

4 Ergebnisse

4.1 Versuche zu DIN 13 914

4.1.1 Einfluß von Fehlern bei der Prüfkörperherstellung und Biegeprüfung

4.1.1.1 Einfluß des Verbundflächenwinkels auf Biegefestigkeit und Bruchverlauf

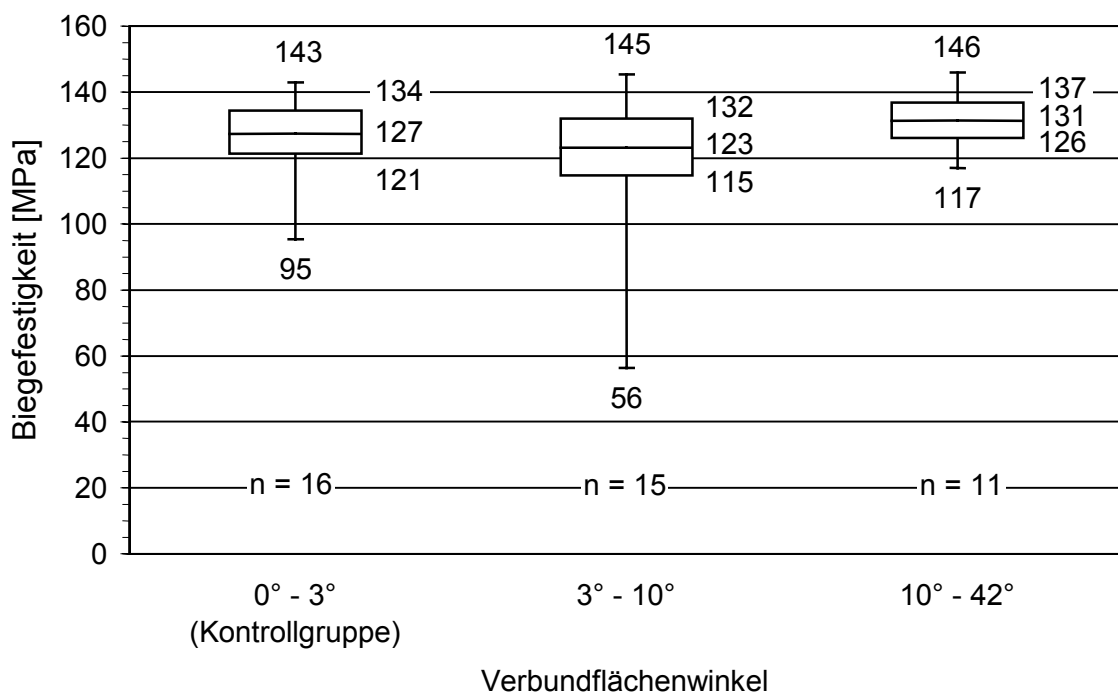
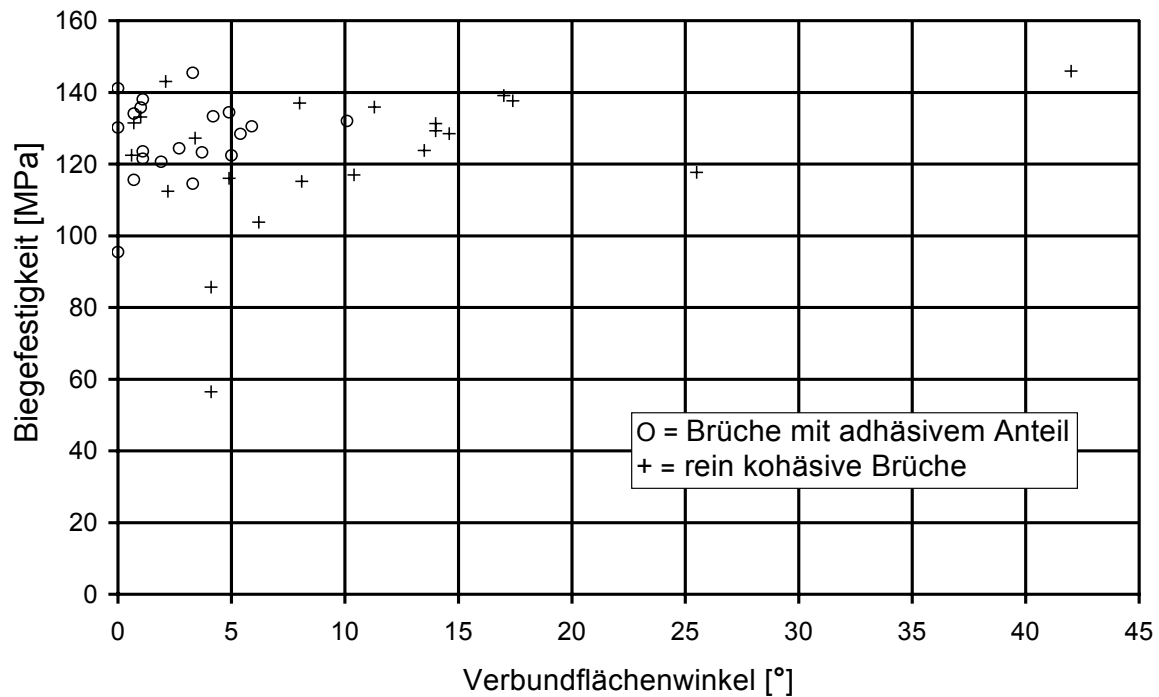


Abb. 12: Einfluß des Verbundflächenwinkels auf die Biegefestigkeit

Bei den nach DIN 13 914 hergestellten Prüfkörpern liegt die Verbundfläche oft nicht ganz gerade, d. h. querschnittsparallel, im Prüfkörper. Nach mikroskopischer Vermessung und trigonometrischer Berechnung des Winkel der Verbundfläche jedes einzelnen Prüfkörpers zu seinem Querschnitt wurden drei Gruppen gebildet. Die Kontrollgruppe enthält Prüfkörper mit Winkeln von 0° bis 3°, der zweiten Gruppe wurden Winkel von 3° bis 10° zugeordnet, der dritten Gruppe Winkel von 10° bis 42°. (siehe Abb. 12). Weder die zweite noch die dritte Gruppe unterscheidet sich signifikant von der Kontrollgruppe ($\alpha = 0,05$).



