



Masterarbeit

Bearbeitungsprozessanalyse beim Tiefbohren in hochfesten Werkstoffen

in Zusammenarbeit mit:

Robert Bosch AG in Hallein



von

Reinfried Schröcker

0730970

Durchgeführt am Institut für Fertigungstechnik

Institutsvorstand:

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich Hochleitner

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Jörg Edler

Eidstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich den Bediensteten des Institutes für Fertigungstechnik an der Technischen Universität Graz, im Speziellen meinem Betreuer Herr Dipl.-Ing. Dr.techn. Jörg Edler, der mich immer mit seinem äußerst kompetenten Fachwissen in jeder technischen Problemstellung lösungsorientiert beraten hat, danken.

Des Weiteren spreche ich der Robert Bosch AG in Hallein und deren Mitarbeitern einen herzlichen Dank aus. Besonders hervorheben möchte ich hierbei die Teamleiter der einzelnen Fertigungsbereiche des Prototypenbaus. Durch ihre tatkräftige Unterstützung und praktischen Denkweisen ist es gelungen, die jahrzehntelange Erfahrung des Fertigungspersonals in diese Arbeit einfließen zu lassen.

Kurzfassung

Am Produktions- und Entwicklungstandort der Robert Bosch AG in Hallein werden Einspritzsysteme für Großdieselmotoren hergestellt. Einige dieser Bauteile beinhalten Tiefbohrungen für die Zuführung des Kraftstoffes. Diese Bohrungen sind einer hohen Beanspruchung durch den unter Hochdruck stehenden Kraftstoff ausgesetzt, daher werden höchste Anforderungen an die Qualität gestellt. Die Bauteile bestehen aus einem hochfesten Werkstoff, der im vergüteten Zustand mechanisch bearbeitet wird. Durch die hohen Festigkeiten des Werkstoffes sind die Tiefbohrprozesse nicht mehr beherrschbar und die Standzeiten der Werkzeuge unwirtschaftlich.

Im Zuge dieser Arbeit sollte ein optimales Gesamtmaschinenkonzept gefunden und bewertet werden, um die Tiefbohrprozesse in Eigenfertigung durchführen zu können.

In einem ersten Schritt erfolgte eine Analyse des Bauteilespektrums, daraus resultierten die Maschinenanforderungen. Im Folgenden führte man Prozess und Verschleißversuche mit den Werkzeugherstellern durch, um den Prozess zu definieren. Mit der Konstruktion von Versuchsteilen und deren Testfertigung bei den einzelnen Maschinenherstellern konnten die Bearbeitungseigenschaften überprüft und eine vergleichbare Bewertungsbasis geschaffen werden.

In einer abschließenden Nutzwertanalyse erfolgte eine objektive Bewertung der vorliegenden Konzepte, und das beste wurde bis zur Anschaffung hin weiterverfolgt. Die Entscheidung fiel auf ein Bearbeitungszentrum in Öl, dieses vereint höchste Flexibilität und ausgezeichnete Bearbeitungseigenschaften.

Abstract

The production and development facility of the Robert Bosch AG in Hallein produces injection systems for large diesel engines. Some of these components include deep holes to supply the fuel. These holes are exposed to high stress due to the highly pressurized fuel. Placing high demands on quality. These components consist of a high strength material in the annealed condition is machined. These high strength of the material are the deep hole drilling process no longer controlled and the tool life is uneconomical. In the course of this work should be an optimal overall machine concept can be found and assessed by the drilling process perform in-house production can be.

In a first step, an analysis of the components spectrum was resulted from the machine requirements. The following process is carried out experiments with the wear and tool manufacture, to define the process. With the design of test parts and their manufacturing on test machines at the various manufacturing processing properties could be reviewed and a comparable assessment base will be created.

In a final cost-benefit analysis was an objective evaluation of the existing concepts and the best part was continued until the initial point. The decision was taken to a milling center in oil. It combines maximum flexibility and excellent handling characteristics

I. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung / Beschreibung
AG		Aktiengesellschaft
BAZ		Bearbeitungszentrum
BTA		Boring and Trepanning Association
CO ₂		Kohlendioxid
DIN		Deutsche Industrienorm
DM		Durchmesser
ELB		Einlippenbohrer
FEM		Finite Elemente
HM		Hartmetall
KO		Ausschluss
KSS		Kühlschmierestoff
MMS		Minimalmengenschmierung
Pt	μm	Profiltiefe
Rz	μm	Gemittelte Rautiefe
VDI		Verein Deutscher Ingenieure
VHM		Vollhartmetall
WW		Werkzeugwechsel
Firmenbezeichnungen		
Alzmetall		deutscher Werkzeugmaschinenbauer
Bosch		deutscher Großkonzern
Botek		deutscher Tiefbohrwerkzeughersteller
Buck		deutscher Werkzeugmaschinenbauer
DMG		deutscher Werkzeugmaschinenbauer (Deckel Maho Gildemeister)
Imser		italienischer Werkzeugmaschinenbauer
Mazak		japanischer Werkzeugmaschinenbauer
Samag		deutscher Werkzeugmaschinenbauer
TBT		deutscher Werkzeugmaschinenbauer (Tief - Bohr - Technik)

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Commonrailssystem für Großdieselanwendung	2
Abbildung 2: Injektoraufbau.....	3
Abbildung 3: Aufbau Haltekörper	4
Abbildung 4: Prozesskette Haltekörperfertigung in der Vergangenheit.....	5
Abbildung 5: Prozesskette aktuelle Haltekörperfertigung.....	6
Abbildung 6: Prozesskette zukünftige Haltekörperfertigung.....	6
Abbildung 7: Steinzeitliche Bohrmaschine	8
Abbildung 8: Einteilung nach DIN8580.....	11
Abbildung 9: Einlippenverfahren	12
Abbildung 10: BTA - Verfahren	13
Abbildung 11: Ejektor - Bohrverfahren	14
Abbildung 12: Einlippenbohrer	15
Abbildung 13: Konizität des Bohrkopfes.....	18
Abbildung 14: Zerspankräfte am Werkzeug	19
Abbildung 15: Kräfte am Werkzeug.....	20
Abbildung 16: Massenkräfte am Werkzeug.....	22
Abbildung 17: Resultierende Massenkräfte.....	22
Abbildung 18: Ersatzsystem Torsionsschwinger.....	23
Abbildung 19: Gesamtbeanspruchung Einlippenbohrer.....	24
Abbildung 20: Einteilung KSS	25
Abbildung 21: Aufgabenfelder KSS.....	27
Abbildung 22: erforderlicher Druck und Volumenstrom.....	29
Abbildung 23: Tiefbohrereinheit.....	30
Abbildung 24: Tiefbohrmaschine.....	31
Abbildung 25: gegenläufige Arbeitsweise	31
Abbildung 26: rotierendes Werkstück.....	32
Abbildung 27: exzentrisches Tiefbohren	32
Abbildung 28: Grundtoleranzen.....	33
Abbildung 29: Bohrungsgeradheit.....	34
Abbildung 30: Oberflächengüte beim Tiefbohren.....	34
Abbildung 31: Bohrungsverlauf	35
Abbildung 32: VHM - Einlippenbohrer	36
Abbildung 33: ELB Schälphase.....	37
Abbildung 34: Spanteilernut und Spanleitstufe am ELB - Bohrkopf	38
Abbildung 35: Axialpulsator.....	39
Abbildung 36: Zweilippenbohrer.....	40
Abbildung 37: Hochleistungsspiralbohrer.....	42
Abbildung 38: Tiefbohren am BAZ	44
Abbildung 39: gestuftes Tiefbohren am BAZ.....	45

Abbildung 40: MMS Regelkreis	47
Abbildung 41: Einteilung MMS Systeme	48
Abbildung 42: Äußere Zuführung	49
Abbildung 43: 1 Kanal MMS System.....	51
Abbildung 44: 2 Kanal System	52
Abbildung 45: MMS gerechte Werkzeugaufnahme.....	54
Abbildung 46: Haltekörperdichfläche mit Stiftbohrungen	58
Abbildung 47: ELB am Ende der Standzeit	59
Abbildung 48: Fertigungsbedingte Stufe beim Tiefbohren am BAZ	61
Abbildung 49: Pt-Aufzeichnung über eine Stufe.....	62
Abbildung 50: FEM Rechnung Stufe	63
Abbildung 51: Aufbau BAZ Alzmetall	68
Abbildung 52: Tiefbohrzentrum mit Fräsoption	70
Abbildung 53: Vorstufe	74
Abbildung 54: Bild Versuchsteil Fertigteil	75
Abbildung 55: Standweg Versuchsteil.....	76
Abbildung 56: Alzmetall Versuch-Fräsen Verlauf am Austrittspunkt	79
Abbildung 57: TBT Versuch-Fräsen Verlauf am Austrittspunkt.....	81
Abbildung 58: Qualitative Anzahl der Tiefbohrungen mit manuellem WW am BAZ.....	84
Abbildung 59: Quantitative Anzahl der Tiefbohrungen mit manuellem WW am BAZ.....	84
Abbildung 60: Einflussfaktoren Tiefbohrprozess	92
Abbildung 61: Zeichnung Versuch - Fräsen	97
Abbildung 62: Zeichnung Versuch TiBo 2.5 / 5 mm	98

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anschliffe für Einlippenbohrer.....	16
Tabelle 2: Umfangsformen für Einlippenbohrer.....	17
Tabelle 3: Gegenüberstellung ELB - Hochleistungsspiralbohrer.....	43
Tabelle 4: Vor und Nachteile Äußere Zuführung.....	49
Tabelle 5: Innere Zuführung.....	50
Tabelle 6: Gegenüberstellung der Systeme.....	52
Tabelle 7: Teilespektrum Bosch Hallein.....	57
Tabelle 8: MMS Standweg.....	60
Tabelle 9: Tiefbohrrol Standweg.....	60
Tabelle 10: Pt-Messung.....	62
Tabelle 11: analysierte Maschinenhersteller.....	73
Tabelle 12: Abnahmeteile.....	77
Tabelle 13: Bearbeitungsparameter Alzmetall Versuch - Fräsen.....	78
Tabelle 14: Bearbeitungsparameter TBT Versuch - Fräsen.....	80
Tabelle 15: Haltekörperfertigung Planung 2012.....	83
Tabelle 16: KO – Kriterien Nutzwertanalyse.....	85
Tabelle 17: Punktevergabe Gewichtung.....	86
Tabelle 18: Gewichtungsfaktoren Allgemein.....	87
Tabelle 19: Gewichtungsfaktoren Tiefbohren und Fräsen.....	88
Tabelle 20: Bewertung Bearbeitungsversuch.....	89
Tabelle 21: Bewertung allgemeine Faktoren.....	90
Tabelle 22: Gesamtnutzwert.....	91
Tabelle 23: Messwerte Alzmetall – Versuch - Fräsen.....	93
Tabelle 24: Messwerte TBT – Versuch - Fräsen.....	94
Tabelle 25: Messwerte TBT – TiBo 2.5 mm.....	95
Tabelle 26: Messwerte TBT – TiBo 5 mm.....	96

IV. Formelverzeichnis

(1).....	10
(2).....	20
(3).....	20
(4).....	20
(5).....	20
(6).....	20
(7).....	21
(8).....	21
(9).....	21

Inhalt

I. Abkürzungsverzeichnis	VI
II. Abbildungsverzeichnis	VII
III. Tabellenverzeichnis.....	IX
IV. Formelverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Aufgabenstellung.....	1
1.2.1 Commonrailsystem	1
1.2.2 Commonrailinjektor.....	3
1.2.3 Prototypenbau	5
1.3 Ziele der Arbeit	7
2 Grundlagen	8
2.1 Geschichtliches	8
2.2 Tiefbohrverfahren	10
2.2.1 Definition und Einteilung nach DIN	10
2.2.2 Einlappenverfahren.....	12
2.2.3 Das BTA – Verfahren Boring and Trepanning Association.....	13
2.2.4 Ejektorverfahren	14
2.3 Einlippentiefbohrerwerkzeug	15
2.3.1 Aufbau	15
2.3.2 Anschliffformen	16
2.3.3 Umfangsformen	17
2.3.4 Aufnahme	18
2.3.5 Bohrkopfkonzität	18
2.3.6 Kräfte am Einlippentiefbohrwerkzeug.....	19
2.3.7 Schwingungsanalyse des Werkzeuges	23
2.3.8 Gesamtbeanspruchung	24
2.4 Kühlschmierstoffsystem.....	25
2.4.1 Unterscheidung und Typisierung von Kühlschmierstoffen.....	25
2.4.2 Aufgaben und Wirkweise von KSS in der Tiefbohrtechnik	27
2.4.3 Kühlschmierstoffanlage	28
2.5 Tiefbohrsysteme	29
2.5.1 Tiefbohrprozess auf der Tiefbohrereinheit.....	29
2.5.2 Konventionelle Tiefbohrmaschine.....	30
2.5.3 Arbeitsweisen beim Tiefbohren	31
2.5.4 Verfahrensgrenzen	33

3	Stand der Technik	36
3.1	Tiefbohrwerkzeuge	36
3.1.1	Vollhartmetall Einlippenbohrer	36
3.1.2	Sonderanschliffe für Tiefbohrwerkzeuge	37
3.1.3	Axialpulsator	38
3.1.4	Beschichtungen	39
3.1.5	Zweilippenbohrer	40
3.1.6	Spiralisierte Hochleistungstiefbohrer	41
3.1.7	Einlippenbohrer – Spiralisierter Hochleistungstiefbohrer	43
3.2	Tiefbohren am Bearbeitungszentrum	43
3.3	Minimalmengenschmierung.....	46
3.3.1	Einführung und Allgemeines.....	46
3.3.2	MMS – System	47
3.3.3	Einflussfaktoren MMS Systeme.....	53
4	Prozessfestlegung.....	55
4.1	Analyse des Teilespektrums.....	55
4.2	Prozessversuche Kühlschmierstoff für Tiefbohren	58
4.2.1	Einleitung und Allgemeines	58
4.2.2	MMS – Standwegversuch.....	60
4.2.3	Tiefbohröl – Standwegversuch	60
4.2.4	Diskussion	61
4.3	Prozessversuch gestuftes Tiefbohren am Bearbeitungszentrum	61
4.3.1	Einleitung	61
4.3.2	Messung der Profiltiefe einer Stufenbohrung	62
4.3.3	FEM Rechnung.....	63
4.3.4	Diskussion	63
5	Maschinenbewertung.....	65
5.1	Definition der Auswahlkriterien	65
5.2	Marktanalyse	67
5.2.1	5 – Achs - Bearbeitungszentrum in Öl mit vertikaler Spindel.....	67
5.2.2	Tiefbohrzentrum mit Fräsoption.....	70
5.2.3	Maschinenhersteller.....	72
5.3	Versuchs- und Abnahmeteile	74
5.3.1	Fräsen und Tiefbohren	74
5.3.2	Machbarkeit Standweg und Bohrungsverlauf	76
5.3.3	Abnahmeteile.....	76
5.4	Versuchsauswertung	77
5.4.1	Einführung	77
5.4.2	Bearbeitungsversuche Alzmetall	77
5.4.3	Bearbeitungsversuche TBT	80
5.4.4	Gegenüberstellung und Diskussion	81

5.5	Nutzwertanalyse	81
5.5.1	Allgemeines	81
5.5.2	Produktionszahlen	83
5.5.3	KO – Kriterien	85
5.5.4	Gewichtungsfaktoren	86
5.5.5	Bewertung.....	88
5.5.6	Ergebnis.....	91
6	Zusammenfassung	92
V.	Anhang	93
VI.	Literaturverzeichnis.....	99

1 Einleitung

1.1 Einführung

Tiefbohren ist eine Fertigungstechnologie, deren Anfänge im frühen Altertum liegen, und sich bis in die Gegenwart behauptet hat.

Im frühen Mittelalter setzte man das Fertigungsverfahren zur Herstellung von Brunnenrohren und Wasserleitungen aus Holz ein. Mit Beginn der Neuzeit, und der Erfindung des Schwarzpulvers fand das Tiefbohren in der Herstellung von Kanonen und Gewehren seinen Einsatz, und man verfeinerte und präzisierte die Technologie ständig. Aus dieser Zeit leitet sich auch die englische Übersetzung von Tiefbohren (engl.: gun drilling) ab.

Heute wird das Verfahren im Maschinenbau vorzugsweise zur Fertigung von hochgenauen und tiefen Bohrungen angewendet. Durch die hohe Zerspanungsleistung, die Standzeit des Werkzeuges und die gute Oberflächenqualität ist das Tieflochbohren ein sehr wirtschaftliches Verfahren.

Die Einsatzgebiete des Verfahrens reichen heute zur Herstellung von Schmierölbohrungen in Motorkomponenten bis hin zu Fertigung von Kühlkanälen in Spritzgussformen und Schmiedegesenken.

1.2 Aufgabenstellung

Die Firma Bosch, ein weltweit agierender Großkonzern, unter anderem auch Vorreiter in der Technologieentwicklung für Dieseleinspritzsysteme, fertigt und entwickelt am Standort Hallein Einspritzsysteme für Großdieselmotoren.

Durch die Einführung der Commonrailtechnologie und die ständige Erhöhung der Systemdrücke steigt auch die Komplexität der Bauteile und somit auch die Anforderungen an die Fertigungsprozesse, Maschinen und Werkzeuge.

1.2.1 Commonrailsystem

Die Commonrailtechnologie ist ein neues Dieseleinspritzsystem für Verbrennungskraftmaschinen. Ein wesentlicher Vorteil dieses Systems ist die Entkoppelung der starren mechanischen Verbindung zwischen Kurbelwelle und

Einspritzpumpe. Das bedeutet, der Einspritzdruck wird nicht mehr in der Pumpe erzeugt, und direkt zur Einspritzdüse weitergeleitet und in den Brennraum eingespritzt, sondern der unter Druck stehenden Kraftstoff wird in einem Speichervolumen, dem so genannten Rail gespeichert. Dadurch steht immer, unabhängig vom Kurbelwinkel, unter Druck stehender Kraftstoff bereit. Die Einspritzung erfolgt dann über ein vorgesteuertes Magnetventil.

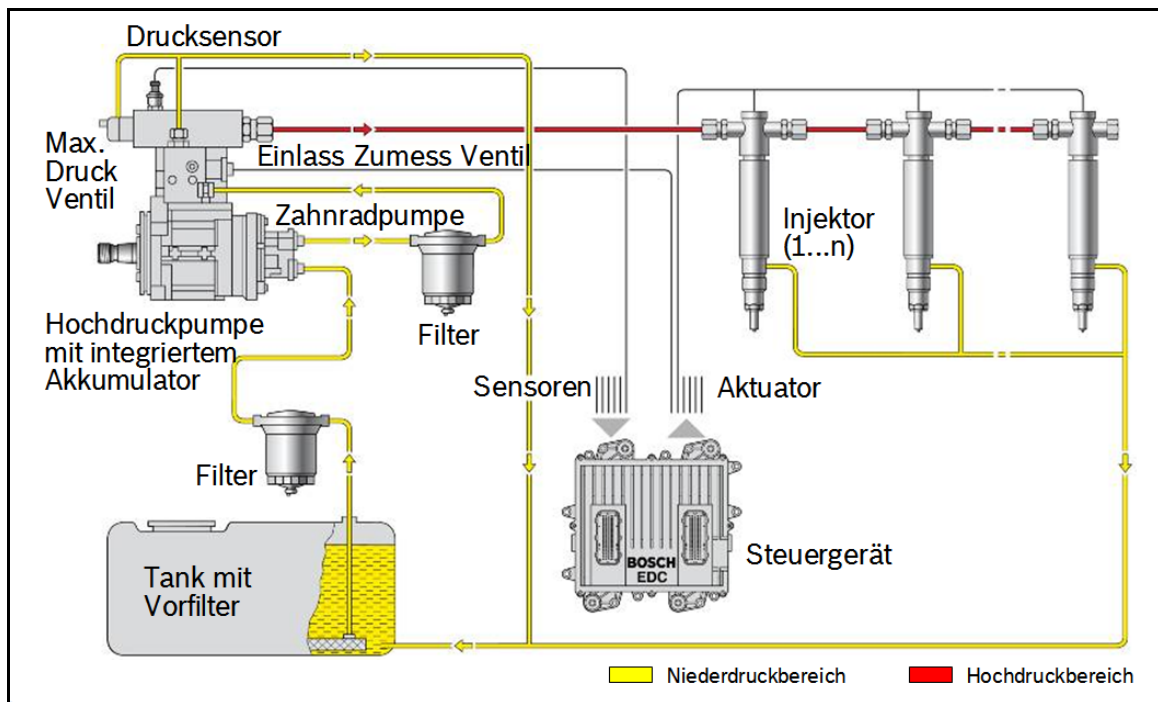


Abbildung 1: Commonrailsystem für Großdieselanwendung¹

Ein für Großdieselmotoren typisches Commonrail-System funktioniert folgendermaßen. Der Kraftstoff wird durch eine Zahnradpumpe durch einen Filter hindurch angesaugt und auf Vorförderdruck gebracht. Danach wird der Kraftstoff über einen weiteren Feinfilter zum Einlass-Zumessventil der Hochdruckpumpe gepumpt. Das Einlass-Zumessventil wird durch ein elektronisches Steuergerät geregelt. Es regelt die benötigte Menge an unter Hochdruck stehendem Kraftstoff. Diese hängt vom Betriebspunkt des Motors ab. Der Betriebspunkt des Motors wird durch eine entsprechende Sensorik erfasst und an das Steuergerät gemeldet. Der beim Regelvorgang anfallende überschüssige Kraftstoff wird wieder in den Tank zurückgeleitet.

¹ Robert Bosch AG Hallein Hauptfirmenpräsentation 2010

Nach der Mengenregelung gelangt der Kraftstoff in die Hochdruckpumpe und wird in dieser auf bis zu 2200 bar verdichtet und im Sammelrohr gespeichert. Von diesem Sammelrohr wird der Kraftstoff über Hochdruckleitungen zu den einzelnen im Zylinderkopf des Motors eingebauten Injektoren verteilt. Bekommt nun eine Injektor ein Steuersignal vom Steuergerät, so öffnet sich die Einspritzdüse, Kraftstoff wird in den Brennraum eingespritzt und die Verbrennung beginnt.

1.2.2 Commonrailinjektor

Der Injektor hat die Aufgabe den Kraftstoff durch den Zylinderkopf hindurch bis hin zur Einspritzdüse zu befördern. Er beinhaltet ein vorgesteuertes Magnetventil, welches sich bei Bestromung öffnet und die Einspritzung bewerkstelligt. Der dabei entstehende drucklose Kraftstoff muss durch den Haltekörper wieder in den Tank zurückgeleitet werden. Dies geschieht durch die so genannte Leckageabführung

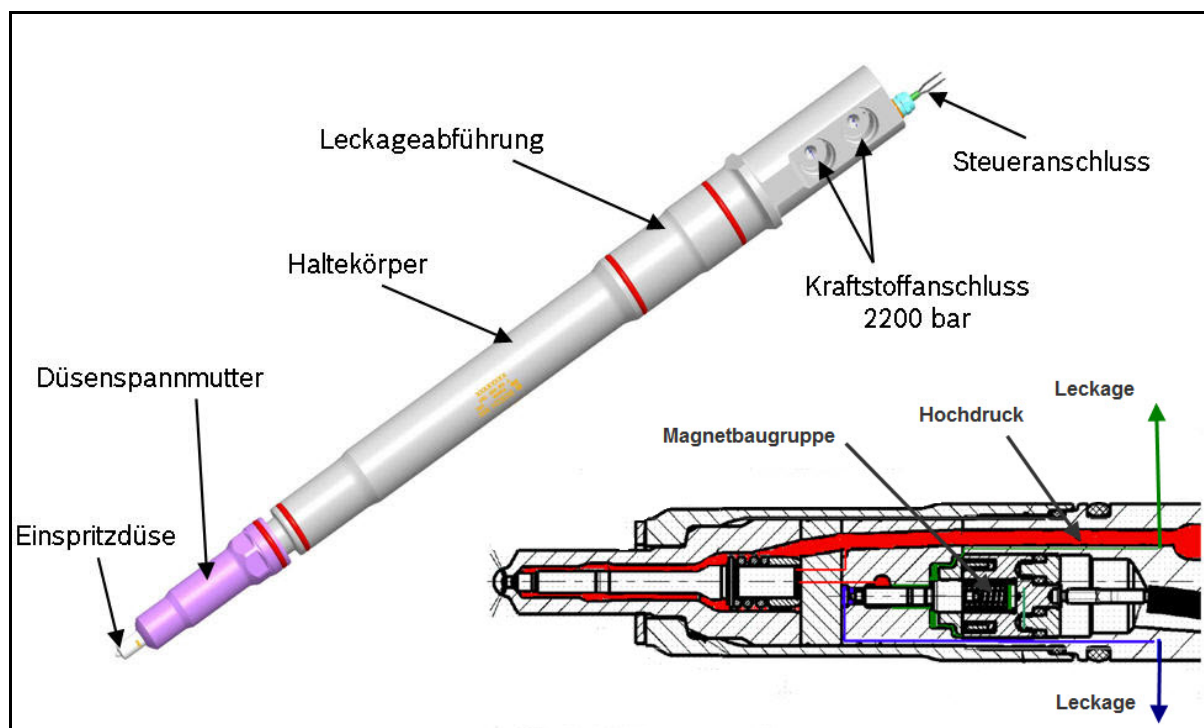


Abbildung 2: Injektoraufbau

Das Hauptbauteil eines Injektors ist der Haltekörper. Dieser beinhaltet mehrere Tiefbohrungen. Die Kabelbohrung für die Zuleitung des Stroms für das Magnetventil. Eine Hochdruckbohrung durch diese wird der unter Hochdruck stehende Kraftstoff bis zur Ventilbaugruppe geleitet. Da diese Bohrung während des Betriebs des Motors permanent unter Druck steht und auch Druckstöße auftreten, ist bei dieser

Bohrung die Qualität der Oberfläche von enormer Bedeutung. Wird hierbei die geforderte Oberflächengüte nicht erreicht, kann dies durch die ständige dynamische Belastung zu Dauerbrüchen führen. Auch muss die entstehende Leckage durch eine Leckageabführbohrung wieder aus den Zylinderkopf zurück in das Kraftstoffniederdrucksystem transportiert werden. Durch eine Schlüssel­fläche an der Oberseite des Haltekörpers wird der Injektor im Zylinderkopf in seiner Drehlage fixiert. An der Unterseite des Haltekörpers befinden sich Stiftbohrungen mit denen alle weiteren Bauteile bis hin zu Einspritzdüse in ihrer Drehlage exakt positioniert werden. Ist die Einspritzdüse nicht im Brennraum exakt positioniert, so kann sich ein verändertes vom Motorenhersteller nicht gewolltes Spritzbild der Düse ergeben. Dadurch kann sich unverbrannter Kraftstoff an der Zylinderwand und dem Zylinderkopf anlagern oder sich eine schlechte Kraftstoffvermischung einstellen. Dies hat eine Leistungsverminderung und erhöhte Schadstoffemissionen zur Folge. Mit der fein supfinierten Dichtfläche an der Unterseite des Haltekörpers werden die einzelnen Komponenten rein metallisch durch Verspannen mit der Düsen­spannmutter gegeneinander abgedichtet. Eine andere Dichtungsvariante würde bei diesen hohen Drücken und Temperaturen versagen.

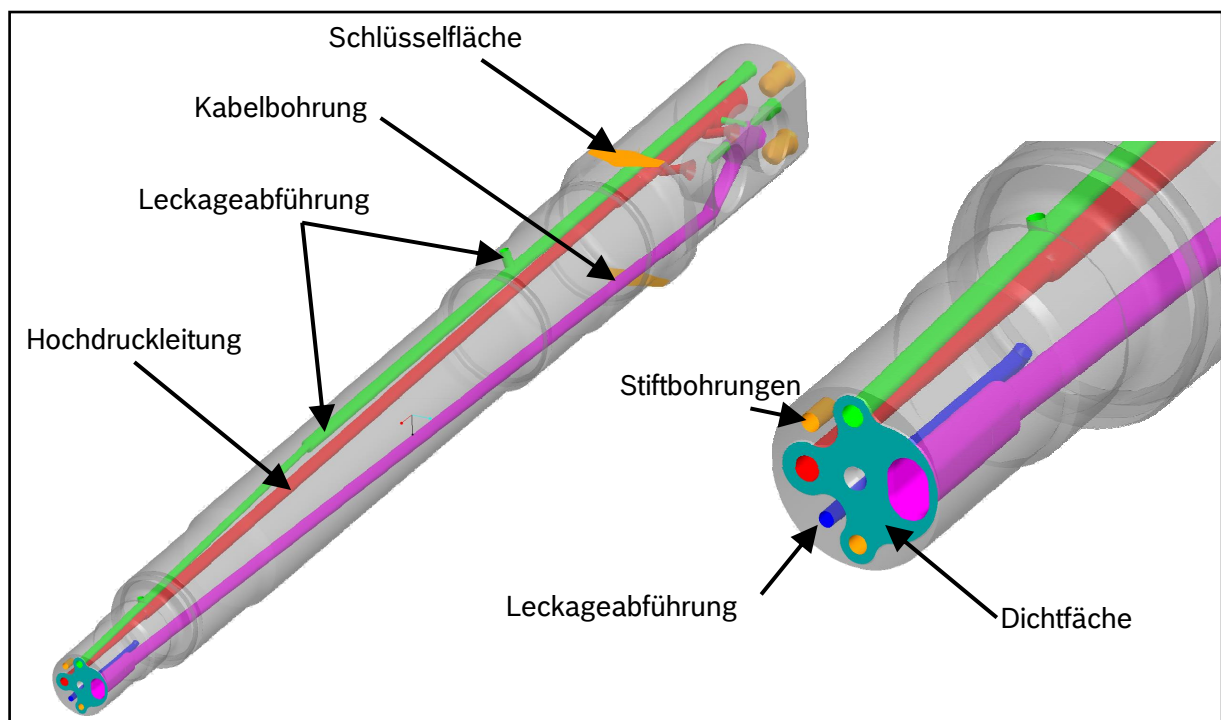


Abbildung 3: Aufbau Haltekörper

1.2.3 Prototypenbau

Der Prototypenbau, auch als Musterbau bezeichnet, am Standort Hallein fertigt Funktionsmuster und Verkaufsmuster für solche Commonrailgroßdieselsysteme. Eine wesentliche Aufgabe in diesem Bereich ist, die Entwicklung der Fertigungsprozesse bis hin zur Serienreife.

Ein äußerst kritischer Prozess ist hier die Herstellung von hochdruckführenden Tiefbohrungen in Großdieselinjektoren. Hierbei können die Bohrungstiefen bis zu einhundert mal dem Bohrungsdurchmesser betragen. Es werden zusätzlich noch höchste Anforderungen hinsichtlich Oberflächenqualität und Positionsgenauigkeit an die Bauteile gestellt.

In der Vergangenheit wurden Haltekörper aus einem weich geglühten Werkstoff hergestellt und danach vergütet und hartbearbeitet.

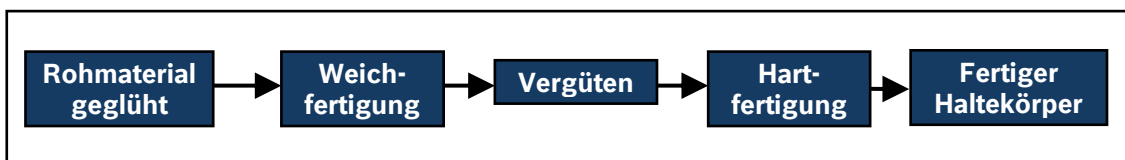


Abbildung 4: Prozesskette Haltekörperfertigung in der Vergangenheit

Des Weiteren fordert der globale Wettbewerb eine ständige Verkürzung der Entwicklungs- und Lieferzeiten. Ein wichtiger Punkt zur Erreichung dieser Ziele ist die Bearbeitung von bereits vergüteten Werkstoffen. Dadurch wird der gesamte Prozess der Wärmebehandlung eingespart und ein Härteverzug durch den Vergütungsprozess ausgeschlossen. Andererseits steigt dadurch die Beanspruchung von Werkzeug und Maschine in teilweise unwirtschaftliche Bereiche. Dies macht die Erprobung und Anwendung neuer Fertigungstechnologien erforderlich.

Aktuell werden Tiefbohrungen in Haltekörpern mit einem Längendurchmesser Verhältnis kleiner 50 im Prototypenbau bei Bosch in Hallein am Bearbeitungszentrum mit einem Einlippentieflochbohrer gebohrt. Dabei werden mit Sonderbeschichtungen und optimierten Vollhartmetallwerkzeugen nur Standzeiten von ca. einem Meter erreicht. Aus wirtschaftlicher und prozesstechnischer Sicht besteht hierbei noch ein großes Optimierungspotenzial.

Tiefere Bohrungen mit einem Längendurchmesser Verhältnis größer 50 werden von Firmen, die sich auf Tiefbohraufgaben spezialisiert haben, hergestellt. Dies bedeutet einen Zeitverlust durch Transportwege und einen erhöhten Logistikaufwand.

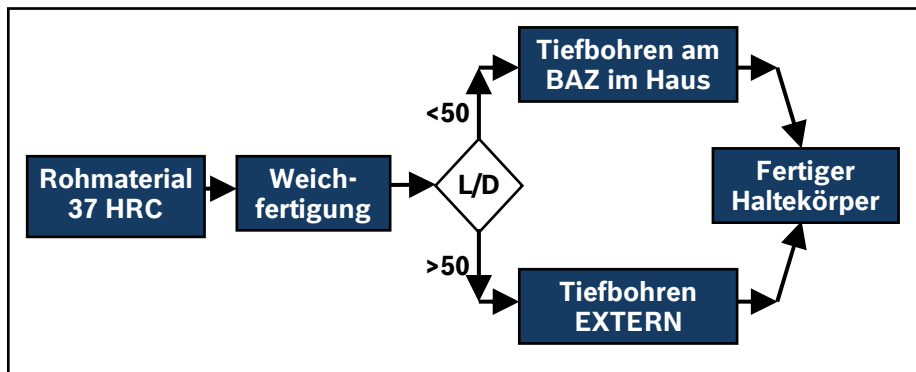


Abbildung 5: Prozesskette aktuelle Haltekörperfertigung

Im Zuge dieser Arbeit sollen die am Markt vorhandenen Tiefbohrmaschinen und Tiefbohrtechnologien analysiert und nach einer Versuchs- und Bewertungsreihe die beste Technologie im Haus eingeführt werden.

Mit der Maschinenbeschaffung und Technologieeinführung sollte es möglich sein, alle Haltekörper komplett selbst im Haus zu fertigen und damit die Durchlaufzeit und den Logistikaufwand zu verkleinern.

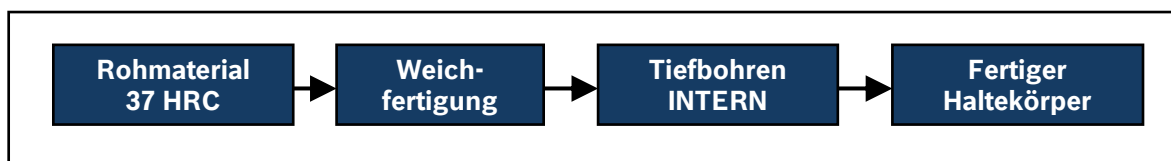


Abbildung 6: Prozesskette zukünftige Haltekörperfertigung

1.3 Ziele der Arbeit

In einem ersten Schritt sollen das derzeit vorhandene Teilespektrum analysiert und die einzelnen Tiefbohrungen nach Positionsgenauigkeit, Oberflächengüte, Durchmesser und Bohrungstiefe klassifiziert werden. Gleichzeitig sind in Abstimmung mit Fertigung und Konstruktion jene weiteren Bearbeitungsschritte zu definieren, die auf Grund von engen Fertigungstoleranzen in derselben Aufspannung durchgeführt werden müssen.

Mit diesen erarbeiteten Daten und kritischen Merkmalen sind die Maschinenanforderungen und Prozessdaten festzulegen. Durch die darauf folgende Konstruktion von Versuchsteilen, die all diese Merkmale beinhalten, sind die einzelnen Maschinenkonzepte durch Versuche zu überprüfen. Mit der Erstellung eines Pflichtenheftes sollen alle Anforderungen klar definiert und festgehalten werden. Durch eine abschließende Nutzwertanalyse sind die jeweiligen Maschinenarten und Technologien zu vergleichen, und das beste Maschinenkonzept ist anzuschaffen.

