

## III – 2.12

## Tauchcomputer

## III – 2.12.1

## Einleitung

Die *Dekompressionstabellen* – oder *Austauchtabellen*, wie sie in der gewerblichen Taucherei genannt werden – sind ursprünglich für die Arbeiter in luftgefüllten Senkkästen („*Caisson*“) erstellt worden. Damals war die Ursache der „*Caisson-Krankheit*“ zwar noch unklar, auf der Erfahrung beruhend fand man aber heraus, daß sie durch verlangsamten, stufenweisen Aufstieg verhindert werden konnte. Dies führte zur Entwicklung von *Austauchtabellen*.

Von HALDANE wurden 1909 erstmals Maßgaben für die stufenweise Dekompression publiziert. Sein Prinzip gilt bis heute, nur die Tabellenwerte sind den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen angepaßt. Wesentlichstes Merkmal der *Austauchtabellen* ist das für die Berechnung zugrundegelegte Tauchprofil in Form eines Rechtecks (→ *Abb. II – 3.2.1/1: Tauchprofil eines Berufstauchers*). Es entsprach den Arbeitsbedingungen (abtauchen, arbeiten, austauchen) der Taucher.

Mit autonomen Leichttauchgeräten werden, wie der Name schon sagt, „unabhängige“ Profile getaucht (→ *Abb. II – 3.2.1/2: Tauchprofil eines Sporttauchers*). Insbesondere Sporttaucher vollführen – innerhalb der durch den Luftvorrat gesetzten Grenzen – ständig unsymmetrische Dreiecksprofile mit der größten Tiefe am Anfang der Tauchzeit und einem langsamen Aufstieg. Dabei wird bekannterweise weniger Stickstoff ( $N_2$ ) im Körper gelöst (→ *Kap. II – 3.6.1.1*) als bei einem rechteckigen Tauchprofil, welches aber für die Tabellenablesung zugrunde gelegt werden muß. Dies bedeutet in der Praxis: Bei Tauchgängen, die vom Rechteckprofil abweichen, wird der Taucher – im besonderen Maße der Hobbytaucher – zu überflüssigen Dekompressionspausen (Haltezeiten), damit zusätzlichem Unfallrisiko, gezwungen.

Mußten die Veteranen des Tauchsports ihre auf Papier gedruckten *Austauchtabellen* noch auswendig lernen, hatte es die nächste Generation schon besser: mit wasserfesten Tabellen konnte der Taucher abtauchen und in Abstimmung zu Taucheruhr und Tiefenmesser die Dekompressionspausen bzw. -stufen fortlaufend ablesen. Man war aber anfänglich froh über die Entwicklung des sogenannten *Dekompressionsmeter* (→ *Kap. III – 2.9.5*), denn dieses Gerät berücksichtigte erstmals das tatsächlich getauchte Profil und brachte so eine Popularisierung des Tauchens. Doch die Leistungsfähigkeit dieses Meßgerätes – es konnte nur ein Gewebe „berechnet“ werden – war stark eingeschränkt. Diese Tatsache, sowie mögliche Ablesefehler – insbesondere bei Wiederholungstauchgängen – beim Umgang mit den Tabellen eröffneten den Markt für etwas Revolutionäres: den **Tauchcomputer!**

Wie vielen Novitäten der Geschichte erging es auch dem Tauchcomputer; er ist noch heute – obwohl tausendfach verkauft – das am meisten kontrovers diskutierte Utensil des Tauchers. Bewußt wurde schon im Grundwerk dieses Handbuches vor einer „Computereuphorie“ gewarnt. Dies hat seine Gründe:

## III – 2.12.1

Der Tauchcomputer sollte originär die  $N_2$ -Aufnahme im Körper gemäß dem tatsächlichen Druck-Zeit-Profil auf digital-elektronischem Weg nachbilden, und dem Taucher Informationen über eventuell einzuhaltende Austausch-Stufen und -Pausen anzeigen. Dazu war er ohne Zweifel besser in der Lage als das *Dekompressiometer*. An den ureigensten Möglichkeiten der Mikroelektronik und dem natürlichen Drang der freien Marktwirtschaft lag es, daß die Tauchcomputer zu wahren „Unterwasserrechenzentren“ ausgebaut wurden. Die abrufbaren Funktionen, Anzeigen und Memory-Daten der jüngsten Computer-Altersklasse haben ein Ausmaß erreicht, daß für die Betriebsanleitung 40 Seiten (!) Umfang erforderlich sind. Ob der erfahrene Taucher diese „Datensammlung“ benötigt erscheint zweifelhaft, ohne Zweifel wird jedoch dem unerfahrenen Taucher bei Benutzung dieses Gerätes Sicherheit suggeriert, die (noch) nicht vorhanden ist! Einige Zeitgenossen unterwerfen sich auf Gedeih und Verderb dieser Technik, reizen sie bis an ihre Grenzen aus und legen so den Grundstock für die Verkehrung des im Prinzip hilfreichen Equipments. In den ersten Werbetexten wurden Tauchcomputer als „Wundergeräte“ angepriesen und mit irrationalen Tauchtiefen in Verbindung gebracht. Es wurden beliebige Tauchprofile empfohlen, obwohl die einzige Überprüfung der Werte aus Tabellen mit Rechteckprofilen stammte. Probleme bestanden noch in der Erfassung der Risiken mehrfach wiederholter Tauchgänge (z. B. mehr als drei) innerhalb der angenommenen Totalentsättigungszeit. Kein Wunder, wenn unter diesen Umständen namhafte Tauchmediziner die Anwendung von Tauchcomputern sogar grundsätzlich ablehnten, da nach ihrer Auffassung die Geräte zu fahrlässigem Tauchen verleiten und somit weniger statt mehr Sicherheit beim Tauchen bringen. Es würde den Rahmen dieser Einleitung sprengen, wollte man die Polemik zu diesem Thema in allen Einzelheiten erörtern. Der interessierte Leser wird vielmehr die Quellenangaben (→ Kap. III – 2.12.5) zu weiterem Studium benutzen.

Geräte und Betriebsanleitungen aus jünster Zeit lassen, ebenso wie die einschlägige Werbung, einen Schritt in Richtung Vernunft erkennen. Möglicherweise ist dies der Renitenz derer zu verdanken, die Anfangs als „Hemmschuhe“ moderner Technologien abgestempelt wurden. Wenn ein Hersteller von Tauchcomputern in seiner Gebrauchsanweisung neben der Verwendung des Computers zur Sicherheit auch noch die parallele Anwendung der konventionellen Taucheruhr, Tiefenmesser und Dekompressionstabelle empfiehlt und darüber hinaus den Nullzeit-Tauchgang als Standard und dekopflichtige Tauchgänge als Ausnahme proklamiert, so kann diese Einsicht nur begrüßt und zur Nachahmung empfohlen werden. Ebenso sind die standhaften Statements eines anderen Herstellers zu würdigen, wo mit Sachverstand verlängerte Austauschpausen und kürzere Nullzeiten bei Verwendung der neuen Computergeneration begründet werden. Es hat alles in allem den Anschein, als würden die zu Recht geführten Diskussionen erste Ergebnisse zeigen, die man als Kompromiß akzeptieren kann.

