

6. Physiologische Grundlagen des Sauerstofftransportes durch Blut

Blut ist ein Transportmedium für Atemgase, Stoffwechselprodukte, für Hormone und Vitamine sowie für Wärme. Der für den Stoffwechsel der einzelnen Zellen notwendige Sauerstoff wird über das Blut transportiert. Die Menge des vom Blut aufgenommenen Sauerstoffs kann über die Sauerstoffsättigung des Blutes S_{O_2} charakterisiert werden. Ein Interesse dieser Arbeit bestand in der Bestimmung der Sauerstoffsättigung des Blutes im Gehirn. Aus diesem Grunde wird im Folgenden ein Teil des Lehrbuchwissens der physiologischen Grundlagen des Sauerstofftransportes beschrieben. Wenn nicht anders angegeben, stammen die Daten und Zahlen aus einem der Standardlehrbücher der Physiologie [1] und einem Nachschlagewerk [2].

6.1. Zusammensetzung des Blutes

Blut hat einen Anteil am Körpergewicht des erwachsenen Menschen von ca. sechs bis acht Prozent. Seine Bestandteile lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen: Blutplasma (55 %) und korpuskulare Bestandteile (45%). Für die Farbe des Blutes ist ein in den Erythrozyten enthaltenes Chromoprotein, das Hämoglobin (Hb), zuständig. Die gesamte Menge Hämoglobin im erwachsenen Körper beträgt ca. 650g. Das Hämoglobinmolekül ist aus vier Peptidketten mit je einer Häm-Gruppe aufgebaut. Durch Anlagerung je

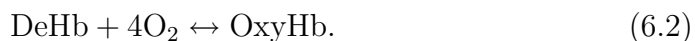
6. Physiologische Grundlagen des Sauerstofftransportes durch Blut

eines Sauerstoffmoleküls an das Häm entsteht oxygeniertes Hämoglobin¹. Weitere Typen des Hämoglobins sind das Methämoglobin (MetHb) und das Carboxy-Hämoglobin (COHb) das durch Anlagerung von Kohlenmonoxid entsteht.

Für eine physiologische Zellatmung muss am Ort des Atemgasaustausches, im Kapillarbett, eine genügend hohe O₂-Konzentration vorhanden sein. Sauerstoff wird im Gewebe und in der Lunge in physikalisch gelöster Form ausgetauscht. In der Lunge nimmt unter physiologischen Bedingungen der Sauerstoffpartialdruck im Blut den Wert des Sauerstoffpartialdruckes in den Lungenbläschen an. Über die Arterien fließt das O₂-reiche Blut zum Gewebe. Der arterielle O₂-Partialdruck (paO₂) zeigt an, ob der Sauerstoff in das Blut diffundiert ist. Der überwiegende Teil des Sauerstoffes ist aber an das Hämoglobin chemisch gebunden². Bei einem normalen O₂-Partialdruck tritt eine physiologische arterielle O₂-Konzentration nur dann auf, wenn das Hämoglobin in genügend hoher Konzentration vorhanden ist und mit O₂ gesättigt ist. Die Anlagerung des Sauerstoffs kann über die Reaktionsgleichung



beschrieben werden. Diese lautet in der hier verwendeten Schreibweise



Das Gleichgewicht dieser Reaktion ist abhängig von dem Angebot an physikalisch gelöstem Sauerstoff. Deshalb ist die Sauerstoffsättigung

$$S_{\text{O}_2} = \frac{c_{\text{OxyHb}}}{c_{\text{OxyHb}} + c_{\text{DeHb}} + c_{\text{COHb}} + c_{\text{MetHb}}}. \quad (6.3)$$

¹In dieser Arbeit wird folgende Notation verwendet: Oxygeniertes Hämoglobin (OxyHb), desoxygeniertes Hämoglobin (DeHb) und Hämoglobin (Hb). Für die Konzentrationen gilt $c_{\text{Hb}} = c_{\text{OxyHb}} + c_{\text{DeHb}}$.

