

Sachbericht für den Zeitraum 01.04.2011 bis 30.06.2012

des ZIM-Kooperationsprojekts

Prototypenherstellung für gasdurchlässige Tiefziehwerkzeuge mittels Schichtenkeramikverfahren

Förderkennzeichen: KF3000501SU1

und

Förderkennzeichen: KF2609403SU1

und

Förderkennzeichen: KF2817291SU1



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

DECHEMA-Forschungsinstitut

Name der Forschungsstelle

Frankfurt am Main, 18.09.2012

Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters

Zusammenfassung des Projekts

Im vorliegenden Projekt wurde ein neuartiges Werkzeug aus Schichtenkeramik für das thermoplastische Vakuumtiefziehen entwickelt. Das entwickelte Formwerkzeug verfügt über eine intrinsische Gasdurchlässigkeit, bedingt durch die feine Porosität der Keramik, und über eine sehr glatte Oberfläche, die einen hohen Detailreichtum ermöglicht. Bei dem entwickelten Werkzeug ist das nachträgliche Einbringen von Bohrungen nicht nötig und die Oberflächendetails bleiben vollständig erhalten. Auch lassen sich hohe Kanten, die mit herkömmlichen Werkzeugen nur schwierig abgeformt werden können, sehr gut abbilden.

Es wurden Untersuchungen zur mechanischen Stabilität sowie zur Porosität und Gasdurchlässigkeit der Schichtenkeramik durchgeführt, um die Materialeigenschaften an die Anforderungen für ein Thermoformwerkzeug anzupassen. Zudem wurde das Sinterverhalten der Keramik (Schwindung des Werkzeugs beim Brennvorgang) untersucht.

Schließlich wurde ein Prototyp-Werkzeug zur Abformung eines Kunstobjekts erstellt. Ein Unternehmen der Kunststoffindustrie konnte erfolgreich Abformungen mit verschiedenen Kunststoffen erzeugen, die sich durch eine hervorragende Wiedergabe der feinen Details auszeichnen.

1. Einleitung

Das Thermoformen oder thermoplastisches Tiefziehen ist eine Methode, um dünne Folien oder Platten thermoplastischer Kunststoffe in eine gewünschte Form zu bringen. Typische Beispiele für Bauteile, die durch Thermoformen hergestellt werden, sind Hauben und Verkleidungen für Maschinen und Anlagen, Werbeträger und Verpackungsmittel. Als Kunststoffe, die im Thermoverfahren gut umgeformt werden können, kommen zum Beispiel Polycarbonat, Polyethylen, Polyvinylchlorid, Polypropylen oder auch Polystyrol in Frage. Beim thermoplastischen Tiefziehen wird die Kunststoffplatte zunächst meist durch IR-Strahler erhitzt, bis sie einen formbaren Zustand erreicht, und anschließend wird eine Form (das sogenannte Werkzeug) gegen die Kunststoffplatte gedrückt. Gleichzeitig wird das Luftvolumen zwischen Kunststoff und Form mittels einer Vakuumpumpe abgesaugt, so dass der Kunststoff in die Form gezogen wird und eine exakte Passform erreicht wird. Nach dem Abkühlen durch den Kontakt mit dem Werkzeug wird das Bauteil mittels Druckluft entformt. Ein typischer Aufbau ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

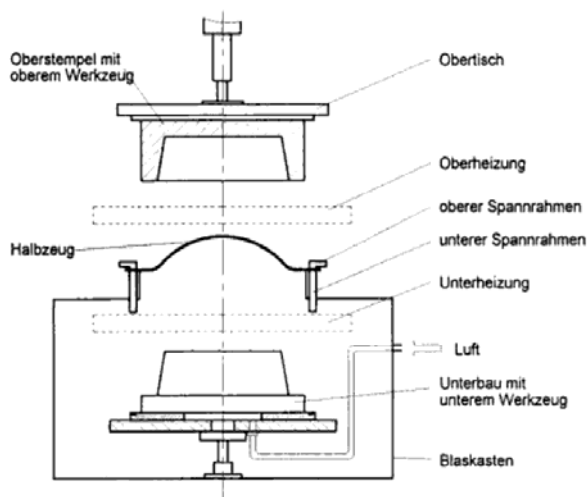


Abbildung 1: Typischer schematischer Aufbau einer Thermoformanlage (Quelle: Throne/Beine, Thermoformen, Hanser, 1999)

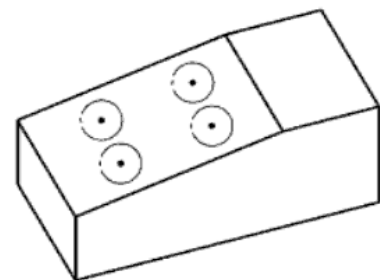


Abbildung 2: Abdrücke durch Ansaugbohrungen (Quelle: Illig, Thermoformen in der Praxis, Hanser, 2008)

Abbildung 2 illustriert die durch die Ansaugbohrungen im Produkt entstehenden Abdrücke, die unerwünscht sind.

2. Stand des Wissens

Die Herstellung des Werkzeugs (d.h. der Form für die Kunststoffteile) trägt beim thermoplastischen Tiefziehen insbesondere bei kleinen Stückzahlen (an produzierten Kunststoffteilen) einen großen Anteil an den Gesamtkosten der Produktion. Daher spielt sowohl der Preis für die Herstellung des Werkzeugs, aber auch die Standzeit des Werkzeugs, also letztlich die Anzahl der mit einem Werkzeug herstellbaren Produkte eine große Rolle. Herkömmliche Verfahren für die Herstellung von Thermoformwerkzeugen sind die zerspanende Bearbeitung von Aluminiumblöcken oder teilweise geeigneter Kunststoffmaterialien (z.B. PUR-Schäume) oder das Gießen von Formen mit einer Mischung von Aluminiumpulver und Epoxidharz. Bei diesen Verfahren muss über nachträglich eingebrachte Bohrungen gewährleistet werden, dass die Luft aus dem Volumen zwischen Form und Kunststoff abgesaugt werden kann. Selbst die leicht zu bearbeitenden PUR-Schäume verfügen lediglich über eine geschlossene Porosität, die keinen Gasfluss durch die Form ermöglicht. Daher müssen auch bei diesem Werkstoff Saugbohrungen eingebracht werden. Viel kritischer ist jedoch die geringe Standzeit eines Werkzeugs aus PUR-Schaum, die oft nur wenige (etwa <20) Abformungen gestattet, bevor das Werkzeug sich verformt oder beim Entformen zerstört wird.

Darüber hinaus kann über eine zerspanende Bearbeitung nur ein gewisses Maß an Detailreichtum erreicht werden – sehr feine Details wie z.B. die Porenstruktur der menschlichen Haut lassen sich auf diese Weise nicht abbilden.

