

Bemerkungen zur Physik der Selbstreinigung des Interdentalraumes

Meiners, Hermann

First published in:

Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift, 31. Jg., S. 341 - 344, München 1976, ISSN 0012-1029

Münstersches Informations- und Archivsystem multimedialer Inhalte (MIAMI)

URN: urn:nbn:de:hbz:6-39339615118

Bemerkungen zur Physik der Selbstreinigung des Interdentalraumes

Von H. Meiners, Münster*

In den Veröffentlichungen von Lukas und Schulte zur Hydrodynamik des Interdentalraumes wird dem am Strömungsengpaß möglichen Unterdruck durch Abfall des statischen Druckes in der strömenden Flüssigkeit (Bernoulli-Gleichung) ein reinigender Effekt zugeschrieben. Es wird gezeigt, daß dieser Effekt in der geschilderten Weise (Beanspruchung von Haftkräften zwischen Plaque und Zahnoberfläche) nicht zutrifft.

In der Diskussion des Vortrages „Basisgestaltung und Selbstreinigung“ [1] während der Kölner Tagung der Dtsch. Gesellschaft für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde (März 1975) wurde auch mit Schlußfolgerungen der Publikationen von Lukas und Schulte [2, 3, 4] zur Hydrodynamik des Interdentalraumes argumentiert, die nicht unwidersprochen bleiben können.

Die Autoren wenden die *Bernoulli*-Gleichung

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 \quad (1)$$

auf die Strömung im Interdentalraum an. Diese Gleichung beschreibt die Abnahme des statischen Druckes einer Strömung von p_1 auf p_2 , wenn sich auf Grund einer Querschnittsverjüngung von q_1 auf q_2 die mittlere Strömungsgeschwindigkeit umgekehrt proportional zum Querschnitt (vgl. Gleichung 3) von v_1 auf v_2 erhöht (ρ = Dichte der als inkompressibel vorausgesetzten Flüssigkeit).

Gegenüber den aus diesen Untersuchungen gezogenen Schlußfolgerungen im Zusammenhang mit der Selbstreinigung ergeben sich Bedenken und Einwände physikalischer Art, die auch nach einer ausführlichen Korrespondenz mit den Autoren nicht ganz ausgeräumt werden können.

Es besteht Anlaß zu folgenden Bemerkungen:

1. Druck und Druckdifferenz

Um Mißverständnissen vorzubeugen, sollte immer deutlich unterschieden werden zwischen einem absoluten Druck p_i und einer Druckdifferenz Δp_i gegenüber einem Vergleichsdruck $p_v > 0$; es gilt

$$\Delta p_i = p_i - p_v (= p_{iv}) \quad (2)$$

wobei mit Hilfe des Indexes i verschiedene Drucke bzw. Druckdifferenzen bezeichnet werden können. Eine äquivalente Schreibweise für Δp_i ist p_{iv} . Während ein absoluter Druck grundsätzlich positiv ist, können Druckdifferenzen sowohl positive als auch negative Werte annehmen, je nachdem p_i größer (Überdruck) oder kleiner (Unterdruck) als der Vergleichsdruck p_v ist. Lediglich bei Festkörpern wird zuweilen aus formalistischen Gründen eine Zugspannung als „negativer Druck“ bezeichnet.

Das in den drei Arbeiten [2, 3, 4] aufgeführte Rechenbeispiel zur *Bernoulli*-Gleichung ist zumindest mißverständlich. Aus dem Beispiel ergibt sich für p_2 der Wert $-0,5 \text{ N/m}^2$. Der negative Wert ist mathematisch richtig, doch ohne physikalische Realität, wenn man die Drucke p_1 und p_2 als Absolutwerte auffaßt. Das Minuszeichen resultiert, weil Dichte, Druck, Querschnitt und Strömungsgeschwindigkeit willkürlich gewählt wurden. Das ist jedoch nicht zulässig, da die drei letztgenannten Größen nach dem *Hagen-Poiseuille*-schen Gesetz (Strömungswiderstand) in einer ganz bestimmten Relation zueinander stehen bei zusätzlicher Abhängigkeit von der Viskosität. (Wird dagegen im Beispiel der Querschnitt anstatt auf 0,5 z. B. nur auf 0,75 m^2 reduziert, so ergibt sich aus der Gl. (1) für p_2 ein realistischer Wert von $+0,61 \text{ N/m}^2$.) Der maximale Zuwachs an kinetischer Energie pro Volumen ($\rho/2 \cdot v^2$) kann nicht größer sein als die vorhandene Druckenergie pro Volumen (p); daraus folgt: $p_2 \geq 0$. Das Beispiel hat nur dann einen physikalischen Sinn, wenn p_1 und p_2 Druckdifferenzen gegenüber einem Vergleichsdruck bedeuten. Das geht jedoch aus der Schreibweise der Gleichungen nicht