2 Grundlagen

2.1 Geschichtliches

Bereits in der Altsteinzeit beschäftigte sich die Menschheit mit der Entwicklung von Technologien zur Herstellung von Bohrungen. Diese Bohrungen wurden zur Herstellung besserer Waffen und Werkzeuge benötigt. Auch war es nun möglich, Schmuckgegenstände wie zum Beispiel Ketten und Bänder zu erzeugen, was auch mit einer kulturellen Weiterentwicklung in Verbindung zu setzen ist.

In (Abbildung 7: Steinzeitliche Bohrmaschine) ist eine steinzeitliche Bohrmaschine zu sehen, mit dieser Entwicklung war es möglich, Bohrungen in einer für damalige Verhältnisse kurzen Zeit herzustellen.

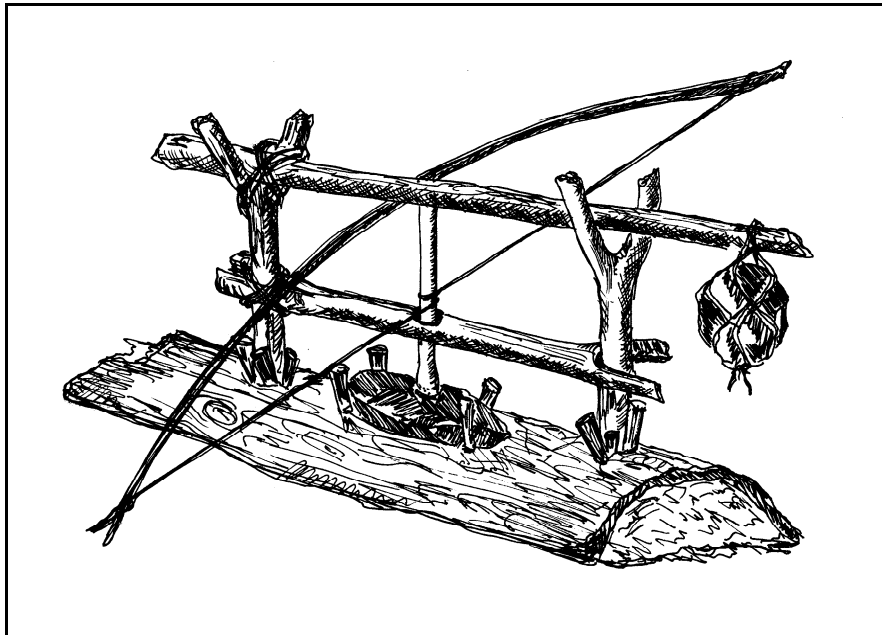


Abbildung 7: Steinzeitliche Bohrmaschine²

Durch die Bewegung des Bogens und die daraus resultierende Drehbewegung des Werkzeuges wird eine höhere Schnittgeschwindigkeit als beim Drehen von Hand erreicht. Durch Zugabe von scharfkantigem Quarzsand wird die Bohrung durchgeschliffen. Die Vorschubkraft wird durch ein Hebelsystem mit Gewichtsbelastung aufgebracht.

² Handzeichnung von Reinfried Schröcker sen. nach Vorlage von A.TH. Sonnleitner, Die Höhlenkinder im Pfahlbau, Unser Pfad Verlag Salzburg 1949

Mit der zunehmenden Urbanisierung im Altertum war es notwendig, Trinkwasser in die Städte zu transportieren. Dafür wurden oftmals Holzstämme mit langen zentralen Bohrungen versehen und als Wasserrohre benutzt. Da man im Altertum bereits Metalle zur Herstellung von Bohrwerkzeugen zur Verfügung hatte, war es möglich, solche tiefe Bohrungen herzustellen. Die damaligen Werkzeuge sind bereits Vorläufer des heutigen Einlippentiefbohrer.

Mit der Erfindung des Schwarzpulvers und der Schusswaffen zu Beginn der Neuzeit verfeinerte und entwickelte man die Technologie weiter. Jetzt war es auch erforderlich, Bohrungen mit einer hohen Genauigkeit herzustellen und damit die Treffsicherheit der Schusswaffen zu erhöhen, um einen militärischen Vorteil zu haben.

Ein weiterer Technologieschub für das Bohren begann mit der Einleitung der Industrialisierung und der Erfindung der Dampfmaschine. Um den Wirkungsgrad einer Dampfmaschine zu erhöhen, war es erforderlich, die Zylinderbohrung so genau wie möglich zu fertigen. Diese Maßnahme ermöglichte es, den Kolben besser abzudichten und die Leckageverluste zu verkleinern.

Heute wird das Tiefbohren zur Fertigung von Komponenten für Dieseleinspritzsystemen, Hydraulikzylinder, Schmierbohrungen in Verbrennungskraftmaschinen und Kühlbohrungen von Druckgußwerkzeugen und Schmiedegesenken hauptsächlich eingesetzt [1].

2.2 Tiefbohrverfahren

2.2.1 Definition und Einteilung nach DIN

Unter dem Begriff Tiefbohren versteht man die Herstellung von Bohrungen in Werkstücken ab einem Längendurchmesser Verhältnis λ (1) von ca. 10. Dieses Verhältnis ist der Quotient aus Bohrungstiefe zu Bohrungsdurchmesser und kann bei Tiefbohroperation bis zu 200 betragen [1].

$$\lambda = l / d \quad (1)$$

Mit herkömmlichen Standardspiralbohrern können Längendurchmesser Verhältnisse von bis zu 10 gebohrt werden. Werden höhere Anforderungen an Verlauf oder Oberflächengüte gestellt, so können Tiefbohrverfahren bereits für geringere Bohrtiefen verwendet werden, um sich einen weiteren Bearbeitungsschritt, z.B. Reiben zu ersparen. Wegen des geringen Verlaufs und der guten Qualität der Oberfläche zählt das Tiefbohren zu den Präzisionsbohrverfahren.

In der metallverarbeitenden Industrie werden heute Tiefbohrverfahren bis hin zu folgenden Bohrtiefen und Bohrdurchmesser eingesetzt [1].

- Bohrungsdurchmesser: 0.7 mm – 400 mm
- Bohrungstiefen: 1 mm – 15.000 mm

In der Einteilung nach DIN 8580 der Fertigungsverfahren zählt das Tiefbohrverfahren zu den Verfahren mit geometrisch bestimmter Scheidengeometrie und hier wiederum zu den Bohrverfahren.

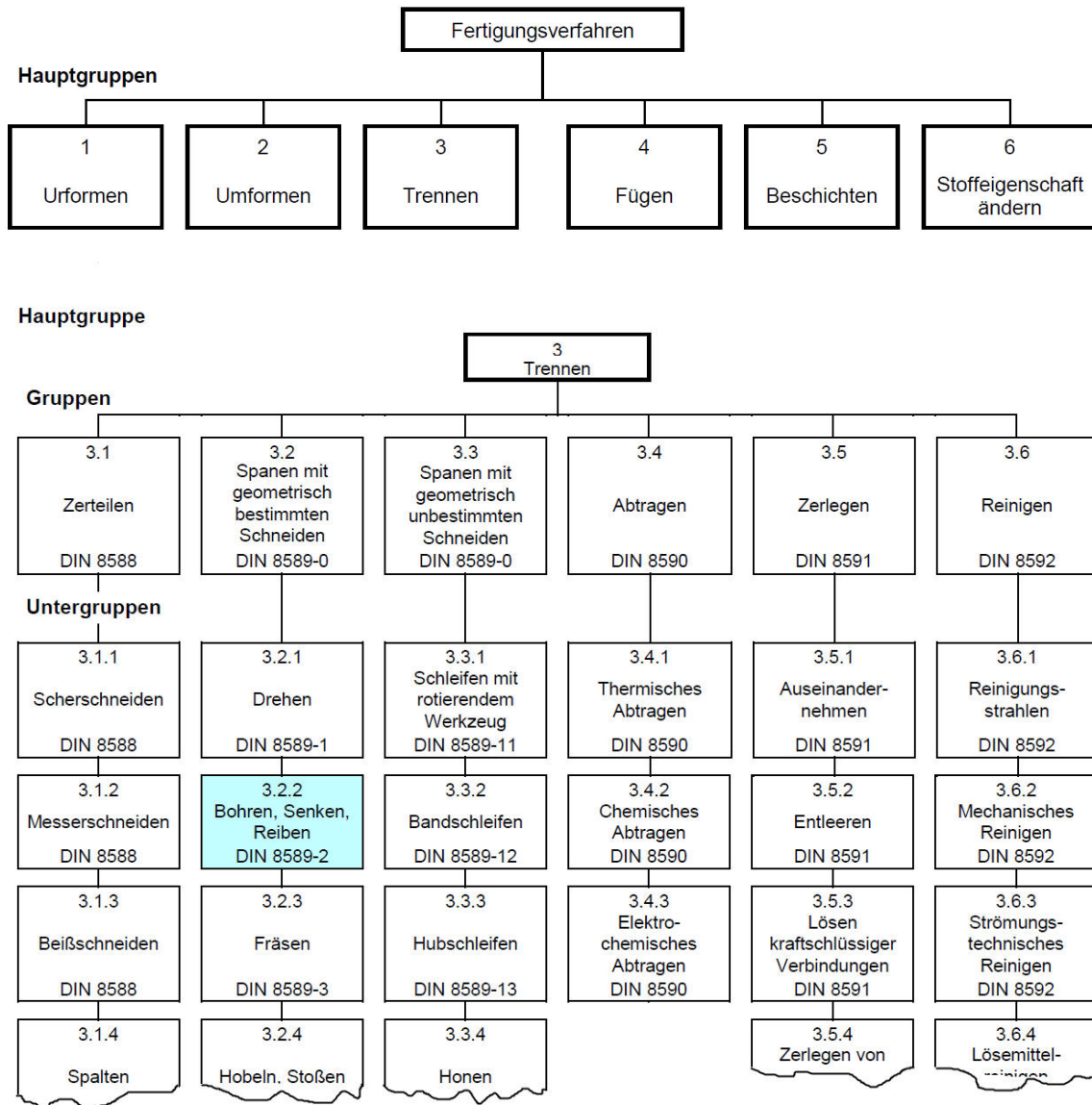


Abbildung 8: Einteilung nach DIN8580³

³ Deutsche Norm DIN 8580:2003-09 Seite 7-10

Grundsätzlich wird zwischen folgenden Tiefbohrverfahren unterschieden:

- Einlippenverfahren
- BTA – Verfahren
- Ejektor – Verfahren

2.2.2 Einlippenverfahren

Beim Einlippenverfahren erfolgt die Zuführung des Kühlschmierstoffes im Inneres des Werkzeuges und tritt direkt an der Werkzeugschneide aus. Der Rückfluss des Kühlschmierstoffes erfolgt über eine Sicke am Werkzeugschaft. Gleichzeitig werden dabei auch die Späne abtransportiert. Die Führung des Werkzeuges beim Anbohrvorgang wird durch die Bohrbuchse, die dicht am Werkstück anliegt, übernommen. Sind die Werkzeuge länger, werden noch zusätzliche Lünttenbuchsen zur Verbesserung der Führung angewendet. Einlippenverfahren werden heute im Durchmesserbereich von 0.7 mm – 30 mm eingesetzt.

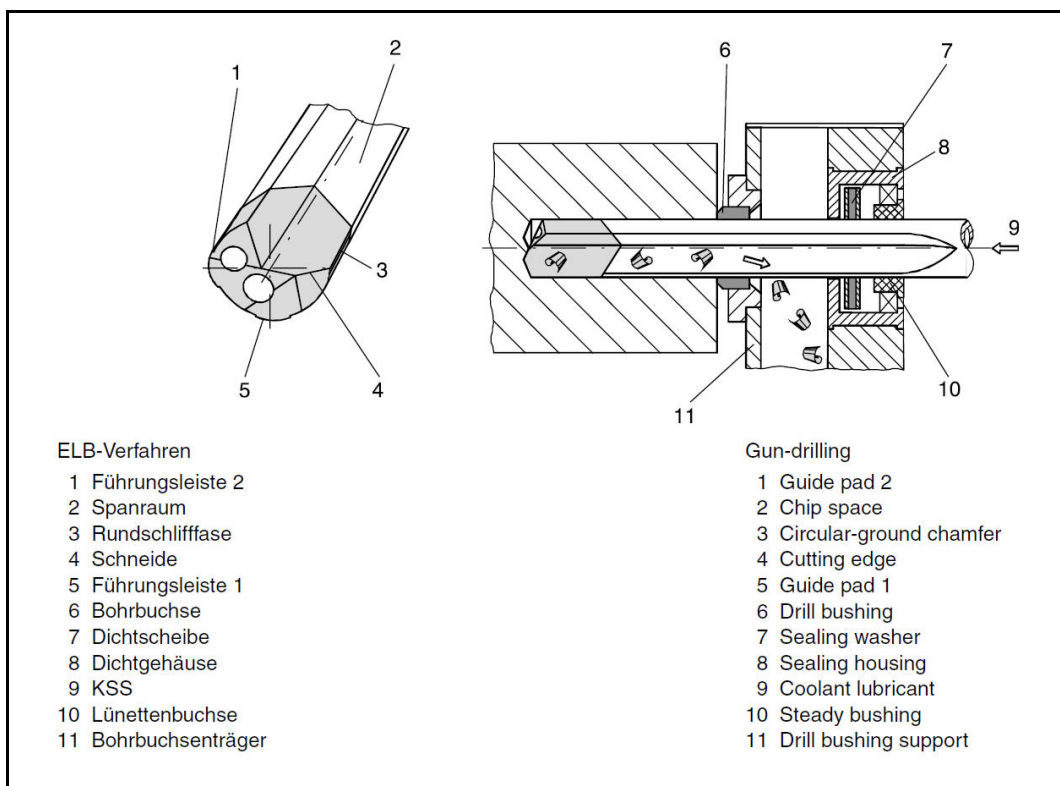


Abbildung 9: Einlippenverfahren⁴

⁴ VDI Richtlinie VDI 3210:2006-03 Seite 6

2.2.3 Das BTA – Verfahren Boring and Trepanning Association

Dieses Verfahren ist dadurch charakterisiert, dass die Kühlschmierstoffzufuhr außen am Werkzeug und der Späneabtransport im Inneren des Werkzeugschaftes erfolgt. Dadurch werden Beschädigungen der Bohroberfläche und Werkzeugbrüche durch sich verklemmende Späne vermieden. Allerdings erfordert dieses Verfahren einen eigenen Bohrzuführapparat, der diese Aufgaben übernimmt. Zusätzlich muss der Bohrzuführapparat zum Werkstück hin abgedichtet werden. Ansonsten kann kein Kühlschmiermitteldruck an der Werkzeugschneide aufgebaut werden.

Der Anwendungsbereich dieser Fertigungstechnologie liegen bei Bohrungsdurchmessern von 12 mm – 400 mm.

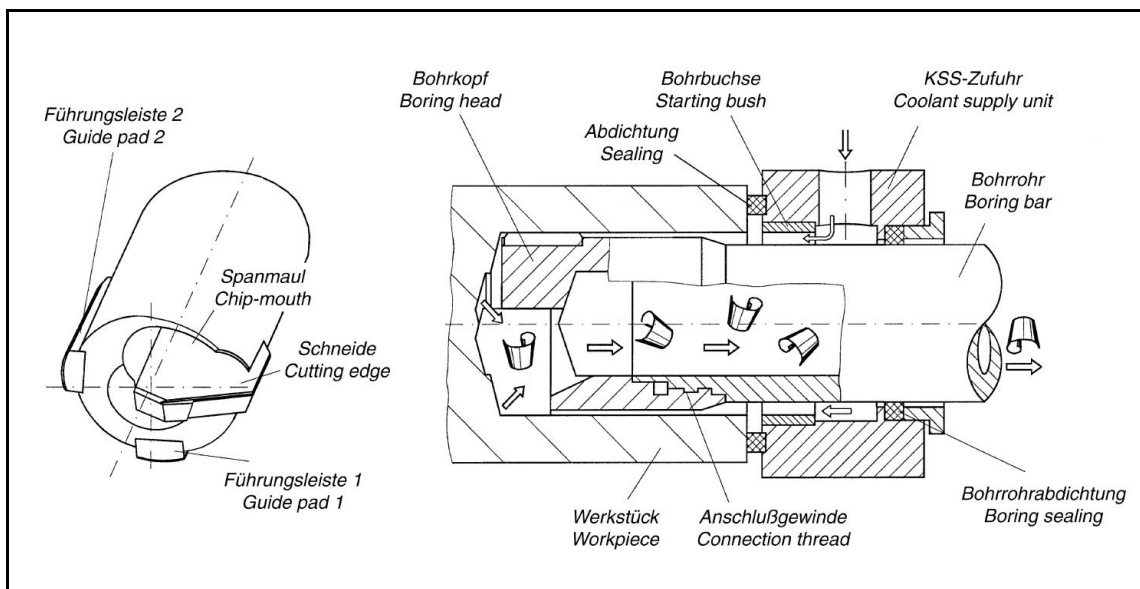


Abbildung 10: BTA - Verfahren⁵

⁵ VDI Richtlinie VDI 3209:1999-11 Blatt1 Seite 3

2.2.4 Ejektorverfahren

Das Ejektorverfahren ist ein Zweirohrverfahren, hierbei erfolgt die Zuführung des Kühlschmierstoffes zwischen Außen- und Innenrohr, der Rückfluss und Späneabtransport erfolgt über das Innenrohr. Der zugeführte Kühlschmierstoff tritt durch radiale Bohrungen vor der Werkzeugschneide aus. Der dabei entstehende Unterdruck sorgt für den Rückfluss. Da dieses Verfahren keine äußere Kühlschmierstoffzuführung hat, kann auch die Abdichtung zwischen Werkstück und Spänekasten entfallen. Dieses Fertigungsverfahren wird im Bohrbereich von 20mm – 120 mm eingesetzt [1].

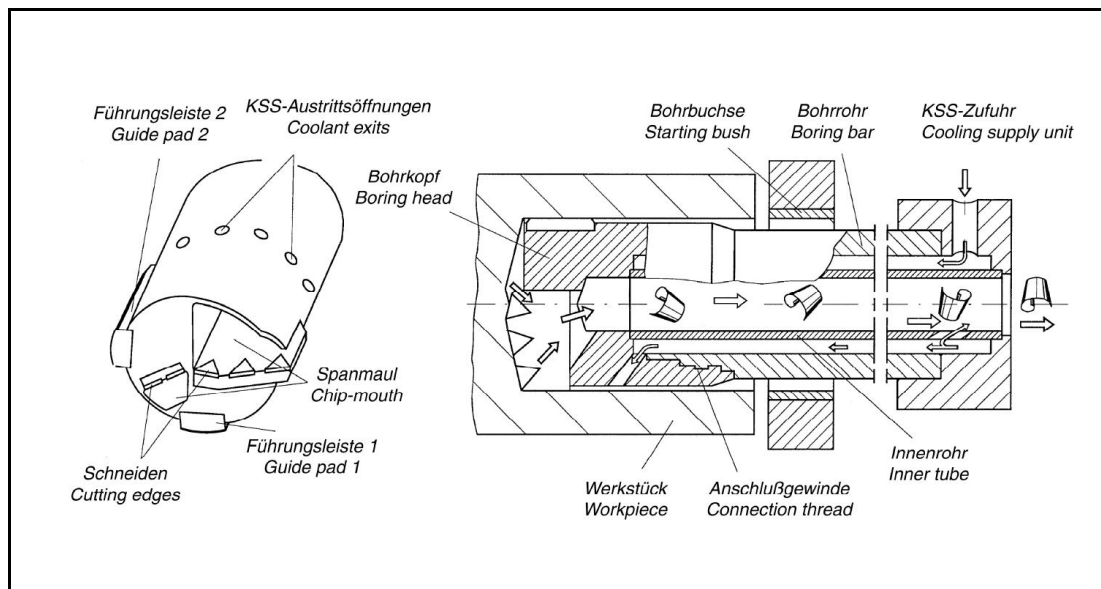


Abbildung 11: Ejektor - Bohrverfahren⁶

⁶ VDI Richtlinie VDI 3209:1999-11 Blatt1 Seite 3

2.3 Einlippentiefbohrerwerkzeug

2.3.1 Aufbau

Ein Standard-Einlippentiefbohrer mit aufgelötetem Bohrkopf besteht aus folgenden Komponenten: einem Aufnahmeschaft, welcher im Betrieb mit der Werkzeugaufnahme verbunden wird. Einerseits muss er das Drehmoment von der Werkzeugspindel und die Vorschubkräfte in axialer Richtung auf das Werkzeug übertragen, zusätzlich muss noch durch die zentrale Bohrung der Kühlschmierstoff zugeführt werden. In der Aufnahme ist der rohrförmige Werkzeugschaft eingelötet, über welchen die Kräfte übertragen werden und der Kühlschmierstoff zugeführt wird. Die im Werkzeugschaft eingeprägte Sicke dient zum Abtransport der Späne und dem Kühlschmierstoffrückfluss.

Am anderen Ende des Werkzeugschaftes befindet sich der aufgelötete Schneidkopf. Er beinhaltet die KSS-Zuführung, die Spänenut, die Bohrkopfführung und die Werkzeugschneide.

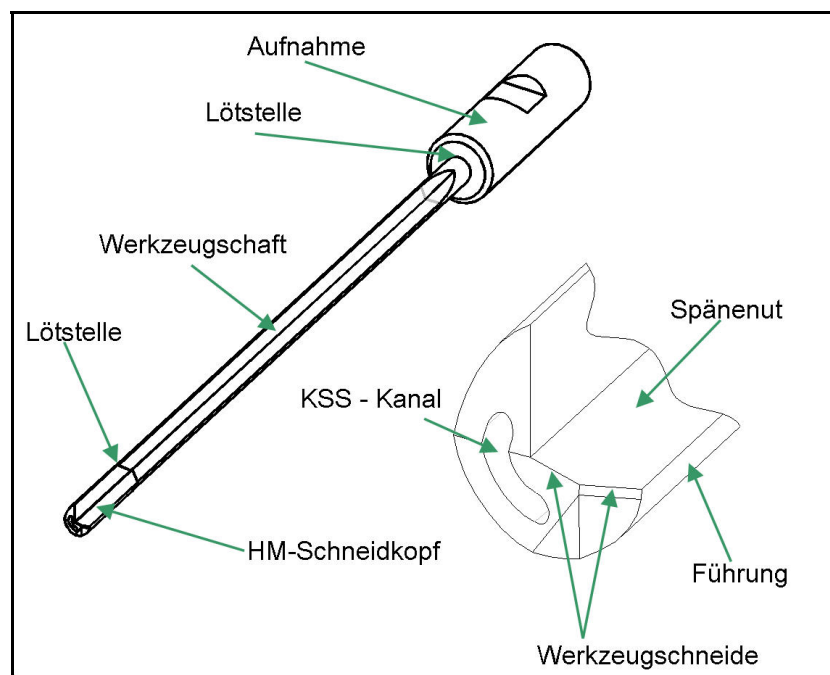


Abbildung 12: Einlippentiefbohrer

2.3.2 Anschliffformen

Veränderungen der Schneidengeometrie des Einlippenbohrers können Bohrgrund, Spanform, Bohrungstoleranz, Bohrungsmittenverlauf, Späneabfuhr, Oberflächenqualität und Standweg beeinflussen. Standard-Anschliffe sind das Ergebnis jahrelanger Tests und Weiterentwicklungen. Damit können nahezu alle Bohraufgaben erfolgreich gelöst werden. Für das Tiefbohren besonders langspanender und schwer zerspanbarer Werkstoffe sind in der Regel Sonder-Anschliffe einzusetzen [2].

Bohrerdurchmesser	Anschliffform
1.500 – 4.000 mm	
4.001 – 20.000 mm	
>20.000 mm	

Tabelle 1: Anschliffe für Einlippenbohrer⁷

⁷ Botek Broschüre Typ 110 2008-08-22 Version 24 Seite 11

2.3.3 Umfangsformen

Da beim Einlippenwerkzeug die entstehenden Schnittkräfte in der Bohrungswand abgestützt werden und somit auch der für das Tiefbohren typische Glättungseffekt der Oberfläche erzeugt wird, hat die Umfangsform einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit und die Oberflächenqualität der Bohrung. Im Laufe der Jahre haben sich folgende Umfangsformen für die jeweiligen Anwendungszwecke als optimal herauskristallisiert.






Beschreibung	Umfangsform
Standardumfangsform Für sämtliche Werkstoffe geeignet, jedoch für kleinere Bohrungstoleranzen	
Für schwer zerspanbare Werkstoffe geeignet, z. B. hochlegierte Stähle	
Für sämtliche Werkstoffe geeignet, jedoch für größere Bohrungstoleranzen	
Für sämtliche Werkstoffe geeignet, jedoch nur bei ungünstigen Anbohrverhältnissen	
Diese Ausführung ist hauptsächlich für Grauguss geeignet	

Tabelle 2: Umfangsformen für Einlippenbohrer⁸

⁸ Broschüre Stock AG TLB Präzisionswerkzeuge Berlin Seite 6

2.3.4 Aufnahme

Die Aufnahme des Tiefbohrwerkzeuges hat die Aufgabe, die für die Zerspanung erforderlichen Axialkräfte und Drehmomente von der Werkzeugmaschinen spindle auf das Werkzeug zu übertragen. Hierbei ist ein möglichst geringer Rundlauffehler zwischen Aufnahme und Schneidkopf erforderlich. Alle Rundlauffehler des Werkzeuges wirken sich direkt auf die Qualität der Bohrung aus.

2.3.5 Bohrkopfkonzizität

Um beim Tiefbohrprozesse ein Verklemmen oder Festfressen des Bohrkopfes in der Bohrung zu vermeiden bzw. das Risiko zu minimieren, ist der Bohrkopf leicht konisch ausgeführt. Dies bedeutet die Nebenschneide des Bohrkopfes ist nur ganz vorne an der Schnittstelle im Eingriff. Danach ist sie frei und berührt die Bohrungswand nicht mehr.

Wird jedoch der Bohrkopf nachgeschärft, ergibt sich durch diese kegelige Form ein immer kleinerer Werkzeugdurchmesser. Deswegen ist die Nachschärflänge der meisten Tiefbohrwerkzeuge begrenzt.

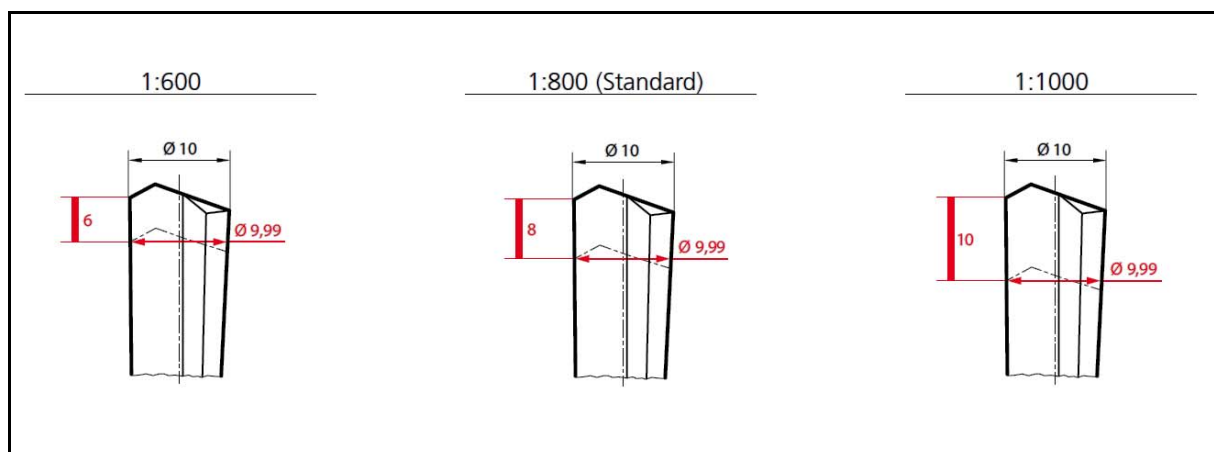


Abbildung 13: Konizität des Bohrkopfes⁹

⁹ Broschüre Stock AG TLB Präzisionswerkzeuge Berlin Seite 15

2.3.6 Kräfte am Einlippentiefbohrwerkzeug

- **Zerspankräfte**

Betrachtet man die Kräfte, die beim Bohren auf das Werkzeug wirken, so ergibt sich folgende Kräftesituation. Von außen wirken die Vorschubkraft F_v und das Bohrmoment M_b auf das Werkzeug ein. Diese stehen mit den Kräften bei der Spanbildung im Gleichgewicht. Hierbei entstehen die Schnittkraft F_s welche mit dem zugehörigen Abstand a das Schnittmoment M_s erzeugt. Die entstehende Passivkraft F_p ist abhängig vom Anstellwinkel κ . Addiert man die im Raum senkrecht aufeinander stehenden Kräfte geometrisch, so erhält man die Zerspankraft F_z .

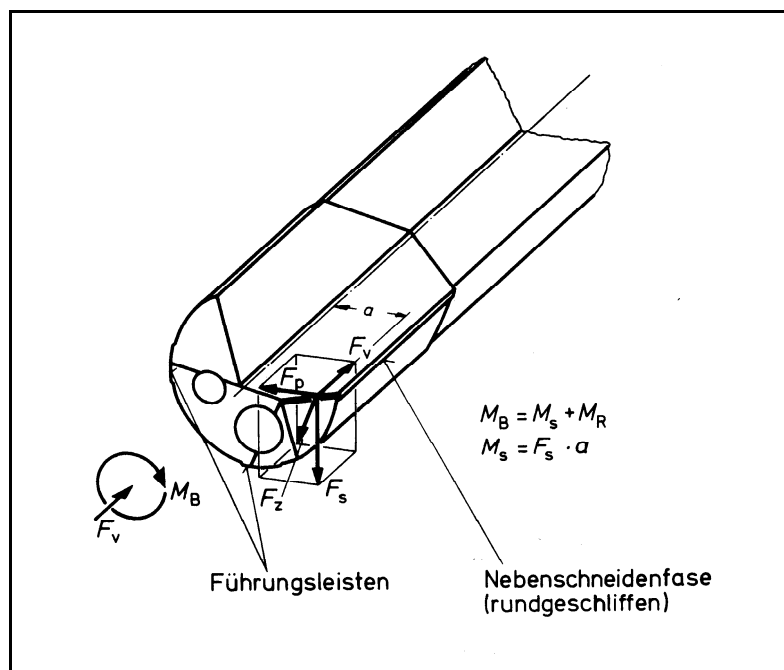


Abbildung 14: Zerspankräfte am Werkzeug¹⁰

Da die geometrische Summe aus Schnittkraft F_s und resultierender Passivkraft F_p , (5) die aus innerer Hauptschneide und äußerer Hauptschneide besteht, eine Stützkraft erfordert, treten auf den Führungsleisten Normalkräfte (N_1 , N_2) auf. Diese Normalkräfte bewirken Reibkräfte (R_1 , R_2) (6) und diese erzeugen wiederum mit dem zugehörigen Abstand ein Reibmoment M_R (3) um die Bohrermittelechse. Dieses Reibmoment M_R ergibt in Addition mit dem Schnittmoment M_s (2) das gesamte vom Antrieb bereitzustellende Bohrmoment M_B (4).

¹⁰ Streicher P. Tiefbohren der Metalle Vogel-Verlag 1975 Seite 59 Bild 4.13

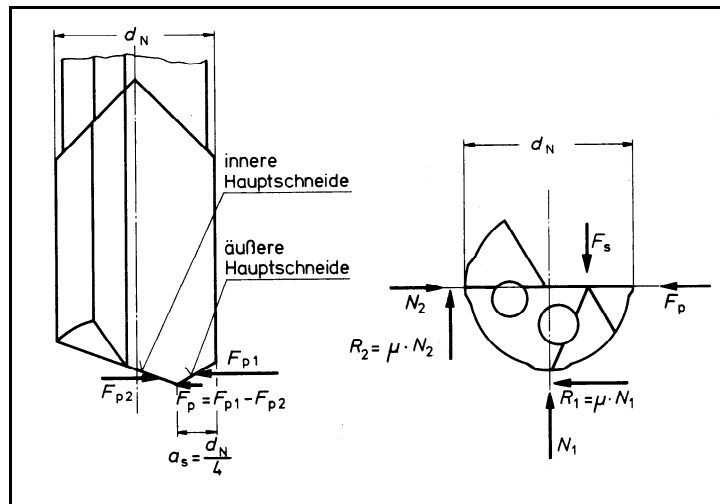


Abbildung 15: Kräfte am Werkzeug¹¹

Schnittmoment

$$M_s = F_s \cdot a \quad (2)$$

Reibmoment

$$M_R = \frac{1}{2} (R_1 + R_2) \cdot d_N \quad (3)$$

Bohrmoment

$$M_B = M_R + M_s \quad (4)$$

Passivkraft

$$F_P = F_{P1} - F_{P2} \quad (5)$$

Reibkraft

$$R_x = \mu \cdot N_x \quad (6)$$

¹¹ Streicher P. Tiefbohren der Metalle Vogel-Verlag 1975 Seite 59 Bild 4.14/15

- **Massenkräfte**

Betrachtet man den Querschnitt durch den Schaft eines Einlippentiefbohrwerkzeuges, so erkennt man, dass sich der Flächenschwerpunkt des rohrförmigen Schaftquerschnittes mit dem Abstand y_s entfernt von der Rotationsachse befindet. Rotiert nun das Werkzeug mit einer Drehzahl n , so wird eine Belastung durch Fliehkräfte hervorgerufen.

Streckenlast durch Fliehkräfte

$$q_z = A \cdot \rho \cdot v^2 \cdot y_s \quad (7)$$

Eine weitere Streckenlast wird durch die Erdbeschleunigung hervorgerufen.

Streckenlast durch Gravitationskräfte

$$q_g = A \cdot \rho \cdot g \quad (8)$$

Addiert man diese beiden Lasten vektoriell, so erhält man die gesamte Belastung des Werkzeuges

Vektoraddition

$$\vec{q}_{\text{res}} = \vec{q}_z + \vec{q}_g \quad (9)$$

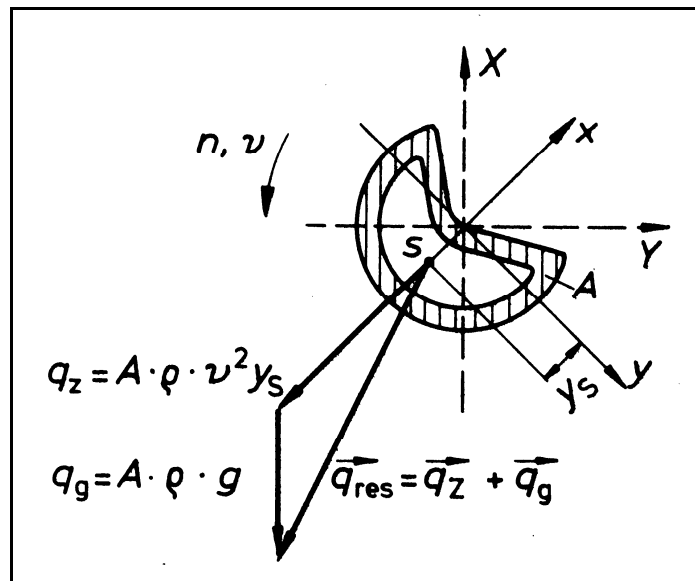


Abbildung 16: Massenkräfte am Werkzeug¹²

Über die gesamte Schaftlänge ruft diese resultierende Streckenlast eine Durchbiegung des Werkzeuges hervor. Die Durchbiegung $w(\xi)$ ist abhängig von der in axialer Richtung verlaufenden Koordinate ξ .

