

Facharbeit Physik

Thema:

Dekompression und Tauchcomputer

M.Lardelli 7Eb, 1989

INHALTSVERZEICHNIS

1. Dekompressionskrankheit

- 1.0 Einführung
- 1.1 Physikalische Grundlagen

2. Dekompression

2.0 Mathematische Modelle für die Dekompressionsberechnung

2.0.0 Das System Bühlmann 83

2.0.1 Vorteile des Bühlmann-Systems

2.0.2 Programm zur Tauchgangsimulation

2.1 Dekompressionstabellen

2.1.0 Vergleich gebräuchlicher Dekotabellen

2.1.1 Programm zur Berechnung von Dekotabellen nach Bühlmann

2.1.2 Nachteile der Dekompressionstabellen

2.2 Dekompressiometer

2.2.0 Nachteile des Dekompressiometers

2.3 Tauchcomputer

2.3.0 Nachteile des Tauchcomputers

2.3.1 Beispiel für ein Tauchcomputer-Programm

3. Tauchcomputer

3.0 Anforderungen

4. Konzept für einen Tauchcomputer mit RS-232 Schnittstelle

4.0 Wahl des Mikroprozessors

4.1 Display

4.2 Stromversorgung

4.3 Schaltung

4.4 Mechanischer Aufbau

4.5 Werkzeuge zur Softwareentwicklung

4.6 Softwarestruktur

5. Literaturverzeichnis

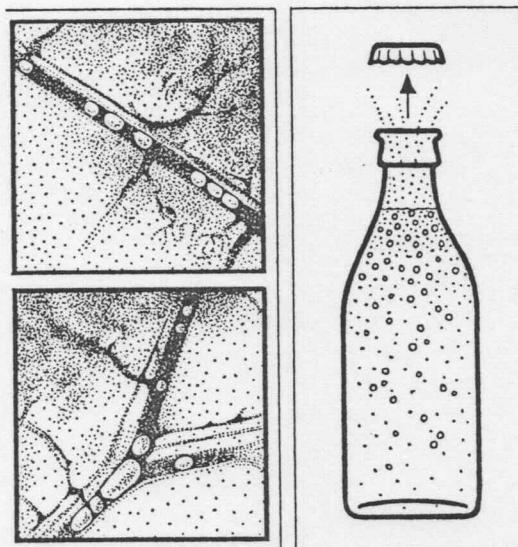
Anhänge:

- A Verschiedene Dekotabellen
- B Tauchgangsimulation in GfA-Basic
- C Programm zur Berechnung von Dekompressionstabellen nach Bühlmann
- D Beispiel für einen Dekocomputerprogramm in GfA-Basic
- E Shell für Entwicklungssoftware in Turbo-Pascal
- F Assemblerprogramm für Tauchcomputer
inkl. verwendter Floating-Point Routinen
- G Schaltplan, Verbindungsliste, Stückliste
Bestückungsplan
- H Platinenlayout und Belichtungsfolien
- I Schaltbeispiel für tauchfähige Version

1. Dekompressionskrankheit

1.0 Einführung

Die Dekompressionskrankheit wurde erstmals bei Caissonarbeitern beobachtet, weshalb sie auch 'Caissonkrankheit' genannt wird. Sie wird durch Gasblasen im Blut sowie im Körpergewebe verursacht, die entstehen, wenn ein Mensch über längere Zeit ein Inertgase (z.B. N₂) enthaltendes Gasgemisch unter Überdruck einatmet und anschliessend zu schnell wieder auf Normaldruck gebracht wird. Die Symptome sind je nach betroffenem Gewebe unterschiedlich und reichen vom Hautjucken ("Taucherflöhe") über Gelenkschmerzen zu Schädigungen des Nervensystems, Lähmungen, Gehörverlust und Tod. Als chronische Krankheit ist vor allem die Zerstörung von Knochengewebe (sog. dysbarische Osteonekrose) bei Berufstauchern problematisch. Um solche Schäden zu verhindern erfolgt die Druckentlastung nur langsam, um das im Gewebe und Blut gelöste Inertgas ohne Blasenentwicklung entweichen zu lassen (Als Vergleich kann man sich eine Mineralwasserflasche vorstellen, die man auch langsam öffnen sollte, um ein Überschäumen zu verhindern). Zur Behandlung der Dekompressionskrankheit wird der Verunfallte in einer Dekompressionskammer rekompriiniert. Schon entstandene Gasblasen werden so verkleinert, was die Symptome meist sofort zum verschwinden bringt. Nun lösen sich die Blasen wieder auf und es kann mit einer langsamen Dekompression begonnen werden.



1.1 Physikalische Grundlagen

Die Luft der Atmosphäre besteht zu 21% aus Sauerstoff, und zu 79% aus Stickstoff sowie Kohlendioxyd und Spuren von Edelgasen.

Der Partialdruck (sog. inspiratorischer Druck) dieser Gase errechnet sich zu

$$p_{IO_2} = (p - 0.063) * 0.21 \quad p: \text{Gesamtdruck}$$
$$p_{IN_2} = (p - 0.063) * 0.79$$

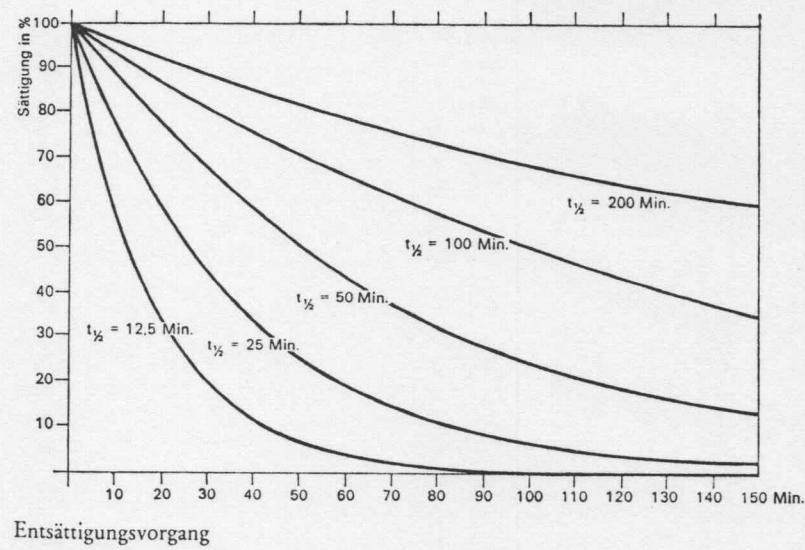
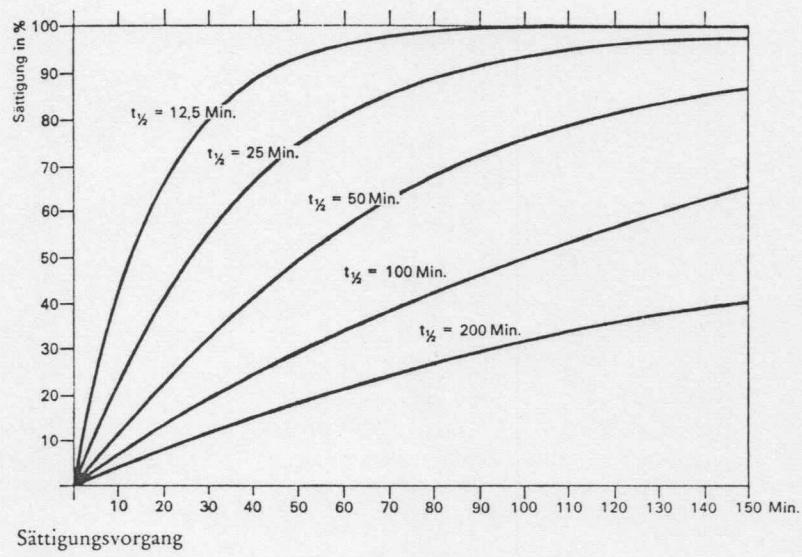
wobei 0.063 dem Wasserdampfdruck bei 37°C entspricht.

Die beim Tauchen verwendeten Inertgase N₂, He, H₂ (in Pressluft, Heliox, Trimix, Hydro-Heliox) lösen sich in Flüssigkeiten solange, bis der Inertgasdruck der Flüssigkeit (Blut, Gewebe) den gleichen Wert wie der inspiratorische Gasdruck erreicht hat (Gleichgewicht). Der Inertgasdruck der Flüssigkeit wird, da es sich ja nicht um einen richtigen Gasdruck handelt, zur Unterscheidung auch als Gasspannung bezeichnet.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Körpergewebe mit Inertgas sättigen ist von drei Faktoren abhängig:

- dem Druckgradienten, d.h von der Differenz zwischen Gasspannung im Gewebe und dem Inspiratorischen Gasdruck.
- der Expositionszeit, während der der Druck auf das Gewebe wirkt.
- den sog. Halbwertszeiten der verschiedenen Gewebesorten. Unter der Halbwertszeit wird diejenige Zeit verstanden, nach deren Ablauf die Gasspannung um die Hälfte des anfänglichen Druckgradienten zugenommen (bzw. bei neg. Druckgradienten abgenommen) hat. Die Halbwertszeiten der Körpergewebe betragen zwischen 2 und 700 Minuten. Am schnellsten sättigt sich das Blut und die Haut. Langsamer sättigen sich Muskelgewebe, noch langsamer das Fettgewebe sowie die Knochen.
Gewebe mit langer Halbwertszeit nennt man 'langsame' Gewebe, umgekehrt solche mit kurzer HZ 'schnelle' Gewebe. Die Halbwertszeit ist von der Durchblutung abhängig ('Oberfläche', mit der das Gewebe dem Gas, bzw. dem voll gesättigten Blut, ausgesetzt ist). Wird diese verbessert (z.B. durch körperliche Arbeit), so nimmt die HZ ab. Auch das Lösevermögen des Gewebes spielt eine Rolle. So hat z.B. Fettgewebe eine lange HZ, da Fett einen hohen Löslichkeitskoeffizienten hat und rel. schlecht durchblutet ist.

Die Sättigung/Entsättigung erfolgt Exponentiell.



Liegt nun die Gasspannung in einem Gewebe höher als der inspiratorische Gasdruck bei Normaldruck, kann evtl. nicht mehr beliebig dekomprimiert werden, da das Gewebe unter Normaldruck übersättigt wäre. Eine gewisse Übersättigung ist allerdings tolerierbar. Wird die sog. Übersättigungstoleranz nicht überschritten, treten keine Symptome (nur wenig Blasen) auf. Die Übersättigungstoleranz ist für Gewebe mit verschiedenen Halbwertszeiten unterschiedlich. Allgemein haben die schnellen Gewebe die höheren Übersättigungstoleranzen. Dies bedeutet auch, dass fettleibige Personen schneller Symptome zeigen als magere. Dasselbe gilt für Frauen, die einen höheren Anteil an Körperfett besitzen.

2. Dekompression

Unter Dekompression versteht man eine Druckentlastung (im allgemeinen das Auftauchen) des Körpers. Diese muss nach längeren bzw. tieferen Aufenthalten langsam erfolgen. Meistens werden hierzu sog. Dekostufen berechnet, auf denen dann eine bestimmte Zeit verweilt werden muss, bis zur Oberfläche oder zur nächsthöheren Dekostufe aufgetaucht werden kann. Die Dekompression muss nicht unbedingt stufenweise geschehen. Allerdings ist die stufenweise Dekompression im Wasser viel leichter kontrolliert durchzuführen als die kontinuierliche. In einer Dekokammer oder mittels eines Tauchcomputers kann jedoch stufenlos dekomprimiert werden, was je nach Abstand der Dekostufen effizienter ist, als die stufenweise.

Dekostufen müssen erst nach Ablauf einer bestimmten Expositionszeit eingehalten werden. Diese Zeit, während der ein direktes Auftauchen gefahrlos ist (ein Sicherheitsstop 3m-3' wird empfohlen), wird Nullzeit genannt. Die Nullzeit nimmt mit zunehmender Tiefe ab. Als Faustregel gilt:

$$\text{Nullzeit[min]} = 50 - \text{Tauchtiefe[m]}$$

2.0 Mathematische Modelle für die Dekompressionsberechnung

Es existieren verschiedene mathematische Modelle, die zur Beschreibung der physikalischen Vorgänge im menschlichen Körper bei der Dekompression entwickelt wurden. Das älteste und einfachste ist das HALDANE-Modell. Es arbeitet mit Geweben verschiedener Halbwertszeiten, mit einer für alle Gewebe konstanten Übersättigungstoleranz. Die meisten Dekotabellen haben ihren Ursprung in einer Weiterentwicklung des HALDANE-Modells.

