



KfK 3215
Oktober 1981

Test des Massenstrom- Meßgerätes TMFM-50 für Zweiphasen-Strömungen

H. John, K. Hain, F. Brüderle, J. Reimann, F. Schloß
Institut für Reaktorbauelemente
Hauptabteilung Ingenieurtechnik
Projekt Nukleare Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe
Institut für Reaktorbauelemente
Hauptabteilung Ingenieurtechnik
Projekt Nukleare Sicherheit

KfK 3215

Test des Massenstrom-Meßgerätes
TMFM-50 für Zweiphasen-Strömungen
von

H. John
K. Hain
F. Brüderle
J. Reimann
F. Schloß

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Der Test eines im KfK-IT entwickelten und als Referenzmeßgerät für den instationären Zweiphasenkreislauf des KfK-IRB vorgesehenen Zweiphasen-Massenstrommeßgerätes wird beschrieben. Das True Mass Flow Meter (TMFM 50) wird nebst der Teststrecke kurz beschrieben und vor allem werden die Meßgenauigkeit und der Druckverlust behandelt.

Der Test hat ergeben, daß der Meßfehler des Gerätes unter $\pm 1,5$ % bezogen auf den vollen Meßbereich von 50 kg/s liegt, und bei Kenntnis des Gasanteiles der Strömung auf $\pm 0,5$ % reduziert werden kann. Der Druckverlust wird in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen dargestellt.

Abstract

Tests of an Advanced True Mass Flow Meter in Gas Liquid Flow

A True Mass Flow Meter (TMFM 50) designed for measuring two phase mass flow rate up to 50 kg/s has been developed and tested in the KfK for the use in a KfK transient two phase flow loop as a reference measurement device. The report describes shortly the device, the test loop, the testing procedure and mainly the test results. The test showed that the measuring error is less than $\pm 1,5$ % related to full flow, when the gas content is not known and less than $\pm 0,5$ % with known gas content x of the flow. The pressure loss will be shown dependent from the operation conditions.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Abstract

1. Einleitung
 2. Anlagenbeschreibung
 - 2.1 True-Mass-Flow-Meter
 - 2.2 Test-Kreislauf
 3. Versuchsdurchführung
 4. Versuchsergebnisse
 - 4.1 Versuchsreihe 1
 - 4.2 Versuchsreihe 2
 - 4.3 Versuchsreihe 3
 - 4.3.1 Massenstrommessung
 - 4.3.2 Druckverlustbestimmung
 5. Schlußbetrachtungen
- Literaturverzeichnis

1. Einleitung

Im Rahmen der Reaktorsicherheitsforschung ist die Kenntnis des transienten zweiphasigen Kühlmittelmassenstromes für die Untersuchung des Kühlmittelverluststörfalles von großer Bedeutung. Es wurden bisher an vielen Forschungsstellen zu diesem Zweck eine Reihe von experimentellen Methoden zur Messung eines zweiphasigen Massenstromes entwickelt. Alle seitdem bekannt gewordenen Verfahren benötigen 2 oder mehr Meßsignale z.B. Impuls + Dichte, Geschwindigkeit + Dichte, Impuls + Geschwindigkeit usw. die kombiniert werden müssen, um den Massenstrom zu bestimmen. Diese Meßmethoden arbeiten mit sehr unterschiedlicher Genauigkeit. Mit dem im KfK entwickelten True Mass Flow-Meter (TMFM) wurde zum erstenmal ein Gerät geschaffen, das es gestattet, einen transienten zweiphasigen Massenstrom direkt, und wie der Bericht zeigt, mit großer Genauigkeit zu messen. Dieses zunächst für einen Massenstrom von nur 2,5 kg/s entwickelte Meßgerät /1,2/ wurde wegen des kleinen Meßfehlers, der unabhängig von der Strömungsform des Dampf-Wasser-Gemisches kleiner als $\pm 3,5\%$ war, als Referenzmassenstromgerät für den im KfK-IRB im Aufbau begriffenen Kreislauf für Instationäre Zweiphasen-Meßtechnik, gewählt. Von KfK-IT wurde deshalb eine größere Version für 50 kg/s, das TMFM-50, entwickelt und gebaut. Im Kreislauf für stationäre Zweiphasen-Meßtechnik im KfK-IRB wurde der Test und die Kalibrierung des Gerätes durchgeführt. Der vorliegende Bericht hat die Aufgabe nach einer kurzen Beschreibung des True Mass Flow Meters und des Test-Kreislaufes den Test und vor allem die Testergebnisse vorzustellen.

2. Anlagenbeschreibung

2.1 True Mass Flow Meter

Das TMFM ist im Prinzip eine radiale Kreiselpumpe. Es hat einen Rotor mit einem axialen Ein- und radialen Austritt und ein radiales Leitrad (Stator).

Das zweiphasige Fluid verläßt den Rotor, der mit streng konstanter Drehzahl läuft, mit einem definierten Drall. Durch Abbau des Dralls im Leitrad wird dort ein entsprechendes Drehmoment erzeugt, welches das Maß für den Massenstrom ist. Lauf und Leitrad haben enge radiale Schaufelkanäle damit das Fluid beim Austritt möglichst genau ge-

richtet ist. Unter dieser Bedingung ist der zu bestimmende Massenstrom durch folgende einfache Beziehung zu bestimmen:

$$\dot{m} = K \frac{M_a}{r^2 \cdot \omega}$$

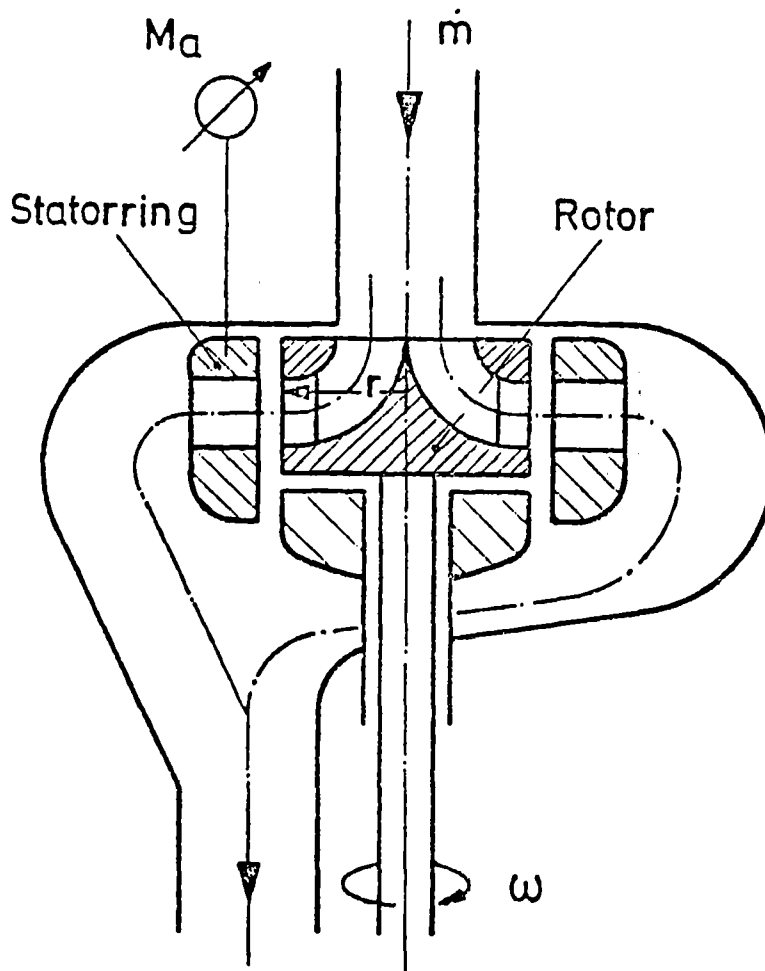
M_a = Stator Drehmoment

r = Rotor Außendurchmesser

ω = Winkelgeschwindigkeit des Rotors

K = Eichkonstante

Die folgende Skizze zeigt die Anordnung vereinfacht.



Das Meßprinzip ist unabhängig von der Dichte und der Dichteverteilung im Zweiphasenstrom, weil alle Massepartikel das Laufrad bei gleichem Durchmesser und gleicher Winkelgeschwindigkeit verlassen. Bei bekanntem Rotordurchmesser und bekannter Winkelgeschwindigkeit ist das Stator-Moment die einzige Meßgröße. Mit der Konstanten K wird den inneren Bypassströmen (Leckagen) und einer geringen Abweichung der Strömungsrichtung von der

Schaufelrichtung Rechnung getragen. Abb. 1 zeigt das beschriebene Meßgerät in perspektivischer Darstellung. Der Stator ist in 3 Federbeinen aufgehängt. Die Verformung der Federbeine wird mit Dehnungsmeßstreifen gemessen, die damit ein massenstromproportionales Signal erzeugen. Wegen der relativ hohen Eigenfrequenz der Statoraufhängung und der verzögerungsfreien Anzeige der DMS kann die Massenstromanzeige mit zeitlich hoher Auflösung erfolgen.

Die Abdichtung des Rotors erfolgt mit Kohleringdichtung. Der Stator ist wegen der erforderlichen Hysteresefreiheit mit berührungsfreien Ringspalten abgedichtet.

An dem Stator ist ein konzentrischer Ringkanal befestigt, der mit Quecksilber gefüllt ist. Er dient der Schwingungsdämpfung des Stators. Bei Schwingungen tritt eine Differenzbewegung zwischen diesem Ringkanal und der Quecksilberfüllung auf, die zu dämpfenden Reibungskräften führt. Durch eingebaute Drosseln werden diese Kräfte vergrößert /7/.

Eine genaue Beschreibung des TMFM 50 mit seinen charakteristischen Eigenschaften wurde in /3/ durchgeführt.

2.2 Testkreislauf

Der Gemeinsame Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren verschiedener Zweiphasen-Massenstrommeßverfahren im KFK-IRB ist seit einigen Jahren im Betrieb. Er kann mit Dampf-Wasser bis zu 5 kg/s und 150 bar und mit Luft-Wasser bis 35 kg/s und 10 bar betrieben werden. Durch Umrüsten einiger Rohrleitungen kann die für alle Versuche gemeinsame Teststrecke entweder mit der Dampf-Wasser oder der Luft-Wasser-Versorgungsanlage verbunden werden. Da es bezüglich der Größe des Meßbereiches für das TMFM-50 sinnvoll war, im Luft-Wasser-Betrieb zu kalibrieren, wird hier nur diese Kreislaufschaltung kurz beschrieben.

Abb. 2 zeigt das Schema des Luft-Wasser-Kreislaufes und Abb. 3 ein Bild des in den Kreislauf eingebauten TMFM.

Vier Kolbenkompressoren liefern zusammen bis zu 1 kg/s Luft

über Filter, Kühler und Ölreinigung zum Kreislauf. Eine drehzahl-geregelte Umwälzpumpe fördert bis zu $130 \text{ m}^3/\text{h}$ kaltes Wasser aus einem Vorratsbehälter zum Kreislauf. In einer Mischkammer werden Luft und Wasserstrom gemischt und treten in die 8 m lange waage-rechte Teststrecke ein, die aus auswechselbaren Rohrstücken der Nennweite 80 oder 50 besteht. Da das TMFM-50 nur für senkrechten Einbau konzipiert ist mußte, wie Abb. 3 zeigt, eine etwas auf-wendige Sonder-Rohrführung geschaffen werden.

Nach der Teststrecke wird das Zweiphasengemisch in einem Zyklon separiert und das Wasser wieder in den Vorratsbehälter und die separierte Luft ins Freie entlassen. Die einzelnen Massen-ströme und damit der Gasanteil des Gemisches und der Teststrecken-druck werden durch Handventile bzw. durch die Motordrehzahl ge-regelt. Der Wasser- und der Luftmassenstrom werden jeweils ge-trennt mit Drosselblenden, die in 3 Größenabstufungen für jede Phase vorhanden sind, gemessen. Die nach DIN 1952 berechnete Drosselblenden-Messung hat einen Meßfehler von ca. 1,5 %, der sich aus dem Systemfehler und der Meßunsicherheit zusammensetzt. Eine genaue Beschreibung des Kreislaufes ist in / 4 / ent-halten.

