

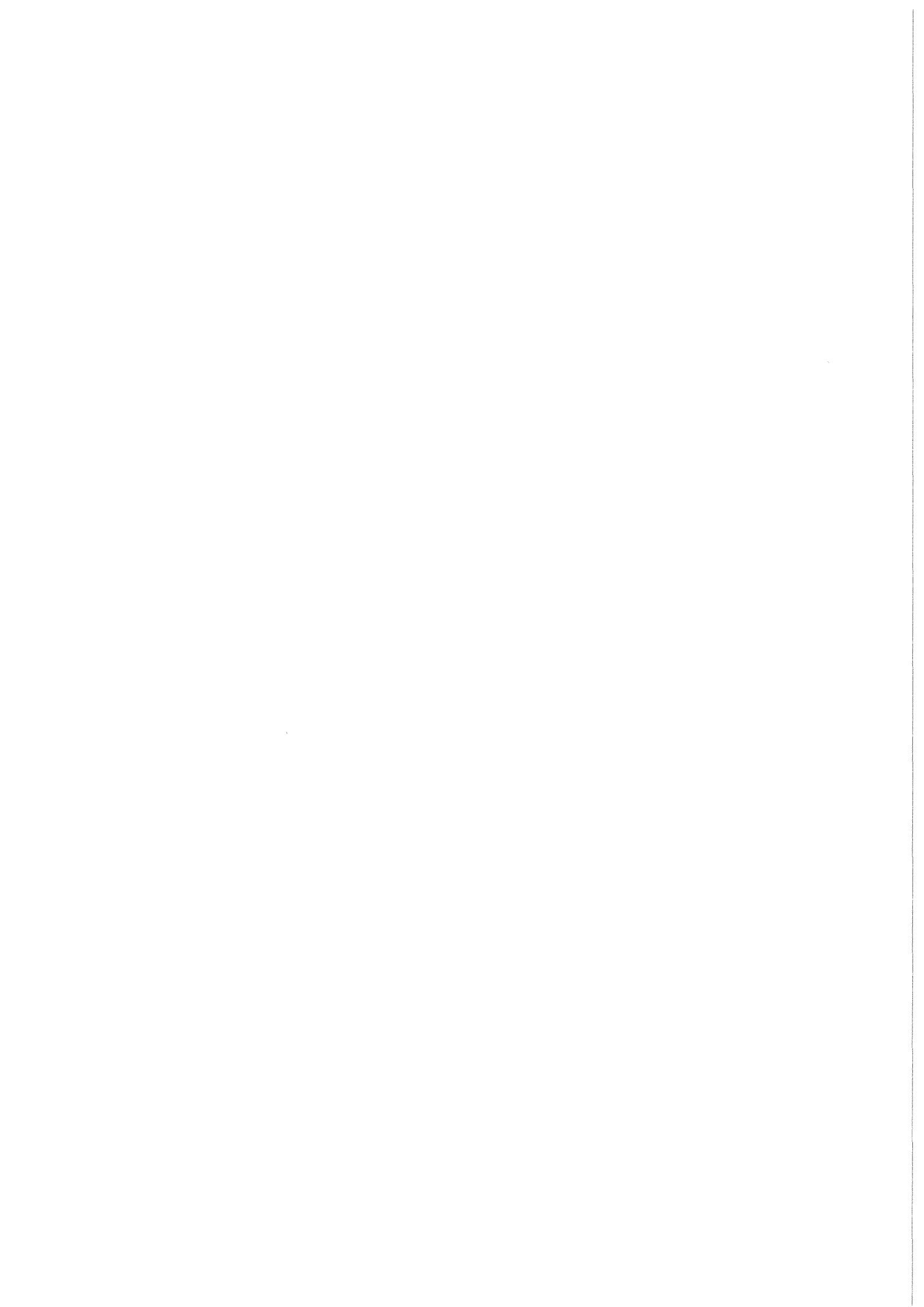


KfK 4192
Oktober 1987

Kritische Leckströmung aus rauhen Rissen in Druckbehältern

H. John, J. Reimann, G. Eisele
Institut für Reaktorbauelemente

Kernforschungszentrum Karlsruhe



Kernforschungszentrum Karlsruhe
Institut für Reaktorbauelemente

KfK 4192

Kritische Leckströmung aus rauhen Rissen
in Druckbehältern

H. John, J. Reimann, G. Eisele

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Zweiphasige Leckraten, die aus Rissen in druckführenden Komponenten von Kernreaktoren oder chemischen Apparaten austreten können, berechenbar zu machen, ist von großer Bedeutung besonders im Rahmen des Leck- vor Bruch-Kriteriums. Um eine zuverlässige Berechnungsmethode für diese kritischen zweiphasigen Massenströme durch rauhe Risse zu finden, wurden umfangreiche Versuche mit unterkühltem Wasser bis zu Drücken von 140 bar mit echten und simulierten Rissen durchgeführt. Die entscheidenden Parameter, wie Einlaßdruck und Unterkühlungstemperatur des Wassers, ferner die Spaltweite und die Rauigkeit der Spaltflächen wurden in weitem Umfang variiert. Die Meßergebnisse wurden mit Berechnungen nach mehreren Modellen verglichen. Ein von Pana veröffentlichtes Modell zeigte die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Erste Berechnungen mit diesem Modell wurden mit experimentell bestimmten Reibungsbeiwerten ζ gemacht. Mit einer aus diesen Experimenten abgeleiteten Beziehung zur Berechnung des Reibungsbeiwertes wurde das Pana Modell erweitert. Ein Vergleich von 458 mit diesem modifizierten Pana Modell berechneten Versuchspunkten mit den Meßergebnissen ergab eine relative Standardabweichung von unter 20 %.

CRITICAL TWO-PHASE FLOW THROUGH ROUGH SLITS

Abstract

The knowledge of the two-phase mass flow rate through a crack in the wall of nuclear or chemical reactor components is very important under the leak-before-break criterion point of view. For providing a qualified analytical tool for calculating critical mass flow rates through such a crack a detailed test program was carried out using subcooled water up to pressures of 14 MPa. A real crack and several simulated cracks (rough slits) were examined experimentally. The important parameters such as inlet pressure, subcooling temperature of water, slit width, and inner surface roughness were varied in a wide range and the measured data compared with calculated values from different models. The data comparison indicates that the model published by Pana leads to predictions which agree best with the observed data. First calculations were carried out using the friction coefficient ζ , which results from single phase flow measurements. A correlation has been developed to calculate ζ from the geometrical dimensions of the crack and was integrated into an advanced version of the Pana Model. The Modified Pana Model was qualified against some hundreds of test values. The measured data were predicted with a relative standard deviation of less than 20 percent.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
- Zusammenfassung	
- Abstract	
1. Einleitung	1
2. Versuchseinrichtung	2
2.1 Versuchskreislauf	2
2.2 Teststrecke	3
2.3 Versuchsdurchführung	5
3. Betrachtung von Modellen für zweiphasigen kritischen Massenstrom	6
3.1 Pana-Modell	6
3.2 Abdollahian-Modell I	10
3.3 Abdollahian-Modell II	12
3.4 Collier-Modell	13
4. Ergebnisse	13
4.1 Messung des Reibungsbeiwertes	13
4.2 Empirische Gleichung zur Berechnung des Reibungsbeiwertes aus den geometrischen Spaltparametern	14
4.3 Kritische Massenstromdichten aus Messung und Rechnung	16
4.4 Druckverlaufmessung im Spalt	19
5. Schlußfolgerung	20
- Danksagung	22
- Literatur	23
- Anhang A: Daten aus Messung und Rechnung	59
- Anhang B: Diagramme zur Bestimmung der Massenstromdichte in rauhem Rissen	76

1. Einleitung

Für die Sicherheit von Kernreaktoren und chemischen Apparaten ist es von großer Bedeutung, Leckraten aus Rissen druckführender Komponenten vorausbestimmen zu können. Meistens handelt es sich dabei um zweiphasige kritische Massenströme, wenn die Temperatur des Mediums in der Nähe des Siedepunktes liegt, was bei Kernreaktoren zutrifft.

Die Literatur weist viele theoretische und experimentelle Untersuchungen zu dieser Thematik auf, die sich jedoch meist mit Bruchöffnungen von 1 bis 10 cm, gelegentlich bis zu 1 m, befassen. Diese Untersuchungen, aus denen eine Reihe bekannter Ausströmmodelle (Blowdownmodelle) hervorgegangen sind, stammen aus der Zeit in der man beim Kühlmittelverluststörfall vom Abbruch einer ganzen Kühlmittelleitung (2F-Bruch) ausging. Als Folge der heute verwendeten zäheren Materialien und der fortgeschrittenen Kenntnisse über einen Bruchverlauf wird jetzt immer mehr das Leck- vor Bruch-Kriterium als realistisch angesehen (Munz [1,2]). Das Interesse hat sich daher mehr Strömungen durch kleine Leckagen wie Risse zugewandt.

In diesem Bericht sollen Untersuchungen von Strömungen durch enge rauhe Risse mit typischen hydraulischen Durchmessern ab $d_H = 0,5$ mm, Kanalbreiten von 80 mm und Kanallängen von $L = 46$ mm behandelt werden. Hierüber wird auch in [17] berichtet. Diese Kanäle sind gekennzeichnet durch ein großes $L/d_H =$ Verhältnis, jedoch relativ kurze Strömungslängen und große Wandrauigkeiten.

Die Frage, ob dafür die bisherigen Ausströmmodelle für zweiphasigen Massenstrom noch anwendbar sind, wurde häufig wie z.B. von Wallis [3] Amos [4] und Reimann [5] diskutiert.

Für Kanäle mit sehr großem L/d_H Verhältnis wird oft mechanisches und thermisches Gleichgewicht in der Strömung (Homogeneous Equilibrium Model = HEM) angenommen. Wegen der jedoch relativ kurzen Übergangszeiten für den Phasenwechsel wird bisweilen auch thermisches Ungleichgewicht, wie von Friedel [6] untersucht, zugrundegelegt. In diesem Bericht werden Modelle mit beiden Annahmen zum Vergleich mit den Meßergebnissen herangezogen und zwar einerseits das Gleichgewichtsmodell von Pana [7,8] und das Modell II von Abdollahian [9,10] und andererseits das Modell I von Abdollahian, das zwar mechanisches Gleichgewicht, jedoch thermisches Ungleichgewicht voraussetzt.

Letzteres baut auf ein Modell von Henry [11,12,13] auf. Es gibt nur sehr wenige Experimente mit Strömung durch enge Spalte, auf die zurückgegriffen werden kann. Zum Teil wurden sie in glatten Spalten oder mit geringer Oberflächenrauigkeit gemacht. Collier [14,15], Amos [4] und Kefer [16] führten Versuche mit unterkühltem Wasser durch und verglichen sie mit vorhandenen Modellen bzw. modifizierten sie diese Modelle. Tabelle I zeigt die wichtigsten Parameter dieser Versuche. Weitere Informationen sind in [17] enthalten.

2. Versuchseinrichtung

2.1 Versuchskreislauf

Abb. 1 zeigt das Schema des Versuchskreislaufes. Der von der Dampfkesselanlage gelieferte Wasserstrom fließt über ein Sintermetallfilter und eine variable Drosselstrecke zum Druckbehälter mit der Teststrecke. Nach dem Druckbehälter strömt das normalerweise jetzt zweiphasige Gemisch über ein Ventil zum Kondensator und von dort als Kondensat über eine Pumpe zur Kesselanlage zurück. Ein Zweigstrom fließt über das Bypassventil, das zum Einstellen des gewünschten Druckes vor der Teststrecke erforderlich ist, direkt zum Kondensator zurück.

Das Sintermetallfilter soll Korrosionsprodukte zum Schutz der engen Testspalte zurückhalten. Diese können aus der aus ferritischem Material gebauten Kesselanlage besonders beim Anfahren herausgetragen werden. Vom Filter bis zum Gegendruckregelventil ist der Versuchskreislauf aus diesem Grunde aus Edelstahl gefertigt. Die aus zwei parallelen Einheiten bestehende Drosselstrecke Fabrikat Caldyn/Ettlingen, die zur Bestimmung des einphasigen Massenstromes dient, erlaubt die Einstellung von 12 geeichten Öffnungsverhältnissen. Damit kann der über einen großen Bereich zu erwartende Massenstrom mit optimaler Genauigkeit bestimmt werden. Der absolute und der Differenzdruck an der Drosselstrecke werden mit Rosemounttransmittern und die Temperatur mit NiCrNi-Thermoelementen bestimmt. Diese 3 Signale gehen zum Rechner PDP 11, durch den eine ständige on-line-Berechnung des Massenstroms durchgeführt wird. Die Anlage kann mit maximal 3 kg/s unterkühlten Wassers bis zu einem Druck von 14 MPa betrieben werden. Die Unterkühlung des Wassers, bezogen auf den Siedepunkt vor der Teststrecke konnte bis minimal ca. 2 K reduziert werden. Die maximalen Werte lagen bei 60 K.

Der Kreislauf ist an mehreren zusätzlichen Stellen mit Temperatur- und Druckmeßstellen bestückt, deren Signale teilweise vom Rechner erfaßt werden.

2.2 Teststrecke

Die Einzelheiten der Teststrecke die abweichend von Abb. 1 aus 4 parallel geschalteten Einheiten bestand, sind in Abb. 2 in vereinfachter Form dargestellt. Prinzipiell besteht die Teststrecke aus zwei gleichgroßen Stahlblöcken, zwischen denen mittels Abstandshaltern ein definierter senkrechter paralleler Spalt eingestellt wird. Die Abstandshalter sind wie die Abbildung zeigt, in Nuten eingelassen, die die Spaltflächen seitlich begrenzen. Durch Einsetzen von Abstandshaltern verschiedener Dicke kann die Spaltweite variiert werden. Dieses wurde in Stufen von 0,1 mm getan. Das Blockpaar mit Abstandshaltern wird mit einer speziellen Abdeckplatte und 4 Stiftschrauben auf eine dickwandige runde Grundplatte gespannt, die eine konzentrische Bohrung hat, deren Durchmesser wie die Spaltbreite, 80 mm beträgt. Zwischen Blockpaar und Grundplatte befindet sich eine Dichtung. Durch eine Reihe von Schrauben in der Abdeckplatte werden die Blöcke gegen ihre Abstandshalter zusammengedrückt, die Abstandshalter in ihre Nuten gepreßt und axial mit den Stirnflächen gegen die Dichtung der Grundplatte gedrückt. Auf diese Weise werden Bypassströme zur Spaltströmung, die das Meßergebnis verfälschen würden, vermieden. Die Spalttiefe (in Strömungsrichtung) ist bei allen Testeinsätzen 46 mm und die Spaltbreite 80 mm. Die Grundplatte wird als Zwischenboden zwischen die beiden glockenförmigen Hälften des Testbehälters, die jeweils einen Eintritts- und Austrittsstutzen haben, geflanscht. Die dem Spalt zugewandten Flächen der beiden Blöcke sind durch Sandstrahlen mit unterschiedlicher Korngröße, bzw. mit Stahlgries, künstlich aufgeraut, um echte Rißstrukturen zu simulieren. Es wurden 2 Blockpaare hergestellt, deren Spaltrauhigkeiten mehrmals nach Abschluß der Versuche geändert wurde. Das Material ist V2A. Es wurde ferner ein Teststreckeneinsatz mit einem echten Riß hergestellt. In einer Materialprüfmaschine wurde ein längerer Stahlblock mit 100 x 50 mm Querschnitt durch Biegewechselbelastung "durchgebrochen". In der Rißebene war der Block ringsherum eingekerbt, um das Rißwachstum zu begünstigen und um eine möglichst ebene Rißfläche zu bekommen. Es mußten dennoch mehrere Risse erzeugt werden, um einen brauchbaren Teststreckeneinsatz mit definierbaren Größen zu bekommen. Aus dem geteilten Rißblock wurde ein Teststreckeneinsatz mit den selben Abmessungen, wie die beschriebenen Einsätze, herausgearbeitet. Das Material des Einsatzes für den echten Riß war das Reaktormaterial 20

MnMoNi 55. Es wurde verwendet, um möglichst realistische Rißrauhigkeiten zu bekommen.

Die Rauigkeiten der Rißoberflächen wurden sowohl bei den simulierten als auch bei dem echten Riß mit einem Perthometer ausgemessen. Die gegenüberliegenden Rißflächen wurden an ca. 10 verschiedenen Stellen über eine Länge von jeweils 5 mm abgetastet. Die auf dieser Strecke ermittelten maximalen Höhendifferenzen wurden von allen 10 Messungen gemittelt und als gemittelte maximale Rauigkeit (R) definiert. Von den möglichen Rauigkeitsdefinitionen scheint diese als Parameter für die flüssige Reibung im Spalt am sinnvollsten zu sein. Weniger sinnvoll scheint die von einigen Autoren zugrunde gelegte sogenannte mittlere Rauigkeit zu sein, die als Mittelwert aller Spitzen- und Tälerabstände von einer Mittellinie definiert ist. Die Größe der mittleren Rauigkeit wird stark durch die vielen kleinen Rauigkeitserhebungen bestimmt, die aber an der Strömungsreibung offenbar keinen großen Einfluß haben. Zwischen der gemittelten maximalen Rauigkeit und der mittleren Rauigkeit besteht kein eindeutiger funktionaler Zusammenhang. Nach eigenen Erfahrungen und Aussagen aus der Literatur, z.B. Button [17], ist letztere etwa 6 bis 10 mal kleiner als die von uns definierte Rauigkeit. Wie die später behandelten Ergebnisse zeigen, ist der Parameter Rauigkeit und die genaue Definition desselben von großer Bedeutung für die Berechnung der Spaltleckraten.

Ebenso wichtig ist die richtige Bestimmung der effektiven Spaltweite S. Da die Rauigkeitserhebungen in der Größenordnung der Spaltweiten liegen, müssen sie bei der Festlegung der Strömungskanalweiten berücksichtigt werden. Bei den simulierten Spalten, bei denen die Rißflächen absolut plan sind, wurden mit Fühlerblechen (Spione), die in Dickenstufen von 0,01 mm zur Verfügung standen, nach der Montage der Testeinsätze die lichten Spaltweiten S_m d.h., die Abstände zwischen den großen Rauigkeitserhebungen beider Flächen festgestellt. Zu diesem Maß wurde 2 mal die halbe Rauigkeitserhebung R dazu gezählt d.h. $S = S_m + R$.

Beim echten Riß, bei dem die Flächen eine leichte Welligkeit hatten, war dieses Meßverfahren nicht optimal anwendbar. In diesem Fall wurden die 2 Rißflächen so zur Deckung gebracht, daß die Spaltweite praktisch 0 war. In dieser Position, in der auch die Endbearbeitung der anderen Blockflächen und der Abstandshalternuten gemacht werden mußten, wurden die beiden Nuten ver-

messen. Der Betrag um den die Abstandshalter dicker waren als die Nutenweite wurde als Spaltweite S_m definiert. Die gemessene Rauigkeit R wurde auch hier zu S_m addiert, um die effektiven Spaltweite S zu bekommen, denn beim Aufeinanderliegen der beiden Rißflächen wurde angenommen, daß zwar das Welligkeitsprofil beider Flächen deckungsgleich sei, jedoch nicht die Rauigkeitserhebungen ineinander verzahnt seien.

Beim Vermessen der simulierten Risse wurde festgestellt, daß in den meisten Fällen die Austrittsweite etwas größer war als die Eintrittsweite. Vermutlich waren geringfügige Verformungen des Testeinsatzes durch Montagekräfte die Ursache. Da bei allen Versuchspunkten der Austrittsquerschnitt der kritische Querschnitt war, wurde die Austrittspaltweite S_A für die Berechnungen zugrundegelegt.

7 Druckentnahmebohrungen in Strömungsrichtung auf beiden Rißflächen verteilt dienten der Messung des Strömungsdruckabfalles im Spalt. Die Bohrungen waren mit variablen seitlichem Abstand nach beiden Seiten der Strömungsmittellinie angebracht um die Strömung möglichst wenig zu stören.

2.3 Versuchsdurchführung

Abb. 3 zeigt die Matrix der Versuchsparameter. Alle Testeinsätze wurden mit Eintrittsdrücken von 4, 6, 8, 10 und 12 MPa und wenige mit 14 MPa gefahren. Die Unterkühlungstemperaturen, bezogen auf den Eintrittsdruck, waren 60, 50, 40, 30, 20, 10 und 2 K. Die Unterkühlung 0 (Siedepunkt) konnte wegen instabilen Verhaltens der Druckregelung nicht ganz erreicht werden. Der Gegendruck p_u , der normalerweise beim Umgebungsdruck lag, wurde jeweils beim 60 K Punkt so weit angehoben bis unterkritische und einphasige Strömung erreicht war. Mit steigendem Gegendruck wurden dann jeweils einige einphasige Punkte gefahren, um den Reibungsbeiwert ζ , der, wie später berichtet wird, für die Rechnungen benötigt wurde, zu bestimmen.

Die ζ -Bestimmung war auch deshalb von großer Bedeutung und wurde daher nach jedem neuen Versuchsstart wiederholt, weil ein konstanter ζ -Wert ein Zeichen für unveränderte Geometrie des Spaltes ist. Gegenüber Ablagerungen, Erosion oder thermischer Dehnung sind die engen Spalte sehr empfindlich.

Der Versuchsablauf war folgender: Nach dem Starten der Kesselanlage wurde zunächst mit steigender Temperatur das Wasser durch den Bypass geleitet, bis die Leitungen frei vom Rost waren. Danach wurde der Testkreislauf angewärmt. Die einzelnen Versuchspunkte wurden gewöhnlich mit steigender Temperatur, die nur langsam erhöht werden konnte angesteuert. Der Eintrittsdruck wurde dabei durch ständige Korrekturen konstant gehalten. Vom Rechner wurden die notwendigen Leitgrößen, wie Drücke, Temperaturen und Unterkühlungsgrade bei Bedarf ausgedruckt. Die Zeitspanne zwischen zwei Versuchspunkten war 20 bis 30 Minuten. Beim Erreichen der gewünschten Werte wurden auf Befehl vom Rechner die Drücke und Temperaturen vor und nach dem Spalt, die Unterkühlungstemperatur, der gerechnete Massenstrom und die sieben gemessenen Drücke im Spalt aufgenommen und auf Magnetplatten gespeichert, um sie zur späteren Weiterverarbeitung abzurufen.

Insgesamt wurden mit 16 Schlitzkonfigurationen 458 verwertbare Versuchspunkte erreicht.

3. Betrachtung von Modellen für zweiphasigen kritischen Massenstrom

Da es das Ziel der Arbeiten, über die hier berichtet wird, ist eine Rechenmethode zu finden, mit der sich Leckraten aus Rissen möglichst genau und mit annehmbarem Aufwand berechnen lassen, wurden Modelle aus der Literatur aufgegriffen und auf ihre Verwendbarkeit untersucht. Im Folgenden werden 4 ausgewählte Modelle, die später mit den Versuchsergebnissen verglichen werden, kurz beschrieben.

3.1 Pana Modell

Pana [7,8] hat eine Methode für die Berechnung von kritischen zweiphasigen Leckraten veröffentlicht, die die flüssige Reibung in dem Leck durch Einführung des Reibungsbeiwertes ζ berücksichtigt. Diese Methode unterscheidet sich hierdurch von den Blowdown-Modellen. Die Berechnungsmethode basiert auf thermodynamischen Gleichgewichtsmodellen, wie die modifizierte Bernoulligleichung und das homogene Gleichgewichtsmodell (HEM) bzw. alternativ das Moody Modell [20].

Das Moody Modell geht von fluiddynamischem Ungleichgewicht aus. Bei einem Strömungskanal, wie ihn ein enger rauher Riß darstellt, ist die Strömung so stark durchmischt, daß man homogene Strömung annehmen kann. Es wird daher das Pana Modell für unsere Anwendung nur in Verbindung mit dem HEM betrachtet. Exemplarische Rechnungen zeigten, daß sich mit dem Moodyansatz ein um 30 bis 100 % höherer Massenstrom ergeben würde, der, wie später einleuchtend wird, unrealistisch ist. Pana teilt den Bereich der kritischen Entspannung von unterkühltem bis zum gesättigten Wasser, und nur dieser Bereich soll hier betrachtet werden, in 2 Gebiete ein, die anhand des Enthalpie-Entropiediagrammausschnittes in Abb. 4 erläutert werden sollen.

Da die Entspannung zwischen dem Eintrittsdruck P_o und dem Gegendruck P_u reibungsbehaftet ist (polytrop), verläuft sie nicht als Senkrechte im Diagramm, sondern mit einer Steigung, die zunehmender Entropie entspricht. Ausgehend von dem Gebiet niedriger Eintrittstemperatur T_o zu höherer Temperatur (von links unten nach rechts oben) wird mit T_o'' und T_2'' der Punkt erreicht, in dem der Zustand im Austritt des Spaltes die Sättigungslinie erreicht, Zweiphasenstrom entsteht und kritische Entspannung beginnt. Mit steigender Eintrittstemperatur (sinkender Unterkühlung) steigt der Austrittsdruck p_2 an und liegt jetzt über dem Gegendruck p_u . Der Verdampfungsbeginn bleibt nach Pana trotz steigender Eintrittstemperatur im Austrittsquerschnitt bis die Grenztemperaturen T_{oLim} und T_{2Lim} erreicht werden. Von jetzt an wandert die Stelle der Dampfbildung im Spalt stromaufwärts und erreicht den Spalteintritt, wenn die Eintrittstemperatur den Sättigungszustand erreicht hat. Der Bereich I reicht von T_o'' bis T_{oLim} und Bereich II von T_{oLim} bis T_{os} .

Der von Pana weiterhin behandelte Bereich III mit zweiphasiger Zuströmung trifft bei den hier betrachteten Verhältnissen nicht zu. Er wäre nur bei homogener Zuströmung sinnvoll, die jedoch bei Stagnationszustand vor dem Spalt nicht vorstellbar ist.

Pana beschreibt die Massenstromdichte für den Bereich I, in dem im Spalt erst im Austrittsquerschnitt Zweiphasenströmung vorliegt, mit der Gleichung:

$$G = \left[\frac{2 (P_o - P_2)}{v (1 + \zeta)} \right]^{0,5} \quad (1)$$

mit dem spezifischen Volumen v im Spalt und dem einphasigen Reibungsbeiwert ζ . Da die Temperaturdifferenz $T_o - T_2$ sehr klein ist und am Austritt Sättigungs-

zustand herrscht hat er Gl. (1) durch die sogen. modifizierte Bernoulligleichung angenähert.

$$G \approx \left[\frac{2 [P_o - P_s(T_o)]}{v_s(T_o) \cdot (1 + \zeta)} \right]^{0,5} \quad (2)$$

Diese Gleichung ist sehr einfach zu handhaben. Die treibende Kraft ist die Druckdifferenz zwischen dem Eintrittsdruck und dem Siededruck der Eintrittstemperatur. Die obere Grenze des Bereiches I ist erreicht, wenn $G = G_{lim}$ und

$$\frac{P_o}{P_s(T_o)} \Big|_{lim} = 1 + \frac{1 + \zeta}{2} \cdot \frac{G_{lim} \cdot v_s}{P_s} \quad (3)$$

Beim Überschreiten dieser Grenze d.h., wenn

$$\frac{P_o}{P_s(T_o)} < \frac{P_o}{P_s(T_o)} \Big|_{lim} \quad (4)$$

ist, liegt der Bereich II vor.

Der Bereich II ist begrenzt durch:

$$G_{Lim} = f(T_{o\ lim}, T_{2\ lim}) \text{ bei } x_2 = 0$$

und

$$G_{HEM} = f(T_{os}) \text{ bei } x_o = 0$$

Zwischen diesen beiden Grenzwerten ist die Massenstromdichte eine lineare Funktion von der Eintrittstemperatur T_o , die zwischen $T_{o\ lim}$ und T_{os} liegt.

Die Massenstromdichte für Bereich II ist:

$$G = G_{HEM} + \frac{T_{os} - T_o}{T_{os} - T_{olim}} (G_{lim} - G_{HEM}) \quad (5)$$

Die Grenzwerte G_{lim} und G_{HEM} werden mit dem homogenen Gleichgewichtsmodell HEM (Homogeneous Equilibrium Model) für die o.g. Randbedingungen errechnet.

Die Temperatur T_{2lim} errechnet sich iterativ aus der Beziehung:

$$T_{olim} - T_{2lim} = \frac{[V \cdot (T_{2lim}) \cdot G_{lim}(T_{2lim})]^2}{c_p (T_{2lim})} \cdot \frac{1+\zeta}{2} \cdot \left(\alpha \cdot T_2 - \frac{\zeta}{1+\zeta} \right) \quad (6)$$

mit

$$c_p = \left. \frac{dh}{dt} \right|_p \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1}{v} \cdot \left. \frac{dv}{dt} \right|_p \quad (8)$$

Das homogene Gleichgewichtsmodell kann als bekannt vorausgesetzt werden und ist in vielen Rechenprogrammen installiert. An dieser Stelle soll daher nur kurz die Grundlage für das Modell, das sowohl thermisches als auch fluiddynamisches Gleichgewicht voraussetzt, angedeutet werden.

Aus der allgemeinen Beziehung für Massenstromdichte bei einphasiger Strömung

$$G = \frac{1}{v} \cdot [2 \cdot (h_0 - h_2)]^{0,5} \quad (9)$$

entsteht, wenn für das spezifische Volumen v und die Enthalpie h die Beziehungen für homogene Zweiphasenmischung

$$v = x \cdot v_G + (1 - x) \cdot v_L \quad (10)$$

$$h = x \cdot h_G + (1 - x) \cdot h_L \quad (11)$$

eingesetzt werden; wobei x der Dampfgewichtsanteil und die Indices G und L für Gas und Flüssigkeit stehen, die Massenstromdichte für homogenes Zweiphasengemisch:

$$G = \left\{ \frac{2[h_0 - (1 - x) \cdot h_{L2} - x h_{G2}]}{x_2 \cdot v_{G2} + (1 - x_2) \cdot v_{L2}} \right\}^{0,5} \quad (12)$$

Unter weiterer Annahme eines isotropen Strömungseinlaufes in den Spalt (Position 0 bis 1)

$$S_o = S_1 = x_1 \cdot S_{GL} + (1 - x_1) \cdot S_{L1} \quad (13)$$

und Einbeziehung des Impulsansatzes für den Druckabfall

$$\zeta = \int_{p_1}^{p_2} 2 \frac{1+G^2 \cdot \frac{dv}{dp}}{G^2 \cdot v} \cdot dp = f(G_1, G_2, p_1, p_2, x_1, x_2) \quad (14)$$

wird die Gleichung für die Massenstromdichte nach dem Druck p abgeleitet und gleich 0 gesetzt. Damit ergibt sich die Beziehung für die kritische Strömung

$$\frac{dG}{dp} = 0 \quad (15)$$

3.2 Abdollahian-Modell I

Dieses Modell ist auf der Grundlage von Henry's [10,11,12] Modell, das auf fluiddynamischem Gleichgewicht (homogene Strömung) aber auf thermodynamischem Ungleichgewicht beruht, entstanden. Das thermische Ungleichgewicht, d.h. die Verzögerung des Phasenwechsels wird durch einen empirischen Faktor N auf folgende Weise berücksichtigt:

In der aus der Massenerhaltungsgleichung und der Impulsgleichung entstandenen Beziehung für die kritischen Massenstromdichte

$$G_c^2 = - \left[x \cdot \frac{dv_G}{dp} + (v_G - v_L) \cdot \frac{dx}{dp} \right]_c^{-1} \quad (16)$$

in der der Index c für kritischen Zustand steht ist:

$$\frac{dv_G}{dp} = - \frac{1}{x} \cdot \frac{v_G}{p} \quad (17)$$

mit dem Isotropenexponenten x , und dem Term für den Phasenwechsel (Wasser zu Dampf)

$$\frac{dx}{dp} = N \cdot \frac{dx_E}{dp} \quad (18)$$

Der Ungleichgewichtsfaktor N ist

$$N = 2 \cdot x_E \quad \text{für } x_E < 0,05 \quad \text{und} \\ N = 1 \quad \text{für } x_E \geq 0,05$$

und der Gleichgewichtsdampfanteil

$$x_E = \left| \frac{S_o - S_L}{S_G - S_L} \right|_E \quad (19)$$

mit den Entropien vor dem Spalt S_o und der Entropie der Flüssigkeit und des Dampfes S_G im Gleichgewichtszustand. Aus (16, 17, 18) ergibt sich dann

$$G_c^2 = \left[x \frac{\dot{v}_G}{\dot{v}_L \cdot p} - (\dot{v}_G - \dot{v}_{LO}) \cdot N \cdot \frac{dx_E}{dp} \right]_c^{-1} \quad (20)$$

Der Langrohr-Dampfgehaltsanteil ist nach der Definition des Modells:

$$x_{LT} = N \cdot x_E \quad (21)$$

Und im Spalt mit der Länge L und dem hydraulischen Durchmesser $d_H = 2 S$ wird davon ausgegangen (nach Henry), daß der Beginn der Verdampfung bei $L/d_H = 12$ liegt und sich der kritische Dampfanteil als Funktion von L/d_H des Spaltes asymptotisch dem Wert der Gl. 21 nähert nach folgender Beziehung:

$$x_c = x_{LT} \left[1 - \exp \left\{ -0,0523 (L/d_H - 12) \right\} \right] \quad (22)$$

Abdollahian hat das Henry-Modell dadurch erweitert, daß er alle Druckverluste im Spalt berücksichtigt hat. Er setzt für den gesamten Druckabfall über den Spalt:

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_e + \Delta p_f + \Delta p_A + \Delta p_{AA} \quad (23)$$

Im Einzelnen bedeuten:

$$\Delta p_e = \frac{G_c^2 \cdot \dot{v}_{LO}}{2 C^2} \quad (24)$$

der Eintrittsdruckverlust mit der Kontraktionszahl $C = 0,61$

$$\Delta P_f = \frac{12}{2} \lambda \cdot G_c^2 \cdot v_{LO} + \lambda \frac{L/d_H - 12}{2} \cdot G_c^2 \cdot [v_L + x(v_G - v_L)] \quad (25)$$

der Reibungsdruckverlust mit dem Reibungsfaktor λ der nach der modifizierten Karman-Gleichung

$$\lambda = (2 \log \frac{d_H}{2K} + 1,74)^{-2} \quad (26)$$

mit der mittleren Rauigkeitshöhe K berechnet wird.