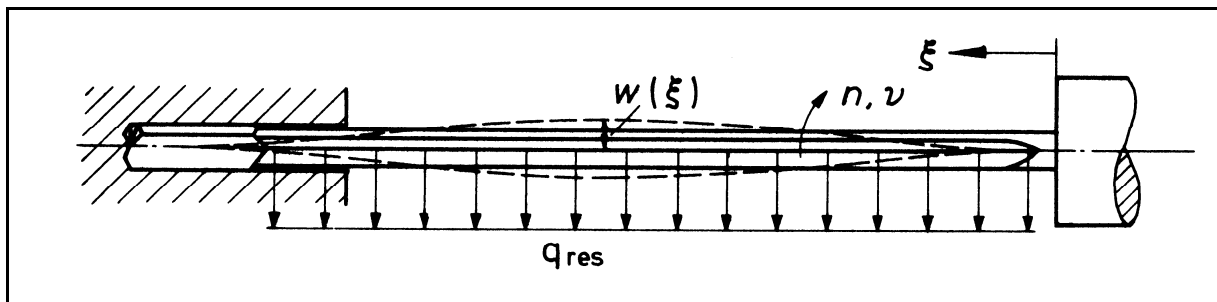


Abbildung 17: Resultierende Massenkräfte¹³

¹² Streicher P. Tiefbohren der Metalle Vogel-Verlag 1975 Seite 61 Bild 4.16

¹³ Streicher P. Tiefbohren der Metalle Vogel-Verlag 1975 Seite 61 Bild 4.16

2.3.7 Schwingungsanalyse des Werkzeuges

- Torsionseigenfrequenz

Zur Ermittlung der Torsionseigenfrequenz eines Einlippenbohrers wird folgende vereinfachte Modellannahme getroffen. Das Werkzeug wird in einen Mehrmassentorsionsschwinger aufgeteilt und als ungedämpfter Schwinger nach den maschinendynamischen Berechnungsansätzen berechnet. Die Einspannung in der Werkzeugspindel wird als starr angenommen, da das Massenträgheitsmoment der Spindel um 3 bis 4 Zehnerpotenzen höher ist als die des Werkzeuges. Heute werden diese Berechnungen meist mittels finite Element-Methoden am Rechner durchgeführt.

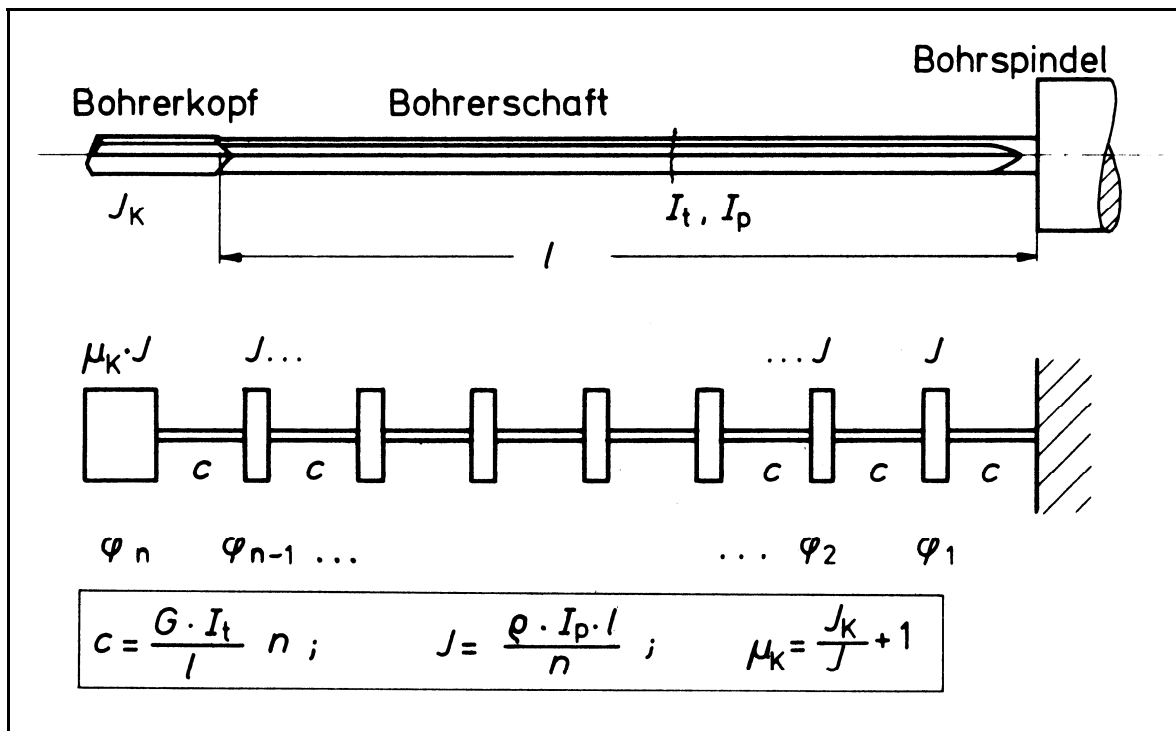


Abbildung 18: Ersatzsystem Torsionsschwinger¹⁴

¹⁴ Streicher P. Tiefbohren der Metalle Vogel-Verlag 1975 Seite 55 Bild 4.8

- **Biegeeigenfrequenz**

Da das Einlippenwerkzeug auf Grund seiner nicht rotationssymmetrischen Querschnittsform in unterschiedliche Richtungen andere Biegesteifigkeiten besitzt, ergeben sich für die biegekritischen Drehzahlen nicht diskrete Werte, sondern ein biegekritisches Drehzahlband. Hierbei werden für die Berechnung das minimale und das maximale Flächenmoment zweiter Ordnung herangezogen. Mit diesen beiden Werten erfolgt dann die Berechnung der Grenzen für den kritischen Bereich.

Die Modellbildung und Berechnung der Resonanzfrequenzen erfolgt dann nach dem gleichem Lösungsprinzip wie bei der Errechnung der Torsionseigenfrequenz.

2.3.8 Gesamtbeanspruchung

Das unten abgebildete Schema (Abbildung 19: Gesamtbeanspruchung Einlippenbohrer) zeigt wie sich die einzelnen Kräfte auf das Werkzeug auswirken und aus welchen Komponenten sie bestehen. So entsteht zum Beispiel durch die Vorschubkraftkomponente der Zerspankraft eine Längenänderung des Werkzeuges daraus entstehen im dynamischen Fall Translationsschwingungen. Auch entsteht durch die Längskraft im Werkzeug eine Knickspannung [3].

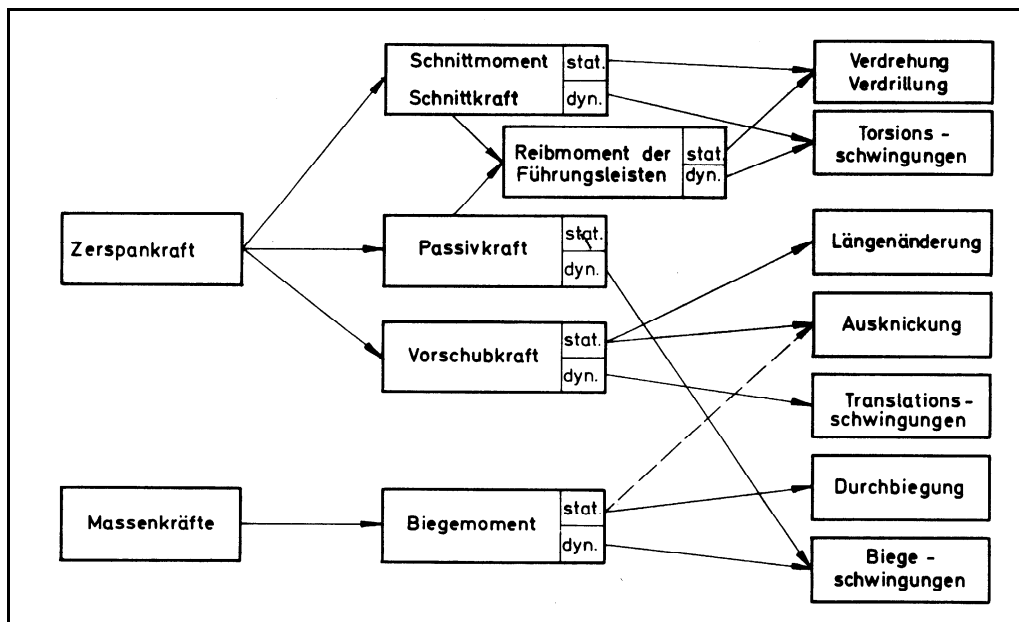


Abbildung 19: Gesamtbeanspruchung Einlippenbohrer¹⁵

¹⁵ Streicher P. Tiefbohren der Metalle Vogel-Verlag 1975 Seite 63 Bild 4.19

2.4 Kühlschmierstoffsystem

2.4.1 Unterscheidung und Typisierung von Kühlschmierstoffen

Kühlschmierstoffe sind Bearbeitungsflüssigkeiten, welche in spangebenden und spanlosen Fertigungsverfahren vorwiegend zum Schmieren der Kontaktzonen und zum Abführen der entstehenden Prozesswärme eingesetzt werden. Da einige nicht eindeutig definierte und umgangssprachlich benutzte Synonyme für Kühlschmierstoffe in der Vergangenheit zu Verwechslungen und Missverständnissen geführt haben, wurde in der DIN 51385 eine genormte Unterscheidung und Typisierung vorgenommen. Hiernach teilt man Kühlschmierstoffe nach ihrer Verwendung in die beiden Kühlschmierstoffarten, nichtwassermischbare und wassermischbare Kühlschmierstoffe. Nichtwassermischbare Kühlschmierstoffe stellen unlegierte oder mit verschiedenen Zusätzen legierte Öle dar, die meist mineralölbasischer Natur sind.

In ihrer Anwendung werden diese Kühlschmierstoffe im Originalzustand eingesetzt und nicht mit Wasser gemischt. Die wassermischbaren Kühlschmierstoffe werden je nach ihrer wassermischbaren Kühlschmierstoffkomponente in emulgierbare Kühlschmierstoffe und in wasserlösliche Kühlschmierstoffe unterschieden. Werden diese Konzentrate für die Anwendung mit Wasser gemischt, spricht man von milchig-weißen Kühlschmierstoff-Emulsionen und praktisch transparenten Kühlschmierstoff-Lösungen [4].

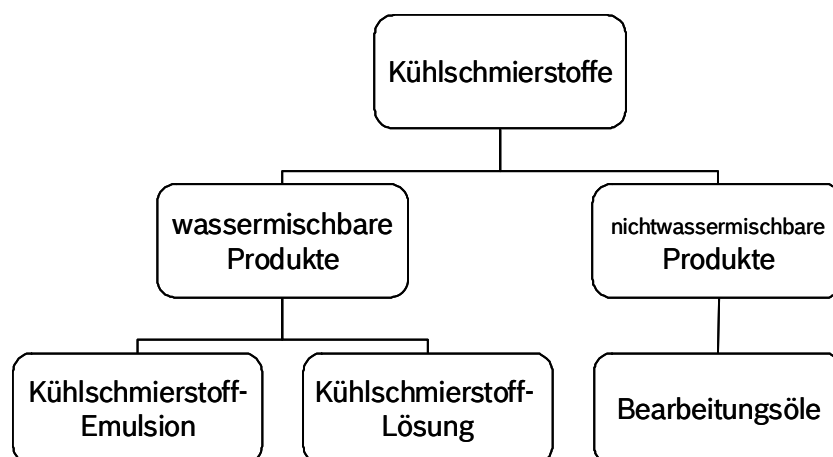


Abbildung 20: Einteilung KSS¹⁶

¹⁶ VDI Berichte 2142 Präzisions- und Tiefbohren aktuell VDI Wissensforum GmbH März 2011 Seite 82 Bild 1

Für Tiefbohrverfahren werden am häufigsten nichtwassermischbare Kühlschmierstoffe in unterschiedlichen Viskositäten (in der Regel zwischen 10 und 20 mm²/s bei 40°C) je nach erforderlichem Bohrdurchmesser und Bohrverfahren mit leistungssteigernden Zusätzen verwendet. Die Basis bilden meist Mineral- oder Esteröle. Wegen ihrer vergleichsweise geringeren Anpassungsfähigkeit an die zu erfüllenden vielseitigen und schwierigen technologischen Anforderungen sind wassermischbare Kühlschmierstoffe in der Tiefbohrtechnik eher weniger vertreten. Welche Kühlschmierstoffart sich letztlich beim Tiefbohren durchsetzt, bestimmt maßgeblich die anzuwendende Schnittgeschwindigkeit und die Schneidbelastung. Verfahren mit hohen Schnittgeschwindigkeiten bevorzugen wegen der hohen Kühlanforderung eher wassermischbare Kühlschmierstoffe. Verfahren, bei denen hohe Schneidbelastungen bei geringen Schnittgeschwindigkeiten im Vordergrund stehen, favorisieren die nichtwassermischbaren Bearbeitungsöle [4].

2.4.2 Aufgaben und Wirkweise von KSS in der Tiefbohrtechnik

Im Hinblick auf das Streben nach immer höheren Prozesssicherheiten, Bearbeitungsgüten und Produktivitäten in der Fertigung kommt dem Kühlschmierstoff als Fertigungshilfsstoff eine bedeutende Schlüsselrolle zu, denn mit seiner Hilfe wird die volle Nutzung der Leistungsfähigkeit moderner Werkzeugmaschinen und die Feinabstimmung auf den individuellen Fertigungsprozess erst ermöglicht. Die am Markt stetig weiterentwickelten Kühlschmierstoffe haben ein Potpourri vielseitiger technologischer wie auch umwelt- und arbeitssicherheitstechnischer Aufgaben abzudecken. Im Tiefbohrverfahren muss der Kühlschmierstoff primär die Aufgaben Schmieren, Kühlen und Spülen erfüllen [4].

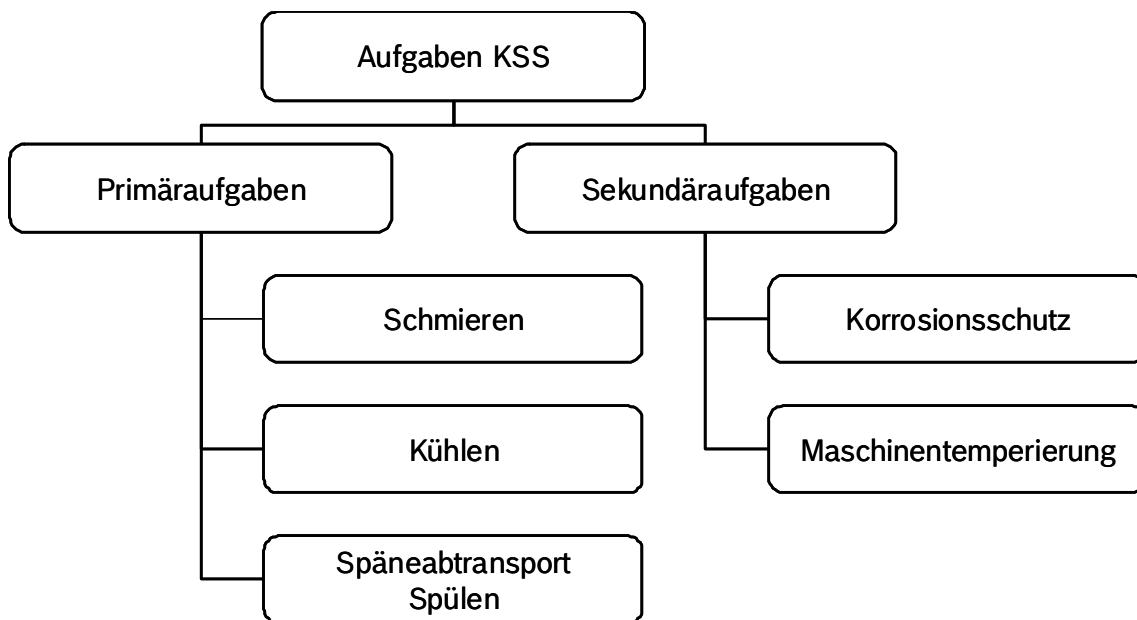


Abbildung 21: Aufgabenfelder KSS¹⁷

Eine optimierte Schmierung der Werkzeugschneide(n) und Führungsleisten bewirkt im Prozess eine Minimierung von Reibung und Verschleiß an den Kontaktzonen und dementsprechend eine Senkung des Energiebedarfs der Maschine. Durch die hohe thermische und mechanische Beanspruchung reagieren die Wirkzusätze des Kühlschmierstoffes an den Wirkflächen. Geeignete schmierwirksame und verschleißsenkende Additive im Kühlschmierstoff sollen der Bildung von Aufbauschneiden an den Werkzeugen und den hohen Reibenergien entgegenwirken.

¹⁷ VDI Berichte 2142 Präzisions- und Tiefbohren aktuell VDI Wissensforum GmbH März 2011 Seite 83 Bild 2

Die Aufgabe Kühlen wird im Wesentlichen durch die rasche und konstante Ableitung der Verformungs- und Reibungswärme von Werkzeug und Werkstück erfüllt. Ein hoher Aufgabenanteil kommt in diesem Zusammenhang dem anfallenden Span zu. Durch optimale Kühlung werden beim Tiefbohrverfahren hohe Bearbeitungsgenauigkeiten erzielt und unveränderte Gefüge in den Randschichten erhalten. Die Effizienz der Kühlung ist maßgebend abhängig vom Kühlschmierstoffdruck und der –menge, wie auch der Viskosität und der Art des Kühlschmierstoffes sowie dessen Wärmekapazität. Bei wassermischbaren Kühlschmierstoffen trägt die Verdampfung von Wasser an den heißen Bearbeitungszonen merklich zur Kühlung bei. Anfallende Späne, Abrieb und andere Feststoffe sind darüber hinaus aus den Bearbeitungszonen abzutransportieren und Spannvorrichtungen, Werkstückauflagen sowie Mess- und Steuereinrichtungen freizuspülen. Das Spülvermögen des Kühlschmierstoffes ist abhängig von seiner Viskosität, dem Volumenstrom und dem angewandten Kühlschmierstoffdruck.

Schmierung, Kühlung und Spülung sind also Faktoren, durch die der Werkzeugverschleiß minimiert, Produktpräzisionen und Kosteneinsparungen erhöht und hohe Prozessgeschwindigkeiten mit gesteigerter Prozesssicherheit umgesetzt werden können.

Neben den genannten Primäraufgaben hat der Kühlschmierstoff noch weitere Aufgaben, sogenannte Sekundäraufgaben, zu erfüllen; beispielsweise die Maschinentemperierung, Korrosionsschutz von Maschine und Werkstück sowie Anforderungen an Mensch und Umwelt. Von Bedeutung bei der Tiefbohranwendung ist auch die dämpfende Wirkung des Kühlschmierstoffes auf das Bohrohr [4].

2.4.3 Kühlschmierstoffanlage

Im Speziellen bei sehr kleinen Werkzeugdurchmessern entsteht bei der inneren Zuführung des Kühlschmierstoffs ein großer Druckverlust. Um noch genügend Durchflussmenge für einen prozesssicheren Spänenabtransport zu erhalten, muss die Kühlschmierstoffanlage sehr leistungsfähig ausgelegt sein. Im unten angeführten Bild sind einige Richtwerte für Durchflussmengen und Drücke angegeben. Es ist aber von Fall zu Fall, je nach Bohrtiefe und Spanbeschaffenheit, ein geeigneter Druckbereich durch Versuche zu definieren. Auch sollte der Kühlschmierstoff durch mehrere Filtersysteme vor dem Wiedereintritt in die Pumpe so partikelfrei und rein,

wie technisch und wirtschaftlich möglich, sein. Dies reduziert Werkzeug und Pumpenverschleiß und erhöht zusätzlich noch die Qualität der gebohrten Oberfläche

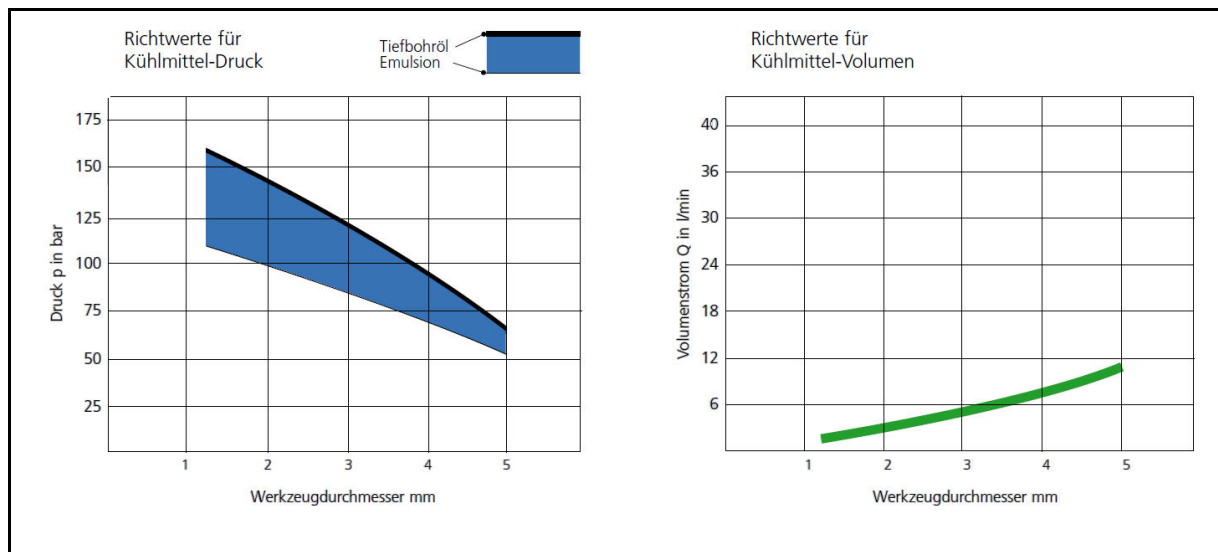


Abbildung 22: erforderlicher Druck und Volumenstrom¹⁸

2.5 Tiefbohrsysteme

2.5.1 Tiefbohrprozess auf der Tiefbohrreinheit

Eine Tiefbohrereinheit besteht im Wesentlichen aus folgenden Hauptkomponenten. Die Werkzeugspindel mit Tiefbohrwerkzeug, sie wird meist über einen drehzahlregelbaren Motor mit Riementrieb angetrieben, und ist in axialer Richtung beweglich. Diese axiale Bewegung ist für die Vorschubbewegung des Werkzeuges notwendig. Sie wird durch einen Spindeltrieb mit vor geschaltetem Getriebemotor erreicht. Für die Erzeugung des nötigen Kühlschmierstoffdruckes ist eine Hochdruckpumpe eingebaut. Der gefilterte und gereinigte Kühlschmierstoff wird angesaugt, in der Pumpe auf ein höheres Druckniveau gehoben und durch eine Drehdurchführung in die Maschinenspindel eingeleitet. Dort wird der Kühlschmierstoff über innere Druckbohrungen in Werkzeugspindel und Tiefbohrwerkzeug bis hin zur Werkzeugschneide befördert. An der Werkzeugschneide kühlt und schmiert er beim Schneidprozess und transportiert die anfallenden Späne durch die sich im Werkzeugschaft befindliche Sicke wieder ab.

¹⁸ Broschüre Stock AG TLB Präzisionswerkzeuge Berlin Seite 5

Der Bohrbuchsenträger samt Bohrbuchse und Abdichtung verhindert eine Verschmutzung der Umgebung durch den Kühlschmierstoff und die Späne. Die im Bohrbuchsenträger fest eingebaute und höchst verschleißfeste Bohrbuchse übernimmt die Führung des Werkzeuges beim Anbohrvorgang. Sie hat einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Bohrung.

Das zu bearbeitende Werkstück wird fest in der Werkstückaufnahme gespannt und vor dem Bohren wird die Bohrbuchse spielfrei an das Werkstück angelegt.

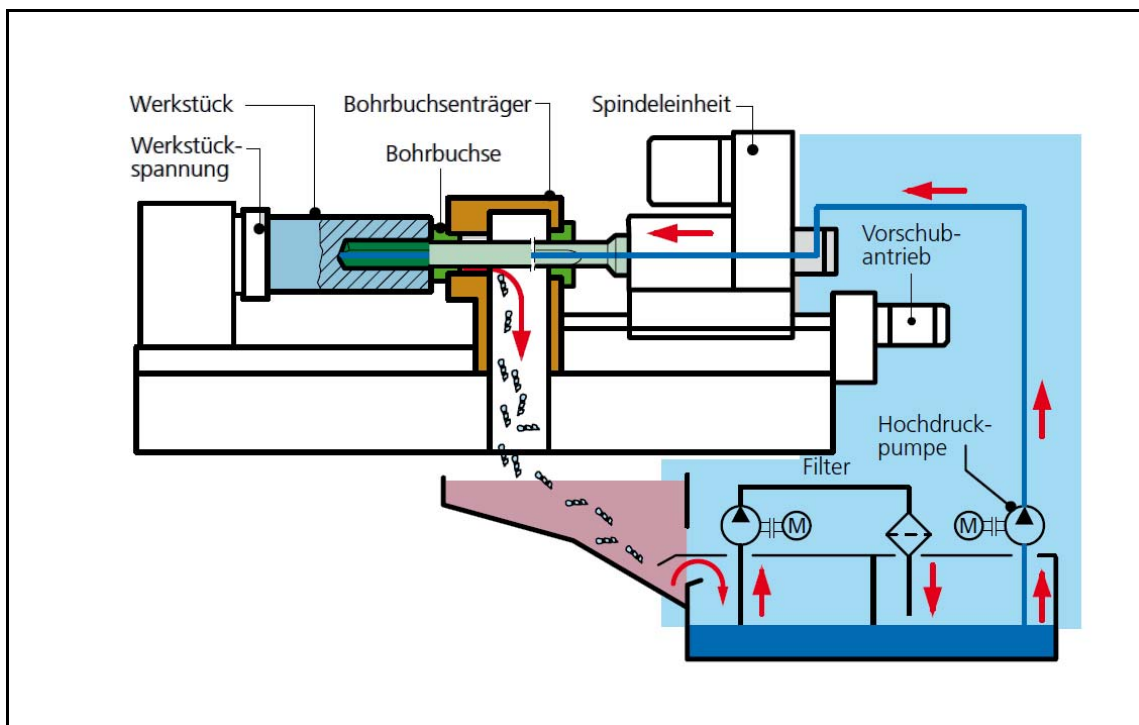


Abbildung 23: Tiefbohrereinheit¹⁹

2.5.2 Konventionelle Tiefbohrmaschine

Eine konventionelle Tiefbohrmaschine besteht aus einem massiven schwingungsdämpfenden Maschinenbett auf diesem Werkstückspindel, Bohrbuchsenträger, Werkzeugspindel und Lüntten in axialer Richtung beweglich wie oben beschrieben aufgebaut sind. Die Lüntten führen das Werkzeug zusätzlich und verhindern ein Ausknicken des Werkzeugschaftes infolge der Vorschubkräfte. Auch wird durch die zusätzliche Führung der Einfluss der Massenkräfte verringert und die biegekritische Drehzahl erhöht. Die Lüntten bewegen sich bei einer Vorschubbewegung der Werkzeugspindel entsprechend in axialer Richtung mit und

¹⁹ Broschüre Stock AG TLB Präzisionswerkzeuge Berlin Seite 2

führen das Werkzeug immer optimal. Üblicherweise werden die Lüntten in einem Abstand von ca. 40 mal dem Bohrerdurchmesser gesetzt.

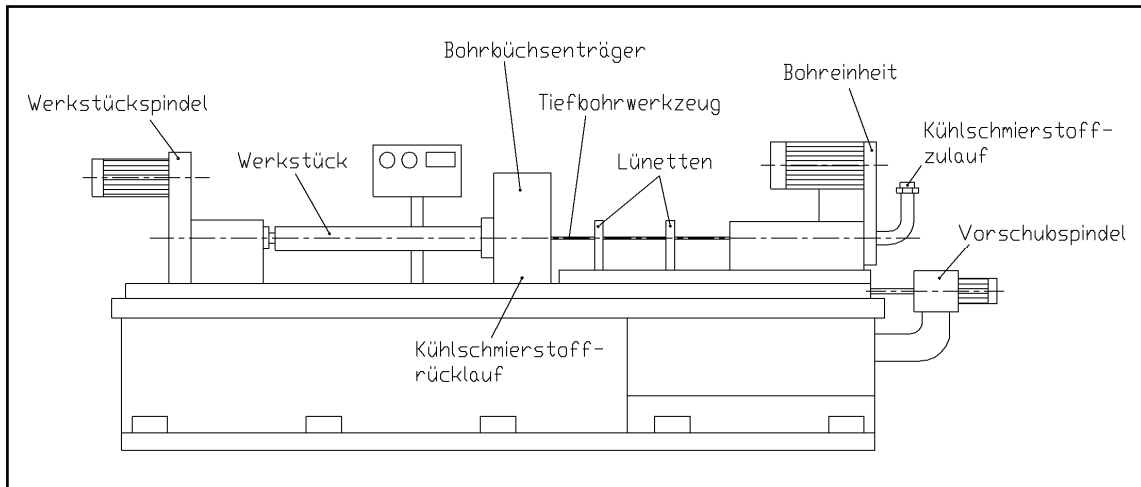


Abbildung 24: Tiefbohrmaschine

2.5.3 Arbeitsweisen beim Tiefbohren

Zur Fertigung von zentrischen Tiefbohrungen in rotationssymmetrischen Bauteilen sind drei unterschiedliche Arbeitsweisen möglich. Durch die Wahl der Arbeitsweise kann der Mittenverlauf der Tiefbohrung entscheidend verbessert werden.

- **Gegenläufige Arbeitsweise**

Bei dieser Bearbeitungsvariante drehen sich Werkzeug und Werkstück in entgegengesetzte Richtung. Die Schnittgeschwindigkeit wird durch Addition der beiden Drehzahlen ermittelt bzw. eingestellt.

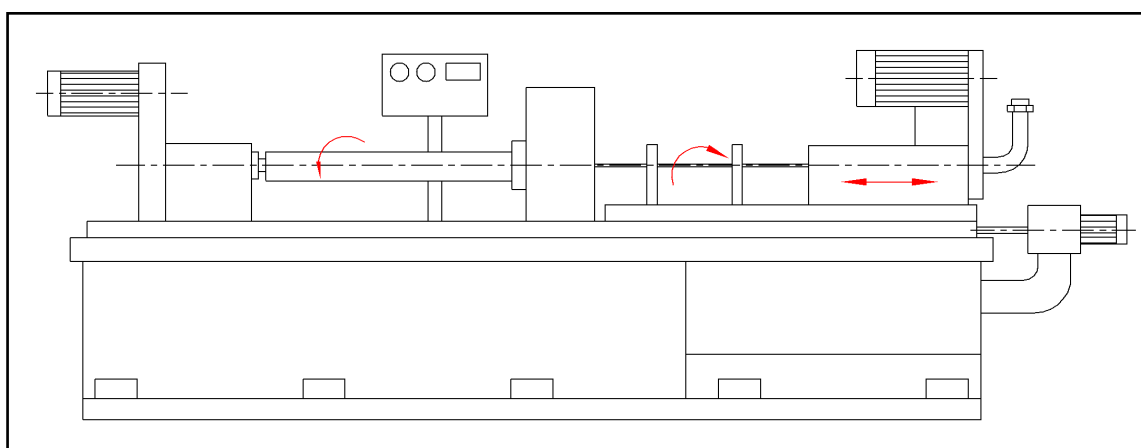


Abbildung 25: gegenläufige Arbeitsweise

- **rotierendes Werkstück**

Bei dieser Arbeitsweise steht das Werkzeug still und nur das Werkstück rotiert. Die Vorschubbewegung wird vom Tiefbohrwerkzeug ausgeführt.

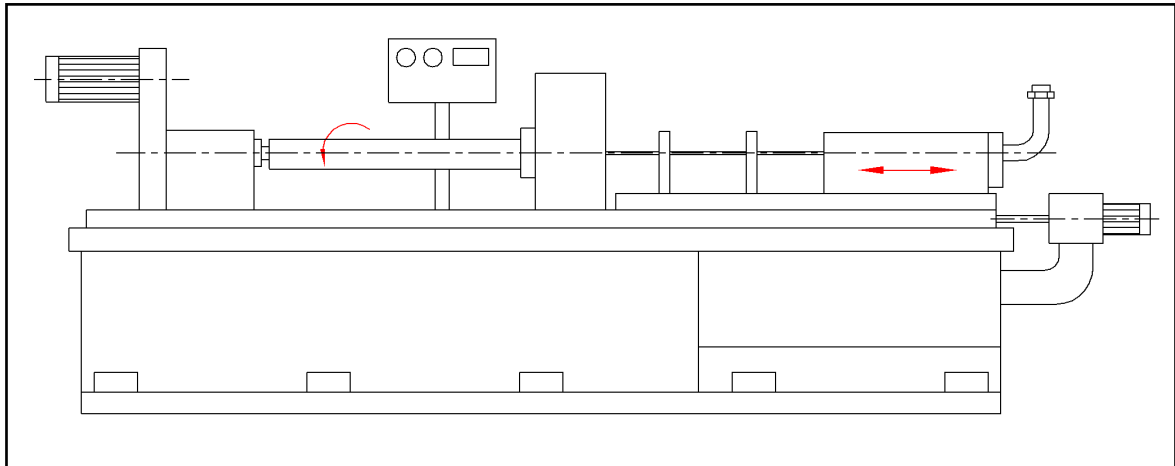


Abbildung 26: rotierendes Werkstück

- **Rotierendes Werkzeug für exzentrische Bohrungen**

Die im Folgenden beschriebene Arbeitsweise ist die am universellsten einsetzbare. Sie erfordert keine rotationssymmetrischen Werkstücke, deshalb kann sie auch zur Bearbeitung prismatischer Werkstücke angewendet werden. Allerdings ist sie hinsichtlich Mittenverlauf durch die auftretenden Massenkräfte sehr ungenau.

Das Werkstück befindet sich in Ruhe, die Schnittbewegung und Vorschubbewegung werden nur vom Werkzeug ausgeführt.

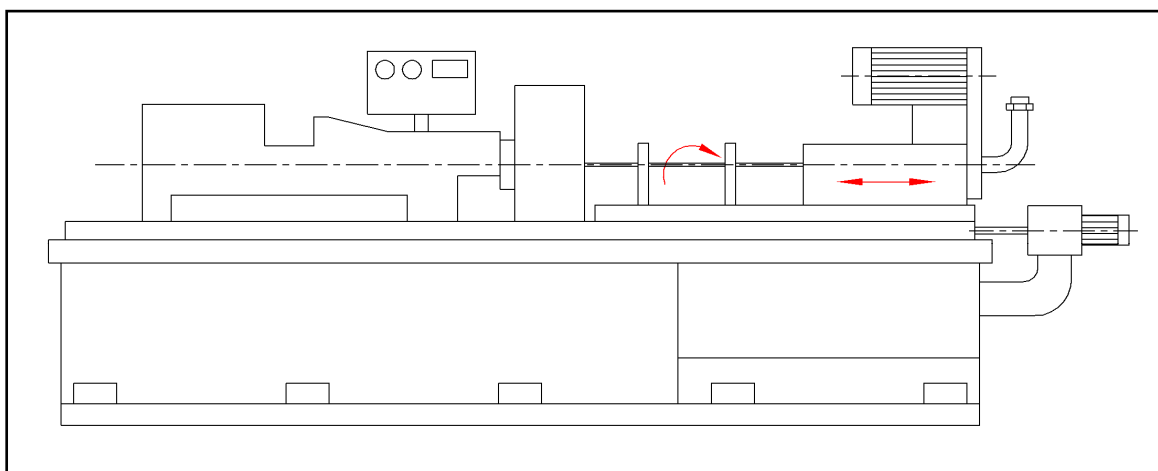


Abbildung 27: exzentrisches Tiefbohren

2.5.4 Verfahrensgrenzen

- **Grundtoleranzen**

Mit Einlippenbohrern kann eine kleinere Grundtoleranz erreicht werden, da die Schnittkräfte an der Schneide von den vorhandenen Stützleisten aufgenommen werden und nicht, wie z.B. bei Spiralbohrern, schon durch geringe Abweichungen der beiden Schneiden sofort eine größere Bohrung entsteht [5].

