

**Bohrkraftmessungen und Verschleiß zweier chirurgischer
Knochenbohrer am Markt**

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom Ingenieur (Dipl. Ing.)

an der

Technischen Universität Graz

vorgelegt von

Ulrich Stoiber

0430030

Graz, März 2014

Deutsche Fassung:

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTATTLICHE 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)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

.....

(signature)

Kurzbeschreibung

Chirurgische Knochenbohrer der Legierungstypen AISI 440A und 440B wurden durch maschinelle Bohrungen in Kunstknochen einem Praxistest unterzogen. Die gemessenen Vorschubkräfte bei den Testbohrungen und der daraus resultierende Verschleiß der Bohrerspitzen wurden metallografisch miteinander verglichen. Dabei zeigten sich deutliche Vorteile des 440A Bohrers anhand der geringeren Vorschubkraft und des geringeren Reibverschleißes der Hauptschneiden und der Querschneide gegenüber dem 440B Bohrer. Dies ist vor allem auf die optimierte Spitzengeometrie des 440A und die gleichmäßigere Verarbeitung, besonders hinsichtlich Karbidverteilung, zurückzuführen. Beim Anbringen derselben Spitzengeometrie (die von Praktikern entwickelt wurde) zeigt 440B geringere Bohrkräfte als 440A, d.h. die Legierung 440B ist prinzipiell die besser geeignete und der 440B Bohrer hat noch ein größeres Optimierungspotential.

Abstract

Surgical bone drills of the alloys AISI 440A and 440B were practically tested by drilling an artificial bone by machine. The measured feed forces during drilling and the resulting wear of the drill bits were metallographically compared. Thereby clear benefits of the 440A drill appeared, i.e. lower feed forces and a less abrasive wear of the main and the chisel edge, in comparison to the 440B drill. They are attributed to the optimised drill bit geometry, the smooth manufacture and also the uniform carbide distribution. After grinding a self developed drill bit geometry on both drill types, the feed force of 440B was lower than for 440A, i.e. the former alloy ought to have a better drilling performance and it has a bigger potential for optimisation.

Vorwort

Das Können von Chirurgen grenzt heutzutage nahezu an ein Wunder und verblüfft immer wieder aufs Neue. Trotzdem bedarf es, neben dem Geschick der Ärzte, des Einsatzes von chirurgischen Utensilien, wie z.B. den Knochenbohrern. Dabei verlässt man sich auf die Verwendung von hochwertigen und funktionstüchtigen Werkzeugen. Schneidhaltigkeit und Verschleißbeständigkeit sind beim Gebrauch von chirurgischen Spiralbohrern ein Muss, um die gewünschten Resultate zu erzielen. Verschlissene Werkzeuge führen im Bereich der Osteosynthese zu unzureichenden Ergebnissen. Von geringerer Haltbarkeit von Schrauben, über das Auftreten zu hoher Temperaturen, bis hin zur lokalen Schädigung des umliegenden Gewebes, können diese Schäden zu erheblichen Auswirkungen auf den Heilungsprozess der PatientInnen führen. Trotz des enormen technischen Fortschritts im Bereich der Medizintechnik, kommen derart verschlissene Werkzeuge bei operativen Eingriffen zum Einsatz.

Die Literaturrecherche erwies sich bei diesem Thema als äußerst schwierig und aufwendig, da diesbezüglich sehr wenig und vorwiegend alte Literatur existiert. Grundsätzlich herrscht auf diesem Sektor jedoch noch ein großes Verbesserungspotential zur Reduktion der Verschleißerscheinungen und der damit verbundenen Bohrkraftminimierung.

An dieser Stelle möchte ich mich bei der SALMHOFER GmbH für die Vermessung der bestehenden Bohrer und für die Geometrieangepassung, bei Dr.techn. Fernando WARCHOMICKA für die Hilfe bei metallografischen Fragen, bei Ing. Kurt KERSCHBAUMER und Thomas FRIEDL für die Betreuung im Labor, bei Gernot STÖFAN für die Anfertigung der REM-Aufnahmen und vor allem bei Leander HERBITSCHKEK für die Durchführung der Bohrungen bedanken. Des Weiteren gilt Herrn SCHROTTNER († Mai 2013, R.I.P.) großer Dank, der mich mit seinem Wissen bzgl. Bohrer, Bohrergeometrien und Bohrerherstellung unterstützte. Bedanken möchte ich mich auch noch bei meiner Freundin Sonja RITTENSCHOBBER, die mir bei der Korrektur dieser Arbeit und der Zitierung zur Seite stand.

Diese Diplomarbeit wurde von Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf VALLANT und OA Dr. Hans CLEMENT, welcher mir auch die Versuchsbohrer und den Kunstknochen zur Verfügung stellte, betreut. Vielen Dank auch dafür!

Inhaltsverzeichnis

1 Chirurgische Bohrungen	8
1.1 Osteosynthese	8
1.2 Bohrwerkzeug	12
1.2.1 Kräfte beim Bohren	12
1.3 Die Zerspanntemperatur und Wärmeabfuhr.....	13
1.3.1 Auswirkungen einer zu hohen Zerspanntemperatur.....	14
1.3.2 Auswirkungen thermischer Gewebeschädigung	15
1.3.3 Wärmeabfuhr	17
1.4 Schädigung durch eisenhaltige Rückstände	17
1.5 Einfluss auf die Schnittkraft	18
1.5.1 Einfluss der Vorschubkraft beim Bohren von Knochen.....	19
1.5.2 Schneidengeometrie.....	20
1.5.3 Spanende Fertigung	23
1.6 Bohrerherstellung	23
1.6.1 Herstellung durch Fräsen und Schleifen.....	24
1.6.2 Herstellung durch Schmieden, Winden und Schleifen.....	24
1.6.3 Herstellung durch Walzen und Schleifen	25
1.7 Werkstoffe für Spiralbohrer	26
1.7.1 Schneidstoffanforderungen.....	27
1.7.2 Standbegriffe	29
1.7.2.1 Standvermögen.....	29
1.8 Parameter der Schneidleistung.....	30
1.9 Verschleiß und Verschleißursachen	30
1.10 Arten des Bohrens in der Chirurgie und die Gefahr des Überbohrens.....	32
1.10.1 Gleichmäßiges Bohren	32
1.10.2 Stoßbohren.....	32
1.10.3 Überbohren	33
2 Medizinische Geräte beim Bohren.....	34
2.1 Die chirurgische Bohrmaschine.....	34
2.1.1 Elektrische Bohrmaschine	34
2.1.2 Pneumatische Bohrmaschine	35
2.1.3 Akkubohrmaschine.....	35
2.2 Hilfsgeräte beim Bohrvorgang.....	35
2.2.1 Bohrlehre	35
2.2.2 Kortikalistiefenmesser	36
2.3 Präzisionswerkzeuge im chirurgischen Bereich.....	36

2.3.1	Spiralknochenbohrer.....	37
2.3.1.1	Geometrische Eigenschaften der verwendeten Bohrer.....	38
2.4	Einfluss verschiedener Parameter beim Bohren in der Kortikalis	42
2.4.1	Veränderte Umdrehungszahl.....	44
2.4.2	Vorschub.....	44
3	Bohrversuche	45
3.1	Praktische Versuche im Labor – Technische Universität Graz	46
3.1.1	Ziele der Versuchsreihe.....	46
3.1.2	Ablauf.....	46
3.1.3	Versuchsmaterialien und Hilfsmittel.....	47
3.1.4	Kunstknochen.....	48
3.1.5	FSW-Anlage.....	49
3.1.6	Spannvorrichtung.....	49
3.1.7	Kraftmessung.....	50
3.1.7.1	Dehnungsmessstreifen (DMS).....	51
3.1.8	Datenrekorder.....	51
3.1.9	Versuchsaufbau.....	54
3.1.9.1	Testphase.....	55
3.1.10	Bohrgut.....	56
3.1.11	Stereolichtmikroskop.....	57
3.1.11.1	Gegenüberstellung im Stereolichtmikroskop – neu und verschlissen.....	57
3.1.12	Versuchsablauf.....	59
3.1.13	Anpassung der Bohrergeometrie.....	61
4	Metallografische Probenpräparation	64
4.1	Probenpräparation	64
4.1.1	Anschliffvorbereitung.....	65
4.1.2	Probenahme.....	65
4.1.3	Einfassen.....	67
4.1.4	Einspannen.....	67
4.1.5	Einbetten.....	68
4.1.5.1	Kalt- und Warmeingießen.....	68
4.1.5.2	Warmeinpressen.....	69
4.1.6	Anschliffherstellung.....	69
4.1.7	Schleifen.....	70
4.1.8	Mechanisches Polieren.....	71
4.1.9	Kontrastierung.....	73
4.2	Härtemessung.....	76

4.2.1	Praktische Durchführung.....	78
4.3	Entstehung von Primär- und Sekundärkarbiden	81
4.4	Rasterelektronenmikroskop.....	81
5	Ergebnisse	83
5.1	Auswertung der Kräfte aus den Bohrversuchen.....	83
5.1.1	Vergleich der Bohrer mit unterschiedlicher LOT-Nummer von Synthes	85
5.2	Vergleich Bohrkraftverlauf der Originalgeometrie mit der neuen Geometrie.....	86
5.2.1	Originalgeometrie vs. neue Geometrie bei Synthes	87
5.2.2	Originalgeometrie vs. neue Geometrie bei Brasseler	88
5.2.3	Gegenüberstellung der neuen Geometrie von Synthes und Brasseler	89
5.3	Zerstörungsfreie Untersuchungen.....	90
5.3.1	Verschlossene Bohrer im REM	94
5.3.2	Oberfläche der Bohrerspitze	95
5.4	Vergleich der Verschleißerscheinungen mit der Literatur von Zopf	99
5.5	Resümee der Versuchsreihen.....	102
5.5.1	Resümee der Bohrungen mit Synthes.....	103
5.5.2	Resümee der Bohrungen mit Brasseler	103
5.6	Risse im Gefüge der Bohrer	104
5.7	Ermittlung der mittleren Korngröße	108
5.7.1	Prinzip der Ermittlung der Korngröße.....	109
5.7.2	Probenvorbereitung	109
5.7.3	Auswertung der Gefügaufnahme	111
6	Zusammenfassung.....	113
7	Ausblick.....	116
8	Literaturverzeichnis.....	118
9	Abbildungsverzeichnis	122
10	Tabellenverzeichnis.....	125
11	Diagrammverzeichnis	126
12	Abkürzungsverzeichnis.....	127
13	Anhang	i

1 Chirurgische Bohrungen

„Die chirurgische Forschung ist eine der reizvollsten Medizinwissenschaften mit einem breiten Methodenspektrum, das von der Grundlagenforschung, über die krankheitsbezogene Forschung bis hin zur patientenorientierten Forschung reicht“ (Krukemeyer 2005:19).

Dieses Kapitel soll einen Einblick in den Bereich der chirurgischen Knochenbohrer geben. Beginnend bei den Schneidwerkzeugen (Spiralbohrern), deren Herstellung, den eingesetzten Werkstoffen, bis hin zu möglichen Verschleißerscheinungen und -ursachen.

Dabei wird sowohl auf die physikalischen Größen eingegangen, welche bei Bohrungen auftreten, als auch werden biologische Grundlagen behandelt.

Der Einsatz von Schneidwerkzeugen in der Chirurgie kann auch erhebliche Folgen für den Patienten mit sich bringen. So führen laut Clement (Chirurg am UKH Graz) verschlissene Bohrer zu höheren Temperaturen während des Bohrvorgangs. Die Aufbringung höherer Bohrkräfte birgt die Gefahr des Überbohrens und der Verletzung des umliegenden Gewebes. (pers. Mitteilung Clement/UKH Graz, April 2013).

Wie auch Krukemeyer schreibt, handelt es sich bei der chirurgischen Forschung um ein äußerst reizvolles Thema. Dem Streben nach Perfektion, nach verschleißfesteren Materialien oder Alternativen, wie Hybridbohrern oder Beschichtungen von Bohrerstippen, sind dabei keine Grenzen gesetzt. Ebenso bietet der Bereich der Kontrolle von chirurgischen Utensilien vor der Operation noch eine große Vielfalt an Verbesserungsmöglichkeiten (Krukemeyer 2005:19).

1.1 Osteosynthese

Als Osteosynthese bezeichnet man das operative Verfahren in der Chirurgie, die Funktionsfähigkeit von z.B. gebrochenen (frakturierten) oder durch Erkrankungen geschädigten Knochen wiederherzustellen (<http://flexikon.doccheck.com/de/Osteosynthese>).

Im Zuge einer Erstoperation werden dabei die Bruchenden mit Implantaten (z.B. Metallplatten) durch Schrauben, Drähte oder Nägel fixiert und zusammengehalten. Vorteilhaft an diesem Verfahren, im Vergleich zum Gips, ist der schnellere Heilungsprozess und folglich die frühere erneute Belastbarkeit des Knochens (<http://de.wikipedia.org/wiki/Osteosynthese>).

Je nach Material des Implantats (Titan, oder bioabbaubare Magnesium-Kalzium-Legierungen) ist ein sekundärer Eingriff (Zweitoperation) erforderlich oder nicht. Dabei werden die eingebrachten Schrauben und Platten wieder entfernt. Bei dem Implantat aus Abbildung 1 handelt es sich um ein bioabbaubares Magnesiummaterial, welches den zweiten Eingriff nicht erfordert

(http://www.hzg.de/public_relations/press_releases/034437/index_0034437.html.de).



Abbildung 1: Implantatmaterial aus bioabbaubarem Magnesium;
(http://www.hzg.de/public_relations/press_releases/034437/index_0034437.html.de)

Unabhängig von den verwendeten Materialien müssen aber die Bruchenden miteinander verbunden werden. Um eine derartige Verschraubung zu ermöglichen, werden durch den Einsatz von chirurgischen Schneidwerkzeugen, im vorliegenden Fall durch Spiralbohrer, Löcher gebohrt (<http://flexikon.doccheck.com/de/Osteosynthese>). Die eingesetzten Metallplatten werden über der Bruchstelle positioniert und durch Schrauben im Knochen fixiert.

„Bohrwerkzeuge finden in der Medizin ein weites Einsatzfeld. Durch die bei der spanenden Bearbeitung des Knochens entstehende Wärme kann der Knochen thermisch geschädigt werden. Ein Temperaturanstieg war mit dem Verschleißfortschritt des Bohrers zu verzeichnen. Nach 20 bis 30 Bohrlöchern ist ein Spiralbohrer soweit verschlissen, dass er nachgeschliffen werden muss. Eines der größten Probleme beim Bohren von Knochen ist die mögliche thermische Schädigung des Knochengewebes. Dadurch wird die Regenerationsfähigkeit des Knochens stark herabgesetzt und der Heilungsprozess verzögert

sich um eine erhebliche Zeit“ (Fuchsberger 1986:54). Im Vergleich dazu traten bei der DA Zopf derartige Verschleißerscheinungen weit früher ein - und zwar bereits nach der 14. Bohrung (s. Kap. 5.4, Seite 100, Abb. 85) (Zopf 2011:39ff).

Es wird zwischen 3 Typen von Osteosynthese unterschieden:

1. Schraubenosteosynthese:

Dabei handelt es sich um die Fixierung der Bruchstücke durch Schrauben. Diese bestehen in der Regel aus Titan oder Titanitrid-Legierungen. Beim Bruch von großen Knochen im Körper werden aufgrund der starken Kräfte zusätzlich zu den Schrauben Platten verwendet.

Am Beispiel einer Abriss-Fraktur der Tuberositas tibiae (Schienbeinplateau) wird dieser Osteosynthesetyp veranschaulicht. Bei dieser Art von Knochenbruch handelt es sich um ein Herausreißen eines Knochenfragments durch einen starken Zug an einer im Knochen verankerten Sehne (<http://www.mta-r.de/blog/2011/09/20/fallbeispiel-abriss-fraktur-tuberositas-tibiae.html>).



Abbildung 2: Ausriss der Tuberositas tibiae
<http://www.mta-r.de/blog/2011/09/20/fallbeispiel-abriss-fraktur-tuberositas-tibiae.html>

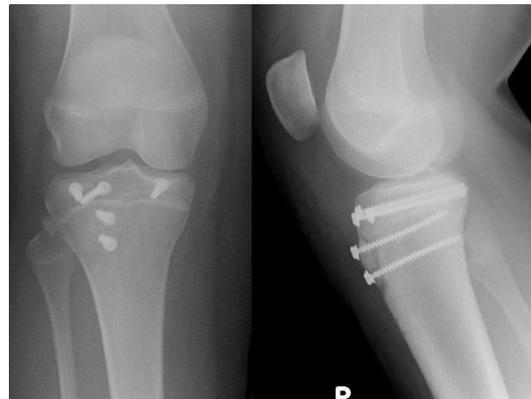


Abbildung 3: Schraubenosteosynthese (<http://www.mta-r.de/blog/2011/09/20/fallbeispiel-abriss-fraktur-tuberositas-tibiae.html>)

2. Plattenosteosynthese:

Hier kommt es zu einer Kombination mit der Schraubenosteosynthese unter Verwendung von Metallplatten. Diese helfen die auftretenden Belastungen besser zu verteilen.

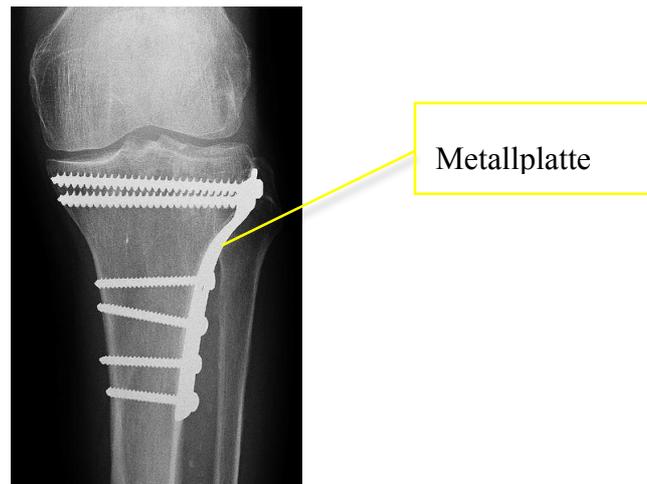


Abbildung 4: Tibiakopffraktur mit Plattenosteosynthese (<http://www.rkh-kassel.de/typo3temp/pics/41ebd3ad68.jpg>)

3. Marknagelosteosynthese:

Nach der Fraktur eines großen Röhrenknochens dient diese Art der Osteosynthese zur Wiederherstellung der Knochenintegrität. Ein Marknagel wird in die Markhöhle eingetrieben und dient dort zur Stabilisierung des Knochens. Der Nagel wird zusätzlich mit Schrauben durch die Enden des Bruchstückes befestigt und stabilisiert.

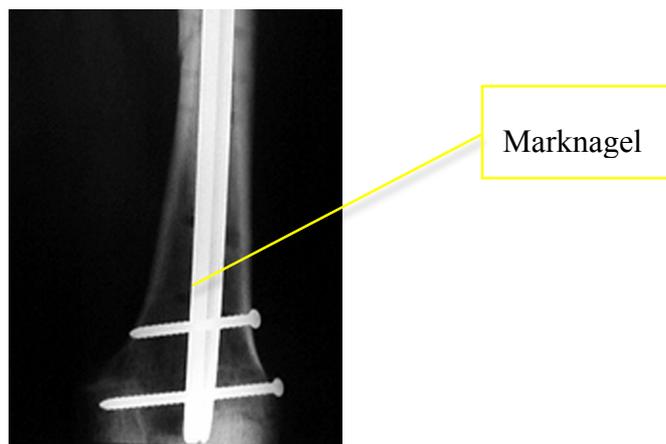


Abbildung 5: Marknagel für Oberschenkelfrakturen (<http://www.klinikverbund-suedwest.de/809.0.html>)

Als Vorteile der Osteosynthese wurden zuvor schon der schnellere Heilungsprozess und die frühere Belastbarkeit des frakturierten Knochens erwähnt. Jedoch ist dieses Verfahren einerseits von der Art der Verletzung und andererseits auch vom Zustand der verletzten Person abhängig. Vor allem bei älteren Menschen ist sowohl beim Eingriff mit höheren Operationsrisiken zu rechnen, als auch können bei konservativen Behandlungen mehrere Komplikationen auftreten (<http://flexikon.doccheck.com/de/Osteosynthese>).

Die Verwendung von spanenden Werkzeugen in der Medizin birgt mitunter die Gefahr von Infektionen, die Schädigung des Gewebes, die Schwächung des Knochens, oder erfüllt schlussendlich nicht die erwünschte Bearbeitungsqualität (Fuchsberger 1988:339).

Bei nicht operativ bedingten Gefahren könnte es sich z.B. um Osteoporose, Thrombose oder Lungenentzündung handeln (<http://flexikon.doccheck.com/de/Osteosynthese>).

„Die spanende Bearbeitung von Knochen hat ein breites Einsatzgebiet in der Medizin. Es kommen vor allem die Bearbeitungsverfahren Bohren, Sägen, Fräsen und Schleifen zum Einsatz“ (Fuchsberger 1988:339).

1.2 Bohrwerkzeug

Ein zweiseitiger Wendelbohrer, auch üblicherweise als Spiralbohrer bezeichnet, ist der am meisten verwendete Bohrertyp (Feurer 2009:o.S.).

Dobler beschreibt ihn als das am häufigsten verwendete Werkzeug bei Bohrvorgängen. Im Wesentlichen besteht der Spiralbohrer aus einem Schaft und einem Schneidteil mit Bohrspitze (Dobler 2003:113).

Abgesehen von Bohrern, deren Spitzen mit diversen Beschichtungen (z.B.: Titan) hergestellt sind, um die gewünschten Gebrauchseigenschaften zu verbessern, kommen heutzutage auch Bohrer mit Spitzen aus anderen Werkstoffen (z.B.: Zirkoniumoxid) zum Einsatz (Begriff Hybridbohrer).

1.2.1 Kräfte beim Bohren

„Beim Bohren führt meist das Werkzeug eine kreisförmige Schnittbewegung aus, wobei die Vorschubbewegung geradlinig in Richtung der Rotationsachse erfolgt (Abbildung 6). Durch die Vorschubkraft dringen die Werkzeugschneiden in den Werkstoff ein. Die kreisförmige Schnittbewegung erzeugt die Schnittkraft“ (Dobler 2003:112).

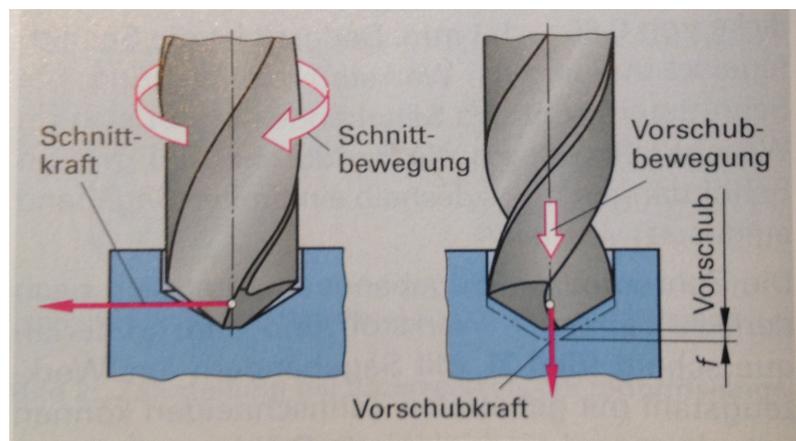


Abbildung 6: Bewegungen beim Bohren (Ebd.:112)

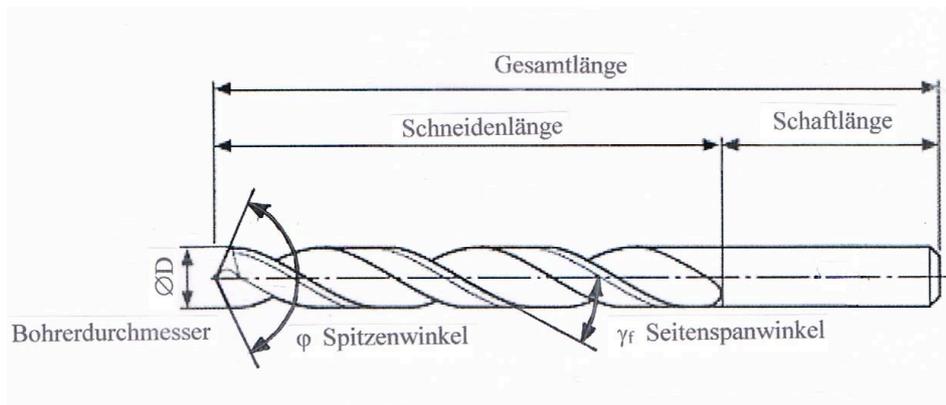


Abbildung 7: Allgemeiner Spiralbohrer (http://145.253.206.136/bosch/ew-wissen/content/themen/1500_fragen_und_antworten/bohren/bohrer/9/index_ger.html?preview=preview)

Kreisförmige Bewegungen des Werkzeuges führen bei der Berührung des Werkstoffes zu Reibungswärme. Wie im Kapitel 1.3.1 „Auswirkungen einer zu hohen Zerspanntemperatur“ später erläutert wird, dringt die erzeugte Wärme in das Knochengewebe ein.

1.3 Die Zerspanntemperatur und Wärmeabfuhr

Bei allen Zerspanarbeiten ergeben sich Wärmequellen. Diese entstehen durch die Umwandlung der mechanischen Arbeit entsprechend dem Wärmeäquivalent. Diese Wärmeentwicklung entsteht wie folgt:

- „In der Scherzone und im Werkstück nahe der Scherzone durch plastische Verformung des Werkstoffes;
- Vor der Schneidkante des Werkzeuges durch die Trennarbeit und die vom Zustand des Werkzeuges abhängige Reibung eines Teiles der Freifläche auf der Werkstückoberfläche;
- Auf der Spanfläche des Werkzeuges durch die äußere und innere Reibung des ablaufenden Spanes;
- In der Kontaktzone Spiralbohrer und Bohrungswand durch die Reibung der Fase der Nebenflechte des Spiralbohrers an der Bohrungswand;
- In der Kontaktzone von Span und Bohrungswand durch die Reibung der ablaufenden Späne an der Bohrungswand“ (Fuchsberger 1984:311).

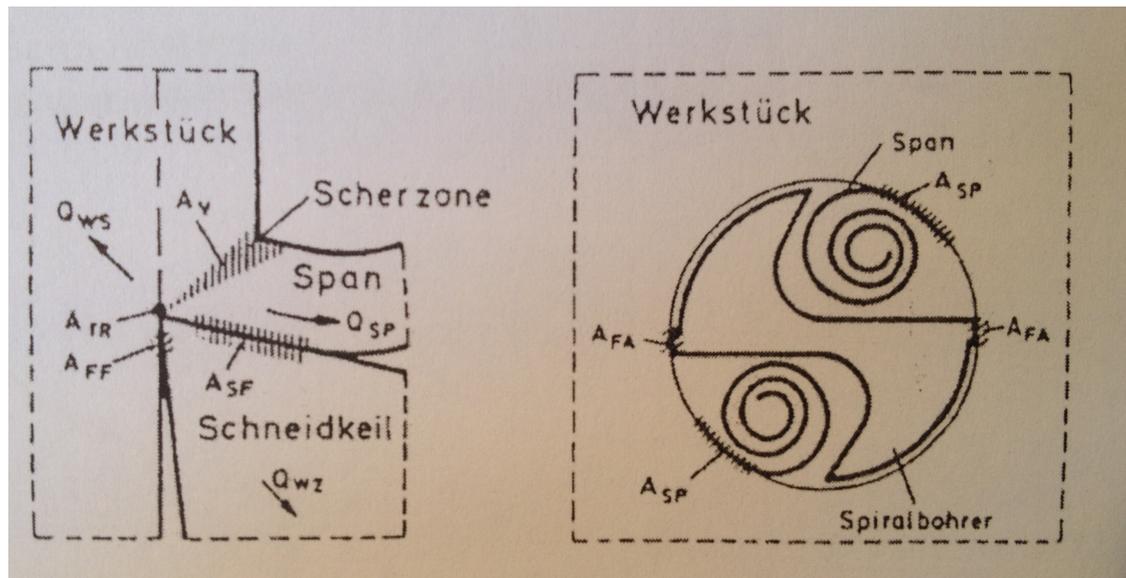


Abbildung 8: Wärmeerzeugung beim Bohren (Ebd.:311)

Die Intensität von auftretenden Hitzenekrosen¹ im Bereich der Knochenbohrungen ist von dieser Wärmeentwicklung abhängig. Die zuvor erwähnten Wärmeentwicklungszonen führen natürlich während des Trennvorganges nicht zu einem direkt proportionalen Anstieg der Temperatur.

Die Temperatur kann durch folgende Parameter verändert werden:

- „Lage der Wärmequellen
- Örtlich entstehende Wärmemengen (Leistung)
- Wärmeleitfähigkeit des zerspanenden Werkstoffes und des Schneidstoffes
- Größe der wärmeabführenden Querschnitte
- Kontaktzeit von Werkstück/Werkzeug und Werkzeug/Span
- Zusätzliche Wärmeabführung“ (Fuchsberger 1986:54).

Fuchsberger weist auf die Gefahr der Gewebeschädigung bei Knochenbohrungen hin und darauf, die Schnittkraft möglichst gering zu halten, damit die Zerspanntemperatur niedrig bleibt (Fuchsberger 1984:312).

1.3.1 Auswirkungen einer zu hohen Zerspanntemperatur

Wie bereits im Kapitel 1.1 erwähnt wurde, gelten die Wärmeentwicklung und die dadurch mögliche thermische Schädigung des umliegenden Knochengewebes als eines der größten Probleme beim Bohren mit chirurgischen Knochenbohrern. Der damit verbundene schlechtere

¹ Nekrose (gr.): Das, in der Medizin bezeichnete, Absterben einzelner oder mehrerer Zellen; Gewebstod (Drosdowski 1989:1069)

Heilungsprozess erfordert den Einsatz von schneidfähigen Werkzeugen, um die auftretende Schnittkraft zu reduzieren.

Ebenso ist die Wahl der Bohrparameter von entscheidender Bedeutung, um eine möglichst geringe Temperatur während des Bohrvorganges zu erreichen. Laut Fuchsberger wird eine Verringerung der entstehenden Wärmemenge über die Senkung der Bohrarbeit erzielt. Erreicht wird dies durch eine niedrigere Schnittkraft bei geeigneter Wahl der Schnittbedingungen und der Werkzeuggeometrie (Ebd.:54).

„Die Schnittkraft hängt jedoch nicht nur von den Schnittbedingungen und der Werkzeuggeometrie ab, sondern auch noch von weiteren Parametern wie z.B. vom Verschleißzustand des Werkzeuges. Durch Senkung der Kontaktzeit des Werkzeugs mit dem Knochen und durch den Einsatz von Kühlmitteln kann die Temperatur gesenkt werden“ (Fuchsberger 1986:54f.).

Mit einem zunehmenden Verschleiß des verwendeten Werkzeuges steigt die Temperatur, da es zu höheren Reibkräften zwischen Werkzeug und Knochen kommt. Diese Wärme wird folglich in das Knochengewebe geleitet und fließt sehr schwer ab. Diese Beeinträchtigung der Kortikalis kann die Festigkeit des Implantates herabsetzen und dessen (frühere) Lockerung bewirken (Schmelzeisen 1990:83).

„Aus allen Untersuchungen geht hervor, dass mineralisiertes, biologisches Gewebe eine hohe spezifische Wärme und eine relativ schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzt“ (Schmelzeisen 1990:10).

1.3.2 Auswirkungen thermischer Gewebeschädigung

Zu hohe Temperaturen führen zu einer Schädigung des Knochengewebes.

„Bone temperature must be below the temperature of 47 °C during drilling to avoid thermal osteonecrosis“ (Augustin 2012:313).

Als Osteonekrose bezeichnet man den Infarkt des Knochens bzw. eines Knochenabschnittes, welcher zu einem Absterben (Nekrose) des betroffenen Teiles führt (<http://flexikon.doccheck.com/de/Osteonekrose>).

Die Wärmeentwicklung beim Bohren und Sägen führt zu einer Hemmung der Regenerationsfähigkeit des Knochens. Deshalb wurde damals schon auf die Verwendung von möglichst scharfen Bohr- und Schneidinstrumenten hingewiesen (Schmelzeisen 1990:16).

Temperaturmessungen bei Knochenbohrungen erweisen sich seit geraumer Zeit als sehr schwierig, wodurch aufgrund unterschiedlicher Messtechniken (Messung durch Thermoelemente und Infrarot-Kamera) unterschiedliche Temperaturbereiche festgestellt wurden (Augustin 2012:313ff).

„Der nach thermischen Noxen² auftretende Temperaturabfall zwischen der Haut und den tiefer gelegenen Gewebestrukturen wurde mit Hilfe von Thermosonden gemessen. [...] Je kürzer die Einwirkungszeit ist, desto lokalisierter bleibt die Gewebeschädigung. [...] Das Ausmaß der Gewebeschädigung hängt von dem Wärmefluß, also von der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturdifferenz ab. Den größten Einfluss übt jedoch der Zeitfaktor aus; durch ihn wird der Grenzwert für die Gewebeschädigung, bzw. den Gewebetod, wesentlich bestimmt“ (Schmelzeisen 1990:11).

In der Abbildung 9 ist die Bedeutung der Einwirkungszeit im Hinblick auf die Zellschädigung dargestellt. Die Bohrdauer ist natürlich wiederum abhängig von der Beschaffenheit des Bohrers, der Kortikalisdicke und auch von der Härte des Knochens.

Bei den praktischen Bohrversuchen wird in der Regel mit einer Einwirkzeit von ca. 5 sec gerechnet. Laut dem Diagramm würde sich dadurch eine Temperatur von ca. 60 °C ergeben (Ebd.:11).

Aufgrund der Kortikalisdicke von 4,3 mm beim Kunstknochen, der im Zuge dieser Arbeit verwendet wurde (Kap. 3.1.4, Seite 48, Abb. 42), und der eingestellten Vorschubgeschwindigkeit von 70 mm/min, errechnet sich bei den Versuchsbohrungen eine Einwirkzeit von ca. 3,7 sec. Dies würde einer Temperatur von ca. 62 °C entsprechen.

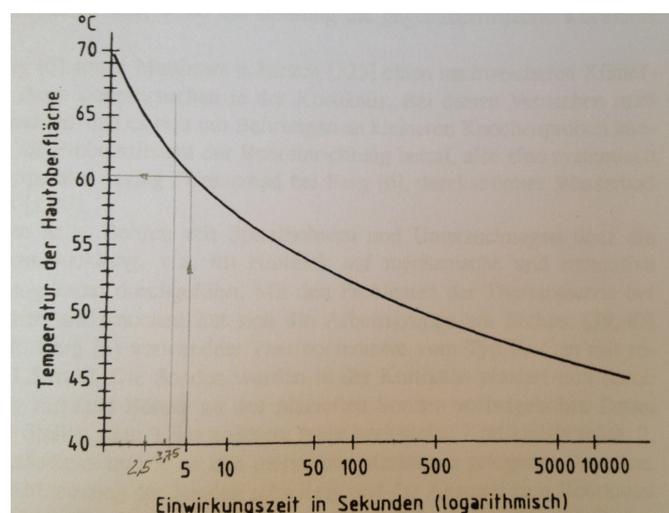


Abbildung 9: Temperatur in Abhängigkeit der Einwirkzeit (Schmelzeisen 1990:11)

² Noxe (lat.): „Stoff od. Umstand, der eine schädigende Wirkung auf den Organismus ausübt“ (Drosdowski 1989:1086).

1.3.3 Wärmeabfuhr

Die entstehende Wärme bei den Zerspanarbeiten muss auch wieder aus der Bearbeitungszone abgeführt werden. Dies erfolgt entweder von selbst, oder man versucht, die Temperaturerhöhung während des Einsatzes auf ein Minimum zu reduzieren. Die Möglichkeiten der Wärmeabfuhr während des Bearbeitungsprozesses sind in der Metalltechnik die Außen- oder Innenkühlung. Bei der äußeren Kühlung hilft dabei ein Wasser-Öl-Gemisch, welches während des Bohrvorganges auf die zu bearbeitende Stelle gespritzt wird. Bei der Innenkühlung hingegen zirkuliert im Bohrer dieses Gemisch durch zwei Innenbohrungen. Diese wird meist in Kombination mit der Außenkühlung eingesetzt (Fuchsberger 1986:56f.).

Auch in der Medizintechnik sind Bohrer mit Innenkühlung schon verfügbar (siehe Kapitel 2.3.1 „Spiralknochenbohrer“). Erfahrungen bzgl. der Temperaturreduktion bei derartigen Spiralbohrern liegen nicht vor. Ansonsten kommt als Kühlmittel eine physiologische Kochsalzlösung zum Einsatz. Diese Lösung dient nicht nur zur Wärmeabfuhr, sondern auch als Spülung im Arbeitsbereich.

„Dies zeigt deutlich auf, dass die physiologische Kochsalzlösung nur zur zusätzlichen Wärmeabfuhr vom Werkzeug dient. Durch den Einsatz eines Kühlmittels kann also die schädigende Wirkung auf den Knochen erheblich verringert werden“ (Fuchsberger 1986:57).

1.4 Schädigung durch eisenhaltige Rückstände

Der Verlust der Schneidfähigkeit der Spiralbohrer führt neben dem Temperaturanstieg während des Bohrvorganges auch zu einer Schädigung des Knochengewebes infolge der eisenhaltigen Rückstände im Bohrloch. Sämtliche eisenhaltige Partikel, die durch den Abrieb der Schneiden, oder auch durch Teilchen im Falle eines Ausbruchs der Hauptschneiden entstehen, können beim Bohrvorgang nicht zur Gänze herausgedreht werden und verbleiben im Gewebe. Wie auch Zopf bei seiner Diplomarbeit erläutert, können derartige Rückstände schädlich für den Organismus sein.

„Eisen, einerseits essentiell notwendiges Element für den Organismus, übt andererseits in der Umgebung von Implantaten/Prothesen offensichtlich massive nachteilige Auswirkungen z. B.: auf das Einwachsverhalten von Osteosyntheseplatten, Prothesen, Implantaten und Schrauben u. ä. aus. [...] Wenn diese Implantate aus eisenfreiem Material hergestellt sind, können diese Spuren nur von chirurgischen Instrumenten und durch deren Verschleiß bzw. Abrieb stammen. [...] Dieser bei der Operation eisenhaltige Abrieb sammelt sich offensichtlich im

periprotetischen Gewebe an und kann damit mitverantwortlich für die Lockerung von Schrauben und Prothesen gemacht werden“ (Patentschrift Medizinische Instrumente 2000:1f.).

1.5 Einfluss auf die Schnittkraft

Die Schnittgeschwindigkeit als qualitative Einflussgröße ist in Abbildung 10 von Fuchsberger graphisch dargestellt.

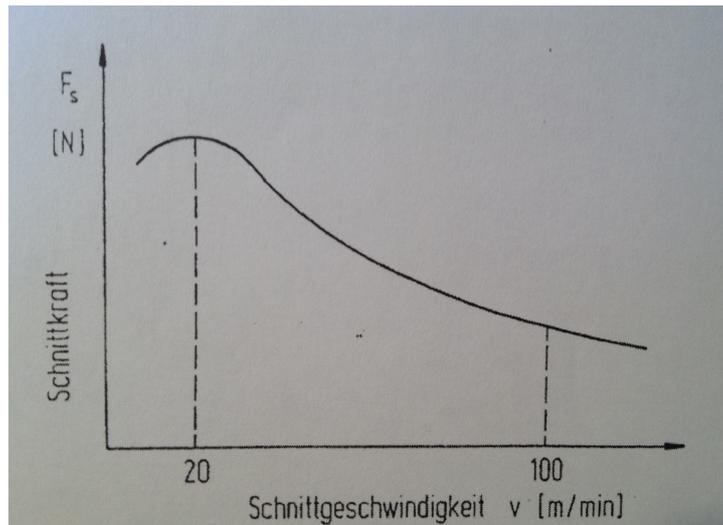


Abbildung 10: Schnittkraft in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit (Fuchsberger 1984:312)

Wie beispielsweise im Diagramm der Schnittkraft in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit ersichtlich ist, nimmt die Kraft mit steigender Geschwindigkeit ab. Diese Werte beziehen sich allerdings nur auf die Werkstoffe Stahl, Stahlguss und Gusseisen im mittleren Vorschubbereich. Dieser Vorschub hat wiederum einen entscheidenden Einfluss auf die Schnittkraft.

Ebenso lässt sich eine leichte Steigerung der Temperatur in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit bzw. der Drehzahl erkennen. Fuchsberger erklärt dies durch die Einleitung von mehr Energie in den Zerspanprozess, welche sich wiederum in Wärme umwandelt. Aus diesem Diagramm wird ersichtlich, dass die Schnittgeschwindigkeit somit nur einen kleinen Einfluss auf die Temperatur des Knochens hat (Fuchsberger 1984:315).

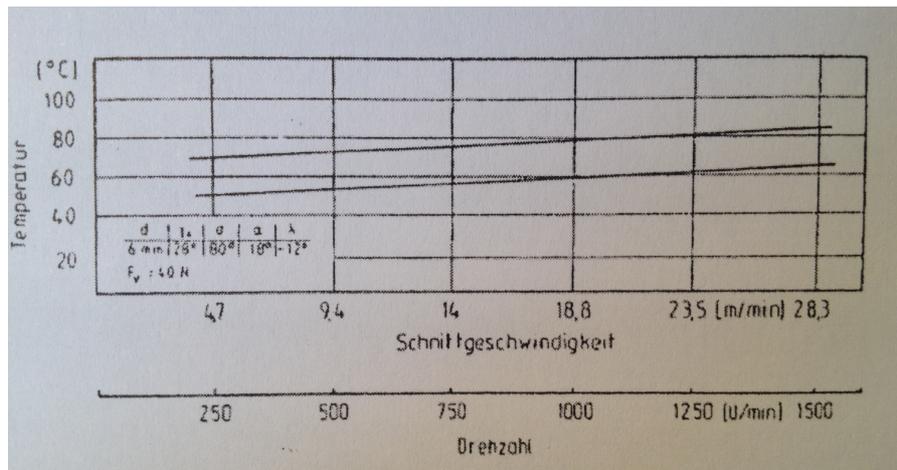


Abbildung 11: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Temperatur (Ebd.:315)

Wie zuvor von Fuchsberger beschrieben, werden die Einflussfaktoren auch bei den Knochenbohrungen eine wichtige Rolle spielen. Insbesondere die Reibung eines Teils der Freifläche vom Werkzeug auf der Werkstückoberfläche (dem Knochen) und die Reibung der Schneidlänge (s. Abb. 7, Seite 13) an der Bohrwand. Durch einen möglichen schlechten Abtransport bzw. durch das Vorliegen von Bohrmehl, wird dieser Reibfaktor sicherlich verstärkt werden – anders als bei Bruchspänen, welche sich in den Spannuten des Bohrers aus dem Bearbeitungsbereich herausbewegen. Diese Späne werden aber vorwiegend nur bei schneidfähigen Bohrwerkzeugen erreicht (siehe Kapitel 3.1.10).

„Beim Bohren [...] im Bereich der Kortikalis entstehen keine größeren Späne, sondern kleinere Partikel [...]“ (Schmelzeisen 1990:81).

1.5.1 Einfluss der Vorschubkraft beim Bohren von Knochen

Über den dargestellten Bereich von 10 bis 60 N lässt sich auch hier eine Abnahme der Temperatur erkennen (Abbildung 12). Die Temperaturabnahme beträgt dabei ca. 10 °C. Ausschlaggebend für diese Abnahme ist die kürzere Bohrdauer durch den erhöhten Vorschub. Somit verringert sich die Kontaktzeit zwischen dem Werkzeug und dem Knochen. Ausschlaggebend bei einer derartigen Betrachtung ist aber auch die Knochenzusammensetzung, welche natürlich für das Vorankommen des Bohrers und für dessen Verschleiß von Bedeutung ist.

Die Knochenmatrix besteht zu 60 - 70% aus anorganischen Materialien, vorwiegend Calciumsalze (in Form von Hydroxylapatit³), zu 10 - 15% aus Wasser und zu 20 - 25% aus organischen Substanzen (vorwiegend Kollagen) (<http://flexikon.doccheck.com/de/Knochen>).

³ hydroxyliertes Calciumphosphatsalz von hohem Härtegrad

Die Betrachtung der normierten Vergleichszeit über die Vorschubkraft zeigt, dass sich bei einer konstanten Erhöhung der Vorschubkraft die Bohrzeit nicht gleichmäßig verringert. Eine bestimmte Grenze kann dabei laut Fuchsberger nicht erniedrigt werden.

„Für den Zerspanprozeß bei der Knochenbearbeitung mit Spiralbohrern ist der Übergangsbereich der Kurve um die 40 bis 50 N der günstigste“ (Fuchsberger 1984:316).

Er begründet dies durch die starke Abnahme der Bohrzeit bis zu einer Vorschubkraft von 40 N. Weiter Krafterhöhungen bewirken kaum merkbare Verbesserungen der Bohrdauer (Ebd.:316).

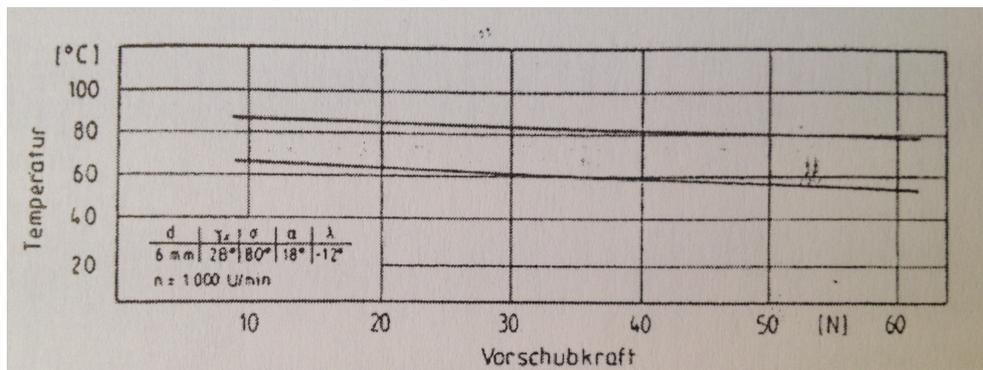


Abbildung 12: Einfluss der Vorschubkraft auf die Temperatur (Fuchsberger 1984:316)

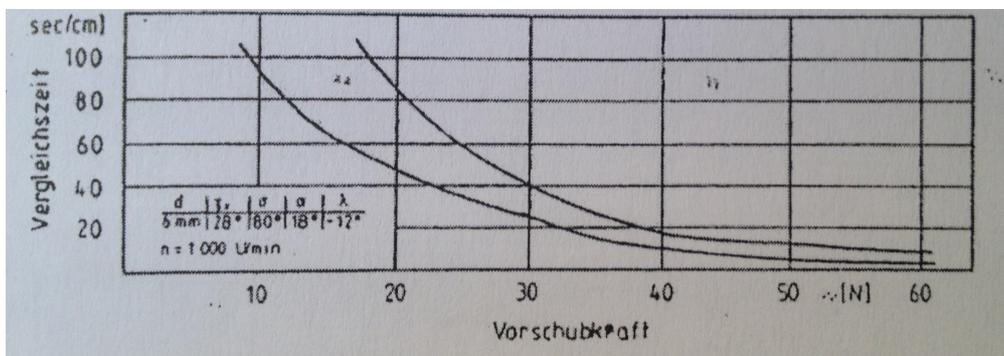


Abbildung 13: Normierte Vergleichszeit in Abhängigkeit der Vorschubkraft (Ebd.:316)

1.5.2 Schneidengeometrie

Wesentliche konstruktive Vorteile des Spiralbohrers, welche ihn zu einem unverzichtbaren Werkzeug im Bereich der Bohrererei gemacht haben, sind folgende:

1. „Richtiger, positiver Spanwinkel infolge des schraubenförmigen Anstiegs der beiden, an der Spitze bei den Schneidkanten beginnenden Nuten (kein Einschleifen).
2. Gleichbleiben des Durchmessers nach dem Schleifen, bis zuletzt (kein Schmieden).
3. Gute Führung durch die Fasen an den schraubenförmigen Stegen.
4. Gute Abfuhr der Späne durch die schraubenförmigen Nuten“ (Dinnebier 1949:12).

Die grundsätzliche Form der Bohrerschneide ist der Keil, wobei zwei gegenüberliegende, wendelförmige Spannuten die Haupt- und Nebenschneiden und die Führungsfasen bilden.

Die Hauptschneiden befinden sich an der Bohrerspitze. Die Schnittkraft wird durch die kreisförmige Schnittbewegung des Bohrwerkzeuges erzeugt. Durch das Zusammenwirken von Schnittkraft und Vorschubkraft dringt der Bohrer in den Werkstoff ein und die Hauptschneiden trennen das Material ab (Feurer 2009:Kap.B).

„Form und Steigung der Drallnut bestimmen die Größe des Spanwinkels γ (siehe Abbildung 14), der von seinem größten Winkel an der Schneidenecke zur Bohrermitte hin abnimmt und an der Querschneide negativ ist“ (Dobler 2003:113).