Man sollte sich immer bewusst sein, dass die derzeitigen Modelle die tatsächlichen Vorgänge nur angenähert beschreiben, und dass im Körper noch zahlreiche weitere Effekte das Verhalten der Inertgase beeinflussen. So spielen Alkohol, Kälte, körperliche Arbeit sowie Stress eine wesentliche Rolle.

Alle Modelle wurden nur für einfache Tauchprofile mit konstanter Tiefe getestet, und auch nur in begrenztem Zeit/Tiefenbereich. Gerade mit Tauchcomputern werden aber heute oft ausgesprochene 'Yo-Yo'-Profile getaucht.

Nach einer ersten Exposition befinden sich auch nach vorschriftsgemässer Dekompression Gasblasen im Blut, die sich bei einer erneuten Kompression nicht gleich verhalten, wie im Blut gelöstes Gas. Solche Blasen entstehen auch nach grosszügiger Dekompression und können mittels Ultrasonographie (Ultraschall) nachgewiesen werden.

Die Blasen werden von einer dünnen Proteinhülle eingeschlossen und lösen sich daher schlechter wieder auf. Dieser Effekt wird von den Modellen nicht berücksichtigt, spielt aber bei Wiederholungstauchgängen (mehrere Tauchgänge am selben Tag) eine Rolle. Heutige Tauchcomputer gehen aber von der irrgigen Annahme aus, dass der gesamte nicht abgeatmete Stickstoff im Blut gelöst ist, was zur Folge hat, dass der Sicherheitsspielraum beim zweiten Tauchgang kleiner ist als beim ersten.

Auch sollte man sich darüber im klaren sein, dass bei der Bestimmung der Übersättigungstoleranzen nur auf die Symptomlosigkeit¹ geachtet wurde, was nicht bedeutet das bei korrekter Einhaltung der Grenzen keine chronischen Erkrankungen auftreten können (es entstehen ja wie gesagt auch bei korrekter Dekompression Gasblasen). Heute ist man besonders bezüglich dieses letzten Aspekts um einiges vorsichtiger geworden. Es hat sich auch gezeigt, dass verschiedene Menschen sehr unterschiedlich empfindlich sind.

2.0.0 Das System Bühlmann 83 (ZH-L₁₂)

Das von Dr. A. Bühlmann am Zürcher Druckkammerlabor entwickelte Dekompressionssystem ist im wesentlichen ein verbessertes HALDANE-Modell. Es besteht aus einem Satz von 16 Kompartimenten (nicht Gewebe genannt, da nicht eindeutig bestimmten Körperteilen zuordnenbar) mit Halbwertszeiten von 2.65 bis 635 Minuten mit zugehörigen Faktoren zur Berechnung der minimalen Umgebungsdrucks. Das System ist ganz für die sichere Dekompressionsberechnung ausgelegt und erhebt nicht den Anspruch die physikalischen Vorgänge genau zu beschreiben.

Die Gasspannung wird nach folgender Formel berechnet:

$$\{1\} \quad p_i.g.t(t_E) = p_i.g.t(t_0) + (p_i.g. - p_i.g.t.(t_0)) * (1 - e^{-k*t_E}) \\ |---Druckgradient---|$$

wobei:

¹Dr. Bühlmann spricht von der 'risikoarmen Dekompression'

$p_{i.g.t}(t_E)$ = Inertgasdruck im Gewebe am Ende der Expositionszeit.
 $p_{i.g.t}(t_0)$ = Inertgasdruck im Gewebe zu Beginn der Expositionszeit
 $p_{i.g.e}$ = Inspiratorischer Gasdruck
 e = Eulersche Zahl = 2.71828
 k = $\ln(2)/t_{1/2}$, $t_{1/2}$ = Halbwertszeit des Gewebes

Die Übersättigungstoleranz bzw. bei Bühlmann der (minimal) erlaubte Umgebungsdruck, errechnet sich aus den Faktoren a,b des jeweiligen Gewebes nach folgender Formel:

$$\{2\} \quad p_{amb.tol} = (p_{i.g.t.} - a) * b$$

a, b = tolerierter Umgebungsdruck = Kompartimentspezifische Konstanten

Die Übersättigungstoleranz eines Gewebes ist nicht konstant, sondern nimmt mit zunehmender Gewebespannung linear zu.

Die Dekompressionsgeschwindigkeit sollte nicht

$$\{3\} \quad (p_{amb.} * 0.2) + 0.6 \text{ [bar/min]} \text{ überschreiten,}$$

und in jedem Fall nicht mehr als 1 bar/min betragen.

Für Tabellen gilt deshalb: max. 10m/min

2.0.1 Vorteile des System Bühlmann

- Die Faktoren sind experimentell sehr gut geprüft, und gelten als recht sicher. Dekompressionstabellen nach Bühlmann sind seit Jahren in der Schweiz und in der BRD in Gebrauch.
- Es werden auch die Gewebe mit sehr langen bzw. sehr kurzen Halbwertszeiten berücksichtigt, was auch bei sehr langen oder sehr kurzen, tiefen Tauchgängen eine sichere Dekompression garantiert.
- Das System ist für jede beliebige Mischung von Sauerstoff, Stickstoff und Helium geeignet und in verschiedenen Kombinationen auch getestet.

²Man beachte das nur ein minimaler (Gesamt-) Umgebungsdruck vorgeschrieben wird, und nicht ein minimaler inspiratorischer (Partial-) Gasdruck. Dies macht eine 'Dekompression' ohne Druckminderung, nur durch Ersatz des Inertgases möglich!

- Berechnungsmethoden und Daten sind gut und vollständig dokumentiert
- Die Dekompressionsberechnung ist einfach durchzuführen.
- Ermöglicht die Berechnung einer stufenlosen Dekompression, was es für Tauchcomputer geeignet macht.
- Auch für Tauchgänge mit verminderter Normdruck anwendbar. (Bergseen)

2.0.2 Programm zur Tauchgangsimulation

Ich habe ein kleines Programm geschrieben, mit welchem Presslufttauchgänge in verschiedenen Höhenlagen simuliert werden können. Das Tauchgangprofil wird graphisch dargestellt. Es werden die Gewebespannungen der 16 Kompartimente mit den zugehörigen erlaubten Umgebungsdrücken angezeigt. Zusätzlich wird für jedes Kompartiment die tiefste Dekostufe (falls nötig) sowie die Nullzeit angezeigt.

Das Programm ist in GfA-Basic geschrieben, einem modernen, strukturierten BASIC-Dialekt, der sich hervorragend für die Entwicklung kleiner Programme an denen viel herumgebastelt werden muss, eignet. GfA-Basic ist ein sehr schneller Interpreter. Die Programme können aber zur Beschleunigung noch kompiliert werden. Das Programm ist unverändert nur auf dem ATARI-ST lauffähig.

Der Umgebungsdruck wird mit Tiefe/10+atmcomp ($\approx 1 \text{ atm} \approx 1 \text{ bar}$) angenommen, also 1bar Druckzunahme pro 10m Tiefe. atmcomp ist der Atmosphärendruck auf Höhe des Wasserspiegels.

Die Dekostufe habe ich nach

```
dekostufe[m]=INT((p amb.tol - atmdekom)/0.3)*3
```

berechnet. Wobei:

```
p amb.tol = tolerierter Umgebungsdruck des Gewebes  
atmdekom = kleinstmöglich Druck auf Höhe Wasserspiegel
```

Durch Addieren von 0.3 wird immer aufgerundet (sichere Seite). Durch $\text{INT}(X/0.3)*3$ entsteht ein ganzzahliges Resultat in Metern.

Für die Berechnung der Nullzeit müssen drei Fälle unterschieden werden:

1. $p \text{ amb.tol} > \text{atmdekom}$
 -> Für das Gewebe ist die Nullzeit schon abgelaufen, es muss eine Dekostufe eingehalten werden.
 $\rightarrow \underline{\text{NZ=0}}$

2. Insp. Gasdruck $\geq p_{max}$
wobei $p_{max} = (\text{Gesamtdruck auf der Dekostufe}) / b + a =$
Gewebespannung, bei deren Erreichen eine Dekompression
erforderlich ist (Formel {2} nach $p_i.g.t$ aufgelöst).
In diesem Fall habe ich die NZ mit

$\text{LN}(1 + (p_i.g.t - a - atmdekom * b) / (p_{Ii.g} - p_i.g.t)) / (-k)$ berechnet.
(Formel {2} in Formel {1} eingesetzt und nach t_e aufgelöst)

3. Insp. Gasdruck $< p_{max}$
Ist der inspiratorische Gasdruck kleiner als
diese Gasspannung, kann sie gar nie erreicht werden, und die
NZ ist unendlich.

Die Unterscheidung der 3 Fälle ist notwendig, da bei Anwendung
der Dekozeitformel auf Fall 1 oder 3 der Logarithmus einer neg.
Zahl berechnet werden müsste, bzw. verwirrende Resultate
entstehen.

Die Dekompressionszeit wird (falls Dekostufe > 0) mit

Dekozeit = $\text{LN}(1 + (p_i.g.t - a - dekodruck / b) / (p_{Ii.g} - p_i.g.t)) / (-k)$
wobei:

dekodruck = atmdekom + 0.1 * (nächsthöhere Dekostufe in Metern)
 $p_{Ii.g}$ = Inspiratorischer Inertgasdruck auf der momentanen
Dekostufe
atmdekom = Luftdruck auf Höhe des Wasserspiegels

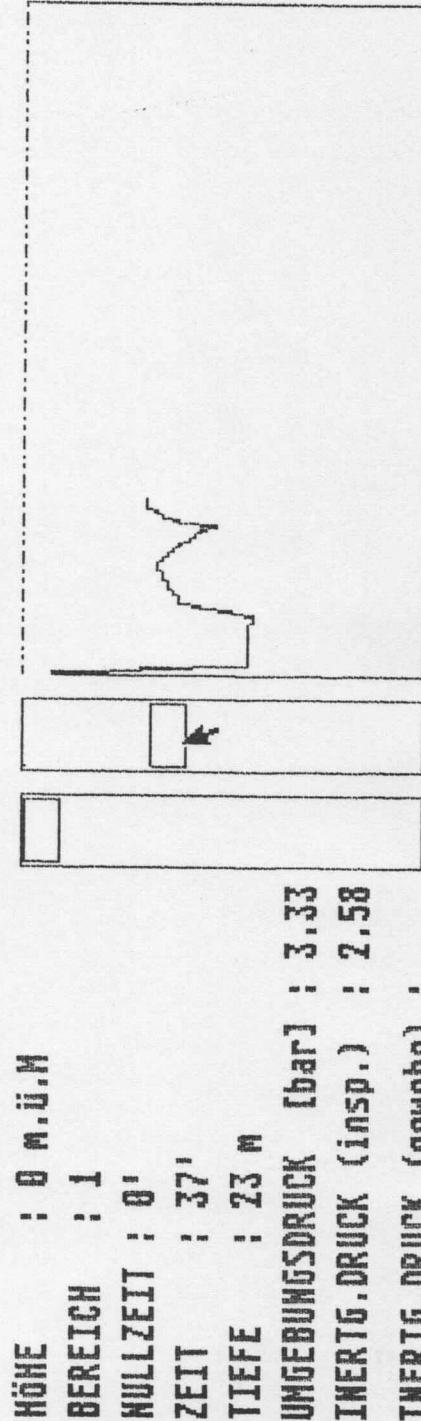
atmkomp ist der grösstmögliche Luftdruck auf Höhe Wasserspiegel
und wird zur Berechnung der Gewebedrücke benutzt.
atmkomp und atmdekom werden nicht als gleich angenommen. Da die
Dekompressionsberechnung für einen ganzen Höhenbereich (wie auch
bei Dekotabellen üblich) sowie für verschiedene Wetterlagen (Mit
unterschiedlichem Luftdruck) gültig sein müssen, wird die Gewebe-
sättigung mit dem grösstmöglichen Luftdruck berechnet (was die
grösstmögliche Sättigung ergibt), und die Dekostufe/Zeit mit dem
kleinstmöglichen Luftdruck auf den ja dekomprimiert werden muss.
Somit liegt die Berechnung in jedem Fall auf der sicheren Seite.