ΔP_A und ΔP_{AA} sind die Druckverluste bedingt durch Querschnittsveränderung des Spaltes und durch Phasenwechsel. Der kritische Druck ergibt sich schließlich aus:

$$p_c = p_o - \Delta p_{tot} \quad (27)$$

Für den ersten Vergleich von Experiment und Rechnung, mit dem Pana- und dem Abdollahian I-Modell, bei dem die gemessenen Reibungsbeiwerte für beide Modelle als Grundlage dienen sollten, wurde Gl. (23) durch folgende Beziehung substituiert:

$$\Delta p_{tot} = (1 + \zeta) \frac{v_{LO}}{2} G_c^2 \quad (28)$$

Auf diese Weise konnten beide Modelle auf gleicher Basis verglichen werden.

3.3 Abdollahian-Modell II

Dieses Modell von Abdollahian et al. [9,10] für kritische Entspannung aus unterkühltem Stagnationszustand ist im Aufbau und der Anwendung besonders einfach. Es geht von homogener Gleichgewichtsströmung mit thermischem Gleichgewicht aus und verlangt im Gegensatz zum Modell I keine besonderen Eingaben von geometrischen Parametern des Strömungskanals.

Mit der Annahme, daß $p_c \approx p_s (T_o)$ und der Berücksichtigung nur des Eintrittsverlustes und des Reibungsdruckverlustes wird die kritische Massenstromdichte nach folgender Gleichung berechnet:

$$G_c = \left[\frac{2 [p_o - p_s (T_o)]}{v_m + v_m \cdot f \cdot \frac{L}{d_H} + \frac{v_o}{c^2}} \right]^{0,5} \quad (29)$$

mit $c = 0,61$ und f ein Reibungsfaktor (Karman)

$$v_m = \bar{v}_L + \bar{x} (\bar{v}_G - \bar{v}_L) \quad (30)$$

die quergestrichenen Werte sind über den Entspannungsweg gemittelte Werte.

3.4 Collier-Modell

Dieses Modell [14,15] ist wie das Abdollahian Modell I (in 3.2 beschrieben) auf dem Modell von Henry aufgebaut. Der wesentliche Unterschied zum beschriebenen Modell liegt in der Beziehung für den Reibungsdruckverlust im Spalt. An die Stelle von Gleichung (25) tritt bei diesem Modell die Beziehung:

$$\Delta p_f = \frac{\lambda}{4} \left(\frac{L}{d_H} - 12 \right) G_c^2 \left[\bar{v}_L \left(1 + \frac{A_e^2}{Ai^2} + x_e (v_{GC} - v_{LO}) \right) \right] \quad (31)$$

Hierbei stehen die Indices c, e, i für kritischen Zustand, Austritt und die Stelle $L/d_H = 12$ im Spalt.

4. Ergebnisse

4.1 Messung des Reibungsbeiwertes

Der Reibungsbeiwert des Spaltes bei einphasiger Strömung errechnet sich aus den Meßwerten mit folgender Gleichung:

$$\zeta = \frac{(p_o - p_u) \cdot A^2 \cdot \rho \cdot 2}{m^2} - 1 \quad (32)$$

Hierin sind ρ die mittlere Dichte, p_o und p_u die gemessenen statischen Drücke vor und hinter dem Spalt und A der Strömungsquerschnitt des Spaltes, der mit der in 2.2 definierten Spaltweite errechnet wurde. Aus Gründen der Vereinheitlichung wurde der Austrittsquerschnitt genommen und damit der Wert ζ_A errechnet. In diesem Wert sind außer der flüssigen Reibung auch der Eintrittsdruckverlust und der Verlust durch Querschnittsänderung enthalten.

Wie in 2.3 bereits erwähnt wurde, wurden die Messungen bei Betriebstemperatur d.h. jeweils beim Versuchspunkt mit der Unterkühlung 60 K durch Anhebung von

p_u durchgeführt, weil die Spaltweite offenbar leicht temperaturabhängig war. Für eine Spaltgeometrie wurden jeweils etwa 20 Messungen und ζ_A -Berechnungen durchgeführt und gemittelt. Die Streuung der einzelnen ζ_A -Werte um den Mittelwert betrug etwa 5 - 8 %.

Waren bei einer Teststreckengeometrie diese Streuungen merklich größer, wurde diese Geometrie nicht verwendet. ζ_A -Werte von Messungen mit kaltem Wasser (70°C) waren um 10 bis 20 % größer als die beschriebenen. Sie wurden für Berechnungen nicht verwendet.

4.2 Empirische Gleichung zur Berechnung des Reibungsbeiwertes aus den geometrischen Spaltparametern

Die experimentelle Bestimmung des Reibungsbeiwertes, wie sie in 2.3 und 4.1 beschrieben wurde, ist, um das Pana-Modell für Berechnungen anwenden zu können, viel zu aufwendig oder gar nicht durchführbar. Da aber andererseits mit diesem Modell so gute Ergebnisse erzielt wurden, wie später gezeigt wird, wurde eine Beziehung für die Berechnung von ζ aus den geometrischen Reibparametern entwickelt, mit der das Pana-Modell erweitert und für allgemeine Fälle anwendbar gemacht wurde.

Der Reibungsbeiwert setzt sich nach allgemeiner Definition zusammen aus einem Anteil für den Eintrittsverlust ζ_i , für den Reibungsverlust ζ_f und für den Austrittsverlust ζ_E

$$\zeta = \zeta_i + \zeta_f + \zeta_E \quad (33)$$

Ein Anteil für Querschnittsänderung wurde nicht eingeführt. Er ist in ζ_f enthalten. Der Eintrittsverlust für scharfkantigen Einlauf ist nach dem Wärmeatlas 1984 [18] $\zeta_i = 0,5$.

Der Reibungsverlustanteil ist durch die bekannte Beziehung

$$\zeta_f = \lambda \cdot \frac{L}{d_H} \quad (34)$$

gegeben, wobei λ der Reibungsfaktor, L die Strömungslänge und d_H (2 x Spaltweite) der hydraulische Durchmesser sind. Der Austrittsverlust ist bei

scharfkantigem Austritt ohne Druckrückgewinnung gleich Null, wenn die dynamische Druckhöhe als verloren angesetzt wird.

Für die Berechnung des Reibungsfaktors λ gibt es viele Gleichungen aus der Literatur, die jedoch meistens für Strömungskanäle größerer Abmessungen geeignet sind. Nikuradse [20,21] hat in seinem bekannten Diagramm, in dem die Reibungsfaktoren über der Re-Zahl mit dem Parameter d_H/R (R = Oberflächenrauigkeit) dargestellt sind, gezeigt, daß bei großen Re-Zahlen und großen d_H/R -Werten λ praktisch nur noch vom Verhältnis d_H/R abhängt. Bei unseren ζ -Messungen zeigte sich, daß keine Abhängigkeit mehr von der Re-Zahl bestand. Aus diesem Grunde kann hierfür die von Nikuradse verwendete Form der folgenden Gleichung verwendet werden:

$$\lambda = (a \cdot \log \frac{d_H}{R} + b)^{-2} \quad (35)$$

Nikuradse fand bei seinen bekannten Versuchen mit Sandrauigkeiten die Faktoren $a = 2$, $b = 1,46$. Button [18] fand für seine Versuche mit rauhen Spalten die Werte $a = 2,25$, $b = 1,25$.

In Abb. 5 wurde $1/\sqrt{\lambda}$ über dem Logarithmus von d_H/R aufgetragen. Gleichungen vom Typ Gl. (35) ergeben dabei Geraden.

Mit Hilfe der Gleichungen (33, 34 und 35) wurden aus den bei unseren Versuchen gemessenen ζ -Werten und den gemessenen Rauigkeitswerten R und den hydraulischen Durchmessern d_H die λ -Werte errechnet und in Abb. 5 für die unterschiedlichen Rauigkeiten eingetragen. Mit Hilfe der linearen Degression wurde dann die für unsere Spalt- und Rißkonfigurationen zutreffende Gleichung

$$\lambda = (3,39 \cdot \log \frac{d_H}{R} - 0,866)^{-2} \quad (36)$$

gefunden, die mit Gl. (33) und (34) die folgende Gleichung zur Berechnung des Reibungsbeiwertes liefert:

$$\zeta_A = 0,5 + (3,39 \cdot \log \frac{d_H}{R} - 0,866)^{-2} \cdot \frac{L}{d_H} \quad (37)$$

Mit dieser Gleichung wurde das Pana Modell zum Modifizierten Pana Modell erweitert. Voraussetzung für die Anwendung ist die in Abschn. 2.2 detailliert gegebene Definition für R und d_H .

4.3 Kritische Massenstromdichten aus Messung und Rechnung

In den Tabellen 4 - 20 im Anhang sind die wichtigsten Versuchsdaten mit den in Tabelle 2 aufgeführten Spaltgeometrien, dokumentiert. Jede der Tabellen 4 - 20 enthält jeweils die Werte für einen Spalt. Außer den Meßwerten p_0 , T_0 , p_u bzw. den on-line errechneten Werten ΔT , \dot{m} und G_M sind die mit dem ursprünglichen Pana Modell, unter Verwendung des gemessenen Reibungsbeiwertes ζ_A , gerechneten Werte G_R , p_2 und G_R/G_M enthalten. G_M ist die gemessene und G_R die mit dem Modell gerechnete Massenstromdichte. p_2 ist der theoretische Druck im Austrittsquerschnitt.

In Abb. 6 bis 10 sind die gemessenen Massenstromdichten über dem gemessenen Reibungsbeiwert ζ_A mit dem Stagnationsdruck p_0 als Parameter aufgetragen. Ein Diagramm enthält jeweils eine Kurvenschar für eine konstante Unterkühlungstemperatur ΔT . Die Diagramme zeigen, daß sich durch die Versuchspunkte Kurven mit stetiger Tendenz legen lassen. Wie zu erwarten war, geben höhere Eintrittsdrucke p_0 , kleinere Werte von ζ_A und größere ΔT -Werte größere Massenstromdichten. Die Kurven werden mit abnehmender Eintrittstemperatur d.h. mit zunehmender Unterkühlungstemperatur ΔT steiler. Grundsätzlich ist eine starke Abhängigkeit von dem Parameter ζ_A zu erkennen, die mit zunehmender Unterkühlungstemperatur größer wird. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, daß mit wachsendem G der Reibungsverlust im Spalt quadratisch wächst.

In Abb. 11 ist die Massenstromdichte über dem Parameter L/d_H aufgetragen. Parameter ist die Rauigkeit R . Die Kurven wurden für die Unterkühlungstemperaturen 10 K und 60 K dargestellt. L ist die Länge des Strömungskanals (46 mm bei den beschriebenen Versuchen). Diese Darstellungsart wurde hauptsächlich deshalb gewählt, weil sie in der Literatur häufig anzutreffen ist. Da G eine Funktion von L , d_H und R ist, sind Kurven in diesem Diagramm nur dann vergleichbar, wenn R immer in der gleichen Weise definiert wurde. Eine Kurve die einem Bericht von R.P. Collier [14,15] entnommen und in das Diagramm eingezeichnet wurde, läßt sich schlecht in die Kurvenschar eingliedern, weil vermutlich die Definition der angegebenen Rauigkeit anders als bei uns durchgeführt wurde. Leider wird oft die Bedeutung dieser Größe vernachlässigt.

Der Vergleich der Versuchsdaten mit Modellrechnungen wurde in folgender Weise durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurden Berechnungen mit dem ursprünglichen Pana Modell und dem modifizierten Abdollahian-Modell I (auch modifiz. LEAK01-Modell genannt) gemacht. Beide erfordern die Eingabe der durch Messung gefundenen ζ_A -Werte und sind daher von der rechnerischen Bestimmung der flüssigen Reibung aus den Reibparametern unabhängig. Abb. 12 und 13 zeigen die gemessene (ausgezogene Linie) und die mit Pana gerechnete Massenstromdichte (gestrichelte Linie) über der Unterkühlungstemperatur ΔT aufgetragen. Der Stagnationsdruck p_0 ist dabei ein Parameter. Abb. 12 wurde mit $\zeta_A = 3,2$ und Abb. 13 mit $\zeta_A = 38,2$ gemacht. Beide Diagramme zeigen, daß die gerechneten Werte dicht unter den gemessenen liegen. In Abb. 14, 15, 16 wurden die Verhältnisse von gerechneten zu gemessenen Werten G_R/G_M über der Unterkühlungstemperatur ΔT für das Pana Modell und in Abb. 17 und 18 für das modif. LEAK01-Modell aufgetragen. Es kann schon hier gesehen werden, daß die LEAK01-Werte wesentlich stärker von der Linie $G_R/G_M = 1$ abweichen, als die Pana-Werte. Die Abb. 19 und 20 zeigen endlich die gerechneten Werte über den gemessenen Werten aufgetragen und zwar in Abb. 19 für Pana und in Abb. 20 für Abdollahian I. Beide Diagramme zeigen für 458 Versuchspunkte bemerkenswert geringe Abweichungen von der Ideallinie (45°-Linie). Beim Pana Modell beträgt die relative Standard Abweichung nur 10,2 % und beim modif. LEAK01-Modell 16,3 %. Das Pana Modell ist daher für die Beschreibung der Versuchswerte wesentlich besser geeignet als das Abdollahian-Modell I.

Die auf Abb. 19 und 20 angegebenen Fehlergrößen sind wie folgt definiert.

relativer Fehler:

$$\bar{x}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{im}$$

$$x_{im} = (G_{\text{Mess.}} - G_{\text{Rechn.}}) / G_{\text{Mess.}}$$

relative Standardabweichung:

$$S_{Rm} = \left[\sum_{i=1}^n x_{im}^2 / (n - f - 1) \right]^{0,5}$$

wobei n die Anzahl der Werte und f die Anzahl der Variablen im Modell sind.

In einem zweiten Schritt wurden Vergleichsrechnungen mit 3 Modellen gemacht, die als Eingaben nur noch geometrische Rißgrößen, neben den üblichen fluiddynamischen Größen erfordern. Es sind dies das Modifizierte Pana Modell, das original Abdollahian Modell I und das Abdollahian-Modell II.

In den Abbildungen 21, 22 und 23 sind die Berechnungen dieser 3 Modelle für 458 Versuchspunkte über den Messungen aufgetragen. Die Punkte, die zu den 3 echten Rißgeometrien gehören, wurden hier gegenüber den Werten der simulierten Rißgeometrien durch besondere Symbole gekennzeichnet. In Tabelle 3, auf die später noch eingegangen wird, sind die Fehlergrößen für diese Vergleiche aufgeführt. Die 3 Diagramme zeigen, daß das Modifizierte Pana Modell eine größere Streubreite und größere Standardabweichung verglichen mit dem original Pana Modell Abb. 19 hat, was darauf zurückzuführen ist, daß mit der Korrelation, mit der das ursprüngliche Pana Modell erweitert wurde, eine zusätzliche Unsicherheit, besonders in Bezug auf die Definition der Rauigkeit und der effektiven Spaltweite eingeführt wurde. Dieser Effekt kommt besonders bei den Versuchspunkten mit den echten Rissen zum Ausdruck, bei denen die Bestimmung der effektiven Spaltweite schwieriger als bei den simulierten Rissen war. Allgemein kann man jedoch feststellen, daß das Modifizierte Pana Modell von den 3 Modellen die Versuchsergebnisse am besten wiedergibt. Mit einer Standardabweichung von etwa 18 % ist die Übereinstimmung auch absolut gesehen als sehr gut anzusehen.

In einem dritten Schritt wurden der Vollständigkeit halber Versuchsdaten, die von R.P. Collier [14, 15] und von Amos und Schrock [4] aus der Literatur entnommen wurden, mit dem modifizierten Pana Modell nachgerechnet und in Abb. 24 dargestellt. Als Rauigkeiten wurden bei Collier die angegebenen Werte eingesetzt, die wie bereits erwähnt wurde, offenbar auf eine andere Weise definiert waren. Bei Amos und Schrock, bei denen keine Rauigkeiten angegeben sind, wurden aus einphasigen Kalibrierdaten aus dem Bericht durch Rückwärtsrechnung Rauigkeitswerte errechnet und dann wieder in die Modellrechnung eingesetzt.

Schließlich wurden auch die übrigen Kombinationsmöglichkeiten von Modellen und Versuchsdaten durchgeführt unter Einschluß des Modells von R.P. Collier. Die Fehlerdaten dieser Kombinationen sind in Tabelle 3 zu sehen. Die jeweils günstigste Kombination, die den kleinsten Fehler ergibt, ist mit einem eingekreisten Wert gekennzeichnet. Das Modifizierte Pana Modell ist, wie man sehen

kann, außer bei den Collier-Daten das Modell mit der besten Wiedergabe der Versuchsdaten. Die Collierdaten aus den Versuchen mit simulierten Rissen werden systematisch zu groß wiedergegeben. Geht man davon aus, daß Collier die arithmetisch gemittelte Rauigkeit verwendet hat, die etwa 6 bis 10 mal kleiner ist als die von uns verwendete Spitzenrauigkeit, wie in Abschnitt 2.2 erwähnt wurde, so kann man mit Verwendung von Gleichung 3.2 und den Abbildungen 6 bis 10 überschlagen, daß die gerechnete Massenstromdichte dadurch um den Faktor 1,3 bis 3 zu groß gerechnet wurde. Dieser Faktor erklärt das Herausfallen der Collier-Werte in Abb. 24 und die hohen Fehlerwerte in Tabelle 3. Die Abweichungen der Werte für echte Risse bei Collier sind damit nicht interpretierbar. Es kann im Augenblick nur gesagt werden, daß die Versuchswerte offenbar wegen der großen Streubreite stark fehlerbehaftet sind.

4.4 Druckverlaufmessung im Spalt

Die Darstellung der Druckverlaufmessungen im Spalt hat rein informativen Charakter. Eine Rückkopplung zu den Rechnungen wurde nicht durchgeführt. Ebenso sind keine vergleichenden Druckverlaufrechnungen gemacht worden.

Über 7 Druckerbohrungen von 1 mm \emptyset , die in Strömungsrichtung gesehen von der Mittellinie um wenige Millimeter unregelmäßig seitlich versetzt waren, wie in 2.2 bereits erwähnt wurde, wurden die Drucke mit Absolutdrucktransmittern (Sensotec, 200 bar Meßbereich) gemessen. Für jeden Stagnationsdruck wurde eine Eichmessung beim Massenstrom 0 gemacht und das Ergebnis beim Plotten der Drucke berücksichtigt. In den Abbildungen 25 bis 31 wurden die Messungen von 2 Schlitzkonfigurationen (s. Tabelle 2) mit je 3 Stagnationsdrucken dargestellt. Die Unterkühlungstemperatur ist der variable Parameter in jeder Abbildung. Die gestrichelten waagerechten Linien zeigen den zur Eintrittstemperatur gehörenden Sättigungsdruck. Die senkrechten Linien zeigen die axiale Position der Meßbohrungen. Die auf Pos. 0 und 46 aufgetragenen Werte sind die Drücke p_o vor und p_u hinter dem Spalt und sind nur durch die Art des Plottens mit den benachbarten Punkten durch gerade Linien verbunden.

Nach einem Eintrittsdruckverlust (Pos. 0 - 3.2) müßten die Kurven bei parallelen Spalten und einphasiger Strömung einen linearen Verlauf haben, deren Steigung von der Massenstromdichte G und vom Reibungsbeiwert ζ abhängt. Nach dem Erreichen des Sättigungsdruckes sollten sie direkt (ohne Siedeverzug)

oder mit geringen Abstand danach (mit Siedeverzug) stärker und mit zunehmender Neigung infolge zweiphasigen Druckverlustes abfallen.

Deutlich zu erkennen ist, daß die Kurven mit größter Unterkühlung (60 K) den größten Druckabfall haben, wegen der größten Massenstromdichte. Die Kurven mit kleinster Unterkühlung (2 K) beginnen dagegen entsprechend mit kleinerem Druckabfall um dann nach Unterschreiten des Siededruckes stärker abzufallen und die anderen Kurven zu überschneiden. Leider ist der lineare Verlauf der Kurven vor dem Siedepunkt nicht immer ganz eindeutig ausgeprägt. Das liegt an geringen Querschnittsänderungen der Spalte und an dem zu geringen Auflösungsvermögen der Absolutdrucktransmitter. Beim Unterschreiten des Sättigungsdruckes ist bei einigen Kurven ein kurzer relativer Anstieg des Druckes zu entdecken.

Amos und Schrock [4], die eine umfangreiche Darstellung von Druckmessungen im Spalt in ihrem Bericht gemacht haben, haben diese Erscheinung noch weit stärker beobachtet und nicht eindeutig erklären können.

Vermutlich ist der Beschleunigungsvorgang der Strömung beim Expandieren der Dampfblasen die Ursache. Bei Amos und Schrock überdecken die Kurven größerer und kleinerer Unterkühlung, würde man sie in ein Diagramm einzeichnen, einen größeren Bereich als bei unserer Darstellung. Die Begründung ist, daß der Einfluß der Unterkühlung mit zunehmendem Reibungsbeiwert kleiner wird. Amos und Schrock haben ihre Versuche mit glatten Spalten, also kleinen ζ -Werten (ca. 2 - 5) gemacht, während bei uns die Reibungsbeiwerte sich bis zum Wert 85 erstreckten.

5. Schlußfolgerung

Mit dem Modifizierten Pana Modell wurde eine Methode gefunden, Leckraten aus Rissen in Wandungen von Druckbehältern mit unterkühltem Wasser bis zu hohen Drücken mit guter Genauigkeit zu berechnen.

Experimente mit simulierten und echten Rissen, die in einem großen Parameterbereich in Bezug auf den Druck, die Unterkühlungstemperaturen die Spaltweiten und die Oberflächenrauigkeiten gefahren wurden, konnten in guter Übereinstimmung nachgerechnet werden.

Der Vergleich der Rechnung und der Messung hatte für 458 Versuchspunkte eine Standardabweichung unter 20 %.

Trotz des großen behandelten Parameterbereiches kann die Rechenmethode nicht alle Rißformen mit gleicher Genauigkeit abdecken. So wurde zum Beispiel nur die Rauigkeitsgröße, nicht aber die Rauigkeitsstruktur, die von der Art des Rißbildungsprozesses und dem Wandmaterial abhängt, untersucht. Ferner wurde der Einfluß der Querschnittsänderung (Spaltweite, Breite) nicht behandelt.

Der Anhang dieses Berichts enthält einige Arbeitsdiagramme Abb. 32 bis 38 mit denen sich auf der Basis des Modifizierten Pana Modells eine einfache Abschätzung einer zweiphasigen Leckrate durchführen läßt, wenn die geometrischen Rißparameter und der Stagnationszustand des Fluids bekannt sind.

Danksagung

Herrn Professor D. Munz und Herrn St. Müller vom KfK danken wir für die Möglichkeit der Herstellung der echten Rißprobe und die dabei geleistete Unterstützung.

Den Herren Dr. L. Friedel und F. Westphal danken wir für die bei der Firma Hoechst/Frankfurt durchgeführten Modellrechnungen und für die Mitarbeit an dem Bericht für das "Int. Journal of Multiphase Flow" [17].

Herrn H. Kastner und Herrn H. Kefer von der KWU/Erlangen danken wir für Beratung und Literaturhinweise, besonders bezüglich des Pana-Modells.

Literatur

- [1] Munz, D., Leck-vor-Bruch-Verhalten druckbeaufschlagter Komponenten. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 18, Nr. 14, (1984).
- [2] Müller, H.M., Müller, S., Munz, B., Neumann, J., Extension of surface cracks during cyclic loading. Fracture Mechanics, 17. Volume, ASTM STP 905, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 625-643, (1986).
- [3] Wallis, G.B., Critical two-phase flow. Int. J. Multiphase Flow, Vol. 6, 97-112, (1980).
- [4] Amos, C.N. and Schrock, V.E., Critical discharge of initially subcooled water through slits. NUREG/CR-3475, (1983).
- [5] Reimann, J., Vergleich von kritischen Massenstrommodellen im Hinblick auf die Strömung durch Lecks. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 18 Nr. 14, 63-94, (1984).
- [6] Friedel, L., Siedeverzug in Kältemitteln bei plötzlicher Druckentlastung aus dem Gleichgewichtszustand. Chem.-Ing.-Tech. 57, 154/155, (1985).
- [7] Pana, P., Eine modifizierte Bernoulli-Gleichung für die Berechnung der Strömungsvorgänge im unterkühlten Wassergebiet. IRS-W-18, (1975).
- [8] Pana, P., Berechnung der stationären Massenstromdichte von Wasserdampfgemischen und der auftretenden Rückstoßkräfte. IRS-W-24, (1976).
- [9] Abdollahian, D., Calculation of leak rates through cracks in pipes and tubes. EPRI NR-3395, (1983).
- [10] Abdollahian, D., Analytical prediction of single-phase and two-phase flow through cracks in pipes and tubes. Heat Transfer-Niagara Falls AICHE Symposium Series, No. 236, 80, 19-23, (1984).

- [11] Henry, R.E., The two-phase critical discharge of initially saturated or subcooled liquid. Nucl. Sci & Engng 41, 336-242, (1970).
- [12] Henry, R.E., An experimental study of low-quality, steam-water critical flow at moderate pressures. ANL-7740, (1970).
- [13] Henry, R.E., Fauske, H.K., The two-phase critical flow of one-component mixtures in nozzles, orifices and short tubes. Trans. ASME, J. Heat Transfer 95, 179-187, (1971).
- [14] Collier, R.P., Liu, J.S., Mayfield, M.E., Stuben, F.B., Study of Critical two-phase flow through simulated cracks. BCL-EPRI-80-1, (1980).
- [15] Collier, R.P., Stulen, F.B., Mayfield, M.E., Pape, D.B. and Scott, P.M., Two-phase flow through intergranular stress corrosion cracks. EPRI-NP-3540-LD. Research Project T118-2, Final Report, (1984).
- [16] Kefer, V., Kastner, W., Krätzer, W., (Kraftwerk Union A.G., Erlangen), Leckraten bei unterkritischen Rohrleitungsrissen - Experimente und Berechnungskonzept. Proceedings Jahrestagung Kerntechnik '86, p. 81-84, Aachen, April 8-10, 1986.
- [17] John, H., Reimann, J., Westphal, F., Friedel, L., Critical Two-Phase Flow Through Rough Slits, Intern. Journal of Multiphase Flow, (Submitted March 1987).
- [18] Button, B.L., Grogan, A.F., Chivers, T.C. and Manning, P.T., Gas flow through cracks. J. Fluids Engng., 100, 453-458, (1978).
- [19] VDI-Wärmeatlas 1984 4. Auflage, LC 2, VDI-Verlag/Düsseldorf.
- [20] Moody, F.J., Maximum flowrate of a single component two-phase mixture. Journal of heat transfer, Trans. ASME, Series C, Vol. 87 p. 134-142, (1965).
- [21] Nikuradse, J., Strömungsgesetze in rauhen Rohren. VDI Forschungsheft 361, (1933).
- [22] Schlichting, H., Boundary Layer Theory. Pergamon Press, (1955).

