

KfK 3197
Oktober 1981

True Mass Flow Meter 50

Ein direkt anzeigendes Massenstrom-
Meßgerät hoher Genauigkeit für transiente
Zweiphasenströmungen bis $\dot{m} = 50 \text{ kg/s}$

K. Hain, F. Brüderle, W. Butzer, F. Schloß, T. Vollmer
Hauptabteilung Ingenieurtechnik
Projekt Nukleare Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

HAUPTABTEILUNG INGENIEURTECHNIK
PROJEKT NUKLEARE SICHERHEIT

KfK 3197

TRUE MASS FLOW METER 50

Ein direkt anzeigendes Massenstrom-Meßgerät
höherer Genauigkeit für transiente Zweiphasen-
strömungen bis $\dot{m} = 50 \text{ kg/s}$

K. Hain
F. Brüderle
W. Butzer
F. Schloß
T. Vollmer

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung:

Es wird ein Meßgerät zur Messung eines transienten Zweiphasenmassenstromes Wasser/Dampf beschrieben, das einmal in der Lage ist, den Massenstrom unabhängig vom Mediumszustand und der Strömungsart zu messen und zum anderen den momentanen Massenstrom direkt und unmittelbar anzuzeigen.

Die Betriebsdaten entsprechen mit 160 bar und 620 K den DWR-Bedingungen; der Meßbereich reicht bis 50 kg/s. Die im Eichbetrieb mit einem Luft/Wassergemisch erzielte Genauigkeit betrug:

ein- und zweiphasige Strömung, allgemein $\pm 1,3 \%$
einphasig besser $\pm 0,5 \%$ und
zweiphasig ab $x = 0,35$ % besser $\pm 0,5 \%$

$$\text{Dampfgehalt } x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L}$$

\dot{m}_G = Dampf-, Gasmassenstrom (kg/s)

\dot{m}_L = Flüssigkeitsmassenstrom (kg/s)

TRUE MASS FLOW METER 50

A direkt-reading high-precision mass flow meter for transient two-phase flow up to $\dot{m} = 50$ kg/s

Abstract:

An instrument for measuring transient water/steam two-phase flows is described which, on the one hand, is able to measure mass flows independent of the state of the medium and the type of flow involved and, on the other hand, directly indicates the instantaneous mass flow.

The operating data of 160 bar and 620 K correspond to PWR conditions; the measuring range extends up to 50 kg/s. The accuracy achieved in calibration on an air/water mixture was this:

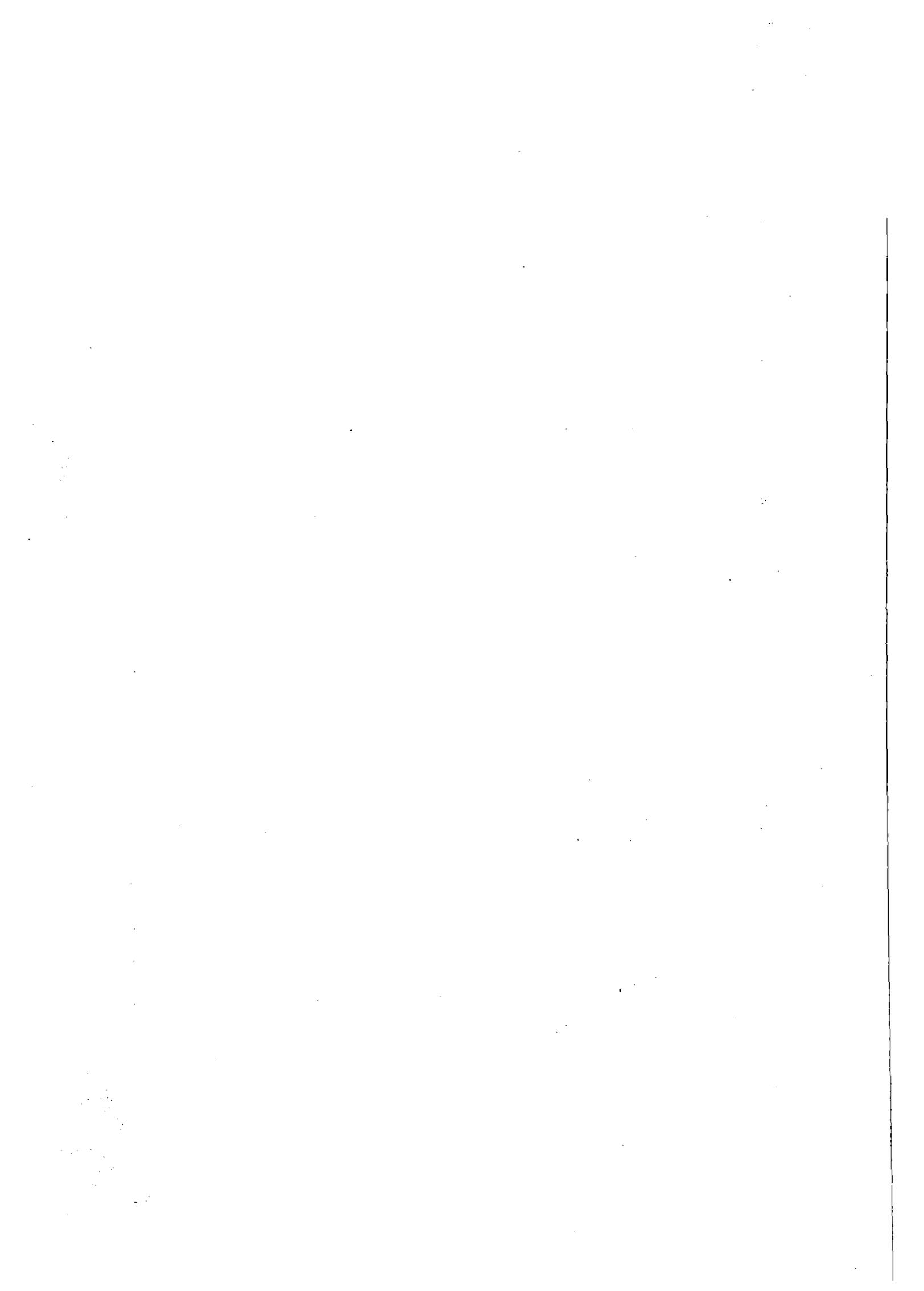
- single- and two-phase flow, general valid $\pm 1,3$ %
- single-phase, better than $\pm 0,5$ %
- two-phase, above $x = 0,35$ %, better than $\pm 0,5$ %

$$\text{Steam content } x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L}$$

\dot{m}_G = steam, gas mass flows (kg/s)

\dot{m}_L = liquid mass flow (kg/s)

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung	2
3. Meßprinzip	3
4. Wesentliche Planungsgesichtspunkte	4
5. Bestimmung der technischen Hauptdaten des TMFM 50	6
5.1 Hauptabmessungen von Rotor und Stator	6
5.2 Berechnung der Statoraufhängung	8
5.3 Zu erwartendes Meßsignal U_M	10
5.4 Maximale mechanische Spannungen	11
5.5 Eigenfrequenz des Meßsystems	12
5.6 Rotorleistung	12
5.7 Auslegungswerte für das Meßsystem TMFM 50	13
5.8 Vergleich der Meßwerte mit den berechneten Werten für das Meßsystem	14
5.9 Auslastung der Bauteile des Meßsystems	16
6. Konstruktive Anforderungen	17
7. Konstruktive Ausführung	18
7.1 Das Meßsystem mit Dämpfung	18
7.2 Die Abdichtung des Rotors und Stators gegen Umströmungen	20
7.3 Die Strömungsführung	21
7.4 Die Rotorlagerung	22
7.5 Abdichtung drucktragender Wandungsteile	23
7.6 Fertigung	23
8. Betrieb des TMFM 50 im Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren von Zweiphasen-Massenstrommeßgeräten	24
8.1 Vergleich der theoretischen mit der statisch aufgenommenen Kennlinie	24
8.2 Eichmessung mit stationärer Zweiphasen-Strömung Luft/Wasser	25
8.3 Eichmessung mit stationärer Einphasen-Strömung Wasser	28
8.4 Abhängigkeit der Massenstromanzeige vom x-Gehalt der Zweiphasenströmung	28
8.5 Genauigkeit der Massenstrommessung mit dem TMFM 50	29
8.6 Druckverlust beim Durchströmen des TMFM 50	30
9. Schlußbetrachtung	31
Literaturverzeichnis	33
Abbildungen	



Abbildungsverzeichnis:

- Abb. 1: Prinzipieller Aufbau des TMFM mit radialer Rotor- und Statorbeschaufelung
- Abb. 2: TMFM 50 - Meßsystem
Stator mit Dämpfungsring und Federbeine - Ansicht
- Abb. 3: TMFM 50 - Meßsystem
Stator mit Dämpfungsring und Federbeine - Draufsicht
- Abb. 4: TMFM 50
Aufhängung des Stators (schematisch)
- Abb. 5: TMFM 50, Verwindung des Federbeines
A. Frei eingespannt, B. am Stator befestigt
- Abb. 6: TMFM 50 - True Mass Flow Meter
Gesamtschnitt
- Abb. 7: Zweiphasen-Meßgerät True Mass Flow Meter
TMFM 50, $\dot{m} = 50 \text{ kg/s}$, $p = 160 \text{ bar}$, $t = 620 \text{ K}$
- Abb. 8: Zweiphasenstrom-Meßgerät True Mass Flow Meter
und TMFM 50, $p = 160 \text{ bar}$, $T = 620 \text{ K}$
- Abb. 9: TMFM 50 - True Mass Flow Meter,
Drehmasse-Federsystem, Stator mit Dämpfungsring
und Federbeine
- Abb. 10: TMFM 50 - Abdichtung des Rotors und Stators,
Stator oben mit Spaltdichtung, unten mit
Labyrinthdichtung
- Abb. 11: TMFM 50 - Schnitt durch den Strömungskanal
(links) und Strömungsquerschnitt über der
mittleren Stromfadenlänge (rechts)
- Abb. 12: TMFM 50 - Leitkörper zur Dreiteilung des
Massenstromes und Abströmrohrleitungen
- Abb. 13: TMFM 50 - Rotorwelle mit Rotor,
Lagerung und Gleitringdichtung
- Abb. 14: TMFM 50 - Schaufelgitter des Stators (links)
und des Rotors (rechts)
- Abb. 15: TMFM 50 - Vergleich der theoretischen Kenn-
linie mit der durch Gewichtsbelastung
gemessenen Kennlinie

- Abb. 16: Zweiphasen - Luft/Wasser - Versuchsstand des IRB, Schema der Teststrecke
- Abb. 17: TMFM 50 - Kennlinien mit Rotor $Z = 68$
- Abb. 18: TMFM 50 - Allgemein gültige Kennlinie bei unbekannter Strömungsart
- Abb. 19: TMFM 50 - Meßsignale bei konstantem Massenstrom in Abhängigkeit vom x-Gehalt
- Abb. 20: TMFM 50 - Relativer Fehler über dem Referenzmassenstrom bei unbekanntem x-Gehalt
- Abb. 21: TMFM 50 - Relativer Fehler über dem Referenzmassenstrom, $x = 0 \%$ (Mitte) und $x > 0,35 \%$ (unten)
- Abb. 22: TMFM 50 - Relativer Fehler über dem x-Gehalt (linear)
- Abb. 23: TMFM 50 - Relativer Fehler über dem x-Gehalt (logarithmisch)
- Abb. 24: TMFM 50 - Druckverluste in Abhängigkeit vom Massenstrom und x-Gehalt

Anmerkung

Die Entwicklung des TMFM 50 entstand im Auftrag des Projektes Nukleare Sicherheit des KfK.

Die Autoren möchten dem Institut für Reaktorbauelemente (IRB) und hier besonders den Herren H. John und Dr. J.Reimann für die Möglichkeit und Durchführung der Eichversuche am Versuchstand zum Testen und Kalibrieren von Zweiphasen-Massenstrommeßverfahren danken.

1. Einleitung

Die Bestimmung des Massenstromes bei einer inhomogenen, instationären Strömung erfordert in der Regel die orts- und zeitgleiche Kenntnis mehrerer physikalischer Zustandsgrößen des Strömungsmediums über den Strömungsquerschnitt. Besonders bei Strömungen von Flüssigkeiten zusammen mit Dämpfen bringt diese Notwendigkeit erhebliche meßtechnische Schwierigkeiten mit sich.

Mit dem True Mass Flow Meter (TMFM) steht nunmehr ein Meßgerät zur Verfügung, mit dem ein momentaner ein- oder mehrphasiger Massenstrom unabhängig von dem jeweiligen Mediumszustand aus der Kenntnis einer einzigen Meßgröße und mit Hilfe einer vorab bestimmbaren Apparatekonstante ermittelt werden kann.

Das TMFM 2.5 wurde zur Bestimmung des transienten zweiphasigen Massenstromes (Druckwasser und Dampf) in der Blowdownleitung der Versuchsanlage COSIMA /1/ im Rahmen der Untersuchungen zum Brennstabverhalten bei Kühlmittelverluststörfällen des Projektes Nukleare Sicherheit bei der KfK entwickelt /2/.

Aufgrund der guten Meßgenauigkeit des Massenstromes von besser $\pm 3,5 \%$ und des äußerst stabilen Betriebsverhaltens bei über 130 Blowdownvorgängen an der COSIMA-Anlage /3/ wurde beschlossen, das TMFM 2.5 mit seinem Nominalmeßbereich von 2,5 kg/s auf einen Massenstromdurchsatz bis 50 kg/s weiterzuentwickeln.

Das TMFM 50 soll in dem im Aufbau befindlichen Versuchsstand für instationäre Zweiphasen-Strömungen des Instituts für Reaktorbauelemente am KfK als Referenzmeßgerät eingesetzt werden.

2. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung umfaßt Planung und Bau eines True Mass Flow Meter auf der Basis des TMFM 2,5 mit folgenden Hauptdaten:

Massendurchsatz:	$\dot{m} = 50 \text{ kg/s}$
Zul. Überlast:	$\dot{m} = 80 \text{ kg/s}$ bei $\dot{m} \geq 80 \text{ kg/s}$ Anschlag des Meßsystems
Genauigkeit:	$\leq \pm 3 \%$ von 50 kg/s im Bereich von 0 bis 50 kg/s
Meßzeit:	2 min
Betriebsdruck:	160 bar
Betriebstemperatur:	620 K (347 °C)
Auslegungsdruck:	180 bar
Auslegungstemperatur:	630 K (357 °C)

Die Druckverluste sollen dabei so klein wie technisch realisierbar gehalten werden.

Der Aufbau des TMFM soll ferner so erfolgen, daß ohne größere Änderungen der Hauptabmessungen lediglich durch Änderungen an den Daten des Meßsystems eine Anpassung des Meßbereiches an andere Nominaldurchsätze möglich wird.

Letztendlich waren die Erfahrungen beim Bau und Betrieb des TMFM 2,5 zu berücksichtigen.

3. Meßprinzip

Das Meßprinzip des TMFM beruht auf Eigenschaften einer Kreiselsströmungsmaschine (Abb. 1) und ist in /2/ näher beschrieben. Dem Strömungsmedium wird in einem Rotor ein genau definierter Drall aufgeprägt, der im Fall des radialbeschaufelten Rotors den Wert

$$D = \varphi_{\text{Rotor}} \cdot \dot{m} \cdot r^2 \cdot \omega \quad (1)$$

hat. Dieser Drall wird in einem radial beschaufelten Stator dem Medium wieder entzogen, wobei ein Abbremsmoment

$$M_a = \varphi_{\text{Stator}} \cdot D \quad (2)$$

auftritt. Durch Einsetzen von 2 in 1 ergibt sich der Massenstrom zu

$$\dot{m} = \frac{M_a}{\varphi_{\text{Rotor}} \cdot \varphi_{\text{Stator}} \cdot r^2 \cdot \omega} \quad (3)$$

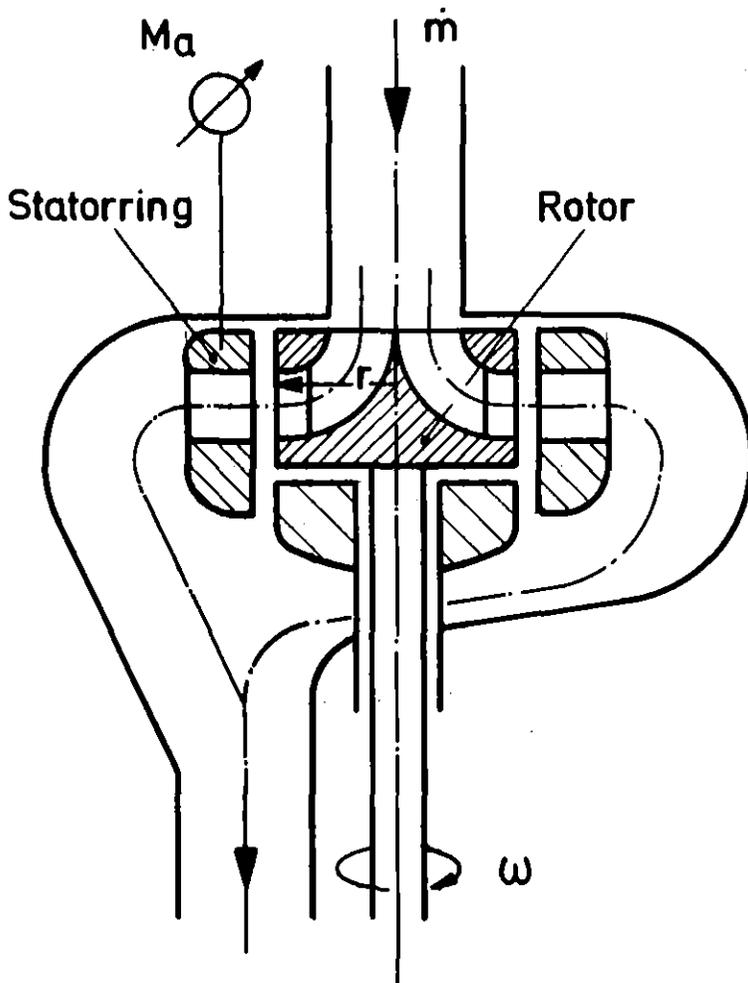


ABB. 1
Prinzipieller Aufbau
des TMFM mit radialer
Rotor- und Statorbe-
schaufelung

Diese Ableitung ist mathematisch exakt. Aus der Gleichung ist ersichtlich, daß das Drehmoment M_a am Statorring der einzige Meßwert ist, während die Faktoren φ_{Rotor} , φ_{Stator} und ω geräteabhängige Größen sind.

Die Gerätekonstante r ist bei einem radialen Austritt aus dem Laufrad genau zu bestimmen. Die Winkelgeschwindigkeit ω kann mit Hilfe einer konstanten Motordrehzahl ebenfalls mit hoher Genauigkeit angegeben werden.

4. Wesentliche Planungsgesichtspunkte

Aus dem Meßprinzip und den Betriebsbedingungen ergeben sich die Hauptanforderungen an das Gerät:

- Erzeugung eines genau definierten Dralls.

Dies ist möglich durch einen mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω (z.B. mit einem Synchronmotor) getriebenen Rotor, dessen Radius r sehr genau gefertigt werden kann. Bei radialem Strömungsausritt hat so jedes Massenteilchen eine Umfangskomponente, die der genau bestimmbaren Umfangsgeschwindigkeit des Rotors entspricht.

- Vollständiges Entziehen des Dralls im Stator.

Ebenfalls im hohen Maße durch eine enge radiale Beschau felung erreichbar.

- Genaue Messung des dabei wirkenden Moments.

Hierzu ist es wichtig, den Stator vollkommen reibungsfrei aufzuhängen.

- Weitestgehende Abdichtung des Rotors und des Stators, um Nebenströmungen zu vermeiden.

- Auswirkungen auf das Meßsignal durch die beim Ablauf von transienten Vorgängen (z.B. Blowdown-Druckentlastung mit entsprechender Temperaturänderung) auftretenden mechanischen und thermischen Belastungen möglichst auszuschalten.

Die Genauigkeit der Drallerzeugung im Rotor und Drallentziehung im Stator, berücksichtigt durch die Faktoren φ_{Rotor} und φ_{Stator} , ist auch wesentlich abhängig von der Güte der Beschau- felungen im Rotor und Stator. Die Kanäle müssen lang, schmal und möglichst genau radial sein. Die Faktoren φ_{Rotor} und φ_{Stator} stellen somit eine Art Wirkungsgrad der Beschau- felungen dar. Sie sollen Abweichungen der Strömung von der theore- tisch genau radial vorgesehenen Richtung berücksichtigen.

