

Infusionen und Transfusionen

Bereicherung des Physikunterrichts durch Themen aus der Biologie und Medizin

Giuseppe Colicchia; Hartmut Wiesner

In einigen früheren Beiträgen haben wir bereits ausführlich dargestellt, dass fächerübergreifende Themen aus der Biologie und der Medizin sowohl motivierende Einstiege als auch Bereicherungen für den Physikunterricht liefern /1 bis 3/. Auch für den Hydrostatik- und Hydrodynamikunterricht gibt es in dieser Hinsicht geeignete Fragestellungen, von denen eine davon in diesem Beitrag vorgestellt wird: Wir schlagen vor, dem Hydrodynamikunterricht ein Kapitel über Infusionen und Transfusionen hinzuzufügen. Diese sind täglich (z. B. im Fernsehen) zu beobachten und es sind sicher viele Schüler neugierig zu erfahren, warum es bei einer Rettung fast immer eine Tropfflasche zu sehen gibt. Antworten auf diese und andere Fragen enthalten eine ganze Reihe physikalischer Aspekte, die auch für den Physikunterricht geeignet sind.

Der Blutkreislauf beim Menschen

Das Herz pumpt Blut durch die Arterien in alle Körperabschnitte bis in die feinsten Kapillaren und nimmt das durch die Venen zurückströmende Blut wieder auf. Dieser ständige Kreislauf ist verantwortlich für den schnellen Antransport von Sauerstoff und anderen Substanzen zu jeder einzelnen Zelle des Organismus und für den Abtransport der Kohlensäure und Stoffwechselprodukte.

Der menschliche Körper besitzt zwei aufeinander folgende Kreisläufe: Den großen Körperkreislauf, der von der linken Herzseite zur Versorgung der Körperzellen angetrieben wird, und den kleinen Lungenkreislauf, der von der rechten Herzseite ausgeht, wobei

das Blut nur durch die Lungenarterien und -venen fließt.

Während das Blut in die Arterien gepumpt wird, erreicht der Blutdruck im großen Körperkreislauf ein Maximum von 16 kPa. (Vergl. für die folgenden Ausführungen /2/. Die Druckangaben sind auf den Luftdruck bezogen! Der angegebene Blutdruck liegt also um 16 kPa über dem Luftdruck p_L .) In der Erschlaffungsphase des Herzmuskels wird vom Herz kein Blut gepumpt. Aber die großen Arterien, die sich erweitert haben, ziehen sich wieder zusammen, so dass ein minimaler Druck (11 kPa) bestehen bleibt und das Blut kontinuierlich weiter fließt (Windkesselfunktion) /4/.

Auf Grund der Reibung findet ein Druckabfall beim Abfließen des Blutes statt und der Blutdruck wird in den Blutbahnen allmählich geringer, je weiter das Blut vom Herzen wegfließt. In einem laminaren Blutstrom wird der Druckabfall ziemlich gut durch die Hagen-Poiseuille'sche Gleichung

$$\Delta p = (8 \eta l / \pi r^4) \cdot I$$

beschrieben, wobei η die Viskosität, I die Volumenstromstärke des Blutes, l die Länge und r der Radius einer Arterie sind. Wegen der Abhängigkeit von r zur vierten Potenz findet der größte Druckabfall im Bereich der Arteriolen und Kapillaren statt. Der Druck beträgt am Ende der Kapillaren etwa 2 kPa. Er wird in den Venen noch

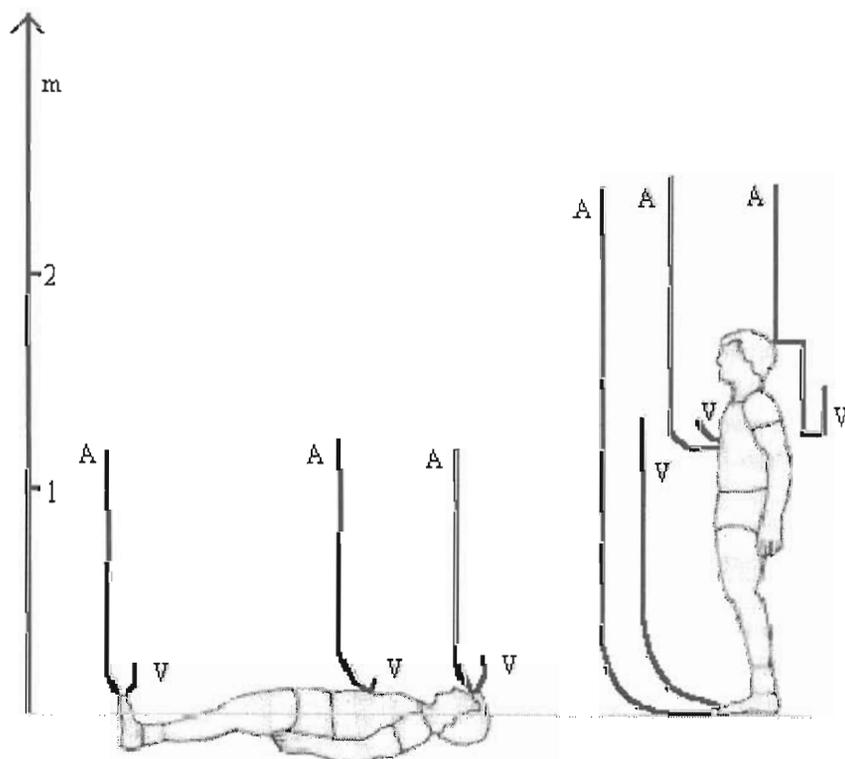


Bild 1 Erzeugte Blutsäule in den Arterien (A) und in den Venen (V) bei einem Menschen in liegender und in aufrechter Position. In den Kopfvenen eines aufrecht stehenden Menschen ist der Druck negativ.

geringer und im rechten Vorhof des Herzens, wohin das Blut wieder zurückkommt, ist fast kein Druck vorhanden. Das sind Werte bei einem normalen Menschen in horizontaler Position. In aufrechter Position werden wegen des Einflusses des Schweredruckes alle Druckwerte unter der Herzhöhe größer, hingegen jene über der Herzhöhe niedriger /2/. In Bild 1 sind die mittleren Werte durch die Längen der Blutssäulen angegeben, wobei der arterielle mittlere Blutdruck ca. 13 kPa beträgt. Der Schweredruck einer Blutssäule, den man unter der Herzhöhe addieren bzw. oberhalb subtrahieren muss, ist

