

III – 2.12

Tauchcomputer

von Dipl.-Phys. ALBRECHT SALM

III – 2.12.1

Einleitung

Seit es Tauchtabellen gibt, gab es auch den Wunsch, die Berechnung der Dekompressions-Stopps zu automatisieren, um so für die Taucher schneller und einfacher das gewünschte Ergebnis zu erreichen.

In den grauen Vorzeiten der oberflächenversorgten Luft-Taucherei waren die Erstellung und Kontrolle der Tauchprofile den Spezialisten der *top side*¹⁾, den Menschen an der Oberfläche, vorbehalten. Dies betraf nicht nur die Helmtaucher, sondern auch die Arbeiter in den druckluft-durchströmten Senkkästen, den Caissons. Unbelastet von physikalischem Wissen und den physiologischen Besonderheiten der Überdruckexposition waren diese Wesen dazu verdammt, nach getaner Arbeit unter Wasser den Befehlen der an der Oberfläche Verbliebenen zu gehorchen, ab und zu auch mit fatalen Folgen. Oft geschahen auch Fehler nicht nur aus Unkenntnis der Handhabung der Tabellen, sondern schlicht aus einer ganz anderen Unkenntnis: nämlich der des real wirkenden Umgebungsdrucks und der tatsächlichen körperlichen Belastung inklusive der Temperatur und der Luftzusammensetzung in einem Caisson.

Mit der Entwicklung von autonomen Leicht- und Helmtauchgeräten wurde die Emanzipation von der „top side“ eingeläutet. Unabhängig von einer Oberflächenversorgung, egal ob mit Flaschenpaket oder Kreislaufgerät, mussten unter Wasser selbstständige Entscheidungen getroffen werden. Dies betraf nicht nur die Wahl des Werkzeuges, den Kurs oder die gewünschte Arbeitstiefe, sondern auch die Austausch-, die Dekompressionsphase.

Parallel dazu wurden die medizinischen, physiologischen und mathematischen Methoden weiterentwickelt. Aus einer einzigen Dekompressionstabelle für Luft (Haldane, 1907), begrenzt auf ca. 50 m Tauchtiefe und Austauschzeiten kleiner 30 min, wurden innerhalb von ca. 50 Jahren ganze Bündel von Tabellen, gültig für Normalnull oder Bergseen, beliebige Wiederholungstauchgänge oder auch für Mischgase, einschließlich den Gaswechseln in ausgedehnten Dekompressionsphasen, und, nicht zu vergessen, die Tabellen für Oberflächendekompression oder auch für Sättigungstauchgänge für mehrere hundert Meter Arbeitstiefe. Entsprechend dieser Variabilität stiegen auch die Anforderungen an die Tabellenbenutzer.

Hierdurch und zweifelsohne auch durch die wachsende Popularität des Tauchsports nach Ende des zweiten Weltkrieges, auch durch die Verbreitung der zweistufigen Einschlauch-Lungenautomaten, wurde die Abkehr von den traditionellen Rechteckprofilen gefördert. Der autonome (SCUBA)-Sporttaucher²⁾ tauchte nach Gusto und nicht nach

¹⁾ Sammelbegriff für das Unterstützungspersonal beim oberflächenversorgten Tauchen

²⁾ Self Contained Underwater Breathing Apparatus, autonomes, nichtgeschlossenes Tauchgerät

III – 2.12.1

einem vorgeplanten fixierten Tiefen-/Zeitprofil. Die traditionellen Tabellen scheiterten an diesen „Multi-Level“-Profilen, die ungetesteten Interpolationsverfahren ebenso. Damit wurden ganze Generationen von Tauchschülern, egal ob im zivilen oder militärischen Bereich, oft ratlos zurückgelassen. Die Folge waren „Geheimrezepte“ im Umgang mit einer vermeintlich „todsicheren“ Methode zur Berechnung von „ad libitum“-Profilen oder schlichtweg die Vernachlässigung des Themas. Das Resultat waren entweder gefährlich kurze Austauschpläne oder solche, die einfach unnötig zu lang und damit auch nicht sicherer waren.

Ein Ausweg bot sich mit Simulationsmethoden an: zunächst wurde mit einfachen pneumatischen Geräten, später mit elektrischen Widerstandsnetzwerken versucht, die Inertgasaufnahme analog, später digital zu simulieren. Der Tiefe-Zeit-Kasten des Rechteckprofils wurde zerlegt in viele kleine Zeitschritte: somit ergab sich die Möglichkeit zur Berechnung eines Multi-Level-Profiles automatisch. Allerdings waren dadurch die ersten öffentlichen Kontroversen um Tauchcomputer bereits programmiert: die rechentechnischen Vorgaben eines instantanen Abstiegs, das Einhalten einer exakten Aufstiegs geschwindigkeit sowie das komplette Verweilen auf der Planungstiefe bis zum vollständigen Ablauf der Grundzeit werden so in der Regel von nicht-kommerziellen oder nicht-militärischen Tauchern nicht eingehalten. Tauchcomputer berechneten somit Austauschprofile, die scheinbar liberaler waren als die entsprechenden Tabellenangaben. Diesen Methoden wurde erst durch die (weiter unten noch zu skizzierenden) Möglichkeiten der modernen Unterhaltungselektronik zum Erfolg verholfen. Darüber hinaus bot sich mit leistungsfähigen Halbleiter-Speichern die Möglichkeit, den kompletten Tauchgang zu dokumentieren. Jenseits des von der Inertgasnarkose umnebelten Taucherhirnes gab es nun die Chance, Tiefen und Zeiten für alle Phasen des Tauchganges objektiv festzuhalten und der Nachwelt bzw. auch „top side“ oder dem allfälligen Druckkammer-Behandlungspersonal zugänglich zu machen.

Allerdings waren die Tauchcomputer der ersten kommerziellen Wellen nicht nur Spott, z.B. über mangelnde Betriebszuverlässigkeit oder unbegreiflich hohen Batteriekonsum, ausgesetzt, sondern auch den kontroversen Diskussionen über Tauchsicherheit. Bei diesen Diskussionen spielte es keine Rolle, ob. z.B. die Nullzeiten relativ lang oder sehr kurz waren. Im ersten Fall wurden Nullzeiten der USN verwendet, die prinzipiell nicht für die Sporttaucher-Klientel gedacht waren (und auch bei der neueren USN-Tabelle von 2008 immer noch nicht für Sporttaucher gedacht sind!). Im anderen Fall wurden Begriffe wie „Duschcomputer“ bemüht und der vermeintliche Sicherheitsgewinn gegenüber der USN in Frage gestellt.

Den stellenweise stark subjektiven Auslassungen über zunehmende Tauchunfälle durch Tauchcomputerbenutzung in den Anfangsphasen der 80er, oder über „Mikro-Blasen“ und die Unzuverlässigkeit der Geräte, spezielle Verfahren wie „reversed profiles“ (= Wiederholungstauchgang tiefer als der vorhergehende) oder die Jo-Jo-Profile der Fischfarmtaucherei abzubilden, zu Beginn der 90er, wollen wir hier nicht mehr folgen, sondern lediglich den Status quo festhalten: der Tauchcomputer ist ein Standardteil einer durchschnittlichen Ausrüstung geworden, etwa wie Maske oder Flossen. Die traditionellen und großen Organisationen der Sporttaucherausbildung beginnen (oder haben teilweise bereits durchgeführt), den Umgang mit Computern in die Curricula aufzunehmen, einhergehend mit der Vernachlässigung der Themen rund um die Tauchtabellen.



Quelle: Axel Dornis

Abb. III – 2.12.1/1: Der Verfasser im Bodensee mit den Tauchcomputern der jeweiligen Epoche

Die sich langsam verbreitende Erkenntnis, dass es eben doch den „undeserved hit“ gibt, diejenige Dekompressionskrankheit, die sich der Taucher eben unverdient, d.h. ohne einen Regelverstoß gegen Dekompressionsvorschriften, zugezogen hat, und dass diese nicht direkt mit der Unfähigkeit des Computerbenutzers, der falschen Benutzung oder den unzureichenden Koeffizienten des Computers selber korreliert, hat sicherlich auch zur Glättung der Wogen beigetragen. Statt modischer Leistungsmerkmale oder längerer Nullzeiten sind nun andere Dinge in den Fokus der Konsumenten gerückt. Dinge wie PFO³⁾, Alter und Fitness, Umgebungstemperatur und körperliche Aktivität, und vor allem: die Hydrierung (Hydratation) und weitere Shunts spielen wesentlich wichtigere Rollen als bisher angenommen. Diese Rollen sind aber Stand heute auf Grund des mangelnden Datenmaterials nur unzureichend quantifiziert und damit auch im Tauchcomputer nur ansatzweise, und oft auch nur proprietär, d.h. kryptisch für den Benutzer, implementiert.

Zwischen beiden Bildern (Abb. III – 2.12.1/1) liegen nicht nur ca. ein Vierteljahrhundert Taucherfahrung und mehrere tausend Tauchgänge, sondern vor allem der persönlich miterlebte Beginn der kommerziellen Entwicklung und Vermarktung von Tauchcomputern in der Mitte der 80er des letzten Jahrtausends und der aktuelle Status im Jahre 2011.

³⁾ Persistierendes Foramen Ovale, eine dauernde Verbindung der beiden Vorhöfe des Herzens

III – 2.12.1

Der Beginn dieser Entwicklung wird, zumindest gilt dies für den deutschsprachigen europäischen Wirtschaftsraum, vom legendären Deco-Brain der Schweizer Firma Divetronic markiert (linkes Bild). Am anderen Ende des Spektrums sehen wir mischgasfähige Computer, nur unwesentlich größer als eine Taucher-Uhr mit Betriebszeiten, die in die Jahre gehen (rechtes Bild; am rechten Arm: Cochran EMC-20H, am linken Arm: VR3).

Bedingt durch die zunehmende Miniaturisierung der elektronischen Bauteile, die ständig steigende Leistungsfähigkeit und den sinkenden Energieverbrauch sind den Wünschen der Taucher kaum Grenzen gesetzt. Hierbei folgt die Tauchindustrie den Gesetzen der aktuellen Unterhaltungselektronik, allerdings mit dem Vorteil der langsameren Innovationszyklen (= stabilere Modellreihen), gepaart mit dem Nachteil der im Vergleich zur Verbreitung von Smartphones oder Tablett-PCs, geradezu nicht-wahrnehmbaren Stückzahlen: die Menge der Produkte mit einem angeknabberten Apfel im Logo von nur einem Quartal im Herbst 2011 ist immer noch um eine Zehnerpotenz größer als die Summe sämtlicher bisher produzierten Tauchcomputer aller Hersteller zusammengekommen!

Heute (2012) hat der Taucher, egal ob Hobby- oder Sport-, gewerblich oder militärisch motivierter Einsatz, oder Forschungstaucher, die Qual der Wahl. Bei kontinuierlich sinkenden Preisen für Endverbraucher-Elektronik steigt die Zahl der Angebote. Mischgase, Sauerstoff- oder auch Kohlendioxid-Sensoren, farbige oder auch Head Up-Displays, elektronischer Kompass, Unterwasser-Kommunikation und Dokumentation auf dem PC und die Personalisierung inklusive Notfalldaten (z.B. Blutgruppe oder Allergien und Medikationen) sowie eine autonome, solarbetriebene Spannungsversorgung sind nur einige dieser Wünsche, die relativ problemlos und kostengünstig auf portabler, wasserdichter Hardware realisiert werden konnten.

Mit zunehmender Akzeptanz des Internets in den privaten Haushalten und der immer einfacher werdenden elektronischen Kommunikation wird auch immer schneller vorhandenes Wissen (allerdings auch Unwissen) verbreitet. Dies und die zunehmende Leistungsfähigkeit medizinischer Diagnosegeräte hatte schwerwiegende Einflüsse auf die Weiterentwicklung der Computer zum Tauchen, also auch auf die darunterliegenden Methoden, Rechen-Algorithmen und Dekompressions-Modelle.

Sicherlich spielen mobile, vom Taucher zu tragende Tauchcomputer in einigen Bereichen traditionell eher eine untergeordnete Rolle: z.B. beim Sättigungstauchen oder den Arbeitsaufenthalten in einem Caisson oder einem Tunnelbauwerk.

Nichtsdestoweniger sind durch die stürmische Entwicklung der kommerziellen Halbleiterprodukte den künftigen Leistungsmerkmalen von Tauchcomputern kaum Grenzen gesetzt. So sind Sensoren denkbar, die bereits mit dem Tauchanzug vernetzt sind und nicht mehr von Hand mit dem Körper des Tauchers nachverkabelt werden müssen. Ähnlich z.B. den flexiblen RF-ID Tags⁴⁾ könnten die Temperatur engmaschig an der Körperperipherie oder auch die Gehirnströme erfasst werden. Der Verlauf der peripheren Temperatur ist einer der Bausteine in Richtung individueller Dekompression. Die Kenntnis der Gehirnströme hätte den Charme einer halbwegs quantitativen Ermittlung der Inertgasnarkose bzw. der Veränderungen, die einem Sauerstoff-Krampfanfall vor-

⁴⁾ Radio Frequency Identification Tags, kleine Schildchen zur Daten-Erkennung mittels Radiowellen

weg gehen. Mit diesen Messwerten könnten dann über Aktoren aktive Eingriffe in das Tauchgeschehen gesteuert werden. Durch die globale Präsenz von drahtlosen Kommunikationsnetzen und deren fast schon zwanghaften Folgeanwendungen der „Social Media“ könnte, spätestens wenn der Tauchcomputer wieder an der Oberfläche ist, der Daten- und Meinungsaustausch stattfinden. Da die Reichweite von UMTS-⁵⁾, LTE-⁶⁾ oder auch satellitengestützten Netzen virtuell unbegrenzt ist, könnten auch anhand von Positionsdaten die sogenannten „location based services“ zur Lokalisierung des Tauchers im Notfall oder auch zu Dokumentationszwecken ausgenutzt werden. Beim Drücken eines „Notfall-Knopfes“ könnte die Bereitschaftsnummer der nächsten Druckkammer erscheinen. Wird das Gespräch getätigt, könnten bereits im Hintergrund die Daten des aktuellen Tauchganges übertragen werden, um so eine rasche und effiziente Behandlung vorzubereiten.

Allerdings ist bei diesen farbigen Aussichten in die schöne neue Tauchcomputer-Welt ein Wort der Mahnung angebracht. Nach dem Motto: „Aha: eine digitale Anzeige! Und auch noch mit einer Nachkommastelle: also, dann muss das ja vollkommen korrekt sein!“ hat sich, vor allem bei Computer-Erstbenutzern, eine gewisse Technik- und Dekompressionsmodell-Gläubigkeit gezeigt. Die oben beschriebenen Paradigmen-Änderungen bei den Ausbildungsorganisationen sollten unter diesem Aspekt noch etwas deutlicher ausfallen.

⁵⁾ Universal Mobile Telecommunications System, Mobilfunknetz der 3. Generation

⁶⁾ Long Term Evolution, Breitband-Mobilfunknetz der 3. bis 4. Generation

III – 2.12.1

III – 2.12.1.1

Zweck

Aus der Sicht eines Messtechnikers sind der Zweck und die Aufgaben eines Tauchcomputers trivial und prägnant mit den „drei D“ komplett umrissen:

- Digitalisierung
- Darstellung
- Dokumentation

Soll heißen: die gemessenen (analogen) Werte, z.B. eines Umgebungsdruckes, werden in elektronisch einfach zu verarbeitende Signale umgewandelt (digitalisiert), im Display dargestellt und zum Zwecke der späteren Dokumentation oder Weiterverarbeitung für einen Dekompressionsalgorithmus gespeichert.

Alles andere, inkl. die Interpretation dieser Werte und die Dekompressionsprognosen sind lediglich Folgeprodukte der gemessenen Umgebungsvariablen. Das Wort „Algorithmus“ bedeutet in diesem Zusammenhang einfach eine „Rechenvorschrift“: wann soll was mit den Zahlen der Messwerte gemacht werden. Der Namensgeber war der persische Mathematiker Muhammad ibn Musa al-Khwarizmi, der von ca. 780–850 gelebt hat. Die latinisierte Form seines Familiennamens lebt nun in ähnlicher Form in vielen Sprachen rund um den Globus weiter. (Historische Randbemerkung: Eines seiner berühmten Bücher führte im Titel u.a. die Worte „al Jabr“, hieraus wurde durch die üblichen Lautverschiebungen für uns Europäer die „Algebra“.¹⁾

Etwas detaillierter beschrieben gilt eigentlich für die meisten Tauchcomputer Folgendes: die elektronische Erfassung und Aufbereitung der Messwerte (Druck → Tauchtiefe, Zeit → Tauchzeit, Temperatur) ist die Grundlage zur Information über den aktuellen Status des Tauchganges: verstrichene Zeit, gegenwärtige Tiefe, Aufstiegsgeschwindigkeit, Gewässer-Temperatur. Damit kann die Berechnung der Dekompressionspflichten erfolgen und hernach die gespeicherten Werte zur Dokumentation des kompletten Tauchganges für berufliche, forensische oder auch hobbymäßige Zwecke.

Die Temperaturwerte dienen nicht nur zur Information über den Komfortwert der Umgebung, sondern hauptsächlich zur Temperatur-Kompensation der gemessenen Druckwerte (Umgebungsdruck, Flaschendruck) der Drucksensoren und, bei neueren Dekompressionsalgorithmen auch zur mathematischen Veränderung der Kompartiment-Perfusion: durch Kälte kann sich die Durchblutung der Körperperipherie verringern. Diese herabgesetzte Perfusion kann man mittels Erhöhung der Halbwertszeiten ausgewählter Kompartimente (Haut, Muskeln) simulieren.

Zur Information des Tauchers werden die gespeicherten Werte so verändert, dass sie in einem Display lesbare und verständliche Werte darstellen. Parallel bzw. im Hintergrund der Darstellung dienen die gemessenen Werte als Basis für die Berechnungen, den bereits erwähnten „Dekompressions-Algorithmus“. Je nach Güte desselben und der Qualität der hierzu erforderlichen Software liefert die Berechnung eine Deko-Prognose oder auch eine Rest-Nullzeit, die verbleibende Tauchzeit bei angenommenem Atemgasverbrauch und weitere nützliche Informationen, um den Tauchgang sicher und erfolgreich zu beenden.

Ebenso werden die Daten für weitere Berechnungen gespeichert, um zu einem späteren Zeitpunkt, z.B. während einer Oberflächenpause, als Logbuch abgerufen werden zu können. Der Tauchgang wird üblicherweise in kleinen Zeitschritten protokolliert: z.B. werden im Abstand von zwei Sekunden die aktuelle Tiefe, die Tiefenänderung (Ab- oder Aufstieg), die Wassertemperatur und die berechneten Kompartimentsättigungen in einem flüchtigen Speicherort (RAM) aufgezeichnet. (→ *Kap. III – 2.12.3 Aufbau*).

Je nach Computermodell können noch weitere Informationen parallel mitgespeichert werden: Druck und Druckabfall in den Atemgasflaschen, Richtungsänderungen, aktuelle Warnhinweise (Verstöße gegen eine vordefinierte Aufstiegsgeschwindigkeit, Verlassen des Dekompressionskorridors u.Ä.), erforderliche Gaswechsel in Abhängigkeit von einer vorgegebenen MOD („Maximum Operation Depth“).

Die Aufzeichnungsdichte (Frequenz der Datenspeicherung; die Häufigkeit der Messungen) sowie die Art der gespeicherten Werte sind von der Leistungsfähigkeit der Tauchcomputer-Hardware abhängig. Das Alter sowie der Preis spielen hierbei die entscheidenden Rollen. Neue, aktuelle Hardware ist i.d.R. teurer, aber auch leistungsfähiger. Oft besitzt ein neuerer Tauchcomputer nicht nur mehr Leistungsmerkmale (Features), sondern manches Mal auch den Charme der kleineren Baugröße und darüber hinaus eines geringeren Energieverbrauchs – sprich der längeren Laufzeit mit einer Batterie oder einem Akku gegenüber älteren Modellen. Dem üblichen Preisverfall bei elektronischen Standard-Bauteilen, hervorgerufen durch den global steigenden Bedarf und die hieraus resultierende Massenproduktion, begegnen Tauchcomputerhersteller einfach mit einer neuen Baureihe ihrer Produkte. Die getätigten Aufwände in die Softwareentwicklung gehen hierbei nicht verloren: der einmal entwickelte und getestete Maschinencode kann üblicherweise auch in aktuellen Prozessorgenerationen, zumindest mit nur marginalen Anpassungen, wiederverwendet werden.

Die gespeicherten Werte können üblicherweise auf einen PC mit installierter Logbuch- oder Desktop-Deco-Software übertragen und dort weiterverarbeitet werden. Diese Speicherung zur Übertragung auf den PC zum Zwecke der Dokumentation ist nicht nur für den Urlaubstaucher als Erinnerung oder als relativ unbestechliches Logbuch gedacht, sondern in zunehmendem Maße für forensische Analysen, wenn der Taucher nicht mehr auskunftsfähig ist sowie zur Unterstützung für den behandelnden Druckkammerarzt bei der Durchführung der allfälligen Druckkammer-Behandlung nach einer Dekompressionskrankheit. Durch Einfügen elektronischer Lesezeichen auf Knopfdruck unter Wasser können auch berufliche Tauchgänge, z.B. bei der Unterwasser-Inspektion von Bauwerken oder Schiffen, minutiös und aussagekräftig für den Auftraggeber gestaltet werden.

III – 2.12.1.2

Tabelle (Rechteck-Profile) versus Multi-Level

Die sogenannten „Rechteckprofile“ oder auch „Kasten-Profile“ waren in den Anfängen der (Helm-)Taucherei einfach historisch bedingt durch die Aufgaben und die erhältliche Ausrüstung. Der oberflächenversorgte Helmtaucher verbrachte die gesamte Grundzeit auf einer relativ konstanten Arbeitstiefe. Die hierzu gehörigen Austausch Tabellen wurden dementsprechend auch als „C & R“-Tabellen (Construction & Repair Tabelle von 1937 der United States Navy, engl. für Bau und Reparatur) bezeichnet.²⁾

III – 2.12.1

Aber auch heute noch verlangt der Einsatz im Off-shore-Bereich von Ölbohrinseln oder Windkraftanlagen den dauernden Aufenthalt auf der Arbeitstiefe. Für die allfälligen Tiefenexkursionen (Abweichungen von der Arbeitstiefe in größere und kleinere Tiefen) gibt es vorberechnete sogenannte „Exkursions-Tabellen“.

Kastenprofile ergaben sich auch historisch aus der manuellen Berechnung der Tauchta-bellen. Anhand von Logarithmen-Tafeln musste der Anteil der exponentiellen Sättigung für jedes Kompartiment abgelesen werden. Ein einmaliger Drucksprung vom Oberflä-chendruck auf den Arbeitsdruck ist daher einfacher zu berechnen als die sogenannten „Multi Level Profile“ von modernen Sport- und Forschungstauchern.

Hierbei kann ein völlig beliebiges Tiefenprofil getaucht werden, da der Tauchcomputer die Druckänderungen üblicherweise im 2-Sekunden-Takt erfasst. Das Multi Level Profil wird somit mathematisch in sehr viele, kurze Kastenprofile zerlegt. Die bisherige Sätti-gung dient somit als Ausgangspunkt für die Berechnung des aktuellen Status.

III – 2.12.1.3

Ein Tauchgang versus Wiederholungstauchgänge

Ebenso wie die Kastenprofile war, zumindest zu Beginn der kommerziellen und mili-tärischen Taucherei, auch die Anzahl der Tauchgänge mit regelmäßig 1 pro Tag üblich. Der Wunsch nach Wiederholungstauchgängen, d.h. mehreren Tauchgängen innerhalb einer 12-h-Frist, wurde erst mit der Verbesserung der Tauchausrüstung laut. Die Verbes-serungen umfassten das Gewicht, die elektrischen Kommunikationsmöglichkeiten, die thermische Isolierung, die Belüftung und damit die Vermeidung von CO₂-Anreicherung im Helm und auch den Ersatz der Handpumpen durch Kompressoren.

Sicherlich gab es auch zu Zeiten von JOHN SCOTT HALDANE bereits Vorschriften, wie mit seiner Tauchtafel weitere Tauchgänge zu berechnen waren. Die Vorschrift war rudi-mentär und bestand einfach aus der Addition der bereits vergangenen Grundzeiten. Das heißt, Grundzeit von Tauchgang 2 setzte sich aus der hierfür geplanten, tatsächlichen Grundzeit plus der bereits verstrichenen Grundzeit des ersten Tauchgangs zusammen. Mit dieser effektiven Grundzeit wurde dann die Dekompression aus der Tabelle ab-gelesen. Die Länge der Pause zwischen den Tauchgängen wurde somit nicht berücksich-tigt. Das Resultat waren dann eben etwas längliche Dekompressionsstopps.³⁾ (Histo-rische Bemerkung: Interessanterweise hat sich diese Vorschrift, trotz gegenteiliger Erkenntnisse der modernen Dekompressionsforschung, bis heute noch in einigen Tabel-lenwerken der Berufstaucherei erhalten [ganz analog zu der im April 2001 abgelösten VBG 39 (Unfallverhütungsvorschrift Taucherarbeiten) sowie der Marinedienst-vorschrift MDv 450/1])⁴⁾.