4.1.1.2 Einfluß von Positionierungsfehlern auf die Biegefestigkeit

Kunststoffzähne mit normalem Vernetzungsgrad

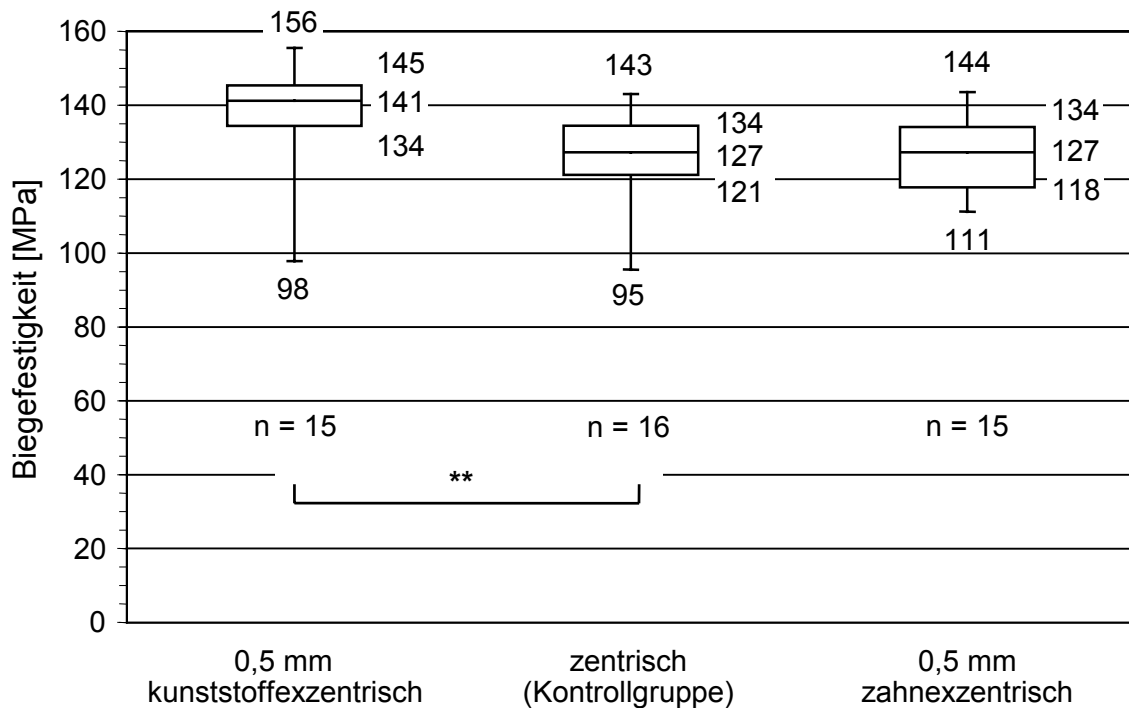


Abb. 14: Einfluß von Positionierungsfehlern auf die Biegefestigkeit bei Kunststoffzähnen mit normalem Vernetzungsgrad

Um zu untersuchen, ob Ungenauigkeiten bei der Positionierung die Biegefestigkeit beeinflussen, wurden zwei Gruppen von Prüfkörpern exzentrisch zum Zahn bzw. zur Kunststoffseite hin ausgerichtet (kunststoffexzentrisch, zahnexzentrisch), und zwar jeweils um 0,5 mm. Die Prüfkörper der Kontrollgruppe wurden zentrisch belastet (siehe Abb. 14).

Die zahnexzentrisch ausgerichtete Gruppe lag nahe bei der Vergleichsgruppe und zeigte ihr gegenüber keinen signifikanten Unterschied der Biegefestigkeit. Für die kunststoffexzentrisch positionierte Gruppe ergaben sich hochsignifikant höhere Werte ($\alpha = 0,01$).

Kunststoffzähne mit hohem Vernetzungsgrad

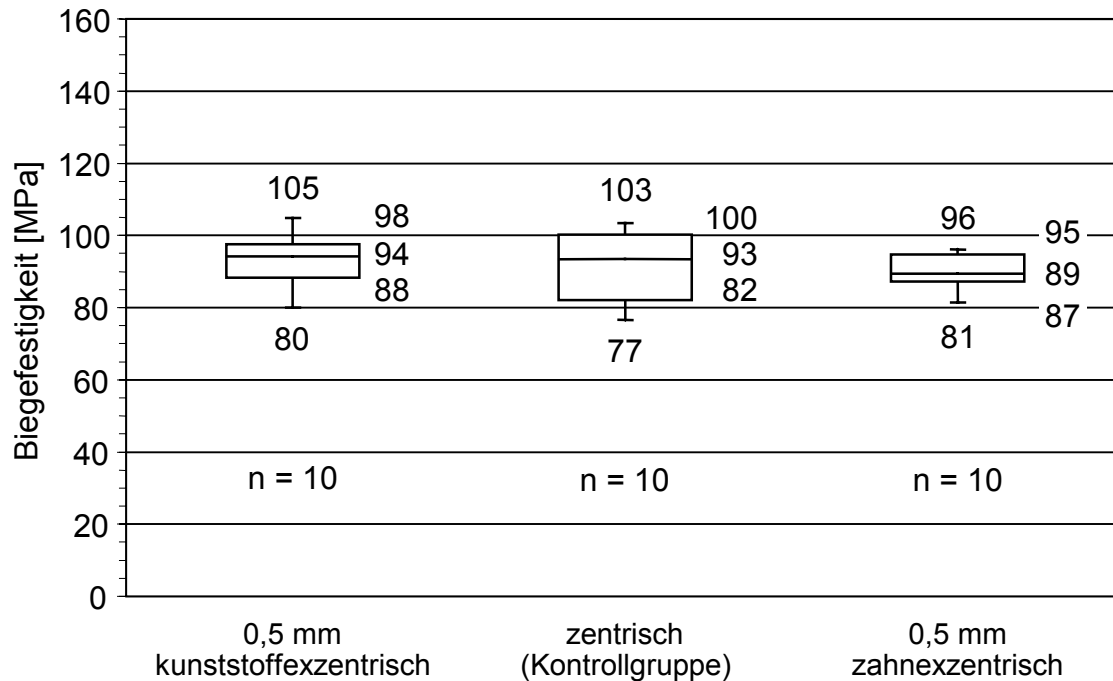


Abb. 15: Einfluß von Positionierungsfehlern auf die Biegefestigkeit bei Kunststoffzähnen mit hohem Vernetzungsgrad

Der Versuch wurde mit besonders hochvernetzten Kunststoffzähnen wiederholt (siehe Abb. 15).

Die exzentrischen Gruppen unterscheiden sich hier nur geringgradig von der zentrischen Vergleichsgruppe. Die Unterschiede sind nicht signifikant ($\alpha = 0,05$).

4.1.2 Reproduzierbarkeit anhand des Einflusses von nicht oder schlecht definierten Parametern bei der Prüfkörperherstellung

