

Atemwiderstandsmessungen an trachealstenotischen Patienten

Ein Vergleich der Wechseldruckmethode mit der Körperplethysmographie

M. Pilgramm, K. Schumann und A. Kovács

Abteilung V für HNO-Kranke (Leitender Arzt: Oberstarzt Professor Dr. K. Schumann) des Bundeswehrkrankenhauses Ulm
(Chefarzt: Oberstarzt Dr. K. Kalbitzer)

Comparative measurements of pressure change and total-body plethysmographic resistance in patients with tracheal stenosis

Summary. In this study, the airway resistance of 67 patients who suffered tracheal stenosis was measured by body plethysmography and by the pressure change method.

These comparative measurements were carried out in order to assess the value of the pressure change method. There was significant linear correlation between the results for the two methods.

The pressure change method is uncomplicated and mobile, and promises to have many practical applications.

Zusammenfassung. In der vorliegenden Arbeit wurde bei 67 Patienten, die an einer Trachealstenose litten, der Atemwiderstand sowohl mit der Körperplethysmographie als auch mit der Wechseldruckmethode gemessen. Die vergleichenden Messungen sollten zu einer Eignungsbeurteilung der Wechseldruckmethode beitragen. Es ergab sich bei der Berechnung der linearen Regression ein Korrelationskoeffizient von 0,83 und eine gute Annäherung an die Identitätsgrade. Aufgrund dieser Ergebnisse, ihrer einfachen Handhabung und Mobilität eröffnen sich der Wechseldruckmethode vielfältige Verwendungsmöglichkeiten.

Zu objektiver Beurteilung obstruktiver Atemwegserkrankungen hat die sehr aufwendige Körperplethysmographie die größte Verbreitung gefunden. Diese Methode hat viele Vorteile. Man ermittelt mit ihr den Atemwegswiderstand, zusätzlich kann bei Kenntnis des Körpergewichtes das intrathoracale Gasvolumen bestimmt werden [3, 4]. Die Messungen lassen sich schnell durchführen. Darüber hinaus läßt sich aus der Form der anfallenden Kurven über die Lokalisation und den Zustand der Engen eine zusätzliche Information gewinnen.

Nachteilig sind vor allem die hohen Anschaffungskosten. Die Tatsache, daß die Apparatur groß und deshalb ortsgelunden ist und von geschultem Fachpersonal bedient werden muß, schränkt ihre Verbreitungsmöglichkeit auf die Klinik ein. Messungen an bettlägerigen Patienten sind nur schwer möglich.

Aufgrund dieser Tatsache gibt es zur Atemwiderstandsmessung seit längerer Zeit weitaus einfachere Verfahren, wie z.B. die Oszilloresistometrie [5] oder die Wechseldruckmethode [2].

Für beide Methoden sind handliche Geräte im klinischen Gebrauch. Vergleichsuntersuchungen der Oszilloresistometrie mit der Körperplethysmographie führten sowohl bei gesunden als auch bei pathologischen Ausgangswerten zu unterschiedlichen Korrelationskoeffizienten [6–8]. Insgesamt gesehen läßt die Korrelation leider noch zu wünschen übrig. Zudem muß die im Verständnis der Methode zu berücksichtigende umständliche Wechselstromtheorie sowie die Komplexität der Beurteilung der erhaltenen Werte mit „Realteil“ und „Imaginärteil“ des Widerstandes kritisch betrachtet werden.

Was die Wechseldruckmethode angeht, so sind systematische Vergleichsmessungen mit der Body-Plethysmographie bekannt [9, 13]. Neben Untersuchungen der Nase [12] wurden auch die tieferen Atemwege in einer größeren Studie mit beiden Methoden gemessen [15]. Seit kurzem liegen uns auch vergleichende Messungen mit der Verschußdruckmethode bei inhalativen Allergenprovokationstests vor [9]. In allen Fällen ist eine befriedigende Übereinstimmung zwischen der Körperplethysmographie und der Wechsel- bzw. Verschußdruckmethode zu beobachten. Eine vergleichende Messung bei eingengten Tracheallumen stand bisher noch aus.

Material und Methoden

Der Atemwiderstand von 67 Patienten mit Trachealstenosen wurden in einem Ganzkörperplethysmographen und mit der

Wechseldruckmethode gemessen. 40 Patienten waren männlich, 27 weiblich. Das Durchschnittsalter betrug 52,2 Jahre. Im Durchschnitt waren die Patienten 170 cm groß, das Durchschnittsgewicht betrug 69,9 kg.

