

# Therapie in einer Druckkammer: Hyperbare Sauerstofftherapie (HBO) - Grundlagen, Indikationen und Forschung

Hartmut Strelow

**HBO ist die gebräuchliche Abkürzung für „Hyperbare Oxygenation“. Bei dieser Behandlungsform wird reiner Sauerstoff unter Überdruck eingeatmet. Dadurch wird die Sauerstoffmenge, die im menschlichen Blut und in den Geweben in physikalisch gelöster Form vorkommt, um ein Vielfaches erhöht.**

Der Einsatz des Überdrucks in der Medizin hat eine lange Geschichte. Bereits 1664 versuchte der britische Arzt Henshaw in einer mit Hilfe großer Blasebälge betriebenen Druckkammer Lungenerkrankungen zu therapieren bzw. deren Auftreten zu verhindern. Nach Entdeckung des Sauerstoffs als essenziellem Bestandteil der Atemluft durch Priesley im Jahre 1775 wurde die zunächst aufkommende Euphorie durch die Beschreibung toxischer Effekte des Sauerstoffs gebremst. Erst 1834 lebte die Sauerstofftherapie mit einer von dem Franzosen Junot erbauten Druckkammer wieder auf, in der verschiedene Lungenerkrankungen bei einem Druck von 3 atm. behandelt wurden. Die erste Dekompressionsbehandlung bei Überdruck-erkrankungen datiert aus dem Jahre 1885; beim Bau des Hudson-Tunnels in New York wurde eine Druckkammer zur erfolgreichen Behandlung erkrankter Caissonarbeiter eingesetzt. Seit Anfang der zwanziger Jahre des letzten Jahrhunderts wird die HBO routinemäßig zur Therapie der Dekompressionskrankheit bei Tauchern und Überdruckarbeitern durchgeführt. 1956 etablierten Boerema und Brummelkamp in den Niederlanden sowie Illingworth in England mit ihren grundlegenden Studien über den Gastransport unter hyperbaren Bedingungen die HBO in der Herz- und Thoraxchirurgie und zur Therapie des Gasbrands. Erstmals wurde für diese Therapie ausschließlich reiner Sauerstoff benutzt. Der Einsatz für Operationen am offenen Herzen erlangte kaum Popularität und wurde von der rasanten Entwicklung der Herz-Lungen-Maschine überholt.

Der Einsatz zur Behandlung des Gasbrands jedoch löste in der ganzen Welt Interesse an der Frage aus, wie der Sauerstoff unter hyperbaren Bedingungen therapeutisch zu nutzen wäre. Erste Anwendungen der hyperbaren Sauerstofftherapie in Deutschland erfolgten ab 1961 im Schiffahrtsmedizinischen Institut der Marine in Kiel-Kronshagen.

Trotz intensiver Fortschritte der hyperbaren Medizin in den USA und auch Europa kam es erst Anfang der neunziger Jahre in Deutschland zu einer Renaissance dieser Behand-

lungsmethode. Neue Druckkammerzentren entstanden, Qualitätsstandards wurden geschaffen und die Hyperbarmedizin wurde mühsam, aber zielstrebig in das ambulante und stationäre Behandlungsregime integriert. Erst seit kurzer Zeit werden Druckkammern auch auf dem Gelände von Universitäten installiert, mit dem Ziel, die wissenschaftliche Erforschung der Sauerstoffüberdruckbehandlung und deren Nutzen für den Menschen zu aktivieren, zu forcieren und zu unterstützen. Die Wirkungen der HBO-Therapie sind durch umfangreiche experimentelle Studien gut definiert und lassen sich auf physikalische, physiologische und biochemische Grundprinzipien zurückführen.

Die hyperbare Sauerstofftherapie verwendet als physikalisches Hilfsmittel einen erhöhten Umgebungsdruck, der bei einigen Indikationen, z. B. bei Tauchunfällen oder Gasembolien, auch als eigenständige therapeutische Komponente wirkt.