²Das arterielle Blut weist im Mittel eine Konzentration des gelösten Sauerstoffs von $c_{\text{O}_2, \text{sol}} = 3.0 \frac{\text{ml O}_2}{\text{l Blut}}$ auf. Die Konzentration des chemisch gebundenen Sauerstoffs beträgt $c_{\text{O}_2, \text{chem}} = 209 \frac{\text{ml O}_2}{\text{l Blut}}$. Es werden also fast 99 % des Sauerstoffs chemisch gebunden transportiert.

6.1. Zusammensetzung des Blutes

eine relevante Größe, da sie ein Maß für den im Blut vorhandenen Sauerstoff liefert. Diese kann mit optischen Methoden, die zwei oder drei Wellenlängen nutzen nicht ermittelt werden. Statt dessen wird die partielle Sauerstoffsättigung:

$$pS_{O_2} = \frac{c_{OxyHb}}{c_{OxyHb} + c_{DeOxy}} \quad (6.4)$$

ermittelt ³.

Der Zusammenhang zwischen dem Sauerstoff-Partialdruck p_{O_2} und der Sauerstoffsättigung wird *Bindungskurve* genannt. Diese ist für physiologische Bedingungen in Abbildung 6.1 dargestellt. Ihr Verlauf ist unter anderem von dem pH-Wert und der Temperatur des Blutes und von dem CO_2 -Partialdruck abhängig.

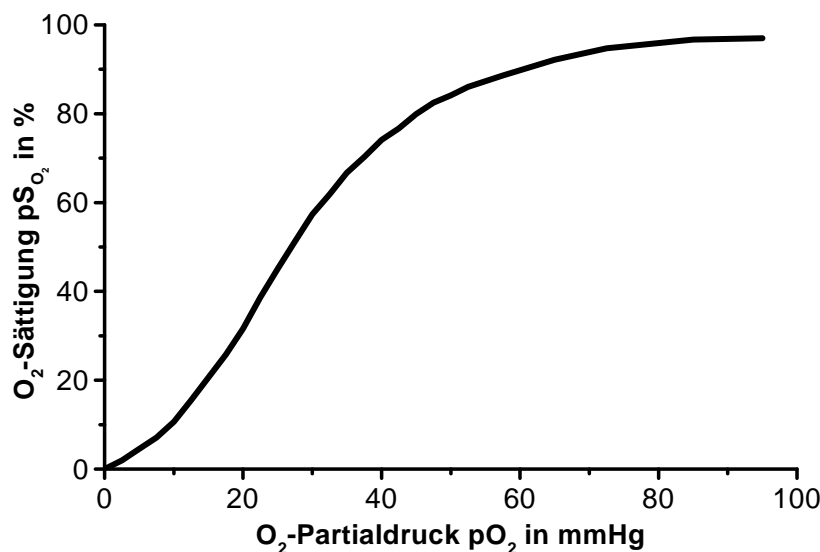


Abb. 6.1.: Die O₂-Bindungskurve des Hämoglobins (pH=7.4, T=37°C)

Der typische Wert von S_{O_2} in den verschiedenen Abschnitten des Blutkreislaufes (Arterien, Venen, Kapillarbett) ist sehr unterschiedlich. Dies wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

³In der Literatur wird diese Unterscheidung der unterschiedlichen Definitionen der Sättigungen oft nicht durchgeführt. Oft wird die partielle Sättigung einfach als Sättigung bezeichnet.

6.2. Die Sauerstoffsättigung in den Gefäßkompartimenten des Gehirns

Das Blut fließt durch die Blutgefäße und wird von der rechten und linken Herzkammer gepumpt. Der Teil des Kreislaufes zwischen der rechten und der linken Herzkammer, der die Lunge einschließt und der Sauerstoffaufnahme dient wird Lungenkreislauf genannt. Der Blutkreislauf wird über den sogenannten Körperkreislauf geschlossen.

