

# Energieforschung im Hochbau

8./9. September 1988, ETH-Zürich

## Nouveaux développements de deux méthodes de mesures aérauliques dans les bâtiments

R. Compagnon, J.-M. Fürbringer, C. Roecker, C.-A. Roulet  
Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment  
1015 Lausanne

### RESUME

Les techniques de mesures aérauliques par pressurisation ainsi que par gaz traceur à concentration constante ont été initialement développées pour mesurer des bâtiments entiers.

Nous présentons deux développements de ces techniques qui permettent des mesures plus détaillées sur des bâtiments multizones. Ces deux développements nous ont conduit à la réalisation de deux nouvelles installations de mesure : MAGE et CESAR 3.

### ZUSAMMENFASSUNG

Die Überdruckmessmethode sowie die Spurgasmessmethoden wurden ursprünglich zum Ausmessen ganzer Gebäude entwickelt.

Es werden Weiterentwicklungen dieser zwei Methoden vorgestellt die Messungen von mehreren Zonen (Räumen) in Gebäuden erlauben. Zwei neue Messvorrichtungen (MAGE und CESAR 3) wurden entwickelt.

## 1. INTRODUCTION

Les méthodes de mesures aérauliques sur les bâtiments sont actuellement utilisées de manière courante pour la détermination des caractéristiques globales des constructions, telles que le taux de renouvellement en air frais (méthodes à gaz traceurs) et l'étanchéité de l'enveloppe (méthodes par pressurisation).

A partir d'une première approche monozone du bâtiment, pour laquelle ces méthodes ont été initialement développées, il est apparu qu'une étude plus détaillée des mouvements d'air à l'intérieur d'une construction nécessite une modélisation multizone. Dans ce but nous développons un nouvel équipement de mesure à concentration constante utilisant simultanément 3 gaz traceurs différents. Pour un bâtiment divisé en dix zones distinctes contrôlables par notre installation, l'utilisation de ces trois gaz permet la détermination simultanée de plusieurs flux d'air interzones ainsi qu'entre les zones et l'extérieur.

D'autre part nous perfectionnons la méthode par pressurisation afin de pouvoir déterminer les coefficients d'exfiltrations des séparations interzones et des éléments de l'enveloppe du bâtiment.

Ces développements contribuent à l'effort actuel de recherche dans le domaine des échanges d'air multizones tant au niveau national dans le cadre du projet "Aspects énergétiques de l'aéraulique des bâtiments" [1] qu'au niveau international en relation avec le programme "Air flow patterns within buildings" [2] de l'Agence Internationale de l'Energie.

## 2. NOUVEAUX DEVELOPPEMENTS

### 2.1 Méthode de mesure à concentration constante de gaz traceurs

L'étude des échanges d'air par la technique des gaz traceurs dans un bâtiment divisé en N zones homogènes se base sur les équations suivantes :

- ◆ Conservation de la masse de gaz traceur k dans la zone i

$$\left(\frac{d}{dt} \rho_i\right) V_i C_i^k + \rho_i V_i \frac{d}{dt} C_i^k = q_i^k + \sum_{j=0}^N C_j^k \rho_j Q_{ji} (1 - \delta_{ij}) - C_i^k \rho_i \sum_{j=0}^N Q_{ij} (1 - \delta_{ij})$$

- ◆ Conservation de la masse d'air dans la zone i

$$\left(\frac{d}{dt} \rho_i\right) V_i = \sum_{j=0}^N \rho_j Q_{ji} (1 - \delta_{ij}) - \sum_{j=0}^N \rho_i Q_{ij} (1 - \delta_{ij})$$

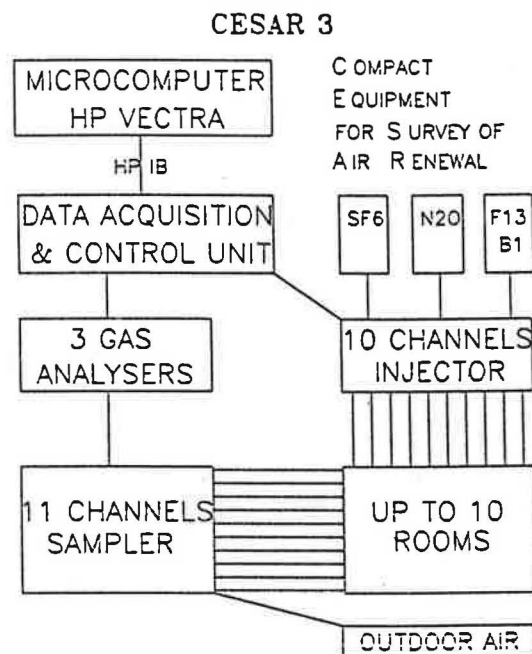
Avec :