Die wichtigsten Auswirkungen des erhöhten Umgebungsdrucks lassen sich mit drei physikalischen Gesetzen beschreiben:

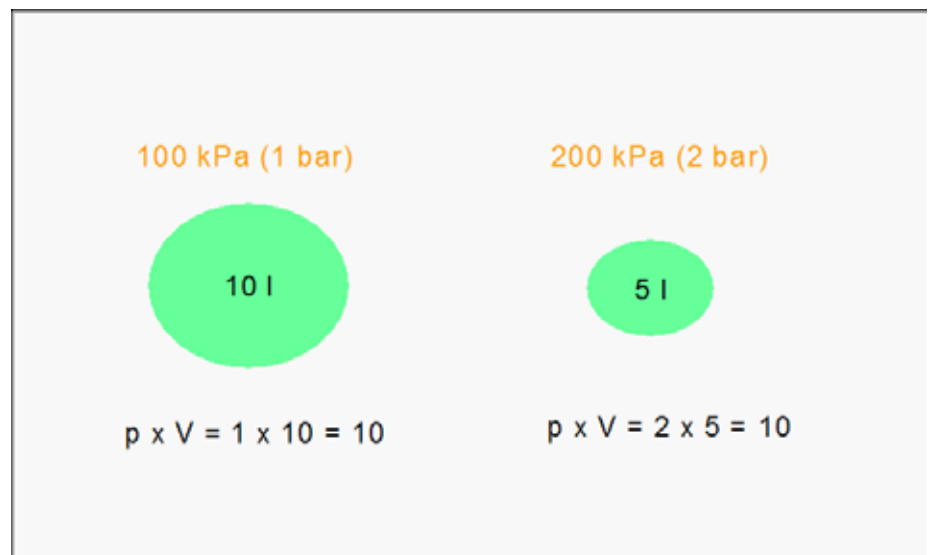
Bei der Applikation von Überdruck kommt es zu einer mechanischen Kompression gasgefüllter Hohlräume. Nach dem Gesetz von Boyle und Mariotte ist dabei das Produkt aus Druck und Volumen bei abgeschlossenen Gasräu-

men und gegebener Temperatur konstant. Wird z. B. der Druck einer bestimmten Gasmenge auf das Doppelte gesteigert, so halbiert sich das Gasvolumen (Abbildung 1). Betroffen sind hiervon sowohl anatomisch vorgegebene gasgefüllte Hohlräume (z. B. Nasennebenhöhlen, Lunge etc.), als auch Gasblasen gleich welcher Genese im Körpergewebe bzw. im Gefäßsystem. Dieses Gesetz erklärt die Verkleinerung des Volumens von Gasblasen nach arterieller Gasembolie oder Dekompressionskrankheit während einer Rekompensation.

Als weiterer Effekt der Erhöhung des Umgebungsdrucks kommt es zu einer analogen Teildruckerhöhung der Atemgase. Nach dem Gesetz von Dalton setzt sich der Gesamtdruck eines Gasgemisches (z. B. Luft) aus den Partialdrücken seiner Gaskomponenten zusammen. Dies hat zur Folge, dass schon bei Luftatmung unter hyperbaren Bedingungen der Sauerstoffteildruck, der sog.  $pO_2$ , in der Inspirationsluft steigt. Bei Atmung von 100% Sauerstoff als Inspirationsgas steigt der  $pO_2$  entsprechend proportional zur Gesamtdruckerhöhung an und entspricht in diesem Fall dem einwirkenden Umgebungsdruck.

Das Gesetz von Henry beschreibt die Lösung von Gasen in Flüssigkeiten in Abhängigkeit vom einwirkenden Außendruck, wobei mit ansteigendem Umgebungsdruck entsprechend

**Abbildung 1:** Druckvolumenänderung gemäß dem Gesetz von Boyle-Mariotte



mehr Gas in Flüssigkeiten, wie z. B. dem Blut oder der Gewebsflüssigkeit, gelöst wird. Daraus folgt, dass bei einer Anhebung des Sauerstoffpartialdruckes im Atemgas proportional auch die im Blut physikalisch gelöste Sauerstoffmenge steigt (Abbildung 2).

