

**„Der Haftmechanismus von
Galvano-Doppelkronen-Systemen
und seine Beeinflussbarkeit durch
Zwischenflüssigkeiten“**

Dissertation

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

vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Schiller-Universität Jena

von **Jan Rößler**

geboren am **26. März 1978** in Jena

Gutachter:

1. Prof. Dr. D. Welker, Jena
2. PD Dr. J.-D. Schnapp, Jena
3. Prof. Dr. J. Geis-Gerstorfer, Tübingen

Tag der öffentlichen Verteidigung:

3. Mai 2005

I Verzeichnis der Abkürzungen und Hinweise

Stellenweise stehen dieselben Buchstaben sowohl für eine Abkürzung einer Einheit als auch einer Variable. Um Übersichtlichkeit beim Lesen des Textes zu erreichen, wurden deshalb unterschiedliche Formatierungen verwendet:

Literaturverweise werden *kursiv* dargestellt, *Variablen* erhalten eine andere Schriftart und erscheinen ebenfalls *kursiv*.

Mathematisch-physikalische Zusammenhänge werden in eckigen Klammern fortlaufend nummeriert (»[Formel]«), um Verweise zu ermöglichen.

Eigene sprachliche Abkürzungen

SI	International standardisierte Einheit
UK 3	Unterkiefer-Eckzahn
UK 6	1. Unterkiefer-Molar

Organisationen, Markennamen und Studien

AGC®	Auro-Galva-Crown®-System (Fa. Wieland, Pforzheim)
DGZPW	Deutsche Gesellschaft für zahnärztliche Prothetik e. V.
DMS III	Dritte Deutsche Mundgesundheitsstudie des IDZ
FSU	Friedrich-Schiller-Universität (Jena)
IDZ	Institut der Deutschen Zahnärzte
MD	Marburger Doppelkrone

Materialkennzeichnungen und chemische Größen

Co	Kobalt
Cr	Chrom
M1500	Mischung aus N1000 und N10000 mit einer Nennviskosität von 1500 mPas
M3000	Mischung aus N1000 und N10000 mit einer Nennviskosität von 1500 mPas
Mo	Molybdän
N1000	Neutralöl mit einer Nennviskosität von 1000 mPas
N10000	Neutralöl mit einer Nennviskosität von 10000 mPas
N2000	Neutralöl mit einer Nennviskosität von 2000 mPas
N350	Neutralöl mit einer Nennviskosität von 350 mPas
NEM	Nichtedelmetallhaltige Legierung (Chrom-Kobalthaltig)

Ni	Nickel
pH	pH-Wert (Protonensättigung einer Lösung)
V1000	Vinylöl mit einer Nennviskosität von 1000 mPas
V200	Vinylöl mit einer Nennviskosität von 200 mPas
V _{2A}	rostfreier Edelstahl
V50	Vinylöl mit einer Nennviskosität von 50 mPas

Physikalische und technische Einheiten

°	Grad
° C	Grad Celsius
µm	Mikrometer
cm ²	Quadratcentimeter
HV _{5/30}	Vickershärte, ermittelt bei 30-sekündiger Belastung mit 5 Kilogramm Auflast
min	Minute
mm	Millimeter
mm ²	Quadratmillimeter
mPas	Millipascalsekunde
N	Newton. Wo Kräfte in der Einheit „Pond“ angegeben waren, wurden die Werte näherungsweise mit 1 Pond ≈ 0,1 N in die SI-Einheit Newton umgerechnet.
Pa	Pascal
s	Sekunde

Physikalische und mathematische Variablen

α_k	„Kegelwinkel“ [°] nach der Bezeichnung von <i>Körper (1968)</i> . Wird von ihm zur Quantifizierung des halb so großen „Konuswinkels“ ($\frac{\alpha_k}{2}$) verwendet, der die Konizität einer Konuskronen beschreibt. Der Index „k“ wurde vom Autor zur Abgrenzung gegenüber der Definition „Konvergenzwinkel“ nach <i>Lenz (1983)</i> hinzugefügt.
α_l	„Konvergenzwinkel“ [°] nach der Definition von <i>Lenz (1983)</i> . α_l bezeichnet die Neigung der Mantelfläche zur Symmetrieachse einer Krone oder einer schiefen Ebene zur Horizontale. Der Konvergenzwinkel dient als Grundlage eigener Überlegungen,

wird jedoch vom Autor als „ β “ gekennzeichnet, um Verwechslungen vorzubeugen und darf nicht mit dem Konuswinkel ($\frac{\alpha_k}{2}$) nach *Körber (1968)* verwechselt werden. Der Index „l“ kennzeichnet diese Unterscheidung.

- β „Konvergenzwinkel“ [°], also α_l . Die Verwendung von β , statt des sonst üblichen α , soll lediglich vor Verwechslungen mit dem Kegelwinkel schützen.
- Δd Abstand [m] der Zwischenschichten einer laminaren Strömung
- Δd_s Änderung der Weite des Fügespalt [m]
- Δp Druckdifferenz
- Δv „Relativgeschwindigkeit“ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] zwischen Zwischenschichten einer laminaren Strömung
- $\dot{\gamma}$ „Schergrad“ [s^{-1}]
- η „Viskosität“ [mPas]
- $\bar{\eta}$ „mittlere Viskosität“ [mPas]
- ρ_0 „Grenzhaftungswinkel“ [°]. Wird dieser unterschritten, bleibt ein Körper auf einer schiefen Ebene liegen oder eine Konuskronen beginnt zu haften.
- σ „Oberflächenspannung“ [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
- τ „Schubspannung“ [Pa]
- A Flächeninhalt [m^2]
- A_M Flächeninhalt der „Mantelfläche“ [mm^2]
- A_O Flächeninhalt der „Okklusalfäche“ [mm^2]
- d_s Abstand [m] der Begrenzungsflächen, entspricht der Weite des Fügespalt
- d_u „Basisdurchmesser“ [mm], Durchmesser am zervikalen Ende der Konuskronen
- d_w „Wandstärke der Außenkronen“ [mm]
- F „Fügekraft“ [N], mit der die Außenkronen auf die Innenkronen gesetzt wird. Sie wird experimentell durch die Auflast vorgegeben. F entspricht L_k und F_F .

- F_A „Abzugskraft“ [N] im Konushaftungs-Modell nach *Stenzel et al. (1980)*
- F_{Ad} „Adhäsionskraft“ [N], Kraft, die aufgebracht werden muss, um die Adhäsion zu überwinden
- F_F „Fügekraft“ [N] im Konushaftungs-Modell nach *Stenzel et al. (1980)*. F_F entspricht F und L_k .
- F_R „Innere Reibungskraft“ [N]
- G „Gravitationskraft“ [N]
- h „Kronenhöhe“ [m]
- h_p „Spaltweite“, entspricht der Plattendistanz und damit d_s [m]
- L „Lösekraft“ [N] nach der Definition von *Lenz (1983)*. Sie findet bei der Angabe eigener Ergebnisse Verwendung. L entspricht F_A .
- \bar{L} Mittelwert von L
- l „Rohr-“ bzw. „Spaltlänge“ [m]
- L_σ Anteil der Oberflächenspannung [N] an L_A
- L_A Anteil der Adhäsion [N] an der Gesamtlösekraft
- L_{hydr} Anteil hydraulischer Effekte [N] an der Gesamtlösekraft
- $L_{hydr,max}$ Maximalwert von L_{hydr} [N]
- L_k „Fügekraft“ [N] nach der Bezeichnung von *Körber (1968)*. Der Index „ k “ dient zur Abgrenzung gegenüber der Lösekraft (L) nach der Definition von *Lenz (1983)*. L_k entspricht F und F_F .
- N „Normalkraft“ [N]. Sie entsteht senkrecht zur Berührungsfläche und verhindert ein Eindringen des aufliegenden Körpers.
- P „Anpresskraft“ [N], senkrecht zur Mantelfläche wirkende Kraft, hervorgerufen durch das Fügen der Doppelkrone
- $p_{1,2}$ Druck [Pa] an den Rohrenden
- p_{Atm} „Luftdruck“ [Pa]
- p_{Dampf} „Dampfdruck“ [Pa]
- R „Rohrdurchmesser“ [m]
- RF_A „Reibungsfaktor“ [dimensionslos] im Konushaftmechanismus-Modell nach *Stenzel et al. (1980)*, abhängig von Konizität und Haftungskoeffizient (μ_0)
- r_o „oberer Radius“ der Krone [mm]

- r_u „unterer Radius“ der Krone [mm], also $\frac{1}{2} d_u$
- s „Standardabweichung“
- s_f „Fügestrecke“ [m]. Größe der vertikalen Absenkung der Außenkrone unter der Fügelast
- s_r relative Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert [%]
- s_v „Verzögerungsstrecke“ [mm], die zurückgelegt wird bis von der Universalprüfmaschine bei Abzugsmessungen die wirksame Kraft registriert wird
- T „Haftungskraft“ oder „Tangentialkraft“ [N]. Da sie parallel zu den sich berührenden Flächen, statt zur Symmetrieachse, wirkt, darf sie nicht mit der Haftkraft (L) gleichgesetzt werden.
- T_0 „maximale Haftreibung der Ruhe“ [N] in der Definition nach *Körber (1968)*. Sie entspricht Haftungskraft (T).
- t_v „Verzögerungszeit“ [s], bis die Universalprüfmaschine die auftretende Kraft registriert hat
- u „Umfang“ [m]
- \bar{u} „mittlerer Umfang“ [m]
- \dot{V} „Volumenstrom“ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
- \dot{V}^* „Volumenstrom“ pro Meter Spaltbreite [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
- \dot{V} Volumenstrom [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
- v_l „Abzugsgeschwindigkeit“ [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
- w „Strömungsgeschwindigkeit“ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
- w_0 Geschwindigkeit [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], mit der eine Platte im Gleitlager verschoben wird
- W_{Ob} „Oberflächenenergie“ [J]
- x, y Koordinaten zur Beschreibung der Position innerhalb der Strömung
- x° Faktor [dimensionslos], laut eigener Definition, um den die Lösekraft kleiner als die Fügekraft ist. x° wird zur einfacheren Darstellung der Zusammenhänge benutzt.

II Inhaltsverzeichnis

I	Verzeichnis der Abkürzungen und Hinweise.....	I
II	Inhaltsverzeichnis.....	VI
III	Zusammenfassung.....	X
1	Einleitung	1
1.1	Entwicklungen des prothetischen Behandlungsbedarfs.....	1
1.2	Halteelemente in der Teilprothetik.....	3
1.2.1	Funktionen und Anforderungen bei Verankerungselementen.....	4
1.3	Standortbestimmung der Doppelkronen	5
1.3.1	Teilprothetische Konstruktionsrichtlinien.....	6
1.3.2	Parameter des Verlustrisikos von Pfeilerzähnen	7
1.3.3	Erfolge im Vergleich zu anderen Verankerungselementen.....	8
1.3.4	Ästhetik.....	10
1.3.5	Problem - Spaltkorrosion	11
1.4	Werkstoffe und Technologien bei kombiniertem Zahnersatz.....	12
1.4.1	Galvanoforming	12
1.4.2	Methoden für „Galvano-Doppelkronen“	15
1.5	Die Notwendigkeit eines definierten Haftverhaltens	18
1.5.1	Differenzierung der Verankerungselemente in Haft- und Stützanker	19
1.6	Haftmechanismen in der Doppelkronen-Prothetik	20
1.6.1	Retention durch Friktion.....	21
1.6.2	Zusätzliche retentive Elemente.....	22
1.6.3	Die Konushaftung	23
1.6.4	Auswirkungen von Flüssigkeiten im Fügespalt	27
1.6.5	Thesen zum Haftmechanismus galvanogeformter Doppelkronen	28
1.6.6	Offene Fragen zum Haftmechanismus von Galvanodoppelkronen.....	28
2	Ziele der Arbeit.....	30
2.1	Zu evaluierende Parameter	30
2.2	Die Notwendigkeit separater Betrachtung	31

3	Methodik	32
3.1	Hinweise zu den verwendeten Definitionen	32
3.1.1	Geometrische Form	32
3.1.2	Kraftwirkungen.....	33
3.2	Der Versuchsaufbau zur Messung der Haftkraft	34
3.2.1	Der allgemeine Versuchsaufbau.....	35
3.2.2	Die Primärprüfkörper	36
3.2.3	Galvanisieren der Sekundärkronen	38
3.2.4	Das Messinstrument	40
3.2.5	Der Versuchsablauf	40
3.3	Verwendete Zwischenmedien	42
3.3.1	Viskositätsbestimmung der verwendeten Zwischenmedien.....	43
3.4	Erste orientierende Testserie	43
3.5	Abzugsgeschwindigkeitstest	44
3.6	Bestimmen der Kaugeschwindigkeit	44
3.7	Geschwindigkeitsträgheits-Kontrolle	44
3.8	Die Hauptmessreihen	45
3.9	Prüfmethoden zur Beurteilung der Teilkomponenten	46
3.9.1	Der Einfluss der Mantelfläche	46
3.9.2	Der Einfluss von Kohäsion und Adhäsion	46
3.9.3	Der Einfluss innerer und äußerer Reibung.....	47
3.10	Wasser-Speichel-Öl-Kombinationstest	47
3.11	Anstoßen einer klinischen Eignungsprüfung	48
3.12	Statistische Auswertung der ermittelten Daten	51
4	Ergebnisse	53
4.1	Viskositätsbestimmungen	53
4.2	Erste orientierende Testserie	54
4.2.1	Kompensation von Haftungsunterschieden durch Zwischenmedien.....	55
4.2.2	Auswirkungen von künstlichem Verschleiß.....	56
4.2.3	Lösekräfte bei Doppelkronen mit Spielpassung.....	57
4.3	Prüfen des Geschwindigkeitseinflusses	57
4.4	Die Geschwindigkeitsträgheit der Messmaschine	58
4.5	Abschätzen der in vivo wirkenden Abzugsgeschwindigkeit	60

4.6	Abzugsmessungen zur Beurteilung der Gesamthaftung	61
4.6.1	Lösekräfte in Abhängigkeit von der Viskosität	63
4.6.2	Lösekräfte in Abhängigkeit von der Abzugsgeschwindigkeit	66
4.7	Lösekräfte bei Prüfkörpern ohne okklusale Deckel	68
4.8	Der Einfluss der Adhäsion auf das Haftverhalten	69
4.9	Wasser-Speichel-Öl-Kombinationstest	70
5	Diskussion	72
5.1	Fehlerdiskussion	72
5.1.1	Zufällige Fehler	72
5.1.2	Systematische Fehler	73
5.2	Der Einfluss der Reibung	75
5.2.1	Äußere Reibung - Friktionsverbindungen	75
5.2.2	Bezug eigener Ergebnisse zur Friktion	76
5.2.3	Auswirkungen durch benetzende Flüssigkeiten.....	77
5.2.4	Schlussfolgerungen zur Friktion.....	77
5.2.5	Innere Reibung	77
5.3	Konuspassung	78
5.3.1	Theoretische Modelle und Haftungsbedingungen.....	78
5.3.2	Anwendung auf direkt galvanisierte Konuskronen	80
5.4	Der Einfluss von Kohäsion und Adhäsion	82
5.4.1	Verdampfungs- und Oberflächenenergie.....	82
5.4.2	Grenzflächenspannungen.....	83
5.4.3	Oberflächenspannung	84
5.4.4	Der Einfluss der geometrischen Form aus Sicht der Adhäsion.....	85
5.4.5	Einbeziehung eigener Ergebnisse	86
5.4.6	Störungen	87
5.5	Hydraulische Effekte	87
5.5.1	Anwendung der Strömungslehre auf die Doppelkrone.....	88
5.5.2	Die Doppelkronen-Unterdruck-Formel	90
5.5.3	Maximum der unterdruckbedingten Lösekraft.....	91
5.5.4	Die Beeinflussbarkeit der hydraulischen Haftung	92
5.6	Zusammenfassende Betrachtung	95
5.6.1	Mathematische Funktion der Gesamtlösekraft.....	96
5.6.2	Mögliche Empfehlungen	96

5.6.3	Lösekraftsummation	97
5.6.4	Lösekraft-Verläufe	97
5.6.5	Verschleißminimierung	98
5.6.6	Anwendbarkeit von Silikonölen in der Mundhöhle	98
6	Schlussfolgerungen	99
7	Literatur- und Quellenverzeichnis	101
8	Anhang	114
8.1	Werte-Tabellen	114
8.2	Signifikanz-Tabellen	127
8.2.1	Signifikanzen zwischen Abzugsgeschwindigkeiten	128
8.2.2	Signifikanzen zwischen Zwischenflüssigkeiten	129
8.2.3	Signifikanzen geometrischer Parameter	130
8.2.4	Signifikanzen zwischen Wasser-Öl-Mischungsverhältnissen	131
8.2.5	Signifikanzen der Mantelprüfkörper-Tests	131
8.2.6	Signifikanzen zwischen Adhäsionsmessungen	132
8.3	Mathematische Ableitungen	133
8.3.1	Geometrie der Prüfkörper	133
8.3.2	Kraft zum Überwinden der Oberflächenspannung	134
8.3.3	Einfluss der Präparationsform auf die Adhäsion	134
8.3.4	Hydraulischer Effekt beim Doppelkronenabzug	135
8.4	Regressionen	138
8.4.1	Adhäsionstest	138
8.5	Lebenslauf	139
8.6	Danksagung	140
8.7	Ehrenwörtliche Erklärung	141

III Zusammenfassung

Wissenschaftlicher Hintergrund und Ziele dieser Arbeit

Erwartete demographische Veränderungen führen dazu, dass der Teilprothetik in den nächsten 20 bis 30 Jahren, trotz zunehmender Erfolge in der präventiven Zahnheilkunde, eine große Bedeutung zukommen wird. Die Doppelkrone, als eines ihrer Halteelemente, ist im reduzierten Restgebiss indiziert und vereint durch ihre physiologische axiale Pfeilerzahnbelastung, ihre guten parodontalhygienischen Gestaltungsmöglichkeiten und die gleichzeitige Erfüllung aller an Verankerungselemente gestellten Funktionen viele Vorteile in sich. Nachteilig ist der Effekt „Spaltkorrosion“, der durch ein Belüftungselement entsteht und hauptsächlich an der Innenseite der Außenkrone stattfindet. Durch Biokompatibilität und Präzision ist das Galvanoforming zum Abscheiden von gewebefreundlichem, korrosionsfestem Feingold besonders vorteilhaft. Zahlreiche Autoren beschreiben gute Erfahrungen mit Galvano-Doppelkronen, ohne jedoch auf ihren Haftmechanismus einzugehen. Die Haftkraft soll bei Halteelementen im Bereich von 5 bis 10 N liegen, um ausreichend Retention gegen abziehende Kräfte beim Kauen klebriger Speisen zu bieten, ohne jedoch den Zahnhalteapparat beim Ausgliedern zu schädigen. Ziel dieser Arbeit war es, die Parameter, die die Haftkraft beeinflussen und das Haftprinzip zu untersuchen, das sich von denen der vorwiegend durch Verkeilung haltenden gegossenen Konuskronen unterscheidet.

Methodik

Analog der praxisnahen Innenkronenformen wurden sechs verschiedene Primärprüfkörper feinmechanisch aus V₂A hergestellt:

- Zylinderteleskope mit 6,5 mm, 4,5 mm und 9,0 mm Durchmesser sowie
- Konuskronen mit 2°, 4° und 6° Konvergenzwinkel mit dem Basisdurchmesser von 6,5 mm.

Auf diese wurden mit dem AGC[®]-Verfahren Feingoldkappchen galvanisiert. In einer speziellen Versuchsanordnung konnten diese Doppelkronenpaare in einer Universalprüfmaschine (Zwick 1435) unter Aufzeichnung von Kraft-Weg-Diagrammen mit variablen Abzugsgeschwindigkeiten abgezogen werden. Die Kraft, die benötigt wird, um die Kronen zu trennen, wird hier nicht, wie üblich Haftkraft, sondern Lösekraft (L) genannt, um Verwechslungen mit der tangential wirkenden Haftungskraft (T_0) zu vermeiden. Neben dem Trockenabzug wurden vor dem Fügen verschiedene Flüssigkeiten mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften

ten in die Außenkronen gegeben.

Verwendet wurden Wasser, künstlicher Speichel (Glandosane[®]), Rapsöl und verschiedene synthetische Silikonöle. Deren Viskositäten wurden rheologisch bestimmt (RS 100, Haake). Die Kieferöffnungsgeschwindigkeit wurde gemessen und die Messgenauigkeit der Prüfvorrichtung kontrolliert.

Ergebnisse, Diskussion und Schlussfolgerungen

Eine Friktion, die in der Literatur immer wieder für die Haftung von AGC[®]-Doppelkronenhaftung verantwortlich gemacht wird, kann bei direkt galvanisierten Doppelkronen aufgrund des Fügspaltes, der der Stärke der Leitsilberschicht entspricht, nicht wirksam werden. Konuspassung ist aus trigonometrischer Sicht ebenfalls nicht vorhanden. Adhäsion kann prinzipiell auftreten, macht allerdings nur ca. 1 % der Gesamtlösekraft aus. Der Haftmechanismus beruht im Wesentlichen auf einem hydraulischen Effekt: Bei Kronenabzug entsteht aufgrund des Strömungswiderstandes der Zwischenflüssigkeit im Fügspalt ein Unterdruck, so dass der äußere Luftdruck die Deckelfläche auf das Primärteil presst. Bei wässrigen Medien, wie Speichel, begrenzt der Dampfdruck den möglichen Unterdruck. Daher erbringen Silikonöle höhere Haftungswerte. Die Viskosität der Zwischenflüssigkeit bestimmt nicht die Größe der Lösekraft, sondern die Abzugsgeschwindigkeit, die benötigt wird, um die maximale hydraulische Wirkung zu entfalten. Dies trifft unter klinischen Bedingungen immer zu. Die Weite des Fügspaltes wirkt sich hierbei in dritter Potenz negativ aus. Einer verschleißbedingten Verbreiterung des Spaltes kann durch die Verwendung von Silikonölen wirksam begegnet werden. Wasser und Speichel können keine zuverlässige Retention bieten. Silikonöle im Bereich von 200 bis 1000 mPas erbringen eine Lösekraft von ca. 3 N pro Anker. Gegen die Anwendung von Silikonölen bestehen keine biologischen Bedenken. Aus geometrischer Sicht ist der Durchmesser der Innenkronen von entscheidender Bedeutung. Höhe und Konizität haben weniger Einfluss. Es ist wichtig, eine ausreichende Deckelfläche zu präparieren, was sich durch einen geringen Konvergenzwinkel von 2° am sinnvollsten realisieren lässt.

Bei unzureichender oder verlorengangener Retention können Silikonöle, aber auch Rapsöl, dem Patienten zuverlässig helfen. Dabei sollte die Lösekraft-Sumation beachtet werden und bei mehr als vier Pfeilern eine Unterscheidung in Haft- und Stützanker erfolgen.

1 Einleitung

Schon Pierre Fauchard stellte fest, dass die Zähne nicht nur „zur Erhaltung der Gesundheit wichtig“, sondern auch „für die Aussprache und Artikulation der Worte und zur Zierde des Gesichts absolut notwendig“ sind (*Fauchard 1728: S. 37*). Das Behandlungsziel prothetischer Zahnheilkunde ist es, strukturelle Schäden und Defekte sowie funktionelle Störungen im orofazialen Organ zu kompensieren und weitere zu verhüten, statt sich allein auf die Wiederherstellung der mastikatorischen, phonetischen und physiognomischen Funktion zu beschränken (*Weiskopf 1991, Strub et al. 1999*). Zur Wiederherstellung des Kauorgans gehören neben der Behandlung von Erkrankungen der Zahnhartsubstanzen, des Zahnhalteapparates, der Mundschleimhaut und der Kieferknochen sowie deren Folgeerkrankungen und der Wiederherstellung einer funktionstüchtigen Zahnreihe auch die Beseitigung bzw. Linderung bereits eingetretener Schäden der Kiefergelenke und der Kaumuskelatur. Zu deren Prävention müssen parafunktionelle Reize ausgeschaltet und neuromuskuläre Fehlbelastungen vermieden werden (*Körber 1987*).

Demzufolge kommt der individuell richtigen Auswahl der Konstruktions- und Halteelemente sowie der zu verwendenden Materialien bei der Konzeption eines anzufertigenden Zahnersatzes eine entscheidende Bedeutung zu.

1.1 Entwicklungen des prothetischen Behandlungsbedarfs

Bislang gibt es nur unzureichende Erkenntnisse, die es ermöglichen, den normativen Bedarf an zu ersetzenden Zähnen objektiv einzuschätzen. Das Wissen, in welchen Fällen zur Vermeidung von Folgeschäden Zähne ersetzt werden müssen und wo das Konzept vom verkürzten Zahnbogen eine sinnvolle Alternative darstellt, ist gegenwärtig beschränkt und erlaubt der prothetischen Zahnheilkunde nur eine relativ freie Interpretation (*Bergman 1999*). Beispielsweise sind die Faktoren der Elongation antagonistischer Zähne immer noch nicht restlos geklärt. So beschreiben *Kiliaridis et al. (2000)*, dass bei weitem nicht alle antagonistischen Zähne elongieren. Andererseits kann man nicht allein aus dem normativen auf den tatsächlichen Bedarf schließen, da dieser zum einen nicht exakt mit dem subjektivem Empfinden der Patienten übereinstimmt, das sich nach Ansicht von *Bergman (1999)* stark nach den Gesichtspunkten der Ästhetik und des Einsatzes von Materialien mit gutem Ruf hinsichtlich ihrer biologischen Unbedenklichkeit richtet und zum anderen durch die Frage der Finanzierung der Therapie beeinflusst wird.

Bei einer Studie an älteren Patienten einer Würzburger Klinik 1999 (*Stark et al.*) stellte sich heraus, dass 80 % der durchschnittlich 77,5-Jährigen Prothesen tragen, 55 % an Karies und 70 % an Parodontopathien leiden. 40 % der Teil- und Totalprothesen waren nachsorgebedürftig. Etwa jedem fünften Patienten wurde angeraten, diese erneuern zu lassen. Gegenwärtig scheint somit genügend Bedarf an prothetischen Leistungen vorzuliegen.

Die *Bundeszahnärztekammer (1996)* formulierte Mundgesundheitsziele für die Jahre 2000 und 2010. Demnach sollten 2000 weniger als 2 % der 35-44-Jährigen und weniger als 20 % der 65-74-Jährigen zahnlos sein. Für 2010 werden für die entsprechenden Altersgruppen weniger als 1 % bzw. weniger als 15 % Zahnlosigkeit angestrebt. Das Ziel der WHO für 2010, eine Zahnlosigkeit von weniger als 5 % für die letztere Altersgruppe zu erreichen, erscheint für Deutschland utopisch (*Bundeszahnärztekammer 1996, Schroeder 2001*).

Die Dritte Deutsche Mundgesundheitsstudie (*IDZ 1999*) stellte fest, dass 1997 nur 0,8 % der 35-44-Jährigen naturgesunde Gebisse hatten. Dieser Zustand konnte nur noch bei 0,3 % der 65-74-Jährigen gefunden werden. Im Mittel fehlten ihnen 17,6 Zähne, wobei nur 24,8 % völlig zahnlos waren. Das bedeutet andererseits, dass etwa drei von vier Senioren teilprothetischen Zahnersatz benötigen.

Lenz (1998a) bestätigt diesen Trend: Je nach Alter und Kiefer sieht er für 7,3 - 21,0 % der über 55-Jährigen die Notwendigkeit, Teilprothesen neu anzufertigen.

Somit sind Studien, wie die hier vorliegende, die sich mit der Qualitätsoptimierung teilprothetischer Therapiemittel beschäftigen, von aktueller Bedeutung.

Um Prognosen über den zukünftigen Bedarf an prothetischer Therapie zu erlangen, hat die Deutsche Gesellschaft für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde e. V. im September 2000 anlässlich ihrer 50. Jahrestagung ein Gutachten bei der Firma I+G Gesundheitsforschung (München) in Auftrag gegeben (*Schroeder 2001*). Ziel dieser Studie war es, den zu erwartenden Behandlungsbedarf mit Zahnersatz bis zum Jahre 2020 abzuschätzen. Als Datenbasis dienten die Mundgesundheitsstudien der Jahre 1983 bis 1997 und als Leitgröße die Anzahl fehlender Zähne. Trotz erheblicher Erfolge der präventiven Zahnheilkunde in den letzten 25 Jahren (*Marthaler 1993, Marthaler 1998, O'Mullane 1998, Schroeder 2001*) werden Karies und Parodontalerkrankungen nach wie vor als Hauptursachen für Zahnverluste angesehen. Dabei sind bis zum 40. Lebensjahr Karies und danach die Parodontalerkrankungen quantitativ am bedeutsamsten (*Reich 1993,*

Glockmann und Köhler 1998). In der Altersgruppe der 34-55-Jährigen war innerhalb von 14 Jahren kein nennenswerter Rückgang fehlender Zähne zu verzeichnen (*Schroeder 2001*).

Neben diesen epidemiologischen Fakten haben auch demografische Faktoren eine entscheidende Bedeutung. So erwartet das *Statistische Bundesamt (2000)*, dass der Altenquotient (Verhältnis der über 65-Jährigen zur Restbevölkerung auf 100 Personen bezogen) von 25 im Jahr 1998 auf 35 im Jahr 2020 und auf 52 im Jahr 2050 ansteigt. *Gerabek (1995)* geht ebenfalls von einer Verschiebung zur Gerostomatologie aus. *Schroeders (2001)* Prognosen beruhen auf Vorausberechnungen dieser gegenläufigen Trends mittels verschiedener Szenarien, wobei im Bezug auf den Erhalt naturgesunder Gebisse sowohl realistische als auch unrealistisch optimistische Varianten verwendet wurden. Zusammenfassend kommt er zu dem Schluss, dass sich bis zum Jahre 2020 die Gesamtzahl fehlender Zähne als wichtigste Ursache prothetischer Maßnahmen trotz einsetzender Erfolge der Präventionsstrategien aufgrund demografischer Entwicklungen nicht wesentlich verändern wird.

1.2 Halteelemente in der Teilprothetik

Die Anfertigung herausnehmbaren Zahnersatzes ist immer dann indiziert, wenn der Indikationsbereich für festsitzende Versorgungen überschritten wird (*Weiskopf 1992*). Die letzten Restzähne zu erhalten, statt sie zu opfern, um gleich eine Totalprothese anzufertigen, hat große Vorteile hinsichtlich der Psyche des Patienten, der Verbesserung der Gesamtfunktion des prothetischen Ersatzes und um vertikale Knochenabbauprozesse der Alveolarkämme zu verzögern (*Hofmann 1990*). So werden bei Totalprothesenträgern in pathologisch-anatomischen Studien vermehrt pathologische Kieferkambefunde und verstärkte resorptive Atrophie in Alveolarfortsätzen gefunden (*Fröhlich 1952, Patyk et al. 1993*). Der harte Gaumen ist von diesen Erscheinungen weniger betroffen. Daraus leitet *Fröhlich* die Forderung ab, Zahnersatz möglichst parodontal abzustützen und horizontale Verschiebungen unmöglich zu machen. Somit bekommt die Frage nach dem jeweils geeigneten Halteelement besondere klinische Relevanz. *Battistuzzi et al. (1991)* haben sogar die Meinung geäußert, dass mögliche negative Folgen durch falsche Auswahl der Halteelemente bei der Anfertigung von Teilprothesen in der Lehre zu wenig Beachtung finden. Nennenswerte Schäden

sind zum Beispiel erhöhte Plaqueakkumulation, vermehrte Karies und gingivale bzw. parodontale Destruktionen mit der Folge zunehmender Zahnbeweglichkeit oder beschleunigter Kieferkammresorptionen.

Beste Ergebnisse bei der Wiederherstellung des mandibulomaxillären Apparates hinsichtlich Vermeidung von Fehlbelastungen der Parodontien und Kiefergelenke mit Schädigungen wechselnden Ausmaßes, lassen sich erreichen, wenn man durch möglichst starre Lagerung und sichere axiale Belastung der Pfeiler funktionell und parodontal hochwertige Stützzonen schaffen kann (*Reither 1967*).

Dies ist, wie nachfolgend dargestellt, mit dem Halteelement „Doppelkrone“ (*Körber 1988*), auf dem das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt, einfach und sicher zu erreichen. Dieses Verankerungssystem wurde 1886 erstmals von dem amerikanischen Zahnarzt *Starr* verwendet und hat sich seitdem millionenfach bewährt. Die Kronen konnten damals nur aus Goldblech geformt und mit einem verlöteten Deckel versehen werden. Nach seiner Weiterentwicklung für die Gusstechnik durch *Böttger (1961)* wurde es als „Teleskop“ bekannt. Dieser (der technischen Terminologie entlehene) Begriff beschreibt zwei parallelwandige, ineinander verschiebbare Zylinder. Aufgrund der nicht von der Hand zu weisenden Nachteile der Zylinderteleskope (s. Abschnitt 1.6.1, S. 21) veröffentlichte *Körber 1968* die Theorie der „Konuskrone“. Daher sollte heutzutage der Terminus „Doppelkrone“, statt des unexakten Begriffs „Teleskop“, der stellenweise irreführend auch für die „Konuskrone“ gebraucht wird, als Überbegriff verwendet werden (*Wenz et al. 1999a*).

1.2.1 Funktionen und Anforderungen bei Verankerungselementen

Partieller Zahnersatz hat prinzipiell die Aufgabe, Kaufunktion, Phonetik und Ästhetik wiederherzustellen und weitergehende direkte oder indirekte Destruktionen im stomatognathen System zu verhüten. Sicherung von statischer und dynamischer Okklusion, Verhinderung von Elongation der Antagonisten und Stellungsänderungen der Nachbarzähne und die Verteilung der Kaukräfte auf das Restgebiss, die zahnlosen Kieferabschnitte und die antagonistischen Zähne gehören selbstverständlich dazu (*Strub et al. 1999*).

Wichtige Funktionen von Verankerungselementen (*Freesmeyer und Eisenmann 1999, Strub et al. 1999*) sind:

- Retentions- oder Haltefunktion,
- Stütz- und Kraftverteilungsfunktion,

- Verblockungs- oder Schubverteilungsfunktion,
- Führungsfunktion,
- Kippmeiderfunktion.

Kaum ein Halteelement erfüllt alle Anforderungen, die an Verankerungselemente gestellt werden (*Weigl et al. 1996 und 2000*): Exakte Passung, gleichbleibend ausreichende Haftung zur sicheren Fixierung am Anker ohne Lösen der Verbindung während des Kauvorgangs, geringe Pfeilerbelastung, Biokompatibilität - insbesondere Korrosionsfestigkeit -, geringe Plaqueadhäsion, gute Ästhetik und geringe Kosten, einfache Handhabung beim Ein- und Ausgliedern und gute Hygienisierbarkeit, da abnehmbarer Zahnersatz gerade für ältere Patienten mit Altersbehinderungen tauglich sein sollte. Zahnreiche Halteelemente, wie Klammern, Riegel oder Steg, haben diesbezüglich Schwächen.

1.3 Standortbestimmung der Doppelkronen

Doppelkronen, als Sonderform der Geschiebe, ermöglichen es, Zahnersatz in Brücken- oder Prothesenform völlig starr und dennoch abnehmbar an Pfeilerzähnen zu verankern (*Körber 1968*). Das stark reduzierte Lückengebiss (*Schwanewede 2000*), sowohl für rein parodontal als auch für parodontal-gingival gelagerte Teilprothesen (*Wenz et al. 1999a*), stellt die typische Indikation dar. Doppelkronen decken nach *Engelhardt (1995)* gleichsam den konservierenden, prothetischen und funktionellen Indikationsbereich ab.

Ihre Funktionalität und Praktikabilität bringt große Vorteile. So ermöglicht die Doppelkrone, wie kein anderes Halteelement, eine streng körperliche Fassung der Pfeilerzähne und Stütz-, Halte-, Führungs-, Kippmeider- und Schubverteilungsfunktion in einem Konstruktionselement. Daher sind im Gegensatz zu anderen Verankerungssystemen keine zusätzlichen Elemente nötig, was sowohl Planung als auch Anfertigung des Zahnersatzes vergleichsweise vereinfacht (*Körber 1970 und 1988, Freesmeyer 1987, Lehmann et al. 1996a, Strub et al. 1999, Weigl et al. 2000*). Des Weiteren können Doppelkronen universell und zur vollsten Zufriedenheit der Patienten bei jeder Lückengebissstopographie eingesetzt werden, unabhängig von Kennedy-Klassifikation, Stellung der Zähne oder Verlaufsform des Kieferkamms (*Hofmann 1990, Psoch und Setz 2002*). *Heners und Walther (1988 und Walther 1990)* fanden keinen Einfluss von Anzahl und Lokalisation der zur Verfügung stehenden Pfeilerzähne auf die Erfolgsrate von doppelkronengetrage-

nem Zahnersatz.

Ein weiterer Vorteil ist die gute Erweiter- und Umarbeitbarkeit der Prothesen. Nach Pfeilerverlust kann die dazugehörige Außenkrone direkt vom Zahnarzt mit Kunststoff aufgefüllt werden, was es möglich macht, auch Zähne mit ungewisser Prognose in die Konstruktion mit einzubeziehen (*Freesmeyer 1987, Bergman et al. 1997, Bartsch 1998a, Strub et al. 1999, Wenz et al. 1999a, Schwanewede 2000*).

1.3.1 Teilprothetische Konstruktionsrichtlinien

Herausnehmbare Teilprothesen benötigen oft Komponenten, die nicht dem Ersatz verlorengewangenen Körpergewebes dienen, aber für Stabilität oder Halt der Prothese erforderlich sind (*Wenz et al. 1999a*). Unphysiologische Komponenten, wie große und kleine Verbinder oder stark extendierte Bänder, sind häufig Ursachen für Probleme, Irritationen oder Beschwerden und sollten möglichst vermieden werden, wenn Stabilität und Halt der Prothese dadurch nicht gefährdet werden (*Wenz and Lehmann 1998*). Die Röhrenform der Doppelkronen bietet statisch das Höchstmaß an möglicher Versteifung (*Bartsch 1998a*). Daher kann im typischen Indikationsbereich - nur noch geringer Restzahnbestand - in der Regel auf solche Komponenten verzichtet werden, wenn alle satteltrennenden Zähne mit Doppelkronen versorgt werden (*Lehmann et al. 1996b und 1997, Wenz et al. 1999a, Schwanewede 2000, Michel 2002*). Dabei ist die Verbindungsstelle zwischen Außenkrone und Modellgussgerüst den stärksten Beanspruchungen ausgesetzt und muss deshalb ausreichend dimensioniert werden (*Strub et al. 1999*). Dies ist jedoch problemlos möglich. Klinische Studien (*Heners 1990, Heners und Walther 1990*) zeigen, dass die Häufigkeit von Gerüstfrakturen bei Teilprothesen mit und ohne Transversalbügel vergleichbar und gering ist.

Zahn und Parodontium bilden ein komplexes Funktionssystem, das mechanische Kraftdämpfung, sensorische Kraftkontrolle und die Regeneration durch das mesektodermale Parodontium gewährleisten soll. Unnötiges Abdecken des marginalen Parodonts erhöht das Risiko für marginale Defekte, die leicht zum Verlust des Zahnes führen können. Daraus leitet sich die Forderung ab, den Zahnersatz mit kleinstmöglicher Gerüstausslegung möglichst parodontal abzustützen, ohne dabei das marginale Parodont zu bedecken (*Heners 1990*). Die brückenzwischengliedartige Gestaltung der Prothesensättel unter Freihaltung marginaler Strukturen stellt das seit Jahren anerkannte Gestaltungsprinzip dar (*Wenz et al. 1999a*), das jedoch bei tegumental gelagertem Zahnersatz häufig nicht realisiert werden kann

(*Richter 1992, Stark 1996*). Doppelkronengetragener Zahnersatz ist hingegen einwandfrei parodontalhygienisch gestaltbar (*Wenz et al. 1999a, Schwanewede 2000*). So fanden *Ericson et al. (1991)* nach 24- bis 43-monatiger Tragedauer konuskronen-getragener Teilprothesen nur verhältnismäßig geringe Veränderungen an biologischen Geweben.

Zusätzlich ist eine optimale häusliche Mund- und Prothesenhygiene möglich (*Körber 1970, Freesmeyer 1987, Strub et al. 1999, Weigl and Lauer 2000*). *Bartsch (1998a)* beschreibt, dass Plaque beim Ausgliedern der Prothese durch die Außenkrone von der Innenkrone mitgenommen wird. Außerhalb des Mundes - an der Prothese - sind Beläge unter Sichtkontrolle für den Patienten leichter entfernbar. Dieses Phänomen nennt er „Handschuheffekt“. Außerdem zeigen Doppelkronen eine günstige kariesprotektive Wirkung für die Pfeilerzähne (*Körber 1970*).

Einfache Handhabbarkeit der Prothesen, optimale Hygiene und die Möglichkeit, das Gerüst im dentoalveolären Design auslegen zu können, bieten dem Patienten einen hohen Kau- und Tragekomfort (*Lehmann et al. 1996b, Strub et al. 1999, Wenz et al. 1999a, Schwanewede 2000*). Befragte Patienten sind überwiegend sowohl aus funktioneller wie auch ästhetischer Sicht mit ihrem doppelkronenverankerten Zahnersatz zufrieden (*Bergman et al. 1997, Weigl and Lauer 2000*).

1.3.2 Parameter des Verlustrisikos von Pfeilerzähnen

Die Konuskrone sichert nachweislich, wie kaum ein anderes Halte- und Stützelement, die parodontale Funktionsfähigkeit der Pfeilerzähne (*Ludwig und Blum 1992, Heners und Walther 1988, Ericson et al. 1991*), da die physiologische axiale Belastung deren frühzeitige Lockerung verhindert (*Bartsch 1998a, Weigl et al. 2000*). Sogar ungünstige Pfeilerverteilungen führen nicht zu höheren Misserfolgsraten. Somit stellen selbst diametrale oder diagonale Restzahnarrangements keine Kontraindikation für die Verwendung als Pfeilerzähne für Doppelkronen dar (*Heners 1990*).

Bergman et al. (1997) fanden in klinischen Untersuchungen Pfeilerüberlebensraten von 78,3 % nach sechs bis sieben Jahren. *Heners und Walther (1992)* bemerken, dass klinische Langzeitstudien nicht einfach anhand des Mittelwertes initialer Befunde Vergleiche anstellen dürfen, da sich die Hauptmenge pathologischer Befunde häufig auf eine Minderheit der untersuchten Individuen konzentriert. Dementsprechend fanden sie unter Verwendung der kumulativen Häufigkeitsverteilung in einer klinischen Studie mit 700 Teilprothesen heraus, dass das Risiko

des Pfeilerverlustes bei Patienten mit fortgeschrittenen pathologischen Ausgangsbefunden signifikant höher ist (Kaplan-Meier-Wahrscheinlichkeit) als bei parodontalgesunden Patienten. Letztere haben eine Wahrscheinlichkeit von 86 - 90 %, nach fünf Jahren noch alle Pfeiler zu besitzen. Erhöhte Zahnlockerung (ab Grad II) oder fortgeschrittener, röntgenologisch sichtbarer Knochenverlust senkt die Chance auf 64 - 67 % (*Walther und Heners 1992*).

Entsprechend waren parodontale Ursachen dreimal so häufig für Pfeilerverlust verantwortlich wie die nächsthäufigste Ursache, Zahnfraktur.

1.3.3 Erfolge im Vergleich zu anderen Verankerungselementen

Trotz dieser guten Ergebnisse liegen die Misserfolgsraten von Konuskronen-Konstruktionen etwas über denen der festsitzenden Brückenkonstruktionen, deren Indikation jedoch im Allgemeinen bei besseren Ausgangssituationen gestellt wird. Im Vergleich mit Teilgeschiebe- oder Gussklammer-verankerten Prothesen schneiden Doppelkronen-Konstruktionen jedoch besser ab (*Kerschbaum 1987, Strub et al. 1999*), da Doppelkronen bekanntermaßen einen wesentlich günstigeren Einfluss auf den Erhalt der Funktionstüchtigkeit der Parodontien als Klammern ausüben (*Niedermeier und Rießner 1994*).

Klammerverankerte Modellgussprothesen

Klammerprothesen sind erfahrungsgemäß ästhetische Kompromisslösungen mit ungünstiger Pfeilerbelastung (*Weigl and Lauer 2000*). Die geforderte starre körperliche Fassung des Pfeilerzahnes ist mit Klammern nicht erreichbar. Weiterhin ist eine ausreichende Ankoppelung an das Restgebiss schwierig und nur durch Kompromisse hinsichtlich Ästhetik und Prävention von Karies zu ermöglichen (*Weiskopf 1992, Strub et al. 1999, Schwanewede 2000*). Vorteilhaft sind die geringe Präparationsnotwendigkeit und die relativ gering ausfallenden Kosten (*Schwanewede 2000*).

Innerhalb eines Jahres werden bereits 10 % der Klammern funktionsuntüchtig. Doppelkronen-Teilprothetik erreicht dieses Verlustrisiko jedoch erst nach drei bis vier Jahren (*Eisenburger und Tschernitschek 1998*). Die Fünfjahres-Überlebensraten der Klammerprothesen liegen nur zwischen 65 % und 75 %. Ursachen und Verteilungsmuster der Pfeilerverluste ähneln dabei denen der Doppelkronen (*Wöstmann 1997*).

Profilgeschiebe

Profilgeschiebe sind miniaturisierte teleskopierende Verbindungselemente und können bei lückiger anteriorer Restbezahnung mit schwierigen Okklusionsverhältnissen und hohen ästhetischen Ansprüchen angewandt werden. Sie bieten einen hohen Patientenkomfort, beanspruchen jedoch auch einen höheren Aufwand und durch die geforderte intrakoronale Gestaltung - extrakoronale Elemente werden als hygienisch ungünstig bewertet - großzügige Raumverhältnisse (*Strub et al. 1999, Schwanewede 2000*). Kontraindiziert sind sie bei vorgeschädigten Pfeilerzähnen mit ungewisser Prognose, stark reduzierter Restbezahnung oder einzeln stehenden Zähnen, also in Situationen, in denen der Einsatz von Konuskronen noch möglich ist (*Wichmann 1999b*).

Nachteilig ist, dass je nach Auslegung als intra-, inter- oder extrakoronales Geschiebe der Platzbedarf zu Devitalisationen zwingen kann, die Hygienisierung erschwert ist und größeres manuelles Geschick verlangt, Gingivahyperplasien entstehen können oder eine unphysiologische, nicht-axiale Kraftübertragung resultiert. Des Weiteren sind zusätzliche Geschiebeklammern in Form von Umlauffräsungen unabdingbar (*Engelhardt 1994, Strub et al. 1999, Wichmann 1999b*).

Hybridprothetik

Hybridprothetik ist bei geringem Restzahnbestand mit großen Kieferkammdefekten im Seitenzahnggebiet oder in Kombination mit enossaler Implantologie indiziert (*Wirz und Jäger 1991, Strub et al. 1999, Augthun und Edelhoff 1999, Schwanewede 2000*).

Stegkonstruktionen ermöglichen dabei eine direkte primäre Verblockung. Sie sind jedoch schwer zu reinigen, gelten daher auch als parodontalhygienisch ungünstig und stellen beim Pfeilverlust durch ihre schwierige Erweiterbarkeit vor Probleme (*Ludwig und Blum 1992, Augthun und Edelhoff 1999, Strub et al. 1999, Schwanewede 2000*). Besonders im Seitenzahnbereich bilden sich am Übergang vom Steg zum Anker Vakatuwucherungen, was den Indikationsbereich der Stege stark einschränkt (*Lauer et al. 1997*). Steggetragene Prothesen sinken mit der Zeit dorsal stärker ab als Konuskronenprothesen (*Hofmann 1990*).

Magnetanker sind eine gute und preiswerte Alternative zum Steg, ermöglichen ein Ausklinken bei unphysiologischen Belastungskräften und Bewegungen in allen Freiheitsgraden. Bei vorhandener Totalprothese kann man sie ohne Laborarbeit direkt am Behandlungsstuhl einarbeiten. Dies gilt ebenfalls für die Kugelanker, die

jedoch nur Bewegungen im sagittalen Freiheitsgrad ermöglichen (*Wirz und Jäger 1991*).

1.3.4 Ästhetik

Nachteilig ist bei Doppelkronen der nicht unerhebliche Platzbedarf durch die Schichten Zement, Innenkrone, Außenkrone, Modellgussgerüst und Verblendung, wodurch es schnell zur Überkonturierung der Pfeilerzähne, vor allem im Bereich der Unterkieferfrontzähne, kommen kann (*Freesmeyer 1987, Freesmeyer und Eisenmann 1999, Strub et al. 1999*). Mehrere Autoren beschreiben jedoch die Möglichkeit, durch Minimierung der Innenkronen-Schichtstärke und Vollverblendung die Ästhetik deutlich zu verbessern (*Ludwig und Blum 1992, Körber und Johnke 1992*). *Bartsch (1998a - 1998f und 1999)* zeigt, „dass bei korrekter Planung und Präparation und dem Einsatz moderner Verbundtechniken... diese Nachteile ausgeschlossen werden können“ (*1998a: S. 921*). Es ist möglich, die Zwischenglieder im Frontzahnbereich ponticartig zu gestalten, wodurch keinerlei Prothesenkunststoff sichtbar wird. Bei geringem okklusalen Platzangebot über der Doppelkrone gibt es die Möglichkeit, das Metallgerüst im Fissurenbereich Inlay-imitierend auszulegen (*1998f*).

Dennoch gefährdet ausgeprägtes Präparieren die Vitalität der Pfeilerzähne (*Wenz et al. 1999a*). Diese Schwierigkeit kann man unter Verwendung eines „Dentometers“ (*Gente 1996*) beherrschen, dass durch Widerstandsmessung über die Dentinkanälchen den Abstand zur Pulpa während der Präparation signalisiert. Damit wird die Vitalerhaltung selbst elongierter Zähne ohne entstehende parallelitätsbedingte Überhänge möglich.

Einige Autoren haben zwar gezeigt, dass keramische Verblendungen von Konuskronen technisch möglich sind und den Beanspruchungen in der Mundhöhle standhalten (*Lenz et al. 1978, Gilde et al. 1988, Ludwig und Blum 1992*). Dennoch kann Keramik, als dauerhaft ästhetisches Verblendmaterial nur ausnahmsweise empfohlen werden, da eine erhebliche Bruchgefahr für die Verblendung besteht (z. B. Fallenlassen beim Reinigen der Prothese) und die Reparaturmöglichkeiten vergleichsweise schwierig sind (*Strub et al. 1999*).

Dennoch lassen sich auch mit Kompositverblendungen, deren Abrasionswerte schon vor mehr als zehn Jahren in der Größenordnung von Amalgam lagen, gute ästhetische Ergebnisse erreichen (*Körber und Johnke 1992*). Da der Abrieb von Komposit gegen Schmelz geringer als der von Schmelz gegen Schmelz ist, stellt

die Vollverblendung kein Problem dar (*Gallegos and Nicholls 1988*).

Nach Entnahme der Doppelkronen-Prothese aus dem Mund werden die metallischen Stümpfe sichtbar, was auf den Patienten und seine Angehörigen ungünstige psychologische Wirkungen haben kann (*Strub et al. 1999, Weigl and Lauer 2000*). Des Weiteren kommt es nach intrasulkulärer Präparation häufig zur Gingivaretraktion (*Weigl et al. 1996*), wodurch der Metallrand nachträglich sichtbar wird. Diesen beiden Gegebenheiten begegnen *Weigl et al. (1996 und 2000)* mit der Gestaltung der Innenkrone aus Keramik.