In diesem Sinne soll dieses Kapitel verstanden werden. Wissenschaftliche und technische Informationen zur Thematik sind dazu gedacht, den Tauchcomputer nicht als „elektronischen Führer“ sondern mit Wissen und Verstand als „elektronischen Helfer“ einzusetzen.

## III - 2.12.3

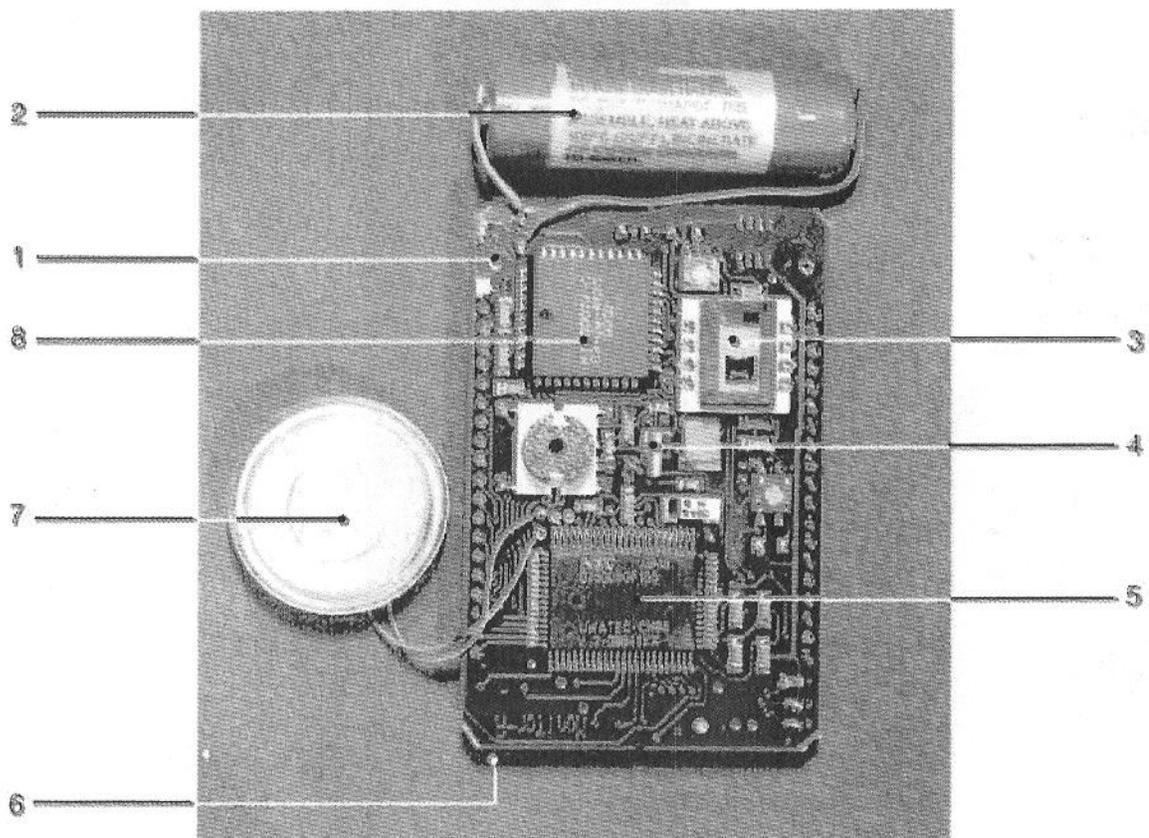
Technische Universalien (Von DIPL.-ING. ERNST VÖLLM)

## III - 2.12.3.1

## Aufbau eines Tauchcomputers

Ein Tauchcomputer besteht aus zwei Bereichen:

1. Die Hardware ist derjenige Teil des Computers, welcher „angefasst“ werden kann. Die Hardware besteht aus mechanischen und elektronischen Bauteilen, welche entwickelt oder eingekauft werden (→ Abb. III - 2.12.3.1/1).



Quelle: E: VÖLLM

Abb. III - 2.12.3.1/1: Hardware des Tauchcomputers Typ „MONITOR 2“  
(System LA SPIROTECHNIQUE)

## Benennung

- |                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| 1 = Leiterplatte | 5 = Mikroprozessor      |
| 2 = Batterie     | 6 = Anzeige (Rückseite) |
| 3 = Drucksensor  | 7 = Buzzer (Piepser)    |
| 4 = Quarz        | 8 = ASIC                |

III – 2.12.3.1

2. Die Software (das Computerprogramm) beinhaltet das Berechnungsmodell und bestimmt die Art und Weise der Bedienung und das Ablesen der Daten. Die Software ist im Speicher eines Mikroprozessors (Rechner) abgespeichert (→ Abb. III – 2.12.3.1/2).



Quelle: E. VÖLLM

Abb. III – 2.12.3.1/2: Ein Mikroprozessor auf einem Software-Ausdruck (Listing) zum Größenvergleich