4.1.2.1 Einfluß des Prüfkörperquerschnitts auf Biegefestigkeit und Bruchverlauf

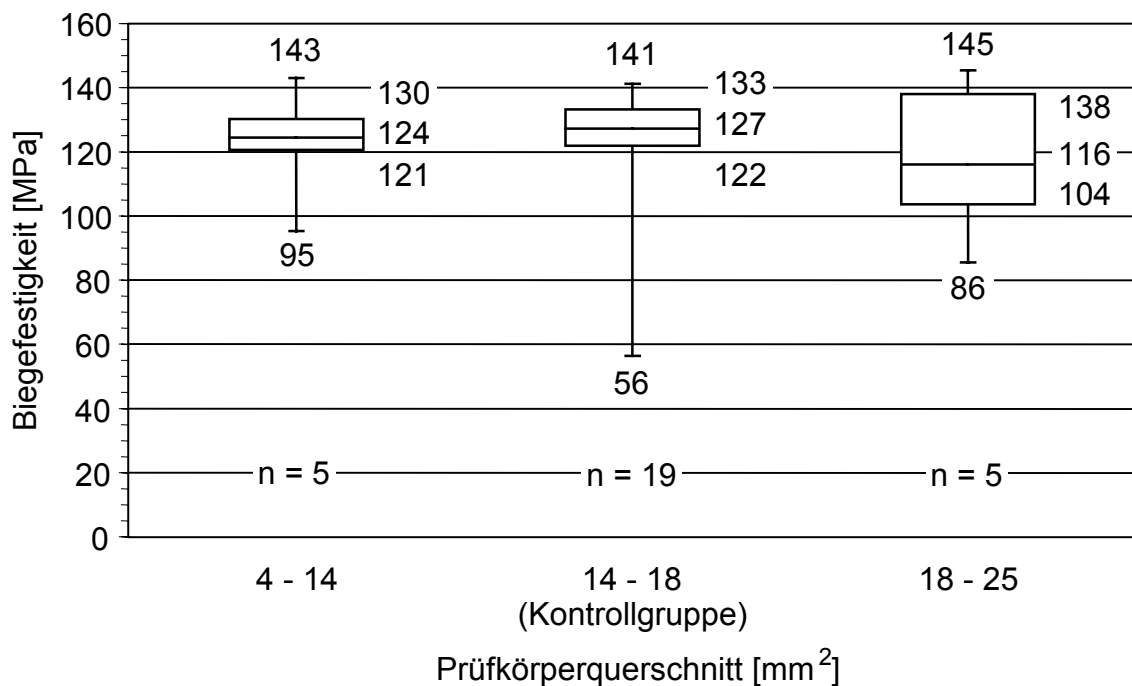


Abb. 16: Einfluß des Prüfkörperquerschnitts auf die Biegefestigkeit

Die Querschnitte der hier für die Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 verwendeten Prüfkörper wichen zum Teil stark von dem in dieser Norm geforderten Querschnitt von „etwa 4 x 4 mm“ ab. Die Untermaße entstanden unbeabsichtigt bei der Prüfkörperherstellung, die Übermaße wurden hergestellt, um den Einfluß des Prüfkörperquerschnittes auf die Biegefestigkeit zu untersuchen (siehe 3.1.1). Die Prüfkörper wurden nach der Größe ihres Querschnittes in drei Gruppen eingeteilt: Die erste Gruppe umfaßt Prüfkörper mit Querschnitten von 4 bis 14 mm², die zweite Gruppe (erweiterte Kontrollgruppe) enthält alle Prüfkörper, deren Querschnitte zwischen 14 und 18 mm² betragen, während die dritte Gruppe Prüfkörper von 18 bis 25 mm² beinhaltet (Siehe Abb. 16). Keine der Gruppen unterscheidet sich signifikant von den anderen ($\alpha = 0,05$).

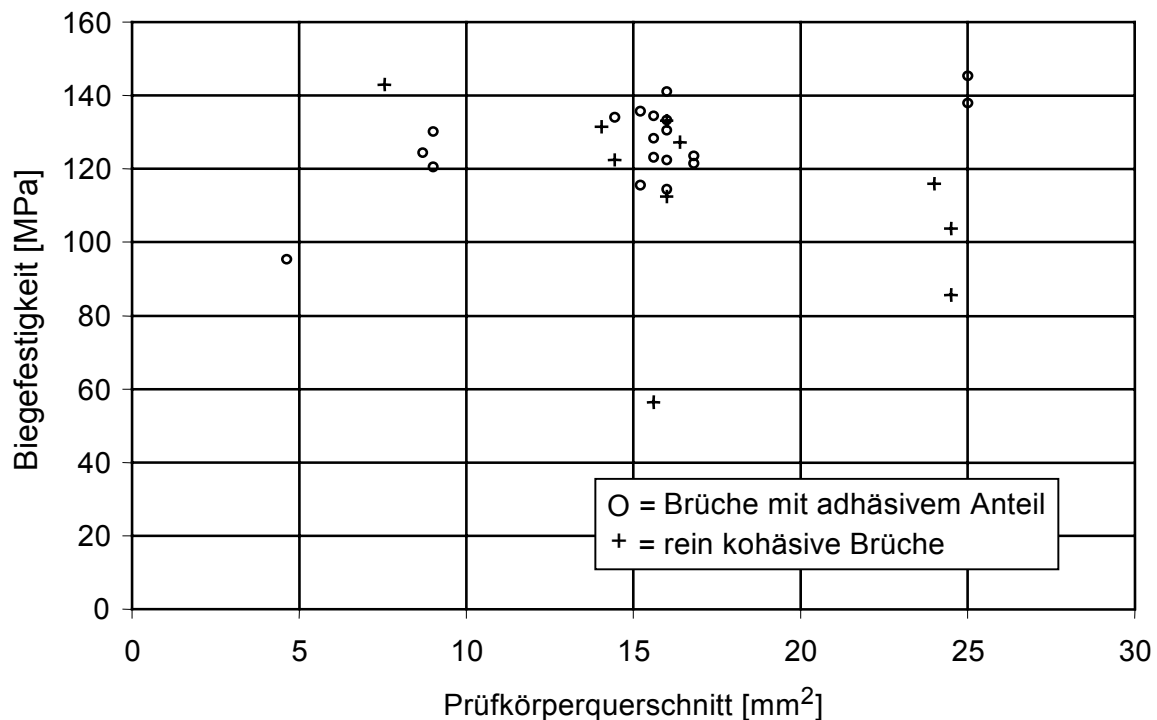


Abb. 17: Einfluß des Prüfkörperquerschnitts auf Biegefestigkeit und Bruchverlauf

Die Verteilung der Biegefestigkeiten bei variierendem Prüfkörperquerschnitt ist in Abb. 17 dargestellt. Ein Zusammenhang zwischen der Bruchcharakteristik und dem Prüfkörperquerschnitt ist nicht erkennbar.

Damit genügend Prüfkörper mit extremen Querschnittmaßen anfallen, wurde für diesen Versuch die enge Toleranz für den Verbundflächenwinkel von 3° auf 6° gelockert. Dieses Vorgehen legitimiert sich wie folgt:

Brüche mit adhäsivem Anteil häufen sich zwischen 0° und 6° , und kommen mit annähernd gleicher Häufigkeit zwischen 0° und 3° (69%) und zwischen 3° und 6° (67%) vor (siehe Tabellenanhang). Erst bei Winkeln $> 6^\circ$ ist ein Abfall der Validität und somit eine Verfälschung der Meßwerte zu erwarten.

4.1.2.2 Einfluß der Abtragsmenge auf die Biegefestigkeit

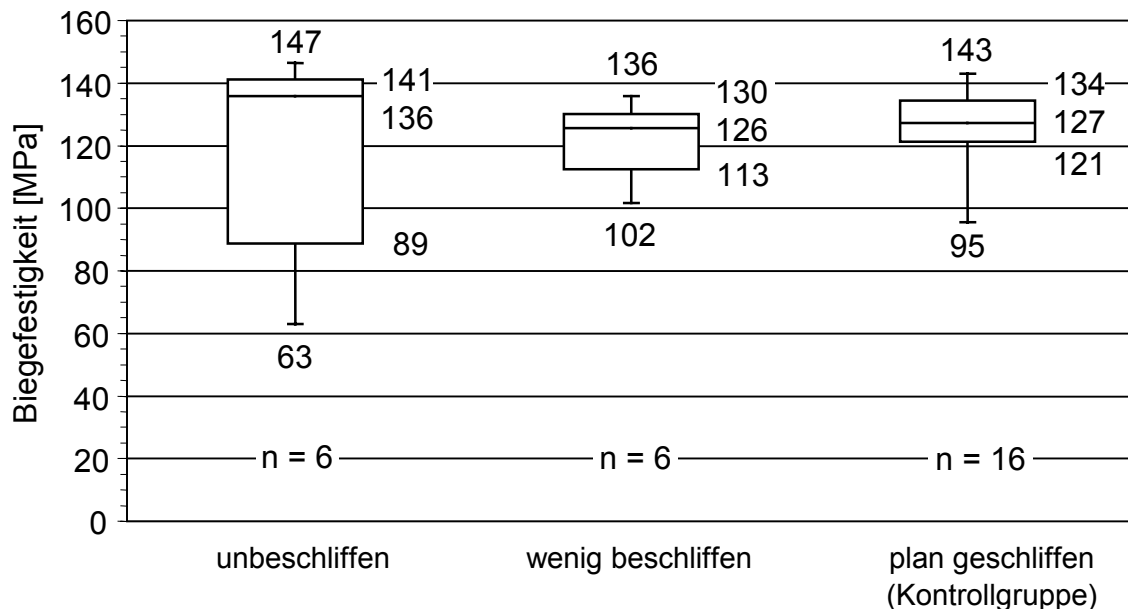


Abb. 18: Einfluß der Abtragsmenge auf die Biegefestigkeit

In der DIN 13 914 wird gefordert, daß die Zahnbasis mit einem Hartmetallfräser aufgeraut werden soll. Es wird jedoch nicht beschrieben, wieviel Material beim Aufrauen abgetragen werden soll bzw. darf. Um festzustellen, ob die Menge des an der Zahnbasis abgetragenen Materials einen Einfluß auf die Verbundfestigkeit hat, wurden drei Gruppen von Prüfkörpern untersucht.

