

6. Diskussion

6.1 Die Fehlerbetrachtung

Bei der Herstellung von Prüfkörpern und deren messtechnischer Auswertung, können Fehler auftreten. Um das Fehlerrisiko bei der Herstellung der Grünlinge so gering wie möglich zu halten, wurden bei diesem Prozess an die in DIN 13 289/0.188 von KLINKE vorgegebenen Arbeitsabläufe angewendet. Trotz exakter Einhaltung der vorgegebenen Abläufe können bei den Grünlingen Abweichungen im Durchmesser von $\pm 0,2$ mm und bei der Höhe von $\pm 0,1$ mm auftreten. Diese Schwankungen befinden sich jedoch in einem tolerierbaren und in der DIN akzeptierten Bereich.

Zur Vermeidung von Fehlern beim Sintern der Grünlinge wurde der Sinterofen vor Beginn der Experimente nach Herstellerangaben kalibriert. Des Weiteren überprüften wir Unterschiede zwischen der ofeninternen und den ofenexternen Temperaturerfassung. Dies geschah durch mehrfaches Durchlaufen eines Brennprogramms ohne Bestückung der Brennkammer. Für die vorliegenden Auswertungen wurden die am externen Temperaturfühler, d.h. in der Nähe des Wirkortes gemessenen Werte herangezogenen.

6.2 Der Temperaturverlauf

Für die auf dem Markt befindlichen Verblendkeramiken schreiben deren Hersteller von Materialien und Sinteröfen spezifische Brennprogramme vor. Diese Programme legen fest, zu welchem Zeitpunkt welche Temperatur innerhalb der Brennkammer erreicht

werden muss und wie lange diese zu halten ist (Claus 1989). Zur Kontrolle der Einhaltung von Brennvorgaben, besitzt jeder Sinterofen die Möglichkeit die Temperaturen innerhalb der Brennkammer zu messen und intern zu kontrollieren. Die Anzeigen auf dem Display des Ofens trügen jedoch oft, da die Temperaturverläufe innerhalb der Sinterkammer beim Fahren gleicher Brennprogramme aber unterschiedlicher Brennbedingungen nicht immer identisch sind (DIN 2004 ,Paarsch 2001).

Bei unseren Untersuchungen zeigen sich trotz Nutzung gleicher Brennprogramme in Übereinstimmung mit der Literatur ebenfalls Abweichungen hinsichtlich der am Wirkort erfassten Temperaturverläufe. Beeinflussungen durch Störkörper, eine veränderte Position des Thermoelementes oder eine geänderte Anzahl oder Anordnung der Prüfkörper können aufgrund der Versuchsdurchführung ausgeschlossen werden (Klinke 2001). Im Unterschied zur Anwendung im Dentallabor befindet sich zur Messung der tatsächlichen Temperatur am Wirkort ein Thermoelement mit Träger. Bei den von uns gefahrenen Sinterbränden wurde als variabler Faktor der Brenngutträger eingeführt. Wie unsere Ergebnisse zeigen, führt die Veränderung dieses Faktors bei jedem Dentinbrand zu einer Veränderung des Wertes für die maximale Sintertemperatur und zur Veränderung des Temperaturanstieges und Verlaufs in der Haltephase. Bei allen untersuchten Keramiken ermittelten wir für die Brennronde und den Honeycomb-Thermo-Tray (Fa. Heraeus Kulzer, Hanau) die höchsten Werte für die maximale Sintertemperatur und die schnellsten Temperaturanstiege. Gründe hierfür liegen unseres Erachtens in den Abmessungen und den Materialien der Träger. Beide weisen eine

runde Grundform auf und besitzen im Vergleich zu den anderen verwendeten Trägern die größten Durchmesser. Damit weisen sie den kleinsten Abstand zu den Heizpulen des Ofens auf. Dies hat zur Folge, dass der Übertragungsweg durch Luft gering gehalten und deren schlechte Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 0,02 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) nicht so stark zum Tragen kommt (Becker 1996). Ein weiterer Vorteil liegt im Material beider Träger, so besteht die Brennronde aus Platin. Dieses Metall zeichnet sich durch eine gute Wärmeleitfähigkeit und eine geringe Wärmekapazität aus (Grigorjew 1929). Durch die massive Bauart kommen diese Materialeigenschaften der Brennronde stark zum Tragen. Das Material des Honeycomb-Thermo-Trays (Fa. Heraeus Kulzer, Hanau) ist eine metallische Legierung, welche sich ebenfalls durch eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit auszeichnet. Im Gegensatz zur Brennronde hat dieser Träger eine Wabenstruktur und eine fast schwarze Oberfläche. Diese dunkle Oberfläche führt zu einer besseren Aufnahme der Wärmestrahlung und ist Ursache für die etwas höheren Temperaturmesswerte in den Versuchsdurchläufen.

