

Das Bühlmann-Rechenmodell für Tauchcomputer

Zusammenfassung des Vortrags am Bühlmann Memorial Symposium

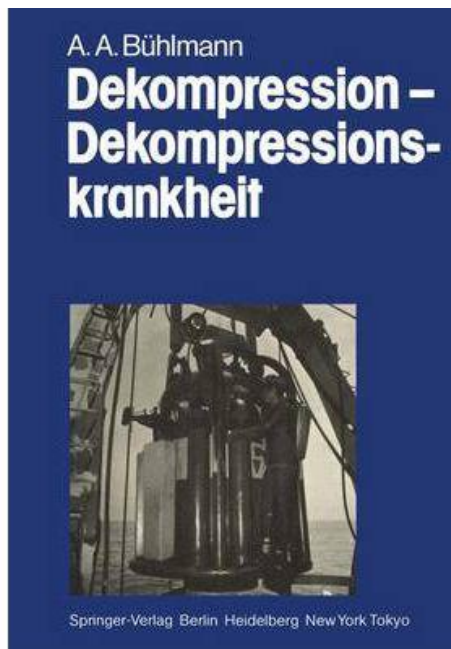
Ernst B. Völlm, Dipl.-Ing. ETH

In dieser Zusammenfassung schildere ich die Entwicklungsgeschichte des Bühlmann-Rechenmodells für Tauchcomputer im Zeitraum 1984 bis heute aus meiner persönlichen Sicht. Seit 1976 bin ich Taucher und seit 1980 Tauchlehrer. Von 1984 bis 2011 war ich in der Schweiz als Tauchcomputer-Entwickler tätig und habe in dieser Zeit eng mit Prof. Bühlmann zusammengearbeitet. 1987 gründete ich mit meinem Geschäftspartner das Unternehmen Dynatron AG, um mich voll der Tauchcomputer-Entwicklung widmen zu können.

1. Wie alles begann

Die Forschungstätigkeit von Prof. Dr. med. Albert Bühlmann führte u.a. zu den bekannten Bühlmann-Dekompressionstabellen. Ab den frühen 80er Jahren erschienen dann die ersten noch grossen und unhandlichen Tauchcomputer, welche die Dekompressionsangaben von den Bühlmann Tabellen abgeleiteten und im Gerät abgelegten Werten bestimmten.

1983 hat Prof. Bühlmann mit dem Buch «Dekompression – Dekompressionskrankheit» die Resultate seiner Forschung erstmals einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Sein Ziel war es, Fachleuten aus der Wissenschaft, Technik und der Versicherungsbranche Verständnis für die Vorgänge beim Tauchen zu vermitteln. Dazu gehörten auch die Methoden zur Berechnung der risikoarmen Dekompression. Die im Buch von Bühlmann beschriebenen Methoden eröffneten dann auch einem grösseren Kreis die Möglichkeit, die Dekompression mit Hilfe von Algorithmen zu berechnen. (Bild 1):



In diese Zeit fiel mein erster Kontakt mit Prof. Bühlmann. Die Motivation für die Kontaktaufnahme war der Wunsch, mit der Firma Uwatec zusammen einen kleinen, einfachen und preiswerten Tauchcomputer zu entwickeln. Für diesen Tauchcomputer war das Bühlmann-Rechenmodell vorgesehen. Um die Unterstützung von Prof. Bühlmann zu erhalten, musste zuerst Vertrauen aufgebaut und Überzeugungsarbeit geleistet werden. Anschliessend kam es zu einer äusserst fruchtbaren, langfristigen Zusammenarbeit, welche bis zu seinem Tod anhalten sollte.

2. Vom ZH-L16 Modell zum ersten kleinen Tauchcomputer

Der zukünftige Tauchcomputer sollte eine lange Betriebszeit ohne Batteriewechsel oder Nachladen haben. Eine dafür geeignete Hardware wurde evaluiert und die Rechenleistung analysiert. Bald stand fest, dass Vereinfachungen des Modells ZH-L16 notwendig waren. Wir mussten Rechenzeit einsparen und dies bedingte eine Reduktion der Anzahl Gewebe (Kompartimente). Damit dies nicht zu einer Einbusse der Sicherheit führte, mussten die Parameter des Modells angepasst und viele Tauchgangprofile damit durchgerechnet werden. Das Resultat war das ZH-L6 Rechenmodell mit 6 Geweben (Kompartimenten).