Bei einer Gruppe blieb die sphärisch gekrümmte Basis der Kunststoffzähne, die im fertigen Prüfkörper die Verbundfläche darstellt, gänzlich unbeschiffen. Bei einer zweiten Gruppe wurde die Zahnbasis nur wenig beschiffen ohne sie einzuebnen. An den Kunststoffzähnen der dritten Gruppe (Kontrollgruppe) wurde so viel Material abgetragen, daß die Basis plangeschliffen war (siehe Abb.18). Die Unterschiede sind nicht signifikant ($\alpha = 0,05$).

Da aufgrund der gekrümmten Zahnbasen bei den unbeschiffenen und wenig beschiffenen Prüfkörpern der Verbundflächenwinkel nicht bestimmt werden konnte und eine zentrische Positionierung erschwert war, ist die Aussagekraft des Versuchsergebnisses eingeschränkt.

4.1.2.3 Einfluß des Fräsers auf die Biegefestigkeit

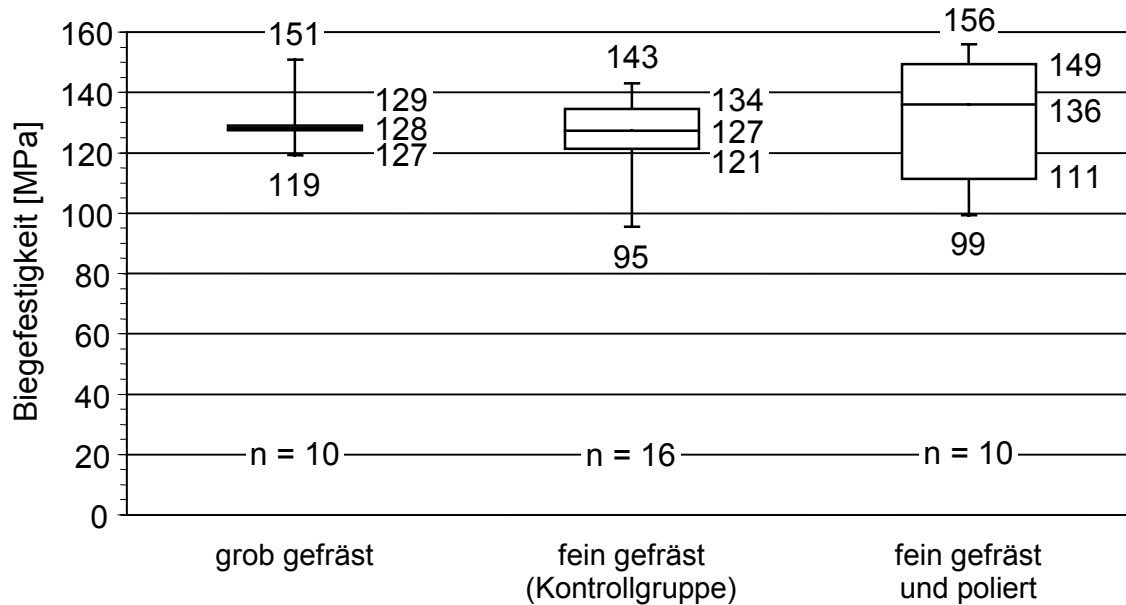


Abb.19: Einfluß des Fräsers auf die Biegefestigkeit

Die Art der zum Anrauen der Zahnbasis zu verwendenden Hartmetallfräser ist in der DIN 13 914 nicht spezifiziert. Um zu untersuchen, ob die Biegefestigkeit durch die Art des verwendeten Fräsers, bzw. durch die daraus resultierende unterschiedliche Rauigkeit der Zahnbasis beeinflusst wird, wurden drei Gruppen von Prüfkörpern untersucht, an deren Zahnbasis so viel Material abgetragen wurde, daß eine ebene Fläche entstand.

Bei der ersten Gruppe (Kontrollgruppe) wurde die Zahnbasis mit einem feinen, bei der zweiten Gruppe mit einem groben Hartmetallfräser bearbeitet.

Bei der dritten Gruppe wurde die Zahnbasis zunächst mit einem feinen Hartmetallfräser bearbeitet und danach hochglanzpoliert (siehe Abb. 19).

Keine der Gruppen unterscheidet sich signifikant von den anderen ($\alpha = 0,05$).

4.1.3 Validität der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 anhand der Häufigkeit von Brüchen mit adhäsivem Anteil

Nur wenn die Prüfkörper im Bereich der Verbundfläche (adhäsiv) brechen, finden sich die Festigkeitseigenschaften des Verbundes in den Meßwerten wieder. Insofern deuten häufige Brüche mit adhäsivem Anteil auf eine hohe Validität der Prüfmethode hin.

Bei der Erfassung der Bruchverläufe wurde die Gesamtheit aller Prüfkörper aus der Kontrollgruppe der normalvernetzten Zähne (n = 42) berücksichtigt.

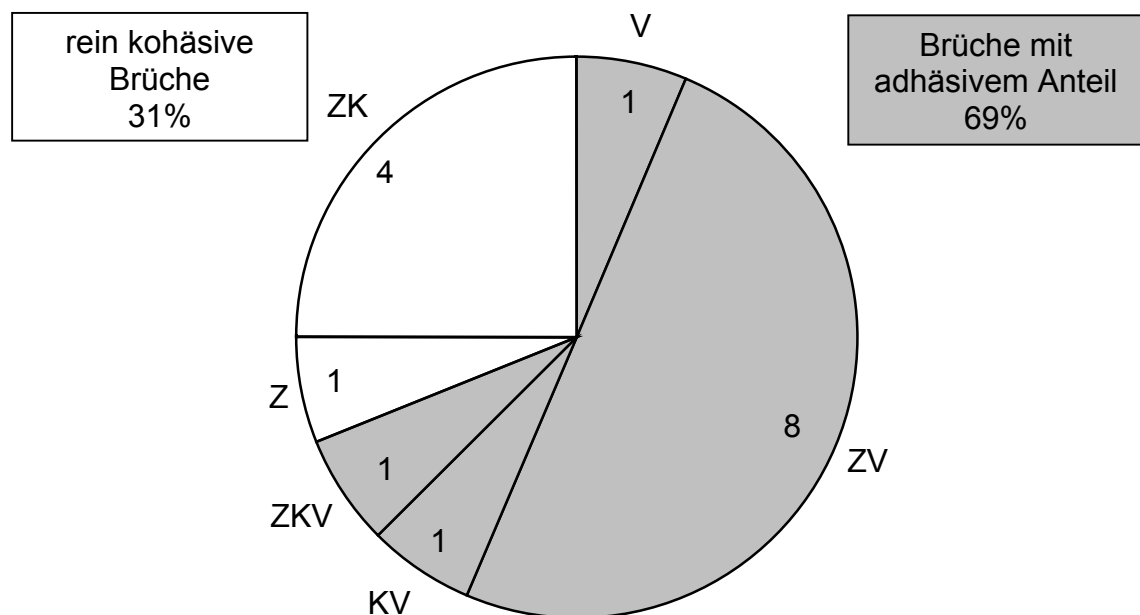


Abb. 20: Brüche mit adhäsivem Anteil bei 16 Prüfkörpern mit Verbundflächenwinkeln von 0° - 3° (Kontrollgruppe)

Im Biegeversuch nach DIN 13 914 zeigten Prüfkörper mit Verbundflächenwinkeln $< 3^\circ$ (Kontrollgruppe, n = 16) in 69% der Fälle Brüche mit adhäsivem Anteil, entweder nur entlang der Verbundfläche (V) oder unter Beteiligung des Zahnes (ZV), des Kunststoffes (KV) oder beider Komponenten (ZKV).

