

**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

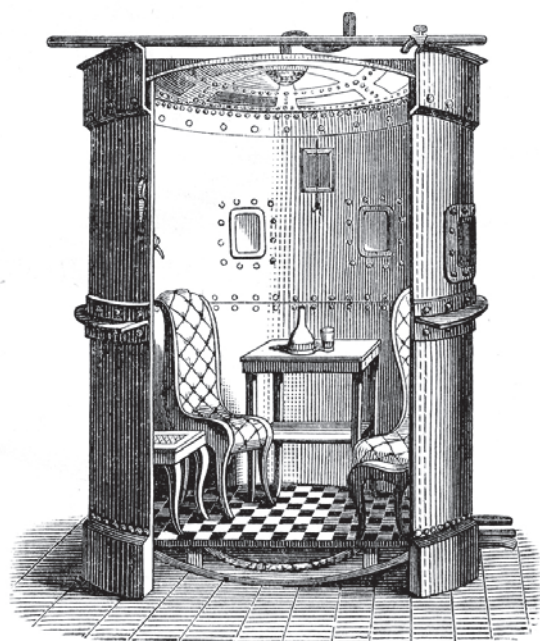
**Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf**

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) Therapieansätze 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].

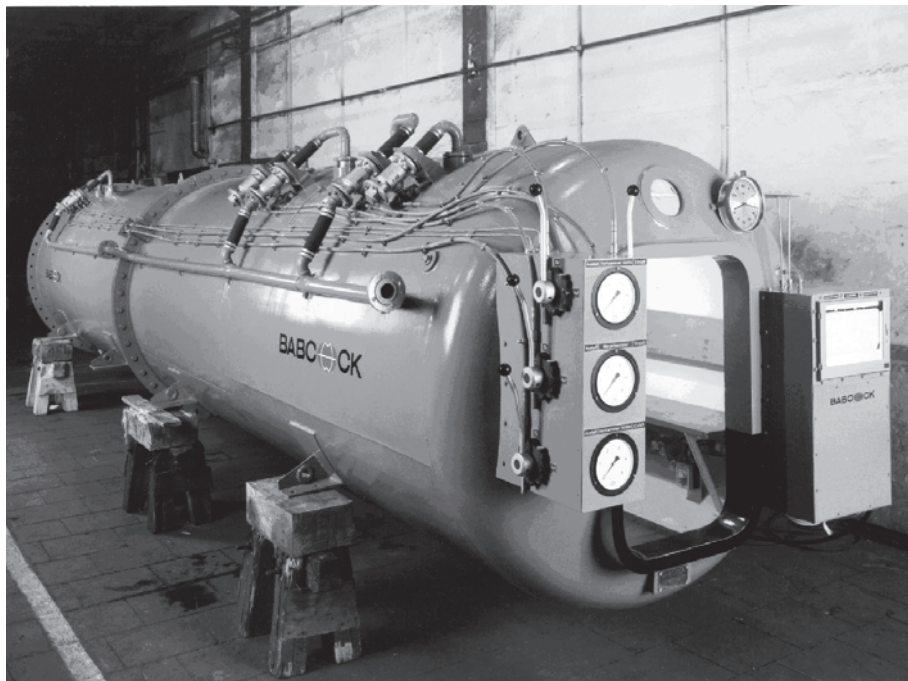


Abbildung 1: Überdruckkammer für eine Caisson-Baustelle (Firma Babcock), ca. 1980

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.

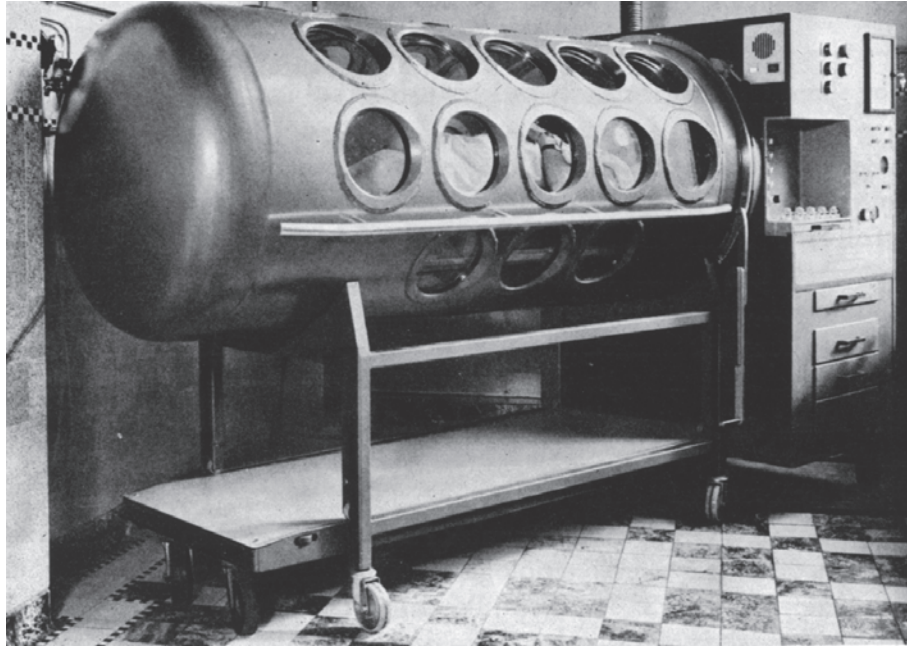


Abbildung 2: Modell einer Einzelpersonen-Kammer, wie es auch im Universitätsklinikum Düsseldorf für die HBO-Therapie genutzt wurde (Firma Dräger), ca. 1965

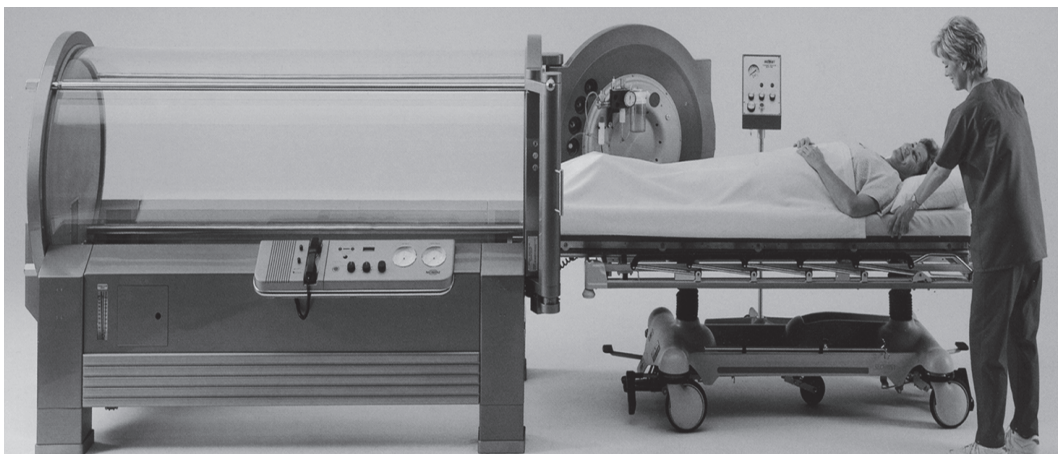


Abbildung 3: Einzelpersonen-Kammer der neuesten Generation (Firma Sechrist Inc., USA)

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 entflammbaren 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 entflammbareren 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 • leistet
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.

