

Sonderdruck aus STOMA, Heft 3, 17. Jahrgang 1964, Seiten 247-260
Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg

Versuche über die Temperaturerhöhung beim Bohren und Schleifen von Zähnen

Von U. GRIGULL

Der Erfolg einer konservierenden Zahnbehandlung hängt entscheidend davon ab, daß während der Präparation die Pulpa nicht thermisch geschädigt wird. Die obere Temperaturgrenze für die Pulpa wird zu 40 (1) oder 50° C (2) angegeben. In jedem Fall ist von der normalen Ausgangstemperatur von 36 bis 37° C nur eine geringe Aufwärmespanne zulässig, die beim Bohren ohne Kühlung leicht überschritten werden kann, da oft der Abstand zwischen Bohrspitze und Pulpenkanal kleiner als 1 mm sein kann. Daher ist wichtig, die beim Bohren auftretenden Temperaturerhöhungen und den Einfluß der verschiedenen Kühlverfahren zu kennen. Hierbei treten sehr verschiedenartige Fragen auf, so daß trotz der bisherigen Vorarbeit (1) bis (4) weitere systematische Versuche notwendig sind.

Zweck und Durchführung der Versuche

Die im folgenden beschriebenen Versuche hatten den Zweck, Temperaturerhöhungen an der Pulpa unter verschiedenen Arbeitsbedingungen zu messen. Hierbei wurden verändert: die Bohrer (Hartstahl-Rosenbohrer und Diamantschleifer), die Drehzahlen von 12 000 bis 300 000 U/min, die durch Riemenantrieb oder Luftturbine (Airotor) erzeugt wurden, das Kühlverfahren (ohne Kühlung, Spray- und Wasserkühlung), der Andruck von 40 bis 140 g beim Riemenantrieb und von 10 bis 30 g beim Turbinenantrieb. Die übrigen zahlreichen Veränderlichen wurden konstant gehalten. In besonderen Versuchsreihen wurde die Tiefe der Bohrung in einer bestimmten Zeit als Funktion von Andruck und Drehzahl bestimmt. Auch wurde der Abfall der Drehzahl als Funktion des Andrucks gemessen.

Für die Versuche wurden frisch extrahierte gesunde Kälber-Schneidezähne benutzt, die bis zu ihrer Verwendung in 3%iger Wasserstoffsuperoxydlösung aufbewahrt wurden. Die 1,8 bis 2 mm starke Schmelzschicht auf der Vorderseite diente als Bearbeitungsfläche. Ein aus 0,1 mm starken Manganin- und Konstantandrähten bestehendes Thermoelement wurde in einem keramischen Röhrchen durch eine Bohrung von der Rückseite eingeführt (Abb. 1). Die Lötperle war in der Nähe des Pulpadaches in Plastemail eingebettet, das etwa die gleichen thermischen Eigenschaften wie Dentin haben soll (2). Die zweite Lötstelle wurde auf der Temperatur schmelzenden Eises gehalten, die Thermokraft an einem Spiegelgalvanometer auf etwa 0,1 grd genau abgelesen.

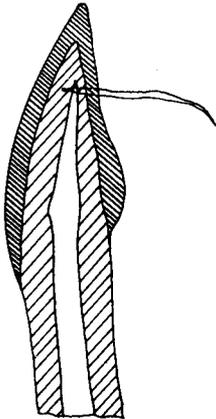


Abb. 1. Schnittbild des Zahnes mit Thermo-element.

Der vorbereitete Zahn wurde in eine Vorrichtung eingespannt, die ihm eine hin- und hergehende Bewegung von 2 mm Hub bei einer mittleren Geschwindigkeit von 1 mm/sec erteilte (d. h. Hin- und Hergang dauerten 4 sec). Diese Vorrichtung wurde über

Kurbeltrieb und Schnecke von einem Gleichstrommotor angetrieben. Motor, Getriebe und Spannvorrichtung mit Zahn standen auf einer Hebelwaage, über der sich das fest (relativ zum Arbeitstisch) eingespannte Handstück mit den Bohrern befand. Die Waage hatte eine Flüssigkeitsdämpfung, die Schwingungen verhindern sollte. Durch Gegengewichte auf der anderen Waagschale konnte ein bestimmter Andruck erzeugt werden. Der Winkel zwischen Bohrerachse und Bearbeitungsfläche betrug rund 15° und wurde ebenso wie Hub und Geschwindigkeit des Zahns bei den Versuchen konstant gehalten (soweit nicht weiter unten ausdrücklich etwas anderes vermerkt ist). Mit den gewählten Werten sollte eine bestimmte Arbeitsweise bei der Zahnbehandlung näherungsweise nachgeahmt werden. Die Tiefe der Bohrung wurde mit einer Meßuhr auf ca. 0,01 mm genau gemessen. Die Bearbeitungsfläche des Zahns war vorher glatt geschliffen, um eine eindeutige Ausgangsebene zu bekommen. Die Drehzahl des Bohrers wurde mit einem photoelektrischen Drehzahlmesser mit einem Meßbereich von 0 bis 600 000 U/min bestimmt. Bei Spray- und Wasserkühlung war dieses Verfahren nicht anwendbar; hierbei wurde die Drehzahl in Parallelversuchen ohne Kühlung gemessen.

Nachdem der Bohrer auf die gewünschte Drehzahl gebracht, die Hubbewegung des Zahns angestellt und die Gewichte für den Andruck aufgelegt waren, wurde der eingespannte Zahn von unten her stoßfrei mit dem Bohrer in Kontakt gebracht. Der Bohrvorgang dauerte 60 sec beim Riemen- und 30 sec beim Turbinenantrieb. Während dieser Zeit und 30 sec danach wurden die Temperaturen in Abständen von 5 sec am Spiegelgalvanometer abgelesen. Bei Versuchsbeginn befand sich der Zahn stets auf Zimmertemperatur. Da die thermischen Stoffgrößen der Zahnsubstanzen sich innerhalb kleiner Temperaturbereiche nur wenig ändern und ohnehin nicht genau bekannt sind, bestand keine Notwendigkeit, den Zahn auf 36 bis 37°C vorzuheizen. Alle gemessene Zahntemperaturen ϑ sind Übertemperaturen über der Anfangstemperatur.