Bsp. : Höhenbereich 700-1500m (Bereich 2)
atmkomp = 0.93 bar
atmdekom = 0.86

Wahrscheinlich bin ich damit etwas zu vorsichtig, denn die von
mir berechneten Tabellen weisen auf der 3m-Stufe z.T. erheblich
längere Dekozeiten auf als die von Dr. Bühlmann berechneten.

Dekompressions-simulation

M.Lardelli



ERLÄUTER UMGEB.DRUCK :

0.47 1.15 1.44 1.37 1.28 1.19 1.09 0.9 0.73 0.67 0.6 0.62 0.69 0.65 0.62 0.59

DEKOSTUFE/DEKOZEIT/RESTNULLZEIT:

-	3	6	6	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	1.6	2.8	3.3	1.39	18.4	20.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
∞	0	0	0	0	0	5	32	48	75	85	77	116	162	218	

--> Unterste Dekostufe : 6 m 4'

2.1 Dekompressionstabellen

Alle Dekompressionstabellen beruhen auf mathematischen Modellen und Tests in Druckkammer und Wasser. Sie wurden meistens von der jeweiligen Kriegsmarine eines Landes entwickelt, da nur diese über die nötigen Mittel und Einrichtungen verfügten. Die Bühlmanntabellen aus Zürich bilden eine Ausnahme.

Die meisten Tabellen, ausser derjenigen von Dr. Bühlmann werden schon sehr lange unverändert benutzt. Aufgrund neuerer Forschungen sind nun aber einige Marinen dabei, neue Tabellen zu entwickeln.

Alle Tabellen geben Auskunft über Nullzeit, Dekostufen und Dekozeiten ausgewählter Tiefen und Tauchzeiten. Bei den meisten kann nach einem Tauchgang eine sog. Wiederholungsgruppe bestimmt werden, die Aufschluss über die Rest-Stickstoffsättigung gibt. Mittels einer weiteren Tabelle kann nun eine Zeitzuschlag bestimmt werden, der zur Tauchzeit des nächsten Tauchgangs addiert werden muss, um so die Dekompression zu bestimmen.

Die höchste Dekostufe sollte bei mindestens 2m liegen, da auf noch höheren Stufen die Tiefe sehr schwer genau gehalten werden kann (vor allem im offenen Wasser oder bei Wellengang). Im Allgemeinen liegt sie auf 3m. Für Tabellen die für das Tauchen in Höhenlagen (Bergseen) gerechnet sind, liegt sie oft bei 2m, da die Druckzunahme von Wasserspiegel auf 3m schon zu gross ist für eine effiziente Dekompression. Die Abstände der Dekostufen betragen wiederum 3 (bzw. 2) Meter (Also 3m, 6m, 9m, 12m, 15m). Die 3m-Abstufung kommt von den amerikanischen Dekotabellen, da $3m \approx 10\text{Feet}$.

2.1.0 Vergleich gebräuchlicher Dekotabellen

Im folgenden möchte ich einen Überblick über die wichtigsten Tabellen und Rechenmodelle geben.

Es ist zwar recht schwierig zu sagen welche Tabelle die beste ist, da ja ein Kompromiss zwischen Effizienz und Sicherheit gefunden werden muss und es auch eine Rolle spielt wer mit einer bestimmten Tabelle taucht. So können für durchtrainierte und disziplinierte Armee-Froschmänner kleinere Toleranzen eingerechnet werden als für gutgenährte Ferientaucher. Beim Vergleich der Tabellen lassen sich aber sehr wohl Unterschiede in der Länge der Nullzeiten und der Länge der Dekopausen feststellen:

U.S-Navy-Tabelle (1958):

Sehr verbreitet, wird von PADI³ unverändert empfohlen (allerdings mit zusätzlichen Empfehlungen wie z.B Sicherheitshalt 3m/3' der zur Grundzeit zu addieren ist). Sehr gut geprüft, aber mit Marinetauchern. Daher recht knapp und dem Sporttaucher nur beschränkt zu empfehlen. Hat im Mittel ähnliche Gesamtaustauchzeiten wie die Bühlmann-Tabelle, aber z.T um einiges kürzere Dekozeiten auf den tieferen Stufen zugunsten der 3m-Stufe. Dies führt zu einer unregelmässigen und anfänglich zu hohen Druckentlastungsgeschwindigkeit.

Aufstiegsgeschwindigkeit: max. 18m/min

Keine Tabellen für Höhenbereiche, nur auf Meereshöhe gültig.

Arbeitet mit 6 Geweben mit $t_{1/2}$ von 5-120'

COMEX-Tabelle:

Tabelle der franz. Tieftauchunternehmung COMEX. Sehr vorsichtig.

Bühlmann-Tabelle(1983)

Offizielle Tabelle des SUSV⁴. Recht sicher, vor allem in Tiefen bis zu 30m, darunter ähnlich der U.S-Tabelle. Liegt etwa zwischen der COMEX und der U.S-Navy Tabelle.

Aufstiegsgeschwindigkeit: max. 10m/min

Separate Tabellen für 0-700, 700-2500 m.ü.M erhältlich.

Bühlmann-Hahn-Tabelle(1987)

Offizielle Tabelle des VDST⁵. Wurde nach dem Bühlmann-83 System erstellt, daher ähnlich der CH-Bühlmann Tabelle.

Aufstiegsgeschwindigkeit: auch max. 10m/min

Für die Höhenbereiche 250, 700, 1200 m.ü.M erhältlich.

Tabelle der franz. Marine G.E.R.S :

Alte, teilweise sehr unvorsichtige Tabelle. Auf keinen Fall zu empfehlen. In tieferen Bereichen besser.

Wohl auch für den Marinetaucher ungesund.

Aufstiegsgeschwindigkeit: max 20m/min

3 Gewebe mit $t_{1/2}$ von 40,75,120', feste Übersättigungsfaktoren

³PADI=Professional Association of Diving Instructors.
Amerikanischer Tauchlehrerverband.

⁴SUSV=Schweizerischer Unterwassersportverband

⁵VDST=Verband deutscher Sporttaucher.

Zum Vergleich einige Nullzeiten:

Nullzeit:

Tiefe	U.S-Navy	Bühlmann-83	G.E.R.S	Bühlmann-Hahn
10m	∞	300'	∞	653'
15m	100'	75'	∞	99'
18m	60'	53'	75'	65'
24m	40'	25'	45'	27'
36m	15'	15'	25'	9'

Dekozeiten auf 9m/6m/3m :

61m/10' 0'/2'/4' 1'/4'/5' 0'/1'/4' 1'/3'/4'

Der Leser ziehe seine eigenen Schlüsse.

2.1.1 Programm zur Berechnung von Dekotabellen nach Bühlmann

Ich habe aus dem Simulationsprogramm ein zweites Programm entwickelt, das Dekotabellen für verschiedenste Anwendungen drucken kann. Folgende Möglichkeiten stehen zur Wahl:

- Beliebige Höhe, Berechnung durch Einteilung in 4 Bereiche
 - 0 - 700 m.ü.M
 - 700 - 1500
 - 1500 - 2500
 - 2500 - 3500
- Tiefenstufen in Abständen von 3 oder 5 Metern
 - > Berechnung für Tiefen von 9-51m oder von 10-80m
- Abstand der Dekostufen von 2 oder 3 Metern
- Sicherheitszuschlag zur wahren Tiefe (Addition ergibt Tiefe die zur Berechnung benutzt wird) in Metern.
- Die Entättigung während des Auftauchens kann eingerechnet werden (nicht bei Nullzeiten). Dies führt zu etwas kürzeren Dekozeiten.

Ausserdem habe ich versuchsweise zwei Verfahren programmiert, mit denen die Dekozeiten erheblich gesenkt werden können:

'Hohe : 0 m..M Bereich : 1
'Sicherheitszuschlag zur Tiefe : 0m

Hoehe : 0 m..M Bereich : 1
Dekompression ab 6m mit reinem O2
Sicherheitszuschlag zur Tiefe : 0m

Tiefe	Zeit	24	21	18	15	12	9	6	3
9 m	Nullzeit = 328 '								
12 m	Nullzeit = 105 '								
15 m	Nullzeit = 66 '								
18 m	Nullzeit = 48 '								
18 m	50 '	-	-	-	-	-	-	-	1
18 m	55 '	-	-	-	-	-	-	-	3
18 m	60 '	-	-	-	-	-	-	-	6
21 m	Nullzeit = 30 '								
21 m	35 '	-	-	-	-	-	-	-	1
21 m	40 '	-	-	-	-	-	-	-	2
21 m	45 '	-	-	-	-	-	-	-	4
21 m	50 '	-	-	-	-	-	-	-	7
21 m	55 '	-	-	-	-	-	-	-	10
21 m	60 '	-	-	-	-	-	-	-	13
24 m	Nullzeit = 21 '								
24 m	25 '	-	-	-	-	-	-	-	1
24 m	30 '	-	-	-	-	-	-	-	2
24 m	35 '	-	-	-	-	-	-	-	3
24 m	40 '	-	-	-	-	-	-	-	7
24 m	45 '	-	-	-	-	-	-	-	12
24 m	50 '	-	-	-	-	-	-	1	9
24 m	55 '	-	-	-	-	-	-	2	14
24 m	60 '	-	-	-	-	-	-	3	16
27 m	Nullzeit = 17 '								
27 m	20 '	-	-	-	-	-	-	-	1
27 m	25 '	-	-	-	-	-	-	-	3
27 m	30 '	-	-	-	-	-	-	1	3
27 m	35 '	-	-	-	-	-	-	1	6
27 m	40 '	-	-	-	-	-	-	2	10
27 m	45 '	-	-	-	-	-	-	3	12
27 m	50 '	-	-	-	-	-	-	4	15
27 m	55 '	-	-	-	-	-	-	5	17
27 m	60 '	-	-	-	-	-	-	7	17
30 m	Nullzeit = 14 '								
30 m	15 '	-	-	-	-	-	-	-	1
30 m	20 '	-	-	-	-	-	-	-	3
30 m	25 '	-	-	-	-	-	-	1	3
30 m	30 '	-	-	-	-	-	-	2	5
30 m	35 '	-	-	-	-	-	-	3	9
30 m	40 '	-	-	-	-	-	1	3	13
30 m	45 '	-	-	-	-	-	1	5	15
30 m	50 '	-	-	-	-	-	2	7	16
30 m	55 '	-	-	-	-	-	3	8	18

Hoehe : 0 m..M Bereich : 1
Tauchen mit maximalem O2-Anteil
Sicherheitszuschlag zur Tiefe : 0m

- Dekomprimiert man ab 6m mit reinem O₂, so erfolgt die Abatmung des N₂ wegen dem höheren Druckgradienten erheblich schneller (Siehe auch Fussnote zu 2.0.0). Diese Methode wird z.T praktiziert. Sauerstoff wirkt aber ab einem Partialdruck von 1.7 bar toxisch ! Deshalb kann nur auf den obersten Dekostufen reines O₂ geatmet werden. Wie die abgebildete Beispieldatabelle zeigt, werden die Dekozeiten um einiges kürzer, die Nullzeiten bleiben natürlich gleich, da in der Tiefe normale Pressluft geatmet wird.

- Als weitergehende Variante ist ein Gerät vorstellbar, dass das Gasgemisch O₂/N₂ immer so reguliert, dass der O₂-Anteil maximal, also Partialdruck 1.7, ist. So wird auch in der Tiefe wegen des kleineren Druckgradienten weniger N₂ gelöst, was zu teilweise sehr viel längeren Nullzeiten führt (vor allem in den geringeren Tiefen, da hier der %-Anteil O₂ sehr hoch gehalten werden kann). Die dritte Beispieldatabelle ist mit dieser Option gerechnet. Ich weiss allerdings nicht ob ich das Bühlmann-System damit nicht etwas zu sehr strapaziere. Der Nutzen wäre allerdings nicht zu verachten. So ein Gerät käme allerdings kaum ohne eine komplizierte Regel- und Kontrollelektronik aus, womit der Vorteil der Einfachheit und Preisgünstigkeit des Presslufttauchgeräts verloren ginge. Auch müsste man zusätzlich zur Pressluft reinen Sauerstoff mitführen.

2.1.2 Nachteile der Dekompressionstabelle

Tauchtabellen haben einige entscheidende Nachteile.