3. Versuchsdurchführung

Wegen des großen Meßbereiches von 50 kg/s wurde das TMFM, wie im Abschn. 2 berichtet wurde, in Luft-Wasserströmung getestet. In reiner Wasserströmung konnte mit maximal 35 kg/s etwa $2/3$ und in Luft-Wasserströmung mit maximal 25 kg/s Massenstrom die Hälfte des Bereiches überdeckt werden. Der kleinere Massenstrom bei zweiphasiger Strömung ist auf den steigenden Druckverlust der Anlage beim Übergang von einphasiger auf zweiphasige Strömung zurückzuführen. Auf den "heißen Test" mit Dampf-Wasser-Strömung wurde verzichtet, weil damit nur ca. 10 % des Meßbereiches hätten abgedeckt werden können. Ein reiner Temperatur- und Drucktest ohne nennenswerten Massenstrom wurde vorher im Cosima-Versuchs-stand der KFK-IT / 5 / bei Auslegungstemperatur und -Druck erfolgreich durchgeführt. Außerdem wurde die kleinere Version des True Mass Flow Meters das TMFM 2.5 das nach dem gleichen Prinzip erbaut wurde, erfolgreich im Dampf-Wasserstrom getestet

und geeicht /2/.

Für das zu testende TMFM-50 standen je 2 Rotor-Varianten und 2 Varianten der Stator-Spalt-Dichtungen zur Verfügung. Die beiden Läufer unterschieden sich durch die Schaufelzahl und zwar 136 und 68 Schaufeln und für den Stator war eine glatte- und eine Labyrinth-Dichtung hergestellt worden. Aus Abb. 4 sind beide Dichtungsarten schematisch ersichtlich. Im Versuch sollte die jeweils beste Version herausgefunden werden.

Die Kombination der wichtigsten zu testenden Parameter ergab 3 Versuchsreihen, die durch die folgende Tabelle gekennzeichnet sind.

Versuchs-Reihe	Rotor 1 136 Schauf.	Rotor 2 68 Sch.	Statordichtung glatt	Statordichtung Labyr.	Wasser	Wasser- Luft
1	x		x		x	x
2		x		x	x	
3		x	x		x	x

Im Abschnitt 4. wird über die Ergebnisse der 3 Versuchsreihen berichtet.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Versuchsreihe 1

Wie aus der letzten Tabelle in Abschn. 3 zu entnehmen ist, wurde in der Versuchsreihe 1 das TMFM 50 mit dem Rotor 1 in reiner Wasserströmung und in Luft-Wasser-Strömung getestet. Das aus den drei Dehnungsmeßstreifen der Leitradaufhängung gewonnene zusammengesetzte Signal M_a wurde über dem Referenzmassenstrom aufgetragen. Abb. 5 zeigt die so gewonnenen Kennlinien, die sich wie folgt charakterisieren lassen:

Die einphasige Kennlinie besteht aus zwei Geraden, die den Bereich $0 \leq \dot{m} \leq 15 \text{ kg/s}$ und $17 \leq \dot{m} \leq 33,5 \text{ kg/s}$ überdecken. Das Ende der zweiten Geraden bis $33,5 \text{ kg/s}$ ist das Ende des Testbereiches. Zwischen 15 und 17 kg/s ist eine Unstetigkeitsstelle, in der keine verwertbaren Meßergebnisse erzielt wurden. Die Streuung der Meßwerte um die beiden Geraden ist gering und liegt unter $0,5 \%$ vom Meßbereich.

Die Zweiphasenmeßwerte, die bis zu einem Gasgewichtsanteil von $x \approx 5 \%$ gefahren wurden, bei einem Eintrittsdruck von 5 bar absolut, liegen alle mit äußerst geringer Streuung (unter $0,5 \%$) auf einer Geraden, wie Abb. 5 zeigt. Dieses trifft jedoch nur für die Werte $x > 1 \%$ zu. Mit kleiner werdendem x liegen die Meßwerte zwischen der Einphasen- und der Zweiphasen-Kennlinie und nähern sich der Einphasen-Linie. Diese Meßpunkte wurden nicht eingetragen. Im Abschn. 4.3 wird darauf näher eingegangen. Die Meßergebnisse der Reihe 1, die wegen des Sprunges in der Einphasen-Kennlinie unbefriedigend sind, sollen nicht weiter interpretiert werden, weil die Ergebnisse der Versuchsreihe 3 diesen Mangel nicht aufweisen. Eine Strömungsänderung an den Leitschaufeln im Bereich von 15 bis 17 kg/s ist vermutlich die Ursache für diesen Signalsprung.

4.2 Versuchsreihe 2

Diese Versuchsreihe, bei der der 2. Rotor mit 68 Schaufeln zusammen mit dem Stator mit Labyrinthdichtung eingesetzt war, wurde nur einphasig mit Wasser durchgeführt. Nachdem sich zeigte, daß die Kennlinie bei einem Massenstrom unter 17 kg/s einen unlinearen unstetigen Verlauf hat, wurde der Versuch abgebrochen und auf die

zweiphasigen Tests verzichtet. Abb. 6 zeigt die einphasige Kennlinie. Der Erfolg der 3. Versuchsreihe gab die Rechtfertigung dafür, keine weiteren Untersuchungen über das unerwartete Verhalten des Signalverlaufs bei Labyrinthdichtung anzustellen.

4.3 Versuchsreihe 3

4.3.1 Massenstrommessung

Die Kombination von Rotor 2 (68 Schaufeln) und dem Stator mit glatter Spaltdichtung brachte den weitaus besten Erfolg. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe werden deshalb zentrales Thema dieses Berichtes sein.

In Abb. 7 sind die Kennlinien des TMFM 50, d.h. das Massenstromsignal M_a über dem Referenzmassenstrom, aufgezeichnet. Obwohl die mit Wasser gefahrene Einphasenkennlinie über den gefahrenen Testbereich (0 - 35 kg/s) wie bei Versuchsreihe 1 im Prinzip aus zwei Geradenabschnitten und zwar 0 - 20 kg/s und > 20 kg/s besteht, wurde hier wegen der nur geringen Steigungsänderung für den Gesamtbereich eine gemittelte Gerade aufgestellt. Die Zweiphasenmeßwerte, die mit Luft-Wasser im Massenstrombereich von 0 - 25 kg/s und Gasgewichtsanteilen x von ca. 0,01 bis 20 % bei 5 bar Eintrittsdruck gefahren werden konnten, ergaben für x Werte > 1 % eine im gesamten Testbereich durchgehende gerade Kennlinie mit äußerst geringer Streuung der Meßwerte. Diese Gerade verläuft annähernd parallel zur Einphasengeraden mit einem Signalabstand von ca. 2,5 % von dieser bezogen auf 50 kg/s. Die Gleichungen der beiden Geraden wurden mit Hilfe der linearen Regression aus den Meßwerten \dot{m} und M_a mit einem Rechenprogramm auf die folgende Weise bestimmt.

Ist

$$y = a + bx$$

mit $y = \dot{m}$ und $x = M_a$

die Geradengleichung, so ergeben sich die Regressionskonstanten aus:

$$a = \left| \frac{\sum y_i}{n} - b \frac{\sum x_i}{n} \right|$$
$$b = \frac{\sum x_j \cdot y_j - \frac{\sum x_i \cdot \sum y_i}{n}}{\sum n_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}$$

Nach dieser Methode der "kleinsten Quadrate" ergeben sich für die beiden Gleichungen.

$$Ma_w = 45,83 + 39,82 \dot{m} \text{ |mV|} \quad (\text{Einphasig, Wasser})$$

$$Ma_{2 \text{ Ph}} = 6,53 + 39,58 \dot{m} \text{ |mV|} \quad (\text{Zweiphasig, } x > 1 \%)$$

Diese Kennlinien schließen praktisch das gesamte Gebiet der möglichen Ein- und Zweiphasen-Meßpunkte ein. Bei unbekannter Zusammensetzung des Zweiphasengemisches, was der Normalfall ist, ist deshalb die Mittelwertlinie zwischen den genannten Linien die eigentliche Kennlinie des Meßgerätes. Sie hat die Gleichung:

$$Ma = 26,18 + 39,7 \dot{m} \text{ |mV|}$$

oder

$$\dot{m} = \frac{Ma - 26,18}{39,7} \text{ |kg/s|}$$

In Abb. 8 wurden die relativen Meßfehler, erstens der Einphasen-Meßwerte bezogen auf die Einphasen-Kennlinie, zweitens der Zweiphasen-Meßwerte ($x > 1 \%$) bezogen auf die Zweiphasen-Kennlinie und drittens die Meßfehler aller Meßpunkte bezogen auf die Mittelwertlinie über dem Referenzmassenstrom aufgetragen. Der relative Fehler wurde dabei auf den maximalen Massenstrom $\dot{m}_{\max} = 50 \text{ kg/s}$ bezogen:

$$F = \frac{\dot{m} - m_{\text{Ref}}}{\dot{m}_{\max}} \cdot 100 \text{ |%|}$$

Der systematische Verlauf der Meßfehler der Einphasen-Kennlinie von positiven Werten beim Referenzmassenstrom 2,5 kg/s zu negativen Werten bei 20 kg/s und dann wieder in Richtung positiver Werte ist auf die vorstehend beschriebene Mittelung der Einphasen-Kennlinie zurückzuführen. Es ist jedoch entscheidend, daß die maximalen Fehler deutlich unter $\pm 1 \%$ liegen.

Die Streuung der Fehler um die Zweiphasen-Kennlinie ist erstaunlich gering. Sie beträgt wie die Abb. 8 zeigt, für die Werte mit $x > 1 \%$ unter $0,2 \%$. Sie liegt damit im Bereich der Messunsicherheit bei der Referenzmessung. Die Streuung um die Mittelwertkennlinie ist durch den Abstand der beiden begrenzenden Kennlinien bedingt. Das Streuband dieser Meßfehler gibt die allgemeine Genauigkeit des TMFM-50 an. Die Fehlerbandbreite liegt wie die Abb. 8 zeigt unter $\pm 1,5 \%$. Dieser Messunsicherheit kann natürlich noch ein Systemfehler überlagert sein, der zu Lasten der Eichung geht. Obwohl diese Fehlerbandbreite für ein Zweiphasenmassenstrom-Meßgerät an sich schon außerordentlich gering ist, liegt in ihr noch ein von der Zusammensetzung des Zweiphasengemisches abhängiger Systemfehler, wie aus den Betrachtungen ersichtlich war. Bei Kenntnis des Gasgewichtsanteiles x kann deshalb der Gesamtfehler weiter reduziert werden.

In Abb. 9 wurde für einige konstante Massenströme das TMFM-Signal M_a über dem x -Wert aufgetragen. Es ist zu sehen, daß die Signale in dem Bereich

$$x > 1 \%$$

praktisch konstant sind und erst zwischen

$$0 \leq x \leq 1 \%$$

auf den einphasigen Wert ansteigen.

Die Auftragung der relativen Meßfehler bezogen auf die Mittelwertkennlinie in Abhängigkeit vom x -Wert, jedoch unabhängig vom Massenstrom \dot{m} , zeigt Abb. 10. Aus ihr wird das eben Gesagte besonders klar. Für Werte von $x > 1 \%$ lassen sich die relativen Fehler durch die Gerade $F = -1$ gut annähern mit einer Streuung die deutlich unter $0,5 \%$ liegt. Für Werte von x zwischen 0 und 1% steigt der Fehler bis etwa 1% an.

Über logarithmischer Abszisse ($\ln x$) aufgetragen, lassen sich die Meßfehler dieses unteren x Bereiches wie Abb. 11 zeigt, relativ gut durch eine Gerade annähern.

Mit Hilfe der linearen Regression wurde die Gleichung der Geraden mit einem Rechenprogramm wie am Anfang dieses Kapitels erklärt wurde, bestimmt und ist:

$$F = -0,63 - 0,36 \ln x$$

Wie Abb. 11 zeigt, haben die Meßfehler bezogen auf diese Gerade eine Streuung von weniger als $\pm 0,5 \%$ (auf 50 kg/s bezogen).

Nach diesen Betrachtungen kann man die Kennliniengleichung des TMFM-50 mit einem Korrekturglied versehen und damit, wenn der x-Wert bekannt ist, den Massenstrom-Meßfehler auf unter $\pm 0,5 \%$ reduzieren. Es ist dann:

$$\dot{m}_K = \dot{m} - \frac{F \cdot \dot{m}_{\max}}{100} \quad F \text{ in } \%$$

das ergibt für $x > 1 \%$:

$$\dot{m}_K = \frac{Ma - 26,18}{39,7} + 0,5 \quad |\text{kg/s}|$$

und für $x < 1 \%$

$$\dot{m}_K = \frac{Ma - 26,18}{39,7} - (-0,63 - 0,36 \ln x) \cdot \frac{50}{100}$$

$$\dot{m}_K = \frac{Ma}{39,7} - 0,344 + 0,18 \ln x \quad |\text{kg/s}|$$

Ma in mV

x in %

Das Korrekturglied für $x < 1 \%$ ist druckabhängig.