Bei den Versuchen wurden die in Tabelle 1 angeführten Bohrer verwendet:

Tab. 1. Verwendete Bohrer

Antrieb	Bohrer	Durchm. mm	Höhe mm	Schneiden
Riemen und Turbine	Hartstahl-Rosenbohrer Meisinger 2 Round	1	1,1	6
	Diamantschleifer Meisinger 2 Round	1,4	1,1	-
nur Turbine	Hartstahl-Rosenbohrer Komet 2 Round	1,2	1,04	6
	Diamantschleifer Komet 2 Round	1,4	1,05	-
	Hartstahl-Rosenbohrer Ela 2 Round	1,3	1,1	6

Zu den Vorversuchen benutzten wir auch zylindrische und konische Schneidbohrer, die aber kein grundsätzlich anderes Verhalten als die bei den Hauptversuchen verwendeten zeigten. Für die Gebrauchszeit eines Hartstahlbohrers ermittelten wir 30 bis 40 min; bei längerem Gebrauch wurde die Wand des Bohrlochs unsauber und rau. Wir haben bei unseren Versuchen nur 10 bis 12 min mit einem Bohrer gearbeitet.

Alles in allem führten wir etwa 300 Versuche mit über 5000 einzelnen Temperaturmessungen durch, von denen im folgenden nur ein kleiner Auszug wiedergegeben werden kann.

Einfluß des Abstandes zwischen Bohrer und Thermoement

Die Lage des Thermoementes im Zahn wurde durch ein Röntgenbild festgestellt (Abb. 1). Aus diesem konnte auch der Abstand zwischen Bohrer und Thermoement ermittelt werden. Da es nicht möglich war, alle Versuche beim gleichen Abstand durchzuführen, wurde dessen Einfluß gesondert untersucht. Abb. 2 zeigt die Temperaturerhöhungen beim selben Zahn und

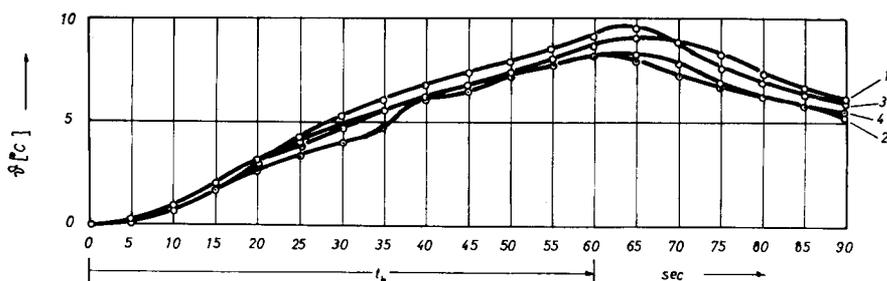


Abb. 2. Temperaturverlauf bei verschiedenem Abstand s (1) 2,9 mm; (2) 3,0 mm; (3) 3,3 mm; (4) 3,5 mm
Rosenbohrer, $n = 57\ 000$ U/min; $p = 80$ g, $t_b = 60$ sec.

selben Bohrer mit gleicher Drehzahl und gleichem Schnittdruck als Funktion der Zeit bei 60 sec Bohrzeit. Der Abstand ändert sich um 0,6 mm, ein Wert, der etwa den maximalen Wert für die meisten späteren Versuche darstellt. Die 4 Kurven liegen dicht beieinander und zeigen, insbesondere im Vergleich mit späteren Bildern, z. B. Abb. 8, daß der Einfluß des Abstandes zwischen Bohrer und Thermoement innerhalb des hier interessierenden Bereichs gegenüber dem Einfluß von Drehzahl und Andruck zu vernachlässigen ist. Den Einfluß extremer Änderung dieses Abstandes (wie er bei den später beschriebenen Versuchen nicht vorkam) zeigt Abb. 3. Bei größerem Abstand tritt das Temperaturmaximum später und flacher auf.

Die gleiche Tendenz zeigt die theoretische Lösung eines analogen Problems (5). Während bei unserem Versuch eine fast punktförmige Wärmequelle (die reibende Fläche des Bohrkopfes) angenommen werden kann, ist in Abb. 4 der zeitliche Temperaturverlauf in verschiebener Tiefe x eines halbumendlichen Körpers dargestellt, an dessen Oberfläche eine flächenhafte Wärmequelle mit konstanter Wärmestromdichte q ab Versuchsbeginn 60 sec lang wirksam ist. Die Kurven entsprechen $q = 0,25$ W/cm² mit einer Temperaturleitfähigkeit $a = 4,5 \cdot 10^{-2}$ cm²/s. Trotz der verschiedenen Randbedingungen ist der Temperaturverlauf in beiden Fällen recht ähnlich, insbeson-

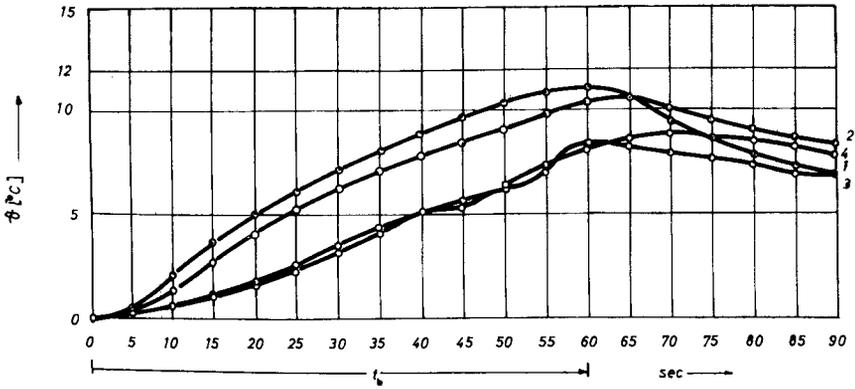


Abb. 3. Daten wie Abb. 2, aber (1) 3,1 mm; (2) 3,7 mm; (3) 5,7 mm; (4) 6,4 mm.

