

Aus der Abteilung für Orale Struktur- und Entwicklungsbiologie  
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Vergleichende Untersuchung zum Einfluss der Position des  
Brenngutes auf Verbundfestigkeit

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Friederike Zimny

aus Berlin

Gutachter:           1. Priv.-Doz. Dr. R. Strietzel  
                          2. Prof. Dr. M. Gente  
                          3. Prof. Dr. W. B. Freesmeyer

**Datum der Promotion: 19.11.2010**

Meinen lieben Eltern gewidmet



# Inhaltsangabe

1	Einleitung .....	1
2	Literaturübersicht .....	3
2.1	Dentallegierungen .....	3
2.1.1	Einteilung von Dentallegierungen .....	3
2.1.2	Aufbrennfähige Dentallegierungen .....	4
2.1.3	Eigenschaften der Legierungen.....	7
2.2	Dentalkeramiken.....	10
2.2.1	Zusammensetzung der Keramik.....	10
2.2.2	Einteilung der Keramik .....	12
2.2.3	Eigenschaften der Verblendkeramik.....	13
2.2.4	Aufbrennen der Keramik.....	17
2.2.5	Brennofen .....	22
2.3	Haftmechanismen zwischen Keramik und Metall .....	26
2.3.1	Adhäsion.....	26
2.3.2	Physikalische Kräfte .....	26
2.3.3	Chemische Kräfte .....	27
2.4	Prüfverfahren der Verbundfestigkeit.....	27
2.4.1	Biegeversuch (nach SCHWICKERATH) .....	28
2.4.2	Drucktest (nach VOSS) .....	29
2.4.3	Scherversuch (nach SCHMITZ/SCHULMEYER) .....	29
2.4.4	Versuch (nach SCHELL/NIELSON) .....	30
2.4.5	Schlagversuch (nach DIN 51155).....	30
2.4.6	Temperatur-Wechsel-Belastungstest (TWB-Test).....	30
2.5	Fehlerursachen für das Versagen des Metall-Keramik-Verbundes.....	31
2.6	Überlebenswahrscheinlichkeit von Metall-Keramik-Restorationen.....	38
2.6.1	In-vitro-Überlebenswahrscheinlichkeit.....	38
2.6.2	In-vivo-Überlebenswahrscheinlichkeit .....	39
3	Material und Methode .....	43
3.1	Prüfkörper .....	43
3.1.1	Herstellung der Metallgerüste.....	44
3.1.2	Schichten der Keramik .....	49

3.1.3	Brennen der Keramik.....	52
3.2	SCHWICKERATH-Test .....	61
3.2.1	Aufbau .....	61
3.2.2	Durchführung.....	62
3.2.3	Auswertung.....	63
3.3	Statistik .....	64
4	Ergebnisse.....	66
4.1	Brennofen VITA Vacumat® 300 .....	67
4.1.1	Wabe .....	67
4.1.2	Keramik .....	69
4.2	Brennofen ZUBLER Vario Press® 300.....	71
4.2.1	Wabe .....	71
4.2.2	Keramik .....	73
4.3	Brennofen IVOCLAR Programat® P90 .....	75
4.3.1	Wabe .....	75
4.3.2	Keramik .....	77
4.4	Vergleich der Brennöfen und Brenngutträger untereinander.....	80
4.5	Visuelle Begutachtung aller Prüfkörper .....	82
5	Diskussion .....	83
5.1	Fehlerdiskussion.....	83
5.1.1	Materialien .....	83
5.1.2	Herstellung der Prüfkörper .....	84
5.1.3	Versuchsaufbau.....	89
5.2	Diskussion der Ergebnisse .....	92
5.2.1	Brennofen VITA Vacumat® 300 .....	93
5.2.2	Brennofen ZUBLER VarioPress® 300.....	94
5.2.3	Brennofen IVOCLAR Programat® P90 .....	95
5.2.4	Brennofen IVOCLAR Programat® P90 bei veränderter Temperatur.....	96
5.2.5	Vergleich der untersuchten Brennöfen und Brenngutträger.....	98
5.3	Praktische Bedeutung .....	99
6	Zusammenfassung .....	103
6.1	Summary .....	105
7	Literaturverzeichnis.....	107
8	Anhang .....	115

---

8.1	Geräte und Zusatzmaterialien .....	115
8.2	Tabellen und Diagramme .....	115
8.2.1	Brennofen VITA Vacumat® 300 .....	116
8.2.2	Brennofen ZUBLER Vario Press® 300.....	128
8.2.3	Brennofen IVOCCLAR Programat® P90 .....	140
8.2.4	Tabelle der In-Vivo-Überlebenswahrscheinlichkeit von Metall-Keramik- Restaurationen .....	154



# 1 Einleitung

Die Forderung der Kliniker nach größerer Festigkeit in den Verblendkronen führte zur Einführung der keramisch verblendeten Metall-Krone [MCLEAN, 1978]. Nicht nur wegen ihrer Abrasionsfestigkeit, auch wegen ihrer Farbbeständigkeit wurden keramisch verblendete Restaurationen schon 1980 gegenüber kunststoffverblendeten Arbeiten vorgezogen [VOß und MEINERS, 1980], denn Kunststoffe neigen durch Änderung der chemischen Struktur zu inneren Verfärbungen und durch Einflüsse aller in der Mundhöhle vorkommender Stoffe (z. B. Speichel, Nahrungsmittel, Tabak) zu äußeren Verfärbungen [SEHER und VIOHL, 1992].

Etwa in der Mitte der 1960er Jahre wurden Metall-Keramik-Verbundsysteme für dentale Restaurationen in Deutschland eingeführt [DORSCH, 1990; EICHNER, 1997; KERSCHBAUM et al., 1997]. Die Metall-Keramik-Restauration basiert auf einer vorteilhaften Kombination der Werkstoffeigenschaften beider Verbundkomponenten. Während das Metall die mechanische Stabilität liefert, steuert die Keramik eine dem natürlichen Zahn ähnliche Oberfläche, Farbe und Wirkung im Licht bei [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Werden sehr hohe ästhetische Anforderungen gestellt, konkurriert keramisch verblendeter Zahnersatz aus Metall heute mit vollkeramischen Systemen [KAPPERT und EICHNER, 2008; SHIRAKURA et al., 2009]. Dabei zeigen vollkeramische Frontzahnkronen verglichen mit keramisch verblendeten Metall-Kronen eine vergleichbare 5-Jahres-Überlebensrate [PJETURSSON et al., 2007]. Bei dem Vergleich von vollkeramischen Brücken mit Brücken aus keramisch verblendeten Metallgerüsten erreichen die vollkeramischen Brücken allerdings nur eine signifikant geringere 5-Jahres-Überlebensrate [SAILER et al., 2007].

Keramisch verblendeter Zahnersatz aus Metall stellt heute nach wie vor die mit Abstand häufigste Form zahnfarbener Kronen- und Brückenversorgung dar und gilt in der Regel als Mittel der ersten Wahl bei dem Erfordernis zahnfarbener festsitzender Restaurationen [GARDNER et al., 1997; LAUER et al., 1998; REITEMEIER et al., 2007; KAPPERT und EICHNER, 2008; BONFANTE et al., 2009]. Ohne die Metall-Keramik-Systeme wäre der heutige hohe Standard der Prothetik nicht denkbar [EICHNER, 1997]. Keramisch verblendeter Zahnersatz aus Metall wird also mittlerweile seit Jahrzehnten

routinemäßig angefertigt, dennoch sind auch heute noch nicht alle Probleme gelöst [EICHNER, 2000].

Es treten Misserfolge durch Sprünge, Rissbildungen, mangelnde Haftung und Frakturen auf [LINDEMANN, 1983; FISCHER et al., 2000]. Wenn auch die Statistik von nur etwa zwei bis drei Prozent Versagensfällen berichtet, so bringt doch jeder Bruch oder eine Abplatzung für alle Betroffenen Ärger und Probleme [SCHWICKERATH, 1995].

Bei kleinflächigen Frakturen ist die Anwendung von Kunststoff-Systemen zur Reparatur sinnvoll, allerdings erreichen diese Reparaturmaterialien im Vergleich zur Scherfestigkeit der Metall-Keramik-Systeme deutlich geringere Verbundfestigkeitswerte [KRAFT und SCHÄFER, 1994]. Da der langfristige Erfolg von Reparaturen an keramisch verblendetem Zahnersatz eingeschränkt ist, muss das Frakturrisiko der Metall-Keramik-Systeme von vornherein soweit wie möglich minimiert werden [KRAFT und SCHÄFER, 1994]. Die Verbundfestigkeit ist dabei von großer Bedeutung für das immer wiederkehrende Problem von Abplatzungen bei Metall-Keramik-Restaurationen [SCHWICKERATH, 1978; SCHWICKERATH und MOKBEL, 1983]. Es gilt also, die Verbundfestigkeit zwischen Metall und Keramik weiter zu optimieren und eventuelle Fehlerquellen mit schwächendem Einfluss auf die Verbundfestigkeit auffindig zu machen.

Die Ursachen für klinisch auftretende Defekte können vielfältig sein und reichen von zahnärztlichen Faktoren und labortechnischen Fehlern bis zu den Werkstoffeigenschaften. Im Mundmilieu kommt dem Einfluss von Feuchtigkeit und Materialermüdung durch intermittierende Belastung eine besondere Bedeutung zu [KAPPERT und EICHNER, 2008]. Bei der zahntechnischen Verarbeitung können viele Parameter den Haftverbund beeinflussen. Im Schadensfalle lässt sich im Nachhinein meist nicht genau klären, warum es zum Versagen gekommen ist. Dann ist detektivisches Suchen gefragt. Immer wieder kommt die Frage auf, inwieweit der Brennofen eine Rolle spielt. Möglicherweise existieren Temperaturgradienten, die eine Rolle spielen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, herauszufinden, welchen Einfluss die Brennposition im Keramikbrennofen auf die Verbundfestigkeit hat.

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Dentallegierungen

Da reine Metalle meist unzureichende mechanische Stabilität haben, sind diese bis auf wenige Ausnahmen (z. B. Stopfgold, Galvanoforming, Titan) für die dentale Anwendung ungeeignet. Es kommen daher Legierungen zur Anwendung [LUDWIG, 2005].

Legierungen sind Mischungen von Metallen mit anderen Metallen oder Nicht-Metallen. Hauptbestandteil einer Legierung ist aber auf jeden Fall ein Metall [STRIETZEL, 2005].

Das mengenmäßig am häufigsten vorkommende Metall gibt dem Legierungstyp den Namen [STRIETZEL, 2005].

Der Legierungsbasis, dem Metall mit dem höchsten Anteil, sind also weitere Metalle beigemischt. Neben der Festigkeit werden hierdurch auch weitere Eigenschaften, wie z. B. das Schmelzintervall, der thermische Ausdehnungskoeffizient, die technische Verarbeitbarkeit und insbesondere die Mundbeständigkeit (Korrosion) beeinflusst [LUDWIG, 2005].

#### 2.1.1 Einteilung von Dentallegierungen

Die Unterteilung der Dentallegierungen erfolgt üblicherweise nach der Legierungsbasis, der Möglichkeit einer keramischen Verblendung, sowie dem Indikationsbereich, d. h. der mechanischen Beanspruchungsklasse Typ 1/weich bis 4/extrahart [LUDWIG, 2005].

##### 2.1.1.1 Einteilung nach der Legierungsbasis

Bei der Legierungsbasis wird zwischen „Edelmetallen“ (EM) und „Nichtedelmetallen“ (NEM) unterschieden. Sind die NEM-Legierungen frei von Edelmetallen spricht man auch von edelmetallfreien (EMF-) Legierungen [STRIETZEL, 2005].

Für die EM-Legierungen stehen Gold, Palladium und mit eingeschränkter Indikation Silber als Legierungsbasis zur Verfügung. Für EMF-Legierungen eignen sich Eisen, Nickel und Kobalt als Basismetalle mit Kombination von passivierenden Chromanteilen

zwischen 10 % und 30 % [LUDWIG, 2005]. Eine Einteilung der Dentallegierungen nach ihrer chemischen Zusammensetzung zeigt Tab. I.

**Tab. I:** Einteilung der Dentallegierungen nach ihrer chemischen Zusammensetzung

<b>EM-Legierungen</b>	<b>EMF-Legierungen</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Goldlegierungen</b> Hochgoldhaltig Goldreduziert</li> <li>• <b>Palladiumlegierungen</b> Kupferhaltige Silberhaltige</li> <li>• <b>Silberlegierungen</b> Silber-Palladium-Legierungen Silber-Gold-Legierungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Eisenlegierungen</b> Stähle</li> <li>• <b>Nickellegierungen</b> Nickel-Chrom-Legierungen Nickel-Titan-Legierungen</li> <li>• <b>Cobaltlegierungen</b></li> <li>• <b>Titan und Titanlegierungen</b> Rein-Titan Titan-Legierungen</li> </ul>

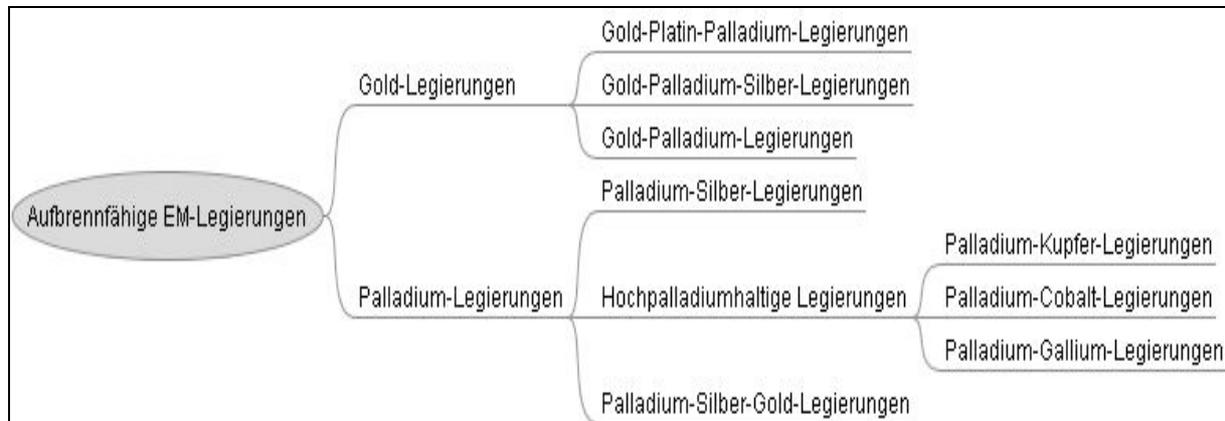
### 2.1.2 Aufbrennfähige Dentallegierungen

In der Zahnheilkunde existiert eine große Anzahl von Legierungen und Metallen zum Herstellen von Metall-Keramik-Systemen [ROBERTS et al., 2009].

Aus Sicht der chemischen Zusammensetzung müssen für den Metall-Keramik-Verbund sogenannte Haftoxidbildner zulegiert werden. Bei den EM-Legierungen sind das die Elemente Indium (In), Gallium (Ga), Zinn (Sn), aber auch Eisen (Fe) oder Mangan (Mn). Bei den NEM- oder EMF-Legierungen ist es das Chrom (Cr). Andere Zusätze sind hier nicht nötig [STRIETZEL, 2002].

### 2.1.2.1 Aufbrennfähige Edelmetall-Legierungen

Eine Übersicht über die Einteilung von aufbrennfähigen EM-Legierungen zeigt Abb. 1.



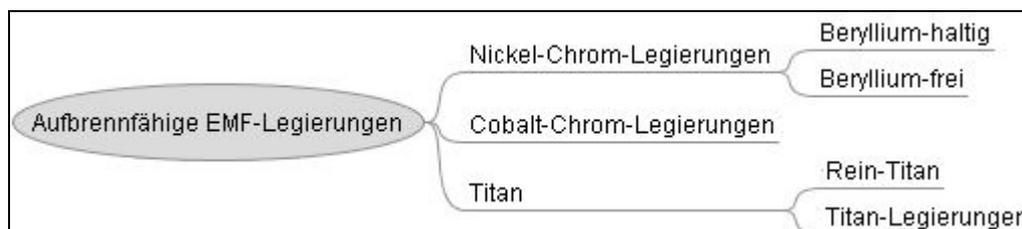
**Abb. 1:** Übersicht über die aufbrennfähigen Edelmetall-Legierungen [ROBERTS et al., 2009]

Die hochgoldhaltigen Aufbrennlegierungen erwiesen sich von Anfang an (Beginn der Verwendung in Deutschland ca. 1965/66) als problemlos [EICHNER, 1997; EICHNER, 2000].

Bei Edelmetall-Legierungen mit hohem Goldanteil sind bisher außer Kleinblasen-Bildungen keine systemischen Fehler bekannt geworden [EICHNER, 2000].

### 2.1.2.2 Aufbrennfähige edelmetallfreie Legierungen

Eine Übersicht über die Einteilung von aufbrennfähigen EMF-Legierungen zeigt Abb. 2.



**Abb. 2:** Übersicht über aufbrennfähige EMF-Legierungen [ROBERTS et al., 2009]

Die steigenden Kosten für EM-Legierungen sowie die zunehmende Nachfrage nach stabileren Legierungen mit geringerem „Creep“, also geringerem Kriechverhalten bei hohen Porzellanaufbrenntemperaturen, lässt das Interesse an EMF-Legierungen stetig steigen [MCLEAN, 1978; MCLEAN, 1981; YILMAZ und DINCER, 1999].

Im Bezug auf die Materialeigenschaften besteht der Hauptunterschied zwischen EM- und EMF-Legierungen in der Höhe der Elastizitätsmodule (E-Modul) sowie in ihrer Dichte [SCHWICKERATH, 1978]. Das E-Modul der EMF-Legierungen ist höher, daher kann hier die Gerütherstellung graziler erfolgen als bei EM-Legierungen [TAUBER und EYKMANN, 2006].

Edelmetallfreie Systeme sind verfahrensempfindlicher als Edelmetall-Systeme, da sich an der Metall-Keramik-Grenzschicht beim Aufbrennen der Keramik sehr rasch eine Oxidschicht bildet, deren Schichtstärke von der Art der Vorbehandlung des Metalls und der Dauer des Brennvorganges abhängt [MCLEAN, 1981]. Zusätzlich wird der Praktiker mit gewissen Passungenauigkeiten konfrontiert und muss in ästhetischer Hinsicht gewisse Kompromisse schließen, da die Metallfarbe nicht ideal ist [MCLEAN, 1981; LAUER et al., 1998].

Werden die Verarbeitungsbedingungen der Hersteller beachtet, so steht der Metall-Keramik-Verbund auf EMF-Legierungen bei Biege-, Scher-, Schlag- und Druckbelastung dem bewährten Metall-Keramik-System (VMK-System) mit der Hochgoldlegierung Degudent U während keiner mechanisch-physikalischen Beanspruchung nach [SIEBERT, 1989]. Andere Quellen besagen, dass sich für EM-Legierungen (Gold-Palladium-Legierungen) ein höherer Durchschnittswert der Verbundfestigkeit (bestimmt im Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH siehe 2.4.1) im Vergleich zu EMF-Legierungen (Cobalt-Chrom-Legierungen) zeigt [VENKATACHALAM et al., 2009].

Da in der vorliegenden Arbeit eine Cobalt-Chrom-Legierung verwendet wurde, wird im Folgenden auf diese Legierung genauer eingegangen.

### **Cobalt-Chrom-Legierungen**

Bereits seit 1929 werden Cobaltbasislegierungen als Biomaterialien angewendet, weil sie über eine hohe Biokompatibilität und Korrosionsbeständigkeit in Verbindung mit günstigen mechanischen Eigenschaften verfügen [OETTEL und SCHUMANN, 2005].

Typische Gusslegierungen enthalten 27-30 % Chrom, 5-7 % Molybdän und maximal 0,35 % Kohlenstoff [OETTEL und SCHUMANN, 2005]. Das deckt sich mit den Angaben von PFEIFFER und SCHWICKERTATH, die sagen, dass Cobalt-Legierungen mindestens (Massenanteil) 25 % Chrom und mindestens 4 % Molybdän enthalten sollten [PFEIFFER und SCHWICKERATH, 1995]. Geringe Abweichungen in der Zusammensetzung oder von

den in den Empfehlungen geforderten Mindestanteilen können keine, manchmal jedoch auch starke Änderungen im Löslichkeitsverhalten bewirken. Es scheint deshalb notwendig, dass grundsätzlich eine Löslichkeitsprüfung für jede Legierung durchgeführt werden sollte [PFEIFFER und SCHWICKERATH, 1995].

Obwohl im Prinzip die Cobalt-Chrom-Legierungen (wie auch die nickelhaltigen Legierungen) für die Bindung keramischer Massen wegen der eigenen Oxidbildung besonders geeignet sind, muss der Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK, siehe auch Kap. 2.1.3), berücksichtigt werden. Wird gegen die Forderung nach langsamem Abkühlen verstoßen, entstehen Sprünge in der aufgebrannten keramischen Masse, in der Regel nicht in der Bindungszone [EICHNER, 2000]. Einige EMF-Legierungen können jedoch nach Herstellerangaben auch mit normaler Abkühlung verarbeitet werden.

Wenn der Patient eine Nickelallergie hat, ist die Cobalt-Chrom-Legierung die meist gebräuchliche Alternative bei EMF-Legierungen [ROBERTS et al., 2009].

Mit Ausnahme der Titanlegierungen haben die Cobalt-Chrom-Legierungen die höchsten Schmelztemperaturen, was die Bearbeitung dieser Legierungen im Labor schwierig gestaltet [ROBERTS et al., 2009].

### **2.1.3 Eigenschaften der Legierungen**

Die mechanischen Eigenschaften einer dentalen Gusslegierung werden durch die Härteprüfung nach VICKERS und durch Zugversuche bestimmt, wobei aus dem Zugversuch die für das klinische Verhalten und den klinischen Langzeiterfolg wichtigen Werte des Elastizitätsmoduls und der Dehngrenze ermittelt werden können [FISCHER, 1997].

#### ***Elastizität***

Elastizität ist die Eigenschaft eines Körpers, nach Nullwerden einer deformierenden Kraft wieder in seine ursprüngliche Form zurückzukehren [ZUKUNFT, 1985].

Bei Kronen und Brückenkörpern ist die Elastizität unerwünscht, weil sie hier zur Schädigung der Brückenpfeiler bzw. zum Abplatzen des Verblendwerkstoffes führen kann [ZUKUNFT, 1985].

Die Elastizitätsgrenze gibt die Spannung an, bis zu der ein Werkstoff belastet werden kann, ohne sich plastisch zu verformen [ZUKUNFT, 1985].

Das Elastizitätsmodul sagt etwas über die Steifigkeit eines Materials aus [SCHWICKERATH, 1995]. Das Elastizitätsmodul ist eine werkstoffabhängige Konstante, die angibt, wieviel Kraft notwendig wäre, um einen Draht von 1 m Länge und 1 mm Querschnitt auf 2 m elastisch auszudehnen [ZUKUNFT, 1985].

Das Elastizitätsmodul ist also ein Maß für den Widerstand eines Werkstoffes gegen seine elastische Verformung. Ein Werkstoff mit hohem Elastizitätsmodul setzt einer elastischen Verformung demzufolge mehr Widerstand entgegen als einer mit niedrigerem Elastizitätsmodul [ZUKUNFT, 1985].

### **0,2 % Dehngrenze**

Die 0,2 % Dehngrenze gibt an, bei welcher Spannung im Zugversuch eine bleibende Verformung von 0,2 % der Messlänge nach der Entlastung zurückbleibt [SCHWICKERATH, 1995]. Das bedeutet auch, dass sich bei Beanspruchungen unter der 0,2 % Dehnung ein Stab nach einer Verformung unter Lasteinwirkung bei Entlastung wieder voll in seine Ausgangslage zurückstellt. Dies ist von großer Bedeutung für das Bruchverhalten unter Dauerbelastung [SCHWICKERATH, 1995].

Je höher also die 0,2 % Dehngrenze, desto schwieriger ist eine Verformung der Legierung möglich [ZUKUNFT, 1985].

### **Festigkeit/Zugfestigkeit**

Die Festigkeit ist der Widerstand eines Stoffes, den er seiner Zusammenhangstrennung durch mechanische Kräfte entgegengesetzt (Trennfestigkeit). Nach der Art der Kräfte, denen ein solcher Widerstand entgegengesetzt wird, unterscheidet man unter anderem Zug-, Druck- und Biegefestigkeit [ZUKUNFT, 1985].

Die Zugfestigkeit ist die maximale Spannung, die ein Werkstoff vor dem Zerreißen annimmt. Sie ist ein Maß für die Belastbarkeit des Werkstoffes. Je höher die Zugfestigkeit, desto stärker belastbar ist die Legierung [ZUKUNFT, 1985].

### **Bruchdehnung**

Die Bruchdehnung ist die in Prozent zur Ausgangslänge angegebene Verlängerung des Prüfkörpers, die er im Zerreißversuch erfahren hat. Sie ist ein Maß für die plastische Verformbarkeit eines Werkstoffes, z. B. durch Ziehen, Biegen oder Stanzen. Je größer

die Bruchdehnung ist, desto leichter kann eine Legierung verformt werden, ohne zu reißen [ZUKUNFT, 1985].

### **Härte**

Die Härte ist als derjenige Widerstand definiert, der dem Eindringen eines anderen, härteren Körpers entgegengesetzt wird. Der Härtewert liefert also lediglich Hinweise auf die plastische Verformbarkeit und kann deshalb für die Bewertung des Werkstoffverhaltens nur bedingt herangezogen werden [FISCHER, 1997].

### **Wärmeausdehnungskoeffizient**

Der lineare Ausdehnungskoeffizient einer Substanz ist jene Zahl, die angibt, um den wievielten Teil der Länge bei 0 °C ein aus dieser Substanz gefertigter Stab sich bei Erwärmung um 1 °C ausdehnt. Er gibt also das Verhältnis der Volumen- oder Längenänderung eines Stoffes zur Temperaturänderung an, als Raumausdehnungszahl bzw. Längenausdehnungszahl bezeichnet [STEINBERG und SCHMITZ, 1968].

Der WAK ist bei Metall-Keramik-Restaurationen für die meisten Dentallegierungen genau definiert und verändert sich nicht, unabhängig von der Anzahl der Brennzyklen sowie der Erhitzungs- und Abkühlphasen, die in diesen Zyklen verwendet werden (siehe auch Kap.2.2.3) [PRASAD et al., 1991].

### **Korrosion**

Für die Praxis ist zu empfehlen, aufbrennfähige Dentallegierungen zu verwenden, die auch nach längerer Einlagerungszeit nur geringe Löslichkeit (Korrosion) zeigen, um das Risiko toxikologischer Schädigungen oder allergischer Reaktionen zu minimieren [PFEIFFER et al., 1997].

Die Freisetzungsrates von Ionen nimmt mit zunehmender Einlagerungszeit von EMF-Legierungen in einer Korrosionslösung ab, denn es bilden sich auf der Oberfläche der Legierung Deckschichten, die die Löslichkeit herabsetzen. Dabei ist maßgeblich der Anteil von Chrom und auch Molybdän beteiligt. Man spricht von Passivierung [SCHWICKERATH, 1993b].

Nach dem Keramikbrand sind die Korrosionsraten erhöht. Es wird deshalb empfohlen, die erhöhten Korrosionsraten durch einen Abtrag von 20 µm und eine Politur der von der Keramik nicht bedeckten Bereiche des Zahnersatzes zu vermindern. Um trotzdem

eine exakte Kronenpassung zu erreichen, ist also eine leichte Übermodellation der Kronenränder erforderlich [PFEIFFER et al., 1997].

## 2.2 Dentalkeramiken

### 2.2.1 Zusammensetzung der Keramik

Dentalkeramische Produkte sind als Silikate Verbindungen der Kieselsäure in einer Vielzahl von Modifikationen und Zusammensetzungen und können zusammensetzungs- und strukturabhängig als Feldspatgläser mit kristallinen Anteilen, Oxidkeramiken und Spezialemailen bezeichnet werden, da anorganische Festkörper dieser Art auf supramolekularer Strukturebene sowohl kristallin (Keramik-Merkmal) als auch quasiamorph (Glas-Merkmal) aufgebaut sind [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Feldspat (vor allem Kalifeldspat) und Quarz sind die Hauptbestandteile der heutigen dentalkeramischen Massen, während Kaolin, die wichtigste Komponente der Porzellane, nur in geringen Konzentrationen oder gar nicht vorhanden ist (siehe Tab. II) [CAESAR und ERNST, 1987; LUDWIG, 2005; KAPPERT und EICHNER, 2008].

**Tab. II:** Zusammensetzung von Keramik und Porzellan im Vergleich [KAPPERT und EICHNER, 2008]

	Dental-Keramik	Porzellan
Feldspat	60 - 80 Gew. %	12 - 30 Gew. %
Quarz	15 - 25 Gew. %	20 - 30 Gew. %
Kaolin	0 - 5 Gew. %	40 - 70 Gew. %

Die Rohstoffe werden gemischt und die Gemenge werden gefrittet. Dabei schmelzen die verschiedenen Mineralmehle zu einer einheitlichen Schmelze und die Fritte wird durch Abschrecken der heißen Glasphase in kaltem Wasser und durch Mahlen zerkleinert [STEINBERG und SCHMITZ, 1968; CAESAR und ERNST, 1987; LUDWIG, 2005].

### 2.2.1.1 Feldspat

Feldspat, als Hauptteil traditioneller dentalkeramischer Massen, ist ein Mischkristallsystem, meistens bestehend aus [STEINBERG und SCHMITZ, 1968; KAPPERT und EICHNER, 2008]:

- Kalifeldspat (Orthoklas) ( $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6 SiO_2$ )
- Natronfeldspat (Albit) ( $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6 SiO_2$ )
- Kalkfeldspat (Anorthit) ( $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2$ )

Kalifeldspat und Natronfeldspat haben nahezu die gleichen Schmelztemperaturen (1150 °C). Während jedoch der Natronfeldspat völlig schmilzt, bildet der Kalifeldspat in der schmelzflüssigen Phase Leuzitkristalle ( $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4 SiO_2$ ) [CAESAR und ERNST, 1987; KAPPERT und EICHNER, 2008]. Erst bei 1520 °C gehen auch die Leuzitkristalle in Lösung. Innerhalb des Schmelzintervalls verleihen die Leuzitkristalle den dentalkeramischen Schmelzen ihre hohe Viskosität und Standfestigkeit. Auch die mechanische Festigkeit und der WAK der gebrannten Keramik werden vom Leuzitgehalt beeinflusst [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Der Leuzitanteil wird durch den Gehalt an Kaliumoxid (Mindestgehalt für Leuzitbildung 11 %) und die Temperatur und Dauer der Wärmebehandlung bestimmt [KAPPERT und EICHNER, 2008].

### 2.2.1.2 Quarz

Quarz, chemisch Siliziumdioxid ( $SiO_2$ ), ist das am weitesten verbreitete Mineral der Erde. Das Schmelzintervall des Quarzes liegt zwischen 1400 °C und 1600 °C [KAPPERT und EICHNER, 2008]

Quarz dient in keramischen Massen als Magerungsmittel und verringert durch sein thermovolumetrisches Verhalten die Schwindung [KAPPERT und EICHNER, 2008].

### 2.2.1.3 Nebenbestandteile

Kaolin ist chemisch Aluminiumsilikat ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ). Es bildet mit Wasser ein modellierfähiges System und verleiht der Porzellanmasse Plastizität und Formbarkeit [KAPPERT und EICHNER, 2008]. Mit einem Schmelzpunkt von über 1750 °C

gibt Kaolin der Keramikmasse beim Brand Formbeständigkeit [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Weitere Zusätze von dentalkeramischen Massen sind [LUDWIG, 2005; KAPPERT und EICHNER, 2008]:

- Flussmittelzusätze ( z. B. Kaliumkarbonat, Natriumkarbonat, Kaliumphosphat, Borax, Bleioxid)
- Farbzusätze (Metalloxide und Metallsalze wie z. B. Eisenoxid rot, Chromoxid grün, Kobalt blau, Indium schwarz)
- Trübungsmittel (z. B. Titandioxid, Zinnoxid, Zirkoniumdioxid oder Quarz)
- Fluoreszenzbildner (z. B. Caesium, Samarium, Uran)
- Gefügeverstärkende Kristallite (hochschmelzende feste Oxide des Siliziums, Aluminiums, Magnesiums und des Zirkoniums, sowie Leuzit, Glimmer und Hydroxylapatit)

### 2.2.2 Einteilung der Keramik

Die Keramiken können, wie in Abb. 3 dargestellt, eingeteilt werden.



**Abb. 3:** Übersicht über die Einteilung der Dentalkeramiken

Die Dentalkeramiken können auch eingeteilt werden in hochbrennende Keramiken (Sintertemperatur >900 °C), mittelbrennende Keramiken (Sintertemperatur 800-900 °C) und niedrigbrennende Keramiken (Sintertemperatur <800 °C) [LUDWIG, 2005].

### 2.2.2.1 Verblendkeramiken

Es sind drei Typen von Verblendkeramiken für Metalle erhältlich, die sich in der Aufbrenntemperatur und dem WAK-Wert unterscheiden [STRIETZEL, 2002] und in Tab. III übersichtlich dargestellt sind.

**Tab. III:** Klassifizierung von Verblendkeramiken nach ihren WAK-Werten [STRIETZEL, 2002]

Keramiktyp	Beispiele	WAK
Herkömmliche Keramiken	Omega, Omega 900, d.Sign etc.	ca. $14 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$
LFC-Keramiken	Response, Ducera Gold, Carrara Vincent etc.	ca. $16 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$
Titan-Keramiken		ca. $9 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$

Mit der Entwicklung der niedrighschmelzenden Keramiken mit einem an Titan angepassten WAK waren die Grundvoraussetzungen zur Verblendung des Titan geschaffen [STRIETZEL, 2002; GÜRTLER et al., 2005; HOMANN et al., 2006]. In den vergangenen Jahren wurden niedrighschmelzende Keramiken zur Verblendung von Titan entwickelt, die teilweise die entstehenden oberflächennahen Oxide des Titans binden [BLUME et al., 1998a; STRIETZEL, 2002].

Die Scherverbundfestigkeiten von Titan-Keramik-Restaurationen können durch die Verwendung von Bondern, die reduzierende Eigenschaften besitzen, erhöht werden [BLUME et al., 1998a; STRIETZEL, 2002; WEHNERT et al., 2009]. Die Bonder vermindern oder unterbinden eine Oxidation der Titanoberfläche beim Brennprozess und die vorher bestehenden Oxide sollen zusätzlich gelöst werden. Dadurch soll die Ausbildung von verbundschwächenden Zwischenschichten in der Titan-Keramik-Kontaktzone vermieden werden [WEHNERT et al., 2009].

### 2.2.3 **Eigenschaften der Verblendkeramik**

Art, Anteil, Verteilung, Form und Verbund der Gefügebestandteile bestimmen die Eigenschaften der aus einer Glasmatrix mit eingelagerten kristallinen Strukturen bestehenden Dentalkeramik [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Die Glasphase beeinflusst vorrangig das Fließverhalten, Benetzbarkeit und Transparenz, die kristalline Phase die Standfestigkeit der Schmelze, Wärmedehnung, mechanische Parameter und chemische Resistenz [KAPPERT und EICHNER, 2008].

### **Wärmeausdehnungsverhalten**

Der WAK der Keramik muss auf den WAK der Legierung abgestimmt sein. Für den Temperaturbereich, in dem die Keramik als Festkörper vorliegt, sollte ihr Wärmeausdehnungskoeffizient dem der Legierung entsprechen bzw. geringfügig niedriger sein, um Spannungen im Verbundkörper zu minimieren bzw. um leichte Druckspannungen zu erzeugen [PRASAD et al., 1991; SCHÄFER, 1993; HOPP und BIFFAR, 2006; TAUBER, 2006b]. Denn Metall-Keramik-Prüfkörper mit negativer WAK-Differenz ( $WAK_{\text{Metall}} - WAK_{\text{Keramik}} < 0$ ) gehen bei einer signifikant kleineren Biegebelastung zu Bruch als solche mit einer positiven WAK-Differenz [COFFEY et al., 1988].

Über den Leuzitgehalt der keramischen Massen kann die Wärmedehnung gesteuert werden [MACKERT und WILLIAMS, 1996; LAUER et al., 1998; KAPPERT und EICHNER, 2008]. Dabei führt ein hoher Anteil von Leuzit zu hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Der WAK der Keramik, anders als der WAK der Legierung (siehe auch Kap. 2.1.3), kann sich verändern und hängt ab von:

- der Abkühlphase der Brenntemperatur bei der Keramik auf eine Temperatur von ca. 700°C
- der Anzahl der Brennzyklen
- der chemischen Beschaffenheit der Keramik

Je langsamer die Abkühlphase von Brenntemperatur auf ca. 700 °C, umso mehr nimmt der Kontraktionswert zu, da zunehmend Leuzit gebildet wird. Bei einer vorgegebenen Keramik und Abkühlphase führt jedes Brennen zur Zunahme des Kontraktionswertes. Diese Zunahme ist jedoch weniger deutlich sichtbar im Vergleich zur Abkühlphase auf 700 °C [PRASAD et al., 1991].

### **Mechanische Eigenschaften**

Keramische Materialien unterscheiden sich von Metallen durch grundsätzlich andere atomare Bindungsverhältnisse (stabile Mischbindung aus kovalenter- und Ionenbindung) [HAHN und LÖST, 1992; FISCHER und MARX, 2000]. Die von plastischen

Materialien bekannten Fließeffekte und Wanderungen von Versetzungen innerhalb der Gitterstruktur, die zur Selbstheilung von initialen Fehlstellen führen, sind bei keramischen Werkstoffen aufgrund der hohen Gitterenergien blockiert [HAHN und LÖST, 1992].

Die mechanischen Werte hängen zwar vom Material und der Verarbeitung ab, sind aber größenordnungsmäßig für konventionelle Dentalkeramiken wie in Tab. IV gezeigt einzuordnen [KAPPERT und EICHNER, 2008].

**Tab. IV:** Mechanische Durchschnittswerte konventioneller Dentalkeramik [KAPPERT und EICHNER, 2008]

<b>Eigenschaft</b>	<b>Durchschnittswert</b>
Druckfestigkeit (sehr hoch)	800 – 1.000 MPa
Zugfestigkeit (gering)	40 – 100 MPa
Biegefestigkeit (gering)	100 – 180 MPa
Härte nach Vickers (sehr hoch)	4.000 – 5.000 MPa
Abrasionsfestigkeit (hoch)	
E-Modul (unterschiedlich hoch)	60.000 – 130.000 MPa

Zusammengefasst ist die gebrannte Keramik bei hoher Härte und Druckfestigkeit zwar elastisch deformierbar, nicht aber plastisch verformbar, daher spröde und nur gering biege-, scher- und zugfest [BREUSTEDT, 1965; KNISCHEWSKI und GROSSE, 1975; PRASAD et al., 1991; WEILER, 1991; HAHN und LÖST, 1992; FISCHER et al., 1999; RÖSLER et al., 2003; LUDWIG, 2005; KAPPERT und EICHNER, 2008].

Unter Sprödigkeit versteht man die Eigenschaft von Werkstoffen, ohne plastische Verformung beim Überschreiten der Proportionalitätsgrenze (wird im Zugversuch bestimmt) zu Bruch zu gehen [FISCHER et al., 1999; LUDWIG, 2005]. Die Keramik verformt sich durch die Sprödigkeit unter Belastung kaum. Diese an sich gewünschte Formbeständigkeit macht die Keramik empfindlich für winzige Fehler in ihrem Gefüge, die Ausgangspunkte für Risse darstellen. Keramische Werkstücke wären wesentlich widerstandsfähiger, wenn winzige Defekte (Poren oder Spalten) vermieden werden könnten [RÖSLER et al., 2003; KAPPERT und EICHNER, 2008]. Denn von außen auf das Material aufgebrachte Spannungen konzentrieren sich an diesen Fehlstellen [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Es kommt auch unter normalen Belastungen zum sogenannten unterkritischen Risswachstum, bei dem sich die immer vorhandenen Mikrorisse von außen nicht sichtbar stetig bis zu einer kritischen Größe vergrößern. Steigt bei der zunächst hervorragend formbeständigen Keramik die äußere Belastung bis zu einem bestimmten Schwellenwert an, kommt es zum plötzlichen Zerstören der chemischen Bindungen und damit spontan zum Bruch (Sprödbruch) [HAHN und LÖST, 1992; FISCHER und MARX, 2000; RUDOLPH et al., 2005; KAPPERT und EICHNER, 2008].

Sprödigkeit und E-Modul der Keramik bedingen ferner, dass diese Materialien, wie oben bereits aufgeführt, Druckspannungen hervorragend abfangen, bei Biege-, Zug- und Scherspannungen aber nur in sehr geringem Maße belastbar sind. Ursache ist, dass Druckspannungen beginnende Risse schließen und deshalb die Ausbreitung dieser Risse nicht fördern, sondern sogar stoppen, Zug- und Scherbeanspruchungen im Gegensatz dazu aber die Rissflanken öffnen und den Riss vertiefen [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Bei der Festigkeit kann man zwischen Dauerfestigkeit und statischer Festigkeit unterscheiden. Als Faustregel gilt, dass die Dauerfestigkeit der halben statischen Festigkeit entspricht. Dies ist zurückzuführen auf die Benetzung der Keramikoberfläche mit Wasser bzw. Speichel (Wasser beschleunigt die Geschwindigkeit des Risswachstums bis zum Millionenfachen) sowie auf statische Ermüdung (dynamische Kaulastung). Bei keramisch verblendeten Metall-Restaurationen kommen Korrosionserscheinungen im Verbundbereich hinzu, die die Dauerfestigkeit der Keramik herabsetzen [KAPPERT und EICHNER, 2008]. Das Festigkeitsverhalten dentalkeramischer Massen kann im Spaltzug-, Biege- und Druckversuch bestimmt werden [SCHWICKERATH, 1985]. Während dem Verbund zwischen Metall und Keramik immer große Beachtung geschenkt wurde, wird über die Festigkeit der Keramik selbst nur verhältnismäßig wenig berichtet [SCHWICKERATH, 1985].

### ***Optische Eigenschaften***

Die Lichtdurchlässigkeit keramischer Materialien wird durch diffuse Reflektion und Lichtbrechung an Strukturgrenzen, so beispielsweise an kristallinen Einschlüssen und Poren, behindert. Der Streuverlust ist umso größer je zahlreicher und kleiner die optischen Strukturunregelmäßigkeiten sind [KAPPERT und EICHNER, 2008]. Durch ein maßgeschneidertes Verhältnis von kristallinem und amorphem Anteil (Glasphase)

können somit Opazität und Transluzenz der Charakteristik des natürlichen Zahnes nachempfunden werden [FISCHER und MARX, 2000].

Verarbeitungstechnisch haben durch Beeinflussung des Porenvolumens vor allem Kondensation und Vakuumbrand Einfluss auf den Transparenzgrad [KAPPERT und EICHNER, 2008].

### ***Pyroplastisches Verhalten***

Bei keramischen Massen existiert kein Schmelzpunkt sondern ein Schmelz- oder Erweichungsintervall von 100-200 °C, das auch Transformationsbereich genannt wird. Ursache für die allmähliche Erweichung ist die Tatsache, dass dentalkeramische Massen geringe Wärmeleiter sind und strukturelle Veränderungen im Gegensatz beispielsweise zu Metallen bedeutend langsamer vor sich gehen [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Zwischen Brenntemperatur und Brenndauer bestehen Abhängigkeiten. Durch kurzes Brennen bei höherer Temperatur können in gewissen Grenzen ähnliche Wirkungen erzielt werden wie durch längeres Brennen bei einer niedrigeren Temperatur [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Mit jedem zusätzlichen Schmelzvorgang ändern sich Struktur und physikalische Eigenschaften der Keramik [KAPPERT und EICHNER, 2008].

## **2.2.4 Aufbrennen der Keramik**

### **2.2.4.1 Zu brennende Objekte**

#### ***Verbundpartner***

Die Verbundpartner bei Metall-Keramik-Systemen müssen aufeinander abgestimmt sein [STRIETZEL, 2002; EICHNER und KAPPERT, 2005]. Bei der Wahl des Metalls und der Keramik sind die jeweiligen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu berücksichtigen (siehe Kap. 2.2.3), die Elastizitätsmodule [DÖRFLER et al., 1995], wie auch die Zusammensetzung der Keramik (siehe Kap. 2.2.3) und die entsprechende Transformationstemperatur der Keramik (siehe Kap. 2.2.3). Die Brenntemperatur sollte etwa 100-150 °C unterhalb der Solidustemperatur der Legierung liegen, um Formveränderungen des Gerüsts aufgrund mangelnder Warmfestigkeit der Legierung

bei zu hohen Temperaturen so gering wie möglich zu halten [EICHNER und KAPPERT, 2005; KAPPERT und EICHNER, 2008].

### **Objektgröße und Objektform**

Nicht nur der Legierungstyp sondern auch die Objektgröße und Objektform, also das Volumen und die Geometrie des Metallgerüsts, die Stärke und Form der Verbinder, sowie die Wandstärken haben einen großen Einfluss auf die Formbeständigkeit der zu brennenden Objekte.

So beträgt die Mindestdicke des Gerüsts bei EM-Legierungen und Titan 0,5 mm. Bei Einzelkronen und bei der Verwendung von Nickel- und Kobaltlegierungen kann sie geringfügig unterschritten werden [TAUBER und EYKMANN, 2006; TAUBER und KAPPERT, 2006; STRIETZEL, 2007; KAPPERT und EICHNER, 2008].

Bei der Modellation ist folgendes zu beachten: Berücksichtigung des T-Träger-Prinzips bei Verbindungen (Höhe wichtiger als Breite), die Masse der Restauration sollte aus Metall sein und scharfe Kanten und Ecken müssen vermieden werden [STRIETZEL, 2002; STRIETZEL, 2007]. Das Gerüst sollte außerdem so stabil wie möglich gestaltet werden [TAUBER, 2006b] und die Geometrie und Form des Metallgerüsts sollte das verkleinerte Abbild der späteren Restauration sein [TAUBER, 2006b; KAPPERT und EICHNER, 2008].

Legierungsgerüste mit geringen physikalischen Werten werden durch modellierte Girlanden verstärkt. Zusätzlich zur größeren Stabilität kühlen Gerüste mit Girlanden auch noch gleichmäßiger ab [TAUBER und EYKMANN, 2006].

### **Brennvorgang**

Unter Brennen versteht man das Sintern von Metallen oder Keramiken durch Hitzeeinfluss [LUDWIG, 2005]. Die Sinterung erfolgt dabei unterhalb des Schmelz- bzw. Soliduspunktes, wobei durch atomare und molekulare Kohäsionskräfte, durch Diffusion und Reaktionen die einzelnen Teilchen miteinander verklebt, verfestigt werden, ohne zu einer Flüssigkeit zu verschmelzen [STEINBERG und SCHMITZ, 1968].

Die Vorbereitung der Metalloberfläche zur Verbesserung der Verbundfestigkeit erfolgt mit Hartmetallfräsen und/oder keramisch gebundenen Schleifkörpern und durch anschließendes Strahlen mit Aluminiumoxid, z. B. der Körnung 110 µm für EM-Legierungen und 250 µm für EMF-Legierungen [MCLEAN, 1981; BRÄMER und PETTER, 1990; STRIETZEL, 2002; STRIETZEL, 2007; KAPPERT und EICHNER, 2008; KIM und

CHO, 2009]. Das Abstrahlen sollte bei einem Stahldruck von 2 bar bei EM-Legierungen bzw. 4 bar bei EMF-Legierungen erfolgen, mit einem Strahlwinkel von optimal 45° und einer Strahlzeit von ca. 30 s pro Einheit [STRIETZEL, 2002; HOPP und BIFFAR, 2006].

Wie vor jedem Brand bzw. Keramikauftrag wird nun das Gerüst gesäubert (Bürsten, Dampfstrahlen). Bei EM-Legierungen erfolgt anschließend ein atmosphärisches Oxidglühen, d. h. unter Anwesenheit von Luft, bei 780-980 °C [KAPPERT und EICHNER, 2008]. EMF-Legierungen benötigen keinen Oxidbrand [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Es folgt der zweizeitige Auftrag und das jeweils anschließende Brennen der Grundmasse (opake Abdeckkeramiken, Opaker) [HÜRZELER et al., 1995; KAPPERT und EICHNER, 2008]. Nach dem Brennen der Grundmasse bei etwa 930-980 °C (herkömmliche Aufbrennkeramik) soll das Oxid vollständig abgedeckt sein [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Der eigentliche Aufbau der Zahnform erfolgt mit Dentinmasse und Schmelzmasse, wobei eine minimale Schichtstärke von 0,8 mm nicht unterschritten werden sollte [TAUBER und EYKMANN, 2006; KAPPERT und EICHNER, 2008].

Wegen der Sinterschrumpfung von 10-15 % linear muss die Masse in leichtem Überschuss aufgetragen werden [RÖSLER et al., 2003; LUDWIG, 2005; KAPPERT und EICHNER, 2008].

Zudem muss die Masse beim Modellieren bestmöglich mechanisch kondensiert werden, d. h. die Keramikmasse wird vor dem Brand verdichtet (z. B. durch Riffeln mit dem Le Cron-Instrument) und die überflüssige Flüssigkeit abgesaugt. Dadurch wird die Schwindung und der Anteil an Bläschen in der Keramik herabgesetzt [CLAUS, 1990; EICHNER und KAPPERT, 2005]. Es ist bekannt (siehe Kap. 2.2.3), dass die Dichte und Porenfreiheit der Keramik einen großen Einfluss auf ihre Festigkeit hat [SCHWICKERATH, 1985].

Die Dentin- und Schmelzmasse wird in einem Hauptvakuumbrand bei etwa 900-950 °C gebrannt, wenn herkömmliche, hochschmelzende Feldspatkeramiken verwendet werden [MCLEAN, 1981; KAPPERT und EICHNER, 2008]. Nach dem Hauptvakuumbrand wird die gesinterte Keramik beschliffen und keramische Masse nachgetragen und bei einem 2. Vakuumbrand gebrannt [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Gegebenenfalls kann ein Korrekturbrand erfolgen [KAPPERT und EICHNER, 2008].

Es können danach Malfarben und Glasurmasse für eine optische Charakterisierung aufgetragen werden. Abschließend wird ein atmosphärischer Glanzbrand durchgeführt [KAPPERT und EICHNER, 2008].

#### 2.2.4.2 Einfluss der Brenntemperatur und Temperaturführung

Die Brenntemperatur hat vielfältigen Einfluss auf die Festigkeit der Keramik, die Verbundfestigkeit, Form, Porositäten, Risse und Sprünge sowie auf Farbe und Ästhetik der Metall-Keramik-Restauration.

##### ***Festigkeit und Verbundfestigkeit***

Einhalten der Brenntemperaturen und Temperaturführung sind wesentlich für die Qualität des metallkeramischen Verbundes [EICHNER und KAPPERT, 2005; ANUSAVICE et al., 2007; KAPPERT und EICHNER, 2008].

Wie bereits im Kapitel 2.2.3 aufgezeigt, hängt der WAK der Keramik und damit die Verbundfestigkeit des Metall-Keramik-Systems entscheidend von der Brandführung (Abkühlphase und Anzahl der Brennzyklen) ab. Es ist also auch eine Minimierung der Brandanzahl wichtig [SCHWICKERATH, 1985; STRIETZEL, 2002]. Bei POSS zeigte sich ein Abfall der Biegefestigkeitswerte vor allem bei den Dentinmassen mit zunehmender Anzahl der Brände [SCHWICKERATH und MOKBEL, 1983]. Durch eine verzögerte Abkühlung kann der WAK der Keramik angehoben werden, woraus eine Verminderung der Spannungen in der Keramikschicht und daraus eine größere Festigkeit resultiert [DORSCH, 1990].