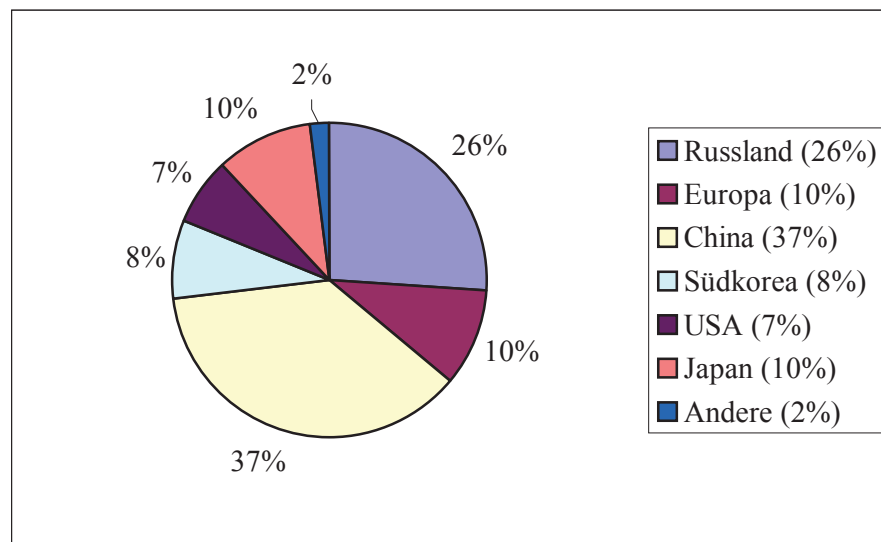
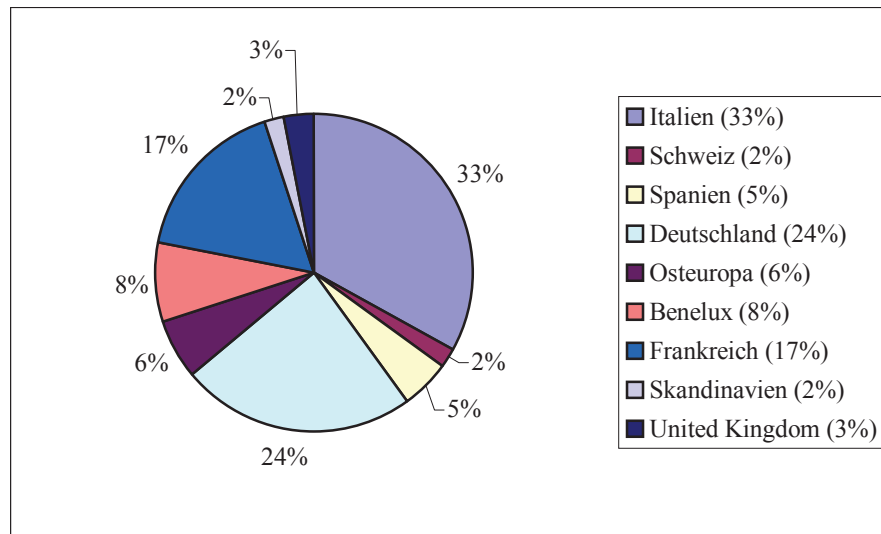


Abbildung 7: Verteilung der Druckkammern für die HBO-Therapie weltweit [JAIN 1999, © Hogrefe und Huber Publisher Inc.]



**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].

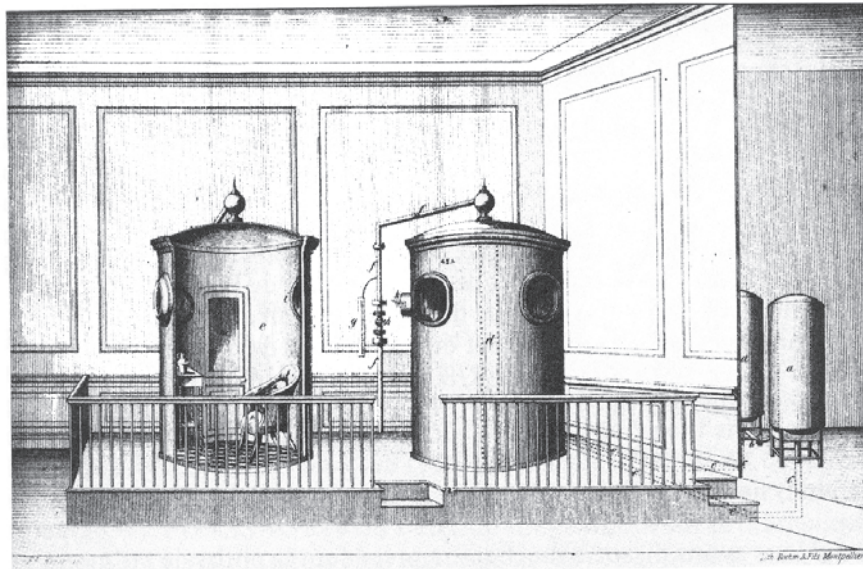


Abbildung 9: die von Tabarié in Montpellier gebaute und genutzte Druckkammeranlage, ca. 1840

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.

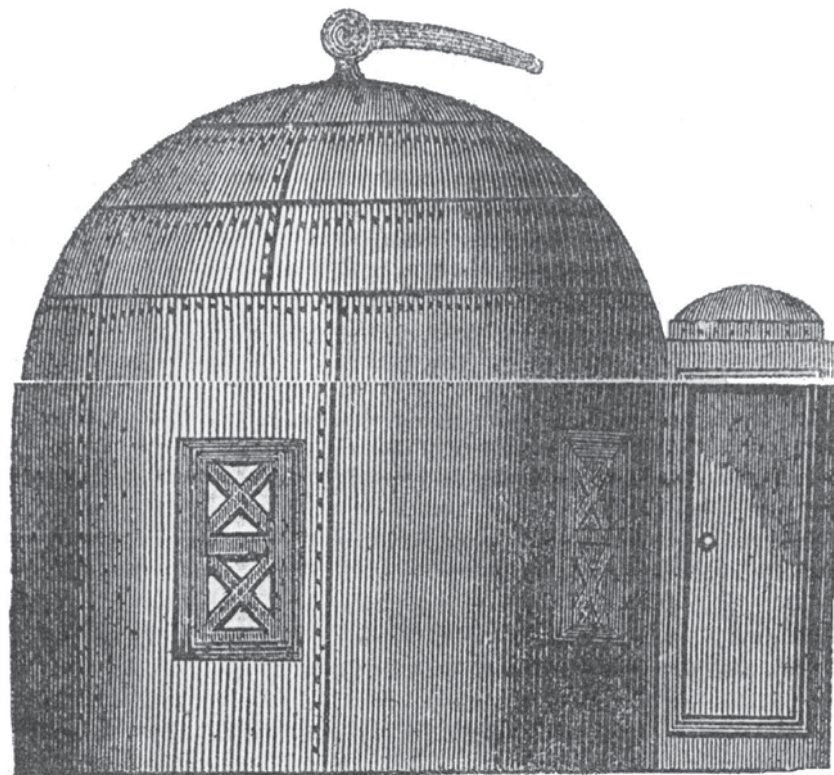


Abbildung 10: eine der Druckkammern, in der Milliet in Nizza seine Behandlungen durchführte, ca. 1860

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].

