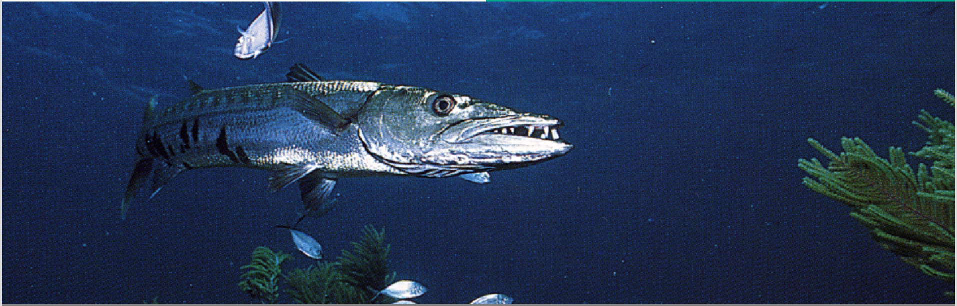
Karlsruhe Institute of Technology

Implementierung eines Tauchcomputers für mobile Java-Geräte

IPD Snelting
Prof. Dr.-Ing. G. Snelting

Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Universität Karlsruhe (TH)
Forschungsuniversität • gegründet 1825



San Salvador, Bahamas

Tauchcomputer

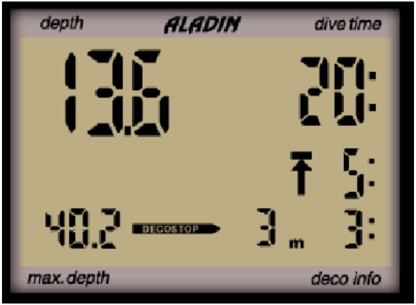
Hardware:

- druckfestes Gehäuse
- Quarzuhr
- Piezo-Druckmesser
- Prozessor
- LCD-Display, Bediensensoren
- evtl. Temperatursensor, Luftverbrauchsmessung

Tauchcomputer

Funktionen:

- Tiefe, Tauchzeit, Maximaltiefe
- Nullzeitberechnung
- Auftauchgeschwindigkeit
- Dekostufenberechnung, Aufstiegszeitberechnung
- Oberflächenintervalle, Entsättigungszeit, No-Flight-Time
- Logbuch, PC-Interface, ...



Basics

- Atmosphärendruck: $p = 1 \text{ bar} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
- Atmosphärenzusammensetzung:
  21% O_2, 78% N_2, 1% Rest
- Wasserdruck: $+1 \frac{\text{bar}}{10 \text{ m}}$
  auf 30m: $p = 4 \text{ bar}$
- Partialdruck N_2: $p_{N2} = 0.78 \cdot p$
- Gewebedruck N_2 (Inertgasdruck): p_I
  Normalerweise ist $p_I = p_{N2}$

p_I steigt beim Tauchen durch Diffusion ins Gewebe unter Wasserdruck an
Dies geschieht mit Verzögerung gegenüber p (exponentielle Sättigung)

Bends

Karlsruhe Institute of Technology

- Tauchprofil: Tiefe/Druck als Funktion der Zeit $p(t)$
- taucht man zu schnell auf, sinkt p schnell, während p_I noch groß ist
- Taucherkrankheit („Bends"): N_2 perlt im Gewebe aus, wenn $p - p_I$ zu groß (vgl. Öffnen einer Sprudelflasche)
- Nullzeit: Maximalzeit in einer bestimmten Tiefe, ohne dass $p - p_I$ bei Sofortaufstieg zu groß wird

Tiefe	Nullzeit ca.
20 m	40 min
30 m	20 min
40 m	10 min

- Dekostop: Pause unter Wasser zum Abatmen von N_2 nach Nullzeitüberschreitung

Tauchcomputer: Berechnung von Nullzeit / Dekostops anhand des Tauchprofils

Dekompressionstheorie

Karlsruhe Institute of Technology

- zulässige Druckdifferenz zwischen Außendruck und Gewebe-Inertgasdruck (Bühlmann 1960):

  $$p_I \leq p/b + a$$

  bzw

  $$p \geq (p_I - a) \cdot b$$

  a, b hängen von Gewebeart ab
- Beispiel:
  Haut $\Longrightarrow$ $a = 0.53, b = 0.87$
  Gelenke $\Longrightarrow$ $a = 0.27, b = 0.95$