Bei allen Prüfungen von SCHWICKERATH wurden bei dem schnellen Anstieg der Aufheiztemperatur die geringsten Festigkeitswerte gemessen. In den meisten Fällen waren die höchsten Festigkeitswerte bei der längsten Aufheizzeit festzustellen [SCHWICKERATH, 1985]. Ist die Brenntemperatur oder Aufheizrate zu hoch, können sich Aufblähungen und Blasen bilden, die durch zu lange Vakuumeinwirkung verstärkt werden [CLAUS, 1990; OGinni, 2005] und die Festigkeit herabsetzen. Man sollte zur Blasenvermeidung niemals ausgereifte Keramik im Vakuum brennen, den Glasurbrand immer nur atmosphärisch durchführen [OGinni, 2005].

### ***Form, Porositäten, Risse und Sprünge***

Zu langes Brennen kann zu Oberflächenporositäten führen. Besonders beim Schluss- oder Glasurbrand sollten deshalb zu hohe Temperaturen vermieden werden [OGINNI, 2005].

Auch zu schnelles Trocknen und Sintern hat Einfluss: die Keramik kann nicht korrekt und flächenhaft verschmelzen. Die isolierten Schrumpfungen führen zu Sprüngen und Oberflächendefekten [OGINNI, 2005].

Ein weiteres Problem stellen thermische Brüche dar. Thermische Brüche haben ihre Ursache in einem Thermalschock, hervorgerufen durch zu rasches Einfahren in die Brennkammer, wodurch das Metall und die Keramik auf verschiedenen Punkten der Expansionskurve zu liegen kommen. Ausreichendes Vorwärmen vor dem Biskuit- oder Glasurbrand der Krone ist also Bedingung [MCLEAN, 1981; OGINNI, 2005]. Durch zu schnelles Trocknen oder durch die Verwendung von zu feuchter Keramik können ebenfalls Rissbildungen entstehen [MCLEAN, 1981; OGINNI, 2005].

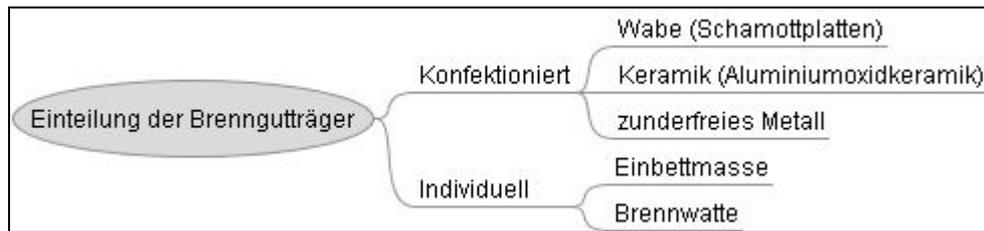
### ***Ästhetik und Farbe***

Es besteht eine Abhängigkeit zwischen Farbe der Masse und Brenntemperatur [SCHWICKERATH, 1985]. Mit zunehmender Temperatur und Haltezeit, ebenso mit längeren Aufheizzeiten nimmt der Anteil an Sinterphase ab und der an Glasphase zu. Je höher der Anteil an Glasphase ist, desto transparenter und farbintensiver wird die gebrannte dentalkeramische Masse [CLAUS, 1990].

Verfärbungen (Grünstich oder Graustich) können ebenfalls von zu starker Erhitzung und Überhitzung herrühren [OGINNI, 2005]. Auch bei zu oft durchgeführtem Brennen kann eine Grautönung auftreten: die kristallisierte Keramik wirkt grauer [OGINNI, 2005].

#### ***2.2.4.3 Brenngutträger***

Brenngutträger sind feuerfeste Verbindungen, auf der keramische oder metallische Gerüste während des Aufbrennens von Keramik im Brennofen gestützt werden können [STEINBERG und SCHMITZ, 1968; LUDWIG, 2005]. Abb. 4 zeigt eine übersichtliche Einteilung der Brenngutträger.



**Abb. 4:** Einteilung der Brenngutträger

Schamottplatten besitzen aufgrund der wabenförmigen Bauweise eine geringe Masse und lassen sich leicht aufheizen bzw. abkühlen. In der wabenförmigen Oberfläche lassen sich Haltestifte variabel positionieren [LUDWIG, 2005].

Die Positionierung der Objekte auf dem Brenngutträger kann variiert werden. Sowohl die vertikale Lage (Höhe) und die horizontale Lage (Verschiebung zum Rand des Brenngutträgers nach hinten, vorne, links, rechts oder in die Mitte) kann verändert werden, als auch die Lagerung des Objektes entweder direkt auf dem Brenngutträger, auf Watte oder auf Pins, die in dem Brenngutträger fixiert werden.

Die Haltestifte (Pins) sind aus einer hochtemperaturfesten Legierung oder Keramik hergestellt [LUDWIG, 2005].

Der Vorzug der Anwendung von Brenngutträgern zeigt sich an folgendem Beispiel: Wenn eine weitspannige Brücke beim Brennprozess ungenügend abgestützt ist, kann es zum „Creep“ des Metalls beim Aufbrennen der Keramik kommen. Abhilfe wird geschafft, indem korrekt geformte Brenngutträger für jedes einzelne Glied der Brücke verwendet werden [OGINNI, 2005].

## 2.2.5 Brennofen

### 2.2.5.1 Aufbau und Funktionsprinzip des Brennofens

Der Brennofen, auch Sinterofen genannt, ist ein elektrisch beheizbares Gerät, das für das Brennen von Keramik eingesetzt wird [LUDWIG, 2005]. Er besteht aus einer Brennkammer (Muffel), dem Objektisch und dem Bedienfeld. Die Öfen unterscheiden sich in ihrem Heizsystem, dem Ort der Temperaturkontrolle und dem Dämmmaterial und damit Temperaturgradienten innerhalb der Brennkammer.

Auch die Art des Öffnungsprinzips kann variieren. So sind unterschiedliche Modelle mit Frontöffnung, Liftführung bzw. Klappmechanismen verfügbar [LUDWIG, 2005].

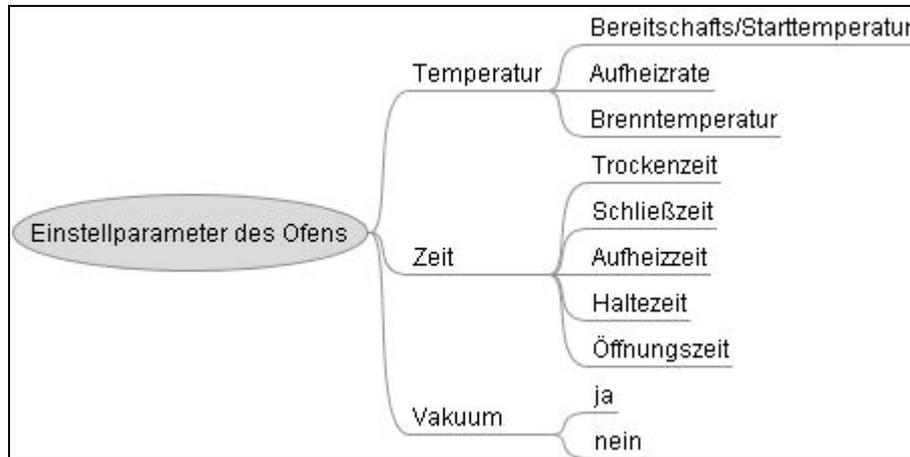
Die Brennöfen müssen exakt steuerbar sein und sowohl ein atmosphärisches Brennen unter Luftzutritt als auch ein Brennen unter Vakuum erlauben [KAPPERT und EICHNER, 2008]. Das Vakuum wird mit Hilfe einer Unterdruckpumpe (Vakuumpumpe) erzeugt [STEINBERG und SCHMITZ, 1968; LUDWIG, 2005].

Folgende Anforderungen an einen Brennofen werden definiert [MCLEAN, 1981]:

- Vortrocknen: langsames Trocknen zur Vermeidung von Dampfexplosionen und Rissen
- Brennen: rasches Steigern der Temperatur der Muffel nach dem Vortrocknen und Evakuieren der Muffel ohne Temperaturerhöhung, um Blasenbildung zu vermeiden
- Gleichmäßige Hitzeverteilung innerhalb der Muffel
- Automatische Steuerung des Zeit-Temperatur-Zyklus
- Brennprogramm sollte während des Zyklus unterbrochen werden können
- Vakuumpumpe sollte während des Brennprogramms manuell ausgeschaltet werden können, ohne den Ablauf zu beeinflussen
- Brenntemperaturen müssen unabhängig vom Alter der Heizelemente immer steuerbar bleiben
- Netzspannungsschwankungen sollten automatisch ausgeglichen werden

### 2.2.5.2 Einstellparameter des Ofens

Eine Übersicht über die an einem Keramikbrennofen einstellbaren Parameter zeigt Abb. 5.



**Abb. 5:** Einstellparameter des Keramikbrennofens

Ein Brennprogramm legt die Abfolge von Zeiten und Temperaturen fest [CLAUS, 1990].

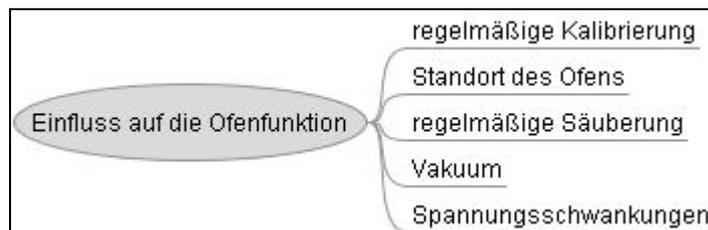
Während der Trockenzeit verdampft bei der Vortrockentemperatur die der Masse zugeführte Modellierflüssigkeit. Anschließend verbrennen und veraschen die organischen Bestandteile der Flüssigkeit [CLAUS, 1990]. Bei einigen Herstellern kann die Trockenzeit weiter unterteilt werden in Trockenzeit und Schließzeit. Bei diesen Öfen kann die Phase der Trocknung also noch genauer gesteuert werden, indem in der ersten Phase der Trocknung der Ofen komplett geöffnet ist (Trockenzeit) und in der zweiten Phase der Trocknung der Ofen in einem einzustellenden Zeitraum kontinuierlich schließt (Schließzeit). Die anderen Hersteller unterteilen die Trockenzeit nicht. Bei diesen Öfen kann also nicht separat gesteuert werden wie lange der Ofen erst geöffnet ist um dann zu schließen.

Die Aufheizzeit schließt sich an. Nach einer vorgegebenen Zeit wird eine festgelegte maximale Temperaturhöhe erreicht. Bei diesem Aufheizvorgang findet eine Sinterung der Dentinmasse statt [CLAUS, 1990] (siehe auch Kap. 2.2.4.1). Die maximale Temperaturhöhe wird über einen vorgegebenen Zeitraum gehalten (Haltezeit) und dann öffnet sich die Brennkammer (Öffnungszeit).

Das Vakuum ist für den Farbeindruck wichtig: Das Halten des Vakuums besonders während der ersten Minute der Haltezeit der maximalen Brenntemperatur verbessert die Farbintensität und verhindert, dass die Keramik trübe bleibt [CLAUS, 1990]. Der Oxidbrand und der Glanzbrand erfolgen ohne Vakuum (siehe Kap. 2.2.4.1).

### 2.2.5.3 Wartung des Ofens

Eine übersichtliche Darstellung über mögliche Faktoren, die Einfluss auf die Ofenfunktion haben, zeigt Abb. 6.



**Abb. 6:** Einflussfaktoren auf die Funktion des Keramikbrennofens

Die zahntechnischen Brennöfen sind von den Herstellern in Bezug auf Brenntemperatur und Vakuumführung mit geeigneten Mitteln geeicht [MCLEAN, 1981; LUDWIG, 2005]. Trotzdem ist ein regelmäßiges Kalibrieren des Ofens und eine Kontrolle des Zeit-Temperatur-Zyklus unerlässlich, um Überbrennen oder Unterbrennen der Keramik mit allen dazugehörigen Folgen (siehe Kap. 2.2.4.2) zu verhindern [LUDWIG, 2005; OGinni, 2005; TAUBER und EYKMANN, 2006].

Die Kontrolle des Ofens und der Temperaturanzeige kann mittels einer Reinsilberfolie erfolgen, welche bei einer eingestellten oberen Temperatur von 960 °C schmelzen soll. Der Schmelzpunkt von Reinsilber beträgt nach der internationalen Temperaturskala 961,63 °C. Wenn die Folie bei einer höher oder tiefer eingestellten Temperatur als 960 °C schmilzt, müssen die Ofen- und Temperatureichungen neu kalibriert werden, indem die Einstellschraube der Temperaturanzeige nachgestellt wird [MCLEAN, 1981].

Der Standort des Ofens sollte nicht direkt am Fenster sondern abseits von direkter Sonneneinstrahlung sein, um Temperaturveränderungen durch die Sonnenwärme bzw. Windzug zu vermeiden.

Der Ofen einschließlich des Dichtrandes und -ringes muss regelmäßig gereinigt werden, um Verunreinigungen der Brennobjekte zu verhindern und um gleichzeitig

einen dichten Abschluss von Ofenober- und Ofenunterteil für ein komplettes Vakuum zu garantieren. Spannungsschwankungen des Stromnetzes sollten wenn irgend möglich reduziert bzw. auch vom Ofen selbst automatisch ausgeglichen werden (siehe Kap. 2.2.5.1).

## 2.3 Haftmechanismen zwischen Keramik und Metall

Obwohl zahlreiche Studien und Theorien zu Bindungen zwischen Metall und Keramik vorliegen, sind sie noch nicht restlos aufgeklärt [CAESAR und ERNST, 1987]. Das Zustandekommen eines Verbundes zwischen Metall und Keramik kann bei verschiedenen Materialkombinationen auf unterschiedlichen Grundlagen beruhen [KAPPERT und EICHNER, 2008]. Ganz allgemein lässt sich allerdings festhalten, dass der chemischen Bindung unter den verschiedenen Faktoren der höchste Anteil zukommt [VOSS, 1969; EICHNER, 1997; KAPPERT und EICHNER, 2008].

### 2.3.1 Adhäsion

Van-der-Waals-Kräfte wirken zwischen Molekülen. Sie sind jedoch die schwächsten von allen Bindungsarten, so dass sie nur dann eine merkliche Rolle spielen, wenn kein anderer Bindungstyp vorliegt [RÖSLER et al., 2003].

### 2.3.2 Physikalische Kräfte

#### 2.3.2.1 Retention

Die Haftung durch mikromechanische Verzahnung (Retention) zählt zu der mechanischen Bindung [STRIETZEL, 2002; KAPPERT und EICHNER, 2008].

Die für die Retention notwendige Rauigkeit der Metalloberfläche wird durch ein Bearbeiten mit Schleifkörpern aus Edelkorund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) mit keramischer Bindung oder durch ein Bearbeiten mit Hartmetallfräsen und durch ein Abstrahlen mit Edelkorund erreicht [MCLEAN, 1981; CAESAR und ERNST, 1987]. Durch das Abstrahlen entsteht eine

stark vergrößerte Oberfläche mit einer Rautiefe, die von der Körnung des Strahlmittels, der Härte der Legierung und dem Druck, mit dem das Korund-Pressluft-Gemisch aufgeschleudert wird, abhängig ist [CAESAR und ERNST, 1987].

### 2.3.2.2 Wärmeausdehnungskoeffizient

Kompressionskräfte, die auf einer leichten auf die Keramik einwirkenden Druckspannung beruhen, verstärken die mechanische Bindung zwischen Keramik und Metall [HOPP und BIFFAR, 2006; KAPPERT und EICHNER, 2008]. Sie werden hervorgerufen durch die aufeinander abgestimmten WAKs zwischen Metall und Keramik (siehe Kap. 2.2.3).

### 2.3.3 Chemische Kräfte

Für die chemische Bindung ist die Bildung von Oxiden unedler Legierungsbestandteile von Bedeutung [STRIETZEL, 2002; SCHWEITZER et al., 2005; KAPPERT und EICHNER, 2008]. Diese Haftoxide sind Legierungsbestandteile, die in der Schmelzphase der Dentalkeramik löslich sind, dabei aber nicht den Kontakt zur Grundstruktur des Metalls verlieren [MCLEAN, 1978; CLAUS, 1983; CAESAR und ERNST, 1987]. Obwohl dieser Prozess nicht restlos geklärt ist, stellt man sich Sauerstoff als Bindeglied zwischen Metall, Oxidschicht und Keramik vor [CAESAR und ERNST, 1987].

Edelmetallhaltigen Aufbrennlegierungen müssen daher Oxidbildner wie Zinn, Indium und Eisen zulegiert sein [CLAUS, 1983; REPEL, 1986; CAESAR und ERNST, 1987] (siehe auch Kap. 2.1.2).

## 2.4 Prüfverfahren der Verbundfestigkeit

Metall-Keramik-Verbundsysteme können durch verschiedene Zug-, Druck-, Scher- und Biegeversuche mit unterschiedlichen, mehr oder weniger genormten Prüfkörpergeometrien getestet werden. Um Aussagen über die Einsetzbarkeit im klinischen Bereich machen zu können, wird allerdings auch ein klinisch relevanter

Bewertungsmaßstab benötigt, mit welchem die Labormesswerte eingeordnet und kritisch beurteilt werden können [SCHMITZ und SCHULMEYER, 1975; SIEBERT, 1989].

Die genaue Messung der Haftfestigkeit bringt enorme Schwierigkeiten mit sich, da die Komplexität der Bindung wahrscheinlich die Entwicklung eines einzigen Testversuches unmöglich macht [CAPUTO et al., 1977; MCLEAN, 1978].

Allgemeine Forderungen an eine Verbundprüfung sind eine möglichst einfache, reproduzierbare Herstellung der Probekörper, eine unkomplizierte Durchführbarkeit der Prüfung sowie eine verlässliche Übertragbarkeit auf klinische Verhältnisse [KAPPERT und EICHNER, 2008].

#### **2.4.1 Biegeversuch (nach SCHWICKERATH)**

Auf einen Metallstab von  $0,5 \pm 0,05$  mm Stärke,  $3 \pm 0,1$  mm Breite und 25 mm Länge wird eine  $1 \pm 0,1$  mm dicke Keramiksicht von  $8 \pm 0,1$  mm Länge in der Mitte des Stabes aufgebrannt [KAPPERT et al., 1985; DÖRFLER et al., 1995].

Die Prüfung wird als Drei-Punkt-Biegetest in einer Universalprüfmaschine durchgeführt. Der Abstand zwischen den Auflagern beträgt 20 mm [KAPPERT und EICHNER, 2008]. Die Belastung erfolgt mittig von der unverblendeten Seite durch eine Druckfinne mit einem Krümmungsradius von 1 mm mit einer Querhauptgeschwindigkeit von  $1,5 \pm 0,5$  mm. Die Bruchkraft wird an Probekörpern gemessen, die einen Ablöseriss an einem Ende der Keramiksicht aufweisen. Aus einem Diagramm (DIN EN ISO 9693) wird ein Koeffizient  $k$  als Funktion der Dicke des Metallgerüsts und des Elastizitätsmoduls des metallischen Werkstoffes abgelesen [DÖRFLER et al., 1995; KAPPERT und EICHNER, 2008].

Für die berechnete Ablöse/Rissbeginn-Festigkeit wird als Mindestanforderung 25 MPa verlangt [KAPPERT und EICHNER, 2008]. Die in der DIN EN ISO 9693 festgelegte Bezeichnung „Ablöse/Rissbeginn-Festigkeit“ entspricht dem in früheren Normausgaben verwendeten Begriff „Scher/Verbund-Festigkeit“ [GÜRTLER et al., 2005].

Der Biegeversuch lässt eine Aussage über die Qualität eines Verbundsystems unter Biegelast zu. Dieser Biegebeanspruchung setzen die Steifigkeit des Metallprüfkörpers, die Steifigkeit des Keramikanteils und die Haftung beider Werkstoffe einen Widerstand entgegen [SIEBERT, 1989].

Die Messergebnisse aus dem Biegeversuch lassen Prognosen zu, wie groß das Risiko für Keramikabplatzungen auf der einen oder anderen Legierung bei vergleichbaren Manipulationen in der Mundhöhle ist. Der Biegeversuch erlaubt zusätzlich Aussagen über den Einfluss unterschiedlicher Oberflächenbehandlungen des Metallprüfkörpers, z. B. durch Schleifen, Polieren, Strahlen und Oxidieren, auf die Verbundfestigkeit [SIEBERT, 1989].

#### **2.4.2 Drucktest (nach VOSS)**

Beim Drucktest nach VOSS wird ein keramikverblendeter oberer Eckzahn unter 45° zur Zahnachse mit einer Druckfinne auf der Inzisalkante bis zum Bruch belastet. Für die Versuchsdurchführung wird die keramikverblendete Krone auf einem polierten Metallstumpf mit einem massiven Sockel zum Einspannen in die Universalprüfmaschine zementiert [VOSS, 1969; SIEBERT, 1989; KAPPERT und EICHNER, 2008].

Physiologisch kann eine solche oder zumindest ähnliche Druckbelastung bei Eckzahnführung tatsächlich auftreten [SIEBERT, 1989].

Beim Testvorgang werden im Prinzip ähnliche Material- und Verbundeigenschaften wie im oben beschriebenen Schertest geprüft. Die Versuchsanordnung des Drucktest nach Voss hat den Nachteil, dass es schwierig und fast unmöglich ist, die Prüfkörpergeometrie exakt reproduzierbar zu gestalten [SIEBERT, 1989]. Der Vorteil ist, dass die ermittelte Messgröße, im Gegensatz zu allen anderen Prüfmethoden, zu einer praxisnahen Größe, nämlich zu den physiologischen Kaukräften in Bezug gesetzt werden kann. Zudem ist die gesamte Technologie zur Herstellung einer keramikverblendeten Krone Schritt für Schritt erforderlich und muss mit Erfolg durchgeführt werden, ehe ein Messergebnis erzielt werden kann [SIEBERT, 1989].

#### **2.4.3 Scherversuch (nach SCHMITZ/SCHULMEYER)**

Ein quaderförmiger Keramikprüfkörper mit den Abmessungen 3 mm · 3 mm · 6 mm wird beim Scherversuch nach SCHMITZ/SCHULMEYER von einem Metallwürfel mit etwa 6 mm Kantenlänge abgeschert. Aus der hierfür benötigten Abscherkraft wird durch

Division mit der Haftfläche die maximale Abscherspannung in MPa ermittelt [SCHMITZ und SCHULMEYER, 1975; KAPPERT et al., 1985; SIEBERT, 1989].

Eine entsprechende Belastung in der Mundhöhle, wie sie dem Scherversuch entspricht, wäre bei okklusal verblendeten Kronen durch die gegenseitige Kraffteinwirkung antagonistischer Arbeitshöcker bei Lateralbewegungen denkbar [SIEBERT, 1989].

#### **2.4.4 Versuch (nach SCHELL/NIELSON)**

Es wird ein metallischer Rundstab (1,63 mm Durchmesser) in einem Keramikblock in einer Tiefe von etwa 2,5 mm eingebettet und die Spannung gemessen, mit der er herausgezogen wird [SCHMITZ und SCHULMEYER, 1975; MCLEAN, 1978].

Kritik hat dieses Prinzip der zylindrischen Ausziehprobe erfahren, weil WAK-Fehlanpassungen einen möglichen festhaltenden Effekt ausüben [MCLEAN, 1978].

#### **2.4.5 Schlagversuch (nach DIN 51155)**

Die Prüfung der Schlagfestigkeit wird auf keramikverblendeten planparallelen Metallplättchen mit den Abmessungen 15 mm · 15 mm · 1,3 mm mit einer Schlagpistole nach DIN 51155 durchgeführt [SIEBERT, 1989].

In der Praxis, unter physiologischen Bedingungen, kommt eine entsprechende Belastung nicht vor. Lediglich bei Gewaltanwendung oder etwa bei herausnehmbarem Zahnersatz durch versehentliches Auf-den-Boden-fallen könnte durch eine Schlagbelastung die Keramikverblendung zerstört werden [SIEBERT, 1989].

#### **2.4.6 Temperatur-Wechsel-Belastungstest (TWB-Test)**

Der Temperatur-Wechsel-Belastungstest (TWB-Test) ist eine Prüfung, bei der Brücken unterschiedlich hohen Temperaturen ausgesetzt und dann in Eiswasser abgeschreckt werden, bis sie versagen. Diese Ergebnisse spiegeln die Kompatibilität von metallkeramischen Verbundsystemen, wie sie der Zahntechniker erlebt, wider [SCHNETTGER et al., 2006]. Der TWB-Test hat folgenden Ablauf: Die nummerierten

Brücken werden in einer feuerfesten Schale bei 90 °C in einem Wärmeofen gelagert und nach 15 Minuten in Eiswasser abgeschreckt. Weisen die Brücken unter Tageslicht Risse oder Sprünge auf, werden sie aussortiert und die Temperatur, von der abgekühlt wurde, wird notiert. Nicht frakturierte Brücken werden bei einer um 10 °C erhöhten Temperatur wieder in den Wärmeofen gelegt und durchlaufen erneut die einzelnen Schritte. Der Versuch wird z. B. bis zu einer Temperatur von 160 °C durchgeführt [SCHNETTGER et al., 2006].

Der TWB-Test ist ein Verfahren, das die thermischen Spannungen, die in einer Materialkombination verblieben, ermittelt [SCHNETTGER et al., 2006].

## 2.5 Fehlerursachen für das Versagen des Metall-Keramik-Verbundes

Bei den durch Fehler hervorgerufenen Defekten in der Keramik bzw. der Metall-Keramik-Verbundzone kann unterschieden werden zwischen Haarrissen (feiner Riss, der durch unterschiedlichen Lichteinfall in der Verblendung erkennbar ist), Sprüngen (deutlicher Sprung in der Verblendung mit Verfärbung im Sprung), Abplatzungen innerhalb der Keramik (als Ausdruck unzureichender Kohäsion innerhalb des Verblendmaterials) und Abplatzungen mit Freilegung des Metallgerüsts (als Ausdruck unzureichender Adhäsion zwischen Metall und Keramik) [PSOCH et al., 2006].

Neben Abplatzungen großflächiger Abschnitte der keramischen Verblendung werden als Fehler in keramisch verblendeten Metall-Kronen vornehmlich muschelförmige Aussprengungen am marginalen Kronenrand sowie von diesem Rand ausgehende Risse registriert [AUTERHOFF und LENZ, 1985].

Tab. V und Tab. VI zeigen die möglichen Fehlerursachen bei der Herstellung der Metall-Keramik-Restaurationen durch den Zahntechniker (labortechnische Fehler) und bei der Arbeit des Zahnarztes am Patienten (klinische Fehler).

**Tab. V:** Labortechnische Fehler als Ursache für das Versagen von Metall-Keramik-Restorationen

Fehlerzeitpunkt	Fehler	Folge	Quelle
Materialauswahl	Verwendung von nicht aufeinander abgestimmter Legierung und Keramik (WAK etc., siehe Kap. 2.2.4.1)	Große innere Spannungen mit herabgesetzter Belastbarkeit und Dauerhaftigkeit des Metall-Keramik-Systems	[STEINBERG und SCHMITZ, 1968; SCHMITZ und SCHULMEYER, 1975; MCLEAN, 1978; SCHWICKERATH und MOKBEL, 1983; EICHNER und KAPPERT, 2005; SCHNETTGER et al., 2006; ANUSAVICE et al., 2007; KAPPERT und EICHNER, 2008]
Modellierung	Zu dünne Gerüstgestaltung	Starke Formveränderungen des Gerüsts beim Brennen, denen die erstarrende keramische Masse nicht mehr folgen kann. Risse und spätere Frakturen sind die Folge. Zusätzlich ungenügende Stabilität des Gerüsts mit späterer Deformation der Restauration und Keramikabplatzungen	[EICHNER, 2000; TAUBER und KAPPERT, 2006; STRIETZEL, 2007]
Modellierung	Keine Berücksichtigung von E-Modul und 0,2 %-Dehngrenze mit ungünstiger Gestaltung von Form, Abmessung und Verteilung der Materialien im Querschnitt	Verringerte Kraftaufnahmefähigkeit & Belastbarkeit der Restauration	[SCHWICKERATH, 1993a]

Modellation	Schafe Kanten bei der Gerüstmodellation	Scharfe Kanten stellen die Ausgangssituation für Risse der Keramik dar	[STRIETZEL, 2002; STRIETZEL, 2007]
Guss	Lunker im Gussobjekt, Kohlenstoff in hochpalladiumhaltigen Legierungen	Blasenbildung innerhalb der Verbundzone mit herabgesetzter Stabilität	[BRÄMER und PETER, 1990]
Bearbeitung des Gerüsts	Durch Unterlassung von nachfolgenden Bearbeitungsschritten des gegossenen Gerüsts, wie Schleifen und Abstrahlen, können Graphitteilchen (von den für den Guss verwendeten Graphitiegeln) auf der Oberfläche des Gussobjektes verbleiben	Verbrennen von den verbliebenen Graphitteilchen mit Blasenbildung in der Keramik und herabgesetzter Stabilität	[STRIETZEL, 2007]
Bearbeitung des Gerüsts	Keine Reduktion der nach dem Guss vorhandenen Oxidschicht (z.B. durch Abstrahlen)	Die zu dicke Oxidschicht führt unter Kaubelastung zu einem Bruch innerhalb dieser Schicht	[STRIETZEL, 2002]
Abstrahlen des Gerüsts	Unterlassen des Abstrahlprozesses	Durch das fehlende Abstrahlen mangelnde Mikroretentionen, mangelnde Säuberung der Oberfläche und keine Erhöhung der Oberflächenenergie: verringerte Verbundfestigkeit zwischen Metall und Keramik	[STRIETZEL, 2002; FISCHER et al., 2009]
Abstrahlen des Gerüsts	Zu großer Strahldruck in Bezug auf die Legierungsoberfläche, sodass Korundreste auf der Oberfläche verbleiben	Verstärkte Blasenbildung innerhalb der Keramik mit herabgesetzter Stabilität	[BRÄMER und PETER, 1990]

Abstrahlen des Gerüstes	Zu lange Wartezeit zwischen dem Abstrahlen und dem Weiterarbeiten (es muss normalerweise nach dem Abstrahlen sofort weitergearbeitet werden)	Die durch das Abstrahlen erhöhte Oberflächenenergie und damit die verbesserte Benetzbarkeit geht verloren: verringerte Verbundfestigkeit ist die Folge	[STRIETZEL, 2002]
Abdampfen des Gerüstes	Bei ungenügendem oder unterlassenem Abdampfen der zu verblendenden Objekte können Fette und Öle auf der Oberfläche verbleiben	Blasenbildung innerhalb der Verbundzone mit herabgesetzter Stabilität	[BRÄMER und PETER, 1990]
Auftrag des Bonders	Verzicht von Bondern bei der Verblendung von Titangerüsten	Die normalerweise vom Bänder kontrollierte Oxidation des Titans kann ungehindert ablaufen: die Verbundfestigkeit sinkt	[WEHNERT et al., 2009]
Auftrag des Bonders	Fehlerhafter Auftrag (nicht spaltfrei, ungleichmäßig) des Goldbonders bei zu verblendenden Galvanogerüsten	Herabgesetzte Randstabilität der Keramik mit lokalisierter Keramikabplatzung	[HOPP und BIFFAR, 2006]
Brennen des Bonders	Fehlerhaftes Brennen (zu schnelle Trocknung bei zu hoher Temperatur) des Goldbonders bei zu verblendenden Galvanogerüsten	Keramik bindet zwar die Partikel des Bonders, es besteht aber keine Stabilität zur Goldkappe, sodass sich das Goldkappchen aus der Keramikverblendung herauslösen lässt	[HOPP und BIFFAR, 2006]
Keramikschichtung	Keramikschricker zu trocken angemischt, Keramik zu trocken geschichtet oder Flüssigkeit mit Zellstoffpapier zu stark abgesaugt	Oberfläche der Keramik zeigt Mikroporositäten oder Aufrisse, Abplatzungen oder Abhebungen an der Keramikoberfläche oder bisquitartige Keramik nach dem Brand mit Minderung der mechanischen Qualität	[EICHNER, 2000; VITA, 2007]

Keramik-schichtung	Mangelnde Primärverdichtung durch Kondensation (z.B. mittels Riffeln), Einschlüsse und Verunreinigungen	Porenbildung und Rissbildung mit mangelnder Festigkeit der Keramik	[HAHN und LÖST, 1992; EICHNER und KAPPERT, 2005]
Keramik-schichtung	Keramische Schicht wird ungleichmäßig dick aufgetragen, läuft ggf. spitz aus	Unerwünschte Farbdifferenzen, unkontrollierbare Schrumpfungen und Spannungen mit Abplatzungen von Keramik	[EICHNER, 2000; TAUBER, 2006b]
Keramik-schichtung	Zu große Keramikschichtdicke im Vergleich zur Gerüststärke	Zunahme der Spannungen zwischen Metall und Keramik mit herabgesetzter Belastbarkeit	[STEINBERG und SCHMITZ, 1968; SCHNETTGER et al., 2006]
Keramik-schichtung	Einarbeiten von einzelnen Luftblasen beim Auftragen der keramischen Masse	Je nach Zahl und Lage der Blasen ungünstig oder ohne Bedeutung für die Stabilität der Keramikschicht	[EICHNER, 2000]
Keramik-schichtung	Ausdehnung der Keramik bis auf den nur 0,1 mm starken Rand des Metallgerüsts	Hohe Frakturgefährdung der Keramikschicht	[EICHNER, 2000]
Keramik-schichtung	Zu häufiges Schichten und Brennen eines keramisch verblendeten Werkstückes aus Metall erhöht den WAK der Keramik um 0,2 % bei jedem Brand	Risse und Sprünge in der Keramik wegen nicht mehr aufeinander abgestimmten WAK von Metall und Keramik	[CAESAR und ERNST, 1987; ANUSAVICE et al., 2007]
Ofen-einstellung	Zu hohe Trocknungstemperatur oder zu schnelle Aufheizrate eingestellt	Die Keramikpartikel versintern an der Oberfläche, so dass die Flüssigkeit des Opakers (Wasser oder Glyzerin) bzw. der Keramik nicht verdampfen kann und zu Blasenbildung mit verringerter Stabilität der Keramik führt	[STRIETZEL, 2007]

Ofen-einstellung	Keine Berücksichtigung der Forderung nach langsamen Abkühlen	Sprünge in der Keramik, in der Regel nicht in der Bindungszone	[EICHNER, 2000]
Nachbearbeitung keramischer Komponenten	Abtragende Bearbeitung (Bohren, Fräsen) von Keramik schlägt Werkstoffpartikel heraus und induziert somit extreme Zugspannungen. Überschreiten diese Zugspannungen eine kritische Größe, so kann ausgehend von einem Mikrodefekt (Pore, Fremdeinschluss etc.) ein Mikroriss entstehen	Versagen des Bauteils bei Beanspruchung durch Festigkeitsminderung im Bereich des Mikrodefekts	[FISCHER et al., 1999]

**Tab. VI:** Klinische Fehler als Ursache für das Versagen von Metall-Keramik-Restaurationen

<b>Fehlerzeitpunkt</b>	<b>Fehler</b>	<b>Folge</b>	<b>Quelle</b>
Planung	Nichtbeachten von Bruxismus	Höhere Wahrscheinlichkeit für Defekte der Metall-Keramik-Restauration	[REITEMEIER et al., 2007]
Planung	Nichterkennen der Grenzen der Indikation und Kontraindikation (z. B. Kontraindikation der Metall-Keramik-Systeme bei jugendlichen Zähnen, ungenügendem vertikalen Platzangebot, großen Brücken ohne Geschiebeteilungen, sehr kurzen klinischen Kronen)	Misserfolge der Restauration durch Unkenntnis des Anwenders	[BREUSTEDT, 1965; VOß und MEINERS, 1980]

Präparation	Tangentialpräparation statt Stufe oder tiefer Hohlkehle	Die Temperaturveränderung beim Brennprozess, besonders beim Abkühlen, wirkt sich auf den Metallrand aus. Die notwendigerweise dünn auslaufende Keramikschicht kann der Metallkontraktion nicht folgen, so dass eine Längsfraktur entsteht. Beim Probearbeiten oder Zementieren der Restauration kann es wegen des entstehenden Innendrucks zu muschelförmigen Aussprengungen kommen.	[EICHNER, 2000; TAUBER, 2006a]
Präparation	Zu wenig Platz geschaffen zum Antagonisten, zu Nachbarzähnen und nach vestibulär oder oral	Der Techniker hat keine Möglichkeit eine stabile, dauerhafte und ästhetische keramisch verblendete Metall-Restauration zu fertigen	[SEYMOUR et al., 1996; TAUBER, 2006b; TAUBER, 2006a]
Einpassen der Restauration	Nichterkennen von Passungengenauigkeiten führen zu einer Durchbiegung des Kronenrandes beim Zementieren (ca. 120 N Kraft) oder Zubeißen (über 300 N Kraft möglich)	Abplatzungen von Keramik in Situ	[SCHWICKERATH, 1978]
Eingliedern der Restauration	Belassen von okklusalen Überbelastungen und Vorkontakten	Häufig Versagen des Metall-Keramik-Systems mit Abplatzungen von Keramik	[ANUSAVICE et al., 2007; KAPPERT und EICHNER, 2008]

## 2.6 Überlebenswahrscheinlichkeit von Metall-Keramik-Restaurationen

Die Aufnahmefähigkeit gegenüber auftretenden Beanspruchungen und damit die Überlebenswahrscheinlichkeit von Metall-Keramik-Restaurationen wird grundsätzlich durch die Festigkeits- und elastischen Eigenschaften sowie durch die Festigkeit des Verbundes bestimmt [MCLEAN, 1978; SCHWICKERATH, 1978].

Oft ist es so, dass mehrere Fehler erst in Kombination miteinander zum Versagen der Restauration führen, die im Einzelnen normalerweise vom System vertragen werden [STRIETZEL, 2007].

### 2.6.1 In-vitro-Überlebenswahrscheinlichkeit

Bei der In-vitro-Untersuchung kommen verschiedene Prüfverfahren der Verbundfestigkeit (die wie oben unter Kap. 2.6 genannt, einen großen Einfluss auf die Überlebenswahrscheinlichkeit von Metall-Keramik-Restaurationen hat) zum Einsatz (siehe Kap. 2.4).

In der Wichtung der Verbundstabilität zeigen sich bei fast allen Tests die besten Ergebnisse beim Keramikverbund mit klassischen Goldlegierungen, dicht gefolgt von NEM-Legierung und dem Titan, wobei die Unterschiede oftmals nicht signifikant sind [HOPP et al., 2006] (siehe auch Kap. 2.1.2.2). Tab. VII zeigt eine tabellarische Übersicht über verschiedene Überlebenswahrscheinlichkeiten von Metall-Keramik-Restaurationen *in vitro*.

**Tab. VII:** In-vitro-Überlebenswahrscheinlichkeit von Metall-Keramik-Restaurationen

Legierung/ Metall	Prüfverfahren	Ergebnis	Quelle
Hochgoldhaltige Legierung	Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13927	47,2 MPa (trocken), 41,6 MPa (nach 90d in Korrosionslsg.)	[RINKE et al., 1998]
Titan, gefräst	Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13927	32,6 MPa (trocken), 29,6 MPa (nach 90d in Korrosionslsg.)	[RINKE et al., 1998]
Titan, gegossen	Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13927	33,0 MPa (trocken), 27,3 MPa (nach 90d in Korrosionslsg.)	[RINKE et al., 1998]
Gold-Platin-Indium	Schwickerath-Test	64 MPa	[DÖRFLER et al., 1995]
Hochgoldhaltige Legierung	Schwickerath-Test	47-65 MPa	[SCHNETTGER et al., 2006]
Goldreduzierte Legierung	Schwickerath-Test	47-60 MPa	[SCHNETTGER et al., 2006]
Palladiumbasis-Legierung	Schwickerath-Test	49-70 MPa	[SCHNETTGER et al., 2006]
Nickel- und Cobaltbasis Legierung	Schwickerath-Test	41-44 MPa	[SCHNETTGER et al., 2006]
Cobalt-Chrom-Legierung	Schwickerath-Test	36,1 MPa	[VENKATACHALAM et al., 2009]
Nickel-Chrom-Legierung	Schwickerath-Test	31 MPa	[SCHWEITZER et al., 2005]
Titan	Schwickerath-Test	35-51 MPa	[BLUME et al., 1998b]

### 2.6.2 In-vivo-Überlebenswahrscheinlichkeit

Frakturen der Keramik treten außergewöhnlich häufig während der ersten Monate nach Eingliederung der Restauration auf [LEIBROCK et al., 1999].

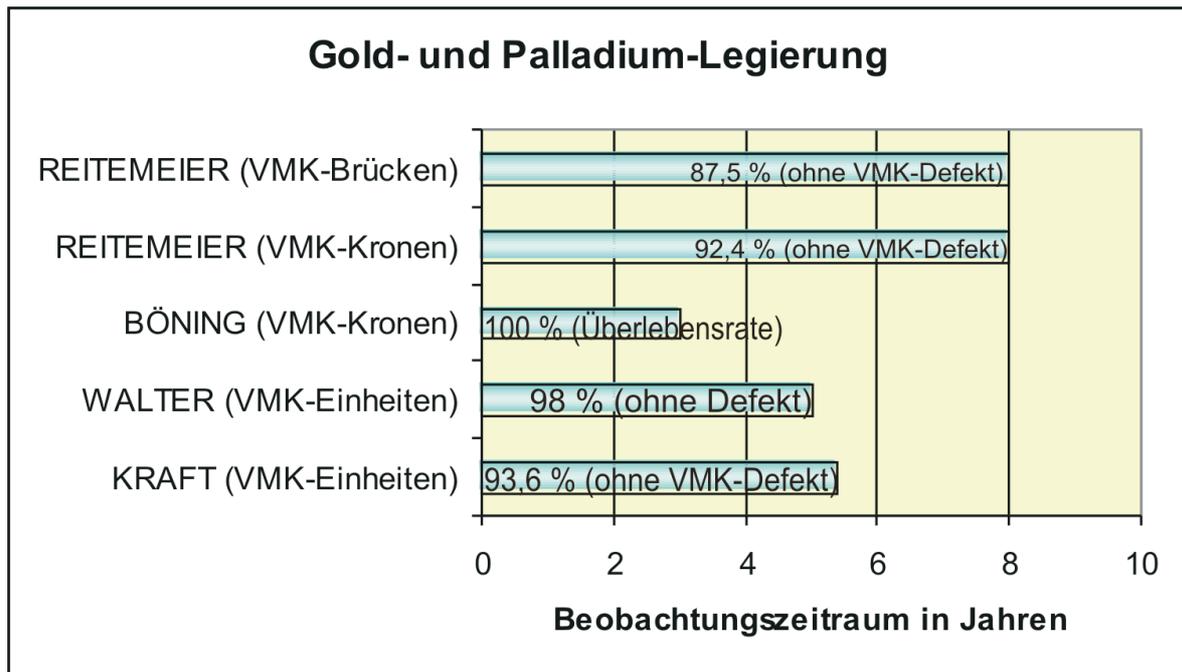
Bei kleinflächigen Frakturen von Metall-Keramik-Systemen kann die Reparatur mit Compositen eine Erneuerung der gesamten Restauration verhindern bzw. hinauszögern. An der Bruchstelle sollten Unterschnitte in die Keramikdentinmasse präpariert werden mit anschließender vollständiger Trockenlegung, ein sorgfältiger Silanisiervorgang muss durchgeführt werden und die Restauration sollte wenn möglich ohne Okklusionskontakt erfolgen [KRAFT und SCHÄFER, 1994]. Wegen der im Vergleich zur Scherverbundfestigkeit der Metallkeramik-Systeme geringeren

Verbundfestigkeitswerte ist das beschriebene Vorgehen bei größeren Frakturen nicht indiziert [KRAFT und SCHÄFER, 1994].

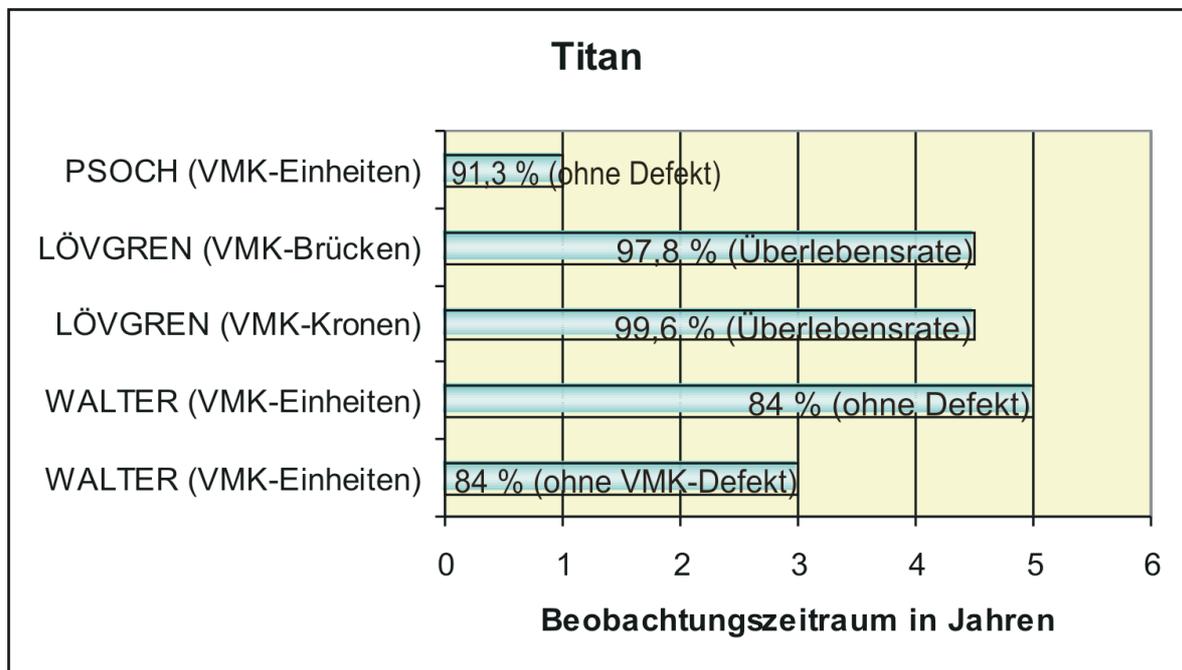
Ganz allgemein ergibt die Analyse von Risikofaktoren bei an Patienten eingegliederten Brücken, dass Faktoren wie Größe der Brücke, Alter bei der Eingliederung, Lokalisation im Kiefer und Konstruktion (Freiendbrücke) signifikanten Einfluss auf die Überlebenszeiten der Restaurationen haben [KERSCHBAUM et al., 1991]:

Große Brücken mit mehr als zwei Ankerzähnen zeigen ein um ein Drittel erhöhtes Risiko; wird nur ein Pfeilerzahn verwendet, so steigt das Risiko um rund 75 %. Mit zunehmendem Alter steigt das Verlustrisiko bis zum Fünffachen an, vermutlich aus parodontalen Gründen. Im Vergleich zu einer Frontzahnkrone steigt das Risiko bei einer Eckzahnrestauration um mehr als 30 % und verbessert sich bei Prämolaren und Molaren. Ebenso hat die Seitenzahnbrücke im Vergleich zur „Standardfrontzahnbrücke“ nur die Hälfte des Risikos verloren zu gehen. Freiendsituationen sind primär höher (ca. 40 %) verlustgefährdet im Vergleich zur Endpfeilerbrücke [KERSCHBAUM et al., 1991].

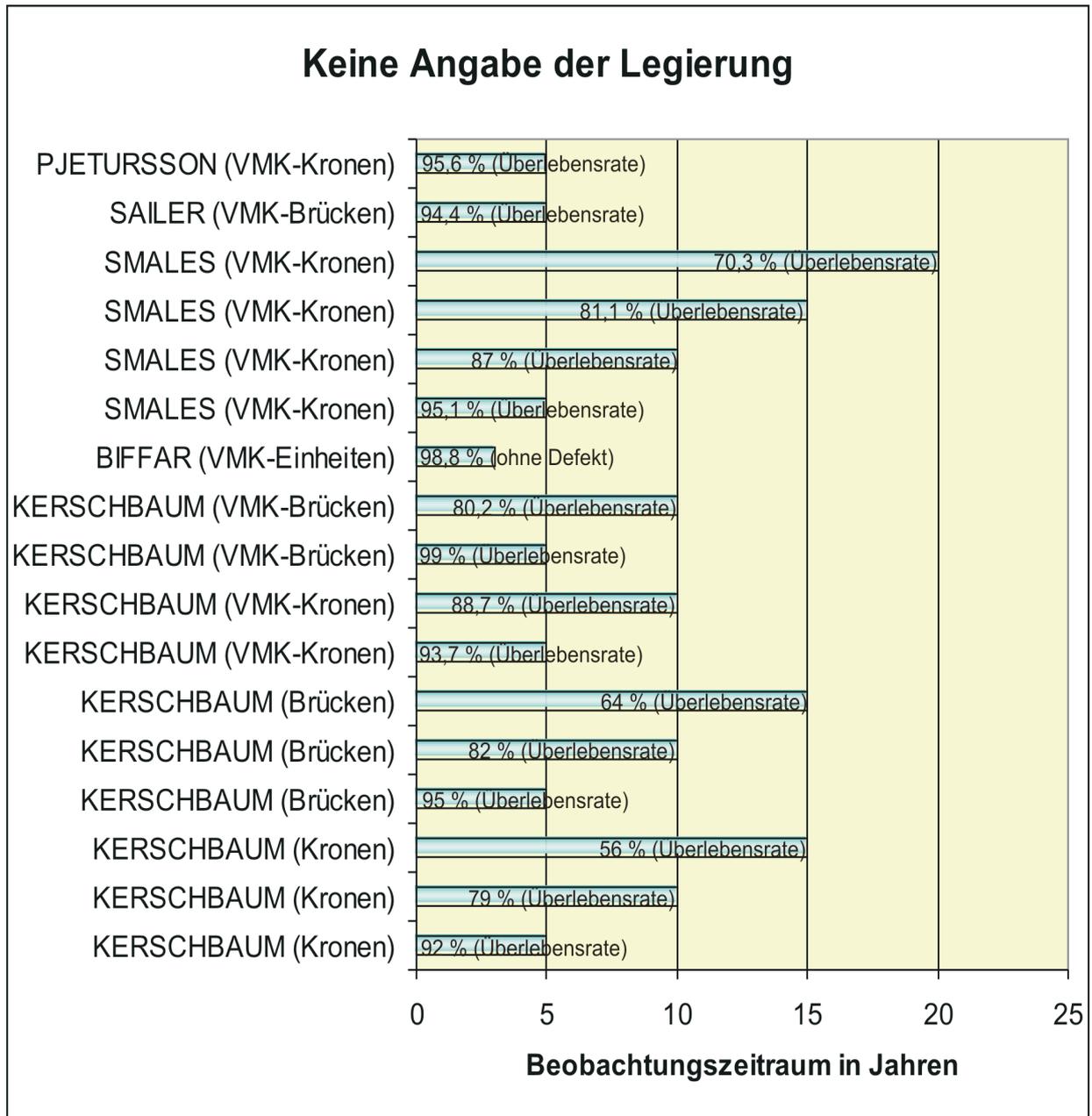
Die Balkendiagramme in Abb. 7, Abb. 8 und Abb. 9 zeigen zusammenfassend die in der Literatur genannten Überlebenswahrscheinlichkeiten von verschiedenen VMK-Einheiten unterteilt nach der chemischen Zusammensetzung der Metallgerüste in Abhängigkeit vom In-vivo-Beobachtungszeitraum und vom jeweiligen Erstautor. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Tabellen mit den genauen Angaben der Quellen, den untersuchten Einheiten sowie dem Erscheinungsjahr im Anhang aufgeführt (siehe 8.2.4, Tab. LXXX).