Unter physiologischen Bedingungen wird der Sauerstoff mit der Atemluft aufgenommen und über den Gasaustausch in den Lungenbläschen ins Blut weitergeleitet. Dort wird der Sauerstoff zum größten Teil chemisch an den roten Blutfarbstoff, das Hämoglobin, gebunden, in die Peripherie transportiert und dort verstoffwechselt. Eine geringe Sauerstoffmenge wird bereits unter normobaren Bedingungen physikalisch im Blut gelöst, allerdings ist dieser Anteil so gering und unbedeutend, dass er bei Berechnungen vernachlässigt werden kann.

Die Transportkapazität der roten Blutkörperchen ist allerdings begrenzt. Bei Gesunden ist das Hämoglobin im arteriellen Schenkel unter Normaldruckbedingungen zu 96–98% mit Sauerstoff gesättigt. Eine signifikante Steigerung der Sauerstoffaufnahme des Körpers ist über die chemische Bindung an das Hämoglobin nicht zu erreichen. Bei der Sauerstoffatmung unter Überdruck wird das Hämoglobin als Transportmedium umgangen und der Sauerstoff vermehrt physikalisch im Blut gelöst.

Aus dem Alltag ist dies z. B. mit der unter Druck im Mineralwasser gelösten Kohlensäure vergleichbar. Nach dem Öffnen der Flasche

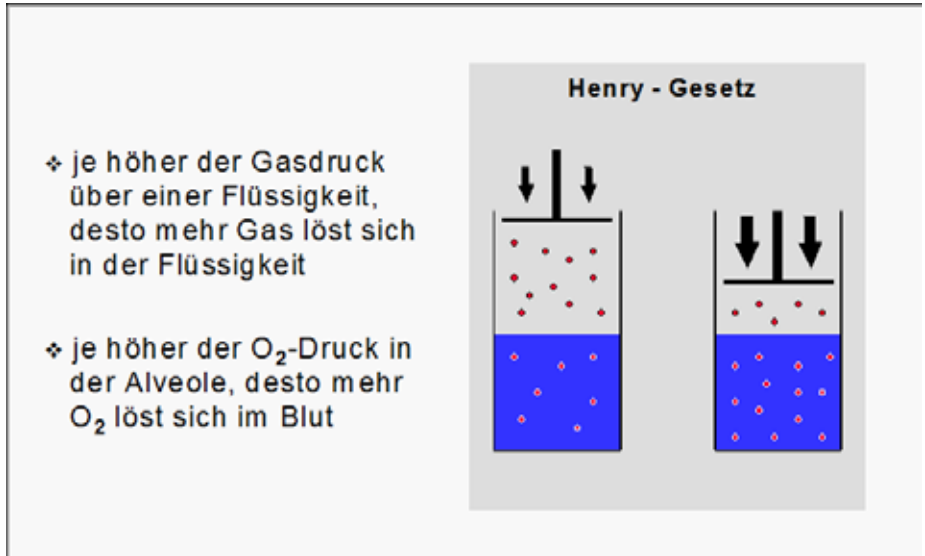


Abbildung 2: Änderung der Gaslöslichkeit bei Erhöhung des Umgebungsdruckes

perlt die Kohlensäure aus, da bei normalem atmosphärischen Luftdruck nur sehr wenig Kohlensäure im Wasser gelöst werden kann. Unter Überdruck kann der physikalisch gelöste Kohlensäureanteil im Wasser erhöht werden.

Den gleichen Effekt macht man sich bei der hyperbaren Sauerstofftherapie zunutze, d. h. der physikalisch gelöste Anteil des Sauerstoffs im Blut wird erhöht. Im Vergleich zur Atmung von normaler atmosphärischer Luft kann während