31% brachen rein kohäsiv durch den Zahn (Z) oder durch Zahn und Kunststoff (ZK). Die Verteilung ist in Abb. 20 dargestellt.

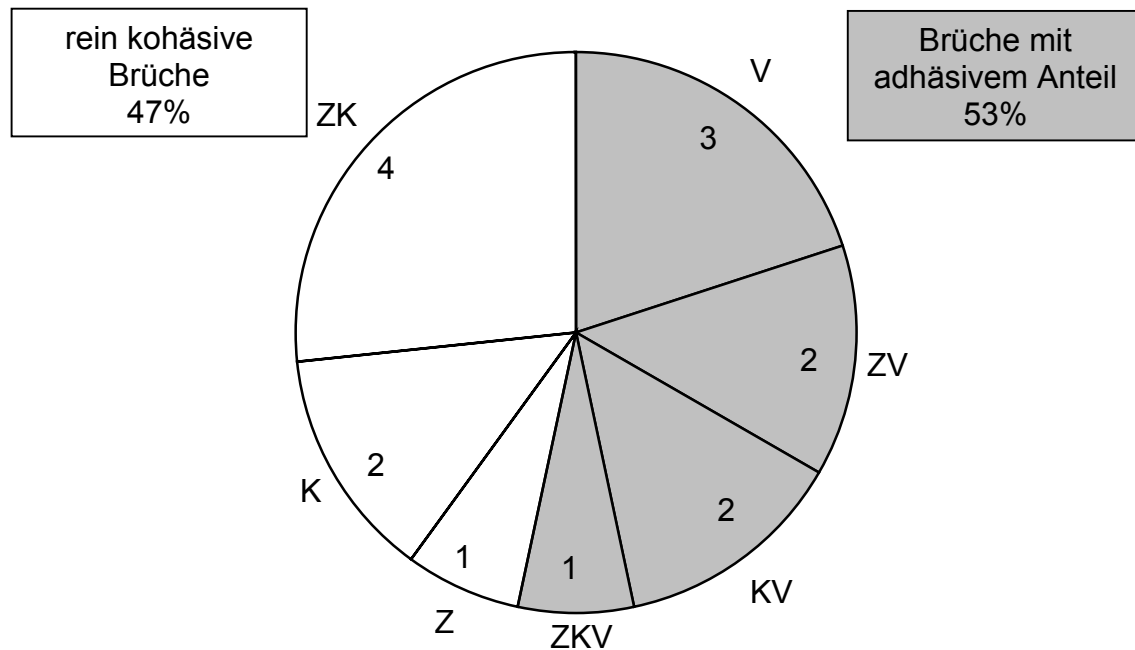


Abb. 21: Brüche mit adhäsivem Anteil bei 15 Prüfkörpern mit Verbundflächenwinkel von $3^\circ - 10^\circ$

Bereits bei Verbundflächenwinkeln von $3^\circ - 10^\circ$ ($n = 15$) sank die Häufigkeit von Brüchen mit adhäsivem Anteil auf 53%. Die Brüche verliefen entweder nur entlang der Verbundfläche (V) oder unter Beteiligung des Zahnes (ZV), des Kunststoffes (KV) oder beider Komponenten (ZKV).

47% der Prüfkörper brachen rein kohäsiv durch den Zahn (Z), den Kunststoff oder durch Zahn und Kunststoff (ZK). Die Verteilung ist in Abb. 21 dargestellt.

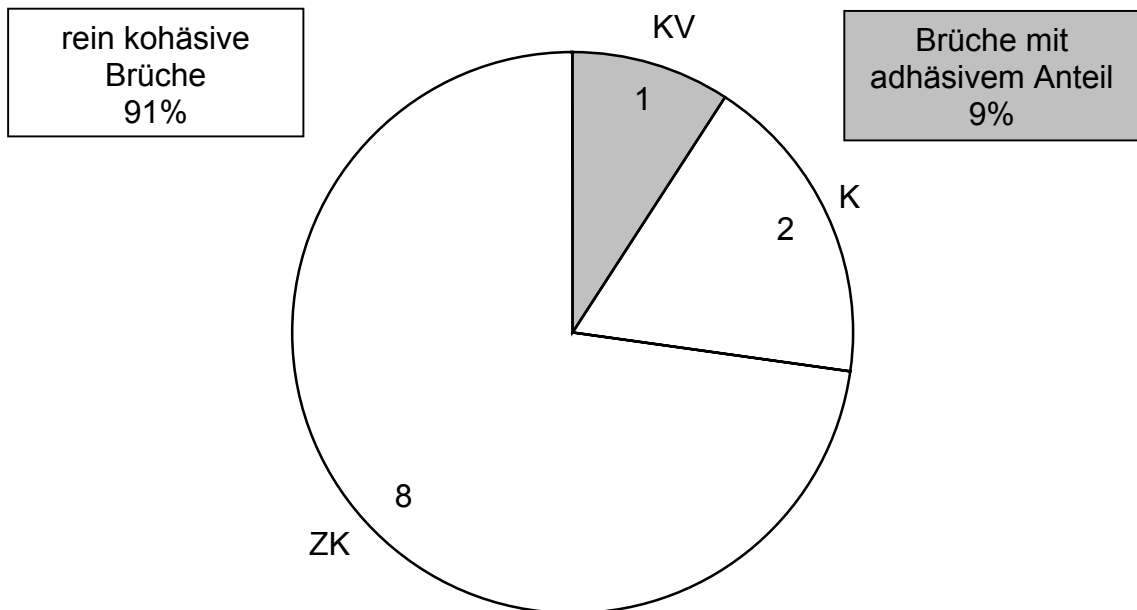


Abb. 22: Brüche mit adhäsivem Anteil bei 11 Prüfkörpern mit Verbundflächenwinkel von 10° - 42°

Prüfkörper mit Verbundflächenwinkeln von 10° - 42° ($n = 11$) brachen nur noch in 9% der Fälle mit adhäsivem Anteil unter Beteiligung des Kunststoffes (KV). 91% brachen rein kohäsiv durch den Kunststoff (K) oder durch Zahn und Kunststoff (ZK). Die Verteilung ist in Abb. 22 dargestellt.

Bei zunehmenden Verbundflächenwinkeln nahm die Häufigkeit von Brüchen mit adhäsivem Anteil ab, was auf eine Abnahme der Validität hindeutet.

4.1.4 Unterscheidungsvermögen der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 anhand der Diskrimination unterschiedlicher Zahnfabrikate