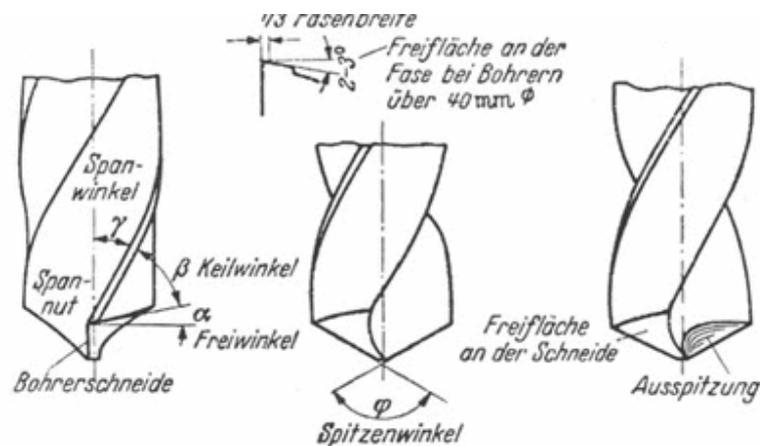


Abbildung 14: Bohrerwinkel (Dinnebier 1949:13)

„Als Ersatzmerkmal für den eigentlichen Spanwinkel wird der Seitenspanwinkel γ_f (siehe Abbildung 15) herangezogen, der am Umfang dem Drallwinkel entspricht. Dieser richtet sich nach dem zu bearbeitenden Werkstoff und wird den Typen N, H und W zugeordnet (s. Tabelle in Abbildung 16)“ (Dobler 2003:113).

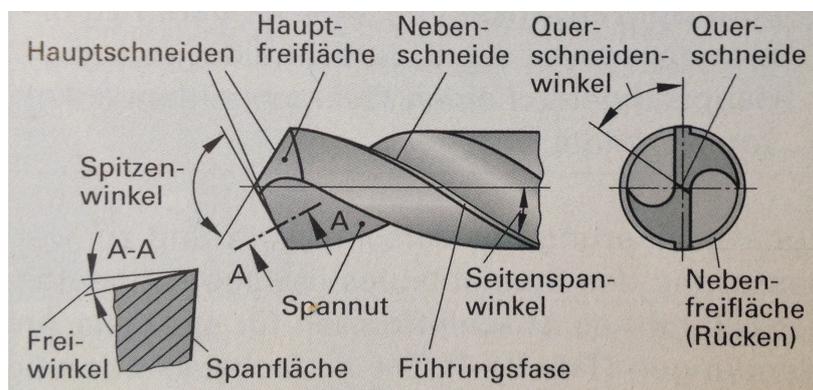


Abbildung 15: Schneiden an Spiralbohrern (Ebd.:113)

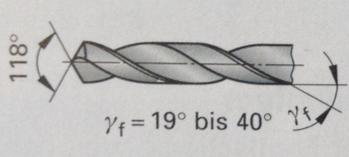
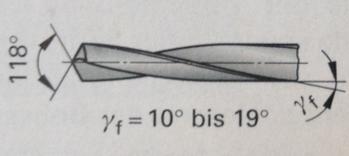
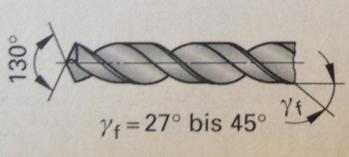
 <p>118° $\gamma_f = 19^\circ \text{ bis } 40^\circ$</p>	<p>Typ N normale Ausführung für weichen Stahl, Grauguss, nichtrostenden Stahl</p>
 <p>118° $\gamma_f = 10^\circ \text{ bis } 19^\circ$</p>	<p>Typ H für harte und spröde Werkstoffe, z. B. hochfester Stahl, Schichtpresstoffe</p>
 <p>130° $\gamma_f = 27^\circ \text{ bis } 45^\circ$</p>	<p>Typ W für weiche und zähe Werkstoffe, z. B. Aluminium-, Kupfer- und Zink-Legierungen</p>

Abbildung 16: Spiralbohrertypen (Ebd.:113)

Der Spitzenwinkel, wie in Abbildung 15 dargestellt, ist der Winkel zwischen den beiden Hauptschneiden. Dabei ist darauf zu achten, ob es sich um einen großen oder kleinen Winkel handelt. Spiralbohrer weisen in der Regel einen Spitzenwinkel von 118° auf (Ebd.:114).

Werkzeugtyp und Spitzwinkel von Wendelbohrern Nach DIN 1414		
Zu bearbeitender Werkstoff	Werkzeugtyp	Spitzenwinkel
Pressstoffe, Hartgummi, Marmor, Schiefer, Kohle	H	60°
Stahl und Stahlguss bis 700 N/m ² Zugfestigkeit, Gusseisen, Temperguss, Messing ab CuZn 40 bis CuZn 5, Cu-Ni 25 Zn 15, Nickel	N	118°
Messing bis CuZn 40 Pb 3	H	
Zinklegierungen, Weißmetall	W	
Stahl und Stahlguss über 700/mm ² Zugfestigkeit	N	130°
Nichtrostende Stähle, Kupfer über 30 mm Bohrerdurchmesser, kurzspanende Al-Legierungen	N	140°
Austenitische Stähle, Magnesiumlegierungen	H	
Kupfer bis 30 mm Bohrerdurchmesser, langspanende Al-Legierungen, Zelluloid	W	

Abbildung 17: Spitzwinkel in Abhängigkeit des Materials
(<http://www.elearnforum.net/index.php?m1=m1420&c1=c14251&c2=c14252&c3=c14253&c4=c>)

Zu große Winkel können zu einem Verlaufen der Bohrerspitze führen und somit den Bohrungsdurchmesser vergrößern. Ein geringerer Winkel hingegen gewährleistet eine gute und genaue Zentrierung, erhöht aber den Schneidenverschleiß (pers. Mitteilung Hr. Schrottner/TU Graz, April 2013).

Ein 90° Spitzenwinkel wird für Bohrungen von harten, meist stark verschleißend wirkenden Kunststoffen verwendet. Bohrer mit einem Winkel von 130° ergeben hingegen bei weicheren

und zäheren Werkstoffen eine geeignetere Spanabfuhr. Bei langspanenden Leichtmetallen wird ein Spitzenwinkel von 140° angeschliffen (Dobler 2003:114).

Der Freiwinkel entsteht durch das Hinterschleifen der Hauptfreiflächen. Dieser muss genau angepasst werden, da der Bohrer bei zu kleinem Winkel nicht frei schneidet und bei zu großem Winkel sowohl die Schneide geschwächt, als auch die Ratterneigung vergrößert wird. Die Querschneide erschwert den Spanungsvorgang, da sie den Werkstoff quetscht (Ebd.:114).

„Zur Verringerung der Vorschubkraft und zur Verbesserung des Spanablaufes im Querschneidenbereich gibt es Anschliffformen für spezielle Anwendungen (siehe Abbildung 18). Die einfachste Änderung des Normalanschliffes ist das Ausspitzen der Querschneide“ (Dobler 2003:114).

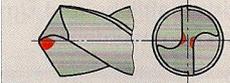
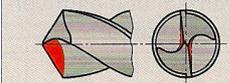
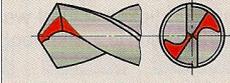
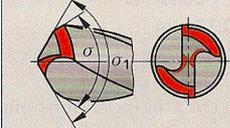
<p>ausgespitzte Querschneide</p> 	<p>geringere Vorschubkraft, verbesserte Zentriereigenschaften</p>
<p>Ausgespitzte Querschneide mit korrigierter Hauptschneide</p> 	<p>Stabilisierung des Bohrers, verhindert, dass der Bohrer sich in den Werkstoff einhakt und einzieht, ohne zu schneiden</p>
<p>Kreuzanschliff</p> 	<p>Querschneide wird in zwei Nebenschneiden aufgeteilt, Querschneidenrest 0,3 bis 0,5 mm, Anwendung bei Tieflochbohrern</p>
<p>Anschliff für Grauguss</p> 	<p>Spitzenwinkel von 118° ist durch einen zweiten von 90° ergänzt, Ausbrechen an der Schneidenecke wird verhindert, die Ableitung der Zerspannungswärme wird verbessert</p>

Abbildung 18: Anschliffformen von Spiralbohrern (Edb.:114)

1.5.3 Spanende Fertigung

Spanende Werkzeuge zeichnen sich insbesondere durch ihre Schneidenform und der Spanbildung an der Schneide während des Einsatzes aus. Ebenfalls haben die auftretenden Temperaturen und die Verschleißfestigkeit der Schneidstoffe Einfluss auf die Qualität der bearbeiteten Fläche (Dobler 2003:102).

1.6 Bohrerherstellung

Die Ermittlung der Herstellverfahren erwies sich als äußerst schwierig, da diesbezüglich keinerlei einschlägige Literatur auffindbar war. Die folgenden Aussagen bzgl. der Herstellverfahren von Spiralbohrern beruhen daher vorwiegend auf den Erfahrungen von Herrn Schrottner (TU Graz) und Herrn Salmhofer (Salmhofer GmbH, Vasoldsberg, A).

Die Produktion, insbesondere die geometrische Auslegung der Bohrer, hängt stark von dessen Einsatzgebiet ab – ebenso auch die Wahl des verwendeten Werkstoffes. So muss im Bereich der Medizintechnik auf die rostfreien, martensitischen Stähle mit hohem Chrom (Cr)-Gehalt zurückgegriffen werden (pers. Mitteilung Schrottner/TU Graz, April 2013). Bei etwaigen Beschichtungen der Bohrerspitze muss auf die Humanverträglichkeit geachtet werden (Zopf 2011:64f.).

1.6.1 Herstellung durch Fräsen und Schleifen

Der abgelängte Rundling wird bei diesem Verfahren in einer Spindel fixiert. Diese führt beim Fräsvorgang sowohl eine Vorwärts-, als auch eine Rotationsbewegung durch. Der Blank wird dazu durch eine Gehäuseöffnung geführt. Wie in Abbildung 19 ersichtlich ist, befindet sich darüber der rotierende Fräser. Beim Vorschub der Spindel werden dabei die Spannuten über die vorgesehene Schneidenlänge eingefräst.

Das Schärfen der Schneiden und die gewünschte Geometrieanpassung der Bohrerspitze erfolgen in einem separaten Schleifvorgang (pers. Mitteilung Schrottner/TU Graz, Mai 2013).

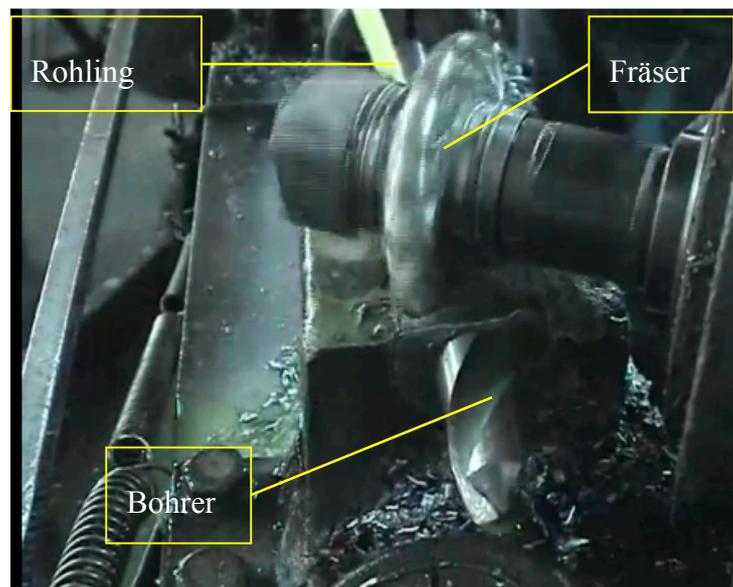


Abbildung 19: Herstellung Spiralbohrer durch Fräsen (<http://www.ecef.eu/de/2011/10/produzione-di-una-punta-da-trapano-per-fresatura-2/>)

1.6.2 Herstellung durch Schmieden, Winden und Schleifen

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Stahl zuerst zu walzen und auf die gewünschte Länge zu kürzen. Das weitere Walzen zwischen speziellen Rollen bildet eine Vertiefung auf dem Werkstück. Dieser sogenannte „Blank“ wird dann in eine Windemaschine eingeführt. Diese besteht im Wesentlichen aus einer hohlen Spindel, die den Blank erfasst und durch deren Umdrehungsbewegung verwindet. Durch die gleichzeitige Verschiebung der Spindel in

Achsrichtung des Rohlings entsteht eine konstante Verwindung. Das endgültige Maß erhält der Bohrer durch das Schleifen. Entscheidend bei diesem Verfahren des Schmiedens und Windens ist die Zentrierung des Bohrers (pers. Mitteilung Schrottner/TU Graz, Mai 2013).

1.6.3 Herstellung durch Walzen und Schleifen

Beim Walzverfahren wird der Rundling erhitzt (auf ca. 850 °C) und mechanisch in eine vorhandene Form geführt. Ein Gegenstück mit dem entsprechenden Bohrerdurchmesser nimmt den Schaft des Rohlings auf. Ab einer gewissen Position (Beginn der Schneidenlänge) wird durch den Druck von vier Walzen das Profil des Bohrers abgebildet. Nach Erreichen der Bohrer Spitze werden die Druckwalzen entlastet und der Bohrer aus der Form gedrückt. Das Endprodukt bei diesem Verfahren ist der Spiralbohrer, der wieder in einem zweiten Schritt durch den Schleifvorgang seine endgültige Geometrie erhält (pers. Mitteilung Schrottner/TU Graz, Mai 2013).



Abbildung 20: Herstellung eines Spiralbohrers durch Walzung



Abbildung 21: Spiralbohrer nach Walzvorgang (<http://www.ecef.eu/de/2011/10/produzione-di-una-punta-hss-da-trapano-per-rullatura/>)

Die verwendeten Synthes Bohrer (siehe Abb. 35, Seite 38) wurden vermutlich durch einen Walzvorgang mit anschließendem Schleifprozess hergestellt. Vor allem die Bohrer der Fa. Brasseler weisen eine sehr aufwendig gestaltete Bohrer Spitze auf (siehe Kapitel 2.3.1.1 „Geometrische Eigenschaften der verwendeten Bohrer“) (pers. Mitteilung Salmhofer, Juli 2013).

Laut Angaben der Fa. Brasseler erfolgt die Bohrerherstellung in folgenden Schritten:

- Vordrehen des Rohlings (ungehärteter Werkstoff)
- Härten
- Schleifen der Spiralnuten
- Schleifen der Spitzen
- Schaftschliff
- Endgraten.

1.7 Werkstoffe für Spiralbohrer

Grundsätzlich werden bei der Herstellung von Spiralbohrern Schnellarbeitsstahl (HSS = high speed steel) und Hartmetall (HM) verwendet. Der HSS ist ein hochlegierter Werkzeugstahl, der die Hauptlegierungselemente Wolfram, Molybdän, Vanadium und Kobalt aufweist (Dobler 2003:104). Durch den Zusatz dieser carbidbildenden Legierungselemente wird eine Warmhärte bis etwa 600 °C erreicht. Wolfram erhöht dabei die Zähigkeit und Warmhärte, Chrom steigert die Härtefähigkeit und die Durchhärtung. Vanadin verbessert neben der Warmhärte auch die Anlassbeständigkeit, ebenso wie Kobalt.

„Als Schnellarbeitsstähle (SS oder HSS) bezeichnet man solche Stähle, die durch die Anlassbeständigkeit der Grundmasse und durch den Zusatz von carbidbildenden Legierungselementen eine Warmhärte bis etwa 600 °C aufweisen. Von den Legierungselementen sind besonders wichtig: Wolfram (verbessert die Warmhärte und die Zähigkeit), Vanadin (erhöht die Warmhärte und die Anlassbeständigkeit), Chrom (steigert die Härtefähigkeit und die Durchhärtung) und Cobalt (erhöht die Anlassbeständigkeit)“ (Degner 2009:64f.).

Die grundsätzliche Unterscheidung der Schnellarbeitsstähle (HSS) erfolgt nach deren Formgebung: HSS-R entsteht durch Rollieren, HSS-G durch Schleifen und HSS-E (wie HSS-G, nur mit zusätzlicher Kobaltlegierung) durch Schleifen. Je nach den Legierungsbestandteilen (Wolfram und Molybdän) bilden sie vier Gruppen (s. Tab. 1.1) (<http://de.wikipedia.org/wiki/Schnellarbeitsstahl>):

	Wolfram [%]	Molybdän [%]
Gruppe 1	2	1
Gruppe 2	12	1
Gruppe 3	6	5
Gruppe 4	18	9

Tabelle 1.1: Gruppen der Schnellarbeitsstähle (<http://de.wikipedia.org/wiki/Schnellarbeitsstahl>)

1.7.1 Schneidstoffanforderungen

„Schneidstoffe für Zerspanwerkzeuge sind während ihres Einsatzes großen mechanischen und thermischen Beanspruchungen ausgesetzt, die zu starkem Verschleiß durch Abrieb oder zum Bruch des Schneidwerkzeuges führen können.

Damit die Schneiden eine möglichst große Standzeit haben, sollten sie die folgenden Eigenschaften besitzen:

- *große Warmhärte, d. h. die Werkzeugschneide muss auch bei hohen Temperaturen noch hart genug sein, um in den Werkstoff einzudringen*
- *hohe Verschleißfestigkeit, d. h. Widerstandsfähigkeit gegen mechanischen Abrieb sowie gegen chemische und physikalische Einflüsse wie Oxidation und Diffusion*
- *hohe Wärmewechselbeständigkeit, damit sich bei stark wechselnden Arbeitstemperaturen keine Risse bilden*
- *große Druckfestigkeit, um Verformungen und Ausbröckelungen der Schneidkanten zu vermeiden*
- *große Zähigkeit und Biegefestigkeit, damit die Werkzeugschneide auch schlagartig auftretende Beanspruchung aushält und die scharfe Schneidkante nicht ausbricht“* (Dobler 2003:103).

Insbesondere im chirurgischen Bereich würde ein Bruch eines Spiralbohrers schlimme Folgen mit sich führen. Alleine das Entfernen des Bohrerbruchstückes aus dem Bohrloch könnte sich als sehr mühsam erweisen.

Folgende Risiken bestehen im Allgemeinen beim Einsatz von Knochenbohrern (pers. Mitteilung Clement/UKH Graz):

- schlechte Bohrqualität, v. a. durch verschlissene Bohrer
- Infektionen (ausgelöst durch Nekrose)
- geringere Haltbarkeit von Schrauben im toten Gewebe aufgrund zu hoher Temperatur
- Bruch des Bohrers während dessen Einsatz (bei zu geringer Bruchzähigkeit des Werkstoffes in Kombination mit zu hoher Vorschubkraft, oder durch schlechte axiale Aufbringung der Vorschubkraft beim Einsatz).

Die Auswirkung steigender Temperatur während des Bohrvorganges auf die Stabilität der Schrauben wurde von Schmelzeisen untersucht. Es ergaben sich niedrigere Haltefestigkeit von eingebrachten Schrauben bei stumpfen Bohrern im Vergleich zu einem scharfen (Schmelzeisen 1990:43).

	Normale Proben	Erhitzte Proben
Proximal	210, 212, 215, 217, 217, 218 (215)	170, 170, 174, 176, 176, 180 (174)
	225, 225, 230, 230, 232, 232 (229)	185, 185, 190, 194, 195, 195 (191)
	228, 230, 230, 235, 235, 235 (232)	195, 198, 200, 205, 208, 208 (202)
	232, 232, 235, 235, 240, 240 (236)	190, 194, 194, 196, 196, 198 (195)
	215, 218, 220, 220, 222, 225 (220)	202, 202, 206, 208, 210, 210 (206)
	218, 220, 220, 222, 225, 225 (222)	184, 184, 190, 190, 194, 195 (190)
Distal	214, 216, 218, 218, 220, 220 (218)	172, 172, 178, 184, 184, 188 (180)
	195, 195, 200, 200, 204, 206 (200)	150, 155, 158, 164, 165, 165 (160)
	Normale Proben	Stumpfe Bohrung
Proximal	232, 235, 236, 238, 240, 245 (238)	174, 174, 180, 180, 182, 186 (179)
	250, 256, 260, 260, 260, 260 (258)	200, 205, 210, 210, 212, 214 (209)
	246, 250, 250, 256, 256, 258 (253)	176, 178, 178, 180, 182, 186 (180)
	240, 244, 244, 248, 250, 252 (246)	170, 170, 174, 176, 178, 178 (174)
	238, 242, 245, 248, 248, 248 (245)	184, 194, 194, 200, 202, 206 (197)
	228, 232, 235, 235, 238, 240 (235)	150, 158, 160, 160, 162, 164 (159)
Distal	220, 224, 224, 225, 230, 230 (226)	148, 158, 160, 162, 162, 164 (159)
	216, 220, 220, 224, 226, 228 (222)	148, 150, 154, 154, 160, 160 (154)

Abbildung 22: Mittlere Haltefestigkeit von Schrauben (Ebd.:43)

Deshalb achtet man bei der Wahl der Werkstoffe neben der Verschleißfestigkeit und Härte auch auf die Zähigkeit und Biegefestigkeit (1490 – 1820 N/mm² bei AISI 440A, 1670 – 2050 N/mm² bei AISI 440B). Informationen über diese Zähigkeits- und Festigkeitswerte konnten nicht in Erfahrung gebracht werden.

Wie in Abbildung 23 ersichtlich, weist der Schnellarbeitsstahl eine geringere Verschleißfestigkeit und Härte, aber eine höhere Zähigkeit und Biegefestigkeit im Vergleich zu Hartmetall- oder Keramikwerkstoffen auf. Aufgrund dieser hohen Zähigkeit eignet sich der Schnellarbeitsstahl sehr für Spiralbohrer. Solche Bohrer werden zusätzlich mit Beschichtungen (meist Titannitrid TiN) versehen, um den Verschleiß zu vermindern und eine Leistungssteigerung hervorzurufen (Dobler 2003:115).

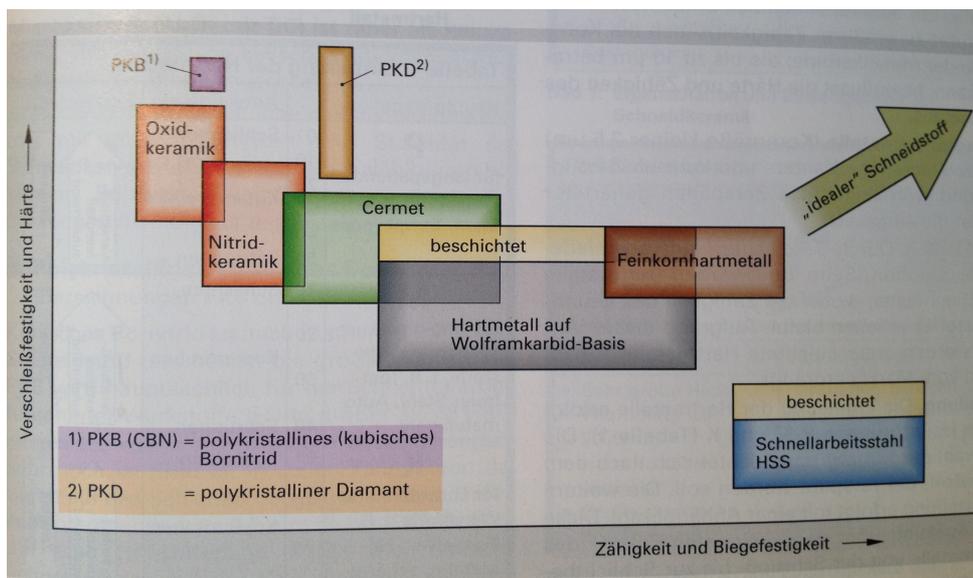


Abbildung 23: Verschleißfestigkeit und Zähigkeit von Schneidstoffen (Ebd.:103)

1.7.2 Standbegriffe

Für sämtliche Spannungsvorgänge sind, in Bezug auf deren Effektivität, die Standbegriffe von entscheidender Bedeutung. Sie sprechen für die Fähigkeit des Wirkpaares Werkzeug-Werkstück/Knochen den jeweiligen Spannungsvorgang umzusetzen (Degner 2009:44).

1.7.2.1 Standvermögen

Darunter versteht man die Fähigkeit des Wirkpaares Werkzeug – Werkstück einen bestimmten Spannungsvorgang durchzuführen.

Charakteristisch dafür sind:

- Schneidfähigkeit des Werkzeuges, um einen Werkstoff spanend zu bearbeiten.
- Schneidhaltigkeit des Werkzeuges bzw. Beibehaltung der Schneidfähigkeit.
- Spanbarkeit des Werkstücks bzw. des Werkstoffs (Ebd.:44).

Das Standvermögen setzt sich folglich, wie in Abbildung 24 dargestellt, aus den Standbedingungen, den Standkriterien und den Standgrößen zusammen (Ebd.:45).

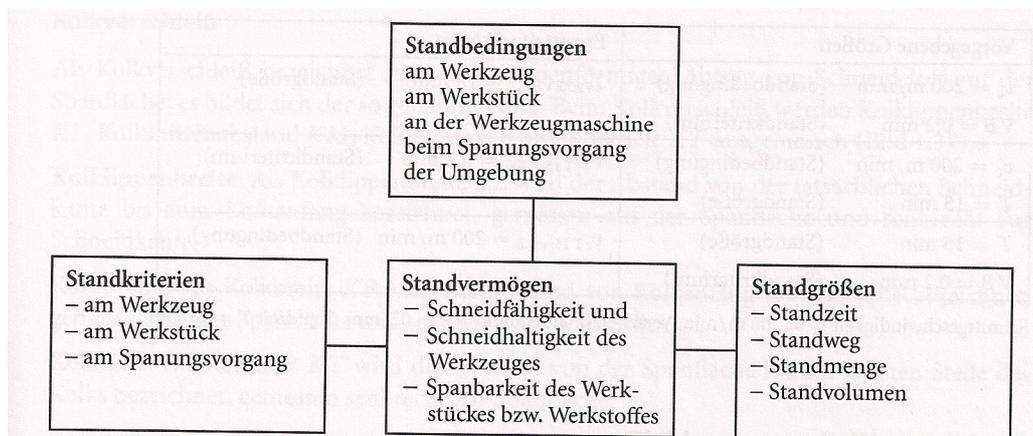


Abbildung 24: Standbegriffe (Ebd.:45)

Standbedingungen sind sämtliche Bedingungen, welche beim jeweiligen Spannungsvorgang vorliegen, wie z.B. Gestalt des Werkzeuges, dessen Schneidengeometrie, Werkstoffeigenschaften oder der Schneideneingriff beim Spanungsprozess.

Unter Standkriterien versteht man mögliche auftretende Grenzwerte bzw. unerwünschte Veränderungen während des Arbeitsprozesses, wie z.B. Standzeit, Standweg, Standmenge oder Standvolumen (Ebd.:45).

1.8 Parameter der Schneidleistung

Die relevanten Parameter der Schneidfähigkeit eines Bohrers sind der Vorschub s [mm/U], die dafür ausschlaggebende Vorschubkraft P [N], das Drehmoment M [Nm], die Umdrehungszahl n [U/min] und die Radialkräfte [N]. Diese Kräfte treten beim Bohren an den Schneidkanten und an den Ecken auf und sind für die Zerspanarbeit und die Wärmeentwicklung von Bedeutung (Schmelzeisen 1990:6).

1.9 Verschleiß und Verschleißursachen

„Die Verschleißbeanspruchung des Werkzeuges hängt sehr stark von den Spannungsparametern, besonders der Paarung Werkstoff/Schneidstoff und dem zeitlichen Verlauf ab. Damit stellen sich unterschiedliche Verschleißursachen mit unterschiedlichen Verschleißmechanismen ein“ (Degner 2009:81):

- **Abrasiver Verschleiß:**

Diese Art von Verschleiß charakterisiert den mechanischen Abtrag des Schneidwerkzeuges, welcher durch die Reibung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück hervorgerufen wird. Der Ausbruch der Werkzeugschneiden fällt ebenso in diese Kategorie. Verstärkt wird dieser Mechanismus insbesondere durch hohe Oberflächentemperaturen (Ebd.:81).

- **Diffusionsverschleiß:**

Darunter versteht man das Wandern von Schneidstoffteilen in den Werkstoff oder auch in die entgegengesetzte Richtung, also vom Werkstoff in den Schneidstoff. Bei dieser Verschleißart spielt die Temperatur eine entscheidende Rolle, da diese Teilchenwanderung bei hohen Temperaturen auftreten kann (Ebd.:81).

- **Oxidationsverschleiß:**

Charakteristisch dafür ist die auftretende Verzunderung, welche durch die Aufnahme von Luftsauerstoff entsteht. Dabei oxidieren bei hohen Schnitttemperaturen (ab ca. 700 °C) frei liegende Schneidteile. Dies kann – bei hoher Temperatur und bei Oxidationsneigung vom Schneidstoff – an Rändern der Kontaktzonen auftreten. Diese Art von Verschleiß hat eine zerstörende Wirkung, sodass es zum Ausbruch der Schneidenecke führen kann (Ebd.:81f.).

- **Adhäsiver Verschleiß:**

Hier kommt es zu einer Press-Schweißung, bei der Sauerstoffteilchen mit der Unterseite des Spans kaltverschweißt werden. Dabei kann der Werkstoff auch am

Schneidkeil abgelagert werden, was zur Bildung einer Aufbauschneide führt (Ebd.:82).

„Der Schneidenverschleiß setzt sich stets aus den erläuterten Verschleißursachen zusammen, wobei je nach Schnittbedingungen, Paarung Werkzeug/Schneidstoff etc. die einzelnen Anteile am Gesamtverschleiß verschieden groß sein können. Bei höheren Schnittgeschwindigkeiten und damit höherer Schnitttemperatur wird immer abrasiver (mechanischer) Verschleiß [...] auftreten“ (Degner 2009:82).

Die Unterscheidung der Verschleißarten bezüglich der Bohrergeometrie erfolgt nach Degner wie folgt (Ebd.:46f.):

- Freiflächenverschleiß:
Als solchen bezeichnet man den beinahe gleichmäßigen Abtrag des Schneidstoffes an der Freifläche vom Werkzeug. Gemessen wird diese Verschleißmarkenbreite in der Schneidenebene senkrecht zur Schneidkante, von der tatsächlichen Schneidkante bis zu einer ausgleichenden Geraden, parallel zur Schneidkante durch die Verschleißgrenze.
- Spanflächenverschleiß:
Abtrag der Spanfläche (u. U. mit zunehmender Schneidkantenabrundung).
- Schneidkantenverschleiß:
Ist der gleichmäßige Abtrag vom Schneidstoff entlang der Schneidkante.
- Kolkverschleiß:
Der muldenförmige Abtrag von Schneidstoff auf der Spanfläche wird als Kolkverschleiß bezeichnet. Dabei entsteht der so genannte Kolk. Dabei unterscheidet man zwischen Kolkklippenbreite⁴ KL, Kolkmittenabstand⁵ KM, Kolkbreite⁶ KB, und Kolktiefe⁷ KT (Ebd.:47).
- Spitzenverschleiß:
Die Schneidenspitze wird dabei abgerieben (Ebd.:82f.).

⁴ Abstand von der tatsächlichen Schneidkante bis zum Kolkfang; senkrecht gemessen von der Spanfläche bis zur Schneidkante

⁵ Abstand von der tatsächlichen Schneidkante bis zur Mitte des Kolks

⁶ Abstand von Kolkfang bis Kolkende

⁷ Abstand von der Spanfläche bis zur tiefsten Stelle des Kolks

Die Auswirkungen des Verschleißes sind in Abbildung 25 von Degner zusammengefasst:

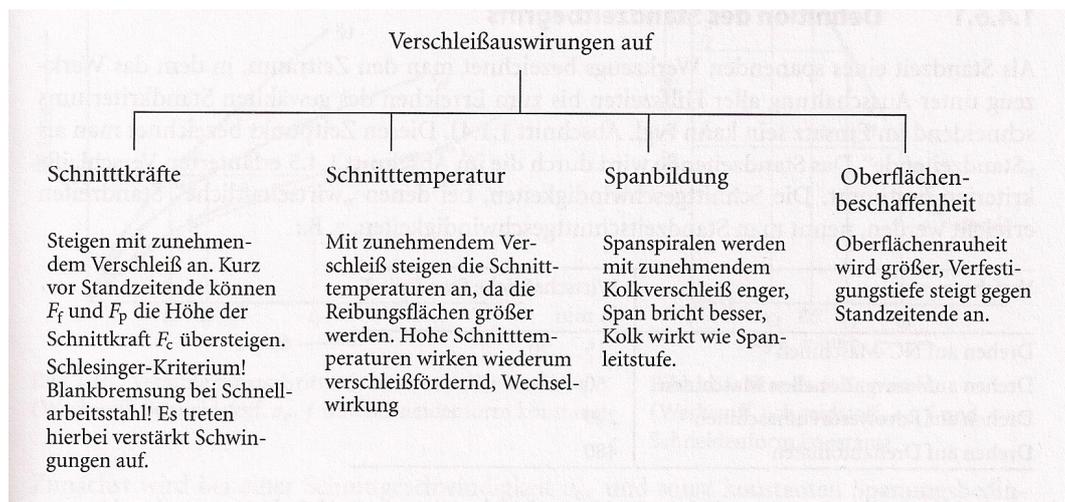


Abbildung 25: Verschleißauswirkungen (Ebd.:83)

1.10 Arten des Bohrens in der Chirurgie und die Gefahr des Überbohrens

Manuelle Bohrungen sind sehr individuell und vor allem äußerst vom menschlichen Können und der Beschaffenheit des Bohrers abhängig (Zopf 2011:33ff). Als mögliche Arten des Bohrvorgangs sind die im Folgenden angeführten Verfahren zu erwähnen.

1.10.1 Gleichmäßiges Bohren

Eine gleichmäßige Vorschubkraft beim Bohren kann nur bei maschinell gesteuerter Ausführung aufgebracht werden und wird somit bei den händischen Bohrungen in der Chirurgie kaum gewährleistet. Dabei versucht man beim Aufsetzen der Bohrspitze einen nahezu gleichbleibenden Druck während des Bohrvorganges aufzubringen.

1.10.2 Stoßbohren

Die Möglichkeit des „Stoßbohrens“ stellt bei chirurgischen Eingriffen eine Alternative zum Bohren mit konstantem Vorschub dar. Es handelt sich hier um eine alternierende Bewegung, also um eine regelmäßige Rückwärtsbewegung des Bohrers und somit um eine Entlastung. Diese Art des Bohrens findet in der Chirurgie immer wieder ihren Einsatz, da somit das Bohrgut (Knochenmehl) leichter aus dem Bohrloch entfernt werden kann. Ebenso kann damit auch eine bessere Wärmeabfuhr ermöglicht werden (pers. Mitteilung Clement/UKH Graz, April 2013). Wie auch die Versuche bei der Bachelorarbeit von de Pretis zeigen, ist das Maß des Überbohrens beim Stoßbohrverfahren geringer (de Pretis 2012:23).

1.10.3 Überbohren

Darunter versteht man den Austritt des Bohrers aus der untenliegenden Kortikalis und die damit verbundene Gewebeerletzung durch die Bohrer Spitze und die Schneiden. Solche Weichteilverletzungen haben unter anderem eine schlechtere Wundheilung zur Folge (pers. Mitteilung Clement/UKH Graz, April 2013).

2 Medizinische Geräte beim Bohren

Neben den verwendeten Spiralbohrern ist die Bohrmaschine einer der Hauptbestandteile bei der Erzeugung von chirurgischen Bohrlöchern.

2.1 Die chirurgische Bohrmaschine

Die unten angeführten Abbildungen (Abbildung 26 – Abbildung 28) lassen erkennen, dass sich die verschiedenen Typen von Bohrmaschinen optisch kaum unterscheiden. Grundsätzlich werden diese nach Antriebsart (elektrisch, pneumatisch oder akkubetrieben) unterschieden.

Die maximal erreichbare Drehzahl variiert dabei zwischen den einzelnen Geräten. Bis zur Erreichung des Maximalwerts von 1000 U/min sind aber alle Ausführungen stufenlos regelbar. Die ergonomische Ausführung der Bohrmaschinen unterstützt den Chirurgen bei der Bohrarbeit. Bei den elektrischen und pneumatischen Ausführungen können das Steuerkabel bzw. der Druckluftschlauch im Einsatz als störend empfunden werden. Dies spricht für den Einsatz von Akkubohrmaschinen, da man hier bei der Anwendung nicht behindert wird. Jedoch muss man das höhere Gewicht durch den wieder aufladbaren Li-Ionen-Akku bedenken. Wie in den Abbildungen 26 - 28 ersichtlich, weisen die Bohrer eine spezielle Schaftform auf, wodurch sie bei verschiedenen Geräten verwendet werden können. Durch ein Schnellspannfutter kann man diese Bohrer einfach durch das händische Zurückziehen dieses Futters spannen und entspannen. Ebenso verfügen die Geräte über eine Drehrichtungsregelung, welche auch das Lösen von Schrauben ermöglicht.

2.1.1 Elektrische Bohrmaschine

Vorteilhaft an dieser Ausführung ist die Kompaktheit des Geräts. Durch Steuerung mittels Zeige-, oder Mittelfinger ist die jeweilige Drehrichtung steuerbar.



Abbildung 26: Elektrische Bohrmaschine (http://www.medicalexpo.de/prod/desoutter-medical/chirurgische-motorensysteme-grosse-knochenchirurgie-elektrisch-akkubetrieben-68192-419980.html#product-item_419995)

2.1.2 Pneumatische Bohrmaschine

Der ersichtliche Anschluss (unten) dient zur Anbringung des Druckluftschlauches. Mittels Verstellung des Hebels (unten rechts) ist die gewünschte Rechts- oder Linksschraubung einstellbar.



Abbildung 27: Pneumatische Bohrmaschine (<http://www.medicaexpo.de/prod/desoutter-medical/chirurgische-motorensysteme-kleine-knochenchirurgie-druckluftbetrieben-68192-420004.html>)

2.1.3 Akkubohrmaschine

Unnötige Behinderungen durch das Steuerkabel oder den Druckluftschlauch sind bei dieser Ausführung nicht gegeben. Lediglich das zuvor erwähnte höhere Gewicht des Akkus muss berücksichtigt werden.



Abbildung 28: Akkubohrmaschine (<http://www.medicaexpo.de/prod/desoutter-medical/chirurgische-motorensysteme-grosse-knochenchirurgie-elektrisch-akkubetrieben-68192-419980.html>)

2.2 Hilfsgeräte beim Bohrvorgang

Zum präzisen Positionieren der Bohrerspitze und zur einwandfreien Durchführung des Bohrvorganges bedient man sich mehrerer Hilfsmittel.

2.2.1 Bohrlehre

Um einen sicheren Bohrvorgang durchführen zu können und um ein Verlaufen der Bohrerspitze zu vermeiden, verwendet man eine sogenannte Bohrlehre. Diese wird zu Beginn des Bohrvorgangs angesetzt und ermöglicht die genaue Positionierung des Bohrlochs. Ebenso erleichtert deren Einsatz den Bohrvorgang unter einem bestimmten Bohrwinkel.



Abbildung 29: Bohrlehre (<http://www.cls-med.de/Osteosynthese/Osteosynthese-Instrumente/Standard-Osteosynthese-Instrumente/Gewebeschutzhülse-und-Bohrlehre-fuer-2-5-mm-Bohrer-und-3-5-mm-Gewindeschneider::6837.html>)

Das Ende der Bohrlochhülse wird dazu an der erforderlichen Stelle am Knochen positioniert und unter Druck gehalten. Der Knochenbohrer wird an der Oberseite in die Hülse eingeführt. Am Berührungspunkt (Bohrerspitze und Knochen) beginnt der eigentliche Bohrvorgang. Dadurch wird der bereits erwähnten Gefahr des Verlaufs der Bohrerspitze entgegengewirkt.

2.2.2 Kortikalistiefenmesser

Nach dem Bohrvorgang bedient man sich eines Kortikalistiefenmessers, um die Bohrtiefe zu ermitteln bzw. zu kontrollieren. Dies gewährleistet den richtigen Einsatz der passenden Schrauben.

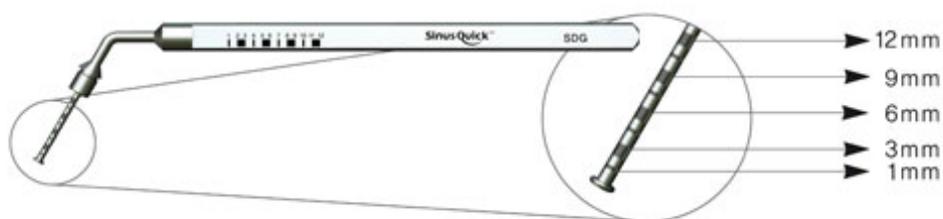


Abbildung 30: Kortikalistiefenmesser (<http://www.sinuslift-safety.de/pages/de/sca-kit/instrumente.php>)

2.3 Präzisionswerkzeuge im chirurgischen Bereich

Neben dem Einsatz von Bohrern gibt es auch noch eine Reihe anderer Werkzeuge, welche im chirurgischen Bereich Einsatz finden. Wie in Abbildung 31 dargestellt, gibt es auch noch Microfräser, Stufenbohrer, Fräser usw.

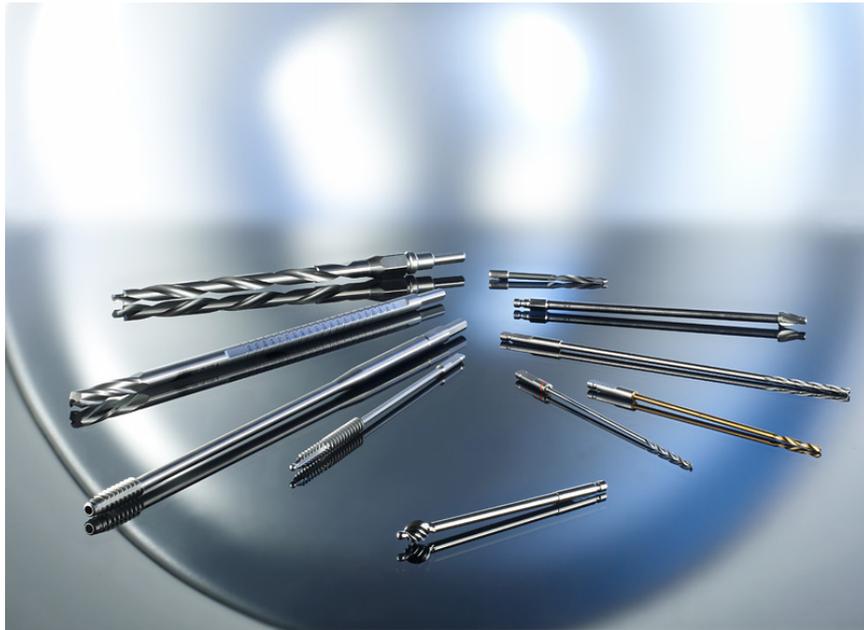


Abbildung 31: Chirurgische Präzisionswerkzeuge (<http://www.sphinx-tools.ch/medizintechnik.phtml>)

2.3.1 Spiralknochenbohrer

Der am häufigsten eingesetzte Bohrer im Bereich der Osteosynthese ist der Spiralbohrer. Dieser ist wie handelsübliche Bohrer in unterschiedlichen Ausführungen erhältlich. So variieren Parameter, wie die Schneiden- und Schaftlängen, der Durchmesser und die Schneidengeometrie (Spitzenwinkel, Freiwinkel etc.). Des Weiteren stehen diese Schneidwerkzeuge mit beschichteten Spitzen zur Verfügung. Diese Produkte sind auch mit oder ohne Innenkühlung verfügbar (<http://www.sphinx-tools.ch/picture/upload/file/Bohren-Reiben.pdf>).



Abbildung 32: Spiralbohrer ohne Innenkühlung (<http://www.sphinx-tools.ch/picture/upload/file/Bohren-Reiben.pdf>)



Abbildung 33: Hochleistungsbohrer mit verstärktem Schaft und Innenkühlung (<http://www.sphinx-tools.ch/picture/upload/file/Bohren-Reiben.pdf>)

Die im Zuge dieser Arbeit verwendeten Bohrer bestehen, wie oben beschrieben und in der folgenden Abbildung 34 ersichtlich, ebenfalls aus Bohrerspitze, -schneide und -schaft. Dabei wurden von Fa. Synthes und Fa. Brasseler jeweils zehn Stück zu den Versuchsbohrungen zur Verfügung gestellt. Diese Knochenbohrer weisen am Ende des Bohrerschafts eine kleine Durchmessererhöhung und eine plane Fläche auf (s. Abbildungen 34 und 35). Diese spezielle Geometrie dient zur Schnellspannung des Bohrers im Bohrfutter. Die Bezeichnung $\varnothing 3,5$

[mm] bezieht sich auf den Durchmesser der Bohrerschneide. Die sechsstellige Nummer am Bohrerschaft ist die LOT-Nummer (Abb. 57, Seite 60). Diese Chargennummer dient der Rückverfolgung des Werkzeuges, des verwendeten Werkstoffes und der Herstellung.



Abbildung 34: Knochenbohrer Fa. Brasseler, neu



IWS SLR Makro

Bildname: [knochenbohrer13u0073.jpg](#)



Abbildung 35: Knochenbohrer Fa. Synthes, neu

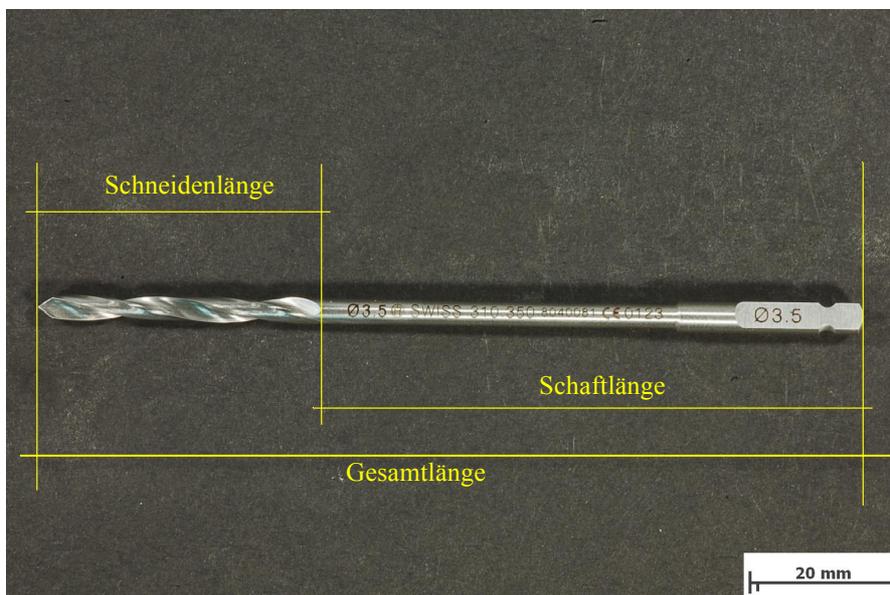
2.3.1.1 Geometrische Eigenschaften der verwendeten Bohrer

Beim Einsatz von Spiralbohrern spielt deren Geometrie eine bedeutende Rolle. Laut Salmhofer und Schrottner erweisen sich die Anpassung an das zu bearbeitende Werkstück und vor allem die Wahl der „richtigen“ Schneidengeometrie als äußerst schwierig. Geringe Abweichungen hinsichtlich des Spitzenwinkels, oder der Querschneidenbreite könnten bereits große Auswirkungen auf die erforderliche Vorschubkraft haben und könnten sich für den Einsatz des zu bearbeitenden Werkstoffes als ungünstig erweisen. Eine Vielzahl von Versuchsbohrungen ist notwendig, um die gewünschten Resultate auch umsetzen zu können (pers. Mitteilung Schrottner/TU Graz, Fa. Salmhofer). Die Meinungen bzgl. der „optimalen“ Schneidengeometrie sind sehr verschieden und lassen doch einen gewissen Gestaltungsspielraum offen (pers. Mitteilung Schrottner/TU Graz). So auch bei den vorliegenden Knochenbohrern der Firmen Synthes und Brasseler. Die Geometrien beider Bohrertypen könnten kaum unterschiedlicher sein. Zwar herrschen bei den geometrischen Abmessungen (im Bereich des Spitzenwinkels und der Querschneidenlänge) nur geringfügige Unterschiede, welche sich aber bei den ermittelten Bohrkräften deutlich auswirkten.