Das Alter variierte von 18–80, die Größe von 155 cm bis 186 cm, der leichteste Patient wog 50 kg, der schwerste 105 kg.

Alle Messungen wurden von der gleichen Person in jeweils einer Sitzung durchgeführt.

Bei der Ganzkörperplethysmographie sitzt die Versuchsperson in einer Kabine, deren Druckschwankungen die während der Atmung auftretenden intrathoracalen Druckänderungen widerspiegeln. Im ersten Meßgang wird die Kabinendruckschwankung registriert, die bei einer Atemstromgeschwindigkeit von 1 Liter/pro Sekunde auftritt. In einem zweiten Meßgang ermittelt man bei externer Unterbrechung des Atemstromes den entsprechenden Alveolardruck (Δp). Aus der Kabinendruck-Alveolardruck-Beziehung (zweiter Meßgang) kann gleichzeitig auch das intrathoracale Gasvolumen (funktionelle Residualkapazität) bestimmt werden. Aus den entstandenen Diagrammen kann man den Atemwiderstand mit Hilfe eines entsprechenden Nomogrammes oder eines speziellen Rechenschiebers errechnen [11].

Die Messung des Atemwiderstandes bei der Wechseldruckmethode erfolgt bei Spontanatmung. Die Atemluft durchströmt den inneren Atemwiderstand (W_i) und den Meßwiderstand eines verzweigten Pneumotachographen, die hintereinander geschaltet sind. An beiden Strömungswiderständen tritt dadurch ein Teildruck auf, welcher der Größe des Strömungswiderstandes proportional ist. Um zu einer fortlaufenden dynamischen Messung des inneren Atemwiderstandes zu gelangen, läßt man den Meßwiderstand des Pneumotachographen um einen gewissen Betrag variieren. Dies erfolgt mit einem Verschlusmechanismus. Bei geschlossenem System ist der Widerstand (W_z) höher als bei geöffnetem System (W_o). Es gilt bei geöffnetem System:

$$\frac{P_A}{P_o} = \frac{W_i + W_o}{W_o}$$

Es gilt bei geschlossenem System:

$$\frac{P_A}{P_z} = \frac{W_i + W_z}{W_z}$$

Hieraus ist der zu messende Atemwegwiderstand (W_i) leicht abzuleiten [11]:

$$W_i = \frac{W_z \times W_o (P_z - P_o)}{P_o \times W_z - P_z \times W_o}$$

W_i : Atemwegwiderstand

P_A : Alveolardruck. Er ist die Summe der Teildrucke an W_i und am Meßwiderstand.

W_o : Meßwiderstand bei offenem System.

P_o : Teildruck an W_o .

W_z : Widerstand bei geschlossenem System.

P_z : Teildruck an W_z .

Die umständlich anmutende Auswertung und die Rechenarbeit kann durch Verwendung von Nomogrammen und Computer erleichtert werden.

Ergebnisse

Das Gesamtkollektiv wurde nach der Größe des ermittelten Atemwiderstandes geordnet und zu 20% Perzentilen zusammengefaßt. Die Ergebnisse sämtlicher 67 Messungen mit dem Ganzkörperplethysmographen an den 67 Patienten mit Trachealstenosen gibt die Tabelle 1 wieder.

Der kleinste gemessene Atemwiderstand betrug 10 mm H₂O/l/sec, der größte war 195,5 mm H₂O/l/sec.

Es zeigt sich, daß weder das Alter noch die Größe noch das Gewicht der Patienten einen Einfluß auf die Höhe der Widerstandswerte ausüben. Lediglich bei dem jeweils höchsten Mittelwert des Atemwiderstandes findet man ein relativ deutlich verringertes Gewicht, was auf den reduzierten Allgemeinzustand dieser Patientengruppe zurückzuführen ist. Aufgezeichnet in ein Koordinatensystem stellt sich der Vergleich beider Meßmethoden dar wie aus Abb. 1 zu ersehen ist. Auf einem Hewlett-Packard 97 Kalkulator wurde mit dem Programm STD-O3A eine lineare Regression mit der geraden Gleichung $g = 1,15x + 17,52$ und dem Korrelationskoeffizienten 0,83 errechnet.

Diese Korrelation kann in Hinsicht auf die Literatur anderer Vergleichsmessungen mit der Körperplethysmographie [1, 6–8] als sehr gut bei Funktionsbeurteilung lebender Systeme bezeichnet werden.