3. Aufgabenstellung

Ziel des vorliegenden Projekts war die Herstellung eines funktionsfähigen Prototypen eines luftdurchlässigen Thermoformwerkzeugs aus Schichtenkeramik. Ein entscheidender Vorteil eines solchen keramischen Tiefziehwerkzeugs ist die einfache Herstellung der Form im Schlicker-Verfahren. Dabei werden in einem sukzessiven Verfahren mehrere Lagen aus feinem Schlicker und einer Besandung mit variabler Korngröße übereinander geschichtet. Durch die Verwendung von sehr feinen Pulverkörnungen für die ersten Schlicker-Lagen bleiben selbst feinste Details erhalten und auch komplexere Geometrien lassen sich einfach abformen, ohne dass eine aufwendige zerspanende Bearbeitung erforderlich ist. Zudem ist die komplette Form gasdurchlässig, weshalb der thermoplastische Kunststoff gleichmäßig in alle Ecken der Form gezogen wird, ohne dass Saugbohrungen eingebracht werden müssen. Dadurch wird eine sehr hohe Abformgenauigkeit erzielt und Abbildungsfehler, wie sie bei der Verwendung von Saugbohrungen entstehen, werden vermieden. Ein abschließender Brennprozess führt zudem zu einer sehr guten mechanischen Stabilität.

Um die Anforderungen an einem funktionsfähigen und marktfähigen Prototyp eines schichtenkeramischen Thermoformwerkzeugs zu erfüllen, müssen die mechanischen und die mikrostrukturellen Eigenschaften hinsichtlich größtmöglicher Gasdurchlässigkeit und hoher mechanischer Stabilität optimiert werden. Da über die

Zusammenhänge dieser beiden Eigenschaften bei den neuartigen Schichtenkeramiken zu Beginn des Vorhabens keine Erkenntnisse vorlagen, wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt.

4. Darstellung der erreichten Ergebnisse

4.1. Herstellung der Probekörper

Die Herstellung der Probekörper aus der neuartigen Schichtenkeramik erfolgte bei der Kunstguss-Team Grundhöfer GmbH (KTG). In einem ersten Schritt wurden Silikonnegativformen nach den Stahlmodellen des DECHEMA-Forschungsinstituts (DFI) angefertigt (siehe Abbildung 3). Die Abmessungen wurden wie folgt gewählt:

- Rechteckplatten (150x150x10mm³) für die Porosimetrie und die Dilatometrie
- Probekörper (80x10x6mm³, mit Einkerbung) für die 4-Punkt Biegeversuche



Abbildung 3: Stahlmodelle und angefertigte Silikonnegativform für die 4-Punkt Biegeproben (links) und die Rechteckplatten (rechts).

Die fertigen Silikonformen wurden nach dem Aushärten mit einem Trennmittel versehen und der Schichtaufbau mit dem keramischen Schlicker und den jeweiligen Körnungen wurde bis zur gewünschten Stärke ausgeführt. In Abbildung 4 ist Herr Grundhöfer bei der Fertigung der 4-Punkt Biegeproben aus Schichtenkeramik zu sehen. Zwischen der Herstellung der einzelnen Schichten verweilte die Form in einer Trocknungskammer. Nachdem die gewünschte Grünstandfestigkeit erreicht war, wurden die Probekörper aus der Negativform entnommen, wie in Abbildung 5 zu sehen ist. Ein Teil der Probekörper wurde bei der KTG bei 1240°C gebrannt. Der andere Teil wurde im ungebrannten Zustand (als Grünling) am DFI getestet.



Abbildung 4: Herr Grundhöfer bei der Anfertigung von 4-Punkt Biegeproben in der Silikonform.

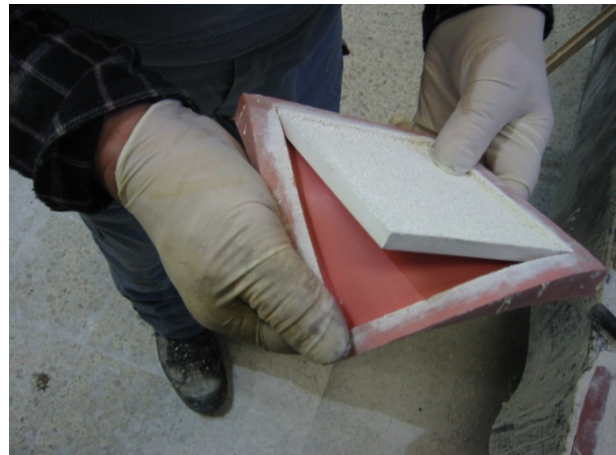


Abbildung 5: Entnahme der fertigen Grünlinge aus den Silikonnegativformen: 4-Punkt Biegeproben (links) und Rechteckplatte (rechts).

Aus den durch die KTG hergestellten Rechteckplatten ($150 \times 150 \times 10 \text{ mm}^3$) wurden am DFI jeweils mehrere Kreisplatten und kleine Zylinderproben für die Durchführung der Experimente ausgebohrt. Die Kreisplatten ($\text{Ø}=50 \text{ mm}$) wurden für die Porosimetrie verwendet, die kleinen Zylinderproben ($\text{Ø}=5 \text{ mm}$) wurden für die Dilatometrie (Untersuchung der Sinterprozesse) verwendet. Die Proben für die mechanischen 4-Punkt Biegeversuche wurden seitens der KTG direkt von metallischen Proben abgeformt und benötigten keine weitere Nachbearbeitung. In den Abbildungen 6 bis 8 sind die verwendeten Probekörper gezeigt. Zusätzlich wurden Rechteckproben ($20 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$, ohne Abbildung) aus den Platten für die Mikrostrukturanalyse gefertigt.

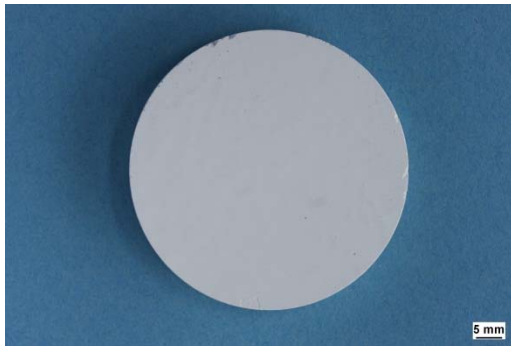


Abbildung 6: Aus den Rechteckplatten ausgebohrte Kreisproben ($\varnothing=50\text{mm}$) für die Porosimetrie. Das obere Bild zeigt die glatte Oberseite und das untere Bild die raue Unterseite.

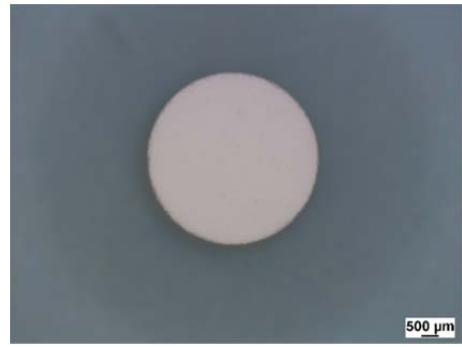


Abbildung 7: Aus den Rechteckplatten ausgebohrte Zylinderproben ($\varnothing=5\text{mm}$) für die Dilatometrie.