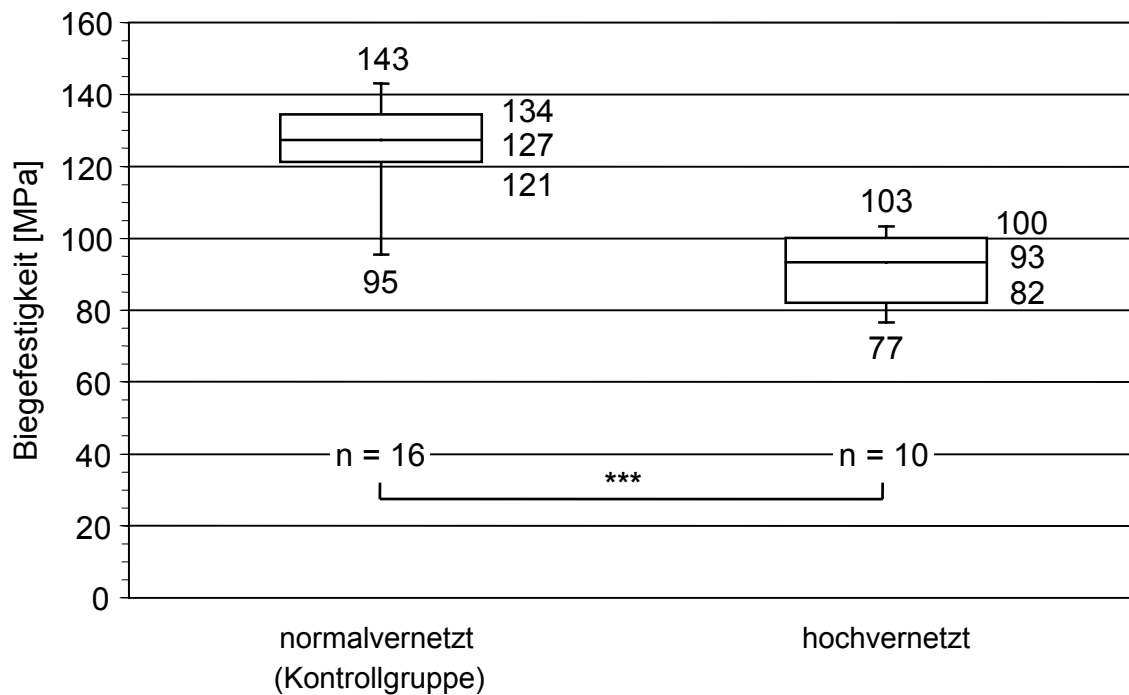


Abb. 23: Unterscheidung unterschiedlicher Zahnfabrikate

Zur Ermittlung des Unterscheidungsvermögens der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 wurden die normalvernetzten Zähne den hochvernetzten gegenübergestellt. Berücksichtigt wurden hier alle Prüfkörper mit Verbundflächenwinkeln $< 3^\circ$ aus der Kontrollgruppe der normalvernetzten ($n = 16$) und der hochvernetzten Zähne ($n = 10$). Es zeigt sich ein höchstsignifikanter Unterschied ($\alpha = 0,001$) der Biegefestigkeit bei normalvernetzten (NV) und hochvernetzten (HV) Zähnen. Die Ergebnisse sind in Abb. 23 dargestellt.

4.2 Versuche zu DIN EN ISO 3336

4.2.1 Validität der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 anhand der Häufigkeit von Brüchen mit adhäsivem Anteil

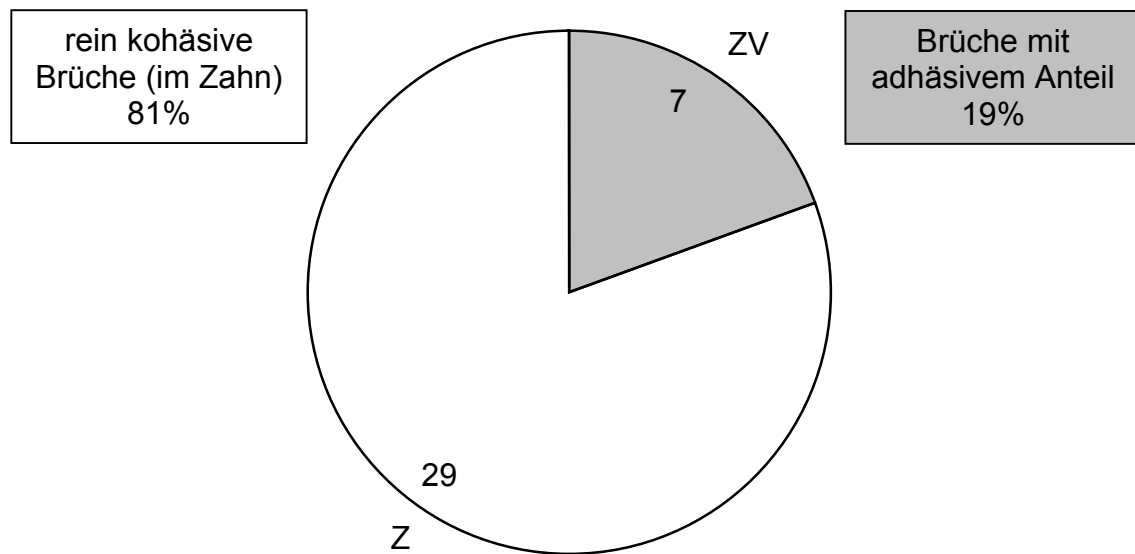


Abb. 24: Brüchen mit adhäsivem Anteil bei 36 Prüfkörpern nach DIN EN ISO 3336

Bei der Erfassung der Bruchverläufe wurde die Gesamtheit ($n = 36$) aller Prüfkörper mit normalvernetzten Zähnen berücksichtigt.

Lediglich 19% der Prüfkörper brachen mit adhäsivem Anteil im Bereich des Zahnes und der Verbundfläche (ZV), die übrigen 81% brachen rein kohäsiv im Zahn (Z). Kein einziger Prüfkörper brach ausschließlich entlang der Verbundfläche, wodurch nach DIN EN ISO 3336 das Versagen des Verbundes angezeigt wird. Dies deutet auf eine sehr geringe Validität hin. Die Verteilung ist in Abb. 24 dargestellt.

4.2.2 Unterscheidungsvermögen der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 anhand der Diskrimination unterschiedlicher Zahnfabrikate