Autor	Flüssigkeit	Schlitzbreite		Schl.Tiefe	Schl.Weite	Rauigkeit	
		Eintr.[mm]	Austr.[mm]	L [mm]	S [mm]	R [μm]	
C.N.Amos et al.	unterkühlt H ₂ O ΔT = 0 - 65K P _{max} = 16,0MPa	20.4	20.4	60-75	0.127 0.254 0.381		simulierte Risse
R.P.Collier et al.	unterkühlt H ₂ O ΔT = 33-120K P _{max} = 11,5MPa	57.2	57.2	63.5	0.2-1,12	0.3-10.2	simulierte Risse
R.P.Collier et al.	unterkühlt H ₂ O ΔT = 0-72K P _{max} = 11,5MPa	0.74-27.9	0.74-27.9	20	0.02 0.05 0.074 0.108 0.22	1,78	echte Risse
V.Kefer et al.	unterkühlt H ₂ O ΔT = 0-60K P _{max} = 16,0 MPa	19-108	19-108	10-33	0.097 0.129 0.325	20-40	simulierte und echte Risse

Tabelle 1 Parameter von Experimenten aus der Literatur

Tabelle 2 Liste der getesteten Schlitzgeometrien

Probe Nr.	tot. Schlitzweite		Rauigkeit μm	Querschnitt A_{ex_2}	Reibungsbeiwert ζ_A
	Eintr. mm	Austr. mm			
2.204	0.205	0.25	5	20.0	3.2
2.13A	0.25	0.35	70	28.0	18.1
2.24A	0.26	0.26	70	20.8	23.0
3.13A	0.27	0.35	70	28.0	15.3
3.24A	0.34	0.39	70	31.2	8.1
3.13B	0.34	0.43	150	34.4	15.2
3.24B	0.41	0.48	150	38.4	11.2
2.13B	0.24	0.32	150	25.6	38.2
4.24B	0.53	0.58	150	46.4	8.3
* 2.15R	0.44	0.44	240	35.2	85
* 3.15R	0.54	0.54	240	43.2	43
* 4.15R	0.64	0.64	240	51.2	23.5
2.24C	0.24	0.25	100	20.0	28.2
3.13C	0.39	0.43	100	34.4	7.8
4.13C	0.50	0.55	100	44.0	6.4
2.24D	0.21	0.28	50	22.4	7.5

* echte Risse

Experimentelle Daten Modelle	R.P.Collier et al Sim. Risse		R.P.Collier et al wirkliche Risse		C.N.Amos et al. Sim.Risse		eigene Experimente			
	\bar{x}_m [%]	S_{Rm} [%]	\bar{x}_m [%]	S_{Rm} [%]	\bar{x}_m [%]	S_{Rm} [%]	\bar{x}_m [%]	S_{Rm} [%]	\bar{x}_m [%]	S_{Rm} [%]
R.P.Collier et al.	-16	62	27	62	56	63	-41	51	33	39
D.Abdollahian et al.I	⑥	49	①5	97	22	29	-78	91	10	20
D.Abdollahian et al.II	-8	④8	16	⑤9	31	38	-55	79	10	30
Modifiz. Pana	-49	108	55	92	⑨	②1	②4	②7	⑥	①4
Anzahl von Versuchspunkten %	27 3		70 8		345 38		100 11		358 40	

Tabelle 3 Fehlerdaten für den Einsatz mehrerer Modelle bei unterschiedlichen Experimenten

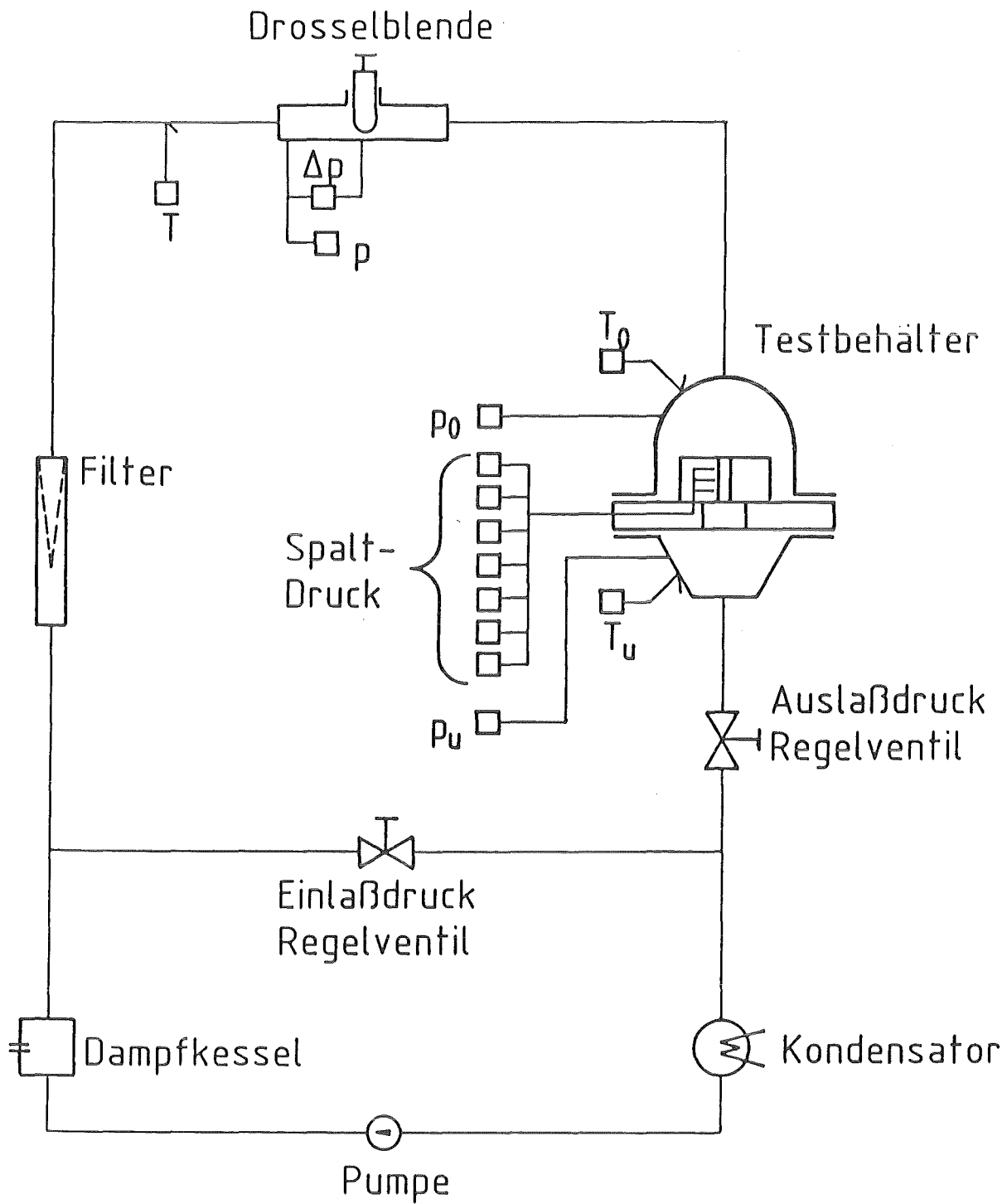
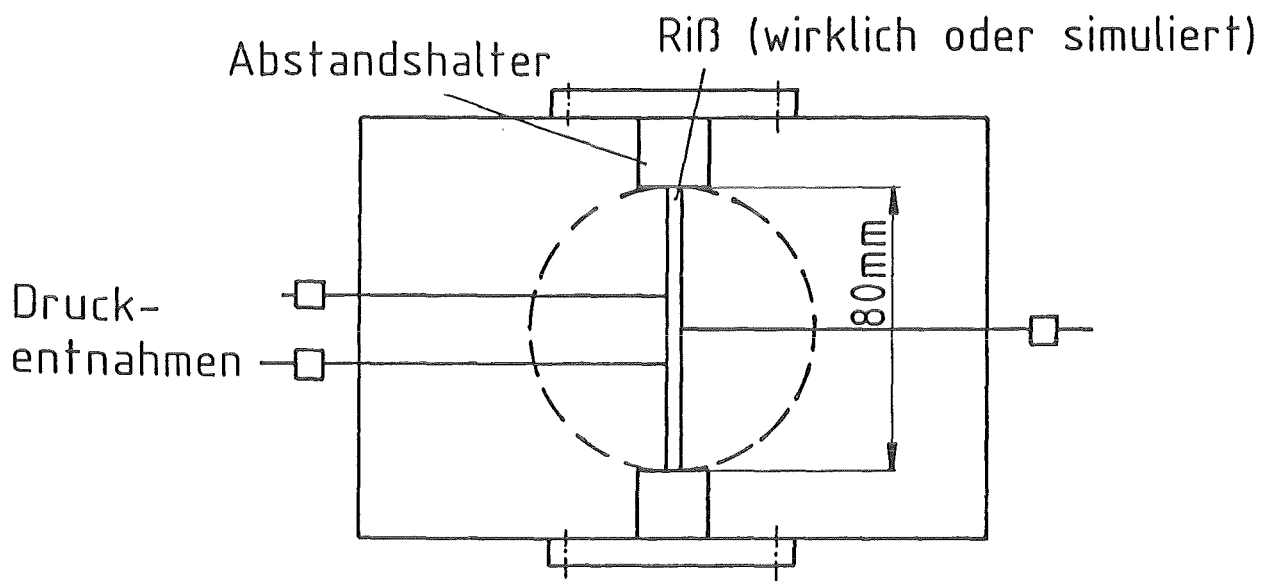
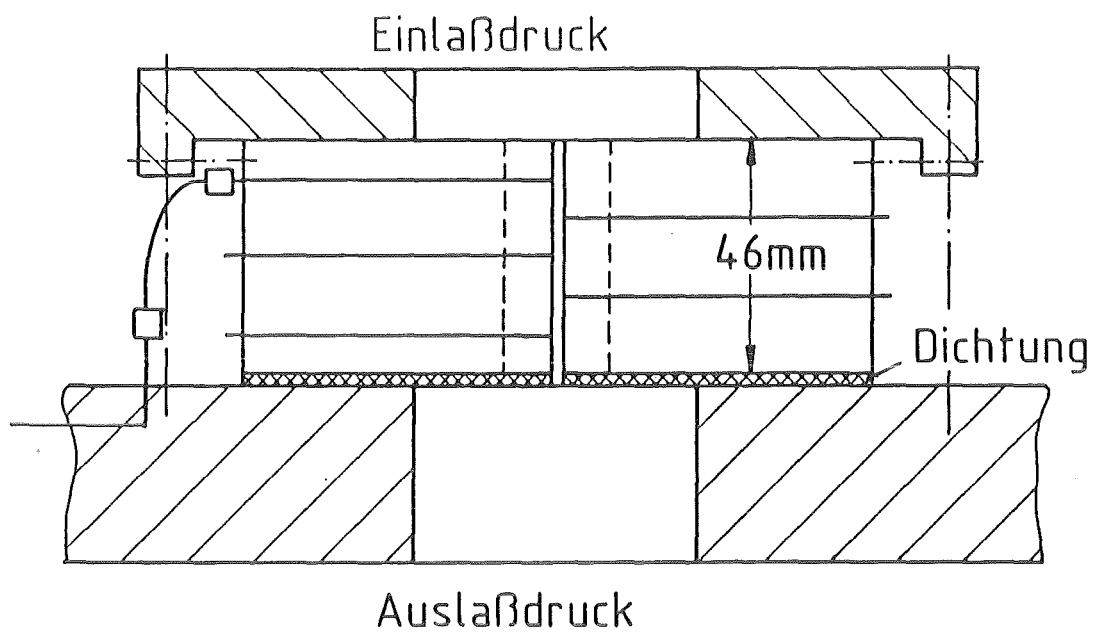


Abb.1 Schema des Versuchskreislaufes



KfK

Abb.2 Teststrecke mit veränderlichem Schlitz

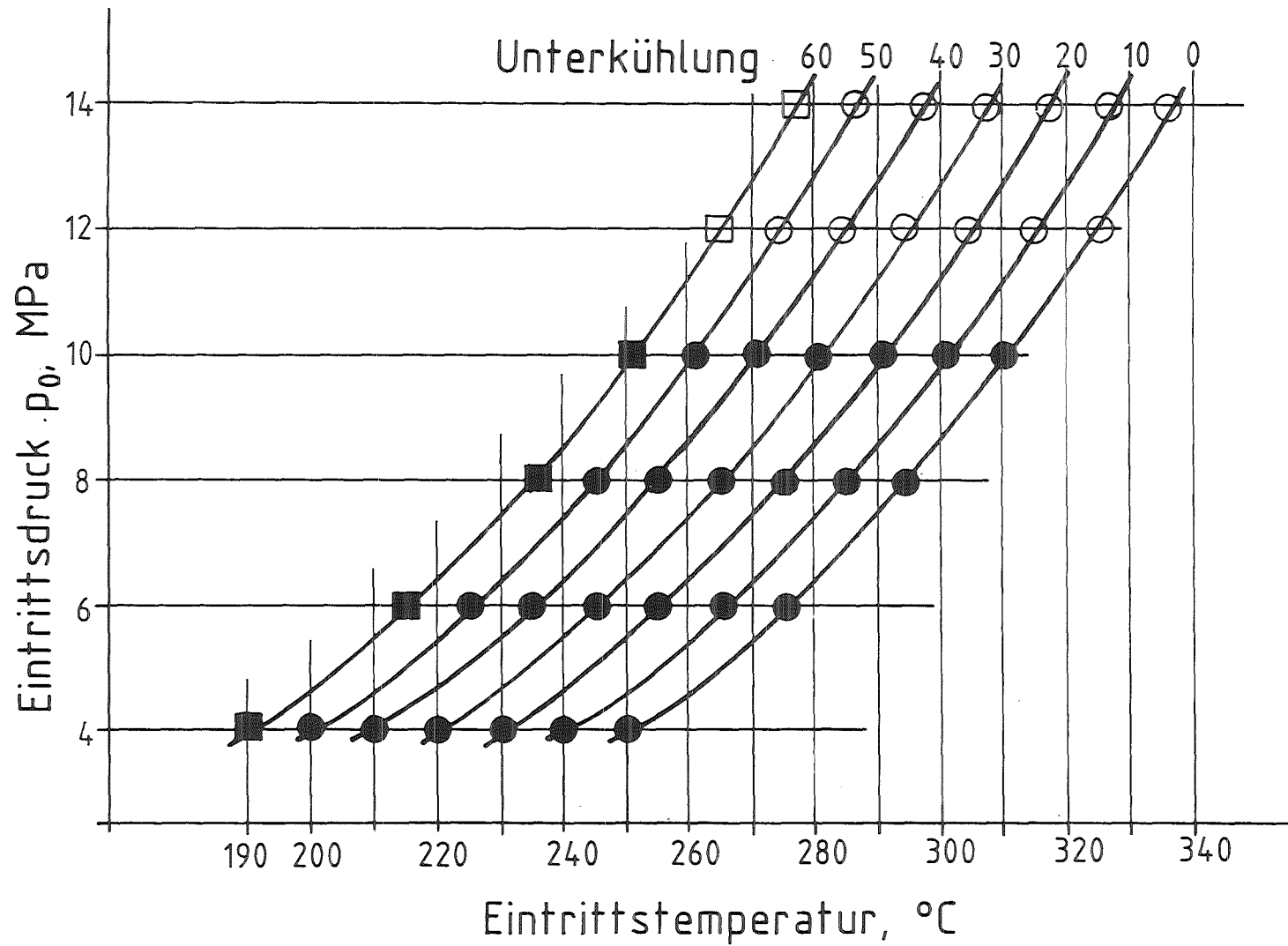


Abb.3 Testmatix für alle Schlitzgeometrien

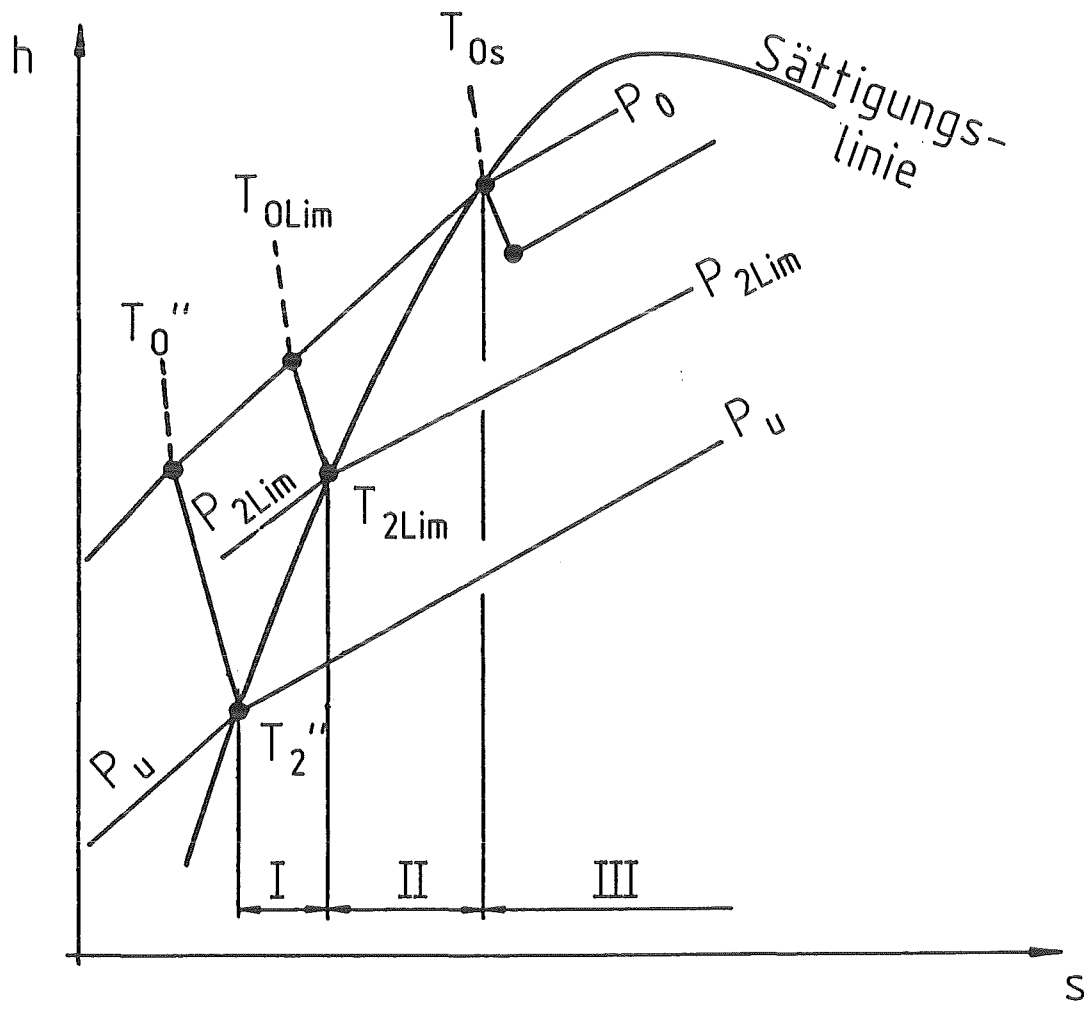


Abb.4 Enthalpie-Entropie-Diagramm für Pana-Modell

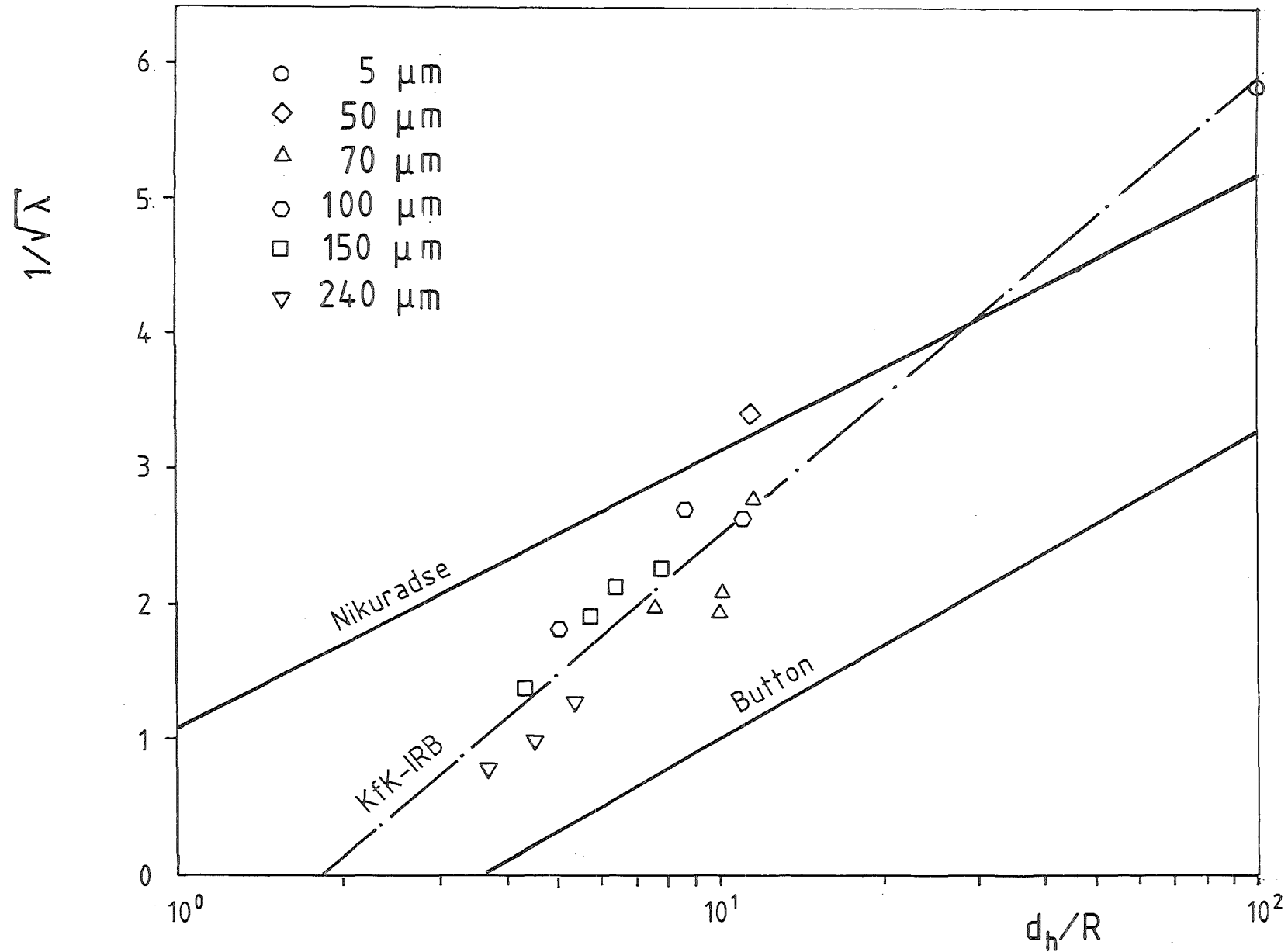
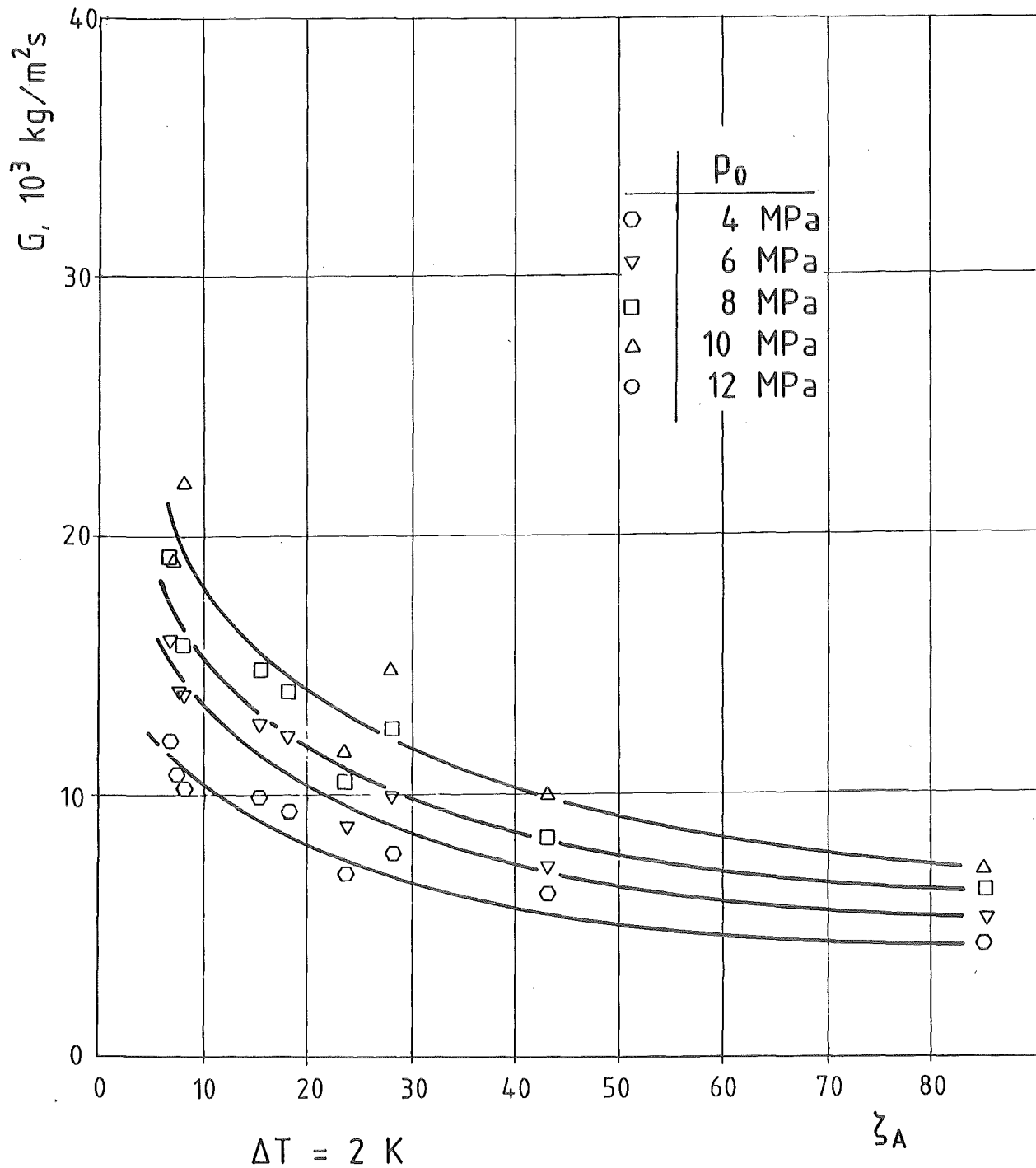


Abb.5 Bestimmung des Reibungsfaktors λ aus Schlitzgeometrie



KfK

Abb. 6 Kritische Massenstromdichte über Reibungsbeiwert ζ_A (Experiment)

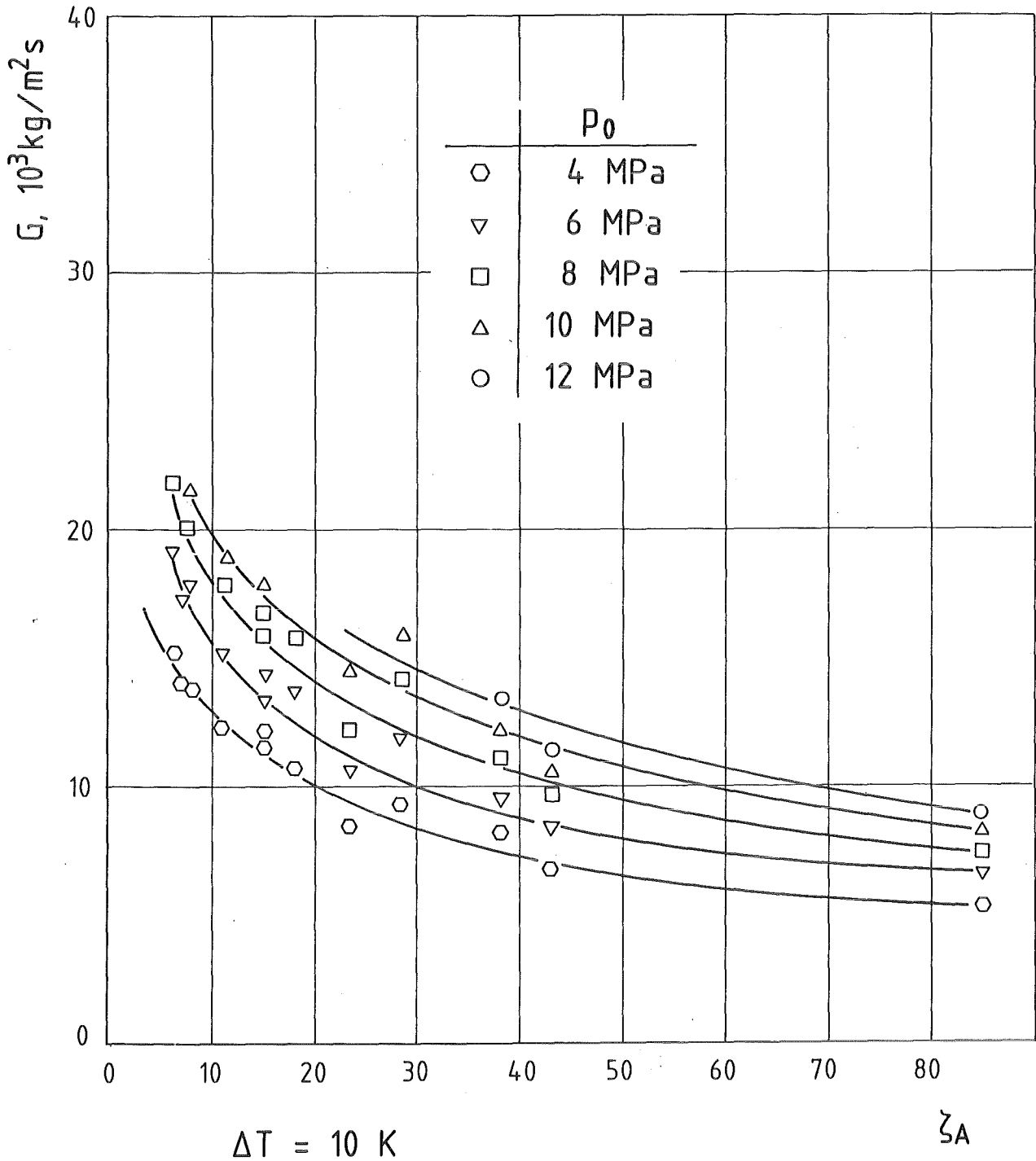
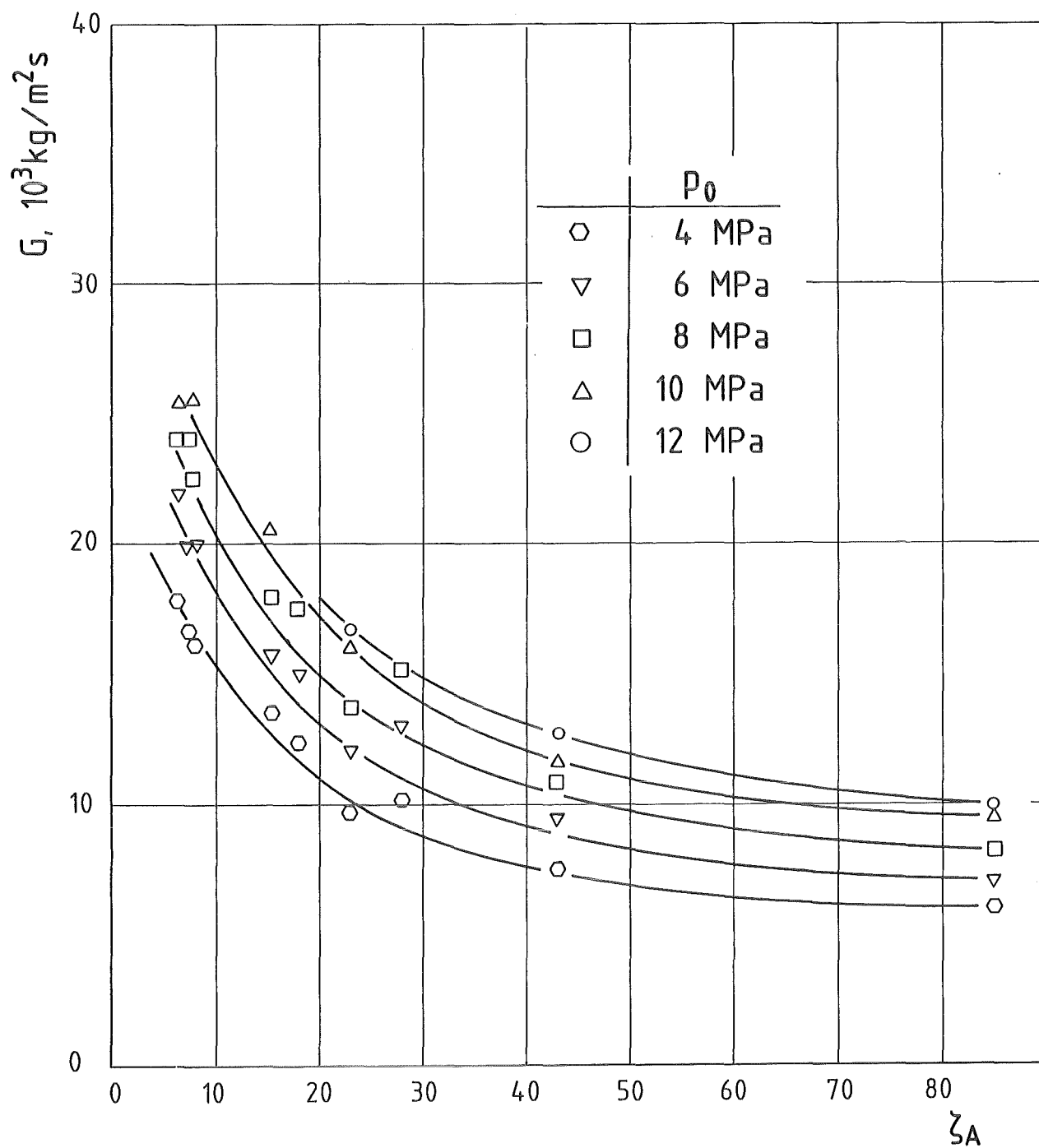


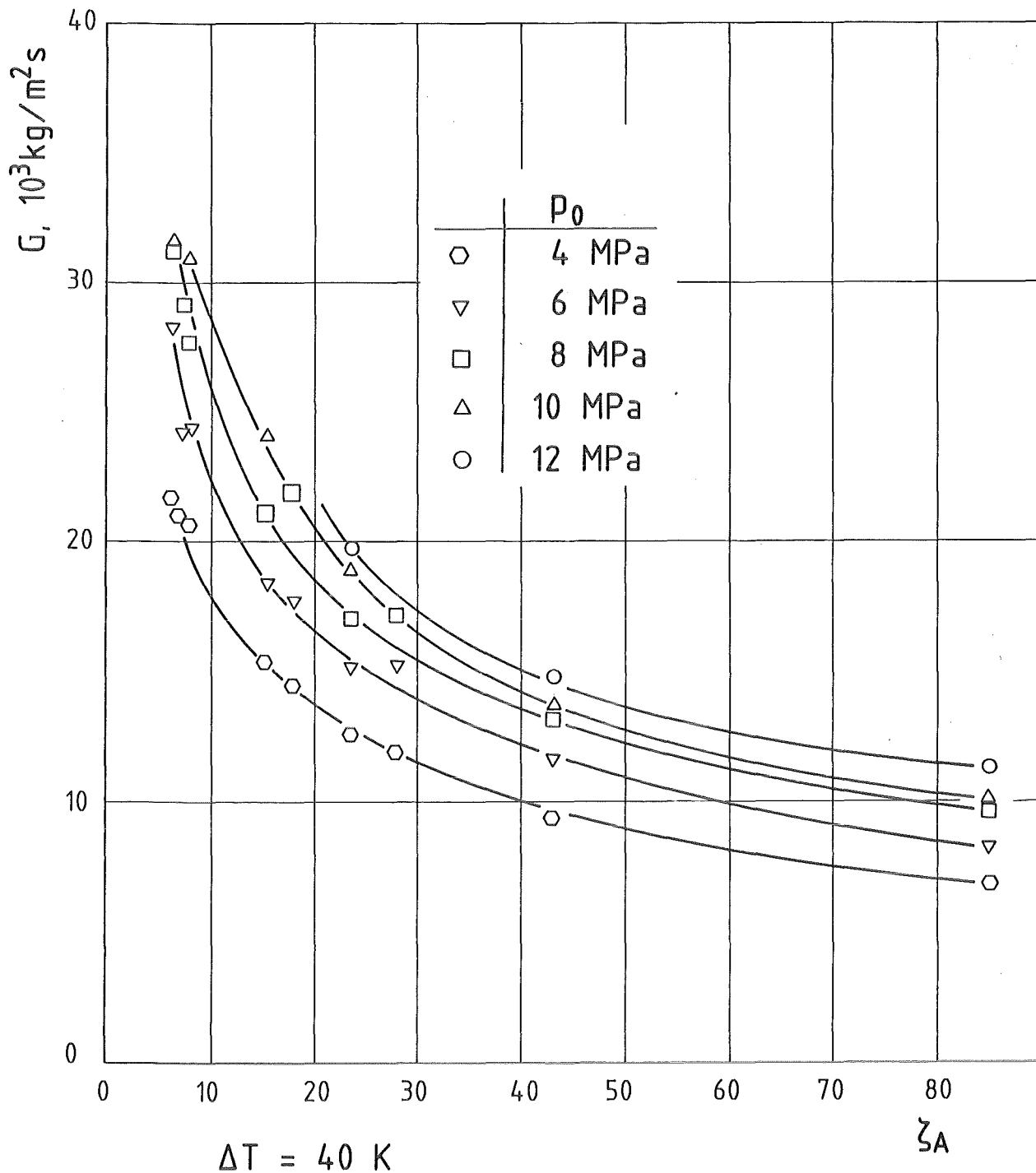
Abb. 7 Kritische Massenstromdichte über Reibungsbeiwert ζ_A (Experiment)