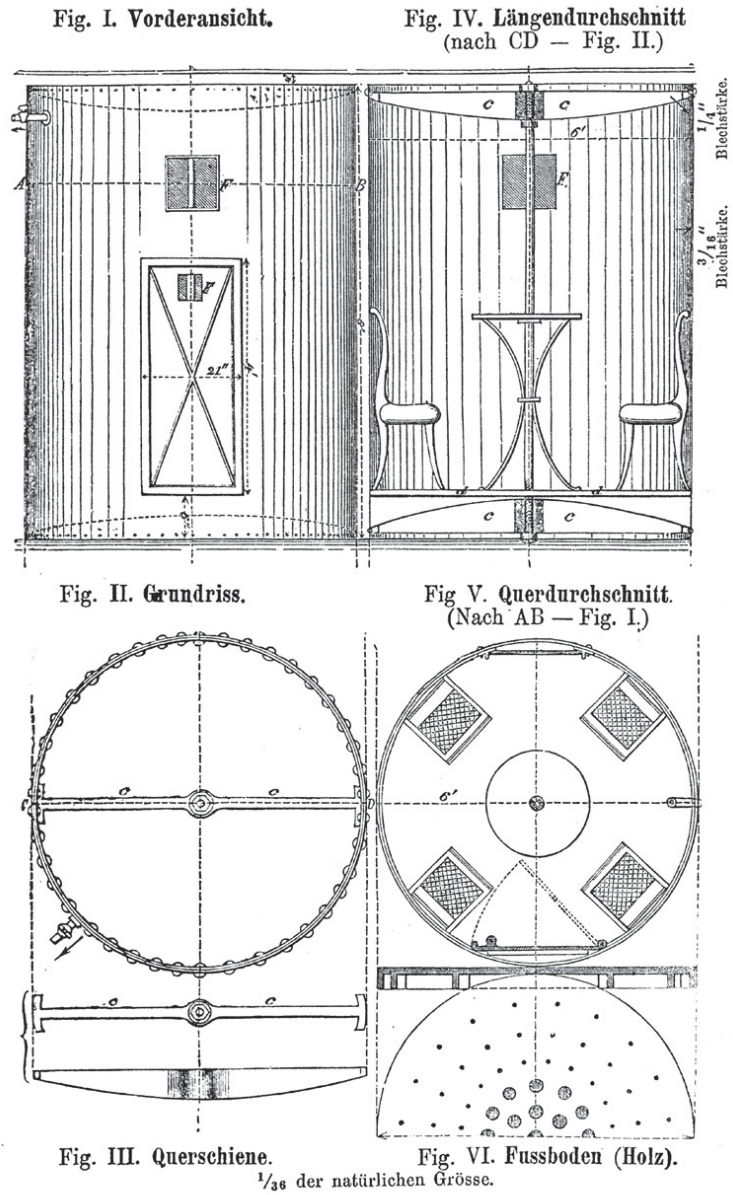


Abbildung 11: Lange konstruierte als erster eine zylindrische Druckkammer, ca. 1860

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].

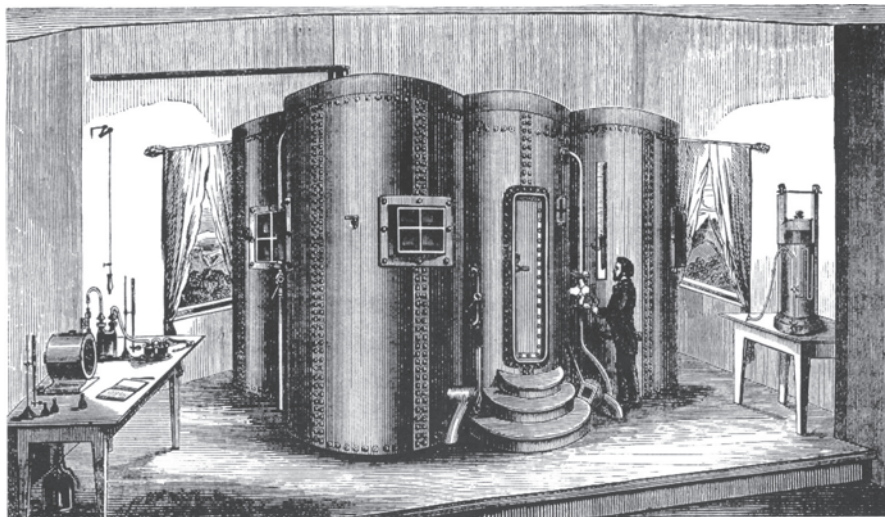


Abbildung 12: Druckkammeranlage in Bad Reichenhall, um 1900

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.

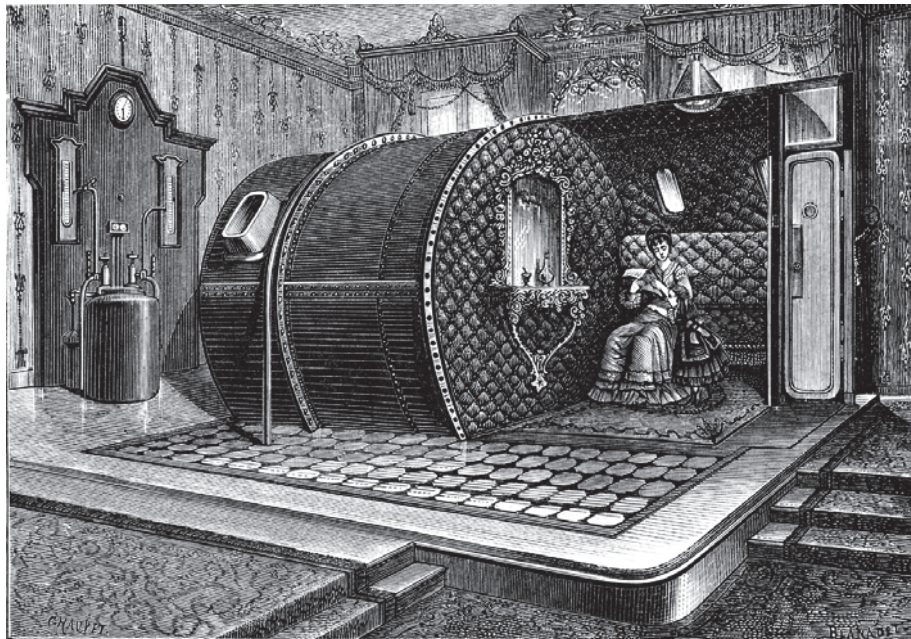


Abbildung 13: die Druckkammer von Fornanini in Mailand, ca. 1860

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.