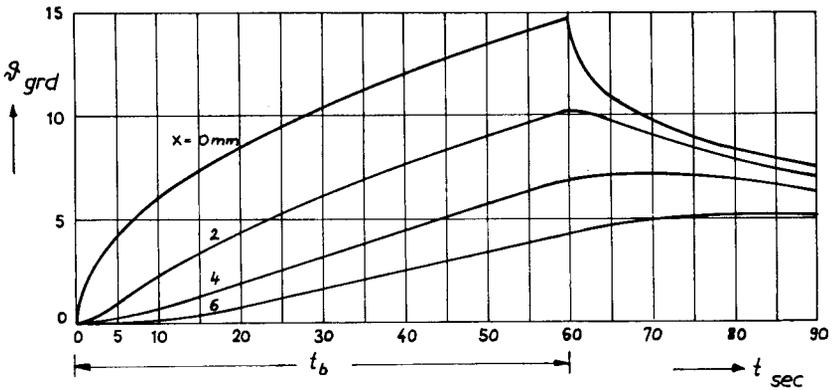


Abb. 4. Temperaturverlauf in verschiedener Tiefe x , wenn die Oberfläche 60 sec lang mit einer Wärmestromdichte $q = 0,25 \text{ W/cm}^2$ geheizt wurde.

dere zeigt sich deutlich die zeitliche Verschiebung des Temperaturmaximums als Funktion der Tiefe.

Die in den folgenden Diagrammen angegebenen Abstände zwischen Bohrer und Thermoelement beziehen sich auf Bohrbeginn.

Versuche mit Riemenantrieb ohne Kühlung

An Abb. 5 bis 7 sind typische Versuchsergebnisse für den Hartstahl-Rosenbohrer Meisinger 2 Round mit Riemenantrieb ohne Kühlung wiedergegeben. Der Abstand zwischen Bohrer und Thermoelement betrug im Mittel 4,3 mm mit den Extremwerten 5,1 und 3,6 mm. Innerhalb eines Diagramms schwankten die Abstände nur um einige Zehntel Millimeter, so daß dieser Einfluß zu vernachlässigen war. Man erkennt das auch daran, daß die Temperaturmaxima etwa gleichzeitig auftraten, im deutlichen Gegensatz zu der Lage der Maxima in Abb. 3. Gebohrt wurde 60 sec lang, wie bei allen Versuchen mit Riemenantrieb. Die Bilder zeigen einen im wesentlichen gleichförmigen Temperaturverlauf über der Zeit; einige Ungleichmäßigkeiten hier und auch

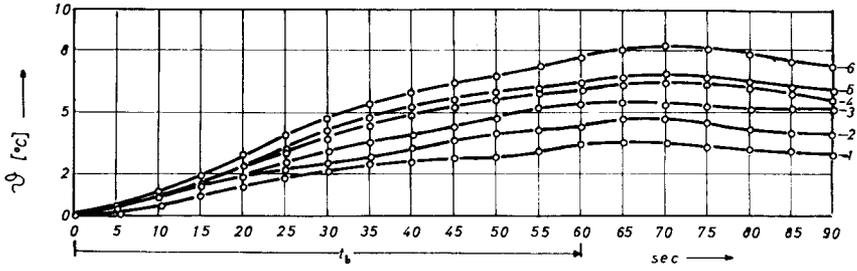


Abb. 5. Riemenantrieb ohne Kühlung. Hartstahl-Rosenbohrer $n = 12000$ U/min. Verschiedener Andruck p (1) 40 g; (2) 60 g; (3) 80 g; (4) 100 g; (5) 120 g; (6) 140 g.

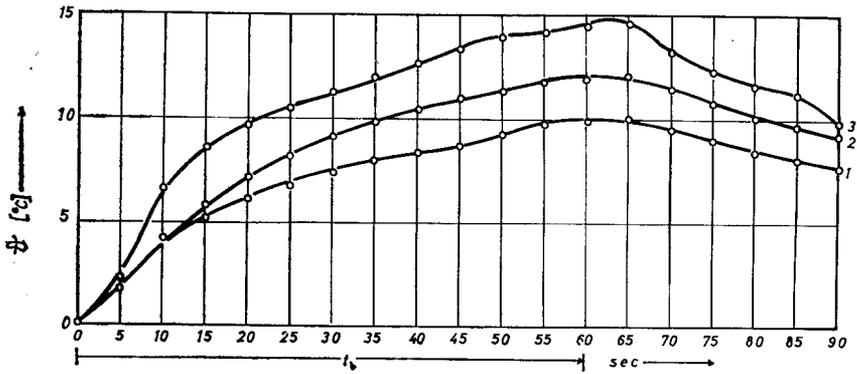


Abb. 6. Wie Abb. 5 aber $n = 42500$ U/min. Andruck p (1) 40 g; (2) 60 g; (3) 80 g.

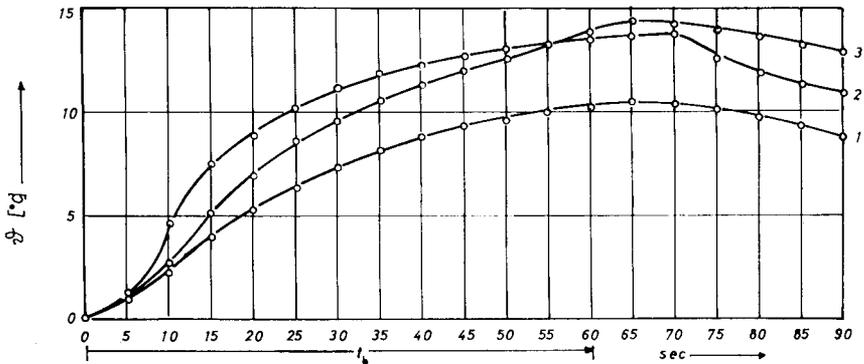


Abb. 7. Wie Abb. 5, aber $n = 110000$ U/min. Andruck p (1) 20 g; (2) 40 g; (3) 60 g.

bei weiteren Versuchen dürften auf Drehzahlschwankungen zurückzuführen sein, die wiederum durch Inhomogenitäten im Material entstanden sind. Der Einfluß von Andruck und Drehzahl ist deutlich zu erkennen. Bei 110 000 U/min wurden nur die kleinsten Andrücke 20, 40 und 60 g untersucht, da die Temperatursteigerung von 15 grd bei etwa 4 mm Abstand vom Thermoelement schon außerhalb der zulässigen Grenze liegt, zumal wenn man sie auf den menschlichen Zahn mit den geringeren Abständen übertragen wollte.