$\Delta T = 20 \text{ K}$



Abb. 8 Kritische Massenstromdichte über Reibungsbeiwert ζ_A (Experiment)



KfK

Abb. 9 Kritische Massenstromdichte über Reibungsbeiwert ζ_A (Experiment)

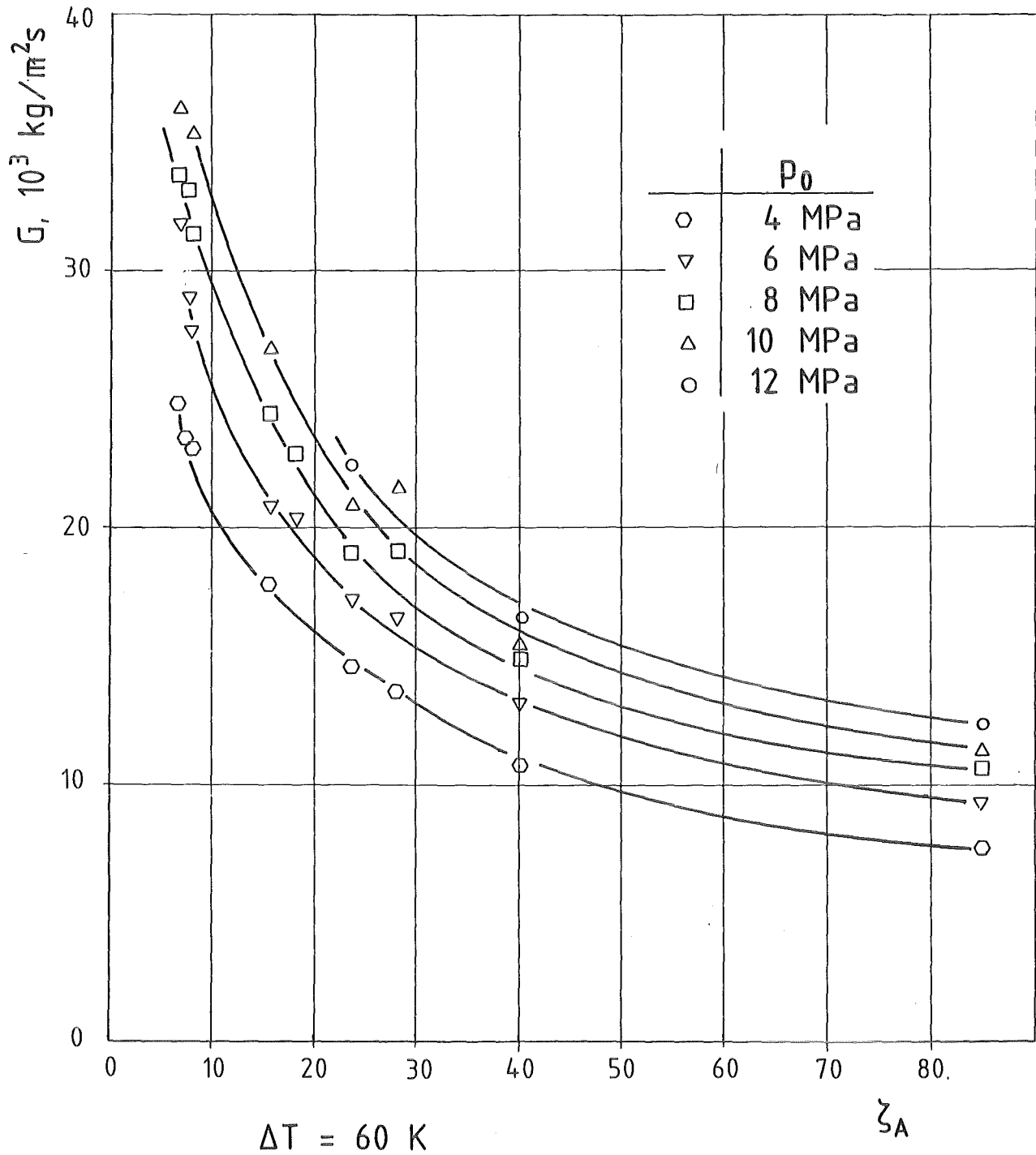


Abb. 10 Kritische Massenstromdichte über Reibungsbeiwert ζ_A (Experiment)

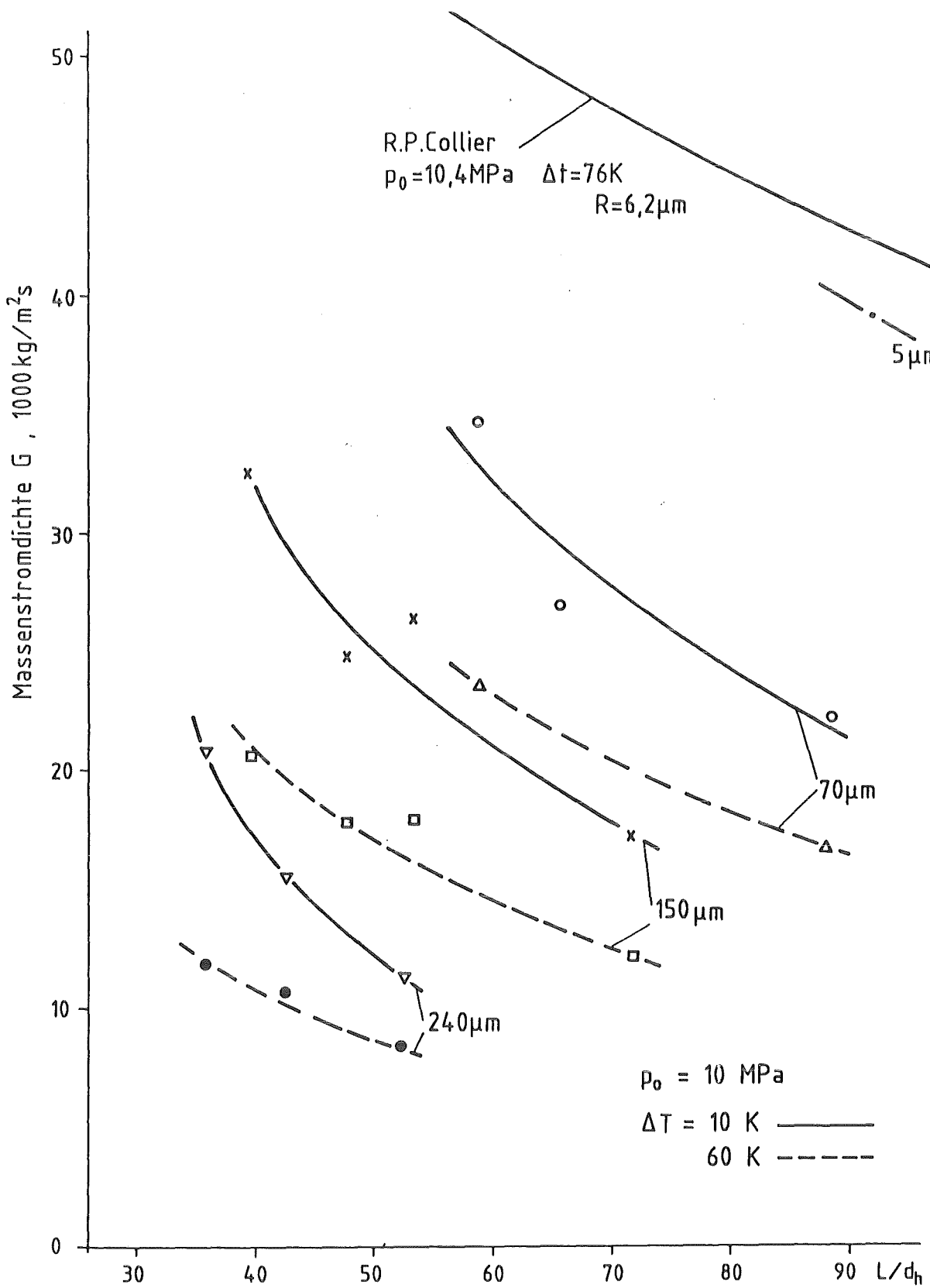
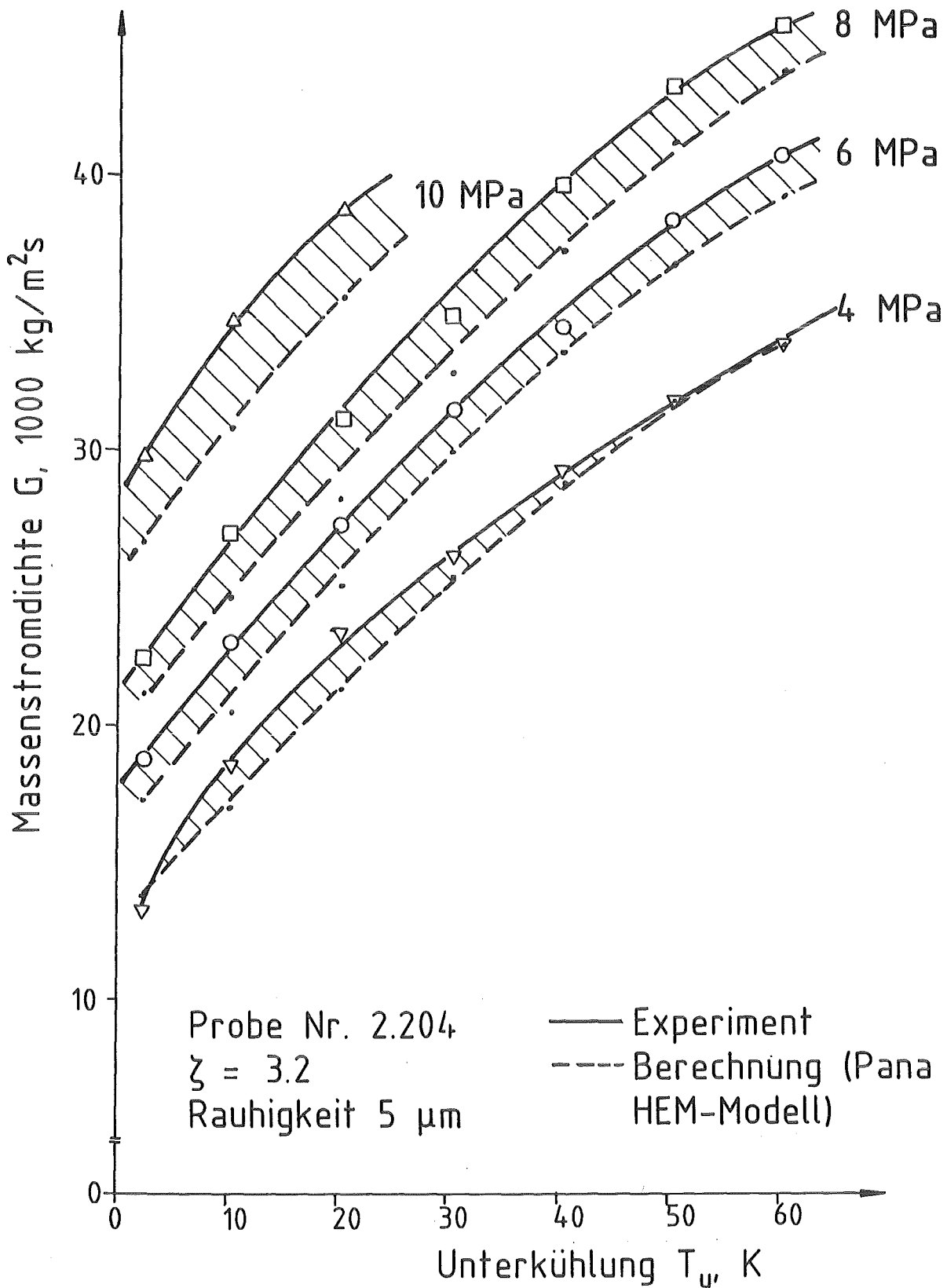
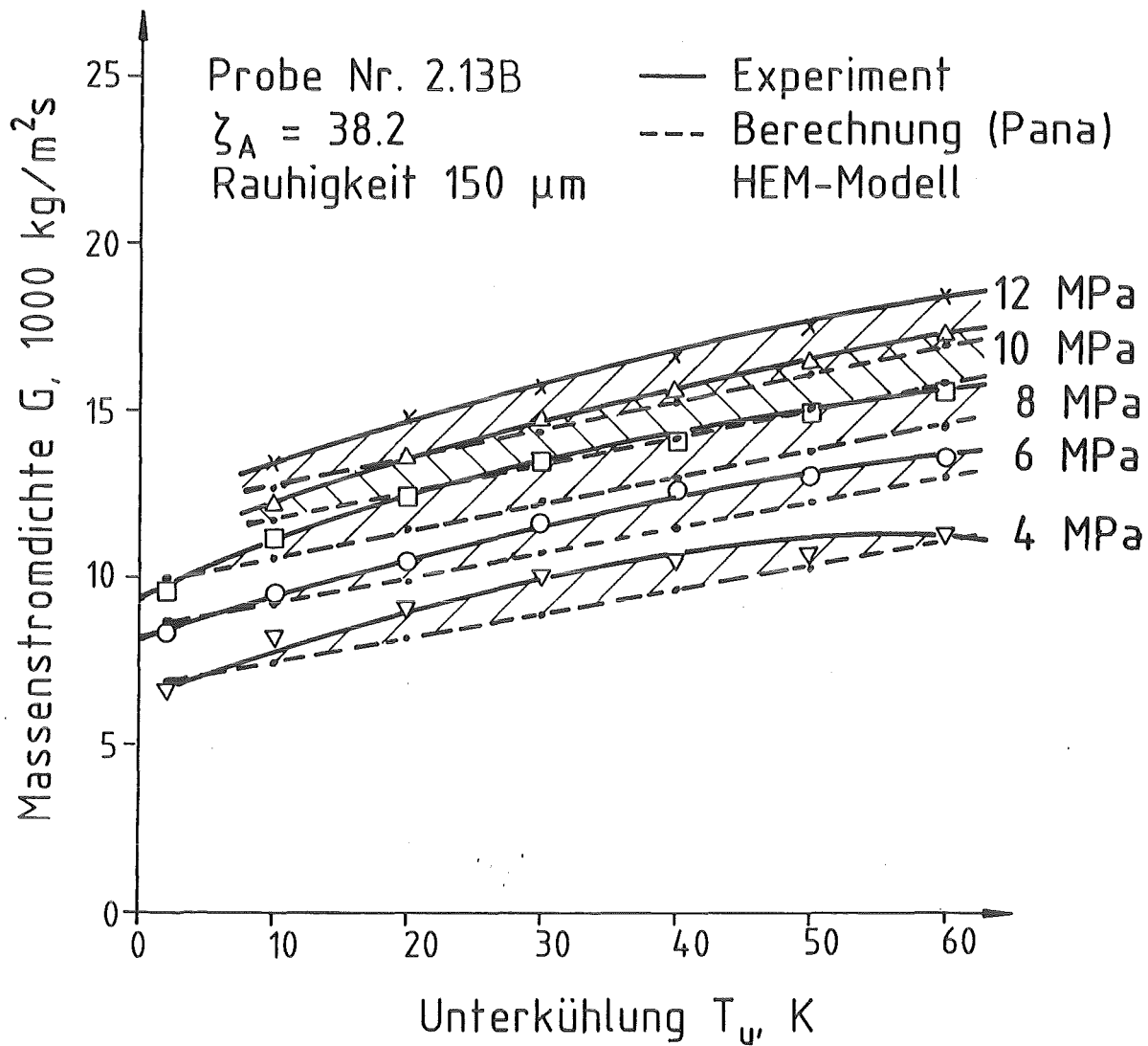


Abb.11 Experimentelle kritische Massenstromdichte als Funktion von L/d_h



KfK

Abb. 12 Massenstromdichte von Experiment und Berechnung



KfK

Abb. 13 Massenströmdichte von Experiment und Berechnung

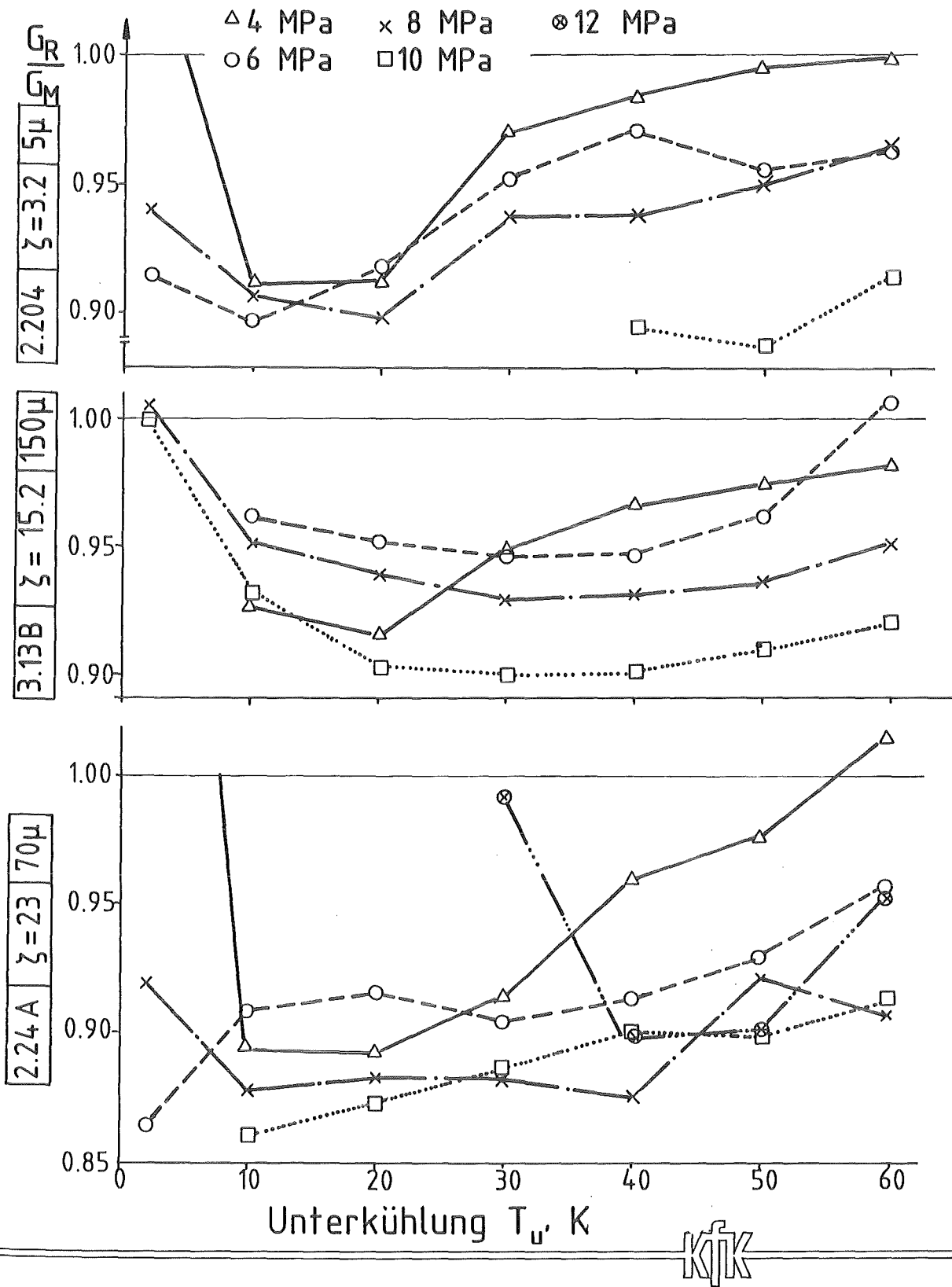
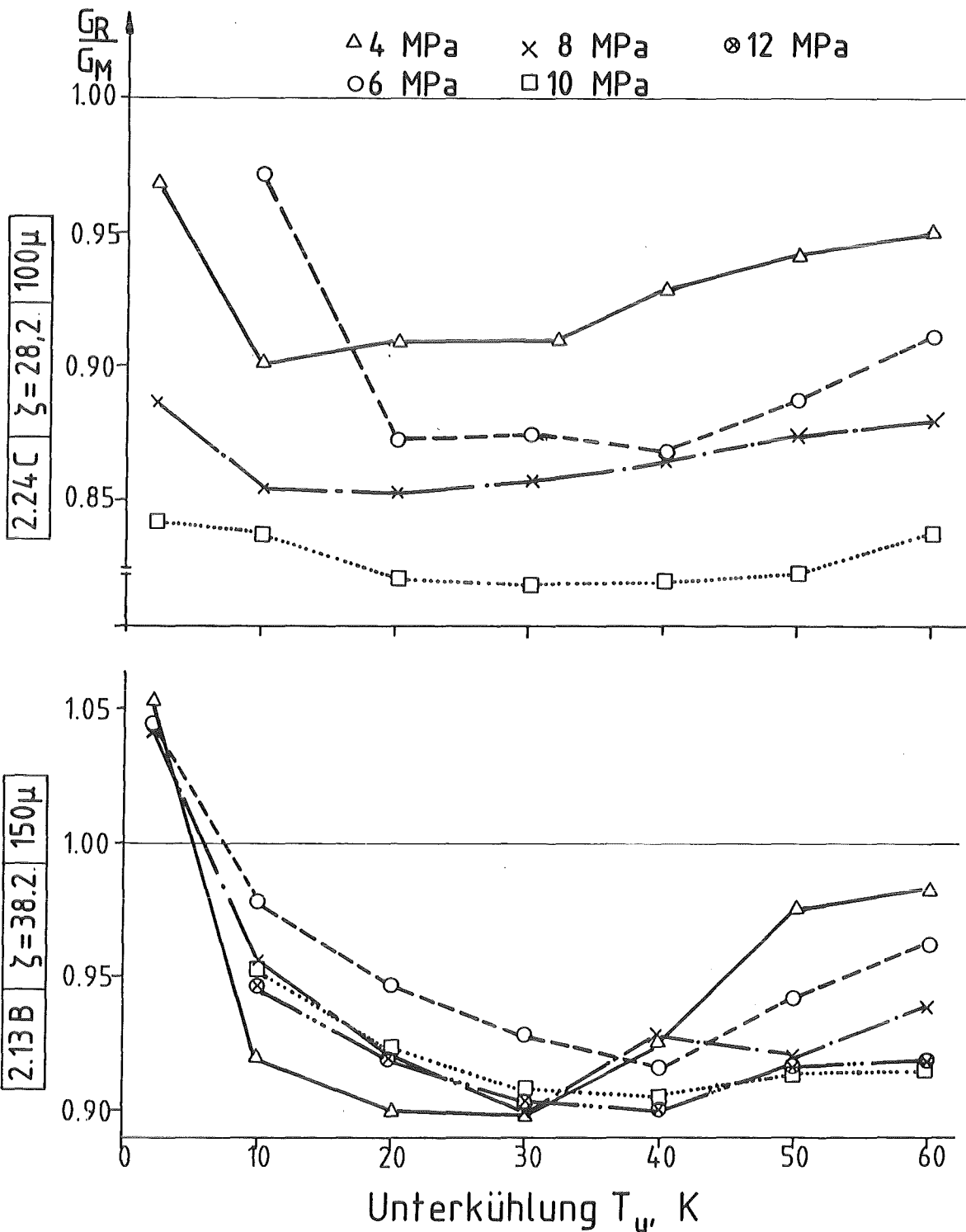


Abb.14 Berechnete/gemessene Massenstromdichte (Pana Modell) $\zeta = 3.2; 15.2; 23$



KfK

Abb.15 Berechnete/gemessene Massenstromdichte (Pana Modell) $\zeta = 28,2; 38,2$

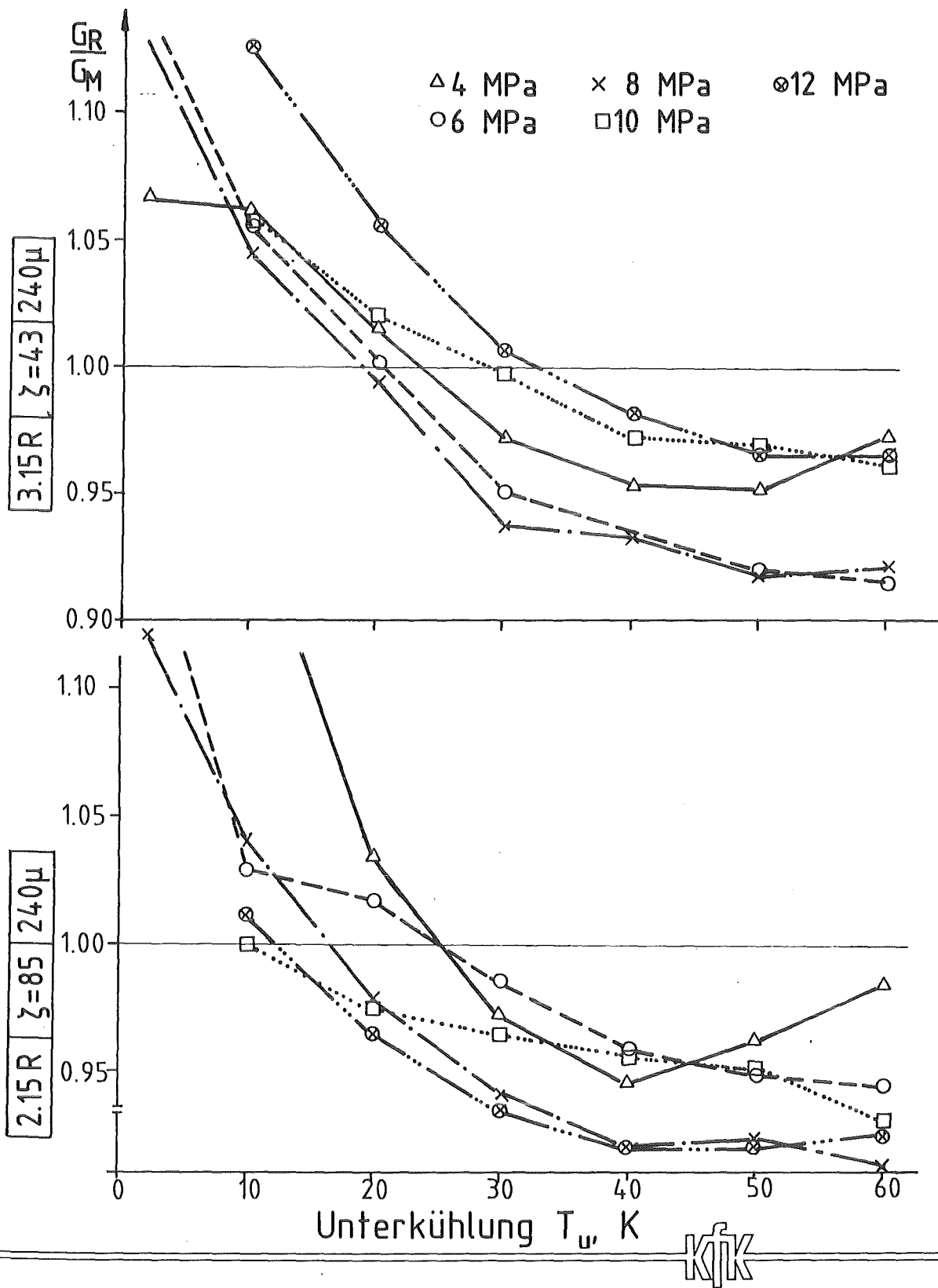
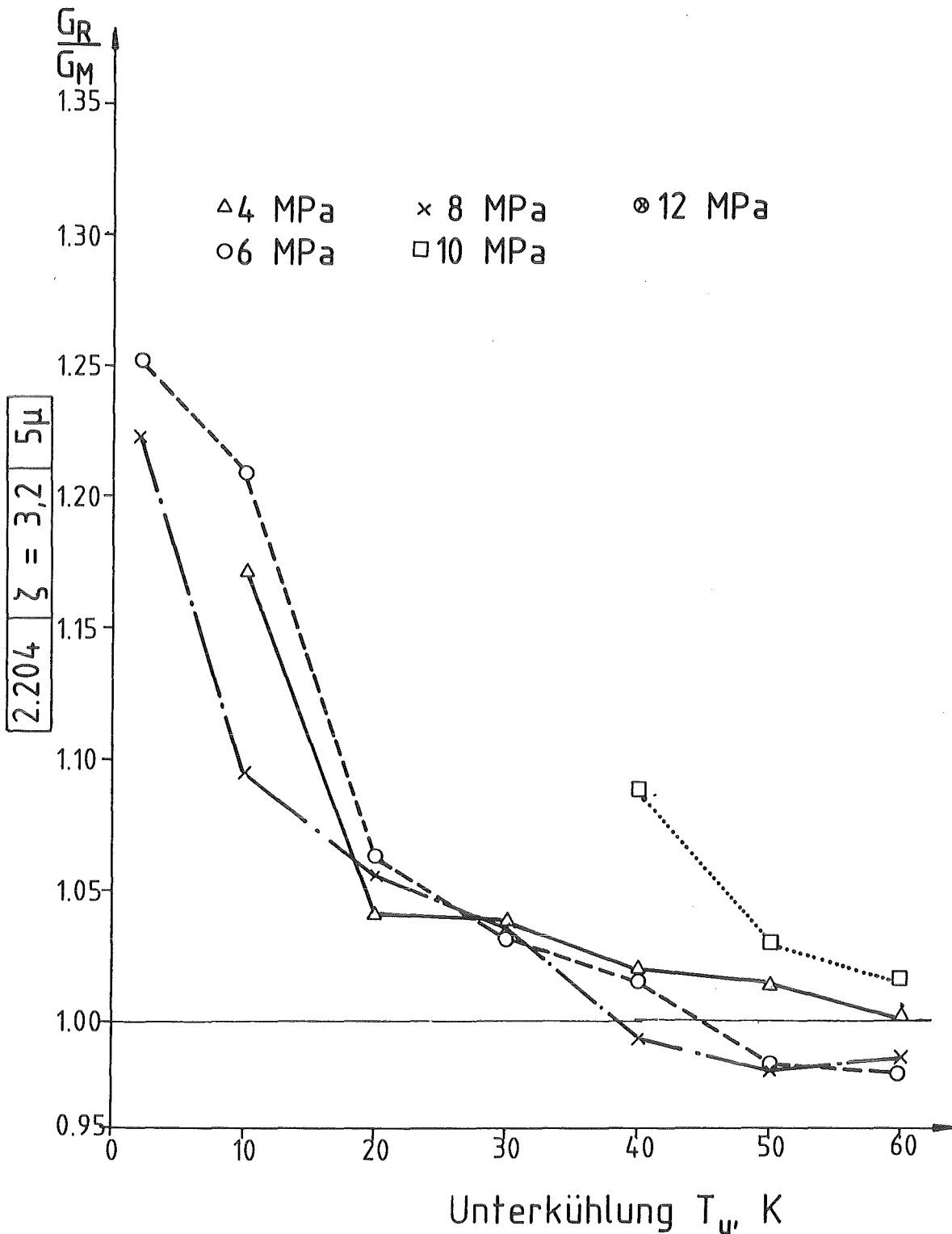
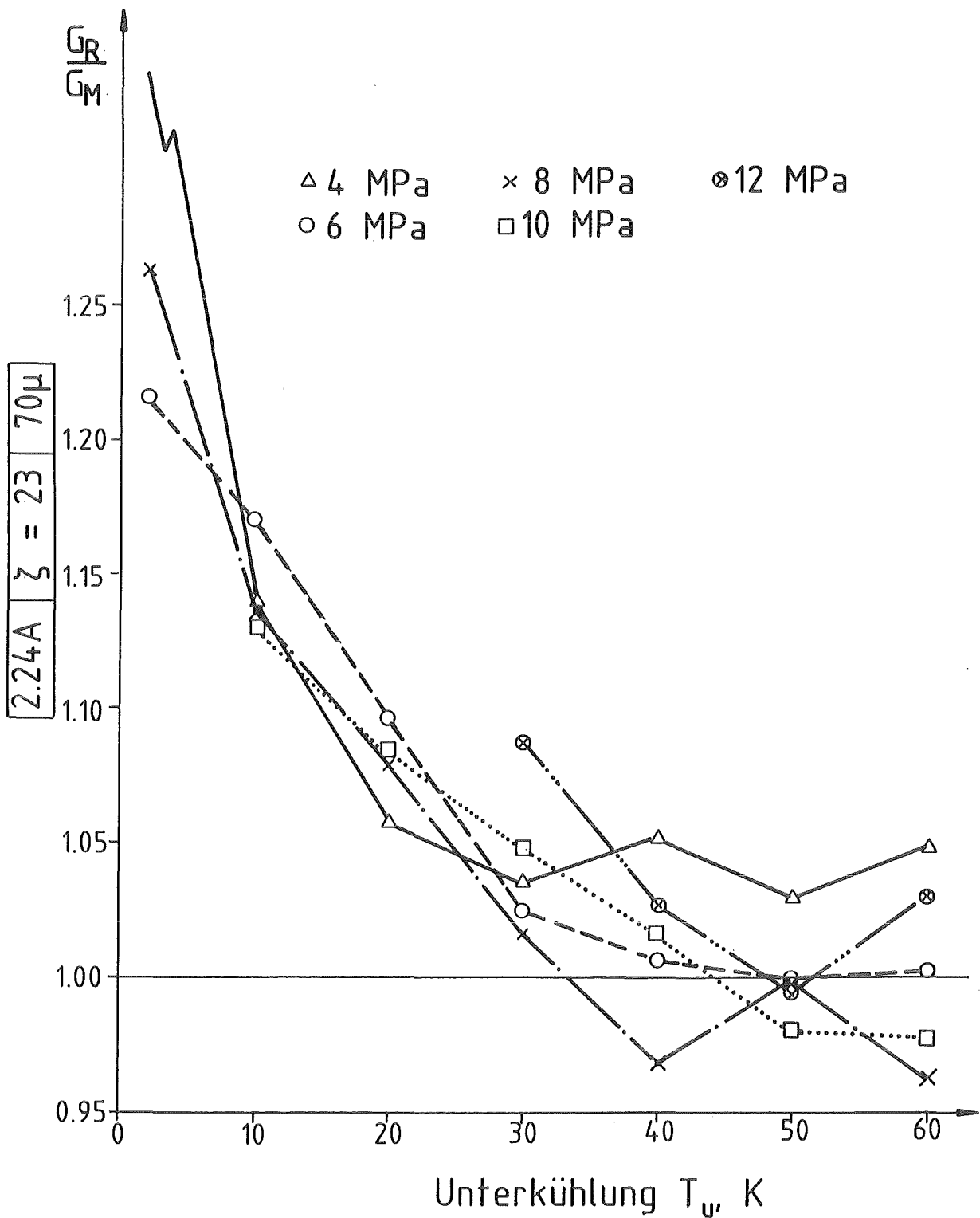


