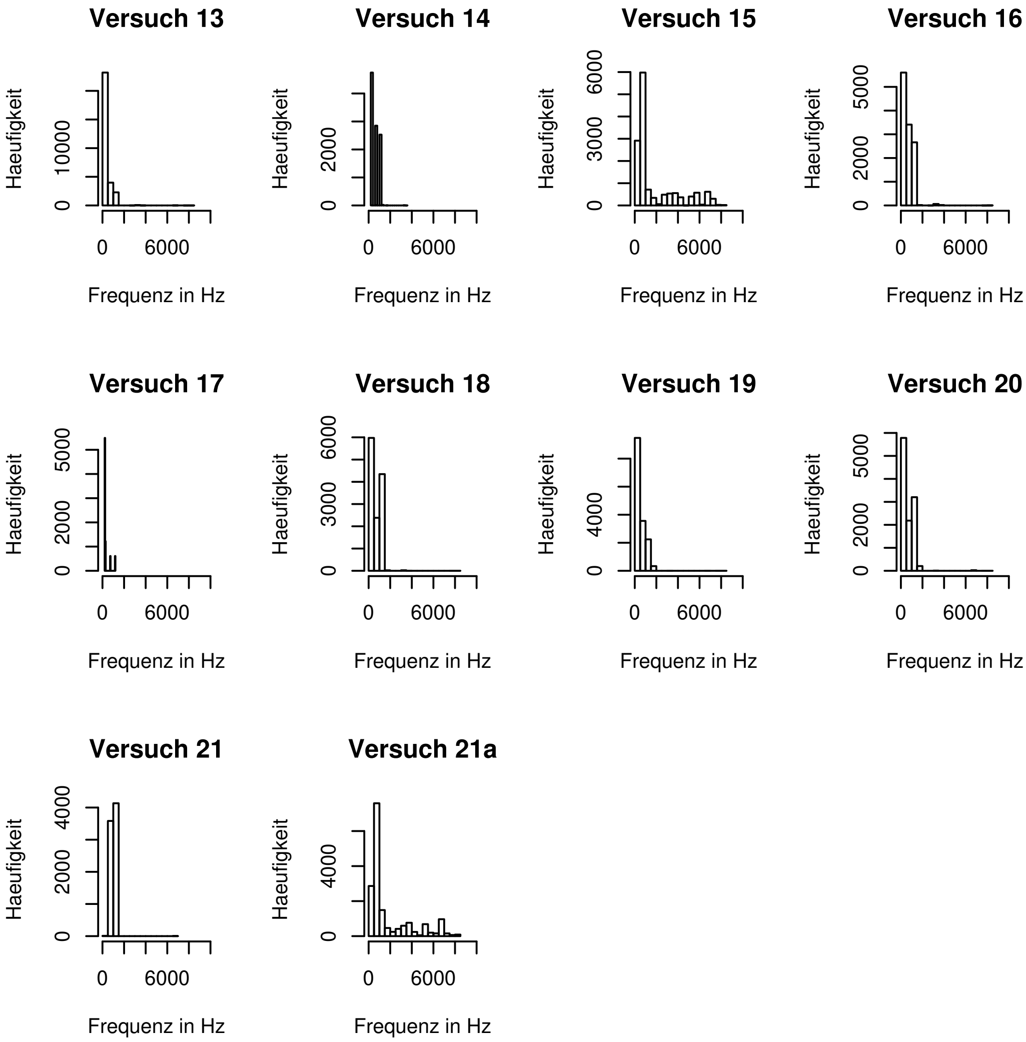

Abbildung 19: Histogramme zu den signifikanten Frequenzen der Versuche 13 bis 21a

In den Abbildungen 20 und 21 sind die Histogramme auf den Bereich zwischen 0 Hz und 2000 Hz beschränkt, weil in den Histogrammen in Abbildungen 18 und 19 hauptsächlich Frequenzen aus diesem Bereich in allen Versuchen wesentlich waren. Die Balkenbreite ist auf 50 Hz festgelegt, um die einzelnen Bilder besser vergleichbar zu machen.

