

---

Aus dem Centrum für Zahnmedizin  
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

„Einsatz der Speckle-Interferometrie für die Bewertung des Spannungs- und  
Verformungsverhaltens zur materialabhängigen Gestaltoptimierung prothetischer  
Konstruktionen“

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Patrick Heerde

aus Berlin

---

Gutachter: 1. Prof. Dr. W. B. Freesmeyer  
2. Prof. Dr. H. Küpper  
3. Prof. Dr. med. dent. K. Böning

Datum der Promotion: 28.05.2009

---

Meinen Eltern gewidmet

<b>1 Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1 Allgemeines	7
1.2 Keramische Werkstoffe als Gerüstwerkstoff in der Kronen- und Brückenprothetik	7
1.3 Kunststoffe als Gerüstwerkstoff für Brückenversorgungen	14
1.4 Brückengerüstdesign und Verbinderdimensionierung	14
1.5 Aktueller Entwicklungsstand bei CAD /CAM-Systemen in der Zahnmedizin	16
1.6 Anwendung der FE-Methode für Materialanalysen	17
1.7 Werkstoffanalysen mit der Speckle-Messtechnik in der Zahnmedizin	19
1.8 Alternative, experimentelle Messmethoden für Versagens- und Verformungsanalysen	20
<b>2 Fragestellung</b>	<b>22</b>
2.1 Allgemein	22
2.1.1 Zielsetzung	25
<b>3 Material und Methode</b>	<b>26</b>
3.1 Übersicht	26
3.2 3D-ESPI Messung	27
3.2.1 Grundlagen der 3D-ESPI Messmethode	27
3.2.2 Gerüstmaterialien	28
3.2.3 Gerütherstellung	29
3.2.4 Aufbau des 3D-ESPI-Messplatzes	30
3.2.5 Messanordnungen	32
3.2.6 Versuchsdurchführung	33
3.2.7 3D-ESPI-Messaufnahme	35
3.2.8 Auswertung der Messergebnisse	38
3.3 Das Finite Elemente-Modell	39
<b>4 Ergebnisse</b>	<b>40</b>
4.1 Allgemeines	40
4.2 Gerüstwerkstoff DC-Tell	41
4.2.1 mit variabler Verbindergeometrie und starrer Lagerung/ unzementiert	41
4.2.2 mit variabler Verbindergeometrie und starrer Lagerung/ zementiert	43

4.2.3 DC-Tell mit variabler Verbindergeometrie im Dreipunktbiegeversuch	45
<b>4.3 Gerüstwerkstoff PEEK</b>	<b>47</b>
4.3.1 mit variabler Verbindergeometrie und starrer Lagerung/ unzementiert	47
4.3.2 mit variabler Verbindergeometrie bei starrer Lagerung/ zementiert	49
4.3.3 PEEK mit variabler Verbindergeometrie im Dreipunktbiegeversuch	51
<b>4.4 Gerüstwerkstoff DC-Zirkon</b>	<b>53</b>
4.4.1 mit variabler Verbindergeometrie bei starrer Lagerung/unzementiert	53
4.4.2 DC-Zirkon mit variabler Verbindergeometrie bei starrer Lagerung/zementiert	55
4.4.3 DC-Zirkon mit variabler Verbindergeometrie im Dreipunktbiegeversuch	57
<b>4.5 Gerüstwerkstoff ProTemp III</b>	<b>59</b>
4.5.1 bei variabler Verbindergeometrie und starrer Lagerung/ unzementiert	59
4.5.2 ProTemp III mit variabler Verbindergeometrie und starrer Lagerung/zementiert	61
<b>4.6 Tabellarische Übersicht über die Messergebnisse</b>	<b>63</b>
<b>5 Diskussion</b>	<b>64</b>
<b>5.1 Eignung der 3D-ESPI Messmethode zur Messung von Gerüstverformungen</b>	<b>64</b>
<b>5.2 Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Messgenauigkeit</b>	<b>66</b>
<b>5.3 Zusammenhang zwischen Verbinderabmessungen und Gerüstverformung</b>	<b>67</b>
5.3.1 DC-Zirkon	69
5.3.2 DC-Tell	70
5.3.3 PEEK und ProTemp III	70
<b>5.4 Finite-Elemente-Methode</b>	<b>71</b>
5.4.1 Vergleich der Verformungen aus 3D-ESPI-Messung und FEM-Simulation	73
5.4.1.1 Y-Messachsenrichtung	73
5.4.1.2 X-Messachsenrichtung	75
5.4.1.3 Z-Messachsenrichtung	76
5.4.1.4 Darstellung der dreidimensionalen Verformung des Brückengerüsts	77
5.4.2 Veränderung der Modellparameter für die Brückenpfeileigenschaften	78
5.4.3 Zusammenfassung FE/ESPI	80
<b>5.5 Auswirkungen der Pfeilerbeweglichkeit auf die Gerüstverformung</b>	<b>82</b>
5.5.1 Verformungsmuster	82
5.5.2 Gerüstdurchbiegung	83
5.6.1 Verformungsmuster	84
5.6.2 Gerüstdurchbiegung	85
<b>5.7 Vergleich der Werkstoffeigenschaften</b>	<b>86</b>
<b>5.8 Einfluss der Versuchsanordnungen auf die Messqualität</b>	<b>89</b>

<b>6 Schlussfolgerungen</b>	<b>91</b>
6.1 Allgemein	91
6.2 Anwendungseinschränkungen der Speckle-Interferometrie-Messmethode	96
<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>97</b>
<b>8 Literaturverzeichnis</b>	<b>100</b>
<b>9 Abbildungsverzeichnis</b>	<b>110</b>
<b>10 Diagrammverzeichnis</b>	<b>112</b>
<b>11 Tabellenverzeichnis</b>	<b>113</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Behandlungskonzepte, Zahnlücken mit vollkeramischen Restaurationen zu versorgen, rücken zunehmend in den Blickpunkt und werden daher seit einiger Zeit verstärkt von Zahnärzten und Patienten in Anspruch genommen. Besonders auf dem Gebiet der Kronen- und Brückenprothetik ist ein deutlicher Trend erkennbar, die bislang überwiegend verwendeten metallischen Gerüstwerkstoffe durch alternative Materialien zu ersetzen. Unter den zur Auswahl stehenden Materialien nehmen die keramischen Werkstoffe eine herausragende Stellung ein. Die Keramiken zeichnen sich durch ihre hervorragende Biokompatibilität aus. Sie besitzen weiterhin gute mechanische Eigenschaften, sind abrasionsstabil und entfalten eine exzellente ästhetische Wirkung. Prothetische Versorgungen, die höchsten ästhetischen Ansprüchen genügen, sind somit ausschließlich nur mit vollkeramischen Kronen und Brücken zu erreichen. Auch die aktuell geführten Diskussionen über die Biokompatibilität herkömmlicher Restaurationsmaterialien führt zu einer zunehmenden Verbreitung von Vollkeramikrestaurationen. Der Anteil der vollkeramischen Restaurationen an der gesamten Kronen- und Brückenprothetik nimmt aufgrund dessen in den letzten Jahren in Deutschland stetig zu.

## 1.2 Keramische Werkstoffe als Gerüstwerkstoff in der Kronen- und Brückenprothetik

Keramische Werkstoffe werden bereits seit mehr als 25 Jahren erfolgreich in der Zahnmedizin verwendet.<sup>1</sup> Das Einsatzspektrum der Keramiken ist sehr vielschichtig und reicht von der Verwendung als Verblend- und Gerüstmaterial bei Kronen- und Brückenversorgungen bis zum Füllpartikel in plastischen Füllungswerkstoffen.

Die Keramiken besitzen eine Vielzahl von positiven Werkstoffeigenschaften. Sie weisen sehr gute mechanische Eigenschaften auf, die jedoch wegen ihres spröden Bruchverhaltens bisher nicht optimal genutzt werden können.<sup>2-6</sup> Keramiken zeichnen sich zudem durch eine hohe Abrieb- und Korrosionsbeständigkeit sowie eine außerordentliche gute Biokompatibilität aus.<sup>7,8,9,10</sup> Ihre Wärmeleitfähigkeit und die Fähigkeit zur Plaqueakkumulation ist im Vergleich zu den Metallen deutlich reduziert. Einige der Keramiken eignen sich darüber hinaus für die Bearbeitung mit CNC-Fräsmaschinen. Die Passgenauigkeit dieser durch Fräsmaschinen hergestellten keramischen Kronen- und Brückengerüste genügt dabei den klinischen Anforderungen.<sup>11,12</sup>

Aufgrund dieser positiven Materialeigenschaften erscheinen keramische Werkstoffe als Restaurationsmaterial für Kronen- und Brückenversorgungen besonders geeignet.

Demgegenüber stehen jedoch einige negative Eigenschaften, die das Indikationsspektrum bislang einschränken. Dazu zählen vor allem die geringe Zug- und Biegefestigkeit, die Tendenz zum Spröbruch, die große Streuung der mechanischen Eigenschaften sowie das Auftreten des unterkritischen Risswachstums bei intermittierender Langzeitbelastung.

Das Bruchverhalten von keramischen Bauteilen vorauszusagen, ist schwierig. Es ist charakteristisch für Keramiken, dass eine rein konventionelle Festigkeitsanalyse, wie bei den Metallen, nicht ausreicht. Erst die Kombination von Bruchmechanik, Statistik und konventioneller Festigkeitsrechnung ermöglicht eine zuverlässige materialspezifische Beschreibung der Festigkeit. Besonders von Bedeutung für Aussagen zur Zuverlässigkeit von keramischen Bauteilen ist die Weibull-Verteilung. Die Weibull-Verteilung ist die klassische Zuverlässigkeitsanalyse und beschreibt eine statistische Verteilung, die zur Untersuchung von Lebensdauern von Bauteilen verwendet wird. Man verwendet sie vor allem bei Fragestellungen wie Materialermüdungen von spröden Werkstoffen.

Die Festigkeit von Keramiken ist von mehreren materialspezifischen Größen unmittelbar abhängig:

- Fehlergröße
- Risszähigkeit  $K_{IC}$
- Elastizitätsmodul  $E$
- Querkontraktionszahl  $\nu$
- statistische Verteilung der Materialfehler (**Weibull-Modul  $m$** )
- Volumen der Proben

Keramiken zeigen eine große Streuung der mechanischen Eigenschaften, die auf die statistische Verteilung der Defektgröße und der Lage der Fehler im Probenvolumen zurückzuführen ist.

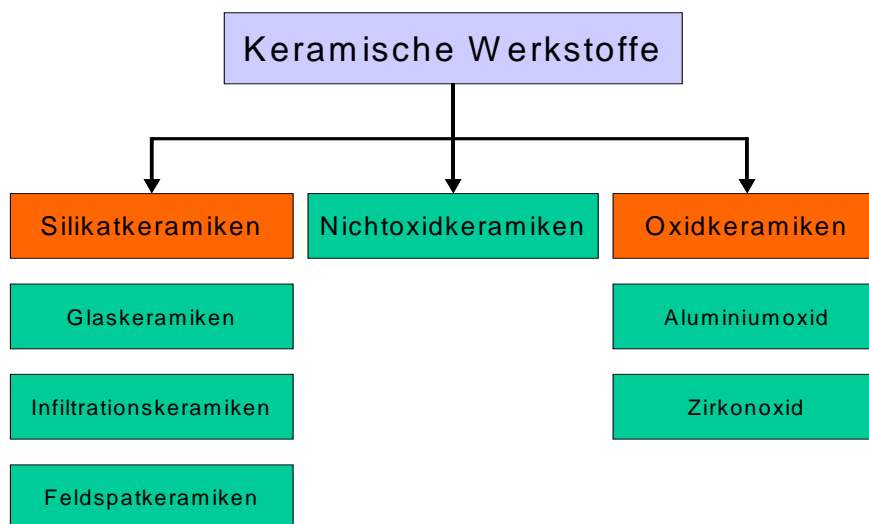
Der größte Fehler innerhalb des Materialgefüges bestimmt damit die Festigkeit des Bauteils. Der Zusammenhang zwischen der statistischen Fehlerverteilung und dem Probenvolumen wird durch das **Weibull-Modul  $m$**  beschrieben und kann als Maß für die Prozessfähigkeit des Herstellungsvorgangs herangezogen werden.<sup>13</sup> Das heißt, je größer der Faktor  $m$  ist, desto näher liegen die gemessenen Festigkeitswerte zusammen und um so genauere Vorhersagen über das Festigkeitsverhalten können getroffen werden, bei welcher ein Bauteil der gleichen Art und Gestalt versagen wird.



Das für Keramiken charakteristische unterkritische Risswachstum führt dazu, dass ein Bruch der Keramik, auch bei konstanter Belastung, nach Ablauf eines bestimmten Zeitraumes auftreten kann. Diese Sprödigkeit hat ihre Ursache im geringen Widerstand, den die Keramik der Rissausbreitung entgegenbringt. Die Keramik versagt, da die während der Verformung gespeicherte Verformungsenergie nicht durch plastische Verformung, wie bei den Metallen möglich, abgebaut werden kann. Die **Risszähigkeit  $K_{IC}$**  beschreibt, wie gut der Werkstoff der Verlängerung eines Risses widerstehen kann.

Im Bereich der Zahnmedizin stehen zur Zeit unzählige Keramiksyste­me für die verschiedensten Indikationen zur Verfügung. Die verwendeten Keramiken lassen sich nach drei Hauptwerkstoffgruppen klassifizieren (*Abbildung 1*). Diese Gruppen unterscheiden sich wesentlich in ihren mechanisch-physikalischen Eigenschaften und sind aufgrund dessen jeweils nur für spezielle Indikationen (Verblendung, Gerüst, Inlay, Veneer)geeignet.

---



**Abbildung 1: Gliederung der Keramiken anhand ihrer chemischen Struktur**

---

Anfänglich wurden aufgrund der ungenügenden mechanischen Eigenschaften keramische Werkstoffe überwiegend nur in Verbindung mit metallischen Grundgerüsten in der Kronen- und Brückenprothetik verwendet.<sup>14,15</sup> Hierbei wird die Biegefestigkeit der Metalle mit der guten ästhetischen Wirkung der Keramiken kombiniert. Die metallkeramischen Systeme führen aufgrund des lichtundurchlässigen Metallgerüstes jedoch nur zu befriedigenden ästhetischen Resultaten.

Die vollkeramische Einzelkrone wird schon seit mehreren Jahren erfolgreich eingesetzt. Wie Studien belegen, sind klinische Langzeiterfolge, bei Verweildauern von bis zu > 10 Jahren,

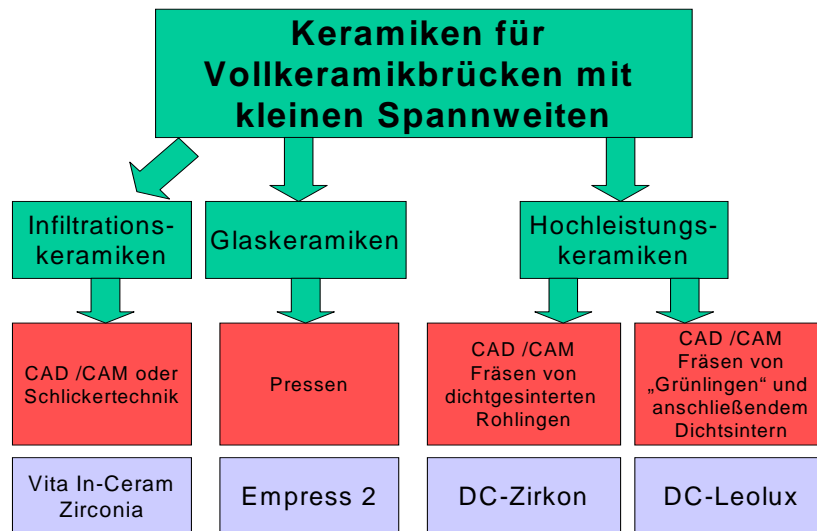
möglich.<sup>16</sup> Die Bruchfestigkeit von Einzelkronen aus den Aluminiumoxidkeramiken In-Ceram und Empress 2 erreicht bereits ähnliche Werte wie die von metallkeramischen Verblendkronen.<sup>2</sup> Erst mit der Einführung der Aluminiumoxidkeramiken konnten Kronen und Brücken aus Vollkeramik, jedoch nur mit eingeschränktem Indikationsspektrum, klinisch erfolgreich eingesetzt werden.<sup>14,17,18</sup> Das Indikationsspektrum für Aluminiumoxidkeramik ist limitiert auf Frontzahnkronen und dreigliedrige Brücken mit geringer Spannweite im Front- und Prämolarenregion.

Mehrgliedrige oder weitspannige Brücken für den Einsatz in der Molarenregion benötigen Keramiken mit wesentlich verbesserten Biegefestigkeiten.<sup>19-21</sup> Viele der bislang verfügbaren Vollkeramiksysteme (In-Ceram<sup>®</sup>, Empress2<sup>®</sup> etc.) haben die Anforderungen an ein stabiles Gerüstmaterial für Brückenversorgungen in der Molarenregion jedoch nicht erfüllen können.<sup>22,23</sup> Mehrgliedrige Brückenkonstruktionen sind mit diesen Keramiken nicht möglich.<sup>24</sup> Versorgungsungen sollen auf maximal drei Brückenglieder begrenzt werden.<sup>17,25</sup>

Neu entwickelte Hochleistungskeramiken, wie das **Y-TZP-Zirkoniumdioxid** (Yttriumoxid-Tetragonal Zirconia Polycrystals ZrO<sub>2</sub>), bieten diesbezüglich neue Ansatzpunkte. Diese so genannten Hochleistungskeramiken weisen eine ausreichende Festigkeit für weitspannige Brücken im Seitenzahnbereich auf. Für dreigliedrige Vollkeramikbrücken stehen mehrere Keramiksysteme zur Verfügung. Einen Überblick über die möglichen Keramiksysteme gibt Abbildung 2.

Glaskeramiken erzielen im Gegensatz im Gegensatz zu den opaken Infiltrationskeramiken bessere ästhetische Resultate und werden daher bevorzugt im sichtbaren Bereich eingesetzt. Ihre Indikation ist jedoch wegen geringere Festigkeitswerte auf dreigliedrige Brücken in der Frontzahnregion begrenzt. Die Infiltrationskeramiken weisen hingegen höhere Festigkeits- und Bruchzähigkeitswerte auf.

Besonders das Zirkoniumdioxid (ZrO<sub>2</sub>) besitzt hervorragende mit den Metallen vergleichbare Festigkeitseigenschaften.<sup>26</sup> Die Biegefestigkeit beträgt 1.100 MPa.<sup>27-29</sup> Mit Zirkoniumdioxid sind damit mehrgliedrige Brückengerüste von bis zu theoretisch 16 Gliedern möglich. Eine gute Biokompatibilität für ZrO<sub>2</sub> ist nachgewiesen.<sup>30,31</sup> Studien belegen, dass dies derzeit das beste verfügbare Material für weitspannige vollkeramische Brücken im Seitenzahnbereich ist.<sup>32,33,19,20,26,34,35</sup> Aus ZrO<sub>2</sub> kann Zahnersatz mit hoher Festigkeit, verbunden mit den hervorragenden ästhetischen Eigenschaften der Verblendkeramiken, hergestellt werden.<sup>35-37</sup> Eine Übersicht über weitere Studien gibt Tabelle 1.



**Abbildung 2: Keramiken für dreigliedrige Vollkeramikbrücken, geordnet bzgl. Keramikgrundstruktur und der Bearbeitungstechnologie mit zugehörigen Produktbeispielen**

Besonders durch das Hinzufügen von 3mol % Yttriumoxid zum Zirkoniumdioxid entsteht eine hochfeste Keramik. Das Yttriumoxid bewirkt dabei die Bildung und Stabilisierung einer mehrphasigen kristallinen Struktur, die überwiegend aus kubischem  $ZrO_2$  besteht, zusätzlich aber Anteile an homogenen und fein verteilten monoklinen und tetragonalen Kristallen aufweist. Durch das zulegierte Yttriumoxid konnte das Risswachstum deutlich reduziert werden, da die Umwandlung von tetragonaler Kristallphase zu monokliner Phase diejenige Energie verbraucht, die für das Risswachstum notwendig ist. Die tetragonale Struktur ist bei Raumtemperatur nicht stabil. Sie wandelt sich spontan in die monokline Struktur um. Dabei schließt sich der Riss aktiv. Die verhinderte Umwandlung setzt zudem die Oberflächen unter Kompression, was zu einer Art Vergütung führt und der Rissentstehung bzw. -ausbreitung schon von vornherein entgegenwirkt.<sup>38,39</sup>

Aufgrund seiner extremen Härte lässt sich das  $ZrO_2$  jedoch nur subtraktiv mit Fräsmaschinen bearbeiten. Um die Festigkeitseigenschaften des Werkstoffs dennoch nutzen zu können, wurde die CAD/CAM-Technologie weiterentwickelt. Außerdem wurden Verfahren entwickelt, mit denen die langen Fräszeiten reduziert werden konnten. Dabei wird das  $ZrO_2$  im vorgesinterten Zustand als „Grünling“ aus dem Materialrohling herausgefräst und anschließend nachgesintert. Aufgrund des industriellen Sintervorgangs weist „gehipptes“ (HIP: high isostatic pressure)  $ZrO_2$  ein optimiertes defektarmes Werkstoffgefüge auf. Die Festigkeitsreserve von  $ZrO_2$  ist so hoch, dass die bei allen Keramiken eintretende Strukturschwächung aufgrund der Werkstoffermüdung keinen kritischen Wert während des Zeitraums der klinischen Beanspruchung erreicht.<sup>40</sup>

**Tabelle 1: Auswahl von werkstoffkundlichen Untersuchungen über ZrO<sub>2</sub> als Gerüstmaterial**

Studie	Werkstoff/ Abmessungen	Frakturlasten Bruchlasten	Ergebnisse und Schlussfolgerungen
TINSCHERT et al. <sup>5</sup>	ZrO <sub>2</sub> (CAD/CAM gefräst) Brückengerüste	2289/ 1607/ 1262 N (3-, 4-, 5- gliedrige Brücken)	Die Frakturwerte liegen alle oberhalb einer angenommenen Belastungsgrenze von 1000 N und somit oberhalb der hypothetischen maximalen Kaukraft.
FILSER et al. <sup>41</sup>	Empress 2 ZrO <sub>2</sub> In-Ceram Verbinderabmessungen 6,9 mm <sup>2</sup> (2,7 mm* 2,6 mm) Die Pfeiler besitzen eine laterale Beweglichkeit.	experimentell: 621N, m= 3,0 1278N, m= 8,5 514N, m= 2,7 Die Krafteinleitung erfolgte auf den Pontic.  klinisch: Verbinderquerschnitt unter 10 mm <sup>2</sup>	ZrO <sub>2</sub> zeigte hierbei die höchsten Bruchlasten und die höchste Zuverlässigkeit. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich für die verblendeten Testbrücken. Die Fraktur erfolgte ausgehend von der gingivalen Seite des Verbinders und anschließend diagonal zum Pontic. Die 22 eingesetzten ZrO <sub>2</sub> -Brücken zeigten nach 2 Jahren keine Auffälligkeiten. Damit ist die Eignung von ZrO <sub>2</sub> für Vollkeramikbrücken im Seitenzahnbereich nachgewiesen.
GEIS- GEISENDORFER und FÄBLER <sup>40</sup>	In-Ceram Y-TZP ZrO <sub>2</sub>	Die Dauerfestigkeit von ZrO <sub>2</sub> (480Mpa), In-Ceram (130Mpa) wurde nach DIN 50100 bestimmt.	ZrO <sub>2</sub> besitzt eine hohe Zuverlässigkeit.
KAPPERT <sup>37</sup>	Es wurden Festigkeitsuntersuchungen von Kronen mit Y-TZP ZrO <sub>2</sub> -Gerüsten mit verschiedenen Verblendkeramiken durchgeführt.	Die Festigkeitswerte betragen in Anhängigkeit von der Verblendung 1267N 1571N	Damit übertrifft die Frakturresistenz von Y-TZP ZrO <sub>2</sub> -Gerüsten die Belastbarkeit von Metallkeramikronen.
LÜTHY et al. <sup>42</sup>	Untersucht wurden 4-gliedrige Brücken aus In-Ceram Zirconia, Empress 2, Cercon base (ZrO <sub>2</sub> ) mit einem Verbinderquerschnitt von 7 mm <sup>2</sup> .	Frakturlasten: 518N, m= 4,5 282N, m= 5,7 755N, m= 7,0	ZrO <sub>2</sub> zeigt im Vergleich die höchsten Bruchlasten.

Inzwischen liegen erste klinische Erfahrungen über einen Zeitraum von sechs Jahren für ZrO<sub>2</sub>-Keramik als Bestandteil von Kronen, mehrgliedrigen Brücken, auch mit zwei Zwischengliedern und Implantatkronen, vor.<sup>43,44</sup> Alle Studien zeigen, dass im betrachteten Zeitraum keine Gerüstfrakturen auftraten. Lediglich vereinzelter postoperativer Vitalitätsverlust und Abplatzungen der Verblendkeramik kamen in einer prozentualen Größenordnung, vergleichbar mit denen der Metallkeramiken, vor. Weitere klinische Studien belegen die Eignung von ZrO<sub>2</sub> als Gerüstmaterial für Brücken (Tabelle 2).

**Tabelle 2: Auswahl von durchgeführten klinischen Studien für Zirkoniumdioxid als Brückengerüstmaterial**

Studie	Materialien	Zeitraum	Ergebnisse
STURZENEGGER et al. <sup>45</sup>	Seitenzahnbrücken Zirkonoxid	durchschnittliche Verweildauer von 385 Tagen	Es konnten keine Frakturen und Verluste der Verblendungen beobachtet werden.
POSPIECH <sup>46</sup>	21 ZrO <sub>2</sub> - Seitenzahnbrücken mit Glasionomerkement	durchschnittliche Tragedauer von 8 Monaten	Es traten keine Frakturen und Verluste der Verblendungen in diesem Zeitraum auf.
TINSCHERT <sup>47</sup>	26 ZrO <sub>2</sub> - Seitenzahnbrücken Zementierung mit Zinkoxid- Phosphatzement	über einen Zeitraum von einem Jahr	Es sind keine Misserfolge erkennbar.
TINSCHERT <sup>48</sup>	65 drei- und mehrgliedrige Brücken mit DC-Zirkon Gerüst (verblendet mit Vita D)	mittlere Beobachtungszeit für 15 Frontzahnbrücken: 38 Monate für 50 Seitenzahnbrücken über 37 Monate	Keine Frakturen aufgetreten, jedoch vier partielle Abplatzungen der Verblendkeramik im Seitenzahnbereich

Die klinischen Misserfolge haben mehrere Ursachen. Ungeeignete Präparationsformen, zu geringe Wandstärken, unterdimensionierte Konnektorenabmessungen, sehr tief separierte Brückenglieder sowie Verarbeitungsfehler im Labor können zu der Entstehung von Zugspannungen und Mikrorissen im Werkstoff führen, die auch nach längeren Zeiträumen immer noch Frakturen auslösen können. Die Frakturrisse konzentrieren sich überwiegend auf die Verbinderabschnitte und auf die Grenzflächen zwischen der Gerüst- und Verblendkeramik.<sup>2,3</sup> Bei Untersuchungen mit dichtgesinterten ZrO<sub>2</sub>-Gerüsten konnte Ähnliches beobachtet werden.<sup>5,49</sup> Neben den Gerüstfrakturen treten auch Abscherungen und Frakturen in der Verblendkeramik auf.<sup>48,50</sup> Besonders aufgrund der Verblendfrakturen kommt es daher immer wieder zu klinischen Misserfolgen.<sup>51</sup>

### 1.3 Kunststoffe als Gerüstwerkstoff für Brückenversorgungen

Kunststoff als Gerüstwerkstoff wird schon seit einiger Zeit zum Ersatz fehlender Zähne überwiegend als adhäsiv befestigte Frontzahnbrücke eingesetzt.<sup>52</sup> Ein bedeutender Vorteil dieses Werkstoffs ist seine schnelle und einfache Bearbeitbarkeit und die damit verbundenen geringen Kosten. Die toxische Wirkung der Kunststoffe durch sich verflüchtigende Monomere kann außerdem als gering eingestuft werden.<sup>53</sup> Die ästhetische Wirkung dieser verblendeten Kunststoffbrücken ist hingegen nur zufriedenstellend.

Von Nachteil ist, dass die Kunststoffgerüste nur eine geringe Festigkeit aufweisen, wodurch sich das Frakturrisiko besonders bei mehrgliedrigen und weitspannigen Brücken im Seitenzahnbereich erhöht.<sup>35</sup> Durch eine Vergrößerung der Verbinderabmessungen, durch das Integrieren von Keramikbalken sowie durch das Verwenden von parallel ausgerichteten Glasfasern kann die Bruchfestigkeit erhöht werden. Studien belegen, dass mit Glasfasern verstärkte Brückengerüste aus BisGMA eine signifikant höhere Bruchfestigkeit aufweisen als Brücken ohne eine Glasfaserverstärkung.<sup>54,55,56</sup> Eine weitere Option stellt die Einbettung von Keramikmikrofüllern in die Kompositmatrix dar.<sup>54,57</sup> Neben den Verbinderabmessungen hat auch das Gerüstdesign einen wesentlichen Einfluss auf die Bruchfestigkeit. Mit der Optimierung des Verbindersdesigns beschäftigen sich bereits mehrere Studien. Hierbei wurden Festigkeitsanalysen mit Hilfe der Finiten Elemente Methode durchgeführt.<sup>58-60</sup>

Diese Ergebnisse zeigen, dass neuartige Hochleistungskunststoffe eine wirtschaftliche Alternative zur Vollkeramik darstellen können.

### 1.4 Brückengerüstdesign und Verbinderdimensionierung

Damit die Brückenversorgungen den intermittierenden Beanspruchungen über einen langen Funktionszeitraum widerstehen können, muss die Dimensionierung der Brückengerüste an die zu versorgenden Spannweiten und an die von der Lokalisation abhängige Kaubelastung angepasst werden.<sup>61</sup> Besonders die Verbinderabmessungen haben hierbei einen wesentlichen Einfluss auf die Frakturfestigkeit der Gerüste.<sup>22,23,61-63</sup> Große Spannweiten erfordern eine Verstärkung der Verbinder. Eine Häufung von Gerüstfrakturen ist insbesondere in der Molarenregion, infolge der dort vorhandenen hohen Kaukräfte, beobachtet worden. Die Verbinder bei Brückenversorgungen in der Molarenregion müssen infolge dessen größer dimensioniert werden als die Verbinder von Frontzahnbrücken. Aufgrund der bislang ungenügenden Festigkeitseigenschaften der Keramiken konnte die angestrebte Festigkeitssteigerung der Brücken bislang nur durch eine Vergrößerung der Verbinderquerschnitte erreicht werden (*Tabelle 3*).

**Tabelle 3: Übersicht von Empfehlungen zur Verbinderdimensionierung**

Studie, Autor	Werkstoff Abmessungen	Art der Prüfung	Prüfgröße/ Verbinder	Ergebnisse/ Empfehlungen
STUDART <sup>20</sup>	Y-TZP Zirkonoxid drei-, vier-, und fünfgliedrige Brücken	mechanisch	Es wurden Langzeitbelastungen (20Jahre) mit 250N und kurzzeitige Belastungen mit 800N auf das Zwischenglied getestet	Es wurden minimale Durchmesser von 2,7; 4; 4,9 mm und Querschnitte von 5,7;12,6; 18,8 mm <sup>2</sup> für 3-, 4-, und 5-gliedrige Brücken empfohlen.
KAMPOSIORA <sup>64</sup>	Dreigliedrige vollkeramische Seitenzahnbrücken mit verschiedenen Verbinderhöhen (3 mm, 4 mm)	Simulation 2D-FEM		Die Spannungen waren in den Konnektoren konzentriert und verringerten sich um 40- 50 % bei Zunahme der Verbinderhöhe von 3 mm auf 4 mm.
AUGEREAU <sup>65</sup>	Dreigliedrige Vollkeramikbrücke im Prämolarenbereich	Simulation 3D-FEM	okklusal geöffnetes Trapez Abmessungen: 3,3; 7,95; 14,6; 23,25 mm <sup>2</sup> , 500N auf Pontic	Die 0,15 % Dehngrenze wurde nur bei 3,3 mm <sup>2</sup> erreicht. Die größten Spannungen traten an der Unterseite des Pontic auf.
ERDELT <sup>82</sup>	Es wurden 210 Vollkeramikbrücken mit unterschiedlicher Geometrie durch ein Computerprogramm regeneriert.	Simulation 3D-FEM	Im Anschluß erfolgte die Auswahl durch Dentaltechniker unter ästhetischen Punkten und dann eine erneute Digitalisierung und Untersuchung mit FE.	Im Anschluss wurde der beste „Kompromiss“ zwischen der Ästhetik und der Spannungsgrößen ermittelt
FILSER <sup>41</sup>	gefräste, dreigliedrige Zirkonoxidbrücken sowie InCeram und Empress 2 Brücken im Molarenbereich	Mechanisch, Biegeversuch bis Fraktur	Die Abmessungen betragen 6,9 mm <sup>2</sup> (2,7 mm* 2,6 mm), die Pfeiler weisen eine laterale Beweglichkeit auf.	Bei Zunahme des Konnektorenquerschnitts stieg die Bruchfestigkeit. Für dreigliedrige TZP-Zirkon Brücken ist ein minimaler Querschnitt von 6,9 mm <sup>2</sup> ausreichend.
WON-SUCK <sup>66</sup>	Eine dreigliedrige Brücke aus experimenteller heiß-gepresster, lithiumdisilikat verstärkter Keramik wurde mit Variolink zementiert. Die Zahn Pfeiler und das Modell bestehen aus Epoxidharz-Kunststoff.	mechanisch Biegeversuch	Untersuchung des Einflusses des Radius des Verbinders am Übergang zwischen Pontic und Krone auf die Frakturspannung. Krafteinleitung auf Pontic Die Brücke wurde für 1 Woche bei 37° C im Wassergelagert.	Mit Zunahme des Radius auf der gingivalen Seite des Verbinders von 0,25 mm auf 0,90 mm stieg die durchschnittliche Frakturspannung um ca. 140 %. Der okklusale Radius spielt dabei keine Rolle. Die Fraktur beginnt an der Unterseite des Verbinders. Radius an der Unterseite der Verbinder soll mind. 0,90 mm betragen.
SORENSEN <sup>2</sup>				Folgende Empfehlungen für Empress 2 wurden gegeben: 12 mm <sup>2</sup> Frontzahnbereich (4 mm* 3 mm) 20 mm <sup>2</sup> Seitenzahnbereich (5 mm* 4 mm)

Bisher werden Gerüste und Verbinder hauptsächlich nach Erfahrungswerten gestaltet und sind daher individuellen Einflüssen unterworfen. Dies führt häufig zu einer Überdimensionierung der Verbinder mit den daraus resultierenden ungünstigen parodontalen Verhältnissen und einer unzureichenden ästhetischen Wirkung.

Entscheidend für die Dimensionierung der Gerüste ist das verwendete Gerüstmaterial. So wird die Verwendung von leuzithverstärkten Feldspatkeramiken nur für dreigliedrige Brücken und Einzelkronen bis zum zweiten Prämolaren empfohlen.<sup>62,63</sup>

Aufgrund der geringeren Festigkeitseigenschaften von Silikatkeramiken sind die Verbinder dreigliedriger Brücken wesentlich massiver zu gestalten, als die Verbinder vergleichbarer Oxidkeramikbrücken. Die Silikatkeramiken sind nur für dreigliedrige Brücken bis zum zweiten Prämolaren und als Einzelkrone im Molarenbereich zugelassen. Dafür sind ästhetisch und parodontalhygienisch problematische Verbinderquerschnittsflächen von mindestens 16 mm<sup>2</sup> notwendig.<sup>17,67</sup> Für die Querschnittsflächengestaltung wird eine vertikal-ovale Form empfohlen.

Für ZrO<sub>2</sub>-Brücken des LAVA<sup>®</sup>-System sind dagegen geringere Verbinderabmessungen erforderlich. Vor allem die hochfesten ZrO<sub>2</sub>-Keramiken eröffnen die Möglichkeit den Indikationsbereich für vollkeramischen Zahnersatz auf Seitenzahnbrücken und Brücken mit mehreren Brückengliedern auszudehnen.<sup>32,68</sup>

Ungeachtet der vorhandenen Materialvielfalt ist die Frakturproblematik bei Brückenversorgungen im Seitenzahnbereich noch immer nicht gelöst. Eine Vielzahl von Studien hat sich bereits mit der Frakturbeständigkeit in Zusammenhang mit Verbinderabmessungen beschäftigt. Die in den Studien empfohlenen Verbinderabmessungen variieren jedoch sehr stark (*Tabelle 3*). Besonders aufgrund der verschiedenen Untersuchungsansätze und Versuchsanordnungen ist die Vergleichbarkeit der Studienergebnisse eingeschränkt.

### **1.5 Aktueller Entwicklungsstand bei CAD /CAM-Systemen in der Zahnmedizin**

Die neuartigen Hochleistungskeramiken lassen sich aufgrund ihrer extremen Härte nur subtraktiv bearbeiten. Diese Materialeigenschaften erforderten es, die bislang vorwiegend industriell eingesetzten CAD/CAM-Frässysteme für eine zahnmedizinische Anwendung zu modifizieren. Mittlerweile steht eine Vielzahl an Systemen dem Anwender zur Verfügung.<sup>69,70,71</sup> Mehr als zehn verschiedene CAD/CAM-Systeme sind bereits eingeführt oder stehen kurz vor der Markteinführung (Cerec<sup>®</sup>, DCS-Precident<sup>®</sup>, Cicero<sup>®</sup>, Everest<sup>®</sup>, Lava<sup>®</sup>, Procera<sup>®</sup>, Digident<sup>®</sup>, Celay<sup>®</sup> (Kopierschleifverfahren), Cercon smart ceramics<sup>®</sup>, WOL-Ceram<sup>®</sup>). Einen Überblick über die vorhandenen marktreifen Systeme geben Tinschert und Luthardt.<sup>21,72-75</sup>



Die CAD/CAM-Technologie umfasst die dreidimensionale Planung eines Bauteils am Computer und seine anschließende vollautomatisierte Herstellung durch eine computergesteuerte Werkzeugmaschine. Der größte Teil der CAD/CAM-Systeme ist in der Lage Titan, Kunststoff und Keramik zu bearbeiten und daraus Kronen und Brückengerüste herzustellen. Die erforderliche Verblendung erfolgt anschließend in einem zweiten Arbeitsschritt.

Die industriell vorgefertigten Rohmaterialien, die unter gleichbleibenden, optimalen und reproduzierbaren Bedingungen hergestellt wurden, erfüllen höchste Anforderungen an Reinheit und Homogenität und reduzieren dadurch die Gefahr von Materialfehlern. Durch die subtraktive Bearbeitung bleiben die vorteilhaften Materialeigenschaften erhalten. Somit kann das gesamte Potenzial eines Werkstoffes bezüglich seiner Materialeigenschaften ausgeschöpft werden.

Zusätzliche Vorteile des Verfahrens liegen in der Kostenersparnis durch die weitgehende Automatisierung der Herstellungsprozesse.

Mit der CAD/CAM-Technologie ist es möglich, Zahnersatz von gleichbleibender Qualität zu produzieren. Von Nachteil ist der enorme zeitliche Aufwand beim Fräsen der Gerüste aus „gehipptem“ hochfesten Zirkoniumdioxid. Als zeitsparende Alternative besteht die Möglichkeit, ungesinterte „Grünlinge“ anstelle von bereits gesinterten Keramiken zu fräsen. Die vorgesinterten Gerüste müssen anschließend noch nachgesintert werden.

### **1.6 Anwendung der FE-Methode für Materialanalysen**

Die Finite Elemente-Methode (FEM) ist ein hoch entwickeltes numerisches Verfahren, u. a. für die Berechnung der Spannungsverteilung in Bauteilen. Sie wurde ursprünglich für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt entwickelt und zählt heute zu den Standardkonstruktionswerkzeugen der Ingenieure. Sie wird schwerpunktmäßig im Bereich der Entwicklung und Optimierung von Bauteilen eingesetzt.<sup>76</sup>

Bei diesem Verfahren wird der zu berechnende Körper in eine große Anzahl kleiner, aber endlich vieler Elemente unterteilt. Die Elemente werden durch mathematische Funktionen beschrieben, aus denen sich mit Hilfe partieller Differentialgleichungen und definierter Randbedingungen ein großes, komplexes Gleichungssystem ergibt. Es ist ein numerisches Näherungsverfahren, bestehend aus einer Vielzahl von Differentialgleichungen, welches auf der Lösung dieser komplexen Gleichungssysteme beruht. Aus der Lösung des Gleichungssystems werden im Anschluss die Ergebnisse durch den Anwender interpretiert.

In der Medizin fand das Verfahren u. a. bei der Untersuchung der Druck- und Spannungsverteilung im belasteten sowie im unbelasteten Knochen Anwendung.<sup>77</sup> Auch in der

zahnmedizinischen Forschung ist die FE-Methode seit einigen Jahren eine gängige Analyseverfahren. <sup>78</sup> Sie wird vorwiegend zur Spannungs- und Verformungsanalyse innerhalb von knöchernen Strukturen, Parodontium, Kronen, Brücken und Zähnen mit und ohne Füllungen hinzugezogen.

In der Anfangszeit konnten aufgrund beschränkter Rechenkapazitäten nur zweidimensionale FE-Modelle erstellt werden. Diese zweidimensionalen Rechenmodelle beschreiben jedoch nur unzureichend die kritischen Aspekte der Druck- und Spannungsverteilung im Zahn sowie in den zahnärztlichen Restaurationen. <sup>79,80</sup> Für genauere Untersuchungen war die Erweiterung des FE-Simulationsmodelle durch die Einbeziehung der dreidimensionalen Struktur zwingend notwendig. Erst mit der Zunahme der PC-Prozessorleistung konnten diese Modelle immer komplexer gestaltet werden.

Mit Hilfe der FE-Analyse wurden zum Beispiel Designvorschläge auf eine optimale Konnektorengestaltung hin untersucht und anschließend experimentell überprüft. <sup>81</sup> Damit konnten Empfehlungen zur Gestaltung von Verbindern mit maximaler Festigkeit bei gleichzeitig guter Ästhetik gegeben werden. <sup>82</sup> Andere Studien beschäftigen sich mit Belastungs- und Verformungsanalysen verschiedener Implantatdesigns und stellen die Zusammenhänge zwischen dem Design und der Spannungsentwicklung in den Zug- und Druckzonen des umliegenden Alveolarknochens dar. <sup>83-87</sup> Auch verschiedene Vollkeramikronendesigns sind auf ihre Frakturfestigkeit und Spannungsverteilung hin untersucht und daraus neue Designvorschläge entwickelt worden. <sup>88-90</sup> Analysen von Vollkeramikmolarenkronen zeigen, dass die Präparation des Zahnstumpfes mit einer abgerundeten Stufe erfolgen sollten und die Gerüst- und Verblendkeramiken einen ähnlichen Expansionskoeffizienten besitzen müssen, um die Langzeitfestigkeit sicherzustellen. <sup>90</sup> Der Zusammenhang zwischen der Schichtdicke der Gerüste vollkeramischer Kronen und der Stabilität der Gesamtstruktur kann mit der FEM sehr gut dargestellt werden. <sup>91,92</sup> Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass die adhäsive Befestigung von Kompositfüllungen und Keramikeilkronen einen festigkeitssteigernden Einfluss auf die Spannungsentwicklung innerhalb der Füllung und auf den Zahn hat. <sup>93,94</sup> Ausiello stellt in seiner Studie das Verformungsverhalten eines unversorgten Prämolaren und okkusalen Belastung dem Verhalten eines Prämolaren gegenüber, welcher mit einer MOD-Füllung versorgt ist. <sup>95</sup> Kampiosiora hat dagegen den Einfluss des Befestigungszementes auf die Festigkeit von zahnärztlichen Restaurationen untersucht. <sup>96</sup> Weitere Studien beschäftigen sich mit dem Einfluss unterschiedlicher Randdesigns und der Art der Befestigung auf die Spannungsverteilung und Festigkeit von Prämolarenkronen. <sup>97,98</sup> Alle diese Studien kommen zu dem Ergebnis, dass es bisher keine perfekte Methode zur Untersuchung der Festigkeits- und Fraktureigenschaften

speziell von dentalen Keramiken gibt. Die FE-Methode stellt hierbei eine sinnvolle Ergänzung zu den klassischen mechanischen Biegeversuchen für Festigkeitsuntersuchungen dar. Dazu muss der FEM-Algorithmus jedoch das reale Verformungsverhalten exakt darstellen, wozu die Zusammenhänge zwischen den Werkstoffkenngrößen und dem Verformungsverhalten zwingend bekannt- und der Frakturmechanismus identifiziert sein muss. Die richtige Verteilung und Vernetzung der Knoten, die Konstruktion des 3D-Modells, die Auswahl der Materialparameter sowie die Interpretation der Messergebnisse hängen sehr stark von der Erfahrung des Anwenders ab und kann bei ungenügenden Kenntnissen leicht zu Fehlinterpretationen der Rechenergebnisse führen<sup>99</sup>. Der Vergleich der Genauigkeit von errechneten FEM-Werten mit den gemessenen Werten von Biegeversuchen an Zähnen aus der Prämolarenregion hat bislang nur zufriedenstellende Übereinstimmungen gezeigt.<sup>95</sup>

### **1.7 Werkstoffanalysen mit der Speckle-Messtechnik in der Zahnmedizin**

Die elektronische Speckle-Interferometrie (ESPI) ist ein optisches Messverfahren zur berührungslosen flächenhaften Verschiebungsmessung und Deformationsmessung von Oberflächen mit sehr hoher Genauigkeit.<sup>100,101</sup> Die Messungen lassen sich in alle drei Raumrichtungen (x, y, z) durchführen. Die Grundlagen dieser laseroptischen Vermessungsmethode wurden bereits Anfang 1970 entwickelt.<sup>102</sup> Die Speckle-Interferometrie findet eine breite Anwendung in der experimentellen Mechanik sowie der Werkstoffprüfung. Sie eignet sich zur Vermessung von sehr kleinen dreidimensionalen Verschiebungen oder ebenen Dehnungen. Zusätzlich muss auch das Schwingungsverhalten von Bauteilen erfasst werden. Die Speckle-Interferometrie ist ein bewährtes Messverfahren zur hochgenauen Vermessung von Oberflächen unter statischen und dynamischen Lastverhältnissen.<sup>103</sup>

In der Zahnmedizin wird 3D-ESPI als zerstörungsfreies Messverfahren zur Bestimmung des E-Moduls von Kompositen und zur 3D-Vermessung von Deformationen eingegliedert Restaurationen, eingesetzt.<sup>100,104</sup> Eine andere Studie nutzt die Messmethode zur Ermittlung des freien Schrumpfungsvektors von Kompositen während der Polymerisationsreaktion.<sup>105</sup> Die Speckle-Interferometrie ermöglicht die Echtzeitdarstellung von Volumenveränderungen während der lichtinduzierten Aushärtung von Kompositkunststoffen. Die Einflüsse des Kavitätendesigns auf die Verformungen der verbliebenen Zahnhartsubstanz können ebenso mit der Messmethode untersucht werden wie die Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Polymerisationsschrumpfungsgraden der Kunststoffe und der resultierenden Spannungsentwicklung innerhalb der Zahnstruktur.<sup>106,107</sup> Weiterhin wurde das

Verformungsverhalten von viergliedrigen metallkeramischen Brücken bestimmt und unter dem Gesichtspunkt des Verbinderdesigns ausgewertet.<sup>103</sup>

Die Ergebnisse zeigen, dass die Speckle-Interferometrie für Messaufgaben in der Zahnmedizin geeignet ist, wobei jedoch, in Abhängigkeit von der jeweiligen Versuchsdurchführung, womöglich eine reduzierte Messqualität zu verzeichnen ist.<sup>108-110</sup>

### **1.8 Alternative, experimentelle Messmethoden für Versagens- und Verformungsanalysen**

Um die erforderliche Minstdimensionierung von Gerüsten und Verbindern ermitteln zu können, sind genaue Kenntnisse über das Verformungsverhalten und die Frakturmechanismen der verschiedenen Werkstoffe und ihrer Materialkombinationen notwendig.