**Abb. 7:** In-vivo-Überlebenswahrscheinlichkeit von keramisch verblendeten Kronen und Brücken mit einem Metallgerüst aus einer Gold- oder Palladium-Legierung



**Abb. 8:** In-vivo-Überlebenswahrscheinlichkeit von keramisch verblendeten Kronen und Brücken mit einem Metallgerüst aus Titan



**Abb. 9:** In-vivo-Überlebenswahrscheinlichkeit von keramisch verblendeten Kronen und Brücken mit einem Metallgerüst ohne Angabe der verwendeten Legierung

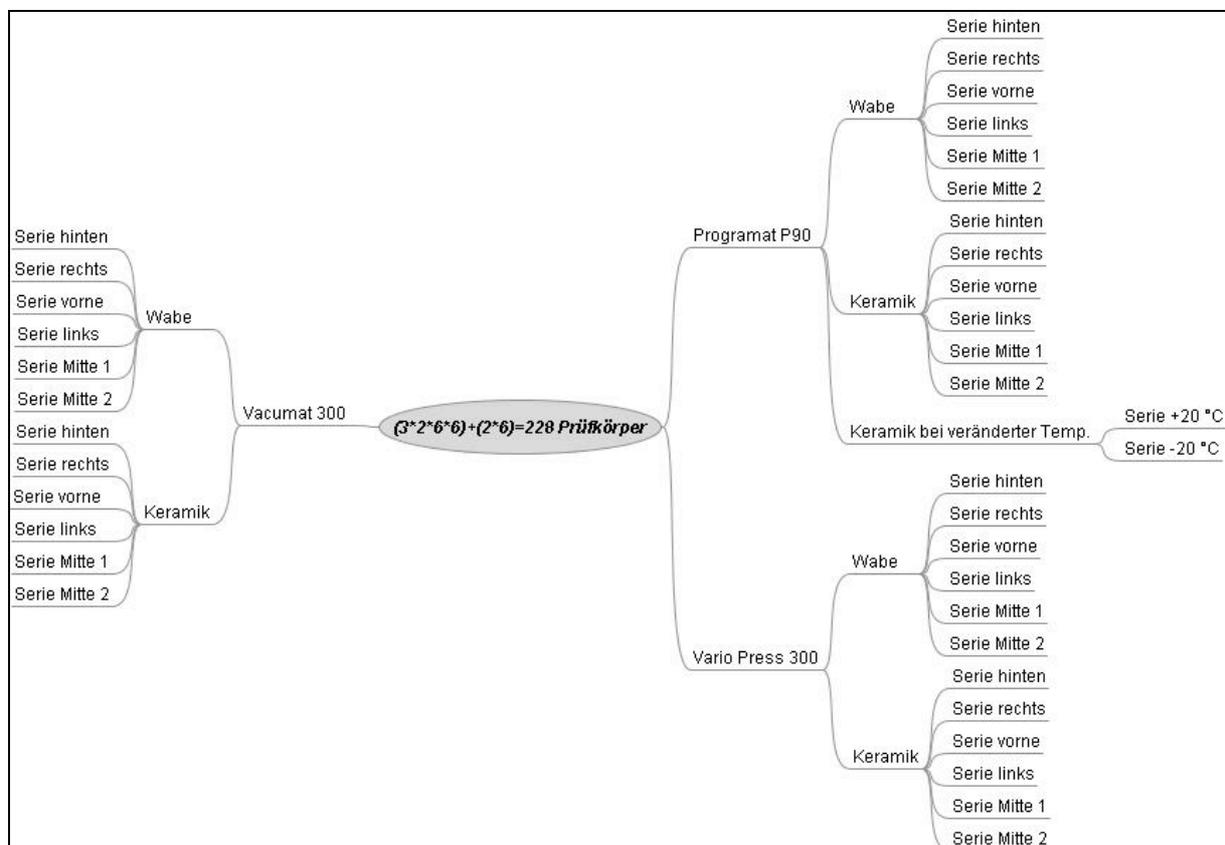
### 3 Material und Methode

#### 3.1 Prüfkörper

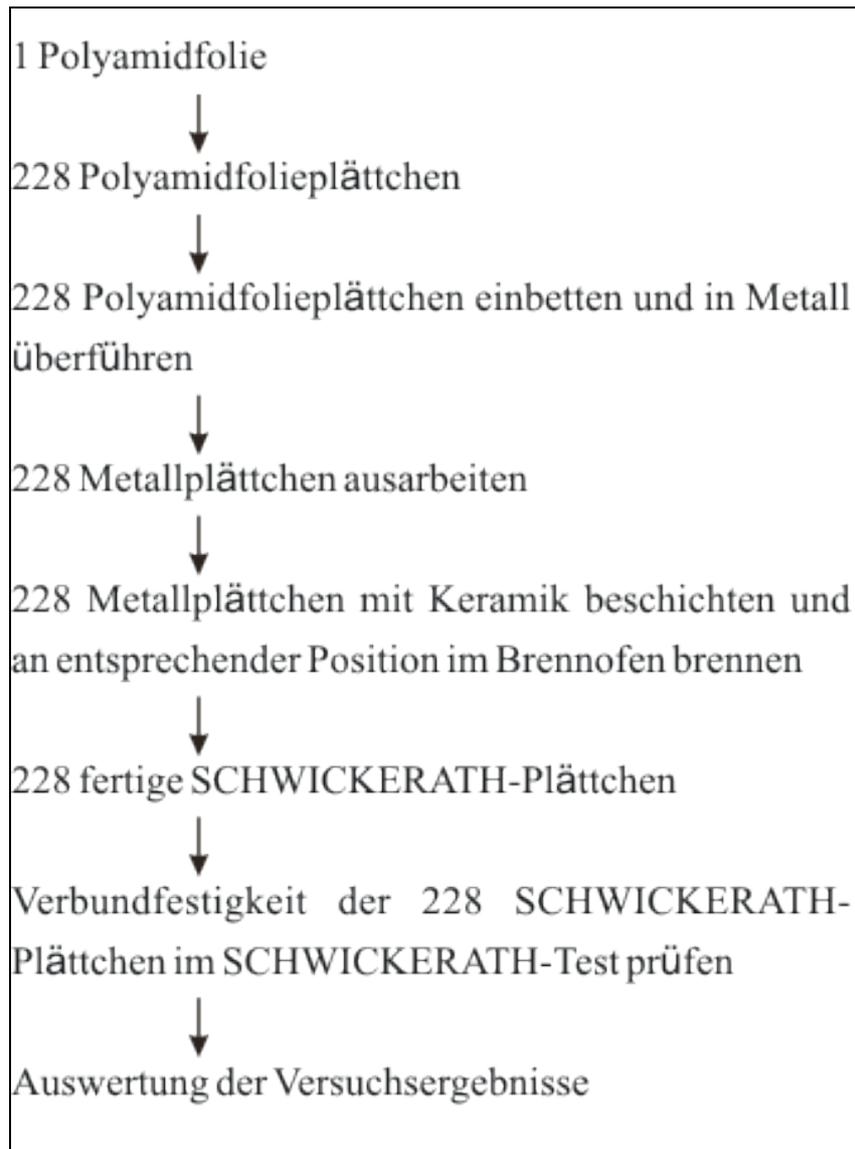
Es wurden 228 (216+12) Prüfkörper nach der DIN EN ISO 9693 [DIN, 2000] hergestellt.

Die Prüfkörper (SCHWICKERATH-Plättchen) wurden alle unter identischen Bedingungen und gleichen Arbeitsabläufen hergestellt (Abb. 11). Variiert wurde lediglich der Brennofen, der Brenngutträger und die Brennposition auf dem Brenngutträger (Abb. 10).

Die Anzahl von 216 ergab sich aus der Anzahl der verwendeten Keramikbrennöfen (3 Öfen: Vacumat® 300, Vario Press® 300, Programat® P90), der verschiedenen Brenngutträger (2 Brenngutträger: Wabe und Keramik) und der Positionen (6 Positionen: hinten, rechts, vorne, links, Mitte 1, Mitte 2). Für jede Position (Serie) wurden sechs Prüfkörper benötigt. Die Anzahl 12 ergab sich aus 2 zusätzlichen Serien, die bei veränderter Brandtemperatur gebrannt wurden.



**Abb. 10:** Übersicht über den Versuchsaufbau

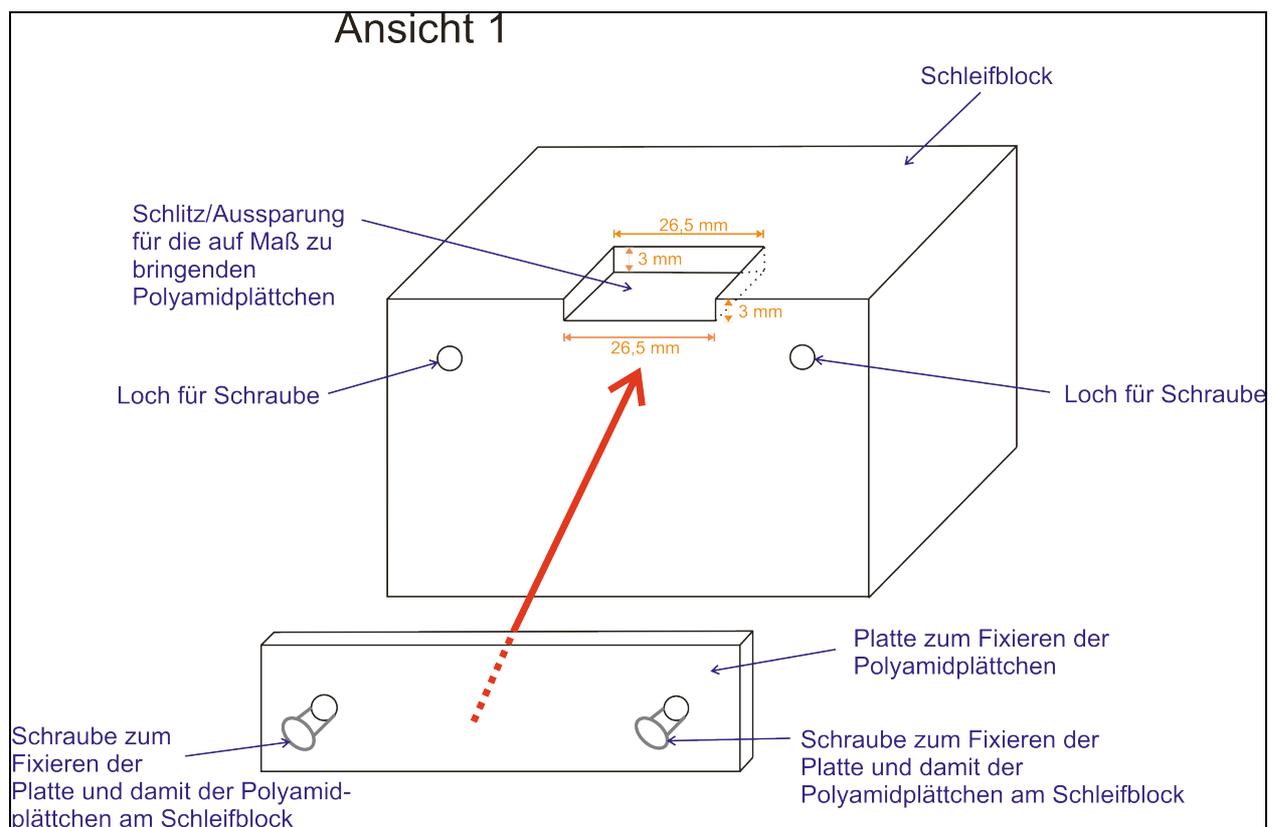


**Abb. 11:** Arbeitsablauf im Überblick

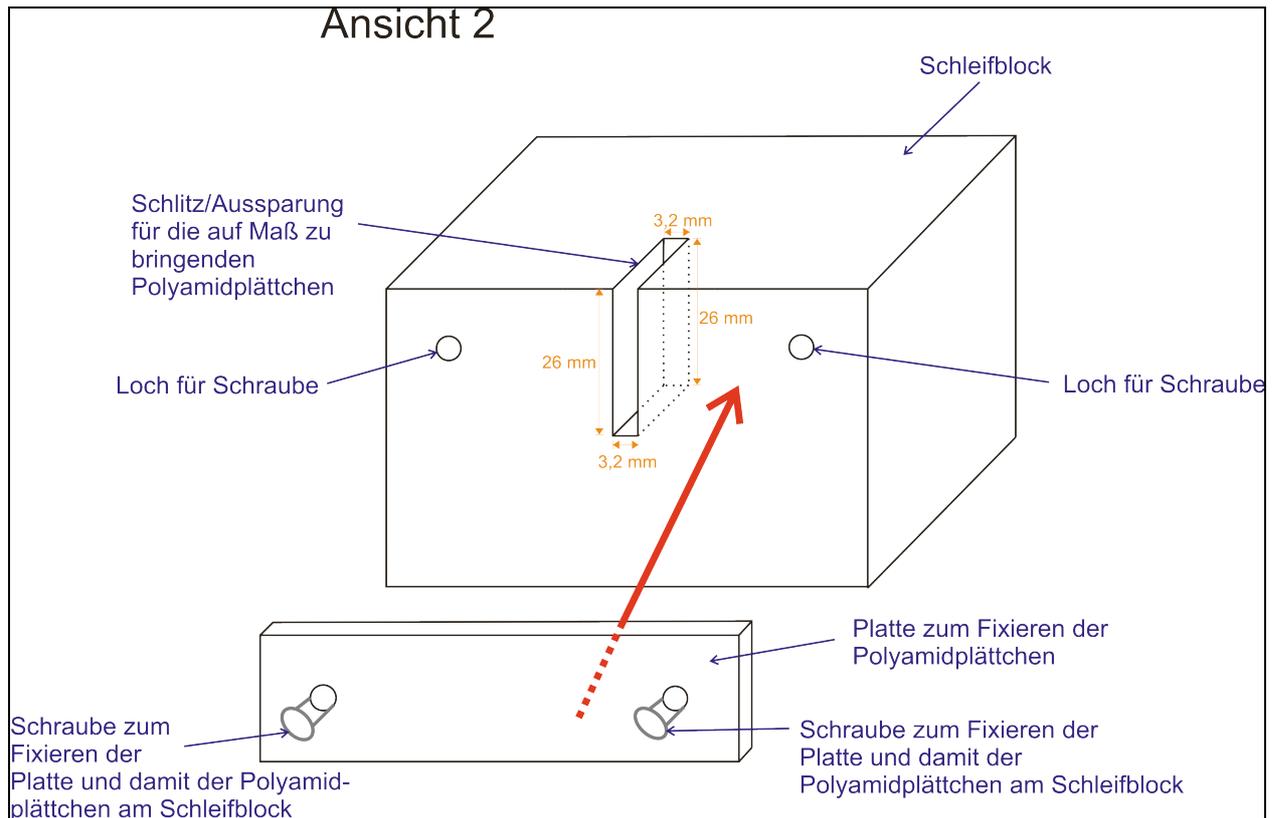
### 3.1.1 Herstellung der Metallgerüste

Aus einer 0,5 mm dicken Polyamidfolie (Maße ca. 23 cm × 23 cm × 0,5 mm) wurden, nachdem die Schutzfolie auf beiden Seiten entfernt worden war, Streifen geschnitten, die etwa eine Breite von 3,2 mm aufwiesen. Alle Streifen wurden mit einem Skalpell in knapp 26,5 mm große Abschnitte geteilt. Diese grob ausgearbeiteten Polyamidplättchen wurden in einer eigens dafür entwickelten Schleifhilfe nach ZIMNY (siehe Abb. 12 und Abb. 13) mithilfe von Schleifpapier (Firma Wolfcraft®, Körnung 60, 100 und 240) auf die Maße von 3 mm × 26 mm × 0,5 mm gebracht.

Pro Schleifvorgang konnten dabei 19 Polyamidplättchen auf Maß gebracht werden, indem der Schleifblock mit den eingespannten Polyamidplättchen so häufig über das Schleifpapier gezogen wurde (von grob nach fein), bis die Polyamidplättchen nicht mehr überstanden sondern auf Höhe des Schleifblockes endeten. Dieser Vorgang wurde zuerst für die Breite von 3 mm (siehe Abb. 12) und danach für die Länge von 26 mm (siehe Abb. 13) durchgeführt. Das Maß der Dicke von 0,5 mm war durch die Dicke der Polyamidfolie vorgegeben.



**Abb. 12:** Schleifblock nach ZIMNY, Ansicht 1



**Abb. 13:** Schleifblock nach ZIMNY, Ansicht 2

Die Polyamidplättchen wurden von Schleifpapierstaub mit Hilfe eines sauberen Pinsels gereinigt und an einen kreisrund geformten FINOWAX® Wachsdraht der Stärke 4 mm (Firma FINO GmbH) mit der 3 mm langen Seite angestiftet (Abb. 14).



**Abb. 14:** Zum Gießen angestiftete Polyamidplättchen

Bei dem verwendeten ringlosen Muffelsystem wurde ein Silikon-Muffelring 200g BeCe® PRESS (Firma BEGO) mit einem 6er Muffelteller kombiniert.

Nachdem der mit Vaseline eingepinselte Muffelring auf dem ebenfalls dünn mit Vaseline bestrichenen Muffelteller platziert war, wurde die phosphatgebundene Einbettmasse angemischt. Dazu wurde die Flüssigkeit BegoSol® HE (Firma BEGO) mithilfe von destilliertem Wasser auf 40 % verdünnt, dann 50 ml der verdünnten Lösung mit 200 g Bellavest® SH (Firma BEGO) per Hand 10-15 s in einem trockenen und sauberen Vakuumanmischbecher durchgespatelt. Anschließend wurde die Einbettmasse im Vakuumanmischgerät WAMIX-2M® (Firma Wassermann) 60 s angerührt und weitere 30 s unter Vakuum belassen. Während des Befüllens der Muffel sorgte der Rüttler KV-36 (Firma Wassermann) für günstiges Fließverhalten und blasenfreies Einbetten.

Direkt nach dem Einbetten wurde die Muffel für 10 min bei 4 bar in den Druckverdichter (Firma Leleux Vertriebs GmbH) gestellt und nach 30 min Aushärtezeit konnte der Muffelformer aus Silikon sowie der Sockel entfernt werden.

Vorgewärmt wurde die Muffel im Vorwärmofen Miditherm® (Firma BEGO) mit konventionellem Aufheizverfahren unter Berücksichtigung der Temperaturen und Zeiten des Herstellers (Tab. VIII).

**Tab. VIII:** Vorwärmtablette für konventionelles Aufheizen von Wirobond® 280

Abbindezeit nach dem Einbetten	mindestens 30 min
Einlegetemperatur	Raumtemperatur
Haltestufe	250 °C (mit 5 °C/min)
Endtemperatur	900 °C (mit 7 °C/min)
Haltezeiten für Haltestufe und Endtemperatur	30-60 min (je nach Größe und Anzahl der Muffeln)

Für den Guss wurde für alle Muffeln die edelmetallfreie, nickel- und berylliumfreie Kobalt-Chrom-Aufbrennlegierung Wirobond® 280 (Firma BEGO) mit der Chargennummer 12569 verwendet, die folgende Zusammensetzung und Eigenschaften hat (Tab. IX, Tab. X):

**Tab. IX:** Richtanalyse in Massen-% (Elemente) der Legierung Wirobond® 280

Element	Massen-%
Co	60,2
Cr	25,0
Mo	4,8
W	6,2
Ga	2,9
Si, Mn	

**Tab. X:** Legierungsmerkmale (Richtwerte) der Legierung Wirobond® 280

Legierungsmerkmale	Richtwerte von Wirobond® 280
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	8,5
Vickershärte (HV 10)	280
Elastizitätsmodul [GPa]	ca. 220
Dehngrenze (R <sub>p0,2</sub> ) [MPa]	540
Zugfestigkeit (R <sub>m</sub> ) [MPa]	680
Bruchdehnung (A <sub>5</sub> ) [%]	14
Schmelzintervall [°C]	1360-1400
Gießtempertaur [°C]	ca. 1500
WAK [10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ] 25-500°C	14,0
WAK [10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ] 20-600°C	14,2

Nach dem Vorwärmen, bei dem das Wachs ausgetrieben wurde und die Polyamidfolie rückstandslos verbrannte, wurde die Muffel zum Gießen in den vollautomatischen Gießautomaten Nautilus® CC plus (Firma BEGO) mit Vakuum-Druckguss und Induktionsheizung eingelegt. Geschmolzen wurde die Legierung ohne Schmelzpulver. Das Auslösen des Gießvorganges erfolgte automatisch mit Erreichen der Gießtemperatur von 1500 °C.

Vor dem Gießen einer weiteren Muffel wurde stets der Keramikgusstiegel auf Rückstände kontrolliert und gegebenenfalls von solchen befreit.

Nach dem Guss kühlten die Muffeln bei Raumtemperatur ab und wurden danach mittels Ausbettzange grob von der Einbettmasse befreit, um anschließend im Umlaufstrahler Protompomatic® Z (Firma BEGO) mit Korox® 250 µm automatisch abgestrahlt zu werden. Mit dem Griffelstrahler Topstar® Z3 (Firma BEGO) konnten auch die letzten Einbettmassereste mit Korox® 250 µm per Hand abgestrahlt werden.

Mittels einer Trennscheibe wurden die nun in Metall überführten Plättchen vom Gusskanal getrennt und durchnummeriert, so dass zu jedem Zeitpunkt des Versuches ein Identifizieren, Zuordnen und gegebenenfalls Rückverfolgen des Prüfkörpers bis zum Guss möglich war. Die verschiedenen Güsse wurden dabei mit Buchstaben des Alphabetes gekennzeichnet und die verschiedenen Plättchen eines Gusses wurden von 1 ansteigend durchnummeriert.

Auf die endgültig angestrebten Maße von  $(3\pm 0,1)$  mm  $\times$   $(25\pm 1)$  mm  $\times$   $(0,5\pm 0,05)$  mm wurden die Metallplättchen mithilfe einer elektronischen und kalibrierten Messlehre und feinverzahnten Hartmetallfräsen gebracht, mit welchen auch die gesamte Oxidschicht abgetragen wurde.

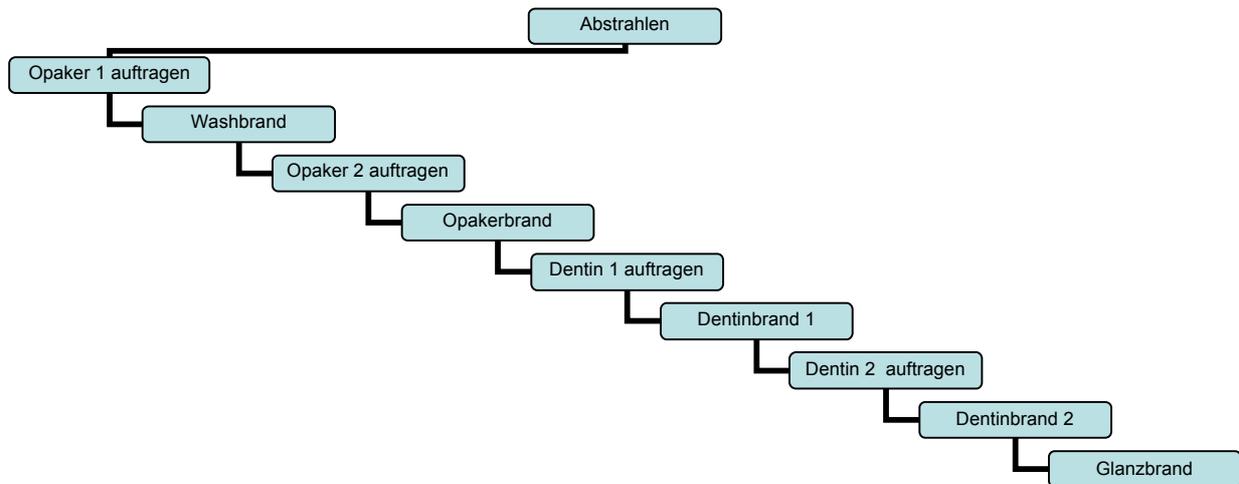
### 3.1.2 Schichten der Keramik

Bevor die auf Maß gebrachten Metallplättchen mit Opaker und Keramikmasse beschichtet werden konnten, mussten sie nochmals auf der zu beschichtenden Fläche mit Korox® 250  $\mu$ m im Griffelstrahler Topstar® Z3 (Firma BEGO) bei 3-4 bar gestrahlt werden. Da die Keramikbeschichtung nicht über das gesamte Metallplättchen erfolgen sollte, wurde der zu beschichtende Teil des Plättchens in der Keramikschichthilfe (siehe Abb. 15) mittels einer Reißnadel markiert und danach die Oberfläche des Plättchens durch Abdampfen mit der Triton® SLA (Firma BEGO) mit Dampf  $>65$  °C und einem Dampfdruck von  $3\pm 0,2$  bar gesäubert. Ab diesem Zeitpunkt durfte das Plättchen nur noch mit der Arterienklemme und nicht mehr mit den Händen berührt werden.

Eine Übersicht über den Ablauf der sich anschließenden Keramikschichtung und entsprechenden Brände zeigt Abb. 16.



**Abb. 15:** Keramikschichthilfe



**Abb. 16:** Übersicht über den Ablauf der Keramikschichtung

Anwendung fand für alle Prüfkörper die Keramik VITA VM® 13 (Firma VITA), die einen WAK bei 25-500 °C von  $13,1-13,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  hat.

Es wurde zuerst der Pastenopaker WASH OPAQUE PASTE VITA VM® 13 (Firma VITA, Chargen-Nummer 22280) mittels eines Pinsels innerhalb des markierten Bereiches dünn aufmassiert und durch Riffeln mit dem Le Cron-Instrument verdichtet. Dann erfolgte im Ofen der Washbrand (mehr zu den Öfen, Bränden und zur Positionierung siehe Kap. 3.1.3).

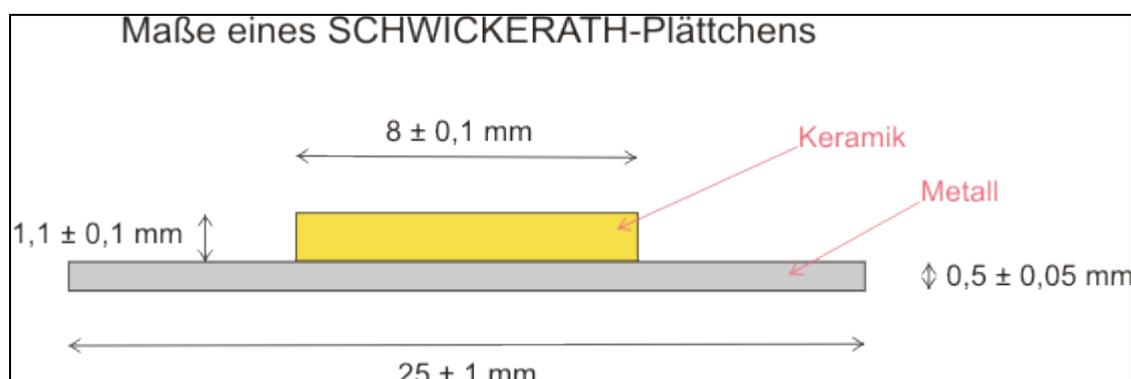
Nach abermaligem Abdampfen mit der Triton® SLA (Firma BEGO) bei gleichen Abdampfeinstellungen, wurde mit gesäubertem Pinsel der zweite Pastenopaker OPAQUE PASTE VITA VM® 13 (Firma VITA, Chargen-Nummer 10810) aufgetragen und ebenfalls verdichtet und gebrannt.

Wieder wurde abgedampft und dann aus der Dentinmasse BASE DENTINE VITA VM® 13 (Firma VITA, Chargen-Nummer 23730) und der Anmischflüssigkeit MODELLING LIQUID (Firma VITA, Chargen-Nummer 26210) ein pastenartiges und standfestes, zu schichtendes Gemisch angefertigt. Unter Zuhilfenahme der Keramikschichthilfe wurde die erste Schicht der Dentinmasse mit einem Pinsel

aufgebracht, wiederum durch Riffeln mit dem Le Cron-Instrument verdichtet und dann im Ofen gebrannt.

Es folgte ein Anrauen der gesamten Keramik durch einen Diamantschleifkörper und ein abermaliges Abdampfen mit der Triton® SLA (Firma BEGO) sowie ein Auftragen einer zweiten Dentinmasseschicht in der Keramikschichthilfe mit anschließender Verdichtung und Brand.

Nun mussten die entstandenen Prüfkörper mit der Keramik durch vorsichtiges Beschleifen mit einem Diamantschleifkörper bearbeitet werden, bis die Keramik folgende Maße aufwies:  $(3 \pm 0,1) \text{ mm} \times (8 \pm 0,1) \text{ mm} \times (1,1 \pm 0,1) \text{ mm}$  (Abb. 17).



**Abb. 17:** Maße eines SCHWICKERATH-Plättchen

Nach erneutem Abdampfen konnten die Prüfkörper für den letzten Brand, den Glanzbrand, in den Brennofen gebracht werden (Abb. 18).



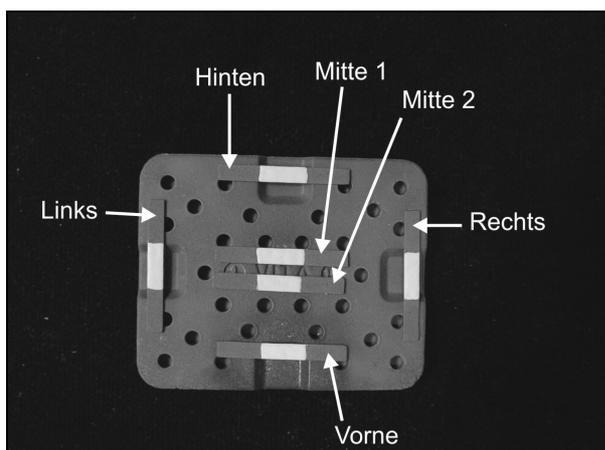
**Abb. 18:** SCHWICKERATH-Plättchen nach Glanzbrand

### 3.1.3 Brennen der Keramik

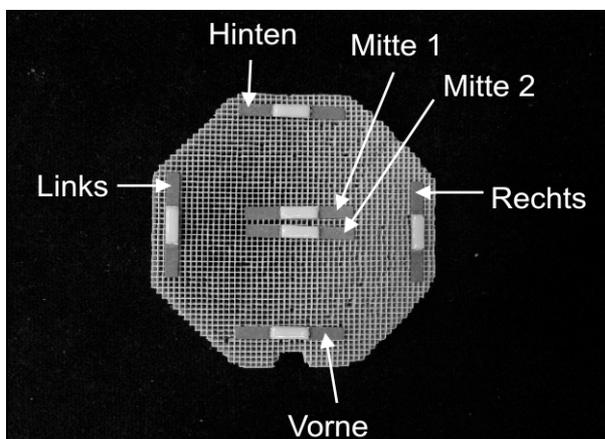
Wie bereits in Kapitel 3.1.1 und 3.1.2 erläutert, erfolgte das Herstellen und Vorbereiten der Metallprüfkörper sowie das Auftragen von Opaker und Schichten der Keramik bei allen Prüfkörpern identisch.

Variiert wurde die Brennposition im Keramikbrennofen (sechs verschiedene Positionen auf zwei verschiedenen Brenngutträgern in drei verschiedenen Öfen).

Für die sechs verschiedenen Positionen auf den Brenngutträgern, wurde jeweils ein Plättchen hinten, rechts, vorne, links und zwei in der Mitte positioniert (Abb. 19 und Abb. 20). Dabei wurde durch die Nummerierung der Prüfkörper sichergestellt, dass das entsprechende Plättchen jeden einzelnen Brand des Brennzyklus (also Washbrand, Opakerbrand, Deninbrand 1 und 2 und Glanzbrand) an stets derselben Brennposition durchlief.



**Abb. 19:** Brenngutträger Keramik mit Brennpositionen



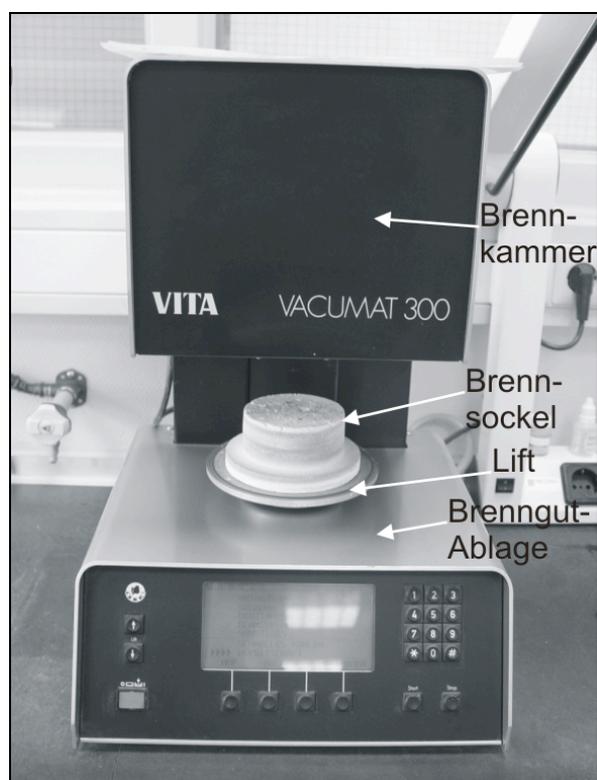
**Abb. 20:** Brenngutträger Wabe mit Brennpositionen

Bei der Brandführung, die in allen Öfen identisch eingestellt wurde, richtete man sich nach den Herstellerangaben (Tab. XI).

**Tab. XI:** Brenntabelle für die Keramik VITA VM® 13, Herstellerangaben

	Start-temperatur	Vortrockenzeit, Schließzeit	Aufheizzeit	Temperaturanstieg	Endtemperatur	Haltezeit für Endtemperatur	Vakuum Haltezeit
<b>Washbrand</b>	500 °C	4 min	5,12 min	75 °C/min	890 °C	2 min	5,12 min
<b>Opakerbrand</b>	500 °C	4 min	5,12 min	75 °C/min	890 °C	1 min	5,12 min
<b>1.Dentinbrand</b>	500 °C	6 min	6,55 min	55 °C/min	880 °C	1 min	6,55 min
<b>2.Dentinbrand</b>	500 °C	6 min	6,44 min	55 °C/min	870 °C	1 min	6,44 min
<b>Glanzbrand</b>	500 °C	0 min	4,45 min	80 °C/min	880 °C	2 min	-

### 3.1.3.1 Brennofen VITA Vacumat® 300



**Abb. 21:** VITA Vacumat® 300

Bei dem Vacumat® 300 (Abb. 21, Tab. XII) handelt es sich um einen Ofen, dessen Lift sich in der Vertikalen nach oben und unten bewegt. Der Ofen schließt, indem der Lift nach oben in die Brennkammer hereinfährt. Es ist, wie auch bei den beiden anderen verwendeten Öfen, eine Vakuumpumpe angeschlossen, die beliebig programmiert werden kann.

Als Besonderheit verfügt der Vacumat® 300 über das Programm „Schnelles Abkühlen“, bei dem die Vakuumpumpe bei geöffneter Brennkammer eingeschaltet wird. Die Brennkammer wird dabei besonders schnell abgekühlt und steht sehr bald einem neuen Brand zur Verfügung.

**Tab. XII:** Technische Daten Vacumat® 300

Höhe	550 mm
Breite	350 mm
Tiefe	365 mm
Gewicht (ohne Pumpe)	20 kg
Elektrischer Anschluss	220 V, 50 Hz
Leistungsaufnahme	max. 1,5 kW
Brennraum-Temperatur	max. 1200 °C

### **Wabe**

Bei der Wabe als Brenngutträger wurden im Vacumat® 300, wie bei allen weiteren Öfen und Brenngutträgern ebenfalls, insgesamt sechs Serien angefertigt. Eine Serie entsprach einer Position auf dem Brenngutträger (z. B. hinten) und setzte sich aus sechs Prüfkörper zusammen. Diese sechs Prüfkörper wurden für jeden Brand der fünf Brände (Washbrand, Opakerbrand, Dentinbrand 1, Dentinbrand 2, Glanzbrand) jeweils an dieselbe Position (also in dem Beispiel hinten) auf denselben Brenngutträger im selben Ofen gelegt.

Folgende sechs Serien mit jeweils sechs Prüfkörpern ergaben sich (Tab. XIII):

**Tab. XIII:** Vacumat® 300/Wabe (Prüfkörper der 6 Serien)

<b>Serie</b>	<b>Prüfkörper</b>					
Hinten	A1	A13	A25	C1	B11	B17
Rechts	A2	A14	B23	C2	C7	B18
Vorne	A3	A15	B24	C3	B13	B19
Links	A4	A16	B2	C4	C8	B20
Mitte 1	A5	A17	B3	C5	C9	B21
Mitte 2	A6	A18	B4	C6	C10	B22

Anmerkung: Die Nummerierung der Prüfkörper (z. B. A14) ergab sich, wie unter 3.1.1. erläutert, aus dem Guss (Buchstabe) und den einzelnen Metallplättchen eines Gusses (Ziffern).

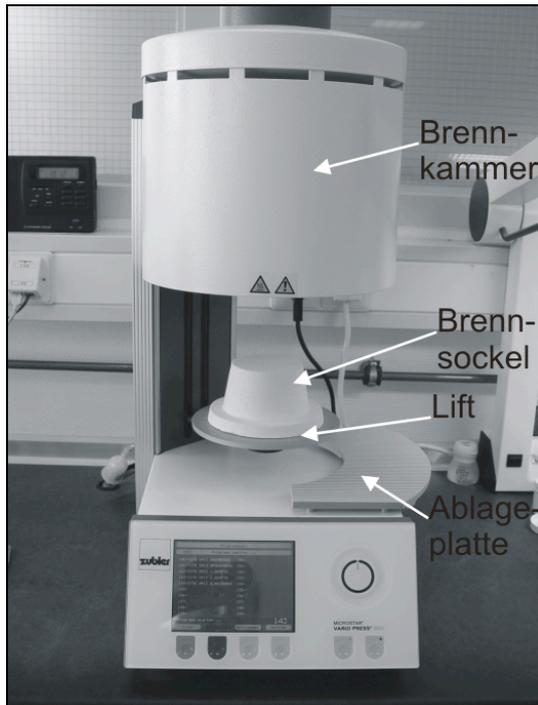
### ***Keramik***

Folgende sechs Serien mit jeweils sechs Prüfkörpern ergaben sich (Tab. XIV):

**Tab. XIV:** Vacumat® 300/Keramik (Prüfkörper der 6 Serien)

<b>Serie</b>	<b>Prüfkörper</b>					
Hinten	D24	A19	C23	D6	D12	D18
Rechts	A8	A20	D1	D7	D13	D19
Vorne	A9	A21	D2	D8	D14	D20
Links	A10	A22	D3	D9	D15	D21
Mitte 1	A11	A23	D4	D10	D16	D22
Mitte 2	A12	A24	D5	D11	D17	D23

### 3.1.3.2 Brennofen ZUBLER Vario Press® 300



**Abb. 22:** ZUBLER Vario Press® 300

Der Vario Press® 300 (Abb. 22, Tab. XV) ist ein Multifunktionsofen, in dem Keramik nicht nur gebrannt sondern auch gepresst werden kann. Zum Brennen der Keramik darf ausschließlich der Brennsockel, zum Pressen der Keramik ausschließlich der Presssockel mit Pressinsert genutzt werden.

Der Lift, auf dem der Brennsockel und das zu brennende Objekt platziert wird, bewegt sich, wie beim Vacumat® 300, auf einer Vertikalen und der Ofen schließt, indem der Lift in die Brennkammer nach oben hereinfährt.

**Tab. XV:** Technische Daten Vario Press® 300

Höhe	765 mm
Breite	360 mm
Tiefe	430 mm
Gewicht (Ofen komplett)	26 kg
Elektrischer Anschluss	230 V, 50 Hz
Leistungsaufnahme (ohne Pumpe)	max. 1350 VA
Brennraum-Temperatur	max. 1200 °C

**Wabe**

Folgende sechs Serien mit jeweils sechs Prüfkörpern ergaben sich (Tab. XVI):

**Tab. XVI:** Vario Press® 300/Wabe (Prüfkörper der 6 Serien)

<b>Serie</b>	<b>Prüfkörper</b>					
Hinten	I5	I23	J4	J10	J16	K2
Rechts	I6	I24	J5	J11	J17	K3
Vorne	I7	I25	J6	J12	J18	K4
Links	I8	J1	J7	J13	J19	K5
Mitte 1	I9	J2	J8	J14	J20	K6
Mitte 2	I10	J3	J9	J15	K1	K7

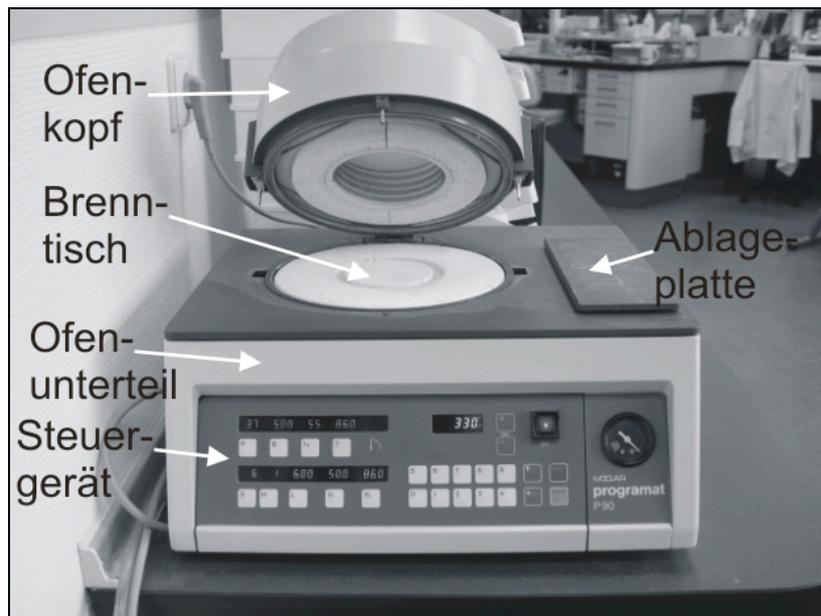
**Keramik**

Folgende sechs Serien mit jeweils sechs Prüfkörpern ergaben sich (Tab. XVII):

**Tab. XVII:** Vario Press® 300/Keramik (Prüfkörper der 6 Serien)

<b>Serie</b>	<b>Prüfkörper</b>					
Hinten	G13	G19	H5	H11	H17	H23
Rechts	G14	K8	H6	H12	H18	H24
Vorne	G15	H1	H7	H13	H19	I1
Links	G16	H2	H8	H14	H20	I2
Mitte 1	G17	H3	H9	H15	H21	I3
Mitte 2	G18	H4	H10	H16	H22	I4

### 3.1.3.3 Brennofen IVOCLAR Programat® P90



**Abb. 23:** IVOCLAR Programat® P90

Der Programat® P90 (Abb. 23, Tab. XVIII) ist ein Ofen, der aus einem Ofenkopf, einem Ofenunterteil, Steuergerät und Ablageplatte besteht. Der Ofen schließt, indem der Ofenkopf, der über eine gelenkige Verbindung mit dem Ofenunterteil verbunden ist, schrittweise auf den Brenntisch zuklappt.

**Tab. XVIII:** Technische Daten Programat® P90

Höhe	295 mm
Breite	415 mm
Tiefe	433 mm
Gewicht (Ofen komplett)	16,5 kg
Elektrischer Anschluss	220 V, 50 Hz
Leistungsaufnahme (mit Pumpe)	max. 1,6 kW
Brennraum-Temperatur	max. 1200 °C

**Wabe**

Folgende sechs Serien mit jeweils sechs Prüfkörpern ergaben sich (Tab. XIX):

**Tab. XIX:** Programat® P90/Wabe (Prüfkörper der 6 Serien)

<b>Serie</b>	<b>Prüfkörper</b>					
Hinten	E24	F4	F10	F16	G1	G7
Rechts	E25	F5	F11	F17	G2	G8
Vorne	E26	F6	F12	F18	G3	G9
Links	F1	F7	F13	F19	G4	G10
Mitte 1	F2	F8	F14	F20	G5	G11
Mitte 2	F3	F9	F15	F21	G6	G12

**Keramik**

Folgende sechs Serien mit jeweils sechs Prüfkörpern ergaben sich (Tab. XX):

**Tab. XX:** Programat® P90/Keramik (Prüfkörper der 6 Serien)

<b>Serie</b>	<b>Prüfkörper</b>					
Hinten	C11	C17	D25	E6	E12	E18
Rechts	C12	C18	E1	E7	E13	E19
Vorne	C13	C19	E2	E8	E14	E20
Links	F22	C20	E3	E9	E15	E21
Mitte 1	C15	C21	E4	E10	E16	E22
Mitte 2	C16	C22	E5	E11	E17	E23

**Brennofen IVOCLAR Programat® P90 bei veränderter Temperatur**

Um zu erörtern, ab welcher Temperaturveränderung eine Änderung im Haftverbund zwischen Metall und Keramik eintritt, wurden zwei weitere Serien nach Beendigung aller anderen Versuche angefertigt. Dabei wurden bei beiden Serien die Prüfkörper auf Keramik an der Position Mitte 1 im Brennofen Programat® P90 gebrannt. Bei einer Serie wurden alle Temperaturen des Brennzyklus (d. h. Washbrand, Opakerbrand, Dentinbrand 1, Dentinbrand 2 und Glanzbrand) um 20 °C erhöht (Serie +20 °C), bei der anderen Serie alle Temperaturen des Brennzyklus um 20 °C erniedrigt (Serie -20 °C). Es wurde also bewusst von den Herstellerangaben der optimalen Brenntemperaturen abgewichen.

### **Um 20 °C erhöhte Brenntemperaturen**

Bei den in Tab. XXI genannten Brenntemperaturen wurde gebrannt (20 °C höher als Herstellerangaben).

**Tab. XXI:** Brenntabelle bei 20 °C höherer Temperatur als Herstellerangaben

	Start-temperatur	Vortrockenzeit, Schließzeit	Temperaturanstieg	Endtemperatur	Haltezeit für Endtemperatur
<b>Washbrand</b>	500 °C	4 min	75 °C/min	910 °C	2 min
<b>Opakerbrand</b>	500 °C	4 min	75 °C/min	910 °C	1 min
<b>1.Dentinbrand</b>	500 °C	6 min	55 °C/min	900 °C	1 min
<b>2.Dentinbrand</b>	500 °C	6 min	55 °C/min	890 °C	1 min
<b>Glanzbrand</b>	500 °C	0 min	80 °C/min	900 °C	2 min

Folgende Serie mit jeweils sechs Prüfkörpern ergab sich (Tab. XXII):

**Tab. XXII:** Programat® P90/Keramik bei um 20 °C erhöhten Brenntemperaturen (Prüfkörper der Serie +20 °C)

Serie	Prüfkörper					
+20 °C	I11	I12	I13	I14	I15	I16

### **Um 20 °C erniedrigte Brenntemperaturen**

Gebrannt wurde bei den in Tab. XXIII genannten Brenntemperaturen (20 °C niedriger als Herstellerangaben).

**Tab. XXIII:** Brenntabelle bei 20°C niedrigerer Temperatur als Herstellerangaben

	Start-temperatur	Vortrockenzeit, Schließzeit	Temperaturanstieg	Endtemperatur	Haltezeit für Endtemperatur
<b>Washbrand</b>	500 °C	4 min	75 °C/min	870 °C	2 min
<b>Opaker-brand</b>	500 °C	4 min	75 °C/min	870 °C	1 min
<b>1.Dentinbrand</b>	500 °C	6 min	55 °C/min	860 °C	1 min
<b>2.Dentinbrand</b>	500 °C	6 min	55 °C/min	850 °C	1 min
<b>Glanzbrand</b>	500 °C	0 min	80 °C/min	860 °C	2 min

Folgende Serie mit jeweils sechs Prüfkörpern ergab sich (Tab. XXIV):

**Tab. XXIV:** Programat® P90/Keramik bei um 20 °C erniedrigten Brenntemperaturen (Prüfkörper der Serie +20 °C)

Serie	Prüfkörper					
-20 °C	I17	I18	I19	I20	I21	I22

## 3.2 SCHWICKERATH-Test

### 3.2.1 Aufbau

Für die Durchführung des SCHWICKERATH-Test nach DIN EN ISO 9693 [DIN, 2000] wurde die Universalprüfmaschine Zwick Z010® (Firma Zwick GmbH & Co) verwendet. Die in Tab. XXV und Tab. XXVI genannten Einstellungen wurden vorgenommen.

**Tab. XXV:** Einstellungen der Zwick Z010® für die Vorkraft

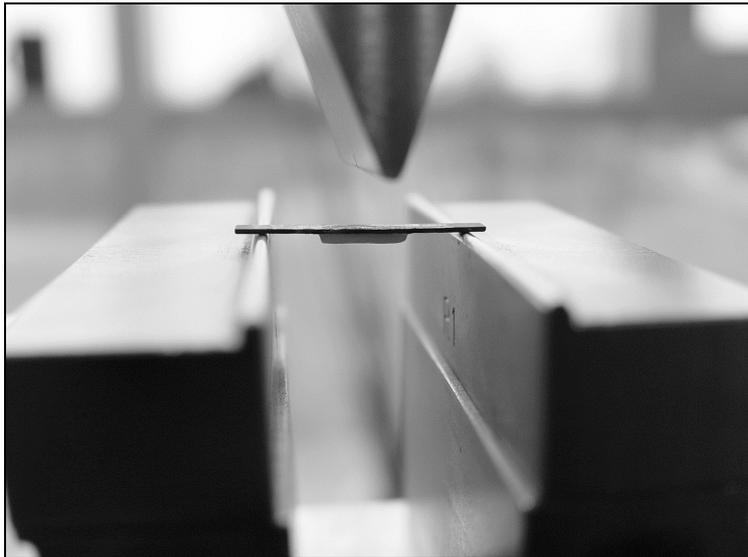
Vorkraft	0,1 N
Vorkraft-Geschwindigkeit	1 mm/min
Vorkraft Haltezeitmodus	keine Haltezeit
Zeit bis zur Vorkraft	30 s

**Tab. XXVI:** Einstellungen der Zwick Z010® für die Prüfung/Prüfungsende

Prüfgeschwindigkeit	lagegeregelt, 1,5 mm/min
Verzögerung bei Geschwindigkeitsumschaltung	0,1
Kraftabschaltsschwelle	15 % Fmax
Kraftschwelle für Bruchuntersuchung	0,01 % Fnom
Maximale Längenänderung	Dehnung, 3 mm

### 3.2.2 Durchführung

Die gebrannten Prüfkörper wurden der Reihe nach in der Universalprüfmaschine Zwick Z010® (Firma Zwick GmbH & Co) positioniert und auf ihre Verbundfestigkeit getestet. Dazu wurde der Prüfkörper mit der Keramik nach unten symmetrisch auf die 20 mm breite Auflage gelegt (Abb. 24).