In den modernen Dekompressionstheorien hingegen wird die Entsättigung in der Oberflächenpause berücksichtigt. In neuen Tabellenwerken finden sich separate Tabellen für die Oberflächenpause, der Tauchcomputer macht dies automatisch. Den aktuellen Stand der berechneten Entsättigung kann der Tauchcomputerbenutzer kontrollieren.

Im sogenannten Oberflächenmodus kann üblicherweise eine Nullzeittabelle mit rollie-renden Tiefen (von ca. 9–40 m) des nächsten Tauchgangs abgerufen werden. Im

„Planungs-“ oder „Simulations-Modus“ werden ebenfalls die aktuellen Kompartiment-Sättigungen dargestellt. Diese Sättigungen nehmen während der Oberflächenpause ab. Je länger die Pause, desto größer die Entsättigung. Diese Modi gestatten die Planung zukünftiger Tauchgänge sowie die dazugehörige Dekompressionsprognose. Durch manuelle Eingaben können oft auch Auf- und Abstiegseschwindigkeiten verändert werden; der Taucher kann damit ausgiebig und gefahrlos im Trockenen die Anzeigen im Tauchcomputer-Display studieren.

III – 2.12.1.4

No-Decompression-Limits (NDL) versus Dekompressions-Tauchgang

Bequemerweise unterscheidet die traditionelle Taucherei zwischen Tauchgängen, bei denen nach Verstreichen der geplanten Grundzeit direkt zur Oberfläche aufgestiegen werden darf [unter Einhaltung einer vorgegebenen, maximalen Aufstiegsgeschwindigkeit; in der Regel zwischen 9 bis ca. 18 m/min (= 60 feet/min = 1 foot/sec)] und denen, wo dies nicht der Fall ist.

Bei den ersteren hat sich der Begriff „Nullzeit-Tauchgänge“ eingebürgert, die letzteren werden als Dekompressions-Tauchgänge bezeichnet. Es müssen auf dem Weg zur Oberfläche in bestimmten Tiefen Aufstiegsphasen eingehalten werden. Die folgende Verfahrensweise hat sich hier bewährt: die Stopps sollen alle 10 feet (ca. alle 3 m) stattfinden. Auch dieses Verfahren geht auf den „Vater aller Tauchtabellen“ zurück: JOHN SCOTT HALDANE. Die ersten Tauchtabellen der Welt mit Stufendekompression wurden von ihm und zwei seiner Mitstreiter zu Beginn des 20. Jahrhunderts veröffentlicht.

Über die Länge der Nullzeit in einer bestimmten Tiefe oder über die Anzahl und Dauer der allfälligen Deko-Stopps lässt sich trefflich streiten. Unterschiedliche Dekompressionsalgorithmen oder -modelle liefern hierbei nicht nur unterschiedliche Zeitangaben, sondern manches Mal auch divergierende Vorgehensweisen (→ *Tab. III – 2.12.7/1*).

Aus historischer Sicht kann Folgendes konstatiert werden: die Dauer der Nullzeiten hat sich im Laufe der Jahre leicht verkürzt, die Anzahl und Länge der Deko-Stopps hingegen tendenziell vergrößert. Hierzu ein Beispiel über Nullzeiten (NDL) mit Luft:

C & R, USN Standard Air, 1937;100 feet (= ca. 30,48 m) NDL 25 min

DECO 2000: NDL 30 m 15 min

Allerdings soll nicht verschwiegen werden, dass schon alleine durch die Tabellenformate in definierten Tiefen- und Zeitabständen Sicherheitsmargen durch Aufrunden entstehen. Diese Sicherheitsmarge hat ein wie auch immer gearteter Tauchcomputer nicht mehr! Sicherheitsmargen müssen hierbei im Nachhinein, von Hand, über Konservatismus- oder Fitness- und Alters-Faktoren einprogrammiert bzw. beim Auftauchen vom Taucher selber realisiert werden.

III – 2.12.1

III – 2.12.1.5

Luft versus Mischgase (Nitrox, Trimix)

Neuere Tauchcomputer bieten die Möglichkeit der Eingabe des Sauerstoffanteils für Nitrox/EAN-Gemische und weiterhin des Heliumanteils für Trimixgase. Die Dekompressionsphasen werden in Art und Dauer von der Größe des Sauerstoffanteils als auch von den verwendeten Inertgasen bestimmt.

NNI/NNII: NOAA Nitrox I/NOAA Nitrox II

Bei den beliebten und auch standardisierten Nitrox/EAN-Gemischen mit 32 und 36 Volumenprozent Sauerstoff werden die Nullzeiten gegenüber Pressluft verlängert, respektive die Deko-Stopps bei vergleichbaren Profilen verkürzt. Üblicherweise berechnet der Tauchcomputer auch die % ZNS sowie OTU Sauerstoffbelastungen, sobald der Sauerstoffanteil $fO_2 > 0,21$ % eingestellt wird.

„% ZNS“ bedeutet die prozentuale Dosis der Sauerstoffbelastung für das ZNS, das Zentralnervensystem; diese Sauerstoffbelastung hat PAUL BERT an Tieren erforscht. Die Symptome heißen deshalb auch „Paul Bert-Effekt“. Von der NOAA und der USN stammen die hierfür vereinbarten Tabellen für die „Sauerstoff-Uhr“. Dabei werden für den pO_2 zwischen 0,5 und 1,6 atm die Zeitbereiche definiert, bei denen die 100 % ZNS-Dosis erreicht ist. Beispiel: Bei einem $pO_2 = 1,6$ atm sind nach 45 min 100 % erreicht.^{a)}

„OTU“ bedeutet: „Oxygen Tolerance Unit“ und ist eine Einheit der Ganzkörpersauerstoffbelastung, oft auch pulmonale Sauerstoffschädigung genannt (s.a. Kap. V – 2.10).

Ebenfalls als Standard hat sich die Verringerung der % ZNS-Dosis während der Oberflächenpause unter Luftatmung durchgesetzt. Diese Verringerung wird mit einer hypothetischen Halbwertszeit von 90 min berechnet.

Beispiel: % ZNS = 30 % am Ende des Tauchganges, nach einer Oberflächenpause von 90 min ist diese Dosis auf 15 % gesunken. Auch dieses berechnet ein Tauchcomputer während der Oberflächenpausen.

Für Wiederholungstauchgänge werden die aktuellen Dosen summiert und mit den maximal möglichen/erlaubten/sinnvollen 100 % Tabellen der NOAA verglichen. Die Summation bzw. lineare Extrapolation von Zwischendosen ist die übliche Methode, welche in den Nitrox-Kursen oder auch in den Kursen für Mischgas- und technisches Tauchen gelehrt wird.

Allerdings sei hier ein Wort der Warnung bezüglich dieser üblichen Extrapolationsmethoden angebracht! Vom Erfinder der REPEX-Methoden, R.W. HAMILTON, stammt die Feststellung:^{5) 6)}

„There is no experimental basis on this!“

a) Werte nicht in bar!

Soll sagen: Es gibt keine gesicherten Erkenntnisse, ob dies tatsächlich auch so stimmt! Im Klartext, die Anzahl der hierfür dokumentierten und nachprüfbaren Tauchgänge ist bis heute wesentlich zu gering.

Die OTU-Dosen sind eher für Kreislaufgerätetaucher bzw. bei Sättigungsaufenthalten im Habitat relevant, da die pulmonale Sauerstoffbelastung ihre diversen Wirkungen erst im mehrstündigen Zeitbereich entfaltet.

Sind im Atemgas neben O₂ und N₂ auch noch He-Anteile zu finden, handelt es sich um Trimix, ein Gemisch aus 3 (= Tri) Komponenten. Bei vergleichbaren Inertgasdosen bzw. Tauchprofilen findet die Dekompression mit Trimix in Relation zu den Luft/Nitrox-Stops eher tiefer statt und kann auch etwas länger andauern.

Der Vorteil der höheren Diffusionsgeschwindigkeit der kleineren He-Atome sowie der veränderten Fett- und Wasserlöslichkeit gegenüber den N₂-Molekülen macht sich erst bei längeren Tauchgängen mit Heliox-Gemischen bemerkbar. Heliox ist ein (binäres) Atemgas nur aus Helium und O₂.

III – 2.12.1.6

Zusätzliche Berechnungen und weitere Leistungsmerkmale

Die mit dem noch vorhandenen Atemgasvorrat mögliche Tauchzeit auf der aktuellen Tiefe wird als ATR = Air Time Remaining bezeichnet. Hierfür misst der Drucksensor an der ersten Stufe den Druckabfall in den Atemgasflaschen. Aus den aufgezeichneten Werten wird über einen gewissen Zeitraum gemittelt. Die allfällige prognostizierte Austauschphase wird in der angezeigten ATR ebenfalls berücksichtigt.

Gleichzeitig kann über die Größe des Gasverbrauchs bzw. über die gemessene Pulsrate (Herzfrequenz) ein Rückschluss auf die körperliche Belastung gezogen werden. Da bei erhöhter körperlicher Belastung die Durchblutung und damit auch die Inertgassättigung ansteigt, kann über die Erhöhung der Halbwertszeiten ausgewählter Kompartimente im Bereich Muskeln und Haut die erhöhte Sättigung simuliert werden. Mit dieser erhöhten Sättigung erhöhen sich dann natürlich die Dekompressionspflichten.

Die Verringerung des Luftdrucks beim Bergseetauchen oder auch in der Druckkabine eines kommerziellen Flugzeuges während des Fliegens kann vom Tauchcomputer gemessen werden und in der Anfangssättigung bzw. der Entsättigungszeit berücksichtigt werden. Bei der Berechnung der Flugverbotszeit (time-to-flight) wird in der Regel ein Kabinendruck von 0,58 bar unterstellt.

Weitere Aufgaben respektive moderne Leistungsmerkmale wie UW-Navigation und UW-Kommunikation werden im *Kapitel III – 2.12.5* kurz gestreift. Die Berücksichtigung der Umgebungstemperatur in neuen Dekompressionsalgorithmen wurde am Anfang dieses Kapitels kurz skizziert; ebenso die Schätzung der verschiedenen Ox-Tox-Dosen.

Üblicherweise haben Tauchcomputer weitere Funktionen für die Oberflächenpause (rollierende Nullzeittabellen) bzw. zur Tauchgangsplanung und -simulation vor den Tauchgängen. Für die Berechnungen während der Oberflächenpause werden die Kom-

III – 2.12.1

partmentssättigungen der vorausgegangenen Tauchgänge berücksichtigt; ebenso die Entsättigung während den normobaren Perioden.

III – 2.12.1.7

Kreislaufgeräte

Auch für halb und ganz geschlossene Rebreather (Kreislaufgeräte) werden zum einen ab Werk elektronische Mess- und Regelrechner mitgeliefert (Buddy Inspiration, MK XVI etc.), zum anderen gibt es Anschlussmöglichkeiten für Sauerstoffsensoren am Tauchcomputer. Dabei werden üblicherweise drei O₂-Sensoren benutzt, die Auswahl eines halbwegs korrekten pO₂ geschieht über einen sogenannten Wahlalgorithmus; entscheidend sind hierbei die Betriebszeit des Sensors, die Häufigkeit und die Abweichung der Messwerte zueinander.

Der ausgewählte pO₂ wird dann benutzt, um z.B. über Magnetventile die Sauerstoffzufuhr zu beeinflussen, um so den gewünschten pO₂ im Atemgaskreislauf herzustellen. Der gewünschte pO₂ wird vor dem Tauchgang eingestellt. Es handelt sich üblicherweise um die beiden konstanten Sauerstoffpartialdrücke (Set Points: high & low) für Grund- und Austauschphasen.

Relativ aktuelle Leistungsmerkmale sind die Messung von pCO₂ (Kohlendioxidpartialdruck) sowie die Feuchtigkeit und Temperatur des Atemgases. Beides beeinflusst sowohl die Standzeit des Scrubbers (Wirkzeit der CO₂-Patrone) als auch die Genauigkeit der O₂-Sensoren.

Aus dem gemessenen Umgebungsdruck, dem eingestellten Mischgas sowie dem ausgewählten pO₂ wird der aktuelle Inertgasanteil im Kreislauf berechnet und damit dann die aktuellen Kompartimentssättigungen.

Quellen

- 1) MUHAMMAD IBN MUSA AL-KHWARIZMI. Über die Rechnung mit indischen Zahlzeichen, ca. 825
- 2) United States Navy Standard Air Decompression Tables, 1937
- 3) BOYCOTT, A.E., DAMANT, G.C.C., HALDANE, J.S. The Prevention of Compressed Air Illness, Journal of Hygiene, Cambridge, Volume 8, (1908), pp. 342–443
- 4) DRÄGER: Austauschabelle für das Tauchen mit Pressluftgeräten, Tabelle 210, 10. Ausgabe Dezember 1984, Drägerwerk AG Lübeck. Hinweis von Tobias Dräger (damals Productmanager Dräger Sicherheitstechnik, private Mitteilung 11.01.2001 per E-Mail): „letzte Überarbeitung 1970“
- 5) NATIONAL UNDERSEA RESEARCH PROGRAM Technical Report 88-1A, REPEX: Development of Repetitive Excursions, Surfacing Techniques and Oxygen Procedures for Habitat Diving. R.W. HAMILTON, D.J. KENYON, R.E. PETERSON, G.J. BUTLER, D.M. BEERS; May 1988
- 6) R.W. BILL HAMILTON „There is no experimental basis on this!“ in: 49th UHMS workshop, 2001, p. 70

III – 2.12.2

Historie

Auch für dieses Kapitel gilt, vom Grundsatz her, die ähnliche Einschränkung wie für das Kapitel III – 2.12.5: wird ein Gerät oder eine Entwicklung hier nicht erläutert, bedeutet dies keinerlei Wertung.

Die „Tauch“-Computer der allerersten Generation waren kühlenschrank- bis zimmergroß: es handelte sich hierbei um Großrechner (Mainframes) oder auch kleinere, im Labor unmittelbar neben der Dekompressionskammer befindliche Prozessrechner. Damit wurden Tauchtabellen und spezielle Dekompressionspläne für Sättigungs-Tauchgänge berechnet. Von der Rechengeschwindigkeit her betrachtet waren diese Dinosaurier der EDV-Steinzeit nicht einmal in etwa so leistungsfähig wie heute ein kleines SmartPhone.

Der nächste Schritt brachte diese Geräte, in etwa auf Koffergröße verkleinert, aber trotzdem mit bereits gesteigerter Rechengeschwindigkeit in die Nähe des Tauchers: der oberflächenversorgte Helm-Taucher wurde mittels eines zweiten „Umbilicals“, dem sogenannten Pneumo-Fathometer (Luftschlauch zur Druckmessung) an einen stationären Tischrechner angeschlossen. Somit wurde zur Laufzeit die aktuelle Tiefe des Tauchers erfasst und direkt in den Dekompressionsalgorithmus des Tischrechners eingespeist. Der berechnete Dekompressionsplan wurde auf einem Vakuum-Röhren-Display zur Anzeige gebracht oder auf Endlospapier resp. auf einem X-Y-Flachbettplotter ausgedruckt. Der an der „top side“ (Wasseroberfläche) verantwortliche Tauch-Offizier konnte damit die Austauschphase kontrollieren. Beispiele hierfür waren in der Mitte der 70er Jahre: XDC-1 und XDC-2 von DCIEM & CTF, geeignet für Luft oder Heliox20 (→ *Abb. III – 2.12.2/1*).



*Quelle: USC Catalina Marine Science Center
Abb. III – 2.12.2/1: XDC-1 Decompression
Computer; DCIEM & CTF Systems, Inc.
British Columbia.*

Der in *Abb. III – 2.12.2/2-3* gezeigte Rechner ist heute (2013) noch in Betrieb in der genannten Dekompressions-Kammer. Man sieht das Front-Display und die Rückansicht mit den beiden Stromanschlüssen sowie den Luft-Schlauch an den Drucksensor (Pressure Input, 0–150 PSIA), geht also bis ca. 10,3 bar.

III – 2.12.2



Quelle: Marc Essertaize, Chief Operator, Hyperbaric Chamber Sacre Coeur Hospital, Montreal

Abb. III – 2.12.2/2: XDC-2 Decompression Computer (Vorderseite) DCIEM & CTF Systems, Inc. BC



Quelle: Marc Essertaize, Chief Operator, Hyperbaric Chamber Sacre Coeur Hospital, Montreal

Abb. III – 2.12.2/3: XDC-2 Decompression Computer (Rückseite) DCIEM & CTF Systems, Inc. BC

Bedingt durch die Emanzipation von der „top side“ war natürlich der Wunsch, dies auch für frei bewegliche „Scuba“-Taucher zu bewerkstelligen, relativ schnell entstanden und auch verständlich. Die Aufgabe bestand nun darin, den Dekompressionsplan auf einem kleinen, vom Taucher zu tragenden, wasserdichten Gerät zu implementieren. Den ersten Schritt in diese Richtung machte die sogenannte „analoge Simulation“ (im Gegensatz zur „digitalen“) einer algebraisch geschlossenen Lösung der Gewebesättigungsgleichung. Diese analoge Simulation wurde zum einen:

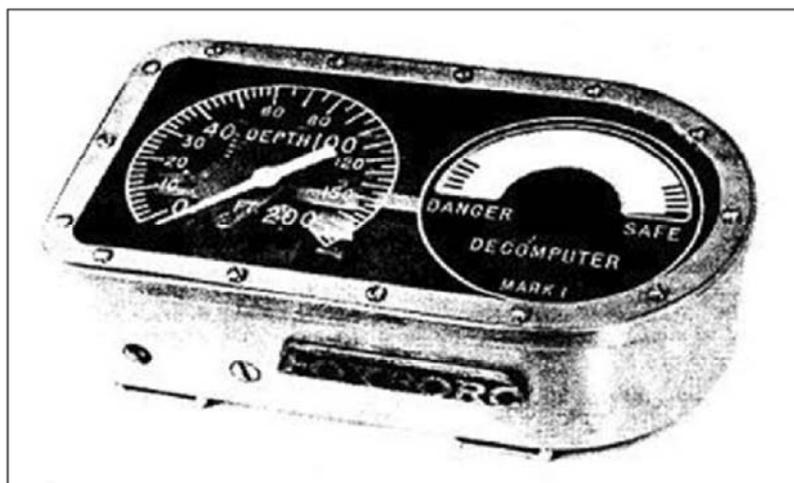
- pneumatisch durch die „Deco Meter“ realisiert,
- zum anderen elektrisch durch diskrete Schaltungen.

Diese Erkenntnisse reiften langsam: im Jahre 1953 begann das erste, vom ONR (Office of Naval Research) initiierte Projekt, um gemeinsam mit dem Scripps Institute of Oceanography die theoretischen Grundlagen zu schaffen [0]. Diese Grundlagen waren der Ausgangspunkt für die vielen Entwicklungen und die nachfolgenden Tests im Zeitraum von ca. 20 Jahren bei der NEDU (Naval Experimental Diving Unit, eine Einheit der USN) und beim DCIEM.

III – 2.12.2.1

Deco Meter

Die pneumatischen Deco Meter bestanden normalerweise aus einer beweglichen, abgeschlossenen Kunststoff-Membran, die den Inertgas-Vorrat darstellte, einer Bourdon-Röhre mit Zeigerwerk und Anzeige für das Ergebnis der Simulation, sowie einer genau berechneten Öffnung (Kapillare oder Sinter-Filter) zwischen Kunststoff-Membran und Bourdon-Röhre. Diese Öffnung simulierte ein einziges Kompartiment. Die Größe der Öffnung sowie der Strömungs-Widerstand der Kapillare zum Druckausgleich zwischen der Kunststoff-Membran und der Bourdon-Röhre symbolisierte die Halbwertszeit des Kompartiments.



Quelle: Mead Bradner

Abb. III – 2.12.2.1/1: Foxboro Decomputer Mark I

III – 2.12.2

Weiterentwicklungen dieser Geräte betrafen i.d.R. die Anzahl der Kapillaren sowie die asymmetrische Darstellung des Sättigungs- und Entsättigungsvorgangs über unterschiedliche Kapillar-Gruppen und somit auch über unterschiedliche Anzeigen.

Zeitlicher Überblick

1955	Foxboro Decomputer Mark I, Foxboro, MA; mit zwei Kammern, d.h. zwei simulierten Kompartimenten mit den Halbwertszeiten 40 und 75 min (→ Abb. III – 2.12.2.1/1)
1959	SOS D.C.P. (®) Automatic Decompression Meter, Carlo Alinari, SOS s.r.l. Torino: 1 Kompartiment mit einer geschätzten Halbwertszeit von 60 min bei ca. 1 Bar (→ Abb. III – 2.12.2.1/2)
1962	Mark II P, DCIEM: mit 4 parallelen Kompartimenten (→ Abb. III – 2.12.2.1/3)
1972	Mark V S, DCIEM: bis 200 feet, Luft; Mark VI S bis 300 feet und auch Heliox, jeweils 4 serielle Kompartimente
1973	Decompression Meter, General Electric, 4 Kompartimente (parallel) mit den Halbwertszeiten 24, 39, 90 und 144 min
1975	Decomputer, Farallon, 2 Kompartimente für N ₂ -Aufnahme und 2 für die Abgabe



Quelle: Verfasser
 Abb. III – 2.12.2.1/2: SOS Deco Meter



Quelle: DCIEM Report 65-RD-1
Abb. III – 2.12.2.1/3: DCIEM Mark II P

Abb. III – 2.12.2.1/3 zeigt den DCIEM Mark II P bei ersten nassen Feldtests im Juli 1963: der Umgebungsdruck wurde über die Ausatemluft des Lungenautomaten beaufschlagt [2]. II P bedeutet die zweite Serie von Geräten mit einer parallelen Anordnung der vier simulierten Kompartimente. Insgesamt wurden 614 Testtauchgänge dokumentiert, bei denen 9 Fälle von DCS Type II und 33 Fälle DCS Type I auftraten. Die darauffolgende dritte Reihe hieß dann III S. Das „S“ steht für die serielle Schaltung der vier Kompartimente, so wie es das Kidd-Stubbs Dekompressions-Modell vorschlug. Die erzielten Verbesserungen beim Modell-Wechsel von 4 parallelen auf 4 serielle Kompartimente waren signifikant [3].

Typ des Computers	Anzahl der Tauchgänge	„Bends“ DCS Type II	„Bends“ DCS Type I	Prozentuales Auftreten der Dekompressionskrankheit
Mark II P	523	6	20	5,0
Mark III P	478	2	5	1,5
Mark V S	852	–	4	0,5

Tabelle III – 2.12.2.1/1: DCS-Häufigkeit bei DCIEM Mark II -V

Von den angeführten 852 Testtauchgängen mit dem Mark V S waren 564 Wiederholungstauchgänge. Interessanterweise hatten die pneumatischen Deko-Meter bereits eine intrinsische Asymmetrie¹⁾ bei der Auf- und der Entsättigung: bedingt durch die Nicht-Linearität des Gasflusses von der Vorratskammer zur Anzeige-Mimik mit zunehmendem Druck wurde die Sättigung mit kürzeren Halbwertszeiten simuliert als die Entsättigung.

¹⁾ intrinsische Asymmetrie = durch den mechanischen Aufbau bedingte Asymmetrie

III – 2.12.2

Alle diese „Deco Meter“ waren an sich relativ unempfindlich, was den Wasser- und Temperatureinfluss betraf und benötigten auch keine störungsanfällige Stromversorgung. Sie waren aber, bedingt durch mechanische Toleranzen in der Fertigung der Bauteile, ziemlich ungenau und, im Vergleich der Ergebnisse untereinander, so gut wie nicht wiederholbar. Der zuverlässige Einsatz hätte eine genaue Kalibrierung der Geräte erfordert: eine ziemlich langwierige Aufgabe, die zudem vor jedem Tauchgang von entsprechend qualifiziertem Personal hätte durchgeführt werden müssen. Wenn auf die Vergleichbarkeit untereinander verzichtet wurde, waren diese Teile aber wartungsarm. Durch die relativ preiswerte Herstellung gab es in den 60er und bis hinein in die frühen 80er einen großen Markt für Sporttaucher. Da aber die dokumentierten Abweichungen zu den damals üblichen Druckluft- und Helioxtabellen relativ groß waren, war diesen Geräten im kommerziellen und militärischen Bereich kein durchschlagender Erfolg beschieden.