Abb.16 Berechnete/gemessene Massenstromdichte (Pana Modell) $\zeta = 43; 85$



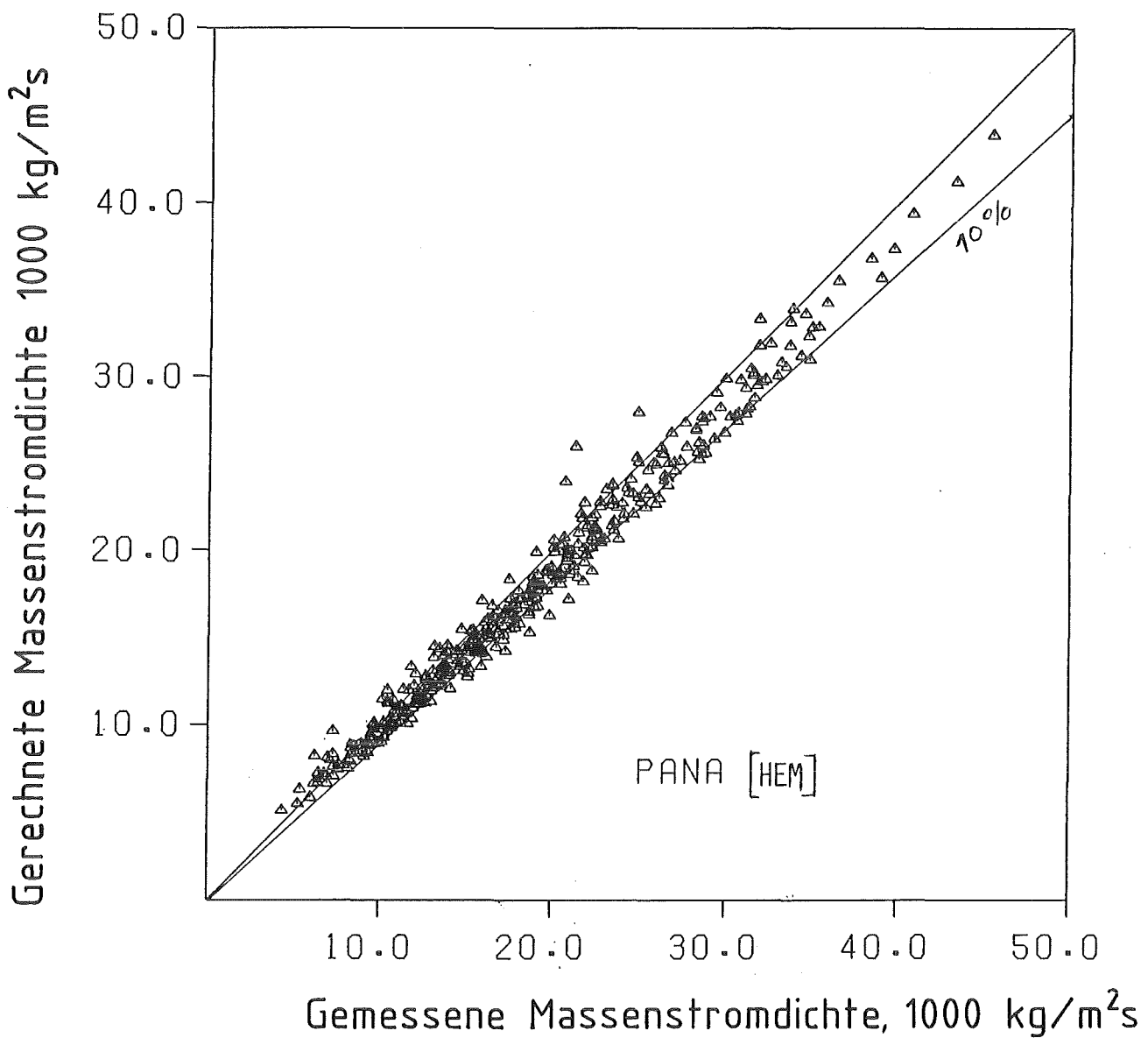
KfK

Abb.17 Berechnete/gemessene Massenstromdichte (LEAK 01 Modell, ABDOLLAHIAN)



KfK

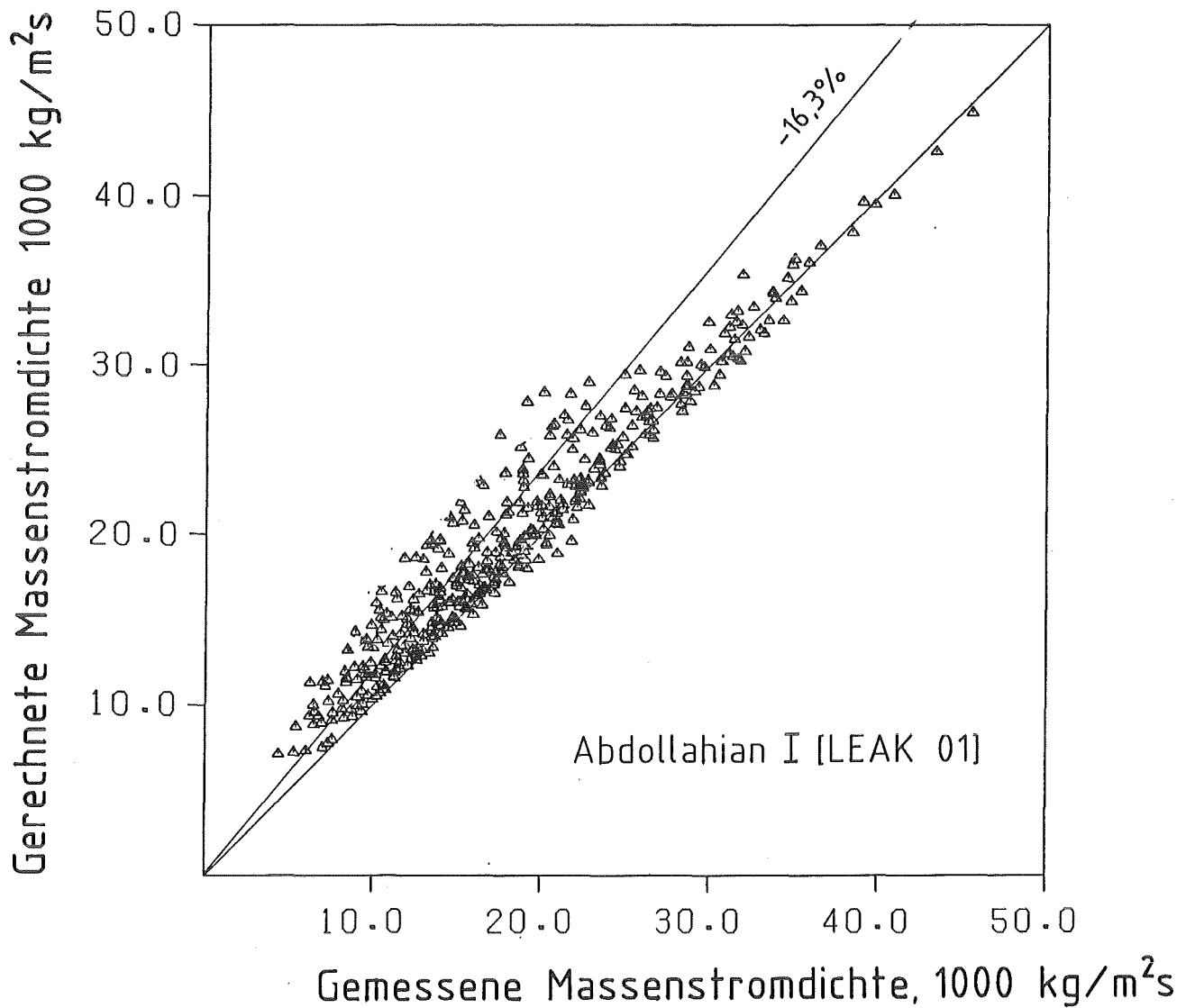
Abb.18 Berechnete/gemessene Massenstromdichte (LEAK 01 Modell, ABDOLLAHIAN)



Anzahl der Versuchspunkte	458
mittlerer relativer Fehler	3.7 %
relative Standardabweichung	10.2 %
absolute Standardabweichung	1820 kg/m ² s



Abb. 19 Genauigkeit der Massenstromdichte mit Pana - Modell



Anzahl der Versuchspunkte	458
mittlerer relativer Fehler	- 10.7 %
relative Standardabweichung	- 16.3 %
absolute Standardabweichung	2936 kg/m ² s



Abb. 20 Genauigkeit der Massenstromdichte mit LEAK 01-ABDOLLAHIAN Modell

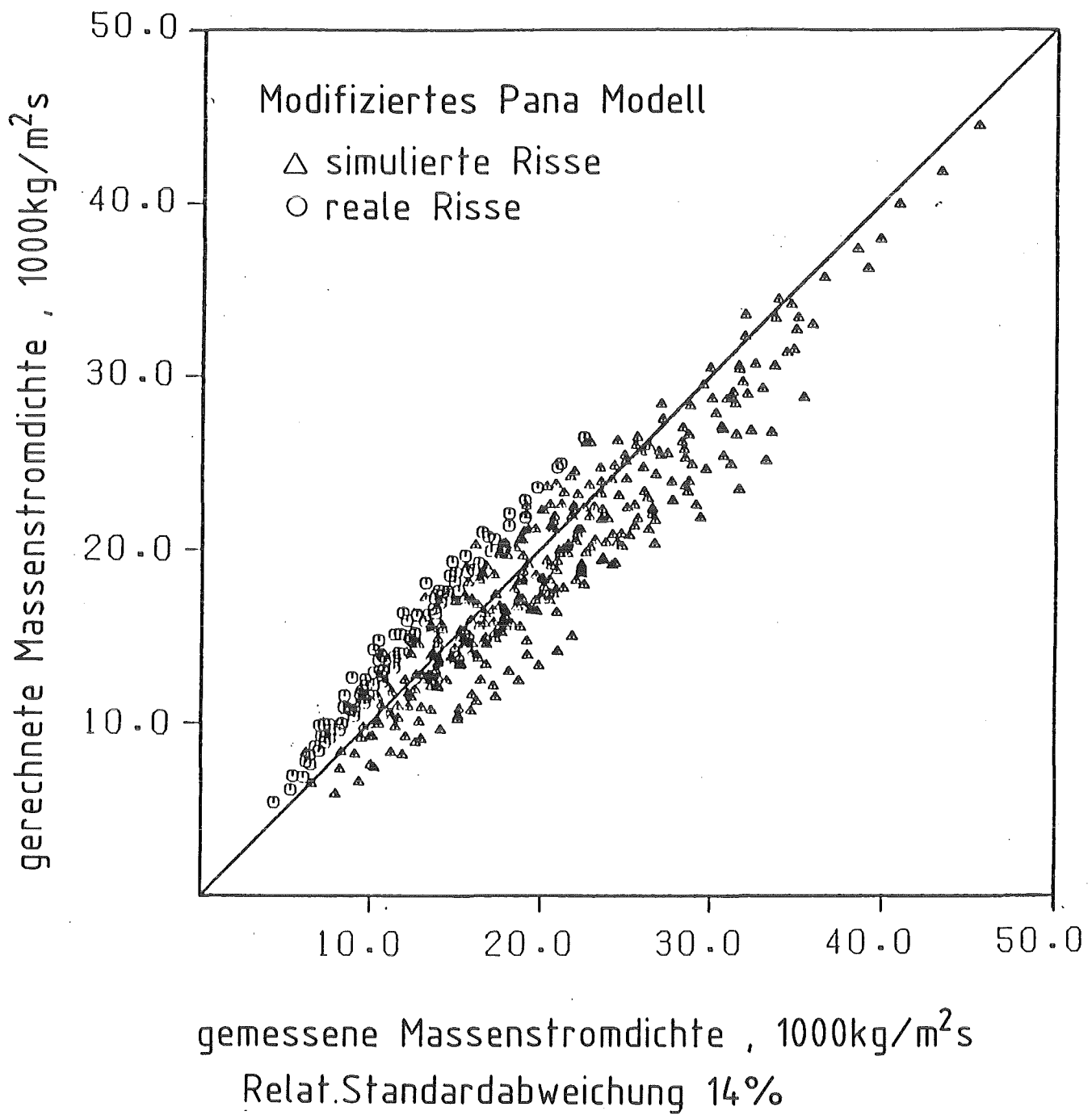
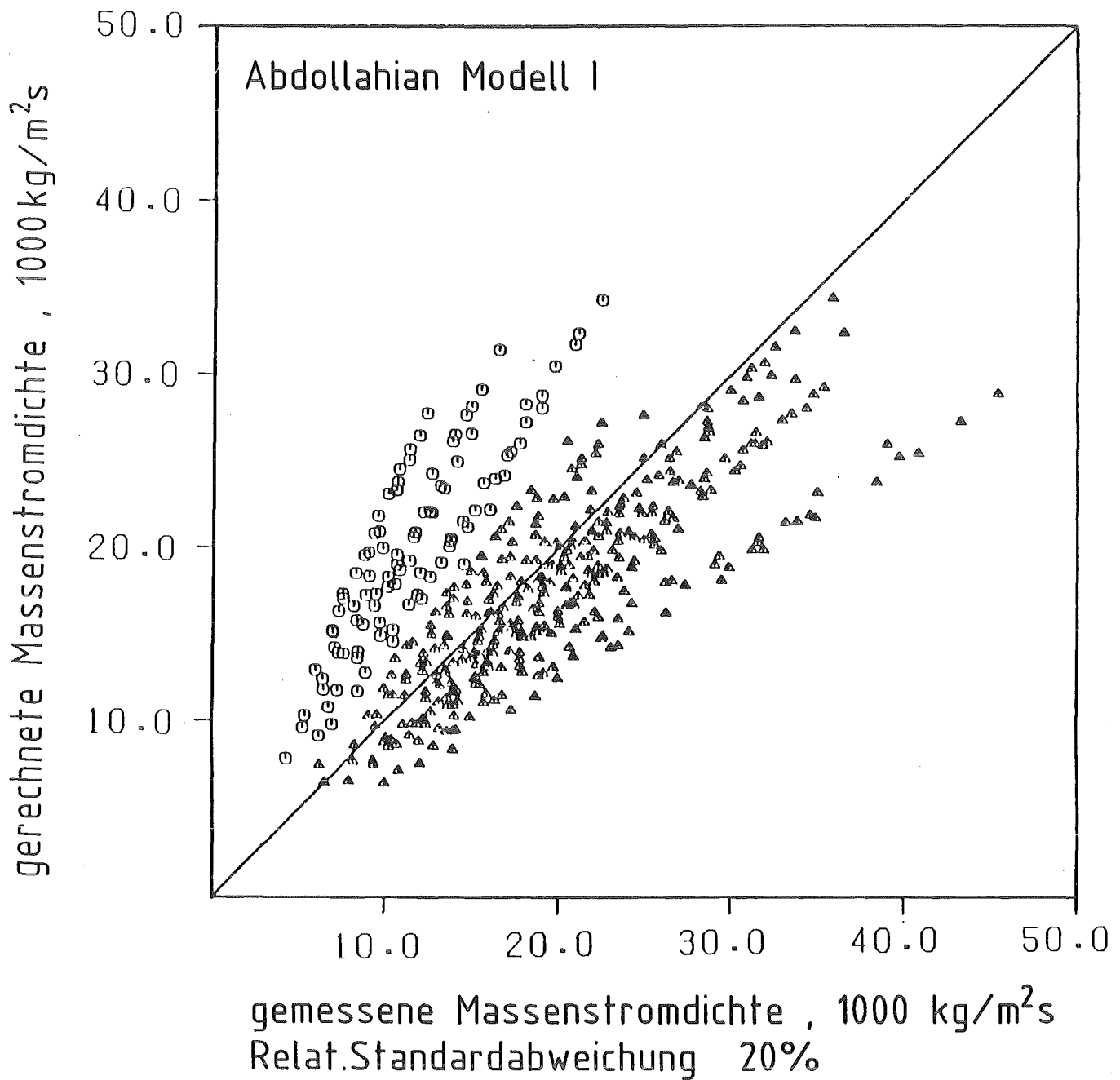


Abb. 21 Modellvergleich



KfK

Abb. 22 Modellvergleich

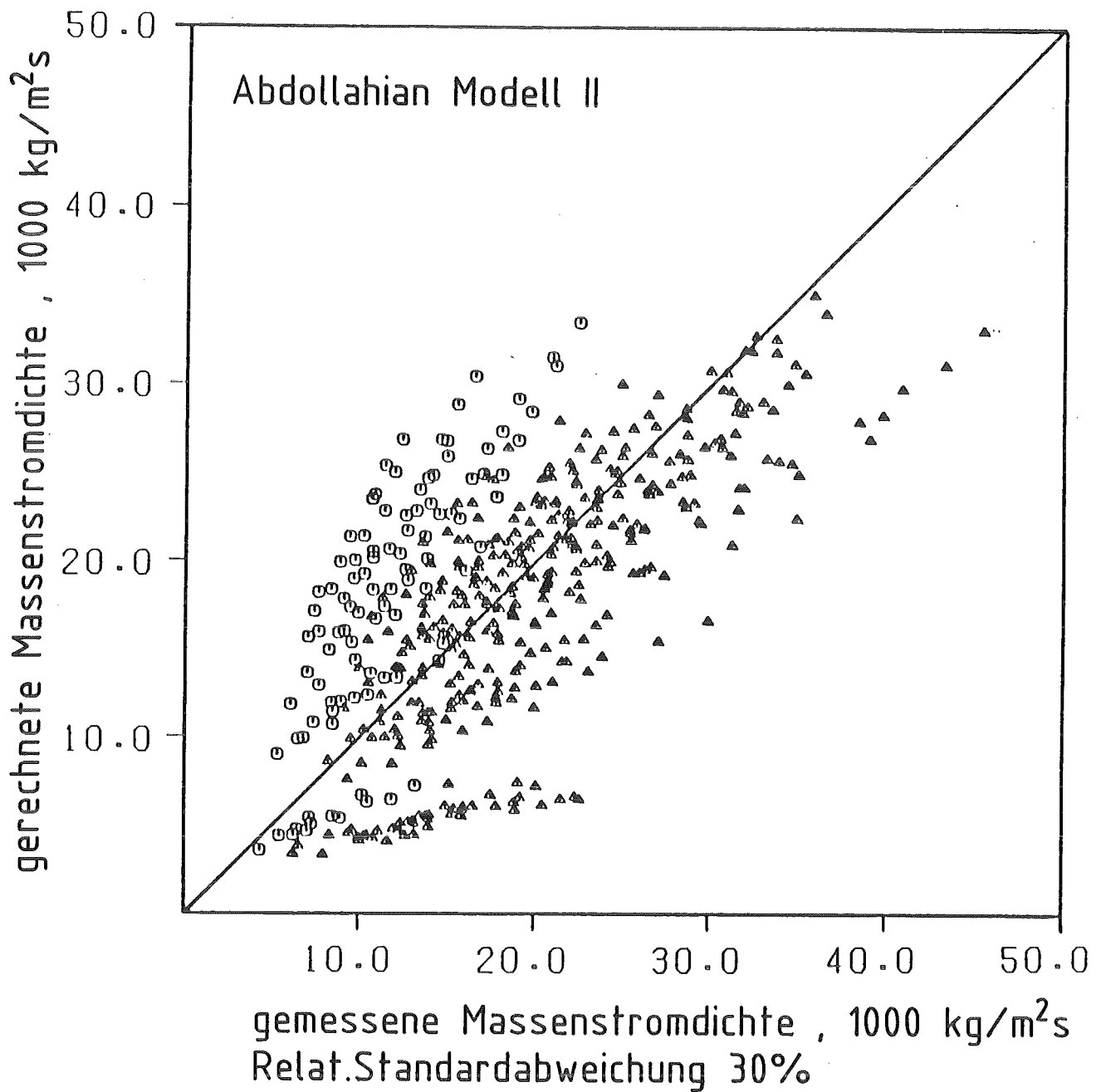


Abb. 23 Modellvergleich

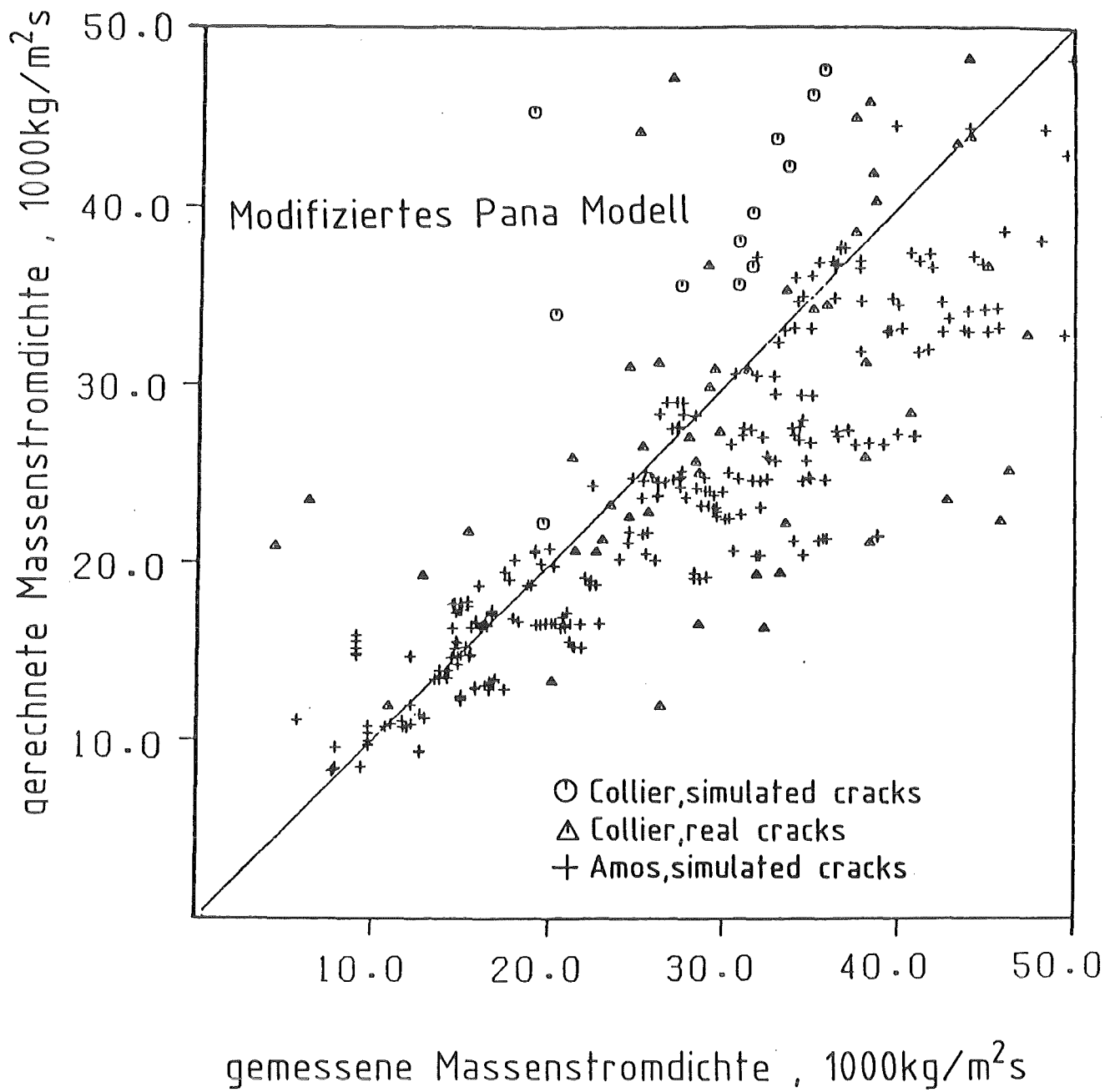


Abb. 24 Modellvergleich

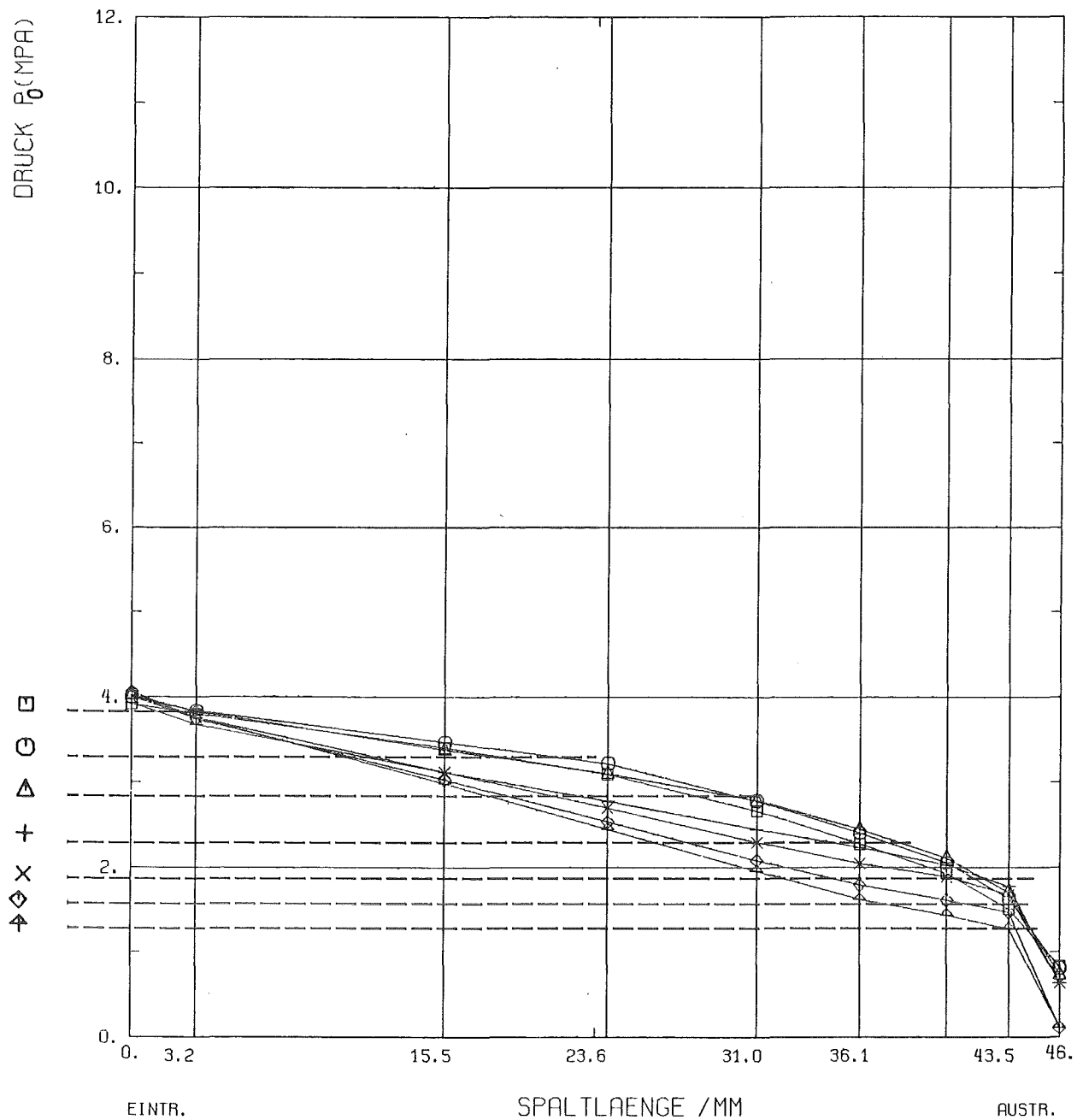
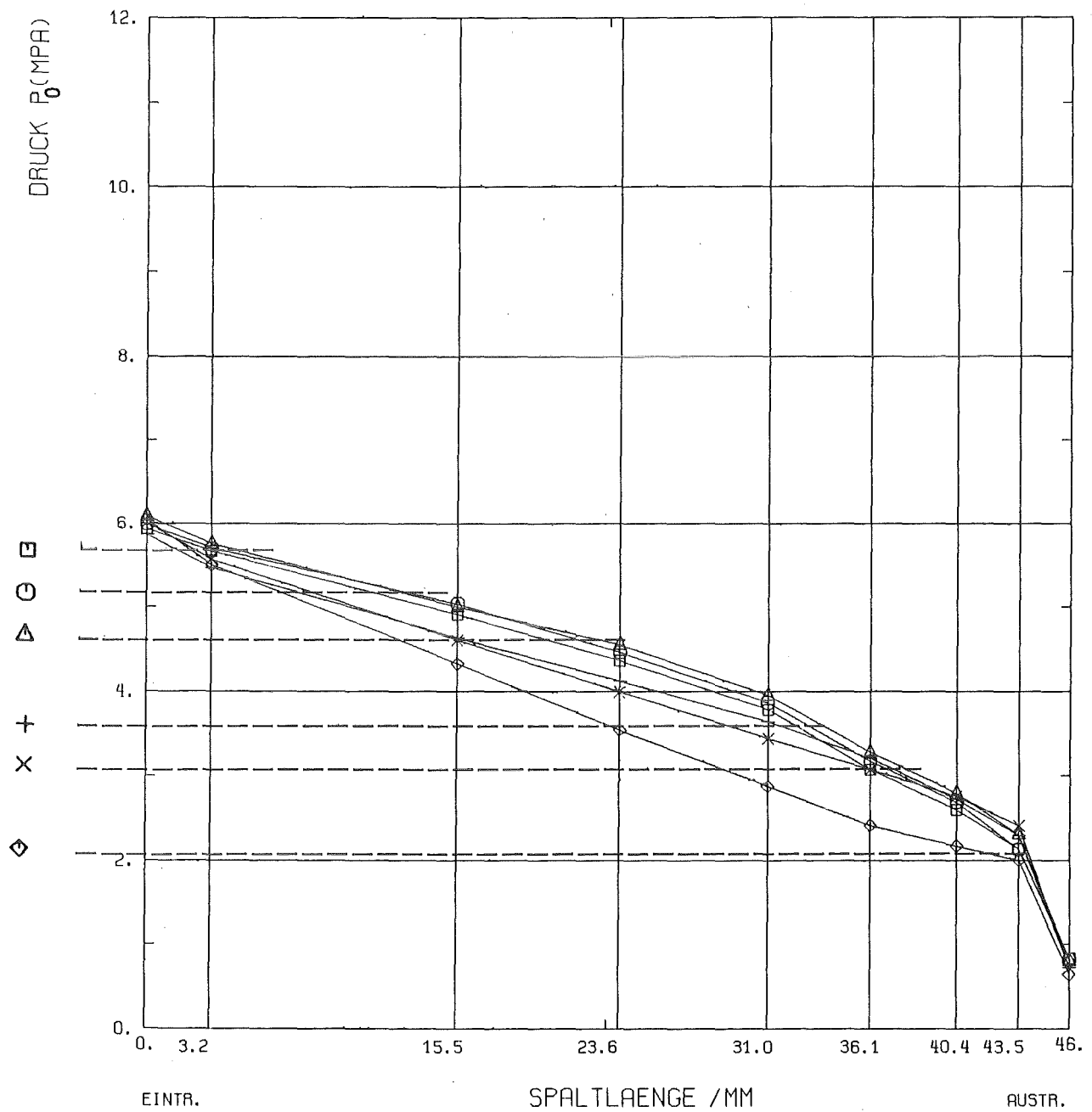


Abb.25 Druckverlauf im Spalt 2.24 A



EINTR.