Es ist leicht einzusehen, daß sie einer genauen theoretischen Beschreibung nicht zugänglich sind. In der einschlägigen Lite- ratur /4/ sind zwar Ansatzpunkte zu finden, die aber der hier gewünschten Genauigkeit nicht standhalten. Insofern ist neben einer großen Sorgfalt bei der Auslegung und Fertigung der Be- schaufelungen eine Eichung des Gerätes erforderlich, um die angestrebte hohe Absolutgenauigkeit zu erreichen.

Aus der technischen Realisierung der Drallentziehung und der Momentenmessung am Stator ergibt sich ein weiterer Problemkreis. Der Stator ist an 3 um 120° versetzten Federbeinen aufgehängt, Abb. 2, deren Biegung, durch Dehnmeßstreifen gemessen, das Maß für den Massenstrom ergibt. Zusammen mit den Federbeinen bildet der Stator aber ein schwingfähiges Drehmasse-Feder- system, das durch das instationär strömende, pulsierende Zwei- phasengemisch zu Schwingungen angeregt werden kann. Diese An- regungsschwingungen beeinträchtigen die Auflösegenauigkeit und müssen deshalb gedämpft werden /5/.

Aus Gründen der Meßgenauigkeit ist es weiter notwendig, eine gleichmäßige Beanspruchung der drei Federbeine zu erzielen. Dies ergibt die Forderung, die Hauptachse des Stators und da- mit des Meßgerätes senkrecht anzuordnen.

5. Bestimmung der technischen Hauptdaten des TMFM

5.1 Hauptabmessungen von Rotor und Stator

Bei der Festlegung der Hauptabmessungen für den Rotor und den Stator wurden die gleichen Strömungsgeschwindigkeiten wie beim TMFM 2,5 zugrundegelegt /2/.

Damit ergab sich für Rotor und Stator ein freier

$$\text{Strömungsquerschnitt} \quad A = 6280 \text{ mm}^2$$

Analog zu den Verhältnissen am TMFM 2,5 wurde weiter gesetzt:

$$\text{Verhältnis der Spalthöhen} \quad h_{\text{Stator}}/h_{\text{Rotor}} \cong 0,8$$

$$\text{Schaufelwirkungsgrad} \quad \eta_{\text{Stat}} = \eta_{\text{Rot}} \cong 97 \%$$

$$\text{Verhältnis Statoraußenradius} \\ \text{zur Spalthöhe} \quad r_{\text{A Stat}}/h_{\text{Stat}} \sim 6$$

Aus fertigungstechnischen Gründen war die Schaufelhöhe auf ca. 25 mm begrenzt.

Um den Wirkungsgrad von Rotor und Stator möglichst hoch und eventuell zu erwartende Abweichungen vom linearen Zusammenhang zwischen dem Moment M_a und dem Massenstrom \dot{m} möglichst klein zu halten, muß der Einfluß der Endlichkeit der Beschaufelung minimiert werden. Nach /4/ gilt für Pumpenräder der Zusammenhang zwischen den Förderhöhen $y_{\text{Sch}\infty}$ (unendliche Schaufelzahl) und y_{Sch} (endliche Schaufelzahl)

$$y_{\text{Sch}\infty} = y_{\text{Sch}} (1 + p)$$

$$\text{mit } p = \frac{0,8 \cdot r}{z \cdot l}$$

Hierin bedeuten

z = Anzahl der Schaufeln

r = Außendurchmesser des Pumpenrades

l = axiale Länge der Schaufeln

mit $\eta = 1 - p \geq 0,97$ wird

$p \leq 0,03$

daraus und mit den übrigen vorgegebenen Daten ergaben sich folgende Abmessungen:

	Rotor	Stator
Radius innen	65 (57,5) mm	92,22 mm
Radius außen	87,22 mm	115,9 mm
Spalthöhe	25 (23) mm	20 mm
Spaltweite	1,6 mm	1,6 mm
Schaufelanzahl	157 (136)	196 (180)

mit $\eta = 0,98$ und

$$r_{A \text{ Stat}}/h_{\text{Stat}} = 5,8$$

Aus fertigungstechnischen Gründen wurden die in Klammern stehenden Werte gewählt. Dadurch wurde die Strömungsgeschwindigkeit im Rotor um 13 % und im Stator um 8 % erhöht.

Die Mediumsgeschwindigkeit, bei der ein Fluidpartikel beginnt, ohne Schaufelberührung durch den Rotor zu fliegen, ergibt sich aus der Gleichung

$$v_{\text{med}} = \frac{2\omega \cdot l}{S_w \left(\frac{1}{r_{AR}} + \frac{1}{r_{IR}} \right)} \quad 5 - 2$$

mit S_w = Schlitzweite des Rotors

r_{AR} r_{IR} = Außen- bzw. Innenradius des Rotors

l = radiale Schaufellänge

ω = Winkelgeschwindigkeit des Rotors

Für den ausgelegten Rotor beträgt diese

$$v_{\text{med}} = 202 \text{ m/s.}$$

Diese Geschwindigkeit würde gerade erreicht bei 50 kg/s Massendurchsatz mit reinem Sattedampf von 300 °C.

5.2 Berechnung der Statoraufhängung

Der Stator ist an 3 Federbeinen freischwingend aufgehängt (Abb. 3). In der Abb. 4 ist ein Federbein schematisch dargestellt. Das am Stator angreifende Moment ist M_a . Eine umfassende Analyse des Meßsystems ist in /6/ dargestellt. Hier sind der Übersicht halber nur die Endergebnisse aufgeführt. Die Bezeichnungen beziehen sich dabei auf die Abb. 4 und 5.

Federauslenkungswinkel β

Der Auslenkungswinkel β des Federbeines infolge des Statormomentes M_a ist:

$$\beta = B \cdot l_F (R \cdot F_4 - M_t^* \cdot r_A) \quad [\text{rad}] \quad 5-3$$

mit $B = \frac{M_A}{E_F \cdot J_F \cdot r_A}$

$$M_A = M_a / 3$$

$$R = 1 - M_t^* \quad 5-4$$

E_F = Elastizitätsmodul der Meßfeder

$$J_F = \frac{b_F \cdot h_F^3}{12} \quad 5-5$$

$$M_t^* = \frac{M_t}{M_A} \quad (\text{siehe Gl. 5-15}) \quad 5-6$$

M_t = Torsionsmoment der Aufhängung

$$F_4 = l_1 - l_F / 2 \quad 5-7$$

$$l_1 = l_B + l_F \quad 5-8$$

Durchbiegung der Meßfeder f*

$$f^* = \frac{B \cdot l_F^2}{2} (R \cdot F_3 - M_t^* \cdot r_A) \quad 5-9$$

$$\text{mit } F_3 = l_1 - \frac{l_F}{3} \quad 5-10$$

Statorauslenkung an der Aufhängung f

$$f = f^* + \beta \cdot l_B \quad 5-11$$

Verdrillwinkel \mathcal{J} an der Aufhängung

$$\mathcal{J} = \frac{f^* + \beta (l_B + r_A)}{r_A} = \frac{M_t}{G \cdot J_t} \cdot l_A \quad 5-12/-13$$

$$\text{mit } G = \frac{E_A}{2(1 + \gamma)} \quad 5-14$$

M_t = Torsionsmoment an der Aufhängung

E_A = Elastizitätsmodul der Aufhängung

J_t = polares Trägheitsmoment der Aufhängung

γ = Querkontraktionszahl

Torsionsmoment M_t , (M_t^*)

Aus den Gleichungen 5-3 bis 5-14 ergibt sich

$$M_t^* = \frac{G_1 + G_2}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5} \quad 5-15$$

und somit aus Gl. 5-6

$$M_t = M_t^* \cdot M_A \quad 5-16$$

Hierin bedeuten

$$G_1 = \frac{l_F \cdot F_3}{2} \quad 5-17$$

$$G_2 = \frac{r_A \cdot l_F}{2} \quad 5-18$$

$$G_3 = F_4 \cdot A \quad 5-19$$

$$G_4 = r_A \cdot A \quad 5-20$$

$$G_5 = \frac{M_A \cdot l_A \cdot r_A}{G \cdot J_t \cdot B \cdot l_F} \quad 5-21$$

$$A = l_B + r_A \quad 5-22$$

Durchbiegung der Aufhängung c_A

Die Durchbiegung der Aufhängung aufgrund der Statorauslenkung beträgt

$$c_A \cdot l_F = \sqrt{l_F^2 - f^{*2}} + l_B (1 - \cos\beta) + r_A (1 - \cos\alpha) \quad 5-23$$

mit α = Statorauslenkungswinkel

5.3 Zu erwartendes Meßsignal U_M

Die vollständige Ableitung ist ebenfalls in /6/ zu finden.

Die mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}$ im Bereich der Dehnmeßstreifen beträgt

$$\bar{\epsilon} = \frac{h_F}{2} B [R \cdot l_1 - M_t^* \cdot r_A - \frac{R}{2} \cdot (x_2 + x_1)] \quad 5-24$$

Darin sind

x_1, x_2 = Anfang und Ende des aktiven Bereiches der Dehnmeßstreifen (DMS).

An einer DMS-Halbbrücke entsteht damit ein Meßsignal

$$\Delta U = \frac{1}{2} U_0 \cdot K \cdot \bar{\epsilon} \quad 5-25$$

mit K = Multiplikationsfaktor der DMS

U_0 = Brückenspeisespannung

Da insgesamt 3 DMS-Halbbrücken zusammengeschaltet sind, ergibt sich das Meßsignal zu

$$U_M = V \cdot \frac{3}{2} \cdot U_0 \cdot K \cdot \bar{\epsilon} \quad 5-26$$

wobei V ein elektrischer Verstärkungsfaktor bedeutet.

Maximale Dehnung der DMS

Um reproduzierbare Werte der DMS zu erhalten, dürfen diese nur um einen maximal zulässigen Wert gedehnt werden. Vereinfachend wird hier angenommen, daß die maximale Dehnung der DMS identisch sei mit der maximalen Dehnung der Feder. Diese beträgt

$$\epsilon_{\max} = \frac{h_F}{2} \cdot B \cdot (R \cdot l_1 - M_t^* \cdot r_A) \quad 5-27$$

5.4 Maximale mechanische Spannungen

Um reproduzierbare Meßwerte zu erhalten, müssen die Meßfedern so ausgelegt sein, daß durch die Auslenkung bei voller Belastung die Streckgrenze nicht erreicht wird, damit keine bleibenden Dehnungen auftreten, die zu einer Langzeitverschiebung des Nullpunktes führen würden. Zur Anhebung der Streckgrenze ist das Federmaterial u.U. kalt zu verformen, wobei anschließendes Schweißen und Löten so ausgeführt werden müssen, daß die Wirkung der Kaltverformung nicht verloren geht. Es ergeben sich für die Meßfeder:

$$\sigma_{\max} = E_F \cdot \epsilon_{\max} \quad 5-28$$

und für die Aufhängung

$$\tau_o = \frac{h_A}{J_t} \cdot M_t \text{ max} \quad 5 - 29$$

$$\sigma_{A.1} = \frac{3 \cdot f_D \cdot E_A \cdot h_A}{l_A^2} \quad 5 - 30$$

$$\sigma_{A.2} = \frac{3 \cdot C_A \cdot E_A \cdot h_A}{l_A^2} \quad 5 - 31$$

mit f_D = horizontale Auslenkung durch Wärmedehnung

C_A = horizontale Auslenkung durch Verdrehung

5.5 Eigenfrequenz des Meßsystems

Mit dem Trägheitsmoment θ von Stator und Dämpfungsgehäuse und der Federkonstanten C ergibt sich die Kreisfrequenz ω_o zu

$$\omega_o = \sqrt{\frac{C}{\theta}} \quad 5 - 32$$

und hiermit die Eigenfrequenz

$$f_o = \frac{\omega_o}{2\pi} \quad 5 - 33$$

mit $C = \frac{M_a}{\alpha} \quad 5 - 34$

wobei $\alpha = \frac{f^x + \beta \cdot l_B}{r_A} \quad 5 - 35$

die Auslenkung des Stators bei M_a in rad darstellt.

5.6 Rotorleistung

Ohne Berücksichtigung der Schaufelwirkungsgrade beträgt das am Stator angreifende Moment

$$M_a = M_e = \dot{m} \cdot r_{AR}^2 \cdot \omega$$

und die am Rotor aufzubringende Leistung

$$N_R = M_a \cdot \omega$$

5 - 37

mit ω = Kreisfrequenz des Rotors

r_{AR} = Rotoraußenradius

\dot{m} = Massenstrom

5.7 Auslegungswerte für das Meßsystem TMFM 50

Mit $\dot{m} = 50 \text{ kg/s}$, $r_{AR} = 87,2 \text{ mm}$ und einer Rotordrehzahl $n = 1500 \text{ U/min}$ ergibt sich ein Rotornennmoment

$$M_R = 59,7 \text{ Nm} \quad (\equiv M_a \text{ Statormoment})$$

und eine hierfür erforderliche Antriebsleistung für den Rotor

$$M_R = 9,4 \text{ kW}$$

ohne Berücksichtigung der Reibverlustleistung z.B. für die Gleitringdichtung. Ausgehend von einer starren Befestigung (Balken zwischen Meßfeder und Aufhängefeder) wurden folgende Werte für die Meßfeder und Aufhängefeder berechnet.

Meßfeder: $l_F = 49 \text{ mm}$

$$h_F = 9,5 \text{ mm}$$

$$b_F = 24 \text{ mm}$$

Aufhängung: $l_A = 40 \text{ mm}$

$$h_A = 0,9 \text{ mm}$$

$$b_A = 30 \text{ mm}$$

Länge des starren Befestigungsbalkens

$$l_B = 125,5 \text{ mm}$$

Mit den Elastizitätsmoduln $E_F = 1,86 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ für die Meßfeder und $E_A = 2,0 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ für die Aufhängefeder ergaben sich die in der Tabelle 1, Spalte 1 aufgelisteten Rechenwerte.

5.8 Vergleich der Meßwerte mit den berechneten Werten für das Meßsystem

Die Tabelle 1 zeigt ferner für die Auslenkung der Federbeine eine Gegenüberstellung der berechneten und der gemessenen Werte. Hierbei wurde einmal der Bügel frei ausragend einzeln und in Verbindung mit dem Statorsimulator mechanisch belastet.

Tabelle 1: Vergleich der berechneten mit den gemessenen Werten

gemessene Größe	berechnete Werte	am freien Hebel gemessen	am Statorsimulator gemessen
f^* [mm]	0,104	0,12	0,11
β [grad]	0,23	0,28	0,275
f [mm]	0,613	0,78	0,90
$\Delta U/3$ [V]**	0,847	0,863	0,840
ψ [grad]*	0	0	0,06

*) Verwindung ψ am Ende der Meßfeder Punkt B der Abb. 4 gemessen

***) Dehnmeßstreifen entsprechen nicht der Endausführung

Das berechnete Meßsignal stimmt sehr gut mit den gemessenen Daten überein, während die gemessenen Ausbiegungen etwas höher als die berechneten sind. Dies ist einmal auf die Radien zurückzuführen, die nicht exakt erfaßbar sind und damit die Balkenlängen nicht genau definierbar machen und zum anderen darauf, daß bei der realen Ausführung die Durchbiegung des Befestigungsbalkens nicht vernachlässigbar wird.

Letzteres ist auch die Ursache für die Differenz in der Gesamtauslenkung f des Federbeines, gemessen einmal frei ausragend und am Statorsimulator befestigt. Die Erklärung hierfür zeigt

die Abb. 5. Im Fall des frei eingespannten Hebels wirkt die Kraft P in der Statorebene und verdreht den Befestigungsbalken um den Winkel ζ ($\sim 0,14$ grad) nach Abb. 5A.

In Verbindung mit dem Stator ist eine Verdrehung dieser Art nicht möglich, ζ bleibt Null. Auch kann nicht davon ausgegangen werden, daß die Kraft P in der Statorebene angreift, sondern so wie in der Abb. 5B gezeigt ist.

Für die Meßwertbildung ergibt dies keine Veränderung, da das entstehende Drehmoment $P \cdot h$ von der DMS-Halbbrücke eliminiert wird. Jedoch für die Durchbiegung des Befestigungsbalkens muß nun die Länge l_B zu $l_B/\cos\gamma$ gesetzt werden, wobei sich die Durchbiegung etwa verdoppelt. (ca. 0,2 mm anstatt 0,1 beim frei eingespannten Hebel.) Dem von P herrührenden Drehmoment $P \cdot h$ wirkt vom Stator her eine Torsionsmoment M_B entgegen, so daß die Einspannstelle "A" (Abb. 5) nicht verdreht wird. Daraus resultiert jedoch eine Verdrehung der Meßfeder um den Winkel ψ ($\sim 0,06$ grad).

Die Konsequenz hieraus ist, daß der Befestigungsbalken in der Berechnung hinsichtlich Durchbiegung und Torsion nicht vernachlässigt werden darf und zum anderen sehr steif ausgelegt werden muß.

Aufgrund dieser zusätzlichen Durchbiegung sinkt die Eigenfrequenz des Stators z.B. in Titanausführung von

$$f_0 \approx 73 \text{ Hz auf } 60 \text{ Hz.}$$

5.9 Auslastung der Bauteile des Meßsystems

Auslastung der Meßfeder (Gl. 5-28)

$$\sigma_{\max}/\sigma_{0,2} = 0,32$$

Auslastung der Aufhängung durch Torsion (Gl. 5-29)

$$\tau_0/\sigma_{0,2} = 0,08$$

Auslastung der Aufhängung durch Rückbiegung (Gl. 5-31)

$$\sigma_{A2}/\sigma_{0,2} = 0,4 \cdot 10^{-2}$$

Auslastung der Aufhängung durch die Wärmedehnung des gesamten Systems (Gl. 5-30)

$$\sigma_{A1}/\sigma_{0,2} = 0,59 \quad \text{Statorausführung in Titan} \\ \quad \quad \quad (0,75 \text{ bei einem Edelstahlstator})$$

Auslastung der Dehnmeßstreifen

$$\epsilon_{\max}/\epsilon_{\text{zul.}} = 0,07$$

Meßsignal bei max. Durchsatz und gekoppelten, angeschweißten Dehnmeßstreifen

$$U_M = 2192 \text{ mV}$$

Für den Vergleich der berechneten mit der gemessenen Kennlinie wird auf das Kapitel 8 verwiesen.

6. Konstruktive Anforderungen

Die Aufgabenstellung, das TMFM bei der geforderten Meßgenauigkeit $\pm 3\%$ vom Endwert für die Betriebsbedingungen 180 bar und 357 °C auszulegen, verbirgt in sich eine Reihe von Schwierigkeiten. Aus den strömungstechnischen Hauptabmessungen ergibt sich eine Gerätegröße, die im Sinne der Unfallverhütungsvorschriften (UVV) eine Behandlung als Druckbehälter unter Beachtung der dafür geltenden technischen Regeln zweckmäßig erscheinen läßt.

Sowohl die festigkeitsmäßige Auslegung, als auch die in der Meßgenauigkeit begründete Forderung nach geringer Verformung unter Druckbeanspruchung bedingen große Wanddicken und damit große Massen. Da diese wiederum eine große Wärmekapazität haben, können sie schnellen Temperaturänderungen des zu messenden Mediums nicht folgen. Außerdem sind aus meßtechnischen und maschinenbaulichen Gründen verschiedene Teile zu kühlen. Dadurch entstehen automatisch unterschiedliche Wärmedehnungen, die zu berücksichtigen sind.

Ein weiteres wesentliches Problem ist, die Leckmengen um den Rotor und den Stator möglichst gering zu halten. Schließlich sind so klein wie mögliche Druckverluste über das TMFM anzustreben, was eine entsprechende Ausbildung der Strömungskanäle erforderlich macht.

7. Die konstruktive Ausführung

Einen Überblick über die konstruktive Ausführung des TMFM 50 zeigen der Gesamtschnitt Abb. 6 sowie der räumlich dargestellte Teilschnitt des Mittelteiles Abb. 7.