Je nach Funktion und Durchmesser werden die Gefäße des Körperkreislaufes unterschiedlich bezeichnet (man spricht auch von Gefäßkompartimenten). Das Blut verlässt das linke Herz über den linken Vorhof und die Aorta und strömt über die Arterien zu den Organen des Körpers. Hier spalten sich die Arterien in die Arteriolen auf, durch welche die Kapillaren gespeist werden. In der räumlichen Umgebung der Kapillaren, dem Kapillarbett, werden die Atemgase wegen der großen Gefäßoberfläche und der geringen Flußgeschwindigkeit gut mit dem Gewebe ausgetauscht. Das Blut verläßt die Kapillaren über die Venolen, die zu den Venen zusammengeführt werden, über welche das Blut zum rechten Herz fließt. Wichtig für diese Arbeit ist die unterschiedliche Sauerstoffsättigung des Blutes in den verschiedenen Gefäßkompartimenten. In den Arterien beträgt die Sättigung unter physiologischen Normalbedingungen $paS_{O_2} = 96$ und $aS_{O_2} = 98$ Prozent⁴. Dies gilt für den Zufluss zu allen Organen. Die Sauerstoffextraktion des Gewebes ist für die verschiedenen Organe sehr unterschiedlich. Der venöse Rückfluss zum rechten Herzen, der sich aus einem Blutfluss aus allen Organen zusammensetzt, hat einen Sättigungswert (pvS_{O_2}) von ca. 75 Prozent. Die Sauerstoffextraktion des Gehirns ist im Vergleich zu anderen Organen sehr hoch. Dementsprechend niedrig ist die Sättigung des venösen Blutes. In der Literatur existieren unterschiedliche Werte, die im folgenden zusammengefasst werden.

Für den venösen Rückfluss aus dem menschlichen Kopf über die Jugularvene werden in einem Lehrbuch [1] Sättigungswerte von 61 Prozent angegeben. In einer älteren Publikation [3] wird für 50 gesunde Männer im Alter von 18 bis 29 Jahren die Sauerstoffsättigung in der Jugularvene zwischen 55 und 71 Prozent bei Ruhebedingungen angegeben. Im derzeitigen klinischen Ge-

⁴Zur Notation: Mit $paS_{O_2} = 96$ ist die partielle arterielle Sauerstoffsättigung gemeint.

6.2. Die Sauerstoffsättigung in den Gefäßkompartimenten des Gehirns

| | arteriell | kapillar | venös |
|--------------------|-----------|------------|--------|
| Volumenanteil in % | 21 | 33 | 46 |
| Sättigung in % | 97 | dazwischen | 55- 71 |

Tab. 6.1.: Die Sauerstoffsättigung in den verschiedenen Gefäßkompartimenten und ihre Anteil am gesamten Gefäßvolumen im Kortex. Volumenabschätzung aus [6].

brauch wird von einer physiologischen Sauerstoffsättigung des Blutes in der Jugularvene im Bereich von 55 bis 75 Prozent ausgegangen [4]. Es ist ein erster Versuch publiziert, die Sauerstoffsättigung des Blutes in großen Venen durch Untersuchungen in einem Kernspintomographen zu bestimmen. Hierzu wurde bei 5 Probanden an insgesamt 14 verschiedenen Venen Messungen ausgewertet. Der Autor findet eine mittlere Sauerstoffsättigung von $S_{O_2} = (54 \pm 3)\%$ [5].

Durch optische Methoden, die über einen Bereich von zirka einem Kubikzentimeter die Gewebeabsorption im Gehirn ermitteln, können die Gefäßkompartimente nicht unterschieden werden. Die gemessene Sauerstoffsättigung wird ein irgendwie geartetes Mittel aus den Sättigungswerten der verschiedenen Gefäßkompartimenten sein. Um diese Schwierigkeit deutlich zu machen wird dieser Sättigungswert im weiteren Sättigungsparameter Y genannt.

Der Anteil der verschiedenen Gefäßkompartimente am gesamten Blutvolumen kann grob abgeschätzt werden. In [6] kommt der Autor dabei zu den in der Tabelle 6.1 dargestellten Werten. Wenn man annimmt, dass die optische Methode die Sättigung in den Gefäßkompartimente gewichtet mit ihrem prozentualen Volumentanteilen mittelt und dass die Sättigung in den Kapillargefäßen sich als Mittelwert der arteriellen und der venösen Sättigung ergibt, so erhält man für den Sättigungsparameter des Gesamtblutes einen Wert zwischen 70 und 80 Prozent.