- $V_i$  : Volume effectif de la zone i [ $m^3$ ]
- $\rho_i$  : masse volumique de l'air dans la zone i [ $kg/m^3$ ]
- $C_i^k$  : Concentration massique du gaz traceur k dans la zone i [ $kg/kg$ ]
- $q_i^k$  : débit massique de gaz traceur k injecté dans la zone i [ $kg/s$ ]
- $Q_{ij}$  : débit volumique de l'air passant de la zone i vers la zone j [ $m^3/s$ ]
- $\delta_{ij}$  : symbole de Kroenecker ( $\delta_{ij} = 1$  si  $i = j$ ;  $\delta_{ij} = 0$  si  $i \neq j$ )

L'objectif recherché est la détermination des  $N^2+N$  débits  $Q_{ij}$  à partir des mesures de concentrations  $C_i^k$  et des débits injectés  $q_i^k$ . Une des meilleures façons de générer les  $N^2+N$  équations nécessaires à partir des  $2N$  équations ci-dessus consiste à utiliser  $N$  gaz différents [3]. On obtient alors pour chaque zone,  $N$  équations de conservation pour les  $k = 1$  à  $N$  gaz traceurs.

Cette approche multigaz a déjà été mise en oeuvre avec les techniques de mesures par décroissance de la concentration (decay) et par injection constante [4]. Nous avons choisi de développer un système de mesure multigaz utilisant la méthode à concentration constante qui présente l'avantage de pouvoir confondre en une seule zone d'intérêt plusieurs locaux adjacents sans que les débits d'air entre ces locaux ne perturbent l'interprétation des mesures. Cette propriété est notamment indispensable pour les mesures sur des bâtiments occupés.

La figure 1 schématise l'installation CESAR 3 que nous développons à partir de l'expérience acquise avec notre premier système monogaz [5].



**Fig. 1 :**  
Schéma de l'installation CESAR 3. Entièrement pilotée par un ordinateur personnel, l'installation permet d'injecter trois gaz différents (hexafluorure de soufre SF<sub>6</sub>, protoxyde d'azote N<sub>2</sub>O et trifluorobromométhane CF<sub>3</sub>Br, tous non toxiques) et de contrôler leurs concentrations respectives dans 10 locaux au maximum.

Pour des raisons de coût, nous nous sommes limités à l'utilisation de trois gaz, ce qui ne suffit pas à la détermination des 110 débits  $Q_{ij}$  possibles pour les 10 zones simultanément mesurables. Il est cependant évident que, dans un bâtiment, les zones définies par l'agencement des pièces ne sont pas toutes en contact les unes avec les autres : certaines paires de débits ( $Q_{ij}$  et  $Q_{ji}$ ) sont nulles de par la répartition même des zones. Avec trois gaz il est ainsi théoriquement possible de déterminer tous les débits  $Q_{ij}$  pour autant que le bâtiment puisse être divisé en  $N$  zones selon la procédure suivante :

- 3 zones principales adjacentes les unes aux autres sont premièrement définies
- les  $(N-3)$  zones restantes sont définies l'une après l'autre de façon à ne donner lieu qu'à 4 nouveaux débits chacune.

On remarque qu'ainsi on a défini  $(3^2 + 3) + 4(N-3) = 4N$  débits à déterminer à l'aide de  $(3N + N) = 4N$  équations.

Du point de vue pratique, certaines contraintes sont à respecter de façon à obtenir tout au long de la mesure, des systèmes d'équations bien conditionnés. Dans ce but nous concentrons actuellement nos efforts sur la méthodologie expérimentale à adopter (stratégie de répartition des trois gaz entre les différentes zones et choix des concentrations de consigne) ainsi que sur les algorithmes de résolution pour la détermination des débits et de leurs intervalles de confiance.