Der Diamantschleifer Meisinger 2 Round ergab bei fast den gleichen Abständen stärkere Erwärmungen (Abb. 8 und 9). Allerdings war auch die Bohrleistung größer (tiefere Bohrungen), wie die späteren Tabellen 4 und 5 zeigen werden.

Die Versuche ohne Kühlung zeigen also, daß man bei 60 sec Bohrzeit auch im Bereich normaler Arbeitsbedingungen hinsichtlich Andruck und

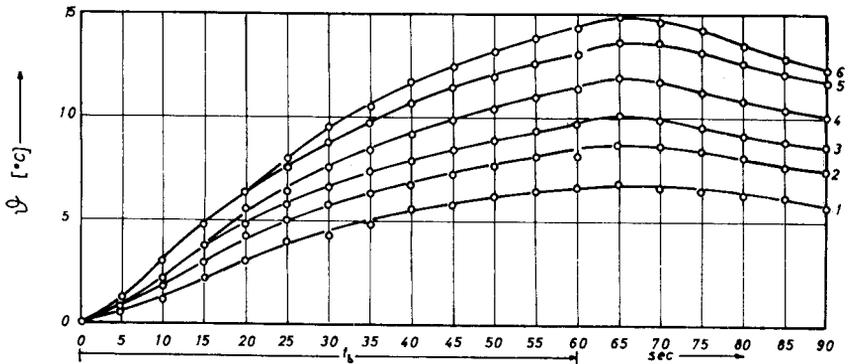


Abb. 8. Riemenantrieb ohne Kühlung. Diamantschleifer, $n = 12\,500$ U/min. Andruck p (1) 40 g; (2) 60 g; (3) 80 g; (4) 100 g; (5) 120 g; (6) 140 g.

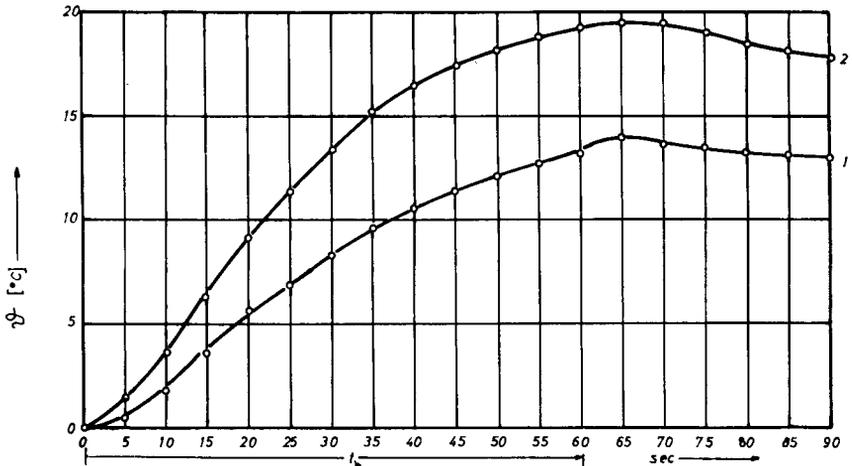


Abb. 9. Wie Abb. 8, aber $n = 110\,000$ U/min; Andruck p (1) 40 g; (2) 60 g.

Drehzahl im Abstand von etwa 4 mm unzulässige Temperatursteigerungen hervorrufen kann, die die Pulpa mit Sicherheit schädigen würden. Für den menschlichen Zahn mit den geringeren Wandstärken gilt das in verstärktem Maße.

Versuche mit Riemenantrieb und Spraykühlung

Bei der sogenannten Spraykühlung tritt das durch einen Luftstrahl zerstäubte Kühlwasser aus Bohrungen im Handstück, die es auf den Bohrkopf lenken. Das Wasser kommt aus einem Vorratsbehälter, der bei unseren Versuchen durch einen Thermostaten auf konstanter Temperatur gehalten wurde. Diese Wassertemperatur ϑ_w ist auf den Diagrammen vermerkt. Die Zerstäubungsluft wurde aus der Umgebung angesaugt und durch einen besonderen Kompressor verdichtet. Die Temperatur des Kühlmittels ist an der Bohrstelle etwas geringer als im Vorratsbehälter, da es sich in der verhältnismäßig langen Zuleitung abkühlen kann und da außerdem bei der Zerstäubung ein Teil des Wassers verdunstet und die dazu nötige Wärmemenge dem Strahl entzogen wird. Eine weitere geringe Abkühlung tritt durch die Entspannung der Luft ein. Bei unseren Versuchen, bei denen Kühlwasser, Luft, Behälter und Zahn (bei Bohrbeginn) auf nahezu gleicher Temperatur waren, fiel der erstgenannte Teil der Abkühlung weg. Für die Abkühlung durch Verdunstung und Entspannung ermittelten wir 1 bis 2 grd, abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit, die bei den nachstehenden Versuchen 85 % betrug. In trockenen Räumen kann die Abkühlung größer sein. Die Drehzahl des Bohrers konnte nicht gemessen werden, da der Geber des photoelektrischen Drehzahlmessers durch den zerstäubten Strahl verdeckt wurde. Die Drehzahl wurde deswegen aus Vergleichen mit Versuchen ohne Kühlung abgeschätzt und ist daher nur in einem gewissen Streubereich bekannt.