SPALTLENGE / MM

AUSTR.

$$\zeta_A = 23$$

$$R = 70 \mu\text{m}$$

EINGANGSDRUCK = 6 MPA

UNTERKUEHLUNG = □ 1.81 K

○ 9.70

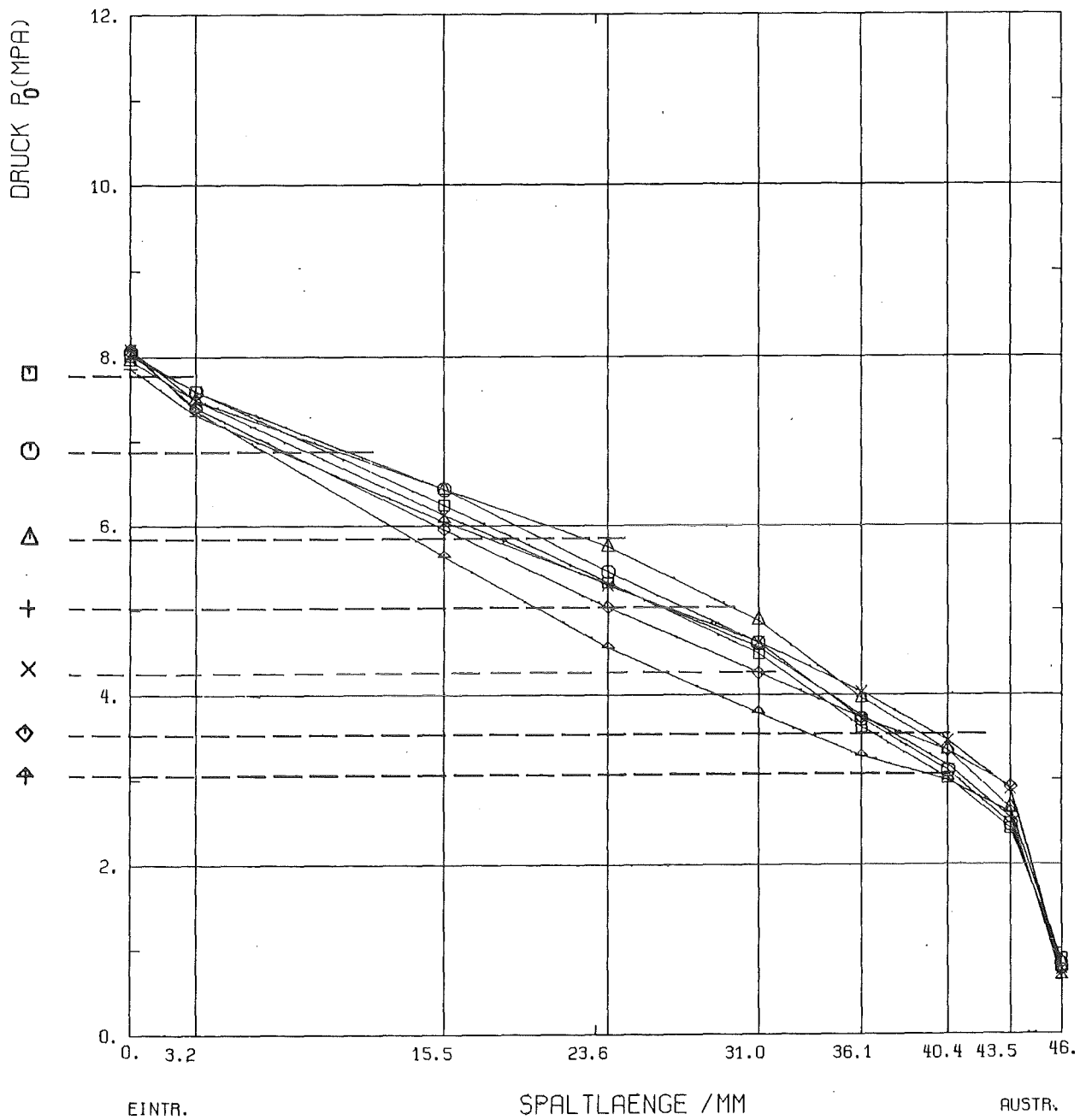
△ 20.31

+ 30.08

× 40.36

◇ 60.31

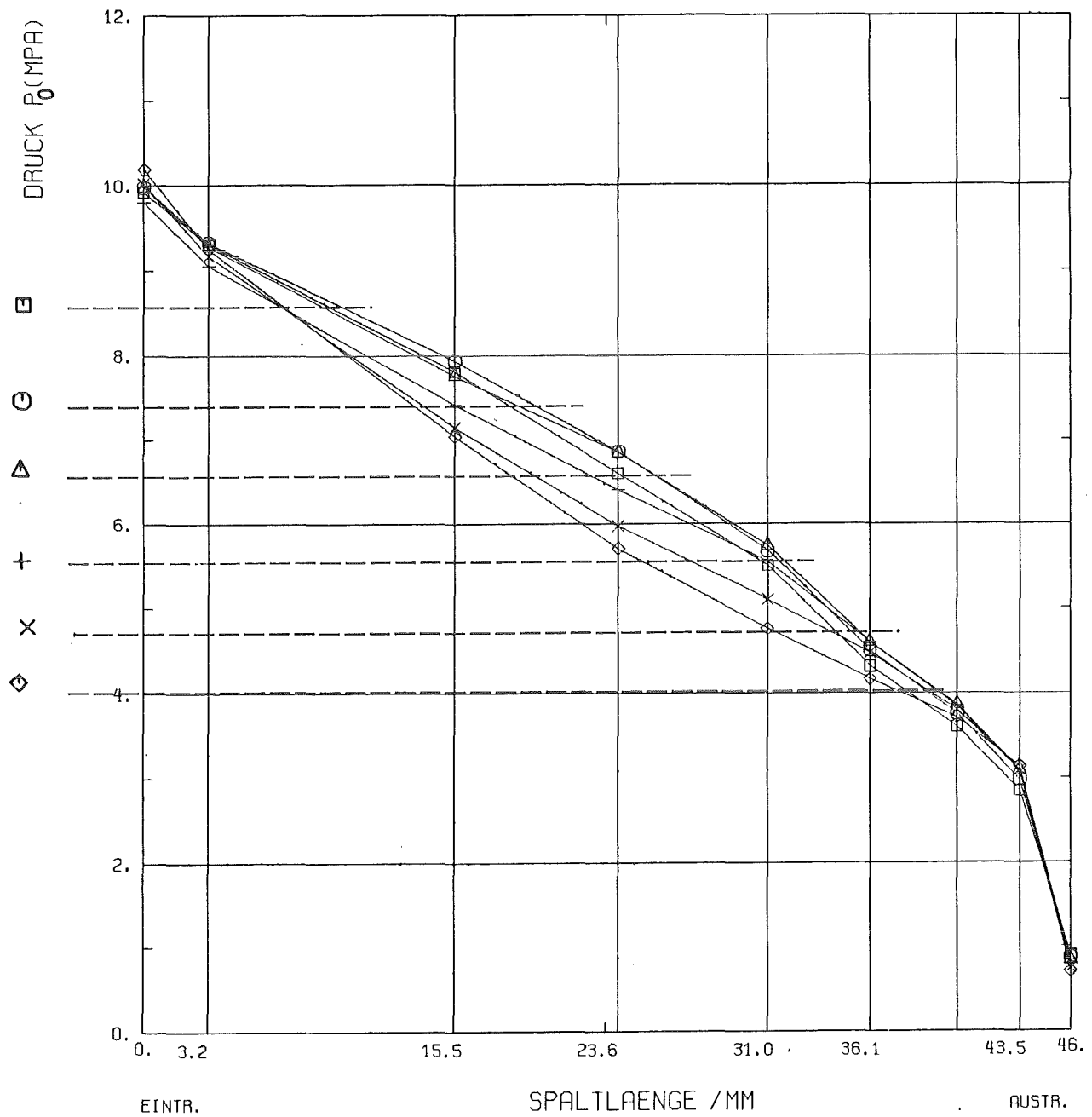
Abb.26 Druckverlauf im Spalt 2.24 A



EINGANGSDRUCK = 8 MPA
 UNTERKUEHLUNG = □ 1.63 K
 ○ 10.70
 △ 20.13
 + 30.10
 × 40.00
 ◇ 49.83
 ♣ 59.90

$\zeta_A = 23$
 $R = 70\mu\text{m}$

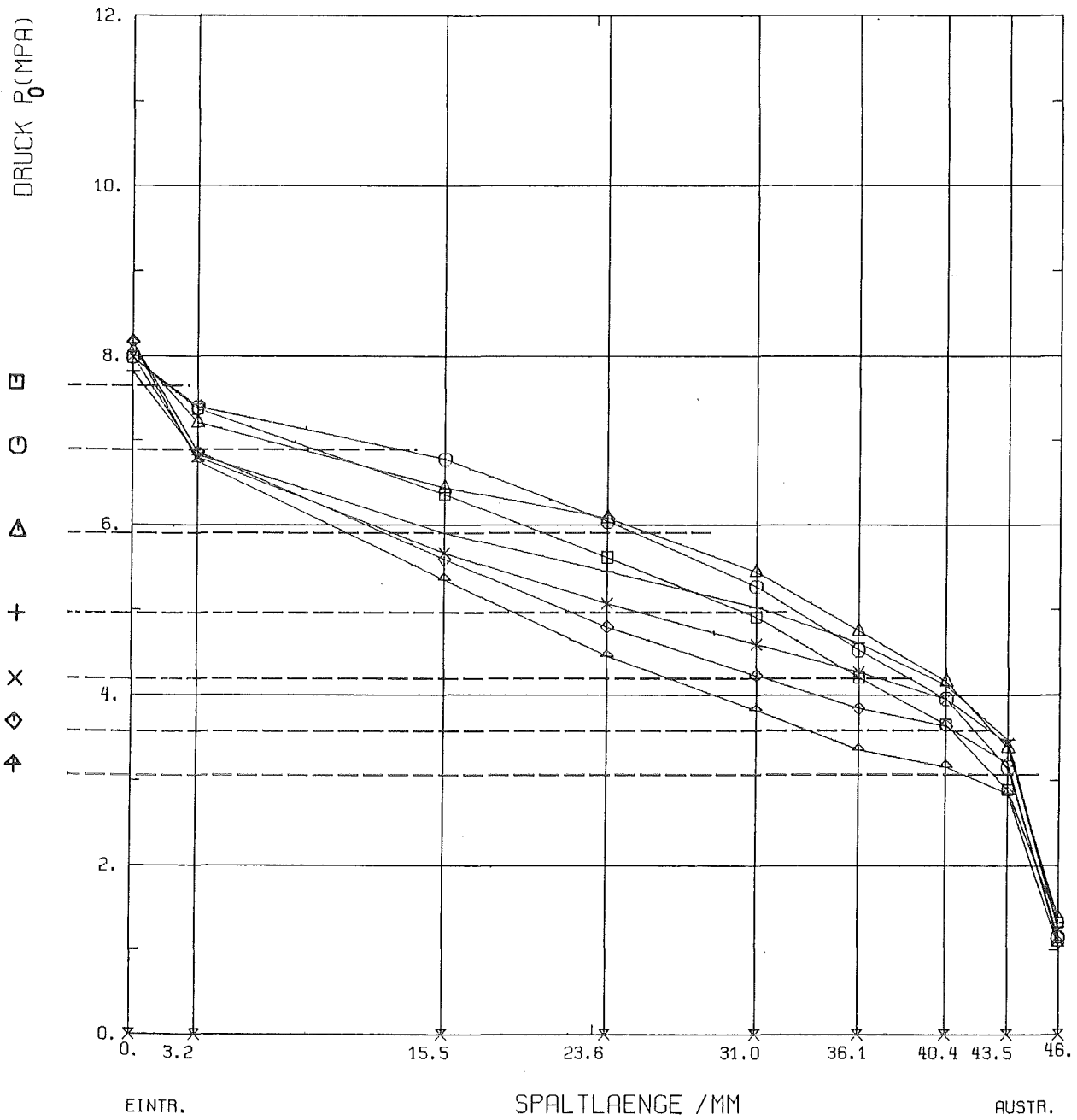
Abb.27 Druckverlauf im Spalt 2.24 A



$\zeta_A = 23$
 $R = 70\mu\text{m}$

EINGANGSDRUCK =	10	MPA
UNTERKUEHLUNG =	□	10.09 K
	○	20.04
	△	29.13
	+	39.62
	×	49.90
	◇	60.31

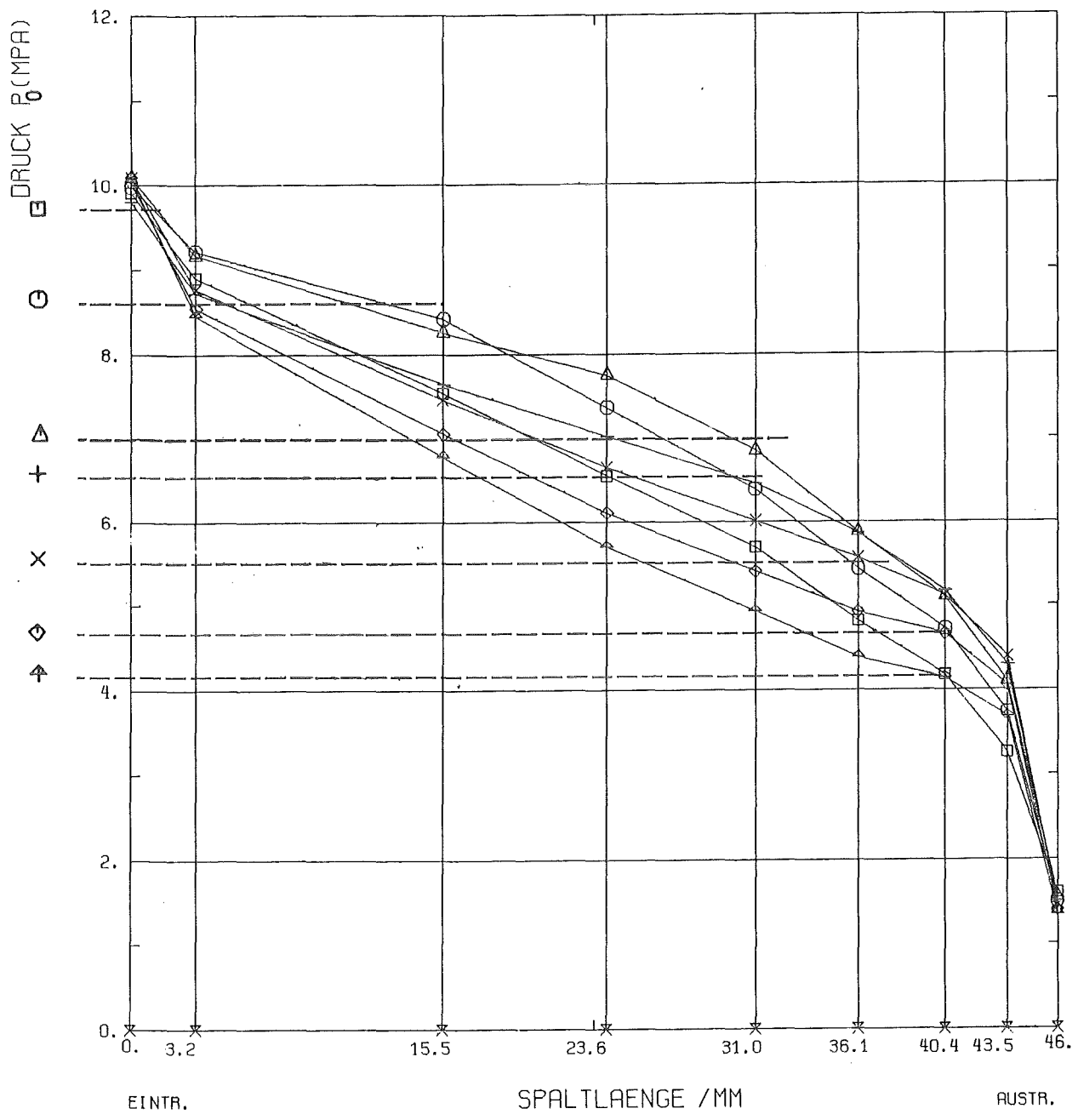
Abb.28 Druckverlauf im Spalt 2.24 A



EINGANGSDRUCK = 8 MPA
 UNTERKUEHLUNG = □ 1.86 K
 ○ 9.77
 △ 20.32
 + 29.68
 × 40.00
 ◇ 50.15
 ↗ 60.29

$\zeta_A = 8,3$
 $R = 150\mu\text{m}$

Abb.29 Druckverlauf im Spalt 4.24 B

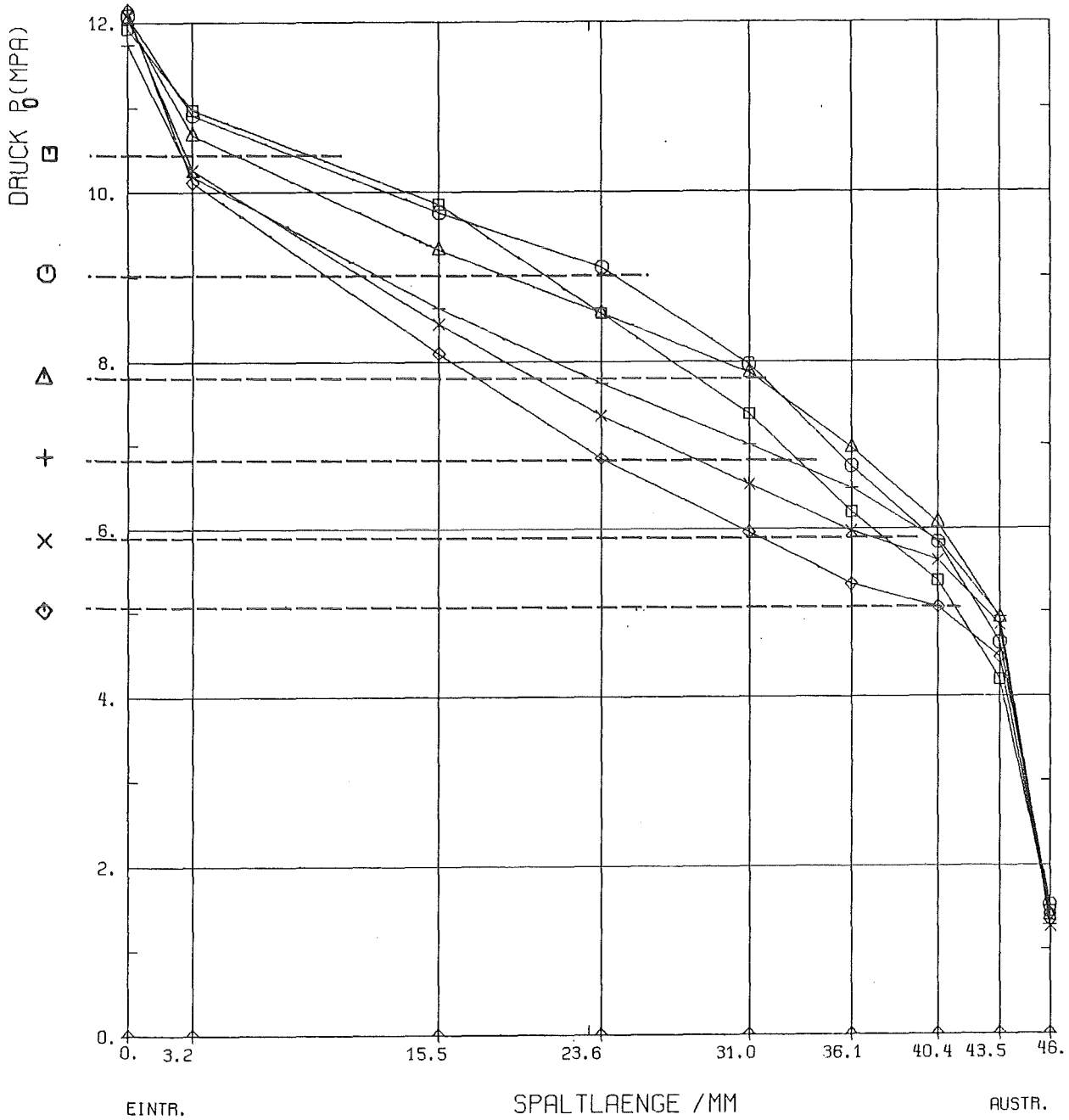


$\zeta_A = 8,3$
 $R = 150\mu\text{m}$

EINGANGSDRUCK = 10 MPA
 UNTERKUEHLUNG =

□	2.06	K
○	10.38	
△	19.69	
+	30.05	
×	40.19	
◇	49.86	
♠	59.56	

Abb. 30 Druckverlauf im Spalt 4.24 B



EINGANGSDRUCK = 12 MPA
 UNTERKUEHLUNG = □ 10.13 K
 ○ 20.77
 △ 29.86
 + 40.14
 × 50.09
 ◇ 60.00

$\zeta_A = 8,3$
 $R = 150\mu\text{m}$

Abb.31 Druckverlauf im Spalt 4.24 B

Anhang A (Tabellen 4 bis 19)

Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

In den Tabellen 4 bis 19 sind die experimentellen Werte

- p_0 Stagnationsdruck vor dem Spalt
- T_0 Stagnationstemperatur vor dem Spalt
- ΔT Unterkühlung des Wasser vor dem Spalt
- p_u Stagnationsdruck nach dem Spalt
- \dot{m} Massenstrom, einphasig gemessen
- G_M Massenstromdichte auf Austrittsquerschnitt bezogen

und die mit dem Pana-Modell unter Verwendung des gemessenen Reibungsbeiwertes ζ gerechneten Werte

- p_2 Druck im Spaltaustritt
- G_R Massenstromdichte auf Austrittsquerschnitt bezogen

und das Verhältnis der gerechneten zu den gemessenen Massenstromdichten dokumentiert. Jede Tabelle enthält die Daten einer Spaltkonfiguration.

Probe: 2.204

Spaltweite: 0.25 mm
 Spaltquerschn: 20.00 mm²

Spaltrauhigkeit: 5 µm
 Reibungsbeiwert: 3.2

P ₀ bar	T ₀ K	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	\dot{m} kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
40.30	463.1	60	12.57	5.30	0.5422	33820.0	33889.6	1.0020
40.30	473.2	50	15.58	5.70	0.5086	31880.0	31784.7	0.9970
40.00	483.0	40	19.06	6.20	0.4650	29430.0	29060.2	0.9874
40.00	493.9	30	23.55	6.60	0.4088	26240.0	25547.1	0.9736
39.90	503.5	20	28.16	6.80	0.3428	23420.0	21426.1	0.9148
40.10	513.4	10	31.20	7.20	0.2728	18650.0	17048.7	0.9141
39.70	521.3	2	30.93	7.60	0.2216	13170.0	13848.2	1.0515
60.30	489.3	60	21.56	6.40	0.6295	40820.0	39346.8	0.9639
59.80	498.2	50	25.50	6.70	0.5884	38400.0	36773.3	0.9576
60.20	509.2	40	31.04	7.10	0.5378	34550.0	33615.5	0.9725
60.30	518.3	30	36.55	7.40	0.4815	31540.0	30091.3	0.9540
60.00	528.1	20	43.14	7.70	0.4021	27320.0	25128.2	0.9198
60.20	538.9	10	44.37	8.00	0.3305	22990.0	20657.0	0.8985
59.80	546.5	2	44.12	8.40	0.2763	18840.0	17268.4	0.9166
80.60	509.1	60	30.98	7.10	0.7016	45430.0	43851.3	0.9652
80.30	517.4	50	35.92	7.40	0.6587	43290.0	41171.7	0.9510
80.30	528.2	40	43.10	7.60	0.5971	39710.0	37321.3	0.9398
80.00	538.1	30	50.64	8.00	0.5253	34960.0	32832.6	0.9391
80.10	548.0	20	56.48	8.10	0.4501	31210.0	28129.2	0.9013
80.00	557.4	10	56.42	8.40	0.3931	27020.0	24568.5	0.9093
80.00	566.3	2	56.42	8.80	0.3400	22540.0	21252.5	0.9429
100.50	554.1	30	64.62	8.40	0.5707	38980.0	35667.1	0.9150
100.60	564.2	20	68.17	8.50	0.4955	34850.0	30967.3	0.8885
100.00	573.3	10	67.84	9.00	0.4282	29880.0	26764.5	0.8957

Tabelle 4: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 2.13A

Spaltweite: 0.35 mm Spaltrauhigkeit: 70 μm
Spaltquerschn: 28.00 mm² Reibungsbeiwert: 18.1

P_o bar	T_o K	ΔT K	P_2 bar	P_u bar	\dot{m} kg/s	G_M kg/s m ²	GR kg/s m ²	G_R/G_M
40.40	464.2	60	12.92	5.80	0.2287	16090.0	15878.8	0.9869
40.30	473.7	50	15.79	5.50	0.2147	15570.0	14906.5	0.9574
40.00	483.2	40	19.17	5.90	0.1966	14550.0	13649.9	0.9381
40.00	493.8	30	20.36	6.40	0.1770	13500.0	12294.3	0.9107
40.40	503.6	20	20.51	6.80	0.1611	12370.0	11189.2	0.9045
39.90	513.4	10	20.32	7.20	0.1421	10730.0	9868.5	0.9197
39.90	521.4	2	20.32	7.50	0.1280	9404.0	8886.8	0.9450
60.30	489.0	60	21.51	5.90	0.2671	20280.0	18548.7	0.9146
59.90	498.6	50	25.78	6.20	0.2487	19040.0	17270.3	0.9070
60.20	508.7	40	27.63	6.60	0.2310	17690.0	16044.5	0.9070
60.40	518.2	30	27.70	6.90	0.2149	16520.0	14922.5	0.9033
60.40	529.3	20	27.70	7.70	0.1952	15040.0	13557.1	0.9014
59.90	538.7	10	27.53	7.90	0.1770	13630.0	12291.0	0.9018
60.40	547.2	2	27.70	8.20	0.1635	12400.0	11355.0	0.9157
79.90	508.5	60	30.80	6.60	0.2960	22760.0	20556.6	0.9032
80.10	518.0	50	34.07	6.80	0.2780	21860.0	19308.8	0.8833
80.30	528.1	40	34.13	7.20	0.2602	20450.0	18066.7	0.8835
79.90	538.1	30	34.01	7.50	0.2406	18950.0	16707.1	0.8816
80.20	548.2	20	34.10	7.70	0.2230	17570.0	15487.1	0.8815
79.90	558.1	10	34.01	8.30	0.2039	15700.0	14162.8	0.9021
79.60	565.9	2	33.91	8.60	0.1889	14050.0	13120.1	0.9338

Tabelle 5: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 2.24A

Spaltweite: 0.26 mm
 Spaltquerschn: 20.80 mm²

Spaltrauhigkeit: 70 µm
 Reibungsbeiwert: 23.0

P ₀ bar	T ₀ K	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	\dot{m} kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
40.10	463.5	60	12.72	0.00	0.2148	13930.0	14132.5	1.0145
40.08	472.6	50	15.43	0.00	0.2026	13660.0	13330.5	0.9759
39.88	483.1	40	18.60	40.20	0.1850	12670.0	12169.5	0.9605
40.12	493.2	30	18.68	6.55	0.1700	12250.0	11181.8	0.9128
40.09	504.0	20	18.67	7.33	0.1529	11270.0	10056.7	0.8923
40.10	513.5	10	18.67	8.13	0.1379	10140.0	9070.0	0.8945
39.56	521.3	2	18.49	8.37	0.1250	6221.0	8221.3	1.3215
60.12	488.5	60	21.31	6.38	0.2514	17290.0	16539.0	0.9565
60.67	499.2	50	25.27	6.81	0.2358	16710.0	15510.8	0.9282
59.94	508.2	40	25.06	7.13	0.2191	15810.0	14415.6	0.9118
59.80	518.5	30	25.01	7.42	0.2024	14750.0	13317.9	0.9029
60.69	529.1	20	25.28	7.98	0.1880	13520.0	12366.6	0.9147
59.98	539.0	10	25.07	8.25	0.1705	12370.0	11217.0	0.9068
59.06	545.9	2	24.79	8.54	0.1528	11640.0	10054.2	0.8637
80.00	508.2	60	30.65	6.27	0.2792	20260.0	18369.4	0.9067
80.11	518.4	50	30.79	7.40	0.2627	18790.0	17283.0	0.9198
80.64	528.5	40	30.93	7.52	0.2475	18630.0	16285.7	0.8741
80.27	538.2	30	30.83	7.40	0.2304	17190.0	15154.9	0.8816
80.10	548.0	20	30.79	7.67	0.2138	15940.0	14064.5	0.8823
80.84	558.1	10	30.98	8.07	0.1990	14920.0	13090.7	0.8774
80.78	567.1	2	30.96	8.60	0.1840	13170.0	12105.5	0.9192
101.30	524.7	60	36.46	6.99	0.3056	22080.0	20108.4	0.9107
99.91	534.1	50	36.11	7.39	0.2862	20990.0	18830.9	0.8971
100.22	544.6	40	36.18	8.19	0.2688	19650.0	17686.7	0.9001
99.68	554.6	30	36.05	8.43	0.2504	18620.0	16475.5	0.8848
100.30	563.6	20	36.20	8.66	0.2363	17840.0	15548.9	0.8716
99.80	573.0	10	36.08	8.71	0.2191	16750.0	14414.2	0.8605
120.47	538.8	60	41.20	7.38	0.3242	22390.0	21330.0	0.9526
120.49	549.0	50	41.21	7.69	0.3060	22240.0	20128.5	0.8990
120.00	557.2	40	41.09	7.99	0.2902	21230.0	19094.7	0.8994
121.22	548.4	50	41.38	8.78	0.3085	20450.0	20293.4	0.9923