$\rho = m \cdot g/A = \rho \cdot g \cdot h$, wobei ρ die Dichte des Blutes ist ($\rho = 1,06 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3}$), h und A die Höhe bzw. die Grundfläche der Flüssigkeitssäule sind. Setzt man die Werte ein, ist

$$\rho = 10,4 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-2} = 10,4 \text{ kPa für } 1 \text{ m Bluthöhe.}$$

Die Strömungsgeschwindigkeit des Blutes verändert sich aber nicht von liegender zu aufrechter Position, weil sie von dem Druckgradienten des Blutes und den Widerständen in den Gefäßen bestimmt wird /2/. Am Eingang der Aorta beträgt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ca. $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Da die Volumenstromstärke des Blutes in jedem der hintereinander geschalteten Kreislaufabschnitte gleich groß sein muss, muss sich die mittlere Strömungsgeschwindigkeit entsprechend der Zunahme des Gesamtquerschnittes verändern. Sie wird daher bis in die Kapillaren abnehmen, wobei ein Wert von $0,3 \text{ mm s}^{-1}$ erreicht wird. Sie steigt wegen der Abnahme des Gesamtquerschnittes in den Venen wieder an. Ein kompletter Zyklus durch den ganzen Körper dauert wenige Sekunden und wird von ca. 70 Herzschlägen pro Minute erzeugt.

Infusionen und Transfusionen

In vielen Fällen wird der Blutkreislauf vom Arzt als Transportweg benutzt, um zum Beispiel Medikamente oder Nährstoffe zum Körpergewebe zu schicken. Das kommt vor allem dann vor, wenn andere Wege nicht benutzt werden können, wenn beispielsweise Magen- und Darmbereich beeinträchtigt sind, bei Bewusstlosigkeit oder, wenn es notwendig ist, die Flüssigkeit mit einer Diffusion in den ganzen Or-

ganismus gleichmäßig aufzunehmen. In jedem Fall hat das Bluttransportsystem den Vorteil, eine schnelle Verteilung von Stoffen im ganzen Körper zu bewirken. Man hat ermittelt, dass ein am Arm injiziertes Präparat nach 20 bis 55 Sekunden am Fuß nachweisbar ist /5/. Das spielt insbesondere bei Notfallpatienten eine große Rolle – die Infusion kann bereits am Ort des Geschehens oder während der Einlieferung in die Klinik beginnen. Auf Grund der Fortschritte in der Medizin und des Einsatzes von Standard-Infusionsbestecken werden zur Zeit täglich große Mengen von Infusionslösungen verbraucht.

Auch Infusionen mit Blut, die sogenannten Transfusionen, sind sehr wichtig, z. B. wenn ein hoher Blutverlust im Körper auf Grund einer starken Blutung aufgetreten ist.

Vor der Entdeckung der Blutgruppen (1901) scheiterten die meisten Transfusionsversuche, und zwar sowohl Bluttransfusionen mit menschlichem Blut als auch Transfusionen mit Tierblut (z. B. vom Schaf oder Rind) auf den Menschen. Vor allem die letzteren, meist erfolglosen Versuche ließen einen Chirurgen zu der Bemerkung hinreißen: *Zur Übertragung von Schafblut gehören drei Schafe: eines, dem man das Blut entnimmt, ein zweites, das es sich übertragen läßt, und dazu ein drittes, das die Übertragung ausführt* /6/.

Bei einer normalen Infusion bzw. Transfusion fließt die Flüssigkeit auf Grund der Schwerkraft vom Behälter in den Körper. In Bild 2 ist eine einfache Anordnung dargestellt. *B* ist der Behälter, aus dem langsam, tropfenweise, eine Lösung bzw. Blut in eine Vene (in der Regel die Hautvene am Handrücken) fließt. *T* ist eine Tropfkammer und *S* ein Plastikschlauch, an dem eine Kanüle *K* angeschlossen ist. Die Kanüle befindet sich in der angestochenen Vene. Zur Regulierung der Tropfenfolge dient eine Rollenklemme *R*, Luft tritt durch ein Belüftungsröhr *L* in den Behälter ein /5/.

Infusionsbehälter gibt es aus Glas und Kunststoff. Die Glasflasche ist wegen ihrer chemischen Inertheit für alle Infusionslösungen geeignet. Der Nachteil einer Glasflasche ist ihr hohes Gewicht und sie muss belüftet werden, denn die abgeflossene Flüssigkeit muss von einer entsprechenden Luftmenge ersetzt werden.

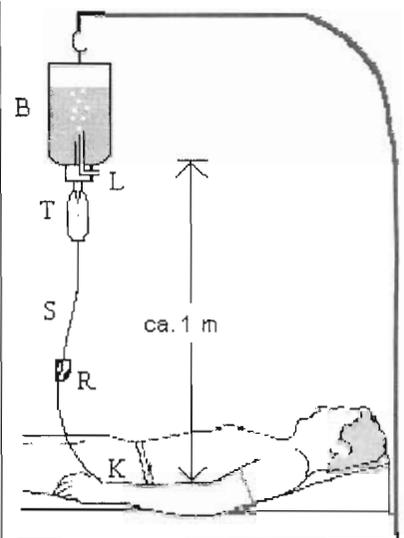


Bild 2 Anordnung einer Standard-Infusion. Die Flüssigkeit fließt vom Behälter *B* durch einen Schlauch *S*, eine Tropfkammer *T* und eine Kanüle *K* zu einer Vene. *R* ist eine Rollenklemme zur Regulierung der Tropfenfolge, *L* die Belüftung.

Kunststoffbehälter gibt es als Plastikflaschen und -beutel. Sie haben ein niedrigeres Gewicht und wenn sie flexibel sind, erfordern sie keine Belüftung. Denn während sie sich entleeren, zieht sich der Behälter zusammen, das Volumen wird kleiner und der innere Druck bleibt immer gleich (ca. 1 bar). In der letzten Zeit werden diese Kunststoffbehälter immer häufiger verwendet.

