

## 25 Strömungsverhältnisse in Blutkapillaren

### 25.1 Das Bernoulli Theorem

Um die Strömungsverhältnisse an Blutkapillaren besser verstehen zu können, soll zunächst das Bernoulli Theorem erläutert werden. Daniel Bernoulli, ein holländischer Physiker, der im 18. Jahrhundert lebte, beschäftigte sich mit dem Strömungsverhalten von idealen Flüssigkeiten in starren Röhren.<sup>19</sup>

Laut Bernoulli besteht ein Druck, der z.B. eine Flüssigkeit in einem Gefäß in Strömung versetzt, aus zwei Teildrücken:

1. Potentielle Energie ( $E_{\text{pot}}$ )  
Sie entspricht dem Druck der Flüssigkeit gegen die Gefäßwand.
2. Kinetische Energie ( $E_{\text{kin}}$ )  
Sie bewirkt die Stärke der Strömung = Fließgeschwindigkeit.

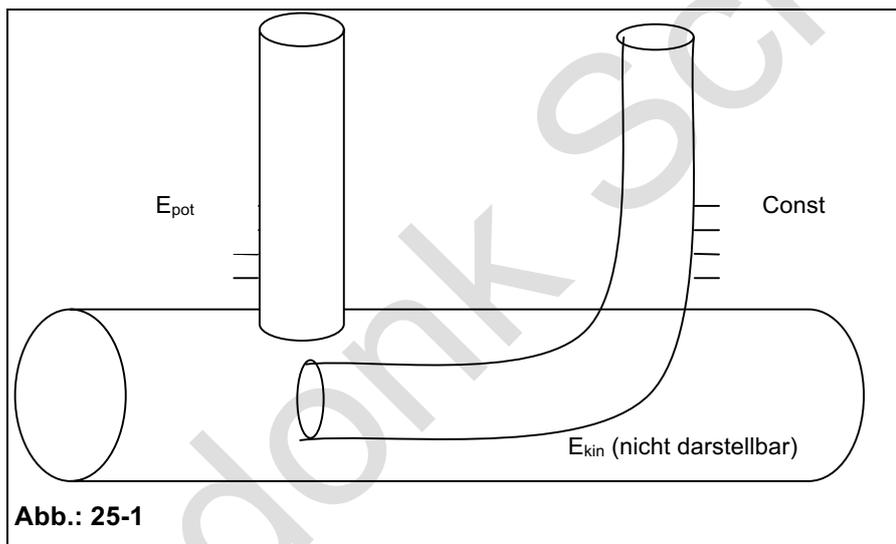


Abb.: 25-1

Bernoulli fand mit Hilfe dieser Versuchsanordnung und Berechnungen heraus, dass die Summe von  $E_{\text{kin}}$  und  $E_{\text{pot}}$  immer gleich, d.h. konstant ist, egal wie die beiden Teilkraft untereinander variieren.

$$E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = \text{konstant}$$

Der Herzmuskel erzeugt den Druck, der benötigt wird, das Blut durch die Gefäße zu treiben. Ein Teil dieses Druckes, der **Blutperfusionsdruck (BPD =  $E_{\text{kin}}$ )** ist für die Strömungsgeschwindigkeit verantwortlich. Der andere Teil, der **Blutwanddruck (BWD =  $E_{\text{pot}}$ )** spannt die Wand des Blutgefäßes. Übertragen auf die Blutkapillaren besagt das Bernoulli Theorem also:

<sup>19</sup> Das Blut ist weder eine ideale Flüssigkeit (Newtonsche Flüssigkeit), noch sind Blutgefäße starre Röhren, aber das Prinzip lässt sich hier anwenden.

$$\text{BPD} + \text{BWD} = \text{konstant}$$

Gleichgültig wie sich die Kräfte untereinander verändern, die Summe ist immer gleich. Dies bedeutet, umgesetzt auf die Verhältnisse an der Blutkapillare, ändert sich der BPD, so ändert sich auch der BWD.

Beispiel:

BPD	BWD	Konstante
70	30	100
60	40	100
50	50	100
80	20	100

Mit sinkendem BWD steigt der BPD und umgekehrt. Da die transmurale Wirkung des BWD die Filtration ist, steigt oder sinkt die Filtration mit.

BPD ↑ BWD ↓ FI ↓ vorh. Ödem ↓  
BPD ↓ BWD ↑ FI ↑ vorh. Ödem ↑

Je langsamer die Blutströmung, desto stärker der Wanddruck und damit die Filtration und eine mögliche Ödemzunahme.