Die Risszähigkeit  $K_{IC}$ , das Elastizitätsmodul (E-Modul), der Weibull-Faktor  $m$  und der Poisson-Koeffizient  $\mu$  sind materialspezifische Kennwerte, die einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit haben. Die Bestimmung dieser Kennzahlen ist bislang in aufwendigen werkstoffkundlichen Untersuchungen erfolgt. Mit den Biege- und Zugversuchen stehen dafür einfache Messmethoden zur Verfügung, die aber besonders bei keramischen Werkstoffen wegen der teuren Probenherstellung und der notwendigen momentfreien Probeneinspannung aufwendig und kostenintensiv sind. Für die Festigkeitsanalyse haben sich der Dreipunkt- und der Vierpunktbiegeversuch etabliert.

Für Keramiken genügt eine rein konventionelle Festigkeitsbetrachtung, wie bei den Metallen, nicht. Erst die Kombination von konventioneller Festigkeitsberechnung, Statistik und Bruchmechanik erlaubt hier eine zuverlässige Materialbeschreibung.

Bisher konnte die Verformungs- und Spannungsverteilung in Zähnen, Kronen und Brücken nur mit Hilfe von Spannungs- und Dehnungsmessstreifen untersucht werden.<sup>111,112</sup> Diese Vorgehensweise stellt jedoch eine große Herausforderung an die experimentellen Messmethoden dar.<sup>58,59</sup> Aufgrund der Sprödigkeit der Keramiken sind vergleichende Untersuchungen zu den Verformungseigenschaften nicht zerstörungsfrei möglich. Für die Ermittlung statistisch verlässlicher Ergebnisse ist jedoch eine Vielzahl von Probekörpern mit den damit verbundenen Kosten notwendig. Zur Ermittlung der Belastungsverteilung an Pfeilerzähnen und Brückengliedern sind mehrere Methoden entwickelt worden. Fischer hat Keramiken mit der Resonanzfrequenzmethode untersucht und damit gezeigt, dass dieses Messverfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffuntersuchung und zur Bestimmung der Langzeitfestigkeit von Keramiken geeignet ist.<sup>113</sup>

Eine weitere Methode ist die „Reißlacktechnik“, mit der Verformungen der Brückenoberflächen dargestellt werden, so dass eine begrenzte Aussage über die Spannungsverteilung innerhalb von Brücken möglich ist.<sup>114,115</sup>

Auch können fotoelastische Kunststoffe verwendet werden, die bei Belastung ihre optischen Eigenschaften verändern. Der Nachteil dieser Methode ist, dass die Materialeigenschaften der Prüfkörper sich sehr stark von den Eigenschaften der Keramiken und Kunststoffe unterscheiden und daher die Informationen nur begrenzt auf die reale Brückenkonstruktion übertragbar sind.<sup>116</sup>

Die elektronische Speckle-Interferometrie bietet eine gute Möglichkeit zerstörungsfrei und mit sehr hoher Präzision, Oberflächenverformungen zu erfassen.<sup>100,103-110,117,118</sup>

## 2 Fragestellung

### 2.1 Allgemein

Die Haltbarkeit von Seitenzahnbrücken hängt im Wesentlichen vom Widerstand ab, den das Gerüst den Kaubelastungen entgegensetzen kann. An der Brücke entsteht ein Biegemoment, welches von der Höhe der Kaukraft und dem Abstand des Kraftangriffspunktes von den Pfeilern bestimmt wird. Die Festigkeit der Gerüste wird in erster Linie durch das Design, die Verbinderabmessungen und die Materialeigenschaften der verwendeten Werkstoffe festgelegt. Zur Vermeidung von Frakturen ist es deshalb notwendig, das Gerüstdesign und besonders die Gestaltung der Konnektoren so zu wählen, dass auftretende Zugspannungen nicht in belastungsintensiven Regionen liegen und die frakturkritischen Werte nicht überschritten werden. Aufgrund der geringeren Bruchlasten einiger Keramiken müssen die Verbinderquerschnitte sehr groß gewählt werden, was eine parodontalhygienisch ungünstige Gestaltung der Interdentalräume und Einschränkungen im ästhetischen Gesamterscheinungsbild zur Folge hat. Ein zusätzliches Problem stellen die mitunter sehr ungünstigen Platzverhältnisse, besonders bei kurzen klinischen Kronen, dar.

Bei der Gestaltung der Konnektoren muss also zwischen einer ausreichenden Festigkeit der Gerüste, einer parodontalhygienisch günstigsten Gestaltungsform der Verbinder und der bestmöglichen Ästhetik abgewogen und ein Kompromiss gefunden werden. Die ungenügenden Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Festigkeit, Design und Frakturmechanismen führen dazu, dass die Gestaltung der Brückengerüste bislang auf den Erfahrungen der Zahntechniker beruht.

Durch die neuen Hochleistungskeramiken besteht nun die Möglichkeit, Vollkeramiksysteme auch für Molarenkronen und weitspannige Brücken im Seitenzahnbereich einzusetzen. Auch die neuentwickelten Kunststoffe stellen ihre Eignung als Gerüstmaterial jedoch nur für kleinere Brückenspannweiten bereits erfolgreich unter Beweis.

Das „ideale“ Gerüstmaterial muss eine ausreichende Bruchfestigkeit und Abrasionsbeständigkeit aufweisen und dadurch die Grundlagen für ein breites Indikationsspektrum legen. Weiterhin muss er wirtschaftlich, d. h. mit einem geringem Zeitaufwand, zu bearbeiten sein, und er muss noch eine sehr gute Ästhetik der Restauration ermöglichen.

Diese neuen Hochleistungskeramiken und Kunststoffe sind ein wichtiger Schritt in Richtung zahnfarbener Zahnersatz. Aufgrund der besonderen Materialeigenschaften können diese

Werkstoffe jedoch nur maschinell bearbeitet werden. Dieser anfängliche Nachteil könnte sich jetzt womöglich als ein entscheidender Vorteil herausstellen. Die zunehmende Verbreitung der CAD/CAM-Technologie in der Zahnmedizin eröffnet erst die Möglichkeit, ganz gezielt Einfluss auf das Design der Gerüste zu nehmen und diese individuell zu konstruieren.

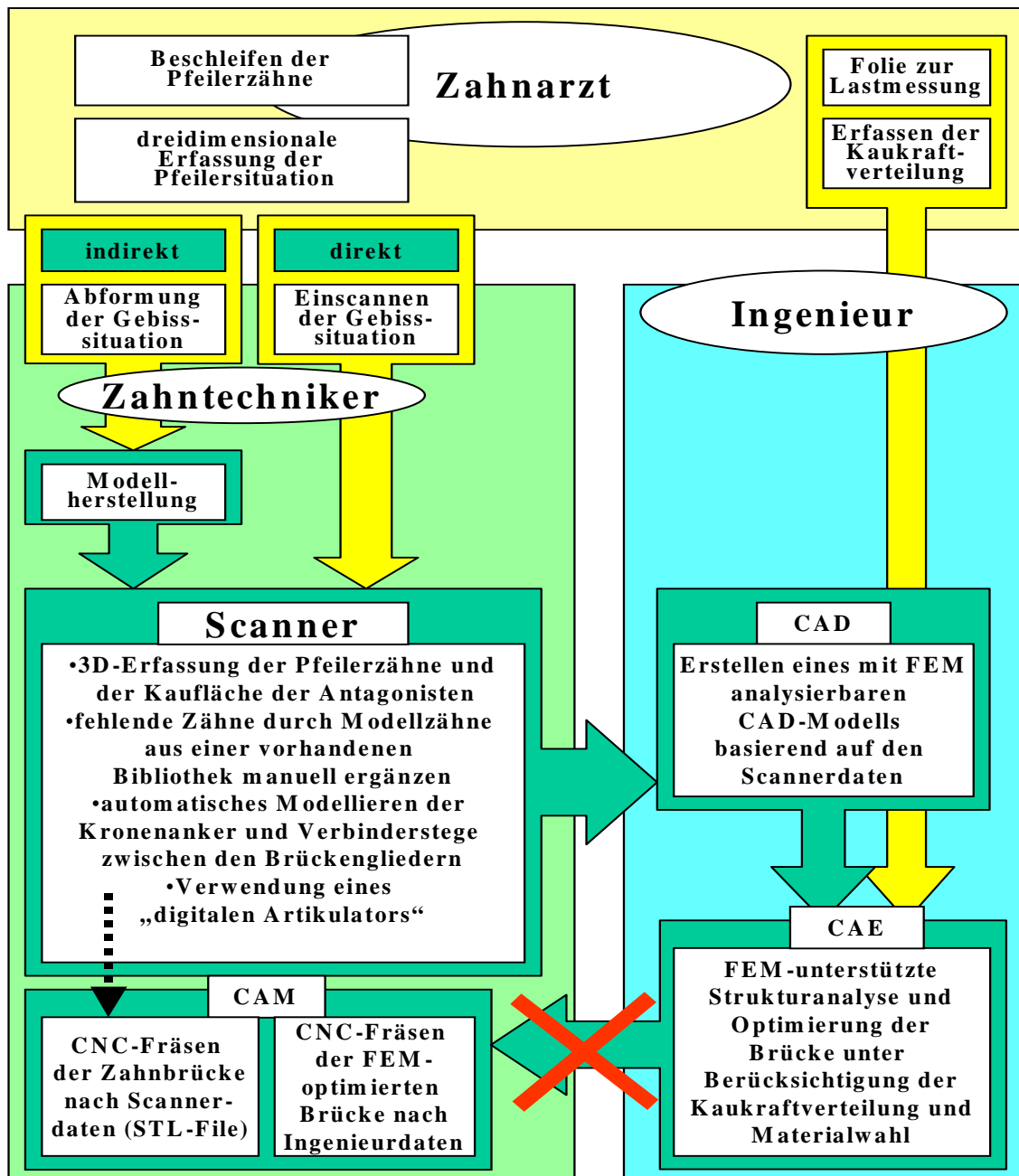


Abbildung 3: optimierter Verfahrensablauf zur Herstellung von Zahnersatz

Zur Zeit ist es allerdings noch nicht möglich, so gezielt in den Konstruktionsprozess einzugreifen, dass speziell die Gestaltung und die Abmessungen der Verbinder sowie das Gerüstdesign auf die individuelle Belastungssituation im Patientenmund, in Verbindung mit den gewünschten Materialien und der vorliegenden Platzsituation, angepasst werden kann. Erst das Zusammenwirken der CAD/CAM-Technologie mit integrierten FE-basierenden Konstruktionstools für eine belastungsabhängige Gestaltoptimierung des Brückengerüstdesigns in Verbindung mit Hochleistungskeramiken und Kunststoffen wird zu einer Ausweitung der Indikationsgrenzen auch auf weitspannige Brücken für die Molarenregion führen und damit zur weiteren Verbreitung der Vollkeramik beitragen. Die Vorteile eines FE-optimierten Brückengerüsts sind in der folgenden Übersicht zusammengefasst:

- Durch die Anpassung der Verbinder- und Gerüstdimensionierung an die vorliegenden Belastungen in der Mundhöhle wird die Langzeitfestigkeit von Brücken erhöht.
- Positive, materialspezifische Eigenschaften des „Wunschwerkstoffes“ können in die Gestaltung der Gerüste gezielt mit „eingearbeitet“ werden.
- Durch die Verbindung der CAD/CAM-Technologie mit rechnergestützten FE-Konstruktionsprogrammen kann das errechnete „individuelle“ Design der optimierten Gerüste direkt in den Herstellungsprozess überführt werden, ohne das durch Gieß- und Sinterprozesse Materialfehler generiert werden können.
- Die Vorteile industriell hergestellter Fräsblöcke können gezielt genutzt werden.
- Es ist eine individuelle Anpassung der Gerüste an zu erwartende ortsabhängige Belastungen (Frontzahn- und Molarenregion) mit „eingebauter“ Sicherheitsreserve möglich.
- Die Vielfalt der bekannten Werkstoffe wird dadurch nutzbar, und ihre spezifischen Werkstoffigenschaften können gezielt eingesetzt werden.
- Es können Besonderheiten der Kaulastverteilung bei der Gerüstkonstruktion berücksichtigt werden (Bruxismus).
- Durch die rechnerstützte Konstruktion kann die Gerüstkonstruktion auf das individuelle Platzangebot abgestimmt werden.
- Die Mindestschichtdicken für Keramikverblendungen können in die Konstruktion mit einfließen und bei Festlegung der Gerüststärken beachtet werden.
- Der Herstellungsprozess wird nachvollziehbar dokumentiert, was besonders im Hinblick auf die Qualitätssicherung von Bedeutung ist.



### *2.1.1 Zielsetzung*

Für die Beantwortung der Fragestellung nach dem optimalen Gerüstdesign und den „sichersten“ Verbinderabmessungen, hat sich die FE-Analyse, neben dem klassischen Biegeversuch, als adäquates Hilfsmittel herausgestellt. Entscheidend hierbei ist, dass die FE-Analyse auch wirklich das reale Festigkeitsverhalten der Brückengerüste im Ergebnis abbildet. Besonders die keramischen Werkstoffe führen bei FE-Analysen, aufgrund ihrer besonderen materialspezifischen Eigenschaften, zu Problemen. Voraussetzung für eine FE-gestützte Designoptimierung von Brückengerüsten ist daher die „richtige“ Festlegung der Rechenparameter, da Fehler bei der Modellerstellung und Parameterauswahl sich unmittelbar auf das Rechenergebnis übertragen könnten. Mit Messverfahren, basierend auf dem Prinzip der Elektronischen-Speckle-Pattern-Interferometrie (ESPI), können Oberflächenverformungen mit sehr hoher Präzision berührungslos vermessen werden. Mit den Ergebnissen der 3D-ESPI-Messungen könnte daher die Übereinstimmung mit der FE-Analyse experimentell überprüft werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, zu zeigen, dass die Speckle-Interferometrie, als hochpräzises optisches Messverfahren, einen bedeutenden Beitrag bei der experimentellen Bestimmung der Verformungs- und Festigkeitseigenschaften von Brückengerüsten aus Keramiken und Kunststoffen leisten kann und als experimentelles Messverfahren zur Überprüfung der FE-Analyseergebnisse geeignet ist.

Gelingt eine präzise Vermessung der Gerüstverformungen, sollen im Anschluss die Zusammenhänge zwischen der Gerüstverformung und den Verbinderabmessungen für verschiedene Kunststoffe und Zirkoniumdioxid dargestellt werden.

### 3 Material und Methode

#### 3.1 Übersicht

Die Studie ist gegliedert in einen experimentellen und einen theoretischen Anteil. Im experimentellen Anteil wird die lastabhängige Verformung dreigliedriger Brückengerüste mit variablen Verbinderquerschnitten vermessen. Die Vermessung der Verformungen wird mit dem Messsystem, welches nach dem Prinzip der 3D-Speckleinterferometrie (3D-ESPI) arbeitet, durchgeführt. Die Brückengerüste wurden zuvor mit Hilfe des Konstruktionstools des dentalen CAD/CAM-Systems (DCS Precident®) in digitaler Form generiert und mit dem zugehörigen CNC-Frässystem aus systemspezifisch gelieferten Materialblöcken herausgefräst. Für die Analyse wurden verschiedene Gerüstwerkstoffe aus Keramik und Kunststoff ausgewählt. Ziel der Messungen ist es, die Zusammenhänge zwischen dem lastabhängigen Verformungsverhalten, der Durchbiegung des Gerüsts und den Verbinderabmessungen darzustellen.

Im theoretische Anteil wird die Verformung des dreigliedrigen Brückengerüsts mit dem Verbinderquerschnitt 4 mm<sup>2</sup> mit der FE-Methode numerisch simuliert. Anschließend werden die FE-Ergebnisse den experimentell gemessenen Verformungen gegenübergestellt und miteinander verglichen.

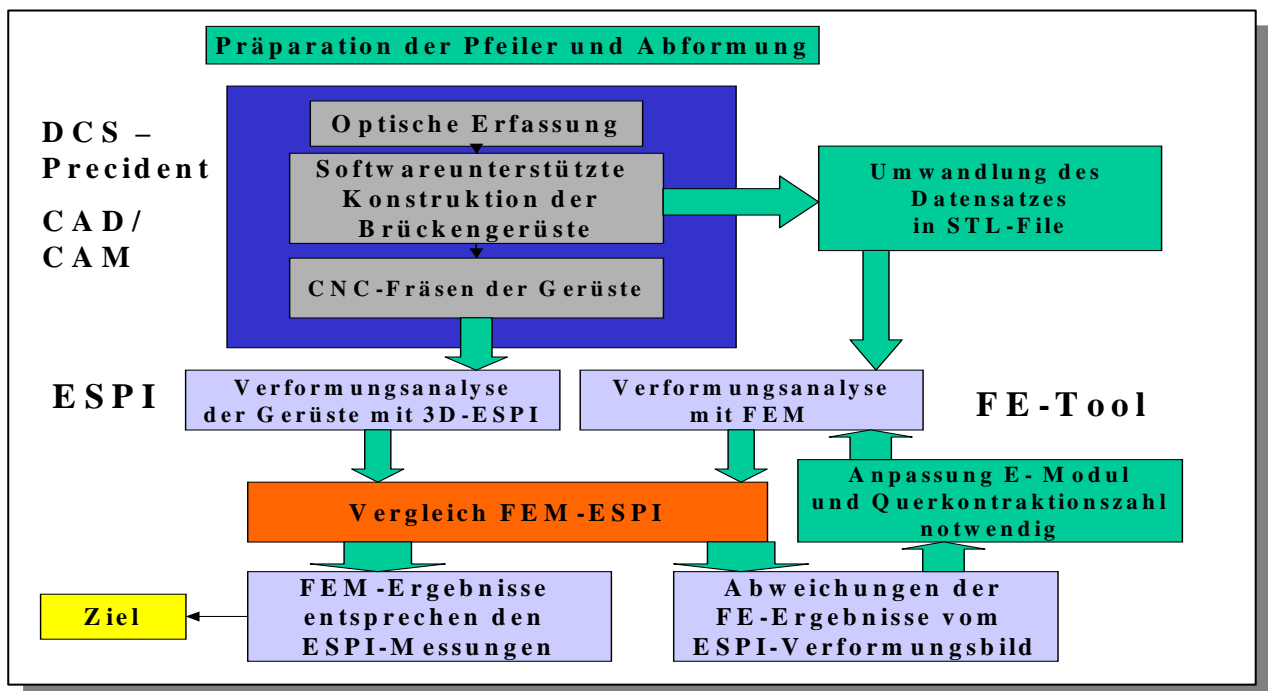


Abbildung 4: Übersicht über den Versuchsablauf

### 3.2 3D-ESPI Messung

#### 3.2.1 Grundlagen der 3D-ESPI Messmethode

Der Speckle-Effekt beruht auf der diffusen Streuung monochromatischen Lichts an mikrorauen Oberflächen. Die optischen Grundlagen leiten sich von der Holographie ab. Dabei wird das zu vermessende Bauteil mit kohärentem und monochromatischem Licht beleuchtet, das reflektierte Licht zur Interferenz gebracht und das entstandene Interferenzmuster mit einer CCD-Kamera aufgenommen. Als Lichtquelle eignet sich deshalb nur Laserlicht. Für die Messungen wurde ein Argonlaser mit einer Wellenlänge von 512 nm verwendet. Die Speckle-Interferenzen entstehen durch die Beleuchtung von mikrorauen Oberflächen, bei denen die Rauigkeitsspitzen nach dem Huygenschen Prinzip als Ausgangspunkte für neue Elementarwellen dienen. An den Rauigkeitsspitzen der Oberfläche wird das kohärente Licht in verschiedenen Winkeln wieder reflektiert und breitet sich nach dem Zufälligkeitsprinzip im Raum aus wobei sich die Wellenfronten überlagern.

Mit entsprechenden Interferometeraufbauten können Objektverformungen senkrecht zur Objektoberfläche ("out-of-plane") und tangential zur Objektoberfläche ("in-plane") vermessen werden. Dadurch ist es möglich, die Oberflächenverformungen dreidimensional zu messen und darzustellen. Jede Verformung der Oberfläche wird für jede der drei Raumrichtungen in einem eigenen Messbild erfasst. Für jeden Pixel des Messbildes liegt ein bestimmter Verformungswert vor. Aus den einzelnen Verformungsbildern der x-, y- und z-Achsenrichtung lässt sich die absolute Oberflächenverformung des gesamten Bauteils zusammensetzen. Die Messbilder in der z-Achse zeigen dabei die Oberflächenverformungen in der „out of-Plane“-Ebene, d. h., die Bewegungen von der Kamera weg oder auf sie zu. In dieser Messrichtung ist die Messgenauigkeit am größten. Der experimentell bedingte Messfehler beträgt hier +/- 0,025µm.

Um die genaue Lage der einzelnen Oberflächenpunkte im dreidimensionalen Raum bestimmen zu können, muss sichergestellt werden, dass jeder Punkt auf der Oberfläche des zu vermessenden Objekts mit dem Laserstrahl beleuchtet werden kann.

### 3.2.2 Gerüstmaterialien

Insgesamt vier verschiedene Gerüstmaterialien wurden näher untersucht (DC-Zirkon<sup>®</sup>, DC-Tell<sup>®</sup>, PEEK<sup>®</sup> und ProTemp III<sup>®</sup>). DC-Zirkon<sup>®</sup> ist eine Hochleistungskeramik aus „gehipptem“ Zirkoniumdioxid. Speziell handelt es sich um einen feinkristallinen, Yttriumoxid stabilisierten TZP-Werkstoff (Tetragonal Zirkonia Polycrystals). DC-Tell<sup>®</sup> (Polyamid 66) ist ein mit parallel angeordneten Glasfasern verstärktes Polyamid. Eingesetzt wird es als metallfreie Restauration bei Allergiepatienten, in der Implantologie, für Provisorien und bei der klassischen Kronen- und Brückenversorgung. ProTemp III Garant<sup>®</sup> (Fa. 3M ESPE, Seefeld) ist ein Bis-Acryl-Komposit, welches Verwendung bei Kronen- und Brückenprovisorien findet. Festigkeitsuntersuchungen an dreigliedrigen Brückenprovisorien ergaben für die 24 h Wasserlagerung Festigkeitswerte von 728 N und bei der Kausimulation Werte von 745 N.<sup>119</sup> PEEK<sup>®</sup> (Polyetheretherketon) ist ein Hochleistungspolymer mit guten Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften und einem guten Abriebverhalten. Verwendet wird PEEK<sup>®</sup> unter anderem für temporäre Aufbauten bei Implantatversorgungen (CAMLOG<sup>®</sup>) sowie für mit Hilfe von CAD/CAM-Systemen hergestellte Brückenprovisorien.

**Tabelle 4: Übersicht über materialspezifische Kennzahlen der analysierten Materialien**

<b>Werkstoffname</b>	<b>PEEK</b>	<b>DC-Zirkon<sup>®</sup></b> <b>Fa. DCS Dental</b>	<b>DC-Tell<sup>®</sup></b> <b>Fa. DCS Dental</b>	<b>ProTemp III<sup>®</sup></b> <b>Fa. 3M-ESPE</b>
<b>Materialgruppe</b>	Hochleistungspolymer Polyetheretherketon	Gehipptes Zirkoniumdioxid	Glasfaserverstärktes Polyamid (PA 66)	Bis-Acryl- Komposit
<b>Biegefestigkeit</b> in MPa	keine Angaben	1200 <sup>120</sup>	380 <sup>120</sup>	>60 <sup>121</sup>
<b>E- Modul</b> in MPa	3600	210 GPa <sup>120</sup>	22000 <sup>120</sup>	>1600 <sup>121</sup>
<b>Druckfestigkeit</b> in MPa	keine Angaben	2000 <sup>120</sup>	keine Angaben	keine Angaben

### 3.2.3 Gerüstherstellung

Der für die Durchführung der Verformungsanalysen ausgewählte Prüfkörper ist ein dreigliedriges Brückengerüst für die Versorgung einer klinisch häufig auftretenden Lückensituation. Das Brückengerüst ersetzt den ersten Molaren und verwendet dabei den zweiten Prämolaren und zweiten Molaren als Brückenpfeiler.

Die Präparationsform der Pfeilerzähne orientiert sich an den empfohlenen Präparationsrichtlinien für vollkeramische Seitenzahnkronen und wurde als Hohlkehlpräparation durchgeführt, wobei scharfe Ecken und Kanten konsequent vermieden wurden.<sup>122,123</sup> Die Stumpfkonzität beträgt 4 – 6 °, um ein optimales Einlesen der Stumpfform in den Scanner zu ermöglichen.

Die Brückenpfeiler bestehen aus einer Nickel-Basislegierung (WIRON 99<sup>®</sup>) und sind unbeweglich in den Bohrungen einer stabil mit der Prüfmaschine verschraubten Stahlplatte verankert. Die Pfeilersituation wurde mit einem additionsvernetzenden Silikon abgeformt (Provil<sup>®</sup>) und damit ein Sägemodell aus Spezialhartgips (CAD/CAM-Stone<sup>®</sup>) hergestellt.

Anschließend wurde die Pfeilersituation digitalisiert. Hierfür stand ein handelsübliches CAD/CAM-System der Firma DCS-Precident<sup>®</sup> (Alschwill, Schweiz) zur Verfügung. Das System ist aus drei Komponenten aufgebaut:

- Scannereinheit für die dreidimensionale Stumpf und Zahnbogenerfassung
- PC mit zugehöriger 3D-CAD-Konstruktionssoftware
- CNC-Fräseinheit für die Anfertigung der Zahnrestaurationen

Im ersten Arbeitsschritt wird die Oberfläche des präparierten Zahnstumpfes dreidimensional erfasst. Der Scannvorgang erfolgt über das angefertigte Gipsmodell. Ein Laserscanner tastet dabei den Zahnstumpf berührungslos ab. Anschließend wird der zugehörige Zahnbogen gescannt und die Scandaten des Zahnbogens und der Zahnstümpfe zusammen gefügt. Das System speichert die 3D-Daten als **STL**-Datensatz (*STereo-Lithographie*).

Mit Hilfe des CAD-Konstruktionstool wird anschließend das dreigliedrige Brückengerüst mit den Verbinderabmessungen 4 mm\* 3 mm (Höhe\* Breite) am PC konstruiert. Die Kronengerüstdicke wurde mit 1,0 mm und die Zementspaltbreite mit 0,1 mm definiert. Die Gestalt des Zwischengliedes (Pontic) wurde der systeminternen Zahndatenbank entnommen. Aus dem Datensatz des konstruierten Brückengerüsts errechnet das System dann die notwendigen CNC-Fräsbahnen.

Die CAM-Komponente besteht aus einer computergesteuerten CNC-Fräsmaschine. Diese Fräsmaschine arbeitet mit Hilfe der errechneten CNC-Fräsbahnen aus industriell vorgefertigten Fräsrohlingen (PEEK<sup>®</sup>-, DC-Tell<sup>®</sup>- und DC-Zirkon<sup>®</sup>) die Gerüste heraus.

Die Herstellung der ProTemp III<sup>®</sup>-Brückengerüste erfolgte dagegen nicht durch subtraktives Herausfräsen, sondern mittels eines Silikonabdruck (Provil<sup>®</sup>) über die bereits gefrästen dreigliedrigen Brückengerüste. Der Silikonabdruck wurde über die Metallpfeiler gesetzt und in den verbliebenen Hohlraum anschließend der Kunststoff eingespritzt. Die Proben wurden während der Polymerisationsreaktion für ca. zehn Minuten in einem 50 °C warmen Wasserbad gelagert. Danach wurde der Verbinderquerschnitt erneut vermessen und korrigiert. Die Übergänge zwischen den Verbindern, Brückenglied und Kronen wurden nachbearbeitet und wiesen nach der Nachbearbeitung einen Radius von 0,7 mm auf. Die ProTemp III<sup>®</sup>-Gerüste besitzen exakt die gleichen Abmessungen wie die gefrästen Gerüste. Um herstellungsbedingte Lufteinschlüsse auszuschließen, wurden die Gerüste mit einer intensiven Lichtquelle durchleuchtet und dahingehend auf Unregelmäßigkeiten kontrolliert. Bei erkennbaren Lufteinschlüssen wurden die Proben verworfen.

### 3.2.4 Aufbau des 3D-ESPI-Messplatzes

Das verwendete Speckleinterferometer (Typ: ISTR A 3D<sup>®</sup>-Speckleinterferometer, Version 2.1, Fa. DANTEC ETTEMEYER, Ulm) besteht aus einer Laserlichtquelle, einem modifiziertem PC für die Auswertung und Darstellung der Messdaten und der zugehörigen CCD-Kamera. Die Aufnahme der Speckelmuster erfolgt im Phasenshiftverfahren. Das resultierende Phasenbild

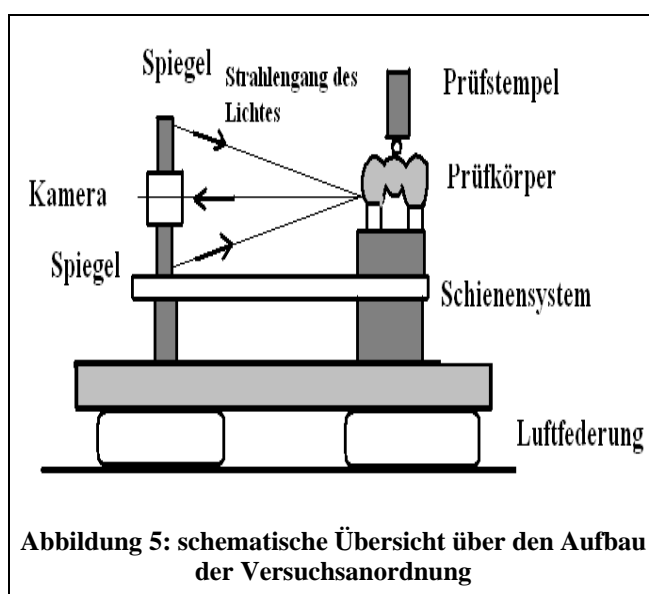


Abbildung 5: schematische Übersicht über den Aufbau der Versuchsanordnung

wird durch die Subtraktion der einzelnen Specklephasen im belasteten und unbelasteten Prüfkörperzustand ermittelt. Erfasst werden die Oberflächenverformungen und Dehnungen der Gerüste mit einer Genauigkeit von 10 nm. Das Messsystem ermöglicht die Messung der Verformungen in allen drei Richtungsvektoren. Kamera, Prüfmaschine und Einspannvorrichtung sind

über ein Schienensystem starr miteinander verbunden (*Abbildung 5*). Der Abstand der Kamera vom Messobjekt ist durch das Schienensystem individuell einstellbar. Die möglichen Objekt-Kameraabstände liegen zwischen 0 – 450 mm. In Verbindung mit verschiedenen Kameraobjektiven sind unterschiedliche Vergrößerungen des Untersuchungsobjektes möglich. Der Abstand des Kameraobjektivs vom Prüfkörper wurde während der Messungen nicht verändert und betrug konstant 370 mm.

Vorversuche zeigten, dass besonders die „spiegelnden“ Oberflächen der Keramikgerüste zu Problemen bei der 3D-ESPI-Messung führen können. Infolge einer reduzierten Mikrorauigkeit der Keramikoberfläche, welche jedoch die Grundlage für das Speckle-Interferometrieprinzip darstellt, kommt es verstärkt zu Reflexionen. Die Reflexionseffekte verursachen punktuelle Überbelichtungen auf dem Prüfkörper und führen dazu, dass das Messsystem an diesen Stellen keine Specklemuster erfassen kann und dadurch keine Verformungen errechnet werden können.

Um die Reflexionseffekte an den sehr glatten Oberflächen zu reduzieren, wurden die zu untersuchenden Gerüste mit einer feinen Farbschicht beschichtet (Farbeindring- Entwickler-Spray-DIFFU-Therm<sup>®</sup>, Fa. H. Klumpf KG, Herten).



**Abbildung 6: Metallplatte mit Pfeilern**



**Abbildung 7: Einspannvorrichtung**

Die Vorversuche zeigten, dass Messungen von matten Gerüstoberflächen zu einer deutlichen Verbesserung der Messbildqualität führen. Alternative Versuche mit aufgetragenem Titandioxidpulver führten aufgrund der großen Schichtdicke zu keiner wesentlichen Qualitätsverbesserung. Um die Beeinflussung der Messung durch die Übertragung von Schwingungen innerhalb des Laborraums zu verhindern, wurde der gesamte Versuchsaufbau auf einer auf Luftkissen gelagerten Arbeitsplatte realisiert.



**Abbildung 8: schwingungsarme Lagerung**



**Abbildung 9: Schienensystem und Kamerabefestigung**

Damit konnte die Versuchsanordnung weitestgehend von den Eigenschwingungen des Gebäudes entkoppelt werden (*Abbildung 8*). Aufgrund der Lichtempfindlichkeit gegenüber den Wellenlängenbereichen des natürlichen Lichtes war es notwendig den Messplatz gegen das Umgebungslicht abzuschirmen, in dem der Raum mit den Messgeräten abgedunkelt wurde. Die Verformungsdaten werden in der systemseitig zugehörigen Datenverarbeitungseinheit bearbeitet und gespeichert. Die gemessenen Verformungen werden in Form von farblich unterlegten Messbildern abgebildet.

### **3.2.5 Messanordnungen**

Für die Messung der Gerüstverformungen der dreigliedrigen Brückengerüste wurden zwei grundlegend verschiedene Versuchsanordnungen ausgewählt. Der wesentliche Unterschied der einzelnen Versuchsanordnungen beruht auf der Veränderung der Beweglichkeit der brückentragenden Zahn Pfeiler. Die Zahn Pfeiler, bestehend aus der Legierung: WIRON 99<sup>®</sup>, sind in den Versuchsanordnungen a und b unbeweglich mit der Unterlage (Stahlplatte) verbunden („starre Pfeilerlagerung“, *Abbildung 10*). Vermessen wurden die Gerüste im nicht zementierten (Versuchsanordnung a) und im zementierten Zustand (Versuchsanordnung b). Die Zementierung der Gerüste erfolgte mit einem Zinkoxid-Phosphat-Zement (Harvard Zement<sup>®</sup>). Während der Aushärtungsphase des Befestigungszementes (Harvard Zement<sup>®</sup>) wurden die Gerüste mit einer Last von 50 N über einen Zeitraum von 30 Minuten fixiert.

In der Versuchsserie c hingegen sind die Zahn Pfeiler beweglich gelagert (Dreipunktbiegeversuch, *Abbildung 10*). Dafür wurden identische Zahn Pfeiler aus einem Superhartgips (Klasse IV, CAD/CAM-Stone<sup>®</sup>) hergestellt und die Gerüste mit Zinkoxid-



Phosphat-Zement (Harvard Zement<sup>®</sup>) darauf befestigt. Die Pfeiler wurden an ihrer Unterseite horizontal abgetrimmt und anschließend auf waagrecht liegenden Rollenlagern positioniert. Die Rollenlager waren gegen seitliches Wegrollen gesichert. Dadurch konnte eine kontrollierte Kippbewegung der Pfeiler aufeinander ermöglicht werden. Die identische Positionierung der verschiedenen Gerüste auf den Stahlzylindern in den verschiedenen Versuchsserien wurde durch eine Schablone sichergestellt.

---

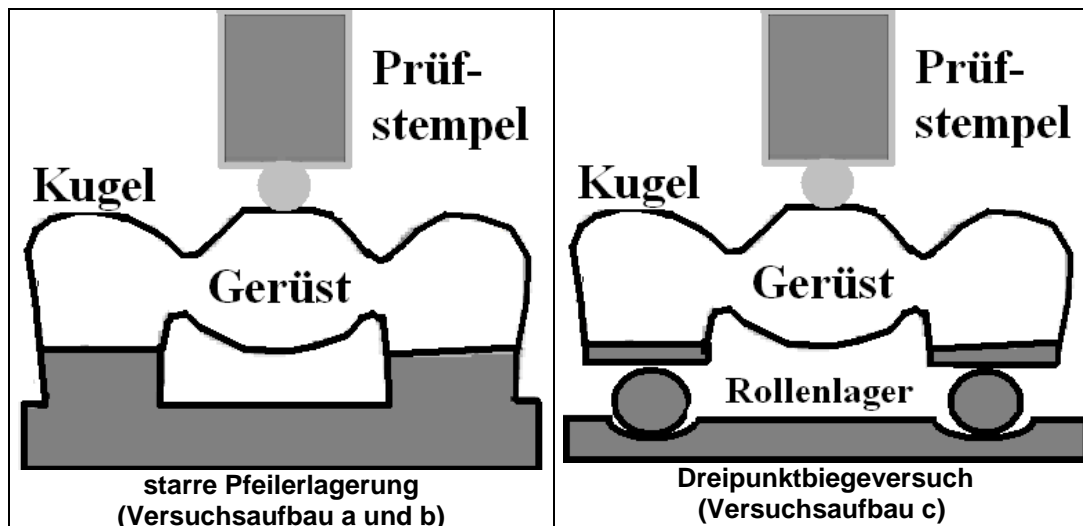


Abbildung 10: schematische Gegenüberstellung der Versuchsanordnungen

---

### 3.2.6 Versuchsdurchführung

Im Ausgangspunkt der Analyse wurden die belastungsabhängigen Verformungen unzementierter Brückengerüste mit dem Verbinderquerschnitt  $12 \text{ mm}^2$  gemessen. Anschließend wurden die Gerüste mit Zinkoxid-Phosphat-Zement (Harvard Zement<sup>®</sup>) zementiert und dann erneut vermessen. Danach wurden die Gerüste von den Stümpfen rezementiert und die lastabhängige Verformung im Versuchsaufbau c (Dreipunktbiegeversuch) bestimmt. Einen Überblick über die Versuchsorganisation gibt Abbildung 11.

Nach dem Dreipunktbiegeversuch wurden die Gerüste vorsichtig von den Gipsstümpfen gelöst und die Verbinderquerschnitte mit diamantierten Schleifkörpern (Farbmarkierung rot, Fa. Komet) unter Verwendung von Wasserkühlung auf den gewünschten nächstfolgenden Querschnitt reduziert. Die Querschnitte der Verbinder wurden so letztendlich in mehreren Messschritten bis auf die Endabmessungen  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  verringert.

Die Last wurde senkrecht in einem definierten Punkt, zentral auf dem Brückenzwischenstück gelegen, eingeleitet. Für die punktuelle Krafteinleitung wurde in der Zentralfissur des

Brückenzwischenstück eine Auflagemulde vorbereitet, die eine Stahlkugel mit dem Durchmesser 3 mm aufnehmen kann. Um sicherzustellen, dass bei den verschiedenen Messserien die Krafteinleitung immer im selben Punkt erfolgt, wurde eine Übertragungsschablone verwendet, mit der die Lage der Kugel auf jedem Gerüst exakt reproduziert werden konnte. Die Kugel wurde anschließend mit Harvard Zement<sup>®</sup> befestigt.

Die Krafteinleitung erfolgte über eine manuell gesteuerte Universalprüfmaschine des Typs Zwick 005<sup>®</sup> (Fa. Zwick, Ulm) mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 1,0 mm/ min.