* Poliklinik und Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten der Westfälischen Wilhelms-Universität (44 Münster, Robert-Koch-Straße 27a)

hervor. Daß es sich im Beispiel dennoch um Druckdifferenzen (Δp_i) handeln soll und als Vergleichsdruck der Atmosphärendruck gemeint ist, wird im Text der zweiten Publikation [3] allenfalls angedeutet.

2. Strömung von Flüssigkeiten

Die *Bernoulli*-Gleichung beschreibt den Druckabfall im verjüngten Strömungsquerschnitt für eine ideale Flüssigkeit. Bei der Strömung realer Flüssigkeiten ist ein Strömungswiderstand zu überwinden, der ein Druckgefälle zwischen Eintritts- und Austrittsseite des Strömungskanals erfordert.

Dieses Druckgefälle, das bei konstantem Strömungsquerschnitt linear mit dem Strömungsweg abnimmt,

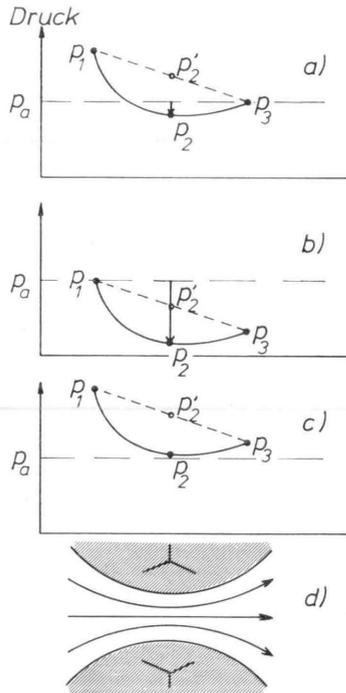


Abb. 1. Druckverlauf (schematisch) in einem düsenförmigen, durchströmten Engpaß (d).

- a) Überdruck (relativ zum Atmosphärendruck p_a) an der Eintrittsseite,
- b) Unterdruck (relativ zu p_a) an der Austrittsseite,
- c) Überdruck (relativ zu p_a) unterschiedlicher Größe sowohl an der Eintritts- als auch an der Austrittsseite.

Die gestrichelten Linien skizzieren den Druckabfall in einem Strömungskanal mit konstantem Querschnitt. Unterdruck (relativ zu p_a) an der Engstelle entsteht nur, wenn p_2 kleiner als p_a wird (Pfeile).

kann auf sehr unterschiedliche Weise erzeugt werden, z. B. nur durch Überdruck (etwa gegenüber Atmosphärendruck p_a) auf der Eintrittsseite (Abb. 1a) oder ausschließlich durch Unterdruck (relativ zu p_a) auf der Austrittsseite (Abb. 1b). Aber auch Kombinationen von Über- und Unterdruck an Ein- und Austrittsseite sind denkbar (z. B. Abb. 1c). Dabei ist der im Vergleich zur Strömungssituation mit konstantem Querschnitt im Engpaß entstehende Druckabfall $p_2 - p'_2$ unabhängig von der relativen Lage des Druckgefälles zum Vergleichsdruck. Es sind somit auch Strömungssituationen möglich, bei denen der statische Druck p_2 im Engpaß nicht unter den Vergleichsdruck sinkt (Abb. 1c): in einem durchströmten Engpaß entsteht nicht generell ein Unterdruck gegenüber der strömungsfreien Situation ($v = 0$). Das ergibt sich auch aus dem von *Lukas* und *Schulte* [3] angeführten Meßbeispiel (Abb. 5 u. 6 in Dtsch. zahnärztl. Z. 28, Seite 136), in welchem der an der Engstelle gemessene Druck p_2 als ein Überdruck von 0,5 mbar gegenüber dem offenbar als Bezugswert dienenden Druck während der strömungsfreien Normalsituation ($v = 0$) erscheint.