Eine Gegenüberstellung des TMFM 2,5 zum TMFM 50 ist im Foto Abb. 8 gezeigt. In anschaulicher Weise sind hier die Größenverhältnisse - man beachte die Flanschstärken - bei der Meßbereichserweiterung des TMFM 2,5 um den Faktor 20 dargestellt.

Die konstruktiven Hauptelemente sind in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

7.1 Das Meßsystem mit Dämpfung

Die konstruktive Ausführung des Meßsystems mit Dämpfung ist in den Abbildungen 2, 3 und 9 dargestellt. Der Stator ist in den drei Federbeinen so eingespannt, daß Schaufelgitter, Federn und Dehnmeßstreifen (DMS) in einer Ebene liegen (Abb. 2). Auf diese Weise wird eine schiefe Biegung der Federn weitgehend vermieden. Die Federbeine sind abgekröpft, um Radialdehnungen des Stators gegenüber den fest eingespannten Meßflanschen aufnehmen zu können. Obwohl die drei Statoraufhängungen relativ dünn sind, ergeben sie durch die Versetzung um jeweils 120° dennoch eine sehr genaue Zentrierung, die deshalb besonders wichtig ist, weil der Stator wegen der erforderlichen vollkommen freien Aufhängung das Gehäuse einerseits nicht berühren darf, andererseits jedoch gegen Nebenströmungen weitgehend abgedichtet sein soll. Aus diesem Grund ist der Stator auch beiderseits mit rohrförmigen Ansätzen versehen, die mit ihren Gegenflächen die Funktion einer Spaltdichtung erfüllen.

Von der Entwicklung des TMFM 2,5 ist bekannt, daß alle Aufhänge-Verbindungen vollkommen reibungsfrei, aus Montagegründen aber einige auch einfach lösbar sein müssen. Aus diesem Grund

wurden die Federbeine in die Meßflansche eingeschrumpft, gegenüber dem Stator aber mit Dehnschrauben verschraubt.

Die beiderseits der Federn auf der Hauptträgheitsachse im Bereich des größten Biegemoments angeordneten Dehnmeßstreifen sind voll gekapselt und durch Punktschweißung sehr genau an der Feder befestigt. Ihre Zuleitung durch die Meßflansche ist druckdicht ausgeführt.

Um Temperatureinflüsse so klein wie möglich zu halten, ist die Umgebung der DMS durch einen wasserdurchflossenen Kupferkörper gekühlt. Die Schaltung der 6 DMS ist in /2/ beschrieben.

Die Dämpfung des Meßsystems erfolgt durch den am Stator befestigten quecksilbergefüllten Dämpfungsring, der aus Gründen unterschiedlicher Wärmedehnung zwischen Dämpfungsflüssigkeit und Gehäuse über eine Kapillare mit Ausdehnungsgefäßen verbunden ist. In diesen Dämpfungsring sind radiale Trennwände eingeschweißt, die mit Bohrungen versehen sind. Bei einem angeregten Schwingungsvorgang üben diese Wände auf das träge Quecksilber einen Druck aus, der zu einer Durchströmung der Bohrungen führt. Die dazu erforderliche Energie wird dem Schwingungsvorgang entzogen, was wiederum zu einer exponentiellen Amplitudenverkleinerung führt. Einzelheiten über Funktion und Konstruktion der Dämpfung sind in /5/ beschrieben.

Einen räumlichen Eindruck des im starren Mittelteil freischwingbar aufgehängten kompletten Stators mit Dämpfungsring vermittelt Abb. 9.

7.2 Die Abdichtung des Rotors und Stators gegen Umströmungen

Jeder Strömungsanteil, der nicht den vorgesehenen Weg durch die Stator- und Rotorbeschaufelung nimmt, verfälscht insbesondere im unteren Meßbereich den Meßwert. Um diese Leckagen um das Laufrad und insbesondere um den Stator zu vermeiden, wurden 2 Abdichtungsprinzipien angewandt.

Die Abdichtung des Rotors erfolgt über eine Gleitringdichtung mit einem metallimprägnierten Kunstkohlering, der über einen Kompensator auf eine Ringfläche der Eintrittseite des Laufrades angedrückt wird. Die Ausführung ist in den Abb. 7 und 10, jeweils obere Bildhälfte, ersichtlich.

Da der Stator das Gehäuse nicht berühren darf, wurde zur Abdichtung des Stators eine Spaltabdichtung gewählt, die in der Abb. 10 gezeigt ist. Die dabei in jedem Fall verbleibende Leckmenge kann durch folgende Faktoren beeinflußt werden,

- den Druckunterschied zwischen Spalteintritt, Stelle (1) und Spaltaustritt, Stelle (2) der Abb. 10
- der Spaltlänge
- der Spaltbreite bei gegebenem Umfang
- der Oberflächenausbildung entlang dem Spaltweg.

Da für den Druckunterschied der Unterschied der statischen Drücke zwischen 1 und 2 maßgebend ist, ist eine Beeinflussung durch konstruktive Maßnahmen möglich. Es ist z.B. denkbar, daß der statische Druck durch geschickte Wahl der dynamischen Druckanteile vom Gesamtdruck, erzielt durch entsprechende Querschnittsausführung bei 1 und 2, zumindest für einen Betriebspunkt gleich groß gemacht werden kann. Damit wäre ein Leckstrom ausgeschlossen.

Für die Spaltlänge bestehen konstruktive Grenzen, für die Ausführung der Spaltbreite fertigungstechnische und insbesondere solche betriebstechnischer Art.

Wesentlich beeinflussbar ist deshalb lediglich die Oberflächen-
ausbildung. Als beste der untersuchten Ausführungen hat sich
der glattwandige Ringspalt nach Abb. 10, obere Bildhälfte,
herausgestellt. Er war der in der unteren Bildhälfte gezeigten
Labyrinthdichtung bezüglich Gleichmäßigkeit über den gesamten
Betriebsbereich überlegen.

7.3 Die Strömungsführung

Entsprechend der Aufgabenstellung, die Druckverluste so klein
wie möglich zu halten, wurde auf die Strömungsführung beson-
derer Wert gelegt. Obwohl der Massenstrom zweiphasig ist und
hier je nach Strömungsart der auf das homogene Gemisch be-
zogene Zweiphasenreibungswert sehr unterschiedlich sein kann,
wurden für die Betrachtung der Druckverluste und zur Beurtei-
lung von konstruktiven Maßnahmen näherungsweise die Gesetz-
mäßigkeit für einphasige Strömung zugrunde gelegt. Angestrebt
wurden

- möglichst große Strömungsquerschnitte
- stetige Querschnittsübergänge
- Abrundung scharfer Kanten auf der Anströmseite
- optimale Krümmung mit leichter Beschleunigung der Strömung.

Ein Schnitt durch den Strömungskanal sowie der Strömungsquer-
schnitt über der mittleren Stromfadenlänge zeigt Abb. 11.
Als Ein- und Austrittsgeschwindigkeit im Auslegungspunkt sind
10 m/s bezogen auf kaltes Wasser zugrundegelegt.

Die größten Druckverluste liegen in den Schaufelgittern des
Rotors und des Stators, da hier die hydraulischen Radien re-
lativ klein sind. Es wurde jedoch auf gute Abrundung der Ein-
trittskanten geachtet. Die Strömungsumlenkung im Rotor und
nach dem Statoraustritt ist systembedingt. Im letzteren Be-

reich sowie bei der anschließenden Kanalaufteilung wurden die Querschnitte so ausgelegt, daß eine leichte Beschleunigung der Strömung auftritt. Die Kanalaufteilung erfolgte, um möglichst symmetrische Abströmverhältnisse ohne Druck-Rückwirkungen auf das Statorschaufelgitter zu erzielen. Die Dreiteilung des Ringkanals wurde durch Einbau von Strömungsleitkörpern erreicht, die jeden Teilstrom ohne Querschnittsprünge einer der drei schräg nach unten führenden Abströmleitung zuführen.

Die drei Teilströme wurden nach einer sanften 90° -Umlenkung in einem Formstück ohne Stoßverluste wieder zusammengeführt. Strömungsleitkörper und Abströmrohrleitungen sind in Abb. 12 dargestellt.

Eine Zusammenführung der Abströmrohrleitungen wäre natürlich auch ohne 90° -Umlenkung möglich. In diesem Fall könnte das TMFM in eine gerade, senkrechte Rohrleitung eingebaut werden.

7.4 Die Rotorlagerung

Der Rotor samt Welle, Lagerung und Gleitringdichtung ist in Abb. 13 dargestellt. Die Betriebsdrehzahl von $n = 1500$ 1/min liegt weit unterhalb der kritischen Drehzahl. Als Festlager ist im etwa auf Raumtemperatur liegenden Lagerflansch ein zweireihiges fettgeschmiertes Schrägkugellager angeordnet; als Loslager im Bereich erhöhter Temperatur dient ein wassergeschmiertes Kohlelager. Die Wasserschmierung erfolgt durch ein auf die Welle aufgesetztes Radialpumpenrad, das eine Wasser-Zirkulation aus dem Bereich der Kühlschlangen (siehe Abb. 6) durch die Lagerschmiernut und die Kühlwasserbohrung der Welle aufrechterhält.

Längenänderungen der Welle aufgrund von Temperaturunterschieden liegen innerhalb der vorgesehenen Spiele und können an der Laufradabdichtung vom Kompensatorbalg aufgenommen werden. Um einer Beschädigung des Rotors bei einer Blockierung z.B. durch

Fremdkörper vorzubeugen, ist die Welle hinter der Kupplung mit einer Soll-Bruchstelle versehen.

7.5 Abdichtung drucktragender Wandungsteile

Die Abdichtung der rotierenden Welle erfolgt über eine handelsübliche, kompakte Gleitringdichtung mit einer Gleitgeschwindigkeit von ca. 3,5 m/s. Als maximale Umgebungstemperatur müssen 75 °C eingehalten werden, was durch Einsatz einer doppelt gewendelten Kühlschlange um den Bereich der Gleitringdichtung erreicht wird.

Die Abdichtung der sonstigen Wandungsteile erfolgt über gummielastische Äthylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) Rundschnurdichtungen. Um gleichbleibende Anpreßkräfte zu erhalten, wurden für Gehäuse und Gehäusedehnschrauben Werkstoffe mit gleichem thermischem Ausdehnungsfaktor verwendet. Für die Abdichtung der Flansche wurden Flanschdichtungen aus Klingerit 1000 mit Drahtgewebe eingesetzt.

7.6 Fertigung

Aus dem Gesamtschnitt Abb. 6 lassen sich auch die fertigungstechnischen Anforderungen abschätzen. Die freie Aufhängung des Stators bei kleinstem Spalt erfordert genaue Passungen an spannungsarmen Werkstücken und insbesondere eine sorgfältige und geschickte Montage. Der zwischen Stator und Gehäuse vorgesehene radiale Spalt von 0,6 mm konnte mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm erreicht werden.

Besondere Aufmerksamkeit wurde der Fertigung der Schaufelkanäle von Rotor und Stator gewidmet. Abb. 14 zeigt die mit großer Genauigkeit gefertigten Schaufelgitter. Die Fertigung der 1,6 mm breiten relativ langen und tiefen Kanäle erforderte neben einer großen Erfahrung ein hohes Maß an handwerklicher Geschicklichkeit.

8. Betrieb des TMFM 50 im Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren von Zweiphasen-Massenstrom-Meßgeräten

Eich- und Testversuche für das TMFM 50 werfen insofern Probleme auf, da kein geeigneter Testkreislauf mit einem Durchsatz bis $50 \text{ kg/s} \approx 180 \text{ t/h}$ zur Verfügung steht. Selbst die eigens für das Testen und Kalibrieren von Zweiphasen-Massenstrom-Meßgeräten geschaffene Versuchseinrichtung für Luft-Wasser- sowie Dampf-Wasser-Strömung am Institut für Reaktorbauelemente (IRB) des KfK /7/, reicht in ihrer Kapazität nicht aus, den gesamten Meßbereich zu überdecken. So können dort mit einem Luft/Wasser-Gemisch max. 34 kg/s und bei einem Dampf/Wasser-Gemisch lediglich 5 kg/s Massendurchsatz erreicht werden.

Eine Eichung des TMFM ist also zunächst bis zur Fertigstellung des Versuchsstandes für instationäre Zweiphasenströmungen, der sich ebenfalls am IRB im Aufbau befindet, nur mit einem Luft/Wasser-Gemisch möglich. Mit einem Dampf/Wasser-Gemisch sind dagegen nur Warmfahrversuche mit praktisch 0-Durchsatz durchführbar.

Gleichwohl sind die Ergebnisse der Luft/Wasser-Versuche /9/ eine wertvolle Aussage, da sie unter den gleichen Versuchsbedingungen an derselben Anlage gewonnen wurden, an der auch alle übrigen bekannten und aussichtsreichen Meßverfahren zur Erfassung einer Zweiphasenstrom-Messung getestet wurden /8/. Somit ist ein Vergleich und eine Wertung des TMFM 50 im Hinblick auf die anderen zur Verfügung stehenden Meßgeräte möglich.

8.1 Vergleich der theoretischen mit der statisch aufgenommenen Kennlinie

Entsprechend der Gleichung 5 - 26 ergibt sich für den Nenndurchsatz $\dot{m} = 50 \text{ kg/s}$ ein Meßsignal von 2192 mV . Der Vergleich der theoretischen Kennlinie mit der statisch, durch Gewichtsbelastung des Meßsystems gemessenen Kennlinie, ist in der Abb. 15 dargestellt. Die Prüfeinrichtung zur Ermittlung der statischen Kenn-

linie sowie die Meßmethode ist in /5/ näher beschrieben. Die so gemessene Kennlinie verläuft ohne Hysterese streng linear und es ergibt sich beim Nenndurchsatz $\dot{m} = 50 \text{ kg/h}$ entsprechend dem Statormoment $M_a = 59,7 \text{ Nm}$ und einer Gewichtsbelastung pro Federarm von

$$p_A = \frac{M_a}{3} \cdot \frac{1}{r_{AS}} = \frac{59,7}{3} \cdot \frac{1}{0,112} = 18,1 \text{ kp}$$

eine Anzeige von

$$U_{MG} = 2130 \text{ mV, daraus}$$

$$U_{MG} = 42,6 \cdot \dot{m} \text{ (mV)} \quad (8-1)$$

Die Abweichung der berechneten zur statisch aufgenommenen Kennlinie, bei der also Strömungsvorgänge noch ausgeschlossen sind, von 62 mV beim Nenndurchsatz von 50 kg/s entspricht etwa - 1,5 kg/s und ist auf die im Kapitel 5.8 angegebenen Gründe zurückzuführen.

Bei den folgenden Betrachtungen der Meßkurven wird beim Vergleich mit der theoretischen Kennlinie auf die mit Gewichtsbelastung gefundenen Kennlinie (U_{MG}) bezogen.

8.2 Eichmessung mit stationärer Zweiphasen-Strömung Luft/Wasser

Das TMFM 50 wurde in dem in /7/ näher beschriebenen Zweiphasen-Luft-Wasser-Versuchsstand an der im Schema Abb. 16 gezeigten Stelle eingebaut. Die Massenströme wurden vor der Mischkammer einphasig und getrennt über Drosselblenden und Hg-Manometer bestimmt. Für beide Phasen waren jeweils zwei Meßstrecken NW 100 und N 50 und jeweils 3 Blendengrößen vorhanden, deren Meßbereiche sich teilweise überdeckten.

Die Eichversuche wurden einphasig und zweiphasig bis zu einem x-Gehalt von 18 % bei einem Systemdruck auf der Eingangsseite von 4 bar durchgeführt.

Der Dampf (Gas-) gehalt \dot{x} ist als Quotient von Dampfmassenstrom \dot{m}_G und Gesamtmassenstrom \dot{m} definiert.

$$\dot{x} = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}} = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_L + \dot{m}_G} \quad (8-2)$$

mit \dot{m}_L = Flüssigkeitsmassenstrom

Analog zu den übrigen Testversuchen anderer Zweiphasen-Massenstrom-Meßsysteme wurden die Meßpunkte der Blendenmessung, die mit einer Genauigkeit von $\pm 1,5 \%$ (DIN 1952, Entwurf Okt. 1980) abzuschätzen wäre, als Absolutwerte angesehen, um eine objektive Vergleichsbasis zu schaffen.

Sobald die Meßabweichungen der zu testenden Geräte in die Nähe der Eichpunktgenauigkeit kommt, erhebt sich natürlich die Frage, ob ein solches Vorgehen noch gerechtfertigt ist.

Die Ergebnisse der ersten Messungen ergaben zwischen zweiphasigen und einphasigen Massenströmen insbesondere im unteren Meßbereich etwas unterschiedliche Kennlinien. Daraufhin wurde die Schaufelzahl des Rotors von 136 auf 68 geändert.

Diese Maßnahme beeinflusste die Zweiphasenkennlinie nicht, schob aber die Einphasenkennlinie nahe an die Zweiphasenkennlinie heran. Alle weiteren Versuche wurden mit dieser reduzierten Rotorschaufelzahl bei sonst gleichbleibenden Abmessungen des Gesamtmeßsystems durchgeführt.

In der Abb. 17 sind die Massenstromsignale des TMFM 50, und zwar die statisch durch Gewichtsbelastung gewonnenen Werte U_{MG} , die im stationären Strömungszustand einphasig mit reiner Flüssigkeit U_{ME} und zweiphasig ab einem x -Gehalt über 0,35 % gewonnenen Meßpunkte U_{MZ} in Abhängigkeit des über die Blendenmessungen gewonnenen Massendurchsatzes aufgetragen.

Der Unterschied zwischen der statisch gewonnenen Geraden und den bei einer realistischen Strömung erhaltenen Meßpunktskurve ist in der Umströmung des Stators und in Ablöseerscheinungen an den Schaufeln zu suchen.

Soweit die Eichmessungen zweiphasig möglich waren, also bis etwa zu einem Gesamtmassenstrom von 25 kg/s, ergeben die Meßpunkte eine exakte Gerade über den gesamten Meßbereich, sofern der x-Gehalt des Zweiphasengemisches größer 0,35 % betrug.

Das Meßsignal U_{MZ} läßt sich dafür angeben.

$$U_{MZ} = 39,496 \cdot \dot{m} + 10 \text{ (mV)} \quad (8-3)$$

oder

$$\dot{m} = \frac{U_{MZ} - 10}{39,496} \text{ (kg/s)} \quad (8-4)$$

Wenn nun die Strömungsart einphasig oder zweiphasig mit beliebigem x-Gehalt nicht bekannt ist, so muß in dem durch die Eichversuche für beide Strömungsformen abgedeckten Durchsatzbereich auf eine mittlere Gerade bezogen werden, die mit

$$U_M = 39,400 \cdot \dot{m} + 30 \text{ (mV)} \quad (8-5)$$

oder

$$\dot{m} = \frac{U_M - 30}{39,400} \text{ (kg/s)} \quad (8-6)$$

beschrieben wird.

In der Abb. 18 ist diese allgemein gültige Kennlinie, in der alle ein- und zweiphasigen Meßpunkte eingetragen sind, aufgetragen.

Sie ist immer dort anzuwenden, wenn über den Zustand der Strömungsart keinerlei Aussage gemacht werden kann.

In besonderen Fällen können, wie in den folgenden Kapiteln gezeigt wird, speziell gültige Kennlinien angegeben werden, die eine verfeinerte Aussage über den jeweiligen Massenstrom erlauben.

8.3 Eichmessungen mit stationärer Einphasen-Strömung Wasser

Bei reinem einphasigem Testbetrieb mit Wasser, hierbei waren Massendurchsätze bis 36 kg/s möglich, liegen die Meßpunkte auf zwei Geraden, und zwar in einem Massenstrombereich von 0 bis 21,5 kg/s

$$U_{ME} = 38,888 \cdot \dot{m} + 50 \quad (\text{mV}) \quad (8-7)$$

und innerhalb des Massenstrombereiches von 21,5 bis 36 kg/s

$$U_{ME} = 42,857 \cdot \dot{m} - 32,5 \quad (\text{mV}) \quad (8-8)$$

Im Massenstrombereich über 21,5 kg/s liegt die einphasige Kennlinie, wie aus der Abb. 17 zu entnehmen ist, nahezu parallel zur theoretischen Kennlinie mit einem Nullpunktversatz von - 32,5 mV.