Die dritthöchsten Temperaturen liegen hauptsächlich bei der Nutzung des Wattedrenngutträgers (Fa. Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen). Hier zeigen die Temperaturanstiege im Vergleich zu den schon erwähnten Brenngutträgern einen leicht verzögerten Verlauf. Im Gegensatz zu den vorher genannten Trägern besitzt dieser eine rechteckige Grundform mit kleineren Abmessungen. Dies führt zu einem wesentlich größeren Abstand zu den Heizspulen und somit zu einem längeren Übertragungsweg für die Wärmeenergie über die Luft. Ein weiterer Grund für die schlechteren Temperaturwerte liegt im verwendeten Material. Dieser Träger ist aus Aluminiumoxid und Siliziumoxid hergestellt. Diese Stoffe weisen eine geringere

Wärmeleitfähigkeit auf (Übler 2002). Warum beim Wattedrenngutträger (Fa. Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen) trotzdem solch hohe Temperaturwerte ermittelt wurden, ist mit der faserigen Struktur, dem hohem Luftvolumen zwischen den Fasern und seiner mit 1,9 g geringen Masse zu begründen.

Im Gegensatz dazu sind beim Brennuntersatz Wabe (Fa. Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen), welcher aus ähnlichem Material wie der Wattedrenngutträger (Fa. Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen) besteht, die gemessenen Temperaturen geringer. Dies liegt zum einen darin begründet, dass er eine massive Wabenstruktur hat und bei unserer Konfiguration eine Masse von 29,6 g aufweist. Hierdurch kommen die schlechten Wärmeeigenschaften des Materials wesentlich stärker zum Tragen. Ein weiterer Grund ist seine ebenfalls rechteckige Grundform, dessen Abmessungen einen noch größeren Abstand zu den Heizspulen aufweist. Neben diesem Träger zeigte der Siliziumnitrid-Brenngutträger (Fa. Ivoclar, Schaan, Lichtenstein) mit die niedrigsten Messwerte für die maximale Sintertemperatur. Dieser besitzt wie die Brennronde und der Honeycomb-Thermo-Tray (Fa. Heraeus Kulzer, Hanau) eine runde Grundform und weist den drittgrößten Durchmesser auf. Den Grund für die niedrigen Messwerte sehen wir zum einen in der Verwendung von Siliziumnitrid als Baumaterial. Dieser Stoff weist eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität auf (Askeland 1996). Zum anderen werden diese Materialeigenschaften durch die massive Bauweise des Trägers noch zusätzlich verstärkt. Die Temperaturkurven dieser beiden Träger zeigen den flachsten Temperaturanstieg.

Die bei den Leerlaufbränden aufgetretenen Temperaturabfälle kurz vor Erreichen der Haltephase lassen sich durch das Einströmen kalter

Luft während dem Ende der Unterdruckphase erklären. Dieser Kurvenverlauf ist mit den Brenngutträgern im Ansatz sichtbar, aber bei weitem nicht so ausgeprägt. Dies liegt unseres Erachtens an der Speicherung der Wärme durch die Träger. Beim Einströmen der kalten Luft, reicht die gespeicherte Wärme aus, um den Wärmeverlust im Umfeld der externen Thermosonde zu kompensieren. Der initiale Zacken im Kurvenverlauf kurz nach Erreichen der Haltephase ist in allen Aufzeichnungen mehr oder weniger deutlich sichtbar. Eine Erklärung für den veränderte Kurvenverlauf im Leerlauf kann auch durch das veränderte Abstrahlverhalten im Ofenraum gefunden werden.

Eine vergleichende Betrachtung der Temperaturabweichungen von den Leerlauftemperaturen zeigt, dass es bei den niedrigbrennenden Keramiken außerordentlich häufig zu einer Anhebung der Temperaturwerte bei Verwendung der Brenngutträger kommt. Bei den mittel- und hochbrennenden Keramiken sind neben den Temperaturerhöhungen im Vergleich zur Leerlauftemperatur auch zahlreiche Absenkungen der Temperaturwerte durch verwendete Träger zu erkennen. Dies ist mit einer schnelleren Adjustierung der Temperaturen im höheren Temperaturbereich zu erklären.