Dekompressionstheorie

- Annahme: 30m Tiefe, $p_{N2} = p_I$ (volle Sättigung)
  $\Longrightarrow\ p_I = 0.78 \cdot 4$ bar $= 3.12$ bar
  $\Longrightarrow\ p \geq (3.12 - 0.53) \cdot 0.87 = 2.25$ bar
  und $p \geq (3.12 - 0.27) \cdot 0.95 = 2.71$ bar
- 2.25 bar $\triangleq$ 12.5 m Tiefe; 2.71 bar $\triangleq$ 17.1 m
- taucht man nach langem Aufenthalt auf 30m schnell auf 17.1m, gibt es Gasblasen im Gelenk; oberhalb 12.5m zusätzlich Hautsymptome

Druckausgleich im Gewebe

Druckänderung ∂p_I ist proportional zur Differenz von Gewebedruck und Außendruck (Haldane 1908):

$$\frac{\partial p_I}{\partial t} = c \cdot (p_{N2} - p_I)$$

Druckausgleich im Gewebe I

wichtige Fälle:

1. stationäre Tiefe:

$$p = p(t) = const \implies p_{N2} = const$$

die homogene DGL hat allgemeine Lösung

$$p_I(t) = p_{N2} + \left(p_{N2} - p_I(t_0)\right) \cdot e^{-ct}$$

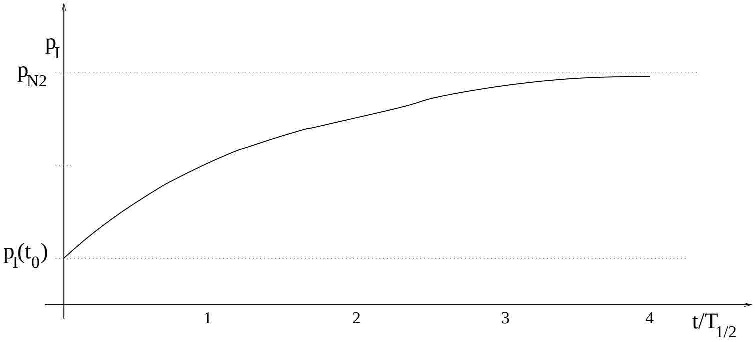
oder als Halbwertszeitprozess

$$p_I(t) = p_I(t_0) + \left(p_{N2} - p_I(t_0)\right)\left(1 - 2^{-t/T_{1/2}}\right)$$

Es ist $c = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$, $p_I(T_{1/2}) = 0.5 \cdot (p_{N2} - p_I(t_0))$

Druckausgleich im Gewebe II

Sättigungskurve:



Falls $p_I(t_0) > p_{N2}$ erfolgt *Entsättigung*

Druckausgleich im Gewebe III

2. Auf/Abstieg mit konstanter Geschwindigkeit

$$p_{N2}(t) = rt + p_0$$

(p_0 ist der initiale N2-Außen-Partialdruck)

$$\frac{\partial p_I}{\partial t} = c \cdot (p_0 + rt - p_I)$$

inhomogene DGL hat Lösung

$$p_I(t) = p_0 + r(t - 1/c) + \left(p_0 - p_I(t_0) - r/c\right) \cdot e^{-ct}$$

(für $r = 0$ geht sie in die homogene Lösung über)

Nullzeitbestimmung

- Szenario: Abtauchen in Tiefe mit Druck p (Partial-Außendruck p_{N2}) und Anfangs-Gewebepartialdruck $p_I(t_0) < p_{N2}$
- $p_I(t \geq t_0)$ steigt monoton, konvergiert gegen p_{N2}
- taucht man zur Zeit t plötzlich auf, ist $p = 1$ bar und $p_I(t)$ könnte im Vergleich zu p zu groß werden
- Nullzeit = Zeit, bis $p_I(t)$ die zulässige Druckdifferenz zum Oberflächen-Partialdruck überschreitet
- mit Nullzeit t_N, kritischer Partialdruck p_K ist $p_I(t_N) \geq p_K = 1\,\text{bar}/b + a$ Einsetzen in Halbwertszeitgleichung ergibt

$$\frac{p_K - p_{N2}}{p_{N2} - p_I(t_0)} = -2^{-t/T_{1/2}}$$

oder $$t_N = -T_{1/2} \cdot \log_2 \frac{p_{N2} - p_K}{p_{N2} - p_I(t_0)}$$

Nullzeitbestimmung

Beispiel: 30 m Tiefe, $p_{N2} = 3.12$ bar

- $T_{1/2} = 54.3$ min (Haut)
  $\Longrightarrow \; a = 0.53, b = 0.87, p_K = 1/b + a = 1.68$ bar
- Es sei $p_I(t_0) = 0.78$ (Oberflächendruck). Ab $p_I(t) \geq 1.68$ kritisch
- dies ist nach