Auf keinen Fall aber darf der Druckabfall $p_2 - p'_2$ als Unterdruck bezeichnet werden, wenn einmal über den Vergleichsdruck verfügt ist. Vorzeichen und Ausmaß der Druckabweichung im durchströmten Engpaß gegenüber dem Druck bei strömungsfreier Situation (Vergleichsdruck) sind abhängig von der relativen Lage des die Strömung verursachenden Druckgefälles zu diesem Vergleichsdruck (Abb. 1). Zwischen den Begriffen Druckabfall und Unterdruck wird in den Arbeiten [2, 3, 4] nicht konsequent unterschieden.

3. Druckabfall und Zugspannung

Der Druckabfall im Engpaß, selbst wenn er zu einem Unterdruck gegenüber der nichtströmenden Situation führt, erzeugt keine Zugspannung an den Grenzflächen, sondern allenfalls eine Druckminderung. Der verbleibende Druck p_2 (nicht zu verwechseln mit einer möglicherweise negativen Druckdifferenz Δp) ist nach wie vor positiv. Haftkräfte zwischen einer den Strömungskanal bedeckenden Schicht (Plaque) und der Unterlage (Zahn) werden somit durch einen Unterdruck nicht beansprucht. Die Erwartung, daß diese Schichten abgelöst werden, „sobald der Unterdruck in der Flüssigkeit die Haftkraft übersteigt“ [2] ist falsch. Das sei anhand der Abb. 2 näher erläutert: Bei Verringerung oder Entfernung des Gewichtes (= Druck) werden

eventuelle Haftkräfte zwischen Auflage und Unterlage nicht beeinträchtigt; für den Fall, daß die bewegliche Unterlage an ihrer Unterseite einem die Wirkung des Gewichtes kompensierenden Druck p ausgesetzt ist, wird bei einer Druckminderung an der Oberseite der Auflage das gesamte System dem Druckgefälle folgen als Resultat eines Schubes von unten, nicht eines die Haftkräfte beanspruchenden Zuges von oben. Die Folge eines Unterdruckes in einem Interdentalraum ist somit ein Schub auf die begrenzenden Zähne in Richtung des Interdentalraumes (Abb. 3). Unterdruck ist kein negativer Druck. Das erwähnte Rechenbeispiel ist deshalb besonders unglücklich gewählt, weil der negative Wert für die nicht einwandfrei als Druckdifferenz gekennzeichnete Größe p_2 die Existenz einer Zugspannung suggeriert (vgl. Pkt. 1). Ein auf die Schicht beschränkter Sog senkrecht zur Strömungsrichtung stellt sich nur ein, wenn die Schicht unterspülbar ist und die Strömungs-

situation zwischen Schicht (Plaque) und Unterlage (Zahnoberfläche) einen höheren statischen Druck erzeugt als die Strömung über der Schicht. In einem solchen Fall würden natürlich auch lokal begrenzte Haftstellen der Schicht beansprucht. Bei Zahnbelägen ist im allgemeinen jedoch von einer durchgehenden Flächenhaftung auszugehen.

4. Reinigungseffekt in engen Interdentalräumen

In den Arbeiten [2, 3, 4] wird als reinigender Effekt einer Strömung insbesondere die unterstellte Zug-Wirkung des Unterdruckes angeführt. Konsequenterweise wird die Bedeutung stark verengter düsenförmiger Strömungskanäle zur Erreichung eines möglichst großen Druckabfalles an den Engstellen betont.

Ein weiteres Argument für einen engen Interdentalraum leiten die Autoren aus der Behauptung ab, daß es „mit der Vergrößerung des Querschnittes zu einer erheblichen Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit und damit zu einer vergrößerten Ablagerungswahrscheinlichkeit“ [2] kommt.