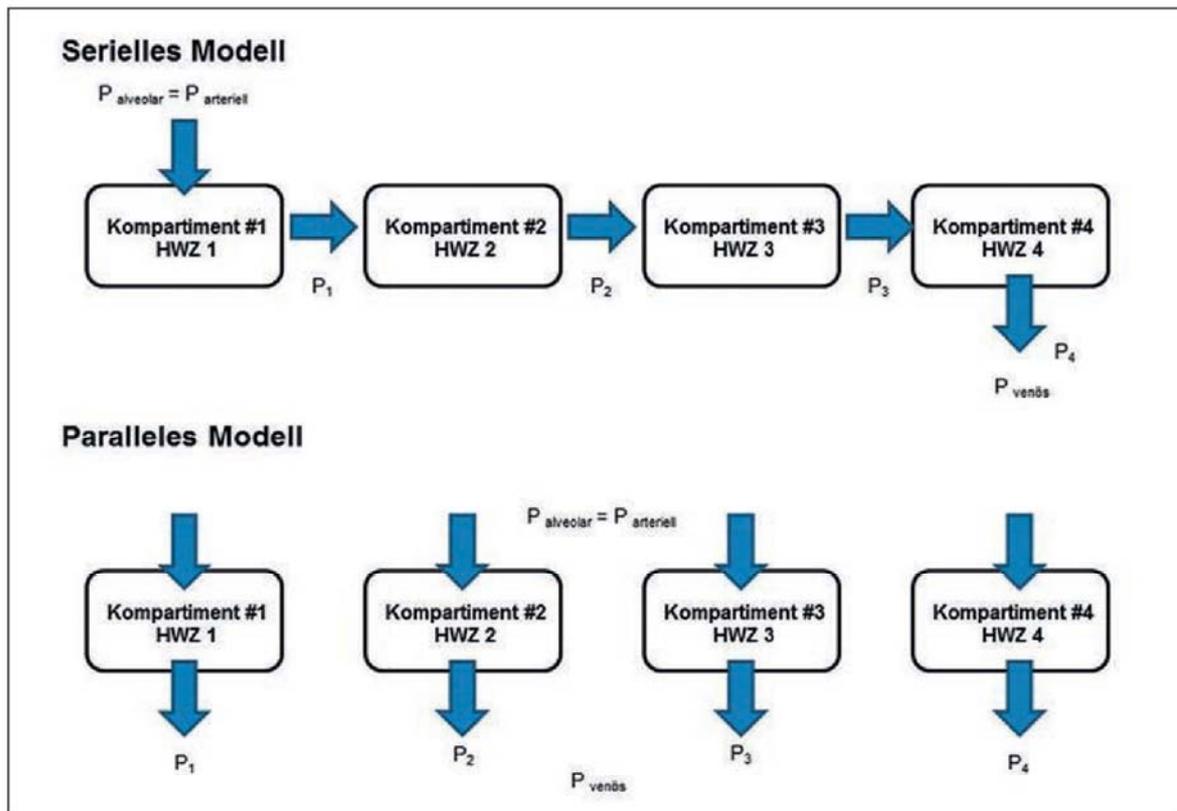
III – 2.12.2.2

Exkurs über Dekompressions-Modelle

Wenn versucht wird, die Inertgasaufnahme des menschlichen Körpers zu berechnen, so wird dies als „Dekompressions-Modell“ bezeichnet. Hiervon getrennt ist die technische Umsetzung zu sehen. Einerseits als *Simulation* in den hier beschriebenen Geräten oder andererseits als Rechenvorschrift, einem *Algorithmus* (→ Kap. III – 2.12.1, III – 2.12.4 und III – 2.12.7). Die üblichen Dekompressions-Modelle leben von gewissen Annahmen und Vereinfachungen: erst damit sind die Berechnungen mit endlichem Aufwand möglich. Die wesentlichen Vereinfachungen sind, hier nur auszugsweise:

- der Druckausgleich zwischen den Lungen und dem Blut erfolgt instantan, d.h. der alveolare Inertgaspartialdruck ist sofort mit dem arteriellen Inertgaspartialdruck gleichgesetzt
- der menschliche Körper wird in getrennte mathematische Modellgewebe, die sogenannten „Kompartimente“, unterteilt
- die Gas-Versorgung der Kompartimente geschieht durch den Blutstrom, die Perfusion
- Diffusion soll zunächst keine Rolle spielen
- die Inertgasaufnahme und die Inertgasabgabe dieser Kompartimente soll einfachen Formeln genügen, in der Regel einer Exponential-Funktion
- das Kennzeichen der Exponentialfunktion ist die sogenannte „Halbwertszeit“ (HWZ);
- diese soll sowohl für die Inertgasaufnahme wie auch für die -abgabe gelten
- Feinheiten, wie metabolische Gase (O_2 , CO_2 , aber auch H_2O) oder die Störung der Perfusion durch Inertgasblasen werden im ersten Schritt nicht berücksichtigt.

Die beiden hauptsächlichen Gruppen von Perfusions-Modellen unterscheiden sich in der prinzipiellen Anordnung der Kompartimente (→ Abb. III – 2.12.2.2/1): bei der seriellen Anordnung sind die Kompartimente hintereinander, in Serie geschaltet; bei der parallelen Anordnung erfolgt die Blut- und Gasversorgung auf parallele Art; unter den $P_{\langle i \rangle}$ sind die jeweiligen Inertgaspartialdrücke zu verstehen:



Quelle: Verfasser

Abb. III – 2.12.2.2/1: Dekompressions-Modelle – seriell versus parallel

Die prominentesten Vertreter der Gruppe „seriell“ sind das Kidd-Stubbs-Modell der DCIEM (s.u.) mit 4 Kompartimenten und einer gemeinsamen Halbwertszeit von ca. 21 min sowie das „Slab“-Modell vom RNPL (Royal Naval Physiological Laboratory, Slab = Platte, Scheibe).

In der Gruppe der „parallelen“ finden wird u.a. das Ur-Modell von J.S. Haldane (5 Kompartimente, HWZ von 5 bis 75 min), USN/Workman (9 Kompartimente mit HWZ von 5 bis 240 min), das PADI/DSAT/RDP-Modell (14 Kompartimente von 5 bis 480 min) und das Bühlmann-Hahn-Modell (16 Kompartimente, HWZ von 4 bis 635 min).

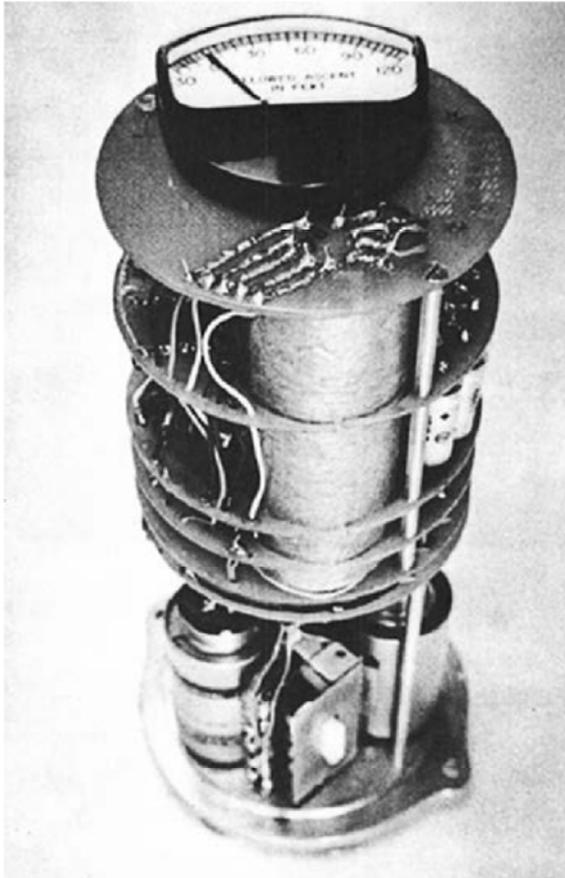
III – 2.12.2.3

Geräte der USN und der DCIEM²⁾

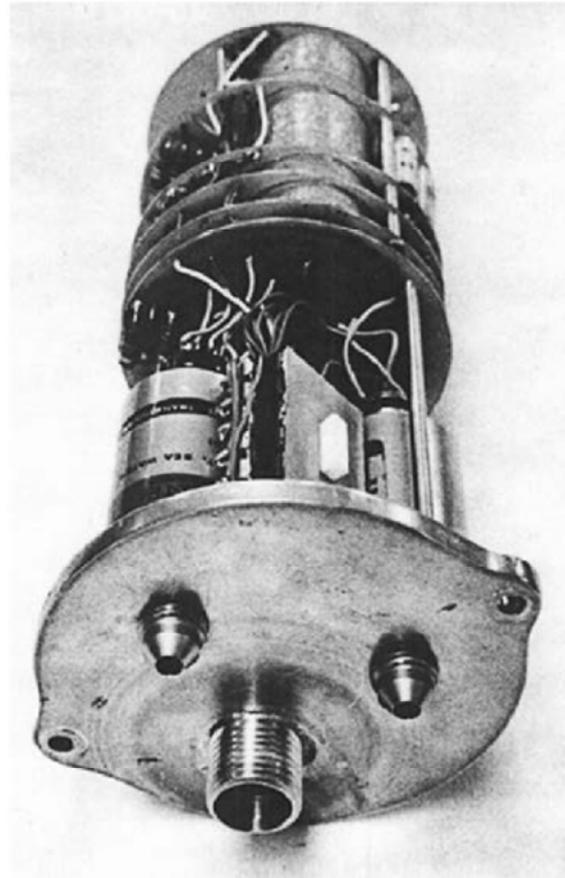
Die weitaus genauere und schnellere, aber auch wesentlich empfindlichere (und teurere) Simulation bestand aus diskreten elektronischen Bauteilen. Ein erstes dokumentiertes Gerät war der „Decompression-Meter“ (→ Abb. III – 2.12.2.3/1-2).

²⁾ USN = United States Navy; DCIEM = Defense and Civil Institute of Environmental Medicine (früher), heute: Defence R&D Canada (DRDC)

III – 2.12.2



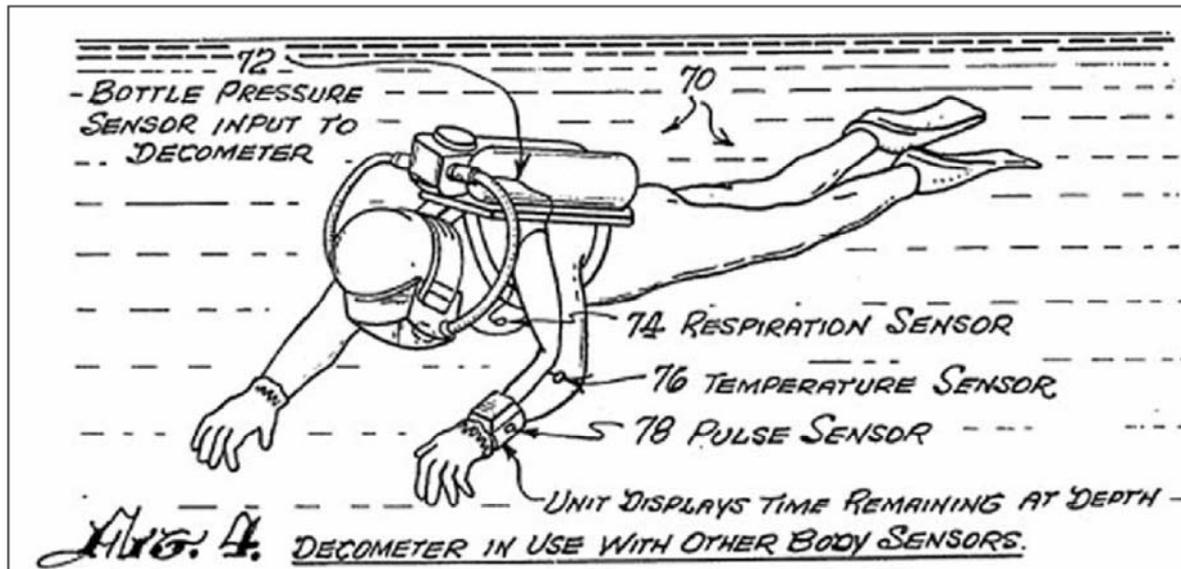
Quelle: Texas Research Associates (Tracor)
Abb. III – 2.12.2.3/1: Decompression-Meter



Quelle: Texas Research Associates (Tracor)
Abb. III – 2.12.2.3/2: Decompression-Meter

Es wartete mit einem 10-teiligen RC-Netzwerk auf: 10 in Serie geschaltete Widerstände mit parallelen Kondensatoren sollten den Gasdiffusions-Prozess simulieren [1]. Ein Drucksensor beaufschlagte die Spannungsversorgung des gesamten Netzwerks. Das komplette System wurde von zwei Batterien auf 90 °F (ca. 32 °C) gehalten. Das Display war ein Micro-Amperemeter [→ Abb. III – 2.12.2.3/1 (oben)], dessen Skala in fsw kalibriert war. Es sollte damit die „safe ascend depth“ zeigen; auf diese Tiefe sollte der Taucher sicher aufsteigen können. Da die Resultate stark temperaturabhängig waren, nicht reproduzierbar und je nach Tauchtiefe und Tauchzeit unterschiedlich starke Abweichungen zur USN-Lufttabelle darstellten, wurde auf den flottenmäßigen Einsatz dieses Gerätes verzichtet.

Eines der ersten und zukunftsweisenden Patente auf dem Gebiet der vom Taucher tragbaren Computer war dasjenige von Kirk E. Jennings von der USN, Hawaii (US Patent 4,005,282): sein Design sah bereits 1975 (!) einen Temperatur- und einen Flaschendruckfühler sowie diverse zusätzliche Sensoren für Puls und Atmung und ein Computer-Interface vor.



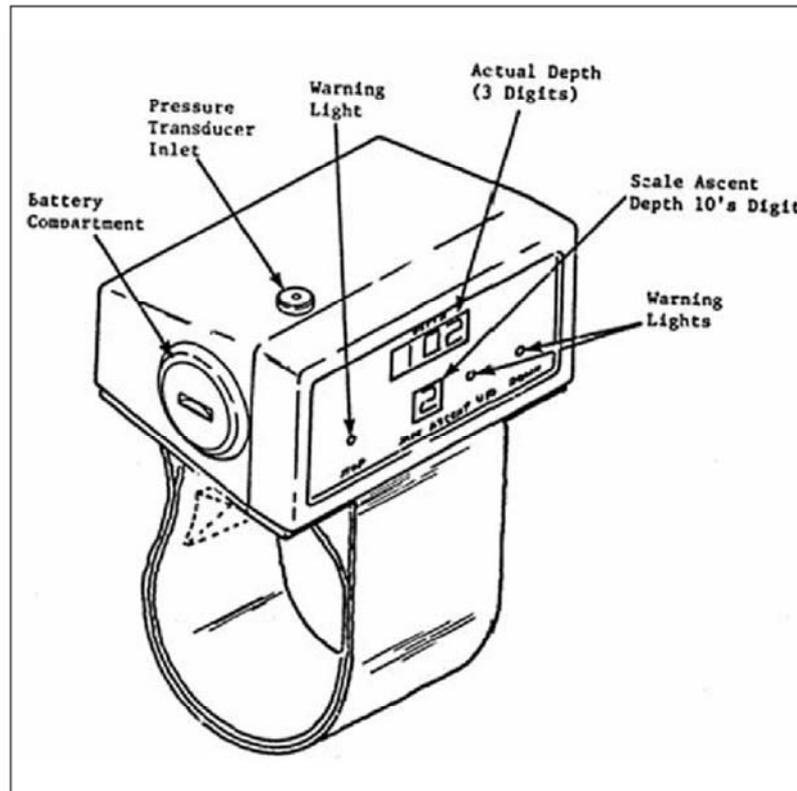
Quelle: US Patent 4,005,282, vom 25.09.1975, Fig. 4, Sheet 3

Abb. III – 2.12.2.3/3: Übersichtsskizze des patentierten Tauchcomputers von Jennings

Ebenfalls in der Mitte der 70er Jahre gab es dann in Kanada für den militärischen Einsatz digitale Prototypen. Diese wurden vom DCIEM und CTF Systems (Canadian Thin Film Corporation) entwickelt und gebaut. Benutzt wurde hierbei das bewährte DCIEM Dekompressions-Modell von Kidd & Stubbs, welches 4 in Serie geschaltete Kompartimente aufweist. Es wurden also keine Tabellenwerte gespeichert und dann interpoliert, sondern ein vollständiges Dekompressionsmodell durchlaufen. Diesem Modell lagen ca. 20.000 Tauchstunden als Datenbasis zu Grunde. Folgende Geräte der DCIEM sind dokumentiert:

- XDC-3: Luft bis 330 feet
- XDC-4: Mehrprozessor, Multi-Gassystem bis 600 feet, mit wählbaren Dekompressions-Algorithmen; bereits seit 1977 in der Entwicklung [4], [14], [15]
 - Die Nachfolge-Produkte Cyberdiver II und Cyberdiver III wurden von Kybertec, später Newtec, British Columbia, produziert und waren ab ca. 1980, allerdings mit begrenztem Erfolg, im Handel auch für Sporttaucher erhältlich ([15], S. 18–20).
- USN UDC-1: Die Abb. III – 2.12.2.3/4 zeigt einen frühen Prototypen der United States Navy, den USN UDC-1, den „Underwater Decompression Computer“ zu Beginn der 80er Jahre [5], [12], [13]

III – 2.12.2



Quelle: Faceplate 1977

Abb. III – 2.12.2.3/4: USN UDC-1

Interessanterweise erwähnt eine Publikation (Faceplate: the official newsletter for the divers and salvors of the USN) dieses Gerät bereits 1977. In einem späteren Bericht vom Dezember 1986 taucht es dann aber nicht mehr auf [13]: damals wurden speziell programmierte Prototypen vom Deco-Brain II, einem Orca EDGE und ein Tekna-Gerät der militärisch harten Testprozedur unterworfen. Einer der Tests war der berüchtigte „drop test“ (von to drop = fallen lassen) sowie ein „mud test“ (mud = Schlamm).

Die speziellen Programme verwendeten den Algorithmus „VVAL18“ mit Vorschlägen von Cdr. Edward D. Thalmann: die Sättigung verlief exponentiell, die Entsättigung (bis zu einem gewissen „cross over“-Punkt) linear und somit langsamer. Diese Klasse von Algorithmen wird daher als „E-L“ bezeichnet (im Gegensatz zum Bsp. zu den Bühlmann-Hahn-Modellen, welche als „E-E“ zu bezeichnen wären).

Der Algorithmus wurde entwickelt, um die mehrstündigen Multi-Level-Tauchgänge mit geschlossenen Kreislaufgeräten, hier das Mk-15 UBA (UBA = Underwater Breathing Apparatus) mit einem $pO_2 = \text{const} = 0,7 \text{ atm}$, sinnvoll zu berechnen: die Benutzung einer über die EAD-Methode adaptierten Tabelle hätte viel zu lange Dekompressions-Stopps erfordert. Allerdings setzte die USN dann keinen dieser Computer gefechtsmäßig ein: den Erhalt des „heiligen Grals“ der ANU (approved for Navy use; geprüft und empfohlen für den Einsatz in der Navy) blieb ca. 15 Jahre später der Fa. Cochran, TX, vorbehalten [21].

Tabellenrechner

Die sich nun langsam beschleunigende Entwicklung auf dem Feld der Halbleiter-Bausteine brachte preiswertere und leistungsfähigerer Chips auf immer kleiner werdenden Baugrößen. Ebenfalls zu Beginn der 80er Jahre wurden dann die neuen Bausteine benutzt, um komplette Tauchtabellen zu speichern. Der Dekompressionsplan für ein beliebiges Tauchprofil wurde durch Interpolation der Tabellenwerte gewonnen. Typische frühe Vertreter waren der Deco-Brain I sowie der Suunto SME-USN.

Der logisch naheliegende Schritt nach der analogen Simulation bestand in der digitalen Lösung der Sättigungsgleichung; hierzu mussten die Halbleiterbausteine allerdings noch etwas leistungsfähiger werden.

III – 2.12.2.4

Hardware, die Geschichte machte



Quelle: Verfasser

Abb. III – 2.12.2.4/1: zum Größenvergleich, von links nach rechts: oben: Deco Meter von Scubapro; unten: Deco Meter von SOS; Bildmitte: Orca EDGE; rechts: Deco-Brain II

III – 2.12.2

Mit die ersten Geräte, die auch zivilen und Sporttauchern zur Verfügung standen und die ebenfalls tabellenunabhängig die Sättigungen/Entsättigungen, hier allerdings für mehrere parallele Kompartimente, berechnen konnten, waren der EDGE (Electronic Dive Guide) von ORCA Industries von 1983 sowie der „Hans Hass Deco-Brain II“ von Divetronic, Liechtenstein (1985).

Da zwischenzeitlich für Halbleiterbausteine der Preisverfall bei gleichzeitig einhergehender Leistungssteigerung und Miniaturisierung einsetzte, war diesen beiden Geräten eine gewisse Verbreitung und auch kommerzieller Erfolg beschert. Die Abb. III – 2.12.2.4/2 zeigt links einen Tauchcomputer vom Formfaktor „Handgelenk“ (Scubapro DC 12), daneben die beiden aufeinander gesteckten Leiter-Platinen des Deco-Brain II mit dem Deckel und der Geräte-Blende (unten).



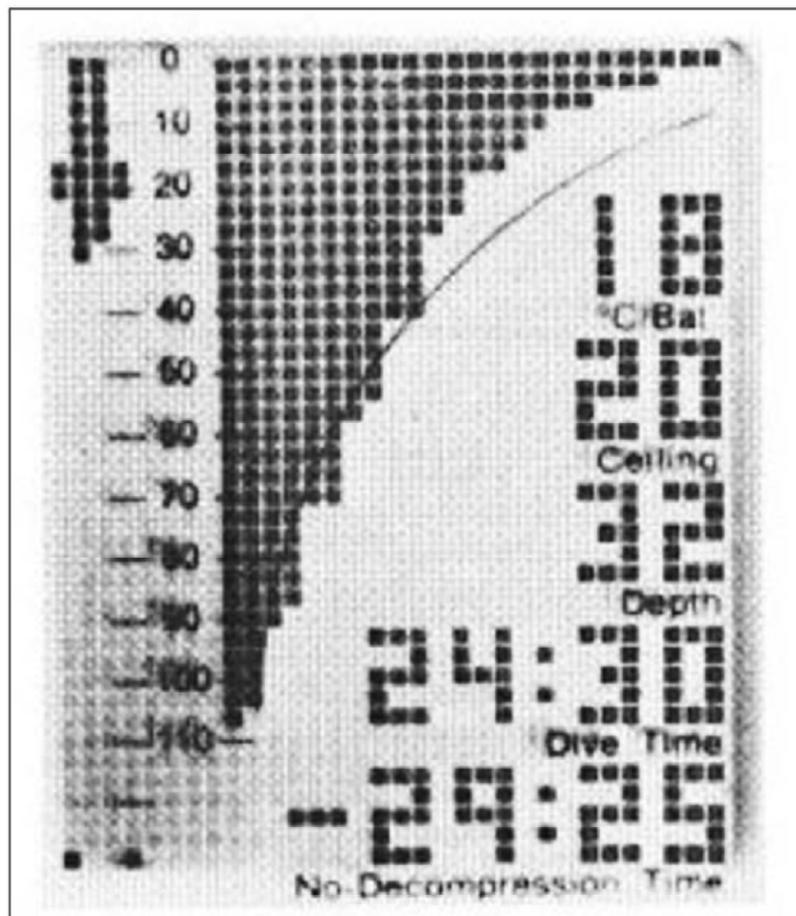
Quelle: Verfasser

Abb. III – 2.12.2.4/2: Scubapro DC-12, Deco-Brain II

Der Orca EDGE benutzte ein modifiziertes USN Workman-Modell mit 12 Kompartimenten und den Halbwertszeiten von 5 bis 480 min. Dieses Modell war etwas konservativer gestaltet als die ursprünglichen USN Luft-Tabellen. Konservativer bedeutet: kleinere M_0 -Werte und somit kürzere Nullzeiten (NDL).

Beispiel: NDL 100 feet statt 25 min (USN) nur 19 min (Edge).

Grundlage bildeten hierfür Ultraschall-Doppler-Messungen nach Multi-Level-Tauchgängen [6], [7], [9], [14]. Darüber hinaus glänzte der EDGE mit einem innovativen Display: nicht nur der übliche Zahlenfriedhof mit den Tauchtiefen und Tauchzeiten wurde dargestellt, sondern ebenfalls eine Pixel-Graphik mit den berechneten Inertgas-sättigungen der Kompartimente. Zusätzlich gab es noch eine graphische Balkendarstellung mit aktueller und maximaler Tauchtiefe. Die mitten im Display eingezogene Kurvenlinie zeigt die oben erwähnten M_0 -Werte: überschreitet die Kompartiment-sättigung diesen Grenzwert, wird aus dem Nullzeit-Tauchgang ein dekompensationspflichtiger Tauchgang [8].