- Ihre Handhabung ist nicht immer ganz einfach, die Möglichkeiten etwas falsch zu machen sind vielfältig. Der Gebrauch der Tabellen setzt daher etwas Übung und Gewissenhaftigkeit voraus. Besonders da Denkleistung und Konzentrationsvermögen durch Stickstoffnarkose, Kälte etc. beim Tauchen herabgesetzt sind.
- Vor allem wenn mehrere Tauchgänge am selben Tag durchgeführt werden, ist die Berechnung mühsam und zeitraubend.

- Es werden nur die Nullzeiten/Dekozeiten für Rechteckprofile angegeben. Dies spielt für den Berufstaucher keine Rolle, da dieser meist während dem ganzen Tauchgang auf der selben Tiefe verweilt. Sporttaucher wechseln aber oft die Tiefe, und die durchschnittliche Tauchtiefe liegt meistens einiges oberhalb der maximal erreichten Tauchtiefe (die für die Dekompressionsberechnung herangezogen werden muss : Tiefenmesser mit Schleppzeiger).
-> Es wird meistens überflüssig lange dekomprimiert was nicht unbedingt einen grösseren Sicherheitsspielraum garantiert (eine weit verbreiteter Irrtum), da für die angegebenen Rechteckprofile oft ein kleiner Spielraum berücksichtigt wurde, um die Ineffizienz nicht noch zu vergrößern.

- Aufgrund der erwähnten Ineffizienz und der Tatsache dass das Einhalten der Dekostops eine unliebsame Angelegenheit ist, werden häufig Dekozeiten geschätzt, überschlagsmäßig die durchschnittliche Tauchtiefe geschätzt und zur Dekompressionsberechnung herangezogen und andere zweifelhafte und z.T. gefährliche Praktiken angewendet und gelehrt.

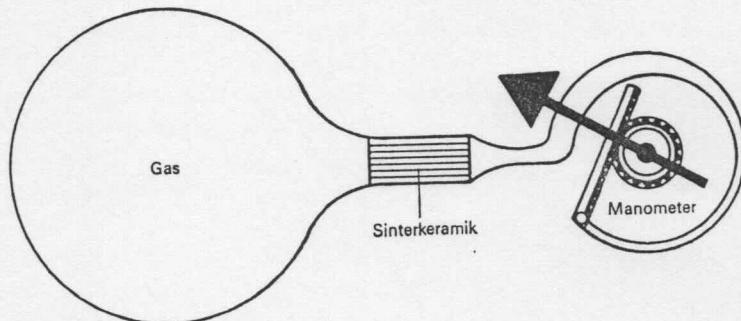
- Bei einigen Dekotabellen wurden zum Test Versuchspersonen herangezogen, die Ergebnisse liefern die nicht ohne weiteres auf den Sporttaucher übertragbar sind. So wurden beispielweise die weit verbreiteten Austauchtabellen der US-Navy von Marinetauchern getestet, die sicherlich schlanker als der europäische Durchschnittsbürger sind. Das gleiche Problem besteht bei den Tabellen der franz. Marine (G.E.R.S.).

-Beim Nachrechnen von Dekotabellen nach Bühlmann ist mir bei einer häufig verwendeten Tabelle der Verdacht gekommen, dass bei den Nullzeiten die Entättigung während des Auftauchens auch mitgerechnet wird, da ich mir die langen Nullzeiten auf den grösseren Tiefenstufen nicht anders erklären kann. Dies wäre zwar nicht falsch, da beim Erreichen der Wasseroberfläche die Übersättigungstoleranz nicht überschritten wird, aber die Grundidee der Nullzeit, nähmlich dass auch bei einem Notaufstieg kein Unfall entsteht, geht verloren. Wird nach Ende der NZ die Aufstiegsgeschwindigkeit von 10m/min (was langsamer ist als man denkt) überschritten, so können Dekoprobleme entstehen.

2.2 Dekompressiometer

Noch vor einigen Jahren waren bei vielen ambitionierten Sporttauchern noch die sog. Dekompressiometer in Verwendung. Dies ist ein recht einfaches Gerät, dass eine Simulation der Stickstoff-sättigung des Gewebes ermöglicht. Es besteht im wesentlichen aus einem unter Umgebungsdruck stehenden Beutel, der mit Gas gefüllt ist. Dieses kann nun durch ein feines Filter aus Sinterkeramik diffundieren und gelangt so in eine 2. Kammer, an die ein genaues Manometer angeschlossen ist. Das Filter simuliert also das Gewebe des Tauchers. Ist der Druck in der 2. Kammer höher als der Umgebungsdruck, kann die Luft wieder zurückdiffundieren. Ein Dekometer ist also ein Analogrechner, der über das Manometer die tiefste Dekostufe anzeigen kann. Die Berechnung ist viel genauer als sie mit Tabellen möglich wäre, und bei oft wechselnder Tiefe sehr effizient. Ausserdem entfallen die bei der Tabelle notwendigen Berechnungen beim Wiederholungstauchen.

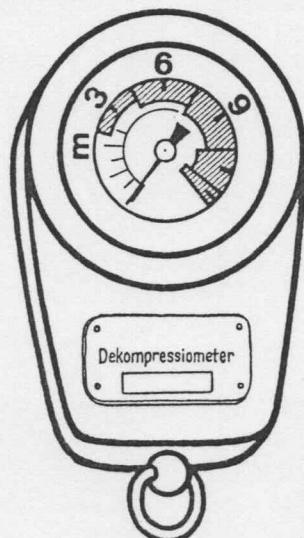
Dekometer werden heute wegen der mit ihrem Gebrauch verbundenen Gefahren kaum mehr verwendet.



Pneumatischer Dekompressiometer.

2.2.0 Nachteile des Dekompressiometers

-Es wird nur ein Gewebe mit einer representativen Halbwertszeit simuliert (zumindest beim am weitesten verbreiteten S.O.S Dekometer. Es existieren aufwendigere Dekometer mit bis zu drei simulierten Geweben). Dies führt zu falschen Angaben bei längeren oder kurzen und tiefen Tauchgängen. Es ist gut möglich auch bei genauer Beachtung des Dekometers einen Unfall zu erleiden.



-Das Dekometer ist mit allen Nachteilen der Mechanik behaftet:

- * Dekometer dürfen nicht im Frachtraum eines Flugzeugs transportiert werden, da sie sonst zerstört werden.
- * Wird ein DM zwischen zwei Tauchgängen in der Sonne liegen gelassen, können falsche Werte angezeigt werden.
- * Das DM informiert nur ungefähr über die verbleibende Restnullzeit und die Dauer der Dekozeit.
- * Ein DM ist recht empfindlich und muss öfters geprüft werden.

2.3 Tauchcomputer

Der Tauchcomputer ist in gewisser Weise das elektronische Pendant zum Dekometer. Es wird die Stickstoffsättigung von mehreren hypothetischen Geweben anhand von Tauchzeit und Tiefe simuliert. Aus diesen Daten werden die Restnullzeit, die tiefste einzuhaltende Dekostufe und evtl. die Dekozeit berechnet. Natürlich werden auch die aktuelle Tiefe, die maximal erreichte Tiefe sowie die Tauchzeit angezeigt. Die meisten Geräte warnen auch bei zu grosser Aufstiegsgeschwindigkeit.

Da es sich um ein Mikrocomputersystem handelt, sind die Geräte praktisch wartungsfrei. Es genügt, wenn man von Zeit zu Zeit die Tiefenmesserangabe mit derjenigen des Tauchpartners vergleicht. Stimmt diese, so ist die Dekompressionsberechnung auch einwandfrei.

2.3.0 Nachteile des Tauchcomputers

Die Ausstattung der erhältlichen TC variiert stark. Prinzipbedingte Nachteile scheinen mir:

- Tauchcomputer verlassen sich voll auf ein mathematisches Modell, welche alle irgendwelche Mängel haben. Dies kann vor allem in Grenzsituationen von Bedeutung sein.
- Tauchcomputer verleiten zum Unterschätzen der mit der Dekompression verbundenen Gefahren. Auch wenn alle Informationen bequem am Arm abgelesen werden können, kann eine simple Übelkeit in der Dekompressionsphase zu gefährlichen Komplikationen führen.
- Die effiziente Dekompression verleitet zum Tieftauchen. Tiefen von 50-90 Meter werden von vielen Sporttauchern routinemässig betaut. In diesen Tiefen ist die Gefahr einer schweren Stickstoffnarkose oder auch einer O₂-Vergiftung gross. Solche Tauchgänge sind sicherlich mit gesundheitlichen Risiken verbunden.
- Das Wiederholungstauchen wird dermassen vereinfacht, dass auf mancher Basis heute 'Non-Limit Tauchen' angeboten wird, was mancher Feriengast dazu nutzt 6-7 Tauchgänge im Tag zu machen. Da gerade bei Wiederholungstauchgängen die heutigen Modelle Schwächen haben, kann dies zu Dekoproblemen führen.
- Viele Taucher verlassen sich auf den Computer und führen keine Ersatzinstrumente mit. Geht nun der TC auf einem Tauchgang aus irgend einem Grund kaputt, steht der Taucher ohne jede Information da. Weder Tiefe, Maximaltiefe noch Tauchzeit sind bekannt, was eine Dekompression nach Tabelle verunmöglicht.
- Die Geräte sind recht teuer (noch), deshalb tauchen oft mehrere Taucher nach einem Gerät. Dies verschlimmert obgenanntes Problem zusätzlich.
- Wenn zwei Taucher zusammen einen Tauchgang unternehmen wollen, die beide am gleichen Tag schon einmal getaucht sind (nicht zusammen), dann ist eine sichere Dekompressionsberechnung fast unmöglich. Die genauen Gewebespansungen der Taucher sind ja nicht bekannt, und da ja beide Taucher ein unterschiedliches Profil getaucht sind, sicher unterschiedlich. Manchmal wird in solchen Fällen einfach nach dem Computer desjenigen Tauchers getaucht, der beim ersten Tauchgang tiefer war. Dies kann jedoch ins Auge gehen, wenn z.B. der zweite Taucher beim ersten Tauchgang in geringer Tiefe sehr lange getaucht ist (z.B. Schulung), und deshalb die langsamsten Gewebe stärker gesättigt sind als beim ersten Taucher. Beim Austauchen nach dem Computer des ersten wird der zweite seine langsamsten Kompartimente unvollständig dekomprimieren! Dies ist umso schlimmer, da sich die langsamsten Kompartimente während des Oberflächenintervalls weniger

entsättigen als die schnellen.

Dieses Problem tritt beim Tauchen nach Tabellen nicht auf, da mit der Wiederholungsgruppe ein eindeutiger Maßstab für die Stickstoff-sättigung besteht, der verglichen werden kann. Die Dekompression richtet sich dann nach dem Taucher mit der höheren Gruppe.

2.3.1 Beispiel für ein Tauchcomputer-Programm

Das Tauchcomputerprogramm ist im wesentlichen eine abgespeckte Version des Simulationsprogramms. Ich habe aber die Routinen so programmiert, das alle Berechnungen in einer einzigen Schleife für alle Gewebe erledigt werden.

Die Tiefe wird mit den Pfeiltasten Auf/Ab eingestellt.

3. Tauchcomputer

Tauchcomputer sind erst seit 1985 auf dem Markt. Mittlerweile ist ein Angebot von etwa 7 Modellen von 4 Herstellern vorhanden.

3.0 Anforderungen

Mindestanforderungen:

- Anzeige der Tauchtiefe
- " " Tauchzeit
- " " maximalen Tauchtiefe
- " " Restnullzeit, oder:
- " " tiefsten Dekostufe
- Warnung bei Verletzen der Dekompressionsvorschrift
- " " ungenügender Batteriespannung

Als für Sporttaucher nützlich erachte ich folgende zusätzlichen Merkmale:

- Speisung aus einer Dauerbatterie, die für einige hundert Tauchgänge ausreicht.
- Anzeige der Zeit, vor deren Ablauf nicht geflogen werden darf.
- Warnung bei Überschreiten der max. Auftauchgeschw.
- Anzeige des Höhenbereichs zur Kontrolle des Drucksensors.
- Adaptionszeit in der Höhe
- Piepton bei Warnung
- Anzeige der Oberflächenintervallzeit

Tauchcomputer in dieser Ausstattung werden auch Nullzeitcomputer genannt. Solche die zusätzlich die Dauer der tiefsten Dekostufe und/oder die Gesamtaustauchzeit (Summe aller Dekostops) anzeigen, nennt man Dekompressionscomputer.