Abbildung 8: Mittels Schichtenkeramik-Verfahren aufgebaute 4-Punkt Biegeprobe

Der Schichtaufbau wurde variiert, um den Einfluss verschiedener Besandungskörnungen auf die Eigenschaften der Keramik zu untersuchen. In Tabelle 1 sind die verschiedenen Varianten aufgelistet. Im Folgenden werden die Kurzbezeichnungen für die verschiedenen Varianten verwendet. Abbildung 9 verdeutlicht den Schichtaufbau anhand einer schematischen Zeichnung.

Schlicker	Besandung	Brennparameter	Kurzbezeichnung
Silikat-Binder & Al ₂ O ₃ (45µm)	Al ₂ O ₃ 0,1-0,3 mm (feinkörnig)	Grünling	fein
Silikat-Binder & Al ₂ O ₃ (45µm)	Al ₂ O ₃ 0,1-0,3 mm (feinkörnig)	Gebrannt 1240°C	fein
Silikat-Binder & Al ₂ O ₃ (45µm)	Al ₂ O ₃ 0,5-1 mm (grobkörnig)	Grünling	grob
Silikat-Binder & Al ₂ O ₃ (45µm)	Al ₂ O ₃ 0,5-1 mm (grobkörnig)	Gebrannt 1240°C	grob
Silikat-Binder & Al ₂ O ₃ (45µm)	1 x feinkörnig grob bis Finish	Grünling	fein & grob
Silikat-Binder & Al ₂ O ₃ (45µm)	1 x feinkörnig grob bis Finish	Gebrannt 1240°C	fein & grob
Silikat-Binder & Al ₂ O ₃ (45µm)	Fein & grob, vorgemischt	Grünling	gemischt
Silikat-Binder & Al ₂ O ₃ (45µm)	Fein & grob, vorgemischt	Gebrannt 1240°C	gemischt
Silikat-Binder & Al ₂ O ₃ (45µm)	1 x feinkörnig grob bis Finish	Gebrannt 1150°C (Energieeinsparung)	fein & grob

Tabelle 1: Auflistung verschiedener Herstellungsverfahren für Proben aus Schichtenkeramik.

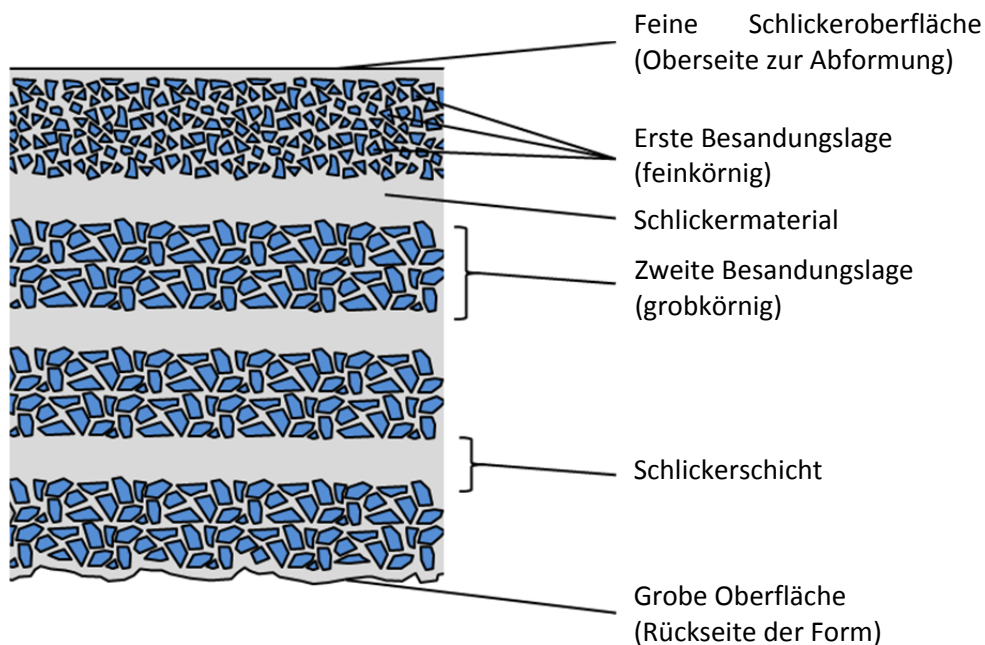


Abbildung 9: Schematischer Schichtaufbau der Schichtenkeramik am Beispiel der Variante „fein & grob“.

4.2. Mikrostrukturanalyse

Die Mikrostruktur der Schichtenkeramik wurde mittels Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Abbildung 10 zeigt zwei lichtmikroskopische Aufnahmen der Schichtenkeramik im Querschliff. Deutlich erkennbar ist der schichtweise Aufbau mit abwechselnden Lagen aus feinem Schlicker und der Besandung aus gekörntem Al_2O_3 . Die linke Aufnahme zeigt eine Probe, die mit einer feinkörnigen Besandung hergestellt wurde, während für die rechte Probe eine größere Körnung verwendet wurde. Die glatte Seite der Probe, die für die Abbildung der feinen Details sorgt, ist in den Bildern unten gelegen, am oberen Rand der Bilder ist die raue Hinterseite (Saugseite) zu sehen. Teilweise sind große Poren zu erkennen, die mit blauem Einbettmittel (nötig für Probenpräparation) gefüllt sind.

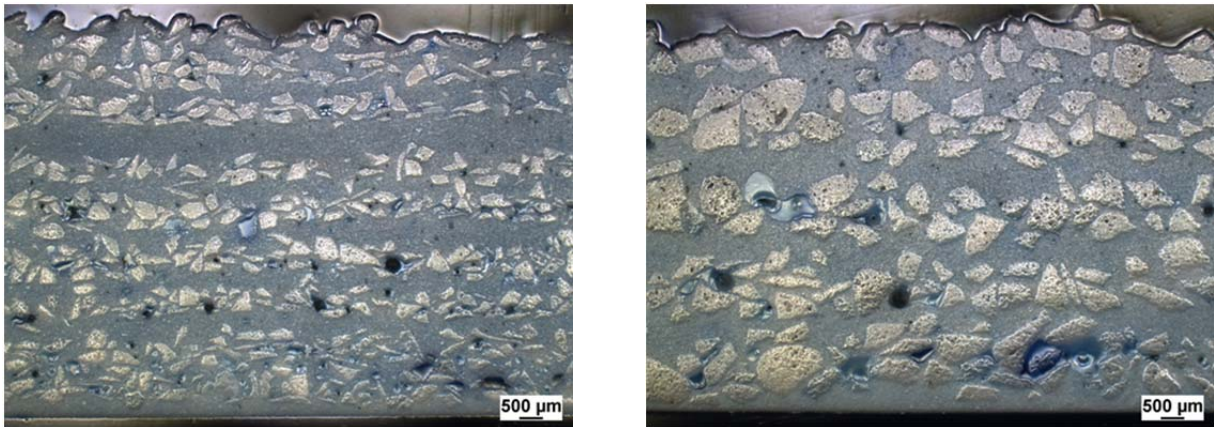


Abbildung 10: Lichtmikroskopische Aufnahmen (Querschliffe) von zwei im Schichtenkeramik-Verfahren aufgebauten Proben. Links wurde eine feine Körnung der Besandung verwendet, im rechten Bild wurde die Keramik mit grober Körnung hergestellt. Oben ist jeweils die raue Oberfläche und unten die glatte Oberfläche der Keramik zu erkennen.