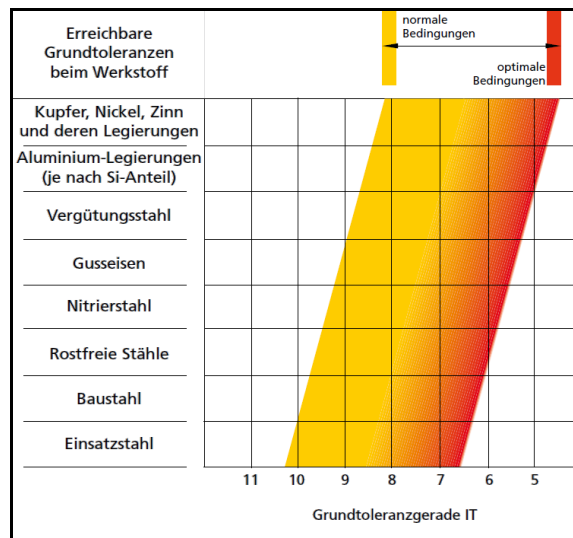


Abbildung 28: Grundtoleranzen²⁰

²⁰ Broschüre Stock AG TLB Präzisionswerkzeuge Berlin Seite 3

- **Bohrungsgeradheit**

Da der Präzisions-HM-Kopf bei gelöteten Einlippenbohrern immer auf einen flexiblen Rohrschaft gelötet wird, erzeugt das Werkzeug unbeeinflusst von eventuellen Rundlauf Fehlern eine sehr gerade Bohrung. Extreme Materialschwankungen und andere Einflussfaktoren können jedoch die Geradheit beeinträchtigen [5].

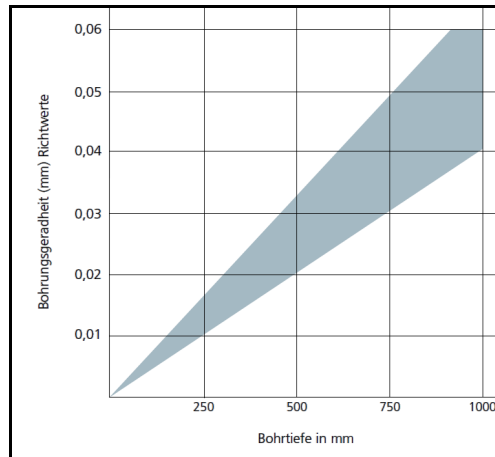


Abbildung 29: Bohrungsgeradheit²¹

- **Oberflächengüte**

Die Kräfte werden an der Schneide von den Stützleisten aufgenommen, welche wiederum die Oberfläche glätten. Der Schmierfilm zwischen den Stützleisten und der Bohrungsoberfläche spielt deshalb eine wichtige Rolle. Je besser der Kühlschmierstoff, desto besser die Oberfläche [5].

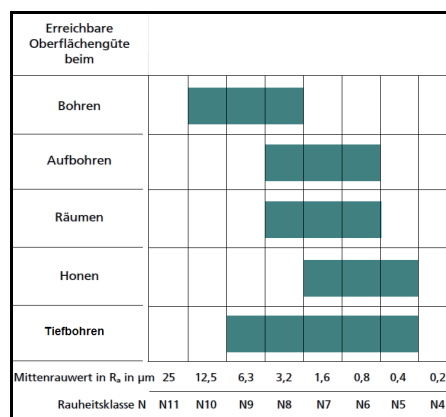


Abbildung 30: Oberflächengüte beim Tiefbohren²²

²¹ Broschüre Stock AG TLB Präzisionswerkzeuge Berlin Seite 3

²² Broschüre Stock AG TLB Präzisionswerkzeuge Berlin Seite 3

- **Bohrungsmittenverlauf**

Wird eine Bohrung z.B. mit einem handelsüblichen Spiralbohrer hergestellt, beeinflusst die Qualität des Spitzenanschliffs unter anderem den Bohrungsmittenverlauf. Es entsteht ein Kräfte-Ungleichgewicht an den Schneiden. Beim Einlippenbohren nehmen Stützleisten die Schnittkräfte auf, woraus ein guter Mittenverlauf resultiert [5].

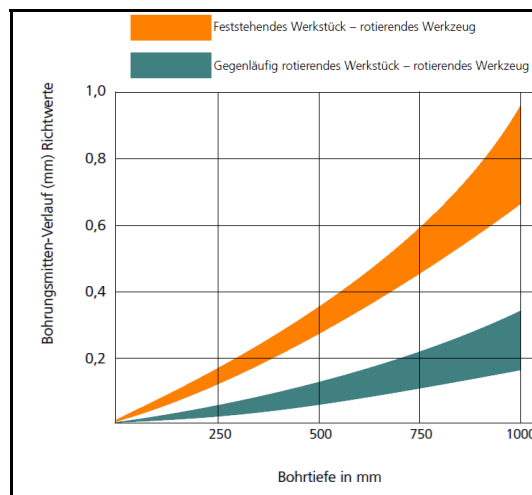


Abbildung 31: Bohrungsverlauf²³

²³ Broschüre Stock AG TLB Präzisionswerkzeuge Berlin Seite 3

3 Stand der Technik

3.1 Tiefbohrwerkzeuge

3.1.1 Vollhartmetall Einlippenbohrer

Bei modernen Tiefbohrwerkzeugen bestehen Bohrkopf und Bohrerschaft aus einem Teil aus gesinterterem Vollhartmetall. Im Vergleich zu gewöhnlichen Einlippenwerkzeugen, wo der Hartmetallbohrkopf auf einen Schaft aus Vergütungsstahl aufgelötet ist. Bei Vollhartmetalleinlippenbohrern können wegen der erhöhten Torsions- und Biegesteifigkeiten wesentlich höhere Standzeiten erreicht werden. Diese erhöhten Steifigkeiten ergeben sich aus dem wesentlich höheren Werkstoffkennwerten (Elastizitätsmodul und Schubmodul) von Hartmetall im Vergleich zu Stahl. Auch können die Vorschubwerte durch diese Eigenschaften vergrößert werden.

Da der Bohrerschaft aus Hartmetall ist, kann er für Richtvorgänge nicht mehr plastisch verformt werden. Der Rundlauffehler zwischen Einspannhülse und Bohrkopf sollte für exakte Bohrungen so gering wie möglich sein, deshalb wird der Schaft in einen Richtzapfen aus Vergütungsstahl eingelötet um noch etwaige Korrekturen durchführen zu können.

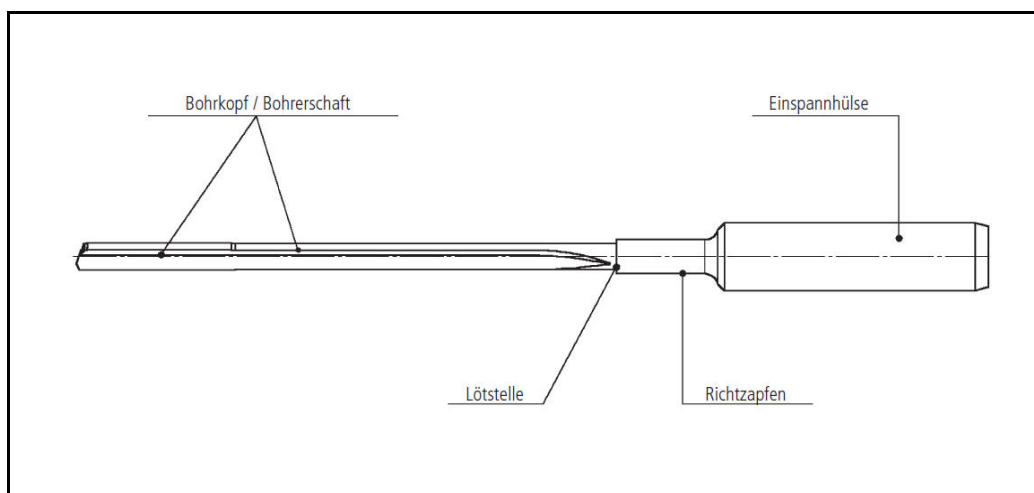


Abbildung 32: VHM - Einlippenbohrer²⁴

²⁴ Botek Broschüre Typ 110 2008-08-22 Version 24 Seite 6

3.1.2 Sonderanschliffe für Tiefbohrwerkzeuge

- **Schälanschliff**

Ist das gewünschte Oberflächenergebnis mit Standardanschliffen nicht zu erreichen, so kann mit einer Schälphase eine Verbesserung erreicht werden. Dies sollte aber nur benutzt werden, wenn andere Anschliffe nicht zum Erfolg führen. Schälphasen bedeuten mehr Aufwand beim Schärfen und einen größeren Hartmetallverbrauch. Die Größe der Schälphase ist durchmesserabhängig und muss erprobt werden. Es muss darauf geachtet werden, dass die Schneidecke nicht hinter den Führungsleisten liegt, da sie sonst drücken und das Ergebnis wieder verschlechtern. Mit einer Schälphase kann auch die Bohrungstoleranz verkleinert werden. Durch die Schälphase wird eine größere Querkraft erzeugt und der Druck auf die gegenüberliegende Führungsleiste verstärkt [1].

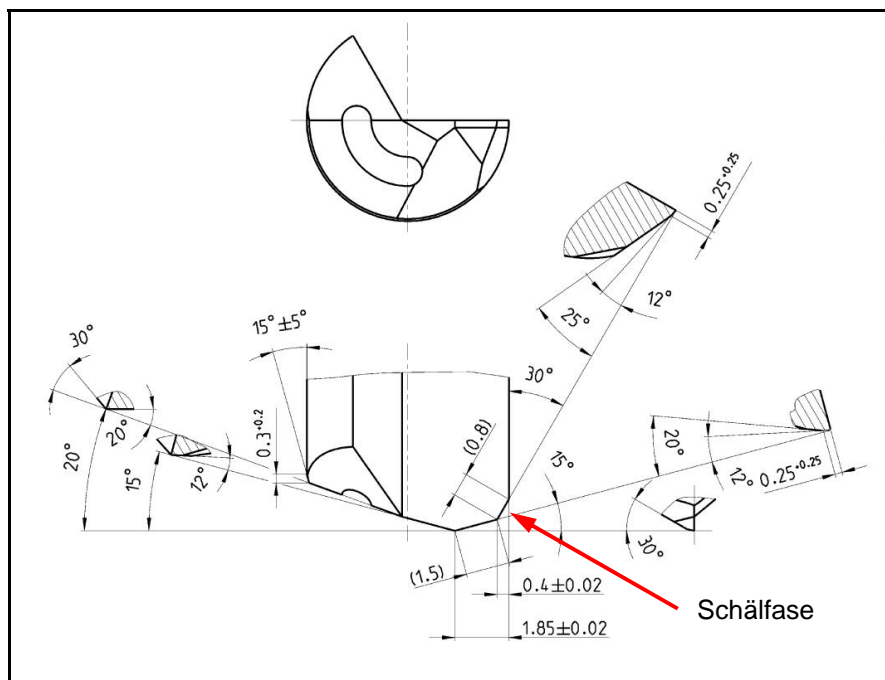


Abbildung 33: ELB Schälphase

- **Spanleitstufe**

Bei langspanenden Werkstoffen kann es oft durch die Größe der Späne zu Verstopfungen in der Sicke am Werkzeugschaft kommen. Dies führt in weiterer Folge meist zum Werkzeugbruch, da sich das Antriebsdrehmoment erhöht. Da die Spanleitstufe in der Herstellung sehr aufwendig und teuer ist, sollte sie erst zur Anwendung kommen, wenn eine Veränderung der Schneidengeometrie nicht zu einem stabilen Prozess und in weiterer Folge zu einem zufriedenstellendem Ergebnis führt.

- **Spanteilernut**

Als Alternative zur Spanleitstufe kann auch an der Werkzeugschneide zwischen innerer und äußerer Hauptschneide am Bohrkopf eine Nut in die Spanfläche eingeschliffen werden. Es wird wiederum der gleiche Effekt wie bei der Spanleitstufe erzielt. Die Spanform wird kleiner und der Abtransport durch die Sicke erleichtert.

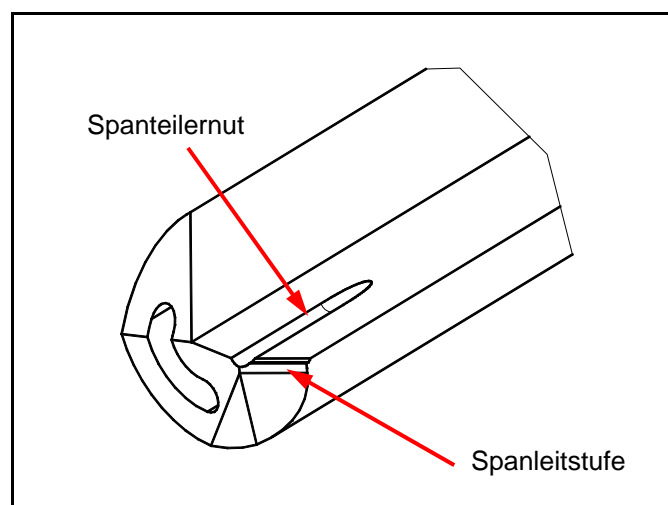


Abbildung 34: Spanteilernut und Spanleitstufe am ELB - Bohrkopf

3.1.3 Axialpulsator

Durch hochfrequente Pulsation des Werkzeugs in Vorschubrichtung während des Bohrvorgangs kann die Spanbildung günstig beeinflusst werden. Die kurzen Späne können besser durch die Sicke abtransportiert werden. Der Pulsator wird zwischen Spindel und Werkzeug zwischengeschaltet. Er überträgt sowohl Schnittmomente als auch Vorschubkräfte.

Sämtliche Qualitätsmerkmale, die das Bohren mit Einlippen- und Zweilippenbohrern auszeichnen – wie hohe Oberflächengüte, geringer Bohrungsmittenverlauf und optimale Werte bezüglich Bohrungsgeradheit und Bohrungsrundheit – können in Kombination mit dem Pulsator besonders wirtschaftlich realisiert werden. Und dies bei einer hohen Prozessfähigkeit [7].



Abbildung 35: Axialpulsator²⁵

3.1.4 Beschichtungen

Beschichtungen sind heute bei Schneidwerkzeugen ein unverzichtbarer Bestandteil für eine wirtschaftliche Fertigung. Einerseits reduzieren sie den Verschleiß von Freispanfläche, andererseits sollen sie im Speziellen bei Einlippentiefbohrwerkzeugen die Reibung in der Sicke minimieren. Dadurch wird der Späneabtransport durch den Kühlschmierstoff erleichtert. Oft werden auch die aufgetragenen Beschichtungen durch nachträgliches Polieren der Sicke in ihrer Oberflächenqualität verbessert, was zu einem noch besseren Spänerückfluss führt. Beschichtungen sind auf den zu bearbeiteten Werkstoff, den verwendeten Kühlschmierstoff, den Schneidstoff und der Schneidengeometrie abzustimmen. Meist wird nur durch eine enge Zusammenarbeit von allen beteiligten Partnern ein wirtschaftliches Schnittwerkzeug entwickelt.

²⁵ Botek Prospekt Typ 120 2008-08-28 Version 24 Seite 4

3.1.5 Zweilippenbohrer

Im konstruktiven Aufbau sind sich Zweilippenwerkzeug und Einlippenwerkzeug sehr ähnlich. Er besteht aus einem Hartmetallbohrkopf der, in einem Rohrschaft eingelötet ist. Dieser Rohrschaft ist wiederum mit der Aufnahme verlötet. Genauso wie beim Einlippenbohrer gibt es auch Zweilippenbohrer in Vollhartmetallausführung.

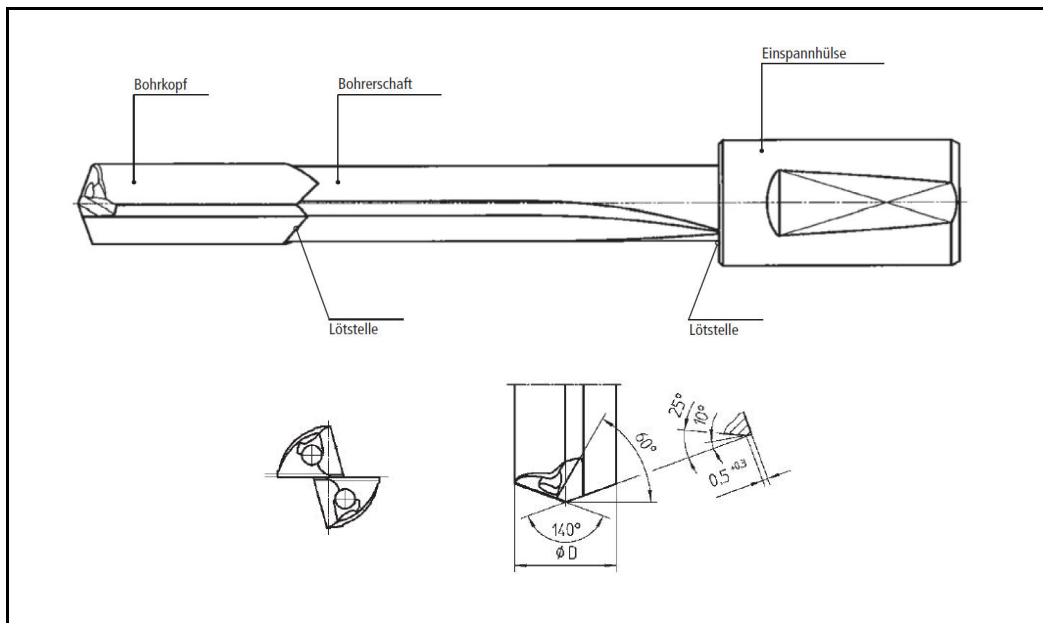


Abbildung 36: Zweilippenbohrer²⁶

Der Bearbeitungsprozess beim Zweilippenwerkzeug ist ähnlich dem des Einlippenwerkzeuges. Der durch den hohlen Werkzeugschaft zugeführte Kühlschmierstoff übernimmt den Abtransport der Späne. Da das Werkzeug zwei Spänenuten besitzt, ist die Querschnittsfläche einer Sicke wesentlich geringer als beim Einlippenwerkzeug dadurch ist die Größe der Späne eingeschränkt. Deshalb wird dieses Verfahren vorzugsweise für kurzspanende Werkstoffe eingesetzt.

Wesentlicher Vorteil der Zweilippen- gegenüber den Einlippen-Tiefbohrern ist der deutlich höhere Vorschub, mit dem bei der Herstellung von Bohrungen gearbeitet werden kann. Er resultiert aus der Konstruktion des Zweilippenbohrers mit zwei Schneiden und zwei Spannuten. Bohrungen können also wesentlich schneller hergestellt werden. Allerdings ist dieser Zuwachs bei der Bearbeitungsgeschwindigkeit verbunden mit einer geringeren Bohrungs Genauigkeit.

²⁶ Botek Prospekt Typ 120 2008-08-28 Version 24 Seite 9

Auch diese ist eine direkte Folge der Bohrerkonstruktion mit zwei Schneiden. Da es eine gegenüberliegende Schneide gibt, sind der Glättungseffekt und die Führung geringer als bei einem Einlippen-Tieflochbohrer. Durch den symmetrischen Schneidenaufbau ist der Zweilippenbohrer selbstzentrierend, und es kann in einigen Fällen auf eine Zentrier- oder Pilotbohrung verzichtet werden [5].

3.1.6 Spiralisierte Hochleistungstiefbohrer

Mit zunehmender Bohrtiefe erhöht sich bei Spiralbohren die Reibung, die sich durch den Kontakt der Späne mit den Nuten ergibt. Herkömmliche Vollhartmetallbohrer sind deshalb nur bis zu Bohrtiefen von ca. $5-6 \times D$ in der Lage, die Späne sicher aus der Bohrung zu transportieren. Bei größeren Tiefen kommt es zum Spanstau, der das Drehmoment stark ansteigen lässt, und zu Werkzeugbruch führen kann. Bei konventionellen Bohrern kann man diesem Problem mit Entspanzyklen entgegenwirken. Diese Vorgehensweise verlangsamt den Bohrfortschritt und stellt einen Unsicherheitsfaktor dar, da sie im Allgemeinen an den Werkstoff, die Schnittdaten und andere Randbedingungen angepasst werden muss. Spiralbohrer erlauben jedoch wesentlich größere Bohrtiefen ohne Lüftzyklen, wenn die Reibung der Späne in den Nuten verringert wird. Eine sehr wirkungsvolle konstruktive Maßnahme hierzu besteht darin, den Spanraum des Bohrers von der Spitze zum Schaftende hin kontinuierlich zu vergrößern. Eine weitere Maßnahme ist die Verbesserung der Gleiteigenschaften der Spannut. Herkömmliche Hartstoffschichten wirken sich in dieser Hinsicht ungünstig aus. Sie weisen Mikrorauheiten auf, die im Vergleich zur unbeschichteten Schleifstruktur des Bohrers auf die Späne hemmend wirken [6].

Durch diese Maßnahme ist es heute technologisch möglich, Bohrungen mit einer Tiefe von $30 \times D$ mit Spiralbohrern herzustellen. Spiralisierte Hochleistungstiefbohrer können Vorschubwerte, die das 5-fache von Einlippenbohren übersteigen, erreichen. Da Spiralbohrer die Späne mechanisch abtransportieren, reicht meist eine normale, wie in modernen Bearbeitungszentren übliche, Kühlschmieranlage aus um Tiefbohrungen herzustellen. Dadurch können die Anzahl der einzelnen Aufspannungen bei der Werkstückfertigung verringert und die Rüstzeiten minimiert werden. Oft ist es auch möglich, eine Komplettbearbeitung am Bearbeitungszentrum durchzuführen, und man kann auf aufwändige Sondermaschinen und Spannmittel verzichten. Allerdings ist die Oberflächenrauigkeit der Bohrung durch den fehlenden Glättungseffekt des Einlippenwerkzeuges schlechter, was aber in vielen Anwendungsgebieten zweitrangig ist [7].

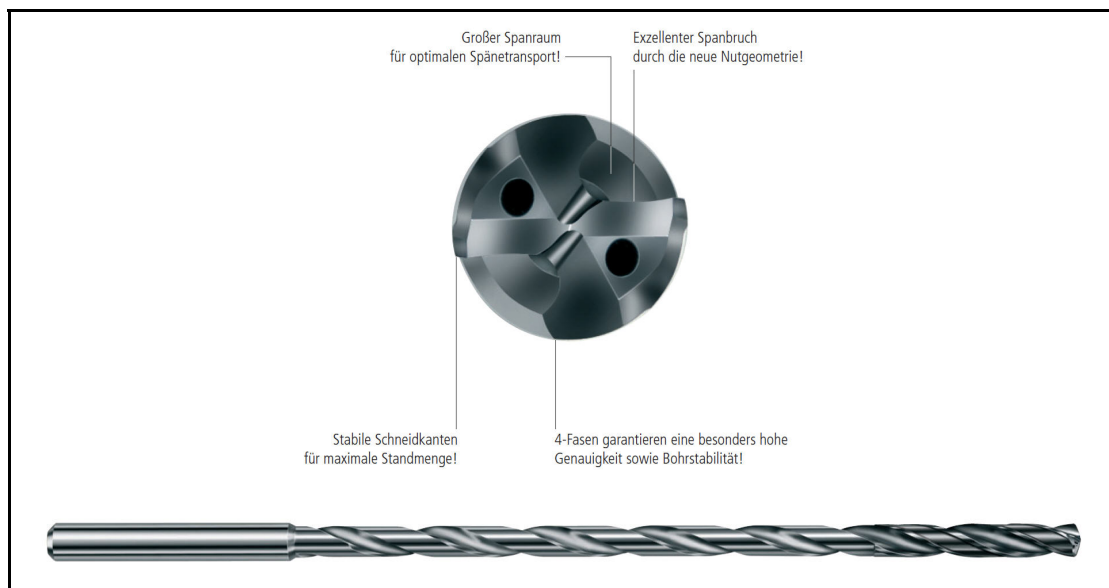


Abbildung 37: Hochleistungsspiralbohrer²⁷

²⁷ Botek Broschüre Typ 158 2009-04-17 Version 1 Seite 3

3.1.7 Einlippenbohrer – Spiralisierter Hochleistungstiefbohrer

Einlippenbohrer	Spiralisierter Hochleistungstiefbohrer
1 Schneide	2 Schneiden
Passivkraft durch Stützleisten	Symmetrisch im Aufbau keine Passivkraft
Tiefbohröl bei Stahl	Emulsion
Systemdruck bis 200 bar	Systemdruck ca. 30 bar ausreichend
Spänetransport über KSS	Spänetransport mechanisch über Wendelnut
Sondermaschine	Bearbeitungszentrum
Sehr guter Glättungseffekt der Oberfläche	Kein Glättungseigenschaften
Mittlere Vorschübe	Hohe Vorschübe
Höchste Genauigkeit	Standard Genauigkeit für Bohren

Tabelle 3: Gegenüberstellung ELB - Hochleistungsspiralbohrer²⁸

Grundsätzlich kann keine pauschale Aussage getroffen werden, wann sich welches der beiden Tiefbohrverfahren besser eignet. Es sind im Einzelnen die Bohrtiefen, Durchmesser und Toleranzanforderungen in Bezug auf Position und Oberflächenqualität zu bewerten.

3.2 Tiefbohren am Bearbeitungszentrum

Die heutigen Anforderungen bezüglich Toleranzen der Werkstücke und die zunehmende Flexibilisierung des Maschinenparks eines Fertigungsbetriebes, erfordern es oft auch, Tiefbohrungen am Bearbeitungszentrum herstellen zu können. Mit diesem Prozess werden mehrere Bearbeitungsschritte, die früher mehrere Aufspannungen auf verschiedenen Werkzeugmaschinen erforderten, in einer Fertigungsmaschine in meist einer Aufspannung hergestellt. Dadurch werden Spannfehler durch Umspannvorgänge minimiert, der Vorrichtungsaufwand verkleinert und die Bearbeitungszeit verkürzt und damit die Wirtschaftlichkeit vergrößert. Allerdings sind damit auch einige tiefbohrspezifische Erweiterungen am Bearbeitungszentrum durchzuführen. Die Leistungsfähigkeit des Kühlschmierstoffsystems muss bezüglich Druck und Durchflussmenge wesentlich erhöht werden.

²⁸ Toweko Tiefbohren Praxis 72644 Oberboihingen 2001

Dies ist für einen optimalen Späneabtransport aus der Tiefbohrung erforderlich. Auch ist der Kühlschmierstoff sorgfältig in Zusammensetzung und Mischungsgrad abzustimmen, um ein optimales Ergebnis beim Tiefbohren und Fräsen zu erreichen. Da beim Tiefbohren am Bearbeitungszentrum nicht die Möglichkeit besteht, das Bohrwerkzeug beim Anbohrvorgang durch eine Bohrbuchse zu führen, muss vorher eine so genannte Pilotbohrung hergestellt werden. Die Bohrung wird mit einem kurzen, sehr steifen Werkzeug gefertigt und soll die Führungsaufgabe des Bohrkopfes übernehmen. Danach wird das Tiefbohrwerkzeug eingeführt und die Bohrbearbeitung durchgeführt. Allerdings sind mit dieser Technologie nur Bohrungen mit einer Tiefe von maximal 40 mal dem Bohrungsdurchmesser herstellbar. Bei tieferen Bohrungen kann sonst das Werkzeug wegen der mangelnden Führung durch die Vorschubkräfte ausknicken oder sich durch die Massenkräfte sich in unbeherrschbare Biegeschwingungen versetzen. Dieser Effekt kann durch die Verwendung von Werkzeugen mit Vollhartmetallschaft abgeschwächt werden.

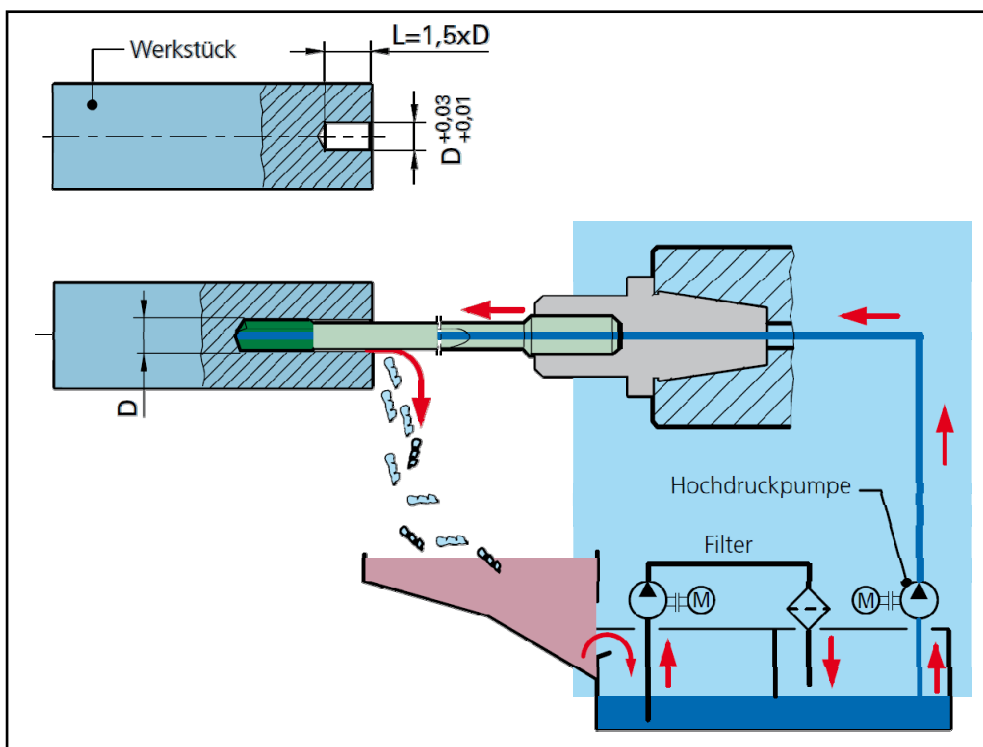


Abbildung 38: Tiefbohren am BAZ²⁹

²⁹ Broschüre Stock AG TLB Präzisionswerkzeuge Berlin Seite 2

- **Gestuftes Bohren am Bearbeitungszentrum**

Ist es erforderlich, größere Bohrtiefen am Bearbeitungszentrum herzustellen wird folgendermaßen vorgegangen. (siehe Abbildung 39)

1. Herstellen einer Pilotbohrung mit einem kurzen steifen Werkzeug
2. Das Bohrwerkzeug mit entgegen der Schnittrichtung langsam drehender Spindel in die Pilotbohrung einführen
3. Tiefbohrung herstellen: Die freie Werkzeuglänge sollte hierbei wiederum maximal 40 mal dem Bohrungsdurchmesser entsprechen
4. Ein längeres Bohrwerkzeug, mit einer Länge von ca. 80 mal dem Durchmesser, wird wiederum wie vorher in die bereits bestehende Bohrung langsam eingeführt. Somit ist wiederum die maximal freie ungeführte Werkzeuglänge ca. 40 mal dem Durchmesser. Die restliche Werkzeuglänge wird in der bereits bestehenden Bohrung geführt. Die Bohrung kann gefertigt werden.
5. Bohrwerkzeug hat die maximale Bohrungstiefe erreicht
6. Fertig hergestellte Bohrung

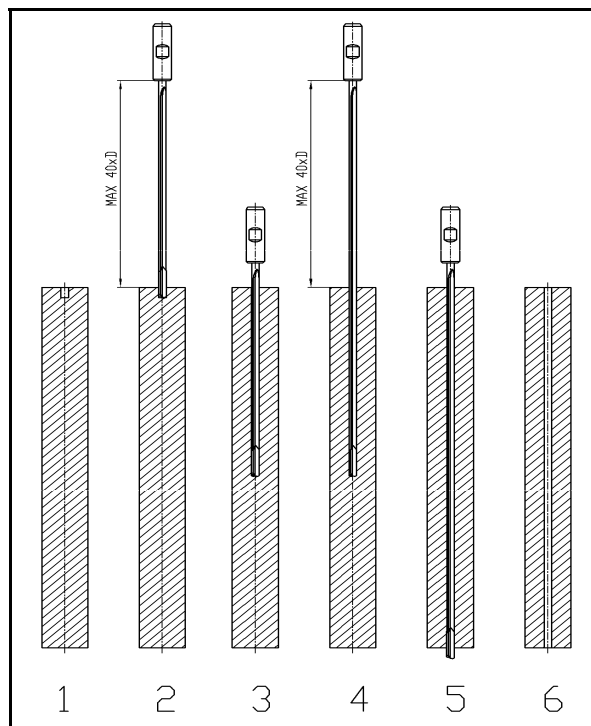


Abbildung 39: gestuftes Tiefbohren am BAZ

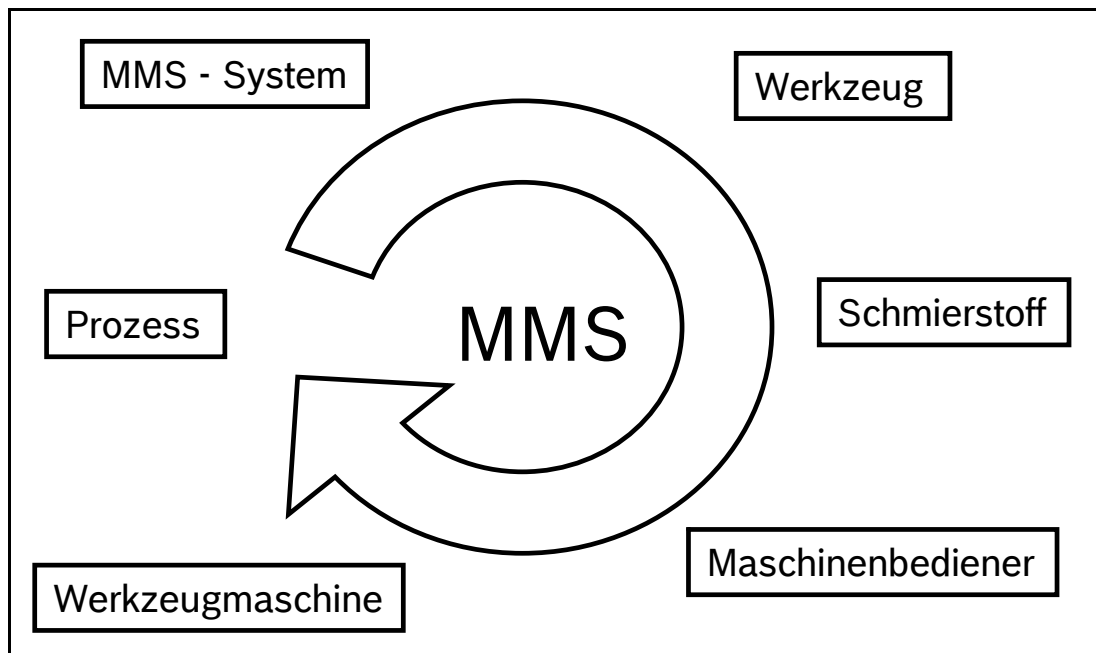
3.3 Minimalmengenschmierung

3.3.1 Einführung und Allgemeines

Die Minimalmengenschmierung ist eine Variante zur Kühlung und Schmierung von Werkzeug und Werkstück bei der spanenden Bearbeitung. Hierbei wird ein Gemisch aus Luft und einem speziellen Minimalmengenschmierstoff direkt beim Bearbeitungsprozess zur Werkzeugschneide befördert. Dieses Gemisch wird auch als Aerosol bezeichnet. In den letzten Jahrzehnten hatte dieses Verfahren ein sehr kleines Anwendungsgebiet in der metallverarbeitenden Industrie. Heute setzt man dieses Verfahren wegen der Kostenreduktion durch den Entfall der Emulsionspflege und den geringen Verbrauch an Minimalmengenschmierstoff immer öfter ein. Ein weiterer Vorteil ist auch, der weithingehend trockene Bearbeitungsablauf. Es entfallen somit Reinigungsvorgänge vor einem weiteren Bearbeitungsschritt in einer anderen Maschine, und die anfallenden Späne sind auch frei von Verunreinigungen durch Öl- oder Emulsionsrückstände [8].

Um ein dauerhaft funktionstüchtiges und prozessfähiges Minimalmengenschmierungssystem betreiben zu können, sind eine Reihe von Faktoren zu berücksichtigen. Es ist eine exakte Abstimmung aller im Prozess involvierten Bereiche erforderlich. Hierzu zählen die Maschine, das Werkzeug mit Aufnahme, das Minimalmengenschmiersystem, der Maschinenbediener, der Prozess und der eingesetzte Minimalmengenschmierstoff.

Dies lässt sich durch einen geschlossenen Regelkreis visualisieren.