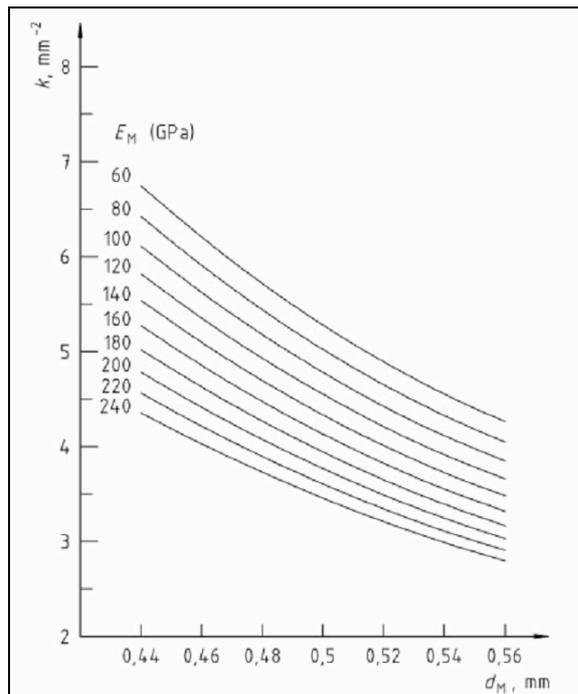


**Abb. 24:** Aufbau des SCHWICKERATH-Testversuches

Daraufhin wurde die Zwick Z010® (Firma Zwick GmbH & Co) aktiviert, so dass sich der Prüfstempel mit der konstanten Rate von 1,5 mm/min absenkte. Die Kraft, die auf den Prüfkörper wirkte, erhöhte sich so schrittweise, bis es zum Versagen des Prüfkörpers (Ablöseriss der Keramik vom Metall) kam. Der Kraftverlauf wurde dabei gemessen und aufgezeichnet (siehe Kap. 8.2). Die gemessene Bruchkraft  $F$  entsprach der Kraft, bei der es zu einem Ablöseriss an einem Ende der Keramikschicht kam. Gleichzeitig mit dem Erreichen der Bruchkraft  $F$  war ein leises Knacken der Keramik akustisch zu vernehmen, verursacht durch die Ablösung der Keramik von dem Metall. Die Keramik war daraufhin jedoch noch vollständig auf dem Metallgerüst, d. h. es kamen keine sichtbaren Abplatzungen vor.

### 3.2.3 Auswertung

Die Bruchkraft  $F$  musste mit einem Koeffizienten  $k$  multipliziert werden. Der Koeffizient  $k$  ist eine Funktion der Dicke des Metallgerüsts  $d$  und des Elastizitätsmoduls  $E$  der verwendeten Legierung [DIN, 2000]. Bei bekanntem Elastizitätsmodul der Legierung (Wirobond® 280 ca. 220 GPa) und Dicke des Metalls des Prüfkörpers ( $0,5 \pm 0,05$  mm) kann der Koeffizient  $k$  aus dem in Abb. 25 gezeigten Diagramm abgelesen werden.



**Abb. 25:** Diagramm zum Ablesen des Koeffizienten  $k$  bei bekanntem Elastizitätsmodul  $E$  und Dicke  $d$  des Metalls

Um den Wert  $k$  für eine bestimmte Dicke  $d$  abzulesen, wird die Kurve für den zugehörigen Wert  $E$  ausgewählt und dann von der gewählten Kurve der Wert  $k$  für die Dicke  $d$  abgelesen. Es ergibt sich also für die verwendeten Prüfkörper ein Faktor  $k$  von 3,70.

Die Ablösefestigkeit/Scherverbundfestigkeit wird nach der folgenden Gleichung berechnet [DIN, 2000; KHALOUF, 2003]:

$$\text{Verbundfestigkeit } T_m \text{ [MPa]} = k \text{ [mm}^{-2}\text{]} \cdot F \text{ [N]}.$$

Durchgeführt wurde der SCHWICKERATH-Test an allen Prüfkörpern und erfolgte jeweils unter denselben Bedingungen.

### 3.3 Statistik

In einer MS-Excel-Tabelle wurden die ermittelten Scherverbundfestigkeitswerte für die beschreibende Messwertstatistik zusammengeführt. Für jede Serie wurde so der Mittelwert, Median, Standardabweichung, Variationskoeffizient, Minimalwert und Maximalwert errechnet. Auch die graphische Darstellung der Mittelwerte der Verbundfestigkeiten mit Standardabweichung wurde in der MS-Excel-Tabelle für jede Serie durchgeführt. Damit ist ein guter Vergleich der einzelnen Serien eines Ofens und Brenngutträgers möglich.

Mit dem Student T-Test wurden die verschiedenen Serien eines bestimmten Ofens und Brenngutträgers untereinander verglichen (vergleichende Statistik). Es sollte nachgewiesen werden, ob ein beobachteter Unterschied zwischen den Werten der Stichproben dem Zufall oder einer bewussten Änderung der Verbundfestigkeit zuzuschreiben ist.

Der Student T-Test ist ein Hypothesentest. Bei Hypothesentests unterscheidet man parametrische Tests und Verteilungsanpassungstests. Der Student T-Test ist ein parametrischer Test, der dadurch gekennzeichnet ist, dass Lage- und Streuungsparameter zweier Stichproben verglichen und auf Übereinstimmung überprüft werden.

Vorraussetzung für den T-Test ist, dass die betrachtete Grundgesamtheit normal verteilt ist. Für die Normalverteilung gilt, dass rund Zweidrittel aller Messwerte innerhalb der Entfernung einer Standardabweichung zum Mittelwert liegen. In der vorliegenden Arbeit wurde die Normalverteilung mittels des Quotienten Mittelwert/Median untersucht: Liegt der Quotient von Mittelwert/Median bei  $1 \pm 0,05$ , so existiert eine Normalverteilung, liegt dieser Quotient außerhalb des angegebenen Bereiches, so existiert keine Normalverteilung der untersuchten Serie. Von den 38 hergestellten Serien zeigten zwei Serien (Serie vorne und Serie links des Programat® P90/Keramik) keine Normalverteilung, alle anderen Serien waren normal verteilt und erfüllten somit die Voraussetzung zur Durchführung des T-Tests. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde der T-Test für alle hergestellten Serien durchgeführt, auch für die beiden keine Normalverteilung zeigenden Serien.

Das Ergebnis des T-Tests wird als p-Wert bezeichnet. Nach allgemeiner Konvention wurde das Signifikanzniveau auf 5 % festgelegt, d.h. dass in 100 Fällen fünf Mal irrtümlich das Urteil „echter Unterschied“ gefällt wird. Ist der p-Wert gleich dem oder kleiner als das Signifikanzniveau von 5 % ( $p \leq 0,05$ ), gilt er statistisch als signifikant. Liegt der p-Wert bei oder unter 1 % ( $p \leq 0,01$ ) ist das Ergebnis statistisch hoch signifikant, liegt es bei oder unter 0,1 % ( $p \leq 0,001$ ) ist es höchst signifikant. In allen drei Fällen kann die Nullhypothese verworfen werden. Die Nullhypothese besagt, dass alle Werte einer gemeinsamen Grundgesamtheit angehören und die Ergebnisse zufällig unterschiedlich sind [PUMPE, 2008].

Zum Vergleich der Öfen und Brenngutträger untereinander wurde Mittelwert und Standardabweichung der Scherverbundfestigkeiten aller nach Herstellerangaben gebrannten Serien eines bestimmten Ofens und Brenngutträgers errechnet und diese gemittelten Werte der Öfen und Brenngutträger graphisch dargestellt.

Der Vergleich der Öfen und Brenngutträger erfolgte ebenfalls mit dem Student T-Test.

## 4 Ergebnisse

Nicht alle angefangenen Prüfkörper konnten für den SCHWICKERATH-Test genutzt werden, da vor allem zu Beginn der Prüfkörperherstellung einige Male die Keramik beim Ausarbeiten vom Metallgerüst abplatzte. Auch wegen falscher Brandführung und falscher Maße mussten einige Prüfkörper vor Beendigung der Prüfkörperherstellung ausgesondert werden. Diese vorzeitigen Verluste wurden ersetzt, so dass in jeder Serie 6 zu prüfende, korrekt hergestellte Prüfkörper vorlagen, die dem SCHWICKERATH-Test unterzogen werden konnten.

Von der jeweils gemessenen Bruchkraft  $F$  wurde, mittels der in Kapitel 3.2.3 genannten Formel, die Scherverbundfestigkeit  $T_m$ , angegeben in MPa, errechnet ( $T_m = F \cdot k$  wobei Faktor  $k = 3,70$ ). Von den jeweils sechs Prüfkörpern einer Serie wurde der Mittelwert der Scherverbundfestigkeiten ermittelt. Weiterhin wurde der Medianwert von  $T_m$ , der Quotient aus Mittelwert/Median, die Standardabweichung, der Variationskoeffizient, sowie der minimale und der maximale Wert der Scherverbundfestigkeit innerhalb einer Serie errechnet. Für die bessere Übersicht sind diese Werte jeweils in Tabellenform zusammengefasst und eine graphische Darstellung zeigt die Mittelwerte der Scherverbundfestigkeiten der verschiedenen Serien mit den dazugehörigen Standardabweichungen.

Die gemessenen Werte der einzelnen Prüfkörper und die dazugehörigen Diagramme sind im Anhang unter Kapitel 8.2 zu finden.

## 4.1 Brennofen VITA Vacumat® 300

### 4.1.1 Wabe

Die beschreibende Statistik ist in Tab. XXVII zusammengefasst, die graphische Darstellung zeigt Abb. 26. Alle Serien zeigten Mittelwerte der Scherverbundfestigkeit, die weit oberhalb der Mindestanforderung von 25 MPa lagen. Alle Serien waren normal verteilt.

Tab. XXVII: Beschreibende Statistik des Vacumat® 300/Wabe

	Serie hinten	Serie rechts	Serie vorne	Serie links	Serie Mitte 1	Serie Mitte 2
<b>Mittelwert von <math>T_m</math> [MPa]</b>	48,3	46,8	48,5	50,4	47,4	46,8
<b>Median von <math>T_m</math> [MPa]</b>	47,9	44,5	49,8	51,1	47,7	47,0
<b>Mittelwert/Median</b>	1,01	1,05	0,97	0,99	0,99	1,00
<b>Standardabweichung</b>	4,1	4,6	5,6	3,2	3,0	2,6
<b>Variationskoeffizient</b>	8,6	9,9	11,6	6,4	6,2	5,6
<b>min. Wert von <math>T_m</math> [MPa]</b>	43,7	43,2	39,1	45,0	42,4	43,3
<b>max. Wert von <math>T_m</math> [MPa]</b>	55,1	55,2	54,6	53,4	51,0	49,4

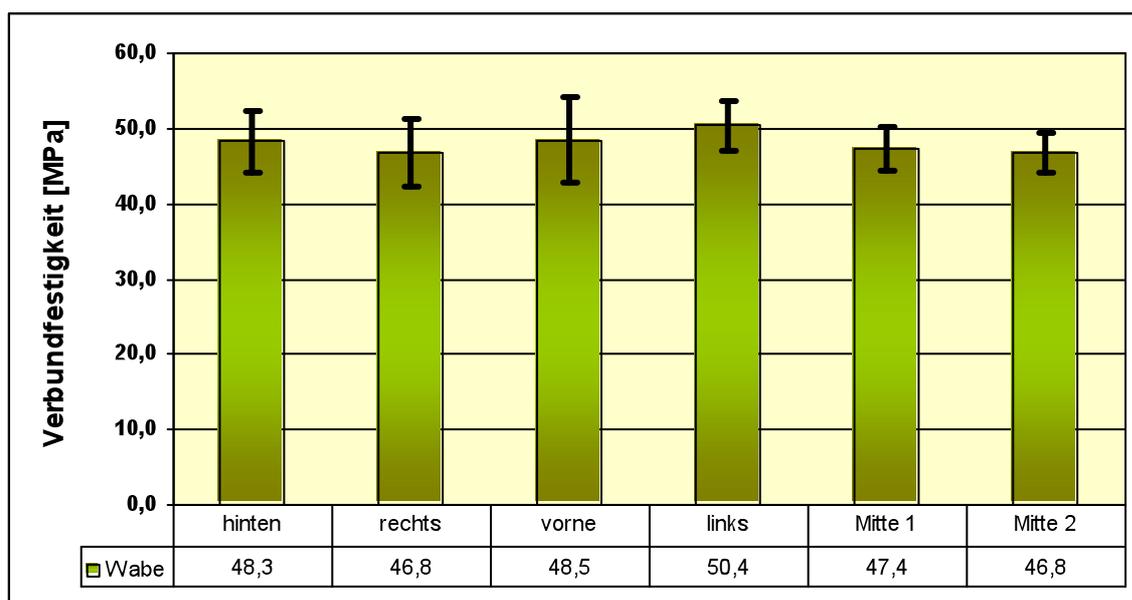


Abb. 26: Mittelwerte und Standardabweichungen der 6 Serien des Vacumat® 300/Wabe

Der Vergleich der Serien untereinander mittels des T-Tests ergab folgende Kreuztabelle (Tab. XXVIII):

**Tab. XXVIII:** Kreuztabelle zum T-Test nach STUDENT zum Vergleich der Serien des Vacuumat® 300/Wabe untereinander

	hinten	rechts	vorne	links	Mitte 1	Mitte 2
hinten		0,56975359	0,94313354	0,34636204	0,66768934	0,48015377
rechts	n.s.		0,58052287	0,14779321	0,80464124	0,99281682
vorne	n.s.	n.s.		0,48763052	0,67307516	0,52314468
links	n.s.	n.s.	n.s.		0,11983379	0,060528
Mitte 1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		0,74118532
Mitte 2	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

p=0,05; n.s.=nicht signifikant; \*=signifikanter Unterschied

Die Scherverbundfestigkeitswerte der einzelnen Serien unterschieden sich nicht signifikant ( $p > 0,05$ ).

### 4.1.2 Keramik

Die beschreibende Statistik ist in Tab. XXIX zusammengefasst, die graphische Darstellung zeigt Abb. 27. Alle Serien zeigten Mittelwerte der Scherverbundfestigkeit, die weit oberhalb der Mindestanforderung von 25 MPa lagen. Alle Serien waren normal verteilt.

Tab. XXIX: Beschreibende Statistik des Vacumat® 300/Keramik

	Serie hinten	Serie rechts	Serie vorne	Serie links	Serie Mitte 1	Serie Mitte 2
Mittelwert von $T_m$ [MPa]	49,9	49,4	46,2	51,0	45,8	49,4
Median von $T_m$ [MPa]	49,3	47,9	44,1	51,8	45,6	48,9
Mittelwert/Median	1,01	1,03	1,05	0,99	1,01	1,01
Standardabweichung	2,9	5,8	8,2	5,9	1,5	6,2
Variationskoeffizient	5,8	11,7	17,7	11,6	3,4	12,5
min. Wert von $T_m$ [MPa]	46,9	43,2	38,7	40,7	44,4	43,0
max. Wert von $T_m$ [MPa]	55,2	60,3	61,9	57,7	47,8	60,1

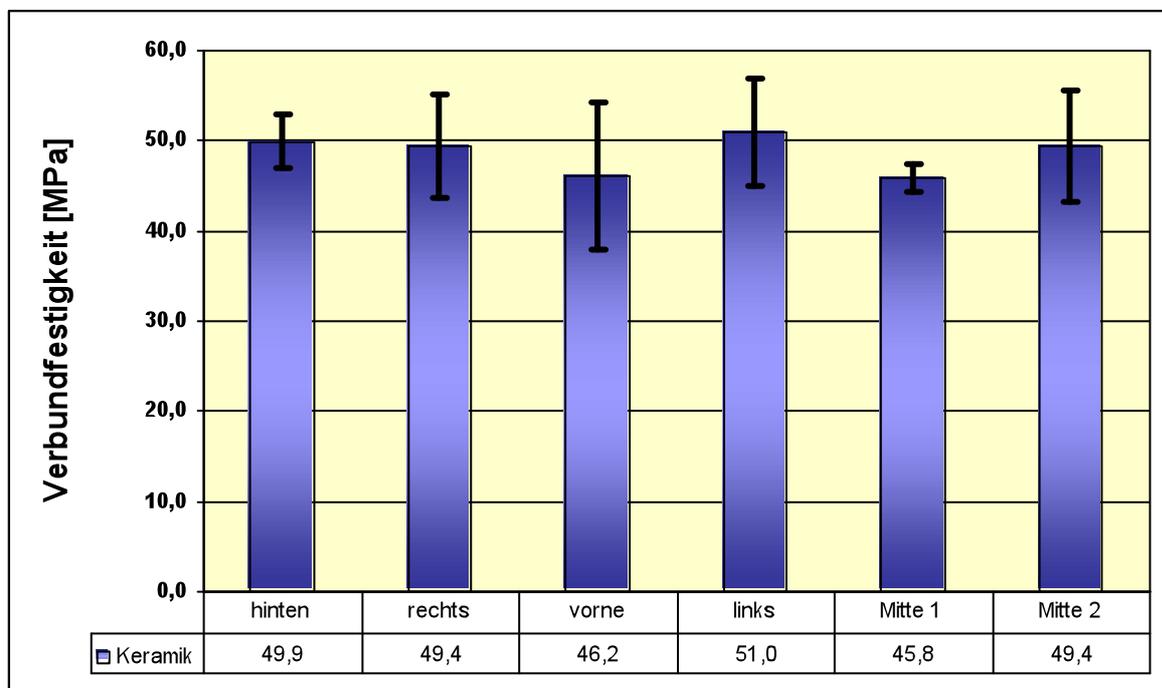


Abb. 27: Mittelwerte und Standardabweichungen der 6 Serien des Vacumat® 300/Keramik

Der Vergleich der Serien untereinander mittels des T-Tests ergab folgende Kreuztabelle (Tab. XXX):

**Tab. XXX:** Kreuztabelle zum T-Test nach STUDENT zum Vergleich der Serien des Vacuumat® 300/Keramik untereinander

	hinten	rechts	vorne	links	Mitte 1	Mitte 2
hinten		0,85804388	0,31692745	0,6929504	0,01259151	0,86658386
rechts	n.s.		0,44579723	0,65017824	0,1722493	0,99925038
vorne	n.s.	n.s.		0,2687573	0,91947573	0,45596232
links	n.s.	n.s.	n.s.		0,06530958	0,66196138
Mitte 1	*	n.s.	n.s.	n.s.		0,19784768
Mitte 2	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

p=0,05; n.s.=nicht signifikant; \*=signifikanter Unterschied

Der Vergleich der Scherverbundfestigkeit von der Serie Mitte 1 mit der Serie hinten, die eine geringe Standardabweichung von nur 1,5 MPa hat, zeigte einen signifikanten Unterschied ( $p = 0,012$ ). Alle anderen Unterschiede zwischen den Serien waren nicht signifikant ( $p > 0,05$ ).

## 4.2 Brennofen ZUBLER Vario Press® 300

### 4.2.1 Wabe

Die beschreibende Statistik ist in Tab. XXXI zusammengefasst, die graphische Darstellung zeigt Abb. 28. Alle Serien zeigten Mittelwerte der Scherverbundfestigkeit, die weit oberhalb der Mindestanforderung von 25 MPa lagen. Alle Serien waren normal verteilt.

Tab. XXXI: Beschreibende Statistik des Vario Press® 300/Wabe

	Serie hinten	Serie rechts	Serie vorne	Serie links	Serie Mitte 1	Serie Mitte 2
Mittelwert von $T_m$ [MPa]	50,9	46,3	50,3	49,0	50,4	49,9
Median von $T_m$ [MPa]	49,9	46,8	50,7	48,6	49,9	51,3
Mittelwert/Median	1,02	0,99	0,99	1,01	1,01	0,97
Standardabweichung	4,5	2,5	4,4	3,6	3,6	3,1
Variationskoeffizient	8,8	5,4	8,7	7,4	7,1	6,1
min. Wert von $T_m$ [MPa]	46,6	42,5	45,1	44,6	45,8	44,9
max. Wert von $T_m$ [MPa]	56,6	49,5	56,4	53,2	56,3	52,6

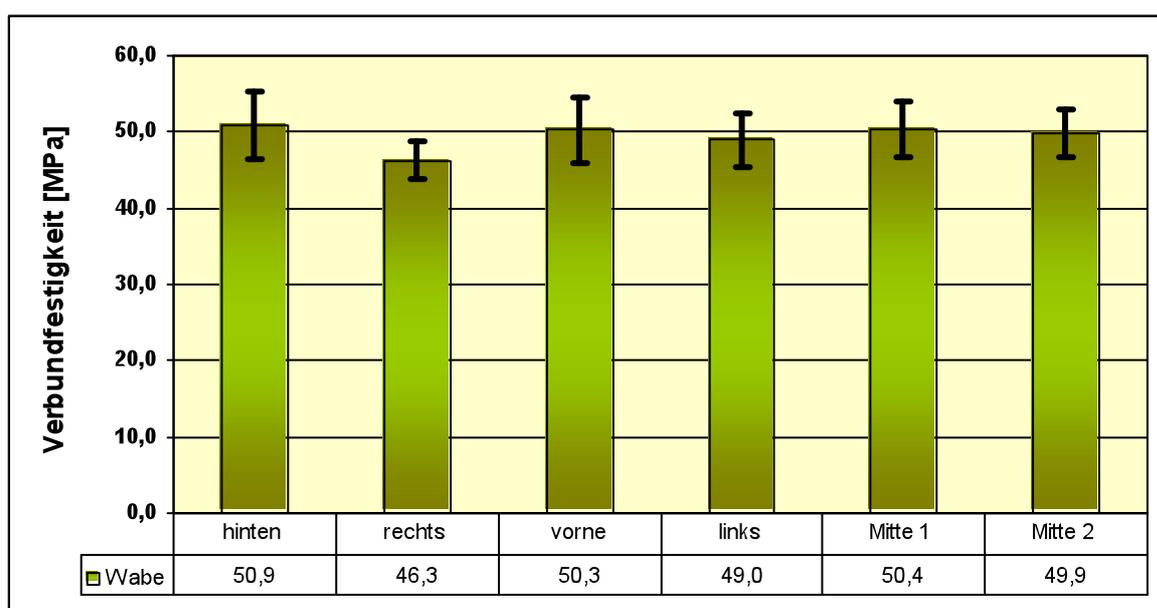


Abb. 28: Mittelwerte und Standardabweichungen der 6 Serien des Vario Press® 300/Wabe

Der Vergleich der Serien untereinander mittels des T-Tests ergab folgende Kreuztabelle (Tab. XXXII):

**Tab. XXXII:** Kreuztabelle zum T-Test nach STUDENT zum Vergleich der Serien des Vario Press® 300/Wabe untereinander

	hinten	rechts	vorne	links	Mitte 1	Mitte 2
hinten		0,05169074	0,8106744	0,4285971	0,822481	0,65609566
rechts	n.s.		0,0800237	0,16414726	0,04511618	0,04910386
vorne	n.s.	n.s.		0,58348382	0,97021155	0,8619012
links	n.s.	n.s.	n.s.		0,51620326	0,64337726
Mitte 1	n.s.	*	n.s.	n.s.		0,80942207
Mitte 2	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	

p=0,05; n.s.=nicht signifikant; \*=signifikanter Unterschied

Der Vergleich der Scherverbundfestigkeit von der Serie Mitte 1 und Mitte 2 mit der Serie rechts zeigte einen signifikanten Unterschied ( $p = 0,044$  bzw.  $p = 0,048$ ). Alle anderen Unterschiede zwischen den Serien waren nicht signifikant ( $p > 0,05$ ).

#### 4.2.2 Keramik

Die beschreibende Statistik ist in Tab. XXXIII zusammengefasst, die graphische Darstellung zeigt Abb. 29. Alle Serien zeigten Mittelwerte der Scherverbundfestigkeit, die weit oberhalb der Mindestanforderung von 25 MPa lagen. Alle Serien waren normal verteilt.

Tab. XXXIII: Beschreibende Statistik des Vario Press® 300/Keramik

	Serie hinten	Serie rechts	Serie vorne	Serie links	Serie Mitte 1	Serie Mitte 2
Mittelwert von $T_m$ [MPa]	48,5	49,6	46,8	50,5	47,7	50,6
Median von $T_m$ [MPa]	48,6	49,3	47,2	49,3	47,4	51,9
Mittelwert/Median	1,00	1,01	0,99	1,02	1,01	0,98
Standardabweichung	5,0	5,3	3,9	2,7	1,1	3,7
Variationskoeffizient	10,2	10,6	8,4	5,3	2,3	7,4
min. Wert von $T_m$ [MPa]	41,4	43,9	39,6	47,8	46,9	44,8
max. Wert von $T_m$ [MPa]	55,8	57,7	51,8	54,7	49,9	54,9

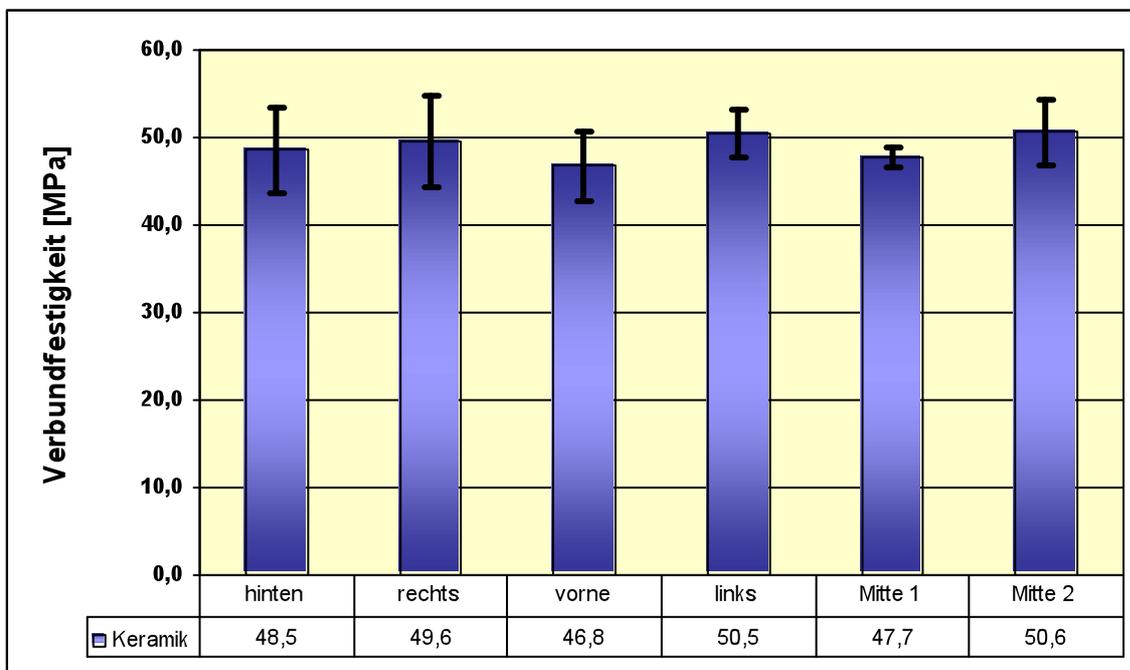


Abb. 29: Mittelwerte und Standardabweichungen der 6 Serien des Vario Press® 300/Keramik

Der Vergleich der Serien untereinander mittels des T-Tests ergab folgende Kreuztabelle (Tab. XXXIV):

**Tab. XXXIV:** Kreuztabelle zum T-Test nach STUDENT zum Vergleich der Serien des Vario Press® 300/Keramik untereinander

	hinten	rechts	vorne	links	Mitte 1	Mitte 2
hinten		0,71634824	0,50675555	0,41861954	0,69980176	0,4342433
rechts	n.s.		0,30773023	0,73548213	0,40026658	0,72206373
vorne	n.s.	n.s.		0,08475483	0,57880948	0,1139615
links	n.s.	n.s.	n.s.		0,04063628	0,94678792
Mitte 1	n.s.	n.s.	n.s.	*		0,0997627
Mitte 2	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

$p=0,05$ ; n.s.=nicht signifikant; \*=signifikanter Unterschied

Der Vergleich der Scherverbundfestigkeit von der Serie Mitte 1 mit der Serie links zeigte einen signifikanten Unterschied ( $p = 0,040$ ). Alle anderen Unterschiede zwischen den Serien waren nicht signifikant ( $p > 0,05$ ).

### 4.3 Brennofen IVOCLAR Programat® P90

#### 4.3.1 Wabe

Die beschreibende Statistik ist in Tab. XXXV zusammengefasst, die graphische Darstellung zeigt Abb. 30. Alle Serien zeigten Mittelwerte der Scherverbundfestigkeit, die weit oberhalb der Mindestanforderung von 25 MPa lagen. Alle Serien waren normal verteilt.

Tab. XXXV: Beschreibende Statistik des Programat® P90/Wabe

	Serie hinten	Serie rechts	Serie vorne	Serie links	Serie Mitte 1	Serie Mitte 2
Mittelwert von $T_m$ [MPa]	49,2	46,5	52,1	49,6	48,5	45,8
Median von $T_m$ [MPa]	49,4	46,1	52,9	50,6	47,4	47,8
Mittelwert/Median	0,99	1,01	0,99	0,98	1,02	0,96
Standardabweichung	3,3	4,0	2,0	3,5	2,6	7,7
Variationskoeffizient	6,7	8,7	3,9	7,0	5,3	16,8
min. Wert von $T_m$ [MPa]	45,1	40,8	48,7	44,4	46,0	30,6
max. Wert von $T_m$ [MPa]	54,1	51,7	53,8	53,1	52,9	51,9

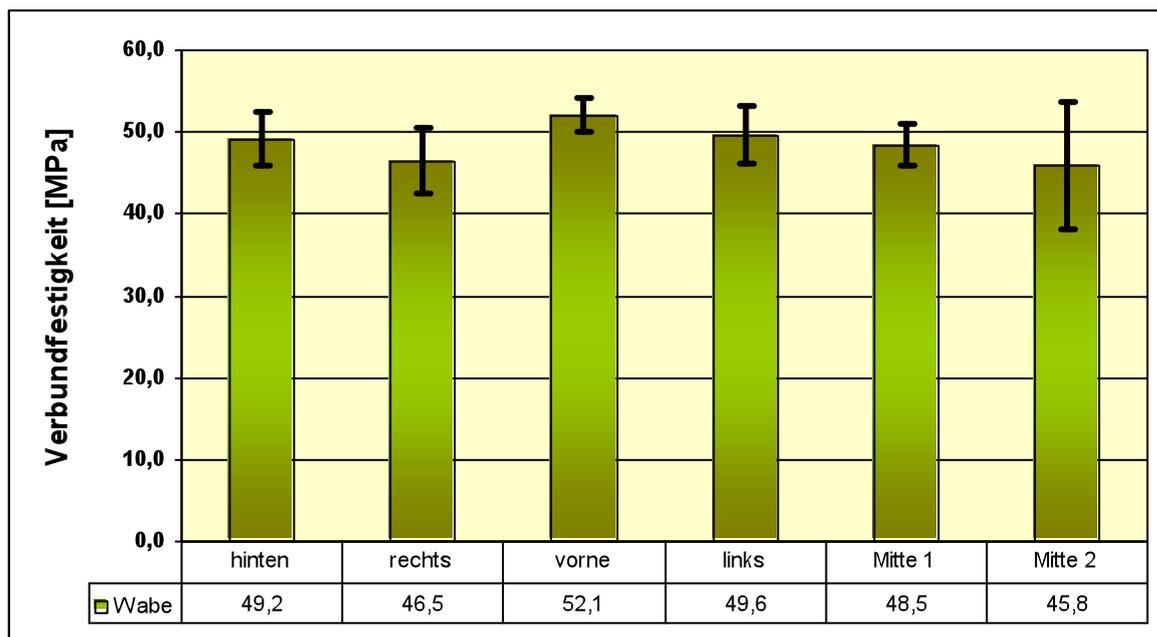


Abb. 30: Mittelwerte und Standardabweichungen der 6 Serien des Programat® P90/Wabe

Der Vergleich der Serien untereinander mittels des T-Tests ergab folgende Kreuztabelle (Tab. XXXVI):

**Tab. XXXVI:** Kreuztabelle zum T-Test nach STUDENT zum Vergleich der Serien des Programat® P90/Wabe untereinander

	hinten	rechts	vorne	links	Mitte 1	Mitte 2
hinten		0,23852551	0,09366111	0,82003546	0,67768903	0,35323039
rechts	n.s.		0,01277765	0,18132141	0,34466867	0,85514782
vorne	n.s.	*		0,16320582	0,02087292	0,08401273
links	n.s.	n.s.	n.s.		0,51606797	0,29821178
Mitte 1	n.s.	n.s.	*	n.s.		0,45070168
Mitte 2	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

p=0,05; n.s.=nicht signifikant; \*=signifikanter Unterschied

Der Vergleich der Scherverbundfestigkeit von der Serie vorne mit der Serie Mitte 1 zeigte einen signifikanten Unterschied ( $p = 0,021$ ), genauso wie die Serie vorne mit der Serie rechts ( $p = 0,013$ ). Alle anderen Unterschiede zwischen den Serien waren nicht signifikant ( $p > 0,05$ ).

### 4.3.2 Keramik

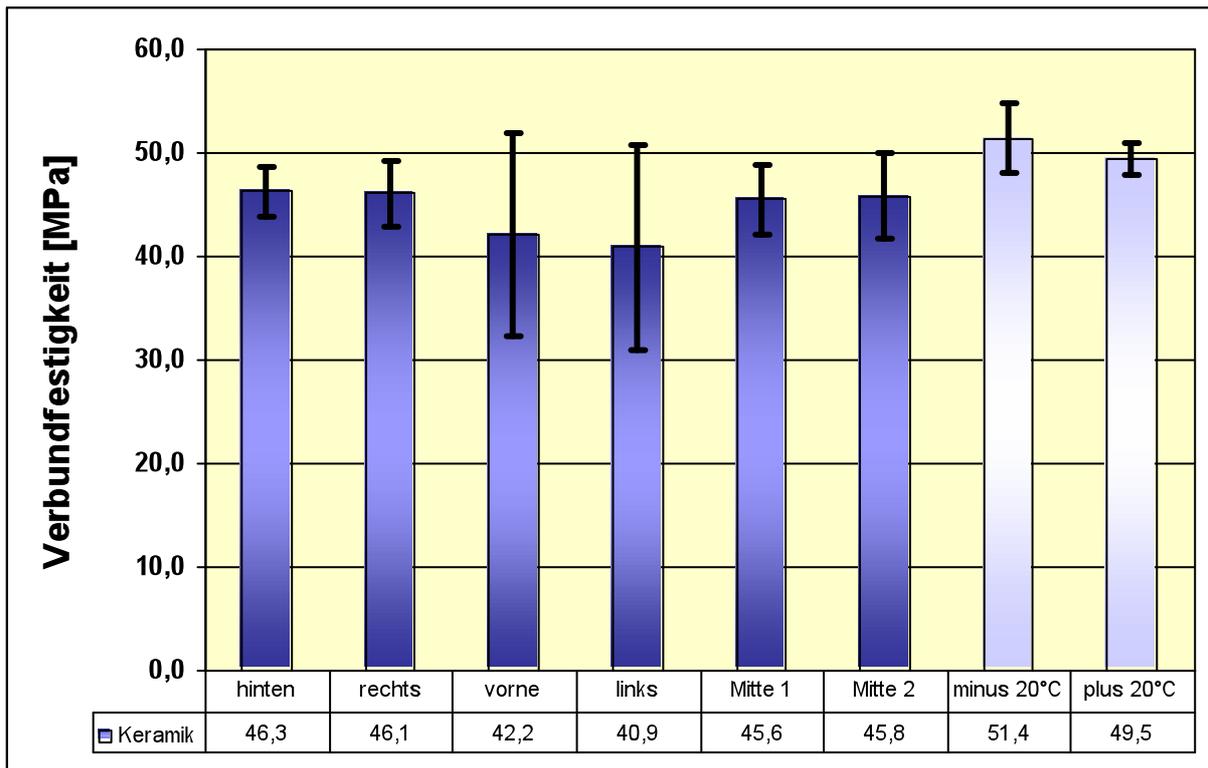
Die beschreibende Statistik ist in Tab. XXXVII (normale Brandführung) und Tab. XXXVIII (um 20 °C veränderte Brandführung) zusammengefasst, die graphische Darstellung zeigt Abb. 31. Alle Serien, auch die bei veränderter Brandführung, zeigten Mittelwerte der Scherverbundfestigkeit, die weit oberhalb der Mindestanforderung von 25 MPa lagen. Bis auf die Serie vorne und die Serie links waren alle Serien normal verteilt.

**Tab. XXXVII:** Beschreibende Statistik des Programat® P90/Keramik

	<b>Serie hinten</b>	<b>Serie rechts</b>	<b>Serie vorne</b>	<b>Serie links</b>	<b>Serie Mitte 1</b>	<b>Serie Mitte 2</b>
<b>Mittelwert von <math>T_m</math> [MPa]</b>	46,3	46,1	42,2	40,9	45,6	45,8
<b>Median von <math>T_m</math> [MPa]</b>	46,2	45,8	46,0	44,2	44,3	46,1
<b>Mittelwert/Median</b>	1,00	1,01	0,92	0,92	1,03	0,99
<b>Standardabweichung</b>	2,4	3,2	9,8	10,0	3,4	4,2
<b>Variationskoeffizient</b>	5,2	6,9	23,3	24,3	7,4	9,1
<b>min. Wert von <math>T_m</math> [MPa]</b>	42,9	41,1	23,6	26,2	42,8	40,0
<b>max. Wert von <math>T_m</math> [MPa]</b>	49,4	50,3	50,9	51,0	51,9	51,0

**Tab. XXXVIII:** Beschreibende Statistik des Programat® P90/Keramik bei 20°C erhöhter und 20°C erniedrigter Temperatur

	<b>Serie -20°C</b>	<b>Serie +20°C</b>
<b>Mittelwert von <math>T_m</math> [MPa]</b>	51,4	49,5
<b>Median von <math>T_m</math> [MPa]</b>	51,3	49,5
<b>Mittelwert/Median</b>	1,00	1,00
<b>Standardabweichung</b>	3,3	1,5
<b>Variationskoeffizient</b>	6,5	3,1
<b>min. Wert von <math>T_m</math> [MPa]</b>	46,5	47,1
<b>max. Wert von <math>T_m</math> [MPa]</b>	56,3	51,5



**Abb. 31:** Mittelwerte und Standardabweichungen der 8 Serien des Programat® P90/Keramik

Da es sich bei der Serie vorne und links um Einzelfälle handelte, die nicht normal verteilt waren, wurde trotzdem der Übersichtlichkeit halber, der T-Test zum Vergleich der Serien untereinander herangezogen, auch wenn dieser eigentlich nur bei Normalverteilung zur Anwendung kommen darf (siehe Kap. 3.3).

Der Vergleich der Serien untereinander mittels des T-Tests ergab folgende Kreuztabelle (Tab. XXXIX):

**Tab. XXXIX:** Kreuztabelle zum T-Test nach STUDENT zum Vergleich der Serien des Programat® P90/Keramik untereinander

	hinten	rechts	vorne	links	Mitte 1	Mitte 2	-20°C	+20°C
hinten		0,88299324	0,33946393	0,22126763	0,66263303	0,80562572	0,01248498	0,02139134
rechts	n.s.		0,37756298	0,25053708	0,79203469	0,90959752	0,0177312	0,0402386
vorne	n.s.	n.s.		0,82286237	0,44412197	0,42244815	0,05387427	0,10217441
links	n.s.	n.s.	n.s.		0,30000313	0,28691046	0,03342354	0,06255586
Mitte 1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		0,90622104	0,01284476	0,02694854
Mitte 2	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		0,02798773	0,07131485
-20°C	*	*	n.s.	*	*	*		0,22214327
+20°C	*	*	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	

$p=0,05$ ; n.s.=nicht signifikant; \*=signifikanter Unterschied

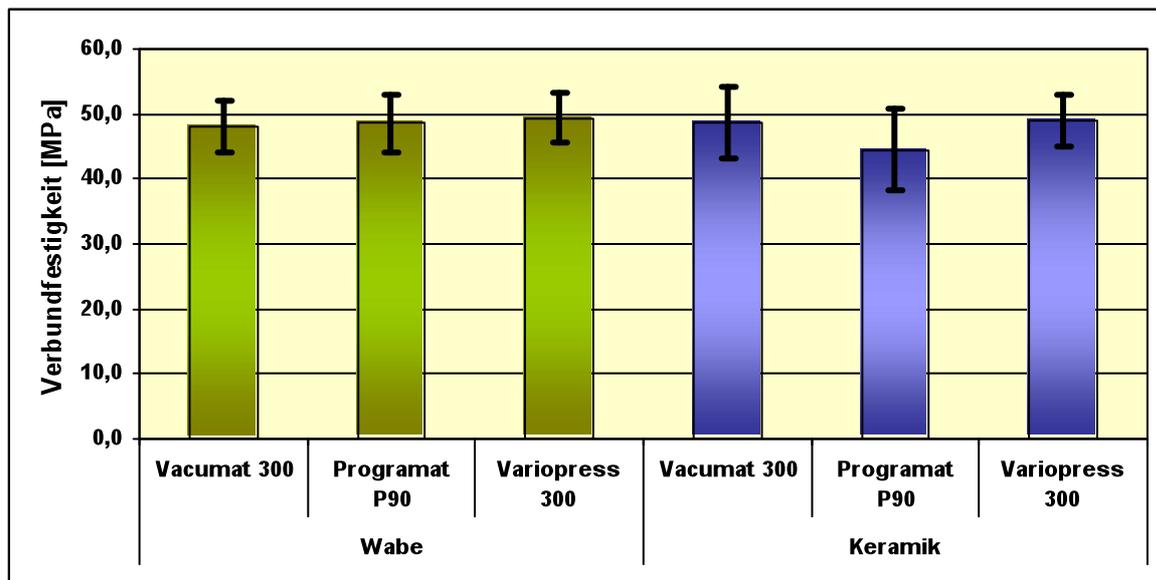
Beim Vergleich der Serien untereinander ergab sich zwischen der Serie -20 °C und den weiteren Serien sowie zwischen der Serie +20 °C und den weiteren Serien häufig ein signifikanter Unterschied. So zeigte die Serie -20 °C einen signifikanten Unterschied zu allen Serien bis auf die Serie vorne. Die Serie +20 °C hatte einen signifikanten Unterschied zu der Serie hinten, der Serie rechts und der Serie Mitte 1. Alle anderen Serien zeigten untereinander einen nicht signifikanten Unterschied ( $p > 0,05$ ).

#### 4.4 Vergleich der Brennöfen und Brenngutträger untereinander

In die gemittelten Werte der Öfen und Brenngutträger sind nur Prüfkörper, die nach Herstellerangaben gebrannt wurden, mit eingegangen. Die Serie +20 °C und die Serie -20 °C finden bei diesem Vergleich keine Beachtung. Die beschreibende Statistik ist in Tab. XL zusammengefasst, die graphische Darstellung zeigt Abb. 32. Alle Öfen zeigten Mittelwerte der Scherverbundfestigkeit, die weit oberhalb der Mindestanforderung von 25 MPa lagen, wobei der Ofen Programat® P90 mit dem Brenngutträger Keramik mit 44,5 MPa die niedrigste Scherverbundfestigkeit erreichte.

**Tab. XL:** Mittelwerte aller Positionen und Standardabweichung der Öfen und Brenngutträger gemittelt

Brenngutträger	Ofen	Mittelwert von $T_m$ [MPa]	Standardabweichung
Wabe	Vacumat® 300	48,0	3,9
	Programat® P90	48,6	4,5
	Variopress® 300	49,4	3,7
Keramik	Vacumat® 300	48,6	5,5
	Programat® P90	44,5	6,2
	Variopress® 300	49,0	3,9



**Abb. 32:** Mittelwerte und Standardabweichungen Öfen und Brenngutträger gemittelt

Der Vergleich der Öfen untereinander mittels des T-Tests ergab folgende Kreuztabelle (Tab. XLI):

**Tab. XLI:** Kreuztabelle zum T-Test nach STUDENT zum Vergleich der Öfen und Brenngutträger untereinander

	<b>Vac300 Wab</b>	<b>ProgP90 Wab</b>	<b>Var300 Wab</b>	<b>Vac300 Ker</b>	<b>ProgP90 Ker</b>	<b>Var300 Ker</b>
<b>Vac300 Wab</b>		0,54229265	0,11948563	0,57438498	0,00520375	0,30889778
<b>ProgP90 Wab</b>	n.s.		0,40463021	0,98129785	0,0018267	0,73667876
<b>Var300 Wab</b>	n.s.	n.s.		0,47978637	0,00011277	0,59216803
<b>Vac300 Ker</b>	n.s.	n.s.	n.s.		0,00359922	0,78621402
<b>ProgP90 Ker</b>	*	*	*	*		0,00048207
<b>Var300 Ker</b>	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	

p=0,05; n.s.=nicht signifikant; \*=signifikanter Unterschied

Der Vergleich der Scherverbundfestigkeit von dem Ofen Programat® P90/Keramik mit allen anderen Öfen bzw. auch mit dem Ofen Programat® P90/Wabe zeigte einen signifikanten Unterschied. Alle anderen Öfen mit den entsprechenden Brenngutträgern zeigten keinen signifikanten Unterschied ( $p > 0,05$ ).

#### 4.5 Visuelle Begutachtung aller Prüfkörper

Für die visuelle Begutachtung wurde die Keramik der Prüfkörper nach der Bestimmung der Verbundfestigkeit im SCHWICKERATH-Versuch visuell ohne Zuhilfenahme von Vergrößerungshilfen auf eventuelle Farbstiche, Risse, Sprünge, Verfärbungen oder Unterschiede im Glanzverhalten hin untersucht.

Die visuelle Betrachtung ergab bei den nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörpern keine Unterschiede in ihrem Glanzverhalten und auch keine weiteren Auffälligkeiten.

Bei der visuellen Untersuchung der Serie +20 °C und der Serie -20 °C zeigten sich Veränderungen im Glanzverhalten: Die Oberflächen der Prüfkörper der Serie -20 °C waren mit einem geringeren Glanzverhalten und einer raueren Oberfläche ausgestattet als diejenigen, die nach Herstellerangaben bzw. die bei +20 °C gebrannten Prüfkörper. Die Prüfkörper der Serie +20 °C zeigten besonders ausgeprägten Oberflächenglanz und eine sehr glatte Oberfläche, im Vergleich zu der Serie -20 °C war dieser Unterschied groß, im Vergleich zu den nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörpern geringer.

## 5 Diskussion

### 5.1 Fehlerdiskussion

#### 5.1.1 Materialien

##### 5.1.1.1 Chargenkonstanz

Es wurden in der vorliegenden Arbeit jeweils nur Materialien einer Chargennummer verwendet, um die einheitliche Zusammensetzung und die einheitlichen Herstellungsparameter der Materialien und damit innerhalb der durchgeführten Versuche gleiche Voraussetzungen garantieren zu können.

So beeinflussen beispielsweise die zufällig anwesenden Metalloxide oder organischen Verunreinigungen des bergmännisch abgebauten Feldspats in der Keramik nicht nur die Ästhetik (Verfärbungen), sondern auch die Spannungen in der Keramik und damit deren Festigkeit [HÄNSEL et al., 1997]. Auch die Zusammensetzung von verschiedenen Chargen ein und derselben Legierung kann variieren und damit auch deren physikalische Eigenschaften.

Da von einer Chargenkonstanz ausgegangen werden kann, sind Abweichungen der Messwerte auf Grund von verschiedenen Zusammensetzungen der verwendeten Materialien zu vernachlässigen.

##### 5.1.1.2 Legierung

Bei der für alle Prüfkörper verwendeten Legierung Wirobond® 280 (Firma BEGO) mit einem WAK bei 25-500 °C von  $14,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  handelte es sich um eine handelsübliche EMF-Legierung, eine aufbrennfähige Cobalt-Chrom-Legierung, die stellvertretend für viele aufbrennfähigen EMF-Legierungen steht. Die Legierung wurde nach Herstellerangaben verarbeitet, um mögliche Fehler und damit Verfälschungen der Messergebnisse zu verhindern.

### 5.1.1.3 Keramik

Die verwendete Verblendkeramik VITA VM® 13 (Firma VITA), die einen WAK bei 25-500 °C von  $13,1-13,6 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  hat, gilt als kompatibel gegenüber der Legierung Wirobond® 280 (Firma BEGO) [VITA, 2007] und stellt eine häufig in der Praxis angewandte Verblendkeramik dar. Bei der Verblendung wurden ebenfalls die Herstellerangaben berücksichtigt und die notwendigen Schritte für eine stabile Verblendung, wie in der Literatur beschrieben (siehe Kap. 2.2.4.1), der Reihe nach und vollständig durchgeführt.

## 5.1.2 Herstellung der Prüfkörper

### 5.1.2.1 Herstellung der Metallgerüste.

Die mit Hilfe der Schleifhilfe nach ZIMNY auf Maß gebrachten Polyamidplättchen wurden vor Verunreinigungen geschützt (Säuberung vom Schleifpapierstaub mittels sauberem Pinsel und anschließend kein großflächiger direkter Kontakt mit der Hand) dann eingebettet, wobei auf geeignetes Fließverhalten der Einbettmasse geachtet wurde, um Fehlstellen der Gerüste zu vermeiden. Es folgte der Guss der Plättchen. Schon beim Guss der Metallgerüste können die ersten Fehler gemacht werden [STRIETZEL, 2002].

Die Gussbedingungen beeinflussen die mechanischen Eigenschaften von EMF-Legierungen. Ein Überhitzen der Schmelze führt zu Werten der 0,2 %-Dehngrenze und der E-Moduli, die bei Cobalt-Chrom-Legierungen legierungsabhängig bis zu 25 % unter denen mit korrekter Temperaturführung liegen können [PFEIFFER et al., 1993]. Das E-Modul hat wiederum starken Einfluss auf das Ergebnis des SCHWICKERATH-Versuches (siehe 5.1.3.1). Durch die Anwendung des vollautomatischen Gießautomaten Nautilus® CC plus in der vorliegenden Arbeit, ist die Wahrscheinlichkeit für eine Überhitzung der Schmelze stark reduziert worden.

Ungenauigkeiten wie Fehlgüsse, ungleichmäßige Plättchendicke und unterschiedliche Längen und Breiten der Plättchen beeinträchtigen die Reproduzierbarkeit des SCHWICKERATH-Tests in hohem Maße [DÖRFLER et al., 1995]. Sie sollten daher unbedingt vermieden werden.

Fehlgüsse kamen in der vorliegenden Arbeit nicht vor. Die korrekten Plättchenmaße wurden mittels Bearbeitung durch Hartmetallfräsen erreicht und mit einer bis auf 0,01 mm genauen, geeichten, elektronischen Schiebelehre kontrolliert. Zu kleine oder ungleichmäßige Plättchen wurden aussortiert und durch geeignete ersetzt.

#### 5.1.2.2 Verblendung

Bei der keramischen Verblendung von Metallgerüsten können viele Fehler gemacht werden, die sich auf die Verbundfestigkeit auswirken (siehe Kap. 2.5). Deswegen wurde genauestens darauf geachtet, alle möglichen Fehler zu vermeiden. Nur die Brennposition im Ofen wurde variiert, ansonsten wurde sich nach den Herstellerangaben zur Verblendung von Metallgerüsten gerichtet.