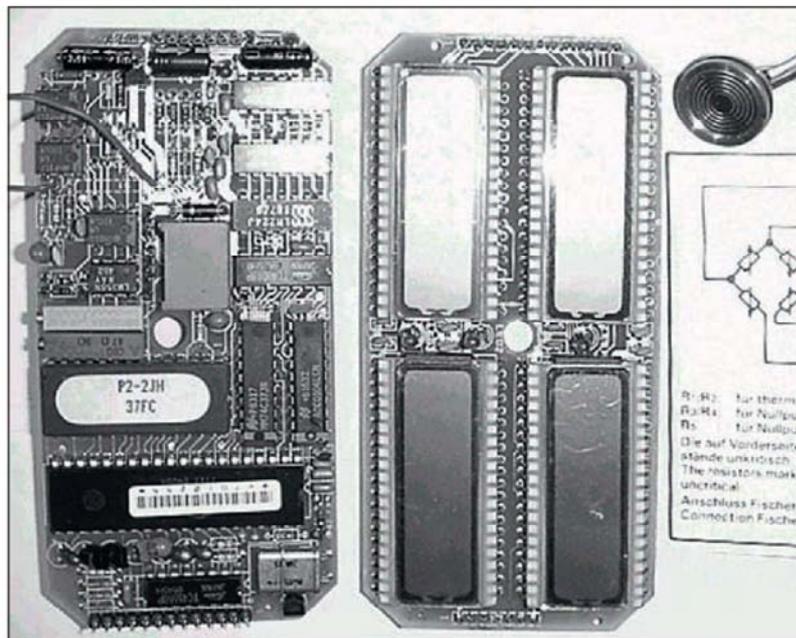
Quelle: Verfasser

Abb. III – 2.12.2.4/3: Orca Edge Display

In Abb. III – 2.12.2.4/3 links ist die Balkengraphik mit Ceiling (Querbalken), aktueller (32 feet) und maximaler Tauchtiefe (132 feet), daneben die Pixel-Graphik mit den Balken der Inertgassättigung der Kompartimente zu sehen. Die Balken sind pro Kompartiment jeweils 2 Pixel breit. Ganz rechts im Display, die Zahlen im Klartext, von oben nach unten: Umgebungstemperatur, Ceiling (d.h. Aufstieg auf maximal 20 feet), die aktuelle Tiefe (32 feet), Tauchzeit (24,5 min) und die Summe aller Dekompensationszeiten (ca. 29 min, mit einem Minus gekennzeichnet zur sofortigen Unterscheidung von Restnullzeiten).

III – 2.12.2

Der Deco-Brain II benutzte ab der Software Version P2-2 ein 16-Kompartiment-Bühlmann-Modell, das sogenannte ZH-L 12 mit 16 von Max Hahn modifizierten a- und b-Parametern. Die Halbwertszeiten rangierten von 4 bis 635 min. Da dies gegen Ende 1984 geschah, war die P2-2 ca. Anfang 1985 erhältlich ([11], S.22). Das Innenleben eines Deco-Brain II: links die Platine mit den Memory- und den CPU-Chips, man kann auf dem mittleren EPROM das Schildchen mit der Software-Version (P2-2) erkennen; die rechte Platine ist mit den LCD-Display-Chips bestückt. Ganz rechts im Bild der Drucksensor mit dem Anschlusschaltplan.

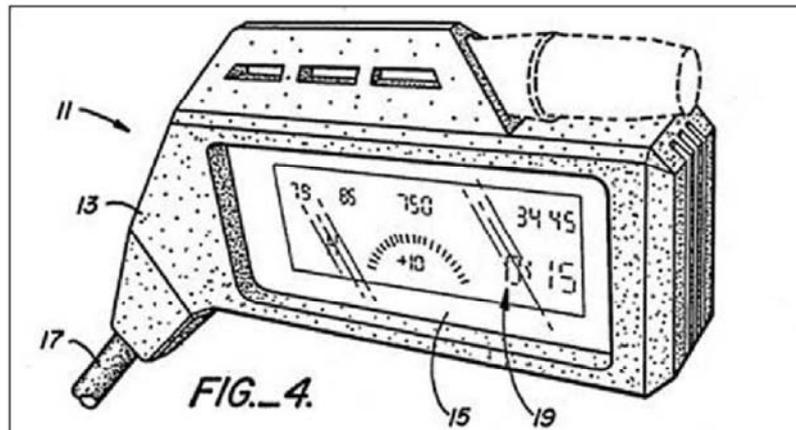


Quelle: Verfasser

Abb. III – 2.12.2.4/4: Innenleben des Deco-Brain II

Das ZH-L-Modell wurde 1983 vollständig veröffentlicht in der Monographie von Albert Alois Bühlmann beim Springer Verlag [10]. Alle Parameter für die Inertgase Stickstoff als auch für Helium sowie viele Druckkammer-Experimente waren relativ ausführlich dokumentiert. Somit wurde es ziemlich schnell zur anerkannten Grundlage vieler Implementierungen in Tauchcomputern und auch bei Dekompressionsprogrammen für den PC.

Ebenfalls bahnbrechend war der erste kommerziell erhältliche Tauchcomputer mit Luft-Integration und der Prognose der verbleibenden Resttauchzeit; dieses Gerät war der Data-Master II von Oceanic (US Patent # 4,882,678 von 1987, S. 3) (→ Abb. III – 2.12.2.4/5).



Quelle: US Patent 4,882,678 v. 14.01.87, Fig. 4, Sheet 2

Abb. III – 2.12.2.4/5: DataMaster II

Der *DataMaster II* war eines der ersten Geräte, welches in der Zusammenarbeit der Firmen Oceanic USA und U.S. Divers Company entwickelt wurde. Die eigentliche Forschungsarbeit und das Patent wurden durch Pelagic Pressure Systems, San Leandro, Calif. getätigt; der gesamte finanzielle Aufwand soll ca. 1,5 Millionen US \$ betragen haben [16].

Nachdem ganz langsam die grundlegenden technischen Probleme wie Wasser- bzw. Druckdichtigkeit der Gehäuse, Energieverbrauch der Prozessoren und Displays bereinigt sowie die Speicherchips leistungsfähiger wurden, konnten sich die Hersteller um andere Dinge wie zusätzliche Leistungsmerkmale und die Benutzerfreundlichkeit kümmern. Ein guter Ansatz war das ganz spezielle LCD-Display des DACOR MicroBrain® (→Abb. III – 2.12.2.4/6).



Quelle: Verfasser

Abb. III – 2.12.2.4/6: MicroBrain® Pro Plus von DACOR (1989)

III – 2.12.2

Im linken unteren Eck waren Balken proportional zur noch vorhandenen Rest-Nullzeit zu sehen. Das Gerät wartete als eines der ersten mit einem Langzeitsummenspeicher auf: dieses als „recorder“ bezeichnete Leistungsmerkmal speicherte die Summe aller Tauchzeiten und die Anzahl der Tauchgänge während der gesamten Laufzeit des Geräts. Das hier benutzte Programm war die Version P-4 von 1988, die ebenfalls von Max Hahn nochmals konservativer gestaltete Koeffizienten verwendete [22].

Auf Grund einer für den tauchenden Kunden ziemlich günstigen Kombination von Preis, Größe, Zuverlässigkeit und Einfachheit waren die Gerätetypen „ALADIN“ von Uwatec (Halwil, Schweiz) sehr beliebt:



Quelle: Verfasser

Abb. III – 2.12.2.4/7: Aladin Pro (1988)

Abb. III – 2.12.2.4/7 zeigt einen Tauchgang von aktuell 6 m und max. 36,5 m bei einer Tauchzeit von 26 min die TTS von 9 min incl. eines Stopps von 2 min auf 6 m. Das Display wirkt sehr aufgeräumt und übersichtlich.

Ein weiterer zukunftsweisender Schritt der Fa. Uwatec (später Scubapro) war die schlauchlose (drahtlose) Luftintegration im Jahre 1994, hier der Aladin Air X von Uwatec mit dem dazugehörigen Drucksensor mit Sender an der 1. Stufe (Bild 12); Quelle [19].

(→ Abb. III – 2.12.2.4/8-9)



Quelle: Uwaterc

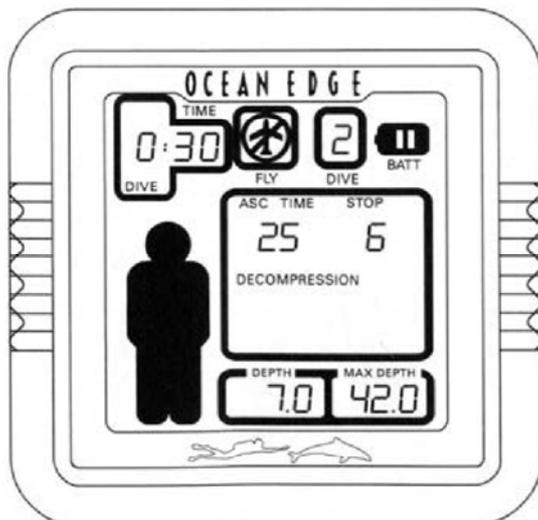
Abb. III – 2.12.2.4/8: Aladin Air X



Quelle: Uwaterc

Abb. III – 2.12.2.4/9: Drucksensor an der ersten Stufe für den Aladin Air X

Die Tradition von Piktogrammen im Display wurde zwischendurch auch von anderen Herstellern aufgegriffen. Im Bild das Display des MC36 von Ocean EDGE (1993):



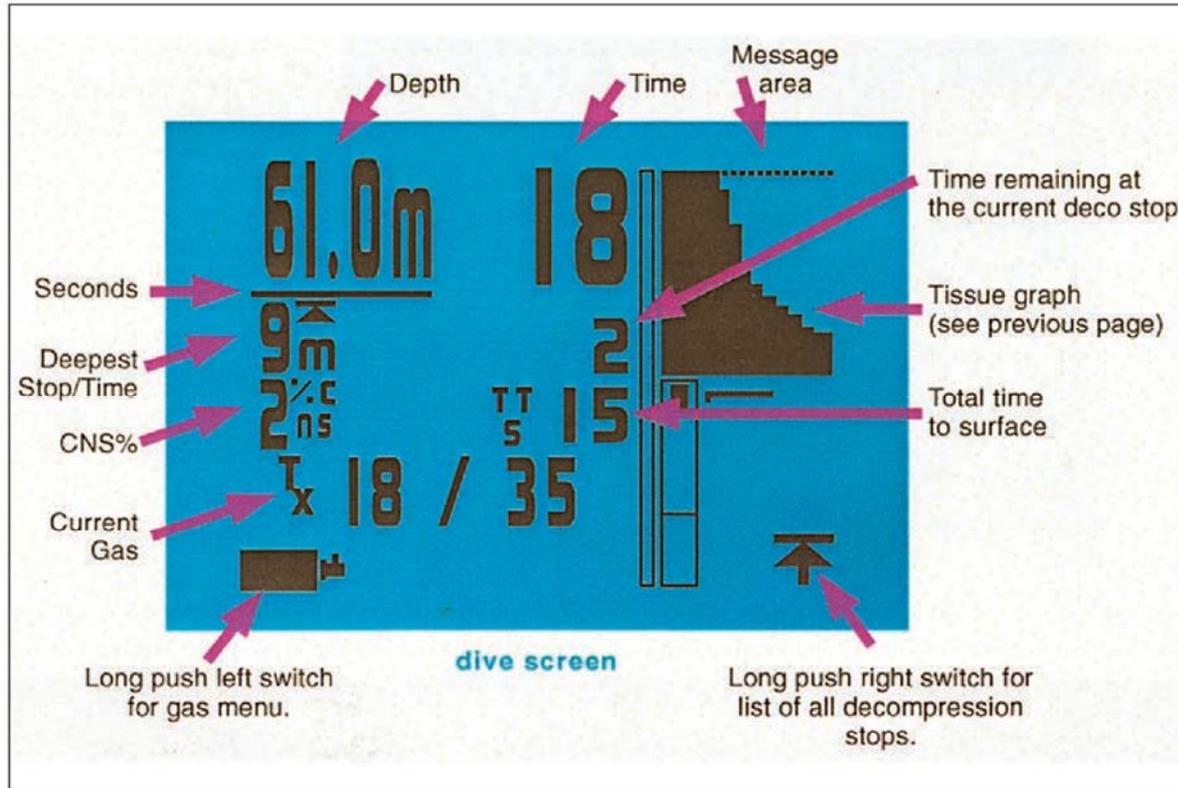
Quelle: Ocean EDGE

Abb. III – 2.12.2.4/10: Display des MC36

Abb. III – 2.12.2.4/10 zeigt einen Wiederholungs-Tauchgang von aktuell 7 m und max. 42 m bei einer Tauchzeit von 30 min die TTS von 25 min incl. eines Stopps auf 6 m. Das Piktogramm des Männchens links im Display war zu Beginn des Tauchgangs „leer“ („weiß“, keine Sättigung). Mit zunehmender Sättigung begann sich das Männchen von den Füßen her mit „schwarz“ aufzufüllen.

III – 2.12.2

Eine ganz ähnliche Aussagekraft hatte das graphische Display des VR3 Mischgas-computers, damals Delta P Technology Ltd. (→ Abb. III – 2.12.2.4/11).



Quelle: Delta P Technology Ltd.

Abb. III – 2.12.2.4/11: Anzeigen auf dem Display des VR3

Abb. III – 2.12.2.4/11 zeigt einen simulierten Trimix Tauchgang auf 61 m bei einer Tauchzeit von 18 min die TTS von 15 min incl. einem Stopp von 2 min auf der Ceiling von 9 m. Rechts oben im Display die Graphik der Kompartimentsättigungen. Zusätzlich ist zu sehen, wie im Bereich des technischen Tauchens eigentlich üblich, die aktuell verwendete Gasmischung (T_x 18 % O_2 , 35 % He) sowie die ZNS-Sauerstoffbelastung (2 % cns).

Für den Bereich Sporttaucher hatten dann verschiedene Hersteller das Prinzip der „Ampel-Darstellung“ neu entdeckt. So sind z.B. bei OCEANIC-Computern Stickstoffsättigungen mit einer grünen, gelben oder roten Markierung am Gehäuserand versehen.

Der EMC-20 H³) (→ Abb. III – 2.12.2.4/12) ist einer der wenigen, dessen baugleiche Nitrox-Computer mit dem VVAL 18 Algorithmus eine Zulassung zur Benutzung bei der USN (ANU) haben [21]. Diese Hardware stellt den aktuellen Endpunkt bei Veröffentlichung dieser Seiten der Mischgas-Tauchcomputer in Bezug auf Robustheit und Zuverlässigkeit dar. Über die drei Sensoren (rechte Gehäuserseite) wird sowohl die Leitfähigkeit des Mediums bestimmt (d.h. eine automatische Süß-/Salzwasser-Korrektur

³) EMC = environmental compensation

wird durchgeführt), als auch Überwasser die Mischgas-Programmierung vorgenommen. Auch die Hintergrundbeleuchtung wird ohne mechanische Kontakte eingeschaltet. Die Datenübertragung zum PC geschieht über eine USB-Klammer (links in der Transportbox). Der links vorne liegende, mitgelieferte (echte) Silberdollar dient zur Unterstützung der Programmierung über die 3 Kontakte. Der verwendete Mischgas-Algorithmus, der an den Workman-USN Algorithmus angelehnt ist, benutzt 20 Kompartimente mit Halbwertszeiten von 1,25 bis 950 min, Adaptionen an die Umgebungstemperatur, Luftdruckveränderungen während der Oberflächenpause und an eine Mikroblasen Vermeidung. Die Umschaltung auf die eingesetzten Gase geschieht ohne Eingriff des Tauchers automatisch anhand der MOD sowie einer an der Oberfläche vorher einprogrammierten Zeitmarke (time benchmark).



Quelle: Verfasser

Abb. III – 2.12.2.4/12: EMC-20H von Cochran Undersea Technology, TX

Weitere Entwicklungen, die zeitlich nacheinander erfolgten, da die weiter zunehmende Leistungsdichte der elektronischen Bausteine auch mit sinkendem Energieverbrauch einherging, waren:

- O₂-Sensoren zur Messung des aktuellen Sauerstoff-Partialdruckes in der Gegenlung eines Kreislaufgerätes, 1–3 Sensoren
- farbiges Graphikdisplay über OLEDs (organic light emitting diodes)

III – 2.12.2

- Anzeige der aktuellen Geo-Position über einen GPS-Empfänger
- Elektronischer Kompass

Hierzu passende aktuelle Hardware wird im *Kap. III – 2.12.5* vorgestellt. Die Auswirkungen in den verwendeten unterschiedlichen Algorithmen werden im *Kap. III – 2.12.4* besprochen.

III – 2.12.2.5

Weiterführende Literatur – historische Dokumente in zeitlicher Reihenfolge

- [0] Navy Experimental Diving Unit, Evaluation Report No. 7-57, Foxboro Decomputer Mark I, W. F. Searle, Jr.
- [1] Navy Experimental Diving Unit, Evaluation Report No. 1-63, Evaluation of a Decompression Computer developed for Divers. R.D. Workman
- [2] A Pneumatic Analogue Decompression Computer, by: Wing Commander R.A. Stubbs, Surgeon Lieutenant Commander D.J. Kidd, DCIEM Report 65-RD-1
- [3] Control of Decompression by Analogue Computer, Stubbs R. A., Kidd D. J.; DCIEM Report 65-RD-8
- [4] Decompression Computers, p. 45–52, by: Mr. R.Y. Nishi, in: The 2nd Canadian Diving Symposium, 31.10.1977, DCIEM-TR-78X12
- [5] Navy Experimental Diving Unit: Report No. 11-80, Testing of Decompression Algorithms for use in the U. S. Navy Underwater Decompression Computer, Phase I Edward D. Thalmann, CDR, MC, USN, Ian P. Buckingham, LCDR, CFMS W. H. Spaur, CAPT, MC, USN
- [6] New No-Decompression Tables based on No-Decompression Limits determined by Doppler Ultrasonic Bubble Detection, Huggins Karl E, 1981, MICHU-SG-81-205
- [7] Mathematical Evaluation of Multi-Level Diving, Huggins Karl E; Somers Lee, 1981, MICHU-SG-81-207
- [8] The EDGE (®TM) Electronic Dive Guide, Owner's Instruction Manual, ORCA Industries, 1983
- [9] Doppler Evaluation of Multi-Level Dive Profiles, Huggins Karl E; Conference On Underwater Education Proceedings Of The Fourteenth International Conference PP. 125–130, Chicago, Illinois November 3-6, 1983, MICHU-SG-84-300
- [10] A. A. Bühlmann, Dekompression – Dekompressionskrankheit, Springer, 1983, ISBN 3-540-12514-0
- [11] Hans Hass Deco-Brain II®, Gebrauchsanweisung, Divetronic AG
- [12] Navy Experimental Diving Unit, Report No. 1-84. Phase II Testing of Decompression Algorithms for use in the U.S. Navy Underwater Decompression Computer. by: Edward D. Thalmann, CDR, MC, USN; JANUARY 1984; (p. 2)
- [13] Navy Experimental Diving Unit, Report No. 10–86. Test and Evaluation of Two Prototype Model Underwater Decompression Monitors, by: Clark G. Presswood, Edward D. Thalmann, Michael D. Curley; December 1986 (p. 12, 195, 204)
- [14] Microprocessor Applications to Multi-Level Air Decompression Problems, Copyright (C) 1987 Karl E. Huggins, Michigan Sea Grant College Program, MICHU-SG-87-201

- [15] Proceedings of Dive Computer Workshop; The American Academy of Underwater Sciences, September 26 to 28, 1988, USC Catalina Marine Science Center; Michael A. Lang, R.W. Hamilton; Editors, USCSG-TR-01-89
- [16] Dive Computers: A consumer's guide to history, theory & performance. By: Ken Loyst, Watersport Books 1991, ISBN 0-922769-09-5
- [17] Decompression Theory, Dive Tables and Dive Computers, John E. Lewis, PADI 1991, ISBN 1- 878663-06-2
- [18] The Dynamics of Decompression Workbook; First Edition, Copyright (C) 1992 by Karl E. Huggins. The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan
- [19] Pressemitteilungen der Fa. UWATEC anlässlich der Ausstellung „boot 94“, Düsseldorf
- [20] The Effectiveness of Dive Computers in Repetitive Diving, R.W. Hamilton (ed.); 44th. UHMS workshop, 1995
- [21] Butler FK, Southerland D. The U.S. Navy decompression computer. Undersea Hyper Med 2001; 28(4): 213–228
- [22] Benutzerhandbuch; MicroBrain® Pro Plus von DACOR
- [23] Kassler, Alex, „Tauchcomputer im Detail“, unterwasser, April 2008, S. 96 – 105.
- [24] Kassler, Alex. „Wer konnte denn damit rechnen ...“, unterwasser, August 2009, S. 92–100.
- [25] Das „kleine virtuelle Tauchcomputermuseum“:
http://www.divetable.info/museum_g.htm

III – 2.12.3

Aufbau

Vom Grundsatz her gesehen handelt es sich beim Tauchcomputer zunächst um ein Messinstrument. Die Messaufgaben werden durch die Hardware ermöglicht, die Interpretation der Messwerte wird in Silizium, i.e. die Speicherchips und die Software gegossen (→ Kap. III – 2.12.1).

III – 2.12.3.1

Hardware

Die hauptsächlich vorhandenen Komponenten, sprich die „Hardware“ zum Anfassen, eingepackt in ein üblicherweise wasserdichtes und mechanisch stabiles Gehäuse, können wir der Abb. III – 2.12.3.1/1 entnehmen. Individuelle Ausprägungen sind natürlich möglich: ein Tauchcomputer, der zur Bedienung Reed-Relais im Gehäuse integriert hat, wird auf die Trägheits- bzw. Beschleunigungssensoren verzichtet. Ebenso gibt es beliebig viele Tauchcomputer, welche völlig auf externe Sensoren verzichten und somit z.B. auch auf die Darstellung und Auswertung des Flaschendrucks oder des Luftverbrauchs.

Diese generischen Bildchen sind seit langem verbreitet und jedes Büchlein über Tauchcomputer weist diese entsprechend vor (s.a. Kap. III – 2.12.3.5). Dem schließen wir uns mit einer aktuellen Version einfach an:

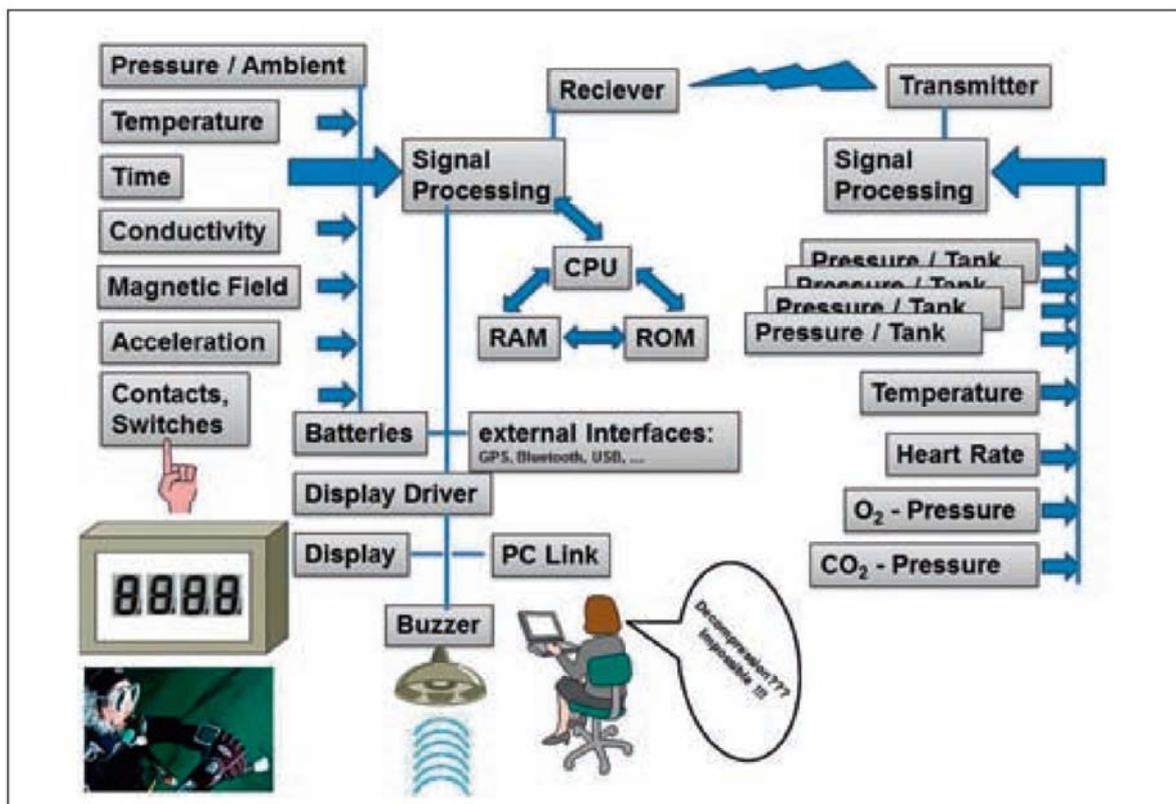


Abb. III – 2.12.3.1/1: Generischer Aufbau eines Tauchcomputers

III – 2.12.3

Die unterschiedlichsten Sensoren für z.B.