Tabelle 6: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 3.13A

Spaltweite: 0.35 mm
 Spaltquerschn: 28.00 mm²

Spaltrauhigkeit: 70 μm
 Reibungsbeiwert: 15.3

P _o bar	T _o K	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	\dot{m} kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
40.70	464.3	60	12.96	5.20	0.2760	17790.0	17251.5	0,9697
40.70	474.4	50	16.05	5.60	0.2585	16740.0	16156.8	0.9652
39.90	483.2	40	19.16	6.00	0.2357	15490.0	14731.5	0.9510
39.80	493.2	30	21.46	6.30	0.2114	14200.0	13210.0	0.9303
40.00	502.7	20	21.54	6.10	0.1912	13600.0	11947.6	0.8789
40.60	513.5	10	21.79	6.80	0.1695	12050.0	10592.4	0.8790
39.70	521.2	2	21.42	7.20	0.1500	10000.0	9374.8	0.9375
60.30	488.1	60	21.14	6.10	0.3227	20810.0	20166.7	0.9691
61.10	499.3	50	26.11	6.60	0.3024	19950.0	18902.0	0.9475
60.50	510.1	40	29.48	6.90	0.2740	18400.0	17123.1	0.9306
60.20	518.7	30	29.37	7.10	0.2536	17200.0	15848.0	0.9214
60.40	529.1	20	29.45	7.40	0.2312	15690.0	14451.0	0.9210
60.70	539.5	10	29.55	7.80	0.2092	14150.0	13075.8	0.9241
60.10	546.9	2	29.34	8.00	0.1904	12830.0	11899.0	0.9274
80.50	508.9	60	31.00	6.60	0.3570	24360.0	22311.3	0.9159
80.50	517.5	50	36.16	6.80	0.3353	23380.0	20959.2	0.8964
80.50	528.4	40	36.46	7.00	0.3102	21090.0	19387.5	0.9193
80.70	538.6	30	36.53	7.40	0.2876	19580.0	17975.1	0.9180
79.80	547.6	20	36.23	7.60	0.2638	17940.0	16485.7	0.9189
80.10	557.9	10	36.33	8.00	0.2413	16340.0	15083.1	0.9231
79.80	565.6	2	36.23	8.40	0.2226	14940.0	13910.5	0.9311
99.90	524.4	60	40.62	7.10	0.3853	26950.0	24082.8	0.8936
100.10	534.1	50	42.78	7.30	0.3619	25550.0	22616.2	0.8852
100.10	543.6	40	42.78	7.60	0.3389	24190.0	21181.6	0.8756
100.40	554.2	30	42.87	7.90	0.3144	22080.0	19650.5	0.8899
100.40	564.0	20	42.87	8.10	0.2907	20630.0	18169.9	0.8807

Tabelle 7: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 3.24A

Spaltweite: 0.34 mm
 Spaltquerschn: 31.20 mm²

Spaltrauhigkeit: 70 μm
 Reibungsbeiwert: 8.1

P _o bar	T _o K	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	\dot{m} kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
40.00	463.3	60	12.67	5.10	0.4946	23470.0	22896.8	0.9756
40.20	474.1	50	15.93	5.60	0.4628	22020.0	21425.5	0.9730
40.10	483.1	40	19.10	6.00	0.4278	20880.0	19804.4	0.9485
40.10	493.9	30	23.56	6.30	0.3767	18630.0	17440.7	0.9362
39.50	505.4	20	25.68	6.60	0.3123	15670.0	14460.4	0.9228
40.10	514.0	10	26.00	6.60	0.2772	14030.0	12834.8	0.9148
39.90	521.4	2	25.89	7.20	0.2425	12010.0	11228.0	0.9349
60.40	488.5	60	21.29	6.20	0.5815	28210.0	26922.5	0.9544
60.10	498.8	50	25.86	6.70	0.5399	26620.0	24994.8	0.9385
60.30	508.7	40	30.84	7.00	0.4969	24920.0	23006.2	0.9232
60.30	518.8	30	36.07	7.20	0.4410	22760.0	20418.4	0.8971
59.70	528.4	20	35.78	7.50	0.3898	19930.0	18045.2	0.9054
59.60	538.2	10	35.73	7.70	0.3407	17800.0	15773.5	0.8861
60.40	547.1	2	36.12	8.20	0.3128	15860.0	14483.5	0.9132
80.10	509.0	60	30.99	7.00	0.6414	32050.0	29693.1	0.9265
80.20	518.2	50	36.52	7.20	0.6001	30540.0	27780.7	0.8668
79.80	526.6	40	42.13	7.30	0.5530	28790.0	25599.6	0.8892
80.30	538.5	30	45.16	7.50	0.4964	26130.0	22982.8	0.8795
80.00	558.0	10	45.03	8.20	0.4021	20980.0	18615.7	0.8873
79.80	566.0	2	44.94	8.70	0.3627	18900.0	16792.5	0.8885
99.80	523.6	60	40.04	7.90	0.6984	34740.0	32334.1	0.9307
100.10	534.0	50	47.46	8.00	0.6490	32950.0	30046.6	0.9119
99.30	543.4	40	53.18	8.10	0.5920	30630.0	27409.4	0.8948
101.00	555.0	30	53.86	8.20	0.5445	28400.0	25206.5	0.8875
100.00	564.3	20	53.46	8.40	0.4895	25930.0	22661.9	0.8740
100.40	573.6	10	53.62	8.50	0.4457	23790.0	20634.0	0.8673
100.00	582.1	2	53.46	9.10	0.3985	21460.0	18448.2	0.8596

Tabelle 8: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 3.13B

Spaltweite: 0.34 mm
 Spaltquerschn: 34.40 mm²

Spaltrauhigkeit: 150 µm
 Reibungsbeiwert: 15.2

P ₀ bar	T ₀ K	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	ṁ kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
40.30	463.8	60	12.80	5.10	0.2618	17570.0	17223.4	0.9803
40.30	473.8	50	15.82	5.50	0.2454	16590.0	16145.1	0.9732
40.10	483.5	40	19.28	5.80	0.2248	15330.0	14789.3	0.9647
39.50	492.6	30	21.38	6.01	0.2011	13970.0	13233.2	0.9473
40.30	503.8	20	21.71	6.60	0.1811	13010.0	11912.4	0.9156
40.40	513.1	10	21.75	6.10	0.1614	11460.0	10616.3	0.9264
60.20	488.5	60	21.30	6.20	0.3062	20040.0	20142.5	1.0051
60.70	499.2	50	26.10	6.60	0.2864	19610.0	18844.6	0.9610
60.10	508.7	40	29.39	7.00	0.2623	18230.0	17254.1	0.9465
60.20	518.8	30	29.43	7.20	0.2412	16800.0	15869.7	0.9446
60.30	529.1	20	29.46	7.50	0.2198	15200.0	14457.6	0.9512
60.10	538.8	10	29.39	7.80	0.1984	13580.0	13053.0	0.9612
80.60	508.2	60	30.65	6.90	0.3417	23690.0	22480.7	0.9489
80.50	519.0	50	36.53	7.30	0.3159	22260.0	20782.2	0.9336
79.90	528.0	40	36.33	7.50	0.2942	20820.0	19358.1	0.9298
80.00	537.9	30	36.37	7.70	0.2730	19350.0	17961.8	0.9282
80.20	548.3	20	36.43	8.00	0.2511	17600.0	16517.0	0.9385
80.50	558.3	10	36.53	8.20	0.2301	15920.0	15137.8	0.9509
80.10	566.1	2	36.40	8.50	0.2119	13850.0	13938.7	1.0064
100.70	524.6	60	40.74	7.30	0.3690	26400.0	24277.0	0.9196
100.80	534.4	50	43.08	7.50	0.3460	25060.0	22761.5	0.9083
100.00	544.0	40	42.84	7.60	0.3216	23520.0	21156.2	0.8995
100.90	554.5	30	43.11	7.90	0.3000	21980.0	19734.0	0.8978
100.20	562.3	20	42.90	7.90	0.2800	20430.0	18423.2	0.9018
101.30	575.3	10	43.23	8.40	0.2531	17890.0	16649.2	0.9306
100.20	582.1	2	42.90	8.60	0.2345	15420.0	15425.2	1.0009

Tabelle 9: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 3.24B

Spaltweite: 0.48 mm
 Spaltquerschn: 38.40 mm²

Spaltrauhigkeit: 150 μm
 Reibungsbeiwert: 11.2

P_o bar	T_o K	ΔT K	P_2 bar	P_u bar	\dot{m} kg/s	G_M kg/s m ²	G_R kg/s m ²	G_R/G_M
40.20	463.2	60	12.64	5.30	0.4134	20090.0	19873.3	0.9892
40.20	473.7	50	15.80	5.70	0.3863	19150.0	18573.0	0.9698
39.90	483.9	40	19.42	6.10	0.3515	17670.0	16898.2	0.9563
40.00	493.4	30	23.36	6.40	0.3146	16310.0	15122.7	0.9272
41.00	504.7	20	24.21	6.80	0.2801	14480.0	13466.1	0.9300
41.70	516.5	10	24.54	7.20	0.2394	12230.0	11510.3	0.9412
40.00	521.7	2	23.75	6.80	0.2111	10260.0	10149.0	0.9892
60.30	488.5	60	21.29	6.10	0.4834	24590.0	23238.8	0.9450
60.40	498.9	50	25.93	6.40	0.4508	23550.0	21674.3	0.9203
59.70	508.5	40	30.73	7.00	0.4102	21240.0	19723.2	0.9286
60.10	518.8	30	32.59	7.30	0.3733	19460.0	17945.9	0.9222
60.00	528.5	20	32.55	7.60	0.3380	17250.0	16248.4	0.9419
60.20	538.9	10	32.63	7.80	0.3019	15220.0	14516.0	0.9537
60.00	546.8	2	32.55	8.10	0.2725	13110.0	13099.7	0.9992
80.20	507.4	60	30.21	8.70	0.5393	21280.0	25927.0	1.2184
79.20	516.0	50	35.20	7.10	0.5022	26610.0	24144.6	0.9073
80.10	527.9	40	40.64	7.50	0.4594	24630.0	22087.8	0.8968
80.10	538.8	30	40.64	7.70	0.4196	22280.0	20175.4	0.9955
79.80	546.9	20	40.52	7.90	0.3885	20400.0	18676.3	0.9155
79.90	557.2	10	40.56	8.40	0.3516	17860.0	16902.0	0.9464
80.00	566.2	2	40.60	8.80	0.3192	15290.0	15347.1	1.0037
99.60	523.4	60	39.90	11.10	0.5812	24880.0	27940.3	1.1230
100.90	533.9	50	47.40	12.50	0.5447	28410.0	26185.5	0.9217
99.80	544.4	40	47.91	16.20	0.4977	20700.0	23929.6	1.1560
100.80	555.1	30	48.26	19.80	0.4626	18700.0	22239.0	1.1892
98.40	573.8	10	47.42	8.40	0.3721	18820.0	17890.9	0.9506
100.00	582.2	2	47.98	8.40	0.3527	17820.0	16956.5	0.9515
120.50	538.0	60	50.50	11.50	0.6205	32270.0	29831.6	0.9244
121.60	548.9	50	55.44	12.10	0.5801	30680.0	27887.8	0.9090
121.30	558.3	40	55.34	12.50	0.5416	28650.0	26036.4	0.9088
120.10	567.7	30	54.93	13.00	0.4997	26430.0	24022.2	0.9089
119.50	577.5	20	54.73	13.40	0.4592	24110.0	22075.6	0.9756
120.10	596.0	2	54.93	7.60	0.3886	20450.0	18681.4	0.9135

Tabelle 10: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 2.13B

Spaltweite: 0.32 mm
 Spaltquerschn: 25.60 mm²

Spaltrauhigkeit: 150 µm
 Reibungsbeiwert: 38.2

P _o bar	T _o K	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	\dot{m} kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
40.20	463.6	60	12.76	5.10	0.7972	11270.0	11071.7	0.9824
39.97	472.9	50	15.19	5.50	0.7478	10640.0	10386.7	0.9762
40.10	483.5	40	15.22	6.10	0.6949	10430.0	9650.9	0.9253
40.60	494.2	30	15.35	6.50	0.6458	9973.0	8969.0	0.8993
40.10	503.6	20	15.22	6.80	0.5906	9109.0	8202.8	0.9005
40.50	513.8	10	15.33	7.20	0.5423	8188.0	7531.9	0.9199
39.80	521.2	2	15.14	8.10	0.4959	6535.0	6888.1	1.0540
60.80	488.7	60	20.37	5.90	0.9393	13550.0	13045.5	0.9627
60.10	499.3	50	20.21	6.40	0.8754	12910.0	12158.7	0.9418
60.30	508.3	40	20.26	6.50	0.8302	12590.0	11530.4	0.9158
60.10	518.4	30	20.21	6.80	0.7747	11590.0	10759.1	0.9283
60.00	529.4	20	20.19	7.50	0.7155	10490.0	9937.9	0.9473
59.70	537.7	10	20.12	7.70	0.6685	9492.0	9284.7	0.9782
60.20	546.9	2	20.24	8.40	0.6252	8316.0	8683.6	1.0442
80.00	506.9	60	24.63	6.40	0.1047	15490.0	14537.9	0.9385
80.00	517.7	50	24.63	6.80	0.9872	14920.0	13710.5	0.9189
79.70	527.2	40	24.57	7.30	0.9322	13980.0	12946.8	0.9261
80.60	538.5	30	24.76	7.40	0.8770	13530.0	12180.7	0.9003
79.70	547.2	20	24.57	7.70	0.8221	12390.0	11418.3	0.9216
80.10	557.6	10	24.65	8.50	0.7678	11160.0	10663.8	0.9555
80.40	566.5	2	24.72	9.00	0.7207	9605.0	10009.2	1.0429
100.40	525.3	60	28.79	6.90	0.1128	17150.0	15670.7	0.9137
100.10	533.9	50	28.73	7.40	0.1075	16330.0	14929.4	0.9142
100.90	545.2	40	28.88	7.40	0.1015	15580.0	14103.8	0.9052
100.30	553.9	30	28.77	7.60	0.9597	14670.0	13329.7	0.9086
100.00	563.6	20	28.71	7.90	0.9006	13580.0	12508.7	0.9211
99.90	574.2	10	28.69	8.40	0.8376	12190.0	11633.3	0.9543
120.00	537.7	60	32.43	7.40	0.1214	18370.0	16867.5	0.9182
120.20	547.8	50	32.47	7.60	0.1154	17520.0	16032.4	0.9151
119.90	557.7	40	32.41	7.90	0.1092	16660.0	15170.4	0.9106
119.60	567.8	30	32.35	8.10	0.1029	15640.0	14294.6	0.9140
121.00	578.0	20	32.63	8.50	0.9755	14710.0	13548.9	0.9211
120.10	587.5	10	32.45	8.80	0.9123	13390.0	12670.4	0.9462

Tabelle 11: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 4.24B

Spaltweite: 0.58 mm
 Spaltquerschn: 46.40 mm²

Spaltrauhigkeit: 150 μm
 Reibungsbeiwert: 8.3

P ₀ bar	T ₀ K	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	\dot{m} kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
40.30	464.0	60	12.84	8.00	0.6917	22740.0	22753.5	1.0006
40.10	473.7	50	15.78	8.60	0.6469	21980.0	21278.4	0.9681
40.00	483.4	40	19.24	9.40	0.5937	20840.0	19529.5	0.9371
40.00	493.3	30	23.31	10.30	0.5284	18530.0	17380.6	0.9380
39.90	503.0	20	25.77	11.20	0.4566	15430.0	15019.1	0.9734
40.00	512.8	10	25.82	12.30	0.3945	13940.0	12977.5	0.9310
40.40	522.4	2	26.03	11.00	0.3336	11110.0	10975.2	0.9879
60.10	487.7	60	20.95	9.60	0.8126	26810.0	26731.8	0.9971
59.10	500.6	50	26.75	10.60	0.7315	24460.0	24063.0	0.9838
59.70	508.7	40	30.82	11.10	0.6869	23450.0	22594.4	0.9635
59.50	516.9	30	35.50	11.80	0.6190	21480.0	20361.2	0.9479
60.50	529.2	20	35.97	11.10	0.5524	18850.0	18169.5	0.9610
60.60	539.5	10	36.02	11.80	0.4880	16270.0	16051.0	0.9865
60.30	547.2	2	35.88	12.30	0.4360	13510.0	14342.0	1.0616
80.90	508.0	60	30.50	10.30	0.9078	29980.0	29861.1	0.9960
81.20	518.9	50	37.00	10.80	0.8421	28560.0	27700.4	0.9699
79.70	527.8	40	42.97	12.30	0.7613	24910.0	25043.3	1.0053
79.90	538.3	30	44.73	12.90	0.6906	21850.0	22718.0	1.0397
80.40	548.3	20	44.95	13.60	0.6302	20650.0	20729.9	1.0098
80.10	558.4	10	44.82	11.60	0.5615	18860.0	18470.2	0.9793
80.40	566.6	2	44.95	13.40	0.5108	16490.0	16801.6	1.0189
99.80	524.4	60	40.59	13.20	0.9697	32500.0	31899.5	0.9815
99.70	533.5	50	47.10	19.80	0.9061	30820.0	29806.8	0.9671
100.60	544.3	40	53.39	14.50	0.8319	28600.0	27363.8	0.9568
100.20	554.2	30	53.23	15.10	0.7579	25910.0	24931.5	0.9622
100.50	563.7	20	53.35	15.40	0.6943	23450.0	22838.3	0.9739
100.20	573.8	10	53.23	15.10	0.6188	20580.0	20356.9	0.9891
99.90	582.0	2	53.11	16.20	0.5566	17500.0	18307.8	1.0462
120.80	538.3	60	50.70	14.90	0.1041	35800.0	34247.7	0.9566
120.50	548.0	50	58.84	12.70	0.9665	33640.0	31794.0	0.9451
120.00	557.7	40	61.01	13.20	0.8917	31120.0	29332.7	0.9425
120.00	567.9	30	61.01	13.90	0.8208	28230.0	27001.5	0.9565
121.30	577.8	20	61.50	15.30	0.7609	25780.0	25030.2	0.9709
120.30	587.9	10	61.12	14.60	0.6845	22740.0	22516.3	0.9902
119.50	595.4	2	60.82	15.30	0.6258	20060.0	20585.4	1.0161

Tabelle 12: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 2.15R

Spaltweite: 0.44 mm
 Spaltquerschn: 35.20 mm²

Spaltrauhigkeit: 240 µm
 Reibungsbeiwert: 85

P _o bar	T _o K	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	\dot{m} kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
39.90	462.8	60	10.53	5.17	0.1193	7577.0	7457.2	0.9842
40.10	473.3	50	10.56	5.60	0.1130	7338.0	7060.1	0.9621
40.10	484.1	40	10.56	6.10	0.1060	7000.0	6624.7	0.9464
40.30	503.8	20	10.59	6.60	0.9359	6020.0	5849.5	0.9717
40.00	512.4	10	10.54	6.80	0.8757	5290.0	5473.0	1.0346
40.00	521.8	2	10.54	7.90	0.8151	4349.0	5094.7	1.1714
60.70	488.6	60	13.88	6.05	0.1414	9358.0	8835.0	0.9441
60.00	498.3	50	13.77	6.50	0.1337	8813.0	8354.2	0.9479
60.40	508.5	40	13.83	6.90	0.1274	8310.0	7962.6	0.9582
60.40	520.0	30	13.83	8.40	0.1196	7591.0	7475.8	0.9848
59.90	528.2	20	13.76	9.00	0.1133	6957.0	7080.0	1.0177
60.20	538.7	10	13.80	7.80	0.1066	6480.0	6664.9	1.0285
59.80	546.6	2	13.74	9.50	0.1007	5420.0	6292.3	1.1609
80.10	508.6	60	16.65	6.30	0.1569	10630.0	9807.4	0.9132
80.30	508.8	60	16.68	6.30	0.1571	10630.0	9817.0	0.9235
79.70	527.9	40	16.60	6.70	0.1425	9682.0	8907.1	0.9199
80.00	537.8	30	16.64	6.90	0.1359	9034.0	8491.9	0.9400
79.30	547.0	20	16.54	7.80	0.1283	8199.0	8021.8	0.9784
80.90	558.8	10	16.76	8.50	0.1220	7332.0	7627.5	1.0403
79.90	566.1	2	16.62	6.90	0.1155	6440.0	7216.7	1.1206
99.40	523.1	60	19.18	6.80	0.1712	11390.0	10698.3	0.9393
100.10	533.5	50	19.26	7.20	0.1641	10810.0	10257.8	0.9489
100.60	545.6	40	19.33	7.70	0.1555	10160.0	9721.7	0.9568
100.40	554.8	30	19.30	7.90	0.1483	9599.0	9271.9	0.9659
100.50	564.1	20	19.31	8.20	0.1413	9065.0	8833.5	0.9744
100.00	573.2	10	19.25	8.40	0.1339	8372.0	8368.9	0.9996
100.70	582.5	2	19.34	10.30	0.1276	7128.0	7974.4	1.1187
120.40	538.4	60	21.72	7.10	0.1833	12380.0	11456.7	0.9254
120.50	548.3	50	21.73	7.30	0.1755	11940.0	10971.4	0.9189
120.10	557.8	40	21.68	7.70	0.1675	11380.0	10468.5	0.9199
120.60	568.2	30	21.74	8.00	0.1598	10690.0	9985.8	0.9341
120.10	576.9	20	21.68	8.50	0.1522	9872.0	9515.4	0.9639
120.60	588.2	10	21.74	8.50	0.1438	8895.0	8986.2	1.0102

Tabelle 13: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 3.15R

Spaltweite: 0.54 mm
 Spaltquerschn: 43.20 mm²

Spaltrauhigkeit: 240 μm
 Reibungsbeiwert: 43

P _o bar	T _o K	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	\dot{m} kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
39.60	462.7	60	12.50	4.80	0.2493	10700.0	10389.0	0.9709
39.60	473.3	50	14.33	5.50	0.2332	10210.0	9716.0	0.9516
40.00	486.0	40	14.43	5.90	0.2150	9394.0	8958.4	0.9536
40.00	493.3	30	14.43	5.30	0.2036	8722.0	8481.5	0.9724
40.40	505.5	20	14.53	7.00	0.1858	7620.0	7741.9	1.0160
39.90	512.9	10	14.41	6.70	0.1725	6766.0	7188.4	1.0624
40.90	522.8	2	14.66	7.00	0.1596	6234.0	6649.3	1.0666
60.10	488.8	60	19.15	5.90	0.2930	13360.0	12209.0	0.9138
60.10	498.5	50	19.15	6.20	0.2774	12570.0	11556.4	0.9194
59.90	508.7	40	19.11	6.60	0.2602	11650.0	10840.9	0.9305
59.30	517.4	30	18.97	6.80	0.2439	10700.0	10163.9	0.9499
59.80	528.3	20	19.08	7.30	0.2282	9498.0	9508.7	1.0011
59.90	537.9	10	19.11	7.60	0.2130	8417.0	8876.6	1.0546
60.20	546.9	2	19.17	8.00	0.1994	7282.0	8310.1	1.1412
80.80	508.5	60	23.45	6.40	0.3292	14910.0	13717.4	0.9200
79.80	517.8	50	23.26	6.70	0.3105	14100.0	12938.8	0.9176
80.40	528.3	40	23.38	6.90	0.2943	13170.0	12261.8	0.9310
80.50	537.8	30	23.40	7.30	0.2784	12250.0	11599.1	0.9468
80.00	548.3	20	23.30	7.60	0.2594	10870.0	10808.1	0.9943
80.20	558.2	10	23.34	7.90	0.2431	9697.0	10128.2	1.0445
80.00	566.1	2	23.30	8.30	0.2292	8458.0	9548.9	1.1290
100.00	523.8	60	27.12	7.10	0.3573	15510.0	14889.4	0.9600
100.40	534.3	50	27.19	7.60	0.3396	14600.0	14151.9	0.9693
100.00	543.2	40	27.12	7.60	0.3227	13840.0	13445.2	0.9715
99.70	553.5	30	27.07	7.90	0.3034	12680.0	12640.8	0.9969
100.40	563.5	20	27.19	8.00	0.2874	11740.0	11975.0	1.0200
100.30	573.3	10	27.17	8.10	0.2696	10610.0	11231.9	1.0586
120.60	538.9	60	30.69	7.80	0.3819	16510.0	15911.6	0.9637
119.90	557.5	40	30.58	7.80	0.3453	14930.0	14389.3	0.9638
119.80	566.3	30	30.56	7.80	0.3286	13960.0	13691.4	0.9807
119.20	577.3	20	30.47	7.90	0.3068	12700.0	12784.5	1.0066
120.20	588.2	10	30.63	8.40	0.2886	11400.0	12026.8	1.0550
119.90	595.3	2	30.58	8.90	0.2747	10170.0	11444.9	1.1253

Tabelle 14: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 4.15R

Spaltweite: 0.64 mm
 Spaltquerschn: 51.20 mm²

Spaltrauhigkeit: 240 μm
 Reibungsbeiwert: 23.5

Po bar	T K ^o	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	ṁ kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
40.20	463.5	60	12.73	7.30	0.4483	14480.0	14009.9	0.9675
40.40	473.5	50	15.74	8.30	0.4220	13660.0	13188.5	0.9655
40.00	483.6	40	18.49	9.10	0.3848	12560.0	12024.1	0.9573
40.10	493.6	30	18.52	10.90	0.3530	11380.0	11031.9	0.9694
40.00	504.1	20	18.49	11.70	0.3177	9742.0	9927.7	1.0191
39.70	512.8	10	18.39	12.30	0.2881	8434.0	9002.7	1.0674
39.80	521.3	2	18.42	12.90	0.2604	6984.0	8137.2	1.1651
60.00	488.3	60	21.22	8.00	0.5237	17200.0	16366.6	0.9515
60.30	499.0	50	24.95	10.80	0.4897	16310.0	15301.6	0.9382
60.00	508.7	40	24.86	11.60	0.4560	15150.0	14248.6	0.9405
60.40	519.1	30	24.98	12.20	0.4241	13800.0	13254.0	0.9604
60.20	528.6	20	24.92	13.00	0.3918	12010.0	12243.9	1.0195
59.60	537.7	10	24.74	13.50	0.3584	10480.0	11198.8	1.0686
60.20	547.1	2	24.92	14.70	0.3310	8914.0	10345.2	1.1605
79.70	507.8	60	30.47	10.90	0.5812	18980.0	18163.7	0.9570
80.00	517.7	50	30.50	11.60	0.5492	18050.0	17161.4	0.9508
79.80	527.8	40	30.45	12.00	0.5133	16990.0	16039.5	0.9440
80.50	537.6	30	30.63	12.50	0.4836	15620.0	15112.0	0.9675
80.00	548.0	20	30.50	13.10	0.4451	13720.0	13910.1	1.0138
80.80	558.7	10	30.70	14.50	0.4128	12100.0	12901.0	1.0662
80.00	565.9	2	30.50	14.80	0.3836	10460.0	11988.8	1.1461
100.30	524.7	60	35.87	11.30	0.6322	20880.0	19756.9	0.9462
100.30	544.3	40	35.87	12.60	0.5621	18980.0	17565.3	0.9255
99.60	553.9	30	35.69	12.70	0.5245	17740.0	16390.2	0.9239
100.20	564.7	20	35.84	13.40	0.4886	16000.0	15267.3	0.9542
99.90	573.8	10	35.77	14.00	0.4547	14490.0	14208.8	0.9806
100.20	582.2	2	35.84	14.50	0.4259	11860.0	13310.5	1.1223
120.00	537.9	60	40.70	11.30	0.6771	22400.0	21159.6	0.9446
120.30	548.5	50	40.77	12.10	0.6390	21070.0	19967.7	0.9477
120.20	557.8	40	40.75	12.60	0.6039	19710.0	18871.0	0.9574
120.30	568.3	30	40.77	12.90	0.5653	18020.0	17665.2	0.9803
120.70	578.1	20	40.87	13.20	0.5300	16850.0	16562.0	0.9829
120.20	587.2	10	40.75	12.90	0.4945	14730.0	15454.5	1.0492
120.10	595.5	2	40.72	13.40	0.4633	13210.0	14476.6	1.0959

Tabelle 15: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 2.24C

Spaltweite: 0.25 mm
 Spaltquerschn: 20.00 mm²

Spaltrauhigkeit: 100 µm
 Reibungsbeiwert: 28.2

P _o bar	T _o K	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	\dot{m} kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
40.30	463.5	60	12.72	4.90	0.1442	13570.0	12871.1	0.9485
40.60	474.1	50	15.93	5.60	0.1354	12860.0	12087.3	0.9399
40.30	483.4	40	17.33	6.00	0.1251	12050.0	11168.3	0.9268
40.10	493.6	30	17.26	6.20	0.1143	11230.0	10207.7	0.9090
40.00	503.4	20	17.23	6.60	0.1042	10240.0	9307.2	0.9089
39.90	513.2	10	17.20	7.20	0.9426	9330.0	8415.8	0.9020
40.10	521.9	2	17.26	7.70	0.8600	7925.0	7678.6	0.9689
59.90	488.4	60	21.26	5.80	0.1677	16470.0	14975.6	0.9092
60.50	499.0	50	23.20	6.30	0.1581	15950.0	14113.8	0.8849
60.10	508.3	40	23.09	6.50	0.1478	15220.0	13199.2	0.8672
60.10	528.8	20	23.09	7.10	0.1271	12990.0	11345.2	0.8734
59.70	538.8	10	22.98	7.30	0.1161	11900.0	10370.5	0.8715
60.00	546.6	2	23.06	7.80	0.1088	10010.0	9717.6	0.9708
80.50	507.7	60	28.40	6.30	0.1883	19150.0	16809.5	0.8778
80.10	518.1	50	28.30	6.90	0.1766	18090.0	15770.7	0.8718
80.30	528.3	40	28.35	7.20	0.1663	17190.0	14844.2	0.8635
80.30	538.4	30	28.35	7.50	0.1556	16220.0	13893.1	0.8565
80.30	548.6	20	28.35	7.90	0.1448	15160.0	12932.5	0.8531
80.10	557.4	10	28.30	8.10	0.1352	14120.0	12071.1	0.8549
80.10	566.2	2	28.30	8.40	0.1259	12670.0	11242.4	0.8873
100.00	524.0	60	33.03	6.60	0.2037	21750.0	18189.7	0.8363
100.00	534.1	50	33.03	6.80	0.1925	20910.0	17190.8	0.8221
100.30	544.1	40	33.10	7.10	0.1819	19810.0	16239.6	0.8197
100.50	554.1	30	33.15	7.40	0.1710	18670.0	15271.8	0.8180
99.90	564.2	20	33.00	7.80	0.1590	17320.0	14197.2	0.8197
100.60	574.0	10	33.17	8.30	0.1491	15900.0	13316.0	0.8375
99.40	578.4	2	32.88	8.10	0.1425	15120.0	12725.5	0.8416

Tabelle 16: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 3.13C

Spaltweite: 0.43 mm
 Spaltquerschn: 34.40 mm²

Spaltrauhigkeit: 100 µm
 Reibungsbeiwert: 7.8

P _o bar	T _o K	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	\dot{m} kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
40.20	462.8	60	12.53	9.80	0.5446	23060.0	23473.3	1.0179
40.10	473.5	50	15.71	5.30	0.5077	22270.0	21884.6	0.9827
39.10	481.8	40	18.63	5.60	0.4625	20660.0	19937.4	0.9650
40.00	493.6	30	23.44	6.00	0.4124	18720.0	17774.2	0.9495
39.90	503.7	20	26.17	6.30	0.3525	16240.0	15193.0	0.9355
40.30	513.1	10	26.38	10.90	0.3076	13960.0	13259.9	0.9498
39.60	521.2	2	26.00	11.50	0.2629	10440.0	11332.9	1.0855
60.20	488.5	60	21.28	9.90	0.6346	27600.0	27354.9	0.9911
60.30	498.9	50	25.91	10.70	0.5919	26370.0	25511.9	0.9674
60.20	509.1	40	31.03	6.90	0.5407	24360.0	23307.5	0.9568
60.20	519.3	30	36.44	7.20	0.4779	22260.0	20600.4	0.9254
60.40	529.0	20	36.54	7.30	0.4310	20000.0	18576.3	0.9288
60.30	538.3	10	36.49	7.50	0.3837	17760.0	16537.4	0.9311
60.00	546.8	2	36.35	13.20	0.3363	13920.0	14496.1	1.0414
80.20	508.0	60	30.49	11.20	0.7065	31400.0	30454.4	0.9699
81.10	519.9	50	37.57	12.30	0.6544	29620.0	28206.0	0.9522
80.70	528.3	40	43.28	12.70	0.6020	27680.0	25946.2	0.9374
80.40	538.0	30	45.78	13.40	0.5446	25360.0	23475.6	0.9257
80.40	548.6	20	45.78	14.10	0.4902	22530.0	21130.4	0.9379
80.30	558.5	10	45.73	14.50	0.4391	20030.0	18927.6	0.9450
80.10	566.3	2	45.64	15.20	0.3966	15910.0	17093.6	1.0744
100.30	524.6	60	40.70	11.80	0.7624	35350.0	32863.0	0.9296
100.00	534.1	50	47.48	12.30	0.7092	33460.0	30569.6	0.9136
100.10	544.4	40	54.19	12.80	0.6464	31100.0	27861.4	0.8958
100.10	554.0	30	54.19	13.50	0.5924	28580.0	25534.0	0.8934
100.40	564.1	20	54.32	14.50	0.5387	25580.0	23221.1	0.9078
100.70	573.9	10	54.45	14.90	0.4870	21510.0	20990.0	0.9758
100.20	582.0	2	54.24	16.40	0.4363	22270.0	18807.7	0.8445