8.4 Abhängigkeit der Massenstromanzeige vom x-Gehalt der Zweiphasenströmung

Die wenn auch geringen unterschiedlichen Anzeigen bei einphasigem und zweiphasigem Testbetrieb gaben Anlaß dazu, die Abhängigkeit der Massenstromanzeige vom x-Gehalt (Gl. 8-2) näher zu untersuchen. Dazu wurden bei konstantem Gesamtmassenstrom \dot{m} der Luft-Teilstrom \dot{m}_G variiert.

Die Meßkurve für verschiedene Massenströme \dot{m} in Abhängigkeit des x-Gehaltes sind in der Abb. 19 aufgezeigt.

Auf der linken Ordinaten sind bei $x = 0,01 \%$ die Grenzwerte der reinen Einphasenströmung und auf der rechten Ordinaten die Meßwerte bei $x > 10 \%$ des jeweiligen Massenstromparameters \dot{m} eingetragen.

Die Meßkurven lassen erkennen, daß über einem x-Gehalt von 0,0035 entsprechend 0,35 % ein merkbarer Einfluß auf das Massenstromsignal nicht mehr gegeben ist. Dies gilt auch unabhängig davon, welche Strömungsform (Blasen-, Pfropfen-, Ring- oder Nebelströmung) in der dem TMFM vorgeschalteten Rohrstrecke vorlag.

Die Abweichungen im Bereich von $x = 0,35 \%$ bis zum Einphasenbetrieb (Flüssigkeit), gehen alle in Richtung eines positiven Meßsignales.

8.5 Genauigkeit der Massenstrommessung mit dem TMFM 50

Unbekannte Strömungsart

Bei völliger Unkenntnis des x-Gehaltes eines zu messenden Massenstromes entsprechend Abb. 18 muß die allgemeingültige Gleichung 8-6 angewandt werden. In Abb. 20 ist der relative Fehler

$$\frac{\dot{m} - \dot{m}_R}{\dot{m}_{\max}} \cdot 100 \text{ in } \% \quad (\dot{m}_{\max} = 50 \text{ kg/s})$$

der Meßpunkte aus Abb. 18 über dem Referenzmassenstrom \dot{m}_R aufgetragen.

Der Fehler beträgt maximal $\pm 1,3 \%$.

Gibt es Anhaltspunkte über die Größe des x-Gehaltes, so kann der Fehler noch eingeschränkt werden.

Einphasenströmung (Flüssigkeit)

Bei reiner Einphasenströmung $x = 0$, entsprechend den in Abb. 17 mit einem Kreuz (+) gekennzeichneten Meßpunkten, gelten entsprechend den Meßbereichen die Gleichungen 8-7 und 8-8. Der relative Fehler der zugehörigen Meßpunkte ist in Abb. 21 Mitte aufgetragen.

Er beträgt maximal $\pm 0,5 \%$.

Zweiphasenströmung $x > 0,35\%$

Hierzu gehören die in Abb. 17 mit einem Kreis (o) gekennzeichneten Meßpunkte. Die zugehörige Gleichung ist 8-3. Der relative Fehler der Meßpunkte ist in Abb. 21 unten aufgetragen.

Er beträgt maximal $\pm 0,5\%$.

Zweiphasenströmung $0 < x < 0,35\%$

In der Abb. 22 und 23 ist der auf die Gleichung 8-3 der Zweiphasenströmung bezogene relative Fehler der Meßpunkte über dem x-Gehalt aufgetragen. Man erkennt insbesondere in Abb. 23 deutlich, daß lediglich in dem Bereich $0 < x < 0,35\%$ eine Abweichung über $+ 0,5\%$ auftritt.

Bei bekanntem x-Gehalt in diesem Bereich kann jedoch zur Verkleinerung der Fehlerbandbreite eine Korrektur vorgenommen werden. Dies geschieht derart, daß vom angezeigten Massenstrom der von der 0-Linie abweichende Betrag entsprechend der Abb. 23 abgezogen wird.

Z.B. bei $x = 0,1$ ein Abzug von $1,25\%$.

Der so erhaltene Wert des Massenstromes ist dann nur noch mit einem relativen Fehler von

maximal $\pm 0,5\%$ behaftet.

8.6 Druckverlust beim Durchströmen des TMFM 50

Die Abb. 24 zeigt die bei den Testversuchen mit Luft/Wasser-Betrieb aufgenommenen Druckverlustmeßwerte, gemessen zwischen dem zentralen senkrechten Eingangsstutzen zum TMFM und einem der waagrecht liegenden Austrittsrohre. Die Meßwerte wurden mit Absolutdruckmanometern und einem Differenzdruckaufnehmer, Meßbereich $0 - 1$ bar aufgenommen und umfassen neben dem zwei-

phasigen auch den einphasigen Betrieb mit reiner Flüssigkeit. Wie die Meßwerte erkennen lassen, wirkt das TMFM 50 in einem bestimmten Betriebsbereich als Pumpe mit einer Druckerhöhung bis etwa 0,6 bar.

In dem an dem Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren für Zweiphasen-Massenstrom-Meßgeräte möglichen Betriebsfeld wurden je nach eingestelltem x-Gehalt Druckerhöhungen bis 0,6 bar und Druckverluste bis 1,4 bar über das TMFM gemessen.

9. Schlußbetrachtung

Mit dem True Mass Flow Meter TMFM 50 steht ein Meßgerät zur Bestimmung des Massenstromes in einer beliebigen Zweiphasenströmung zur Verfügung, dessen besonderer Vorteil in einer unmittelbaren direkten Massenstromanzeige bei gleichzeitiger hoher Genauigkeit liegt.

Die Anzeige ist innerhalb des angegebenen Fehlerbandes von $\pm 1,3 \%$ unabhängig von der Strömungsart und der Strömungsform.

Der Druckverlust über das TMFM 50 hält sich für ein "mechanisches Meßgerät" seiner Größenordnung in vertretbaren Grenzen.

Das TMFM 50 eignet sich aufgrund seiner hohen Genauigkeit besonders als Referenzmeßgerät in Test- und Eichversuchskreisläufen für Zweiphasenstrom-Meßgeräte.

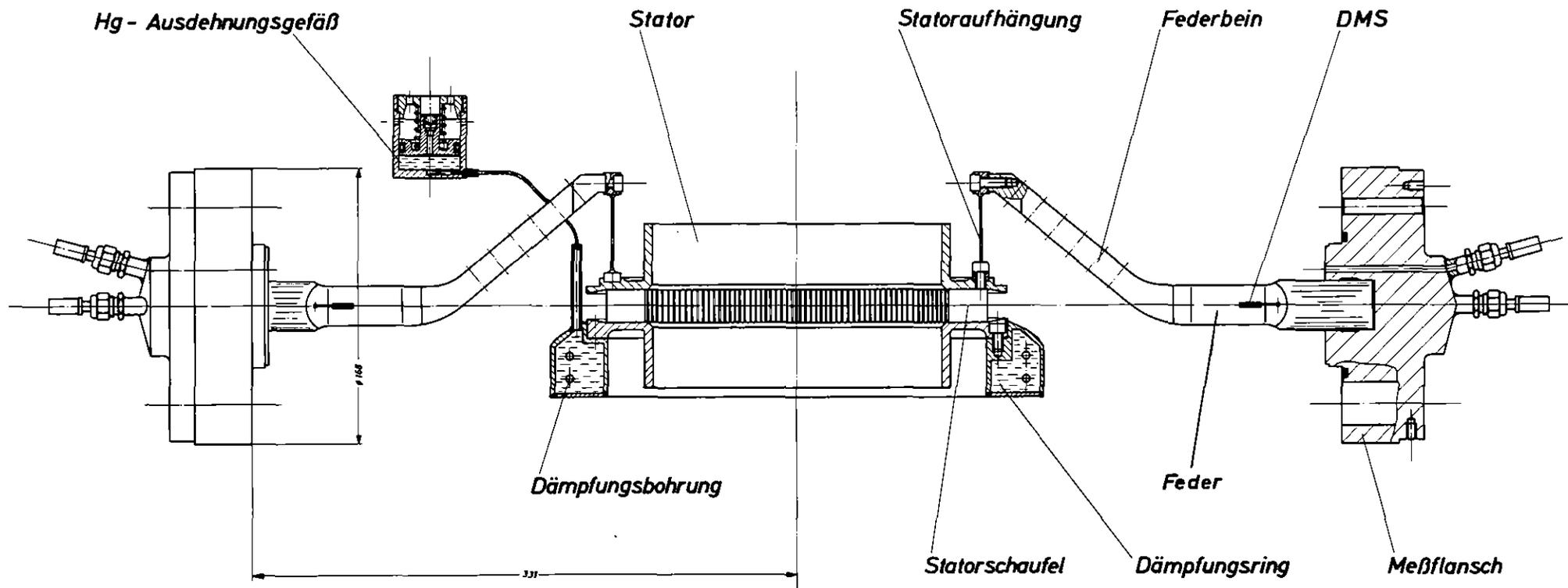
Die mögliche Kombination des TMFM 50 mit einem Meßgerät bzw. Meßverfahren zur Bestimmung der momentan vorliegenden Strömungsform der Zweiphasenströmung (Blasen-, Schwall-, Kolben-, Pfropfen-, Ring- oder Nebelströmung) läßt eine vollständige Erfassung hoher Qualität beliebiger, auch transienter Zweiphasenströmungen erwarten.

Der nicht unerhebliche mechanische Aufwand beim TMFM 50 ist zu einem großen Teil auf die scharfen Betriebsbedingungen von 160 bar und 620 K zurückzuführen.

Literaturverzeichnis

- /1/ G. Class, K.Hain:
COSIMA - Gesteuerte Blowdown-Versuche zum LWR-Brennstabverhalten
KfK-Nachrichten, Jhg. 10, Heft 2/78, S. 39-48
- /2/ G. Class, K. Hain, F. Schloß, K.H. Wagner:
True Mass Flow Meter - Entwicklung und Einsatz eines Massenstrom-Meßgerätes für instationäre Zweiphasenströmungen, KfK-Bericht 2790, Juli 1979
- /3/ K. Hain, unveröffentlichter Bericht des KfK, 1978
- /4/ C. Pfeleiderer:
Strömungsmaschinen
4. Auflage, Springer Verlag, S. 45 - 48
- /5/ K. Hain, F. Brüderle, W. Butzer, F. Schloß, T. Vollmer:
Flüssigkeitsdämpfung der Statorschwingungen am True Mass Flow Meter 50, KfK-Bericht 3031, September 1980
- /6/ K. Wagner, T. Vollmer, unveröffentlichter Bericht des KfK, 1979
- /7/ H. John, J. Reimann:
Gemeinsamer Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren verschiedener Zweiphasen-Massenstrommeßverfahren
KfK-Bericht 2731B, Februar 1979
- /8/ J. Reimann, H. John, U. Müller:
Zweiphasenmassenstrom-Messungen - Ein Vergleich verschiedener Meßverfahren
KfK-Bericht 3070, Februar 1981
Sammlung der Vorträge zum Jahreskolloquium 1980 des Projektes Nukleare Sicherheit

/9/ H. John, K. Hain, F. Brüderle, J. Reimann, F. Schloß:
Test des Massenstrom-Meßgerätes TMFM 50 für Zweiphasen-
strömungen, KfK-Bericht 3215, Oktober 1981



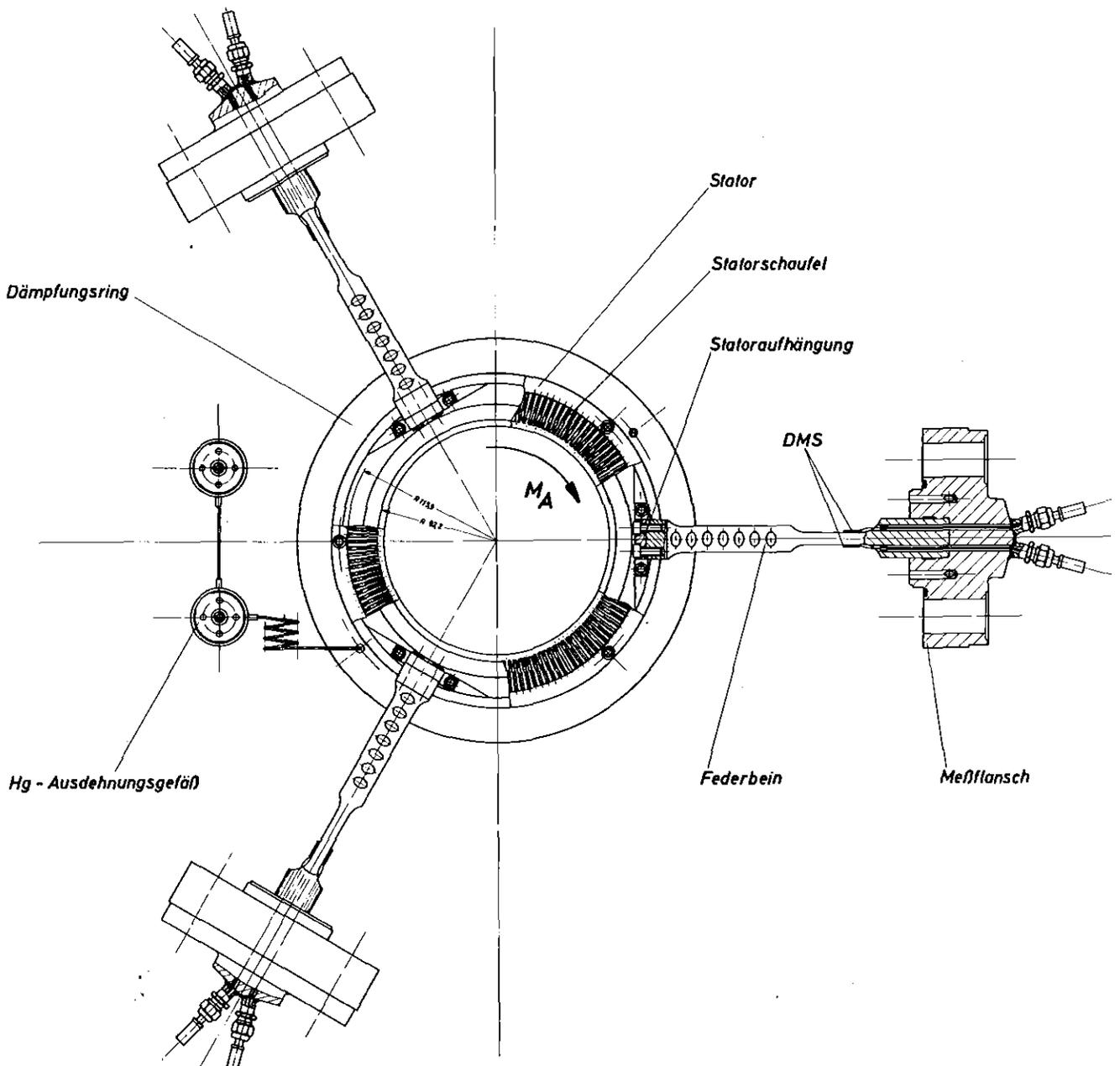
— 35 —



IT 1980

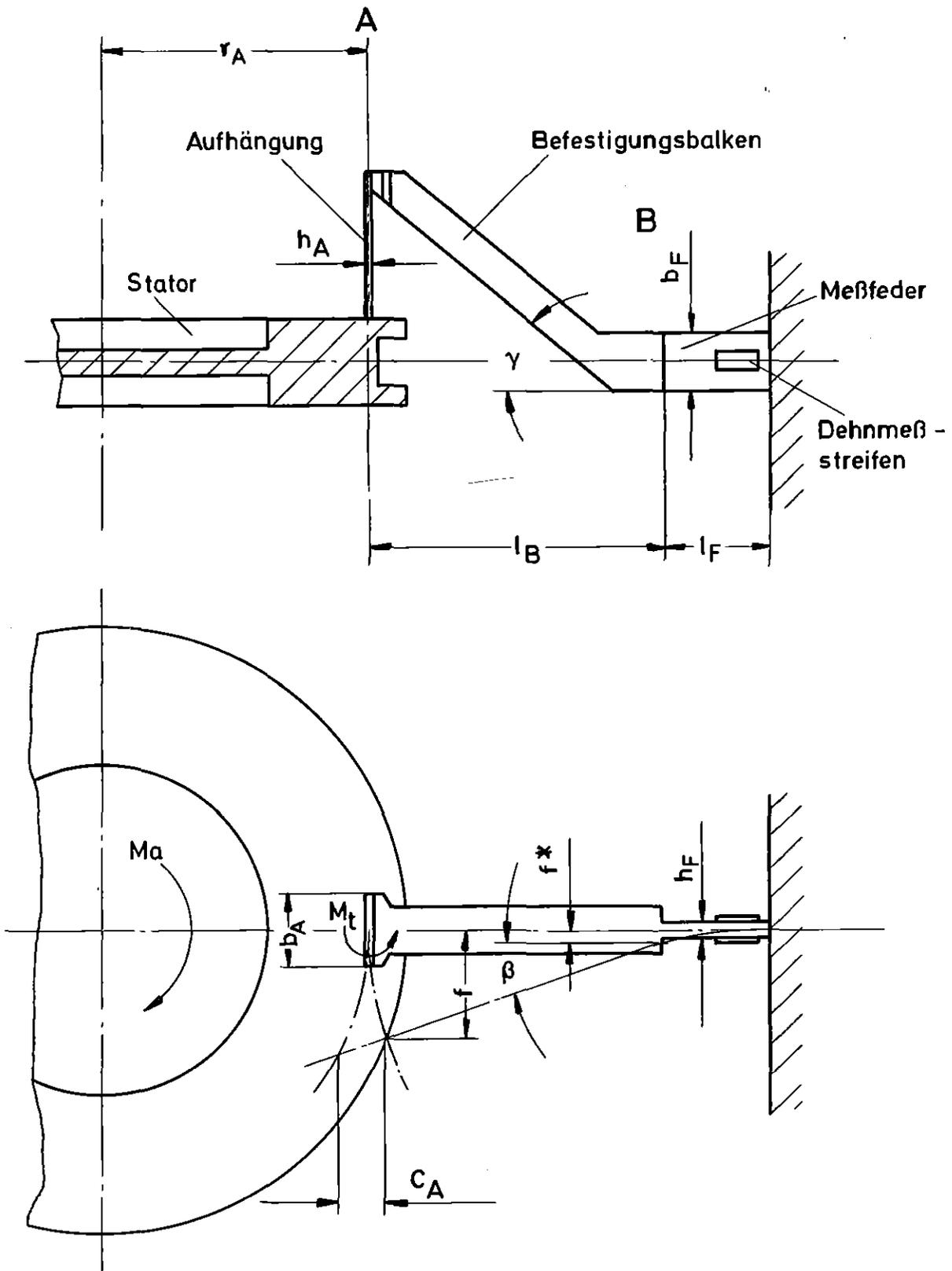
TMFM 50-MESSYSTEM
 STATOR MIT DÄMPFUNGRING UND FEDERBEINE - ANSICHT

ABB. 2



TMFM 50-MESSYSTEM

STATOR MIT DÄMPFUNGSRING UND FEDERBEINE - DRAUFSICHT



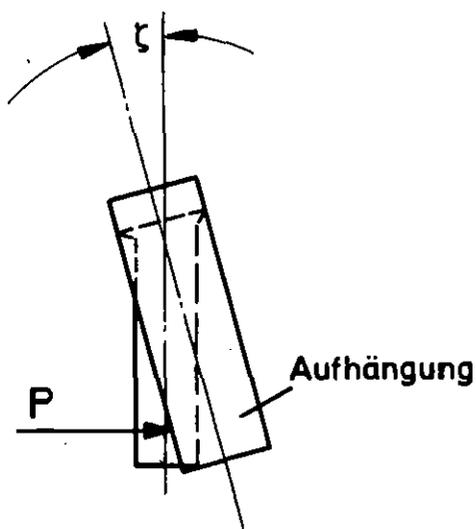
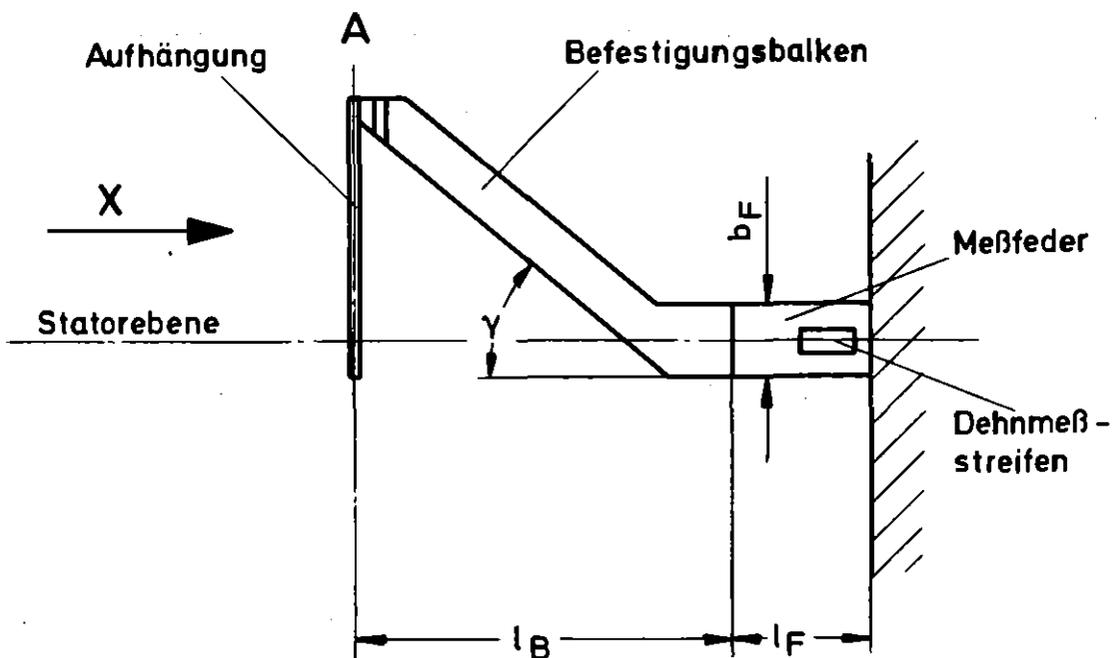