Der Konfidenzbereich für die Steigerung 1,15 liegt zwischen 0,96 und 1,34. Für den Achsenabschnitt 17,52 lauten die Werte 5,4 und 29,6.

Die Gerade weicht somit lediglich geringfügig von der Identitätsgeraden ab.

Bei der Auswertung der Kurven der Wechseldruckmethode wurde im Gegensatz zur Körperplethysmographie zwischen Inspiration und Expiration unterschieden. Dabei zeigt sich, daß 40 der Inspirationswerte näher bei den dazugehörigen Werten der Plethysmographie lagen als der Wert der Expiration. Bei 26 war es umgekehrt. Bei einer Messung waren die Ergebnisse für In- und Expiration gleich. Das bedeutet, daß weder die Daten für die Inspiration noch die für die Expiration stärker mit den Werten des Körperplethysmographen korrelieren als der Mittelwert aus In- und Expiration. Deshalb wurde der Mittelwert ermittelt und in Beziehung zu den Werten der Plethysmographie gesetzt. Ferner zeigte sich bei der Trennung der In- und Expirationswerte bei der Wechseldruckmethode, daß Engen im Bereich der oberen Luftwege einschließlich der Trachea an den erhöhten Widerstandswerten im Inspirium kenntlich sind, während Bronchialstrukturen an den erhöhten Resistenzen im Expirium zu erkennen sind. Tatsächlich war bei den meisten Patienten der Einatemungswert gegenüber dem Ausatemungswert erhöht, was bei ihrer Erkrankung zu erwarten war. Drei Patienten hatten stark erhöhte Ausatemungswerte bedingt durch zusätzliches Asthma bronchiale oder ein obstruktives Lungenemphysem.

Den Mechanismus hat man sich im ersten Falle so vorzustellen, daß der Unterdruck bei der Einatmung zu einem Kollabieren der schlaffen Luftröhrenwandung bzw. bei starren Stenosen zu einer dynamischen Strömungsbehinderung und somit zu einer Widerstandserhöhung führt, wohingegen bei tiefen Stenosierungen des Trachealbronchialbau-

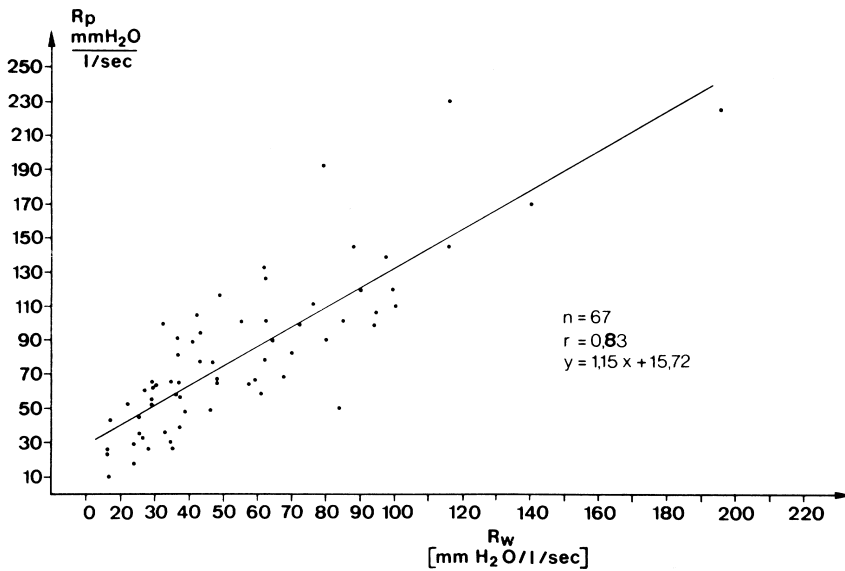


Abb. 1. Vergleich der Meßergebnisse der Körperplethysmographie (R_p) und der Wechseldruckmethode (R_w) anhand der Regressionsgerade. (Korrelationskoeffizient r : 0,83). Benennung: mm H_2O /l/sec