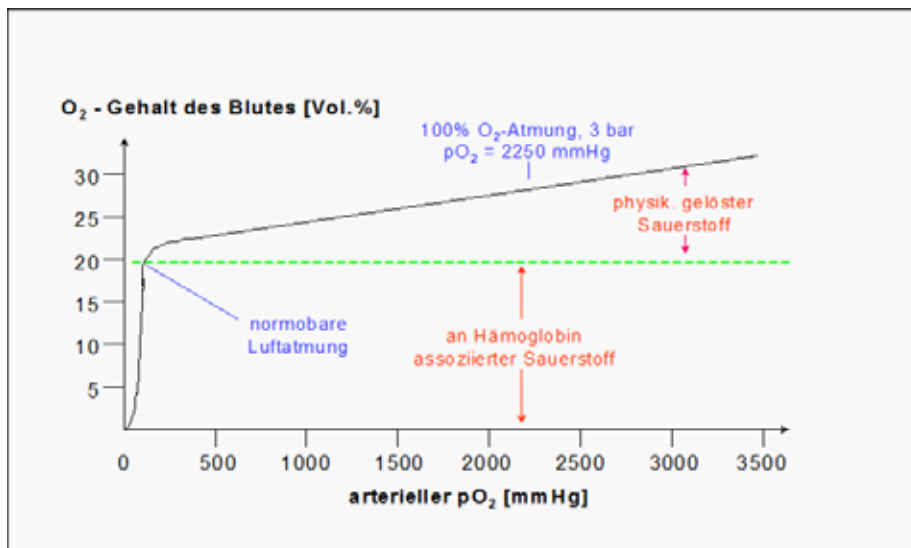
der HBO-Therapie im Blut die ca. 20-fache Menge Sauerstoff gelöst werden (Abb. 3).

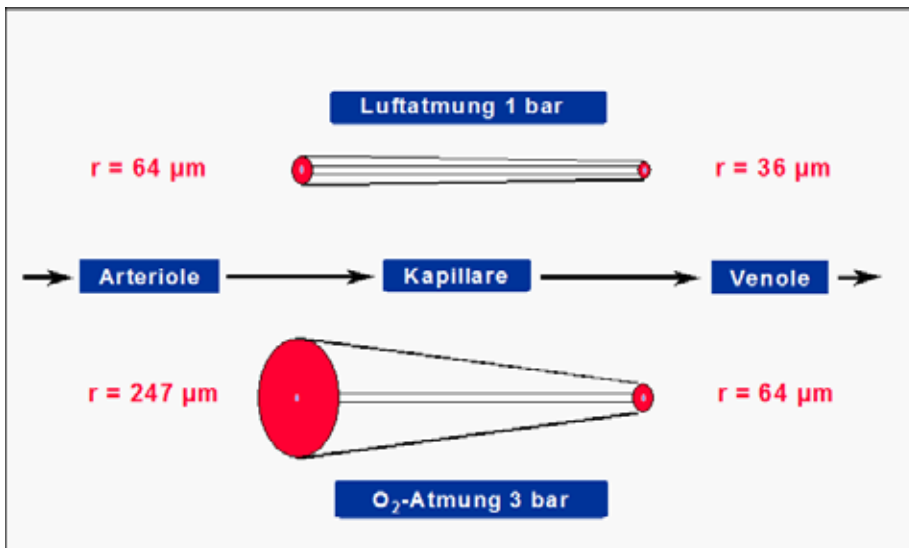
Der Amsterdamer Chirurg Boerema veröffentlichte 1961 sein berühmtes Werk „Life without blood“. Er entfernte bei Versuchstieren die roten Blutkörperchen als Sauerstoffträger und füllte das Volumen mit Plasmaexpander, einer Blutersatzflüssigkeit, auf. Es zeigte sich, dass die Tiere trotz des erythrozytenfreien Blutes unter hyperbaren Bedingungen einzig und allein aufgrund des physikalisch gelösten Sauerstoffanteils überlebten.

Diese physikalischen und physiologischen Mechanismen sind in vielfältiger Weise beim Menschen therapeutisch nutzbar:

- Die Sauerstoffversorgung der Gewebe erfolgt hauptsächlich über Diffusion aus den Kapillargefäßen. Die Diffusionsstrecke für Sauerstoff wird wesentlich durch seinen Teildruckgradienten von der Kapillare zum Gewebe mitbestimmt. Je höher der Partialdruckgradient und je größer der physikalisch gelöste Sauerstoffanteil im Blut, desto besser können weiter von der Kapillare entfernt liegende Gewebereiche erreicht und oxygeniert werden. Unter hyperbaren Bedingungen kann sich die Sauerstoffdiffusionsstrecke vervierfachen, d. h. der Sauerstoff erreicht Körperzellen, deren Versorgung, z. B. bei Verletzungen oder Durchblutungsstörungen, bedroht ist (Abbildung 4).