Es ist einfach zu verstehen, dass sich der Behälter auf einer Mindesthöhe befinden muss, so dass der erzeugte Druck der Flüssigkeitssäule größer als der Blutdruck in der punktierten Vene ist. Wenn wir den Blutdruck in einer Vene mit 2 kPa annehmen, dann muss diese Höhe mindestens 20 cm betragen. Sonst würde das Blut vom Patienten in den Behälter fließen. Der Behälter wird normalerweise auf eine Höhe von 80–100 cm gehängt, um die Widerstände, die auf die Flüssigkeit vom Behälter bis zum Patienten wirken, zu überwinden. Die benötigte Regulierung der Infusionsgeschwindigkeit wird hauptsächlich durch eine Rollenklemme erreicht, die den Infusionsschlauch verschieden stark komprimiert.

Um ein numerisches Beispiel zu geben, rechnen wir aus, wie hoch der Behälter aufgehängt sein muss, um eine Transfusion durchzuführen und dabei z. B. eine Volumenstromstärke V/t des Blutplasmas von $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($= 1 \text{ ml s}^{-1}$) zu erreichen. Nehmen wir

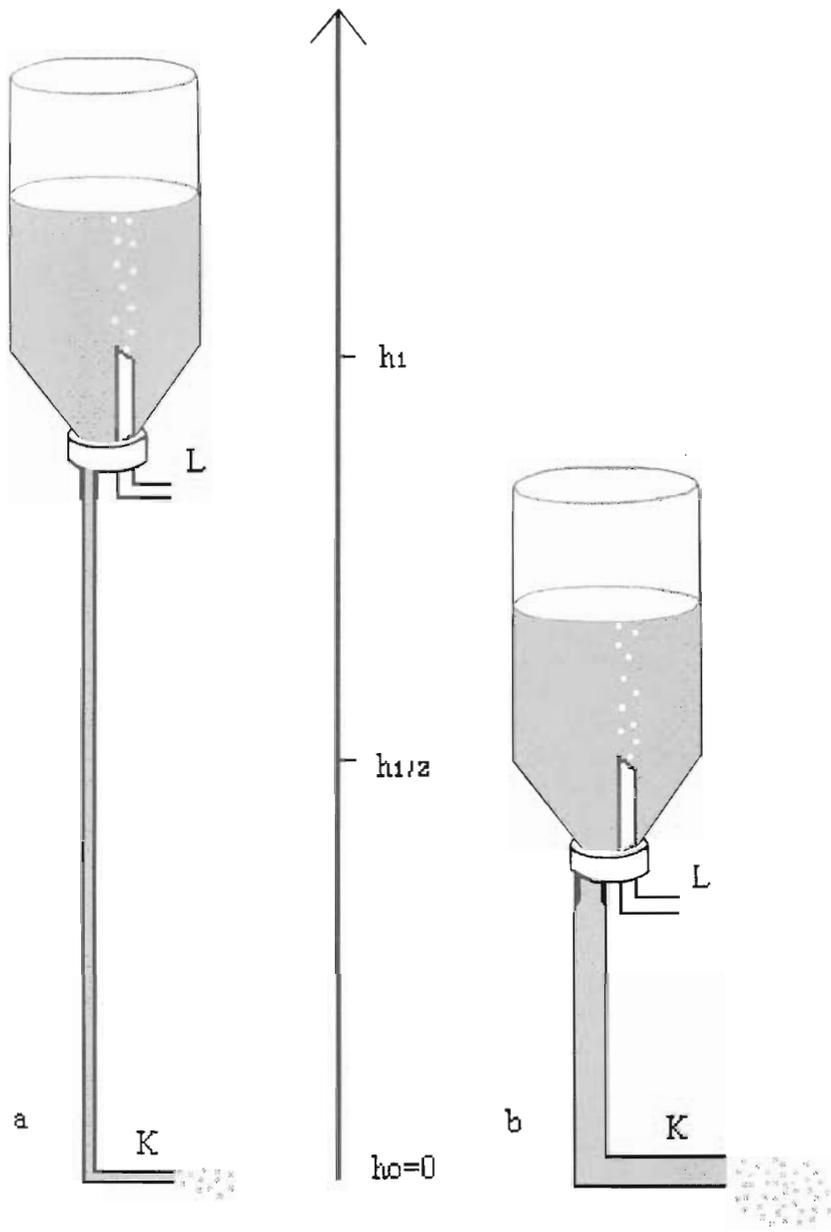


Bild 3 Wird die Infusionsflasche auf halbe Höhe aufgehängt (b), aber mit einem Schlauch mit doppeltem Durchmesser als in (a) verbunden, erreicht man eine größere Volumenstromstärke als in (a). K ist die Kanüle, die denselben Durchmesser wie der Schlauch haben soll.

an, dass die benutzte Kanüle eine Länge $l = 5 \cdot 10^{-2}$ m und einen inneren Durchmesser von $1 \cdot 10^{-3}$ m hat. Nach der Hagen-Poiseuille'schen Gleichung ist die nötige Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende der Kanüle

$$\Delta p = (8 \eta l / \pi r^4) \cdot I,$$

wobei wir $\eta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ Pa·s annehmen. Einsetzen der Werte ergibt für Δp ca. 3 kPa. Wenn wir der Einfachheit halber die wegen des fließenden Blutplasmas auftretende Druckverminderung im Schlauch bzw. Tropfkammer vernachlässigen, brauchen wir nur den Druck in der Vene (2kPa) addieren. Zusammen ergibt das 5 kPa, die einer Höhe von ca. 0,5 m entsprechen. Man sollte aber beachten, dass ein langer Schlauch mit kleinem Durchmesser

bzw. eine mit einem Filter ausgestattete Tropfkammer einen großen Widerstand haben kann.

In einer Oberstufenklasse kann man die Frage erwarten oder anregen, ob das Blutplasma unter den gegebenen Bedingungen laminar fließt und daher die Benutzung der Hagen-Poiseuille'schen Gleichung richtig ist. Die Reynoldszahl, die zeigt, ob eine Strömung laminar oder turbulent ist, ist gegeben durch $Re = 2r \cdot v \cdot \rho / \eta$, wobei $2r$ der Kanüldurchmesser, $v = (V/t) / \pi r^2$ die mittlere Strömungsgeschwindigkeit, ρ die Dichte des Blutplasmas und η die dynamische Viskosität ist. Für eine laminare Strömung muss $Re < 2000$ sein. Wir finden für Re einen Wert von ca. 850, damit kann

die Strömung als laminar angesehen werden.