Es wurde für 5 bar (abs.) bestimmt. Bei höheren Drücken werden sich die Bereichsgrenzen verschieben und die Steigung der Geraden verändern.

4.3.2 Druckverlustbestimmung

Nach der Meßgenauigkeit gehört das Maß der Strömungsbeeinflussung zu den wichtigsten Eigenschaften eines Zweiphasen-Massenstrommeßgerätes. Unter Strömungsbeeinflussung versteht man bei Zweiphasenströmung vor allem die Änderung der Phasenverteilung und den Druckverlust. Beim TMFM tritt zwar auch noch eine Änderung des Energiegehaltes auf, doch kann diese in den meisten Bereichen vernachlässigt werden. Die Änderung der Phasenverteilung wurde bei diesem Test nicht untersucht. Es besteht jedoch kein Zweifel darüber, daß das TMFM, da es wie ein Strömungsquirl wirkt, eine starke Umverteilung der Phasen erzeugen kann. Es muß mit einer annähernd homogenisierten Strömung unmittelbar hinter dem Auslaß des Gerätes gerechnet werden. Der Druckverlust, eine in Bezug auf seine spätere Verwendung sehr wesentliche Eigenschaft des Gerätes, wurde untersucht und im Folgenden behandelt:

Durch das Bauprinzip unterscheidet sich das TMFM bezüglich Druckverlust von einem normalen Strömungswiderstand. Der Antriebsmotor gibt über den Rotor Leistung an die Strömung ab, die sich wie gezeigt wird, in bestimmten Bereichen, wie bei einer Pumpe, als Drucksteigerung auswirkt.

In Abb. 12 ist der Druckverlust über dem Gasgewichtsanteil x für mehrere konstante Massenströme als Parameter aufgetragen. Negativer Druckverlust bedeutet hier Drucksteigerung. Abb. 13 zeigt das gleiche Ergebnis in einer anderen Darstellung. Die Drucksteigerung wurde hier positiv und der Druckverlust negativ über dem Massenstrom \dot{m} aufgetragen. Der Gasgewichtsanteil x wurde hier als Parameter eingeführt. Den beiden Abbildungen ist zu entnehmen, daß im einphasigen Wasserbereich bei jedem Massenstrom ein Druckaufbau von 0,5 - 0,6 bar, bezogen auf Ein- und Auslaß des TMFM, auftritt. Beide Abbildungen beziehen sich auf einen Eintrittsdruck von 5 bar (absolut). Bei zunehmendem x -Anteil wird die Drucksteigerung je nach Massenstrom kleiner und sinkt in Abb. 12 bei einem x -Wert zwischen 0,1 und 0,4 auf 0 ab. Mit weiter ansteigendem x tritt ein Druckverlust auf, der mit x bei konstantem Druck und konstantem Massenstrom zunimmt. In dem Zweiphasen-Massenstrombereich des Testes wurde ein Druckverlust von 1 bar

nur geringfügig überschritten.

In Abb. 14 wurde für einen konstanten Massenstrom (7,7 kg/s) jedoch für 3 verschiedene TMFM-Eintrittsdrücke, der Druckverlust über x dargestellt. Wie zu erwarten, zeigt sich eine starke Abhängigkeit vom Systemdruck, weil Geschwindigkeit und Dichte die bestimmenden Größen sind. Eine Auftragung der gleichen Meßpunkte über dem homogenen Gasvolumenanteil α_{HOM} zeigt in Abb. 15, daß sich die Punkte unterschiedlichen Druckes gut in eine Kurve einordnen und keine nennenswerte Druckabhängigkeit zu erkennen ist. α_{HOM} wurde für den mittleren Druck des Testgerätes errechnet, nach der Beziehung:

$$\frac{\alpha_{\text{H}}}{1-\alpha} = \frac{x}{1-x} \cdot \frac{\rho_{\text{fl}}}{\rho_{\text{g}}}$$

Zur Interpretation dieser gemessenen Druckverlustkurven und zur Abschätzung ihrer Druckabhängigkeit soll im Folgenden der Versuch unternommen werden, die Messung mit der bekannten Berechnungsmethode für zweiphasigen Druckverlust, von Lockhart und Martinelli /6/ zu vergleichen.

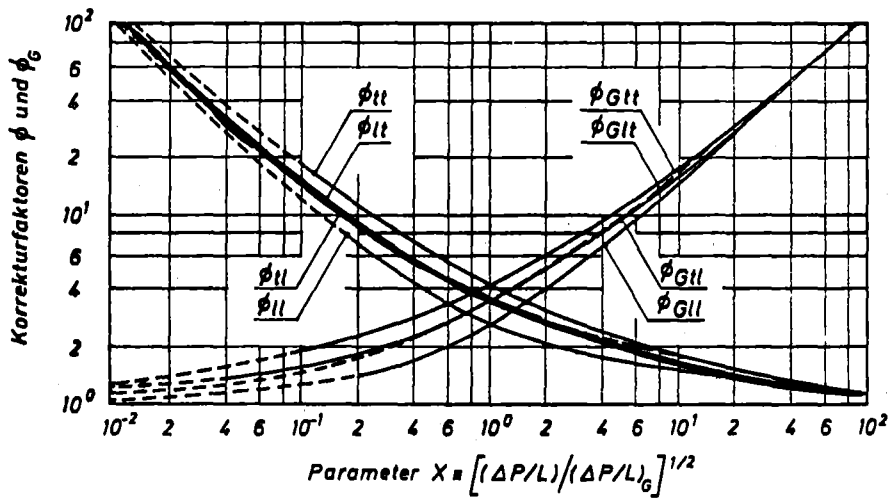
Nach dieser Methode ist der Zweiphasendruckverlust proportional dem Druckverlust der einen Phase, z.B. der flüssigen Phase. Dieser würde auftreten, wenn die Phase allein, über den gesamten Querschnitt verteilt, fließen würde. Bezogen auf gleiche Kanallängen ist:

$$\Delta P_{2\text{Ph}} = \Delta P_{\text{fl}} \cdot \phi^2$$

Der Faktor ϕ wird in einem Diagramm aus Meßwerten stammend über $(\frac{\Delta P_{\text{fl}}}{\Delta P_{\text{g}}})^{1/2}$ dargestellt. Dabei ist $\frac{\Delta P_{\text{fl}}}{\Delta P_{\text{g}}}$ das Verhältnis der beiden einphasigen Druckverluste, die wieder einzeln fließend auf den ganzen Querschnitt bezogen werden müssen.

Die folgende Abb. zeigt dieses Diagramm aus /6/.

Im Folgenden wurde die mittlere dick ausgezogene Kurve ϕ_{st} verwendet.



Nun ist der einphasige Druckverlust proportional ρv_s^2 , mit der Einphasendichte ρ und der auf den ganzen Querschnitt bezogenen Geschwindigkeit des einen Phasenteiles v_{sfl} bzw. v_{sg} (superficial velocity).

Es ist dann das Verhältnis:

$$\frac{\Delta P_{fl}}{\Delta P_g} \sim \frac{v_{sfl}^2}{v_{sg}^2} \cdot \frac{\rho_{fl}}{\rho_g}$$

und

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{fl}}{\Delta P_g}} \sim \frac{v_{sfl}}{v_{sg}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{fl}}{\rho_g}}$$

unter der Voraussetzung gleicher Reibungsbeiwerte für Gas und Flüssigkeit.

Der homogene Gasvolumenanteil ist:

$$\alpha_{HOM} = \frac{v_{sg}}{v_{sfl} + v_{sg}} \quad \text{und damit}$$

$$\frac{v_{sfl}}{v_{sg}} = \frac{1 - \alpha_H}{\alpha_H}$$

durch Einsetzen in die obige Gleichung ergibt sich:

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{fl}}{\Delta P_g}} = \frac{1 - \alpha_H}{\alpha_H} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{fl}}{\rho_g}} \quad \alpha_H = 0 \text{ bis } 1$$

Mit Hilfe dieser Gleichung kann man für Werte α_H die Korrekturfaktoren ϕ aus dem genannten Diagramm ablesen. In Abb. 16 wurde auf diese Weise ϕ^2 über α_H (in %) für 3 Drücke dargestellt.

Da in dem zu überprüfenden Druckverlustdiagramm Abb. 14 die einzelnen Kurven für konstanten Massenstrom aufgetragen wurden und ΔP_{fl} für jede Kurve praktisch konstant ist, weil der Flüssigkeitsanteil fast konstant bleibt, müßten diese Kurven Abb. 14 die gleiche Abhängigkeit von α_H wie die Kurven $\phi = f(\alpha_H)$ Abb. 15 haben.

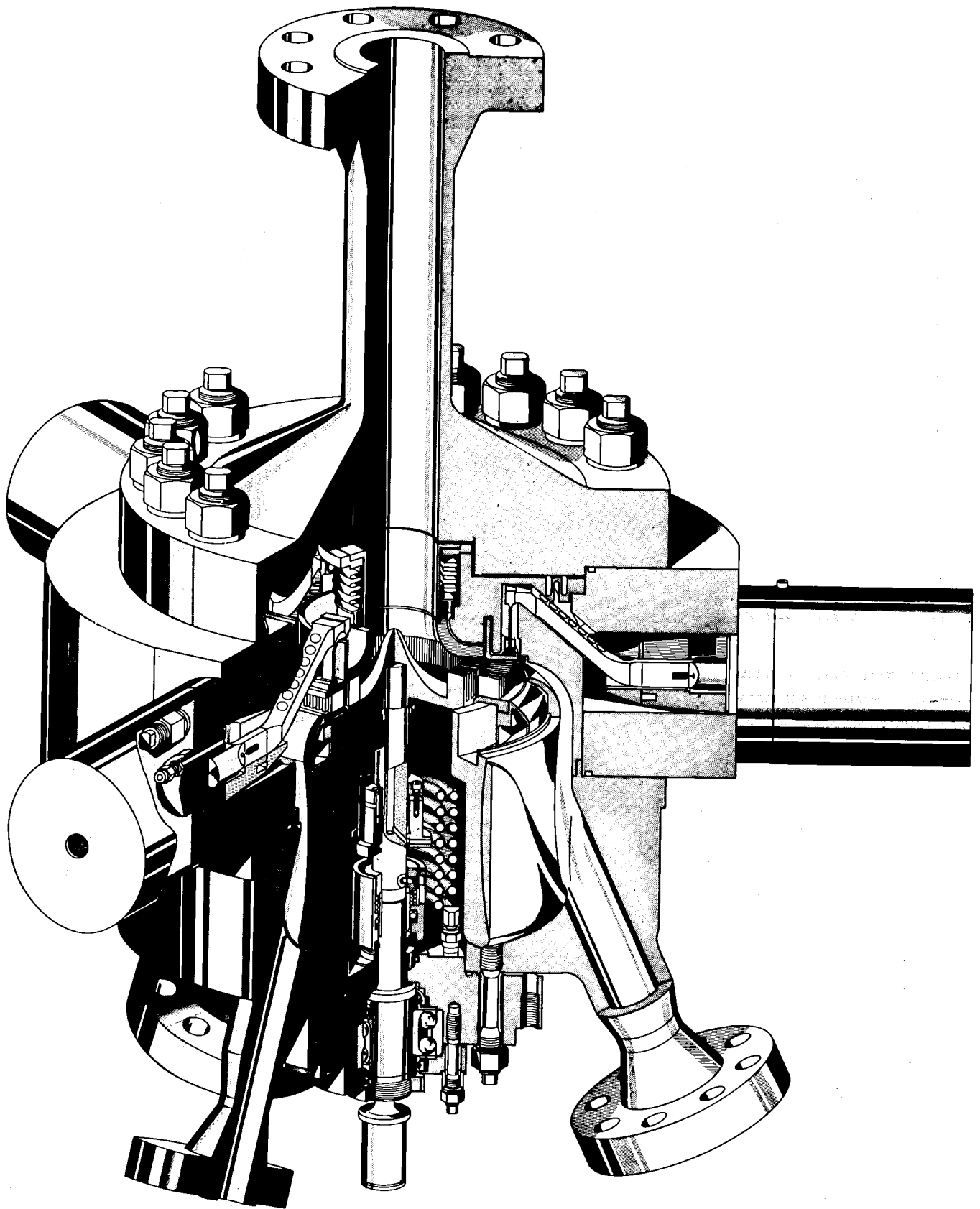
Der Vergleich dieser beiden Abbildungen zeigt, daß im Bereich von $\alpha_H > 50\%$ die Tendenz etwa stimmt d.h. daß die Kurven $\Delta P = f(\alpha_H)$ und $\phi^2 = f(\alpha_H)$ Abb. 15 ähnlichen Verlauf für Werte von $\alpha_H > 50\%$ zeigen.