Abb. a

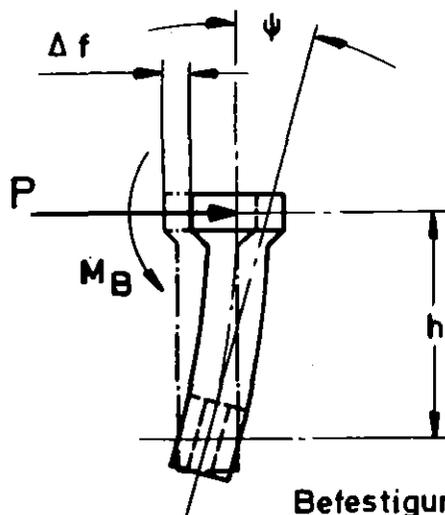
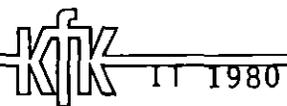
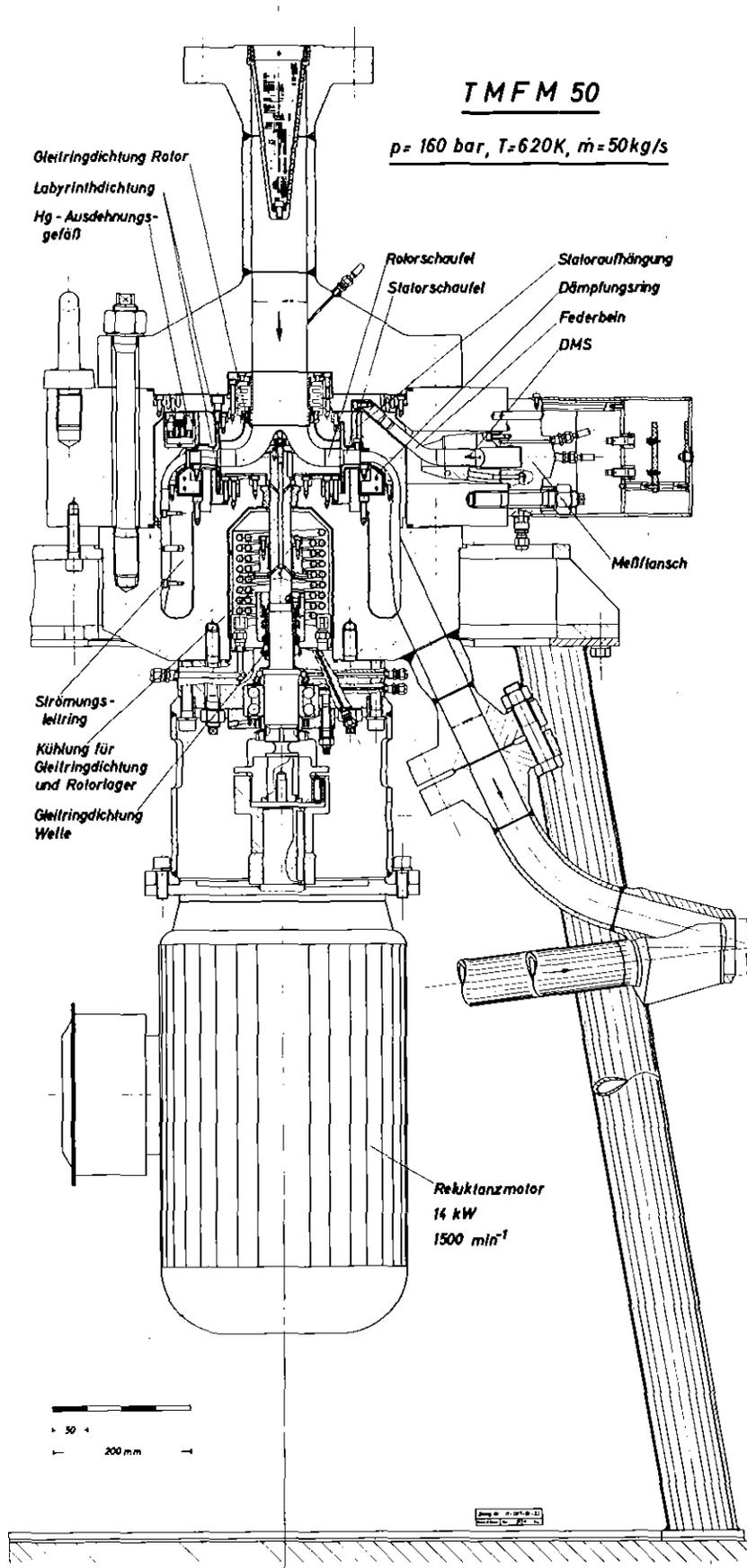


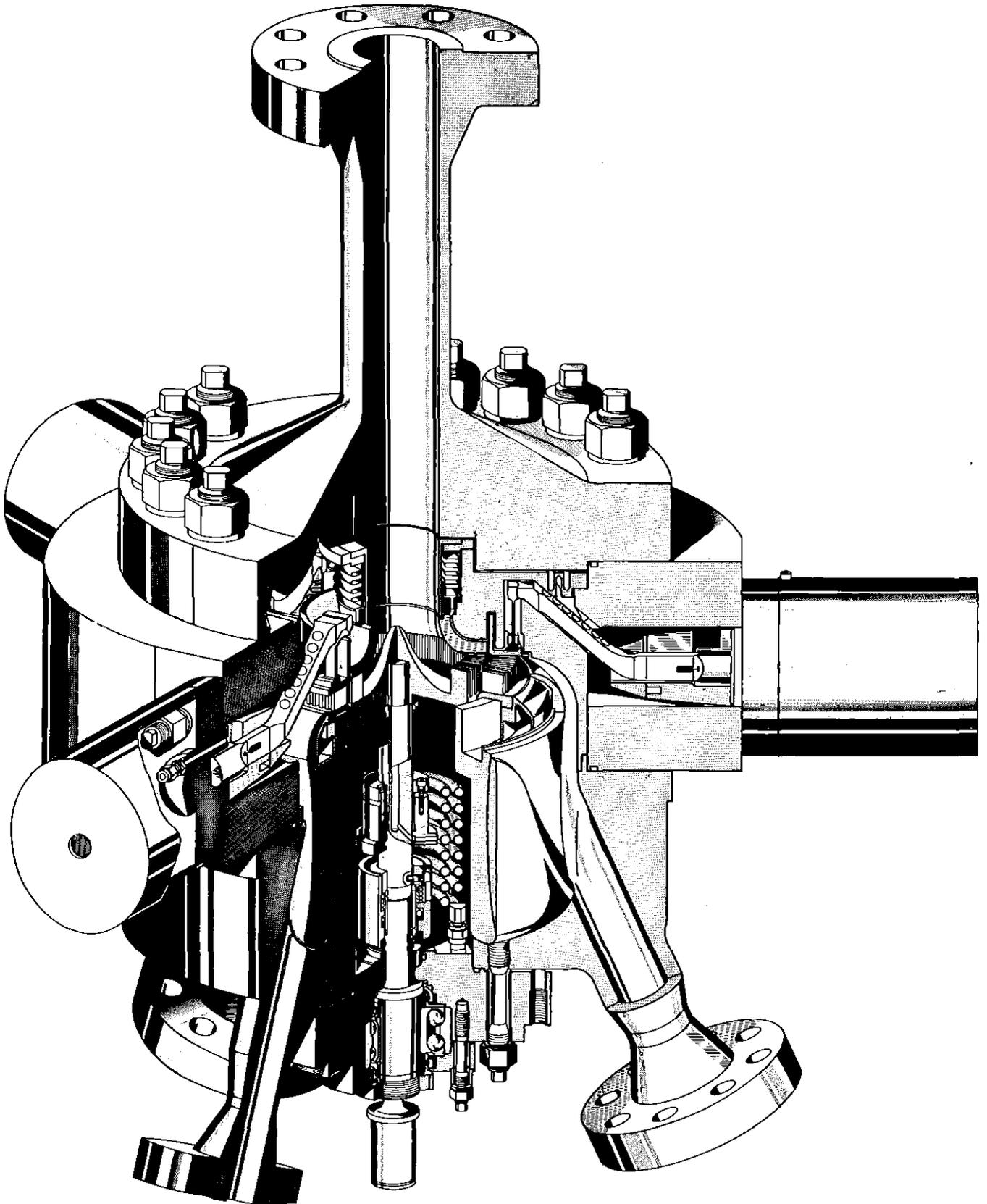
Abb. b

Befestigungsbalken
(ohne Aufhängung gezeichnet)

Ansicht in Richtung X



TMFM 50 - TRUE MASS FLOW METER
GESAMTSCHNITT

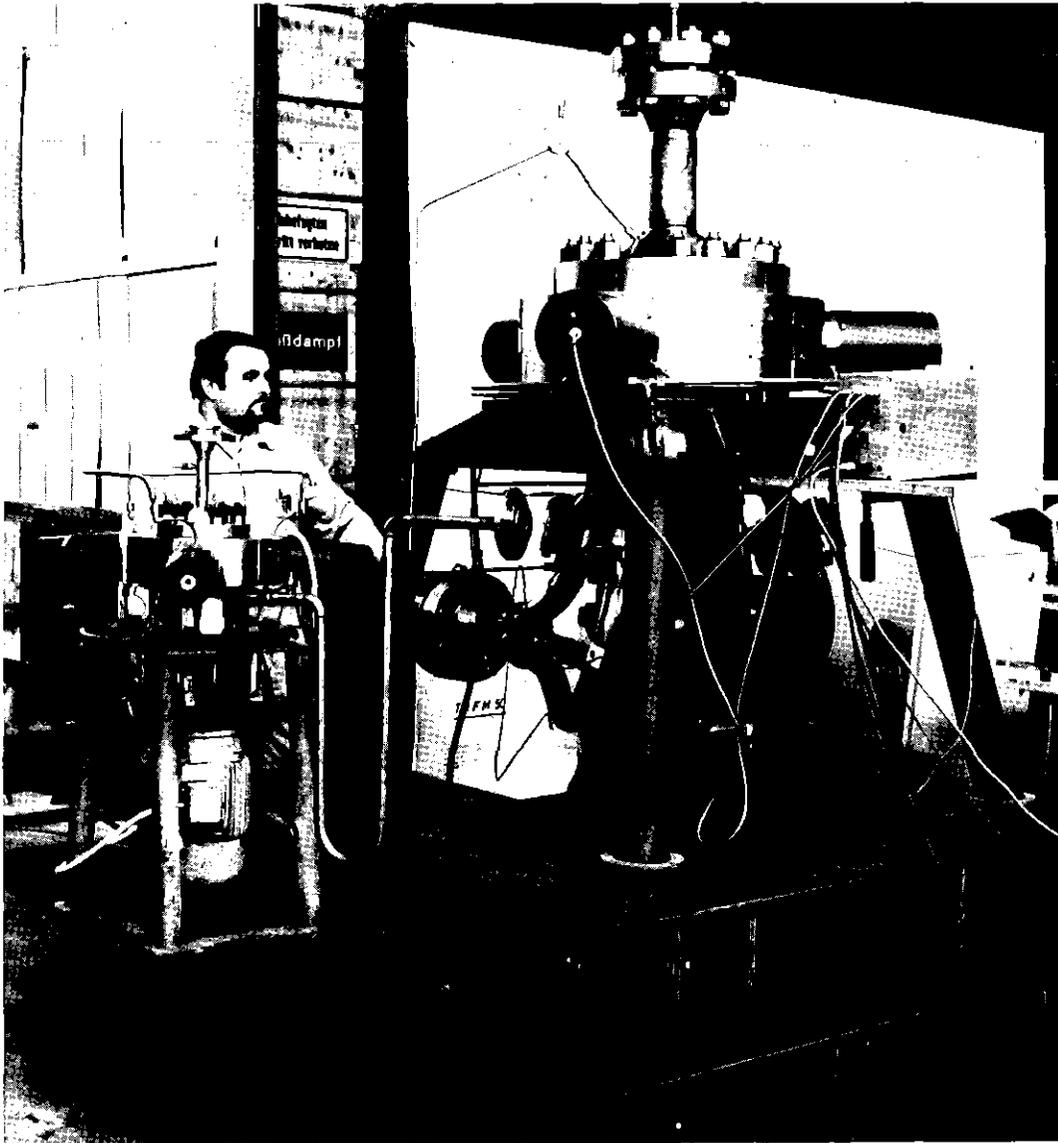


KfK

IT 1980

ZWEIPHASENSTROM-MESSGERÄT TRUE MASS FLOW METER, TMFM 50
 $\dot{m} = 50 \text{ kg/s}$, $p = 160 \text{ bar}$, $t = 620 \text{ K}$

ABB. 7



Linke Bildseite: TMFM 2,5
Meßbereich \dot{m} = 2,5 kg/s
NW 20

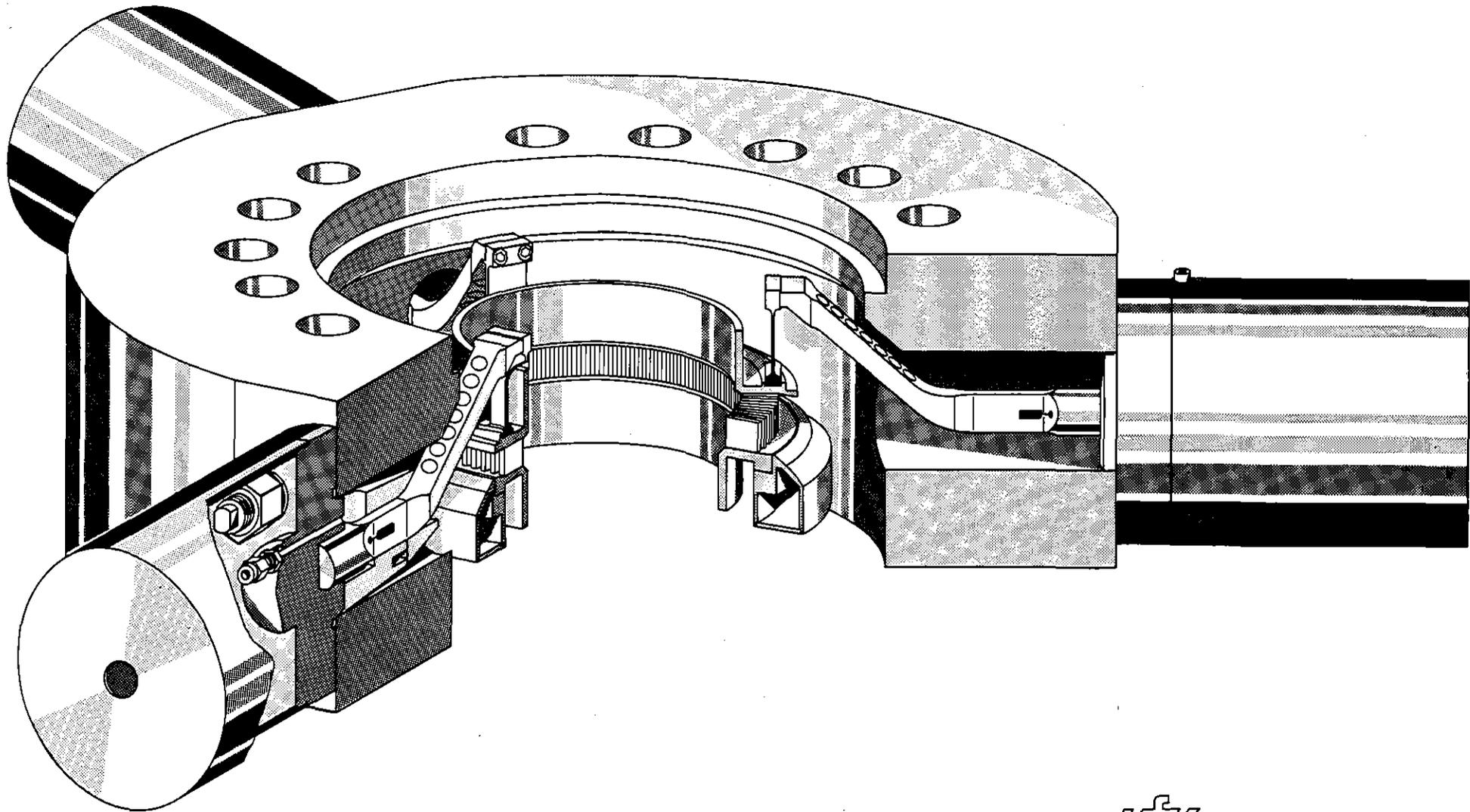
Rechte Bildseite: TMFM 50
Meßbereich \dot{m} = 50 kg/s
NW 80