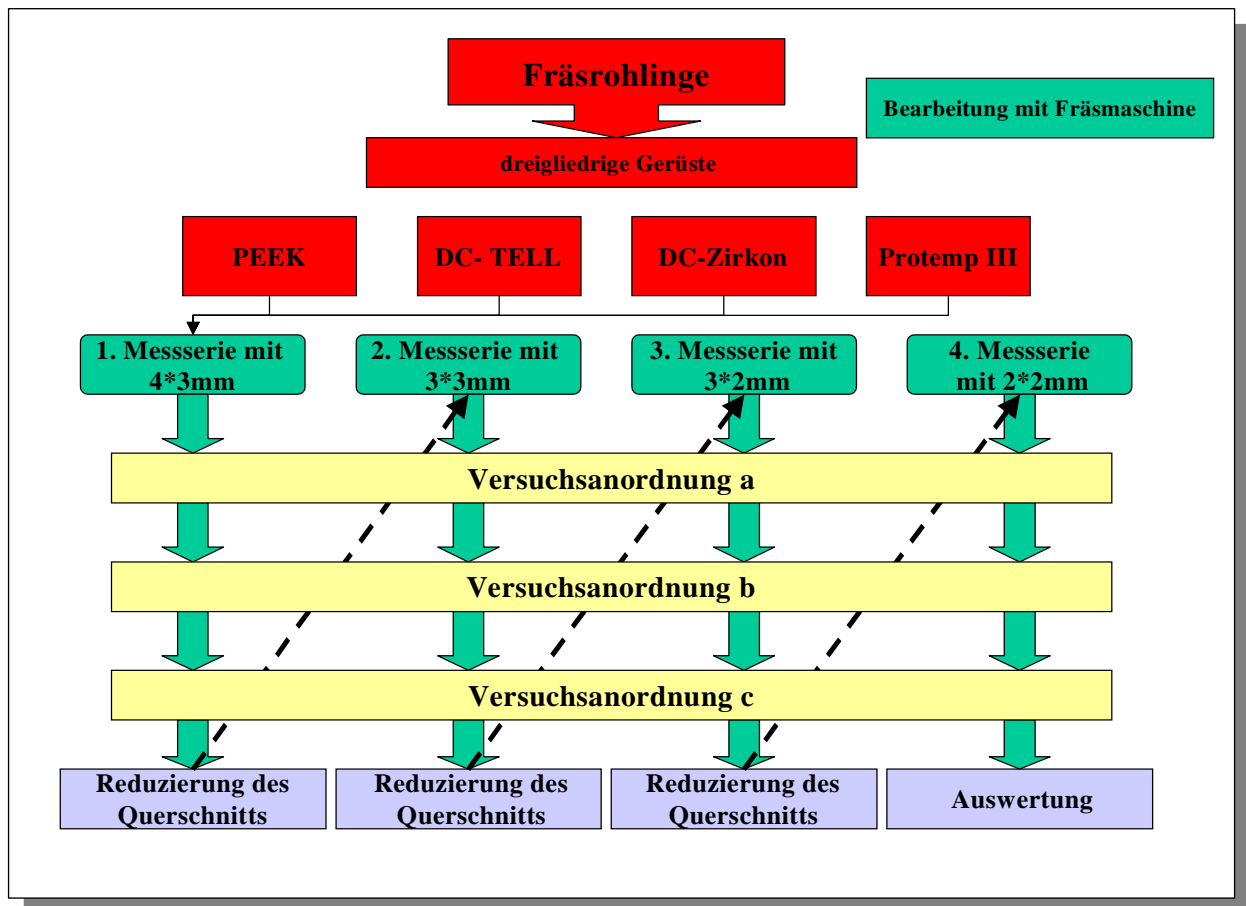
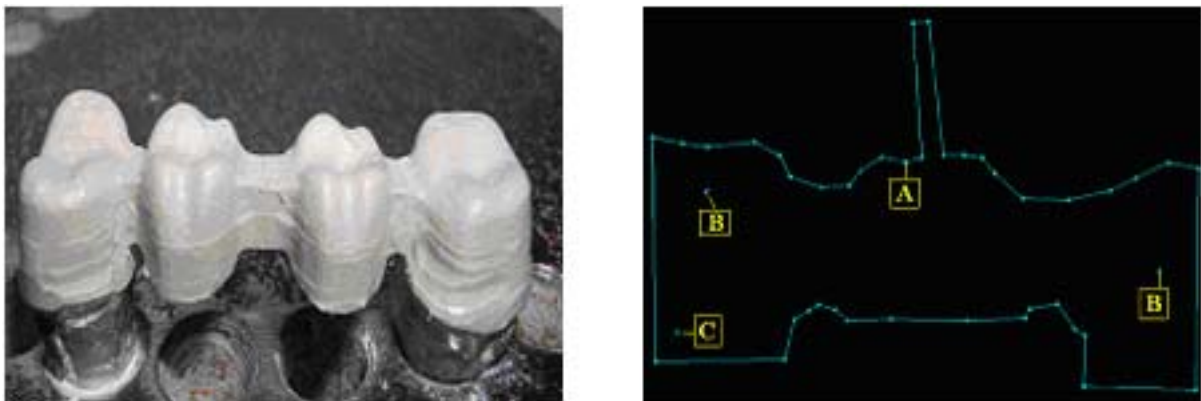


Abbildung 11: Versuchsorganisation

### 3.2.7 3D-ESPI-Messaufnahme

Aufgrund der sehr hohen Messempfindlichkeit des 3D-ESPI-Messsystems war es zwingend notwendig, die Gesamtprüflast von 200 N in Messintervalle von jeweils 5-20 N zu unterteilen, um eine gute Messqualität zu erhalten. Die Gesamtverformung der Gerüste konnte somit nur durch die Aufsummierung der Verformungen der entsprechenden Einzelmessungen ermittelt werden. Somit setzte sich eine Messung mit einer Gesamtprüflast von 200 N und einem festgelegten Messintervall von 10 N aus jeweils 20 Einzelmessbildern zusammen. Bei einem Messintervall von 5 N bzw. 20 N bestand die Messserie aus 40 bzw. 10 einzelnen Messaufnahmen. Der Messplatzrechner summierte am Ende der Messung die Ergebnisse der Einzelmessungen auf. Im Folgenden sind vorwiegend die Gesamtverformungsbilder für eine Prüflast von 200 N dargestellt.

In den Vorversuchen zeigte sich, dass die Messintervalle für jedes der untersuchten Werkstoffe individuell bestimmt werden müssen. Für die relativ „weichen“ Kunststoffe DC-Tell<sup>®</sup> und PEEK<sup>®</sup> lieferte ein Messintervall von 10 N qualitativ gute Messbilder. Der Kunststoff ProTemp III<sup>®</sup> konnte hingegen nur in Intervallen von jeweils 5 N vermessen werden. Für das hochfeste Zirkoniumdioxid konnte ein größeres Messintervall (20 N) gewählt werden, ohne dass eine Verschlechterung der Messqualität eintrat.



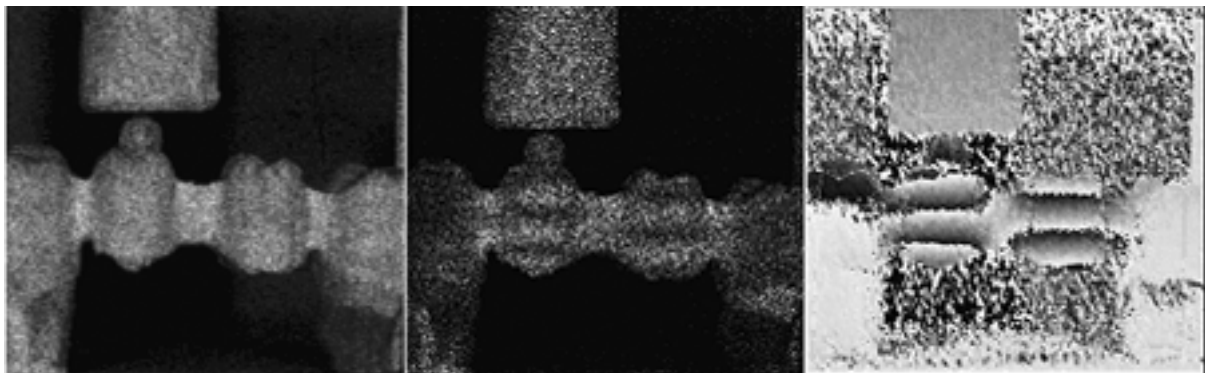
**Abbildung 12: viergliedriges Brückengerüst (links) und Berandungseditor (rechts)**

---

Abbildung 12 zeigt ein CNC-gefrästes, viergliedriges Brückengerüst, dessen Oberfläche noch nicht beschichtet wurde, in der Kameraperspektive. Vor Beginn der Messung müssen im Berandungseditor des Messprogramms die Umrisse des Gerüsts festgelegt werden. Aufgrund der begrenzten Rechenkapazitäten werden nur die Interferenzmuster ausgewertet, die innerhalb der Berandung (A) liegen. Zusätzlich wird ein Referenzpunkt (C) definiert, zu dem

alle Verformungen relativ gemessen werden. Punkt (C) sollte sich daher in einem Bereich befinden, in dem keine Verformungen zu erwarten sind. Die Größenverhältnisse werden durch zwei festzulegende Punkte (B) definiert.

Zu Beginn jeder Messserie wurde eine Messaufnahme bei einer Last von 10 N aufgenommen (sogenannte Referenzaufnahme, hier als Vorlast bezeichnet). Anschließend wurde das Gerüst belastet und eine Messaufnahme des verformten Gerüsts aufgenommen. Zur Vermessung der Oberflächenverformungen sind zwei Aufnahmen notwendig, eine im unbelasteten (*Abbildung 13 a*) und eine im belasteten Zustand (*Abbildung 13 b*). *Abbildung 13 a* zeigt die mit der CCD-Kamera aufgenommenen Specklefflecken im unbelasteten Zustand. Durch die Überlagerung des "Objektstrahls" mit dem "Referenzstrahl" treten Interferenzeffekte auf, die dem Bild seine körnige Struktur geben ("Speckles"). Die Auflösung beträgt ca. 10 nm an jedem sichtbaren Bildpunkt des Bauteils. Für kleine Bewegungen oder Verformungen verhalten sich die Speckles "objekttreu".



**Abbildung 13: Specklefflecken vor Belastung (a), bei Belastung (b) und defektselektives Streifenmuster (c)**

---

Überlagert man die Messbilder und subtrahiert die Lichtintensitäten der jeweiligen Specklefflecken, entsteht auf dem Objektbild ein defektselektives Streifenmuster, das "Höhenlinien" gleicher Verformung darstellt (*Abbildung 13 c*). Verändert sich der Verformungszustand, so verändert sich das Specklemuster entsprechend. Ein Streifenordnungssprung im Interferenzlinienbild entspricht einer Verformung in einer bestimmten Raumrichtung. Aus diesem Grund sind die Interferenzlinienbilder, unter Berücksichtigung der verwendeten Laserwellenlänge und der Strahlgeometrie des Interferometers, quantifizierbar und die Verformungen bestimmbar.

Nach der Aufnahme durch die CCD-Kamera wird jedem Specklepunkt gleicher Intensität innerhalb der im Berandungseditor vorher festgelegten Grenzen (*Abbildung 12*, grüne Linien) ein Grauwert zugeordnet. Identischen Grautönen (Punkte mit gleichen Verformungswerten) wird automatisch zur besseren Darstellung eine von acht vordefinierten Farben zugewiesen (*Abbildung 14*, Pfeil Nr. 1 in  $\mu\text{m}$ ). Die Verformungswerte werden relativ in Bezug zum definierten Nullpunkt angegeben. Um Möglichkeit von Messfehlern zu reduzieren, wurden jeweils immer drei Messungen mit identischen Versuchsparametern durchgeführt.

Die *Abbildung 14* zeigt ein 3D-ESPI-Messbild in der y-Achsenrichtung. Die Zahlenwerte (angegeben in mm) des linken (Pfeil Nr. 2) und unteren (Pfeil Nr. 3) Messbildrandes stellen jeweils die x- und y-Achsenrichtung des Koordinatensystems dar. Das Koordinatensystem erleichtert das Auffinden und Vergleichen einzelner Messpunkte.

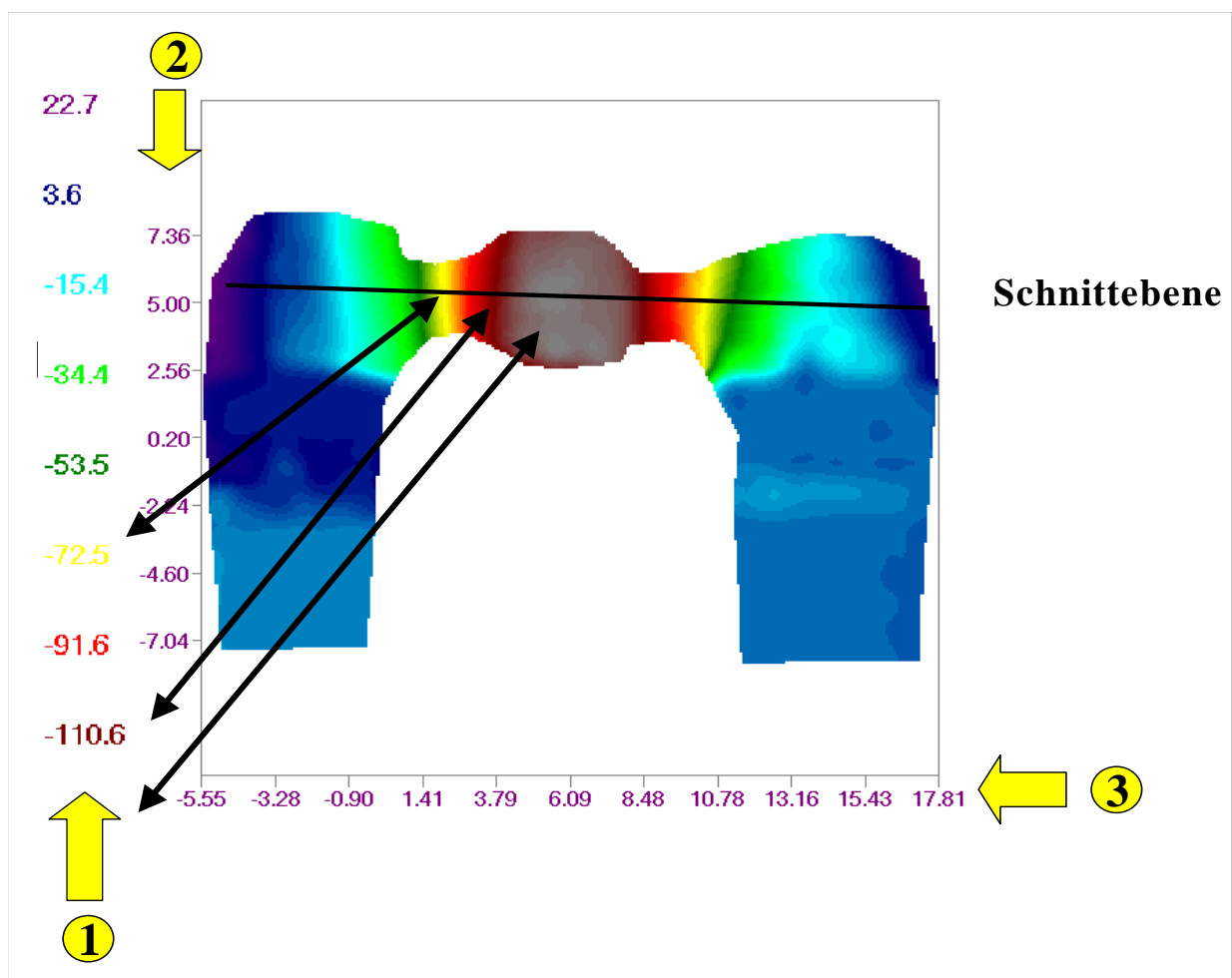
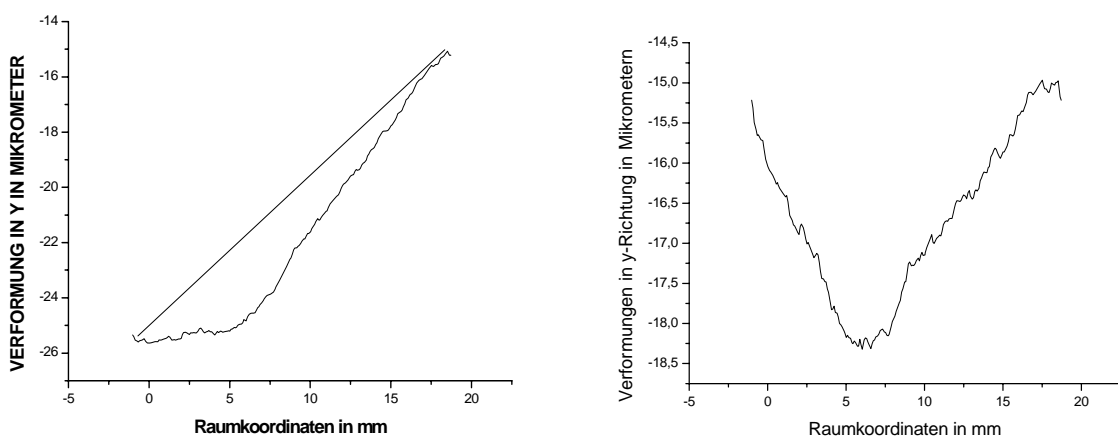


Abbildung 14: Messbild von der Durchbiegung des Gerüsts (bezogen auf die y-Messrichtung)

---

### 3.2.8 Auswertung der Messergebnisse

Um die Gerüstdurchbiegungen der verschiedenen Messungen überhaupt miteinander vergleichen zu können, musste zuerst eine horizontale Schnittebene als Bezugsebene definiert werden. Die Messwerte der auf der Bezugsebene liegenden Messpunkte wurden anschließend in Form einer Messkurve graphisch dargestellt (*Abbildung 15, linkes Bild*). Aufgrund der hohen Messempfindlichkeit der Messanordnung zeigte sich jedoch, dass auch die, wenn auch sehr geringen Eigenbewegungen des Versuchsaufbaus, miterfasst wurden. Die Auswertung der Messungen zeigt, dass diese Bewegungen sich mit den belastungsabhängigen Verformungen der Gerüste überlagern. Folglich kommt es zu einem verzerrten Messkurvenverlauf. Dieser Effekt musste in einem weiteren Schritt wieder „herausgerechnet“ werden. Für die Korrekturrechnung musste zuerst das arithmetische Mittel der 20 ersten und 20 letzten Messwerten bestimmt werden. Diese beiden Punkten wurden dann mit einer Geraden verbunden. Im Anschluss wurde die Steigung der Geraden mit den Messkurven verrechnet. Grundlage dafür waren die in das Datenbearbeitungsprogramm (ORIGIN 7.0®, Fa. OriginLab Corporation) transferierten Messwerte. Am Ende entstanden korrigierte Kurven für die Gerüstdurchbiegung. Diese mussten anschließend entlang der vertikalen Achse so verschoben werden, dass die Anfangs- und Endpunkte der Kurven im Koordinatensystem deckungsgleich waren. *Abbildung 15* zeigt die gemessene Durchbiegung des Brückengerüsts am Beispiel von Vollkeramikbrücken vor und nach der erforderlichen Korrekturrechnung. Die Korrekturrechnung ist somit notwendig, um den Einfluss der Eigenbeweglichkeit des Versuchsaufbaus auf das Messergebnis herauszurechnen.

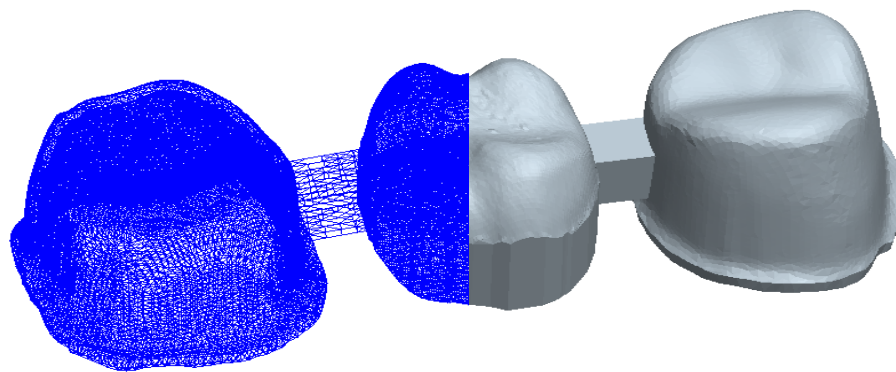


**Abbildung 15: Durchbiegung vor (links) und nach Korrektur (rechts)**

### 3.3 Das Finite Elemente-Modell

Für die Erstellung des FE- Modells des Brückengerüsts musste zuerst die vorliegende Lückensituation erfasst und digitalisiert werden. Dazu wurde das angefertigte Sägeschnittmodell mit dem DCS-Scanner dreidimensional vermessen. Die so gewonnenen Datensätze wurden anschließend in das Konstruktionstool der DCS-Software transferiert. Mit der DCS-Software wurde dann das Gerüst über die Pfeilersituation konstruiert. Die Konstruktionsdaten des Brückengerüsts wurden schließlich im STL-Datenformat gespeichert. Für die Weiterverwendung der Datensätze im Programm „ProEngineer®“ (Fa. Parametric Technology Corporation) musste jedoch dieser Datensatz mit Unterstützung der Firma DCS entschlüsselt und konvertiert werden. Aus dem konvertierten Datensatz wurde nun ein FE-Modell auf Basis der Arbeitsoberfläche ProEngineer® erzeugt. Die Festlegung und Vernetzung der Knoten erfolgte selbstständig durch das FE-Programm. Der E-Modul und der Poisson-Koeffizient der Werkstoffe wurden während der gesamten FE-Analyse als konstant angenommen. Die Querkontraktionszahl betrug 0,3. Die Rechnungen wurden an einem dreidimensionalen vernetzten FE-Volumenmodell durchgeführt (*Abbildung 16*). Das Volumenmodell zeigte dabei keine Symmetrien. In Vorversuchen wurde das herstellerseitig angegebene Elastizitätsmodul durch einen mechanischen Biegeversuch überprüft. Für das E-Modul von PA (Polyamid 66, Produktname DC-Tell®) wurde hierbei ein Wert von 5425 N/mm<sup>2</sup> ermittelt.

---



**Abbildung 16: das dreigliedrige Brückengerüsts als Facettenmodell**

---

Der Punkt der Krafteinleitung wurde als kreisrunde Fläche mit 1,5 mm Durchmesser auf der Oberseite des Zwischengliedes festgelegt. Zur Reduzierung der Komplexität des FE-Modells wurden die Eigenschaften des Befestigungszementes nicht integriert. Auf die Modellierung des Zementspaltes und der Pulpa wurde daher verzichtet. Die Beweglichkeit der Zahn Pfeiler wurde in Abhängigkeit von der Zielstellung entweder mit starren oder flexiblen Merkmalen definiert.

### 4 Ergebnisse

#### 4.1 Allgemeines

Die infolge der mechanischen Belastung des Brückenzwischenstückes mit dem 3D-ESPI-Messsystem gemessenen Gerüstverformungen werden im folgendem Abschnitt als mehrfarbiges Messbild dargestellt (*Abbildung 14*). Für die vergleichende analytische Betrachtung der Verformungsergebnisse wurden aufgrund ihrer hohen Aussagekraft und überdurchschnittlichen Messqualität überwiegend die Messbilder der y-Messachsenrichtung verwendet. Messbilder der x- und z-Messachsenrichtung wiesen vielfach nur eine reduzierte Messqualität auf. Um einen aussagekräftigen Vergleich der verschiedenen Gerüstwerkstoffe und Versuchsanordnungen zu ermöglichen, wurde vorwiegend die Gerüstdurchbiegung in Bezug zur y-Messachsenrichtung verglichen. Betrachtet wurde dazu die gemessene Gerüstdurchbiegung entlang einer definierten Schnittebene. Die so ermittelten Gerüstdurchbiegungen wurden anschließend graphisch gegenübergestellt.

Die Hauptverformungsrichtungen der Brückengerüste sind durch nachträglich in die Messbilder eingefügte, farbig unterlegte Pfeile (nicht maßstabsgetreu) dargestellt. Die schwarzen Linien sind ebenfalls nachträglich hinzugefügt worden und zeigen den ungefähren Verlauf der Streifenübergänge.

Zusätzlich wurde die maximale Durchbiegung des Brückenzwischenstückes in einer Tabelle zusammengefasst. Gemessen wurde dazu die Bewegung eines definierten Oberflächenpunktes auf der Vorderseite des Zwischenstückes.

Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte hierbei nach verschiedenen Blickpunkten. Im ersten Abschnitt wurden die bei konstantem Querschnitt und unveränderter Versuchsanordnung gemessenen, Verformungseigenschaften der verschiedenen Materialien gegenübergestellt und miteinander verglichen. Im Anschluss wurden die Versuchsanordnungen bei unverändertem Querschnitt und dem selbigen Material gegenübergestellt. Im letzten Abschnitt wurden die Messbilder der veränderten Verbinderquerschnitte für jedes Material getrennt dargestellt.

Aufgrund der reduzierten Messqualität sind die im Dreipunktbiegeversuch durchgeführten Messungen für DC-Tell<sup>®</sup> und PEEK<sup>®</sup>-Gerüste mit einem Verbinderquerschnitt von 4 mm<sup>2</sup> nicht auswertbar. Außerdem konnten die Messergebnisse der ProTemp III<sup>®</sup> Gerüste mit dem Querschnitt 4 mm<sup>2</sup> und die Ergebnisse im Dreipunktbiegeversuch nicht verwertet werden. Die Messbilder wiesen eine unzureichende Messqualität durch eine Vielzahl von Artefakten auf.



## 4.2 Gerüstwerkstoff DC-Tell

### 4.2.1 mit variabler Verbindergeometrie und starrer Lagerung/ unzementiert

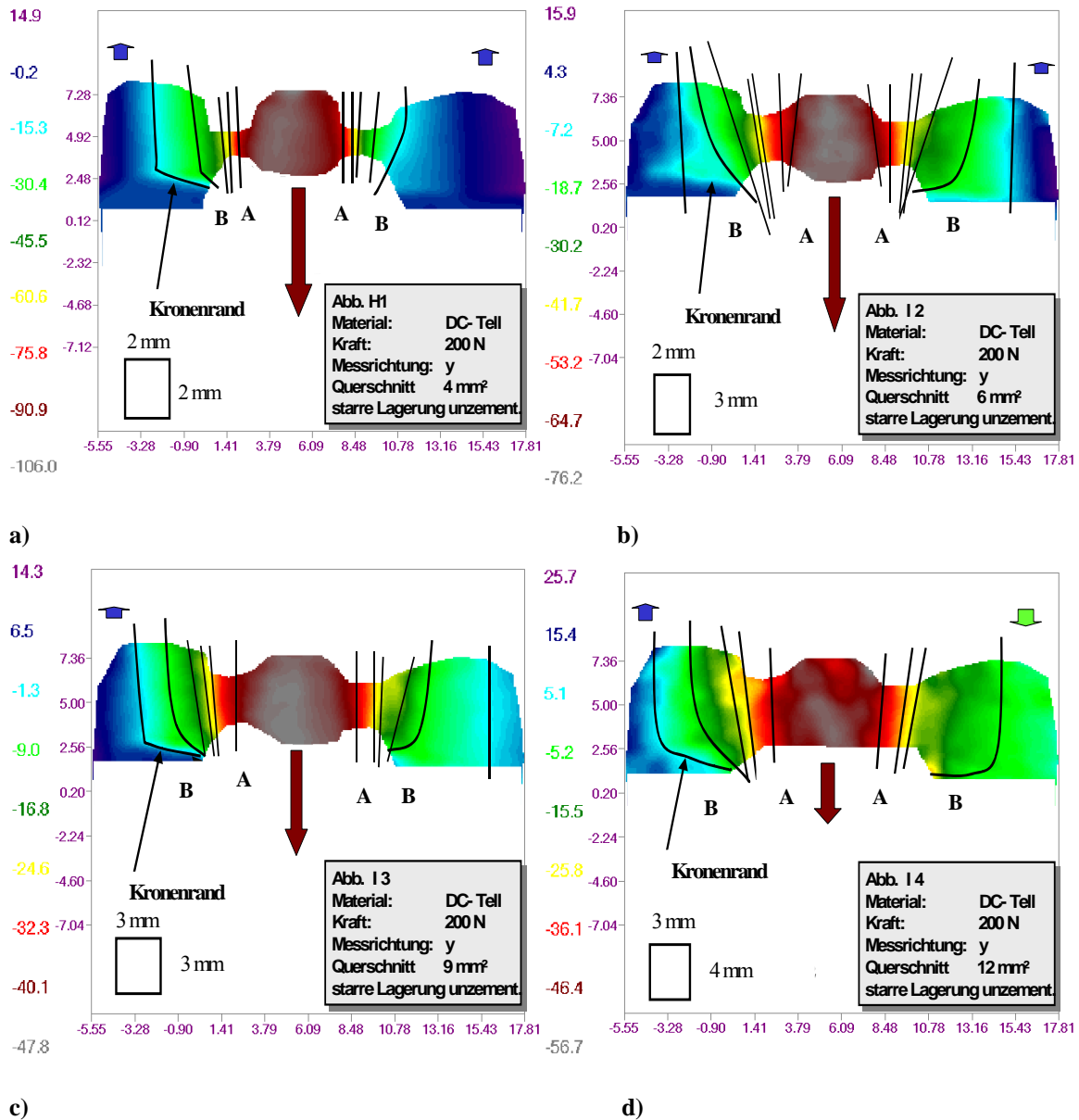
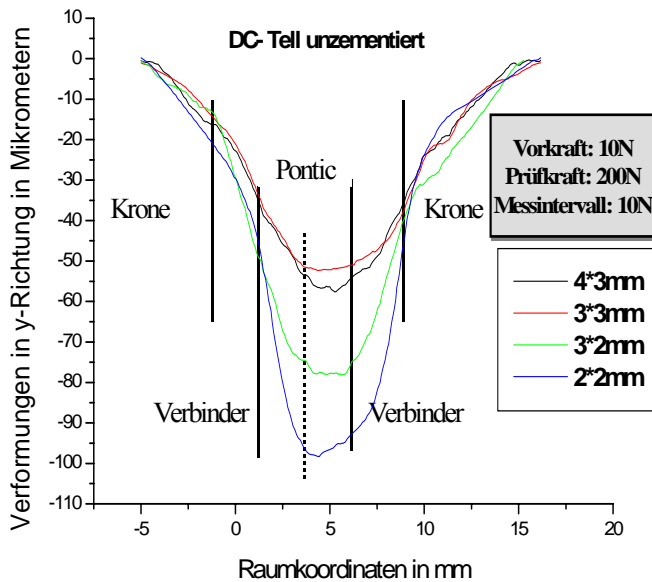


Abbildung 17: DC-Tell starre Lagerung und unzementiert (verschiedene Querschnitte)

Die Messbilder (Abbildung 17 a bis d) zeigen die Durchbiegung des unzementierten DC-Tell<sup>®</sup> Gerüsts entlang der y-Koordinatenachse. Die höchste Farbstreifendichte findet sich, unabhängig vom Verbinderschnitt, in der Verbinderegion und somit im Bereich des geringsten Querschnitts. Mit Zunahme des Querschnitts nimmt die Breite der Farbstreifen zu. Die innen liegenden Streifen (A) zeigen einen überwiegend geraden Verlauf mit vertikaler Orientierung.

## Ergebnisse

Die äußeren Streifen (**B**) weisen einen gebogenen Verlauf mit schräg nach außen gerichteter Verlaufsrichtung auf.



Querschnitt	Durchbiegung [ $\mu\text{m}$ ]
4 mm <sup>2</sup>	97
6 mm <sup>2</sup>	75
9 mm <sup>2</sup>	50
12 mm <sup>2</sup>	52

Diagramm 1: „starre Pfeilerlagerung“ mit nicht zementiertem DC-Teil-Gerüst

Die Durchbiegung des Gerüsts mit 4 mm<sup>2</sup> Verbinderquerschnitt ist am größten. Die Abnahme des Querschnitts von 9 mm<sup>2</sup> auf 6 mm<sup>2</sup> und von 6 mm<sup>2</sup> auf 4 mm<sup>2</sup> führt zu einer Zunahme der Durchbiegung (Diagramm 1). Die Abnahme der Verbinderhöhe von 3 mm auf 2 mm bei unveränderter Verbinderbreite und die Abnahme der Verbinderbreite von 3 mm auf 2 mm bei unveränderter Verbinderhöhe haben einen Anstieg der Durchbiegung zur Folge. Es sind keine Unterschiede zwischen den Querschnitten 12 mm<sup>2</sup> und 9 mm<sup>2</sup> zu erkennen. Die Abnahme der Verbinderhöhe von 4 mm auf 3 mm hat demnach fast keine Auswirkungen auf die Verformung des Gerüsts.

4.2.2 mit variabler Verbindergeometrie und starrer Lagerung/ zementiert

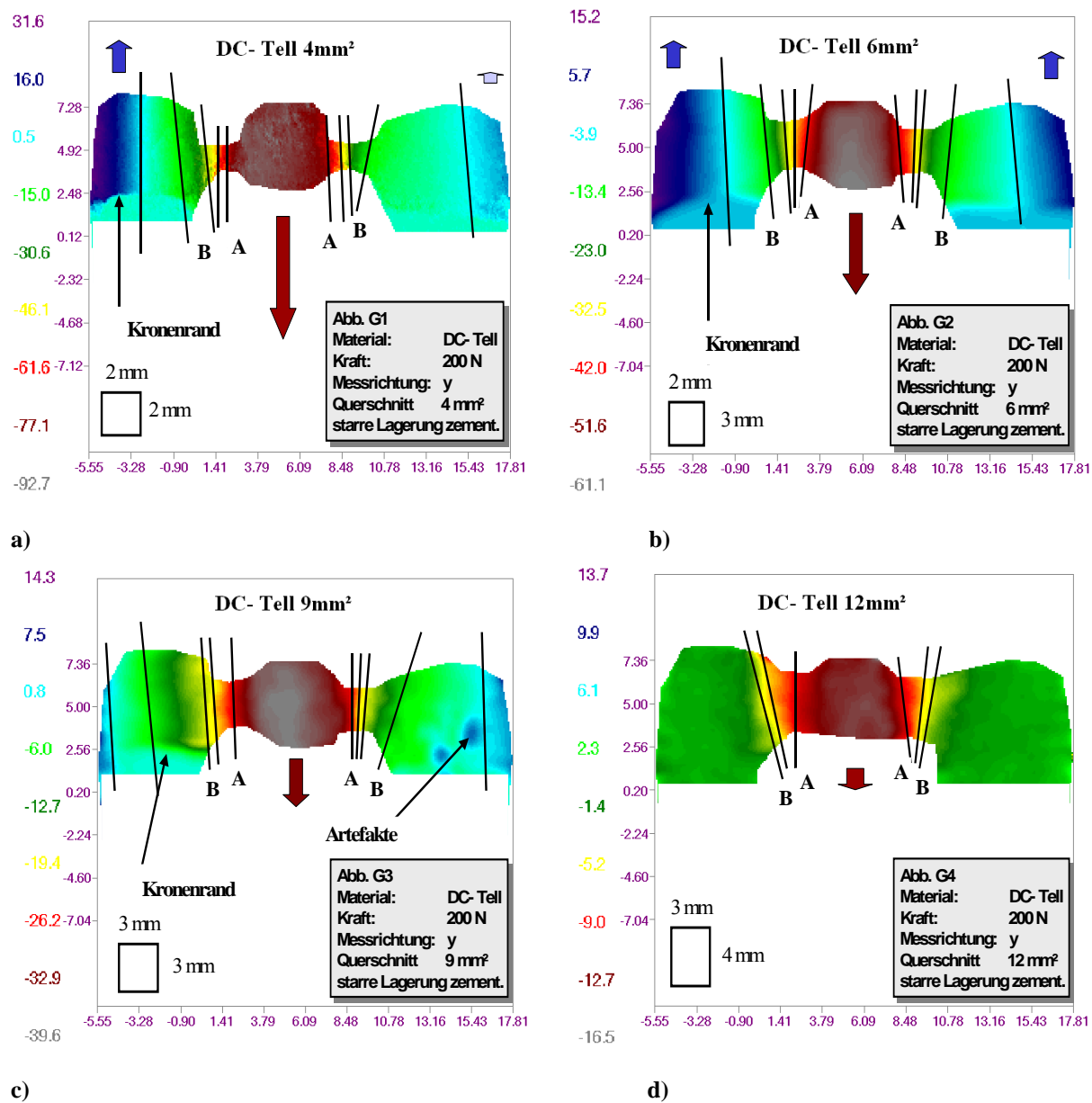
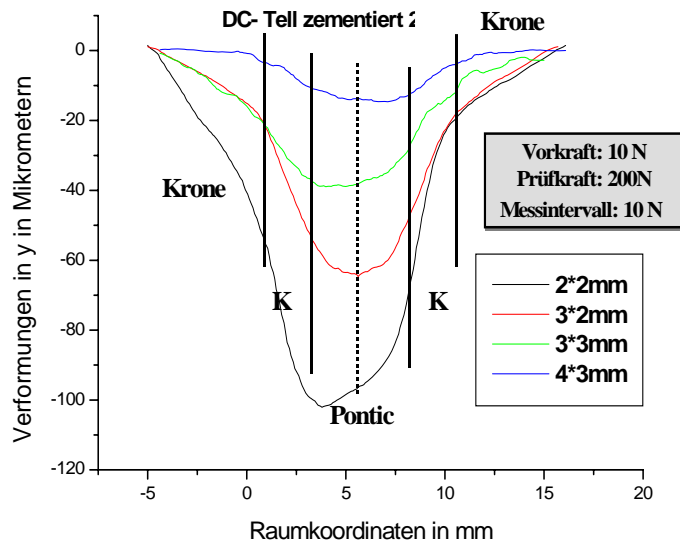


Abbildung 18: DC-Tell starre Lagerung und zementiert (verschiedene Querschnitte)

Die Messbilder (Abbildung 18 a - d) zeigen die Durchbiegung des zementierten DC-Tell® Gerüsts. Die höchste Streifendichte (schwarze Linien) konzentriert sich ausschließlich auf die Konnektoren und ist dabei unabhängig vom Querschnitt. Die innen liegenden Streifen (A) weisen eine vertikale, die äußeren Streifen (B) hingegen eine schräge, nach außen gerichtete Verlaufsrichtung auf. Mit der Vergrößerung des Querschnitts verringert sich die Anzahl der Farbstreifen, und die äußeren Streifen zeigen eine zunehmend schrägere Verlaufsrichtung. Die Zwischenglieder weisen, unabhängig vom Querschnitt, keine eigenen Verformungen auf. Bei

## Ergebnisse

den Querschnitten 4 mm<sup>2</sup>, 6 mm<sup>2</sup> und 9 mm<sup>2</sup> sind zusätzlich in den Kronenankern Verformungen zu beobachten. Die Kronenränder sind gut zu identifizieren. Bei dem Gerüst mit einem 12 mm<sup>2</sup> Querschnitt konzentrieren sich die Streifen ausschließlich in den Verbindern. Die Kronen weisen hier keine nachweisbaren Verformungen auf.



Querschnitt	Durchbiegung [ $\mu\text{m}$ ]
4 mm <sup>2</sup>	101
6 mm <sup>2</sup>	62
9 mm <sup>2</sup>	38
12 mm <sup>2</sup>	13

Diagramm 2: „starre Pfeilerlagerung“ mit zementiertem DC-Tell Gerüst

Mit Reduktion des Querschnitts von 12 mm<sup>2</sup> auf 9 mm<sup>2</sup> und damit einer Verringerung der Verbinderhöhe von 4 mm auf 3 mm nimmt die Durchbiegung von 12  $\mu\text{m}$  auf 38  $\mu\text{m}$ , das heißt um mehr als den Faktor 3, zu (Diagramm 2). Die Verringerung der Verbinderbreite von 3 mm auf 2 mm führt zur Zunahme der Verformung um fast die Hälfte (von 38  $\mu\text{m}$  auf 62  $\mu\text{m}$ ). Eine Verringerung der Verbinderhöhe von 3 mm auf 2 mm bei konstanter Verbinderbreite führt zur Zunahme der Durchbiegung von 62  $\mu\text{m}$  auf 101  $\mu\text{m}$ .

### 4.2.3 DC-Tell mit variabler Verbindergeometrie im Dreipunktbiegeversuch

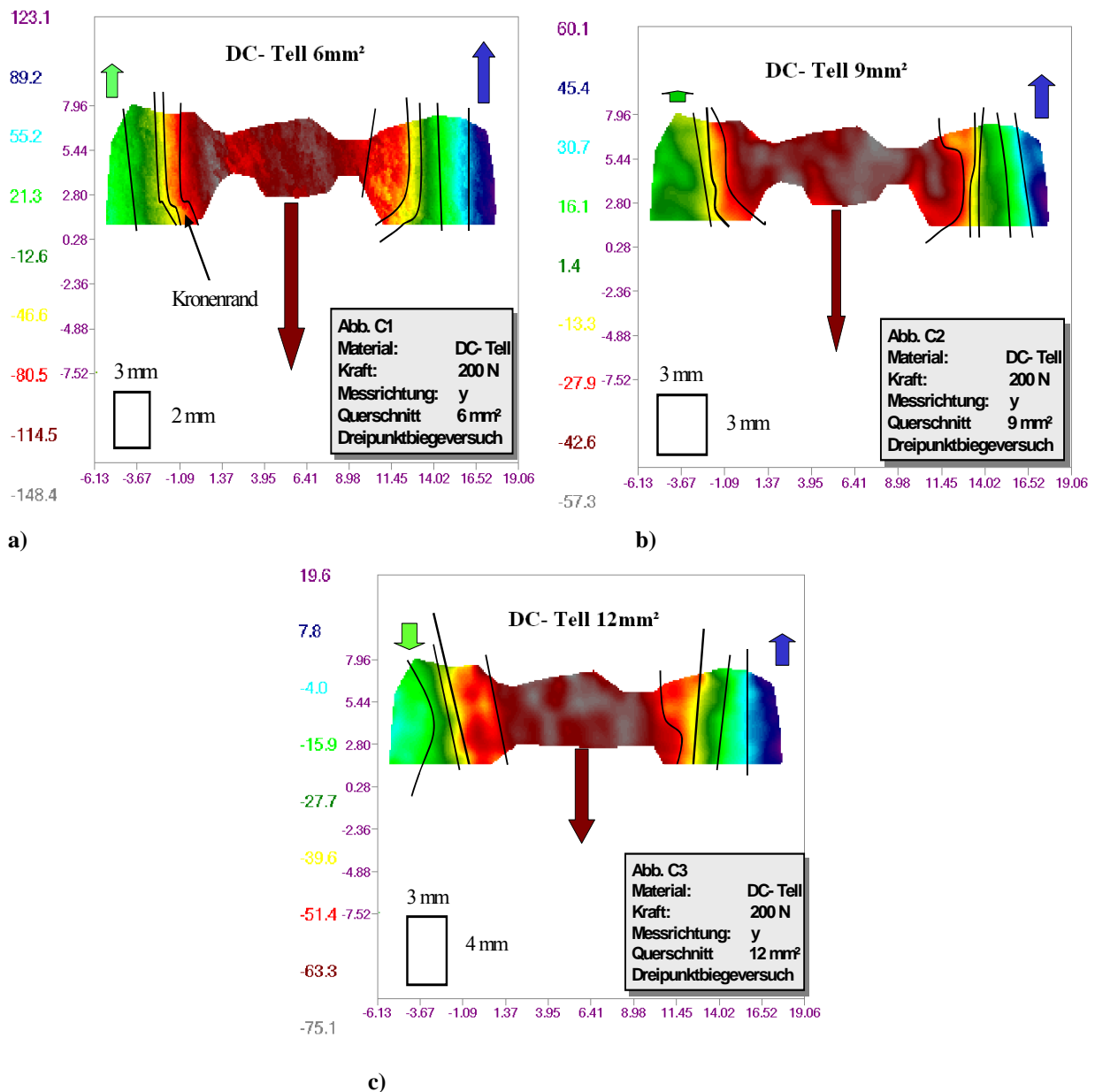


Abbildung 19: DC-Tell Dreipunktbiegeversuch (verschiedene Querschnitte)

Die Messbilder (Abbildung 19 a - c) stellen die im Dreipunktbiegeversuch gemessenen Durchbiegungen der DC-Tell<sup>®</sup>-Brückengerüste mit verschiedenen Querschnittsabmessungen dar. Die Aufnahmen zeigen, unabhängig vom Querschnitt, ähnliche Verformungsbilder. Die Farbübergänge zwischen den Streifen sind deutlich erkennbar. Die Zwischenglieder verformen sich nicht. Eine Konzentration der Farbstreifen in der Verbindergeometrie kann nicht beobachtet werden. Die größte Streifendichte lässt sich hingegen im Bereich der Kronengerüste identifizieren.

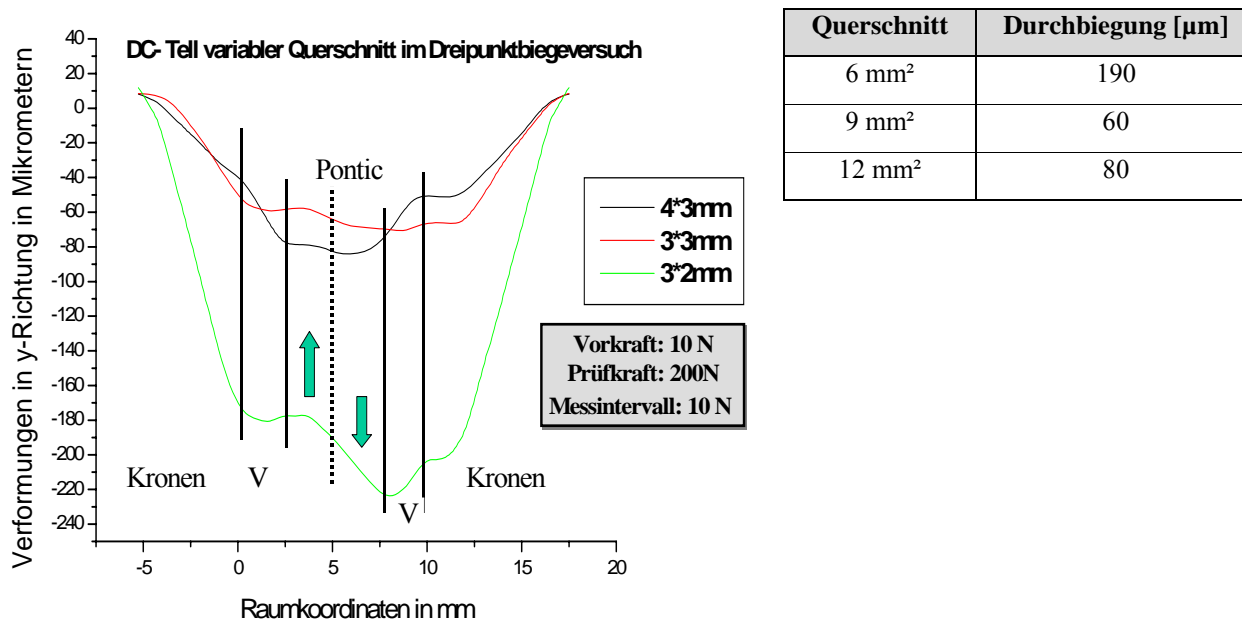


Diagramm 3: DC-Tell-Gerüst in Dreipunkt-Biegeversuchsordnung gemessen

Das Gerüst mit dem Querschnitt 4 mm<sup>2</sup> zeigt die größte Durchbiegung. Die vertikalen Durchbiegungen der Gerüste mit den Querschnitten 9 mm<sup>2</sup> und 12 mm<sup>2</sup> sind annähernd gleich. Die Verformungskurven zeigen jedoch, unabhängig vom Querschnitt, einen unregelmäßigen Verlauf. Der Pontic des Gerüsts mit dem Querschnitt 4 mm<sup>2</sup> rotiert um eine gedachte Querachse (Diagramm 3, grüne Pfeile). Die linken Bereiche des Pontic bewegen sich hierbei nach oben. Die rechten Bereiche rotieren nach unten. Für die Querschnitte 9 mm<sup>2</sup> und 12 mm<sup>2</sup> lässt sich eine solche Rotation des Brückenzwischengliedes nicht beobachten. Aufgrund der Unregelmäßigkeiten im Kurvenverlauf müssen die Verformungskurven und die Werte für die maximale Verformung des Brückengerüsts kritisch betrachtet werden.