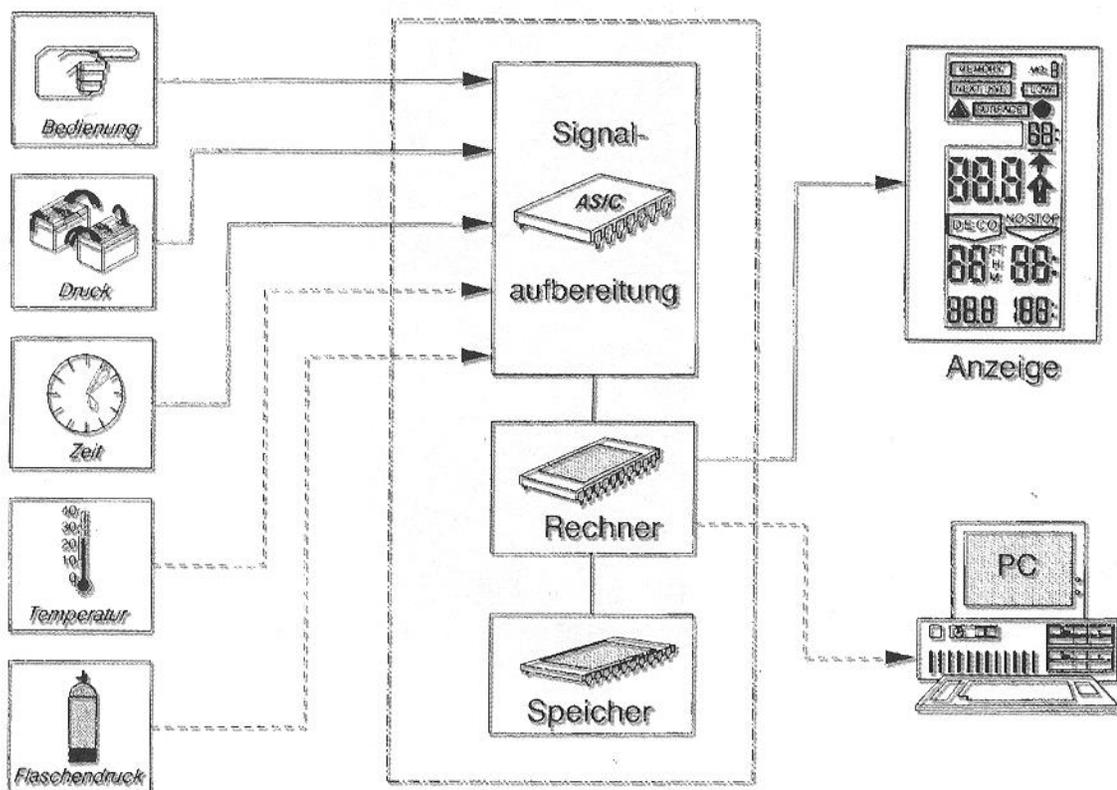
Die Qualität eines Tauchcomputers ist neben der Zuverlässigkeit der Hardware weitgehend durch die Software bestimmt. Übersichtlichkeit, Universalität, Informationsfülle, Sicherheitsmargen und vieles mehr, wird durch Software vorgegeben.

III – 2.12.3.2  
Hardware

Das Hardware-Konzept

Es gibt mehrere Lösungen für den Aufbau der Hardware. Eine mögliche Lösung ist im Blockschaltbild (→ Abb. III – 2.12.3.2/1) dargestellt. Darauf ist ersichtlich, daß die Elektronik aus folgenden Elementen besteht:

- Zentrales Rechenelement (Single-Chip Mikroprozessor)
- Drucksensor zur Erfassung des Luft- und Wasserdrucks
- Schaltung zur Aufbereitung des Drucksignals
- Sensoren/Schalter zur Bedienung des Computers
- Display zur Anzeige der Daten für den Taucher
- Summer für akustische Warnungen
- Batterie für die Energieversorgung



Quelle: E: VÖLLM

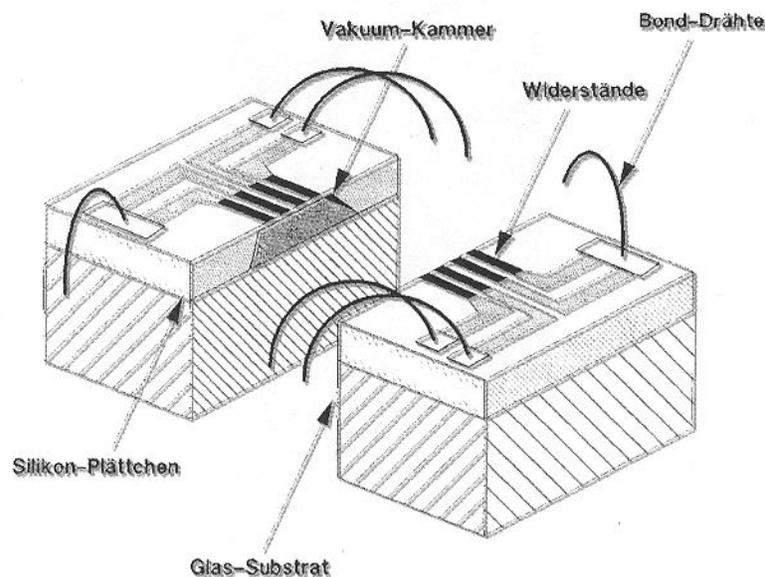
Abb. III – 2.12.3.2/1: Blockschemata eines Tauchcomputers

### Technik der Hardware

Der Energieverbrauch der heutigen Computer liegt weit unterhalb desjenigen der ersten Geräte dieser Art. Trotzdem hat der Energieverbrauch immer noch eine hohe Priorität. Moderne Geräte müssen immer aufwendigere Berechnungen durchführen und sind teilweise zur Messung des sich verändernden Luftdrucks permanent aktiv. Der Stromverbrauch eines Mikroprozessors steigt mit zunehmender Arbeitsgeschwindigkeit. Da aber eine Batterielebensdauer von mehreren Jahren auch bei extremen Bedingungen gefordert wird, sind der Rechenleistung Grenzen gesetzt. Ein Kompromiß zwischen Berechnungsaufwand und Energieaufwand ist deshalb heute noch unumgänglich.

III – 2.12.3.2

Tauchcomputer verwenden piezoresistive Absolutdruck-Sensoren. Da als Referenz Vakuum verwendet wird, kann der Absolutdruck (Luft- plus Wasserdruck) gemessen werden. Ein solcher Drucksensor ist in *Abbildung III – 2.12.3.2/2* zu sehen. Über einer miniaturisierten Vakuumkammer befindet sich eine dünne Siliziummembrane mit eingetätzten Widerständen. Der Wert dieser Widerstände ändert sich mit der Durchbiegung der Membrane, was zur Druckmessung benutzt wird.



Quelle: E. VÖLLM

Abb. III – 2.12.3.2/2: Piezoresistiver Drucksensor (2 x 3 x 4 mm)

Das Ausgangssignal des Sensors ist temperaturabhängig und muß daher temperaturkompensiert werden. Weiter muß die Druckkennlinie des Sensors geeicht werden, was hardwaremäßig (z. B. mit Potentiometern) oder softwaremäßig geschehen kann. Langzeiteffekte, vor allem eine Drift des Offsets, sind in ihrer Größe abhängig vom Herstellprozeß des Sensors. Bei einem guten Absolutdrucksensor für den Tauchcomputer ist heute eine Langzeit-Drift von weniger als 3 mbar (5 cm Wassersäule oder 50 m Luftsäule) pro Jahr erreichbar.

Da die Erzeugung von Licht verhältnismäßig viel Energie verbraucht, werden in Tauchcomputern z. Z. nur passive Anzeigen eingesetzt. Passive Displays sind nur ablesbar, wenn extern ein Minimum an Licht vorhanden ist. LCD's („Liquid Cristal Displays“) brauchen sehr

wenig Energie und sind dadurch beim Tauchcomputer weit verbreitet. Es wird z. T. versucht, die Ablesbarkeit bei wenig Umgebungslicht mittels eines fluoreszierenden Hintergrundes oder mit einer aktiven Hintergrundbeleuchtung zu verbessern. Wenn Fluoreszenzschicht und LCD nicht optimal aufeinander abgestimmt sind, führt dies allerdings zu unbefriedigenden Ergebnissen.