KfK IT - 1980

ZWEIPHASEN-MASSENSTROMMESSGERÄTE TMFM 2.5 UND TMFM 50

$p = 160 \text{ bar}$, $T = 620 \text{ K}$

ABB. 8

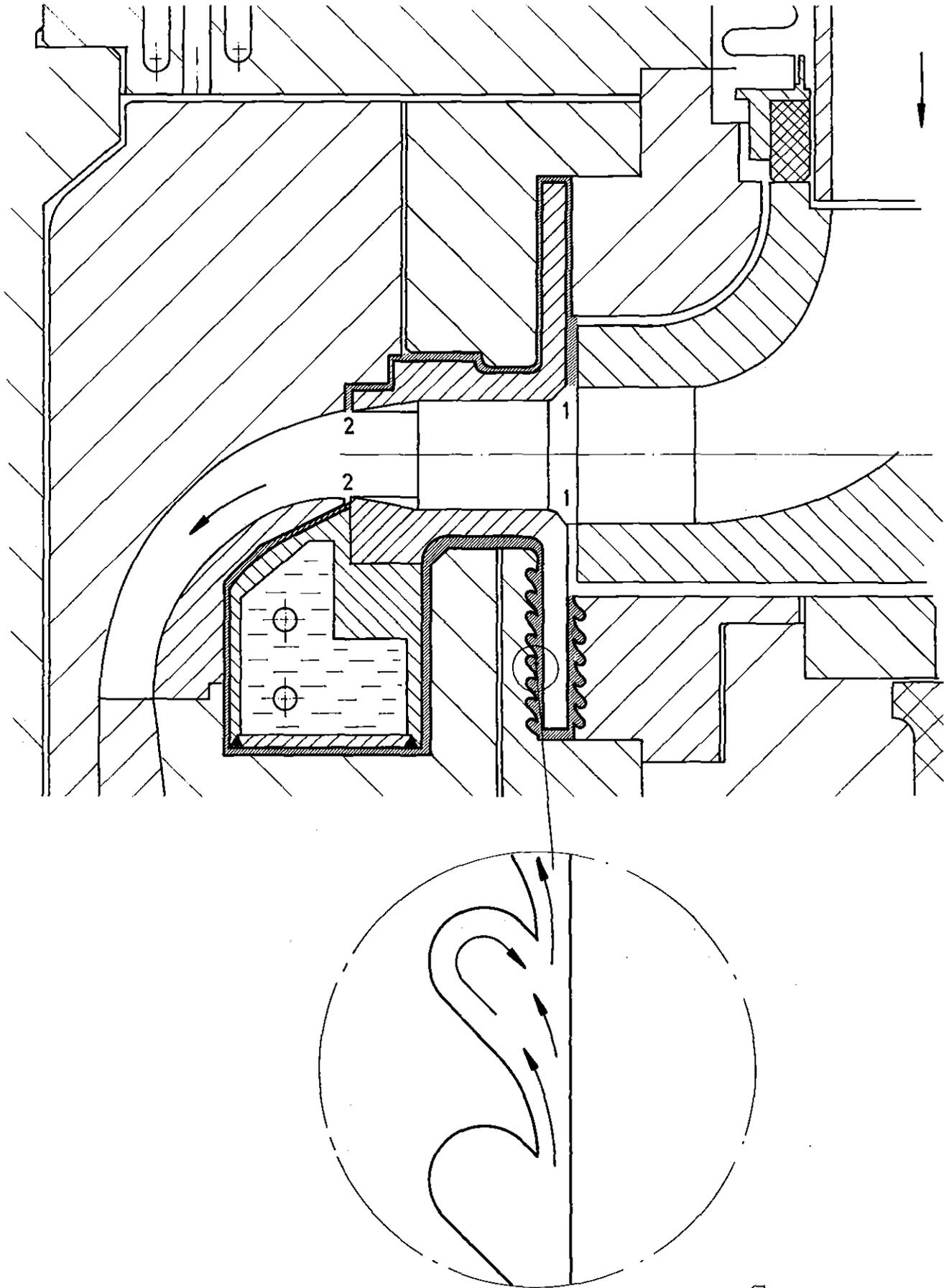


IT - 1980

TMFM 50 - TRUE MASS FLOW METER, DREHMASSE-FEDERSYSTEM

Stator mit Dämpfungsring und Federbeine

ABB. 9

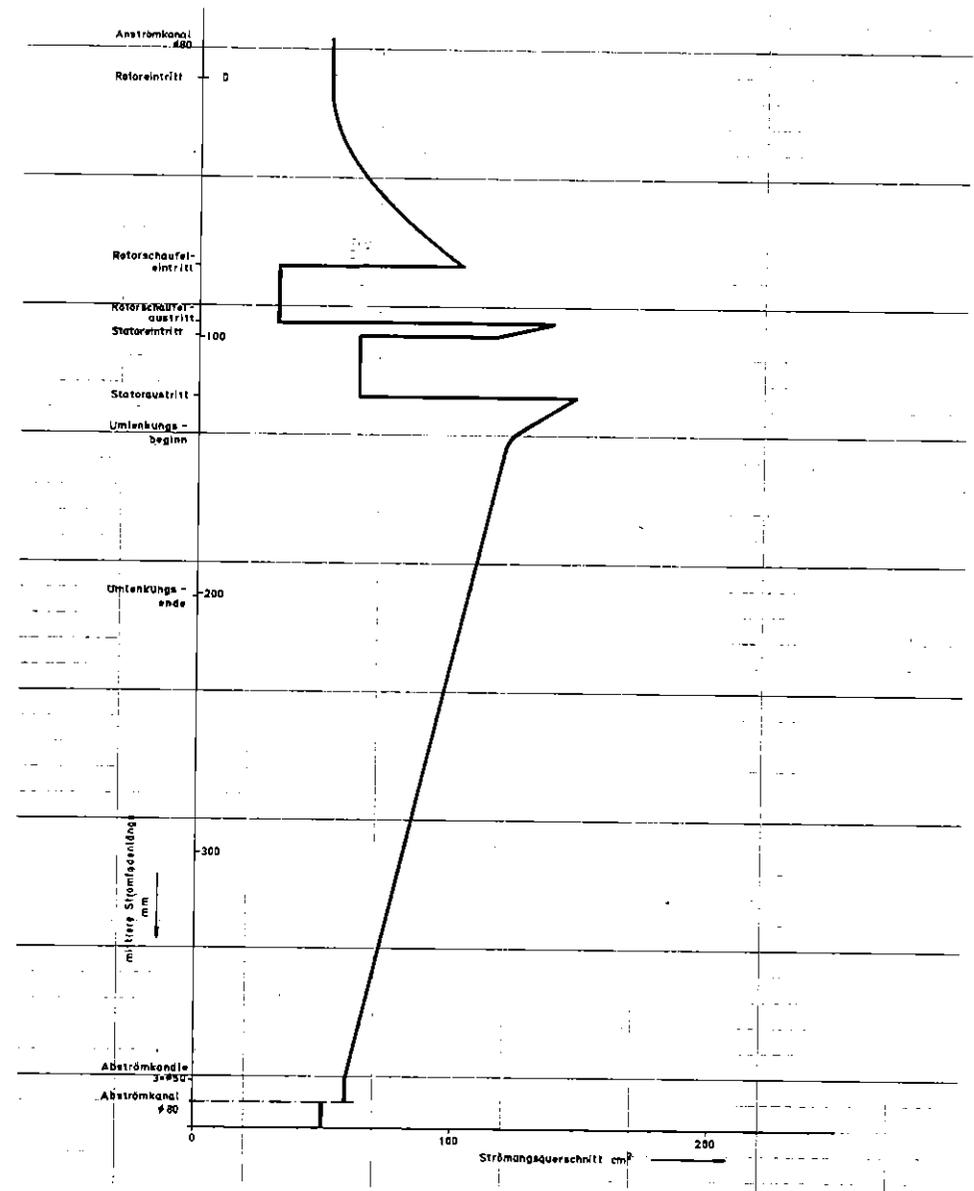
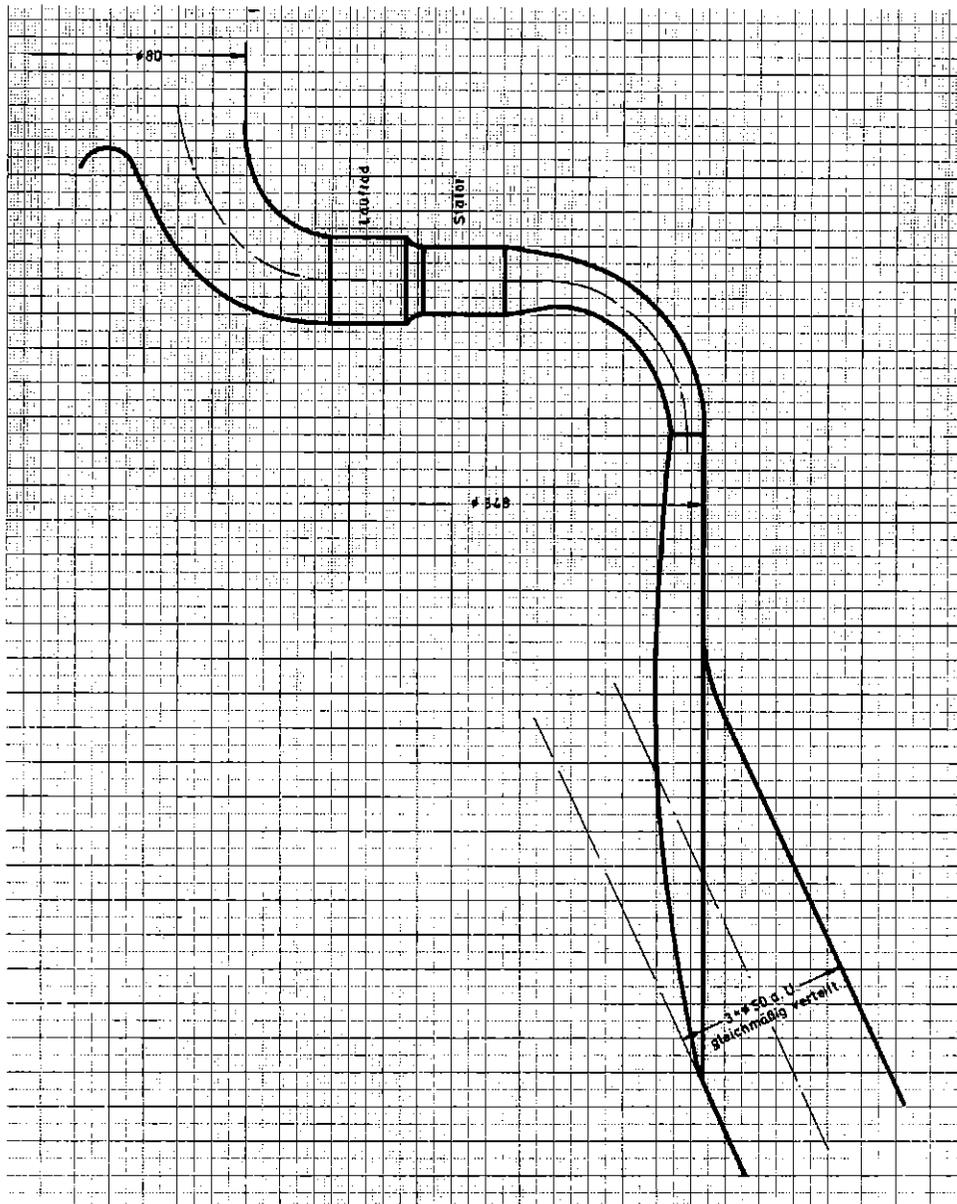


kfk IT 1981

TMFM 50 - ABDICHTUNG DES ROTORS UND STATORS

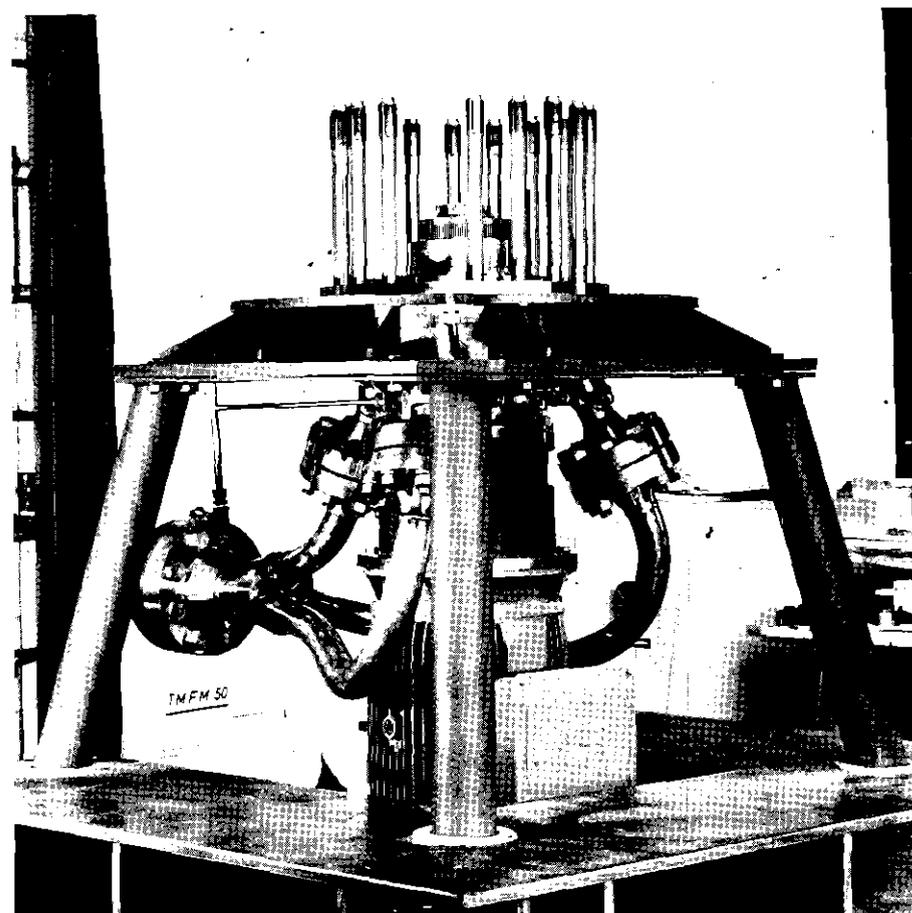
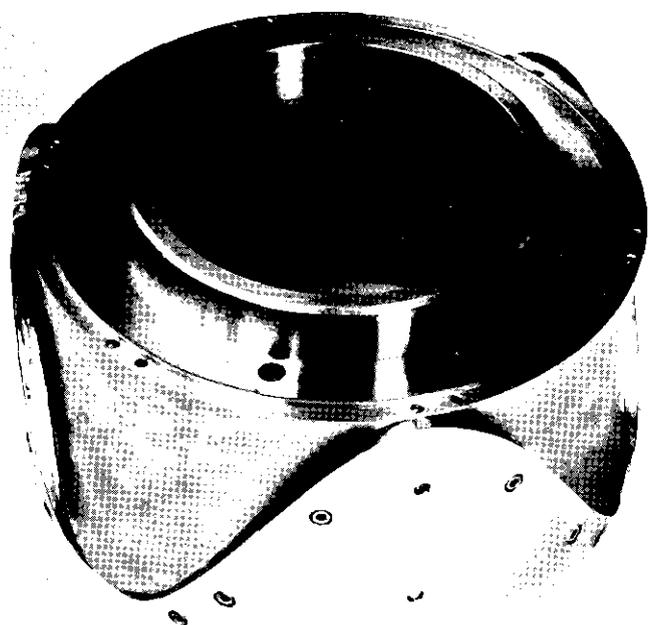
ABB. 10

STATOR OBEN MIT SPALTDICHTUNG, UNTEN MIT LABYRINTHDICHTUNG



TMFM 50 - SCHNITT DURCH DEN STRÖMUNGSKANAL (LINKS) UND
STRÖMUNGSQUERSCHNITT ÜBER DER MITTLEREN STROMFADENLÄNGE (RECHTS)

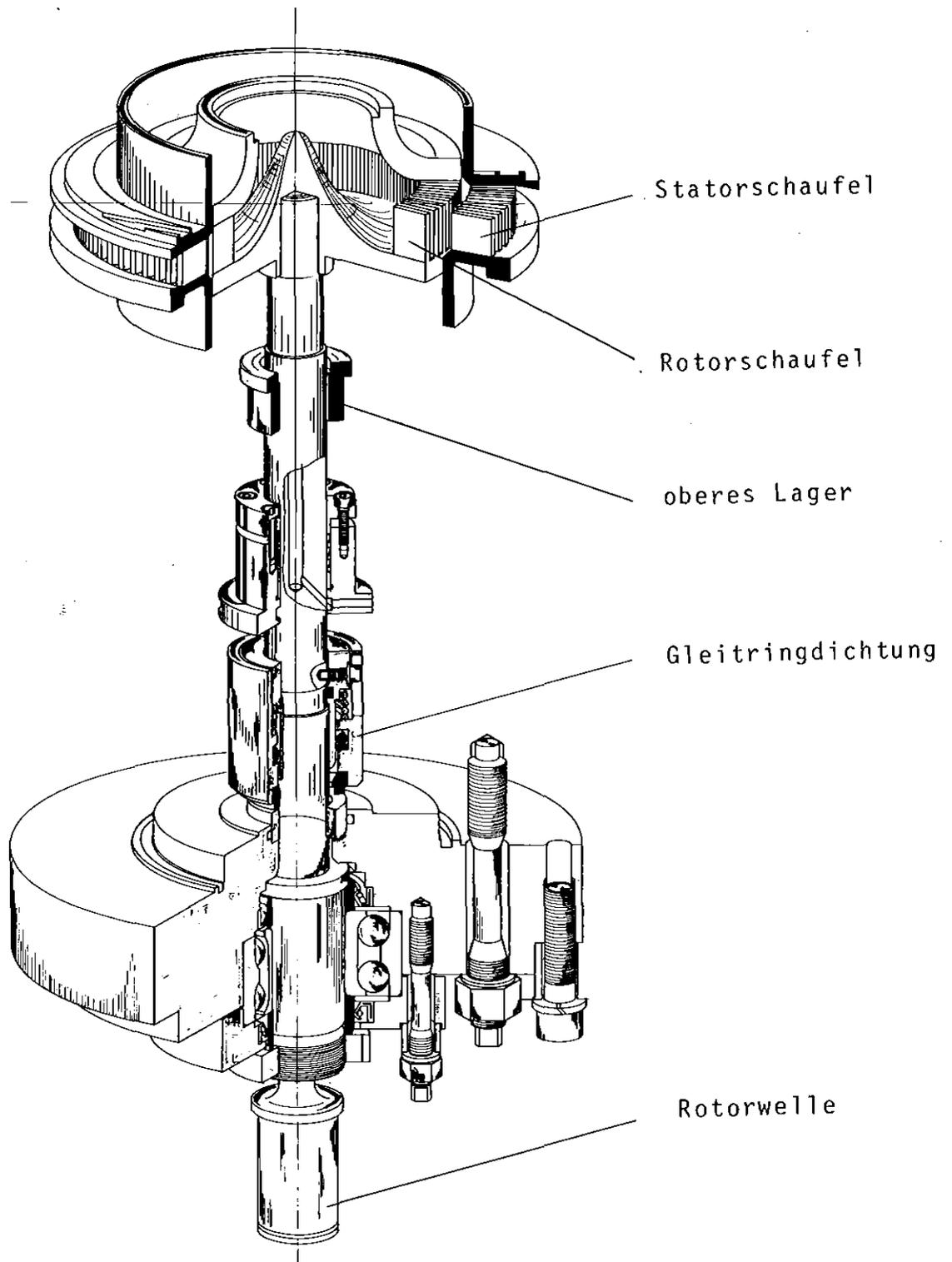
ABB. 11



TMFM 50 - LEITKÖRPER ZUR DREITEILUNG DES MASSENSTROMES
UND ABSTRÖMROHRLEITUNGEN

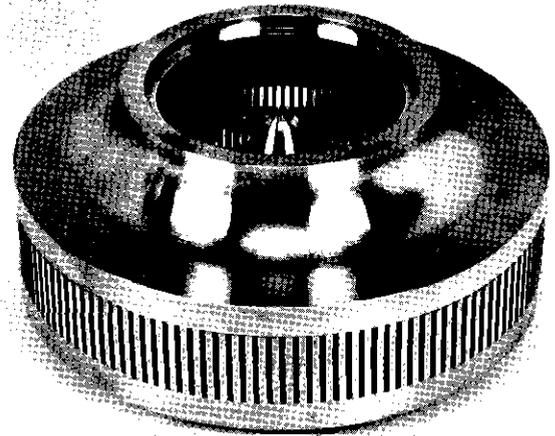
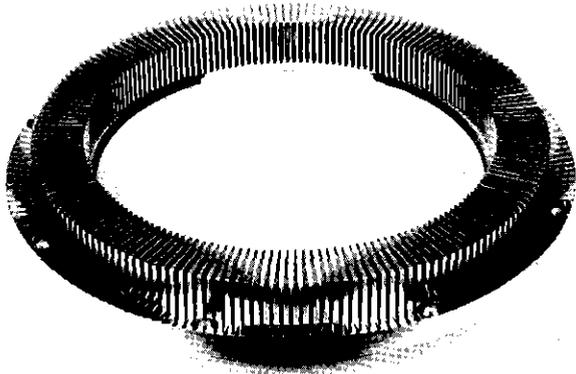
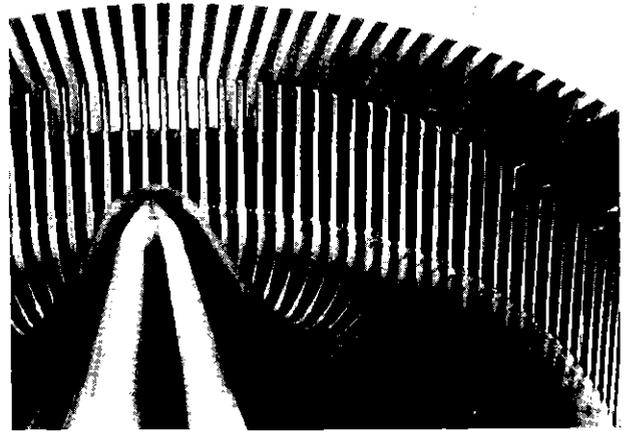
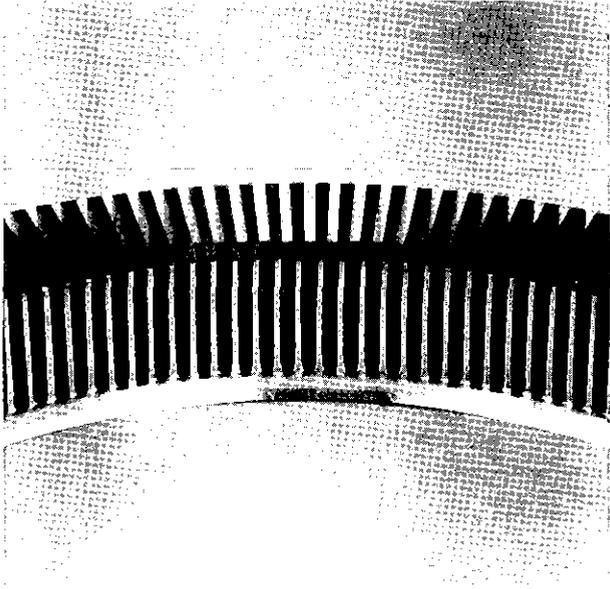
KfK IT - 1981