Parallèlement nous cherchons à optimiser l'algorithme de régulation permettant de maintenir une concentration constante à l'intérieur d'une zone [6] [7].

## 2.2 Mesures par pressurisation

La pressurisation d'un bâtiment entier est couramment utilisée pour tester son étanchéité à l'air et tend à devenir une mesure systématique lors de la réception d'un bâtiment neuf [8]. Les résultats de cette mesure peuvent être résumés par trois coefficients définis par les relations suivantes :

$Q$	:	$C \Delta P^n$
$n_{L,50}$	:	$\frac{C (50)^n}{V} = \frac{Q(\Delta P = 50 \text{ Pascals})}{V}$
avec $Q$	:	Débit volumique, [ $m^3/h$ ]
$\Delta P$	:	Différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur, [Pa]
$C$	:	Coefficient d'exfiltration, [ $m^3 h^{-1} Pa^{-n}$ ]
$n$	:	Un exposant compris entre 0,5 et 1, [-]
$n_{L,50}$	:	Taux de renouvellement d'air à 50 Pa, [ $h^{-1}$ ]
$V$	:	Le volume pressurisé, [ $m^3$ ]

Une mesure monozone consiste à évaluer les débits induits par pressurisation (ou dépressurisation) du bâtiment à l'aide d'un ventilateur (figure 2). Les coefficients recherchés s'obtiennent par régression linéaire sur un ensemble de mesures prises pour plusieurs différences de pression (figure 3).

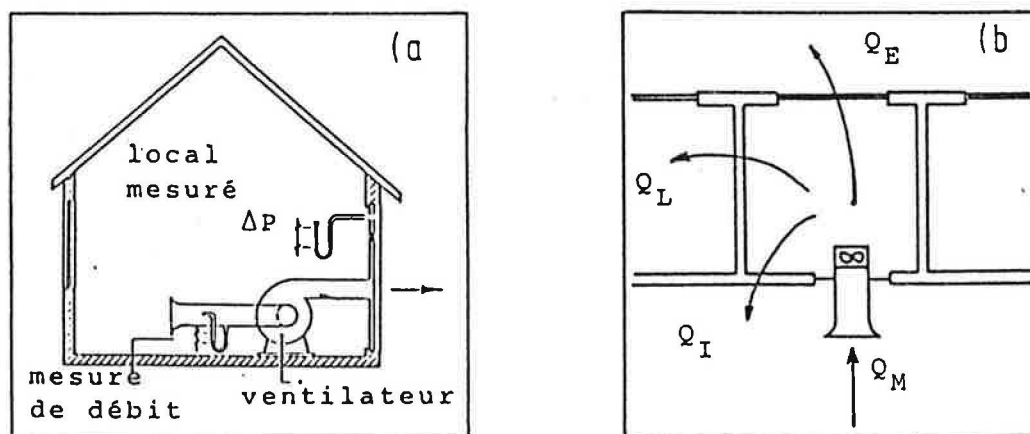
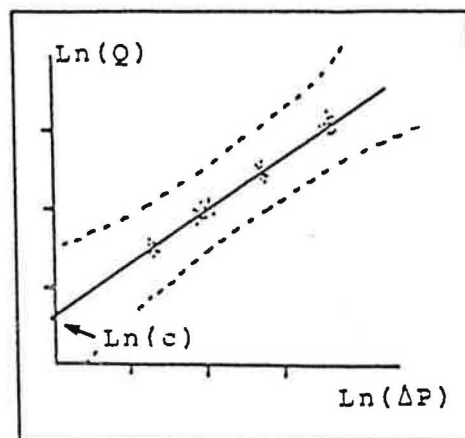


Fig. 2: Pressurisation d'un bâtiment entier a), ou d'une zone b). Dans ce dernier cas on voit que le débit mesuré  $Q_M$  est égal à la somme  $Q_E + Q_L + Q_I$  avec  $Q_{E,I,L}$  respectivement, les débits Extérieur, Latéral et Intérieur.

Fig. 3 : Interprétation d'une mesure par pressurisation. Les coefficients C et n sont obtenus par régression linéaire sur la fonction  $\text{Ln}(Q_M) = \text{Ln}(C) + n\text{Ln}(\Delta P)$ .