5. Schlußbetrachtungen

Der vorliegende Bericht zeigt, daß mit dem TMFM-50 eine Messung zweiphasiger Massenströme, unabhängig von der Strömungsform, mit hoher Genauigkeit, möglich ist. Eine Meßfehler-Bandbreite, die kleiner als $\pm 1,5\%$ ist und bei bekanntem Gasanteil mittels Korrekturglied auf $\pm 0,5\%$, bezogen auf vollen Meßbereich, reduziert werden kann, wurde bisher von keiner bekannten Meßmethode erreicht. Das getestete Gerät ist deshalb für seine vorgesehene Aufgabe, in dem im Aufbau begriffenen "Versuchskreislauf für instationäre Zweiphasen-Meßtechnik" die Referenzmessung durchzuführen, hervorragend geeignet. Wie sehr eingehend gezeigt wurde, ist der entstehende Druckverlust des Gerätes relativ gering und ohne weiteres tragbar.

Literatur:

- /1/ G. Class, K. Hain, F. Schloß, K.H. Wagner
True Mass Flow Meter - Entwicklung und Einsatz eines
Massenstrom-Meßgerätes für instationäre Zweiphasen-
strömungen
KfK 2790 Juli 1979
- /2/ K. Wagner, J. Reimann, G. Class, H. John, F. Schloß
Transient and Steady-State Two-Phase Flow Rate
Measurements with a True Mass Flow Meter
European Nuclear Conference May 6-11, 1979, Hamburg
- /3/ K. Hain, F. Brüderle, W. Butzer, F. Schloß, T. Vollmer
True Mass Flow Meter 50
Ein direkt anzeigendes Massenstrom-Meßgerät hoher Genauig-
keit für transiente Zweiphasenströmungen bis $\dot{m} = 50 \text{ kg/s}$
KfK 3197 Oktober 1981
- /4/ H. John, J. Reimann
Gemeinsamer Versuchsstand zum Testen und Kalibrieren ver-
schiedener Zweiphasen-Massenstrommeßverfahren
KfK 2731 B
- /5/ G. Class, K. Hain
COSIMA - gesteuerte Blowdown-Versuche zum LWR-Brennstab-
verhalten
KfK-Nachrichten Jhg. 10 Heft 2/1978, S. 39-48
- /6/ Heinz Brauer
Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen
1971 Verlag Sauerländer AG, Aarau S. 749
- /7/ K. Hain, F. Brüderle, W. Butzer, F. Schloß, T. Vollmer
Flüssigkeitsdämpfung der Statorschwingungen am True Mass
Flow Meter 50, einem Massenstrom-Meßgerät für instationäre
Zweiphasenströmungen
KfK 3031 September 1980



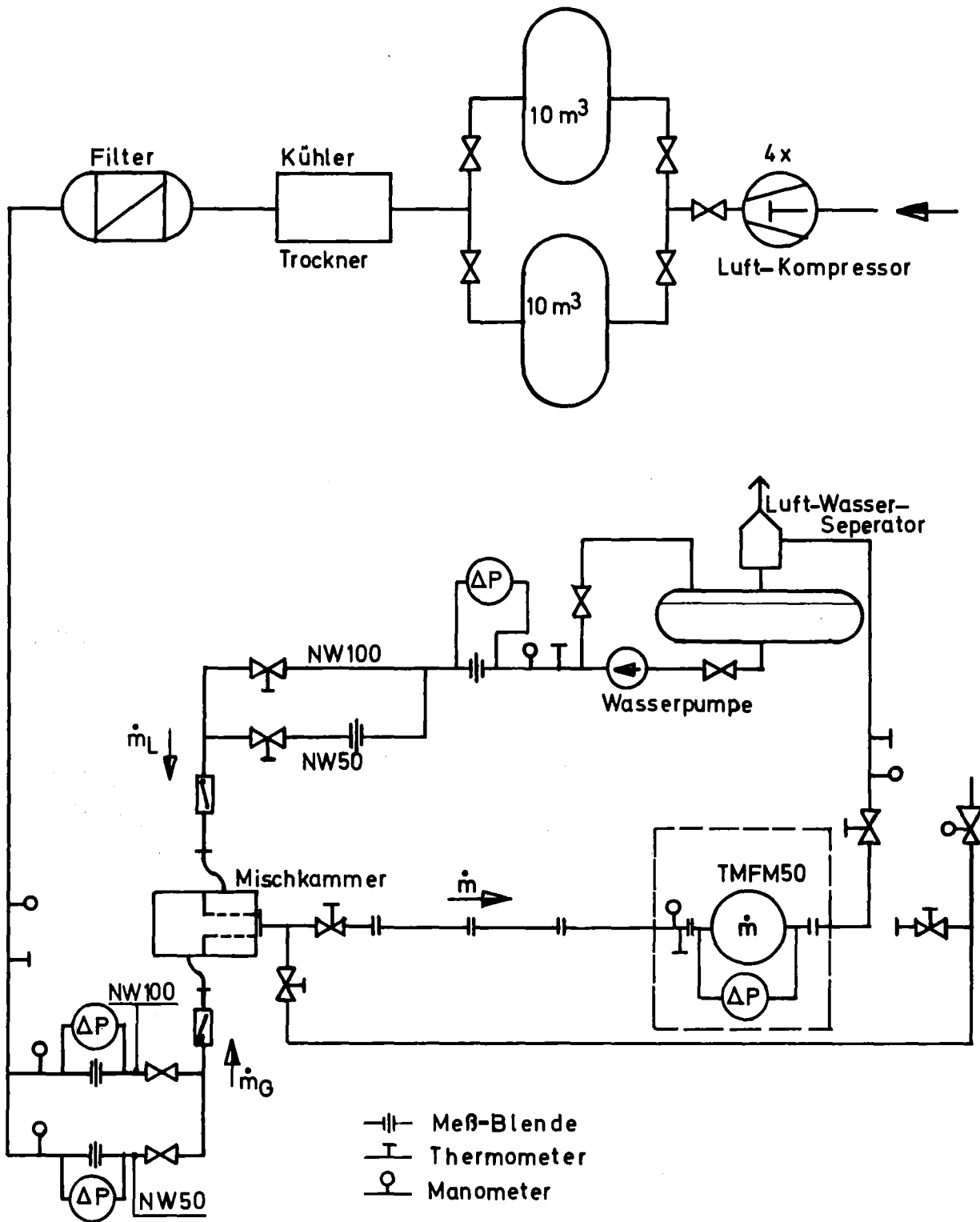
KfK

IT 1980

ZWEIPHASENSTROM-MESSGERÄT TRUE MASS FLOW METER, TMFM 50

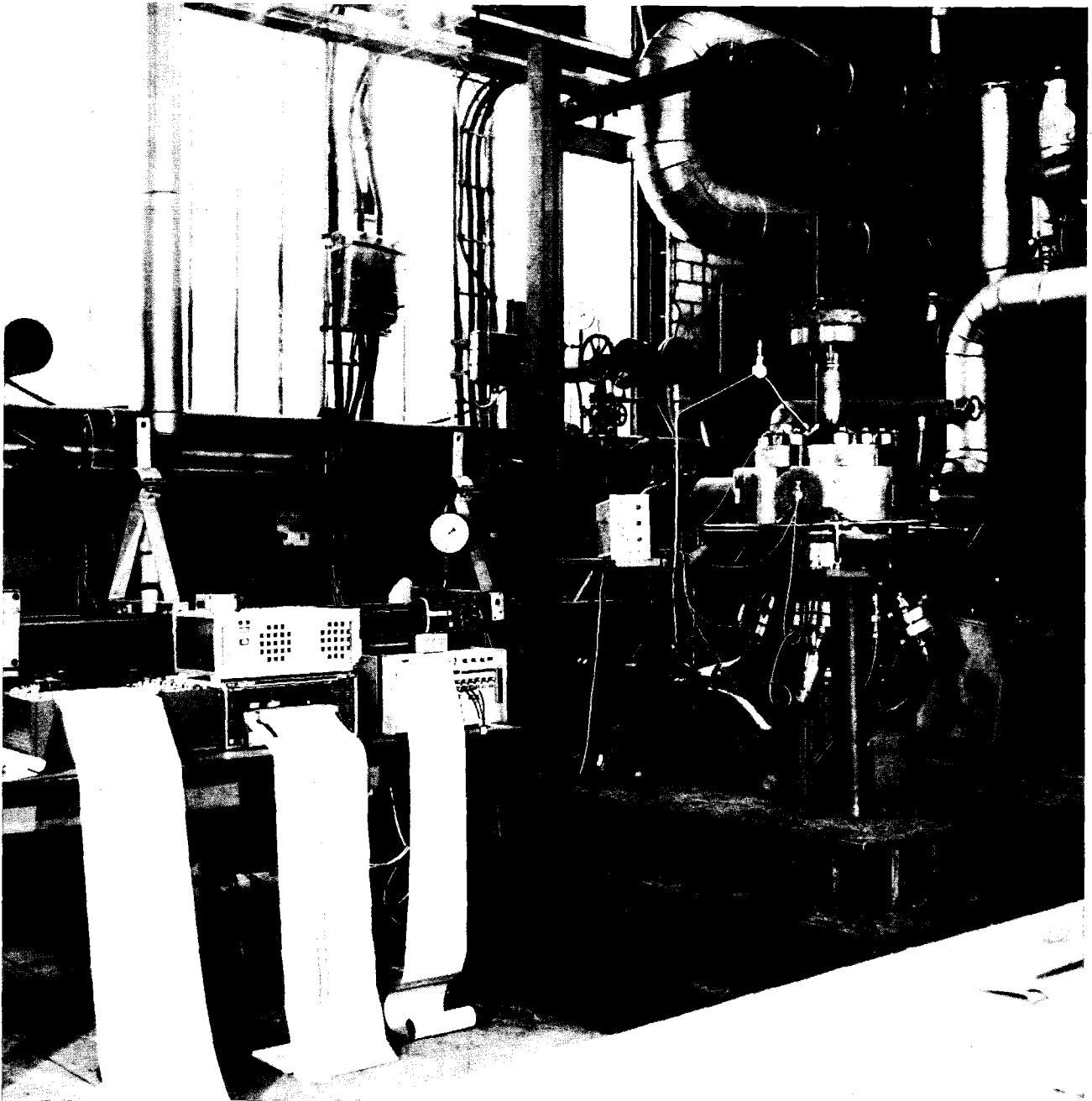
$\dot{m} = 50 \text{ kg/s}$, $p = 160 \text{ bar}$, $t = 620 \text{ K}$