- Umgebungs- und Flaschendruck,
- Temperatur,
- Leitfähigkeit,
- Magnetfeld,
- Trägheit/Beschleunigung,
- Berührung,
- Herzfrequenz und
- O₂- und CO₂-Partialdrücke

übermitteln ihre Daten entweder direkt, per Draht in die Signalaufbereitung oder aber über eine Luftschnittstelle [z.B. die Funkübertragung vom Sender (Transmitter) zum Empfänger (Receiver)]. Die Signale müssen auf vielfältige Art und Weise aufbereitet werden: zum Einen muss zuvor oft noch eine „Analog-Digital-Wandlung“ erfolgen: das gemessene, analoge Signal muss in ein dem Computer verständlichen digitalen Wert gewandelt werden. Danach müssen die digitalen Werte so verändert werden, dass die CPU und andere Bauteile entsprechend dem Programm damit arbeiten können.

Der Zeit-Baustein ist nicht nur als elektronische Uhr gedacht, sondern hat eine ebenso zentrale Funktion wie die CPU: damit die einzelnen Bauteile sinnvoll zusammenarbeiten können und sich nicht gegenseitig bei der Datenübertragung stören, muss ein zentraler Taktgeber existieren. Diese Synchronisation übernimmt der interne Quarz-Baustein.

Dass die Daten- und Befehlsübertragung zum Teil auf parallelen Kanälen, einem sogenannten Bus, vollzogen wird, soll nicht unerwähnt bleiben. Die Details würden den Rahmen dieser Darstellung aber sprengen.

Das Programm, die Befehle sowie die unveränderlichen Werte der Kompartimente und weitere Konstanten sind im Festwertspeicher, dem ROM (Read Only Memory) hinterlegt: das Herz (oder auch das Gehirn) des Ganzen ist die CPU, die „Central Processing Unit“; die CPU greift zunächst auf das ROM zu. In der CPU werden die übermittelten Daten gemäß dem Programm weiterverarbeitet, Zwischenergebnisse im RAM (Random Access Memory) gespeichert. Die so gewonnenen Daten werden aufbereitet im Display zur Anzeige gebracht. Ist die Oberfläche erreicht und eine vordefinierte Oberflächenpause verstrichen, werden maximale Tiefe und Tauchzeit und, je nach Modell, auch weitere Daten in den Logbuchspeicherbereich des Tauchcomputers übernommen. Oft werden parallel dazu in bestimmten Zeitabständen die wichtigsten Daten des Tauchganges in einem nicht-flüchtigen (NVRAM: non volatile RAM) oder elektrisch veränderbaren Speicher hinterlegt. Diese Daten können später zum PC in eine Logbuch-Software übertragen werden.

Wie bereits angedeutet, ist diese Darstellung recht generisch: es gibt Miniatur-Chips, in denen fast alle diese Funktionen in einem Baustein monolithisch integriert sind (Mikro-Controller). Je nach Aktualität des Tauchcomputers gibt es noch weitere externe Schnittstellen: die Datenübertragung zum PC kann über proprietäre PC-Links erfolgen, über Bluetooth oder USB oder kabellos über Infrarot (IrDA). Oft ist die Datenübertragung auch bi-direktional ausgeprägt: mit dem PC im Internet die aktuellste Tauchcomputer-Software herunterladen und dann vom PC auf den Tauchcomputer. Bei qualitativ

höherwertiger Logbuch-Software für den PC finden wir auch ein Konfigurations-Modul für den Tauchcomputer. Der Benutzer kann im Trockenen, in aller Ruhe (an einem großen Bildschirm mit Tastatur) die Konfigurations-Datei für seinen Tauchcomputer erstellen, auf einer lokalen Festplatte speichern und hernach auf den Tauchcomputer übertragen. Ganz neue Modelle verfügen, wie auch schon viele kleine digitale Kameras, über ein GPS-Modul. Die USB-Schnittstelle hat nicht nur den Charme der relativ problemlosen Anbindung an einen PC: diese Schnittstelle kann auch zum Aufladen der internen Akkus benutzt werden.

III – 2.12.3.2 Software

Was ist „Software“? Software ist alles, was durch einen Telephondraht passt! Im Zeitalter von GSM, UMTS & LTE wird zur Daten- oder Programmübertragung nicht einmal mehr dieser Draht benötigt: die Luft als Übertragungsmedium tut es auch ... Software ist die Gesamtheit aller Daten und der Befehle, mit diesen Daten umzugehen.

Beim Tauchcomputer gibt es flüchtige Daten und fest gespeicherte Daten. Flüchtig sind die Daten, die zur Laufzeit erworben werden (Tiefe, Zeit, ...); im Gegensatz hierzu sind die fest gespeicherten Daten: die Halbwertszeiten der Kompartimente sowie deren weitere Charakteristika. Die Befehle, wie diese Daten untereinander verknüpft werden sollen, sind Rechenoperationen. Diese Rechenoperationen werden durch den Algorithmus (s.a. *Kap. III – 2.12.4* und *Kap. III – 2.12.7*) vorgegeben. Die flüchtigen Daten werden zusammen mit den Zwischenergebnissen der Rechenoperationen im RAM gespeichert. Die fest gespeicherten Daten sowie die Abfolge der Befehle (das Programm) finden sich im ROM wieder.

Üblicherweise wird die Befehlsfolge, das Programm, in einer der verbreiteten Computer-Hochsprachen verfasst. Computer-Hochsprachen sind z.B. FORTRAN oder C. Damit der Computer dies versteht und umsetzen kann, müssen die hochsprachlichen Konstrukte mittels eines Compilers übersetzt werden. Erst diese kompilierten Befehle veranlassen die CPU zu den vom Programm erwünschten Rechenaktionen. Hochsprachen können vom Menschen im Klartext geschrieben und gelesen werden: für Dokumentation, Weiterentwicklung und zur allfälligen Fehlerbehebung der Programme ein unverzichtbarer Vorteil! Müssen aber gewisse Aktionen und Rechenoperationen zeitnah und ganz schnell erfolgen, so wird üblicherweise auf kleine Assembler-Subroutinen zurückgegriffen. Der Assembler-Code sind die sogenannten einfachen, direkten Maschinenbefehle und in der Regel schneller abgearbeitet als Hochsprachen-Konstrukte. Wenn z.B. eine rasche Abnahme des Umgebungsdruckes beim schnellen Aufstieg erfolgt, muss sofort die Aufstiegsgeschwindigkeitswarnung angezeigt werden und die neue aktuelle Tiefe, bevor sich die CPU wieder der erneuten Berechnung der Kompartimentsättigungen widmen darf. Diese Programmunterbrechungen werden über die sogenannten Interrupts gesteuert. Die Summe des kompilierten Hochsprachen-Codes und der Assembler-Subroutinen sind das komplette digitale Abbild des Programms und somit auch des Dekompressions-Modells.

III – 2.12.3

III – 2.12.3.3

Gehäusetypen (Öl-, Gel-, Luft-Füllungen)

Zum Aufbau des Gehäuses kommen die unterschiedlichsten Materialien zum Einsatz: Polycarbonat, ABS-Kunststoff, Eloxal (Aluminium), Edelstahl.

Angepasst an die Vorgaben durch das Gehäuse werden dann die verschiedenen Füllungen benutzt. Diese Füllungen (außer der „Luft“) sind, ähnlich wie Wasser, nahezu inkompressibel. Der Vorteil gefüllter Gehäuse ist in der Regel ein einfacherer und dünnerer Aufbau sowie eine gewisse Unempfindlichkeit gegenüber höheren Drücken. Im Falle des komplett wasserdichten Gehäuses ist die Füllung einfach nur Luft. Luftgefüllte Gehäuse müssen also extrem robust sein und dem Schutz der kompletten Elektronik zu jeder Zeit dienen. Es dürfen während der Lebenszeit des Gerätes keine Risse oder sonstige Materialermüdungen auftreten. Die Elektronik selbst, außer dem Drucksensor, muss also nur ca. 1 Bar standhalten. Gehäusepenetrationen für Sensoren oder Schalter müssen äußerst sorgfältig konstruiert und ausgeführt werden (Prinzip „U-Boot“).

Bei (Silikon)-Öl oder -Gel-Füllungen erfolgt die Druckübertragung in das Gehäuse hinein: die elektronischen Bauteile müssen mit diesen Füllungen vor der chemischen Schädigung durch Wasser sowie einem eventuell anliegenden, anisotropen Druck geschützt werden. Das Gehäuse selber hat lediglich die Funktion eines Geräteträgers: der übertragene Druck wirkt dann auf alle internen Bestandteile. D.h.: alle elektronischen Bauteile müssen dem Druck standhalten. Dies wirkt sich in den Kosten pro Bauteil aus. Ist die Batterie oder der Akku ebenfalls mitvergossen, so ist für den Tausch üblicherweise ein kostenpflichtiger Aufenthalt beim Hersteller vorgesehen: das Gehäuse wird dann wieder frisch gefüllt. Die verwendeten Füllungen müssen, je nach Gehäuseausprägung, wasser- oder auch gasfrei sein.

III – 2.12.3.4

Display

Zum Schutz der elektronischen Bauteile eines Displays werden kratzfestes Mineralglas, Borosilikat oder transparentes Polycarbonat eingesetzt. Display-Protectoren (z.B. flexible, zuschneidbare transparente, aber kratz feste Kunststofffolie, z.B. von 3M o.Ä.), oder vorgefertigte transparente Kunststoff-Hauben schützen zusätzlich das Display.

In der Display-Elektronik kommen üblicherweise folgende Bausteine zum Einsatz:

- LED: light-emitting diode
- LCD: liquid crystal display
- OLED: organic light-emitting diode

Allen diesen Bausteinen ist gemeinsam, dass der von der CPU gelieferte Output mit dem Anschalten oder Sichtbarmachen diverser Segmente bzw. bei LEDs einfach mit dem Ein- oder Ausschalten der entsprechenden Leuchtdiode beantwortet wird. Die Bauteile unterscheiden sich (von der Robustheit und vom Preis abgesehen) im Energieverbrauch sowie in der Ablesbarkeit. LEDs können bei Dunkelheit sehr gut und auch im trüben Wasser noch gut erkannt werden, benötigen aber im Vergleich zu den anderen kristallinen

Displays deutlich mehr Energie. LCDs sind wahre Energiesparer, haben aber das Problem der Erkennbarkeit: der Tauchcomputer muss für eine Hintergrundbeleuchtung sorgen. Viele aktuelle Tauchcomputer haben OLEDs im Display. Diese zeichnen sich durch einen sehr breiten Ablesewinkel sowie sehr guten Kontrast und Ablesbarkeit auch in der Dunkelheit aus; zusätzlich kann das Display grafisch oder auch farblich gestaltet werden. Allerdings ist der Energiekonsum dann wieder ein Thema.

Weiterhin ist das Display, ebenso wie der Drucksensor, ein relativ empfindliches Bauteil: anisotrope Drücke, wie sie mit Werkzeugen oder spitzen Gegenständen erzeugt werden, sollten niemals auf diese Bauteile angewendet werden. Auch große Temperaturunterschiede tragen zum erhöhten Verschleiß bei. Insbesondere direktes Sonnenlicht kann LCD-Displays nachhaltig zerstören (siehe Tipps zum Umgang mit dem Tauchcomputer unter III – 2.12.8).

III – 2.12.3.5

Literatur

- [1] DECOMPRESSION COMPUTERS by: Mr. R.Y. NISHI, in: The 2nd Canadian Diving Symposium, 31.10.1977, DCIEM-TR-78X12, S. 52
- [2] Decompression Theory, Dive Tables and Dive Computers, JOHN E. LEWIS, PADI 1991, ISBN 1-878663-06-2, S. 16
- [3] DIVE COMPUTERS, KEN LOYST, Watersport Books 1992, ISBN 0-922769-09-5, S. 67
- [4] „Tauchmedizin.“, ALBERT A. BÜHLMANN, ERNST B. VÖLLM (Mitarbeiter), P. NUSSBERGER; 5. Auflage in 2002, Springer, ISBN 3-540-42979-4, S. 198 sowie auf S. 199 ein zerlegter Aladin AIR
- [5] BARSKY, STEVEN M., Deeper Diving and Dive Computers, Scuba Diving International, 2001, ISBN 1-931451-03-6, S.67; bzw. das hierzu passend Video (DVD):
- [6] BARSKY, STEVEN M., Choosing and Using Dive Computers, Hammerhead Press Video, 2007, ISBN 978-0-9740923-4-8

III – 2.12.4

Modelle und Algorithmen

„Alle Modelle sind falsch! Grundsätzlich! Und einige sind falscher als andere; aber ein paar taugen wenigstens ein bisschen was ...“

ALBI, „das Deco Manual“ Tauchsportcenter Esslingen, Version 2011, S. 141

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Herangehensweisen an die Dekompressions-Thematik:

1. Deterministische Modelle
2. Statistische Modelle

Zu 1.: Hierunter sind die bereits bekannten und in den nachfolgenden Kapiteln genannten Vertreter zu verstehen. Es handelt sich um Modelle, die mittels einfacher physiologischer Annahmen und einfacher mathematischer Algorithmen die Voraussage einer sicheren Dekompression wagen.

Zu 2.: Hier ist die statistische Analyse tausender absolvierter und gut dokumentierter Tauchgänge zu verstehen. Mittels dieser Datenbasis werden neue Tabellen erstellt. Der Vorteil ist, dass die bekannten Unzulänglichkeiten der deterministischen Modelle elegant umgangen werden. Nachteil ist, dass der zu planende neue Tauchgang zu denen aus der Datenbasis keine allzu großen Abweichungen aufweisen darf. Weiterhin gibt es auch keine Implementierungen in Tauchcomputern: statistische Modelle resultieren üblicherweise in Tabellenwerken. Die einzelnen Tabellen dieser Werke unterscheiden sich in den zugrundegelegten, akzeptierten Risiken, eine Dekompressionskrankheit zu erleiden.

In Tauchcomputern sind üblicherweise die Modelle aus den Kapiteln III – 2.12.4.1 bis III – 2.12.4.8 zu finden. Die deterministischen Modelle wiederum können nach der Art der physiologischen Annahmen unterteilt werden. Diese grundlegenden Annahmen für die Berechnungen der sogenannten „Perfusions-Modelle“ (III – 2.12.4.1 bis III – 2.12.4.6) lassen sich so zusammenfassen:

- Die Perfusion (die Durchblutung) dominiert den Gasaustausch-Prozess
- Die Dekompression erfolgt „ereignislos“, d.h. ohne freie Gasblasen
- Der Zusammenhang zwischen der Inertgassättigung in einem Kompartiment und dessen erlaubter/tolerierter Überdruck ist eine einfache, lineare Beziehung (eine Geradengleichung).

Für die sogenannten „Blasen-Modelle“ (III – 2.12.4.7 und III – 2.12.4.8) gilt, dass versucht wird, das Auftreten einer freien Gasphase, also echte Gasblasen, zu modellieren. Die grundlegenden Annahmen sind:

- Die Bildung von Gasblasen wird durch Kavitationskerne begünstigt
- Die Gasblasen sind sphärisch (kugelsymmetrisch); sie sind genügend klein, um in Lösung zu bleiben, aber genügend groß, um nicht unter externem Druck zu kollabieren.
- Die Radien bzw. Durchmesser der Gasblasen folgen einer exponentiellen Verteilung.

III – 2.12.4

Nun zu den Details der einzelnen Modelle im Überblick.

III – 2.12.4.1

Bühlmann-Hahn

Diese beiden Forscher (A. A. Bühlmann und M. Hahn) lassen sich in das zeitliche Ende der Reihenfolge der Perfusionsmodelle in etwa so einordnen:

Haldane (1907) – Yarborough, Dwyer, DesGranges – Schreiner – Workman – Ruf/Müller – Thalmann – Bühlmann (1983) – Hahn (2000).

Diese Perfusions-Modelle berechnen die Inertgasaufnahme in einem Satz von parallelgeschalteten Kompartimenten. Kompartimente sind mathematische Modellgewebe, gekennzeichnet durch eine Halbwertszeit. Die Halbwertszeit, mathematisch in etwa der Kehrwert der Perfusionsrate, ist diejenige Zeit, die ein Kompartiment benötigt, um bei konstantem Druck gerade zur Hälfte ge- oder auch entsättigt zu werden. Der Satz Halbwertszeiten erstreckte sich bei Haldane mit 5 Kompartimenten von 5 bis 75 min, bei Bühlmann-Hahn sind es 16 mit Halbwertszeiten von ca. 2 bis 635 min für Stickstoff sowie von ca. 1 bis 240 min für Helium.

Das Kriterium für „sichere Dekompression“ ist eine einfache Geradengleichung. Diese Gleichung setzt den berechneten Inertgasdruck in einem Kompartiment mit dem erlaubten/tolerierten Umgebungsdruck in eine lineare Beziehung; hierbei werden, je nach Ausprägung des Modells, unterschiedliche Konstanten benutzt. Bei Haldane galt noch „2:1“, unterschiedslos für alle Kompartimente. Aktuellere Modelle weisen eine feine Abstufung entlang den Halbwertszeiten auf: ca. 3,2:1 für schnelle und ca. 1,1:1 für ganz langsame Kompartimente.

Eine aktuelle Implementierung in einem modernen Mischgascomputer mit 20 Kompartimenten und Halbwertszeiten von 1,25 bis 900 min finden wir im EMC-20H von Cochran Technologies (<http://www.divecochran.com/>).

III – 2.12.4.2

PADI/DSAT

Die Firma PADI (Professional Association of Diving Instructors) sowie deren Tochterfirma DSAT (Diving Science and Technology) entwickelten zwischen 1980 und 1990 anhand von 1.437 Testtauchgängen in der Druckkammer sowie im offenen Wasser einen konservativeren Nachfolger der United States Navy Tabelle (USN, 1963). Ziel der „RDP“ (Recreational Dive Planner) genannten Tabelle war es, die für Militärtäucher erprobten Tabellen auf die Bedürfnisse und körperlichen Voraussetzungen der Sporttaucher anzupassen. Dieses Ziel wurde erreicht durch eine ca. 10 % Reduktion der „M“-Werte der USN-Tabelle und durch eine Erweiterung des Halbwertszeiten-Spektrums. Die USN-Tabelle benutzte 9 Kompartimente von 5 bis 240 min, der RDP benutzt 14 von 5 bis 480 min. Die „M“-Werte (M steht für Maximum) dieser Tabellentypen bedeuten die maximale Inertgassättigung eines Kompartiments, in der amerikanischen Li-

teratur üblicherweise in „fswa“ (= feet of seawater absolute) angegeben, und entsprechen den tolerierten Inertgasüberdrücken in den anderen Perfusions-Modellen. Das statistische Hauptgewicht der Testtauchgänge hat sich im flachen Bereich bewegt; 32 % der Tauchgänge haben sich in Tiefen zwischen 110 bis 130 feet (ca. 33 bis 39 m) abgepielt. Eine weitere Veränderung gegenüber den USN-Tabellen war die Berechnung der Entsättigung an der Oberfläche mit dem 60 min Kompartiment. Die USN benutzte für die Berechnung dieses Oberflächenkredits ebenfalls nur ein einziges Kompartiment und zwar dasjenige mit der Halbwertszeit von 120 min.

Die meisten Computer der Fa. Pelagic Pressure Systems (Aeris, Oceanic, Hollis, Sherwood, Tusa, Seemann, Beuchat und Weitere) benutzen diesen Algorithmus, manchmal mit reduzierter Kompartimentanzahl und weiterhin etwas abgewandelt, um Bergsee- oder auch Dekompressions-Tauchgänge abzubilden. Beide Verfahren sind im originalen RDP-Programm nicht enthalten und wurden auch bei den Testtauchgängen nicht berücksichtigt.

III – 2.12.4.3

Micro-Bubble-Anpassungen

Da die Perfusions-Modelle freie Inertgasblasen per se nicht berücksichtigen, aber trotzdem neueste Erkenntnisse aus Medizin und Forschung berücksichtigen wollten, wurden in den Algorithmen unterschiedliche Verfahren einprogrammiert. Die zu berücksichtigenden Erkenntnisse waren:

- Inertgasblasen scheinen bei jeder Dekompression zu entstehen
- Der Körper kann eine gewisse Anzahl und Menge von Blasen tolerieren
- Die Quellen für die wenigen, großen Blasen sind viele kleine Blasen (micro bubbles)
- Micro Bubbles sollen auch für Spätschäden verantwortlich sein
- Die Spätschäden sollen u.a. betreffen:
 - die drucklose Knochenzersetzung (dysbarische oder auch aseptische Osteonekrose)
 - Mikroinfarkte in gewissen Gehirnbezirken
 - Mikroinfarkte im Augenhintergrund
 - Zerstörung von Lebergewebe

Die nachfolgend aufgeführten Verfahren (→ *Kap. III – 2.12.4.4 bis III – 2.12.4.6*) haben alle zum Ziel, die Dekompression so konservativ zu machen, dass auch die Zahl dieser micro bubbles gering bleibt.

III – 2.12.4

III – 2.12.4.4

Adaptive Algorithmen

„Adaptiv“ bedeutet Anpassung, und zwar die Anpassung der berechneten Inertgassättigung an:

- Körperliche Belastung (work load) bzw. Atemgasverbrauch
- Herzfrequenz (Puls)
- Umgebungstemperatur

Ein erhöhter Gasverbrauch, normalerweise hervorgerufen durch erhöhte körperliche Belastung, geht i. d. R. mit einer erhöhten Inertgassättigung einher und bedeutet normalerweise auch eine erhöhte Herzfrequenz. Die Umgebungstemperatur beeinflusst zum einen die Inertgaslöslichkeit (der Löslichkeitskoeffizient im Henryschen Gesetz ist temperaturabhängig), zum anderen auch die Durchblutung an der menschlichen Peripherie.

Aktuelle Implementierung findet man in Produkten der Firma Uwatec/Scubapro.

Im Gegensatz zu den Implementierungen der Algorithmen für *Kap. III – 2.12.4.1* und auch *Kap. III – 2.12.4.2* sind weder die Algorithmen noch die Parameter öffentlich dokumentiert. Ebenso fehlen nachvollziehbare Messungen. Auch dies steht im ausdrücklichen Gegensatz zu den publizierten Ergebnissen der Messungen von Bühlmann, Hahn und Anderen für III – 2.12.4.1 als auch zu denjenigen der United States Navy für III – 2.12.4.2.

III – 2.12.4.5

Gradienten-Faktoren (GF)

Die GF sind einfach Faktoren < 1 , mit denen die erlaubten/tolerierten Inertgasüberdrücke der Kompartimente multipliziert werden, um eine konservativere Dekompression rechentechnisch zu erzwingen. GF gab es eigentlich schon seit den ersten Tauchtafeln der Welt (Haldane, 1907), wurden aber nur anders genannt. Bedingt durch die unter III – 2.12.4.3 genannten Erkenntnisse wurden überall, wo Dekompressions-Forscher arbeiteten, Verfahren entwickelt, um die berechneten Inertgasüberdrücke rein mathematisch zu erhöhen, um eine vergrößerte Inertgassättigung zu simulieren, oder aber, um genau das gleiche Ergebnis zu erzielen, die tolerierten Inertgasüberdrücke der Kompartimente zu verringern. Die bereits skizzierte Verringerung der „M-Werte“ fällt genau in dieses Schema, ebenso die „Adaptiven“ Algorithmen. Bei den Verfahren zu den GF werden nun einfach Faktoren < 1 benutzt, zunächst ohne physiologische Hintergründe. Weiterhin hat sich ein Skalierungsverfahren eingebürgert, mit dem sogenannte „tiefe Stopps“ rechentechnisch erzwungen werden können, ohne die dazugehörigen Stopps im flachen Bereich unnötig zu verlängern. Es handelt sich hierbei um eine lineare Skalierung von einem GF Low (GF Lo) für die tiefen Stopps, die über eine Geradenfunktion an die GF High (HG Hi) für die flachen Stopps herangeführt werden. Dies soll *Abb. III – 2.12.4.5/1* schematisch erläutern.