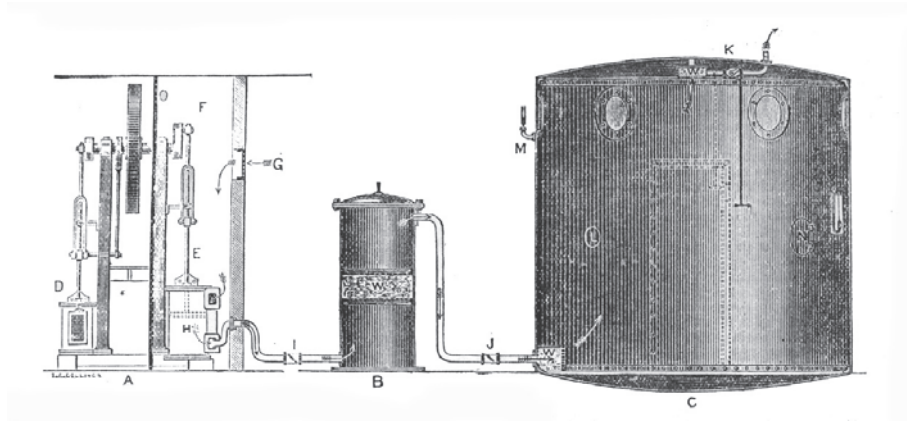


Abbildung 14: Druckkammer-Anlage des Brompton Hospitals (Großbritannien), 1885

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].

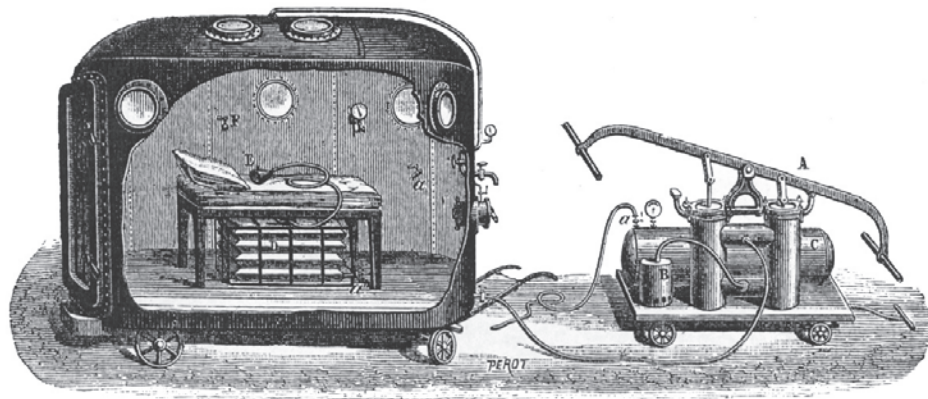


Abbildung 15: Fontaine verfügte über eine mobile Überdruckkammer, in der unter Narkose Operationen durchgeführt wurden, ca. 1879

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].

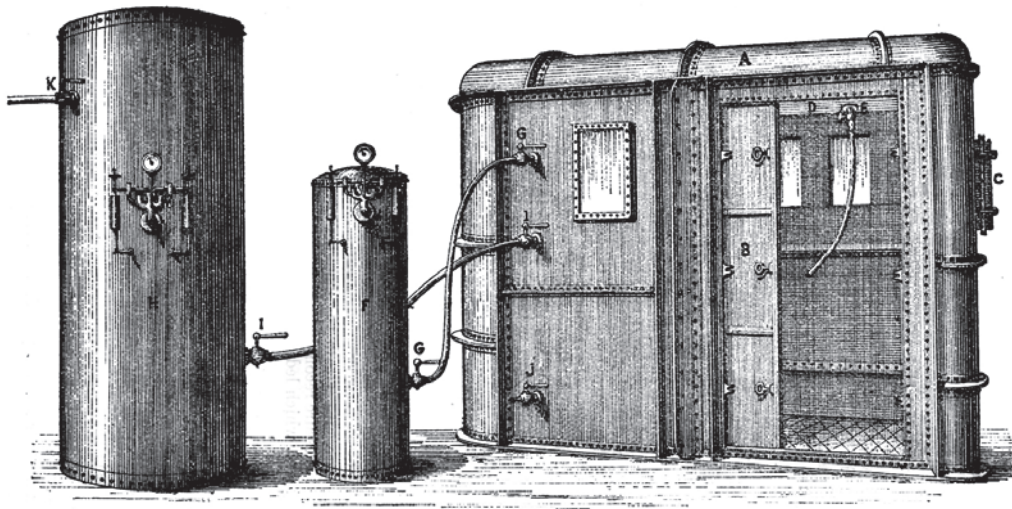


Abbildung 16: stationäre Überdruckkammer mit Schiebetür, ca. 1893

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].

COMPRESSED AIR BATH APPARATUS.
 No. 179,414. Patented July 4, 1876.

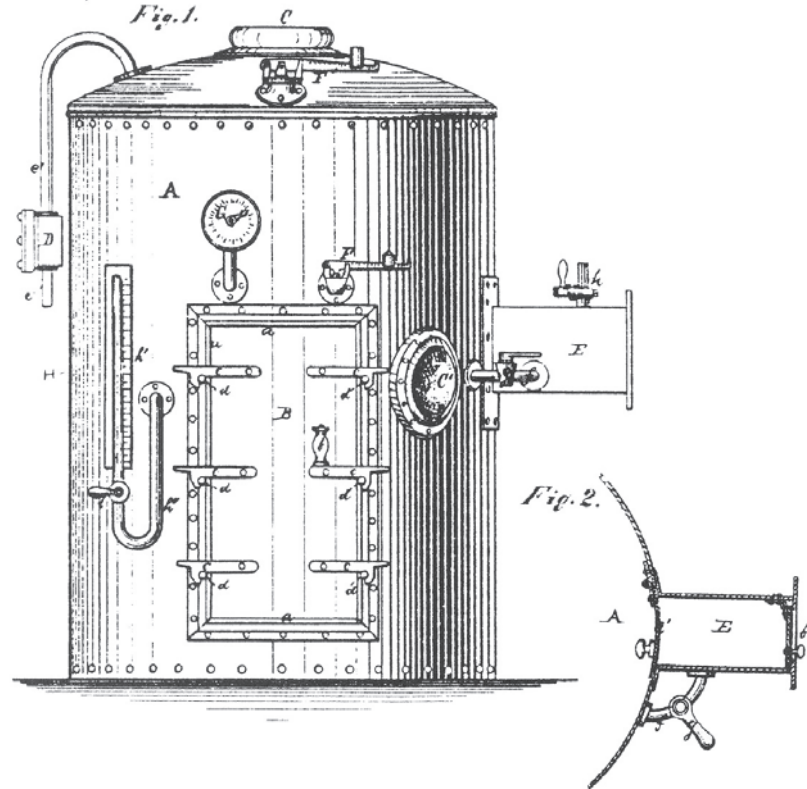


Abbildung 17: Patentschrift von Daniel Kelly aus Chicago/Illinois (USA), 1876

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].