Es wurde, wie von STRIETZEL [STRIETZEL, 2002] empfohlen, zeitnah nach dem Abstrahlprozess der Metallplättchen weitergearbeitet, um die durch den Abstrahlprozess erhöhte Oberflächenenergie auszunutzen und damit die Benetzbarkeit mit Keramik und deren Verbundfestigkeit zum Metall zu erhöhen (siehe Kap. 2.5).

Vor jedem Keramikauftrag wurde das Gerüst abgedampft/gesäubert und nicht mehr mit der Hand berührt, um Verunreinigungen und deren Folgen (Blasenbildung im Opaker, Sprünge in der Keramik, Verfärbungen der Keramik [VITA, 2007]) zu verhindern. Der Keramikschlicker wurde mit der vorgegebenen Flüssigkeit in der korrekten Konsistenz hergestellt, denn bei zu flüssigem Schlicker kann es durch explosionsartiges Verdampfen der Flüssigkeit zu Porositäten und Rissen im Keramikblock kommen. Bei zu trockenem Schlicker kann die Oberfläche Mikroporositäten aufweisen oder Aufrisse zeigen. Abplatzungen und Abhebungen an der Keramikoberfläche nach dem 2. Dentin- oder Korrekturbrand können die Folge sein (siehe Kap. 2.5).

Ein wichtiger Schritt nach jedem Keramikauftrag ist die Kondensation und das Absaugen der überschüssigen Flüssigkeit mit einem Zellstofftuch. Bei den ersten Prüfkörpern wurde der Schritt der Kondensation nicht korrekt ausgeführt. Deswegen gingen die ersten Prüfkörper alle bereits beim Ausarbeiten der Keramikschicht auf die exakten Maße zu Bruch. Es handelte sich um einen Bruch, der innerhalb der Keramikschicht verlief, also nicht auf mangelnder Verbundfestigkeit beruhte sondern auf mangelnder Verdichtung innerhalb der Keramik. Außerdem wurde mit der korrekten Kondensation auch die Ausarbeitetechnik nach dem Zubruchgehen der ersten Prüfkörper umgestellt. Es wurde seitdem immer darauf geachtet, dass sich das keramisch

gebundene Steinchen auf das Metall zubewegte/hinrotierte, auf die Keramik also im Verbundbereich Druck ausgeübt wurde und nicht Zug, wie bei der entgegen gesetzten Rotationsrichtung. Grund der Überlegung zur Änderung der Ausarbeitetechnik war, dass, wie in Kapitel 2.2.3 genannt, die Druckfestigkeit der Keramik größer ist als deren Zugfestigkeit. Nachdem der Fehler der Kondensation aufgedeckt und die Ausarbeitetechnik umgestellt wurde, gingen nur noch zwei Prüfkörper der 228 Prüfkörper zu Bruch, wahrscheinlich verursacht durch eine Biegung der Prüfkörper bei zu kräftigem Ausarbeiten.

### 5.1.2.3 Brenngutträger

Brenngutträger können das Brennergebnis stark beeinflussen [VITA, 2007]. Die vom Hersteller angegebenen Einstellparameter des Brennofens beziehen sich auf die Verwendung von Keramikbrenngutträgern [VITA, 2007]. Um den Einfluss des Brenngutträgers beurteilen zu können, wurden nicht nur Keramikbrenngutträger verwendet, sondern auch Wabenbrenngutträger (siehe Kap. 2.2.4.3). Die vertikale Lage (Höhe) war bei allen Prüfkörpern identisch. Sie wurden mit der Metallseite nach unten, ohne die Verwendung von Pins, direkt auf den Brenngutträger gelegt. Variiert wurde, wie in Kapitel 3 erläutert, die horizontale Lage: Die Prüfkörper durchliefen alle Phasen des Brennzyklus entweder hinten, rechts, vorne, links oder auf Position Mitte 1 oder Mitte 2 des entsprechenden Brenngutträgers im entsprechenden Ofen. Die Lage der Prüfkörper in der horizontalen und vertikalen Ebene konnte also reproduzierbar eingehalten werden.

Was der Versuchsaufbau nicht berücksichtigte, war der Einfluss der Höhe. So kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob es eine gleichmäßige Wärmeverteilung in der Höhe gibt. Es ist denkbar, dass beim Vorliegen eines starken vertikalen Temperaturgradienten z. B. Kronenränder unterbrannt werden, oder Höckerspitzen überbrannt werden. Beide Fälle könnten zu Spannungen führen, die in Sprüngen oder Abplatzungen münden könnten.

Auch wurde mit einer konstanten Aufheizrate und konstanten Haltezeiten gearbeitet. Zu diskutieren wäre, wie sich z. B. kurze Haltezeiten auswirken. Hier wäre denkbar, dass sich kein Temperaturngleichgewicht ausbilden kann und sich ungleichmäßige Temperaturen einstellen.

#### 5.1.2.4 Brennofen (Funktion)

Um den Einfluss der Öfen bestimmen zu können, wurden drei verschiedene Keramikbrennöfen verwendet: Vacumat® 300 der Firma VITA (siehe Kap. 3.1.3.1), Vario Press® 300 der Firma ZUBLER (siehe Kap. 3.1.3.2) und Programat® P90 der Firma IVOCLAR (siehe Kap. 3.1.3.3).

Der Hauptunterschied der Öfen bestand in deren Öffnungsprinzip. Der Vacumat® 300 und der Vario Press® 300 schlossen, indem der Lift mit dem Brenntisch nach oben in die Brennkammer hineinfuhr bzw. öffneten, indem der Lift nach unten aus der Brennkammer herausfuhr. Der Programat® P90 hingegen schloss und öffnete, indem das Ofenoberteil auf das Ofenunterteil zuklappte bzw. vom Ofenunterteil wegklappte. Bei dem letztgenannten Öffnungsprinzip war ein größerer Temperaturgradient auch durch Luftverwirbelungen bei der Öffnungs- und Schließbewegung zwischen der Position hinten und vorne zu erwarten als bei dem vorgenannten Öffnungsprinzip.

Die Hersteller sind ständig dabei, ihre Öfen zu optimieren. Dabei verändern sie das Heizsystem (z. B. Heizspirale mit Ummantelung aus Quarzglas, Spiralrohr beim Vario Press® 300 [OEMUS-MEDIA, 2007]), den Ort der Temperaturkontrolle (Temperaturkontrolle direkt am Brenntisch oder in der Brennkammer) und das Dämmmaterial der Brennkammer (zur Realisierung möglichst geringer Temperaturgradienten innerhalb des Brennofens). Da der Markt für Keramikbrennöfen eng umkämpft ist, bewahren die Ofenhersteller den genauen Aufbau ihrer Brennöfen als Betriebsgeheimnis, weswegen in der vorliegenden Arbeit leider nicht genauer auf die Unterschiede der verwendeten Öfen eingegangen werden konnte.

In regelmäßigen Abständen sollte sichergestellt werden, dass das Heizsystem sowie die Temperaturkontrolle des Ofens nicht defekt sind, dass die Temperatur konstant gehalten werden kann und der Temperaturgradient möglichst gering ausfällt. Die Kontrolle kann dabei nur indirekt über die Silberprobe erfolgen. Ist z. B. das Heizsystem oder Temperaturkontrolle des Ofens defekt, so ist die tatsächliche Temperatur im Ofen (kontrolliert mit der Silberprobe) nicht mit der eingestellten Temperatur identisch. Aber auch die Verwendung der Silberprobe ist problematisch. Hier geht man von einem linearen Fehler aus, d. h. man nimmt an, dass eine gemessene Temperaturabweichung in jedem Temperaturbereich gleich ist. Diese Hypothese ist jedoch nicht valide.

### 5.1.2.5 Einstellparameter des Brennofens

Das Optimum der Haftfestigkeit ist mit den Brennbedingungen der Hersteller vorgegeben [BLUME et al., 1998b]. In Kapitel 2.2.5.2 sind die Einstellparameter des Brennofens genannt und erläutert. Bei der vorliegenden Arbeit wurde sich bei der Einstellung von Temperatur, Zeit und Vakuum nach den Herstellerangaben gerichtet.

Was nicht zu kontrollieren war, ist die Hysterese, also die Genauigkeit der eingestellten Temperatur. Mit Hilfe der Silberprobe wurden die Öfen aber regelmäßig kalibriert, um möglichst sicher sein zu können, dass die eingestellte Temperatur auch wirklich erreicht wurde.

Ein Unterbrennen oder Überbrennen sollte unbedingt vermieden werden (bis auf die beiden Serien des Programat® P90, die absichtlich bei +20 °C bzw. -20 °C gebrannt wurden). Ein Unterbrennen/Überbrennen kann eintreten bei falscher Temperaturwahl, bei Überschießen der Temperatur und bei ungleichmäßiger Temperaturverteilung im Objekt (z. B. bei sehr dickem Objekt). Bei sechs Prüfkörpern war in der vorliegenden Arbeit der Opakerbrand unbeabsichtigt bei zu hoch eingestellter Temperatur durchgeführt worden: diese sechs Prüfkörper wurden aussortiert und neue Prüfkörper angefertigt. Ein Überschießen der Temperatur konnte durch regelmäßiges Kalibrieren der Öfen verhindert werden und eine ungleichmäßige Temperaturverteilung im Objekt konnte ebenfalls ausgeschlossen werden, da es sich um genormte Prüfkörper nach DIN EN ISO 9693 [DIN, 2000] handelte, die exakt festgelegte, gleiche Abmessungen hatten.

Auch die vom Hersteller vorgegebenen Zeiten (Trockenzeit, Schließzeit, Aufheizzeit, Haltezeit, Öffnungszeit) wurden in der vorliegenden Arbeit übernommen und eingestellt, denn werden diese Zeiten nicht eingehalten, kann das die Verbundfestigkeit beeinflussen (siehe Kap. 2.2.4.2). Beim jeweiligen Piep-Signal des Ofens wurde das zu brennende Objekt auf den Objektisch gestellt bzw. vom Objektisch genommen und auf die Abkühlplatte neben dem Ofen abgestellt, so wie vom Hersteller vorgesehen.

Genauso wurde darauf geachtet, dass das Vakuum jeweils korrekt eingestellt und aufgebaut wurde, um Blasenbildung und damit eine Festigkeitsminderung der Keramik zu vermeiden (siehe Kap. 2.2.4.2) und um den Farbeindruck der Keramik nicht negativ zu beeinflussen (siehe Kap. 2.2.5.2).

### 5.1.2.6 Wartung des Brennofens

Wie in Kapitel 2.2.5.3 erläutert, muss eine regelmäßige Wartung des Brennofens durchgeführt werden, um eine exakte Brennführung zu garantieren. Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Brennöfen wurden regelmäßig kalibriert (siehe Kap. 2.2.5.3). Die Öfen waren, mit Ausnahme des ZUBLER VarioPress® 300, keiner direkten Sonneneinstrahlung oder Luftzug ausgesetzt. Die Öfen wiesen keine Verschmutzungen auf, die das Vakuum hätten behindern oder die Prüfkörper verschmutzen können. Ob Spannungsschwankungen im örtlichen Stromnetz vorkamen und wie groß selbige ausfielen, konnte leider nicht eruiert werden. Beim Programat® P90 sind vom Hersteller zulässige Spannungsschwankungen von +10 % bis -15 % angegeben worden [IVOCLAR]. Beim VarioPress® 300 überwachte ein integriertes Kontrollsystem auftretende Spannungsspitzen und sicherte somit einen ungestörten Ablauf der Brennzyklen [ZUBLER].

## 5.1.3 Versuchsaufbau

### 5.1.3.1 SCHWICKERATH-Test

Zur Beurteilung der Haftfestigkeit sind verschiedene Verfahren vorgeschlagen worden [SCHMITZ und SCHULMEYER, 1975; HERRMANN et al., 1992] (siehe Kap. 2.4). Auch wenn es offensichtlich keinen „vollkommenen“ Test gibt [SCHMITZ und SCHULMEYER, 1975], bietet sich als Prüfanordnung zur Bestimmung der Verbundfestigkeit die Biegeprüfung an, da dies die hauptsächliche Beanspruchungsart des Verbundes ist [SCHWICKERATH, 1978].

Kritisch zu bemerken ist, dass die Methode des Drei-Punkt-Biegeversuchs nach SCHWICKERATH an sich reproduzierbare Resultate liefert, dennoch Messergebnisse verschiedener Autoren deutliche Abweichungen untereinander zeigen, die zum Teil sicherlich auf die Prüfkörperherstellung zurückzuführen sind [DÖRFLER et al., 1995]. Es wurde also auf die korrekte Prüfkörperherstellung in der vorliegenden Arbeit größten Wert gelegt, denn Ungenauigkeiten bei der Herstellung der Prüfkörper machen die größte Fehlerquelle aus und können das Messergebnis stark beeinflussen.

Die Belastbarkeit eines Versuchsstabes bei der Drei-Punkt-Biegeprüfung wird von mehreren Faktoren bestimmt: von der Verbundfestigkeit zwischen Metall und Keramik, von der Oberflächenbehandlung des Gerüsts, von dem E-Modul der Legierung (um so mehr Kraft wird zum Ablösen der Keramik vom Metall benötigt, je höher der E-Modul der Legierung ist) und von der Einlagerung in eine Korrosionslösung (z. B. Abfall der Verbundfestigkeitswerte bei Einlagerung für 90 Tage in eine Korrosionslösung mit einem pH-Wert von 2,3) [SCHWICKERATH, 1995]. Es geht also nicht allein die Verbundfestigkeit in das Versuchsergebnis des SCHWICKERATH-Tests mit ein.

Auch KAPPERT et al. gibt zu bedenken, dass die zum Abplatzen von Keramik aufzuwendende Kraft beim SCHWICKERATH-Test stark von der Biegesteifigkeit des Metallplättchens (E-Modul der Legierung) und nur zum Teil von der Haftung der Keramik abhängt. Er nimmt an, dass die zum Abplatzen von Keramik verwendete Kraft also eher ein Maß für die Biegesteifigkeit der Plättchen als für die Haftung der Keramik auf dem Plättchen sei [KAPPERT et al., 1985]. SIEBERT et al. bestätigt dies. Möglich ist, dass ein Metallprüfkörper mit größerer Steifigkeit (z. B. aus EMF-Legierung) bei geringerer Haftung oder Verbundfestigkeit zur Keramik im Biegeversuch ein höheres Ergebnis erzielt. Es kann also sein, dass die Haftung der Keramik auf einer EMF-Legierung geringer ist als auf einer Goldlegierung, dass aber trotzdem das Metall-Keramik-Verbundsystem auf EMF-Basis im SCHWICKERATH-Test günstiger abschneidet als das auf EM-Basis [SIEBERT, 1989]. Da bei der vorliegenden Arbeit ausschließlich eine Legierungsart, eine Cobalt-Chrom-Legierung, verwendet wurde, die immer das gleiche E-Modul (bei gleicher, vorgegebener Plättchenstärke und gleichen Gussbedingungen) aufwies, war der SCHWICKERATH-Test geeignet, denn es sollte die Verbundfestigkeit der Plättchen untereinander und nicht mit z. B. EM-Legierungen verglichen werden.

Der Biegeversuch nach SCHWICKERATH gibt Auskunft über die Qualität der Haftung der Keramik auf dem Metall. WAK-Differenzen spielen hierbei nur eine untergeordnete Rolle, dahingegen können Fragen nach der günstigsten Oberflächenbeschaffenheit (z. B. glatt oder rau) durch den Biegeversuch beantwortet werden [KAPPERT et al., 1985]. KAPPERT et al. sieht den Scherversuch nach SCHULMEYER als den Versuch an, der spezielle Aussagen über den Einfluss von WAK-Differenzen und die optimale Brennführung des Verbundsystems zulässt [KAPPERT et al., 1985]. KAPPERT et al. erscheint es insofern günstig, den besten Haftmechanismus durch den Biegeversuch

vorweg auszutesten und den Test für die bessere Brennführung zur WAK-Anpassung von Metall und Keramik durch den Scherversuch anzuschließen [KAPPERT et al., 1985]. In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der Brennposition auf die Verbundfestigkeit untersucht. Da es durch eventuelle Temperaturgradienten im Brennofen zu möglichen Änderungen im WAK der Keramik, abhängig von der Brennposition, kommen kann, ist der Scherversuch nach SCHULMEYER ebenfalls ein sinnvoller Test, um den Einfluss der Brennposition im Ofen zu untersuchen. Dies sollte in weiteren Studien mit dem Scherversuch nach SCHULMEYER nachgeprüft werden.

Der SCHWICKERATH-Test berücksichtigt nicht die Spannungen, die innerhalb der Krone oder Brücke aufgebaut wurden. Daher muss die Übertragbarkeit auf die klinische Situation kritisch betrachtet werden. Er vernachlässigt auch alle geometrischen Faktoren, die im Alltag des Zahntechnikers auftreten und beachtet werden müssen. So können ungleichmäßige und/oder zu dicke Keramiksichten zu Sprüngen und Abplatzungen führen. Auch wird der ästhetische Eindruck nicht beachtet: durch Über- oder Unterbrennen kann sich das Aussehen der Verblendkeramik ungünstig verändern (siehe Kap. 2.2.4.2).

Für die Fragestellung dieser Arbeit war der SCHWICKERATH-Test jedoch das geeignete Verfahren. Er kann bereits geringe Unterschiede in der Verbundfestigkeit aufzeigen. Der Biegeversuch nach SCHWICKERTH zur Prüfung der Verbundfestigkeit ist vielfach erprobt und wird häufig als Testmethode herangezogen [KAPPERT et al., 1985; SCHWICKERATH und MOSLEH, 1985; PANG et al., 1995; HÄNSEL et al., 1997; PAPAZOGLU und BRANTLEY, 1998; HUANG et al., 2005; FISCHER et al., 2009]. Er hat sich im deutschsprachigen Raum als geeignete Methode zur Bestimmung der Verbundfestigkeit durchgesetzt [DÖRFLER et al., 1995], und ist in der DIN EN ISO 9693 [DIN, 2000] verankert.

### ***Messfehler und Einstellparameter des Gerätes***

Verschiedene Einstellparameter der Universalprüfmaschine beeinflussen das Ergebnis des SCHWICKERATH-Versuchs und sind in der DIN EN ISO 9693 genau festgelegt: Der Abstand zwischen den Auflagen muss 20 mm betragen, die Druckfinne muss einen Radius von 1 mm aufweisen und die Last muss mit einer konstanten Rate von  $1,5 \pm 0,5$  mm/min aufgebracht und bis zum Versagen aufgezeichnet werden [DIN, 2000]. Weiteren Einfluss hat die Position des Prüfkörpers und die Kraftabfallgrenze. Die Kraftabfallgrenze sollte zwischen 5 % und 30 % liegen, wobei ein mittlerer Wert von

15 % empfehlenswert ist. KHALOUF fand im angegebenen Bereich keine signifikanten Unterschiede. Höhere Kraftabfallgrenzen, die im Bereich von 50 % und mehr liegen, sind seiner Meinung nach abzulehnen [KHALOUF, 2003].

Wie von der DIN EN ISO 9693 [DIN, 2000] vorgeschrieben und KHALOUF empfohlen, wurden die Einstellungen der Prüfmaschine vorgenommen. Die Prüfkörper wurden mittig zwischen den Auflagen positioniert und eine Kraftabschaltschwelle von 15 % bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1,5 mm/min gewählt. Der k-Wert für die Berechnung der Scherverbundfestigkeit wurde ausschließlich graphisch näherungsweise ermittelt, wobei mit einem systematischen Fehler von 5 % bis 10 % gerechnet werden muss [DERFERT, 2003].

#### 5.1.3.2 Visuelles Abschätzen

Bei der visuellen Begutachtung handelte es sich um eine rein subjektive Wahrnehmung, bei der mit dem bloßen Auge die Keramik auf Veränderungen im Glanzverhalten, Oberflächenrauigkeit, eventuelle Sprünge, Risse, Farbstiche und Verfärbungen hin untersucht wurde. Mit Hilfe dieser Untersuchung sollte der Einfluss der Brennposition auf das ästhetische Erscheinungsbild der Keramik beurteilt werden. Kritisch zu sehen ist, dass es sich um kein objektives Verfahren handelt sondern das Ergebnis von Untersucher zu Untersucher differieren kann.

## 5.2 Diskussion der Ergebnisse

Der in der Norm DIN EN ISO 9693 [DIN, 2000] genannte Mindestwert für die Verbundfestigkeit von 25 MPa wurde von jeder Serie erreicht, ja sogar deutlich überschritten, unabhängig davon in welchem Ofen und an welcher Position auf welchem Brenngutträger der Prüfkörper gebrannt wurde. Die durchschnittliche Scherverbundfestigkeit aller nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörper lag bei 48,0 MPa (die einzelnen Serien lagen zwischen 40,9 - 52,1 MPa).

In der vorhandenen Literatur ergaben sich im SCHWICKERATH-Versuch Verbundfestigkeiten bei keramisch verblendeten EMF-Legierungen von ca. 31-51 MPa (siehe Kap. 2.6.1). Es zeigte sich also, dass die in dieser Arbeit gemessenen

Verbundfestigkeiten mit den Literaturwerten übereinstimmten, sogar weit im oberen Bereich derselben lagen. Es konnte somit von der Richtigkeit der ermittelten Werte, in Bezug auf die in der Literatur genannten Werte, ausgegangen werden.

Die Standardabweichung ist ein Maß für die Abweichung der Einzelwerte von der Grundgesamtheit. Wenn die Standardabweichung gering ausfällt, kann auf eine hohe Genauigkeit der Versuche geschlossen werden. In der Literatur wurden mit dem SCHWICKERATH-Test nur geringe Standardabweichungen (z. B. 6 MPa bei SCHNETTGER [SCHNETTGER et al., 2006]) gemessen, was eine geringe Streuung der Messergebnisse und damit hohe Reproduzierbarkeit des SCHWICKERATH-Versuches an sich bedeutet [DÖRFLER et al., 1995]. In der vorliegenden Arbeit lag die Standardabweichung bei den einzelnen Serien zwischen 1,1 und 10 MPa, sie war also gering. Es konnte somit durch gleich bleibende Bedingungen während der Herstellung auf eine hohe Genauigkeit der durchgeführten Versuche geschlossen werden, sodass die gemessenen Ergebnisse als repräsentativ gelten konnten.

## **5.2.1 Brennofen VITA Vacumat® 300**

### **5.2.1.1 Ergebnisse des SCHWICKERATH –Versuches**

Es zeigte sich, dass kein signifikanter Unterschied der Scherverbundfestigkeiten ( $T_m$ ) zwischen den einzelnen Serien auf dem Brenngutträger Wabe im Ofen Vacumat® 300 vorlag. Mit Ausnahme einer Serie galt das auch für den Brenngutträger Keramik.

Bei dem Brenngutträger Keramik zeigte sich nur zwischen der Serie Mitte 1 und der Serie hinten ein signifikanter Unterschied, bei dem die Serie Mitte 1 eine signifikant geringere Verbundfestigkeit von 45,8 MPa gegenüber der Verbundfestigkeit der Serie hinten mit 49,9 MPa aufwies. Die absoluten Werte der Verbundfestigkeiten lagen also nur gering auseinander, doch durch jeweils geringe Werte der Standardabweichungen (Serie Mitte 1 = 1,5 MPa, Serie hinten = 2,9 MPa) erwies sich der Unterschied als signifikant.

### 5.2.1.2 Visuelles Abschätzen

Subjektiv ergaben sich keine Unterschiede im Erscheinungsbild der Keramik der verschiedenen Prüfkörper des Vacumat® 300. Es ließ sich daraus schließen, dass die Brennposition auf das ästhetische Erscheinungsbild der Keramik keinen Einfluss hatte.

## 5.2.2 Brennofen ZUBLER VarioPress® 300

### 5.2.2.1 Ergebnisse des SCHWICKERATH –Versuches

Bei dem Brennofen VarioPress® 300 und dem Brenngutträger Wabe erwiesen sich bei zwei Vergleichen der Scherverbundfestigkeiten die Unterschiede als signifikant: der Vergleich der Serie rechts ( $T_m = 46,3$  MPa, Standardabweichung von 2,5 MPa) mit der Serie Mitte 1 ( $T_m = 50,4$  MPa, Standardabweichung von 3,6 MPa) bzw. der Mitte 2 ( $T_m = 49,9$  MPa, Standardabweichung von 3,1 MPa). Die Werte von  $T_m$  variierten dabei nicht stark, da jedoch die Standardabweichungen vor allem der Serie rechts gering war, kam es zu einem signifikanten Unterschied.

Gleiches war die Ursache für den einzigen signifikanten Unterschied beim Vergleich der Serien auf dem Brenngutträger Keramik. Die Werte von  $T_m$  lagen eng beieinander (Serie Mitte 1 mit  $T_m = 47,7$  MPa und Serie links mit  $T_m = 50,5$  MPa), dennoch ließ sich beim Vergleich der beiden Serien miteinander ein signifikanter Unterschied feststellen. Auch hier war der Grund die geringe Standardabweichung der Serie links (2,7 MPa) und die noch geringere der Serie Mitte 1 (1,1 MPa).

### 5.2.2.2 Visuelles Abschätzen

Subjektiv ergaben sich keine Unterschiede im Erscheinungsbild der Keramik der verschiedenen Prüfkörper. Auch hier trat durch die Brennposition keine sichtbare Beeinflussung der Keramik ein.

### 5.2.3 Brennofen IVOCLAR Programat® P90

#### 5.2.3.1 Ergebnisse des SCHWICKERATH –Versuches

Zwei signifikante Unterschiede ergab der Vergleich der Scherverbundfestigkeiten beim Ofen Programat® P90 und dem Brenngutträger Wabe. Diese signifikanten Unterschiede traten auf zwischen der Serie vorne ( $T_m = 52,1$  MPa, Standardabweichung von 2,0 MPa) mit der Serie Mitte 1 ( $T_m = 48,5$  MPa, Standardabweichung von 2,6 MPa) bzw. der Serie rechts ( $T_m = 46,5$  MPa, Standardabweichung von 4,0 MPa). Die Serie vorne zeigte also besonders hohe Werte von  $T_m$  bei gleichzeitig geringer Standardabweichung, also bei sehr großer Genauigkeit bei der Prüfkörperherstellung. Die Werte von  $T_m$  der Serie Mitte 1 lagen nah bei denen der Serie vorne, da jedoch auch hier eine geringe Standardabweichung vorlag, kam es zu dem genannten signifikanten Unterschied. Die Serie rechts zeigte niedrigere Werte von  $T_m$  im Vergleich zur Serie vorne, wobei auch hier der signifikante Unterschied eher auf die geringe Standardabweichung und den besonders hohen Wert von  $T_m$  der Serie vorne zurückzuführen war als auf die geringere Scherverbundfestigkeit von der Serie rechts.

Wenn bei diesem Ofen, bei Brandführung nach Herstellerangaben, eine signifikant geringere Scherverbundfestigkeit zu erwarten war, so vor allem bei der Serie vorne. Durch das Auf- und Zuklappen im Vergleich zu der vertikalen Liftbewegung der beiden anderen Öfen ist es vorstellbar, dass der Probenkörper vorne weniger Wärme des Ofenoberteils abbekommt als die anderen, beim Auf- und Zuklappen stets näher am Ofenoberteil und damit Heizsystem befindlichen Proben. Durch die geringere Hitzeeinwirkung wäre eine Verringerung der Scherverbundfestigkeit möglich. Diese Theorie konnte mit der vorliegenden Arbeit widerlegt werden, denn die Serie vorne zeigte nicht die geringsten Werte von  $T_m$  sondern sogar die höchsten und das bei sehr geringer Standardabweichung, also großer Genauigkeit der Ergebnisse.

Auf dem Brenngutträger Keramik wurden wie immer sechs Serien nach Herstellerangaben gebrannt. Um eine Aussage über das Verhalten der Verbundfestigkeit bei bekannter Temperaturabweichung von den Herstellerangaben machen zu können, wurden zusätzlich zwei Serien in der Mitte des Brenngutträgers Keramik im Programat® P90 gebrannt. Bei einer dieser beiden Serien wurden alle Brände des Brandzyklus um  $+20$  °C gegenüber den Herstellerangaben erhöht (Serie

+20 °C), bei der anderen Serie um 20 °C erniedrigt (Serie -20 °C). Die Diskussion dieser von den Herstellerangaben abweichenden Serien erfolgt unten.

Beim Vergleich der nach Herstellerangaben gebrannten sechs Serien ergab sich kein signifikanter Unterschied.

Auffällig war jedoch, dass der Mittelwert von  $T_m$  bei der Serie links ( $T_m = 40,9$  MPa) und der Serie vorne ( $T_m = 42,2$  MPa) jeweils im Vergleich zu den anderen Serien niedriger war, die Standardabweichung hingegen fiel ausgesprochen groß aus (Serie links = 10,0 MPa, Serie vorne = 9,8 MPa). Auch wenn diese Tatsache beim Vergleich der nach Herstellerangaben gebrannten Serien keinen signifikanten Unterschied ergab, so hatte sie doch Einfluss bei dem Vergleich mit den Serien bei veränderter Temperaturführung (siehe unten).

#### 5.2.3.2 Visuelles Abschätzen

Bei den nach Herstellerangaben im Programat® P90 gebrannten Prüfkörpern ergaben sich keine Unterschiede im Erscheinungsbild der Keramik. Eine ästhetische Beeinflussung der Keramik in Form von vermindertem Glanz, Verfärbungen etc. war also nicht gegeben.

### 5.2.4 Brennofen IVOCLAR Programat® P90 bei veränderter Temperatur

#### 5.2.4.1 Ergebnisse des SCHWICKERATH –Versuches

Mit der Serie +20 °C wurde ein Überbrennen und der Einfluss auf die Scherverbundfestigkeit, mit der Serie -20 °C wurde ein Unterbrennen der Keramik und der Einfluss auf die Scherverbundfestigkeit simuliert. Es zeigte sich, dass die Verbundfestigkeit nicht, wie erwartet, geringer als bei den nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörpern ausfiel, sondern im Gegensatz dazu sehr hohe Verbundfestigkeitswerte mit gleichzeitig geringer Standardabweichung gemessen wurden. Die Serie +20 °C wies eine Scherverbundfestigkeit von 49,5 MPa auf, mit einer Standardabweichung von 1,5 MPa, die Serie -20 °C eine Scherverbundfestigkeit von 51,4 MPa mit einer Standardabweichung von 3,3 MPa.

Beim Vergleich der Serie +20 °C mit der Serie -20 °C ergab sich kein signifikanter Unterschied.

Beim Vergleich der Serie +20 °C bzw. der Serie -20 °C mit den nach Herstellerangaben gebrannten Serien ergaben sich mehrere signifikante Unterschiede: Beim Vergleich der Serie -20 °C, die einen ausgesprochen hohen  $T_m$ -Wert aufwies, ergab sich zu allen Serien bis auf die Serie vorne und die Serie +20 °C ein signifikanter Unterschied. Beim Vergleich der Serie +20 °C ergab sich zu allen Serien bis auf die Serie vorne, Serie links, Serie Mitte 2 und Serie -20 °C ein signifikanter Unterschied.

Die Scherverbundfestigkeiten der nicht nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörper wiesen also keine geringeren Werte sondern im Vergleich zu den nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörpern signifikant größere Werte auf. Zu erklären ist das mit der Tatsache, dass die Prüfkörper der Serie +20 °C und der Serie -20 °C zum Ende der praktischen Versuche angefertigt wurden. Mit nur mäßigen zahntechnischen Erfahrungen zu Beginn der Versuche trat mit der Zeit immer mehr Routine bei der Herstellung der Prüfkörper ein, die Technik der Keramikschichtung verbesserte sich und damit vermutlich auch die Qualität des Verbundes zwischen Metall und Keramik. Die Herstellung der im Progamat® P90 nach Herstellerangaben auf dem Brenngutträger Keramik gebrannten Prüfkörper erfolgte dagegen zu Beginn der praktischen Versuche, wo es noch an praktischer Erfahrung mangelte und dementsprechend Scherverbundfestigkeitswerte gemessen wurden, die relativ großen Schwankungen unterworfen waren (siehe Standardabweichung von Serie vorne und links) und die auch geringer ausfielen.

Es lässt sich also daraus schließen, dass die signifikanten Unterschiede zwischen den Serien +20 °C bzw. -20 °C des Brenngutträgers Keramik gegenüber den nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörpern auf Grund der Prüfkörperherstellung und nicht auf Grund der Brennposition oder Brenntemperatur im Ofen aufgetreten sind.

BLUME et al. untersuchte ebenfalls den Einfluss der Brennbedingungen auf die Verbundeigenschaften. Er verwendete dabei Titan und verblendete dieses mit Keramik. Dabei erfolgte der eine Brennzyklus nach Herstellerangaben, bei dem anderen Brennzyklus wurden die Haltezeiten verdoppelt. Die Scherverbundfestigkeiten veränderten sich dabei nicht signifikant [BLUME et al., 1998b]. BLUME stützt also das Ergebnis der vorliegenden Arbeit, dass eine Änderung der Brenntemperatur keinen Einfluss auf die Verbundfestigkeit haben muss.

In weiteren Studien bleibt jedoch abzuklären, welchen Einfluss die veränderten Temperaturen bzw. auch die Brennpositionen im Ofen auf die Festigkeit der Keramik haben.

Betrachtet man die Ergebnisse der vorsätzlich über- und unterbrannten Prüfkörper (Serie +20 °C und Serie -20 °C), müssen wirksame Effekte, die zu Sprüngen oder Abplatzungen führen, Temperaturdifferenzen über 20 °C aufweisen. Konstruktive Maßnahmen der Hersteller scheinen dies auszuschließen. Voraussetzung ist natürlich ein funktionsfähiger und genormter Ofen, denn z. B. defekte Heizelemente können zu starken Temperaturgradienten führen.

Des Weiteren bleibt die Frage zu klären, ob die gemessenen hohen Scherverbundfestigkeiten unter Temperaturwechsellast oder bei Lagerung in einer korrosiven Lösung schneller oder tiefer absinken, als bei normal (bei Temperaturen nach Herstellerangaben) gebrannten Objekten (siehe Kap. 5.3).

#### 5.2.4.2 Visuelles Abschätzen

Der stärkere Glanz und die glattere Oberfläche der Serie +20 °C ist mit einem Überbrennen der Keramik zu erklären. Die jeweils um 20 °C gegenüber den Herstellerangaben erhöhten Temperaturen führten dazu, dass die Keramik stärker versinterte und dadurch die Oberfläche glatter und der Glanz stärker wurde. Der gegenteilige Effekt war bei der Serie -20 °C zu beobachten. Hier kam es durch ein Unterbrennen der Keramik zu einer geringeren Versinterung, die Oberfläche erschien rauer und glänzte weniger.

### 5.2.5 Vergleich der untersuchten Brennöfen und Brenngutträger

Beim Vergleich der Brennöfen mit Brenngutträgern untereinander, bei denen nur Werte von nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörpern mit eingingen, zeigten sich, mit Ausnahme des Programat® P90 mit verwendetem Brenngutträger Keramik, keine signifikanten Unterschiede. Der Programat® P90/Keramik zeigte hingegen beim Vergleich mit allen anderen Brennöfen/Brenngutträgern signifikante Unterschiede. Der Mittelwert von  $T_m$  beim Programat® P90/Keramik betrug 44,5 MPa mit einer Standardabweichung von 6,2 MPa. Die Mittelwerte von  $T_m$  der anderen Öfen mit

Brenngutträgern lagen zwischen 48-49,4 MPa, waren demnach um 3,5-4,9 MPa größer. Bei der Betrachtung aller Serien des Programat® P90/Keramik, war festzustellen, dass zwei Serien relativ geringe Mittelwerte von  $T_m$  aufwiesen: Serie vorne = 42,2 MPa, Serie links = 40,9 MPa. Auch die anderen vier Serien lagen eher am unteren Bereich aller sonst ermittelten Scherverbundfestigkeiten. Zu erklären ist das mit der Herstellung dieser Prüfkörper zu Beginn der praktischen Versuche mit noch geringer zahntechnischer Erfahrung (siehe Kap. 5.2.4.1).

Es war also nicht der Ofen Programat® P90, der zu geringeren Verbundfestigkeiten führte, denn bei demselben Ofen (Programat® P90) und dem Brenngutträger Wabe traten keine signifikanten Unterschiede zu anderen Öfen auf. Auch war nicht der Brenngutträger Keramik die Ursache für signifikant geringere Scherverbundfestigkeiten, denn auch dann hätten die anderen Öfen mit Brenngutträger Keramik signifikant geringere Verbundfestigkeiten aufweisen müssen, was nicht der Fall war. Zu erklären sind die signifikanten Unterschiede des Programat® P90/Keramik zu allen anderen Öfen/Brenngutträgern mit der noch mangelnden Erfahrung der Prüfkörperherstellung und daraus folgend geringerer Verbundfestigkeit.

### 5.3 Praktische Bedeutung

DÖRFLER et al. behauptet, dass Dank der geringen Abmessungen der SCHWICKERATH-Plättchen alle sechs Plättchen gleichzeitig im Keramikofen gebrannt werden können, wodurch für alle gleiche Brennbedingungen bestehen [DÖRFLER et al., 1995]. Diese Aussage konnte durch die vorliegende Arbeit bestätigt werden, wobei hier die Plättchen sogar so weit wie möglich auseinander gelegt wurden, mit dem größtmöglichen Abstand zueinander. Die Lagerung der Plättchen am Rand oder in der Mitte des Brenngutträgers und die Wahl des Brenngutträgers hatten somit keinen Einfluss auf die Verbundfestigkeit.

Der klinische Einsatz von weit am Ofenrand gebrannten Metall-Keramik-Restorationen sollte jedoch aus folgenden Gründen kritisch gesehen werden:

- Eine hohe Haftfestigkeit ist wichtige Voraussetzung für die Dauerhaftigkeit metallkeramischer Kronen und Brücken [SCHMITZ und SCHULMEYER, 1975] und

wurde deshalb in dieser Arbeit in Abhängigkeit von der Brennposition im Ofen untersucht. Die Haftfestigkeit ist aber gleichzeitig nicht der einzige Faktor für die Dauerhaftigkeit. Auch die Festigkeit der Keramik sowie die Lagerung in einem korrosiven Milieu, wie es im Mund vorkommt, sind von Bedeutung für die Dauerhaftigkeit.

- Es kamen genormte Prüfkörper zum Einsatz, d. h. eine ungleichmäßige Temperaturverteilung durch Temperaturgradienten bei zu dicken Objekten mit der Folge eines möglichen Überbrennens/Unterbrennens wurden ausgeschlossen.
- Da es durch eventuelle Temperaturgradienten im Brennofen (abhängig von der Brennposition) möglicherweise zu Änderungen im WAK der Keramik kommen kann (siehe Kap. 2.2.3), ist der Scherversuch nach SCHULMEYER ein zusätzlich sinnvoller Test, um den Einfluss der Brennposition im Ofen zu untersuchen.
- Eine Aussage über die klinische Einsetzbarkeit sollte erst nach der Durchführung weiterer Versuche erfolgen. Klinische Verlaufsbeobachtungen sind unbedingte Voraussetzungen für eine Empfehlung an die Praxis [BÖNING et al., 2006].

### ***Korrosives Milieu***

Dentalkeramische Komponenten befinden sich klinisch ständig in einem korrosiven Milieu (100 % rel. Feuchte, Schwankungen des pH-Wertes zwischen 5,0 und 7,0 auf Grund der Nahrungsaufnahme und Schwankungen der Umgebungstemperatur zwischen 5 °C und 70 °C). Das hat im Bezug auf die unterkritische Rissausbreitung und damit die mechanischen Aspekte eine zentrale Bedeutung [FISCHER et al., 2000].

Bei SCHWICKERATH zeigte sich der pH-Wert der Lösung von Bedeutung bei der Verbundfestigkeit. Es zeigte sich nach der Lagerung in verschiedenen Korrosionsbädern eine unterschiedlich starke Minderung der Verbundfestigkeit bei den geprüften Legierungen, allerdings gab es auch EMF-Legierungen, die die Angriffe aller Lösungen ohne Minderung der Verbundfestigkeit überstanden [SCHWICKERATH und MOSLEH, 1985]. Es ließ sich ohne Zweifel der Einfluss von Korrosionslösungen auf die Grenzfläche Metall-Keramik feststellen. Um die Variationen des Mundmilieus im In-vitro-Versuch näherungsweise zu immitieren, können, wie bei KRAFT, die Prüfkörper in Korrosionslösungen und physiologischer Kochsalzlösung gelagert und Temperaturwechselbelastung ausgesetzt werden [KRAFT und STENDER, 1995]. Nicht bei

allen Probenkörpern zeigten sich bei KRAFT Verbundfestigkeitsverluste nach Einwirkung von Wasser und Temperaturwechsel, abhängig von der Dauer der Einwirkung und der Art des Metall-Keramik-Systems [KRAFT und STENDER, 1995]. Es lässt sich also folgendes festhalten: Zur Beurteilung der klinischen Brauchbarkeit ist es notwendig, dass bei der Prüfung der Einfluss von Zeit, Temperatur und Feuchtigkeit, denen die Verbindungsstelle zwischen Metall und Keramik beim Gebrauch ausgesetzt ist, beachtet wird [SCHWICKERATH, 1994a]. Auch HÄNSEL et al. setzten ihre Proben Temperaturwechselbelastungen aus und lagerten sie in Korrosionslösungen, um eine künstliche Alterung zu erreichen [HÄNSEL et al., 1997].

Bei den Messergebnissen der vorliegenden Arbeit ist zu berücksichtigen, dass diese nicht einem korrosiven Milieu oder Temperaturveränderungen ausgesetzt wurden. Die sehr hohen Verbundfestigkeitswerte, die In-vitro gemessen wurden, müssen also zurückhaltend gesehen werden und können sich In-vivo als geringer herausstellen.

### ***Festigkeit***

Jedweder Zahnersatz ist bei der Kautätigkeit, bei Leermastikation und bei Parafunktionen Dauerschwellenbeanspruchungen von Null bis zu einer Obergrenze ausgesetzt [SCHWICKERATH, 1986; SCHWICKERATH, 1994b]. Es ist bekannt, dass ständig sich wiederholende Belastungen zu einer Zerstörung einer Konstruktion führen können. Die Höhe des Lastwertes liegt dabei unter dem Wert, bei dem bei einmaliger sich stetig steigender Kraft das Versagen eingetreten wäre [SCHWICKERATH, 1986].

Dauerschwellenbeanspruchungen entsprechen den im klinischen Gebrauch auftretenden Beanspruchungen. Auch im Mund sind erst nach längerer Tragezeit Risse oder Abplatzungen erkennbar, die nur selten auf eine plötzliche Überbelastung zurückzuführen sind [SCHWICKERATH, 1994b]. SCHWICKERATH konnte bei dem Verhalten von keramisch verblendeten Metallstäben (Verbundstäben) unter Dauerbiegebelastung keine signifikante Abhängigkeit von der Verbundfestigkeit zwischen Metall und Keramik feststellen. Ohne Zweifel spielten aber die Festigkeitseigenschaften der Keramik selbst eine große Rolle [SCHWICKERATH, 1986] (siehe auch Kap. 2.2.3).

In der vorliegenden Arbeit wurde die Festigkeit der Keramik nicht bestimmt. Es ist also möglich, dass die Festigkeit der Keramik in Abhängigkeit von der Brennposition im Ofen

bei gleich bleibender Verbundfestigkeit variiert. Um dies zu untersuchen sind weitere Studien nötig.

Ein klinischer Einsatz von am Rand des Ofens gebrannten Objekten, sollte nach den derzeitigen Untersuchungen deshalb kritisch hinterfragt werden.

## 6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der Brennposition auf die Verbundfestigkeit von Metall-Keramik-Restaurationen untersucht. Dazu wurden in drei verschiedenen Keramikbrennöfen (Vacumat® 300, Programat® P90, Vario Press® 300) je sechs Serien von SCHWICKERATH-Plättchen auf dem Brenngutträger Wabe und je sechs Serien von SCHWICKERATH-Plättchen auf dem Brenngutträger Keramik hergestellt. Die Serien wurden entsprechend ihrer Position beim Keramikbrand (hinten, rechts, vorne, links, Mitte) benannt: Serie hinten, Serie rechts, Serie vorne, Serie links, Serie Mitte 1 und Serie Mitte 2. Eine Serie bestand dabei aus sechs Prüfkörpern, wobei diese jeden der einzelnen Brennvorgänge an derselben Brennposition durchliefen. Realisiert wurde das durch eine entsprechende Markierung der Prüfkörper, die ein Verwechseln ausschloss.

Es wurden zusätzlich zwei Serien in der Position Mitte 1 im Brennofen Programat® P90 angefertigt, die nicht, wie alle anderen Serien, nach Herstellerangaben gebrannt wurden, sondern um +20 °C bzw. um -20 °C bei allen Bränden von den Herstellerangaben abwichen. Entsprechend wurden die Serien als Serie +20 °C bzw. als Serie -20 °C benannt.

Zur Prüfung der Verbundfestigkeit kam der SCHWICKERATH-Test zum Einsatz, der in der DIN EN ISO 9693 [DIN, 2000] verankert ist und sich im deutschsprachigen Raum als geeignete Methode zur Bestimmung der Verbundfestigkeit durchgesetzt hat [DÖRFLER et al., 1995].

Alle ermittelten Scherverbundfestigkeitswerte, auch die, bei denen die Brenntemperaturen von den Herstellerangaben abwichen, lagen ohne Ausnahme oberhalb der Mindestanforderung von 25 MPa. Die meisten Serien unterschieden sich nicht signifikant. Die signifikanten Unterschiede ließen sich nicht durch die unterschiedliche Brennposition erklären. Die Ursache lag vielmehr in der mit der Zeit routinierteren Prüfkörperherstellung und damit erhöhten Scherverbundfestigkeit bei gleichzeitig geringer Standardabweichung. Beim Vergleich der Brennöfen untereinander ergab sich nur jeweils zum Ofen Programat® P90 mit Brenngutträger Keramik ein signifikanter Unterschied, der sich, wie oben beschrieben, erklären ließ. Zusammenfassend kann also festhalten werden, dass die Brennposition im Ofen keinen

Einfluss auf die Verbundfestigkeit hatte. Genauso wenig zeigte der verwendete Brenngutträger oder der verwendete Ofen Einfluss auf die Verbundfestigkeit.

Neben der Scherverbundfestigkeit wurde visuell der Einfluss auf das ästhetische Erscheinungsbild der Keramik abgeschätzt. Hierbei ergab sich, dass die von den Herstellerangaben abweichenden Brennbedingungen eine Veränderung im Glanzverhalten der Keramik bewirkten. Die Serie +20 °C zeigte ein ausgeprägteres Glanzverhalten der Keramik, die Serie -20 °C ein geringeres Glanzverhalten mit einem stumpferen Aussehen, als die nach Herstellerangaben gebrannten Serien. Die nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörper der verschiedenen Brennpositionen, Öfen und Brenngutträger zeigten visuell keine Unterschiede.

Vor einem klinischen Einsatz von bewusst am Ofenrand gebrannten Metall-Keramik-Restaurationen sollte zusätzlich der Einfluss der Brennposition auf die Festigkeit der Keramik untersucht werden. Weiterhin sollte der Einfluss der Brennposition auf den Metall-Keramik-Verbund unter Temperaturwechselbelastung und nach Lagerung in einer korrosiven Lösung bekannt sein, bevor der klinische Einsatz empfohlen werden kann.

## 6.1 Summary

This study investigated the influence of firing positions on the bonding strength of metal ceramic restorations. For this purpose a series of six SCHWICKERATH discs was prepared on the honeycomb firing tray and a series of six SCHWICKERATH discs on the ceramic firing tray in three different ceramic furnaces (Vacumat® 300, Programat® P90, Vario Press® 300). The series was labelled according to position (rear, right, front, left, middle): rear series, right series, front series, left series, middle 1 series, middle 2 series. A series, therefore, consisted of six test specimens whereby each of them underwent the separate firing processes in the same firing positions. This was achieved by appropriately labelling the test specimens so that any confusion was eliminated.

In addition, two series in position middle 1 in the furnace Programat® P90 were prepared which, unlike all the other series, were not fired according to the manufacturer's instructions, but fired with +20 °C or -20 °C respectively, from all of the firings according to the manufacturer's instructions.

The bond strength was tested using the SCHWICKERATH-test which is defined in DIN EN ISO 9693 [DIN, 2000] and is established as a suitable method of determining the bond strength in the German speaking world [DÖRFLER et al., 1995].

All of the tested shear bond strength values, including those that deviated from the firing temperatures in the manufacturer's instructions were, without exception, above the minimum specification of 25 MPa. Most of the series did not vary significantly. The significant variations could not be explained by the different firing positions. The cause was rather more to do with practice in manufacturing test specimens and associated greater shear bond strength, along with the concomitant decrease in standard deviation. Each time a comparison of the furnaces revealed a significant variation only in furnace Programat® P90 with the ceramic tray, as described above. In summary, it can be asserted that the firing position in the furnace had no influence on the bonding strength. Similarly, the type of firing tray or furnace used had no effect on the bond strength.

The visual impact on the aesthetic appearance was also assessed along with the bond strength. This showed that the firing conditions which differed from the manufacturer's instructions had an effect on the gloss characteristics of the ceramic.

Series +20 °C showed a more pronounced gloss characteristic of the ceramic, series -20 °C less gloss characteristic with a duller appearance, than the series fired according to the manufacturer's instructions. The test specimens fired according to the manufacturer's instructions for the various firing positions, furnaces and firing trays showed no visual variations.

Prior to the clinical application of known furnace fired metal ceramic restorations, the influence of the firing position on the bonding of the ceramic should be investigated. Furthermore, the influence of the firing position on the metal ceramic bonding under varying temperature conditions and after storage in a corrosive solution should be ascertained before clinical use can be recommended.