ABB. 12



kfk IT-1980

TMFM 50 - ROTORWELLE MIT ROTOR, LÄGERUNG UND GLEITRINGDICHTUNG

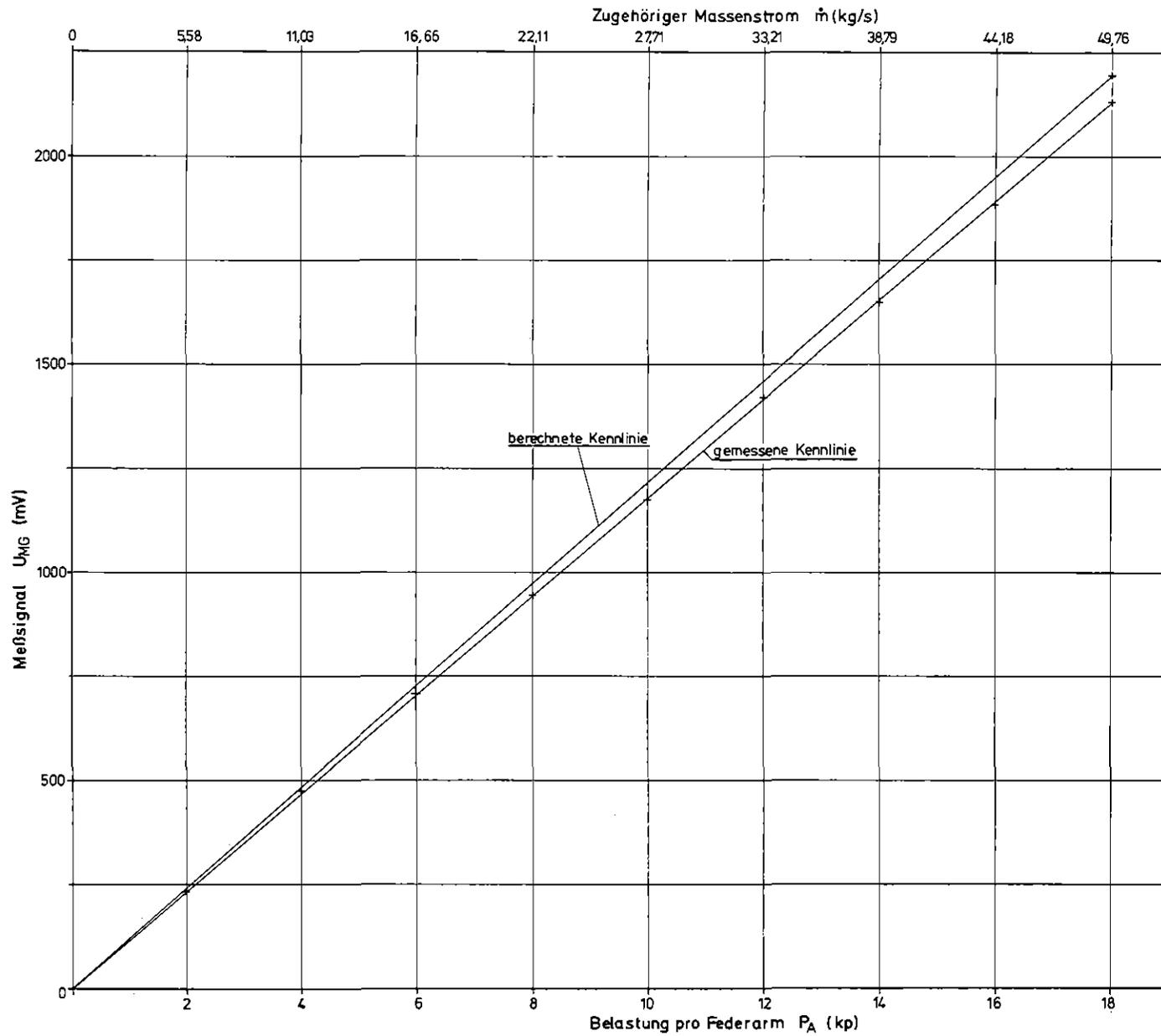


IT - 1981

TMFM 50 - SCHAUFELGITTER DES STATORS (LINKS)

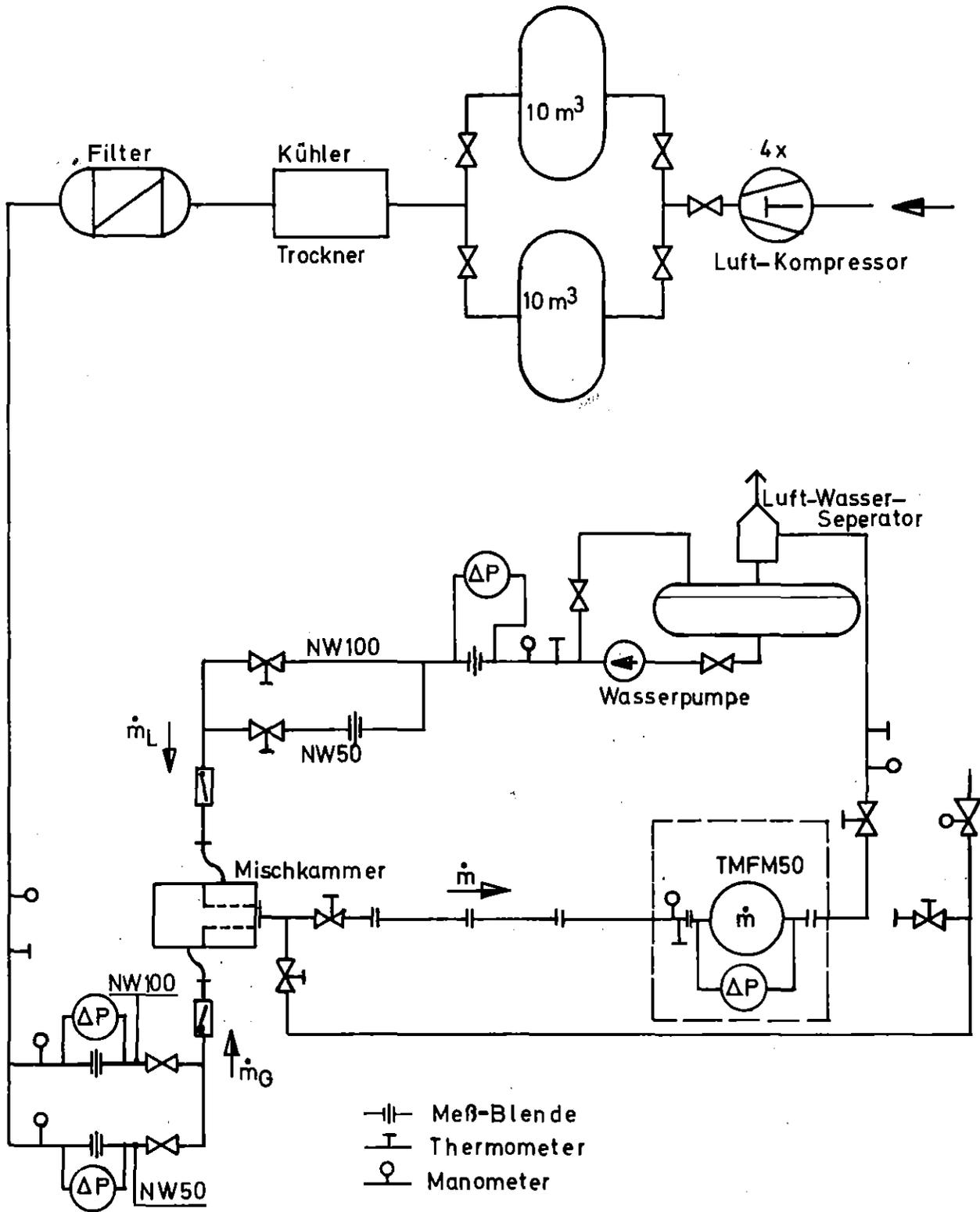
UND DES ROTORS (RECHTS)

ABB. 14

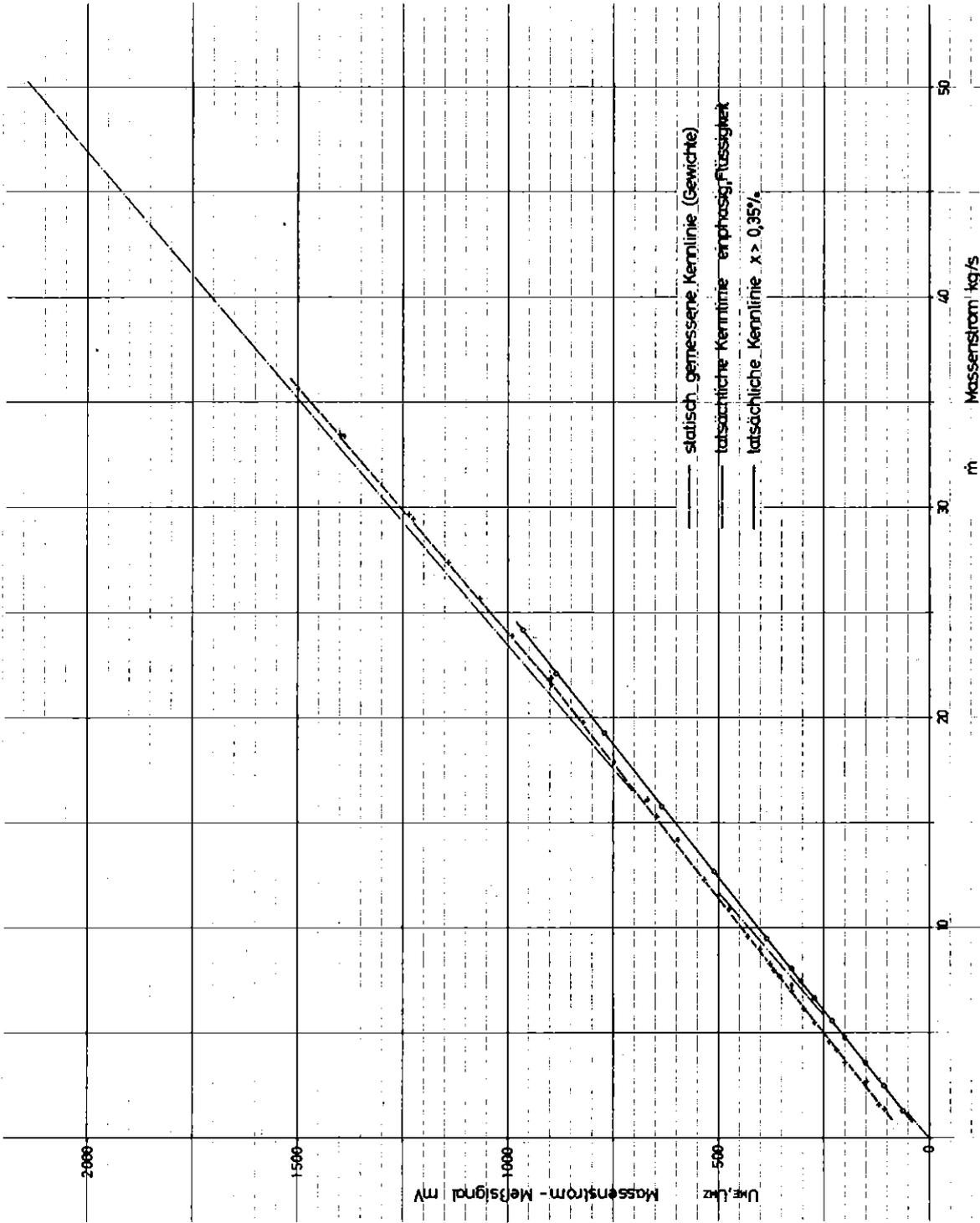


TMFM 50 VERGLEICH DER THEORETISCHEN KENNLINIE MIT DER DURCH GEWICHTSBELASTUNG GEMESSENEN KENNLINIE

ABB. 15



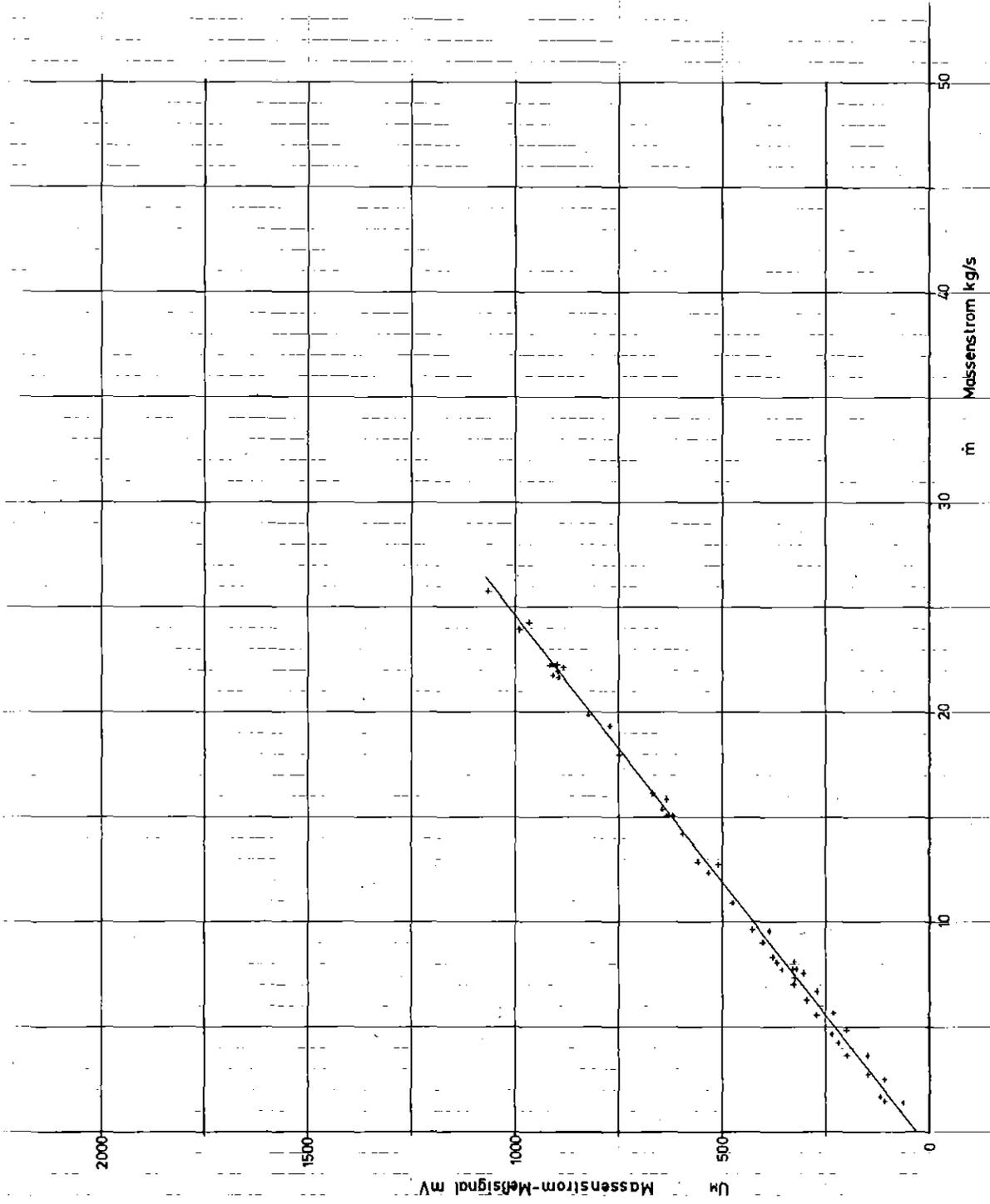
Zweiphasen-Luft/Wasser-Versuchsstand des IRB
Schema der Teststrecke