1.3.5 Problem - Spaltkorrosion

Ein schwerwiegendes Problem bei der klinischen Anwendung von Doppelkronen kann Spaltkorrosion sein, die sich vor allem im Inneren der Außenkrone, die als Anode fungiert, in dunklen Verfärbungen widerspiegelt. Ihre Ursache liegt in der sogenannten „differentiellen Belüftung“ (*Wall 1996*): Das Sekundärteil grenzt mit seiner Außenseite direkt oder - über das mit ihm verbundene, elektrisch leitende Metallgerüst - mittelbar an das sauerstoffhaltige Mundmilieu. Das Fluid des Geschiebespaltes kann sich mit der Umgebung kaum austauschen. Somit entsteht an der Außenkrone ein Belüftungselement, das, wenn der Sauerstoffgradient hoch genug ist oder andere Faktoren zusätzlich gleichsinnig wirken, zu Korrosionserscheinungen als elektrogalvanische Niederschläge führt.

Die Innenkrone grenzt zum einen an den sauerstoffarmen Spalt, zum anderen aber an den Zahnstumpf. Daher bleibt sie elektrisch annähernd neutral. Sie sieht in der Regel metallisch sauber, wie frisch poliert, aus, selbst dann, wenn der Parodontalzustand eine gute Mundhygiene stark in Frage stellt.

Qualifizierte NEM-Legierungen¹ sollen für Innenkronen bedenkenlos einsetzbar sein (*Wall 1996*). *Wall* versucht, die Spaltkorrosion zu umgehen, indem er im Aufgießverfahren die Innenseiten der Außenkronen mit Keramik versieht. Dieses Verfahren ist jedoch aufwendig und teuer, stellt zusätzliche Platzansprüche und verhindert das typische elastische Aufbiegen des Außenkonus, auf dem ja seine Retentionswirkung hauptsächlich beruht (*Körber 1968*).

¹ „Qualifiziert“ bedeutet Co mindestens 27 % des Cr-Gehalts, Ni mindestens 25 % des Cr-Gehalts.

1.4 Werkstoffe und Technologien bei kombiniertem Zahnersatz

In Lösung gehende Ionen stellen potentielle Auslöser allergischer und toxischer Reaktionen dar (*Ludwig 1994, Freesmeyer und Eisenmann 1999, Wirz 1999c*). *Wirz (1999c)* warnt davor, metallbedingte Erkrankungen in der Mundhöhle, die immer auf Korrosionserscheinungen beruhen, zu bagatellisieren. Dabei soll das oftmals beschuldigte galvanische Element aufgrund verschiedener inkorporierter Metalle unwesentlich sein, da Speichel als Elektrolyt bei weit entfernten Metallteilen zu wenig Leitfähigkeit besitzt. Die Anzahl der Metalle in der Mundhöhle ist unwesentlich, solange jedes für sich korrosionsfest ist. Hauptsächlich ist das Lokalelement, beispielsweise in der bereits genannten Spaltkorrosion, aber auch im Lochfraß, ursächlich für parodontale Erkrankungen. So empfiehlt *Wirz*, ausschließlich korrosionsfeste, biokompatible Legierungen in der Mundhöhle einzusetzen.

Nach dem 1995 in Kraft getretenen Medizinproduktegesetz sind zwar Dentallegierungen einheitlichen Zulassungsverfahren nach ihrer Risikobetrachtung unterworfen (*Diedrichs 1994*); jedoch konnten bislang solche Prüfverfahren nicht für die gesamte Palette verfügbarer Legierungen durchgeführt werden. Dazu müssten erst einmal genaue Schwell- und Grenzwerte bedenklicher Ionenfreisetzungen ermittelt werden (*Schwickerath und Pfeiffer 1995*).

Unverträglichkeitsreaktionen äußern sich meist in Form von Gewebeverfärbungen, Erythemen, Schleimhautbrennen, Geschmacksirritationen, Mundtrockenheit und Fremdkörpergefühlen bis hin zu Schmerzen (*Wirz 1999a, Schwanewede 2000*). Allergische Reaktionen auf dentale Materialien sind ebenfalls möglich, jedoch eher selten (*Marxkors 1995*).

1.4.1 Galvanoforming

Möchte man hinsichtlich Biokompatibilität auf ganz sicherer Seite sein und Korrosionsrisiken durch Lunker oder Porositäten nach dem Gießen ausschließen, empfiehlt es sich, Monometalle zu verwenden, wobei derzeit nur Rein-Titan und Feingold in Frage kommen. Titan ist jedoch schwer zu bearbeiten, kann kaum porenfrei gegossen werden und besitzt nach dem Guss stets die mindestens 30 µm starke α -Case. Da diese entfernt werden muss, ist eine gute Passgenauigkeit, wie sie für die Doppelkronentechnologie benötigt wird, nicht sicherzustellen. Die Alternative ist galvanisch abgeschiedenes Feingold (*Diedrichs und Rosenhain 1995*).

Geschichtliches

1961 wurden von *Rogers and Armstrong* erstmals galvanisch hergestellte Goldkappchen für Einlagefüllungen verwendet, die anschließend in der Angusstechnik vervollständigt werden mussten. 1979 gelang *Rogers* deren keramische Verblendung. Die verwendeten Kalium-Gold-Zyanid-Bäder waren jedoch hochtoxisch und die Abscheidungsergebnisse noch unbefriedigend (*Biewer 1998*).

Wismann entwickelte 1983 mit dem Platamic-Verfahren ungiftige zyanidfreie Galvanisierbäder und konnte dabei die Qualität der Abscheidung steigern. Diese Technik war jedoch noch sehr aufwendig und nur in speziellen Galvanisierzentren einsetzbar. 1989 gelang dann der Firma Wieland (Pforzheim) mit der Gammat-12[®]-Anlage der Firma Gramm der Durchbruch. Mit dem entwickelten Auro-Galva-Crown-System[®] (AGC[®]) gab es nun ein praxistaugliches Verfahren, das gleichmäßig hohe Qualität sicherstellen konnte (*Biewer 1998*). Heutzutage stehen verschiedene Abscheidungsgeräte der Firmen Wieland, Gramm, Heraeus und Hafner zur Verfügung.

Funktionsweise (*Diedrichs und Rosenhain 1995, Wagner und Helmling 1998*)

Zur galvanischen Abscheidung werden optisch wasserklare Galvanisierbäder verwendet. Als Anode dient ein in der Regel platinüberzogener Titanstab. Das Werkstück wird an der formgebenden und leitfähigen Kathode abgeschieden (s. Abschnitt 3.2.3, S. 38). Da Ionen nur unter Stromfluss wandern können, wird elektrische Leitfähigkeit vorausgesetzt, die über verschiedene Salze erreicht wird. Das sind zum einen spezielle Leitsalze, zum anderen Ammonium-Gold-Sulfit-Komplexe. Bei ihrer galvanischen Abscheidung an der Kathode entstehen elektrisch neutrales Gold und Zersetzungsprodukte, die in der Lösung verbleiben. Des Weiteren müssen pH-Puffer, Stabilisatoren und Glanzbildner-Zusätze vorhanden sein. Der Glanzzusatz, der den Aufbau einer gleichmäßigen Goldschicht initiiert und steuert, wird direkt vor dem Prozess der sonst gebrauchsfertigen Lösung zugegeben. Der Abscheidungsvorgang wird mikroprozessorgesteuert.

Das entstehende Gefüge ist poren- und lunkerfrei. Durch dessen schnelle Abscheidung (30 Milliarden Goldatome pro cm² in der Sekunde) bildet sich kein typischer kristalliner Gitteraufbau, was zu einer enormen Stabilität mit einer Härte¹ von

¹ Vickers-Härte, ermittelt durch die Eindringtiefe einer definierten Diamantspitze bei 30-sekündiger Belastung mit 5 kg.

100 bis 120 HV_{5/30} führt. Durch Glühen des Goldgerüsts, etwa bei der keramischen Verblendung, entsteht im Zuge einer Gefügeumwandlung ein kristalliner Aufbau, der einen Härteverlust von ca. 75 % bewirkt. Dennoch bewähren sich keramisch verblendete AGC[®]-Kronen hinsichtlich ihrer axialen Belastbarkeit, selbst bei punktueller Belastung an Frontzahnkronen (*Gilde et al. 1991*).

Würde man Feingold gusstechnisch verarbeiten, resultierte ein Metallgitter mit Korngrößen um 400 µm, was die physikalischen Eigenschaften für die Zahntechnik nicht mehr tolerierbar verschlechtern würde. Die Korngröße von Galvanogold liegt im Gegensatz dazu bei 50 µm.

Vor- und Nachteile von Galvanogold

An erster Stelle der Vorteile steht die Biokompatibilität. Im Zellkultur-Test wurden keine Fibroblastenschädigungen gefunden (*Diedrichs und Rosenhain 1995*). Durch die Metallhomogenität mit mindestens 99,9-prozentigem Feingoldgehalt ist nicht mit Gewebeerirritationen und Korrosionserscheinungen zu rechnen. Galvanogold ist resistent gegen Säuren, Basen und Salze und anlaufbeständig (*Stroppe 1990a, Diedrichs und Rosenhain 1995, Wirz et al. 1995, Biewer 1998, Hopp et al. 2001*). Die Verbindung von Halteelement und Modellgussgerüst muss nicht durch Löten hergestellt werden, da Galvanogold kaltverschweißbar ist (*Diedrichs und Rosenhain 1995*). Neben Lasern, Angießen, Ansintern und Eingalvanisieren (*Hopp et al. 2001*) stehen Klebesysteme zur Verfügung, deren Verbundfestigkeit höher als die innere Festigkeit des Zahnes ist (*Lu und Faber 1999*).

Weitere Vorteile sind reproduzierbar gleichmäßige und dennoch geringe Schichtstärke bei höchster Präzision und Passgenauigkeit. So konnten *Setz et al. (1989)* bei 99 % der von ihnen untersuchten galvanokeramischen Kronen einen Randspalt < 100 µm messen. Zu 85 % war dieser < 50 µm und bei 62 % überhaupt nicht mehr messbar. Die exakte Passung gegossener Doppelkronen bedarf großer zahntechnischer Erfahrung. AGC[®]-Außenkronen passen nicht nur exakt, ihr Einsatz vermeidet auch Gussfehler. Es entstehen absolut lunkerfreie Gerüste. Das die Passung gefährdende Expansionsverhalten der Einbettmasse entfällt. Galvanodoppelkronen sparen nicht nur Material, sondern auch Zeit, da die zeitaufwendige Modellation und Ausarbeitung der Sekundärteile wegfällt. Ihre geringere Schichtstärke schont die Pulpa allein schon aufgrund verminderter thermischer Leitfähigkeit. Gleichzeitig bewirkt die geringere Metallschicht zusammen mit der warmen Farbwiedergabe eine günstige ästhetische Wirkung. Auch keramisch verblendete

AGC[®]-Inlays haben sich bewährt (*Stroppe 1990a, Diedrichs und Rosenhain 1995, Wirz et al. 1995 und 1996a, Biewer 1998, Wagner und Helmling 1998, Hopp et al. 2001*).

Die auf dem Markt erhältlichen Galvanoforming-Systeme sind außerordentlich betriebssicher. Liegen keine Gerätedefekte vor und vermeidet man grobe Bedienungsfehler, wie Eingriffe in den Programmablauf, Verwenden falscher oder verunreinigter Lösungen und trägt man das gut durchmischte Leitsilber überall ausreichend auf, so erreicht man mit Sicherheit eine gleichbleibende und optimale Qualität (*Hopp et al. 2001*).

Als nachteilig gilt die nötige Investition in eine Galvanoforming-Anlage, die sich nur bei regelmäßiger Benutzung rentiert. Dies kann durch das weite Anwendungsspektrum dennoch sinnvoll sein (*Biewer 1998*). Außerdem ist die Winkelschwäche zu nennen, die zu fehlender Festigkeit in spitzen scharfkantigen Innenwinkeln führt. Somit müssen scharfe Innenkanten bei Inlaypräparationen abgerundet werden (*Diedrichs und Rosenhain 1995*).

Anwendungsmöglichkeiten von AGC[®]

Die Anwendungsmöglichkeiten sind sehr vielfältig und erstrecken sich von Halteelementen in der kombiniert festsitzend-abnehmbaren Prothetik in Form von Doppelkronen oder Stegpatrizen über keramisch verblendete Inlays, Onlays, Teilkronen und Kronen bis hin zu Mesostrukturen in der Implantatprothetik, Verblockungen von Einzelkronen und kleineren Brücken, Aufbissschienen und Prothesenbasen (*Klaus 1988, Krieg und Klaus 1988, Schwickerath 1988, Stroppe 1990a und 1990b, Diedrichs und Rosenhain 1995, Wirz et al. 1995, Biewer 1998, Jäger et al. 1998, Wenzel 1999, Bregler 2002*). Weiterhin wird die Möglichkeit der Friktionserneuerung konventioneller Außenkronen durch Aufgalvanisieren dünner Goldschichten auf ihre Innenflächen (*Hoffmann und Hopp 1999, Hopp et al. 2001, Bregler 2002*) und das Austauschen schadhafter Sekundärkronen in Verbindung mit intraoralem Verkleben (*Wirz und Jäger 1998, Hör 2000*) beschrieben.

1.4.2 Methoden für „Galvano-Doppelkronen“

Zur Anfertigung von Doppelkronen stehen fünf verschiedene Techniken zur Verfügung: Neben der konventionellen Methode, Innen- und Außenkrone gusstechnisch herzustellen, gibt es die Möglichkeit des direkten Aufgießens des Sekundärteils auf die Innenkrone, des Aufgalvanisierens auf ein in Kunststoff dubliertes Guss-

primärteil, des direkten Aufgalvanisierens auf ein konventionell gegossenes oder aber auch auf ein galvanoplastisch hergestelltes Primärteil (*Bongartz und Rosenhain 1996*).

Die Methode des indirekten Galvanisierens auf einen dublierten Stumpf (*Stroppe 1990a, Stauch und Stauch 1996, Wirz et al. 1996b*) birgt die Gefahr geringer Dimensionierungsfehler mit Einfluss auf die Friktion in sich. Um dies zu vermeiden und den Arbeitsaufwand zu reduzieren, wird das direkte Aufgalvanisieren auf ein mit Leitslack bestrichenes Primärteil nach *Diedrichs und Rosenhain (1991)* favorisiert (*Biewer 1999*). Das Leitsilber darf nur bei Titaninnenkronen weggelassen werden und muss nach dem Abscheiden mittels Salpetersäure vollständig entfernt werden, um Korrosionen des verbliebenen Silbers an der Außenkroneninnenseite zu vermeiden (*Bregler 2002*).

Um Innenkronen galvanoplastisch herstellen zu können, hat *Rosenhain* eine spezielle Technik¹ entwickelt, die jedoch ein gewisses Know-how des Zahntechnikers und gute präparatorische Fertigkeiten des Zahnarztes voraussetzt (*Diedrichs 1995, Diedrichs und Rosenhain 1995*) und somit seltener zum Einsatz kommt. Diese Methode erscheint bei Verwendung mehrerer Pfeiler aus Parallelitätsgründen fraglich.

Wahl der Werkstoffkombination

Die Hauptursache von Korrosionserscheinungen liegt nicht, wie oftmals angenommen, im galvanischem Element zweier Metalle, sondern in der elektrochemischen Korrosionsform „Lokalelement“, was sich beispielsweise in der bereits genannten Spaltkorrosion äußert (*Wirz (1999a)*). Da sich diese an den differentiell belüfteten Außenkronen abspielt, sind Kombinationen von monometallischem Feingold außen und verschiedenen Legierungen innen möglich. Die Kombination von Titan und Feingold gilt von vornherein als unproblematisch, da es sich nicht um Legierungen, sondern um Monometalle handelt. Es eignen sich dazu aber auch NEM- und Edelmetalllegierungen (*Bregler 2002*). Selbst *Wall (1996)*, der sich intensiv mit dem Thema Spaltkorrosion auseinandergesetzt hat, hält „qualifizierte NEM-Legierungen“ (s. Abschnitt 1.3.5, S. 11) für bedenkenlos einsetzbar.

Vorsorglich vorvergoldet (*Biewer (1998)*) die gegossenen Innenkronen.

¹ Ausblocken des Stumpfes mit Wachs, stumpfnahes Schaben, Dublieren des Stumpfes, Galvanoformen einer 0,4-0,5 mm dicken Feingoldschicht, Nachfräsen der Kappchen

Bregler (2002) hält keramische Innenteile für das Nonplusultra in der Doppelkrontechnik. Diese von *Weigl et al. (1996)* veröffentlichte Technik soll zusätzlich jegliche Abnutzungserscheinungen durch die besondere Werkstoffkombination eliminieren und eine günstigere psychologische Wirkung für die Patienten und ihre Angehörigen ausüben, da nach dem Ausgliedern der Prothese keine metallischen Stümpfe sichtbar werden und eventuelle Gingivaretraktionen keine ästhetischen Nachteile mit sich bringen (*Weigl et al. 2000, Weigl and Lauer 2000*).

Tertiärkonstruktion

Die Stabilität des herausnehmbaren Zahnersatzes wird bei Galvano-Doppelkronen ebenfalls über die Tertiärkonstruktion erreicht, die in Form eines konventionellen Modellgussgerüsts oder brückenartig gestaltet sein kann. Im erstgenannten Fall genügt für die Funktion und Haltbarkeit eine ringschlussartige Umfassung in der Ausdehnung eines Drittels der Labialfläche (*Bregler 2002*). Brückenartige Gerüste benötigen aufgrund der Beanspruchung der Gesamtkonstruktion durch unkontrollierbare Ausgliederungskräfte, ebenso wie bügelfreie Konstruktionen mit Freiersätteln, eine stabilere käppchenartige Fassung der Pfeilerzähne.

Für solche Gerüste eignen sich NEM-Legierungen aufgrund ihres im Vergleich zu hochgoldhaltigen Legierungen doppelt so hohen Elastizitätsmoduls (*Stüttgen 1990*) besonders. Andernfalls würden viel dickere Gerüste zur Stabilitätssicherung benötigt (*Wenz et al. 1999a*). Die biologische Eignung der Co-Cr-Mo-Legierungen wurde mehrfach belegt (*Reuling 1992, Wirz 1993e, Lenz 1998b*).

Möchte man den direkten Kontakt dieser Materialien dennoch vermeiden, kann man durch Vergolden eine Oberflächenveredlung bewirken und nicht vollständig biokompatible Materialien „einpacken“. Dies sollte jedoch nicht zum Verarbeiten von Nickellegierungen bei bestehender Nickelallergie angewandt werden, da Beschädigungen dieser Schutzhülle mit der Zeit nicht ausgeschlossen werden können (*Biewer 1998, Bregler 2002*). *Wirz (1999c)* hält Beschichtungen inkompatibler Legierungen zu Veredelungszwecken jedoch für unsinnig.

Verbindung von Sekundärkrone und Tertiärteil

Zur Befestigung der Außenkronen am Modellgussgerüst wird von Lötungen abgeraten, da dies erfahrungsgemäß neben den bekannten elektrochemischen Nachteilen zu Ungenauigkeiten führt. Verschweißen mittels Laser und Verkleben kann hingegen empfohlen werden (*Wirz und Jäger 1998, München et al. 2000*). Wenn die Primärteile im Mund eingesetzt werden und auch bleiben, was bei-

spielsweise für Keramikinnenteile sinnvoll ist, führt intraorales Verkleben zu definitiv spannungsfreiem Sitz. Andernfalls sollte auf dem Modell geklebt werden (*Bregler 2002*).

1.5 Die Notwendigkeit eines definierten Haftverhaltens

Böttger (1978) fordert von doppelkronenverankertem Zahnersatz problemloses Ein- und Ausgliedern mit dem subjektiven Gefühl der Passgenauigkeit und des absolut festen Sitzes der über längere Tragezeiten erhalten bleiben sollte.

Neben ihren Grundformen¹ und ihrem Kronenanteil² teilt *Körber (1988)* die Doppelkronen nach ihrem Haftmechanismus in

- friktiv haltende Teleskopkronen,
- durch Konuspassung haltende Konuskronen und in
- Doppelkronen mit zusätzlichen Haftelementen ein.

Dies allein lässt schon vermuten, dass die Frage nach dem Haltemechanismus von klinischer Relevanz ist. Als „Haftkraft“ bezeichnet er die Kraft, die nötig ist, um einen kombinierten Zahnersatz von seinen festsitzenden Verankerungsanteilen abzuziehen. Sie lässt sich zwar mittels Kronenzange subjektiv überprüfen, jedoch ist die nötige Abzugskraft für die Gesamtkonstruktion oftmals nicht feststellbar, da Summationen von Einzelkräften eine Rolle spielen und Verklemmungen bei mehreren Doppelkronen auftreten können oder in situ zu starke Presspassungen entstehen. Dabei kann es zu Überbelastungen der Pfeilerzähne kommen (*Kammertöns 1989*). *Braunwarth (1994)* spricht sogar von „Extraktions-Prothesen“, wenn etwa durch Ungenauigkeiten mehr oder weniger starke Klemmwirkungen entstehen.

Die Haftkraft darf keinesfalls Werte erreichen, die beim Ausgliedern des Zahnersatzes zu Schädigungen der Parodontalgewebe führen, wobei kurzzeitige Kräfte von 5 bis 10 N keine schädigende Wirkung entfalten (*Körber 1988, Strub et al. 1999*). *Renggli (1997)* weist darauf hin, dass abnorme mechanische Parodontalbelastungen niemals Gingivitiden oder Taschenbildungen induzieren, jedoch Schädigungen des Desmodontalgewebes mit vermehrter Zahnbeweglichkeit bewirken können.

Andererseits soll eine Haftung erreicht werden, die die Prothese gegen abziehende

¹ Zylinderteleskop, Konuskronen, Resilienzteleskop, Ovoidform und undefinierte Form.

² Vollteleskop und Teildeleskop.

Kräfte klebriger Speisen sichert. Für solche Kräfte werden maximal 5 N angegeben (*Körber 1988, Ludwig und Blum 1992*), die als Haftkraft-Sollwert definiert werden (*Lenz 1983, Körber 1968, 1988, Strub et al. 1999*).

1.5.1 Differenzierung der Verankerungselemente in Haft- und Stützanker

Weiskopf (1992) weist darauf hin, dass bei Verwendung von starren Verbindungselementen bei Lückengebissituationen mit Freieindlücken, Spannungen, Ganzkörperverschiebungen und Deformationen auf die Parodontien der Pfeilerzähne übertragen werden. Er empfiehlt, die Art der Verbindung des Zahnersatzes am Restgebiss von der Belastbarkeit der jeweiligen Pfeiler abhängig zu machen.

Laut *E. Körber (1987)* sollte im Normalfall ein Gleichgewichtszustand zwischen funktioneller Belastung des Zahnes und dessen physiologischer Belastbarkeit vorliegen. Ist dieser gestört und kann nicht kompensiert werden, so folgt die parodontale Insuffizienz, die sich in Entzündungen des Zahnfleischrandes, Zahnlockerungen und Taschenbildungen äußert, unabhängig davon, welcher der beiden Faktoren verantwortlich ist. Jede prothetische Therapie sollte daher eine verminderte Belastbarkeit der Gewebe und Neigungen zu entzündlichen Prozessen berücksichtigen, wenn im Lückengebiss ein Gleichgewichtszustand erreicht werden soll. *K. Körber (1988)* differenziert deshalb die Pfeilerzähne in Stütz- und Haftanker. *Becker (1982c)* trifft dieselbe Differenzierung, wobei er jedoch eine Gesamthaftung von 3 N für ausreichend hält, um die Belastung des Zahnhalteapparates durch die unphysiologische Richtung der Kraftwirkung minimal zu halten. Da es während der „Einspielphase“ (s. Abschnitt 1.6.1, S. 21) zu ca. 10 % Friktionsverlust kommt, empfiehlt er die Haftkraft anfangs auf 3,5 N einzustellen.

Sind mehrere Anker in einen Zahnersatz integriert, so addieren sich die Haftwerte der einzelnen Halteelemente (*Körber 1968 und 1988, Kammertöns 1989, Ludwig und Blum 1992*). Dies führt dazu, dass man bei ankerreichen Prothesen die Einzelhaftungen der jeweiligen Doppelkronen kleiner einstellen muss, da der Patient das Therapiemittel sonst nicht mehr ohne Schwierigkeiten entnehmen kann. *Körber (1988)* hält eine Gesamtabzugskraft von 20 N für noch „angenehm“, während *Becker (1982c)* berichtet, dass sich schon bei Werten über 6,5 N Probleme ergeben. Unterschreitet die Einzelhaftkraft eines Pfeilers jedoch einen kritischen Wert, besteht die Gefahr, dass die betroffene Doppelkrone gar nicht mehr haftet

oder sich spontan löst¹. Dieses Problem lässt sich ebenfalls durch Differenzierung der Halteelemente in Anker mit überwiegender Haft- oder Stützfunktion lösen (*Körber 1988*). Außerdem verkanten die Doppelkronen beim Ausgliedern der Prothese um so eher, je weiter distal sie in der Mundhöhle lokalisiert sind, weshalb Molaren eher als Stützanker und andere Zähne eher als Haftanker geeignet sind (*Becker 1982c*). Neben der Anzahl integrierter Ankerzähne und der Festigkeit derselben erfordert die verschiedenartige Veranlagung des Patienten und seine manuelle Geschicklichkeit eine individuelle Vorgabe der Haftwerte (*Böttger 1978*). Letztendlich obliegt es der Verantwortung des behandelnden Zahnarztes, die Sollwerte der Haftung der verwendeten Verankerungselemente im Einzelfall sinnvoll zu definieren. Dies bedeutet aber, dass es wichtig ist, zu wissen, wie man die Vorgaben praktisch erreichen kann.

Die 1968 von *Körber* beschriebene Konuskronen ist eines der wenigen Halte- und Stützelemente, bei dem es möglich ist, die Retentionskraft der Suprastrukturen in definierten Bereichen zahntechnisch vorzugeben (*Ludwig und Blum 1992*). So existieren für konventionell gegossene Doppelkronen etliche Studien, die den Haftmechanismus untersuchen. Für galvanoplastische Außenkronen gibt es hierfür zwar gewisse Vorstellungen, die jedoch meist intuitiver Natur sind und experimentell erst noch auf ihre Einflussgrößen evaluiert werden müssen.

Bislang ist kein Abschätzen, geschweige denn ein gezieltes Einstellen der zum Lösen erforderlichen Kraft, möglich.

Die vorliegende Arbeit verfolgte das Ziel, die entscheidenden Parameter für die Haftkomponenten bei Doppelkronen-Systemen mit galvanogeformten Sekundärteilen sowohl qualitativ als auch quantitativ zu bestimmen.

1.6 Haftmechanismen in der Doppelkronen-Prothetik

Zur Erklärung der Haltewirkung werden generell die Mechanismen Friktion, Konushaftung, Adhäsion, sowie hydraulische Wirkungen herangezogen. An dieser Stelle soll nur eine einführende Erklärung dieser Faktoren erfolgen. Soweit es für die Fragestellung dieser Arbeit von Bedeutung ist, werden physikalische Zusammenhänge im Kapitel „Diskussion“ (S. 72) genauer erläutert.

¹ Einerseits unterliegen die Haftwerte naturgemäß gewissen Streuungen, andererseits wird die Haftkraft von Konuskronen über die Konizität eingestellt, wobei ein kritischer Grenzhaftungswinkel ($\rho_0 \approx 9^\circ$) existiert, über dem gar keine Haftung mehr erreicht wird.

1.6.1 Retention durch Friktion

Der Begriff Friktion beschreibt das Phänomen Gleitreibung, also die Kraft, die zum Verschieben zweier ineinander gleitender Röhren überwunden werden muss (*Stüttgen und Hupfauf 1996, Bartsch 1998a*). Das Zylinderteleskop ist die Form der Doppelkrone, die friktiv halten soll. Angestrebt wird dabei ein möglichst großflächiger Kontakt der Reibungsflächen mit definierter Übergangspassung. Dies ist jedoch mit den alltäglichen zahntechnischen Guss- und Frästechniken nicht zu erreichen. Geringste Dimensions- und Formabweichungen führen zu gravierenden Retentionsänderungen (*Körber 1988, Bartsch 1998a, Wenz et al. 1999a, Strub et al. 1999*). So hat *Körber* für parallelwandige Zylinderteleskope einen Toleranzbereich von nur 0,009 µm ermittelt.

Die Einspielphase

Becker (1982a) stellte bei retentionsmessenden Untersuchungen fest, dass die Streuungen der Messwerte nicht allein auf Messfehlern oder ungenauen Versuchsanordnungen beruhen, sondern „in der Natur der Sache“ liegen. Nach einer gewissen Anzahl an Füge-Trenn-Zyklen nehmen diese Streuungen ab, wobei der Mittelwert der Haftkraft ebenfalls sinkt. Dies liegt daran, dass die Kontaktflächen anfangs rau und wellig sind und die wahre Kontaktfläche viel kleiner als die geometrische Fläche ist. Experimentell konnten lediglich kleinflächige oder punktuelle Kontaktbereiche gefunden werden. In Verschleißuntersuchungen wurden sowohl Steigerungen der Haftkraft aufgrund von Materialabtragungen mit Aufschuppungen, die zu Furchen mit aufgeworfenen Rändern führten, als auch deutliche Retentionsverluste im Laufe der Zeit nachgewiesen (*Stark 1996*).

Während der ersten Tragezeit des Zahnersatzes, deren Dauer von der Verformbarkeit der Legierung abhängig ist, werden diese Kontaktareale plastisch deformiert. Durch diese Verschleißvorgänge entsteht die endgültige geometrische Form der Doppelkronen erst unter Funktion (*Stüttgen und Hupfauf 1996*). Die anfangs recht starken Schwankungen der Haftung von Zylinderteleskopen werden nach dieser Einspielphase geringer, wobei auch die Haftkraft abnimmt (*Becker 1982a*). So fand *Böttger (1978)* nach 1.000 Verschleißzyklen (entspr. knapp 1 ½ Jahre) 2 - 9 % Friktionsverlust und anschließend nur noch sehr geringe Retentionsverluste (7 - 15 % in 10.000 Zyklen, entspr. knapp 14 Jahre). Dieses Schicksal erleiden sämtliche teleskopierende Elemente, also neben Zylinderteleskopen und Profilgeschieben auch die Konuskronen. Die Auswirkung auf die Haftung letzterer

ist jedoch aufgrund des andersgearteten Haftmechanismus (s. 1.6.3, S. 23) viel geringer.

Beurteilung friktiv haltender Zylinderteleskope

Da der friktiv erreichte Haftwert neben legierungsspezifischen Eigenschaften und der Oberflächengüte vom Fugendruck abhängt, die beiden letztgenannten Parameter allerdings während der Einspielphase verändert werden und geringste Dimensionsänderungen gravierende Auswirkungen haben, ist die Haftkraft von Zylinderteleskopen nicht vorherbestimmbar und muss nach Eingliederung der Arbeit in mehreren Sitzungen durch Bearbeiten der sich berührenden Flächen manuell eingestellt werden. Dabei besteht die Gefahr, dass die Retention ganz verloren geht (*Becker 1982a, Stüttgen und Hupfau 1996*). Zahntechnisch ist es nicht möglich, mathematisch exakte Parallelität zu gestalten. So können wenige hundertstel Millimeter Divergenz zwischen mehreren Zylinderteleskopen nicht mehr durch die physiologische Zahnbeweglichkeit ausgeglichen werden. Abformfehler sind in einem solchen Fall selbst durch mehrfache Korrekturabformungen nicht sicher vermeidbar. Konusförmige Kronengestaltung eliminiert diese Schwierigkeiten (*Körber 2002*).

Weiterhin ergeben sich für die Patienten Schwierigkeiten beim Ein- und Ausgliedern der Prothese. Für diesen Vorgang gelten zwei scheinbar gegensätzliche Forderungen: Einerseits soll der Zahnersatz leicht aufzuschieben und abzunehmen sein und andererseits wird ein fester Halt gegenüber abziehenden Kräften gefordert. Dies ist mit Zylinderteleskopen technisch nicht möglich. Während des gesamten Füge- oder Trennvorgangs muss Arbeit geleistet werden. Zusätzlich bestehen extreme Verkantungsgefahren. Pfeilerüberlastungen mit Kronenlockerungen oder Zahnfrakturen sind übliche Komplikationen. Verschleißbedingte Kratzer erhöhen weiterhin die Plaqueadhäsion. Folglich kann das Zylinderteleskop nicht als Verankerungselement (bestenfalls als Führungselement) empfohlen werden (*Körber 1968 und 1988, Strub et al. 1999, Wenz et al. 1999a, Weigl et al. 2000*).

1.6.2 Zusätzliche retentive Elemente

Um diesen Nachteil zu umgehen, kann man die 1966 von *Hofmann* bzw. *Graber* beschriebenen „Doppelkronen mit Spielpassung“ verwenden und von vornherein auf jegliche Friktion verzichten. *Lehmann und Gente* haben 1988 entsprechende

Prothesen ohne große und kleine Verbinder im Einstückgussverfahren komplett aus einer Co-Cr-Mo-Legierung hergestellt, was den technischen Aufwand verringert (*Lehmann 1999*). In Verbindung mit einem zusätzlichen Retentionselement ging diese Verankerungsform als „Marburger Doppelkrone“ (MD) in die Literatur ein (*Wenz et al. 1999a, Caesar 2001*). Hierfür wird das Haftelement „TK-Snap“^{®1} empfohlen, dessen Anwendbarkeit bestätigt werden konnte (*Stark und Stiefenhofer 1994*). Des Weiteren kann die Marburger Doppelkrone durch einen okklusalen Resilienzspielraum variiert werden. Resilienzteleskope, wie sie 1973 von *Hofmann und Ludwig* beschrieben wurden, sind heute in ihrer Indikation jedoch umstritten (*Strub et al. 1999*). Langzeiterfahrungen mit dem MD-System zeigen Überlebenserwartungen, die zwischen denen von starr und resilient gelagertem Zahnersatz liegen (*Lehmann 1999*).

Neben den konfektionierten zusätzlichen Retentionselementen, wie TK-Snap^{®1}, TK-Frik^{®2}, TK-1^{®3}, MT-Klick^{®3} oder Securalock^{®4}, können Friktionsstifte in Verbindung mit der Funkenerosion empfohlen werden, die über Jahre aktivierbar sind (*Michel 2002*). Sie sind schon längere Zeit bekannt und gewannen im Zusammenhang mit den Kostendämpfungsgesetzen der 80er Jahre an Bedeutung, da sie die Verwendung schwer exakt zu bearbeitender NEM-Legierungen⁵ ermöglichen (*Weber 1989*).

1.6.3 Die Konushaftung

Wird eine Doppelkrone konusförmig statt parallelwandig angefertigt, so ergeben sich zahlreiche Vorteile (*Körber 1968*): Kegelstümpfe werden in der Technik immer dann eingesetzt, wenn temporär lösbare Verbindungen erreicht werden sollen. Solange ein geringer okklusaler Spalt besteht, spielen die verschiedenen Toleranzen bezüglich der Passung keine Rolle mehr - alle Koni haften gleich fest. Da nur zwischen den korrespondierenden Berührungsflächen Parallelität besteht, gleitet der Außenkonus selbstständig und ohne friktive Kontakte in seine Endlage, was

¹ Firma Si-tec; eine Titankugel, die in einen an der Außenkrone befestigtem Kasten mit elastischem Kunststoffkörper eingesetzt ist, schnappt in eine Mulde der Innenkrone ein.

² Firma Si-tec; verschieden starke, austauschbare Elemente.

³ Firma Microtec; Friktion ist mittels Schraube einstellbar.

⁴ ZL-Microdent-Attachment; federgelagerte Saphir-Kugel als Patrizie.

⁵ Zu entfernende, ausgeprägte Oxidschichten nach dem Guss und erschwerte Kaltbearbeitung machen exakte friktive Passungen unmöglich.

das Eingliedern des Zahnersatzes vereinfacht, wobei die Haftung erst in dieser endgültigen Position durch Verkeilung entsteht. Der Haltemechanismus beruht also ausschließlich auf Ruhehaftung. Nach dem ersten Löseruck kann die Außenkrone, im Gegensatz zum Zylinderteleskop, ohne Gleitreibung nahezu berührungslos abgenommen werden. Dies erfüllt nicht nur die Anforderungen an Halteelemente, leicht ein- und ausgliederbar zu sein und dennoch fest zu haften, sondern es minimiert zusätzlich noch den Materialverschleiß infolge des Abriebs während der Füge- und Trennphasen (*Körber 1970*).

Das Haftmechanismus-Modell nach *K. Körber*

Die Konizität quantifiziert *Körber (1968)* im sogenannten „Konuswinkel“¹ und die Kraft, die zum Lösen der Doppelkrone nötig ist, in dem Ausdruck „Haftkraft“² (dazu Abschnitt 3.1: „Hinweise zu den verwendeten Definitionen“, S. 32).

Körber leitet seine Theorie der Haftkraftentstehung von dem physikalischen Prinzip der „schiefen Ebene“ ab: Ein von der Schwerkraft beeinflusster Körper rutscht auf einer großen Steigung immer wieder ab. Ist die Ebene jedoch flacher als ein bestimmter Grenzwinkels (ρ_0), so bleibt er liegen. Dieser als „Selbsthemmung“ bezeichnete Effekt bedingt einen „Selbsthemmungsbereich“ ($\alpha < \rho_0$)³, in dem die potentielle Energie sozusagen in der Haftreibung der Ruhe aufgespeichert wird. *Körber* überträgt diese Zusammenhänge durch ein Modell mit quasi starrem⁴ Außenkonus und starrem Innenkonus auf die Konuskronen. Nach trigonometrischen Berechnungen hängt die Haftreibung (T_0) neben der Fügekraft (L_k) und einer systemspezifischen Konstante (μ_0) ausschließlich von der Konizität ab:

¹ $= \frac{\alpha_k}{2}$, wobei der Index „k“ für „Definition nach *Körber*“ steht. Er darf nicht mit dem „Kegelwinkel“

verwechselt werden, weshalb er von *Lenz (1983)* „Konvergenzwinkel“ (α_i) genannt wird.

² Sie darf nicht mit der „Haftungskraft“ verwechselt werden, die eine tangential wirkende „Haftreibungskraft“ ist und wird daher von *Lenz (1983)* als „Lösekraft“ bezeichnet.

³ Zur Beschreibung der schiefen Ebene wird der „Konvergenzwinkel“ α benötigt, der sich vom „Konuswinkel“ unterscheidet.

⁴ „Quasi starr“ bedeutet weitestgehend starr, abgesehen von dem geringfügigem Aufbiegen des Außenkonus beim Fügen, der zur Verkeilung führt.

$$[1] \quad T_o = \mu_0 \cdot N = \mu_0 \frac{L_k}{\sin \frac{\alpha_k}{2}}$$

Haftreibung nach K. Körber

- T_o maximale Haftreibung der Ruhe
- μ_0 Haftreibungszahl (dimensionslose Materialkonstante, abhängig von Materialkombination, Rauigkeiten der Oberflächen und Feuchtigkeit)
- N Normalkraft (als Reaktion auf die Anpresskraft)
- L_k Fügekraft
- $\frac{\alpha_k}{2}$... Konuswinkel

Mit einer angenommenen Fügelast von 100 N und einer Haftreibungszahl von 0,2 für zahntechnisch standardmäßig bearbeitete Gold- gegen Goldflächen erhält er die typische „Konuswinkel-Haftkraft-Funktion“. *Lenz (1983)* weist jedoch darauf hin, dass die Haftreibung (T_o) tangential zur Haftfläche wirkt, also im Konvergenzwinkel zur eigentlichen „Haftkraft“. Die experimentellen Untersuchungen von *Körber* bestätigten seinen Kurvenverlauf, ergeben aber geringere Haftungswerte, so dass er empfiehlt, den Konuswinkel für Stützanker auf 6° bis 7° und für Haftanker auf 5° einzustellen (*Körber 1988*).

Andere, den Haftmechanismus erklärende Modelle

1980 stellten *Stenzel et al.* ein Haftmechanismus-Modell vor, das sich aus der Elastizitätstheorie ableitet und die Außenkrone als einen elastischen Ring idealisiert, der auf einen Kegelstumpf aufgeschoben wird. *Lenz* veröffentlichte 1982 ein vektorielles mathematisches Modell zur Erklärung der Haftung, das die Doppelkrone als eine elastische Schale auf einem starrem Stumpf abstrahiert. Da er sowohl materialspezifische als auch geometrische Parameter weitgehend eliminieren konnte, veröffentlichte er 1983 ein vereinfachtes Modell, das zu gleichen Zusammenhängen führt und dem Grundansatz von *Körber (1968)* ähnelt. *Lenz (1982: S. 10)* wirft *Körber* jedoch vor, dass er in seiner Erstbeschreibung „die bekannte Haftungsbedingung »Klotz auf schiefer Ebene« auf den Konus“ übertrug, „ohne allerdings ausdrücklich sicherzustellen, dass dann der Konvergenzwinkel und nicht der Konuswinkel¹ die Rolle des Neigungswinkels der schiefen Ebene übernimmt“. Diesem Untersuchungsbedarf nachgehend, prüfte *Lenz (1983)* die Hypothesen von *Körber*.

¹ *Lenz* bezeichnet mit „Konvergenzwinkel“ den halben Kegelwinkel, den er hier auch „Konuswinkel“ nennt. *Körber* versteht unter „Konuswinkel“ genau diesen. Laut *Lenz* lässt *Körber* also die Frage offen, ob der ganze oder der halbe Kegelwinkel die Rolle des Neigungswinkels übernimmt.

Bedeutsam ist, dass alle Modelle übereinstimmend davon ausgehen, dass die materialspezifischen Eigenschaften Elastizitätsmodul, Schubmodul und Querkontraktionszahl sowie die geometrischen Parameter Kronenhöhe, Kronendurchmesser und Kronenwandstärke in den zahntechnisch relevanten Bereichen keinen mathematischen Einfluss auf die resultierende Haftung haben.

Folgende Zusammenhänge sind von praktischer Bedeutung:

Ein Konus haftet, wenn der Konvergenzwinkel (β) den Grenzhaftungswinkel (ρ_0) unterschreitet:

$$[2] \quad \beta < \rho_0$$

Alle Autoren verknüpfen die dann entstehende Lösekraft (L , auch „Haftkraft“ genannt) mit der Fügekraft (F) im Sinne von:

$$[3] \quad L = F \cdot x^\circ$$

Der Faktor „ x° “ ist jeweils nur von der Konizität (β) und von der Haftreibungszahl (μ_0) abhängig, für die wiederum folgender Zusammenhang gilt:

$$[4] \quad \mu_0 = \tan \rho_0$$

Dies ermöglicht es nun, den Haftungskoeffizienten (μ_0) experimentell zu ermitteln, indem man mit der entsprechenden Werkstoff-Paarung den Grenzwinkel (ρ_0) austestet. Er wird durch die entsprechende Werkstoff-Paarung, deren Oberflächenbeschaffenheit, die sich im Rauheitsgrad niederschlägt, und dem Schmierungsgrad der Berührungsflächen beeinflusst. Da letzterer den Einfluss der Konushaftung auf galvanischen Doppelkronen sehr stark verändern kann (s. 1.6.5, S. 28), bedarf diese Tatsache näherer Beleuchtung. Die Größe der Berührungsfläche und die entstehende Normalkraft (zu weiteren Ausführungen zum Haftmechanismus s. Abschnitt 5.3.1, S. 78) beeinflussen μ_0 nicht (*Lenz 1983*).

Verknüpft man [2] und [4], so erhält man die allgemein gültige Haftungsbedingung:

$$[5] \quad \tan \beta \leq \mu_0$$

Der kritische Winkelbereich (ρ_0), über dem keine Konushaftung mehr möglich ist, liegt unter üblichen zahntechnischen Bedingungen bei ca. 9° (*Körber 1988*).

Manche Autoren (*Strub et al. 1999, Wolfart und Kern 2000*) gehen pauschal davon aus, dass die Haftkraft in etwa einem Drittel der Fügekraft entspricht. Dies trifft zwar für eine 6° -Konuskrone zu, bei einer Konvergenz von 2° liegt das Verhältnis (x°) hingegen bei 69% (*Lenz 1983*).

Der Kaudruck, der letztendlich die Fügelast bedingt, bleibt jedoch als variable

Größe bestehen. Er kann recht unterschiedlich ausfallen, bedenkt man allein, dass im Gegenkiefer Totalprothesentragende Patienten im Vergleich zu Vollbezahnten oder gar Knirschern viel weniger Kaukraft aufbringen (*Becker 1982a und 1982c*). Den Anforderungen an Halteelemente (s. Abschnitt 1.5, S. 18) würde ein Haftmechanismus gerecht, der über einer gewissen Auflast zu keiner weiteren Steigerung der Haftkraft führt. Von diesbezüglichen Versuchen, durch nachträgliches Einbringen eines okklusalen Stopps die Einsenktiefe beim Fügen zu verringern, wird berichtet (*Wolfart und Kern 2000*).

1.6.4 Auswirkungen von Flüssigkeiten im Fügespalt

Die Haftreibungszahl (μ_0) ist vom Schmierungsgrad der Oberflächen abhängig. Nach *Bartsch (1998a)* führt menschlicher Speichel bei exakter spaltfreier Passung von Primär- und Sekundärteil durch Adhäsion mindestens zur Verdopplung der Haftkraft. *Becker (1982b)* weist darauf hin, dass Wasser und Speichel in klinischen Doppelkronensystemen immer mit am Wirken sind. Das Phänomen „Adhäsion“, das er auf die okklusale Kronenfläche bezieht, bedingt zum Beispiel das feste Zusammenhalten zweier wasserbenetzter Glasplatten. Trotz ihrer großen Haftung lassen sie sich sehr leicht gegeneinander verschieben. Wasser und künstlicher Speichel bewirkten in *Beckers* Experimenten stets Haftkraftsteigerungen. Wurden jedoch geringe Mengen von Ölen (oder Fetten) in den Fügespalt gegeben, so sank die Haftkraft. Tatsächlich vermindern Öle die Reibung über einen längeren Zeitraum. Interessanterweise ließ sich die Haftung steigern, wenn soviel Öl in den Spalt gegeben wurde, dass die zervikale Stufe vor dem Fügen ebenfalls umspült war. *Becker* interpretiert dieses scheinbar paradoxe Verhalten durch das Auftreten erheblicher Strömungswiderstände beim Ausgleichen des Unterdruckes, der ja durch die abdichtende Flüssigkeit entsteht, solange diese nicht nachfließt. Für diesen, auch Hydraulikprinzip genannten Vorgang, wird Viskositäts-Abhängigkeit angenommen.

Faber und Huber (2001) postulieren, dass der Dampfdruck der entsprechenden Flüssigkeit den maximal erreichbaren Unterdruck und somit die Haftkraft begrenzt, da die Flüssigkeit sonst zu sieden beginnt und gasförmige Siedebblasen dehnbar sind. Aufgrund des trägen Nachfließens der Flüssigkeit lässt sich dieser maximale Unterdruck bei schnellem Abziehen erreichen. Bei langsamen Trennen der Teile wird der Unterdruck durch nachströmende Flüssigkeit ausgeglichen, bevor Unterdruckwerte im Dampfdruckbereich erreicht werden. Somit besteht ein Zusammen-

hang zwischen Abzugsgeschwindigkeit und Abzugskraft.

1.6.5 Thesen zum Haftmechanismus galvanogeformter Doppelkronen

Über die Vorzüge von galvanoplastischen Doppelkronen wird mehrfach berichtet. Zahlreiche Publikationen (*Stauch und Stauch 1996, Biewer 1998, Wirz und Jäger 1998, Wirz 1999b, Hör 2000, Münich et al. 2000, Dietzschold 2001 und 2002, Heel und Chan 2001, Wichnalek 2001, Zimmermann 2002, Braunbarth und Münich 2003, Ernst 2003, Jung 2003*) erklären klinische und zahntechnische Vorgehensweisen und berichten von guten Erfahrungen, ohne jedoch Haftungsfragen zu klären.

Im Schrifttum findet man Schlagworte, wie »Friktive Galvanodoppelkronen« (*Klaus 2003*) oder »dauerhafte Friktion von AGC[®]-Doppelkronen« (*Busch 1999, Hoffmann 2001, Meschke und Volf 2001*), ohne dass in diesen Arbeiten ein Wort über den Haftmechanismus verloren wird. Es ist jedoch mehr als nur fraglich, inwiefern Friktion bei galvanischen Zylinderteleskopen relevant ist.

In der Literatur ließen sich keine genaueren Hinweise über die Art der Einflüsse von Konushaftung bei Galvanodoppelkronen finden. Vielmehr werden die durch Flüssigkeiten hervorgerufenen hydraulischen und adhäsiven Phänomene (s. Abschnitt 1.6.4, S. 27) zur Erklärung der Haftung herangezogen (*Weigl et al. 2000*). Dazu wird gern der Begriff „tribologisches System“ verwendet. Der Ausdruck „Tribologie“ dient als Oberbegriff für das Gesamtgebiet »Reibung-Verschleiß-Schmierung« (*Diedrichs 1995*).

1.6.6 Offene Fragen zum Haftmechanismus von Galvanodoppelkronen

Bisherige Untersuchungen führten zu der Annahme, dass die Auflast und eventuelle Verschleißerscheinungen aufgrund der schmierenden Flüssigkeit keinen bedeutsamen Einfluss auf die Haftung ausüben. Eventuelle Auswirkungen von Konuswinkel, Höhe und Durchmesser seien hingegen noch zu untersuchen (*Weigl et al. 2000*). *Faber* soll in einem Vortrag während des „3. Basler Titan- und Galvanosymposiums“ geäußert haben, dass größere Höhe und Durchmesser der Doppelkronen zu Steigerungen und breitere Fügespalten zu Verringerungen der Abzugskräfte führen (*Hopp 2003*).

Offen bleibt hierbei die Frage, auf welche Weise geometrische Parameter Einfluss ausüben. Ist Kronenhöhe oder -durchmesser entscheidender? Welchen Einfluss übt der Konvergenzwinkel aus? Wie verhalten sich diese Parameter zueinander?

Oder spielt vielleicht vornehmlich die Größe der Adhäsionsfläche eine Rolle? Würden dann unterschiedliche Parameter-Kombinationen zu vergleichbarer Haftung führen?

Weiterhin seien Abzugsgeschwindigkeit und Viskosität einflussreiche Größen. Diese Zusammenhänge verdeutlichten *Faber und Huber* auf einem Poster zur 50. Jahrestagung der DGZPW (2001) in Bad Homburg. Dabei haben unterschiedliche Viskositäten der Zwischenflüssigkeiten, die sie durch verschiedene Glukosekonzentrationen einstellten, jedoch keine deutlichen Auswirkungen gezeigt. Vielmehr vermuten sie die Begrenzung der Haftwerte, wie bereits erwähnt (s. Abschnitt 1.6.4, S. 27) durch den jeweiligen Dampfdruck.

So ergibt sich die Frage, inwieweit sich bei Verwendung andersgearteter Flüssigkeiten größere Auswirkungen einstellen. Welche Wirkungen würden hier beispielsweise Öle bringen? In welchem Maße liegt hier überhaupt Viskositätsabhängigkeit vor? Oder hängt alles nur vom Dampfdruck ab?

2 Ziele der Arbeit

Ziel dieser Arbeit war es, Zusammenhänge zu klären, die es ermöglichen, die Haftkraft von galvanoplastischen Doppelkronen auf möglichst einfache und dennoch sichere Art einstellen zu können.

Für konventionell gegossene Doppelkronen existierten bereits umfangreiche haftkraftanalysierende Modelle, deren Richtigkeit ausgiebig evaluiert wurde (*Körber 1968 und 1988, Stenzel et al. 1980, Becker 1982a - 1982c, Lenz 1982 und 1983, Wolfart und Kern 2000*).