Die elektronische Signalaufbereitung besitzt eine zentrale Bedeutung. Im analogen Teil werden die Signale der Sensoren und Schalter aufbereitet (z. B. verstärkt oder gefiltert) und im Analog/Digitalwandler zu digitalen Werten (Zahlen) verarbeitet. Energie- und Platzbedarf müssen so gering wie möglich gehalten werden und dies bei sehr hohen Anforderungen an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

Heute lassen sich diese Forderungen praktisch nur noch mit kundenspezifischen Chips (ASIC's) erreichen, welche nur mit großem finanziellen und zeitlichen Aufwand realisiert werden können. Die Entwicklung eines solchen Chips kann ohne weiteres 1 Jahr dauern und mehrere 100.000 DM kosten. Dies ist wirtschaftlich nur dann vertretbar, wenn hohe Stückzahlen hergestellt werden können. Die Zuverlässigkeit der Tauchcomputer-Elektronik wird durch den Einsatz von ASIC's maßgebend verbessert. Hier sind in nächster Zeit sicher große Fortschritte zu erwarten.

### III - 2.12.3.3

#### Software

Software besteht aus einer Reihe von Befehlen an eine Recheneinheit. Mit diesen Befehlen wird der Rechner angehalten, bestimmte Dinge zu tun, z. B. den Wasserdruck oder die Zeit zu messen, bestimmte Werte abzuspeichern, eine Addition durchzuführen oder eine bestimmte Zahl anzuzeigen. In einer Computer-Hochsprache, wie z. B. Pascal, Fortran oder Basic, werden die Befehle in einer dem Englischen sehr ähnlichen, einfachen Sprache formuliert. Auch mathematische Operationen können in einer uns vertrauten Weise mit „+“, „-“ usw. ausgeführt werden. Bei der Programmierung eines Mikroprozessors (z. B. für einen Tauchcomputer) ist das leider wesentlich komplizierter. Es ist wichtig zu wissen, daß die Befehle in einer prozessorspezifischen Sprache (Assembler) ausgeführt werden, welche wesentlich weniger Komfort bietet als eine Hochsprache. Eine Multiplikation besteht z. B. aus mehreren Teilbefehlen, und einzelne Operationen können nur durch aufwendige Approximations-Algorithmen (Näherungsverfahren) durchgeführt werden.

Noch vor kurzer Zeit (bei den ersten Tauchcomputern) war die Größe der Software durch den zur Verfügung stehenden Speicherplatz der Mikroprozessoren stark beschränkt. Heute bieten viele Hersteller Ausführungen an, welche den Software-Ingenieur kaum mehr einschränken. Der Programmcode eines modernen Tauchcomputers kann ohne weiteres 8 kB Speicherplatz (ROM \*) oder mehr beanspruchen, das sind etwa 100 DIN A 4-Seiten Programmtext.

\*) Abkürzung für: read only memory, Nur-Lese-Speicher. Im Gegensatz zu Schreib-Lese-Speichern (RAM) sind ROM's Festwertspeicher: Ihre Inhalte sind unveränderbar und bleiben auch nach dem Wegfallen der Betriebsspannung erhalten.

## III – 2.12.3.3

Für die Anwendung im Tauchcomputer sollte das verwendete Modell gewisse Voraussetzungen erfüllen. Dazu gehört natürlich in erster Linie die qualitativ und quantitativ gute Absicherung mittels Labor- und Praxistests. Wichtige Tests sind z. B. Tauchgänge in allen gängigen Tiefen und Repetivtauchgänge<sup>\*)</sup>. Tauchgänge mit reduziertem Luftdruck eignen sich sehr gut, um Gewebe mit längeren Halbwertszeiten mit vernünftigem Aufwand zu testen (durch kurze Adaptionszeiten werden auch langsame Gewebe in der Dekompressionsphase führend).

Um die korrekte Funktion des Computers in jeder Situation zu gewährleisten, muß das Modell möglichst universell sein. Dies betrifft insbesondere die Anwendung bei reduziertem Luftdruck (Tauchen in Bergseen, Fliegen nach dem Tauchen).

Das Dekompressionsmodell ist ein Rezept zur Prävention der Dekompressionskrankheit. Rezepte können und müssen durch neue Forschungsergebnisse angepaßt werden. Das Modell muß also möglichst transparent sein, denn nur so kann es schnell und sicher an neue Erkenntnisse angepaßt werden.

Die zur Zeit erhältlichen Tauchcomputer verwenden entweder das Modell der US-Navy oder dasjenige der Universität Zürich (BÜHLMANN). Allerdings werden beide Modelle durch die Hersteller der Tauchcomputer zum Teil stark modifiziert. Diese Modifikationen dienen einerseits dazu, die Modelle „mikroprozessortauglich“ zu machen, andererseits sind damit auch Veränderungen möglich, welche mit dem Ursprungsmodell nicht mehr viel gemeinsam haben. Wenn solche Modifikationen vorgenommen werden, müssen die Änderungen vom medizinisch/physiologischen Standpunkt her auch vernünftig sein. Eine Beratung durch qualifizierte Tauchmediziner ist unumgänglich.

Aus einer Vielzahl von möglichen Modifikationen werden zwei Beispiele etwas näher erläutert:

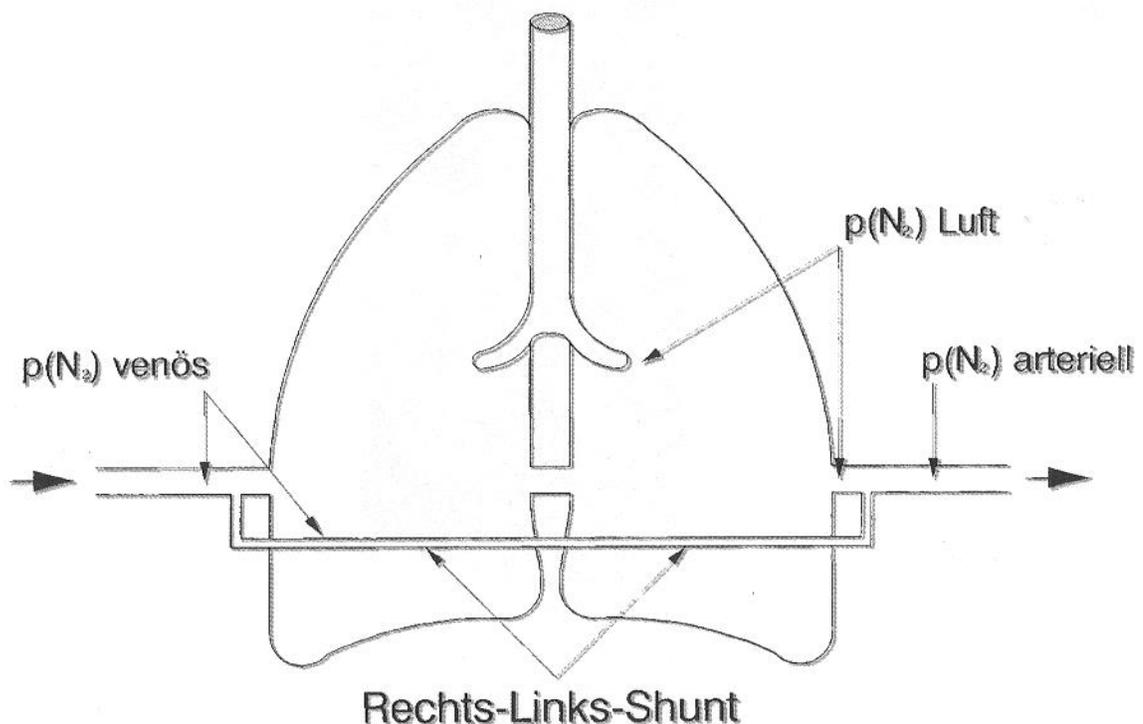
#### 1. Das Gewebespektrum

Gewebe mit Halbwertszeiten von weniger als 5–6 Minuten entsättigen sich auch bei raschen Aufstiegen so schnell, daß sie für die Dekompression keine Bedeutung mehr haben. Andererseits haben Gewebe mit Halbwertszeiten von mehr als 300 bis 350 Minuten auf den Sporttaucher keinen Einfluß mehr, auch nicht bei häufigen Repetivtauchgängen. Diese Gewebe sind nur dann von Bedeutung, wenn außergewöhnlich lange Tauchgänge (mehrere Stunden) oder Sättigungstauchgänge (Tage) gemacht werden. Der Luftverbrauch dieser Tauchgänge liegt weit über dem Luftvorrat eines Sporttauchers. Für den Sporttaucher reicht also ein Gewebespektrum von 5–6 Minuten bis zu 300–350 Minuten Halbwertszeit völlig aus. Dieses gegenüber dem Originalmodell geänderte Gewebespektrum kann zu leicht anderen (konservativeren) Dekompressionsdaten führen.

<sup>\*)</sup> Wiederholungstauchgänge (< lat. *repetere* = wiederholen)

## 2. Die Berücksichtigung des Rechts-Links-Shunts

Wie heute bekannt ist, entstehen bei jedem Aufstieg (auch bei korrekter Aufstiegs- geschwindigkeit und Dekompression) Mikrogasblasen, welche über den Kreislauf in die Lunge geschwemmt werden (→ Kap. III – 2.12.5 (1), (2)). Dort werden diese durch die feinen Lungenkapillaren herausgefiltert und durch die normale Atmung ausgeschieden. Ein Teil der Lungenkapillaren wird aber durch die Mikrogasblasen blockiert. Dadurch fließt ein Teil des Blutes durch die Lunge, ohne am Gasaustausch teilnehmen zu können. Der arterielle Stickstoffdruck wird während der Dekompression durch die Beimischung von venösem Blut leicht erhöht (→ Abb. III – 2.12.3.3/1).



Quelle: E: VÖLLM

Abb. III – 2.12.3.3/1: Schema des Rechts-Links-Shunt \*)

In der ersten Zeit nach einem Tauchgang (3–4 Stunden) wird somit die Entsättigung verlangsamt, und die Sättigungsdrücke in gewissen Geweben liegen vor einem neuen Tauchgang etwas höher als ohne Shunt-Berücksichtigung. Dadurch können bei empfindlich veranlagten Personen nach dem Repetivtauchgang oder beim Fliegen Symptome einer leichten Dekompressionskrankheit (Taucherflöhe, Muskelschmerzen) auftreten (→ Kap. III – 2.12.5 (3)).

\*) *shunt* (< engl. *shunt* = verschieben)