ABB. 1



KIK

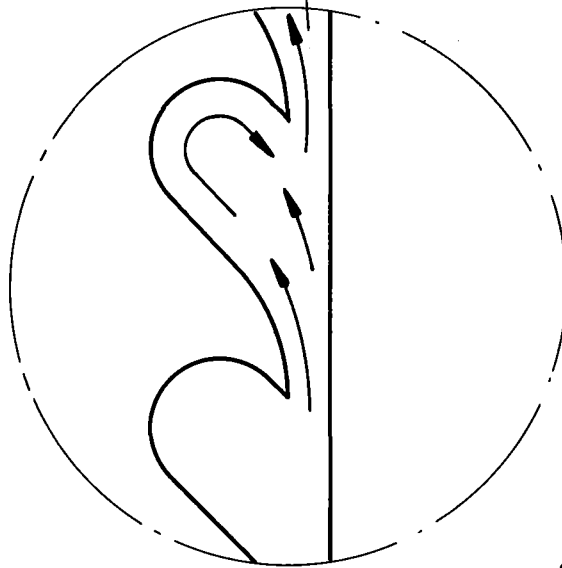
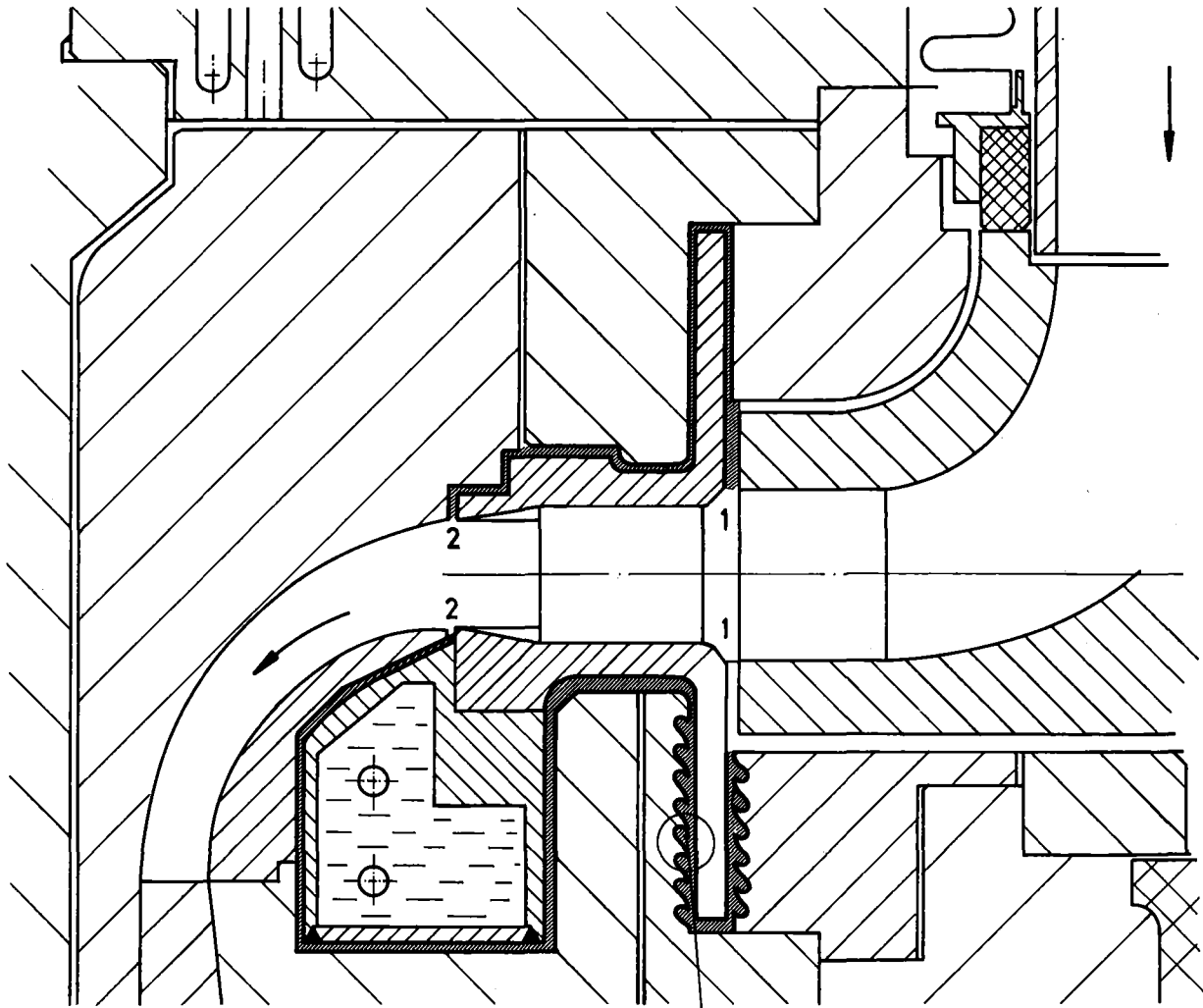
Zweiphasen-Luft/Wasser-Versuchsstand des IRB
 Schemá der Teststrecke