Diese Zahl ist aber nur gültig, wenn man annimmt, dass das gesamte Blutvolumen homogen im Gehirn verteilt ist. Das Blut befindet sich jedoch in unterschiedlich großen Blutgefäßen. In [7] werden Modellierungen und Phantommessungen präsentiert, die zeigen, dass der Beitrag zur Gesamtabsorption durch die dicken Gefäße geringer als durch feinere Gefäße ist. Im Resümee lässt sich feststellen, dass der oben angegebene Wert für die Sauerstoffsätti-

6. Physiologische Grundlagen des Sauerstofftransportes durch Blut

gung des Gesamtblutes im Gehirn nur eine sehr grobe Abschätzung darstellt.

6.3. Weitere Eigenschaften der Gehirndurchblutung

Mit der in dieser Arbeit beschriebenen spektroskopischen Methode können Änderungen der Oxy- und Desoxyhämoglobin-Konzentrationen im Gehirn bestimmt werden. Diese Konzentrationsänderungen können z.B. durch Blutdruckschwankungen, neuronale Aktivität oder durch pathogene Gefäßveränderungen induziert werden. Einen Teil dieser Ursachen für Konzentrationsänderungen soll im folgenden kurz dargestellt werden.

Bei NIRS-Messungen am Kopf beobachtet man oszillierende Änderungen der Oxy- und Deoxyhämoglobin-Konzentration bei unterschiedlichsten Frequenzen.

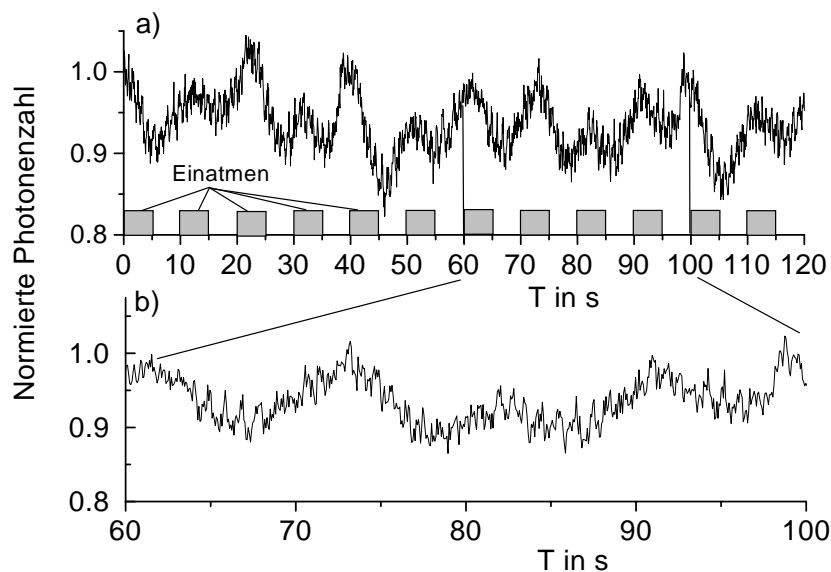


Abb. 6.2.: Der Einfluss forcierten Atmens, auf die registrierte Photonenzahl. Während der grau eingezeichneten Phasen a) wurde der Proband aufgefordert einzuzatmen. In dem vergrößerten Bereich b) ist der Effekt des Pulsierens der Gefäße mit dem Herzschlag gut zu erkennen.

Am gesamten Körper sorgt die pulsatile Druckänderung für eine Veränderung des Gefäßdurchmessers. Diese Volumenänderung der Blutgefäße wird

6.3. Weitere Eigenschaften der Gehirndurchblutung

bei der Pulsoxymetrie (u. a. am Finger) zur Bestimmung der arteriellen Sauerstoffsättigung verwendet. Die Gefäße der Kopfhaut und des Gehirns pulsieren ebenfalls mit dem Herzschlag und führen hiermit zur einer periodischen Änderung der Absorption. Diese dominiert die optischen Signale die am ruhende Probanden gemessen werden. Das Gehirn bewegt sich im Kopf mit dem Rhythmus des Herzschlages. Welchen Einfluss dies auf dies NIRS-Signale hat, ist unbekannt. Weiterhin ist die Bewegung des Gehirns korreliert mit der Atmung. Abbildung 6.2 a) zeigt das Ergebnis einer NIRS Messung am menschlichen Kopf. Der Proband wurde aufgefordert, seine Atmung bewusst auf einem 10s-Rhythmus zu halten⁵. Die in Abbildung 6.2 b) dargestellte Intensitätsänderung wird durch die Atmung dominiert Auf einer anderen Zeitskala (Abbildung 6.2 b)) ist die durch das Pulsieren der Gefäße dominierte Intensitätsänderung dargestellt. Der Effekt durch den Herzschlag ist gut zu erkennen und beträgt bei der verwendeten Wellenlänge von 805 nm typischerweise ein bis drei Prozent. Oft beobachtet wird auch eine langsame periodische Änderung des Blutdruckes von 0.1 Hz, selbst wenn die Atmung des Probanden eine andere Frequenz hat [8]. Die zugehörigen physiologischen Mechanismen sind weitgehend unbekannt.