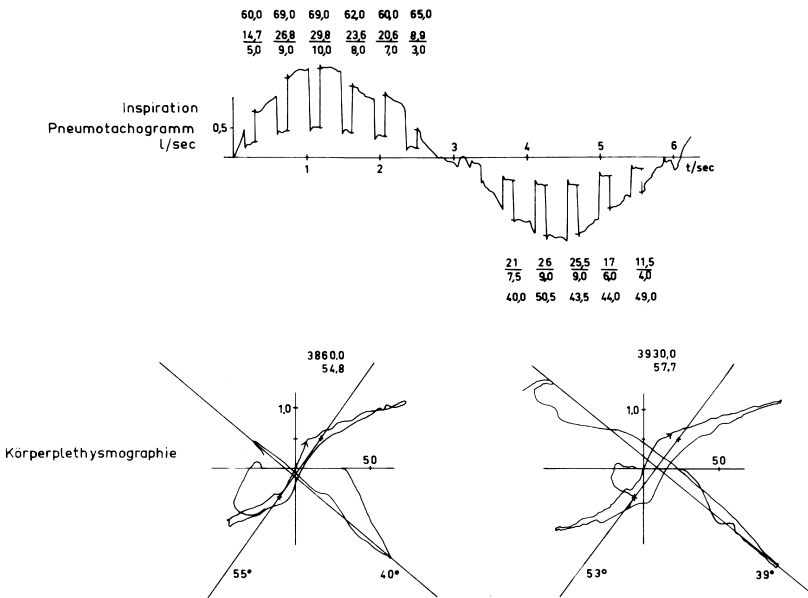


Abb. 2. Starre Trachealstenose. Oben: Widerstandsmessung mit der Wechseldruckmethode (erhöhte Einatmungswerte, Mittelwert 55,6 mm H_2O /l/sec). Unten: Widerstandsmessung mit der Körperplethysmographie (bauchig-s-förmige Kurven, Mittelwert 56,3 mm H_2O /l/sec)

mes sowohl die forcierte Tiffeneauatmung als auch die ruhige Ausatmung durch Bronchiolenkollaps erschwert werden [10, 16].

Abbildung 2 zeigt eine Trachealstenose mit deutlich erhöhten Widerstandswerten in der Einatmung. Darunter erkennt man zwei dazugehörige Körperplethysmographiekurven.

Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wird erstmals über 67 Vergleichsmessungen des Atemwiderstandes an Patienten mit Luftröhrenstenosen mit der Ganzkörperplethysmographie und der Wechseldruckmethode berichtet.

Aus unseren Untersuchungen ergab sich eine Korrelation von 0,83 mit einer linearen Regressionsgleichung von $g = 1,15x + 15,72$. Der Konfi-

denzbereich der Steigung lag zwischen 5,4 und 29,6. Das bedeutet, daß die Regressionsgerade lediglich geringfügig über der Identitätsgeraden liegt. Sowohl Schumann bei Normalpersonen [14] mit der Wechseldruckmethode, als auch Klein bei inhalativen Allergenprovokationstests [9] mit der nur gering abweichenden Verschlusdruckmethode, fanden eine ausreichende Korrelation beider Verfahren, verbunden mit annähernd gleichen Mittelwerten. Diese Ergebnisse können durch diese Arbeit bestätigt werden.

Die erste 20%-Perzentile in Tabelle 1 und 2 (bei der die Werte noch im oberen Toleranzbereich unter 30 mm H_2O /l/sec liegen) zeigt Mittelwerte von 28,8 (R_p) und 22,9 (R_w) mm H_2O /l/sec. Über 30 mm H_2O /l/sec, also im beginnenden pathologischen Bereich, weichen die Werte der Wechseldruckmethode um einen konstanten Faktor nach

Tabelle 1. Meßergebnisse der Körperplethysmographie am nach der Größe des ermittelten Atemwegswiderstandes geordneten und zu 20%-Perzentilen zusammengefaßten Kollektiv, das nach Geschlecht, Alter, Größe und Gewicht aufgeschlüsselt ist

	<i>n</i>	♂; ♀	Alter (±s) (Jahre)	Größe (±s) (cm)	Gewicht (±s) (kg)	Atemwegs- widerstand R_p (±s) (mm H ₂ O/l/sec)
20%	13	7; 6	53,5 (±16,9)	169 (± 8,4)	70,9 (± 8,7)	28,8 (± 8,9)
20%	13	4; 9	50,7 (±17,4)	168,6 (± 9,6)	71,5 (±11,6)	54,7 (± 5,8)
20%	14	9; 5	46,1 (±19,4)	170,5 (± 7,7)	70,4 (±12,9)	71,4 (± 7,1)
20%	13	10; 3	52,5 (±18,5)	171,5 (± 9,7)	72,5 (±15,8)	96,5 (± 6,1)
20%	14	10; 4	58,5 (±18,1)	170,6 (±10)	64,6 (±12)	148,9 (±40,5)
Gesamt	67	40; 27	52,3 (±18)	170,1 (±8,9)	69,9 (±12,4)	80,95 (±45,6)