Einige Schüler werden sicherlich die Frage stellen, warum keine Flüssigkeit durch die Belüftung L austritt. In der Regel wird zur Beantwortung ein Hinweis genügen, und zwar, ob nicht ein Zusammenhang zu dem umgestülpten Glas Wasser besteht, das nicht ausfließt. (Die voll gefüllte Infusionsflasche müsste über 9 m hoch sein.)

Infusionsströmung einer idealen Flüssigkeit

Der Infusionsfluss hängt von dem inneren Durchmesser des Schlauches und dem hydrostatischen Gefälle zwischen dem Infusionsbehälter und dem Patienten ab. Je größer das Gefälle bzw. der innere Durchmesser des Schlauches ist, desto größer ist die Volumenstromstärke.

Untersuchen wir zunächst die Druckverhältnisse längs des Schlauches und betrachten dazu Bild 3a.

Im folgenden nehmen wir an, dass eine ideale Flüssigkeit fließt, die Kanüle in der Luft hängt und den gleichen Durchmesser wie der Schlauch hat. Wegen des Belüftungsrohres L ist der Druck in der Höhe h_1 immer gleich dem äußeren Luftdruck p_L . Wenn die Kanüle geschlossen ist, steigt nach unten der statische Druck linear an, weil der Schweredruck $\rho \cdot g \cdot h$ zum Luftdruck zu addieren ist. Daher beträgt der Gesamtdruck in der Höhe der Kanüle $p_L + \rho \cdot g \cdot h_1$. Wenn man die Kanüle öffnet, sinkt der statische Druck an jeder Stelle im Schlauch um den Betrag des sogenannten dynamischen Drucks $1/2 \cdot \rho v^2$ (die Geschwindigkeit v muss wegen der Massenerhaltung im Schlauch überall gleich groß sein).

Wir wenden das Bernoulli'sche Gesetz auf die Höhe $h = 0$ (Kanüle) und eine beliebige Höhe h längs des Schlauches an

$$p_L + 1/2 \cdot \rho v^2 = p(h) + 1/2 \cdot \rho v^2 + \rho gh$$

$$p(h) = p_L - \rho gh.$$

Das heißt, der Druck ist an der Kanüle gerade so groß wie der äußere Luftdruck, nimmt dann längs des Schlauches linear ab und erreicht an der Anschlussstelle zur Infusionsflasche den kleinsten Wert, der dort deutlich unter dem Luftdruck liegt. Ist der Schlauch an irgendeiner Stelle undicht, insbesondere in der Nähe der Anschlussstelle, dann drückt der äußere

Luftdruck Luftblasen in die Infusionslösung, die von dort in die Venen gelangen und somit zur Gefahr einer Embolie (Verstopfung des Blutflusses durch Luftblase in einem Blutgefäß kleinen Durchmessers) führen kann.

Es stellt sich nun die Frage, ob es zur Steigerung der Volumenstromstärke besser ist, den Behälter höher zu hängen oder den inneren Schlauch- und den Kanüledurchmesser zu vergrößern (Bild 3).

Diese Frage kann wieder mit Hilfe der *Bernoulli'schen* Gleichung beantwortet werden.

Angewendet auf die beiden Höhen $h = 0$ und h_1 ergibt sich

$$p_L + 1/2 \cdot \rho v^2 = p_L + \rho g h_1,$$

denn bei h_1 ist die Geschwindigkeit praktisch Null. Damit ist die Ausströmgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{2gh_1} \text{ (Torricelli'sches Ausströmgesetz).}$$

Die Volumenstromstärke $I = A \cdot v$ ist daher $A \cdot (2g \cdot h_1)^{1/2}$, wobei A die Querschnittsfläche des Schlauches ist. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine Steigerung der Volumenstromstärke günstiger durch eine Vergrößerung der Querschnittsfläche A als durch eine Vergrößerung der Höhe h_1 erreicht werden kann. Denn die Volumenstromstärke ist zur Querschnittsfläche direkt proportional, zur Höhe hingegen nur proportional zur Wurzel.

Außerdem ist die Strömungsgeschwindigkeit für die gleiche Volumenstromstärke in einem Schlauch mit größerem Radius kleiner als in einem Schlauch mit kleinerem Radius und damit ist der Unterdruck gegen den Luftdruck im dickeren Schlauch geringer. Deshalb ist auch die Gefahr einer Luftembolie geringer. Am günstigsten ist es also, eine niedrige Höhe des Behälters, einen Schlauch mit größerem Durchmesser und eine enge Kanüle, die von unten den Fluss bremst, zu wählen, mit der Folge einer Steigerung des Druckes im Schlauch. Denn zum einen steigt der Druck, weil dann der dynamische Druck kleiner wird. Und weiterhin wirkt sich der nach *Hagen-Poiseuille* erforderliche Druckabfall Δp erst am Schlauchende aus und nicht schon in der Nähe der Infusionsflasche. Aus demselben Grund soll an einem Infusionsgerät das Regulierventil (Schlauchklemme) unten angebracht werden, damit der Flüssig-

keitsdruck an allen höherliegenden Schlauchverbindungen möglichst wenig vom äußeren Luftdruck abweicht.

Infusion realer Flüssigkeit

Es ist anzunehmen, dass jeder Schüler intuitiv denkt, dass eine Flüssigkeit mit einer hohen Viskosität langsam fließt. Je größer die Viskosität ist, desto kleiner wird die Volumenstromstärke. Glycerin z. B. hat eine 1000mal so große Viskosität wie Wasser. Deshalb braucht die gleiche Menge Glycerin eine 1000mal längere Zeit um durch das Rohr zu fließen. Hat das Blut z. B. eine 3-4mal so große Viskosität wie Wasser, dann sollte die Volumenstromstärke 3-4mal kleiner sein. Die Änderung der dynamischen Viskosität, insbesondere von Blut, erfolgt aber auf recht komplexe Weise. Die dynamische Viskosität nimmt im allgemeinen mit der Temperatur ab, und für das Blut ändert sie sich auch mit seiner Zusammensetzung und Geschwindigkeit. Insbesondere die roten Blutkörperchen, die scheibenförmig sind, richten sich bei hohen Geschwindigkeiten zunehmend parallel zur Strömungsrichtung aus, was die Viskosität des Blutes erniedrigt. Die Besonderheiten der Blutströmung treten aber in den Kapillargefäßen auf. Hier konzentrieren sich die roten Blutkörperchen unter Verformung in der Mitte der Kapillare und können sich sogar etwas zusammenziehen, um die feinsten Kapillargefäße zu passieren.