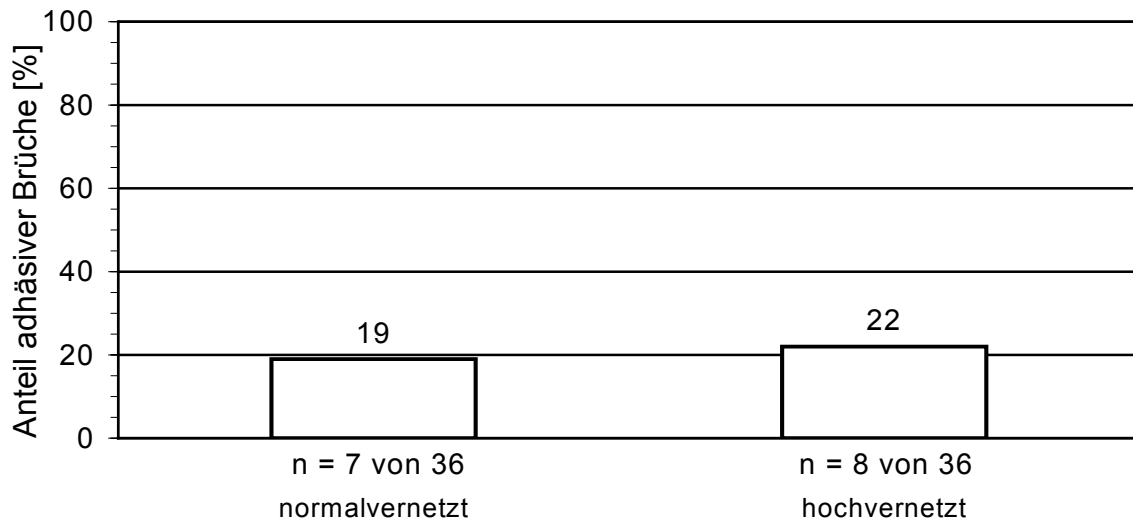


Abb. 25: adhäsive Bruchverläufe unterschiedlicher Zahnfabrikate

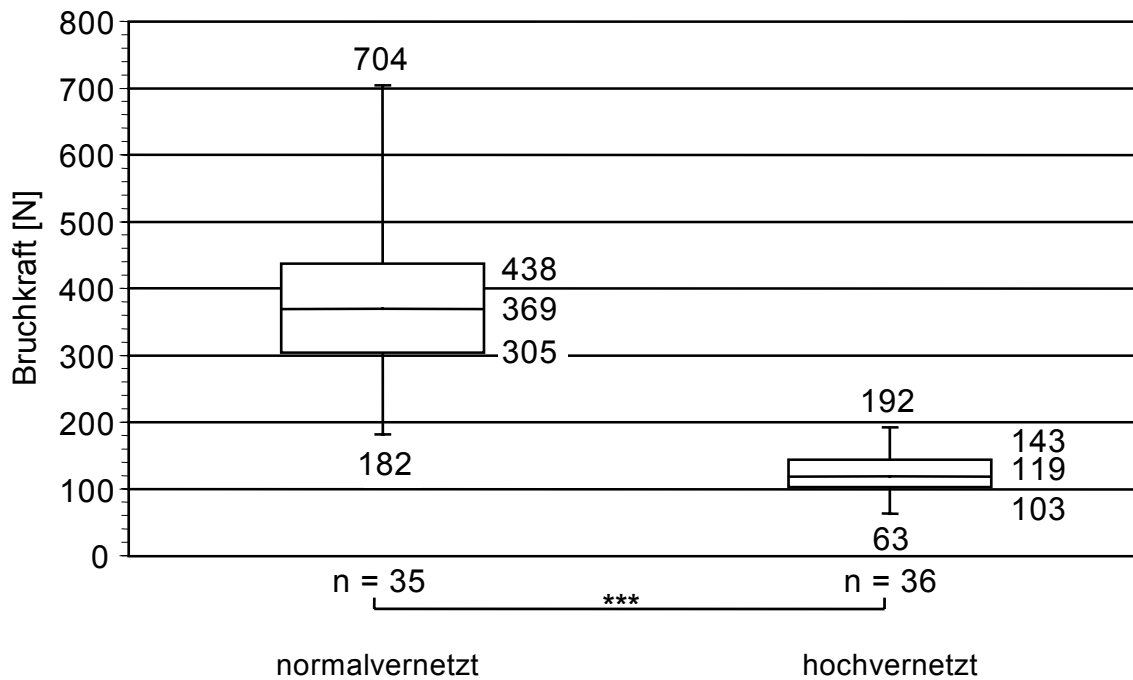


Abb. 26: Bruchkräfte unterschiedlicher Zahnfabrikate

Zur Ermittlung des Unterscheidungsvermögens der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 wurden Prüfkörper mit normalvernetzten ($n = 36$) und hochvernetzten ($n = 36$) Zähnen gegenübergestellt.

Der Anteil von Brüchen mit adhäsiver Charakteristik ist bei beiden Zahnfabrikaten nahezu gleich. Anhand des für die Prüfmethode nach DIN EN ISO 3336 vorgesehenen Kriteriums, nämlich des Bruchverlaufes, zeigen sich also keine nennenswerten Unterschiede in der Verbundfestigkeit zwischen normal- und hochvernetzten Kunststoffzähnen (Abb. 25).

Obwohl dies in der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 nicht vorgesehen ist, wurden hier auch die Bruchkräfte erfaßt und hinsichtlich der Zahnfabrikate differenziert (Abb. 26), wobei die Gesamtheit der nach DIN EN ISO 3336 durchgeführten Versuche berücksichtigt wurde, abzüglich eines Versuches, der aufgrund eines Meßfehlers verworfen wurde ($n = 71$).

Es wird ersichtlich, daß mit normalvernetzten Kunststoffzähnen (NV) deutlich höhere Bruchkräfte auftraten als mit hochvernetzten Kunststoffzähnen (HV). Der Unterschied ist auf dem 1-Promille-Niveau gesichert. ($\alpha = 0,001$)

4.2.3 Inkonsistente Meßergebnisse

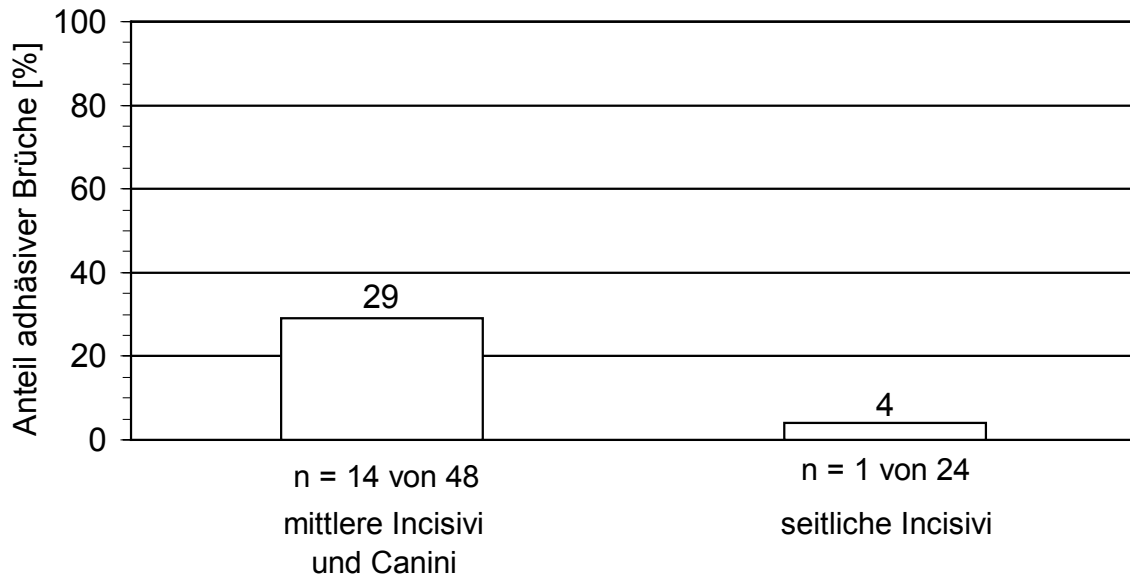


Abb. 27: adhäsive Bruchverläufe unterschiedlicher Zahnarten

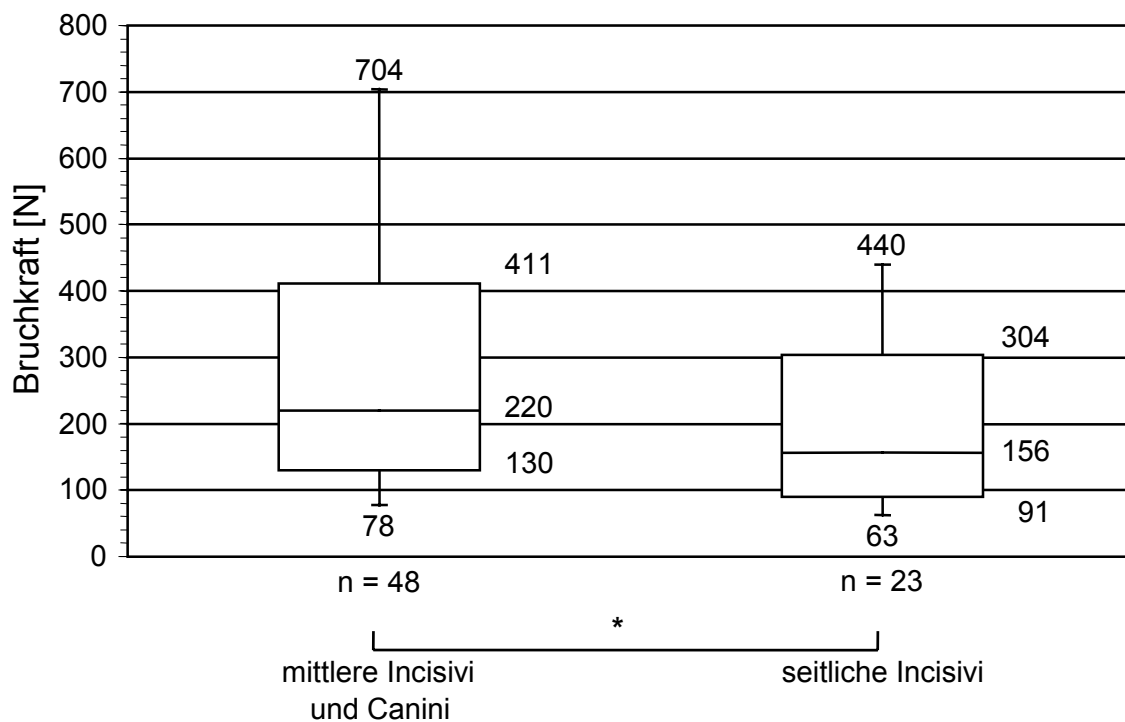


Abb. 28: Bruchkräfte unterschiedlicher Zahnarten

Differenziert man bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 die Zahnarten nach der Stärke der Schneidekante, so zeigt sich, daß bei Zähnen mit starker Schneidekante (mittlere Incisivi und Canini) erheblich häufiger Brüche mit adhäsiver Charakteristik vorkommen als bei Zähnen mit schwacher Schneidekante (seitliche Incisivi).