Aus Vorversuchen ermittelten wir die günstigste Kühlwirkung in unserem Falle (also ohne Abkühlung in der Zuleitung) bei einer Wassertemperatur im Behälter gleich der Zahntemperatur bei Bohrbeginn, also auch etwa gleich der Lufttemperatur. Infolge der Verdunstung war dann der Sprühstrahl um 1 bis 2 grd kälter als der Zahn bei Bohrbeginn. Typische Ergebnisse beim Rosenbohrer und Diamantenbohrer zeigen Abb. 10 und 11. Wir sehen eine ganz unsystematische Streuung der Temperaturen innerhalb eines verhältnismäßig kleinen Bereichs, besonders bei kleinen Drehzahlen. Die Extremwerte der Temperatur fallen nicht (oder nur sehr kurzzeitig in Abb. 11) mit den extremen Belastungen zusammen. Selbst der höchste Andruck von 140 g

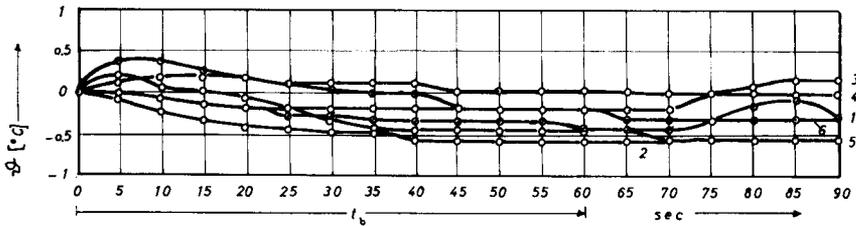


Abb. 10. Riemenantrieb mit Spraykühlung. Hartstahl-Rosenbohrer, $n = 25\ 090$ U/min. $\vartheta_w = 20,4^\circ\text{C}$, $\vartheta_z = 20,4^\circ\text{C}$, $\vartheta_l = 19,7^\circ\text{C}$. Andruck p (1) 40 g; (2) 60 g; (3) 80 g; (4) 100 g; (5) 120 g; (6) 140 g.

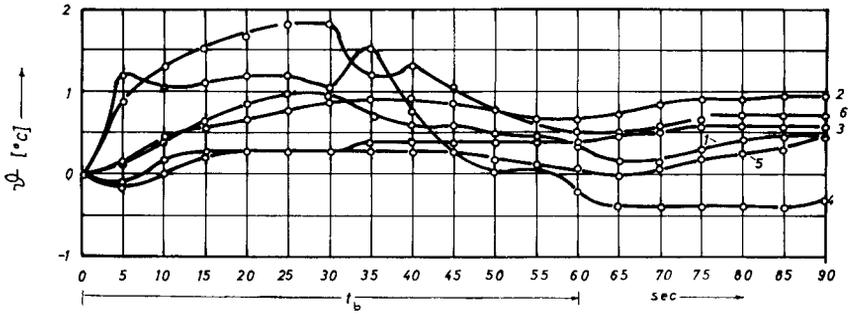


Abb. 11. Wie Abb. 10, aber Diamantschleifer. $n=110\,000$ U/min. $\vartheta_w = 20,3^\circ$ C, $\vartheta_z = 20,3^\circ$ C, $\vartheta_1 = 20^\circ$ C.

ergibt beim Diamantschleifer mit 110000 U/min (Abb. 11) einen unschädlichen Temperaturanstieg, während ohne Kühlung (Abb. 9) schon bei 60 g eine Erwärmung um fast 20 grad auftrat. Die Abstände zwischen Bohrer und Thermoelement waren hier etwa die gleichen wie bei den Versuchen ohne Kühlung. Diese Abstände werden im folgenden nicht mehr angegeben, da sie bei gekühlter Bohrstelle fast keinen Einfluß auf den Temperaturverlauf hatten.

Bei zu geringer Kühlmitteltemperatur kann man den Zahn auch während des Bohrens abkühlen, wie Abb. 12 zeigt. Mit der Untertemperatur $\vartheta_z - \vartheta_w$

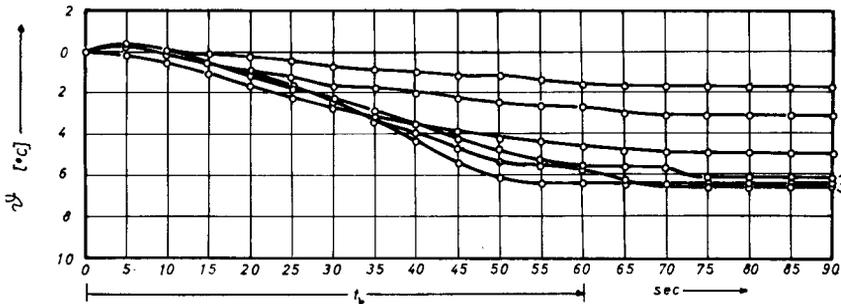


Abb. 12. Wie Abb. 10, aber $n = 12\,000$ U/min. $\vartheta_w = 19,4^\circ$ C, $\vartheta_z = 21,4^\circ$ C, $\vartheta_1 = 20,7^\circ$ C.

= 2 grad und der Abkühlung durch Verdunstung erreichte man selbst beim Andruck $p = 140$ g eine Abkühlung um 5 grad. ϑ_w ist die Kühlwassertemperatur im Behälter und ϑ_z die Zahntemperatur bei Bohrbeginn (vgl. Liste der Formelzeichen). Auch hier entspricht die geringste Abkühlung nicht dem höchsten Andruck, die Streuung ist unsystematisch.

Die Versuche mit Spraykühlung zeigen, daß man selbst bei den höchsten Drehzahlen und den größten Andrücken den Temperaturanstieg in unschädlichen Grenzen halten kann. Die Temperatur des Zahns wird wesentlich von der Kühlmitteltemperatur und nicht vom Bohrvorgang bestimmt.