Es gab auch schon einige Studien, die sich prinzipiell mit dem Haftmechanismus galvanoplastischer Doppelkronen befassten, jedoch diesen dabei recht knapp beleuchten (*Diedrichs 1995, Bongartz und Rosenhain 1996, Biewer 1999, Bregler 2002, Dollansky 2002*). Wenige Autoren hatten versucht, quantitative Aussagen zu treffen (*Weigl and Lauer 2000, Weigl et al. 2000*). Einzelne Ergebnisse lagen nur als Tagungsposter vor (*Faber und Huber 2001, Hartlage und Faber 2001*).

Da längst noch nicht alle Fragen geklärt sind, wurde in dieser Arbeit angestrebt, den Haftmechanismus auf seine möglichen Einzelkomponenten hin praktisch zu untersuchen und die jeweiligen Ergebnisse theoretisch zu untermauern.

2.1 Zu evaluierende Parameter

Geometrische Form

Von besonderer praktischer Relevanz war die Frage, inwieweit geometrische Variationen Einfluss auf die Haftung ausüben. Nur wenn die Zusammenhänge zwischen den Parametern Innenkronenbasisdurchmesser (d_u), Konvergenzwinkel (β), Kronenhöhe (h) klar sind, kann beurteilt werden, inwiefern es sinnvoll wäre, Empfehlungen bezüglich der Präparationsform auszusprechen. Unterschiedliche Wichtungen oder etwa die Feststellung, dass verschiedene Parameter-Kombinationen zu vergleichbaren Ergebnissen führen, könnten dem praktisch tätigen Zahnarzt helfen, die individuell günstigste Präparationsform zu wählen, die substanzschonend ist, zu ästhetisch akzeptablen Ergebnissen führt und die gewünschte Abzugskraft (L) bedingt.

Umgebendes Zwischenmedium

Da die Haftung der Galvanoaußenkronen auf hydraulische und adhäsive Phänomene zurückgeführt wurde, bisher aber noch unklar war, welche physikalischen Eigenschaften der verwendeten Flüssigkeiten welche Auswirkungen bedingen, sollten die Parameter Viskosität (η), Dampfdruck (P_{Dampf}) und Oberflächenspannung (σ) Beachtung finden. Ziel war es, zu untersuchen, inwieweit die Verwendung von Siliconölen im Vergleich zu wässrigen Lösungen die Haftkraft ändert.

Abzugsgeschwindigkeit

Da gezeigt wurde, dass die Abzugsgeschwindigkeit (v_l) zu Änderungen der Haftungswerte führt (*Faber und Huber 2001*), sollte diese bei den Untersuchungen ebenfalls variiert werden.

2.2 Die Notwendigkeit separater Betrachtung

Da mechanistisch Friktion, Konuspassung, Adhäsion und hydraulische Wirkungen bei Haftungsfragen eine Rolle spielen können (s. Abschnitt 1.6, S. 20) und die Frage bestand, welcher Parameter in wie starkem Ausmaß an der Gesamthaftung beteiligt ist, war es sinnvoll, den Haftungsmechanismus nicht nur in seiner Gesamtheit zu betrachten, sondern diesen auch in seine Einzelkomponenten zu zergliedern.

3 Methodik

Zur Bestimmung von Haftungskräften wurden unterschiedliche Doppelkronenpaare hergestellt und in vitro manuell unter Verwendung verschiedener Zwischenmedien gefügt und in einer Universalprüfmaschine abgezogen. Die Kräfte, die zum Abziehen nötig waren, wurden gemessen und in Weg-Kraft-Diagrammen festgehalten. Um den Versuchsaufbau genauer erläutern zu können, sind einige Definitionen zu treffen:

3.1 Hinweise zu den verwendeten Definitionen

In der zahnärztlichen Prothetik werden leider Begrifflichkeiten recht unterschiedlich verwendet, so dass es schnell zu Verwirrungen und Missverständnissen kommen kann (*Körber 1987*). So erscheint es nicht verwunderlich, dass für physikalische Modelle zur Erklärung von Haftungsphänomenen ebenfalls Größen verschieden definiert werden und somit Verwechslungen möglich sind. Dies betrifft nicht etwa nur Formelzeichen.

Bevor Material und Methoden eindeutig beschrieben werden können, erscheint es wichtig, die verwendeten Variablen zu beschreiben und die Größen, die bei eigenen Experimenten und Überlegungen zu Grunde gelegt werden, festzulegen.

Abbildung 1 und 2 (S. 33) verdeutlichen die grundlegenden Definitionen. Deren Bezeichnungen sind in Tabelle 1 (S. 34) zusammengefasst.

3.1.1 Geometrische Form

Der „Basisdurchmesser“ (d_u) bezeichnet den Durchmesser der Innenkrone am zervikalen Ende, der Index „u“ steht für „unten“. Als Messpunkte dienen dabei die Schnittpunkte der verlängerten Tangente an der Mantelfläche mit der horizontalen Verbindungslinie der äußeren Abschlüsse der Hohlkehlen. Damit wurde zur Vereinfachung für Berechnungen die Krone geometrisch als Kegelstumpf abstrahiert. Experimentell wurden die Prüfkörper dennoch mit der klinisch empfohlenen Hohlkehle versehen. Alternativ finden der „untere Radius“ ($r_u = \frac{1}{2} d_u$) und der „obere Radius“ (r_o) Verwendung. Die „Kronenhöhe“ (h) wird als Abstand der Okklusalfäche zu der eben genannten horizontalen Verbindungslinie festgelegt. Der Flächeninhalt dieser okklusalen Fläche wird mit „ A_o “ und derjenige der Mantelfläche mit „ A_M “ bezeichnet.

Die Konizität wird üblicherweise nach *Körber (1968)* im „Konuswinkel“ ($\frac{\alpha_k}{2}$) ausgedrückt. Dieser entspricht dem halben „Kegelwinkel“ (α_k)¹. *Lenz (1983)* weist jedoch darauf hin, dass diese beiden Winkel leicht verwechselt werden können und beschreibt die Konizität daher im „Konvergenzwinkel“ (α_i). In dieser Arbeit kommt die Definition nach *Lenz* zum Einsatz. Um Verwirrungen zu vermeiden, wird der Konvergenzwinkel vom Autor mit (β) gekennzeichnet.

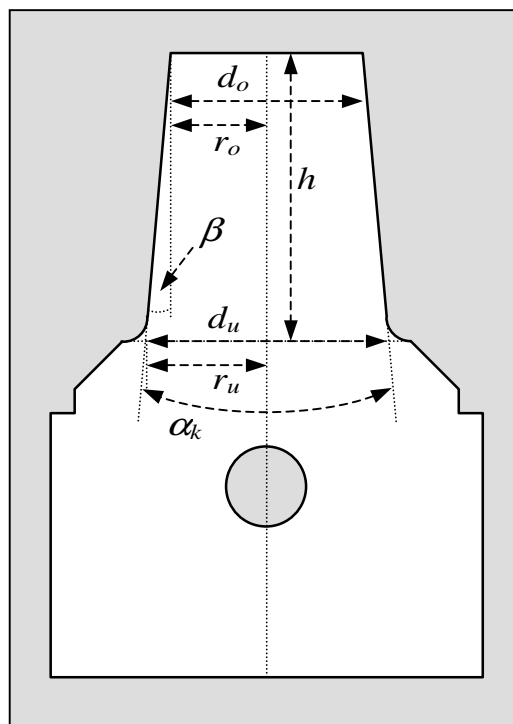


Abbildung 1. Maße von Primärteilen.

3.1.2 Kraftwirkungen

Die Kraft, mit der die Sekundärkrone auf die Primärkrone geschoben wird, wird als „Fügekraft“ bezeichnet. Auch hier sind unterschiedliche Variablen im Gebrauch. Eingängigerweise wird die Entscheidung zur Kennzeichnung als „F“ nach *Lenz (1983)* getroffen. *Körber (1968)* verwendet hierfür „L“². Mit „L“ bezeichnet *Lenz* wiederum die „Lösekraft“, also die Kraft, die aufgebracht werden muss, um die gefügte Außenkrone von der Innenkrone abzuziehen (oder „zu lösen“).

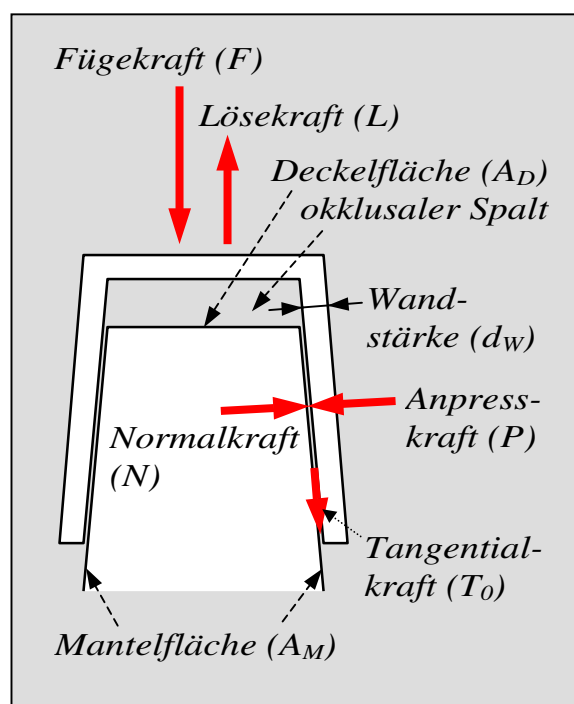


Abbildung 2. Kräfte zwischen Doppelkronen.

¹ Die Indizes „k“ und „i“ wurden zur Kennzeichnung für „nach *Körber*“ bzw. „*Lenz*“ hinzugefügt.

² L wurde, wo zitiert, zur Abgrenzung als „L_k“ gekennzeichnet.

Auch für die Lösekraft wird die Wahl im Sinne von *Lenz* getroffen. *Stenzel et al. (1980)* bezeichnen die Lösekraft mit „ F_A “ und die Fügekraft mit „ F_F “. Wichtig ist dabei, dass beide Kräfte parallel zur Schwerpunktsachse, also „axial“, wirken.

Die Fügekraft bewirkt ein Anpressen der Außenkroneninnenwand an die Innenkronenaußenwand. Dadurch entsteht die „Anpresskraft“ (P), die wiederum die gegenseitig gerichtete „Normalkraft“ (N) hervorruft. N verhindert ein Eindringen des auflastenden Körpers in die Unterlage. Beide wirken senkrecht zur Mantelfläche. Hier gibt es keine verwirrenden Bezeichnungsabweichungen. Die „Haftungskraft“, auch „Haftreibungskraft“ (*Lenz 1983*) oder „maximale Haftreibung der Ruhe“ (*Körber 1968*) genannt, wird mit „ T “ oder „ T_0 “ (*Körber 1968*) bezeichnet. *Lenz 1983* gibt hier zu bedenken, dass diese „Haftreibungskraft“ nicht mit der Lösekraft (L) verwechselt werden darf, die ja häufig „Haftkraft“ genannt wird. In *Körbers* Buch „Konuskronen“ (1988) wird diese Unterscheidung tatsächlich nicht deutlich. Daher wird im Ergebnis- und Diskussionsteil dieser Arbeit der Ausdruck „Haftkraft“ vermieden.

Tabelle 1. Unterschiedliche Bezeichnungen für wichtige Variablen.

eigene Bezeichnung	eigene Variable	<i>Körber 1968</i>	<i>Lenz 1983</i>	<i>Stenzel et al. 1980</i>
Konvergenzwinkel	β	Konuswinkel = $\frac{1}{2} \alpha$	α	α
Fügekraft	F	L	F	F_F
Lösekraft	L	Haftkraft (ohne Symbol)	L	F_A
Anpresskraft	P	P	P	P
Normalkraft	N	N	N	N
Tangentialkraft	T	Haftreibungskraft = T_0	T	T

3.2 Der Versuchsaufbau zur Messung der Haftkraft

Wie schon erwähnt, ist das „Einstellen“ einer definierten Lösekraft von Doppelkronen ein wünschenswertes Ziel. Es ist jedoch für den Praktiker nicht immer leicht, die erreichte Haftung sicher zu beurteilen. Zu diesem Zweck haben verschiedene Firmen, wie die „Austenal GmbH“ (*Strub et al. 1999*) oder „Bredent“ (*Kammertöns 1989*), für die alltägliche Arbeit in der Zahnarztpraxis und im zahnärztlichen Labor spezielle Messinstrumente auf den Markt gebracht.

Für wissenschaftlich-theoretische Untersuchungen erscheint es jedoch sinnvoller, ein elektronisch gestütztes Registrierverfahren mit der Möglichkeit zur Erfassung

von Kraftverläufen zu verwenden.

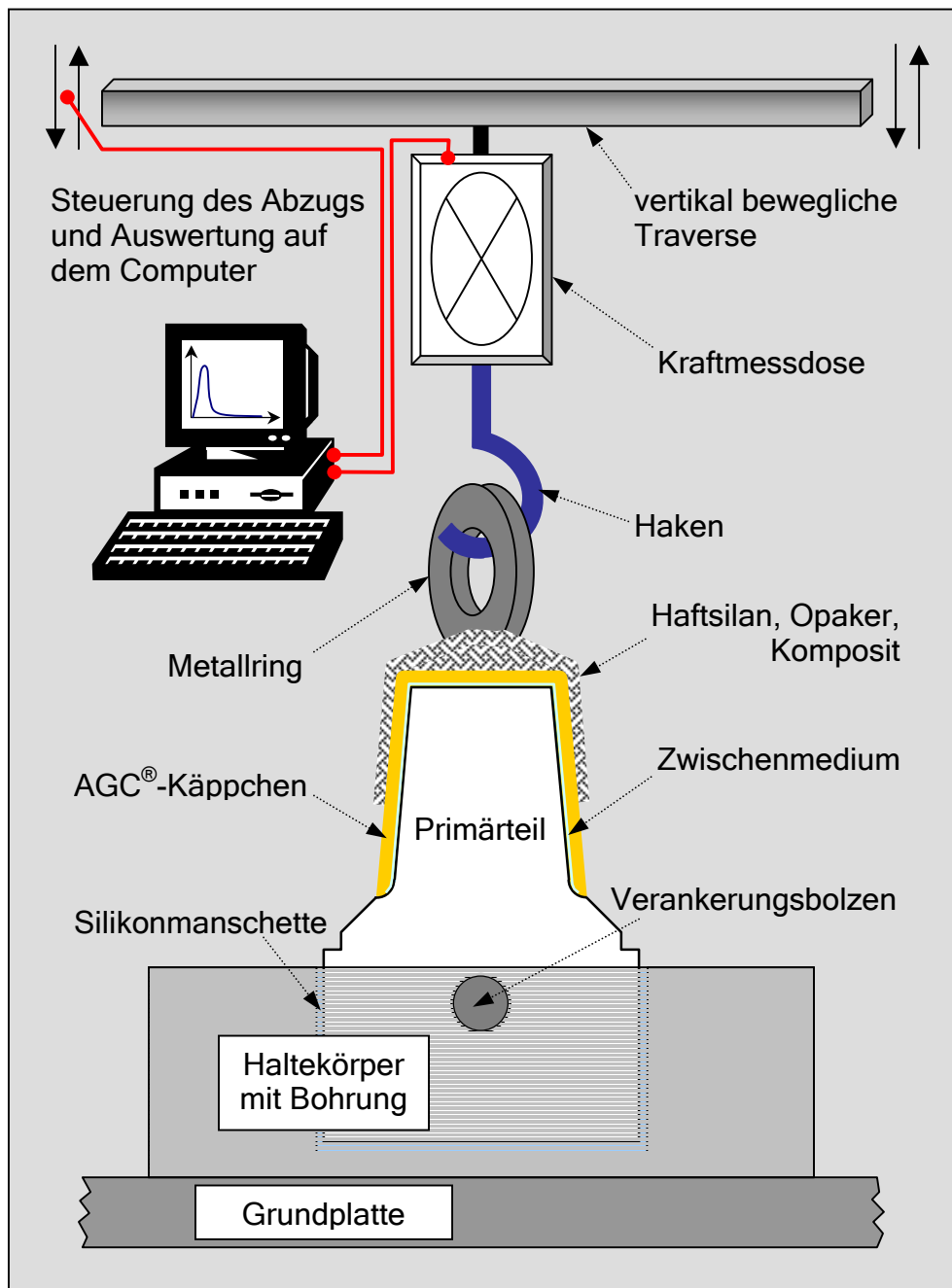


Abbildung 3. Versuchsaufbau zur Messung von Lösekräften.

3.2.1 Der allgemeine Versuchsaufbau

Das Prinzip des Versuchsaufbaus wird in Abbildung 3 skizziert.

Die unterschiedlichen Primärteile wurden alle mit dem gleichen Fußteil versehen. Das heißt, es wurden Einstück-Primärprüfkörper aus Vollmetall angefertigt, statt „normale“ Innenkronen auf Zahnstümpfe zu zementieren (s. Abschnitt 3.2.2, S. 36). Der Fuß dieser Primärteile konnte in eine vertikale Bohrung des mit der

metallischen Grundplatte verklebten, ebenfalls metallischen Haltekörpers gesteckt werden. Die Arretierung der Primärkörper wurde über einen Verankerungsbolzen vorgenommen, der durch ein horizontales Loch geschoben werden konnte, das sich gleichermaßen an Halte- und Prüfkörper befand. In dem geringen Spalt (wenige $\frac{1}{10}$ mm) zwischen Primärkörper und Bohrungswand des Haltekörpers wurde zahnärztliches additionsvernetzendes Silikon geklebt. Dies geschah mengenmäßig vor allem auf dem Bohrungsboden, um den Prüfkörper vor dem Abzug des Außenkappchens in einer maximalen vertikalen Position zu halten und Relativbewegungen beim Trennen der Doppelkronen zu vermeiden. Die minimale Silikonmanschette lässt in Kombination mit der Bolzenarretierung, die zu einer leicht drehbaren Lagerung führt, geringfügige horizontale Bewegungen um die Bolzenachse zu. Dies verhindert - vornehmlich bei Zylinderteleskopen - Verkantungen beim Trennen der Kronen durch etwaige minimale Unparallelitäten. Die Symmetrieachse des Primärprüfkörpers richtet sich selbständig zur Abzugsachse der Außenkrone aus.

An den Okklusalfächen der „direkt“ galvanisierten Außenkronen (s. Abschnitt 3.2.3, S. 38) wurde je ein Metallring mittels Metall-Kunststoff-Verbundtechnologie befestigt. Die Kronen wurden mit Alkohol gereinigt, im oberen Bereich mit „Metal Primer“[®] (GC) und nach dem Verdunsten des enthaltenen Lösungsmittels mit Opaker bestrichen und anschließend mit fließfähigem Verblendkomposit („Visio-Gem“[®], 3M-Espe) in mehreren Schichten beschickt. So wurde der Metallring mechanisch sicher verankert. Die Kompositschichten wurden, wie üblich, 90 Sekunden und abschließend noch einmal 180 Sekunden im Belichtungsgerät (Dentacolor S, Heraeus Kulzer) polymerisiert.

In den Metallring (Unterlegscheibe aus dem Baumarkt) griff ein Metallhaken, der über Klemmbacken an der Kraftmessdose der Universalprüfmaschine befestigt war. Diese war fest mit der computergesteuert beweglichen Traverse verbunden. So konnte der Versuchsablauf über eine entsprechende Software gesteuert werden, wobei die gemessenen Abzugskräfte in Verbindung mit der zurückgelegten Abzugsstrecke in Weg-Kraft-Diagrammen elektronisch registriert wurden.

3.2.2 Die Primärprüfkörper

Werkstoffkombination

Aus heutiger werkstoffkundlicher Sicht ist es von Vorteil, wenn der formbestimmende Anteil einer reversiblen Fügung aus einem verschleißfesteren Werkstoff

und die Sekundärkrone aufgrund der erwähnten Einspielvorgänge aus einem „anpassungsfähigerem“ Material besteht (*Stüttgen und Hupfauf 1996*). Galvanogold ist viel duktiler als kristallisiertes Gussmetall und weist aufgrund geringerer Fehlstellenanzahl eine hohe Härte auf. AGC[®]-Galvanogold (Wieland) ist daher für Außenkronen gut einsetzbar (*Busch 1999*). Innenkronen können zwar prinzipiell ebenfalls galvanoplastisch hergestellt werden, dies erfordert jedoch hohes zahn-technisches Können und kann bei mehreren Pfeilern aus Parallelitätsgründen schnell zu Problemen führen. So werden Primärkronen üblicherweise gegossen (*Diedrichs und Rosenhain 1995, Wirz 1999d*). Demzufolge wurden die Primärteile aus einem härteren Metall hergestellt. Da mit keinem nennenswerten Einfluss durch Friktion zu rechnen ist (s. Abschnitt 1.6.5, S. 28), wurden die Primärteile in der Feinmechanischen Werkstatt der Technischen Betriebseinheit der Physikalisch-Astronomischen Fakultät der FSU Jena aus Edelstahl präzisionsgefertigt. So entstand die Werkstoffkombination V₂A / AGC[®]. Dass Materialkombinationen mit unedleren Legierungen für die Innenkronen und Feingold für die Außenkronen als unbedenklich bewertet werden, wurde bereits erwähnt (s. Abschnitt 1.4.2, S. 15).

Die Geometrie der Prüfkörper

Körber und Blum (2003) beschreiben, dass bei einer durchschnittlichen Schichtstärke der Innenkoni von 0,44 mm inklusive Verblendung 1,97 mm Gesamtschichtstärke resultiert. Auch wenn AGC[®]-Innenkronen nur ca. 0,2 mm Wandstärke aufweisen, kann man guten Gewissens 2 mm Präparationsbreite oral und vestibulär und 1 mm approximal annehmen. Für Doppelkronen nutzbare Zähne (Eckzähne, Prämolaren und Molaren) haben durchschnittliche Durchmesser zwischen 7,25 mm (UK 3) und 10,85 mm (UK 6) (*Lehmann und Hellwig 1993*). Da die Prüfkörper rotationssymmetrisch angefertigt wurden, wurde für den Standardprüfkörper ein Basisdurchmesser von 6,5 mm festgelegt. Um den Einfluss des Kronendurchmessers untersuchen zu können, wurden zusätzlich Zylinderteleskope mit 4,5 mm und 9,0 mm Basisdurchmessern hergestellt.

Für den Konvergenzwinkel finden sich in der Literatur Vorschläge zwischen 4° und 6° (*Körber 1988, Strub et al. 1999*). Auf dem „3. Baseler Galvano-Titan-Symposium“ (*Hopp 2003*) wurde jedoch von mehreren Referenten für Galvanodoppelkronen eine Konizität von 2° empfohlen. Da bis zu einem Präparationswinkel von 12° nicht mit Kronenlockerung vom Stumpf zu rechnen ist (*Wichmann 1999a*), sind alle diese Vorgaben praktisch anwendbar. So wurden Prüfkörper als Zylinderteleskope

mit den Konvergenzwinkeln 2° , 4° und 6° angefertigt, wobei der Bereich 2° bis 4° die größte klinische Bedeutung besitzt.

Die Primärteile sind alle rotationssymmetrisch, bestehen im oberen Anteil aus der Innenkrone, wobei der allgemeinen Empfehlung nach zirkulärer Abstützung des AGC[®]-Käppchens an einer Hohlkehle am Primärteil (*Körber 1988, Diedrichs und Wilmerstaedt 2001*) Rechnung getragen wurde. Nach unten folgend wurde eine 45° geneigte Abschrägung vorgesehen, um eine leichte Handhabung beim „direkten Galvanisieren“ sicherzustellen. Abschließend erhielten alle Prüfkörper den gleichen Haltefuß mit einer mittigen Bohrung. Das Halteelement wurde in derselben Werkstatt ebenfalls anhand einer technischen Zeichnung aus Aluminium angefertigt und mittels eines Zwei-Komponenten-Klebers an eine Grundplatte aus Stahl geklebt. Die Tabelle 2 zeigt alle Kenndaten der angefertigten Prüfkörper:

Tabelle 2. Maße der verwendeten Primärteile.

Prüfkörper	d_u	d_o	h	β	Hohlkehle
PK-1	6,5 mm	6,5 mm	8,0 mm	0°	1,0 mm x 1,0 mm
PK-2	4,5 mm	4,5 mm	8,0 mm	0°	1,0 mm x 1,0 mm
PK-3	9,0 mm	9,0 mm	8,0 mm	0°	1,0 mm x 1,0 mm
PK-4	6,5 mm	6,0 mm	8,0 mm	2°	1,0 mm x 1,0 mm
PK-5	6,5 mm	5,5 mm	8,0 mm	4°	1,0 mm x 1,0 mm
PK-6	6,5 mm	5,1 mm	8,0 mm	6°	1,0 mm x 1,0 mm

3.2.3 Galvanisieren der Sekundärkronen

Die AGC[®]-Sekundärkronen wurden in der von *Diedrichs und Rosenhain (1995)* empfohlenen Technik hergestellt. Dazu wurde ein Kupferdraht in die Bohrung des jeweiligen Primärteils gesteckt und der komplette Bereich, der nicht galvanoplastisch wiedergegeben werden sollte, mit autopolymerisierendem Modellationskunststoff (Pattern Resin[®], GC) abgedeckt. Dann wurde der Kronenbereich mit zuvor kräftig geschütteltem und durchgerührtem Leitsilber (Wieland) bestrichen, wobei auch eine Verbindung zum Kupferdraht hergestellt wurde und die ersten Millimeter desselben mit bedeckt wurden, um Verunreinigungen des Goldbades zu vermeiden. Der Draht wurde dann unter Verwendung eines Heißluftgebläses mit

einem Schrumpfschlauch überzogen.

Das Galvanisieren geschah in dem Gerät „AGC® Micro“ (Wieland) mit den dazugehörigen Lösungen. Die benötigten Stromstärke-Stufen und die entsprechende Menge an Goldbad wurden aus einer vorliegenden Tabelle entnommen. Das Gefäß wurde vor dem Einfüllen des Goldbades gründlich mit destilliertem Wasser gereinigt. Pro Prüfkörper wurde 4 ml Glanzzusatz zugegeben. Die vorgegebene Galvanisierzeit von 720 min ergibt eine Schichtstärke von ca. 200 µm. Die Tabelle 3 zeigt die zum Galvanisieren gewählten Parameter:

Tabelle 3. Einstellungen zum Galvanisieren mit dem „AGC® Micro“-Gerät.

Prüfkörper	eingestellte Stromstärke	Menge an Goldbad	eingesetzte Goldmenge	erreichtes Gewicht
PK 1	Stufe 6	89 ml	1,21 g	1,17 g
PK 2	Stufe 5	68 ml	0,92 g	0,80 g
PK 3	Stufe 7	118 ml	1,60 g	1,51 g
PK 4	Stufe 6	89 ml	1,21 g	1,15 g
PK 5	Stufe 6	89 ml	1,21 g	1,11 g
PK 6	Stufe 5	68 ml	0,92 g	0,81 g
Gesamtmenge - Goldbad		Gesamtmenge - Glanzzusatz		Dauer
521 ml		24 ml		720 min

Dieser Galvanisiervorgang wurde dreimal durchgeführt, je für die erste orientierende Versuchsserie, die Hauptmessreihe und für die Mantelprüfkörper.

Nach Abschluss des Galvanisierprozesses wurden in die Feingoldkämpchen vorsichtig Positionsmarkierungen geritzt, die später mit wasserfestem Stift nachgezeichnet wurden, um Verdrehungen bei den Versuchen auszuschließen, auch wenn daraus kein nennenswerter Einfluss resultieren würde. Anschließend wurden die Kämpchen vorsichtig von ihrer Unterlage abgezogen und in 35%-iger Salpetersäure für fünf Minuten in einem Ultraschallbad abgesäuert, um die Leitsilberschicht zu entfernen. Nach gründlichem Spülen wurden die über die Hohlkehलगrenze überstehenden Feingoldanteile mit einer Gummipolierscheibe entfernt.

3.2.4 Das Messinstrument

Als Messgerät diente die Universalprüfmaschine „Zwick 1435“ (Zwick). Diese besteht aus einem Metallrahmen, in dem an zwei großen schraubenförmigen Metallbolzen eine Traverse computergesteuert auf und ab bewegt werden kann. Je oben und unten am Rahmen und an der Traverse können verschiedene Haltevorrichtungen angebracht werden. Weiterhin stehen Längen- und Kraftmessdosen zur Verfügung, die die Längen- bzw. Kraftänderungen im Sinne von Analog-Digital-Wandlern in elektronische Signale umwandeln, die wiederum vom steuernden Computer erfasst werden. Die Ansteuerung und Datenverarbeitung erfolgte mittels der „Zwick-PC-Software Z7005“ (Version 5.50A) auf einem Personalcomputer. Abbildung 4 und 5 zeigen den typischen Versuchsaufbau in der Messmaschine:



Abbildung 4. Versuchsanordnung in der Universalprüfmaschine „Zwick 1435“.

3.2.5 Der Versuchsablauf

An die Unterseite der Traverse wurde eine Kraftmessdose mit einem Messbereich bis 2000 N eingeschraubt. An dieser befand sich eine Klemmvorrichtung, in der ein Haken befestigt wurde. Der zu testende Prüfkörper wurde in die Bohrung des Haltekörpers gesteckt und durch den Verankerungsbolzen arretiert. Außer beim Trockenabzug wurde das Innere der AGC[®]-Käppchen bis zu einem Drittel mit der zu untersuchenden Zwischenflüssigkeit gefüllt und die Außenkrone auf das Primärteil gedrückt. Dabei wurde kein einheitlicher Fügedruck festgelegt, da aufgrund

des transversalen Spaltraumes die Konushaftung keine Hauptrolle spielt. Vielmehr wurde die Auflast angewandt, die nötig war, um das Sekundärteil bis zum vollständigen Randschluss zu bewegen. Dafür wurde bei hochviskosen Ölen verständlicherweise eine höhere Kraft benötigt.

Für den Versuchsablauf wurde folgender Ablauf programmiert:

- Kalibrieren des Kraftmesskanals auf 0,00 N,
- Langsames ($10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) Aufwärtsbewegen bis zu einer Vorkraft von 0,01 N,
- Kronenabzug in der vorgegebenen Abzugsgeschwindigkeit (v_l) unter Aufzeichnen eines Weg-Kraft-Diagramms,
- Abbrechen der Aufwärtsbewegung bei einem Kraftabfall auf 10 % des zuvor erreichten Maximalwertes,
- Sichern dieses Maximalwertes samt der bis dahin zurückgelegten Abzugsstrecke in einem Datenblatt,
- Zurückfahren ($200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) der Traverse in die Ausgangsposition für eine erneute Messung,
- Nach Erreichen der Stichprobengröße Durchführen des Ausreißertests nach „Grubbs“ und Errechnen des Mittelwertes (\bar{L}) und der Standardabweichung (s) (s. Abschnitt 3.12, S. 51).

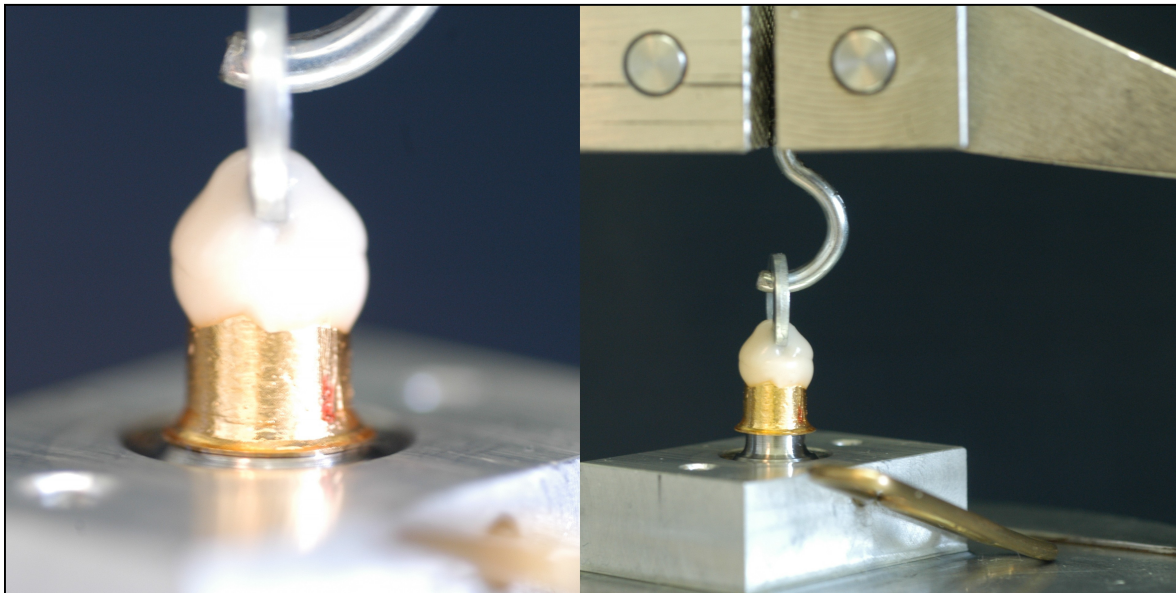


Abbildung 5. AGC®-Doppelkronen im Test vor und während des Abzugs.

Als Stichprobengröße wurden in der Regel 10 Einzelmessungen festgelegt. Wenn allerdings während des Messens „Ausreißer“ auftraten, wurde die Zahl der Messungen erhöht. Bei sehr gleichmäßigen Messreihen mit geringen Streuungen

(< 15 %) wurden gelegentlich nur 7 bis 9 Messungen durchgeführt.

3.3 Verwendete Zwischenmedien

Als Zwischenmedien wurden Leitungswasser (nachfolgend einfach nur „Wasser“ genannt), künstlicher Speichel, Rapsöl (Kunella Feinkost) und verschiedene Silikonöle verwendet.

Als künstlicher Speichel wurde das Präparat „Glandosane[®]“ (Cell pharm) in Form von Spray eingesetzt. Die vinylgestoppten Silikonöle „Silopren“ wurden von der Fa. Heraeus Kulzer Dental und die Neutralöle von der Fa. Wacker bezogen. Die Tabelle 4 zeigt alle verwendeten Zwischenmedien. In der Spalte „Kurzbezeichnung“ sind die Namen bzw. Kürzel angegeben, die bei der Darstellung und Auswertung der Ergebnisse der Übersichtlichkeit halber verwendet werden:

Tabelle 4. Kurzbezeichnungen für verwendete Zwischenmedien.

Kurzbezeichnung	Nenn-Viskosität	Zwischenmedium / Experimentelles Vorgehen
Trocken	-	„Trockenabzug“ ohne Verwendung eines Zwischenmediums nach sorgfältigem Trocknen der Kronen
Wasser	1 mPas	Leitungswasser
künstl. Speichel	5-10 mPas	Glandosane [®] (Cell pharm)
Rapsöl	-	Rapsöl (Kunella Feinkost)
V50	50 mPas	Vinylöl „Silopren M 50“ (Heraeus Kulzer Dental)
V200	200 mPas	Vinylöl „Silopren U 0,2“ (Heraeus Kulzer Dental)
N350	350 mPas	Neutralöl (Wacker)
V1000	1000 mPas	Vinylöl „Silopren U 1“ (Heraeus Kulzer Dental)
N1000	1000 mPas	Neutralöl (Wacker)
M1500	1500 mPas	eigene Mischung Nr. 1 aus N1000 und N10000
N2000	2000 mPas	Neutralöl (Wacker)
M3000	3000 mPas	eigene Mischung Nr. 2 aus N1000 und N10000
N10000	10000 mPas	Neutralöl (Wacker)

Wie ersichtlich, wurden aus den Silikonölen N1000 und N10000 zwei Mischungen angefertigt, um die Viskositätsskala zu erweitern. Die tatsächlich vorliegenden Viskositäten zeigt die Tabelle 5 (S. 53).

3.3.1 Viskositätsbestimmung der verwendeten Zwischenmedien

Die Nennviskositäten der zur Verfügung stehenden Silikonöle sind stets glatte Werte (200, 350, 1000, etc.). Somit lag der Verdacht nahe, dass diese Herstellerangaben stark gerundet sind. Um korrekte Kurvenverläufe im Ergebnisteil dieser Arbeit sicherzustellen, erschien es daher wichtig, die tatsächlich gegebenen Viskositäten nachzumessen.

Dies geschah mit dem Rheometer „RheoStress RS 100“ (Haake) im Rotationstest. Zur Steuerung und Datenauswertung diente die Software „RheoWin Pro“ (Version 2.94) auf einem Personalcomputer. Zum Test wurde ein glatter 4°-Kegel („C20/4°“) in einem Abstand von 0,138 mm auf einer planen Grundplatte (Durchmesser = 20 mm) zum Rotieren gebracht. Dabei wurde die Schubspannung (τ) mit $\tau = 10$ Pa vorgegeben. Ab einer Nennviskosität von 350 mPas wurde $\tau = 20$ Pa, ab 500 mPas $\tau = 50$ Pa, ab 1500 mPas $\tau = 100$ Pa und für 10000 mPas $\tau = 200$ Pa eingestellt. Dies war nötig, um eine gleichmäßige Rotation zu ermöglichen. Gemessen wurde der resultierende Schergrad ($\dot{\gamma}$).

Aus der bekannten Beziehung

$$[6] \quad \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

konnte so die Viskosität berechnet werden. Da einige Sekunden vergingen, bis die Flüssigkeit vollständig mitbewegt wurde, wurde eine Testdauer von 200 s festgelegt. Während der letzten 20 s wurden 10 Messwerte registriert, aus denen dann der Mittelwert und die Standardabweichung errechnet wurden. Die Tabelle 5 (S. 53) zeigt die entsprechenden Ergebnisse.

3.4 Erste orientierende Testserie

Bei den ersten Untersuchungen nach oben genanntem Protokoll (s. Abschnitt 3.2.5, S. 40) wurden alle sechs Prüfkörperpaare bei einer Abzugsgeschwindigkeit (v_l) von $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ abgezogen. Dies wurde als Trockenabzug, also ohne Zwischenmedium und mit den Flüssigkeiten Wasser, N350 und N1000 vorgenommen. Anschließend wurden die Außenkronen künstlich verschliffen. Dazu wurden deren Innenseiten manuell mit einer kreuzverzahnten Fräse ausgeschliffen, bis keine Haftung mehr im Trockenabzug vorhanden war, so dass jetzt »Spielpassung« vorlag. Nun wurden die Messungen wiederholt. Dabei wurden zusätzlich die Zwi-

schenmedien V50, V200, V1000, M1500, N2000, M3000 und N10000 getestet. Die Ergebnisse beider Testserien werden im Abschnitt 4.2 (S. 54) vorgestellt.

3.5 Abzugsgeschwindigkeitstest

Der Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit auf die Lösekraft wurde mit den Prüfkörpern PK-1, PK-4, PK-5 und PK-6 unter Verwendung des Silikonöls V200 evaluiert. Dabei wurde die Abzugsgeschwindigkeit bei $1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ beginnend in etwa exponentiell gesteigert. Der Verlauf der Geschwindigkeits-Lösekraft-Funktion wird in Abschnitt 4.3 (S. 57) wiedergegeben.

3.6 Bestimmen der Kaugeschwindigkeit

Um abschätzen zu können, welche Abzugsgeschwindigkeit in dem Moment auftritt, in dem die Lösekraft hohe Werte annehmen soll, wurde ein orientierender Test zur Bestimmung von Kaugeschwindigkeiten durchgeführt. Dabei ist sicher davon auszugehen, dass der prothetisch versorgte Patient seine Prothese viel langsamer ausgliedert, als sich seine Zahnreihen zwischen den Kauvorgängen auseinander bewegen. Letztgenannter Vorgang führt aber am ehesten zu Abzugsvorgängen an den Doppelkronen, denen die Lösekraft entgegenwirken soll. Somit ist genau diese vertikale Voneinanderweg-Bewegung der Kiefer der zu untersuchende Parameter.

Hierzu wurde an die Oberseite der Traverse der Universalprüfmaschine „Zwick 1435“ eine Längenmessdose angebracht, an der wiederum ein Metallplättchen befestigt wurde. Dieses wurde in der Vertikalen an den Unterkieferunterrand des Probanden geführt, der nun aufgefordert wurde, Kekse zu kauen. Dabei wurden vom Personalcomputer Zeit-Weg-Kurven aufgezeichnet und ausgedruckt. Auf diese wurden in die zu ermittelnden Bewegungsschenkel Geraden eingezeichnet, aus deren negativen Anstiegen die Lösegeschwindigkeiten ermittelt werden konnten. Insgesamt wurde mit vier Probanden getestet. Es wurde jeweils der Mittelwert aus der minimalen und maximalen Lösegeschwindigkeit gebildet. Die entsprechenden Ergebnisse finden sich in Abschnitt 4.5 (S. 60).

3.7 Geschwindigkeitsträgheits-Kontrolle

Da die in vivo wirkenden Lösegeschwindigkeiten jenseits der maximalen Abzugsgeschwindigkeit der Zwick-Messmaschine ($400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) lagen, sollte geklärt

werden, inwiefern das Registriersystem in diesem Testbereich noch exakte Ergebnisse liefert. Dabei steht die Geschwindigkeitsträgheit im Mittelpunkt des Interesses. Die Kraftmessdose liefert zweifelsohne innerhalb eines gewissen Genauigkeitsbereiches richtige Ergebnisse. Die Frage, mit welcher Verzögerung jedoch diese Kräfte gemessen werden, ist für unsere Fragestellung von enormer Bedeutung. Da die Kraft beim Abziehen erst ansteigt und nach dem Erreichen des Maximalwertes abrupt abfällt, wie es ja gewünscht wird, würden verzögerte Messungen bedeuten, dass die Maximalkraft nur so kurz wirkt, dass sie gar nicht unbedingt registriert werden kann.

Für diese Untersuchung wurde ein 25-N-Federkraftmesser an der Kraftmessdose befestigt, an dem ein 1 kg schweres Gewicht hing. Dann wurde die Traverse mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten nach oben bewegt. Ist die Feder mit 10 N gedehnt, wird das Gewicht angehoben. Der Personalcomputer registrierte und druckte die Weg-Kraft-Kurven. Somit muss ein zweiphasiger Kurvenverlauf resultieren. Erst steigt die Kraft proportional an, um dann auf dem Maximalwert, der aus dem Gewicht resultiert, konstant zu bleiben. Naturgemäß schwingt eine Feder nach hoher Beschleunigung nach. So wäre es normal, wenn die registrierte Kraft nach dem ersten Erreichen des Maximums wellenartig ab- und wieder zunimmt. Wird der Kurvenverlauf jedoch schon vor dem Erreichen dieses Übergangspunktes verwaschen, so liegt eine verzögerte Registrierung vor. Ergebnisse dieser Tests sind im Abschnitt 4.4 (S. 58) wiedergegeben.

3.8 Die Hauptmessreihen

Diese Versuchsreihen waren die eigentlichen Untersuchungen, um die Gesamtlösekräfte auf verschiedene Parameter hin zu evaluieren. Dabei wurden Konvergenzwinkel ($0^\circ - 6^\circ$), Abzugsgeschwindigkeit ($30 - 400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) und Viskosität (5 - 10000 mPas) in allen zweckmäßigen Kombination variiert, so dass alle sechs Prüfkörper in Benutzung kamen. Hierfür wurden neue AGC[®]-Käppchen galvanisiert. Als Zwischenmedien dienten Glandosane[®], Rapsöl, V50, V200, N350, N1000, M1500, M3000 und N10000. Der Versuchsablauf erfolgte nach dem bereits beschriebenen Protokoll (s. Abschnitt 3.2.5, S. 40).

Aus den zahlreichen Ergebnissen lassen sich verschiedenste Zusammenhänge grafisch darstellen. Dies geschieht im Abschnitt 4.6 (S. 61).

3.9 Prüfmethoden zur Beurteilung der Teilkomponenten

Die bereits aufgelisteten Versuche ermöglichen es zwar, die resultierende Löse- kraft bei Konstanthalten der anderen Parameter abzuschätzen, sie gestatten es jedoch nicht, Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der am Haftmechanismus beteiligten Faktoren zu ziehen. Deshalb wurden Teilprüfkörper hergestellt, mit denen nach weiteren Hinweisen gesucht wurde:

3.9.1 Der Einfluss der Mantelfläche

Um den Einfluss der Größe der Mantelfläche (A_M) mitsamt ihres Konvergenzwinkels (β) zu bestimmen, wurden AGC[®]-Käppchen galvanisiert, die keinen okklusalen Deckel besaßen. Um Verfälschungen durch Verdrehen der Teile zueinander zu vermeiden, wurden die Primärteile zuvor manuell am Parallelometer-Handstück mit den von der Fa. Wieland empfohlenen (*mündliche Information*) Fräsen nachbearbeitet. Dabei wurden die Durchmesser kaum verringert, aber eine Abflachung als Rotationsschutz an einer Seite vorgenommen.

Um Deformationen gering zu halten und eine stabile Verankerung in der Messapparat-ur zu erreichen, wurden die Feingoldkäppchen komplett mit Komposit überzogen. Der Metallring wurde hier in eine okklusal überspannende Kompositbrücke eingebettet. Dieses Vorgehen wurde mit den Prüfkörpern PK-1, PK-4, PK-5 und PK-6 vorgenommen, so dass unterschiedliche Mantelprüfkörper mit verschiedenen Konvergenzwinkeln und gleichen Basisdurchmessern beurteilt werden konnten.

Neben dem Trockenabzug wurden als Zwischenmedien Wasser, V200, N350 und N1000 in Kombination mit den Abzugsgeschwindigkeiten 30, 50 und 400 mm·min⁻¹ verwendet. Die Ergebnisse der analog Abschnitt 3.2.5 (S. 40) durchgeführten Versuche können dem Abschnitt 4.7 (S. 68) entnommen werden.

3.9.2 Der Einfluss von Kohäsion und Adhäsion

Zwei flüssigkeitsbenetzte Platten haften bekanntlich aneinander, obwohl sie sich leicht gegeneinander verschieben lassen. Letzteres gibt den eher geringen Einfluss innerer und äußerer Reibung (s. Abschnitt 3.9.3, S. 47) wieder. Das erstgenannte Phänomen hingegen beruht auf dem Einfluss von Adhäsion und Kohäsion. Dieser ist betragsmäßig dennoch zu klein, um ihn mit separierten Deckelflächen sicher messen zu können. Daher wurden zwei größere Metallplatten (25,1 · 48,1 mm = 1207,3 mm²) gegeneinander abgezogen. Die untere war fest im Rahmen

der Universalprüfmaschine eingeschraubt. Die obere Platte wurde mit Komposit überzogen, um zwei Metallringe daran zu befestigen. Durch diese wurde ein Draht gefädelt, der dann an den Haken gehängt wurde. Der Abzug erfolgte nach dem üblichen Protokoll (s. Abschnitt 3.2.5, S. 40). Der Abschnitt 4.8 (S. 69) beschreibt die Ergebnisse.

3.9.3 Der Einfluss innerer und äußerer Reibung

Zur Bestimmung der Größenordnung der Reibung beim Verschieben zweier ölbenetzter Platten, wurden verschiedene Versuchsanordnungen ausprobiert. Die Reibkräfte lagen jedoch in jedem Falle unterhalb des Messbereichs. Somit können diese Parameter nicht genau bestimmt werden. Daher wird deren Einflussnahme nur theoretisch beleuchtet (s. Abschnitt 5.2, S. 75).

3.10 Wasser-Speichel-Öl-Kombinationstest

Abschließend sollte überprüft werden, inwiefern Wasserreste, die nach dem Reinigen der Prothese in den Außenkronen verbleiben, oder eine Speichelschicht auf den Innenkronen die Haftkräfte beeinflusst. Dies soll ermöglichen, aus den in vitro-Ergebnissen guten Gewissens Empfehlungen für eine klinische Erprobung geben zu können.

Dazu wurden der relevanteste Prüfkörper PK-4 und die Öle V200 und Rapsöl herangezogen. Vor jeder Einzelmessung wurden die Primärteile mit einem mit Glandosane[®] benetztem Tuch abgewischt und die Außenkronen unter fließendem Wasser gereinigt und anschließend lediglich ausgeschüttelt. Auf die so verbliebenen Wasserreste wurde das Testöl getropft, bis das Käppchen zu ca. einem Drittel gefüllt war. Mit dem üblichen Versuchsablauf (s. Abschnitt 3.2.5, S. 40) wurde eine annähernd exponentielle Abzugsgeschwindigkeits-Variation durchgeführt.

Bei $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ Lösegeschwindigkeit wurde mit V200 zusätzlich ein Mengenverhältnis-Test durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Tropfenzahlen an Wasser und anschließend Öl in die zuvor getrockneten Feingoldkäppchen gegeben. Alle diesbezüglichen Ergebnisse sind im Abschnitt 4.9 (S. 70) zu finden.

3.11 Anstoßen einer klinischen Eignungsprüfung

Um die theoretischen Empfehlungen auf ihre praktische Eignung hin überprüfen zu können, wurde eine klinische Untersuchung angestoßen. Dazu wurde ein Fragebogen mit entsprechenden Empfehlungen erstellt und an die Fa. Wieland übermittelt, die nach Einholen von Unbedenklichkeitsbescheinigungen der zu testenden Neutralöle, diese gemeinsam mit den Fragebögen an Zahnärzte verteilen möchte. Die Zahnärzte sollen das Material dann an Patienten weitergeben, die mit AGC[®]-Doppelkronen versorgt wurden und die Retentionswirkung ihrer Prothese als zu gering erachten.

Die Abbildungen 6 und 7 (S. 49 bis 50) zeigen den erstellten Fragebogen.

Folgende Fragestellungen sollen damit beantwortet werden:

- Sind Patienten mit reduzierter Retention ihrer mit Doppelkronen verankerten Prothese durch Verwendung eines „Haftöls“ subjektiv zufriedenzustellen?
- Ist dieser positive Effekt nur bei leichtem Lösekraftverlust möglich oder kann selbst bei stark verminderter Haltewirkung Abhilfe geschaffen werden?
- Welche Tropfenzahl ist unter klinischen Bedingungen notwendig?
- Ist es sinnvoll, verschiedene Haftöle bereitzuhalten?
- Lassen sich die gut haltenden Prothesen dennoch ohne Schwierigkeiten ausgliedern?
- Ist diese Methode alltagstauglich oder zu aufwendig?
- Ist das Vorhandensein von mehreren Ankern Grundvoraussetzung für einen subjektiv guten Halt?
- Welche Rolle spielt die Lokalisation der Pfeilerzähne?
- Gibt es Diskrepanzen in der Beurteilung der Retentionswirkung zwischen Zahnärzten und Patienten?

Im Moment lässt sich noch nicht abschätzen, wann Rückmeldungen einer ausreichend großen Zahl klinischer Probanden vorliegen werden. Somit bleiben die Ergebnisse dieser Untersuchungen vorerst abzuwarten. Sie werden gegebenenfalls zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht.

Sehr geehrte(r) Patient(in),

mit dem AGC®-Doppelkronensystem haben Sie sich für einen hochwertigen Zahnersatz entschieden. Die Doppelkrone ist aus biologischer Sicht eines der günstigsten Halteelemente überhaupt. Natürlich ist es für Sie ebenso wichtig, dass ihre Prothese beim Kauen verschiedenster Speisen nicht versehentlich abgezogen wird. Aus heutiger wissenschaftlicher Sicht ist die Flüssigkeit, die sich zwischen Prothese und Zahnstumpf befindet - in der Regel Speichel - für diesen Halt von besonderer Bedeutung. Da ihre Prothese durch gebrauchsbedingte Abnutzung an Halt verloren hat, gibt es jetzt die Möglichkeit, durch spezielle biologisch gut verträgliche „Haftöle“ die Prothese wieder zum Halten zu bringen. Dieses Verfahren befindet sich zur Zeit noch in Erprobung. Wir bitten Sie daher, einfach einmal auszuprobieren, ob Ihnen das überreichte Haftöl den gewünschten Erfolg bringt und diesen kleinen Fragebogen auszufüllen und ihrem Zahnarzt zurückzugeben.