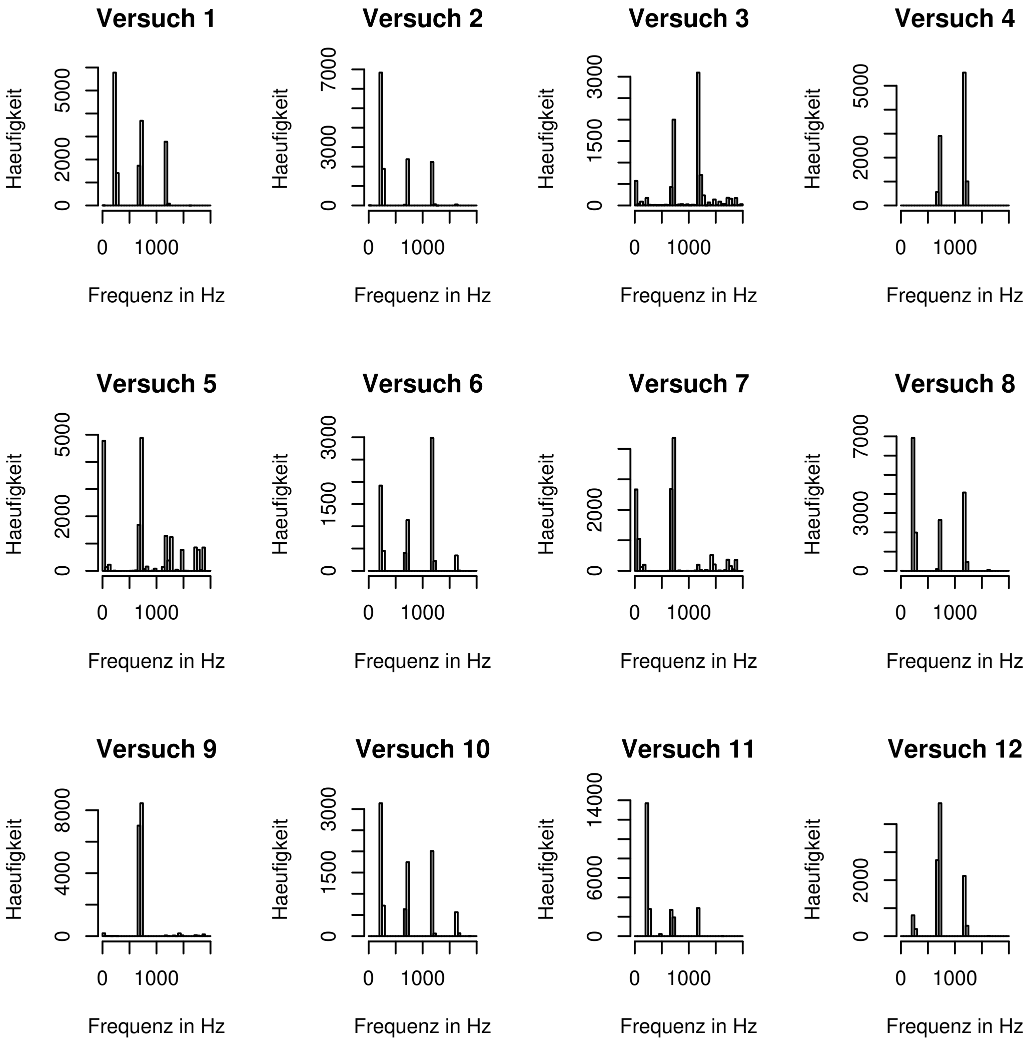

Abbildung 20: Histogramme zu den signifikanten Frequenzen der Versuche 1 bis 12 , die kleiner als 2000 Hz sind.