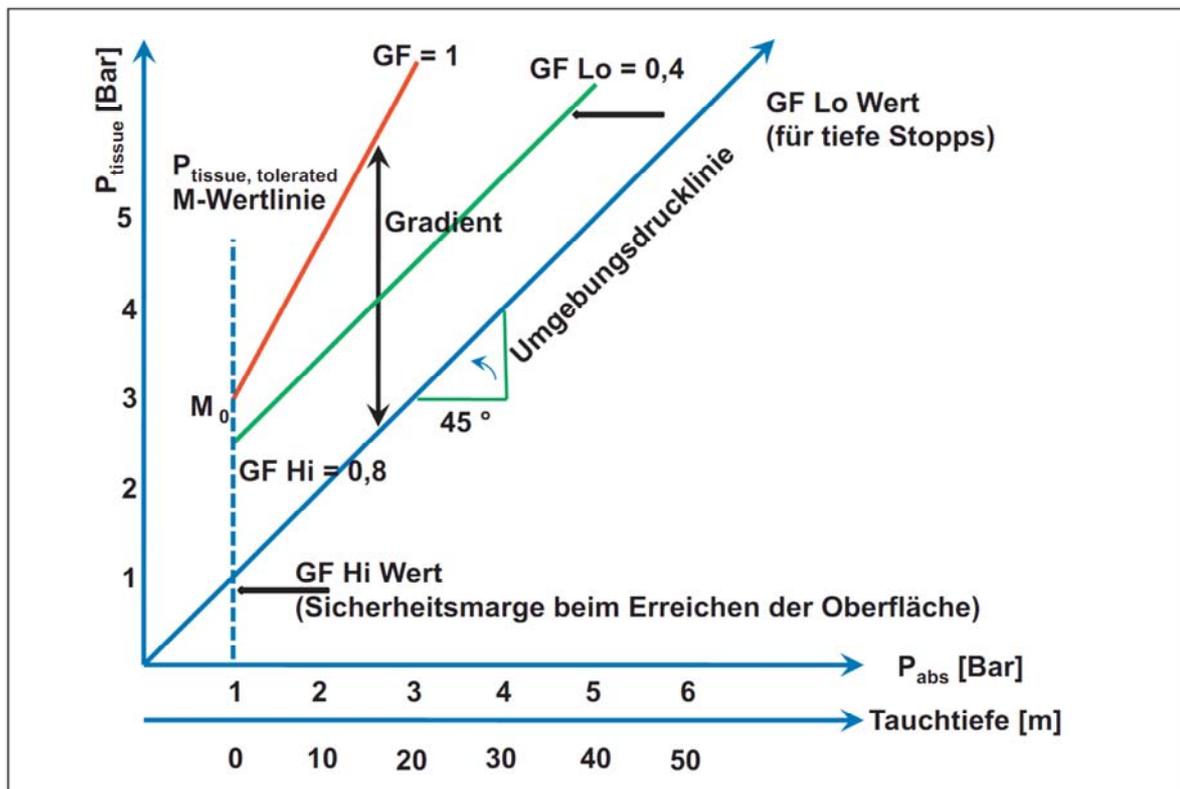


Abb. III – 2.12.4.5/1: Gradienten-Faktoren

Für einen $GF = 1$ werden die üblichen M-Werte der USN bzw. die publizierten Werte von Bühlmann-Hahn benutzt. Die $GF < 1$ bedeuten nun eine Verschiebung der Geraden nach rechts bzw. eine Verkleinerung des Winkels zur Achse des Umgebungsdruckes (je nachdem, wie diese GF rechenstechnisch im Tauchcomputer implementiert sind). Die benutzten GF gelten nun für die komplette Schar aller Kompartimente in gleicher Weise.

Aktuelle Tauchcomputer, bei denen GF explizit eingegeben werden können, sind u.a. Produkte von Shearwater (Predator, <http://www.shearwaterresearch.com>) sowie der Open Source Tauchcomputer von Heinrichs Weikamp (OSTC 2N, <http://www.heinrichsweikamp.net>).

III – 2.12.4.6

Variable Gradient Method (VGM)

Statt, wie oben beschrieben, nur ein Paar GF Hi/GF Lo für alle benutzten Kompartimente unterschiedslos in Rechnung zu bringen, benutzt die VGM nun das Paar GF Hi/GF Lo für jedes Kompartiment völlig individuell. Haben wir vorher, als Beispiel, bei einem Tauchcomputer mit 9 Kompartimenten die GF benutzt ($GF\ Hi + GF\ Lo = 2$ Parameter) so wären es beim gleichen Computer für die 9 Kompartimente eben 2×9 Parameter. Dies gilt pro Inertgas; d.h. bei einem Mischgascomputer wären dann $2 \times 9 \times 2$ Parameter zu bedienen. Abweichend zu den obigen GF ist das VGM auch in der Lage,

III – 2.12.4

GF > 1 zu verkraften. Ein GF > 1 bedeutet eine erhöhte tolerierte Inertgasübersättigung, gleichbedeutend mit reduzierten Dekompressions-Stops oder verlängerten Nullzeiten.

Ein aktuelles Modell mit VGM ist der VRX von VRTechnology (<http://www.vrtechnology.net/>) bzw. das OEM-Produkt von Hollis, der „DG05“, siehe: <http://hollis-gear.com/>.

III – 2.12.4.7

Varying Permeability Model (VPM)

Das VPM ist eines der ersten Blasenmodelle, bekanntgeworden durch viele Veröffentlichungen der Herren D.E. Yount und D.C. Hoffman et al. (→ *Kap. III – 2.12.4.9* mit den Quellenangaben). Die dort publizierten Algorithmen benutzen 5 freie Parameter: die Oberflächenspannung sowie die Grenzspannung einer Inertgasblase, deren minimal zulässiger Radius, eine Erholungszeit für die Blasen-Population und einen Summen-Parameter. Da aber alle diese Parameter prinzipiell unbekannt sind und sich nicht aus ersten Prinzipien ableiten lassen, werden sie durch numerische Fits angepasst. Die Datenbasis für diese Fits sind die bekannten Tabellen für Luft-Tauchgänge der USN, der britischen Marine (Royal Naval Physiological Laboratory = RNPL Tabellen) sowie das „Tektite“-Sättigungsexperiment. Bei dem Tektite Experiment von 1969 wurden 4 Taucher in einer Tiefe von 12,7 m über einen Zeitraum von 59 Tagen in einem Taucher-Habitat in der Karibik wissenschaftlich beobachtet. Die nachfolgende Dekompression betrug ca. 1 Tag.

Aktuelle Computer mit unterschiedlichen VPM-Implementierungen sind u.a.: Liquivision X1, neue Shearwater und ältere VR3-Produkte.

III – 2.12.4.8

Reduced Gradient Bubble Model (RGBM)

Hierbei handelt es sich um eine proprietäre Modifikation des VPM. Es sollen folgende Probleme adressiert sein:

- reversed profiles: Wiederholungs-Tauchgang tiefer als der vorangegangene
- repetitive: Dauer der Oberflächenpause bei wiederholtem Tauchen
- multi day: Mehrtages-Tauchaktivitäten

Aktuelle Modelle mit unterschiedlichen RGBM-Implementierungen findet man bei: Mares, Suunto und Liquivision und den UDI (Underwater Digital Interface) von UTC (<http://www.utc-digital.com>, siehe III – 2.12.4).

Die im Internet kursierenden Dokumente, auch diejenigen des RGBM-Hauptautors selber, Bruce Wienke, bleiben unvollständig, stellenweise mit Schreib-/Rechenfehlern behaftet, mit undokumentierten Konstanten und rätselhaften Variablen. Die angebotenen

Erklärungen zur Verbesserung, etwa gegenüber dem VPM, sind mehr als kryptisch (→ *Kap. III – 2.12.4.9* mit den Quellenangaben). Auf Grund der fehlenden Transparenz des Algorithmus und der verwendeten Parameter, d.h. wegen einer komplett mangelnden Nachvollziehbarkeit spielen Tauchcomputer (und auch die dazugehörige Planungssoftware für den PC) mit diesem Modell bei der Elitegruppe der exponierten TEC-Taucher so gut wie keine Rolle.

III – 2.12.4.9

Weiterführende Literatur

Die Hyper-Links führen direkt in die „RUBICON“ Datenbank, die Dokumente können von dort kostenlos heruntergeladen werden.

Perfusionsmodelle, allgemein

BOYCOTT, A.E., DAMANT, G.C.C., HALDANE, J.S.: The Prevention of Compressed Air Illness, *Journal of Hygiene*, Volume 8, (1908), pp. 342–443, <http://archive.rubicon-foundation.org/7489>

WORKMAN, ROBERT D.: „Calculation of Decompression Tables for Nitrogen-Oxygen and Helium-Oxygen Dives“, Research Report 6-65, U.S. Navy Experimental Diving Unit, Washington, D.C. (26 May 1965) <http://archive.rubicon-foundation.org/3367>

SCHREINER, H.R., KELLEY, P.L.: „A Pragmatic View of Decompression“, *Underwater Physiology Proceedings of the Fourth Symposium on Underwater Physiology*, edited by C.J. Lambertsen. Academic Press, New York, (1971) pp. 205–219

MÜLLER, K. G., RUFF, S.:

- Experimentelle und Theoretische Untersuchungen des Druck-Fall Problems, DLR, Forschungsbericht 71–48, Juli, 1971; sowie
- Theorie der Druckfallbeschwerden und ihre Anwendung auf Tauchtabellen, DVL/Bericht – 623/ 1966

THALMANN, ED., PARKER, EC., SURVANSKI, SS., WEATHERSBY, PK.: Improved probabilistic decompression model risk predictions using linear-exponential kinetics. *Undersea Hyper. Med.* 1997; 24(4): 255–274; <http://archive.rubicon-foundation.org/2276>

ZH-L

BÜHLMANN A. A.: Dekompression – Dekompressionskrankheit, Springer, 1983, ISBN 3-540-12514-0

BÜHLMANN A. A.: Tauchmedizin (Barotrauma, Gasembolie, Dekompression, Dekompressionskrankheit) Springer, 1993, ISBN 3-540-55581-1

III – 2.12.4

BÜHLMANN, A.A., VÖLLM, E.B., NUSSBERGER, P.: Tauchmedizin, 5. Auflage in 2002, Springer, ISBN 3-540-42979-4

HAHN, MH.: Workman-Bühlmann algorithm for dive computers: A critical analysis. 1995. In: HAMILTON, RW., ed. The effectiveness of dive computers in repetitive diving. UHMS workshop 81(DC)6-1-94. KENSINGTON, MD: Undersea and Hyperbaric Medical Soc. <http://archive.rubicon-foundation.org/7998>

Allgemeine Tauchmedizin sowie die Standardwerke

siehe auch in: CAISSON 2010; 25(1): 9,

EDMONDS, LOWRY, PENNEFATHER, WALKER: „Diving and Subaquatic Medicine“, 4 th. Ed., Arnold, ISBN 0-340-80630-3

Hierfür gibt es eine elektronische, für den Sporttaucher angepasste Komplett-Version zum kostenlosen Download unter:
www.divingmedicine.info/

BRUBAKK, NEUMAN et al.: „Benett and Elliot’s Physiology and Medicine of Diving“, 5th Ed. Saunders, ISBN 0-7020-2571-2

BOVE: „Bove and Davis’ Diving Medicine“, 4 th. edition, Saunders 2004, ISBN 0-7216-9424-1

HILLS, B. A.: (1977), Decompression Sickness, Volume 1, The Biophysical Basis of Prevention and Treatment, John Wiley & Sons, Ltd.. ISBN 0 471 99457 X.

DSAT/RDP

HAMILTON, ROGERS, POWELL, VANN: The DSAT Recreational Dive Planner: Development and validation of no-stop decompression procedures for recreational diving. 28 Februar 1994

VPM

YOUNT, HOFFMAN: On the use of a bubble formation model to calculate diving tables. Aviat. Space Environ. Med. 1986; 57: 149 – 156

RGBM

WIENKE: „Reduced Gradient Bubble Model in depth“, Best Publishing Company, 2003, ISBN 1-930536-11-9

III – 2.12.5

Aktuelle Hardware

Derzeit gibt es über 100 verschiedene Tauchcomputer am Markt. Im Folgenden wird eine Auswahl an (relativ) aktuellen Produktphotos, Formfaktoren sowie Leistungsmerkmalen vorgestellt. Es ist daher ganz zwangsläufig, dass hier nicht alle Hersteller erscheinen können. Wird ein Produkt nicht erwähnt, so bedeutet dies keinerlei Wertung.

III – 2.12.5.1

Produktphotos



Quelle: Oceanic

Abb. III – 2.12.5.1/1: Typ Atom 3.0



Quelle: Oceanic

Abb. III – 2.12.5.1/2: Typ OCS blue Metric



Quelle: Oceanic

Abb. III – 2.12.5.1/3: Typ OC1 mit Sender



Quelle: Oceanic

Abb. III – 2.12.5.1/4: Typ veo 3.0 wrist 1

III – 2.12.5



Quelle: Johnson Outdoor
Abb. III – 2.12.5.1/5: Typ Aladin 2 G



Quelle: Johnson Outdoor
Abb. III – 2.12.5.1/6: Typ Galileo Sol EU



Quelle: Subgear
Abb. III – 2.12.5.1/7: Typ XP-Air



Quelle: Johnson Outdoor
Abb. III – 2.12.5.1/8: Typ Digi 330

III – 2.12.5.2 Formfaktoren

Die „Tauch“-Computer der allerersten Generation waren Mainframes oder schrankgroße Prozessrechner und dienten im Wesentlichen zur Generierung der Tauchtabellen. Die ersten mobilen digitalen Geräte waren in etwa größere Zigarrenkisten (s. a. Kap. III – 2.12.2).

Der raschen Miniaturisierung der elektronischen Bauteile, dem sinkenden Energieverbrauch und der gestiegenen Leistungsfähigkeit ist es zu verdanken, dass heutige Geräte in einer Vielzahl von Formfaktoren und Leistungsmerkmalen auf dem Markt sind.



Quelle: Verfasser

Abb. III – 2.12.5.2 /1: Auswahl einiger aktueller Tauchcomputer

Grob kann man die Formfaktoren wie folgt unterscheiden:

- Typ Handgelenk, kleines Display
- Typ Handgelenk, großes Display
- Typ Uhr
- Typ Konsole
- Typ Maske (Head Up Display, HUD)

III – 2.12.5

Die Grenzen sind fließend, die Leistungsfähigkeit auch. Nicht immer geht ein großer Formfaktor mit vielen Leistungsmerkmalen einher. Eine Gewissheit bleibt: ein großes, hübsch buntes Display benötigt immer mehr Energie als eine kleine LCD- oder monochrome Anzeige. Allenfalls kann man ein paar generelle Trends erkennen.

- Typ Handgelenk, kleines Display

Oft preiswerte Einsteigergeräte, mit nur einem EAN-Gas. Aber auch hier: der Aladin TEC 2 G von Uwatec/Scubapro glänzt mit einem EAN-Gas und einem zweiten, dem Dekompressions-Gas, weiterhin mit vom Taucher frei wählbaren (tiefen) Level-Stopps und einer kabelfreien Infrarot-Kopplung zum PC (→ *Abb. III – 2.12.5.2/2 - 4*).



Quelle: Johnson Outdoors
Abb. III – 2.12.5.2/2: Typ Aladin TEC 2 G



Quelle: Oceanic
Abb. III – 2.12.5.2/3: Typ VEO 1.0



Quelle: Oceanic
Abb. III – 2.12.5.2/4: Typ VEO 2.0

Oft sind mit diesem Formfaktor die einfachen Bottom-Timer (nur Messung und Anzeige von Tiefe und Tauchzeit) sowie Ersatzgeräte üblich. Beispiele: der „Digital-Tiefenmesser 330“ von Uwatec/Scubapro sowie das *back up device*, der b.u.d. von Oceanic (→ Abb. III – 2.12.5.2/5 - 7).



Quelle: Johnson Outdoor
Abb. III – 2.12.5.2/5: Typ Digi 330



Quelle: Oceanic
Abb. III – 2.12.5.2/6: Typ b.u.d. mit Clip

III – 2.12.5



Quelle: Oceanic

Abb. III – 2.12.5.2/7: Typ GEO 2.0

- Typ Handgelenk, großes Display

Das größere Display verlockt zur Darstellung von mehr Funktionen oder Parametern gleichzeitig. Oft kommen diese Geräte mit farbigen, relativ hochauflösenden Displays und eignen sich somit zur Darstellung von Photos oder Bitmaps, z.B. der im Moment betauchten Unterwasser-Landschaft. Aktuelle Beispiele: die Galileo Klasse von Uwatec/Scubapro oder der Mares, Type *icon* (→ Abb. III – 2.12.5.2/8). In dieser Klasse sind oft auch Mischgas-Computer zu finden, gerne auch die weitergehenden Leistungsmerkmale wie digitaler Kompass und Puls- oder Sauerstoffmessung. Preislich befinden sich diese Geräte in der Oberklasse. Beispiele: die EMC-Reihe von Cochran oder „The Reef“ von Linde Werdelin; „VRX“ resp. „VRX OLED“ von VR-Technology bzw. das entsprechende OEM-Produkt von Hollis, der „DG05“ (→ Abb. III – 2.12.5.2/9).



Quelle: HTM Sport GmbH
Abb. III – 2.12.5.2/8: Typ icon HD



Quelle: VR Technology Limited
Abb. III – 2.12.5.2/9: Typ VR 3

III – 2.12.5

• Typ Uhr

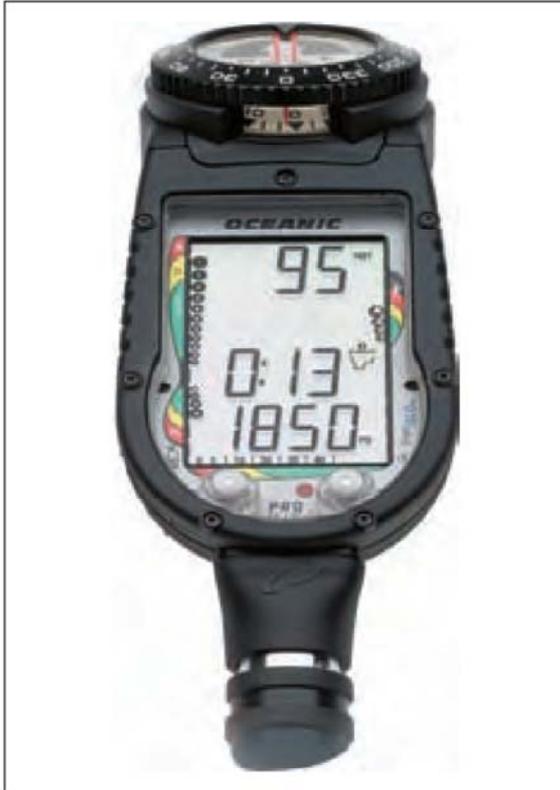
Parallel zur Funktion eines Tauchcomputers nehmen diese Geräte auch die Uhr- und Stoppuhrfunktionen wahr. Bedingt durch die Größe und ein modisches, attraktives Gehäuse können diese Geräte auch im Leben oberhalb der Wasserlinie benutzt werden. War früher eine Rolex das Statussymbol des Sättigungstauchers, ist heute ein „Life-Style“ Objekt für den Freizeitsportler angesagt. Beispiele: OC1 von Oceanic, „Dx“-Serie von Suunto (x = 6, 9, etc.) (→ *Abb. III – 2.12.5.2/10*) oder auch der „MATRIX“ von Mares und der Meridian Wrist von Scubapro. Dominiert der Uhren- oder auch der Aspekt eines Schmuckstückes, wird gerne die Funktion des Tauchcomputers in den Hintergrund gedrängt. Beispiele sind die Uhren von Citizen.



Quelle: Suunto Oy
Abb. III – 2.12.5.2/10: Typ Vector Funktionsuhr

• Typ Konsole

Auch hier wird das, im Vergleich zur Uhr, größere Display mit mehr Funktionen ausgefüllt. Oft finden wir in der Konsole die Kombination mit analogen Geräten wie Manometer oder Kompass. Üblicherweise wird die Konsole mechanisch ausgenutzt zum Anschluss des HD-Abganges der ersten Stufe. Die schlauchgebundene Druckmessung des Atemgases wird so in den Tauchcomputer integriert, z.B. beim „Aquatics Cobalt“ von Atomic und beim Oceanic ProPlus 2.1 (→ *Abb. III – 2.12.5.2/11*).



Quelle: Oceanic

Abb. III – 2.12.5.2/11: Typ ProPlus 2.1

- Typ Maske (Head Up Display, HUD)

Wer die Hände oder Handgelenke frei haben will, wem die Konsole zur Last fällt, hat nur noch die Wahl eines HUD-Gerätes. Der Computer befindet sich an der Tauchmaske, das Display wird in die Maske integriert. Beispiel: DataMask von Oceanic (→ Abb. III – 2.12.5.2/12 – 13).

III – 2.12.5



Quelle: Oceanic

Abb. III – 2.12.5.2/12: DataMask, Außenansicht



Quelle: Oceanic

Abb. III – 2.12.5.2/13: DataMask, Innenansicht, rechts unten das HUD-Display

Die schlauchlose – und auch drahtlose – Messung des Flaschendruckes geschieht über einen Sensor mit Sender. Der Sensor wird an einen Hochdruck-Abgang des Druckminderers (erste Stufe) geschraubt und üblicherweise zur Inbetriebnahme mit dem Empfänger des Tauchcomputers elektronisch „verheiratet“. Dieser Vorgang wird oft als „Paarung“ bezeichnet und ähnelt stark dem Einbuchen eines DECT-Telephons in eine Telephonanlage oder der Bekanntmachung von kabelloser Tastatur und Maus am PC. Parallel zur Druckmessung (üblicherweise mittels eines Piezo-Sensors) wird auch die Temperatur gemessen zur Kompensation des Druckmesswertes.

Das (generische) Kommunikationsprotokoll des Senders mit dem Empfänger im Tauchcomputer kann man sich in etwa so vorstellen (→ *Abb. III – 2.12.5.2/14*).

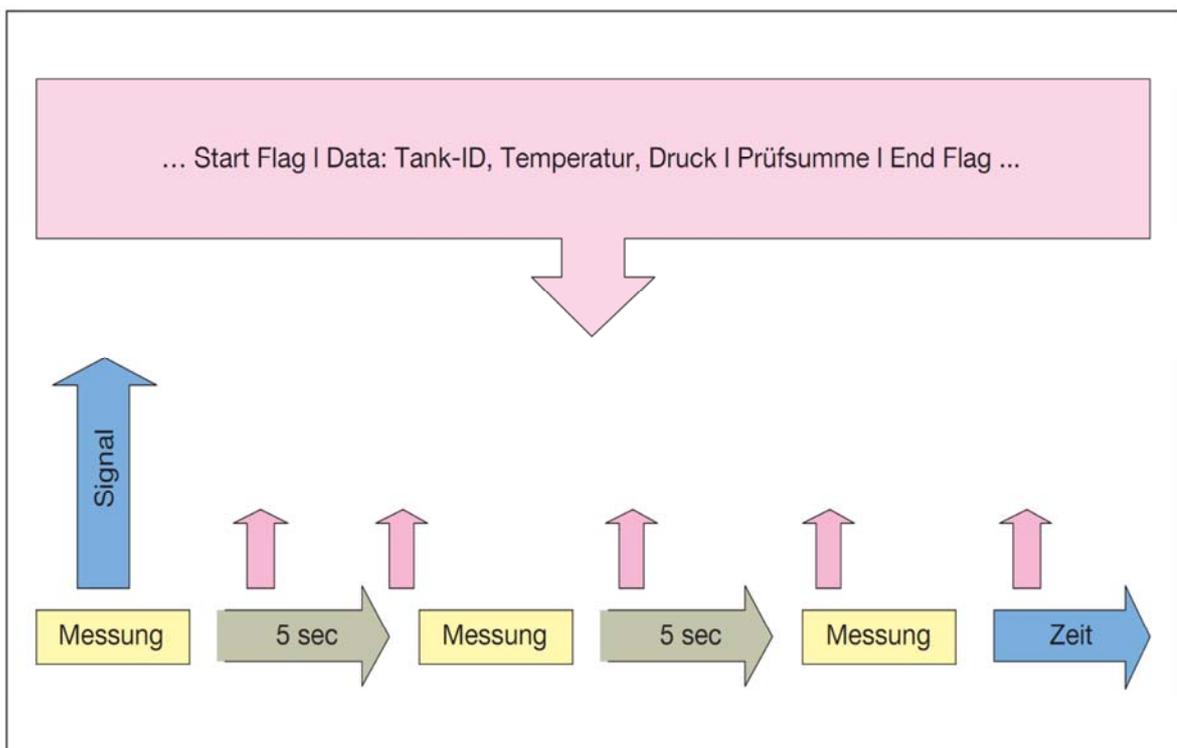


Abb. III – 2.12.5.2/14: Generisches (analog HDLC etc.) Sender-Protokoll für drahtlose Datenübertragung des Druckluftvorrats

Der dargestellte Zeitabstand zwischen den Messungen, hier z.B. 5 Sekunden, ist gleichbleibend. Die Sendeaktivität (Signal) ist zufallsversetzt, um permanente Daten-Kollisionen mit anderen Sendern von Tauchcomputern zu vermeiden. Die Fehlerkontrolle bzw. -korrektur erfolgt über Prüfsummen.

III – 2.12.5

III – 2.12.5.3

Leistungsmerkmale

Hier eine breite Palette alter und neuer Leistungsmerkmale, welche in der einen oder auch ganz anderen Form in der aktuellen Hardware implementiert ist. Manche sinnvoll, manche weniger, dies muss bei der aktuellen Beschleunigung der technologischen Entwicklung nicht mehr diskutiert werden. Lediglich die Überlegung, wie hoch die Investition sein soll, für nicht benötigte Leistungsmerkmale. Für einen Urlaubstaucher, der ein paar Luft-Tauchgänge pro Jahr in tropischen Gewässern absolviert, stellen sich Heliumgase und Sauerstoff-Sensoren lediglich als unnötige Ausgabe dar. Für diese Zielgruppe sollte die Bedienung möglichst intuitiv sein und nicht durch jede Menge Parameter verkompliziert. Eine Konvergenz jedoch in Richtung der weitverbreiteten mobilen Konsumelektronik (Smartphones, Tablet-PCs, Kameras, Audio- und Video-Player) ist durchaus erkennbar.