In Tabelle (2.1) sind die geometrischen Abmessungen der zwei für die experimentellen Untersuchungen verwendeten Bohrer (s. Abb. 34 und 35) aufgelistet:

	Synthes	Brasseler
	AISI 440 A	AISI 440 B
Gesamtlänge	113 mm	110 mm
Schaftlänge	75 mm	62 mm
Schneidenlänge	38 mm	48 mm
Bohrerdurchmesser	3,5 mm	3,5 mm
Spitzenwinkel	80°	90°
Seitenspanwinkel	ca. 14°	ca. 13°
Querschneidenlänge	0,84 mm	0,98 mm
Hinterschliff	ca. 0,5 mm	ca. 0,2 mm

Tabelle 2.1: Geometrische Abmessungen beider Bohrerarten



IWS SLR Makro

Bildname: knochenbohrer13u0073.jpg



Abbildung 36: Benennung der Bohrersegmente der Fa. Synthes

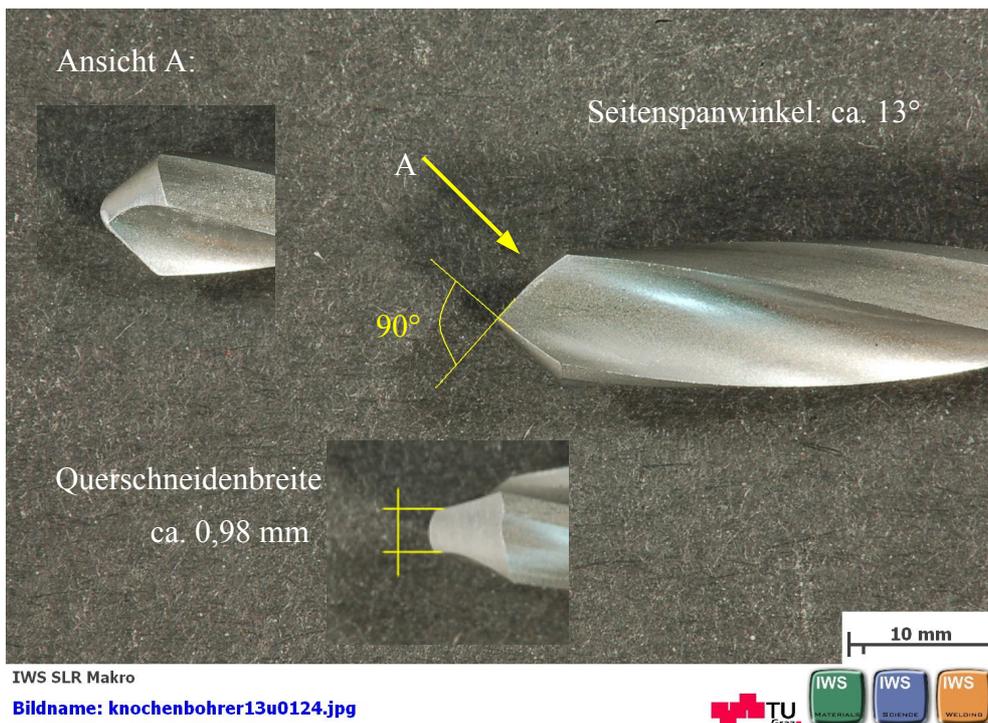


Abbildung 37: Spitzenwinkel Knochenbohrer Fa. Brasseler

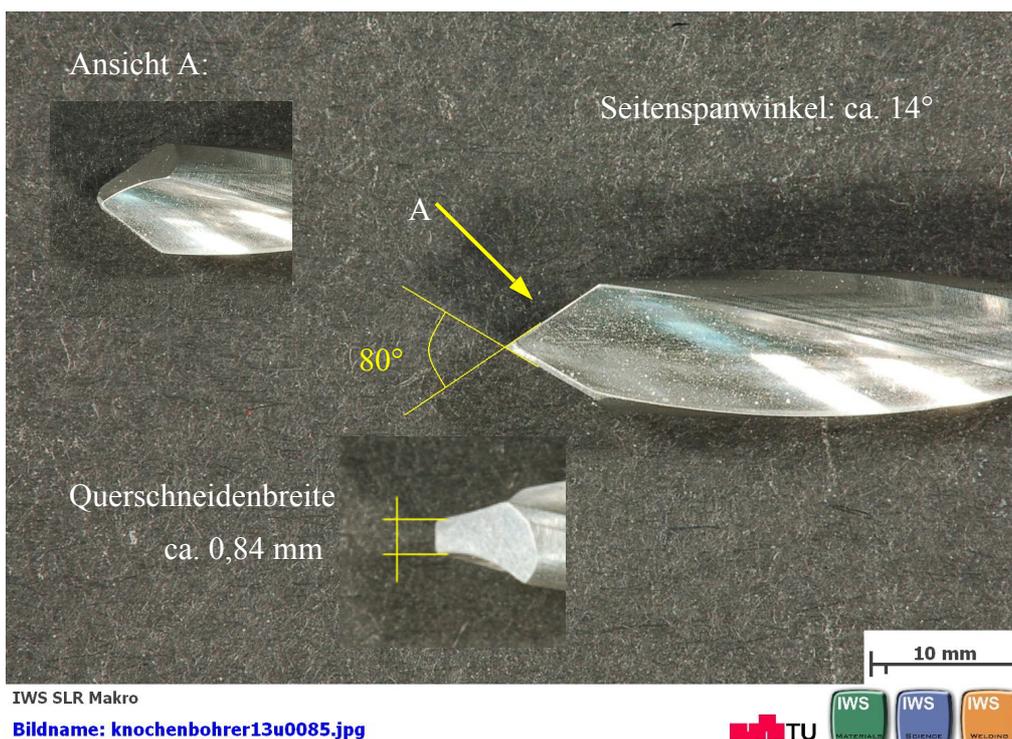


Abbildung 38: Spitzenwinkel Knochenbohrer Fa. Synthes

Abgesehen vom Spitzenwinkel würden die Testbohrer, ausgehend von einem Drallwinkel zwischen 10° und 19° , dem Typ H (Kap. 1.5.2, Abb. 16, S. 22) entsprechen. Dieser würde sich für harte und spröde Werkstoffe eignen (Dobler 2003:113).

Die Anschliffformen, sowohl von Fa. Synthes, als auch von Fa. Brasseler könnte man als einen „Normalanschliff“ bezeichnen, wobei bei letzterem die Hauptfreifläche nicht gerade geschliffen wurde, sondern eine nach außen gewölbte Form aufweist.

Der gerade Schliff bei Synthes wirkt einfacher und ist vermutlich einfacher herzustellen. Dessen Hauptfreifläche weist eine Vielzahl von Schleifriefen auf. Auf den Nachteil derartiger Riefen wird im Kapitel 5.3.2 näher eingegangen.

Bei Schmelzeisen wurden die Auswirkungen der Bohrer-Geometrie bereits untersucht (siehe Kapitel 2.4, Seite 42f.). Demzufolge würden die Testbohrer Synthes und Brasseler dem Typ W mit einem Spitzenwinkel um 80° und einem Seitenspanwinkel von ca. 15° entsprechen (Schmelzeisen 1990:6).

„ [...] Typ W: für weiche Werkstoffe (Hartgummi, Kunststoffe, Kohle u.a.), Spitzenwinkel um 80° , Seitenpanwinkel um 15° “ (Schmelzeisen 1990:6).

Auffällig ist die größere Querschneidenbreite (0,98 mm) bei der Fa. Brasseler, welche sich nachteilig auf die Bohrqualität auswirken könnte, da eine höhere Querschneidenbreite leichter zum Verlaufen der Bohrerspitze führen kann. Der Spitzenwinkel ist für die auftretenden Bohrkraften von entscheidender Bedeutung. Ein Bohrer mit geringerem Spitzenwinkel dringt leichter in das Material ein, kann die aufgebrauchten Kräfte besser übertragen und verhindert ein Verlaufen der Bohrerspitze (pers. Mitteilung Schrottner/TU Graz).

Aus Abbildungen 37 und 38 ist ersichtlich, dass Fa. Brasseler in eine aufwendigere Bohrerspitze investiert, da der Bohrer eine gewölbte Hauptfreifläche aufweist, wobei beinahe kein Hinterschliff (ca. 0,2 mm) (s. Abb. 39) erkennbar ist. Bei Synthes hingegen scheint diese Freifläche nur gerade geschliffen zu sein. Der AISI 440A Bohrer weist einen Hinterschliff von ca. 0,5 mm auf. Bohrer mit einem geringen Hinterschliff führen während des Einsatzes zu einem „Drücken“, d.h. der Reibkontakt zwischen der Freifläche des Bohrers und des Werkstoffes ist sehr hoch. Der Bohrer schneidet sich nicht „von selbst“ ins Material, sondern muss durch die Vorschubkraft hineingedrückt werden.

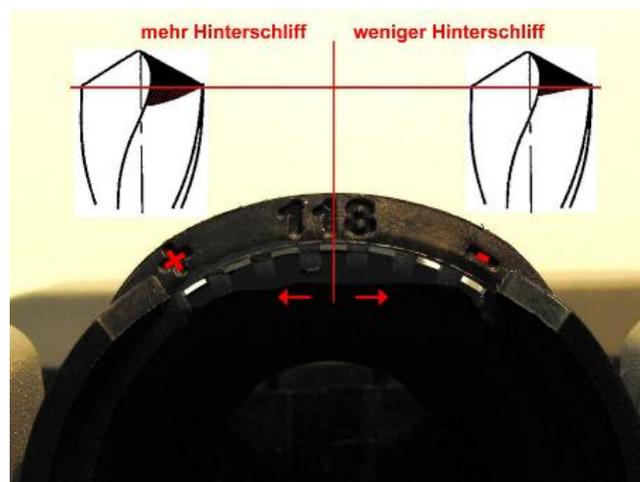


Abbildung 39: Hinterschliff der Bohrerspitze (<http://www.drilldoctor.de/index.php?a=109>)

Die Legierungen der untersuchten Bohrer werden als AISI 440 B (Brasseler) und AISI 440 A (Synthes) bezeichnet. Dabei handelt es sich um rostbeständige, martensitische Stähle mit hohem Cr-Gehalt, welche eine gute Korrosions- und Verschleißbeständigkeit durch Karbidbildung aufweisen. Die Legierung AISI 440 A entspricht der DIN Kurzbezeichnung X55CrMo14 (DIN Werkstoffnummer 1.4110) und weist folgende Zusammensetzung auf (Gew. %) (Wegst 2013:390):

AISI 440 A	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
von	0.48					13.0	0.50	
bis	0.60	1.00	1.00	0.040	0.015	15.0	0.80	0.15

Tabelle 2.2: Chemische Zusammensetzung Werkstoff Synthes (440A)

Der AISI 440 B hingegen entspricht dem X90CrMoV18 (DIN Werkstoffnummer 1.4122) und setzt sich wie folgt zusammen aus (Gew. %) (Ebd.:390):

AISI 440 B	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
von	0.85					17.0	0.90	0.07
bis	0.95	1.00	1.00	0.040	0.015	19.0	1.30	0.12

Tabelle 2.3: Chemische Zusammensetzung Werkstoff Brasseler (440B)

Der Werkstoff der chirurgischen Knochenbohrer ist grundsätzlich mit jenem eines Messerstahls vergleichbar. Die erreichbare Härte ist abhängig von der Legierungszusammensetzung, d.h. steigt mit zunehmendem C-Gehalt (Martensithärte). Cr und V wirken hierbei als Karbid- sowie Mo als Feinkornbildner. Die Wärmebehandlung (Vergüten bzw. Härten und Anlassen) ist von entscheidender Bedeutung, womit ein Optimum zwischen Härte (Verschleißbeständigkeit) und Zähigkeit erreicht werden kann (Beitz 1995:E31f.).

2.4 Einfluss verschiedener Parameter beim Bohren in der Kortikalis

Bei Schmelzeisen wurden die Auswirkungen der Bohrergeometrie auf den Bohrvorgang untersucht, wobei Spiralbohrer mit einem Spitzenwinkel zwischen 130 und 140° die besten Resultate erbrachten (Schmelzeisen 1990:7).

„Bei den Spitzenwinkeln scheinen sich die Befunde von Sneath⁸ mit günstigeren Ergebnissen im Bereich zwischen 120 und 140° zu bestätigen. Die gebräuchlichen Bohrer, wie sie bei operativen Maßnahmen im Bereich der Kortikalis derzeit Verwendung finden (Spitzenwinkel zwischen 80 – 90°) erscheinen den Autoren daher nicht optimal“ (Schmelzeisen 1990:7).

⁸ Sneath (1965): *The determination of optimum twist drill shape for bone*. Pergamon, Oxford.

Zu diesen Ergebnissen kam Sneath bei konstanter Umdrehungszahl und konstanter Vorschubkraft (Angaben dazu sind nicht bekannt).

Wie auch im Zuge dieser Arbeit (Umdrehungszahl und Vorschub konstant), führen bei Schmelzeisen die verschiedenen Bohrerarten, im Hinblick auf die aufzuwendende Vorschubkraft, zu unterschiedlichen Ergebnissen. Somit erweisen sich Spiralbohrerarten mit einem kleineren Anschlag – der Spitzenwinkel bewegt sich hier im Rahmen von 60 bis 75° - durchaus geeigneter als Bohrer mit einem großen Winkel (90 – 130°). Die dabei auftretende Vorschubkraft kann sich dadurch um 1/3 – 1/4 verringern (Ebd.:39).

„Einen verhältnismäßig geringen Einfluss hat der Steigungswinkel, der in Kombination mit den verschiedenen Spitzenwinkeln keine wesentlichen Unterschiede der verschiedenen Kurven erkennen lässt. Da sich die Kurven z. T. mehrfach überschneiden, lässt sich aufgrund dieser Befunde keine sichere Abhängigkeit der Schneidleistung des Bohrers beim kortikalen Bohrvorgang im Hinblick auf den Steigungswinkel (Spanwinkel) angeben“ (Schmelzeisen 1990:39f.).

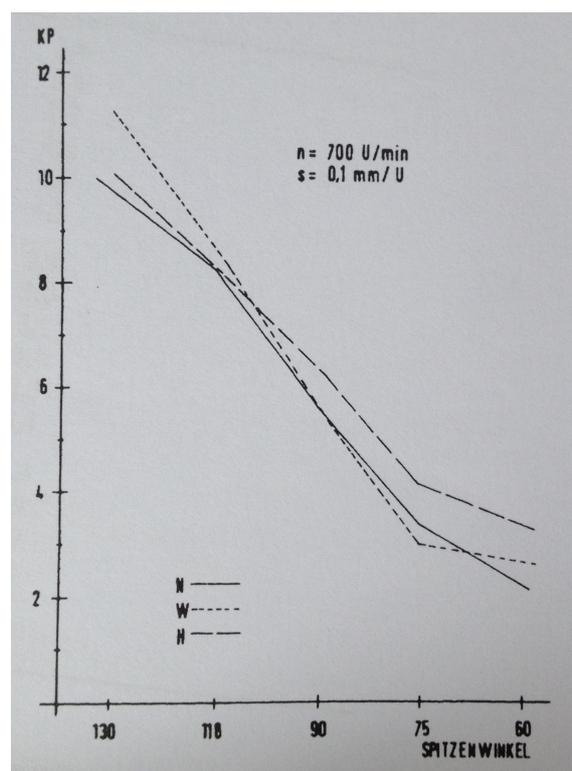


Abbildung 40: Vorschubkraft in Abhängigkeit des Spitzenwinkels (Ebd.:39)

Die in Abbildung 40 eingetragenen Linien beschreiben die Vorschubkraft in Abhängigkeit vom Spitzenwinkel (σ) bei konstantem Vorschubweg und konstanter Umdrehungszahl. Die einzelnen Typen H, N und W beschreiben die am häufigsten verwendeten Spiralbohrerarten. Die Testreihe wurde bei Schmelzeisen auch mit veränderter Drehzahl (500, 700, 900 U/min) und verändertem Vorschub (70, 140, 210 mm/min) durchgeführt. So erfolgte z.B. je eine

Bohrung bei der gleichen Drehzahl von 500 U/min mit 70, 140 und 210 mm/min Vorschub (Ebd.:40).

2.4.1 Veränderte Umdrehungszahl

Die Kurvenverläufe blieben bei der Testreihe von Schmelzeisen annähernd gleich. So erwiesen sich die Spiralbohrer mit spitzem Winkel (60 und 90°) am besten geeignet, um möglichst geringe Vorschubkräfte zu erzielen. Die Testreihe wurde mit Umdrehungen von 500, 700 und 900 U/min durchgeführt. Die höchste Vorschubkraft stellte sich bei der geringsten Drehzahl ein. Die Versuchsreihe bei Schmelzeisen wurde weggesteuert durchgeführt (Ebd.:39f.).

2.4.2 Vorschub

In diesem Fall wurde der Vorschubparameter variiert. Es wurden Bohrungen mit jeweils 70, 140, und 210 mm/min dem Praxistest (maschinell) unterzogen (Ebd.:40).

„Höhere Werte konnten nicht vorgegeben werden, da dann eine exakte Bohrung nicht mehr gewährleistet war. Es kam dann teilweise zur Verschiebung der eingespannten Knochenproben, zu mangelhaftem Auswurf des Bohrgutes, unsymmetrischer Ausformung der Bohrlöcher und auch zur Aufsplitterung der Knochenproben. Die Änderung des Vorschubweges bringt den stärksten Einfluss auf die Vorschubkraft. Der Anstieg der erforderlichen Vorschubkräfte von 0.1 auf 0.2 mm/U betrug z. T. mehr als 2 Kp. Mit einem Vorschub von 0.3 mm/U wurden nahezu die 4- bis 5fachen Werte gemessen im Vergleich zum kleineren Vorschub von 0.1 mm/U“ (Schmelzeisen 1990:40).

Die dabei verwendeten Bohrer hatten die o.g. Spitzenwinkel von 60, 90 und 130°. Das Ergebnis in Bezug auf die Schneidleistung sprach auch hier wieder für jene Bohrer mit einem spitzen Anschliff (Ebd.:41).

Zusammenfassend kann man aus der Testreihe von Schmelzeisen den Schluss ziehen, dass die Parameter Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit und Spitzenwinkel erheblichen Einfluss auf die erreichte Vorschubkraft und folglich auf die erzielte Bohrqualität haben. Die Veränderung einzelner Parameter führt zu einer starken Änderung der erforderlichen Kraft. Bei größerem Spitzenwinkel, niedrigerer Drehzahl und größerer Vorschubgeschwindigkeit steigt die Vorschubkraft.

3 Bohrversuche

In diesem Kapitel wird nun auf das zur Verfügung stehende Equipment eingegangen und die Ergebnisse der Versuchsbohrungen betrachtet, welche am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik (IWS) der TU Graz von April bis August 2013, durchgeführt wurden. Dabei ging es um die Messung und Aufzeichnung der Bohrkräfte, die während den Bohrvorgängen an einem Kunstknochen auftreten und um den daraus resultierenden Bohrerverschleiß.

Ausschlaggebend dafür war die Bachelorarbeit de Pretis, in der ebenso Bohrkräfte in Kunstknochen bestimmt wurden, sowie auch die Diplomarbeit von Zopf, in der einige Serien von Bohrversuchen mit unterschiedlichen Bohrern und Knochen durchgeführt wurden (de Pretis 2012:25ff, Zopf 2011:32ff). Ebenso ist der Beitrag, „Untersuchung der Porosität in medizinischen Bohrern, hervorgerufen durch gebrochene Karbide“ (Haubner 2012:221) für die durchgeführten Versuche relevant. Darin wurden im Zuge von Gefügeuntersuchungen Risse oder quadratische Poren erkannt. Risse in Bohrern aufgrund gebrochener Karbide verschlechtern die mechanischen Eigenschaften und könnten den Bruch des Bohrers verursachen (Sohar 2009:o.S.).

Die Querschliffe sämtlicher Proben weisen Poren (s. Abb. 41) über den gesamten Querschnitt verteilt auf. Es ist naheliegend, dass diese wahrscheinlich durch die Probenpräparation entstanden sind. Zuvor eingelagerte Primärkarbide könnten dabei durch den Schleifvorgang herausgearbeitet worden sein (pers. Mitteilung Warchomicka/TU Graz, Februar 2014).



Abbildung 41: Poren am Querschliff

3.1 Praktische Versuche im Labor – Technische Universität Graz

Die praktischen Bohrungen wurden an der Friction Stir Welding-Anlage (FSW) durchgeführt und die dabei auftretenden Bohrkraften wurden mit Kraftmessdosen gemessen und mit einem externen Datenrekorder aufgezeichnet. Der Versuchsaufbau und die verwendeten Hilfsmittel sind in diesem Kapitel erläutert.

3.1.1 Ziele der Versuchsreihe

Ausschlaggebend für die Erzielung einwandfreier Ergebnisse beim Bohren bzw. der spanenden Fertigung im Allgemeinen ist die Verwendung von schneidfähigen und für den jeweiligen Anwendungsbereich passenden Schneidwerkzeugen. Der Einsatz von Knochenbohrern mit ausreichender Schneidfähigkeit ist jedoch nicht immer gewährleistet, ein mehrmaliger Wechsel von Bohrern während der Operation ist keine Seltenheit (pers. Mitteilung Clement/UKH Graz). Wesentliche Fragen hierbei sind, ob man den Einsatz von schneidfähigen Bohrern gewährleisten kann und ob verlässliche Aussagen über den durchschnittlichen Einsatz (Anzahl der Bohrlöcher) getätigt werden können.

Diese Fragen und die Tatsache, dass bei Operationen der Gebrauch von verschlissenen Knochenbohrern „normal“ ist, waren ausschlaggebend für diese Arbeit, als Vertiefung der o.g. Bachelorarbeit de Pretis und der Diplomarbeit Zopf.

Die Aufzeichnung der Bohrkraften ermöglichte den direkten Vergleich der Bohrer von Fa. Synthes und Fa. Brasseler. Wie bereits im Kapitel 1.3 erwähnt, lässt die Größe der Bohrkraft Aussagen über die Schneidfähigkeit des Bohrers zu. Abgesehen von der Schädigung durch eisenhaltige Rückstände (siehe Kapitel 1.4) würden zusätzlich auftretende Ausbrüche an den Haupt- und Querschneiden zu einem weiteren Anstieg dieser Kraft führen.

3.1.2 Ablauf

In der Diplomarbeit Zopf wurde bei Praxisbohrungen die durchschnittliche, auftretende Kraft bei Bohrvorgängen von Chirurgen mit ca. 45 N +/- 15 N gemessen (Zopf 2011:38). Der Maximalwert von 60 N an Bohrkraft diente als oberer Grenzwert bei den Versuchen. Parameter, wie Umdrehungszahl und Vorschub, wurden in Anlehnung an die Bachelorarbeit beibehalten (de Pretis 2012:18). Die verwendete Umdrehungsgeschwindigkeit von 800 1/min, sowie der konstante Vorschub von 70 mm/min wurde bei allen Bohrungen gewährleistet. Die Einstellung dieser Parameter erforderte die maschinelle Durchführung sämtlicher Bohrungen. Dazu diente die Friction Stir Welding Anlage (FSW) am Institut für Werkstoffkunde an der Technischen Universität Graz (s. Kapitel 3.1.5).

Die Bohrungen wurden an einem Kunstknochen der Fa. Sawbones (Washington USA) ausgeführt. Die geometrischen Abmessungen und das Material des Knochens sind im Kapitel 3.1.4 erläutert. Der Kunstknochen wurde dabei unter Zuhilfenahme der Bohrvorrichtung (Schraubstock) eingespannt (Zopf 2011:40). Die eingesetzten drei Kraftmessdosen, welche unter der Spannvorrichtung positioniert wurden (s. Kapitel 3.1.7), lieferten mit Hilfe des externen Datenrekorders der Fa. HBM die Bohrkraftverläufe. Diese Werte waren während der Bohrungen in einem Diagramm verfolgbar und wurden in einem Textdokument abgespeichert.

Die einzelnen Werte, je Kraftmessdose, wurden in das Programm „Excel“ übertragen, summiert und ausgewertet. Dadurch erhielt man die jeweilige Bohrkraft bzw. den Bohrkraftverlauf je Bohrung. An dieser Stelle ist noch anzumerken, dass die beiden Kortikalishälften in einem Bohrvorgang durchbohrt, die Werte aber jeweils getrennt dokumentiert wurden. Die Bohrer wurden schließlich im Stereolicht- und Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht und für die Metallografie einer zerstörenden Prüfung unterzogen. Die erhaltenen Ergebnisse wurden schließlich miteinander verglichen und diskutiert.

3.1.3 Versuchsmaterialien und Hilfsmittel

Versuchsbohrer: 10 Stück Fa. Synthes (5 Stück mit LOT-Nr. 8040081, 5 Stück mit LOT-Nr. 8099355) und 10 Stück Fa. Brasseler (Marke Komet, LOT-Nr. 777252)

- Kunstknochen der Fa. Sawbones: Produktnr. 3403-15, Länge: 500 mm, Durchmesser: 30 mm, Kortikalisdicke: 4,3 mm.
- Spannvorrichtung (Bohrmaschinen-Schraubstock der Fa. Röhm, Typ 729-60 DPV)
- Vorrichtung mit Kraftmessdosen (3 Stück vom Typ KD140 der Fa. ME Messsysteme)
- Datenrekorder der Fa. HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) (Typ Gen2i, Perception software)
- Friction Stir Welding-Anlage (FSW) (Markenname MTS I-Stir BR4, Fa. MTS)

Alle Bohrungen wurden mit den gleichen Bohrparametern (800 U/min, 70 mm/min Vorschub) durchgeführt und es wurde getrachtet, die selben Bohrbedingungen (wie z.B. die Beibehaltung der Messposition, oder die genaue Fixierung des Knochens zu schaffen), um die Messungen nicht zu verfälschen.

3.1.4 Kunstknochen

Die Fa. Sawbones, von der der verwendete Kunstknochen stammt, ist Marktführer im Bereich der orthopädischen und medizinischen Modelle. Mit über 2000 Produkten (orthopädische Modelle, biomechanische Testmaterialien usw.) werden sämtliche im menschlichen Körper vorkommende Knochen als Kunstprodukte angeboten (<http://www.sawbones.com/>).

Der verwendete rohrförmige Kunstknochen wird als *Short Fiber Filled Epoxy Cylinder* (Produktnr. 3403-15) bezeichnet, s. Abb. 42. D.h. die Kortikalisschicht (Rohrwand) besteht aus einem so genannten Epoxidglas. Dies ist der Gruppe der Kunstharze zuzuordnen und wird aus Epichlorhydrin und Diphenolen hergestellt. Durch den Zusatz von Härtemitteln erfolgt die Umsetzung zu einem duroplastischen Kunststoff (<http://www.sawbones.com/products/product.aspx?2256>).

Duroplaste (auch Duromere genannt) sind im ausgehärteten Zustand hart. Eine weitere Verformung ist nur mehr spanend möglich. Sie sind weder schmelz- noch schweiß-, noch auflösbar (Domke 1986:o.S.).

Wie in der Abbildung 42 ersichtlich, ist dieses Produkt in unterschiedlicher Ausführung erhältlich. Der Kunstknochen links stellt den für die Bohrversuche verwendeten dar. Die Abmessungen – 500 mm Länge, 30 mm Durchmesser und 4,3 mm Kortikalisdicke – stimmen mit jenen auf der Homepage der Fa. Sawbones überein (<http://www.sawbones.com/products/product.aspx?2256>). Der Knochen rechts ist mit einem Schaum aus Polyurethanen gefüllt, um das Knochenmark zu simulieren. Je nach Herstellung weist die Füllung des Kunstknochens eine harte und spröde oder weiche und elastische Eigenschaft auf. Bei der Fa. Sawbones hätten diese Polyurethane einen porösen Zustand.

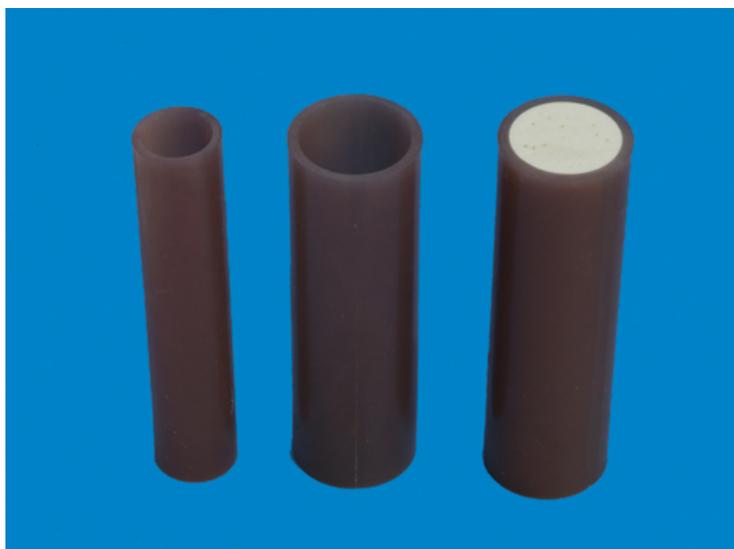


Abbildung 42: Kunstknochen der Fa. Sawbones (http://www.sawbones.com/images/products/l/generic_cylinder.jpg)

3.1.5 FSW-Anlage

Es wurden für die Bohrversuche an der FSW Anlage (Fa. MTS, Minneapolis USA) die Umdrehungszahl 800 min⁻¹ und der konstante Vorschub von 70 mm/min eingestellt und bei allen Versuchen beibehalten. Der Knochen selbst wurde in der Spannvorrichtung fixiert und nach jedem Bohrvorgang händisch nachgerückt, um für jede Bohrung die gleiche Position zu haben. Obwohl die Anlage über eine automatische Datenerfassungssoftware verfügt, wurden die auftretenden Bohrkräfte mit dem, mit den Kraftmessdosen (Typ KD140) verbundenen, Datenrekorder der Fa. HBM (Typ Gen2i) erfasst.

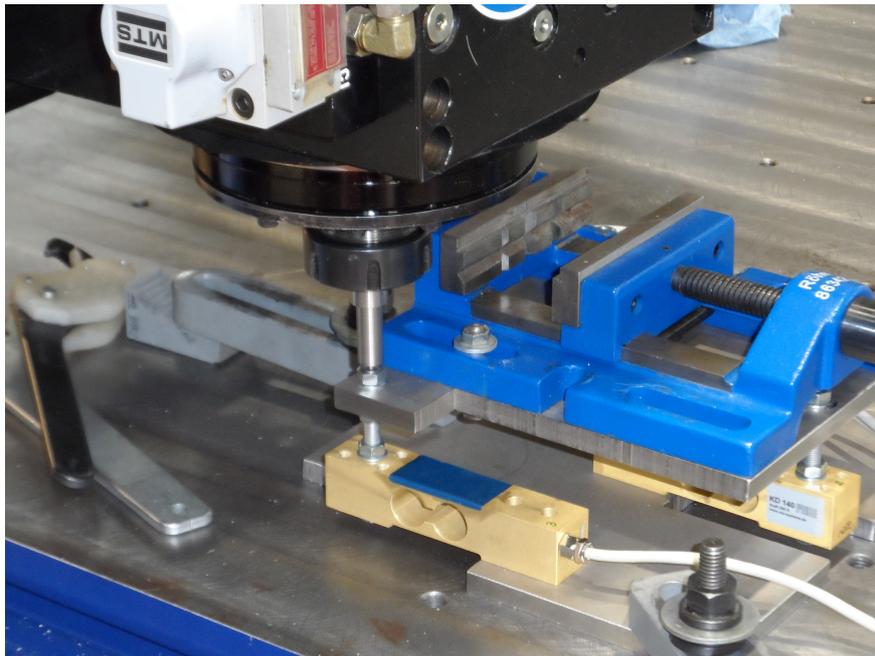


Abbildung 43: Spannvorrichtung (blau), Bohrkopf der FSW (schwarz), Kraftmessdose (gold)

3.1.6 Spannvorrichtung

Der Schraubstock (Spannvorrichtung) der Fa. Röhm (Sontheim an der Brenz, D) wurde auf der Deckplatte der Kraftmessdosen befestigt. Durch die Verwendung von Spannpratzen wurde die Kraftmesseinheit auf dem Arbeitstisch der FSW Anlage fixiert. Der Kunstknochen wurde zwischen den beiden Backen positioniert und mittels der Spindel händisch befestigt. Das Auflegen des Knochens auf der Grundplatte der Spannvorrichtung verhinderte dessen vertikales Verrutschen.

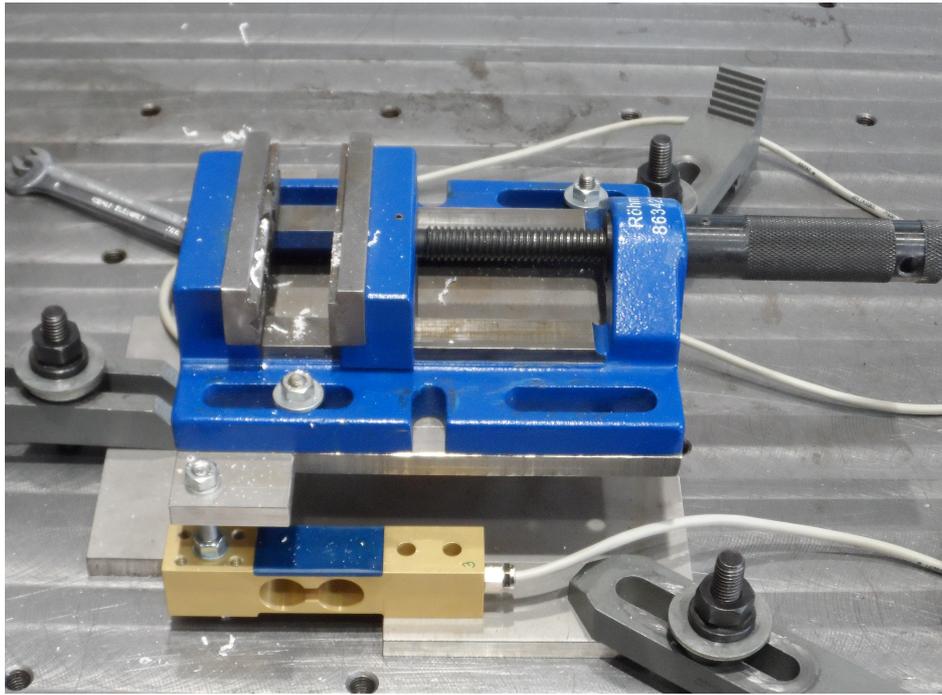


Abbildung 44: Spannvorrichtung mit Kraftmessdose und Spannpratzen

3.1.7 Kraftmessung

Die Erfassung der auftretenden Bohrkraft erfolgte durch 3 Kraftmessdosen vom Typ KD140 (Nennkraft 200 N, Genauigkeitsklasse 0,1 %) der Fa. ME Messsysteme (Henningsdorf, D). Diese KD-Kraftsensoren sind als Biegebalken ausgeführt und werden nur einseitig fixiert. Die Erfassung der Kraft am freien Ende des Balkens erfolgt durch das Doppelbalken-Prinzip. Der Vorteil bei diesem Messprinzip liegt in der Unempfindlichkeit der Kraftaufnehmer bei einer Verschiebung der Krafteinleitung (<http://www.me-systeme.de/sensorik/kraftsensoren/kd-kraftsensor.html>).

Beim Kraftsensor erfolgt die Messung durch eine elastische Verformung des Sensors infolge der Krafteinbringung. Dadurch können sowohl Zug-, als auch Druckkräfte gemessen werden.

Der Sensor befindet sich auf dem Balken (s. Abb. 45). Durch die Fixierung des Balkens auf einer Seite und die Krafteinleitung auf der gegenüberliegenden, ändert sich die Dehnung des Dehnmessstreifens (<http://de.wikipedia.org/wiki/Kraftaufnehmer>).

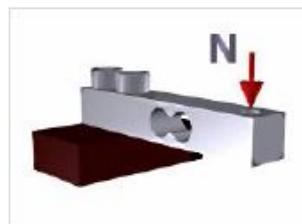


Abbildung 45: Kraftsensor Fa. ME-Systeme (<http://www.me-systeme.de/sensorik/kraftsensoren/kd-kraftsensor.html>)

3.1.7.1 Dehnungsmessstreifen (DMS)

Ausschlaggebend für einen DMS ist dessen Empfindlichkeit (k-Wert⁹). Unterschiedliche DMS-Werkstoffe besitzen unterschiedliche k-Werte. Durch die Kräfteinwirkung ändert sich die geometrische Gestalt des Messgitters, was wiederum zu einer elektrischen Widerstandsänderung führt. Diese elektrische Veränderung wird üblicherweise in eine elektrische Schaltung eingebunden, in einen Verstärker eingespeist und ausgewertet (<http://de.wikipedia.org/wiki/Dehnungsmessstreifen>).

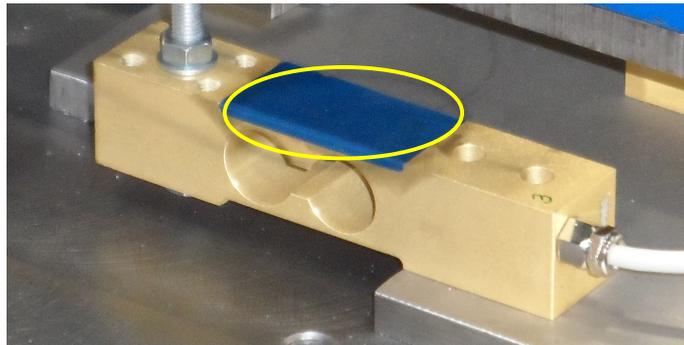


Abbildung 46: Kraftsensor mit Dehnungsmessstreifen

3.1.8 Datenrekorder

Zur genaueren Ermittlung der Messdaten wurden die Werte mittels eines externen Datenrekorders (Typ Gen2i, kontinuierliche Streaming-Rate 20 MB/s) der Fa. HBM (Darmstadt, D) erfasst.

Es handelte sich dabei um die Genesis-HighSpeed-Serie mit hohen Abtastraten. Die Modelle basieren auf modularen Plattformen, wodurch sie je nach Anforderungen an die jeweiligen Anwendungen angepasst werden können. So enthält das verwendete Modell sechs Kanäle. Dieser portable Modelltyp ist sofort und überall einsetzbar, besitzt eine physische Signalaufbereitung für alle gängigen Sensoren und erfasst sogar Signale im Hochspannungsbereich. Die Vorteile dieses Typs sind der einfache Touchscreen-Betrieb, eine integrierte Wiedergabe und die Überprüfung und Analyse mittels der integrierten Perception- Software (<http://www.hbm.com/de/menu/produkte/messelektroniken/high-speed-datenerfassung/>).

Die Verwendung dieses Geräts beruht auf der Verfügbarkeit der drei DMS-Brückeneingänge für die drei Kraftmessdosen. Außerdem ermöglicht es die gleichzeitige Erfassung und Speicherung der Daten.

Diese Software bedient alle Bereiche der Hochgeschwindigkeitsdatenerfassung:

⁹ Der k-Wert gibt die Proportionalität der Widerstandsänderung ΔR zur Dehnung ϵ an

- „Einfache Einrichtung, professionelle Erfassung und faszinierende Live-Anzeigen mit beinahe unbegrenzten Möglichkeiten
- Analyse mithilfe der Formeldatenbank mit über 150 Funktionen
- Berichterstattung mit der „Ein Klick nach Word“-Funktion oder dem leistungsstarken internen Berichtsgenerator“

(<http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/s2782.pdf>).

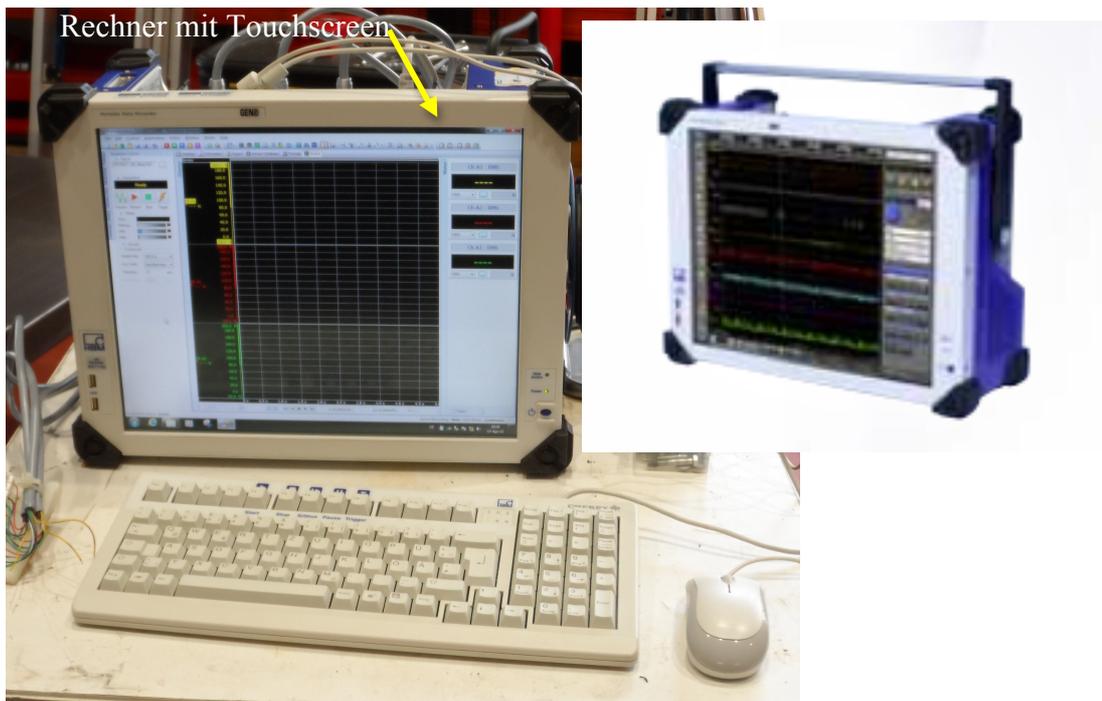


Abbildung 47: Datenrekorder der Fa. HBM

Durch die separate Verbindung der einzelnen Kraftmessdosen mit dem Rekorder konnten die einzelnen Belastungen aufgezeichnet werden. In Abbildung 48 ist ein typischer Kraftverlauf, wie er bei den einzelnen Bohrvorgängen mittels des Datenrekorders dokumentiert wurde, ersichtlich (drei Signale von den drei verwendeten Kraftmessdosen). Jede Farbe symbolisiert eine andere Kraftmessdose. Für die weitere Bewertung und Darstellung der Vorschubkraft bei den Bohrungen wurde je Bohrvorgang die Summe der drei Kraftmessdosen ermittelt. Dazu wurde jeweils der Maximalwert (durch blauen Pfeil dargestellt) herangezogen.

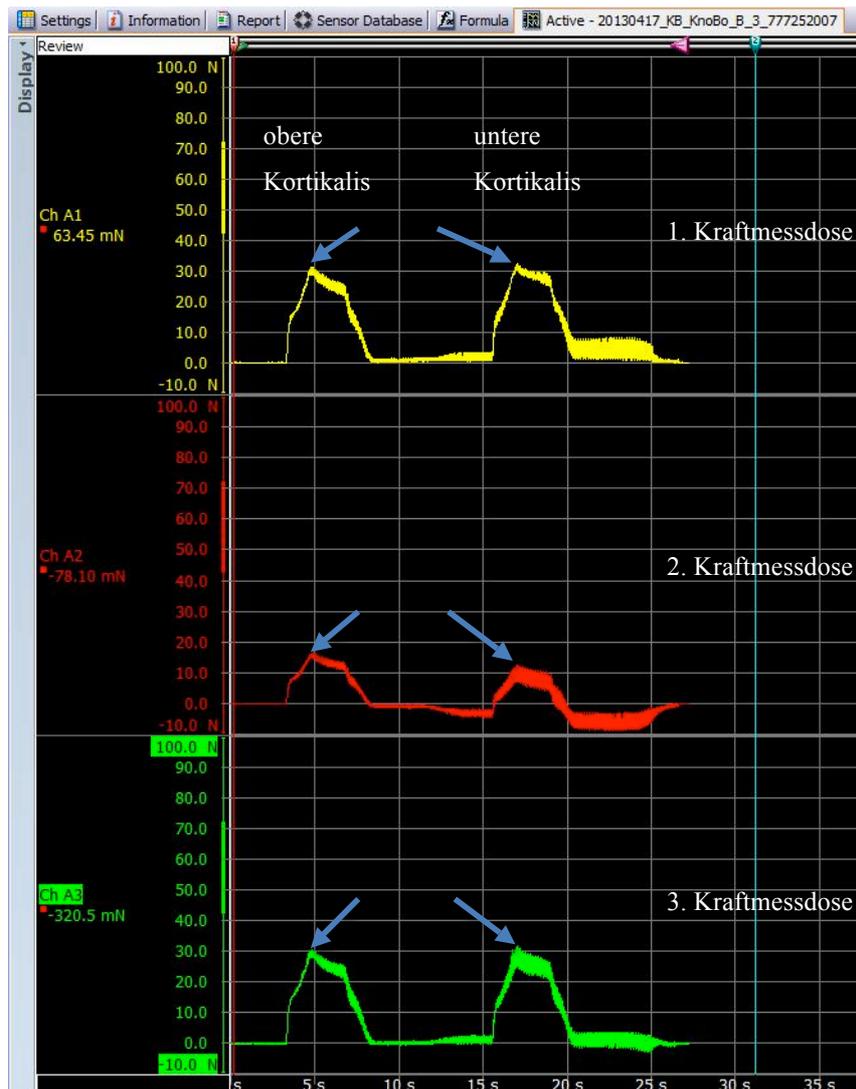


Abbildung 48: Darstellung des Kraftverlaufes einer Bohrung mit dem Datenrekorder (Screenshot Bildschirm)

Aufgrund der unterschiedlichen Positionen der Kraftmessdosen unter der Spannvorrichtung ergaben sich zwar grundsätzlich drei ähnliche, aber vom Ausschlag her unterschiedliche Verläufe. Die rote Kurve entspricht der Kraftmessdose Nr. 2. Diese war am weitesten vom Bohrloch entfernt und wurde somit am wenigsten belastet. Die Messung startete bei Aktivierung des Bohrvorganges. Die Nulllinie (0 N) entspricht dem Zeitraum vom Erreichen der eingestellten Drehzahl der FSW, bis zum Berühren des Bohrers am Kunstknochen.

Nach ca. 3s (Abbildung 48, grüne Kurve) erfolgt ein steiler Anstieg der Messkurve. Dies entspricht dem Zeitpunkt, an dem die Bohrerspitze in den Kunstknochen eindringt. Ein erstes Abflachen und ein annähernd linearer Anstieg bis zum Maximum (30 N) der Kurve ist ab ca. 15 N erkennbar (grün). Dabei befindet sich die Hauptschneide vollständig im Werkstoff und der Bohrer bohrt im Vollen. Der Abfall der Kurve nach ca. 5s ist auf die Durchdringung der Bohrerspitze durch die Wanddicke bzw. obere Kortikalisschicht zurückzuführen. Erst wenn der Großteil der Hauptschneiden durchgedrungen ist, kommt es zu einem steilen Abfall der

Kraft (nach ca. 7 bis 8 s). Anschließend fällt der Kraftverlauf wieder auf ein Niveau nahe der Nulllinie. Ein stetiger Kurvenverlauf zwischen den beiden Anstiegen ist nicht möglich, da sich der Bohrer während des Bohrvorganges durch die zweite Kortikalishälfte im Bohrloch der ersten Kortikalisschicht befindet.

Am Ende des Bohrvorganges (ca. 20 bis 25 s) kommt es zu einem starken „Rauschen“. Die Vermutung liegt nahe, dass dies auf das Herausziehen des Bohrers aus den Bohrlöchern (den zwei Kortikalisschichten) zurückzuführen ist, daher ist auch bei der zweiten Kraftmessdose (rot) ein negativer Kraftverlauf zu verzeichnen. Überlegungen, den Vorschub [mm/s] betreffend, bestätigen diesen Bohrkraftverlauf. Die Länge der Freifläche (gemessen von der Bohrerspitze bis zum Hinterschliff) beträgt bei Synthes ca. 2,4 und bei Brasseler ca. 2,1 mm. Aufgrund des konstanten Vorschubs von 70 mm/min ergeben sich folgende Berechnungen:

Vorschub:	1,16 ^{mm} /s	[s]	[mm]
		1	1,16
		2	2,32
		3	3,48
		4	4,64
		5	5,8

Tabelle 3.1: Vorschub in Abhängigkeit der Zeit

Bei einer Kortikalisdicke von 4,3 mm dauert der Bohrvorgang durch eine Kortikalishälfte ca. 3,7s.

3.1.9 Versuchsaufbau

Vor Beginn der Bohrungen wurde die gesamte Bohrvorrichtung am Tisch der FSW Anlage mit den Spannpratzen montiert. Diese Vorrichtung bestand aus den zuvor schon erwähnten Kraftmessdosen, der Bodenplatte und der sich darüber befindlichen Spannvorrichtung für den Kunstknochen, s. Abb. 42 und 44. Zuerst wurde die Bohrvorrichtung vertikal unter dem Bohrkopf der FSW positioniert. Im Anschluss dazu markierte man eine bestimmte Stelle auf der Spannvorrichtung, die dem Mittelpunkt der Spannbackenbreite entsprach. Durch das händische Nachrücken des Kunstknochens bei den Bohrvorgängen gewährleistete diese Markierung die exakt gleiche Bohrposition bei sämtlichen Bohrungen.

Die Kraftmessdosen wurden dann mit dem externen Datenrekorder verbunden und getestet. Dazu beschwerte man die Spannvorrichtung mit einem bestimmten Gewicht und verglich es

mit der Anzeige am Rekorder. Durch die Übereinstimmung beider Werte wurde nun der erste Bohrer im Spannfutter fixiert und an der markierten Stelle über dem Knochen positioniert.

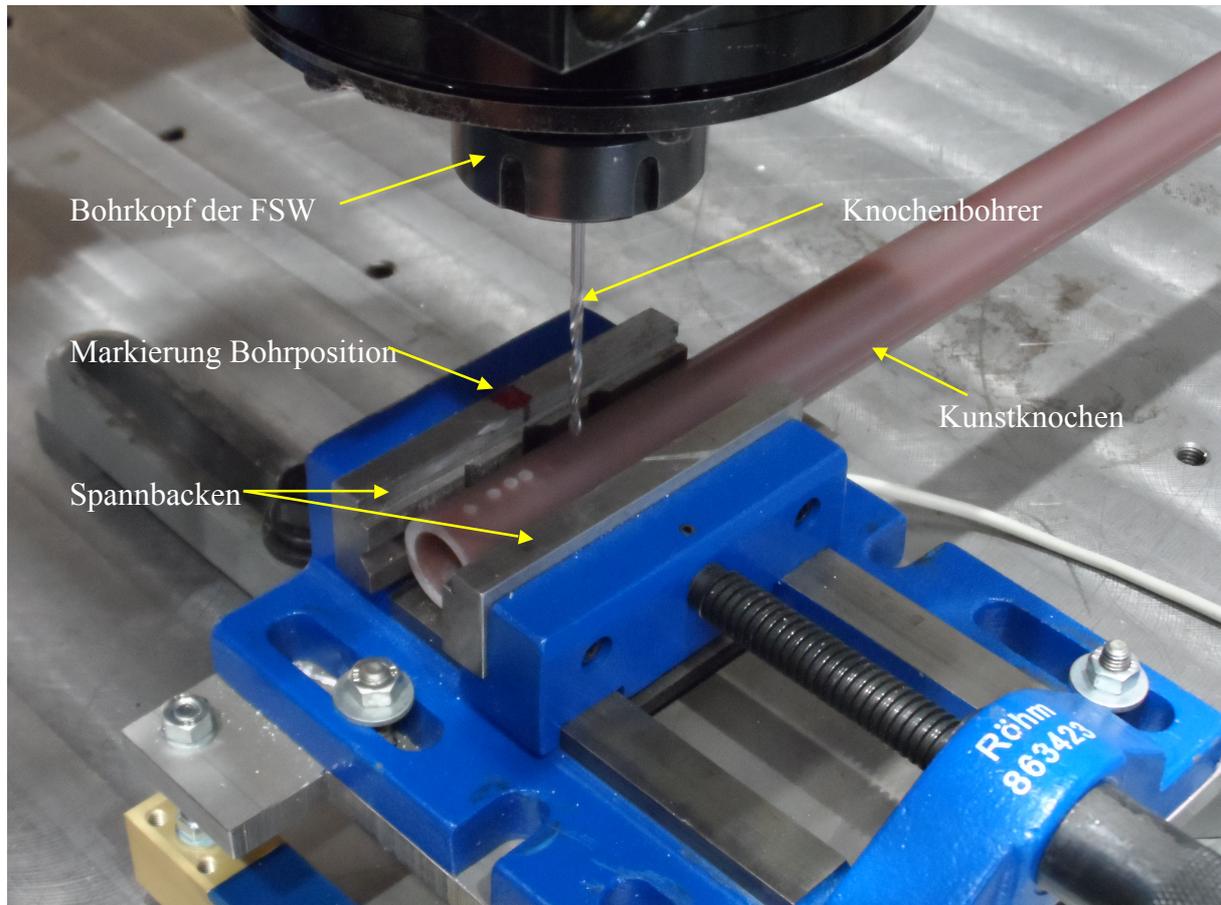


Abbildung 49: Spannvorrichtung (blau) mit Bohrposition (rote Markierung)

3.1.9.1 Testphase

Nach Abschluss des Versuchsaufbaus wurden einzelne Testbohrungen mit den zuvor getroffenen Parametern am Kunststoffknochen durchgeführt.