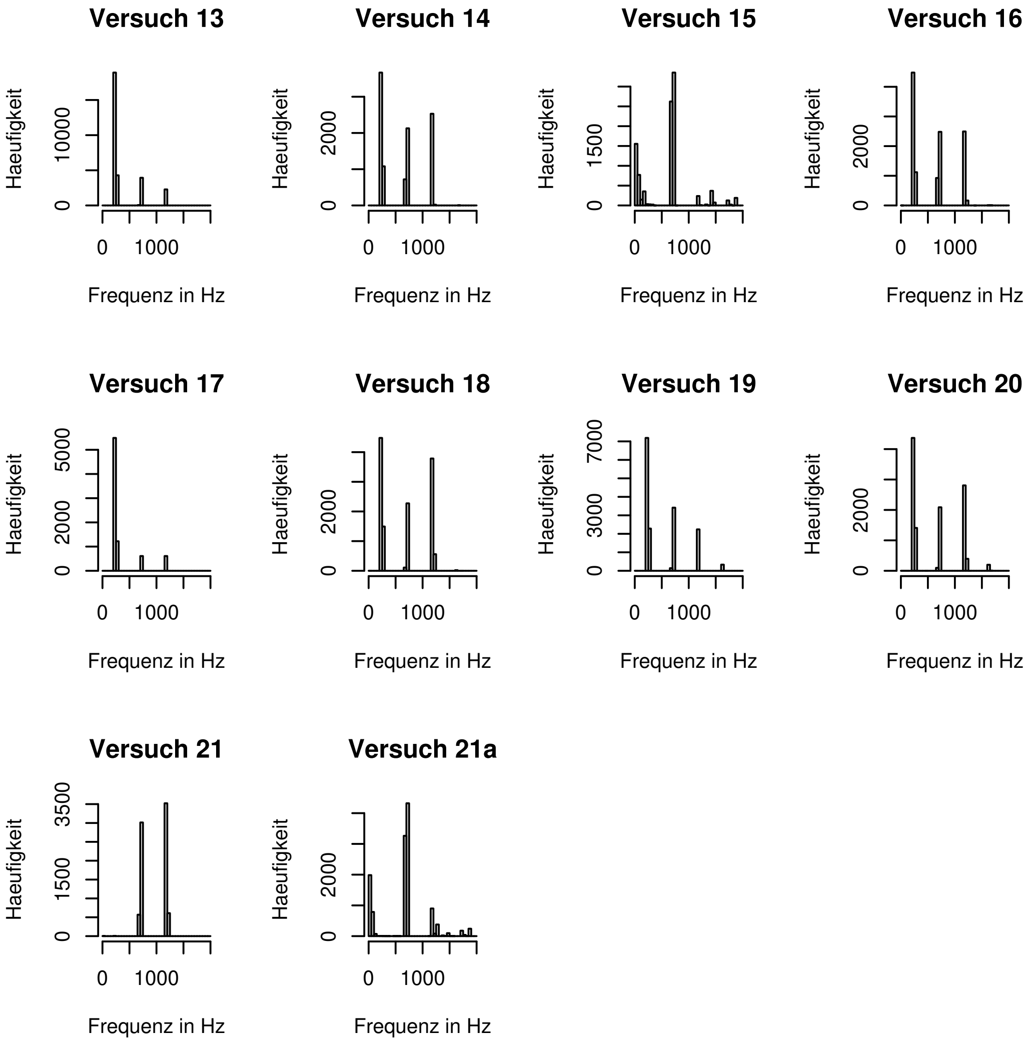

Abbildung 21: Histogramme zu den signifikanten Frequenzen der Versuche 13 bis 21a, die kleiner als 2000 Hz sind.

Abbildung 22 bietet eine Zusammenfassung über alle in den letzten zwei Grafiken gezeigten Histogramme, wobei Balken in den Histogrammen, die kleiner als 2 waren, nicht berücksichtigt wurden. Aus Abbildung 22 lässt sich entnehmen, dass Frequenzen, die in diesem Histogramm besonders herausragen, besonders interessant sein dürften. Die zugehörigen Balkenmitten sind:

`25 Hz    225 Hz    275 Hz    675 Hz    725 Hz   1175 Hz    1225 Hz    1625 Hz`

Vielfachheiten können hier durch die equidistant gewählten Grenzen der Balken entstehen. Schaut man sich alle signifikanten Frequenzen in den zugehörigen Intervallen an, ergeben sich folgende Frequenzen:

```
> 0 - 50 Hz
  4.9  9.8 14.7 19.5 24.4 29.3 34.2 39.1 43.9 48.8

> 200 - 300 Hz
 200.2  205.1  210.0  214.9  219.7  224.6  229.5  234.4  239.3  244.1
 249.0  253.9  258.8  263.7  268.6  293.0  297.9

> 650 - 750 Hz
 659.2  664.1  668.9  673.8  678.7  683.6  688.5  693.4  698.2  703.1
 708.0  712.9  717.8  722.7  727.5  732.4  737.3  742.2  747.1

> 1150 - 1250 Hz
 1152.3  1157.2  1162.1  1167.0  1171.9  1176.8  1181.6  1186.5  1191.4
 1196.3  1201.2  1206.1  1210.9  1215.8  1220.7  1225.6  1230.5  1235.4
 1240.2  1245.1

>  1600 - 1650 Hz
 1601.6  1606.4  1611.3  1616.2  1621.1  1626.0  1630.9  1635.7  1640.6
 1645.5
```

Es fällt auf, dass die ersten drei Eigenfrequenzen der Bohrstange auch die dominierenden Frequenzen in den Zeitreihen sind. Die Beobachtungen stimmen somit mit den Ergebnissen bisheriger Untersuchungen überein, die Rattern als selbsterregte Torsionsschwingungen identifiziert haben.