Abbildung 40: MMS Regelkreis ³⁰

Nur wenn all diese Faktoren best möglich aufeinander abgestimmt sind, lässt sich ein optimales Prozessergebnis erzielen. Im Folgenden werden all diese Parameter und deren Einflussfaktoren erläutert [8].

3.3.2 MMS – System

- **Allgemeine Anforderungen**

Die Hauptaufgabe der MMS - Systeme ist die gezielte Zufuhr eines geeigneten Schmierstoffs an die Wirkstelle des Werkzeugs. Hierfür steht eine Reihe verschiedener Gerätetypen zur Verfügung, die den unterschiedlichsten Anforderungen gerecht werden. Für Einzweckmaschinen, z.B. Räumen, Sägen, Umformen, kommen vorwiegend einfache, manuell regulierbare MMS - Geräte zur internen und externen Zuführung mit unterschiedlicher Wirkungsweise zum Einsatz. Dies sind vorwiegend Systeme mit Druckbehälter und Dosierpumpen. Moderne flexible Fertigungssysteme stellen sehr hohe Anforderungen an die MMS - Gerätetechnik. Um diesen gerecht zu werden, wurden komplexe MMS - Systeme entwickelt, die über integrierte Regelungs-, Steuerungs- und Überwachungskomponenten verfügen. Bei den Fertigungsverfahren werden je nach Zugänglichkeit der Schneide unterschiedliche Anforderungen an die eingesetzten

³⁰ Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung BGI / GUV-I 718 November 2010 Seite 15 Bild 6

Geräte gestellt. Aus diesem Grund unterscheidet man heute in äußere und innere Zufuhr des Schmiermediums, die sich deutlich im Aufwand für die Gerätetechnik unterscheiden [8].

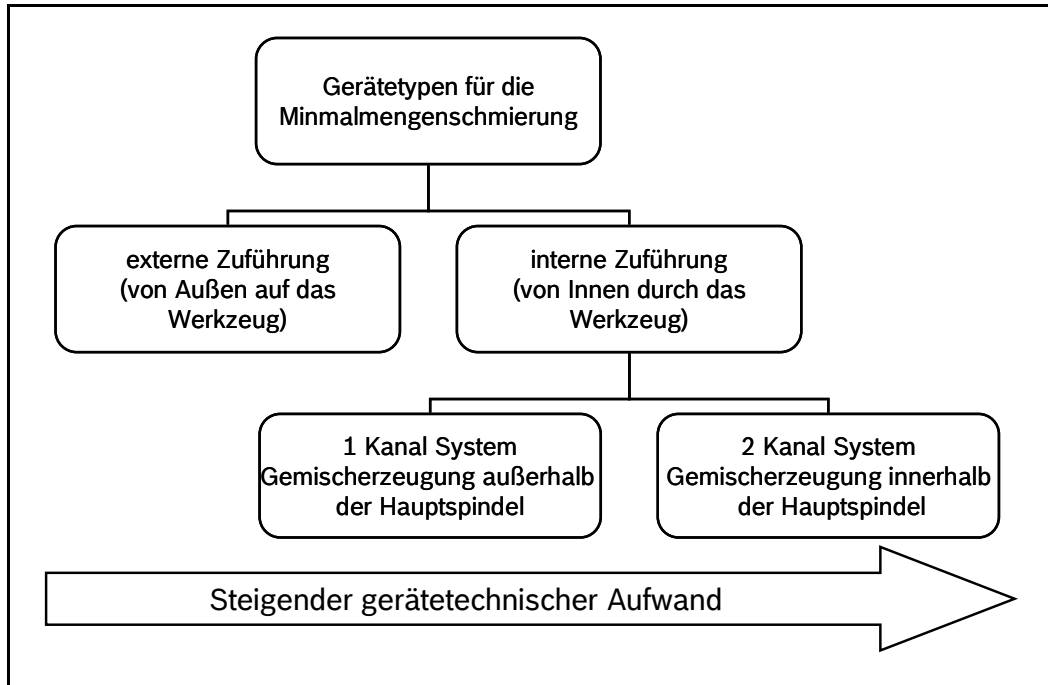
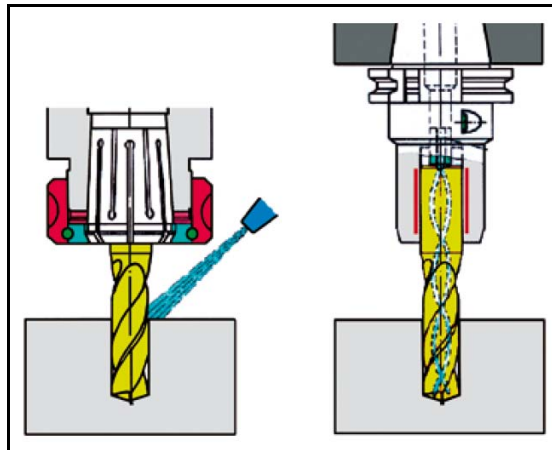


Abbildung 41: Einteilung MMS Systeme ³¹

- **Äußere Zuführung**

Bei der äußeren Zuführung des Aerosols wird das Öl-Luftgemisch direkt durch eine Düse an die Werkzeugscheide befördert. Bei der inneren Zuführung wird das Ölgemisch durch das Werkzeug hindurch an die sich im Eingriff befindliche Schneide transportiert. Der Vergleich ist in Bild (Abbildung 42: Äußere Zuführung) schemenhaft dargestellt [8].

³¹ Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung BGI / GUV-I 718 November 2010 Seite 26 Bild 8

Abbildung 42: Äußere Zuführung³²

Geräte zur externen Zuführung fördern den Schmierstoff und die Zerstäubungsluft getrennt bis in die Nähe der Wirkstelle. Dies geschieht in einem koaxial oder parallel geführten Leitungspaket. Am Ende der Leitungen wird der Schmierstoff mit einer Sprühdüse zerstäubt und als Aerosol dem Werkzeug von außen zugeführt. Geringe Kosten, einfache Nachrüstung und die Möglichkeit, konventionelle Werkzeuge einzusetzen sind wichtige Vorteile dieser Systeme. Alle diese Systeme haben aber auch prinzipbedingte Nachteile, die ihren Einsatz einschränken. Die Düsen müssen manuell oder über zusätzliche Positionierachsen dem Werkzeug angepasst werden und es treten Verluste durch Streuung und Abschattungseffekte auf. Als wichtigste Einsatzgebiete sind Werkzeugmaschinen mit niedrigem Flexibilitätsgrad zu nennen sowie die Fertigungsverfahren Sägen, Fräsen, Räumen, Umformen, Bohren und Gewinden [8].

Äußere Zufuhr	
Vorteile	Nachteil
Einfache Adaption	Ungeeignet für lange Werkzeuge und höher Anforderungen
Geringe Investitionskosten	Ev. Abschattungseffekt des Sprühstrahls
Geringer Nachrüstaufwand	Streuverluste des Sprühstrahls
Schnelles Ansprechverhalten	
Keine speziellen Werkzeuge erforderlich	

Tabelle 4: Vor und Nachteile Äußere Zuführung³³

³² Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung BGI / GUV-I 718 November 2010 Seite 11 Bild 4

³³ Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung BGI / GUV-I 718 November 2010 Seite 12 Tabelle 1

- **Innere Zufuhr**

Bei der inneren Zuführung wird das Schmiermedium direkt durch die Maschinenspindel und das Werkzeug zur Wirkstelle hin transportiert. Dabei wird zwischen Ein und Zweikanalsystem unterschieden. Generell ergeben sich bei der Inneren Zuführung folgende Vor- und Nachteile.

Inner Zufuhr	
Vorteile	Nachteil
Optimale Schmierung an der Eingriffstelle	Hohe Investitionskosten
Keine Sprühverluste	Geeignete Maschinenspindel erforderlich
Menge für jedes Werkzeug optimierbar	Spezielle Werkzeuge erforderlich

Tabelle 5: Innere Zuführung³⁴

- **Das Einkanal- System**

Beim Einkanal-System wird das Aerosol außerhalb der Spindel erzeugt. Durch ein Nachfüllaggregat wird der Minimalmengenschmierstoff in den Aerosolerzeuger gepumpt. In diesem wird dann mit Druckluft ein feinstes Ölnebel erzeugt, welcher durch eine Drehdurchführung in die Spindel eingeleitet wird. Durch die koaxiale Bohrung in der Werkzeugspindel wird dann das Aerosol direkt zur Werkzeugaufnahme und zum Werkzeug geleitet. Hierbei sollen alle Übergänge und Durchmessersprünge so glatt als möglich ausgeführt werden, um eine Ansammlung von Schmierölpartikeln in Bereichen mit geringer Strömungsgeschwindigkeit zu vermeiden. Auch sind scharfe Umlenkungen des Mediums zu vermeiden, da es an diesen Stellen, durch die dort wirkenden Fliehkräfte zur Extraktion des Öls aus der Luft kommt und sich das Schmiermittel an der Wand anlagert. Die Aerosolleitung vom Aerosolerzeuger zur Spindel sollte so kurz als möglich ausgeführt werden, dadurch wird ein reaktionsträges System vermieden. Die am Aerosolerzeuger eingestellten Parameter sind somit dann innerhalb von kleinen Zeitspannen direkt an der Werkzeugschneide verfügbar.

³⁴ Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung BGI / GUV-I 718 November 2010 Seite 13 Tabelle 2

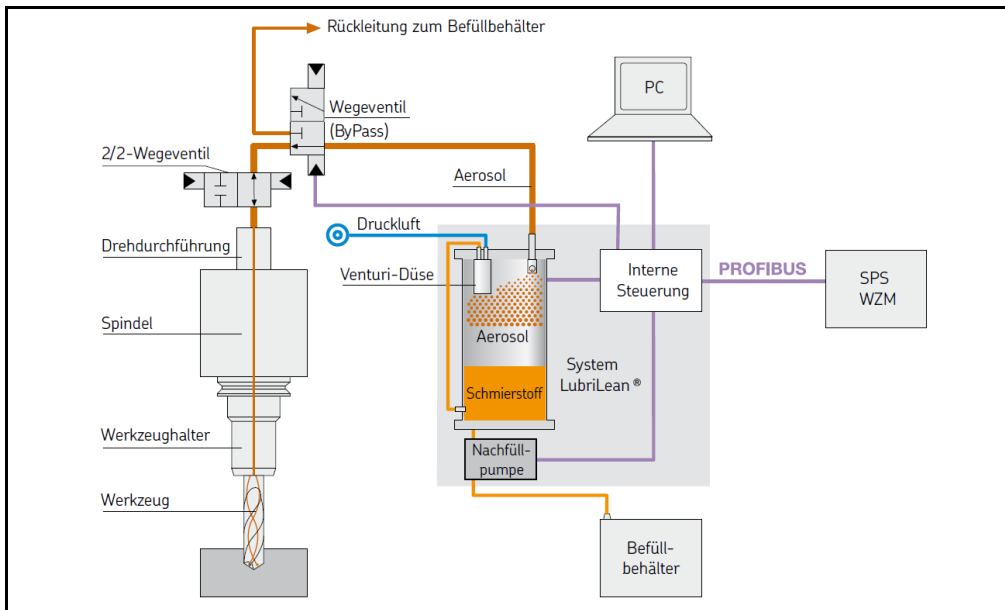


Abbildung 43: 1 Kanal MMS System³⁵

Im Aerosolerzeuger wird in einer Venturi-Düse durch die einströmende Druckluft ein Unterdruck erzeugt und der Minimalmengenschmierstoff fein zum Aerosol zerstäubt.

- **Das Zweikanal- System**

Beim Zweikanalsystem werden Öl und Luft voneinander getrennt zur Spindel geführt. Beide Medien werden dann, durch eine sich in der Mitte befindliche Lanze getrennt, bis direkt vor die Werkzeugaufnahme befördert. Die Erzeugung des Aerosols erfolgt dann erst unmittelbar vor dem Werkzeug in einer Rohrdüse. Durch diese Anordnung der Komponenten wird ein sehr reaktionsschnelles System erreicht. Unmittelbar nach der Parameterauswahl sind diese auch an der Werkzeugschneide verfügbar. Entmischungen oder Ölabscheidungen sind durch diese Art der Mediumszuführung nahezu nicht möglich.

³⁵ Skf LubriLean Broschüre 1-5102-DE Seite 2 Bild 1

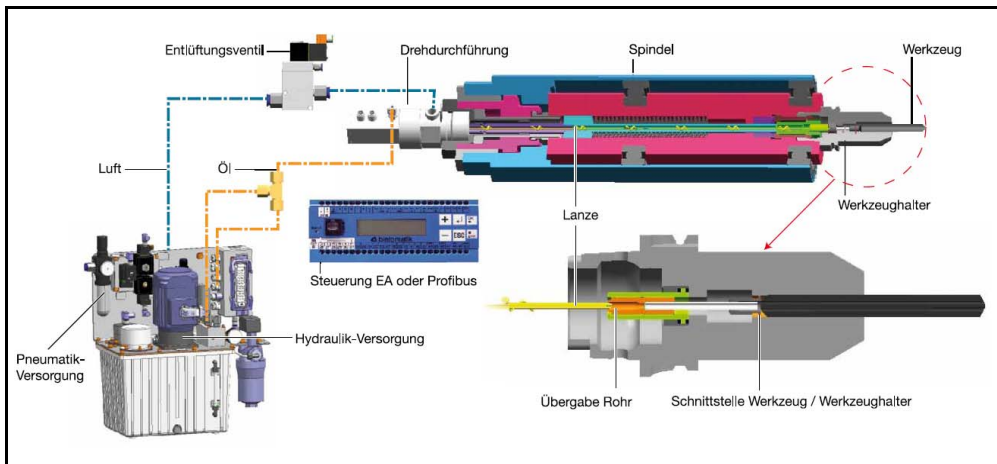


Abbildung 44: 2 Kanal System³⁶

- **Gegenüberstellung Einkanal – Zweikanalsystem**

1-Kanal-System	2-Kanal-System
Ölzufuhr bedingt abhängig von Drehzahl	Ölzufuhr bedingt unabhängig von Drehzahl
Ölmenge abhängig vom Luftdurchsatz	Ölmenge unabhängig vom Luftdurchsatz
Schnelles Reaktionsverhalten	Sehr schnelles Reaktionsverhalten
Systemdruck > 4 bar	Systemdruck > 4 bar
Förderung durch Winkel bedingt möglich	Förderung durch Winkel höchst aufwendig
Wartungsarm	Mehr Wartung und Verschleiß
Schmierstoffviskosität < 50mm ² /s	Schmierstoffviskosität < 100mm ² /s
Einfache Aufteilung des Aerosolsstroms	Aufteilung auf mehrer Spindeln aufwendig
Standart Werkzeugaufnahme verwendbar	Sonderaufnahme

Tabelle 6: Gegenüberstellung der Systeme³⁷

³⁶ Bielomatik Minimalmengen-Schmiertechnik Neuffen Broschüre 2010-09 Seite 10

³⁷ Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung BGI / GUV-I 718 November 2010 Seite 37 Tabelle 8

3.3.3 Einflussfaktoren MMS Systeme

- **Schmierstoff**

Bei der Minimalmengenschmierung handelt es sich um eine Verlustschmierung. Der eingesetzte Schmierstoff ist oftmals hohen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt und gelangt in Form von Dämpfen und Aerosolen in den Arbeitsbereich. Der Anwender sollte daher auf die toxikologische Unbedenklichkeit des Schmierstoffes besonderen Wert legen.

Für eine reibungslose und emissionsarme Metallbearbeitung mit Minimalmengenschmierung haben sich Schmierstoffe mit möglichst gutem Schmiervermögen und hoher thermischer Belastbarkeit bewährt. In der industriellen Fertigung kommen synthetische Esteröle und Fettalkohole mit günstigem Verdampfungsverhalten und einem hohen Flammpunkt zum Einsatz [8].

- **Bediener**

Ein wesentlicher Punkt für den erfolgreichen Einsatz der Mindermengenschmierungstechnologie ist die Einbindung der Mitarbeiter in die ablaufenden Prozesse. Durch ständige Weiterbildung und Know-How Transfer unter den Mitarbeitern kann die Prozessqualität dauerhaft verbessert werden.

- **Prozess**

Grundsätzlich kann die Mindermengenschmierung in allen Bereichen der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide eingesetzt werden. Besonders geeignet ist diese Variante der Schmierung und Kühlung zum Bearbeiten von Graugußwerkstoffen. Der Graphitanteil im Werkstoff schmiert noch zusätzlich das Werkzeug und erhöht somit die Standzeit. Bei Bearbeitungsprozessen von hochfesten, schwer zerspanbaren Werkstoffen, wo zusätzlich noch Spülwirkung des Kühlschmierstoffes zum Späneabtransport benötigt wird, ist der Einsatz der Mindermengentechnologie nur mit sehr viel Prozessentwicklung beherrschbar.

- **Maschine**

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Berücksichtigung mindermengenschmierungsspezifischer Ausführungsmerkmale der Maschine. Die Spindel muss, je nach Kanalanzahl des Schmiersystems, geeignete Drehdurchführungen und Bohrungen bis zur Schnittstelle mit der Werkzeugaufnahme besitzen. Der Arbeitsraum der Maschine soll möglichst reinigungsfreundlich und mit keinen waagrechten Verkleidungen ausgeführt werden. Dadurch werden große Späneablagerungen im Arbeitsraum und den damit verbundenen Spänestau im Späneförder vermieden.

- **Werkzeug und Werkzeugaufnahme**

Werkzeug und Aufnahme müssen im speziellen bei der inneren Zuführung aufeinander abgestimmt sein. Es sollten sich keine Toträume im Innern der Werkzeugaufnahme befinden. Diese Toträume verzögern durch Ölsammlungen die Ansprechzeit des System und bewirken eine Änderung des Sättigungsgrades des zugeführten Aerosols und führen somit zu sehr instabilen Prozessen. Geforderte Toleranzen, Oberflächenqualitäten und Standzeiten werden nicht erreicht.

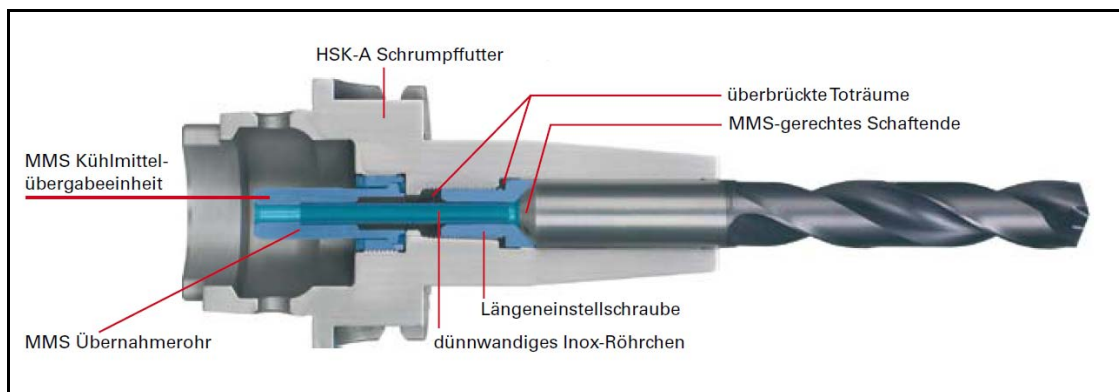


Abbildung 45: MMS gerechte Werkzeugaufnahme³⁸

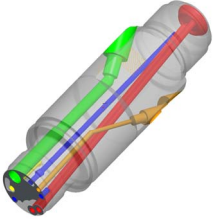
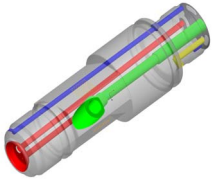
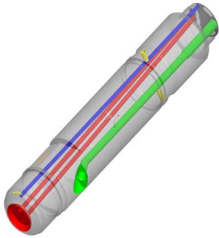
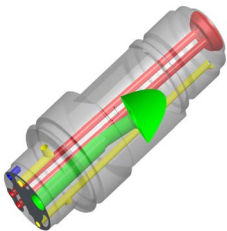
³⁸ Gühring GM 300 MMS Programm Broschüre Albstadt 2010 Seite 14

4 Prozessfestlegung

4.1 Analyse des Teilespektrums

In einem ersten Schritt ist es notwendig, die zu bearbeitenden Teile zu analysieren. Hiefür wird eine Matrix aufgestellt, die alle Bauteile beinhaltet. Die Bauteile werden nach ihrem Außendurchmesser und der Länge, dem Werkstoff, den Parametern der einzelnen Tiefbohrungen und der geforderten Oberflächenqualität eingeteilt. Als kritischer Kennwert für die Tiefbohrungen, wie bereits in 2.2.1 beschrieben, wird das Längendurchmesser Verhältnis verwendet. Des Weiteren wird noch die Rautiefe der Bohrung in die Wertung miteinbezogen.

Betrachtet man die Teilematrix, so sind es zwei Bauteile, die sich als sehr bearbeitungskritisch herauskristallisieren. Einerseits der Haltekörper mit der Nummer (C 431 516 650), er sticht durch seine großen Abmessungen von über 550 mm Länge und Tiefbohrungen mit einem Längendurchmesser Verhältnis von beinahe 100 hervor. Auch ist hier die Oberflächenrauigkeit mit $R_{z1max12}$ sehr fein. Andererseits ist im Haltekörper mit der Nummer (C 431 516 834) eine Tiefbohrung mit Durchmesser 2.5 mm zu fertigen.

Bezeichnung	Nummer	Werkstoff / WB	Hauptabmessungen		Tiefbohrungen			Oberfläche	MAE	ANZ ELB	WZW BAZ	
			DM	Länge	Nr.	DM	L					L/D
Haltekörper	C 431 516 855	50CrMo4+ESU	45	131	1	3	126	42,12	Rz1max12	BAZ	1	Auto
2200 bar	BilderTB/c431516855.jpg	37+2 HRC			2	3	130	43,33	Rz1max12	BAZ	1	Auto
					3	2,6	124	47,15	Rzmax40	BAZ	2	Auto
					4	3	124	41,33	Rzmax40	BAZ	1	Auto
Haltekörper	C 431 516 841 / 829	50CrMo4+ESU	45	131	1	3	126	42,12	Rz1max12	BAZ	1	Auto
2200 bar	BilderTB/c431516841.jpg	37+2 HRC			2	3	130	43,33	Rz1max12	BAZ	1	Auto
					3	2,6	124	47,15	Rzmax40	BAZ	2	Auto
					4	3	124	41,33	Rzmax40	BAZ	1	Auto
Haltekörper	C 431 516 834	50CrMo4+ESU	40	220	1	2,6	209	79,47	Rzmax40	BAZ	3	Auto
2200 bar	BilderTB/c431516834.jpg	37+2 HRC			2	3	214	71,22	Rz1max12	BAZ	2	Auto
					3	3	216	72,00	Rz1max12	BAZ	2	Auto
					Freifahren des Haltekörper durch Pulstests erforderlich ABNAHMEBAUTEIL							
Haltekörper	C 431 516 858 / 798 / 826	50CrMo4+ESU	40	100	1	3	95,3	31,77	Rz1max12	BAZ	1	Auto
2200 bar	BilderTB/c431516858.jpg	37 +2 HRC			2	2,6	93,5	35,55	Rzmax40	BAZ	1	Auto
					3	3	100	33,33	Rz1max12	BAZ	1	Auto
					wird bereits in HIP / COS gefertigt							

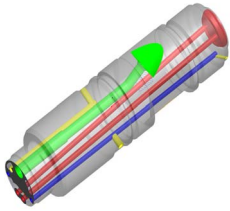


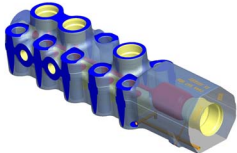
Haltekörper	C 431 516 819	50CrMo4+ESU	40	150	1	2,6	138	52,28	Rzmax40	BAZ	2	Auto
2200 bar	BilderTBvc431516819.jpg	37+2 HRC			2	3	142	47,38	Rz1max12	BAZ	2	Auto
					3	3	145	48,33	Rz1max12	BAZ	2	Auto
					4	3	63	21,00	Rzmax40	BAZ	1	Auto
		Freifahren des Haltekörper durch Pulstests erforderlich										
Druckstutzen	C 431 332 153	50CrMo4+ESU	25	380	1	4	300	75,00	Rz1max12	BAZ	2	Manuell
1600 bar	BilderTBvc431332153.jpg	37+2 HRC										
												
		1600 bar Stufen eher unkritisch										
Haltekörper	C 431 516 650	42CrMo4+HH	50	550	1	5	355	71,00	Rz1max16	BAZ	2	Manuell
1600 bar	BilderTBvc431516650.jpg	33+5 HRC			2	3	160	53,33	Rz1max16	BAZ	2	Auto
					3	5	490	98,00	Rzmax40	BAZ	3	Manuell
					4	5	485	97,00	Rz1max16	BAZ	3	Manuell
		1600 bar Stufen eher unkritisch ABNAHMEBAUTEIL										
Sammelrohr	C 444 547 007	50CrMo4+ESU	115	400	1	3,8	107	28,16	Rz1max16	BAZ	1	Auto
2200 bar	BilderTBvc444547007.jpg	37+2 HRC	(400x86x76)		2	5	300	60,00	Rz1max16	BAZ	1	Manuell
												

Tabelle 7: Teilespektrum Bosch Hallein

Diese angeführte Tabelle ist die Datenbasis für alle weiteren Analysen, sie beinhaltet alle Daten die von fertigungstechnischer Relevanz sind.

Bei der Analyse der Fertigungszeichnung der einzelnen Bauteilen wurde festgestellt, dass auf Grund der sehr engen Toleranzen der Bauteile noch einige Fertigungsschritte in der selben Aufspannung wie beim Tiefbohren durchgeführt werden müssen. Daraus resultiert die Anforderung, eine Fräsbearbeitung in derselben Maschine durchzuführen.

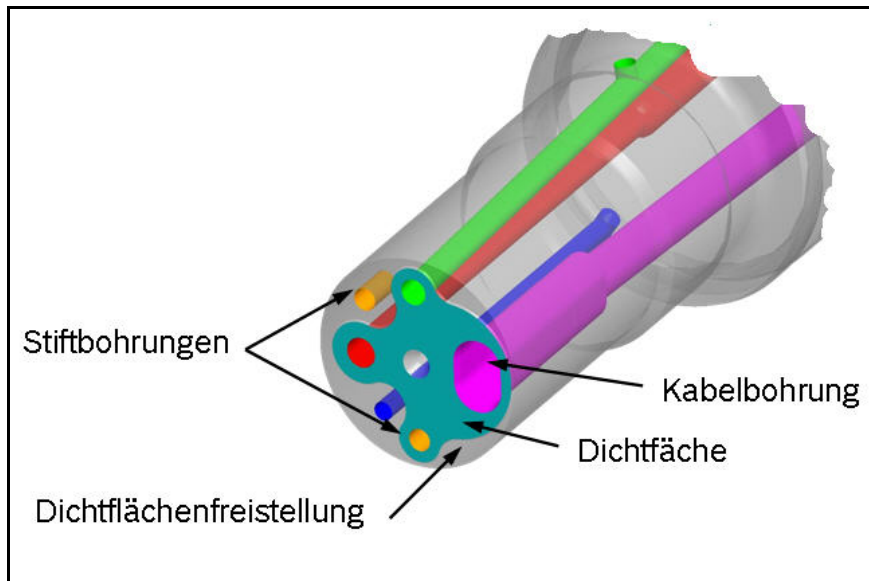


Abbildung 46: Haltekörperdichtfläche mit Stiftbohrungen

Zusammenfassend können mit der Analyse des Teilespektrums und den dazugehörigen Fertigungszeichnungen die notwendigen Fertigungsschritte wie folgt festgelegt werden.

- alle Tiefbohrungen herstellen
- Fräsoperationen
- Stiftlochbohrungen
- Dichtkontur
- Schlüsselfläche
- Kabelbohrung

4.2 Prozessversuche Kühlschmierstoff für Tiefbohren

4.2.1 Einleitung und Allgemeines

Grundsätzlich gibt es beim Tiefbohren in hochfesten Werkstoffen zwei Möglichkeiten die Werkzeugschneide zu schmieren und zu kühlen. Die Mindermengenschmierung bietet den Vorteil einer Quasi-Trockenbearbeitung, Ölverschleppungen und die Gefahr eines Brandes durch zu hohe Wärmeentwicklung ist nahezu auszuschließen. Allerdings entsteht durch das Fehlen eines Fluids mit hoher spezifischer Wärmekapazität ein Medium das die entstehende Prozesswärme ableitet, und es resultiert ein höher Wärmeeintrag in das Werkstück.

Bei der Verwendung eines Tiefbohröls ist eine optimale Schmierwirkung gegeben, allerdings ist wegen der erhöhten Brandgefahr ein Löschanlage vorzusehen. Durch die Benetzung von Werkstück und Späne mit Tiefbohröl sind zusätzliche Reinigungseinrichtungen im Teilefluss zu integrieren, ansonsten werden die Kühlschmierstoffe der in der Bearbeitungskette folgenden Maschinen verunreinigt und unbrauchbar.

In Zusammenarbeit mit der Versuchsabteilung der Firma BOTEK wurden Standwegversuche zur Festlegung des Kühlschmierstoffes durchgeführt. Dabei werden in ein zylinderförmiges Rohmaterial so viele Bohrungen gebohrt, bis das Verschleißkriterium (Schneidkantenausbruch) erreicht ist und dabei die Anzahl der Bohrungen dokumentiert.

Das Verschleißkriterium, wie im unten angeführten Bild, ist der Schneidkantenausbruch. Es ist ein Einlippenwerkzeug am Ende seiner Standzeit abgebildet. Hierbei ist der Ausbruch der Schneidecke deutlich ersichtlich.

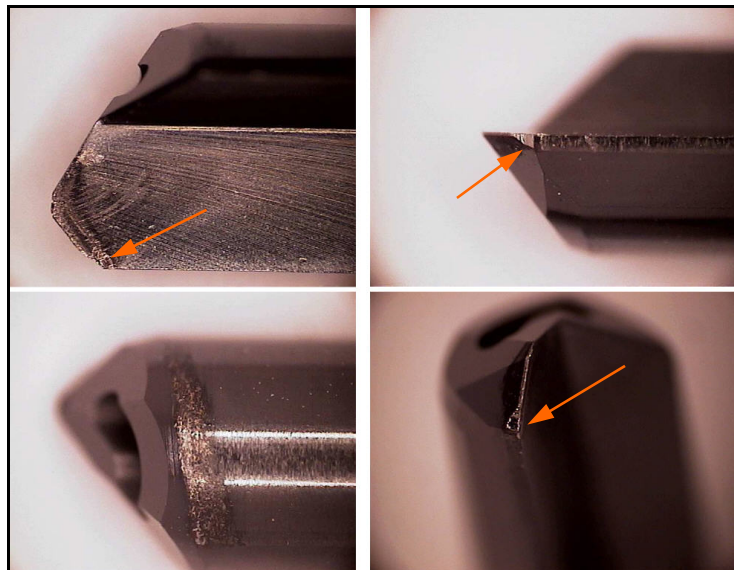


Abbildung 47: ELB am Ende der Standzeit

4.2.2 MMS – Standwegversuch

Hierbei wurden Tiefbohrungen mit den unten angeführten Parametern in ein zylindrisches Werkstück gebohrt. Da wurde die Anzahl der gefertigten Bohrungen festgehalten und daraus der Standweg errechnet. Dieser Versuch wurde mit fünf Werkzeugen wiederholt

Standwegversuch - MMS		Werkzeugnummer	gefertigte Bohrungen	Standweg [m]
Werkstück	Dummy DM 48x128	1	62	7,94
Werkstoff	50 CrMo4 37 HRC	2	30	3,84
Bohr-Ø	2,5 mm	3	83	10,62
Bohrtiefe	128 mm	4	22	2,82
Kühlschmierstoff	Oest Meba SP 43 EZ	5	45	5,76
Lutdruck	10 bar	Mittelwert Standweg: 6,20 Standardabweichung 3,15		
Werkzeug	Typ 113-HP, Ø2,5 x 180mm HM HP1 Anschliff SA-0504			
Schnittgeschwindigkeit	Vc= 50 m/min			
Drehzahl	n= 6300 U/min			
Vorschub	f= 0,03 mm/U vf= 189 mm/min			

Tabelle 8: MMS Standweg

4.2.3 Tiefbohröl – Standwegversuch

Bei diesem Versuch entspricht die Vorgehensweise exakt derjenigen aus dem Versuch mit MMS, allerdings wurde Tiefbohröl als Kühlschmierstoff eingesetzt.

Standwegversuch - Tiefbohröl		Werkzeugnummer	gefertigte Bohrungen	Standweg [m]
Werkstück	Dummy DM 48x128	1	251	32,13
Werkstoff	50 CrMo4 37 HRC	2	220	28,16
Bohr-Ø	2,5 mm	3	188	24,06
Bohrtiefe	128 mm	Mittelwert Standweg: 28,12 Standardabweichung 4,04		
Kühlschmierstoff	Tiefbohröl Fuchs Ecocut 515			
Öldruck	140 bar			
Werkzeug	Typ 113-HP, Ø2,5 x 180mm HM HP1 Anschliff SA-0504			
Schnittgeschwindigkeit	Vc= 70 m/min			
Drehzahl	n= 8900 U/min			
Vorschub	f= 0,073 mm/U vf= 650 mm/min			

Tabelle 9: Tiefbohröl Standweg

4.2.4 Diskussion

Der Standweg mit Tiefbohröl ist wesentlich höher als der Standweg bei der Versuchsbearbeitung mit MMS. Auch ist die Streuung der Werte bei der Ölbearbeitung wesentlich geringer. Die großen Abweichungen der Standwege beim Versuch mit MMS ist auf die große Sensibilität eines Mindermengenschmiersystems zurückzuführen. Alle Parameter müssen hier optimal aufeinander abgestimmt werden um stabile Prozesse zu erhalten.

Wegen dieser beiden großen Nachteile bei der MMS wird der Prozess Kühlschmierstoff für Tiefbohren bei Bosch in Hallein mit Tiefbohröl festgelegt.

4.3 Prozessversuch gestuftes Tiefbohren am Bearbeitungszentrum

4.3.1 Einleitung

Beim gestuften Bohren am Bearbeitungszentrum entsteht prozessbedingt durch den kleineren Werkzeugdurchmesser des Folgewerkzeuges eine Stufe in der Bohrung. Bei Leckage und Kabelbohrungen ist dies wegen der geringen Beanspruchung des Werkstoffes von geringer Relevanz. Hingegen bei hochdruckführenden Bohrungen kann dies bedingt durch die Kerbwirkung zu einem Versagen des Bauteils führen.

Um den Einfluss dieser Stufe auf die Dauerfestigkeit bewerten zu können, wurde einerseits die Kontur einer solchen Bohrungsoberfläche vermessen und andererseits eine finite Elemente Analyse durch die Entwicklungsabteilung der Firma Bosch durchgeführt.