Parmi les inconvénients et limites de la pressurisation monozone, on peut citer :

- les variations de pression sur l'enveloppe du bâtiment. Par exemple sur le bâtiment LESO, un vent sud d'une vitesse de 4 [m/s] peut provoquer une différence de pression de 10 [Pa]. Plus la zone mesurée est grande, plus le risque est grand de rencontrer des différences de pression parasites.
- Le manque d'étanchéité des galandages, souvent non négligeable, rend impossible la mesure de l'étanchéité de l'enveloppe par simples pressurisations successives de zones juxtaposées (appartements dans un locatif, pièces d'un appartement).
- D'autre part, les recherches dans le domaine de la perméabilité à l'air des bâtiments ont montré ces dernières années que la répartition des débits d'air entre les zones a autant d'importance que leur valeur totale [9].

Compte tenu de ces remarques, nous avons cherché à améliorer cette méthode de mesure. La première tentative d'amélioration a consisté à mettre au point un plan de mesures monozone successive par changement des conditions expérimentales en ouvrant ou fermant des portes et des fenêtres. L'exécution d'un tel plan fournit un système d'équations liant les débits mesurés  $\vec{Q}_M$  aux débits traversant chaque zones  $\vec{Q}_B$ . On a alors :

$$\vec{Q}_M = M \vec{Q}_B$$

où M est la matrice d'expérience. On peut en principe résoudre ce système par

$$\vec{Q}_B = M^{-1} \vec{Q}_M$$

La qualité des résultats obtenus par cette méthode dépend fortement de la structure du bâtiment : Wouters [10] l'a exploitée avec succès sur des bâtiment à quatre zones, par contre, nous n'avons pas obtenu de résultats satisfaisants en l'utilisant sur un bâtiment aussi complexe que le LESO [11] (c.f. figure 4).

Pour pallier les défauts de notre première tentative, nous avons développé une nouvelle méthode par anneau de garde. Elle consiste à utiliser un second ventilateur pour pressuriser les pièces adjacentes (l'anneau) à la zone mesurée, de façon à annuler la différence de pression entre l'anneau et la zone (fig. 5). Les débits parasites  $Q_L$  et  $Q_I$  sont ainsi annulés et le débit mesuré  $Q_M$  est alors égal au débit  $Q_E$  traversant l'enveloppe. En jouant sur l'ouverture et la fermeture des portes et fenêtres, toutes les conductances peuvent également être déterminées.