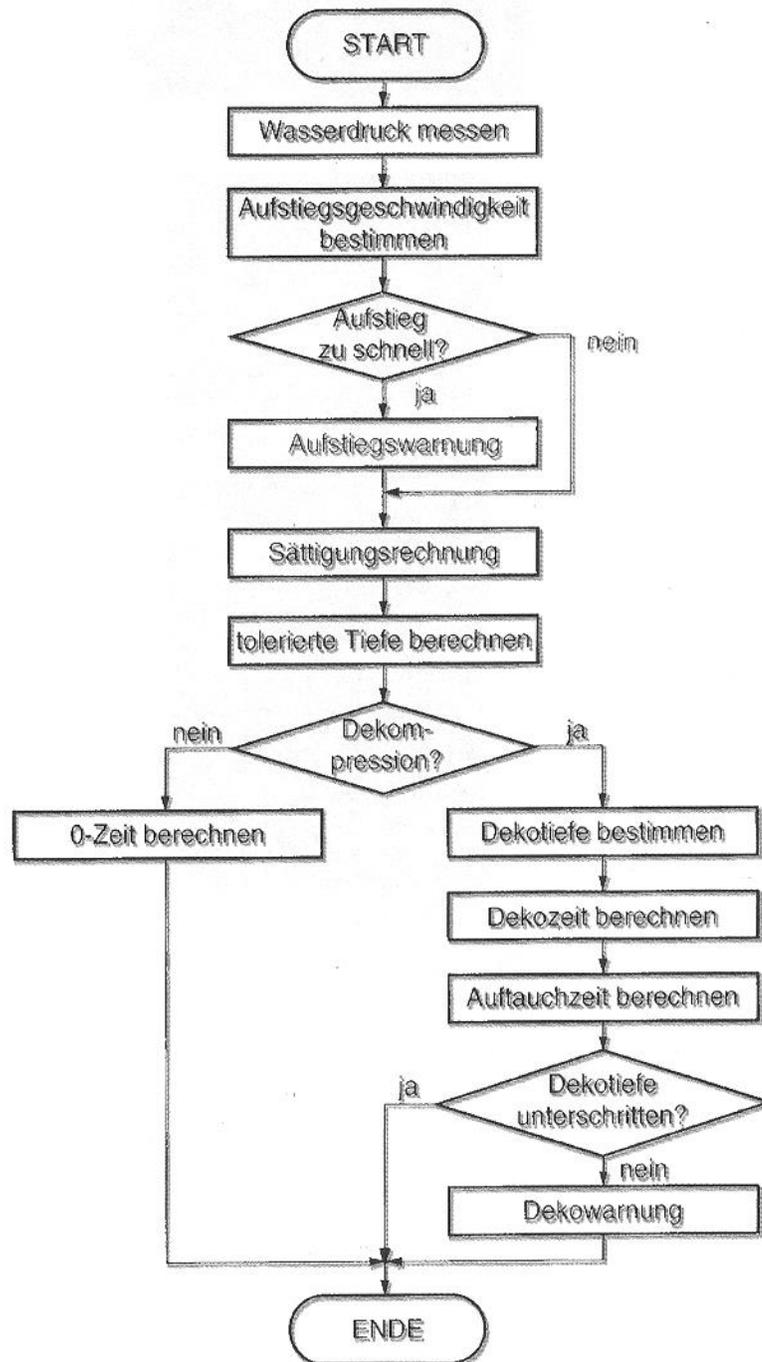
## III – 2.12.3.3

Bei längerem Aufenthalt an der Oberfläche verschwinden die Mikrogasblasen durch Diffusion wieder, und ab etwa 4 Stunden nach dem Tauchgang ist kein erhöhter arterieller Stickstoffdruck mehr feststellbar. Daß das Risiko einer Dekompressionskrankheit für repetierte Tauchgänge größer ist als für den Ersttauchgang, geht z. B. aus den Statistiken des BSAC (BRITISH SUBAQUA CLUB) (→ Kap. 2.12.5 (4)) hervor.

Es liegt nun nahe, den Rechts-Links-Shunt in den Rechenmodellen zu berücksichtigen. In einigen Tauchcomputern werden solche Modelle eingesetzt. Allerdings werden in ihrer Wirkung sehr unterschiedliche Shuntmodelle verwendet. Wichtig ist, daß der Ersttauchgang durch den Shunt kaum beeinflusst wird, da die Mikrogasblasen zum größten Teil erst an der Oberfläche entstehen.

Bevor mit dem Schreiben der Software begonnen werden kann, muß ein Konzept für die Funktion des Tauchcomputers erarbeitet werden. Dieses Softwarekonzept bestimmt weitgehend, wie verständlich die Anzeige und wie einfach die Bedienung ist. Auch die Möglichkeiten des zu entwickelnden Gerätes werden dadurch bestimmt.

Mittels Zustands- oder Flußdiagrammen wird die Struktur des Programmes detailliert beschrieben (→ Abb. III – 2.12.3.3/2). Dabei stößt man schnell auf die neuralgischen Punkte der Software. Diese bestehen z. B. in der Lösung von mathematischen Problemen, in der Entwicklung von Approximations-Algorithmen oder im Timing (Zeitablauf) des Programmes im Mikroprozessor.



Quelle: E: VÖLLM

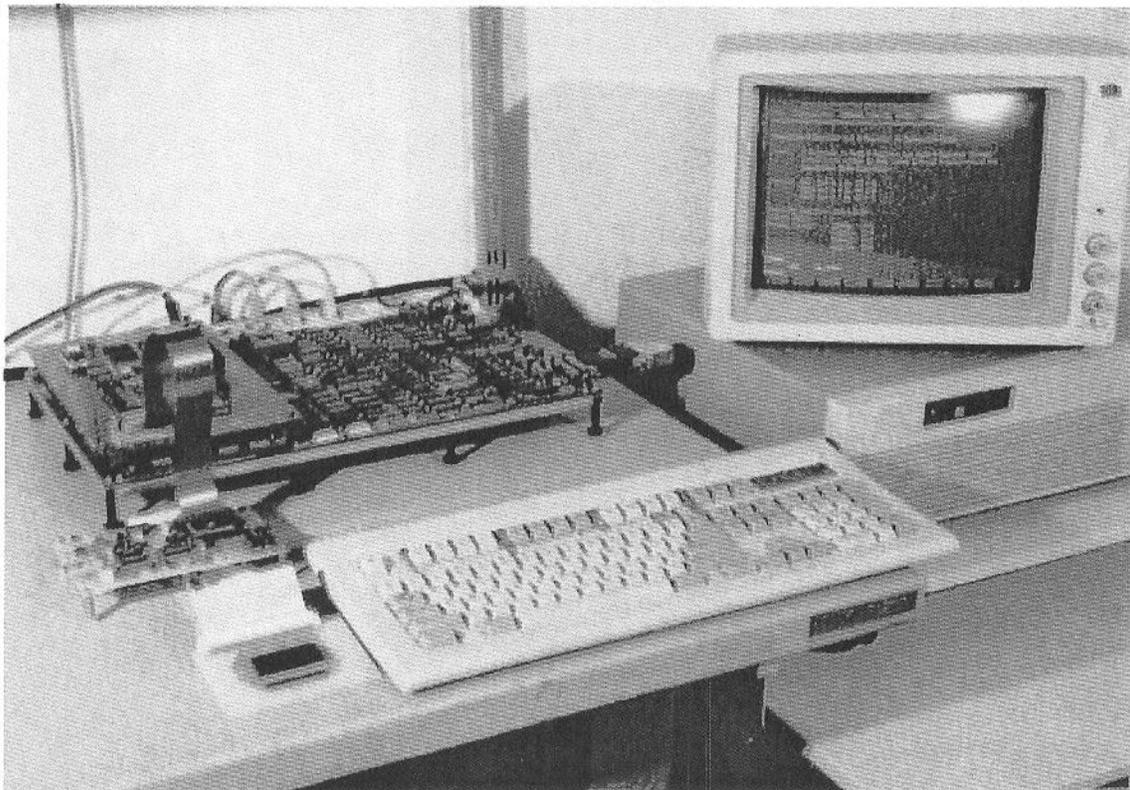
Abb. III - 2.12.3.3/2; Vereinfachtes Flußdiagramm für die Funktion eines Tauchcomputers unter Wasser

## III – 2.12.3.3

Nachdem diese Probleme theoretisch gelöst worden sind, ist es sinnvoll, ein Simulationsprogramm zu erstellen, welches in einer Hochsprache geschrieben wird. Damit können der Ablauf des Programmes kontrolliert und die entwickelten Algorithmen überprüft werden. Auch die Rechengenauigkeit usw. kann so schon vor dem eigentlichen Beginn der definitiven Softwarearbeit ausgetestet werden. Oft ergeben sich aus den Simulationen nachträgliche Änderungen im Konzept oder in einem Algorithmus.

Nach der Fertigstellung des Simulationsprogrammes folgt eine sehr wichtige und zeitraubende Optimierungsphase, in deren Verlauf u. a. auch die definitiven Modelldaten festgelegt werden. Dies kann z. B. erfolgen, indem die Dekompressionsangaben von verschiedenen Druckprofilen mit dem „Master-Modell“ (Tauchtabelle, Referenzprogramm) oder mit den Werten von früheren Tauchcomputern verglichen werden. Diese Optimierungsphase kann die Simulation von mehreren hundert oder tausend Tauchgängen umfassen und einige Monate dauern.