## 25.2 Querschnitt und Geschwindigkeit

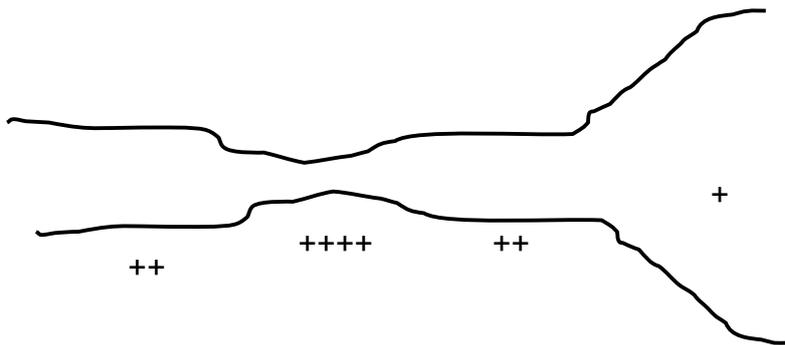


Abb.: 25-2

Beispiel:

Ein Fluss fließt mit einer bestimmten Geschwindigkeit (++) . Verengt sich das Flussbett so erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit (++++) deutlich. Erweitert sich das Flussbett wieder auf die alte Größe, so nimmt auch die Geschwindigkeit auf den alten Wert ab (++) . Mündet er in einen See, so ist die Geschwindigkeit so gering, dass sie kaum noch zu bemerken ist (+) . Daraus folgt:

Die Strömungsgeschwindigkeit verhält sich  
umgekehrt proportional zum Gefäßquerschnitt

übertragen auf die Blutgefäße kann folgender beispielhafter Vergleich aufgestellt werden:

Aorta Q 3 cm <sup>2</sup>	V = 0,5 m/sec.
Kapillare	V = 0,5 mm/sec.

In der Aorta strömt das Blut mit einer Geschwindigkeit von  $V^{20} = 0,5 \text{ m/sec}$ . In der Kapillare beträgt die Geschwindigkeit  $V = 0,5 \text{ mm/sec}$ . Das Blut in der Kapillare strömt als 1000-mal langsamer als in der Aorta. Wenn die oben aufgestellte Behauptung stimmen soll, müsste die Kapillare einen 1000-mal größeren Querschnitt haben als die Aorta. Es kann daher nur die Summe aller momentan geöffneten Kapillaren gemeint sein. Die Aorta würde demnach der Engstelle und die Summe der Kapillaren dem See aus dem Beispiel entsprechen<sup>21</sup>

Aorta Q 3 cm <sup>2</sup>	V = 0,5m/sec.
Σ Q Kapillaren 3000 cm <sup>2</sup>	V = 0,5mm/sec.

<sup>20</sup> V = Velocitas steht für Geschwindigkeit.

<sup>21</sup> Denkt man sich alle Kapillaren zu einer einzigen Röhre vereinigt so hat diese „Kapillarröhre“ einen Durchmesser von 62 cm, wogegen die „Aortaröhre“ einen Durchmesser von etwa 2 cm hat.

### 25.2.1 Praktische Auswirkungen

Wenn nun die Anzahl der geöffneten Kapillaren zunimmt, nimmt die Geschwindigkeit (V) im gleichen Maße ab. Dies geht einher mit einem sinkenden BPD und einem – nach Bernoulli – steigenden BWD, was zu einer erhöhten Filtration und damit zur Ödemzunahme führt.

$$\Sigma \text{ Kap Q } \uparrow ; v \downarrow ; \text{BPD } \downarrow ; \text{BWD } \uparrow ; \text{Fi } \uparrow$$

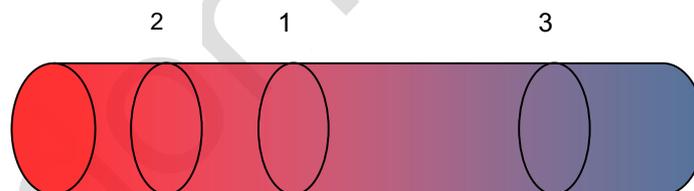
Praktisches Beispiel:

Werden hyperämisierende Maßnahmen (z.B. klassische Massage, Heißluft, Fango, Kryotherapie, ermüdende Bewegungstherapie etc.) durchgeführt, bedeutet dies immer eine Vergrößerung des kapillaren Querschnittes, eine Verminderung des BPD, eine Erhöhung des BWD, eine erhöhte Fi. und somit – bei Vorschädigung des Lymphgefäßsystems - eine Ödembildung oder -zunahme. Aus diesem Grund sind hyperämisierende Maßnahmen bei ödem- und ödemgefährdeten Patienten kontraindiziert.

$$\text{Hyperämie; } \Sigma \text{ Kap Q } \uparrow ; v \downarrow ; \text{BPD } \downarrow ; \text{BWD } \uparrow ; \text{Fi } \uparrow ; \text{Ödem } \uparrow$$

### 25.2.2 Konsequenzen unterschiedlicher Strömungsverhältnisse

Unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten verändern die transmuralen Vorgänge an den Blutkapillaren. Dies wird an der jeweiligen Lage des Isoringes deutlich.



#### 25-3

1. Normale Strömung im Ruhezustand: Isoring mehr auf der arteriellen Seite  
Reab  $\uparrow$
2. Schnellere Strömung: Isoring weiter nach arteriell  
Reab  $\uparrow\uparrow$
3. Verlangsamte Strömung: Isoring mehr auf der venösen Seite  
Fi  $\uparrow$