4. Konzept eines Nullzeitcomputers mit Personalcomputer-Schnittstelle

Ich habe bei meinem eigenen Konzept natürlich versucht die Schwächen der heutigen Computer möglichst zu überwinden. Vor allem was die Software betrifft, ist da natürlich im Rahmen einer Facharbeit nicht viel zu machen. Trotztem glaube ich das einige Verbesserungen ohne grossen Aufwand zu realisieren wären. So z.B (z.T. natürlich Ansichtssache):

-Bei Tiefen über 60m sollte der Computer zwar weiterrechnen, aber keine Tiefen/Dekoangaben mehr zeigen.

-Eine Angabe der Gesamtaustauchzeit ist für den Sporttaucher überflüssig und verleitet zudem zu Tauchgängen mit langen Dekozeiten.

-Obwohl die Drucksensoren des Tauchcomputers viel genauer und zuverlässiger als normale Tiefenmesser arbeiten, sollte trotzdem ein Sicherheitszuschlag zur Tiefe eingerechnet werden, da oft mehrere Taucher nach demselben Computer tauchen und es gut sein kann, dass einer davon durchschnittlich zwei Meter tiefer getaucht ist als derjenige der den Computer trägt.

-Für Wiederholungstauchgänge sollte der Computer grössere Sicherheitsreserven vorsehen, um der Blasenbildung in der Dekompressionsphase Rechnung zu tragen.

-Wenn schon ein Mikrocomputer verwendet wird, ist der zusätzliche Aufwand klein auch eine serielle Schnittstelle miteinzubauen. Diese eröffnet viele Möglichkeiten:

- autom. Logbuch am PC (Datenbank) mit Tauchgangplaner
- Speichern des Tauchprofils, graph. Darstellung im Logbuch, (Kombination mit PC-Logbuchsoftware), was vor allem für Tauchschulen und Berufstaucher interessant wäre.
- Durch Ausgabemöglichkeit der Gewebedaten würde im Falle eines Unfalls eine viel abgestimmtere Dekokammerbehandlung möglich.
- Durch Datenübertragung zwischen zwei Computern können beliebige Partner sicher Wiederholungstauchgänge machen.

-Bei Tabellen ist es möglich, bei erhöhtem Risiko (z.B. besonders kaltes Wasser, körperliche Arbeit, fettleibiger Taucher) eine grössere Tiefe bzw. eine längere Tauchzeit als die tatsächliche als Grundlage zur Dekompression zu wählen. Zwar kann man beim Computer ebenfalls eine zusätzliche Sicherheit erzielen, wenn man beispielsweise 5 min. vor Ablauf der Nullzeit auftaucht. Bei Dekotauchgängen wird das aber schwieriger. Besser wäre es, wenn man die Sicherheitszuschläge ändern könnte.

Funktionen meines Computers:

Hier musste ich mich der Zeit wegen auf die Grundfunktionen eines Nullzeitcomputers beschränken:

- Anzeige der Tauchtiefe
- " " Tauchzeit
- " " maximalen Tauchtiefe
- " " Restnullzeit bzw. tiefste Dekostufe.

Bei der Restnullzeit stellt sich das Problem, dass eine Logarithmusfunktion programmiert werden müsste. Man kann zwar auch mit Tabellen arbeiten, diese werden aber recht lang, wenn man Nullzeiten über 99' anzeigen will. Ich habe versucht eine Ln-Funktion aus

$$\begin{aligned} \text{LN}(X) = & X-1-(X-1)^2/2+(X-1)^3/3-\dots & \text{für } 0 < X \leq 2 \\ \text{LN}(X) = & (X-1)/X+(X-1)^2/(2*X^2)+(X-1)^3/(3*X^3)+\dots & \text{für } X > 0.5 \end{aligned}$$

zu berechnen, was aber enttäuschend ungenaue Ergebnisse liefert. Für Ideen wie man sowas besser machen könnte, wäre ich dankbar.

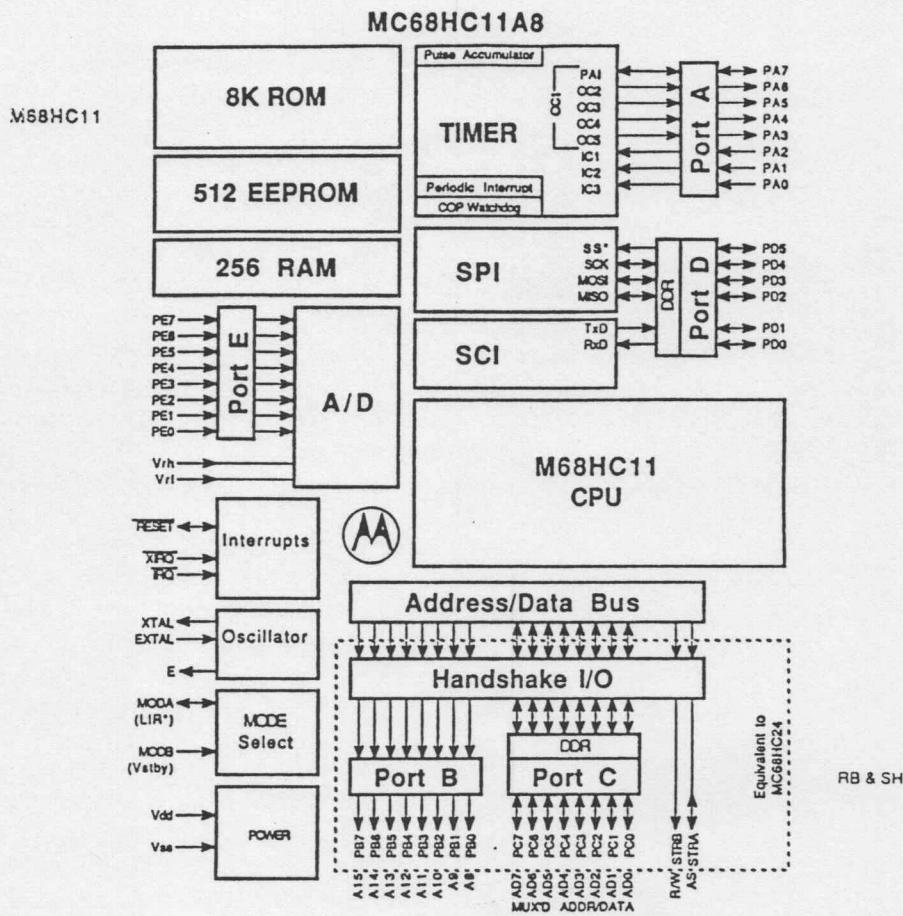
4.0 Wahl des Mikrocontrollers

Nach längeren Überlegungen habe ich mich für einen Controller der 68C11-Familie von Motorola entschieden. Folgende Eigenschaften lassen diesen Chip als ideal erscheinen.

- Genügende Rechenleistung auch bei niedrigerer Taktfrequenz.
- Nicht heikel in bezug auf Speisespannung. Bei 1Mhz ca. 3-6V. Deshalb ideal für Batteriebetrieb.
- Eingebauter 8-Bit A/D-Wandler mit 4 Eingängen, für Drucksensor, Batteriespannungsüberwachung, evtl. Temperatursensor.
- 256 Byte SRAM^a, was auch für ein komplexeres Programm mit Fließkomma-Arithmetik genug ist.
- 512 Byte EEPROM^b. Hier können Tauchgangdaten und Gewebedaten dauerhaft gespeichert werden. Die zur Programmierung nötige höhere Spannung wird selbstständig mittels einer Ladungspumpe erzeugt. Bei zu tiefer Taktfrequenz funktioniert die Ladungspumpe mittels eines intern zuschaltbaren RC-Oszillators.

^aSRAM= Statisches Random Access Memory

^bEEPROM=Electrically Erasable Programmable Read Only Memory



M68HC11

68HC11A8 (A1, A0) OVERVIEW

ROM	8K (0K, 0K)
RAM	256 B
EEPROM	512 B (512 B, 0 B)
EPROM	---

I/O in Single Chip Mode 38 I/O in Expanded Mode 20

Serial I/O SCI, SPI

16-Bit Timer: Free running counters: 1
 Input Capture Registers: 3
 Output Compare Registers: 5
 I/C, O/C programmable Registers: 0

Bus	2.1 MHz Multiplexed, 3 MHz planned
A/D Converter	8 Channel 8-Bit
PWM	---
Other Timer	8-Bit Pulse Accumulator, Periodic Interrupt, Watchdog
Package	52 PLCC, 48 DIP

RB & SH

- Sehr tiefer Stromverbrauch durch CMOS[®] Technologie. Der Verbrauch ist zusätzlich auf wenige μ A begrenzbar durch Umschalten in spezielle Stromsparmodi. Dies sollte eine Speisung mit einer Lithiumbatterie ermöglichen, die dann für einige hundert Tauchgänge ausreicht.
- Umfangreiche Sicherheitseinrichtungen eingebaut:
 - COP[®]- Watchdog-Timer
 - Automatische Clock-Überwachung. Fällt der Takt unter eine bestimmte Frequenz, wird ein Reset ausgelöst.
- Eingebauter programmierbarer, synchroner serieller Bus für einfache Kommunikation zwischen CPU und Peripherie.
- Es ist ein kleiner CMOS-Chip (68HC68T1) erhältlich, der eine Echtzeituhr sowie 32 Byte SRAM enthält. Dieser kann einfach über den synchronen Bus angeschlossen werden und übernimmt zusätzlich die Aufgabe die CPU bei ungenügender Speisespannung im RESET-Zustand zu halten um einen Datenverlust zu vermeiden. Er beinhaltet zudem einen Quarz-Taktgenerator, dessen Ausgangsfrequenz von der CPU aus programmierbar ist. Die CPU kann so während Wartepausen ihre eigene Taktfrequenz heruntersetzen um so den Stromverbrauch zu verkleinern.
- Eingebaute asynchrone, programmierbare, serielle Schnittstelle, die mittels Pegelwandler sehr einfach als RS-232 PC-Schnittstelle zu gebrauchen ist.
- Vollstatisches Design, d.h. keine minimale Taktfrequenz vorgeschrieben. Deshalb ist ein Debugging auch mit einfachen Mitteln (Oszilloskop, Logikprobe) gut möglich, indem z.B. mit einem Takt von 50Hz gearbeitet wird.
- Sowohl als Mikroprozessor mit externem Bus und Speicher als auch als 1-Chip-Mikrocomputer konfigurierbar. So kann man im Prototyp mit einem externen EPROM arbeiten und später, wenn das Programm fehlerfrei ist, das interne EPROM programmieren.

Nicht zuletzt spielte auch die Verfügbarkeit eines Public-Domain Assemblers/Linkers sowie der günstige Preis eine wichtige Rolle bei der Auswahl.

[®]CMOS = Complementary Metal Oxyd Semiconductor. FET-Technologie mit Gattern aus 2 komplementären Transistoren.

[®]COP = Computer Operating Properly

4.1 Display

Ich habe ein zweizeiliges, alphanumerisches Display der Firma Hitachi ausgewählt. Dieses ist sehr einfach zu programmieren und kann auch selbstdefinierte Zeichen darstellen. Es ist eigentlich für eine Ansteuerung über I/O-Portleitungen gedacht, funktioniert aber auch wenn es direkt an den Bus angeschlossen wird. Der Stromverbrauch der CMOS-Controller-IC's ist gering.

4.2 Stromversorgung

Ich betreibe meinen Prototypen mit einem 4.8V/500mAh NiCd-Akku, da der Chip im Expanded-mode (also als Mikroprozessor mit externem Bus und Speicher konfiguriert) doch einige mA konsumiert und deshalb der Einsatz einer Lithiumbatterie zu teuer wäre. Eine Lithiumbatterie kann aber zum Betrieb der Echtzeituhr eingesetzt werden, damit diese auch zwischen zwei Tauchgängen weiterläuft, und so das Oberflächenintervall bestimmt werden kann.

4.3 Schaltung

Prototyp (zum Softwaretesten):

Der 68HC11 ist für den Prototypen im expanded-mode konfiguriert, was mit den Widerständen R21/22 geschieht (1-Pegel an MODA und MODB).