Erst jetzt werden die Programmteile in einer mikroprozessorspezifischen Sprache (Assembler) auf einem sogenannten *Entwicklungssystem* ausprogrammiert und ausgetestet (→ Abb. III – 2.12.3.3/3). Durch die hardwarenahe Programmiersprache bestehen viel mehr Fehlermöglichkeiten als bei der Programmierung in einer Hochsprache. Dementsprechend kommt auch der Seriosität des Austestens (debugging) größte Bedeutung zu.



Quelle: E. VÖLLM

Abb. III – 2.12.3.3/3: Entwicklungssystem, bestehend aus PC und Emulator (Simulator für den Mikroprozessor)

## III – 2.12.3.4

## Entwicklungsaufwand des Tauchcomputers

Um eine Vorstellung über den Aufwand bei der Entwicklung eines Tauchcomputers zu vermitteln, sollen hier an einem Beispiel einige Angaben gemacht werden.

Der gesamte Entwicklungsaufwand für das betreffende Gerät betrug ca. 4000 Stunden, ohne die Entwicklung von kundenspezifischen Chips beim Lieferanten zu berücksichtigen. Auch der Zeitaufwand für die praktischen Tauchversuche ist darin nicht enthalten. Diese Zeit teilt sich folgendermaßen auf:

Konzepterarbeitung:	10%
Hardware-Aufwand:	30%
Problemlösungen, Simulation:	25%
Software, Debugging:	25%
Dokumentation:	10%

Die Kosten für eine solche Entwicklung inklusive externer Lieferanten beliefen sich in diesem Fall auf mindestens 1,3 Mio. DM, zuzüglich Kosten für Einrichtung der Produktion. Dazu kommt, daß Teile nur günstig eingekauft werden können, wenn große Stückzahlen bestellt werden. Die Einkaufsmengen betragen deshalb oft einen Jahresbedarf oder mehr.

Zukünftige Entwicklungen werden immer komplexer und damit auch teurer. Nur durch hohe Stückzahlen und rationelle Fertigung kann ein vernünftiger Preis erreicht werden. Tiefer Verkaufspreise als heute üblich sind zwar möglich, aber durch die kleinere Gewinnmarge fehlen später die Mittel für anspruchsvolle Weiterentwicklungen.

## III – 2.12.3.5

## Sicherheit des Tauchcomputers

Erwähnenswert sind die Unterschiede zwischen Tabelle und Computer. Der moderne Tauchcomputer verwendet das Multi-Level Berechnungsverfahren. Dies ermöglicht einerseits eine dem Druckprofil angepasste Dekompression, andererseits wird die Dekompressionszeit eines Multi-Level Tauchgangs gegenüber derjenigen der Tabelle in der Regel verkürzt, weil beim Sporttaucher kaum Rechteck-Tauchprofile vorkommen. Trotzdem sind Tauchtabellen nicht sicherer als Tauchcomputer ( $\rightarrow$  Kap. III – 2.12.5 (4)). Bei der Anwendung der Tabelle wird aus Einfachheitsgründen oft unnötig lang dekomprimiert (gesamte Grundzeit auf maximaler Tauchtiefe, Vereinfachungen für das Oberflächenintervall, Rundungen). Die Sicherheitsmarge des Tauchcomputers dagegen wird über eine Verringerung der Gewebeübersättigungstoleranzen gegenüber der Tabelle vergrößert.

Die Meßgenauigkeit der elektronischen Sensoren ist bedeutend besser als diejenige mechanischer Geräte. Bei der Berechnung der Tabellen muß deshalb ein Tiefenzuschlag gemacht werden. Bei der BÜHLMANN-Tabelle wurde dieser z. B. mit  $+1\text{ m} + 3\%$  der Tiefe berücksichtigt. Bei modernen Tauchcomputern ist eine Ungenauigkeit kleiner als  $\pm 0,2\text{ m} + 1\%$  möglich. Dadurch entfällt ein großer Teil des Tiefenzuschlages.

Grundsätzlich sind mit dem Tauchcomputer viel mehr Tauchgänge pro Zeit möglich als mit der Tabelle. Dies hat dazu geführt, daß seit der Einführung der Tauchcomputer viel

mehr über die Problematik der Repetivtauchgänge bekannt wurde. Hauptsächlich sind drei unterschiedliche Effekte zu beobachten, welche sich ungünstig auf das Non-Limit-Tauchen auswirken:

### 1. Größere Abkühlung bei Repetivtauchgängen

Wasser leitet Wärme bedeutend besser als Luft. Selbst ein guter Tauchanzug und relativ warmes Tauchgewässer können deshalb nicht verhindern, daß sich der Taucher während des Tauchganges abkühlt. Bei wiederholten Tauchgängen reicht die Intervallzeit oft nicht aus, um den Körper auf die normale Temperatur aufzuwärmen. Der Taucher friert also bei einem Repetivtauchgang früher.

Der Körper reagiert auf Unterkühlung als erstes mit Muskelzittern, welches die Wärmeproduktion steigern soll. Daraus resultiert ein erhöhter Stoffwechsel, d. h. der Sauerstoffverbrauch steigt stark an (beschleunigte Atmung). Der Taucher beginnt sehr schnell zu atmen, was zur Hyperventilation oder zur Kurzatmigkeit (Pendelatmung) führen kann. Beides bewirkt über längere Zeit Sauerstoffmangel. Durch den erhöhten CO<sub>2</sub>-Gehalt des Blutes kann es bei Kurzatmigkeit auch zu Atemnot und damit zur Panik kommen.

Wenn sich der Körper abkühlt, ändert sich auch die Durchblutung der Gewebe. Nach dem Gesetz von HENRY wird in den Körpergeweben bei tieferer Temperatur auch mehr Stickstoff gelöst (→ Kap. II – 1.4.6). Beide Effekte beeinflussen die N<sub>2</sub>-Aufnahme und -abgabe speziell an den Extremitäten und der Haut und sind damit wichtig für eine genügende Dekompression am Ende des Tauchganges. In der Praxis gibt es heute kein vernünftiges Modell, welches die Kälteeinwirkung in die Berechnung der Dekompression einbezieht. Eine Schwierigkeit besteht auch darin, die Temperatur an den entsprechenden Stellen zu erfassen. Man behilft sich deshalb mit einer vergrößerten Sicherheitsmarge für die exponierten Gewebe.