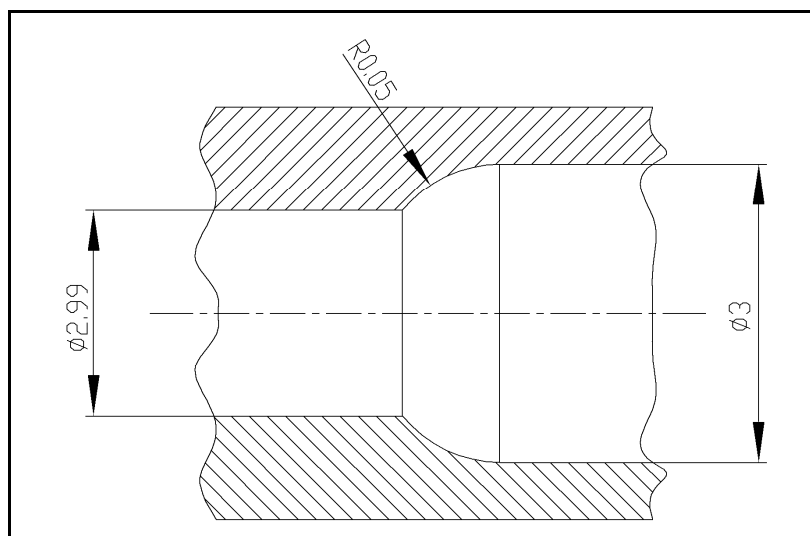


Abbildung 48: Fertigungsbedingte Stufe beim Tiefbohren am BAZ

4.3.2 Messung der Profiltiefe einer Stufenbohrung

Da die Größe der Stufe bei der radialen Messung nur ca. 0.005 mm beträgt und deren Messung sich als sehr schwierig herausstellte, wurden mehrerer Werkstücke vermessen. Es wurden vier Werkstücke mit einer solchen Stufenbohrung gefertigt aufgefräst und vermessen

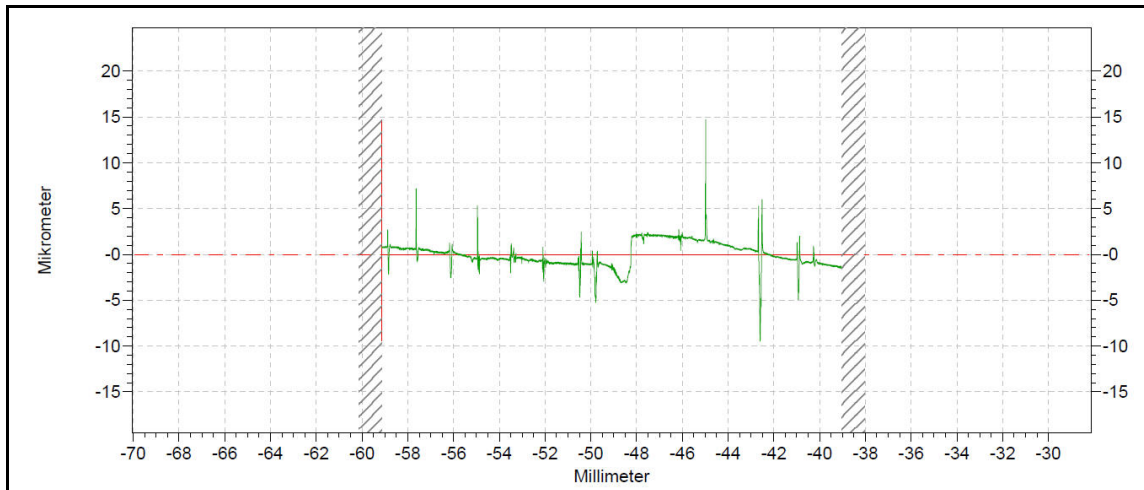


Abbildung 49: Pt-Aufzeichnung über eine Stufe

In der Oberflächenaufzeichnung ist die Stufe, die durch das im Durchmesser kleinere Folgewerkzeug entsteht, deutlich ersichtlich. Obwohl sich die Werte im Toleranzbereich befinden, wurde von der Entwicklungsabteilung eine FEM Analyse durchgeführt.

Messung Profiltiefe	
Nummer	Pt [μm]
1	24,16
2	13,45
3	10,05
4	10,18

Tabelle 10: Pt-Messung

4.3.3 FEM Rechnung

Für die FE – Rechnung wurde ein Innendruck von 2500 bar angenommen und die Größe der Stufe für den Fall der völligen Deaxierung mit 0.01mm angenommen. Basis für diese Modellannahmen sind einerseits die Messungen der Profiltiefe und andererseits die große Erfahrung der Berechnungsabteilung, die ihre Berechnungsergebnisse ständig durch praktische Hochdruckpulsversuche überprüft.

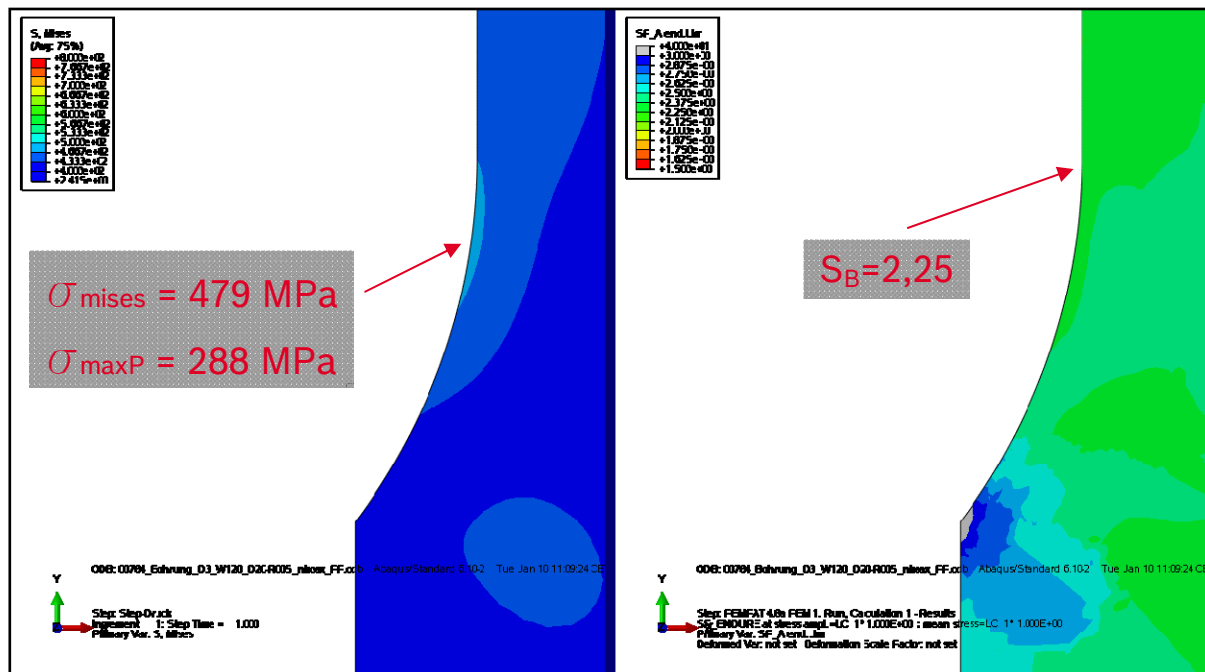


Abbildung 50: FEM Rechnung Stufe

4.3.4 Diskussion

Die Simulation der Spannungsverhältnisse im Inneren der Hochdruckbohrung hat ergeben, dass die fertigungsbedingte Stufe einen sehr geringen Einfluss auf die Dauerfestigkeit hat. Man geht davon aus, dass die Bauteile im Pulsversuch keine Ausfallerscheinungen zeigen werden.

Die maximale Vergleichsspannung nach Mises $\sigma_{\text{mises}} = 479 \text{ MPa}$ und die maximale Normalspannung $\sigma_{\text{maxP}} = 288 \text{ MPa}$ bewegen sich in einem dauerfesten Bereich. Die Sicherheit gegen Dauerbruch $S_B=2.25$ ist völlig ausreichend für diesen Anwendungsfall und den Haltekörperwerkstoff.

Es wird aber vor dem endgültigen Einführen dieser neuen Bearbeitungstechnologie eine Pulsversuch durchgeführt um ein späteres Versagen mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschließen zu können.

5 Maschinenbewertung

5.1 Definition der Auswahlkriterien

Aus den oben gewonnenen Daten ergeben sich folgenden Hauptanforderungen, die die Maschine erfüllen muss.

- **Vollwertige 5 Achs Maschinenlinematik**

In einem Haltekörper befinden sich bis zu vier unterschiedliche Tiefbohrungen. Sie variieren in der Anbohrposition, dem Winkel und dem Bohrungsdurchmesser. Da sich einige Bohrungen doppelte Schräg im Raum befinden, ist es notwendig, eine 5 Achs Bearbeitung durchführen zu können. Eine schräge Aufspannung des Bauteils durch Vorrichtungen ist wegen der geringen Stückzahl, der hohen Teilevielfalt und der eingeschränkten Flexibilität nicht vorteilhaft.

- **40 Fach Werkzeugwechselmagazin für Fräswerkzeuge**

Wie schon vorher beschrieben machen es die engen Bauteiltoleranzen notwendig, neben den Tiefbohroperationen noch andere Fräs- und Bohrbearbeitungen durchzuführen. Bei der Durchsicht des Teilespektrums inklusive Konstruktionszeichnung und viel Fertigungswissen des Fachpersonals bei Bosch Hallein wurde die Anzahl der notwendigen Werkzeugplätze mit 40 Stück festgelegt.

- **verschiedene Tiefbohrdurchmesser**

In einem Bauteil befinden sich maximal vier unterschiedliche Tiefbohrungen, diese sollten alle in einer Spannung gefertigt werden. Berechnet man noch einen Durchmesser als Reserve hinzu, so ergeben sich fünf unterschiedliche Bohrungsdurchmesser. Der Durchmesserbereich beginnt mit Durchmesser 2 mm und endet mit Durchmesser 7 mm. Diese Informationen sind für die Auslegung der Tiefbohrereinheit notwendig, einerseits bestimmen sie die Schnittleistung, andererseits gibt das Tiefbohrwerkzeug den erforderlichen Kühlschmierstoffdruck vor.

- **3 D Tastsystem und Ausrichtautomatik**

Oft ist es nicht möglich, den Spannfehler so zu minimieren, dass ein prozesssicheres Ergebnis erzielt wird. Die Reduzierung des Spannfehlers fordert oft aufwändige und teure Vorrichtungen oder eine sehr enge Toleranzeinschränkung bei der vorhergehenden Bearbeitung. Da diese Maßnahme bei keinen Stückzahlen oft sehr unwirtschaftlich sind, ist es erforderlich, jedes Bauteil nach dem Spannvorgang neu im Arbeitsraum der Maschine einzumessen und somit den neuen Werkstücknullpunkt individuell für jedes Werkstück festzulegen. Mit einem 3 D Tastersystem und einer Ausrichtautomatik kann dieser Vorgang CNC gesteuert durchgeführt werden, und die Wirtschaftlichkeit eines Ausrichtvorgangs wird durch Verkleinerung der Nebenzeiten erhöht.

- **20 m Standweg beim Einlippenbohrer**

Für die erfolgreiche Fertigung einer Tiefbohrung ist eine optimale Abstimmung der folgenden Einflussfaktoren nötig. Die Maschine muss die erforderlichen Steifigkeiten und Genauigkeiten aufweisen, Kühlschmierstoff und Kühlschmierstoffpumpe müssen aufeinander abgestimmt werden. Zusätzlich ist das Werkzeug noch an das Kühlschmierstoffsystem anzupassen. In Anlehnung an die Standwegversuche ist ein Standweg von 20m festgelegt worden, den der Maschinenhersteller erfüllen muss.

- **CO₂ Löschanlage**

Da der Prozess mit Tiefbohröl festgeschrieben wurde und Tiefbohröl bzw. Ölnebel ein sehr leicht entzündliche Substanz darstellen, schreiben die Brandschutzmaßnahmen bei Bosch in Hallein einen vollautomatische Löschanlage auf CO₂ Basis vor.

- **Maximale Werkstückgröße Ø130x600**

Das größte am Teilespektrum vorhandene Werkstück wird als Basis für die Berechnung der maximalen Verfahrswege der Maschine herangezogen.

5.2 Marktanalyse

Mit dem aus dem Prozessanalyseergebnis resultierenden Lastenheft, ist nun eine einheitliche Datenbasis geschaffen, mit der es möglich ist bei den unterschiedlichsten Maschinenherstellern einheitliche und vergleichbare Angebote und Konzeptvorschläge einzuholen. Grundsätzlich gibt es für diesen flexiblen Anwendungsfall zwei verschiedene Konzepte, die Anforderungen aus dem Lastenheft erfüllen.

5.2.1 5 – Achs - Bearbeitungszentrum in Öl mit vertikaler Spindel

Ein BAZ mit drei gesteuerten Linearachsen und zwei gesteuerten Schwenkachsen erfüllt die Anforderungen an die Maschinenkinematik. Weiters muss das Bearbeitungszentrum in ihrer Bauart noch eine vertikal liegende Werkzeugspindel besitzen, ansonsten ist ein gestuftes Tiefbohren wegen des großen Werkzeugdurchmessers bei langen Einlippenwerkzeugen nicht möglich. Das Folgewerkzeug kann nicht mehr automatisch in die Pilotbohrung eingeführt werden. Bei der genauen Analyse eines BAZ für den Einsatz zum Tiefbohren haben sich folgende Vor und Nachteile herauskristallisiert.

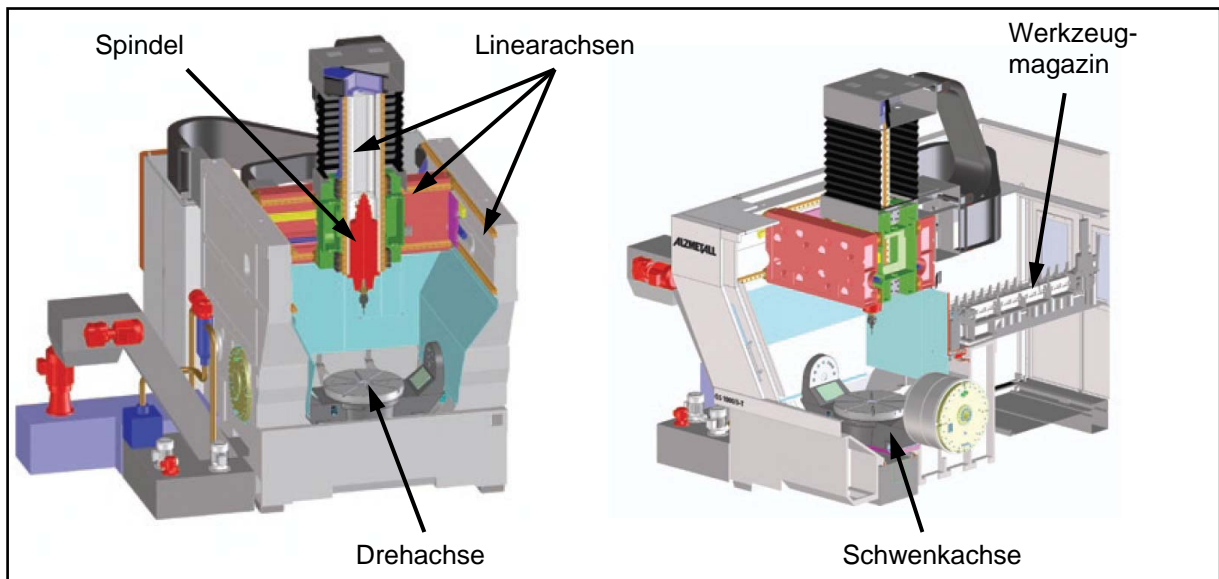


Abbildung 51: Aufbau BAZ Alzmetall³⁹

- **Vorteile:**

höhere Dynamik

Bearbeitungszentren sind in der Regel für den industriellen Großserieneinsatz ausgelegt. Sie besitzen sehr leistungsfähige Achsantriebe, und der automatische Werkzeugwechsel nimmt sehr wenig Zeit in Anspruch.

größerer Schwenkbereich im 5 – Achs - Bereich

Großteil sind Bearbeitungszentren für eine vollwertige Fünfseitenbearbeitung konzipiert. Die Schwenkachse kann meist über die Vertikale schwenken. Dies bietet erhöhte Flexibilität in der Fertigung, und es können viele Bearbeitungsschritte in einer Aufspannung ausgeführt werden.

³⁹ Alzmetall GS 1000 Broschüre 09/2008 Seite 3

- **Nachteile:**

geringerer Kühlschmierstoffdruck

Für die meisten Zerspanungsaufgaben an Bearbeitungszentren sind Kühlschmierstoffdrücke von ca. 80 bar völlig ausreichend. Wegen des hohen Druckverlustes durch das Einlippenwerkzeug beim Tiefbohren und der notwendigen Menge für den Späneabtransport ist die für diese Tiefbohraufgaben zu gering. Dies macht den Einsatz einer Sonderspindel mit einer Druckbeständigkeit von bis zu 160 bar erforderlich

Pilotbohrungen nötig

Prozessbedingt ist beim Tiefbohren am BAZ eine Pilotbohrung nötig. Diese herzustellen erfordert Zeit und Werkzeuge. Damit steigt die Gesamtbearbeitungsdauer zu Herstellung einer Tiefbohrung

Bohrwerkzeuge in unterschiedlichen Längen bei einer Bohrung notwendig

Da die maximale freie ungeführte Werkzeuglänge beim gestuften Tiefbohren nur ca. 40 mal dem Bohrungsdurchmesser betragen darf, sind für tiefere Bohrungen mehrere Werkzeuge nötig. Diese Werkzeuge müssen beschafft werden, und der zusätzliche Werkzeugwechsel erhöht die Bearbeitungsdauer

Begrenzte Werkzeuglänge im Magazin

Die meisten Bearbeitungszentren haben eingeschränkten Bauraum im Werkzeugwechselmagazin. Die maximale Werkzeuglänge im Magazin ist somit beschränkt. Lange Werkzeuge müssen manuell eingewechselt werden.

Arbeitsraum muss wegen Werkzeuglänge wesentlich größer sein

Stellt man am Bearbeitungszentrum eine Tiefbohrung her, so muss der Arbeitsraum der Maschine mindestens doppelt so groß sein wie die Bohrungstiefe. Dies ergibt sich aus der Summe von Werkstücklänge und Werkzeuglänge.

5.2.2 Tiefbohrzentrum mit Fräsoption

Ein anderes Maschinenkonzept für diese Anwendung ist ein Tiefbohrzentrum mit Fräsoption. Es besteht aus einer Tiefbohrereinheit, die in alle fünf Achsen zum Werkstück beweglich ist. Diese Maschinen werden mit großer Beliebtheit im Formenbau verwendet. Sollte diese Maschine nun zum Fräsen verwendet werden, wird anstatt des Spänekastens der Tiefbohrereinheit ein Fräskopf eingewechselt. Da die Schwenkachse (A-Achse) der Tiefbohrereinheit konstruktionsbedingt nicht mehr als $\pm 25^\circ$ schwenken kann, ist mit diesem Maschinenkonzept keine vollwertige Fünfseitenbearbeitung möglich.

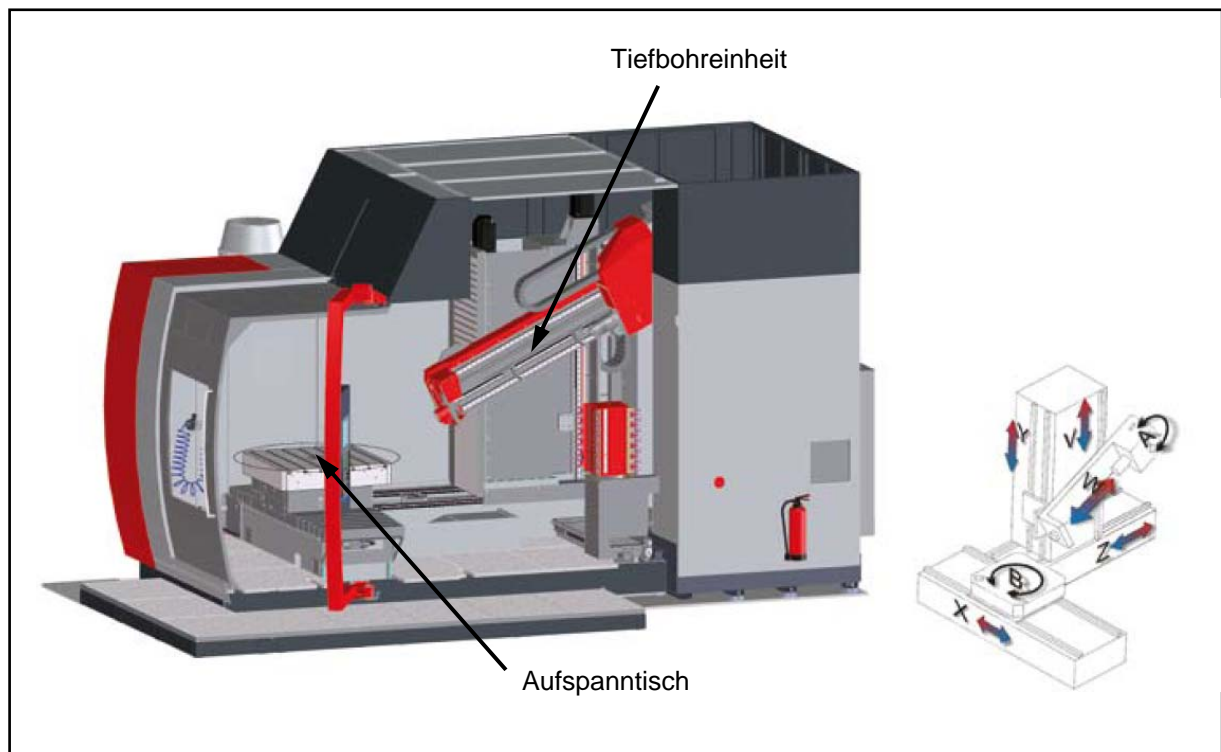


Abbildung 52: Tiefbohrzentrum mit Fräsoption⁴⁰

⁴⁰ Samag TFZ Baureihe Broschüre Hamburg 04/2010

- **Vorteile:**

optimale Bohrwerkzeugführung

Der Einlippenbohrer ist durch die Tiefbohrereinheit optimal geführt und gestützt. Beim Anbohrvorgang wird das Werkzeug durch die Bohrbuchse geführt, länger Werkzeuge werden in der Tiefbohrereinheit durch mitfahrende Lünetten zusätzlich geführt.

ein Werkzeug für unterschiedliche Bohrtiefen

Durch die Führung des Werkzeuges können mit einem Werkzeug die unterschiedlichsten Bohrtiefen hergestellt werden. Ein Ausknicken durch Vorschubkräfte oder ein Aufschwingen des Werkzeuges ist durch die Lünettenführung nicht möglich.

ausreichend Kühlschmierstoffdruck vorhanden

Kleine Werkzeugdurchmesser erfordern sehr hohe Kühlschmierstoffdrücke. Die Kühlschmierstoffanlage eines Tiefbohrzentrums ist bereits drauf ausgelegt.

Bohrprozess auch mit Pilotbohrung möglich

Durch die zusätzliche Fräsoption können auch Tiefbohrungen mittels Pilotiertechnik hergestellt werden. Dies kann für sehr kleine Stückzahlen durch das Einsparen der Bohrbüchse einen wirtschaftlichen Vorteil bedeuten.

Maschinenhersteller hat Erfahrung im Bereich Tiefbohren

Die Kernkompetenz eines solchen Maschinenhersteller liegt beim Tiefbohren, daher kann man in der Regel davon ausgehen, dass alle Tiefbohrprozesse beherrscht werden.

- **Nachteile:**

kostenintensiver Bohrstangenwechsler

für einen automatischen Wechsel der langen Tiefbohrwerkzeuge ist ein eigener Bohrstangenwechsler vorgesehen. Dieser Wechsler ist sehr teuer, andererseits ist die manuelle Wechselzeit sehr groß und eine Wirtschaftlichkeit sehr bald gegeben.

Geringe Zerspanungsleistung

Tiefbohrzentren sind im Aufbau nicht so steif wie Bearbeitungszentren und die Antriebsleistung der Spindel ist wegen des nicht so leistungsintensiven Tiefbohrprozess geringer als beim BAZ. Das Zerspanungsvolumen beim Fräsen ist deshalb im Vergleich zu moderen Bearbeitungszentren als eher gering einzustufen.

Sonderbohrbüchse notwendig

Bei schrägen Bohrungen sind für jeden Winkel technologiebedingt eigene Bohrbüchsen anzufertigen. Die Herstellung dieser Bohrbüchsen kostet oft viel Zeit und schränkt somit die Reaktionszeit eines Tiefbohrzentrums ein.

5.2.3 Maschinenhersteller

Um für den Anwendungsfall bei Bosch in Hallein das beste Konzept zu finden wurden bei mehreren verschiedenen Herstellern Angebote eingeholt. Hierfür wurde mit drei Herstellern von Bearbeitungszentren und vier Herstellern von Tiefbohrzentren angefragt. In der folgenden Matrix sind alle Lieferanten aufgelistet und die wichtigsten Kriterien der einzelnen Maschinekonzepte festgehalten.

Hersteller	Alzmetall	DMG	Mazak	Imser	Buck	TBT	SAMAG
Maschinenkonzept	Bearbeitungszentrum (BAZ)			Tiefbohr-Fräszentrum			
Typ	GS1000/5-T	DMU 80 P	VARIAxis 700	MF1000/2F	TB 800	BW200-H	Sonder / Prototyp
Maschinenart	Fräse	Fräse	Fräse	Fräse / Tiefbohr	Fräse / Tiefbohr	Fräse / Tiefbohr	Fräse / Tiefbohr
Max Werkzeuglänge Werkzeugwechsler	sonder 400	470	360	250	400	300	
Kapa Werkzeugwechsler	66	120	30	12	60	60	
Kapa TB Wechsler	x	x	x	x	6	12	x
Aufnahme	HSK-63	HSK-63	SK 40	SK 40	SK 40	HSK-63	
Steuerungsart	Heidenhain	Siemens	Mazatrol	Heidenhain	Heidenhain	Siemens	
Lieferzeit	4 Monate	8 Monate	6 Monate	12 Monate	6-8 Monate	min 10 Monate	min 12 Monate
Fräseigenschaften / Test	siehe Versuche	nicht durchgef.	nicht durchgef.	nicht durchgef.	nicht durchgef.	siehe Versuche	
Bohreigenschaften ELB / Test	siehe Versuche	nicht durchgef.	nicht durchgef.	nicht durchgef.	nicht durchgef.	siehe Versuche	
Kühlschmierstoff	Öl	Öl	Öl	Öl	Öl / Emulsion	Öl / MMS	Öl
Kühlmitteldruck [bar]	150	80	70	bis 210	120	160	
Geo. Nähe / Ersatzteilservice [km]	80	300	München	700	300	400	900
Preis ca. €	500.000	715.000	270.000 (Basis)	500.000	520.000	800.000	350.000 (Basis)
Bohrspindleleistung [kW]	nicht vorhanden	nicht vorhanden	nicht vorhanden	7	11	11	
Bohrspindeldrehzahl [1/min]	nicht vorhanden	nicht vorhanden	nicht vorhanden	10000	10000	8000 / 12000	
Spindleleistung [kW]	40	29	22	7	11	11	
Spindeldrehzahl [1/min]	18000	18000	18000	4000	10000	8000 / 12000	
NC Achsen	5	5	5	5	7	6	
Höhe [mm]	3400	3500	3457	2885	2300	3000	
Länge / Breite [mm]	4759 / 2250	5700 / 3700	2400 / 4121	5000 / 2500	3500 / 2700	6850 / 5100	
Aufstellfläche [m²]	30	20,3		30		51	
Verfahrweg x [mm]	800	800	630	1400	800	1050	
Verfahrweg y [mm]	800	1050	1100	700	650	600	
Verfahrweg z [mm]	600	800	600	500	1000	800	
Schwenkbereich 4 Achse (Schwenkjoch)	+/- 120	120 / -22,5	-120/+30	+/- 22,5	+/- 20	+/- 25	
Schwenkbereich 5 Achse (Rundtisch)	360	360	360	360	360	360	
Tastersystem / Ausrichtautomatik	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
Beschleunigen im Eingriff	Sonderprogramm	keine Info	keine Info	Sonderprogramm	Sonderprogramm	Sonderprogramm	
Werkzeugwechselzeit [s]	2	keine Info	3,6	keine Info	keine Info	5	
Überlange Werkzeuge / Platz	nein	nein	nein	x	x	x	
Ergonomie	gut	bedingt	sehr gut	keine Bewertung	keine Bewertung	Tisch sehr hoch	
CO2 Löschanlage	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
Maschinengewicht	15,5	15,5	15	14	14	15	
Garantie	12	12	12	12	12	12	
Wartung	ausziehbar						

Tabelle 11: analysierte Maschinenhersteller

Die beiden Hauptkriterien bei der Auswahl sind die Lieferzeit, sie sollte so kurz als möglich sein und die Kosten sich im wirtschaftlichen Bereich bewegen.

5.3 Versuchs- und Abnahmeteile

Um die Bearbeitungseigenschaft einer Maschine bewerten zu können, ist es notwendig Versuchsteile zu fertigen. Diese Versuchsteile sollten alle notwendigen Bearbeitungsschritte beinhalten.

5.3.1 Fräsen und Tiefbohren

Für die Bewertung der beiden Eigenschaften wurde in enger Zusammenarbeit mit der Fertigung ein Versuchsteil konstruiert. (Abbildung 61: Zeichnung Versuch - Fräsen) Es ist dem normalen Fertigungsablauf im Musterbau bei Bosch in Hallein angepasst.

Es besteht aus dem gleichem Werkstoff, aus dem Haltekörper in Hallein gefertigt werden. Die Vorstufe dieses Werkstücks wird in einem ersten Schritt am Außendurchmesser überdreht und mit zwei Sacklöchern versehen. Die Vorstufe wird dem Lieferanten in dieser Form zur Verfügung gestellt, und die Testbearbeitungen können durchgeführt werden. Die beiden Sacklöcher (grün in Abbildung 53: Vorstufe) simulieren die Stiftbohrungen im Haltekörper über welche normalerweise die Einspritzdüse am Injektor in der Drehlage exakt positioniert wird. In den meisten Fällen wird bei der Haltekörperherstellung vorher gedreht und danach gefräst. Wird nun aber die Drehbearbeitung am Bearbeitungszentrum mit zusätzlicher Fräsbearbeitung durchgeführt, und das Bauteil ist nicht mehr völlig rotationssymmetrisch, so dienen diese Stiftbohrungen meist als Referenz in der Drehlage für die folgenden Bearbeitungsschritte.

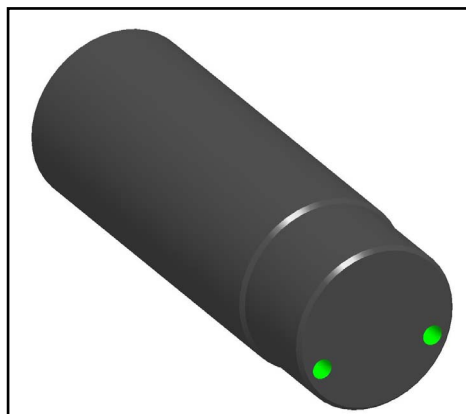


Abbildung 53: Vorstufe

Diese beiden Stiftbohrungen dienen nun als Bezug für alle folgenden Bearbeitungen. Beim Versuch muss also das Vorstufenbauteil nach dem Spannen mit der Ausrichtautomatik vermessen und seine Nullpunktlage korrigiert werden. Somit ist es, möglich über die folgenden Bohrungen die Qualität der Ausrichtung zu bestimmen.

Weiters beinhaltet das Versuchsteil mehrere Tiefbohrungen. Sie dienen zum Überprüfen der Positionsgenauigkeit der Maschine, der Tiefbohreigenschaften und dem schrägen Bohren im Raum. Zusätzlich sind am Versuchsteil noch zwei Flächen eingezeichnet. Mit diesen Flächen sollen die Fräseigenschaften bewertet werden.

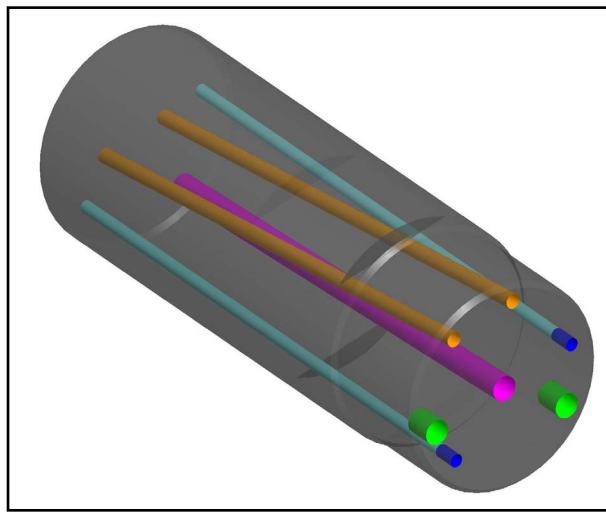


Abbildung 54: Bild Versuchsteil Fertigteil

5.3.2 Machbarkeit Standweg und Bohrungsverlauf

Bei der Analyse des Teilespektrums kristallisierten sich zwei Tiefbohrfälle heraus, die selbst in punkto Verlauf und Bohrtiefe für ein Tiefbohrzentrum keine leichte Bearbeitungsaufgabe sind. Diese beiden Tiefbohrungen wurden als Referenz für die Konstruktion dieses Versuchsteils herangezogen. (Abbildung 62: Zeichnung Versuch TiBo 2.5 / 5 mm)

Dabei werden in einem vorbearbeiteten Rohling achsparallele Tiefbohrungen gebohrt. Damit sollte der Standweg, die Machbarkeit und der Bohrungsverlauf bewertet werden. Mit fortschreitendem Werkzeugverschleiß verschlechtert sich auch der Bohrungsverlauf. Kriterium ist: Es sollte auch noch nach 20 m Bohrweg der Verlauf in Toleranz bleiben.

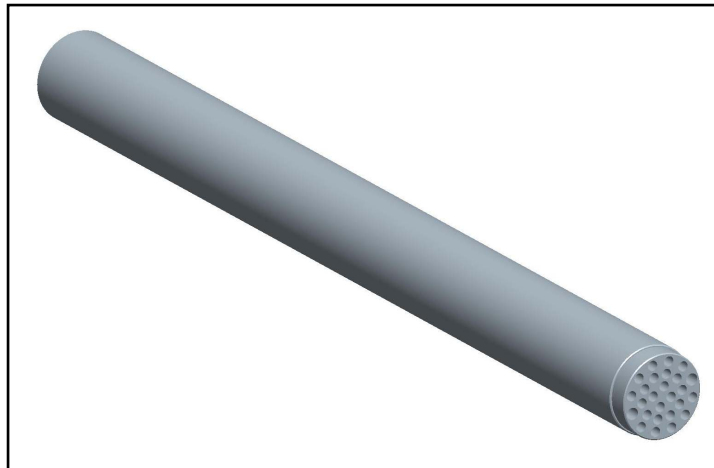


Abbildung 55: Standweg Versuchsteil

5.3.3 Abnahmeteile

Abnahmeteile sind jene Teile, die bei Fertigstellung der Maschine vom Hersteller gefertigt werden müssen. Mit diesen Teilen und den Messergebnissen wird dann die Fähigkeit der Maschine bewertet.

Als Abnahmeteil werden jene zwei Bauteile festgelegt, welche die beiden am schwierigsten zu bearbeitenden Tiefbohrfälle beinhalten. Der Lieferant erhält die Vorstufe aus der Drehbearbeitung, muss alle Tiefbohrungen bohren und die Dichtkontur fräsen.

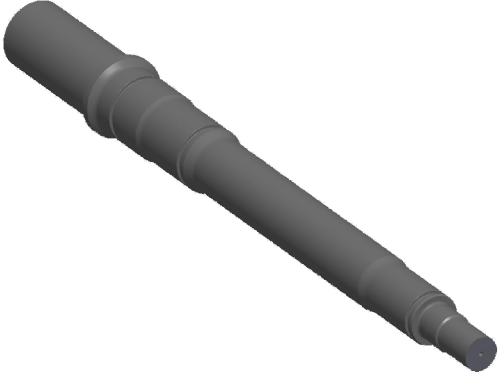
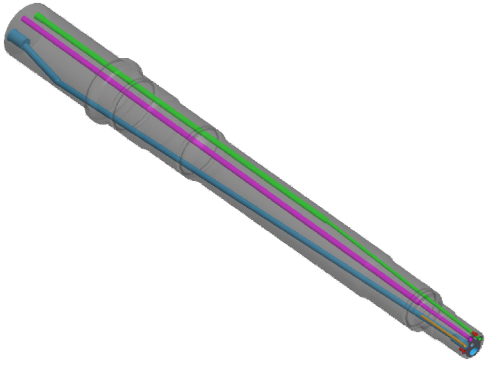
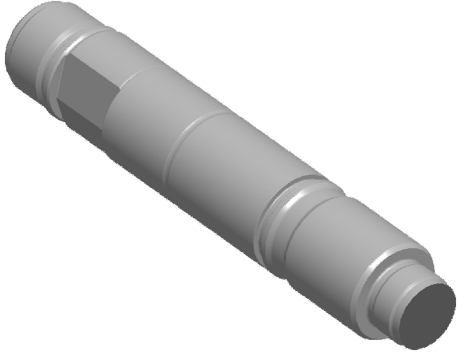
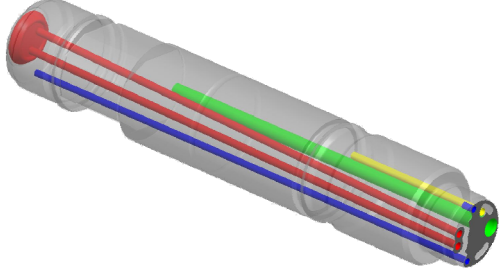
Abnahmeteile	
Vorstufe Drehen	Fertigteil nach Tiefbohrprozess
	
	

Tabelle 12: Abnahmeteile

5.4 Versuchsauswertung

5.4.1 Einführung

In einer Vorselektion der Maschinenhersteller wurde beschlossen, bei der Firma TBT und Alzmetall Bearbeitungsversuche durchzuführen. Eine Durchführung von Versuchen bei allen aufgelisteten Herstellern ist zu Zeit und Kostenintensiv.