Versuche mit Riemenantrieb und Wasserkühlung

Stellt man die Zerstäubungsluft ab, so wird aus der Spraykühlung die Wasserkühlung. Wegen der höheren Wärmekapazität des Wassers müßte die vom Wasserstrahl getroffene Stelle des Zahn intensiver als bei Spraykühlung gekühlt werden. Unsere Versuche bestätigen das vollständig: in noch stärkerem Maße als bei Spraykühlung folgt die Zahntemperatur der Wassertemperatur. Auf den Nachweis durch Einzeldiagramme sei verzichtet. Dagegen zeigt Abb. 13 eine andere wichtige Erscheinung, nämlich eine verhältnismäßig starke Auffächerung der Temperaturkurven, aber wiederum nicht in der Reihenfolge der Andrucke und damit der Wärmeproduktion. Offenbar traf bei den Kurven 2, 3 und 4 der Wasserstrahl sehr genau die Bohrstelle, was infolge etwas anderer Einspannung von Zahn und Bohrer bei den Kurven 1, 6 und 5 nicht der Fall war. Da der Strahl ohne Zerstäubung einen kleineren Querschnitt hat und da die Wärmeleitfähigkeit der Zahnschubstanz gering ist, kann der Wasserstrahl bei seitlichem Auftreffen die Bohrwärme nicht mehr abführen. Hierauf sollte bei der Konstruktion des Handstücks geachtet werden. Abb. 13 zeigt, daß sich bei guter Kühlung der

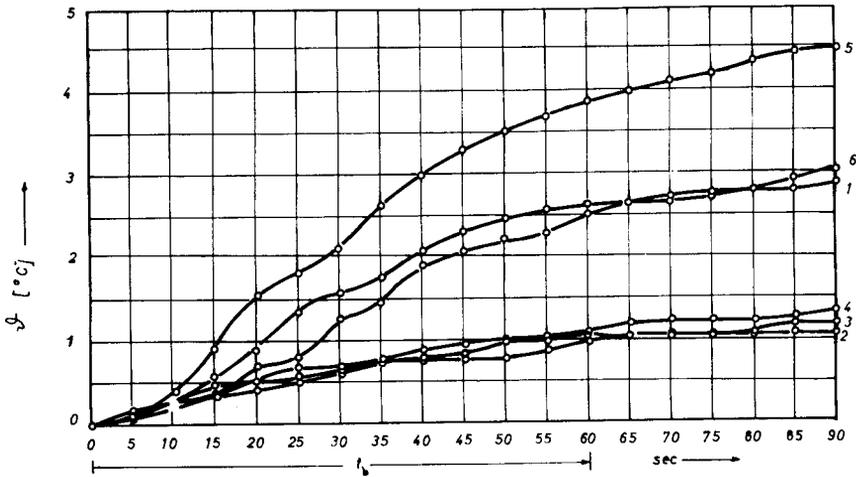


Abb. 13. Riemenantrieb mit Wasserkühlung. Hartstahl-Rosenbohrer $n = 110\,000$ U/min. $\vartheta_w = 20,4^\circ\text{C}$, $\vartheta_z = 20,4^\circ\text{C}$. Andruck p wie Abb. 10.

Zahn um 1 grad erwärmt, wenn $\vartheta_w = \vartheta_z$ gewählt ist. Wäre das Kühlwasser ca. 1 grad kälter als der Zahn gewesen, so hätte man „isotherm“ bohren können.

Versuche mit Turbinenantrieb

Die Luftturbine (Airotor) ermöglichte Drehzahlen bis 340 000 U/min. Wegen des geringen Drehmoments sind nur kleine Schnittdrücke möglich, so daß dadurch von selbst ein Schutz gegen allzu starke Erwärmung eintritt. Wir wählten Andrucke von 10 bis 30 g und stellten fest, daß bei etwa 40 g die Turbine stehen blieb.

Die in den folgenden Diagrammen angegebenen Drehzahlen beziehen sich auf den unbelasteten Zustand. Da die Bohrleistung wegen der höheren

Drehzahl größer ist, wurde nur 30 sec lang gebohrt, um nicht die Schmelzschicht zu durchstoßen. Bei abgestelltem Kühlwasser tritt eine gewisse Kühlwirkung durch die Turbinenabluft ein, die sonst zur Zerstäubung dient und zugleich das Schmiermittel abführt. Daher, wegen der kürzeren Bohrzeit und wegen der geringeren Andrücke sind die bei gleichem Bohrer (Meisinger 2 Round) mit Turbinenantrieb erzielten Höchsttemperaturen ohne Kühlwasser geringer als bei Riemenantrieb, wie Abb. 14 und 15 zeigen. Die übr-

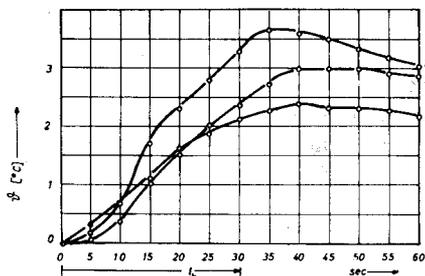


Abb. 14. Turbinenantrieb ohne Kühlwasser. Hartstahl-Rosenbohrer $n = 340\,000$ U/min, Andruck p (1) 10 g, (2) 20 g, (3) 30 g.

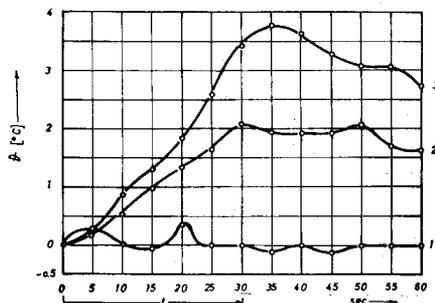


Abb. 15. Wie Abb. 14, aber Diamantschleifer.

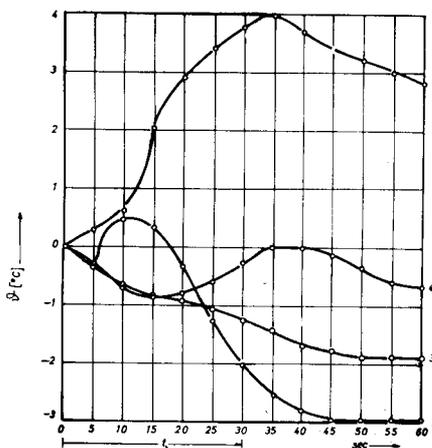


Abb. 16. Turbinenantrieb mit Spraykühlung. Diamantschleifer $n = 332\,000$ U/min. $\phi_w = 20,1^\circ$ C, $\phi_z = 20,0^\circ$ C, $\phi_1 = 20,2^\circ$ C, Andruck p (1) 10 g ohne Kühlwasser, (2) 10 g mit Spray, (3) 20 g, (4) 30 g.

gen Bohrer nach Tabelle 1 ergeben unter den gleichen Arbeitsbedingungen bei Turbinenantrieb höhere Maximalerwärmungen (5 bis 15 grad) als der oben genannte Bohrer, allerdings bei vermutlich größerer Bohrleistung.