„Bei experimentellen Untersuchungen kann es bei zu hoch eingestelltem Vorschub zu Reißvorgängen an Bohrern kommen, die die Meßwerte verfälschen können und ungünstige Auswirkungen auf die Bohrlochform und den Bohrvorgang haben. [...] Verschiedentlich wurde auch darauf hingewiesen, daß bei zu starkem Vorschub und ungünstiger Geometrie die Zerspanung beim Bohrvorgang und der Spanfluß ungenügend sind, was mit verstärkter Wärmeentwicklung und raschem Abstumpfen des Bohrers einhergeht“ (Schmelzeisen 1990:9).

Die Gedanken dabei waren die Kontrolle der bereits getroffenen Parameter (Bohrerdrehzahl 800U/min, Vorschub 70mm/min) und die Optimierung der Einstellungen am Datenrekorder, da noch keine Erfahrungen mit dem Rekorder im Zusammenhang mit Bohrungen vorlagen. Somit konnte man sich einen Überblick über die erhaltenen Messdaten und den Kraftverlauf

beim Bohrer verschaffen. Dazu waren lediglich sechs Bohrungen notwendig, ehe man nach Abschluss der Testphase mit den Versuchsbohrungen beginnen konnte.

3.1.10 Bohrgut

Die Spanbildung und der Abtransport des sogenannten Bohrguts sind bei Bohrvorgängen ebenfalls von großer Bedeutung. Ablagerungen in Bohrlöchern können die Haltbarkeit von eingebrachten Schrauben verschlechtern. Eine unzureichende Spanbildung – kein durchgängiger Span – lässt Rückschlüsse auf den Zustand der Schneiden von Bohrern zu. Ein bröselartiges Bohrgut ist auf verschlissene Bohrer zurückzuführen (pers. Mitteilung Schrottner/TU Graz). Ist in Abbildung 50 (links u. rechts) ein durchgehender, langer Span zu sehen, so ähnelt Abbildung 51 einem Bohrmehl. Letztes wurde bei den Versuchsbohrungen bereits nach der 6. Bohrung festgestellt.



Abbildung 50: durchgehender Span (Aufnahmen aus Bohrversuchen)

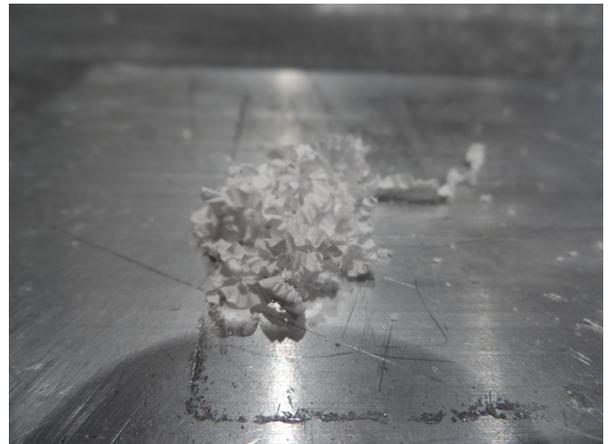


Abbildung 51: Bohrmehl (Aufnahme aus Bohrversuchen)

3.1.11 Stereolichtmikroskop

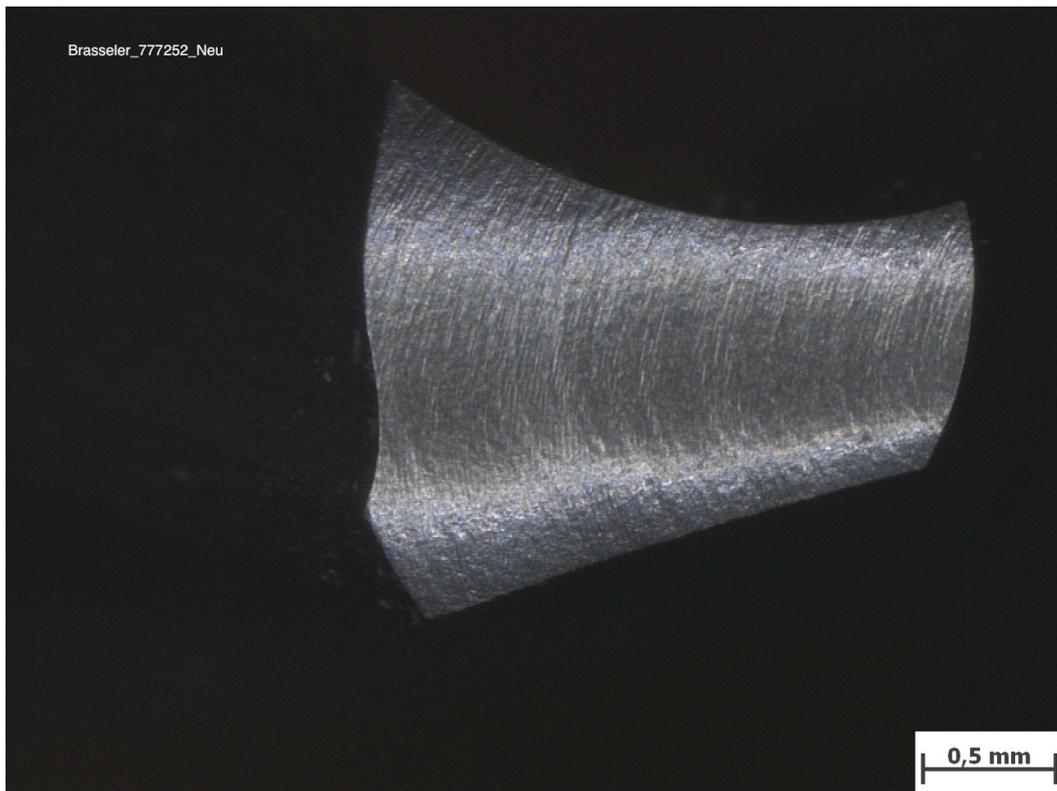
Mit dem Stereolichtmikroskop (Abbildung 52) erfolgte die Begutachtung der verschlissenen Bohrer. Dazu wurden diese ultraschallgereinigt, getrocknet und mit einer Vorrichtung fixiert. Bei den verschlissenen Bohrern achtete man besonders auf markante Schäden im Bereich der Haupt- und Querschneide. Ebenso wurde der Eckpunkt (Ende Hauptschneide – Übergang Nebenschneide bzw. Führungsphase, s. Kapitel 5.3, Abb. 78, S. 93) überprüft. Die Aufnahmen der verschlissenen Bohrer ermöglichten den direkten Vergleich mit jenen im Lieferzustand (s. Abbildungen 53 bis 56).



Abbildung 52: Stereolichtmikroskop

3.1.11.1 Gegenüberstellung im Stereolichtmikroskop – neu und verschlissen

Hierbei wurde eine Mikroskopvergrößerung von 35-fach für alle Aufnahmen verwendet. Bezüglich der Charakterisierung des Verschleißes wird auf Kapitel 1.9 verwiesen. Der Bohrerverschleiß eines Bohrers der Fa. Brasseler im Vergleich zum neuen Bohrer ist in Abb. 53 und 54 zu sehen, jener der Fa. Synthes in Abb. 55 und 56.



Brasseler_777252_Neu

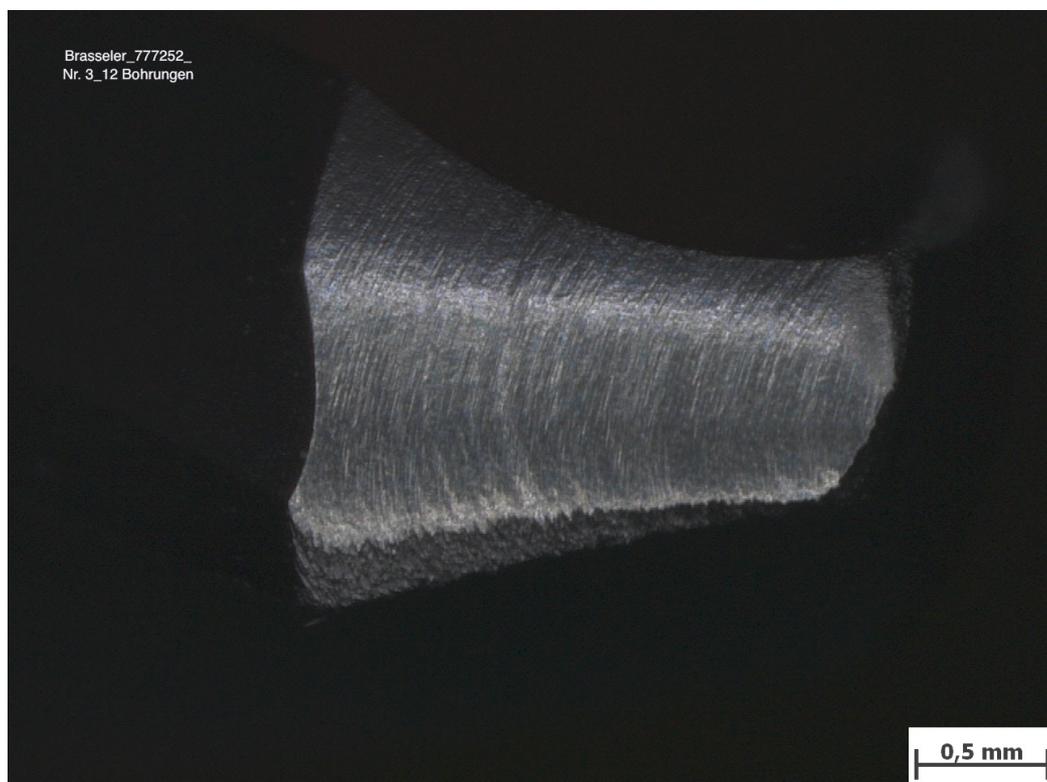
0,5 mm

Mikroskopvergrößerung: 35,0x; Bildbreite: 3,98 mm

Bildname: knochenbohrer13u0129.jpg



Abbildung 53: Brasseler_777252_Neu



Brasseler_777252_
Nr. 3_12 Bohrungen

0,5 mm

Mikroskopvergrößerung: 35,0x; Bildbreite: 3,98 mm

Bildname: knochenbohrer13u0133.jpg



Abbildung 54: Brasseler_777252_verschlissen (nach 12 Bohrungen)

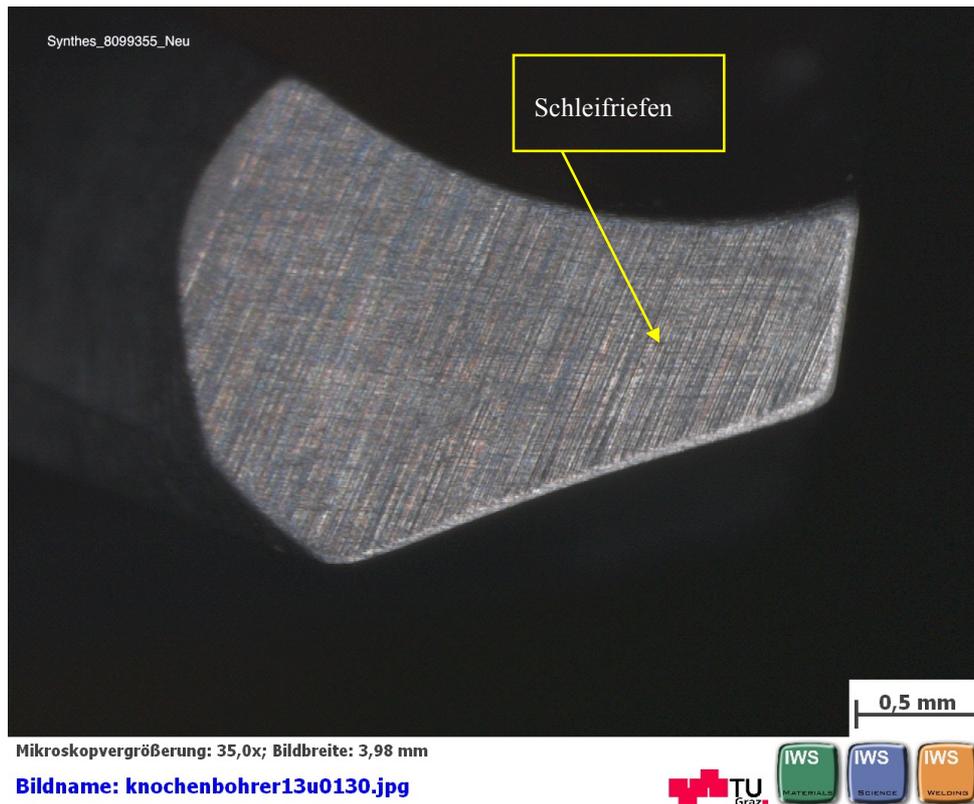


Abbildung 55: Synthes_8099355_Neu

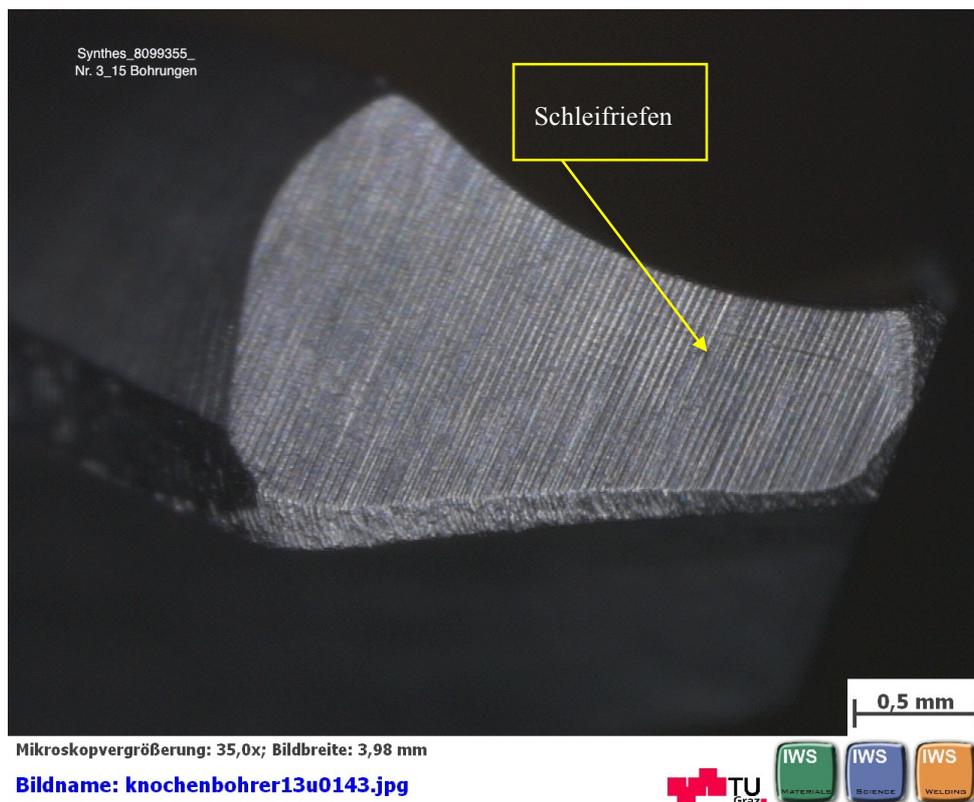


Abbildung 56: Synthes_8099355_verschlissen (nach 15 Bohrungen)

3.1.12 Versuchsablauf

Das Versuchsprogramm wurde im Anschluss an die Testbohrungen festgelegt. Die zur Verfügung stehende Ausrüstung wurde bereits auf Seite 54 aufgelistet.

Da bei den Bohrungen die auftretende Kraft gemessen wurde und aufgrund der Testbohrungen noch keine Aussagen über den Kraftanstieg mit der Bohrungsanzahl getroffen werden konnten, wurde als oberer Richtwert (für Versuchsende) die doppelte Kraft, wie in der Diplomarbeit Zopf bei händischen Bohrungen ermittelt, festgelegt – d.h. 90 N (45 N * 2).

Zu Beginn wurden die Bohrer einzeln verpackt und beschriftet. Zur eindeutigen Zuordnung wurde der Firmenname, die LOT-Nummer und eine fortlaufende Nummer verwendet. Eine typische Bezeichnung lautete z.B.: „Synthes_8040081_Nr. 1“.

LOT-Nummer: Dabei handelt es sich um eine von der Fa. vorgegebene Chargennummer (lot-number = Chargennr.), welche den kompletten Herstellungsprozess des Bohrers nachverfolgen lässt ([http://de.wikipedia.org/wiki/Los_\(Produktion\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Los_(Produktion))), s. Abb. 57.

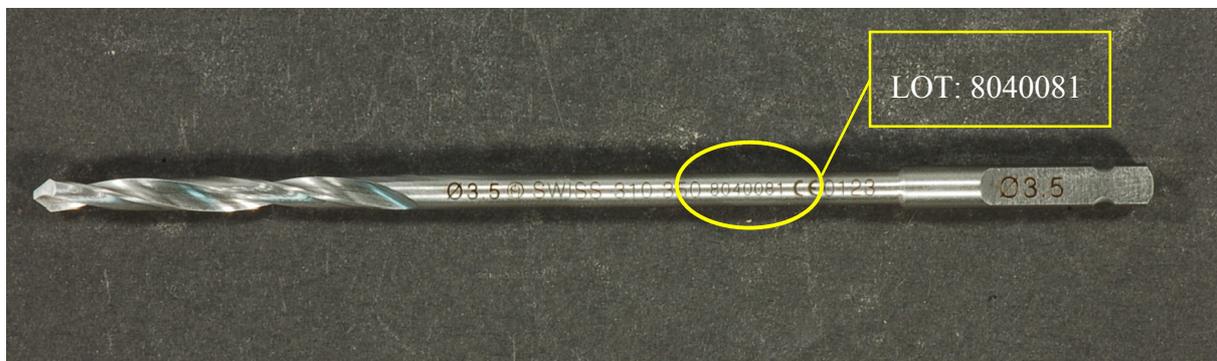


Abbildung 57: LOT-Nummer auf Synthes Bohrer

Von Fa. Synthes wurden je fünf Stück Bohrer mit den LOT-Nummern 8040081 und 8099355 bereitgestellt und geliefert. Alle Bohrer von Fa. Brasseler hatten die gleiche LOT-Nr. 777252.

Es wurde mit den Bohrern von Fa. Synthes begonnen. Mit dem ersten Bohrer wurden 30 Bohrungen durchgeführt. Die maximale Bohrkraft stieg dabei von ca. 37 N (1. Bohrung) auf ca. 77 N (30. Bohrung) an. Beim zweiten Synthes Bohrer stellte sich eine Bohrkraft von ca. 82 N nach bereits 22 Bohrungen ein (1. Bohrung ca. 39 N).

Da der Kunstknochen mit einer Länge von 500 mm aufgrund der hohen Anzahl von Bohrungen nicht für sämtliche Bohrer ausgereicht hätte, wurde beschlossen, die Anzahl der Bohrungen auf ca. 15 zu beschränken; falls nicht bei einer geringeren Anzahl von Bohrungen bereits der 90 N Richtwert erreicht werden würde.

Somit wurde mit den restlichen Bohrern eine geringere Anzahl von Bohrungen durchgeführt. Die dabei erreichten Bohrkraft je Bohrer und Bohrung sind im Anhang („Tabelle mit allen gemessenen Bohrkraften,“) ersichtlich.

Alle Bohrer wurden nach deren Einsatz wieder sorgfältig verpackt und anschließend im Stereolichtmikroskop betrachtet. Dabei achtete man besonders auf eventuelle grobe

Ausbrüche im Bereich der Hauptschneiden und der Bohrerspitze. Es konnten jedoch an keinem Bohrer Ausbrüche festgestellt werden. Näheres dazu im Kapitel 5.1 „Auswertung der Bohrversuche“.

Am Kunstknochen wurden die Bohrlöcher unterteilt, markiert und zugehörig zu den jeweiligen Bohrern beschriftet., Abb. 58.

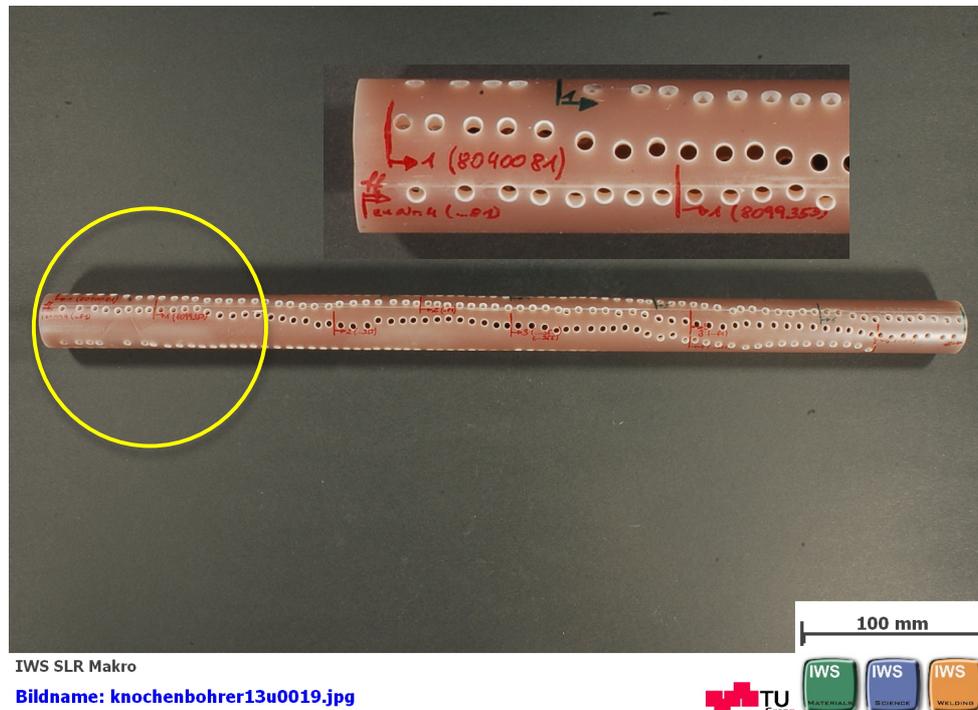


Abbildung 58: Kunstknochen verbraucht

3.1.13 Anpassung der Bohrergeometrie

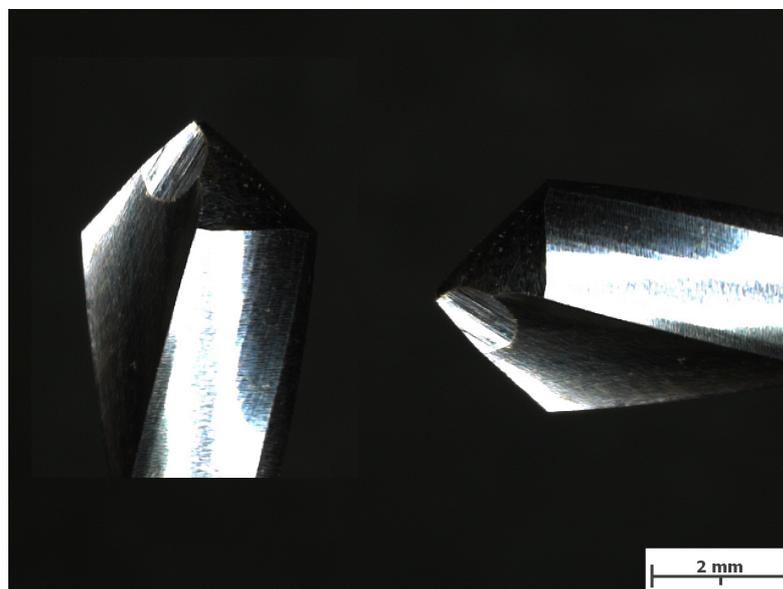
Bei den Versuchsbohrern von Fa. Synthes und Fa. Brasseler liegen sehr unterschiedliche Geometrien vor (siehe Tabelle 3.2). Zu Vergleichszwecken wurde eine Geometrieangepassung dieser durchgeführt. Im Allgemeinen hat man hierbei sehr viel Spielraum. Beginnend bei unterschiedlichen Geometrieformen mit unterschiedlichen Spitzenwinkeln, Querschneidenlängen, usw., über Ausspitzungen der Querschneide (s. Abb. 59), bis hin zu chirurgischen Hybrid-Bohrern. Da derartige Anpassungen und experimentelle Untersuchungen nicht Schwerpunkt dieser Arbeit sind, wurde lediglich eine Geometrieänderung durchgeführt und getestet.

Mit der Unterstützung der Werkzeugschleiffirma Salmhofer wurde an je einem Brasseler bzw. Synthes Bohrer eine Änderung der Geometrie vorgenommen. Erfahrungen von Fa. Salmhofer im Bereich chirurgischer Knochenbohrer existierten leider nicht. Die neue Geometrie in Abbildung 59 (größerer Spitzenwinkel, kleine Querschneidenbreite, Ausspitzung der Querschneide) beruhte auf Erfahrungen beim Bohren von Metallen und Kunststoffen, Tabelle

3.2. Diese neue Anschliffform ähnelt jener aus der Abb. 18 „Anschliffformen von Spiralbohrern“ (Kap. 1.5.2, S. 23) und verspricht eine geringere Vorschubkraft und bessere Zentrieeigenschaften.

	Synthes Geometrie neu	Brasseler Geometrie neu	Synthes Original	Brasseler Original
	AISI 440 A	AISI 440 B	AISI 440 A	AISI 440 B
Gesamtlänge	101 mm	98 mm	113 mm	110 mm
Schaftlänge	75 mm	62 mm	75 mm	62 mm
Schneidenlänge	26 mm	36 mm	38 mm	48 mm
Bohrerdurchmesser	3,5 mm	3,5 mm	3,5 mm	3,5 mm
Spitzenwinkel	90°	90°	80°	90°
Drallwinkel	ca. 14°	ca. 13°	ca. 14°	ca. 13°
Querschneidenbreite	0,5 mm	0,5 mm	0,84 mm	0,98 mm
Hinterschliff	ca. 0,3 mm	ca. 0,3 mm	ca. 0,5 mm	ca. 0,2 mm

Tabelle 3.2: Vergleich neue Geometrie mit Originalschliff



Mikroskopvergrößerung: 12,2x; Bildbreite: 11,46 mm

Bildname: knochenbohrer13u0354.jpg



Abbildung 59: Neue Geometrie am Beispiel von Synthes

Anhand der Aufnahme im Rasterelektronenmikroskop sind Unebenheiten im Bereich der Hauptschneide ersichtlich (s. Abb. 60). Der Geometriefertigung sollte hinsichtlich der Qualität der Schneiden also mehr Aufmerksamkeit und Genauigkeit (beim Schleifprozess) gewidmet werden.

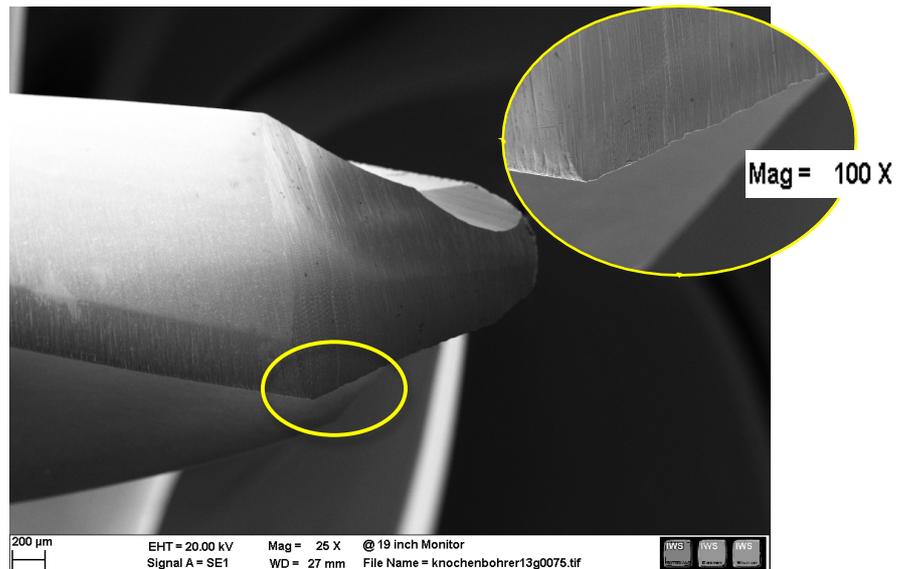


Abbildung 60: REM – Aufnahme neue Geometrie Synthes

Die Geometrieänderung lieferte erstaunliche Ergebnisse. Mit einem derartigen Wandel der auftretenden Bohrkraft rechnete man vor Versuchsbeginn nicht. Synthes verzeichnete dabei deutlich höhere Bohrkraften als bei den Bohrungen mit der Originalgeometrie. Auch verglichen mit den Ergebnissen (Bohrungen mit neuer Geometrie) von Brasseler schnitt Synthes schlechter ab. Die genauen Bohrkraften und der Vergleich der Geometrieformen beider Bohrerarten sind im Kapitel 5.1 „Auswertung der Kräfte aus den Bohrversuchen“ (Seite 80) angeführt. Natürlich sind für detaillierte Aussagen mehr Bohrungen und vor allem eine größere Vielfalt an Bohrergeometrien notwendig. Dennoch wird ersichtlich, dass man in Sachen Geometrie einen großen Gestaltungsspielraum hat und mit der Anpassung die Bohrkraft senken kann.

4 Metallografische Probenpräparation

Die grundsätzliche Vorgehensweise wurde in Anlehnung an das Werk „Metallografie“ von Oettel und Schumann vorgenommen.

4.1 Probenpräparation

„Unter Präparation wird die gesamte Vorbereitung einer Probe für die makro- und mikroskopische Untersuchung verstanden. Da metallische Stoffe opak sind, muss ihr Aufbau bei einer lichtmikroskopischen Untersuchung im Auflicht beobachtet werden. Die von der präparierten Anschlifffläche reflektierten Lichtstrahlen enthalten Informationen über den Werkstoffaufbau“ (Oettel 2005:134).

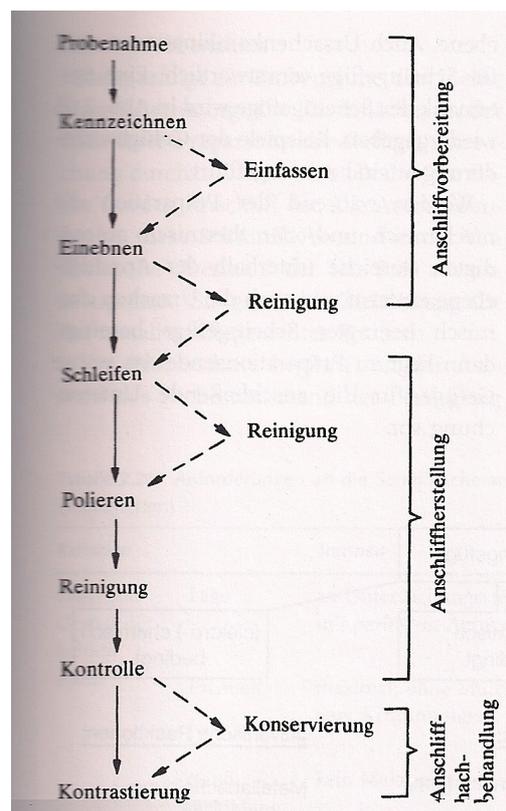


Abbildung 61: Stufen zur Herstellung eines metallografischen Schliffs (Ebd.:135)

Wie aus der Abbildung ersichtlich, unterteilt Oettel die Probenpräparation in folgende Stufen: Anschliffvorbereitung, -herstellung, -nachbehandlung.

Die jeweiligen Bearbeitungsschritte sind den einzelnen Präparationsstufen zu entnehmen.

Eine Bearbeitung der Probenoberfläche muss gewährleistet werden. Verunreinigungen, Fremdkörper oder Schmierstoffe würden keine optimalen Bilder zulassen. Die Prüfung ansich wird auf einer glatten und ebenen Oberfläche durchgeführt (Ebd.:134).

Insbesondere wegen der geringen Eindringtiefen bei den Mikrohärteprüfungen, wird laut Norm die Anwendung eines – an die Werkstoffeigenschaften angepassten – Polier- oder Elektropolierverfahrens empfohlen. Die Probendicke muss mindestens 1,5 mal größer als die Diagonalenlänge des Eindrucks sein. Sollte die Probe eine gekrümmte Oberfläche aufweisen, sind entsprechende Korrekturwerte (siehe Norm Tabellen B.1 bis B.6 im Anhang) heranzuziehen.

4.1.1 Anschliffvorbereitung

„Wesentliche Schritte der Anschliffvorbereitung sind Probenahme und Einfassen der Probe. Erfolgt die Probenahme metallografiegerecht, d. h. mit planer sowie grat- und ausbruchfreier Schnittfläche, ohne Wärmebeeinflussung des oberflächennahen Bereichs, mit minimaler Schädigung durch Rauigkeit und Mikrodeformation, dann erübrigt sich für eine Einzelprobenbearbeitung das Einebnen“ (Oettel 2005:135). Unter dem Begriff Einebnen versteht man die Schaffung eines gemeinsamen Anschliffniveaus durch abtragsintensive Nassschleifvorgänge (Ebd.:135).

4.1.2 Probenahme

Ausgehend von der Wahl des Probenstücks und der entstehenden Schliffebene erfolgt eine mechanische Trennung des Materials. Diese Trennebene stellt die zu untersuchende Schlifffläche dar. Mit einem geringen Aufmaß soll beim Trennen eine maximale Planheit (ohne Stufen oder Krümmungen) gewährleistet werden. Dabei bedient man sich bei der Probenentnahme von Werkstoffen über 100 HV üblicherweise des Nasstrennschleifens. Das Material wird unter starker Kühlung mit einer Kühlflüssigkeit auf Wasserbasis durch eine motorbetriebene Trennscheibe heraus- bzw. abgetrennt (Ebd.:137ff).

„Die beigemischten Additive bewirken einen Schmiereffekt und verhindern die Korrosion der Trennflächen sowie der Geräteteile im Trennraum der Trennmaschine. Zudem erhöhen einige den Siedepunkt des Wassers, wodurch die Kühlwirkung der Flüssigkeit verbessert wird. Weitere Additive wirken antibakteriell“ (Oettel 2005:139).

Beim Nasstrennschleifen ist die Anwendung mehrerer Schnittmodi möglich. Das jeweilige Verfahren hängt dabei von dem Probestück ab. Dessen Abmessungen, Form und

Materialeigenschaften spielen eine entscheidende Rolle bei der Auswahl des Trennverfahrens. Oettel unterscheidet zwischen drei Grundarten:

- Kappschnitt:
Das Probenstück ist fix unter der Trennscheibe montiert. Diese wird nur vertikal verschoben.
- Kombinationsschnitt:
Dieses Verfahren findet seinen Einsatz bei schwierigen Trennaufgaben. Die Trennscheibe wird in horizontaler und/oder vertikaler Richtung bewegt. Das Probenstück ist wie beim Kappschnitt ortsgebunden.
- Fahrschnitt:
Darunter versteht man eine ortsgebundene, rotierende Trennscheibe und die Bewegung des Probenstücks zur Scheibe (Ebd.:140f.).

Nach erfolgter Entnahme des Probenstücks ist dieses eindeutig zu kennzeichnen, um mögliche Verwechslungen zu verhindern. Bei der Kennzeichnung ist zu beachten, dass die Schnittfläche bzw. die spätere Schlieffläche nicht beschädigt wird. Die dauerhafte Kennzeichnung erfolgt in der Regel mit Graviergeräten (Ebd.:144).

Fehler im Zuge der Präparation können zu Täuschungen von Gefügeerscheinungen führen. Derartige Scheingefüge stellen nicht das wahre Gefüge des zu untersuchenden Werkstoffes dar. Auslöser dafür können mechanische, thermische oder (elektro-)chemische Einflüsse sein (s. Abb. 62) (Ebd.:136).

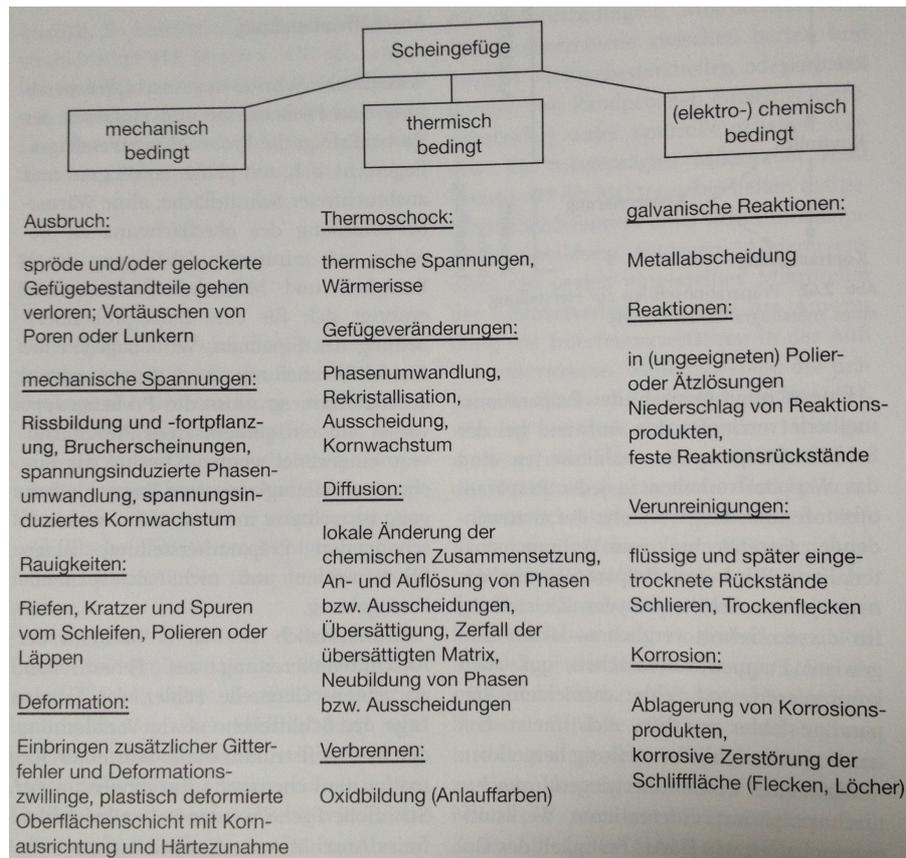


Abbildung 62: Scheingefüge und deren Ursachen (Ebd.:136)

4.1.3 Einfassen

Die Ziele des Einfassens von Schlißproben definiert Oettel wie folgt:

- „Probenformen und –abmaße hand- oder maschinengerecht zu gestalten
- Pulverförmige, flexible, weiche, poröse, randrissige, spröde oder brüchige Proben zusammenzuhalten und vor Präparationsfehlern zu schützen
- Probenränder, insbesondere Oberflächenschichten, zu stützen und Kantenabrundungen entgegenzuwirken
- Rationalisierung der Anschlißherstellung kleinerer Proben durch Zusammenfassen zu einem Probekörper“ (Oettel 2005:144).

Für die Metallografie gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten des Einfassens von Proben: das Einbetten und das Klemmen zwischen Klammern (Einspannen).

4.1.4 Einspannen

Die Anpassung des Schlißhalterwerkstoffs auf den Probenwerkstoff ist wichtig, um Abtragsunterschiede zwischen beiden Materialien einzuschränken. Auch das Ätzverhalten des Klammermaterials ist wegen der chemischen Kontrastierung (kein chemisch bedingtes Scheingefüge) zu beachten (Ebd.:144).

4.1.5 Einbetten

Dazu positioniert man die Proben in meist zylindrischen Formen und füllt diese mit einem Einbettmittel. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen dem Eingießen und dem Einpressen (Ebd.:144). Beim Eingießen verwendet man ein gießfähiges, organisches Kalteinbettmittel (Kaltgießen; z.B.: Akryl-Einbettmittel „DuroCit“ der Fa. Struers, Ballerup Denmark), oder eine niedrigschmelzende Legierung (Warmeingießen; z.B.: Kunstharze „DuroFast“ der Fa. Struers)

(http://www.struers.com/default.asp?top_id=3&main_id=9&doc_id=181&target=_self&admin_language=4&collapse=1).

Das Verfahren des Einpressens erfolgt mit einem aufschmelzbaren organischen Warmeinbettmittel (Oettel 2005:144).

Auswahlkriterien für die Einbettmittel:

- *„Verarbeitungstemperatur und –zeit*
- *Aushärtetemperatur und –zeit*
- *Schrumpfungsverhalten (bzw. Dehnungsverhalten)*
- *Härte- und Abrasivverhalten*
- *Resistenz gegenüber Probenmaterial, Einbettform und Einwirkungen von Chemikalien sowie Wärme (ggf. UV-Strahlung)*
- *Elektrische Leitfähigkeit*

Zusätzlich bei Einbettkunststoffen:

- *Mischbarkeit mit härtesteigernden oder elektrisch leitenden Füllstoffen*
- *Einfärbbarkeit bzw. Mischbarkeit mit fluoreszierenden Substanzen“* (Oettel 2005:145).

Anforderungen an die Einbettmittel:

- gute Adhäsion zum Probenmaterial
- geringe Viskosität während der Verarbeitung
- formfüllend und blasenfrei
- keine Lokalelementbildung (Ebd.:145).

4.1.5.1 Kalt- und Warmeingießen

Das flüssige, aus zwei oder drei Komponenten (flüssig – flüssig, flüssig – pulvrig, 2x flüssig – pulvrig) bestehende Einbettmittel (niedrigschmelzende Legierungen beim Warmeingießen)

wird bei Raumtemperatur in die Form gefüllt. Das Probenstück wurde zuvor gereinigt, entfettet und in der Form positioniert. Je nach Zusammensetzung des Einbettmittels ergeben sich unterschiedliche Aushärtezeiten (Ebd.:146).

4.1.5.2 Warmeinpressen

Unter Zuhilfenahme der Einbettpresse wird die Probe auf dem Stempel der Maschine positioniert. Mit dem körnig-pulvrigen Einbettmittel (Duro- oder Thermoplaste) wird dieser Zylinder gefüllt. Unter Druck und Wärmeeinwirkung wird die Probe eingebettet. Der Betriebsdruck liegt dabei zwischen 15 und 60 kN bei einer Temperatur von ca. 140 bis 180°C. Diese Werte variieren je nach Einbettmittel und Durchmesser des Zylinders der Einbettmaschine. Die modernen Geräte sind programmierbar und der Einbettvorgang läuft automatisch. Je nach Einbettmittel sind die erforderlichen Parameter voreingestellt (Ebd.:146f.). Die erforderlichen Einbettparameter beim Warmeinpressen sind:

- *„Art des Einbettmittels (Erweichungs- und Verarbeitungstemperatur, Aushärteverhalten)*
- *Presslingdurchmesser*
- *Aufheizen (Aufheizzeit, druckloses Erwärmen, Aufheizen unter definiertem Druck)*
- *Haltetemperatur und –zeit*
- *Einpresskraft bzw. –druck*
- *Abkühlen (Intensität), Abkühlzeit*
- *Prozessdauer“ (Oettel 2005:147).*

4.1.6 Anschliffherstellung

„Nach der Probenahme kann die erzeugte Trennfläche je nach Entnahmeverfahren Ebenheitsabweichungen und unzulässige Rauigkeiten aufweisen. Zusätzlich befindet sich unmittelbar hinter der Trennfläche eine gestörte Schicht. Sie besteht selbst nach einem metallografiegerechten Nasstrennschleifen aus mechanisch geschädigten Werkstoffzonen. Die Schädigungen nehmen zum Probeninneren hin graduell ab. [...] Harte und spröde Werkstoffe besitzen im Vergleich zu weichen und duktilen eine weniger ausgeprägte Störschicht. Sie weist jedoch Ausbrüche und Mikrorisse auf, die wegen der guten Verformungsfähigkeit bei weichen Werkstoffen fehlen“ (Oettel 2005:147f.). Diese Schädigungen der Trennschicht müssen im Zuge der Anschliffherstellung entfernt werden. Durch geeignete Abtragsverfahren muss die Schlifffläche auf das Niveau des wahren Gefüges des Werkstoffes reduziert werden (Ebd.:148).

4.1.7 Schleifen

Der mechanische Schleifprozess erfolgt durch horizontale Drehteller. Dazu werden die Schliffproben in einer Spannvorrichtung mit der Schlifffläche nach unten fixiert. Dabei erfolgen einerseits eine Drehbewegung des Drehtellers und andererseits eine Kreisrotation des Probenaufnehmers. Auf dem Drehteller ist ein Abrasivstoffträger befestigt, welcher durch die enthaltenen Abrasivpartikel als Wirkfläche agiert. Man unterscheidet zwischen starren und flexiblen Schleifkörpern:

- Starre Schleifkörper:

Der Drehteller selbst dient hier als spezielle Unterlage, da hier Magnet-Disc-Scheiben (MD-Scheiben) oder „halb“-flexible Ronden magnetisch darauf angebracht werden.

- Flexible Schleifkörper:

Rondenförmige Schleiffolien oder –papiere oder Poliertextilien (Tücher) werden auf ein eigenes Drehteller aufgeklebt, daran angesaugt, oder aufgespannt. Durch die Fixierung erhalten sie die erforderliche Steifigkeit.

Zur Kühlung der Probe und zur Abfuhr von Schleifpartikeln erfolgt der Schleifvorgang mit einem Schleifpapier unter Verwendung von Wasser. Spezielle Kühl-Schmier-Flüssigkeiten dienen neben der Kühlung zur gezielten Beeinflussung der Reibung (Ebd.:163f.).

„Die eingesetzten Abrasivstoffe werden je nach Abtragsverfahren in einem Durchmesserbereich von bis zu vier Zehnerpotenzen angewandt (z. B. zwischen 250 μm und 0,03 μm). Während für das Schleifen neben Diamant und verschiedene Al_2O_3 -Sorten auch SiC eingesetzt wird, haben sich als Poliermittel mit universeller Anwendung lediglich Diamant und (Polier-)Tonerde durchgesetzt“ (Oettel 2005:164).

Abtragsverfahren	Abrasivstoff und \varnothing -Bereich (Schleif-, Polier- oder Läppmittel)	Abrasivstoffträger (Unterlage)	Hilfsstoff (Spezialflüssigkeit)
<i>Schleifen:</i>			
- Grobschleifen (Planschleifen)	Flachschleifkörper aus Diamant, Al ₂ O ₃ -Sorten oder SiC (z. B. Horizontalschleifstein, Topfscheibe, Schleifring); 40 bis 260 μm \varnothing		Kühlschmierstoffe auf Wasser- oder Öl-Basis
	Diamant; 40 bis 250 μm \varnothing	Schleifscheiben; selbstklebende Schleiffolie; Stahlblech-Ronde für Magnethaftung (z. B. MD-Piano 120, Struers)	Leitungswasser (ggf. mit Anti-Korrosions- und/oder Schmieradditiven)
	ZrO ₂ - Al ₂ O ₃ ; 75 bis 200 μm \varnothing SiC; 30 bis 200 μm \varnothing	Nass-Schleifpapiersorten	
- Feinschleifen	Diamant; 0,1 bis 30 μm \varnothing	Scheiben; selbstklebende Folien Stahlblech-Ronde (z. B. MD-Piano 1200, Struers)	
	SiC; 5 bis 30 μm	Nass-Schleifpapiersorten; Schleifleinen	
<i>Feinschleif-Läppen:</i>	Diamant (Suspension, Spray); 3 bis 15 (30) μm \varnothing	Kunststoff-Metall-Verbund-scheibe als: Massivscheibe (z. B. Typ New Lam von Heraeus Kulzer) oder Stahlblech-Ronde für Magnethaftung mit Waben-Wirkfläche (Typ MD-Allegro von Struers)	Gleitmittel auf Alkohol-Glykol- oder Wasserbasis
<i>Läppen:</i>	Läpppulver aus Diamant, B ₄ C, SiC, Al ₂ O ₃ -Sorten; 0,05 bis 20 μm \varnothing	Läppscheibe aus Glas, GGL oder Spezialscheiben abgestufter Härte (z. B. Typ Metlap von Wirtz-Buehler)	spezielle Läppöle, Glykole, Wasser mit oberflächenaktiven Zusätzen
<i>Polieren:</i>			
- reliefarm, mit ausgeprägter Verformungszone	Diamant (Paste, Suspension, Spray) 0,05 bis 15 (45) μm \varnothing oder Poliertonerde	Poliertuch aus: Pellon, Leinen, Nylon, Kunstseide	Gleitmittel auf Basis von Leichtölen Alkohol-Glykol-Gemischen oder Wasser
- Reliefpolieren, verformungsarm	(Al ₂ O ₃ -Sorten als Suspension) 0,03 bis 5 μm \varnothing	Baumwolle, Langflor-Synthetik, Samt, Filz	Aufschlammmittel auf Wasser (dest.)-Basis

Abbildung 63: Materialien für mikrospanende Abtragsverfahren (Ebd.:165)

4.1.8 Mechanisches Polieren

Auf den Schleifvorgang folgt nun das mechanische Polieren. Dabei handelt es sich um eine Mikrospanung der Schlifffläche. Der geringere Abtrag beim Polieren wird anhand folgender Punkte erklärt:

- „die Partikeldurchmesser der angewandten Poliermittel sind kleiner als beim Feinschleifen
- die Abrasivpartikelbindung auf der Wirkfläche des Poliermittelträgers ist mit vergleichsweise höherer Stoßelastizität eine „halb“-bewegliche
- die Schmierwirkung der eingesetzten Gleitflüssigkeit dominiert gegenüber ihrer Kühlwirkung
- die Bewegungsgeschwindigkeit zwischen Probe und gleichsinnig drehender Arbeitsscheibe ist geringer als beim Feinschleifen“ (Oettel 2005:185).