5.4.2 Bearbeitungsversuche Alzmetall

Bei dem Maschinenhersteller Alzmetall wurden alle Bearbeitungsversuche in Emulsion durchgeführt, obwohl der Prozess vorher mit Öl festgelegt wurde. Eine Versuchsbearbeitung am BAZ in Öl ist sehr schwierig, da die meisten Zentren in Emulsion ausgeführt werden. Für eine Probearbeitung in Öl müsste die Maschine aufwändig umgebaut werden.

Auf Grund der großen Tiefbohrerfahrung bei Bosch in Hallein und zahlreichen Versuchsergebnissen aus der Vergangenheit wurde Folgendes festgelegt. Der Kühlschmierstoff hat keinen Einfluss auf den Verlauf der Bohrung, bei Verwendung von Tiefbohröl erhöht sich der Standweg üblicherweise um den Faktor 20.

Bearbeitungsparameter

Es wurden drei Versuchstücke mit folgenden Bearbeitungsparametern hergestellt und vermessen

Alzmetall / Versuch-Fräsen	
Maschine	GS1000/5-T
Werkstück	Versuch-Fräsen
Werkstoff	50CrMo4 37 HRC
Bohr-Ø	lt. Zeichnung
Bohrtiefe	lt. Zeichnung
Kühlschmierstoff	Hebro LUB 565 B 20%
Druck	90 bar
Werkzeug (Botek)	Typ 113-HP DM 2.5,DM 3,DM 5
	HM HP1 Anschliff SA-0504
Schnittgeschwindigkeit	Vc = 70m/min
Drehzahl	entsprechend DM
Vorschub	f = 0,008 mm

Tabelle 13: Bearbeitungsparameter Alzmetall Versuch - Fräsen

Auswertung

Die Auswertung und Vermessung der Versuchsteile erfolgte im Feinmessraum der Firma Bosch in Hallein. Eine genaue Darstellung und Auflistung der Messwerte ist dem Anhang zu entnehmen. (Tabelle 23: Messwerte Alzmetall – Versuch - Fräsen)

Das hier dargestellte Diagramm zeigt den Verlauf der einzelnen Tiefbohrungen am Austrittspunkt.

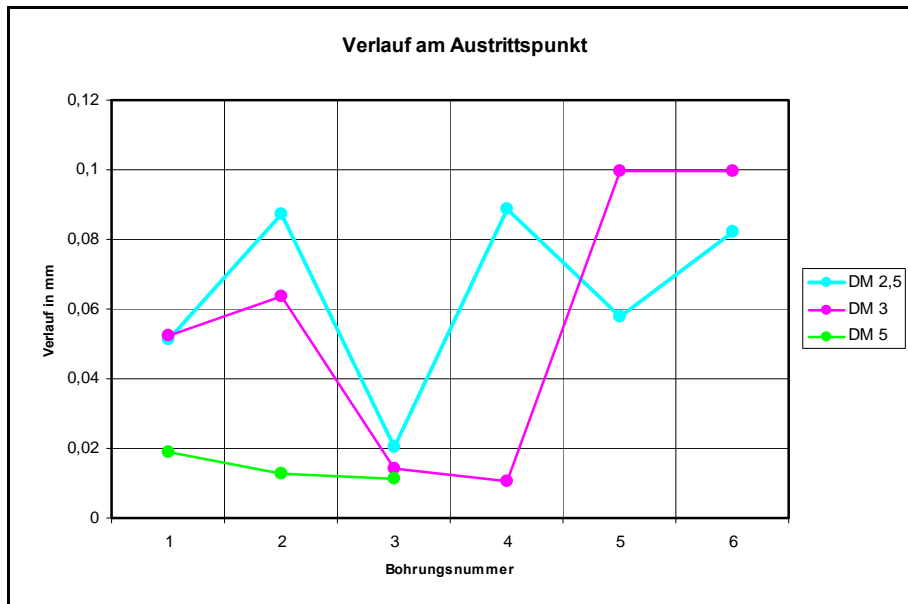


Abbildung 56: Alzmetall Versuch-Fräsen Verlauf am Austrittspunkt

5.4.3 Bearbeitungsversuche TBT

Die Firma TBT ist ein Hersteller von Tiefbohrzentren, ist Vorzugslieferant bei Bosch und bietet ein Tiefbohrzentrum mit Fräsoption an.

Bearbeitungsparameter

Es wurden drei Versuchstücke mit folgenden Bearbeitungsparametern hergestellt und vermessen

TBT / Versuch-Fräsen	
Maschine	TBT - BW200-H
Werkstück	Versuch-Fräsen
Werkstoff	50CrMo4 37 HRC
Bohr-Ø	lt. Zeichnung
Bohrtiefe	lt. Zeichnung
Kühlschmierstoff	Tiefbohröl
Druck	max 150 bar
Werkzeug (TBT)	VHM Highspeed
Schnittgeschwindigkeit	$V_c = 56\text{m/min}$
Drehzahl	entsprechend DM
Vorschub	$f = 0,015\text{ mm}$

Tabelle 14: Bearbeitungsparameter TBT Versuch - Fräsen

Auswertung

Die Auswertung und Vermessung der Versuchsteile erfolgte im Feinmessraum der Firma Bosch in Hallein. Eine genaue Darstellung und Auflistung der Messwerte ist dem Anhang zu entnehmen. (Tabelle 24: Messwerte TBT – Versuch - Fräsen)

Das hier dargestellte Diagramm zeigt den Verlauf der einzelnen Tiefbohrungen am Austrittspunkt.

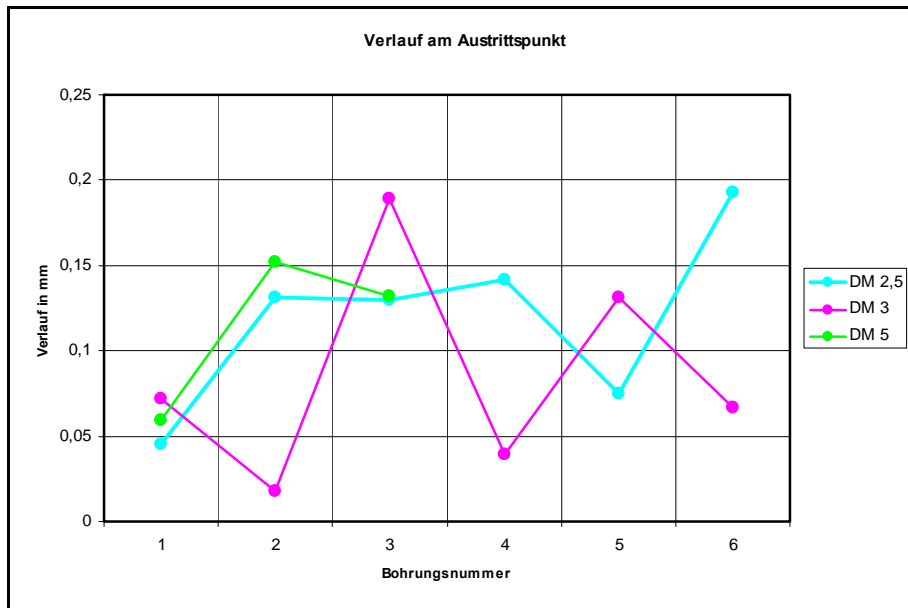


Abbildung 57: TBT Versuch-Fräsen Verlauf am Austrittspunkt

5.4.4 Gegenüberstellung und Diskussion

Die gesamten Mess- und Versuchsergebnisse sind im Anhang vollständig dargestellt. Im Folgenden sind jeweils die gemittelten Messergebnisse aus den einzelnen Versuchsreihen bei den jeweiligen Maschinenherstellern aufgelistet. Sie dienen als vergleichbare Basis für die Punktevergabe bei der folgenden Nutzwertanalyse.

5.5 Nutzwertanalyse

5.5.1 Allgemeines

Projektleiter sind Entscheider. Dabei ist es von großem Interesse, möglichst sicher vorzugehen, denn jede Entscheidung wird den weiteren Verlauf des Projektes positiv oder negativ beeinflussen. Das heißt für das Unternehmen, einen Vorteil sichern oder einen Nachteil mit sich ziehen.

Was auch immer zur Diskussion steht, ob es beispielsweise darum geht, sich vor Projektbeginn für einen Beratungspartner zu entscheiden oder während eines Einführungsprojekts aus verschiedenen Möglichkeiten für den Umstieg in den Echtbetrieb die für ihre Situation beste zu wählen – die Entscheidung hat entsprechende Auswirkungen auf das Projekt und kann letztendlich erfolgsbestimmend sein. Leider gibt es keine vorausschauende Sicherheit: ob richtig

oder falsch, stellt sich erst zu einem späteren Zeitpunkt des Projektes heraus. Es ist jedoch durchaus möglich, mehr Sicherheit in der Entscheidungsfindung zu erreichen. Der Einsatz von Entscheidungsmethoden hat sich hierbei in der Praxis bewährt.

Eine solche Methode, die in der Entscheidungsfindung sehr gute Unterstützung bietet, ist die Nutzwertanalyse. Sie eröffnet einerseits einen anderen Blickwinkel auf diejenigen Kriterien, die schließlich zur Entscheidung führen und verhindert darüber hinaus, dass wichtige Kriterien vergessen werden.

Der große Vorteil, den die Nutzwertanalyse bietet, liegt nicht nur in der Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Entscheidungsfindung begründet. Er liegt auch darin, dass die Kriterien, welche letztendlich eine Entscheidung bestimmen, einer genauen Prüfung unterzogen werden. Dies führt oft zu neuen Erkenntnissen während des Entscheidungsprozesses. Die Konzentration auf die wirklich entscheidenden Faktoren schafft Klarheit. Aufgrund der Zahlendarstellungen wird darüber hinaus eine Vergleichbarkeit hergestellt, die ohne diese Methode nicht gegeben ist. Auf diese Weise werden „Bauchentscheidungen“ deutlich reduziert [9].

5.5.2 Produktionszahlen

Eine weitere wichtige Entscheidungsbasis dieses Projektes ist die Produktionsvorschau für die kommenden Jahre. Dabei wurde in einem ersten Schritt die reine Tiefbohrzeit für das Jahr 2012 ermittelt. Der daraus resultierende Nutzungsgrad ist auch ein wichtiger Aussagefaktor für die projektbezogene Nutzwertanalyse. Auch wurde in (Tabelle 15: Haltekörperfertigung Planung 2012) noch analysiert, für welche Bauteile ein manueller Werkzeugwechsel erforderlich ist. Das bedeutet, das Werkzeug ist länger als die im Magazin maximale Speicherlänge.

Planung 2012										
Injektornummer	Plan 2012	Haltekörper	Bohrungsanzahl	Bohrlänge gesamt	manueller WW	Vorschub	Bearbeitungsdauer	Gesamt	Nebenzeiten	Bohrungen 2012
	Stk			mm		mm/min	min	min	min	Stk
Y431K05547-00	385	C431516819	4	580	N	70	8,29	3190,00	6380,00	1540
Y431K05589-00	100	C431516841	4	520	N	70	7,43	742,86	1485,71	400
Y431K05566-00	90	C431516759	3	400	N	70	5,71	514,29	1028,57	270
Y431K05556-00	90	C431516798	4	350	N	70	5,00	450,00	900,00	360
Y431K05632-00	76	C431516864	4	840	N	70	12,00	912,00	1824,00	304
B444550023-00	70	C444557012	1	300	J	70	4,29	300,00	600,00	70

Tabelle 15: Haltekörperfertigung Planung 2012

Aus der Planung für 2012 ergibt sich eine reine Fertigungszeit für Tiefbohrungen von ca. 300h. Bei einem 2-Schicht-Betrieb der Anlage errechnet sich somit eine Nutzungsgrad einer reinen Tiefbohrmaschine von ca. 10%.

Um die Problematik des nicht automatischen Werkzeugwechsels beim Fertigen am Bearbeitungszentrum erfassen zu können, wurden folgende Auswertungen aufbereitet.

Bei einer qualitativen Analyse des gesamten Bauteilespektrums, errechnete sich ein Anteil von ca. 25% derjenigen Bauteile, bei denen ein manueller Werkzeugwechsel erforderlich ist.

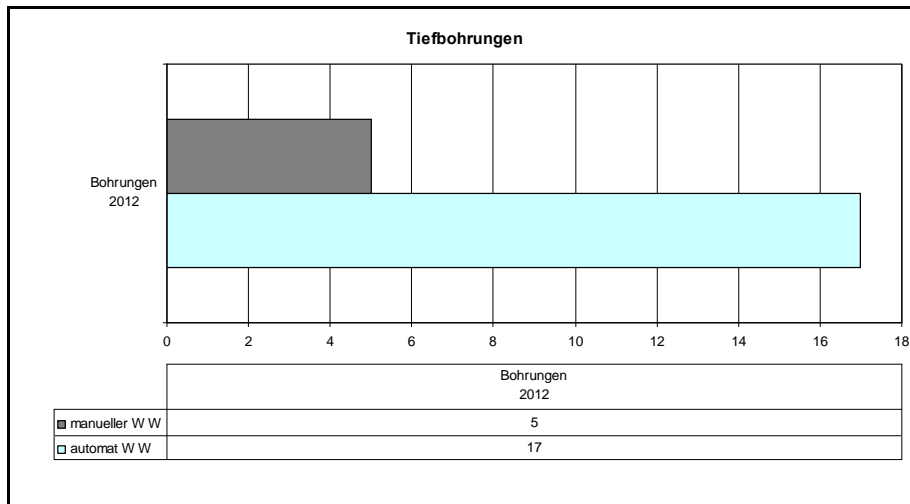


Abbildung 58: Qualitative Anzahl der Tiefbohrungen mit manuellem WW am BAZ

Bei der Auswertung des Datenmaterials auf Basis 2012 ergaben die Berechnungen, dass bei einer Anzahl von ca. 2900 gefertigten Tiefbohrungen ca. 70 Tiefbohrungen einen vorausgehenden manuellen Werkzeugwechsel erfordern.

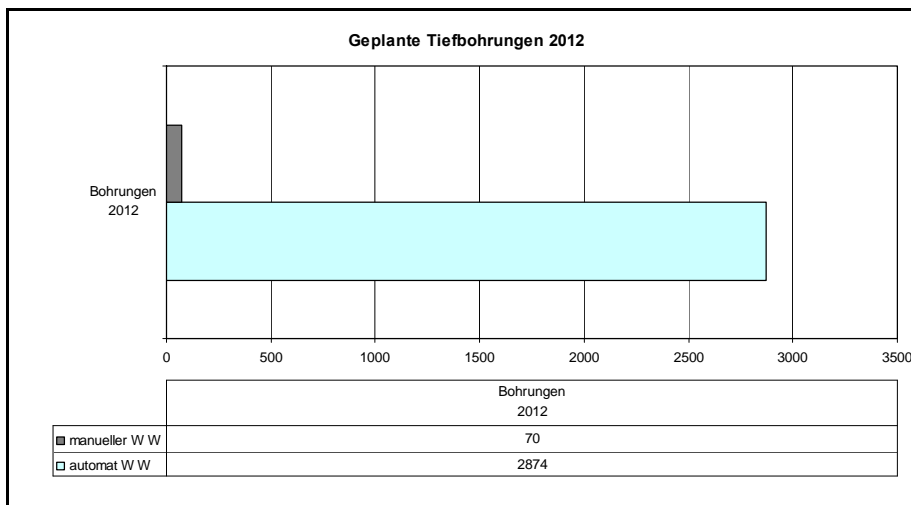


Abbildung 59: Quantitative Anzahl der Tiefbohrungen mit manuellem WW am BAZ

5.5.3 KO – Kriterien

KO – Kriterien sind jene muss Bedingungen, die das Konzept erfüllen muss, um überhaupt einer näheren Bewertung durch die Nutzwertanalyse unterzogen zu werden. Ist eines dieser Kriterien nicht erfüllt, so ist das Maschinekonzept für den Einsatz nicht geeignet und wird nicht mehr weiter verfolgt.

Kriterium	Beschreibung	Alzmetall	DMG	Mazak	TBT	BUCK	IMSER
1	Fertigung des Bauteils in 1 Aufspannung das längste Bauteil muss auf beiden Stirnseiten ohne umspannen bearbeitet werden können	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	Tiefbohrölbeständigkeit Dichtungen und Führungen von BAZ sind nicht immer ölbeständig	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	vollwertige 5-Achs-Maschinen-Kinematik alle Achsen sind NC-Achsen	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	Möglichkeit Bearbeitungsversuch Fertigung der Versuchsteile bis zum Stichtag möglich (Ende KW2/2012)	✓ nur Emulsion möglich	✓ nur Emulsion möglich	✓ nur Emulsion möglich	✓ mit Tiefbohröl	✗ bis zum Stichtag konnte der Lieferant keinen Bearbeitungsversuch durchführen	✗ keine Serienmaschine / Prototyp
5	Bauteilspektrum abgedeckt ist die Fertigung aller geisteten Bauteile möglich	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	Servicequalität in Bezug auf vergangene Projekte und beim aktuellen Projekt	✓	✗ Angebot wird erst KW1 zur Verfügung stehen	✓	✓	✗ Lieferant ist nicht um eine Terminfindung mit dem Kunden bemüht	✓
7	Maschinensteuerung auf Grund der bereits eingesetzten Haidenhein und Siemens Steuerung bei HIP/COS wird keine andere Steuerung verwendet da ansonsten die Flexibilität der MA verloren geht	✓	✓	✗ Mazatrol-Steuerung nicht geeignet für HIP/COS	✓	✓	✓

Tabelle 16: KO – Kriterien Nutzwertanalyse

5.5.4 Gewichtungsfaktoren

Gewichtungsfaktoren sind jene Kriterien, nach denen die Eigenschaften der Maschinen bewertet werden. Da einige Faktoren mehr Aussagekraft besitzen als andere, wird eine Gewichtung der einzelnen Einflussgrößen vorgenommen. Durch paarweisen Vergleich und Festlegung der Wichtigkeit der einzelnen Parameter wird ein systematische Gewichtung der Faktoren erreicht.

A deutlich unwichtiger als B	0
A nicht ganz so wichtig wie B	2
A und B gleich wichtig	4
A etwas wichtiger als B	6
A deutlich wichtiger als B	8

Tabelle 17: Punktevergabe Gewichtung

Die Bewertungsparameter wurden in zwei Hauptgruppen aufgeteilt: In die allgemeinen Kriterien und die versuchsbezogenen Auswertungsfaktoren. Aus der nochmaligen Gewichtung dieser zwei Hauptgruppen errechnet sich dann der Gesamtnutzwert. Durch diese detaillierte Aufschlüsselung der einzelnen Größen erreicht man einen hohen Grad der Nachvollziehbarkeit einer Nutzwertanalyse.

Allgemein

Diese Punkte beinhalten wirtschaftliche Kriterien und auch technische Punkte, deren Bewertung unabhängig vom Versuchsergebnis passierte.

Ermittlung der Gewichtungsfaktoren der Kriterien <u>Allgemein</u>																			
		Bewertungskriterien B															Σ der Bewertungspunkte je Bewertungskriterium	Gewichtungsfaktor	Rangfolge
		Werkzeugmagazin Fräsen	Bewertet wird Magazikapa, max. prozentualer Anteil der Teile die vollautomatisch gefertigt werden können	Werkzeugwechsellzeit ELB für lange Tiefbohrwerkzeug	Spindel	Spindeldrehzahl für Entgratprozesse	Energieverbrauch - Standbymodus	Schwenkbereich 4. / 5. Achse	Reserve im Arbeitsraum	Ergonomie / Steuerung	zugänglichkeit zum Arbeitsraum / Bedienung	Rüstaufwand	Lieferantenbewertung / Vorzugslieferant	Anschaffungskosten lt. Angebot	Nutzungsgrad	Hochlaufdauer / Schlungsaufwand			
Bewertungskriterien A	1	Werkzeugmagazin Fräsen	6	4	4	8	4	4	2	0	2	2	0	0	6	6	48	5,7%	12
	2	Prozentualer Anteil der Teile die vollautomatisch gefertigt werden können	2	4	6	6	2	4	6	2	2	2	2	4	6	6	54	6,4%	9
	3	Werkzeugwechsellzeit ELB für lange Tiefbohrwerkzeug	4	4	4	8	4	2	4	4	4	2	0	0	4	6	50	6,0%	11
	4	Spindel Spindeldrehzahl für Entgratprozesse, Spindelleistung für Fräsaufgaben	4	2	4	6	4	4	4	4	2	4	2	6	6	6	58	6,9%	7
	5	Energieverbrauch - Standbymodus	0	2	0	2	0	0	2	0	4	4	2	0	2	4	22	2,6%	15
	6	Schwenkbereich 4. / 5. Achse	4	6	4	4	8	4	4	2	6	6	4	4	6	6	68	8,1%	4
	7	Reserve im Arbeitsraum (maximale Bauteilgröße künftiger Projekte)	4	4	6	4	8	4	4	4	6	4	2	6	6	8	70	8,3%	3
	8	Ergonomie / Steuerung zugänglichkeit zum Arbeitsraum / Bedienung	6	2	4	4	6	4	4	4	6	4	2	4	6	6	62	7,4%	5
	9	Rüstaufwand	8	6	4	4	8	6	4	4	8	6	4	4	6	8	80	9,5%	2
	10	Lieferantenbewertung / Vorzugslieferant	6	6	4	6	4	2	2	0	8	0	2	4	4	4	52	6,2%	10
	11	Anschaffungskosten lt. Angebot	6	6	6	4	4	2	4	4	2	2	4	6	4	2	56	6,7%	8
	12	Nutzungsgrad	8	6	8	6	6	4	6	2	8	8	6	6	6	6	82	9,8%	1
	13	Hochlaufdauer / Schlungsaufwand erlernen der Technologie im Haus	8	4	8	2	8	4	2	4	4	2	2	6	4	6	62	7,4%	5
	14	Ersatzteilverfügbarkeit / geographische Nähe	2	2	4	2	6	2	2	2	4	4	2	2	4	4	40	4,8%	13
	15	Lieferzeit / Flächenbedarf	2	2	2	2	4	2	0	2	0	4	6	2	4	4	36	4,3%	14
																	840	100%	

Tabelle 18: Gewichtungsfaktoren Allgemein

Tiefbohren und Fräsen

Hier wurde wieder an dem selben Schema wie bei der vorhergehenden Bewertung vorgegangen. Allerdings beziehen hier sich die Einflussgrößen auf die Versuchsauswertung der Bearbeitungsversuche.

Ermittlung der Gewichtungsfaktoren der Kriterien <i>Tiefbohren und Fräsen</i>															
		Bewertungskriterien B									Σ der Bewertungspunkte je Bewertungskriterium	Gewichtungsfaktor	Rangfolge		
		keine Stufen in der Bohrung	Tiefbohrung 500 mm DM 5 Verlauf	Tiefbohrung 250 mm DM 2.5 Verlauf	realitätsnahe Versuchsbedingungen	Leistungsfähigkeit KSS Anlage	Position Anbohrpunkte Fräsen	Toleranzen Fräsen Schlüsselfläche	Werkzeugbedarf / Betriebsmittelaufwand	Oberflächenqualität					
Bewertungskriterien A	1	keine Stufen in der Bohrung	4	4	4	6	6	4	6	6	6	8	44	15,3%	1
	2	Tiefbohrung 500 mm DM 5 Verlauf	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	42	14,6%	2
	3	Tiefbohrung 250 mm DM 2.5 Verlauf	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	42	14,6%	2
	4	realitätsnahe Versuchsbedingungen	2	4	4	4	6	6	8	6	6	6	42	14,6%	2
	5	Leistungsfähigkeit KSS Anlage	2	2	2	2	4	4	4	2	4	4	22	7,6%	7
	6	Position Anbohrpunkte Fräsen	4	2	2	2	4	4	6	6	2	2	28	9,7%	5
	7	Toleranzen Fräsen Schlüsselfläche	2	2	2	0	4	2	4	6	2	2	20	6,9%	9
	8	Werkzeugbedarf / Betriebsmittelaufwand	2	2	2	2	6	2	2	4	4	4	22	7,6%	7
	9	Oberflächenqualität	0	2	2	2	4	6	6	4	4	4	26	9,0%	6
											288	100%			

Tabelle 19: Gewichtungsfaktoren Tiefbohren und Fräsen

5.5.5 Bewertung

Die Bewertung der einzelnen Gewichtungsfaktoren erfolgte in einem Team mit den fertigungsverantwortlichen Meistern des Prototypenbaus von Bosch Hallein. So erreichte man eine hohe Diversität und die Bewertung erfolgte so objektiv als möglich. Für eine bessere Unterscheidung der jeweiligen Faktoren wurde die Matrix in zwei Hauptkriterien unterteilt. Der Einfluss der Versuchsbearbeitungen ist mit 40% des Hauptnutzwertes festgelegt und die allgemeinen Parameter mit 60%. Daraus errechnet sich dann ein Gesamtnutzwert der Maschinenkonzepte.


Entscheidungsblatt für Nutzwerte						 BOSCH		
Bearbeitungsversuch 40%			TBT			Alzmetall GS1000		
Bewertungskriterien:	Beschreibung	Gewichtung	Bewertungskriterien:	Wertzahl	gew. WZ	Bewertungskriterien:	Wertzahl	gew. WZ
keine Stufen in der Bohrung	Fertigungsbedingte Stufen durch Werkzeugwechsel	15,3%	Bearbeitung in einem Zug kein Werkzeugwechsel	5	0,764	Festigkeitsanalyse durchgeführt / ev. Pulstests zur Absicherung	3	0,458
Tiefbohrung 500 mm DM 5 Verlauf	Zeichnung Versuch 5mm	14,6%	siehe Versuchsauswertung	2	0,292	siehe Versuchsauswertung	3	0,438
Tiefbohrung 250 mm DM 2.5 Verlauf	Zeichnung Versuch 2.5mm	14,6%	keine Info	3	0,438	siehe Versuchsauswertung	3	0,438
realitätsnahe Versuchsbedingungen	Vergleichbarkeit der Tests mit dem späteren Einsatz / Versuch in Emulsion und nicht in Öl	14,6%	völlig identische Bedingungen	5	0,729	Standzeitversuchs bereits zu einem früheren Zeitpunkt in Hallein durchgeführt	3	0,438
Leistungsfähigkeit KSS Anlage	je höher der KSS Druck umso stabiler der Prozess	7,6%	160 bar	5	0,382	150 bar	5	0,382
Position Anbohrpunkte Fräsen	Zeichnung Versuch Fräsen	9,7%	siehe Versuchsauswertung	2	0,194	siehe Versuchsauswertung	4	0,389
Toleranzen Fräsen Schlüsselfläche	Zeichnung Versuch Fräsen	6,9%	keine Info	3	0,208	siehe Versuchsauswertung	3	0,208
Werkzeugbedarf / Betriebsmittelaufwand	Benötigte Werkzeuge und Aufnahme bei Erstausrüstung	7,6%	kompl ELB Bohrbüchsen und Lünetten nötig	2	0,153	Standard Großteil bereits bei COS vorhanden	4	0,306
Oberflächenqualität	Zeichnung Versuch Fräsen	9,0%	keine Info	5	0,451	siehe Versuchsauswertung	4	0,361
		100,0%			3,611			3,417

Tabelle 20: Bewertung Bearbeitungsversuch

Allgemein 60%								
Bewertungskriterien:	Beschreibung	Gewicht- ung	Bewertungskriterien:	Wert- zahl	gew. WZ	Bewertungskriterien:	Wert- zahl	gew. WZ
Werkzeugmagazin Fräsen Bewertet wird Magazinkapa, max Werkzeuglänge, und die Wechselzeit	Magazinkapazität, Wechselzeit und Werkzeuglänge	5,7%	lt. Tabelle	3	0,171	66 Plätze bei 400 Länge	5	0,286
Prozentualer Anteil der Teile die vollautomatisch gefertigt werden können	bei großen Bohrtiefen sind am BAZ Unterbrechnungen der Programms für einen Automatischen Werkzeugwechsel einzuführen	6,4%	gesamtes Teilespektrum	5	0,321	siehe Tabelle	4	0,257
Werkzeugwechselzeit ELB für lange Tiefbohrwerkzeug	Am BAZ sind lange Werkzeuge manuell einzuwechseln, weil das Magazin zu klein ist	6,0%	automatisch	5	0,298	ca 30 sec	2	0,119
Spindel Spindeldrehzahl für Entgratprozesse, Spindelleistung für Fräsaufgaben	für Fräsaufgaben ist eine hohe Spindelleistung erforderlich, bei Entgratprozessen eine sehr hohe Drehzahl	6,9%	nicht so leistungsfähig beim Fräsen	3	0,207	40 KW bei 18000 U/min	5	0,345
Energieverbrauch - Standbymodus	gibt es Pakte die den Energieverbrauch (Strom / Druckluft) senken	2,6%	keine Info	3	0,079	keine Info	3	0,079
Schwenkbereich 4. / 5. Achse	je höher der Schwenkbereich umso mehr Bearbeitungsschritte können in einer Aufspannung gefertigt werden	8,1%	lt. Tabelle	2	0,162	lt. Tabelle	5	0,405
Reserve im Arbeitsraum (maximale Bauteilgröße künftiger Projekte)	wie weit sind die bestehenden Verfahrswege bereits ausgereizt. Ist noch Platz für größere Bauteile	8,3%	große Reserve für künftige Projekte	5	0,417	wenig Reserve für größere Bauteile	2	0,167
Ergonomie / Steuerung zugänglichkeit zum Arbeitsraum / Bedienung	Bedienung der Maschine / Programmierung an der Maschine / Zugänglichkeit des Arbeitsraums / Tischhöhe	7,4%	Tisch sehr hoch / Steuerung eher zum Bohren	2	0,148	Bekannte Steuerung und gute Zugänglichkeit des Arbeitsraums	4	0,295
Rüstaufwand	Benötigte Spannmittel / Vorrichtungen um ein Bauteil zu fertigen	9,5%	Bohrbüchse vorbereiten	3	0,286	Standard bei COS	4	0,381
Lieferantenbewertung / Vorzugslieferant	Hat der Maschinenhersteller bereits an Bosch geliefert / kennt er die Liefervorschriften	6,2%	Bosch Lieferant	5	0,31	COS Linz hat bereits Maschine	4	0,248
Anschaffungskosten lt. Angebot	Kosten der fertigungsbereiten Maschine inkl. notwendigem Zubehör	6,7%	lt. Tabelle	1	0,067	lt. Tabelle	3	0,2
Nutzungsgrad	Passierend auf der Prognose von 2012	9,8%	siehe Tabelle	1	0,098	kann auch vollwertig als BAZ eingesetzt werden	5	0,488
Hochlaufdauer / Schlunsaufwand erlernen der Technologie im Haus	Bekanntheitsgrad des Fertigungsverfahren, Neuheit der Technologie,	7,4%	neue Technologie eher hoch	3	0,221	eher gering bekannt bei COS	4	0,295
Ersatzteilverfügbarkeit / geographische Nähe	Anreisezeit Servicetechniker, Lagerhaltung Ersatzteile	4,8%	lt. Tabelle	3	0,143	70 km	5	0,238
Lieferzeit / Flächenbedarf	Flächenbedarf in der Halle für Fertigung / Lieferzeit	4,3%	sehr groß	1	0,043	lt. Tabelle	4	0,171
		100,0%			2,969			3,974
Nutzwert Gesamt					3,1			3,8

Tabelle 21: Bewertung allgemeine Faktoren

5.5.6 Ergebnis

Aus der Gewichtung der beiden Teilnutzwerte errechnet sich der Gesamtnutzwert. Je höher dieser ausfällt, umso geeigneter ist das Konzept für den analysierten Anwendungsfall.

Da alle anderen Hersteller bereits durch die Nichterfüllung der KO – Kriterien ausgeschieden sind, tauchen auch hier in der Schlussbewertung nur die beiden Konzepte von Alzmetall und TBT auf.

Hersteller:	Bearbeitungs- versuch Pkt. (40%):	Allgemein Pkt. (60%):	Summe Pkt.	Rang:
TBT	3,61	2,97	3,13	2
Alzmetall	3,42	3,97	3,75	1

Tabelle 22: Gesamtnutzwert

Mit einem Gesamtnutzwert von 3.75 Punkten geht die Maschine der Firma Alzmetall als optimaler Hersteller hervor.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Theorie zum Tiefbohren, der Prozessentwicklungszyklus der spanenden Fertigung in hochfesten Werkstoffen und schließlich der Weg zur optimalen Fertigungsmaschine aufgezeigt. Mit den daraus gewonnen Erkenntnissen war es möglich, das vorhandene Teilespektrum zu analysieren, Auswertungen zu fahren und eine spätere Nutzwertanalyse einer Bewertung zuführen.

Schon zu einem sehr frühen Zeitpunkt kristallisierte sich heraus, dass es zwei grundsätzlich unterschiedliche Maschinen für die Erfüllung der Kriterien gibt. Ein sehr flexibles Bearbeitungszentrum in Öl oder eine sehr komplexes Tiefbohrzentrum mit Fräsoption. Mit steigendem Projektfortschritt und erhöhtem Versuchsauswertungsgrad erkannte man die hohe Komplexität dieser Bearbeitungsaufgaben.

In der unten angeführten Grafik sind die wesentlichen Einflussfaktoren eines Tiefbohrprozesses aufgelistet, nur wenn all diese Faktoren optimal aufeinander abgestimmt sind, kann ein prozesssicherer Tiefbohrprozess eingeführt werden.

Schlussendlich entschied man sich für den Prozess des gestuften Tiefbohren am Bearbeitungszentrum. Hauptgründe hierfür sind die hohe Flexibilität der Maschine, die sehr geringe Lieferzeit des favorisierten Maschinenherstellers, die Bekanntheit der Technologie und der wesentlich geringere Flächenbedarf der Maschine.