### 2. Lokale Entzündungsherde in der Lunge

Die in unseren Tauchgeräten befindliche Luft wird am Kompressor getrocknet (→ Kap. III – 3.2.3). Bei der Entspannung auf den Umgebungsdruck im Lungenautomaten kühlt sich die Luft entsprechend dem Druckverhältnis und der Umgebungstemperatur ab. In die Lunge des Tauchers gelangt also wesentlich trockenere und kühlere Luft, als dies normalerweise der Fall ist.

Die trockene und kalte Luft reizt die Atemwege und kann auch zu lokalen Entzündungsherden in der Lunge führen. Je länger nun ein Tauchgang dauert und je häufiger getaucht wird, desto größer ist die Gefahr der beschriebenen Veränderungen in der Lunge. Bei Untersuchungen an verunfallten Tauchern wurde festgestellt, daß diese Veränderungen in der Tat bei Repetivtauchgängen häufiger vorkommen. Diese entzündeten Stellen sind natürlich geschwächt und mechanisch weniger widerstandsfähig. Lungenrisse sind deshalb bei Repetivtauchgängen wesentlich wahrscheinlicher und treten auch in der Praxis häufiger auf. Diese Lungenrisse können lokal begrenzt sein und bewirken durch in den Kreislauf eingeschwemmte Luftblasen oft Symptome, welche denjenigen einer Dekompressionskrankheit wohl ähnlich sind (Lähmungen, Störungen des ZNS usw.), mit ihr aber nichts zu tun haben.

### 3. Grenzen der heutigen Modelle

Die Gewebesättigung, welche mittels Tauchcomputer berechnet wird, kommt durch das Multi-Level-Verfahren dem tatsächlichen Verlauf der Stickstoffsättigung viel näher als diejenige, welche mit den Tabellen bestimmt wird. Gleichzeitig muss man sich aber bewusst sein, dass auch das beste Rechenmodell nur eine Simulation der tatsächlichen Vorgänge im Körper darstellt. Durch individuelle Unterschiede beim Taucher (Statur, Geschlecht, Training usw.) und durch außergewöhnliche Bedingungen beim Tauchgang (Temperatur, körperliche Anstrengung usw.) können Differenzen zwischen den berechneten und den tatsächlichen Stickstoffdrücken auftreten. Nur durch eine Messung des tatsächlichen Sättigungszustandes im Körper könnten solche Abweichungen erkannt und korrigiert werden.

In der Regel sind die berechneten Werte bei einem konservativen Modell höher als die tatsächlichen Werte, so dass durch den Tauchcomputer fast immer eine zu lange Dekompression vorgeschrieben wird. Ein Restrisiko bleibt aber immer bestehen, besonders wenn verschiedene Risikofaktoren zusammen auftreten (z.B. Kälte, starke Strömung, drückender Anzug usw.). Beim Non-Limit-Tauchen können sich Abweichungen kumulieren und das Restrisiko vergrößern.

Bei der Tauchtabelle bestehen im Prinzip die gleichen Restrisiken. Durch das Repetivsystem der Tabelle und die von der Tabelle vorausgesetzten rechteckigen Tauchprofile werden aber bei Wiederholungstauchgängen die Nullzeiten so stark verkürzt und die Dekozeiten soweit verlängert, dass oft weniger Tauchgänge hintereinander durchgeführt werden können. Dies verringert natürlich das Restrisiko nicht nur einer Dekompressionskrankheit, sondern auch anderer Tauchunfälle.

Ein besonderer Sicherheitsfaktor des Tauchcomputers sind seine **Warnanzeigen**. Der Tauchcomputer kann mit der Überwachung von wichtigen Parametern – vor allem in der Dekompressionsphase – wesentlich zur Sicherheit beitragen.

Wie Unfallstatistiken zeigen, betreffen die häufigsten Zwischenfälle beim Tauchen nicht die Dekompressionskrankheit, sondern Barotraumen des Ohres und der Lunge. Mit der Überwachung der Aufstiegsgeschwindigkeit bietet der Tauchcomputer die Möglichkeit, die Aufstiegsgeschwindigkeit genau einzuhalten und so das Risiko eines Barotraumas zu verringern.

Während der Dekompression kann der Computer auch die Einhaltung der notwendigen Dekompressionstiefen und -zeiten kontrollieren; eine wichtige Funktion, welche die absichtliche oder unabsichtliche Verletzung von Dekompressionsvorschriften verhindern hilft.

### III – 2.12.3.6

#### Sicherheitsregeln für den Gebrauch von Tauchcomputern

1. **Keine Tauchprofile**, die einen längeren Aufenthalt in geringen Tiefen und am Schluss in dekopflichtigen Tiefen vorsehen (s. a. Kap. II – 3.6.2.4.6).
2. **Keine Pendeltauchgänge** in dekopflichtigen Tiefen (z.B. fünfmal von 20 m auf 50 m und dann austauchen!).

## III – 2,12,3,5

3. **Auftauchgeschwindigkeit einhalten!** Dies vermindert die Mikroblasenbildung und das Risiko eines Barotraumas.
4. **Pro Person einen Tauchcomputer!** Die Tauchprofile sind auch innerhalb einer Tauchergruppe nie identisch.
5. **Optimalen Kälteschutz tragen!** Tauchgänge abbrechen, wenn man friert! Unterkühlung am Ende des Tauchganges ist ein Sicherheitsrisiko!
6. **Oberflächenintervalle genügend lang wählen,** um dem Körper genügend Aufwärmzeit zu geben! Auch wenn man sich wohl fühlt, hat der Körper unter Umständen noch nicht wieder Normaltemperatur.
7. **Repetivtauchgänge kürzer planen als den ersten Tauchgang!** Der Körper kühlt beim Repetivtauchgang schneller aus.
8. **2-3 Tauchgänge pro Tag genügen!** Durch das Ausschöpfen der Möglichkeiten des Computers sind Tauchgänge möglich, welche mit der Tabelle nie hätten durchgeführt werden können. Dies vergrößert ganz allgemein das Risiko eines Zwischenfalls.
9. **In den Tauchferien einen Tag pro Woche nicht tauchen!** Der Körper soll sich einmal pro Woche praktisch entsättigen können.
10. **Der Taucher ist verantwortlich für den Tauchgang!** Tauchcomputer nehmen dem Taucher die Verantwortung für seine Tauchgänge – und seinen Tauchpartner – nicht ab!
11. **Die Herstellerangaben genau beachten!** Vor Inbetriebnahme des Computers ist die Gebrauchsanweisung aufmerksam zu lesen, um Fehlinterpretationen – damit Tauchunfälle – zu vermeiden.
12. **Tauchcomputer sind für Sporttaucher konzipiert!** Die Verwendung im gewerblichen Bereich (UW-Arbeiten) und im Rettungsdienst (körperliche Anstrengung, Kälte, Stress) ist lebensgefährlich!