KfK

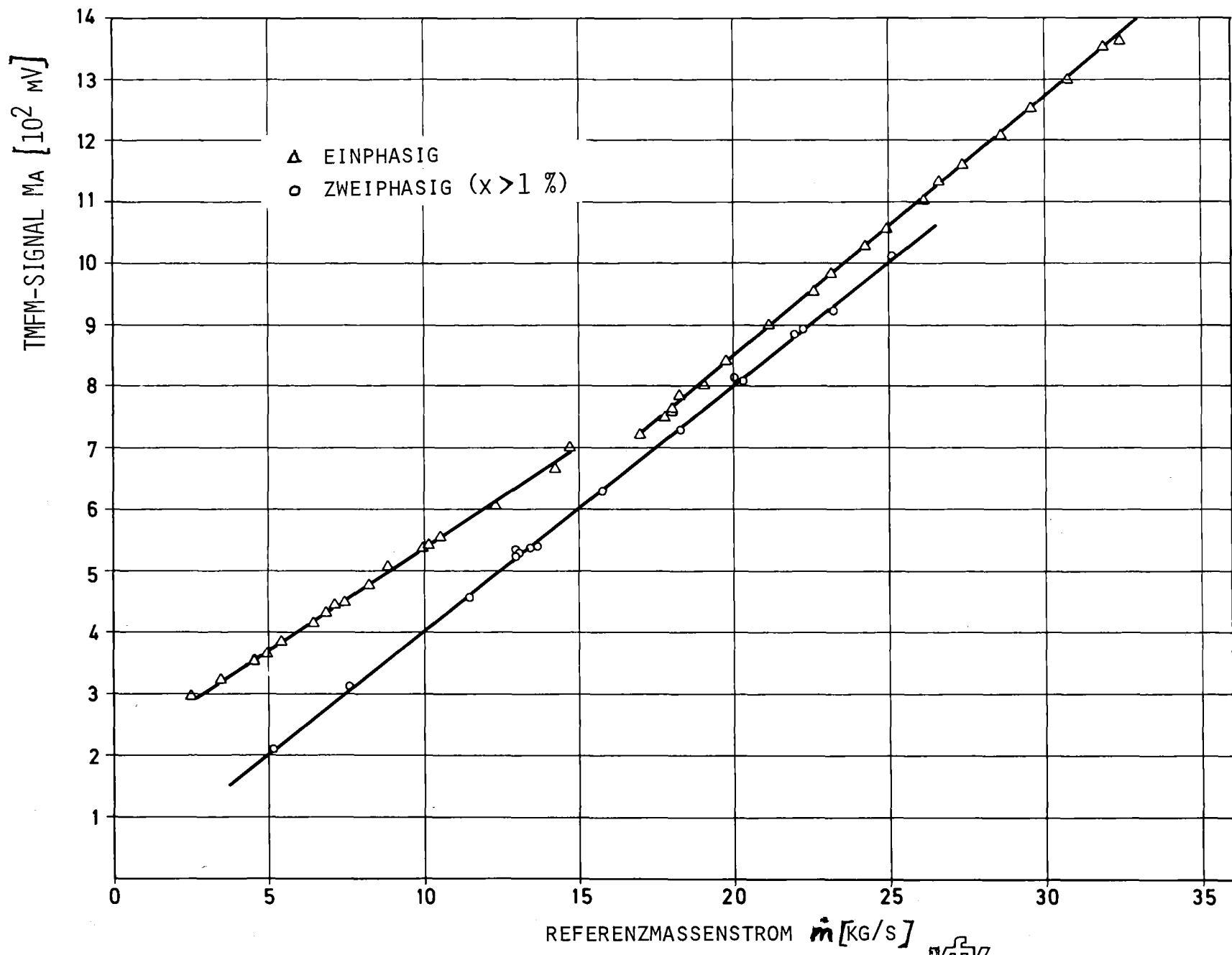
TRUE MASS FLOW METER 50 EINGEBAUT IM TESTSTAND FÜR
ZWEIPHASENSTRÖMUNGEN

ABB. 3

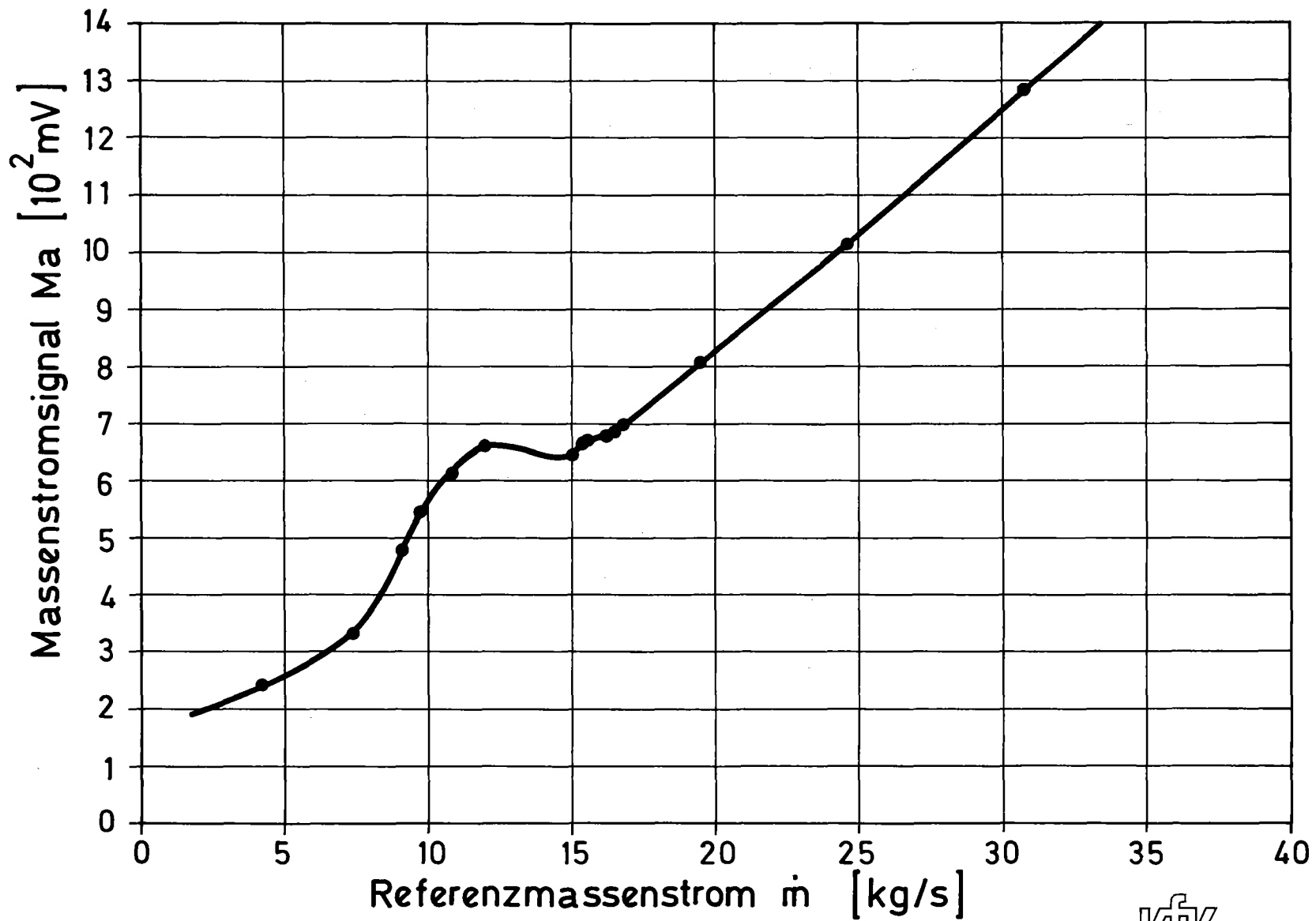


KfK IT 1981

TMFM 50 - ABDICHTUNG DES ROTORS UND STATORS
 STATOR OBEN MIT SPALTDICHTUNG, UNTEN MIT LABYRINTHDICHTUNG

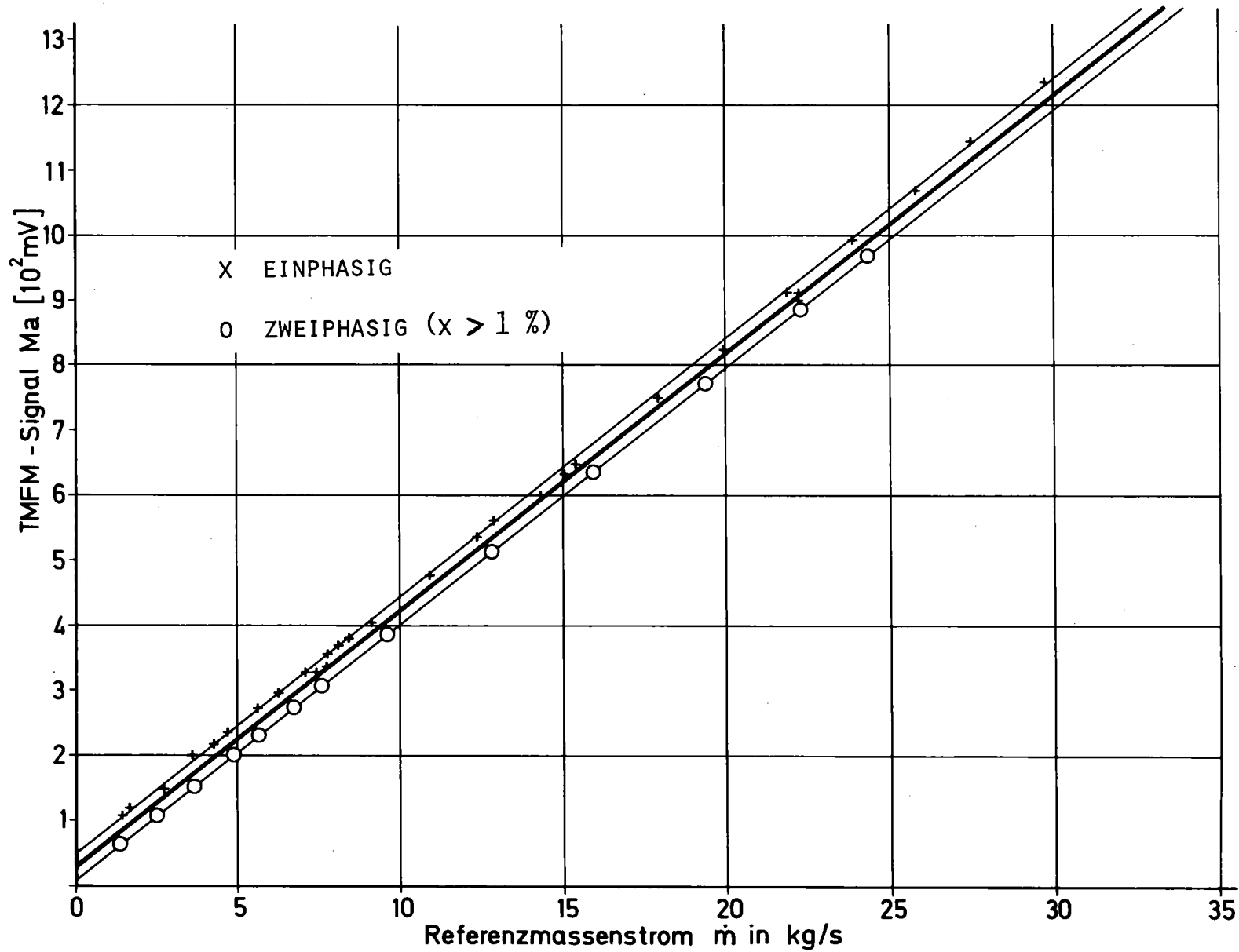


KENNLINIEN DES TMFM-50 MIT ROTOR I (136 SCHAUFELN)

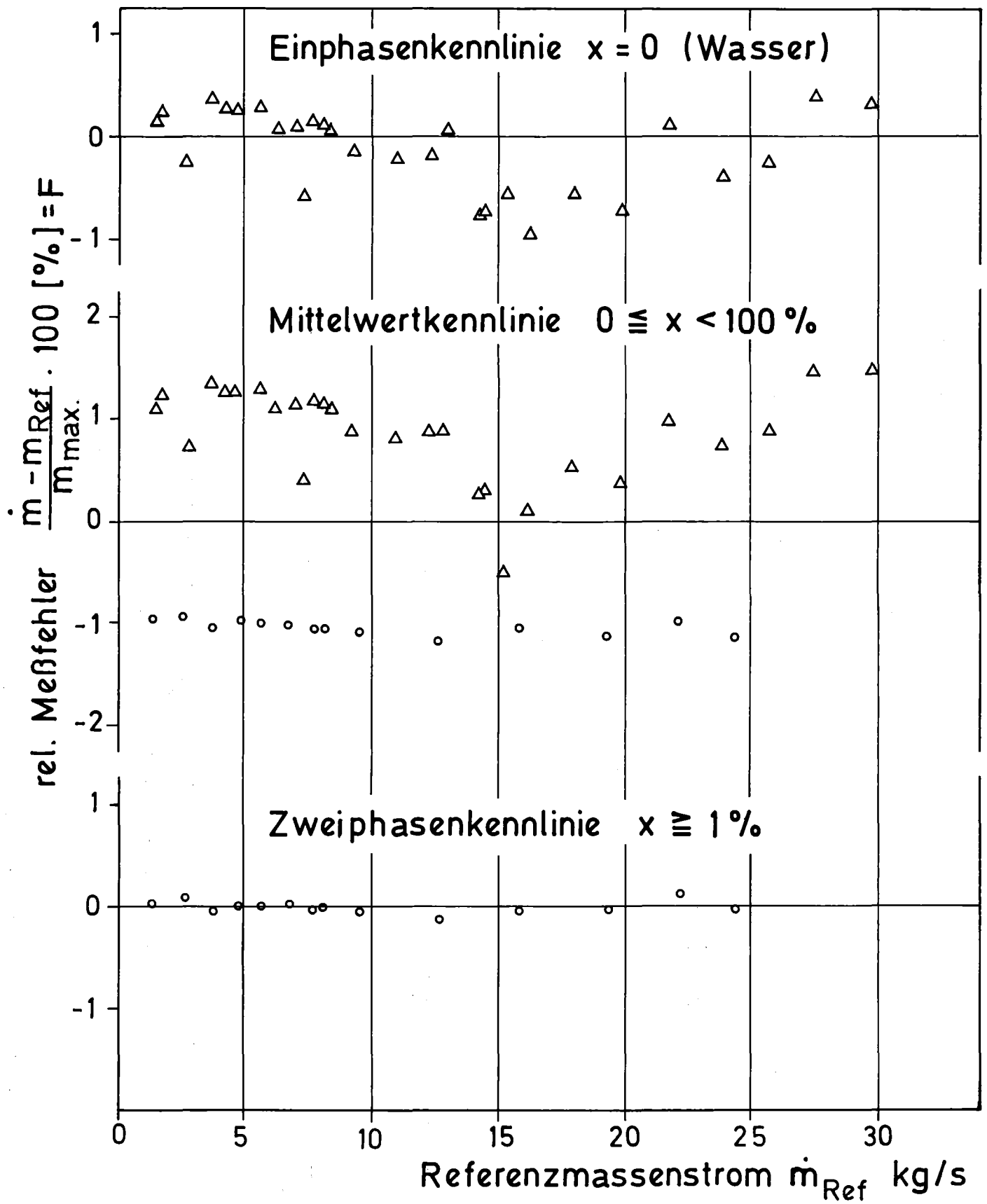


KfK

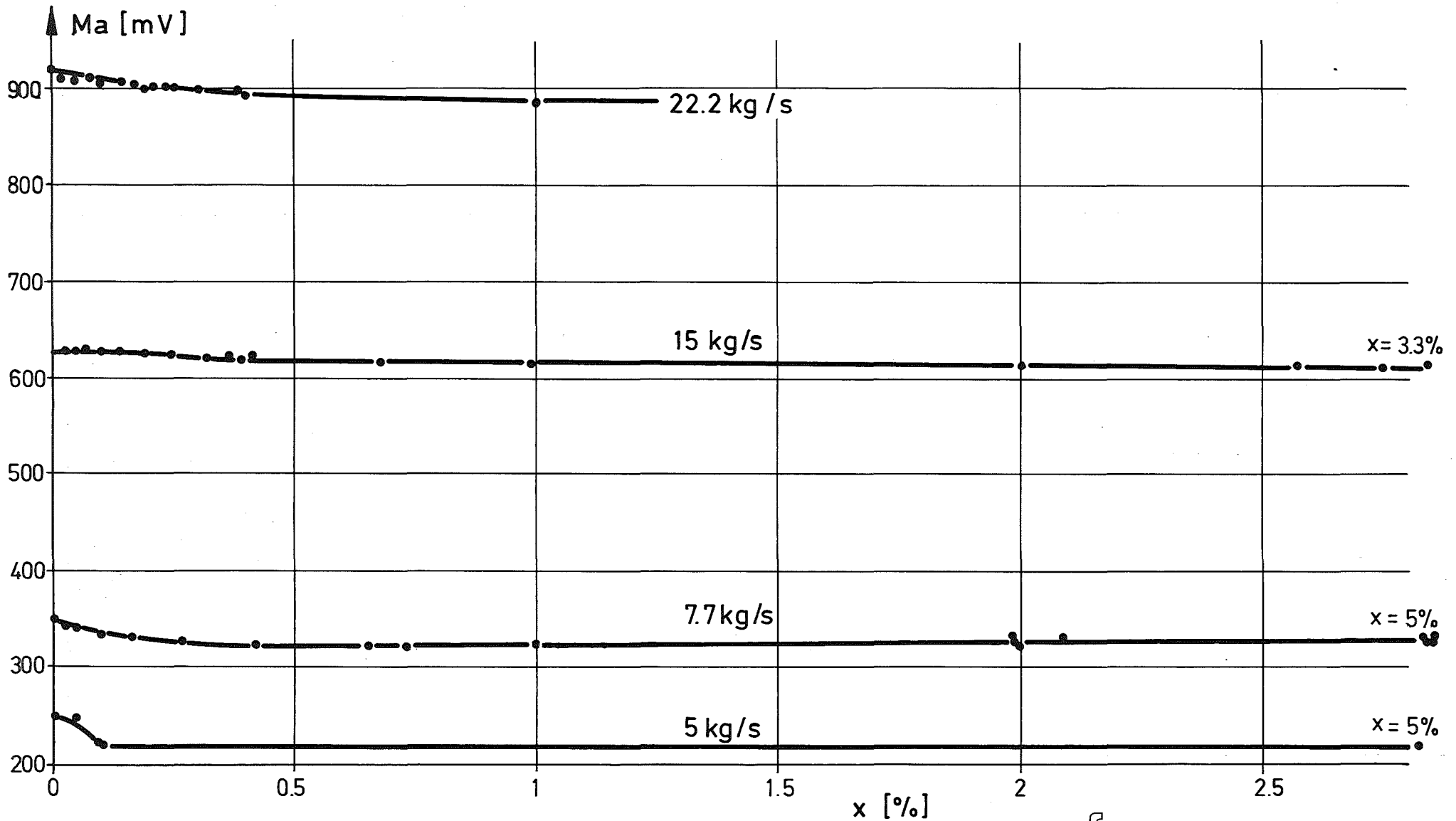
KENNLINIE (EINPHASIG, WASSER) DES TMFM-50 MIT ROTOR II
(68 SCHAUFELN) UND LABYRINTH-DICHTUNG DER STATORS