Das *Bernoulli'sche* Gesetz gilt nur für ideale Flüssigkeiten. Wenn die Reibung hoch ist, gelten andere Gesetze. Dieser Fall ergibt sich z. B. bei Schläuchen mit kleinem Durchmesser. Mit wachsender Länge des Schlauches zwischen Kanüle und Infusionsflasche sollte sich die Volumenstromstärke einerseits wegen der wachsenden Höhe vergrößern, andererseits aber muss wegen des steigenden Widerstands die Volumenstromstärke geringer werden.

Die Tropfkammer

Zur Kontrolle der Durchflussmenge wird oft eine Tropfkammer verwendet. Diese besteht aus einer kreisrunden Kapillarenöffnung, aus der eine tropfende Flüssigkeit austritt. Die Flüssigkeit fällt in eine Kammer aus durchsichtigem Kunststoff und fließt dann

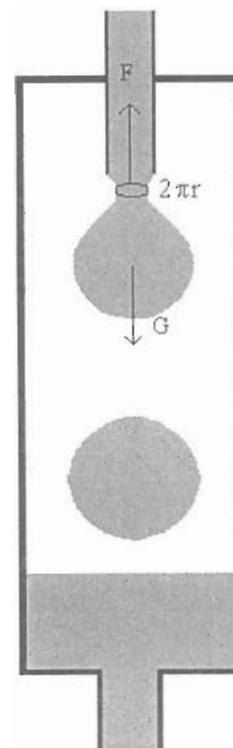


Bild 4 Tropfkammer. Der Tropfen reißt ab, wenn sein Gewicht G die Haltekraft F überschreitet. $2\pi r$ ist der Umfang an der Einschnürung.

durch den Schlauch zum Patienten weiter (Bild 4).

Der Tropfen reißt ab, wenn sein Gewicht $G = \rho \cdot V \cdot g$ die durch die Oberflächenspannung entstehende Haltekraft $F = 2\pi r \cdot \gamma$ überschreitet, wobei ρ die Dichte der Flüssigkeit, V das Volumen eines Tropfens, $2\pi r$ der Umfang an der Einschnürung und γ die Oberflächenspannung ist $/8/$. Die Oberflächenspannung von Wasser ist $0,073 \text{ N m}^{-1}$ (bei 20°C) und nimmt mit wachsender Temperatur ab.

Es muss in der Schule ausreichen, dass die Schüler intuitiv einsehen, dass der Grenzfall des Abreißens einer Flüssigkeit von dem Einschnürungsdurchmesser bestimmt wird, der wiederum von dem Durchmesser der Kapillare abhängt. So kann man durch die Wahl der Größe der Kapillaren auch die Größe des Tropfens wählen. Ein Normaltropfenzähler liefert mit 20 Tropfen pro Minute eine Menge von 1 g (1 cm^3) Wasser $/9/$. Tropfenzähler mit kleinerer Kapillarenöffnung für Kinder liefern 1 g Wasser mit 60 Tropfen.

Infusionsdruck

Wenn es erforderlich ist, eine große Menge einer Flüssigkeit in kurzer Zeit zu verabreichen, kann man eine Druck-

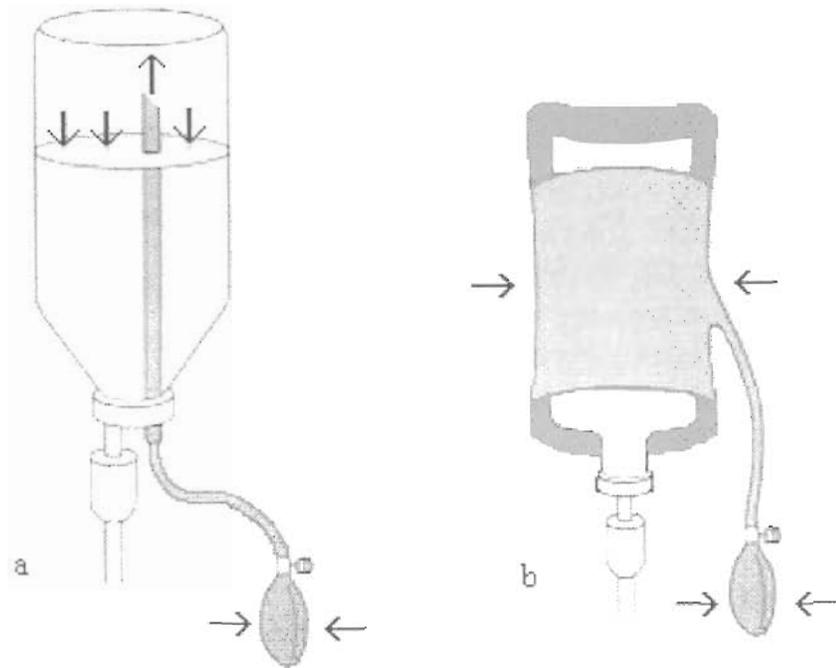


Bild 5 Erhöhung der Infusionsgeschwindigkeit (a) durch Zupumpen von Luft in den Behälter und (b) durch eine komprimierende Manschette.

infusion anwenden. Die Durchlaufgeschwindigkeit wird durch in die Flasche gepumpte Luft erhöht (Bild 5a). Bei Verwendung eines Plastikbeutels benutzt man eine Manschette, um den Behälter zu komprimieren (Bild 5b). Bei Infusionsdrücken wird der Druck innen an der Schlauchwand erhöht. Daher ist die Gefahr einer Luftembolie aufgrund eintretender Luft im Schlauch gering, auch wenn der dynamische Druck wegen der höheren Flüssigkeitsgeschwindigkeit groß wird und der Druck entsprechend sinkt.