Grund der geringeren Drehzahl beim Polieren sind der werkzeugschonende Abtrag und die Reduktion der Fliehkraft auf das Poliermittel. Diese Polierflüssigkeit besteht in der Regel aus Spezialfetten, oder –flüssigkeiten, Wachsen, Emulgatoren oder Ölen. Der gleichmäßige Auftrag dieser pastösen oder flüssigen Suspensionen auf die Polierscheibe und die genau dosierte Menge von frischen Suspensionen während des Poliervorganges ermöglichen eine genaue und werkstoffschonende Arbeitsweise (Ebd.:185f.). Neben den erläuterten Präparationsmethoden führt Oettel des Weiteren noch folgende Verfahren an (Ebd.:201ff):

- Mikrotomieren und Ultrafräsen als makrospanendes Verfahren
 - Mikrotomieren:
Herstellung der Planheit der Schliifffläche durch Schneidmesser mit Hartmetall- oder Diamantschneide mit spezieller Geometrie.
 - Ultrafräsen:
Abtrag durch schnell rotierende Spezialfräser.
- Chemisch-mechanisches Polieren:
zur Fein- bzw. Endpolitur.
- Elektrochemischer Metallabtrag:
Herauslösen von Atomen aus der Anschliifffläche.

Eine erfolgreiche Probenpräparation ist laut Oettel erst gegeben, wenn die Anforderungen in der angeführten Tabelle (s. Abb. 64, letzte Spalte) erfüllt sind.

Kriterien		Trennen	Schleifen	Polieren
Lage und Gestalt der Schliif-ebene	Lage	an Untersuchungsstelle mit geringem Aufmaß	nahe des interessierenden Bereichs	im interessierenden, unverfälschten Gefügebereich
	Planheit	maximal; ohne Stufen oder Krümmungen	maximal; ohne Facette, Kegel oder Balligkeit	geometrisch (fast) ideal
	Randausbildung	kein Makrograt	randscharf; ohne Abrundung oder Mikrograt	hohe Randschärfe, ohne Verschmierung
Schädigung der Probe durch	Wärme	keine	keine	keine
	Deformation bzw. Kraffeinwirkung	keine Makrodeformation, neue Risse (bzw. Risswachstum) oder Brüche, Mikroausbrüche < 10 µm	dto Mikroausbrüche < 1 µm (→ Null)	dto keine Ausbrüche keine eingedrückten Abrasivprodukte
Abbau der gestörten Oberflächenschicht	Reaktionsschicht	≤ 1 µm	minimal (→ Null); trocken	keine; sauber und trocken
	Schmier-schicht	keine	minimal	minimal (→ Null)
	Rauigkeit		$R_m \leq 1 \mu m$	$R_m \leq 0,1 \mu m$
	Deformationstiefe	Schädigungstiefe insgesamt ≤ 50 µm	≤ 5 µm	≤ 1 µm (→ Null)
Makro-wirkung des Lichts	Reflexion	matt starke Streureflexion	Mattglanz, verminderte Streureflexion	Spiegelglanz (reguläre Reflexion) $\Delta R \geq 10\%$, dann Gefüge-erkennung im Lichtmikroskop

Abbildung 64: Zielkriterien von Schliifflächen (Ebd.:137)

4.1.9 Kontrastierung

Wie Abbildung 65 zeigt, gibt es zwei grundsätzliche Unterschiede bei den Kontrastierungsmethoden. Einerseits die Methode ohne Veränderung der polierten Schliiffläche, andererseits jene mit Veränderung der Probenfläche.

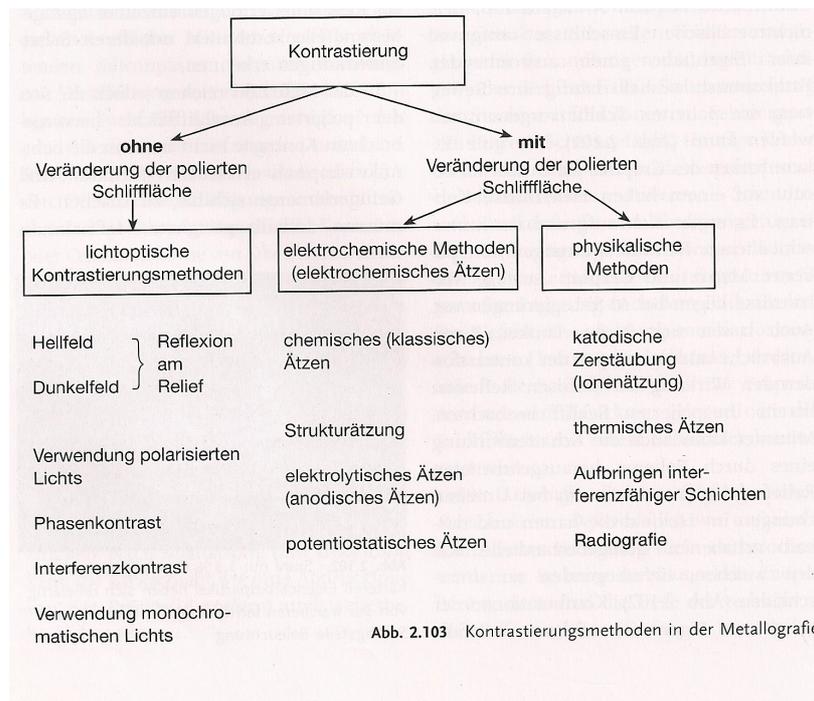


Abb. 2.103 Kontrastierungsmethoden in der Metallografie

Abbildung 65: Kontrastierungsmethoden (Ebd.:226)

- Keine Veränderung der polierten Schliiffläche: Dabei wird unter Verwendung geeigneter Mikroskope die optische Gesetzmäßigkeit des auftreffenden Lichts auf die metallische Schliiffläche genutzt.
- Veränderung der polierten Schliiffläche: Unter Zuhilfenahme von Ätzverfahren und Ätzmitteln wird die polierte Fläche weiterbehandelt, um dadurch einen besseren Kontrast der Strukturen und des Gefüges zu schaffen.

Auf die jeweiligen Ätzmittel und deren Verfahren wird im Zuge dieser Arbeit nicht eingegangen. Es wird an dieser Stelle auf das Lehrbuch „Metallografie“ von Schumann und Oettel verwiesen (Kapitel 2.3.4.1, Seite 227ff).

Die im Zuge dieser Arbeit untersuchten Bohrerstipzen wurden maschinell – 1 cm von der Spitze aus gemessen – vom restlichen Bohrer getrennt und mit dem Einbettmittel DuroFast der Fa. Struers warm eingebettet. Die Beschriftung der erhaltenen Proben erfolgte wie zuvor. Um einen Vergleich mit dem Artikel in der Fachzeitschrift „Praktische Metallographie“ (Haubner 2012:221ff) zu gewährleisten, wurden neben den Querschliffen auch noch fünf Längsschliffe angefertigt.

Zur metallografischen Untersuchung müssen Proben sorgfältig geschliffen und poliert werden, damit eine reflektierende Oberfläche erreicht wird. Diese Fläche muss frei von Kratzern und Deformationen sein. Der Schleifvorgang an sich ist der unten stehenden Tabelle 4.1 zu entnehmen. Alle zu untersuchenden Proben wurden in gleicher Reihenfolge stufenweise mit den angeführten Werten bis P 4000¹⁰ (5 µm) geschliffen. Im Anschluss dazu wurde jede Probe noch mit einer Diamant-Schleifscheibe mit 3 µm und 1 µm poliert (Kraft: 30 N, Dauer: 3 min).

Schleifvorgang	Schleifscheibe	Dauer [min]	mit Wasser	Kraft [N]
1.	Magnetscheibe Körnung 80	2	ja	100-150
2.	Körnung 320	1	ja	50
3.	Körnung 800	1	ja	60
4.	Körnung 1200	1	ja	40
5.	Körnung 2400	1	ja	40
6.	Körnung 4000	1	ja	40

Tabelle 4.1: Schleifvorgang für die metallografische Untersuchung der Bohrerwerkstoffe

¹⁰ SiC Papier der Fa. Struers

Unter Zuhilfenahme des Lichtmikroskops wurde das Gefüge der Proben im geätzten Zustand untersucht. Zur Ätzung wurden eine V2A-Beize und eine Vilella Lösung verwendet. Die Einwirkzeit bei der Beize lag bei einer Temperatur von 50 – 70 °C etwa bei 15 Sekunden, bei der Vilella Lösung zwischen 10 und 13 Sekunden. Die Zusammensetzung der Ätzmittel sind der angeführten Tabelle 4.2 zu entnehmen (Bramfitt 2002:214ff; <http://www.metallograf.de/start.htm?/probenvorbereitung/mikro3.htm>).

Vilella	1 g Pikrin-Säure	V2A-Beize	100 ml Salzsäure HCl
	5 ml Salzsäure		100 ml Wasser H ₂ O
	100 ml Ethylalkohol		10 ml Salpetersäure HNO ₃
			0,2-2 ml Sparbeize

Tabelle 4.2: Zusammensetzung der Ätzmittel Vilella und V2A-Beize



IWS SLR Makro

Bildname: [knochenbohrer13u0208.jpg](#)



Abbildung 66: Probengröße für Präparation (Querschliff durch Knochenbohrer)



Abbildung 67: eingebettete Bohrerspitze

4.2 Härtemessung

Die Härteprüfung nach Vickers ist in der Norm EN ISO 6507-1:2005 festgelegt. Dabei unterscheidet man bei der Prüfung für metallische Werkstoffe nach der angewandten Prüfkraft. Die Unterteilung in drei Bereiche ist in der Abbildung 68 ersichtlich.

Bereiche der Prüfkraft, F N	Härtesymbol	Bezeichnung
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Vickers-Härteprüfung
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 bis $< HV 5$	Vickers-Kleinkrafthärteprüfung
$0,098 07 \leq F < 1,961$	HV 0,01 bis $< HV 0,2$	Vickers-Mikrohärteprüfung

Abbildung 68: Prüfkraftbereiche bei der Vickers-Härtemessung (ÖNORM EN ISO 6507-1 2006:4)

Die Längen der Eindruckdiagonalen dieser Norm liegen zwischen 0,020 mm und 1,400 mm. Es sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse mit abnehmender Länge variieren. D. h., dass die Messunsicherheit bei Eindruckdiagonalen $< 0,020$ mm größer wird. Das Prinzip der Härteprüfung nach Vickers liegt darin, dass ein Diamant-Eindringkörper in die Oberfläche einer Probe hineingedrückt wird. Die Form des Körpers entspricht einer geraden Pyramide mit quadratischer Grundfläche mit einem festgelegten Winkel α_H (136°) zwischen den gegenüberliegenden Flächen (siehe Abbildung 69).

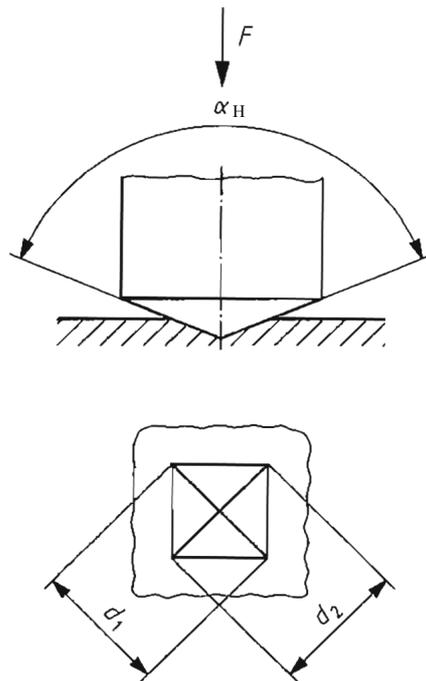


Abbildung 69: Diamant-Eindringkörper bei der Vickers-Härtemessung (ÖNORM EN ISO 6507-1 2006:5)

Nach Beendigung des Eindrucks und Wegnahme der Prüfkraft F werden die in der Abbildung 69 ersichtlichen Diagonalen d_1 und d_2 des Eindrucks gemessen. Die Vickershärte errechnet sich nun aus dem Quotienten der Prüfkraft und der Oberfläche des Eindrucks.

Abkürzungen:

- α_H Winkel zwischen den gegenüberliegenden Flächen des Eindringkörpers (136°)
- F Prüfkraft [N]
- d arithmetischer Mittelwert der beiden Diagonalenlängen d_1 und d_2 [mm]
- HV Vickershärte = Konstante \times (Prüfkraft/Oberfläche des Eindrucks)

Konstante = $0,102 = 1/(9,80665)$; (9,80665 entspricht dem Umrechnungsfaktor von kP auf Newton)

Das folgende Beispiel zur Erläuterung der Bezeichnungen für die Vickershärte wurde aus der Norm übernommen:

Beispiel: „640HV30/20.“

640: Vickers-Härtewert; HV: Härteprüfverfahren; 30: kP-Wert entsprechend der Prüfkraft, wobei $30 \text{ kP} = 294,2 \text{ N}$; /20: Einwirkdauer der Prüfkraft (20 s), wenn außerhalb des festgelegten Bereichs (10 s bis 15 s)“ (ÖNORM EN ISO 6507-1 2006:5f.).

Anforderungen an die Prüfmaschine:

- „Die Prüfmaschine muss die vorgegebene Prüfkraft oder Prüfkraften des entsprechenden Anwendungsbereichs (siehe Tabelle, Abbildung 68) aufbringen können und die Anforderungen nach ISO 6507-2 erfüllen.
- Der Eindringkörper ist eine gerade Diamantpyramide mit quadratischer Grundfläche nach ISO 6507-2.
- Das Messsystem muss den Anforderungen in ISO 6507-2 entsprechen“ (ÖNORM EN ISO 6507-1 2006:6).

Konventioneller Härtebereich ^a		Kleinkraftbereich		Mikrohärtebereich	
Härtesymbol	Prüfkraft F N	Härtesymbol	Prüfkraft F N	Härtesymbol	Prüfkraft F N
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,098 07
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,147
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,196 1
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,245 2
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,490 3
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,980 7

^a Prüfkraften > 980,7 N dürfen angewandt werden.

Abbildung 70: Härtesymbole und dazugehörige Prüfkraften (ÖNORM EN ISO 6507-1 2006:7)

4.2.1 Praktische Durchführung

Die Ausführung der Härteprüfung erfolgt bei Raumtemperatur zwischen 10 und 35 °C. Bei den in der Abbildung 70 angeführten Werten handelt es sich um empfohlene Prüfwerte. Während der Durchführung wird die Probe auf einer ebenen, glatten Auflagefläche fixiert, sodass diese während des Eindringvorganges nicht verrutscht. Die Zeit vom Aufbringen der Kraft bis zur Erreichung des vorgegebenen Wertes muss zwischen 2 und 8 s liegen. Im Bereich der Kleinkraft- und Mikrohärtemessung zwischen 2 und maximal 10 s. In diesem Bereich müssen die Annäherungsgeschwindigkeit des Eindringkörpers kleiner als 0,2 mm/s und die Geschwindigkeit im Kontakt mit der Probe zwischen 15 und 70 µm/s sein. Stöße und Erschütterungen während des Prüfvorgangs verfälschen das Ergebnis. Die konstante Aufbringung der Kraft muss zwischen 10 und 15 s betragen. Ebenso ist die Positionierung des Mittelpunktes des Diamant-Eindringkörpers vorgeschrieben und muss unter anderem für Stahlwerkstoffe mindestens das Zweieinhalbfache der mittleren Diagonalenlänge vom Probenrand entfernt sein. Der Abstand zweier Prüfeindrücke darf nicht kleiner als das Dreifache dieser mittleren Diagonalenlänge sein. Wie zuvor erwähnt, bildet man den arithmetischen Mittelwert beider Diagonalenlängen, um die Vickers-Härte berechnen zu können.

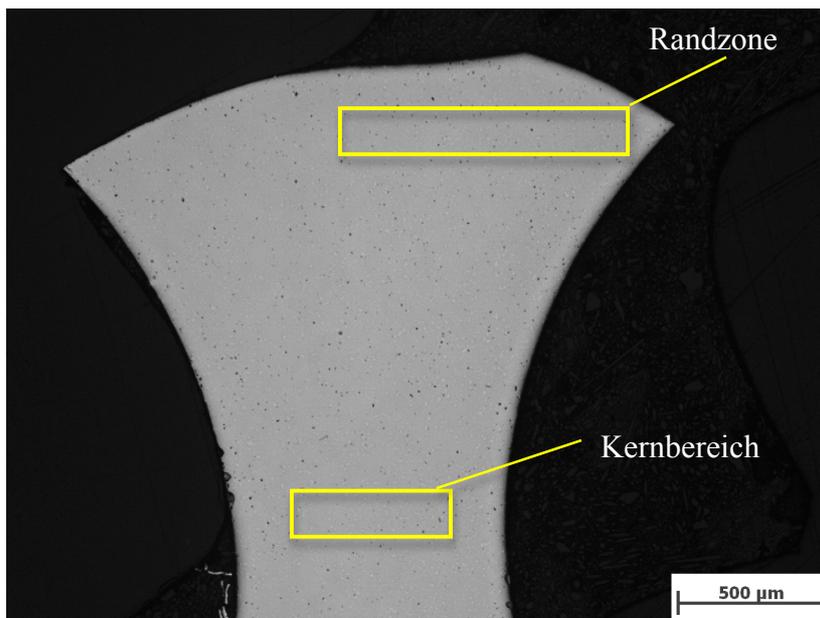
Die Mikrohärtemessungen nach Vickers wurden mit HV 0,025 durchgeführt. Es erfolgten dabei bei den Proben sieben Messungen im Bereich der Randzone und des Kerns der Knochenbohrer. Aus diesen Messungen wurden jeweils der Maximal- und Minimalwert (in Tab. 4.3 rot markiert) nicht berücksichtigt, um bei der Streuung der Ergebnisse den durchschnittlichen Härtewert nicht zu verfälschen. Der Mittelwert ergab sich zu 722 HV 0,025 (ca. 61 HRC) in der Randzone und 699 HV 0,025 (ca. 59 HRC) im Kernbereich bei Synthes und 706 HV 0,025 (ca. 59 HRC) in der Randzone und 713 HV 0,025 (ca. 60 HRC) im Kern bei Brasseler. Die Härteumwandlung nach Rockwell erfolgte nach der Norm EN ISO 18265:2003.

HV 0,025	AISI 440A	AISI 440B		AISI 440A	AISI 440B
Rand	716	573	Kern	680	691
	728	674		691	716
	716	691		703	723
	716	691		712	703
	728	719		700	716
	723	718		722	709
	741	723		741	852
Durchschnittliche Härte	722,2	698,6		705,6	713,4
Standardabweichung	+/- 6,02	+/- 19,45		+/- 11,84	+/- 7,64

Tabelle 4.3: Härtemessung nach Vickers an Querschlifflinien Synthes und Brasseler

Die Messpositionen sind Abb. 71 zu entnehmen. Der Untergrund des betrachteten Gefüges bzw. der Messposition könnte aufgrund des möglichen Eindrucks eines Karbids die Auswertung verfälschen. Deshalb wurden Härtewerte > 900 HV 0,025 nicht berücksichtigt.

Unter Berücksichtigung der Standardabweichung der Messwerte ist ersichtlich, dass die Ergebnisse keinerlei große Unterschiede aufweisen. Weder im Bereich der Randzone und des Kerns, noch beim Vergleich der gleichen Positionen der unterschiedlichen Legierungen. Die annähernd gleichmäßige Karbidverteilung sorgt hier wahrscheinlich für ähnliche Härtewerte.

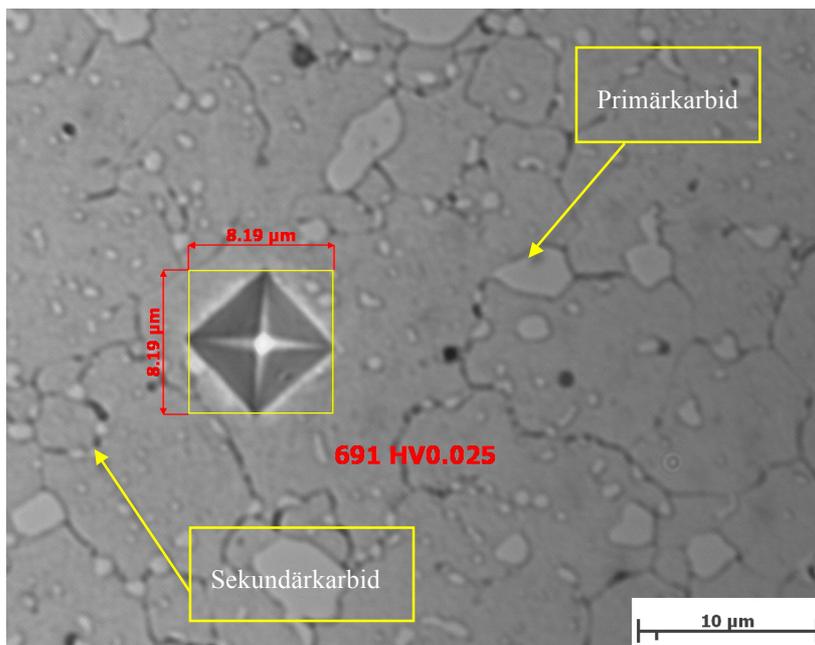


Mikroskopvergrößerung: 50,0x; Bildbreite: 2789,08 µm

Bildname: **knochenbohrer13u0251.jpg**



Abbildung 71: Messbereiche für die Mikrohärtprüfung nach Vickers am Querschliff



Mikroskopverg.: 1880x (Obj.:100 / VW:1.88); Bildbreite: 45.90 µm

Bild: **knochenbohrer13u0493.jpg**



Abbildung 72: Mikrohärtprüfung nach Vickers am Beispiel von Brasseler_Nr.3_Kern

Das Anlassen von martensitischen rostfreien Stählen führt zu einer Verstärkung der Härte. Die Abbildung 73 zeigt eine Zusammenfassung der Härte von verschiedenen AISI Stählen mit einem 12%igen Chrom-Gehalt und einem Anteil von Kohlenstoff mit 0,055 – 0,14 %. Die höhere Härte ist auf den höheren C-Gehalt zurückzuführen. Ein leichter Rückgang der Härte ist bei übersteigen der Temperatur von 482 °C ersichtlich. Auslöser für die hohe Reduktion der Härte ist auf die Bildung von K1 Karbiden zurückzuführen. Es empfiehlt sich daher ein Härteprozess bei Temperaturen um 260 °C (Verhoeven 2005:133f.).

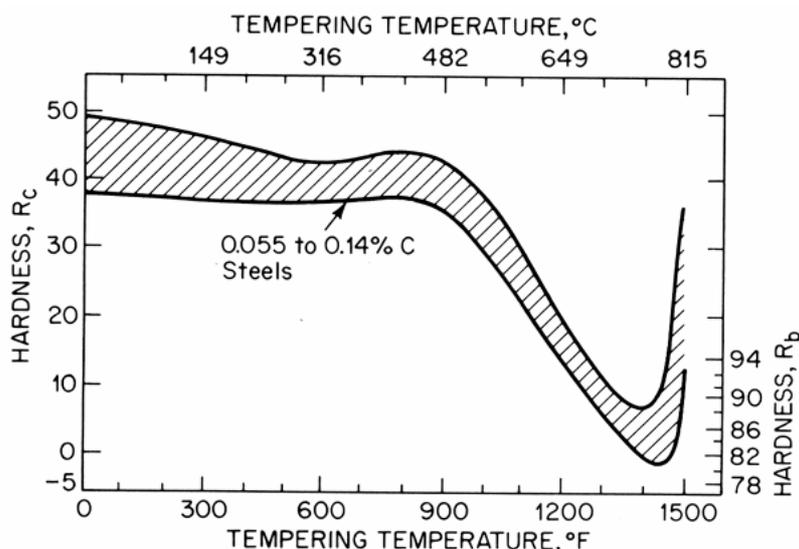


Abbildung 73: Härte in Abhängigkeit der Anlasstemperatur 12%iger Cr-Stähle (Ebd.:133)

4.3 Entstehung von Primär- und Sekundärkarbiden

Der Begriff von Primär- und Sekundärkarbiden (s. Abb. 72) tritt oft im Zusammenhang mit Legierungs- oder restfreien Stählen auf. Die grundsätzliche Unterscheidung dieser Karbide liegt in deren Größe und Entstehung. Die Primärkarbide bilden sich aus der Schmelze nach der Erstarrung. Sie weisen dabei meist eine größere Karbidgröße als die Sekundärkarbide auf. Letztere formen sich im Festkörper durch Wärmebehandlungen, wie z.B. Anlassen und sammeln sich überwiegend zwischen den Korngrenzen an. Die in der Matrix eingelagerten Primärkarbide formen dabei ein „Netzwerk“ und können zu extremer Brüchigkeit des Werkstoffes führen. Durch eine rasche Erstarrung kann diese Größe der Primärkarbide reduziert werden (Verhoeven 2005:162f.).

4.4 Rasterelektronenmikroskop

Die Bohrspitzen wurden an zwei verschiedenen Positionen (Abbildung 74) im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht: Dazu wurden sie zuvor in Isopropanol mit Ultraschall gereinigt und mittels Druckluft getrocknet.

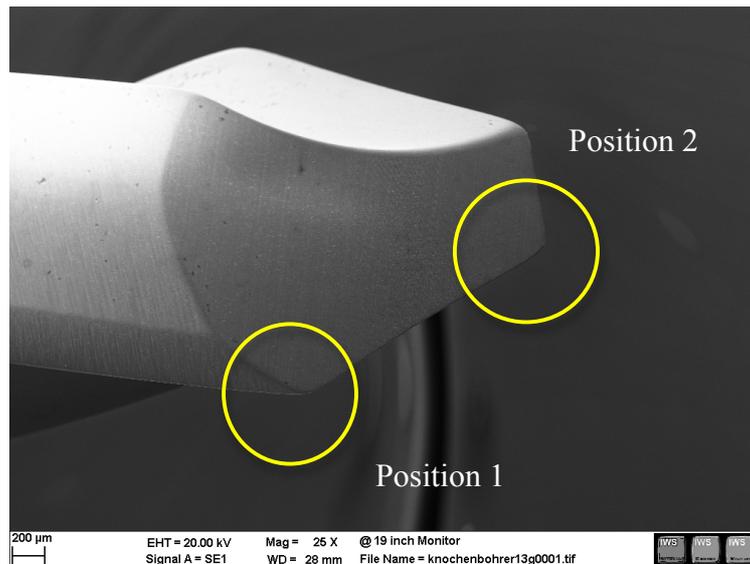


Abbildung 74: Untersuchte Stellen am Knochenbohrer im REM

Die Festlegung der zu untersuchenden Stellen an den verschlissenen Bohrern erfolgte nach den Empfehlungen von Schrottner/TU Graz.

Position 1 ist der Eckpunkt am Ende der Hauptschneide zur Nebenschneide (Führungsphase). Diese ist bei Bohrvorgängen hohen Belastungen ausgesetzt und weist bei Praxisbohrungen (andere Werkzeug-Werkstück-Paarungen) häufig abrasive Verschleißerscheinungen (wie Ausbrüche; Zopf 2011:46f.) auf (pers. Mitteilung, Schrottner/TU Graz).

Die zweite Position ist der Übergang Haupts- zur Querschneide. Diese kommt beim Bohren als erste mit dem Material bzw. dem Kunstknochen in Kontakt und leistet den ersten Materialabtrag vor der eigentlichen Erzeugung des Bohrloches.

Ebenfalls behielt man bei den Untersuchungen die gesamte Hauptschneidenlänge im Auge. Da entlang dieser aber bei den Bohrern keine Ausbrüche oder verdächtige Unebenheiten festgestellt wurden, spezialisierte man sich auf die beiden beschriebenen Positionen.

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse anschaulich dargestellt und miteinander verglichen.

5.1 Auswertung der Kräfte aus den Bohrversuchen

Die Kraftmessung anhand des Datenrekorders lieferte eine Vielzahl von Daten, welche nach Abschluss der Bohrungen in eine Excel-Datei kopiert und dort bearbeitet wurden. Dabei bildete man die Summe der auftretenden Maximalkräfte je Kraftmessdose und unterteilte diese Summe wiederum in die obere und untere Kortikalishälfte des Kunstknochens.

Dies führte zu einem erstaunlichen Ergebnis. Trotz ähnlicher Werkstoffzusammensetzung der Knochenbohrer beider Firmen erzielten jene der Fa. Brasseler deutlich schlechtere Werte als die der Fa. Synthes. So überstieg die Bohrkraft bereits bei der ersten Bohrung – als Bohrung wird hier der Bohrvorgang durch beide Kortikalishälften bezeichnet – den Richtwert von 45 N.

Die durchschnittliche Maximalkraft betrug bei der ersten Bohrung bei sechs Bohrern der Fa. Brasseler ca. 52,5 N. Die acht Testbohrer der Fa. Synthes erreichten hingegen durchschnittlich erst bei der 3. Bohrung eine Maximalkraft von ca. 45,9 N.

Den oberen Grenzwert von 60 N erzielte Brasseler mit seinen Bohrern bereits nach der 2. Bohrung. Bei Synthes ist hingegen ein leichter kontinuierlicher Anstieg der auftretenden Kraft zu verzeichnen. So wurde der besagte Maximalwert 60 N auch bei der 10. Bohrung noch nicht überschritten. Tabelle 5.1 und Diagramm 5.1 geben den direkten Vergleich der Bohrkräfte der Testbohrer beider Firmen. Es wurden dabei die 1., 5. und 10. Bohrung betrachtet.

Bohrung	Synthes [N]	Brasseler [N]
1	37,65	56,12
5	50,99	77,25
10	58,83	87,70
1	39,01	54,90
5	51,25	77,18
10	59,85	89,69
1	39,16	54,57
5	52,96	76,79
10	61,48	86,03

Bohrung	Synthes [N]	Brasseler [N]
1	38,91	53,42
5	54,02	71,88
10	64,34	87,38
1	34,50	51,93
5	46,58	70,80
10	55,34	85,24
1	37,12	52,57
5	50,65	74,13
10	56,52	84,99

Tabelle 5.1: Verlauf der durchschnittlichen Bohrkraft der 1., 5. und 10. Bohrung von Synthes und Brasseler

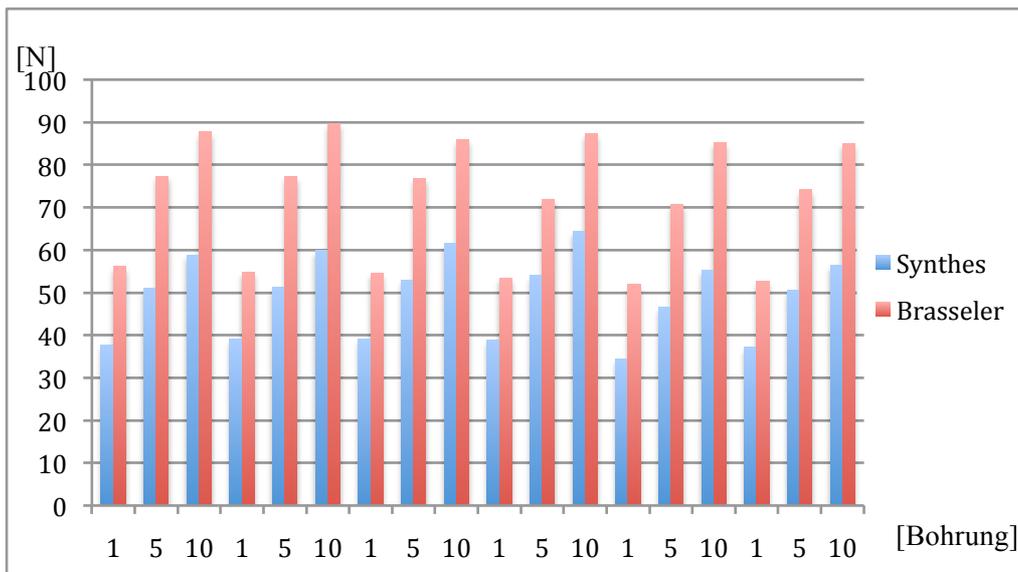


Diagramm 5.1: Bohrkraftverlauf der 1., 5. und 10. Bohrung von Synthes und Brasseler

Ebenfalls wurde der prozentuelle Zuwachs der Bohrkraft je Bohrung ermittelt. Die Berechnungen ergaben dabei eine durchschnittliche Zunahme von ca. 3,9 % bei allen getesteten Bohrern der Fa. Synthes und einen mittleren Anstieg bei den sechs Knochenbohrern der Fa. Brasseler von ca. 4,9 %.

	Synthes 1A [N]	Brasseler 1B [N]
1. Bohrung	32,75	53,92
2. Bohrung	41,98	62,27
3. Bohrung	45,06	67,57
4. Bohrung	48,52	70,79
5. Bohrung	51,08	74,67
6. Bohrung	52,76	77,62
7. Bohrung	54,43	79,20
8. Bohrung	56,29	81,44
9. Bohrung	57,94	83,66
10. Bohrung	59,38	86,84

Tabelle 5.2: Vergleich der durchschnittlichen Bohrkraft der ersten zehn Bohrungen von Synthes (LOT 8040081, 8099355) und Brasseler (LOT 777252) (Originalgeometrie)

Die in der Tabelle 5.2 (Synthes 1A und Brasseler 1B) angeführten Werte ergeben sich jeweils aus dem Mittelwert der jeweiligen Bohrung der getesteten Bohrer. Eine Bohrung entspricht hier, wie bereits erwähnt, dem Bohrvorgang durch beide Kortikalisschichten.

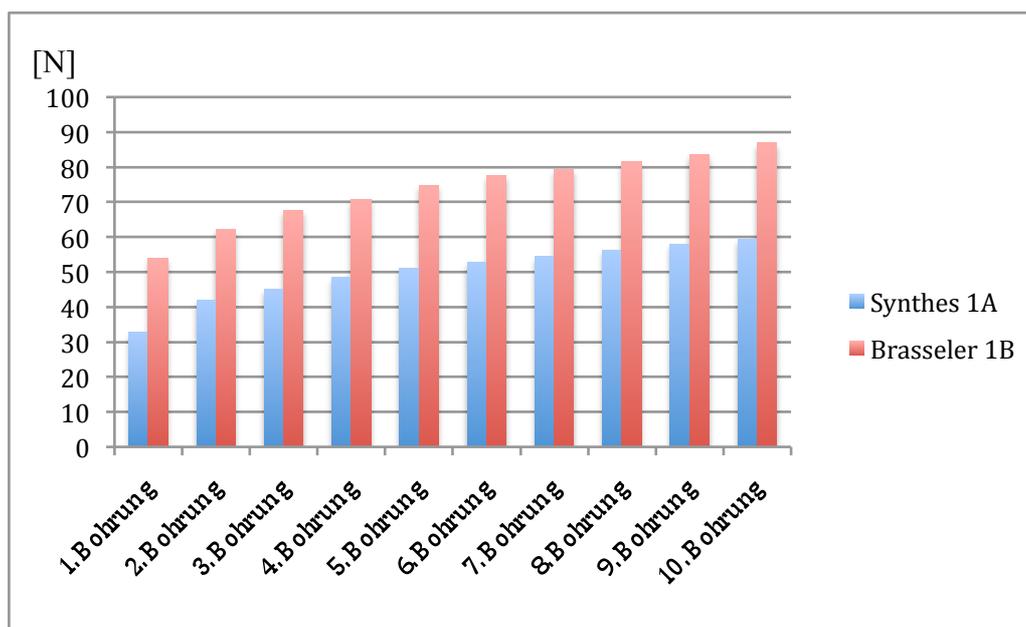


Diagramm 5.2: Bohrkraftverlauf von Synthes (1A) und Brasseler (1B)

Aus den Diagrammen 5.1 (1., 5., 10. Bohrung) und 5.2 (1. - 10. Bohrung) ist ein annähernd linearer Anstieg der Bohrkraft mit zunehmender Anzahl der Bohrungen erkennbar. Markant dabei ist die deutlich geringere Bohrkraft bei den Synthes Bohrern. Etwaige Messfehler sind dabei auszuschließen. Die Einstellungen wurden in einer Datei am Datenrekorder gespeichert. An allen Tagen wurde diese Datei geladen und es wurden keine Änderungen daran vorgenommen.

Mit Synthes Bohrer Nr. 1 wurden zu Beginn der Versuchsreihe 30 Bohrungen durchgeführt. Dabei lieferte dieser ein erstaunliches Ergebnis, da der Wert der gemessenen Bohrkraft bei der 22. Bohrung in etwa dem von der Fa. Brasseler bei der 5. Bohrung entsprach. Auch ein zweiter Bohrer (Synthes_Nr.2) lieferte bei der 20. Bohrung einen Wert von ca. 74 N.

5.1.1 Vergleich der Bohrer mit unterschiedlicher LOT-Nummer von Synthes

In Tabelle 5.3 und Diagramm 5.3 sind die unterschiedlichen Bohrkräfte im Vergleich der zwei vorliegenden Synthes LOT Nummern (verschiedene Herstellchargen) gezeigt. Aufgrund der gleichen Geometrie beider Bohrertypen ist die unterschiedliche Vorschubkraft wahrscheinlich auf eine unterschiedliche Gefügestruktur bzw. mechanischen Eigenschaften im Zuge der Herstellungsschwankungen zurückzuführen. Interessant wären Informationen bzgl. Anlasstemperatur, Abkühlrate usw. beider Bohrertypen zu erhalten. Die ausgewählten Bohrer mit LOT-Nr. 8099355 weisen charakteristisch geringere Bohrkräfte mit bis zu 6 N auf (Werte aus dem Mittelwert der Maximalkräfte der getesteten Bohrer).

Synthes	8040081 [N]	8099355 [N]
1. Bohrung	38,68	35,68
2. Bohrung	44,25	40,12
3. Bohrung	47,32	43,53
4. Bohrung	50,93	46,31
5. Bohrung	52,31	49,94
6. Bohrung	55,44	50,31
7. Bohrung	56,96	52,15
8. Bohrung	58,95	53,64
9. Bohrung	60,20	55,68
10. Bohrung	61,13	57,64

Tabelle 5.3: Vergleich der durchschnittlichen Bohrkraft der ersten zehn Bohrungen von Synthes LOT 8040081 und 8099355

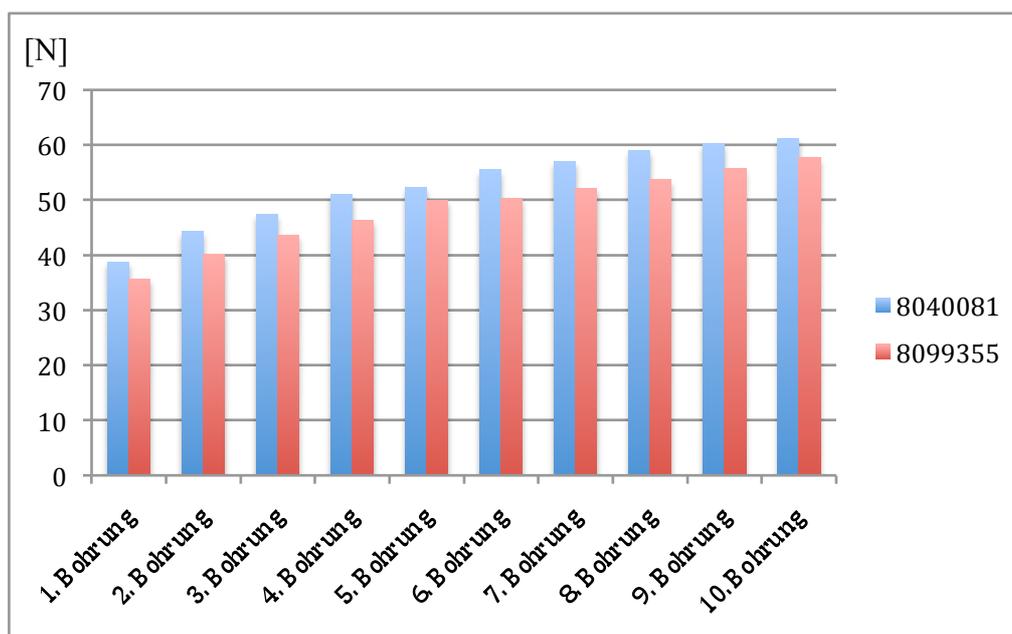


Diagramm 5.3: Bohrkraftverlauf von Synthes LOT 8040081 und 8099355

5.2 Vergleich Bohrkraftverlauf der Originalgeometrie mit der neuen Geometrie

Im Folgenden werden die gemessenen Bohrkraft der Knochenbohrer beider Firmen mit dem selben geometrischen Anschliff (Querschneidenbreite auf 0,85 mm verringert/Spitzenwinkel auf 90° erhöht) Veränderung verglichen und der Verlauf grafisch dargestellt.

5.2.1 Originalgeometrie vs. neue Geometrie bei Synthes

Der direkte Vergleich beider Geometrien des gleichen Bohrertyps zeigt eine beinahe Verdoppelung der auftretenden Bohrkraft mit der Geometrieanpassung. Trotz des identischen Grundwerkstoffs hat die neue Geometrieform gravierende Folgen. Eine Bohrkraft mit 60 N entspricht dem Grenzwert der üblichen Kraft beim praktischen Einsatz des Chirurgen und führt so bei der ersten Bohrung bereits zu einer unerwünschten höheren Belastung des Knochens.

	Synthes 1A [N]	Synthes neue Geometrie (neuA) [N]
1. Bohrung	32,75	60,29
2. Bohrung	41,98	75,77
3. Bohrung	45,06	87,81
4. Bohrung	48,52	95,00
5. Bohrung	51,08	98,87
6. Bohrung	52,76	101,83
7. Bohrung	54,43	104,91
8. Bohrung	56,29	112,01
9. Bohrung	57,94	113,77
10. Bohrung	59,38	118,17

Tabelle 5.4: Vergleich der durchschnittlichen Bohrkraft der ersten zehn Bohrungen von Synthes original (1A) und Synthes neue Geometrie (neuA)

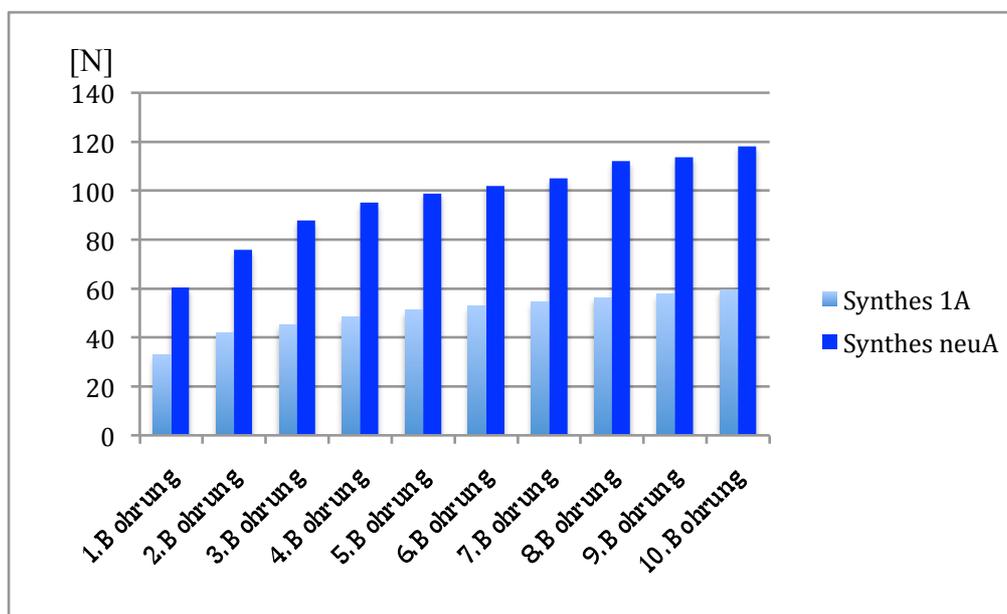


Diagramm 5.4: Bohrkraftverlauf der Originalgeometrie Synthes (1A) und der neuen Geometrie Synthes (neuA)

5.2.2 Originalgeometrie vs. neue Geometrie bei Brasseler

Dem Bohrerotyp der Fa. Brasseler hingegen entspricht die Anpassung eher, da sich bei der ersten gemessenen Bohrkraft eine Reduktion um ca. 10 N ergab. Der obere Grenzwert 60 N der bei DA Zopf gemessenen Vorschubkraft wird erst bei der 4. Bohrung erreicht. Ein Optimum stellt diese Geometrie jedoch noch keinesfalls dar, da die Kräfte mit neuer Geometrie noch um ca. 14 N über der jener beim Bohren mit Originalgeometrie von Synthes liegen.

	Brasseler 1B [N]	Brasseler neue Geometrie (neuB) [N]
1. Bohrung	53,92	43,82
2. Bohrung	62,27	53,05
3. Bohrung	67,57	56,44
4. Bohrung	70,79	60,04
5. Bohrung	74,67	64,17
6. Bohrung	77,62	68,32
7. Bohrung	79,20	69,17
8. Bohrung	81,44	72,03
9. Bohrung	83,66	75,67
10. Bohrung	86,84	76,13

Tabelle 5.5: Vergleich der durchschnittlichen Bohrkraft der ersten zehn Bohrungen von Brasseler original (1B) und Brasseler neue Geometrie (neuB)

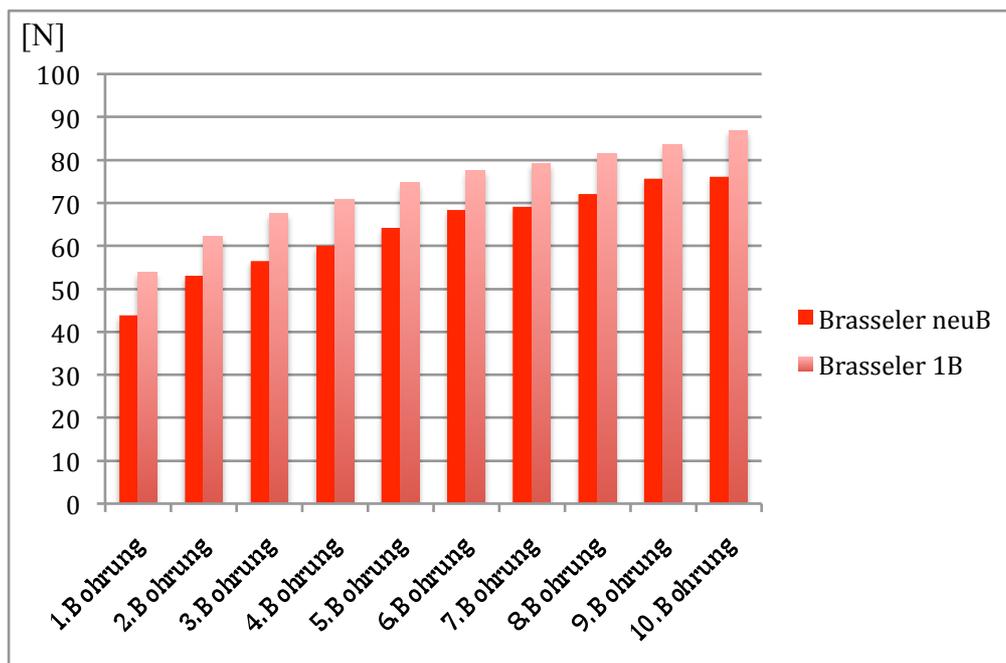


Diagramm 5.5: Bohrkraftverlauf der Originalgeometrie Brasseler (1B) und der neuen Geometrie Brasseler (neuB)

5.2.3 Gegenüberstellung der neuen Geometrie von Synthes und Brasseler

Seltsam dabei ist der enorme Wandel der gemessenen Bohrkraft beider Bohrertypen. Nach nochmaliger Kontrolle konnte man die anfangs vermutete Vertauschung beider Typen ausschließen.

Dieses Ergebnis der Bohrkraft lässt nur wage Aussagen über den geometrischen Einfluss der Bohrerspitze auf die resultierende Vorschubkraft zu. So scheint die Originalgeometrie von Synthes sehr gut zu sein und die optisch ausgefeilte von Brasseler schlechter als jene, neu gefertigte, von Salmhofer.

Beschädigungen an den Spitzen der Bohrer oder Ausbrüche an den Hauptschneiden wurden auch bei den neuen Geometrien nicht festgestellt. Deren Aussehen ähnelte dem wie bei den Originalbohrern, sprich ein Abrunden der Hauptschneiden durch den gleichmäßigen Abtrag des Materials und ein Zuspitzen der Bohrerspitze.