$$t_N = -54.3 \cdot \log_2 \frac{3.12 - 1.68}{3.12 - 0.78} = -54.3 \cdot \log_2 0.62 = 38.03 \text{ min}$$

  der Fall
- Achtung: Argument des $\log$ kann ≤ 0 werden, wenn $p_{N2} < p_K$ (sehr geringe Tiefe); dann ist $t_N = \infty$. Nur wenn gleichzeitig $p_{N2} < p_I(t_0)$ (hohe Restbelastung aus vorangegangenem Tauchgang), erhält man wieder „normale“ Nullzeiten

New Providence, Bahamas

Kompartimente

- Tauchcomputer berechnen $p_I(t)$ in Abhängigkeit von $p(t)$ für 8-16 verschiedene Gewebe
  $\Longrightarrow$ 8-16 verschiedene $T^i_{1/2}$ nebst a^i, b^i
- die verschiedenen a^i, b^i-Werte wurden von Bühlmann in umfangreichen Experimenten bestimmt
- Es werden grundsätzlich alle $p^i_I(t)$ berechnet und alle Nullzeiten t^i_N bestimmt
- angezeigt wird das *Minimum* dieser Nullzeiten

Kompartimente

Karlsruhe Institute of Technology

Theoretisch ist $a = \frac{2.0}{\sqrt[3]{T_{1/2}}}, b = 1.0005 - \frac{1}{\sqrt{T_{1/2}}}$

Einige Kompartimente der ZH-L16 Tabelle:

Gewebe	$T_{1/2}$	b	a
Nieren	4.0 min	0.5050	1.2599
Bauch, Darm, Leber, Nerven	12.5 min	0.7222	0.8618
Haut	54.3 min	0.8693	0.5282
Muskeln	140.0 min	0.9222	0.3798
Knochen, Gelenke, Fett	390.0 min	0.9544	0.2737

Achtung: die Kompartimente entsprechen hypothetischen Geweben, von denen angenommen wird, dass es interferenzfreie Halbwertszeitprozesse sind. Dies ist nur näherungsweise der Fall!

Dekostops, Fliegen

Karlsruhe Institute of Technology

- Falls $t_N \leq 0$, müssen Dekostops eingelegt werden
- Berechnung der *Ceiling*, also der Tiefe bzw des Drucks, in der gerade noch $p \geq (p_I(t) - a) \cdot b$
- Dekostops werden unterhalb der Ceiling eingelegt, und zwar so lange, bis die Nullzeit wieder positiv ist
  dabei müssen Aufstiegszeiten berücksichtigt werden
  $\Longrightarrow$ verwende Lösung der nichthomogenen DGL

Dekostops, Fliegen

- Fliegen nach dem Tauchen: in der Kabine herrscht Druck wie in 3000m $= 0.8$ bar
  $\implies$ berechne Zeit, bis $p_I(t) \leq 0.8/b + a$
  löse dazu Halbwertszeitgleichung nach t auf (analog Nullzeitberechnung)
- vollständige Entsättigung: nach $6 \cdot T_{1/2}$ ist
  $|p_{N2} - p_I(t)| < 0.02 \cdot |p_{N2} - p_I(t_0)|$
  t_0 ist in diesem Fall *Auftauch*zeitpunkt

Softwaretechnische Aspekte

- Berechnung von $p_I(t)$ gemäß nichthomogener DGL, sodann t_N. Dies alle paar Sekunden für alle Kompartimente
- Berechnung von $p_I(t), t_N$ ist anfällig für Auslöschung
  $\Longrightarrow$ doppelte Genauigkeit
  Alternative: direkte numerische Lösung der DGL mit Runge-Kutta, iterative Berechnung von t_N (?)
- Tauchcomputer sind sicherheitskritische eingebettete Systeme!
  $\Longrightarrow$ formale Spezifikation, strikte Trennung Sicherheitskern / GUI, Verifikation zentraler Berechnungen, intensive Qualitätssicherung, stochastische Zuverlässigkeitsvorhersage

Ausblick: PSE

Tauchcomputersimulation in zwei Fenstern:

1. Tauchprofil („Ozean“, Tauchersteuerung per Maus, Fische, explodierende Taucher, ...)
2. Tauchcomputer (GUI wie echt) als mobile Applikation („Handy“)
3. Kommunikation über Bluetooth

Abacos, Bahamas