Die Erwartung einer Geschwindigkeitsabnahme ist nur bedingt richtig und bedarf einer Erläuterung: Unter der Voraussetzung, daß das die Strömung verursachende Druckgefälle p_1-p_3 (Abb. 1) konstant bleibt, steigt an der Engstelle – und damit auch in jedem anderen Strömungsquerschnitt – die Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmender Erweiterung des Engpasses an. Betrachtet man den Strömungswiderstand des Engpasses in erster Näherung als ausschlaggebend für die gesamte Strömungssituation (selbstverständlich haben auch Zu- und Ablauf Widerstände, die in eine exakte Berechnung mit einzubeziehen sind), so nimmt nach der *Hagen-Poiseuilleschen* Gleichung der Volumenstrom V/t , also das den Strömungskanal pro Zeiteinheit passierende Flüssigkeitsvolumen zu mit der 4. Potenz des Radius r bei kreisförmigem Querschnitt. Aus der Kontinuitätsgleichung $V/t = q_1 \cdot v_1 = \text{const.}$ (3)

ergibt sich für jeden Querschnitt q im Strömungskanal die zugehörige mittlere Strömungsgeschwindigkeit v . Eine Verdoppelung des Radius bedingt dann einen sechzehnfach höheren Volumenstrom und damit, bezogen auf den vierfach größeren Querschnitt, eine vierfach höhere Strömungsgeschwindigkeit.

Es ist allerdings die Frage, ob bei verkleinertem Strömungswiderstand die Muskulatur durch höhere Kontraktionsgeschwindigkeit in der Lage ist, das gleiche Druckgefälle p_1-p_3 zu erzeugen. Die Strömungsge-

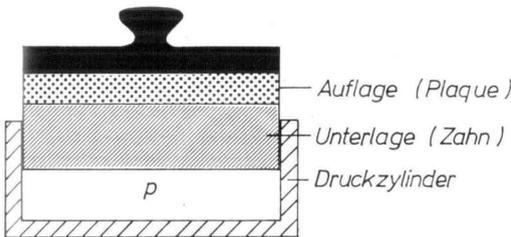


Abb. 2. Eine Reduzierung des Gewichtes beeinträchtigt nicht eventuelle Haftkräfte in der Grenzfläche Auflage/Unterlage. Der Druck p im Zylinder erzeugt einen Schub nach oben.

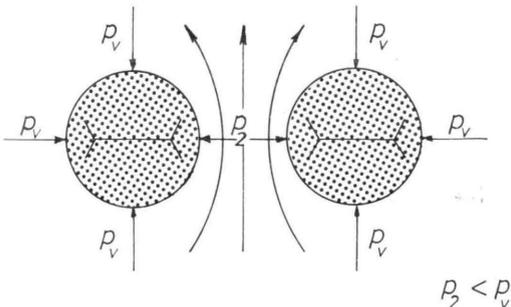


Abb. 3. Ein strömungsbedingter Unterdruck relativ zu p_V ($p_2 < p_V$) bewirkt einen Schub, jedoch keinen Zug der Zähne in Richtung Interdentalraum.

schwindigkeit ist dem Druckgefälle jedoch nur direkt proportional, so daß im erweiterten Engpaß mit doppeltem Radius die Geschwindigkeit erst abnimmt, wenn gleichzeitig auch das Druckgefälle auf Werte unter 25% des ursprünglichen Betrages sinkt. Die Strömungsgeschwindigkeit im erweiterten Interdentalraum kann abnehmen, das muß jedoch nicht der Fall sein.

Eventuell wird der Interdentalraum durch einen rechteckigen Querschnitt besser beschrieben. Für dieses Profil gilt, daß der Volumenstrom zur dritten Potenz der Spaltbreite a proportional ist, solange die Spalthöhe h groß gegen a ist. Eine Verdoppelung der Spaltbreite a bei konstanter Höhe bedingt dann einen Anstieg des Volumenstromes auf das Achtfache. Da gleichzeitig der Querschnitt nur verdoppelt wird, resultiert wiederum eine vierfach höhere Strömungsgeschwindigkeit im erweiterten Spalt, konstantes Druckgefälle vorausgesetzt.

