

**Aus dem Zentrum für Operative Medizin I
Forschungsgruppe Experimentelle Chirurgie
Geschäftsführender Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. E. Gams
Betreuer: Prof. Dr. J.D. Schipke**

**Die Entwicklungsgeschichte der Überdruckkammer und
Indikationen für die Hyperbare Sauerstoff-Therapie**

Dissertation

**zur Erlangung des Grades eines Doktors der
Zahnmedizin**

**Der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität
Düsseldorf**

vorgelegt von

Kerstin Petersen

2002

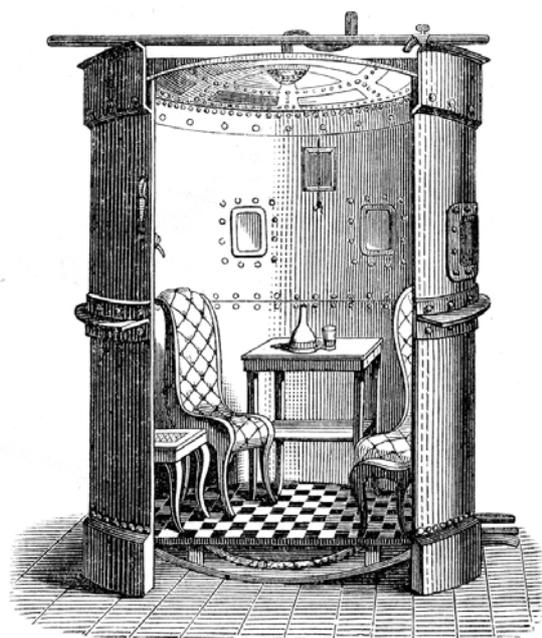
**Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf**

gez.: Univ.-Prof. Dr. med. Dieter Häussinger

Dekan

Referent: Prof. Dr. Schipke

Korreferent: Univ.- Prof. Dr. Dr. Lentrodt



Phantasie ist wichtiger als Wissen.

Denn Wissen ist begrenzt.

Albert Einstein

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung	1
2.	Druckkammern	3
2.1	Einteilung der Druckkammern.....	3
2.2	Überdruckkammern für die HBO-Therapie.....	5
2.2.1	Einpersonen-Kammern	5
2.2.2	Mehrpersonen-Kammern	7
2.3	Standorte von HBO-Therapiekammern	12
3.	Entwicklungsgeschichte der Überdruckkammer	15
3.1	Technologie und Anwendung von 1600 bis 1800	15
3.1.1	Erste Entwürfe für Druckkammern und Therapieansätze.....	15
3.2	Pneumatische Institute ab 1800	17
3.2.1	Aufnahme der pneumatischen Therapie in Frankreich.....	17
3.2.2	Einsatz der pneumatischen Therapie in Deutschland: Johannisberg im Rheingau und Bad Reichenhall	20
3.2.3	Ausdehnung der pneumatischen Therapie auf Europa	23
3.2.4	Pneumatische Kammern in Nordamerika	27
3.2.5	Technische Weiterentwicklung der Überdruckkammer	28
3.3	Ende der pneumatischen Kabinette.....	30
3.4	Arbeitsmedizinische Erkenntnisse über die Anwendung der Überdrucktechnologie im 19. Jahrhundert.....	31
3.4.1	Caisson-Technik und erste Krankheitssymptome bei Arbeiten in Überdruck	31
3.4.2	Arbeitsmedizinische Aspekte bei Arbeiten in Überdruck Ende des 19. Jahrhunderts.....	34

4.	Der Weg zur Hyperbaren Sauerstoff (HBO) –Therapie	39
4.1	Nutzung der Überdruckkammer zwischen 1900 und 1950.....	39
4.2	Anerkennung der Hyperbaren Oxygenierung (HBO) in der Medizin	40
4.3	Druckkammer-Zentren in Deutschland und Graz (Österreich)	42
4.3.1	Druckkammer des Schiffahrtsmedizinischen Instituts der Marine in Kronshagen.....	43
4.3.2	Tauchsimulator in der Bundeslehr- und Forschungsstätte der Deutschen Lebensrettungsgesellschaft (DLRG) in Berlin.....	45
4.3.3	Forschungsanlagen in Köln-Porz und Geesthacht	46
4.3.4	Druckkammeranlage in Graz (Österreich).....	48
4.3.5	Rechteckkammer in der berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik in Murnau/Bayern.....	49
4.3.6	Druckkammeranlage der Heinrich-Heine-Universität in Düsseldorf.....	52
4.4	Betonkammern	53
4.5	Unfälle in Überdruckkammern und ihre Konsequenzen	54
4.5.1	Unfall in Hannover 1976	54
4.5.2	Technische und medizinische Auflagen	55
5.	Transportdruckkammern	57
5.1	Einpersonen-Transportkammern.....	57
5.2	Mehrpersonen-Transportkammern	61
5.2.1	Sanitäts-Schleuse auf S.M.S. Vulkan	61
5.2.2	Transportable Mehrpersonen-Kammer	62
5.3	Transportkammern zur Rettung verschütteter Bergleute.....	63
5.3.1	Lengede.....	63
5.3.2	Lassing (Österreich).....	63

6.	Indikationen und Kontraindikationen für die Hyperbare Sauerstoff (HBO) –Therapie	65
6.1	Physiologische Wirkmechanismen bei der Anwendung von hyperbarem Sauerstoff	65
6.1.1	Grundlagen der HBO-Therapie.....	65
6.1.2	Effekte des hyperbaren Sauerstoffes.....	66
6.2	Indikationsempfehlungen für die HBO-Therapie	68
6.3	Indikationen der UHMS für die HBO-Therapie	73
6.3.1	Dekompressionserkrankung.....	73
6.3.2	Luft- oder Gasembolie	75
6.3.3	Kohlenmonoxid-Intoxikation mit/ohne Cyanid-Inhalation	76
6.3.4	Clostridiale Myositis und Myonekrose (Gasbrand).....	76
6.3.5	Crush-Verletzungen, Kompartmentsyndrom und andere akute traumatische periphere Ischämien.....	77
6.3.6	Verbesserte Wundheilung bei ausgewählten Problemwunden	78
6.3.7	Außergewöhnlicher Blutverlust (Anämie).....	81
6.3.8	Intracranielle Abszesse	81
6.3.9	Nekrotisierende, nichtclostridiale Weichteilinfektionen	82
6.3.10	Therapierefraktäre Osteomyelitis.....	82
6.3.11	Weichteilradionekrose und Osteoradionekrose	83
6.3.12	Kritische Hauttransplantate und Hautlappen	84
6.3.13	Brandverletzungen	84
6.4	Kontraindikationen für eine HBO-Therapie	86
6.5	Komplikationen während der HBO-Therapie.....	87
6.6	Forschungsbereiche der HBO-Therapie	88
7.	Heutiger Stand der HBO-Therapie in Deutschland	91
7.1	Bewertung der HBO-Therapie durch den Bundesausschuß der Ärzte und Krankenkassen	91
7.2	Ausblick	92

8.	Zusammenfassung.....	95
9.	Literaturverzeichnis	97
10.	Abbildungsverzeichnis.....	115
	Verdankung.....	117
	Lebenslauf	

1. EINLEITUNG

Schon im Altertum wollten die Menschen die Unterwasserwelt erforschen und benutzten hierfür Taucherglocken. Berichten zufolge befaßten sich die berühmten Politiker Alexander der Große und Julius Cäsar mit der Anwendung von Tauchapparaten [HELLER, MAGER, VON SCHROETTER 1900].

Im Mittelalter befaßte sich Sir Edmund Halley mit der Weiterentwicklung der Taucherglocke [HELLER, MAGER, VON SCHROETTER 1900], und im Jahre 1662 beschrieb erstmals der englische Wissenschaftler Nathaniel Henshaw (1628-1673) Therapiansätze unter hypo- und hyperbaren Bedingungen in einer Kammer, die er "Domicilium" nannte [VON VIVENOT 1868, JACOBSON ET AL. 1964].

Nachdem es im 18. Jahrhundert still um die Entwicklung von medizinischen Behandlungsmethoden in einer Druckkammer geworden war, erlebte diese Technologie Mitte des 19. Jahrhunderts insbesondere durch die Arbeiten des Schweizer Victor Théodore Junod (1809-1882) und der Franzosen Charles Gabriel Pravaz (1791-1853) und Emile Tabarié eine Renaissance [JUNOD 1835, PRAVAZ 1837, TABARIÉ 1838, 1840].

Die industrielle Revolution und der Wunsch, Flüsse mit Brücken zu überqueren, half der Drucklufttechnologie entscheidend vorwärts. Durch das Arbeiten in Überdruck traten neue Krankheitsbilder auf [TRIGER 1845]; Wissenschaftler und Ärzte begannen mit Forschungen auf diesem Gebiet. Auf Caisson-Baustellen (Caisson = frz.: Senkkasten) wurden die ersten Überdruckkammern aufgestellt und therapeutisch genutzt [SMITH 1873, HELLER, MAGER, VON SCHRÖTTER 1900]. Seit dieser Zeit hat die Überdrucktherapie ihren Platz in der Arbeitsmedizin.

Der französische Physiologe Paul Bert (1833-1886) führte umfangreiche Studien in der Überdruck- und Unterdruckkammer durch, wobei er auch mit Sauerstoff experimentierte [BERT 1878].

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden die ersten Tauchtöpfe entwickelt, um tauchphysiologische Aspekte zu untersuchen [STELZNER 1942]. 50 Jahre später brachten Churchill-Davidson, Ite Boerema und ihre Mitarbeiter die Hyperbare Sauerstoff (HBO)-Therapie ins Gespräch und machten sie zu einem Bestandteil der heutigen kura-

tiven und präventiven Medizin [CHURCHILL-DAVIDSON ET AL. 1955, BOEREMA ET AL. 1960].

In der vorliegenden Arbeit werden die historischen und technischen Aspekte der Druckkammer vorgestellt und medizinische Indikationen für eine Behandlung mit hyperbarem Sauerstoff diskutiert.

2. DRUCKKAMMERN

2.1 Einteilung der Druckkammern

Es gibt Unterdruckkammern und Überdruckkammern. In Unterdruckkammern kann der Umgebungsdruck von 1 bar auf subatmosphärische Werte gebracht werden. Diese Kammern finden in der Luft- und Raumfahrtmedizin Anwendung. Aufbau und Funktion der Unterdruckkammern werden in der vorliegenden Arbeit nicht vertieft.

In Überdruckkammern kann der Innendruck von 1 bar auf höhere Drücke gesteigert werden. Die erreichbare Drucksteigerung ist abhängig von der Kammerkonstruktion. Diese Kammern werden auf folgenden Gebieten eingesetzt:

- Hyperbare Sauerstoff (HBO)-Therapie,
- Therapie von verunfallten Berufs- und Sporttauchern,
- Forschung auf dem Gebiet der Tauch- und Hyperbarmedizin,
- Simulation von Tauchgängen,
- Entwicklung von Techniken für die Unterwasserarbeit und
- Caisson- und Tunnelbaustellen zum Ein- und Ausschleusen der Arbeiter.

Auf Überdruckkammern, die ausschließlich für Tier- und Laborversuche konstruiert werden, wird nicht näher eingegangen.

Je nach Anwendungsbereich lassen sich in Überdruckkammern Dekompressionen und Rekompansionen durchführen. Die Dekompression wird angewandt, um Personen, die einem höheren Druck ausgesetzt waren, wieder in eine normobare Umgebung zu bringen. Sie erfolgt stufenweise mit Hilfe sogenannter Austausch Tabellen.

Im Bereich der Berufstaucherei kann weiter unterschieden werden in Kammern, die versenkt werden können (submersible decompression chamber) und Kammern, die auf Schiffen installiert sind (deck decompression chamber). Letztere haben den Vorteil, daß die Versorgung der Taucher auch bei ungünstigen Bedingungen wie Sturm oder Strömung gesichert ist. Mit den versenkbaren Kammern werden Taucher zu und von ihrem

Arbeitsplatz transportiert und gegebenenfalls in einer auf Deck installierten Kammer weiterbehandelt [EDMONDS ET AL. 1983].

Rekompressionskammern werden zur Simulation von Tieftauchgängen benutzt. Auf diese Weise lassen sich Erfahrungen mit Überdruck bei weitgehend kontrollierbaren und standardisierten Bedingungen sammeln.

Außerdem werden Überdruckkammern von Bauunternehmen auf Tunnel- und Caisson-Baustellen zur Verfügung gestellt. Die in Abbildung 1 dargestellte Kammer verfügt auf jeder Seite über eine Vorkammer, die für jeweils vier Personen konzipiert ist und zum Ein- und Ausschleusen der Arbeiter dient. In der Mitte befindet sich die Hauptkammer, die 20 Personen aufnehmen kann [LINDNER 2001].

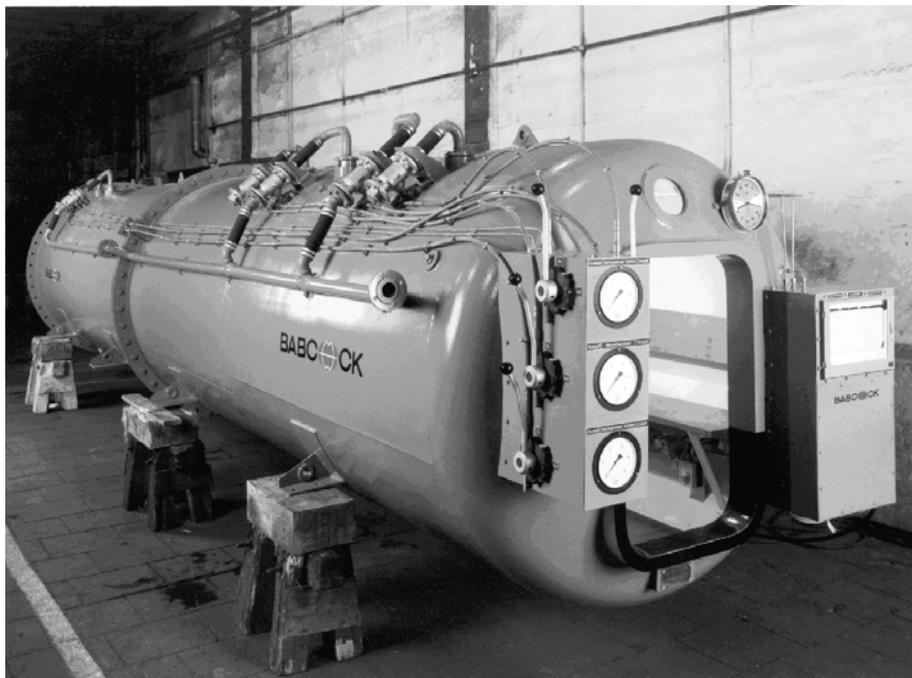


Abbildung 1: Überdruckkammer für eine Caisson-Baustelle (Firma Babcock), ca. 1980

2.2 Überdruckkammern für die HBO-Therapie

Bei den Überdruckkammern, die zur Behandlung mit hyperbarem Sauerstoff zum Einsatz kommen, gibt es nicht begehbare (= Einzelpersonen-) und begehbare (= Mehrpersonen-) Kammern.

2.2.1 Einzelpersonen-Kammern

Einzelpersonen-Kammern waren zunächst für den Transport von Personen gedacht, die einen Unfall während oder nach einem Aufenthalt in Überdruck erlitten hatten. Nach dem Transport des Verunfallten, der z.B. mit dem Hubschrauber erfolgen kann, soll die Einzelpersonen-Kammer an eine Mehrpersonen-Kammer angeschlossen werden, in welcher dann die geeigneten Therapiemaßnahmen durchgeführt werden.

Stationäre Einzelpersonen-Kammern, die nicht der Notfallversorgung dienen, werden seit ca. 40 Jahren gebaut. Die ersten deutschen Universitäten (u. a. Düsseldorf, Hamburg, Heidelberg und Tübingen), die etwa 1965 mit der HBO-Therapie begannen, verfügten über Einzelpersonen-Kammern [KRIETEMEYER 1970], die damals noch aus Stahl konstruiert wurden [KÄRCHER UND KUTTIG 1967] und zur Beobachtung der Patienten über kleine, runde Fenster verfügten (Abbildung 2).

Heute werden Einzelpersonen-Kammern z.B. aus doppelwandigem Acrylglas hergestellt (Abbildung 3). In diese zylindrischen Kammern kann eine Trage geschoben werden. Während der HBO-Therapie wird der Patient im Kammerinneren zu 100% mit dem einströmenden Sauerstoff versorgt. Dies bedeutet, daß Atemmasken nicht notwendig sind. Eine Behandlung von großflächigen Problemwunden in diesem Kammertyp bietet den Vorteil, daß der Sauerstoff vom Patienten eingeatmet wird und zusätzlich direkt an die Wundoberfläche gelangt. Ein weiterer Vorteil dieser Kammer besteht im geringen Platzbedarf. Die Kosten für diesen Kammertyp liegen deutlich unter den Investitionen für eine Mehrpersonen-Kammer. Außerdem wird zur Überwachung der Therapie und des Patienten nur eine Person benötigt [HART UND KINDWALL 1977]. Da es sich bei den meisten Einzelpersonen-Kammern um mobile Ausführungen handelt, können sie in verschiedenen Abteilungen eines Krankenhauses eingesetzt werden.

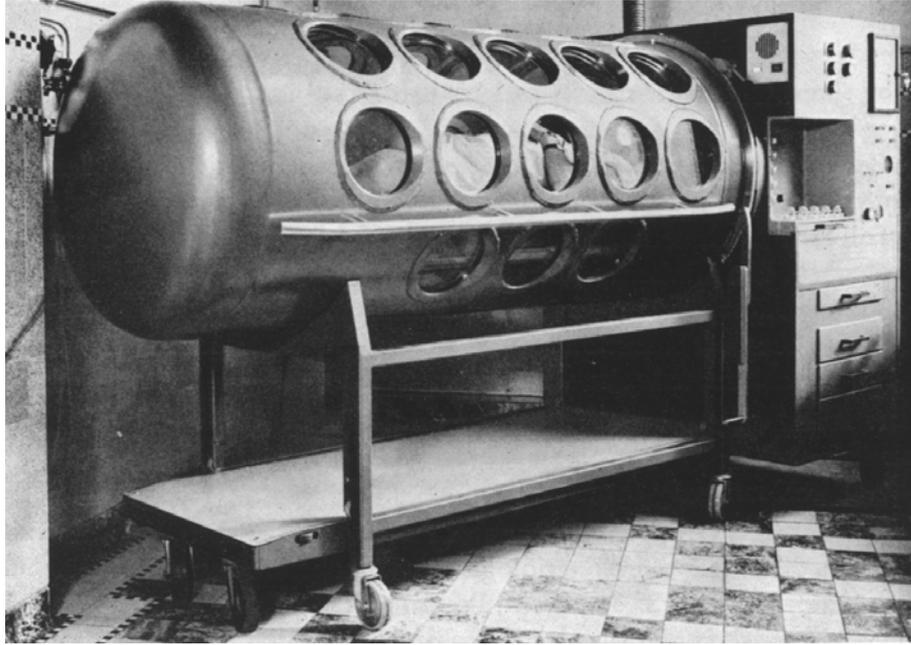


Abbildung 2: Modell einer Einzelpersonen-Kammer, wie es auch im Universitätsklinikum Düsseldorf für die HBO-Therapie genutzt wurde (Firma Dräger), ca. 1965

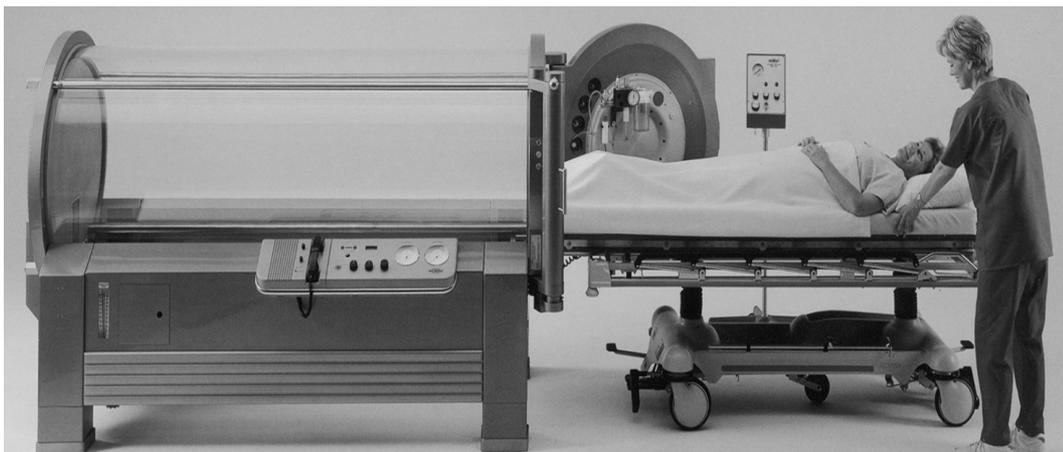


Abbildung 3: Einzelpersonen-Kammer der neuesten Generation (Firma Sechrist Inc., USA)

Ein erheblicher Nachteil der Einzelpersonen-Kammern zeigt sich in Notfallsituationen, denn der Zugriff auf den Patienten kann nicht sofort erfolgen. Außerdem besteht durch den hohen Sauerstoffanteil in der Kammer eine erhöhte Brandgefahr [JAIN 1999]. Daher werden bei der Herstellung der Kammer keine entflammenden Werkstoffe verarbeitet.

Die Einzelpersonen-Kammern werden in Deutschland kaum für die HBO-Therapie genutzt [JAIN 1999].

2.2.2 Mehrpersonen-Kammern

Im Prinzip besteht die Mehrpersonen-Kammer aus zwei Komponenten: aus der Kammer, in welcher die Therapie durchgeführt wird und aus dem Fahrstand, der die Technologie für die Inbetriebnahme der Kammer enthält (Abbildung 4).



Abbildung 4: HBO-Kammer (im Hintergrund) und Fahrstand im St. Joseph-Hospital Duisburg-Laar (Firma Dräger)

Die Mehrpersonen-Kammer verfügt immer über eine Vor- und eine Hauptkammer. In der Hauptkammer befinden sich die zu therapierenden Personen und gegebenenfalls ein Arzt. Die Vorkammer gestattet im Notfall, einen Arzt rasch in die Hauptkammer einzuschleusen und Rettungsmaßnahmen einzuleiten oder einen Patienten vorzeitig aus der Kammer auszuschleusen [SHEFFIELD ET AL. 1977, EDMONDS ET AL. 1983]. Die Überdruckkammer des St. Joseph-Hospitals in Duisburg-Laar verfügt über einen sogenannten Natoflansch, welcher das Andocken einer Transportkammer ermöglicht (Abbildung 5).



Abbildung 5: Natoflansch zum Andocken einer Transportkammer; die geöffneten runden Türen erlauben einen Blick in die Vor- bzw. Hauptkammer

Die meisten Druckkammern sind mit einer kleinen Materialschleuse ausgestattet, die es ermöglicht, dringend benötigte Medikamente und Materialien schnell bereitzustellen, ohne die Kammerfahrt zu unterbrechen.

Die Innenausstattung einer Mehrpersonen-Kammer variiert aufgrund der verschiedenen Anwendungsbereiche. Eine Grundausrüstung besteht aus Sitzen, die so angeordnet sind, daß sich die zu behandelnden Personen gegenüber sitzen. Diese Sitze lassen sich ausbauen, und es entsteht Platz für ein Krankenbett oder eine Transportliege.

Jeder Therapieplatz verfügt über eine eigene Sauerstoffleitung. Die Patienten atmen über Maske oder Kopfzelt den Sauerstoff [SHEFFIELD ET AL. 1977] (Abbildung 6).



Abbildung 6: Patienten mit Sauerstoffmasken

Nach Angaben der Tiefbau-Berufsgenossenschaft sind in Deutschland etwa 40 Therapie-Überdruckkammern mit 12 Sitzen ausgestattet. Die meisten Kammern sind für einen maximalen Überdruck von 5,0 bis 5,5 bar ausgerüstet [TIEFBAU-BERUFGENOSSENSCHAFT 2000].

Zur Erhöhung der Sicherheit kann jeder Patient mittels Videomonitoring überwacht werden. Die Kammern verfügen zusätzlich über kleine Fenster, die es dem Patienten erlauben, visuell mit der Umwelt zu kommunizieren und der Klaustrophobie vorzubeugen. Eine Wechselsprechanlage, respektive ein Telefon, ermöglicht einen kontinuierlichen Informationsaustausch zwischen den Kammerkompartimenten und dem Fahrstand. Die Belüftung der Kammer wird durch ein automatisches Frischluftspülsystem geregelt. Durch spezielle Kammerschalldämpfer reduziert sich der Lärmpegel in der Kammer auf unter 90 dB bei maximaler Kompression [EDMONDS ET AL. 1983].

Unter Berücksichtigung von arbeitsmedizinischen Aspekten und aufgrund der Erfahrungen mit Sicherheitsmängeln der Kammer (z.B. defekte Ventile, Kammerbrände) sind die Sicherheitsbestimmungen und die Kammerkonstruktion kontinuierlich verbessert worden.

Bisher sind nur wenige Druckkammerbrände bekannt. In den Anfängen der Überdruckbehandlung verursachten die in der Kammer verwendeten Materialien die Brände durch elektrische Aufladung und Funkenbildung. Die Verwendung von schwer entflammenden Materialien eliminierte dieses Problem. Seit 1980 ereigneten sich die Kammerbrände durch die unerlaubte Mitnahme von funkenerzeugenden Gegenständen (z.B. Taschenwärmer). Die mit Sauerstoff angereicherte Atmosphäre führt zu einer schnellen Ausbreitung des Feuers und hat für die Personen in der Kammer tödliche Folgen [SHEFFIELD UND DESAUTELS 1997]. Die zum Öffnen der Kammer erforderliche Dekompression verhindert ein sofortiges Verlassen der Kammer und verzögert die Rettungsmaßnahmen [GÖDECKEN UND PAULI 1999]. Nur in Kammern, die zur Zeit der Brandentstehung mit Luft gespült wurden, konnten die Personen lebend gerettet werden [SHEFFIELD UND DESAUTELS 1997].

So ist in den USA die Installation einer Sprinkleranlage Pflicht [JAIN 1999], um im Falle eines Kammerbrandes durch unverzügliche Aktivierung den Brand zu bekämpfen. In Deutschland sind die Kammern mit Brandschutzdecken und Feuerlöschern bestückt [GÖDECKEN UND PAULI 1999].

Die neue Druckkammeranlage des Universitätsklinikums Düsseldorf verfügt über eine Vernebelungsanlage. Ihre Aktivierung kann sowohl in der Kammer als auch vom Fahrstand ausgelöst werden und alarmiert gleichzeitig die Feuerwehr. Durch Aktivierung der Vernebelungsanlage werden feinste Wasserpartikel mit hohem Druck ausgesprüht. Außerdem wird die Sauerstoffzufuhr durch automatisches Schließen der Ventile unterbunden [KOPITZIOK 2001].

Eine Gegenüberstellung der Einpersonen-Kammer und der Mehrpersonen-Kammer ist in Tabelle 1 zusammengefaßt [HARMS UND RODEWALD 1965].

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Einpersonen- und Mehrpersonen-Kammer
[modifiziert nach HARMS UND RODEWALD 1965]

	Einpersonen-Kammer	Mehrpersonen-Kammer
Personal	<ul style="list-style-type: none"> • außerhalb der Kammer 	<ul style="list-style-type: none"> • innerhalb und außerhalb der Kammer
Überwachung des Patienten	<ul style="list-style-type: none"> • nur durch Sichtkontakt möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • innerhalb und außerhalb der Kammer gewährleistet
Kontakt zu dem Patienten	<ul style="list-style-type: none"> • ausreichend 	<ul style="list-style-type: none"> • gut
Zwischenfälle	<ul style="list-style-type: none"> • Dekompression der Kammer erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> • innerhalb der Kammer behandelbar
bewußtlose Patienten	<ul style="list-style-type: none"> • schwieriger als in der Mehrpersonen-Kammer, da kein schneller Zugriff möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • innerhalb der Kammer behandelbar
technischer, personeller und finanzieller Aufwand	<ul style="list-style-type: none"> • geringer als bei einer Mehrpersonen-Kammer 	<ul style="list-style-type: none"> • hoch
Investitionsrisiko	<ul style="list-style-type: none"> • geringer als bei einer Mehrpersonen-Kammer 	<ul style="list-style-type: none"> • relativ hoch

2.3 Standorte von HBO-Therapiekammern

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen die Verteilung der HBO-Therapiekammern. Eine Unterteilung in Einzelpersonen- und Mehrpersonen-Kammern erfolgt nicht. Außerdem wird nicht zwischen ambulanten und stationären Therapieplätzen unterschieden. Die Darstellungen beziehen sich somit auf die Kammeranzahl und geben keinen Aufschluß über das Patientenaufkommen oder die Anzahl der durchgeführten Behandlungen [JAIN 1999]. Es ist überraschend, daß sich weltweit (Abbildung 7) die Mehrzahl der Kammern in China (ca. 1800) und Russland (ca. 1300) befindet. In Europa (Abbildung 8) werden ca. 475 Überdruckkammern für die HBO-Therapie genutzt, davon befinden sich ca. 90 Therapiekammern in Deutschland [JAIN 1999]. Neben den in den USA und Europa gültigen Behandlungsstandards für die HBO-Therapie enthalten die Indikationslisten in China und Russland auch eine Vielzahl von Indikationen, die dem Forschungssektor angehören.

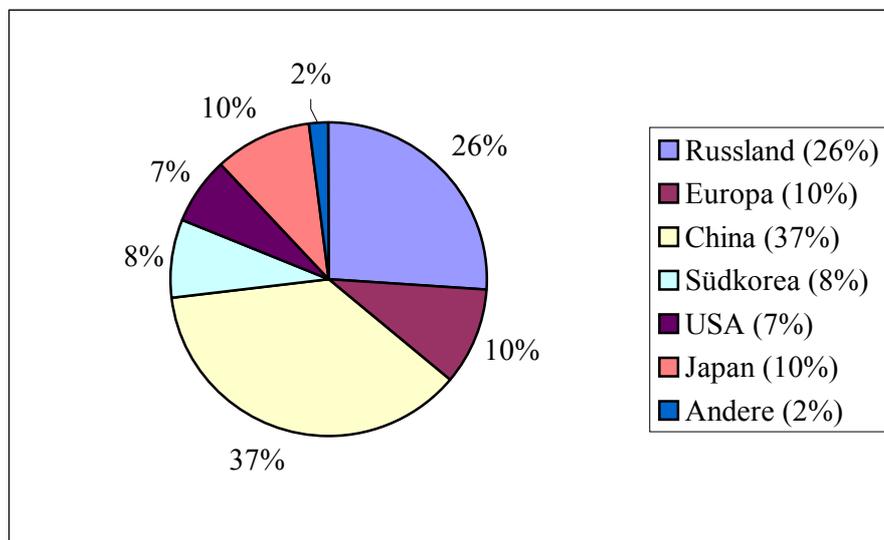


Abbildung 7: Verteilung der Druckkammern für die HBO-Therapie weltweit [JAIN 1999, © Hogrefe und Huber Publisher Inc.]