Der Nullzeit-Computer «ALADIN» mit dem Rechenmodell ZH-L6 kam 1987 auf den Markt und wurde ein durchschlagender Erfolg. Gründe dafür waren die Einfachheit, die Grösse, die Zuverlässigkeit und Batterielaufzeit, der Preis und die gute, weltweite Vermarktung. Möglicherweise hat auch das „Swiss Made“ dazu beigetragen. (Bild 2):



Einer der Gründe für die Bekanntheit der Bühlmann Tabellen und des Algorithmus war, dass damit auch eine sichere Dekompression in Bergseen möglich war. 1987 führte die British Army eine Tauchexpedition im Titicacasee durch. Für die Höhenlage von 3'812 müM. wurden spezielle Tabellen und spezielle Einstellungen für den ALADIN entwickelt. Die bolivianische Marine übernahm nach der erfolgreichen Expedition die Bühlmann-Tabellen für das Tauchen in der Höhe. (Bild 3):



1988 folgte dann der «ALADIN PRO», ein vollwertiger Dekompressionscomputer. Obwohl immer noch einfach in der Anwendung, erlaubte die Anzeige der Dekompressionsstufen und -zeiten nun alle Tauchgänge mit Pressluft. (Bild 4):



3. Der Tauch-Boom und neue Erkenntnisse über Risiken beim Tauchen

Ende der 80er Jahre setzte beim Tauchen ein Aufschwung ein, der bis anfangs der Jahrtausendwende anhielt. Das Erscheinen der ersten erschwinglichen und kleinen Tauchcomputer fiel zusammen mit dem Beginn dieses Aufschwungs und hat sicher zu diesen Boom-Jahren beigetragen. Das hatte auch Auswirkungen auf Studien und Forschung im Tauchbereich.

Die Tauchzwischenfall-Statistiken von Divers Alert Network (DAN) und British Sub-Aqua Club (BSAC) lieferten ab ca. 1988 immer bessere Hinweise auf Risikosituationen für Dekompressionszwischenfälle. In den 90er Jahren wurden Forschungsberichte über Mikrogasblasen und offenes Foramen ovale (PFO) veröffentlicht. Es wurde festgestellt, dass bei einem bedeutenden Anteil der

Tauchgänge trotz symptomlosem Tauchgangprofil Mikroblasen im Kreislauf vorhanden sind und diese Anzahl bei Wiederholungstauchgängen noch deutlich ansteigt (z.B. DAN Europe, Project SAFE DIVE).

Die Unfallstatistiken und die neuen Forschungsergebnisse motivierten uns, die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Tauchcomputer mit Modifikationen am Rechenmodell und zusätzlichen Merkmalen beim Tauchcomputer weiter zu verbessern.

4. Der grosse Schritt zum adaptiven Rechenmodell

Aufgrund der immer leistungsfähigeren Elektronik brauchte es nun keine Vereinfachungen am Rechenmodell mehr. Im Gegenteil - es konnten aufwendige Erweiterungen und Verbesserungen realisiert werden.

Das Rechenmodell sollte nun die neuen Erkenntnisse berücksichtigen. Es folgte eine äusserst interessante, intensive Phase von Diskussionen mit Prof. Bühlmann. Teilweise mussten frühere Annahmen für die Berechnung der Dekompression relativiert oder revidiert werden, was ihm begreiflicherweise manchmal etwas schwerfiel. Meist war er aber nach gründlichen Überlegungen bald von den Vorteilen durch die Modifikationen überzeugt.

