

## Ein tomographisches Meßverfahren und seine Anwendung auf Mischvorgänge und Stoffaustausch

F. Mayinger, München, und D. Lübke, Hannover

### A tomographic technique and its application to mixing and mass transfer

**Abstract.** For researching mixing – and mass transfer processes the knowledge of the temporal and local changes of the concentration field is important, because the effectiveness of mixing and mass transfer influences the production rate of a chemical reaction strongly. With measuring techniques used up to now it was not possible to register the 3-dimensional distribution and the unsteady behaviour simultaneously. A special arrangement of the holographic interferometry gives now the possibility to record not only the 3-dimensionally, but also continuously and optically the concentration field. With this the volume under research is irradiated at the same time from different directions by a laser. From the interferograms of the different viewing directions the concentration field is reconstructed by a computer program. The temporal and local concentration of a added component is measured in a mixer as a function of the Re-number.

**Zusammenfassung.** Für Untersuchungen zur effektiven Durchmischung und zum optimalen Stofftransport in Rührbehältern ist die Kenntnis der zeitlichen und örtlichen Veränderung des Konzentrationsfeldes von großer Bedeutung, da von der Rührwirkung bei gleichzeitig ablaufenden chemischen Reaktionen der Umsatz in starkem Maße beeinflusst wird. Mit den bisher eingesetzten Meßmethoden gelang es nicht, das sowohl dreidimensionale als auch instationäre Verhalten der Konzentration zu erfassen. Mit einer speziellen Anordnung ist es mit der holographischen Interferometrie möglich, Konzentrationsfelder nicht nur dreidimensional zu messen, sondern auch kontinuierlich optisch aufzuzeichnen. Hierbei wird das Modell, ein Standardrührbehälter mit Scheibenrührer, gleichzeitig unter verschiedenen Winkeln durchstrahlt. Aus den Interferenzbildern der verschiedenen Blickwinkel wird das Konzentrationsfeld mit einem Rechenprogramm gewonnen. Die zeitliche und räumliche Durchmischung einer zugegebenen Komponente wird in Abhängigkeit von der Re-Zahl gemessen.

### 1 Einleitung

Aufgrund der guten Anpassungsfähigkeit an die jeweiligen Prozeßbedingungen und der einfachen Bauweise finden Rührapparate bei vielen Reaktions- und Austauschvorgängen bevorzugt Verwendung. Entscheidend für die Wirksamkeit der Rühranlage ist das erzeugte, räumliche Strömungsfeld, welches besonders im Falle der absatzweise

arbeitenden Reaktoren ein instationäres, ebenfalls dreidimensionales Konzentrationsfeld hervorruft. Während die alleinige Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung im Rührgefäß – hierfür stehen einige zuverlässige Meßmethoden zur Verfügung (siehe Nagata [7]) – nur eine qualitative Abschätzung des Wärme- und bzw. oder Stofftransportes erlaubt, ist für eine gesicherte Projektierung die Erfassung der zeitlichen und örtlichen Veränderung des Konzentrationsfeldes von großer Bedeutung. Denn es ist zu vermuten, daß schlechter durchmischte Zonen im Behälter die Quelle für die Qualitäts- bzw. Ausbeuteverluste sind. Letztere lassen sich z.B. durch konstruktive Maßnahmen beeinflussen. Hierfür ist es jedoch erforderlich zu wissen, wo und wann diese Zonen auftreten. Theoretische Ansätze zur numerischen Berechnung der Konzentrations- bzw. Temperaturverteilungen sind jedoch bislang nur außerhalb des technisch relevanten Einsatzbereiches von Rührkesseln veröffentlicht worden [1], so daß weiterhin die Notwendigkeit experimenteller Untersuchungen gegeben ist.

An eine im Rahmen von Modellexperimenten einzusetzenden Meßtechnik werden infolge der erwähnten örtlichen und zeitlichen Varianz der Meßgröße hohe Anforderungen gestellt. Denn bisher sind keine kontinuierlich arbeitenden Meßmethoden, – nur diese sind in der Lage instationäre Vorgänge aufzuzeichnen – bekannt geworden, die gleichzeitig eine geschlossene, räumliche Verteilung quantitativ erfassen können.

### 2 Meßtechnik

Die Forderung der hohen zeitlichen Auflösung erfüllen optische Meßmethoden in idealer Weise, da sie praktisch verzögerungsfrei arbeiten. Darüber hinaus sind sie rückwirkungsfrei und bei geeigneter Aufweitung lassen sich Informationen über den gesamten durchstrahlten Querschnitt gewinnen.