Abbildung 3: Sauerstoffaufnahme im menschlichen Organismus unter HBO (nach Jain)





**Abbildung 4:**  
Modell des Krogh-Zylinders zur Sauerstoffdiffusion unter normo- und hyperbaren Bedingungen

## Zur Person



**Hartmut Strelow**

Druckkammerleitung  
Klinik für Unfall – und Handchirurgie  
- Hyperbare Sauerstofftherapie -  
Universitätsklinikum Düsseldorf  
Moorenstraße 5, 40225 Düsseldorf  
Tel.: 0211-81-19902  
Fax: 0211-81-19906

- Zellen, die bei der Heilung von Wunden für den Aufbau von neuem Gewebe verantwortlich sind, benötigen für ihre Funktion eine Mindestmenge Sauerstoff. Steht diese nicht zur Verfügung, weil die Blutzufuhr in großen oder kleinen Gefäßen vermindert ist, kommt es zu Wundheilungsstörungen. Diese treten z. B. als sogenannte „offene Beine“ häufig bei Zuckerkranken auf. Eine Verbesserung der Sauerstoffversorgung während der HBO-Therapie kann diese Heilungszellen aktivieren und den Wundverschluss fördern.
- Die im Wundheilungsprozess notwendige Neubildung kleinster Blutgefäße, der sogenannten Kapillaren, wird - vor allem bei Wundheilungsproblemen nach einer Strahlentherapie - durch die HBO-Behandlung angeregt.
- Der Auf- und Abbau von Knochensubstanz ist auf Sauerstoff angewiesen. Die HBO-Therapie beeinflusst die im Rahmen der Grunderkrankung und der Gewebesauerstoffmangelversorgung stark reduzierte sauerstoffabhängige Funktion der Knochen auf- und abbauenden Zellen positiv.
- Die HBO-Therapie wirkt auf mehreren Wegen gegen Krankheitskeime. Bestimmte Erreger, die sog. Anaerobier, können in einer sauerstoffreichen Umgebung nicht überleben und werden daher während der HBO-Therapie direkt abgetötet. Zusätzlich wird die Toxinproduktion der Anaerobier inhibiert. Aufgrund dessen kann z. B. für einen Gasbrandpatienten die HBO-Behandlung lebensrettend sein.
- Ein Teil der körpereigenen Abwehrzellen - sog. Fresszellen - benötigt zur Keimabtötung große Mengen Sauerstoff. Bei einem Sauerstoffmangel ist ihre Funktion beeinträchtigt und die Abwehrleistung vermindert, als Folge können sich Wunden infizieren. Die HBO-Therapie kann die Leistung dieser Zellen und damit auch die Abwehrfunktionen verbessern. Die unterstützende Wirkung einiger Antibiotika bei der Infektabwehr wird unter hyperoxischen Bedingungen synergistisch verstärkt.
- Schwellungszustände im Gewebe (Ödeme) können durch eine HBO-Therapie vermindert werden. Aus der stattfindenden Verengung der Blutgefäße resultiert ein abschwellender Effekt, ohne dass es unter HBO-Bedingungen zu einem wesentlichen Abfall des Sauerstoffteildruckes im Gewebe kommt. Hypoxisches Gewebe reagiert nicht in gleichem Maße mit einer Vasokonstriktion. Dies bedeutet eine Blutumverteilung in mangelversorgte Gebiete und eine Verbesserung der Gewebesauerstoffversorgung.
- Bei Rauchgasvergiftungen wird die Elimination von Kohlenmonoxid aus dem Körper durch die HBO-Therapie beschleunigt. Kohlenmonoxid hat eine im Vergleich zu Sauerstoff vielfach höhere Bindungsaffinität zum Hämoglobin, sodass es Sauerstoff kompetitiv verdrängt. Die Folge ist eine Blockierung des Hämoglobins für den Sauerstofftransport zu den Zellen, dadurch kommt es zu intrazellulären Schäden durch Unterbrechung der Atmungskette. Primäres Ziel der HBO-Behandlung ist die schnelle Sauerstoffversorgung der Gewebe durch die Erhöhung des physikalisch gelösten Blutsauerstoffanteils unter Umgehung des Hämoglobins als Sauerstoffträger. Durch Erhöhung des Sauerstoffangebotes wird das Kohlenmonoxid über denselben kompetitiven Mechanismus verdrängt.

nismus von den Sauerstoffbindungsstellen verdrängt, zudem kann das Kohlenmonoxid mehr als zehnmals schneller aus dem Körperkreislauf eliminiert werden.