Vielen Dank.

Gebrauchsanweisung:

Die Zähne in ihrem Mund und die Prothese wie gewohnt reinigen und mit Wasser abspülen. Dann die Prothese schütteln, um große Wassertropfen aus den Goldkämpchen zu entfernen. Die Metallflächen müssen nicht abgetrocknet werden, um Halt zu erreichen - größere Wasserreste vermindern jedoch die Haltewirkung. Dann ein paar Tropfen von dem Haftöl in die Goldkämpchen geben. Vorsicht - Kleidung vor Ölflecken schützen. Jetzt die Prothese im Mund einsetzen und mit zwei Fingern festdrücken.

Zu Beginn sollten Sie etwa 7 Tropfen in die Goldkämpchen geben. Wenn Sie bemerken, dass die Methode erfolgreich ist, probieren Sie bitte, ob Sie mit 5 Tropfen denselben Effekt erreichen. Reicht die Wirkung nicht aus, kann Ihnen ihr Zahnarzt stärkere Haftöle geben.

(Bitte ankreuzen)	fällt von selbst herunter	löst sich bei Essen	löst sich bei klebrigen Speisen	hält immer gut
Wie stark hielt die Prothese nach Fertigstellung ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Wie fest war der Halt direkt bevor Sie das Haftöl bekommen haben ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Wie sehr hielt die Prothese mit dem Haftöl 1 (mindestens 7 Tropfen) ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Wirkung von Haftöl 2, wenn nötig ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Wirkung von Haftöl 3, wenn nötig ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	5 Tropfen		7 Tropfen (oder mehr)	
Wieviel Öl war für guten Halteffekt nötig ?	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	
	gut	mäßig	schwer	schmerzhaft
Wie lässt sich die Prothese entnehmen? (langsam ziehen!)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	gut machbar	mäßig	zu aufwendig	
Ist diese Methode alltagstauglich ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Abbildung 6. Vorderseite des klinischen Fragebogens.

Bitte zurücksenden an:

Hinweise für den Zahnarzt:

Zur Beurteilung der Ergebnisse der Methode ist es wichtig, Anzahl und Lokalisation der Pfeiler zu kennen. Mit dem Haftöl 1 (200 mPa·s) werden Kräfte von ca. 3,5 N pro Pfeiler erwartet. Speichel allein bewirkt ca. 1 - 1,5 N adhäsiven Effekt. Sollten mehr als zwei Anker in die Konstruktion einbezogen sein, sollten zwei günstige Zähne als Haftanker ausgewählt werden. Die anderen sollen dann nicht mit Öl betropft werden. Als maximale Ankerzahl empfehlen wir vier Zähne. Sollte mit dem Haftöl 1 kein ausreichender Effekt erreicht werden, können die Haftöle 2 und 3 (500 bzw. 1000 mPa·s) verwendet werden, wobei die Haltewirkung jedoch nicht mehr so stark ansteigt, wie von Speichel auf Haftöl 1.

- vom Zahnarzt auszufüllen -					
Anzahl an AGC®-Doppelkronen			Anzahl sonstige Halteelemente		
↓	Lokalisation	anderes Halteelement als AGC®-Doppelkrone ?	Haftanker ?	Halt* ohne Haftöl	Halt* mit Haftöl
Anker 1					
Anker 2					
Anker 3					
Anker 4					
Anker 5					
Anker 6					
Anker 7					
Anker 8					

* für die beiden letzten Spalten:

Haltequalität	Definition
0	nicht beurteilbar
1	überhaupt kein Halt
2	Außenkrone hält, lässt sich aber leicht abziehen
3	Außenkrone scheint fest genug zu sitzen
4	Das Ausgliedern der Prothese bereitet schon Mühe

Abbildung 7. Rückseite des klinischen Fragebogens.

3.12 Statistische Auswertung der ermittelten Daten

Becker (1982a) weist darauf hin, dass Schwankungen von 20% bei Messungen von Doppelkronen-Abzugskräften völlig normal sind. Um dennoch quantitative Aussagen treffen zu können, ist es daher wichtig, die Messwerte statistischen Auswertungen zu unterziehen.

Lagemaß und Streuung

Da die Messwerte in aller Regel gleichmäßig verteilt streuten, wurde der arithmetische Mittelwert als Lagemaß verwendet, der bekanntermaßen mit

$$[7] \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

berechnet wird. Um positive und negative Abweichungen auszugleichen, wird die Variabilität von Messwerten innerhalb einer Messreihe gewöhnlich durch die empirische Varianz ausgedrückt. Wie allgemein üblich, wird auch hier die Streuung um das arithmetische Mittel durch die empirische Standardabweichung angegeben, die der Wurzel der Varianz entspricht:

$$[8] \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Die Standardabweichung wurde bei den Hauptmessreihen zusätzlich als relative Streuung in prozentualer Abweichung vom Mittelwert angegeben.

Je nach Praktikabilität wurden Mittelwert und Streuung entweder mit dem Taschenrechner oder mit der „Zwick-PC-Software Z7005“ (Version 5.50A) auf dem Personalcomputer berechnet.

Ausreißertest nach Grubbs

Hin und wieder traten Einzelmesswerte auf, die extrem aus dem Streuungsmaß herausfielen. Diese, auch als »Ausreißer« bezeichneten Werte beruhen ursächlich auf zufälligen Fehlern in der Messanordnung. Trotz aller Vorkehrungen, konnten nicht immer Verkantungen von Doppelkronen vermieden werden. Dies führte dann zu stellenweise doppelt so hohen Messwerten, die sich jedoch häufig nicht reproduzieren ließen. Andererseits gelangten manchmal Luftblasen in die Zwischenflüssigkeit, so dass der zu erwartende hydraulische Effekt nicht eintreten konnte. Hier resultierte eine sehr geringe Kronenhaftung. Würde dies in vivo auftreten, löste sich die Prothese gleich wieder, was den Patienten dazu veranlassen würde, den Eingliederungsvorgang zu wiederholen. Die sture Berechnung von Mittelwert

und Streuung würde in solchen Fällen zu Verfälschungen der Ergebnisse führen, die irreführende Interpretationen der grafischen Kurvenverläufe nach sich ziehen könnten. Daher erscheint es wichtig, vereinzelte Ausreißer von vornherein zu erkennen und diese aus der Statistik zu entfernen. Der hier angewandte »Ausreißertest nach Grubbs« ist ein Algorithmus, der die Messreihe nach jeweils größten und kleinsten Werten durchsucht und anhand von zwei errechneten Testgrößen durch Vergleich mit einem sogenannten kritischen Wert jeweils über »Ausreißer« oder »gültige Prüfung« entscheidet. Dieser Ausreißertest wurde mit der „Zwick-PC-Software Z7005“ (Version 5.50A) durchgeführt. Sind Ausreißer aufgefallen, wurde die Stichprobengröße entsprechend erhöht.

Signifikanz

Um beurteilen zu können, mit welcher Wahrscheinlichkeit man davon ausgehen kann, dass Unterschiede zwischen den Messreihen signifikanten Wahrheitscharakter besitzen, wurde bei normalverteilten Stichproben der homoskedastische Student'sche t-Test zweier Stichproben angewandt. Die Berechnungen erfolgten mit der Computersoftware „Microsoft® Excel 2000“.

Das Signifikanzniveau wurde mit $p > 5 \%$ für »nicht signifikant« $p \leq 5 \%$ für »signifikant« (Kennzeichnung „*“) und $p \leq 1 \%$ für »hochsignifikant« festgelegt.

4 Ergebnisse

Nachstehend werden die Ergebnisse eigener Untersuchungen dargestellt. Dabei werden die in Abschnitt 3.2.2 (S. 36) aufgeführten Prüfkörper in den Messwerttabellen durch ihren Konvergenzwinkel und ihren Basisdurchmesser benannt.

Neutralöle werden mit „N“, Vinylöle mit „V“ und eigene Mischungen mit „M“ und deren Nennviskosität (in mPas) gekennzeichnet. Die verwendeten Zwischenmedien werden somit durch die in Tabelle 4 (S. 42) wiedergegebenen Kurzbezeichnungen benannt.

Standardabweichungen werden in Tabellen durch „±“ gekennzeichnet.

4.1 Viskositätsbestimmungen

Bevor die Ergebnisse der Abzugsmessungen dargestellt werden, sollen die der Viskositätsbestimmungen an den Zwischenmedien vorgestellt werden:

Tabelle 5. Nenn- und tatsächliche Viskosität [mPas] verwendeter Zwischenmedien.

Kurzbezeichnung	Nennviskosität	gemessene Viskosität ($\bar{\eta}$)	Verhältnis
Wasser	1	0,69 ± 0,02	69,0 %
künstl. Speichel	5-10	6,75 ± 0,02	
V50	50	43,77 ± 0,03	87,5 %
Rapsöl	-	62,69 ± 0,07	
V200	200	179 ± 0	89,5 %
N350	350	310 ± 0	88,6 %
V1000	1000	973 ± 2	97,3 %
N1000	1000	742 ± 1	74,2 %
M1500	1500	1118 ± 1	74,5 %
N2000	2000	1860 ± 3	93,0 %
M3000	3000	2967 ± 6	98,9 %
N10000	10000	9571 ± 12	95,7 %

Nur so können Viskositäts-Kraft-Diagramme korrekt gezeichnet werden.

Alle Messungen wurden bei einer Raum- und Flüssigkeitstemperatur von 21°C bis 23 °C durchgeführt, bei denen auch die Abzugsmessungen vorgenommen wurden. Somit sind die temperaturabhängigen Viskositäten bei allen Versuchen standardi-

siert. Die oben aufgelisteten Ergebnisse zeigen deutlich, dass der Verdacht auf grobe Rundungen der angegebenen Nennviskositäten begründet war. Keine einzige Viskosität gleicht in etwa dem angegebenen Wert.

4.2 Erste orientierende Testserie

Zu Beginn der Untersuchungen wurde ein AGC[®]-Zylinderteleskop des Standarddurchmessers von 6,5 mm über 200 mal trocken gefügt und getrennt. Die Tabelle 9 (s. Anhang, S. 114) zeigt den Lösekraftverlauf während der ersten 202 Zyklen, deren Ergebnisse grafisch in Abbildung 8 wiedergegeben werden:

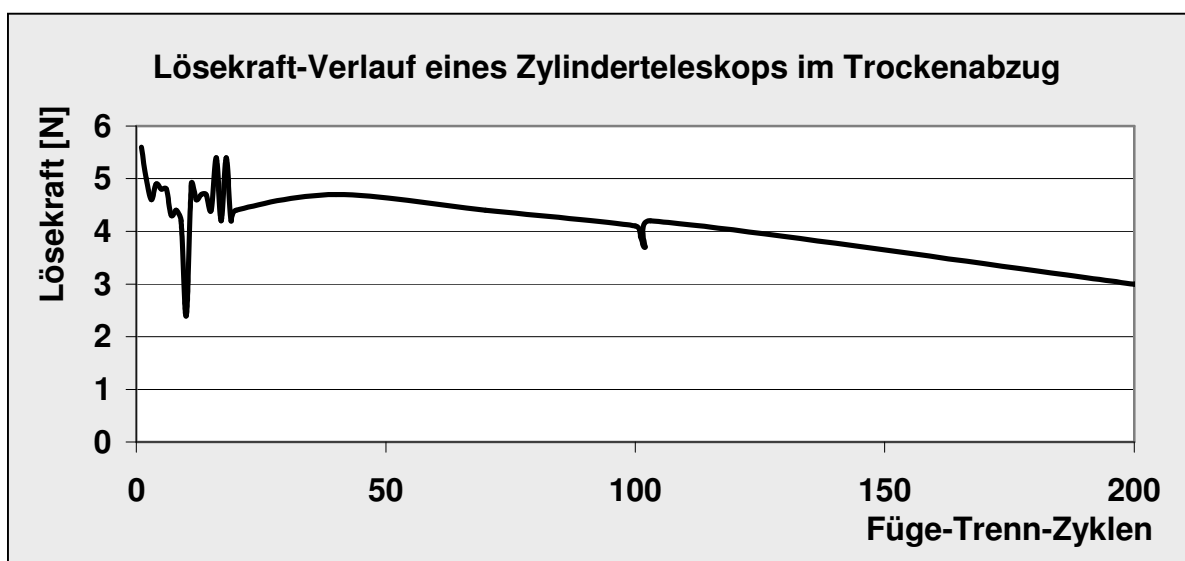


Abbildung 8. Lösekräfte von PK-1 während 202 Füge-Trenn-Zyklen, trocken.

Zu Beginn der Untersuchungen wurden erste orientierende Experimente mit einer langsamen Abzugsgeschwindigkeit von $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ durchgeführt. Fünf verschiedene Prüfkörper wurden mit jeweils fünf verschiedenen Zwischenmedien gefügt und abgezogen. Nach anschließendem künstlichem Verschleiß wurden die Tests mit 10 verschiedenen Zwischenflüssigkeiten wiederholt. Die Messungen wurden jeweils 10 mal durchgeführt. Tabelle 10 (s. Anhang, S. 115) zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der benötigten Lösekräfte.

Die Abbildungen 9 bis 11 (S. 55) zeigen exemplarisch drei Abzugsdiagramme, die während der Messungen aufgezeichnet wurden. Man erkennt deutlich, dass die Lösekraft einer Konuskronen im Trockenabzug nach einem kurzen Löseruck - dies entspricht dem Maximalwert - abrupt auf Null absinkt. Die Verwendung einer Zwischenflüssigkeit (Abbildung 11) erhöht nicht nur die Lösekraft. Der Kurvenverlauf wird zusätzlich in die Länge gestreckt:

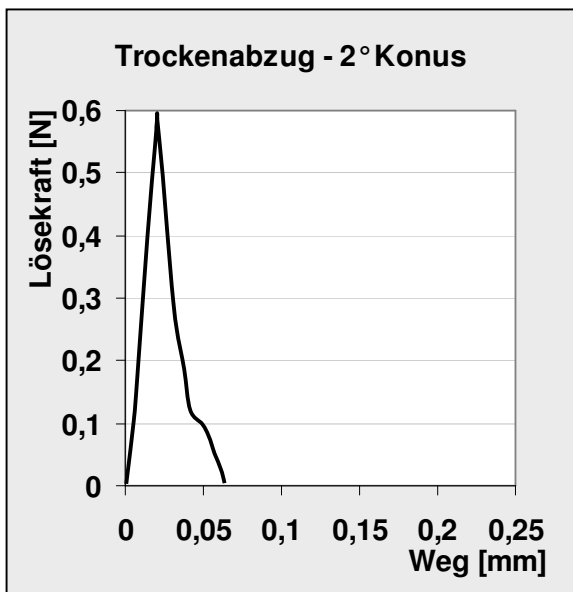


Abbildung 9. Weg-Kraft-Diagramm - Trockenabzug von PK-4 ($1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$).

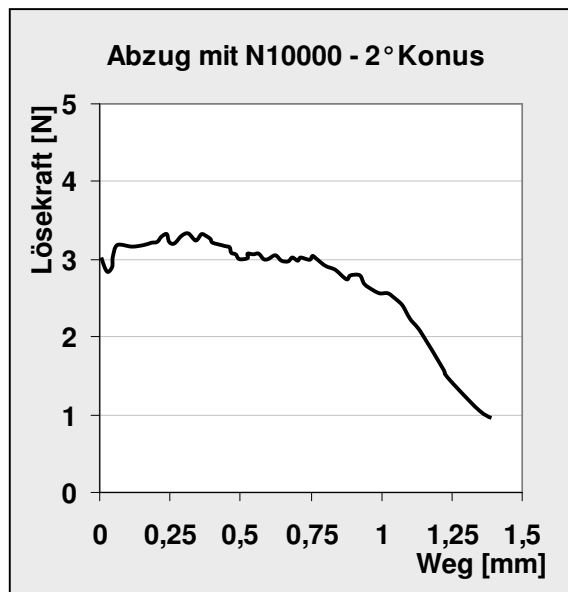


Abbildung 10. Weg-Kraft-Diagramm: Abzug von PK-4 mit N10000 ($1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$).

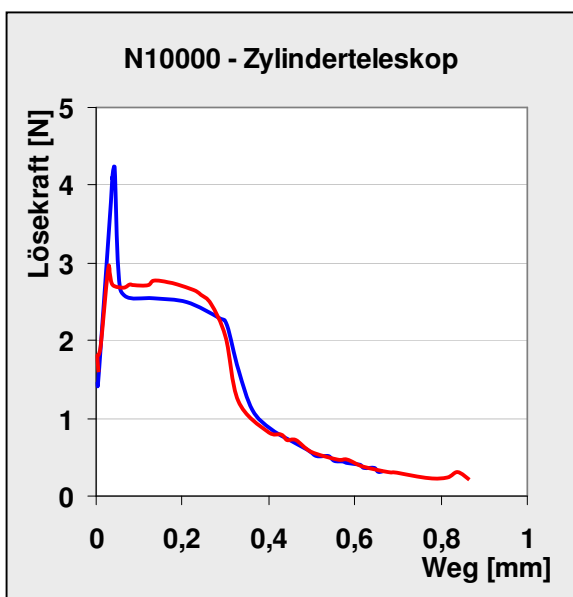


Abbildung 11. Weg-Kraft-Diagramm: Abzug von PK-1 mit N10000 ($1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). Die rote und die blaue Linie kennzeichnen den unterschiedlichen Verlauf zweier aufeinanderfolgender Abzüge.

Die Abbildung 11 zeigt den Verlauf der Lösekraft während zweier Einzelmessungen an dem Zylinderteleskop PK-1. Verwendet wurde ebenfalls das Neutralöl N10000. Man sieht die Schwankungen der Haftwerte bei der langsamen Abzugsgeschwindigkeit ($1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$).

4.2.1 Kompensation von Haftungsunterschieden durch Zwischenmedien

Die Abbildung 12 (S. 56) zeigt deutlich, wie sich selbst bei der langsamen Abzugsgeschwindigkeit von $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ die Haftungsunterschiede ausgleichen, wenn vor dem Fügen von Teleskopen eine Flüssigkeit in ihren Fügespalt gegeben wird. Geprüft wurden hierbei zwei Zylinderteleskope ($\beta = 0^\circ$) mit unterschiedlichen Durchmessern. Interessanterweise erbrachte das größere Teleskop eine wesent-

lich geringere Lösekraft. Wasser veränderte die Messwerte geringfügig. Ein wesentlicher Ausgleich wurde erst bei Verwendung der Silikonöle erreicht:

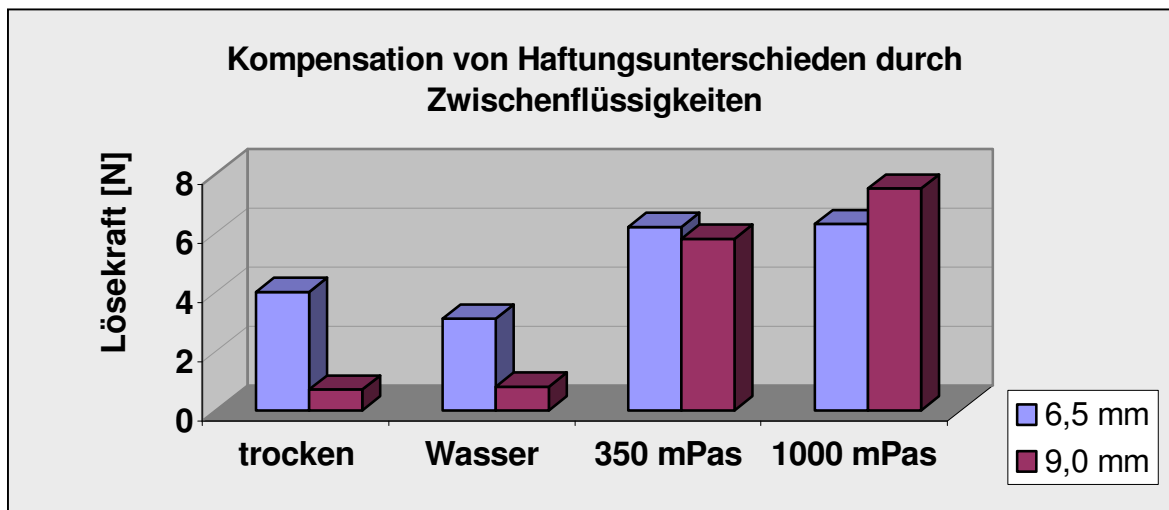


Abbildung 12. Kompensation von Haftungsunterschieden durch Zwischenflüssigkeiten. Getestet wurden 2 Zylinderteleskope. $v_l = 1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

4.2.2 Auswirkungen von künstlichem Verschleiß

Die Abbildung 13 zeigt die unterschiedlichen Lösekräfte bei Prüfkörpern mit $d_u = 6,5 \text{ mm}$ und verschiedenen Konvergenzwinkeln:

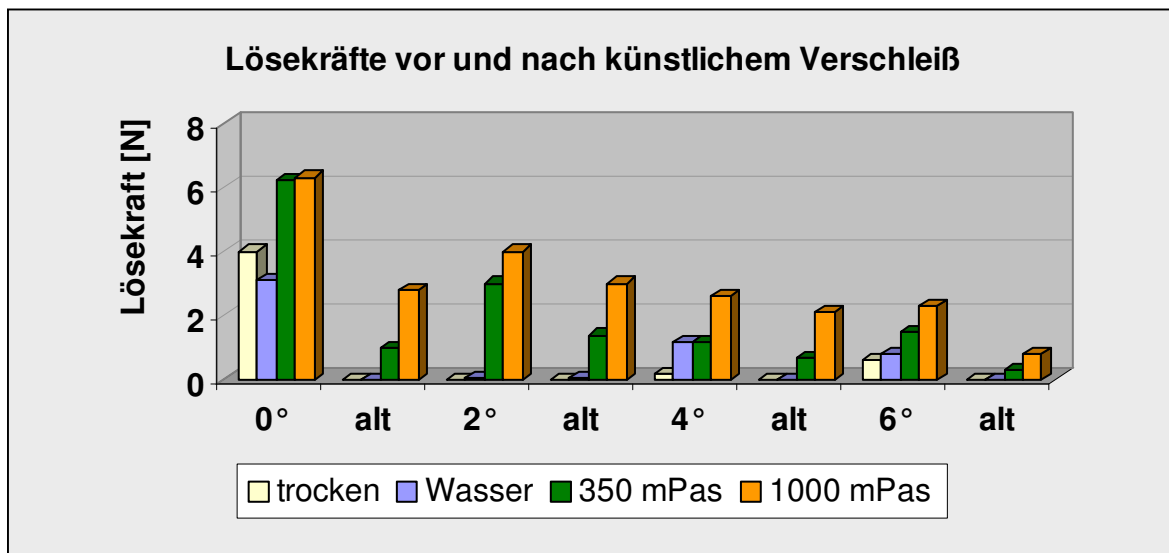


Abbildung 13. Lösekräfte vor und nach künstlichem Verschleiß. Die Gradangabe bezeichnet den jeweiligen Prüfkörper. „alt“ kennzeichnet die Versuche mit manuell verschlissenen Außenkronen. $v_l = 1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Prinzipiell sinken die Haftungswerte bei Vergrößerung der Spaltweite, wobei das Ausmaß dieser Veränderungen zwischen den Prüfkörpern und Zwischenmedien unterschiedlich ausfällt.

4.2.3 Lösekräfte bei Doppelkronen mit Spielpassung

Die Abbildung 14 zeigt die unterschiedlichen Lösekräfte, die mit den künstlich verschlissenen Außenkronen gemessen wurden. Die verbreiterten Fügspalten führten im Trockenabzug zum Fehlen von Haftungskräften. Typischerweise stellen sich bei Verwendung von Zwischenflüssigkeiten wieder Lösekräfte ein, wobei Wasser keinen nennenswerten Effekt liefert und Silikonöle mit steigender Viskosität mehr Retention bewirken. Korrelationen zwischen Konizität und erreichter Lösekraft lassen sich anhand dieser Voruntersuchungen nicht sicher feststellen.

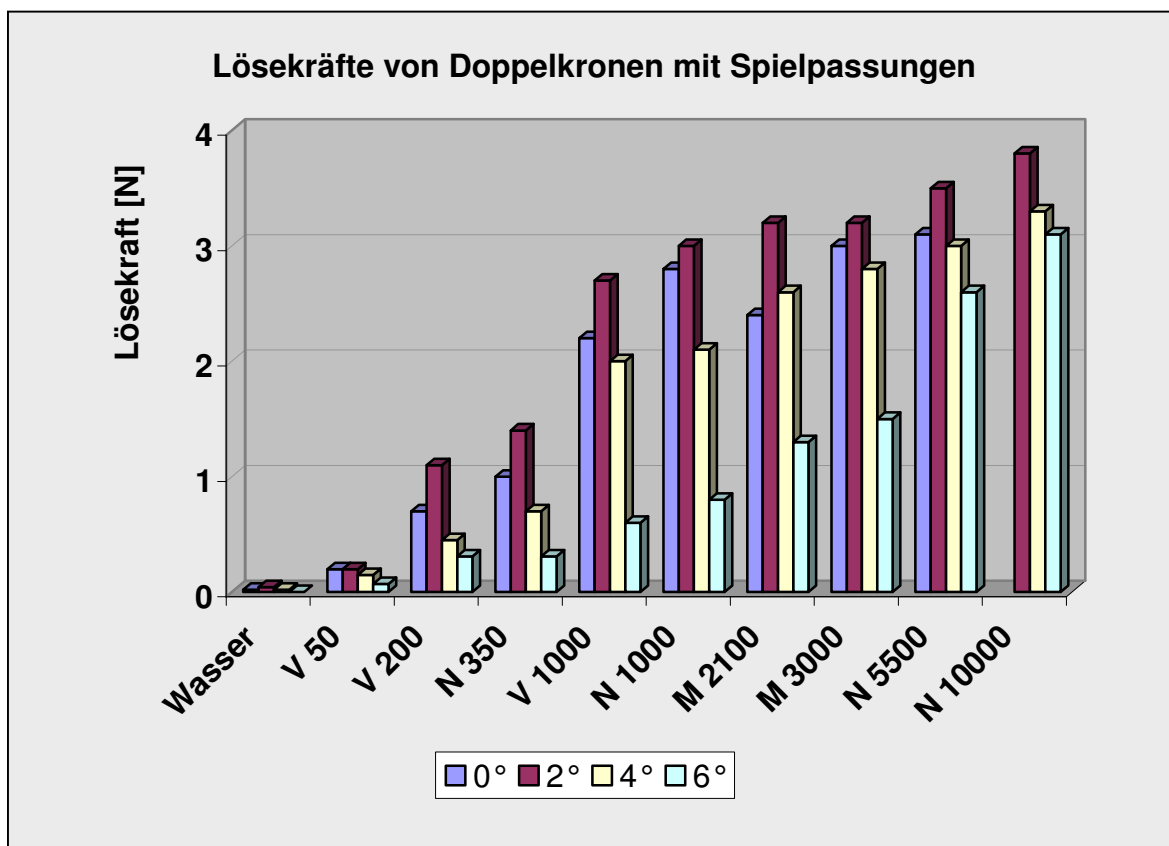


Abbildung 14. Lösekräfte von Doppelkronen mit Spielpassung. $v_l = 1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

4.3 Prüfen des Geschwindigkeitseinflusses

Die Tabelle 11 (s. Anhang, S. 116) zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen bezüglich der Abzugsgeschwindigkeit. Die dazugehörigen Signifikanztests finden sich in Tabelle 23 (s. Anhang, S. 128).

Die Abbildung 15 stellt die Mittelwerte der Messungen grafisch dar:

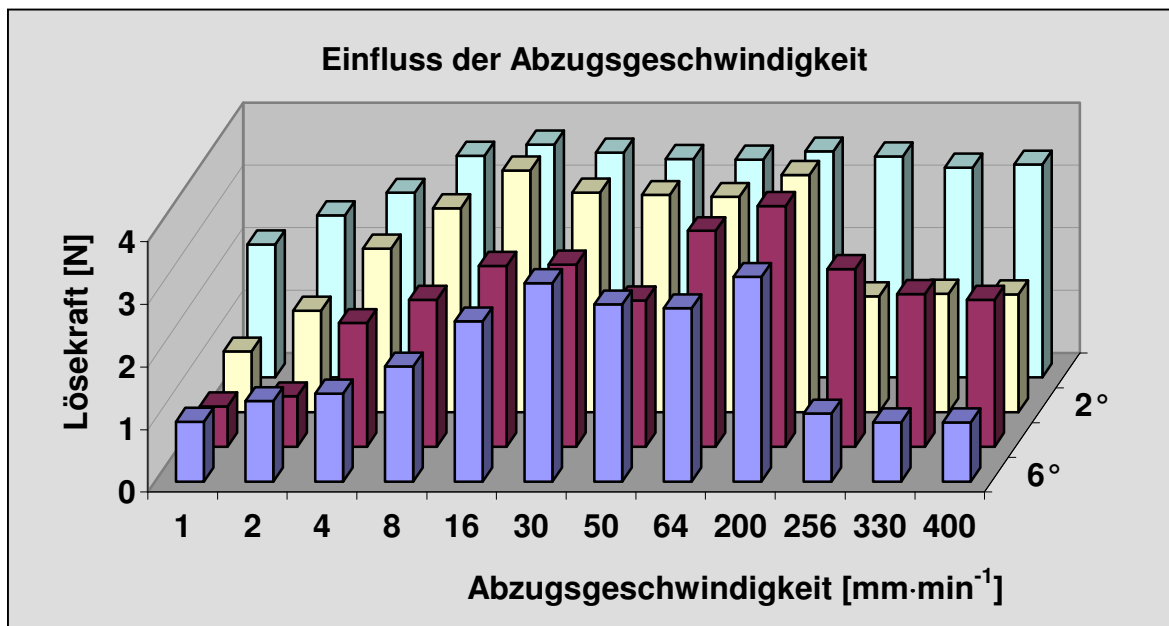


Abbildung 15. Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit auf die Lösekraft.

Es zeigt sich, dass die Lösekraft von der Abzugsgeschwindigkeit abhängt. Steigt v_t beginnend vom Minimalwert an, so steigt auch die Lösekraft signifikant. Ab einer Geschwindigkeit von ca. $30 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ streuen die Ergebnisse mehr oder weniger exakt um einen Maximalwert. Steigt die Abzugsgeschwindigkeit jedoch auf mehr als $200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, so sinkt die gemessene Abzugskraft wieder. Dies ist ein unerwartetes paradoxes Phänomen, das weiterer Abklärung bedarf:

4.4 Die Geschwindigkeitsträgheit der Messmaschine

Der im Abschnitt 3.7 (S. 44) vorgestellte Versuch soll helfen, zu kontrollieren, inwiefern kurzgipfelige Lösekräfte bei hohen Abzugsgeschwindigkeiten im verfügbaren Messsystem zu verlässlichen Ergebnissen führen. Die Abbildungen 16 bis 21 (S. 59 bis 60) zeigen die registrierten Weg-Kraft-Diagramme.

Die Weg-Kraft-Kurve in Abbildung 16 und Abbildung 17 verläuft annähernd erwartungsgemäß. Solange die Feder gedehnt wird, steigt die Kraft in etwa linear an. Sobald eine kritische Hubkraft erreicht wird, bleibt diese plötzlich konstant. Schon bei $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ sind im horizontalen Schenkel geringfügige Federschwingungen sichtbar. Dies ist jedoch bei höheren Hubgeschwindigkeiten viel deutlicher erkennbar. Bis zu $100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (Abbildung 18) tritt diese periodische Kraftänderung erst nach Erreichen des Kraftmaximums auf.

Ab einer Hubgeschwindigkeit von $200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (Abbildung 19) kommt es jedoch zu einer nachweisbaren zeitlichen Verzögerung des erwarteten Kurvenverlaufs.

Dieser Effekt verstärkt sich bei sehr schnellen Hubgeschwindigkeiten noch deutlich (Abbildung 20 und Abbildung 21).

Tabelle 6. Verzögerungsstrecken während der Messungen.

Hubgeschwindigkeit [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	30	50	100	200	300	400
Strecke bis zum Schnittpunkt	15,45	15,41	15,84	14,16	13,84	13,70
Strecke bis L_{\max}				16,19	16,69	17,62
Strecke der Verzögerung	alle Stecken in [mm]			2,03	2,85	3,90

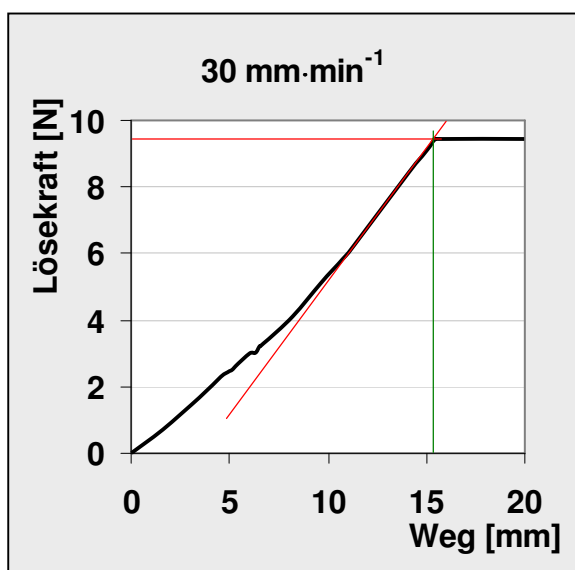


Abbildung 16. Messung mit $30 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

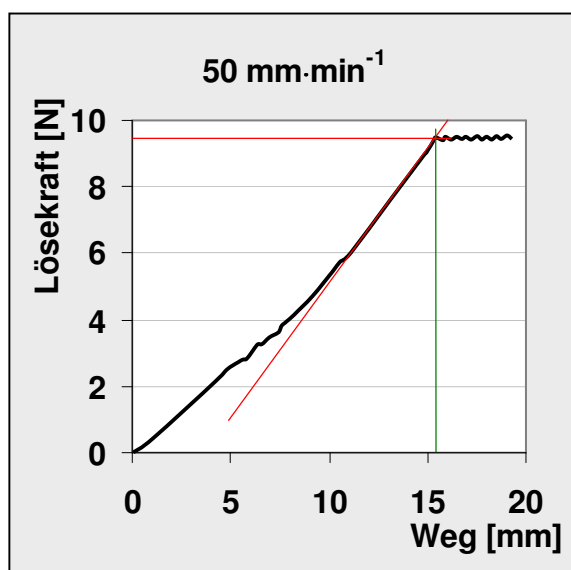


Abbildung 17. Messung mit $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

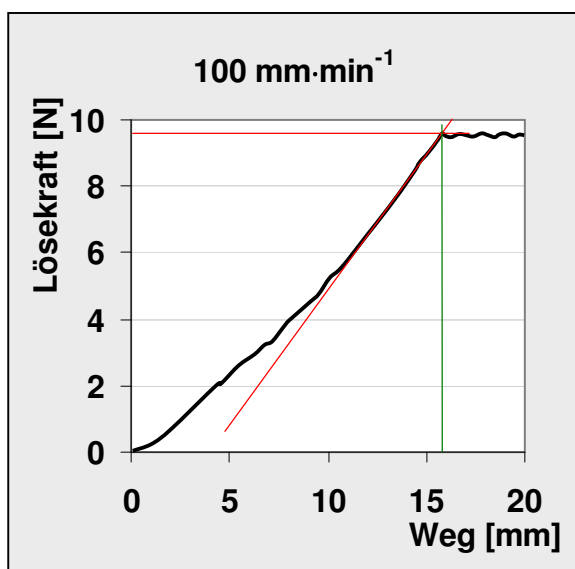


Abbildung 18. Messung mit $100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

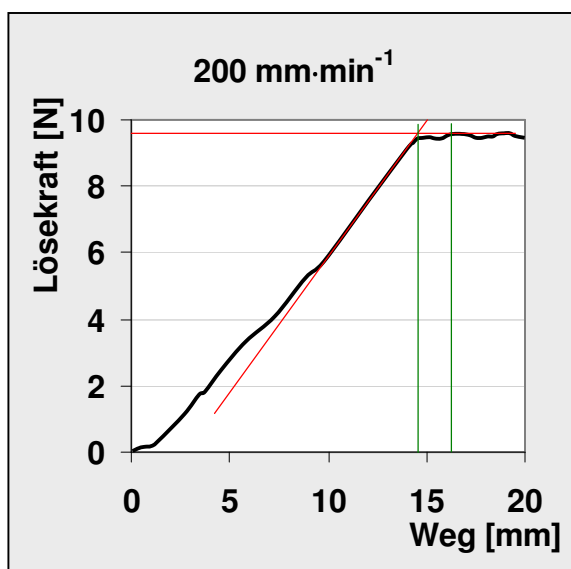


Abbildung 19. Messung mit $200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

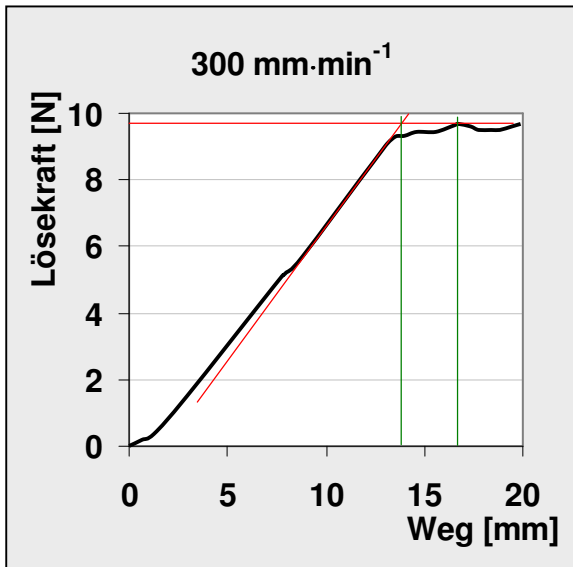


Abbildung 20. Messung mit $300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

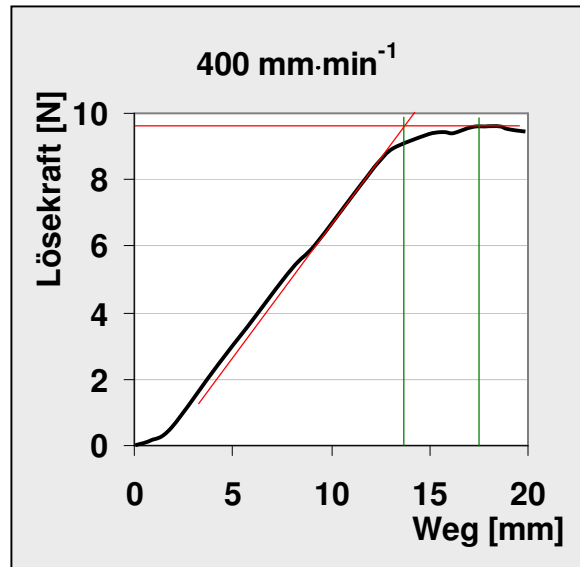


Abbildung 21. Messung mit $400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

4.5 Abschätzen der in vivo wirkenden Abzugsgeschwindigkeit

Von vier Probanden wurden die Unterkiefervertikalbewegungen während des Kauvorgangs registriert. Die Abbildung 22 (S. 60) zeigt exemplarisch ein solches Zeit-Weg-Diagramm:

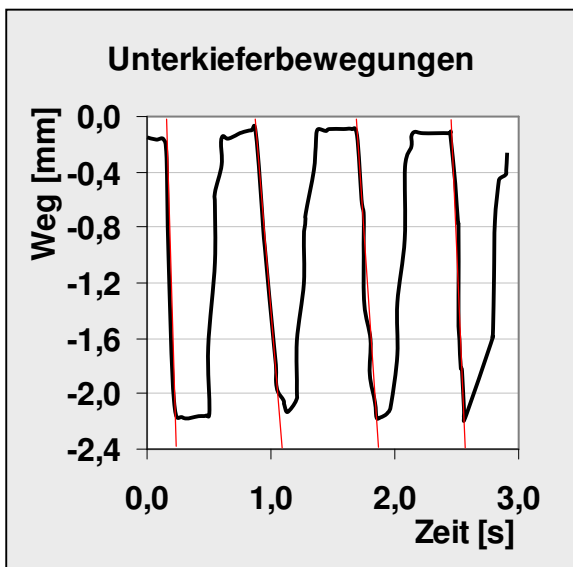


Abbildung 22. Zeit-Weg-Diagramm der Unterkiefervertikalbewegungen von Proband 2 beim Kauen.

Die aus den Anstiegen der eingezeichneten roten Hilfslinien ermittelten Kieferöffnungsgeschwindigkeiten von allen vier getesteten Probanden sind in der Tabelle 7 (S. 61) zusammengestellt. Die Streuung der Werte, die jedoch alle deutlich jenseits der maximal einstellbaren Hubgeschwindigkeit der Universalprüfmaschine „Zwick 1435“ liegen, dürfte aus den individuellen Unterschieden resultieren.

Tabelle 7. Kieferöffnungsgeschwindigkeiten von vier Probanden.

[mm·min ⁻¹]	v_{\min}	v_{\max}	\bar{v}
Proband 1	2682	2682	2682
Proband 2	1006	2680	1463
Proband 3	805	1006	911
Proband 4	766	1609	1049

4.6 Abzugsmessungen zur Beurteilung der Gesamthaftung

Während der Abzugsmessungen wurden geometrische Parameter, Abzugsgeschwindigkeit und die verwendeten Zwischenflüssigkeiten variiert. Die Versuche verliefen alle nach dem im Abschnitt 3.2.5 (S. 40) beschriebenen Protokoll. Für Zylinderteleskope wurden die Hubgeschwindigkeiten 30, 50 und 400 mm·min⁻¹ und für Konuskronen zusätzlich 200 mm·min⁻¹ vorgegeben. Die Mittelwerte der Abzugsmessungen der Konuskronen mit ihren absoluten und relativen Standardabweichungen sind in der Tabelle 12 (s. Anhang, S. 117) aufgeführt. Die Tabelle 13 (s. Anhang, S. 119) zeigt die entsprechenden Ergebnisse für Zylinderteleskope.

Bei Verwendung des hochviskösen Silikonöls N10000 lassen sich die Außenkronen nur sehr schwer aufsetzen. Die Messwerte streuen teilweise so erheblich, dass für einzelne Messreihen (Kennzeichnung „*“ in Tabelle 12) keine verlässlichen Ergebnisse angegeben werden können.

Die Ergebnisse der statistischen Untersuchungen bezüglich der Unterscheidbarkeit der Messreihen, die in den oben genannten Tabellen nur zusammengefasst wiedergegeben werden, finden sich im Anhang (Abschnitt 8.2, S. 127).

Handhabbarkeit

Die niedrigviskosen Flüssigkeiten (bis V50) ließen sich nur bedingt gut verwenden, da sie sehr leicht noch vor dem Eingliedern wieder herauslaufen. Bei extrem zähflüssigen Ölen besteht diese Gefahr nicht; sie benötigen aber eine Fügekraft, die manuell schon unangenehm erscheint und länger als fünf Sekunden anhalten muss. Bei Konvergenzwinkeln $\leq 2^\circ$ ist das Aufsetzen der Außenkrone mit N10000 kaum noch möglich. Subjektiv erscheint die Verwendung von Silikonölen mit einer Viskosität zwischen 200 und 1000 mPas am angenehmsten. Sie fließen nicht zu

schnell aus den Außenkronen, die sich gut andrücken lassen.

Lösekraftverläufe

Exemplarisch werden in den Abbildungen 23 bis 26 typische Kurvenverläufe gezeigt, die während der Abzugsmessungen aufgezeichnet wurden:

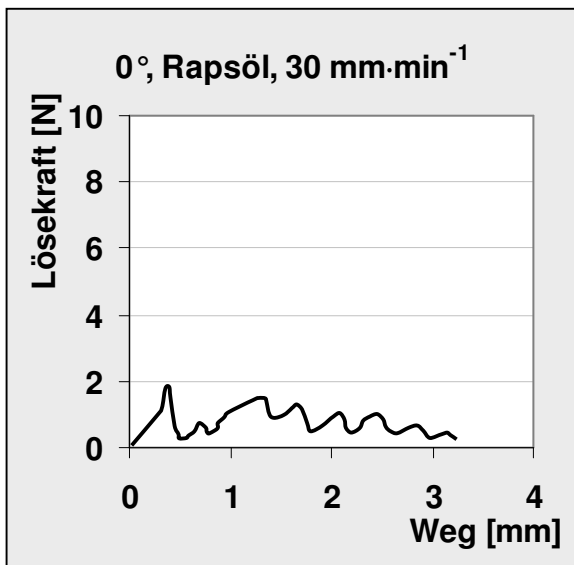


Abbildung 23. Abzug PK-1 mit Rapsöl.

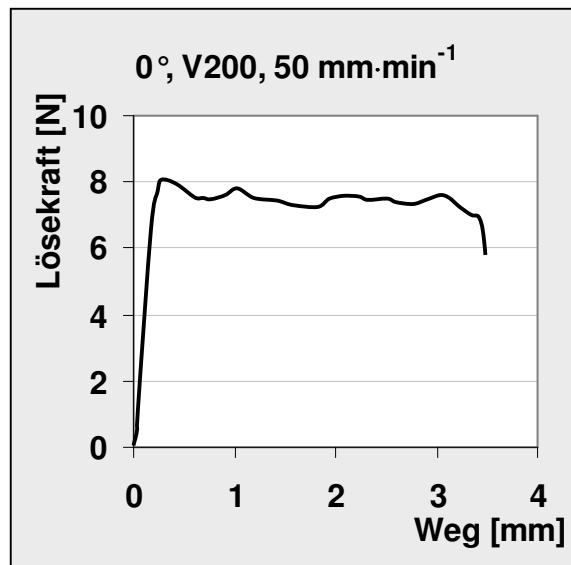


Abbildung 24. Abzug PK-3 mit V200.

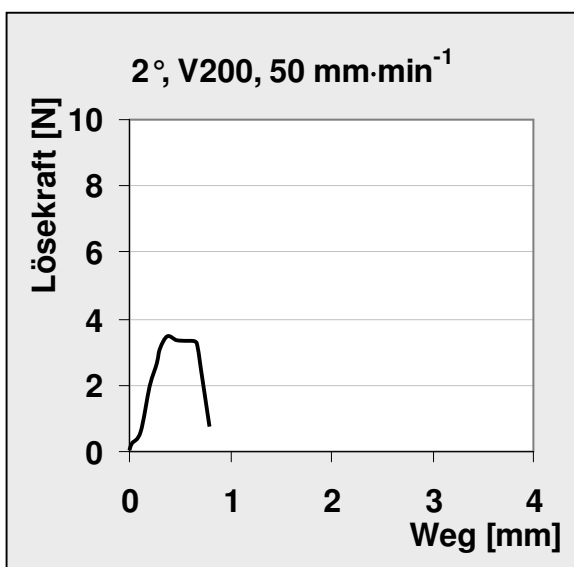


Abbildung 25. Abzug PK-4 mit V200.

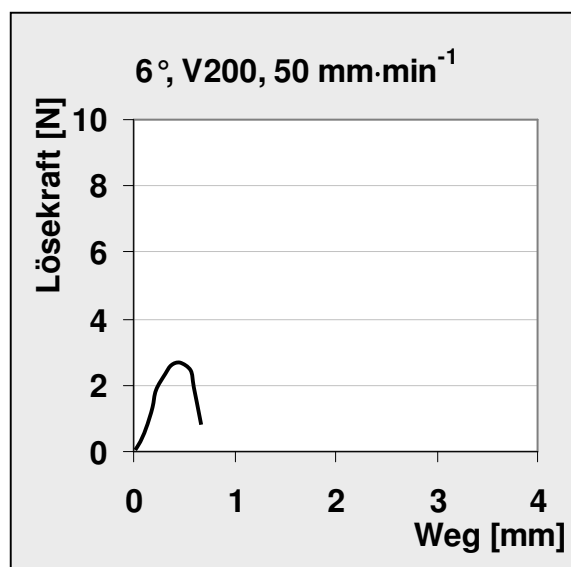


Abbildung 26. Abzug PK-6 mit V200.

Bei den Zylinderteleskopen ist deutlich zu sehen, dass während weiter Strecken des Abzugs Kraft aufgebracht werden muss. Bei den Konuskronen hingegen fällt die Lösekraft nach dem Maximum recht schnell ab. Der Betrag der Lösekraft unterscheidet sich zwischen dem 6,5 mm breiten PK-1 und dem 9,0 mm breiten PK-3 stark. Dieser Unterschied beruht zum einen, wenn auch nur gering, auf der Verwendung des anderen Öls. Zum anderen führt der größere Durchmesser zur Lö-

sekraftsteigerung. Diese Zusammenhänge werden in den Abbildungen der nächsten Abschnitte genauer dargestellt.

Der 2°-Konus (PK-4) weist nur noch ein recht kurzes Lösekraft-Plateau auf, das beim 6°-Konus nur noch als weiche runde Spitze erscheint. Bei den Konuskronen gibt es ebenfalls Haftungsunterschiede. Sie fallen jedoch wesentlich geringer aus, als zwischen PK-1 und PK-3.

4.6.1 Lösekräfte in Abhängigkeit von der Viskosität

Die Abbildungen 27 bis 31 zeigen die Viskositäts-Lösekraft-Kurven aller sechs Prüfkörper¹ bei verschiedenen Abzugsgeschwindigkeiten:

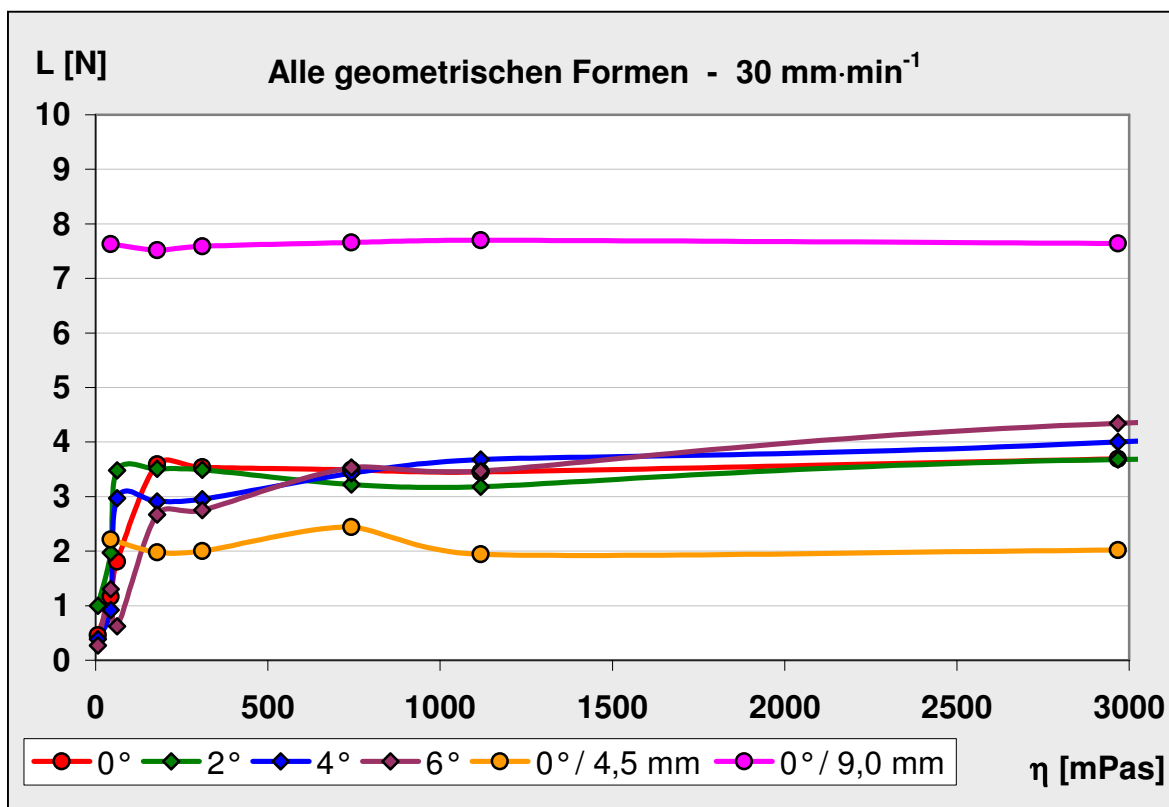


Abbildung 27. Lösekräfte bei 30 mm·min⁻¹, viskositätsabhängig, linear.