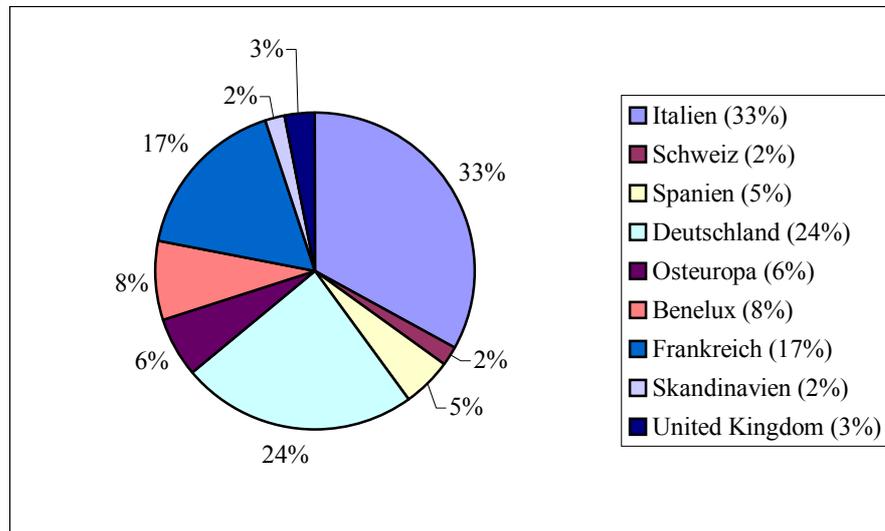


Abbildung 8: Verteilung der Druckkammern für die HBO-Therapie in Europa
[JAIN 1999, © Hogrefe und Huber Publisher Inc.]

3. ENTWICKLUNGSGESCHICHTE DER ÜBERDRUCKKAMMER

3.1 Technologie und Anwendung von 1600 bis 1800

Jacobson, ein amerikanischer Arzt, hielt auf dem ersten Internationalen Kongress für Hyperbare Oxygenierung (HBO), der 1963 in Amsterdam stattfand, einen Vortrag über die Perspektiven der Hyperbaren Sauerstoff (HBO)-Therapie. Dabei machte er folgende bemerkenswerte Ausführungen: "Das Interesse für die Anwendung von Sauerstoff unter Druck, der höher liegt als der Druck auf Meereshöhe, geht bis in die Antike zurück. Die jetzige Renaissance des Interesses erfordert es, auch die Gründe der historischen Fehlschläge zu verstehen, damit der momentane Enthusiasmus richtig geleitet werden kann, und die Methode in ein angemessenes wissenschaftliches Umfeld und auf eine klinische Grundlage gestellt werden kann" [JACOBSON ET AL. 1964].

3.1.1 Erste Entwürfe für Druckkammern und Therapieansätze

Schon bevor der Sauerstoff entdeckt wurde, gab es Untersuchungen über die Auswirkungen verschiedener Druckapplikationen auf den Organismus. Sir Robert Boyle (1627-1691) entdeckte nicht nur den Zusammenhang zwischen Druck- und Volumenänderungen bei Gasen, sondern trug auch Beobachtungen von verschiedenen Tierarten in der „pneumatischen Maschine“ zusammen. 1670 beschrieb er das Austreten von Gasblasen aus dem Blut und aus Gewebeflüssigkeiten nach Luftverdünnung, welches zum Verschluss von Gefäßen führen kann und somit eine Blutzirkulationen hemmen würde [BOYLE 1670].

Bereits 1662 benutzte der britische Arzt Nathaniel Henshaw (1628-1673) für medizinische Zwecke eine Druckkammer, in der sowohl Überdruck als auch Unterdruck erzeugt werden konnte. Berichten zufolge handelte es sich um eine gemauerte Kammer mit ca. 4 m² Grundfläche. In die Kammer "mündeten kupferne Ausführungsgänge zweier großer Orgelblasebälge, welche, abwechselnd in Bewegung gesetzt, mit zwei in entge-

gengesetzter Richtung sich öffnende Klappenvorrichtungen versehen sind“ [VON VIVENOT 1868]. Henshaw therapierte wahrscheinlich Respirationserkrankungen [BALENTINE 1982]. Außerdem soll er akute Erkrankungen mit Überdruck und chronische Krankheiten mit Unterdruck behandelt haben [VON VIVENOT 1868]. Von Henshaw selbst gibt es keine Berichte, die seine vor-geschlagenen Therapien dokumentieren. Der von Henshaw entwickelte Apparat hatte den Vorteil, daß die Patienten jederzeit eine Klimaveränderung zum Wohle ihrer Gesundheit erhielten, ohne daß der Wohnort verlassen oder der Beruf unterbrochen werden mußte [ARNTZENIUS 1887].

Danach vergingen fast 150 Jahre ohne weitere Entwicklung. Die holländische Akademie in Haarlem versuchte das Interesse an der Druckkammertechnologie gegen Ende des 18. Jahrhunderts zu fördern und schrieb mehrmals Wettbewerbe aus, in denen ein Apparat entwickelt werden sollte, mit dem “der Effekt des Überdruckes in der Biologie” studiert werden könnte. Die Ausschreibungen, die in den Jahren 1782, 1785, 1788 und 1791 vorgenommen wurden, blieben allerdings ohne Resonanz [ARNTZENIUS 1887].

Der englische Arzt Thomas Beddoes (1760-1808) und der Ingenieur James Watt (1736-1819) verfaßten 1796 ein Buch über die Sauerstofftherapie. Watt entwickelte einen Apparat, mit dem Sauerstoff erzeugt werden konnte, der anschließend in großen Blasebälgen für die Therapie gespeichert wurde. Beddoes war ein enthusiastischer Befürworter der Behandlung mit Sauerstoff und errichtete in der englischen Stadt Bristol ein pneumatisches Institut, in welchem allerdings Sauerstoff nicht unter Überdruck eingesetzt wurde. Es spricht viel dafür, daß es zu dieser verantwortungsvollen Entscheidung kam, weil die toxischen Eigenschaften des Sauerstoffes durch Lavoisier und Priestley bereits publiziert waren [BEDDOES UND WATT 1796].

3.2 Pneumatische Institute ab 1800

3.2.1 Aufnahme der pneumatischen Therapie in Frankreich

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts nahm der Physiker Emile Tabarié die pneumatische Therapie in Frankreich auf. Im Jahr 1832 legte er in Paris der Académie des Sciences eine Abhandlung über die Behandlung von Respirationserkrankungen vor und errichtete als erster eine pneumatische Kammer in Montpellier, die unter der ärztlichen Leitung von Eugène Bertin (1797-1878) stand (Abbildung 9) [ARNTZENIUS 1887]. Tabarié betonte die Verbesserung des Gesundheitszustandes bei Patienten mit Atemwegserkrankungen. Er lenkte den Blick auch auf den wichtigen Aspekt, daß der Druck sehr langsam zu erhöhen oder zu erniedrigen sei [TABARIÉ 1840]. 1838 wurde die Behandlungsmethode offiziell von der Académie des Sciences anerkannt [ARNTZENIUS 1887].

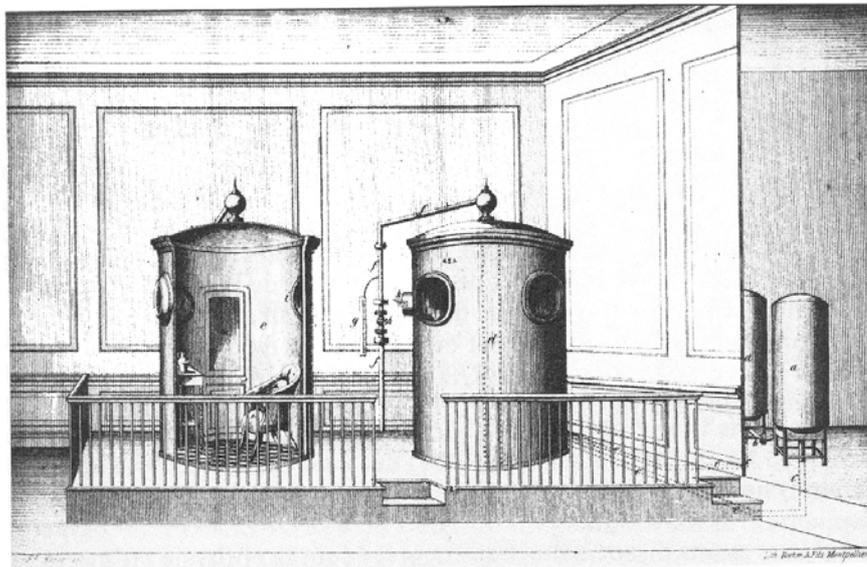


Abbildung 9: die von Tabarié in Montpellier gebaute und genutzte Druckkammeranlage, ca. 1840

Der schweizerische Mediziner Victor Théodore Junod (1809-1882) beschrieb im Jahre 1835 seinen Apparat für unterschiedliche Luftdrücke [JUNOD 1835, NOUVEAU LAROUSSE ILLUSTRÉ 1898/1903]. Dafür erkannte ihm die Académie des Sciences in Paris einen Preis in Höhe von 2000 FRF zu [VON VIVENOT 1868] (ca. 6.640 € [INSEE 2001]). Junod errichtete eine hyperbare Kammer, um Lungenerkrankungen bei einem Druck von 2 bis 4 bar zu behandeln [JUNOD 1835]. Er beschrieb den Anstieg der Zirkulation zu den inneren Organen und führte das Wohlbefinden seiner Patienten in der Kammer auf die Verbesserung der zerebralen Durchblutung zurück [JACOBSON ET AL. 1964]. Die Kammer, in der Junod seine Behandlungen durchführte, war aus Kupfer gefertigt und hatte einen maximalen Durchmesser von 1,3 m. Sie war nach dem Prinzip einer Taucherglocke gebaut. Im Längsschnitt hatte sie die Form einer Ellipse, deren unteres Ende in den Boden eingelassen wurde. Die Tür ließ sich nach innen öffnen und war mit Kautschukdichtungen versehen. Um ein Bersten der Glasfenster zu vermeiden, wurden diese nicht in die gewölbten Seitenwände eingelassen, sondern in eine von außen auf die Seitenwände aufgenieteten Stahlfassung von 2,5-5,0 cm Stärke eingesetzt [VON VIVENOT 1868]. Von Vivenot beschreibt eine Kammer, die über eine Vorkammer verfügte, so daß Personen in die Hauptkammer hinein- und hinausgehen konnten, ohne daß sich der Druck der Hauptkammer merklich änderte. Außerdem wird eine Nische zum Hinein- und Herausbefördern kleiner Gegenstände erwähnt (vermutlich bezieht sich der Autor auch hier auf die Kammer von Junod, Anm. d. Verf.) [VON VIVENOT 1868]. 1876 dokumentiert die Patentschrift (Abbildung 17) der Kammer von Daniel Kelly aus Chicago/Illinois (USA) erstmals eine Materialschleuse [FAESECKE 1991].

Die größte Kammer der damaligen Zeit ließ der französische Arzt Charles Gabriel Pravaz (1791-1853), Direktor der Orthopädischen Heilanstalt, 1837 in Lyon errichten. Ähnlich wie bei heutigen Mehrpersonen-Kammern konnten in ihr gleichzeitig 12 Patienten behandelt werden. Pravaz verfügte über ein breitgefächertes Behandlungsspektrum für folgende Erkrankungen: Lungentuberkulose, kapillare Hämorrhagien, Taubheit, Cholera, Deformierungen des Brustkorbs, Rachitis, akute Konjunktivitis, chronische Laryngitis, Tracheitis und Pertussis [PRAVAZ 1837]. Seine Krankenberichte sind typisch für diese Zeit, und sie unterstreichen für einen Teil der Indikationen die Vermu-

tung, daß es sich bei der Behandlung in Überdruck um eine Variante eines Kuraufenthaltes handelte.

In Frankreich stieg die Anzahl der Druckkammern stetig an. Der französische Mediziner Joannis Milliet verfügte 1854 in Nizza über drei Kammern. Zwei Kammern boten Platz für je zwei Personen, eine dritte ermöglichte die Behandlung von 10 bis 12 Personen. Eine der Kammern ist in Abbildung 10 dargestellt.

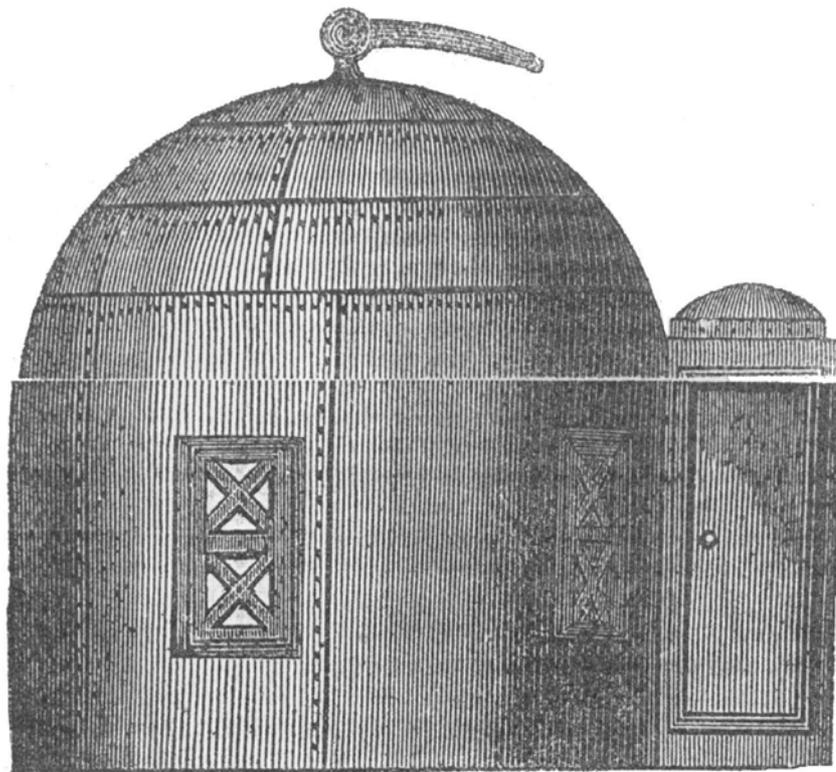


Abbildung 10: eine der Druckkammern, in der Milliet in Nizza seine Behandlungen durchführte, ca. 1860

Die halbkugelförmigen Kammern wurden aus laminiertem Stahl gefertigt. Durch kleine Fenster gelangte genügend Licht in die Kammer, so daß die Patienten lesen oder handarbeiten konnten. Innen waren die Kammern mit Seidenstoffen ausgekleidet, damit die Patienten nicht mit dem kalten Metall in Berührung kamen. Es wurde viel Wert

darauf gelegt, daß der Patient sich wohlfühlte und von seiner Krankheit abgelenkt wurde [MILLIET 1860]. Der Preis für 2 Kammern samt Druckpumpe und Dampfmaschinen wird mit 40.000 FRF [VON VIVENOT 1868] (ca. 122.520 € [INSEE 2001]) angegeben. Milliet therapierte bei Drücken zwischen 2 und 3 bar. Jede Therapiesitzung in der Kammer dauerte 2 h und bestand aus drei Teilen:

- Aufbau des Überdruckes (Kompression): 30 min
- Therapiephase bei konstantem Druck (Isopression): 1 h
- allmähliche Rückkehr auf normalen Umgebungsdruck (Dekompression): 30 min.

Zu seinem Behandlungsspektrum gehörten chronische Erkrankungen der Atemwege, einfache Katarrhe, Phthisis der Lunge und das Lungenemphysem. Im Durchschnitt benötigte er 30 bis 40 Behandlungseinheiten bis sich ein Therapieerfolg zeigte [MILLIET 1860]. Damit lag er mit den Sitzungen in einer Größenordnung, wie sie heute für die Behandlung von Problemwunden [DAVIS, BUCKLEY UND BARR 1988], Osteomyelitis [DAVIS UND HECKMAN 1988] und Osteoradionekrosen [UHMS 1999] angegeben wird.

Bis 1860 blieb die Therapie in pneumatischen Kammern auf Frankreich beschränkt. Während die Ärzte vor den hohen Einrichtungs- und Betriebskosten zurückschreckten, nahm das öffentliche Interesse an dieser Behandlungsmethode zu.

3.2.2 Einsatz der pneumatischen Therapie in Deutschland:

Johannisberg im Rheingau und Bad Reichenhall

In Johannisberg im Rheingau therapierte Gustav Lange mittels einer Überdruckkammer (Abbildung 11). Seine Kammer hatte die Form eines Zylinders, dessen obere und untere Öffnung durch nach innen konvexe Stahlplatten verschlossen war. Eine vertikal durch das Kammerzentrum verlaufende Stahlstange, an deren Ende jeweils eine Querschiene aus Metall geschraubt war, hielt die Stahlplatten zusammen. Die Kammer, in der vier Personen gleichzeitig behandelt werden konnten, war ca. 2,4 m hoch und

hatte einen Durchmesser von ca. 1,8 m. Das Gesamtgewicht betrug ca. 1150 kg [VON VIVENOT 1868].

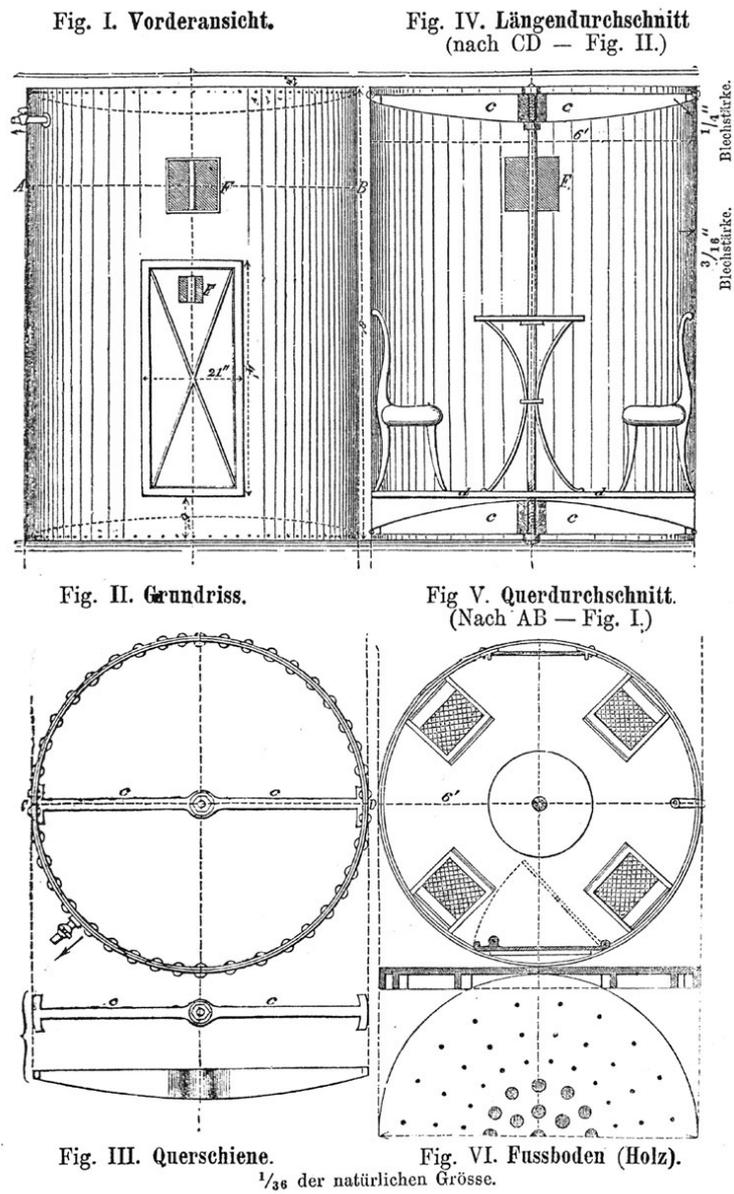


Abbildung 11: Lange konstruierte als erster eine zylindrische Druckkammer, ca. 1860

In Bad Reichenhall waren seit 1866 unter der Leitung des Arztes Georg von Liebig (1827-1903) mehrere pneumatische Kammern in Betrieb. Der Ingenieur Bonte, um 1900 Direktor des Dianabades, beschreibt, daß in acht Kammern insgesamt 86 Personen behandelt werden konnten. Die Bedienung aller Kammern erfolgte von einem zentralen Schaltpult, das von einer Person bedient wurde [BONTE 1903]. In diesen Kammern konnte Unterdruck- und Überdruck erzeugt werden [DIRNAGL UND STIEVE 1954]. Pneumatische Kuren wurden bei chronischen Katarrhen der Atemwege, chronischer Bronchitis (meist in Verbindung mit asthmatischen Beschwerden), katarrhalischer Schwerhörigkeit, Bleichsucht und bei Fettleibigkeit verordnet [BONTE 1903].

Bad Reichenhall verfügte über runde (Abbildung 12) oder elliptische Stahldruckkammern. Eine elliptische Kammer für 14 Personen wies folgende Maße auf: Länge: 3,90 m, Breite: 3,30 m, Höhe: 2,30 m. Der Maximaldruck lag bei 1,5 bar. Dieser Druck wurde innerhalb von 25 min erreicht und dann für 45 min gehalten. Danach folgte eine lineare Dekompression mit einer Dauer von 35 min. Pro Stunde versorgten drei Kompressoren die Kammer mit 3050 m³ Luft [BONTE 1903].

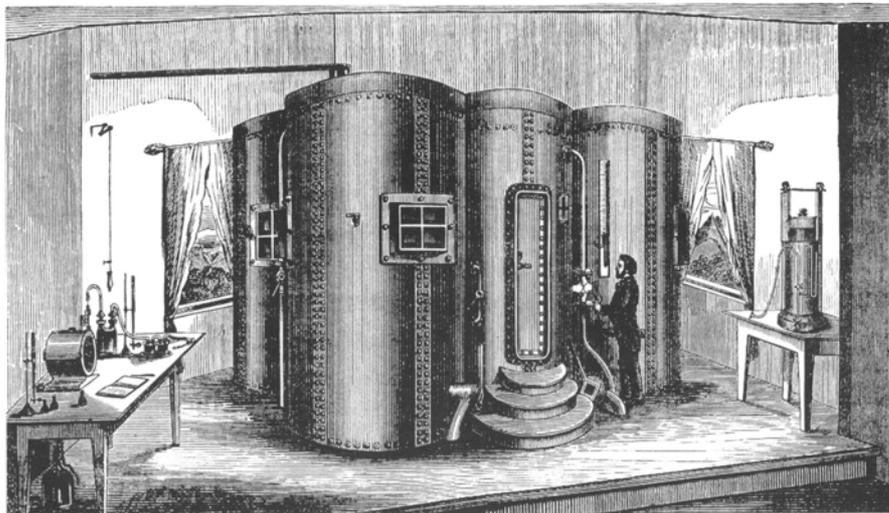


Abbildung 12: Druckkammeranlage in Bad Reichenhall, um 1900

Vermutlich führten Dirnagl und Stieve noch in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts dort Untersuchungen zur physiologischen Wirkung des Überdrucks durch, weil es wenige Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet gab und unterschiedliche Meinungen bezüglich der Wirkung geäußert wurden [DIRNAGL UND STIEVE 1954]. Die Kammeranlage wurde wahrscheinlich zwischen 1960 und 1970 stillgelegt. Eine, allerdings nicht mehr funktionstüchtige, Kammer ist im Dianabad in Bad Reichenhall ausgestellt [FAE-SECKE 1987].

Bonte berichtete außerdem über die Konstruktion einer Rechteckkammer, in der Stahl in Verbindung mit Beton verarbeitet wurde. Dabei könnte es sich um eine Kammer der Kuranstalt Thalfried handeln [BONTE 1903, BARTMANN 1998]. Diese Kuranlage wurde ca. 1970 abgerissen, um dort einer Straße Platz zu geben [STAATLICHE KURVERWALTUNG BAD REICHENHALL 2001].

3.2.3 Ausdehnung der pneumatischen Therapie auf Europa

Obwohl es zu dieser Zeit keine standardisierten Indikationen für eine Behandlung gab, stieg die Anzahl der Druckkammerzentren in ganz Europa weiter an. Unter dem Schlagwort „compressed air bath“ oder „bain d’air comprimé“ wurden Druckkammer-Therapien angepriesen und erlangten den gleichen Stellenwert wie die Behandlungen in Heil- und Kurbädern [JAIN 1999].

Unter den ca. 50 Druckkammer-Standorten waren die europäischen Metropolen Amsterdam, Brüssel, St. Petersburg, Wien, Zürich und Berlin vertreten. Dank der großzügigen Unterstützung der schwedischen Regierung errichtete Sandahl 1860 in Stockholm ein pneumatisches Institut. Im selben Jahr erbaute auch Gindrod in London eine Kammer, und im Jahr 1862 eröffnete Jacobson in Altona eine Einrichtung dieser Art [ARNTZENIUS 1887]. In Mailand wurde ein typisches pneumatisches Institut errichtet (Abbildung 13), welches unter der Leitung von Fornanini (Paul Bert verwendet in seinem Buch „La pression barométrique“ diese Schreibweise; Autoren des 20. Jahrhunderts verwenden den Namen Forlanini, Anm. d. Verf.) stand. Aber auch kleinere Städte wie Haarlem (Holland) [ARNTZENIUS 1887], Ilkley und Malvern (beide Großbritannien) [WILLIAMS 1885] verfügten über eine Therapiekammer.

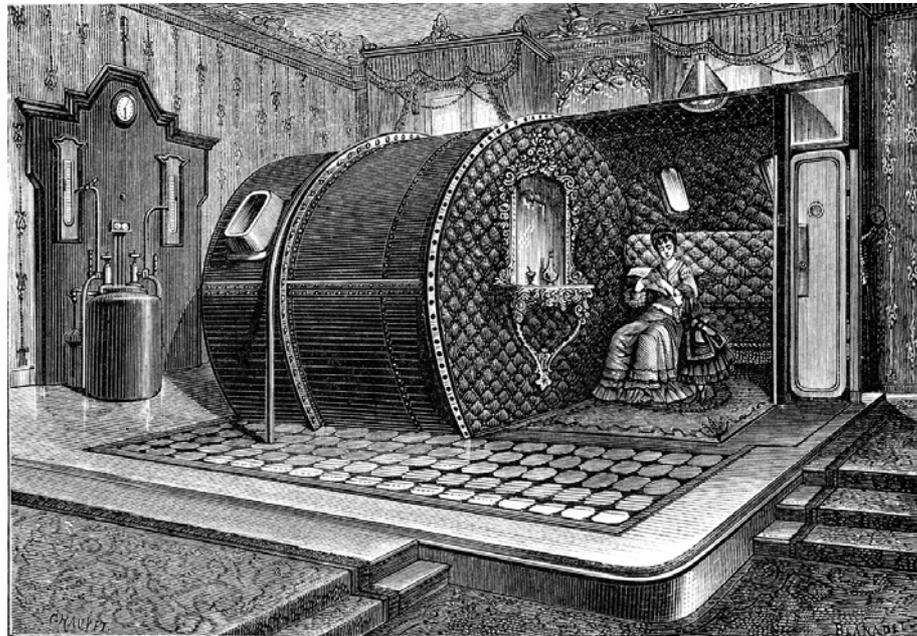


Abbildung 13: die Druckkammer von Fornanini in Mailand, ca. 1860

Die Anwendung von komprimierter Luft erschien einfach und naheliegend, wie ein Artikel von Williams, Arzt im Brompton Hospital (Großbritannien) im *British Medical Journal* aus dem Jahre 1885 belegt: "Die Anwendung atmosphärischer Luft bei verschiedenen Graden von atmosphärischen Drücken zur Behandlung von Krankheiten ist einer der bedeutendsten Fortschritte in der modernen Medizin, und wenn wir die Schlichtheit des Agens berücksichtigen, die exakten Methoden, bei denen es zum Einsatz kommt, und die Präzision, mit der es reguliert werden kann für die Bedürfnisse jedes einzelnen, so sind wir erstaunt, daß diese Behandlungsmethode in England selten angewandt wird" [WILLIAMS 1885]. Er sieht als Möglichkeiten zur Nutzung einer Druckkammer die Behandlung mit Unterdruck, Überdruck und Überdruck in Verbindung mit der Zufuhr anderer Gase (die er leider nicht näher erläuterte, Anm. d. Verf.). Die umfangreichen Studien von Bert waren ihm bekannt. Williams nannte auch Kontraindikationen für eine Behandlung in der pneumatischen Kammer wie Hämorrhagien, Erkrankungen des Gehirns, des Herzens und anderer innerer Organe [WILLIAMS

[1885]. Die Druckkammer-Anlage des Brompton Hospitals ist in Abbildung 14 dargestellt.

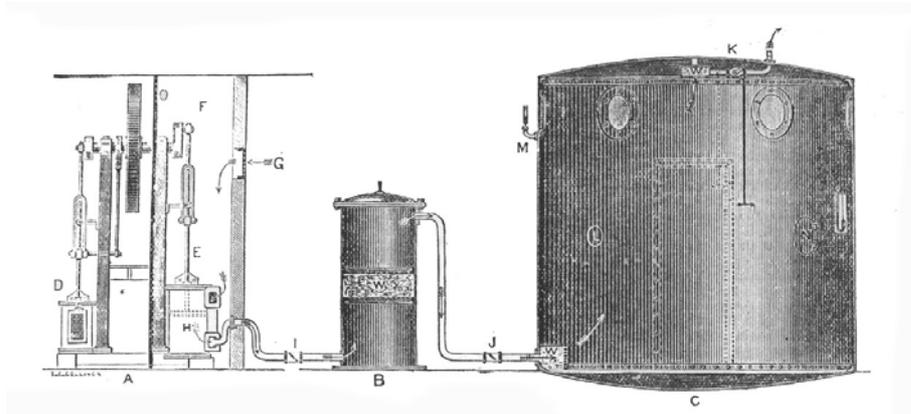


Abbildung 14: Druckkammer-Anlage des Brompton Hospitals (Großbritannien), 1885

Ein mobiler hyperbarer Operationsraum (Abbildung 15) wurde 1879 von Fontaine in Frankreich konstruiert. Diese Kammer war 3,5 m lang, 2 m breit und 2,65 m hoch und bot 10 bis 12 Personen Platz [FONTAINE 1879].

Fontaine, der Direktor einer medizinisch-pneumatischen Einrichtung (vermutlich in Paris, Anm. d. Verf.) war, betreute verschiedene Ärzte, die bis zu diesem Zeitpunkt 27 Operationen in der mobilen Kammer durchgeführt hatten [FONTAINE 1879]; u. a. Tumorresektionen, Knochenoperationen und Repositionen nach Schultergelenkluxation [ANONYMUS 1879A]. In der Kammer erfolgte die Narkose unter hyperbaren Bedingungen und durch Inhalation einer Mischung aus Distickstoffmonoxid (N_2O) und Sauerstoff. Da schon Paul Bert die narkotisierende Wirkung dieses Gases beschrieb, wurde diese Narkoseart in Frankreich als Paul-Bert-Methode bezeichnet. Vorteile der Narkose nach der Paul-Bert-Methode waren eine bessere Wirkung als eine Chloroform- oder Äthernarkose und die bessere Verträglichkeit für den Patienten. Die Narkosezeit betrug zwischen 4 min und 75 min [ANONYMUS 1879A+1879B]. Diese mobile Einrichtung ermöglichte Behandlungen in Hospitals, Krankenanstalten und Privatpraxen. Da die Mediziner überzeugt von dieser Behandlungsmethode waren, forderten sie die

Errichtung einer pneumatischen Operationskammer in einem Hospital [FONTAINE 1879].