	Synthes neuA [N]	Brasseler neuB [N]
1. Bohrung	60,29	43,82
2. Bohrung	75,77	53,05
3. Bohrung	87,81	56,44
4. Bohrung	95,00	60,04
5. Bohrung	98,87	64,17
6. Bohrung	101,83	68,32
7. Bohrung	104,91	69,17
8. Bohrung	112,01	72,03
9. Bohrung	113,77	75,67
10. Bohrung	118,17	76,13

Tabelle 5.6: Vergleich der durchschnittlichen Bohrkraft der ersten zehn Bohrungen von Synthes neu (neuA) und Brasseler neu (neuB)

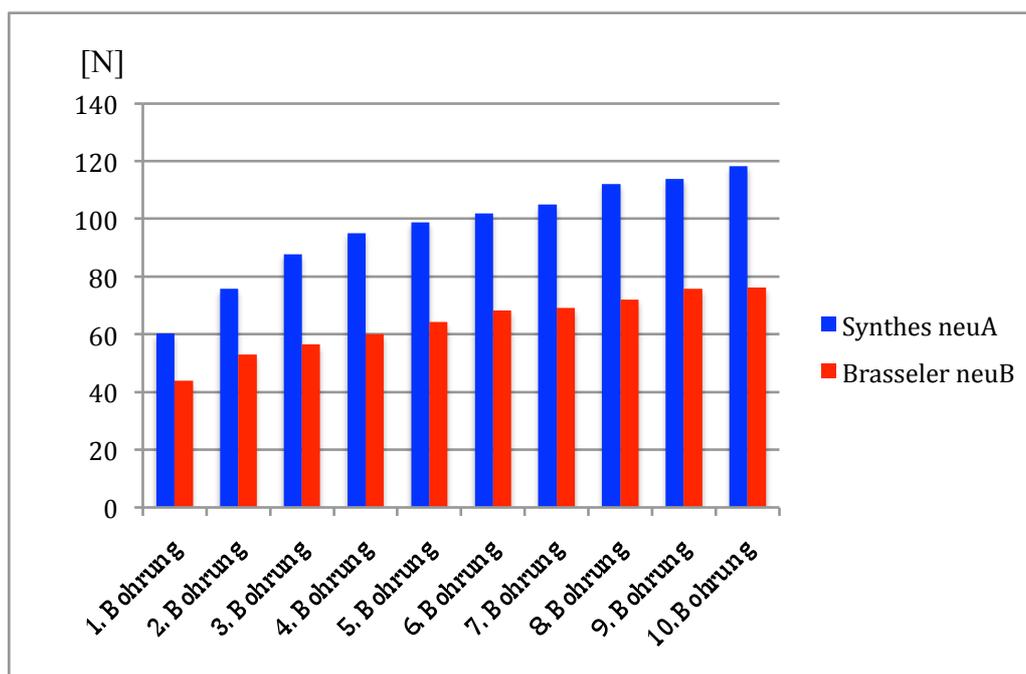


Diagramm 5.6: Bohrkraftverlauf der neuen Geometrie von Synthes (neuA) und Brasseler (neuB)

5.3 Zerstörungsfreie Untersuchungen

Untersuchungen an den verschlissenen Knochenbohrern (Originale und neue Geometrie) im Stereomikroskop wurden wieder in den Bereichen der Haupt- und Querschneide durchgeführt. Dabei konnten weder stärkere Unebenheiten, noch Ausbrüche an den Schneiden

festgestellt werden. Aussagen bzgl. der hohen Bohrkräfte konnten somit nicht getroffen werden.

Interessant ist nur der beinahe gleich große Abtrag der Hauptschneiden bei den in Abbildungen 75 und 76 dargestellten Bohrerspitzen von Synthes und Brasseler. Die zu Beginn getroffene Entscheidung, Bohrungen bis zur Erreichung einer Kraft von ca. 90 N durchzuführen, ermöglicht keinen Vergleich der verschlissenen Bohrer anhand der gleichen Anzahl von Bohrungen. Der Versuchsbohrer der Fa. Brasseler (Nr. 2) erfährt bei „nur“ zehn Bohrungen annähernd den gleichen Abrieb der Hauptschneide von ca. 0,3 mm wie jener der Fa. Synthes (Nr. 2) bei 22 Bohrungen.

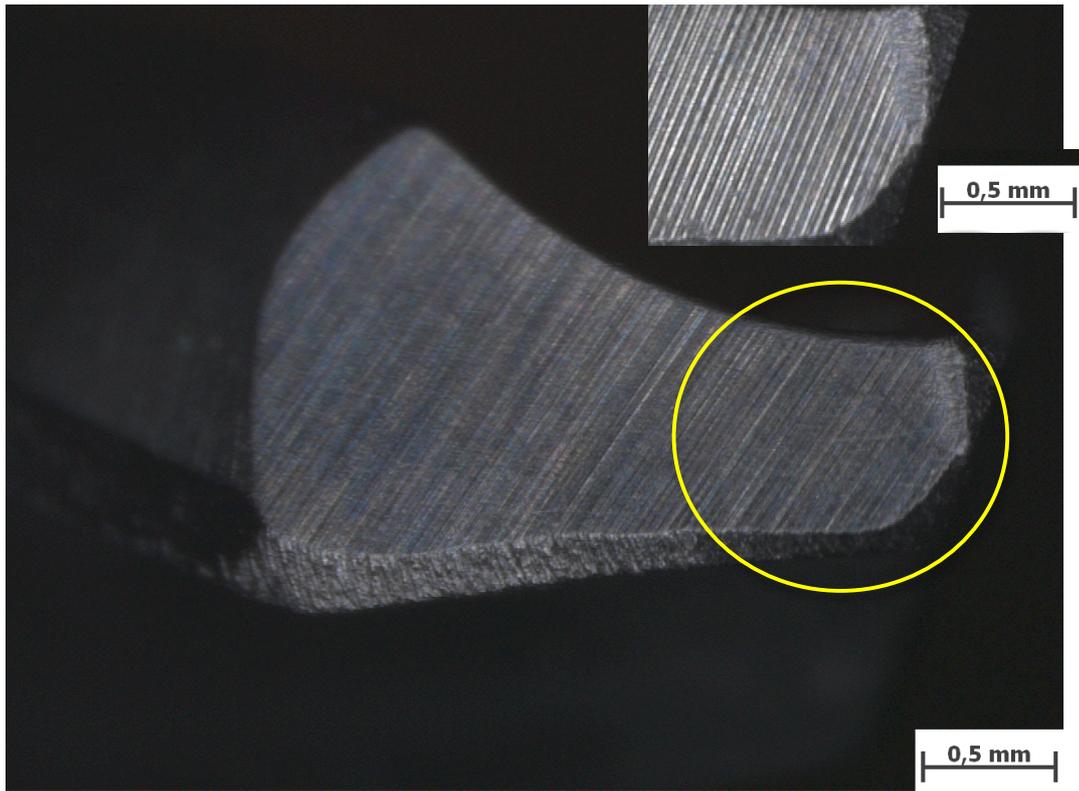
Vergleichbar mit den im Kapitel 1.9 beschriebenen Verschleißursachen kommt es bei allen verschlissenen Bohrern zum abrasiven Verschleiß laut Degner. Wie schon beschrieben, erfährt das Schneidwerkzeug einen mechanischen Abrieb im Bereich der Haupt- und Querschneiden. Charakteristisch dafür ist die auftretende Reibung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück.

Bei der Verschleißart tritt eine Kombination der auf Seite 33f. beschriebenen Arten auf. So entsprechen die verschlissenen Bohrer einer Kombination aus dem Freiflächen-, dem Schneidkanten- und dem Spitzenverschleiß.

Der Freiflächenverschleiß liegt dabei in der geringsten Form vor, da es lediglich unmittelbar nach der Hauptschneide zu einem Abtrag auf der Freifläche kommt. Dabei ist es kaum möglich diese Verschleißart eindeutig zu bestimmen, da dieser Abrieb möglicherweise auch auf den Schneidkantenverschleiß zurückzuführen ist.

Durch den Abrieb der Querschneide an der Bohrerspitze kommt es zu einem Zuspitzen des Bohrers. Dies könnte man zur Art des Schneidkantenverschleißes und in weiterer Folge zum Spitzenverschleiß zählen.

Die anfangs geringere Querschneidenbreite bei den Knochenbohrern von Synthes ist vermutlich ausschlaggebend für den leicht spitzer verschlissenen Bohrer.

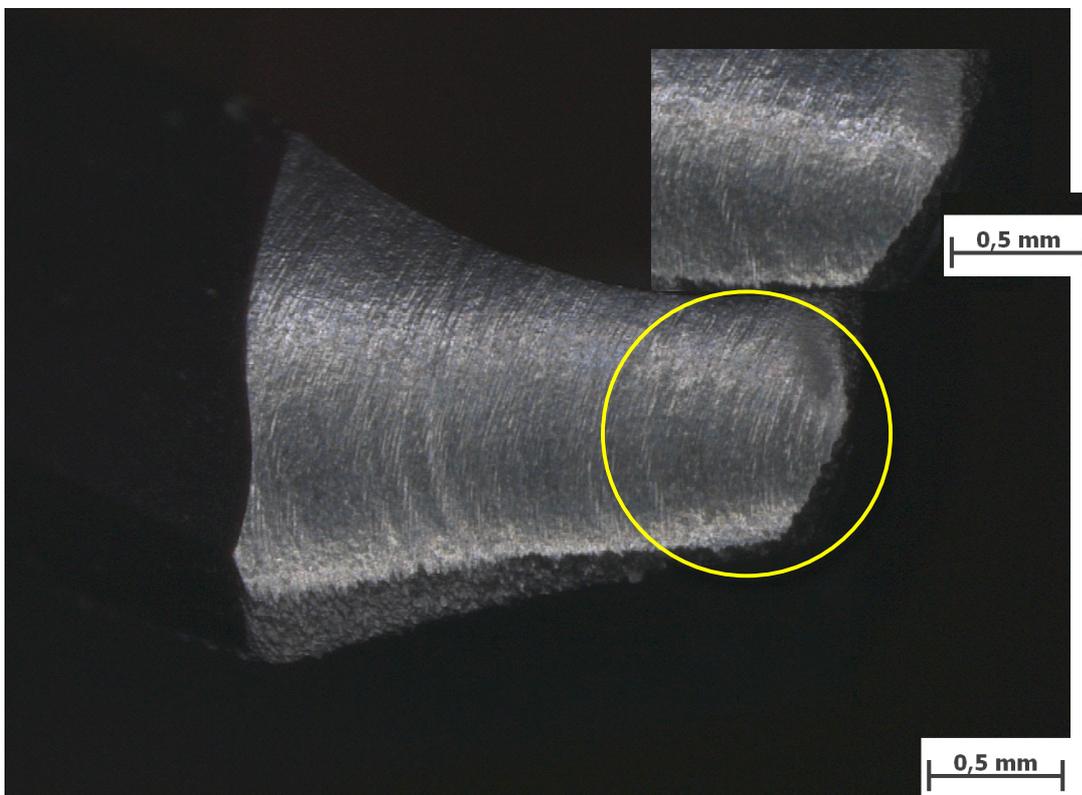


Mikroskopvergrößerung: 35,0x; Bildbreite: 3,98 mm

Bildname: [knochenbohrer13u0138.jpg](#)



Abbildung 75: Verschlissener Bohrer Synthes_8040081_Nr. 2_22 Bohrungen



Mikroskopvergrößerung: 35,0x; Bildbreite: 3,98 mm

Bildname: [knochenbohrer13u0132.jpg](#)



Abbildung 76: Verschlissener Bohrer Brasseler_777252_Nr. 2_10 Bohrungen

Der Verlauf der ermittelten Bohrkräfte in Kap. 5.1 (Seite 83) ist insofern plausibel als dass bei den Verläufen keine rasanten Anstiege verzeichnet wurden. Insbesondere die Bohrerspitzen weisen nach Abschluss der Bohrversuche bei Brasseler wie auch bei Synthes keinerlei Ausbrüche entlang der Hauptschneiden auf. Im Gegensatz dazu waren bei den Bohrungen in realen Knochen in der DA Zopf Ausbrüche am Übergang Haupt- zu Nebenschneide (Führungsfase) das auffälligste Verschleißerscheinungsbild, sowie auch eine Abrundung der Querschneide (s. Abb. 77) (Zopf 2011:53).

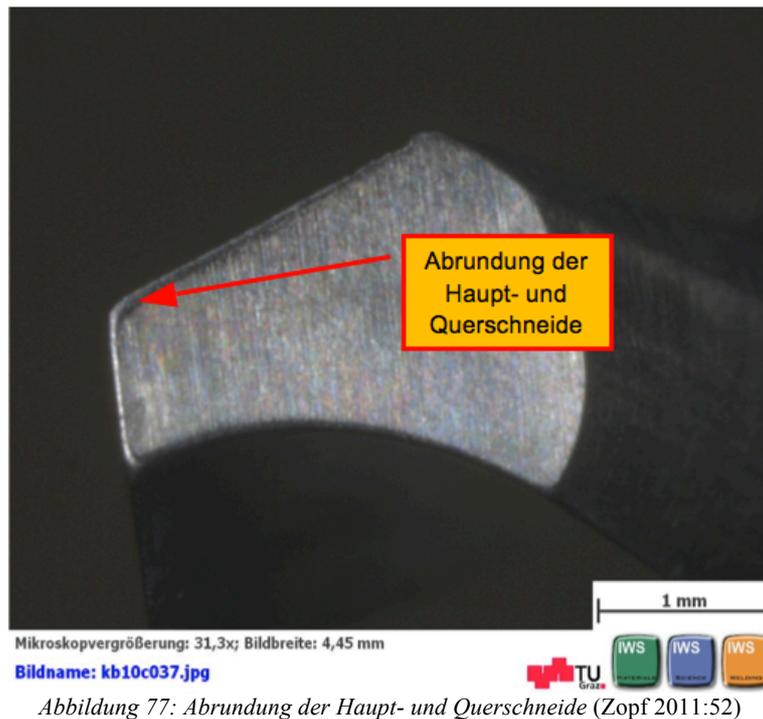


Abbildung 77: Abrundung der Haupt- und Querschneide (Zopf 2011:52)

Ebenso wurden am Übergang Hauptschneide-Nebenschneide (Führungsfase) – Detail X in Abbildung 78 keine ungleichmäßigen Verschleißerscheinungen festgestellt.



Abbildung 78: Bohrer der Fa. Synthes

Diese Stelle ist, wie zuvor erwähnt, bei Bohrungen einer großen Kraft ausgesetzt. Dies führt zumeist zu Ausbrüchen (wie in DA Zopf anschaulich gezeigt) und in weiterer Folge zu einem Anstieg der Bohrkraft. Durch den daraus resultierenden, schlechteren Abtrag des Werkstoffes kann dies zu ungleichmäßigen, leicht ovalen Bohrlöchern führen (pers. Mitteilung Schrottner/TUG). Diese Ovalität wurde in der Bachelor-Arbeit Aigner versucht nachzuweisen, was hierbei leider nicht gelungen ist (Aigner 2012:o.S.).

5.3.1 Verschlossene Bohrer im REM

Die REM Aufnahmen der Verschleißerscheinungen der Bohrer lassen keine Rückschlüsse auf die aufgetretenen Bohrkraft zu. Bei den Untersuchungen konnten auch hier keinerlei Ausbrüche an den Schneiden festgestellt werden.

Die Abnutzungen an den Schneiden deuten vorwiegend auf den sogenannten Schneidkantenverschleiß hin, welchen auch Degner in seinem Kapitel „Werkzeugverschleiß“ anführt und der zuvor auch schon mittels des Stereolichtmikroskops festgestellt wurde (Degner 2009:46).

Durch diesen Verlust an Schneidhaltigkeit kommt es folglich zur Bohrkrafterhöhung bzw. Verringerung der Spanbarkeit des Kunstknorpels, da der Bohrer förmlich in das Material hineingedrückt wird. Der gleichzeitig schlechtere Abtransport des Bohrguts bewirkt eine zusätzliche Reibungswärme, welche wiederum einen steigenden Temperaturgradienten zur Folge haben kann.

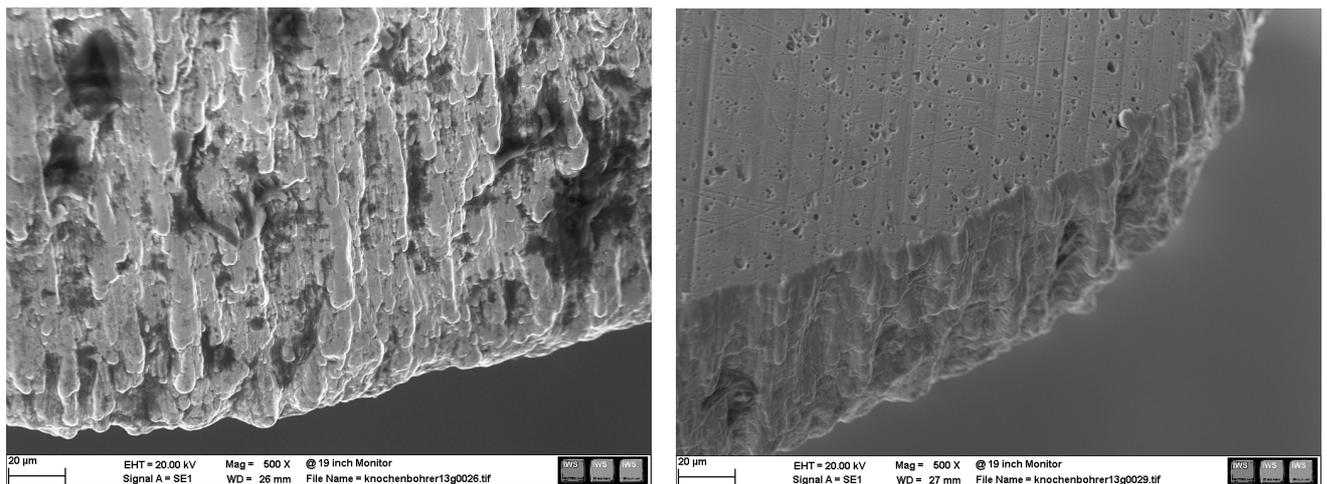


Abbildung 79: REM Aufnahme Synthes_8040081_Nr. 2_22 Bohrungen – Verschleißerscheinung an der Hauptschneide

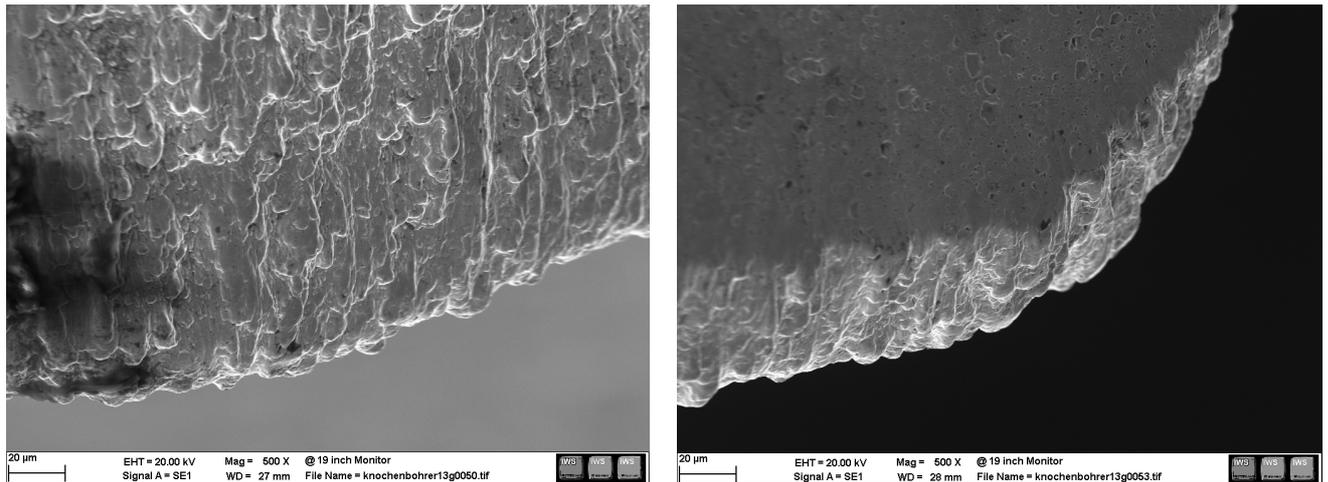


Abbildung 80: REM Aufnahme Brasseler_777252_Nr. 2_10 Bohrungen – Verschleißerscheinung an der Hauptschneide

5.3.2 Oberfläche der Bohrspitze

Neben den geometrischen Abweichungen der Testbohrer beider Firmen, kann auch die Oberflächenbeschaffenheit der Bohrspitzen im Zuge der Fertigung zu deutlich schlechteren Ergebnissen führen.

„Wie umfangreiche Untersuchungen ergaben, hängen die Gebrauchseigenschaften von spanend bearbeiteten Flächen stark von der Oberflächenbeschaffenheit ab.

Die Oberflächenbeschaffenheit charakterisiert die Eigenschaft der obersten Werkstoffschicht des Werkstücks, die durch die spanende Bearbeitung beeinflusst wird. Es entstehen in der Randzone außer Gefügeänderungen und Verfestigungen erhebliche Spannungsspitzen“ (Degner 2009:119).

Ursache für die Entstehung dieser Schicht ist die Bearbeitung (Ebd.:119). Somit verändert sich durch mechanische oder thermische Einwirkung die Struktur gegenüber dem Werkstoffgrundgefüge. Schleifbearbeitung oder Bearbeitungen mit Strahlen hoher Energiedichte, wie Plasma-, Elektronen-, oder Laserstrahlen, können auch eine Phasenumwandlung in der Oberflächenschicht hervorrufen.

„Plastische Verformung und Phasenumwandlung bewirken einen Anstieg der Verfestigung und die Ausbildung von so genannten Bearbeitungsrestspannungen in der Oberflächenschicht. Vor allem durch thermische Einwirkungen können sich in der Oberflächenschicht auch Makro- und Mikrorisse ausbilden. Bei spanender Bearbeitung ist die Ausbildung der Oberflächenschicht im Allgemeinen auf mechanische und thermische Einwirkungen zurückzuführen“ (Degner 2009:120).

Die Oberflächenbeschaffenheit wird durch folgende Faktoren beschrieben:

- „veränderte Gefügestruktur
- *plastische Verformung und Verfestigung (eventuell Phasenumwandlung)*
- *Bearbeitungsrestspannungen*
- *Makro- und Mikrorisse*“ (Degner 2009:120).

Die REM Aufnahmen wurden an zwei unterschiedlichen Positionen durchgeführt. Diese sind in den Abbildungen 81 und 82 dargestellt. Ebenfalls wurde die Betrachtung der Hauptschneide nicht außer Acht gelassen.

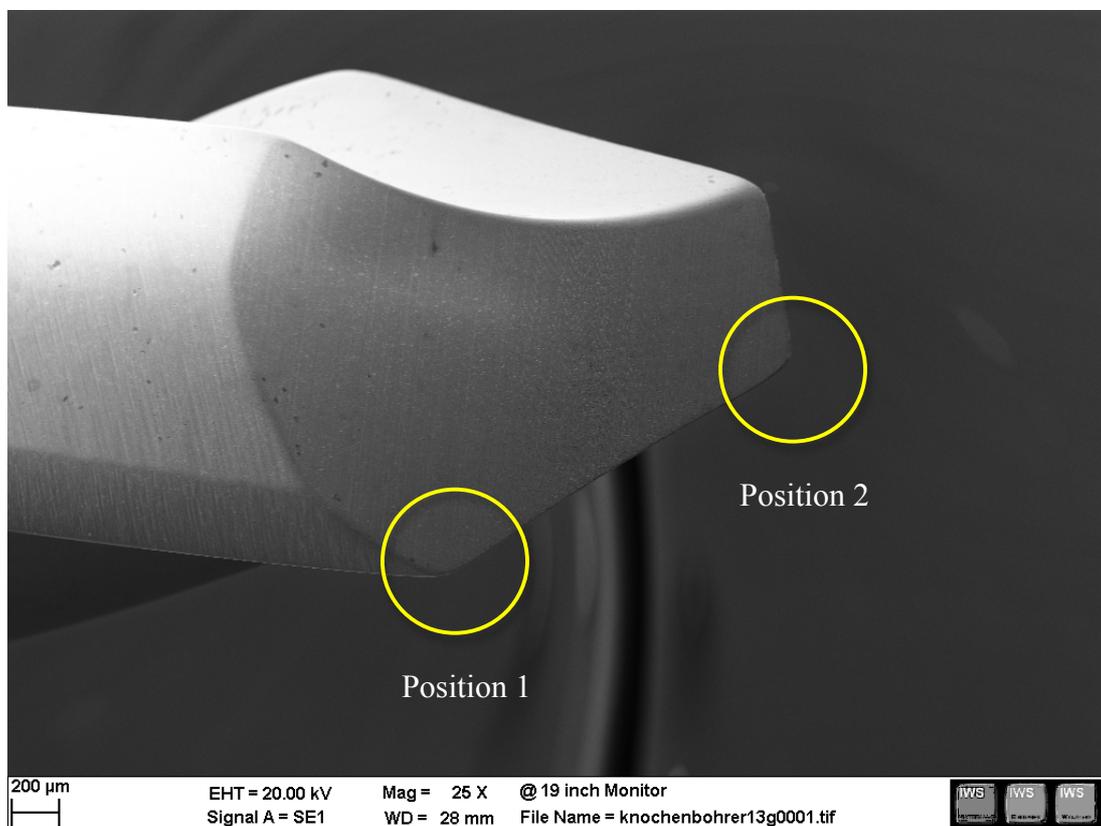


Abbildung 81: Positionen der REM Aufnahmen (mit Sekundärelektronendetektor) / Synthes Neu

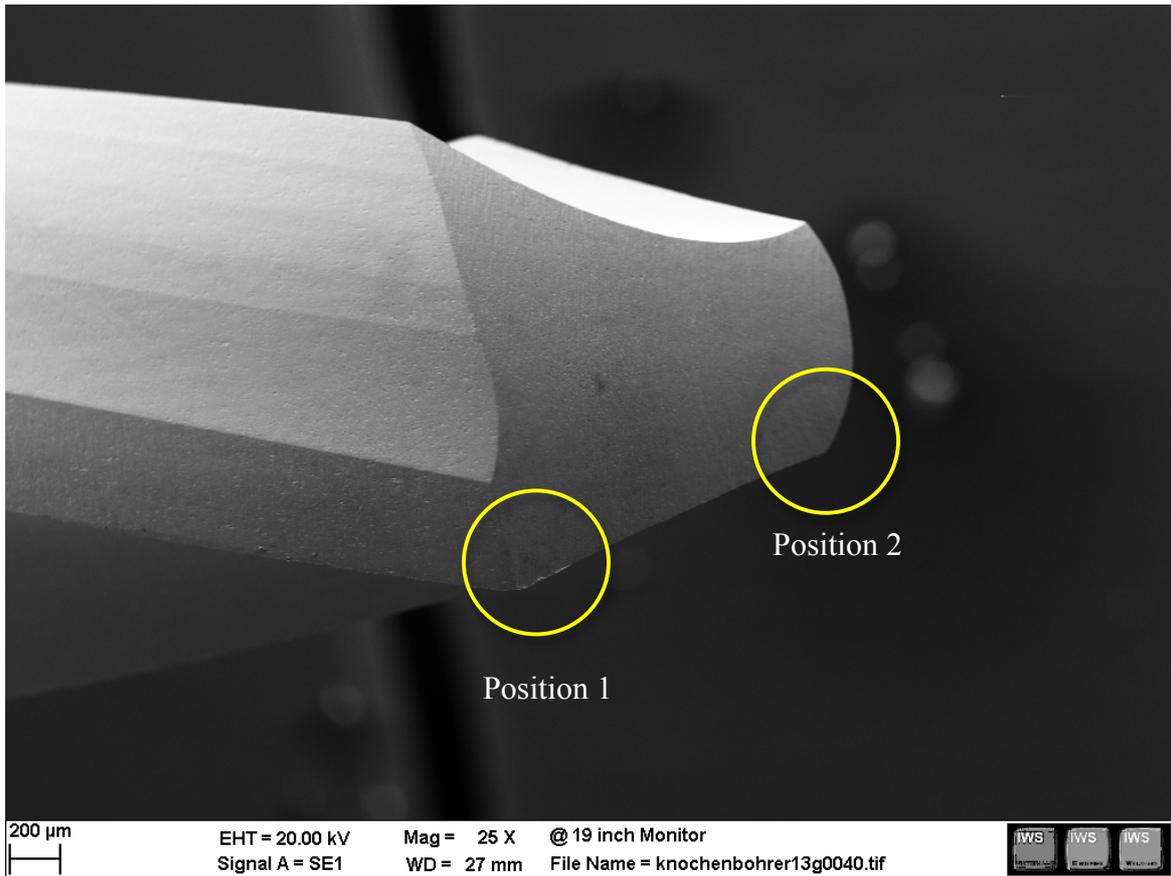


Abbildung 82: Positionen der REM Aufnahmen (mit Sekundärelektronendetektor) / Brasseler Neu

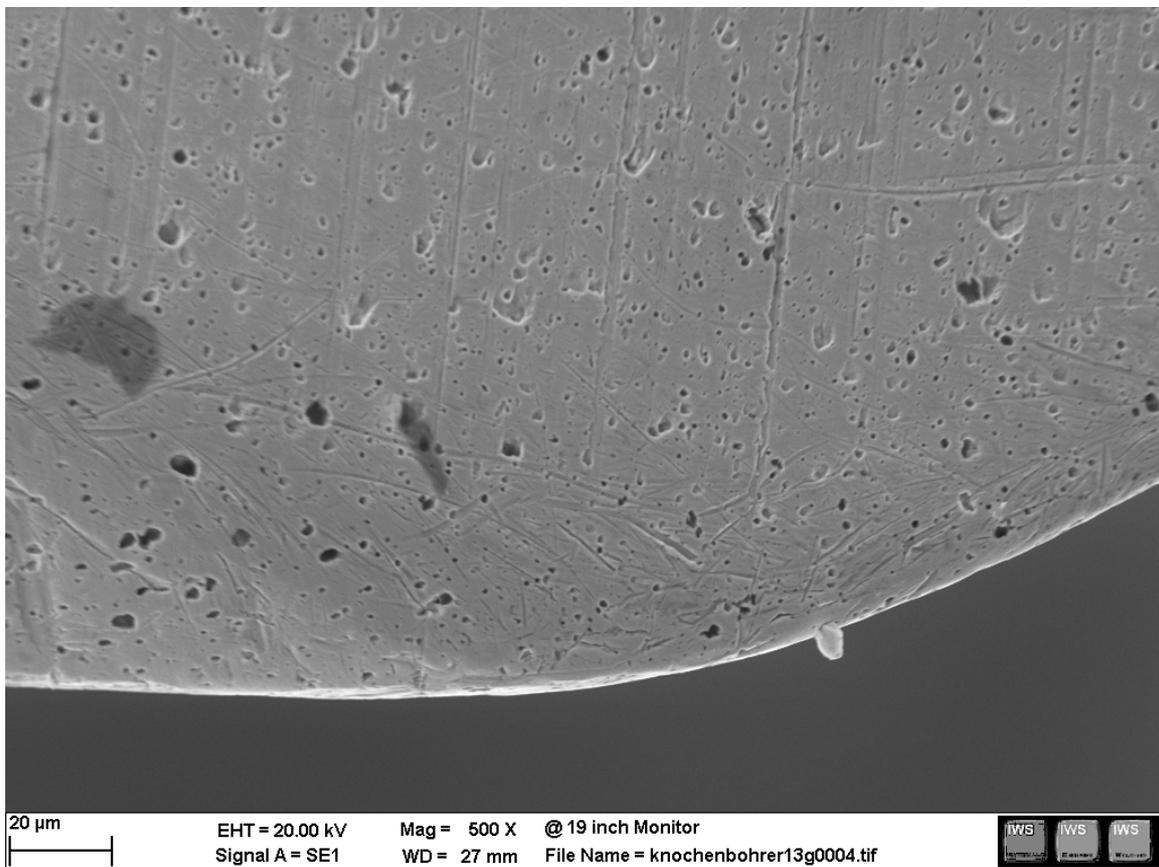


Abbildung 83: REM Aufnahme Synthes Neu (Position 1)

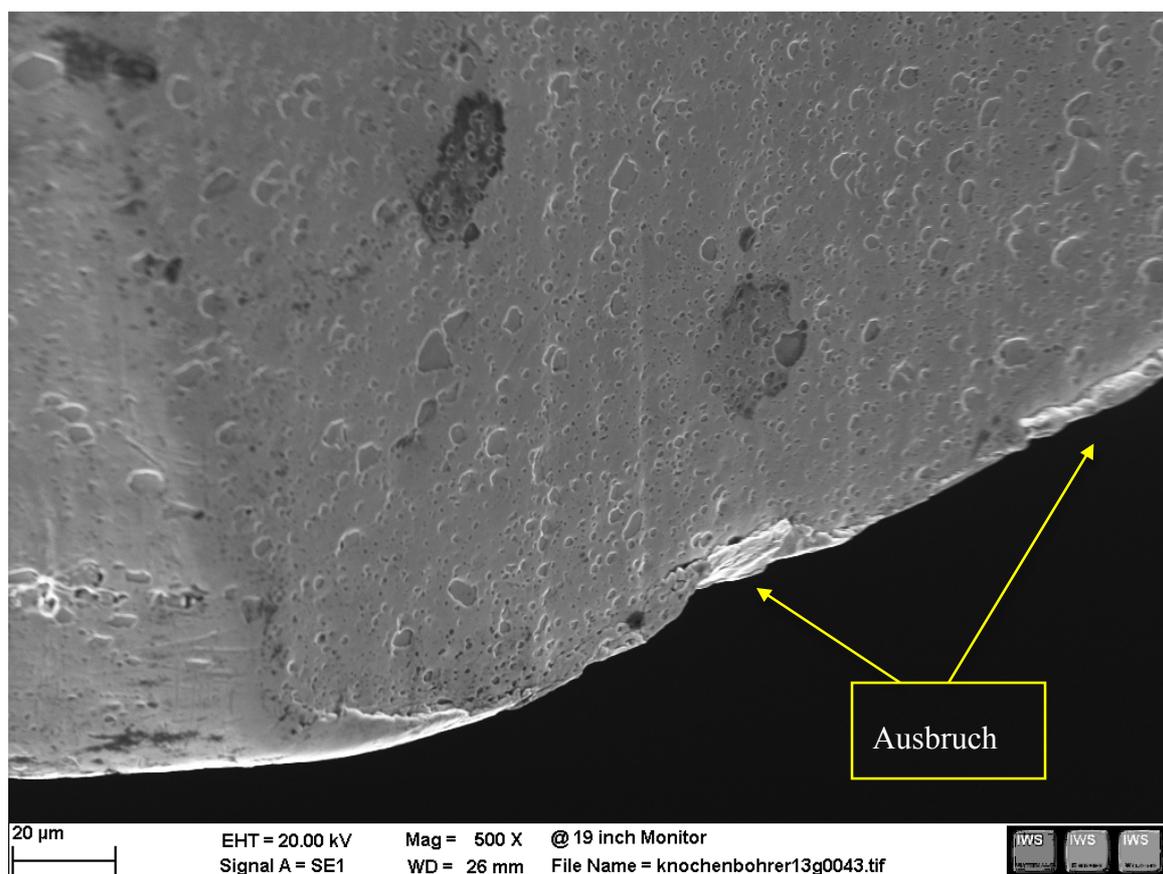


Abbildung 84: REM Aufnahme Brasseler Neu (Position 1)

Der Bohrer Synthes weist auf der Hauptfreifläche Schleifriefen (s. Abb. 56, Seite 59) auf, welche vermutlich auf den Herstellungsprozess zurückzuführen sind. Derartige Oberflächenrauheiten können zu einem Aufstauen und schlechteren Abtransport der Späne bei der Bearbeitung führen (pers. Mitteilung Schrottner / TU Graz). In einem solchen Fall würde der Bereich der Hauptschneide einer noch größeren Kraft ausgesetzt werden und könnte – trotz hoher Bruchzähigkeit dieses Werkstoffes – zu einem Ausbrechen der Schneide führen, wie bei Zopf gefunden wurde (Zopf 2011:51).

Der Bohrer Brasseler hat hingegen eine sehr glatte Oberflächenstruktur. Die Hauptfreifläche ist hierbei auch ein wenig nach außen gewölbt um ein zusätzliches Aufstauen des Bohrguts zu vermeiden bzw. zu verringern. In der Abbildung 84 sind jedoch am neuen Bohrer schon zwei kleine Ausbrüche auf der Hauptschneide ersichtlich, welche einen höheren Kraftbedarf beim Bohren hervorrufen und zu einem weiteren Ausbrechen führen können (pers. Mitteilung Schrottner / TU Graz).

Die Spanbildung und deren Abtransport hat während des Bohrens entscheidende Bedeutung. Einerseits lässt das Aussehen des Bohrguts bereits eine Aussage über die Bohrerbeschaffenheit (Schneidfähigkeit) zu. So spricht ein etwas längerer, durchgängiger Span, vgl. Abbildung 50 (Seite 56), für einen scharfen Bohrer. Bei einem bröselähnlichen

Aussehen hingegen sollte der Bohrer dringend nachbearbeitet werden. Der Werkstoff wird in diesem Fall nicht geschnitten, sondern durch das härtere Material des Bohrers abgerieben. Andererseits führt auch ein schlechter Abtransport des Bohrguts zu einem hohen Temperaturanstieg, da eine hohe Reibungswärme zwischen dem Werkstück und dem Werkzeug entsteht (pers. Mitteilung Schrottner / TU Graz).

Dieses bröselähnliche Bohrgut des Kunstknochens, auch als Bohrmehl bezeichnet, ist in Abbildung 51 (Seite 56) ersichtlich. Es tritt bereits nach ca. 5 – 6 Bohrungen (bei AISI 440A) auf und lässt dadurch schon Rückschlüsse auf die starke Abnahme der Schneidenqualität des Knochenbohrers zu.

5.4 Vergleich der Verschleißerscheinungen mit der Literatur von Zopf

Zopf führte mehrere Reihen von Versuchsbohrungen in Kunst-, Schweine- und auch Menschenknochen durch (Zopf 2011:79ff). Zu Beginn startete eine Versuchsreihe mit Chirurgen am Vorklinikum an der Medizinischen Universität in Graz, um einen besseren Einblick in die Bohrproblematik beim praktischen Einsatz in der Chirurgie zu erhalten. Das Ergebnis fiel sehr unterschiedlich aus, da jeder Chirurg „sein eigenes“ Bohrverhalten und Geschick präsentierte. Fazit daraus: *„Es gibt keinen Standardchirurgen: Das Spektrum des Bohrverhaltens reicht von „sehr konstant“ bis zu „sehr unterschiedlich“. Erfahrene Chirurgen bohren mit mehr Gefühl, Unerfahrene mit weniger (bis hin zur Rauchentwicklung!!)“* (Zopf 2011:39).

Untersuchungen an den verwendeten Bohrern zeigten Ausbrüche an den Hauptschneiden und auf der Freifläche. Ebenso war ein Abrunden der Querschneide ersichtlich. Ausbrüche an der Hauptschneide konnten bereits nach 14 Bohrungen am Schweineknochen erkannt werden (s. Abb. 85). Nach 33 Bohrungen ist ein deutlicher Verschleiß mit markanten Ausbrüchen und großem Freiflächenverschleiß aufgetreten (s. Abb. 86) (Ebd.:36ff).



Mikroskopvergrößerung: 6,3x; Bildbreite: 22,25 mm

Bildname: kb09c067.jpg



Abbildung 85: Verschleiß nach 14 Bohrungen in Schweineknöchel (Synthes) (Zopf 2011:36)



Mikroskopvergrößerung: 6,3x; Bildbreite: 22,25 mm

Bildname: kb09c047.jpg



Abbildung 86: Verschleiß nach 33 Bohrungen in Schweineknöchel (Synthes) (Zopf 2011:37)

Bei diesen Bohrungen sind jedoch unterschiedliche, teilweise stark schwankende Bohrkräfte einzelner Chirurgen zu berücksichtigen, d.h. diese Verschleißerscheinungen können nicht mit den definierten Bohrungen mit konstantem Vorschub in dieser Arbeit verglichen werden.

Des Weiteren wurden Belastungsbohrversuche mit unterschiedlichen Vorschubkräften von 5 N, 30 N, 50 N, 80 N und 100 N an der FSW Maschine unternommen. Diese wurden jeweils am Kunst-, Schweine- und Menschenknöchel durchgeführt. Fazit daraus: [...] „Die

Schwankungen der aufzuwendenden Vorschubkräfte sind bei den Bohrungen von Menschenknochen durchgehend höher, als bei Kunst- bzw. Schweineknochen. [...] Bei Kunst-, Schweine- und Menschenknochen ist mit zunehmender Vorschubkraft ein deutlich höherer Verschleiß der Knochenbohrer erkennbar. Der Verschleiß nimmt in der Reihenfolge Kunst-, Schweine- und Menschenknochen zu. Die meisten Ausbrüche sind bei den Menschenknochen festzustellen. Daher die Vermutung, dass ein Zusammenhang von Knochenzusammensetzung bzgl. Härte und Dichte, Form des Knochens, dem anfänglichen Verlaufen der Bohrer Spitze und dem Bohrerverschleiß besteht“ (Zopf 2011:47f.).

Der auftretende Bohrerverschleiß wurde mit Ausbrüchen an den äußeren Bereichen der Hauptschneiden und zunehmender Abrundung der Querschneide infolge der ansteigenden Kraft beschrieben. Ein Freiflächenverschleiß ist bei dieser Testreihe ebenfalls wieder ersichtlich. Als ausschlaggebend für den Bohrerverschleiß wird die Vorschubkraft im Vergleich zur Bohrdauer und dem Bohrweg angesehen (Ebd.:47f.).



Abbildung 87: Verschleißerscheinungen bei Bohrungen in Kunst-, Schweine-, und Menschenknochen bei 20 Bohrungen mit je 50 N Vorschubkraft (Ebd.:46)

Auch bei den Versuchsreihen dieser Arbeit treten die Verschleißerscheinungen vorwiegend im Bereich der Hauptschneiden auf. Ein Freiflächenverschleiß konnte jedoch weder bei den Brasseler Bohrern, noch bei jenen von Synthes festgestellt werden. Dagegen wiesen die Testbohrer einen starken Verschleiß der Querschneide auf. Der Werkstoffabtrag an der Querschneide war verhältnismäßig hoch und führte zum „Zuspitzen“ derselben (s. Kap. 5.3, Seite 92, Abb. 75 und 76).

Der Vergleich der beiden Arbeiten zeigt also die eingeschränkte Eignung von Kunstknochen zur Untersuchung von Verschleißerscheinungen. Das homogene Gefüge und die gleichmäßige Form der Kortikalishälften, die bei allen Kunstknochen-Bohrungen gewährleistet waren, führten zum gleichmäßigen Abrieb entlang der Hauptschneiden und der Querschneide. Diese

Art des Verschleißes konnte bei Zopf bei vergleichbaren Parametern in diesem Ausmaß nicht festgestellt werden.

Die ungleichmäßigen und geometrisch nicht definierten Oberflächen, wie sie bei den Schweine- oder Menschenknochen auftreten, führen infolge des ungleichmäßigen Eingriffs der Boherschneiden zu unterschiedlichen Belastungen und dadurch zu einem möglichen Ausbruch entlang der Schneiden.

5.5 Resümee der Versuchsreihen

Die Versuchsbohrungen an der FSW verliefen mit allen getesteten Bohrern einwandfrei und mit Hilfe des Datenrekorders (Kap. 3.1.8, Seite 51ff) konnten die auftretenden Vorschubkräfte genau dokumentiert werden. Abschließend können folgende Erkenntnisse zu den Bohrungen festgehalten werden:

- die Anlage ermöglichte eine genaue Positionierung der Bohrspitze
- es kam zu keinem Verlaufen der Bohrspitze zu Beginn des Bohrvorgangs
- der externe Datenrekorder ermöglichte die genaue Dokumentation der Vorschubkräfte und deren Verlauf in Abhängigkeit der Bohrdauer
- der gemessene Kraftanstieg der Testbohrer war bei allen Bohrertypen der gleichen Firma ähnlich
- der erste Kraftanstieg in der Messkurve des Datenrekorders entspricht dem Bohrvorgang in der oberen Kortikalis-, der zweite Kraftanstieg jenem in der unteren Kortikalishälfte
- die Werte über den Vorschub [mm/s] (s. Tab. 3.1, Seite 54) bestätigen den Verlauf der Kraft; dabei ist der Berührungszeitpunkt zwischen Bohrspitze und Werkstoff (Kunstknochen) ersichtlich
- die Rechnungen bestätigen die Abnahme der Kraft, sobald die Bohrspitze durch die Kortikalis dringt
- deutlicher Kraftanstieg des Maximalwertes nach wenigen Bohrungen auf Grund des Bohrerverschleißes ersichtlich
- der Verschleiß bzw. der Kraftanstieg spiegelt sich durch die Veränderung in der Art des Bohrspäne wieder → langer, durchgehender Span zu Beginn; bröselartiges Aussehen spätestens nach der 6. Bohrung.

Vor allem im Bereich der Bohrkraft lieferten die Testbohrer sehr unterschiedliche Werte der maximalen Vorschubkraft. Synthes verzeichnete mit seinen Bohrern den geringen Kraftanstieg. Hinsichtlich der Verschleißerscheinungen ähnelt das Aussehen von Synthes bei der doppelten Anzahl von Bohrungen jenem Verschleißbild von Brasseler (s. Abb. 79 u. 80, Seite 94f.).

5.5.1 Resümee der Bohrungen mit Synthes

- gutes Bohrverhalten zu Beginn (ca. 37 N) → Bohrkraft von 50 N erst nach ca. 6 Bohrungen überschritten
- bessere Spanbildung als Brasseler → durchgängigerer Span bis zur ca. 6. Bohrung
- trotz der scheinbar einfacheren Geometrie der Bohrspitze erzielt dieser Typ ein besseres Ergebnis als erwartet
- keine Ausbrüche entlang der Hauptschneide → gleichmäßiger Abrieb der Haupt- und Querschneide
- starkes „Zuspitzen“ der Bohrspitze infolge des Querschneidenverschleißes
- neue Geometrie (eigener Anschliff) liefert deutlich schlechtere Ergebnisse bzgl. der auftretenden Bohrkraft
- Bohrer mit LOT 8099355 erzielten geringere Vorschubkräfte (ca. 8 N) im Vergleich zu Bohrern von Synthes mit LOT 8040081.

5.5.2 Resümee der Bohrungen mit Brasseler

- sehr hohe Vorschubkräfte, bereits nach der ersten Bohrung (durchschnittlich 19 N höher im Vergleich zu Synthes LOT 8099355)
- stetige Zunahme der Bohrkraft (ca. 3 N) mit zunehmender Anzahl der Bohrungen
- früheres „bröselartiges“ Aussehen des Bohrguts (nach ca. 2.-3. Bohrung) → Bestätigung der höheren Bohrkraft durch schnelleren Verschleiß der Schneiden
- gleichmäßiger abrasiver Verschleiß der Hauptschneiden; vergleichbar mit den Bohrern von Synthes
- Zuspitzen der Bohrspitze bzw. der Querschneide (geringer als bei Synthes)
- keine Ausbrüche entlang der Hauptschneide
- aufwendigere Geometrie nicht von Vorteil; besseres Ergebnis der Bohrkraft mit Geometrieanpassung erreicht (Bohrkraftverringering um ca. 10 N).

5.6 Risse im Gefüge der Bohrer

Bei den metallografischen Gefügeuntersuchungen mussten Risse durch die größeren Karbide (Karbidgebilde) festgestellt werden. Diese waren nur bei den Längsschliffproben erkennbar und traten dabei normal zur Bohrerachse auf. Derartige Karbidgebilde wurden auch schon an der TU Wien nachgewiesen (Haubner 2012:223ff). Bei den Karbiden sollte es sich zum Großteil um Cr_{23}C_6 handeln, wie mit der Mikrosonde analysiert wurde. Es wurden im Jahr 2011 an den untersuchten Bohrern von Synthes und Brasseler der Diplomarbeit Zopf Mikrosondenanalysen EPMA (electron probe micro analysis / wellenlängendispersiven Analyse WDX) der Karbide durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten ein Atomprozent-Verhältnis Cr/C von 4.0 bis 4.3 C. Demnach handelt es sich bei den vorliegenden Carbiden zum allergrößten Teil um M_{23}C_6 ($\text{M}' = \text{Cr}, \text{Fe}, \text{Mo}$). Abbildung 88 zeigt für den Brasseler Bohrer das RE-Bild (BSE) sowie das Cr- und Fe-Mapping (E-Mail Deditius Juli 2011).