¹ Wo nicht anders angegeben, gilt $d_u = 6,5$ mm.

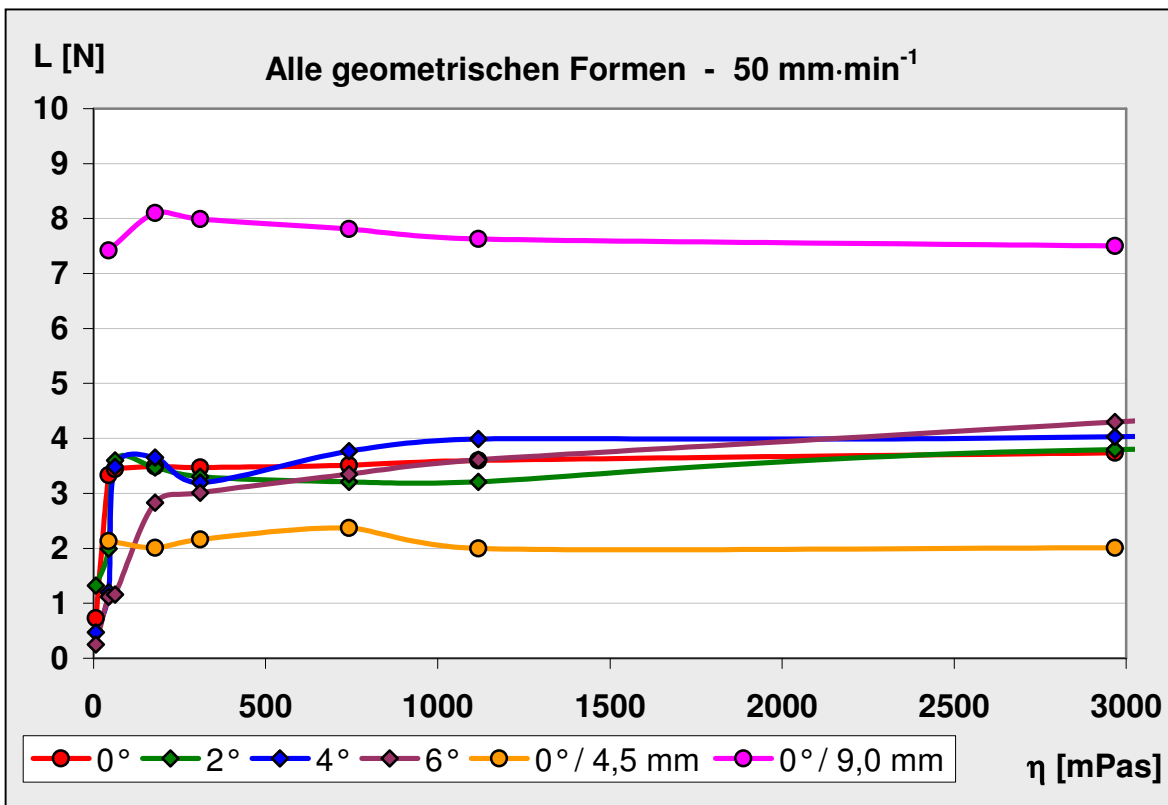


Abbildung 28. Lösekräfte bei 50 mm·min⁻¹, viskositätsabhängig, linear.

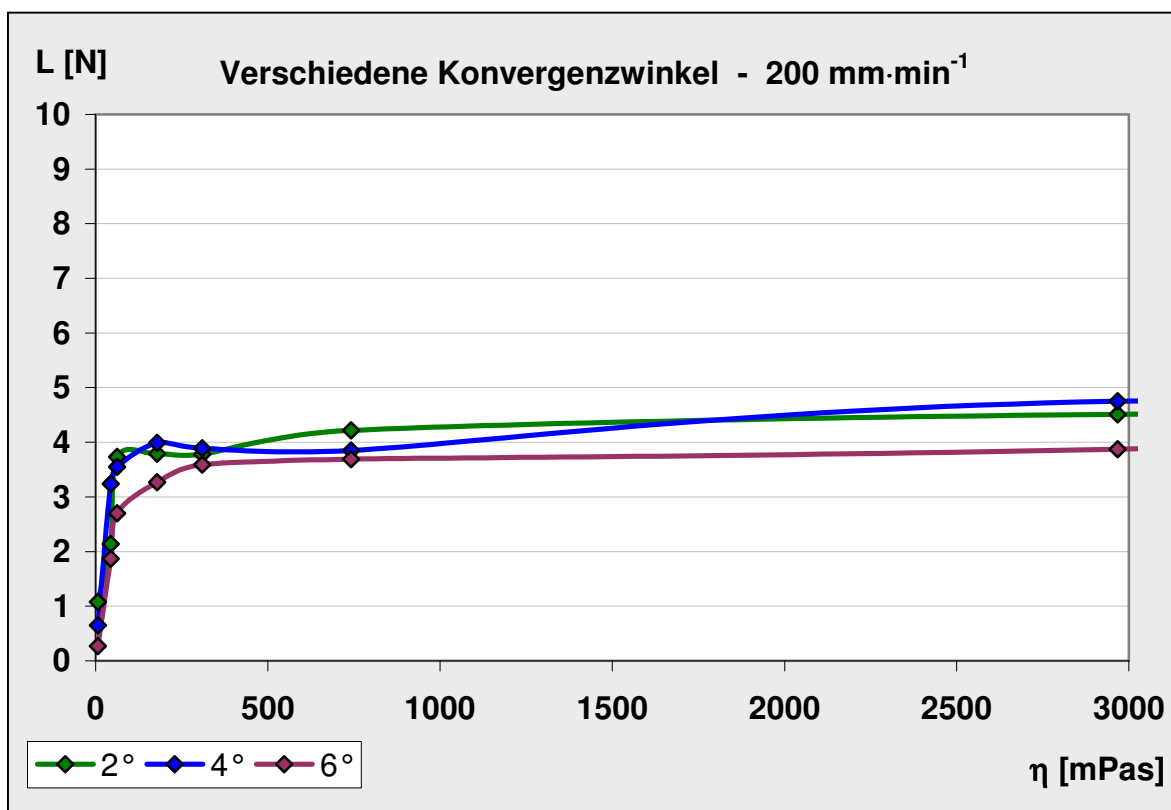


Abbildung 29. Lösekräfte bei 200 mm·min⁻¹, viskositätsabhängig, linear.

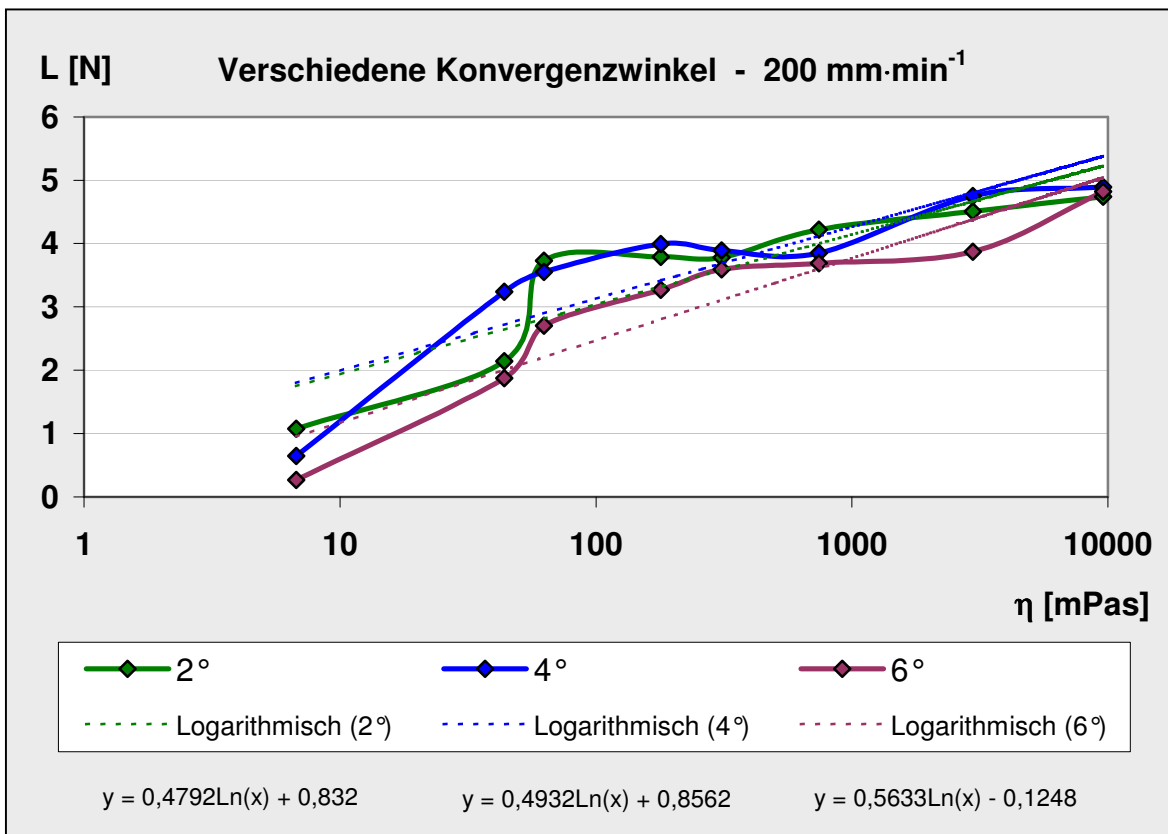


Abbildung 30. Lösekräfte bei 200 mm·min⁻¹, viskositätsabhängig, logarithmisch.

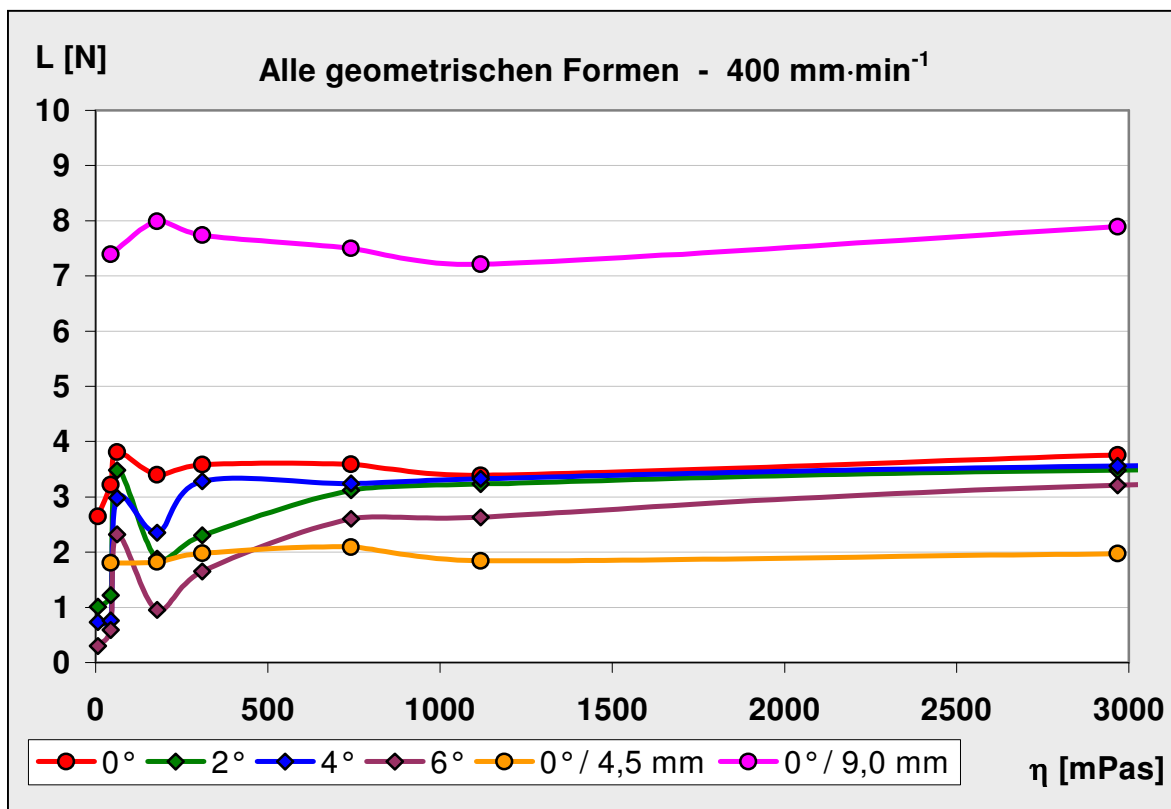


Abbildung 31. Lösekräfte bei 400 mm·min⁻¹, viskositätsabhängig, linear.

Folgende Feststellungen lassen sich anhand der Abbildungen treffen:

- Die Lösekräfte der Zylinderteleskope unterscheiden sich deutlicher voneinander als die der verschiedenen Konuskronen. Breitere Doppelkronen ermöglichen dabei erwartungsgemäß eine hochsignifikant größere Haftung. Für unterschiedliche Konvergenzwinkel lässt sich keine eindeutige Reihenfolge erkennen. Der Kronendurchmesser ist somit wesentlich einflussreicher als die Konizität.
- Vor allem für Konuskronen besteht eine gewisse Viskositätsabhängigkeit. Es liegt jedoch kein linearer Zusammenhang vor. Unterhalb von 200 mPas ist die Abhängigkeit deutlich zu sehen. Bei hochviskosen Siliconölen gibt es kaum noch Lösekraftzunahmen durch Viskositätssteigerungen. Dies verdeutlicht auch die logarithmische Achsenskalierung in der Abbildung 30.

4.6.2 Lösekräfte in Abhängigkeit von der Abzugsgeschwindigkeit

Im folgenden werden die Lösekräfte der verschiedenen Prüfkörper in Abhängigkeit von der jeweiligen Lösegeschwindigkeit dargestellt:

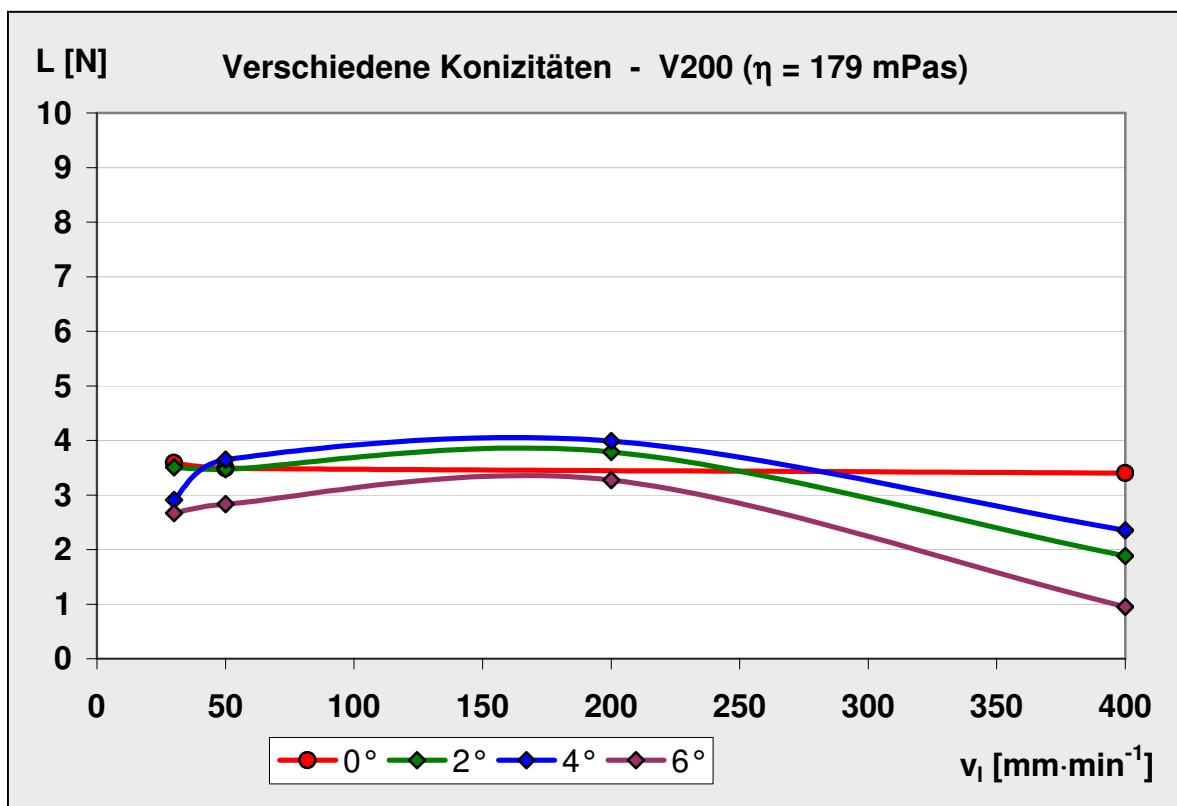


Abbildung 32. Lösekräfte in Abhängigkeit von der Abzugsgeschwindigkeit mit V200.

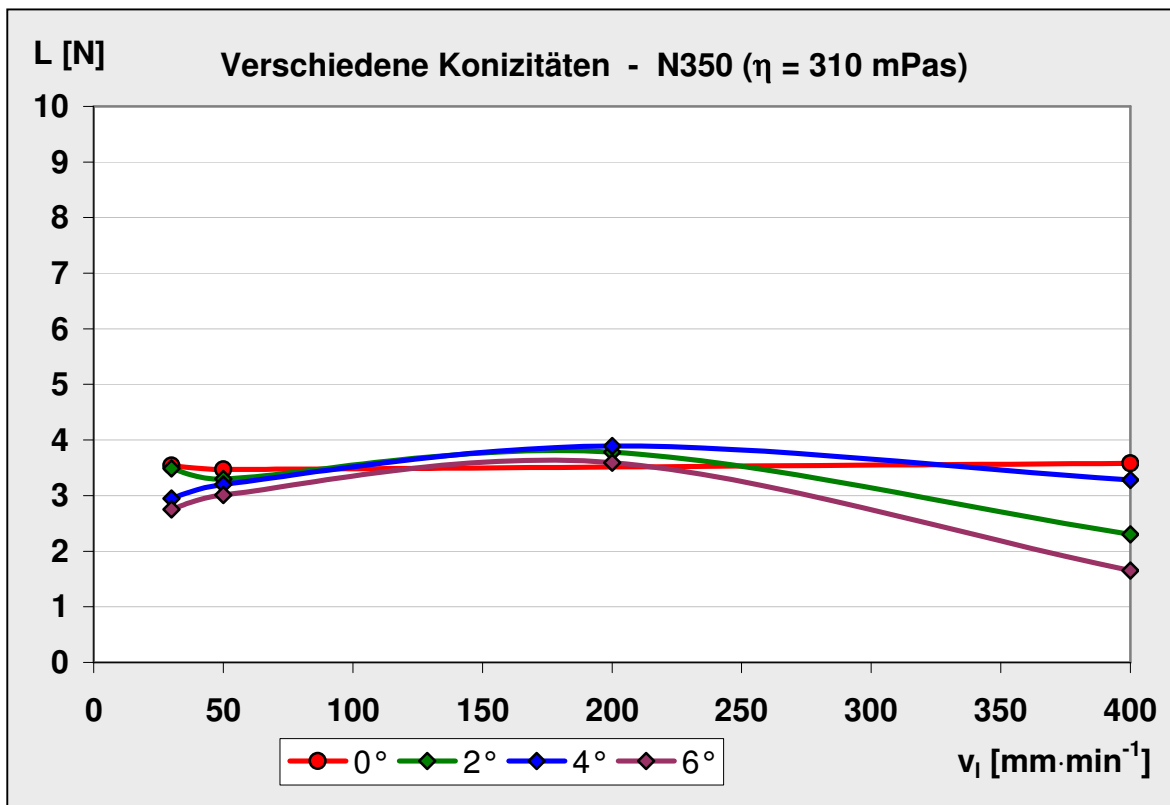


Abbildung 33. Lösekräfte in Abhängigkeit von der Abzugsgeschwindigkeit mit N350.

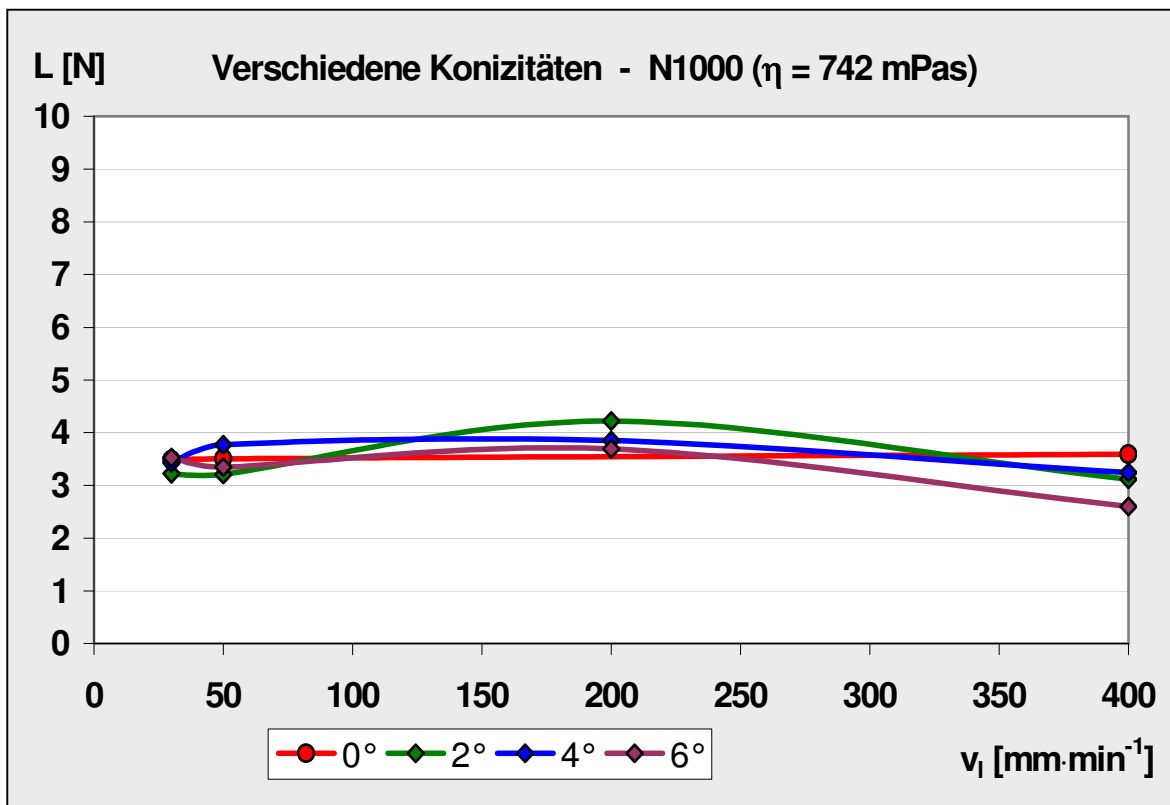


Abbildung 34. Lösekräfte in Abhängigkeit von der Abzugsgeschwindigkeit mit N1000.

Folgende Feststellungen lassen sich treffen:

- Im gemessenen Geschwindigkeitsbereich (30 bis 400 mm·min⁻¹) lassen sich keine wesentlichen Effekte feststellen. In der Regel sind die Veränderungen nicht signifikant oder zumindest unbedeutend (s. Tabelle 23, S. 128).
- Mit steigender Viskosität steigen die Lösekräfte nur minimal. Die Streubreite zwischen den unterschiedlichen Prüfkörpern, besonders bei maximaler Abzugsgeschwindigkeit nimmt jedoch ab.
- Die Lösekräfte sinken oberhalb von 200 mm·min⁻¹ wieder. Dies ist jedoch im Zusammenhang mit den im Abschnitt 4.4 (S. 58) getroffenen Feststellungen zu betrachten. Die Verlässlichkeit der Messwerte im Grenzbereich der Universalprüfmaschine erscheint fraglich.

4.7 Lösekräfte bei Prüfkörpern ohne okklusale Deckel

Alle Ergebnisse der Abzugsmessungen mit Mantelprüfkörpern ohne okklusale Deckel werden in Tabelle 14 (s. Anhang, S. 121) aufgelistet. Die Signifikanzen zwischen den verschiedenen Parametern werden im Anhang dargestellt (s. Tabelle 27, S. 131).

Die Lösekräfte liegen bei Abzugsgeschwindigkeiten ≤ 50 mPas zu nah am unteren Ende des Messbereichs, so dass die Werte nicht sehr verlässlich sind. Zu Interpretationen sollten daher nur die 400 mm·min⁻¹-Felder herangezogen werden. Bei den Zylinderteleskopen waren die Streuungen so groß, dass sie wegen der geringen Messgenauigkeit nicht sicher beurteilt werden können und daher in der Tabelle nicht mit aufgeführt sind. Die Lösekräfte sind generell so klein, dass sie nur einen nahezu vernachlässigbaren Anteil an den Gesamtlösekräften ausmachen. Die Abbildung 35 (S. 69) zeigt die Abhängigkeit der Lösekräfteanteile, die durch die Mantelfläche bewirkt werden, von Konvergenzwinkel und Viskosität.

Mit steigender Viskosität steigen auch die Lösekräfte (für 2° und 4° jeweils und für 6° zwischen V200 und N1000 hochsignifikant). Mit steigendem Konvergenzwinkel nehmen die Lösekräfte ab (zwischen 2° und 6° hochsignifikant).

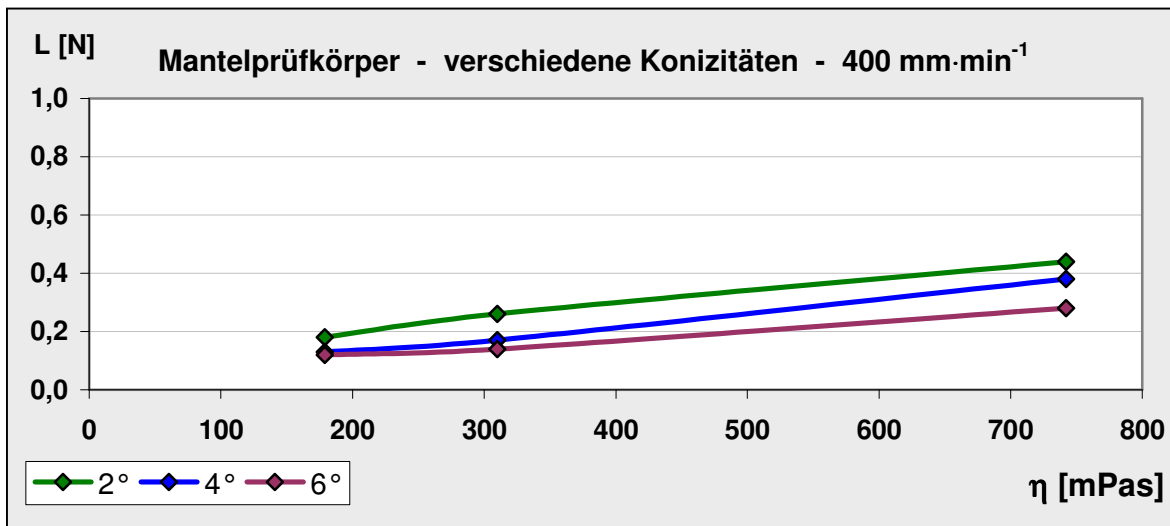


Abbildung 35. Lösekräfte von Mantelprüfkörpern bei 400 mm·min⁻¹.

4.8 Der Einfluss der Adhäsion auf das Haftverhalten

Die Ergebnisse der Plattenabzugsmessungen mit verschiedenen benetzenden Flüssigkeiten sind in Tabelle 15 (s. Anhang, S. 122) und Abbildung 36 zu finden:

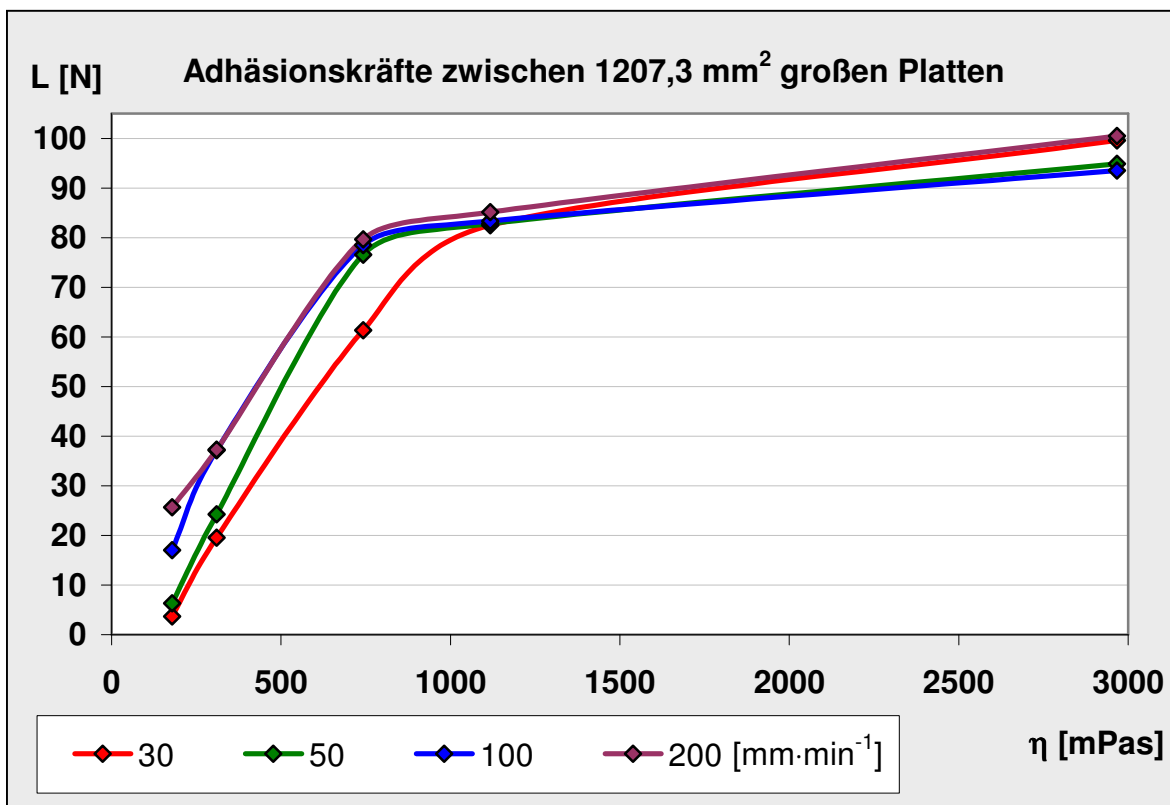


Abbildung 36. Adhäsionskräfte zwischen zwei Metallplatten beim Auseinanderziehen.

Folgendes ist zu erkennen:

- Mit steigender Viskosität steigt auch die Lösekraft. Dieser Effekt folgt, wie auch schon bei den Doppelkronen-Messungen, keinem linearen Kurvenverlauf. Oberhalb von 900 mPas verläuft der Anstieg wesentlich flacher.
- Mit steigender Viskosität wird der Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit geringer. Im Gegensatz zu V200 finden sich ab N1000 kaum noch signifikante Unterschiede und wenn, dann ohne eine wesentliche Effektstärke.

Die Signifikanzen der verschiedenen Unterscheidungsmöglichkeiten finden sich in Tabelle 28 (s. Anhang, S. 132).

4.9 Wasser-Speichel-Öl-Kombinationstest

Die Tabelle 16 (s. Anhang, S. 122) zeigt die bereits aufgeführten Haftwerte von PK-4 im Vergleich mit den Messungen unter Simulation realer klinischer Situation. „Mix“ bezeichnet Messungen, bei denen vor dem Öleintropfen Wasserreste in den Außenkronen verblieben und künstlicher Speichel die Primärteile vor dem Fügen benetzte. Dieselben Ergebnisse werden grafisch in Abbildung 37 und 38 (S. 71) wiedergegeben.

Folgende Beobachtungen wurden gemacht:

- Bei den beiden langsamsten Abzugsgeschwindigkeiten sinken die Lösekräfte unter den „Mix-Verhältnissen“. Bei allen weiteren Messreihen gibt es keine relevanten Unterschiede. Signifikanzen lassen sich, abgesehen von Rapsöl gegen Mix-Rapsöl bei $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, ebenfalls nicht nachweisen (s. Tabelle 24, S. 129). Dieser eine Unterschied ist mit einer Effektstärke von 10 % nicht sonderlich bedeutungsvoll.
- Unterschiedliche Mengenverhältnisse spielen eine Rolle. Dieser Effekt lässt sich jedoch nur zwischen den ersten beiden Messreihen nachweisen. Ab einem gewissem Verhältnis spielen Unterschiede kaum noch eine Rolle. Die Signifikanzen zwischen diesen Messreihen finden sich in Tabelle 26 (S. 131).

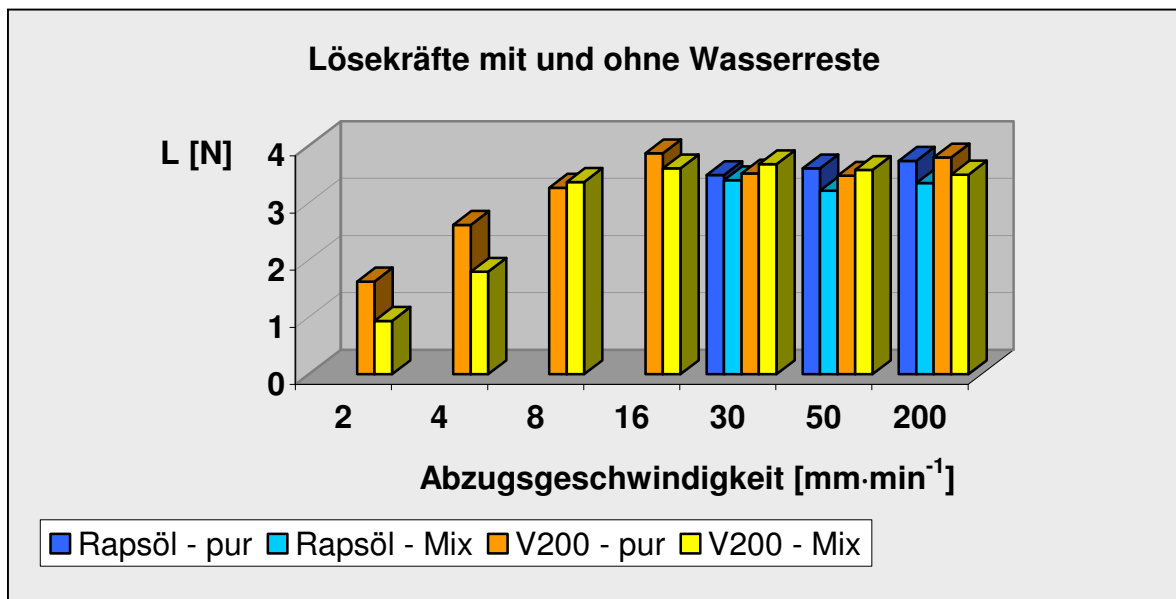


Abbildung 37. Lösekräfte mit und ohne Wasserreste vor dem Öleintropfen im Vergleich.

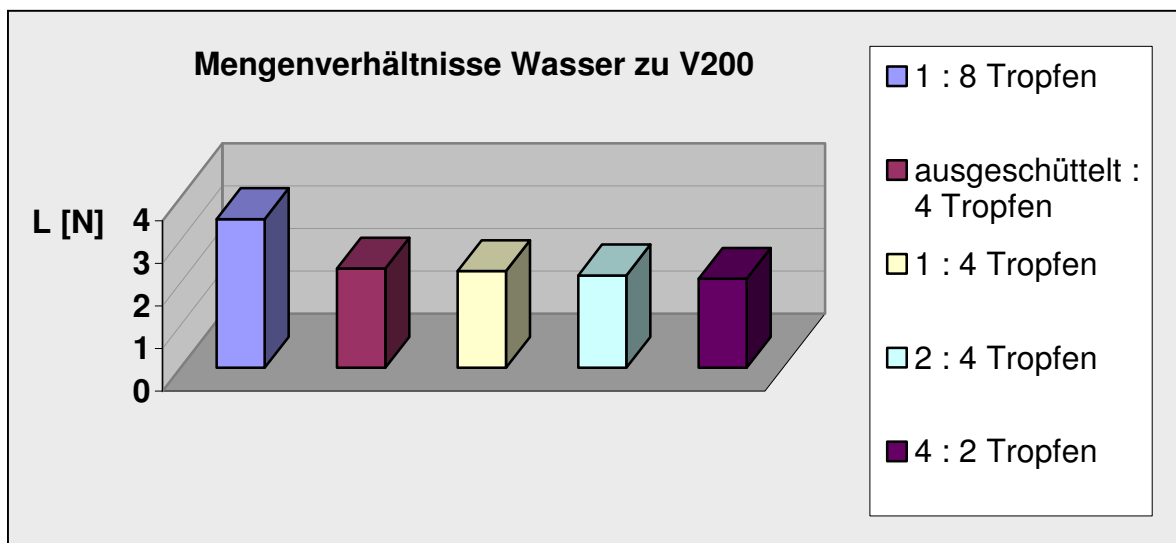


Abbildung 38. Lösekräfte bei unterschiedlichen Mengenverhältnissen.

5 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass durch Veränderungen geometrischer Parameter, Abzugsgeschwindigkeit und Zwischenflüssigkeit deutlich unterschiedliche Lösekräfte resultieren. Im Abschnitt 1.6 (S. 20) wurden die in der Literatur diskutierten Haftmechanismen kurz vorgestellt. An dieser Stelle sollen nicht einfach die Größenordnungen der Gesamthaftung je nach Parameterkombination benannt werden. Sie können dem Ergebnissteil dieser Arbeit (S. 53) entnommen werden. Im Verlauf der weiteren Überlegungen soll hingegen der Versuch unternommen werden, die einzelnen Haftkomponenten separat zu betrachten, um anschließend mit größerer Sicherheit Schlussfolgerungen treffen zu können.

5.1 Fehlerdiskussion

5.1.1 Zufällige Fehler

Ergebnisse sind umso zuverlässiger, je mehr Zufälle eliminiert werden. Im Idealfall müssten alle Messreihen mit verschiedenen, von unterschiedlichen Zahntechnikern hergestellten Prüfkörpern durchgeführt werden, um auszuschließen, dass deren Qualität die Aussagefähigkeit beeinflusst. Dieser Aufwand war jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. So wurden die Prüfkörper nur ein- bis zweimal¹ hergestellt und alle Messungen vom Autor selbst vorgenommen. Zufällig schwankende Messwerte können daher nicht mit hundertprozentiger Sicherheit ausgeschlossen werden.

Die Messwerte schwankten teilweise um 20 %. Dies ist nicht unnormal, sondern liegt „in der Natur der Sache“ begründet (*Becker 1982a*). Werden Doppelkronen nicht exakt axial abgezogen, kann es unter Umständen zu Verklemmungen kommen, was eine erhöhte Lösekraft erfordern kann. Waren vor dem Fügen Luftblasen in den Zwischenflüssigkeiten vorhanden, so kann eine verminderte Retentionswirkung resultieren. So traten in den Messreihen hin und wieder Ausreißer auf. Da sie zufällig auftraten und nicht reproduzierbar waren, könnten sie zu falschen Interpretationen führen. Deshalb wurden sie, wo sie eindeutig als solche identifiziert werden konnten, aus den Messreihen entfernt.

Je nachdem wie die Streuungen im Einzelfall ausfallen, kann das arithmetische

¹ Alle Prüfkörper mit $d_u = 6,5$ mm wurden zweimal, PK-2 und PK-3 einmal hergestellt.

Mittel zur einen oder zur anderen Seite verschoben sein. So kann es passieren, dass im Ergebnissteil dieser Arbeit Kurvenverläufe nicht exakt mathematisch beschreibbaren Funktionen folgen, deren Annahme dennoch möglich sein kann.

Die in den Tabellen genannten Lösekräfte können auf jeden Fall zum groben Abschätzen der Lösekraft-Größenordnung herangezogen werden. Weitere Interpretationsmöglichkeiten hängen vom konkreten Fall ab. Ein theoretisches Untersetzen der Haftmechanismen erscheint sinnvoll, um geeignete Schlussfolgerungen ziehen zu können.

5.1.2 Systematische Fehler

Systematische Fehler führen dazu, dass die Messwerte generell zu hoch oder zu niedrig ausfallen. Da sowieso Streuungen von bis zu 20 % normal sind, haben nur gravierende systematische Fehler Auswirkung auf die Interpretation. Kurvenverläufe werden von solchen Fehlern prinzipiell nicht beeinflusst. Ursächlich kommen Fehler im Versuchsprotokoll, Ungenauigkeiten der Messvorrichtung und Falschanahmen physikalischer Parameter von eingesetzten Substanzen in Betracht.

Physikalische Parameter der Zwischenmedien

Wie Tabelle 5 (S. 53) zeigt, weichen die gemessenen Viskositäten der eingesetzten Silikonöle um 5 - 25 % von den Herstellerangaben ab. Ohne Viskositätskontrolle wären falsche Kurvenverläufe entstanden. Die Nachmessungen erfolgten mit der gerätespezifisch möglichen Messgenauigkeit. Temperaturbedingte Schwankungen können ausgeschlossen werden, da alle Messungen bei 21 - 23 °C durchgeführt wurden.

Fehler im Versuchsprotokoll

Es wurde darauf geachtet, den Versuchsaufbau und -ablauf so sicher wie möglich zu gestalten. Das Messprotokoll in der Messsoftware wurde so eingerichtet, dass zu Beginn einer jeden Messung das Signal der Kraftmessdose auf 0,00 N kalibriert wurde. Lediglich das geringe Gewicht der Sekundärteile führte zu einer generellen Erhöhung der Messwerte, die jedoch vernachlässigt werden kann. Im Weg-Abzugskraft-Diagramm erscheint gelegentlich das Auftreffen des Hakens auf den Haltering und die initiale Ausrichtung des Primärprüfkörpers in seine maximale vertikale Position, bevor der eigentliche Lösekraft-Verlauf beginnt. Dies hat keinen Einfluss auf die maximale Abzugskraft.

Die Geschwindigkeitsträgheit des Messsystems

Da die Messungen bei unterschiedlichen Abzugsgeschwindigkeiten durchgeführt wurden, ist die Frage, wie exakt die Messungen im Grenzbereich der Einstellungsmöglichkeiten der Universalprüfmaschine sind, viel entscheidender. Dies wurde evaluiert (s. Abschnitt 4.4, S. 58). Dabei zeigt sich, dass der Kurvenverlauf bei höheren Hubgeschwindigkeiten verzerrt wird. Die schräg ansteigend eingezeichnete Hilfslinie kennzeichnet den zu erwartenden linearen Kraftanstieg beim Dehnen der Feder und die horizontale Hilfslinie die konstant bleibende Maximalkraft, die wirkt, wenn der Federkraftmesser bis zu seinem Endanschlag ausgezogen ist. Der Schnittpunkt beider stellt den zu erwartenden Übergangspunkt der beiden Kurvenabschnitte dar. Bei langsamer Abzugsgeschwindigkeit sind Hilfslinien und registrierter Kurvenverlauf in etwa kongruent (s. Abbildung 16, S. 59). Steigt die Geschwindigkeit an, so beginnt die Feder nachzuschwingen (s. Abbildung 18, S. 59). Diese periodische Veränderung beginnt naturgemäß mit einem Kraftabfall, da sich die Feder nach maximaler Dehnung wieder zusammenzieht, was die Kraftmessdose entlastet. Ab einer Hubgeschwindigkeit von $200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (s. Abbildung 19, S. 59) wird der Kurvenverlauf jedoch in der Weise verzerrt, dass sich das Kraftmaximum nicht im Hilfslinienschnittpunkt befindet, sondern erst verzögert auftritt. Die vertikalen Hilfslinien zeigen den zurückgelegten Weg bis zum Erreichen des Schnittpunktes bzw. des Kraftmaximums. Deren Abstand zueinander kennzeichnet die Strecke, die zurückgelegt wurde, bis der erwartete Messwert tatsächlich vorhanden ist. Aus Hubgeschwindigkeit (v_l) und Verzögerungsstrecke (s_v) lässt sich durch die Beziehung

$$[9] \quad t_v = \frac{s_v}{v_l}$$

die Verzögerungszeit (t_v) berechnen. Größere Abzugsgeschwindigkeiten bewirken verständlicherweise auch größere Verzögerungsstrecken (vgl. Abbildungen 19 bis 21, S. 59 und 60).

Interessanterweise ergeben sich aber ähnliche Verzögerungszeiten (vgl. Tabelle 8). Man kann also davon ausgehen, dass alle Messungen mit einer Verzögerung von ca. 0,6 Sekunden von der Universalprüfmaschine registriert werden.

Tabelle 8. Errechnete Messverzögerungen.

v_l [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	200	300	400
s_v [mm]	2,03	2,85	3,90
t_v [s]	0,61	0,57	0,59

Bei Messungen mit Zylinderteleskopen, bei deren Trennen über einen längeren Zeitraum Kraft angewandt werden muss (s. Abbildung 24, S. 62), ist dieser Fakt nicht sehr bedeutungsvoll. Wird bei Konuskronen hingegen die maximale Lösekraft erreicht, löst sich die Verbindung abrupt (s. Abbildung 26, S. 62). Bei kurzen und hohen Kurvengipfeln wird die Kraft unter Umständen erst registriert, wenn sie schon gar nicht mehr vorhanden ist. Daraus können zu niedrige Messergebnisse resultieren. Interessanterweise zeigen die Ergebnisse genau diesen Effekt: Bei Konuskronen sinken die Lösekräfte bei grenzwertig hohen Hubgeschwindigkeiten wieder ab, was bei Zylinderteleskopen nicht beobachtet wird (vgl. Abbildung 32 bis Abbildung 34, S. 66 - 67). Dieser Kurvenabfall sollte demzufolge nicht als wirklicher Kraftabfall interpretiert werden. Die entsprechenden Messergebnisse bei $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ Abzugsgeschwindigkeit sind nicht sicher. Diese Tatsache muss bei allen weiteren Betrachtungen beachtet werden.

5.2 Der Einfluss der Reibung

Aus physikalischer Sicht sind zwei unterschiedliche Reibungsarten zu unterscheiden. Die „Äußere Reibung“ beschreibt die Kraft, die zum Verschieben zweier aufeinandergedrückter Körper aufgebracht werden muss. Das Phänomen „Innere Reibung“ wird spürbar, wenn beispielsweise eine Platte parallel zu einer ebenen Wand in einer Flüssigkeit bewegt wird. Für diese Bewegung ist eine Kraft erforderlich, die dem Betrag nach gleich der Reibungskraft ist (*Kuchling 1996*).

5.2.1 Äußere Reibung - Friktionsverbindungen

Friktion beruht auf „reversiblen Kaltschweißverbindungen“ (*Kragelski 1971*) durch Annäherung der Reibungspartner im molekularen Bereich, wobei ein großflächiger Kontakt der Reibungsflächen mit definierter Übergangspassung angestrebt wird. Durch die exakte Formwiedergabe galvanisch hergestellter Außenteile wäre ein flächiges Anliegen zwar denkbar. Werden jedoch keine absolut parallelen Zylinderteleskope, sondern, wie üblich, Konuskronen gefertigt, so entfernen sich die Reibungsflächen schon bei geringster Abzugsstrecke voneinander, so dass dann keine Friktion mehr wirken kann (*Körber 1988*). Eine andere Tatsache hinterfragt die Friktion noch viel stärker:

Manche Autoren verwenden verwunderliche Schlagworte, wie „Friktive Galvanodoppelkronen“ (*Klaus 2003*) oder „dauerhafte Friktion von AGC[®]-Doppelkronen“

(*Busch 1999, Hoffmann 2001, Meschke und Volf 2001*) in Arbeiten, in denen kein Wort über Haftungsfragen verloren wird. In diesen Beiträgen werden die Außenkronen, wie von zahlreichen Autoren empfohlen, direkt auf die Innenkronen aufgalvanisiert. So resultiert ein Fügespalt, der der Stärke der Leitsilberschicht entspricht und im Bereich von 8 bis 12 μm liegt (*Diedrichs 1995*). So liegt ein Abstand zwischen den „Berührungsflächen“ vor, der keine „definitive Übergangspassung“ mehr ermöglicht, denn der Toleranzbereich für friktive Passungen (s. Abschnitt 1.6.1, S. 21) wird somit um das 1000fache überschritten.

Daher kann überhaupt keine nennenswerte Friktion entstehen. Dies könnte man zwar erreichen, wenn man indirekt auf verkleinert dublierte Innenkronen galvanisiert (*Stroppe 1990a, Wirz et al. 1996b*), es stellt sich jedoch die Frage, ob man dieses Ziel in Anbetracht der genannten Nachteile von haftenden Zylinderteleskopen (s. Abschnitt 1.6.1, S. 21) überhaupt anstrebt.

5.2.2 Bezug eigener Ergebnisse zur Friktion

Die Messwerte der eigenen Untersuchungen von Doppelkronenabzügen ohne Zwischenflüssigkeit finden sich in der Tabelle 10 (S. 115). Wie erwartet, waren für Konuskronen im Trockenabzug kaum Lösekräfte messbar oder die Standardabweichungen entsprachen in etwa den geringen Messwerten. Das 9 mm breite Zylinderteleskop erbrachte nur minimale Haftungswerte. Das schmalere Teleskop PK-1, für das aufgrund der kleineren Reibungsfläche geringere Lösekräfte erwartet wurden, zeigte eine deutlich höhere Retention. Für diesen Unterschied gibt es keinen plausiblen Grund, der sich durch flächige Friktion erklären ließe. Vielmehr wird angenommen, dass eine andere Ursache vorliegen muss. Die Überstände im Randbereich der AGC[®]-Außenkronen werden nach dem Galvanisieren mit einem Gummipolierer abgezogen. So kann eine zufällige Verbiegung während dieses Vorgangs dazu führen, dass ein ringförmiger Friktionsbereich im Hohlkehlenbereich entsteht, der weder voraussehbar noch reproduzierbar ist. So konnten bei erneuten Messungen mit einer neu galvanisierten Außenkrone kaum Lösekräfte gemessen werden.

Einspielphase

Abbildung 8 (S. 54) zeigt, dass die gemessenen Lösekräfte des eben genannten Prüfkörpers schon innerhalb von 200 Füge-Trenn-Zyklen deutlich abnahmen. Dies stimmt mit der in der Literatur immer wieder beschriebenen Einspielphase überein

(Böttger 1978, Becker 1982a, Stüttgen und Hupfau 1996). Normalerweise sind Retentionsminderungen solcher Größenordnung erst nach 1000 Zyklen zu erwarten (Böttger 1978). Das weist umso mehr darauf hin, dass nur kleinflächige, leicht deformierbare Kontakte, die Haftung verursachen.