## 7 Literaturverzeichnis

- ANUSAVICE K J, KAKAR K, FERREE N: Which mechanical and physical testing methods are relevant for predicting the clinical performance of ceramic-based dental prostheses? *Clin Oral Implants Res* 18 Suppl 3: 218-31 (2007)
- AUTERHOFF J, LENZ J: Wärmeeigenspannungen am marginalen Rand metallkeramischer Kronen mit Stufenpräparation. *Dtsch Zahnärztl Z* 40: 1004-1009 (1985)
- BIFFAR R, KLINKE T, MATTMÜLLER A: Longitudinale Studie zum Frakturrisiko von hydrothermalen Verblendkeramik Duceragold über mehr als 36 Monate. *Dtsch Zahnärztl Z* 52: 291-4 (1997)
- BLUME A, RASER G, LENZ E, DIETZ W: Der Titan-Keramik-Verbund aus experimenteller Sicht. *Dtsch Zahnärztl Z* 53: 718-21 (1998a)
- BLUME A, RASER G, LENZ E, DIETZ W: Eine experimentelle Wertung des Titan-Keramik-Verbundes. *Quintessenz Zahntechnik* 24: 1143-1149 (1998b)
- BONFANTE E A, DA SILVA N R F A, COELHO P G, BAYARDO-GONZÁLEZ D E, THOMPSON V P, BONFANTE G: Effect of framework design on crown failure. *Eur J Oral Sci* 117: 194-199 (2009)
- BÖNING K, ULLMANN U, WOLF A, LAZAREK K, WALTER M: Dreijährige klinische Bewährung konventionell zementierter Einzelkronen aus Lithiumdisilikat-Keramik. *Dtsch Zahnärztl Z* 61: 604-611 (2006)
- BRÄMER W, PETTER H J: Untersuchung der Blasenbildung im Metallkeramik-Verbund. *dental-labor* 38: 65-66 (1990)
- BREUSTEDT A: Zahnärztliche Keramik. VEB Verlag Volk und Gesundheit, Berlin, pp (1965)
- CAESAR, ERNST: Grundwissen für Zahntechniker. Verlag Neuer Merkur GmbH, München, pp (1987)
- CAPUTO A A, DUNN B, REISBICK M H: A flexural method for evaluation of metal-ceramic bond strengths. *J Dent Res* 56: 1501-06 (1977)
- CLAUS H: Das Gefüge und Mikrogefüge der Dentalkeramik in Abhängigkeit von den Brennbedingungen. *Quintessenz Zahntechnik* 16: 1479-1495 (1990)
- CLAUS H: Gefügeuntersuchungen an metallkeramischen Systemen. *dental-labor* 31: 597-602 (1983)
- COFFEY J P, ANUSAVICE K J, DEHOFF P H, LEE R B, HOJJATIE B: Influence of contraction mismatch and cooling rate on flexural failure of PFM Systems. *J Dent Res* 67: 61-65 (1988)
- DERFERT B: Vergleichende Untersuchung zur Verbundfestigkeit von verschiedenen Metall-Keramik-Kombinationen auf Basis von EM- und NEM-Legierungen in

- Verbindung mit herkömmlicher und niedrigschmelzender Keramik. Med. Diss. (2003).
- DIN: DIN EN ISO 9693 Dentale restaurative Metallkeramiksysteme. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlags GmbH, Berlin, pp (2000)
- DÖRFLER B, FLEETWOOD P W, FISCHER J: Prüfung dentaler Edelmetall-Gusslegierungen. Die Bestimmung der metallkeramischen Verbundfestigkeit mit der Biege-Scher-Prüfung. Quintessenz Zahntechnik 21: 813-824 (1995)
- DORSCH P: Die Charakterisierung des Metall/Keramik-Verbundes mit dem Biegetest nach ISO und DIN. Quintessenz Zahntechnik 16: 709-718 (1990)
- EICHNER K: Gegenwärtiger Stand der werkstoffkundlichen und klinischen Metallkeramik. Teil 1: Entwicklung und Einschätzung. ZWR 106: 477-485 (1997)
- EICHNER K: Methodische und systemische Ursachen von Fehlern in der Metallkeramik. dental-labor 68: 535-543 (2000)
- EICHNER K, KAPPERT H F: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Thieme, Stuttgart, New York, pp (2005)
- ERPENSTEIN H, BORCHARD R, KERSCHBAUM T: Long-term clinical results of galvano-ceramic and glass-ceramic individual crowns. J Prosthet Dent 83: 530-4 (2000)
- FISCHER H, GRÖBEL J, MARX R: Fraktographische Schadensanalyse an Dentalkeramik. Dtsch Zahnärztl Z 55: 667-70 (2000)
- FISCHER H, MARX R: Festigkeit von Dentalkeramik. ZWR 109: 240-244 (2000)
- FISCHER H, WEINZIERL P, WEBER M, MARX R: Bearbeitungsinduzierte Schädigung von Dentalkeramik. Dtsch Zahnärztl Z 54: 484-8 (1999)
- FISCHER J: Vergleich der Brandsimulationen nach DIN 13927 und ISO 9693. Auswirkungen der unterschiedlichen Wärmebehandlungen auf die mechanischen Eigenschaften aufbrennfähiger Edelmetall-Legierungen. Dtsch Zahnärztl Z 52: 800-803 (1997)
- FISCHER J, ZBAREN C, STAWARCZYK B, HAMMERLE C H: The effect of thermal cycling on metal-ceramic bond strength. J Dent 37: 549-53 (2009)
- GARDNER F M, TILLMAN-McCOMBS K W, GASTON M L, RUNYAN D A: In vitro failure load of metal-collar margins compared with porcelain facial margins of metal-ceramic crowns. J Prosthet Dent 78: 1-4 (1997)
- GÜRTLER H, RASER G, DIETZ W, WELKER D, KÜPPER H: Festigkeit und Bruchcharakteristik von 2 Titankeramiksystemen. ZWR 114: 19-26 (2005)
- HAHN R, LÖST C: Konventionelle Dentalporzellane versus bruchzähe Hochleistungskeramiken. Dtsch Zahnärztl Z 47: 659-664 (1992)

- HÄNSEL K, REITEMEIER B, RICHTER G, DÄBRITZ S: Untersuchung des Metall-Keramik-Verbundes der feldspatfreien Dentalkeramik "Solution". Quintessenz Zahntechnik 23: 1503-1510 (1997)
- HERRMANN M, ROTTENEGGER R, TINSCHERT J, MARX R: The effect of corrosive environment on the porcelain-to-metal bond--a fracture mechanics investigation. Dent Mater 8: 2-6 (1992)
- HOMANN F, WADDELL J N, SWAIN M V: Influence of water, loading rate and bonder on the adhesion of porcelain to titanium. J Dent 34: 485-90 (2006)
- HOPP M, BIFFAR R: Besonderheiten der keramischen Verblendung von Galvanostrukturen. Quintessenz Zahntechnik 32: 1036-1050 (2006)
- HOPP M, FISCHER C, TRILCK E, BIFFAR R: Keramische Verblendung von Titan und Titanlegierungen. Quintessenz Zahntechnik 32: 1070-1084 (2006)
- HUANG H H, LIN M C, LEE T H, YANG H W, CHEN F L, WU S C, et al.: Effect of chemical composition of Ni-Cr dental casting alloys on the bonding characterization between porcelain and metal. J Oral Rehabil 32: 206-12 (2005)
- HÜRZELER M B, KOHAL R, FISCHER C, FISCHER J, STRUB J R: In vitro and in vivo evaluation of a new Opaque system for metal ceramic restorations. Int J Prosthodont 8: 142-9 (1995)
- IVOCLAR: Programat P90, Betriebsanleitung, pp
- KAPPERT H F, EICHNER K: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Thieme, Stuttgart, New York, pp (2008)
- KAPPERT H F, RIEDLING W, WEYHMANN J: Eine vergleichende Studie von drei Methoden zur Untersuchung des Metall-Keramik-Verbundes bei NEM-Legierungen. Dtsch Zahnärztl Z 40: 1179-1186 (1985)
- KERSCHBAUM T, PASZYNA C, KLAPP S, MEYER G: Verweilzeit- und Risikofaktorenanalyse von festisitzendem Zahnersatz. Dtsch Zahnärztl Z 46: 20-24 (1991)
- KERSCHBAUM T, SETH M, TEEUWEN U: Verweildauer von kunststoff- und metallkeramisch verblendeten Kronen und Brücken. Dtsch Zahnärztl Z 52: 404-6 (1997)
- KHALOUF E: Einfluss verschiedener Parameter auf die Ergebnisse des Schwickerath-Versuches. Med. Diss. (2003).
- KIM J T, CHO S A: The effects of laser etching on shear bond strength at the titanium ceramic interface. J Prosthet Dent 101: 101-6 (2009)
- KNISCHEWSKI, GROSSE: Grundwissen für Zahntechniker. Verlag Neuer Merkur GmbH, München, pp (1975)
- KRAFT J, SCHÄFER G: Untersuchungen zur Verbundfestigkeit von Metallkeramik/Kunststoff-Systemen. Dtsch Zahnärztl Z 49: 124-8 (1994)

- KRAFT J, STENDER E: Verbund palladiumfreier Au-Legierungen mit niedrigschmelzenden Dentalkeramiken. Dtsch Zahnärztl Z 50: 371-374 (1995)
- LAUER H-C, OTTL P, WEIGL P: Metallkeramik- Einfluss von Verfahrenstechniken auf die klinische Bewertung. Dtsch Zahnärztl Z 53: 167-174 (1998)
- LEIBROCK A, DEGENHART M, BEHR M, ROSENTRITT M, HANDEL G: In vitro study of the effect of thermo- and load-cycling on the bond strength of porcelain repair systems. J Oral Rehabil 26: 130-7 (1999)
- LINDEMANN W: Die Grenzschicht bei aufbrennkeramischen Verbindungen. dental-labor 31: 165-170 (1983)
- LOVGREN R, ANDERSSON B, CARLSSON G E, ODMAN P: Prospective clinical 5-year study of ceramic-veneered titanium restorations with the Procera system. J Prosthet Dent 84: 514-21 (2000)
- LUDWIG K: Lexikon der Zahnmedizinischen Werkstoffkunde. Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin, pp (2005)
- MACKERT J R, JR., WILLIAMS A L: Microcracks in dental porcelain and their behavior during multiple firing. J Dent Res 75: 1484-90 (1996)
- MCLEAN J W: Wissenschaft und Kunst der Dentalkeramik, Band II: Brückenkonstruktionen und Laborarbeiten in der Dentalkeramik. Quintessenz Bibliothek, Berlin, Chicago und Tokio, pp (1981)
- MCLEAN J W: Wissenschaft und Kunst der Dentalkeramik, Monographien I bis IV. Buch- und Zeitschriften-Verlag "Die Quintessenz", Berlin, Chicago Rio, de Janeiro, Tokio, pp (1978)
- OEMUS-MEDIA: Produktübersicht Technik, Keramikbrennöfen. (2007).
- OETTEL H, SCHUMANN H: Metallographie. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim, pp (2005)
- OGINNI A O: Failures related to crowns and fixed partial dentures fabricated in a nigerian dental school. The Journal of Contemporary Dental Practice 6: 1-7 (2005)
- PANG I C, GILBERT J L, CHAI J, LAUTENSCHLAGER E P: Bonding characteristics of low-fusing porcelain bonded to pure titanium and palladium-copper alloy. J Prosthet Dent 73: 17-25 (1995)
- PAPAZOGLU E, BRANTLEY W A: Porcelain adherence vs force to failure for palladium-gallium alloys: a critique of metal-ceramic bond testing. Dent Mater 14: 112-9 (1998)
- PFEIFFER P, KANG-LEE H Y, SCHWICKERATH H: Korrosionsverhalten von 6 aufbrennfähigen Dentallegierungen nach Oberflächenbehandlung. Dtsch Zahnärztl Z 52: 347-50 (1997)

- PFEIFFER P, SCHWICKERATH H: Vergleich der Löslichkeiten von NEM- und Palladiumlegierungen. Dtsch Zahnärztl Z 50: 136-40 (1995)
- PFEIFFER P, SCHWICKERATH H, SOMMER M: Nickelabgabe von Dentallegierungen nach Überhitzen der Schmelze und/oder Keramikbrand. Dtsch Zahnärztl Z 48: 369-71 (1993)
- PJETURSSON B E, SAILER I, ZWAHLEN M, HAMMERLE C H: A systematic review of the survival and complication rates of all-ceramic and metal-ceramic reconstructions after an observation period of at least 3 years. Part I: Single crowns. Clin Oral Implants Res 18 Suppl 3: 73-85 (2007)
- PRASAD A, DAY G P, TOBEY R G: Neues Verfahren zur Bewertung von kompatiblen Keramiklegierungen. dental-labor 39: 1403-1411 (1991)
- PSOCH A, STADLER A, SETZ J M: Bewährung von Keramikverblendungen gefräster Titanrestorationen nach zwölf Monaten Tragezeit. Dtsch Zahnärztl Z 61: 229-232 (2006)
- PUMPE M: Einfluss der Dauer und der Temperatur von Oxidbränden auf die Verbundfestigkeit zwischen Keramik und EMF-Legierungen. (2008).
- REITEMEIER B, HÄNSEL K, KASTNER C, WALTER M H: Prospektive Studie zur Bewährung metallkeramischer Kronen unter Praxisbedingungen: 8-Jahresergebnisse. Dtsch Zahnärztl Z 62: 104-109 (2007)
- REPEL: Gefügeveränderungen einer hochgoldhaltigen Aufbrennlegierung durch den Brennvorgang. Dtsch Zahnärztl Z 41: 259-263 (1986)
- RINKE S, SCHULZ-FINCKE V, SCHÄFERS F, ÖZMUMCU A, HÜLS A: Vergleichende Qualitätsbeurteilung von Einzelzahnrestorationen aus Titan und einer Edelmetall-Legierung. Dtsch Zahnärztl Z 53: 272-275 (1998)
- ROBERTS H W, BERZINS D W, MOORE B K, CHARLTON D G: Metal-ceramic alloys in dentistry: a review. J Prosthodont 18: 188-194 (2009)
- RÖSLER J, HARDERS H, BÄKER M: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden, pp (2003)
- RUDOLPH H, JOHANNES M, LUTHARDT R G: Niederdruckspritzgießen von Hochleistungskeramik. Dtsch Zahnärztl Z 60: 172-5 (2005)
- SAILER I, PJETURSSON B E, ZWAHLEN M, HAMMERLE C H: A systematic review of the survival and complication rates of all-ceramic and metal-ceramic reconstructions after an observation period of at least 3 years. Part II: Fixed dental prostheses. Clin Oral Implants Res 18 Suppl 3: 86-96 (2007)
- SCHÄFER A: Experimentelle Untersuchung über den Einfluss der Brandführung auf Wärmedehnung und Biegefestigkeit keramischer Massen für die Aufbrennkeramik. Quintessenz Zahntechnik 19: 825-832 (1993)

- SCHLÖSSER R, KERSCHBAUM T, AHRENS F J, CRAMER M: Überlebensrate von Teil- und Vollgußkronen. Dtsch Zahnärztl Z 48: 696-8 (1993)
- SCHMITZ K, SCHULMEYER H: Bestimmung der Haftfestigkeit dentaler metallkeramischer Verbundsysteme. dental-labor 23: 1416-1420 (1975)
- SCHNETTGER A, ZYLLA I-M, KAPPERT H F: Prüfung der Verbundfestigkeit metallkeramischer Systeme. Quintessenz Zahntechnik 32: 732-738 (2006)
- SCHWEITZER D M, GOLDSTEIN G R, RICCI J L, SILVA N R, HITTELMAN E L: Comparison of bond strength of a pressed ceramic fused to metal versus feldspathic porcelain fused to metal. J Prosthodont 14: 239-47 (2005)
- SCHWICKERATH H: Das Festigkeitsverhalten von aufbrennfähigen Keramiken. Dtsch Zahnärztl Z 40: 996-1003 (1985)
- SCHWICKERATH H: Dauerfestigkeit von Keramik. Dtsch Zahnärztl Z 41: 264-266 (1986)
- SCHWICKERATH H: Die Bedeutung der mechanischen Eigenschaften von Dentallegierungen. Quintessenz Zahntechnik 19: 285-291 (1993a)
- SCHWICKERATH H: Einfluß mechanischer Eigenschaften der Legierung auf die Belastbarkeit metallkeramischer Restaurationen (Teil I). Zahnärztliche Praxis 5: 6-8 (1995)
- SCHWICKERATH H: Haftung und Verbundfestigkeit. Quintessenz Zahntechnik 20: 859-867 (1994a)
- SCHWICKERATH H: Materialien für die Aufbrennkeramik, ihre Eigenschaften und ihr Verhalten. Dtsch Zahnärztl Z 33: 837-845 (1978)
- SCHWICKERATH H: Neue Keramiksysteme unter Dauerbeanspruchung. Quintessenz Zahntechnik 20: 1495-1499 (1994b)
- SCHWICKERATH H: Zur Passivierung von Dentallegierungen. Quintessenz Zahntechnik 19: 403-408 (1993b)
- SCHWICKERATH H, MOKBEL M A: Grundlagen zur Prüfung des Verbundes Metall-Keramik. Dtsch Zahnärztl Z 38: 949-952 (1983)
- SCHWICKERATH H, MOSLEH I: Verbundfestigkeit und Korrosionslösungen. Dtsch Zahnärztl Z 40: 1126-1128 (1985)
- SEHER J, VIOHL J: In-vitro-Verfärbungen von Kunststoffen durch Farbstoffe und UV-Strahlung. Dtsch Zahnärztl Z 47: 634-636 (1992)
- SEYMOUR K, ZOU L, SAMARAWICKRAMA D Y, LYNCH E: Assessment of shoulder dimensions and angles of porcelain bonded to metal crown preparations. J Prosthet Dent 75: 406-11 (1996)

- SHIRAKURA A, LEE H, GEMINIANI A, ERCOLI C, FENG C: The influence of veneering porcelain thickness of all-ceramic and metal ceramic crowns on failure resistance after cyclic loading. *The Journal of prosthetic dentistry* 101: (2009)
- SIEBERT G K: *Dentallegierungen in der zahnärztlichen Prothetik*. Carl Hanser Verlag, München Wien, pp (1989)
- SMALES R J, HAWTHORNE W S: Long-term survival of extensive amalgams and posterior crowns. *J Dent* 25: 225-7 (1997)
- STEINBERG, SCHMITZ: *Grundriss der Dental-Keramik*. Verlag Neuer Merkur GmbH, München, pp (1968)
- STRIETZEL R: *Der Metall-Keramik-Verbund. Fehler bei der Verarbeitung*. Quintessenz Zahntechnik 28: (2002)
- STRIETZEL R: *Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme*. Verlag Neuer Merkur GmbH, München, pp (2005)
- STRIETZEL R: Edelmetalllegierungen: der Goldstandard, und trotzdem geht es manchmal schief. *Quintessenz Zahntechnik* 33: 966-980 (2007)
- TAUBER M: Gerüstgestaltung für metallkeramische Restaurationen. Teil 3: Gerüstgestaltung für eine parodontale Gesundheit. *Quintessenz Zahntechnik* 32: 672-680 (2006a)
- TAUBER M: Gerüstgestaltung für metallkeramische Restaurationen. Teil 4: Die Verbundfestigkeit von Metall und Keramik. *Quintessenz Zahntechnik* 32: 1052-1061 (2006b)
- TAUBER M, EYKMAN R: Gerüstgestaltung für metallkeramische Restaurationen. Teil 2: Physikalische Hinweise zur Gerüstgestaltung. *Quintessenz Zahntechnik* 32: 384-392 (2006)
- TAUBER M, KAPPERT H: Gerüstgestaltung für metallkeramische Restaurationen. Teil 1: Statik der Gerüstgestaltung. *Quintessenz Zahntechnik* 32: 172-180 (2006)
- VENKATACHALAM B, GOLDSTEIN G R, PINES M S, HITTELMAN E L: Ceramic pressed to metal versus feldspathic porcelain fused to metal: a comparative study of bond strength. *Int J Prosthodont* 22: 94-100 (2009)
- VITA Z: *VITA VM 13, für Metallgerüste im konventionellen WAK-Bereich, Verarbeitungsanleitung*, Bad Säckingen, pp (2007)
- VOSS R: Die Festigkeit metallkeramischer Kronen. *Dtsch Zahnärztl Z* 24: 726-731 (1969)
- VOß R, MEINERS H: *Fortschritte in der Zahnärztlichen Prothetik und Werkstoffkunde*. Carl Hanser Verlag, München Wien, pp (1980)
- WALTER M, BONING K, REPEL P D: Clinical performance of machined titanium restorations. *J Dent* 22: 346-8 (1994)

- WALTER M, REPEL P D, BONING K, FREESMEYER W B: Six-year follow-up of titanium and high-gold porcelain-fused-to-metal fixed partial dentures. J Oral Rehabil 26: 91-6 (1999)
- WEHNERT L, FLECK S, FLECK A, RADLANSKI R J, FREESMEYER W B: Einfluss der Bonder auf die Titan-Keramik-Verbundfestigkeit. Dtsch Zahnärztl Z 64: 28-33 (2009)
- WEILER W W: Grundkurs in Werkstoffkunde. expert-Verlag, Ehningen bei Böblingen, pp (1991)
- YILMAZ H, DINCER C: Comparison of the bond compatibility of titanium and an NiCr alloy to dental porcelain. J Dent 27: 215-22 (1999)
- ZUBLER: VarioPress 300, Prospekt, Ulm-Jengingen, pp
- ZUKUNFT D: Allgemeine Metallkunde. Johann Ambrosius Barth, Leipzig, pp (1985)

## 8 Anhang

### 8.1 Geräte und Zusatzmaterialien

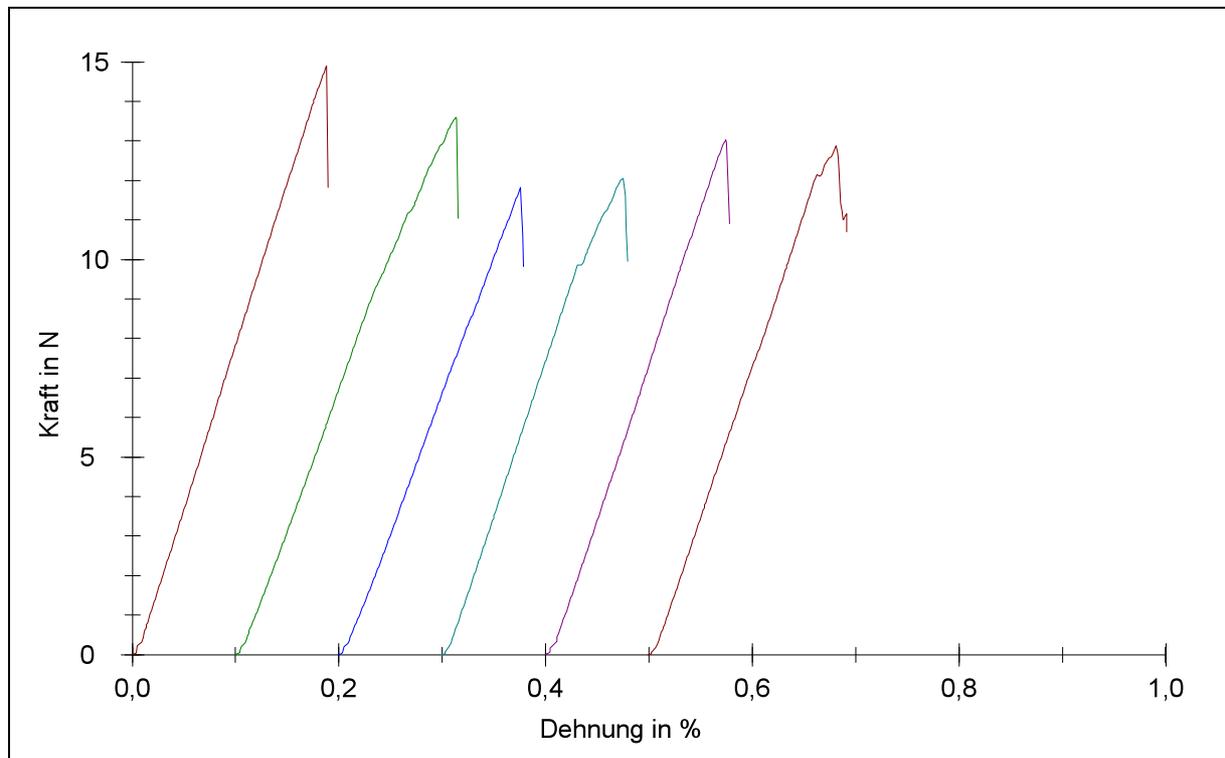
- Schleifpapier mit Körnung 60, 100 und 240 (Fa. Wolfcraft®)
- Schleifhilfe nach ZIMNY (Eigenherstellung)
- Wachsdraht der Stärke 4 mm (Fa. FINO GmbH)
- Muffelsystem BeCe® PRESS (Fa. BEGO)
- BegoSol® HE (Fa. BEGO)
- Bellavest® SH (Fa. BEGO)
- Vakuumanmischgerät WAMIX-2M® (Fa. Wassermann)
- Rüttler KV-36 (Fa. Wassermann)
- Druckverdichter (Fa. Leleux Vertriebs GmbH)
- Vorwärmofen Miditherm® (Fa. BEGO)
- Vollautomatischer Gießautomat Nautilus® CC plus (Fa. BEGO)
- Strahlsand Korox 250 µm (Fa. BEGO)
- Umlaufstrahler Protempomatic® Z (Fa. BEGO)
- Griffelstrahler Topstar® Z3 (Fa. BEGO)
- Trockendampf- und Nassdampfreiniger Triton® SLA (Fa. BEGO)
- Keramikschiebthilfe
- Keramikbrennofen Vacumat® 300 (Fa. VITA)
- Keramikbrennofen Vario Press® 300 (Fa. ZUBLER)
- Keramikbrennofen Programat® P90 (Fa. IVOCLAR)
- Universalprüfmaschine Zwick Z010® (Fa. Zwick GmbH & Co)

### 8.2 Tabellen und Diagramme

## 8.2.1 Brennofen VITA Vacumat® 300

### 8.2.1.1 Wabe

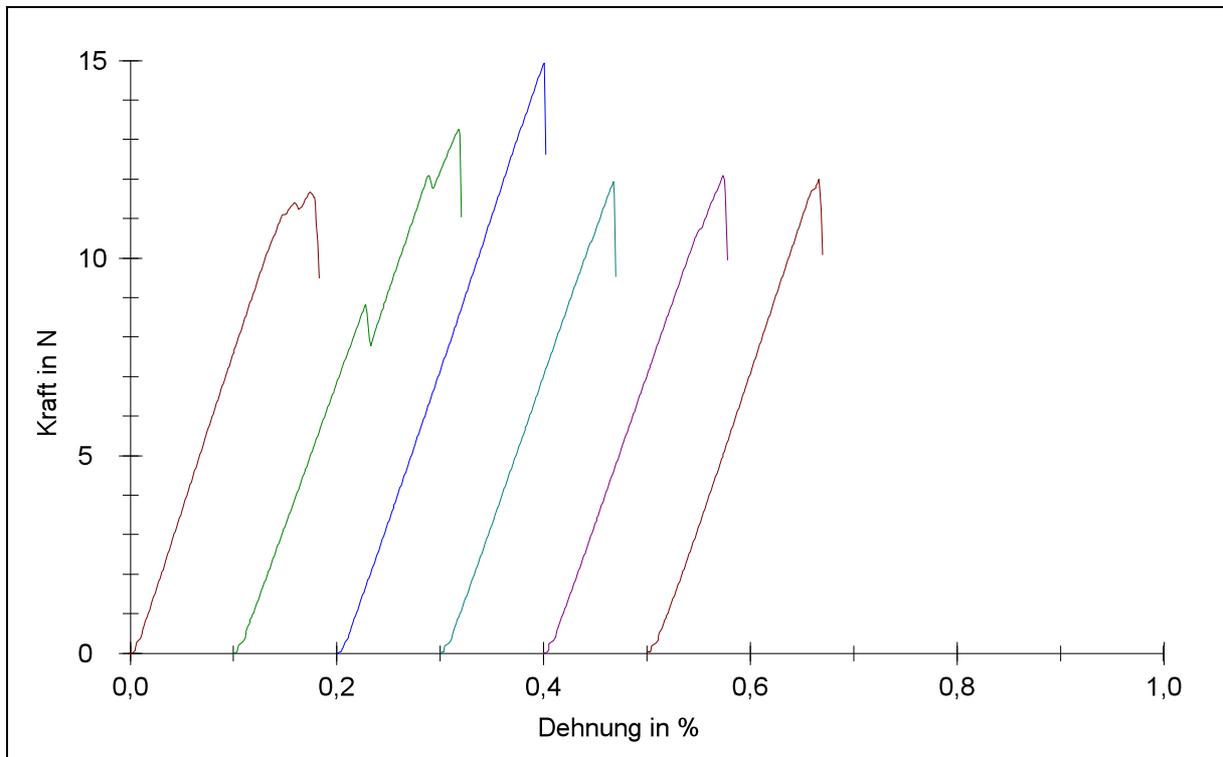
#### Serie hinten



**Abb. 33:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vacumat® 300/Wabe, Serie hinten

**Tab. XLII:** Ergebnisse Vacumat® 300/Wabe, Serie hinten

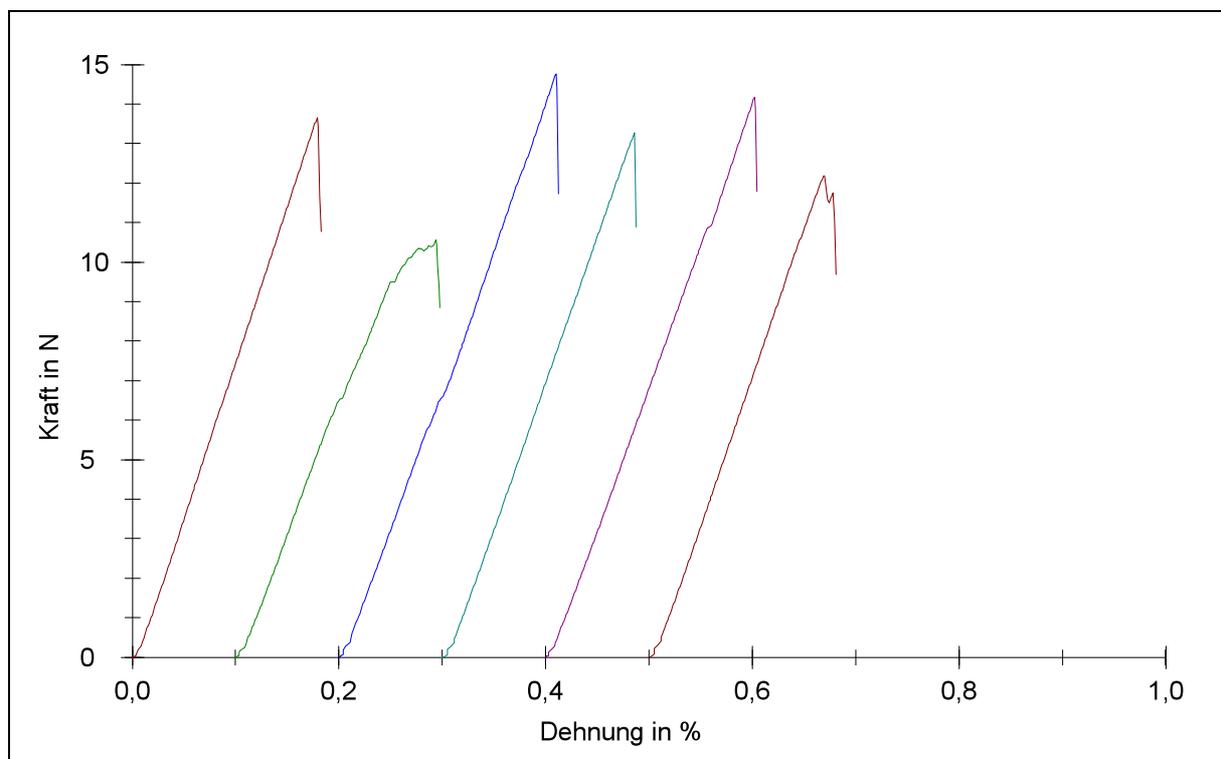
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	A1	14,89	55,11
2	A13	13,61	50,34
3	A25	11,82	43,74
4	C1	12,05	44,59
5	B11	13,03	48,21
6	B17	12,87	47,63

**Serie rechts**

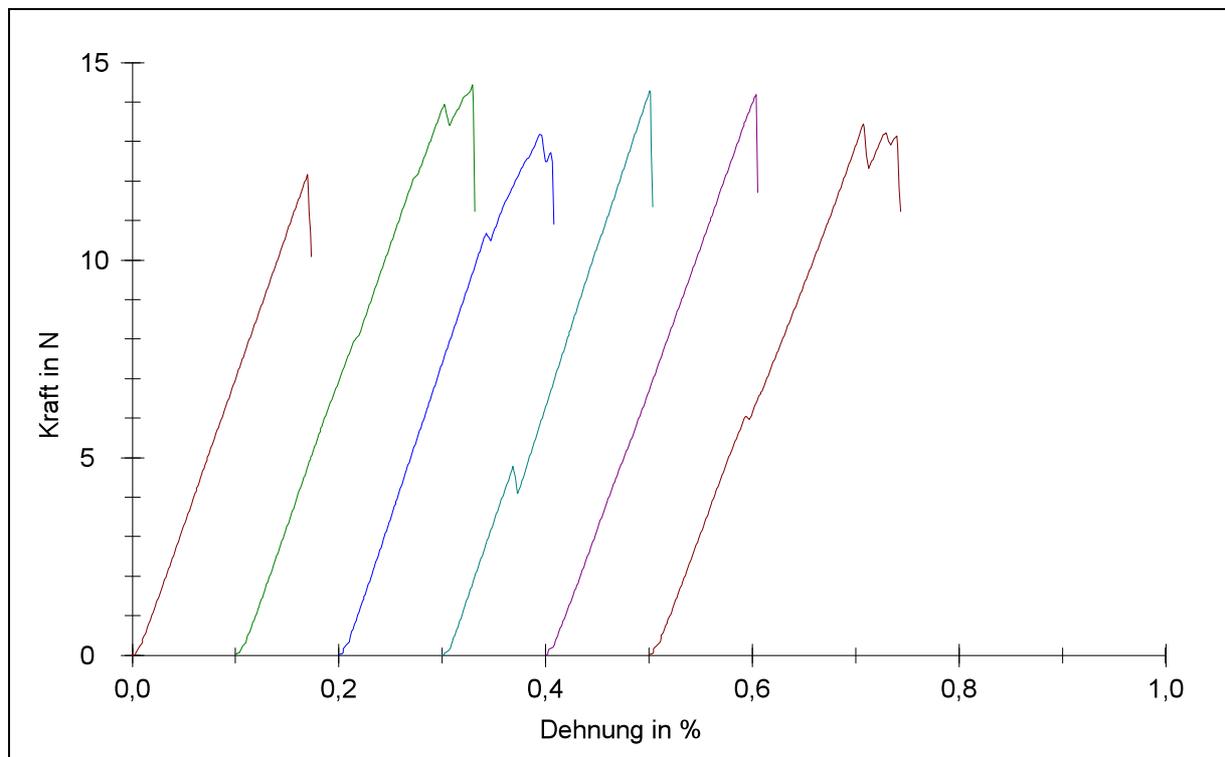
**Abb. 34:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vacumat® 300/Wabe, Serie rechts

**Tab. XLIII:** Ergebnisse Vacumat® 300/Wabe, Serie rechts

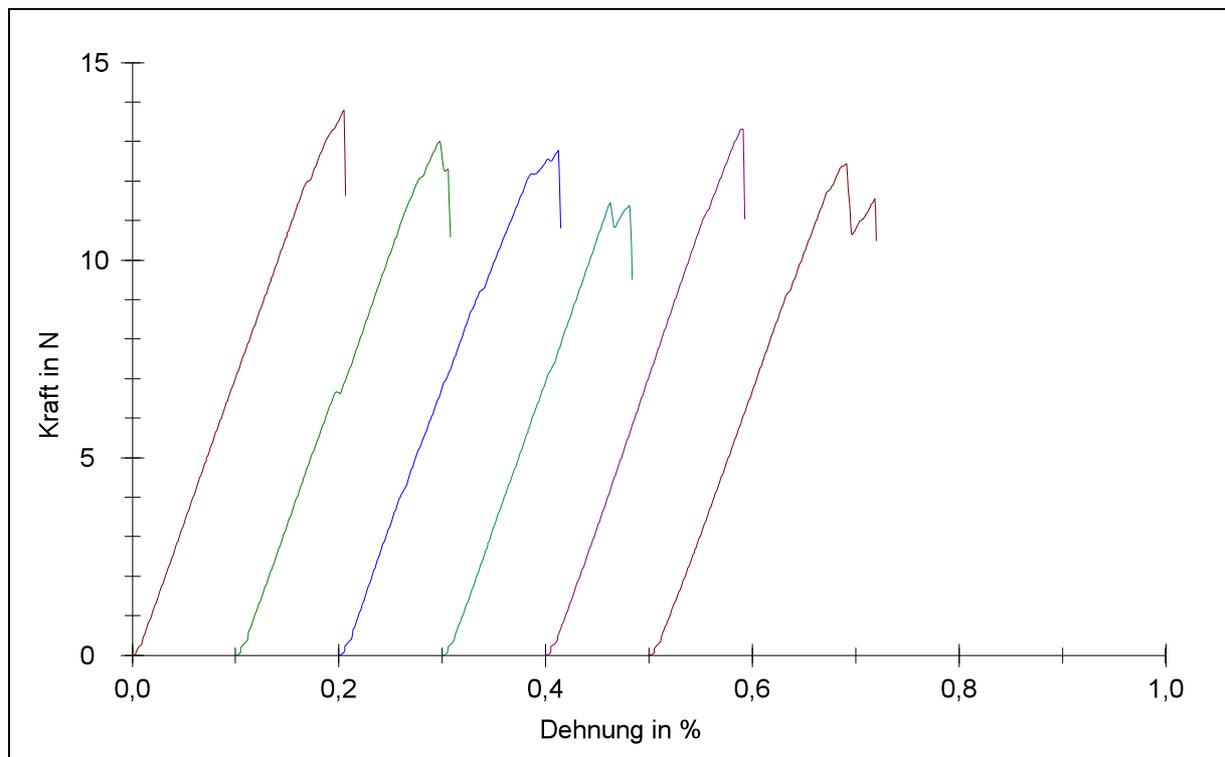
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	A2	11,66	43,16
2	A14	13,25	49,04
3	B23	14,93	55,23
4	C2	11,94	44,20
5	C7	12,08	44,71
6	B18	11,99	44,36

**Serie vorne****Abb. 35:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vacumat® 300/Wabe, Serie vorne**Tab. XLIV:** Ergebnisse Vacumat® 300/Wabe, Serie vorne

Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	A3	13,65	50,49
2	A15	10,56	39,07
3	B24	14,76	54,62
4	C3	13,28	49,13
5	B13	14,18	52,45
6	B19	12,19	45,11

**Serie links****Abb. 36:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vacumat® 300/Wabe, Serie links**Tab. XLV:** Ergebnisse Vacumat® 300/Wabe, Serie links

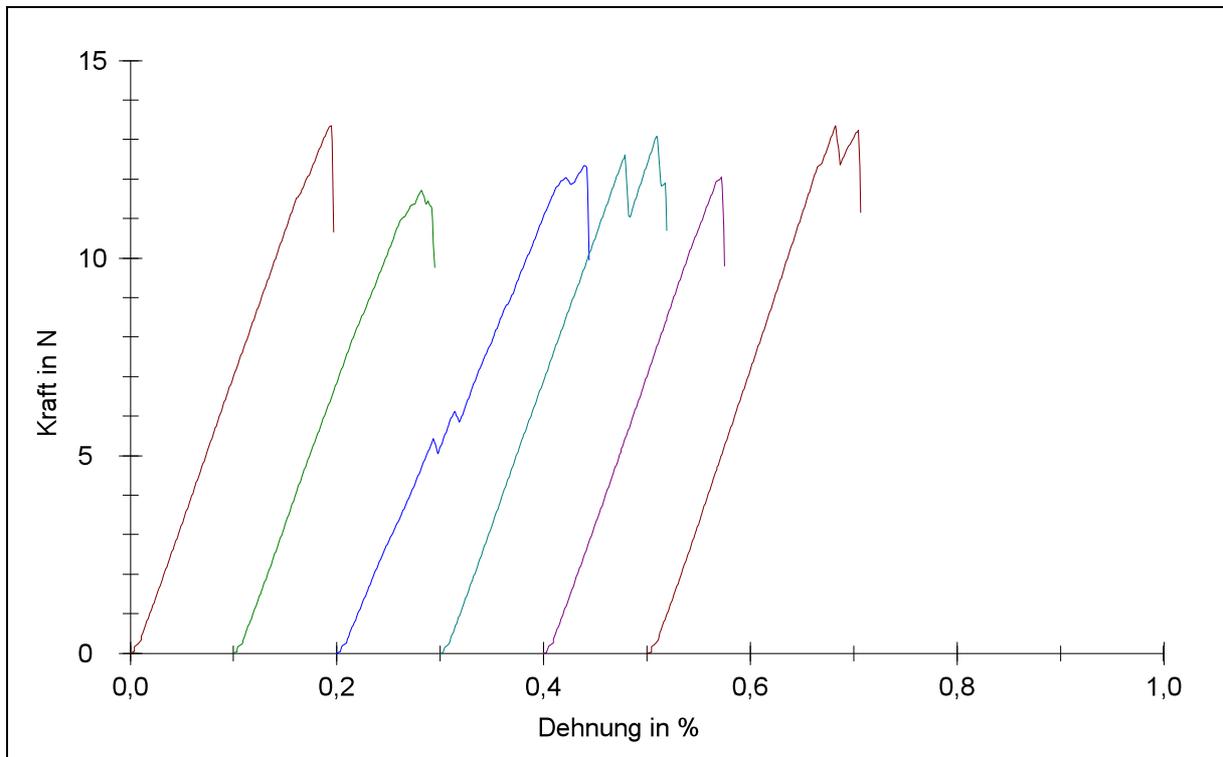
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	A4	12,17	45,04
2	A16	14,43	53,39
3	B2	13,18	48,75
4	C4	14,29	52,86
5	C8	14,20	52,53
6	B20	13,44	49,72

**Serie Mitte1**

**Abb. 37:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vacumat® 300/Wabe, Serie Mitte 1

**Tab. XLVI:** Ergebnisse Vacumat® 300/Wabe, Serie Mitte 1

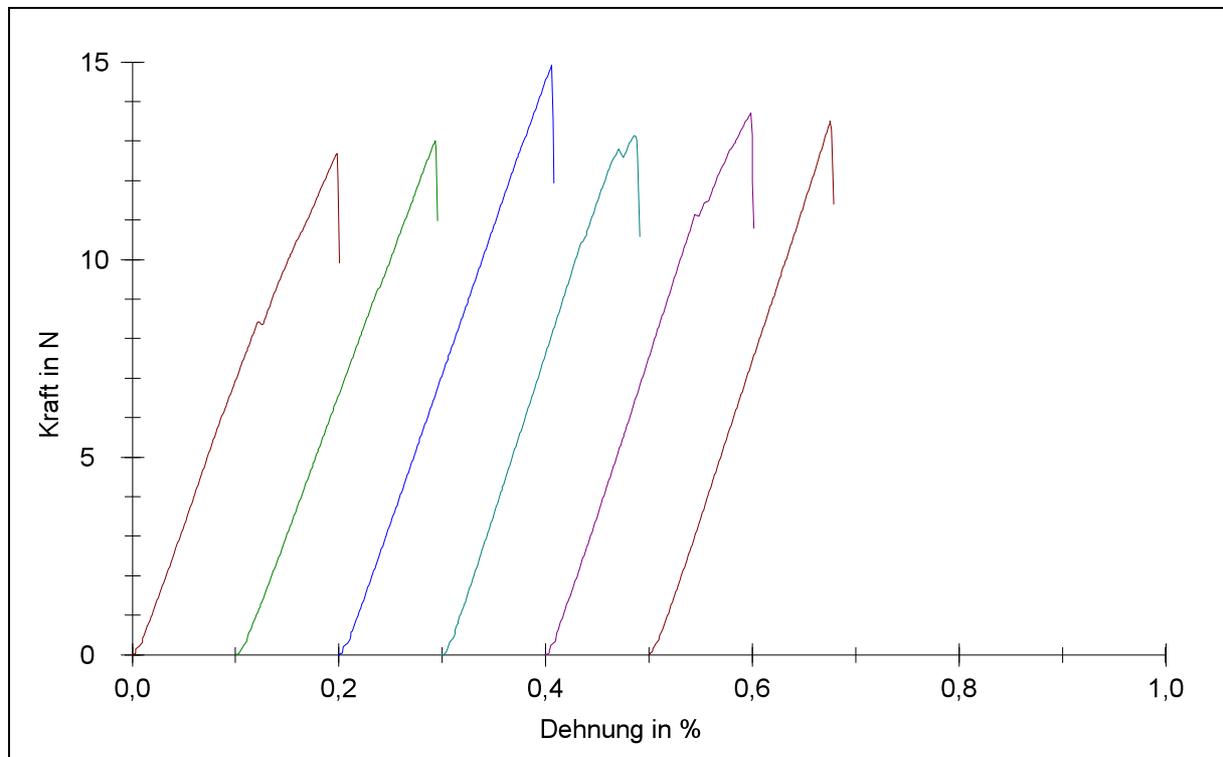
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	A5	13,79	51,02
2	A17	13,01	48,12
3	B3	12,77	47,27
4	C5	11,47	42,43
5	C9	13,32	49,27
6	B21	12,43	46,00

**Serie Mitte 2**

**Abb. 38:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vacumat® 300/Wabe, Serie Mitte 2

**Tab. XLVII:** Ergebnisse Vacumat® 300/Wabe, Serie Mitte 2

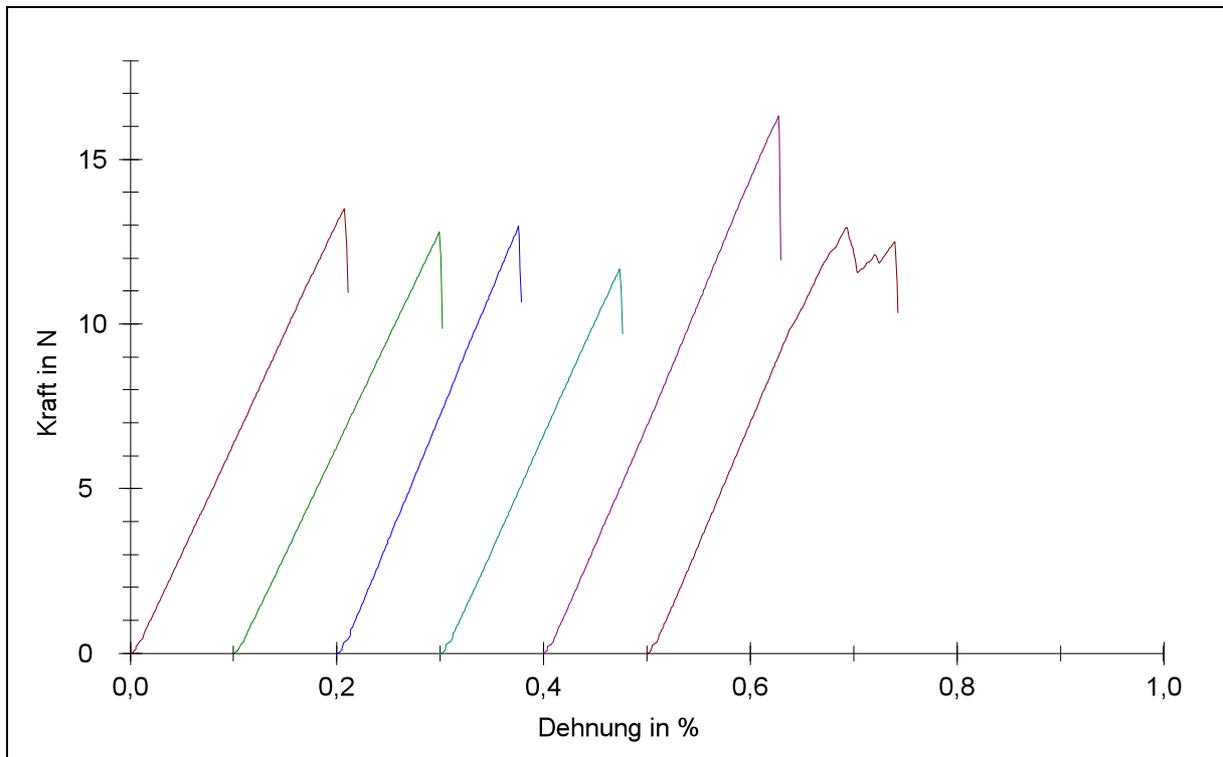
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	A6	13,35	49,41
2	A18	11,71	43,33
3	B4	12,33	45,63
4	C6	13,08	48,41
5	C10	12,06	44,62
6	B22	13,36	49,42

8.2.1.2 Keramik**Serie hinten**

**Abb. 39:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vacumat® 300/Keramik, Serie hinten

**Tab. XLVIII:** Ergebnisse Vacumat® 300/Keramik, Serie hinten

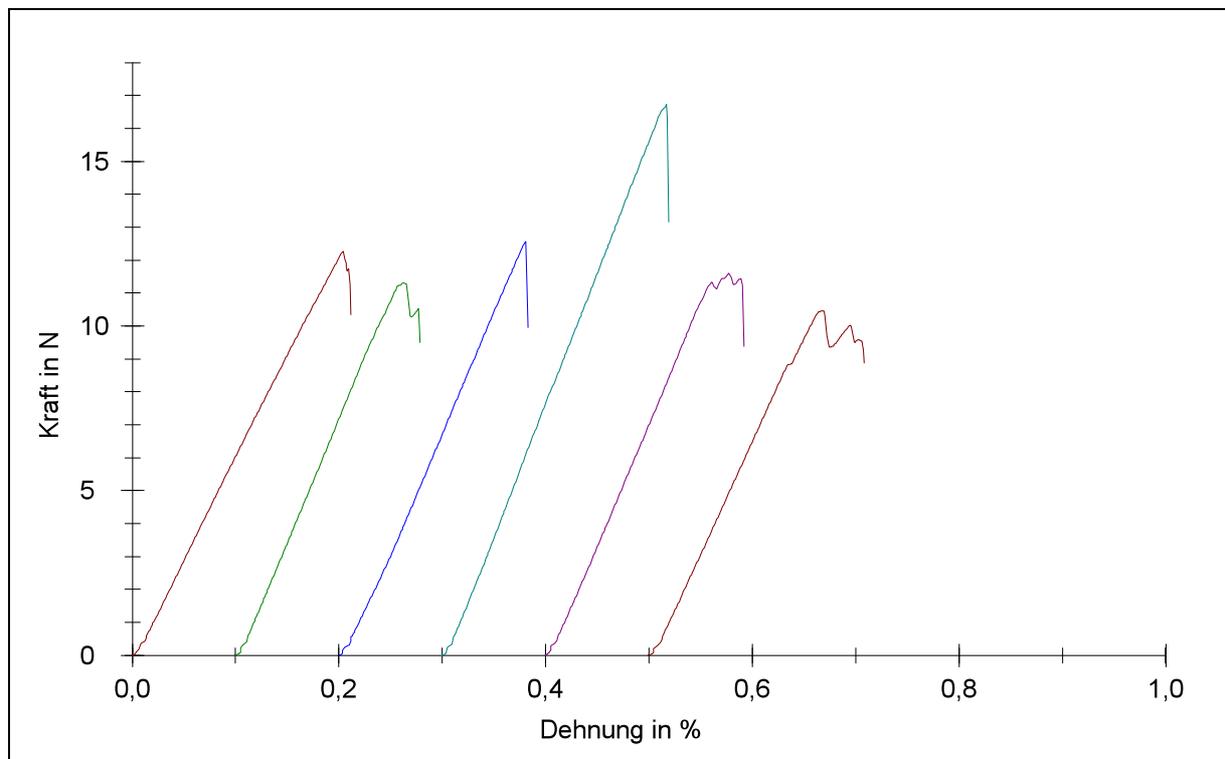
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	D24	12,69	46,94
2	A19	13,00	48,09
3	C23	14,91	55,17
4	D6	13,14	48,60
5	D12	13,72	50,76
6	D18	13,51	49,99