Tabelle 2. Meßergebnisse der Wechseldruckmethode am nach der Größe des ermittelten Atemwegswiderstandes geordneten und zu 20%-Perzentilen zusammengefaßten Kollektiv, das nach Geschlecht, Alter, Größe und Gewicht aufgeschlüsselt ist

	<i>n</i>	♂; ♀	Alter (±s) (Jahre)	Größe (±s) (cm)	Gewicht (±s) (kg)	Atemwegs- widerstand R_w (±s) (mm H ₂ O/l/sec)
20%	13	8; 5	53,4 (±19,1)	171,1 (± 8,9)	72 (± 9,7)	22,9 (± 4,8)
20%	13	7; 6	47,5 (±17,8)	172,5 (± 9,9)	73,7 (± 9,1)	33,5 (± 2,9)
20%	14	7; 7	47,3 (±17,8)	167,6 (± 7,5)	69,6 (±13,4)	44,8 (± 5,4)
20%	13	9; 4	53,2 (±14,3)	170,9 (± 8,3)	68,9 (±12,4)	65,8 (± 6,7)
20%	14	9; 5	59,9 (±19,9)	168,9 (±10)	65,8 (±16)	105,8 (±30,3)
Gesamt	67	40; 27	52,3 (±18)	170,1 (± 8,9)	69,9 (±12,4)	55,14 (±33)

unt von R_p ab. Daß die Werte für die Wechseldruckmethode bei Patienten mit Trachealstenosen, also pathologischen Widerständen, etwas unter denen der Körperplethysmographie liegen, ist dadurch erklärbar, daß die obstruktiven Patienten mit ihrem „air-trapping“ bzw. gesteigerten intrathoracalen Gasvolumen mehr kapazitive (= Elastizität- und Kompressibilität-) Widerstände aufweisen, die aber von dem direkt abzulesenden R_w nicht erfaßt werden. Bei der Plethysmographie gehen jedoch durch gleichzeitige Messung des intrathoracalen Gasvolumen diese Werte sehrwohl in die Messungen ein. Außerdem zeigen die Konfidenzbereiche, daß dieses Phänomen auch auf die relativ geringe Anzahl von Messungen zurückzuführen ist und der Unterschied mit zunehmender Anzahl der Messungen abnehmen würde. Ferner lassen die im Zusammenhang mit der Oszillometrie genannten Autoren diesen auch bei ihren Parallelmessungen auftretenden Aspekt der Dinge außer acht, da er an der prinzipiellen guten Verwendbarkeit der Methode nichts ändert.

Der größte Nachteil der Wechseldruckmethode jedoch ist die fehlende Ermittlung des intrathoracalen Gasvolumens. Dem stehen aber große Vorzüge entgegen. Abgesehen von der guten Genauigkeit der Methode ist die Handhabung einfach und die Belastung des Patienten minimal. Man kann sie vornehmlich zur Beurteilung von Atemwegen

bei bettlägerigen Patienten nutzen. Man kommt hierbei zu mitarbeitersunabhängigen Verlaufskontrollen.

Für die Intensivüberwachung stellt die Wechseldruckmethode sicher eine wertvolle Bereicherung dar. Einsetzende Verschleimung, beginnende Pneumonie und Bronchialspasmen sind frühzeitig erkennbar, da es sich um rasche Änderungen des Widerstandes in Abhängigkeit von der Zeit handelt, die von den gemittelten zeitlichen Momentanwerten sehr gut erfaßt werden. Es bereitet keinen besonderen technischen Mehraufwand, Messungen bei assistierter Beatmung durchzuführen. Im halb-offenen System (z.B. Bird-Beatmung) schließen wir unseren Meßkopf an die Tubusabzweigung an und beschränken uns auf expiratorische Widerstandsmessungen. Im geschlossenen System (z.B. Einsatz von Narkosegeräten) sind Widerstandsmessungen mit dazwischengeschalteten Lochkranzpneumatographen möglich.