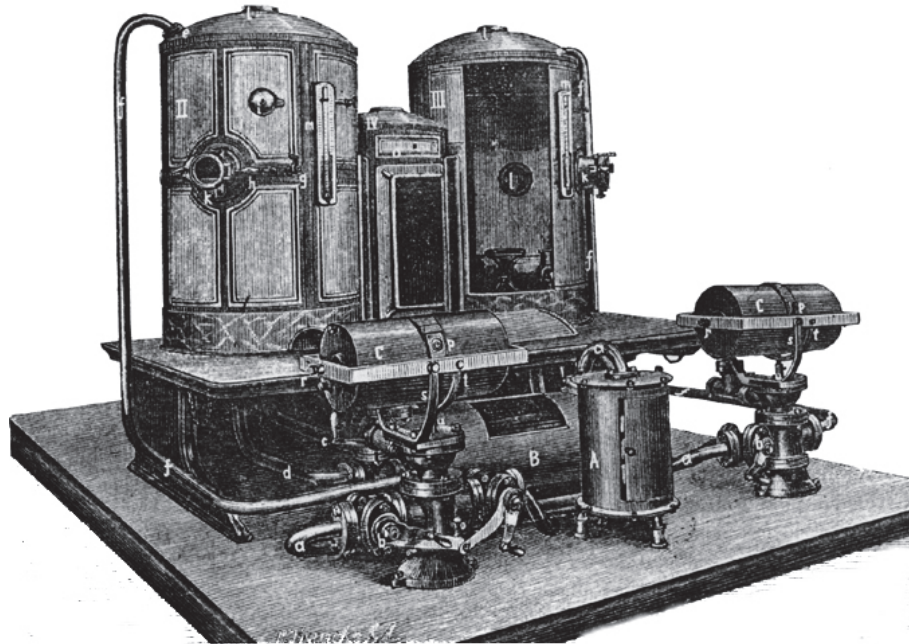


Abbildung 18: zwei Druckkammern des Jüdischen Krankenhauses in Berlin, die durch eine Personenschleuse verbunden sind, ca. 1884

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].

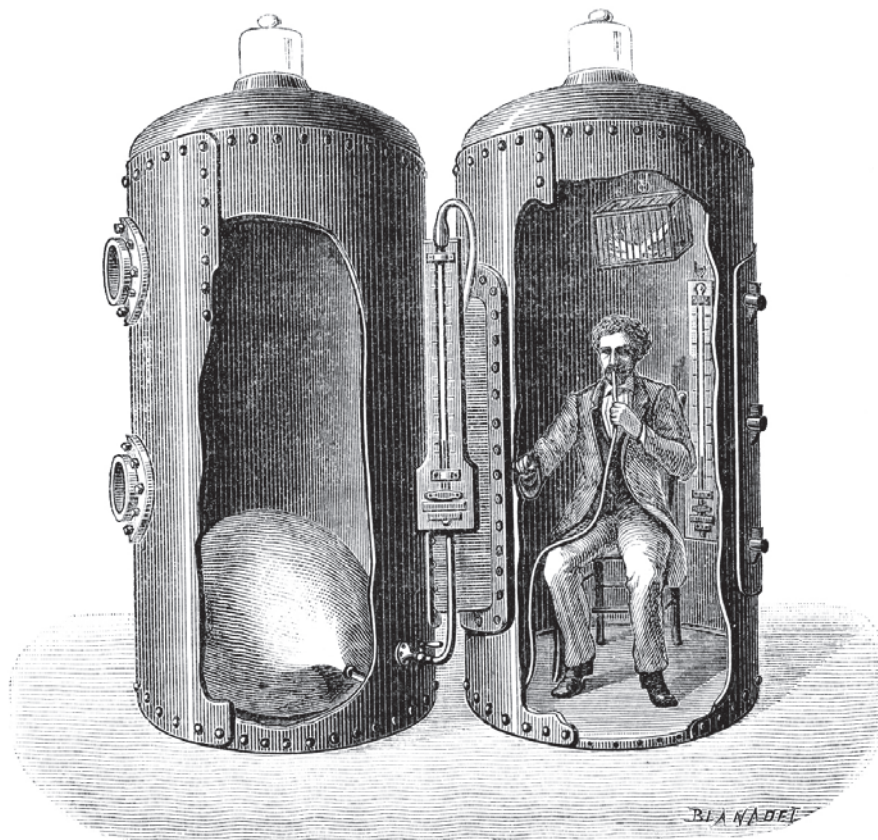


Abbildung 19: Paul Bert in seiner Druckkammer, ca. 1870

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].

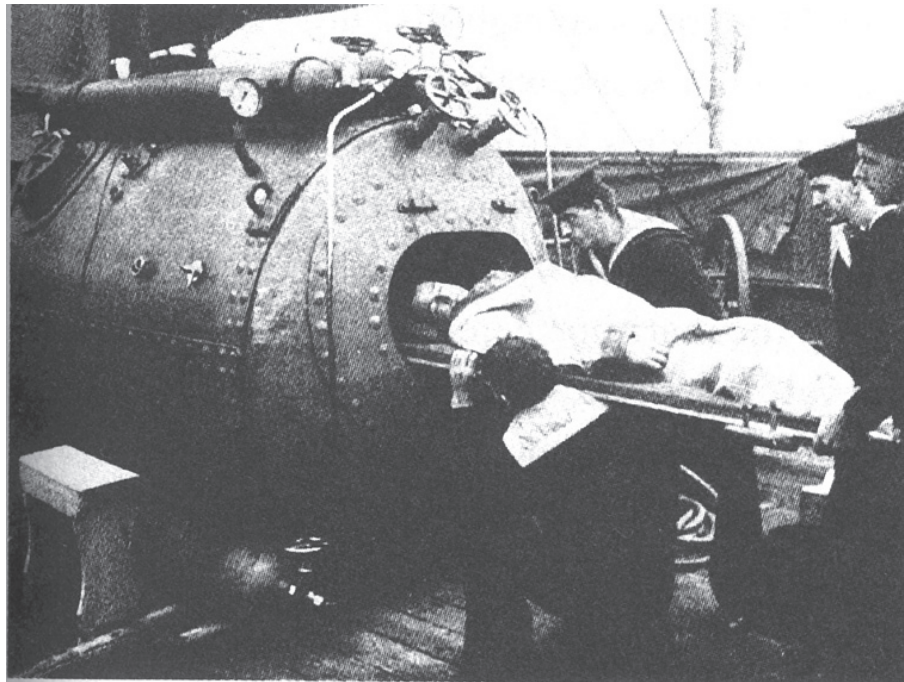


Abbildung 20: Einsatz einer Druckkammer auf einem Schiff, ca. 1915

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 Einschieben 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 Rekompresseionskammer (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 Rekompresseionskammer 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 Dekompresseionskrankheit 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].