Dies umfangreichen und wirkungsvollen Weiterentwicklungen des Bühlmann-Rechenmodells führten zum adaptive Rechenmodell ZH-L8 ADT. Es wurde erstmalig mit dem «ALADIN Air X» eingeführt und wird bis heute kaum verändert in vielen anderen Tauchcomputern verwendet. Der ALADIN Air X verfügte über einen Flaschendrucksender mit drahtloser Verbindung zum Tauchcomputer. (Bild 5):

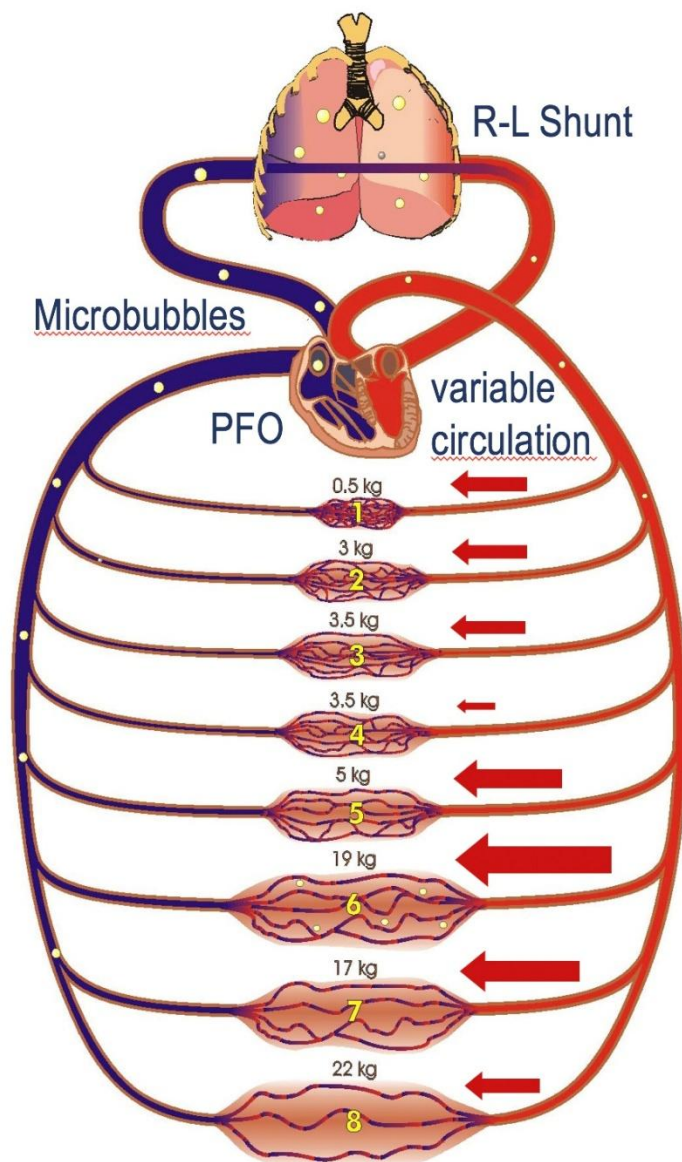


Der ALADIN Air X wurde 1994 an der BOOT in Düsseldorf präsentiert. Prof. Bühlmann hielt damals kurz vor seinem Tod einen Vortrag zum Thema «Tauchmedizinische Grundlagen des neuen Rechenmodells ZH-L8 ADT».

5. Die wichtigsten Neuerungen im Bühlmann-Rechenmodell ZH-L8 ADT (Bild 6)

5.1 Variable Halbwertszeiten und Übersättigungstoleranzen

Eine erste, wichtige Verbesserung dieses Rechenmodells gegenüber den Modellen ZH-L16 und ZH-L6, betrifft die Variabilität der Durchblutung in Organen wie Muskulatur oder Haut durch Anstrengung und Abkühlung. Kompartimente mit variablen Halbwertszeiten und Übersättigungstoleranzen erlauben genauere Dekompensationsberechnungen, welche die Sicherheit bei Risikosituationen verbessern. Wenn im Tauchcomputer der Druck in der Tauchflasche verfügbar ist, kann die Anstrengung des Tauchers über den Luftverbrauch bestimmt und die Muskel-Kompartimente damit in Echtzeit verändert (adaptiert) werden. Die Haut-Kompartimente können auf gleiche Weise mittels einer Wassertemperaturmessung und einem Abkühlungsmodell für die Haut beeinflusst werden.