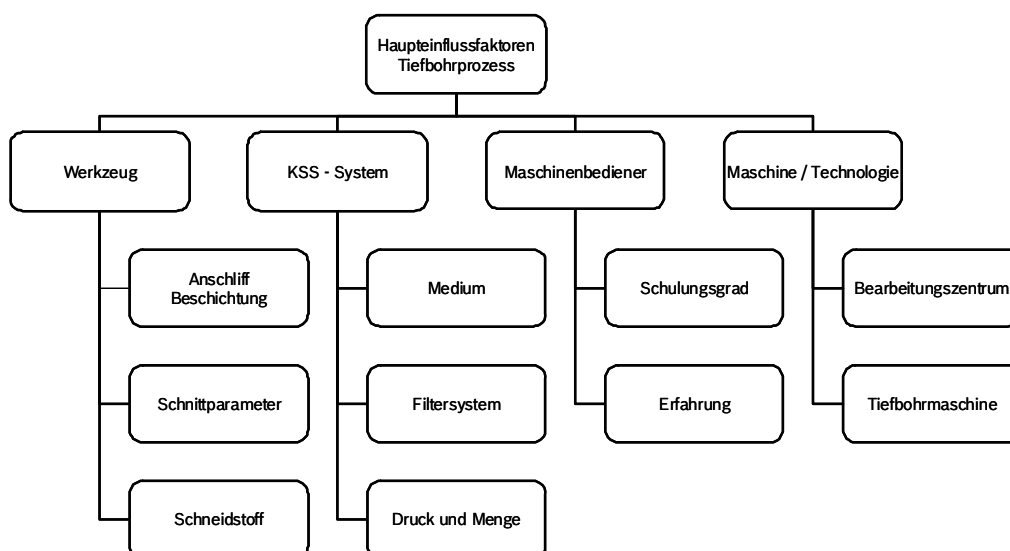


Abbildung 60: Einflussfaktoren Tiefbohrprozess

V. Anhang

Messwerte	Firma Alzmetall	Zeichnung: Abbildung 61: Zeichnung Versuch - Fräsen					
Positons- und Verlaufsmessung							
Alzmetall_1							
1	Anbohrpunkte			Austrittspunkte			Nr
	Abweichung			Abweichung			
	Z-Richtung	Y-Richtung	Gesamt	Z-Richtung	Y-Richtung	Gesamt	
Ø2,5 - 1	-0,0141	0,0184	0,0231812	0,0067	0,0509	0,0513391	1
Ø2,5 - 2	0,0154	0,0082	0,0174471	-0,0612	0,0623	0,0873312	2
Ø3 - 1	-0,0047	-0,0016	0,0049649	0,0509	0,0125	0,0524124	1
Ø3 - 2	-0,0077	-0,0089	0,0117686	0,0591	-0,0232	0,0634906	2
Ø5 - 1	-0,0112	-0,0054	0,0124338	-0,0158	0,0101	0,0187523	1
Alzmetall_2			Alzmetall_2				
2	Anbohrpunkte			Austrittspunkte			Nr
	Abweichung			Abweichung			
	Z-Richtung	Y-Richtung	Gesamt	Z-Richtung	Y-Richtung	Gesamt	
Ø2,5 - 1	-0,0236	-0,0182	0,0298027	0,0025	0,0201	0,0202549	3
Ø2,5 - 2	-0,0288	0,0114	0,0309742	-0,0671	-0,0582	0,0888237	4
Ø3 - 1	-0,0223	0,0076	0,0235595	0,0135	0,0046	0,0142622	3
Ø3 - 2	-0,0176	-0,0016	0,0176726	-0,0102	-0,0028	0,0105773	4
Ø5 - 1	-0,0127	-0,007	0,0145014	-0,0127	-0,0018	0,0128269	2
Alzmetall_3			Alzmetall_3				
3	Anbohrpunkte			Austrittspunkte			Nr
	Abweichung			Abweichung			
	Z-Richtung	Y-Richtung	Gesamt	Z-Richtung	Y-Richtung	Gesamt	
Ø2,5 - 1	-0,0137	-0,009	0,0163918	-0,0572	-0,0096	0,058	5
Ø2,5 - 2	-0,0061	-0,0231	0,0238918	-0,0818	0,0077	0,0821616	6
Ø3 - 1	-0,0393	-0,0021	0,0393561	0,0833	0,0549	0,0997642	5
Ø3 - 2	-0,0064	0,0022	0,0067676	0,0503	0,086	0,0996298	6
Ø5 - 1	-0,0016	-0,0096	0,0097324	0,0021	-0,0111	0,0112969	3

Härtemessung / Stirnfläche			
Nummer:	Alzmetall_1	Alzmetall_2	Alzmetall_3
	HRC	HRC	HRC
1	37	37,5	38
2	38	38,5	38,5
3	38	38,5	39
4	38	38	38,5
5	37,5	37	38
Mittelwert:	37,7	37,9	38,4

Oberflächenmessung						
Bez.	Alzmetall_1		Alzmetall_2		Alzmetall_3	
	Rz	Rz1max	Rz	Rz1max	Rz	Rz1max
1 Ø2,5 - 1	0,4016	0,6286	0,6761	1,0855	1,0081	1,3167
2 Ø2,5 - 2	0,7461	1,3775	0,4089	0,7326	0,7304	1,3287
3 Ø3 - 1	0,5638	0,7657	0,3497	0,5875	0,2245	0,5636
4 Ø3 - 2	0,723	1,2061	1,3401	3,5335	0,2583	0,5901
5 Ø5 - 1	0,7225	2,004	1,4021	6,203	0,6211	1,3519

Form und Lage Schlüsselfläche		
	⊥ 0,06 A	∠ 0,08
Alzmetall_1	0,037	0,0287
Alzmetall_2	0,044	0,0375
Alzmetall_3	0,0262	0,0417

Verlauf am Austrittspunkt

Tabelle 23: Messwerte Alzmetall – Versuch - Fräsen

Messwerte **Firma TBT** **Zeichnung: Abbildung 61: Zeichnung Versuch - Fräsen**

Positons- und Verlaufsmessung							
TBT_1							
1	Anbohrpunkte			Austrittspunkte			Nr
	Abweichung			Abweichung			
	Z-Richtung	Y-Richtung	Gesamt	Z-Richtung	Y-Richtung	Gesamt	
Ø2,5 - 1	0	0,02	0,02	-0,013	0,043	0,0449222	1
Ø2,5 - 2	0	0,026	0,026	-0,09	-0,096	0,1315903	2
Ø3 - 1	-0,035	0	0,035	-0,056	-0,045	0,0718401	1
Ø3 - 2	-0,009	0	0,009	-0,012	0,013	0,0176918	2
Ø5 - 1	0,009	0	0,009	-0,058	0,012	0,0592284	1
TBT_2							
2	Anbohrpunkte			Austrittspunkte			Nr
	Abweichung			Abweichung			
	Z-Richtung	Y-Richtung	Gesamt	Z-Richtung	Y-Richtung	Gesamt	
Ø2,5 - 1	0	0,007	0,007	-0,129	0,012	0,1295569	3
Ø2,5 - 2	0	0,004	0,004	-0,093	-0,107	0,1417674	4
Ø3 - 1	-0,032	0	0,032	-0,184	-0,044	0,1891877	3
Ø3 - 2	-0,019	0	0,019	-0,028	0,028	0,039598	4
Ø5 - 1	0,016	0	0,016	0,123	-0,089	0,1518223	2
TBT_3							
3	Anbohrpunkte			Austrittspunkte			Nr
	Abweichung			Abweichung			
	Z-Richtung	Y-Richtung	Gesamt	Z-Richtung	Y-Richtung	Gesamt	
Ø2,5 - 1	0	0,023	0,023	-0,0572	0,048	0,0746715	5
Ø2,5 - 2	0	0,061	0,061	-0,193	0,0077	0,1931535	6
Ø3 - 1	-0,022	0	0,022	-0,12	-0,054	0,1315903	5
Ø3 - 2	-0,035	0	0,035	-0,063	-0,021	0,0664078	6
Ø5 - 1	0,022	0	0,022	0,074	-0,109	0,131746	3

Härtemessung / Stirnfläche			
Nummer:	TBT_1	TBT_2	TBT_3
	HRC	HRC	HRC
1	39	38	38
2	39	37	39
3	39	38	38
4	38	38	39
5	38	39	38
Mittelwert:	38,6	38	38,4

Oberflächenmessung						
Bohrungsbez.	TBT_1		TBT_2		TBT_3	
	Rz	Rz1max	Rz	Rz1max	Rz	Rz1max
1 Ø2,5 - 1	0,2851	0,4463	0,4800	0,7707	0,7158	0,9349
2 Ø2,5 - 2	0,5297	0,9780	0,2903	0,5201	0,5186	0,9434
3 Ø3 - 1	0,4003	0,5436	0,2483	0,4171	0,1594	0,4002
4 Ø3 - 2	0,5133	0,8563	0,9515	2,5088	0,1834	0,4190
5 Ø5 - 1	0,5130	1,4228	0,9955	4,4041	0,4410	0,9598

Form und Lage Schlüsselfläche		
	⊥ 0,06 A	∠ 0,08
TBT_1	0,023	0,042
TBT_2	0,016	0,036
TBT_3	0,025	0,027

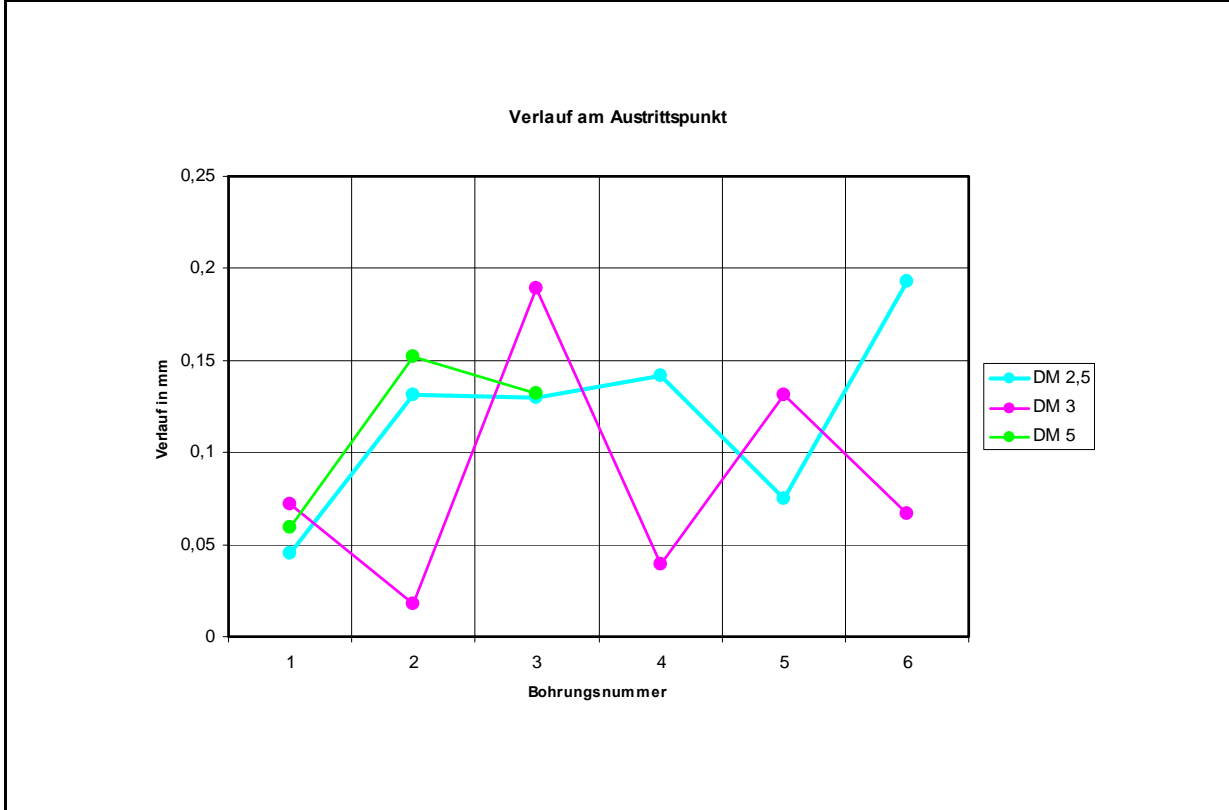


Tabelle 24: Messwerte TBT – Versuch - Fräsen

Messwerte	Firma TBT 2.5	Abbildung 62: Zeichnung Versuch TiBo 2.5 / 5 mm
TBT / TiBo 2.5mm in einem Zug		
Maschine	TBT - BW200-H	
Werkstück	Versuch-2.5mm	
Werkstoff	50CrMo4 37 HRC	
Bohr-Ø	2.5 mm	
Bohrtiefe	250 mm	
Kühlschmierstoff	Tiefbohröl	
Druck	max 150 bar	
Werkzeug (TBT)	VHM-Kopf	
Schnittgeschwindigkeit	V _c = 40 m/min	
Drehzahl	n = 5500 1/min	
Vorschub	f = 0,007 mm	

Nr.	Ø Anbohren	Ø Austritt	Nr.	Ø Anbohren	Ø Austritt	Nr.	Ø Anbohren	Ø Austritt
1	0,064	0,549	17	0,182	0,110	33	0,130	0,962
2	0,120	0,606	18	0,184	0,146	34	0,100	0,920
3	0,214	0,963	19	0,158	0,314	35	0,107	0,509
4	0,258	0,908	20	0,088	0,297	36	0,160	0,784
5	0,285	0,826	21	0,098	0,292	37	0,240	0,850
6	0,290	1,294	22	0,152	0,221	38	0,212	0,646
7	0,268	0,355	23	0,186	0,160	39	0,242	0,681
8	0,163	0,322	24	0,149	0,124	40	0,185	0,449
9	0,088	0,273	25	0,130	1,237	41	0,177	0,152
10	0,011	0,344	26	0,205	1,584	42	0,090	0,135
11	0,051	0,352	27	0,227	0,898	43	0,082	0,239
12	0,041	0,435	28	0,232	0,844	44	0,052	0,218
13	0,026	0,767	29	0,273	0,835	45	0,101	0,328
14	0,154	0,501	30	0,362	0,774	46	0,148	0,413
15	0,147	0,411	31	0,323	0,831	47	0,143	0,428
16	0,221	0,275	32	0,198	0,938	48	0,090	0,302
MW:							0,163	0,558

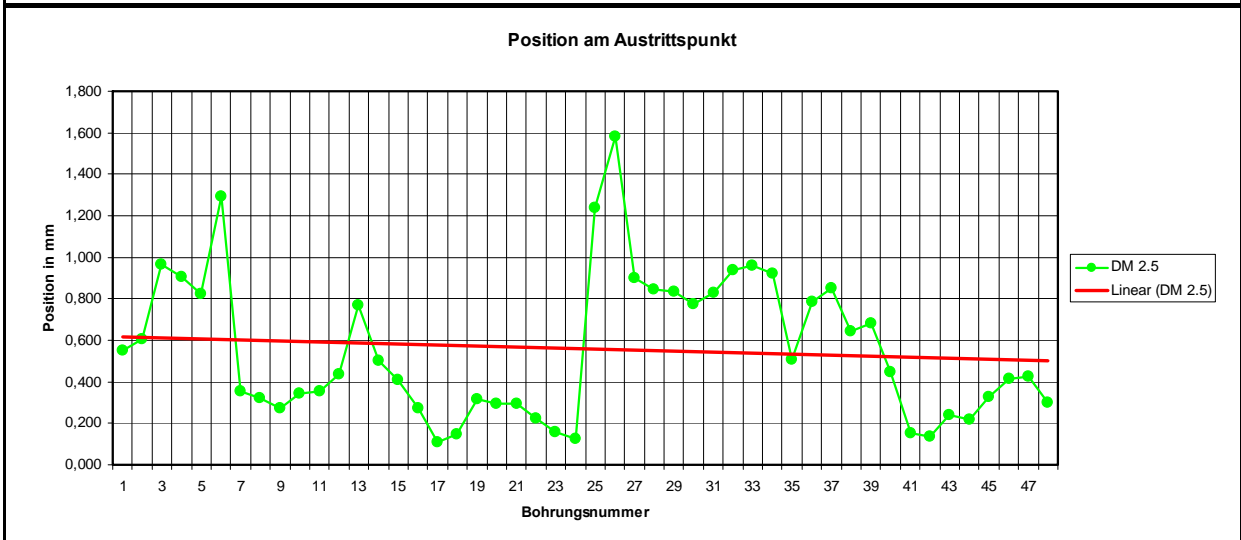
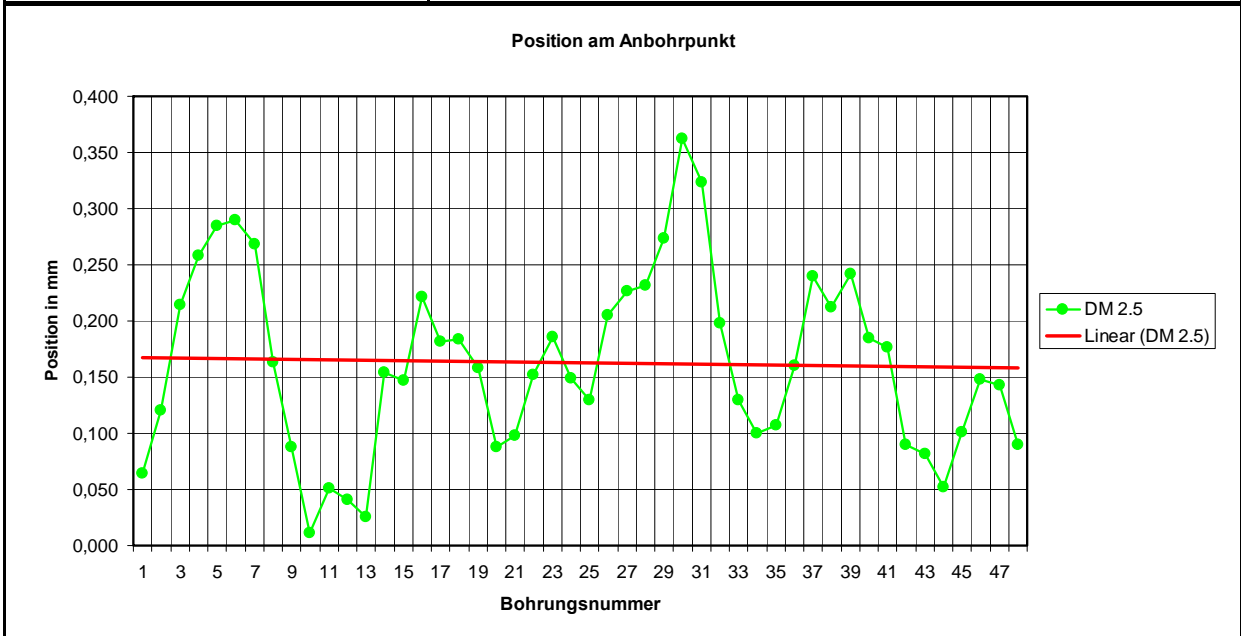
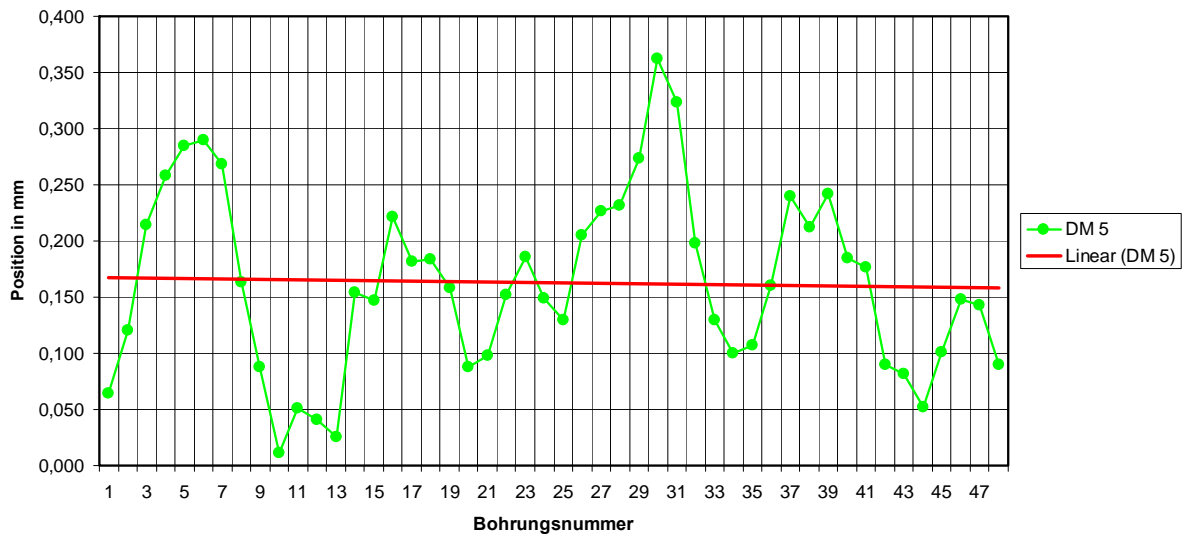


Tabelle 25: Messwerte TBT – TiBo 2.5 mm

Messwerte	Firma TBT 5	Abbildung 62: Zeichnung Versuch TiBo 2.5 / 5 mm																																																																																																																																																																																								
<table border="1"> <tr> <th colspan="2">TBT / TiBo 5mm</th> </tr> <tr> <td colspan="2">in einem Zug</td> </tr> <tr> <td>Maschine</td> <td>TBT - BW200-H</td> </tr> <tr> <td>Werkstück</td> <td>Versuch-5mm</td> </tr> <tr> <td>Werkstoff</td> <td>50CrMo4 37 HRC</td> </tr> <tr> <td>Bohr-Ø</td> <td>5 mm</td> </tr> <tr> <td>Bohrtiefe</td> <td>500 mm</td> </tr> <tr> <td>Kühlschmierstoff</td> <td>Tiefbohröl</td> </tr> <tr> <td>Druck</td> <td>max 75 bar</td> </tr> <tr> <td>Werkzeug (TBT)</td> <td>VHM-Kopf</td> </tr> <tr> <td>Schnittgeschwindigkeit</td> <td>Vc = 40m/min</td> </tr> <tr> <td>Drehzahl</td> <td>n=2600 1/min</td> </tr> <tr> <td>Vorschub</td> <td>f = 0,027 mm</td> </tr> </table>		TBT / TiBo 5mm		in einem Zug		Maschine	TBT - BW200-H	Werkstück	Versuch-5mm	Werkstoff	50CrMo4 37 HRC	Bohr-Ø	5 mm	Bohrtiefe	500 mm	Kühlschmierstoff	Tiefbohröl	Druck	max 75 bar	Werkzeug (TBT)	VHM-Kopf	Schnittgeschwindigkeit	Vc = 40m/min	Drehzahl	n=2600 1/min	Vorschub	f = 0,027 mm	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr.</th> <th>Ø Anbohren</th> <th>Ø Austritt</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0,044</td><td>1,637</td></tr> <tr><td>2</td><td>0,049</td><td>2,406</td></tr> <tr><td>3</td><td>0,045</td><td>1,947</td></tr> <tr><td>4</td><td>0,049</td><td>1,555</td></tr> <tr><td>5</td><td>0,045</td><td>1,477</td></tr> <tr><td>6</td><td>0,033</td><td>1,172</td></tr> <tr><td>7</td><td>0,024</td><td>1,445</td></tr> <tr><td>8</td><td>0,020</td><td>0,681</td></tr> <tr><td>9</td><td>0,033</td><td>0,928</td></tr> <tr><td>10</td><td>0,039</td><td>1,672</td></tr> <tr><td>11</td><td>0,026</td><td>1,508</td></tr> <tr><td>12</td><td>0,019</td><td>1,755</td></tr> <tr><td>13</td><td>0,068</td><td>2,591</td></tr> <tr><td>14</td><td>0,027</td><td>1,372</td></tr> <tr><td>15</td><td>0,068</td><td>2,437</td></tr> <tr><td>16</td><td>0,036</td><td>0,927</td></tr> </tbody> </table>	Nr.	Ø Anbohren	Ø Austritt	1	0,044	1,637	2	0,049	2,406	3	0,045	1,947	4	0,049	1,555	5	0,045	1,477	6	0,033	1,172	7	0,024	1,445	8	0,020	0,681	9	0,033	0,928	10	0,039	1,672	11	0,026	1,508	12	0,019	1,755	13	0,068	2,591	14	0,027	1,372	15	0,068	2,437	16	0,036	0,927	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr.</th> <th>Ø Anbohren</th> <th>Ø Austritt</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>17</td><td>0,077</td><td>1,112</td></tr> <tr><td>18</td><td>0,028</td><td>0,300</td></tr> <tr><td>19</td><td>0,055</td><td>0,936</td></tr> <tr><td>20</td><td>0,022</td><td>1,144</td></tr> <tr><td>21</td><td>0,010</td><td>1,027</td></tr> <tr><td>22</td><td>0,024</td><td>0,671</td></tr> <tr><td>23</td><td>0,016</td><td>0,533</td></tr> <tr><td>24</td><td>0,004</td><td>0,582</td></tr> <tr><td>25</td><td>0,013</td><td>2,028</td></tr> <tr><td>26</td><td>0,025</td><td>2,266</td></tr> <tr><td>27</td><td>0,064</td><td>1,499</td></tr> <tr><td>28</td><td>0,073</td><td>1,917</td></tr> <tr><td>29</td><td>0,076</td><td>1,957</td></tr> <tr><td>30</td><td>0,070</td><td>1,217</td></tr> <tr><td>31</td><td>0,061</td><td>1,333</td></tr> <tr><td>32</td><td>0,049</td><td>1,293</td></tr> </tbody> </table>	Nr.	Ø Anbohren	Ø Austritt	17	0,077	1,112	18	0,028	0,300	19	0,055	0,936	20	0,022	1,144	21	0,010	1,027	22	0,024	0,671	23	0,016	0,533	24	0,004	0,582	25	0,013	2,028	26	0,025	2,266	27	0,064	1,499	28	0,073	1,917	29	0,076	1,957	30	0,070	1,217	31	0,061	1,333	32	0,049	1,293	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr.</th> <th>Ø Anbohren</th> <th>Ø Austritt</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>33</td><td>0,045</td><td>1,238</td></tr> <tr><td>34</td><td>0,034</td><td>1,024</td></tr> <tr><td>35</td><td>0,013</td><td>1,597</td></tr> <tr><td>36</td><td>0,017</td><td>1,708</td></tr> <tr><td>37</td><td>0,042</td><td>2,953</td></tr> <tr><td>38</td><td>0,035</td><td>1,795</td></tr> <tr><td>39</td><td>0,043</td><td>1,285</td></tr> <tr><td>40</td><td>0,018</td><td>0,756</td></tr> <tr><td>41</td><td>0,011</td><td>0,135</td></tr> <tr><td>42</td><td>0,019</td><td>0,522</td></tr> <tr><td>43</td><td>0,006</td><td>0,436</td></tr> <tr><td>44</td><td>0,031</td><td>0,847</td></tr> <tr><td>45</td><td>0,031</td><td>1,250</td></tr> <tr><td>46</td><td>0,041</td><td>0,740</td></tr> <tr><td>47</td><td>0,025</td><td>0,840</td></tr> <tr><td>48</td><td>0,036</td><td>0,303</td></tr> <tr> <td>MW:</td> <td>0,036</td> <td>1,307</td> </tr> </tbody> </table>	Nr.	Ø Anbohren	Ø Austritt	33	0,045	1,238	34	0,034	1,024	35	0,013	1,597	36	0,017	1,708	37	0,042	2,953	38	0,035	1,795	39	0,043	1,285	40	0,018	0,756	41	0,011	0,135	42	0,019	0,522	43	0,006	0,436	44	0,031	0,847	45	0,031	1,250	46	0,041	0,740	47	0,025	0,840	48	0,036	0,303	MW:	0,036	1,307
TBT / TiBo 5mm																																																																																																																																																																																										
in einem Zug																																																																																																																																																																																										
Maschine	TBT - BW200-H																																																																																																																																																																																									
Werkstück	Versuch-5mm																																																																																																																																																																																									
Werkstoff	50CrMo4 37 HRC																																																																																																																																																																																									
Bohr-Ø	5 mm																																																																																																																																																																																									
Bohrtiefe	500 mm																																																																																																																																																																																									
Kühlschmierstoff	Tiefbohröl																																																																																																																																																																																									
Druck	max 75 bar																																																																																																																																																																																									
Werkzeug (TBT)	VHM-Kopf																																																																																																																																																																																									
Schnittgeschwindigkeit	Vc = 40m/min																																																																																																																																																																																									
Drehzahl	n=2600 1/min																																																																																																																																																																																									
Vorschub	f = 0,027 mm																																																																																																																																																																																									
Nr.	Ø Anbohren	Ø Austritt																																																																																																																																																																																								
1	0,044	1,637																																																																																																																																																																																								
2	0,049	2,406																																																																																																																																																																																								
3	0,045	1,947																																																																																																																																																																																								
4	0,049	1,555																																																																																																																																																																																								
5	0,045	1,477																																																																																																																																																																																								
6	0,033	1,172																																																																																																																																																																																								
7	0,024	1,445																																																																																																																																																																																								
8	0,020	0,681																																																																																																																																																																																								
9	0,033	0,928																																																																																																																																																																																								
10	0,039	1,672																																																																																																																																																																																								
11	0,026	1,508																																																																																																																																																																																								
12	0,019	1,755																																																																																																																																																																																								
13	0,068	2,591																																																																																																																																																																																								
14	0,027	1,372																																																																																																																																																																																								
15	0,068	2,437																																																																																																																																																																																								
16	0,036	0,927																																																																																																																																																																																								
Nr.	Ø Anbohren	Ø Austritt																																																																																																																																																																																								
17	0,077	1,112																																																																																																																																																																																								
18	0,028	0,300																																																																																																																																																																																								
19	0,055	0,936																																																																																																																																																																																								
20	0,022	1,144																																																																																																																																																																																								
21	0,010	1,027																																																																																																																																																																																								
22	0,024	0,671																																																																																																																																																																																								
23	0,016	0,533																																																																																																																																																																																								
24	0,004	0,582																																																																																																																																																																																								
25	0,013	2,028																																																																																																																																																																																								
26	0,025	2,266																																																																																																																																																																																								
27	0,064	1,499																																																																																																																																																																																								
28	0,073	1,917																																																																																																																																																																																								
29	0,076	1,957																																																																																																																																																																																								
30	0,070	1,217																																																																																																																																																																																								
31	0,061	1,333																																																																																																																																																																																								
32	0,049	1,293																																																																																																																																																																																								
Nr.	Ø Anbohren	Ø Austritt																																																																																																																																																																																								
33	0,045	1,238																																																																																																																																																																																								
34	0,034	1,024																																																																																																																																																																																								
35	0,013	1,597																																																																																																																																																																																								
36	0,017	1,708																																																																																																																																																																																								
37	0,042	2,953																																																																																																																																																																																								
38	0,035	1,795																																																																																																																																																																																								
39	0,043	1,285																																																																																																																																																																																								
40	0,018	0,756																																																																																																																																																																																								
41	0,011	0,135																																																																																																																																																																																								
42	0,019	0,522																																																																																																																																																																																								
43	0,006	0,436																																																																																																																																																																																								
44	0,031	0,847																																																																																																																																																																																								
45	0,031	1,250																																																																																																																																																																																								
46	0,041	0,740																																																																																																																																																																																								
47	0,025	0,840																																																																																																																																																																																								
48	0,036	0,303																																																																																																																																																																																								
MW:	0,036	1,307																																																																																																																																																																																								

Position am Anbohrpunkt



Position am Austrittspunkt

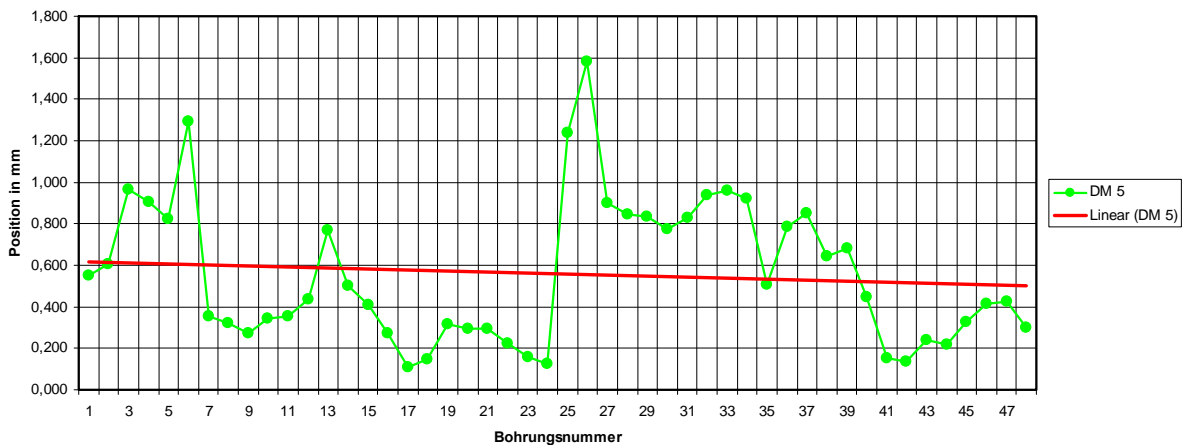


Tabelle 26: Messwerte TBT – TiBo 5 mm

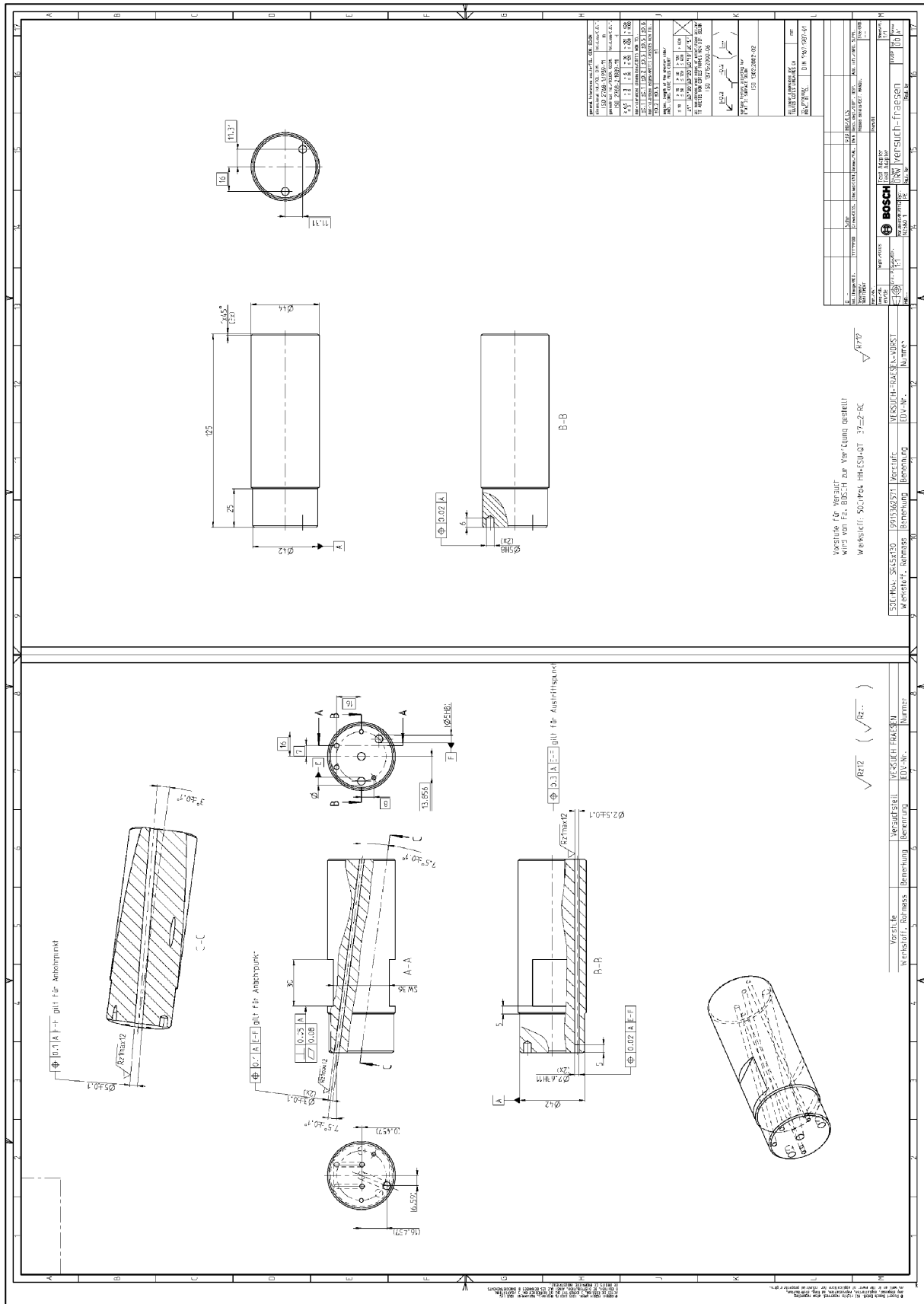


Abbildung 61: Zeichnung Versuch - Fräsen

VI. Literaturverzeichnis

- [1] Toweko, Tiefbohren Praxis, 72644 Oberboihingen 2001
- [2] Botek, Broschüre Typ 110, 2008-08-22 Version 24
- [3] Streicher, P., Tiefbohren der Metalle, Vogel-Verlag 1975
- [4] VDI Berichte 2142, Präzisions- und Tiefbohren aktuell VDI Wissensforum GmbH, März 2011
- [5] Stock, AG Broschüre TLB Präzisionswerkzeuge, Berlin 2008
- [6] VDI Berichte 1897, Präzisions- und Tiefbohren aktuell VDI Wissensforum GmbH, März 2001
- [7] Botek, Broschüre Typ 158, 2009-04-17 Version 1
- [8] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung BGI / GUV-I 718, November 2010
- [9] <http://community.easymind.info/page-76.htm> (Abgerufen am 23.02.2012)