IC4 decodiert die 'gemultiplexten' Adressen/Daten. Die Daten werden mit der fallenden Flanke von AS (Adress-Strobe) übernommen. Als Programmspeicher wird ein 27C64 (CMOS-)EPROM mit 8kByte verwendet. Die Adressierung ist linear und erfolgt über NAND-Gate 2 (Adressleitungen 13+15), was das Programm bei \$E000 beginnen lässt. Die Datenausgänge des EPROMS werden nur freigegeben wenn R/-W auf 1 ist.

Das Display ist hier über den Bus angeschlossen, weil im expanded-mode nicht genügend Portleitungen frei sind. Hier hatte ich anfänglich Bedenken, da die Zeiten des Bus-Timings des Prozessors an der Grenze des für das Display Verträglichen liegen. Die in den Datenblättern angegebenen Grenzwerte können aber erfahrungsgemäß um mind. 50% über- bzw. unterschritten werden, ohne dass Probleme auftreten. Tatsächlich hat es auch keine Probleme bereitet, das Display arbeitet bestens. Die lineare Adressierung erfolgt über AND 1 und NAND 3 und weist dem Display alle Adressen zwischen C000 und D000 zu. Das Display übernimmt die Daten mit der fallenden Flanke des AND 2 Ausgangs. Über Portleitung A4 wird dem Display mitgeteilt, ob es sich bei den übertragenen Daten um Befehle oder Zeichen handelt.

Mit Potentiometer P1 kann der Kontrast eingestellt werden.

Die Kondensatoren C7-C9 kompensieren die Impedanzen der Versorgungsleitungen. Sie stellen eine gleichmässige Stromversorgung sicher. Über den Spannungsteiler R14/15 kann am Analogeingang 1 die Versorgungsspannung/2 gemessen werden. An Analogeingang 0 wird über den Schutzwiderstand R13 die der Tiefe entsprechende Spannung gemessen. Durch die 8-Bit Digitalisierung ergibt sich für eine max. Tiefe von 50m eine Genauigkeit von $50/2^8 = 19\text{cm}$. Berücksichtigt man noch den Fehler des Wandlers von max. $\pm 1\text{LSB}$, so kommt man auf einen Fehler von max. $\pm 40\text{cm}$ was genügend ist. Eventuelle nichtlineare Fehler eines Drucksensors oder einer Verstärkerschaltung könnten durch ROM-Tabellen kompensiert werden, so dass der Fehler nicht viel grösser wird.

Alle nichtbenutzten Prozessor-Eingänge werden auf definierte Pegel gesetzt, um keinen unnötigen Stromverbrauch zu verursachen. Dies erfolgt über die Widerstände R8-12/16/17, damit sie evtl. nachträglich leicht zu nutzen sind (Testzwecke etc.). Nichtbenutzte Eingänge an anderen Bausteinen habe ich direkt auf die Versorgungsleitungen gezogen.

Die Referenzspannungsquelle für den A/D-Wandler ist der Einfachheit halber die Spannung der Lithiumbatterie (müsste für ein brauchbares Gerät durch eine Stabilisierschaltung ersetzt werden) und dem Tiefpass R18/C6.

Die Echtzeituhr ist über die synchrone, serielle Schnittstelle mit der CPU verbunden (Leitungen MOSI,MISO,SCK,SS¹⁰). Der Power Down-Reset wird von IC2 erzeugt und mit R25/C5 noch etwas verlängert. Das Verzögerungsglied R23/C4 sorgt dafür, dass die Zähler der Echtzeituhr nach einem Power-On nochmals zurückgesetzt werden, da diese in der Startphase undefinierten Inhalt annehmen. C3 erfüllt die gleiche Aufgabe wie C7-C8.

Der Oszillator besteht aus dem 4Mhz-Quarz Q1 und den Kondensatoren C1/2 sowie R26. Ein Taktsignal mit $f_{\text{extal}}/2^x$, also 1,2 oder 4Mhz wird über CLK OUT der CPU zugeführt (EXTAL).x ist softwaremäßig programmierbar. Dies ergibt einen CPU-Takt (E-Takt) von $f_{\text{extal}}/4$.

Zur gewählten Taktfrequenz:

Um mit nur einem Quarz auszukommen, habe ich einen Kompromiss eingehen müssen. Die Mindestfrequenz beträgt 1Mhz, da der A/D-Wandler bei tieferen Frequenzen nicht mehr arbeitet. Zwar kann dann ein RC-Oszillator zugeschaltet werden, dieser läuft aber nicht mehr synchron zum Takt, was den Digitalisierfehler des Wandlers vergrössert. Die Echtzeituhr würde eigentlich mit einem 4.194 Mhz-Quarz genau arbeiten. Da der 6811 aber für einen E-Takt von 1 oder 2 Mhz bestimmt ist, würde der Baudratengenerator bei

¹⁰MOSI/MISO:Master Out,Slave In /Master In Slave Out

SCK :Serial Clock
SS :Slave Select

einem 4.194Mhz Quarz ungenau arbeiten. Dies könnte eine Datenübertragung über die RS-232 Schnittstelle verunmöglichen, da diese mit festen Baudaten arbeitet (300,600,1200,2400 bd etc.).

Der NC-Akku kann über den Ladewiderstand und eine als Verpolungsschutz fungierende Diode geladen werden.

Brauchbares Gerät:

Will man nun ein brauchbares Gerät bauen, sind folgende Änderungen nötig:

zur Reduzierung des Stromverbrauchs muss der Chip nun im single-Chip Modus laufen, wozu MODA auf 0 gelegt wird. Es wird die 68HC711E9 CPU-Variante verwendet, die über 12k internes EPROM verfügt.

Da die Stromaufnahme der Echtzeituhr auf ein Minimum begrenzt werden muss, bekommt diese einen eigenen 32kHz Quarz, was nun auch eine genaue Zeitmessung ermöglicht. Die CPU läuft weiterhin mit 4Mhz (->1Mhz E-Takt), nun aus einem eigenen Oszillatoren.

Alle unbenutzten Eingänge werden direkt auf V_{dd} gezogen, was pull-up Widerstände spart. Im single-chip modus reicht, der geringeren Stromaufnahme wegen, ein einziger Entkopplungskondensator von 1 μ F.

Am Analogeingang AN0 wird über einen Operationsverstärker in nichtinvertierender Schaltung¹¹ der Drucksensor angeschlossen. An AN2 wird ebenfalls über eine Verstärkerschaltung ein Temperatursensor angeschlossen. Dieser muss nicht geeicht werden und erzeugt eine Ausgangsspannung von 0.0mV+10.0mV/ $^{\circ}$ C mit einer Genauigkeit von $\pm 0.25^{\circ}$ C. Dank dieser Temperaturmessung kann die Verstärkerschaltung für den Drucksensor sehr einfach gehalten werden, die Temperaturkompensation für Sensor und Verstärker erfolgt über mehrere ROM-Tabellen für versch. Temperaturbereiche. Als Nebenprodukt des Sensors könnte die Wassertemperatur angezeigt werden. Da im single-chip Modus kein externer Bus mehr vorhanden ist, wird das Display über Port C angeschlossen, was eine Dekodierlogik erübriggt und keine Timingprobleme bringen kann.

An V_{rh} muss nun eine von der Batteriespannung unabhängige Referenz angelegt werden.

Dank der nun sehr niedrigen Stromaufnahme kann die gesamte Schaltung aus einer Lithiumbatterie gespeist werden. Allerdings müssen Vorkehrungen getroffen werden, damit kein Datenverlust entsteht, wenn der Computer abgestellt wird:

Wird der Hauptschalter geöffnet, ist die CPU noch für Bruchteile einer Sekunde aus einem Kondensator versorgt. Es wird aber sofort ein nicht maskierbarer Interrupt ausgelöst, da -XIRQ nun über einen Widerstand mit Masse verbunden ist und über eine Diode vom Kondensator getrennt ist. Wird nun also ein nicht maskierbarer Interrupt ausgelöst, werden sofort alle Gewebedaten über die

¹¹Belastet den Drucksensor fast nicht, da der Opamp in dieser Schaltung einen extrem hohen Eingangswiderstand hat.

synchrone Schnittstelle in das RAM der Echtzeituhr gerettet (oder ins EEPROM programmiert). Dies ist eine simple Schaltungsmöglichkeit. Vielleicht funktioniert das aber zuwenig zuverlässig (Kontaktprellen des Schalters). Vorteilhaft ist hier aber die Eigenschaft des 6811 dass der XIRQ nach einem Reset erst durch das Programm aktiviert werden muss.

Bsp. für Kondensatorbemessung:

Die CPU muss nach einem XIRQ 16 Gewebe x 3 Bytes/Gewebe Bytes EEPROM programmieren bzw. über die synchrone übertragen. Pro Byte werden max. 11ms benötigt (EEPROM programmieren), also total $11\text{ms}/\text{Byte} \times 48\text{Byte} = 528\text{ms}$. Die CPU läuft sicher mit 3V d.h. $\epsilon U=3\text{V}$. $I=15\text{mA}+3\text{mA}=18\text{mA}$ {siehe unten}. weil $I[\text{mA}]=C[\mu\text{F}]\cdot\epsilon U[\text{V}]/\delta t[\text{ms}] \rightarrow C=I/\epsilon U\cdot\delta t=3168\mu\text{F}$, was doch etwas viel ist. Die Schaltung funktioniert also nur, wenn die Daten über die synchrone Schmittstelle ins RAM der Echtzeituhr gerettet werden, da dies nur $8\mu\text{s}/\text{Byte}$ benötigt ($SCK=1\text{MHz}$), der ganze Vorgang also $48*8=384\mu\text{s} \rightarrow C=0.0026\mu\text{F}$, es ist also kein extra Kondensator nötig, die vorhandenen reichen locker.

Vielleicht wäre es nützlich einige unbenutzte Porteingänge mit DIP-Schaltern auszustatten, mit welchen eine Einstellmöglichkeit bestehen bliebe (z.B. für versch. Höhenbereiche, Sicherheitszuschläge).

Bsp. zur Dimensionierung der Lithiumbatterie:

Stromaufnahme:

CPU laufend bei E=1MHz	:	15mA
CPU STOP-modus	:	100 μ A
LC-Display	:	3mA
Echtzeituhr laufend, 32kHz	:	0.1mA
Echtzeituhr Standby, 32kHz	:	25 μ A
Temperatursensor	:	60 μ A
Verlust in Widerständen	:	$0.25+0.025+0.227=0.502\text{mA}$
2 Operationsverstärker	:	20 μ A
(z.B. 27L2-low bias)		
Dazu käme noch die Stromaufnahme des Drucksensors.		Allgemein

Eingangsströme der CPU sind vernachlässigbar (FET's mit sehr hohem Eingangswiderstand).

-> Stromaufnahme beim Tauchen:

Annahme: CPU 80% der Zeit im STOP-modus, 20% laufend

$$= 0.2*15\text{mA}+0.8*0.1\text{mA} : 3.08 \quad [\text{mA}]$$

$$\begin{aligned} &+ 3 \quad \text{Display} \\ &+ 0.1 \quad \text{Uhr} \\ &+ 0.06 \quad \text{T-Sensor} \\ &+ 0.502 \quad \text{Widerstände} \\ &+ 0.02 \quad \text{Opamps} \end{aligned}$$

$$= 6.762\text{mA}$$

-> Stromaufnahme im Oberflächenintervall:
nur Echtzeituhr Standby=25µA

Die Batterie sollte nun für mindestens 100 Tauchtagen mit 200 Tauchgängen à 40' und 24-Stündigen Oberflächenintervallen reichen:

-> Tauchgänge:	200x0.66h*0.006762	=0.89 Ah
Oberflächenintervalle:	(100*24-200*0.66)*0.000025=0.057Ah	
Erforderliche Kapazität:		0.947Ah

Lithiumzellen haben aber eine Zellenspannung von 2.8-3V (je nach Temperatur) ! Es müssten also zwei Zellen in Serie geschaltet werden(im Schaltbild leider falsch gezeichnet: $V_{batt}=3V, V_{dd}=6V$) .

4.4 Mechanischer Aufbau

Der Prototyp ist auf einem Epoxy-Print aufgebaut. Ich habe mich nicht um besonders dichten Aufbau bemüht. Das Platinenlayout habe ich mit einem speziellen Programm (PCB-Layout) auf dem ATARI ST hergestellt. Die blind endende Masseleitung in der Oszillatorschaltung ist kein Fehler. Sie trennt die beiden Oszillatoren-Eingänge des 68HC11T1 voneinander. Das EPROM wird in einen TEXTOOL-Sockel gesteckt, alle anderen IC's sind ebenfalls gesockelt. Die Spannung, die am Analogeingang 1 den Drucksensor simuliert wird von einem 10k-Poti erzeugt.