5.2 Mikrogasblasen-Modell und Risikosituationen

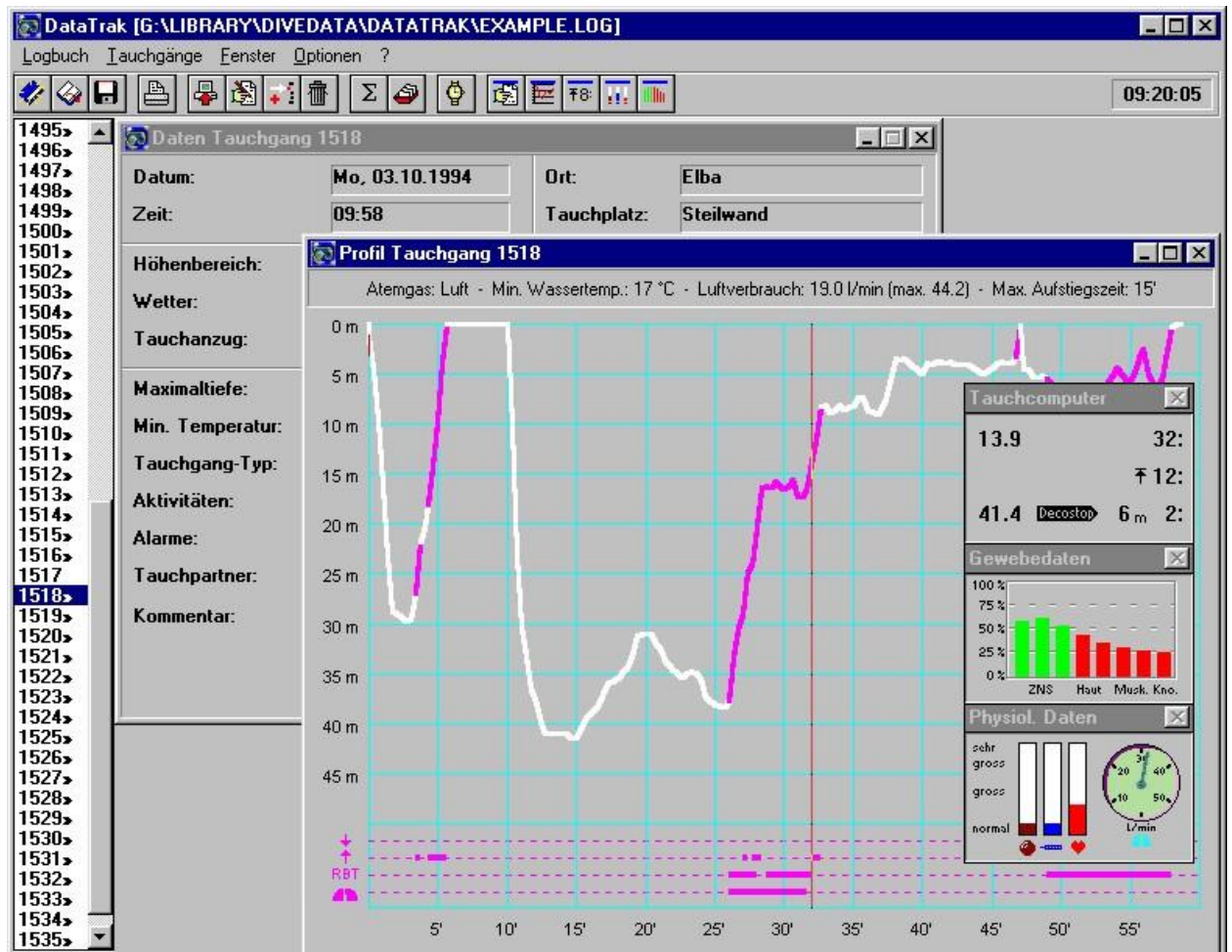
Eine zweite wichtige Verbesserung ist die Integration eines Mikrogasblasenmodells im adaptiven Rechenmodell. Da die Existenz von symptomlosen Mikrogasblasen belegt wurde, mussten folgerichtig auch Überlegungen über deren Prävention folgen.

Das Mikrogasblasenmodell orientiert sich eng an den physiologischen Vorgängen im Körper des Tauchers. Mikrogasblasen haben Einfluss auf den Gasaustausch, die Durchblutung und Übersättigungstoleranzen im Gewebe. Wenn dies nicht berücksichtigt wird, kann es beim Vorhandensein von Risikosituationen zu einer Dekompressionskrankheit kommen.