### 4.3 Gerüstwerkstoff PEEK

#### 4.3.1 mit variabler Verbindergeometrie und starrer Lagerung/ unzementiert

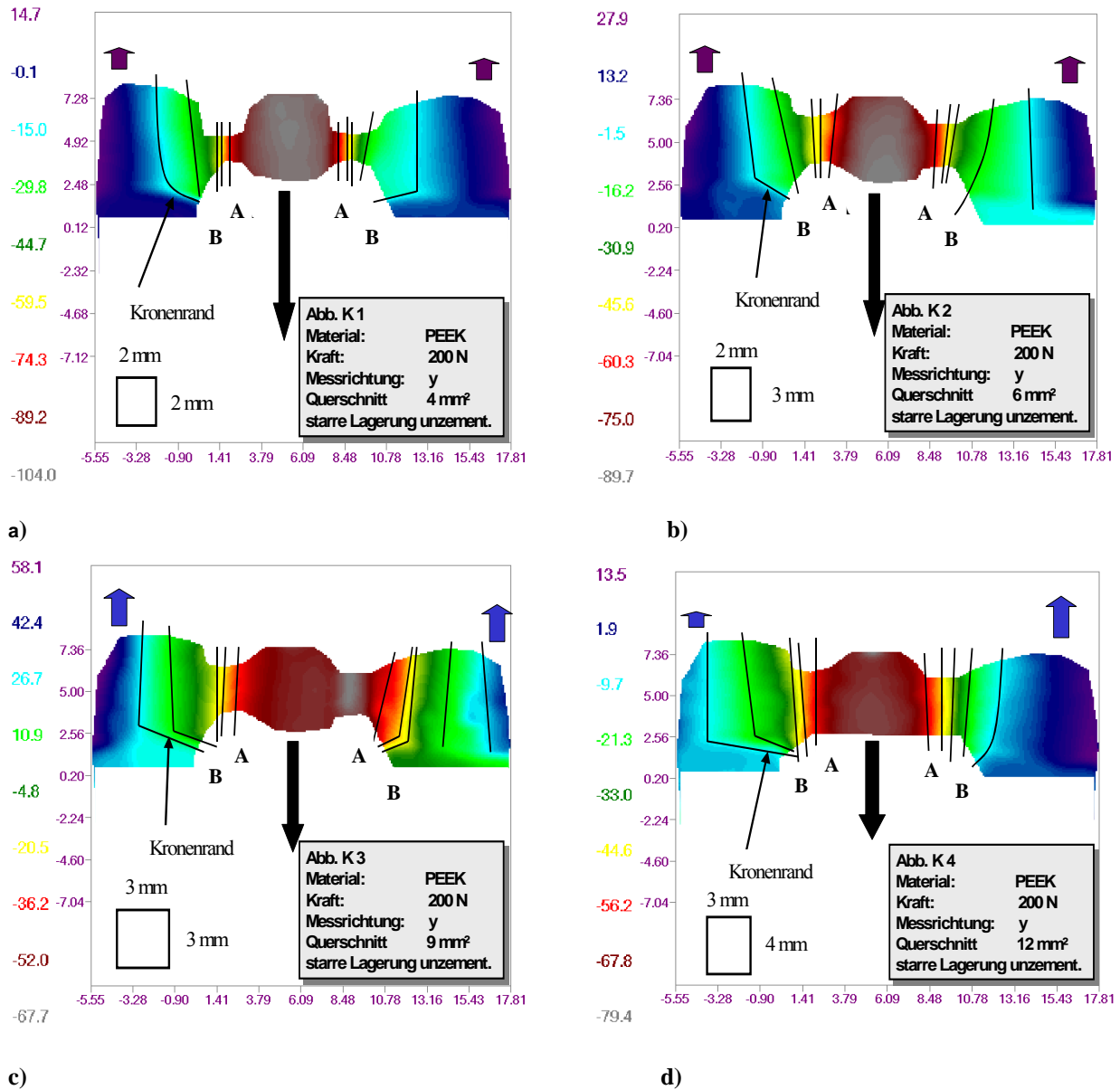
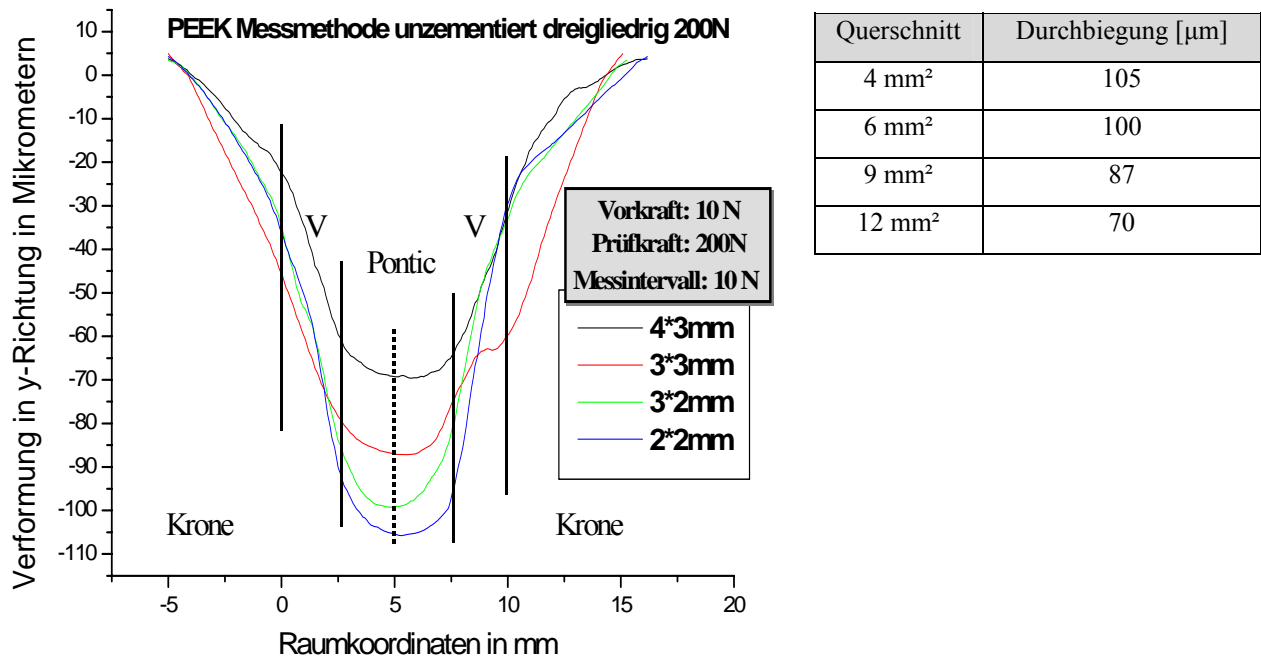


Abbildung 20: PEEK starre Lagerung und unzementiert (verschiedene Querschnitte)

Der Vergleich der Messbilder (Abbildung 20 a - d) zeigt, dass trotz unterschiedlicher Verbinderdimensionierung die Gerüste ein ähnliches Verformungsmuster aufweisen. Die senkrecht verlaufenden Farbstreifen konzentrieren sich ausschließlich auf die Verbinders. Die Breite der Streifen ist dabei annähernd gleich groß. Mit der Zunahme der Verbinderdimensionen verteilen sich die Verformungen zunehmend auch auf die angrenzenden Kronengerüste. Die geringsten Verformungen zeigen die Kronengerüste bei einem Querschnitt von 4 mm<sup>2</sup>. Die

## Ergebnisse

Pontic zeigen keine Verformungsmuster. Sie bewegen sich, vergleichbar mit den anderen gemessenen Gerüstwerkstoffen, mit dem Prüfstempel nach apikal. Die Gerüstgrenzen am Kronenrand sind unabhängig vom Querschnitt immer gut zu identifizieren.



**Diagramm 4:** „starre Pfeilerlagerung“ mit nicht zementiertem PEEK-Gerüst

Die im Diagramm 4 dargestellten Durchbiegungen der Gerüste sind am größten für den Querschnitt 4 mm<sup>2</sup> gefolgt von 6 mm<sup>2</sup>. Die Zunahme der Verbinderhöhe von 2 mm auf 3 mm hat nur geringe Auswirkungen auf die Durchbiegung. Die Vergrößerung der Verbinderhöhe von 3 mm auf 4 mm, bei konstanter Verbinderbreite, führt hingegen zu einer Reduzierung der Verformung des Gerüsts und damit zu einem Zugewinn an Festigkeit. Die Zunahme der Verbinderbreite von 2 mm auf 3 mm, bei unveränderter Verbinderhöhe, bewirkt ebenfalls eine Verringerung der Durchbiegung.



4.3.2 mit variabler Verbindergeometrie bei starrer Lagerung/ zementiert

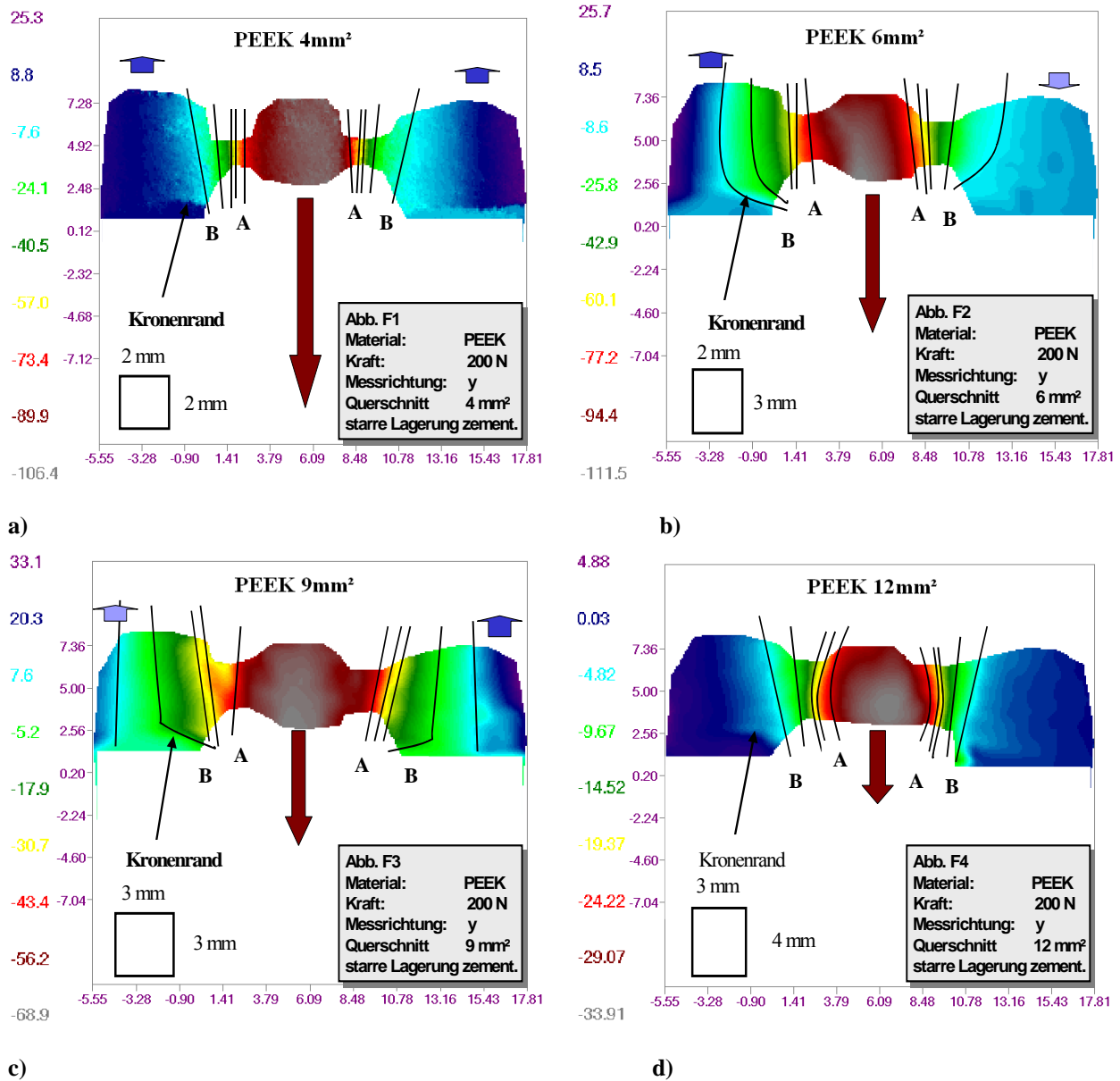


Abbildung 21: PEEK starre Lagerung und zementiert (verschiedene Querschnitte)

Die höchste Streifendichte bzw. Liniendichte (A) in den Verbindern tritt, unabhängig von der jeweiligen Querschnittsfläche, im Bereich ihres geringsten Querschnitts auf (Abbildung 21 a - d). Bei den Querschnitten 6 mm<sup>2</sup> und 9 mm<sup>2</sup> kann außerdem eine Verlagerung der Farbstreifen in die Kronengerüste beobachtet werden. Ein Verbinderquerschnitt von 4 mm<sup>2</sup> und 12 mm<sup>2</sup> hat keine sichtbaren Verformungen in den Kronengerüsten zur Folge. Die Pontic bewegen sich mit dem Prüftempel nach apikal und zeigen für jeden Verbinderquerschnitt keine Verformungseffekte.

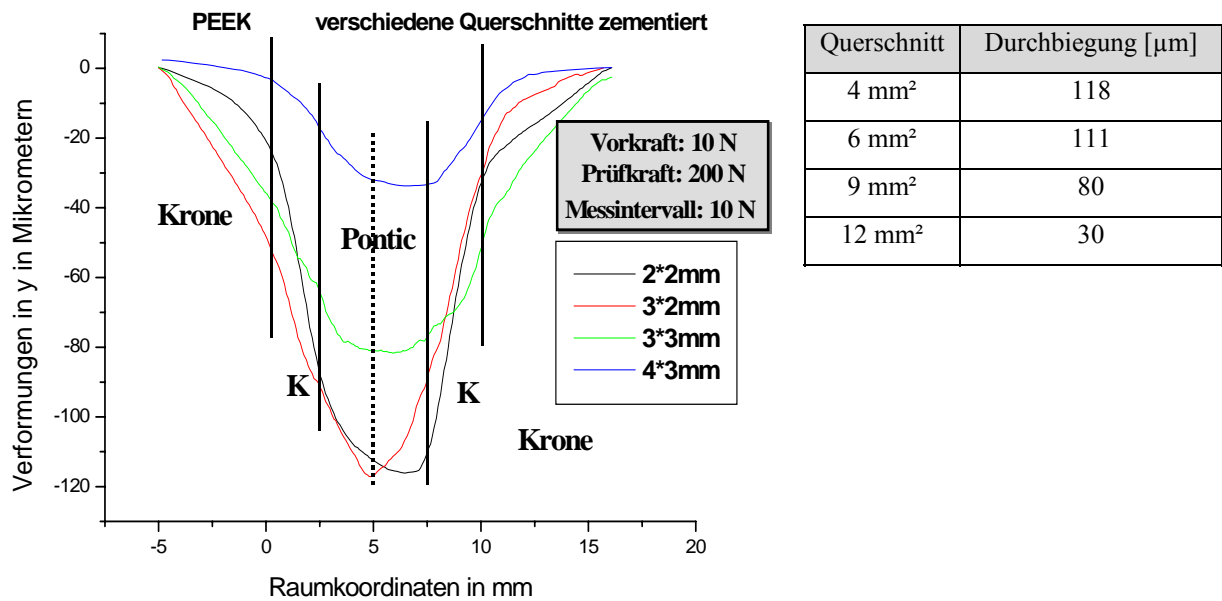


Diagramm 5: „starre Pfeilerlagerung“ mit zementiertem PEEK-Gerüst

Diagramm 5 stellt die Durchbiegung der Gerüste entlang der definierten Schnittenebene bei unterschiedlichen Querschnittsabmessungen dar. Erkennbar ist hierbei nur die geringe Differenz innerhalb der Kurvenverläufe zwischen den Querschnitten von 4 mm<sup>2</sup> und 6 mm<sup>2</sup>. Die Vergrößerung der Verbinderhöhe von 2 mm auf 3 mm, bei konstanter Verbinderbreite, übt keinen wesentlichen festigkeitssteigernden Effekt aus. Die Durchbiegung ist für den 4 mm<sup>2</sup> großen Querschnitt um das Vierfache höher als bei einer Querschnittsfläche von 12 mm<sup>2</sup>. Die Durchbiegung des Gerüsts mit 9mm<sup>2</sup> Querschnittsfläche ist fast dreimal höher, als bei einem Querschnitt von 12 mm<sup>2</sup>. Die Zunahme der Verbinderhöhe von 3 mm auf 4 mm, bei gleichzeitig unveränderter Verbinderbreite, führt zur einer wesentlichen Verringerung der Gerüstdurchbiegung. Die Vergrößerung des Verbinderbreite von 2 mm auf 3 mm, bei einer unveränderten Verbinderhöhe, hat ebenfalls eine Abnahme der Durchbiegung zur Folge.

### 4.3.3 PEEK mit variabler Verbindergeometrie im Dreipunktbiegeversuch

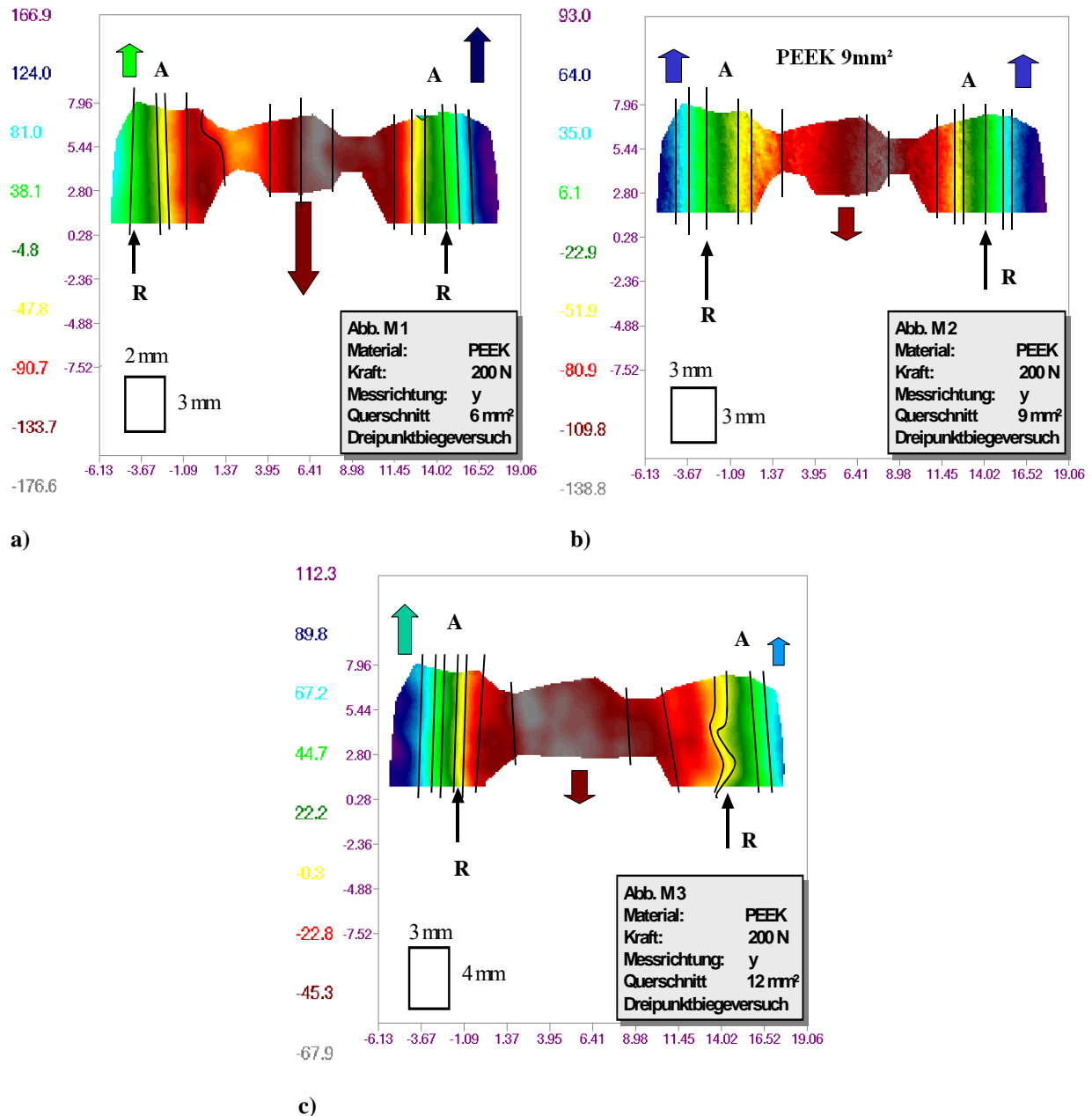
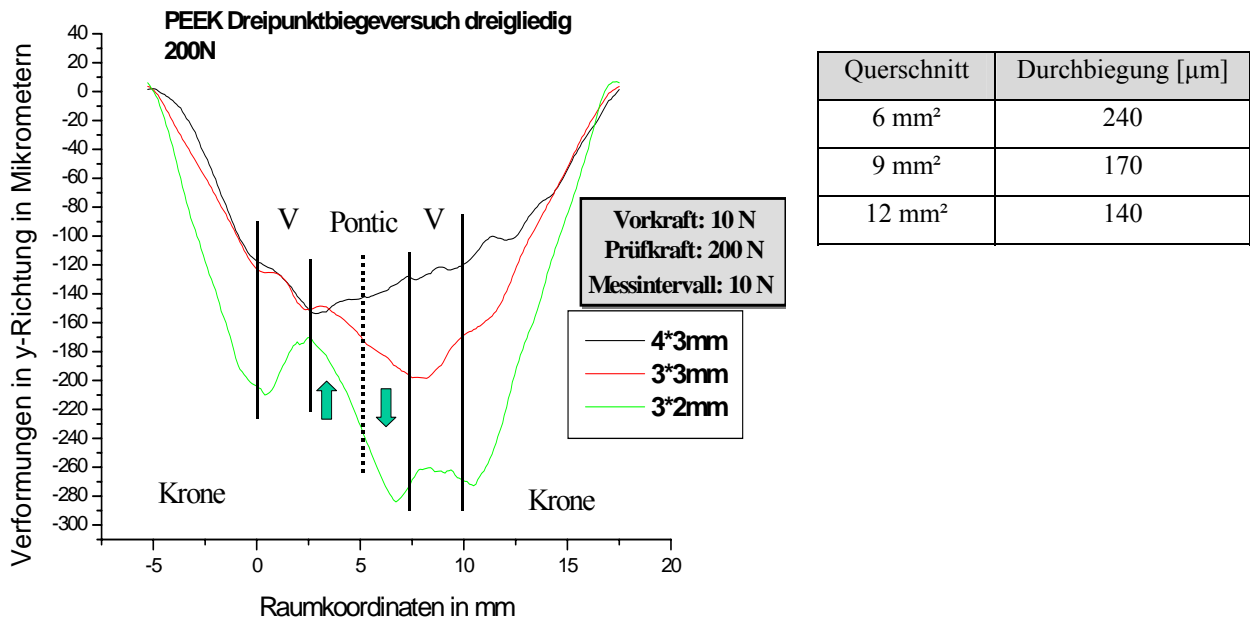


Abbildung 22: PEEK Dreipunktbiegeversuch (verschiedene Querschnitte)

Die oberen Abbildung 22 a - c stellen die im Dreipunktbiegeversuch vermessenen Verformungen des dreigliedrigen PEEK<sup>®</sup>-Gerüsts dar. Es zeigt sich, dass die Messbilder, unabhängig von der ausgewählten Verbinderquerschnittsfläche, sehr ähnliche Verformungsmuster aufweisen. Eine Eigenverformung des Brückenwischengliedes ohne die Verbinder, ist nicht erkennbar. Abweichend von den Beobachtungen innerhalb der anderen Versuchsarrordnungen, kann hier die höchste Streifendichte querschnittsunabhängig ausschließlich im Bereich der Kronengerüste

identifiziert werden. Eine Konzentration der Streifen in der Verbinderegion kann dagegen nicht beobachtet werden. Das Brückengerüst mit dem Querschnitt  $4 \text{ mm}^2$  zeigt wie erwartet die größte Durchbiegung.



**Diagramm 6: PEEK-Gerüst mit Dreipunkt-Biegeversuchanordnung gemessen**

Das Diagramm 6 zeigt die Durchbiegung der Gerüste in Abhängigkeit vom jeweiligen Querschnitt. Die Verformungskurven weisen im Vergleich zur fixierten Pfeilerlagerung einen unregelmäßigen Verlauf auf. Die Unregelmäßigkeiten im mittleren Abschnitt des Kurvenverlaufs sind vermutlich auf die Rotationsbewegung des Zwischengliedes zurückzuführen. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt für das Gerüst mit dem Querschnitt  $4 \text{ mm}^2$ . Das Brückenzwischenglied (Pontic) rotiert hierbei um eine gedachte Querachse (grüne Pfeile). Die linken Areale des Pontic bewegen sich dabei nach oben. Der rechte Anteil des Pontic rotiert hingegen nach unten. Für die Querschnitte  $9 \text{ mm}^2$  und  $12 \text{ mm}^2$  kann eine Rotation des Brückenzwischengliedes nicht beobachtet werden. Aufgrund dieser Unstetigkeiten im Kurvenverlauf, welche vermutlich auch durch die Eigenbeweglichkeit der Versuchsanordnung verstärkt werden, sind die angegebenen Werte für die maximale Durchbiegung des Gerüsts kritisch zu hinterfragen.

## 4.4 Gerüstwerkstoff DC-Zirkon

### 4.4.1 mit variabler Verbindergeometrie bei starrer Lagerung/unzementiert

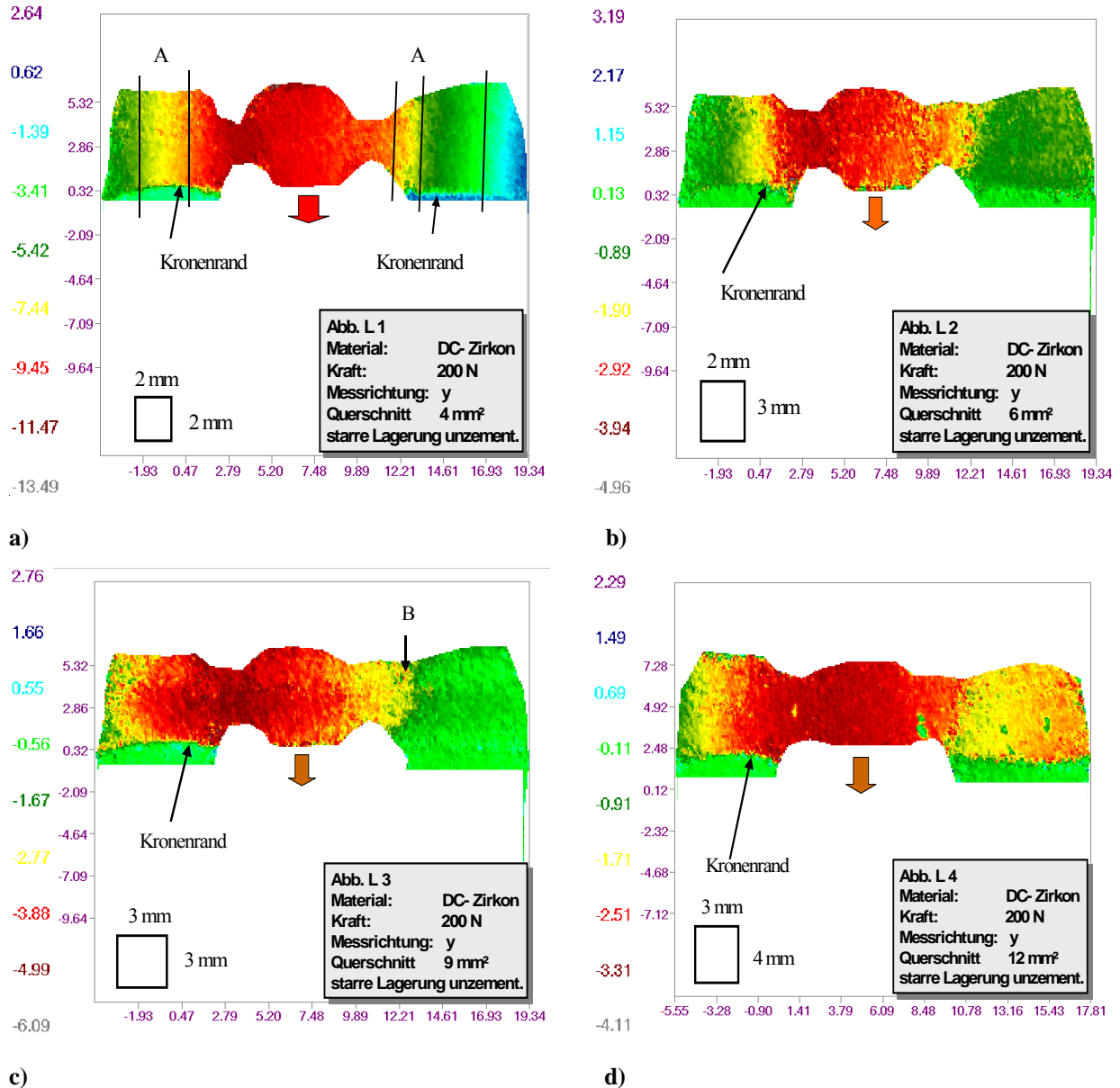
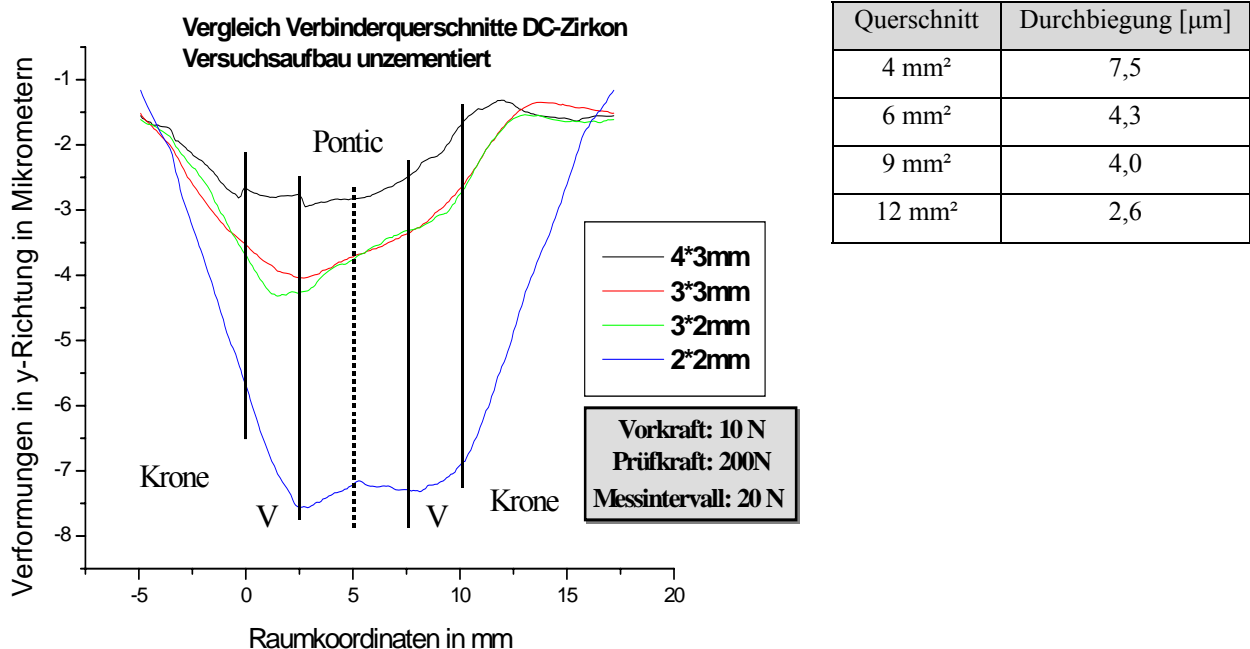


Abbildung 23: DC-Zirkon starre Lagerung und unzementiert (verschiedene Querschnitte)

Die Messbilder zeigen die Verformungen des unzementierten DC-Zirkon<sup>®</sup>-Gerüstes auf starr gelagerten Pfeilern. Die Brückenglieder sind überwiegend einfarbig dargestellt und weisen infolge dessen keine nennenswerten Verformungstendenzen auf. Streifenmuster treten hingegen nur im Kronengerüst auf.

Die Messaufnahmen der Gerüste mit dem Querschnitt 4 mm<sup>2</sup> zeigen im Gegensatz zu den größeren Querschnitten scharf abgegrenzte und senkrecht orientierte Farbstreifen. Dieser Effekt

nimmt jedoch mit zunehmenden Verbinderquerschnitt ab. Die höchste Farbliniendichte kann hier im Anbindungsbereich der Verbinder an die Kronengerüste beobachtet werden. Der Bereich der Anbindung der Verbinder an das Zwischenglied weist dagegen keine Farbabstufungen auf (*Abbildung 23*, Linien **A**). Eine ausschließliche Konzentration der Farblinien auf die Verbinderregion ist nicht erkennbar. Mit der Zunahme der Querschnittsfläche verbreitern sich die Farbstreifen. Dies geht mit einer Abnahme der Durchbiegung einher. Eine Auffälligkeit weist das Gerüst mit 9 mm<sup>2</sup> Querschnitt auf. Dort ist im rechten Verbinder ein scharf begrenzter Farbübergang (Pfeil **B**) sichtbar. Eine Entstehungsursache ist nicht erkennbar. Der Effekt kann jedoch auch nicht im Diagramm 7 lokalisiert werden.



**Diagramm 7:** „starre Pfeilerlagerung“ mit nicht zementiertem DC-Zirkon Gerüst

Die Gerüstumrisse und Kronenränder sind, unabhängig vom Verbinderquerschnitt, deutlich zu erkennen. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die größte Durchbiegung bei den Gerüsten mit einem Querschnitt 4 mm<sup>2</sup> liegt. Die Verringerung der Verbinderhöhe von 3 mm auf 2 mm bei einer unveränderten Breite von 2 mm bewirkt eine Verdopplung der Durchbiegung. Im Gegensatz dazu hat eine Abnahme der Verbinderbreite von 3 mm auf 2 mm bei einer konstanten Verbinderhöhe von 3 mm keine weiteren Auswirkungen. Die Reduktion der Höhe von 4 mm auf 3mm bei einer Verbinderbreite von 3 mm führt ebenfalls zu einer Zunahme der Durchbiegung.

4.4.2 DC-Zirkon mit variabler Verbindergeometrie bei starrer Lagerung/zementiert

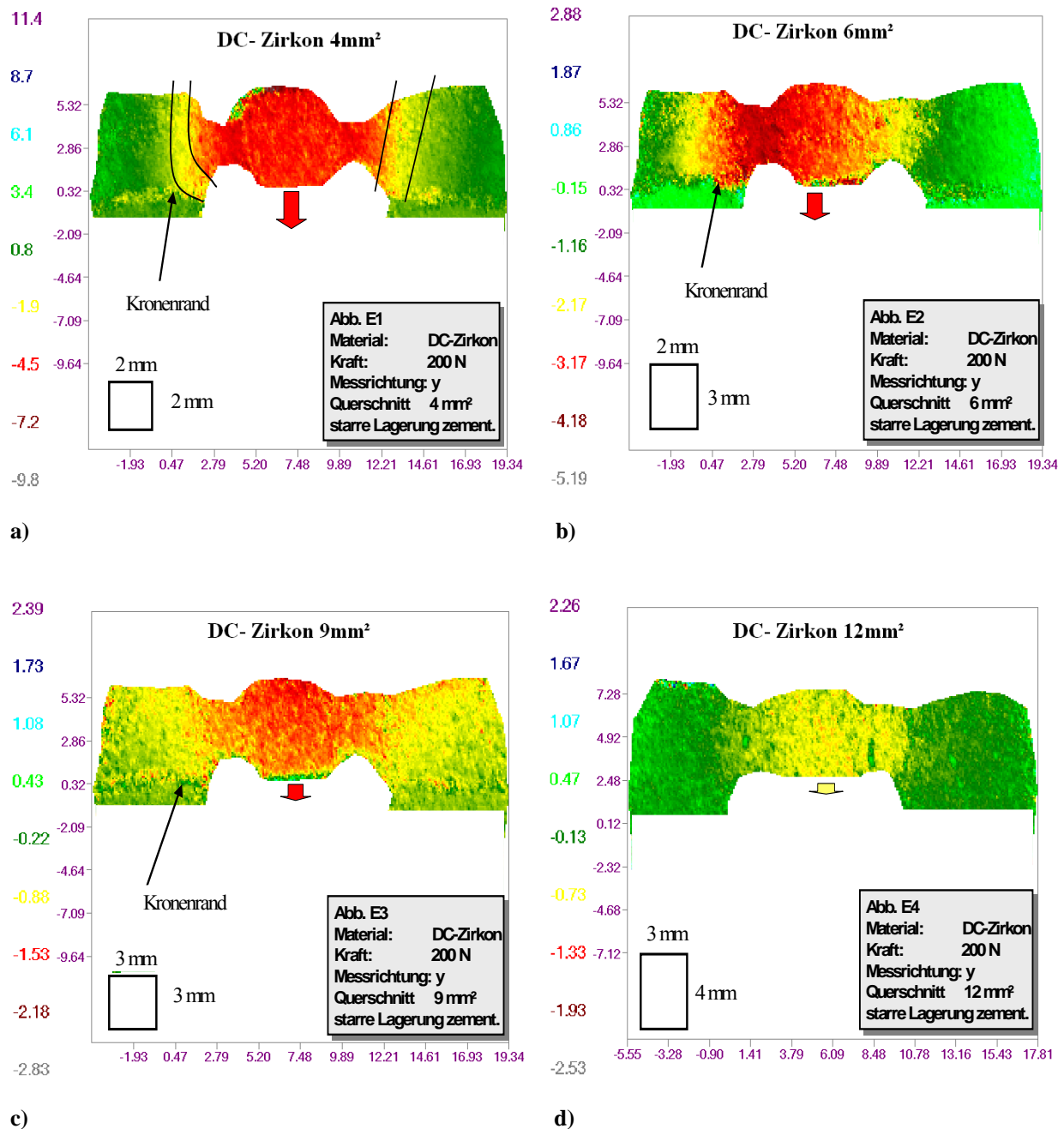
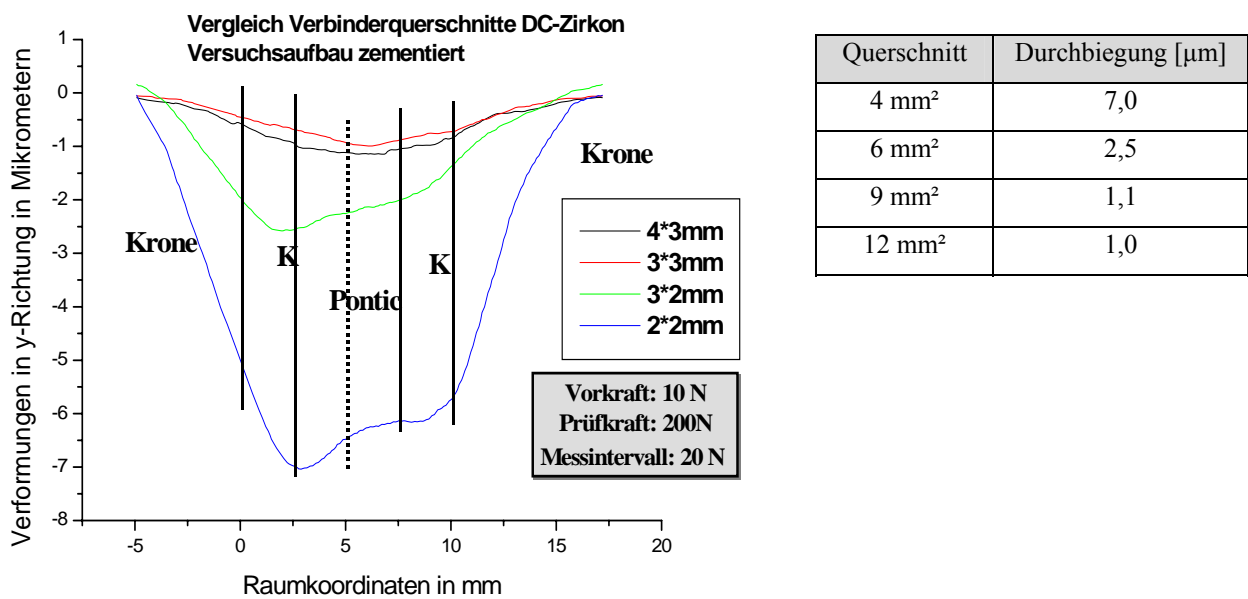


Abbildung 24: DC-Zirkon starre Lagerung und zementiert (verschiedene Querschnitte)

Die Abbildung 24 a - d zeigt die gemessene Verformung des zementierten DC-Zirkon<sup>®</sup>-Gerüsts bei einer starren Lagerung der Pfeiler. Die Verformungen sind dabei jeweils abhängig von der Querschnittsfläche der Verbinder unterschiedlich stark ausgeprägt. Wie erwartet führt auch hier die Zunahme des Verbinderquerschnitts zu einer Verringerung der Gerüstdurchbiegung. Das Zwischenglied selbst stellt sich, unabhängig vom Querschnitt, überwiegend homogen einfarbt

dar. Eine Eigenverformung kann somit nicht beobachtet werden. Die Kronenränder der anderen Gerüste können, bis auf das Gerüst mit einem Querschnitt von 12 mm<sup>2</sup>, klar identifiziert werden. Deutliche Farbstreifenmuster sind nur in den Messbildern (Abbildung 24 a und b) zu erkennen. Mit zunehmendem Querschnitt werden die Specklestreifen breiter und die Abgrenzung wird unschärfer. Bei einem Querschnitt von 12 mm<sup>2</sup> gehen dann die Streifen fließend ineinander über. Die höchste Streifendichte ist im Bereich der Anbindung der Verbinder an die Kronengerüste erkennbar (Abbildung 24 a). Die größten Verformungen sind somit dort lokalisiert (schwarze Linien).



**Diagramm 8:** „starre Pfeilerlagerung“ mit zementiertem DC-Zirkon-Gerüst

Das Diagramm 8 zeigt die Durchbiegung der Gerüste bei verschiedenen Querschnitten. Dabei ist ein geringfügiger Unterschied zwischen 12 mm<sup>2</sup> und 9 mm<sup>2</sup> zu erkennen. Eine Reduzierung des Querschnitts auf 6 mm<sup>2</sup> hat zur Folge, dass sich die Durchbiegung, im Vergleich zu 9 mm<sup>2</sup>, verdoppelt. Eine weitere Reduktion des Querschnitts auf 4 mm<sup>2</sup> führt zu einer wesentlichen Zunahme der Durchbiegung im Vergleich zu 9 mm<sup>2</sup>. Eine Abnahme der Verbinderhöhe von 4 mm auf 3 mm bei konstanter Verbinderbreite bewirkt keinen Festigkeitsverlust.