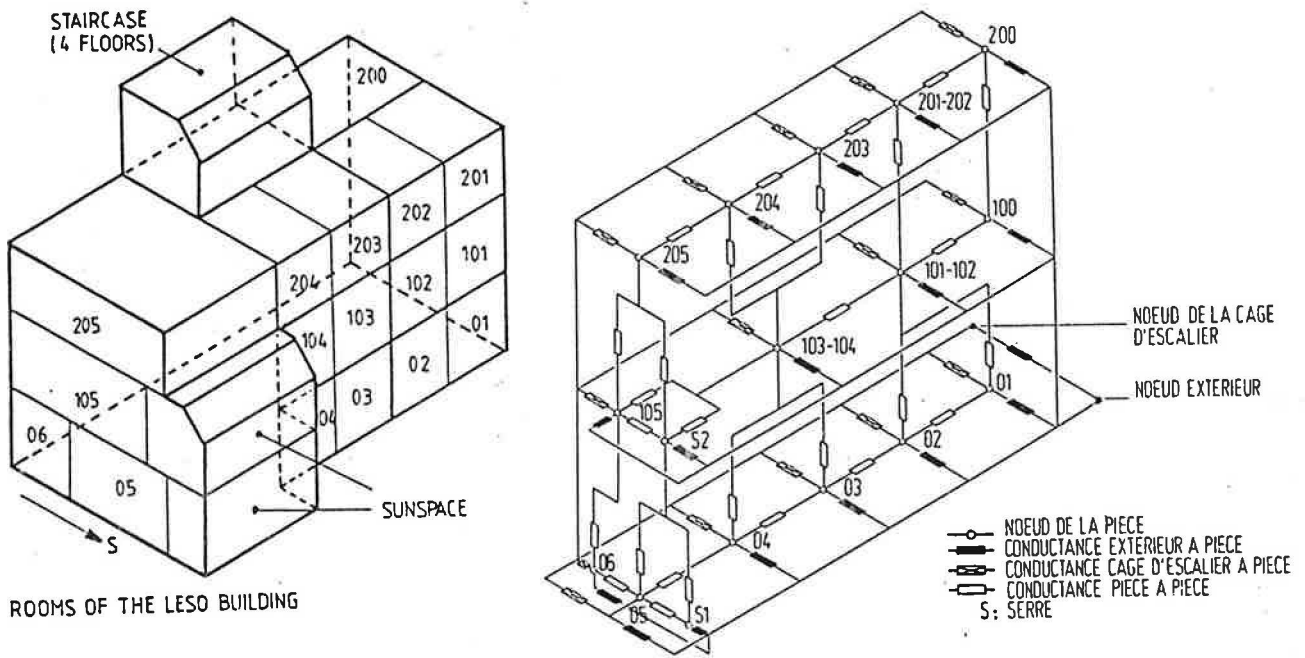


Fig. 4 : Schémas du bâtiment LESO et de son modèle sous forme de réseau de conductances aérauliques.

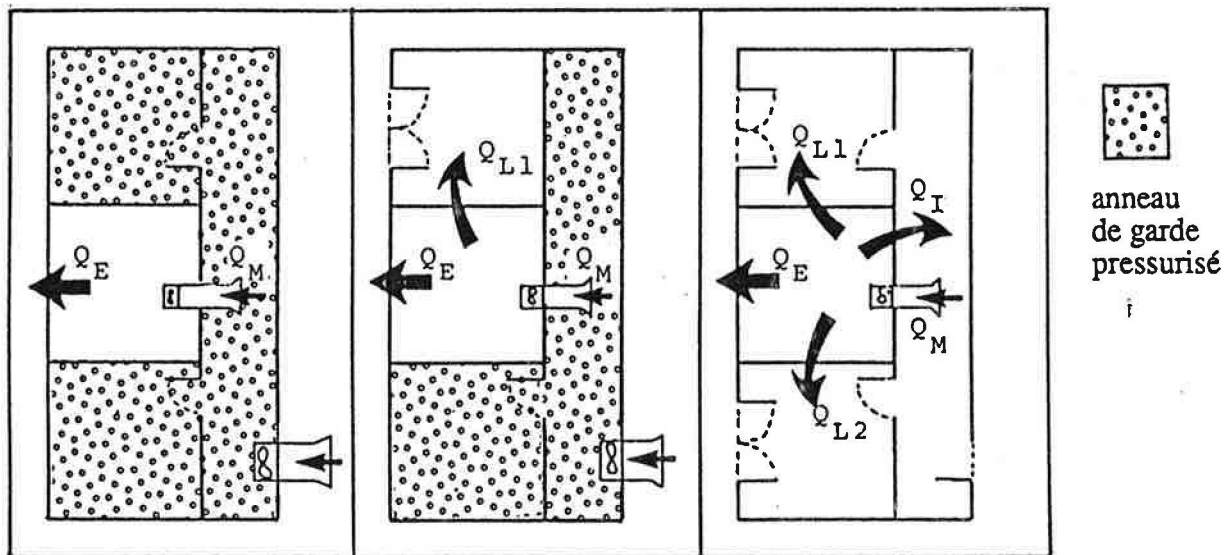


Fig. 5 : Principe de mesure par zone gardée.



Pour déterminer les conductances des 4 murs d'une pièce, on est en mesure d'établir, pour chaque différence de pression entre la zone et l'extérieur, un système d'équations aisément résolvable du type :

$$\begin{pmatrix} Q_{M1} \\ Q_{M2} \\ Q_{M3} \\ Q_{M4} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Q_E \\ Q_{L1} \\ Q_{L2} \\ Q_I \end{pmatrix}$$

A partir des ensembles,  $\{Q_i(\Delta P_j)\}$ , les coefficients  $C_i$  et  $n_i$  de chaque conductances sont ensuite obtenus par régression linéaire.