**Serie rechts**

**Abb. 40:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vacumat® 300/Keramik, Serie rechts

**Tab. XLIX:** Ergebnisse Vacumat® 300/Keramik, Serie rechts

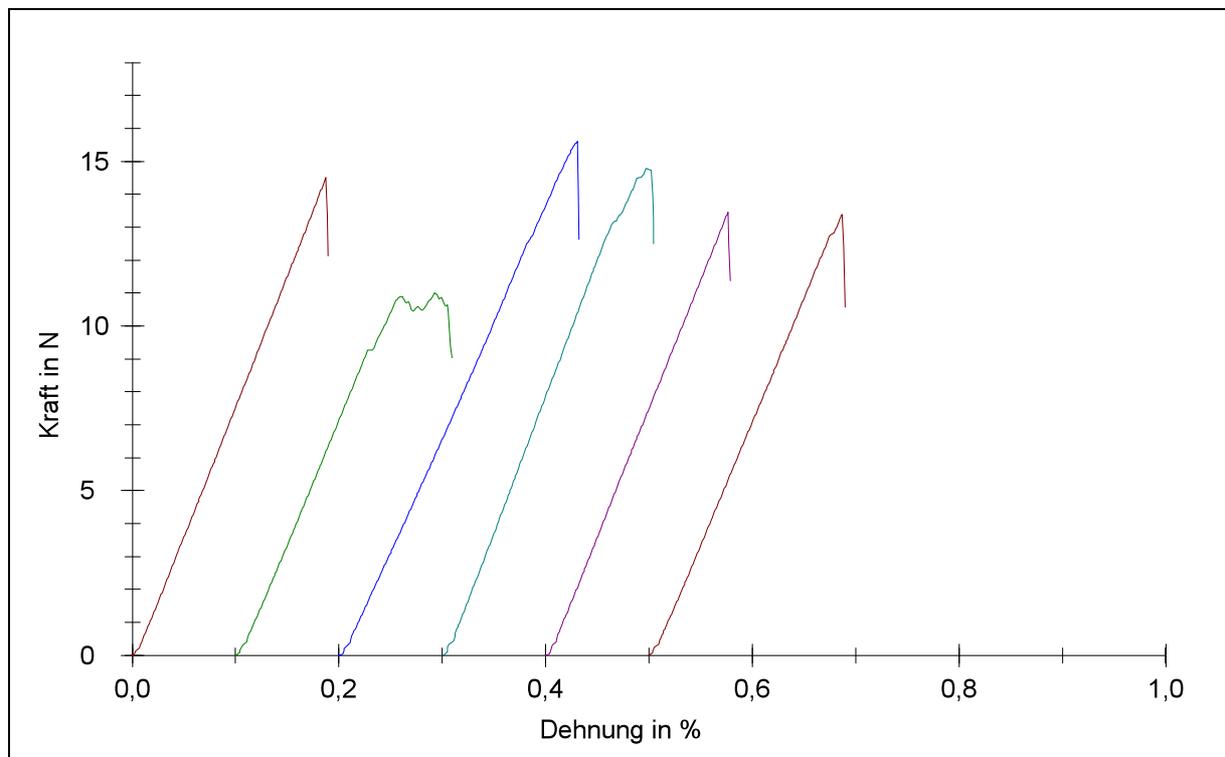
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	A8	13,51	49,97
2	A20	12,79	47,33
3	D1	12,97	47,99
4	D7	11,68	43,20
5	D13	16,31	60,34
6	D19	12,92	47,81

**Serie vorne**

**Abb. 41:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vacumat® 300/Keramik, Serie vorne

**Tab. L:** Ergebnisse Vacumat® 300/Keramik, Serie vorne

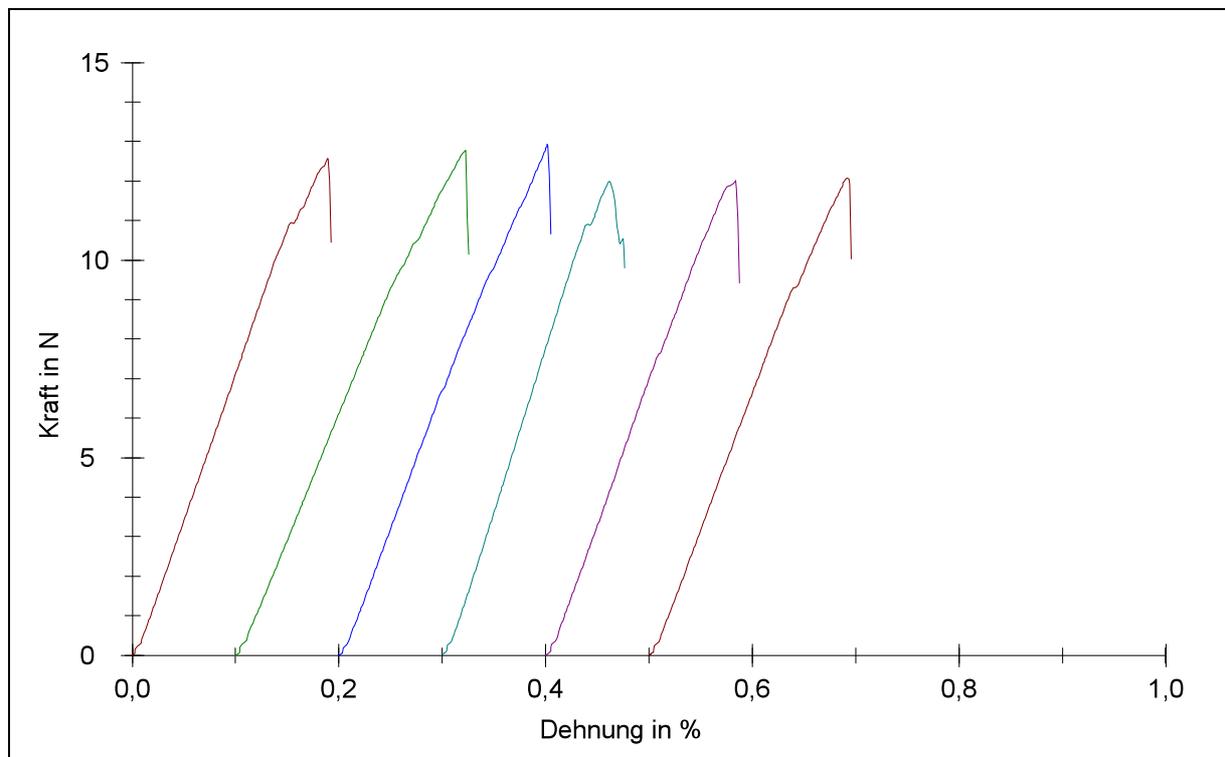
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	A9	12,26	45,35
2	A21	11,30	41,81
3	D2	12,57	46,52
4	D8	16,73	61,89
5	D14	11,60	42,91
6	D20	10,46	38,71

**Serie links**

**Abb. 42:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vacumat® 300/Keramik, Serie links

**Tab. LI:** Ergebnisse Vacumat® 300/Keramik, Serie links

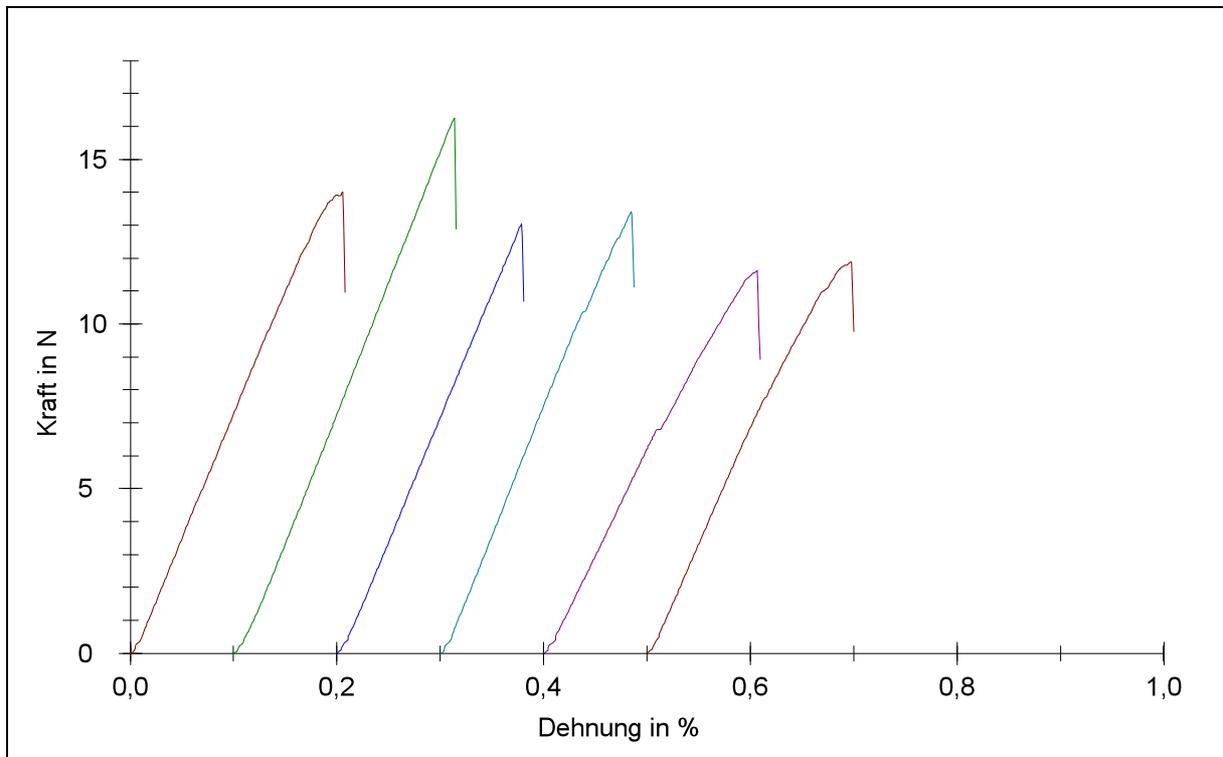
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	A10	14,52	53,71
2	A22	11,00	40,71
3	D3	15,60	57,71
4	D9	14,78	54,68
5	D15	13,46	49,81
6	D21	13,38	49,50

**Serie Mitte1**

**Abb. 43:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vacumat® 300/Keramik, Serie Mitte 1

**Tab. LII:** Ergebnisse Vacumat® 300/Keramik, Serie Mitte 1

Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	A11	12,57	46,52
2	A23	12,78	47,27
3	D4	12,92	47,82
4	D10	11,99	44,35
5	D16	12,01	44,42
6	D22	12,08	44,70

**Serie Mitte 2**

**Abb. 44:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vacumat® 300/Keramik, Serie Mitte 2

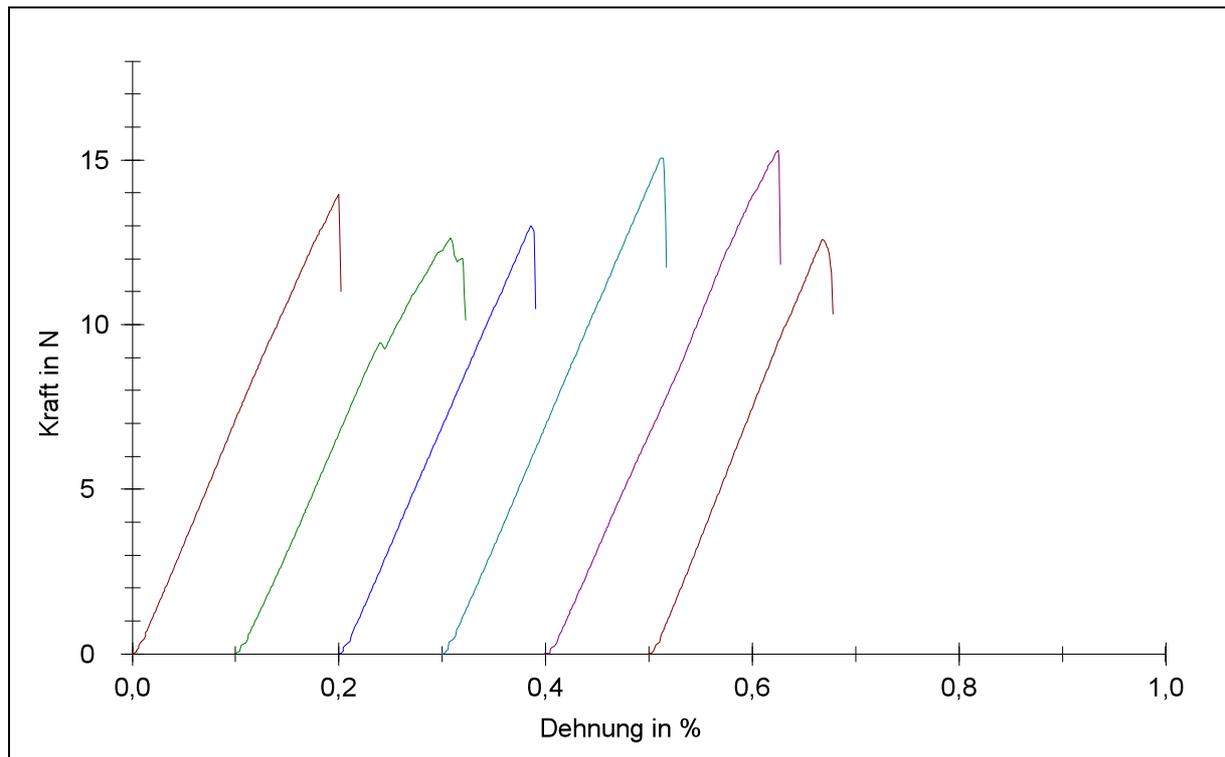
**Tab. LIII:** Ergebnisse Vacumat® 300/Keramik, Serie Mitte 2

Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	A12	14,00	51,80
2	A24	16,24	60,08
3	D5	13,04	48,24
4	D11	13,41	49,60
5	D17	11,62	42,98
6	D23	11,88	43,96

## 8.2.2 Brennofen ZUBLER Vario Press® 300

### 8.2.2.1 Wabe

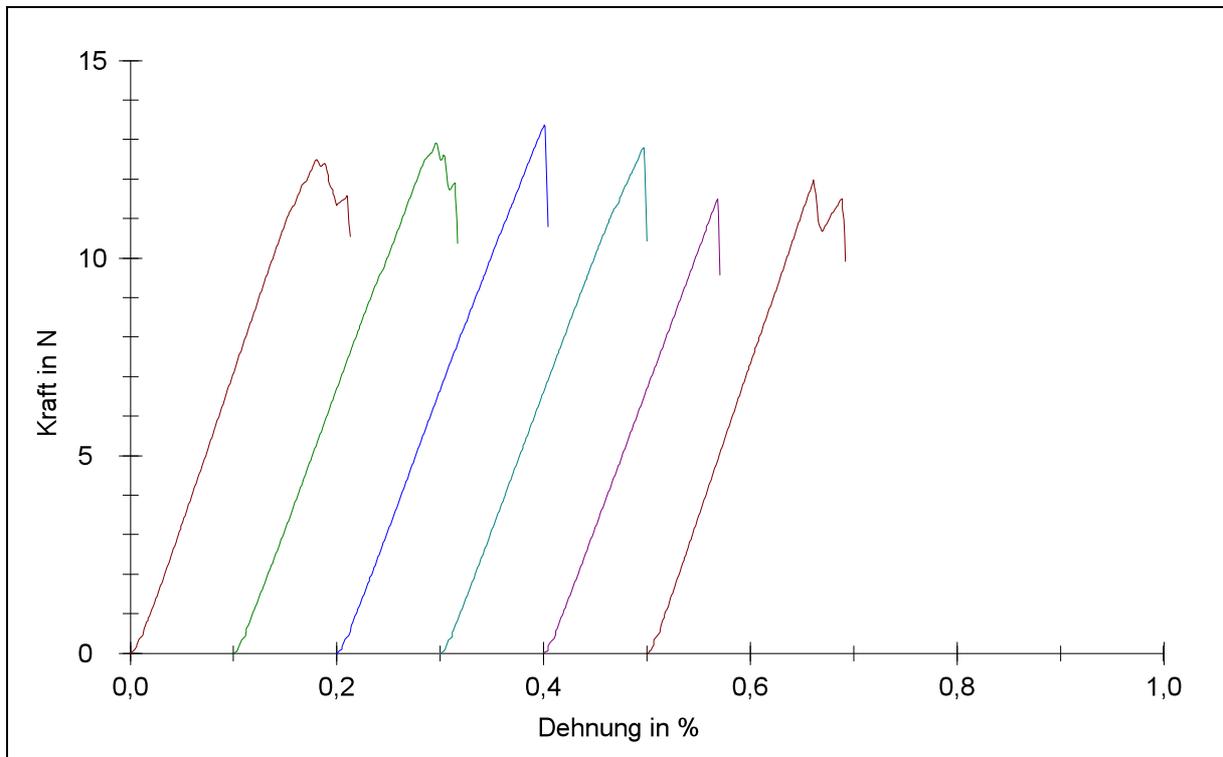
#### Serie hinten



**Abb. 45:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vario Press® 300/Wabe, Serie hinten

**Tab. LIV:** Ergebnisse Vario Press® 300/Wabe, Serie hinten

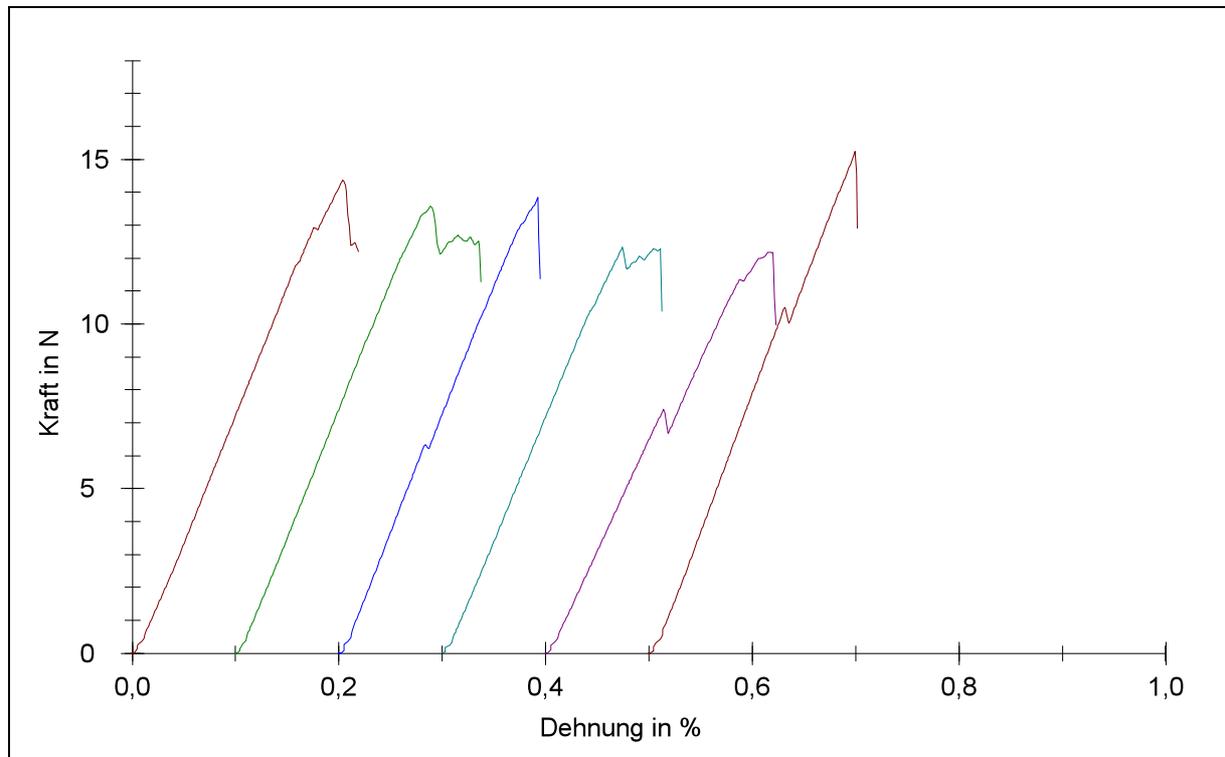
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	I5	13,95	51,62
2	I23	12,62	46,69
3	J4	13,00	48,10
4	J10	15,06	55,74
5	J16	15,30	56,60
6	K2	12,59	46,60

**Serie rechts**

**Abb. 46:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vario Press® 300/Wabe, Serie rechts

**Tab. LV:** Ergebnisse Vario Press® 300/Wabe, Serie rechts

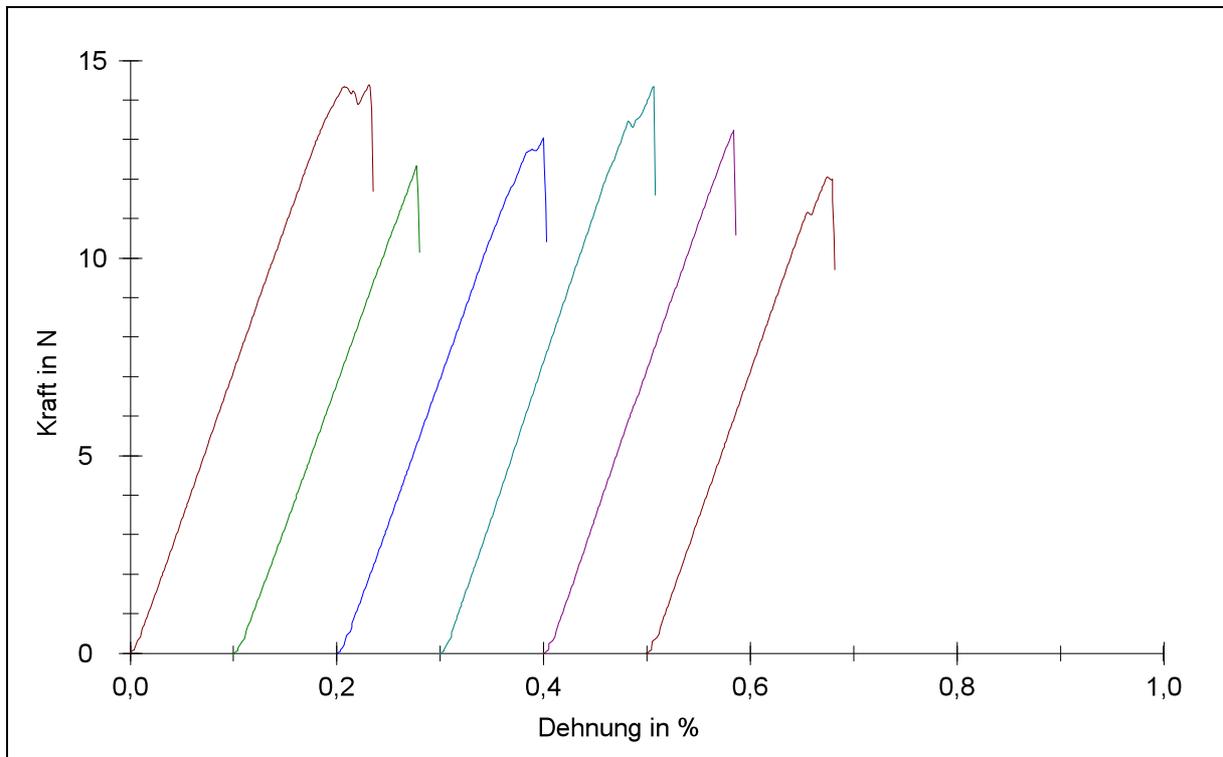
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	I6	12,48	46,19
2	I24	12,90	47,74
3	J5	13,37	49,46
4	J11	12,80	47,36
5	J17	11,49	42,52
6	K3	11,97	44,28

**Serie vorne**

**Abb. 47:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vario Press® 300/Wabe, Serie vorne

**Tab. LVI:** Ergebnisse Vario Press® 300/Wabe, Serie vorne

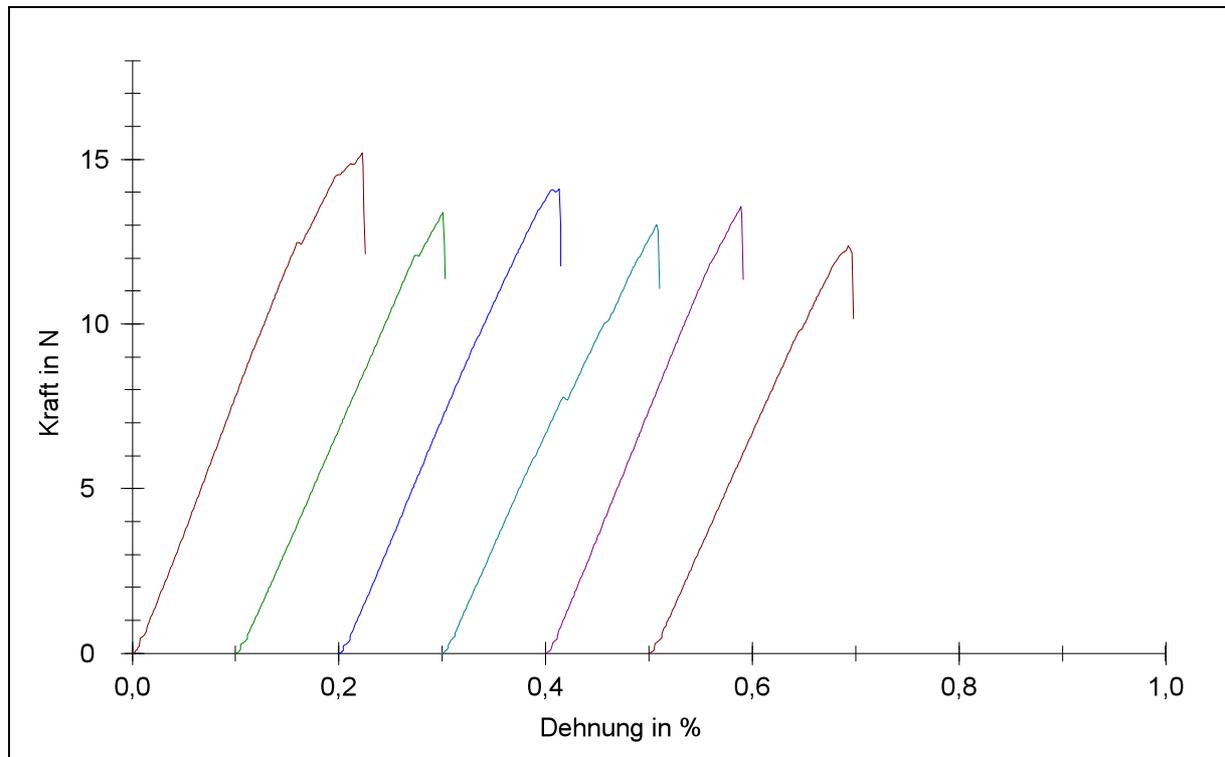
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	I7	14,37	53,15
2	I25	13,56	50,17
3	J6	13,84	51,22
4	J12	12,32	45,60
5	J18	12,18	45,07
6	K4	15,24	56,37

**Serie links**

**Abb. 48:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vario Press® 300/Wabe, Serie links

**Tab. LVII:** Ergebnisse Vario Press® 300/Wabe, Serie links

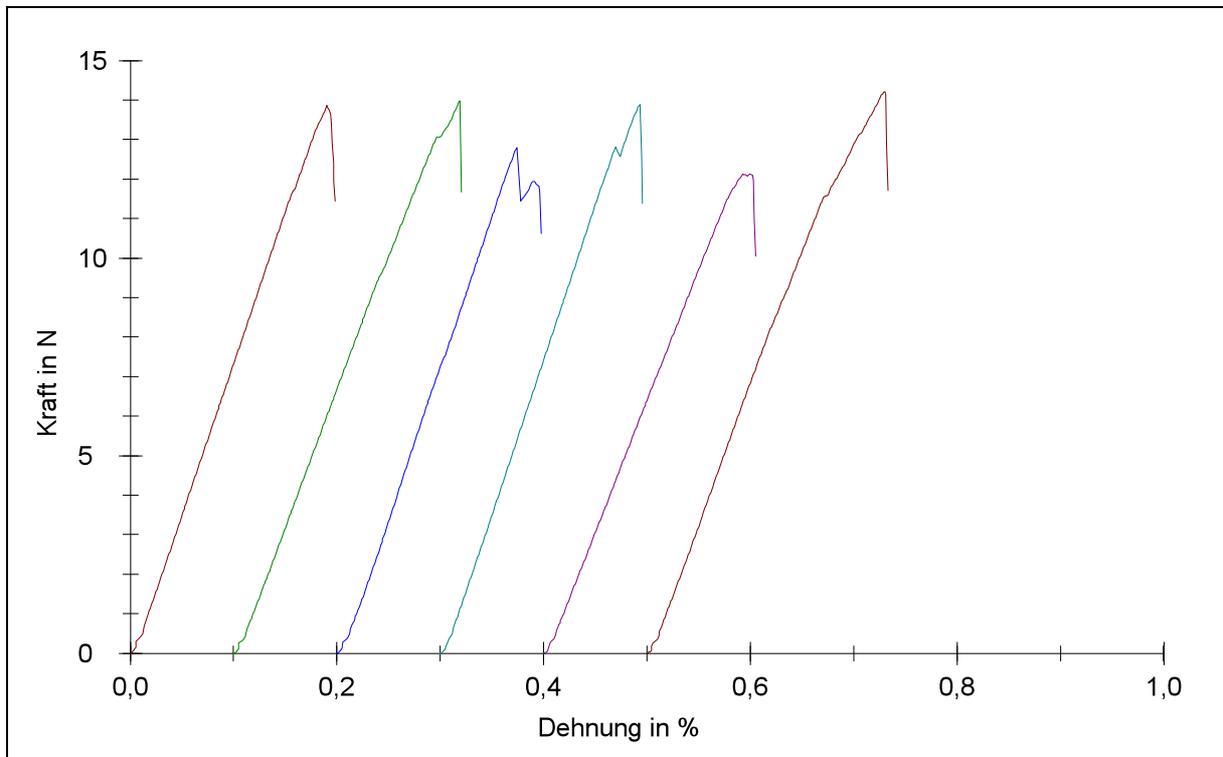
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	I8	14,38	53,20
2	J1	12,34	45,64
3	J7	13,05	48,29
4	J13	14,34	53,04
5	J19	13,23	48,95
6	K5	12,05	44,60

**Serie Mitte1**

**Abb. 49:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vario Press® 300/Wabe, Serie Mitte 1

**Tab. LVIII:** Ergebnisse Vario Press® 300/Wabe, Serie Mitte 1

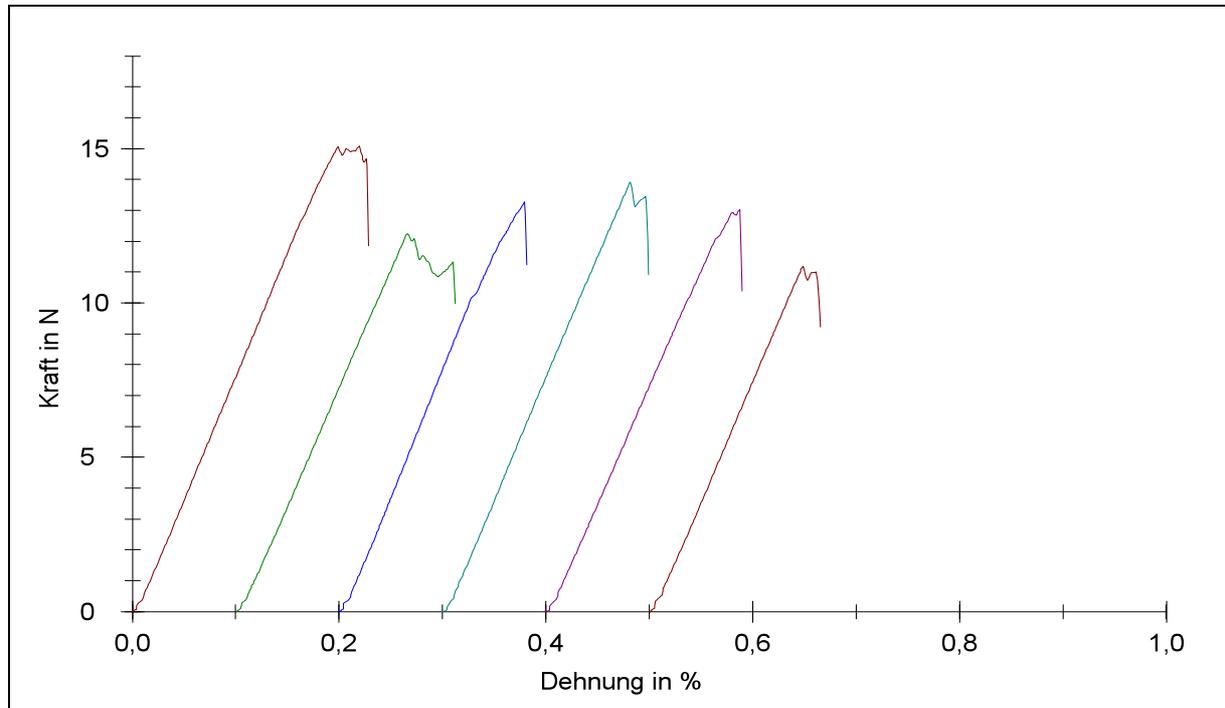
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	I9	15,21	56,26
2	J2	13,39	49,54
3	J8	14,09	52,13
4	J14	13,02	48,19
5	J20	13,57	50,22
6	K6	12,37	45,77

**Serie Mitte 2**

**Abb. 50:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vario Press® 300/Wabe, Serie Mitte 2

**Tab. LIX:** Ergebnisse Vario Press® 300/Wabe, Serie Mitte 2

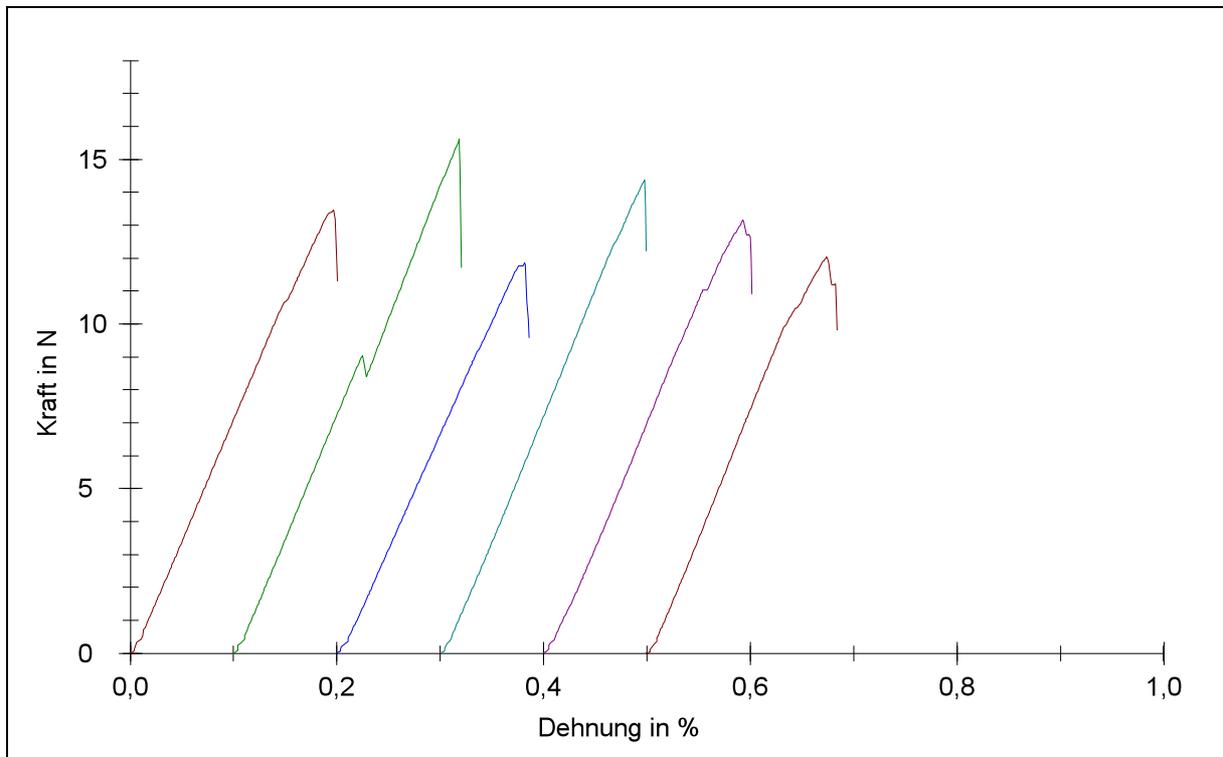
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	I10	13,87	51,31
2	J3	13,99	51,75
3	J9	12,80	47,37
4	J15	13,89	51,38
5	K1	12,12	44,85
6	K7	14,21	52,59

8.2.2.2 Keramik**Serie hinten**

**Abb. 51:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vario Press® 300/Keramik, Serie hinten

**Tab. LX:** Ergebnisse Vario Press® 300/Keramik, Serie hinten

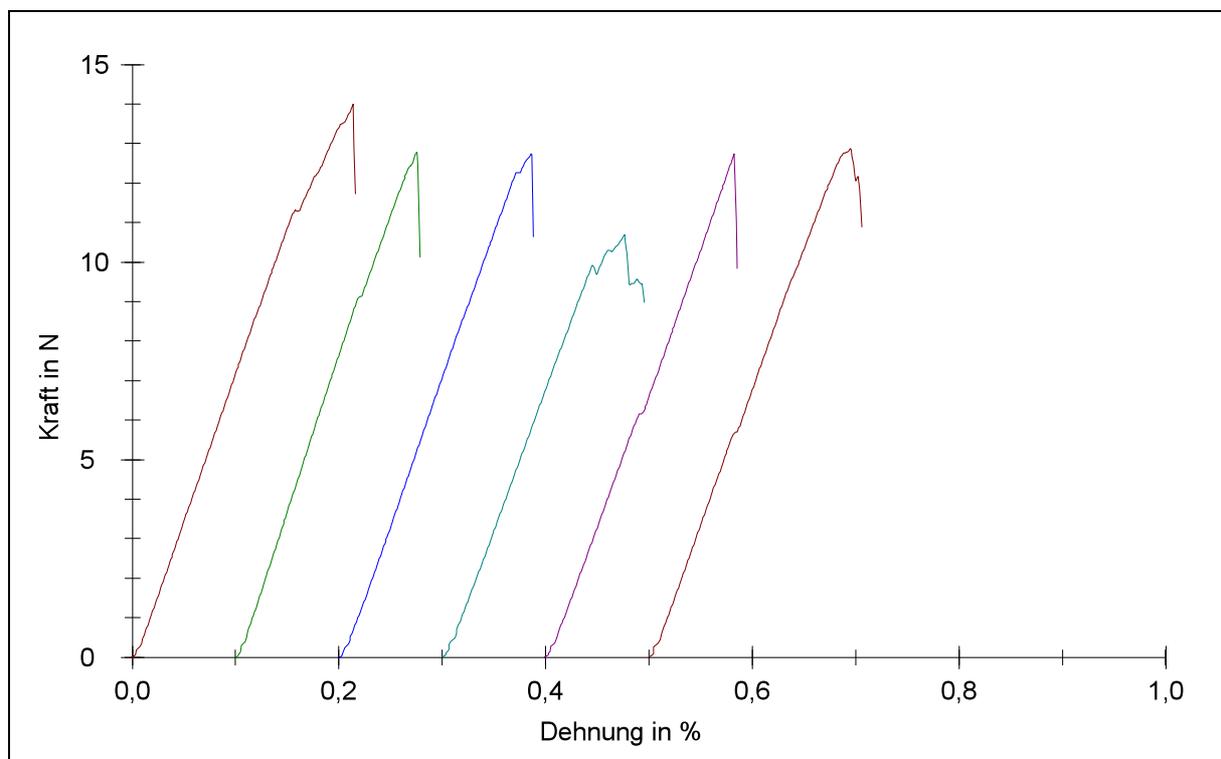
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	G13	15,08	55,80
2	G19	12,24	45,31
3	H5	13,26	49,08
4	H11	13,90	51,44
5	H17	13,01	48,15
6	H23	11,20	41,42

**Serie rechts**

**Abb. 52:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vario Press® 300/Keramik, Serie rechts

**Tab. LXI:** Ergebnisse Vario Press® 300/Keramik, Serie rechts

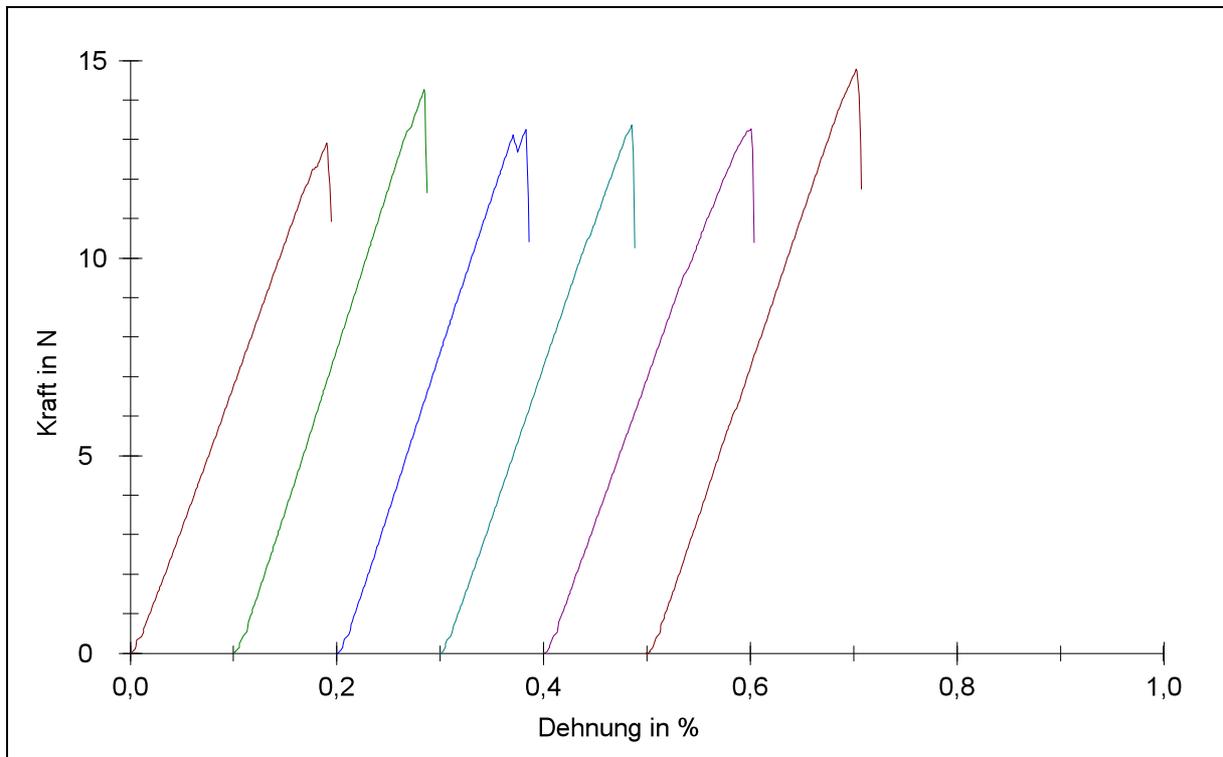
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	G14	13,46	49,80
2	K8	15,60	57,71
3	H6	11,85	43,85
4	H12	14,37	53,18
5	H18	13,16	48,71
6	H24	12,04	44,56

**Serie vorne**

**Abb. 53:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vario Press® 300/Keramik, Serie vorne

**Tab. LXII:** Ergebnisse Vario Press® 300/Keramik, Serie vorne

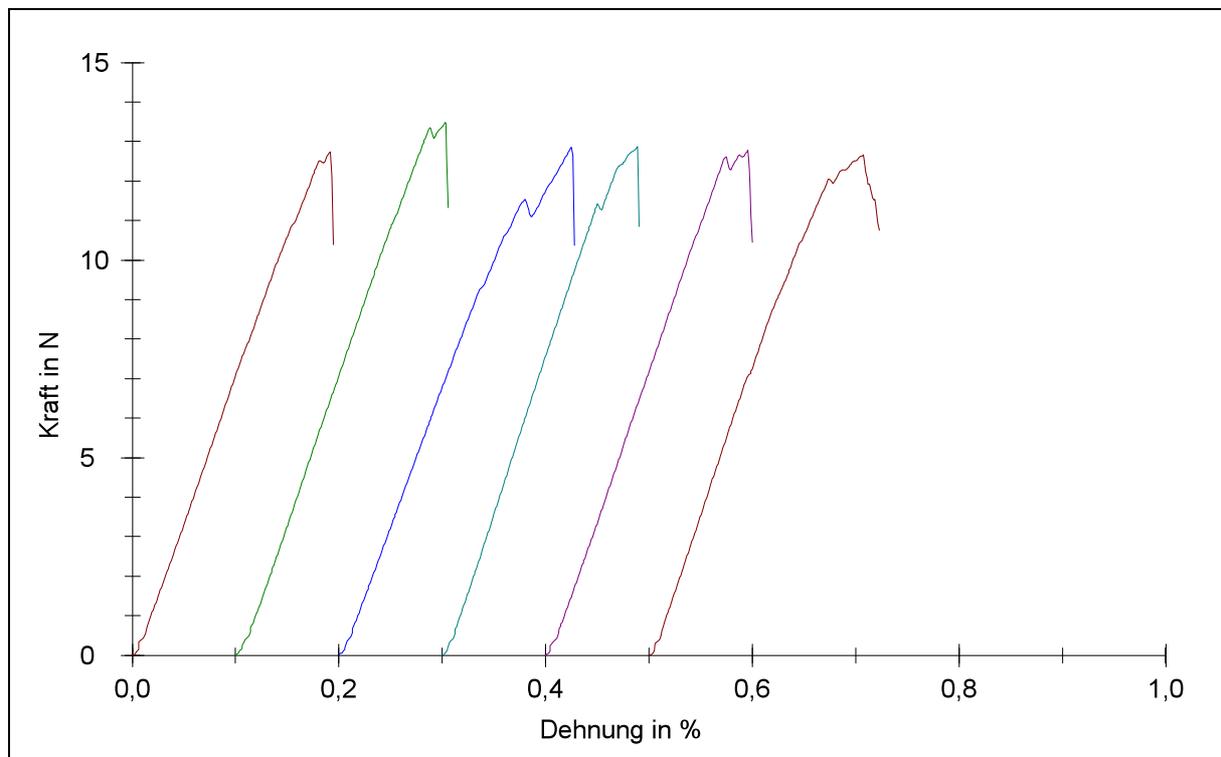
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	G15	13,99	51,77
2	H1	12,78	47,27
3	H7	12,73	47,11
4	H13	10,70	39,59
5	H19	12,75	47,16
6	I1	12,87	47,62

**Serie links**

**Abb. 54:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vario Press® 300/Keramik, Serie links

**Tab. LXIII:** Ergebnisse Vario Press® 300/Keramik, Serie links

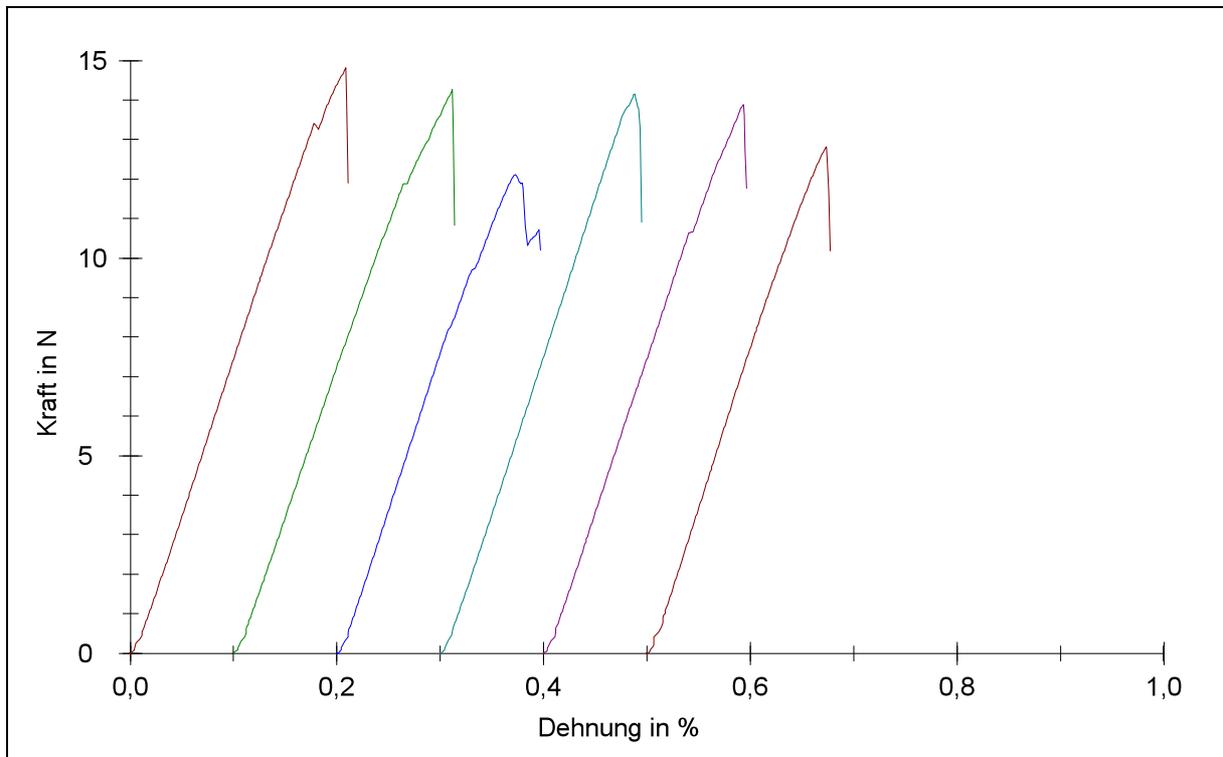
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	G16	12,91	47,77
2	H2	14,26	52,78
3	H8	13,25	49,04
4	H14	13,37	49,45
5	H20	13,27	49,09
6	I2	14,78	54,69

**Serie Mitte 1**

**Abb. 55:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vario Press® 300/Keramik, Serie Mitte 1

**Tab. LXIV:** Ergebnisse Vario Press® 300/Keramik, Serie Mitte 1

Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	G17	12,73	47,12
2	H3	13,47	49,85
3	H9	12,86	47,57
4	H15	12,87	47,63
5	H21	12,77	47,25
6	I3	12,66	46,85

**Serie Mitte 2**

**Abb. 56:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Vario Press® 300/Keramik, Serie Mitte 2

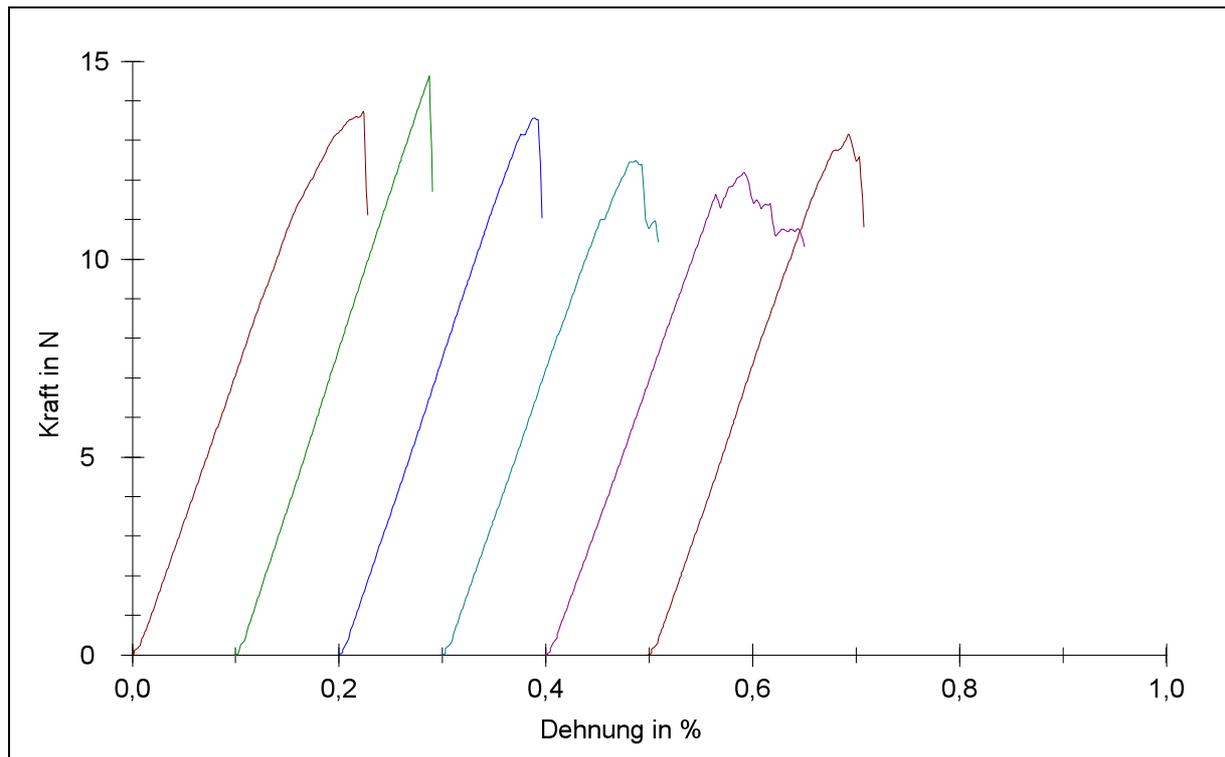
**Tab. LXV:** Ergebnisse Vario Press® 300/Keramik, Serie Mitte 2

Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	G18	14,83	54,86
2	H4	14,26	52,76
3	H10	12,11	44,80
4	H16	14,14	52,33
5	H22	13,89	51,40
6	I4	12,82	47,44

## 8.2.3 Brennofen IVOCLAR Programat® P90

### 8.2.3.1 Wabe

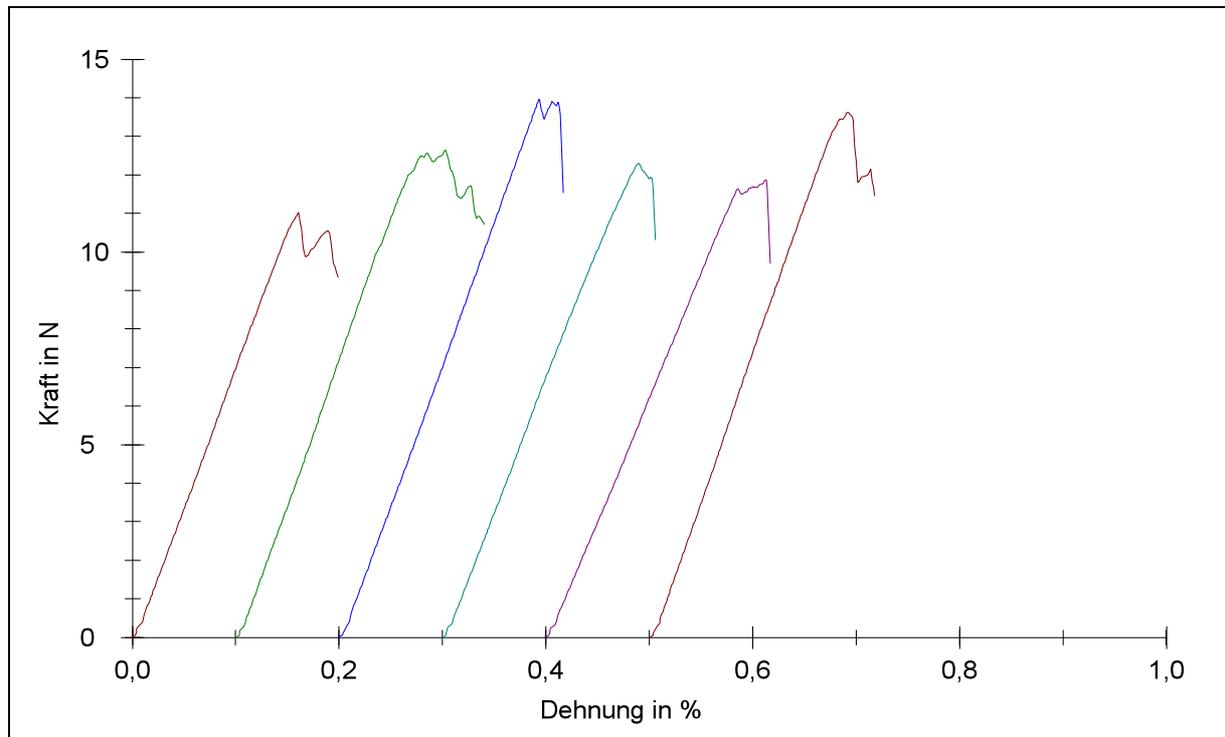
#### Serie hinten



**Abb. 57:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Wabe, Serie hinten

**Tab. LXVI:** Ergebnisse Programat® P90/Wabe, Serie hinten

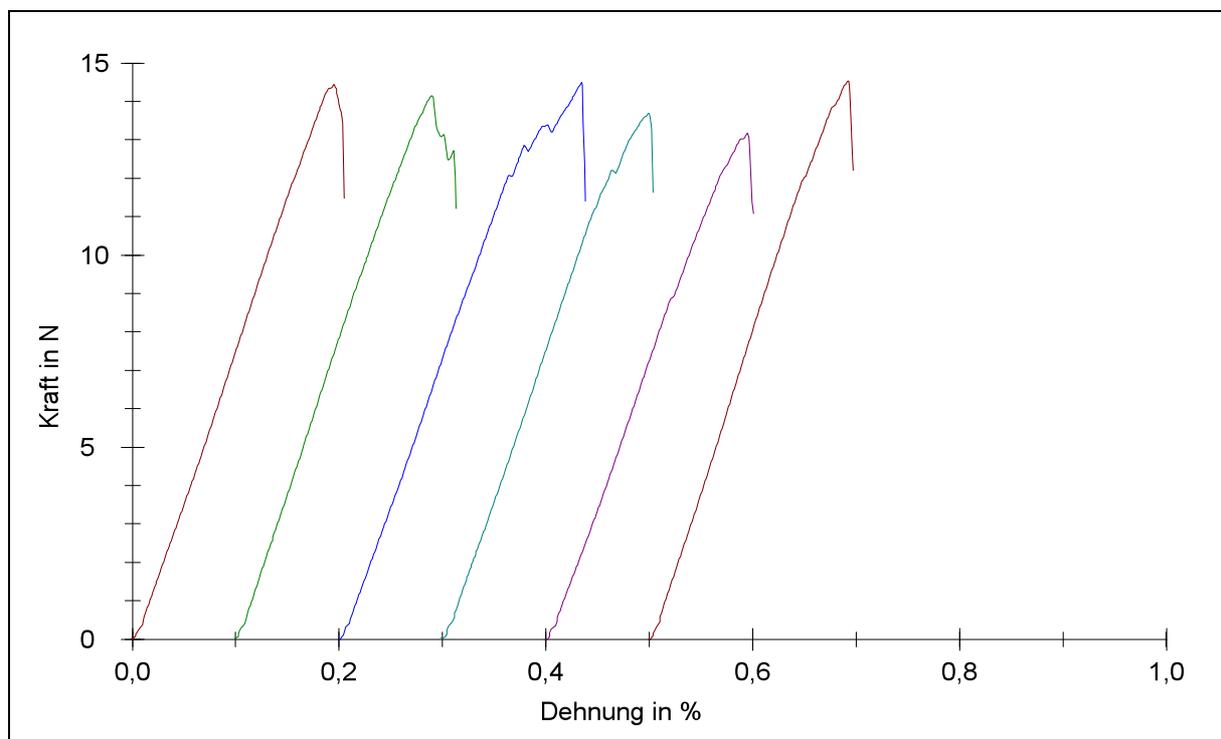
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	E24	13,73	50,80
2	F4	14,63	54,13
3	F10	13,56	50,16
4	F16	12,49	46,20
5	G1	12,18	45,08
6	G7	13,16	48,70

**Serie rechts**

**Abb. 58:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Wabe, Serie rechts

**Tab. LXVII:** Ergebnisse Programat® P90/Wabe, Serie rechts

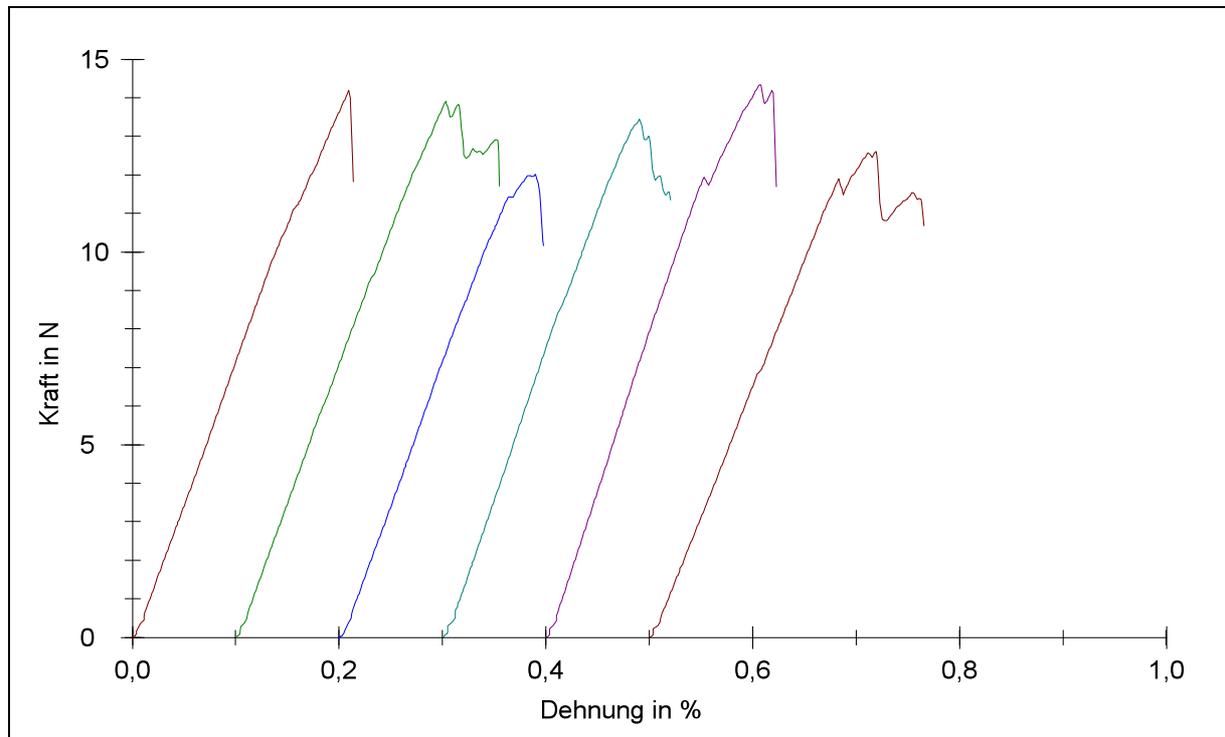
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	E25	11,03	40,81
2	F5	12,65	46,80
3	F11	13,96	51,65
4	F17	12,29	45,49
5	G2	11,87	43,91
6	G8	13,62	50,40

**Serie vorne**

**Abb. 59:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Wabe, Serie vorne

**Tab. LXVIII:** Ergebnisse Programat® P90/Wabe Serie vorne

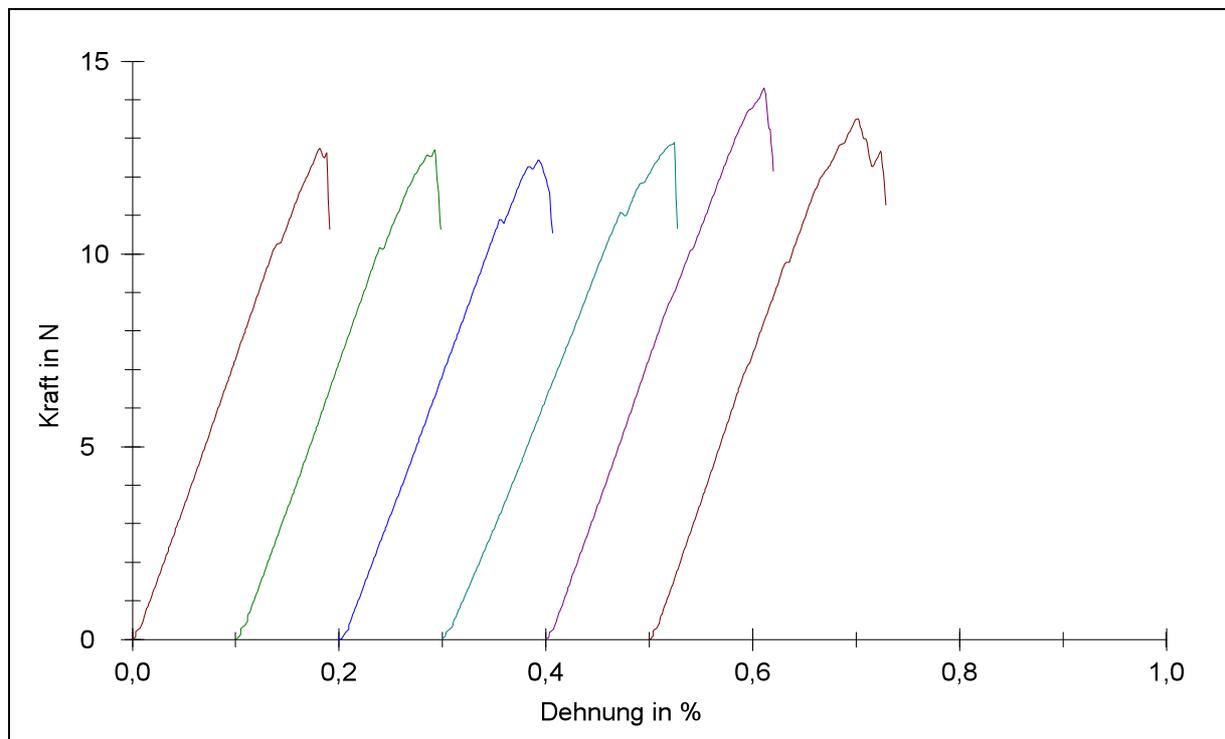
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	E26	14,43	53,40
2	F6	14,15	52,35
3	F12	14,49	53,61
4	F18	13,70	50,67
5	G3	13,17	48,74
6	G9	14,54	53,78

**Serie links**

**Abb. 60:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Wabe, Serie links

**Tab. LXIX:** Ergebnisse Programat® P90/Wabe, Serie links

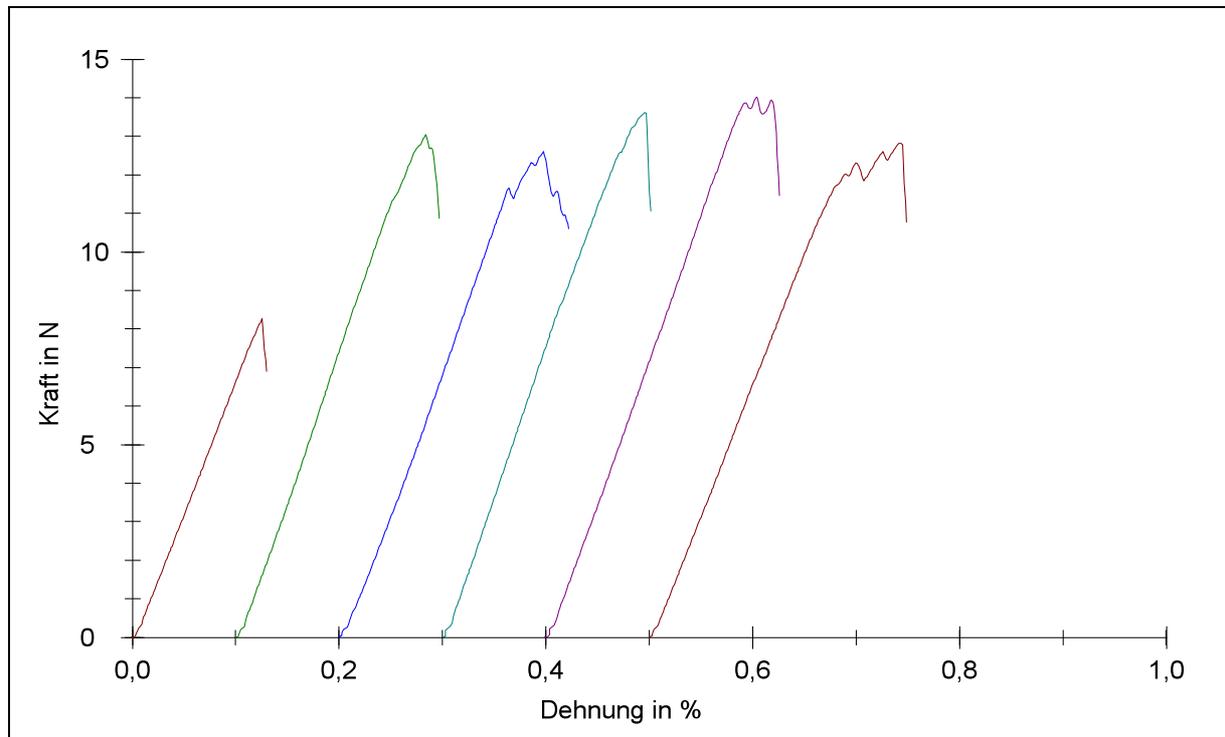
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	F1	14,19	52,52
2	F7	13,90	51,44
3	F13	12,00	44,41
4	F19	13,45	49,77
5	G4	14,34	53,06
6	G10	12,60	46,60

**Serie Mitte1**

**Abb. 61:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Wabe, Serie Mitte 1

**Tab. LXX:** Ergebnisse Programat® P90/Wabe, Serie Mitte 1

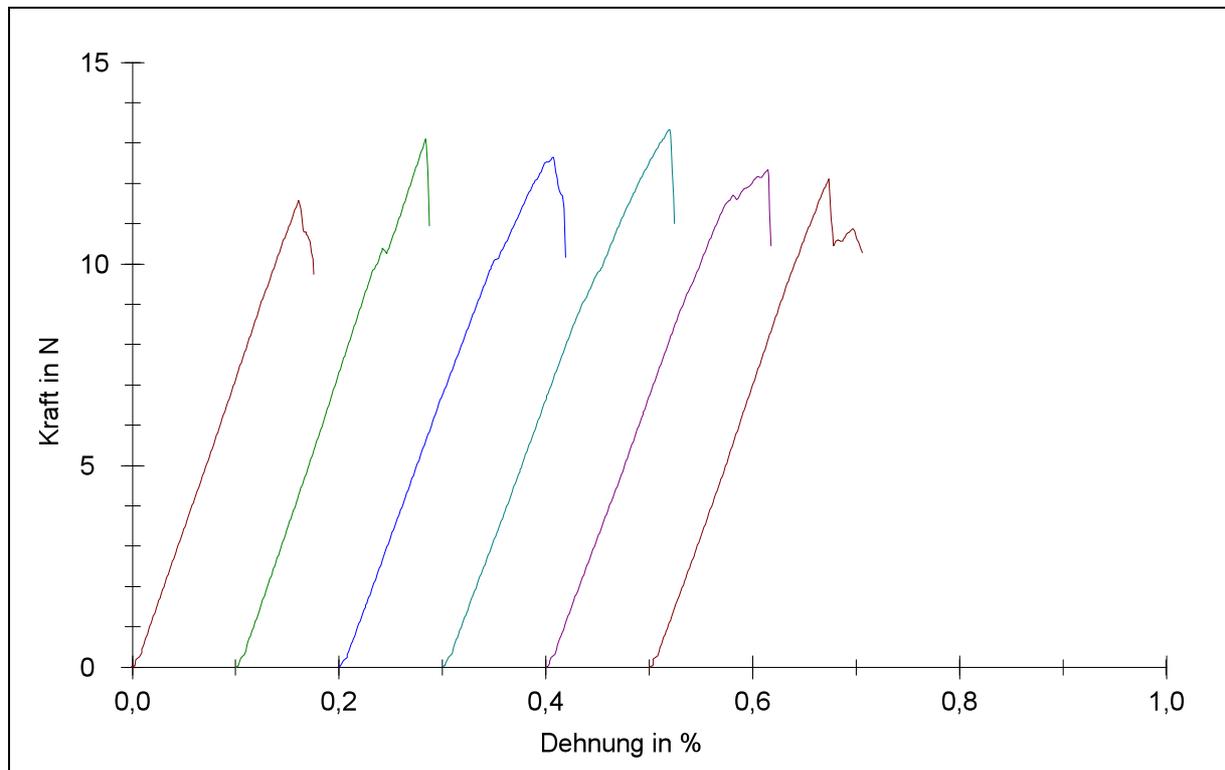
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	F2	12,74	47,16
2	F8	12,69	46,96
3	F14	12,43	46,00
4	F20	12,88	47,67
5	G5	14,30	52,92
6	G11	13,51	49,99

**Serie Mitte 2**

**Abb. 62:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Wabe, Serie Mitte 2

**Tab. LXXI:** Ergebnisse Programat® P90/Wabe, Serie Mitte 2

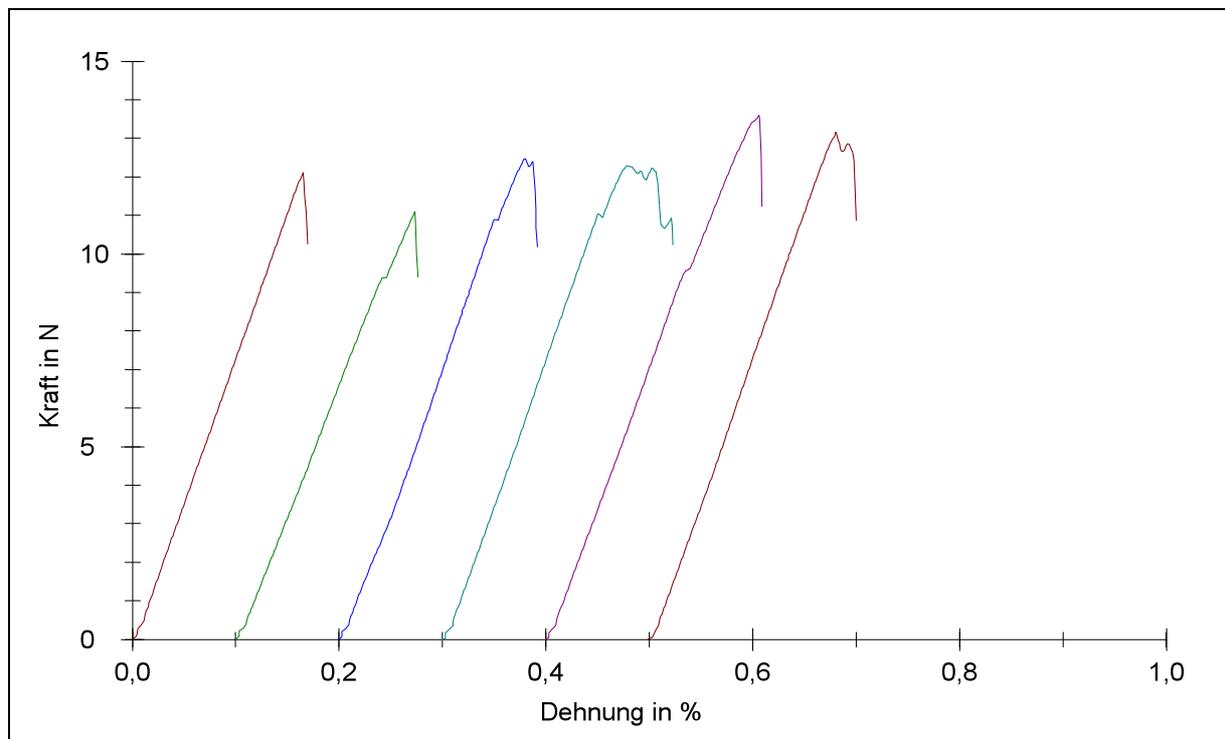
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	F3	8,27	30,59
2	F9	13,04	48,24
3	F15	12,60	46,61
4	F21	13,61	50,36
5	G6	14,02	51,86
6	G12	12,81	47,40

8.2.3.2 Keramik**Serie hinten**

**Abb. 63:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Keramik, Serie hinten

**Tab. LXXII:** Ergebnisse Programat® P90/Keramik, Serie hinten

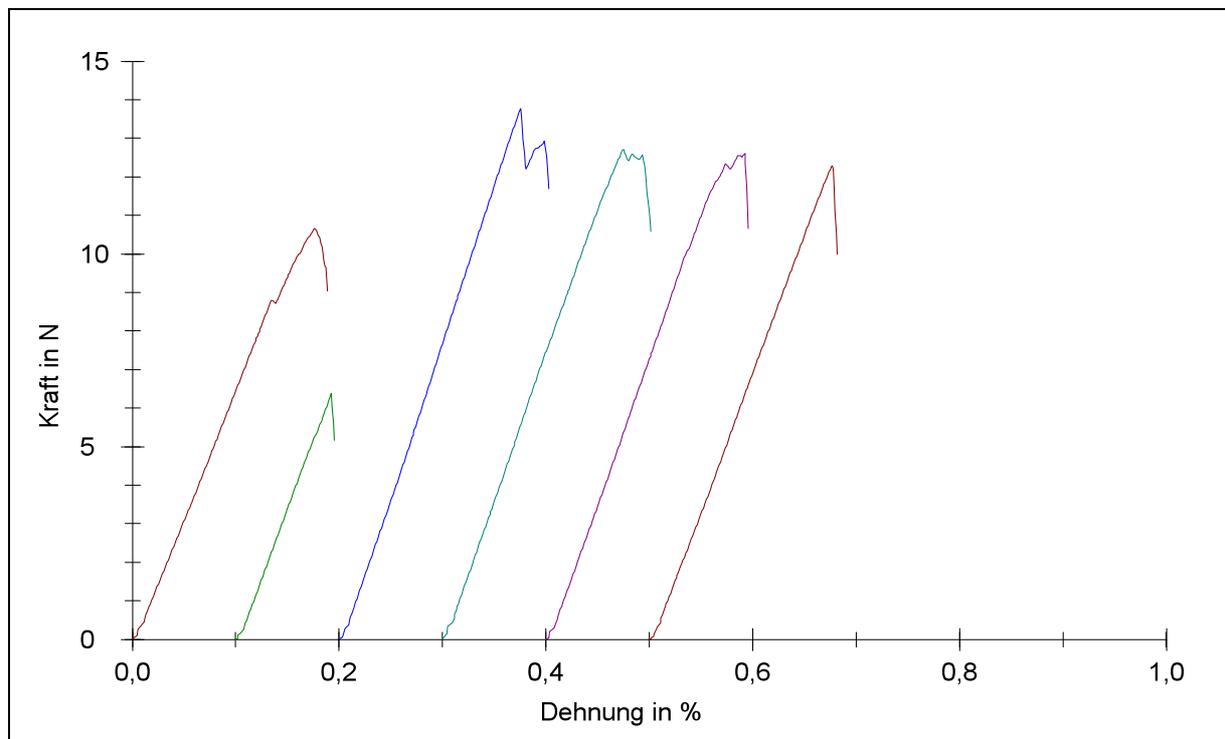
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	C11	11,58	42,85
2	C17	13,10	48,48
3	D25	12,64	46,78
4	E6	13,34	49,35
5	E12	12,34	45,65
6	E18	12,11	44,80

**Serie rechts**

**Abb. 64:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Keramik, Serie rechts

**Tab. LXXIII:** Ergebnisse Programat® P90/Keramik, Serie rechts

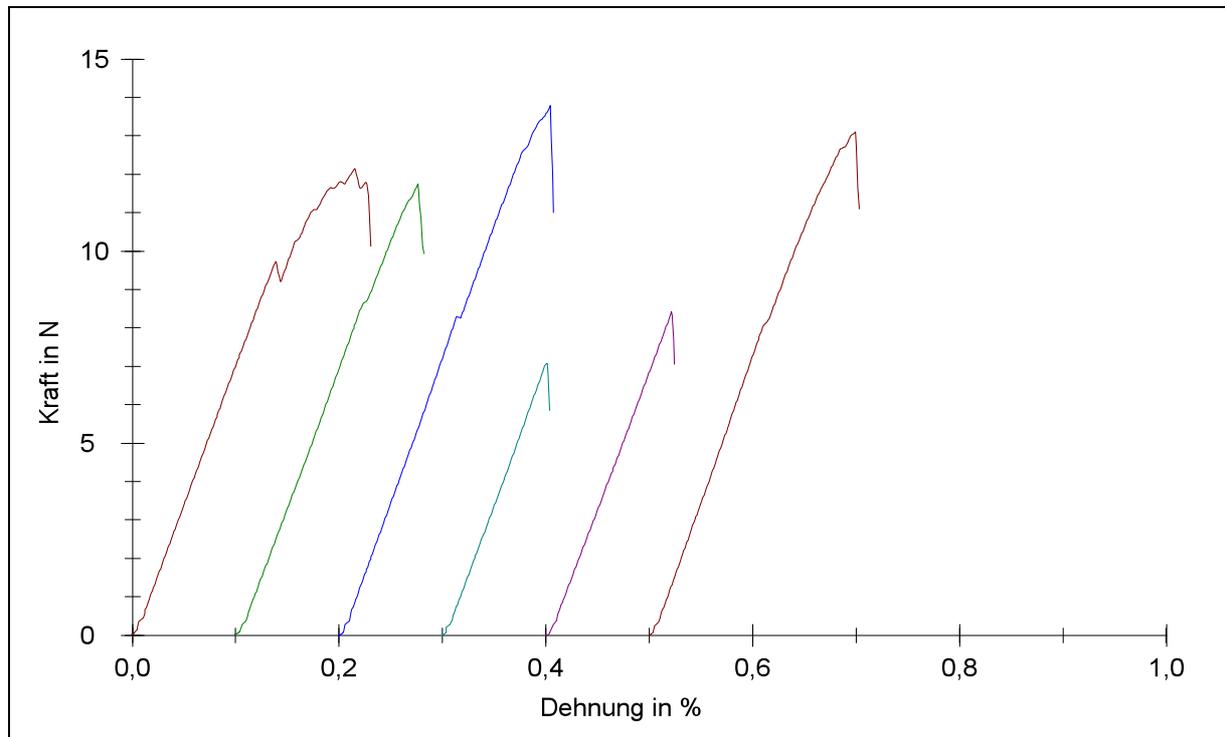
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	C12	12,12	44,83
2	C18	11,11	41,09
3	E1	12,47	46,14
4	E7	12,28	45,43
5	E13	13,59	50,29
6	E19	13,15	48,65

**Serie vorne**

**Abb. 65:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Keramik, Serie vorne

**Tab. LXXIV:** Ergebnisse Programat® P90/Keramik, Serie vorne

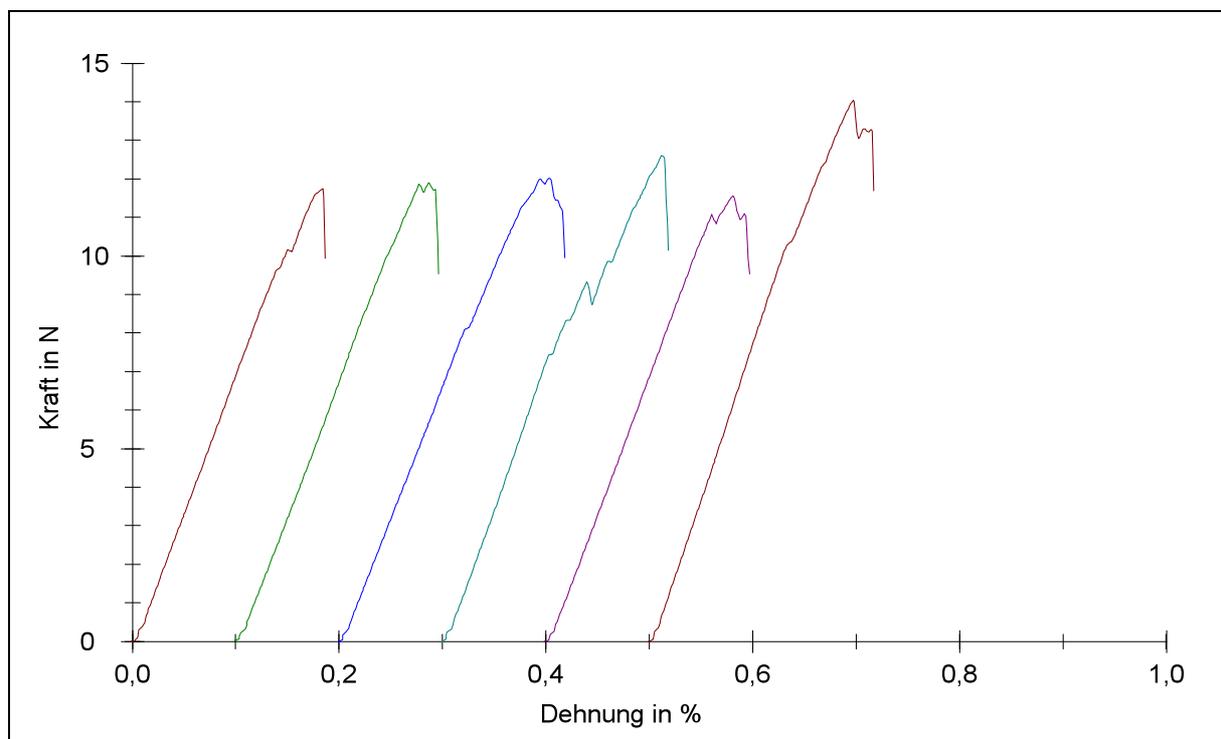
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	C13	10,65	39,41
2	C19	6,39	23,63
3	E2	13,76	50,92
4	E8	12,71	47,02
5	E14	12,60	46,63
6	E20	12,29	45,46

**Serie links**

**Abb. 66:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Keramik, Serie links

**Tab. LXXV:** Ergebnisse Programat® P90/Keramik, Serie links

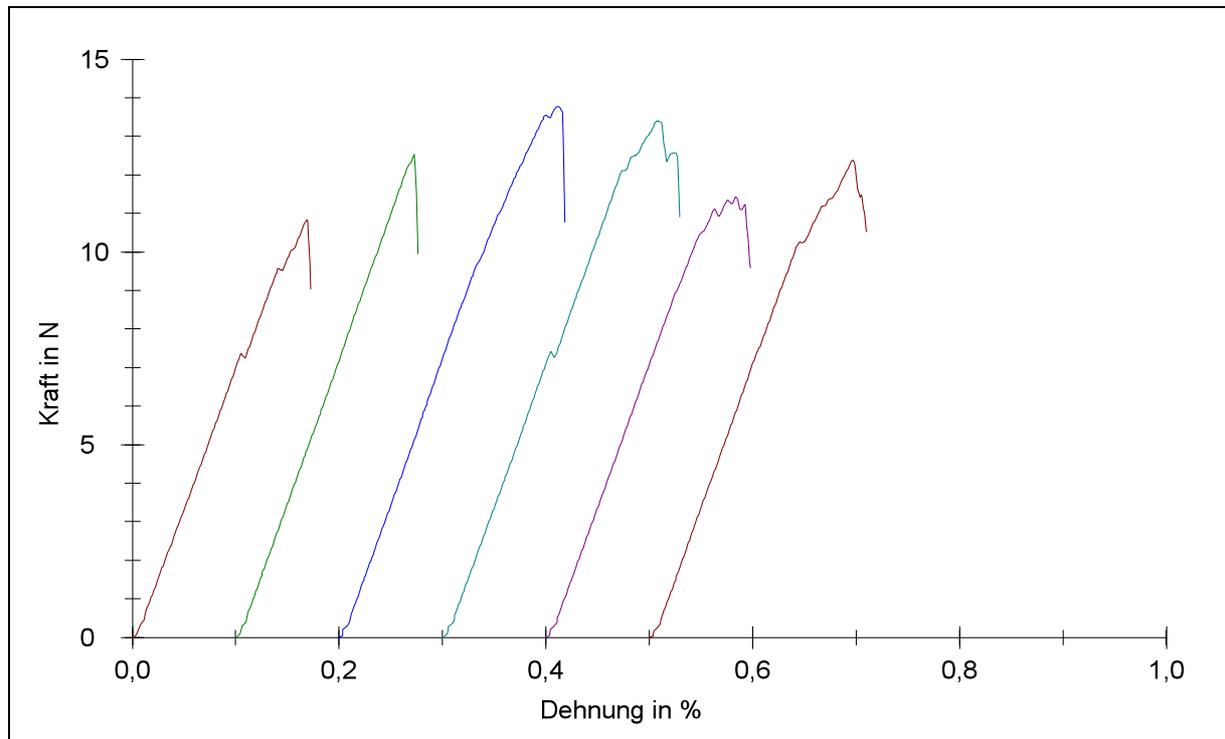
Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	F22	12,15	44,95
2	C20	11,74	43,44
3	E3	13,79	51,02
4	E9	7,07	26,16
5	E15	8,42	31,15
6	E21	13,10	48,48

**Serie Mitte1**

**Abb. 67:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Keramik, Serie Mitte 1

**Tab. LXXVI:** Ergebnisse Programat® P90/Keramik, Serie Mitte 1

Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	C15	11,75	43,48
2	C21	11,91	44,06
3	E4	12,02	44,46
4	E10	12,60	46,61
5	E16	11,56	42,79
6	E22	14,04	51,94

**Serie Mitte 2**

**Abb. 68:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Keramik, Serie Mitte 2

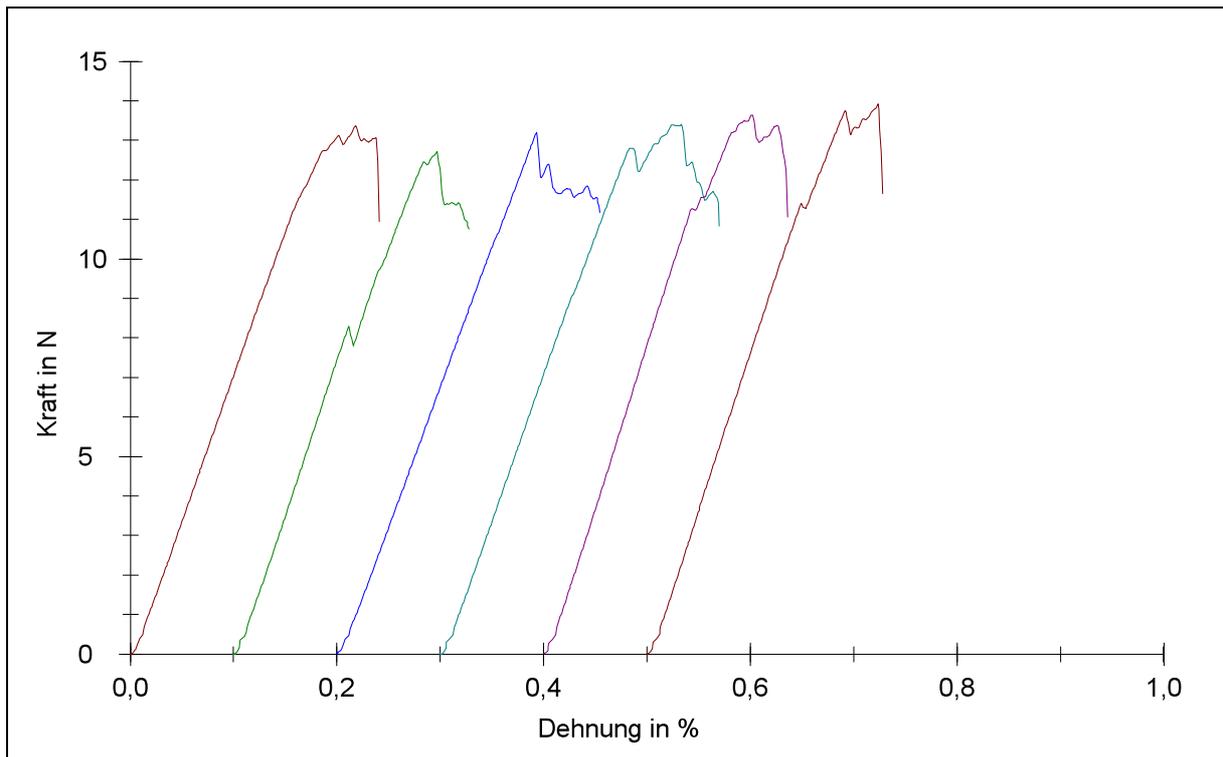
**Tab. LXXVII:** Ergebnisse Programat® P90/Keramik, Serie Mitte 2

Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	C16	10,82	40,04
2	C22	12,52	46,33
3	E5	13,77	50,96
4	E11	13,40	49,57
5	E17	11,41	42,23
6	E23	12,38	45,80

## Brennofen IVOCLAR Programmat P90 bei veränderter Temperatur

### 8.2.3.3 Alle Brennvorgänge bei um 20°C erhöhter Temperatur gegenüber Herstellerangaben

#### **Serie Mitte 1**



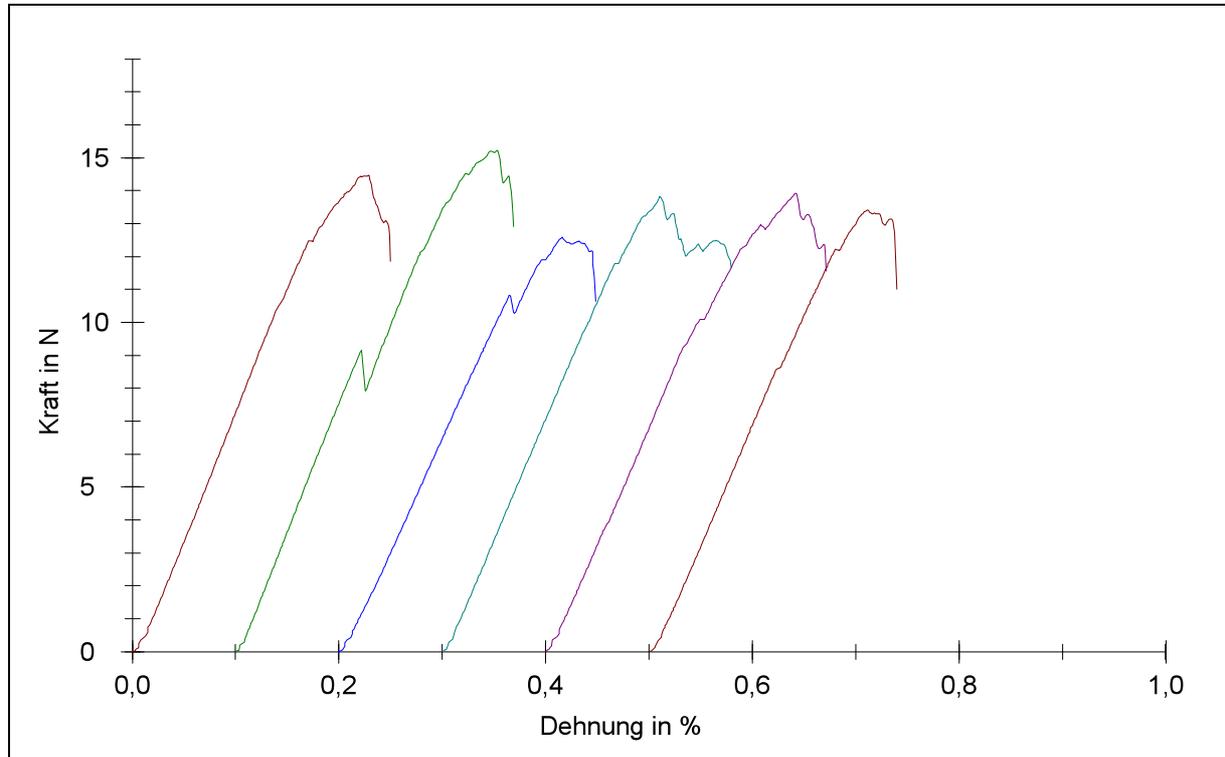
**Abb. 69:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Keramik bei um 20°C erhöhter Temperatur, Serie Mitte 1

**Tab. LXXVIII:** Ergebnisse Programat® P90/Keramik bei um 20°C erhöhter Temperatur, Serie Mitte 1

Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	I11	13,36	49,43
2	I12	12,72	47,05
3	I13	13,20	48,82
4	I14	13,40	49,58
5	I15	13,64	50,47
6	I16	13,92	51,51

### 8.2.3.4 Alle Brennvorgänge bei um 20°C erniedrigter Temperatur gegenüber Herstellerangaben

#### **Serie Mitte 1**



**Abb. 70:** Seriengrafik des SCHWICKERATH-Versuchs des Programat® P90/Keramik bei um 20°C erniedrigter Temperatur, Serie Mitte 1

**Tab. LXXIX:** Ergebnisse Programat P90/Keramik bei um 20°C erniedrigter Temperatur, Serie Mitte 1

Prüfkörper	Prüfkörperbezeichnung	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit $T_m$ [N]
1	I17	14,46	53,50
2	I18	15,23	56,34
3	I19	12,57	46,52
4	I20	13,81	51,10
5	I21	13,92	51,51
6	I22	13,41	49,60

## 8.2.4 Tabelle der In-Vivo-Überlebenswahrscheinlichkeit von Metall-Keramik-Restaurationen

Tab. LXXX: In-vivo-Überlebenswahrscheinlichkeit von Metall-Keramik-Restaurationen

Beobach- tungs- zeitraum	Untersuchte Einheit	Frakturrate	Legierung/ Keramik	Quelle
5 Jahre 10 Jahre 15 Jahre	4371 Kronen, nicht weiter definiert	92 % (Überlebensrate) 79 % (Überlebensrate) 56 % (Überlebensrate)	Keine Angabe	[KERSCHBAUM et al., 1991]
5 Jahre 10 Jahre 15 Jahre	1669 Brücken, nicht weiter definiert	95 % (Überlebensrate) 82 % (Überlebensrate) 64 % (Überlebensrate)	Keine Angabe	[KERSCHBAUM et al., 1991]
9 Jahre	390 Vollguss- kronen	92,1 % (Überlebensrate)	Keine Angabe	[SCHLÖSSER et al., 1993]
5,4 Jahre	503 Verblend- einheiten	6,4 % (Srünge und Abplatzungen)	Gold- und Palladium- Legierungen	[KRAFT und SCHÄFER, 1994]
3 Jahre	147 Verblend- einheiten	95 % (Überlebensrate) 84 % (ohne VMK-Defekt)	Titan, gefräst	[WALTER et al., 1994]
5 Jahre 10 Jahre	VMK-Kronen	93,7 % (Überlebensrate) 88,7 % (Überlebensrate)	Keine Angabe	[KERSCHBAUM et al., 1997]
5 Jahre 10 Jahre	VMK-Brücken und VMK- Kronenblocks	99 % (Überlebensrate) 80,2 % (Überlebensrate)	Keine Angabe	[KERSCHBAUM et al., 1997]
39 Monate	405 VMK-Kronen und Brückenglieder	98,8% (ohne Schaden)	Hydrothermale Keramik	[BIFFAR et al., 1997]
39 Monate	39 verblendete Teilkronen und Inlays	89,0 % (ohne Defekt)	Hydrothermale Keramik	[BIFFAR et al., 1997]
5 Jahre 10 Jahre 15 Jahre 20 Jahre	174 VMK-Kronen	95,1 % (Überlebensrate) 87 % (Überlebensrate) 81,1 % (Überlebensrate) 70,3 % (Überlebensrate)	Keine Angabe	[SMALES und HAWTHORNE, 1997]
5 Jahre	25 Verblend- einheiten	98 % (ohne Defekt)	Hochgoldhal- tige Legierung	[WALTER et al., 1999]
5 Jahre	22 Verblend- einheiten	84 % (ohne Defekt)	Titan (Procera®)	[WALTER et al., 1999]
7 Jahre	769 VMK-Kronen	96,5 % bei Prämolaren und Molaren (ohne Defekt) 92 % bei Front- und Eckzähnen (ohne Defekt)	Galvano	[ERPENSTEIN et al., 2000]
4-5 Jahre	182 VMK-Kronen	99,6 % (Überlebensrate)	Titan (Procera®)	[LOVGREN et al., 2000]
4-5 Jahre	75 VMK-Brücken	97,8 % (Überlebensrate)	Titan (Procera®)	[LOVGREN et al., 2000]
12 Monate	162 Verblend- einheiten	8,7 % (Defektrate)	Titan	[PSOCH et al., 2006]
3 Jahre	40 VMK-Kronen	100 % (ohne technisches Versagen mit Entfernung)	Hochgold- haltige	[BÖNING et al., 2006]

			Legierung	
8 Jahre	190 VMK-Kronen	95,8 % (kein Verlust von Krone oder Zahn) 99,5 % (kein Verlust wegen VMK-Defekt) 92,4 % (ohne jedweden VMK-Defekt)	Hochgoldhaltige Legierung Goldreduzierte Legierung Palladiumbasis-Legierung	[REITEMEIER et al., 2007]
8 Jahre	276 VMK-Brückenanker Kronen	95,4 % (kein Verlust von Krone oder Zahn) 99,6 % (kein Verlust wegen VMK-Defekt) 87,5 % (ohne jedweden VMK-Defekt)	Hochgoldhaltige Legierung Goldreduzierte Legierung Palladiumbasis-Legierung	[REITEMEIER et al., 2007]
5 Jahre	VMK-Brücken (Systematisches Review)	94,4 % (Überlebensrate) 1,6-2,9 % (Materialdefekte)	Keine Angabe	[SAILER et al., 2007]
5 Jahre	VMK-Kronen (Systematisches Review)	95,6 % (Überlebensrate)	Keine Angabe	[PJETURSSON et al., 2007]

## Danksagung

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn PD Dr. R. Striezel für die Überlassung des Themas und die immer freundliche Unterstützung und Hilfsbereitschaft bei der Durchführung und Vollendung dieser Arbeit.

Der Firma BEGO danke ich für die zur Verfügung gestellten Materialien und die Nutzung der Maschinen und des zahntechnischen Arbeitsplatzes.

Des Weiteren gilt mein Dank Frau M. Poppinga und den weiteren Mitarbeitern der Firma BEGO, für die Hilfe bei der Durchführung der Drei-Punkt-Biegeversuche nach SCHWICKERATH und für die vielen kurzweiligen Stunden bei der Prüfkörperherstellung im Labor und die kompetente und freundliche Beantwortung aller Fragen.

Besonders möchte ich mich bei meinen Eltern Dr. Franz Zimny und Dr. Jutta Zimny bedanken, die mir diesen Werdegang in seelischer, moralischer und finanzieller Hinsicht erst ermöglichten und sich auch unermüdlich bei der Durchsicht und Reinschrift der Arbeit einsetzten. Genauso gilt mein Dank meinem Verlobten Oliver Hielscher-Tölzer, der mit seiner Großzügigkeit und Unterstützung im täglichen Leben sein Übriges tat, um diese Arbeit voranzutreiben und zum Abschluss zu bringen. Ebenso danke ich auch meinem Bruder Dr. Burghardt Zimny, der mir bei der Formatierung der Arbeit stets mit Rat und Tat zur Seite stand.

## **Lebenslauf**

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

## Erklärung

„Ich, Friederike Zimny, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema:

**„Vergleichende Untersuchung zum Einfluss der Position des Brenngutes auf Verbundfestigkeit“**

selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Berlin, 29.4.2010

## Publikationsliste

Die Publikation in einer nationalen/internationalen Zeitschrift ist in Arbeit.