In Abbildung 11 sind mit höherer Vergrößerung die Mikrostruktur eines Besandungskorns aus Al_2O_3 (links) und des Schlickermaterials (rechts) gezeigt. Aufgrund der ähnlichen Grauwerte in beiden Bereichen lässt sich jedoch mit bildanalytischen Methoden keine Porositätsbestimmung aus den lichtmikroskopischen Bildern erreichen.

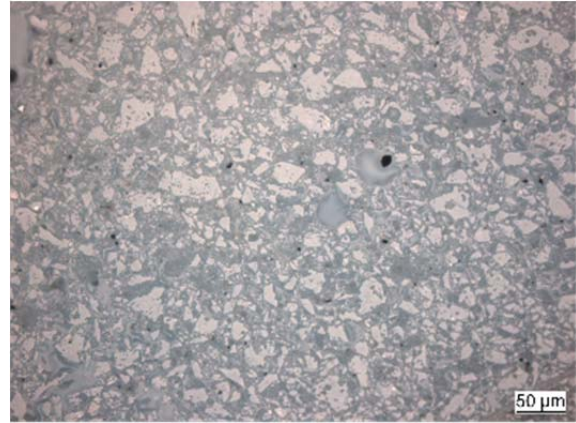
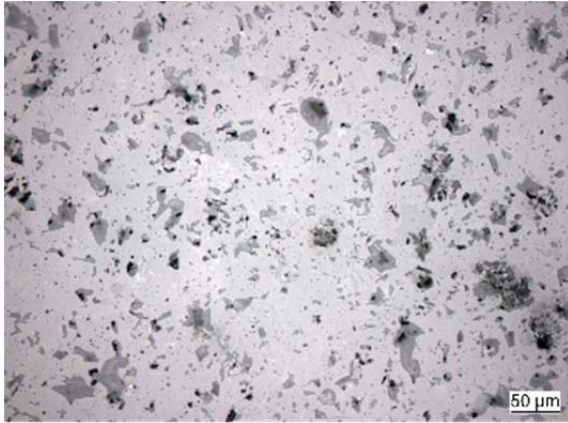


Abbildung 11: Lichtmikroskopische Aufnahmen mit höherer Vergrößerung von einem Al₂O₃-Korn (links) und dem Schlicker (rechts).

Es wurden daher am Rasterelektronenmikroskop (REM) elektronenmikroskopische Aufnahmen der Proben angefertigt, wie in Abbildung 12 gezeigt ist. In den REM-Bildern erscheint das Oxid der Keramik als hellgrau gefärbter Bereich, das Einbettmittel bildet sich in dunklerer Farbe ab. Über eine Schwellenwertbildung kann aus den REM-Aufnahmen schließlich die Flächenporosität mittels Bildanalyse bestimmt werden. In Abbildung 12 ist die Porosität farblich (gelb) hervorgehoben.

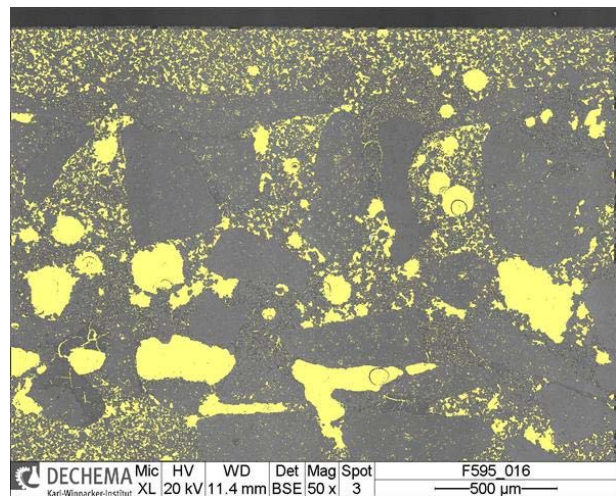
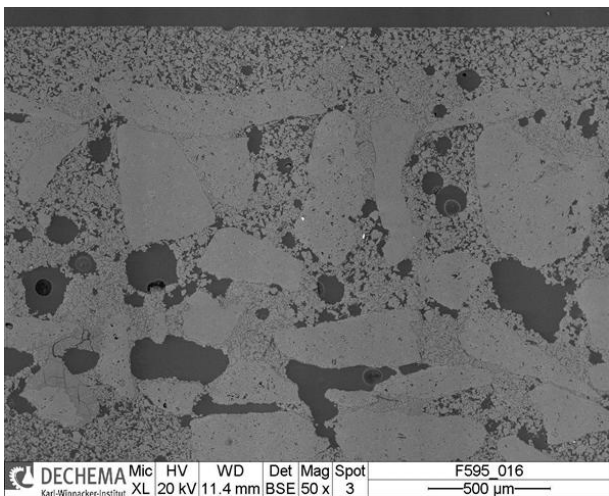


Abbildung 12: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (links) und bildanalytische Bestimmung der Flächenporosität (rechts). Im gewählten Bildausschnitt sind die Poren gelb dargestellt, es liegt eine Flächenporosität von 20,9% vor.

Abbildung 13 zeigt die bildanalytisch bestimmte Flächenporosität der verschiedenen Probenvarianten. Es zeigt sich, dass die Porosität der Grünlinge durchweg leicht geringer ist, als die Porosität der gebrannten Schichtenkeramik. Dies ist durch die Umwandlung des Silikat-Binders während des Brennvorgangs zu erklären. Es kommt hierbei zur Freisetzung von Kristallwasser und einer Umwandlung des Silikats in Mullit und amorphes SiO₂. Dies resultiert in einer geringen Zunahme der Porosität durch den Brennprozess bei gleichzeitig einsetzender Schwindung (vgl. Abschnitt 4.4 – Dilatometrie). Die gemessene Flächenporosität bewegt sich für alle Schichtungsvarianten im Bereich von 19% bis 28%.