Außer Sauerstoff diffundieren weitere Stoffe aus den Kapillaren in das Gewebe der verschiedenen Organe. Die das Gehirn versorgenden Gefäße lassen nur wenige Stoffe in das Gehirngewebe eindringen. Man spricht bei dieser restriktiven Selektion von der *Bluthirnschranke*. Glukose, Sauerstoff, Kohlendioxid und fettlösliche Substanzen wie Alkohol, Coffein, Nikotin, Heroin und verschiedene Anästhetika diffundieren gut aus den Gefäße zu den Gehirnzellen. Andere Substanzen, wie z.B. Proteine und Antibiotika, können die Bluthirnschranke nicht überwinden.

⁵Quelle: Ti:Sa-Laser bei 805 nm, Detektor: MCP-PMT, Optodenabstand: 30 mm, Samplingzeit: 100 ms, für weitere technische Details s. Abschnitt 3

6. Physiologische Grundlagen des Sauerstofftransportes durch Blut

- | |
|---|
| a) Änderung der Konzentration von Oxy- und Desoxyhämoglobin |
| b) Der Sättigungsparameter des Blutes im Gehirn. |
| c) Arterielle Sauerstoffsättigung |
| d) Änderungen der Blutflussgeschwindigkeit |
| e) Störungen der Autoregulation |

Tab. 6.2.: Potentielle Messparameter der NIRS am Kopf.

6.4. Potentielle klinische Anwendungen der NIRS am Kopf

Die NIRS am Kopf wird als neurologische Forschungsmethode von ein bis zwei Dutzend Forschungsgruppen in der Welt eingesetzt. Im folgenden Abschnitt werden die potentiellen Möglichkeiten, die die NIRS im klinischen Alltag besitzt, diskutiert.

Tabelle 6.2 listet die potentiellen Messgrößen der NIRS am Kopf auf und Tabelle 6.4 beschreibt vier klinische Situationen, bei denen die NIRS am Kopf zur Anwendung kommen könnte. Für die diagnostische Bedeutung der Messparameter ist zwischen zwei prinzipiellen klinischen Situationen zu unterscheiden. Zu einem kann die Anforderung bestehen, dass die Parameter lokal aufgelöst gemessen werden, zum anderen sind Situationen (z.B. im Operationssaal) denkbar, bei denen die Messung an ein oder zwei Positionen am Kopf für die Ermittlung eines globalen Parameters ausreicht. Der Aufwand für den ersten Fall ist wegen des schwierigen Verfahren der Anbringung der Optoden sehr hoch. Eine Erleichterung könnte hier noch dadurch gegeben sein, dass kein simultanes Messen der vielen Positionen notwendig ist. Ein Beispiel hierfür wäre die Schlaganfallsdiagnostik, wo das Auffinden eines Areals mit gestörten Sättigungsparametern durch ein mehrfaches Umplatzen von Optoden denkbar ist.