4.5 Werkzeuge zur Softwareentwicklung

Ich habe folgende Programme verwendet:

- turbo.com: Turbo-Pascal 3.0 als schnellen Editor .
- asmhc11-Assembler. Dieser ist gratis von Motorola erhältlich und ist makrofähig. Er erzeugt ein Motorola-S19 File, das leider in der 1. Zeile einen fehlerhaften Kommentar enthält, so dass das File vom Simulationsprogramm (siehe unten) nicht ohne weiteres gelesen werden kann.
- eppgm4-EPROM-Programmiersoftware zu SUNSHINE-Programmer
- readbin.exe : kleines Programm zum Drucken/Anschauen von Hexdumps

- s6811-Prozessorsimulation:
Softwaresimulation des 6811, mit dem assemblierte Programme auf dem PC getestet werden können. Es können versch. Arten von Breakpoints gesetzt werden und alle Register und Speicherbereiche angeschaut werden. Das Programm kann im single-step modus Befehl für Befehl abgearbeitet werden.
- recbin.com : 'Linker'. Wandelt .s19-File in binäres File um.
- rectos19.exe : ein selbstgeschriebenes Pascal-Progrämmchen, welches im .s19-File die fehlerhafte Kommentarzeile entfernt.
- ass.exe: eine Shell, von der aus alle obgenannten Programme gestartet werden können. Ich habe dieses Programm in Turbo-Pascal 4.0 geschrieben. Der Sourcecode ohne zugehörige Units (für Fensterverwaltung beispielsweise) ist im Anhang enthalten. Es hat sich als äusserst praktisch erwiesen, da die Programme auf Knopfdruck gestartet werden können, und alle notwendigen Files automatisch zugeladen werden.
- key-fake: ein von ass.exe benutztes utility-programm. Mit diesem Progrämmchen kann ass.exe alle benutzten Programme automatisch zum Gebrauch vorbereiten (Files zuladen, Einstellungen machen).

Mit dieser Programmkomination liess sich für Assemblerverhältnisse sehr schnell arbeiten. Besonders der Simulator macht sich bezahlt, da manche Fehler ohne ein solches Werkzeug fast nicht zu finden sind. Er ersetzt einen teuren in-Circuit-Emulator.

4.6 Softwarestruktur

Die Tauchtiefe wird jede Sekunde einmal gemessen. Die Gewebeberechnungen werden Minütlich durchgeführt. Zwischen zwei Berechnungen/Messungen bleibt die CPU im STOP-Modus. Die sekündlichen Interrupts werden von der Echtzeituhr ausgelöst.

Programmstruktur - Tauchcomputer mit MC68HC11
für Grundfunktionen Zeit,Tiefe,Max.Tiefe,Dekostufe
In GfA-Basic-ähnlicher Syntax:

```

PROCEDURE adc_konfigurieren
PROCEDURE druck_lesen
PROCEDURE tiefe_bestimmen
  druck_lesen

PROCEDURE zeit_ausgeben
PROCEDURE tiefe_ausgeben
PROCEDURE max_tiefe_ausgeben
PROCEDURE deco_info_ausgeben
PROCEDURE display_löschen

```

```

PROCEDURE display_initialisieren
PROCEDURE test
    display_löschen

PROCEDURE tiefen_ausgeben
    tiefe_ausgeben
    if maxtiefel=tiefe
        max_tiefe_ausgeben
    endif

PROCEDURE daten_ausgeben
    display_löschen
    zeit_ausgeben
    tiefen_ausgeben
    deco_info_ausgeben

PROCEDURE zeitinterrupt_setzen
PROCEDURE zeitinterrupt_löschen

PROCEDURE konstanten_berechnen
    inertganteil=0.79

PROCEDURE gewebeinitialisieren
    FOR x=1 TO 16
        gasspannung(x)=0.75
    NEXT x

PROCEDURE gewebeberechnungen
    unterste=0
    inspdruck=tiefe/10*inertganteil
    FOR x=1 TO 16
        gradient=inspdruck-gasspannung(x)
        gasspannung(x)=gasspannung(x)+gradient*TABELLE(x) {1-e-k}
        tol(x)=gasspannung(x)-a
        tol(x)=tol(x)*b
        stufe(x)=tol(x)+0.3
        stufe(x)=tol(x)/0.3
        stufe(x)=INT(stufe(x))
        stufe(x)=stufe(x)*3
        IF stufe(x)>unterste
            unterste=stufe(x)
        ENDIF
    NEXT x

PROCEDURE tauchen
    sekunden=0
    minuten=0
    alttiefe=-1
    minmaxtiefel=0
    maxtiefel=0
    gewebeinitialisieren
    zeitinterrupt_setzen
    DO

```

```

        WAI {for interrupt}
        tiefe_bestimmen
        if tiefe=0
            zeitinterrupt_löschen
            EXIT
        ENDIF
    LOOP

PROCEDURE intervall
    DO
        tiefe_bestimmen
        IF tiefe>0 THEN EXIT
    LOOP

BEGIN
    adc_konfigurieren
    display_initialisieren
    konstanten_berechnen
    test
    DO
        tiefe_bestimmen
        IF tiefe>0
            tauchen
        ELSE
            intervall
        ENDIF
    LOOP
END.

INTERRUPT
    sekunden=sekunden+1
    IF sekunden=60
        minuten=minuten+1
        sekunden=0
        minmaxtiefe=0
    ENDIF
    tiefe_bestimmen
    IF tiefe>minmaxtiefe
        minmaxtiefe=tiefe
    ENDIF
    IF sekunden=0
        gewebeberechnungen
    ENDIF
    IF tiefe<>alttiefe OR sekunden=0 {jede minute} THEN
        daten_ausgeben
    ENDIF
    alttiefe=tiefe

```

5. Literaturverzeichnis

Dekompression/Dekompressionskrankheit:

- [1] Bühlmann, A.A.
Dekompression und Dekompressionskrankheit
Springer-Verlag, 1983
- [2] Ehm, O.F.
Tauchen noch sicherer! Ein Leitfaden der Tauchmedizin für Sporttaucher, Berufstaucher und Ärzte.
- [3] Renemann, H.
Tauchmedizin verständlich gemacht
Neptun-Bücherei, KOSMOS-Verlag, 1972
- [4] PADI Advanced Diver Manual
Professional Association of Diving Instructors, 1984
- [5] Hahn, M.
Tauchrisiken - Stand 1989
tauchen, 11/89
- [6] Härtel, V.
Tauchen ohne Folgen ?
tauchen, 10/89

Mikroprozessortechnik/Sensoren:

- [7] Zaks, R.
Chip und System
Sybex, 1984
- [8] Funkschau-Arbeitsblätter
Digitalschaltungen I
Funkschau, 1984
- [9] The Guide to "All in One"-Micros
BRE 438/D
Motorola, 1989

Datenbücher/blätter:

- [10] MC68HC11A8 HCMOS Single-Chip Microcontroller
Advance Information
Motorola 1988
- [11] HC11, M68HC11 Reference Manual
Motorola, 1989
- [12] M68HC11 Programmer's Reference Manual
- [13] Datenblatt LM016XML
Hitachi, 1988
- [14] Dokumentation HD44780 Dot-Matrix LCD-Controller
Hitachi
- [15] MC68HC68T1 Real-Time Clock plus RAM with Serial Interface
Technical Data, MC68HC68T1/D
Motorola, 1988
- [16] Hencke,H.
Halbleitersensoren (Druck-)
Elektronik 10/85
- [17] Batterie Spezial, Information der Panasonic Deutschland
Lithium/NiCd/Carbon-Lithium
Panasonic
- [18] °C-Sensor LM35
Schaltungstechnik aktuell
elrad 7/8-1985
- [19] LIN-CMOS,Lineare IC's in CMOS-Technologie
Elektor 11/89
- [20] LOGIC,Databook Volume II
National Semiconductor Corp.

Anhang A

Verschiedene Dekotabellen

(nur für Sporttaucher interessante Bereiche)

Dekompressions-Tabelle												nach US-Navy					
Tiefe	Zeit	6	3	Tiefe	Zeit	12	9	6	3	Tiefe	Zeit	15	12	9	6	3	
12	200		0	27	80			13	40	42	40			2	16	26	
	210		2		90			15	48		50			6	24	44	
	230		7		100			21	54		60			16	23	56	
	250		11		110			24	61		70		4	19	32	68	
	270		15		120			32	68		80		10	23	41	79	
	300		19		130		5	36	74		5				0		
15	100		0	30	25				0	45	10				1		
	110		3		30				3		15				3		
	120		5		40				15		20			2	7		
	140		10		50			2	24		25			4	17		
	160		21		60			9	28		30			8	24		
	180		29		70			17	39		40			5	19	33	
	200		35		80			23	48		50			12	23	51	
	220		40		90		3	23	57		60		3	19	26	62	
	240		47		100		7	23	66		70		11	19	39	75	
	60		0		110		10	34	72		80	1	17	19	50	84	
	70		2		120		12	41	78		5				0		
18	80		7	33	20				0	48	10				1		
	100		14		25				3		15			1	4		
	120		26		30				7		20			3	11		
	140		39		40			2	21		25			7	20		
	160		48		50			8	26		30			2	11	25	
	180		56		60			18	36		40			7	23	39	
	200	1	69		70		1	23	48		50		2	16	22	55	
	50		0		80		7	23	57		60		9	19	33	69	
	60		8		90		12	30	64		70	1	17	22	44	80	
	70		14		100		15	37	72		5				0		
21	80		18	36	15				0	51	10				2		
	90		23		20				2		15			2	5		
	100		33		25				6		20			4	15		
	110	2	41		30				14		25			2	7	23	
	120	4	47		40			5	25		30			4	13	26	
	130	6	52		50			15	31		40		1	10	23	45	
	140	8	56		60		2	22	45		50		5	18	23	61	
	150	9	61		70		9	23	55		60	2	15	22	37	74	
	160	13	72		80		15	27	63		70	8	17	19	51	86	
	170	19	79		90		19	37	74		5				0		
	40		0		100		23	45	80		10				3		
24	50		10	39	10				0	54	15			3	6		
	60		17		15				1		20			1	5	17	
	70		23		20				4		25			3	10	24	
	80	2	31		25				10		30			6	17	27	
	90	7	39		30			3	18		40		3	14	23	50	
	100	11	46		40			10	25		50	2	9	19	30	65	
	110	13	53		50		3	21	37		60	5	16	19	44	81	
	120	17	56		60		9	23	52		5				0		
	130	19	63		70		16	24	61		10			1	3		
	140	26	69		80	3	19	35	72		15			4	7		
	150	32	77		90	8	19	45	80		20			2	6	20	
27	30		0	42	10				0	57	25			5	11	25	
	40		7		15				2		30		1	8	19	32	
	50		18		20				6		40		8	14	23	55	
	60		25		25			2	14		50	4	13	22	33	72	
	70	7	30		30			5	21		60	10	17	19	50	84	

START ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓

PADI® TAUCHTABELLEN

TIEFE (meter)

REPETITIV
GRUPPE ■

NULLZEIT

4

DEKOMPRESSION

35

25
10

TABELLE I: NULLZEITEN UND REPETITIVGRUPPEN-BESTIMMUNG

3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42
60	35	25	20	15	5	5										
120	70	50	35	30	15	15	10	10	5	5	5	5				
210	110	75	55	45	25	25	15	15	10	10	10	7	5	5	5	5
300	160	100	75	60	40	30	25	20	15	15	12	10	10	10	8	7
	225	135	100	75	50	40	30	25	20	20	15	15	13	12	10	10
	350	180	125	95	60	50	40	30	30	25	20	20	15	15	15	1
	240	160	120	80	70	50	40	35	30	25	22	20				15
	325	195	145	100	80	60	50	40	35	30	25	25	20	20	4	2
	245	170	120	100	70	55	45	40			30	3	25	6		20
	315	205	140	110	80	60	50			40		30	30	25	10	6
	250	160	130	90		70	60	50			40		15			K
	310	190	150	100		80	70	60	50			30	30	25		L
	220	170		140		100	80	70	60			20	25			M
				270	200	160	120	90				20	25			N

TABELLE II: OBERFLÄCHEN-INTERVALL

→ Weißes Feld: gibt ZEITZUSCHLAG an (ZZ) in Minuten, zur Grundzeit (GZ) dazuzählen!