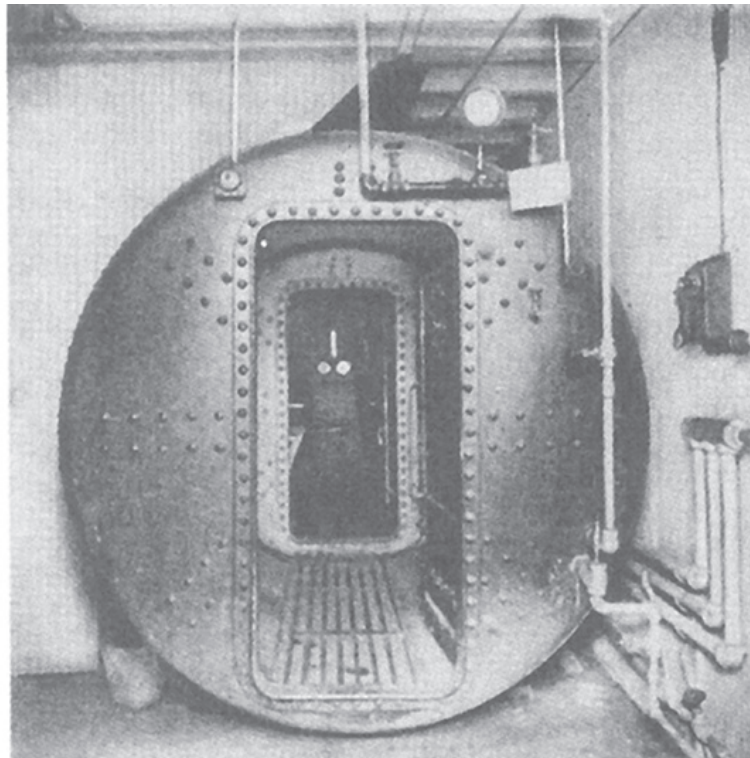


Abbildung 21: Eingang der Schleuse, die Moir beim Bau des East River-Tunnels zur Verfügung stand, 1890

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 Rekompersionskammer bereitstand, erfolgte die Behandlung schwerer Dekompensationserkrankungen stationär mittels Wannenbädern und Morphininjektionen. Nach dem ersten Todesfall schaltete sich die Gewerbepolizei 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 Raftopoulos 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].

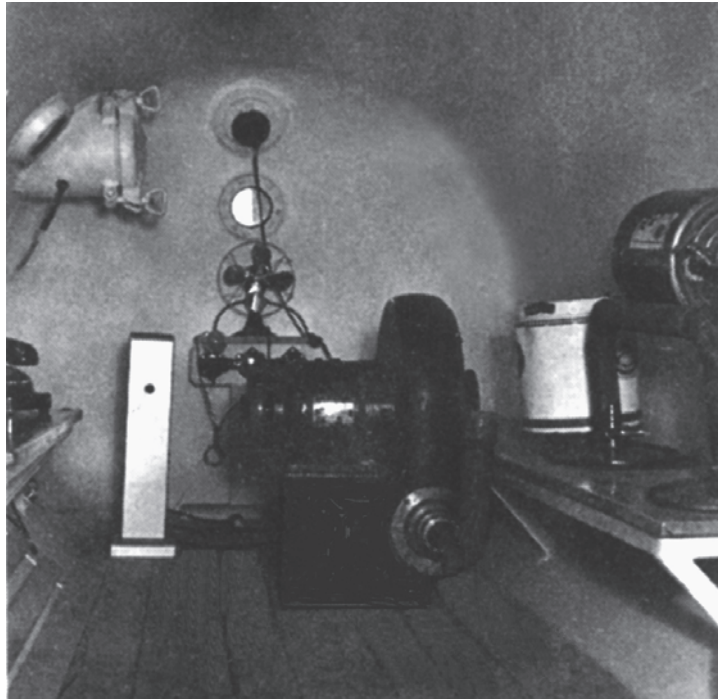


Abbildung 22: Blick in die Druckkammer auf dem Stützpunkt der Deutschen Marine in Carnac (Frankreich), ca. 1942

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].

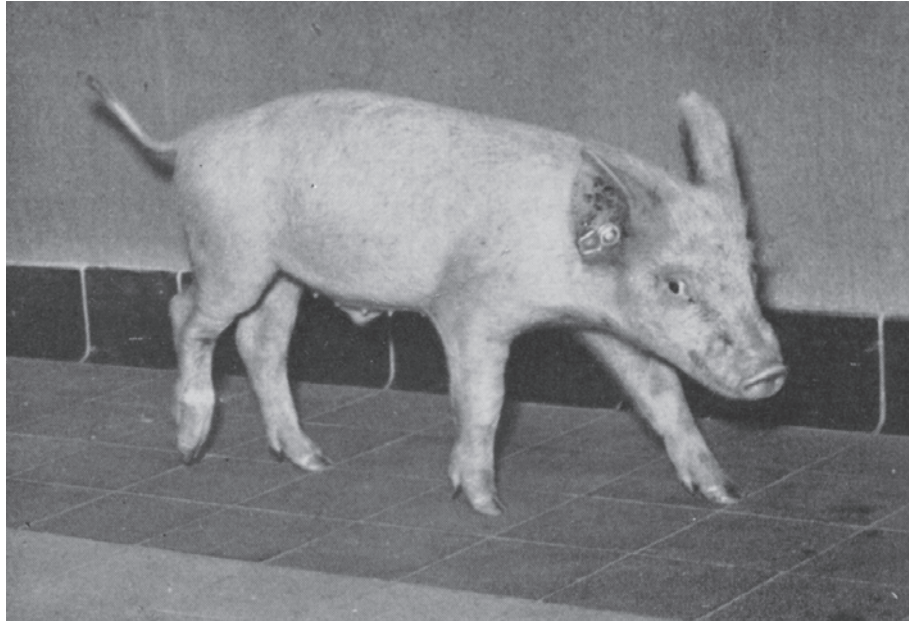


Abbildung 23: eines der Versuchstiere nach dem Aufenthalt in der Druckkammer

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.