Die Bestimmung der **Änderung der Oxy- und Desoxyhämoglobin-**

6.4. Potentielle klinische Anwendungen der NIRS am Kopf

Konzentration ist in der NIRS-Forschung am Kopf bisher am weitesten vorangeschritten. Bisher war eine Quantifizierung dieser Änderungen von mäßigem Interesse. Die Konzentrationsänderungen geben keine Auskunft über eine mögliche Unterversorgung eines Gewebes mit Sauerstoff und werden demnach als direkte Messgröße keine klinische Relevanz erlangen. Die Hauptanwendung ist derzeit auf dem Gebiet der neurologischen Forschung zu sehen. Hier gelingt es mittlerweile mit vielen Quellen und Detektoren am Kopf, über die neurovaskuläre Kopplung, die neuronale Aktivität mit einer räumlichen Auflösung von zirka einem Zentimeter in der Großhirnrinde zu lokalisieren. Indirekt ist ein klinischer Einsatz zur Bestimmung der arteriellen Sauerstoffsättigung oder zur Diagnose von Störungen der Autoregulation (s. u.) denkbar. Ebenso ist die Anwendung in der Epilepsiediagnose vorstellbar, wo durch eine Lokalisation der Änderung von Oxy- und Desoxyhämoglobin während eines Anfalls ein 'Entstehungsherd' lokalisiert werden könnte. Der wesentliche Grund, warum es bisher wenig Publikationen zu NIRS Messungen während eines epileptischen Anfalls gibt, sind die zu erwartenden Bewegungsartefakte während des Anfalls.

Die **Sauerstoffsättigung** des Gesamtblutes im Kopf ist mit den bisherigen optischen Methoden nicht bestimmbar. Es gab diverse apparative Entwicklungen und zwei kommerzielle Geräte⁶, mit denen Studien am Menschen und am Tier durchgeführt wurden. In diesen Studien wird die Korrelation des mit NIRS bestimmten Sättigungsparameters Y entweder mit der Sättigung in der Jugularvene oder mit dem Sauerstoffpartialdruck im Gewebe⁷ untersucht.

Diverse Studien an Erwachsenen zeigen, dass die zwei verbreitetsten kommerziellen NIRS-Geräte für die Bestimmung eines klinisch relevanten

⁶Die kommerziellen Geräte sind das NIRO500 bzw. das NIRO300 von Hamamatsu und das INVOS 3100 bzw INVOS 4100 von Somanetics.

⁷Dieser Partialdruck kann mit einer (elektrochemischen) Sauerstoffsonde, während eines neurochirurgischen Eingriffes mit einer Auflösung von wenigen Millimetern bestimmt werden.

6. Physiologische Grundlagen des Sauerstofftransportes durch Blut

Sättigungsparameters unbrauchbar sind [9, 4, 10, 11]⁸⁹. Die physikalische Diskussion um die Bestimmbarkeit des Sättigungsparameters muss im Kontext der medizinischen Anwendung geführt werden. Hierzu ist es wichtig, wie in Tabelle 6.3 eine Diskussion darüber zu führen, was der Sättigungsparameter leisten soll.

Die **Pulsoxymetrie** ist eine klinische Standarddiagnostik zur Bestimmung der arteriellen Sauerstoffsättigung [13]. Typischerweise wird das Gewebe am Finger, am Zeh oder am Ohrläppchen durchstrahlt [14]. Die pulsatile Komponente des transmittierten Lichtes wird bei mindestens zwei Wellenlängen analysiert. Die zugrundeliegende Annahme ist, dass die Sättigung des pulsierenden Blutes der arteriellen Sauerstoffsättigung entspricht. Dies ist am Finger und am Ohrläppchen gewährleistet, da an diesen peripheren Geweben in Ruhe die Sauerstoffausschöpfung minimal ist, und somit auch die venöse Sättigung nicht weit von der arteriellen Sättigung abweicht. Die Pulsoxymetrie liefert somit ein Maß für die *globale* arterielle Sauerstoffsättigung. Ein ähnliches Verfahren am Gehirn für eine lokale Messung anzuwenden, könnte sehr interessant sein. Man würde eine Mischung aus arterieller und venöser Sättigung erhalten (beide Gefäßkompartimente pulsieren). Wie bei der Sauerstoffsättigung des Gesamtblutes, müssten Studien am Menschen zeigen, ob der ermittelte Sättigungswert mit einem pathologischen Zustand korreliert (es gilt ebenfalls die Diskussion in Tabelle 6.3).

In einer Arbeit wird die Pulsoxymetrie am Kopf eines Erwachsenen durchgeführt [15]. Dabei wurde aber nicht auf das Problem der Störung durch die extrazerebrale Kompartimente eingegangen. Der bestimmte Parameter wird durch die Sauerstoffsättigung der Kopfhaut dominiert und ist demnach für eine Diagnostik des Gehirns wertlos. Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Tiefenauflösung von Absorptionsänderungen stellt eine Lösung dieses Problems dar. Die Möglichkeiten werden an einem ersten Beispiel in Abschnitt 7.5 diskutiert.