Symptomlose Gasblasen kommen bei vielen Tauchgängen im venösen Blut vor. Diese führen zu einem Rechts-Links-Shunt in der Lunge und in der Folge zu einem verlangsamten Gasaustausch, auch während der ersten 3-4 Stunden nach dem Tauchgang. In Extremfällen können Blasen sogar vom venösen ins arterielle Blut eingeschwemmt werden.

Gasblasen entstehen auch im arteriellen Kreislauf, z.B. bei sehr schnellen Aufstiegen des Tauchers. Eine arterielle Gasembolie ist die Folge (AGE). Diese Gasblasen können auch in gut durchblutete Gewebe eingeschwemmt werden, was sie sehr gefährlich macht. Bei einer zu kurzen Dekompression können direkt in den Geweben Blasen entstehen (klassische Dekompressionskrankheit).

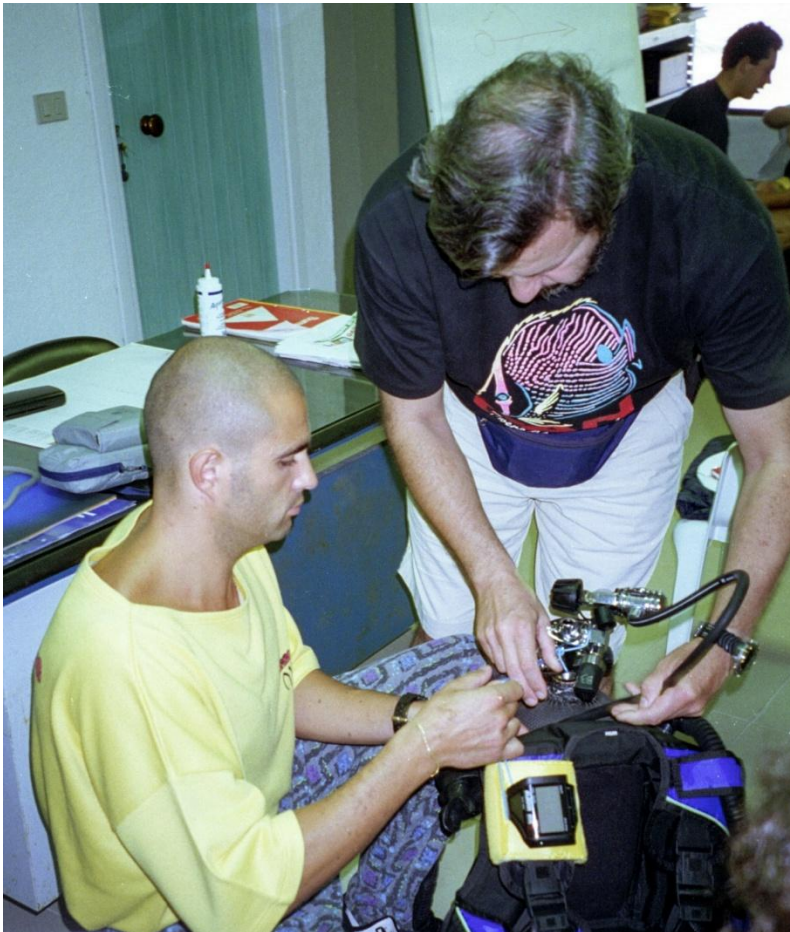
Mit dem adaptiven Rechenmodell können wir alle diese Einflüsse berücksichtigen. Es reagiert auf Risikosituationen durch eine passend modifizierte Dekompression. Dadurch können mögliche Folgen präventiv verhindert oder abgeschwächt werden. Das Mikrogasblasen-Modell ermöglichte uns zudem, das Entstehen von venösen Gasblasen durch Sicherheitseinstellungen zu vermindern. Diese «Low-Bubble Stopps» (später als Deep Stopps bezeichnet) wurden später in Zusammenarbeit mit DAN noch optimiert.



6. Die Post-Bühlmann Ära

Am 16. März 1994 erwartete ich Prof. Bühlmann zu einem Gespräch über das weitere Vorgehen bezüglich des Zürcher Rechenmodells. Er kam nicht. An diesem Tag verstarb Prof. Bühlmann. Die Zusammenarbeit mit einem grossartigen Wissenschaftler wurde damit abrupt beendet. Wir vermisten seine regelmässigen Besuche mit den interessanten Diskussionen sehr.