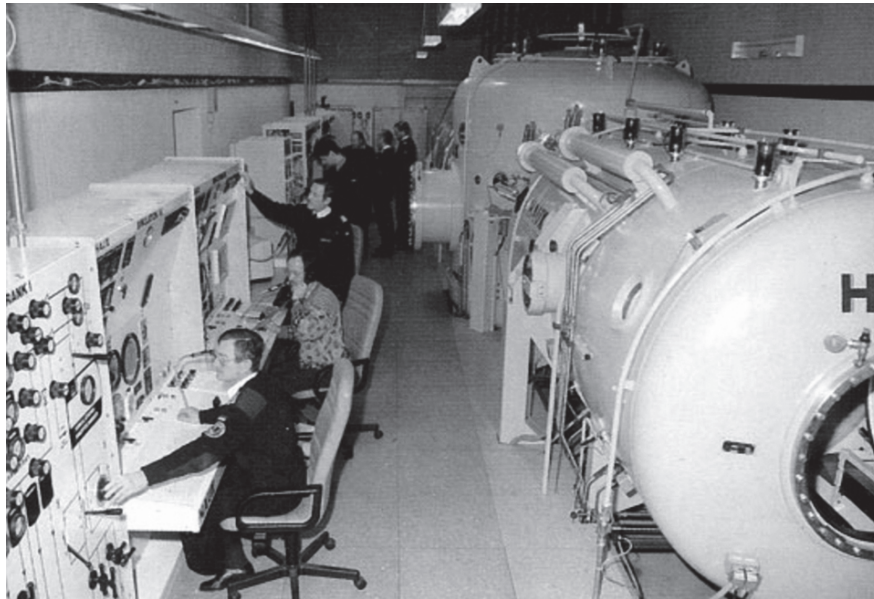


Abbildung 24: HYDRA 2000: Kammeranlage und Fahrstand

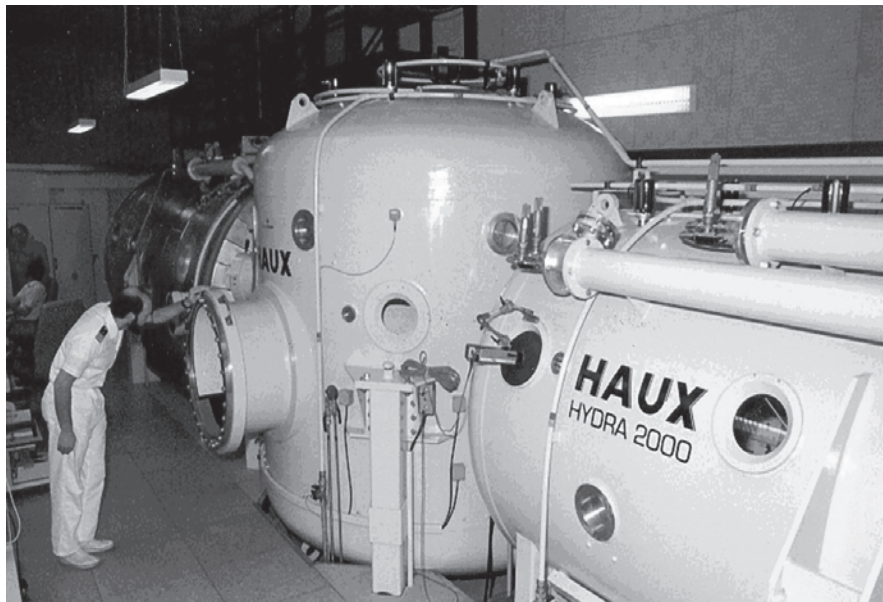


Abbildung 25: HYDRA 2000: Blick auf die Therapiekammer

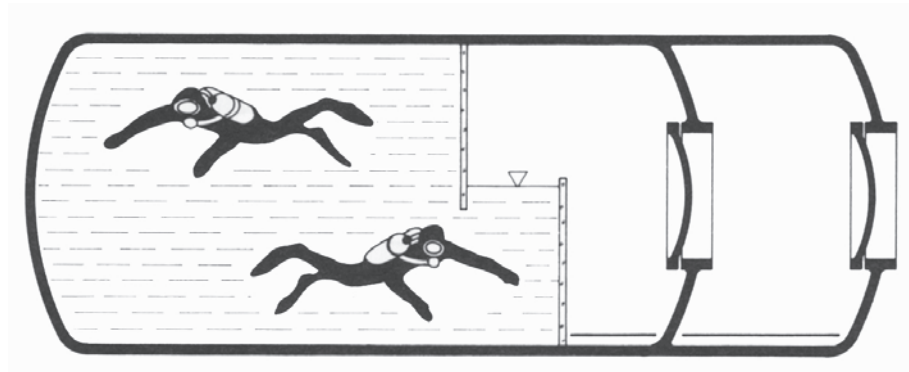


Abbildung 26: schematische Darstellung einer Kammer mit Buffalo-Prinzip

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].