4.4.3 DC-Zirkon mit variabler Verbindergeometrie im Dreipunktbiegeversuch

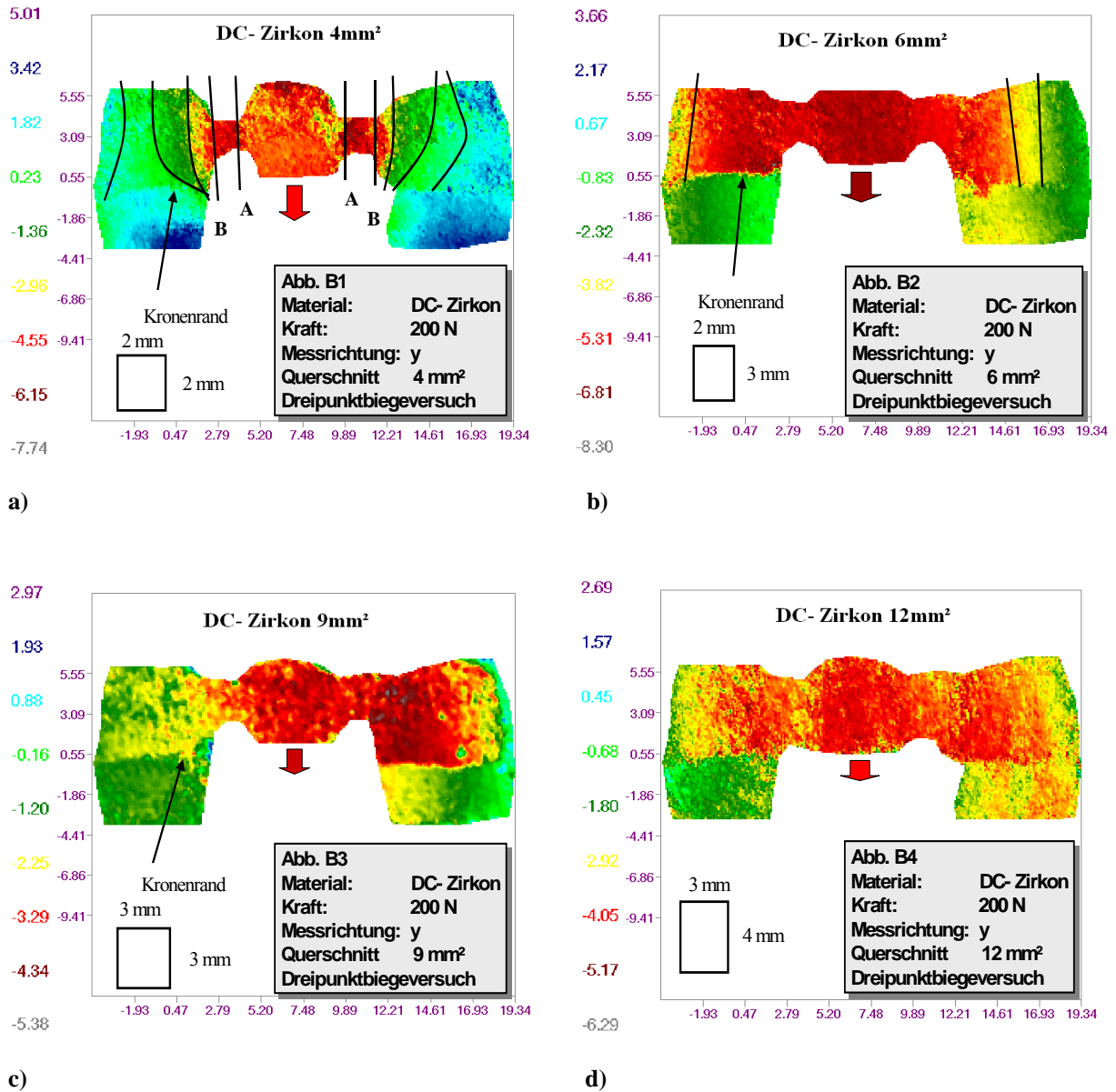
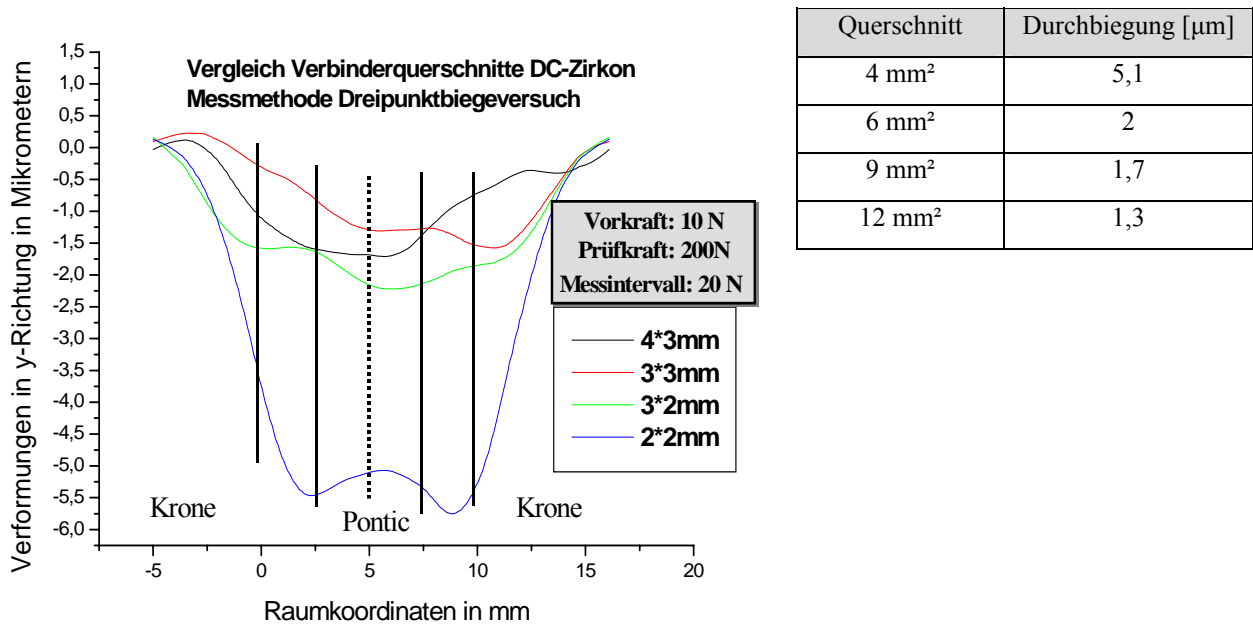


Abbildung 25: DC-Zirkon Dreipunktbiegeversuch mit verschiedenen Querschnitten

Die Abbildung 25 a - d zeigen die gemessenen Verformungsmuster von DC-Zirkon<sup>®</sup>-Gerüsten im Dreipunktbiegeversuch bei unterschiedlichen Verbinderquerschnitten. Unabhängig vom Querschnitt sind die Gerüstumrisse auf allen Messbildern klar zu erkennen. Besonders deutliche Streifenmuster weisen jedoch ausschließlich die Messbilder der Querschnitte 4 mm<sup>2</sup> und 6 mm<sup>2</sup> auf. Die höchste Streifendichte ist bei den Gerüsten für den Querschnitt 4 mm<sup>2</sup> beobachtbar. Die Streifen sind hier im Bereich der Anbindung der Verbinder an die Kronengerüste lokalisiert. Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass sich mit der Zunahme des Verbinderquerschnitts die Durchbiegung (*Diagramm 9*) verringert und die Festigkeit infolgedessen zu nimmt. Mit der

Vergrößerung des Querschnitts verteilen sich die Verformungen zunehmend auf die benachbarten Kronengerüste. Die größte Durchbiegung ist für das Gerüst mit 4mm<sup>2</sup> Querschnitt erkennbar. Das Gerüst mit dem Querschnitt von 12mm<sup>2</sup> zeigt dagegen nur noch eine minimale Verformung auf.



**Diagramm 9:** DC-Zirkon-Gerüst mit Dreipunkt-Biegeversuchsanordnung gemessen

Im Diagramm 9 sind die nur geringen Unterschiede in der Durchbiegung für die Querschnitte 12 mm<sup>2</sup>, 9 mm<sup>2</sup> und 6 mm<sup>2</sup> gut erkennbar. Die Durchbiegung des Gerüsts mit 4 mm<sup>2</sup> Querschnittsfläche ist viermal größer als im Vergleich zu den anderen Querschnitten. Es zeigt sich ebenfalls nur eine geringe Festigkeitszunahme durch die Vergrößerung des Querschnitts von 6 mm<sup>2</sup> auf 12 mm<sup>2</sup>. Die Zunahme der Verbinderhöhe von 3 mm auf 4 mm, bei konstanter Verbinderbreite, hat nur geringe positive Einflüsse auf die Festigkeit. Eine Vergrößerung der Verbinderbreite von 2 mm auf 3 mm, bei unveränderter Verbinderhöhe, führt nur zu geringen Veränderungen.

## 4.5 Gerüstwerkstoff ProTemp III

### 4.5.1 bei variabler Verbindergeometrie und starrer Lagerung/ unzementiert

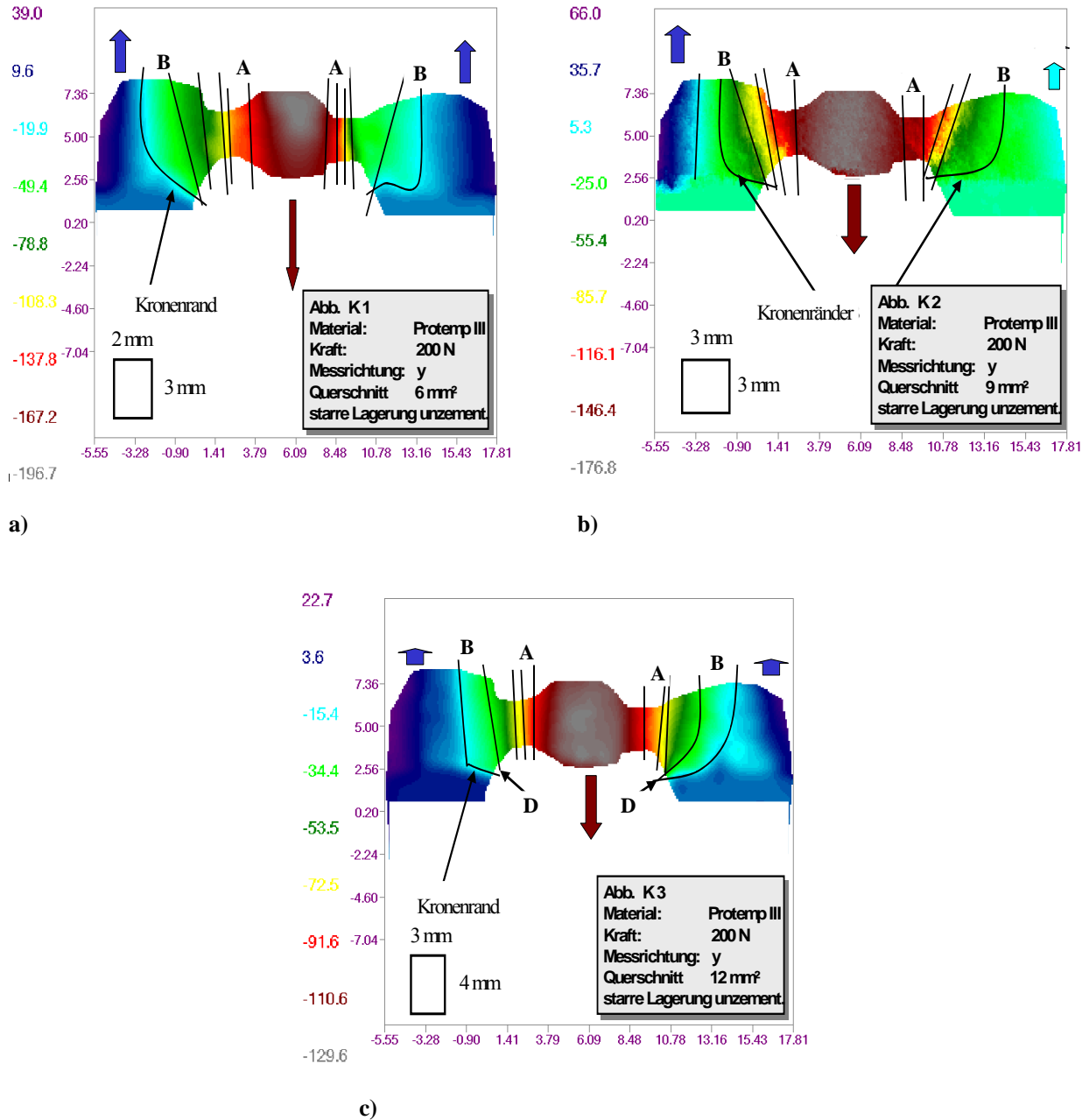


Abbildung 26: ProTemp III starre Lagerung und unzementiert (verschiedene Querschnitte)

Die Messbilder (Abbildung 26 a - c) zeigen, dass sich die Farbstreifen ausschließlich auf die Konnektorregion konzentrieren. Die größte Streifendichte ist in der Mitte der Verbinder, im Bereich des geringsten Querschnitts, zu beobachten. Hier besitzen die Streifen eine vertikale Verlaufsorientierung (A). An den Übergangszonen der Verbinder in die Kronengerüste gehen die Streifen dagegen in einen leicht schräg nach außen gerichteten Verlauf über, was den

Verformungen der Kronengerüste entspricht (**B**). Die Randzonen der Kronengerüste zeigen im Gegensatz dazu keine Verformungen. Die Kronenränder sind für Gerüste mit 6 mm<sup>2</sup>, 9 mm<sup>2</sup> und 12 mm<sup>2</sup> Querschnitt nur angedeutet zu erkennen (Pfeil **B**). Neben der Konzentration der Farbstreifen in den Konnektoren ist zudem eine Verdichtung im Bereich des in unmittelbarer Nähe der Verbinder gelegenen Kronenrandes zu beobachten (Pfeil **D**).

Die Zwischenglieder zeigen keine Eigenverformung. Sie bewegen sich ohne zu verformen mit dem Prüfstempel nach apikal.

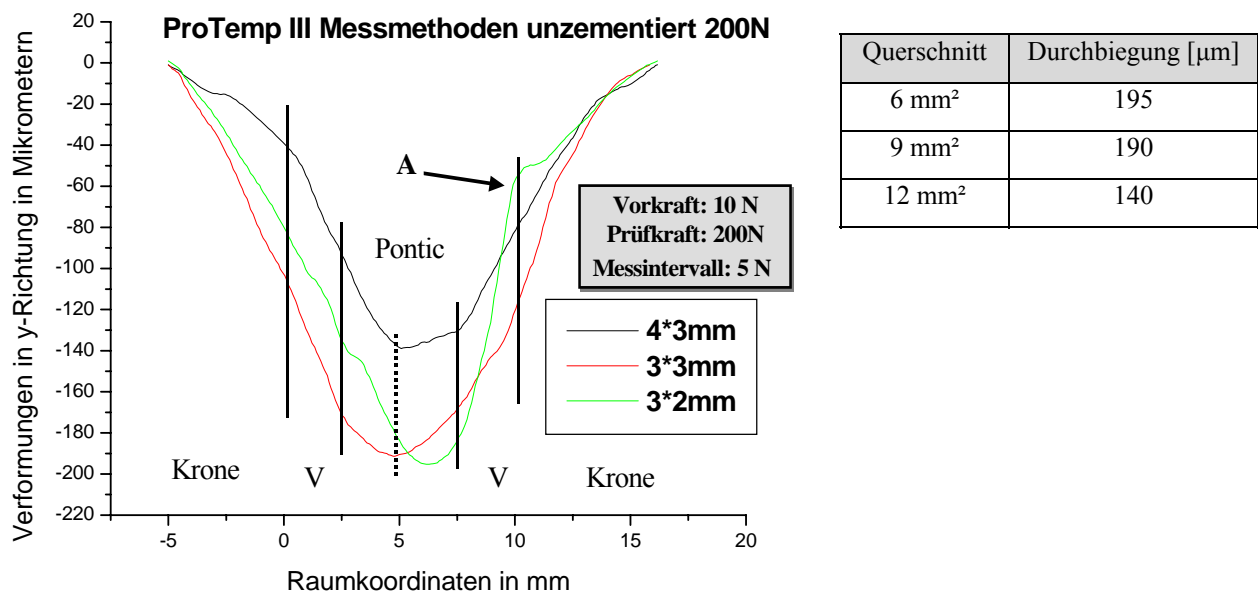


Diagramm 10: „starre Pfeilerlagerung“ mit nicht zementiertem ProTemp III-Gerüst

Im Diagramm 10 ist die vertikale Durchbiegung der Gerüste entlang der definierten Schnittebene, in Abhängigkeit vom Verbinderquerschnitt, dargestellt. Die Kurve für den Querschnitt 6mm<sup>2</sup> zeigt im Bereich des rechten Verbinders Unregelmäßigkeiten im Verlauf (Pfeil A). Man erkennt, dass die Durchbiegung der Gerüste mit 6 mm<sup>2</sup> und 9 mm<sup>2</sup> ähnlich ist und dass die Zunahme der Verbinderbreite von 2 mm auf 3 mm bei unveränderter Verbinderhöhe keinen festigkeitssteigernden Einfluss auf die Gerüste hat. Mit der Vergrößerung der Höhe von 3 mm auf 4 mm, bei konstanter Verbinderbreite, nimmt dagegen die Durchbiegung sichtbar ab und führt zu einer Steigerung der Festigkeit des Gerüsts.

### 4.5.2 ProTemp III mit variabler Verbindergeometrie und starrer Lagerung/zementiert

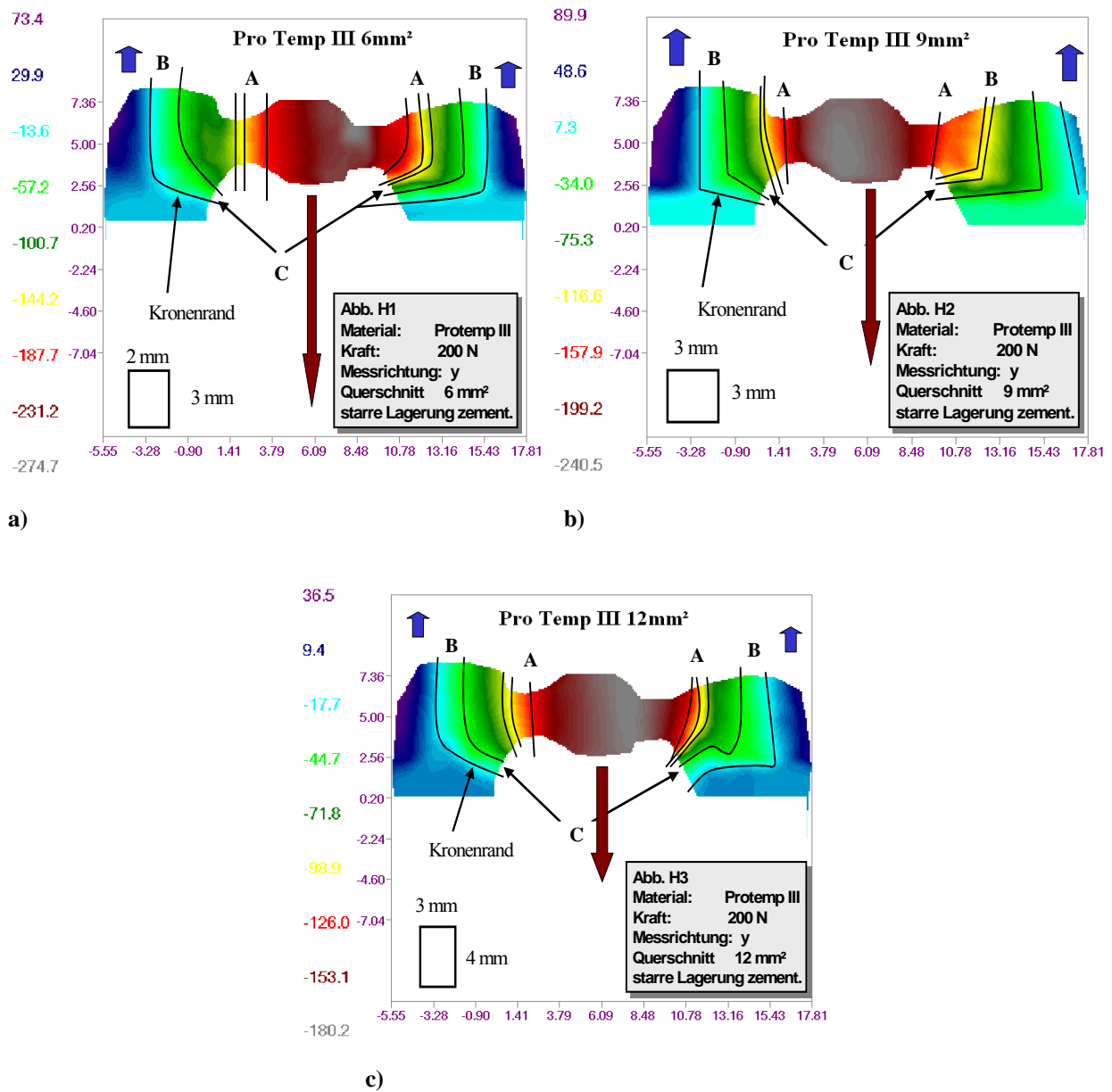
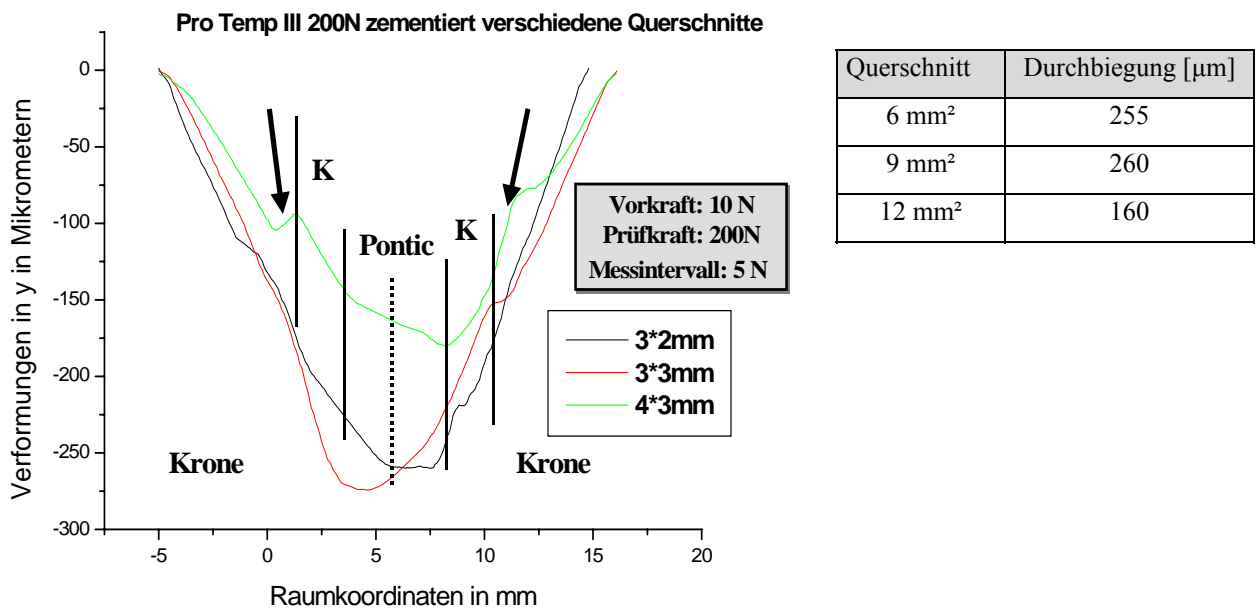


Abbildung 27: ProTemp III starre Lagerung und zementiert (verschiedene Querschnitte)

Diese Messbilder (Abbildung 27 a - c) zeigen die Durchbiegung der zementierten ProTemp III<sup>®</sup>-Gerüste mit verschiedenen Querschnitten. Das Messbild für den 4 mm<sup>2</sup> Verbinderquerschnitt ist aufgrund der sehr schlechten Messqualität nicht auswertbar. Die Gerüste zeigen, unabhängig vom Querschnitt, ähnliche Verformungsbilder. Die höchste Konzentration der Farblinien ist im Bereich der Anbindung der Verbinder an das Kronengerüst zu beobachten (Abbildung 27 c). Dort treten die größten Spannungen im Material auf. Die innen liegenden Farblinien (A) zeigen einen geraden Verlauf mit einer vertikalen Orientierung. Die äußeren Linien (B) hingegen

weisen einen gebogenen und teilweise abgewinkelten Verlauf auf. Sie verlaufen im oberen Anteil vertikal, und in der Nähe des Kronenrandes knicken die Kurven fast im rechten Winkel ab. Neben der Konzentration der Farbstreifen im Übergangsbereich der Verbinder in die Krone ist auch eine Verdichtung der Farblinien im Kronenrandbereich zu beobachten (*Abbildung 27 c*, Pfeil C). Hier zeigt sich der Einfluss der Lage der Kronenränder auf das Verformungsverhalten.



**Diagramm 11: „starre Pfeilerlagerung“ mit zementiertem ProTemp III-Gerüst**

Für den Querschnitt 12 mm<sup>2</sup> sind im Anbindungsbereich der Verbinder an das Kronengerüst Unregelmäßigkeiten im Kurvenverlauf zu erkennen (*Diagramm 11*, Pfeile). Das Gerüst mit dem 12 mm<sup>2</sup> Querschnitt zeigt eine geringere Durchbiegung, im Vergleich zum 6 mm<sup>2</sup> und 9 mm<sup>2</sup> Verbinderquerschnitt. Die Unterschiede zwischen dem 6 mm<sup>2</sup> und 9 mm<sup>2</sup> Querschnitt sind dagegen geringer.

#### 4.6 Tabellarische Übersicht über die Messergebnisse

Tabelle 5: Überblick Messergebnisse

Verbinderquerschnitte in mm (Höhe* Breite)		2*2	3*2	3*3	4*3
<b>Dreipunktbiegeversuch</b>					
<b>Durchbiegung in [µm]</b>	<i>DC-Tell</i> <sup>®</sup>	<b>k.E.</b>	<b>190</b>	<b>60</b>	<b>80</b>
	<i>PEEK</i> <sup>®</sup>	<b>k.E.</b>	<b>240</b>	<b>170</b>	<b>140</b>
	<i>ProTemp III</i> <sup>®</sup>	<b>k.E.</b>	<b>k.E.</b>	<b>k.E.</b>	<b>k.E.</b>
	<i>DC-Zirkon</i> <sup>®</sup>	<b>5,1</b>	<b>2,0</b>	<b>1,7</b>	<b>1,3</b>
<i>nicht zementiert</i>					
<b>Durchbiegung in [µm]</b>	<i>DC-Tell</i> <sup>®</sup>	<b>97</b>	<b>75</b>	<b>50</b>	<b>52</b>
	<i>PEEK</i> <sup>®</sup>	<b>105</b>	<b>100</b>	<b>87</b>	<b>70</b>
	<i>ProTemp III</i> <sup>®</sup>	<b>k.E.</b>	<b>195</b>	<b>190</b>	<b>140</b>
	<i>DC-Zirkon</i> <sup>®</sup>	<b>7,5</b>	<b>4,3</b>	<b>4,0</b>	<b>2,6</b>
<i>zementiert</i>					
<b>Durchbiegung in [µm]</b>	<i>DC-Tell</i> <sup>®</sup>	<b>101</b>	<b>62</b>	<b>38</b>	<b>13</b>
	<i>PEEK</i> <sup>®</sup>	<b>118</b>	<b>111</b>	<b>80</b>	<b>30</b>
	<i>ProTemp III</i> <sup>®</sup>	<b>k.E.</b>	<b>255</b>	<b>260</b>	<b>160</b>
	<i>DC-Zirkon</i> <sup>®</sup>	<b>7,0</b>	<b>2,5</b>	<b>1,1</b>	<b>1,0</b>

**k.E.** keine verwertbaren Ergebnisse

## 5 Diskussion

### 5.1 Eignung der 3D-ESPI Messmethode zur Messung von Gerüstverformungen

Bereits Musewald hat gezeigt, dass das berührungslose Vermessen der lastabhängigen Verformung von Brückenkonstruktionen mit der Speckle-Interferometrie-Messmethode möglich ist.<sup>117</sup> Nicht nur die Verformungen von Gerüsten aus homogenen Werkstoffen konnten präzise gemessen werden. Es zeigte sich, dass die Messmethode auch geeignet ist, um die Verformungen von Gerüsten aus verschiedenen Materialkombinationen zu bestimmen. Dass mit der 3D-ESPI-Messmethode die lastabhängigen Verformungen von Brückengerüsten mit hoher Genauigkeit vermessen werden können, konnte auch im Rahmen der vorliegenden Studie bestätigt werden.

Das 3D-ESPI-Messsystem ist somit ein geeignetes Analysewerkzeug, um die werkstoffspezifischen Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Brückengerüsten aus Keramiken und Kunststoffen zerstörungsfrei zu untersuchen.

Das Messsystem besitzt eine sehr hohe Messauflösung. Bereits die sehr geringen Verformungen von hochfesten Zirkonoxidkeramiken sind mit dem System messbar, wie gezeigt werden konnte. Durch die hohe Messempfindlichkeit der Messgeräte können jedoch selbst kleinste externe Störfaktoren zu Messungenauigkeiten führen. Als externe **Störgrößen** stellten sich dabei folgende Faktoren heraus:

- Umgebungsschwingungen und Vibrationen am Messplatz
- spezifische Wellenlängen, enthalten im natürlichen Tageslicht
- instabile Biegeversuchsanordnungen
- Schwingungen infolge der Krafteinleitung durch die Prüfmaschine

Diese Störeinflüsse manifestieren sich in den Messbildern als „**Specklerauschen**“ und führen zu unscharfen Abgrenzungen innerhalb der Interferenzmuster. Für die Aufnahme der Messbilder wird eine CCD-Kamera mit einer Messzeit im Millisekundenbereich verwendet, wodurch Messungenauigkeiten durch externe Störgrößen während der Messaufnahme reduziert werden können. Durch die Modifizierung des Messplatzes konnte der Einfluss dieser Störgrößen wirksam reduziert werden. Die Luftlagerung des Messplatzes erwies sich als wirksames Mittel, Schwingungen und Vibrationen zu dämpfen. Der negative Einfluss des Umgebungslichtes auf die Messgenauigkeit konnte durch die Abdunklung des Messplatzes verringert werden. Schwierigkeiten bereitete das „Schwingen“ des Gerüstes nach der Krafteinleitung durch die



Prüfmaschine. Daher musste nach jeder erfolgten Kraftereinleitung so lange mit der Messaufnahme gewartet werden, bis keine „Schwingungen“ mehr beobachtet werden konnten.

Das 3D-ESPI-Messsystem ermöglicht die Identifizierung von Regionen mit großen Verformungen und liefert somit Hinweise auf frakturkritische Zugspannungsareale. Mit dem Messsystem sind jedoch ausschließlich nur Oberflächenverformungen messbar. Die Oberflächenspannungen müssen erst aus den gemessenen Verformungswerten errechnet werden. Verformungsprozesse im Inneren des Prüfkörpers lassen sich hingegen nur indirekt als Oberflächenverformungen beobachten. Rückschlüsse auf die Spannungsverteilung innerhalb des Prüfkörpers können daher nur im begrenzten Umfang gezogen werden. Die Spannungsverteilung direkt im Prüfkörper kann mit der FE-Methode simuliert werden.

In Abhängigkeit von der Lokalisation der Verformungen und der Verformungsrichtung können sich die Spannungen als Zug- oder Druckspannungen manifestieren. Das Vorliegen von Zug- oder Druckspannungen ist besonders für Bauteile aus keramischen Werkstoffen in Hinblick auf deren Bruchfestigkeit von wesentlicher Bedeutung. Denn Keramiken besitzen lediglich gegenüber Druckspannungen eine hohe Widerstandsfähigkeit. Zugbelastungen führen dagegen bereits bei wesentlich geringeren Werten zum Materialversagen.<sup>64,65,124</sup> Ziel der Designoptimierung besonders bei Brückengerüsten aus Keramik, ist es, die Gestaltung so zu wählen, dass die frakturkritischen Zugspannungen reduziert und Zugspannungsfelder aus kritischen Bereichen (Verbinderunterseite) in unkritische Bereiche verlagert werden. Die Messmethode ist somit eine sehr präzise Analysemethode zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Verformung, der Festigkeit und den Verbinderabmessungen von Brückengerüsten.

Das 3D-ESPI-Messsystem eignet sich außerdem dazu, wie gezeigt werden konnte, um das mit Hilfe von FEM numerisch simulierte Verformungsverhalten von Brückengerüsten mit dem tatsächlichen Verformungsverhalten zu überprüfen. Mit der Kombination beider Methoden kann die Genauigkeit der FE-Berechnungen präzisiert werden, in dem die Diskrepanzen zwischen den numerisch simulierten und realen messbaren Bauteileigenschaften reduziert werden. Ansätze eines solchen Vorgehens sind bereits durch Farah und Graig beschrieben worden.<sup>125</sup> Auch ein Einsatz des Messverfahrens bei der Suche nach verdeckten Defekten im Anschluss an den zahntechnischen Fertigungsprozess, ist möglich. Messungen an verblendeten Keramikbrücken im Rahmen von Vorversuchen liefern dahingehend positive Ergebnisse. Sprünge und Risse in der Verblendung sind in den Messbildern ansatzweise zu identifizieren. Das 3D-ESPI-Messverfahren ist somit sehr gut geeignet, um die belastungsabhängigen Verformungen der dreigliedrigen Brückengerüste mit hinreichender Genauigkeit zu vermessen.

### **5.2 Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Messgenauigkeit**

Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Genauigkeit der Messergebnisse übt die Oberflächenstruktur der Prüfkörper aus. Besonders die ausgeprägten Einziehungen im Bereich der Verbinder sowie starke Oberflächenkrümmungen führen zu Verzerrungen der Specklemuster. Im Bereich der Verbinder treten aufgrund der Abschirmung durch benachbarte Strukturen Abschattungseffekte auf. Im Rahmen dieser Untersuchung konnten die Abschattungseffekte in der Verbinderregion durch die Reduzierung des Brückenzwischenliedes in oro-vestibulärer Richtung auf das Niveau benachbarter Strukturen verringert werden.

Die Messabweichungen infolge stark gekrümmter Oberflächen können auch durch spezielle Korrektursoftware ausgeglichen werden. Die Korrektursoftware stand dem Messsystem jedoch nicht zur Verfügung.

Zusätzliche Schwierigkeiten bereitet die Oberflächenqualität der Keramikgerüste. Trotz der Fräsbearbeitung besitzen die Gerüste eine sehr glatte Oberfläche und reflektieren daher sehr stark. Diese Reflexionseffekte führen zu Messungenauigkeiten. Infolge der Reflexion wird der CCD-Chip der Messkamera überbelichtet, und die Specklemuster in diesen Punkten gehen verloren. Die Auswertungssoftware kann somit die Messung nicht mehr korrekt auswerten. Die Reflexionspunkte präsentieren sich als scharf begrenzte Flecken in den Messbildern und als „Peaks“ in den Messkurven. In den Vorversuchen zeigte sich, dass die Reflexionswirkung der Oberfläche durch das Benetzen der Gerüstoberflächen mit Farbspray reduziert werden kann. Das verwendete Farbspray wird in der Bauteilprüfung eingesetzt und eignet sich für diese Oberflächenbehandlung hervorragend. Messfehler können jedoch durch das Ablösen dicker Farbschichten bei wiederholter Auftragung entstehen. Von der Vergrößerung der Oberflächenrauigkeit durch die Bearbeitung mit Schleifkörpern muss Abstand genommen werden, da Mikroanrisse in der Keramik entstehen können. So zeigte sich für Zirkoniumdioxidkeramiken eine Reduzierung der Biegefestigkeit und des Weibull-Moduls nach dem Sandstrahlen und dem Bearbeiten der Oberfläche mit rotierenden Werkzeugen.<sup>126</sup>

### 5.3 Zusammenhang zwischen Verbinderabmessungen und Gerüstverformung

Die Empfehlungen zur Gestaltung und Dimensionierung der Verbinder beruhen, wie bereits beschrieben, überwiegend auf den Ergebnissen aus mechanischen Belastungsversuchen und klinischen Beobachtungen. Die Empfehlungen enthalten eine Sicherheitsreserve, um auch bei selten auftretenden Lastfällen mit Sicherheit eine Fraktur des Gerüsts ausschließen zu können. Die Folge sind jedoch zumeist überdimensionierte Verbinder.

Die Versuchsergebnisse zeigen, wie erwartet wurde, dass der Verformungsgrad und damit die Festigkeit der Gerüste überwiegend durch die Verbinderabmessungen mitbestimmt wird. Wie bei den Keramikgerüsten ist auch bei den Kunststoffgerüsten ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Festigkeit der Brücken und dem Verbinderquerschnitt zu erkennen. Wird die Brückenspannweite vergrößert und der Querschnitt beibehalten, so sinkt die Festigkeit. Vergrößert man den Querschnitt und lässt die Spannweite unverändert, nimmt die Durchbiegung ab und die Festigkeit zu.

Im Vergleich zu den Kunststoffen kommen bei den keramischen Gerüstwerkstoffen noch zusätzliche Faktoren hinzu, die darüber entscheiden, ob die Gerüste frakturieren oder nicht. Bei Keramiken genügt ein einziger Riss, der die kritische Risslänge überschreitet, um das gesamte Bauteil zu zerstören. Die rissauslösenden Schwachstellen entstehen jedoch nicht nur durch geometrische, sondern auch durch werkstoffspezifische Faktoren. Dazu zählen die Inhomogenitäten im Kristallgerüst durch Verunreinigungen auf atomarer Ebene, Porositäten und interne Materialspannungen durch ein unterschiedliches Abkühlungsverhalten. Die statistische Verteilung des frakturauslösenden Fehlers ist entscheidend für die Festigkeit und wird durch den Weibull-Faktor hinreichend beschrieben.

Ziel der Messungen war es, die lastabhängige Deformation von dreigliedrigen Brückengerüsten bei unterschiedlichen Verbinderquerschnitten mit hoher Präzision zu vermessen. Vier verschiedene Querschnittsabmessungen wurden dafür ausgewählt. Die Querschnittsfläche von 12 mm<sup>2</sup> (4 mm\* 3 mm) wird für die Verbinder dreigliedriger Brücken aus leuzitverstärkter Silikatkeramik empfohlen. Der Querschnitt von 9 mm<sup>2</sup> Querschnitt entspricht dem empfohlenen Wert für mehrgliedrige Zirkonoxidbrückengerüste in der Molarenregion.<sup>17,67</sup>

Die 3D-ESPI-Messbilder der Gerüste nach der Lastaufnahme zeigen materialspezifische Verformungsmuster. Ausschließlich die Verbinderregion ist durch sehr eng beieinander verlaufende Specklelinien gekennzeichnet. Die größten Verformungen des Gerüsts konzentrieren sich somit auf den Bereich der Verbinder. Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Verbinder die Schwachstelle der Gerüste darstellen.

Das 3D-ESPI-Messsystem ermöglicht die Messung und anschließende getrennte Darstellung der drei Verformungsvektoren (X, Y, Z). Die Verlaufsrichtung des resultierenden Verformungsvektors  $V^{res}$  bestimmt das Vorhandensein von Druck- oder Zugspannungen. Die Zugspannungen stellen die kritische Größe für die Keramiken dar. Dass sich die größten Verformungen und Spannungsspitzen an der Unterseite der Verbinder konzentrieren, wie es in mehreren Studien beschrieben ist, ist in den Ergebnissen nicht zu beobachten.<sup>65,66,127</sup>

Im Diagramm 12 ist die gemessene Durchbiegung in Relation zum Verbinderquerschnitt und der Versuchsanordnung abgebildet. Es zeigt sich, dass die Durchbiegung der Gerüste in einem direkten Zusammenhang zum Verbinderquerschnitt steht. Gut erkennbar ist der Einfluss der Verbinderhöhe und Verbinderbreite auf die Durchbiegung der Gerüste. Dieser Effekt ist jedoch in Abhängigkeit vom untersuchten Brückengerüstmaterialien unterschiedlich stark ausgeprägt.

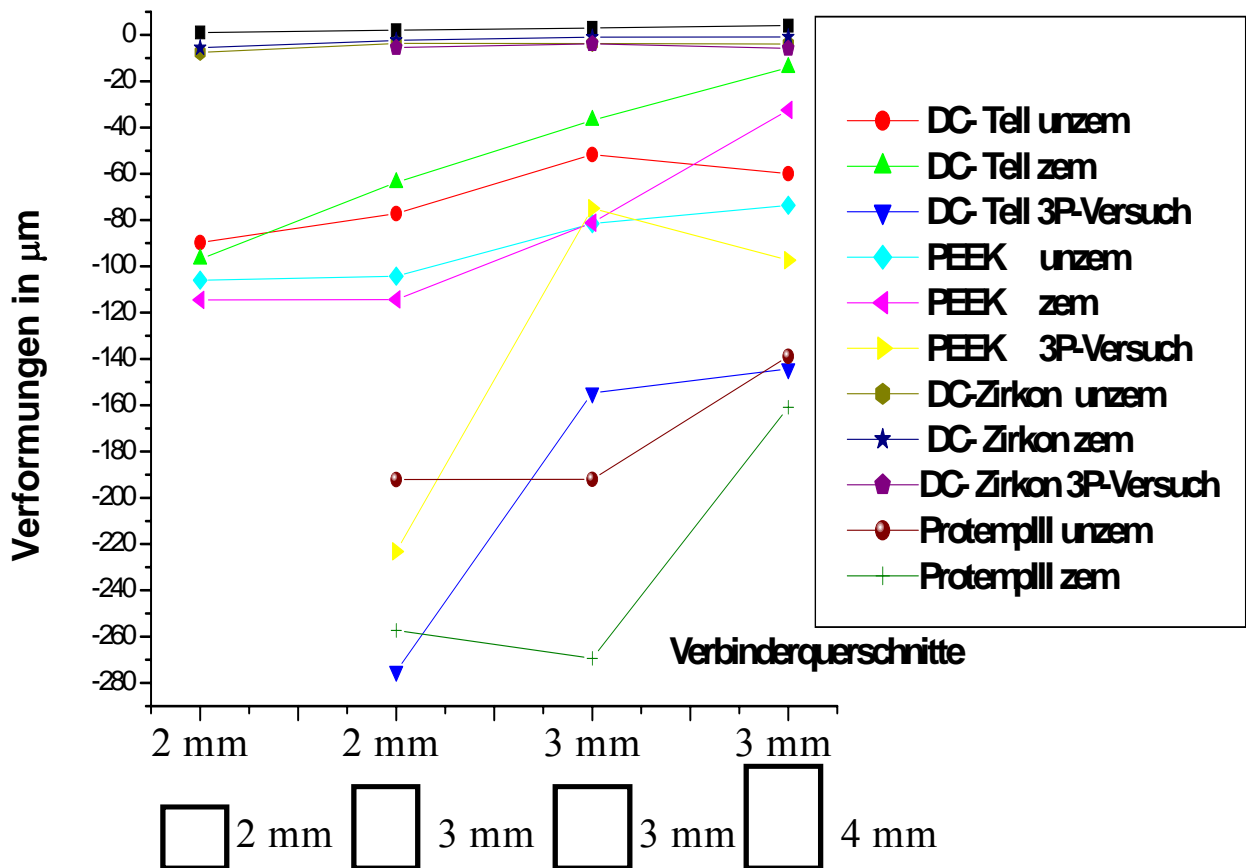
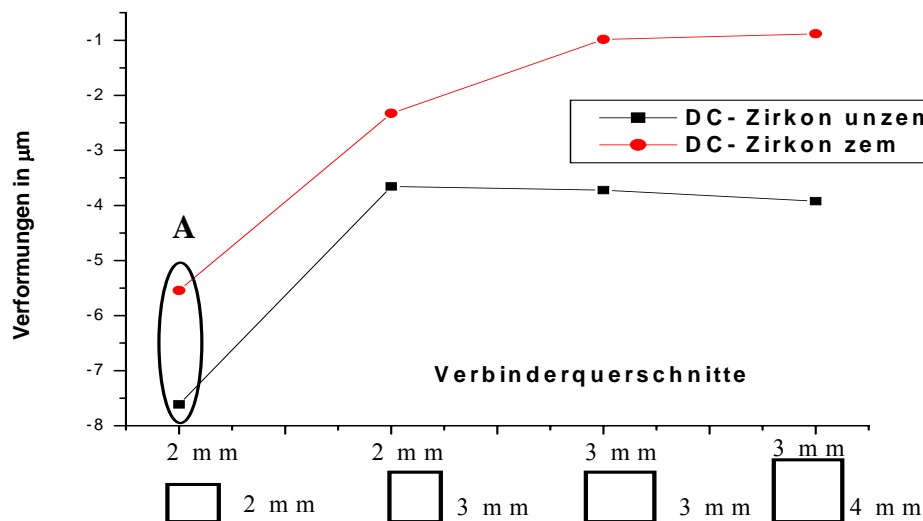


Diagramm 12: Übersicht über die gemessenen Durchbiegungen der Gerüste

### 5.3.1 DC-Zirkon

Das zementierte DC-Zirkon<sup>®</sup>-Gerüst zeigt bei einer Zunahme der Verbinderhöhe von 2 mm auf 3 mm bei gleichbleibender Verbinderbreite (2 mm) eine Abnahme der Durchbiegung. Die Zunahme der Breite von 2 mm auf 3 mm bei einer Höhe von 3 mm führt ebenso zu einer Reduzierung, wenn auch im geringeren Umfang. Dagegen hat die Zunahme der Verbinderhöhe von 3 mm auf 4 mm bei einer Verbinderbreite von 3 mm fast keine Auswirkungen auf die Durchbiegung. Abweichende Ergebnisse zeigt die Studie von Kampiosora. Hier konnte eine Reduktion der Verformungen und gerüstinternen Spannungen um 40 - 50% bei einer Zunahme der Verbinderhöhe von 3 mm auf 4 mm für Keramiken beobachtet werden.<sup>64</sup> Mit der Zunahme des Verbinderquerschnitts tritt eine Verschiebung der Specklestreifenmuster von den Verbindern in die angrenzenden Kronengerüste ein. Die Reduzierung des Querschnitts von 12 mm<sup>2</sup> auf 9 mm<sup>2</sup> hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Durchbiegung (*Diagramm 13*). Folglich sind DC-Zirkon<sup>®</sup>-Gerüste mit 12 mm<sup>2</sup> Querschnitt für eine erwartete Belastung von 200 N überdimensioniert, da Querschnitte von 9 mm<sup>2</sup> bereits eine ausreichende Festigkeit aufweisen. Für Kaulasten über 200 N können hingegen jedoch keine Aussagen getroffen werden.