6.3 Die Sinterschrumpfung

Während der Sinterung von keramischen Massen kommt es zu Volumenschrumpfungen, die bei den Feldspatkeramiken laut Literatur zwischen 10,0 – 15,0 % linear liegen (Schmalz 1994, Kappert, Krah 2001). Diese Schrumpfungen werden durch Diffusionsvorgänge hervorgerufen, welche zu Porenelimination innerhalb des Sintergutes

und zum Fließen der Flüssigphase führen (SALMANG 1982, SALMANG 1983). Die Höhe des Schrumpfungsgrades hängt dabei stark von der, dem System zugeführten Wärmeenergie und der Größe der Pulverteilchen ab (Krumbholz 1986, Rosenstiel 1987, Rasmussen ST 1997). Wie beschrieben, ist bei linearer Erhöhung der Sintertemperatur ebenfalls ein weitgehend linearer Anstieg der Sinterschrumpfung bei allen verwendeten Keramikmassen festzustellen (Rosenstiel 1987). Ursache hierfür ist eine durch die Temperaturerhöhung gesteigerte Zufuhr von Wärmeenergie, welche eine vollständigere Sinterung der keramischen Massen zur Folge hat. Analog kann beobachtet werden, dass eine geringere Sintertemperatur bei allen keramischen Massen auch eine geringere Sinterschrumpfung zur Folge hat. Ursache ist die Abnahme der Sintertemperatur und die dadurch verringerte Zufuhr von Wärmeenergie.

Diese Beeinflussungen der Sinterschrumpfung durch Modifikation der ofeninternen Temperatursteuerung sind bekannt und bereits beschrieben (Pliefke 2000, Krumbholz 1986). Die eigenen Untersuchungen zeigen, dass auch der Brennträger die Sinterschrumpfung der keramischen Proben mit beeinflusst. Grund für diese Erkenntnis ist, dass bei den Sinterungen der jeweiligen keramischen Masse Schrumpfungsunterschiede zwischen den einzelnen Versuchsbränden festgestellt werden können, obwohl diese mit dem selbem Brennprogramm gefahren wurden. Die Ursache für diese Differenzen sehen wir wiederum in der Verwendung der verschiedenen Brenngutträger, wie dies in unseren Versuchen reproduzierbar nachgebildet wurde. Temperaturverläufe und Sinterschrumpfungen stehen in direkter Beziehung zueinander. Es kann aufgezeigt werden, dass bei Brenngutträgern deren Proben eine geringe Sinterschrumpfung aufweisen, die erfasste maximale

Sintertemperatur ebenfalls niedriger ausfällt. Ursache dafür ist die in Kapitel 6.2 erläuterte Beeinflussung der Sintertemperatur durch die physikalischen Eigenschaften der einzelnen Träger.

Die Sinterschrumpfung und der WAK jeder keramischen Masse ist auf die verwendete metallische Legierung eingestellt (Schwickerath, Mokbel 1983). Deren Veränderung durch die Brenntemperatur führt zu einer Beeinflussung der Dauerfestigkeit der mechanischen Haftung zwischen Legierung und keramischer Verblendung (Püchner 1971, Claus 1982, Rosi 1995, Böhm 2001). Abweichende Brennbedingungen können damit potentiell zu einer erhöhten Abplatzrate und Bruchneigung über die Tragezeit führen.

6.4 Die Oberflächenrauigkeit

Im Zuge der Sinterung von keramischen Massen kommt es zur Ausbildung eines neuen Körpers mit einer gemeinsamen Oberfläche. Die Qualität solch einer Oberfläche bestimmt maßgeblich mit, welche physikalischen Eigenschaften eine keramische Verblendung aufweist (De Jager 2000, Bhamra 2002, Fischer 2003). Im Idealfall soll eine keramische Verblendung eine geringe Oberflächenrauigkeit aufweisen, dies bedeutet sie muss so weit wie möglich frei sein von Rissen, Poren und Rillen. Zur Bewertung der Qualität von Oberflächen werden zur technischen Beschreibung die Größen Rz und Ra herangezogen. Dabei handelt es sich bei Ra um den arithmetischen Mittelrauwert und bei Rz um die gemittelte Rautiefe (DIN 1998). Für eine keramische Verblendung ist es das Ziel, die Werte für Rz und Ra so klein wie möglich zu halten. Grund dafür ist, dass Verblendungen mit einer geringen Oberflächenrauigkeit bessere