Die Wechseldruckmethode gestattet Glottiswiderstandsmessungen bei Phonation. Glottisverengende Maßnahmen wie z.B. Tefloninjektionen bei hypertonen Dysphonien und einseitigen Rekurrensparesen können bestens kontrolliert werden [12]. Die Wechseldruckmethode eröffnet zusätzliche Atemwegsdiagnostik an Kleinkindern und Neugeborenen. Daneben ermöglicht sie die Messung körperlicher Anstrengung. Eine gerechte

Beurteilung pulmonaler Leistungsgrenzen in der Begutachtung, Rehabilitation und Sportmedizin sind die Folge.

Soforteffekte parenteraler applizierter Pharmaka sind unmittelbar sichtbar zu machen.

Die Handhabung der Wechseldruckmethode ist in jedem Falle einfach. Ein rascher Einsatz ist gewährleistet, da nicht jedesmal eine Prüfung der Eichung erforderlich ist. Schließlich ist das Gerät auch billig.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß es sich bei der Wechseldruckmethode um eine vielversprechende Entwicklung handelt.

Literatur

1. Berger D, Nolte D (1979) Erlebt die Atemwiderstandsmessung mit der Unterbrechermethode eine Renaissance? *Prax Pneumol* 33:726–730
2. Dirnagl K (1953) Zur fortlaufenden Messung des Atemwiderstandes. *Z Aerosol-Forsch* 2:475–484
3. DuBois AB, Botelho SY, Bedell GN, Marshall R, Comroe jr HJ (1956) A rapid plethysmographic method for measuring thoracic gas volume. *J Clin Invest* 35:322–326
4. DuBois AB, Botelho SY, Comroe jr HJ (1956) A new method for measuring airway resistance in man using a body plethysmograph: values in normal subjects and in patients with respiratory disease. *J Clin Invest* 35:327–335
5. Fisher AB, DuBois AB, Hyde RW (1968) Evaluation of the forced oscillation technique for the determination of resistance to breathing. *J Clin Invest* 47:2045–2057
6. Förster E, Berger D, Nolte D (1978) Vergleichsmessungen des Atemwiderstandes mit der Oszillationsmethode und mit der Bodyplethysmographie. *Verh Dtsch Ges Inn Med* 84:392–395
7. Helltzgruber M, Kummer F, Dorda W (1978) Vergleichsmessungen von oszillatorisch und plethysmographisch gemessenen Atemwiderständen. *Prax Pneumol* 32:578–583
8. Holle JP, Magnussen H, Hartmann V, Hollstein G (1978) Die oszillatorische Atemwiderstandsmessung: Ersatz oder Ergänzung der spirometrischen und plethysmographischen Funktionsdiagnostik? *Verh Dtsch Ges Inn Med* 84:395–397
9. Klein G, Urbanek R, Köhler D, Zeiss A, Matthys H (1983) Vergleichende Messungen zwischen Verschlussdruck- und ganzkörperplethysmographischer Resistance beim inhalativen Allergenprovokationstest an Erwachsenen und Kindern. *Allergologie* 11:406–410
10. Matthys H (1971) Funktionelle Differentialdiagnostik der Atemwegsobstruktion mittels Ganzkörperplethysmographie. *Respir* 28:257–272
11. Nolte D, Renovanz HD, Schumann K (1982) Nase und Respirationstrakt – obere und untere Luftwege als funktionelle Einheit. *Dustri-Verlag, Dr. Karl Feistle, München-Deisenhofen*
12. Schumann K (1973) Über ein neuartiges Verfahren zur Bestimmung des Strömungswiderstandes der Nase. *Arch Klin Exp Ohr Nas und Kehlk Heilk* 203:325–334
13. Schumann K (1975) Vergleichende Nasenwiderstandsmessungen mit der posterioren Rhinomanometrie, der Körperplethysmographie und der computergesteuerten Wechseldruckmethode. *HNO* 23:24–28
14. Schumann K (1975) Funktionsanalyse der oberen Luftwege. Drei verschiedene Methoden und ihre klinische Anwendung. *Habil schrift Freiburg*
15. Schumann K, Beck Chl, Mann W (1978) Indirect measurement of laryngeal and tracheal resistance. *ORL* 40:325–339
16. Siemon G (1972) Lungenfunktionsbefunde bei Stenosen der großen Atemwege. *Verh Ges Lungen und Atm Forsch* 3:262–269

Stabsarzt Dr. M. Pilgramm
Abteilung V für HNO-Kranke
Bundeswehrkrankenhaus Ulm
Oberer Eselsberg 40
D-7900 Ulm