Infusion durch mechanisches Pumpen

Bei arteriellen Infusionen, die vor allem durchgeführt werden um Mittel direkt an den Wirkungsort zu bringen (z. B. gefäßerweiternde Mittel oder Kontrastmittel durch einen Katheter in die Koronararterie), werden normalerweise wegen des hohen Drucks Infusionspumpen verwendet. Im Prinzip sind diese Infusionen auch nach dem Schwerkraftprinzip durchführbar. Das Tropfsystem müsste dann jedoch höher als 2m über dem Niveau der Patienten hängen.

Infusionen durch eine Pumpe werden auch zur Verabreichung eines Medikaments mit einer kontrollierten und programmierten Geschwindigkeit verwendet. Sie können aus einer kleinen batteriebetriebenen Pumpe bestehen, die den Flüssigkeitsstrom aus

einem Vorratsbehälter in die Nadel reguliert, wobei der Patient dieses Gerät am Körper tragen kann.

Im folgenden beschreiben wir einen Versuch, bei dem die *Bernoulli'sche* Gleichung am Beispiel der Infusionsanordnung demonstriert werden kann. In einem zweiten Versuch wird die Abhängigkeit der Infusionsgeschwindigkeit von der Höhe der Infusionsflasche über dem Patienten und dem Kanüldurchmesser verdeutlicht.

Versuch 1: Statischer und dynamischer Druck

In dem Text zu Bild 3 haben wir den statischen Druck bei geschlossener Kanüle und dann bei geöffneter Kanüle die Abnahme des Drucks betrachtet. Ein einfacher Versuch im Zusammenhang mit einer Infusionsanordnung, zeigt dies deutlich (Bild 6).

Mit geschlossener Kanüle (Bild 6a) steht das Wasser in allen Druckmessrohren gleich hoch, und zwar auf Höhe der Belüftung. (Der Druck ist hier gleich dem Luftdruck p_L .) Die an den Ausgängen gemessenen Drücke sind aber aufgrund der darüberliegenden, unterschiedlich hohen Wassersäulen verschieden.

Wird die Kanüle geöffnet, kann man beobachten, dass alle Wasserhöhen annähernd um den gleichen Betrag sinken. Das heißt, dass der Druck des Wassers an der Rohrwand in jeder Höhe des Rohres um den gleichen Wert abnimmt, und zwar um den Wert des dynamischen Drucks. Bei einer genügend hohen Wassergeschwindigkeit wird die Wasserhöhe zuerst in dem am höchsten seitlich verbundenen Rohr null und Luft beginnt in das Hauptrohr einzutreten. Das tritt auf, wenn die Druckverminderung der Wasserhöhe h_3 entspricht. Ist die Kanüle vollständig geöffnet, dann tritt bei hoher Fließgeschwindigkeit in allen Rohren ein Unterdruck auf, während auf der Höhe der Kanüle der Druck dem Außendruck entspricht.

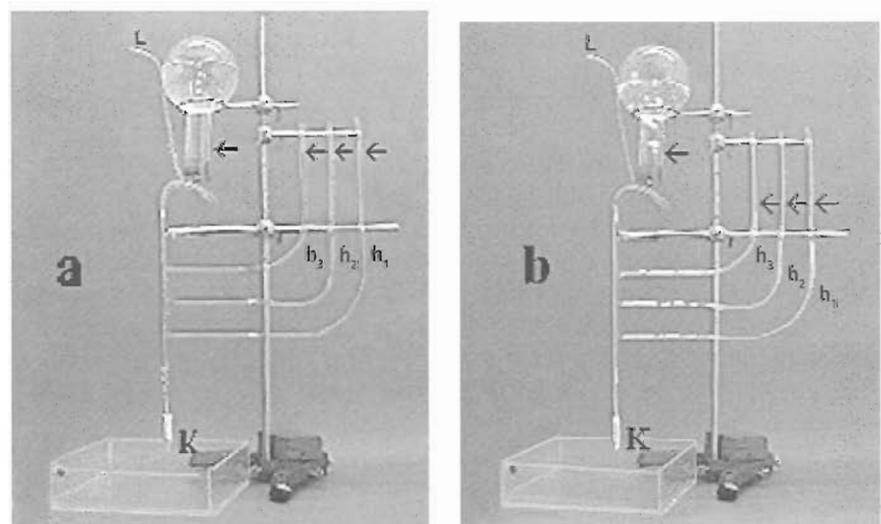


Bild 6 Bei geschlossener Kanüle (6a) ist der statische Druck (gemessen jeweils am Ausgang der Druckmessrohre) unten, in der Mitte und oben jeweils proportional der Wasserhöhe h_1 , h_2 und h_3 . Bei geöffneter Kanüle (6b) bleiben die Wasserhöhen untereinander ungefähr gleich, sind aber um eine Höhendifferenz niedriger, die dem Wert des dynamischen Drucks entspricht. L ist der Belüftungsschlauch. Der Pfeil am Glaskolben markiert die Höhe des Belüftungsschlauches innerhalb des Kolbens.

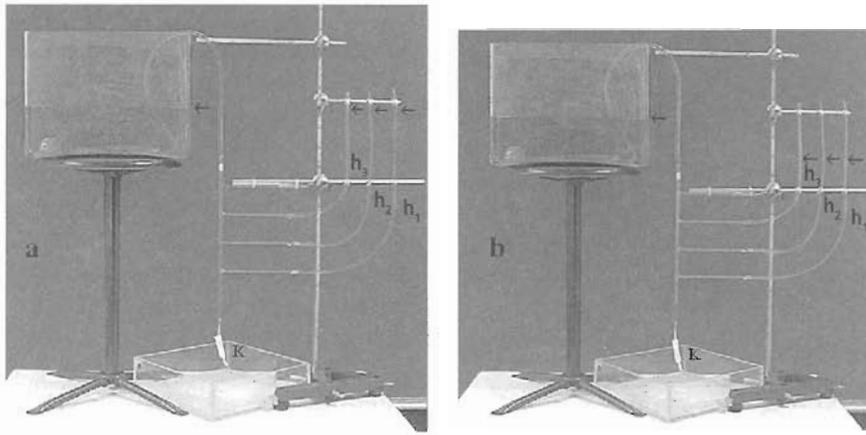


Bild 7(a) und (b) Einfache Anordnung zur Demonstration der Abnahme des Drucks in einer strömenden Flüssigkeit.