Afin d'automatiser l'acquisition des nombreuses mesures indispensables à l'exécution de tels plans d'expérimentation, nous avons développé le système dénommé MAGE (Mesure avec Anneau de Garde de l'Etanchéité). Ce système permet d'effectuer automatiquement des mesures lorsque le bâtiment est inoccupé réduisant ainsi les possibilités de perturbations et les inconvénients pour les habitants.

### 3. CONCLUSIONS

La détermination précise des débits d'air et des conductances aérauliques dans un bâtiment multizone est désormais possible grâce aux développements qui nous ont conduit aux réalisations des installations CESAR 3 et MAGE.

Dans un premier temps nous utilisons conjointement ces deux installations pour constituer une banque de données fiables pour la validation de logiciels de calculs aérauliques multizones [12].

Dans ce but nous déterminons toutes les conductances du bâtiment LESO à l'aide de l'installation MAGE. Celles-ci servent de données d'entrée aux programmes à valider. Durant l'hiver nous menons des campagnes de mesures où tous les paramètres caractérisant le bâtiment et son environnement (températures, pressions différentielles sur l'enveloppe, vitesse et direction du vent, etc.) sont mesurés (également pour servir de données d'entrée). Simultanément nous mesurons les débits d'air à l'aide de notre installation CESAR dans le but de pouvoir les comparer aux résultats des logiciels à valider. Nous disposons actuellement d'une première série de mesures effectuées durant l'hiver 87-88. De nouvelles campagnes de mesures sont prévues pour l'hiver prochain.

Toujours dans l'idée du développement de logiciels de calculs aérauliques, l'installation MAGE permettra de déterminer in-situ et sans travaux d'étanchéification provisoire, les coefficients d'exiltrations de divers éléments du bâtiment qui pourront ensuite être intégrés aux bases de données nécessaires aux logiciels.

Notre équipement CESAR 3 offre également des possibilités d'application dans l'étude de la qualité de l'air (dispersion de polluants dans les bâtiments) ainsi que dans la caractérisation de systèmes de ventilation (âge de l'air, efficacité de la ventilation).

## REFERENCES

- [1] Zollinger H.J.  
Forschungsprogramm : Energierrelevante Luftströmungen in Gebäuden  
4, Schweizerisches Status Seminar Energieforschung im Hochbau, EMPA, 1986
- [2] Roulet C.-A.  
Multiroom air flow problems and international collaboraiton  
IEA-ECB ANNEX XX, Subtask 2, Internal Report 1988
- [3] Shermann M.H., Grimsrund D.T., Condon P.E., Smith B.V.  
Air infiltration measurement techniques  
Ist AIC Conference, Windsor, GB, 1980
- [4] Charlesworth P.S.  
A guide to : air exchange rates and airtightness measurement techniques  
(Draft) AIVC 1988
- [5] Scartezzini J.-L., Roecker C., Quévit D.  
Mesures du taux de renouvellement d'air à l'aide d'un dispositif compact à  
concentration constante; 3, Schweizerisches Status Seminar, Wärmeschutz  
Forschung im Hochbau, EMPA, 1984.
- [6] Kohler A.  
Simulation d'un dispositif de mesure des taux de renouvellement d'air en vue de tester  
des algorithmes de régulation.  
Travail pratique de diplôme, EPFL, 1987.
- [7] Compagnon R., Kohler A., Roecker C., Roulet C.-A.  
Development of an efficient control algorithm for a multizone constant concentration  
tracer gas air infiltration measurement system.  
To be published in 9th AIVC Conference, Septembre 1988.
- [8] Hartmann P.  
Luftaustausch in Gebäuden, Problemstellung und Begriffe  
OFQC Bern, 1988.
- [9] Feustel H., Scartezzini J.-L.  
Development and validation of a simplified multizone infiltration model  
ICBEM Proceedings, Lausanne, 1987
- [10] Wouters P., L'Heureux D., Voordecker P.  
Advanced single fan pressurisation  
CSTB, Belgium, 1988
- [11] Fürbringer J.-M.  
Coefficients d'exfiltration : plan d'expériences et expériences sur un système  
multicellulaire.  
Travail de diplôme, EPFL, 1986
- [12] Scartezzini J.-L., Fürbringer J.-M., Roulet C.-A.  
Data needs for purpose of air infiltration computer code validation  
8th AIVC Conference, Ueberlingen, RFA, 1987.