EINPHASEN - ZWEIPHASEN- UND MITTELWERTKENNLINIE DES TMFM-50

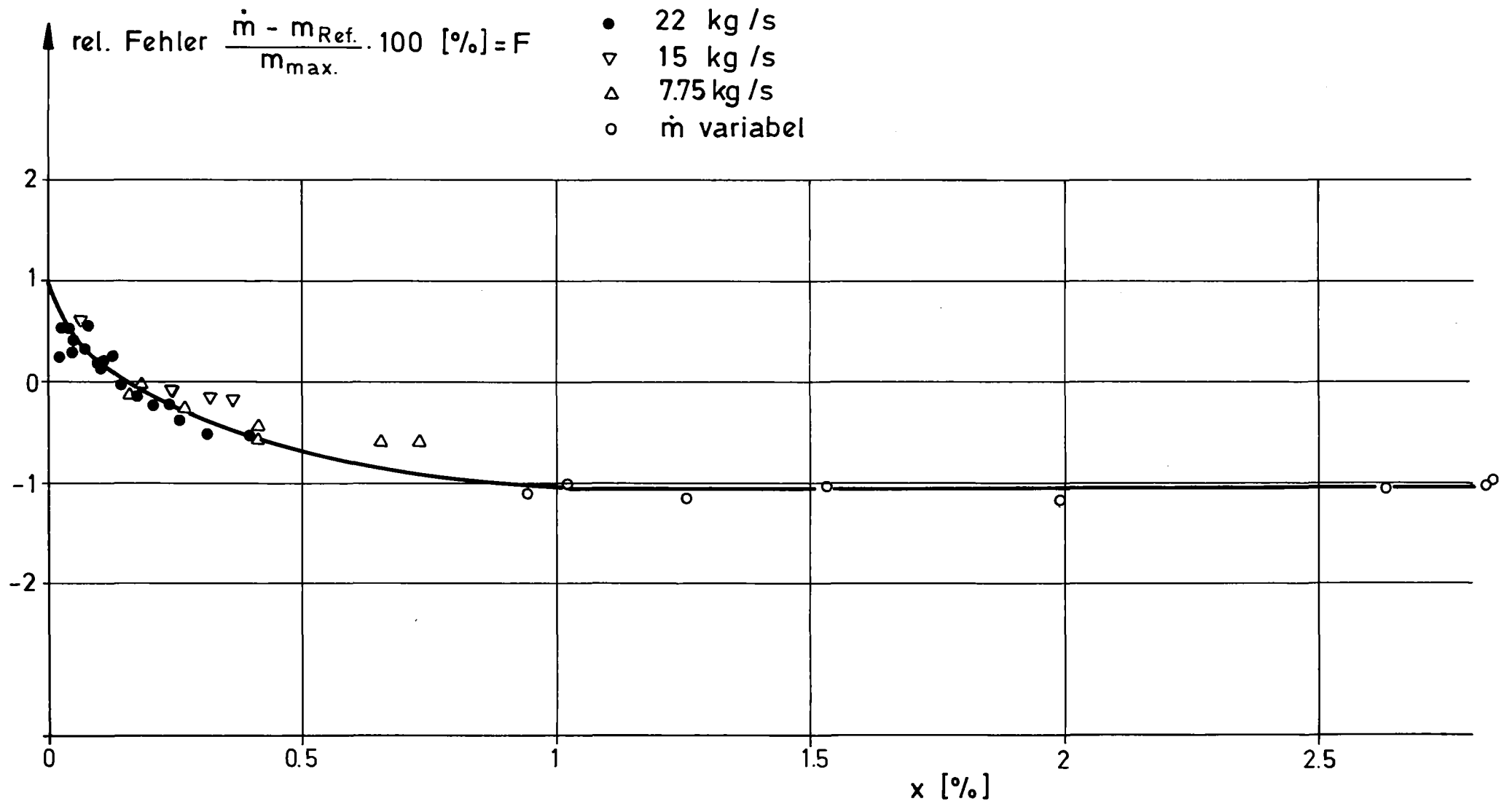


RELATIVE MESSFEHLER BEZOGEN AUF DIE 3 KENNLINIEN



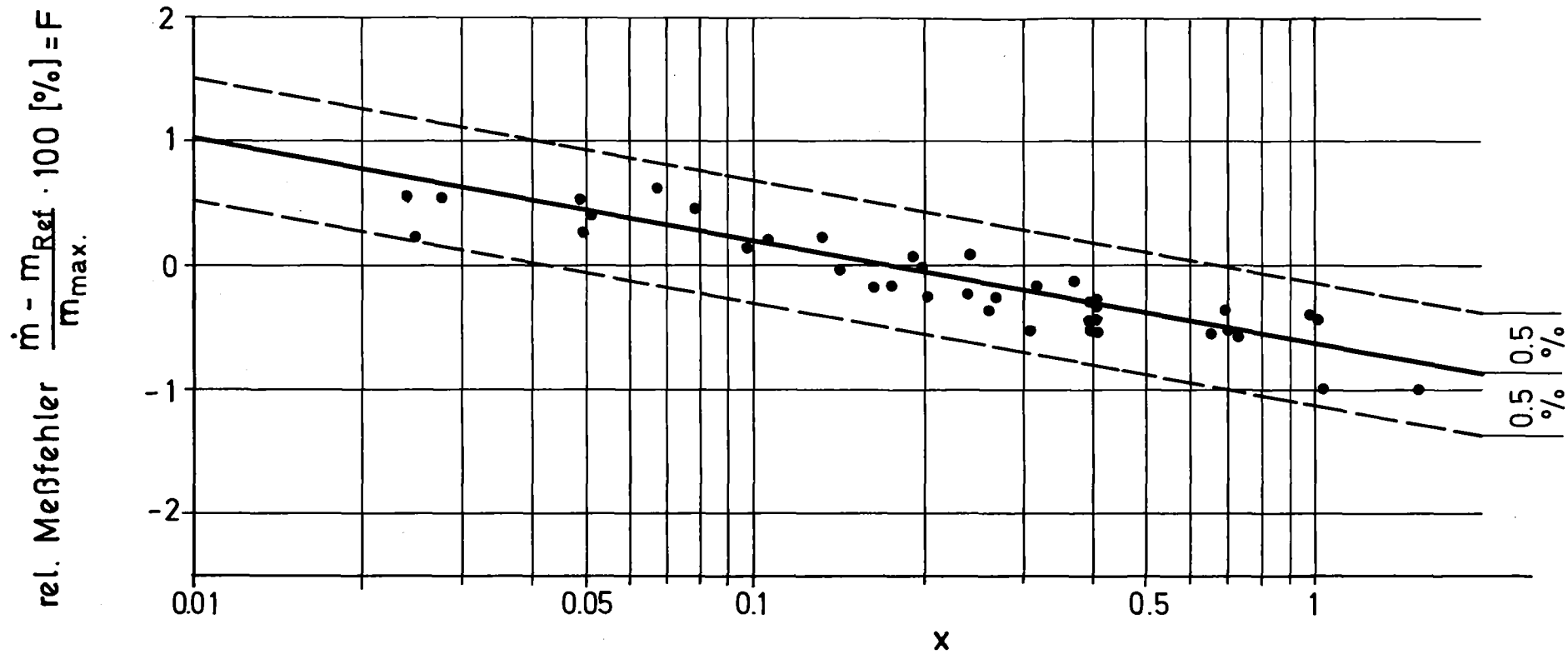
ABHÄNGIGKEIT DES MASSENSTROMSIGNALS VOM GASGEWICHTSANTEIL X

ABB. 9

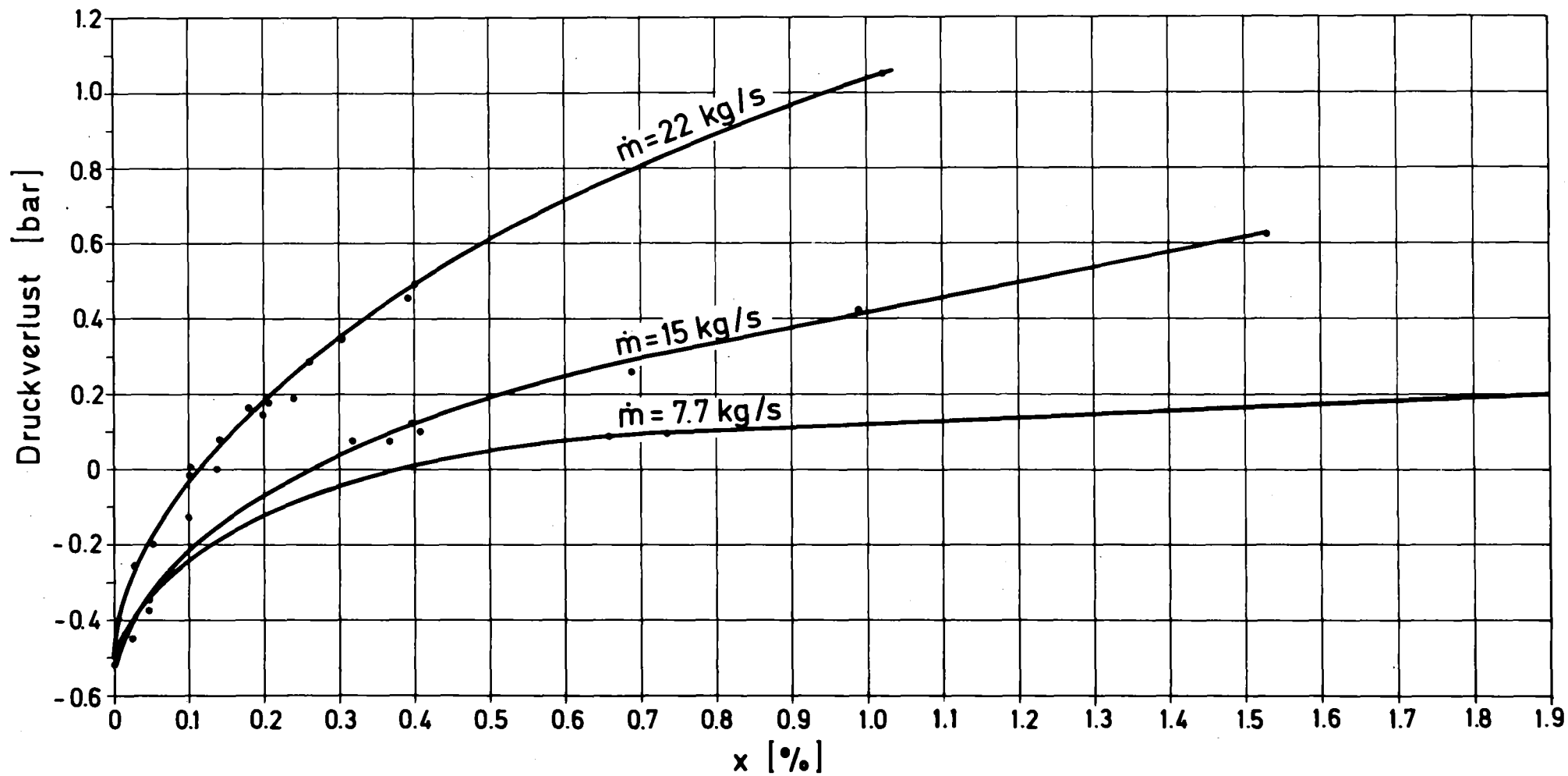


KfK

RELATIV. MESSFEHLER ABHÄNGIG VOM GASGEWICHTSANTEIL X

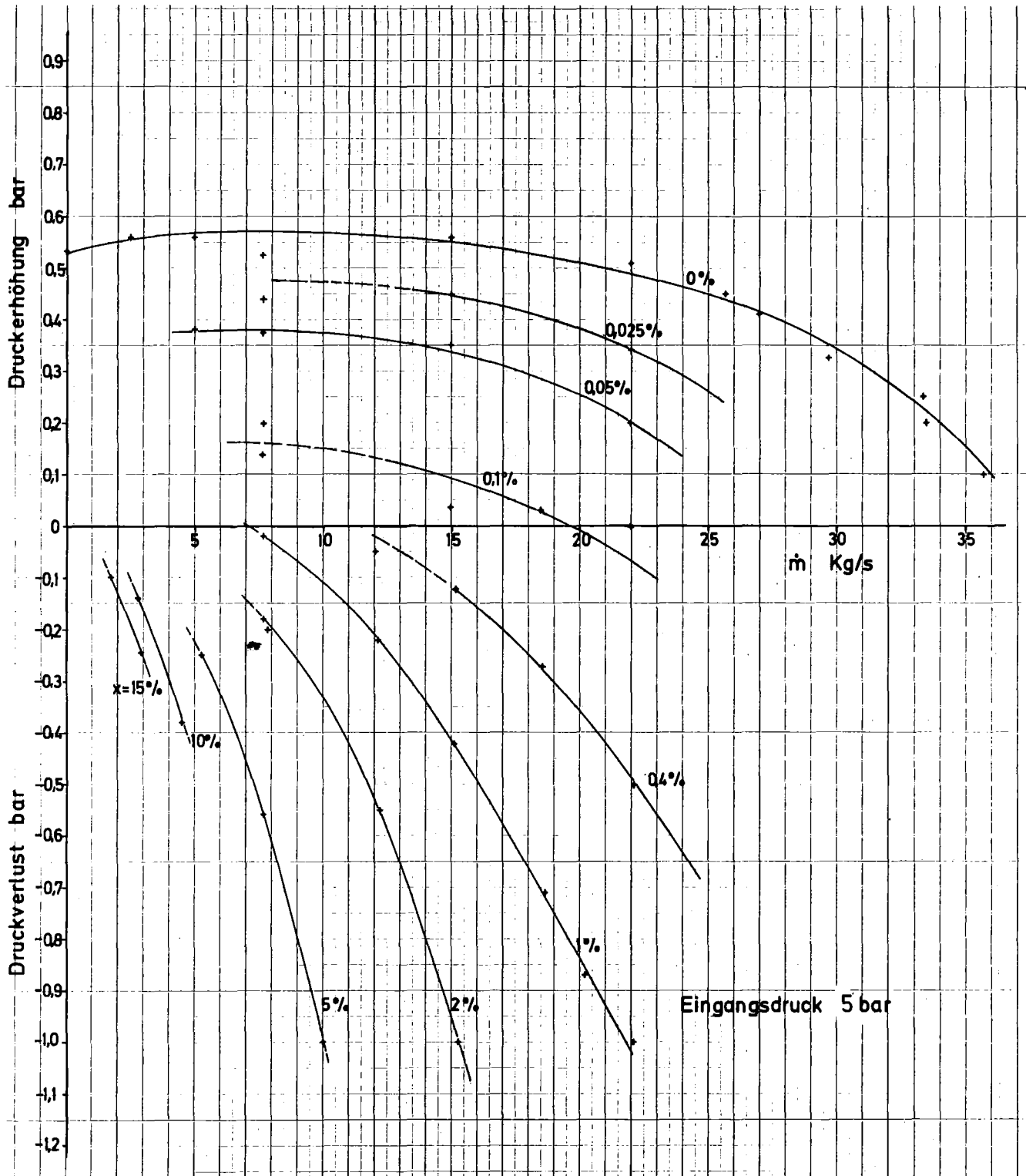


RELAT. MESSFEHLER ABHÄNGIG VOM GASGEWICHTSANTEIL X (FÜR X ≤ 1 %)