In Bild 7 ist eine vereinfachte Anordnung aufgebaut. Hier ist der umgestülpte Glaskolben mit Belüftungsschlauch durch ein einfaches Überlaufgefäß ersetzt worden.

Versuch 2: Infusionsgeschwindigkeit

Es gibt eine ganze Reihe von Versuchen, die den Schülern zeigen können, dass die Volumenstromstärke einer Flüssigkeit von dem Druckgefälle, der Rohrlänge sowie stark von dem Rohrdurchmesser abhängt. Bei einem längeren, dünnen Schlauch und einer realen Infusionskanüle ist die innere Reibung nicht vernachlässigbar und das Gesetz von Hagen-Poiseuille ist anzuwenden.

Man kann z. B. einen Behälter auf verschiedene Höhen hängen, verschiedene Schlauchlängen und Schlauchdurchmesser benutzen und die Zeit messen, die verstreicht, bis der Behälter leer ist.

Normale Infusionsgeräte, die nur ein paar Mark kosten, sind dafür besonders gut geeignet und motivierend.

Die Schüler können die Volumenstromstärke bzw. Massenstromstärke des Wassers messen, indem sie die Zahl der Tropfen in einer bestimmten Zeit zählen, wenn der Behälter in verschiedenen Höhen aufgehängt wird (Bild 8).

Außerdem fließen nur kleine Mengen von Wasser aus und es ist daher nicht notwendig, den Behälter mehrmals zu füllen. In Bild 9 zeigt der Graph (a) das Ergebnis des Versuches mit einer Kanüle eines inneren Durchmessers von 0,7 mm und einer Länge von 3 cm, wobei die Tropffrequenzen mit

steigender Höhe des Behälters gemessen werden. Wie man sieht, steigt die Volumenstromstärke in Abhängigkeit des Druckgefälles. Zu berücksichtigen ist hier, dass das Druckgefälle von der effektiven, d. h. tatsächlich gegebenen Wassersäule zwischen Kanüle und Ende des Entlüftungrohres bestimmt ist: die in der Tropfkammer vorhandene Luftsäule ist nicht zu berücksichtigen und der Nullpunkt liegt deshalb nicht auf der Höhe der Belüftung. Man kann auch feststellen, dass der Verlauf des Schlauches keine Rolle spielt, indem bei Änderung des Verlaufes (der Schlauch hängt mehr oder weniger durch) die Tropffrequenz gleich bleibt. In (b) ist das Ergebnis eines ähnlichen Versuchs dargestellt, wobei eine längere Kanüle (4 cm) aber auch mit einem größeren Durchmesser (0,9 mm) verwendet wurde. Auch in diesem Fall steigt mit wachsendem Druckgefälle die Volumenstromstärke. Die relativen Änderungen von Kanülenlänge und -durchmesser sind bei (b) gegenüber (a) etwa gleich. Es ist aber deutlich zu sehen, dass die Volumenstromstärke gegenüber (a) ansteigt. D. h. der die Fließgeschwindigkeit begünstigende Einfluss des größeren Kanüledurchmessers überkompensiert den hemmenden Einfluss der Verlängerung der Kanüle. M. a. W.: der Durchmesser spielt eine größere Rolle als die Schlauchlänge.

(c) ist das Ergebnis eines Versuchs mit einer 3 cm lange Kanüle, jedoch mit einem noch größeren Durchmesser (1,1 mm). Die Volumenstromstärke wird sichtbar größer als in (a) und (b) und das zeigt noch einmal die starke Abhängigkeit der Volumenstromstärke vom Durchmesser der Kanüle.

In Bild 9 kann man erkennen, dass die Vergrößerung des Durchmessers günstiger als die Vergrößerung der Höhe ist: Verdoppelung der Höhe führt in etwa zu einer doppelten Volumenstromstärke. Hingegen tritt bei einer kleinen Vergrößerung des Durchmessers eine starke Steigerung der Volumenstromstärke auf (Vergleich der Kurven (a) und (c)).

Mit den Ergebnissen aus Bild 9 kann auch das Hagen-Poiseuille'sche Gesetz für den Durchfluss durch die Kanülen näherungsweise bestätigt werden (recht gut für (a) und (c) bei einem Druck, der bei einer Wassersäule von 15 cm entsteht). Aufgrund der sehr geringen Durchflussgeschwindigkeit im Schlauch bleibt bei einer bestimmten Schlauchhöhe die Druckdifferenz an den Kanülen etwa gleich, so dass das Verhältnis der Volumenstärken im Wesentlichen durch das Verhältnis der Kanülenradien $(r_1/r_2)^4$ bestimmt wird.

In den Versuchen kann man keine Rollenklemme benutzen, um die Volumenstromstärke zu regulieren, denn die von der Rollenklemme verursachte

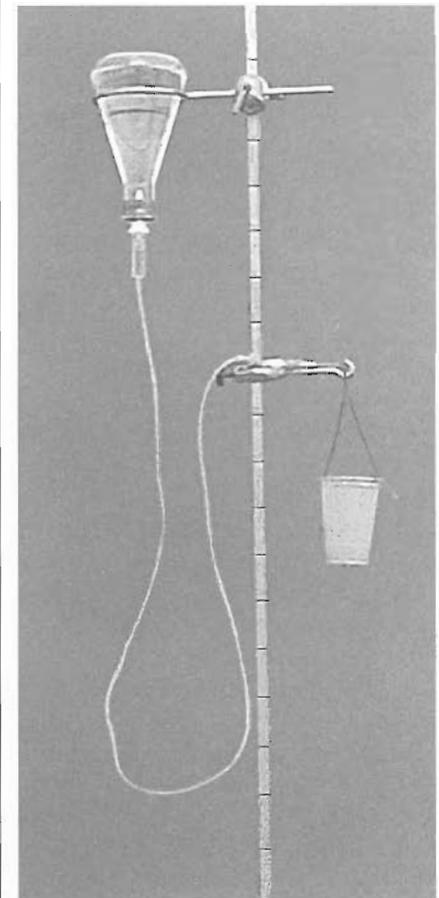


Bild 8 Infusionsgerät zur Messung der Tropffrequenz in Abhängigkeit vom Druckgefälle. Der Nullpunkt liegt nicht auf der Höhe der inneren Belüftung, weil die Luftsäule in der Tropfkammer zu subtrahieren ist.