Die Versuche mit Spraykühlung zeigten prinzipiell das gleiche Ergebnis wie beim Riemenantrieb. Auch bei höchsten Umdrehungen und größten Andrücken wird die Zahntemperatur vom Kühlmittel und nicht vom Bohrvorgang bestimmt. Der versprühte Wasserstrahl kann in jedem Falle die erzeugte Wärme abführen. Das zeigt eindrucksvoll Abb. 16, bei dem Kurve (1) ohne Kühlung, die übrigen Kurven mit Spraykühlung aufgenommen wurden. Da sich der Strahl durch Verdunstung und Entspannung abgekühlt hätte, nahm auch die Zahntemperatur ab. Das Ende der Bohrzeit (30 sec) ist nur

bei Kurve (1) ohne Kühlung zu erkennen, ein weiterer Beweis dafür, daß bei richtiger Kühlung der Bohrvorgang keinen Einfluß auf den Temperaturverlauf hat. Die drei anderen untersuchten Bohrertypen zeigten grundsätzlich das gleiche Verhalten, ohne Rücksicht auf die unterschiedliche Bohrleistung.

Die vorstehenden Versuchsergebnisse wurden mit einer Kühlwassermenge von 12 bis 15 cm³/min erhalten, das ist etwa der halbe Wert jener Menge, auf die das verwendete Gerät ursprünglich eingeregelt war.

Senkrecht Bohren ohne Kühlung

Bei senkrechtem Bohren mit Riemenantrieb wurden bei höheren Andrücken p nach 60 sec Bohrzeit erhebliche Übertemperaturen erreicht, während die Bohrleistung (Bohrtiefe h) annähernd Null war. Diese Technik ist also für die hier verwendeten Bohrertypen nicht zu empfehlen. Die Ergebnisse zeigt nachstehende Übersicht:

Hartstahl-Rosenbohrer, $t_b = 60 \text{ sec}$, $n = 90\,000 \text{ U/min}$

p	60	100	140 g
ϑ_{\max}	2	9	15 grad
h	-	0,04	0,27 mm

Diamantschleifer, $t_b = 60 \text{ sec}$, $n = 90\,000 \text{ U/min}$

p	100 g
ϑ_{\max}	31 grad
h	0,46 mm

Bei längerem Bohren hätte man nahezu beliebige Temperaturen erreichen können, ohne eine nennenswerte Bohrleistung zu erzielen. Man kann also die Nervensubstanz buchstäblich „verkochen“.

Anderung der Drehzahl bei Belastung

Tab. 2. Riemenantrieb

Zwischen Hartstahl-Rosenbohrer und Diamantschleifer ergibt sich kein wesentlicher Unterschied

p	20	40	60	80	120	140 g
unbelastet		12 200	12 000	12 000	12 000	12 000 U/min
belastet		12 000	11 800	11 700	11 650	11 600 U/min
unbelastet		42 000	43 000	42 800	U/min	
belastet		41 500	42 500	42 300	U/min	
unbelastet	61 800	62 000	U/min			
belastet	61 500	61 800	U/min			
unbelastet	108 000		110 000	U/min		
belastet	107 000		109 500	U/min		

Tab. 3. Turbinenantrieb

p	10	20	30 g
Hartstahl-Rosenbohrer 2 Round			
unbelastet	304 000	304 000	304 000 U/min
belastet	296 000	292 000	288 000 U/min
Diamantschleifer Meisinger 2 Round			
unbelastet	340 000	342 000	342 000 U/min
belastet	340 000	336 000	328 000 U/min
Hartstahl-Rosenbohrer Komet 2 Round			
unbelastet	324 000	330 000	330 000 U/min
belastet	316 000	312 000	307 000 U/min
Diamantschleifer Komet 2 Round			
unbelastet			336 000 U/min
belastet			300 000 U/min
Hartstahl-Rosenbohrer Ela 2 Round			
unbelastet	338 000	338 000	338 000 U/min
belastet	334 000	324 000	316 000 U/min

Bohrleistung (Bohrtiefe)

Da der Zahn eine Hubbewegung von 2 mm ausführte, hatte die Bohrung eine Länge von 2 mm + Bohrerdurchmesser und eine Breite etwa gleich dem Bohrerdurchmesser. Diese Werte waren bei allen Versuchen gleich, so daß die Tiefe der Bohrung ein Maß für die weggefräste Schmelzmenge und damit für die Leistung des Bohrers war. Naturgemäß ergeben sich Streuungen, da der Zahnschmelz bei verschiedenen Zähnen nicht immer die gleichen Eigenschaften hatte. In den Tabellen 4 und 5 sind die Bohrtiefen für verschiedene Bohrerarten in Abhängigkeit von Andruck und Drehzahl zusammengestellt, und zwar bei Riemenantrieb mit 60 sec Bohrzeit.

Tab. 4. Bohrtiefe h in mm, Riemenantrieb, $t_b = 60$ sec
Hartstahl-Rosenbohrer Meisinger 2 Round

p in g	Drehzahl unbelastet in U/min			
	11 800	26 000	57 000	110 000
40	0,05	0,15	0,62	1,02
60	0,08	0,15	0,80	1,10
80	0,09	0,41	0,82	1,30
100	0,35	0,45	0,75	1,41
120	0,50	0,80	0,82	1,92
140	0,40	0,65	0,84	1,68

Tab. 5. Bohrtiefe h in mm, Riemenantrieb, $t_b = 60$ sec
Diamantschleifer Meisinger 2 Round

p in g	Drehzahl unbelastet in U/min			
	10 000	25 000	57 000	100 000
40	0,16	0,27	1,20	1,26
60	0,30	0,45	1,05	1,34
80	0,28	1,15	1,25	1,80
100	0,65	1,16	1,41	1,50
120	1,00	1,40	1,50	1,60
140	1,04	1,15	1,60	2,27

Da die Schmelzschicht etwa 2 mm stark war, wurde sie bei einigen Versuchen durchstoßen. Bei Turbinenantrieb wurden 5 verschiedene Bohrer-typen untersucht. Wegen der Streuung der Versuchsergebnisse lassen sich aus der verhältnismäßig kleinen Zahl von Versuchen keine eindeutigen Ergebnisse herleiten, so daß auf die Wiedergabe verzichtet sei.