IT 1981

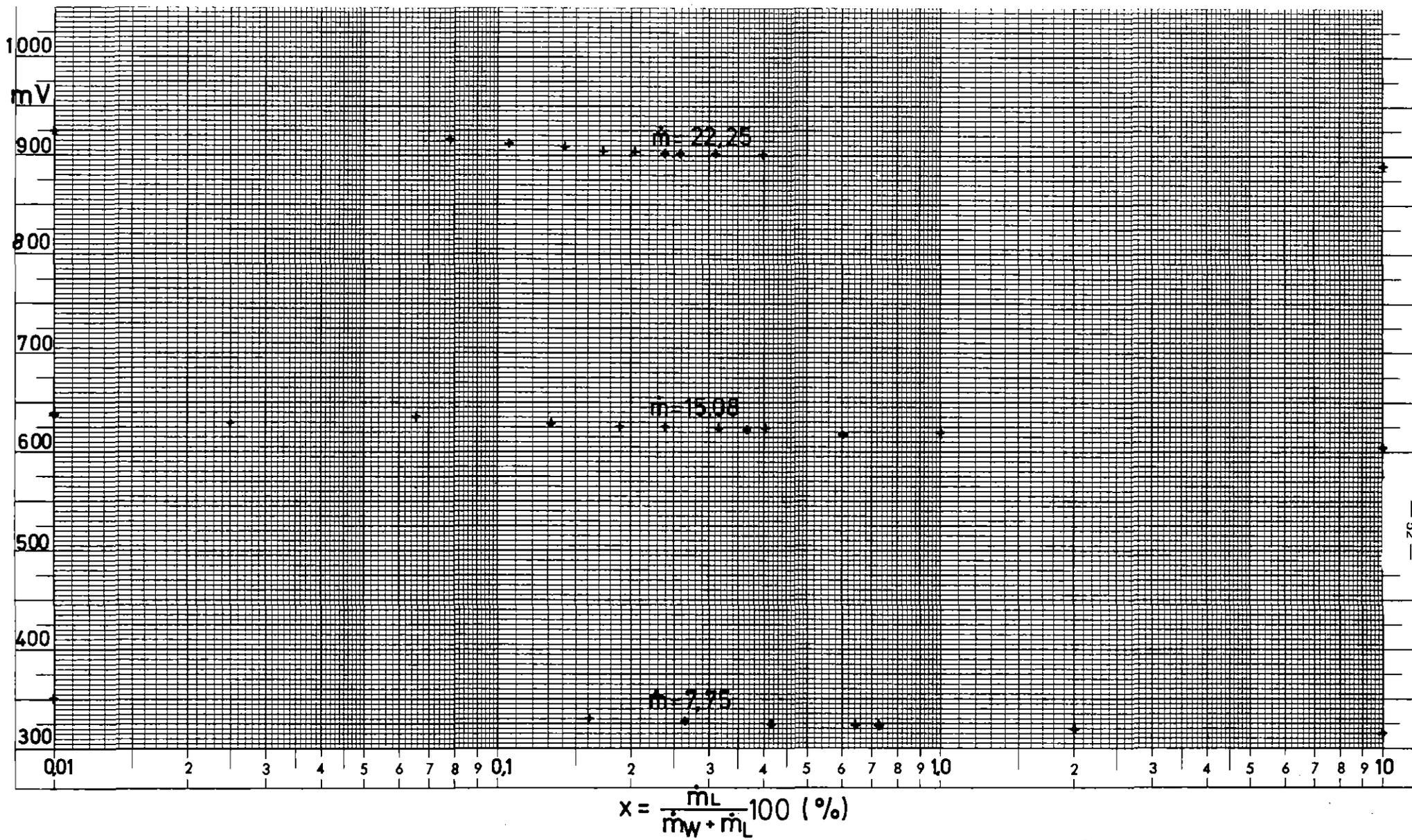
TMFM 50 KENNLINIEN MIT ROTOR Z = 68

ABB. 17



IT - 1981

TMFM 50 - ALLGEMEIN GÜLTIGE KENNLINIE BEI UNBEKANNTER STRÖMUNGSART

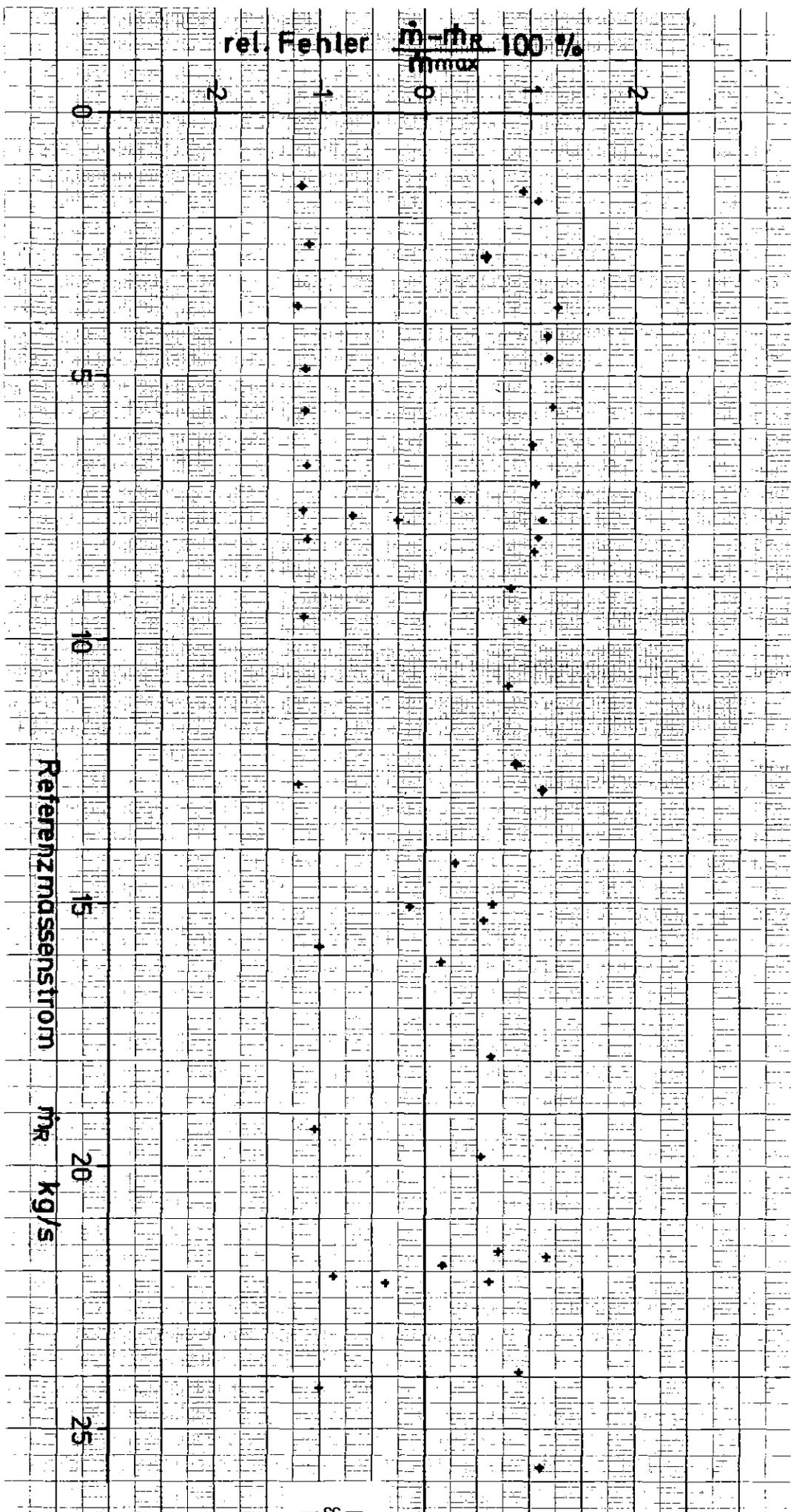


— 52 —

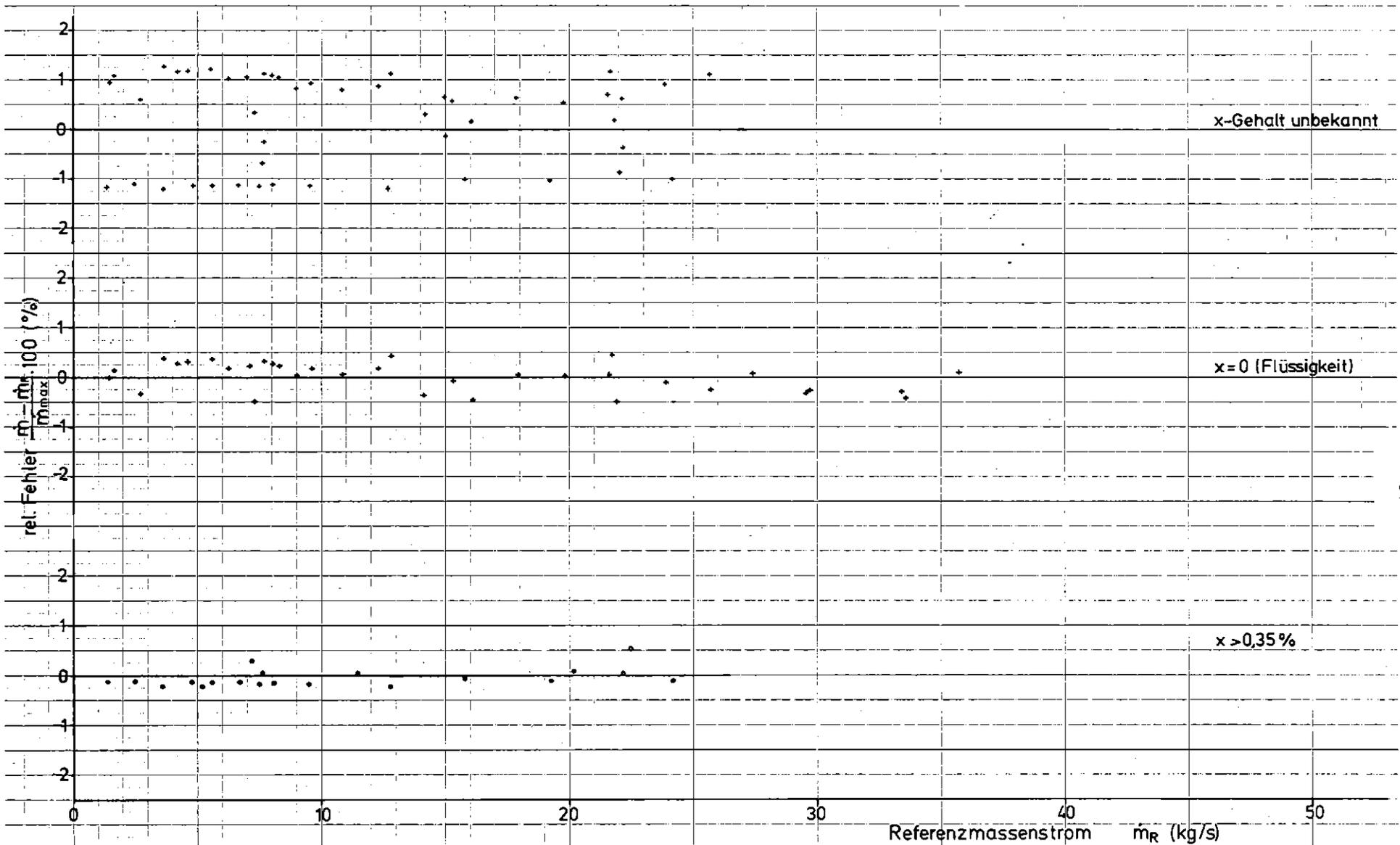
TMFM 50 - MESS-SIGNALE BEI KONSTANTEN MASSENSTRÖMEN IN ABHÄNGIGKEIT VOM X-GEHALT



IT - 1981



TMEM 50 - RELATIVER FEHLER ÜBER DEM REFERENZMASSENSTROM
 BEI UNBEKANNTEM X-GEHALT



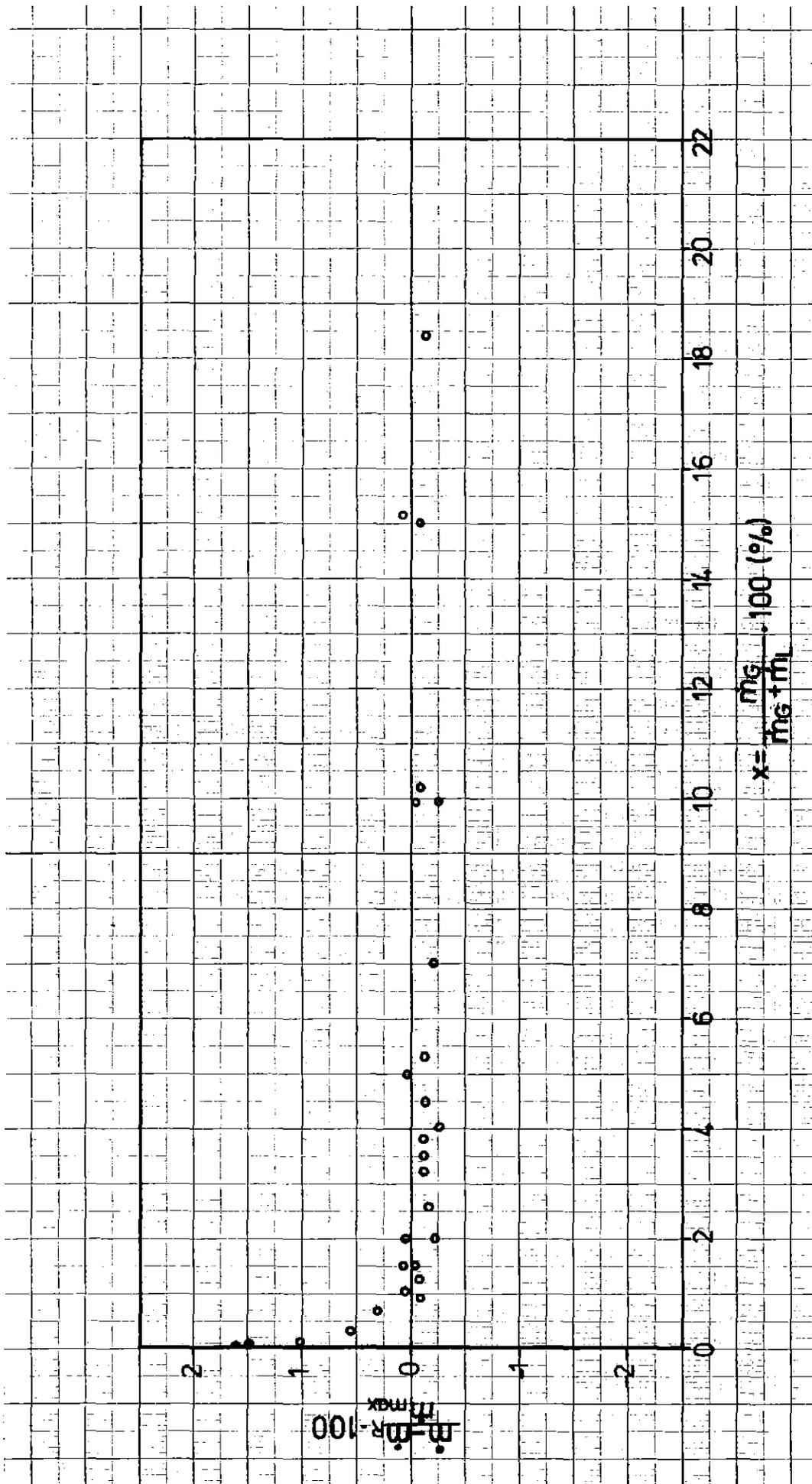
— 54 —



IT - 1981

TMFM 50 - RELATIVER FEHLER ÜBER DEM REFERENZMASSENSTROM
 X = 0 % (MITTE) UND X > 0,35 % (UNTEN)

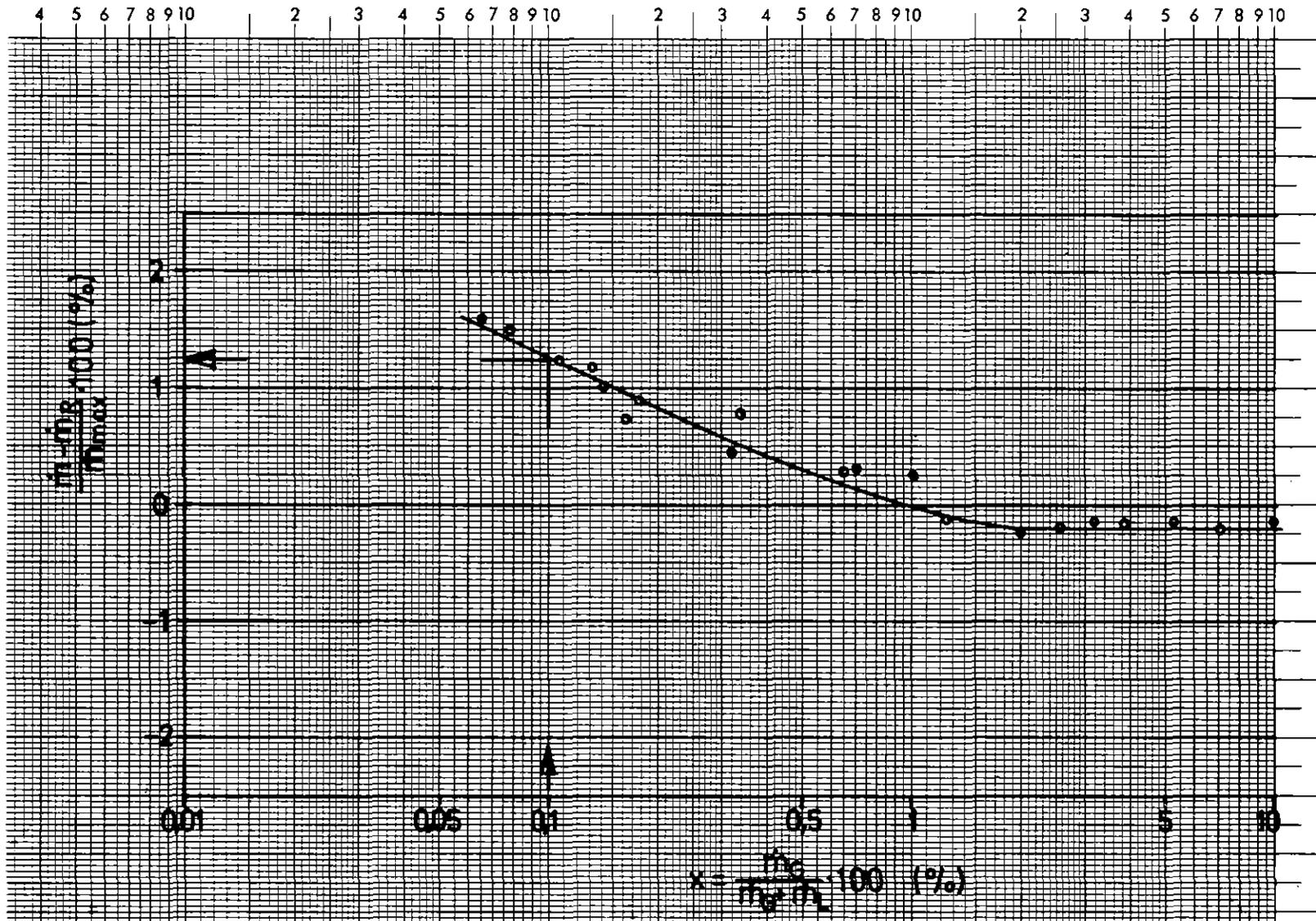
ABB. 21



IT - 1981

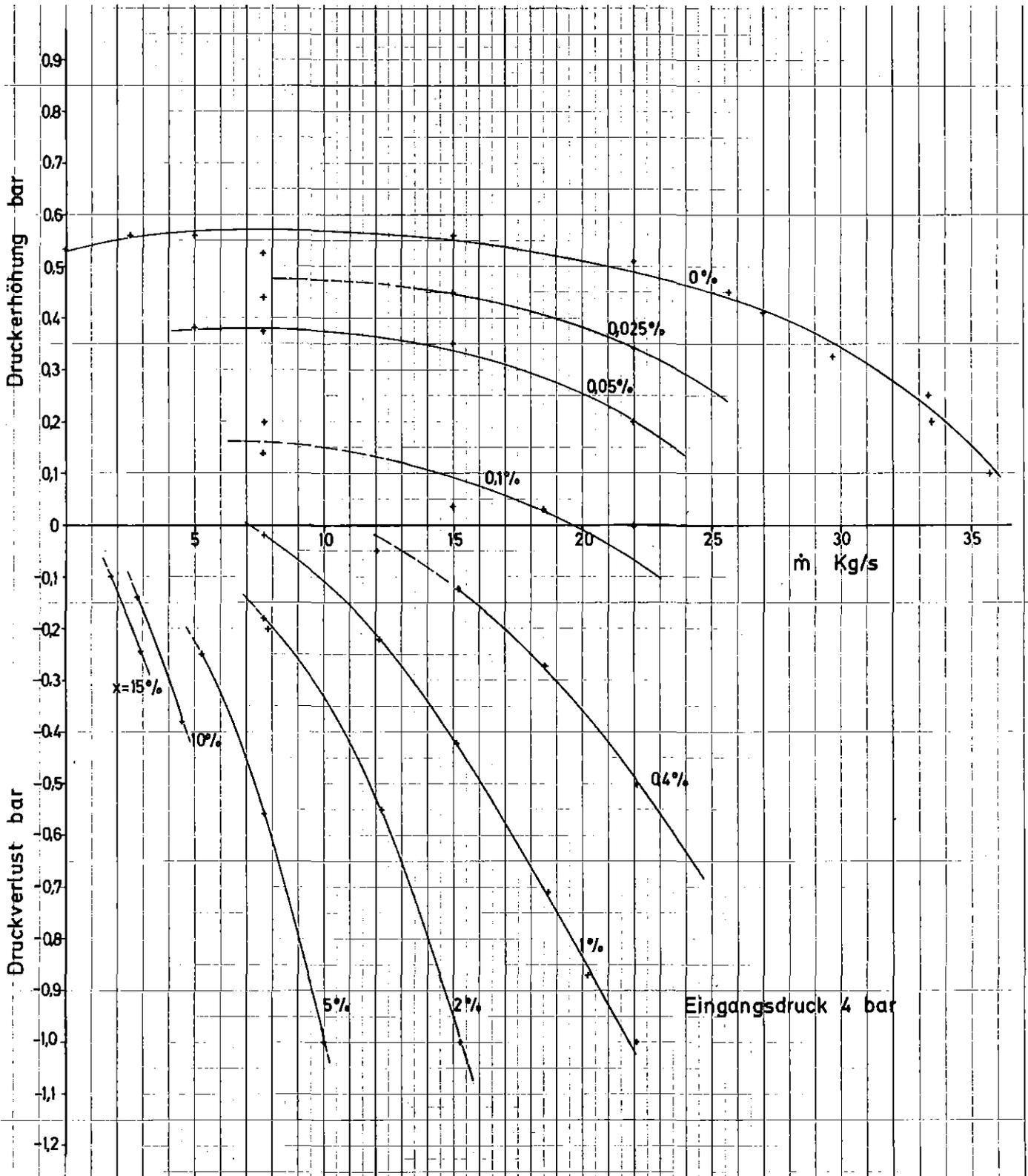
TMFM 50 - RELATIVER FEHLER OBER DEM X-GEHALT (LINEAR)

ABB. 22



TMFM 50 - RELATIVER FEHLER ÜBER DEM X-GEHALT (LOGARITHMISCH)

ABB. 23



TMFM 50 - DRUCKVERLUSTE IN ABHÄNGIGKEIT VOM
MASSENSTROM UND X-GEHALT