⁸Während operativer Eingriffe an Kindern hingegen wird die NIRS als Diagnostik am Kopf erfolgreich eingesetzt (s. z.B. [12]).

⁹Ob diese Geräte einen wesentlichen klinischen Parameter liefern, ist eine andauernde Diskussion. Die Hersteller können viele Studien vorweisen, die ein Funktionieren ihrer Technik beschreiben (s. <http://www.somantics.com> für eine Literaturliste).

Die Sauerstoffsättigung – ein klinisch relevanter Parameter ?

Wie die Diskussion in Abschnitt 6.2 gezeigt hat, ist die Sauerstoffsättigung des Gewebes ein Parameter, für die ein Arzt keinen physiologischen oder pathologischen Grenzwert angeben kann. Diese Grenzwerte müssen erst in klinischen Studien gefunden werden. Insofern ist die Diskussion, ob die Sättigung aus der optischen Messung korrekt oder falsch bestimmt wurde, irrelevant. Wichtiger ist es, Eigenschaften des Sättigungsparameters Y zu definieren, die ihn zu einer klinisch relevanten Größe machen. Diese sind:

1. Y muss unabhängig von Blutvolumen- und Oxygenierungsänderungen in den extrazerebralen Kompartimenten sein.
2. Y sollte beim gesunden Probanden unabhängig von der Messposition am Kopf einen ähnlichen Wert ergeben.
3. Y darf für unterschiedliche Patienten einen unterschiedlichen Basiswert haben.
4. Es muss eine Schwelle für Y geben (relativ oder absolut), unter der eine Schädigung des Gehirns durch eine Unterversorgung mit Sauerstoff aus dem Blut möglich ist.

Tab. 6.3.: Die Diskussion um die Definition eines relevanten Sättigungsparameters Y des Blutes im Gehirn.

Ein Maß für den zerebralen **Blutfluss** wird z.B. mit der Magnetresonanztomographie nach Injektion eines Kontrastmittels bestimmt. Hierbei wird ausgenutzt, dass die messbare Zeit, die der Bolus im Gewebe verbleibt, mit der Blutflussgeschwindigkeit zusammenhängt. Eine ähnliches Vorgehen bietet sich mit der NIRS und einem Kontrastfarbstoff an. Ein Problem sind hierbei die störenden Absorptionsänderungen durch den Farbstoff in den extrazerebralen Kompartimenten. In Abschnitt 7.3 wird bei Messungen am Kopf des Erwachsenen gezeigt, dass dieses Problem lösbar ist.

6. Physiologische Grundlagen des Sauerstofftransportes durch Blut

| |
|--|
| Herzchirurgischer Eingriff mit abgestellter Herz-Lungenmaschine → b) |
| Epileptischer Anfall → a) |
| Schlaganfall, Akutdiagnostik b) e) |
| Schlaganfall, Verlaufsdiagnostik a) - e) |
| Subdurales Hämatom, Akutdiagnostik b) und e) |
| Subdurales Hämatom, Verlaufsdiagnostik a), b) und e) |

Tab. 6.4.: Klinische Situationen, in denen die Messparameter aus Tabelle 6.2 von Interesse sein könnten.

Aufgrund von physiologischen Überlegungen eröffnet sich eine weitere potentielle Anwendung. Der Blutdruck des menschlichen Körpers ist mit 0.1 Hz moduliert. Das Gehirn versucht über die Autoregulation den Blutfluss konstant zu halten und regelt somit diese Blutdruckänderung. Dies ist an einem Phasenversatz zwischen Oxy- und Desoxyhämoglobin feststellbar [8]. Ist aus pathophysiologischen Gründen, z.B. nach einem Schlaganfall, die **Autoregulation gestört**, sollte dies an einer Änderung dieses Phasenversatzes feststellbar sein [8]. Auch bei dieser Methode ist eine Trennung von extra- und intrazerebralen Absorptionsänderungen wesentlich.