Standardleistungsmerkmale

- Tiefen [aktuelle und maximale Tiefe (Schleppzeigerfunktion)]
- Zeiten (Tauchzeit, Rest-Nullzeit, Stoppzeiten pro Stufe, gesamte Austauschzeit, verbleibende Gasmengen-Zeit)
- statt nur Pressluft/EAN auch Mischgase
- schlauchgebundene oder drahtlose (Gerätedruck-)Integration, auch für mehrere Gasflaschen
- Gauge Modus (nur Anzeige von Tauchtiefe und Tauchzeit, keine Dekompressionsberechnungen, Funktion analog „Bottom-Timer“ Gerät)
- Apnoe Modus (wie oben, aber im Sekundenintervall)
- Temperaturangaben (Umgebungstemperatur)
- aktueller (Oberflächen-) Luftdruck
- Süß-/Salzwasser-Anpassung
- metrische/imperiale Einheiten
- verbleibende Gasmenge/restliche Tauchzeit
- Oberflächenpause
- Simulations-/Planungsmodus
- Datum und Uhrzeit, Stoppuhr-Funktion
- Flugverbotszeit (time-to-flight/Entsättigungszeit)
- Ox-Tox (Sauerstoff Vergiftung)-Dosen (% CNS , OTU)
- wechselbarer Display-Schutz
- mit Handschuhen zu bedienen (Knöpfe und Armband ...)
- akustische und optische Warnungen, definierbar und abschaltbar, z.B. bei:
 - Überschreitung der Aufstiegs geschwindigkeit
 - Eintritt der Dekompressionsverpflichtung/Ende der Rest-Nullzeit
 - Verlassen des Deko-Korridors oder eines sonstigen Tiefen- oder Zeit-Korridors
 - O₂-Thematik

Zusätzliche Leistungsmerkmale

- vom Benutzer austauschbare Batterien/Akkus
 - (möglichst ohne Datenverlust)
- bei Akku-Betrieb: Aufladung der Akkus über externe Stromversorgung via USB-Kabel oder Solar-Modul

- UW-Kompass
- große und farbige Displays; OLED Display
 - Sprache der Anzeige einstellbar
 - Spiele während den Deko-Stopps oder Oberflächenpausen
 - individuell konfigurierbare Anzeigen
 - Batterie-/Akku-Status
 - Anpassbare Beleuchtung: Dauer, Intensität und Kontraste
- Kompartimentsättigungen als Balkengraphik
- Set Points [für Betrieb mit einem CCR (closed circuit rebreather, geschlossenes Kreislaufgerät)]
- Gaslisten
- Profilgraphik des Tauchgangs
- externe Herzschlagmessung (Pulsgürtel)
- Interaktive Eingaben:
 - Benutzerdaten und PINs
 - medizinische (Medikation, Blutgruppe, Allergien) und Notfall-Daten
 - Gradientenfaktoren
 - Fitness- oder Konservativismus-Levels
 - Bilder, Bitmaps von Tauchplätzen
 - „Unterwasser-SMS“
 - Mischgase und MOD (Maximum Operating Depth, die maximale Tauchtiefe für einen vorgegebenen Sauerstoff-Partialdruck)
- Kopplung mit dem PC/mit einer Desktop-Deco-Software, zum Zwecke der:
 - Dokumentation, Logbuch- und Tauchgangs-Planungsfunktion
- Anschluss von (eins bis drei) O₂-Sensoren (und auch schon von CO₂-Sensoren), deshalb:
 - Anzeige von pO₂/pCO₂
- individuell anpassbare Alarmer und Warnungen (Tiefe, Zeit, pO₂, ...)
- Auswahl des Dekompressionsmodells/-Algorithmus

Zusätzliche Leistungsmerkmale für den professionellen Bereich

- zuverlässige, möglichst kabellose Kopplung mit dem PC
- reversionssichere Aufzeichnung des Tauchprofils (spätestens für forensische Zwecke)
- die PC-Software sollte einen mit vertretbarem Aufwand zu bedienenden Planungs-Modus haben
- sowie zum Daten-Export die DAN Dateiformate (DL3 und DL7) bedienen können

Wünschenswerte Leistungsmerkmale

- volle 3 Jahresgarantie
 - Computer defekt? Einschicken und 3 Tage später ist das Tauschgerät da ...
- hohe Zuverlässigkeit
- auch bei massiver Falschbedienung unter Wasser: der „Lock Out Mode“ oder „Error Mode“ sollte zumindest die aktuellen Daten und die letzte, gültige Dekompressions-Information liefern sowie im Log-File den Grund für den Lock Out
- einfache, intuitive Bedienung
- geringer Energieverbrauch
- robustes, ergonomisches Gehäuse

III – 2.12.5

- kratzfestes Display, brillant, über einen großen Winkel gut ablesbar
 - auch im Dunkeln und Trüben ...
- Umweltfreundliche Produktion der Geräte; sowie
 - Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten gem. EU Richtlinie 2002/95/EG
 - Erfüllung entsprechender EN-Normen
 - ISO 9001-Zertifizierungen des Herstellers
- kostenlose Software updates über das Internet
- vollständige und verständliche Handbücher
- aktuelle Handbücher als PDF über Internet herunterladbar
- kostenlose Hotlines per E-Mail/interaktiv/call back mit Reaktionszeiten < 24 h

Manches von dieser „Wunschliste“ ist bei einigen Herstellern wie selbstverständlich erfüllt, bei anderen Herstellern ist es noch ein sehr weiter Weg bis dahin.

III – 2.12.5.5**Weiterführende Literatur**

- [1] „Entwicklung eines neuen Interfaces eines Tauchcomputers“, Bianca Bettinger #228 01 32, Studienarbeit am KTD (Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier), Universität Stuttgart: 03/2008.
- [2] „Determining the appropriate font size, and use of colour and contrast for underwater displays“; J.B. Morrison, J.K. Zander; Shearwater Human Engineering, 438 Felton Place, North Vancouver, BC, V7G 1Z9 (604) 929-6589; Contract no. W7711-997606, Defence R&D Canada - Toronto; Contract Report DRDC Toronto CR 2008-034, April 2008.

III – 2.12.6

Fehlerrechnung bei Tauchcomputern

Tauchcomputer berechnen u. a. Dekompressions- oder auch Rest-Nullzeiten anhand gemessener Größen, wenn das Atemgas genau spezifiziert ist. Die hauptsächlichsten Messgrößen sind:

- Umgebungs-Druck (Tauchtiefe),
- Umgebungs-Temperatur,
- verstrichene Zeit (Tauchzeit).

Wird der Tauchcomputer auch noch mit O₂-Sensoren für ein Kreislaufgerät betrieben, kann der Sauerstoffgehalt im Atemgaskreislauf dazu benutzt werden, den Inertgasanteil abzuschätzen. Die Messung des Atemgasverbrauches, z.B. über eine Funkverbindung vom Drucksensor an der ersten Stufe zum Tauchcomputer, wird eher zur Tauchgangsplanung und Überwachung der noch möglichen, verbleibenden Tauchzeit benutzt als zur Ermittlung einer Inertgassättigung.

Diese gemessenen Größen werden nun zur Berechnung der Dekompressionszeit herangezogen. Die genauen Rechenvorschriften liefert das zugehörige Dekompressions-Modell, der Algorithmus. Fehler bei der Erhebung der Messwerte fließen damit direkt in die Berechnung ein: der Messfehler findet sich somit unauffällig in der Anzeige eines Wertes im Tauchcomputer-Display!

Ein Messfehler besteht in der Regel aus einem **zufälligen** Fehleranteil und einem **systematischen** Fehler. Systematische Fehler, also Fehler aus dem System heraus bedingt, die nicht durch wiederholte Messungen „herausgemittelt“ werden können (z.B. Gas-Analyzer falsch kalibriert, falsche Position bei der Tiefenmessung, falsche Nullung eines analogen oder digitalen Tiefenmessers etc.), sollen hier nicht betrachtet werden. Es werden hier nur die prinzipiellen Fehler bei der Dekompressions-Zeit-Berechnung durch einen Tauchcomputer beurteilt. Die Grundlagen hierzu sind:

1. die Tatsache der zufälligen Streuung der Messwerte durch Messfehler,
2. das Fehlerfortpflanzungsgesetz.

Zu 1.: die Messwerte sind um den „wahren“ Wert normalerweise in Form der Gaußschen Glockenkurve verteilt. Die Gaußsche Glockenkurve beschreibt analytisch – in Form einer Exponentialfunktion – die zufällige Streuung der Messwerte um einen Mittelwert.

Zu 2.: das Fehlerfortpflanzungsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen mehreren voneinander unabhängigen Messfehlern und dem Fehler der Zielgröße. Das mathematische Handwerkszeug hierzu ist das sogenannte „totale Differential“.

Die *Abb. III – 2.12.6/1* zeigt den Verlauf mehrerer Messungen: in x-Richtung (nach rechts) die Größe des jeweiligen gemessenen Wertes, in y-Richtung (nach oben) die Häufigkeit dieser Werte. Man erwartet natürlich, dass in der Nähe des Mittelwertes die Häufigkeit zunimmt. Der Mittelwert repräsentiert damit unseren „wahren Wert“. Messwerte mit starken Abweichungen vom Mittelwert, also im linken oder rechten Eck

III – 2.12.6

der Graphik, sollten dagegen seltener vorkommen. Sind die Messungen kontinuierlich, würden die gemessenen Messwerte in genau dieser Glockenkurve liegen. Beim Tauchen handelt es sich aber um diskrete Messwerte. Man erhält somit Treppenstufen, die sich der Kurve anschmiegen.

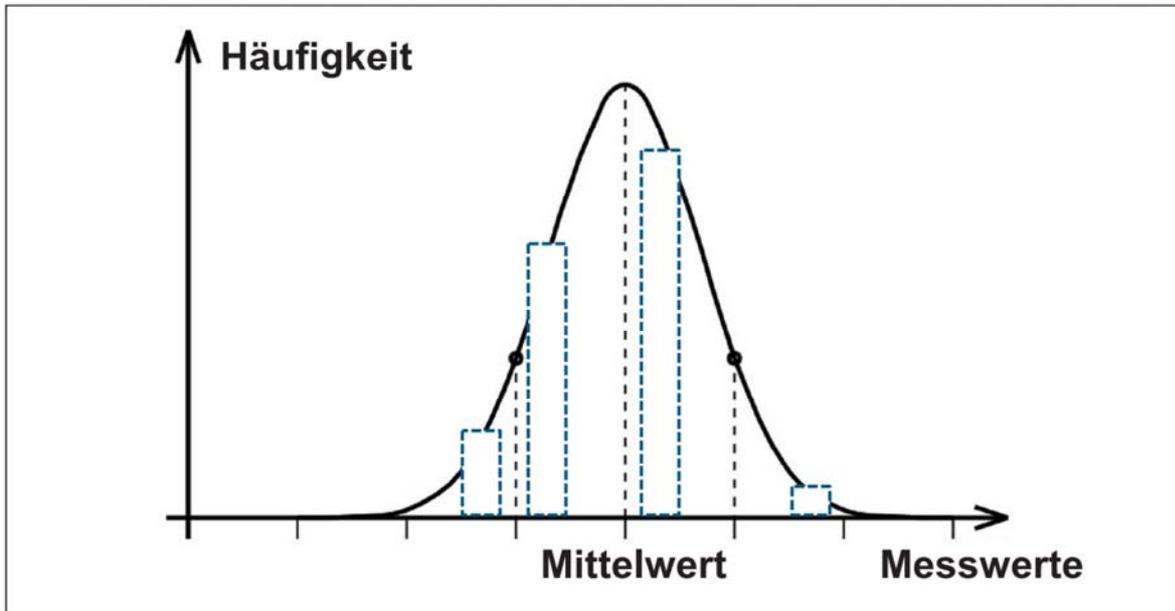


Abb. III – 2.12.6/1: Verteilung gemessener Werte um einen Mittelwert

Ein Beispiel von einer realen Messung zeigen die Abb. III – 2.12.6/2 – 3. Hierbei handelt es sich um zwei unterschiedliche Tauchcomputer, die nebeneinander auf der Plattform eines Tauchturms liegen.

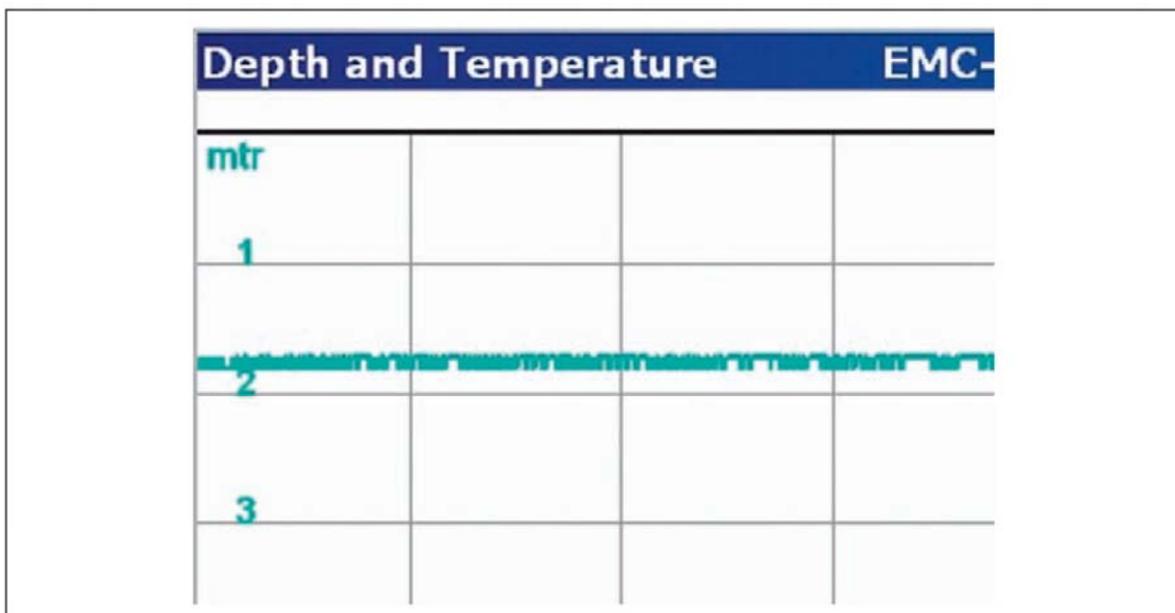


Abb. III – 2.12.6/2: Tiefenmessung

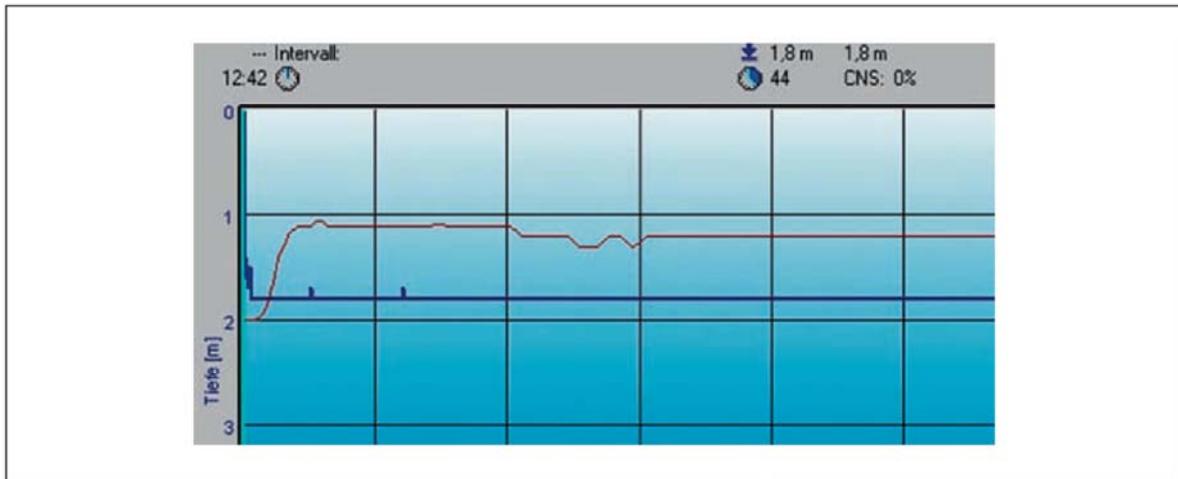


Abb. III – 2.12.6/3: Tiefen- und Temperaturmessung

Auf Grund der Messanordnung würde man eigentlich zweierlei erwarten: die gemessenen Tiefen sollten identisch (= 1,85 m) und über den Messzeitraum konstant sein. Offenbar werden unsere Erwartungen nicht so ganz erfüllt.

Der Fehler ist einfach der Betrag der Abweichung des „wahren“ Wertes (der Abstand zum Mittelwert in *Abb. III – 2.12.6/1* vom Messwert oder dem berechneten Wert, der sich aus gemessenen Werten (Druck, Temperatur, Zeit etc.) zusammensetzt. Der Betrag der relativen Abweichung, also das Verhältnis der absoluten Abweichung zum Absolutwert, gibt dann den relativen Wert in Prozent an. Die Formel sieht so aus:

$$\text{Fehler in Prozent} = |\Delta t_{\text{Deko}} / t_{\text{Deko}}| \times 100$$

wobei t_{Deko} die durch den Tauchcomputer berechnete Dekompressionszeit ist.

Die Dekompressions-Zeit selber ist u.a. eine Funktion des Inertgas-Kompartimentsdrucks $P_t \times P_s$, ist aber seinerseits eine Funktion f von: Tauchzeit t , Länge der Oberflächenpause (OFP), Wassertemperatur T , Anteil Sauerstoff f_{O_2} , Umgebungsdruck P_{amb} , Kompartimentsstartdruck P_{t0} , alveolarer Druck P_{alv} (vereinfacht zusammengefasst = Partialdruck Inertgase), als kleine Formel:

$$P_t = f(t, \text{OFP}, T, f_{\text{O}_2}, P_{\text{amb}}, P_{t0}, P_{\text{alv}}, \dots, \dots)$$

Dieser generische Ansatz gilt vom Prinzip her für alle Dekompressions-Modelle, unabhängig vom zugrundeliegenden Mechanismus und davon unabhängig, ob z.B. der Druck linear oder als Exponentialfunktion in die Berechnung eingeht. Weiterhin ist es so, dass für nur ein Inertgas (N_2 bei Luft/EAN respektive He bei Heliox) die Formel für die Dekompressions-Zeit analytisch, d.h. geschlossen mit einer Gleichung, gelöst werden kann. Sobald ein zweites Inertgas vorhanden ist, muss genau diese Gleichung numerisch gelöst werden. Das totale Differential, welches für eine exakte Fehlerberechnung notwendig wäre, lässt sich somit auch nicht bestimmen.*)

*) siehe folgende Seite

III – 2.12.6

Alle regulären Messfunktionen können in der Nähe des Messwertes durch eine Taylor-Funktion beschrieben werden. **) Für **kleine** Abweichungen vom Messwert (und genau darum handelt es sich ja!) gibt es immer einen linearen Anteil in der Taylor-Reihe. Somit wird sich unsere Fehlerabschätzung als ziemlich universell für alle Computer einsetzen lassen. Es dreht sich hier also ausschließlich um die Darstellung der Fehler einer aus gemessenen Werten berechneten Größe! Aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz haben wir somit zur groben Abschätzung als obere Fehlerschranke einfach die Summe aus den jeweiligen Beträgen zu bilden:

$$|\Delta t_{\text{Deko}}/t_{\text{Deko}}| = |\Delta t/t| + |\Delta T/T| + |\Delta f_{\text{O}_2}/f_{\text{O}_2}| + |\Delta P_{\text{amb}}/P_{\text{amb}}| + |\Delta P_{\text{Inert}}/P_{\text{Inert}}| + \dots + \dots$$

Wenn wir jetzt die Tauchcomputer-Manuals zu Hilfe nehmen und anhand unserer Erfahrung ein paar Abschätzungen zu den Fehlern machen, kann die obige Formel mit Leben, sprich mit einer Abschätzung des zu erwartenden Fehlers, gefüllt werden. Die Tauchcomputer-Manuals haben am Ende üblicherweise ein Kapitel über technische Spezifikationen; genau hier sollten wir die gesuchten Daten finden. Die Tauchzeitabweichung kann schon mal eine gute Minute betragen, der Temperaturgang durchaus 3 °C, die handelsüblichen Sauerstoff-Analyser messen mit ca. +/- 1 % (Analyser Handbuch), die Genauigkeit der Druckmessung (nicht der Tiefenangabe mit dem Süß-/Salzwasserfehler!) ist so ca. bei 2–3 % zu suchen, die Partialdrücke der Inertgase sind von den Wasserdampfkorrekturen bzw. dem respiratorischen Quotienten abhängig; das ergibt nun:

$$|\Delta t/t| = |1 \text{ min} / 60 \text{ min}| = 1 / 60 = 0,016 \rightarrow \text{ca. } 1,7 \%$$

$$|\Delta T/T| = 3 \text{ °C} / T = 3 / 273,15 + T^* = 3 / 300 = 0,01 \rightarrow 1 \%$$

$$|\Delta f_{\text{O}_2}/f_{\text{O}_2}| = 1 \%$$

$$|\Delta P_{\text{amb}}/P_{\text{amb}}| = 2 - 3 \%$$

*) totales Differential einer Funktion f berechnet sich als Summe aller Teildifferentiale nach den anderen Variablen:

$$df = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} dx_i .$$

**) Taylor-Funktion: jede halbwegs „normale“ (stetige) Funktion kann zur Berechnung von Näherungs-Werten in eine Potenzreihen-Funktion entwickelt werden. Die Potenzreihen-Funktion ist somit eine unendliche Summe von Polynomen und wird üblicherweise als „Taylor-Funktion“ bezeichnet. Hier ein Beispiel für die erwähnte Exponential-Funktion der Inertgassättigung:

$$e^x \cong 1 + x + (x^2 / 2) + (x^3 / 6) + \dots +$$

Für kleine Werte von x , dies würde zum Beispiel kurzen Dekompressionszeiten entsprechen, kann die Summe nach dem dritten, dem quadratischen Term oder auch bereits nach dem zweiten, dem linearen Term abgebrochen werden. Dies entspricht einer groben Näherung mit einer dazugehörigen größeren Abweichung. Soll aber die Abweichung kleiner gehalten werden, müssen in der Näherungsrechnung eben mehr Glieder des Polynoms aufsummiert werden.

$|\Delta P_{\text{Inert}}/P_{\text{Inert}}| = \text{ca. } 40 + 47 / \text{ca. } 760 = 87 / 760 = 0,114 \Rightarrow 11 \%$ (auf Tiefe 0 m), 9 % in 3 m, 7 % in 6 m, auf 40 m Tiefe noch 2 %, erst auf 90 m Tiefe ist der relative Fehler ca. 1%. Damit haben wir für diese Fehlerquelle genau in einer der Dekompressions-Zonen zwischen 10 und 0 m einen sehr großen Fehler! Somit haben wir im allerschlechtesten Fall, als Summe der oberen Grenzwerte (worst case):

$$|\Delta t_{\text{Deko}}/t_{\text{Deko}}| = 1 \% + 1 \% + 1 \% + 3 \% + 11 \% = 17 \%$$

Die Summe der unteren Grenzwerte bzw. der bessere Computer liefert höchstens als best case:

$$|\Delta t_{\text{Deko}}/t_{\text{Deko}}| = 0,5 \% + 0,5 \% + 2 \% + 1 \% = 4 \%$$

D.h. der „wahre“ Wert t kann sich irgendwo in diesem Intervall aufhalten:

$$[t - 17\%, t - 4\%, t, t + 4\%, t + 17\%]$$

Da wir aber von oben nach unten und wieder zurück tauchen, haben wir im wirklich besten Fall den arithmetischen Mittelwert zwischen den beiden Extremen:

$$|\Delta t_{\text{Deko}}/t_{\text{Deko}}| = (17 + 4) / 2 = \text{ca. } 10 \%$$

Auf diesen etwa 10 % Fehler sollten wir uns also immer geistig einstellen, sprich die angegebene Dekompressions-Zeit zur sicheren Seite aufrunden (Abrunden wäre ja rein mathematisch auch möglich, ist aber sehr wahrscheinlich nicht der goldene Weg)! In der Regel sind die Tabellen, im Gegensatz zu den Computern, hier schon auf der richtigen Seite, da durch die Einteilung in konkrete Stufen immer gerundet wird. Weiterhin haben die meisten Tabellen auch einen von 1 verschiedenen R_q (bis auf Ur-ZH-L!).

Was heißt das nun in der Praxis? Bei einer berechneten Dekompressions-Zeit von z.B. 20 min für eine Dekompressions-Stufe (Anzeige im Display) sollte man, um auf die sichere Seite zu gelangen, einfach diese ca. 10 %, also hier noch ca. zwei Minuten dazugeben: daran sollte es also wirklich nicht scheitern in Punkto Kälteschutz und Luftvorrat!

Nota Bene: es handelt sich hier nicht um zusätzliche Sicherheitsfaktoren, wie bei den Gradientenfaktoren oder bei einem verlängerten Sicherheits-Stopp. Hier wurden lediglich die Fehler der Physik und der Messung, und damit der Berechnung, egal für welchen Dekompressions-Algorithmus, berücksichtigt.