Rückschlüsse auf die örtliche, im allgemeinen beliebige dreidimensionale Struktur lassen diese Verfahren jedoch

zunächst nicht zu, da nur eine Integration aller Zustandsänderungen entlang des Lichtweges durch den Meßabschnitt vorgenommen wird.

Mit der Entwicklung leistungsfähiger EDV-Anlagen ist zunehmend eine Erweiterung dieser Meßtechniken interessant geworden, die den Nachteil der mangelnden örtlichen Auflösung umgeht. Analog zu einer in der Medizin bereits praktizierten Vorgehensweise beruht die „Optische Tomographie“ auf einer gleichzeitigen Durchleuchtung des Versuchsraumes unter verschiedenen Winkeln (Bild 1).

Der gesamte Behälter wird von mehreren aufgeweiteten, parallelen Lichtbündeln vollständig durchstrahlt, wobei bereits erste qualitative Aussagen über die Veränderungen in Richtung der Behälterachse und dem jeweiligen Durchmesser  $\varrho$  – also einer Ebene senkrecht zur Durchstrahlrichtung – möglich sind. Diese Ebenen werden auch als Projektion bzw. Schattenriß des Meßobjektes bezeichnet.

Die nunmehr aus mehreren Richtungen gewonnenen Integralwerte der noch unbekanntenen Verteilung, welche den einzelnen Projektionen entnommen werden können, werden dazu benutzt, Letztere auf numerischem Wege zu rekonstruieren.

Es ist einsichtig, daß eine solche Rekonstruktion umso genauer gelingt, je besser die azimutale Richtung mit „integralen Meßwerten“ aus möglichst vielen unterschiedlichen Blickwinkeln erfaßt worden ist. Im Falle instationärer Verhältnisse ist es jedoch unerlässlich, diese Werte zum gleichen Zeitpunkt aufzunehmen. Dieses hat zum einen zur Folge, daß ein Versuchsaufbau zur Verfügung stehen muß, der simultan eine kontinuierliche Meßwert erfassung aus vielen Richtungen erlaubt. Zum anderen ist, da dessen experimentellen Realisierung bereits bei wenigen Einzelwinkeln eine obere Grenze gesetzt wird, ein numerischer Algorithmus erforderlich, der eine hinreichende Genauigkeit auch bei einer eingeschränkten Winkelanzahl gewährleistet.

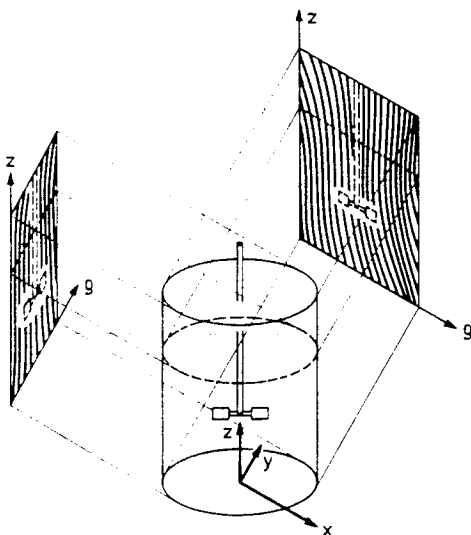


Bild 1. Meßwertgewinnung unter verschiedenen Winkeln

Zur Aufzeichnung der Meßwerte findet die holographische Interferometrie Verwendung. In den nächsten Abschnitten sollen deren Prinzipien erläutert werden, soweit es für das Verständnis der weiteren Betrachtungen notwendig ist.

### 2.1 Die holographische Interferometrie

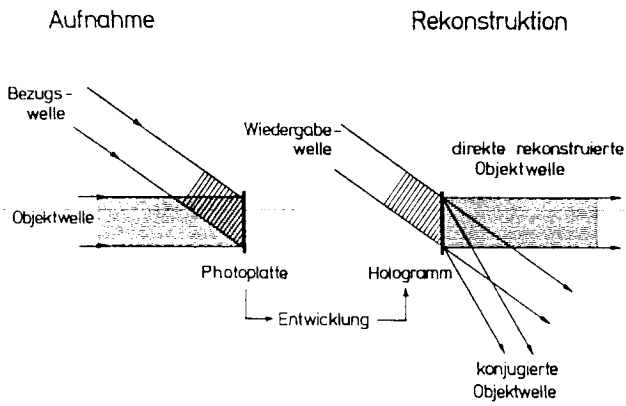
Neben den bereits erwähnten Vorzügen optischer Meßverfahren zeichnen sich speziell die Interferenztechniken durch weitere Vorteile aus, da hier die weiterzuverarbeitenden Informationen als „Binärmuster“ d. h. leicht ausmessende Hell-Dunkel-Verteilungen anfallen. Neben der einfachen Digitalisierung zur Eingabe in eine Großrechenanlage gestatten die Interferogramme zusätzlich eine qualitative Abschätzung der Vorgänge in der Ebene senkrecht zur jeweiligen Einstrahlrichtung; die Integration aller örtlichen Zustandsänderungen entlang des Lichtweges muß hierbei aber weiterhin beachtet werden. Dennoch erleichtert die Möglichkeit der visuellen Betrachtung bei instationären Verteilungen den Auswertaufwand erheblich, da auf diese Weise jene Zeitpunkte diskretisiert werden können, bei denen eine quantitative, rechnergestützte Auswertung sinnvoll erscheint.