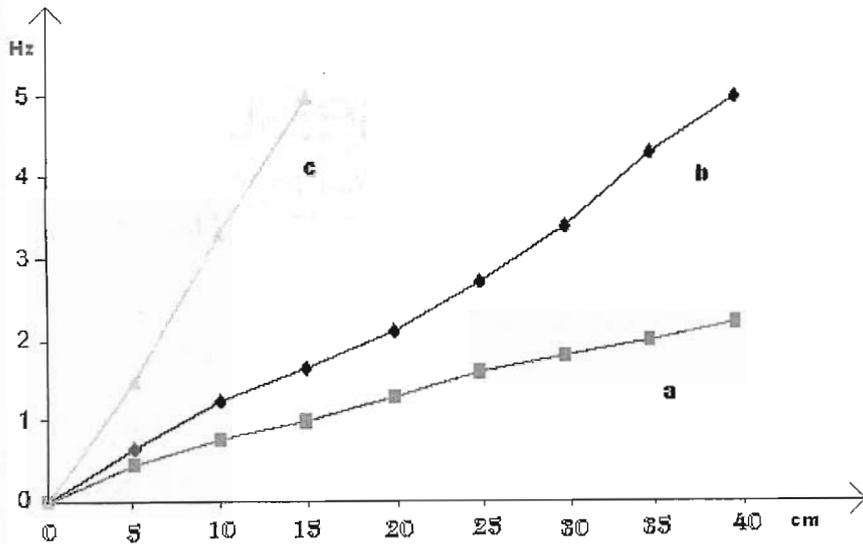


Bild 9 Tropffrequenz in Hz gemessen in Abhängigkeit der Höhe des Behälters in cm. Durchmesser bzw. Länge der benutzten Kanüle ist: (a) 0,7 mm – 3 cm; (b) 0,9 mm – 4 cm; (c) 1,1 mm – 3 cm.

Komprimierung des Schlauches ändert sich in der Zeit und die Messungen werden falsch. Wenn die Tropffrequenz so hoch ist, dass die Tropfen sich nicht zählen lassen, dann könnte man die herauskommende Wassermenge mit einem geeichten Becher messen.

Ein großes Druckgefälle und ein großer Kanüledurchmesser führen zu einer hohen Geschwindigkeit der Flüssigkeit und damit zu einem Unterdruck im Schlauch. Wenn eine Undichtigkeit im oberen Schlauchteil auftritt und Luftbläschen in den Schlauch eintreten, dann deutet dies auf einen Unterdruck hin. Man kann auch feststellen, dass der Fluss in einem langen Schlauch, der vor der Kanüle nach

unten durchhängt, gestoppt werden kann, wenn viel Luft in den Schlauch eintritt. Denn der hydrostatische Wasserdruck in der sich abwärts bewegendes Wassersäule ist, wenn sie viel Luft beinhaltet, zu gering (ρ wird deutlich kleiner), um die auf der anderen Schlauchseite befindliche Wassersäule, die fast keine Luft enthält, zu verdrängen. Auf diese Weise, d. h. mit etwas unter dem Patienten hängenden Schlauch, kann in der Praxis die Gefahr einer Luftembolie vermindert werden.

Bei genaueren Untersuchungen sind die Widerstände im Schlauch und in der Tropfkammer (Filter) zu berücksichtigen. Diese führen dazu, dass Abweichungen von den theoretischen

Werten (z. B. zu dem im Abschnitt "Infusionen und Transfusionen" berechneten) zu den experimentellen Werten (in Bild 9) auftreten.

Literatur

- /1/ Colicchia, G., Wiesner, H.: Wärmeübertragung bei Tieren. Unterrichtsvorschläge für einen fachübergreifenden Unterricht. – In: Physik in der Schule. – 36(1998)6. – S.211–216
- /2/ Colicchia, G., Wiesner, H.: Schweredruck des Blutes im menschlichen Körper. Die Medizin als Bereicherung des Physikunterrichts. – In: Physik in der Schule. – 37(1999)1. – S. 14–19
- /3/ Colicchia, G., Wiesner, H.: Statik des Kauapparats von Reptilien und Säugetieren. – In: MNU (1999), im Druck
- /4/ Deetjen, P., Speckmann, E.J.: Physiologie. – Urban und Schwarzenberg. – München, 1994
- /5/ C. Müller-Eckhardt (Hrsg.): Transfusionsmedizin. – Springer. – Berlin, 1988
- /6/ Gabka, J.: Injektion- und Infusionstechnik. – de Gruyter. – Berlin, 1982
- /7/ Kamke, D., Walcher, W.: Physik für Medizin. – Teubner. – Stuttgart, 1982
- /8/ Hellenthal, W.: Physik für Pharmazeuten, Mediziner und Biologen. – Fischer. – Stuttgart, 1997
- /9/ Haas, U.: Physik für Pharmazeuten und Mediziner. – Wiss. Verl. – Ges. – Stuttgart, 1988

Giuseppe Colicchia

Liceo Linguistico „Oriani“ Roma
z. Zt. Lehrstuhl für Didaktik der Physik
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner

Ludwig-Maximilians-Universität München
Lehrstuhl für Didaktik der Physik
Schellingstr. 4, 80799 München

Berichtigung

Im Artikel „Schweredruck des Blutes im menschlichen Körper“ aus Heft 1/1999 ist versehentlich Bild 8 a um 90° gedreht worden. Hier nun die richtige Darstellung:

Bild 8 a und b: Modellversuch zur Demonstration der Blutdruckverhältnisse im menschlichen Körper beim Übergang von der liegenden zur aufrechten Position: a) Fotografie des Modells in liegender Position. Die Schläuche sind an Winkelstäbe aus Aluminium geklebt. Diese sind am Holzbrett drehbar gelagert, nach unten verlängert und am unteren Ende mit einem Gewichtsstück versehen. Beim Drehen des "Menschen" bleiben die Schläuche dadurch in der senkrechten Lage (Bild 8b). Die Wasserhöhen in den Schläuchen zeigen den Druck an den verschiedenen Stellen an. B ist der Behälter, mit dem man durch Heben und Senken den Herzdruck simulieren kann.