5.2.3 Auswirkungen durch benetzende Flüssigkeiten

Bekanntermaßen werden Flüssigkeiten auf relativ zueinander bewegten Metallflächen als Trennmittel eingesetzt, um die Reibung herabzusetzen. Vor allem Öle vermindern die Reibungskräfte sehr stark. Becker bemerkte schon 1982 (b), dass die Friktion von Doppelkronen nach Benetzen mit Ölen und Fetten langfristig, selbst nach anschließenden Reinigungsversuchen, stark herabgesetzt wird, da Friktionsverbindungen, aber auch Adhäsionskräfte durch Unterdrückung molekularer Wechselwirkungen gehemmt werden. Somit kann die Friktion keinesfalls für die Zunahme von Lösekräften bei Verwendung von Zwischenflüssigkeiten ursächlich sein.

5.2.4 Schlussfolgerungen zur Friktion

Würde man tatsächlich Friktion als wesentlichen Haftungsfaktor anstreben, so wären die resultierenden Kräfte auf der einen Seite nicht vorhersehbar, falls sich überhaupt klinisch relevante Lösekräfte einstellen würden. Zweitens muss aufgrund von Verschleißerscheinungen mit deutlichen Retentionsverlusten während der Funktionsperiode gerechnet werden. Solche Versuche sind demnach nicht empfehlenswert. Friktive Verbindungen haben keinen wesentlichen Anteil an der Gesamtlösekraft von Galvano-Doppelkronen.

5.2.5 Innere Reibung

Des Weiteren stellt sich die Frage, auf welche Art und Weise Zwischenflüssigkeiten die Lösekraft von Doppelkronen beeinflusst. Aus ihrer Zähigkeit heraus resultiert das Phänomen „Innere Reibung“. Diese Flüssigkeitseigenschaft wird durch die dynamische Viskosität beschrieben: Zum Verschieben zweier flüssigkeitsgetrennter Platten ist eine gewisse Kraft nötig. In laminaren Strömungen haben die einzelnen Flüssigkeitsschichten unterschiedliche Geschwindigkeiten. Aus dem Abstand der Zwischenschichten (Δd_s) und ihrer Relativgeschwindigkeit (Δv) resultiert ein spezifisches Geschwindigkeitsgefälle, das zur Beschreibung der Viskosität herangezogen wird. Umgedreht kann aus der Definition der dynamischen Visko-

sität heraus die aufzubringende Reibungsarbeit berechnet werden (*Kuchling 1996*):

[10]
$$F_R = \eta \cdot \frac{A_M \cdot v_l}{d_s}$$

Legende:

- F_R Reibungskraft
- ηdynamische Viskosität
- A_MBerührungsfläche
- v_lAbzugsgeschwindigkeit
- d_sAbstand der Berührungsflächen (Spaltweite)

Anhand dieses Zusammenhanges lässt sich einfach erkennen, dass größere Abzugsgeschwindigkeiten größere Reibungskräfte bewirken. Dieser Anstieg müsste jedoch, im Gegensatz zu den im Ergebnisteil vorgestellten Kurven, linear verlaufen, was vermuten lässt, dass noch weitere Phänomene, wie hydraulische Effekte, eine Rolle spielen. Um die betrachtete innere Reibung ohne Unterdruckwirkungen experimentell untersuchen zu können, müssen zwei deckellose Röhren gegeneinander verschoben werden. Die Ergebnisse solcher Versuche finden sich in Tabelle 14 (S. 121). Die Tabelle 17 (s. Anhang, S. 123) zeigt die aus Zusammenhang [10] theoretisch erwarteten Lösekräfte unter der Annahme eines Fügepaltes (d_s) von 10 μm . Die Größe der Mantelflächen (A_M) entstammen Tabelle 29 (S. 133).

Es resultieren Reibungskräfte, die lediglich im Bereich von 0,1 bis 0,5 % der Gesamthaftung liegen. Innere Reibung, die linear mit Viskosität und Abzugsgeschwindigkeit zunimmt, ohne ein Maximum zu erreichen, kann über Summation mit wesentlich bedeutsameren Faktoren einen minimalen weiteren Lösekraftanstieg bewirken, wenn andere Mechanismen bereits Maximalwerte erreicht haben (vgl. Abbildung 29, S. 64).

5.3 Konuspassung

Alle mathematischen Modelle zur Beschreibung der Konushaftung kommen zu dem Schluss, dass die resultierende Lösekraft (L) von der Fügekraft (F), von der Haftreibungszahl (μ_0) und von der Konizität (β) abhängt.

5.3.1 Theoretische Modelle und Haftungsbedingungen

Körber (1968) beschreibt die Konuskronenhaftung, wie schon erwähnt (S. 25) in der „Haftreibung der Ruhe“ (T_0):

[1]
$$T_o = \mu_0 \cdot N = \mu_0 \frac{L_k}{\sin \frac{\alpha_k}{2}}$$

In dem 1980 von *Stenzel et al.* vorgestellten Modell »elastischer Ring auf starrem Kegelstumpf« werden die geometrischen Parameter effektiv tragende Fläche, Kronendurchmesser und Kronenwandstärke ebenfalls eliminiert. Der Elastizitätsmodul und die Rautiefe sind ebenso ohne Einfluss. Der Reibungsfaktor wird in seiner Gesamtheit durch den Term

$$[11] \quad RF_A = \tan \frac{\alpha}{2} - \mu_0$$

Stenzel et al.:

- RF_AReibungsfaktor

beschrieben. Daraus ermitteln *Stenzel et al.* eine Abzugskraft, die nur vom Konuswinkel, der Fügekraft und der Haftreibungszahl abhängig ist:

$$[12] \quad F_A = F_F \cdot \frac{\tan \frac{\alpha}{2} - \mu_0}{\tan \frac{\alpha}{2} + \mu_0}$$

Abzugskraft nach *Stenzel et al.*:

- F_AAbzugskraft
- F_FFügekraft

1982 veröffentlichte *Lenz* das mathematische Modell „Elastische Schale auf starrem Kegelstumpf“ zur Erklärung der Haftung unter Verwendung von Kugelkoordinaten und den Materialeigenschaften Schubmodul (G_m) und Querkontraktionszahl (ν). Die geometrischen Faktoren Höhe, Basisinnenradius, Öffnungswinkel und Wandstärke fanden ebenfalls Beachtung. Diesen vektoriellen Denkansatz führt er, trotz scheinbarer Kompliziertheit auf die einfache Haftungsbedingung

$$[13] \quad \tan \alpha \leq \mu_0$$

zurück. Sein Endergebnis ist identisch mit dem des vereinfachten Modells „starrer Keil in starrer Keilnut“, auch von der „schiefen Ebene“ abgeleitet, wie er es 1983 veröffentlichte: Da es technisch unmöglich ist, mathematisch glatte Oberflächen herzustellen, verhaken sich die mikroskopischen „Molekulargebirge“ ineinander. Dieser theoretisch schwierig zu erfassende Sachverhalt lässt sich pauschal durch die tangential wirkende Haftungskraft (T) ersetzen, die sich in gewissen Grenzen betragsmäßig der Abzugskraft anpasst und ihr entgegenwirkt. Ist der Konvergenzwinkel (α) kleiner als der Grenzhaftungswinkel (ρ_0), bleibt ein Klotz liegen. Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$[14] \quad T = G \cdot \sin \alpha$$

parallel zur Ebene:

- T sich einstellende Haftungskraft
- G Gravitationskraft, entspricht auf die Konuskronen übertragener Auflast

$$[15] \quad N = G \cdot \cos \alpha$$

senkrecht zur Ebene:

- N sich einstellende Normalkraft, verhindert, dass der Körper in die Unterlage eindringt.

Für den Haftungsfall ($\alpha \leq \rho_0$), gilt dann:

$$[16] \quad \frac{T}{N} = \frac{G \cdot \sin \alpha}{G \cdot \cos \alpha} = \tan \alpha \leq \tan \rho_0$$

oder anders ausgedrückt:

$$[17] \quad T \leq \tan \rho_0 \cdot N$$

Da sich ein Körper umso schwerer verschieben lässt, je fester er angedrückt wird, was sich in der resultierenden Normalkraft widerspiegelt, gilt:

$$[18] \quad T \leq \mu_0 \cdot N$$

und damit entsteht aus [17] und [18] folgende Beziehung:

$$[19] \quad \mu_0 = \tan \rho_0$$

Dies ermöglicht es nun, den Haftungskoeffizienten (μ_0) experimentell zu ermitteln, indem man mit der entsprechenden Werkstoff-Paarung den Grenzwinkel (ρ_0) austestet. Setzt man [19] in [16] ein, so ergibt sich die bereits genannte Haftungsbedingung:

$$[13] \quad \tan \alpha \leq \mu_0$$

Weitere Haftungsbedingungen

Alle Autoren verknüpfen die Lösekraft (L) mit der Fügekraft (F), die das Anpressen der korrespondierenden Doppelkronenflächen bewirkt. Dies ist allerdings nur möglich, wenn ein okklusaler Spalt besteht, der groß genug ist, um ein ausreichendes Aufschieben der Außenkrone auf die Innenkrone zu ermöglichen. *Lenz (1982)* hat gezeigt, dass die vertikale Außenkronenabsenkung proportional mit der Fügekraft zunimmt und überproportional mit der Wandstärke und mit dem Konvergenzwinkel abnimmt. So errechnet er beispielsweise für einen 6°-Konus mit einer Wandstärke von 0,3 mm bei einer Fügelast von 200 N eine Absenkung um ca. 14 μm .

5.3.2 Anwendung auf direkt galvanisierte Konuskronen

Die eben genannte Tatsache impliziert, dass ein okklusaler Spalt in der Größenordnung der Leitsilbersicht gerade ausreichen würde, um Konushaftung zu bewirken, wenn sich die Mantelflächen vor Einwirken der Fügelast spannungsfrei berühren. Direkt galvanisierte Außenkronen sind jedoch in allen Richtungen des Rau-

mes um die Schichtstärke des Leitsilbers (8 - 12 μm) vergrößert. Da die Kronen im Hohlkehlbereich immer vorerst leicht übergalvanisiert werden und sich daher selbst dort Leitsilber befand, kann sich die Außenkrone um ca. 10 μm absenken, ohne Spannungen zu verursachen. Dabei wird der Fügespalt (d_s) verkleinert, wobei folgende Beziehung gilt:

$$[20] \quad \Delta d_s = \sin \beta \cdot s_f$$

Legende:

- Δd_s Veränderung des Fügespalt
- β Konvergenzwinkel
- s_f Strecke der vertikalen Absenkung

Für den 6°-Konus, bei dem die Änderungen noch am deutlichsten ausfallen, verkleinert sich so der Fügespalt nur um ca. 1 μm . Würde man den Spalt vollständig schließen und extra noch 14 μm Spielraum für die Absenkung während der Fügebelastung lassen wollen, so bräuchte man einen okklusalen Spalt von ca. 110 μm . Dies bedeutet nun, dass unter Verwendung derzeit gebräuchlicher Herstellungsmethoden keine Konushaftung resultieren kann. Der Toleranzbereich hierfür wird je nach Konuswinkel um das zeh- bis dreißigfache überschritten.

Will man dennoch Konushaftung bewirken, so müsste man die Innenkrone vor dem Bestreichen mit Leitsilber mittels Modellierkunststoff um 0,3 mm (für einen 2°-Konus) verlängern. Dies ist weder üblich, noch im Sinne der direkten Galvanisieretechnik. Außerdem wird der Haftungskoeffizient (μ_0) sehr stark durch benetzende Flüssigkeiten, insbesondere Öle, beeinflusst. Ein Körper rutscht auf einer geölten schiefen Ebene leichter ab, als auf einer trockenen. So würden die Zwischenmedien die Konushaftung - wenn sie denn überhaupt vorhanden wäre - stark vermindern. Die experimentellen Ergebnisse zeigen aber den gegenteiligen Effekt.

Bezug experimenteller Ergebnisse

Die Konushaftung lässt sich nur im Trockenabzug sinnvoll experimentell evaluieren. Da für sie keine Abhängigkeit von der Abzugsgeschwindigkeit angenommen wird, wurden die Kronen mit 1 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ getrennt (s. Tabelle 10, S. 115). Für den 4°- und den 6°-Konus ergaben sich Standardabweichungen im Bereich der minimalen Messwerte. Für den 2°-Konus konnte kein einziges Messsignal registriert werden. Das heißt, alle Einzelmessungen lagen unter 0,1 N, obwohl gerade dieser Prüfkörper die größte Lösekraft bewirken müsste, wenn Konushaftung vorhanden wäre. Somit bestätigen die eigenen Ergebnisse die oben genannte These.

5.4 Der Einfluss von Kohäsion und Adhäsion

Zahlreiche Publikationen (z. B. *Böttger 1978, Diedrichs und Rosenhain 1991 und 1995, Körber 1968 und 1988, Lenz 1982 und 1983, Ludwig und Blum 1992, Stenzel et al. 1980, Strub et al. 1999, Stüttgen und Hupfaut 1996, Wolfart und Kern 2000*), die sich über Mechanismen der Doppelkronenhaftung äußern, beleuchten den Einfluss von Zwischenflüssigkeiten nicht. Da jedoch Speichel und Wasser in Doppelkronensystemen immer am Wirken sind (*Becker 1982b*), ist es unabdingbar, deren Einfluss zu betrachten.

5.4.1 Verdampfungs- und Oberflächenenergie

Zwischen Molekülen fester und flüssiger Stoffe treten allseitig Van-der-Waals-Kräfte auf, die bewirken, dass Arbeit aufgewendet werden muss, um Moleküle voneinander wegzubewegen. Das Phänomen „Kohäsion“ beschreibt die Kräfte zwischen Molekülen eines Körpers oder einer Phase.

Im Inneren von Flüssigkeiten treten die Moleküle mit jeweils 12 Bindungen in Wechselwirkungen. Die Energie, die benötigt wird, um ein Molekül aus seinem Flüssigkeitsverband herauszureißen, nennt man Verdampfungsenergie. Da die Anziehungskräfte allseitig wirken und die Summe dieser Kräfte an jedem Punkt im Inneren von Flüssigkeiten gleich Null ist, können die Moleküle leicht gegeneinander bewegt werden. Moleküle, die sich hingegen am Rand einer Flüssigkeit befinden, werden nicht allseitig angezogen. Die drei Bindungsstellen, die von der Flüssigkeit wegzeigen, bleiben frei. Daher wird jede Flüssigkeit von einer Art „Haut“ zusammengehalten, die bestrebt ist, die kleinstmögliche Oberfläche anzunehmen. Dies entspricht dem bekanntem Phänomen „Oberflächenspannung“ (σ), auch spezifische Oberflächenenergie genannt. Die Oberflächenenergie (W_{ob}), die also ein Teil der Anziehungsenergie zwischen den Flüssigkeitsmolekülen ausmacht, verhält sich proportional zur Größe der Oberfläche:

$$[21] \quad W_{ob} = \sigma \cdot A$$

Betragsmäßig entspricht sie in etwa einem Viertel der Verdampfungsenergie pro Molekül. Interessanterweise gibt es, im Gegensatz zu elastischen Membranen, keine „Ruhegröße“: Die zusammenziehende Kraft der Flüssigkeitshaut bleibt unabhängig von deren Dehnungszustand dem Betrag nach immer gleich groß (*Meschede 2001*).

5.4.2 Grenzflächenspannungen

Liegen zwei Körper sehr dicht aneinander, so können die Anziehungskräfte auch zwischen ihnen wirken, was deren Zusammenhaften zur Folge hat. Die Reichweite dieser Kräfte liegt jedoch bei nur knapp 10^{-9} m (*Meschede 2001*). Daher sind die Oberflächen von Festkörpern in der Regel zu rau, um sie so sehr einander annähern zu können, dass die Kräfte wirksam werden. Dies ist nur bei kurzzeitiger Verflüssigung eines der beiden Feststoffe, wie zum Beispiel durch Löten, zu erreichen (*Höfling 1987*). Daher können direkte Kohäsionskräfte zwischen den Berührungsflächen von Doppelkronensystemen ausgeschlossen werden.

Bringt man zwei flüssigkeitsbenetzte Platten aufeinander, so lassen sie sich leicht gegeneinander verschieben, aber nur schwer voneinander abziehen. Dies soll kurz erläutert werden: Das Zusammenhaften von Atomen oder Molekülen unterschiedlicher Art wird bekanntlich als Adhäsion bezeichnet. Selbst zwischen Flüssigkeiten können so Grenzflächen entstehen, solange sich diese nicht vermischen, das heißt, solange die Adhäsion kleiner als die Kohäsion ist. Befinden sich die Flüssigkeiten auf Festkörpern, so würde diese Relation zu keiner Benetzung führen. Damit entstünde auch keine Haftung. Flüssigkeiten benetzen Festkörper, wenn die Adhäsion die Kohäsion übersteigt (*Höfling 1987*). Dies kann experimentell überprüft werden, indem man sicherstellt, ob der entstehende Randwinkel kleiner als 90° ist.

Da die Van-der-Waals-Kräfte in einer zur Oberfläche parallelen Ebene allseitig gleich wirken, lassen sich die Moleküle einer Flüssigkeit bei tangential wirkenden Kräften leicht verschieben. Dies erklärt die oben genannte leichte Plattenverschiebung oder den schmierenden Effekt von Ölen. Die Kräfte wirken senkrecht zur Oberfläche am stärksten (*Meschede 2001*). Dies bewirkt die gute Haftung beim Auseinanderziehen der Platten. Da für diese Fälle angenommen wird, dass die Adhäsion stärker als die Kohäsion ist, also Kohäsionsbruch eintritt, ist die Kraft, die benötigt wird, um den Flüssigkeitsfilm zu zerreißen, die limitierende Größe. Sie hängt von der entsprechenden Oberflächenenergie ab. Somit (s. [21], S. 82) ist die Adhäsion zweier Platten vom Flächeninhalt (A) und von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit (σ) abhängig.

In den Lehrbüchern der Physik wird für diesen Vorgang keine Abhängigkeit zur Abzugsgeschwindigkeit beschrieben, die dennoch experimentell gefunden wurde. Es steht jedoch fest, dass sich Flüssigkeitsmoleküle mit langsamer Geschwindig-

keit sehr leicht gegeneinander bewegen lassen, was in Abhängigkeit zur Viskosität bei höheren Geschwindigkeiten viel höhere Kräfte erfordert (*Meschede 2001*). Bevor der Flüssigkeitsfilm zerreißt, passt sich seine geometrische Form unter Beibehalten des Volumens den Anforderungen der Plattenentfernung an. Da die dazu notwendigen Molekülbewegungen in Abhängigkeit zur Viskosität und Hubgeschwindigkeit unterschiedliche Kräfte erfordern, ist es zweifelsohne naheliegend, dass beim Variieren dieser beiden Parameter experimentell unterschiedliche Lösekräfte gemessen werden.

5.4.3 Oberflächenspannung

Will man einen Flüssigkeitsfilm zerreißen, so muss man die Oberflächenspannung überwinden, die dem Quotienten aus Krafteinheit und Längeneinheit entspricht (*Höfling 1987*). Wie sich die benötigte Kraft nicht aus dem Volumen, sondern aus dem Flächeninhalt ergibt, so ist - übertragen auf den Abzug zweier Platten - der Umfang und nicht die Fläche entscheidend. Die Dicke des Flüssigkeitsfilms entfällt; seine Längenänderung lässt sich herauskürzen. So ergibt sich für die benötigte Kraft (s. Anhang: 8.3.2, S. 134):

$$[22] \quad L_{\sigma} = \sigma \cdot u$$

Die Oberflächenspannung unterscheidet sich laut Herstellerangaben für die verwendeten Silikonöle kaum. Sie liegen je nach Viskosität zwischen 0,0210 und 0,0212 m·N⁻¹ (*Wacker-Chemie 2001*). Da sich bei Rechtecken der Umfang aus der Summe seiner vier Seitenlängen zusammensetzt, ergibt sich für die verwendete Testplatte:

$$[23] \quad L_{\sigma} = 0,021 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot 0,1464 \text{ m} = \underline{\underline{3,0744 \cdot 10^{-3} \text{ N}}}$$

Kreise gleicher Fläche haben einen kleineren Umfang. Für sie gilt:

$$[24] \quad u = 2\pi \sqrt{\frac{A}{\pi}} \approx 3,5449 \text{ m}$$

Für einen Kreis mit 1 m² Flächeninhalt erhält man so eine Haftungskraft von ca. 0,074 N. Aus dem Verhältnis beider (1:24,21385) kann man abschätzen, wie groß der Anteil der Oberflächenspannung bzw. Adhäsion an der Gesamthaftkraft ist.

Eigene Ergebnisse

Die experimentell gemessenen Haftwerte liegen deutlich über den allein aus der Oberflächenspannung ermittelten. Da jedoch Geschwindigkeitsabhängigkeit nach-

gewiesen werden konnte, lässt sich mittels logarithmischer Regression (s. Anhang: 8.4.1, S. 138) zeigen, dass man mit deutlich langsamerer Abzugsgeschwindigkeit den errechneten Wert erreichen kann. Interessanterweise besteht hierfür Viskositätsabhängigkeit. Für V200 darf eine Abzugsgeschwindigkeit von ca. $25 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, für N350 von ca. $4 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ und für N1000 von $0,012 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ nicht überschritten werden (s. Tabelle 30, S. 138).

Dies untermauert die bereits genannte These: Je zähflüssiger ein Öl ist, desto mehr Kraft muss aufgewandt werden, um die Flüssigkeitsmoleküle schnell gegeneinander zu bewegen („Innere Reibung“). Somit erreichen die höher viskösen Öle bei zügigem Abzug deutlich höhere Haftungskräfte. Bemerkenswerterweise wird der Geschwindigkeitseinfluss mit steigender Viskosität im gemessenen Bereich unrelevant. Das heißt wiederum, dass über 1000 mPas schon bei der kleinsten Messgeschwindigkeit von $30 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ die Innere Reibung eine große Rolle spielt. Unterschiede hätten, wie Tabelle 30 (S. 138) zeigt, nur bei zusätzlichen Messungen mit viel langsamerem Abzug nachgewiesen werden können. Dies erklärt auch den zweiphasigen Kurvenverlauf von Abbildung 36 (S. 69).

5.4.4 Der Einfluss der geometrischen Form aus Sicht der Adhäsion

Da die Wirksamkeit von Kräften sehr stark von deren Richtung abhängt, werden sie in der Physik bekanntermaßen nicht einfach dem Betrag nach gebraucht, sondern als Vektoren beschrieben. Diese Tatsache gilt auch für Doppelkronen:

Die Adhäsion entsteht an der Okklusalfäche mit voller Wirksamkeit, da die Abzugskräfte hier senkrecht ansetzen. An der Mantelfäche hingegen wirkt die Adhäsion bei parallelwandigen Zylinderteleskopen überhaupt nicht, da $\beta = 0^\circ$. Je konischer die Kronen werden, desto größer werden die Haftungskräfte dem Betrag nach. Da größere Konizitäten nicht über zervikale Vergrößerungen, sondern nur über okklusale Verkleinerungen erreicht werden, wird auf der anderen Seite die Okklusalfäche mit steigendem Konuswinkel kleiner. Kürzt man die Höhe der Kronen, so wird zwar der Flächeninhalt der Mantelflächen kleiner, bei gleichen basalen und okklusalen Durchmessern folgt jedoch eine größere Konizität. Hält man den Konuswinkel konstant, so vergrößert sich die Okklusalfäche.

Im Anhang (Abschnitt 8.3.3, S. 134) dieser Arbeit wird die Adhäsionswirkung bezüglich der verschiedenen geometrischen Parameter trigonometrisch betrachtet. Interessanterweise lassen sich Konuswinkel und Kronenhöhe eliminieren. Übrig

bleibt der Zusammenhang:

$$[25] \quad L_A = \frac{\pi}{4} d_u^2 \cdot F_{Ad}$$

Dabei bezeichnet der Faktor F_{Ad} die systemspezifische Haftungskraft, die eine 1 m^2 große kreisrunde Fläche erbringt.

Berechnet man die Teilkräfte für unterschiedliche Präparationsformen getrennt, so bleibt deren Summe stets konstant. Dies verdeutlicht die Abbildung 39:

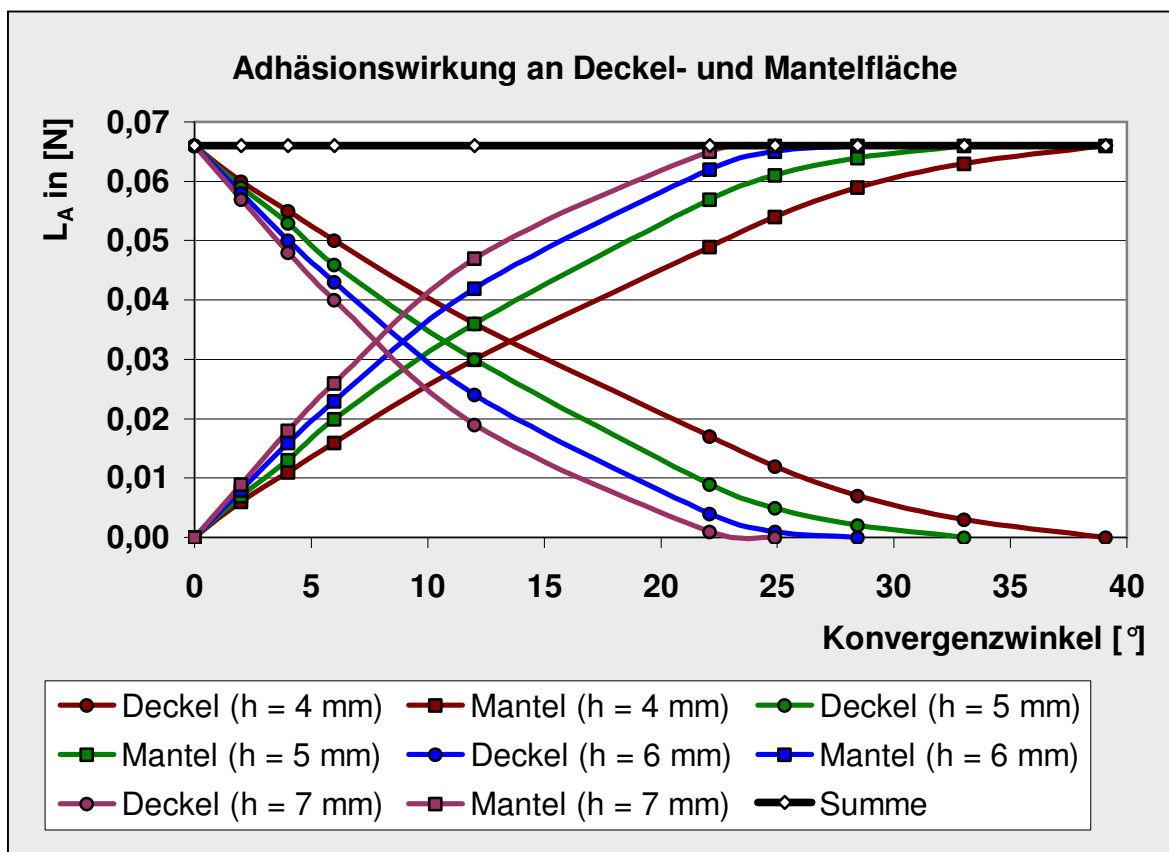


Abbildung 39. Adhäsionswirkung an Deckel- und Mantelfläche. Optimistische Annahme: $F_{Ad} = 2000 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$. Die Winkel wurden so variiert, dass Formen vom Zylinder bis zum Kegel resultieren. Die Summe der Teilkräfte bleibt bei allen Kronenhöhen konstant.

5.4.5 Einbeziehung eigener Ergebnisse

Die Tabelle 18 (s. Anhang, S. 124) wendet die genannten Zusammenhänge für die Standardprüfkörper an und vergleicht die ermittelten Adhäsionskräfte mit den Lösekräften der Abzugsmessungen an Doppelkronen.

Die Adhäsionskräfte steigen zwar mit Zunahme von Viskosität und Abzugsgeschwindigkeit hochsignifikant (s. Tabelle 28, S. 132) um das 21fache an, liegen aber alle unter $0,1 \text{ N}$ und sind damit nicht relevant an der Entstehung der Doppelkronenhaftung beteiligt. Dieser, im Vergleich zu den Gesamtlösekräften, minimale

Anstieg lässt sich mit der technisch realisierbaren Messgenauigkeit nicht sicher nachweisen. Die Adhäsion macht insgesamt ca. 1 % der Gesamthaftung aus. Die geringen prozentualen Unterschiede können damit erklärt werden, dass die Viskositäts-Lösekraft-Kurven einen flacheren Anstieg als die Viskositäts-Adhäsions-Kurven haben.

In der Vergangenheit wurde die Adhäsion mehrfach für einen entscheidenden Faktor der Haftwirkung gehalten. Dies schlägt sich in der Literatur nieder (*Bartsch 1998a, Biewer 1999*) und wurde auch auf Kongressen, beispielsweise von *Bongartz* auf dem „4. C. Hafner Master-Symposium 1994“ (*Bongartz und Rosenhain 1996*), so vorgetragen. Aufgrund der gewonnenen Ergebnisse sollte man künftig die Adhäsion nicht weiter für die AGC[®]-Doppelkronenhaftung verantwortlich machen.

5.4.6 Störungen

Die Oberflächenspannung und damit zusammenhängende Adhäsionseffekte reagieren sehr empfindlich auf Verunreinigungen, vor allem durch oberflächenaktive Entspannungsmittel (*Becker 1982b, Höfling 1987, Meschede 2001*). Die Adhäsion könnte durch unzureichendes Spülen der Prothese nach Reinigung mit Tensiden gestört werden. Da der Adhäsionseffekt jedoch sowieso unbedeutend ist, spielt dies keine sonderlich große Rolle.

5.5 Hydraulische Effekte

Wie die eigenen Ergebnisse zeigen, haben Zwischenflüssigkeiten dennoch einen enormen Einfluss auf die Lösekraft. *Becker (1982b)* bemerkte dies schon vor mehr als zwei Jahrzehnten. Dabei stellte er fest, dass Öle in geringen Mengen die Reibung konventioneller, friktiver Doppelkronen stark herabsetzen, wobei sich die Lösekräfte „paradoxe Weise“ erhöhen, wenn das Öl vor dem Abzug die Stufe umspült. Er begründet diese Beobachtung mit Hilfe des Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

$$[26] \quad \dot{V} = \pi \cdot R^4 \cdot \frac{p_1 - p_2}{8\eta l}$$

Legende:

- \dot{V} Volumenstrom
- R Rohrdurchmesser
- $p_{1,2}$ Druck an den Rohrenden

Aufgrund des kleinen Fügspaltes treten während des Abzugs erhebliche Strömungswiderstände auf. So strömen die Zwischenflüssigkeiten aus dem Spalt verzögert nach, wodurch ein Unterdruck im okklusalen Spaltraum resultiert, der die

Lösekraft erhöht. Da das Hagen-Poiseuille-Gesetz nur für rotationssymmetrische Röhren gilt, ist dessen Anwendung für die Doppelkrone physikalisch unzulässig. Das damit erklärte Prinzip wirkt aber dennoch.

Auf ähnliche Weise erklären *Faber und Huber (2001)* auf einem Tagungsposter die AGC[®]-Doppelkronenhaftung:

Sie weisen darauf hin, dass der strömungsdynamisch entstehende Druckabfall bewirkt, dass der äußere Luftdruck die Deckelfläche der Außenkrone auf die Innenkrone presst. Sie berechnen die Lösekraft nach folgender Formel:

$$[27] \quad L = 3\pi \frac{r_u^3 \cdot \eta \cdot h}{d^3} \cdot v_l$$

Dabei kann der Unterdruck und somit auch die Lösekraft ein bestimmtes Maximum nicht überschreiten.

Zusammenfassend stehen folgende Thesen zur Diskussion

- Der Druckabfall ist direkt von Kronenhöhe, Kronendurchmesser, Abzugsgeschwindigkeit und Viskosität abhängig.
- Die Weite des Fügespaltes verhält sich überproportional (R^4 bzw. d^3) indirekt zum Druckabfall.

5.5.1 Anwendung der Strömungslehre auf die Doppelkrone

Will man den Strömungsverlauf näherungsweise realistisch beschreiben, so muss man auf Kenntnisse der technischen Strömungslehre zurückgreifen:

Strömen Fluide an Festkörpern vorbei, so haften diese aufgrund mikroskopischer Rauigkeiten stets an der Wand, wobei diese Haftung von der Materialkombination unabhängig ist. Für Strömungen in schmalen Spalten gilt weiterhin, dass die Strömung fast immer laminar und schleichend (nur relativ kleine Beschleunigungen der Fluidteilchen) verläuft und dass sich Druck- und Reibungskräfte auf jedes Teilchen nahezu im Gleichgewicht halten (*Böswirth 1995*).

Faber und Huber (2001) skizzierten das Geschwindigkeitsprofil der strömenden Zwischenflüssigkeit im Doppelkronenfügespalt parabolisch (Abbildung 40a, S. 89). Dies trifft jedoch nur für laminare Strömungen in Spalträumen mit unbewegten Wänden zu.

Bewegt sich eine der beiden Platten, so entsteht in der zuvor unbewegten Flüssigkeit ein lineares Geschwindigkeitsgefälle (Abbildung 40b). Für den Doppelkronenabzug folgt das Geschwindigkeitsprofil verständlicherweise keinem

der beiden genannten Profile. Es kommt zur Überlagerung beider (Abbildung 40c).

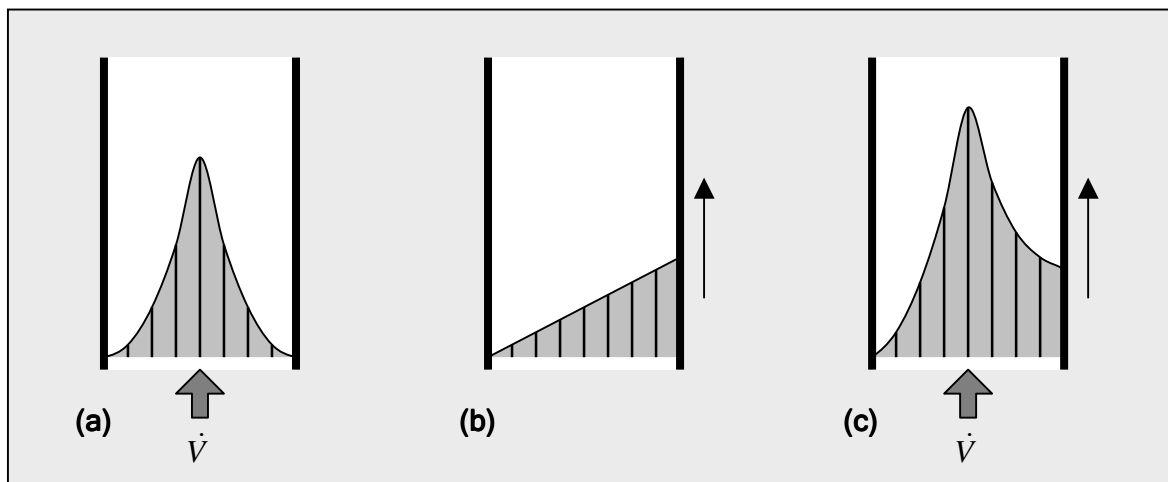


Abbildung 40. Geschwindigkeitsprofile strömender Flüssigkeiten in Spalträumen.
a) Volumenstrom durch einen Spalt unbewegter Platten.
b) Bewegung einer Platte.
c) Volumenstrom durch einen Spalt mit einer bewegten Platte.

Die gezeichneten Linien geben lediglich die Geschwindigkeit in der jeweiligen Flüssigkeitsschicht wieder. Dies bedeutet nicht, dass die Schichten laminar übereinander gleiten. Die Moleküle diffundieren zwischen den Schichten. Das Fluid fließt im Ganzen und verformt sich dabei (*Böswirth 1995*).

Volumenstrom im Spalt mit einer bewegten Platte

Für Spalträume zwischen rotationssymmetrischen Körpern ist es legitim, sich diesen abgewickelt zu denken. Die Spaltkrümmung spielt nur bei extremen Verhältnissen eine Rolle (*Böswirth 1995*). Nach Lehrbuchangaben der technischen Strömungslehre lautet die Grundgleichung der Gleitlagerströmung (*Böswirth 1995*):

$$[28] \quad w(x, y) = \frac{p'(x)}{2\eta} [y^2 - h_p(x)y] + \frac{w_0}{h_p(x)} [h_p(x) - y]$$

Dabei bezeichnet $w(x, y)$ die Strömungsgeschwindigkeit an der Position (x, y) , w_0 die Verschiebegeschwindigkeit der einen Platte und h_p die Spaltweite. Durch Integration erhält man den Volumenstrom pro Meter Spaltbreite (\dot{V}^*). Für den Parallelspalt entfällt die Koordinate y und es ergibt sich (*Böswirth 1995*):

$$[29] \quad \dot{V}^* = \int_0^h w(x, y) dy = \frac{w_0 h_p(x)}{2} - \frac{p'(x) h_p^3(x)}{12\eta} = \text{const}$$

Unterdruck im okklusalen Spaltraum

Nach dem Boyle-Mariotte-Gesetz (*Meschede 2001*) bedingen sich Druck und Volumen eines Fluids gegenseitig:

$$[30] \quad V \cdot c = \text{const}$$

Dies gilt streng genommen nur für Gase, da inkompressible Fluids keiner Volumenverringern durch Druckerhöhung unterzogen werden können. Dennoch führt eine Volumenvergrößerung zu einem Unterdruck im Spaltraum; zwar nicht durch Flüssigkeitsvergrößerung, aber durch Ausbildung eines Vakuums.

5.5.2 Die Doppelkronen-Unterdruck-Formel

Ein Unterdruck kann nur aufrechterhalten werden, wenn die Volumenvergrößerung dem nachströmenden Flüssigkeitsvolumen entspricht. Da die Volumenvergrößerung pro Zeit dem Produkt aus Abzugsgeschwindigkeit (v_l) und Deckelflächeninhalt (A_D) und die nachströmende Menge dem Volumenstrom (\dot{V}) entspricht, gilt folgende Grundbedingung:

$$[31] \quad \frac{dV_{okkl}}{dt} = \frac{dV_{nach}}{dt} = v_l \cdot A_D = \dot{V}$$

Setzt man [29] in [31] ein, so erhält man letztendlich folgende Zusammenhänge (genaue Herleitung: s. Anhang 8.3.4, S. 135):

$$[67] \quad \Delta p \approx \frac{\eta \cdot v_l \cdot K}{d_s^3}$$

Umgestellt nach Viskosität oder Abzugsgeschwindigkeit ergeben sich:

$$[68] \quad \eta \approx \frac{\Delta p \cdot d_s^3}{v_l \cdot K}$$

beziehungsweise:

$$[69] \quad v_l \approx \frac{\Delta p \cdot d_s^3}{\eta \cdot K}$$

Legende:

- Δp Druckveränderung
- η Viskosität
- v_l Abzugsgeschwindigkeit
- K Kronenformfaktor
- d_s Fügespaltweite

Zur Vereinfachung wurde der Term [70] in den Beziehungen [67] bis [69] zum Kronenformfaktor (K) zusammengefasst, der durch folgende Beziehung beschrieben wird:

$$[70] \quad K = \frac{12h^2 \tan \beta - \frac{3hd_u^2}{d_u - h \tan \beta}}{\cos \beta}$$

Diese Formel gilt für alle Konvergenzwinkel und muss bei Konuskronen angewandt werden. Für Zylinderteleskope entfallen alle Terme mit Winkelfunktion, so dass dann vereinfachend gilt:

$$[71] \quad K = -3hd_u \quad (\text{gilt, wenn } \beta = 0^\circ)$$

Da K negative Werte ergibt, resultiert auch ein negatives Δp . Dies besagt, dass, wie erwartet, der Druck im okklusalen Spaltraum abfällt, statt anzusteigen.

5.5.3 Maximum der unterdruckbedingten Lösekraft

Ein Druckabfall bewirkt nun, dass der äußere Luftdruck (ca. 101300 Pa) (*Meschede 2001*) über die Querschnittsfläche (A_D) der Krone deren Abziehen entgegenwirkt. Die resultierende Lösekraft berechnet sich somit mit:

$$[32] \quad L_{hydr} = A_D \cdot (p_{Atm} + \Delta p) \quad (\text{Addition, da } \Delta p \text{ negativ ist})$$

Das bedeutet aber auch, dass der Druck maximal um den Betrag des Luftdruckes abfallen kann, da dann rein theoretisch ein „Vakuum“ vorliegt. Dies begrenzt die Lösekraft auf einen Maximalwert:

$$[33] \quad L_{hydr} \leq L_{hydr,max} = A_D \cdot p_{Atm} = \frac{\pi}{4} (6,5 \text{ mm})^2 \cdot 101300 \text{ Pa} \approx \underline{\underline{3,36 \text{ N}}}$$

Es gibt jedoch ein weiteres physikalisches Problem, das den Maximalwert weiter senken kann:

Eine Flüssigkeit siedet, wenn der Sättigungsdampfdruck gleich dem äußeren Druck ist (*Höfling 1987*). Aus diesem Grunde stellten *Faber und Huber (2001)* die These auf, dass die Zwischenflüssigkeit zu sieden beginnt, wenn der Druck im okklusalen Spaltraum beim Kronenabzug auf ihren Dampfdruck absinkt. Jede weitere Erhöhung der Abzugsgeschwindigkeit kann dann keinen zusätzlichen Druckabfall mehr bewirken, sondern nur zur Vergrößerung der Siedeblasen führen. Wasser siedet bei Körpertemperatur (37°C) bereits bei einem äußeren Druck von 6200 Pa (2330 Pa bei 20°C) (*Meschede 2001*).

Somit wird die maximale Druckdifferenz begrenzt durch:

$$[34] \quad \Delta p_{max} = p_{Atm} - p_{Dampf} \approx 101300 \text{ Pa} - 6200 \text{ Pa} \approx \underline{\underline{95100 \text{ Pa}}} \approx 0,095 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

Die damit theoretisch (nur unter besonderen Bedingungen, die praktisch nicht sicherzustellen sind, s. u.) erreichbare Lösekraft beträgt dann:

$$[35] \quad L_{hydr,max} = A_D \cdot p_{Atm} = \frac{\pi}{4} (6,5 \text{ mm})^2 \cdot 95100 \text{ Pa} \approx \underline{\underline{3,16 \text{ N}}}$$

Unterdruckmaximum von Silikonölen

Laut Angaben des Silikonöherstellers Wacker-Chemie (*Rautschek 2004*) haben die Silikonöle keinen praktisch messbaren Sättigungsdampfdruck. Dies bedeutet, dass man durch Verwendung synthetischer Öle statt wässriger Flüssigkeiten als Zwischenmedium ca. 7 % höhere Lösekräfte erreicht.

5.5.4 Die Beeinflussbarkeit der hydraulischen Haftung

Mit Hilfe von Beziehung [66] (S. 136) und [33] (S. 91) ist es möglich, bei bekannter geometrischer Form den resultierenden Unterdruck im okklusalen Spaltraum in Abhängigkeit von Viskosität und Abzugsgeschwindigkeit zu errechnen.

Aus [67] und [68] (S. 137) kann man ermitteln, welche Viskosität bzw. Abzugsgeschwindigkeit benötigt wird, um einen maximalen Unterdruck zu erreichen. Die Tabelle 20 (s. Anhang, S. 125) zeigt die Bedingungen, mit denen dies bei „normalen“ (10 µm) und verbreiterten Fügspalten erreicht wird. Folgende Schlussfolgerungen können anhand der genannten Formeln gezogen werden:

Viskosität

Sehr interessant ist der geschilderte Maximalwert des Unterdrucks. Dies hat zur Folge, dass die hydraulische Haftwirkung ab einer gewissen Grenze nicht weiter gesteigert werden kann. So ist es für AGC[®]-Doppelkronen mit „normaler“ Fügspaltweite völlig egal, welches Öl verwendet wird. Selbst das relativ niedrigviskose Rapsöl bewirkt, im Gegensatz zu Wasser und Glandosane[®], maximalen Hydraulikeffekt (s. auch Abbildung 41, S. 93). Die Signifikanztests bestätigen dies (s. Tabelle 24, S. 129): Der Wechsel von Glandosane[®] auf jedes beliebige Öl bringt hochsignifikante effektstarke Haftverbesserungen. Zwischen den Ölen kann dies bei Konvergenzwinkel von kleiner 6° nicht festgestellt werden.

Faber und Huber (2001) kamen zu ähnlichen Messergebnissen: Sie steigerten die Viskosität durch Auflösen von Glukose im verwendeten Wasser, ohne dabei Lösekraftsteigerungen zu erreichen. Dass zuckerhaltige Haftflüssigkeiten praktisch mehr als ungeeignet sind, bedarf keiner besonderen Erwähnung.

Abzugsgeschwindigkeit

Für die Abzugsgeschwindigkeit gilt dasselbe Prinzip: Niedrige Viskositäten erfordern höhere Geschwindigkeiten, um maximale Haftwerte zu erreichen und umgekehrt. Hier sind Steigerungen jenseits des Haftmaximums, wie schon aus dem Ergebnissteil der Arbeit ersichtlich wird, nutzlos. Die Abbildung 41 zeigt die rechnerisch benötigten Geschwindigkeiten für vier Zwischenmedien:

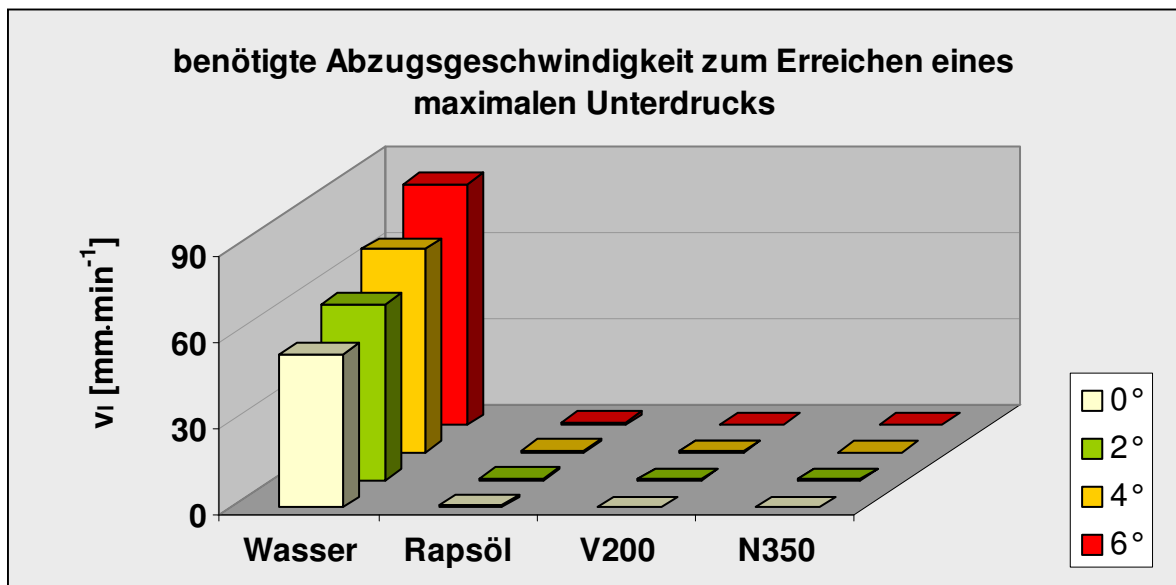


Abbildung 41. Benötigte Abzugsgeschwindigkeiten zum Erreichen eines Maximums.

Derartige mathematische Betrachtungen gehen vom Idealfall aus, der praktisch nie genau erreicht wird. Sobald die erste Luftblase in den Fügespalt eindringt, bricht der Unterdruck zusammen. Daher sollte es nicht zu sehr verwundern, dass für einen guten Hafteffekt experimentell Lösegeschwindigkeiten von mindestens $15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ benötigt wurden. Dies stellt jedoch überhaupt kein Problem dar, da in der Phase, in der der Hafteffekt gebraucht wird, viel höhere Geschwindigkeiten auftreten. Die Ergebnisse von Abschnitt 4.5 (S. 60) zeigen dies sehr deutlich: Die Kieferöffnung, während welcher klebrige Speisen abziehend wirken können, erfolgt vielfach schneller als der Mundschluss.

Andererseits sollte man dem Patienten und seinem Zahnarzt empfehlen, den Zahnersatz so langsam wie möglich zu entnehmen, statt ruckartig daran zu ziehen. Die Ausgliederungsgeschwindigkeit dürfte ohnehin recht klein sein.

Fügespaltweite

Besonders bemerkenswert ist der überproportional ungünstige Einfluss der Fügespaltweite (3. Potenz: d_s^3) auf die Haftung. Dennoch kann über das Abzugs-

geschwindigkeits-Viskositäts-Produkt ein maximaler Hydraulikeffekt erreicht werden. Die Abzugsgeschwindigkeit liegt in der Natur des Patienten und kann nicht beeinflusst werden. Werden Lösegeschwindigkeiten über $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ benötigt, so kann keine zufriedenstellende Retention mehr erwartet werden. Dies verdeutlicht die Abbildung 42:

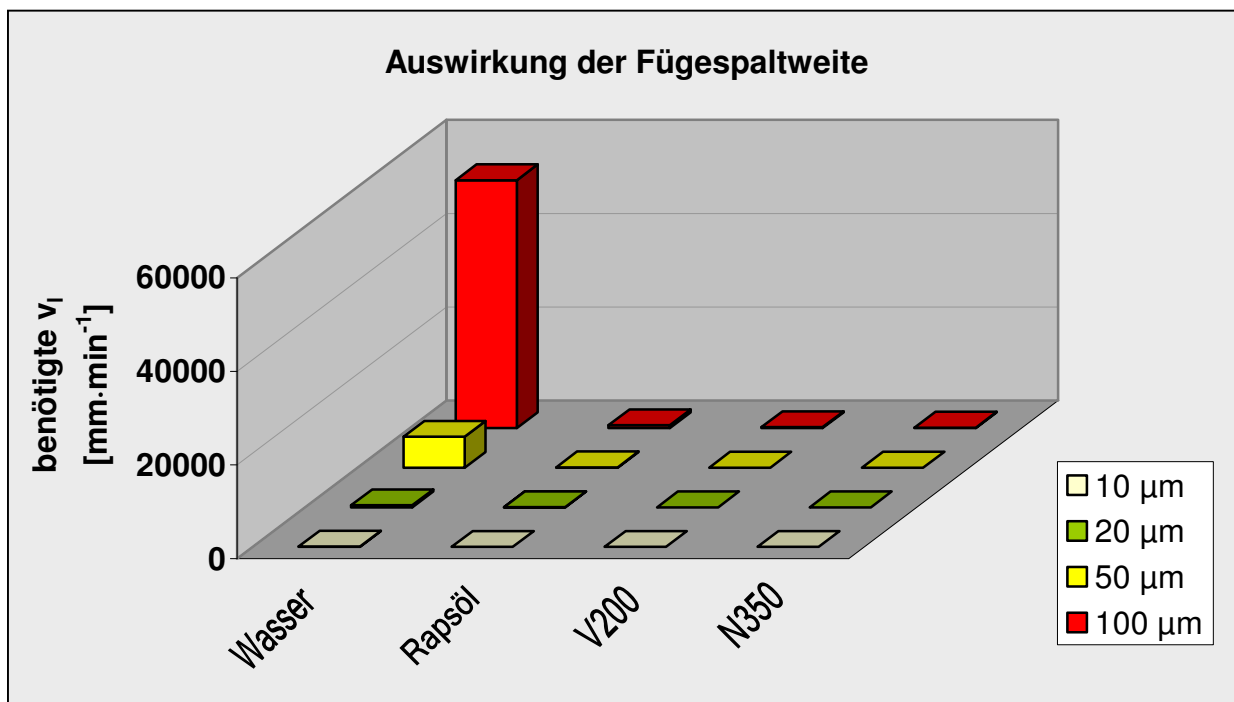


Abbildung 42. Auswirkungen der Fügespaltweite auf den Hydraulikeffekt.