**Diagramm 13: gemessene Gerüstdurchbiegung für DC-Zirkon**

### 5.3.2 DC-Tell

Das zementierte DC-Tell<sup>®</sup>-Gerüst zeigt bei einer Zunahme der Verbinderhöhe von 2 mm auf 3 mm und konstanter Breite von 2 mm eine Abnahme der Verformung. Die Zunahme der Breite von 2 mm auf 3 mm bei einer unveränderten Höhe von 3 mm sowie die Vergrößerung der Höhe von 3 mm auf 4 mm bei einer konstanten Breite von 3 mm führt ebenfalls zu einer Abnahme der Durchbiegung. Die Reduktion der Durchbiegung liegt bei jeder Querschnittsänderung in einer ähnlichen Größenordnung. Die Zunahme des Verbinderquerschnitts führt zu einer stetigen Abnahme der Durchbiegung und damit zu einer Festigkeitssteigerung (*Diagramm 12*).

### 5.3.3 PEEK und ProTemp III

Die Vergrößerung der Verbinderhöhe der zementierten PEEK<sup>®</sup>-Gerüsts von 2 mm auf 3 mm bei einer unveränderten Breite von 2 mm führt zu keiner Reduzierung der Durchbiegung. Die Zunahme der Verbinderbreite von 2 mm auf 3 mm bei einer Höhe von 3 mm hat eine Abnahme der Durchbiegung zur Folge. Dies kann auch bei der Vergrößerung der Höhe von 3 mm auf 4 mm bei einer unveränderten Verbinderbreite von 3 mm beobachtet werden.

Die ProTemp III<sup>®</sup>-Gerüste mit einem Querschnitt von 4 mm<sup>2</sup> frakturierten bereits bei einer Last von 140 N. Bei der Zunahme der Verbinderbreite von 2 mm auf 3 mm und einer Höhe von 3 mm kann keine Veränderungen der Gerüstdurchbiegung beobachtet werden. Eine Vergrößerung der Verbinderhöhe von 3 mm auf 4 mm führt dagegen zu einer wesentlichen Abnahme der Gerüstdurchbiegung (*Diagramm 12*).

Frakturen bei zementierten Gerüsten mit einem Querschnitt von 4 mm<sup>2</sup> sind bereits bei Prüflasten aufgetreten, die weit unter der maximal möglichen Kaukraft von bis zu 800 N im Seitenzahnbereich liegen. DC-Tell<sup>®</sup>-Gerüste frakturierten bei 230 N, PEEK<sup>®</sup> bei 210 N und ProTemp III<sup>®</sup> bei 140 N. Eine Fraktur des dreigliedrigen DC-Zirkon<sup>®</sup>-Gerüst mit dem Querschnitt 4 mm<sup>2</sup> konnte hingegen erst bei über 400 N beobachtet werden.

Aufgrund dessen, dass die Kaukräfte im Seitenzahnbereich über 400 N liegen, sind Verbinderquerschnitte von 4 mm<sup>2</sup> für dreigliedrige Brückengerüste für die Verwendung in der Molarenregion nicht geeignet.

### 5.4 Finite-Elemente-Methode

Damit Konstruktionsrichtlinien die Anforderungen an eine hohe Fraktursicherheit erfüllen können, müssen zuerst die Zusammenhänge zwischen der Gerüst- und insbesondere der Verbinderdimensionierung und der Festigkeit bekannt sein und die Stellen mit den höchsten Beanspruchungen identifiziert werden. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass überwiegend die Verbinder hohen Verformungen ausgesetzt sind.

Numerische Simulationsverfahren, wie die **Finite-Elemente-Methode** (FEM), können einen entscheidenden Beitrag zu Konstruktionsrichtlinien für eine optimale Verbindergestaltung liefern. Jedoch erst mit der Integration der FEM-Tools in die Konstruktionssoftware der dentalen CAD/CAM-Systeme werden die technischen Voraussetzungen für eine praxisnahe Anwendung geschaffen. Damit steht dem Zahntechniker letztendlich ein Werkzeug für die Konstruktion von mehrgliedrigen Brückengerüsten mit garantierten Festigkeitseigenschaften zur Verfügung.

Die Kombination von CAD-Konstruktionssoftware und FEM-Tools wird bereits seit einigen Jahren sehr erfolgreich im Ingenieurbereich eingesetzt, um das Verformungs- und Spannungsverhalten von Bauteilgeometrien zu analysieren und das Konstruktionsdesign auf die gestellten Anforderungen hin zu optimieren.

Grundlage für das verwendete 3D-FE-Volumenmodell ist ein im DCS-Precident<sup>®</sup>-System generierter Datensatz eines dreigliedrigen Brückengerüstes. Diese Daten sind in ein STL-Datenformat konvertiert worden, um sie somit für das CAD-Programm Pro/ENGINEER<sup>®</sup> (Fa. Parametric Technology Corporation, USA) verfügbar zu machen.

Mit dem FE-Programm wurden die nach axialer Belastung des Brückenzwischenliedes resultierenden Verformungen berechnet. Im Anschluss wurden die Rechenergebnisse mit den experimentell durch die 3D-ESPI-Messmethode bestimmten Verformungswerten verglichen.

Die FE-Berechnungen wurden mit den Werkstoffkennwerten von DC-Tell<sup>®</sup> durchgeführt. In Vorversuchen ist der E-Modul von DC-Tell<sup>®</sup> experimentell ermittelt und mit den Herstellerangaben verglichen worden. Hierbei sind große Abweichungen von den durch den Hersteller angegebenen Werten zu erkennen gewesen. Erst durch eine Korrektur der Querkontraktionszahl konnten die Rechenergebnisse an die experimentellen Messergebnisse angenähert werden.

Besonders die FEM-Simulation von Bauteilen aus keramischen Werkstoffen bereitet aufgrund ihrer besonderen Materialeigenschaften noch immer Schwierigkeiten. Mit der numerischen Berechnung der Hauptspannungsverteilung kann bislang nur eine deterministische Aussage zur Frakturwahrscheinlichkeit von Keramikbauteilen (hält oder hält nicht) getätigt werden.

Genauere Ergebnisse kann erst die Integration von wahrscheinlichkeitstheoretischen Berechnungsalgorithmen, basierend auf der Weibull-Statistik, liefern. Diese Algorithmen standen dem hier verwendeten FEM-Programm jedoch nicht zur Verfügung.

Die Komplexität der FE-Methode erfordert jedoch die Einhaltung bestimmter Anwendungsrichtlinien: Die richtige Verteilung und Vernetzung der Knoten, der Aufbau des 3D-Volumenmodells, die Auswahl der Materialkonstanten und die Definition der Randparameter sind für die Richtigkeit des FE-Modells von entscheidender Bedeutung. Die Festlegung dieser Parameter beruht jedoch größtenteils auf den Erfahrungen des Anwenders. Auch die Interpretation der Ergebnisse setzt eine hinreichende Erfahrung mit dem FE-Programm voraus. Ungenügende Erfahrungen können somit zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Daher ist stets eine experimentelle Überprüfung der numerischen Simulationsergebnisse erforderlich.<sup>99</sup>

Um die Stabilität der FE-Simulationen zu gewährleisten und um den erforderlichen Aufwand an Rechenkapazität zu begrenzen, war es notwendig, Vereinfachungen am 3D-FEM-Modell vorzunehmen. Angenommen wurde, dass der Gerüstwerkstoff homogene Werkstoffeigenschaften aufweist. Um die Zementierung der Brücke zu simulieren, wurden im FE-Modell das Brückengerüst „als an die Brückenpfeiler gefesselt“ definiert. Der schalenartige inhomogene Aufbau der Zähne aus Pulpa, Dentin und Schmelz wurde nicht in das Modell integriert, obwohl ein nicht zu vernachlässigender Einfluss auf die Verformung der Zahn Pfeiler nachweisbar ist.<sup>128-132,133</sup> Die Pfeiler besitzen im Modell homogene Materialeigenschaften und ihnen wurde das E-Modul der NEM-Legierung Wiron 99<sup>®</sup> zugewiesen.

Der parodontale Faserapparat wurde im FE-Modell nicht nachgebildet, obwohl Rees empfiehlt, das parodontale Ligament und den Alveolarknochen in ein Rechenmodell des gesamten Zahnes mit einzubeziehen.<sup>134</sup> Gegen die Notwendigkeit der Integration des Parodontiums sprechen die Ergebnisse einer bereits durchgeführten Studie. Die Studienergebnisse zeigen, dass das parodontale Ligament keinen Einfluss auf die Spannungsentwicklung in einer Einzelkrone hat.<sup>135</sup>

Der Einfluss des Pulpenkaviums auf die Spannungsentstehung in Keramikkrone ist ebenfalls vernachlässigt worden, obwohl Hoiyatje und Anusavice diesbezüglich jedoch einen Zusammenhang nachweisen konnten.<sup>88</sup> Unbeantwortet bleibt die Frage, welchen Einfluss der inhomogene Aufbau der Pfeilerzähne und die Zahnbeweglichkeit in Verbindung mit dem parodontalen Faserapparat auf die Gerüstverformung und damit letztendlich auf die Festigkeit haben. Für die nachfolgenden FE-Berechnungen wurde eine jeweils Testlast von 1 N senkrecht mittig auf das Brückenglied zugrunde gelegt.



5.4.1 Vergleich der Verformungen aus 3D-ESPI-Messung und FEM-Simulation

5.4.1.1 Y-Messachsenrichtung

Die Abbildung 28 stellt die experimentell gemessenen Verformungen den Ergebnissen aus der FE-Rechnung, bezogen auf die Y-Messrichtung, gegenüber. Die Verformungsmuster sind das Ergebnis der Durchbiegung des dreigliedrigen Brückengerüsts nach okklusaler Belastung des Brückenzwischen Gliedes. Die 3D-ESPI-Messbilder (Abbildung 28,a-c) zeigen die resultierenden Verformungsbilder bei einer konstanten Prüflast von 20 N. Die errechneten Verformungswerte sind in mm angegeben. Die Gegenüberstellung der Messergebnisse zeigt, dass sowohl qualitativ sowie auch quantitativ ein übereinstimmendes Deformationsverhalten beobachtet werden kann. Dies bestätigt die Vermutung, dass das untersuchte Brückengerüst linearelastische Eigenschaften besitzt.

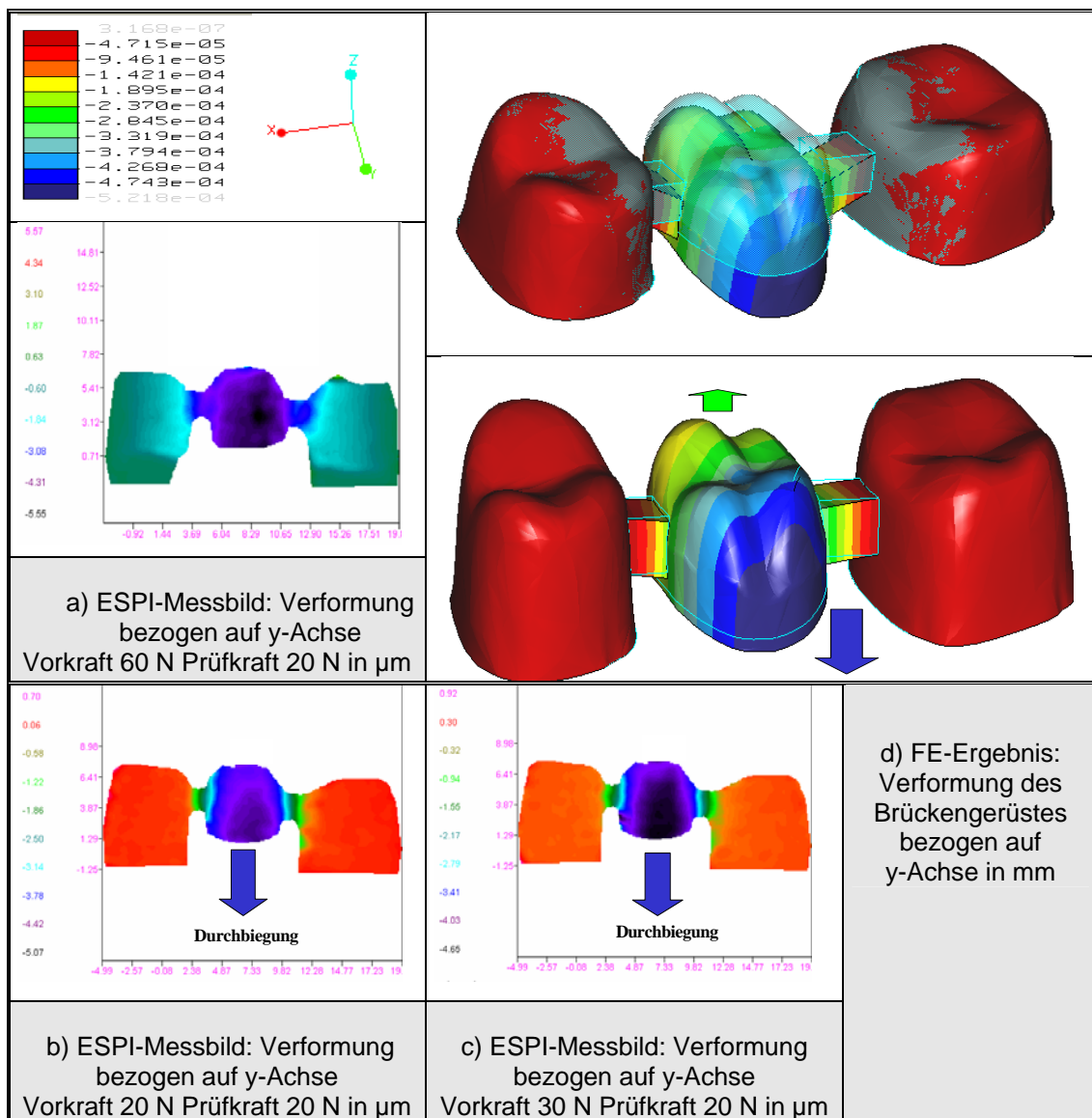
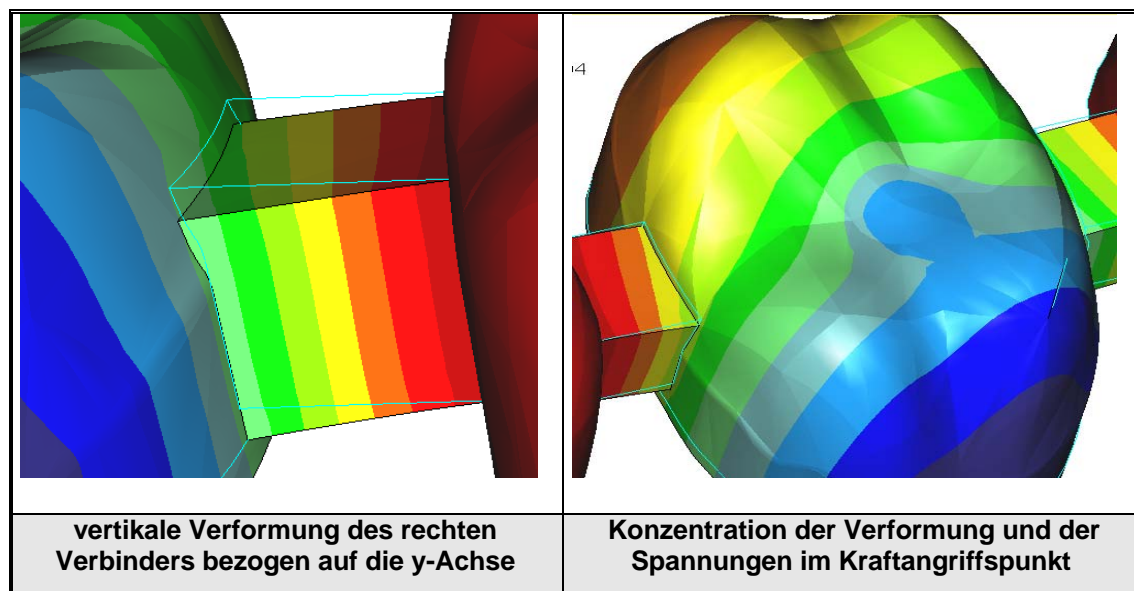


Abbildung 28: Gegenüberstellung ESPI-Messbilder mit FE-Ergebnis bei 20 N Prüflast

In den Messbildern ist im Bereich des linken und rechten Konnektors, im Vergleich zum Brückenzwischenstück und den Kronengerüsten, eine Zunahme der Streifendichte erkennbar. Die Specklestreifenmuster weisen dort eine vertikale Verlaufsorientierung auf. Eine hohe Streifendichte ist dabei kennzeichnend für das Vorhandensein großer Verformungen. Daraus resultiert im Bereich der Materialverformungen eine Konzentration der Spannungen. Die Konnektoren stellen damit die Schwachstelle des Gerüsts dar. Das Zwischenstück zeigt, vermutlich aufgrund seiner massiven Gestalt, nur sehr geringe Verformungseffekte. Zusätzliche Verformungen in den Kronengerüsten können nicht beobachtet werden. Der Vergleich der gemessenen Verformungen mit den errechneten Verformungsdaten (*Abbildung 28*) weist gute quantitative und qualitative Übereinstimmungen auf. Das Verformungsmuster hat damit Ähnlichkeiten mit der Durchbiegung eines an seinen Endpunkten eingespannten Balkens.



**Abbildung 29: Detailabbildungen der Konnektoren**

Die Detailabbildungen (*Abbildung 29*) zeigen die Anbindung des rechten Verbinders an den Pontic und die Oberseite des Zwischenstückes mit der Anbindung an den linken Verbinder. Der blaue Kreis auf der Kaufläche markiert den Krafteinleitungspunkt. Dort kommt es zur Deformation der Auflagefläche durch die aufliegende Kugel, über welche die Krafteinleitung erfolgt ist. Die Verformungen sind regelmäßig und zeigen keine Überhöhungen an der Anbindung von Verbinder und Krone. Die grauen Linien kennzeichnen den Zustand vor der Belastung. Der linke Verbinder senkt sich an der Anbindung zum Zwischenstück um  $0,2 \mu\text{m}$  ab. Am rechten Verbinder beträgt der Wert  $0,3 \mu\text{m}$ . Die Differenz ( $0,1 \mu\text{m}$ ) zwischen der Durchbiegung von linkem und rechtem Verbinder zeigt sich auch auf der Vorderseite des

Zwischengliedes. Der Pontic verdreht sich um diesen Betrag leicht in Richtung der rechten Krone. Die vertikale Anordnung der Streifen in beiden Konnektoren ist eindeutig zu erkennen. Erkennbar ist, dass die Vorderfläche des Zwischengliedes sich nach unten verschiebt und die Rückseite relativ nach oben. Diese Beobachtung ist die Folge einer Rotation des Pontics entlang einer gedachten horizontal verlaufenden Rotationsachse.

5.4.1.2 X-Messachsenrichtung

Die Abbildung 30 (obere Abbildung) zeigt die horizontalen Verformungen des Gerüsts relativ zur x-Achse bei einer 15 N Prüflast. Dabei rotiert das Zwischenglied an der Unterseite nach links und an der Oberseite in geringerem Umfang nach rechts. Die Verbinder weisen dadurch ein entgegengesetztes Verformungsverhalten auf. Die Rotation und die Verbinderverformung sind die direkten Auswirkungen außerhalb des Drehmomentenzentrums des Zwischengliedes eingeleiteten Belastung. Die oberen Anteile der Kronen und Verbinder werden vorwiegend auf Zug belastet, wogegen die Unterseite eher Druckspannungen ausgesetzt wird. Die Farbverteilung zeigt, dass die Zugbeanspruchung wesentlich stärker ausgeprägt ist als die Druckbelastung.

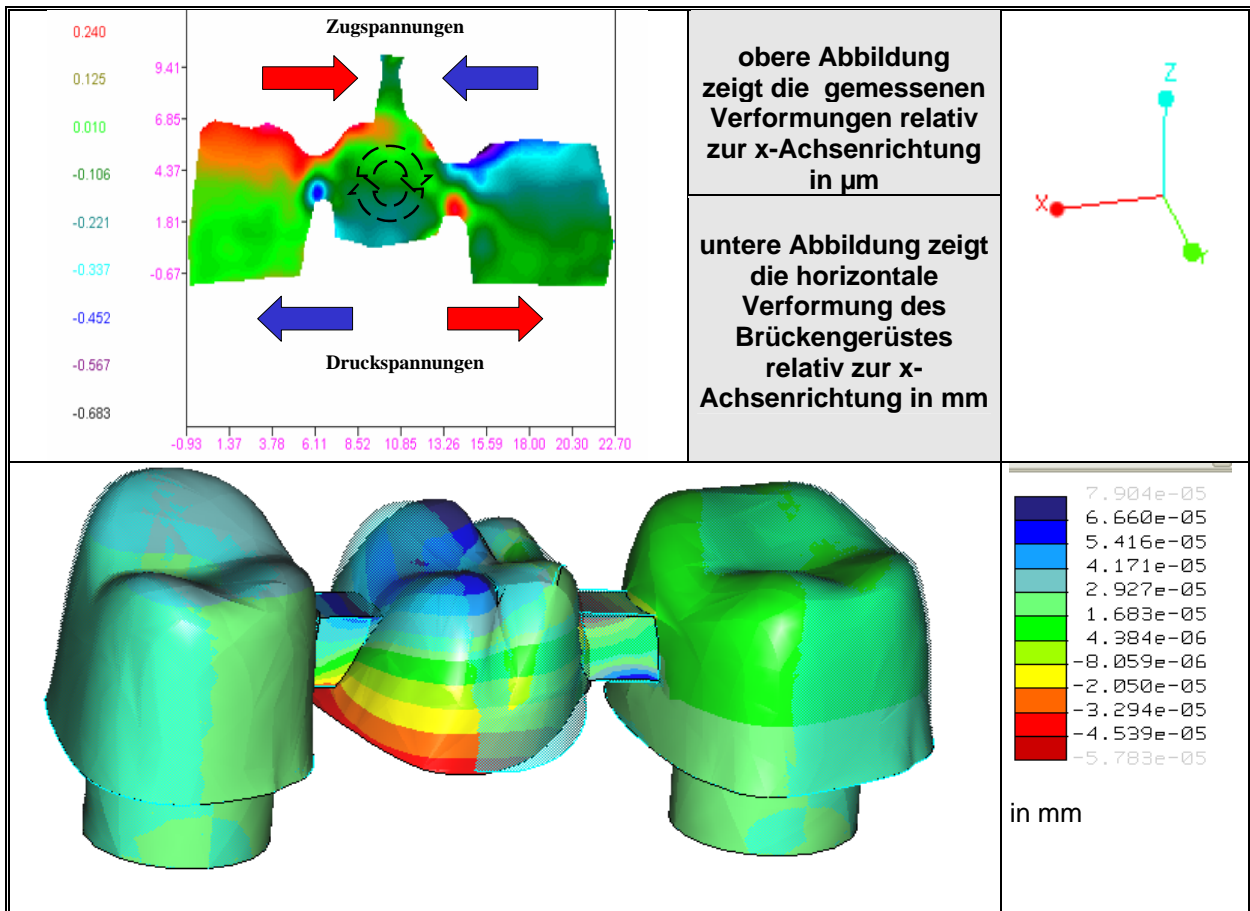


Abbildung 30: gemessene und errechnete Verformungen relativ zur x-Achsenrichtung

Beim Vergleich der Messbilder mit den FE-Ergebnissen ist zu beachten, dass die Farben zur Unterscheidung verschiedener Graustufen (Messwerte) durch das PC-Programm automatisch festgelegt werden und identische Farben in unterschiedlichen Messbildern somit nicht immer die gleiche Verformungsrichtung beschreiben. Im Messbild ist die positive Verformungsrichtung (Verformung nach rechts) rot dargestellt und für die errechneten Verformungswerte dagegen blau. Für die negative Verformungsrichtung ist die Farbzuzuweisung dementsprechend entgegengesetzt. Die Verteilung der Specklestreifenmuster zeigt bei der Gegenüberstellung beider Ergebnisse auch für diese Betrachtungsrichtung eine Ähnlichkeit.

### 5.4.1.3 Z-Messachsenrichtung

Die folgenden Abbildungen zeigen die gemessenen und errechneten Verformungen (*Abbildung 31*) in der z-Messachsenrichtung. Besonders gut zu erkennen sind die Rotation des Pontics und die Torsion der Verbinder. Die Torsion des Zwischengliedes ist die Folge einer außerhalb des Trägheitsmittelpunktes erfolgten Belastung des Pontics. Die Rotation erfolgt dabei um eine angenommene horizontal durch die Verbinder verlaufende Achse (gestrichelte Linie). Die Verbinder und der Pontic können somit als vereinfachte Vierkantstäbe betrachtet werden, die an den Ankerkronen fest eingespannt sind und sich durch die Belastung verwinden. Das größte Torsionsmoment findet sich am Übergang zwischen Pontic und Verbinder (rechter Bildabschnitt). An dieser Stelle ist auch der Verdrehwinkel maximal. Er nimmt zu den Ankerkronen hin ab und ist im Punkt der Anbindung zwischen Verbinder und Krone fast Null. Der Pontic rotiert damit um die Längsachse und verformt sich dabei selbst nur minimal. Infolge der fehlenden Verformung treten keine Spannungen auf. Die größten Spannungen entstehen im Bereich des höchsten Torsionsmoments im Anbindungsbereich zwischen Pontic und Verbinder. Deshalb weist diese Region auch die größte Frakturwahrscheinlichkeit auf. Das 3D-ESPI-Messbild zeigt die Verformungen bei 10 N Last und besitzt große Übereinstimmungen mit dem Rechenergebnis. Die roten Bereiche des Pontic oberhalb der gedachten Achse entfernen sich vom Kameraobjektiv. Die Flächen unterhalb bewegen sich dagegen auf das Kameraobjektiv zu. Eine Verformung der Brückenpfeiler ist nicht zu erkennen. Zu beachten ist, dass für einen direkten Vergleich der Verformungswerte, die FE-Ergebnisse noch mit dem Faktor 10 multipliziert werden müssen, da die FE-Berechnung für 1 N Prüflast durchgeführt wurde. Der rote Höcker des Zwischengliedes (roter Pfeil im Koordinatensystem) entfernt sich somit um 1  $\mu\text{m}$  von der Kamera.

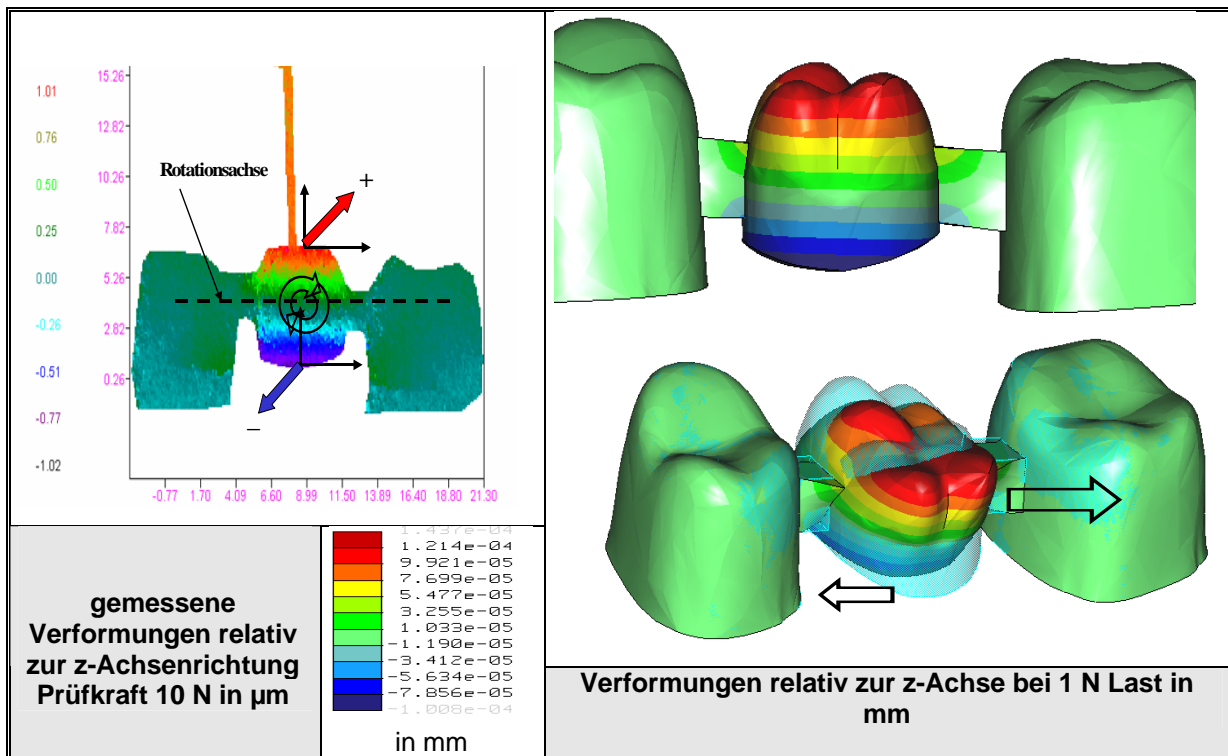


Abbildung 31: Gegenüberstellung gemessener und errechneter Verformungen relativ zur z-Achsenrichtung

#### 5.4.1.4 Darstellung der dreidimensionalen Verformung des Brückengerüsts

Die Abbildung 32 stellt die errechnete dreidimensionale Verformung (Summe der Verformungsvektoren  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) (Abbildung 32) des Brückengerüsts dar. Die Auswertung der FE-Ergebnisse zeigt, dass der vertikale Verformungsanteil ( $y$ -Verformungsvektor) im Vergleich zu den Verformungsvektoren der Achsenrichtungen  $x$  und  $z$  den größten Anteil an der Gesamtverformung einnimmt. Eine Zunahme der Streifendichte ist im Bereich der Konnektoren zu erkennen. Infolge dessen konzentrieren sich dort auch die größten Materialverformungen. Die Kronengerüste weisen dagegen keine nennenswerten Verformungen auf.

Die Ergebnisse der FE-Simulation konnten durch die durchgeführten 3D-ESPI-Messungen bestätigt werden. Die Auswertung der Ergebnisse lässt die Schlussfolgerung zu, dass sich die höchsten und somit auch die frakturkritischsten Materialspannungen überwiegend in der Verbinderregion konzentrieren. Diese Beobachtung stimmt mit bereits durchgeführten klinischen Studien und experimentellen Bruchfestigkeitsversuchen überein.

Zu klären bleibt die Frage, welchen Einfluss die beobachtete Rotation des Zwischengliedes um die Längsachse auf die Verformung und somit auf die Festigkeit der Verbinder hat. Das Biegemoment in den Verbindern infolge der Durchbiegung der Brücke wird durch ein Torsionsmoment (Drehmoment) in den Verbindern ergänzt. Die Torsion (Verdrehung) der

Verbinder könnte zu einer Spannungsüberhöhung mit der Konsequenz einer erhöhten Frakturwahrscheinlichkeit des Gerüsts, ausgehend von den Verbindern, führen.

Der direkte Vergleich der 3D-ESPI-Ergebnisse mit den Ergebnissen der FE-Simulation ist jedoch aufgrund einer abweichenden Darstellungsart innerhalb des ESPI-Systems nicht möglich.

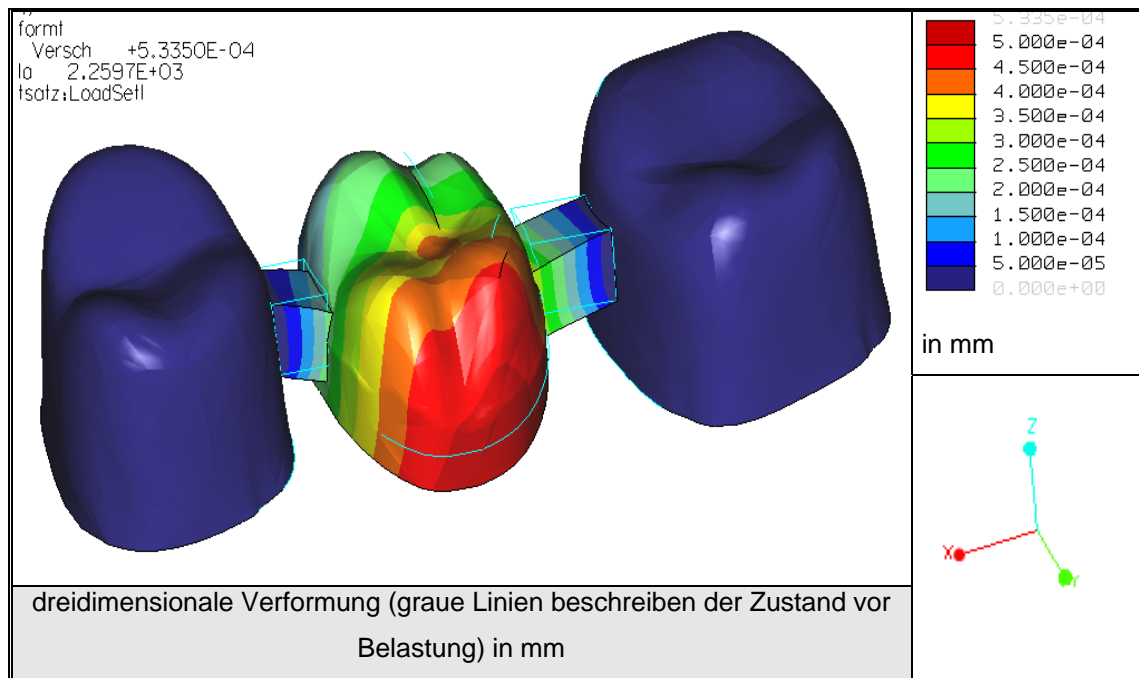


Abbildung 32: dreidimensionale Verformung des Gerüsts

#### 5.4.2 Veränderung der Modellparameter für die Brückenpfeilereigenschaften

Die Auswertung der 3D-ESPI-Messungen in den zwei unterschiedlichen Versuchsanordnungen (starre und flexible Pfeilerlagerung) zeigt, dass die Pfeilerbeweglichkeit einen wesentlichen Einfluss auf die Verformung und somit letztendlich vermutlich auch auf die Gerüstfestigkeit hat. Für die Klärung dieser Frage wurden zwei FE-Simulationen mit verschiedenen Modellparametern durchgeführt.

Für die erste Berechnung wurden die Modellparameter so definiert, dass die Pfeiler keine Beweglichkeit aufweisen und in den drei Raumrichtungen gefesselt sind. Die Parameter sind so bestimmt, dass das Gerüst sich nicht von den Pfeilern lösen kann. Vergleichbar sind die Modellparameter mit einem an beiden Endpunkten fixierten Balkenträger.

Bei der zweiten FEM-Simulation sind die Brückenpfeiler in allen drei Raumachsen in begrenztem Umfang beweglich gelagert. Vergleichbar ist die Versuchssituation mit einem in der Alveole befindlichen Zahn.



Die Abbildung 33 stellt den jeweils errechneten Verformungsvektor der x-Messrichtung dar. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt wesentliche Unterschiede im Deformationsverhalten der Brückengerüste.

Bei „starrer“ Pfeilerlagerung verformt sich ausschließlich das Zwischenglied, die Kronengerüste dagegen nicht. Starke Verformungseffekte treten in beiden Verbindern auf. Das Zwischenglied der auf flexibel gelagerten Pfeilern gelagerten Brücke zeigt dagegen keine nennenswerten Verformungen. Die Verformungen finden überwiegend in den Kronengerüsten statt. Durch die Lasteinwirkung auf das Zwischenglied entsteht ein Biegemoment im Gerüst. Das Biegemoment bezieht sich auf eine gedachte Biegeachse (die sogenannte neutrale Faser) und rechtwinklig zur Lastrichtung steht. Die daraus resultierenden Kräfte erzeugen auf der oberen Seite des Gerüsts eine Zugspannung und auf der Unterseite eine Druckspannung.

Die Pfeilerbeweglichkeit hat somit wesentlichen Einfluss auf die Höhe des Biegemoments und auf die Lokalisation der Druck- und Zugspannungen.

Bei der „flexiblen“ Pfeilerlagerung werden die Verbinder im Vergleich zur „starrten“ Pfeilerlagerung weitestgehend entlastet.

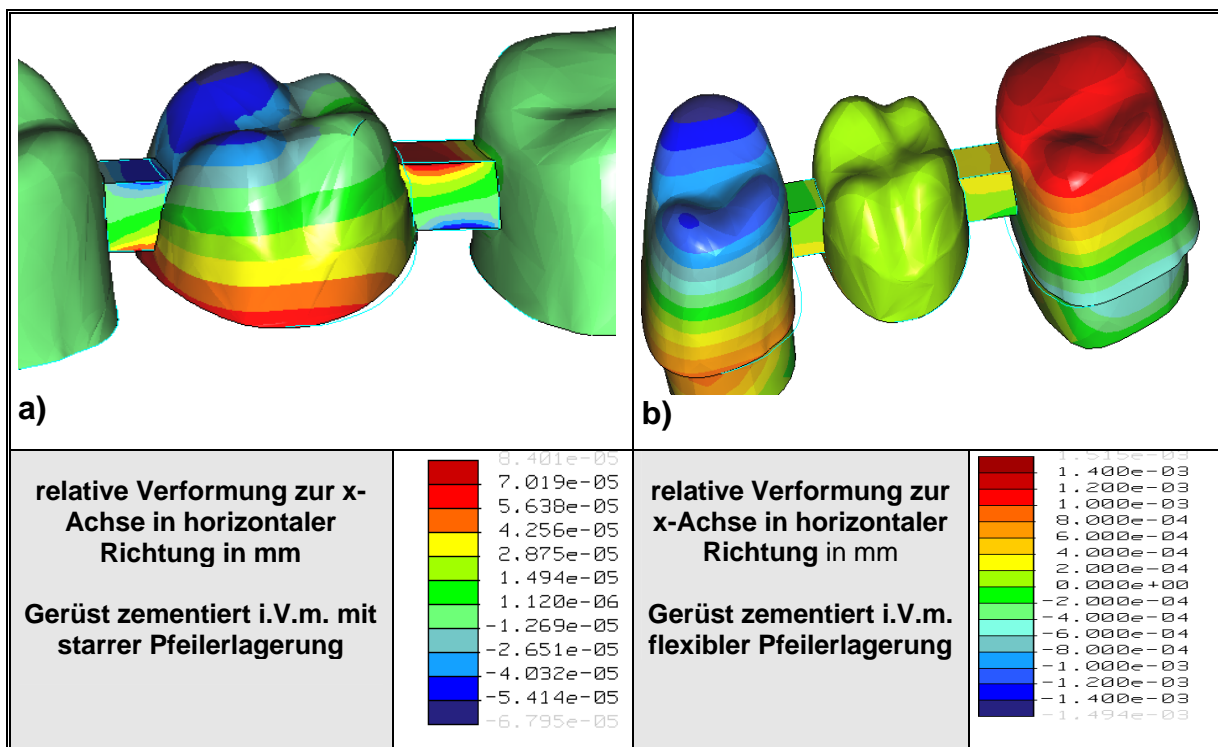


Abbildung 33: x-Achsen Verformungsvektoren bei unterschiedlicher Pfeilerbeweglichkeit

Es zeigt sich, dass die berechneten Verformungen für die „starre“ Pfeilerlagerung wesentlich kleiner sind als die errechneten Werte für die auf flexiblen Pfeilern gelagerten Brückengerüste. Die Ergebnisse zeigen, dass Festigkeitsberechnungen für eine belastungsgerechte Konstruktion von Brücken unbedingt die Einbeziehung ihrer Auflagen (Pfeilerlagerung) erfordert.

### **5.4.3 Zusammenfassung FE/ESPI**

In den FE-Lösungen ist eine gleichmäßige und symmetrische Gerüstverformung zu erkennen. Die Farblinien konzentrieren sich ausschließlich in der Verbinderegion. In dieser Region treten somit die größten Materialverformungen auf. Die Ergebnisse der FE-Simulation mit den Materialparametern von PEEK<sup>®</sup> stimmen mit den gemessenen Verformungswerten annähernd überein.

Unmittelbar miteinander verglichen werden können jedoch nur die gemessenen Verformungen und die errechneten FE-Lösungen für jeweils identische Messachsen. Ein direkter Vergleich der dreidimensionalen Verformungen ist nicht möglich. Die Software des 3D-ESPI-Messsystems stellt die dreidimensionale Verformung des Gerüsts in anderer Form dar als das FE-Programm. Ein zusätzliches Problem, welches den direkten Vergleich von FE-Lösungen und 3D-ESPI-Ergebnissen erschwert, beruht auf der unterschiedlichen Zuweisung der Farbwerte zu den entsprechenden Verformungswerten durch die jeweilige Software. Ein direkter Vergleich ist nur dann möglich, wenn dem FE-Verformungswert und dem entsprechenden 3D-ESPI-Verformungswert eine identische Farbe zugewiesen wird.

Die größten Übereinstimmungen von Messergebnis und FE-Lösung können für die Versuchsanordnung der „starrten Pfeilerlagerung“ mit „gefesseltem“ (zementierten) Gerüst nachgewiesen werden. Die Verformungswerte stimmen bei dieser Versuchsanordnung sowohl qualitativ als auch quantitativ mit den errechneten FE-Lösungen überein.<sup>136</sup>

Die durchgeführten Verformungsanalysen zeigen ausschließlich das Verhalten von Brückengerüsten nach einer punktuellen statischen Belastung des Brückenzwischenlieds. Jedoch treten während des Kauvorgangs, zusätzlich zu den statischen Belastungen, auch dynamische Belastungen im stomatognathen System auf. Die statischen Belastungen führen in aller Regel zu einer überwiegend axialen Verteilung der Kaukräfte entlang der Zahnlongsachse. Die dynamischen Belastungen führen hingegen zusätzlich zu einer Biegebeanspruchung des Zahnes. Besonders diese dynamischen Wechselbelastungen könnten vorwiegend bei Keramiken aber auch bei Kunststoffen Ermüdungseffekte im Gerüstwerkstoff hervorrufen. Bei den Keramikwerkstoffen könnte dies zu einer Beschleunigung des unterkritischen Risswachstums



führen. Dass die dynamische Belastungskomponente während des Kauvorgangs keine zu vernachlässigende Wirkung besitzt, ist bereits nachgewiesen. Die Studie zeigt, dass dynamische Wechsellasten zu einer nachweisbaren Reduzierung der Biegefestigkeit führen. Für Zirkonoxid konnte eine Abnahme der Biegefestigkeit um 50 % gegenüber den Werten für statische Belastungsfälle beobachtet werden.<sup>40</sup> Unter Berücksichtigung dieser Tatsache, kann geschlussfolgert werden, dass bei einer Verbinderdimensionierung eine doppelt so hohe Belastung zu Grunde gelegt werden müsste.

## 5.5 Auswirkungen der Pfeilerbeweglichkeit auf die Gerüstverformung

### 5.5.1 Verformungsmuster

Die Auswertung der Messbilder zeigt, dass die Versuchsanordnung einen wesentlichen Einfluss auf die Verformungseigenschaften und somit auch auf die Spannungsentwicklung innerhalb der Brückengerüste hat. Eine Gegenüberstellung der Messbilder für DC-Tell® und DC-Zirkon® erfolgt in Abbildung 34 und Abbildung 35. Besonders die Gerüste aus Kunststoff sind dabei ausgeprägten Veränderungen in ihren Verformungsmustern unterworfen. Für DC-Zirkon® spielt dagegen der Aufbau der Versuchsanordnung nur eine untergeordnete Rolle. Es zeigen sich nur geringe Veränderungen im Verformungsmuster (Abbildung 35). Deutliche Unterschiede treten zwischen dem Dreipunktbiegeversuch und der „unbeweglichen“ Pfeilerlagerung für den Kunststoff DC-Tell® hervor (Abbildung 34 a, b). Gerüste aus PEEK® weisen ein dem DC-Tell® sehr ähnliches Verformungsverhalten auf. Auch sind die gemessenen Materialverformungen im Dreipunktbiegeversuch wesentlich höher.