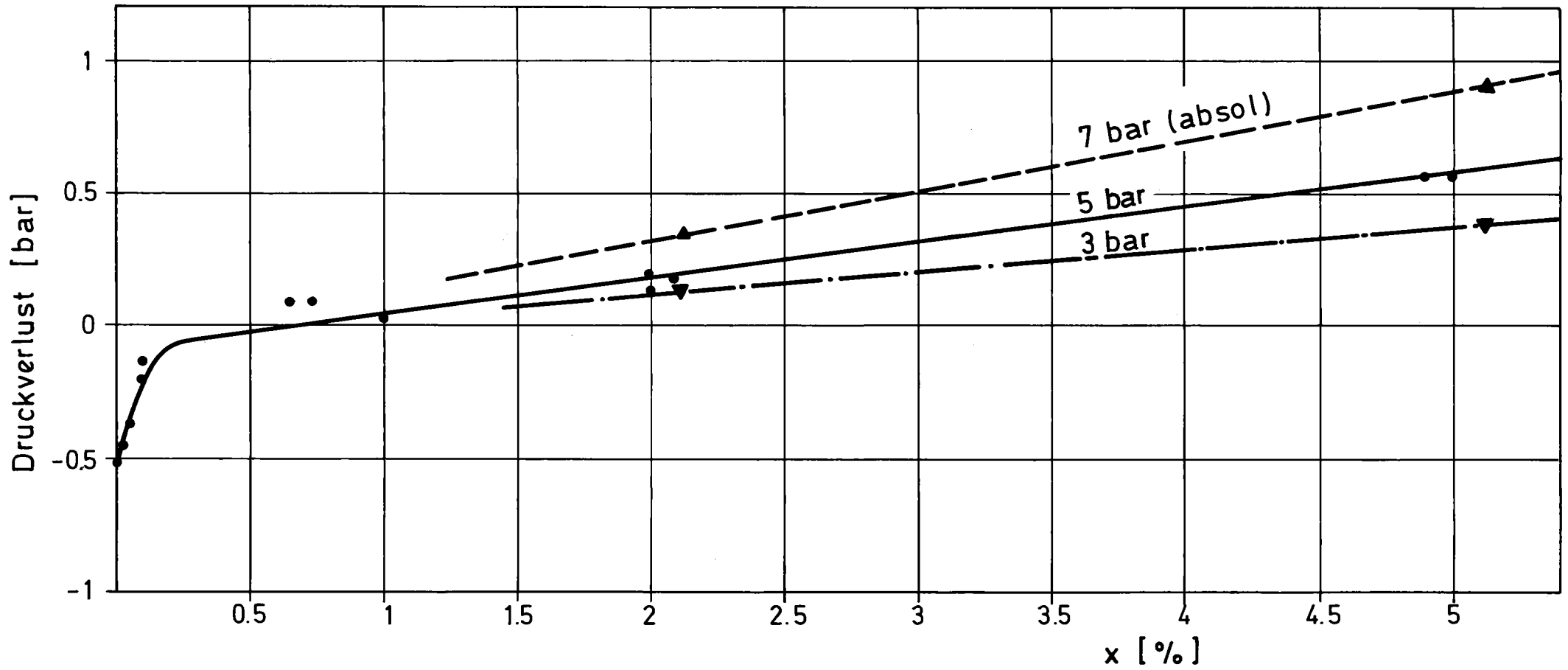


KfK

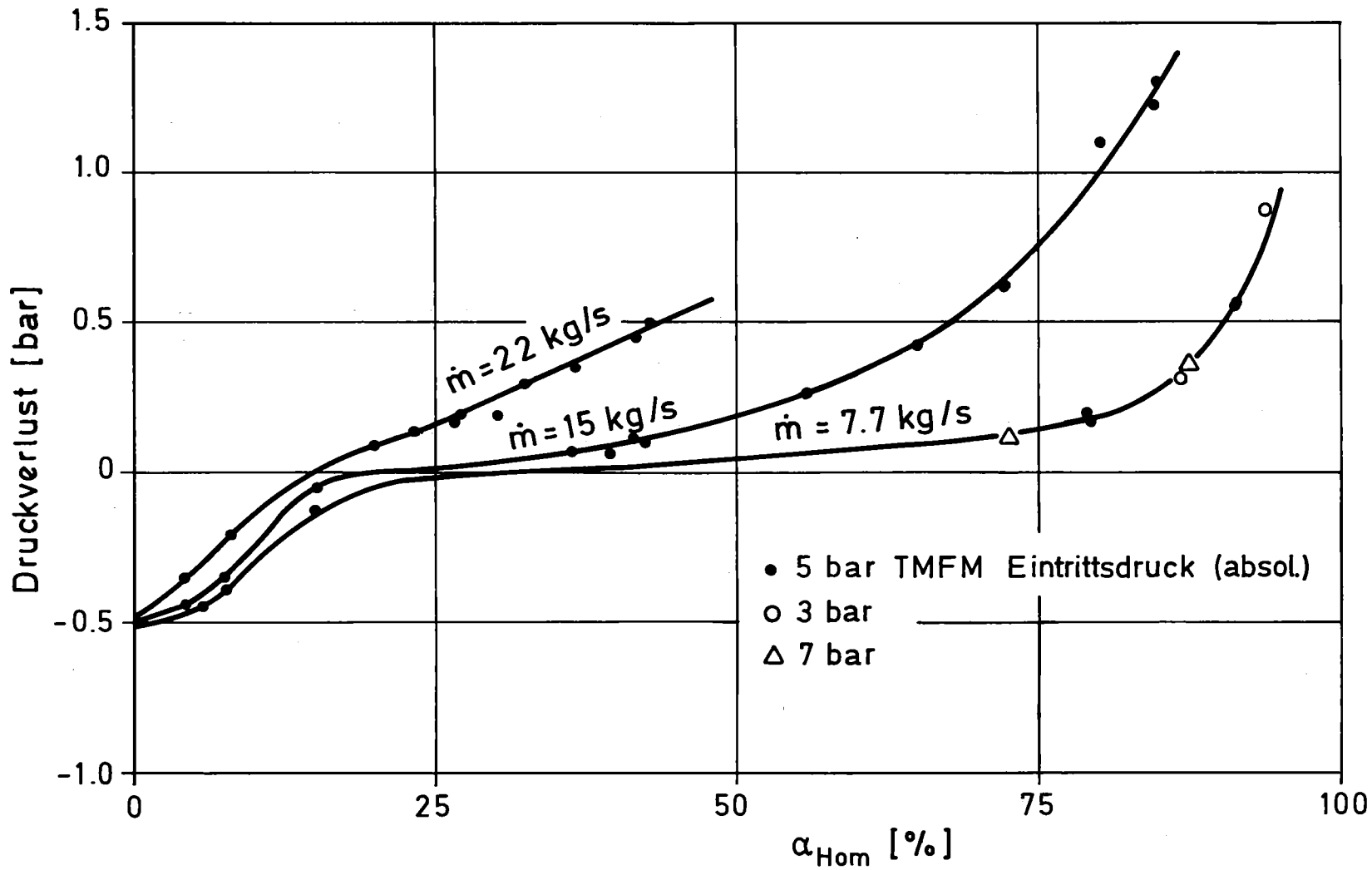
DRUCKVERLUST DES TMFM-50 IN ABHÄNGIGKEIT VOM GASGEWICHTSANTEIL X
 B. 5 BAR (ABS.) EINTRITTSDRUCK



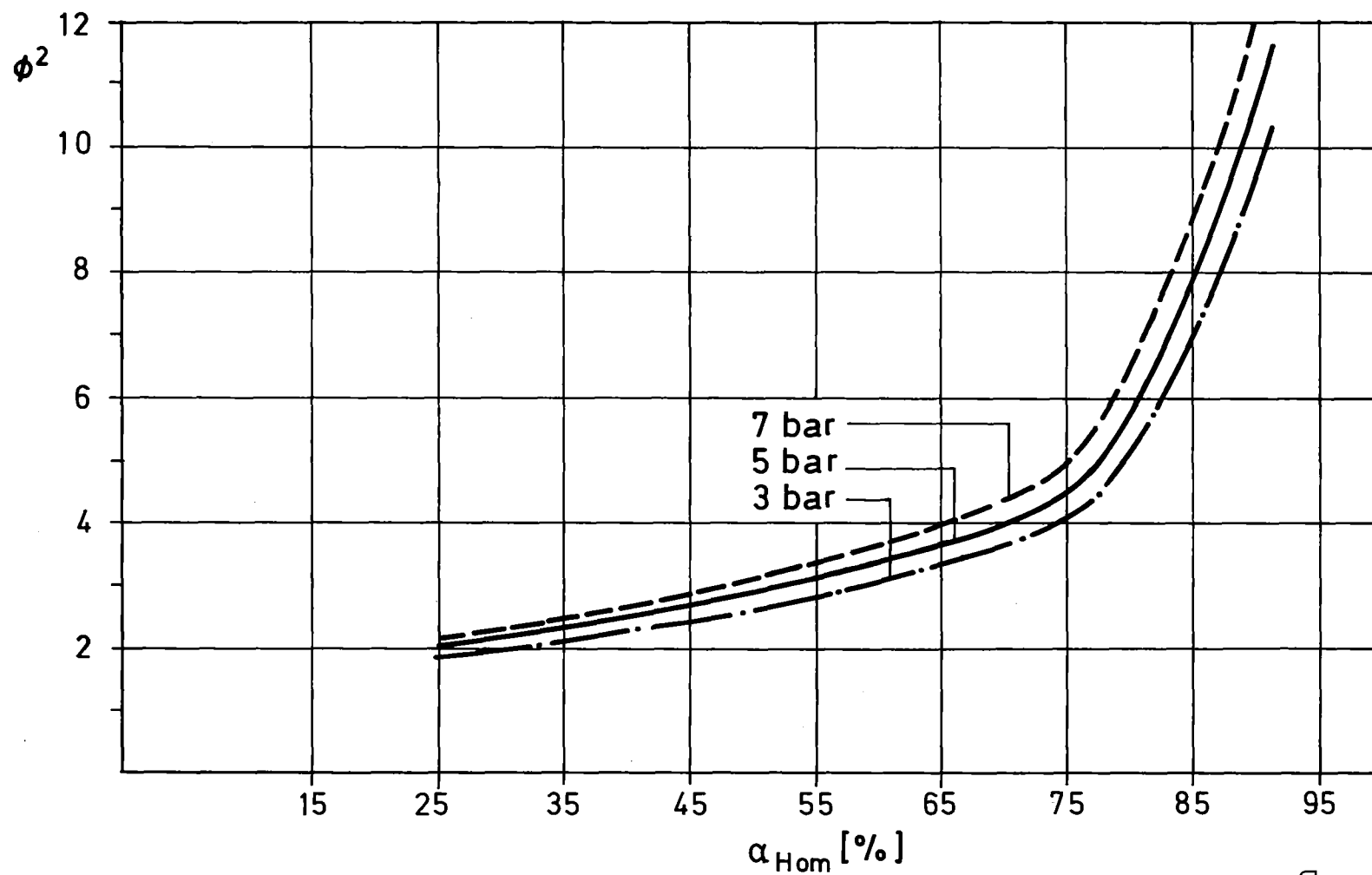
TMFM 50 - DRUCKVERLUSTE IN ABHÄNGIGKEIT VOM
MASSENSTROM UND X-GEHALT



DRUCKVERLUST DES TMFM-50 IN ABHÄNGIGKEIT VON X BEI $\dot{m} = 7,7 \text{ KG/s}$ UND VERSCHIEDENEN EINTRITTSDRUCKEN



DRUCKVERLUST DES TMFM-50 IN ABHÄNGIGKEIT VOM HOMOG. GASVOLUMENANTEIL α_{HOM}
 (α_{HOM}) BEZOGEN AUF MITTLEREN DRUCK IM TMFM)



ZWEIPHASEN-KORREKTUR-FAKTOR NACH LOCKHART UND MARTINELLI FÜR LUFT-WASSER-STRÖMUNG