- Bei Tauchunfällen und Gasembolien werden Gasblasen im Gewebe oder in der Blutbahn sowohl durch den Überdruck als auch durch die Sauerstoffanreicherung verkleinert und schneller eliminiert. Der erhöhte Sauerstoffteildruck sorgt für eine schnelle und effiziente Sauerstoffversorgung der durch die Gasblase verlegten und dadurch mangelversorgten Gebiete. Um direkten Blaseneffekten, wie mechanische Gewebeerregungen, Gewebekompressionen und Gefäßverschlüssen zu begegnen, ist eine Sauerstoffbehandlung unter Überdruck ebenfalls sinnvoll.

Von der internationalen Fachgesellschaft Undersea and Hyperbaric Medical Society (UHMS) werden 1999 folgende Erkrankungen zur Behandlung mit hyperbarem Sauerstoff allgemein anerkannt:

- Luft-/ Gasembolie
- Kohlenmonoxidintoxikation
- Clostridiale Myonekrose (Gasbrand)
- Quetschungsverletzungen, Kompartmentsyndrom und andere traumatische Ischämien
- Dekompressionserkrankung
- Ausgewählte „Problem“-Wunden („non-healing wounds“)
- Außergewöhnlicher Blutverlust
- Intrakranielle Abszesse
- Nekrotisierende Weichteilinfektionen
- Osteomyelitis (therapieresistent)
- Osteoradionekrose, Weichteilradionekrose
- Gefährdete Haut-/Weichteiltransplantate
- Verbrennungen

Diese Indikationen decken sich mit den Empfehlungen der deutschen Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin (GTÜM), wobei diese zusätzlich den Einsatz der HBO bei akuten Innenohrperzeptionsstörungen empfiehlt.

### Die Überdruckkammer der Universität Düsseldorf

Die hyperbare Sauerstofftherapie des Universitätsklinikums Düsseldorf gehört zur Klinik für Unfall- und Handchirurgie unter der Leitung von Prof. Dr. Windolf und verfügt über eine Mehrpersonendruckkammer mit einer Kapazität von zwölf sitzenden und zwei liegenden Patienten. Die Druckkammer besteht dabei aus einem großen Behandlungsraum und einer kleineren Schleuse. In dem großen Behandlungsraum finden die HBO-Therapieeinheiten statt. Die Schleuseneinheit mit einer Kapazität von vier Sitzplätzen dient zum Schleusen von Personal und/oder Patienten in den großen Behandlungsraum, ohne dabei dessen Überdruck absenken zu müssen.



**Abbildung 5:**  
Außenansicht Druckkammer Universitätsklinikum Düsseldorf

Mit modernem Monitoring zur Überwachung und Messung der Vitalparameter der Patienten ist die Druckkammer ausgestattet. An den Patienten können alle Intensivmedizinischen Maßnahmen inklusive Narkose und künstliche Beatmung durchgeführt werden. Die Überdruckkammer ist 24 Stunden erreichbar und ganzjährig in Betrieb.

Abschließend kann resümierend festgehalten werden, dass nach dem derzeitigen Erkenntnisstand die HBO-Therapie bei einer Reihe von Erkrankungen zwar kein Wunderheilmit-

tel, aber doch eine sinnvolle und effektive Ergänzung derzeit etablierter Behandlungsmethoden darstellt. Aus diesem Grund hat sich die Universität Düsseldorf dazu entschlossen, eine interdisziplinäre Einrichtung für hyperbare Sauerstofftherapie zu etablieren. Durch intensive theoretische und klinische Forschungsaktivitäten sollen noch viele ungeklärte Fragen im Zusammenhang mit der HBO-Behandlung beantwortet werden. Diese Studien sollen dazu beitragen, diesem modernen Therapieverfahren den ihm gebührenden Stellenwert im Gesundheitswesen zuzuweisen.

**Abbildung 6:**  
Innenansicht Druckkammer Universitätsklinikum Düsseldorf