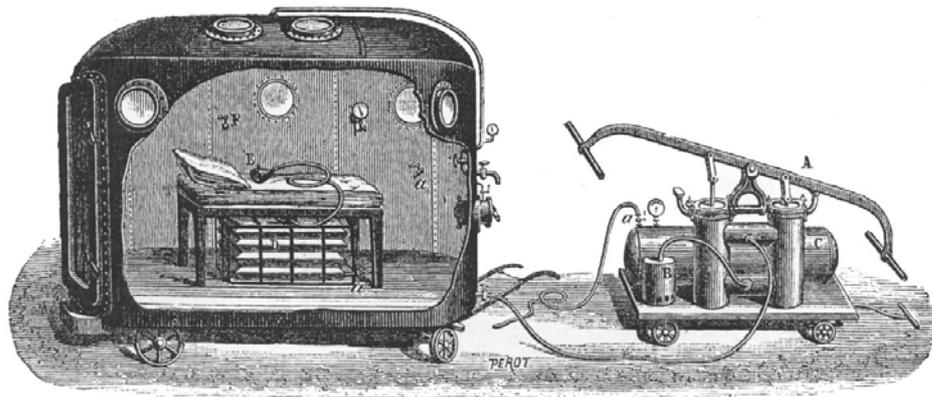


Abbildung 15: Fontaine verfügte über eine mobile Überdruckkammer, in der unter Narkose Operationen durchgeführt wurden, ca. 1879

In Lyon behandelte der Mediziner Claude Martin seine Patienten erfolgreich in einer stationären Kammer (Abbildung 16), in der ebenfalls unter hyperbaren Bedingungen Narkosen mittels Distickstoffmonoxid (N_2O) und Sauerstoff durchgeführt wurden. Diese Behandlungsmethode erwies sich als aufwendig und kostenintensiv. Deshalb konzentrierten die Wissenschaftler ihre Forschungen auf geeignete Narkoseverfahren unter Normaldruck [HEWITT 1893].

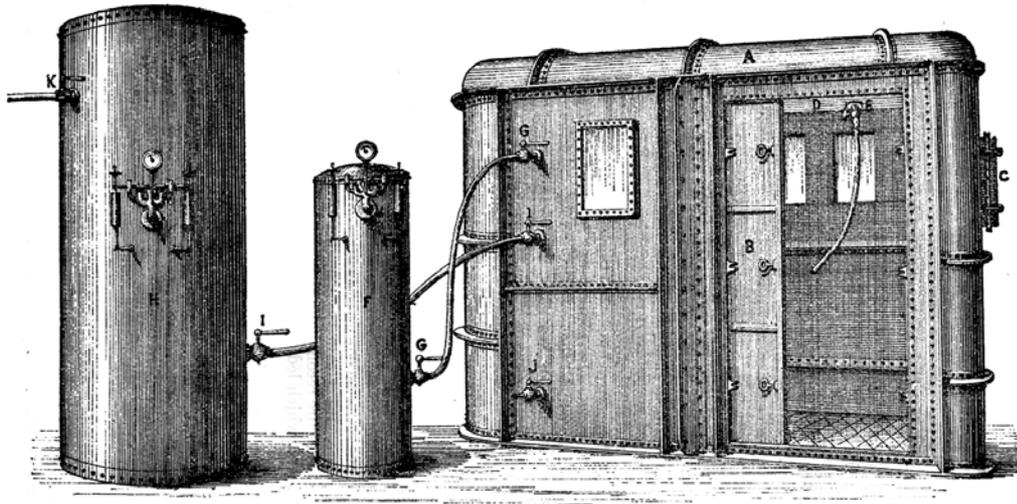


Abbildung 16: stationäre Überdruckkammer mit Schiebetür, ca. 1893

Achtzig Jahre später wurde der Aspekt, unter hyperbaren Bedingungen zu operieren durch Boerema wieder aufgegriffen. Auffallend an der Kammer, die Martin benutzte, ist die aufwendige Ausstattung mit einer rechteckigen Schiebetür. Heute stehen Kammern mit dieser technisch anspruchsvollen Gestaltung z.B. in Adelaide (Australien) (Abbildung 32) und im bayerischen Murnau (Abbildung 30).

3.2.4 Pneumatische Kammern in Nordamerika

Auf dem amerikanischen Kontinent wurde das erste hyperbare Therapiezimmer zunächst in der kanadischen Stadt Oshawa errichtet und später nach Toronto verlegt. In den Vereinigten Staaten wurde in Rochester/New York (USA) das erste Druckkammerzentrum eröffnet, das allerdings nicht von einem Arzt geleitet wurde [JACOBSON ET AL. 1964].

1891 veröffentlichte J. Leonard Corning aus New York City den Artikel "The use of compressed air in conjunction with medical solutions in the treatment of nervous and

mental affections". Er beschreibt darin eine Kammer, die in seinen Behandlungsräumen aufgebaut war. Die von der Firma Cockburn Barrow & Machine Co. aus weichem Stahl ("soft steel") gefertigte Kammer wurde in Einzelteilen in seine Praxis gebracht und dort mit Schrauben (im Gegensatz zu den sonst üblicherweise genieteten Verbindungen der Kammerwände) zusammengebaut. Die Kammer hatte einen Durchmesser von 1,8 m und war ca. 2 m hoch. Das Gewicht betrug 2 Tonnen. Adjustierbare Ventile regulierten die Luftzusammensetzung in der Kammer. Corning behandelte auch Patienten, die mit Schmerzen im Rückenmark zu ihm kamen. Er postulierte das Anlegen von elastischen Bandagen an den Extremitäten, um eine Dilatation der Venen zu verhindern. Dadurch förderte er die Durchblutung des Gehirns und des Rumpfes [CORNING 1891]. Als erster machte Corning Angaben zur Versorgung der Kammer mit Elektrizität. Der Kompressor verfügte über einen Motor mit 1 PS und stand im Keller, damit der Lärm die Patienten im Behandlungszimmer nicht belästigte [CORNING 1891].

3.2.5 Technische Weiterentwicklung der Überdruckkammer

In einer Patentschrift vom 4.7.1876 wird die Druckkammerkonstruktion von Daniel Kelly aus Chicago/Illinois (USA) dargestellt (Abbildung 17). Das Patent zeigt erstmals einige technische Details. Diese Kammer verfügte bereits über eine Medikamentenschleuse, durch die Gegenstände während der Behandlung in die Kammer gebracht werden konnten [FAESECKE 1991]. Sehr detailliert wird eine derartige Vorrichtung von Heller, Mager und von Schroetter beim Bau der Schleusen in Nussdorf (Österreich) beschrieben [HELLER, MAGER, VON SCHROETTER 1900]. Heute gehört die Materialschleuse bei den Mehrpersonen-Kammern zur Standardeinrichtung [FAESECKE 1991].

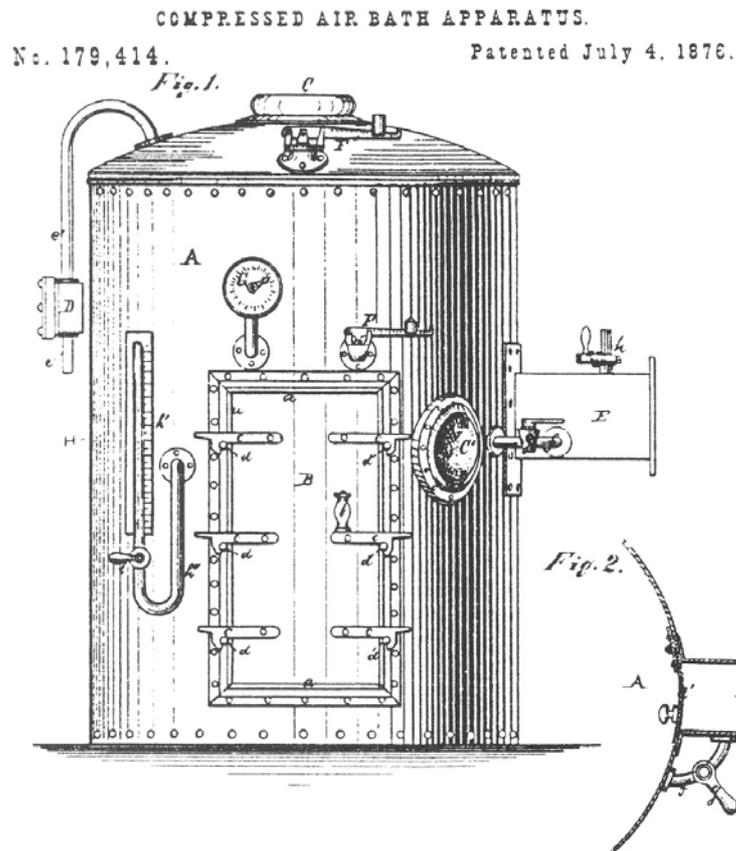


Abbildung 17: Patentschrift von Daniel Kelly aus Chicago/Illinois (USA), 1876

Bemerkenswert ist eine Zeichnung, die eine Druckkammer im Jüdischen Krankenhaus in Berlin zeigt (Abbildung 18). Zwei Druckkammern sind durch eine kleine Schleuse miteinander verbunden. So konnte in Notfallsituationen ein Arzt in die Kammer eingeschleust werden oder ein Patient die Kammer vor Beendigung der Therapie verlassen, ohne daß die Therapiekammer dekomprimiert werden mußte [LAZARUS 1884].

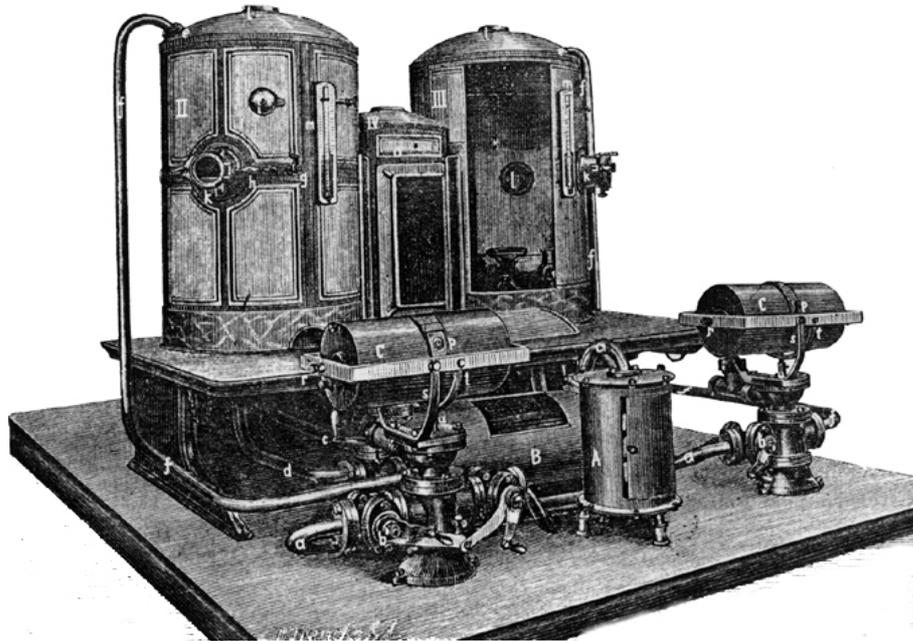


Abbildung 18: zwei Druckkammern des Jüdischen Krankenhauses in Berlin, die durch eine Personenschleuse verbunden sind, ca. 1884

3.3 Ende der pneumatischen Kabinette

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts entstanden in Europa und Amerika die pneumatischen Kabinette, in denen hauptsächlich Erkrankungen der Lunge und der Atemwege therapiert wurden. Erstaunlicherweise berichteten die Mediziner nie über Komplikationen oder therapeutisches Versagen. Während die Wissenschaftler die Ursachen der Caissonkrankheit erforschten und Therapien und Prophylaxemaßnahmen entwickelten, verschwanden die pneumatischen Kabinette wieder. Ihr medizinischer Nutzen war mehr als fraglich. Sauerstoff wurde zu diesem Zeitpunkt noch nicht unter hyperbaren Bedingungen verwendet.

Eines der schillerndsten Beispiele für diese Fehlentwicklung ist mit der Person des Arztes Orville Cunningham aus den Vereinigten Staaten verbunden. 1921 errichtete er eine Kammer (Durchmesser 3 m; Länge ca. 27 m) in Kansas City/Missouri (USA), in der einzelne Zimmer u. a. mit Radio, Telefon und Bad ausgestattet waren. Die Therapie bezog sich auf die Behandlung von Hypertension, Diabetes mellitus, Syphilis und Karzinomen und basierte auf der Annahme, daß diese Krankheiten mit einer anaeroben Infektion einhergingen. Fachgremien äußerten ihre Bedenken gegenüber Cunninghams Behandlungsmethode und vermuteten starke kommerzielle Interessen [ANONYMUS 1928]. Die öffentliche Konfliktaustragung hielt Industrielle allerdings nicht davon ab, ein weiteres Projekt von Cunningham zu unterstützen: in Cleveland/Ohio (USA) entstand ein kugelförmiges Gebäude für Überdrucktherapie ("steel ball hospital" [KINDWALL 1995]). Da Cunningham nur schleppend und unzureichend der Aufforderung der Ärztekammer nachkam, Beweise für die medizinische Indikation seiner Therapie zu liefern, wurde 1930 die Schließung der Kammer erzwungen. Das Material der Kugel wurde im 2. Weltkrieg zur Stahlgewinnung verwendet [JACOBSON ET AL. 1964, JAIN 1999].

3.4 Arbeitsmedizinische Erkenntnisse über die Anwendung der Überdrucktechnologie im 19. Jahrhundert

3.4.1 Caisson-Technik und erste Krankheitssymptome bei Arbeiten in Überdruck

Im frühen 19. Jahrhundert steigerte die industrielle Revolution die Nachfrage nach schnelleren und besseren Transportwegen. So wurden Brücken und Hafenanlagen gebaut, deren Pfeiler oder Uferbefestigungen zum Teil im Flußbett standen. Für die Fundierungsarbeiten wurden sogenannte Caissons (= frz.: Senkkästen) benutzt, aus denen das Flußwasser mittels Druckluft herausgepreßt wurde. Zum Abbau von Kohle in der Nähe von Flüssen wurde die Caisson-Technik ebenfalls eingesetzt, damit es unter Tage nicht zum Wassereinbruch kam.

Der französische Ingenieur und Paläontologe Charles-Jean Triger (1801-1868) [PHILLIPS 1998] (über die Vornamen und Lebensdaten Trigers verweist Phillips auf unterschiedliche Quellen, Anm. d. Verf.) berichtete über seine Erfahrungen mit den ersten Caissons, die beim Kohleabbau an der Loire im Jahr 1841 zur Anwendung kamen. Der Caisson wurde zunächst in eine Tiefe von ca. 20 m herabgelassen. Damit die Arbeiter vom normalen Außendruck zum erhöhten Druck ihrer Arbeitsstätte gelangen konnten, wurde eine Schleuse bereit gestellt. Weil Triger die Arbeiter nicht in den Caisson schicken wollte, ohne selbst die Auswirkung des Aufenthalts in Überdruck zu kennen, machte er erste Erfahrungen mit dem Überdruck in einer pneumatischen Kammer, die ihm ein Arzt in Paris zur Verfügung stellte. Bevor jedoch der erwünschte Druck von 3 bar aufgebaut werden konnte, zersprang ein Fenster der Kammer, und Triger entschloß sich, die Versuche im Caisson durchzuführen. Er berichtete über Ohrenschmerzen, eine nasale Sprache und stellte fest, daß man bei einem Druck von 3 bar nicht mehr pfeifen konnte [TRIGER 1841].

Erste Krankheitssymptome, die durch das Arbeiten in Überdruck entstanden, wurden 1845 von Tiger beobachtet. Nachdem die Arbeiter 7 h im Überdruck gearbeitet hatten, klagte einer von ihnen 30 min nach Verlassen der Arbeitsstätte über Schmerzen im linken Arm. Ein weiterer berichtete über Beschwerden in der linken Schulter und im Knie [TRIGER 1845]. Sie beschrieben damit erstmalig eine Variante der Caissonkrankheit, die später auch als „Bends“ bezeichnet wird [CORNING 1890]. Nachdem die Schmerzen dieser Arbeiter durch Einreibungen mit Weingeist gelindert wurden, konnten sie ihre Arbeit im Caisson am nächsten Tag wieder aufnehmen [TRIGER 1845].

Die französischen Wissenschaftler B. Pol und T.J.-J. Watelle publizierten 1854 die physiologischen und medizinischen Effekte, die durch Überdruck entstanden. Über mehrere Jahre hatten sie die Auswirkungen der komprimierten Luft auf die Bergarbeiter der Steinkohlengrube in Lourches (Frankreich) beobachtet. Sie kamen zu dem Schluß, daß die größte Gefahr, einen gesundheitlichen Schaden davonzutragen, auf einer zu schnellen Dekompression beruhte. Außerdem stellten sie fest, daß sich die Krankheitssymptome mit zunehmenden Alter häuften. Pol und Watelle bemerkten auch, daß die erneute Rekompensation der Betroffenen die Symptome linderte [POL UND WATELLE 1854].

Gravierendere Symptome zeigten sich bei Tauchern, die mit Hilfe einer Taucherglocke zu und von ihrem Arbeitsplatz transportiert wurden. Para- und Hemiplegien wurden beobachtet und die Ursache in der plötzlichen und schnellen Dekompression erkannt, die Auswirkungen auf das Zentrale Nervensystem hatte [LITTLETON 1855]. Das Risiko der Erkrankung erhöhte sich mit zunehmendem Druck und steigender Expositionsdauer. Das Krankheitsbild trat erst bei der Rückkehr in die normobare Umgebung auf [CORNING 1890, HALDANE 1922]. In schwersten Fällen wurde der Taucher einige Minuten nachdem er an die Oberfläche gekommen war bewußtlos. Der Puls war nicht mehr tastbar; wenig später konnte der Tod des Tauchers festgestellt werden. [HALDANE 1922].

Felix Hoppe und Paul Bert erkannten, daß es während der raschen Dekompression zu einem Gasaustritt aus dem Blut kommt [ZUNTZ 1897]. Bert bewies 1878, daß es sich dabei um Stickstoffbläschen handelte und empfahl zur Prävention der Caisson-Krankheit eine langsame und lineare Dekompression [BERT 1878]. Die Abbildung 19 zeigt Paul Bert bei Versuchen in seiner Druckkammer, in der sowohl Überdruck als auch Unterdruck erzeugt werden konnte.

Als Ursache der Bends vermutete der Brite John Scott Haldane (1860-1936) die Entstehung von Gasbläschen in den Myelinscheiden. Aufgrund umfangreicher Untersuchungen für die britische Marine gelangte er zu der Auffassung, daß die Dekompression stufenweise erfolgen sollte und entwickelte dafür Austausch Tabellen [HALDANE 1922].

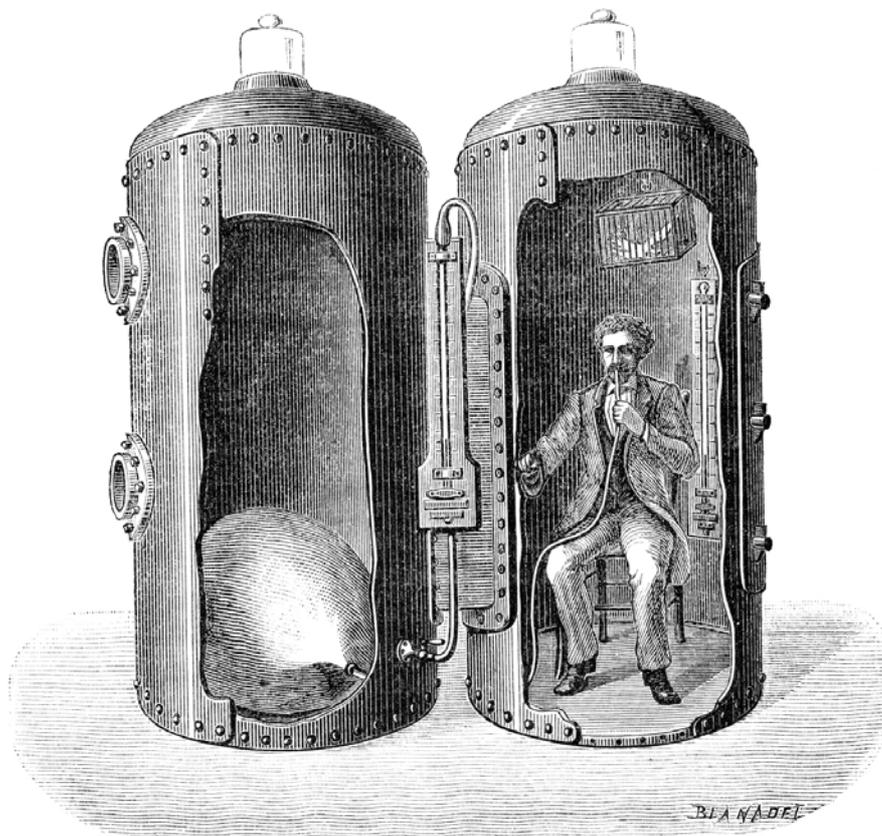


Abbildung 19: Paul Bert in seiner Druckkammer, ca. 1870

3.4.2 Arbeitsmedizinische Aspekte bei Arbeiten in Überdruck

Ende des 19. Jahrhunderts

Die meisten der bisher konstruierten Druckkammern glichen einem stehenden Zylinder (Abbildung 10, 11, 17-19). Im ausgehenden 19. Jahrhundert zeigte sich, daß bei Arbeitsunfällen auf Caisson-Baustellen und bei Berufstauchern Lähmungserscheinungen auftraten. Die Verunglückten mußten liegend in die Überdruckkammer transportiert und dort auch liegend behandelt werden. Aus diesem Grund setzte sich die Druckkammer-Konstruktion in Form eines liegenden Zylinders mit Zugang von der

Kopfseite durch [FAESECKE 1991]. Die Abbildung 20 zeigt eine solche Druckkammer der britischen Marine. Haldane weist darauf hin, daß die Dekompression oft Stunden, in schweren Fällen sogar Tage dauerte [HALDANE 1922].

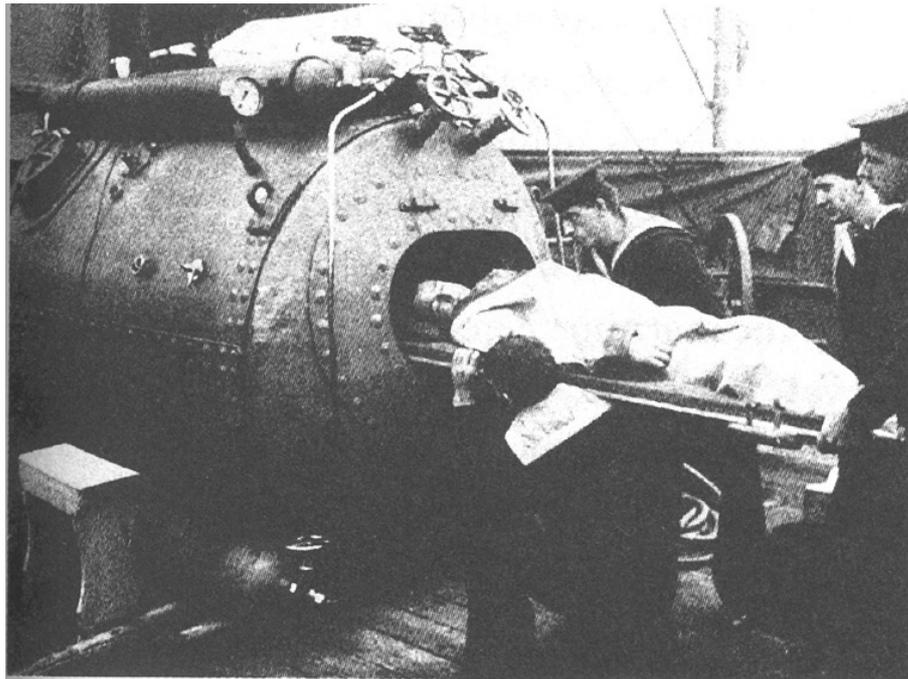


Abbildung 20: Einsatz einer Druckkammer auf einem Schiff, ca. 1915

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts waren aber nicht nur Kammerdesign und Anwendungsgebiete, die manchmal mehr als zweifelhaft erscheinen, Thema der Diskussion. Erfreulicherweise wurde auch der therapeutische Nutzen der Überdruckkammer für arbeitsmedizinische Aspekte aufgegriffen. Im Jahre 1872 verweist der Mediziner Hermann Friedberg (1817-1884) in seinem Bericht im Polytechnischen Journal auf Ausführungen von Triger und beschreibt Arbeitsbedingungen bei 3,7 bar. Unter Berufung auf verschiedene Autoren kam er zu dem Schluß, daß sich die Krankheitssymptomatik erst nach dem Ausschleusen zeigte. Die Leiden wurden nicht dem erhöhten Luftdruck zugeschrieben, sondern resultierten aus der schnellen Rückkehr in eine normobare Um-

gebung. Friedberg bestätigte damit die Auffassung Trigers und seiner Kollegen Pol und Watelle. Darüber hinaus legte er umfangreiche Ausführungen über die Arbeits- und Ruhezeiten sowie Ausschleusungszeiten vor. Eine Zulassung zur Arbeit auf einer Überdruckbaustelle sollte nur nach eingehender ärztlicher Untersuchung erfolgen. Die Arbeitszeit sollte pro Tag nicht mehr als vier Stunden betragen, und Arbeiten bei einem Druck von mehr als 3 bar bezeichnete Friedberg als “unstatthaft“ [FRIEDBERG 1872].

Als erster empfahl Andrew H. Smith 1873 eine Überdruckkammer zur Behandlung der Caissonkrankheit [SMITH 1873], die bis zu diesem Zeitpunkt meist symptombezogen mittels Morphingabe [CORNING 1890] therapiert wurde. Zu dieser Erkenntnis kam er aufgrund seiner Erfahrungen als Chirurg beim Bau der Brooklyn Bridge in New York (USA). Seine konkreten Vorstellungen beschreibt Smith folgendermaßen: “Eine horizontale Stahlröhre von 2,7 m Länge und einem Durchmesser von ca. 1 m, deren Tür sich nach innen öffnet und die luftdicht verschlossen werden kann, sollte oberirdisch in der Nähe des Caissons aufgestellt werden. Die Kammer enthält eine Vorrichtung, die das Einschleiben einer Trage ermöglicht. In der Tür ist ein Fenster eingelassen. Die Gaszufuhr erfolgt über Anschlüsse an die Leitungen, die für den Caisson genutzt werden. Der Patient wird in die Kammer geschoben und angewiesen, ein vereinbartes Zeichen zu geben, wenn die Schmerzen nachlassen. Die Dekompression soll langsam und graduell über mehrere Stunden erfolgen“ [SMITH 1873]. 17 Jahre später wurde beim Bau des East River-Tunnels in New York eine Rekompressionskammer (Abbildung 21) aufgestellt und von Sir Ernest Moir erfolgreich zur Behandlung der Drucklufterkrankung eingesetzt [HALDANE 1922].

In Europa wurde beim Bau der Donauschleusen in Nußdorf (Österreich) erstmals eine Rekompressionskammer auf einer Überdruckbaustelle installiert. Die Ärzte Heller, Mager und von Schroetter (1870-1936) wurden zur Betreuung der Arbeiter verpflichtet. In der Zeit von 1895 bis 1897 führten sie auch umfangreiche und systematische Untersuchungen über den Gesundheitszustand der Beschäftigten durch, die sie 1900 veröffentlichten. Wissenschaftliche Studien über die Entstehung der Dekompressionskrankheit wurden durchgeführt. Daraus resultierten arbeitsmedizinische Empfehlungen auf den Baustellen. Eine Druckkammer mußte in unmittelbarer Nähe des Bauabschnittes aufgestellt werden. Die täglichen Arbeitszeiten und -pausen, so wie die einzuhaltenen Schleusungszeiten wurden festgelegt, und eine permanente Anwesenheit des Arztes

am Bauplatz wurde eingeführt. Außerdem gab es bereits Bestrebungen, die Dekompressionszeiten, auf deren strikte Einhaltung die Mediziner Wert legten, durch Inhalation von Sauerstoff zu verkürzen. Andere arbeitsmedizinische Aspekte wie die hygienischen Bedingungen (Reinhaltung der Luft, Raum- und Beleuchtungsverhältnisse) wurden erläutert. Das Buch enthält detaillierte Bestimmungen zur Regelung der Arbeitsbedingungen auf Druckluftbaustellen [HELLER, MAGER, VON SCHROETTER 1900].

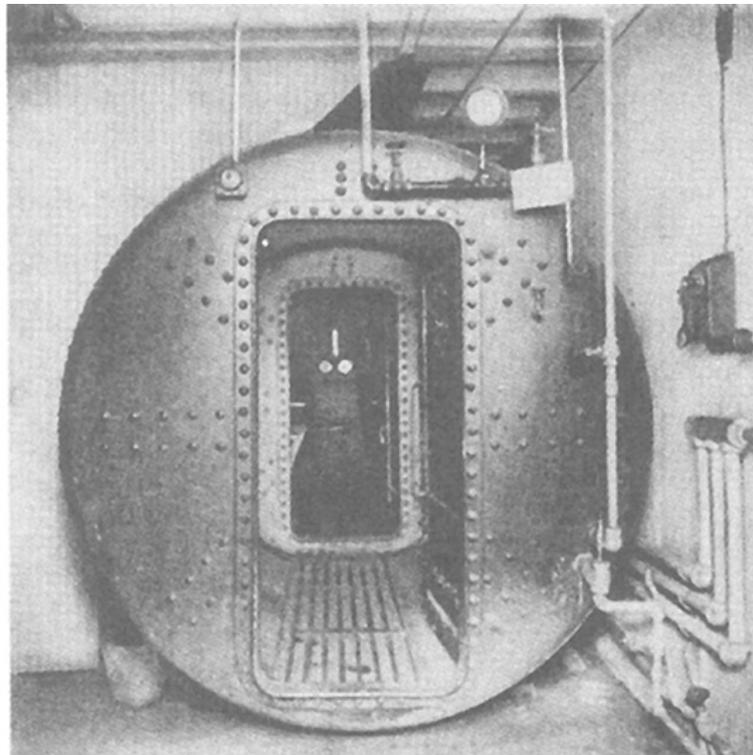


Abbildung 21: Eingang der Schleuse, die Moir beim Bau des East River-Tunnels zur Verfügung stand, 1890

Als in Hamburg zwischen 1908 und 1910 der erste Elbtunnel gebaut wurde, gab es zunächst noch erhebliche arbeitsmedizinische Defizite. Obwohl auf der Caisson-Baustelle eine Rekompresseionskammer bereitstand, erfolgte die Behandlung schwerer Dekompresseionserkrankungen stationär mittels Wannenbädern und Morphininjektionen. Nach dem ersten Todesfall schaltete sich die Gewerbebehörde ein, und die medizinische Leitung der Tunnelbaustelle wurde vom Arzt Arthur Bornstein (1881-1932) übernommen, der Sicherheitsstandards einführte, wie sie in Österreich auf Caisson-Baustellen üblich waren. Bornstein forschte außerdem mit seiner Frau Adele auf dem Gebiet der Überdruck-Physiologie und ließ bei der Dekompression auch Sauerstoff atmen. Eine der Studien Bornsteins belegte schon zu dieser Zeit die später von Boerema mit viel öffentlichem Interesse verfolgte Erkenntnis, das Leben ohne rote Blutkörperchen möglich war. Arthur Bornstein leistete auch einen großen Beitrag für die Arbeitsmedizin, indem er Verbesserungsvorschläge für die Arbeitsbedingungen der Tunnelarbeiter erarbeitete, die später in der Druckluftverordnung berücksichtigt wurden [FAESECKE 1998].