Führen Verschleißerscheinungen zu unbefriedigenden Haftungen, so kann durch Verwendung höhervisköser Öle Abhilfe geschaffen werden. Eine derartige Empfehlung kann man jedem Doppelkronenprothesenträger geben, der mit der Haftung seines Zahnersatzes (hydraulisch nur durch Wasser und Speichel) nicht mehr zufrieden ist. Diese theoretischen Erkenntnisse erklären die experimentell nachgewiesene Kompensation von Haftungsunterschieden durch Silikonöle (vgl. Abbildung 12, S. 56).

Einflussnahme der Präparationsform

Die Präparationsform bedingt zum einen über den Kronenformfaktor (K) den Hydraulikeffekt und zum anderen über den Deckelflächeninhalt (A_D) die tatsächlich erreichte Lösekraft.

Wie aus [71] (S. 137) ersichtlich wird, beeinflussen Höhe (h) und Basisdurchmesser (d_u) der Innenkrone den Kronenformfaktor direkt proportional (linear). Die Beziehung [70] (S. 137) zeigt, dass der Konvergenzwinkel (β) indirekten Einfluss

nimmt: Jedes Grad an zusätzlicher Konizität vermindert den Kronenformfaktor um ca. 7 %. Somit wirken alle drei Parameter auf das Produkt aus Viskosität und Abzugsgeschwindigkeit, das benötigt wird, um den maximalen Hydraulikeffekt zu erreichen.

Die tatsächliche hydraulische Lösekraft wird, anders als beim Adhäsionseffekt (s. Abschnitt 5.4.4, S. 85) durch den okklusalen Durchmesser (d_o) und nicht durch den Basisdurchmesser (d_u) bestimmt, da nur die Fläche, unter der ein Unterdruck herrscht, wirksam werden kann. Die Signifikanztests (Tabelle 25, S. 130) deuten dies ebenfalls an: Unter Verwendung von Rapsöl, V200 oder N350 sinken die Lösekräfte bei Konizitätssteigerungen in aller Regel leicht, aber signifikant ab, obwohl der Basisdurchmesser gleich bleibt.

Will man den Deckflächeninhalt (A_D) aus dem Basisdurchmesser (d_u) berechnen, so ergibt sich aus [37] und [40] (S. 133):

$$[36] \quad A_D = \frac{\pi}{4} d_o^2 = \frac{\pi}{4} (d_u - 2h \tan \beta)^2$$

Dies bedeutet nun, dass mit steigendem Basisdurchmesser wesentlich höhere und mit steigender Höhe (bei der Präparationsform eines Kegelstumpfes) oder steigendem Konvergenzwinkel geringfügig kleinere Lösekräfte entstehen.

Die Geometrie der Prüfkörper hat somit sowohl Einfluss auf die entstehenden Lösekräfte als auch auf Viskosität und Abzugsgeschwindigkeit, die benötigt werden, um maximale Hydraulikeffekte zu erreichen. Dabei ist der Basisdurchmesser der entscheidendste Parameter. Dies bestätigen die Diagramme im Ergebnisteil dieser Arbeit (s. Abbildung 27 und Abbildung 28, S. 63-64).

Sinnvoll erscheint es, dem behandelnden Zahnarzt zu empfehlen, eine möglichst große Deckelfläche zu präparieren, was sich bei einem Konvergenzwinkel von 2° am besten realisieren lässt.

5.6 Zusammenfassende Betrachtung

Betrachtet man die unterschiedlichen genannten Haftungskomponenten gemeinsam, so stellt man fest, dass die Adhäsion nur ca. 1 % und die Innere Reibung nur ca. 0,5 % der theoretischen Haftung ausmacht (vgl. Tabelle 21, S. 126).

Die theoretisch ermittelten Lösekräfte machen für das Zylinderteleskop PK-1 93 - 112 % der experimentell gemessenen Werte aus. Dies ist eine befriedigend gute Übereinstimmung.

Für die in Tabelle 21 exemplarisch herangezogene Konuskronen PK-4 liegen die errechneten Werte jedoch nur bei ca. 80 % der gemessenen. Mit dem derzeitigen Erkenntnisstand kann nicht gesagt werden, ob dies als eher zufällig einzustufen ist oder ob noch weitere, hier nicht beleuchtete Kriterien eine Rolle spielen.

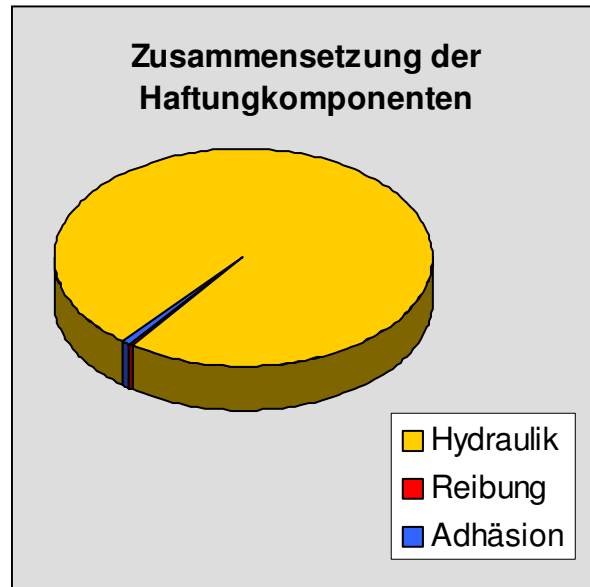


Abbildung 43. Zusammensetzung der Haftungskomponenten.

5.6.1 Mathematische Funktion der Gesamtlösekraft

Generell kann festgestellt werden, dass die Lösekräfte mit steigender Viskosität schnell ansteigen und dann annähernd gleich bleiben. Die gemessenen Kurvenverläufe lassen sich nicht sinnvoll mit Exponentialfunktionen deckungsgleich bringen, da der Übergang vom ersten zum zweiten Kurvenschenkel zu abrupt verläuft (vgl. Abbildung 27 bis Abbildung 31, S. 63-65). Dies lässt sich mit dem raschen Erreichen eines maximalen Hydraulikeffektes gut erklären.

5.6.2 Mögliche Empfehlungen

Obwohl alle Experimente nur mit nichtedelmetallischen Primärteilen durchgeführt wurden, können die gewonnenen Erkenntnisse auf alle galvanoplastischen Doppelkronensysteme angewendet werden, da sowohl die kaum relevante Innere Reibung, als auch die einflussreiche hydraulische Wirkung von der Materialkombination unabhängig sind. Dies begründet sich in der generellen Haftung von Fluiden an Wänden, unabhängig von deren Material und Oberflächenbeschaffenheit (*Böswirth 1995*). Für die ebenfalls nur wenig relevante Adhäsion sind ebenfalls kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen verwendbaren Innenkronenmaterialien zu erwarten, da Öle auf Festkörpern prinzipiell benetzend wirken.

Wasser und künstlicher Speichel erbrachte keine sichere Retention. Rapsöl und Silikonöle können gut verwendet werden, um eine ausreichende Haftung sicherzustellen, die wenig durch Verschleißerscheinungen beeinflusst wird. Weitere Viskositätserhöhungen bringen keine Vorteile. Sinnvoll erscheint es, Öle zu wählen, die

sich gut applizieren lassen, ohne dass sie vor dem Ausgliedern wieder herausfließen. Aus meiner subjektiven Sicht eignen sich hierfür vor allem Viskositäten von 200 mPas bis 1000 mPas. So kann man drei Haftöle (beispielsweise mit 200 mPas, 500 mPas und 1000 mPas) zur klinischen Erprobung empfehlen: Patienten, die mit der Retention ihrer Doppelkronenprothese unzufrieden sind, können das erste Öl verwenden, das Abhilfe schaffen sollte. Gelingt dies im Einzelfall nicht, so kann das zweite oder dritte Haftöl verwendet werden. Patienten, die kein Geld investieren können, kann man auch das normalerweise im Haushalt vorhandene Rapsöl empfehlen, das experimentell ebenfalls zu guten Ergebnissen führte.

Die Haftungsergebnisse lassen sich auf die klinische Situation übertragen: Es können weder signifikante (Tabelle 24, S. 129), noch relevante Unterschiede zwischen den „normalen“ Messungen und den Messungen der Wasser-Speichel-Öl-Kombinationstests (Tabelle 16, S. 122) festgestellt werden.

Bei gusstechnisch angefertigten Doppelkronen, die friktiv oder über Konushaftung halten sollen, sollte man jedoch bedenken, dass geringe Mengen an Ölen solche Haftungskräfte langfristig beeinträchtigen (*Becker 1982b*).

5.6.3 Lösekräftsummation

Wie die Ergebnisse zeigen, kann man davon ausgehen, dass ein Pfeiler unter Verwendung von Ölen ca. 3 N Lösekräft erbringt. Damit lässt sich die von *Körber (1988)* aufgestellte Forderung nicht erfüllen. *Becker (1982c)* hält jedoch Lösekräfte von 3 N für ausreichend. Da sich ja bekanntlich die Lösekräfte mehrerer, in eine Konstruktion einbezogene Pfeiler summieren (*Körber 1968 und 1988, Kammertöns 1989, Ludwig und Blum 1992*), kann man davon ausgehen, dass zwei Pfeiler pro Prothese ausreichende Retention bieten, wobei eine Verteilung auf beide Kieferhälften als besonders günstig zu bewerten ist.

Dies bedeutet aber auch, dass man bei mehr als vier verwendeten Pfeilern in Haft- und Stützanker unterteilen sollte. Der Zahnarzt sollte dann dem Patienten anhand des Parodontalzustandes und statischer Überlegungen vorgeben, in welche Außenkronen die Haftöle zu applizieren sind.

5.6.4 Lösekräft-Verläufe

Die unterschiedlichen Verankerungselemente zeigen unterschiedliche Lösekräft-Verläufe im Weg-Kraft-Diagramm (*Freesmeyer und Eisenmann 1999*): Alle friktiven Haltelemente benötigen über die komplette Abzugsstrecke Abzugskraft, die im

Verlauf linear abfällt. Klammern benötigen anfangs geringe und später, beim Überschreiten des prothetischen Äquators, starke Kräfte. Konventionelle Konuskronen und hydraulisch haltende Galvanokonuskronen (vgl. Abbildung 25, S. 62) benötigen initial hohe und dann kaum noch Abzugskraft. Dieser Verlauf ist der klinisch angestrebte, der zu keiner unnötigen Belastung der Parodontien führt.

5.6.5 Verschleißminimierung

In der Technik werden synthetische Öle, wie zum Beispiel Motorenöle eingesetzt, um verschleißminimierende Wirkung zu erzielen (*Becker 1982b*). Man geht bereits davon aus, dass Galvanogold in Kombination mit Speichel keinen großen Verschleißerscheinungen unterworfen ist (*Diedrichs und Rosenhain 1995, Weigl et. al 2000*).

5.6.6 Anwendbarkeit von Silikonölen in der Mundhöhle

Stoffe, die regelmäßig in der Mundhöhle eingesetzt werden, dürfen nicht toxisch, nicht kanzerogen, nicht mutagen und nicht teratogen wirken. Außerdem sollten sie geschmacksneutral sein. Letztgenannte Forderung ist von vornherein erfüllt, da Neutralöle (unverzweigte Dimethylpolysiloxane) keinerlei funktionelle Gruppen besitzen. Ferner zeigten sich in Tierversuchen bei dermalen, inhalativer oder oraler Exposition weder akut toxische Wirkungen, noch wurden in Studien zur subchronischen oralen Toxizität (90 Tage), die der Chemiekonzern Wacker in Zusammenarbeit mit anderen Silikonherstellern durchgeführt hat, schädigende Effekte beobachtet. Untersuchungen zur Genotoxizität geben keinen Hinweis auf ein erbgutschädigendes Potential (*Wacker-Chemie 2001*).

Die beispielhaft anwendbaren Silikonöle „Wacker AK“ (Wacker-Chemie) sind ab einer Viskosität von 100 mPas nach dem deutschen Lebensmittelgesetz zur Herstellung von Bedarfsgegenständen bedenkenlos einsetzbar. Sie werden bereits zur äußeren kosmetischen Anwendung eingesetzt. Der „Human-Insult-Repeat Patch Test“ erwies eine gute Hautverträglichkeit (*Wacker-Chemie 2001*).

Laut dem entsprechendem EU-Sicherheitsdatenblatt sind bei Verschlucken und selbst bei versehentlichem Einatmen keine besonderen Maßnahmen zu ergreifen. Solche Silikonöle gelten als nicht mutagen, nicht kanzerogen und nicht teratogen (*Wacker-Silicones 2004*). Lediglich direkter Augenkontakt kann zu einer leichten vorübergehenden Bindehautreizung führen, wobei im Sinne der EU-Richtlinie keine Kennzeichnungspflicht besteht (*Wacker-Chemie 2001*).

6 Schlussfolgerungen

Friktion

Friktion, infolge von Kaltschweißverbindungen, kann aufgrund des herstellungsbedingten Fügespaltes bei direkt galvanisierten Doppelkronen nicht wirksam werden. Sie wäre lediglich über den Umweg des verkleinerten Dublierens zu erreichen, wobei die Lösekraft dann nicht sicher vorgegeben und Schädigungen der Parodontien nicht vermieden werden könnten. Dies ist keinesfalls erstrebenswert. Schlagworte wie „friktive Galvanodoppelkronen“ oder ähnliche sollten künftig nicht mehr in wissenschaftlichen Publikationen zu finden sein.

Innere Reibung

Aufgrund Innerer Reibung ist zum Verschieben zweier flüssigkeitsgetrennter, übereinandergeschobener Röhren in Abhängigkeit zur Viskosität eine Innere Reibungskraft zu überwinden. Sie macht bei Galvanodoppelkronen allerdings nur ca. 0,5 % der Gesamtlösekraft aus.

Konuspassung

Die von *Körber (1968)* beschriebene Konuspassung ist aus parodontaler Sicht wesentlich günstiger, kann jedoch bei direkt galvanisierten Außenkronen aufgrund trigonometrischer Auswirkungen des Fügespaltes ebenfalls nicht entstehen.

Adhäsion

Adhäsive Effekte können bei Verwendung von Zwischenflüssigkeiten prinzipiell wirksam werden. Quantitativ sind sie aber relativ unbedeutend. Sie machen nur ca. 1 % des Hafteffektes aus. Materialkombinationen oder Spülmittelreste sind demzufolge weniger relevant, als man erwarten würde.

Hydraulikeffekt

Die Galvanodoppelkronenhaftung beruht hauptsächlich auf hydraulischen Effekten. Voraussetzung hierfür ist die Verwendung geeigneter Zwischenflüssigkeiten in ausreichender Menge, die vor dem Eingliedern des Zahnersatzes in die Außenkappchen zu tropfen sind. Aufgrund strömungsdynamischer Widerstände entsteht im Fügespalt ein Unterdruck, der dazu führt, dass der äußere Luftdruck die Deckelfläche der Außenkrone auf die Innenkrone presst. Dabei begrenzt der Dampfdruck des Zwischenmediums den möglichen Unterdruck. Somit kann durch Öle eine höhere, nicht weiter steigerbare Retention als durch wässrige Medien, wie Speichel, erreicht werden. Der maximale Unterdruck ist unabhängig von Viskosität

und Abzugsgeschwindigkeit. In Abhängigkeit von Viskosität und Weite des Fügspaltes ergibt sich lediglich die Abzugsgeschwindigkeit, die benötigt wird, um den maximalen Hydraulikeffekt zu erreichen.

Die Fügspaltweite wirkt sich hierbei in dritter Potenz ungünstig aus. Dennoch kann man durch die Verwendung von Ölen seiner verschleißbedingten Vergrößerung sicher begegnen.

Wasser führt nicht mit Sicherheit zu guten Haftwerten. Die Verwendung von Silikonölen in Viskositäten von 200 bis 1000 mPas kann ausdrücklich empfohlen werden. In den meisten Fällen dürfte jedoch schon das haushaltsübliche Rapsöl hilfreich sein. Unter der Verwendung von Ölen werden bei klinisch auftretenden Abzugsgeschwindigkeiten immer maximale Lösekräfte erreicht. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit kann aber umgekehrt genutzt werden: Der Patient kann seine Prothese, trotz guter Haftung, leicht ausgliedern, wenn er die Doppelkronen langsam auseinanderzieht.

Präparationsform

Der entscheidende Parameter ist der Basisdurchmesser der Innenkrone. Der Konvergenzwinkel und die Höhe spielen eine untergeordnete, aber dennoch vorhandene Rolle (sie beeinflussen indirekt die Größe der Deckelfläche). Alle drei Parameter wirken sowohl auf das Viskositäts-Abzugsgeschwindigkeits-Produkt, das benötigt wird, um maximalen Hafteffekt zu erreichen, als auch auf den Betrag der Lösekraft.

Der behandelnde Zahnarzt sollte darauf achten, eine ausreichende okklusale Deckelfläche sicherzustellen, was durch einen Konvergenzwinkel von 2° am sinnvollsten zu erreichen ist.

Empfehlung

Sind Patienten mit der Retention ihrer doppelkronengetragenen Prothese unzufrieden, so kann man ihnen ein Haftöl mit einer Viskosität von 200 mPas empfehlen. Sollte das zu keinem befriedigendem Ergebnis führen, so kann man weitere Öle mit Viskositäten von 500 oder 1000 mPas verordnen.

Dabei ist die Lösekraft-Summation zu beachten: Werden mehr als vier Pfeiler in eine Konstruktion einbezogen, so sollte eine Unterscheidung in Haft- und Stützanker erfolgen. Pro Doppelkrone ist mit einer Lösekraft von ca. 3 N zu rechnen.

7 Literatur- und Quellenverzeichnis

1. Augthun M, Edelhoff D. 1999. Stegprothetik. In: Freesmeyer WB, Hrsg. 1999. Klinische Prothetik, Band 2: Herausnehmbarer Zahnersatz. Heidelberg: Hüthig, 91-100.
2. Bartsch F. 1998a. Grundlagen der modernen Teleskoptechnik, Teil 1: Definitionen und Herstellungsprozess. Dentallabor, 46(6):919-927.
3. Bartsch F. 1998b. Grundlagen der modernen Teleskoptechnik, Teil 2: Von der Modellherstellung bis zur Modellation der Sekundärkonstruktion. Dentallabor, 46(7):1087-1093.
4. Bartsch F. 1998c. Grundlagen der modernen Teleskoptechnik, Teil 3: Vom Ausarbeiten eines Sekundärteleskopes bis Ausarbeiten und Verlöten des Modellgusses. Dentallabor, 46(8):1229-1239.
5. Bartsch F. 1998d. Grundlagen der modernen Teleskoptechnik, Teil 4: Vom Wax-up der Front bis zur fertigen OK-Verblendung mit Targis. Dentallabor, 46(10):1561-1569.
6. Bartsch F. 1998e. Grundlagen der modernen Teleskoptechnik, Teil 5: Von der UK-Verblendung mit Targis bis zur fertigen Rekonstruktion. Dentallabor, 46(11):1753-1763.
7. Bartsch F. 1998f. Grundlagen der modernen Teleskoptechnik, Teil 6: Ein zweiter Patientenfall von der Modellherstellung bis zur Einprobe. Dentallabor, 46(12):1965-1976.
8. Bartsch F. 1999. Grundlagen der modernen Teleskoptechnik, Teil 7: Vom Reduzieren des Wax-ups bis zur fertigen Rekonstruktion. Dentallabor, 47(1):55-61.
9. Battistuzzi PG, Käyser AF, Keltjens HM, Plasmans PJ. 1991. Teilprothesen; Planung, Therapie, Nachsorge. Köln: Deutscher Ärzte-Verlag.
10. Becker H. 1982a. Das Haftverhalten teleskopierender Kronen. ZWR, 91(8):48-51.
11. Becker H. 1982b. Einflüsse des umgebenden Mediums auf das Haftverhalten teleskopierender Kronen. ZWR, 91(9):54-60.
12. Becker H. 1982c. Untersuchung der Abzugskräfte abnehmbarer Teleskop-Prothesen. Zahnärztliche Praxis, 33(4):153-156.
13. Bergman B. 1999. Die Zukunft der Prothetischen Zahnheilkunde. Dtsch Zahnärztl Z, 54(5):293-297.

14. Bergman B, Ericson Å, Molin M. 1997. Klinische Langzeitergebnisse zur Versorgung mit über Konuskronen verankerten Teilprothesen. *Quintessenz*, 48(6):779-792.
15. Biewer P. 1998. Biokompatible Herstellung von Galvanoteleskopen. *Dentallabor*, 46(4):539-547.
16. Biewer P. 1999. Galvanoteleskope in Verbindung mit einer keramisch verblendeten Tertiärstruktur. *ZT*, 10(6):345-350.
17. Bongartz B, Rosenhain P. 1996. Galvanogeformte Doppelkronen und Suprastrukturen in der Direkten Technik. *Quintessenz Zahntech*, 22(5):533-548.
18. Böswirth L. 1995. Technische Strömungslehre. Zweite Aufl. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.
19. Böttger H. 1961. Das Teleskopsystem in der zahnärztlichen Prothetik. Leipzig: Barth.
20. Böttger H. 1978. Zur Frage der Friktion teleskopierender Anker. *Zahnärztliche Praxis*, 29(9):347-352.
21. Braunwarth J. 1994. Mehr Ästhetik im Frontzahnbereich - Teleskop-Prothetik im Wandel der Zeit. *Dentallabor*, 42(1):43-49.
22. Braunbarth M, München C. 2003. One more time - Galvanoforming. *Dentallabor*, 51(8):1283-1286.
23. Bregler A. 2002. Galvanoforming. *ZMK*, 18(10):676-686.
24. Bundeszahnärztekammer. 1996. Mundgesundheitsziele der deutschen Zahnärzteschaft. *Zahnärztl Mitt*, 86(19):2188.
25. Busch M. 1999. Kombinationsprothetik mit und ohne Implantaten. In: Wirz J, Hoffmann A, Hrsg. 1999. *Galvanoprothetik: neue Wege zum biologischen Zahnersatz*. Berlin, Chicago, London, Tokio, Paris, Barcelona, São Paulo, Moskau, Prag, Warschau: Quintessenz, 132-160.
26. Caesar H. 2001. Hervorragende Informationsfülle - Symposium „Marburger Doppelkrone“. *Dentallabor*, 49(7):1202-1204.
27. Diedrichs G. 1995. Galvanoforming für die Doppelkronentechnik. *Phillip Journal*, 12(12):579-584.
28. Diedrichs G, Rosenhain P. 1991. Galvanoaußenteleskope in der direkten Technik. *Quintessenz*, 42(1):49-56.

29. Diedrichs G, Rosenhain P. 1995. Galvanoforming - Bio-Ästhetik in der restaurativen Zahnheilkunde. München: Neuer Merkur.
30. Diedrichs U. 1994. Die Angst, die Biokompatibilität und das Marketing. Phillip Journal, 11(12):571.
31. Diedrichs U, Wilmerstaedt A. 2001. Doppelkronen auf natürlichen Zähnen und Implantaten. Teamwork Interdisziplinäre Zahnheilkunde, 4(1):86-89.
32. Dietzschold K. 2001. Titan- und Galvano-Doppelkronen. Quintessenz Zahntechnik, 27(2):143-154.
33. Dietzschold K. 2002. Abnehmbare Titan-Galvano-Restauration. Dentallabor, 50(5):649-652.
34. Dollansky S. 2002. Galvanoteleskope. Dentallabor, 50(5):667-677.
35. Eisenburger M, Tschernitschek H. 1998. Klinisch-technischer Vergleich zu Langzeiterfolgen von klammerverankertem Zahnersatz und Teleskop-Prothesen. Dtsch Zahnärztl Z, 53(4):257-259.
36. Engelhardt JP. 1994. Teleskopierende Anker im stark reduzierten Lückengebiss. Quintessenz Zahntechnik, 20(12):1437-1454.
37. Engelhardt JP. 1995. Teleskopierende Verbindungselemente im stark reduzierten Gebiss. Quintessenz Zahntechnik, 21(1):6-36.
38. Ericson A, Nilsson B, Bergman B. 1991. Klinische Resultate bei Patienten, die mit Konuskronen-getragenen Restaurationen versorgt wurden. Quintessenz, 42(8):1237-1251.
39. Ernst KK. 2003. Gleit-Gold - Falldarstellung einer Galvano-Teleskop-Restauration. Quintessenz Zahntechnik, 29(3):378-388.
40. Faber FJ, Huber C. 2001. Ursache der Begrenzung der Haftkraft bei Galvano-Teleskopkronen. Poster, 50te Jahrestagung der DGZPW, Bad Homburg.
41. Fauchard P. 1728. Le chirurgien dentiste ou traité des dents. Zwei Bde, Paris 1728. Zitiert in: Strub JR, Türp JC, Witkowski S, Hürzeler MB, Kern M. 1999. Curriculum Prothetik, Bd 1: Geschichte, Grundlagen, Behandlungskonzept, Vorbehandlung. Zweite Aufl. Berlin, Chicago, London, Paris, Barcelona, São Paulo, Tokio, Moskau, Prag, Warschau: Quintessenz, 981.
42. Freesmeyer WB. 1987. Konstruktionselemente in der zahnärztlichen Prothetik. München: Hanser.

43. Freesmeyer WB, Eisenmann E. 1999. Konstruktionsprinzipien, Planung und Klinik des kombinierten Zahnersatzes. In: Freesmeyer WB, Hrsg. 1999. Klinische Prothetik, Band 2: Herausnehmbarer Zahnersatz. Heidelberg: Hüthig, 39-67.
44. Fröhlich E. 1952. Gewebeveränderungen als Folge schleimhautgetragener Prothesen. Dtsch Zahnärztl Z, 7(1):107-118.
45. Gallegos LI, Nicholls JI. 1988. In vitro two-body wear of three veneering resins. J Prosthet Dent, 60(2):172-178.
46. Gente M. 1996. Eine neue Methode zur Begrenzung der Präparationstiefe. ZWR, 105(10):524-531.
47. Gerabek WE. 1995. Alterszahnheilkunde - das Fach mit Zukunft. Zahnärztliche Praxis, 46(9):3.
48. Gilde H, Lenz P, Fuchs N. 1988. Dauerversuche an keramisch verblendeten Konuskronen. Dtsch Zahnärztl Z, 43(4):504-506.
49. Gilde H, Lenz P, Samara V, Föllinger M. 1991. Untersuchungen zur Druckbelastbarkeit von Galvanokronen. ZWR, 100(9):632-635.
50. Glockmann, Köhler J. 1998. Ursachen für Zahnextraktionen in den neuen Bundesländern. Dtsch Zahnärztl Z, 53(1):39-41.
51. Graber G. 1966. Teleskopkronen als Fixationsmittel unter schleimhautgetragenen Prothesen. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 76(7):611-621.
52. Hartlage S, Faber FJ. 2001. Einfluss von Speichel und Abzugskraft auf die Haftkraft von Galvanoteleskopbrücken. Poster, 50te Jahrestagung der DGZPW, Bad Homburg.
53. Heel R, Chan R. 2001. Doppelkronenprothese mit vollkeramischen Primärteilen auf Implantaten. Quintessenz Zahntech, 27(9):980-985.
54. Heners M. 1990. Zahnerhaltende Prothetik durch gewebeintegrierende Konstruktionsweise. Zahnärztl Mitt, 80(21):2340-2344.
55. Heners M, Walther W. 1988. Klinische Bewährung der Konuskrone als perioprothetisches Konstruktionselement - Eine Langzeitstudie. Dtsch Zahnärztl Z, 43(4):525-529.
56. Heners M, Walther W. 1990. Die Prognose von Pfeilerzähnen bei stark reduziertem Restzahnbestand. Dtsch Zahnärztl Z, 45(9):579-581.

57. Heners M, Walther W. 1992. Anwendung dichotomer Befundvariablen zur Objektivierung klinischer Langzeitstudien. Dtsch Zahnärztl Z, 47(8):539-541.
58. Hoffmann A. 2001. Keramisch verblendete Teleskope - Die Herstellung von Teleskopen in Verbindung mit galvanischen Konstruktionen. Dentallabor, 49(6):1053-1057.
59. Hoffmann A, Hopp M. 1999. Tips und Tricks für den Zahntechniker. In: Wirz J, Hoffmann A, Hrsg. 1999. Galvanoprothetik: neue Wege zum biologischen Zahnersatz. Berlin, Chicago, London, Tokio, Paris, Barcelona, São Paulo, Moskau, Prag, Warschau: Quintessenz, 381-411.
60. Hofmann M. 1966. Die Versorgung von Gebissen mit einzelstehenden Restzähnen mittels sog Cover-denture-Prothesen. Dtsch Zahnärztl Z, 21(3):478-482.
61. Hofmann M. 1990. Die prothetische Versorgung des wenig bezahnten und des zahnlosen Patienten - eine Standortbestimmung. Dtsch Zahnärztl Z, 45(9):525-537.
62. Hofmann M, Ludwig P. 1973. Die teleskopierende Totalprothese im stark reduzierten Lückengebiss. Dtsch Zahnärztl Z, 28(1):2-17.
63. Höfling Ö. 1987. Physik, Band 2, Teil 1: Mechanik - Wärme. Bonn: Dümmlers.
64. Hopp M. 2003. Drittes Basler Titan- und Galvanosymposium. Quintessenz Zahntech, 29(7):895-903.
65. Hopp M, Jepp R, Hoffmann A, Lange KP. 2001. Fehleranalyse in der Galvanoforming-Technik. Quintessenz Zahntech, 27(2):157-170.
66. Hör D. 2000. Die galvanotechnische Neuanfertigung von Teleskopprothesen bei vorhandenen Innenteleskopen. Quintessenz, 51(6):581-585.
67. IDZ (Institut der Deutschen Zahnärzte), Hrsg. 1999. Dritte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS III): Ergebnisse, Trends und Problemanalysen auf der Grundlage bevölkerungsrepräsentativer Stichproben in Deutschland 1997. Köln: Deutscher Ärzte-Verlag.
68. Jäger K, Wirz J, Baumann F. 1998. Galvanotechnologie in der festsitzenden Prothetik - Eine Falldokumentation. Quintessenz, 49(9):907-913.

69. Jung T. 2003. Implantatgetragene doppelkronenretinierte Deckprothese. Quintessenz Zahntech, 29(9):1054-1064.
70. Kammertöns H. 1989. Teleskop- und Konusprothesen mit definierter Haftreibung. Dentallabor, 37(4):551-553.
71. Kerschbaum T. 1987. Herausnehmbarer Teilersatz. In: Voß R, Meiners H, Hrsg. 1987. Fortschritte der Zahnärztlichen Prothetik und Werkstoffkunde. München, Wien: Hanser, 147-166.
72. Kiliaridis S, Lyka I, Friede H, Carlsson GE, Ahlqwist M. 2000. Vertical position, rotation and tipping of molars without antagonists. Int J Prosthodont, 13(6):480-486.
73. Klaus G. 1988. Galvanotechnik - Elektroforming, die Alternative zur Gußtechnik. Quintessenz Zahntech, 14(5):556-571.
74. Klaus KE. 2003. Friktive Galvano-Doppelkronen für die abnehmbare Implantatprothetik. Dental-praxis, 20(11-12):337-345.
75. Körber E. 1987. Die prothetische Versorgung des Lückengebisses: Befunderhebung und Planung. Dritte Aufl. München, Wien: Hanser.
76. Körber K. 1968. Konuskronen - ein physikalisch definiertes Teleskopsystem. Dtsch Zahnärztl Z, 23(6):619-630.
77. Körber K. 1970. Das Konometer - ein Gerät zur rationellen Herstellung von Konuskronen. ZWR, 79(14):595-601.
78. Körber K. 1988. Konuskronen: Das rationelle Teleskopsystem; Einführung in Klinik und Technik. Sechste Aufl. Heidelberg: Hüthig.
79. Körber K. 2002. Konustoleranz - ein Kriterium der Passgenauigkeit von Suprakonstruktionen. ZMK, 18(10):658-669.
80. Körber K, Blum M. 2003. Schichtstärke von Konus-Verblendkronen. Dentallabor, 51(4):657-669.
81. Körber K, Johnke G. 1992. 15 Jahre Erfahrung mit Isosit-verblendeten Konuskronen. Quintessenz Zahntech, 18(12):1665-1676.
82. Kragelski IW. 1971. Reibung und Verschleiß. München: Hanser.
83. Krieg G, Klaus G. 1988. Klinische Aspekte und neue Anwendungsmöglichkeiten der Galvanotechnik. Quintessenz, 39(12):2103-2114.
84. Kuchling H. 1996. Taschenbuch der Physik. 16te Aufl. Leipzig: Fachbuchverlag.

85. Lauer HC, Ottl P, Weigl P. 1997. Parodontologie und Prothetik. In: Heidemann D, Hrsg. 1997. Parodontologie. München, Wien, Baltimore: Urban und Schwarzenberg, 315-341.
86. Lehmann KM. 1999. Doppelkronen aus NEM-Legierungen. ZT, 56(6):324-328.
87. Lehmann KM, Gente M. 1988. Doppelkronen als Verankerung für herausnehmbaren Zahnersatz. In: Heidemann D, Hrsg. 1988. Deutscher Zahnärzte Kalender 1988. München: Hanser, 106-121.
88. Lehmann KM, Hellwig E. 1993. Einführung in die restaurative Zahnheilkunde. Siebente Aufl. München, Wien, Baltimore: Urban und Schwarzenberg.
89. Lehmann KM, Gente M, Wenz HJ. 1996a. Konzept zur Versorgung des Lückengebisses mit „doppelkronenverankerten“ Teilprothesen, Teil 1. ZWR, 105(5):257-260.
90. Lehmann KM, Gente M, Wenz HJ. 1996b. Konzept zur Versorgung des Lückengebisses mit „doppelkronenverankerten“ Teilprothesen, Teil 2. ZWR, 105(6):325-328.
91. Lehmann KM, Wenz HJ, Gente M. 1997. Die Marburger Doppelkrone: Vielseitig und praxisnah. Dental Spiegel, 17(1):12-18.
92. Lenz E. 1998a. Orale Gesundheit und Betreuungsbedarf der Altenpopulation Mitteldeutschlands - ausgewählte Ergebnisse einer multinationalen Studie. In: Stößer L, Hrsg. 1998. Kariesdynamik und Kariesrisiko. Berlin, Chicago, London, Paris, Barcelona, São Paulo, Tokio, Moskau, Prag, Warschau: Quintessenz, 112-120.
93. Lenz E. 1998b. Dentallegierungen. In: Meiners H, Lehmann KM, Hrsg. 1998. Klinische Materialkunde für Zahnärzte. München, Wien: Hanser, 71-117.
94. Lenz J. 1982. Ein mathematisches Modell zur Berechnung des Haft- und Festigkeitsverhaltens von konischen Teleskopkronen. Dtsch Zahnärztl Z, 37(1):7-15.
95. Lenz J. 1983. Zum Haftungsmechanismus von konischen Teleskopkronen. Quintessenz Zahntech, 9(5):569-583.
96. Lenz P, Gilde H, Süßmann K. 1978. VMK-Konuskronen im Dauerverschleißversuch. Dtsch Zahnärztl Z, 33(7):453-455.

97. Lu HU, Faber FJ. 1999. Verbundfestigkeit von Galvanoforming-Prüfkörpern im Zugversuch. Dtsch Zahnärztl Z, 54(10):648-650.
98. Ludwig K. 1994. Legierungen in der zahnärztlichen Therapie, Teil 1: Übersicht - Korrosionsprobleme. Dental Spiegel, 14(1):44-48.
99. Ludwig K, Blum M. 1992. Untersuchungen zur Haftkraft und Bruchfestigkeit von keramisch verblendeten Konuskronen. Quintessenz Zahntech, 18(6):789-804.
100. Marthaler TM. 1993. Zahnkaries und Zahnverlust bis zum Jahre 2008: Prognosen für die 25- bis 65jährigen Erwachsenen. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 103(11):1476-1477.
101. Marthaler TM. 1998. Gesicherte und wahrscheinliche Ursachen des Kariesrückganges. In: Stößer L, Hrsg. 1998. Kariesdynamik und Kariesrisiko. Berlin, Chicago, London, Paris, Barcelona, São Paulo, Tokio, Moskau, Prag, Warschau: Quintessenz, 112-120.
102. Marxkors R. 1995. Ursachen und Therapie von Prothesen-Intoleranz. Dtsch Zahnärztl Z, 50(10):704-707.
103. Meschede D, Hrsg. 2001. Gerthsen Physik. 21te Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
104. Meschke KP, Volf B. 2001. Ein schwieriger Fall - gelöst mit Hilfe der Galvanotechnik. Dentallabor, 49(9):1493-1498.
105. Michel R. 2002. Einstückprothesen - Die abnehmbare Brücke. Quintessenz Zahntech, 28(7):714-718.
106. München C, Gensler J, Braunbarth M. 2000. Galvanoforming und intraorale Verklebung. Dentallabor, 49(12):2009-2016.
107. Niedermeier W, Rießner EM. 1994. Beweglichkeit von Prothesenpfeilern unter dem Einfluss verschiedenartiger Konstruktionselemente. Dtsch Zahnärztl Z, 49(1):25-29.
108. O'Mullane D. 1998. Caries Decline in Europe. In: Stößer L, Hrsg. 1998. Kariesdynamik und Kariesrisiko. Berlin, Chicago, London, Paris, Barcelona, São Paulo, Tokio, Moskau, Prag, Warschau: Quintessenz, 15-17.
109. Patyk A, Kobes LWR, Huber HP, Bachmann A. 1993. Druckempfindlichkeit des zahnlosen Kieferkammes. Dtsch Zahnärztl Z, 48(9):559-561.

110. Psoch A, Setz JM. 2002. Prothesenakzeptanz teilbezahnter Patienten in Abhängigkeit verschiedener Konstruktionsmerkmale. Dtsch Zahnärztl Z, 57(10):588-590.
111. Rautschek H. 2004. Silikonöle. Schriftliche Information. Nünchritz.
112. Reich E. 1993. Gründe für Zahnverluste in den westlichen Bundesländern. Phillip Journal, 10(7-8):314.
113. Reither W. 1967. Die Bedeutung der Stützzonen für die Fehlbelastung des Parodontiums und des Kiefergelenkes. Dtsch Zahnärztl Z, 22(7):931-939.
114. Renggli HH. 1997. Ätiologie. In: Heidemann D, Hrsg. 1997. Parodontologie. München, Wien, Baltimore: Urban und Schwarzenberg, 21-51.
115. Reuling N. 1992. Biokompatibilität dentaler Legierungen. München, Wien: Hanser.
116. Richter EJ. 1992. Overdenture / Coverdenture; Theoretische und klinische Aspekte. Phillip J, 9(6):269-279.
117. Rogers OW. 1979. The dental application of electroformed pure gold. Aust Dent J, 24(3):163-170.
118. Rogers OW, Armstrong BW. 1961. Electroforming a gold matrix for indirect inlays. J Prosthet Dent 11(5):959.
119. Schroeder E. 2001. Bedarfsermittlung für prothetische Leistungen in der Zahnheilkunde bis zum Jahr 2020 [Ein Bericht der I+G Gesundheitsforschung München für die DGZPW]. München, 1-103.
120. Schwanewede H. 2000. Die Modellgussprothese aus heutiger Sicht. ZMK, 16(10):638-647.
121. Schwickerath H. 1988. Die keramisch verblendete Galvanokrone. Quintessenz Zahntech, 14(10):1147-1151.
122. Schwickerath H, Pfeiffer P. 1995. Zur Bewertung des Korrosionsverhaltens von Edelmetalllegierungen. Dtsch Zahnärztl Z, 50(9):679-682.
123. Setz J, Diehl J, Weber H. 1989. Der Randschluss zementierter galvanokeramischer Kronen. Die Quintessenz, 40(8):1439-1445.
124. Stark H. 1996. Verschleißverhalten von Teleskopkronen und hybridprothetischen Verankerungselementen. ZWR, 105(4),176-183.

125. Stark H, Stiefenhofer A. 1994. Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Aktivierungselementen für Teleskopkronen. Dtsch Zahnärztl Z, 49(9):707-710.
126. Stark H, Holste Th, Swoboda W, Siebert A. 1999. Untersuchungen zum Mundgesundheitszustand rehabilitationsbedürftiger älterer Patienten. Dtsch Zahnärztl Z, 54(11):708-710.
127. Starr RW. 1886. Removable bridge-work, porcelain cap crowns. Dent Cosmos, 28:17-19. Zitiert in: Strub JR, Türp JC, Witkowski S, Hürzeler MB, Kern M. 1999. Curriculum Prothetik, Bd 3: Kombinierte und abnehmbare Prothetik, Implantologie, Nachsorge, Psychologie. Zweite Aufl. Berlin, Chicago, London, Paris, Barcelona, São Paulo, Tokio, Moskau, Prag, Warschau: Quintessenz, 981.
128. Statistisches Bundesamt. 2000. Bevölkerungsentwicklung Deutschlands bis zum Jahr 2050 - Ergebnisse der neunten koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
129. Stauch KH, Stauch JU. 1996. Erfahrungen mit der intermediären friktiven Galvano-Doppelkronentechnik. Quintessenz Zahntech, 22(8):955-962.
130. Stenzel K, Gilde H, Lenz P. 1980. Untersuchungen der Einflußgrößen zur Haftkraft von Konuskronen. Dtsch Zahnärztl Z, 35(10):920-922.
131. Stroppe M. 1990a. Standortbestimmung 1990 - Galvanoplastisch hergestellte Gerüste. Dentallabor, 38(2):201-205.
132. Stroppe M. 1990b. Galvanoplastisch hergestellte Gerüste - Schluß mit dem Guß. Quintessenz Zahntech, 16(8):942-952.
133. Strub JR, Türp JC, Witkowski S, Hürzeler MB, Kern M. 1999. Curriculum Prothetik, Bd 3: Kombinierte und abnehmbare Prothetik, Implantologie, Nachsorge, Psychologie. Zweite Aufl. Berlin, Chicago, London, Paris, Barcelona, São Paulo, Tokio, Moskau, Prag, Warschau: Quintessenz.
134. Stüttgen U. 1990. Doppelkronen aus NEM-Legierungen. Zum Stand der dentalen Technik. Zahnärztliche Praxis, 41(1):10-13.
135. Stüttgen U, Hupfaut L. 1996. Kombiniert festsitzend-abnehmbarer Zahnersatz. In: Koeck B, Hrsg. 1996. Teilprothesen. München, Wien, Baltimore: Urban und Schwarzenberg.
136. Wacker-Chemie. 2001. Wacker Silikonöle AK [Broschüre]. München: Wacker-Chemie GmbH.

137. Wacker-Silicones. 2004. EU - Sicherheitsdatenblatt (91/155/EWG), Material: 00102327 (OEL AK 200), Version 1.6 (DE). München: Wacker-Chemie.
138. Wagner R, Helmling S. 1998. AGC-Galvanotechnik - ein Verfahren mit Zukunft. Quintessenz Zahntech, 24(5):499-507.
139. Wall G. 1996. Minimierung der Spaltkorrosion an teleskopierenden Ankern. Dentallabor, 44(2):225-239.
140. Walther W. 1990. Kronenfrakturen bei herausnehmbarem Zahnersatz. Dtsch Zahnärztl Z, 45(9):542-544.
141. Walther W, Heners M. 1992. Parodontaler Befund und Verlust von Pfeilerzähnen bei herausnehmbarem Zahnersatz. Dtsch Zahnärztl Z, 47(9):603-605.
142. Weber H. 1989. Neue Technologien in der zahnärztlichen Prothetik. Dtsch Zahnärztl Z, 44(11):817-821.
143. Weigl P, Lauer HC. 2000. Advanced biomaterials used for a new telescopic retainer for removable dentures: Ceramic vs. electroplated gold copings, Part 2: Clinical effects. J Biomed Mater Res, 53(4):337-347.
144. Weigl P, Hauptmann J, Lauer HC. 1996. Vorteile und Wirkungsweise eines biokompatiblen neuen Haltelements: Vollkeramische Primärkrone, kombiniert mit metallischer Sekundärkrone. Quintessenz Zahntech, 22(5):507-525.
145. Weigl P, Hahn L, Lauer HC. 2000. Advanced biomaterials used for a new telescopic retainer for removable dentures: Ceramic vs. electroplated gold copings, Part 1: In vitro tribology effects. J Biomed Mater Res, 53(4):320-336.
146. Weiskopf J. 1991. Grundlagen und Voraussetzungen prothetischer Prävention und Therapie. In: Breustedt A, Lenz E, Musil R, Staegemann G, Taege F, Weiskopf J. 1991. Prothetik. Dritte Aufl. Leipzig, Heidelberg: Barth, 11-96.
147. Weiskopf J. 1992. Versorgung des Lückengebisses - festsitzend - herausnehmbar. Dtsch Zahnärztl Z, 47(9):560-565.
148. Wenz HJ, Lehmann KM. 1998. A telescopic crown concept for the restoration of the partially edentulous arch: The Marburg Double Crown System. Int J Prosthodont, 11(6):541-550.

149. Wenz HJ, Lehmann KM, Gente M, Hertrampf K. 1999a. Perioprothetische Rekonstruktion des teilbezahnten Kiefers mit doppelkronenverankerten Teilprothesen. *Quintessenz*, 50(4):359-371.
150. Wenzel R. 1999. Individuelle Herstellung hochpräziser Mesostrukturen aus AGC[®]-Galvanogold als Basis für implantatgetragene Kronen- oder Brückenversorgungen in Metall- oder Vollkeramik. *Quintessenz Zahntech*, 25(3):261-275.
151. Wichmann M. 1999a. Kronen und Brücken. Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK und der DGZPW. *Dtsch Zahnärztl Z*, 54(8):469-470.
152. Wichmann U. 1999b. Geschiebeverankerter Zahnersatz. In: Freesmeyer WB, Hrsg. 1999. *Klinische Prothetik, Band 2: Herausnehmbarer Zahnersatz*. Heidelberg: Hüthig, 67-91.
153. Wichnalek N. 2001. Galvanoforming - eine Technik setzt sich durch. *Dentallabor*, 49(8):1283-1288.
154. Wirz J. 1999a. Galvanotechnologie - ein bewährter Weg zum biologischen Zahnersatz, Teil 1: Biokompatibilität. *Quintessenz*, 50(1):65-70.
155. Wirz J. 1999b. Galvanotechnologie - ein bewährter Weg zum biologischen Zahnersatz, Teil 2: Galvanotechnologie und Klinik. *Quintessenz*, 50(2):153-160.
156. Wirz J. 1999c. Biologischer Zahnersatz. In: Wirz J, Hoffmann A, Hrsg. 1999. *Galvanoprothetik: neue Wege zum biologischen Zahnersatz*. Berlin, Chicago, London, Tokio, Paris, Barcelona, São Paulo, Moskau, Prag, Warschau: Quintessenz, 13-43.
157. Wirz J. 1999d. Kombinationsprothetik mit Galvano-Teleskopen / Konuskronen. In: Wirz J, Hoffmann A, Hrsg. 1999. *Galvanoprothetik: neue Wege zum biologischen Zahnersatz*. Berlin, Chicago, London, Tokio, Paris, Barcelona, São Paulo, Moskau, Prag, Warschau: Quintessenz, 238-267.
158. Wirz J. 1993e. *Klinische Material- und Werkstoffkunde*. Berlin: Quintessenz.
159. Wirz J, Jäger K. 1991. Magnetverankerungen implantatgetragener Hybridprothesen. *Quintessenz Zahntech*, 17(11):1837-1844.
160. Wirz J, Jäger K. 1998. Galvanoteleskope - präzise, einfach und klinisch bewährt. *Quintessenz*, 49(3):283-292.

161. Wirz J, Jäger K, Schmidli F. 1995. Galvanoforming - Zahnersatz mit hoher Biokompatibilität. Quintessenz, 46(4):539-547.
162. Wirz J, Jäger K, Schmidli F. 1996a. Moderne Galvanotechnologie. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 106(7):643-651.
163. Wirz J, Jäger K, Schmidli F. 1996b. Teleskopierende Galvanokronen. Quintessenz, 47(3):385-396.
164. Wismann HL. 1983. Patentschriften DE 3219008 AL und DE 3218300 AL.
165. Wolfart S, Kern M. 2000. Optimale Einstellung der Konushaftung durch Einbringen eines okklusalen Stopps. Quintessenz, 51(2):127-136.
166. Wöstmann B. 1997. Tragedauer von klammerverankerten Einstückgussprothesen im überwachten Gebrauch. Dtsch Zahnärztl Z, 52(2):100-104.
167. Zimmermann R. 2002. Innovative Teleskoptechnik. Dentallabor, 50(3):373-384.

8 Anhang

8.1 Werte-Tabellen

Tabelle 9. Lösekraftverlust eines Teleskops während 202 Füge-Trenn-Zyklen.

Abzug	L [N]	Abzug	L [N]	Abzug	L [N]	Abzug	L [N]
1	5,6	9	4,2	17	4,2	100	4,1
2	5,0	10	2,4	18	5,4	101	3,9
3	4,6	11	4,9	19	4,2	102	3,7
4	4,9	12	4,6	20	4,4	103	4,2
5	4,8	13	4,7				
6	4,8	14	4,7	40	4,7	200	3,0
7	4,3	15	4,4			201	3,1
8	4,4	16	5,4	70	4,4	202	3,1

Tabelle 10. Lösekräfte [N] der ersten orientierenden Untersuchung.

L in [N]. Die Spalte „*“ kennzeichnet die Messungen vor („v“) und nach („n“) künstlichem Verschleiß durch manuelles Ausschleifen der Außenkroneninnenflächen. „v2“ kennzeichnet die Wiederholung einer Messreihe nach erneutem Galvanisieren der Außenkrone.