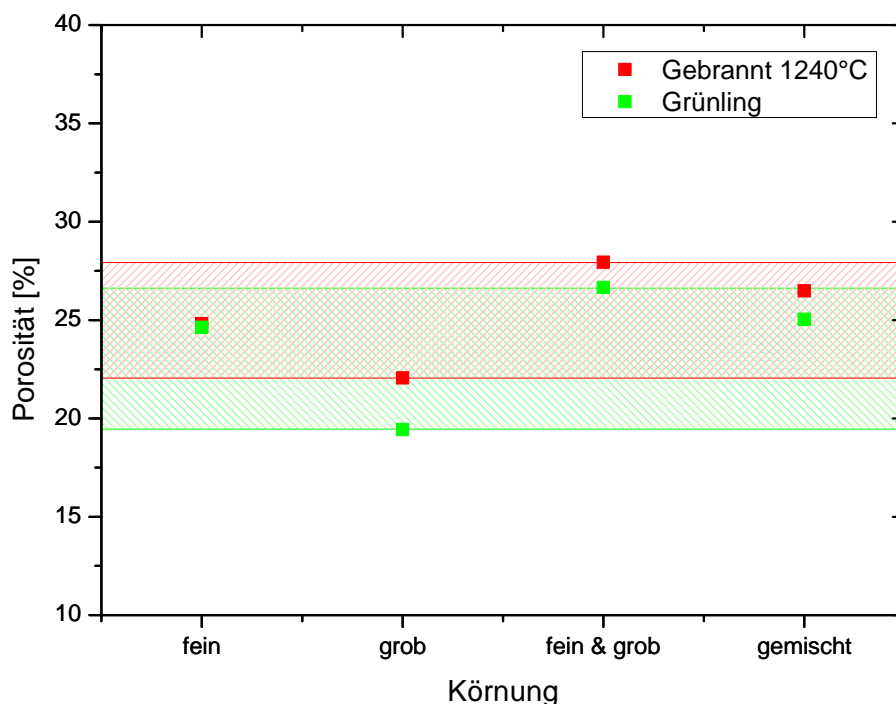


Abbildung 13: Vergleich der Flächenporosität der untersuchten Probenvarianten. Es zeigt sich eine etwas geringere Porosität bei den Grünlingen im Vergleich zur gebrannten Schichtenkeramik.

4.3. Gasdurchlässigkeit

Die Gasdurchlässigkeit der hergestellten Keramiken wurde mittels Porosimetrie untersucht. Hierbei wurde Druckluft zur Prüfung verwendet und bei verschiedenen Vordrücken der spezifische Gasfluss durch die Probe gemessen. Wie in Abbildung 14 zu sehen, ist die Gasdurchlässigkeit der gebrannten Keramik etwa 4 mal höher als die Gasdurchlässigkeit der Grünlinge. Jedoch weisen die Grünlinge eine dünne Schicht aus Trennwachs an der Oberfläche auf, die verwendet wird, um die Grünlinge ohne Beschädigung aus der Silikonform entnehmen zu können. Diese Wachsschicht könnte den Gasdurchfluss behindern. Daher wurden die Grünlinge für 30 Minuten bei 400°C gebrannt. Diese Temperatur ist ausreichend, um das Trennwachs zu verbrennen, aber noch unterhalb der Umwandlungstemperatur des Silikats von etwa 950°C.

Der spezifische Gasfluss durch die Keramik liegt für 1,5 bar Druckdifferenz zwischen 0,3 und 0,4 l/min/cm² für die Grünlinge (nach Brennvorgang bei 400°C) und zwischen 1,2 und 1,5 l/min/cm² für die bei 1240°C gebrannte Keramik.

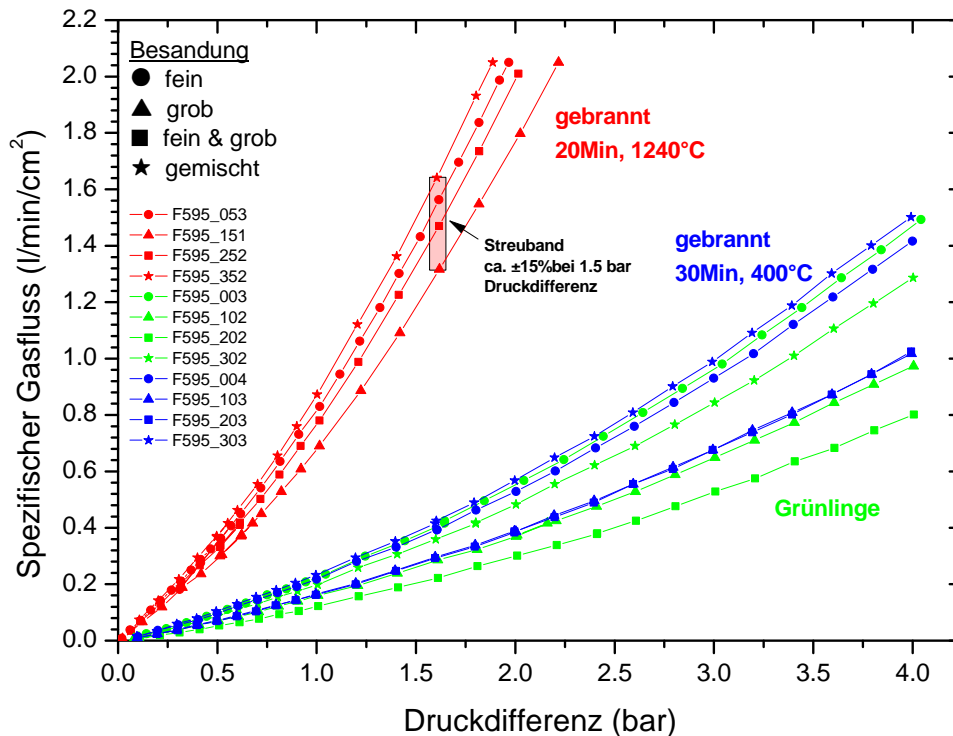


Abbildung 14: Spezifischer Gasfluss durch die feinkörnige Schichtenkeramik als Funktion der angelegten Druckdifferenz. Die gesinterte Keramik weist einen höheren Gasdurchfluss auf.

4.4. Dilatometrie

Das Sinter- bzw. Schwindungsverhalten der Schichtenkeramik wurde mittels Dilatometrie untersucht. Bei dieser Messmethode wird ein kleiner Probekörper kontrolliert auf eine vorbestimmte Temperatur aufgeheizt und dabei die Längenänderung der Probe gemessen. In Abbildung 15 ist im linken Teilbild das Temperaturprofil als rote Kurve und die Längenänderung in schwarzer Farbe für eine Messung an einer feinkörnigen Schichtenkeramik dargestellt. Die Aufheizrate war 5°C/min. und die Maximaltemperatur von 1240°C wurde für 20 Minuten gehalten. Im rechten Teilbild ist die aus den Messdaten bestimmte relative Längenänderung als Funktion der Temperatur aufgetragen. Die Schwindung kann anhand der veränderten Länge bei gleicher Endtemperatur (im Bild 100°C) abgelesen werden. Für die Schichtenkeramik mit feinkörniger Besandung ergibt sich eine Schwindung von 0,76%.