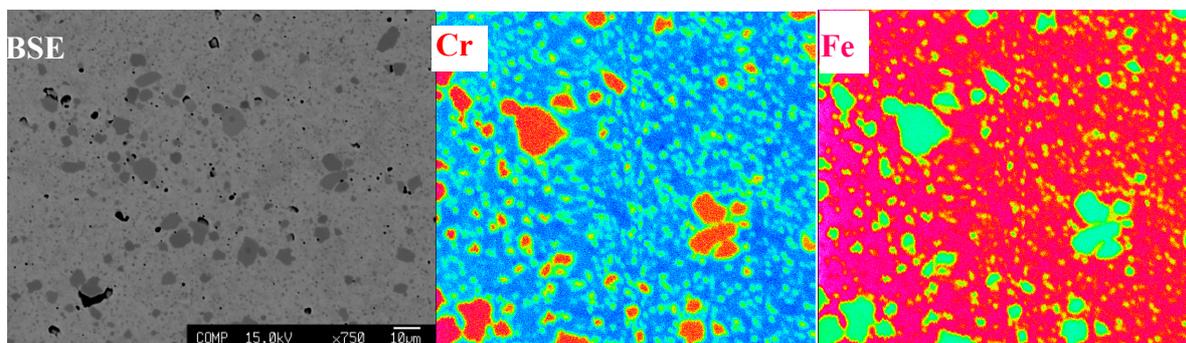
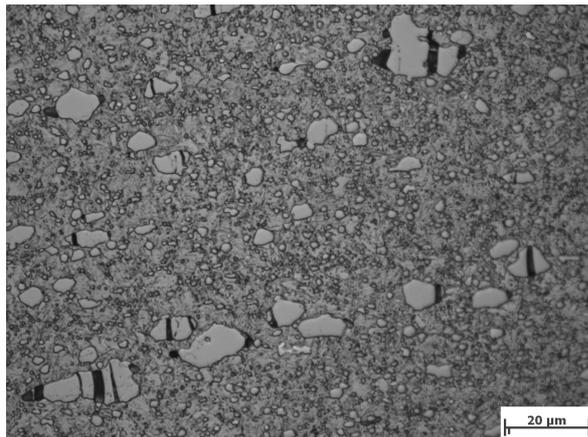


Abbildung 88: EPMA Analyse der Karbide – Brasseler Bohrer (BSE/Cr/Fe) (E-Mail Deditius Juli 2011)

Die quantitativen Auswertungen der Karbid-Analysen sind im Anhang (Kap. 13, S. xii) zu finden.

„Steel Type AISI 440C: 17% chromium, 1% carbon and addition of molybdenum. [...] ist structure being made mostly of Cr_{23}C_6 type carbides. These characteristics allow extremely good edge retention, but, unfortunately, these carbides weaken the Chromium matrix and give this grade very poor corrosion resistance and fracture toughness“ (Winters 2002:14).

Bei den Querschliffen wurden also keine Karbidgebilde gefunden. Bei den Bohrern im Neuzustand (ohne durchgeführte Bohrung) wurden ebenfalls Karbidgebilde festgestellt, d.h. wahrscheinliche entstehen diese nicht durch die Belastung bei den Bohrungen, sondern bereits durch den Herstellungsprozess der Bohrer. Ein Risswachstum von den Karbiden in die Werkstoffmatrix bei den eingesetzten Bohrern konnte nicht festgestellt werden. Aussagen über den eventuellen Einfluss von Bohrungen auf Karbidgebilde im Gefüge könnte man nur an, im Neuzustand rissfreien, Knochenbohrern treffen. Die Abbildungen 89 bis 92 zeigen die Brüche vor allem in den länglichen Karbiden.



Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 µm

Bildname: knochenbohrer13u0426.jpg



Abbildung 89: gebrochene Karbide,

Brasseler 777252 Bohrer Nr. 5



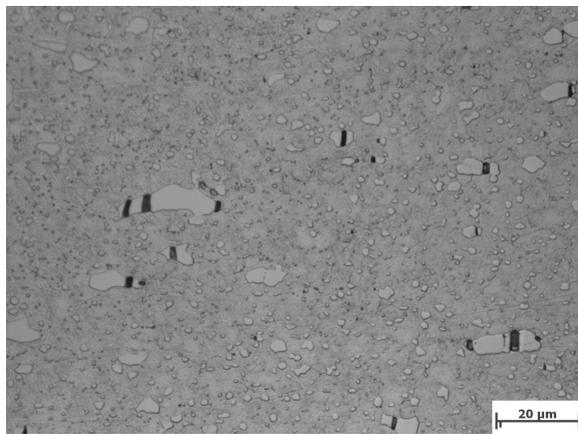
Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 µm

Bildname: knochenbohrer13u0422.jpg



Abbildung 90: gebrochene Karbide,

Synthes 8099355 Bohrer Nr. 2



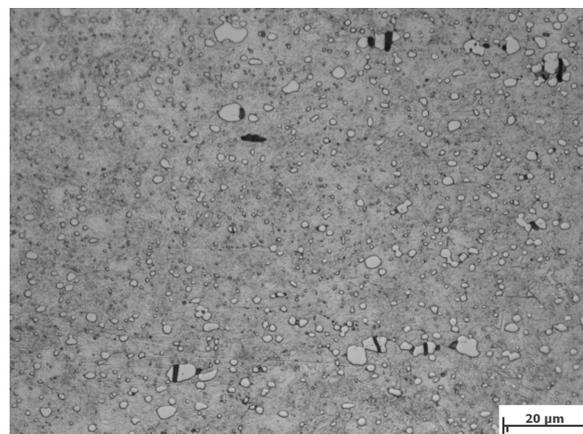
Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 µm

Bildname: knochenbohrer13u0546.jpg



Abbildung 91: gebrochene Karbide,

Brasseler 777252 Neu



Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 µm

Bildname: knochenbohrer13u0553.jpg



Abbildung 92: gebrochene Karbide,

Synthes 8040081 Neu

Eine mittlere Größe der Risse konnte bei den Proben nicht ermittelt werden, weil die Karbidgröße und deren Verteilung stark variieren. Die höhere Anzahl an größeren Karbiden (ca. 15 µm groß) beim Brasseler Bohrer lässt vermuten, dass bei diesem auch eine größere Anzahl an Karbidbrüchen vorliegen.

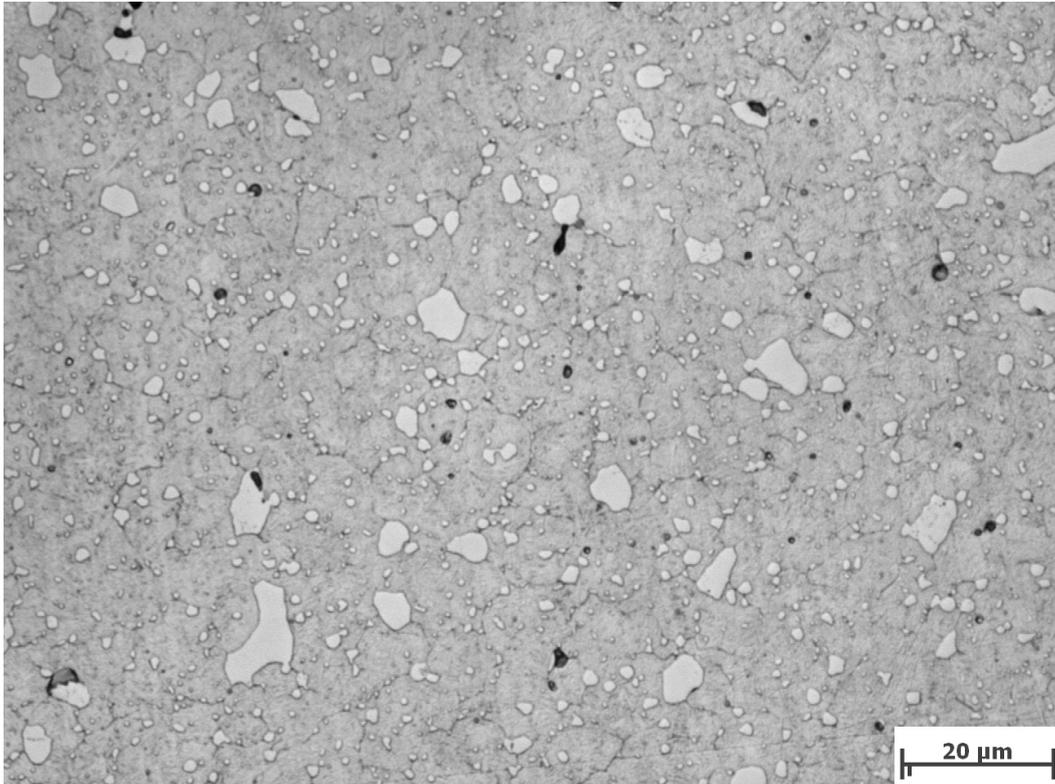
Durch die Ätzung mit der V₂A Beize (Ätzmittelzusammensetzung Kap. 4.1.9, s. Tab. 4.2, Seite 75) werden die Gefügeunterschiede zwischen den beiden Bohrern sehr gut ersichtlich.

Im Lichtmikroskop konnte eine leichte Häufung der größeren Primärkarbide in der Randzone festgestellt werden. Im Kernbereich hingegen traten diese mit etwas geringeren Größen bis zu 10 µm auf.

Die durchschnittliche Größe der in der martensitischen Matrix eingelagerten Karbide bei den Brasseler Bohrern beträgt ca. 5,1 µm (ca. 5,5 µm am Rand und ca. 4,7 µm im Kern). Markant

dafür ist die leicht eckige Form der Karbide. Vor allem die Primärkarbide tragen aufgrund ihrer Größe zu einer höheren Schneidhaltigkeit der Bohrer bei.

Bei der Bestimmung der Karbidgröße sind jene mit einer Größe von $> 2 \mu\text{m}$ berücksichtigt worden; nicht jene $< 2 \mu\text{m}$. Eine Änderung der Grenze der berücksichtigten Karbidgröße von 2 auf $3 \mu\text{m}$ lieferte einen Rückgang von ca. $0,2 \mu\text{m}$ bei der durchschnittlichen Größe.

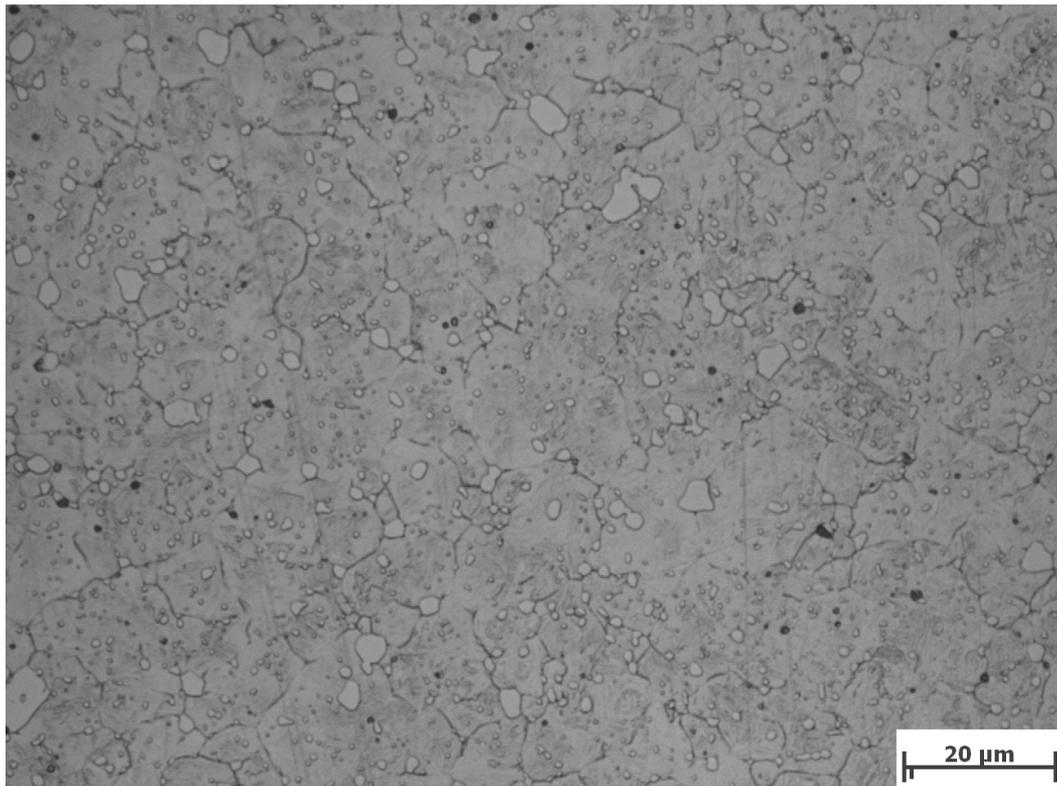


Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 μm

Bildname: knochenbohrer13u0391.jpg



Abbildung 93: Brasseler 777252 Bohrer Nr. 5 Vilella (Rand)



Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 μm

Bildname: knochenbohrer13u0327.jpg



Abbildung 94: Synthes 8040081 Bohrer Nr. 3 Vilella (Rand)

Im Gegensatz zu den Brasseler Bohrern weisen die Schliffbilder von Synthes feinere Karbide auf. Die Auswertung der durchschnittlichen Karbidgröße liefert ca. 3,2 μm (ca. 3,3 μm am Rand und ca. 3,0 μm im Kern). Ein Unterschied bei den betrachteten Positionen der Querschliffe (Rand- und Kernzone) konnte dabei nicht festgestellt werden. Die Primär- und Sekundärkarbide scheinen optisch bei den betrachteten Schliffbildern über den Querschnitt hinweg annähernd gleichmäßig verteilt zu sein. Die Primärkarbide weisen bei Synthes eine rundliche Form auf. Die Ermittlung der durchschnittlichen Karbidgröße wurde per Hand durchgeführt. Dazu wurde pro Bohrerotyp der Mittelwert aus je drei Aufnahmen am Rand und je drei im Kern gebildet.

Es wurde zu Beginn versucht, diese Karbidverteilung anhand der Software KS400 der Fa. Zeiss (Oberkochen, D) durchzuführen. Dabei mussten sehr kontrastreiche Ätzungen der Proben angefertigt werden, um Kontrastunterschiede (mind. 10 %) zwischen den Karbiden und der martensitischen Matrix zu erhalten. Im Anschluss wurden die Karbide bei den LIM1_Aufnahmen mit Hilfe der Software KS400 von Zeiss blau eingefärbt (s. Abb. 95).

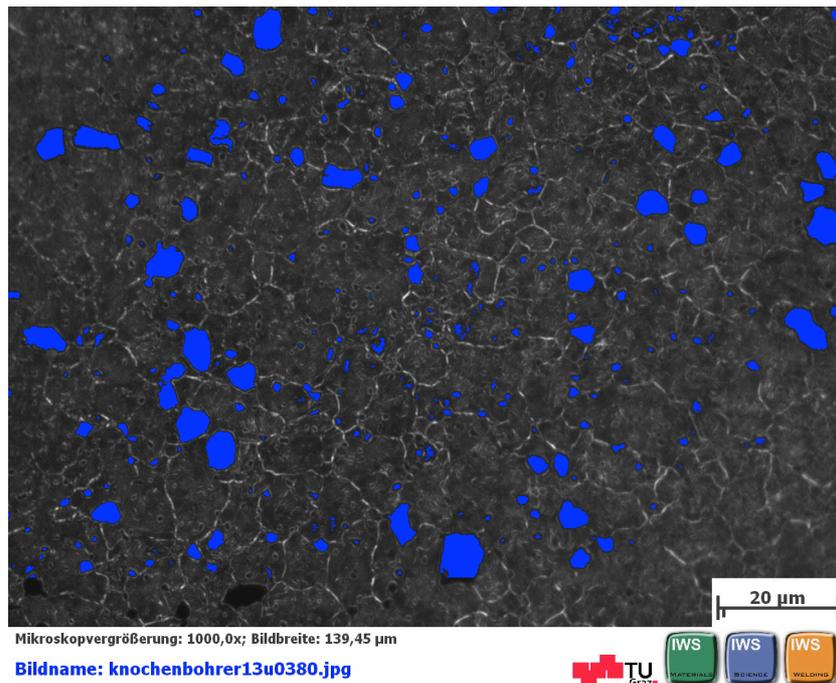


Abbildung 95: Karbide, blau eingefärbt (Brasseler)

Die Markierung der Karbide erwies sich als schwierig, da bei zu hoher Rate keine Unterscheidung zwischen den Karbiden und den Pixeln mehr getroffen werden konnte. Außerdem wurden manche Karbide bei der Anpassung überhaupt nicht erfasst (vgl. Abbildung 95 links unten). Somit würde die Auswertung falsche Ergebnisse liefern.

Vor allem bei den Bildern von den Bohrern von Synthes war nur eine grobe Auswertung mittels dieser Computer-Software möglich. Die unten angeführten Werte sind mit Vorsicht zu genießen und sollen lediglich eine Vorstellung geben, wie viel Prozent des betrachteten Bildausschnittes an Karbiden vorliegen.

Die durchschnittliche Prozentzahl der Karbide pro Bildausschnitt lag bei drei betrachteten Bildern der Bohrer von Brasseler bei ca. 5,57 %.

Synthes liefert hingegen – aufgrund der geringeren Karbidgröße – einen durchschnittlichen Wert von ca. 2,36 % der Karbide pro Bildausschnitt.

5.7 Ermittlung der mittleren Korngröße

Zur Bestimmung der scheinbaren Ferrit- oder Austenitkorngrößen von Stählen wird das mikrofotografische Verfahren nach ISO 643 herangezogen. Dabei werden Verfahren erläutert, die sowohl zur Sichtbarmachung der Korngrenzen, als auch zur Schätzung der mittleren Korngröße von Proben mit gleichmäßiger Größenverteilung dienen.

„Obwohl die Körner dreidimensional sind, können sie durch eine metallographische Schnittebene von einem beliebigen Punkt am Rand eines Kornes bis einschließlich durch

seinen maximalen Durchmesser so durchschnitten werden, dass auch in einer Probe mit vollständig übereinstimmender Korngröße in der zweidimensionalen Ebene eine scheinbare Korngröße erzeugt wird“ (ÖNORM EN ISO 643 2006:3).

Begriffsdefinition „Korn“: Entspricht bei einer präparierten Schliﬀprobe im Allgemeinen einem Polygon mit teilweise gekrümmten Seiten.

Dabei wird laut der ISO Norm 643 unterschieden zwischen „Austenitkorn“ – Kristall mit kubisch flächenzentriertem Gefüge und „Ferritkorn“ – Kristall mit kubisch raumzentriertem Gefüge.

5.7.1 Prinzip der Ermittlung der Korngröße

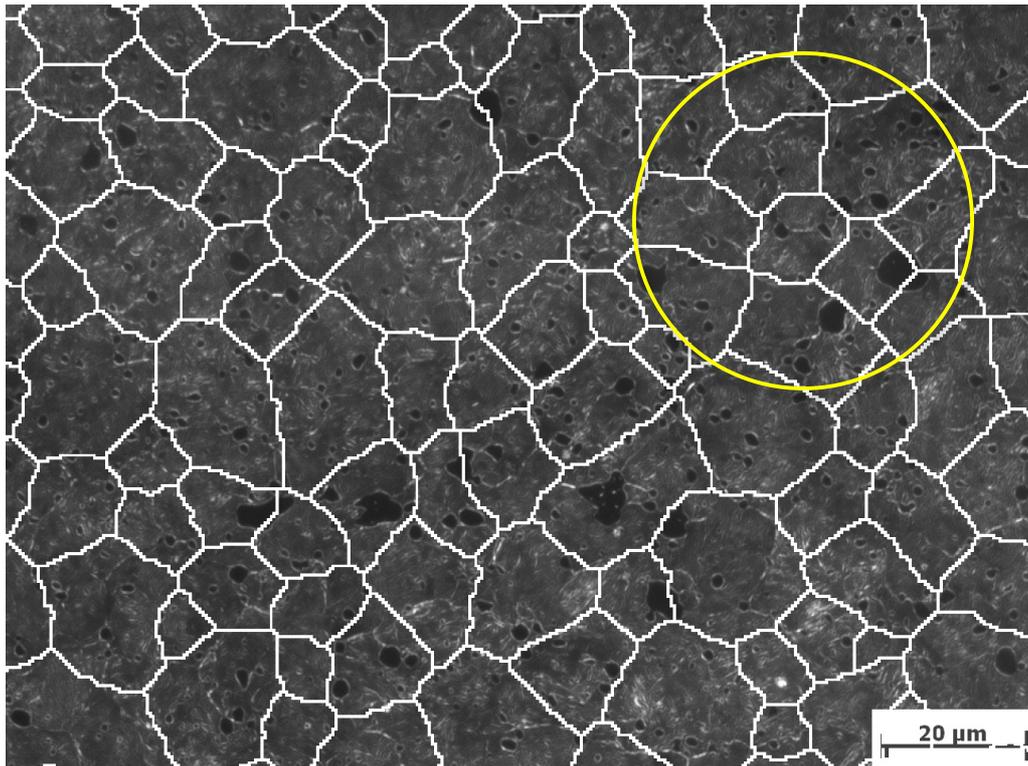
Die Ermittlung der Korngröße erfolgt mikrofotografisch durch Begutachtung der angefertigten Schliﬀprobe. Sollte dabei das Verfahren zum Sichtbarmachen des Korn nicht festgelegt sein, unterliegt dies dem Hersteller.

„Die mittlere Korngrenze wird gekennzeichnet:

- *entweder durch eine Kennzahl,*
 - *die üblicherweise durch einen Vergleich mit genormten Bildreihentafeln (s. Abb. 96) zur Bestimmung der Korngröße ermittelt wird,*
 - *oder durch eine Zählung der mittleren Anzahl Körner je Flächeneinheit;*
- *oder durch den Mittelwert des Linienschnittsegments“ (ÖNORM EN ISO 643 2006:8).*

5.7.2 Probenvorbereitung

Wie bei der Sichtbarmachung der Korngrenzen unterliegt auch die Auswahl der Lage der Probenentnahme dem Hersteller, sofern dies nicht in der internationalen Produktnorm festgelegt ist. Laut Norm wird dabei empfohlen, zwei oder mehrere Bilder auszuwerten, um die Korngrößenbestimmung zu verbessern. Die Darstellung der Korngrenzen erfolgt durch ein geeignetes Ätzmittel. Im Zuge dieser Arbeit wurde dazu eine Vilella-Lösung mit einer Einwirkzeit von 10 – 13 s verwendet.

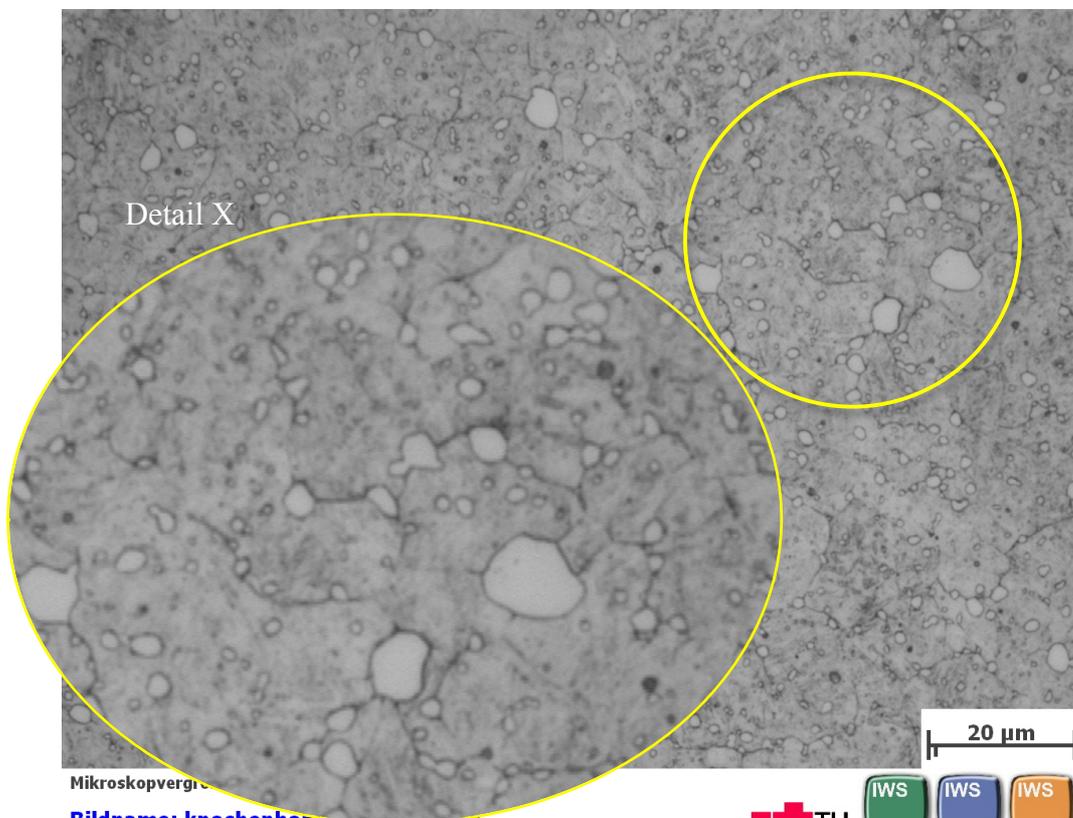


Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 µm

Bildname: knochenbohrer13u0378.jpg



Abbildung 96: Genormte Bildreihentafel 10.0 aus ASTM E 112 (Bsp.: Querschliff Synthes Neu)



Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 µm

Bildname: knochenbohrer13u0377.jpg



Abbildung 97: Gefüge ohne Bildreihentafel 10.0 (Bsp.: Querschliff Synthes Neu)

5.7.3 Auswertung der Gefügaufnahme

„Das auf dem Bildschirm (oder einer Mikrogefügaufnahme) untersuchte Beobachtungsfeld wird mit einer Reihe von genormten Bildtafeln (festgelegt in ASTM E 112) oder Auflegblättern verglichen (Okulargitter für die Korngrößenbestimmung können unter der Voraussetzung angewendet werden, dass sie nationalen oder internationalen Standards entsprechen). Die genormten Bildreihentafeln mit einer Vergrößerung von 100 werden bis 10 so nummeriert, dass ihre Kennzahl G entspricht. Es kann dann die genormte Bildreihentafel mit der Korngröße bestimmt werden, die am besten mit der Korngröße der untersuchten Beobachtungsfelder der Probe übereinstimmt. Für jede Probe müssen mindestens drei zufällig ausgewählte Beobachtungsfelder ausgewertet werden. Für den Fall, dass eine von 100 abweichende Vergrößerung g des Beobachtungsfeldes auf der Mattscheibe oder der Mikrogefügaufnahme angewendet wird, entspricht die Kennzahl G der Nummer M_B der Bildtafel mit der besten Übereinstimmung, wobei die gewählte Vergrößerung folgendermaßen zu berücksichtigen ist“ (ÖNORM EN ISO 643 2003:13):

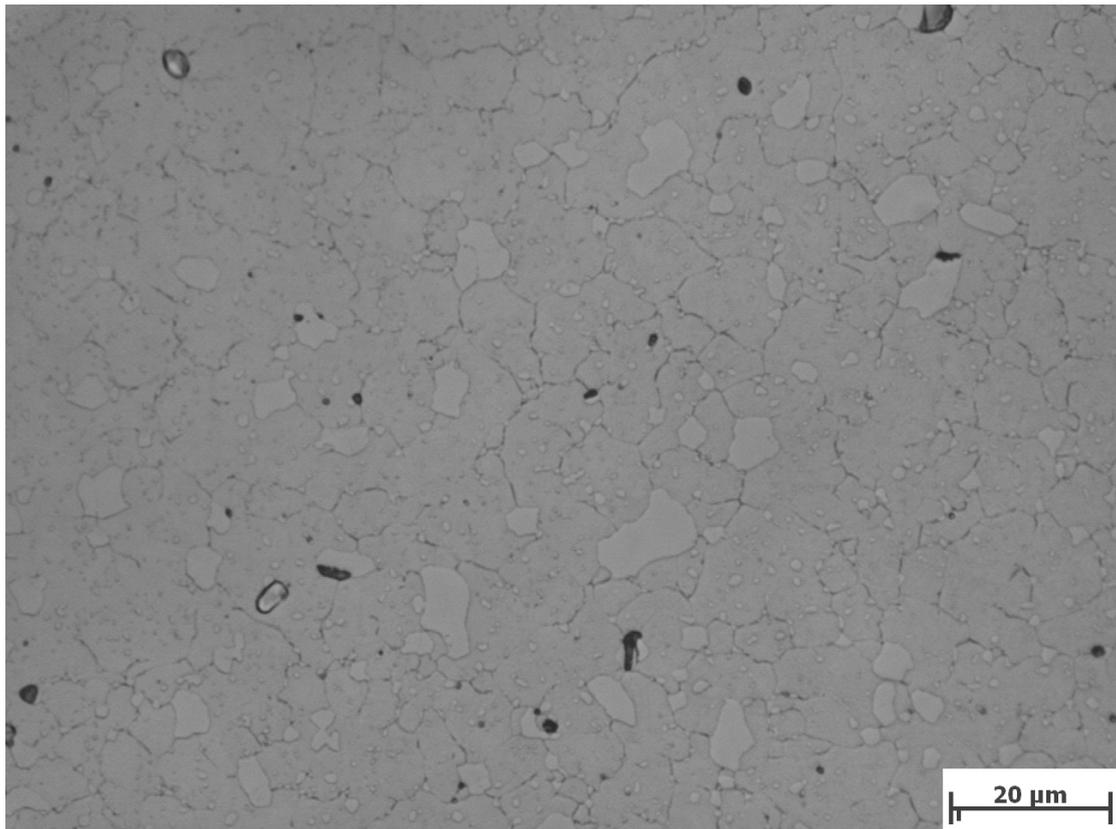
$$G = M_B + 6.64 \log (g/100).$$

Am Beispiel von Synthes (s. Abb. 96 und 97) wurde ersichtlich, dass dieses Auswerteverfahren für das vorliegende Gefüge der Knochenbohrer nicht geeignet war. Die Überdeckung mit den genormten Bildreihentafeln lieferte mit der kleinsten Bildtafel keine Ergebnisse. Sämtliche betrachteten Beobachtungsfelder stimmten mit der Korngröße der Schlitze nicht überein. Die Abbildung 96 zeigt in Kombination mit der Abbildung 97 die Darstellung nicht vorhandener Korngrenzen durch die Bildtafel.

Man erachtete dieses Verfahren für das vorliegende Gefüge als nicht sinnvoll. Die Bildtafeln stimmten mit den Korngrößen unzureichend überein.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich das Ätzen der Proben als sehr schwierig erwies und auch bei gleicher Ätzzeit unterschiedliche Resultate lieferte. In der unten angeführten Abbildung 98 sieht man vor allem bei der Synthes Probe das deutlich schlechtere Ergebnis als bei jener von Brasseler.

Es wurden die Korngrenzen, soweit als möglich, bei verschiedenen Stereobildern per Hand nachskizziert, um aus diesen Skizzen die mittlere Korngröße zu ermitteln. Aus jeweils vier Schliffbildern der Knochenbohrerproben wurde folglich eine durchschnittliche Korngröße von ca. 10 μm berechnet. Das Ergebnis bezieht sich auf Synthes, wie auch auf Brasseler und ist mit gewisser Vorsicht zu genießen, da bei leichten Andeutungen einer Korngrenze bei den Schliffbildern diese auch angenommen wurde.

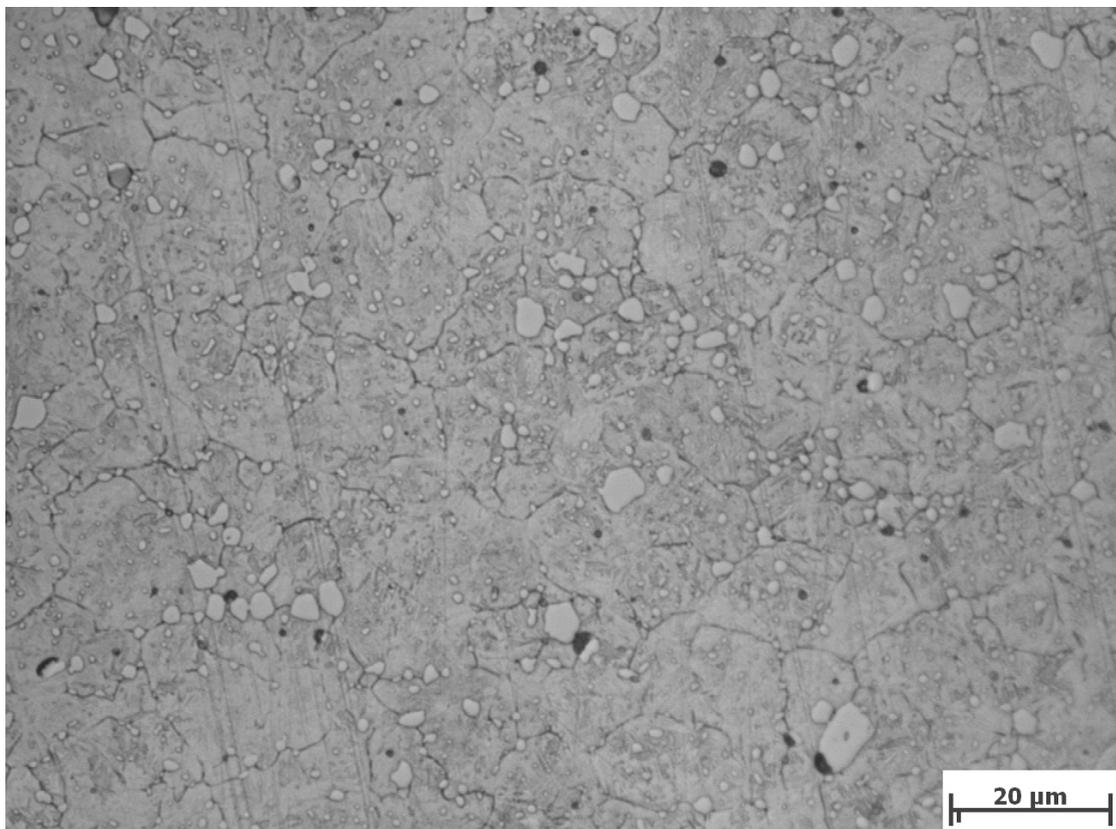


Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 μm

Bildname: knochenbohrer13u0323.jpg



Abbildung 98: Brasseler 777252 Nr. 3 V2A Beize 10-15 s Ätzeit



Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 μm

Bildname: knochenbohrer13u0326.jpg



Abbildung 99: Synthes 8040081 Nr. 4 V2A Beize 10-15 s Ätzeit

6 Zusammenfassung

In der Chirurgie findet heutzutage eine Vielzahl von Schneidwerkzeugen ihren Einsatz. So auch Spiralbohrer zur Erzeugung von Bohrlöchern, um im Bereich der Osteosynthese die Verschraubung von Platten oder Schienen zu ermöglichen. Der Verschleiß dieser chirurgischen Bohrer ist jedoch schon nach den ersten Knochenbohrungen relativ hoch und kann somit zu weiteren Problemen führen: Knochenschädigung durch Nekrose, Bohrlöcher von schlechter Qualität oder Weichteilverletzungen infolge mangelnder Kontrolle durch zu hohe Bohrkraft (Überbohren) sind mitunter die Folgen. Um diesen Bohrerverschleiß zu untersuchen, wurden Bohrversuche an einem Kunstknochen (Epoxidharz mit Glasfasern) mit zwei unterschiedlichen Bohrertypen der Legierungen 440A und 440B durchgeführt. Bei diesen Legierungen handelt es sich um korrosionsbeständige, unbeschichtete, martensitische Chromstähle, wobei die originalen Bohrergeometrien stark unterschiedlich sind (Tabelle 6.1, 440A/440B original). Zu Vergleichszwecken wurden an beiden Bohrern eine eigene Spitzengeometrie, derselben Ausführung angebracht (Tabelle 6.1, 440A/440B eigene). Die neu gefertigte Geometrie führte zur Reduktion der Bohrkraft bei 440B gegenüber der ursprünglichen Geometrie. Diese Bohrkraften überschritten aber jene der ursprünglichen Bohrergeometrie von 440A deutlich.

	Spitzenwinkel [°]	Breite Querschneide [mm]	Form der Freifläche	Hauptschneide	Hinterschliff [mm]	Sonstiges
440A original	80	0,84	gerade	abgerundet	0,5	
440B original	90	0,98	bombiert	scharf	0,2	
440A/440B eigene	90	0,5	gerade	scharf	0,3	Ausspitzung der Querschneide
440A original DA Zopf	80	0,8	gerade	abgerundet	k.A.	Jahr 2011
440B original DA Zopf	k.A.	k.A.	k.A.	abgerundet	k.A.	Jahr 2011

Tabelle 6.1: Vergleich originale und eigene Geometrien der Bohrspitzen 440A und 440B

Bei den Bohrversuchen an der FSW-Maschine wurde der Kraftverlauf bei jeweils 800U/min und 70mm/min Vorschub beim Durchbohren der 1. und der 2. Kortikalis gemessen. Dieser Kraftanstieg wurde mit einem Datenrekorder erfasst und grafisch dargestellt. 440A zeigte bei der 1. Bohrung eine max. Bohrkraft von ca. 33 N die bis zur 10. Bohrung durch den Bohrerverschleiß auf max. 60 N relativ linear angestiegen ist. 440B wies bei der 1. Bohrung eine deutliche höhere Bohrkraft von max. ca. 54 N auf, die bei der 10. Bohrung auf max. 87 N ebenso relativ linear anstieg.

Durch den auftretenden Verschleiß des Knochenbohrers änderte sich auch das Erscheinungsbild der Bohrspäne des Kunstknochens. Bei den ersten Bohrungen bildete sich noch ein Fließspan, während das Bohrgut bereits nach der 6. Bohrung bei 440A ein bröseliges Aussehen hatte. 440B verzeichnete bereits nach der 3. Bohrung bröseliges Bohrguts und deutet somit auf einen stärkeren Bohrerverschleiß hin als bei 440A.

Die Verschleißerscheinungen waren bei beiden Bohrern abrasiver Art an den Haupt- und den Querschneiden. Durch den mechanischen Abrieb bzw. Verschleiß der Querschneide spitzte sich diese vor allem bei 440A aufgrund der geringeren Breite deutlich zu. Auffällig war, dass keine Ausbrüche an den Hauptschneiden – wie sie bei Bohrungen in realen Knochen im Rahmen der Diplomarbeit von Christoph Zopf (2011) deutlich aufgetreten sind – zu beobachten waren. Die Verschleißbreite auf der Hauptschneide war bei den Bohrern beider Firmen annähernd gleich groß. Jedoch wurde dabei mit jenem Bohrer von 440A die doppelte Anzahl an Bohrungen durchgeführt, was auf den schneller verschleißenden 440B Bohrer hindeutet.

Bei beiden Bohrern lag ein sehr feinkörniges Gefüge vor (ca. 10 μm Korngröße). Die primären Karbide waren bei 440B um ca. 2 μm größer als bei 440A, wodurch sich vermutlich auch der stärkere bzw. gröbere Verschleiß durch Herausdrücken der Primärkarbide aus der martensitischen Matrix bei Ersterem ergab, Tabelle 6.2.

	Korngröße [μm]	Härte Rand / Kern [HV0,025]	Größe der primären Karbide Rand/Kern [μm]	Karbid- Anteil [Fl.%]	Karbid- Brüche
440A	10	722/706	3,3/3,0	2,36	ja
440B	10	699/713	5,5/4,7	5,57	ja

Tabelle 6.2: Metallografische Analyse

Die Mikrohärtigkeit der Gefügematrix war bei den beiden Bohrern ähnlich bzw. lag im Bereich der Standardabweichung und betrug ca. 700 HV_{0,025}.

Bei beiden Legierungen wurden Karbidbrüche in Achsrichtung festgestellt. Der Bruch erfolgte dabei normal zur Achsrichtung. Untersuchungen an unbenutzten Knochenbohrern schloss die Entstehung dieser durch Bohrvorgänge aus. Mögliche Ursachen für die gebrochenen Karbide liegen bei der Herstellung der Bohrer (Fertigung des Rohlings, oder durch den Schleifprozess), oder sind eventuell auch auf die Probenpräparation zurückzuführen.

7 Ausblick

Wie die Ergebnisse der Bohrversuche zeigen, besteht noch ein Potential zur Reduktion der Bohrkraft durch Geometrieoptimierung der Bohrerspitzen. Hierbei sollten unterschiedliche Geometrien (Spitzenwinkel, Querschneidenbreite, Freiwinkel und Hinterschliff) getestet werden, um die Haupteinflüsse auf die Bohrkraft und das Bohrverhalten herauszuarbeiten. Dazu sollte womöglich die Methode der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiment) angewendet werden.

Auch hinsichtlich Verschleißbeständigkeit besteht noch Verbesserungspotential hinsichtlich Karbidgröße und Verteilung, sowie Matrixhärte durch eine optimierte Wärmebehandlung, die an Hand von ZTA- und ZTU-Schaubildern durchgeführt werden soll (Zeit-Temperatur-Austenitisierung bzw. -Umwandlung). Insbesondere bei der Legierung 440B, sollte noch eine Verbesserung der Karbidverteilung möglich sein. In diesem Zusammenhang ist zu empfehlen, den Einfluss der Mikrostruktur auf die Zähigkeit (etwa durch einen adaptierten Kerbschlagbiegeversuch) zu überprüfen.

Ein genereller Ansatz zur Verbesserung des Verschleißverhaltens wäre die Aufbringung einer biokompatiblen, harten Schicht (z.B. TiN) auf der Bohrerspitze oder auch die Herstellung eines Hybridbohrers (z.B. Bohrerspitze aus ZrO₂). Diese Themen werden jedoch hauptsächlich von den Herstellkosten bzw. dem Marktpreis bestimmt.

Zur genaueren Verschleißcharakterisierung sollten noch metallografische Querschliffe an der verschlissenen Haupt- und Querschneide durchgeführt werden, um den Zustand der Karbide (evtl. Vorliegen von Karbidbrüchen) nahe der Verschleißfläche zu überprüfen. Des Weiteren sollte über eine genaue Massenbestimmung (mg Waage) oder einer exakten Vermessung der Bohrerspitze aus einem Vorher-Nachher-Vergleich der Verschleiß quantifiziert werden. Die Vermessung der Ovalität der Bohrlöcher mit zunehmenden Bohrerverschleiß (s. Bachelorarbeit Artner, 2012), scheint nach wie vor ein wesentliches Thema zu sein, da damit die Haltefestigkeit der Schrauben in der Osteosynthese verringert wird. Hier sollte evaluiert werden, welche optische oder mechanische Messmethode dafür geeignet wäre.

Des Weiteren sollte überprüft werden, wie sich die geometrischen und mikrostrukturellen Veränderungen auf das Bohrverhalten in realen Knochen auswirken. Die Steuergröße, betreffend der Verschleißproblematik bzw. der stetig zunehmenden Bohrkraft, ist die Knochentemperatur, die bei den Bohrungen entsteht. Daher ist die Temperaturmessung

ebenso ein wichtiges Ziel, um eine Verbindung zur maximal zulässigen Bohrkraft bzw. zum maximal zulässigen Verschleißgrad herzustellen.

Dem Einsatz von verschlissenen Bohrern – in der derzeitigen chirurgischen Praxis nicht vermeidbar – sollte auch insofern entgegengewirkt werden, als dass der Chirurg vorweg die Möglichkeit besitzt, Knochenbohrer visuell zu begutachten und unbrauchbare zu selektieren.

8 Literaturverzeichnis

Literatur:

Augustin, Goran (2012): *Cortical bone drilling and thermal osteonecrosis*. In: *Clinical Biomechanics*. Zeitschrift für Biomechanik. 27. Aufl., Elsevier.

Beitz, Wolfgang (1995): *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. 18. Aufl., Berlin: Springer Verlag.

Bramfitt, Bruce L. (2002): *Metallographer's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*. 1. Aufl., USA: Materials Park.

Ceramtec AG (2000): *Patentschrift Biomedizinische Instrumente*. Veröffentlichungsnummer: WO 00/61517.

De Pretis, Daniel (2012): *Untersuchungen des Überbohrens und des Kraftverlaufes bei Bohrungen in die Knochenkortikalis Einfluss: Bohrertyp und Verschleißgrad*. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz.

Deditius, A. (2011): *Analysis chemical composition of drills using Microprobe*. Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Graz (E-Mail 25. Juli 2011).

Degner, Werner (2009): *Spanende Formung: Theorie – Berechnung – Richtwerte*. 16. Aufl., Stuttgart: Carl Hanser Verlag

Dinnebier, Josef (1949): *Spiralbohrer*. 1. Aufl., Berlin: Springer Verlag.

Dobler, Hans-Dieter (2003): *Fachkunde Metall: Mechanische Technologie*. 54. Aufl., Wien: Europa-Lehrmittel Verlag.

Domke, Wilhelm (1986): *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*. 10. ver. Aufl., Düsseldorf: Girardet; Bielefeld: Cornelsen-Velhagen & Klasing Verlag.

Drosdowski, Günther (1989): *Duden: Deutsches Universalwörterbuch A-Z*. 2. Aufl., Mannheim: Dudenverlag.

Feurer, Manfred (2009): *Stahl-Lexikon: Ein material-, produkt-, und anarbeitungskundliches Nachschlagewerk für den Stahlhandel*. 27. Aufl., Düsseldorf: BDS Verlag.

Fuchsberger, Alfred (1984): *Möglichkeiten zur Verminderung der thermischen Schädigung des Knochens beim Einsatz von Spiralbohrern in der Osteosynthese*. In: *Biomedizinische Technik*. Zeitschrift für biomedizinische Technik. 29. Band, München.

Fuchsberger, Alfred (1986): *Die Zerspantemperatur beim Bohren von Knochen*. In: *Medizinisch orthopädische Technik*. Zeitschrift für medizinisch orthopädische Technik. 106. Aufl., München: Alfons W. Gentner Verlag.

Fuchsberger, Alfred (1988): *Gestaltung spanender Werkzeuge für die Medizin am Beispiel des Spiralbohrers*. In: *Orthopädische Traumatologie*. Zeitschrift für orthopädische Traumatologie. 35. Aufl., München.

Haubner, Roland (2012): *Untersuchung der Porosität in medizinischen Bohrern, hervorgerufen durch gebrochene Karbide*. In: Mücklich, F./Petzow, G.: *Practical Metallography: Preparation, Imaging and Analysis of Microstructures*. Zeitschrift für Metallographie. 49. Aufl., Saarbrücken: Carl Hanser Verlag, S. 221-232.

Krukemeyer, Manfred Georg (2005): *Chirurgische Forschung*. 1. Aufl., Stuttgart: Thieme Verlag.

Oettel Heinrich (2005): *Metallografie*. 14. Aufl., Weinheim: Wiley-VCH Verlag

Schmelzeisen, Helmut (1990): *Der Bohrvorgang in der Kortikalis: Mechanik, Thermometrie, Morphologie*. 1. Aufl., Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Hong Kong; Tokyo; Barcelona: Springer Verlag.

Sohar, Christian (2009): *Lifetime controlling defects in tool steels*. Dissertation, Technische Universität Wien.

Verhoeven, John (2005): *Metallurgy of Steel for Bladesmiths & Others who Heat Treat and Forge Steel*. Iowa State University.

Wegst, Claus (2013): *Stahlschlüssel*. 23. Aufl., Marbach: Stahlschlüssel Wegst Verlag.

Winters, Gary (2002): *Stainless Steels for Medical and Surgical Applications*. West Conshohocken: ASTM International.

Zopf, Christoph (2011): *Verschleiß- und Werkstoffuntersuchungen an Knochenbohrern*. Diplomarbeit, Technische Universität Graz.