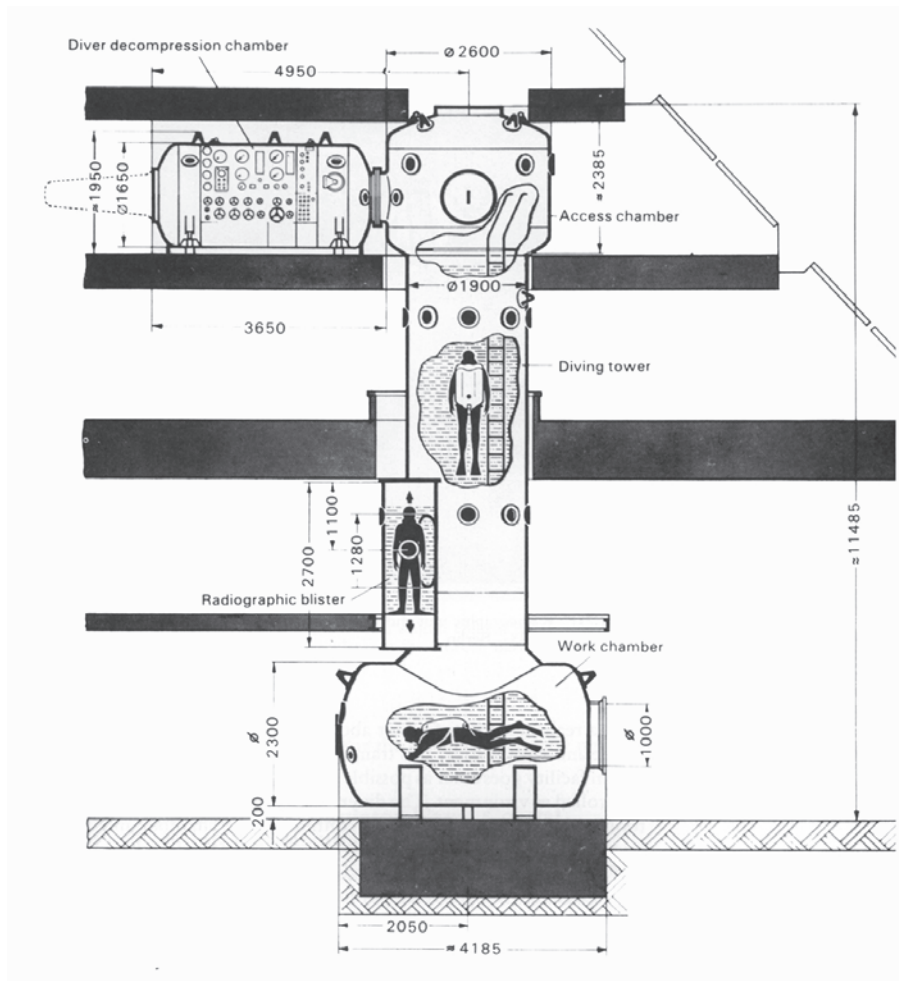


Abbildung 27: Schemazeichnung des Tauchturms der DLRG in Berlin

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].

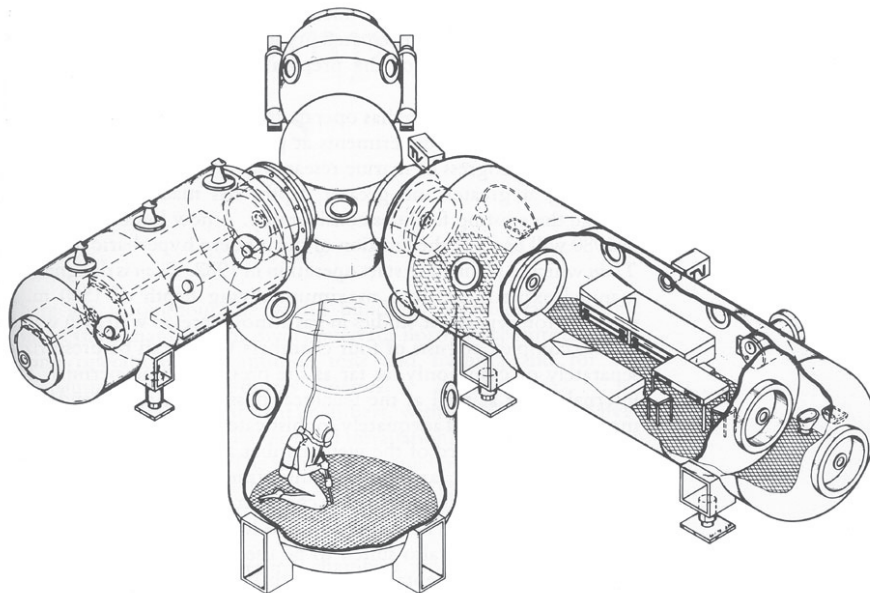


Abbildung 28: Tauchsimulator TITAN in Köln-Porz

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].

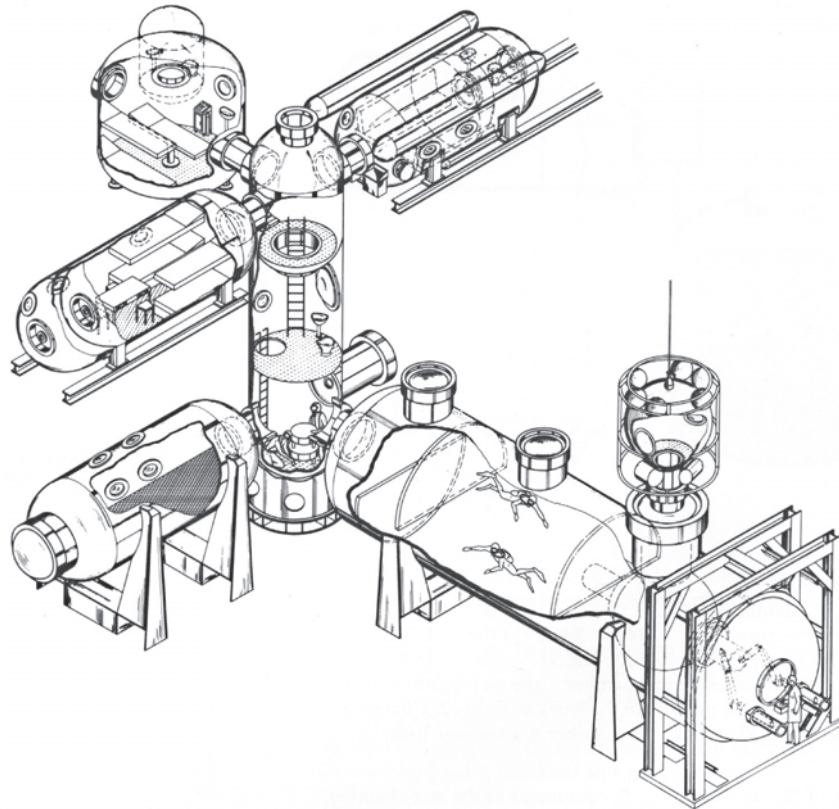


Abbildung 29: Geesthachter Unterwassersimulationsanlage (GUSI)

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

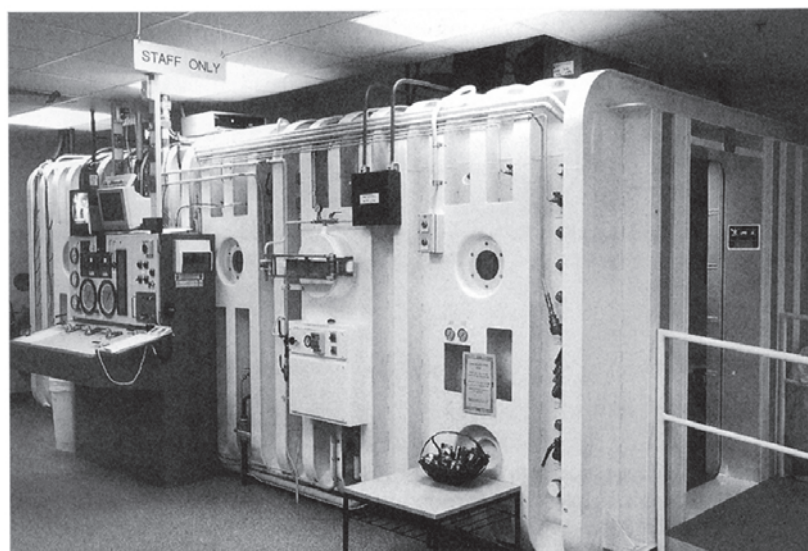


Abbildung 32: rechteckige HBO-Therapiekammer in Adelaide (Australien)

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].