6.5. Zusammenfassung

Durch eine Unterversorgung mit Sauerstoff von wenigen Minuten ist das Gehirn gefährdet. Die Sauerstoffsättigung im Blut des Gehirns ist ein Parameter, dessen Rückgang auf eine solche Unterversorgung hinweist. Diverse weitere Parameter und damit weitere klinische Anwendungen sind denkbar. Der jetzige Stand der Technik ermöglichte bisher keine wesentliche Anwendung.

Weitere Entwicklungen sind notwendig.

6.6. Literatur

- [1] R. F. Schmidt und G. Thews. *Physiologie des Menschen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 27. Auflage, 1997.
- [2] H. Hildebrandt, Hrsg. *Pschyrembel Klinisches Wörterbuch*. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 257. Ausgabe, 1994.
- [3] E. L. Gibbs, W. G. Lennox, L. F. Nims und Gibbs. F. A. Arterial and cerebral venous blood – arterial-venous difference. *J. Biol. Chem.*, **144**:325–332, 1942.
- [4] S. B. Lewis, J. A. Myburg, E. L. Thornton und P. L. Reilly. Cerebral oxygenation monitoring by near-infrared spectroscopy is not clinically useful in patients with severe closed-head injury: a comparison with jugular venous bulb oximetry. *Crit. Care Med.*, **24**:1334–1338, 1996.
- [5] E. M. Haacke, S. Lai, J. R. Reichenbach, K. Kuppusamy, F. G. C. Hoogenraad, H. Takeichi und W. Lin. In vivo measurement of blood oxygen saturation using magnetic resonance imaging: A direct validation of the blood oxygen level-dependent concept in functional brain imaging. *Hum. Brain. Map.*, **5**:341–346, 1997.
- [6] P. C. van Zijl, S. M. Eleff, J. A. Ulatowski, J. M. Oja, A. M. Ulug, R. J. Traystman und R.A. Kauppinen. Quantitative assessment of blood flow, blood volume and blood oxygenation effects in functional magnetic resonance imaging. *Nat. Med.*, **4**(2):159–167, 1998.
- [7] F. Liu, A. H. Hielscher, B. Beauvoit, L. Wang, S. L. Jaques, F. K. Titel und B. Chance. Near infrared spectroscopy of a heterogeneous, turbid system containing distributed absorber. *Proc. SPIE*, **2326**:164–172, 1995.
- [8] H. Obrig, M. Neufang, R. Wenzel, M. Kohl, J. Steinbrink und A. Villringer. Spontaneous low frequency oscillations of cerebral haemodynamics

6. *Physiologische Grundlagen des Sauerstofftransportes durch Blut*

and metabolism under rest and visual stimulation in adults, 2000. eingereicht bei: Int. J. Psychophysiology.

- [9] G. Buunk, J.G. van der Hoeven und A. E. Meinders. A comparison of near-infrared spectroscopy and jugular bulb oximetry in comatose patients resuscitated from cardiac arrest. *Anaesthesia*, **53**(1):13–19, 1998.
- [10] R. Brown, G. Wright und D. Royston. A comparison of two systems for assessing cerebral venous oxyhaemoglobin saturation during cardiopulmonary bypass in humans. *Anaesthesia*, **48**(8):697–700, 1993.
- [11] C. S. Chen, B. K. Leu und K. Liu. Detection of cerebral desaturation during cardiopulmonary bypass by cerebral oximetry. *Acta Anaesthesiol Sin*, **34**(4):173–178, 1996.
- [12] P. E. Daubeney, S. N. Pilkington, E. Janke, G. A. Charlton, D. C. Smith und S. A. Webber. Cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy: comparison with jugular bulb oximetry. *Ann. Thorac. Surg.*, **61**(3):930–934, 1996.
- [13] R. Zander und F. Mertzluft, Hrsg. *The Oxygen Status of Arterial Blood*. Karger, 1991.
- [14] H. Wabnitz und K.-D. Klein, Hrsg. *Pulsoximeter- Messtechnische Prüfung von Medizinprodukten mit Messfunktion*. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1999.
- [15] M. A. Franceschini, E. Gratton und S. Fantini. Noninvasive optical method of measuring tissue and arterial saturation: an application to absolute pulse oximetry of the brain. *Opt. Lett.*, **24**(12):829–831, 1999.