Internetquellen:

<http://www.drilldoctor.de/index.php?a=109> (06.04.2013)

<http://www.rkh-kassel.de/typo3temp/pics/41ebd3ad68.jpg> (07.04.2013)

<http://www.klinikverbund-suedwest.de/809.0.html> (07.04.2013)

- <http://www.sawbones.com/> (10.04.2013)
- http://www.sawbones.com/images/products/l/generic_cylinder.jpg (10.04.2013)
- <http://www.sawbones.com/products/product.aspx?2256> (11.04.2013)
- [http://de.wikipedia.org/wiki/Los_\(Produktion\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Los_(Produktion)) (30.04.2013)
- <http://www.hbm.com/de/menu/produkte/messelektroniken/high-speed-datenerfassung/>
(10.05.2013)
- <http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/s2782.pdf> (10.05.2013)
- <http://www.metallograf.de/start.htm?/probenvorbereitung/mikro3.htm> (10.06.2013)
- <http://www.mta-r.de/blog/2011/09/20/fallbeispiel-abriss-fraktur-tuberositas-tibiae.html>
(10.08.2013)
- <http://flexikon.doccheck.com/de/Osteonekrose> (09.09.2013)
- <http://flexikon.doccheck.com/de/Osteosynthese> (09.09.2013)
- <http://flexikon.doccheck.com/de/Knochen> (09.09.2013)
- http://www.hzg.de/public_relations/press_releases/034437/index_0034437.html.de
(17.10.2013)
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Dehnungsmessstreifen> (20.10.2013)
- <http://www.medicaexpo.de/prod/desoutter-medical/chirurgische-motorensysteme-kleine-knochenchirurgie-druckluftbetrieben-68192-420004.html> (05.11.2013)
- <http://www.medicaexpo.de/prod/desoutter-medical/chirurgische-motorensysteme-grosse-knochenchirurgie-elektrisch-akkubetrieben-68192-419980.html> (05.11.2013)
- http://www.medicaexpo.de/prod/desoutter-medical/chirurgische-motorensysteme-grosse-knochenchirurgie-elektrisch-akkubetrieben-68192-419980.html#product-item_419995
(05.11.2013)
- <http://www.cls-med.de/Osteosynthese/Osteosynthese-Instrumente/Standard-Osteosynthese-Instrumente/Gewebeschutzhuelse-und-Bohrlehre-fuer-2-5-mm-Bohrer-und-3-5-mm-Gewindeschneider::6837.html> (05.11.2013)
- <http://www.sphinx-tools.ch/picture/upload/file/Bohren-Reiben.pdf> (05.11.2013)
- <http://www.sphinx-tools.ch/medizintechnik.phtml> (05.11.2013)
- <http://www.sinuslift-safety.de/pages/de/sca-kit/instrumente.php> (05.11.2013)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Kraftaufnehmer> (21.11.2013)

<http://www.me-systeme.de/sensorik/kraftsensoren/kd-kraftsensor.html> (21.11.2013)

<http://www.ecef.eu/de/2011/10/produzione-di-una-punta-hss-da-trapano-per-rullatura/>
(22.11.2013)

<http://www.ecef.eu/de/2011/10/produzione-di-una-punta-da-trapano-per-fresatura-2/>
(22.11.2013)

<http://www.elearnforum.net/index.php?m1=m1420&c1=c14251&c2=c14252&c3=c14253&c4=c> (07.02.2014)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Schnellarbeitsstahl> (07.02.2014)

http://www.struers.com/default.asp?top_id=3&main_id=9&doc_id=181&target=_self&admin_language=4&collapse=1 (08.02.2014)

http://145.253.206.136/bosch/ew-wissen/content/themen/1500_fragen_und_antworten/bohren/bohrer/9/index_ger.html?preview=preview (14.02.2014)

Normen und Richtlinien

Stand **Dezember 2013**

DIN-EN-ISO-Normen:

DIN EN ISO 643 Stahl – Mikrophotographische Bestimmung der scheinbaren Korngröße (2003-03-00)

DIN EN ISO 6507 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers

Teil 1 Prüfverfahren (2006-03-00)

DIN EN ISO 18265 Metallische Werkstoffe – Umwertung von Härtewerten (2004-04-01)

9 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: IMPLANTATMATERIAL AUS BIOABBAUBAREM MAGNESIUM	9
ABBILDUNG 2: AUSSCHNITT DER TUBEROSITAS TIBIAE	10
ABBILDUNG 3: SCHRAUBENOSTEOSYNTHESE	10
ABBILDUNG 4: TIBIAKOPFFRAKTUR MIT PLATTENOSTEOSYNTHESE	11
ABBILDUNG 5: MARKNAGEL FÜR OBERSCHENKELFRAKTUREN	11
ABBILDUNG 6: BEWEGUNGEN BEIM BOHREN	12
ABBILDUNG 7: ALLGEMEINER SPIRALBOHRER	13
ABBILDUNG 8: WÄRMEERZEUGUNG BEIM BOHREN	14
ABBILDUNG 9: TEMPERATUR IN ABHÄNGIGKEIT DER EINWIRKZEIT	16
ABBILDUNG 10: SCHNITTKRAFT IN ABHÄNGIGKEIT DER SCHNITTGESCHWINDIGKEIT	18
ABBILDUNG 11: EINFLUSS DER SCHNITTGESCHWINDIGKEIT AUF DIE TEMPERATUR	19
ABBILDUNG 12: EINFLUSS DER VORSCHUBKRAFT AUF DIE TEMPERATUR	20
ABBILDUNG 13: NORMIERTE VERGLEICHZEIT IN ABHÄNGIGKEIT DER VORSCHUBKRAFT	20
ABBILDUNG 14: BOHRERWINKEL	21
ABBILDUNG 15: SCHNEIDEN AN SPIRALBOHRERN	21
ABBILDUNG 16: SPIRALBOHRERTYPEN	22
ABBILDUNG 17: SPITZENWINKEL IN ABHÄNGIGKEIT DES MATERIALS	22
ABBILDUNG 18: ANSCHLIFFFORMEN VON SPIRALBOHRERN	23
ABBILDUNG 19: HERSTELLUNG SPIRALBOHRER DURCH FRÄSEN	24
ABBILDUNG 20: HERSTELLUNG EINES SPIRALBOHRERS DURCH WALZUNG	25
ABBILDUNG 21: SPIRALBOHRER NACH WALZVORGANG	25
ABBILDUNG 22: MITTLERE HALTEFESTIGKEIT VON SCHRAUBEN	28
ABBILDUNG 23: VERSCHLEIßFESTIGKEIT UND ZÄHIGKEIT VON SCHNEIDSTOFFEN	28
ABBILDUNG 24: STANDBEGRIFFE	29
ABBILDUNG 25: VERSCHLEIßAUSWIRKUNGEN	32
ABBILDUNG 26: ELEKTRISCHE BOHRMASCHINE	34
ABBILDUNG 27: PNEUMATISCHE BOHRMASCHINE	35
ABBILDUNG 28: AKKUBOHRMASCHINE	35
ABBILDUNG 29: BOHRLEHRE	36
ABBILDUNG 30: KORTIKALISTIEFENMESSER	36
ABBILDUNG 31: CHIRURGISCHE PRÄZISIONSWERKZEUGE	37
ABBILDUNG 32: SPIRALBOHRER OHNE INNENKÜHLUNG	37
ABBILDUNG 33: HOCHLEISTUNGSBOHRER MIT VERSTÄRKTEM SCHAFT UND INNENKÜHLUNG	37
ABBILDUNG 34: KNOCHENBOHRER FA. BRASSELER, NEU	38
ABBILDUNG 35: KNOCHENBOHRER FA. SYNTHES, NEU	38
ABBILDUNG 36: BENENNUNG DER BOHRERSEGMENTE DER FA. SYNTHES	39
ABBILDUNG 37: SPITZENWINKEL KNOCHENBOHRER FA. BRASSELER	40

ABBILDUNG 38: SPITZENWINKEL KNOCHENBOHRER FA. SYNTHES	40
ABBILDUNG 39: HINTERSCHLIFF DER BOHRERSPITZE	41
ABBILDUNG 40: VORSCHUBKRAFT IN ABHÄNGIGKEIT DES SPITZENWINKELS	43
ABBILDUNG 41: POREN AM QUERSCHLIFF	45
ABBILDUNG 42: KUNSTKNOCHEN DER FA. SAWBONES	48
ABBILDUNG 43: SPANNVORRICHTUNG (BLAU), BOHRKOPF DER FSW (SCHWARZ), KRAFTMESSDOSE (GOLD)	49
ABBILDUNG 44: SPANNVORRICHTUNG MIT KRAFTMESSDOSE UND SPANNPRATZEN	50
ABBILDUNG 45: KRAFTSENSOR FA. ME-SYSTEME	50
ABBILDUNG 46: KRAFTSENSOR MIT DEHNMESSSTREIFEN	51
ABBILDUNG 47: DATENREKORDER DER FA. HBM	52
ABBILDUNG 48: DARSTELLUNG DES KRAFTVERLAUFES EINER BOHRUNG MIT DEM DATENREKORDE	53
ABBILDUNG 49: SPANNVORRICHTUNG (BLAU) MIT BOHRPOSITION (ROTE MARKIERUNG)	55
ABBILDUNG 50: DURCHGEHENDER SPAN	56
ABBILDUNG 51: BOHRMEHL	56
ABBILDUNG 52: STEREOLICHTMIKROSKOP	57
ABBILDUNG 53: BRASSELER_777252_NEU	58
ABBILDUNG 54: BRASSELER_777252_VERSCHLISSEN (NACH 12 BOHRUNGEN)	58
ABBILDUNG 55: SYNTHES_8099355_NEU	59
ABBILDUNG 56: SYNTHES_8099355_VERSCHLISSEN (NACH 15 BOHRUNGEN)	59
ABBILDUNG 57: LOT-NUMMER AUF SYNTHES BOHRER	60
ABBILDUNG 58: KUNSTKNOCHEN VERBRAUCHT	61
ABBILDUNG 59: NEUE GEOMETRIE AM BEISPIEL VON SYNTHES	62
ABBILDUNG 60: REM – AUFNAHME NEUE GEOMETRIE SYNTHES	63
ABBILDUNG 61: STUFEN ZUR HERSTELLUNG EINES METALLOGRAFISCHEN SCHLIFFS	64
ABBILDUNG 62: SCHEINGEFÜGE UND DEREN URSACHEN	67
ABBILDUNG 63: MATERIALIEN FÜR MIKROSPANENDE ABTRAGSVERFAHREN	71
ABBILDUNG 64: ZIELKRITERIEN VON SCHLIFFFLÄCHEN	73
ABBILDUNG 65: KONTRASTIERUNGSMETHODEN	73
ABBILDUNG 66: PROBENGRÖÖE FÜR PRÄPARATION (QUERSCHLIFF DURCH KNOCHENBOHRER)	75
ABBILDUNG 67: EINGEBETTETE BOHRERSPITZE	76
ABBILDUNG 68: PRÜFKRAFTBEREICHE BEI DER VICKERS-HÄRTEMESSUNG	76
ABBILDUNG 69: DIAMANT-EINDRINGKÖRPER BEI DER VICKERS-HÄRTEMESSUNG	77
ABBILDUNG 70: HÄRTESYMBOLE UND DAZUGEHÖRIGE PRÜFKRÄFTE	78
ABBILDUNG 71: MESSBEREICHE FÜR DIE MIKROHÄRTEPRÜFUNG NACH VICKERS AM QUERSCHLIFF	80
ABBILDUNG 72: MIKROHÄRTEPRÜFUNG NACH VICKERS AM BEISPIEL VON BRASSELER_NR.3_KERN	80
ABBILDUNG 73: HÄRTE IN ABHÄNGIGKEIT DER ANLASSTEMPERATUR 12%IGER CR-STÄHLE	81
ABBILDUNG 74: UNTERSUCHTE STELLEN AM KNOCHENBOHRER IM REM	82
ABBILDUNG 75: VERSCHLISSENER BOHRER SYNTHES_8040081_NR. 2_22 BOHRUNGEN	92
ABBILDUNG 76: VERSCHLISSENER BOHRER BRASSELER_777252_NR. 2_10 BOHRUNGEN	92

ABBILDUNG 77: ABRUNDUNG DER HAUPT- UND QUERSCHNEIDE	93
ABBILDUNG 78: BOHRER DER FA. SYNTHES	93
ABBILDUNG 79: REM AUFNAHME SYNTHES_8040081_NR. 2_22 BOHRUNGEN – VERSCHLEIßERSCHNUNG AN DER HAUPTSCHNEIDE	94
ABBILDUNG 80: REM AUFNAHME BRASSELER_777252_NR. 2_10 BOHRUNGEN – VERSCHLEIßERSCHNUNG AN DER HAUPTSCHNEIDE	95
ABBILDUNG 81: POSITIONEN DER REM AUFNAHMEN (MIT SEKUNDÄRELEKTRONENDETEKTOR) / SYNTHES NEU	96
ABBILDUNG 82: POSITIONEN DER REM AUFNAHMEN (MIT SEKUNDÄRELEKTRONENDETEKTOR) / BRASSELER NEU	97
ABBILDUNG 83: REM AUFNAHME SYNTHES NEU (POSITION 1)	97
ABBILDUNG 84: REM AUFNAHME BRASSELER NEU (POSITION 1)	98
ABBILDUNG 85: VERSCHLEIß NACH 14 BOHRUNGEN IN SCHWEINEKNOCHEN (SYNTHES)	100
ABBILDUNG 86: VERSCHLEIß NACH 33 BOHRUNGEN IN SCHWEINEKNOCHEN (SYNTHES)	100
ABBILDUNG 87: VERSCHLEIßERSCHNUNGEN BEI BOHRUNGEN IM KUNST-, SCHWEINE-, UND MENSCHENKNOCHEN BEI 20 BOHRUNGEN MIT JE 50 N VORSCHUBKRAFT	101
ABBILDUNG 88: EPMA ANALYSE DER KARBIDE – BRASSELER BOHRER (BSE/CR/FE)	104
ABBILDUNG 89: GEBROCHENE KARBIDE, BRASSELER 777252 BOHRER NR. 5	105
ABBILDUNG 90: GEBROCHENE KARBIDE, SYNTHES 8099355 BOHRER NR. 2	105
ABBILDUNG 91: GEBROCHENE KARBIDE, BRASSELER 777252 NEU	105
ABBILDUNG 92: GEBROCHENE KARBIDE, SYNTHES 8040081 NEU	105
ABBILDUNG 93: BRASSELER 777252 BOHRER NR. 5 VILELLA (RAND)	106
ABBILDUNG 94: SYNTHES 8040081 BOHRER NR. 3 VILELLA (RAND)	107
ABBILDUNG 95: KARBIDE, BLAU EINGEFÄRBT (BRASSELER)	108
ABBILDUNG 96: GENORMTE BILDREIHENTAFEL 10.0 AUS ASTM E 112 (BSP.: QUERSCHLIFF SYNTHES NEU)	110
ABBILDUNG 97: GEFÜGE OHNE BILDREIHENTAFEL 10.0 (BSP.: QUERSCHLIFF SYNTHES NEU)	110
ABBILDUNG 98: BRASSELER 777252 NR. 3 V2A BEIZE 10-15 S ÄTZZEIT	112
ABBILDUNG 99: SYNTHES 8040081 NR. 4 V2A BEIZE 10-15 S ÄTZZEIT	112

10 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1.1: GRUPPEN DER SCHNELLARBEITSSTÄHLE	26
TABELLE 2.1: GEOMETRISCHE ABMESSUNGEN BEIDER BOHRERTYPEN	39
TABELLE 2.2: CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG WERKSTOFF SYNTHES (440A)	42
TABELLE 2.3: CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG WERKSTOFF BRASSELER (440B)	42
TABELLE 3.1: VORSCHUB IN ABHÄNGIGKEIT DER ZEIT	54
TABELLE 3.2: VERGLEICH NEUE GEOMETRIE MIT ORIGINALSCHLIFF	62
TABELLE 4.1: SCHLEIFVORGANG FÜR DIE METALLOGRAFISCHE UNTERSUCHUNG DER BOHRERWERKSTOFFE	74
TABELLE 4.2: ZUSAMMENSETZUNG DER ÄTZMITTEL VILELLA UND V2A-BEIZE	75
TABELLE 4.3: HÄRTEMESSUNG NACH VICKERS AN QUERSCHLIFFEN SYNTHES UND BRASSELER	79
TABELLE 5.1: VERLAUF DER DURCHSCHNITTLICHEN BOHRKRAFT DER 1., 5. UND 10. BOHRUNG VON SYNTHES UND BRASSELER	83
TABELLE 5.2: VERGLEICH DER DURCHSCHNITTLICHEN BOHRKRAFT DER ERSTEN ZEHN BOHRUNGEN VON SYNTHES (LOT 8040081, 8099355) UND BRASSELER (LOT 777252) (ORIGINALGEOMETRIE)	84
TABELLE 5.3: VERGLEICH DER DURCHSCHNITTLICHEN BOHRKRAFT DER ERSTEN ZEHN BOHRUNGEN VON SYNTHES LOT 8040081 UND 8099355	86
TABELLE 5.4: VERGLEICH DER DURCHSCHNITTLICHEN BOHRKRAFT DER ERSTEN ZEHN BOHRUNGEN VON SYNTHES ORIGINAL (1A) UND SYNTHES NEUE GEOMETRIE (NEUA)	87
TABELLE 5.5: VERGLEICH DER DURCHSCHNITTLICHEN BOHRKRAFT DER ERSTEN ZEHN BOHRUNGEN VON BRASSELER ORIGINAL (1B) UND BRASSELER NEUE GEOMETRIE (NEUB)	88
TABELLE 5.6: VERGLEICH DER DURCHSCHNITTLICHEN BOHRKRAFT DER ERSTEN ZEHN BOHRUNGEN VON SYNTHES NEU (NEUA) UND BRASSELER NEU (NEUB)	90
TABELLE 6.1: VERGLEICH ORIGINALE UND EIGENE GEOMETRIEN DER BOHRERSPITZEN 440A UND 440B	113
TABELLE 6.2: METALLOGRAFISCHE ANALYSE	114

11 Diagrammverzeichnis

DIAGRAMM 5.1: BOHRKRAFTVERLAUF DER 1., 5. UND 10. BOHRUNG VON SYNTHES UND BRASSELER	84
DIAGRAMM 5.2: BOHRKRAFTVERLAUF VON SYNTHES (1A) UND BRASSELER (1B)	85
DIAGRAMM 5.3: BOHRKRAFTVERLAUF VON SYNTHES LOT 8040081 UND 8099355	86
DIAGRAMM 5.4: BOHRKRAFTVERLAUF DER ORIGINALGEOMETRIE SYNTHES (1A) UND DER NEUEN GEOMETRIE SYNTHES (NEUA)	87
DIAGRAMM 5.5: BOHRKRAFTVERLAUF DER ORIGINALGEOMETRIE BRASSELER (1B) UND DER NEUEN GEOMETRIE BRASSELER (NEUB)	89
DIAGRAMM 5.6: BOHRKRAFTVERLAUF DER NEUEN GEOMETRIE VON SYNTHES (NEUA) UND BRASSELER (NEUB)	90

12 Abkürzungsverzeichnis

AISI	American Iron and Steel Institute
DMS	Dehnungsmessstreifen
d	arithmetischer Mittelwert der Diagonalenlängen d_1 und d_2 [mm]
EPMA	Electron Probe Micro Analysis/Elektronenstrahlmikroanalyse
FSW	Friction Stir Welding
G	Kennzahl der genormten Bildreihentafel
g	Vergrößerung (von 100 abweichend)
HM	Hartmetall
HRC	Härte nach Rockwell
HSS	High Speed Steel/Schnellarbeitsstahl
HV	Härte Vickers
ISO	International Organization for Standardization
KB	Kolkbreite
KL	Kolklippenbreite
KM	Kolkmittenabstand
Kp	Kilopond (9,81 N)
KT	Kolktiefe
k.A.	keine Angabe
LOT	Chargennummer
M	Drehmoment [mkp]
M _B	Nummer der Bildtafel
N	Newton
n	Umdrehungszahl [U/min]
P	Vorschubkraft [Kp]
REM	Rasterelektronenmikroskop

SS	Stainless Steel
s	Vorschub [mm/U]
WDX	Wavelength-dispersive X-ray spectroscopy/wellenlängendispersive Röntgenspektroskopie
α	Freiwinkel
α_H	Winkel zwischen den Flächen des Eindringkörpers
β	Keilwinkel
γ	Spanwinkel
γ_f	Seitenspanwinkel/Drallwinkel
φ, σ	Spitzenwinkel

Chemische Bezeichnungen

Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
C	Kohlenstoff
Cr	Chrom
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
P	Phosphor
S	Schwefel
Si	Silizium
SiC	Siliziumcarbid
TiN	Titannitrid
V	Vanadium

Medizinische Begriffe

Epithel	Gewebe der inneren und äußeren Oberflächen des Körpers
Hydroxylgruppe	aus Sauerstoff- und Wasserstoff-Atom bestehende Gruppe

Infektion	Übertragung von Krankheitserregern
intraoperativ	während der Operation
Kortikalis	äußere Knochenschicht
Nekrose	Absterben einer Zelle
Osteoporose	Knochenschwund
Osteosynthese	operatives Verfahren zur Wiederherstellung von Knochenbrüchen
Thrombose	Blutgerinnselbildung
Tibiakopffraktur	Schienbeinkopfbruch
transepithelial	durch das Epithel
Tuberositas tibiae	Schienbeinplateau

13 Anhang

Tabelle mit allen gemessenen Bohrkräften

Firma	Bohrer (Nr.)	Bohrung	Fmax _{ges}	Kortikalis	
			N	obere N	untere N
Synthes_8040081	1	1	37,6527	32,2060	37,6527
	1	2	42,1994	41,8461	42,1994
	1	3	46,6127	45,0527	46,6127
	1	4	48,7393	47,9593	48,7393
	1	5	50,9926	50,9926	50,2793
	1	6	54,4127	53,5261	54,4127
	1	7	55,9793	54,9460	55,9793
	1	8	57,7994	57,7994	57,7259
	1	9	60,4993	60,4993	59,1993
	1	10	58,8327	58,8327	58,1327
	1	11	62,9660	62,9660	57,8327
	1	12	63,1460	63,1460	60,6061
	1	13	63,6923	63,6923	61,0323
	1	14	64,4190	64,4190	61,9856
	1	15	65,2590	65,2590	63,5456
	1	16	66,7323	66,7323	64,2590
	1	17	67,8323	67,8323	65,8990
	1	18	70,6123	70,6123	65,6256
	1	19	68,5922	68,5922	65,6923
	1	20	69,3323	69,3323	65,2123
	1	21	70,6990	70,6990	67,8522
	1	22	72,9123	72,9123	70,7057
	1	23	75,7256	75,7256	72,7323
	1	24	74,5989	74,5989	70,4189
	1	25	75,1256	75,1256	72,3456
	1	26	75,0190	75,0190	73,6123
	1	27	76,2257	76,2257	73,5789
	1	28	77,9056	77,9056	75,2456
	1	29	77,3057	77,3057	74,6924
	1	30	77,4189	77,4189	74,4856
Synthes_8040081	2	1	39,0124	34,6991	39,0124
	2	2	46,2698	46,2698	45,0497
	2	3	48,5164	48,5164	45,9898
	2	4	52,0830	52,0830	48,3565
	2	5	51,2549	51,2549	49,3683
	2	6	56,6416	56,6416	52,4616
	2	7	57,3883	57,3883	52,9882
	2	8	57,9334	57,9334	56,2467
	2	9	59,0800	59,0800	56,4201
	2	10	59,8467	59,8467	57,9201
	2	11	64,2373	64,2373	59,9306
	2	12	66,1440	66,1440	64,1173
	2	13	71,3133	71,3133	67,0999
	2	14	71,5133	71,5133	67,6199
	2	15	71,0000	71,0000	66,1866
	2	16	71,3344	71,3344	69,1676
	2	17	71,5210	71,5210	69,8943
	2	18	74,7076	74,7076	70,7211
	2	19	73,2944	73,2944	70,6544

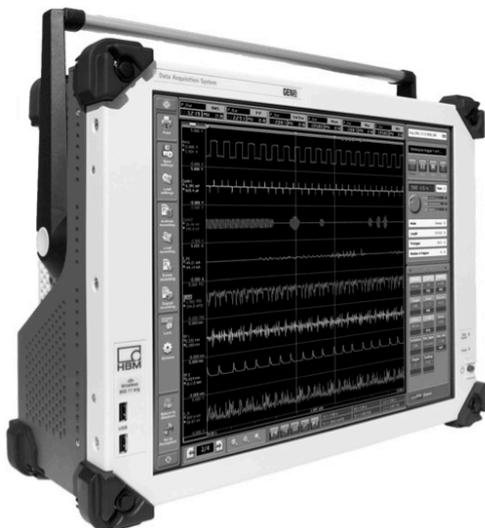
Firma	Bohrer (Nr.)	Bohrung	Fmax _{ges}	Kortikalis	
			N	obere	untere
			N	N	N
Synthes_8040081	2	20	73,6832	73,6832	71,6632
	2	21	75,2765	75,2765	73,3898
	2	22	82,0563	82,0563	77,6030
Synthes_8040081	3	1	39,1644	34,3377	39,1644
	3	2	44,4977	44,2311	44,4977
	3	3	48,2577	48,2577	47,4911
	3	4	52,0243	52,0243	50,7110
	3	5	52,9643	52,9643	52,4044
	3	6	55,8377	55,8377	55,4377
	3	7	56,8044	56,8044	56,1243
	3	8	58,5244	58,5244	57,5910
	3	9	59,7643	59,7643	58,5109
	3	10	61,4844	61,4844	59,8044
	3	11	63,2377	63,2377	61,5843
	3	12	65,3674	65,3674	63,7073
	3	13	65,8140	65,8140	63,6207
	3	14	67,9607	67,9607	65,9273
	3	15	68,7474	68,7474	66,1073
Synthes_8040081	4	1	38,9074	34,7940	38,9074
	4	2	44,0208	44,0208	43,7006
	4	3	45,8874	45,3007	45,8874
	4	4	50,8674	50,8674	48,9073
	4	5	54,0208	54,0208	50,9206
	4	6	54,8873	54,8873	51,9473
	4	7	57,6740	57,6740	54,3674
	4	8	61,5273	61,5273	59,8673
	4	9	61,4540	61,4540	61,0674
	4	10	64,3442	64,3442	62,6376
	4	11	63,6710	63,6710	62,0709
	4	12	64,4042	64,4042	62,6176
	4	13	64,4510	64,4510	61,6110
	4	14	64,9776	64,9776	62,8043
	4	15	66,5309	66,5309	63,4576
Synthes_8099355	1	1	34,5043	30,8043	34,5043
	1	2	39,4377	39,1509	39,4377
	1	3	41,1776	40,4376	41,1776
	1	4	44,7243	44,7243	44,1777
	1	5	46,5776	46,2509	46,5776
	1	6	49,8709	49,8709	47,5443
	1	7	51,0709	51,0709	49,3176
	1	8	52,3909	52,3909	51,1176
	1	9	54,3642	54,3642	52,9776
	1	10	55,3376	55,3376	53,6776
	1	11	56,8443	56,8443	54,9910
	1	12	59,9709	59,9709	57,2043
	1	13	60,3867	60,3867	58,8800
	1	14	62,0067	62,0067	59,3534
	1	15	62,0867	62,0867	59,7067

Firma	Bohrer (Nr.)	Bohrung	Fmax _{ges}	Kortikalis	
			N	obere N	untere N
Synthes_8099355	2	1	37,1232	32,6299	37,1232
	2	2	41,5632	41,5632	40,6566
	2	3	45,4165	45,4165	44,5632
	2	4	47,3433	47,3433	47,1632
	2	5	50,6498	50,6498	49,1364
	2	6	50,4699	50,4233	50,4699
	2	7	51,8765	51,8765	51,4633
	2	8	53,2565	53,2565	52,3432
	2	9	54,5432	54,5432	53,4566
	2	10	56,5233	56,5233	54,2698
	2	11	57,9698	57,9698	56,6965
	2	12	59,5831	59,5831	57,4233
	2	13	59,5566	59,5566	58,8365
	2	14	61,8031	61,8031	59,9966
	2	15	62,1032	62,1032	60,0499
Synthes_8099355	3	1	35,2499	30,6499	35,2499
	3	2	40,1098	39,6432	40,1098
	3	3	45,0231	45,0231	43,8965
	3	4	47,0957	47,0957	45,5491
	3	5	53,8223	53,8223	50,8290
	3	6	51,2490	51,2490	49,7623
	3	7	54,3157	54,3157	52,8356
	3	8	55,8490	55,8490	53,9557
	3	9	58,7890	58,7890	55,8889
	3	10	62,2024	62,2024	58,5357
	3	11	61,6224	61,6224	58,5290
	3	12	59,9690	59,9690	58,3157
	3	13	58,2956	57,7356	58,2956
	3	14	61,6157	61,6157	59,0623
	3	15	62,9756	62,9756	60,2490
Synthes_8099355	4	1	35,8583	31,8915	35,8583
	4	2	39,3649	39,1316	39,3649
	4	3	42,4982	42,4982	42,2182
	4	4	46,0849	46,0849	44,4382
	4	5	48,7182	48,7182	46,8249
	4	6	49,6382	49,6382	49,0915
	4	7	51,3249	51,3249	49,1381
	4	8	53,0649	53,0649	50,9716
	4	9	55,0181	55,0181	52,3582
	4	10	56,4983	56,4983	53,0782
	4	11	58,0782	58,0782	55,1515
	4	12	60,5315	60,5315	57,6715
	4	13	61,4316	61,4316	58,0315
	4	14	61,3982	61,3982	58,0916
	4	15	65,2182	65,2182	61,2715
Brasseler_777252	1	1	56,1243	51,7121	56,1243
	1	2	65,6589	65,6589	64,4189
	1	3	72,7722	72,7722	69,0523

Firma	Bohrer (Nr.)	Bohrung	Fmax _{ges}	Kortikalis		
			N	obere N	untere N	
Brasseler_777252	1	4	75,2017	75,2017	70,1817	
	1	5	77,2484	77,2484	73,9283	
	1	6	81,7618	81,7618	77,3151	
	1	7	80,2084	80,2084	77,0684	
	1	8	83,6818	83,6818	81,0018	
	1	9	87,3817	87,3817	81,9151	
	1	10	87,6951	87,6951	82,9150	
	1	11	88,3684	88,3684	84,4218	
	1	12	90,3418	90,3418	84,5017	
	1	13	92,0351	92,0351	87,0218	
	Brasseler_777252	2	1	54,8951	48,1551	54,8951
		2	2	62,3818	62,3818	61,1617
		2	3	68,4272	68,4272	65,7871
2		4	71,3671	71,3671	70,0271	
2		5	77,1804	77,1804	74,9205	
2		6	79,9605	79,9605	77,1672	
2		7	82,1271	82,1271	78,5605	
2		8	84,9872	84,9872	80,8737	
2		9	90,1471	90,1471	84,3138	
2		10	89,6938	89,6938	84,2005	
Brasseler_777252	3	1	54,5738	47,3738	54,5738	
	3	2	60,3005	60,3005	58,8537	
	3	3	65,2605	65,2605	62,4072	
	3	4	68,8671	68,8671	66,9804	
	3	5	76,7871	76,7871	72,1605	
	3	6	79,5805	79,5805	74,2539	
	3	7	77,6472	77,6472	74,5005	
	3	8	81,2339	81,2339	77,8671	
	3	9	83,5577	83,5577	79,5644	
	3	10	86,0311	86,0311	81,5577	
	3	11	91,4243	91,4243	83,6577	
	3	12	92,0643	92,0643	88,1044	
Brasseler_777252	4	1	53,4240	49,3640	53,4240	
	4	2	61,5707	61,5707	58,9440	
	4	3	66,6440	66,6440	63,0040	
	4	4	69,2973	69,2973	66,2240	
	4	5	71,8840	71,8840	68,2840	
	4	6	74,1773	74,1773	69,6907	
	4	7	77,2840	77,2840	73,7107	
	4	8	79,6174	79,6174	74,8906	
	4	9	81,9506	81,9506	78,8440	
	4	10	87,3774	87,3774	80,0840	
	4	11	87,0976	87,0976	81,8708	
	4	12	88,7908	88,7908	84,1242	
	4	13	93,1575	93,1575	85,6508	
Brasseler_777252	5	1	51,9308	47,5375	51,9308	
	5	2	60,9242	60,9242	58,3909	
	5	3	64,3976	64,3976	61,4041	

Firma	Bohrer (Nr.)	Bohrung	Fmax _{ges}	Kortikalis	
				obere	untere
				N	N
Brasseler_777252	5	4	68,7709	68,7709	64,9241
	5	5	70,8042	70,8042	66,1243
	5	6	73,4375	73,4375	70,8775
	5	7	79,6309	79,6309	73,7842
	5	8	79,2508	79,2508	72,2976
	5	9	78,7976	78,7976	73,9709
	5	10	85,2442	85,2442	78,5842
	5	11	89,8709	89,8709	84,7842
	5	12	92,5731	92,5731	86,9798
	5	13	93,1931	93,1931	85,8131
	5	14	95,6198	95,6198	87,0065
Brasseler_777252	6	1	52,5732	47,2198	52,5732
	6	2	62,7665	62,7665	60,7731
	6	3	67,9265	67,9265	66,3665
	6	4	71,2398	71,2398	67,9265
	6	5	74,1331	74,1331	69,7664
	6	6	76,7798	76,7798	71,3198
	6	7	78,2732	78,2732	73,7598
	6	8	79,8798	79,8798	75,4264
	6	9	80,1332	80,1332	76,5865
	6	10	84,9932	84,9932	79,0465
	6	11	84,8598	84,8598	81,2398
	6	12	83,7866	83,7866	80,9332
Synthes_8040081	neue Geometrie	1	60,2902	45,2902	60,2902
		2	75,7740	66,9141	75,7740
		3	87,8140	82,0341	87,8140
		4	95,0001	89,3001	95,0001
		5	98,8734	92,7200	98,8734
		6	101,8334	97,2534	101,8334
		7	104,9102	96,7168	104,9102
		8	112,0102	111,3702	112,0102
		9	113,7702	112,0368	113,7702
		10	118,1701	115,6235	118,1701
		11	121,4702	119,5369	121,4702
		12	123,1435	119,1635	123,1435
		13	126,7368	123,9102	126,7368
		14	128,4302	125,5369	128,4302
		15	129,9835	124,7768	129,9835
		16	130,9768	124,3368	130,9768
		17	136,8236	134,4435	136,8236
		18	140,5835	137,9235	140,5835
		19	140,5168	130,9701	140,5168
		20	142,6836	140,4968	142,6836

Datenblatt des Datenrekorders



GEN2i

Portable Data Recorder

Data sheet

Features and Benefits

- PC integrated GEN DAQ mainframe
- Robust and portable
- Two slots for acquisition cards
- Accepts any GEN DAQ acquisition cards - also in mixed configuration
- Up to 16 channels
- 20 MB/s continuous streaming rate
- Unique "one-touch" operation using high-res touchscreen
- Windows 7 operating system
- Perception software with Windows based user interface for advanced review and analysis
- Full PC connectivity

GEN2i

The GEN2i is a versatile portable data recorder. In addition it provides all the features you would expect from a transient recorder. The hardware combines a full-featured, low-power, Windows® PC with a large, high-resolution, touch screen and a robust 2-slot acquisition unit. This unit is based on the proven GEN DAQ series data acquisition systems.

Designed for operation in the field as well as in the laboratory the GEN2i features a unique, Instrument Panel touch interface, with one-touch access to all features for daily operation. In addition the GEN2i includes basic Perception on-board for post-processing. With a single touch you can turn your data recorder into a dedicated instrument for analysis and sophisticated reporting.

PC		
Component	Unit Description	Unit Value
Memory	DDR2 RAM	4 GB
PC Board	AMD based Low Power	AMD M690T
Processor	AMD Turion™ 64 Dual core TL-62	2.1 GHz
Ethernet	Copper RJ45 Ethernet Connection	1 Gbit/s
Wireless LAN	Embedded 801.11b/g	54 Mbit/s
USB Connectors	USB 2.0	6 on back + 2 on front
Internal Storage	MLC Solid State Drive	256 GB*
	Data streaming to drive	≈ 20 MB/s direct 16 Channels x 500 kS/s @ 16 bits
Display	TFT SXGA Touch Screen	17" / 1280x1024 resolution
Video connection	DVI and VGA	1x DVI, 1x VGA
Multiple Monitors Support	Clone Mode and Extended Mode	
Speaker	Internal speaker	1
Line Out	Jack plug 3.5 mm	1
Microphone	Jack plug 3.5 mm	1
Accessories	Keyboard / Mouse	1 / 1

*Available space for data is approx. 200 GB

Software		
Component	Unit Description	Unit Value
Operating system	Microsoft® Windows™ 7	
GEN series firmware	Includes High Speed Streaming option, enabling direct-to-disk acquisitions	Up to 20 MB/s (aggregate data transfer rate)
DAQ software	Perception standard package, 6.10 or higher	Refer to Perception specification sheet for details
Instrument panel Touch Interface (Fully touch-optimized)	Setup of instrument Acquisition control Display Data: Live / Review Basic Measurements Export + Archiving Basic Reporting	

Power		
Component	Unit Description	Unit Value
Power Inlet	Primary Power Inlet	47-63 Hz, 100-240 Vac
Power	Total Power of unit (maximum)	250 VA

Hardware		
Component	Unit Description	Unit Value
Backplane	Acquisition slots – See also Acquisition boards	2
Optional Interfaces	IRIG	1x Optional interface only
	IRIG/GPS timing	
	SCSI (Perception only storage)	
I/O	Alarm out	TTL, Level active
	Trigger in	TTL, 50 ns resolution, minimum pulse width 500 ns (Max non destructive voltage: 30 V)
	Trigger out/Recording out	TTL, edge active, pulse width 10 µs/recording duration (software selectable)

Hardware			
Component	Unit Description	Unit Value	
	Timebase in	TTL	
	Timebase	Accuracy	< 30 ppm for internal sources
		Base	Binary, decimal
		External	Up to 500 kS/s or 1MS/s depending on input module (5 MS/s as special); programmable divider per module

Physical/Environmental		
Component	Unit Description	Unit Value
Weight	GEN2i Mainframe (exc. acquisition boards)	9.5 kg (add ≈ 1 kg per acq board) (20.9 lbs (add ≈ 2.2 lbs per acq board))
Dimensions	Height/Height with handle	34.2 cm/39.2 cm (13.5"/15.4")
	Width	43.6 cm (18.2")
	Depth	18.6 cm (7.3")

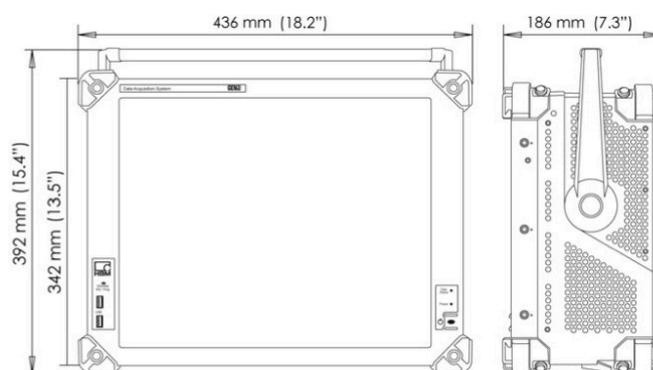


Figure 1.1: Dimensions GEN2i (With and without handle)

Physical/Environmental		
Component	Unit Description	Unit Value
Shipping Carton Weight (Gross)	GEN2i + shipping container	18.2 kg (40.1 lbs)
Shipping Carton dimensions	Height	59.0 cm (23.2")
	Width	49.7 cm (19.6")
	Depth	55.6 cm (21.9")
Shipping Case	With wheels and a handle, tested according to ASTM D4169-04 Level 1 (drop), and ASTM D4728 E (Vibration and shock)	1x Optional
Shock According to IEC-68-2-27	Operational	10 g @ 11 ms half sine
	Non-Operational	25 g @ 6 ms half sine
Vibration According to IEC-60068-2-34	Operational	1 g rms
	Non-Operational	2 g rms
Temperature range	Operating	0 °C to +40 °C (+32 °F to +104 °F)
	Storage	-20 °C to +60 °C (-4 °F to +140 °F)
Humidity	Relative humidity (non-condensing)	0 % to 80 %
Altitude	Operational altitude (maximum)	2000 m (6100 ft)
Acoustic Noise	The total A-weighted SPL of the GEN2i	60 dBA @ 0.6 m maximum

Physical/Environmental		
Component	Unit Description	Unit Value
Temperature Sensors	Temperature for monitoring and Air Flow Control	Multiple
Cooling Fans	Provides Air Flow	2
Handle	Carrying handle, also used for higher tilt angles	1 adjustable
Tilting Feet	Retractable feet for small tilt angles	2
Grounding	Banana plug	1
Casing	Aluminum/plastic cover	
Accessories	Soft carry case with strap for transportation included with hardened front and back for protection, and storage pouches for mouse and keyboard	1
Rack Mount Kit	19 inch rack mount kit	1 optional

Acquisition Boards						
Model	Input type	Isolation	Sample rate (Max)	Resolution	Memory	No. of Channels
Basic200	Single Ended	no	200 kS/s	16 bit	64 MS	8
Basic200 XT iso	Unbalanced Diff	yes	200 kS/s	16 bit	64 MS	8
Basic1M	Single Ended	no	1 MS/s	16 bit	128 MS	8
Basic1M iso	Unbalanced Diff	yes	1 MS/s	16 bit	256 MS	8
Basic1M XT iso	Unbalanced Diff	yes	1 MS/s	16 bit	256 MS	8
Bridge200 iso	Bridge/Diff	yes	200 kS/s	16 bit	64 MS	4
Bridge1M iso	Bridge/Diff	yes	1 MS/s	16 bit	256 MS	4
Uni200 iso	Diff/ICP/Shunt	yes	200 kS/s	16 bit	64 MS	4
Uni1M iso	Diff/ICP/Shunt	yes	1 MS/s	16 bit	256 MS	4
HiSpeed 25M	SE/Diff	no	25 MS/s	15 bit	64 MS	4
HiSpeed 100M	SE/Diff	no	100 MS/s	14 bit	900 MS	4
IsoDig MV	Unbalanced Diff	yes	25/100 MS/s	14/15 bit	100-900 MS	1t / 4r*
IsoDig HV	Unbalanced Diff	yes	25/100 MS/s	14/15 bit	100-900 MS	1t / 4r*
Marker1M	Binary	no	1 MS/s	1 bit	512 MB	64
Marker1M HV	Binary	yes/no	1 MS/s	1 bit	512 MB	8 / 32

*1t = 1 per transmitter board, 4r = 4 per receiver board

© Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. All rights reserved.
All details describe our products in general form only.
They are not to be understood as express warranty and do not constitute any liability whatsoever.

© Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
Im Tiefen See 45 · 64293 Darmstadt · Germany
Tel. +49 6151 803-0 · Fax: +49 6151 803-9100
E-mail: info@hbm.com · www.hbm.com

measure and predict with confidence



Werkstoffdatenblatt Brasseler:

**Werkstoffdatenblatt/ Material data sheet**

DBWS-003-5

Allgemeines/ General

Bezeichnung: Title:	1.4112
Gruppe: Group:	Rost- und säurebeständiger Stahl Stainless and acid proof steel
Werkstoff-Nr. DIN EN 10027-2: Material no. DIN EN 10027-2:	1.4112
Werkstoff-Kurzname DIN EN 10027-1: Material short cut DIN EN 10027-2:	X90CrMoV18
Anwendungszweck: Range of application:	Medizinische Instrumente Medical instruments

Anwendbare Normen und Spezifikationen/ Applicable standards and specifications

Werkstoffreferenzen: Material references:	EN 10088-1 Nichtrostende Stähle - Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle Stainless steels - Part 1: List of stainless steels
	EN 10088-3 Nichtrostende Stähle - Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung Stainless steels - Part 3: Technical delivery conditions for semi-finished products, bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for general purposes
Anwendung: Application:	ISO 7153-1 Chirurgische Instrumente; Metallische Werkstoffe - Teil 1: Nichtrostender Stahl (siehe Referenzbuchstabe R) Surgical instruments; metallic materials - Part 1: Stainless steel (see reference letter R)
Biokompatibilität: Biocompatibility:	DIN EN ISO 10993-1 Biologische Beurteilung von Medizinprodukten - Teil 1: Beurteilung und Prüfungen Biological evaluation of medical devices - Part 1: Evaluation and testing
	Die Anforderungen zur Biokompatibilität gemäß DIN EN ISO 10993-1 werden erfüllt. The requirements for biocompatibility in accordance with DIN EN ISO 10993-1 are fulfilled.

Chemische Zusammensetzung/ Chemical composition [%]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	V	W	Cu	Co
min	0,85					17,00	0,90			0,07			
max	0,95	1,00	1,00	0,040	0,030	19,00	1,30			0,12			

Mechanische Eigenschaften/ Mechanical properties

Härte/ Hardness	HV	HB	HRC
min	590	561	54,7
max	630	599	56,8

Datum/ Date	10.02.2009	Datum/ Date	11.02.2009
Erstellt/ Prepared	T. Rawe	Freigegeben/ Released	F. Idel

Ergebnisse der EPMA Auswertungen der Karbide für Brasseler und Synthes Bohrer (Deditius 2011):

Mass percent									Atomic ratio								Counting error(%) of X-ray intensities							Comment	Company	Metal to Carbon
C	Cr	Mo	Fe	Si	Mn	V	Total		C	Cr	Mo	Fe	Si	Mn	V	Total	C	Cr	Mo	Fe	Si	Mn	V			
6,77	51,62	4,49	38,03	bl.	0,36	0,35	101,62		24,54	43,20	2,04	29,64	0,00	0,29	0,30	100,00	1,0	0,4	2,2	0,5	100,0	5,6	6,91	Carb_12groß	Brasserler	3,1
1,61	18,38	1,06	78,87	0,19	0,43	0,11	100,65		6,95	18,34	0,57	73,27	0,36	0,40	0,11	100,00	2,3	0,7	5,6	0,3	8,3	5,6	16,57	Matrix_6	Brasserler	
5,12	52,24	4,05	38,70	0,01	0,35	0,31	100,78		19,56	46,11	1,94	31,81	0,01	0,29	0,28	100,00	1,1	0,4	2,3	0,4	92,4	5,7	7,64	Carb_8	Brasserler	4,1
6,30	51,50	3,75	38,47	bl.	0,42	0,36	100,80		23,22	43,88	1,73	30,51	0,00	0,34	0,31	100,00	1,0	0,4	2,4	0,4	100,0	5,1	6,77	Carb_11groß	Brasserler	3,3
4,89	51,59	3,33	38,50	bl.	0,35	0,33	99,00		19,07	46,44	1,63	32,26	0,00	0,30	0,31	100,00	1,2	0,4	2,6	0,4	100,0	5,6	6,93	Carb_1	Brasserler	4,2
0,69	13,97	0,66	83,65	0,26	0,45	0,05	99,73		3,12	14,52	0,37	80,99	0,50	0,44	0,05	100,00	3,9	0,8	8,2	0,3	6,3	5,3	37,09	Matrix_2	Brasserler	
5,05	51,61	3,42	39,02	0,01	0,37	0,34	99,82		19,44	45,94	1,65	32,34	0,02	0,31	0,31	100,00	1,1	0,4	2,6	0,4	81,9	5,5	6,99	Carb_7	Brasserler	4,1
0,69	15,81	0,87	82,40	0,21	0,41	0,06	100,45		3,06	16,33	0,49	79,25	0,40	0,40	0,07	100,00	3,9	0,7	6,6	0,3	7,8	5,9	26,49	Matrix_1	Brasserler	
5,04	51,68	4,06	38,43	0,01	0,35	0,43	100,00		19,44	46,02	1,96	31,87	0,02	0,29	0,39	100,00	1,2	0,4	2,3	0,4	58,5	5,9	5,74	Carb_6	Brasserler	4,1
5,16	51,77	3,53	38,79	bl.	0,39	0,34	99,98		19,80	45,87	1,70	32,00	0,00	0,33	0,31	100,00	1,1	0,4	2,5	0,4	100,0	5,2	7,22	Carb_10	Brasserler	4,0
5,15	50,48	3,21	38,64	0,02	0,41	0,36	98,27		20,04	45,36	1,56	32,33	0,04	0,35	0,33	100,00	1,1	0,4	2,6	0,4	37,9	5,1	6,73	Carb_9	Brasserler	4,0
1,23	13,90	0,70	84,39	0,29	0,44	0,06	101,01		5,39	14,01	0,38	79,21	0,54	0,42	0,07	100,00	2,7	0,8	7,7	0,3	6,1	5,4	26,11	Matrix_5	Brasserler	
0,89	13,09	0,60	85,57	0,28	0,42	0,05	100,90		3,94	13,37	0,33	81,37	0,54	0,40	0,05	100,00	3,3	0,8	8,7	0,3	6,3	5,6	33,11	Matrix_3	Brasserler	
0,94	10,75	0,51	86,82	0,31	0,36	0,05	99,74		4,19	11,10	0,29	83,43	0,58	0,35	0,06	100,00	3,2	0,9	10,3	0,3	5,9	6,5	31,48	Matrix_4	Brasserler	
5,03	51,66	4,11	38,88	0,02	0,38	0,35	100,43		19,34	45,87	1,98	32,14	0,03	0,32	0,32	100,00	1,1	0,4	2,3	0,4	49,1	5,5	6,82	Carb_3	Brasserler	4,1
4,93	52,01	3,46	39,24	0,01	0,39	0,34	100,38		18,97	46,23	1,67	32,48	0,02	0,33	0,31	100,00	1,1	0,4	2,5	0,4	91,3	5,2	6,91	Carb_2	Brasserler	4,2
5,03	51,49	3,90	38,99	bl.	0,38	0,39	100,18		19,36	45,79	1,88	32,29	0,00	0,32	0,35	100,00	1,1	0,4	2,3	0,4	100,0	5,3	6,39	Carb_4	Brasserler	4,1
5,03	50,73	4,90	38,43	bl.	0,40	0,39	99,88		19,50	45,40	2,38	32,02	0,01	0,34	0,36	100,00	1,1	0,4	2,1	0,4	100,0	5,2	6,28	Carb_5	Brasserler	4,1
4,86	51,33	2,87	40,03	0,02	0,38	0,32	99,82		18,78	45,87	1,39	33,30	0,04	0,32	0,29	100,00	1,2	0,4	2,8	0,4	37,0	5,3	7,08	Carb_dunkel	Brasserler	4,3
2,32	25,45	0,73	70,00	0,32	0,28	0,08	99,19		9,84	24,95	0,39	63,90	0,59	0,26	0,08	100,00	1,8	0,6	7,5	0,3	5,8	7,4	21,59	Matrix_4	Synthes	
5,01	54,79	2,62	37,00	0,01	0,23	0,24	99,89		19,22	48,56	1,26	30,54	0,01	0,19	0,21	100,00	1,1	0,4	3,0	0,5	96,4	7,2	9,22	Carb_4	Synthes	4,2
5,08	57,53	1,79	34,92	bl.	0,30	0,20	99,82		19,39	50,69	0,85	28,65	0,00	0,25	0,18	100,00	1,1	0,4	3,9	0,5	100,0	6,0	11,13	Carb_5	Synthes	4,1
4,80	56,10	2,16	36,48	bl.	0,23	0,29	100,07		18,46	49,85	1,04	30,18	0,01	0,19	0,26	100,00	1,2	0,4	3,4	0,5	100,0	7,2	7,87	Carb_1	Synthes	4,4
4,85	56,10	2,00	36,05	0,04	0,25	0,23	99,52		18,71	49,95	0,97	29,89	0,06	0,21	0,21	100,00	1,2	0,4	3,6	0,5	26,0	6,8	9,39	Carb_2	Synthes	4,3
4,85	54,36	1,77	38,00	0,04	0,31	0,20	99,53		18,69	48,43	0,85	31,52	0,07	0,26	0,19	100,00	1,2	0,4	3,9	0,5	25,2	6,1	10,67	Carb_3	Synthes	4,3
0,50	13,79	0,22	84,51	0,46	0,30	0,04	99,82		2,26	14,38	0,12	82,02	0,89	0,29	0,04	100,00	5,0	0,8	20,6	0,3	4,8	7,6	43,18	Matrix_1	Synthes	
0,53	14,38	0,31	83,99	0,52	0,29	0,03	100,05		2,38	14,94	0,18	81,19	1,01	0,28	0,03	100,00	4,7	0,8	14,7	0,3	4,4	7,5	58,23	Matrix_3	Synthes	
0,52	14,54	0,27	83,84	0,50	0,33	0,03	100,04		2,36	15,10	0,15	81,08	0,96	0,32	0,03	100,00	4,6	0,8	16,7	0,3	4,4	6,7	52,64	Matrix_2	Synthes	