4. DER WEG ZUR HYPERBAREN SAUERSTOFF (HBO) –THERAPIE

4.1 Nutzung der Überdruckkammer zwischen 1900 und 1950

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war es wissenschaftlich belegt, daß die Rekompresion in Kombination mit der Inhalation von reinem Sauerstoff die Therapie der Dekompressionskrankheit verbesserte. Schon Paul Bert befürwortete die Gabe von Sauerstoff bei normobaren Bedingungen [BERT 1878]. Er zögerte jedoch aufgrund der toxischen Effekte der Hyperbaren Oxygenierung (HBO) diese zu empfehlen. Im Gegensatz dazu sprach sich schon 1897 der Mediziner Nathan Zuntz (1847-1920) für die Behandlung mit hyperbarem Sauerstoff aus [ZUNTZ 1897], und Arthur Bornstein wurde der erste Arzt, der 1908 in Hamburg Sauerstoff zur Behandlung in der Überdruckkammer einsetzte [FAESECKE 1998].

John Scott Haldane erforschte für die Marine die Zusammenhänge der Dekompressionskrankheit in der Taucherei und bei der U-Boot-Rettung. Als einer der ersten bemerkte er, daß Stickstoffblasen im Körpergewebe durch die Übersättigung während des Tauchvorganges entstehen. Er empfahl die mehrstufige Dekompression und entwickelte dafür Austausch Tabellen [HALDANE 1922]. In wissenschaftlichen Studien wurde dieser Sicherheitsstandard bestätigt und weiterentwickelt. 1939 empfahlen Yarbrough und Behnke die Hyperbare Oxygenierung für Taucher [YARBROUGH UND BEHNKE 1939].

Während des 2. Weltkrieges wurde in der bretonischen Stadt Carnac (Frankreich) auf dem deutschen U-Bootstützpunkt ein marineärztliches Forschungsinstitut eingerichtet, in dem sich eine Rekompresionskammer befand (Abbildung 22). Marinestabsarzt Raftopoulo therapierte einen verwundeten Wachmann erfolgreich durch Anwendung von hyperbarem Sauerstoff, einer damals keineswegs routinemäßig praktizierten Methode. Eine anschließende chirurgische Wundversorgung verhinderte die Amputation eines Unterschenkels. Vertiefende Untersuchungen auf dem Gebiet der HBO-Therapie wurden aufgrund der Versetzung Raftopoulos nicht durchgeführt [NÖLDEKE UND HARTMANN 1996].

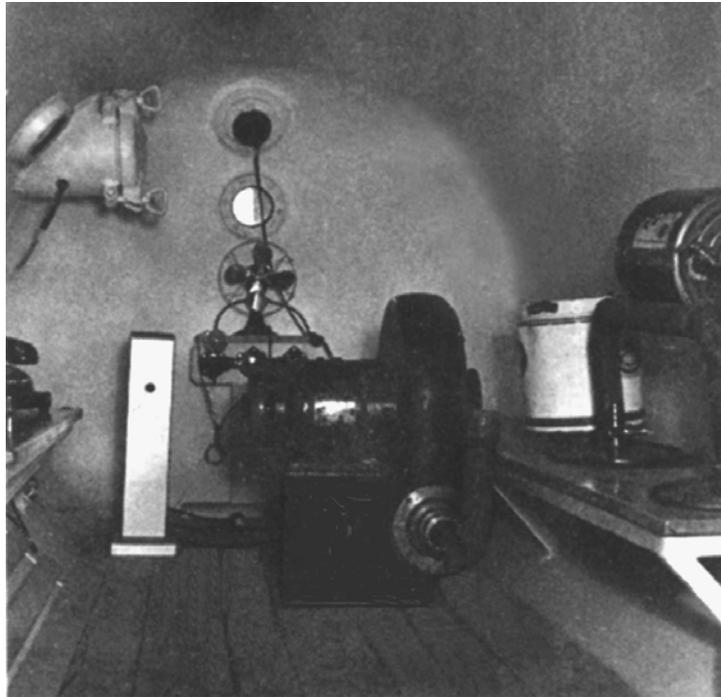


Abbildung 22: Blick in die Druckkammer auf dem Stützpunkt der Deutschen Marine in Carnac (Frankreich), ca. 1942

4.2 Anerkennung der Hyperbaren Oxygenierung (HBO) in der Medizin

Mitte des 20. Jahrhunderts wurde die Forschung auf dem Gebiet der HBO in verschiedenen klinischen Fachgebieten intensiviert.

Churchill-Davidson nutzte hyperbaren Sauerstoff in der Strahlentherapie, weil die Tumorzellen unter HBO-Bedingungen eine höhere Sensivität für die Strahlentherapie aufwiesen und somit eine bessere therapeutische Wirkung erzielt wurde [CHURCHILL-DAVIDSON 1955]. 1956 postulierte der niederländische Mediziner Ite Boerema auf verschiedenen kardiologischen Kongressen die Hyperbare Oxygenierung als Adjuvans in der Herzchirurgie. Seine Studien führte er damals in der Überdruckkammer der Holländischen Marine in Den Helder durch. Er zeigte in Versuchen mit Schweinen, daß unter hyperbaren Bedingungen Leben in Abwesenheit von Hämoglobin möglich ist,

wenn sich genügend physikalisch gelöster Sauerstoff im Blutplasma befindet. Die Abbildung 23 zeigt eines der Versuchstiere nach der Behandlung mit hyperbarem Sauerstoff [BOEREMA ET AL. 1960].

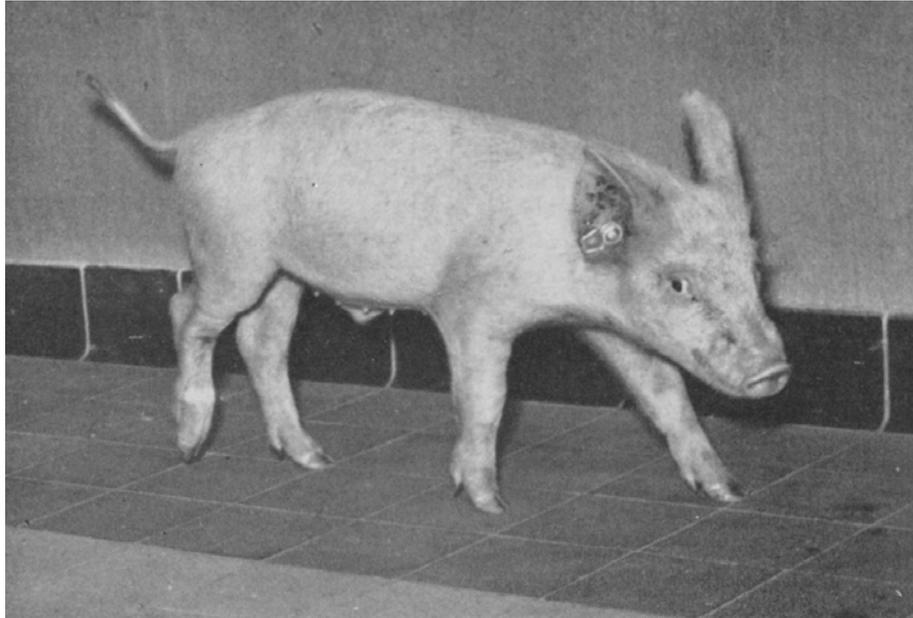


Abbildung 23: eines der Versuchstiere nach dem Aufenthalt in der Druckkammer

Nach einer anfänglichen Begeisterung stagnierte die wissenschaftliche Umsetzung seiner Ergebnisse bis Boerema die Resultate, welche die Anwendung der HBO-Therapie zur Behandlung anaerober Infektionen empfahlen, einige Jahre später in der Fachzeitschrift „Surgery“ veröffentlichte. Damit verhalf er der HBO-Therapie zur medizinischen Anerkennung. Durch sein Wirken wurde im Wilhelmina Gasthuis, einem akademischen Lehrkrankenhaus der Universität Amsterdam, Europas erste Überdruckkammer gebaut, in der ein Operationssaal (Länge: 7,81 m; Durchmesser: 4,63 m) integriert wurde [BOEREMA UND BRUMMELKAMP 1960, BOEREMA 1964].

Durch Gründung von wissenschaftlichen Gesellschaften wie z.B.:

- European Committee for Hyperbaric Medicine (ECHM),
- European Underwater Baromedical Society (EUBS),
- Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin (GTÜM) e.V. und
- Undersea and Hyperbaric Medical Society (UHMS)

sowie durch die regelmäßige Durchführung von Kongressen wurde die Anwendung der HBO-Therapie weiter vorangebracht.

4.3 Druckkammer-Zentren in Deutschland und Graz (Österreich)

In der Zeit von 1960 bis 1976 stieg in der Bundesrepublik Deutschland die Anzahl der Druckkammern zunächst kontinuierlich an. Standorte waren bei Bundeswehr (Marine: Kronshagen, Luftwaffe: Fürstenfeldbruck), Feuerwehr, Polizei, Bundesgrenzschutz und bei der Deutschen Lebensrettungsgesellschaft (DLRG). Auch Universitäten (Einpersonen-Kammer in Düsseldorf, Hamburg, Heidelberg und Ulm; Mehrpersonen-Kammer in Mainz und Würzburg), Krankenhäuser und Privatpraxen verfügten über Druckkammern [KRIETEMEYER 1970, HAUX 1982, TIRPITZ 1988]. Das Universitätsklinikum Graz (Österreich) errichtete eine Druckkammeranlage mit Operationssaal [SMOLLE-JÜTTNER 1999]. Außerdem wurden Forschungseinrichtungen gebaut, welche die Arbeitsbedingungen unter Wasser simulieren konnten. In diesen Einrichtungen wurden Studien zur Tauch- und Überdruckphysiologie durchgeführt.

4.3.1 Druckkammer des Schiffahrtsmedizinischen Instituts der Marine in Kronshagen

In Deutschland wurde im Juni 1965 eine Infektion mit Clostridien erstmals mit der Hyperbaren Oxygenierung therapiert. Die Behandlung wurde in der Druckkammer des Schiffahrtsmedizinischen Instituts in Kronshagen durchgeführt [WANDEL 1990].

Diese Druckkammer wurde 1961 in Betrieb genommen und war sowohl für Untersuchungen in Überdruck als auch in Unterdruck konstruiert. Sie wurde überwiegend als Taucherdruckkammer genutzt. Die Tätigkeit in der räumlich beengten Kammer war nicht immer einfach und angenehm. Große Temperaturschwankungen, die bei Re- und Dekompression entstanden, und enorme Lärmpegel mußten erduldet werden [VAN LAAK 1994]. Nach mehreren Nachrüstungen wurde sie 1990 durch die Hyperbare Dreikammer-Anlage HYDRA 2000 (Abbildung 24 und 25) ersetzt. Die neue Anlage mit einer Gesamtlänge von 14 m und einem Durchmesser von 2,8 m besteht aus einer Simulationskammer, Therapiekammer und Diagnostikkammer sowie einem zentralen Fahrstand. Der maximale Betriebsdruck beträgt 20 bar für Therapie- und Diagnostikkammer und 10 bar für die Simulationskammer. In der Simulationskammer, die über eine Vor- und Hauptkammer verfügt, werden Tauglichkeitsuntersuchungen für Taucher, Kampfschwimmer und U-Bootfahrer durchgeführt. Sie ist mit acht Sitzplätzen oder zwei Liegeplätzen ausgestattet [VAN LAAK 1989]. Die Therapiekammer bietet Platz für eine liegende und drei sitzende Personen und ist für intensivmedizinische Behandlungen konzipiert. Die Diagnostikkammer hat ein Tauchbecken (Buffalo-Prinzip) und wird für Tauchtests genutzt. Tauchmedizinische und tauchphysiologische Forschungen werden durchgeführt, wobei der Schwerpunkt beim Tauchen mit Pressluft und Mischgas liegt [SCHIFFAHRTSMEDIZINISCHES INSTITUT DER MARINE 1990].

Das Buffalo-Prinzip (Abbildung 26) wurde in der State University in Buffalo/New York (USA) ca. 1970 entwickelt. Es zeichnet sich durch zwei durchsichtige Trennwände aus, durch welche die Kammer in einen trockenen Vorraum und ein Tauchbecken unterteilt wird [CARPENTER 1970]. Dies erleichtert den Einstieg ins Tauchbecken und die Rettung eines Tauchers, weil sich Ein- und Ausstieg auf einer Ebene befinden.

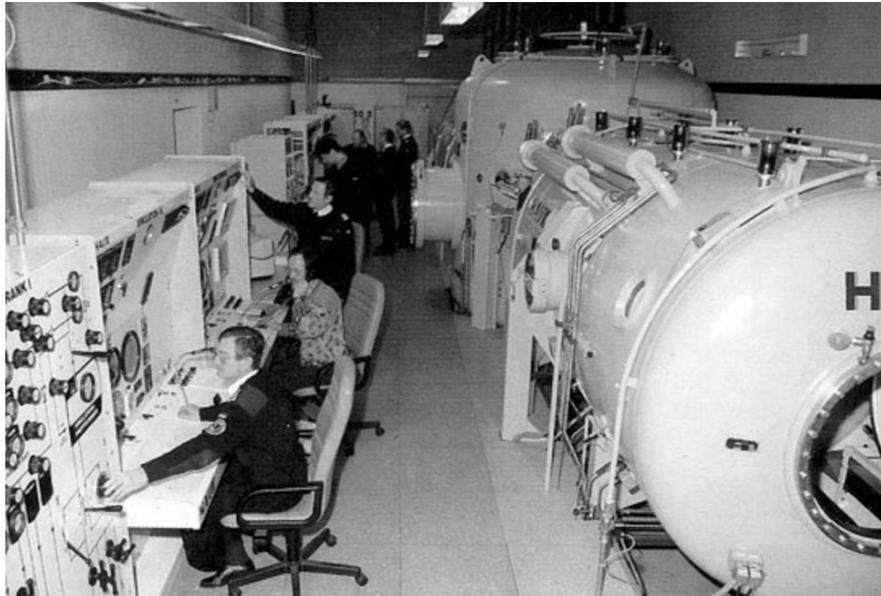


Abbildung 24: HYDRA 2000: Kammeranlage und Fahrstand

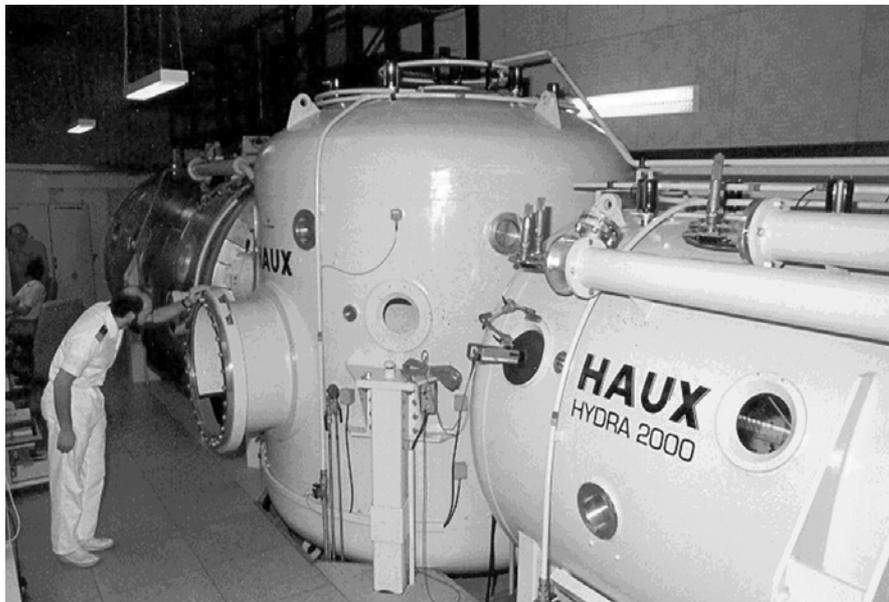


Abbildung 25: HYDRA 2000: Blick auf die Therapiekammer

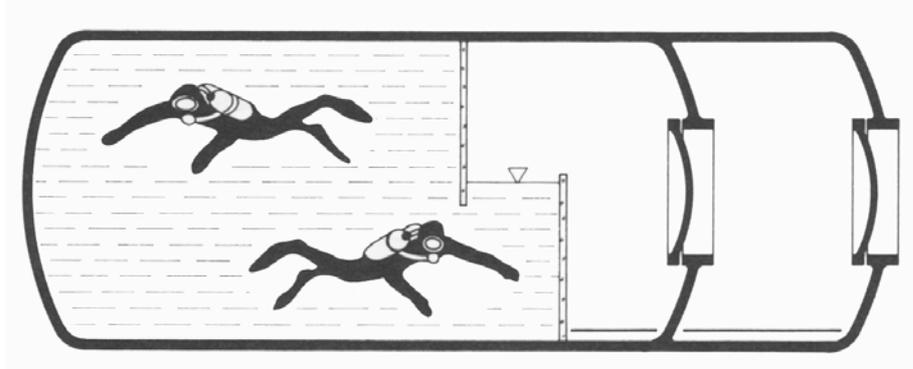


Abbildung 26: schematische Darstellung einer Kammer mit Buffalo-Prinzip

4.3.2 Tauchsimulator in der Bundeslehr- und Forschungsstätte der Deutschen Lebensrettungsgesellschaft (DLRG) in Berlin

Der Tauchsimulator in Berlin (Abbildung 27) zeichnet sich durch einen 8 m hohen Tauchturm aus, in dem Druckverhältnisse, die einer Tauchtiefe bis zu 150 m entsprechen, simuliert werden können. Neben der Ausstattung zur Messung der Herz- und Lungenfunktion, besteht die Möglichkeit, Röntgenaufnahmen während der Tauchsimulation anzufertigen [HAUX 1982]. Der dazu vorgesehene Röntgenblister ist am Tauchturm angebaut, von innen begehbar und verfügt über vier große „Bullaugen“ zur Überwachung des Probanden [DRÄGERWERK 1973]. Allerdings ist die Röntgenvorrichtung nicht in Anspruch genommen worden [WEIST 2001A].

Seit nahezu 30 Jahren wird der Tauchturm auch für Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Tauchmedizin und Tauchtechnik genutzt. Ein aktuelles Forschungsprojekt untersucht die Effekte von 44 m-Tieftauchgängen unter Verwendung verschiedener Atemgasgemische auf die Sympathikusaktivität und Herzfrequenzvariabilität [WEIST 2001B]. Derzeitig ist diese Anlage mit dem 8 m hohen Tauchturm und den Simulationmöglichkeiten wohl einzigartig auf der Welt [WEIST 2001A].

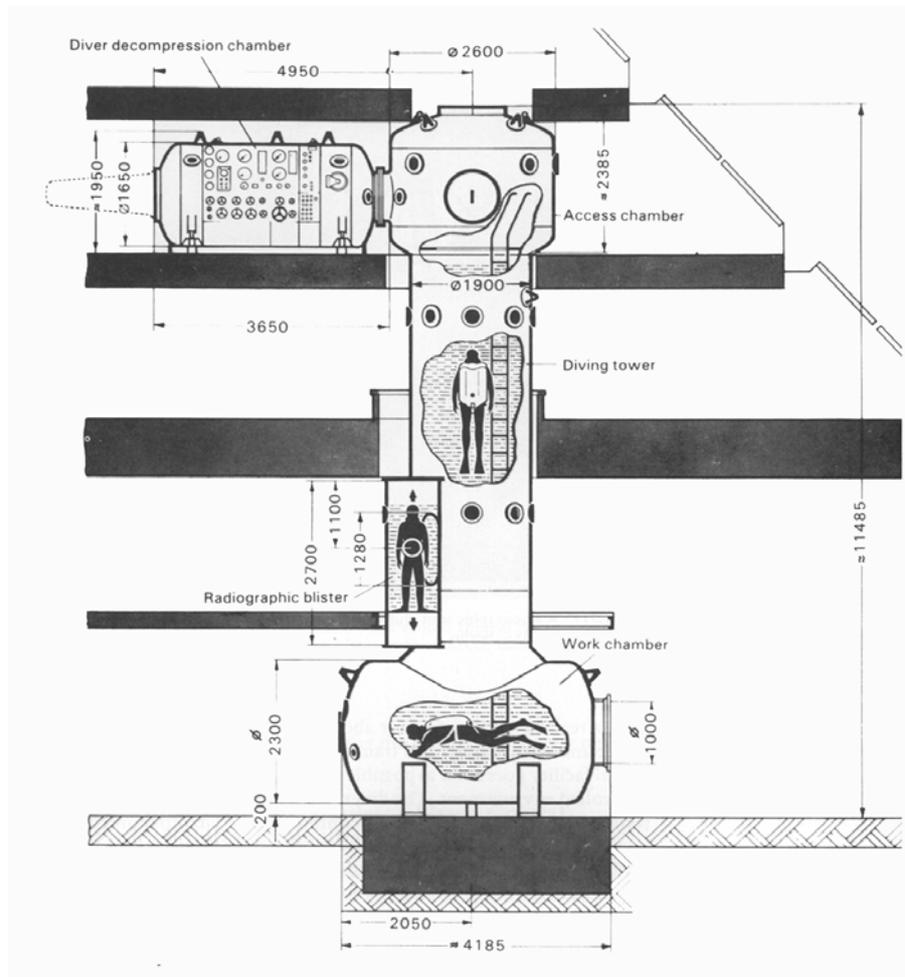


Abbildung 27: Schemazeichnung des Tauchturms der DLRG in Berlin

4.3.3 Forschungsanlagen in Köln-Porz und Geesthacht

Neben den Druckkammern für die Behandlung mit hyperbarem Sauerstoff wurden in Deutschland auch große Forschungsanlagen gebaut. Im Institut für Flugmedizin in Köln-Porz wurden medizinische Vorbereitungen für den Einsatz von Tauchern untersucht. Hier stand zunächst nur eine Kammer für Trockenexperimente zur Verfügung. Eine Erweiterung wurde Anfang der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts erforderlich, da auf dem Gebiet der Unterwassertechnologie enorme Fortschritte gemacht wurden und

die Tauchgänge diesen Umständen angepaßt werden mußten. Die neue Tauchanlage TITAN (Abbildung 28) war für Experimente bis zu 1500 m Tauchtiefe konzipiert. Hyperbare Studien konnten in Gasatmosphäre und in Wasser vorgenommen werden. Der Simulationskomplex bestand aus vier Kammern, in denen unabhängig von einander hyperbare Bedingungen geschaffen werden konnten [HAUX 1982]. Zu Beginn der letzten Dekade des 20. Jahrhunderts wurden die Fördergelder gestrichen und die Anlage stillgelegt [HAUX 1997].

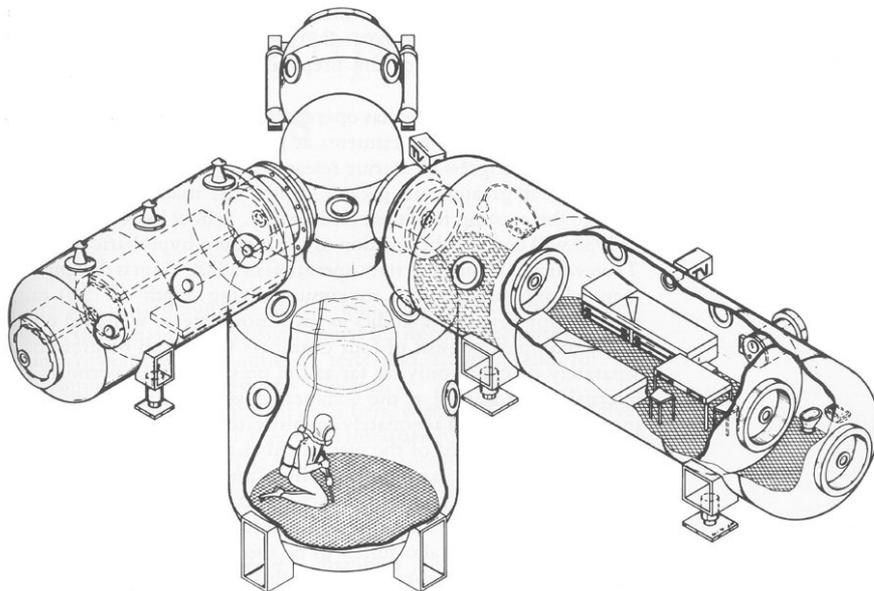


Abbildung 28: Tauchsimulator TITAN in Köln-Porz

Dasselbe Schicksal ereilte die Geesthachter Unterwassersimulationsanlage (GUSI), die 1982 in Betrieb genommen wurde. In der GUSI (Abbildung 29) wurden die technischen Belange und Arbeitsgeräte für Tätigkeiten unter Wasser erforscht [HAUX 1997].

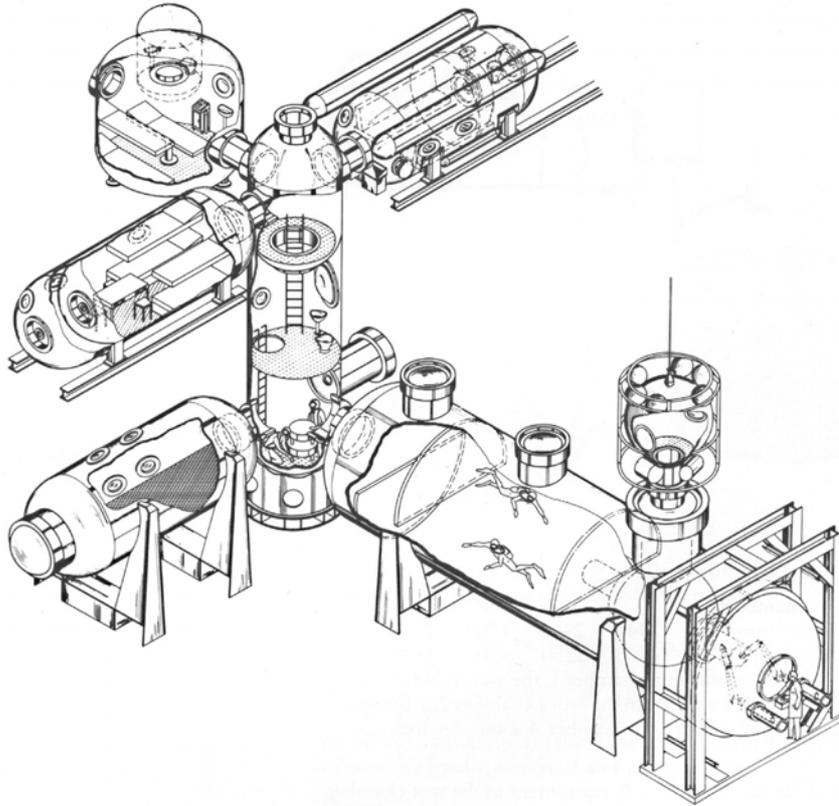


Abbildung 29: Geesthachter Unterwassersimulationsanlage (GUSI)

4.3.4 Druckkammeranlage in Graz (Österreich)

Seit 1972 verfügt die medizinische Fakultät der Universität Graz (Österreich) über eine hyperbare Druckkammeranlage, die als Prototyp von der Grazer Kesselbaufirma Waagner-Biró (die Firma besteht seit 1995 nicht mehr) angefertigt wurde. Der Hauptzylinder ist 11 m lang, hat einen Durchmesser von 4 m und läßt sich durch Druckschotten in zwei Einheiten teilen, die über eine Schleuse zu erreichen sind. Die Größe der Kammer erlaubt es, gleichzeitig mehrere Patienten – auch liegend – zu behandeln. Wahlweise können die beiden Kammern unabhängig voneinander als aseptische Operationssäle oder Intensivseinheiten genutzt werden. Ausreichend dimensionierte Materialschleusen ermöglichen das Durchreichen von Instrumenten, Medikamenten oder Laborproben. Der Maximaldruck liegt bei 5,6 bar. Die Anlage wurde mit einer Sprinkler-

anlage zur Brandbekämpfung und mit einer Wasserleitung für Kühlmatten, die bei Operationen unter Hypothermie benötigt werden, nachgerüstet [BEUSTER ET AL. 1994, SMOLLE-JÜTTNER 1999].

Zunächst wurden Herzoperationen bei Säuglingen und Kleinkindern durchgeführt. Als diese Indikation durch die Entwicklung der Herz-Lungen-Maschine abgelöst wurde, beschränkte sich die Behandlung auf Tauchunfälle, Luftembolie, Gasbrand, Hörsturz und spezielle Indikationen in der Trachealchirurgie. Das Behandlungsspektrum umfaßt heute die von der UHMS vorgeschlagenen Indikationen (s. Kapitel 6.3). Bei einigen Indikationen (Verbrennungen, Verätzungen, Erfrierungen und nekrotisierende Weichteilinfekte) sollte eine operative Erstversorgung möglichst unter HBO erfolgen. Außerdem werden auch chronische Ulcera cruris und seltene, chronische Perfusionsstörungen sowie der akute Hörsturz behandelt. Im Jahr 1999 wurden mehr als 1000 Kompressionen durchgeführt, wobei 30% der Einsätze außerhalb der regulären Dienstzeit stattfanden [SMOLLE-JÜTTNER 1999].

4.3.5 Rechteckkammer in der berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik in Murnau/Bayern

Obwohl die Konstruktion von runden Überdruckkammern technisch einfacher ist, weil die Druckbelastung auf den Schweißnähten günstiger verteilt wird, wurden im Laufe der Entwicklungsgeschichte der medizinisch genutzten Überdruckkammern immer wieder rechteckige Therapiekammern gebaut. Damit sollte der Röhrencharakter vermieden und für die Patienten ein angenehmer Behandlungsraum geschaffen werden.

Das Konzept einer Rechteckkammer wurde in der berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik in Murnau/Bayern (Abbildung 30 und 31) verwirklicht. Es ist die erste in Deutschland gebaute Rechteckkammer aus Stahl, die auf die aufwendigen Versteifungen der Außenwände verzichten kann. Der Vorteil der Rechteckkammer liegt in dem besseren Verhältnis von Stellfläche zu Nutzfläche. Zur besseren Druckverteilung sind im Kammerinneren die Verbindungen zwischen den Decken- bzw. Bodenelemente und den Seitenwänden leicht abgeschrägt. Für die intensiv-medizinische Druckkammer wurde eine Schiebetür nach Vorbild einer Druckkammer (Abbildung 32) in Adelaide

(Australien) eingebaut. Zusätzlich wird den Patienten durch die planen Innenwände ein vertrauter Raumcharakter vermittelt [KEMMER 1998B].