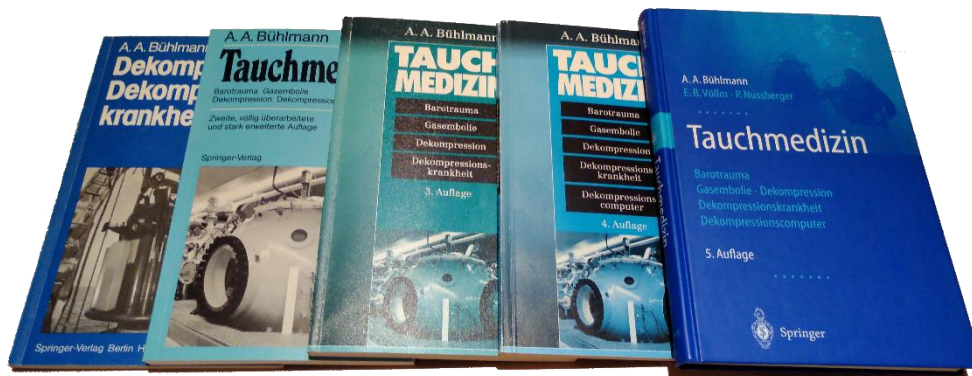
Wir arbeiteten weiter an Verbesserungen des adaptiven Dekompressionsmodells. Eine Spezialversion des ALADIN Air X wurde für das Projekt SAFE DIVE von DAN Europe bereitgestellt. Die Version «Divers Black Box» wurde dann als Datenschreiber für die Tauchgänge verwendet. (Bild 8, Bild 9):





Zusammen mit DAN Europe wurde um die Jahrtausendwende eine weitere Studie mit dem Ziel der Gasblasenreduktion mittels «Deep Stops» durchgeführt (DSL Special Project 01/2000). Auf den Erkenntnissen im SAFE DIVE Projekt aufbauend, wurden mit den DAN bekannten Probanden in der Druckkammer verschiedene von uns vorgeschlagene Tauchprofile getestet und die Mikrogasblasen mittels Doppler Sonografie gemessen. In den Testtauchgängen wurde mit der besten Deep Stop Version eine sehr starke Reduktion der Mikrogasblasen erreicht. Die Deep Stops im ZH-L8 ADT wurden in der Folge mit den gewonnenen Erkenntnissen ergänzt.

Die vielen Verbesserungen des Bühlmann-Modells für Tauchcomputer wurden dann in den 4. und 5. Auflagen von «Tauchmedizin» von mir beschrieben. Die 4. Auflage des Buches «Tauchmedizin» enthält erstmals die Beschreibung des Modells ZH-L8 ADT. Es war Prof. Bühlmann ein grosses Anliegen, die bedeutenden Änderungen seines Rechenmodells zu dokumentieren. Leider verstarb er vor dem Erscheinungstermin. Die 5. und letzte Auflage haben Dr. Nussberger und ich wo nötig aktualisiert und ergänzt. Professor Bühlmann's Lebenswerk lebt darin weiter. (Bild 10):



Heute scheint sich das Bühlmann-Modell bei einer Mehrzahl von bekannten Tauchcomputer-Herstellern etabliert zu haben. Einige Hersteller die früher andere Rechenmodelle verwendet haben, setzen sogar nun auf das Bühlmann-Modell (teilweise mit proprietären, nicht näher beschriebenen Anpassungen).

7. Schlusswort

Professor Bühlmann hat viel zur Entwicklung des sicheren Tauchens beigetragen. Neben seiner wissenschaftlichen Tätigkeit für das professionelle Tauchen, hat er nie den praktischen Nutzen für die immer zahlreicheren Hobbytaucher aus den Augen verloren. Er war bereit, seine eigenen Ideen zu hinterfragen und war nach reiflichem Nachdenken offen für Verbesserungen. Die Zusammenarbeit mit ihm war die interessanteste und spannendste Zeit meiner bisherigen beruflichen Tätigkeit.