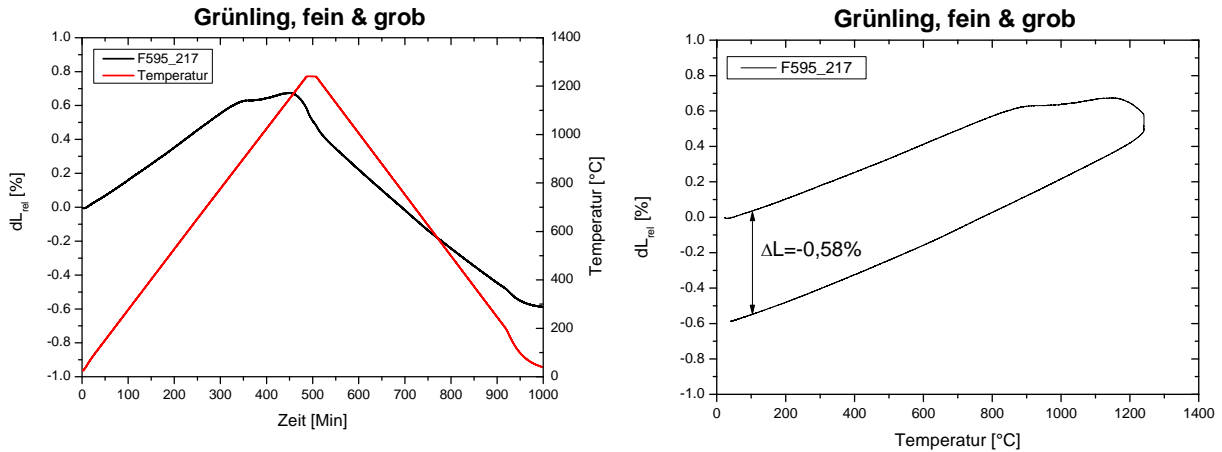


Abbildung 15: Temperaturverlauf und relative Längenänderung einer Schichtenkeramik während des Brennvorgangs bei 1240°C für 20 Minuten (links). Trägt man die Längenänderung als Funktion der Temperatur auf (rechts), kann die Schwindung abgelesen werden. Bei 100°C ergibt sich für die Variante „fein & grob“ eine Schwindung von 0,58%.

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Dilatometrie für die verschiedenen Herstellungsvarianten. Die größte Schwindung ist mit 0,76% bei der feinkörnigen Besandung zu beobachten, die geringste Schwindung tritt bei der grobkörnigen Variante auf. Die beiden Varianten „fein & grob“ sowie „gemischt“ liefern eine Schwindung die mit etwa 0,6% dazwischen liegt. Insgesamt ist die geringe Schwindung der Schichtenkeramik beachtlich, denn herkömmliche Schlickerkeramik (z.B. Sanitärkeramik) zeigt eine Schwindung von 10-20%.

Kurzbezeichnung	Brennparameter	Schwindung
Fein	2,5°C/min 1240°C, 20 Minuten	-0,76%
Grob	2,5°C/min 1240°C, 20 Minuten	-0,35%
fein & grob	2,5°C/min 1240°C, 20 Minuten	-0,58%
Gemischt	2,5°C/min 1240°C, 20 Minuten	-0,56%

Tabelle 2: Brennparameter und resultierende Schwindung der verschiedenen Herstellungsvarianten

4.5. 4-Punkt Biegeversuche

Die mechanischen Eigenschaften der Schichtenkeramik wurden anhand von 4-Punkt Biegeversuchen untersucht. Die Probekörper (siehe Abbildung 8) werden dazu zwischen vier Auflagern eingespannt und bis zum Bruch mechanisch belastet. Die aufgezeichneten Spannungs-Dehnungs-Kurven sind in Abbildung 17 dargestellt. Die Kurven der Grünlinge (links) zeigen einen etwas flacheren Verlauf und weisen eine maximale Spannung von 2,5 bis 4,5 MPa. Das Abknicken der Spannungs-Dehnungs-

Kurven ist dabei nicht abrupt, was auf ein kontinuierliches Risswachstum hindeutet. Durch die stark verzahnte Mikrostruktur und die niedrige maximale Spannung kommt es nicht zu einem kompletten Durchriss, sondern zu einem allmählichen Durchbruch, bei dem nach und nach Teilbereiche der Keramik versagen, aber durch die verzahnte Mikrostruktur noch aneinander haften.

Bei den bei 1240°C gebrannten Proben (rechts) zeigt sich das für keramische Werkstoffe typische spröde Versagen. Das Erreichen der Bruchspannung führt zu einem langen Riss, der fast durch die komplette Dicke der Probe verläuft und sich in einem schlagartigen Abfall der Kurve äußert.

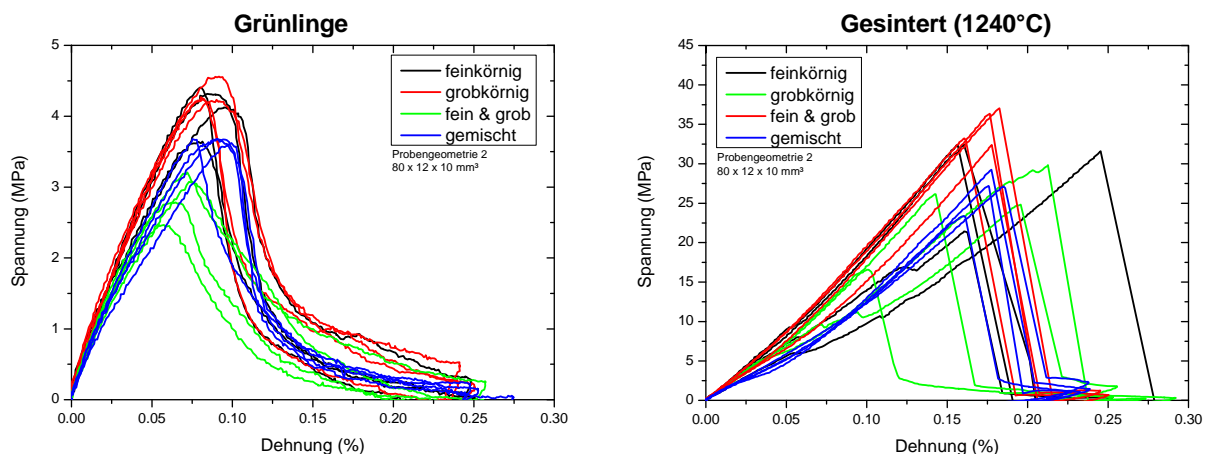


Abbildung 17: Spannungs-Dehnungs-Kurven der Schichtenkeramiken im ungebrannten Zustand (links) sowie nach dem Brennprozess bei 1240°C (rechts).

Der Einfluss der Schichtungsvarianten bzw. der für die Besandung verwendeten Korngrößen auf die Versagensspannung ist in Abbildung 18 gezeigt. Dargestellt ist hierbei der Mittelwert aus vier Messungen als Punktsymbol und der Bereich der Messergebnisse als schraffierter Balken. Aus der Höhe der Balken lässt sich also die Streuung der Messergebnisse ablesen. Die höchste Bruchfestigkeit zeigt die Variante „fein & grob“ bei der zunächst eine Lage mit feiner Besandungskörnung aufgebracht wird und der restliche Schichtaufbau mit grober Besandungskörnung durchgeführt wird. Dieses Ergebnis wurde sowohl für die gebrannten Proben wie auch für die Grünlinge beobachtet – auch hier zeigt die Variante „fein & grob“ die höchste Bruchfestigkeit. Es folgen die Varianten „fein“ und „gemischt“, die schlechtesten mechanischen Eigenschaften zeigt die Variante „grob“ die ausschließlich mit grober Besandung aufgebaut wurde.

Für die Festigkeit der Schichtenkeramik ist also die Verwendung des feinkörnigen Besandungsmaterials insbesondere bei der ersten Lage von Vorteil, da hier eine eng verzahnte Mikrostruktur erzeugt wird und Spannungen besser im Material verteilt werden können.