Abbildung 30: Rechteckkammer in der berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik in Murnau/Bayern (Firma Haux)



Abbildung 31: Innenansicht der Überdruckkammer im Therapiezentrum in Murnau

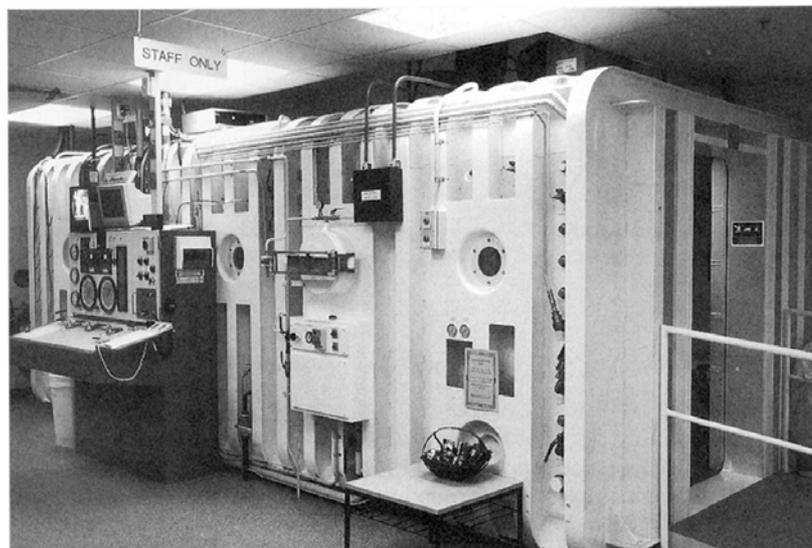


Abbildung 32: rechteckige HBO-Therapiekammer in Adelaide (Australien)

4.3.6 Druckkammeranlage der Heinrich-Heine-Universität in Düsseldorf

Das Universitätsklinikum Düsseldorf verfügte bereits 1965 über eine Einzelpersonen-Kammer (Abbildung 2), in der international anerkannte Indikationen wie Gasbrand [KRISCHNAK 1977] und arterielle Gasembolie [PODLESCH 2000] behandelt wurden. Seit dem Jahr 2000 erfolgt die HBO-Therapie in einer Mehrpersonen-Kammer (Abbildung 33). Zusammen mit der Martin-Luther-Universität in Halle/Saale sind dies in Deutschland die einzigen akademischen Einrichtungen, die auf dem Gebiet der Hyperbaren Oxygenierung Forschung in einer Druckkammer betreiben. Die Druckkammer des Universitätsklinikums Düsseldorf ist eine interdisziplinäre Forschungseinrichtung, die allen interessierten Fachrichtungen der theoretischen und praktischen Medizin für Fragen im Zusammenhang mit der Hyperbaren Sauerstoff (HBO)-Therapie offen steht.



Abbildung 33: Mehrpersonen-Kammer für die HBO-Therapie im Universitätsklinikum Düsseldorf (Firma Sayers/Hebold)

4.4 Betonkammern

Die Kammer, die Henshaw 1662 für erste Therapieansätze nutzte, verfügte wahrscheinlich über gemauerte Wände [VON VIVENOT 1868]. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde die Kammer der Kuranlage Thalfried in Bad Reichenhall vermutlich aus Beton mit Stahlverstärkungen konstruiert [BONTE 1903, BARTMANN 1998].

Diese Technologie scheint jetzt erneut in der Erprobung zu stehen, denn auf dem Luftwaffenstützpunkt Brooks in San Antonio/Texas (USA) befindet sich der Prototyp einer Kammer (Abbildung 34), die aus einer Kombination (von zuvor unter Druckbelastung) ausgehärteter Betonplatten und Stahlverstärkungen besteht. Als Vorteile dieser Bauweise werden nicht nur Kostenreduktion und Zeitersparnis bei der Herstellung genannt, sondern auch höhere Akzeptanz durch die Patienten aufgrund eines höheren Komforts und die Entwicklungsmöglichkeit von weiteren Behandlungsmethoden - insbesondere in der Intensivmedizin - erwähnt. Die Kammer ist ca. 9 m lang, 5,4 m breit und 4,8 m hoch [HAUX 2000].



Abbildung 34: Prototyp einer Kammer aus Beton auf dem Luftwaffenstützpunkt in San Antonio/Texas (USA)

4.5 Unfälle in Überdruckkammern und ihre Konsequenzen

Spätestens seit Mitte des 20. Jahrhunderts waren die wissenschaftlichen Grundlagen der Hyperbaren Sauerstoff (HBO)-Therapie bekannt, und die Druckkammertechnologie war ausgereift. In Deutschland zeigte sich ein verhaltenes Interesse für diese Therapieform. Nachdem Boerema sich für die intensivmedizinische Anwendung der HBO-Therapie einsetzte, wurden zunächst Einzelpersonen-Kammern an deutschen Universitäten genutzt. Ein allmählicher Anstieg an Mehrpersonen-Kammern konnte verzeichnet werden. Durch wenige, jedoch folgenschwere Unfälle in Überdruckkammern geriet diese junge medizinische Fachrichtung in Mißkredit.

4.5.1 Unfall in Hannover 1976

In Hannover ereignete sich 1976 ein folgenschwerer Unfall in einer Überdruckkammer, der diese Technologie in Deutschland für die nächsten 10 Jahre fast zum Erliegen brachte.

Für die Katastrophe waren technische und personelle Ursachen gleichermaßen verantwortlich. Die Kammer war erst seit einem Monat in Betrieb, ohne jedoch über eine amtliche Zulassung zu verfügen. In Hannover waren zwei Kammern, die keine Vorkammer hatten, hintereinander geschaltet und konnten dadurch nicht einzeln gesteuert werden [VAN LAAK 1992].

Der Betreiber hatte keine ausreichenden Kenntnisse auf dem Gebiet der Überdruckmedizin. Seine Indikationen für eine Behandlung, wie beispielsweise chronische Bronchitis, Lungenemphysem oder arterielle Durchblutungsstörung [VAN LAAK 1992], erinnerten stark an die Therapie in den pneumatischen Kabinetten um 1860.

Am Tag des Unglücks war kein ausgebildetes Fachpersonal für die Bedienung der Kammer anwesend. Daher konnte keine adäquate Rettung eingeleitet werden, als ein Patient in der Kammer kollabierte. Aufgrund der Reihenschaltung beider Kammern und unsachgemäßer Bedienung kam es zu einem unkontrollierbaren Druckabfall in den Kammern. Zwei Menschen starben am Ort der Katastrophe. Drei weitere verloren ihr

Leben, weil sie ohne weitere medizinische Versorgung nach Hause geschickt wurden [VAN LAAK 1992].

Nach dem Unfall wurde vielen Druckkammern der Betrieb behördlich untersagt. In Bremen mußte 1977 nach einem erneuten Todesfall eine Kammer geschlossen werden. Andere Druckkammerbetreiber beendeten freiwillig den Betrieb [BARTMANN 1998]. An den deutschen Universitäten sank das Interesse für die Hyperbare Oxygenierung, und diese noch junge Therapieform geriet ins Abseits, so daß es 1988 nur noch vier Einrichtungen für die HBO-Therapie in Deutschland gab. Mit den Fortschritten in den USA, China, Japan und der ehemaligen Sowjetunion konnte nicht mithalten werden. Selbst das kleine Nachbarland Schweiz verfügte zu diesem Zeitpunkt über mehr Kapazitäten [TIRPITZ 1988, VAN LAAK 1992]. Diese traurige Bilanz führte andererseits auch zu einer nachhaltigen Diskussion über therapeutische Indikationen.

4.5.2 Technische und medizinische Auflagen

Als Konsequenz aus den Unfällen wurden technische und organisatorische Erneuerungen durchgeführt. Nach dem Unglück, das sich 1976 in Hannover ereignete, wurde die Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin (GTÜM) e.V. gegründet. Als offizielles Organ trug sie wesentlich zur Reglementierung der Anwendung für die HBO-Therapie bei [BARTMANN 1998].

Bevor eine Druckkammer für die Patientenbehandlung zugelassen wurde, mußte diese fortan vom Germanischen Lloyd abgenommen werden. Für das medizinische Hilfspersonal ist eine Mindestqualifikation erforderlich. Ein Arzt mit den Fachkenntnissen für Tauchmedizin muß anwesend sein, wenn die Kammer in Betrieb ist [BARTMANN 1998].

Um eine Druckkammer für therapeutische Zwecke zu betreiben, sind heute gesetzliche Vorschriften zu beachten. Verankert sind diese unter anderem im Medizinproduktegesetz (MPG), in der Medizinprodukte-Betreiberverordnung (MPBetreibV) und in der Unfallverhütungsvorschrift Gesundheitsdienst (VBG 103) [BARTMANN 1998].

Der Druckkammerhersteller Gerhard Haux fordert darüber hinaus, "daß mindestens ein Mitarbeiter zur Behebung einfacher technischer Störungen in der Lage sein muß" [BARTMANN 1998].

Die GTÜM e.V. fordert in ihren Richtlinien für jede Behandlung in einer Druckkammer fachspezifische Qualifikationen für das Personal. Außerdem muß dem Personal nach den berufsgenossenschaftlichen Grundsätzen für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen „Arbeiten in Überdruck“ (G 31) die Tauglichkeit für das Arbeiten in Überdruck bescheinigt werden [GTÜM e.V. 1996].

Während es in Deutschland keine universitäre ärztliche Weiterbildung für den Bereich Unterwasser- und Hyperbarmedizin gibt, wird dies in Frankreich, Italien und Spanien angeboten und in Großbritannien erwogen [WATTEL UND MATHIEU 1994]. Allerdings bietet die GTÜM e.V. die Qualifikation „Tauchmedizin“ [GTÜM e.V. 1996] an, die den Anforderungen in Frankreich, Italien und Spanien gerecht wird. Die Qualifikation „Tauch- und Überdruckmedizin“ [GTÜM e.V. 1996] ist umfangreicher als die europäische Weiterbildung. Diese Qualitätsstandards der GTÜM e.V. liegen dem Weiterbildungsausschuß der Bundesärztekammer zur Anerkennung als Zusatzbezeichnung vor [LENTRODT 2001].

5. TRANSPORTDRUCKKAMMERN

In der Vergangenheit war eine Therapie in den pneumatischen Kabinetten nicht immer klar indiziert. Unbestritten war jedoch die Behandlung der Dekompressionserkrankungen, wie sie bei Tauchern und bei Arbeitern auf Überdruckbaustellen auftraten. Während die dafür konzipierten Überdruckkammern auf Tunnel- und Caisson-Baustellen aufgebaut werden konnten, gestaltete sich die Behandlung für Taucher schwieriger, weil sich geeignete Therapiekammern oft nicht in unmittelbarer Nähe des Unfallortes befanden. Deshalb wurden schon frühzeitig Transportkammern entwickelt.

5.1 Einpersonen-Transportkammern

Damit Taucher trotz widriger Wetterbedingungen die erforderlichen Austauschzeiten sicher an Bord eines Versorgungsschiffes verbringen konnten, wurde 1908 ein Taucherdrucksack (Abbildung 35) entwickelt und hergestellt [RYBA 1930, STELZNER 1942], dessen Einsatz jedoch hinter den Erwartungen zurückblieb [BARTMANN 1998].

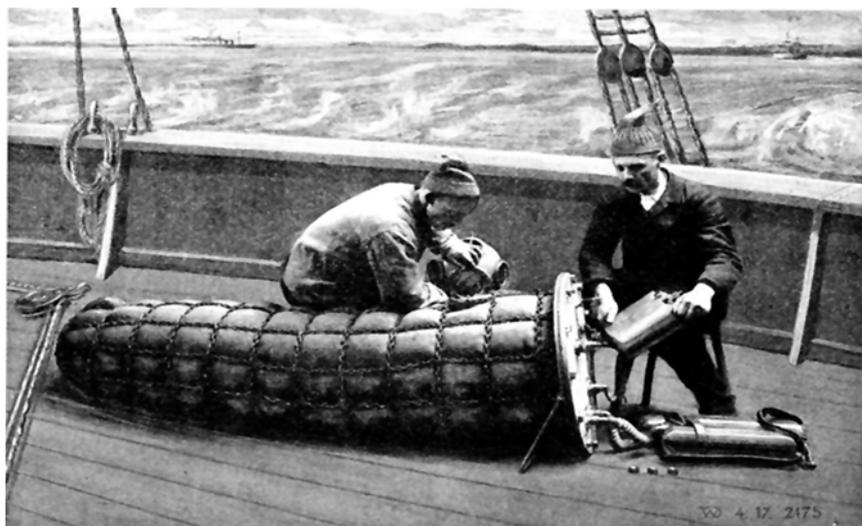


Abbildung 35: Taucherdrucksack (Firma Dräger), ca. 1915

In den Jahren 1940/41 wurde als technische Weiterentwicklung eine Teleskopkammer (Abbildung 36) hergestellt. In dieser Kammer ließ sich bei einwandfreier Funktion der Gummidichtung zwischen den Teleskopelementen ein Druck bis zu 3 bar aufbauen [SEEMANN 1989].

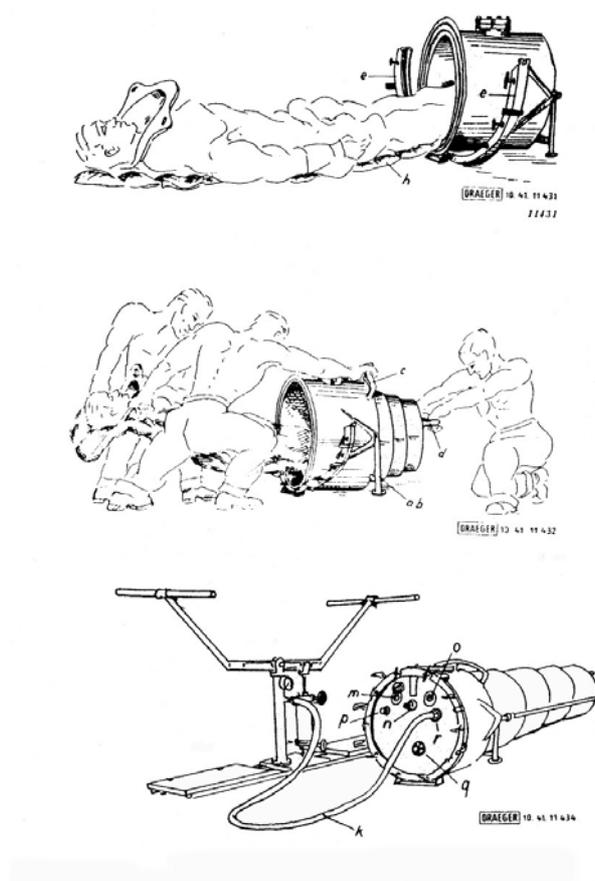
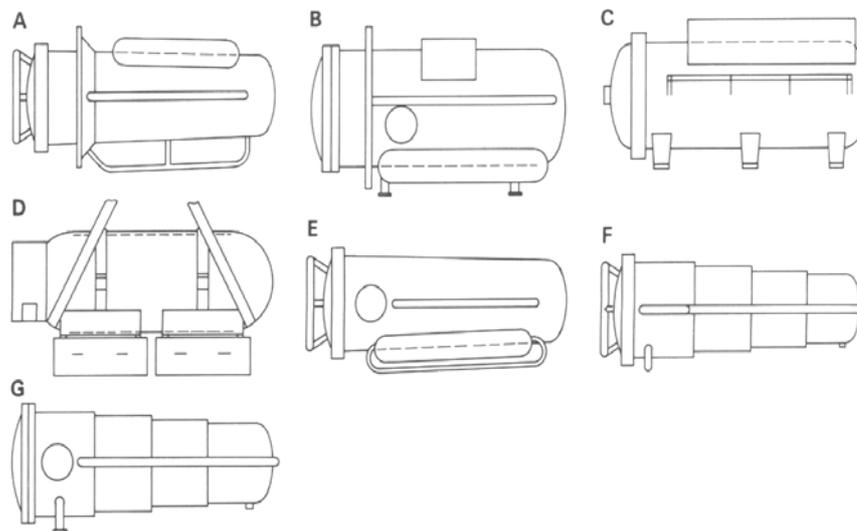


Abbildung 36: Schemazeichnungen zur Funktion der Teleskopkammer (Firma Dräger), 1940/41

In Europa wurden Tauchunfälle bis ca. 1950 nicht direkt am Unfallort behandelt. Auf Initiative des Flottenarztes Seemann wurde die Einpersonen-Transportkammer bei der Bundeswehr und in der Berufstaucherei eingeführt. Die Therapie konnte dadurch kurz nach Auftreten von Symptomen der Dekompressionskrankheit direkt am Unfallort eingeleitet werden [SEEMANN 1989].

Die technisch aufwendige und mit hohen Kosten verbundene Teleskopkonstruktion wurde vor ca. 30 Jahren durch eine starre Konstruktion ersetzt.

Transportkammern (Abbildung 37) verfügen über ein Anflanschsystem, welches mit den Systemen in den Zentren für Hyperbare Sauerstoff (HBO)-Therapie kompatibel ist, so daß der Patient ohne erneute Dekompression in die stationäre Behandlungskammer gebracht werden kann [BARTMANN 1998].



- Legende
- A:** Modell „Piggy back“ (Firma Dräger)
 - B:** Modell 35/cag 2 (Firma Galeazzi)
 - C:** Modell Typ 4 (Firma Cammell Laird)
 - D:** Modell der US-Marine
 - E:** Modell Eco-Transfer (Firma Haux)
 - F:** Teleskop-Kammer (Firma Dräger)
 - G:** Modell 33/b (Firma Galeazzi)

Abb. 37: verschiedene Ausführungen der Einpersonentransportkammern

Seemann empfahl zum Transport einen Luftdruck von 5 bar, der in starren Transportkammern erzeugt werden konnte [SEEMANN 1989]. Es ist nicht vollkommen gesichert, ob derart hohe Drücke erforderlich sind, denn - unabhängig von der Symptomatik - werden auch deutlich niedrigere Drücke zwischen 1,2 und 1,5 bar vorgeschlagen [FAESECKE 1988].

Ein weiterer Diskussionspunkt war die unkontrollierte Atmung von reinem Sauerstoff. In der Unfallverhütungsvorschrift 'Taucharbeiten' (VGB 39) von 1979 wurde die Gabe von Sauerstoff während des Transports in der Kammer gefordert. Nachdem sich mehrere, zum Teil tödliche, Zwischenfälle in Druckkammern ereignet hatten, wurde die Atmung von reinem Sauerstoff in Transportkammern ab 1985 verboten, was zu Kontroversen führte [FAESECKE 1988]. Inzwischen wurde die Sauerstoffgabe in der Transportkammer zur Wiederaufnahme in die neue VGB 39 beantragt [TIRPITZ 2001].

Das Transportproblem in der Einpersonen-Druckkammer hat sich in Deutschland entschärft, denn im Zeitraum von 1987 bis 1998 stieg die Anzahl der Therapieplätze von ca. 100 auf über 1000 an [HAUX 1997]. Die Druckkammerstandorte sind in Deutschland so verteilt, daß sie mittels Rettungstransport auf dem Landweg in 45 bis 60 min zu erreichen sind [BARTMANN 1998]. Von den Kammern werden 62 auf ambulanter Basis betrieben; 7 sind stationäre Einrichtungen in Krankenhäusern [VDD e.V. 2001].

Aufgrund der Richtlinien für die Übernahme der Behandlungskosten durch die gesetzlichen Krankenversicherungen, die Mitte 2000 rechtskräftig wurden [KBV 2000], ist mit einer Reduzierung der Therapiezentren zu rechnen.

5.2 Mehrpersonen-Transportkammern

5.2.1 Sanitäts-Schleuse auf S.M.S. Vulkan

Da bei den Einpersonen-Kammern immer wieder die eingeschränkte Zugriffsmöglichkeit des Arztes ein Problem darstellte, wurden Zweipersonen-Transportkammern entwickelt. Die damit verbundene Zunahme von Größe und Gewicht der Kammer schränkt ihre Transportfähigkeit jedoch ein [BARTMANN 1998].

Eine der ersten Zweipersonen-Kammern wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts in Deutschland entwickelt. Hierbei handelte es sich allerdings um ein stationäres System, welches aus Anlaß des Verlustes des U-Bootes U3 im Jahre 1908 auf S.M.S. Vulkan (Abbildung 38) installiert wurde. Mit dieser Kammer wurde die Arbeit der Taucher unterstützt, welche die Bergung des U-Bootes vornahmen. Zur Besatzung gehörte bereits ein Taucherarzt. Berichten dieser Zeit ist zu entnehmen, daß die Kammer auch für Forschungszwecke eingesetzt wurde. Außerdem wurde sie im jeweiligen Hafen zur therapeutischen Versorgung von Tauchern herangezogen, die nicht zur Besatzung gehörten [BARTMANN 1998].

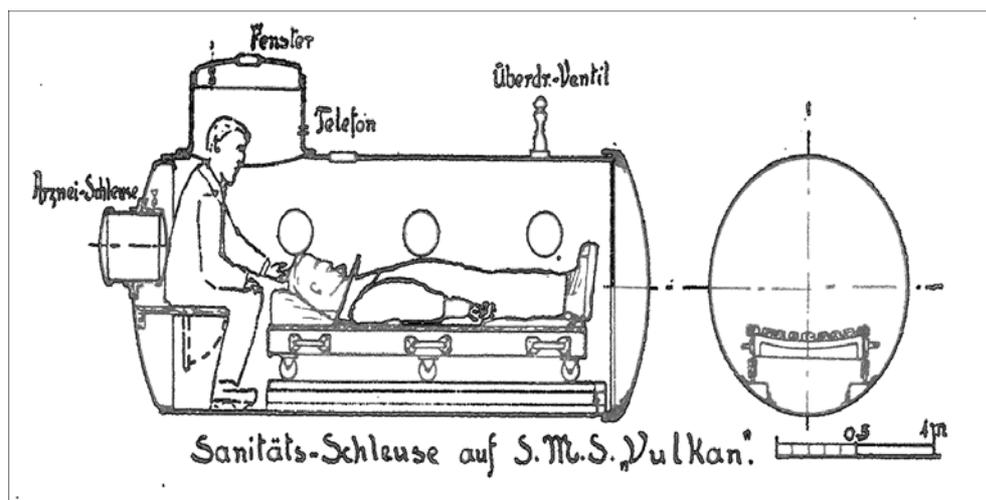


Abbildung 38: Sanitäts-Schleuse auf S.M.S. Vulkan, ca. 1908

5.2.2 Transportable Mehrpersonen-Kammer

Eine Weiterentwicklung ist eine transportable Mehrpersonen-Kammer. Die Abbildung 39 zeigt ein System aus einer kugelförmigen Kammer, an die eine röhrenförmige Transportkammer angeflanscht werden kann. Die runde Kammer bietet vier Personen Platz. In der Transport-Druckkammer, die über ein Beatmungssystem für Luft und Sauerstoff verfügt, können zwei Personen gleichzeitig versorgt werden [LINDNER 2001].



Abbildung 39: Fotomontage der kugelförmigen Transport-Druckkammer mit angeflanschter Transportkammer (Firma Babcock), ca. 1970

5.3 Transportkammern zur Rettung verschütteter Bergleute

5.3.1 Lengede

Der Einsatz einer Überdruckkammer wurde 1963 bei der Rettung verschütteter Bergleute in Lengede notwendig, nachdem am 24. Oktober 1963 ein Klärteich brach, und die Stollen der Grube Mathilde überflutet wurden. Zunächst waren 129 Bergleute verschüttet, von denen sich 86 retten konnten. Von den 43 Vermißten konnten drei nach 196 h und weitere 11 Bergarbeiter nach 14 Tagen lebend geborgen werden [FUST UND HARTMANN 1964, BILGES ET AL. 1987]. Die medizinische und technische Unterstützung erfolgte durch das Institut für Flugmedizin der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt in Köln-Porz. Aufgrund der Verweildauer im Überdruck mußte die Rettung mit Hilfe einer Überdruckkammer erfolgen, die von Winsen a. d. Luhe nach Lengede transportiert wurde. Vor Ort wurde diese Kammer mit den erforderlichen Beatmungsanschlüssen für Sauerstoff nachgerüstet. Die Druckkammer wurde auf den Rettungsschacht montiert, damit die Rekompensation der Bergleute unverzüglich erfolgen konnte [FUST UND HARTMANN 1964].

5.3.2 Lassing (Österreich)

Im Juli 1998 wurde aufgrund von Wasser- und Schlammeinbruch in einem Bergwerk in Lassing (Österreich) ein Bergmann verschüttet, der sich in 65 m Tiefe befand. Bei dem Versuch, ihn zu bergen, wurden 10 Bergleute unter nachrutschenden Erdmassen begraben. Bei einer großen Rettungsaktion mit österreichischer, italienischer und deutscher Beteiligung kamen verschiedene Transportkammersysteme („Transcom“, „Duocom“) zum Einsatz. Eine individuelle Druckkammerkonstruktion (Abbildung 40) wurde für die Rettung erforderlich, da das Gebiet nur schwer zugänglich war und Erdreich nachzurutschen drohte. Außerdem befindet sich das Anflansch-Element für die Rettungskammer an der Unterseite der Hauptkammer (Abbildung 41). Während der verschüttete Bergmann, gerettet werden konnte, verliefen mehrere Bohrungen zur Ortung der verschütteten Gruppe erfolglos [BEUSTER ET AL. 2000].

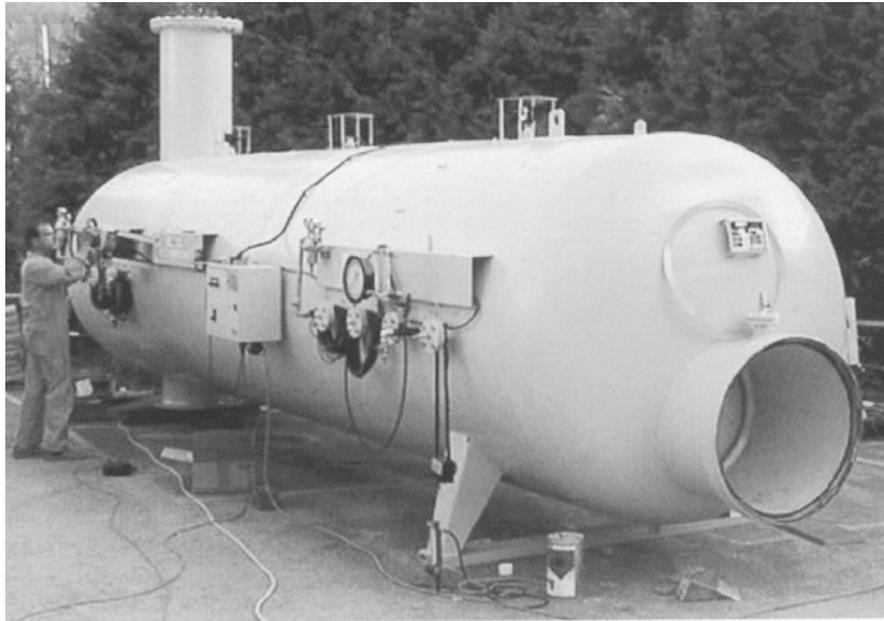


Abbildung 40: spezielle Kammeranfertigung für die Rettung verschütteter Bergleute in Lassing

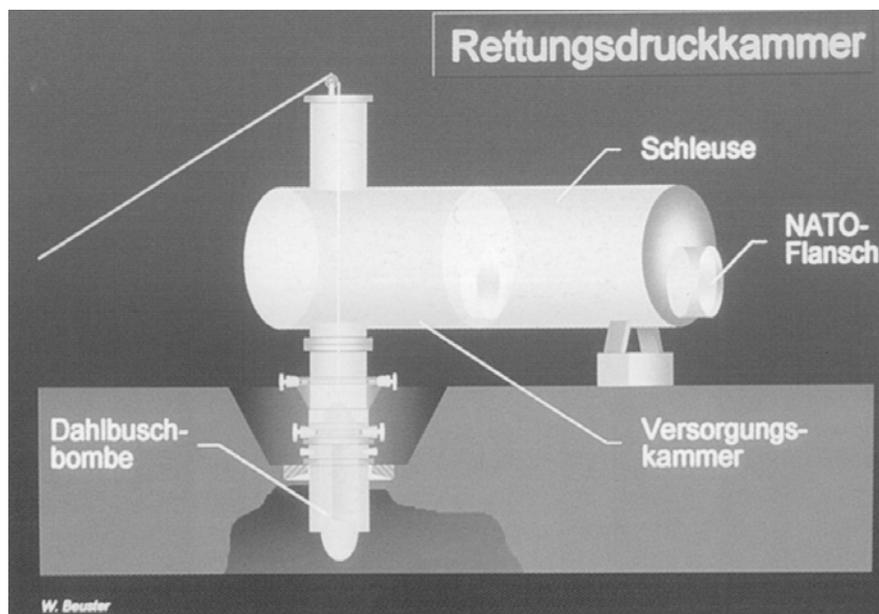


Abbildung 41: Einsatz der Bergungskammer in Lassing (Schemazeichnung)

6. Indikationen und Kontraindikationen für die Hyperbare Sauerstoff (HBO)-Therapie

Definitionsgemäß atmet der Patient während der HBO-Therapie intermittierend 100% Sauerstoff bei mehr als 1 bar [WATTEL UND MATHIEU 1994].

6.1 Physiologische Wirkmechanismen bei der Anwendung von hyperbarem Sauerstoff

6.1.1 Grundlagen der HBO-Therapie

Unter normobaren Bedingungen ist beim Lungengesunden Sauerstoff zu 97% an Hämoglobin chemisch gebunden. Die verbleibenden 3% Sauerstoff sind im Plasma physikalisch gelöst [JAIN 1999]. In Abhängigkeit vom Umgebungsdruck kann die im Plasma physikalisch gelöste Sauerstoffmenge während einer Therapie mit hyperbarem Sauerstoff auf 4,5 Vol.% [BOEREMA ET AL. 1960] bis 6 Vol.% ansteigen [MUTH 1998]. Weil das Gewebe den im Plasma gelösten Sauerstoff schneller nutzen kann, gelangt der an das Hämoglobin gebundene Sauerstoff unverändert vom arteriellen in den venösen Kreislauf [ORIANI ET AL. 1996, JAIN 1999].

Bei einer Kapillarrarefizierung in einem bestimmten Gebiet (z.B. durch thermische oder mechanische Schädigungen, mikroangiopathische Veränderungen, Bestrahlung, Ödeme) werden die Diffusionsbedingungen für Sauerstoff und damit die Voraussetzungen zur Versorgung der Zellen verschlechtert, so daß eine Gewebhypoxie mit anaerobem Stoffwechsel die Folge ist. Eine länger anhaltende, schwere Hypoxie wird vom Gewebe nicht toleriert und führt letztendlich zur Nekrose [CAMPORESI ET AL. 1996, TIBBLES UND EDELSBERG 1996]. Aufgrund des erhöhten Sauerstoffpartialdruckes während der HBO-Therapie kann die Diffusion des Sauerstoffes vom funktionsfähigen Kapillargebiet in den geschädigten, hypoxischen Zellbereich gesteigert werden [SHEFFIELD 1988].

6.1.2 Effekte des hyperbaren Sauerstoffes

Folgende Effekte können aufgrund des erhöhten Sauerstoffpartialdruckes im Gewebe während der HBO-Therapie beobachtet werden:

- **Vasokonstriktive Wirkung**

Bei erhöhtem Sauerstoffpartialdruck kommt es zu einer Reduktion der Durchblutung. Dies beruht auf einem autoregulatorischen Effekt, denn ein erhöhter Sauerstoffpartialdruck bedeutet für das Gewebe eine Luxusversorgung, welche dann vom Gefäßsystem mit einer Vasokonstriktion beantwortet wird. In Organen mit erhaltener Autoregulation läßt sich dadurch eine Ödemreduktion erzielen. Von therapeutischem Nutzen während einer HBO-Therapie ist dieser Effekt z.B. bei postischämischen Ödemen im Rahmen von Crush-Verletzungen, Kompartmentsyndromen oder bei gefährdeten Transplantaten [CAMPORESI ET AL. 1996, ORIANI ET AL. 1996, MUTH 1998].