Maße der Prüfkörper		0° 6,5 mm	0° 9,0 mm	2° 6,5 mm	4° 6,5 mm	6° 6,5 mm
Medium	*	\bar{L}	\bar{L}	\bar{L}	\bar{L}	\bar{L}
Trocken	v	4,0 ± 0,9	0,7 ± 0,1	0,0	0,2 ± 0,3	0,6 ± 0,5
	v2	0,0 ± 0,0				
	n	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Wasser	v	3,1 ± 0,5	0,8 ± 0,1	0,08 ± 0,08	1,2 ± 0,4	0,8 ± 0,1
	n	0,02 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,0
V50	n	0,2 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,20 ± 0,03	0,15 ± 0,2	0,07 ± 0,01
V200	n	0,7 ± 0,1	0,8 ± 0,1	1,1 ± 0,1	0,45 ± 0,04	0,31 ± 0,09
N350	v	6,2 ± 0,4	5,8 ± 0,5	3,0 ± 0,3	1,2 ± 0,2	1,5 ± 0,1
	n	1,0 ± 0,2	1,2 ± 0,2	1,4 ± 0,2	0,7 ± 0,1	0,31 ± 0,03
V1000	n	2,2 ± 0,3	2,6 ± 0,5	2,7 ± 0,2	2,0 ± 0,5	0,6 ± 0,1
N1000	v	6,3 ± 0,4	7,5 ± 0,5	4,0 ± 0,3	2,6 ± 0,5	2,3 ± 0,5
	n	2,8 ± 0,3	3,0 ± 0,4	3,0 ± 0,2	2,1 ± 0,2	0,8 ± 0,1
M2100	n	2,4 ± 0,3	4,4 ± 0,4	3,2 ± 0,2	2,6 ± 0,2	1,3 ± 0,2
N3000	n	3,0 ± 0,2	5,6 ± 0,7	3,2 ± 0,1	2,8 ± 0,1	1,5 ± 0,2
M5500	n	3,1 ± 0,3	6,3 ± 0,4	3,5 ± 0,2	3,0 ± 0,3	2,6 ± 0,3
N10000	v	Aufsetzen der Außenkrone nicht möglich		3,8 ± 0,6	3,1 ± 0,5	3,4 ± 0,6
	n			3,8 ± 0,5	3,3 ± 0,1	3,1 ± 0,3

Tabelle 11. Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit auf die Lösekraft bei N200.

v_l [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	PK-1 (0°)	PK-4 (2°)	PK-5 (4°)	PK-6 (6°)
	\bar{L} [N]	\bar{L} [N]	\bar{L} [N]	\bar{L} [N]
1	2,12 ± 0,36	0,97 ± 0,12	0,65 ± 0,50	0,96 ± 0,06
2	2,59 ± 0,13	1,62 ± 0,20	0,81 ± 0,24	1,29 ± 0,21
4	2,95 ± 0,07	2,61 ± 0,61	1,98 ± 0,55	1,41 ± 0,20
8	3,54 ± 0,39	3,26 ± 0,25	2,35 ± 0,37	1,84 ± 0,23
16	3,72 ± 0,45	3,86 ± 0,61	2,89 ± 0,24	2,56 ± 0,10
30	3,59 ± 0,29	3,51 ± 0,32	2,91 ± 0,12	3,17 ± 0,50
50	3,49 ± 0,11	3,47 ± 0,26	2,34 ± 0,50	2,83 ± 0,22
64	3,48 ± 0,29	3,44 ± 0,16	3,45 ± 0,68	2,77 ± 0,30
200	3,61 ± 0,26	3,79 ± 0,19	3,85 ± 0,92	3,27 ± 0,29
256	3,53 ± 0,17	1,85 ± 0,20	2,84 ± 0,09	1,09 ± 0,12
330	3,35 ± 0,17	1,89 ± 0,34	2,44 ± 0,23	0,95 ± 0,19
400	3,40 ± 0,15	1,88 ± 0,61	2,35 ± 0,17	0,95 ± 0,15

Tabelle 12a. Lösekräfte von Konuskronen in Abhängigkeit vom Zwischenmedium und v_l .

v_l [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	PK-4 (2° / 6,5 mm)		PK-5 (4° / 6,5 mm)		PK-6 (6° / 6,5 mm)	
	\bar{L} [N]	s_r [%]	\bar{L} [N]	s_r [%]	\bar{L} [N]	s_r [%]
künstl. Speichel (Glandosane®) - Viskosität \approx 7 mPas						
30	1,00 \pm 0,07	7,0	0,39 \pm 0,05	12,8	0,27 \pm 0,07	25,9
50	1,32 \pm 0,14	10,6	0,47 \pm 0,07	14,9	0,25 \pm 0,08	32,0
200	1,08 \pm 0,31	28,7	0,65 \pm 0,06	9,2	0,27 \pm 0,04	14,8
400	1,01 \pm 0,24	23,8	0,73 \pm 0,10	13,7	0,30 \pm 0,06	20,0
Vinyllöl „Silopren M 50“ (V50) - Viskosität \approx 44 mPas						
30	1,97 \pm 0,69	35,0	0,92 \pm 0,13	14,1	1,30 \pm 0,32	24,6
50	1,99 \pm 0,29	14,6	1,20 \pm 0,16	13,3	1,12 \pm 0,27	24,1
200	2,14 \pm 0,63	29,4	3,24 \pm 0,49	15,1	1,87 \pm 0,20	10,7
400	1,22 \pm 0,21	17,2	0,76 \pm 0,10	13,2	0,59 \pm 0,06	10,2
Rapsöl - Viskosität \approx 63 mPas						
30	3,48 \pm 0,27	7,8	2,97 \pm 0,55	18,5	0,62 \pm 0,03	4,8
50	3,60 \pm 0,23	6,4	3,48 \pm 0,24	6,9	1,16 \pm 0,29	25,0
200	3,73 \pm 0,22	5,9	3,55 \pm 0,08	2,3	2,70 \pm 0,31	11,5
400	3,48 \pm 0,41	11,8	2,98 \pm 0,17	5,7	2,32 \pm 0,26	11,2
Vinyllöl „Silopren U 0,2“ (V200) - Viskosität \approx 179 mPas						
30	3,51 \pm 0,32	9,2	2,91 \pm 0,12	4,1	2,67 \pm 0,56	21,0
50	3,47 \pm 0,49	14,0	3,65 \pm 0,25	17,0	2,83 \pm 0,22	7,8
200	3,79 \pm 0,19	5,0	3,99 \pm 0,90	22,6	3,27 \pm 0,29	8,9
400	1,88 \pm 0,61	32,4	2,35 \pm 0,17	7,2	0,95 \pm 0,15	15,8
Neutralöl 350 (N350) - Viskosität \approx 310 mPas						
30	3,49 \pm 0,24	6,9	2,95 \pm 0,35	11,9	2,75 \pm 0,36	13,1
50	3,30 \pm 0,16	4,8	3,20 \pm 0,36	11,3	3,01 \pm 0,21	7,0
200	3,78 \pm 0,20	5,3	3,89 \pm 0,73	18,8	3,59 \pm 0,55	15,3
400	2,30 \pm 0,40	17,4	3,28 \pm 0,11	14,9	1,65 \pm 0,27	16,4

Tabelle 12b. Lösekräfte von Konuskronen in Abhängigkeit vom Zwischenmedium und v_l .

v_l [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	PK-4 (2° / 6,5 mm)		PK-5 (4° / 6,5 mm)		PK-6 (6° / 6,5 mm)	
	\bar{L} [N]	s_r [%]	\bar{L} [N]	s_r [%]	\bar{L} [N]	s_r [%]
Neutralöl 1000 (N1000) - Viskosität \approx 973 mPas						
30	3,22 \pm 0,12	3,7	3,43 \pm 0,41	12,0	3,53 \pm 0,22	6,2
50	3,21 \pm 0,04	1,2	3,77 \pm 0,62	16,4	3,35 \pm 0,14	4,2
200	4,22 \pm 0,42	10,0	3,85 \pm 0,26	6,8	3,69 \pm 0,34	9,2
400	3,12 \pm 0,18	5,8	3,24 \pm 0,06	1,9	2,60 \pm 0,08	3,1
Neutralöl-Mischung 1500 (M1500) - Viskosität \approx 1118 mPas						
30	3,18 \pm 0,14	4,4	3,68 \pm 0,32	8,7	3,47 \pm 0,11	3,2
50	3,21 \pm 0,17	5,3	3,99 \pm 0,34	8,5	3,61 \pm 0,07	1,9
400	3,23 \pm 0,11	3,4	3,33 \pm 0,07	2,1	2,63 \pm 0,17	6,5
Neutralöl-Mischung 3000 (M3000) - Viskosität \approx 2967 mPas						
30	3,68 \pm 0,89	24,3	4,00 \pm 0,43	10,8	4,34 \pm 0,21	4,8
50	3,80 \pm 0,42	11,0	4,03 \pm 0,36	8,9	4,30 \pm 0,37	8,6
200	4,51 \pm 0,56	12,4	4,75 \pm 0,51	10,7	3,87 \pm 0,21	5,4
400	3,48 \pm 0,21	6,0	3,56 \pm 0,13	3,7	3,21 \pm 0,14	4,4
Neutralöl 10000 (N10000) - Viskosität \approx 9571 mPas						
30	$4 < L_i < 18^*$	53,2	6,20 \pm 1,50	24,2	5,41 \pm 0,65	12,0
50	4,03 \pm 0,61	15,1	4,79 \pm 0,66	13,8	6,77 \pm 0,81	12,0
200	4,74 \pm 0,70	14,8	4,89 \pm 1,39	28,4	4,82 \pm 0,60	12,4
400	3,71 \pm 0,15	4,0	3,95 \pm 0,27	6,8	4,11 \pm 0,32	7,8

Tabelle 13a. Lösekräfte von Zylinderteleskopen.

v_l [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	PK-1 (0° / 6,5 mm)		PK-2 (0° / 4,5 mm)		PK-3 (0° / 9,0 mm)	
	\bar{L} [N]	s_r [%]	\bar{L} [N]	s_r [%]	\bar{L} [N]	s_r [%]
künstl. Speichel (Glandosane®) - Viskosität \approx 7 mPas						
30	0,46 \pm 0,07	15,2	/		/	
50	0,73 \pm 0,13	17,8				
400	2,65 \pm 0,11	4,2				
Vinylöl „Silopren M 50“ (V50) - Viskosität \approx 44 mPas						
30	1,16 \pm 0,34	29,4	2,21 \pm 0,12	5,4	7,63 \pm 0,28	3,7
50	3,33 \pm 0,37	11,1	2,13 \pm 0,29	13,6	7,42 \pm 0,63	8,5
400	3,22 \pm 0,43	13,4	1,80 \pm 0,07	3,9	7,39 \pm 0,25	3,4
Rapsöl - Viskosität \approx 63 mPas						
30	1,81 \pm 0,57	31,5	/		/	
50	3,44 \pm 1,07	31,1				
200	2,99 \pm 0,59	19,7				
400	3,81 \pm 0,60	16,0				
Vinylöl „Silopren U 0,2“ (V200) - Viskosität \approx 179 mPas						
30	3,59 \pm 0,29	8,1	1,98 \pm 0,13	6,6	7,52 \pm 0,72	9,6
50	3,49 \pm 0,11	3,2	2,01 \pm 0,17	8,5	8,10 \pm 0,35	4,3
400	3,40 \pm 0,15	4,4	1,82 \pm 0,15	8,2	7,99 \pm 0,26	3,3
Neutralöl 350 (N350) - Viskosität \approx 310 mPas						
30	3,54 \pm 0,26	7,3	2,00 \pm 0,23	11,5	7,59 \pm 0,44	5,8
50	3,47 \pm 0,09	2,6	2,16 \pm 0,31	14,4	7,99 \pm 0,24	3,0
400	3,58 \pm 0,27	7,5	3,28 \pm 0,11	3,35	7,74 \pm 0,30	3,9
Neutralöl 1000 (N1000) - Viskosität \approx 973 mPas						
30	3,49 \pm 0,11	3,2	2,44 \pm 0,27	11,1	7,66 \pm 0,34	4,5
50	3,51 \pm 0,08	2,3	2,37 \pm 0,38	16,0	7,81 \pm 0,23	2,9
400	3,59 \pm 0,14	3,9	2,09 \pm 0,18	8,6	7,50 \pm 0,18	2,4

Tabelle 13b. Lösekräfte von Zylinderteleskopen.

v_l [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	PK-1 (0° / 6,5 mm)		PK-2 (0° / 4,5 mm)		PK-3 (0° / 9,0 mm)	
	\bar{L} [N]	s_r [%]	\bar{L} [N]	s_r [%]	\bar{L} [N]	s_r [%]
Neutralöl-Mischung 1500 (M1500) - Viskosität \approx 1118 mPas						
30	3,45 \pm 0,07	2,0	1,94 \pm 0,15	7,7	7,70 \pm 0,22	2,9
50	3,60 \pm 0,15	4,2	2,00 \pm 0,14	7,0	7,63 \pm 0,40	5,2
400	3,39 \pm 0,06	1,8	1,84 \pm 0,14	7,6	7,21 \pm 0,22	3,1
Neutralöl-Mischung 3000 (M3000) - Viskosität \approx 2967 mPas						
30	3,69 \pm 0,27	7,3	2,02 \pm 0,22	10,8	7,64 \pm 0,54	7,1
50	3,74 \pm 0,19	5,1	2,01 \pm 0,22	10,9	7,50 \pm 0,65	8,7
400	3,76 \pm 0,15	4,0	1,97 \pm 0,16	8,5	7,89 \pm 0,67	8,5

Tabelle 14. Lösekräfte von Mantelprüfkörpern.

In den Feldern „Flächenausgleich“ sind die Einzelmesswerte in dem Maße vergrößert worden, wie die Flächeninhalte kleiner als die von PK-4 waren. Die Spalten „Anteil“ geben das Verhältnis der Kräfte zu den Gesamtkräften der oben genannten Messungen an. Die Felder „Anteil Maximum/Maximum“ vergleichen jeweils die maximalen Lösekräfte gegeneinander.

v_i [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	PK-4 (2°)		PK-5 (4°)		PK-6 (6°)	
	\bar{L} [N]	Anteil	\bar{L} [N]	Anteil	\bar{L} [N]	Anteil
Wasser - Viskosität \approx 0,7 mPas						
30	/		/		0,02 \pm 0,01	/
50					0,03 \pm 0,02	
400					0,05 \pm 0,00	
Vinylöl 200 (V200) - Viskosität \approx 179 mPas						
30	0,04 \pm 0,01	1,1 %	0,03 \pm 0,01	1,0 %	0,04 \pm 0,01	1,5 %
50	0,05 \pm 0,02	1,4 %	0,06 \pm 0,03	1,6 %	0,03 \pm 0,01	1,1 %
400	0,18 \pm 0,04	9,6 %	0,13 \pm 0,02	5,5 %	0,12 \pm 0,02	12,6 %
400 - mit Flächenausgleich; Anteil Maximum / Maximum		4,8 %	0,13 \pm 0,02	3,3 %	0,13 \pm 0,02	3,7 %
Neutralöl 350 (N350) - Viskosität \approx 310 mPas						
30	0,12 \pm 0,08	3,4 %	0,05 \pm 0,01	1,7 %	0,05 \pm 0,02	1,8 %
50	0,10 \pm 0,05	3,0 %	0,05 \pm 0,01	1,6 %	0,06 \pm 0,02	2,0 %
400	0,26 \pm 0,05	11,3 %	0,17 \pm 0,01	5,2 %	0,14 \pm 0,04	8,5 %
400 - mit Flächenausgleich; Anteil Maximum / Maximum		6,9 %	0,18 \pm 0,01	4,4 %	0,15 \pm 0,04	3,9 %
Neutralöl 1000 (N1000) - Viskosität \approx 973 mPas						
30	0,15 \pm 0,03	4,7 %	0,12 \pm 0,04	3,5 %	0,14 \pm 0,03	4,0 %
50	0,39 \pm 0,08	12,1 %	0,17 \pm 0,03	4,5 %	0,14 \pm 0,04	4,2 %
400	0,44 \pm 0,06	14,1 %	0,38 \pm 0,05	11,7 %	0,28 \pm 0,04	10,8 %
400 - mit Flächenausgleich; Anteil Maximum / Maximum		10,4 %	0,39 \pm 0,05	9,9 %	0,30 \pm 0,04	7,6 %
Mittelwert der Anteile		5,3 % \pm 4,3	von Maximum/Maximum		6,1 % \pm 2,7	

Tabelle 15. Adhäsionskräfte im Plattenabzugstest.

2 Platten - 25,1 mm · 48,1 mm = 1207,3 mm²					
v_l [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	V200 (179 mPas)	N350 (310 mPas)	N1000 (973 mPas)	M1500 (1118 mPas)	M3000 (2967 mPas)
	\bar{L} [N]	\bar{L} [N]	\bar{L} [N]	\bar{L} [N]	\bar{L} [N]
30	3,66 ± 0,50	19,55 ± 2,42	61,33 ± 15,98	82,52 ± 5,52	99,56 ± 5,51
50	6,29 ± 1,22	24,26 ± 4,36	76,56 ± 5,44	82,81 ± 7,64	94,86 ± 6,59
100	17,00 ± 1,85	37,12 ± 4,65	78,49 ± 6,31	83,35 ± 5,73	93,54 ± 6,42
200	25,70 ± 5,06	37,26 ± 5,65	79,64 ± 9,06	85,12 ± 7,60	100,50 ± 11,59
300	25,74 ± 4,25	33,90 ± 2,45	66,11 ± 8,40	47,29 ± 5,15	70,83 ± 6,70
400	20,53 ± 4,73	31,24 ± 12,39	46,86 ± 7,36	42,32 ± 6,03	59,23 ± 7,87

Tabelle 16. Lösekräfte der Wasser-Speichel-Öl-Kombinationsmessungen mit PK-4.

v_l [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	Rapsöl - pur	Rapsöl - Mix	V200 - pur	V200 - Mix
	\bar{L} [N]	\bar{L} [N]	\bar{L} [N]	\bar{L} [N]
2	/	/	1,62 ± 0,20	0,93 ± 0,36
4			2,61 ± 0,61	1,79 ± 0,62
8			3,26 ± 0,25	3,36 ± 0,35
16			3,86 ± 0,61	3,60 ± 0,25
30	3,48 ± 0,27	3,39 ± 0,47	3,51 ± 0,32	3,67 ± 0,34
50	3,60 ± 0,23	3,21 ± 0,69	3,47 ± 0,26	3,57 ± 0,26
200	3,73 ± 0,22	3,34 ± 0,41	3,79 ± 0,19	3,49 ± 0,29
unterschiedliche Tropfenzahlen von Wasser und V200 bei 200 mm·min⁻¹				
	\bar{L} [N]	\bar{L} [N]	\bar{L} [N]	\bar{L} [N]
	1:8 Tropfen Wasser:V200	ausgeschüttelt + 4 Tropfen Öl	1:4 Tropfen Wasser:V200	2:4 Tropfen Wasser:V200
	4:2 Tropfen Wasser:V200			
	3,49 ± 2,33	2,33 ± 0,62	2,27 ± 0,41	2,17 ± 0,42
				2,09 ± 0,17

Tabelle 17. Rechnerischer Anteil Innerer Reibung an der Gesamtlösekraft.
 Verwendete Maße: $d_u = 6,5 \text{ mm}$; $h = 8 \text{ mm}$; $Fügespalt = 10 \text{ }\mu\text{m}$. Die Zeilen „Messwert“ geben zum Vergleich die experimentell ermittelten Werte aus Tabelle 14 (S. 121) wieder.

(Lösekräfte [N] gerundet)	$v_l \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$	Rapsöl	V200	N350	N1000
		62,69 mPas	179 mPas	310 mPas	973 mPas
PK-1 (163,36 mm ²)	30	0,0005	0,0015	0,0025	0,0079
	50	0,0009	0,0024	0,0042	0,0132
	400	0,0068	0,0195	0,0338	0,1060
PK-4 (157,60 mm ²)	30	0,0005	0,0014	0,0024	0,0077
	Messwert		0,29 %	0,50 %	0,20 %
	50	0,0008	0,0024	0,0041	0,0128
	Messwert		0,21 %	0,24 %	0,31 %
	400	0,0066	0,0188	0,0326	0,01020
	Messwert		0,10 %	0,08 %	0,04 %
PK-5 (152,37 mm ²)	30	0,0005	0,0014	0,0024	0,0074
	Messwert		0,21 %	0,21 %	0,16 %
	50	0,0008	0,0023	0,0039	0,0124
	Messwert		0,26 %	0,13 %	0,14 %
	400	0,0064	0,0182	0,0315	0,0988
	Messwert		0,07 %	0,05 %	0,04 %
PK-6 (148,19 mm ²)	30	0,0005	0,0013	0,0023	0,0072
	Messwert		0,31 %	0,22 %	0,19 %
	50	0,0008	0,0022	0,0038	0,0120
	Messwert		0,14 %	0,16 %	0,12 %
	400	0,0062	0,0177	0,0306	0,0961
	Messwert		0,07 %	0,05 %	0,03 %

Tabelle 18. Ermittelte Adhäsionskräfte von Doppelkronen absolut und relativ.

Öl	v_l [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	F_{Ad} [$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$]	errechnete Adhäsions- kraft [N]	Anteil an Gesamtlösekraft ($d_u = 6,5 \text{ mm}$)			
				0°	2°	4°	6°
V200	30	88,62	0,003	0,08 %	0,08 %	0,10 %	0,11 %
	50	152,31	0,005	0,15 %	0,15 %	0,14 %	0,18 %
	200	622,30	0,021	/	0,55 %	0,52 %	0,63 %
N350	30	473,38	0,016	0,44 %	0,45 %	0,53 %	0,57 %
	50	587,43	0,019	0,56 %	0,59 %	0,61 %	0,65 %
	200	902,21	0,030	/	0,79 %	0,77 %	0,83 %
N1000	30	1485,0	0,049	1,41 %	1,53 %	1,44 %	1,40 %
	50	1853,8	0,062	1,75 %	1,92 %	1,63 %	1,84 %
	200	1928,4	0,064	/	1,52 %	1,66 %	1,73 %

Tabelle 19. Kronenformfaktoren der eigenen Prüfkörper.

Prüfkörper	h	d_u	β	K
PK-1	8,0 mm	6,5 mm	0°	$-1,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
PK-2	8,0 mm	4,5 mm	0°	$-1,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
PK-3	8,0 mm	9,0 mm	0°	$-2,16 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
PK-4	8,0 mm	6,5 mm	2°	$-1,362697579 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
PK-5	8,0 mm	6,5 mm	4°	$-1,172721232 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
PK-6	8,0 mm	6,5 mm	6°	$-9,900062473 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

Tabelle 20. Benötigte Abzugsgeschwindigkeiten zum Erreichen eines maximalen Unterdrucks.

Geometrie		Zwischen- flüssigkeit	Wasser	Rapsöl	V200	N350	η [mPas]
			0,69	62,69	179	310	
Fügespalt	β	95100	101300			$-\Delta p$ [Pa]	
10 μm	0°	53,0	0,62	0,22	0,13	benötigte Abzugsge- schwindig- keit [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	
	2°	60,7	0,71	0,25	0,14		
	4°	70,5	0,83	0,29	0,17		
	6°	83,5	0,98	0,34	0,20		
20 μm	0°	424,1	4,97	1,74	1,01		
	2°	485,5	5,69	1,99	1,15		
	4°	564,1	6,61	2,32	1,34		
	6°	668,2	7,83	2,74	1,58		
50 μm	0°	6626	77,7	27,2	15,7		
	2°	7586	88,9	31,1	18,0		
	4°	8815	103,3	36,2	20,9		
	6°	10441	122,4	42,9	24,8		
100 μm	0°	53010	621,5	217,7	125,7		
	2°	60685	711,5	249,2	143,9		
	4°	70516	826,7	289,5	167,2		
	6°	83530	979,3	343,0	198,0		

Tabelle 21. Rechnerischer Unterdruck und resultierende Lösekräfte für PK-4. Die Reibungskräfte (F_R) entstammen Tabelle 17 (S. 123) und die Adhäsionskräfte (L_{Ad}) Tabelle 18 (S. 124). Lagten keine Messdaten zum Ermitteln des Faktors F_{Ad} oder zum Vergleich vor, so wurden die Felder durchgestrichen.

v_l [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	Medium	$-\Delta p$	L_{hydr}	F_R	L_{Ad}	Summe	Prozent Messwert
		[Pa]	[N]				
1	Wasser	1567,1	0,04	0,000		0,04	
	Rapsöl	101300	2,81	0,000		2,81	
	V200	101300	2,81	0,000		2,81	
10	Wasser	15671	0,43	0,000		0,43	
	Rapsöl	101300	2,81	0,000		2,81	
	V200	101300	2,81	0,000		2,81	
30	Wasser	47013	1,30	0,000		1,30	
	Rapsöl	101300	2,81	0,000		2,81	80,7 %
	V200	101300	2,81	0,001	0,003	2,81	80,1 %
50	Wasser	78355	2,17	0,000		2,17	
	Rapsöl	101300	2,81	0,001		2,81	78,1 %
	V200	101300	2,81	0,002	0,005	2,81	81,0 %
70	Wasser	95100	2,64	0,000		2,64	
	Rapsöl	101300	2,81	0,001		2,81	
	V200	101300	2,81	0,003		2,81	
100	Wasser	95100	2,64	0,000		2,64	
	Rapsöl	101300	2,81	0,002		2,81	
	V200	101300	2,81	0,004		2,81	
200	Wasser	95100	2,64	0,000		2,64	
	Rapsöl	101300	2,81	0,003		2,81	75,3 %
	V200	101300	2,81	0,009	0,021	2,82	74,4 %

8.2 Signifikanz-Tabellen

Folgende Kennzeichnungen werden in den Signifikanz-Tabellen verwendet:

Tabelle 22. In den Signifikanz-Tabellen verwendete Kennzeichnungen.

Kennzeichnung		Bedeutung	
-		Nicht signifikant verschieden (t-Test; $p > 5\%$)	
graue Schrift		nicht sehr aussagekräftig, da unsichere Messgeschwindigkeit	
/		Für diese Kombination ist aufgrund nicht erhobenen Datenbestandes kein Test möglich.	
Steigerung	Minderung	Signifikanzniveau	Effektstärke
·	↓	signifikant verschieden (t-Test; $p \leq 5\%$)	kein nennenswerter Effekt
·	↓		geringe Effektstärke (um $\geq 20\%$)
•			mäßige Effektstärke (um $\geq 40\%$)
●			deutliche Effektstärke (um $\geq 60\%$)
+	↓	hochsignifikant verschieden (t-Test; $p \leq 1\%$)	kein nennenswerter Effekt
+	↓		geringe Effektstärke (um $\geq 20\%$)
+	↓		mäßige Effektstärke (um $\geq 40\%$)
+	↓		deutliche Effektstärke (um $\geq 60\%$)
+	↓		starke Effektstärke (um $\geq 100\%$)

Dabei findet neben der Signifikanz eines Werteunterschiedes zusätzlich die Effektstärke dieser Veränderung Beachtung. Dies ist sinnvoll, da bei geringen Streuungen oder ausreichender Stichprobenzahl teilweise signifikante Unterschiede nachgewiesen werden können, die jedoch so klein sind, dass sie keine praktische Relevanz besitzen.

8.2.1 Signifikanzen zwischen Abzugsgeschwindigkeiten

Die Tabelle 23 zeigt die Sicherheiten der Unterschiede zwischen verschiedenen Abzugsgeschwindigkeiten. Dabei bezieht sich der obere Teil auf die Untersuchung des Geschwindigkeitseinflusses (s. Abschnitt 4.3, S. 57) und der untere Teil auf die Abzugsmessungen unter Variation mehrerer Parameter (s. Abschnitt 4.6, S. 61). Dabei werden die in Tabelle 22 (S. 127) aufgeführten Symbole zur Kennzeichnung verwendet.

Tabelle 23. Signifikanzen zwischen verschiedenen Abzugsgeschwindigkeiten.

[mm·min ⁻¹]		2	4	8	16	30							
PK-4 mit V200	1	+	+	+	+	+							
	2		+	+	+	+							
	4			.	+	+							
	8				.	-							
	16					-							
[$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]		PK-1			PK-2			PK-3			PK-4		
		V200	N350	N1000	V200	N350	N1000	V200	N350	N1000	V200	N350	N1000
30	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	200	/			/			/			+	.	+
	400	-	-	-	-	-	↓	-	-	-	↓	↓	-
50	200	/			/			/			-	.	+
	400	-	-	-	-	●	-	-	-	↓	↓	↓	-

8.2.2 Signifikanzen zwischen Zwischenflüssigkeiten

Die folgende Tabelle zeigt die Unterschiede der Doppelkronen-Haftungen bei Verwendung verschiedener Zwischenmedien. Dabei werden die in Tabelle 22 (S. 127) aufgeführten Symbole zu Grunde gelegt.

Tabelle 24. Signifikanzen zwischen den verschiedenen Zwischenmedien.
 „Mix-Raps“ und „Mix-V200“ bezeichnen Rapsöl bzw. V200 in Kombination mit Wasserresten in den Außenkronen und Speichel auf den Primärteilen.

		mm min		PK-1		PK-2		PK-3		PK-4			PK-5			PK-6			
		30	50	30	50	30	50	30	50	200	30	50	200	30	50	200			
Speichel		Rapsöl	+	+						+	+	+	+	+	+	+	+		
		Mix-Raps	/		/		/		/		+	+	+	/		/		/	
		V200									+	+	+						
		Mix-V200	/		/		/		/		+	+	+	/		/		/	
		N350									+	+	+						
		N1000	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Rapsöl		Mix-Raps	/		/		/		/		-	-	↓	/		/		/	
		V200									+	-	-						
		Mix-V200	/		/		/		/		-	-	-	/		/		/	
		N350									+	-	-						
		N1000	+	-	↓	↓	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+			
Mix-Raps	Mix-V200	/		/		/		/		-	-	-	/		/		/		
V200										Mix-V200	/								/
		N350	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-	-	-	-	-	
		N1000	-	-	+	-	-	-	↓	-	+	-	-	-	+	+	+		
N350	N1000	-	-	+	+	-	-	↓	↓	+	-	-	-	+	+	-			

8.2.3 Signifikanzen geometrischer Parameter

Tabelle 25 zeigt die Signifikanzen zwischen den verschiedenen geometrischen Kronenformen bei verschiedenen Zwischenölen und Abzugsgeschwindigkeiten. Dabei kommen die in Tabelle 22 (S. 127) aufgeführten Symbole in Verwendung.

Tabelle 25. Signifikanzen geometrischer Parameter.

von Prüfkörper zu Prüfkörper		Rapsöl			V200			N350			N1000				
		30	50	400	30	50	400	30	50	400	30	50	400		
1	2				↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
	3				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	4	+	-	↓	-	-	↓	-	↓	↓	↓	↓	↓		
	5	+	-	↓	↓	-	+	↓	-	↓	-	-	↓		
	6	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	-	↓	↓	
2	3				+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	4				+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	
	5				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	6				+	+	↓	+	+	↓	+	+	↓	+	+
3	4				↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
	5				↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	6				↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
		30	50	200	30	50	200	30	50	200	30	50	200		
4	5	-	-	↓	↓	-	-	↓	-	-	-	-	-		
	6	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	-	+	-	-		
5	6	↓	↓	↓	-	↓	↓	-	-	-	-	-	-		

8.2.4 Signifikanzen zwischen Wasser-Öl-Mischungsverhältnissen

In Tabelle 26 sind die Signifikanzen zwischen den Abzugsmessungen mit verschiedenen Wasser-Öl-Mischungsverhältnissen vor dem Fügen dargestellt, wobei die in Tabelle 22 (S. 127) aufgeführten Symbole zur Kennzeichnung dienen.

Tabelle 26. Signifikanzen zwischen Wasser-Öl-Mischungsverhältnissen.

Mischung zu Mischung	ausgeschüttelt : 4 Tropfen	1 : 4 Tropfen	2 : 4 Tropfen	4 : 2 Tropfen
1 : 8 Tropfen	↓	↓	↓	↓
ausgeschüttelt : 4 Tropfen		-	-	-
1 : 4 Tropfen			-	-
2 : 4 Tropfen				-

8.2.5 Signifikanzen der Mantelprüfkörper-Tests

Die folgende Tabelle bezieht sich auf die Abzugsmessungen mit den Mantelprüfkörpern. Zu Kennzeichnung werden dieselben Symbole (Tabelle 22, S. 127) herangezogen.

Tabelle 27. Signifikanzen der Mantelprüfkörper-Tests.

Die Spalten „mit“ kennzeichnen die Tests mit Anpassung der Daten. Dabei wurden die Messwerte in dem Maße erhöht, wie die Flächeninhalte kleiner als die von PK-4 sind.

Winkel-Kombination		V200		N350		N1000	
		ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
2°	4°	↓	↓	↓	↓	-	-
	6°	↓	↓	↓	↓	↓	↓
4°	6°	-	-	↓	-	↓	↓
Öl-Kombination		2°		4°		6°	
V200	N350	+		+		-	
	N1000	+		+		+	
N350	N1000	+		+		+	

8.2.6 Signifikanzen zwischen Adhäsionsmessungen

Tabelle 28 zeigt die Signifikanzen zwischen den Adhäsionsmessungen. Im oberen Teil werden die verschiedenen Öle und im unteren Teil die verschiedenen Abzugsgeschwindigkeiten gegeneinander bewertet. Dabei werden die in Tabelle 22 (S. 127) aufgeführten Symbole gebraucht.

Tabelle 28. Signifikanzen zwischen den Adhäsionsmessungen.

Zwischenmedien		$\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$		30	50	100	200	
		30	50	100	200			
V200	N350	+	+	+	+			
	N1000	+	+	+	+			
	M1500	+	+	+	+			
	M3000	+	+	+	+			
N350	N1000	+	+	+	+			
	M1500	+	+	+	+			
	M3000	+	+	+	+			
N1000	M1500	+	.	.	.		-	
	M3000	+	+	+	+		+	
M1500	M3000	+	+	+	+		+	
Zwischenmedien		$\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$		V200	N350	N1000	M1500	M3000
30	50	+	+	+	.	.	.	-
	100	+	+	+	.	.	.	↓
	200	+	+	+	.	.	.	-
50	100	+	+	-
	200	+	+	-
100	200	+	-

8.3 Mathematische Ableitungen

8.3.1 Geometrie der Prüfkörper

Aus der nebenstehenden Abbildung ergeben sich folgende mathematischen

Zusammenhänge:

$$[37] \quad A_D = \frac{\pi}{4} d_o^2$$

$$[38] \quad A_M = \frac{\pi}{2} s(d_u + d_o)$$

$$[39] \quad h = \frac{d_u - d_o}{2 \tan \beta}$$

$$[40] \quad d_u = 2h \tan \beta + d_o$$

$$[41] \quad s = \frac{h}{\cos \beta}$$

$$[42] \quad \bar{u} = \pi \frac{d_u + d_o}{2} = \pi \frac{d_u + d_u - 2h \tan \beta}{2} = \pi(d_u - h \tan \beta)$$

Zur Berechnung in Tabelle 29 diene folgende Formel mit $h = 7 \text{ mm}$:

$$[43] \quad s = \sqrt{h^2 + \left(\frac{d_u - d_o}{2}\right)^2} + 1 \text{ mm (Hohlkehle)}$$

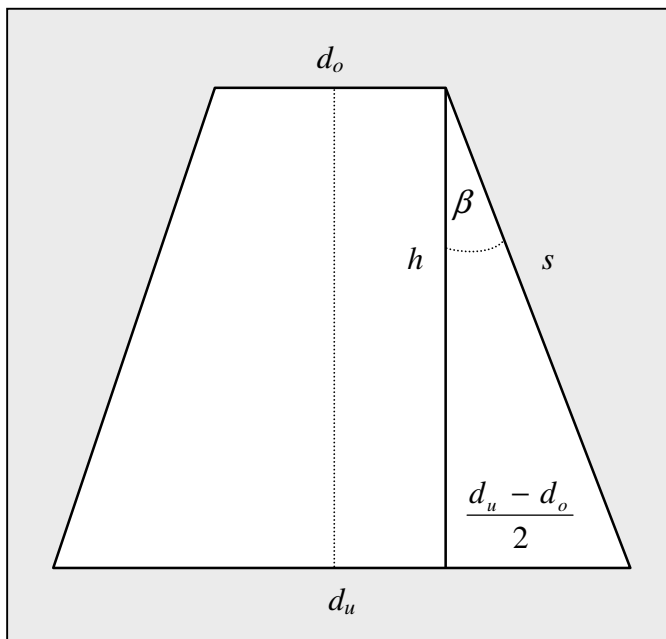


Abbildung 44. Querschnitt einer Konuskrone.

Tabelle 29. Errechnete geometrische Größen der Prüfkörper.

	d_o [mm]	d_u [mm]	s [mm]	A_D [mm ²]	Anteil PK-4	A_M [mm ²]	Anteil PK-4
PK 1 (0°)	6,50	6,50	8,00	33,18	116,95 %	163,36	103,65 %
PK 2 (0°)	4,50	4,50	8,00	15,90	56,05 %	113,10	85,48 %
PK 3 (0°)	9,00	9,00	8,00	63,62	224,25 %	226,19	143,35 %
PK 4 (2°)	6,01	6,50	8,02	28,37	Bezugs- punkt	157,60	Bezugs- punkt
PK 5 (4°)	5,52	6,50	8,07	23,93	84,35 %	152,37	96,68 %
PK 6 (6°)	5,09	6,50	8,14	20,35	71,73 %	148,19	94,03 %

8.3.2 Kraft zum Überwinden der Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung ist durch das Verhältnis von benötigter Arbeit zu Oberflächenvergrößerung definiert:

$$[44] \quad \sigma = \frac{\Delta W}{\Delta A}$$

Die Arbeit ergibt sich aus Kraft (L_σ) und Längenänderung (Δl) beim Abzug:

$$[45] \quad \Delta W = L_\sigma \cdot \Delta l$$

Die Flächenvergrößerung ist das Produkt aus Umfang und Längenänderung:

$$[46] \quad \Delta A = u \cdot \Delta l$$

Für die Kraft folgt daraus:

$$[47] \quad L_\sigma = \sigma \cdot u$$

8.3.3 Einfluss der Präparationsform auf die Adhäsion

Die Gesamtheadhäsionskraft setzt sich aus den Adhäsionskräften, die an den Teilflächen wirken, zusammen, wobei aufgrund der Abzugsrichtung die Kräfte an der Mantelfläche mit Faktor $\sin \beta$ wirken:

$$[48] \quad L_A = F_{Ad} \cdot (A_D + A_M \cdot \sin \beta)$$

Der Faktor F_{Ad} bezeichnet dabei die systemspezifische Haftungskraft, die eine 1 m^2 große kreisrunde Fläche erbringt.

Setzt man [37] und [38] (S. 133) in [48] ein, so folgt:

$$[49] \quad L_A = F_{Ad} \cdot \left(\frac{\pi}{4} d_o^2 + \frac{\pi}{2} s(d_u + d_o) \sin \beta \right)$$

Da:

$$[50] \quad \sin \beta = \frac{d_u - d_o}{2s},$$

so folgt aus [49] und [50]:

$$[51] \quad L_A = F_{Ad} \left(\frac{\pi}{4} d_o^2 + \frac{\pi}{2} (d_u + d_o) \cdot s \frac{d_u - d_o}{2s} \right) = F_{Ad} \left(\frac{\pi}{4} d_o^2 + \frac{\pi}{4} (d_u^2 - d_o^2) \right)$$

oder einfacher ausgedrückt:

$$[52] \quad L_A = \frac{\pi}{4} d_u^2 \cdot F_{Ad}$$

8.3.4 Hydraulischer Effekt beim Doppelkronenabzug

Nach Lehrbuchangaben der technischen Strömungslehre lautet die Grundgleichung der Gleitlagerströmung (*Böswirth 1995*):

$$[28] \quad w(x, y) = \frac{p'(x)}{2\eta} [y^2 - h_p(x)y] + \frac{w_0}{h_p(x)} [h_p(x) - y]$$

Dabei bezeichnet $w(x, y)$ die Strömungsgeschwindigkeit an der Position (x, y) , w_0 die Verschiebegeschwindigkeit der einen Platte und h_p die Spaltweite (Plattenabstand). Durch Integration erhält man den Volumenstrom pro Meter Spaltbreite (\dot{V}^*). Für den Parallelspalt entfällt die Koordinate y und es ergibt sich (*Böswirth 1995*):

$$[29] \quad \dot{V}^* = \int_0^{h_p} w(x, y) dy = \frac{w_0 h_p(x)}{2} - \frac{p'(x) h_p^3(x)}{12\eta} = \text{const}$$

Ein Unterdruck kann nur aufrechterhalten werden, wenn die Volumenvergrößerung pro Zeit (Produkt aus Abzugsgeschwindigkeit und Deckelflächeninhalt) dem nachströmendem Flüssigkeitsvolumen entspricht:

$$[31] \quad \frac{dV_{okkl}}{dt} = \frac{dV_{nach}}{dt} = v_l \cdot A_D = \dot{V}$$

Da \dot{V}^* den Volumenstrom pro Spaltbreite (also Plattenbreite, nicht Spaltweite) angibt, muss dieser mit dem mittleren Umfang (\bar{u} , s. [42]) der Kronen multipliziert werden:

$$[53] \quad \dot{V} = \dot{V}^* \cdot \bar{u}$$

Da

$$[54] \quad p' = \frac{\Delta p}{l} \quad (\text{Böswirth 1995}),$$

w_0 der Abzugsgeschwindigkeit (v_l) entspricht und der Plattenabstand gleich bleibt, also $h_p(x)$ durch die Fügespaltweite (d_s) und l durch die Kronenseitenlänge (s) ersetzt werden kann, so folgt aus [29] und [31]:

$$[55] \quad \frac{v_l \cdot A_D}{\bar{u}} = \frac{v_l \cdot d_s}{2} - \frac{\Delta p \cdot d_s^3}{s \cdot 12\eta}$$

oder, umgestellt nach Δp :

$$[56] \quad \Delta p = \left(\frac{v_l \cdot d_s}{2} - \frac{v_l \cdot A_D}{\bar{u}} \right) \cdot \frac{12\eta s}{d_s^3},$$

beziehungsweise

$$[57] \quad \Delta p = \frac{6\eta v_l s}{d_s^2} - \frac{12\eta v_l s \cdot A_D}{\bar{u} \cdot d_s^3} = \frac{6\eta v_l s \cdot \bar{u} d_s - 12\eta v_l s \cdot A_D}{\bar{u} \cdot d_s^3}$$

oder weiter vereinfacht:

$$[58] \quad \Delta p = \eta v_l \cdot \left[6s \frac{\bar{u} d_s - 2A_D}{\bar{u} d_s^3} \right]_1$$

Nachfolgend wird die eckige Klammer in einer Nebenrechnung separat betrachtet:

Ersetzt man s durch [41], so erhält man nach Umstellung und Kürzen:

$$[59] \quad \left[\right]_1 = 6s \frac{\bar{u} d_s - 2A_D}{d_s^3 \cdot \bar{u}} = \frac{6h}{d_s^3 \cos \beta} \cdot \frac{\bar{u} d_s - 2A_D}{\bar{u}}$$

$$[60] \quad \left[\right]_1 = \frac{6h}{d_s^3 \cos \beta} \cdot \left(d_s - \left[\frac{2A_D}{\bar{u}} \right]_2 \right)$$

Aus [37] und [40] folgt in einer zweiten Nebenrechnung:

$$[61] \quad \left[\right]_2 = \frac{2A_D}{\bar{u}} = \frac{\frac{\pi}{2} d_o^2}{\bar{u}} = \frac{\frac{\pi}{2} \left(\frac{2}{\pi} \bar{u} - d_u \right)^2}{\bar{u}}$$

$$[62] \quad \left[\right]_2 = \frac{\frac{2}{\pi} \bar{u}^2 - 2\bar{u} d_u + \frac{2}{\pi} d_u^2}{\bar{u}} = \frac{2}{\pi} \bar{u} - 2d_u + \frac{\pi d_u^2}{2\bar{u}}$$

Ersetzt man \bar{u} durch [42], so folgt:

$$[63] \quad \left[\right]_2 = 2d_u - 2h \tan \beta - 2d_u + \frac{d_u^2}{2d_u - 2h \tan \beta}$$

$$[64] \quad \left[\right]_2 = -2h \tan \beta + \frac{d_u^2}{2d_u - 2h \tan \beta}$$

$$[65] \quad \left[\right]_1 = \frac{6h \left(d_s + 2h \tan \beta - \frac{d_u^2}{2d_u - 2h \tan \beta} \right)}{d_s^3 \cos \beta}$$

Zur Vereinfachung kann man das d_s in der Klammer weglassen, da die Fügespaltweite mit $10 \mu\text{m}$ so klein ist, dass sie das Ergebnis lediglich um ca. 0,3 % beeinflusst:

$$[66] \quad \left[\right]_1 \approx \frac{12h^2 \tan \beta - \frac{3hd_u^2}{d_u - h \tan \beta}}{d_s^3 \cos \beta} = \frac{K}{d_s^3}$$

Nebenrechnung (1. Ebene)

Nebenrechnung (2. Ebene)

Fasst man nun alle Variablen, die die Kronenform beschreiben, zu einem „Kronenformfaktor“ (K) zusammen, so erhält man die einfache Beziehung:

$$[67] \quad \Delta p \approx \frac{\eta \cdot v_l \cdot K}{d_s^3}$$

Umgestellt nach Viskosität oder Abzugsgeschwindigkeit ergeben sich:

$$[68] \quad \eta \approx \frac{\Delta p \cdot d_s^3}{v_l \cdot K}$$

beziehungsweise:

$$[69] \quad v_l \approx \frac{\Delta p \cdot d_s^3}{\eta \cdot K}$$

Der Kronenfaktor wird dabei durch folgende Beziehung beschrieben:

$$[70] \quad K = \frac{12h^2 \tan \beta - \frac{3hd_u^2}{d_u - h \tan \beta}}{\cos \beta}$$

Für den Spezialfall $\beta = 0^\circ$ (Zylinderteleskope) gilt dann:

$$[71] \quad K = -3hd_u$$

Legende:

- Δp Druckveränderung
- η Viskosität
- v_l Abzugsgeschwindigkeit
- K Kronenformfaktor
- d_s Fügspaltweite

8.4 Regressionen

8.4.1 Adhäsionstest

Stellt man die Ergebnisse aus Tabelle 15 (S. 122) grafisch in Abhängigkeit zur Abzugsgeschwindigkeit dar und zeichnet logarithmische Regressionskurven ein, so erhält man folgendes Bild:

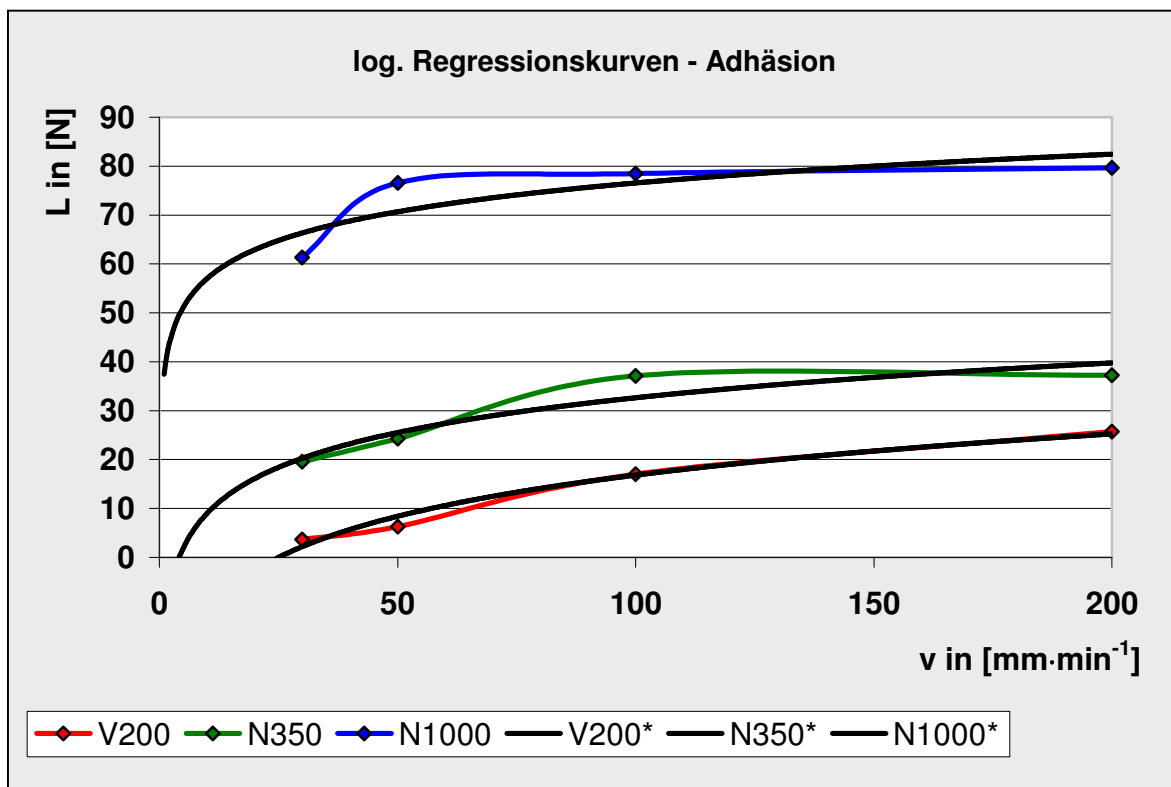


Abbildung 45. Regression der Hubgeschwindigkeit von Adhäsionskräften. Die mit „*“ gekennzeichneten Reihen sind die ermittelten logarithmischen Regressionskurven zum entsprechenden Öl.

Tabelle 30. Hubgeschwindigkeiten für errechnete Lösekräfte anhand der Regressionskurven.

Öl	Funktion	v für errechnetes L ($L = 3,0744 \cdot 10^{-3}$ N)
V200	$L = 12,155\ln(v) - 39,156$	25,07 mm·min ⁻¹
N350	$L = 10,277\ln(v) - 14,686$	4,18 mm·min ⁻¹
N1000	$L = 8,4935\ln(v) + 37,448$	0,012 mm·min ⁻¹

8.5 Lebenslauf

Persönliche Angaben	
Name, Vorname	Rößler, Jan
Familienstand	verheiratet
Staatsangehörigkeit	deutsch
Geburtsdatum	26. März 1978
Geburtsort	Jena
Eltern	Iris Rößler, geb. PISOKE (Zahnärztin)
	Michael Rößler (Lehrer)
Ausbildung	
September 1984 - August 1992	Schulbildung an der „Polytechnischen Oberschule I“ in Thalheim
September 1992 - Juni 1996	Schulbildung am „Drei - Tannen - Gymnasium“ in Thalheim
21. Juni 1996	Abitur
August 1996 - August 1997	Pflegetätigkeit als Zivildienstleistender im Kreiskrankenhaus Stollberg
September 1997 - Dezember 2003	Studium der Zahnmedizin an der FSU Jena
12. Dezember 2003	Zahnärztliche Prüfung

8.6 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, all denen, die mir bei der Entstehung dieser Arbeit zur Seite gestanden haben, zu danken:

Herrn Professor Dr. Welker und Herrn Dr. Göbel danke ich herzlichst für die Überlassung dieses hochinteressanten Themas sowie die ausgezeichnete, unkomplizierte und zeitnahe Betreuung sowie die Unterstützung bei der Planung der experimentellen Untersuchungen. So manche Diskussion über mögliche physikalische Vorgänge bereicherten das Arbeiten am Thema. Ich danke der Feinmechanischen Werkstatt der Technischen Betriebseinheit der Physikalisch-Astronomischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena für die exakte Anfertigung der Primärteile und der Firma Wieland (Pforzheim) für die zur Verfügung gestellten Goldbäder sowie für die geplante Koordination der klinischen Erprobung der hier gegebenen Empfehlungen. Dabei sollen die Fragebögen (Abbildung 6 und Abbildung 7, S. 49-50) zusammen mit drei Haftölen an Zahnärzte, die regelmäßig AGC[®]-Doppelkronen anfertigen, verteilt werden. An dieser Stelle sei Herrn Dr. Krampe Dank gesagt. Ebenfalls danke ich Herrn Dr. Rautschek von der Firma Wacker-Chemie für die schnelle Auskunft über die verwendeten Silikonöle.

Herzlichst danke ich meiner Frau, Christine Rößler, für ihr Verständnis in der vergangenen Zeit. Sie hat mir in vielerlei Hinsicht „den Rücken frei gehalten“ und diese Arbeit Korrektur gelesen. Weiterhin danke ich Ina Koch für das Durchsehen des Manuskripts und meinen Eltern Dr. Iris und Michael Rößler für das auszugsweise Lesen meiner Arbeit.

Weiterhin möchte ich es als Christ nicht versäumen, meinem Gott zu danken. Ich habe mich in der ganzen Zeit getragen und geleitet gewusst und bin dankbar dafür, dass er mir die Ideen, den Verstand und die Mittel gegeben hat, diese Arbeit so umfassend anfertigen zu können.

8.7 Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben:

- Univ.-Professor Dr. med. dent. habil. D. Welker und
- Dr. rer. nat. R. Göbel,

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und
dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.