In einem Versuch zur Energieeinsparung wurde zudem die Temperatur des Brennvorgangs auf 1150°C reduziert, um zu prüfen, ob sich bei leicht verringerter

Temperatur eine ähnlich hohe Festigkeit erzielen lässt. Dies wurde am Schichtsystem „fein & grob“ durchgeführt. Die Bruchfestigkeit nimmt durch die verringerte Temperatur jedoch stark ab und darüber hinaus nimmt die Streuung der Messwerte zu, weshalb der Brennprozess bei 1150°C als weniger geeignet erscheint, um hochfeste Thermoformwerkzeuge zu erstellen.

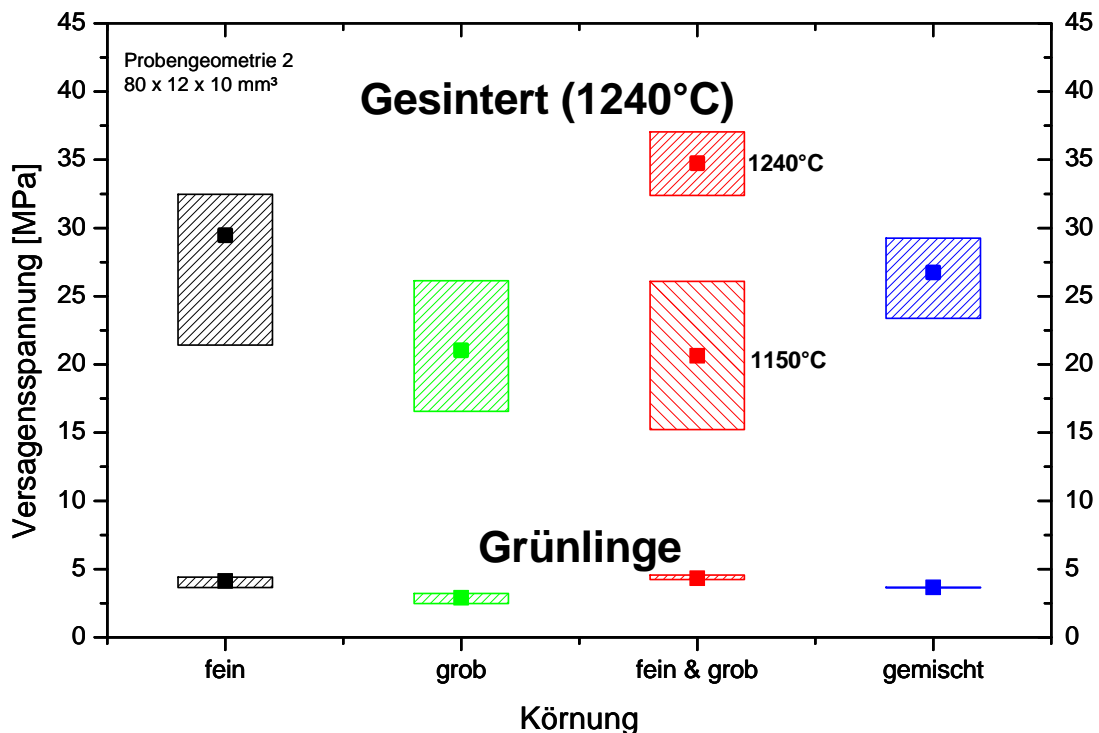


Abbildung 18: Bruchspannung der verschiedenen Schichtenkeramiken als Grünling sowie nach einem Brennprozess bei 1240°C für 20 Minuten.

5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Abbildung 19 zeigt die Gasdurchlässigkeit als Funktion der bildanalytisch bestimmten Flächenporosität. Die Gasdurchlässigkeit nimmt mit zunehmender Porosität zu, die verschiedenen Beschichtungsvarianten unterscheiden sich jedoch nur leicht. Die Variante „fein & grob“ zeigt sich insgesamt als am besten geeignet für die Herstellung eines keramischen Thermoformwerkzeugs. Diese Variante zeigt die höchste mechanische Stabilität bei gleichzeitig hoher Gasdurchlässigkeit. Darüber hinaus ist die feine erste Besandungsschicht von Vorteil, wenn eine Form mit hohem Detailreichtum erstellt werden soll, da sich die feinen Besandungskörner besser den Strukturen anpassen können. Das Schwindungsverhalten der Variante „fein & grob“ ist mit einer Schwindung von -0,6% während des Brennvorgangs noch sehr gut,

wenn man bedenkt, dass typische Keramik z.B. Sanitärkeramik eine Schwindung von 10-20% aufweisen kann. Auch derzeit als Material für Thermoformwerkzeuge eingesetzte Epoxidharz-Aluminiumpulver-Systeme liegen mit einer Schwindung von 0,5 bis 1% in der gleichen Größenordnung bzw. sind leicht schlechter.

Insgesamt konnte somit ein sehr guter Kompromiss zwischen hoher Gasdurchlässigkeit bei gleichzeitig hoher mechanischer Stabilität und geringer Schwindung erzielt werden.

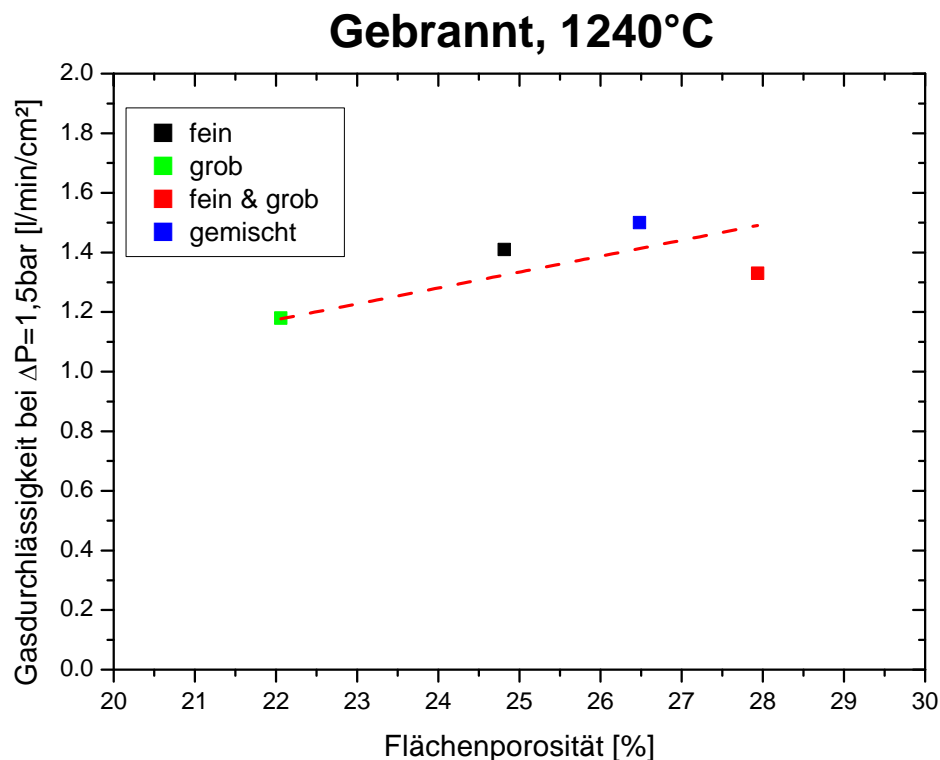


Abbildung 19: Gasdurchlässigkeit der Schichtenkeramik als Funktion der bildanalytisch bestimmten Flächenporosität.