- **Wundheilung im hyperoxischen Milieu**

Die Wundheilung verläuft unter Beteiligung zahlreicher Zellsysteme und Mediatoren, und sie wird durch das Milieu in der Umgebung der Wunde entscheidend mitbestimmt. Dieser Bereich ist in zwei Kompartimente unterteilt: den eigentlichen Wundbereich, der eine Hypoxie und eine hohe Laktatkonzentration aufweist, sowie den gut vaskularisierten, hyperämisierten Wundrandbereich, von dem die Heilungsvorgänge eingeleitet werden. Ein ausreichendes Sauerstoffangebot ist erforderlich, damit in den an der Wundheilung beteiligten Zellen die erforderlichen Syntheseschritte ablaufen können. Zu diesen gehören die Kollagensynthese, die Fibroblastenproliferation und die Angiogeneese [VIHERSAARI ET AL. 1974, HUNT 1988].

- **Erhöhte Osteoblasten- und Osteoklastenaktivität**

Durch die HBO-Therapie wird im hypoxischen Knochengewebe sowohl der Abtransport von nekrotischem Zellmaterial durch eine verstärkte Osteoklastentätigkeit als auch eine Knochenmodellierung durch eine sauerstoffinduzierte Osteoblastenaktivität erreicht [GARRETT ET AL. 1990, SAWAI ET AL. 1996].

- **Inhibition der Bakterienaktivität**

In der Mitte des 20. Jahrhunderts wurde beobachtet, daß die HBO-Therapie aufgrund ihrer inaktivierenden Wirkung auf anaerobe Keime bei Infektionen mit anaeroben oder aerob-anaeroben Erregern indiziert ist [BOEREMA UND BRUMMELKAMP 1960]. Dieser Mechanismus wurde bei den gasbildenden Clostridien (*Clostridium perfringens* u. a.) ausführlich untersucht. Bei In-vitro-Versuchen konnte eine bakterizide Wirkung auf anaerobe Clostridienstämme gezeigt werden [KAYE 1972]. In vivo ist die bakterizide Wirkung des hyperbaren Sauerstoffes abhängig vom Druck, der Expositionsdauer sowie dem Umgebungsmilieu [HILL UND OSTERHOUT 1972A + 1972B]. Darüber hinaus unterdrückt die HBO-Therapie die Produktion des von Clostridien gebildeten α -Toxins, einer Lecithinase, die für die Zerstörung der Zellmembran und somit für einen unerwünschten Anstieg der Kapillarpermeabilität verantwortlich ist [VAN UNNIK 1965].

- **Reduktion der Kohlenmonoxidaffinität zum Hämoglobin**

Im Vergleich zum Sauerstoff hat Kohlenmonoxid eine deutlich höhere Bindungsaffinität zum Hämoglobin. In Anwesenheit von Kohlenmonoxid, das wesentlich langsamer als Sauerstoff dissoziiert, wird eine Sauerstoffabgabe an das Gewebe erschwert und der Sauerstofftransport verhindert. Unter hyperbaren Bedingungen ist dieser Mechanismus reversibel, weil dann der Sauerstoff eine höhere Bindungsaffinität an das Hämoglobin aufweist, und weil der Anteil des physikalisch gelösten Sauerstoffes erhöht wird [BÜCHERL 1965].

Zusammengefaßt zeigen sich folgende Effekte der HBO-Therapie:

- antiödematöse Wirkung,
- verbesserte Wundheilung,
- erhöhte Osteoklastenaktivität und Osteoneogenese,
- Inaktivierung anaerober Erreger und ihrer Toxine,
- Reduktion der Kohlenmonoxidaffinität zum Hämoglobin und
- schnellere Elimination des Kohlenmonoxids aus dem Gewebe.

6.2 Indikationsempfehlungen für die HBO-Therapie

Die Therapie von Patienten in der Druckkammer erfordert (soweit dies vorab möglich ist) eine Tauglichkeitsuntersuchung. Diese umfaßt eine anamnestiche Befragung unter Berücksichtigung der geplanten HBO-Therapie und eine körperliche Untersuchung, die besonders auf die Druckwechselbelastungen der gasgefüllten Organe eingeht. Am Patienten werden ein Ruhe- und ein Belastungs-EKG, eine Lungenfunktionsprüfung und eine Röntgenaufnahme des Thorax durchgeführt. Mittels Otoskopie wird die Tubendurchgängigkeit festgestellt [GTÜM e.V. 1996].

Für die Anwendung der HBO-Therapie werden unter anderem von folgenden Gesellschaften Empfehlungen herausgegeben:

- European Undersea Baromedical Society (EUBS),
- Undersea and Hyperbaric Medical Society (UHMS),
- Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin (GTÜM) e.V. und
- European Committee of Hyperbaric Medicine (ECHM).

In den Tabellen 2 bis 4 sind die Indikationen der EUBS, UHMS und GTÜM e.V. aufgeführt.

Im Jahr 1994 fand in Lille (Frankreich) die erste Europäischen Konsensus-Konferenz für Hyperbarmedizin statt. Drei Indikationsstufen für die HBO-Therapie wurden definiert:

- (1) Situationen, in denen ein Transport zu einem HBO-Zentrum **stark empfohlen** ist, weil die Hyperbare Oxygenierung (HBO) die Heilung des Patienten prognostisch günstig beeinflusst. Dies bedeutet, daß der Patient schnellstmöglich zu der nächstgelegenen HBO-Kammer gebracht wird.
- (2) Der Transport zu einer HBO-Kammer ist **empfohlen**, weil die HBO ein wichtiger Bestandteil der Therapie ist. Sofern keine akute Lebensgefahr für den Patienten besteht, soll der Transport, auch zum Zwecke der Prävention, zu einer Überdruckkammer erfolgen.
- (3) Der Transport zu einer Druckkammer ist **möglich**, weil die HBO eine zusätzliche Therapieform darstellt, die eine Heilung verbessern kann [WATTEL UND MATHIEU 1994].

Gemäß diesen drei Einteilungen stuft die EUBS die verschiedenen Indikationen für eine Therapie mit hyperbarem Sauerstoff ein (Tabelle 2).

Tabelle 2: Empfehlungen der Jury der ersten Europäischen Konsensus-Konferenz für Hyperbarmedizin, Lille (Frankreich) 1994 [WATTEL UND MATHIEU 1994]

1. Empfehlungen Typ 1: stark empfohlen („strongly recommended“)

- (1) Dekompressionskrankheit
- (2) Kohlenmonoxid-Intoxikation
- (3) Gasembolie
- (4) nekrotisierende Weichteilinfektionen (anaerobe oder aerob/anaerob)
- (5) Verbrennungen in Verbindung mit CO-Vergiftungen
- (6) Osteoradionekrose (als Prävention vor Zahnextraktionen im bestrahlten Gebiet und vor chirurgischer Intervention)
- (7) Weichteilradionekrose (jedoch nicht bei Rückenmarksradionekrose)

2. Empfehlungen Typ 2: empfohlen („recommended“)

- (1) Crush-Verletzungen der Extremitäten
- (2) posttraumatisches Reperfusionssyndrom
- (3) kritische Haut- und Myokutantransplantate
- (4) akuter Hörsturz
- (5) chronische Osteomyelitis (therapieresistent)
- (6) Problemwunden (z.B. Fußulcera bei Patienten mit Diabetes mellitus)
- (7) schwere chronische Ischämie

3. Empfehlungen Typ 3: möglich („optional“)

- (1) Enzephalopathien (cerebrale Anoxie)
- (2) milde Formen einer CO-Vergiftung
- (3) Reperfusionssyndrom nach Gefäßchirurgie
- (4) Verbrennungen (> 20% Körperoberfläche, >2°)
- (5) akute Augenerkrankungen (ophthalmologische Ischämie)
- (6) Replantation von amputierten Extremitäten
- (7) Weichteilradionekrose des Rückenmarks

Die Indikationen der UHMS, die ihre Indikationsliste (Tabelle 3) im ca. dreijährigen Turnus aktualisiert, sind enger ausgelegt als die anderer Organisationen.

Tabelle 3: Indikationen der UHMS für die HBO-Therapie [UHMS 1999]

UHMS: Indikationen für die HBO-Therapie	
(1)	Dekompressionserkrankungen
(2)	Luft- oder Gasembolie
(3)	Kohlenmonoxid-Intoxikation mit/ohne Cyanid-Inhalation
(4)	clostridiale Myositis und Myonekrose (Gasgangrän)
(5)	Crush-Verletzungen und andere traumatische periphere Ischämien
(6)	verbesserte Wundheilung bei ausgewählten Problemwunden
(7)	außergewöhnlicher Blutverlust
(8)	intracranielle Abszesse
(9)	nekrotisierende, nichtclostridiale Weichteilinfektionen
(10)	therapierefraktäre Osteomyelitis
(11)	Weichteilradionekrose und Osteoradionekrose
(12)	kritische Hautlappen und Hauttransplantate
(13)	Brandverletzungen

Die deutsche Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin (GTÜM) e.V. wurde 1976 gegründet. Seither finden in regelmäßigen Abständen wissenschaftliche Tagungen mit international renommierten Referenten statt, die auch über die Fortschritte auf dem Gebiet der HBO-Therapie berichten. Die Qualitätsstandards der GTÜM e.V. für die HBO-Therapie wurden 1996 herausgegeben (Tabelle 4) [TIRPITZ 1993, GTÜM e.V. 1996].

Tabelle 4: die Indikationen der GTÜM e.V. für die HBO-Therapie

[TIRPITZ 1993, GTÜM e.V. 1996]

GTÜM e.V.: Indikationen für die HBO-Therapie

- (1) Dekompressionserkrankungen
- (2) Luft- und Gasembolie
(Lungenüberdruckunfall (CAGE), iatrogene Gasembolie)
- (3) Kohlenmonoxid-Intoxikation mit/ohne Cyanid-Inhalation,
Rauchgasinhalation
- (4) clostridiale Myonekrose (Gasbrand)
- (5) Problemwunden
- (6) intrakranielle Abszesse
- (7) nekrotisierende Weichteilinfektionen
- (8) therapierefraktäre Osteomyelitis
- (9) Weichteilradionekrose und Osteoradionekrose
- (10) gefährdete Haut- und Weichteiltransplantate
- (11) Verbrennungen
- (12) chronische, periphere arterielle Verschlusskrankheit
ohne Operationsindikation
- (13) Cochleäre Funktionsstörungen
(Hörminderung, Tinnitus, Lärm-, Knalltrauma)

Russland und China verfügen über wesentlich umfangreichere Indikationslisten, die auch noch zu erforschende Indikationen enthalten [JAIN 1999]. Durch das umfangreiche Behandlungsspektrum läßt sich wahrscheinlich die große Anzahl an Therapiekammern in beiden Ländern erklären.

Die von der UHMS vorgeschlagenen Indikationen [UHMS 1999] werden - zum Teil mit unterschiedlicher Gewichtung - vom ECHM, der EUBS [WATTEL UND MATHIEU 1994] und der GTÜM e.V. [TIRPITZ 1993, GTÜM e.V. 1996] ebenfalls anerkannt. Auch in den Empfehlungen der chinesischen Gesellschaft für HBO-Therapie und in der russischen Indikationsliste sind sie enthalten [JAIN 1999].

6.3 Indikationen der UHMS für die HBO-Therapie

Aufgrund der weltweiten Akzeptanz werden die Indikationen der Undersea and Hyperbaric Medical Society (UHMS) ausführlicher dargestellt.

6.3.1 Dekompressionserkrankung

Die Begriffe Dekompressionserkrankung, Caisson-Krankheit, Taucherkrankheit, Taucherlähmung und Druckfallkrankheit werden synonym benutzt. In Anlehnung an die Damenmode der Zeit um 1880, die mit einem gebeugten Gang einherging, wurde beim Bau der Brooklyn Bridge in New York der Begriff "Bends" eingeführt [KINDWALL 1977], der mit Gelenkschmerzen gleichgesetzt werden kann [MÄNNICHE 1968].

Die Erkrankung tritt auf, wenn nach einem Aufenthalt in Überdruck durch raschen Druckabfall ein niedriger Umgebungsdruck erzeugt wird. Im Körper bilden sich Stickstoffblasen, die Ursache der auftretenden Symptome sind. Bei der Entstehung der Dekompressionskrankheit sind die Druckverhältnisse und die Verweildauer unter diesen erhöhten Drücken bedeutend [ZUNTZ 1897, HELLER, MAGER, VON SCHRÖTTER 1900, HALDANE 1922]. Darüber hinaus konnten "stille" Bläschen bei vielen asymptomatischen Dekompressionen nachgewiesen werden [KINDWALL 1977].

Bei der Dekompressionskrankheit sind zwei Typen bekannt. Typ 1 wird als "pain only" bezeichnet und umfaßt Hautreizungen (z.B. Taucherflöhe (engl.: itches)), kurzzeitige Parästhesien und Gelenksbeschwerden (Bends) [MÄNNICHE 1968]. Die Bends werden als dumpfe Schmerzen beschrieben, die plötzlich entstehen oder sich allmählich steigern [KINDWALL 1977]. Auch Ödeme können beim Typ 1 der Dekompressions-

krankheit auftreten [SCHUSTER 1989]. Typ 2 geht mit gravierenden Symptomen im zentralen oder peripheren Nervensystem und im kardio-pulmonalen Bereich einher [KINDWALL 1977]. Störungen des Vestibularisapparates (z.B. Übelkeit, Ohrgeräusche, Gleichgewichtsstörungen) können ebenfalls auftreten [SCHUSTER 1989].

Die lebensrettende Erstversorgung wird durch Gabe von Sauerstoff am Unfallort und Volumenersatztherapie eingeleitet. Eventuell müssen zusätzliche intensivmedizinische Maßnahmen vor der Behandlung in der Druckkammer durchgeführt werden [MÄNNCHE 1994]. Danach erfolgt der schnellstmögliche Transport zu einer Druckkammer, in der unter Anwendung der Hyperbaren Oxygenierung zunächst eine Re-kompression und anschließend eine stufenweise Dekompression durchgeführt wird. Zur Therapie wird die Mehrpersonen-Kammer bevorzugt, da in der Einpersonen-Kammer kein sofortiger ärztlicher Zugriff möglich ist [KINDWALL 1977, MÄNNCHE 1994]. Verzögert sich die Behandlung der Dekompressionskrankheit Typ 2, ist mit bleibenden neurologischen Schäden zu rechnen [SCHUSTER 1989].

Die Dauer einer HBO-Therapie richtet sich nach dem Schweregrad der Dekompressionserkrankung und der Zeit, die bis zum Beginn der Therapie verstrichen ist. Die vorliegenden Daten zeigen, daß auch mehrere Tage nach einem Dekompressionsunfall die HBO-Therapie zur Heilung führt [SCHIPKE ET AL. 1998]. Studien belegen, daß die Behandlung in den meisten Fällen nach 10 HBO-Behandlungen erfolgreich abgeschlossen werden kann [UHMS 1999].

Eine besondere Situation ergibt sich bei einem offenen Foramen ovale, durch welches in Ausnahmefällen Gasblasen in den arteriellen Kreislauf übertreten können. Die Relevanz des offenen Foramen ovale bei der Entstehung einer Dekompressionserkrankung wird kontrovers diskutiert [BOVE 1998, GERMONPRÉ ET AL. 1998]. Die Vereinigung Divers Alert Network (DAN) hat in Europa zu umfangreichen Untersuchungen, die sich mit dieser Fragestellung befassen, aufgerufen [DAN EUROPE 2001].

6.3.2 Luft- oder Gasembolie

Gelangt Luft oder ein anderes Gas in die arterielle Zirkulation, können Endarterien verschlossen werden, und in den abhängigen Organen treten hypoxiebedingte Schäden auf.

Bei einem erhöhten Umgebungsdruck wird Stickstoff (oder ein anderes Gas) vermehrt im Blut und im Gewebe physikalisch gelöst. Während der Dekompression wird es freigesetzt. Die entstehenden Gasbläschen können sich zu größeren Bläschen zusammenschließen [MÄNNCHE 1968], die bei entsprechend langsamer Dekompression asymptomatisch bleiben und teilweise über die Lunge abgeatmet werden.

Beim Tauchen ohne Anwendung eines Atemgerätes kann es zu einem Lungenunterdruckunfall (= Unterdruckbarotrauma der Lunge) kommen, wenn zu tief abgetaucht wird und sich die Lunge nicht mehr dem Umgebungsdruck entsprechend verkleinern kann. Im Gegensatz dazu steht der Lungenüberdruckunfall oder die arterielle Gasembolie. Sie kann unabhängig von Tauchtiefe und Tauchzeit eintreten. Oft ist sie zu beobachten, wenn der Aufstieg des Tauchers zu schnell erfolgt oder wenn es zu einer forcierten Dekompression in der Druckkammer kommt. Die arterielle Gasembolie (AGE) kann durch die Bildung von großen Gasbläschen im linken Herzen entstehen, die über die Aorta in den arteriellen Kreislauf gelangen. Außerdem kommt es zur AGE, wenn eine rasche Dekompression bei vollständiger Gassättigung erfolgt, wodurch im arteriellen Kreislauf schlagartig große Gasmengen freigesetzt werden [MÄNNCHE 1968]. Darüber hinaus können arteriellen Gasembolien iatrogen im Zusammenhang mit chirurgischen Eingriffen entstehen. Die AGE kann sich zur cerebralen arteriellen Gasembolie (CAGE) ausweiten [MÄNNCHE 1994, BACHA ET AL. 1996, HARVEY ET AL. 1996, DEXTER UND HINDMAN 1998].

Da es sich bei der Gasembolie um einen lebensbedrohlichen Zustand handelt, wird die Erstversorgung mit Sauerstoff am Unfallort eingeleitet. Anschließend erfolgt der unverzügliche Transport des Patienten zu einer Überdruckkammer [MÄNNCHE 1994].

Das Therapieschema orientiert sich an dem zur Behandlung der Dekompressionskrankheit, wobei ein von der US-Navy entwickeltes Schema am häufigsten eingesetzt wird [UHMS 1999].

6.3.3 Kohlenmonoxid-Intoxikation mit/ohne Cyanid-Inhalation

Kohlenmonoxid, ein farb- und geruchloses Gas, ist für den Menschen eines der stärksten Umweltgifte. Das klinische Bild einer Kohlenmonoxid-Intoxikation ist unspezifisch. Ursache für eine Kohlenmonoxid-Intoxikation ist die Inhalation von Rauchgasen, die z.B. bei Bränden entstehen [TIRPITZ 1998A]. Dieses Gift verdrängt Sauerstoff von seinen Bindungsstellen. Da Gehirn und Herz am stärksten unter einer Sauerstoff-Mangelversorgung leiden, manifestieren sich die Krankheitssymptome in diesen beiden Organsystemen. Weitere Symptome, die bei einer Kohlenmonoxid-Intoxikation auftreten können, sind u. a. Übelkeit, Kurzatmigkeit, Tachykardie und Bewußtlosigkeit [SHANK UND MUTH 2000].

In Deutschland wird seit 1973 die HBO-Therapie zur Behandlung eingesetzt. Das Therapieschema wurde seither nur unwesentlich verändert [TIRPITZ 1998A]. Nach der Rettung des Patienten erfolgt die Gabe von 100%-igem Sauerstoff und die unverzügliche Weiterbehandlung in einer Überdruckkammer. Durch diese Therapieform wird eine adäquate Gewebeoxygenierung und eine schnellere Eliminierung des Kohlenmonoxids aus dem Körper erreicht [SHANK UND MUTH 2000].

6.3.4 Clostridiale Myositis und Myonekrose (Gasbrand)

Die Gasbrandinfektion wird durch anaerobe, sporenförmige Bakterien hervorgerufen, die zur Familie der Clostridien gehören, wobei im Keimspektrum der Patienten in 95% der Fälle *Clostridium perfringens* nachgewiesen wird [BAKKER 1988].

Diese seltene Infektion wird durch Operationen (meistens Amputationen aufgrund arterieller Durchblutungsstörungen) oder durch komplizierte Frakturen mit großflächigen Weichteilverletzungen, die durch Unfälle entstehen, verursacht. Ein unbehandelter Gasbrand führt innerhalb weniger Stunden bis Tage zum Tod [SCHOTT 1979].

Durch eine frühzeitige HBO-Therapie bei 3 bar wird die Bildung des α -Toxins, welches für die Zerstörung der Zellmembran verantwortlich ist, unterbunden [VAN UNNIK 1965, HILL UND OSTERHOUT 1972A + 1972B]. Das Behandlungskonzept wird durch chirurgische Maßnahmen und Antibiotikagabe ergänzt [BOEREMA UND BRUMMELKAMP 1960, KRISCHNAK 1977, PEIRCE 1984]. Nach dem Boerema-Schema

wird innerhalb der ersten 24 h eine dreimalige Behandlung bei 3 bar und 100%-iger Sauerstoffatmung über 90 min durchgeführt. Danach erfolgt die HBO-Therapie zweimal pro Tag [BOEREMA UND BRUMMELKAMP 1960]. Nach 10 Behandlungen ist eine Evaluation des Heilungsprozesses indiziert [UHMS 1999].

Durch die Einführung der HBO-Therapie zur Behandlung des Gasbrandes konnten Morbidität und Mortalität herabgesetzt werden. Außerdem bewirkte die Einleitung der HBO-Therapie eine Verminderung der Amputationen [NIER ET AL. 1984, BAKKER 1988].

In Deutschland wurde 1979 der Einsatz der HBO zur Therapie des Gasbrandes kontrovers diskutiert. Neben der Chirurgie und Antibiotikagabe wurde eine Intensivpflege gegenüber der HBO-Therapie favorisiert, wahrscheinlich auch aufgrund der von den Berufsgenossenschaften geforderten 24-Stunden-Bereitschaft in den HBO-Zentren, die personell kaum durchzuführen war [SCHOTT 1979].

6.3.5 Crush-Verletzungen, Kompartmentsyndrom und andere akute traumatische periphere Ischämien

Die Aufgabe der HBO-Therapie ist es, im geschädigten Gebiet den Sauerstoffgehalt zu erhöhen und der Ödembildung, die bei vielen Crush-Verletzungen zu beobachten ist, entgegen zu wirken [UHMS 1999]. Nach Diagnose der bestehenden Erkrankung sollte die HBO-Therapie unverzüglich bei 2,0 bis 2,5 bar durchgeführt werden [JAIN 1999]. Dabei sollten zwei bis drei Behandlungen pro Tag erfolgen und der Behandlungserfolg nach zwei bis sechs Tagen geprüft werden [UHMS 1999]. Wenige randomisierte Studien belegen, daß der Einsatz der HBO-Therapie den Heilungsverlauf unterstützt und die Anzahl chirurgischer Eingriffe reduziert [BOUACHOUR ET AL. 1996].

6.3.6 Verbesserte Wundheilung bei ausgewählten Problemwunden

Wunden, die durch Medikamentengabe und chirurgische Behandlung nicht erfolgreich therapiert werden konnten, gelten als Problemwunden. Gewöhnlich entwickelt sich dieses Krankheitsbild bei Patienten mit systemischen und/oder lokalen Erkrankungen [LERCH 1998, UHMS 1999]. Diese Problemwunden sind durch eine Hypoxie im Wundgebiet gekennzeichnet, die dazu führt, daß die Wundheilung aufgrund der Abnahme der Fibroblastenproliferation, der Kollagenproduktion und einer kapillären Angiogenese gestört wird [HUNT 1988].

Als sinnvolle Anwendungsgebiete für die HBO-Therapie bei gestörter Wundheilung werden diabetische Wunden (diabetisches Fußsyndrom) und die periphere arterielle Verschlusskrankheit genannt [LERCH 1998, UHMS 1999]. Durch die unterstützende HBO-Therapie erhöht sich der transkutane Sauerstoffgehalt, was auch zu einer Verbesserung des Zellmilieus führt. Sobald das Transplantatbett ausreichend vorbereitet ist, erfolgt die Defektdeckung mittels mesh-grafts oder anderen plastischen Deckungsmethoden [MUTH 2000].

Die HBO-Therapie erfolgt bei 2,0 bis 2,5 bar und einer Sauerstoffatmung über 90 bis 120 min. Durchschnittlich sind 30 Behandlungen notwendig, wobei 15 Behandlungen nach der Hauttransplantation erfolgen [DAVIS, BUCKLEY UND BARR 1988]. Der Heilungsverlauf einer Problemwunde mit unterstützender HBO-Therapie ist in den Abbildungen 42 bis 44 dargestellt.

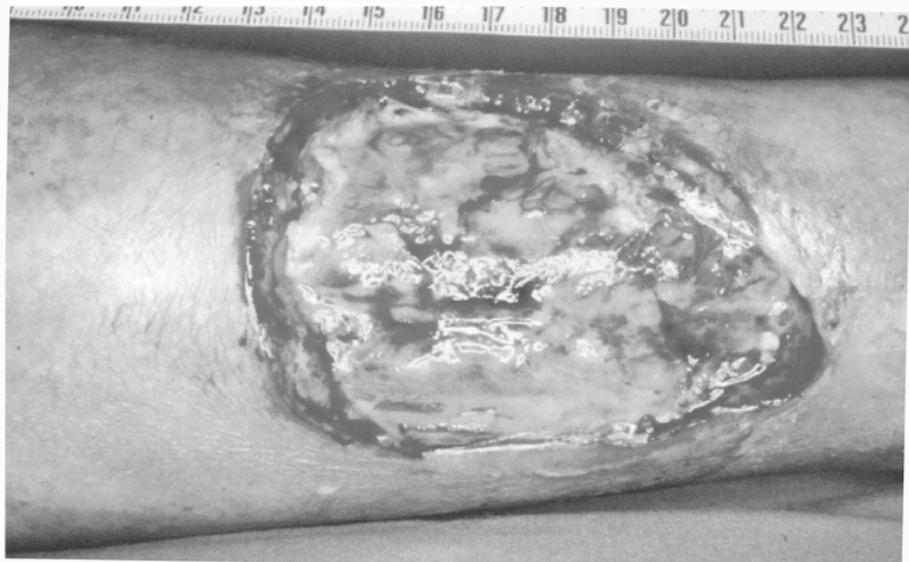


Abbildung 42: infizierter Weichteildefekt am rechten Unterschenkel ohne Heilungstendenz

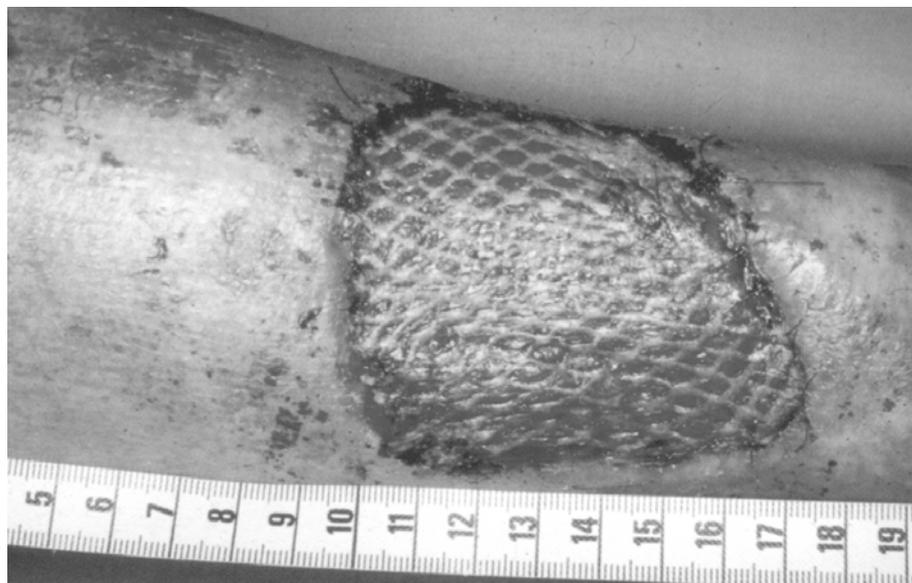


Abbildung 43: Zustand bei Entlassung aus dem stationären Bereich nach insgesamt 30 HBO-Sitzungen und plastischer Wundversorgung



Abbildung 44: Zustand drei Monate nach Entlassung

Auf der Konsensus-Konferenz der ECHM im Jahre 1998 lag der Schwerpunkt auf der HBO-Therapie bei diabetischen Wunden. Eine HBO-Behandlung ist indiziert, wenn folgendes Krankheitsbild vorliegt:

- persistierende Weichteilinfektion,
- kritische Ischämie der Extremität und
- Osteomyelitis [HAMILTON-FARELL 1999].

Es bestand Übereinstimmung darin, daß die Behandlung multidisziplinär erfolgen sollte, wodurch die Inzidenz von wiederholten Ulcerationen und Amputationen reduziert werden kann. Außerdem verursacht die HBO-Therapie keine höheren Kosten als andere Behandlungsmethoden (beispielsweise Gefäßchirurgie oder Amputationen) [CI-ANCI ET AL. 1991A, HAMILTON-FARELL 1999].

6.3.7 Außergewöhnlicher Blutverlust (Anämie)

Die Unterstützung der metabolischen Bedürfnisse des Körpers mit gelöstem Sauerstoff wurde bereits relativ früh von Boerema beschrieben. Er ersetzte das Blut von Schweinen durch einen Puffer, der kein Hämoglobin enthielt. Die Tiere (Abbildung 23) überlebten in einer mit Sauerstoff gesättigten Umgebung und einem Druck von 3 bar ohne nachweisbare neurologische Ausfallerscheinungen [BOEREMA ET AL. 1960].

Bei ungewöhnlich hohem Blutverlust wird in aller Regel eine Transfusion roter Blutzellen vorgenommen. In seltenen Fällen kann diese Transfusion aufgrund medizinischer Probleme nicht erfolgen. Manchmal wird eine Blutübertragung aber auch vom Patienten aus Angst vor Infektion mit Hepatitis oder AIDS oder aus religiösen Gründen abgelehnt [TIRPITZ 1998B, UHMS 1999].

Zum kurzfristigen Überbrücken der Situation kommt die HBO-Therapie zum Einsatz. Der Patient kann aufgrund der Sauerstofftoxizität für die Lunge nur begrenzt in der Überdruckkammer behandelt werden. Nach Beendigung der HBO-Therapie sinkt der arterielle Sauerstoffwert kontinuierlich auf den Basiswert ab, und die Gewebhypoxie tritt erneut auf. Das Schema für die HBO-Therapie sieht pro Tag drei bis vier Sitzungen mit je zwei bis vier Stunden Sauerstoffatmung bei maximal 3 bar Druck vor [UHMS 1999].

Sicherlich ist diese Art der HBO-Therapie nur in Grenzfällen einsetzbar. Sie ist aufwendiger und kostenintensiver als die herkömmliche Bluttransfusion und hat in der zeitlichen Begrenzung der Sauerstoffgabe ihren limitierenden Faktor.

6.3.8 Intracranielle Abszesse

Unter diesem Begriff werden das subdurale und epidurale Empyem sowie der zerebrale Abszeß zusammengefaßt. Die HBO-Therapie bekämpft die bakterielle Infektion, woraus eine bessere Wirkung der Antibiotikatherapie resultiert und trägt zur Reduktion des Hirndruckes bei [UHMS 1999]. Außerdem unterstützt die HBO-Therapie neurochirurgische Maßnahmen [LAMPL UND FREY 1995].

Die HBO-Therapie erfolgt für 60 bis 90 min bei 2,0 bis 2,5 bar. Vorgesehen sind zwei Sitzungen pro Tag. Durchschnittlich werden 20 Sitzungen benötigt [UHMS 1999].

6.3.9 Nekrotisierende, nichtclostridiale Weichteilinfektionen

In dieser Gruppe der Weichteilinfektionen werden die nichtclostridiale Myositis/Myonekrose, die anaerobe Cellulitis, die progressive bakterielle Gangrän und die nekrotisierende Faszitis zusammengefaßt [UHMS 1999].