Schlußbemerkungen

Die Versuche ohne Kühlung haben gezeigt, daß man selbst bei den großen Wandstärken eines Kälber-Schneidezahn (4 mm und mehr) innerhalb 60 bzw. 30 sec am Pulpakanal unzulässige Temperaturen erreichen kann, ohne daß extreme Arbeitsbedingungen gewählt wurden. Die Gefahr der thermischen Schädigung besteht – wie bekannt – bei dem kleineren menschlichen Zahn erst recht. Wegen der stark wechselnden Arbeitsbedingungen des Zahnarztes dürfte es kaum möglich sein, auf den Einzelfall anwendbare Sicherheitsgrenzen aufzustellen, etwa als Maximal- bzw. Minimalwerte der wichtigsten Parameter wie Drehzahl, Andruck, Abstand zum Pulpakanal, Bohrzeit usw.

Bei dieser Sachlage sind Kühlverfahren besonders wichtig. Aus unseren Versuchen mit Spray- und Wasserkühlung ging hervor, daß bei richtiger Einstellung des kühlenden Strahls die Bohrwärme bei allen von uns gewählten Arbeitsbedingungen vollständig abgeführt werden kann. Die Zahn-temperatur wird vom Kühlmittel und nicht vom Bohrvorgang bestimmt. Dieses Ergebnis galt sowohl bei Riemen- wie bei Turbinenantrieb des Bohrers. Auch bei den höchsten Drehzahlen der Turbine ließen sich die Zahn-temperaturen durch richtige Kühlung in einem unschädlichen Bereich halten. Wir erhielten nahezu „isothermes“ Bohren, wenn das Kühlmittel beim Auftreffen auf die Bohrstelle 0 bis 2 grad kälter als der Zahn war. Das Kühlmittel kühlt sich in den Zuleitungen, durch Entspannen und durch Verdunsten im Freistrah ab, so daß die Temperatur im Vorratsbehälter um einen gewissen (durch Versuch festzulegenden) Betrag höher sein muß. Für die Abkühlung durch Verdunstung und Entspannung bei Spraykühlung ermittelten wir 1 bis 2 grad bei relativen Luftfeuchtigkeiten von 85%.

Zwischen Spray- und Wasserkühlung ergab sich kein grundsätzlicher Unterschied. Bei Wasserkühlung muß der Strahl sehr genau die Bohrstelle treffen, da andernfalls wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit der Zahn-substanzen die Bohrwärme nur unvollständig abgeführt wird. Hierauf sollte bei der Konstruktion des Handstückes geachtet werden.

Es dürfte sich empfehlen, den Kühlwasserbehälter wesentlich größer als bisher zu bauen und seine Heizung durch Schaltthermometer zu regeln. Dann läßt sich jene Kühlwassertemperatur einstellen, bei der noch zuverlässig gekühlt wird, ohne daß Schmerzempfindungen durch zu starke Abkühlung eintreten.

Résumé: U. GRIGULL: Expériences concernant l'élévation de la température pendant le fraisage et le meulage.

Pendant le meulage et le fraisage avec fraise classique et turbine on a mesuré la température de dents de ceaux récemment extraites. Ainsi on a constaté que même sous forte pression la température lors du meulage peut être éliminée totalement par des procédés frigorifiques appropriés.

La température de la dent dépend du liquide de refroidissement et non du meulage. Il est recommandé de construire des réservoirs d'eau plus grands et d'en garder constante la température à l'aide de thermostats.

Summary: U. GRIGULL: Experiments about the raise in temperature during the drilling and grinding of teeth.

Measurements of temperature taken when drilling and grinding with normal or ultra high speed freshly extracted calves teeth showed that even under increasing pressure the drilling temperature can be diverted totally by proper cooling. The temperature of the tooth depends on the coolant and not on the drilling.

It is recommended to build a bigger reservoir for the water colants as until now and to keep its temperature constant by thermostats.

Anerkennung

Die Versuche wurden durch die Herren Dipl.-Ing. J. GARCIA-STÖTTER und Labor-Ing. G. FLATTER durchgeführt. In allen zahnärztlichen Fragen beriet uns bereitwilligst Herr Dr. med. dent. Hermann KELLER, München. Er und Frau Dr. med. dent. E. TEUTSCH unterstützten uns auch durch Anfertigung der Röntgenbilder zur Abstandsmessung. Das Riemengerät, das Turbinengerät, den Drehzahlmesser und die Bohrer stellte die Firma KALTENBACH u. VOIGT, Biberach/Riß, zur Verfügung, die auch die Anregung zu dieser Arbeit gab. Der Verfasser dankt allen für die gewährte Unterstützung.

Formelzeichen

h	Tiefe der Bohrung
n	Drehzahl des Bohrers
p	Andruck
s	Abstand zwischen Bohrer und Thermoelement bei Bohrbeginn
t_B	Bohrzeit (60 bzw. 30 sec)
θ	Übertemperatur des Thermoelements über Anfangstemperatur (θ_{\max} Maximalwert der Übertemperatur)
θ_Z	Zahntemperatur bei Bohrbeginn
θ_1	Lufttemperatur
θ_w	Wassertemperatur im Vorratsbehälter

Literaturverzeichnis

1. KLOS, H. u. R. RÖTTKE, 7 Deutsche Zahnärztliche Zeitung 15 (1960) 1659/1679. -
2. STÜBEN, G., Deutsche Zahnärztl. Zeitung 16 (1961) 314/316. -
3. HOFMANN, M., Deutsche Zahnärztl. Zeitung 16 (1961) 584/590. -
4. CLAESSENS, C. P. D., Deutsches Zahnärzteblatt 15 (19) 126/132. -
5. CARSLAW, H. S. u. J. C. JAEGER, Conduction of Heat in Solids. Oxford 1948 S. 57.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. U. GRIGULL, Technische Hochschule, Institut für Technische Thermodynamik, 8 München.