Aufgrund des Bruchverlaufs, des eigentlichen Prüfkriteriums der DIN EN ISO 3336, erscheinen mittlere Incisivi und Canini deutlich verbundschwächer als seitliche Incisivi, da adhäsives Versagen nach DIN EN ISO 3336 einen unzureichenden Verbund anzeigt (Abb. 27).

Obwohl dies in der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 nicht vorgesehen ist, wurden hier auch die Bruchkräfte erfaßt und hinsichtlich der Zahnart differenziert, wobei die Gesamtheit der nach DIN EN ISO 3336 durchgeführten Versuche berücksichtigt wurde, abzüglich eines Versuches, der aufgrund eines Meßfehlers verworfen wurde ($n = 71$).

Die Gruppe mit mittleren Incisivi und Canini zeigt höhere Bruchkräfte als die Gruppe mit seitlichen Incisivi (Abb. 28). Der Unterschied ist signifikant ($\alpha = 0,05$).

Bei einer Beurteilung auf Grundlage des nach DIN EN ISO 3336 vorgesehenen Kriteriums (Bruchverlauf) erscheinen also gerade Prüfkörper mit seitlichen Incisivi, die bei signifikant kleineren Bruchkräften versagen, wegen der kohäsiven Bruchcharakteristik besonders verbundstark.

4.3 Vergleich der Validität der Verbundfestigkeitsprüfungen nach DIN 13 914 und DIN EN ISO 3336 anhand der Häufigkeit von Brüchen mit adhäsivem Anteil

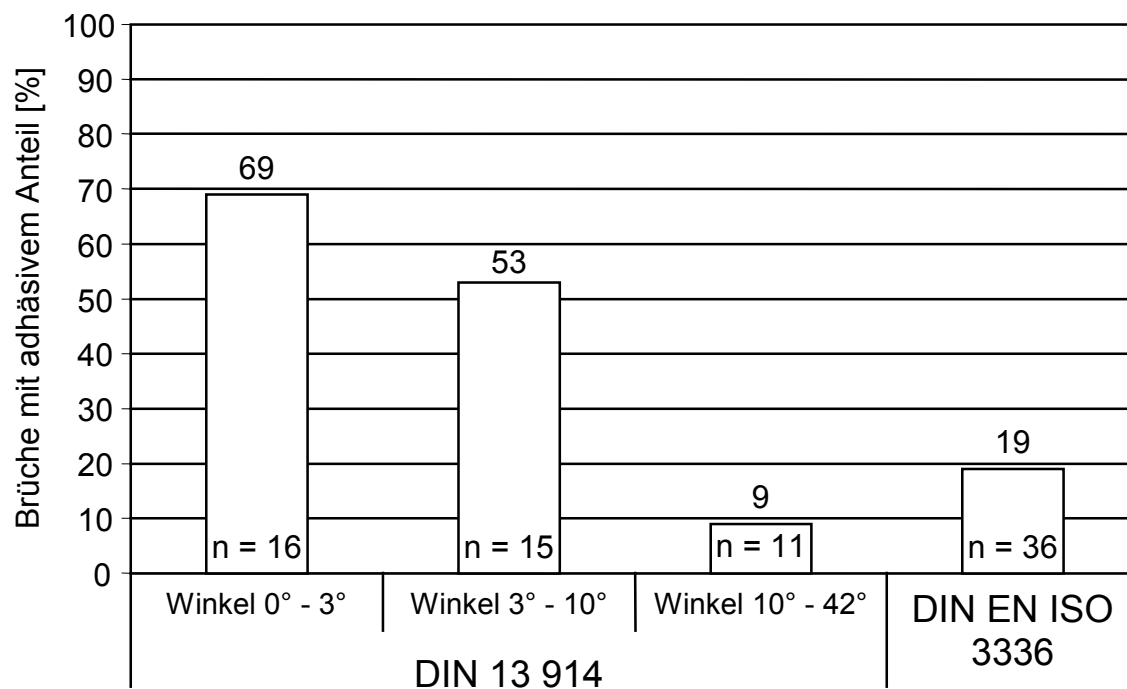


Abb. 29: Brüche mit adhäsivem Anteil bei der Prüfung nach DIN 13 914 und DIN EN ISO 3336 bei normalvernetzten Zähnen

Bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 zeigten, unter Berücksichtigung von Prüfkörpern mit Verbundflächenwinkeln $< 3^\circ$ ($n = 16$) aus der Kontrollgruppe der normalvernetzten Zähne, 69% der Prüfkörper Brüche mit adhäsivem Anteil. Dies deutet auf eine hohe Validität der Prüfmethode hin.

Bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 brachen nur 19% auf diese Weise, was eine geringe Validität dieser Prüfmethode nahelegt.

Die Häufigkeit von Brüchen mit adhäsivem Anteil nimmt jedoch auch bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 erheblich ab, wenn Prüfkörper mit größeren Verbundflächenwinkeln einbezogen werden, so daß die Validität zunehmend fraglicher wird (siehe Abb. 29).

4.4 Vergleich des Unterscheidungsvermögens der Verbundfestigkeitsprüfungen nach DIN 13 914 und DIN EN ISO 3336 anhand der Diskrimination unterschiedlicher Zahnfabrikate

Prüfvorrichtung, Prüfkörper und Prüfmethode gemäß:	Auswertung	Verbund normal- vernetzter Zähne erscheint	Verbund hoch- vernetzter Zähne erscheint	Diskrimination
DIN 13 914 (Dreip.-Biegevers.)	quantitative Auswertung gemäß DIN 13 914: Bestimmung der Biegefestigkeit F/A (Bruchkraft F/ Fläche A)	stärker	schwächer	ja
DIN EN ISO 3336 (Zugversuch)	qualitative Auswertung gemäß DIN EN ISO 3336: Klassifizierung des Bruchverlaufs (rein kohäsiv <> adhäsiv)	nahezu gleich		nein
	quantitative Auswertung im Rahmen dieser Untersuchung: Bestimmung der Bruchkraft F	stärker	schwächer	ja

Tab. 15: Vergleich des Unterscheidungsvermögens

Bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 zeigten normalvernetzte Kunststoffzähne gegenüber hochvernetzten Kunststoffzähnen signifikant höhere Biegefestigkeiten.

Bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 traten Brüche mit adhäsivem Anteil bei normalvernetzten und hochvernetzten Kunststoffzähnen

mit gleicher Häufigkeit auf. Bei vorschriftsmäßiger, rein qualitativer Auswertung anhand des Bruchverlaufes waren keine Unterschiede zwischen den untersuchten Zahnsorten erkennbar.

Bei der nicht vorgeschriebenen, jedoch zusätzlich durchgeführten Messung der dabei aufgetretenen Bruchkräfte zeigten die normalvernetzten Zähne, wie in der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914, signifikant höhere Werte (siehe Tab. 15).