Die Weichteilinfektionen verursachen eine lokale Hypoxie und eine Gewebeschädigung. Neben der Antibiotikagabe und der chirurgischen Wundinfektion ist die HBO-Therapie besonders indiziert bei Patienten mit schweren Grunderkrankungen [JAIN 1999, UHMS 1999].

Die HBO-Therapie wird bei 2,0 bis 2,5 bar über 90 bis 120 min durchgeführt. In der Initialphase finden zwei Therapieeinheiten pro Tag statt. Hat sich der Zustand des Patienten stabilisiert, reicht eine tägliche Behandlung aus. Insgesamt sollte eine Reevaluation nach 30 Behandlungen erfolgen [UHMS 1999].

6.3.10 Therapierefraktäre Osteomyelitis

Eine Osteomyelitis ist dann therapierefraktär, wenn die Behandlung der akuten Osteomyelitis mit den anerkannten Therapiestandards nicht innerhalb von sechs Wochen zum Erfolg führt [DAVIS UND HECKMAN 1988]. Zu dieser Therapiegruppe zählt auch die Otitis externa necroticans (“maligna”) [UHMS 1999].

Weil das Erscheinungsbild der Osteomyelitis sehr variabel ist, führten Cierny, Mader und Mitarbeiter eine Klassifikation der therapierefraktären Osteomyelitis ein, die Aufschluß über Therapieform und Heilungsprognose gibt. Für die Behandlung werden der Allgemeinzustand des Patienten, das Ausmaß der Knochennekrose sowie die Lokalisation der Osteomyelitis differenziert betrachtet [CIERNY, MADER ET AL. 1985]. Neben chirurgischen Maßnahmen und der Antibiotikatherapie ist die HBO ein Adjvans. Die Behandlung in der Überdruckkammer erfolgt bei 2,0 bis 2,5 bar über einen

Zeitraum von 90 bis 240 min. Insgesamt sind durchschnittlich 40 Behandlungen notwendig [DAVIS UND HECKMAN 1988, UHMS 1999].

6.3.11 Weichteilradioneekrose und Osteoradioneekrose

In dieser Gruppe werden verschiedene Krankheitsbilder zusammengefaßt. Dazu gehört die Osteonekrose der Mandibula, Laryngealneekrose, Weichteilnekrose im Kopf- und Halsbereich, Strahlencystitis, Strahlenproktitis, Strahlenenteritis, strahleninduzierte abdominelle Verletzungen sowie Radioneekrosen der Extremitäten.

Eine Osteoradioneekrose konnte durch Radiatio, Trauma und Infektionen entstehen [MEYER 1970]. Marx gliedert die Entstehung einer Osteoradioneekrose in:

- Radiatio,
- hypoxisches, hypozelluläres und hypovaskuläres Gewebe (“3-H-Prinzip”),
- Gewebsuntergang und
- chronische, therapieresistente Wunde.

Aufgrund der Tatsache, daß die Osteoradioneekrose nur in wenigen Fällen weder durch alleinige chirurgische Intervention noch durch ausschließliche HBO-Therapie beherrschbar ist, führte Marx für die Behandlung der Osteoradioneekrose vier verschiedenen Klassifikationen ein. Er betonte auch die Kooperation von Chirurgie und HBO-Therapie und sieht die Antibiotikagabe als weiteren Therapiebestandteil [MARX 1990, MARX 1995].

Die HBO-Therapie erfolgt bei 2,0 bis 2,5 bar über 90 bis 120 min, wobei die durchschnittliche Anzahl der Behandlungen bei 35 bis 45 liegt. Durch die Integration der HBO-Therapie in das Behandlungsspektrum der Radioneekrosen konnten die Behandlungskosten um mehr als die Hälfte gesenkt werden [UHMS 1999].

Wenn ein Trauma die Osteoradioneekrose verursacht, läßt sich dies in 88% der Fälle auf eine Zahnextraktion im bestrahlten Gebiet zurückzuführen [MARX 1983A + 1983B]. Marx zeigte, daß durch die präventive Anwendung der HBO vor Zahnextraktion im bestrahlten Gebiet die Inzidenz für eine mandibuläre Osteoradioneekrose abnahm und somit die Therapiekosten gesenkt wurden [MARX ET AL. 1985].

6.3.12 Kritische Hauttransplantate und Hautlappen

Im Zusammenhang mit Wundheilungsstörungen, sowie Weichteilverletzungen, induziert durch Traumata, Radiatio oder systemische Faktoren treten Komplikationen der Transplantateinheilung auf. Hier stellt die HBO-Therapie ein Adjuvans dar, da sie die Gewebeoxygenierung, die Neoangiogenese, die Mikrovaskularisation und die Fibroblasten- und Kollagensynthese fördert [UHMS 1999].

Das Therapieschema ist mit dem der Problemwunden identisch. Bei 2,0 bis 2,5 bar erfolgt die Gabe von 100% Sauerstoff für 90 bis 120 min, wobei initial zwei Behandlungen pro Tag erfolgen. Sobald die Wundregion revitalisiert ist, genügt eine HBO-Behandlung pro Tag [UHMS 1999].

6.3.13 Brandverletzungen

Eine Brandwunde ist durch eine zentrale Koagulationsnekrose, eine Zone der Stase und eine hyperämische, erythematöse Randzone charakterisiert. Die HBO übernimmt in den verschiedenen Stadien des Krankheitsverlaufs unterschiedliche Funktionen (Tabelle 5) [KEMMER 1998A].

Die bessere und schnellere Heilung von Brandwunden durch Anwendung der Hyperbaren Oxygenierung wurde 1965 in Japan bei der Therapie von Bergarbeitern, die eine Kohlenmonoxid-Intoxikation erlitten hatten, festgestellt [ANONYMUS 1967]. Dennoch ist die Anwendung der adjuvanten HBO-Therapie umstritten, weil diese Therapieform in einigen medizinischen Fachdisziplinen wenig bekannt ist oder als potentiell gefährlich und kostenintensiv eingestuft wird. Andere Studien rechtfertigen den Einsatz der HBO-Therapie zur Behandlung von Brandwunden [CIANCI UND SATO 1994].

**Tabelle 5 : Ansätze für eine adjuvante HBO-Therapie in verschiedenen Phasen der Verbrennungs-
krankheit [KEMMER 1998]**

Frühphase	Antiödematöse Wirkung, antiexudative Wirkung, Vergrößerung der Diffusionsstrecke für Sauerstoff
Sekundärphase	Verbesserung der Gewebeoxygenierung, raschere Erholung des aeroben Stoffwechsels, Verbesserung der Phagozyten- und Leukozytenfunktion, schnellere Reepithelisierung
Rekonstruktionsphase	Verbesserung der Transplantateinheilung durch: Verbesserung der Gewebeoxygenierung, antiödematöse Wirkung, Fibroblastenaktivierung, Induktion der Neoangiogenese

Kemmer und Sauermüller setzen sich auch mit den Studien, die eine Behandlungsunterstützung der HBO-Therapie bei Verbrennungen ablehnen, auseinander und sehen folgende Indikationen für die Behandlung mit hyperbarem Sauerstoff:

- Verbrennungen Schädigungsgrad II von mehr als 20% der Körperoberfläche,
- Verbrennungen Schädigungsgrad II und III im Bereich des Gesichts, der Hände und „kritischer Körperregionen“,
- ausgedehnte zirkuläre Verbrennungen,
- Rekonstruktionsphase bei kritischen Hauttransplantaten und
- Elektrounfälle [KEMMER UND SAUERMÜLLER 2000].

Die Therapie in der Überdruckkammer sollte schnellstmöglich, spätestens 12 h nach dem Unfall erfolgen. In den ersten 48 h werden zwei Behandlungen pro Tag bei 3,0 bar und 90 min Sauerstoffatmung durchgeführt. In den nächsten zwei bis drei Tagen findet eine Behandlung pro Tag statt [KEMMER UND SAUERMÜLLER 2000]. Durch den Einsatz der HBO-Therapie sinken die Morbidität und Mortalität, die Notwendigkeit einer

chirurgischen Intervention, die stationäre Behandlungsdauer und somit auch die Behandlungskosten [CIANCI ET AL. 1991B].

6.4 Kontraindikationen für eine HBO-Therapie

Die Kontraindikationen für die Therapie mit hyperbarem Sauerstoff werden in absolute und relative Kontraindikationen eingeteilt (Tabelle 6). Als einzige absolute Kontraindikation wird der unbehandelte Pneumothorax aufgeführt [FOSTER 1992, JAIN 1999]. Bei den relativen Kontraindikationen muß über die Indikation zur HBO-Therapie im Einzelfall entschieden werden. In den Richtlinien der GTÜM e.V. werden auch schwere Herzinsuffizienzen berücksichtigt. Ermüdung des Patienten und Alkoholgebrauch kurz vor der HBO-Behandlung zählen ebenfalls zu den relativen Kontraindikationen [GTÜM E.V. 1996].

Tabelle 6: Kontraindikationen für eine HBO-Therapie
[FOSTER 1992, GTÜM E.V. 1996, JAIN 1999]

Absolute Kontraindikation:

- nicht therapierter Pneumothorax

Relative Kontraindikationen:

- (1) Infektionen des oberen Respirationstraktes
- (2) Emphysem mit Kohlendioxid-Retention
- (3) asymptomatische Lungenläsionen (röntgenologisch diagnostiziert)
- (4) vorausgegangene Ohr- oder Thoraxchirurgie
- (5) unkontrolliertes hohes Fieber
- (6) Schwangerschaft
- (7) Klaustrophobie
- (8) maligne Erkrankungen

6.5 Komplikationen während der HBO-Therapie

Die Komplikationen, die während einer HBO-Behandlung auftreten können, sind in Tabelle 7 zusammengefaßt.

Das Barotrauma des Mittelohrs ist die häufigste Komplikation, die durch eine Verengung der Tuba Eustachii gekennzeichnet ist. Der Patient hat Schwierigkeiten, während der Dekompressionsphase den Druckausgleich im Mittelohr durchzuführen. Einige Patienten klagen über Zahn- oder Sinusschmerzen. Relativ selten wird die Entstehung eines Pneumothorax während der HBO-Therapie beschrieben [MURPHY 1991, FOSTER 1992].

Die Sauerstofftoxizität, die während einer HBO-Therapie auftreten kann, gehört zu den seltenen Komplikationen. In der Literatur wird sie mit 0,01% [JAIN 1999] bis 0,03% [FOSTER 1992] angegeben. Die toxische Wirkung des Sauerstoffes auf das Zentrale Nervensystem wird als Paul-Bert-Effekt bezeichnet. Wirkt sich die Sauerstofftoxizität auf die Lunge aus, entsteht ein Lungenödem, welches einen alveolären Kollaps verursachen kann (Lorrain-Smith-Effekt) [SMITH 1899].

Während der HBO-Therapie kann sich aufgrund eines plötzlichen Druckabfalls klinisch eine Dekompressionskrankheit manifestieren. Jedoch wird dies nur bei der Anwendung von mehr als 4 bar beobachtet [JAIN 1999].

Zusammenfassend ist zu bemerken, daß es während der HBO-Therapie zu wenigen, gravierenden medizinischen Komplikationen kommt, die bei sofortiger Intervention gut beherrschbar sind.

Neben medizinischen Komplikationen können auch technische Probleme wie Druckabfall während der Kammerfahrt, Mängel in der Sauerstoffzufuhr oder Feuer auftreten. Aufgrund der hohen Sicherheitsstandards sind diese Komplikationen weitgehend eliminiert worden [FOSTER 1992].

Tabelle 7: Komplikationen während der HBO-Therapie [FOSTER 1992]

Komplikationen, die während einer HBO-Therapie auftreten können	
(1)	Barotrauma des Mittelohres
(2)	Sinus- und dentales Barotrauma
(3)	Sehstörungen (Myopie)
(4)	Barotrauma der Lunge
(5)	Toxizität des Sauerstoffes
(6)	Dekompressionskrankheit
(7)	arterielle Gasembolie (AGE)
(8)	Klaustrophobie, Schwindel
(9)	technische Störungen während der Therapie
(10)	Feuerefahr

6.6 Forschungsbereiche der HBO-Therapie

Die ECHM veröffentlichte nach den Konferenzen in Toulouse (Frankreich) 1991 und Ancona (Italien) 1992 eine Aufstellung von Indikationen, die für die Forschung im Bereich der HBO-Therapie von Interesse sind. Außerdem sind auch kontrovers diskutierte Behandlungsindikationen aufgeführt (Tabelle 8) [WATTEL UND MATHIEU 1994].

Tabelle 8: Forschungsbereiche auf dem Gebiet der HBO-Therapie [WATTEL UND MATHIEU | 1994]

Forschungsbereiche der HBO-Therapie	
(1)	Hydrogensulfid-Vergiftung
(2)	Tetrachlorkohlenwasserstoff-Vergiftung
(3)	Abszeß der Leber, der Lunge und des Gehirns
(4)	Mykosen
(5)	Kopfverletzungen
(6)	Rückenmarkverletzungen
(7)	Osteoradionekrose (andere Lokalisationen als die Mandibula)
(8)	Weichteilradionekrose (kutan, subcutan, Enteritis, Proctitis, Myelitis)
(9)	Verbrennungen
(10)	zerebrovaskulärer Insult
Kontrovers diskutierte Indikationen für eine HBO-Therapie	
(1)	fetale Hypoxie bedingt durch eine Gefäßinsuffizienz der Mutter
(2)	Multiple Sklerose
(3)	Blutverlust

Im Druckkammer-Zentrum der Universität Graz (Österreich) werden zu folgenden Themen in der HBO-Therapie Studien durchgeführt:

- Hirnabszesse,
- akutes ZNS-Trauma,
- radiogene Cystitis und Proctitis,
- photodynamische Tumortherapie,
- Tinnitus und
- intraoperative HBO in der Trachealchirurgie [SMOLLE-JÜTTNER | 1999]

Das Universitätsklinikum Düsseldorf befaßt sich mit folgenden Forschungsvorhaben im Bereich der HBO:

- Diagnose und Pathogenese von Knochenmarksödemen sowie aseptischen Osteonekrosen bei Kindern und Jugendlichen mit Akuter Lymphoblastischer Leukämie (ALL),
- Schmerzreduktion durch HBO bei Kindern und Jugendlichen mit malignen Erkrankungen und aseptischen Osteonekrosen,
- Wirkung auf die Mikrozirkulation beim diabetischen Fuß; Messung mittels Laserdoppler-Imager,
- Behandlung des Mammaödems nach brusterhaltender Operation und Radiatio,
- Einfluß der HBO auf den Glukosestoffwechsel von Tumoren und
- kombinierte HBO- und mIBG-Behandlung bei Kindern mit Neuroblastom IV-Residiv [LENTRODT 2002].

Die Teilnahme an der European Cooperation of Scientific and Technical Research (COST) B 14: Hyperbaric oxygen therapy ist ebenfalls geplant. Diese multinationalen, multizentrischen, prospektiven und randomisierten Studien untersuchen die Behandlung mit hyperbarem Sauerstoff bei:

- plötzlichem Hörsturz,
- Folgeverletzungen nach Radiatio und
- Weichteilläsionen (diabetischer Fuß) [LENTRODT 2002].

In den USA fördert das National Institute of Health erstmals in einem fünf Jahre umfassenden Programm Studien auf dem Gebiet der HBO. Pro Jahr werden 1,5 Mio. US-Dollar bereitgestellt [GREENBAUM 2001].

Einige Indikationen werden in den wissenschaftlichen Studien sehr unterschiedlich beurteilt. Die Diskrepanzen in der Bewertung liegen vermutlich am unterschiedlichen Versuchsansatz. Daher sind die Organisationen UHMS, EUBS und GTÜM e.V. bestrebt, Forschungsergebnisse durch randomisierte Verfahren vergleichbar zu gestalten.

7. HEUTIGER STAND DER HBO-THERAPIE IN DEUTSCHLAND

Im April 2000 veröffentlichte der Bundesausschuß der Ärzte und Krankenkassen folgenden Beschluß: “Der Bundesausschuß der Ärzte und Krankenkassen bestätigt nach erneuter, umfassender und indikationsbezogener Überprüfung seinen Beschluß vom 22.11.1994, die Behandlungsmethode der hyperbaren Sauerstofftherapie nicht für die vertragsärztliche Versorgung anzuerkennen“ [KBV 2000].

7.1 Bewertung der HBO-Therapie durch den Bundesausschuß der Ärzte und Krankenkassen

Schon in früheren Beratungen dieses Ausschusses (1994) wurde die HBO-Therapie als “nicht anerkannte Untersuchungs- und Behandlungsmethode“ eingestuft. Allerdings wurde auch darauf verwiesen, daß die Krankenkassen die Behandlungskosten für die hyperbare Sauerstofftherapie im allgemeinen erstattet haben. Unter Bezugnahme auf Angaben der Kommission „hyperbare Medizin in der Anästhesie“ wurden im Zeitraum von 1994 bis 1998 über 40.000 Patienten behandelt. Die Erstattungskosten beliefen sich auf ca. 120 Mio. DM [KBV 2000].

In dem zusammenfassenden Bericht des Arbeitsausschusses “Ärztliche Behandlung“ des Bundesausschusses der Ärzte und Krankenkassen über die Beratungen in den Jahren 1999 und 2000 zur Bewertung der Hyperbaren Sauerstofftherapie gemäß § 135 Abs. 1 SGB V wird im Jahre 2000 erneut bestätigt, daß die HBO-Therapie als nicht vertragsärztliche Versorgung anzusehen ist. Es wird ausdrücklich betont, daß bei schweren, akuten Dekompressionskrankheiten die HBO-Therapie routinemäßig angewandt wird und die Behandlung unter intensivmedizinischen, stationären Bedingungen durchgeführt werden muß. Weiter wird gefolgert: “Auch unter Berücksichtigung dieser routinemäßigen stationären Anwendung sind auf Grundlage der derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisse der Nutzen, die Risiken, die medizinische Notwendigkeit und

die Wirtschaftlichkeit der hyperbaren Sauerstofftherapie insbesondere in Bezug auf eine ambulante Anwendung bei den überprüften Krankheitsbildern so wenig tragfähig belegt, daß der Arbeitsausschuß auch nach der erneuten Prüfung keine Möglichkeit sieht, die hyperbare Sauerstofftherapie für die vertragsärztliche Versorgung zu empfehlen“ [KBV 2000]. Auf mehr als 500 Seiten wird das Ergebnis nach Auswertung von wissenschaftlichen Studien und Stellungnahmen verschiedener Institutionen und Verbänden dargestellt und begründet [KBV 2000].

7.2 Ausblick

Für die HBO-Therapie ist der Beschluß des Bundesausschusses Ärzte und Krankenkassen ein herber Rückschlag. Es ist nicht leicht zu verstehen, daß die Kosten für eine HBO-Therapie zunächst von den Krankenkassen erstattet wurden, obwohl diese Therapie nie als vertragsärztliche Leistung anerkannt gewesen ist. Zudem erstatteten die Krankenkassen auch die Kosten von international wenig gesicherten Indikationen (z.B. Tinnitus) [VAN LAAK 2001].

Aufgrund der angespannten finanziellen Situation im öffentlichen Gesundheitswesen erscheint es daher als logische Konsequenz, die bisher stillschweigend geduldete Kostenübernahme für die HBO-Therapie streng einzugrenzen.

Auf die hyperbare Medizin als adjuvante Therapie, wie sie in den Indikationskatalogen der verschiedenen internationalen Organisationen beschrieben wird, wurde bei dem Beschluß des Bundesausschusses Ärzte und Krankenkassen keine Rücksicht genommen. Es liegt die Vermutung nahe, daß die Entscheidung keinen Ermessensspielraum für die Kostenträger lassen wollte, damit der Beschluß nicht erneut durch „Sonderfall“-Genehmigungen ausgehebelt werden kann.

Gerade hier hätte eine differenzierte Bewertung der einzelnen Indikationen erfolgen sollen. Selbst die seit Jahren von verschiedenen internationalen Gremien anerkannten Behandlungsindikationen wurden vom Ausschuß mit der Begründung abgelehnt, daß die vorliegende Literatur keine neuen Erkenntnisse für eine Kostenübernahme der HBO-Therapie liefert. Die nun vom Ausschuß für die Kostenübernahme durch die gesetzlichen Krankenkassen anerkannten Indikationen bedürfen einer stationären Behand-

lung [KBV 2000]. Es erscheint allerdings zweifelhaft, ob die stationäre Behandlung auf Dauer gesichert ist. Van Laak bemerkt dazu: „Wenn eine medizinische Methode im ambulanten Bereich als wirkungslos bezeichnet wird, wieso sollte sie dann unter klinischen Bedingungen besser angewandt werden?“ [VAN LAAK 2001]. Es erscheint zudem zweifelhaft, ob eine stationäre Behandlung geringere Kosten verursacht als die ambulante Therapie.

Aussagekräftige, wissenschaftliche Studien sind in Deutschland in den letzten Jahren nicht durchgeführt worden. In Deutschland verfügen seit dem Jahr 2000 das Klinikum der Martin-Luther-Universität in Halle/Saale und das Universitätsklinikum Düsseldorf über eine Mehrpersonen-Kammer für die HBO-Therapie. Damit wurde ein Fundament geschaffen, um die berechtigten Indikationen der HBO-Therapie durch standardisierte (und somit vergleichbare) Studien im universitären Bereich zu belegen. Allerdings ist dies auch eine enorme Herausforderung, solange die Hyperbarmedizin keine selbständige Fachrichtung in der Medizin ist.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Erste Beschreibungen einer Druckkammer, die für therapeutische Zwecke genutzt wurde, gehen auf das 17. Jahrhundert zurück.

In der Mitte des 19. Jahrhunderts sind zwei unterschiedliche Entwicklungsrichtungen in der Anwendung von Überdruck erkennbar. Zum einen wurden sogenannte pneumatische Kabinette errichtet, in denen eine Behandlung diverser Erkrankungen unter Anwendung von Druckluft erfolgte. Weil sich keine therapeutischen Erfolge etablieren konnten, wurden die Behandlungen in den pneumatischen Kammern wieder eingestellt. Diese Einrichtungen dürfen nicht als Grundlage für die heutige Therapie mit hyperbarem Sauerstoff angesehen werden, obschon sie zur technischen Weiterentwicklung der Druckkammertechnologie beitrugen. Andererseits erwies sich im Bereich der Arbeitsmedizin die Überdruckkammer zur Behandlung der Dekompressionskrankheiten, die bei Tauchern und Caissonarbeitern diagnostiziert wurden, als wirksame Methode. Kontinuierliche Forschungen und Weiterentwicklungen, die vor allem durch die Tauchmediziner der Marine vorangebracht wurden, trugen entscheidend dazu bei, daß die Überdrucktherapie in verschiedenen, medizinischen Fachrichtungen Einzug hielt.

Im ausgehenden 19. Jahrhundert wurde die Anwendung von Sauerstoff in der Überdruckkammer aufgrund der toxischen Eigenschaften des Sauerstoffes nicht befürwortet. Eine erstmalige Gabe von Sauerstoff auf einer Caisson-Baustelle erfolgte 1908 bei den Tunnelbauarbeiten für den Elbtunnel in Hamburg. Die Sauerstoff-Atmung während der Ausschleusung auf Überdruckbaustellen ist seit 1997 in der deutschen Druckluftverordnung vorgeschrieben.

Im 20. Jahrhundert zeigte sich sowohl eine technische als auch eine medizinische Weiterentwicklung der Überdrucktechnologie. Neben den stationären Ein- und Mehrpersonenkammern, wurden auch verschiedene Transportkammersysteme entwickelt. Dies führte auch dazu, daß die Sicherheitsbestimmungen für die Inbetriebnahme der Überdruckkammern kontinuierlich verbessert und ergänzt wurden.

1960 wurde der Begriff der Hyperbaren Sauerstoff (HBO)-Therapie eingeführt. Diese Therapieform wurde nicht nur bei arbeitsspezifischen Erkrankungen, die im direkten Zusammenhang mit einem Aufenthalt in hyperbarer Umgebung standen, erfolgreich eingesetzt, sondern ist auch Therapie der Wahl bei Dekompressions-

erkrankungen, arteriellen Luft- oder Gasembolien und Kohlenmonoxid-Intoxikationen. Sie ist darüber hinaus ein fester adjuvanter Bestandteil bei der Therapie anderer, schwerer Krankheitsbilder (u. a. Osteoradionekrosen und Problemwunden) geworden. Durch die Gründung von nationalen und internationalen Fachgremien etablierten sich Indikationen zur Behandlung mit hyperbarem Sauerstoff.

Weitere Studien und Forschungsgebiete werden auch in Zukunft den Einsatz der HBO-Therapie in den verschiedenen medizinischen Fachdisziplinen sichern und optimieren.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- (1) Anonymus (M.L.). (1879a)
Académie des Sciences.
Un Med (Paris) 1879; 28: 194-195
- (2) Anonymus. (1879b)
Essai dans les hôpitaux de Paris de la méthode anesthésique de M. Paul Bert.
Un Med (Paris) 1879; 28: 701
- (3) Anonymus.
The Cunningham "Tank Treatment". The alleged value of compressed air in the treatment of diabetes mellitus, pernicious anemia and carcinoma.
J Amer Med Ass 1928; 90 (18): 1494-1496
- (4) Anonymus.
Überdrucktherapie bei Verbrennungen.
Med Tribune 1967; 49: 13
- (5) Arntzenius AKW.
De pneumatische therapie.
Amsterdam: Scheltema & Holkema's Boekhandel 1887
- (6) Bacha S, Annane D, Gajdos P.
Les embolies gazeuses iatrogènes.
Presse Med 1996; 25 (31): 1466-1472
- (7) Bakker DJ.
Clostridial myonecrosis.
In: Davis JC, Hunt TK (Hrsg.).
Problem wounds: the role of oxygen.
New York: Elsevier 1988, 153-172
- (8) Balentine JD.
Pathology of oxygen toxicity.
New York: Academic Press 1982
- (9) Bartmann H.
Taucher-Handbuch.
Loseblatt-Sammlung
Landsberg: ecomed Verlags GmbH 1998,
28. Ergänzungslieferung 11/98

- (10) Beddoes T, Watt J.
Betrachtungen über den medizinischen Gebrauch künstlicher Luftarten und die Methode sie in großen Quantitäten zuzubereiten.
Übersetzt von Casp. Zollikofer von Altenklingen
Halle: Curtsche Buchhandlung 1796
- (11) Bert P.
La pression barométrique. Recherches de physiologie expérimentale.
Paris: G. Masson (éditeur) 1878
- (12) Beuster W, Smolle-Jüttner FM, Kovac H, Jeran H, Neuhold KH, Friehs GB.
Die Druckkammer des Hyperbaren Zentrums Graz, Österreich.
Caisson 1994; 9 (1/2): 46-52
- (13) Beuster W, Smolle-Jüttner FM, Renner H, Panico S, Farralli F, Stevani E.
Das Grubenunglück in Lassing. Rettungstechnische Schwierigkeiten aus hyperbarmedizinischer Sicht.
In: Tirpitz D, Schipke JD, van Laak U. (Hrsg.).
Tauch- und Überdruckmedizin VI. 8. wissenschaftliche Tagung der Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin e.V. 1999 in Düsseldorf.
Heidelberg: Dr. Curt Haefner-Verlag GmbH 2000, 104-116
- (14) Bilges O, Bode R (Hrsg.), Krüger F, Schulz A.
Die Lichter sind erloschen. Über den historischen Bergbau im Landkreis Peine. Eine Fotodokumentation.
Haltern/Westfalen: Bode 1987, 189-199
- (15) Boerema I, Brummelkamp WH.
Behandeling van anaërobe infecties met inademing van zuurstof onder een druk van drie atmosferen.
Ned Tijdschr Geneeskd 1960; 104: 2548-2550
- (16) Boerema I, Meijne NG, Brummelkamp WH, Bouma S, Mensch MH, Kamermans F, Sternhauf M, v. Aalderen W.
Life without blood: A study of the influence of high atmospheric pressure and hypothermia on dilution of the blood.
J Cardiovasc Surg 1960; 1: 133-146

- (17) Boerema I.
Opening.
In: Boerema I, Brummelkamp WH, Meijne NG. (Eds.).
Clinical application of hyperbaric oxygen. Proceedings
of the first international congress. Amsterdam 1963
Amsterdam: Elsevier 1964, 1-6
- (18) Bonte G.
Pneumatische Kabinette und deren maschinelle Einrich-
tung.
Gesundheitsing. 1903; 26 (23): 365-368
- (19) Bouachour G, Cronier P, Gouello JP, Toulemonde JL,
Talha A, Alquier P.
Hyperbaric oxygen therapy in the management of crush
injuries: a randomized double-blind, placebo-controlled
clinical trial.
J Trauma 1996; 41 (2): 333-339
- (20) Bove AA.
Risk of decompression sickness with patent foramen
ovale.
Undersea Hyperb Med 1998; 25 (3): 175-179
- (21) Boyle R.
New pneumatical experiments about respiration.
Philosophical transactions Tome V: 2011-2058
Zit. nach: Heller R, Mager W, von Schroetter H.
Luftdruckerkrankungen mit besonderer Berücksichtigung
der sogenannten Caissonkrankheit.
Wien: Hölder 1900
- (22) Bücherl ES.
Anwendungsmöglichkeiten der Sauerstoff-Überdruckbe-
handlung.
Sonderdruck aus „Langenbecks Archiv für klinische Chi-
rurgie“, Band 313 (1965). Sitzungsbericht der 82. Ta-
gung der Deutschen Gesellschaft für Chirurgie 1965
Berlin: Springer 1965, 641-652
- (23) Camporesi EM, Mascia SR, Thom SR.
Physiological principles of hyperbaric oxygen.
In: Oriani G, Marroni A, Wattel F. (Hrsg.).
Handbook on Hyperbaric Medicine.
Berlin: Springer 1996: 35

- (24) Carpenter S.
The world's highest pressure chamber.
Popular Science 1970, April (reprinted)
- (25) Cianci P, Petrone G, Green B. (1991a)
Adjunctive hyperbaric oxygen in the salvage of the diabetic foot.
Undersea Biomed Res 1991; 18 (suppl.): 108
- (26) Cianci P, Sato R, Green B. (1991b)
Adjunctive hyperbaric oxygen reduces length of hospital stay, surgery, and the cost of care in severe burns.
Undersea Biomed Res 1991; 18 (suppl.): 108
- (27) Cianci P, Sato R.
Adjunctive hyperbaric oxygen therapy in the treatment of thermal burns: a review.
Burns 1994; 20 (1): 5-14
- (28) Cierny G (III), Mader JT, Pennick JJ.
A clinical staging system of adult osteomyelitis.
Contemp Orthop 1985; 10 (5): 17-37
- (29) Churchill-Davidson I, Sanger C, Thomlinson RH.
High-pressure oxygen and radiotherapy.
Lancet (London) 1955; 1: 1091-1095
- (30) Corning JL.
Observations on the caisson or tunnel disease.
Med Rec (New York) 1890; 37 (19): 513-521
- (31) Corning JL.
The use of compressed air in conjunction with medicinal solutions in the treatment of nervous and mental affections.
Med Rec (New York) 1891; 40 (9): 225-232
- (32) Davis JC, Buckley CJ, Barr PO.
Compromised soft tissue wounds: correction of wound hypoxia.
In: Davis JC, Hunt TK. (Eds.).
Problem wounds: the role of oxygen.
New York: Elsevier 1988, 143-152