25
175

Blues Feld:
gibt Rest-Nullzeit an.
Die effektive Tauchzeit sollte
diese Zeit nicht überschreiten!

ZEITZUSCHLAG (ZZ)
+Grundzeit (GZ)
= Totale Grundzeit (TGZ)

ZZ _____ **+GZ** _____ **TAUCHPLAN**
= TGZ _____ min. / _____ m **TIEFE**

DEKOZEIT UND FORTSETZUNG AUF TABELLE I

3 4.5 6 7.5 9 10.5 12 15 18 21 24 27 30 33 36 39

TABELLE III: REPETITIV TAUCHTABELLE

US-Navy-Tabelle, wie sie von PADI herausgegeben wird.

Tabelle 23.3. Luftdekompressionstabelle (0–700 m u.M.)

Tiefe m	Grund- zeit min	Aufstieg zum 1. Halt min : s	Haltezeiten m min								Gesamtauf- stiegszeit min : s	Repe- titiv- gruppe
			24	21	18	15	12	9	6	3		
9	300										1	0
12	120										1	10
	150	0 50									9	50
	180	0 50									14	50
	210	0 50									18	50
	240	0 50									24	50
	270	0 50									29	50
	300	0 50									34	50
15	75										1	30
	90	1 10									6	7 10
	120	1 10									20	21 10
	140	1 10									25	26 10
	160	1 10									31	32 10
	180	1 10									38	39 10
	200	0 50								2 43	45	50
18	53										1	50
	60	1 30									4	5 30
	70	1 30									9	10 30
	80	1 30									16	17 30
	90	1 30									23	24 30
	100	1 30									28	29 30
	110	1 10									1 31	33 10
	120	1 10									3 33	37 10
21	35										2	10
	50	1 50									6	7 50
	60	1 50									13	14 50
	70	1 50									23	24 50
	80	1 30									3 28	32 30
	90	1 30									7 31	39 30
	100	1 30									10 33	44 30
24	25										2	30
	40	2 10									6	8 10
	50	2 10									15	17 10
	60	1 50									3 23	27 50
	70	1 50									8 29	38 50
	80	1 50									13 32	46 50
	90	1 50									18 33	52 50
	100	1 30								1 24	38	64 30
27	22										2	40
	30	2 20									4	6 20
	40	2 10									1 12	15 10
	50	2 10									4 22	28 10
	60	2 10									10 28	40 10
	70	1 50									1 16	32 50
	80	1 50									4 21	34 50
	90	1 50									8 25	39 50
	100	1 50									11 28	84 50
30	20										3	0
	25	2 40									4	6 40
	30	2 20									2 6	10 20
	40	2 20									5 16	23 20
	50	2 10									1 10	39 10
	60	2 10									3 16	52 10
33	17										3	20
	25	2 40									2 6	10 40
	30	2 40									4 10	16 40
	40	2 20									2 7	22 20
	50	2 20									4 14	30 20
	60	2 20									8 20	63 20
36	15										3	40
	20	3 0									2 4	9 0
	25	3 0									4 7	14 0
	30	2 40									2 5	14 40
	40	2 40									4 10	42 40
39	12										3	50
	15	3 40									4	7 40
	20	3 20									3 6	12 20
	25	3 0									2 4	20 0
	30	3 0									3 6	29 0

Größte Tauch-tiefe (m)	Gesamt-tauch-zeit (min)	Austauch-zeiten (min)		Gesamtzeit für den Aufstieg (min)	Größte Tauch-tiefe (m)	Gesamt-tauch-zeit (min)	Austauch-zeiten (min)		Gesamtzeit für den Aufstieg (min)
		6 m	3 m				6 m	3 m	
15	10	—	—	1	22	10	—	—	1
	20	—	—	1		20	—	—	1
	30	—	—	1		30	—	—	1
	40	—	—	1		40	—	—	1
	50	—	—	1		50	—	—	1
	60	—	—	1		55	—	2	3
	70	—	—	1		60	—	7	8
	80	—	—	1		70	—	12	13
	90	—	—	1		80	—	17	18
	120	—	—	1		90	—	31	32
16	10	—	—	1	24	10	—	—	2
	20	—	—	1		20	—	—	2
	30	—	—	1		30	—	—	2
	40	—	—	1		40	—	—	2
	50	—	—	1		45	—	—	2
	60	—	—	1		50	—	5	7
	70	—	—	1		55	—	9	10
	80	—	—	1		60	—	13	15
	90	—	—	1		70	—	22	24
	100	—	1	2		80	—	31	33
	110	—	5	6		90	—	45	47
	120	—	10	11					
18	10	—	—	1	25	10	—	—	2
	20	—	—	1		15	—	—	2
	30	—	—	1		20	—	—	2
	40	—	—	1		25	—	—	2
	50	—	—	1		30	—	—	2
	60	—	—	1		35	—	—	2
	75	—	—	1		40	—	—	2
	80	—	3	4		45	—	3	5
	90	—	6	7		50	—	8	10
	100	—	12	13		55	—	13	15
	110	—	17	18		60	—	15	17
	120	—	26	27		70	—	23	25
	10	—	—	1		80	—	35	37
	20	—	—	1		90	—	52	54
20	10	—	—	1	26	5	—	—	2
	20	—	—	1		10	—	—	2
	30	—	—	1		15	—	—	2
	40	—	—	1		20	—	—	2
	50	—	—	1		25	—	—	2
	60	—	—	1		30	—	—	2
	70	—	6	7		35	—	—	2
	80	—	10	11		40	—	—	2
	90	—	16	17		45	—	6	8
	10	—	—	1		50	—	11	13
	20	—	—	1		55	—	14	16
	30	—	—	1		60	—	18	20
	40	—	—	1		70	—	32	34
	50	—	—	1		80	—	42	44
	10	—	—	1					

Diese Tabelle ist für Marinetaucher bestimmt und mit äußerst knapper Sicherheitsmarge kalkuliert; zum Gebrauch durch Sporttaucher eignet sie sich nur mit entsprechendem Vorbehalt.

G.E.R.S.-Austauhtabelle
der französischen Marine
Aufstiegs geschwindigkeit:
höchstens 20 m/min

Größte Tauch-tiefe (m)	Gesamt-tauch-zeit (min)	Austauch-zeiten (min)		Gesamtzeit für den Aufstieg (min)	Größte Tauch-tiefe (m)	Gesamt-tauch-zeit (min)	Austauch-zeiten (min)		Gesamtzeit für den Aufstieg (min)
		6 m	3 m				6 m	3 m	
28	5	—	—	2	34	5	—	—	2
	10	—	—	2		10	—	—	2
	15	—	—	2		15	—	—	2
	20	—	—	2		20	—	—	2
	25	—	—	2		25	—	—	2
	30	—	—	2		30	—	4	6
	35	—	—	2		35	—	12	14
	40	—	6	8		40	—	19	21
	45	—	11	13		45	—	26	28
	50	—	16	18		50	—	34	36
	55	—	20	22		55	2	42	46
	60	—	28	30		60	7	50	59
	70	—	43	45					
	80	4	55	61					
30	5	—	—	2	35	5	—	—	2
	10	—	—	2		10	—	—	2
	15	—	—	2		15	—	—	2
	20	—	—	2		20	—	—	2
	25	—	—	2		25	—	6	8
	30	—	—	2		30	—	14	16
	35	—	3	5		35	—	22	24
	40	—	10	12		40	—	28	30
	45	—	16	18		45	—	39	41
	50	—	21	23		50	6	45	53
32	55	—	27	29		55	6	53	64
	60	—	37	39					
	65	—	42	44					
	70	5	47	54					
	5	—	—	2	36	5	—	—	2
	10	—	—	2		10	—	—	2
	15	—	—	2		15	—	—	2
	20	—	—	2		20	—	—	2
38	25	—	—	2		25	—	8	10
	30	—	—	2		30	—	16	18
	35	—	—	2		35	—	23	25
	40	—	—	2		40	—	30	32
	45	—	—	2		45	4	38	44
	50	—	—	2		50	7	46	55
	55	—	—	2		55	11	55	68
	60	—	—	2					
	5	—	—	2					
	10	—	—	2					
Diese Tabelle ist für Marinetaucher bestimmt und mit äußerst knapper Sicherheitsmarge kalkuliert, zum Gebrauch durch Sporttaucher eignet sie sich nur mit entsprechendem Vorbehalt.	15	—	—	2					
	20	—	—	2					
	25	—	—	2					
	30	—	—	2					
	35	—	—	2					
	40	—	—	2					
	45	—	—	2					

Tauch-tiefe (in m) - Null-zeit (in min)	Grund-zeit (in min)	Dekompressionspausen (in min) in ... m Tiefe	Wiederholungs- gruppe	Aufwandsbedarf (in bar · m ³)
		18m 15m 12m 9m 6m 3m		
653'	20		B	0,8
	40		C	1,6
	60		D	2,4
	80		D	3,1
	100		E	3,9
	120		E	4,7
192'	15		B	0,7
	30		C	1,4
	45		D	2,1
	60		E	2,7
	75		F	3,4
	90		F	4,1
99'	105		F	4,8
	15		C	0,8
	30		D	1,6
	45		E	2,4
	60		F	3,1
	75		G	3,9
65'	90		G	4,7
	10		B	0,7
	20		C	1,2
	30		D	1,8
	40		E	2,4
	50		F	2,9
40'	60		F	3,5
	70	2	G	4,1
	80	6	G	4,8
	10		B	0,7
	20		D	1,4
	30		E	2,0
27'	40		F	2,6
	50	2	F	3,3
	55	4	G	3,7
	60	8	G	4,1
	65	10	G	4,5
	70	14	G	4,9
21'	10		C	0,8
	20		D	1,5
	30	1	E	2,2
	40	3	F	3,0
	45	6	F	3,4
	50	10	G	3,9
21'	55	13	G	4,3
	60	18	G	4,8
	10		C	0,9
	20		D	1,7
	25	1	E	2,1
	30	3	F	2,5
48 m	35	5	F	2,9
	40	8	F	3,4
	45	1 12	F	3,9
	50	2 16	G	4,4
	55	4 20	G	4,9

Tauch-tiefe (in m) - Null-zeit (in min)	Grund-zeit (in min)	Dekompressionspausen (in min) in ... m Tiefe	Wiederholungs- gruppe	Aufwandsbedarf (in bar · m ³)
		18m 15m 12m 9m 6m 3m		
30 m	5		B	0,6
	10		C	1,0
	15		D	1,4
	20		I	1,8
	25		3	2,3
	30	1 5	F	2,8
33 m	35	2 8	F	3,3
	40	3 13	G	3,9
	45	5 17	G	4,4
	5		B	0,6
	10		C	1,1
	15		D	1,5
36 m	20	3	E	2,0
	25	1 5	F	2,6
	30	3 7	F	3,1
	35	4 13	G	3,7
	40	1 5 18	G	4,4
	5		B	0,7
39 m	10	1	C	1,2
	15	2	D	1,7
	20	1 4	E	2,2
	25	3 6	F	2,8
	30	1 4 11	G	3,5
	35	2 6 16	G	4,2
42 m	40	3 8 23	G	5,0
	5		C	0,8
	10	1	D	1,3
	15	4	E	1,9
	20	3 4	F	2,5
	25	1 4 8	G	3,1
45 m	30	3 5 14	G	3,9
	35	1 3 8 21	G	4,7
	5		C	0,8
	10	1	D	1,4
	15	1 4	E	2,0
	20	1 3 6	F	2,7
48 m	25	3 4 12	G	3,5
	30	1 4 6 18	G	4,3
	3		B	0,7
	6	1	D	1,0
	9	1	E	1,4
	12	4	E	1,8
4'	15	3 4	E	2,2
	18	1 4 5	F	2,6
	21	3 4 9	G	3,2
	24	1 3 5 14	G	3,7
	27	2 3 6 18	G	4,2
	3		C	0,7
4'	6	1	D	1,1
	9	2	E	1,5
	12	1 4	E	1,7
	15	4 5	F	2,4
	18	2 4 7	F	2,9
	21	1 3 5 12	F	3,5
4'	24	2 4 5 17	G	4,0