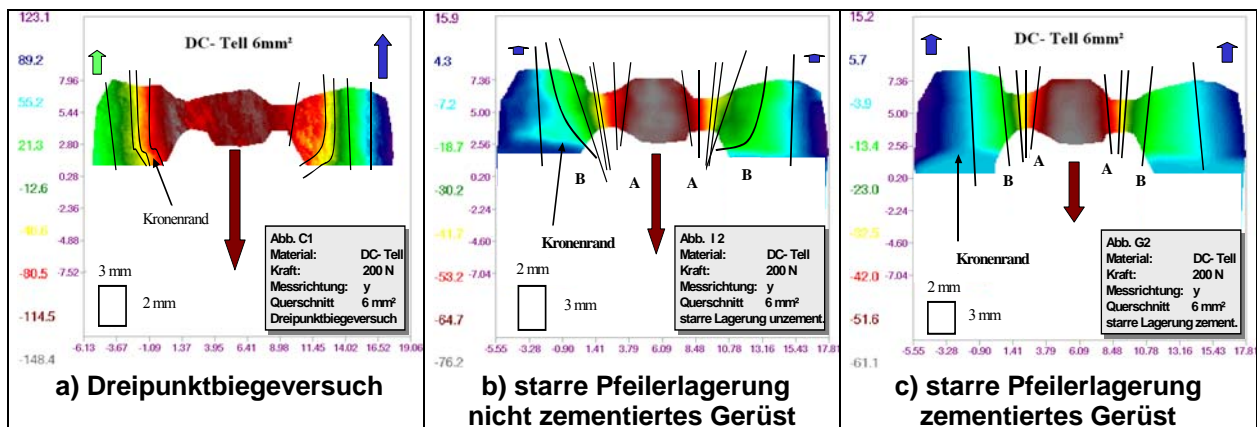


Abbildung 34: Verformungsbilder von DC-Tell® in den unterschiedlichen Versuchsanordnungen (6 mm<sup>2</sup>)

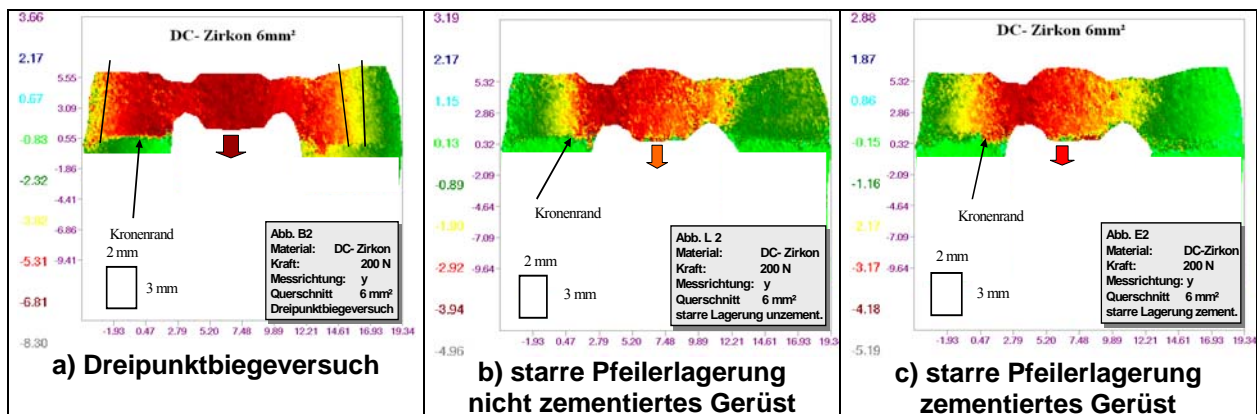


Abbildung 35: Verformungsbilder von DC-Zirkon® in den verschiedenen Versuchsanordnungen (6 mm<sup>2</sup>)

Dass die Lagerungseigenschaften der Brückenpfeiler einen nachweisbaren Einfluss auf die Festigkeit haben, bestätigen bereits mehrere Studien. Die Studien führen zu den Ergebnissen, dass Belastungsversuche mit „unbeweglichen“ Brückenpfeilern höhere Bruchlasten zur Folge haben als die Versuchsanordnungen mit beweglich gelagerten Brückenpfeilern.<sup>5,137</sup> Es müsste auch eine deutlich reduzierte Durchbiegung der auf „starr“ Brückenpfeilern gelagerten Gerüste nachweisbar sein. Eine verminderte Durchbiegung kann im Rahmen dieser Untersuchung bestätigt werden. Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass Verbinderabmessungen, die in den Versuchen mit „unbeweglichen“ Brückenpfeilern eine hinreichende Festigkeit garantieren, unter klinischen Bedingungen, infolge der Beweglichkeit der Brückenpfeiler, keine ausreichende Festigkeit liefern und verstärkt werden müssen.

### 5.5.2 Gerüstdurchbiegung

Der Aufbau der Versuchsanordnungen und damit die Pfeilerbeweglichkeit hat auf die Gerüstdurchbiegung einen erkennbaren Einfluss. Die gemessene Durchbiegung bei Gerüsten aus DC-Zirkon<sup>®</sup> ist im Vergleich zu den Kunststoffgerüsten um ein Vielfaches geringer. Die Auswirkungen der Pfeilerbeweglichkeit sind bei DC-Zirkon<sup>®</sup> jedoch nur als gering einzustufen (**Diagramm 14**). Dagegen ist der Einfluss der Pfeilerbeweglichkeit bei den Kunststoffgerüsten sehr ausgeprägt. Das Diagramm 14 zeigt die Zusammenhänge zwischen der Höhe der Durchbiegung der Brückengerüste und der Versuchsanordnung am Beispiel der Materialien DC-Tell<sup>®</sup> und DC-Zirkon<sup>®</sup>. Die Durchbiegung der Gerüste aus PEEK<sup>®</sup> und DC-Tell<sup>®</sup> ist im Dreipunktbiegeversuch wesentlich größer im Vergleich zu den anderen beiden Versuchsanordnungen (**Diagramm 14 a**). Für das DC-Zirkon<sup>®</sup>-Gerüst ergibt sich ein anderes Bild.

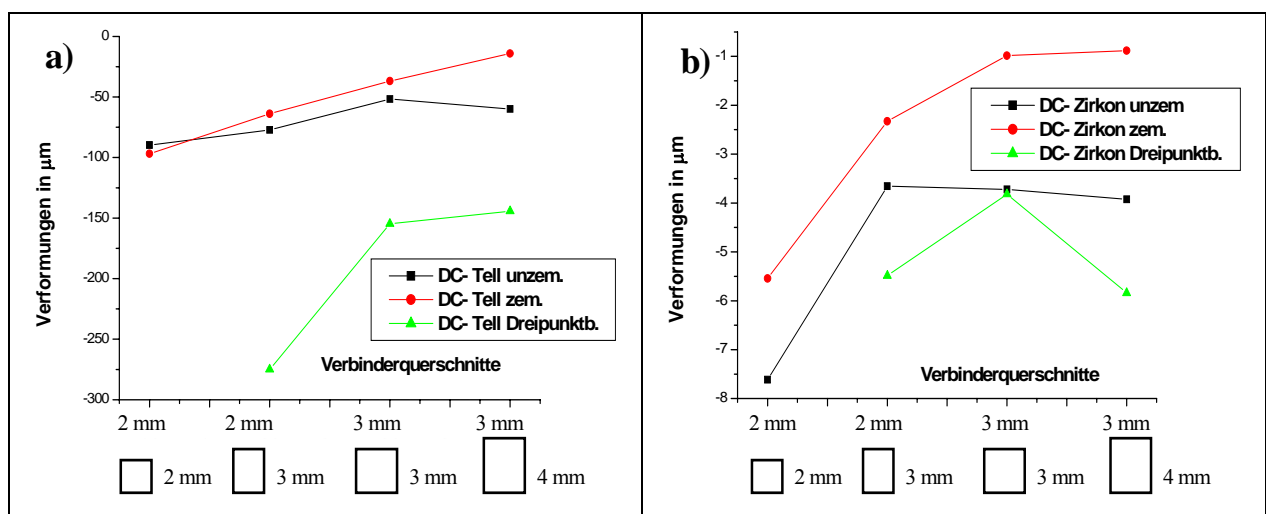


Diagramm 14: Durchbiegung von DC-Tell und DC-Zirkon bei verschiedenen Versuchsanordnungen

## 5.6 Einfluss der Zementierung auf die Verformungseigenschaften der Gerüste

### 5.6.1 Verformungsmuster

Von Bedeutung ist die Fragestellung, ob eine Zementierung der Brückengerüste zu einer Steigerung der Festigkeit führt. Die Gegenüberstellung der Messbilder zeigt, dass die Zementierung der Gerüste zu Veränderungen im den jeweiligen Verformungsmustern führt. Die vertikal verlaufenden Farblinien konzentrieren sich bei einer Zementierung der Gerüste zunehmend auf die Verbinderregion. Sehr gut erkennbar ist dies bei den Werkstoffen DC-Tell<sup>®</sup>, DC-Zirkon<sup>®</sup> und PEEK<sup>®</sup>, wobei der Effekt bei DC-Zirkon<sup>®</sup> jedoch nur sehr gering ausfällt (Abbildung 36, Abbildung 37). ProTemp III<sup>®</sup>-Gerüste zeigen dagegen nur geringe Veränderungen im Verformungsmuster. Hier nehmen die Verbinder mit der Zementierung nur einen steileren Verlauf (Abbildung 37, linker Verbinder, schwarzer Linienverlauf).

Die Gerüstumrisse sind bei DC-Zirkon<sup>®</sup> und ProTemp III<sup>®</sup> deutlich zu erkennen, wogegen für DC-Tell<sup>®</sup> und PEEK<sup>®</sup> Unterschiede hervortreten. Die Gerüste aus DC-Tell<sup>®</sup> und PEEK<sup>®</sup> zeigen nur im unzementierten Zustand ihre Gerüstumrisse. Die zementierten Gerüste „verschmelzen“ dagegen mit ihren Brückenpfeilern.

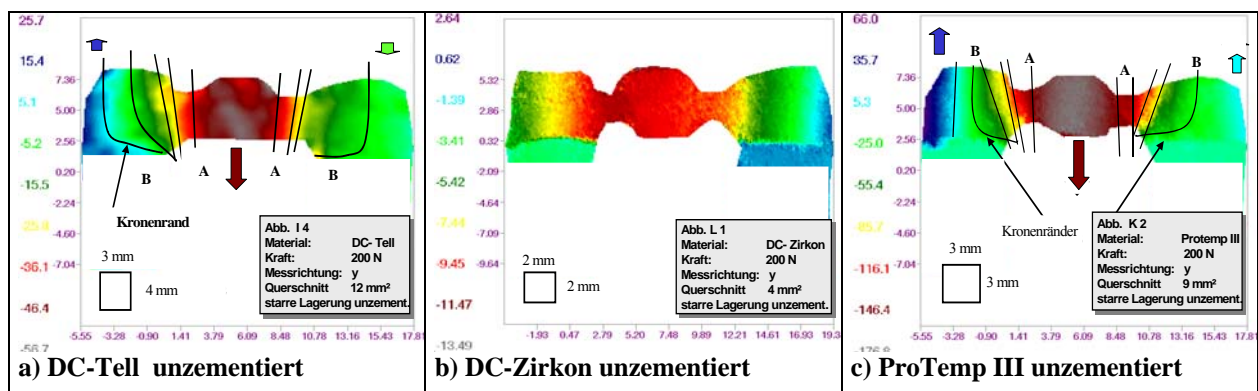


Abbildung 36: verschiedene Gerüstwerkstoffe bei starrer Pfeilerlagerung und unzementierter Befestigung

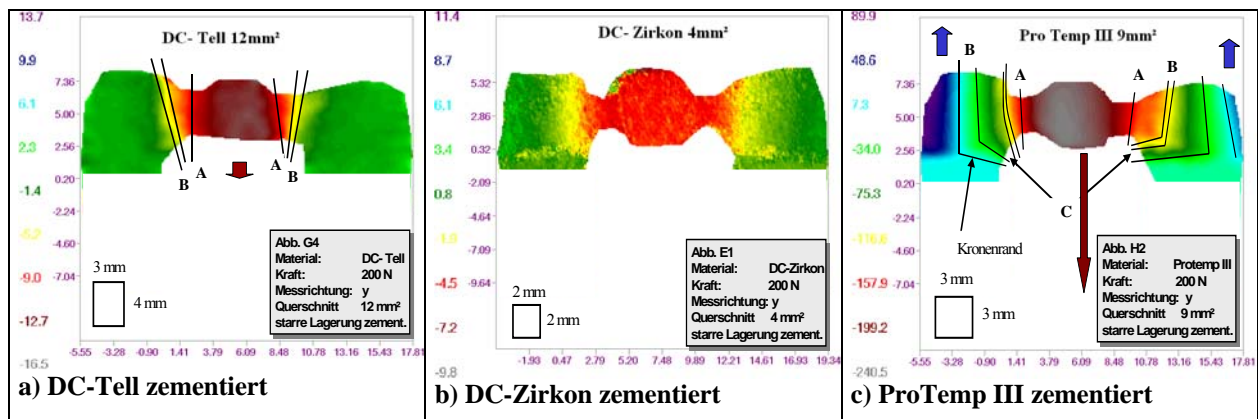


Abbildung 37: verschiedene Gerüstwerkstoffe bei starrer Pfeilerlagerung und zementierter Befestigung

Eine Zementierung der Gerüste reduziert somit die Verformungen und damit die Spannungen innerhalb der Kronengerüste und der Kronenränder. Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass eine Befestigung mit Zement die Festigkeit der Kronengerüste erhöht, jedoch die Spannungen in den Verbindern erhöht, im Vergleich zu unzementierten Gerüsten.

### 5.6.2 Gerüstdurchbiegung

Eine Reduzierung der Gerüstdurchbiegung der DC-Tell<sup>®</sup>-Brückengerüste durch die Zementierung mit dem Zement Temp Bond NE<sup>®</sup> kann für die Querschnitte 4 mm<sup>2</sup>, 6 mm<sup>2</sup> und 9 mm<sup>2</sup> nur in geringem Umfang beobachtet werden. Eine Zementierung der Gerüste aus PEEK<sup>®</sup> führt dagegen für die Querschnitte 6 mm<sup>2</sup> und 9 mm<sup>2</sup> zu keiner Reduzierung der Durchbiegung. Für die zementierten Gerüste aus PEEK<sup>®</sup> und DC-Tell<sup>®</sup> mit dem Querschnitt 12 mm<sup>2</sup> lässt sich jedoch eine deutliche Abnahme der Gerüstdurchbiegung feststellen (Diagramm 15, Markierung B). Somit führt bei einem Querschnitt von 12 mm<sup>2</sup> die Zementierung zu einer Erhöhung der Festigkeit der Gerüsts.

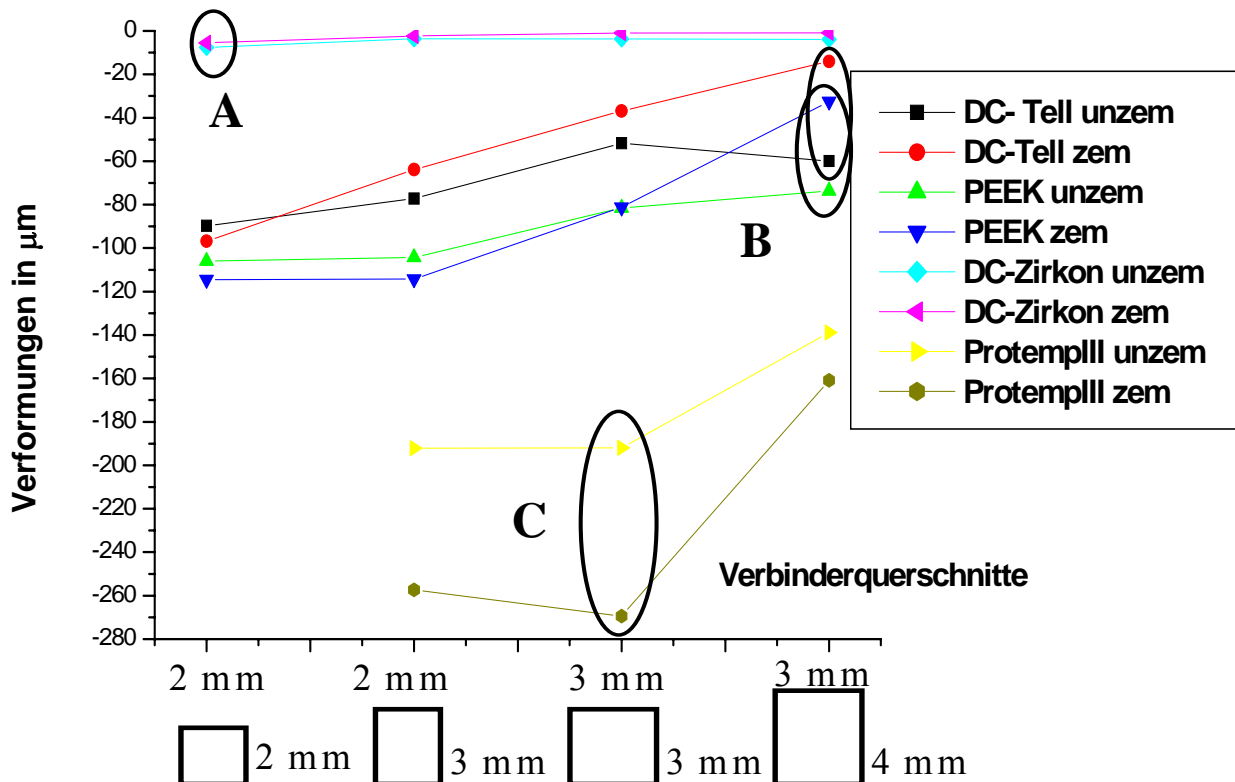


Diagramm 15: Gegenüberstellung der Materialien Einfluss der Befestigungsart auf die Gerüstdurchbiegung

Die Messkurven für zementierte und unzementierte ProTemp III<sup>®</sup>-Gerüste zeigen zwischen 3\*2 mm<sup>2</sup> und 3\*3 mm<sup>2</sup> einen waagerechten Verlauf. Somit führt hier die Zunahme der Verbinderbreite von 2 mm auf 3 mm im Gegensatz zu PEEK<sup>®</sup> und DC-Tell<sup>®</sup> zu keiner Verringerung der Durchbiegung. Dagegen hat der Anstieg der Verbinderhöhe von 3 mm auf 4 mm bei ProTemp III<sup>®</sup> eine Abnahme der Durchbiegung zur Folge. Somit hat die Zementierung einen nachweisbaren Einfluss auf die Durchbiegung der Brückengerüste und auf die Festigkeit.

Im Gegensatz dazu führt die Zementierung des DC-Zirkon<sup>®</sup>-Gerüsts, unabhängig vom Verbinderquerschnitt, wenn auch in einem vergleichsweise sehr geringem Umfang, zu einer Reduzierung der Gerüstdurchbiegung. Für DC-Zirkon<sup>®</sup> hat somit die Zementierung des Gerüsts eine Steigerung der Festigkeit zur Folge. Dieser beobachtete festigkeitssteigernde Effekt ist jedoch im Vergleich zu den absoluten Werten für die Durchbiegung bei Kunststoffgerüsten aus PEEK<sup>®</sup> und DC-Tell<sup>®</sup> extrem gering (*Diagramm 15, Markierung A*).

Für ProTemp III<sup>®</sup>-Gerüste hat die Befestigung unabhängig vom Verbinderquerschnitt ebenfalls einen nachweisbaren Einfluss auf die Gerüstdurchbiegung und somit auch auf die Festigkeit. Das zementierte ProTemp III<sup>®</sup>-Gerüst weist jedoch, entgegen der Erwartungen, eine höhere Durchbiegung auf.

### 5.7 Vergleich der Werkstoffeigenschaften

Die Messbilder (*Abbildung 38*) zeigen die Verformungsbilder der Materialien in der y-Messrichtung. Um eine gute Vergleichbarkeit der Verformungsbilder zu gewährleisten, wurden die Ergebnisse der auf starren Brückenpfeilern gelagerten und zementierten Brückengerüste ausgewählt. Die Verformungsmuster der Gerüste aus den homogen aufgebauten Kunststoffen DC-Tell<sup>®</sup> und PEEK<sup>®</sup> lassen eine große Ähnlichkeit ihrer Verformungsbilder erkennen. Das Verformungsmuster des ProTemp III<sup>®</sup>-Gerüsts unterscheidet sich dagegen von dem Verformungsmuster der anderen beiden analysierten Kunststoffe. Unterschiede treten insbesondere in der Anordnung und dem Verlauf der Specklestreifen hervor. Das DC-Zirkon<sup>®</sup>-Gerüst führt dagegen zu einem Verformungsbild, welches sich grundsätzlich von dem der anderen Materialien unterscheidet.

Besonders die Kunststoffe DC-Tell<sup>®</sup> und PEEK<sup>®</sup> weisen aufgrund ihrer homogenen Struktur, Materialeigenschaften auf, welche diese als besonders geeignet für die Modellierung im FE-Modell erscheinen lassen. Außerdem lassen sich mit geringem zeitlichen und finanziellen Aufwand Probekörper aus dem Material herstellen, um die Richtigkeit der FEM-Rechenergebnisse zu verifizieren. Vermutlich infolge ihrer homogenen Zusammensetzung sind

die Verformungen der DC-Tell<sup>®</sup>- und PEEK<sup>®</sup>-Probenkörper mit dem ESPI-Messprinzip gut messbar. Wegen des, im Vergleich zu der DC-Zirkon<sup>®</sup>-Keramik, geringeren Elastizitätsmoduls, sind die bei gleicher Last resultierenden Verformungen wesentlich größer und daher auch besser „messbar“.

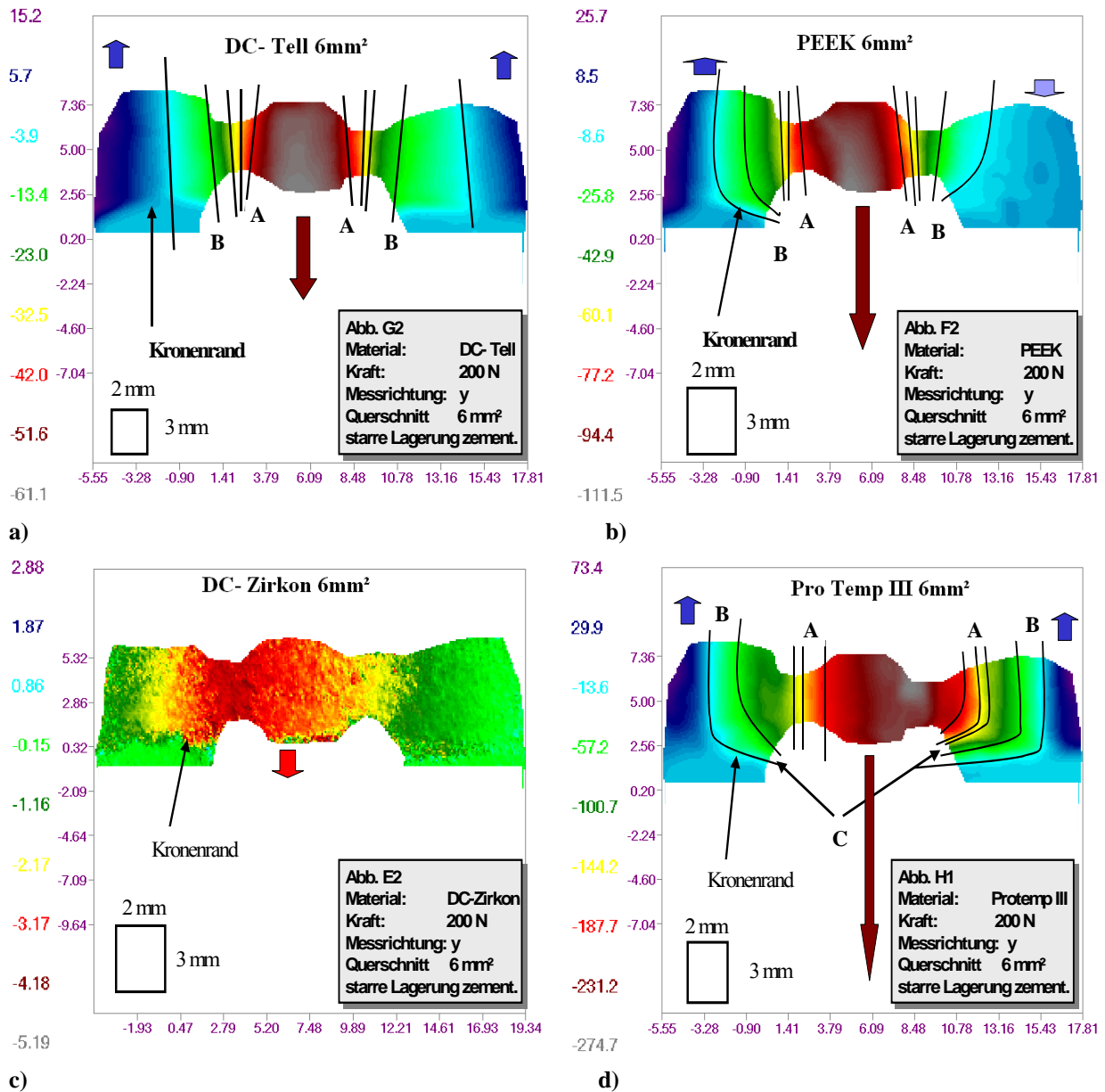
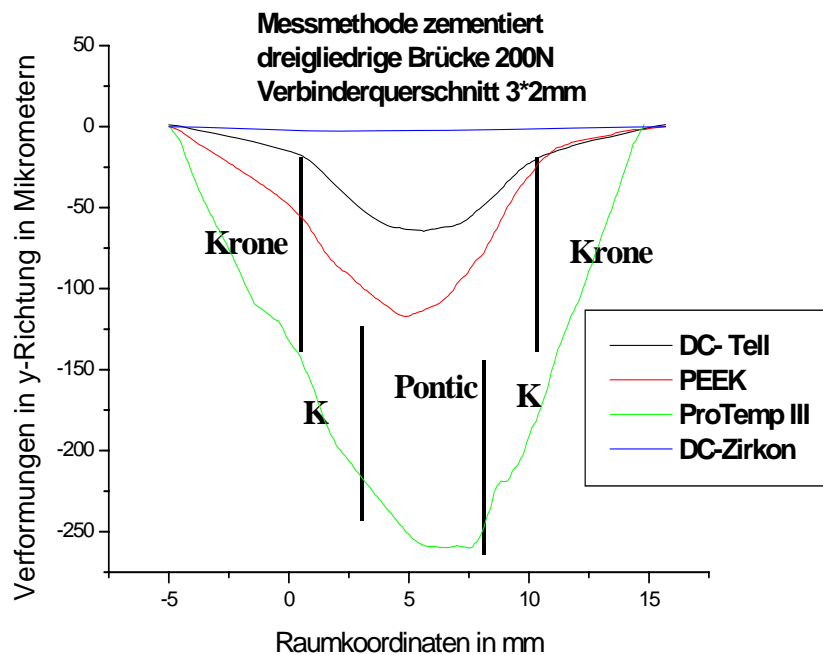


Abbildung 38: Gegenüberstellung der verschiedenen Gerüstmaterialien

Die Gerüste aus dem K&B-Material ProTemp III<sup>®</sup> weisen dagegen die größten aller gemessenen Verformungen auf. Das Material ist jedoch aufgrund der geringen Bruchfestigkeit bei hohen Prüfkräften nur begrenzt verwendbar. Ein zusätzlicher Nachteil von ProTemp III<sup>®</sup> ist seine Oberflächenbeschaffenheit, welche die für die ESPI-Messung notwendige Mattierung der

Oberfläche erschwert. Die Mattierung der Oberfläche ist notwendig, um Reflexionseffekte zu vermeiden.



**Diagramm 16: Gegenüberstellung der verschiedenen Gerüstmaterialien (starre Lagerung/ zement., 6 mm<sup>2</sup>)**

Die ProTemp III<sup>®</sup>-Gerüste liefern in der ESPI-Messung überwiegend unregelmäßige Specklestreifen, welche vermutlich auf die unterschiedlichen Umsetzungsgrade bei der Polymerisationsreaktion zurückzuführen sind. Dies hat eine ungleichmäßige Festigkeitsverteilung zur Folge. Bei ProTemp III<sup>®</sup> treten außerdem während der Abbindereaktion starke Volumenschrumpfungen auf.<sup>138</sup> Diese Volumenschrumpfungen können nicht nur zu Ungenauigkeiten bei der Gerüstpassung, sondern auch zu Spannungen innerhalb des Materialgefüges führen. Während der Polymerisationsreaktion können diese Spannungen „eingefroren“ werden und zu Veränderungen der Verformungseigenschaften führen. Um die Entstehung dieser unerwünschten Spannungen zu verringern und um den Vernetzungsgrad der Moleküle zu erhöhen, wurde der Kunststoff während der Polymerisationsreaktion für ca. 30 Minuten in einem 50 °C Wasserbad gelagert. ProTemp III<sup>®</sup> als relativ inhomogener Kunststoff lieferte im Dreipunktbiegeversuch keine verwertbaren Ergebnisse. Aufgrund dessen ist ProTemp III<sup>®</sup> als Material für Probekörper bei ESPI basierten Verformungsanalysen nicht geeignet. Die ESPI-Messungen an DC-Zirkon<sup>®</sup>-Gerüsten liefern dagegen eine zufriedenstellende Messqualität. Besonders bei der Analyse von DC-Zirkon<sup>®</sup>-Gerüsten ist jedoch eine sehr hohe Stabilität der



Versuchsanordnungen notwendig. Zusätzlich muss der gesamte Versuchsaufbau konsequent von Einflüssen aus der Umgebung abgeschirmt werden.

### **5.8 Einfluss der Versuchsanordnungen auf die Messqualität**

Der Auswertung der Messbilder zeigt, dass die Versuchsanordnung offensichtlich einen direkten Einfluss auf die Messqualität und damit auf die Messgenauigkeit hat. Eine sehr gute Messqualität weisen die Messserien mit den Brücken auf, die auf unbeweglich gelagerten Brückenpfeilern zementiert sind. Die Verwendung „starrer“ Brückenpfeiler hat jedoch den Nachteil, dass damit eine physiologische Beweglichkeit der Pfeilerzähne nicht simuliert und somit auch kein realitätsnahes Verformungs- und Belastungsverhalten von Brückengerüsten beobachtet werden kann.

Schwierigkeiten bei den Messungen bereitet besonders die Instabilität der Versuchsanordnung im Dreipunktbiegeversuch. Aufgrund dessen, dass die Versuchsanordnung des Dreipunktbiegeversuches im Vergleich zu anderen Versuchsanordnungen relativ instabil ist, kann bei der Messung eine Eigenbewegung der Brückengerüste auftreten. Diese Instabilität zeigt sich in Kippbewegungen der Gerüste entlang der z-Achse und in horizontalen Verschiebungen auf der x-Achse. Die Instabilität ist dabei wie erwartet im Vergleich zu den anderen verwendeten Versuchsanordnungen wesentlich ausgeprägter. Unter Umständen ist das Messbild mit der Eigenbewegung der Brückengerüste überlagert. Erkennbar ist dies unter anderem am wellenförmigen Verlauf der Messkurve. Diese bildet die Durchbiegung der Gerüste in Bezug zur y-Messachsenrichtung ab. Diese Eigenbewegung der Gerüste kann somit zu verfälschten Messwerten führen. Die Versuchsanordnung des Dreipunktbiegeversuches ist, besonders aufgrund der Instabilität des Versuchsaufbaus nur bedingt geeignet, um exakte Verformungsmessungen an Gerüsten bzw. Brücken durchzuführen. Daher sollte diese Versuchsanordnung kritisch hinterfragt werden.

Im Rahmen von Vorversuchen sind zusätzlich auch Verformungsmessungen an Vollkeramikbrücken, zementiert auf flexibel gelagerten Brückenpfeilern, durchgeführt worden. Diese Art der flexiblen Lagerung der Brückenpfeiler ist bereits durch Kappert beschrieben. Sie ermöglicht die Simulation der physiologischen Pfeilerbeweglichkeit und kommt somit der Situation in der Mundhöhle sehr nahe.<sup>137</sup> Von Nachteil ist die dreidimensionale Beweglichkeit der Pfeiler, was zu einer unerwünschten Kippbewegung der Brücken in x-, y- und z-Achsenrichtung beiträgt. Die Auswertung der Versuche zeigt, dass am Beginn der Belastungsphase die Pfeiler in die „Alveole“ intrudiert werden. Erst, wenn keine Intrusion mehr

möglich ist, folgt die Verformung der Brücken. Die Brücken zeigen jedoch nach vollständiger Intrusion der Pfeiler ein Verformungsverhalten, das dem Verhalten der Gerüste bei der „starren“ Pfeilerlagerung ähnelt.

Die außerordentliche Stabilität der „starren“ Lagerung der Brückenpfeiler garantiert dagegen eine hohe Messqualität. Besonders die Messbilder der x- und y-Messachsenrichtung weisen hier eine gute Messqualität auf. Die Messbilder der z-Messachsenrichtung sind jedoch von unzureichender Messqualität. Die Ursache liegt in der höchsten Messempfindlichkeit der z-Messachsenrichtung von allen Messachsenrichtungen.

Die Messungen an ProTemp III<sup>®</sup>-Gerüsten im Dreipunktbiegeversuch lieferten, unabhängig vom Verbinderquerschnitt, keine verwertbaren Ergebnisse. Die Verformungsmessungen im Dreipunktbiegeversuch liefern abweichende und teils widersprüchliche Ergebnisse. Die Ergebnisse sind daher kritisch zu hinterfragen. Ursache ist die in allen Messachsen instabile Versuchsanordnung.

Probleme bereitet auch die Vermessung der nicht zementierten Brücken. Die Versuchsanordnung ist vergleichbar mit der Versuchsanordnung eines nicht fixierten, nur auf den Lagern aufliegenden, Stabes. Durch die fehlende Fixierung der Brückengerüste auf ihren Pfeilern können sich diese jedoch von den Pfeilern lösen. Verkantet sich das Kronengerüst auf dem Pfeiler, wird die Brücke fixiert, und ihr Verformungsverhalten verändert sich.

Zusammenfassung:

- Die Gerüstdurchbiegung ist im Dreipunktbiegeversuch wesentlich größer. Dieser Effekt ist bei Kunststoffen stärker ausgeprägt im Gegensatz zu hochfesten Keramik.
- Die Zementierung hat Einfluss auf die Verformung und somit auf die Festigkeit der Gerüste.
- Die prozentuale Abnahme der Durchbiegung in Relation zur Gerüstverformung ist bei Kunststoff DC-Tell<sup>®</sup> geringer ausgeprägt im Vergleich zur Keramik DC-Zirkon<sup>®</sup>.
- Der Einfluss der Befestigungsart nimmt mit der Vergrößerung des Verbinderquerschnitts zu.
- Aufgrund der Instabilität des Versuchsaufbaus des Dreipunktbiegeversuch sind diese Messergebnisse kritisch zu hinterfragen

# 6 Schlussfolgerungen

## 6.1 Allgemein

Das 3D-ESPI-Messsystem ist gut geeignet, um das belastungsabhängige Verformungsverhalten von komplexen Bauteilgeometrien zu bestimmen. Im Rahmen der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Verformungen von dreigliedrigen Brückengerüsten mit einer sehr hohen Präzision in den jeweiligen Messachsenrichtungen (x, y und z) erfasst werden können.

Für die Darstellung der Zusammenhänge zwischen der Gerüstfestigkeit und der Verbinderdimensionierung erwiesen sich die Verformungsbilder der y-Messachsenrichtung als ausreichend. Die Analyse der Verformungsbilder zeigt, dass die Verdichtung der Specklestreifen ausschließlich in der Verbinderregion lokalisiert ist. Infolge dessen, sind dort auch die größten Verformungen und Materialspannungen im Brückengerüst lokalisiert. Dass die größten Belastungen in den Verbindern auftreten und sie die Schwachstelle der Gerüste darstellen, wurden bereits in vorhergehenden Studien beobachtet.

Bei der Analyse der Verformungsbilder konnte beobachtet werden, dass es neben der grundsätzlichen Gerüstdurchbiegung, zusätzlich auch zu einer Verwindung der Verbinder kommt. Diese Verwindung hat vermutlich eine entscheidende und damit auch nicht zu vernachlässigende festigkeitsreduzierende Wirkung auf das Gerüst.

In weiterführenden Untersuchungen zur Gerüstfestigkeit müssen daher diese Verwindung der Verbinder und ihre festigkeitsreduzierende Wirkung unbedingt näher beachtet werden. Deshalb sollte grundsätzlich zu den Verformungsbildern der y-Messachsenrichtung, auch die kombinierte Darstellungsform, welche die resultierende Gesamtverformung des Gerüstes in Vektorschreibweise angibt, in die Festigkeitsanalyse mit einbezogen werden. Denn nur mit dieser kombinierten Darstellungsform kann zusätzlich zu der Durchbiegung der Gerüste, auch der Einfluss der Verwindung der Verbinder auf die Gesamtfestigkeit bewertet werden kann. Dafür werden jedoch Verformungsbilder aller drei Messrichtungen benötigt. Die Messdurchführung lieferte jedoch nur auswertbare Verformungsbilder der x- und y-Messrichtung. Die Messungen in der z-Messrichtung bereiteten, aufgrund der sehr hohen Messempfindlichkeit, in dieser Messrichtung Schwierigkeiten.

Die Versuchsanordnung der „starrten Pfeilerlagerung“ lieferte im Vergleich zu den anderen Versuchsanordnungen die besten Messergebnisse für die drei Messrichtungen. Diese Versuchsanordnung besitzt jedoch die Einschränkung, dass eine physiologische

Pfeilerbeweglichkeit nicht simuliert werden kann. Dadurch kann keine „realitätsnahe“ Verformungsentwicklung in den Gerüsten beobachtet und der Einfluss der Pfeilerbeweglichkeit auf die Festigkeit der Brückengerüste nicht bestimmt werden.

Aufgrund dessen sollte in weiterführenden Verformungs- und Festigkeitsanalysen, zusätzlich zur „starrten Pfeilerlagerung“, die Versuchsanordnung der „flexiblen Pfeilerlagerung“ hinzugezogen werden. Der hier in dieser Form verwendete Dreipunktbiegeversuch bietet, aufgrund der Instabilität des Versuchsaufbaus, keine Vorteile.

Die Analyse der Verformungsbilder von dreigliedrigen Brückengerüsten zeigt, dass die Verformungs- und Spannungsentwicklung und infolge dessen auch die Gerüstfestigkeit direkt abhängig von der Querschnittsfläche der Konnektoren ist. Mit der Zunahme der Verbinderquerschnittsfläche nimmt die Gerüstverformung und damit die Spannungsentwicklung in den Verbindern nachweisbar ab. Dabei spielt die Verbinderhöhe und Verbinderbreite in Relation zur Verbinderquerschnittsfläche für die Festigkeit der Gerüste eine wesentliche Rolle. Betrachtet wurden jedoch nur Verbindergeometrien mit rechteckigen Querschnitten.

Die Verformungsanalyse am Beispiel der dreigliedrigen Brückengerüste zeigt, dass neben der Verbinderdimensionierung auch die Kronengerüstwandstärke einen Einfluss auf die Gesamtfestigkeit der Gerüste hat. Dies ist zu beachten, wenn bei der Zunahme der Brückenspannweiten, gleichzeitig die Dicke der Kronengerüste mit angepasst werden muss. Hierzu sind jedoch noch weitergehende Untersuchungen zwingend notwendig.

In weiterführenden Festigkeitsanalysen muss auch das optimale Verhältnis von Verbinderhöhe zur Verbinderbreite in Relation zur Spannweite und zur Gerüstdicke der Kronen bestimmt werden. Außerdem muss abgeklärt werden, welchen Einfluss das Verbinderdesign und die Gestalt des Verbinderquerschnitts auf die Gerüstfestigkeit haben. Bereits vorliegende Studien zur Gestalt des Verbinderquerschnitts kommen zu dem Ergebnis, dass ovale Querschnitte die höchste Festigkeit liefern. Eine Abklärung der Richtigkeit dieser FEM-Ergebnisse könnte durch 3D-ESPI erfolgen. Aufgrund der Verteilung der Verformungsmuster könnten Verbinderdesigns, welche einem „gotischen“ Bogen ähneln, hohe Festigkeiten bei geringer Verbinderquerschnittsfläche liefern. Zusätzlich muss der Verbinder eine mögliche Verwindung des Verbinders reduzieren. FEM-Berechnungen und Verformungsmessungen dieser Modelle könnten für das optimale Verbinderdesign wichtige Grundlageninformationen liefern.

Mit der hier präsentierten 3D-ESPI-Messmethode können jedoch exakte Verformungswerte realer Brückengerüsten gewonnen werden. Die für die Frakturwiderstandsfähigkeit entscheidende Spannungsverteilung kann jedoch nur indirekt aus den Verformungsmustern ermittelt werden. Die Messergebnisse können somit helfen, die Genauigkeit von FEM-Modellen

zur Spannungsverteilung in Brückengerüsten zu verbessern und sehr viel näher an das reale Materialverhalten der vermessenen Gerüste heranzuführen. Die FEM-Ergebnisse konnten mit den 3D-ESPI-Messungen sowohl qualitativ als auch quantitativ bestätigt werden, wie Peschel zeigte.<sup>136</sup> Somit eröffnet eine Verknüpfung der 3D-ESPI-Messmethode mit der FEM-Analyse die Möglichkeit, die optimale Kronenwandstärke in Relation zu den Verbinderquerschnitten und zur Spannweite der Gerüste zu ermitteln.

Die Genauigkeit der Rechenergebnisse ist, wie gezeigt wurde, von der Wahl der richtigen Materialparameter und Randbedingungen abhängig. Trotz der starken Vereinfachung des FE-Modells, wie der Verzicht auf die Darstellung der unterschiedlichen Strukturmerkmale des Zahnes (Pulpenkavuum, Schmelz, Dentin, Parodontium) zeigen die errechneten Ergebnisse der FE-Simulation eine weitgehende Übereinstimmung mit den Messergebnissen für zementierte starr gelagerte Brückengerüste.<sup>136</sup>

Eine Gerüstoptimierung von Brückengerüsten aus zahnärztlichen Kunststoffen mit FEM-Tools ist damit grundsätzlich möglich. Die errechneten Verformungen sind jedoch erfahrungsgemäß geringfügig kleiner als die experimentell ermittelten Verformungen. Daher sind die Ergebnisse nur als Mindestwerte für die auftretenden Verformungen und Spannungen zu verstehen.

Besonders gut lassen sich die Verformungsmuster an Kunststoffgerüsten bestimmen. Die Materialien DC-Tell<sup>®</sup> und PEEK<sup>®</sup> mit ihren isotropen und homogenen Materialeigenschaften sind besonders gut geeignet, um zukünftig wesentlich komplexere Bauteile mit Hilfe der 3D-ESPI zu vermessen und auf Grundlage dieser Ergebnisse die FEM-Tools auf ihre Genauigkeit hin zu überprüfen und schrittweise die Parameter der FEM anzupassen.

Der K&B-Kunststoff ProTemp III<sup>®</sup> ist jedoch, infolge seines inhomogenen Aufbaus, im Vergleich zu den homogen aufgebauten Kunststoffen PEEK<sup>®</sup> und DC-Tell<sup>®</sup> für die Verformungsanalysen dafür weniger geeignet. Keramikgerüste können ebenfalls mit zufriedenstellenden Ergebnissen vermessen werden. Infolge der sehr geringen Verformungen der Keramiken setzen gute Messergebnisse hier allerdings extrem stabile und von äußeren Einflüssen vollkommen abgeschirmte Versuchsaufbauten voraus. Dieses muss bei der Auswahl der Versuchsanordnungen beachtet werden.

Die Zusammenführung der verschiedenen Untersuchungsansätze, wie die der hochpräzisen 3D-ESPI-Messung, FE-Tools mit den klassischen mechanischen Biegeversuchen, ermöglicht somit die Verringerung der Diskrepanzen zwischen Simulation und Realität und eröffnet damit einen Weg zu einer genauen Vorhersage der Spannungsverteilung innerhalb von Bauteilen mit dem Ziel, das Design dieser Bauteile unter den verschiedenen klinischen Parametern zu optimieren.

Um die Genauigkeit der FE-Methode verbessern zu können, sind jedoch umfangreiche Messdatenmengen zwingend notwendig. Daher ist eine wesentliche Erhöhung der Anzahl der zu vermessenden Probekörper notwendig. In weiterführenden Studien muss außerdem ermittelt werden, welchen Einfluss zusätzliche materialspezifische Parameter ( $K_{IC}$ -Faktor, Weibull-Modul als statistische Fehlerverteilung) auf die Genauigkeit der FE-Modelle haben und in welchem Umfang sie in die FE-Modelle einfließen müssen. Einige dieser Parameter, wie das E-Modul, sind aus den 3D-ESPI-Ergebnissen bestimmbar.<sup>139</sup>

Außerdem ist bei der Modellgenerierung zu berücksichtigen, dass die Pfeilerzähne unbedingt in das FE-Modell mit einbezogen werden müssen, da die Definition der Pfeilereigenschaften für die Festigkeitseigenschaften von entscheidender Bedeutung ist. Da nicht nur die Höhe der Belastung und die Belastungsrichtung einen Einfluss auf die Gerüstverformung haben, sondern zusätzlich auch die Art und der Umfang der Pfeilerbeweglichkeit, wie in dieser Arbeit gezeigt werden konnte.

Zum Abgleich der FE-Modelle mit der tatsächlichen Spannungs- und Verformungsentwicklung sind anfänglich stark vereinfachte Modelle mit wenigen variablen Faktoren sinnvoll. In weiterführenden Studien müssen jedoch die FE-Modelle einen komplexeren Aufbau enthalten, um die verschiedenen Fragestellungen betrachten zu können. Außerdem müssen noch weitere Modellparameter identifiziert werden, welche einen wesentliche Einfluss auf die Genauigkeit der FE-Modelle ausüben. Erst mit diesen komplexen FE-Modellen kann der Einfluss von anatomischen Besonderheiten der Pfeilerzähne, wie die Ausdehnung des Pulpenkammer, die unterschiedlichen Materialeigenschaften von Dentin und dem Schmelz, die dreidimensionale Form der Wurzeln und die verschiedenen Belastungsrichtungen während des Kauvorgangs auf die Festigkeit ermittelt werden.