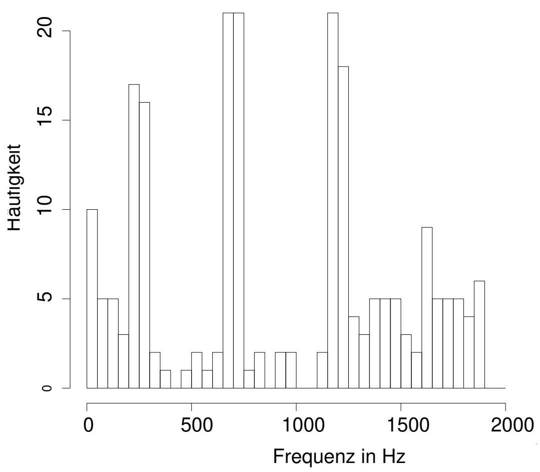

Abbildung 22: Histogramm über die besonders häufig in den Versuchen vorkommenden Frequenzen.

5 Zusammenfassung

Das Ziel der hier beschriebenen Untersuchung war einerseits, Zusammenhänge zwischen kontrollierbaren Einflussgrößen im BTA-Tiefbohrprozess und Qualitätskenngrößen einer Bohrung herzustellen, andererseits sollte der Prozess in möglichst vielen unterschiedlichen Zuständen beobachtet werden, um mögliche Zusammenhänge zwischen Einstellgrößen und Prozessdynamik zu ermitteln. Beide Ziele konnten mit dem hier beschriebenen Vorgehen, durch die Wahl des zentral-zusammengesetzten Versuchsplans verwirklicht werden. Zusätzlich ließ dieser Plan einen Einbau des Verschleißes als zufälligen Einfluss in der statistischen Modellierung der Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und den Rauheits- und Rundheitsmaßen zu.

Während der Versuche traten Prozessstörungen auf, die anhand ihrer Auswirkungen auf das Bearbeitungsergebnis als zwei verschiedene Arten von Rattern identifiziert wurden. Die explorative Datenanalyse der Dauer dieser Störungen in Abhängigkeit von den Einflussgrößen zeigte, dass diese Störungen nicht völlig zufällig aufgetreten sind, sondern einen Zusammenhang mit der Schnittgeschwindigkeit aufweisen. Wiederholversuche im Mittelpunkt zeigen darüber hinaus, dass der Prozess in Teilbereichen auch deutlich variieren kann. Die Versuche ließen sich trotzdem anhand der Schnittgeschwindigkeit mit einer Fehlerrate von 22 % gut linear nach solchen, bei denen kein Rattern Typ B (Rattern mit einem ausgeprägten wendelförmigen Muster in der Bohrwand) aufgetreten ist, und solchen bei denen es aufgetreten ist, trennen.

Für die ermittelten der Rauheitsmaße konnten quadratische Modelle mit einer befriedigenden Anpassungsgüte bestimmt werden, aus denen Optima für die Einstellgrößen berechnet wurden. Die Ermittlung von optimalen Einstellungen der Einflussgrößen zur Erzielung von geringer Rauheit führte zu Einstellungen mit mittlerer Schnittgeschwindigkeit, mittlerem Ölvolumenstrom und geringem Vorschub. Es konnte kein Zusammenhang zwischen der Realisation der Rauheitsmaße und Art und Dauer des Ratterns festgestellt werden.

An die ermittelten Rundheitsfehler konnte ebenfalls ein zufriedenstellendes Modell angepasst werden. In diesem Fall ist das Modell linear, so dass sich bei der Bestimmung der optimalen Werte der Einstellgrößen andere Empfehlungen ergeben. Der Hauptunterschied liegt hier in der Schnittgeschwindigkeit, die möglichst gering gewählt werden sollte. Für den Rundheitsfehler konnte ein Zusammenhang zum Rattern, insbesondere Rattern Typ B, festgestellt werden. Dementsprechend ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Empfehlungen mit den Ergebnissen aus der explorativen Analyse, aus denen hervorgeht, dass bei geringer Schnittgeschwindigkeit kaum Rattern Typ B aufgetreten ist.