6. Herstellung eines funktionsfähigen Prototyps

Das Ziel des Projekts wurde mit der Herstellung eines funktionsfähigen Prototyps erreicht. Hierfür konnte seitens der Kunstguss Team Grundhöfer GmbH ein Künstler gewonnen werden, der ein Objekt zur Abformung bereitgestellt hat. In Abbildung 20 ist das Kunstobjekt (a) und die damit erstellte Silikonnegativform (b) zu sehen. Weiter sind die keramische Tiefziehform aus Schichtenkeramik (c) und schließlich ein abgeformtes Kunststoffteil aus PVC-Glas (d) gezeigt.

Die keramische Tiefziehform (d.h. das Thermoform-Werkzeug) gibt selbst die feinsten Details des Kunstobjekts sehr gut wieder und weist nur eine minimale Schwindung von etwa 1% auf. Nach Aussagen der SL Kunststofftechnik GmbH ließen sich mit dem Werkzeug problemlos verschiedene Kunststoffe bearbeiten. Es konnten ABS, Polystyrol sowie PVC-Glas erfolgreich tiefgezogen werden, wobei sich

eine homogene Verteilung des Vakuums und daraus resultierend eine gleichmäßige Dicke des Kunststoffes ergab. Das Keramik-Werkzeug zeichnet sich darüber hinaus dadurch aus, dass es eine geringere Wärmekapazität hat als herkömmliche Werkzeuge aus Aluminium bzw. aus mit Aluminiumpulver versetztem Gießharz. Das Keramik-Werkzeug heizt sich dadurch schneller auf und ist schneller einsatzfähig, kühlt aber auch schneller wieder ab und kann somit ohne zusätzliche Wasserkühlung eingesetzt werden. Dies vereinfacht die Anwendung des neuen Werkzeugs und trägt zur Energieeinsparung bei der Herstellung der Kunststoffteile bei.

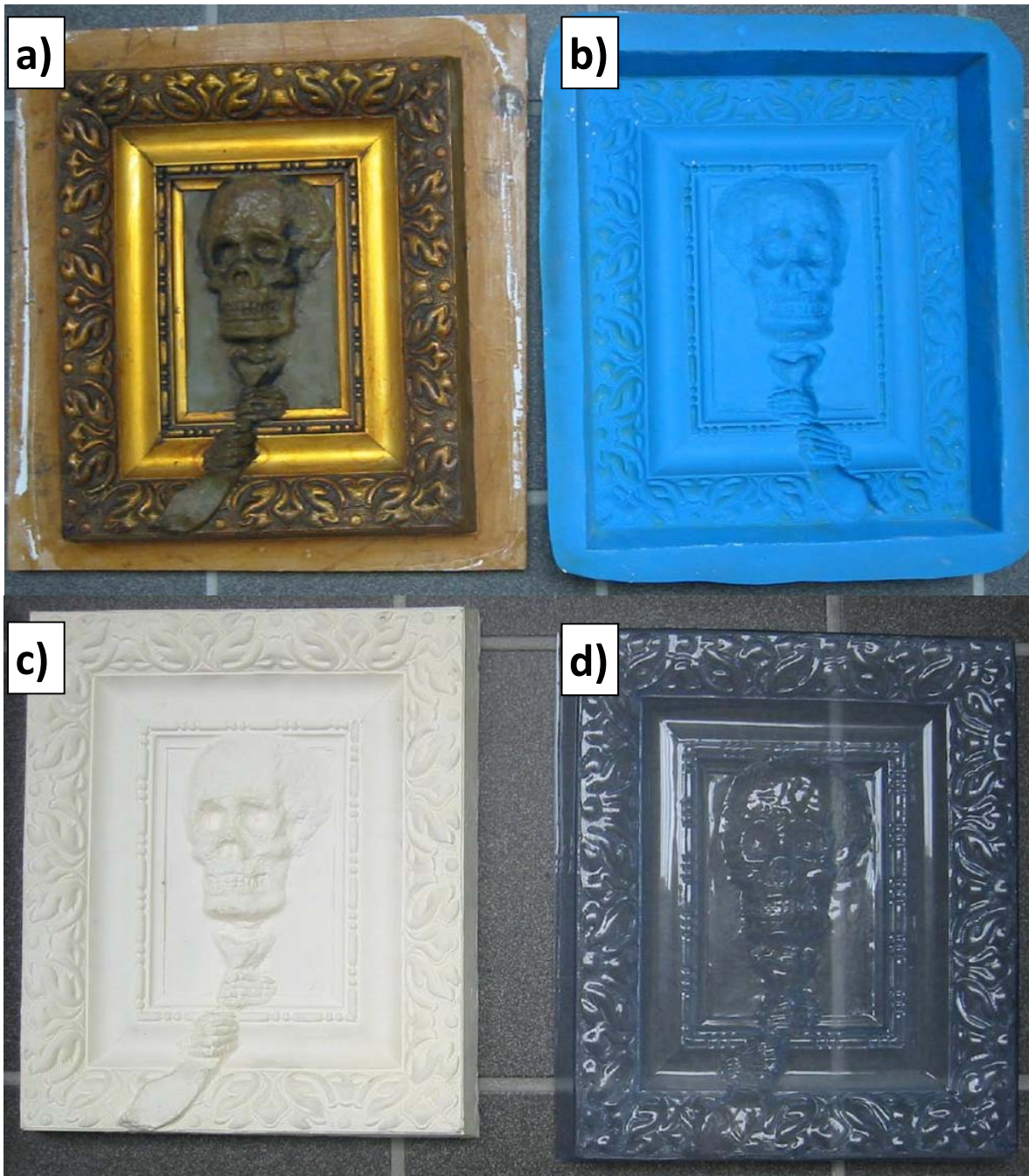


Abbildung 20: Fotostrecke zur Darstellung des Fertigungswegs: (a) Kunstobjekt zur Abformung, (b) Silikonnegativform, (c) keramisches Thermoformwerkzeug und (c) abgeformter Kunststoff.

Die technische Anwendung der keramischen Tiefziehform ist selbstverständlich nicht auf die Herstellung von Kunstobjekten limitiert, sondern ist für alle Anwendungen möglich, bei denen eine fein strukturierte Oberfläche in Verbindung mit einer komplexen Geometrie gewünscht ist. Denkbar wäre z.B. die Fertigung von Formteilen für die Automobilindustrie, wo die Imitation von Lederstrukturen beispielsweise bei Armaturenbrettern Verwendung findet. Ein weiteres Einsatzgebiet könnte die Medizintechnik sein, wenn Kunststoffteile für Prothesen mit hautähnlicher Struktur gefertigt werden sollen.