Die 3D-ESPI-Messungen erfolgten mit einer Prüfkraft von 200 N. Da jedoch besonders im Seitenzahnbereich wesentlich höhere Kaukräfte gemessen werden, müssen in zukünftigen Studien höhere Prüfkraften (300 N, 400 N) für die Verformungsanalysen und FE-Modelle zu Grunde gelegt werden. Aufgrund der hohen Festigkeitswerte von Zirkoniumdioxidkeramiken (DC-Zirkon<sup>®</sup>) ist dieses für die Verwendung als Gerüstmaterial von weitspannigen Brückengerüsten im Seitenzahnbereich gut geeignet. Da jedoch die Gerüste hierbei klinischen Belastungen von weit über 200 N ausgesetzt sind, sollten weitere Belastungs- und Verformungsanalysen mit 3D-ESPI und FEM und mit Prüfkraften bis zu 1000 N durchgeführt werden.

**Tabelle 6: Zusammenstellung der Einflussfaktoren für 3D- ESPI- Messungen**

Einflussfaktoren	Eignungsgrad für ESPI- Messungen			
	sehr gut geeignet	gut geeignet	geeignet	ungeeignet
<b>Eignung der Werkstoffe und Versuchsanordnungen für die 3D- ESPI- Messung für eine Überprüfung der FEM</b>	DC-Tell <sup>®</sup> , DC-Zirkon <sup>®</sup> , PEEK <sup>®</sup> i.V.m. starrer Pfeilerlagerung + zementiert	DC-Tell <sup>®</sup> , DC-Zirkon <sup>®</sup> , PEEK <sup>®</sup> i.V.m. starrer Pfeilerlagerung + nicht zementiert	ProTemp III <sup>®</sup> i.V.m. starrer Pfeilerlagerung + zementiert + nicht zementiert	ProTemp III <sup>®</sup> , DC-Zirkon <sup>®</sup> , DC-Tell <sup>®</sup> und PEEK <sup>®</sup> i.V.m. Dreipunktbiegeversuch
<b>Oberflächenstruktur</b>	mikrorauh	mikrorauh	glatte Oberflächen nur mit matterter Oberfläche	polierte Oberflächen ohne matterte Oberfläche
<b>Oberflächenform</b>	eben, gerade	gering gewölbt	gewölbt, gekrümmt	stark gekrümmte und tief eingeschnittene Flächen
<b>Darstellungsform der ESPI- Messergebnisse</b>	kombinierte Darstellung der x, y und z- Messrichtungen in der Vektordarstellung	y-Messrichtung mit hoher Aussagekraft für Gerüst- durchbiegung	x- Messrichtung, für sich genommen nicht aussagekräftig für Festigkeitsanalysen	z-Messrichtung aufgrund der sehr hohen Messempfindlichkeit

### **6.2 Anwendungseinschränkungen der Speckle-Interferometrie-Messmethode**

Die analysierten Vollkeramikbrücken unterscheiden sich in ihren Festigkeitseigenschaften, wie die 3D-ESPI-Messungen zeigten. Die gemessene Gerüstverformung und damit auch die resultierende Gerüstfestigkeit ergibt sich dabei aus den einzelnen Festigkeitswerten der Gerüst- und Verblendkeramiken und Stabilität des Verbundes zwischen den beiden Materialien. Außerdem spielen die Verbinderabmessungen und das Verbinder- und Gerüstdesign eine entscheidende Rolle in Bezug auf die Festigkeit. Dass der Einfluss der Verblendkeramik bei vollkeramischen Kronen und Brückensystemen eine nicht zu vernachlässigende Größe darstellt, konnte bereits durch Tinschert nachgewiesen werden.<sup>140</sup>

Da die 3D-ESPI- Analyse nur eine Methode zur Vermessung von Oberflächenverformungen darstellt, kann nur die aus den vorhergenannten Faktoren resultierende Gerüstverformung bestimmt werden. Rückschlüsse auf die Verbundfestigkeit können daher nicht geschlossen werden. Um den Einfluss der Gerüstdimensionierung sowie der Verblendung auf die Gerüstfestigkeit zu untersuchen sind weitere Untersuchungen mit verschiedenen Gerüstabmessungen notwendig.

Trotzdem konnte gezeigt werden, dass 3D-ESPI eine sehr leistungsfähige Methode zur Untersuchung der Verformungseigenschaften von Materialien ist, welche inhomogen im Aufbau ihrer Struktur sind und dadurch ein nicht linear elastisches Verformungsverhalten aufweisen.

Diese Eigenschaften besitzen die untersuchten vollkeramischen Brückengerüste mit ihren hochfesten Keramikkerne und der „weicheren“ Verblendkeramik.



### **7 Zusammenfassung**

Seit der Einführung der ersten CAD/CAM-Frässysteme im Bereich der Zahnmedizin in den 80er Jahren nimmt das Interesse an diesen Systemen stetig zu. Besonders die in den letzten Jahren rasant voranschreitende Entwicklung dieser Technologie führt zu einer zunehmenden Verbreitung von CAD/CAM-Systemen. Mittlerweile existiert eine Vielzahl von Frässystemen mit den unterschiedlichsten Konzepten am Markt. Die fortwährend weiterentwickelten Systeme erschließen dabei ein immer breiter werdendes Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten. Mit der Entwicklung der ZrO<sub>2</sub>-Keramiken, welche überragende Materialeigenschaften aufweisen aber nur mit CAD/CAM-Systemen optimal zu bearbeiten sind, hat sich die Entwicklung und Verbreitung dieser Technologie wesentlich beschleunigt.

Trotz der Einführung neuartiger Keramikwerkstoffe und Bearbeitungstechnologien bereitet jedoch besonders die Herstellung von mehrgliedrigen Seitenzahnbrücken aus Vollkeramik auch weiterhin Schwierigkeiten. Das Ziel, weitspannige Vollkeramikbrücken herzustellen, welche nachweisbar eine hinreichend lange Funktionsperiode in der Mundhöhle ermöglichen, ist bislang noch nicht erreicht worden. Wie klinische Erfahrungen und experimentelle Untersuchungen zeigen, neigen Brücken aus Vollkeramik besonders im Seitenzahnbereich häufig zu Frakturen. Ursache dafür sind neben Abscherungen der Verblendkeramik überwiegend unterdimensionierte Verbinderquerschnitte und zu geringe Gerüststärken. Zusätzlich ist die Gestaltung der Verbinderübergänge für die Funktionsdauer der Brücken von Bedeutung, da diese einen bedeutenden Einfluss auf die Festigkeit haben.

Bislang erfolgt die CAD-unterstützte Konstruktion von Brücken ausschließlich unter der Verwendung von systemspezifisch vorgegebenen Abmessungen für die Gerüst- und Verbindergestaltung, welche auf klinischen Studien von durchschnittlichen Patientenfällen und werkstoffkundlichen Untersuchungen basieren. Erst die Implementierung von FE-Algorithmen in die CAD-Tools der Konstruktionsprogramme ermöglicht jedoch eine Gestaltung der Brückengerüste, welche unter Beachtung von vorhandenen Platzverhältnissen, kaulastabhängig optimiert werden können. Damit eröffnet sich nun eine Möglichkeit, individualisierten Zahnersatz mit einer ausreichend langen Funktionsdauer herzustellen, der an die zu erwartenden Kaulastverhältnisse angepasst ist. Zusätzlich können Über- und Unterdimensionierungen der Gerüste vermieden und Material eingespart werden.

Die mit Unterstützung der FE-integrierten CAD-Konstruktionssoftware optimiertes Design der Brückengerüste können anschließend mit sehr hoher Präzision in den Werkstoff überführt werden. Voraussetzung dafür sind allerdings funktionierende FE-Modelle.

Ziel dieser Arbeit war es zu zeigen, dass die 3D-ESPI-Messmethode besonders dafür geeignet ist, dass belastungsabhängige Verformungsverhalten von Brückengerüsten aus unterschiedlichen Materialien mit sehr hoher Präzision zu vermessen. Mit dem Messsystem konnten selbst die sehr geringen Verformungen von  $ZrO_2$ -Keramiken vermessen werden. Zusätzlich wurden die Zusammenhänge zwischen der Verbinderdimensionierung und dem Verformungsverhalten in Hinblick auf die Gerüstdurchbiegung dargestellt, sowie der Einfluss der Pfeilerbeweglichkeit auf die Gerüstverformung mit Hilfe unterschiedlicher Versuchsanordnungen analysiert.

Die so gewonnenen Messergebnisse sollen als Grundlage für die Anpassung der variablen Modellparameter der FE-Berechnung an die gemessene und damit reale Verformungssituation dienen. Am günstigsten für die Vermessung der Verformungen erwies sich dabei eine Versuchsanordnung, bei der die Zahn Pfeiler starr fixiert sind. Andere ausgewählte Versuchsanordnungen, wie die der flexibel gelagerten Zahn Pfeiler, führen zu Verformungsbildern, die nachweisbar von den Messbilder der starren Pfeilerlagerung abweichen. Es konnte gezeigt werden, dass mit dem 3D-ESPI-Messsystem Verformungen von Zahnbrücken aus den verschiedensten Materialien und mit unterschiedlichen Abmessungen mit hoher Genauigkeit vermessen werden können. Diese Messergebnisse lieferten die Grundlage für die Anpassung der variablen FE-Modellparameter und damit auch für die Verbesserung der Genauigkeit der FE-Berechnung. Nach der Anpassung der variablen FE-Modellparameter (Querkontraktionszahl  $\nu$ , E-Modul) konnte eine sehr gute Übereinstimmung der FE-Berechnungsergebnisse mit den experimentell bestimmten Verformungsverhalten erzielt werden. Hierfür wurden die Verformungsbilder eines auf den Pfeilerzähnen starr fixierten dreigliedrigen PEEK-Brückengerüstes genutzt., auch wenn es eine vereinfachte klinische Situation darstellt.

Auf ein Vergleich der FE-Rechenergebnisse mit den 3D-ESPI-Messergebnissen in der Modellannahme mit einer flexiblen Pfeilerlagerung wurde erst einmal aus Gründen der Modellkomplexität verzichtet. In weiteren Studien muss jedoch geklärt werden, inwieweit die FE-Rechenergebnisse mit den gemessenen Verformungsbildern in dem Modell der flexiblen Pfeilerlagerung übereinstimmen. Es zeigte sich nämlich, dass die Größe der Pfeilerbeweglichkeit (starr, flexibel, Dreipunktbiegeversuch) einen entscheidenden Einfluss auf das Verformungsbild und somit auf die Festigkeit hat.

Zukünftig wird angestrebt, dass FE-Programme direkt auf die vom ESPI-System experimentell bestimmten Messwerte zugreifen können, um einen direkten Vergleich der experimentellen Messergebnisse mit den Berechnungsergebnissen über eine gemeinsame Schnittstelle zu ermöglichen.

Es konnte so ein erster Schritt in Richtung der Verknüpfung von experimentell bestimmten Verformungsdaten mit FE-Analysen zur Gestaltoptimierung von dentalen Konstruktionen besprochen und die Möglichkeiten, aber auch noch existierenden Grenzen aufgezeigt werden.

## 8 Literaturverzeichnis

- 1 Chu S, Ahmad I. A historical perspective of synthetic ceramic and traditional feldspathic porcelain. *Pract Proced Aesthet Dent.* 2005;17:593-598.
- 2 Sorensen J. Das System IPS- Empress 2. Möglichkeiten und Grenzen. *Quintessenz Zahntechnik* 2000;26:240-254.
- 3 Kelly J, Tesk JA, Sorensen JA. Failure of all- ceramic fixed partial dentures in vitro and in vivo: Analysis and modeling . *J Dent Res.* 1995;74:1253-1258.
- 4 Geis-Gersdorfer J, Fässler P. Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten der Dentalkeramiken Zirkondioxid-TZP und In Ceram. *Dtsch Zahnärztl Z* 1999;54:692.
- 5 Tinschert J, Natt G, Doose B, et al. Seitenzahnbrücken aus hochfester Strukturkeramik. *Dtsch Zahnärztl Z* 1999;54:545-550.
- 6 Geis- Gersdorfer J, Kajantra, P, Pröbster, L, et al. Untersuchung der Bruchzähigkeit und des Risswachstums zweier vollkeramischer Kronen- und Brückensysteme. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* 1993;48:685-691.
- 7 Mackert J, Wahl MJ. Are there acceptable alternatives to amalgam? *J Calif Dent Assoc.* 2004;32:601-610.
- 8 Pistorius A, Willershausen B. Biocompatibility of dental materials in two human cell lines. *Eur J Med Res.* 2002;7:81-88.
- 9 Francischone C, D'Alpino PH, Garcia FC, et al. Reconstruction of anterior teeth using an aesthetic post-and-core and all-ceramic material. *Pract Proced Aesthet Dent.* 2003;15:459-464.
- 10 Herrguth M, Wichmann M, Reich S. The aesthetics of all-ceramic veneered and monolithic CAD/CAM crowns. *J Oral Rehabil.* 2005;32:747-752.
- 11 Stiegelbauer C. Lichtmikroskopische Passungsanalyse von vollkeramischen Brücken verschiedener Systeme. *Dissertation LMU München* 2005.
- 12 Abdin- Bey S. Untersuchungen zur Passgenauigkeit vollkeramischer Systeme. *Dissertation LMU München* 2003.
- 13 Munz D, Fett T. Mechanisches Verhalten keramischer Werkstoffe: Versagensablauf, Werkstoffauswahl, Dimensionierung. Berlin Springer Verlag 1989.
- 14 Claus H. Vita In- Ceram, ein neues Verfahren zur Herstellung oxidkeramischer Gerüste für Kronen und Brücken. *Quintessenz Zahntechnik* 1990;16:35.

- 15 Kunzelmann K, Pospiech P, Mehl A, et al. Vollkeramik auf einen Blick. Eigenverlag AG Keramik, 76255 Ettlingen 2006.
- 16 Fradeani M, Redemagni M. Klinische Evaluation von leuzitverstärkten glaskeramischen Kronen über 11 Jahre. *Quintessence* 2003;54:379-386.
- 17 Pospiech P, Kistler S, Frasch C, et al. Clinical evaluation of Empress 2 bridges: First results after two years. *J Dent Res.* 2000;79:334.
- 18 Bieniek K, Marx R. Die mechanische Belastbarkeit neuer vollkeramischer Kronen- und Brückenmaterialien. *Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin* 1994;104:284-289.
- 19 Studart A, Filser F, Kocher P, et al. Cyclic fatigue in water of veneer-framework composites for all-ceramic dental bridges. *Dent Mater.* 2006;18:Epub ahead of print.
- 20 Studart A, Filser F, Kocher P, et al. Fatigue of zirconia under cyclic loading in water and its implications for the design of dental bridges. *Dent Mater.* 2006;10:Epub ahead of print.
- 21 Suttor D, Bunke K, Hoescheler S, et al. LAVA- the system for all-ceramic ZrO<sub>2</sub> crown and bridge frameworks. *Int J Comput Dent.* 2001;4:195-206.
- 22 Raigrodski A. All-ceramic full-coverage restorations: concepts and guidelines for material selection. *Pract Proced Aesthet Dent.* 2005;17:249-256;quiz 258.
- 23 V. von Steyern P. All-ceramic fixed partial dentures. Studies on aluminum oxide- and zirconium dioxide-based ceramic systems. *Swed Dent J Suppl.* 2005:1-69.
- 24 Pospiech P, Rountree P, Unsöld F, et al. In-vitro-investigations on the fracture strength of all-ceramic posterior bridges of Empress 2. *J Dent Res.* 1999;79.
- 25 Edelhoff D, Spiekermann H, Rübber A ,et al. Kronen- und Brückengerüste aus hochfester Presskeramik. *Quintessenz* 1999;50:177- 189.
- 26 Tinschert J, et al. Belastbarkeit vollkeramischer Seitenzahnbrücken aus neuen Hartkernkeramiken. *Dtsch Zahnärztl Z* 2000;55:610-616.
- 27 Luthardt R, Herold V, Sandkuhl O, et al. Kronen aus Hochleistungskeramik. *Dtsch Zahnärztl Z* 1998;53:280.
- 28 Kosmac T, Oblak O, Jevnikar P, et al. Strength and reliability of surface treated Y-TZP dental ceramics. *J Biomed Mater Res .* 2000;53:304.
- 29 Tinschert J, Natt G, Mautsch W, et al. Fracture resistance of lithium disilicate-, alumina-, and zirconia-based three- unit fixed partial dentures: a laboratory study. *Int J Prosthodont.* 2001;14:231.

- 30 Akagawa Y, Ichikawa Y, Nikai H, et al. Interface histology of unloaded and early loaded partially stabilized zirconia endosseous implant in initial bone healing. *J Prosthet Dent.* 1993;69:599-604.
- 31 Ichikawa Y, Akagawa Y, Nikai H, et al. Tissue compatibility and stability of new zirconia ceramic in vivo. *J Prosthet Dent.* 1992;68:322-326.
- 32 Guazzato M, Albakry M, Ringer SP, et al. Strength, fracture toughness and microstructure of a selection of all-ceramic materials. Part II. Zirconia-based dental ceramics. *Dent Mater.* 2004;20:449-456.
- 33 Meyer L. Oxid oder Dioxid- was macht Zirkonium zur Denatlkeramik? *DZW-Zahntechnik* 2002;10:6-8.
- 34 Studart A, Filser F, Kocher P, et al. Mechanical and fracture behavior of veneer-framework composites for all-ceramic dental bridges. *Dent Mater.* 2006;10:Epub ahead of print.
- 35 Kappert H, Krahe M. Keramiken-eine Übersicht. *Quintessenz Zahntechnik* 2001;27:668-704.
- 36 Deng Y, Miranda P, Pajares A, et al. Fracture of ceramic/ceramic/polymer trilayers for biomedical applications. *J Biomed Mater Res .* 2003;67:828-833.
- 37 Kappert H. Bruchfestigkeit und Frakturverhalten von DCS- gefrästen Frontzahnkronen nach Verblendung mit Vitadur D und Triceram. *ZWR* 2001;110:134-139.
- 38 Piconi C, Burger W, Richter HG, et al. Y-TZP ceramics for artificial joint replacement. *Biomaterials.* 1998;19:1489-1494.
- 39 Marx R, Fischer H, Weber M. Rissparameter und Weibullmodule: unterkritisches Risswachstum und Langzeitfestigkeit vollkeramischer Materialien. *Dtsch Zahnärztl Z* 2001;56:90-98.
- 40 Geis- Gersdorfer J, Fässler, P. Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten der Dentalkeramiken Zirkondioxid-TZP und In Ceram. *Dtsch Zahnärztl Z* 1999;54:692.
- 41 Filser F, Kocher P, Weibel F, et al. Reliability and strength of all-ceramic dental restorations fabricated by direct ceramic machining (DCM). *Int J Comput Dent.* 2001;4:89-106.
- 42 Lüthy H, Filser F, Loeffel O, et al. Strength and reliability of four-unit all-ceramic posterior bridges. *Dental Materials* 2005;21:930-937.
- 43 Pospiech P, Rountree PR, Nothdurft FP. Clinical evaluation of zirconia based all- ceramic posterior bridges; two year results. *IADR Abstract No 817* 2003.

- 44 Sailer I, Lüthy H, Feher A, et al. 3 year results of zirconia posterior fixed partial dentures made by direct ceramic machining(DCM). *J Dent Res.* 2003;82:Abstract 0074.
- 45 Sturzenegger B, Feher A, Luthy H, et al. Clinical study of zirconium oxide bridges in the posterior segments fabricated with the DCM system. *Schweiz Monatsschr Zahnmed.* 2000;119:131-139.
- 46 Pospiech P, Schweiger J, Meinen J. Vom Zirkonoxidgerüst zur Lava- Vollkeramik. *dental- labor* 2002;L:59-67.
- 47 Tinschert J, Natt G, Spiekermann H. Aktuelle Standortbestimmungen von Dentalkeramiken. *dental- praxis* 2001;XVIII:293-307.
- 48 Tinschert J, Natt G, Latzke, P. Vollkeramische Brücken aus DC-Zirkon- Ein klinisches Konzept mit Erfolg? *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* 2005;60:435-445.
- 49 Luthardt R, Holzhüter MS, Rudolph H, et al. CAD/CAM machining effects on Y- TZP zirconia. *Dent Mat* 2004;20:655-662.
- 50 Kerler T. In- Vitro- Untersuchung zum Einfluss der Verblendkeramik auf die Bruchfestigkeit von Zirkoniumdioxidrestaurationen. *Dissertation LMU München* 2005.
- 51 Marquardt P SJ. Survival rates of IPS empress 2 all-ceramic crowns and fixed partial dentures: results of a 5-year prospective clinical study. *Quintessence Int.* 2006;37:253-259.
- 52 Pröbster B, Heinrich GM. 11- year follow- up study of resin bonded fixed partial dentures. *Int J Prosthodont.* 1997;10:259- 268.
- 53 Reichl F, Esters M, Simon S, et al. Cell death effects of resin-based dental material compounds and mercurials in human gingival fibroblasts. *Arch Toxicol.* 2006;80:370-377.
- 54 Vallittu P. The effect of glass fiber reinforcement on the fracture resistance of a provisional fixed partial denture. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 1998;79:125-130.
- 55 Vallittu P, Sevelius C. Resin- bonded, glass fiber- reinforced composite fixed partial dentures: A clinical study. *J Prosthet Dent.* 2000;84:413-418.
- 56 Fischer H, Weber M, Eck M, et al. Finite element and experimental analyses of polymer-based dental bridges reinforced by ceramic bars. *J Biomech.* 2004;37:289-294.
- 57 Loose M, Rosentritt M, Leibrock A, et al. In vitro study of fracture strength and marginal adaptation of fibre-reinforced-composite versus all ceramic fixed partial dentures. *Eur J Prosthodont Restor Dent.* 1998;6:55-62.

- 58 Li W, Swain MV, Li Q, et al. Towards automated 3D finite element modeling of direct fiber reinforced composite dental bridge. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2005;74:520-528.
- 59 Li W, Swain, MV, Ironside J, et al. Fibre reinforced composite dental bridge. Part II: Numerical investigation. *Biomaterials.* 2004;25:4995-5001.
- 60 Li W, Swain MV, Li Q, et al. Fibre reinforced composite dental bridge. Part I: Experimental investigation. *Biomaterials.* 2004;25:4987-4993.
- 61 Körber K, Ludwig K. Maximale Kaukraft als Berechnungsfaktor zahntechnischer Konstruktionen. *Dental Labor* 1983;XXXI:55-60.
- 62 Fradeani M, Barducci G. Versatility of Empress restorations. 1. Crowns. *J Esthet Dent* 1996;8:127-135.
- 63 V. von Steyern P, Jönsson, O., Nilner, K. Five- year evaluation of posterior all- ceramic three unit (In- Ceram) FPDs. *Int J Prosthodont.* 2001;14:379-384.
- 64 Kamposiora P, Papavasiliou G, Bayne SC, et al. Stress concentration in all- ceramic posterior fixed partial dentures. *Quintessence Int.* 1996;27:701-706.
- 65 Augereau D, Pierrisnard L, Barquins M. Relevance of the finite element method to optimize fixed partial denture design. Part I. Influence of the size of the connector on the magnitude of strain. *Clin Oral Investig.* 1998;2:36-39.
- 66 Oh W, Gotzen N, Anusavice KJ. Influence of connector design on fracture probability of ceramic fixed-partial dentures. *J Dent Res.* 2002;81:623-627.
- 67 Edelhoff D. Gute Langzeitergebnisse ohne Experimente. *Ästhetische Zahnmedizin* 2003;3:18.
- 68 Filser F, et al. Vollkeramischer Zahnersatz im Seitenzahnbereich. *Quintessence Zahntech* 2002;28:48-60.
- 69 Kern M, Mehl, A. Neue Perspektiven für CAD/ CAM in der Zahnheilkunde. *Quintessence Zahntech* 2002;28:1244-1250.
- 70 Palin W, Burke FJ. Trends in indirect dentistry: 8. CAD/CAM technology. *Dent Update.* 2005;32:566-572.
- 71 Tinschert J, Natt G, Hassenpflug S, et al. Status of current CAD/CAM technology in dental medicine. *Int J Comput Dent.* 2004;7:25-45.
- 72 Liu P. A panorama of dental CAD/CAM restorative systems. *Compend Contin Educ Dent.* 2005;26:507-508,510,512 passim;quiz 517,527.



- 73 Luthardt R, Weber A, Rudolph H, et al. Design and production of dental prosthetic restoration: Basic research on dental CAD/CAM technology. *Int J Comput Dent.* 2002;5:165-176.
- 74 Mormann W, Bindl A. All-ceramic, chair-side computer-aided design/computer-aided machining restorations. *Dent Clin North Am.* 2002;46:405-426.
- 75 Piwowarczyk A, Ottl P, Lauer HC, et al. A clinical report and overview of scientific studies and clinical procedures conducted on the 3M ESPE Lava All-Ceramic System. *J Prosthodont.* 2005;14:39-45.
- 76 Turner M, Clough RW, Martin HC, et al. Stiffness and deflection analysis of complex structures. *J Aero Sci* 1956.
- 77 Dalstra M, Huiskes R, van Erning L. Development and validation of a three-dimensional finite element model of the pelvic bone. *Journal of Biomechanical Engineering* 1995;117:272-278.
- 78 Jost- Brinkmann PG, Tanne, K., Sakuda, M., Miethke, R. R. FEM- Studie zum biomechanischen Vergleich von labialem und palatinalen Kraftangriff an oberen Inzisivi. *Journal of Orofacial Orthopedics* 1993;54:76-82.
- 79 Farah J, Craig RG. Finite element stress analysis of a restored axisymmetric first molar. *J Dent Res.* 1974;53:859-866.
- 80 Sakaguchi R, Brust EW, Cross M, et al. Independent movement of cusps during occlusal loading. *Dent Mater.* 1991;7:186-190.
- 81 Keidel F. FE- Analyse einer vollkeramischen Seitenzahnbrücke. Diplomarbeit TU-München 1998.
- 82 Erdelt K. Entwicklung einer integrierten, datenbankgestützten Entwicklungsumgebung(CAD/FEM) zur Berechnung und Design von vollkeramischen Brücken. Dissertation LMU München 2003.
- 83 Ciftci Y, Canay S. The effect of veneering materials on stress distribution in implant-supported fixed prosthetic restorations. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2000;15:571-582.
- 84 Rubin C, Krishnamurthy N, Capilouto E, et al. Stress analysis of the human tooth using a three-dimensional finite element model. *J Dent Res.* 1983;62:82-86.
- 85 Gallas M, Abeleira MT, Fernandez JR, et al. Three-dimensional numerical simulation of dental implants as orthodontic anchorage. *Eur J Orthod.* 2005;27:12-16.

- 86 Sutpideler M, Eckert SE, Zobitz M, et al. Finite element analysis of effect of prosthesis height, angle of force application, and implant offset on supporting bone. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2004;19:819-825.
- 87 Geng J, Tan KB, Liu GR. Application of finite element analysis in implant dentistry: a review of the literature. *J Prosthet Dent.* 2001;85:585-598.
- 88 Hojjatie B, Anusavice KJ. Three-dimensional finite element analysis of glass-ceramic dental crowns. *J Biomech.* 1990;23:1157-1166.
- 89 Nakamura T, Imanishi A, Kashima H, et al. Stress analysis of metal-free polymer crowns using the three-dimensional finite element method. *Int J Prosthodont.* 2001;14:401-405.
- 90 De Jager N, Pallav P, Feilzer AJ. The influence of design parameters on the FEA-determined stress distribution in CAD-CAM produced all-ceramic dental crowns. *Dent Mater.* 2005;21:242-251.
- 91 Proos K, Swain MV, Ironside J, et al. Finite element analysis studies of an all-ceramic crown on a first premolar. *Int J Prosthodont.* 2002;15:404-412.
- 92 Proos K, Swain MV, Ironside J, et al. Influence of core thickness on a restored crown of a first premolar using finite element analysis. *Int J Prosthodont.* 2003;16:474-480.
- 93 Ausiello P, Apicella A, Davidson CL. Effect of adhesive layer properties on stress distribution in composite restorations--a 3D finite element analysis. *Dent Mater.* 2002;18:295-303.
- 94 Mehl A, Kunzelmann KH, Fowaczny M, et al. Stabilization effects of CAD/CAM ceramic restorations in extended MOD cavities. *J Adhes Dent* 2004;6.
- 95 Ausiello P, Apicella A, Davidson CL, et al. 3D-finite element analyses of cusp movements in a human upper premolar, restored with adhesive resin-based composites. *J Biomech.* 2001;34:1269-1277.
- 96 Kamposiora P, Papavasiliou G, Bayne SC, et al. Finite element analysis estimates of cement microfracture under complete veneer crowns. *J Prosthet Dent.* 1994;71:435-441.
- 97 Proos K, Swain MV, Ironside J, et al. Influence of margin design and taper abutment angle on a restored crown of a first premolar using finite element analysis. *Int J Prosthodont.* 2003;16:442-449.
- 98 Proos K, Swain MV, Ironside J, et al. Influence of cement on a restored crown of a first premolar using finite element analysis. *Int J Prosthodont.* 2003;16:82-90.
- 99 Lang L, Wang RF, Kang B, et al. Validation of finite element analysis in dental ceramics research. *J Prosthet Dent.* 2001;86:650-654.

- 100 Lang H, Schwan R, Nolden R. Die 3D- Speckle- Interferometrie zur dreidimensionalen Erfassung eingegliedelter Restaurationen. Dtsch Zahnärztl Z 1995;50:247-251.
- 101 Siebert T, Schubach HR , Ettemeyer A. Laseroptische, berührungslose Verformungsanalyse von Biowerkstoffen mit modernen 3D- ESPI Systemen. Reprint;Ettemeyer AG, Application Report No. 04-02.
- 102 Sharp B. Electronic speckle pattern interferometry. Opt Lasers Enging. 1989;11:241-255.
- 103 Goldstein G, Wesson A, Schweitzer K, et al. Flexion characteristics of four-unit fixed partial denture frameworks using holographic interferometry. J Prosthet Dent. 1992;67:609-613.
- 104 Yap A, Tan AC, Quan C. Non-destructive characterization of resin-based filling materials using Electronic Speckle Pattern Interferometry. Dent Mater. 2004;20:377-382.
- 105 Sato T, Miyazaki M, Rikuta A, et al. Application of the laser speckle-correlation method for determining the shrinkage vector of a light-cured resin. Dent Mater J. 2004;23:284-290.
- 106 Lang H, Rampado M, Mullejans R, et al. Determination of the dynamics of restored teeth by 3D electronic speckle pattern interferometry. Lasers Surg Med. 2004;34:300-309.
- 107 Bouillaguet S, Gamba J, Forchelet J, et al. Dynamics of composite polymerization mediates the development of cuspal strain. Dent Mater. 2005;15:Epub ahead of print.
- 108 Sato T, Miyazaki M, Rikuta A. Real-time dimensional change in light-cured composites at various depths using laser speckle contrast analysis. Eur J Oral Sci. 2004;112:538-544.
- 109 Knezevic A, Demoli N, Tarle Z, et al. Measurement of linear polymerization contraction using digital laser interferometry. Oper Dent. 2005;30:346-352.
- 110 Fogleman E, Kelly MT, Grubbs WT. Laser interferometric method for measuring linear polymerization shrinkage in light cured dental restoratives. Dent Mater. 2002;18:324-330.
- 111 Lang H, Raab, WH-M. Auswirkungen endodontischer- präparativer Maßnahmen auf die Stabilität von Frontzähnen. Dtsch Zahnärztl Z 2005;60:26-31.
- 112 Magne P, Douglas WH. Cumulative effects of successive restorative procedures on anterior crown flexure: intact versus veneered incisors. Quintessence Int. 2000;31:5-18.
- 113 Fischer H, Dautzenberg G, Marx R. Nondestructive estimation of the strength of dental ceramic materials. Dent Mater 2001;17:289-295.

- 114 Craig R, Peyton FA. Measurement of stress in fixed- bridge restorations using a brittle coating technique. *J Dent Res.* 1965;46:615-619.
- 115 Klötzer W. Über die elastische Deformation der Brückenzwischenglieder. *Zahnärztl. Welt* 1960;61:13-16, 45-50.
- 116 El- Ebrashi MK, Graig, R.G., Peyton, F.A. Experimental stress analysis of dental restorations, Part VII, Structural design and stress analysis of fixed partial dentures. *J Prosthet Dent.* 1970;32:177-186.
- 117 Musewald T, Müller WD, Lange R. Speckle- Interferometrie- berührungslose und zerstörungsfreie Belastungs- Verformungs- Messung Stand und Perspektiven. Dissertation HU Berlin 1999.
- 118 Gohring T, Zappini G, Mayer J, et al. Glass-fiber frameworks for fixed partial dentures: laser-interferometrical in vitro analysis. *Quintessence Int.* 2004;35:668-675.
- 119 Lang R, Rosentritt M, Handel G. Bruchfestigkeit von dreigliedrigen Brückenprovisorien - eine in- vitro- Studie. *Dtsch Zahnärztl Z* 2005;60:665-668.
- 120 DCS Dental AG, Alschwill Schweiz. Materialdatenblätter.
- 121 Ireland M, Dixon DL, Breeding LC, et al. In Vitro mechanical property comparison of four resin used for fabrication of provisional fixed restorations. *J Prosthet Dent.* 1998;80:158-162.
- 122 Scherrer S, De Rijk WG, Belser UC. Fracture resistance of human enamel and three all-ceramic crown systems on extracted teeth. *Int J Prosthodont.* 1996;9:580-585.
- 123 Meier M, Fischer H, Richter EJ, et al. Einfluss unterschiedlicher Präparationsrichtlinien auf die Bruchfestigkeit vollkeramischer Molarenkronen. *Dtsch Zahnärztl Z* 1995;50:295.
- 124 Romeed S, Fok SL, Wilson NH. Finite element analysis of fixed partial denture replacement. *J Oral Rehabil.* 2004;31:1208-1217.
- 125 Farah J, Craig RG, Sikarskie DL. Photoelastic and finite element stress analysis of a restored axisymmetric first molar. *J Biomech.* 1973;6:511-520.
- 126 Curtis A, Wright AJ, Fleming GJ. The influence of surface modification techniques on the performance of a Y-TZP dental ceramic. *J Dent* 2006;34:195-206.
- 127 Fischer H, Weber M, Marx R. Lifetime prediction of all-ceramic bridges by computational methods. *J Dent Res.* 2003;82:238-242.

- 128 De Las Casas E, Cornacchia TP, Gouvea PH, et al. Abfraction and anisotropy--effects of prism orientation on stress distribution. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2003;6:65-73.
- 129 Spears I, van Noort R, Crompton RH, et al. The effects of enamel anisotropy on the distribution of stress in a tooth. *J Dent Res.* 1993;72:1526-1531.
- 130 Iwamoto N, Ruse ND. Fracture toughness of human dentin. *J Biomed Mater Res A.* 2003;66:507-512.
- 131 Kinney J, Marshall SJ, Marshall GW. The mechanical properties of human dentin: a critical review and re-evaluation of the dental literature. *Crit Rev Oral Biol Med.* 2003;14:13-29.
- 132 Konishi N, Watanabe LG, Hilton JF, et al. Dentin shear strength: effect of distance from the pulp. *Dent Mater.* 2002;18:516-520.
- 133 Habelitz S, Marshall SJ, Marshall GWJr, et al. Mechanical properties of human dental enamel on the nanometre scale. *Arch Oral Biol.* 2001;46:173-183.
- 134 Rees J. An investigation into the importance of the periodontal ligament and alveolar bone as supporting structures in finite element studies. *J Oral Rehabil.* 2001;28:425-432.
- 135 Chen W, Lee BS, Chiang YC, et al. Effects of various periodontal ligament elastic moduli on the stress distribution of a central incisor and surrounding alveolar bone. *J Formos Med Assoc.* 2005;104:830-838.
- 136 Lackmann P, Müller WD, Peschel M. Belastungs- und Verformungsverhalten zahnmedizinischer Konstruktionen. Diplomarbeit TFH Berlin 2005.
- 137 Kappert H, Knode H, Manzotti L. Metallfreie Brücken für den Seitenzahnbereich. Herstellungsverfahren und Festigkeit von In- Ceram- Vollkeramikbrücken. *Dental Labor* 1990;XXXVIII:177-183.
- 138 Kim S, Watts DC. Polymerization shrinkage-strain kinetics of temporary crown and bridge materials. *Dent Mater.* 2004;20:88-95.
- 139 Zaslansky P, Currey JD, Friesem AA, et al. Phase shifting speckle interferometry for determination of strain and Young's modulus of mineralized biological materials: a study of tooth dentin compression in water. *J Biomed Opt.* 2005;10:024020.
- 140 Guazzato M, Proos K, Quach L, et al. Strength, reliability and mode of fracture of bilayered porcelain/zirconia (Y-TZP) dental ceramics. *Biomaterials.* 2004;25:5045-5052.

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gliederung der Keramiken anhand ihrer chemischen Struktur	9
Abbildung 2: Keramiken für dreigliedrige Vollkeramikbrücken, geordnet bzgl. Keramikgrundstruktur und der Bearbeitungstechnologie mit zugehörigen Produktbeispielen	11
Abbildung 3: optimierter Verfahrensablauf zur Herstellung von Zahnersatz	23
Abbildung 4: Übersicht über den Versuchsablauf	26
Abbildung 5: schematische Übersicht über den Aufbau der Versuchsanordnung	30
Abbildung 6: Metallplatte mit Pfeilern	31
Abbildung 7: Einspannvorrichtung	31
Abbildung 8: schwingungsarme Lagerung	32
Abbildung 9: Schienensystem und Kamerabefestigung	32
Abbildung 10: schematische Gegenüberstellung der Versuchsanordnungen	33
Abbildung 11: Versuchsorganisation	34
Abbildung 12: viergliedriges Brückengerüst (links) und Berandungsditor (rechts)	35
Abbildung 13: Speckflecken vor Belastung (a), bei Belastung (b) und defektselektives Streifenmuster (c)	36
Abbildung 14: Messbild von der Durchbiegung des Gerüsts (bezogen auf die y-Messrichtung)	37
Abbildung 15: Durchbiegung vor (links) und nach Korrektur (rechts)	38
Abbildung 16: das dreigliedrige Brückengerüsts als Facettenmodell	39
Abbildung 17: DC-Tell starre Lagerung und unzementiert (verschiedene Querschnitte)	41
Abbildung 18: DC-Tell starre Lagerung und zementiert (verschiedene Querschnitte)	43
Abbildung 19: DC-Tell Dreipunktbiegeversuch (verschiedene Querschnitte)	45
Abbildung 20: PEEK starre Lagerung und unzementiert (verschiedene Querschnitte)	47
Abbildung 21: PEEK starre Lagerung und zementiert (verschiedene Querschnitte)	49
Abbildung 22: PEEK Dreipunktbiegeversuch (verschiedene Querschnitte)	51
Abbildung 23: DC-Zirkon starre Lagerung und unzementiert (verschiedene Querschnitte)	53
Abbildung 24: DC-Zirkon starre Lagerung und zementiert (verschiedene Querschnitte)	55
Abbildung 25: DC-Zirkon Dreipunktbiegeversuch mit verschiedenen Querschnitten	57
Abbildung 26: ProTemp III starre Lagerung und unzementiert (verschiedene Querschnitte)	59
Abbildung 27: ProTemp III starre Lagerung und zementiert (verschiedene Querschnitte)	61
Abbildung 28: Gegenüberstellung ESPI-Messbilder mit FE-Ergebnis bei 20 N Prüflast	73
Abbildung 29: Detailabbildungen der Konnektoren	74
Abbildung 30: gemessene und errechnete Verformungen relativ zur x-Achsenrichtung	75
Abbildung 31: Gegenüberstellung gemessener und errechneter Verformungen relativ zur z-Achsenrichtung	77

## Abbildungsverzeichnis

---

<i>Abbildung 32: dreidimensionale Verformung des Gerüstes</i>	78
<i>Abbildung 33: x-Achsen Verformungsvektoren bei unterschiedlicher Pfeilerbeweglichkeit</i>	79
<i>Abbildung 34: Verformungsbilder von DC-Tell® in den unterschiedlichen Versuchsanordnungen (6 mm<sup>2</sup>)</i>	82
<i>Abbildung 35: Verformungsbilder von DC-Zirkon® in den verschiedenen Versuchsanordnungen (6 mm<sup>2</sup>)</i>	82
<i>Abbildung 36: verschiedene Gerüstwerkstoffe bei starrer Pfeilerlagerung und unzementierter Befestigung</i>	84
<i>Abbildung 37: verschiedene Gerüstwerkstoffe bei starrer Pfeilerlagerung und zementierter Befestigung</i>	84
<i>Abbildung 38: Gegenüberstellung der verschiedenen Gerüstmaterialien</i>	87

## 10 Diagrammverzeichnis

<i>Diagramm 1: „starre Pfeilerlagerung“ mit nicht zementiertem DC-Tell-Gerüst</i>	42
<i>Diagramm 2: „starre Pfeilerlagerung“ mit zementiertem DC-Tell Gerüst</i>	44
<i>Diagramm 3: DC-Tell-Gerüst in Dreipunkt-Biegeversuchsordnung gemessen</i>	46
<i>Diagramm 4: „starre Pfeilerlagerung“ mit nicht zementiertem PEEK-Gerüst</i>	48
<i>Diagramm 5: „starre Pfeilerlagerung“ mit zementiertem PEEK-Gerüst</i>	50
<i>Diagramm 6: PEEK-Gerüst mit Dreipunkt-Biegeversuchanordnung gemessen</i>	52
<i>Diagramm 7: „starre Pfeilerlagerung“ mit nicht zementiertem DC-Zirkon Gerüst</i>	54
<i>Diagramm 8: „starre Pfeilerlagerung“ mit zementiertem DC-Zirkon-Gerüst</i>	56
<i>Diagramm 9: DC-Zirkon-Gerüst mit Dreipunkt-Biegeversuchsordnung gemessen</i>	58
<i>Diagramm 10: „starre Pfeilerlagerung“ mit nicht zementiertem ProTemp III-Gerüst</i>	60
<i>Diagramm 11: „starre Pfeilerlagerung“ mit zementiertem ProTemp III-Gerüst</i>	62
<i>Diagramm 12: Übersicht über die gemessenen Durchbiegungen der Gerüste</i>	68
<i>Diagramm 13: gemessene Gerüstdurchbiegung für DC-Zirkon</i>	69
<b><i>Diagramm 14: Durchbiegung von DC-Tell und DC-Zirkon bei verschiedenen Versuchsanordnungen</i></b>	<b>83</b>
<i>Diagramm 15: Gegenüberstellung der Materialien Einfluss der Befestigungsart auf die Gerüstdurchbiegung</i>	85
<i>Diagramm 16: Gegenüberstellung der verschiedenen Gerüstmaterialien (starre Lagerung/ zement., 6 mm<sup>2</sup>)</i>	88



---

## 11 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Auswahl von werkstoffkundlichen Untersuchungen über ZrO<sub>2</sub> als Gerüstmaterial</i>	12
<i>Tabelle 2: Auswahl von durchgeführten klinischen Studien für Zirkoniumdioxid als Brückengerüstmaterial</i>	13
<i>Tabelle 3: Übersicht von Empfehlungen zur Verbinderdimensionierung</i>	15
<i>Tabelle 4: Übersicht über materialspezifische Kennzahlen der analysierten Materialien</i>	28
<i>Tabelle 5: Überblick Messergebnisse</i>	63
<i>Tabelle 6: Zusammenstellung der Einflussfaktoren für 3D- ESPI- Messungen</i>	95

---

## **Erklärung an Eides Statt**

„Ich, Patrick Heerde, erkläre an Eides statt, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: „Einsatz der Speckle-Interferometrie für die Bewertung des Spannungs- und Verformungsverhalten zur materialabhängigen Gestaltoptimierung prothetischer Konstruktionen“ 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.“

Datum

Unterschrift

---

## **Curriculum vitae**

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

---

## Danksagung

Mein Dank gilt an erster Stelle den Herren Prof. Dr. Klaus-Peter Lange und Prof. Dr. Wolfgang B. Freesmeyer für die Überlassung des Themas und die wohlwollende Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt darüber hinaus Herrn Prof. (UH) Dr. Müller für die fördernde Unterstützung, konstruktive Beratung und die kritische Begleitung bei der Fertigstellung der in dieser Schrift vorgestellten Untersuchungen.

Mein weiterer Dank gilt Dipl.-Ing. (FH) Mathias Peschel (TFH Berlin) für die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Finite Element Methode basierenden Spannungs- und Verformungsanalyse.

Vielen Dank an die Firma Ivoclar Vivadent AG, Liechtenstein für die Bereitstellung des 3D-ESPI-Messplatzes und für die Unterstützung mit Material.

Mein ausdrücklicher Dank gilt meinen Eltern und meiner Freundin Jana, die in allen Phasen meiner Arbeit zum Gelingen beigetragen haben.

Ebenso sei allen denen ein Dankeschön ausgesprochen, die nicht namentlich Erwähnung fanden, aber zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.