Tabelle 17: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 4.13C

Spaltweite: 0.55 mm
 Spaltquerschn: 44.00 mm²

Spaltrauhigkeit: 100 µm
 Reibungsbeiwert: 6.4

P _o bar	T _o K	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	$\frac{a}{m}$ kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
39.80	463.3	60	12.66	9.20	0.8104	24800.0	25323.9	1.0211
40.30	474.4	50	16.00	9.30	0.7613	23430.0	23791.1	1.0154
40.00	483.5	40	19.27	10.00	0.6988	21710.0	21836.9	1.0058
40.10	495.4	30	24.23	10.80	0.6060	20500.0	18938.1	0.9238
40.00	504.5	20	27.46	11.50	0.5166	17890.0	16142.8	0.9023
39.70	512.2	10	27.29	11.80	0.4518	15280.0	14118.2	0.9239
40.20	522.2	2	27.58	12.50	0.3764	12350.0	11761.0	0.9523
60.40	490.7	60	22.20	10.70	0.9436	31770.0	29487.3	0.9281
59.70	498.4	50	25.64	11.30	0.8858	30200.0	27681.7	0.9166
59.70	507.2	40	30.05	11.80	0.8207	28320.0	25646.3	0.9056
60.00	518.7	30	36.83	12.10	0.7184	25360.0	22449.0	0.8852
60.10	528.8	20	38.34	12.80	0.6318	21890.0	19743.4	0.9019
60.40	537.6	10	38.50	13.20	0.5678	19140.0	17743.4	0.9270
59.70	546.4	2	38.14	13.70	0.4770	15980.0	14904.8	0.9327
80.20	508.2	60	30.57	12.70	0.1061	33680.0	33155.1	0.9844
79.20	515.3	50	34.75	11.50	0.9979	34320.0	31185.4	0.9086
79.80	527.2	40	42.53	12.10	0.9040	31340.0	28250.5	0.9014
79.50	537.5	30	47.97	12.50	0.8024	26950.0	25075.1	0.9304
79.60	547.0	20	48.02	12.80	0.7266	24020.0	22705.2	0.9453
80.50	558.7	10	48.44	13.70	0.6439	21780.0	20122.1	0.9239
79.80	565.9	2	48.11	13.30	0.5752	19180.0	17976.0	0.9372
100.40	526.0	60	41.61	13.30	0.1137	36480.0	35522.1	0.9737
99.60	533.6	50	47.09	13.40	0.1066	31890.0	33326.6	1.0450
101.30	545.8	40	57.03	13.40	0.9669	31570.0	30214.3	0.9570
100.90	554.7	30	57.83	13.80	0.8826	28680.0	27581.8	0.9617
99.70	564.2	20	57.30	14.50	0.7869	25450.0	24589.5	0.9662
100.40	574.3	10	57.61	14.20	0.7066	21620.0	22080.3	1.0213
100.10	581.9	2	57.48	14.80	0.6363	19050.0	19885.8	1.0439

Tabelle 18: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Probe: 2.24D

Spaltweite: 0.28 mm
Spaltquerschn: 22.40 mm²

Spaltrauhigkeit: 50 μm
Reibungsbeiwert: 7.5

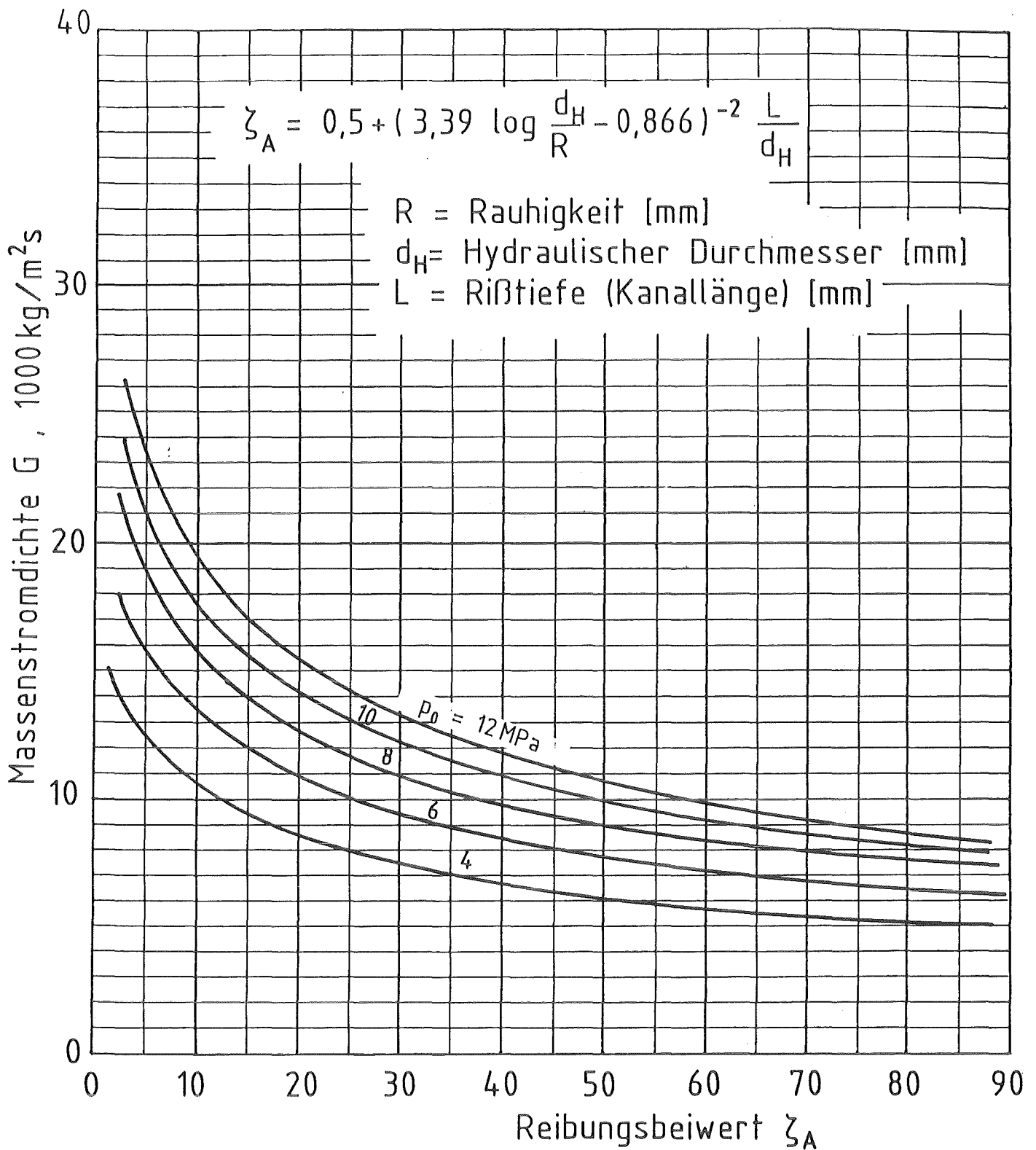
P _o bar	T _o K	ΔT K	P ₂ bar	P _u bar	\dot{m} kg/s	G _M kg/s m ²	G _R kg/s m ²	G _R /G _M
40.00	463.6	60	12.74	4.80	0.3034	23450.0	23705.4	1.0109
39.80	474.1	50	15.93	5.30	0.2820	22420.0	22032.4	0.9827
39.90	484.9	40	19.80	5.70	0.2569	20870.0	20070.2	0.9617
39.90	493.5	30	23.38	6.10	0.2314	19150.0	18077.3	0.9440
40.30	504.0	20	26.65	6.50	0.1988	16760.0	15530.8	0.9266
39.80	512.9	10	26.37	6.80	0.1702	13920.0	13294.3	0.9550
39.80	521.2	2	26.37	7.10	0.1464	10790.0	11435.2	1.0413
60.10	489.3	60	21.60	5.70	0.3543	29040.0	27682.8	0.9533
60.00	498.7	50	25.80	10.40	0.3316	26200.0	25906.0	0.9888
59.50	508.5	40	30.76	11.10	0.3017	24230.0	23566.6	0.9726
60.80	530.0	20	37.14	12.70	0.2398	19690.0	18736.9	0.9516
59.70	538.2	10	36.61	13.00	0.2085	17310.0	16286.5	0.9409
59.90	546.7	2	36.70	14.40	0.1860	13980.0	14534.2	1.0396
78.30	505.7	60	29.36	6.40	0.3945	33170.0	30817.2	0.9291
80.00	518.1	50	36.47	6.70	0.3681	31610.0	28761.0	0.9099
80.10	527.5	40	42.72	6.90	0.3382	29290.0	26424.5	0.9022
79.60	537.4	30	45.97	7.00	0.3037	26580.0	23725.5	0.8926
79.70	546.0	20	46.01	7.30	0.2787	24070.0	21776.5	0.9047
79.70	558.0	10	46.01	7.50	0.2437	19950.0	19039.7	0.9544

Tabelle 19: Daten aus Messung und Rechnung (Pana)

Anhang B (Abb. 32 bis 38)

Diagramme für die Bestimmung der Massenstromdichte in rauhen Rissen

In den Abbn. 32 bis 38 werden die mit dem Pana-Modell gerechneten kritischen Massenstromdichten über dem Reibungsbeiwert ζ_A dargestellt. Der Parameter p_0 ist der Stagnationsdruck vor dem Spalt. Jedes der 7 Arbeitsdiagramme wurde für eine andere Unterkühlungstemperatur berechnet. Zur überschlägigen Bestimmung einer zu erwartenden Massenstromdichte bei einer Leckage aus einem RiB kann zunächst aus der auf den Diagrammen angegebenen Formel der Reibungsbeiwert errechnet werden, wenn die Werte R , d_H und L bekannt sind. Sie müssen nach der im Abschnitt 2.2 gegebenen Beschreibung definiert sein. Mit dem errechneten Wert ζ_A kann die Massenstromdichte dem entsprechenden Diagramm entnommen werden.



Unterkühlung $\Delta T = 2 \text{ K}$



Abb. 32 Diagramm für die Bestimmung der Massenstromdichte in rauen Rissen

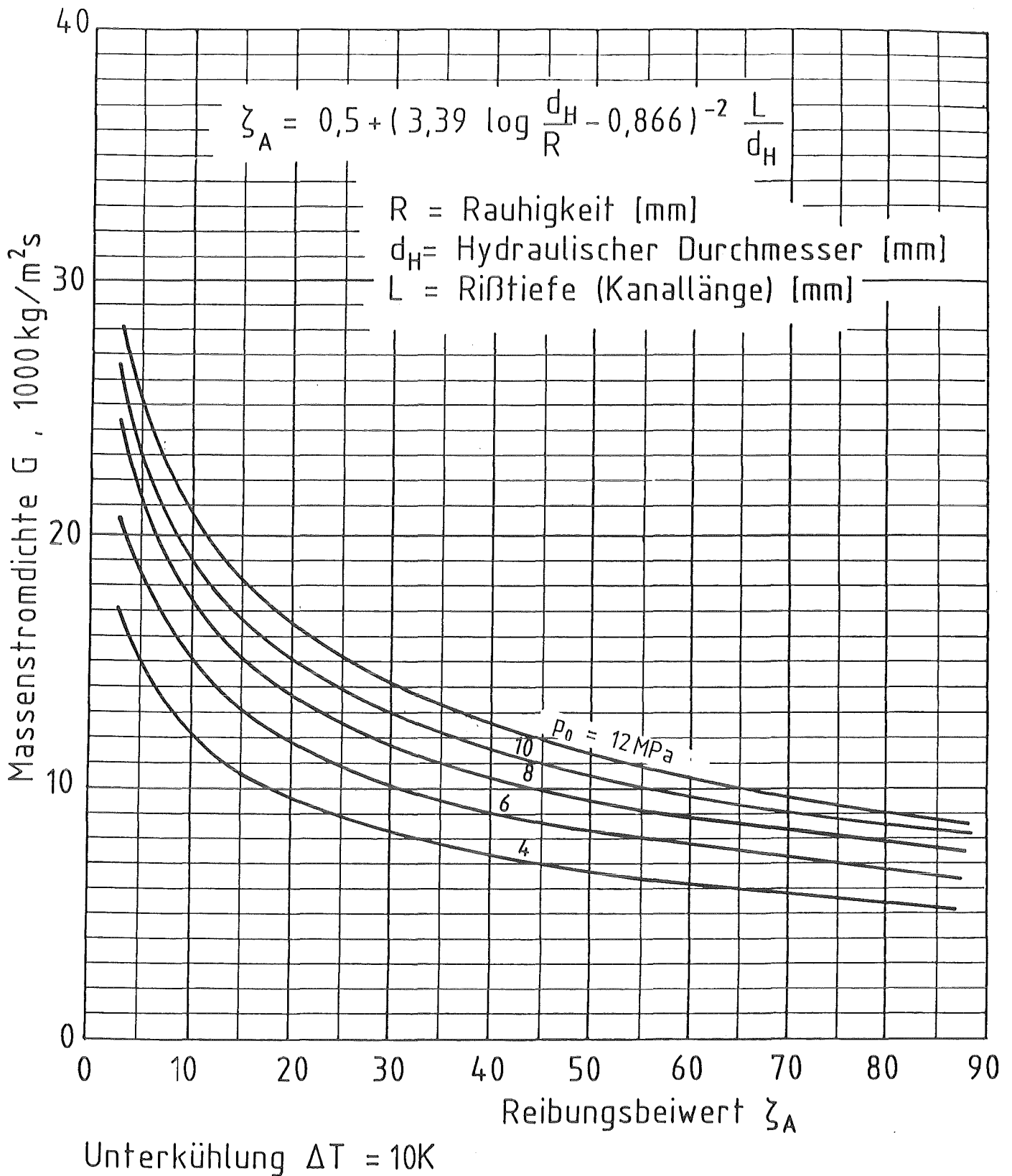
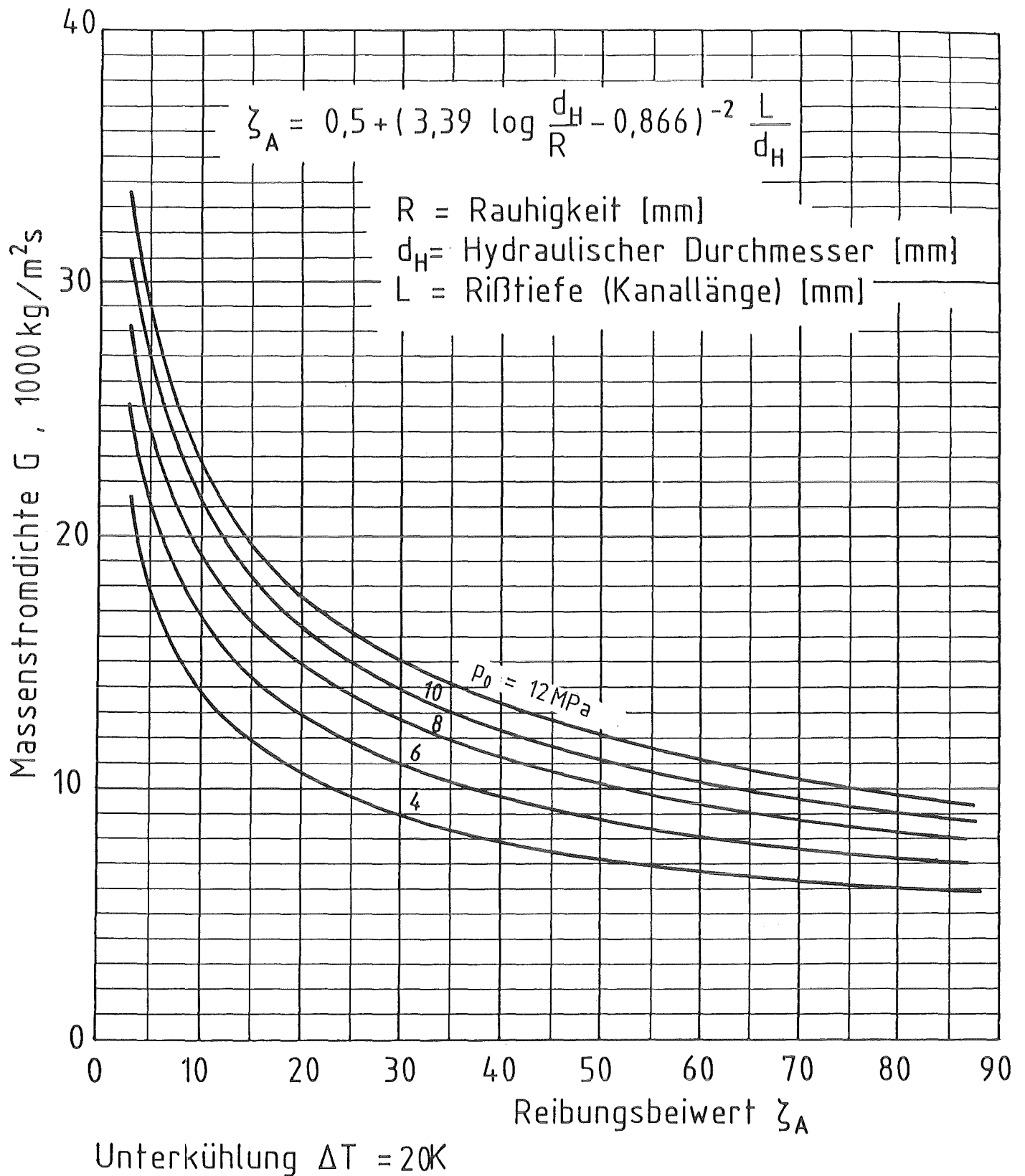
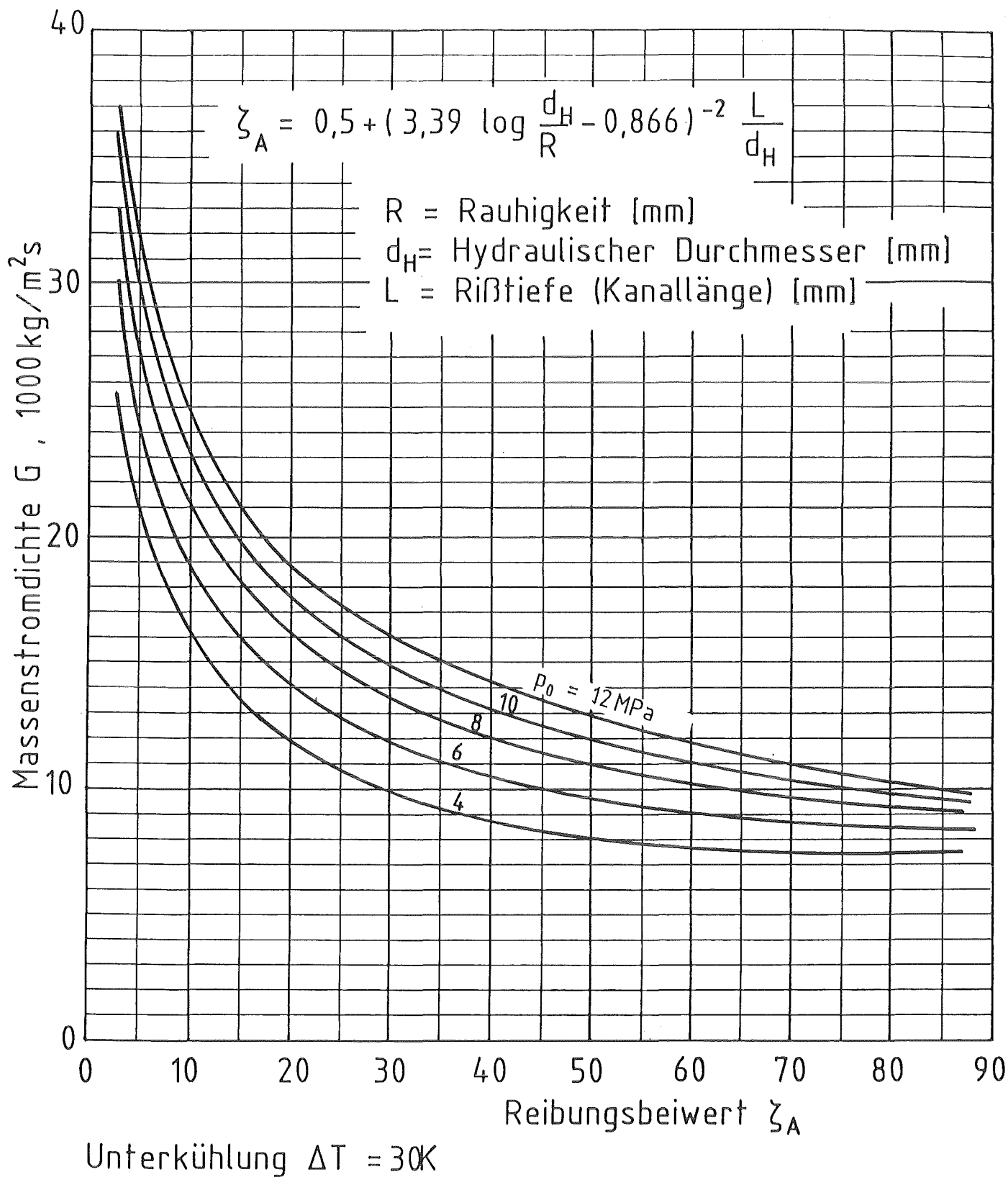


Abb. 33 Diagramm für die Bestimmung der Massenstromdichte in rauen Rissen



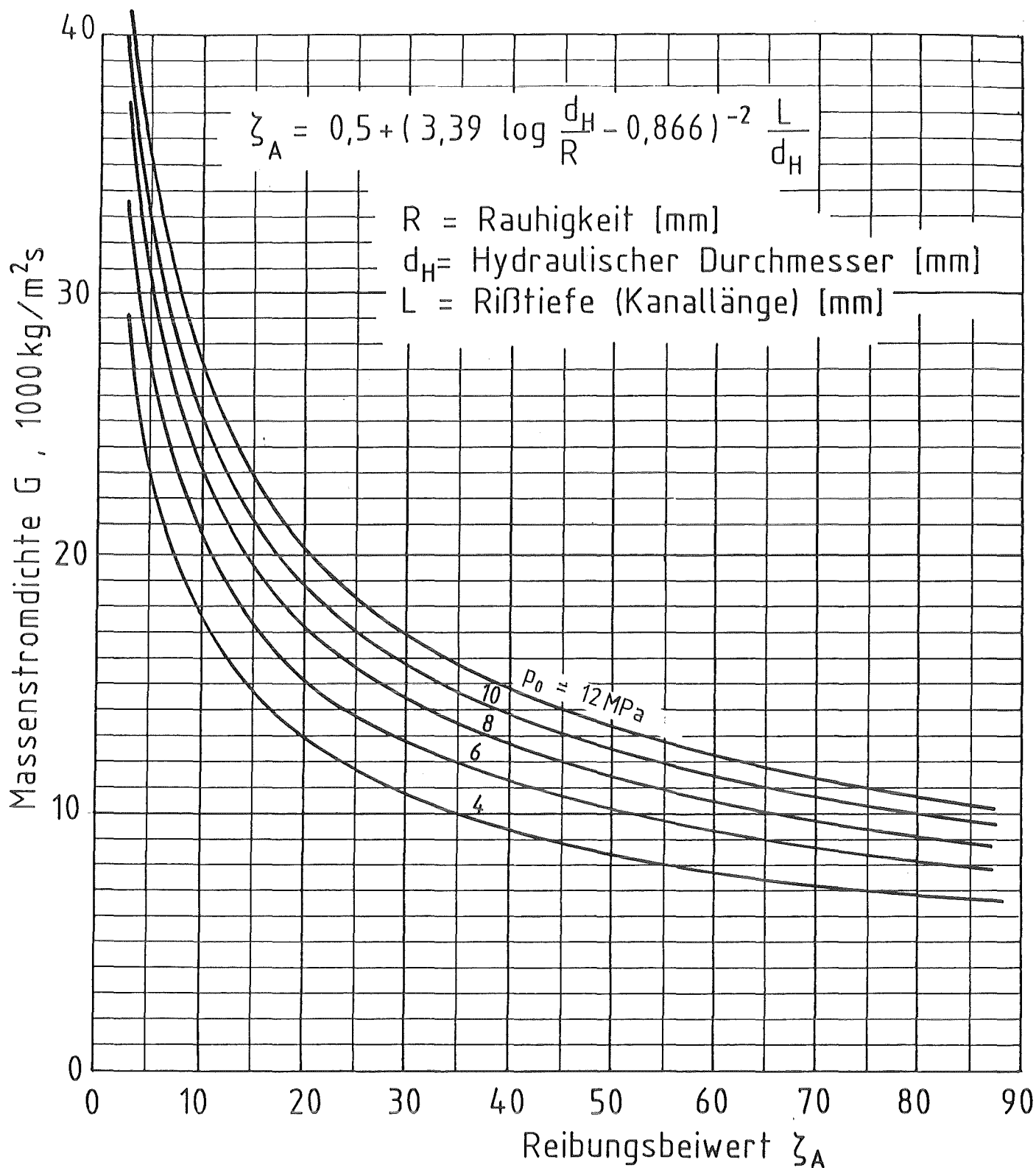
KfK

Abb. 34 Diagramm für die Bestimmung der Massenstromdichte in rauen Rissen



KfK

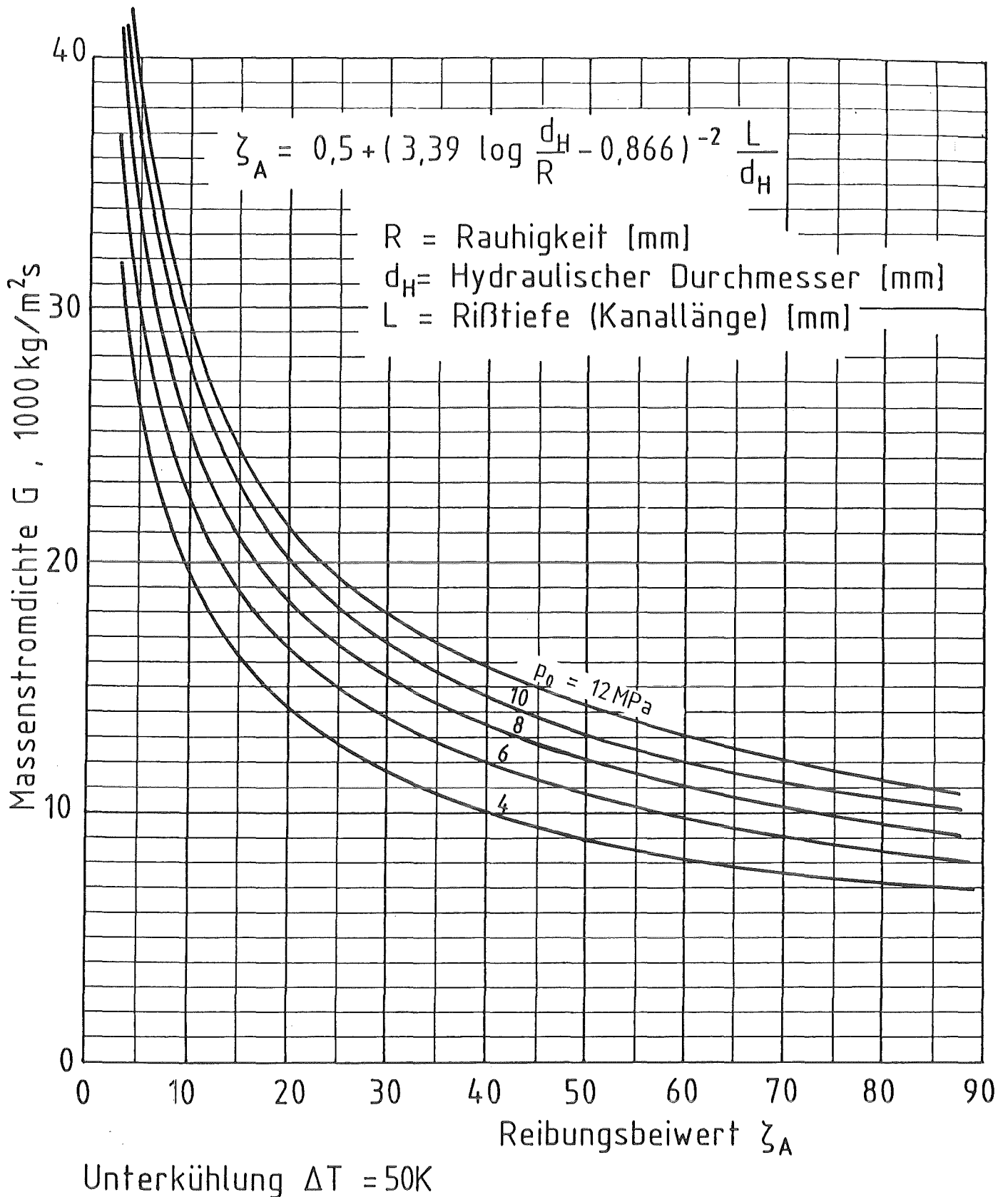
Abb. 35 Diagramm für die Bestimmung der Massenstromdichte in rauen Rissen



Unterkühlung ΔT = 40K

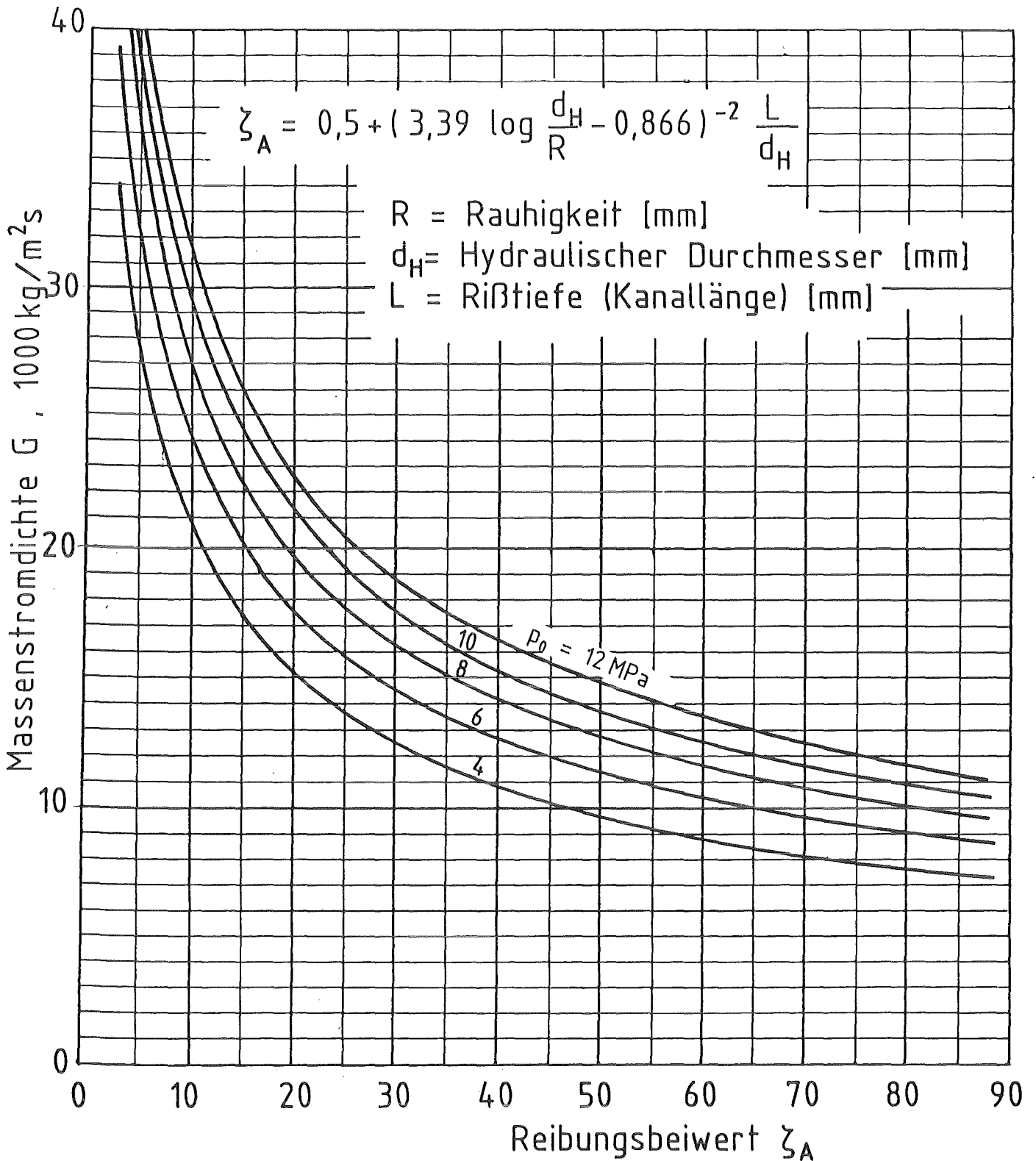


Abb. 36 Diagramm für die Bestimmung der Massenströmdichte in rauen Rissen



KfK

Abb. 37 Diagramm für die Bestimmung der Massenstromdichte in rauen Rissen



Unterkühlung $\Delta T = 60\text{K}$



Abb. 38 Diagramm für die Bestimmung der Massenstromdichte in rauen Rissen