III – 2.12.7

Berechnungsunterschiede

„Es zeichnet einen gebildeten Geist aus, sich mit jenem Grad an Genauigkeit zufriedenzugeben, den die Natur der Dinge zulässt, und nicht dort Exaktheit zu suchen, wo nur Annäherung möglich ist!“

ARISTOTELES, Nikomachische Ethik

Anhand eines „Test-Tauchganges“ zur JURA (Wrack eines Holzschiffes im Konstanzer Trichter des Bodensees, Planungsdaten: 42 m Tauchtiefe, 25 min Grundzeit, Atemgas = Druckluft) sollen einige Computermodelle und Tauchtabellen sowie Desktop-Deco-Software miteinander verglichen werden. So erschließt sich die Variabilität in der TTS. Unter Desktop-Deco-Software werden einfach PC-Programme verstanden, die zur Tauchgangsplanung – oder Tauchgangs-Simulation – dienen.

Die „TTS“ ist die *time-to-surface*, die Summe aller Dekompressions-Stopps. Meist wird auch die Aufstiegszeit mit einer Austauschrampe von 10 m/min mit hinzugerechnet. Dies ist aber nicht standardisiert und jede Desktop-Deco-Software behandelt dies anders ... Die TTS variiert extrem, um den Faktor von ca. 7, und dies bereits beim ersten Tauchgang, wie man selbst bei einem nur oberflächlichen Blick auf die *Tabelle III – 2.12.7/1* sehen kann. Gleichzeitig werden die beiden Extrem-Positionen aufgezeigt, um traditionelle Tabellen und Tauchcomputer gegenseitig einzuordnen. Die Extreme sind das (Standard)-RGBM gegen eine spezielle Hahn-Tabelle. Immerhin ist es von 16/17' (Standard RGBM) über 85' (Hahn: 0,4 Bar Überdruck) zu 102' mittels einem VPM-Modell für den identischen Tauchgang ein großer Schritt.

Stoppzeiten auf den Dekompressionsstufen/ Methode:	24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	TTS min	Bemerkung:
RGBM				1	2	3	3	7	16	Tabelle
GAP				1	3	3	3	7	17	RGBM -2
EMC					2	2	3	8	19	Konservativ = 0
U.S.N. alt							2	14	20	
IANTD Air					1	4	3	18	26	Tabelle
U.S.N. 2008							26		31	140 feet
USN 09-03							28		33	140 feet
ZH-86						4	7	19	33	42 m/27 min
DECO 2000					1	4	8	16	33	
DCIEM						7	8	17	36	
NHeO3	26/2		2			1	8	21	36	Version 11/2011

Tabelle III – 2.12.7/1: Testtauchgang: Druckluft, 42 m, 25 min Grundzeit

III – 2.12.7

Stoppzeiten auf den Dekompressionsstufen/ Methode:	24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	TTS min	Bemerkung:
TEC						3	k.A.	k.A.	36	L0 (Level Stop)
DP			1	1	3	4	9	19	37	GF: 45/90
GAP		1	1	1	2	4	9	19	37	GF: 45/90
VR3	2	-	2	-	-	2	8	22	40	3 m → 4,5 m
TEC					1	k.A.	k.A.	k.A.	40	L1
GAP		2	2	4	4	6	10	12	40	RGBM recreational
EMC			2	1	3	4	8	19	41	Konservativ = 50
TEC					3	k.A.	k.A.	k.A.	45	L2
DP (*)		1	2	2	4	6	11	19	46	VPM: Rel 3.1.4
TEC				1	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	50	L3
TEC				3	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	57	L4
HLP		2	3	4	6	8	13	24	60	VPM 10 % Safety factor
TEC			2	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	65	L5
NHeO3	27/2	20/2			1	8	13	39	69	Cons.: 50
SDP	1			1					73	P2/A0
Hahn ¹⁾	2	3	4	5	7	12	17	30	85 +	24 min / Quelle: s. u.
HLP	2	3	4	6	8	13	22	44	102	VPM 30 % Safety factor

Tabelle III – 2.12.7/1: Testtauchgang: Druckluft, 42 m, 25 min Grundzeit (Forts.)

Legende

- DCIEM = Defence and Civil Institute of Environmental Medicine, (alte Bezeichnung, jetzt): Defence Research and Development Canada; www.drdc-rddc.gc.ca
- DECO 2000 = Austauschabelle Dr. Max Hahn, 2000; für Sporttaucher mit Druckluft
- DP = DecoPlanner Version 2.0.40 bzw.:
- DP (*) = DecoPlanner Version 3.1.4, die Deco-Software von GUE (Global Underwater Explorers, <http://www.gue.com/>)
- EMC = Cochran EMC-20 H, Version j, Deco-Software von Cochran Undersea Technologies, <http://www.divecochran.com/>
- GAP = GasAbsorptionProgram Version 2.3.1665; Deco-Software sowohl mit RGBM als auch ZH-L mit GF

¹⁾ Quelle: HAHN M, WENDLING J: No-Bubbles Decompression Tables. In: Safety Limits of Dive Computers, UHMS workshop 1992, S. 68 – 72

Legende

GF	=	Gradientenfaktoren; die Kombination GF Low = 0,4; GF High = 0,9 ist eine übliche/bewährte Standardeinstellung mit nur leicht erhöhtem Konservatismus gegenüber den etablierten Austausch Tabellen
HLP	=	HL Planner Version 1.0.2314, VPM Deco-Software
IANTD	=	International Association of Nitrox & Technical Divers
NHeO3	=	Mischgasrechner von VR Technologies, Cons. ist der Konservatismus-Faktor, vom Taucher einzuprogrammieren. Pro 10 Punkte wird die Inertgassättigung rechnerisch um 2 % erhöht
RGBM	=	Reduced Gradient Bubble Model, die Luft/EAN Tabelle ist von RGBMdiving.com
SDP	=	Suunto Dive Planner 1.0.0.3, RGBM Deco-Software
TEC	=	Uwatec/Scubapro Aladin TEC 2G; Tauchcomputer: die L0 -> L5 sind die vom Taucher einzuprogrammierenden sogenannten „Level Stops“. Die Level Stops sind nicht-verpflichtende, tiefe Stopps
TTS	=	time-to-surface (nach Ablauf der Grundzeit)
U.S.N.	=	Tabellen der United States Navy, „alt“: Rev.4 / 1965 und Rev. 6 / 2008, sowie die erneute Korrektur in 2009
VPM	=	Varying Permeability Model, in den verschiedensten Deco-Softwares eingepflanzt
VR3	=	Tauchcomputer von VR Technologies, früher: DeltaP. Die Tiefe des letzten Stopps kann vom Taucher einprogrammiert werden, hier z.B. von 3 auf 4,5 m verlegt. Die Nachfolgeprodukte sind die NHeO3 sowie VRX-Computer
ZH-86	=	Luftdekompressionstabelle (Zürich 1986), A.A. Bühlmann; der zugrunde gelegte Perfusions-Algorithmus wird als „ZH-L 16“ bezeichnet

Noch eine Bemerkung zur *Tabelle III – 2.12.7/1*: die meisten Tauchcomputer und Desktop-Deco-Softwares mit den RGBM-Modellen rechnen in Wirklichkeit mit einem sogenannten „RGBM folded over ZH-L“. Dies bedeutet, dass tatsächlich im Kern des Algorithmus mit einem ZH-L Modell gerechnet wird, bei dem lediglich die kritischen a- und b-Parameter über sogenannte „f“-Faktoren reduziert werden. Diese „f“-Faktoren sind, rein mathematisch betrachtet, nichts anderes als die bereits bekannten Gradienten-Faktoren (= GF, → *Kap. III – 2.12.4.5*) .

III – 2.12.8 Anwendertipps

III – 2.12.8.1 Hinweise zur Benutzung

Die zwei wichtigsten Bestimmungen für den Umgang mit Tauchcomputern:

1. Das Handbuch des Herstellers sorgfältig durchlesen!
2. Gibt es Probleme im Betrieb oder Unklarheiten? Ziffer 1. zu Rate zu ziehen!

Allerdings bedeutet „sorgfältiges Durchlesen“ im Falle eines Tauchcomputer-Handbuches: alle Beispiele nachvollziehen!

- Sind Parameter einzustellen oder etwas zu programmieren: Alles ausprobieren!
- Alle dargestellten Display-Informationen prüfen!
- Alle beschriebenen Situationen anhand folgender Idee auf den Prüfstand stellen:
 - wenn ich jetzt unter Wasser wäre, würde ich das verstehen?
 - Wenn ja, welche Konsequenzen hat das für den Tauchgang (z.B. auftauchen? oder gar abtauchen? Richtungswechsel? Gaswechsel? etc. ?)

Alle folgenden Tipps sind eigentlich in den Handbüchern der Tauchcomputer zu finden, zumeist auf den ersten oder den allerletzten Seiten. Weiterhin sind diese Tipps i.d.R. identisch mit denjenigen der AAUS, der American Academy of Underwater Sciences (Amerikanische Akademie für Unterwasserwissenschaften, <http://www.aaus.org>).

Zusammenstellung dieser Tipps

Tauchen ist grundsätzlich mit Risiken behaftet! Auch wenn alle in den Bedienungsanleitungen beschriebenen Anweisungen genauestens befolgt werden, ist man vor den Risiken Dekompressionskrankheit, Sauerstofftoxizität oder anderen mit dem Nitrox-, Mischgas- oder Drucklufttauchen verbundenen Gefahren oder tödlichen Verletzungen nicht unbedingt geschützt.

„Verwenden Sie den Tauchcomputer erst, wenn Sie sich der möglichen Risiken bewusst und Sie gewillt sind, diese auch persönlich zu tragen.“

Den Tauchcomputer nur für diejenigen Gasgemische und Tauchgeräte verwenden, für die er auch ausgelegt ist.

- Vor jedem Tauchgang vergewissern, dass das verwendete Gasgemisch mit dem eingestellten O₂-Mix übereinstimmt. Ein falsch eingestelltes Gemisch hat zur Folge, dass entweder die Dekompression oder die Sauerstofftoxizität falsch berechnet wird. Die maximale Abweichung vom gemessenen Gemisch darf $\pm 1\%$ O₂ nicht überschreiten. Eine falsche Gasmischung kann tödlich sein!
- Den Tauchcomputer nur für die spezifizierten Atemsysteme (offen, halbgeschlossen, geschlossen etc.) benutzen.

III – 2.12.8

- Tauchcomputer sind üblicherweise nicht für Langzeitexpositionen mit Nitrox/O₂ entwickelt.
- Immer die optischen und akustischen Warnungen beachten.
- Die „Ox-Tox Dosen“ (O₂% ZNS oder OTU) häufig beobachten. Mit dem Aufstieg beginnen und den Tauchgang beenden, spätestens, wenn der ZNS-O₂-Wert 75 % überschreitet.
- Nie tiefer tauchen als die maximale, durch das verwendete Gasgemisch vorgegebene Tiefe [(MOD) Maximum Operating Depth].
- An die durch die Ausbildung vorgesehenen Maximaltiefen (Tiefenrausch, Sauerstofftoxizität) halten.
- Es besteht immer die Gefahr einer Stickstoffnarkose (Tiefenrausch). Der Tauchcomputer gibt diesbezüglich keine Warnungen aus.
- Bei jedem Tauchgang, auch Nullzeittauchgang, – mit oder ohne Tauchcomputer – einen Sicherheitsstopp einlegen (mindestens 3–5 min. auf 3–6 m).
- Für die Bestimmung der Dekompression und der Sauerstofftoxizität mit einem Tauchcomputer darf nur ein persönlicher, auf allen Tauchgängen mitgeführter Tauchcomputer verwendet werden.
- Bei einem Versagen des Tauchcomputers muss der Tauchgang unter Berücksichtigung der in der Ausbildung gelernten Aufstiegsprozeduren beendet werden (inklusive einem langsamen Aufstieg mit ca. 9 m/min und einem Sicherheitsstopp von 3 bis 5 Minuten auf 3–6 m).
- Die vom Tauchcomputer angezeigten Aufstiegsgeschwindigkeiten und Dekompressionsstufen müssen eingehalten werden. Bei einem Versagen des Tauchcomputers muss mit einer Aufstiegsgeschwindigkeit von ca. 9 m/min. oder weniger aufgetaucht werden.
- Während eines Tauchgangs müssen sich die Tauchpartner nach den Angaben des konservativsten Tauchcomputers richten. Das heißt nach demjenigen Tauchcomputer, der die kürzesten Rest-Nullzeiten bzw. die längsten Dekompressions-Stopps anzeigt.
- Nie alleine tauchen – der Tauchcomputer ersetzt keinen Tauchpartner.
- Immer entsprechend dem Ausbildungsstand tauchen. Der Tauchcomputer erhöht die taucherischen Fähigkeiten nicht.
- Immer mit zusätzlichen Instrumenten tauchen. Bei jedem Tauchgang mit einem Tauchcomputer müssen Zweitinstrumente („back up“) wie Tiefenmesser, Manometer, digitale Tiefen- und Zeitmesser und auch eine Taucheruhr zur Verfügung stehen, sowie Zugang zu Tauchtabellen.
- Wiederholtes Auftauchen bis in geringe Tiefen (JOJO-Tauchgänge) vermeiden.
- Starke Anstrengung in der Tiefe vermeiden.
- Bei tiefer Wassertemperatur und körperlicher Anstrengung den Tauchgang kürzer planen und/oder die Stoppzeiten verlängern.
- Nach Beendigung der Dekompression oder am Ende von Nullzeit-Tauchgängen die letzten Meter bis zur Oberfläche möglichst langsam aufsteigen.
- Mit allen Anzeichen und Symptomen von Dekompressionskrankheit vertraut sein. Beim Auftreten von Symptomen der Dekompressionskrankheit muss der Taucher gemäß den allgemeinen Richtlinien behandelt werden. Je schneller mit der Behandlung der Dekompressionskrankheit begonnen wird, desto besser ist ihre Wirkung.
- Mit Nitrox oder Mischgasen darf nur getaucht werden, wenn eine entsprechend gründliche Ausbildung von einer allgemein anerkannten Ausbildungsorganisation erfolgreich absolviert wurde.

Wiederholungstauchgänge

- Mit dem Wiederholungstauchgang warten, bis der „CNS O₂ %“ unter xx % gesunken ist. (xx < 25 < 40 < ... %)
- Auch beim Tauchen mit Nitrox oder anderen Mischgasen muss sichergestellt sein, dass die Oberflächenpause ausreichend lang ist (wie auch beim Tauchen mit Druckluft). Die Oberflächenpausen sollten 2, besser 3–4 Stunden betragen.
- Bei anstrengenden Tauchgängen mit Trimix oder Heliox ist es besser, nur einen Tauchgang pro Tag durchzuführen.
- Das Gemisch immer optimal auf den Tauchgang abstimmen.
- Keine Wiederholungstauchgänge, wenn irgendeine Tauchwarnung angezeigt wird.
- Pro Woche einen tauchfreien Tag einplanen.
- Bei einem Wechsel des Tauchcomputers darf der Wiederholungstauchgang erst nach einer Wartezeit von mindestens 48 Stunden begonnen werden.
- Keine Tauchgänge nach einem Tauchcomputer-Wechsel, einem Computer-Reset (normalerweise ausgelöst durch einen Batterietausch) oder nach dem Löschen der Restsättigung/der verbleibenden Entsättigungszeit.

Bergseetauchen

- Nie in Höhen über 4000 m tauchen.

Fliegen nach dem Tauchen

- Nach dem Tauchen mindestens 24 Stunden bis zum nächsten Flug.

Hier noch ein paar Dinge, die so *nicht* in den Handbüchern stehen:

Tauchcomputer können „absaufen“!

Deshalb:

- „back up“, wie Bottom-Timer, separater Tiefenmesser, Taucheruhr und eine Tauchtafel bzw. eine laminierte run time oder, noch besser: einen zweiten Tauchcomputer mitführen!
- Bevor mit dem neuen Tauchcomputer „richtig“ getaucht wird: zuerst ein paar flache Probe-/Gewöhnungstauchgänge in kontrollierter Umgebung durchführen (typischerweise Pool), um sich an die Anzeigen und die Bedienung zu gewöhnen.
- Den Anweisungen des Computer-Displays nicht sklavisch und/oder blindlings folgen. Ist z.B. eine Deko-Zeit auf der 3-m-Stufe beendet, nicht sofort und raketenhaft aus dem Wasser schießen.
- Nicht an die Grenzwerte gehen. Weder bei den Nullzeiten noch bei den % ZNS-Dosen. Versuchen, unter ca. 80 % zu bleiben. Nach jedem Geburtstag diese Grenze noch ein bisschen reduzieren und konservativer tauchen.
- Die maximale Aufstiegs geschwindigkeit sollte 9–10 m/min nicht überschreiten; langsamer ist hier eher besser.

III – 2.12.8

- Auch wenn der Tauchgangs-Simulator (oder die Planungs-Software) schon nach 15 min Oberflächenpause den gleichen Tauchgang auf 40 m erlauben würde: besser sind längere Oberflächenpausen. Gut sind 1–2 Stunden, länger ist auch hier besser: ab ca. 3 h findet, so BÜHLMANN, eine merkliche Reduktion der Mikro-Blasen statt.
- Körperliche Belastung, Kälte und Dehydrierung: immer durch ein erhöhtes Sicherheitspolster berücksichtigen

Tauchcomputer können Fehler machen!

Eine durchaus spaßige Bemerkung hierzu findet man im Shearwater Predator Manual (<http://www.shearwaterresearch.com>), einem High-Tech Tauchcomputer für offene und geschlossene Kreislaufsysteme, in der Revision 2.3.3 auf S.4.

Zitat: „ ... *This computer has bugs. Although we haven't found them all yet, they are there. ... This computer will fail. It is not whether it will fail but when it will fail. ...*”

Zu deutsch sinngemäß: Dieser Computer hat (auf jeden Fall!) Fehler. ... Dieser Computer wird (auf jeden Fall!) versagen ...

Deshalb:

- Während des Tauchens die Anzeigen der Tauchcomputer in der Tauchgruppe vergleichen: sind die Tiefenangaben halbwegs übereinstimmend? Sind die angegebenen Rest-Nullzeiten oder Deko-Stopp-Zeiten ähnlich oder wenigstens halbwegs realistisch?
- Auch wenn dies im Zeitalter von Mischgastauchcomputern und Deco-Software für PCs und Smartphones altmodisch erscheinen mag: die Angaben des Tauchcomputers anhand einer bewährten Dekompressionstabelle überprüfen. Natürlich sind hierbei Annahmen zu treffen und Vereinfachungen bezüglich des real getauchten Profils. Die Zahlen des Computers sollten aber trotzdem halbwegs plausibel sein.
- Und dies insbesondere bei Wiederholungs-Tauchgängen! Das heißt, versuchen, den Tauchgang vorher mit einer Tabelle zu planen. Dann diese Planung auf der UW-Schreibttafel festhalten und während des Tauchens mit den Tauchcomputern in der Tauchgruppe vergleichen. Man kann somit zumindest ein grobes Gespür für die Sinnhaftigkeit der angezeigten Rest-Nullzeiten bzw. der Stoppzeiten entwickeln.
- Bei der Planung von Wiederholungstauchgängen: die nachfolgenden Tauchgänge immer flacher planen.

Tauchcomputer wissen nichts über:

- Fitness oder Allgemeinzustand respektive Krankheiten des Benutzers
- (De-)Hydrierung, Alkohol vom Vorabend, ...
- Medikationen oder Impfungen, zurückliegende Operationen
- Körperliche Belastungen vor oder nach einem Tauchgang
- Nikotin- oder Drogenkonsum
- ...

Deshalb:

- Trifft einer oder auch mehrere dieser Faktoren zu: Sicherheitspolster einplanen. Insbesondere ist der Tauchcomputer ein persönliches Gerät und sollte über alle Tauchgänge beim Benutzer bleiben.
- Der Tauchcomputer ist mit gesundem Menschenverstand zu kontrollieren und nicht etwa umgekehrt!
- Das „ON“ des Tauchcomputers darf nicht das „OFF“ des Taucherhirns zur Folge haben.

III – 2.12.8.2

Pflegetipps

Diese sind normalerweise genauso den Hersteller-Handbüchern zu entnehmen. Auch hier nur eine Zusammenstellung des bereits vorhandenen Materials.

Der Tauchcomputer sollte geschützt werden vor

- Neugier (Gerät nicht aufschrauben!)
- direkter Sonneneinstrahlung
- mechanischer Gewalt, insbesondere punktuell oder stumpf wirkende Kräfte
- Schläge und Vibrationen
- Feuchtigkeit während der Nichtbenutzung
- Überschreitung der spezifizierten Einsatzgrenzen, wie Maximal-Tiefe oder maximale/minimale Betriebstemperatur

Weiterhin

- die Betriebsbedingungen einhalten
- die vorgeschriebenen Wartungsintervalle einhalten
- den Computer nicht fallen lassen
- keine schweren Gegenstände darauf ablegen
- das empfindliche Display kann mit den üblichen Schutzfolien oder den allfälligen Display-Protectoren vor Verkratzen geschützt werden
- nach Benutzung gründlich mit sauberem Süßwasser abspülen
- insbesondere die Öffnungen für den Drucksensor müssen frei sein
- und auch die sonstigen Bedienelemente (Knöpfe, Schalter etc. ...)
- keine aggressiven Putz- oder Scheuermittel oder sonstige Lösungsmittel (Alkohole, Benzine) benutzen
- ist der Computer sehr stark verschmutzt: einfach über Nacht in Wasser „einweichen“
- trocken, kühl und luftig lagern
- Ersatzenergiequellen vorrätig haben
- beim Einschalten die Selbst-Test-Routine aufmerksam beobachten
- ggf. Fehlercode notieren bzw. die Energiequelle austauschen
- erscheinen Warnmeldungen: nicht mit diesem Gerät tauchen!
- vor Benutzung das Gehäuse und ggf. Armband/Schließe auf Risse und Bruchstellen kontrollieren
- sind insbesondere die technischen Öffnungen (PC Link, Sensor Link, Power Link, Batterie-/Akku-Fach etc.) wasserdicht verschlossen?

III – 2.12.8

Tauchcomputer aus dem EU-Wirtschaftsraum sind oft in der Gruppe der PSA (Persönliche Schutzausrüstung) zu finden. Sie müssen dann aber mit den folgenden Richtlinien/Normen konform gehen:

- Richtlinie 89/686/EWG (→ *Kap. II – 4.7.1.1*)
- Richtlinie 93/68/EWG (→ *Kap. II – 4.7.1.2*)
- DIN EN 250:2006-08 (Atemgeräte – Autonome Leichttauchgeräte mit Druckluft – Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung)
- DIN EN 13319:2000-07 (Tauch-Zubehör – Tiefenmesser und kombinierte Tiefen- und Zeitmessgeräte – Funktionelle und sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfverfahren)

Allerdings gilt hier: sämtliche Informationen über Dekompressionsverpflichtungen sind explizit ausgeschlossen!

Ein CE-Kennzeichen im Computer-Manual oder der Hersteller-Homepage bedeutet nur, dass die für die Messungen spezifizierten Parameter eingehalten werden. Die Funktionen, die den Taucher darüber hinaus besonders interessieren, bleiben von diesen Qualitätsprüfungen ausgenommen.

Letzter Tipp

Soll der Tauchcomputer in einer Druckkammer getestet werden, dann muss er sich im **Wasserbad** befinden. Auf keinen Fall „trockenen“ Überdruck anwenden! Tauchcomputer – wie auch Taucheruhren – sind normalerweise wasserdicht, aber **nicht** gasdicht. Spezielle Systeme, die für den Einsatz in Kammern oder Taucherglocken gedacht sind, haben deshalb üblicherweise ein (Helium-)Überdruckventil.



Quelle: Verfasser

Abb. III – 2.12.8.2/1: Test diverser Tauchcomputer im Druckkammer-Centrum 1 in Stuttgart (<http://www.dcs1-stuttgart.de>)



Quelle: Verfasser

Abb. III – 2.12.8.2/2: Tauchcomputer in einer Druckkammer zu Testzwecken, müssen sich im Wasserbad befinden. Auf keinen Fall „trockenen“ Überdruck anwenden!

III – 2.12.8

III – 2.12.8.3

Weiterführende Literatur

- [7] DIVE COMPUTERS, Ken Loyst, Watersport Books 1992, ISBN 0-922769-09-5
- [8] Decompression Theory, Dive Tables and Dive Computers, John E. Lewis, PADI 1991, ISBN 1-878663-06-2
- [84] Barsky, Steven M., Deeper Diving and Dive Computers, Scuba Diving International, 2001, ISBN 1-931451-03-6
- [85] Barsky, Steven M., Choosing and Using Dive Computers, Hammerhead Press Video, 2007, ISBN 978-0-9740923-4-8
(Weiterführende Informationen zu diesen Büchern unter der Nummer in der eckigen Klammer: [] auf: <http://www.divetable.de/books/index.htm>)
Weitere Informationen zum erwähnten Druckkammertest im DCS 1 in Stuttgart (*Abb. III – 2.12.8.2/1*) sind zu finden unter: <http://www.divetable.de/skripte/2.pdf>