Die praktische Umsetzung der aus den Modellen abgeleiteten Empfehlungen ist wirtschaftlich nicht effizient, da sie einerseits lange Bearbeitungszeiten zur Folge haben kann und sich andererseits Rattern alternativ durch Dämpfen vermeiden lässt. Daher erscheint es sinnvoll, den Prozess im nächsten Schritt unter Einsatz eines Dämpfers zu optimieren. Eine Grundlage hierzu bilden die statistischen Untersuchungen der Online-Daten. Hieraus ergab sich, dass die aussagekräftigste Messgröße, das Bohrmoment, unabhängig von den Einstellungen im Wesentlichen von wenigen Frequenzen bestimmt ist. Diese Frequenzen ermöglichen eine gezielte Platzierung des Dämpfers in zukünftigen Versuchen.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die dieses Projekt im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 475 „Komplexitätsreduktion in multivariaten Datenstrukturen" fördert, für die Unterstützung.

Literatur

[Astakhov u. a. 1997a] Astakhov, V. P. ; Osman, M. O. M. ; Al-Ata, M.: Statistical design of Experiments in Metal Cutting – Part Two: Applications. In: *Journal of Testing and Evaluation* 25 (1997), Nr. 3, S. 327–335

[Astakhov u. a. 1997b] Astakhov, V. P. ; Osman, M. O. M. ; Al-Ata, M.: Statistical design of Experiments in Metal Cutting – Part One: Methodology. In: *Journal of Testing and Evaluation* 25 (1997), Nr. 3, S. 322–327

[Bolle 1991] Bolle, D.: *Ein System zur automatischen Dämpfung von Ratterschwingungen beim BTA-Tiefbohren*, Universität Dortmund, Dissertation, 1991

[Box und Draper 1987] Box, G.E.P. ; Draper, N.R.: *Empirical Model-Building and Response Surfaces.* Wiley & Sons, New York, 1987

[Busse u. a. 2001] Busse, A. ; M., Hüsken. ; Stagge, P.: Offline-Analyse eines spanenden Tiefbohrprozesses. In: *Technical Report, SFB 475, Fachbereich Statistik, Universität Dortmund* (2001), Nr. 16

[Cronjäger 1974] Cronjäger, Ludolf: Technolgie des Tiefbohrens. In: *Werkzeugmaschine International* (1974), Oktober, Nr. 5, S. 11–16

[Fuß 1986] Fuss, Hans: *Aspekte zur Beeinflussung der Qualität von BTA – Tiefbohrungen*, Universität Dortmund, Dissertation, 1986

[Gessesse u. a. 1994] Gessesse, Y.B. ; Latinovic, V.N. ; Osman, M.O.M.: On the Problem of Spiralling in BTA Deep-Hole Machining. In: *Journal of Engineering for Industry* 116 (1994), S. 161–165

[Ihaka und Gentleman 1996] Ihaka, Ross ; Gentleman, Robert: R: A Language for Data Analysis and Graphics. In: *Journal of Computational and Graphical Statistics* 5 (1996), Nr. 3, S. 299–314

[Pfleghar 1976] PFLEGHAR, F.: Verbesserung der Bohrungsqualität beim Arbeiten mit Einlippentiefbohrwerkzeugen. In: *Bericht des Instituts für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart*. 1976

[Schlittgen und Streitberg 1999] SCHLITTGEN ; STREITBERG: *Zeitreihenanalyse*. Toutenbourg, 1999 (Statistik)

[Streicher 1975] STREICHER, P.: *Tiefbohren der Metalle*. 1. Würzburg : Vogel-Verlag, 1975 (WI-Fachbuchreihe)

[Thai 1983] THAI, T. P.: *Beitrag zur Untersuchung der selbsterregten Schwingungen von Tiefbohrwerkzeugen*, Universität Dortmund, Dissertation, 1983

[VDI 1974] VDI: Tiefbohrverfahren. In: *VDI Düsseldorf* (1974)

[Weck 2001] WECK, Manfred: *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme*. Bd. 5: *Messtechnische Untersuchung und Beurteilung*. 6. Berlin : Springer-Verlag, 2001

[Weinert u. a. 2002] WEINERT, Klaus ; WEBBER, Oliver ; HÜSKEN, Michael ; MEHNEN, Jörn ; THEIS, Winfried: Analysis and Prediction of Dynamic Disturbances of the BTA Deep Hole Drilling Process. In: *Proceedings of the 3rd CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME 2002)*, 2002