physikalische Eigenschaften aufweisen (Folwaczny 1998). So sind die Biegefestigkeit, die chemische Beständigkeit und die Plaquesresistenz wesentlich besser als bei Verblendungen mit einer hohen Oberflächenrauigkeit (Jäger, Feilzer et al. 2000, Ritter 1975, Schwickerath 1987, Bieniek 1993, Schäfer 1993, Tinschert 1996, Schwöbel 2003, Tschernin 2003). Weiterhin haben Verblendungen mit einer hohen Oberflächenrauigkeit eine Lichtbrechung, welche dem natürlichen Zahn weit weniger ähnelt (Kappert et al. 1996, Il-Jang Kim 2003). Um eine Oberfläche zu erreichen, welche eine geringe Rauigkeit aufweist, muss die Brandführung innerhalb der Brennkammer optimal für die jeweilige keramische Masse durchlaufen werden. Die zu beeinflussenden Hauptfaktoren für solch eine optimale Brandführung sind die Zeit (t), die Temperatur (T) und die Einstellung des Unterdrucks (Biffar, Klinke 1995, Cheung, Darvell 2002). Durch unsere Experimente und die dadurch erlangten Ergebnisse können wir nachweisen, dass durch die Nutzung unterschiedlicher Trägersysteme eine Beeinflussung der Sintertemperatur stattfindet. Als Folge dieser Beeinflussung kommt es zur Ausbildung unterschiedlicher Oberflächerauigkeiten in Abhängigkeit vom verwendeten Brenngutträger. So können wir nachweisen, dass die keramischen Proben, die auf der Brennrunde und dem Honeycomb-Thermo-Tray (Fa. Heraeus Kulzer, Hanau) gesintert wurden, durchgehend die niedrigsten Werte für die Oberflächenrauigkeit nach Rz aufweisen. Dies kann auf den Fakt zurückgeführt werden, dass bei der Nutzung dieser Träger die höchsten Sintertemperaturen gemessen wurden. Die höchsten Werte für Rz waren bei den Proben zu messen, welche mit Hilfe des Brennuntersatzes Wabe (Fa. Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen) und des Siliziumnitrid-Brenngutträgers (Fa. Ivoclar, Schaan, Lichtenstein)

gesintert wurden. Bei der Nutzung dieser Träger sind die niedrigsten Werte für die maximale Sintertemperatur zu messen.

Diese Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit der keramischen Proben wird durch die lichtmikroskopischen Untersuchungen mit der Hellfeld - und Nomarski - Technik auch in der qualitativen Betrachtung bestätigt. Die qualitative Beurteilung unterstützt die Aussagen aus der Rautiefenmessung und der Sinterschrumpfung, um die auf nur auf bestimmte Orte des Prüfkörpers beschränkte Messung der Parameter auf die Gesamtheit der Probe übertragen zu können. Dies beugt Fehlinterpretationen aufgrund zufälliger Messschwankungen vor.

Bei den Proben, welche mit der Brennrunde und dem Honeycomb-Thermo-Tray (Fa. Heraeus Kulzer, Hanau) gesintert wurden, sind die homogensten Oberflächenstrukturierungen zu erkennen. Wiederum die am stärksten inhomogenen Oberflächen weisen die Proben auf, welche mit Hilfe des Siliziumnitrid-Brenngutträgers (Fa. Ivoclar, Schaan, Lichtenstein) gesintert wurden. Für alle qualitativen Kontrollen von Oberfläche und Porosität in der Grenzfläche können die gleichen Abstufungen wie mit den gemessenen Größen hergeleitet werden. Damit werden die Ergebnisse der Messungen bestätigt und können als repräsentativ für die gesamte Probe angesehen werden.

Da in der vorliegenden Untersuchung nur ein Ofentyp zur Anwendung kam, gelten die Ergebnisse bei Betrachtung der absoluten Größen nur für diesen Ofen. Das Wechselspiel zwischen der Ofenkonstruktion, dem Brennt Träger und dem Brennobjekt macht eine Übertragung der Absolutwerte auf andere Öfen nicht möglich. Die relativen Beziehungen zwischen den Ergebnissen der verschiedene

Brennträger werden sich jedoch in jedem Ofen ähnlich, wenn auch mit unterschiedlicher Ausprägung, zeigen.