- (33) Davis JC, Heckman JD.
Refractory osteomyelitis.
In: Davis JC, Hunt TK. (Eds.).
Problem wounds: the role of oxygen.
New York: Elsevier 1988, 126-142
- (34) Dexter F, Hindman BJ.
Computer simulation of microscopic cerebral air emboli
absorption during cardiac surgery.
Undersea Hyperb Med 1998; 25 (19): 43-50
- (35) Dirnagl K, Stieve FE.
Experimentelle Untersuchungen über die Wirkungsweise
der pneumatischen Kammer.
Arch Phys Ther 1954; 6: 115-119
- (36) Divers Alert Network (DAN) Europe.
Carotid artery Doppler screening. Investigating DCS risk
in divers with patent foramen ovale.
Internet-Ausdruck der Homepage des DAN Europe vom
21.12.2001
- (37) Drägerwerk AG Lübeck.
Tauchsimulator DLRG-Berlin.
Beschreibung und Betriebsanleitung (1973)
- (38) Edmonds C, Lowery C, Pennefather J.
Diving and subaquatic medicine. 2nd ed. 1981. Revised
and reprinted 1983.
San Pedro/California (USA): Best Publishing Company
1983
- (39) Faesecke KP.
Überdrucktherapie vor 100 Jahren.
Caisson 1987; 2 (2): 42-43
- (40) Faesecke KP.
The future of portable recompression chambers in Ger-
many. Suggestions of a diving doctor.
In: Bakker DJ (Ed.), Schmutz J.
Hyperbaric medicine. Proceedings of the joint meeting.
2nd swiss symposium on hyperbaric medicine and 2nd
european conference on hyperbaric medicine.
Freiburg: Kehrer Offset 1988, 93-96

- (41) Faesecke KP.
Déjà vu...
Caisson 1991; 6 (1): 5-6
- (42) Faesecke KP.
Ein Pressluftarzt für Hamburg. Die medizinischen Forschungsarbeiten von Arthur und Adele Bornstein beim Bau des ersten Hamburger Elbtunnels 1909-1910.
Kiel: Verlag edition trident 1998
- (43) Fontaine JA.
Emploi chirurgical de l'air comprimé.
Un Med (Paris) 1879; 28: 445-448
- (44) Foster JH.
Hyperbaric oxygen therapy.
Contraindications and complications.
J Oral Maxillofac Surg 1992; 50: 1081-1086
- (45) Friedberg H.
Über die Rücksichten der öffentlichen Gesundheitspflege auf das Arbeiten in comprimierter Luft.
Dinglers J 1872; 205: 509-519
- (46) Fust HD, Hartmann H.
Lengede war Neuland für Arzt und Ingenieur.
VDI Nachrichten aus Naturwissenschaft und Technik
1964; 16: 1, 5
- (47) Garrett IR, Boyce BF, Oreffo ROC, Bonewald L, Poser J, Mundy GR.
Oxygen-derived free radicals stimulate osteoclastic bone resorption in rodent bone in vitro and in vivo.
J Clin Invest 1990; 85 (3): 632-639
- (48) Germonpré P, Dendale P, Unger P, Balestra C.
Patent foramen ovale and decompression sickness in sports divers.
J Appl Physiol 1998; 84 (5): 1622-1626
- (49) Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin (GTÜM) e.V.
Hyperbare Sauerstofftherapie. Qualitätsstandards.
2. Auflage
Kiel: Archimedes-Verlag 1996

- (50) Gödecken J, Pauly H.
Brandrisiken und Brandschutz in hyperbaren Therapiekammern.
In: Bartmann H.
Taucher-Handbuch.
Loseblatt-Sammlung.
Landsberg: ecomed Verlags GmbH 1999,
29. Ergänzungslieferung 2/99
- (51) Greenbaum LJ. Jr.
First NIH grant for research in hyperbaric medicine. Dr. Stephen Thom receives 5-year research grant.
Pressure 2001; 30 (1): 1
- (52) Haldane JS.
Respiration.
New Haven: Yale University Press 1922
- (53) Hamilton-Farrell MR.
Hyperbaric oxygen in the management of foot lesions in diabetic patients.
Diab Nutr Metab 1999; 12 (1): 47-48
- (54) Harms H, Rodewald G.
Anwendung einer kleinen O₂-Überdruckkammer.
Sonderdruck aus „Langenbecks Archiv für klinische Chirurgie“, Band 313 (1965), Sitzungsbericht der 82. Tagung der Deutschen Gesellschaft für Chirurgie 1965.
Berlin: Springer 1965, 652-661
- (55) Hart GB, Kindwall EP.
Hyperbaric chamber clinical support.
In: Davis JC, Hunt TK (Eds.).
Hyperbaric oxygen therapy.
Bethesda/Maryland (USA): Undersea Medical Society
1977, 41-46
- (56) Harvey WR, Lee CJ, Koch SM, Butler BD.
Delayed presentation of cerebral arterial gas embolism following proven intraoperative venous air embolism.
J Neurosurg Anesthesiol 1996; 8: 26-29
- (57) Haux GFK.
Subsea manned engineering.
Carson/California (USA): Best publishing company 1982

- (58) Haux GFK.
Wie aus der HB die HBO wurde.
Kiel: Hansadruck 1997
- (59) Haux GFK.
History of hyperbaric chambers.
Flagstaff/Arizona (USA): Best publishing company
2000, 92-94
- (60) Heller R, Mager W, von Schroetter H.
Luftdruckerkrankungen mit besonderer Berücksichtigung
der sogenannten Caissonkrankheit.
Wien: Hölder 1900
- (61) Hewitt FW.
Anaesthetics and their administration. A manual for
medical and dental practitioners and students.
London: Charles Griffin and Company 1893, 116-118
- (62) Hill GB, Osterhout S. (1972a)
Experimental effects of hyperbaric oxygen on selected
clostridial species (I). In-vitro studies.
J Infect Dis 1972; 125 (1): 17-25
- (63) Hill GB, Osterhout S. (1972b)
Experimental effects of hyperbaric oxygen on selected
clostridial species (II). In-vivo studies.
J Infect Dis 1972; 125 (1): 26-35
- (64) Hunt TK.
The physiology of wound healing.
Ann Emerg Med 1988; 17: 1265-1273
- (65) Institut National de la Statistique et Etudes Économiques
(INSEE).
Schriftliche Mitteilung an M. Raoul Colin. 16.05.2001
- (66) Jacobson (II) JH, Morsch JHC, Rendall-Baker L.
The historical perspective of hyperbaric therapy.
In: Boerema I, Brummelkamp WH, Meijne NG. (Eds.).
Clinical application of hyperbaric oxygen. Proceedings
of the first international congress. Amsterdam 1963.
Amsterdam: Elsevier 1964, 7-19

- (67) Jain KK.
Textbook of hyperbaric medicine.
3rd revised & exp. Edition.
Toronto: Hogrefe & Huber Publishers Inc. 1999
- (68) Junod T.
De la condensation et de la raréfaction de l'air, opérées sur tout l'habitude du corps ou sur les membres seulement, considérées sous leurs rapports thérapeutiques.
C R Acad Sci Paris 1835; 1: 60-65
- (69) Kärcher KH, Kuttig H.
Die Heidelberger Kammer zur Strahlentherapie bei Sauerstoffüberdruck.
Strahlentherapie 1967; 133: 1-6
- (70) Kassenärztliche Bundesvereinigung (KBV).
Hyperbare Sauerstofftherapie (HBO).
Zusammenfassender Bericht des Arbeitsausschusses „Ärztliche Behandlung“ des Bundesausschusses der Ärzte und Krankenkassen über die Beratung der Jahre 1999 und 2000 zur Bewertung der Hyperbaren Sauerstofftherapie gemäß
§ 135 Abs. 1 SGB V.
PDF-Datei von der Homepage der KBV
- (71) Kaye D.
Effect of hyperbaric oxygen on clostridia in vitro and in vivo.
Proc Soc Exp Biol Med 1967; 124: 360-366
- (72) Kemmer A. (1998a)
Brandverletzungen.
In: Almeling M, Welslau W. (Hrsg.).
Grundlagen der hyperbaren Sauerstofftherapie.
Strande: Archimedes-Verlag 1998, 77-82
- (73) Kemmer A. (1998b)
Druckkammerzentrum der berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Murnau. Ein neues Kammerkonzep für die klinische HBO.
Caisson 1998; 13 (4): 167-171

- (74) Kemmer A, Sauer Müller G.
Behandlung von schweren Brandverletzungen mit adjuvanter HBO. Erste Erfahrungen an einem deutschen Verbrennungszentrum.
In: Tirpitz D, Schipke JD, van Laak U. (Hrsg.).
Tauch- und Überdruckmedizin VI. 8. wissenschaftliche Tagung der Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin e.V. Düsseldorf 1999.
Heidelberg: Dr. Curt Haefner-Verlag GmbH 2000, 81-86
- (75) Kindwall EP.
Decompression sickness.
In: Davis JC, Hunt TK. (Eds.).
Hyperbaric oxygen therapy.
Bethesda/Maryland (USA): Undersea Medical Society 1977, 125-140
- (76) Kindwall EP.
Hyperbaric medicine practice.
Flagstaff/Arizona (USA): Best Publishing Company 1995
- (77) Kopitziok.
Mündliche Mitteilung 2001
- (78) Krietemeyer HJ.
Medizinische Forschung und Lehre an den Instituten der Luftwaffe und der Marine.
Sonderdruck aus „Westfälisches Ärzteblatt“ 1970: Nr. 12
- (79) Krischnak G.
Die Trias der Behandlung des Gasödems: Chirurgische Maßnahmen, Intensiv-Therapie, Hyperbare Oxygenation. Ein Erfahrungsbericht über 4 Jahre: 1970-1974.
Med. Diss. Universität Düsseldorf 1977
- (80) van Laak U.
HYDRA 2000 – Neuer Druckkammerkomplex der Bundesmarine in Kronshagen/Kiel.
Caisson 1989; 4 (4): 91-92
- (81) van Laak U.
Es mußte erst Todesfälle geben. Die Druckkammer-Katastrophe von Hannover.
Caisson 1992; 7 (4): 148-155

- (82) van Laak U.
Von der Taucherdruckkammer zum modernen hyperbaren Therapiekomplex. Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine, Kronshagen.
Caisson 1994; 9 (3): 78-83
- (83) van Laak U.
Kostenübernahme bei Tauchunfällen durch die Gesetzlichen Krankenkassen-Sachstand und Bewertung 01.2001. Internet-Ausdruck der Homepage des DAN-Büros in Deutschland vom 12.02.2001
- (84) Lampl LA, Frey G.
Hyperbaric oxygen in intercranial abscess.
In: Kindwall EP. Hyperbaric medicine practice. Flagstaff/Arizona (USA): Best Publishing Company 1995, 661-670
- (85) Lazarus.
Das pneumatische Kabinet des jüdischen Krankenhauses zu Berlin.
Gesundheitsing. 1884; 7 (2): 40-43
- (86) Lentrodt S.
Schriftliche Mitteilung vom 09.01.2001
- (87) Lentrodt S.
Schriftliche Mitteilung vom 06.02.2002
- (88) Lerch M.
Wundheilungsstörungen.
In: Almeling M, Welslau W. (Hrsg.).
Grundlagen der hyperbaren Sauerstofftherapie.
Strande: Archimedes-Verlag 1998, 51-60
- (89) Lindner M.
Schriftliche Mitteilung vom 25.10.2001
- (90) Littleton T.
Effects of submarine descent.
Assoc Med J (London) 1855; i: 127-128
- (91) Männche KH.
Caissonkrankheit. Zur Geschichte, Physiopathologie und Klinik der Dekompressionskrankheit.
Mschr Unfallheilk 1968; 71 (37): 509-525

- (92) Männche KH.
Repititorium Tauchen. Band 1: Tauchmedizin.
Bremen: Selbstverlag 1994, 141-180
- (93) Marx RE. (1983a)
A new concept in the treatment of osteoradionecrosis.
J Oral Maxillofac Surg 1983; 41: 351-357
- (94) Marx RE. (1983b)
Oesteoradionecrosis.
A new concept of its pathophysiology.
J Oral Maxillofac Surg 1983; 41: 283-288
- (95) Marx RE, Johnson RP, Kline SN.
Prevention of osteoradionecrosis: A randomized prospective clinical trial of hyperbaric oxygen versus penicillin.
J Am Dent Assoc 1985; 111: 49-54
- (96) Marx RE, Ehler WJ, Tayapongsak P, Pierce LW.
Relationship of oxygen dose to angiogenesis induction in irradiated tissue.
Am J Surg 1990; 160: 519-524
- (97) Marx RE.
Radiation injury to tissue.
In: Kindwall EP (Hrsg.).
Hyperbaric medicine practice.
Flagstaff/Arizona (USA): Best Publishing Company
1995, 464-503
- (98) Meyer I.
Infectious diseases of the jaws.
J Oral Surg 1970; 28: 17-26
- (99) Milliet J.
De l'air comprimé au pont de vue physiologique.
In: Appréciation des principaux ouvrages de médecine française et étrangères sur l'emploi médical de l'air comprimé.
Nice: Imprimé Canis Frères 1860: 2-40
- (100) Murphy DG, Sloan EP, Hart RG, Narasimhan K, Barreca RS.
Tension pneumothorax associated with hyperbaric oxygen therapy.
Am J Emerg Med 1991; 9 (2): 176-179

- (101) Muth CM.
Physikalische und physiologische Prinzipien der HBO-Therapie.
In: Almeling M, Welslau W. (Hrsg.).
Grundlagen der hyperbaren Sauerstofftherapie.
Strande: Archimedes-Verlag 1998, 11-23
- (102) Muth CM.
Einsatz der Hyperbaren Sauerstofftherapie bei Wundheilungsstörungen: Grundlagen und Fallbeispiele.
In: Tirpitz D, Schipke JD, van Laak U. (Hrsg.).
Tauch- und Überdruckmedizin VI. 8. wissenschaftliche Tagung der Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin e.V. Düsseldorf 1999.
Heidelberg: Dr. Curt Haefner-Verlag GmbH 2000, 20-28
- (103) Nier H, Kremer K.
Der Gasbrand - weiterhin ein diagnostisches und therapeutisches Problem.
Zentralbl Chir 1984; 109: 402-412
- (104) Nöldeke H, Hartmann V.
Der Sanitätsdienst in der deutschen U-Boot-Waffe.
Hamburg: Mittler 1996, 163-164
- (105) Nouveau Larousse Illustré.
Dictionnaire universel encyclopédique.
Paris: Larousse (Eds.) 1898/1903
- (106) Oriani G, Michael M, Marroni A, Longoni C.
Physiology and pathophysiology of hyperbaric oxygen.
In: Oriani G, Marroni A, Wattel F. (Eds.).
Handbook on hyperbaric medicine.
Berlin: Springer 1996: 1-34
- (107) Peirce EC (II).
Gas gangrene: A critique of therapy.
Surg Rounds 1984; 7: 17-25
- (108) Phillips JL.
The bends. Compressed air in the history of science, diving, and engineering.
New Haven, London: Yale University Press 1998
- (109) Podlesch I.
Mündliche Mitteilung 2000

- (110) Pol B, Watelle TJJ.
Mémoire sur les effets de la compression de l'air appliquée au creusement des puits à Houille.
Ann Hyg Publ Et Med Légale (Paris) 1854; 2 (1): 241-304
- (111) Pravaz CG.
Mémoire sur l'application du bain d'air comprimé au traitement des affections tuberculeuses, des hémorrhagies capillaires et des surdités catarrhales.
Bull Akad Méd Paris, 1837; 38 (2): 985-996
- (112) Ryba G.
Handbuch des Grubenrettungswesens.
Bd. 2: Gas- und Wassertauchgeräte.
Leipzig: Verlag Felix A. 1930
- (113) Sawai TA, Niimi A, Takahashi H, Ueda M.
Histologic study of the effect of hyperbaric oxygen therapy on autogenous free bone grafts.
J Oral Maxillofac Surg 1996; 54: 975-981
- (114) Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine.
HYDRA 2000. Pressemitteilung zur Indienstellung.
Kronshagen 1990
- (115) Schipke JD, Erbers R, Tirpitz D.
Verzögerte Behandlung von Dekompressionskrankheiten.
Caisson 1998; 13 (4): 138-147
- (116) Schott H.
Die Gasbrandinfektion (Prinzipien der Behandlung, Ergebnisse).
Hefte zur Unfallheilkunde 1979; 138: 179-186
- (117) Schuster H-P.
Notfallmedizin. Symptomatologie und erste Versorgung der akutlebensbedrohlichen Zustände.
Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag 1989, 258-259
- (118) Seemann K.
Wo und wie sollen Deko-Kranke behandelt werden? Eine Stellungnahme zum Artikel von K.P. Faesecke.
Caisson 1989; 4 (3): 69-71

- (119) Shank ES, Muth CM.
Decompression illness, iatrogenic gas embolism and carbon monoxide poisoning: the role of hyperbaric oxygen therapy.
Int Anaesthesiol Clin 2000; 38 (1): 111-137
- (120) Sheffield PJ.
Tissue oxygen measurements.
In: Davis JC, Hunt TK(Eds.).
Problem wounds. The role of oxygen.
New York: Elsevier 1988, 17-52
- (121) Sheffield PJ, Davis JC, Bell GC, Gallagher TJ.
Hyperbaric chamber clinical support: multiplace.
In: Davis JC, Hunt TK. (Eds.).
Hyperbaric oxygen therapy.
Bethesda/Maryland (USA): Undersea Medical Society
1977, 25-39
- (122) Sheffield PJ, Desautels DA.
Hyperbaric and hypobaric chamber fires:
a 73-year analysis.
Undersea Hyperb Med 1997; 24 (3): 153-154
- (123) Smith AH.
The effects of high atmospheric pressure, including the caisson disease.
Brooklyn 1873.
zit. nach: Corning JL.
Observation on the caisson or tunnel disease.
Med Rec (New York) 1890; 37 (19): 513-521
- (124) Smith JL.
The pathological effects due to increase of oxygen tension in the air breathed.
J Physiol 1899; 24: 19-35
- (125) Smolle-Jüttner FM.
Schriftliche Mitteilung vom 12.10.1999
- (126) Staatliche Kurverwaltung Bad Reichenhall
Schriftliche Mitteilung vom 14.03.2000
- (127) Stelzner H.
Tauchertechnik.
Lübeck: Coleman 1942

- (128) Tabarié E.
Sur l'action thérapeutique de l'air comprimé.
C R Acad Sci Paris 1840; 11: 26-28
- (129) Tabarié E.
Recherches sur les effets des variations dans la pression
atmosphérique à la surface du corps.
C R Acad Sci Paris 1838; 6: 896-897
- (130) Tibbles PM, Edelsberg JS.
Hyperbaric oxygen therapy.
New Engl J Med 1996; 334: 1642-1648
- (131) Tiefbau-Berufsgenossenschaft München.
Liste der Druckkammern. Stand November 2000
- (132) Tirpitz D.
Wo steht die Hyperbare Oxygenation heute? Eine kritische Bestandaufnahme.
Caisson 1988; 3 (2): 21-22
- (133) Tirpitz D. (Hrsg.).
Therapie mit hyperbarem Sauerstoff (HBO) in Traumatologie und Notfallmedizin.
Berlin: Springer-Verlag 1993, VII
- (134) Tirpitz D. (1998a)
Hyperbare Sauerstoffbehandlung (HBO) bei CO-Intoxikation.
Caisson 1998; 13 (1): 17
- (135) Tirpitz D. (1998b)
Außergewöhnliche Blutungsanämien.
In: Almeling M, Welslau W. (Hrsg.).
Grundlagen der hyperbaren Sauerstofftherapie.
Strande: Archimedes-Verlag 1998, 49-50
- (136) Tirpitz D.
Mündliche Mitteilung 2001
- (137) Triger CJ.
Mémoire sur un appareil à air comprimé, pour le percement des puits de mines et autres traveaux, sous les eaux et dans les sables submergés.
C R Acad Sci 1841; 13:884-896

- (138) Triger CJ.
Influence de l'air comprimé sur la santé.
Ann Hyg Publ Et Med Légale (Paris) 1845; 33: 463
- (139) Undersea and Hyperbaric Medical Society (UHMS).
Hyperbaric oxygen therapy: 1999 committee report.
Kensington/Maryland (USA) 1999
- (140) van Unnick AJM.
Inhibition of toxin production in *Clostridium perfringens*
in vitro by hyperbaric oxygen.
Antonie Leeuwenhoek Microbiol 1965; 31: 181-186
- (141) Verband Deutscher Druckkammerzentren (VDD) e.V.
Schriftliche Mitteilung vom 28.02.2001
- (142) Vihersaari T, Kivisaari J, Niinikoski J.
Effect of changes in inspired oxygen tension on wound
metabolism.
Ann Surg 1974; 179, 2: 889-895
- (143) von Vivenot R. Jr.
Zur Kenntnis der physiologischen Wirkungen und der
therapeutischen Anwendung der verdichteten Luft. Eine
physiologisch-therapeutische Untersuchung.
Erlangen: Ferdinand Enke 1868
- (144) Wandel A.
Zur Geschichte der Hyperbaren Medizin und ihrer Indi-
kation. International Symposium on Naval Medicine.
Kiel: Selbstverlag 1990
- (145) Wattel F, Mathieu D. (Eds.).
Proceedings of the 1st European consensus conference
on hyperbaric medicine.
Lille (France): September 1994, ISBN 3-908229-03-0
- (146) Weist F. (2001a)
Mündliche Mitteilung 2001
- (147) Weist F. (2001b)
Effekte von simulierten 44 m-Tieftauchgängen bei ge-
sunden Tauchern auf die Katecholaminkonzentration
sowie die Herzfrequenzvariabilität unter Verwendung
von Sauerstoff, Luft und Heliox als Atemgase.
Studienplanung vom 15. August 2001

- (148) Williams CT.
The compressed air bath and its uses in the treatment of disease.
Brit Med J 1885; 1: 769-772, 824-828, 936-939
- (149) Yarbrough OD, Behnke AR.
Treatment of compressed air illness utilizing oxygen.
J Ind Hyg Toxicol 1939; 21 (6): 213-218
- (150) Zuntz N.
Zur Pathogenese und Therapie der durch rasche Luftdruckänderungen erzeugten Krankheiten.
Fortschr Med 1897; 15: 632-639

10. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Seite iii: von Vivenot R. Jr. Zur Kenntnis der physiologischen Wirkung und therapeutischen Anwendung der verdichteten Luft. 1868: Titelseite
© Druck- und Reprintstelle der Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
- Seite 4: Firma Babcock, Oberhausen
- Seite 6: Podlesch I. Anaesthesiology and Resuscitation. No. 64. Berlin: Springer-Verlag 1972: S. 73 (Abbildung 2)
Firma Sechrist Industries, Inc. (USA) (Abbildung 3)
- Seite 7 und 8: fotografiert mit freundlicher Erlaubnis des St. Joseph-Hospitals, Duisburg-Laar
- Seite 9: fotografiert mit freundlicher Erlaubnis der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
- Seite 12 und 13: Jain JJ. Textbook of hyperbaric medicine.
© Hogrefe und Huber Publisher Inc. 1999: S. 608-609
- Seite 17: Dulieu L. La Médecine à Montpellier.
Avignon: Presse universelles 1990: S. 233
- Seite 19: Appréciation des principaux ouvrages de médecine français et étrangers sur l'emploi médical de l'air comprimé. Nice 1860: Titelseite
- Seite 21: von Vivenot R. Jr. Zur Kenntnis der physiologischen Wirkung und therapeutischen Anwendung der verdichteten Luft. 1868: S. 86
© Druck- und Reprintstelle der Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
- Seite 22: Staatliche Kurverwaltung Bad Reichenhall. Festschrift zum 100. Geburtstag von Ernst Rinck.
- Seite 24: Bert P. La pression barométrique. 1878: S. 429
© Druck- und Reprintstelle der Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
- Seite 25: Brit Med J 1885; 1: 771
- Seite 26: Un Med (Paris) 1879; 28: 447
- Seite 27: Hewitt FW. Anaesthetics and their administration. 1893: S. 117
- Seite 29: Caisson 1991; 6 (1): Titelseite
- Seite 30: Gesundheitsing. 1884; 7: 42

- Seite 34: Bert P. La pression barométrique. 1878: S. 750
© Druck- und Reprostelle der Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
- Seite 35: Phillips JL. The bends. 1998: S. 133
- Seite 37: Phillips JL. The bends. 1998: S. 104
- Seite 40: Nöldeke H, Hartmann V. Der Sanitätsdienst in der deutschen U-Boot-Waffe. 1996: S. 166
- Seite 41: J Cardiovasc Surg 1960; 1: 143
- Seite 44: Dr. van Laak, Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine Kronshagen
- Seite 45: Haux GFK. Subsea manned engineering. 1982: S. 9
- Seite 46: Haux GFK. Subsea manned engineering. 1982: S. 19
- Seite 47: Haux GFK. Subsea manned engineering. 1982: S. 63
- Seite 48: Haux GFK. Subsea manned engineering. 1982: S. 60
- Seite 50: Dr. A. Kemmer, BG-Unfallklinik Murnau
- Seite 51: Dr. A. Kemmer, BG-Unfallklinik Murnau (Abbildung 31)

Haux GFK. History of hyperbaric chambers. 2000: S. 92 (Abbildung 32)
- Seite 52: fotografiert mit freundlicher Erlaubnis der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
- Seite 53: Dr. L. Krocks, Brooks AFB San Antonio/Texas (USA)
- Seite 57: Ryba G. Handbuch des Grubenrettungswesens. Bd. 2. 1930: S. 587 Tafel X
© Druck- und Reprostelle der Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf
- Seite 58: Scheyer W, Seydel M. Druckkammer. Stuttgart: Verlag Stephanie Nagelschmid. 1996: S. 33
- Seite 59: Haux GFK. Subsea manned engineering. 1982: S. 222
- Seite 61: Stelzner H. Tauchertechnik. 1942: S. 342
- Seite 62: Firma Babcock, Oberhausen
- Seite 64: Tirpitz et al. Tauch- und Überdruckmedizin VI. Heidelberg: Dr. Curt Haefner Verlag GmbH 2000: S. A11
- Seite 79 und 80: Tirpitz et al. Tauch- und Überdruckmedizin VI. Heidelberg: Dr. Curt Haefner Verlag GmbH 2000: S. A1 Abb. 1; S. A2

VERDANKUNG

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. J.D. Schipke für die Überlassung des Themas und das stets rege Interesse, das er der Erstellung der Dissertation entgegenbrachte.

Herrn Prof. Dr. med. Dr. med. dent. J. Lentrodt und Herrn PD Dr. med. T. Scheeren danke ich für das der Dissertation entgegengebrachte Interesse und für die Übernahme des Korreferates bzw. für sein Engagement als 3. Prüfer.

Zu Dank verpflichtet bin ich Dr. med. D. Bakker, Dr. med. K.P. Faesecke, Dr. med. A. Kemmer, Dr. L. Krocks, Dr. med. U. van Laak, Dr. med. St. Lentrodt, Dr. med. U. Pongratz und Mitarbeiterinnen, Dr. med. D. Tirpitz, Dipl.-Ing. F. Weist und Dr. med. R. Wetsch sowie Herrn K. Brandt (Drägerwerk AG, Lübeck), Herrn G.F.K. Haux (Haux Life-Support, Karlsbad-Ittersbach), Herrn Kopitziok (Sayers/Hebold), Herrn M. Lindner (Babcock, Oberhausen), Herrn R. Otto (Bundesgrenzschutz, St. Augustin) und der Firma Sechrist Industries, Inc. Anaheim/Ca. (USA) für die Bereitstellung von Literatur und Bildmaterial.

Ich danke Dr. rer. nat. M. Heydthausen und seinem Team (insbesondere Frau B. Ritter und Herrn Ch. Hörster) sowie Herrn cand. med. Semih Özlügedik für die freundliche und kompetente Anleitung bei der graphischen Aufbereitung der Abbildungen.

Außerdem danke ich Frau Angelika Stang und Herrn Raoul Colin für ihre Hilfe bei der Recherche in Frankreich und Herrn O. Giebels für die Anregungen zur Textgestaltung.

Ein herzliches Dankeschön gilt meiner Familie und meinen Freunden, die mich in den letzten Jahren ermuntert und unterstützt haben und somit zum Gelingen der Dissertation beitrugen.

LEBENS LAUF

- 05.12.1967 Geboren als Tochter der Eheleute Klaus und Trude Petersen, geborene Rissel, in Dinslaken
- 09/74 bis 08/78
09/78 bis 06/87 Gemeinschaftsgrundschule Dinslaken
Theodor-Heuss-Gymnasium Dinslaken
03.06.1987 Abitur
- 11/87 bis 09/88 Studium der Zahnheilkunde an der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- 10/88 bis 07/93 Studium der Zahnheilkunde an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
15.07.1993 Staatsexamen
06.08.1993 Approbation
- 01/94 bis 12/94 Beschäftigung als Assistenz Zahnärztin in freier Praxis in Sulingen
- 05/95 bis 12/95 Beschäftigung als Assistenz Zahnärztin in freier Praxis in Voerde
- 04/96 bis 06/97 Beschäftigung als Assistenz Zahnärztin in freien Praxen in Essen
- 07/97 bis 11/97 Mitarbeit in kirchlichen und sozialen Projekten in Chile
- 01/98 bis 04/99 Beschäftigung als Assistenz Zahnärztin in freier Praxis in Neuried
- seit 05/1999 Weiterbildungsassistentin für Kieferorthopädie in freier Praxis in Dinslaken

ZUSAMMENFASSUNG

Bereits im 17. Jahrhundert wurden verschiedene Behandlungen in Überdruckkammern durchgeführt.

Zwei unterschiedliche Entwicklungen bei der Anwendung von Überdruck zeigten sich Mitte des 19. Jahrhunderts. Zunächst wurden in sogenannten pneumatischen Kabinetten verschiedenen Erkrankungen mithilfe von Druckluft behandelt. Da kein therapeutischer Erfolg sichtbar wurde, konnten sich diese pneumatischen Kammern nicht durchsetzen. Auch wenn diese Einrichtungen nicht die Grundlage für die heutige Therapie mit hyperbarem Sauerstoff sind, haben sie dennoch zur Weiterentwicklung der Druckkammertechnologie beigetragen. Andererseits konnte in Überdruckkammern die Behandlung der Dekompressionskrankheiten, die bei Tauchern und Caissonarbeitern diagnostiziert wurden, erfolgreich durchgeführt werden. Dies trug zur Weiterentwicklung der Überdrucktechnologie insbesondere im arbeitsmedizinischen Bereich bei. Eine erstmalige Gabe von Sauerstoff auf einer Caisson-Baustelle erfolgte 1908 beim Bau des Elbtunnels in Hamburg. Seit 1997 ist die Sauerstoffatmung während der Ausschleusung auf Überdruckbaustellen in der deutschen Druckluftverordnung festgeschrieben.

1960 wurde der Begriff der Hyperbaren Sauerstoff (HBO)-Therapie eingeführt. Diese Therapieform wurde nicht nur bei arbeitsspezifischen Erkrankungen, die im direkten Zusammenhang mit einem Aufenthalt in hyperbarer Umgebung standen, erfolgreich eingesetzt, sondern ist auch Therapie der Wahl bei Dekompressionserkrankungen, arteriellen Luft- oder Gasembolien und Kohlenmonoxid-Intoxikationen. Sie ist darüber hinaus ein fester adjuvanter Bestandteil bei der Therapie anderer, schwerer Krankheitsbilder (u. a. Radionekrosen und Problemwunden) geworden.

Weitere Studien und Forschungsgebiete werden auch in Zukunft den Einsatz der HBO-Therapie in den verschiedenen medizinischen Fachdisziplinen sichern und optimieren.