Welchen Einfluß nun eine Erweiterung des Interdentalraumes im Zusammenspiel mit der Muskulatur auf die Strömungsgeschwindigkeit hat, ist exakt nicht zu ermitteln, da die erforderlichen Druckmessungen im Mund nicht möglich sind [3]. Auch kann hier auf die Frage nach der optimalen Gestaltung des Interdentalraumes nicht näher eingegangen werden, schon wegen der mangelnden Kompetenz des Verfassers in bezug auf die klinischen Gesichtspunkte, die neben den physikalischen Gesetzmäßigkeiten in diesem Zusammenhang eine Rolle spielen.

Unterstellt man jedoch, daß auf Grund der begrenzten Muskelkräfte das erreichbare Druckgefälle $p_1 - p_3$ (Abb. 1) mit zunehmendem Strömungswiderstand einem oberen Grenzwert zustrebt und bei weiterer Abnahme des Strömungsquerschnittes praktisch unverändert bleibt, so ist bei hinreichend engen Interdentalräumen die Unabhängigkeit des Druckgefälles von der Größe des Engpasses gegeben. Unter dieser Bedingung gilt, wie gezeigt, daß im weniger engen Interdentalraum die Strömungsgeschwindigkeit beträchtlich größer ist. Da mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit eine Beeinträchtigung der Belagbildung, aber auch – von den Autoren nicht diskutiert – ein reinigender Effekt durch Wechselwirkung über tangentielle Kräfte (Schubspannungen) in der Grenzfläche Strömung/Plaque erwartet werden kann, ergibt sich hieraus ein Argument gegen die möglichst enge Gestaltung von Interdentalräumen. Der Vorteil einer erhöh-

ten Strömungsgeschwindigkeit wirkt sich zudem im gesamten Strömungskanal und nicht nur im Bereich der Engstelle aus.

5. Wirkungen auf die Interdentalpapille

Ein möglicherweise positiver Einfluß von strömungsbedingten Druckschwankungen auf die Papille im Sinne einer Massagewirkung ist nicht an das Vorhandensein einer Engstelle und den dort auftretenden Druckabfall gebunden. Ein solcher Effekt entsteht auch durch den Pump- oder Saugdruck (p_1 bzw. p_3 in Abb. 1) zur Erzeugung der Strömung. Unter Umständen können die Druckschwankungen gerade wegen des zusätzlichen Druckabfalles im Bereich der Engstelle sehr klein bleiben (Abb. 1c).

Schlußfolgerungen

Die starke und auf z.T. falschen Vorstellungen beruhende Betonung der prophylaktischen Bedeutung von strömungsbedingten Druckschwankungen im Interdentalraum birgt die Gefahr einer Fehlinterpretation durch den physikalisch weniger versierten Leser in sich, etwa dahingehend, daß ein durchspülbarer Raum um so sauberer bleibt, je enger sein Querschnitt ist.

Unbestritten sind die experimentellen Ergebnisse zur Abhängigkeit der Strömungssituation eines gegebenen Interdentalraumes von der Geometrie der benachbarten Strömungskanäle. Diese Untersuchungen haben darauf aufmerksam gemacht, daß z.B. bei der Gestaltung von Brückenkörpern die Folgen für die Strömungssituation in den benachbarten Interdentalräumen mit berücksichtigt werden müssen, eine Forderung, die bis dahin wohl häufig außer acht gelassen wurde.

Schrifttum

1. Marxkors, R., Bollmann, F. und Hausbrock, M.: Basisgestaltung und Selbstreinigung. Dtsch. zahnärztl. Z. 30, 700 (1975).
2. Lukas, D. und Schulte, W.: Die Physik der Selbstreinigung des Interdentalraumes. Dtsch. zahnärztl. Z. 27, 269 (1972).
3. Lukas, D. und Schulte, W.: Zur Hydrodynamik des Interdentalraumes. Dtsch. zahnärztl. Z. 28, 133 (1973).
4. Lukas, D., Schulte, W. und Zeyher, A.: Hydrodynamische Messungen an vergrößerten Modellen des menschlichen Interdentalraumes. Dtsch. zahnärztl. Z. 29, 27 (1974).

Anschrift des Verfassers: Dr. rer. nat. Hermann Meiners, 4400 Münster, Robert-Koch-Straße 27a