Bis vor ca. zwei Jahrzehnten kamen zur Erzeugung der Interferogramme bevorzugt Mach-Zehnder- und Michelson-Interferometer zum Einsatz. Mit der Entwicklung der Laser als kohärente, leistungsstarke Lichtquelle werden nun diese klassischen Methoden durch eine neue Interferenztechnik ergänzt und auch teilweise ersetzt, die sich aus der Holographie [2, 4] entwickelt hat. Letztere ist für systematische, anwendungsorientierte Untersuchungen in zunehmendem Maße interessant geworden; zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die holographische Interferometrie schon eine weit entwickelte Meßtechnik, die aus der Literatur hinreichend bekannt ist [6].

Bei der Holographie handelt es sich um ein Abbildungsverfahren, bei der die Überlagerung der Amplituden- und Phasenverteilung von zwei dreidimensionalen Lichtwellen auf einer Fotoplatte gespeichert wird. Die eine der beiden Lichtwellen dient nur als Bezugswelle, während die andere Informationen von dem zu untersuchenden Objekt erhält (Bild 2).

In dem Überlagerungsgebiet beider Strahlengänge ist die resultierende Intensität entsprechend dem Phasenbezug beider Wellen moduliert. Diese Modulation, die infolge der hohen Ortsfrequenzen auch als Mikrointerferenz bezeichnet wird, läßt sich mit einer handelsüblichen Fotoplatte sehr hoher Auflösung aufzeichnen, wenn diese sich in dem genannten Bereich befindet.

Nach dem Entwickeln wirkt die Fotoplatte als Beugungsgitter mit variabler Gitterkonstanten; man spricht von dem Hologramm. Wird dieses nun von der Vergleichswelle durchleuchtet, so wird unter anderem die Objektwelle rekonstruiert (Bild 2).



**Bild 2.** Holographische Speicherung einer Objektwelle

Die Aufzeichnung des Phasenbezugs zwischen Bezugs- und Objektwelle, der in der Mikrointerferenz beider Teilwellen enthalten ist, gelingt nur, wenn der Laser im Single-Mode-Betrieb arbeitet, da er dann den hohen Kohärenz-anforderungen genügt.

2.1.1 Die Real-Time-Methode

Da nur die Real-Time-Methode gegenüber anderen ebenfalls von Mayinger und Panknin [6] dargestellten Techniken in der Lage ist, instationäre Vorgänge kontinuierlich aufzuzeichnen, soll nur jene im folgenden Gegenstand der Betrachtung sein.

Ein Hologramm entsteht auf der lichtempfindlichen Fotoplatte, wenn sich, wie in Bild 2 gezeigt, die Referenzwelle und die durch den Versuchsraum verlaufende Objektwelle überlagern. Der zu untersuchende fluiddynamische oder wärmeübertragende Vorgang ist hierbei noch nicht in Gang gesetzt, es liegen jedoch alle anderen thermodynamischen bzw. hydrodynamischen Zustände, bei denen die Untersuchungen ablaufen sollen, vor. Der durch den Meßraum tretende Lichtstrahl ist also bereits durch optische Unzulänglichkeiten der Meßkammerfenster oder Strömungsturbulenzen beeinflusst.

Diese Objektwelle interferiert hinter der Meßstrecke infolge der hohen Kohärenz der Lichtquelle mit der Bezugswelle. Entsprechend dem Winkel zwischen den beiden Strahlenbündeln und der Wellenlänge des Laserlichtes entsteht hier das bereits erwähnte Interferenzfeld mit weit über 1000 Linien pro Millimeter, das als mikroskopisch feine Hell-Dunkel-Verteilung auf der Fotoplatte aufgezeichnet wird. Nach der externen fototechnischen Behandlung wird diese als Hologramm an dieselbe Stelle repositioniert. In dieser nunmehr gleichen Anordnung wie bei der Aufnahme setzt die Referenzwelle hinter dem Hologramm die gespeicherte Objektwelle als Beugungsstruktur wieder frei.

Zur eigentlichen Messung wird wie im unteren Teil des Bildes 3 gezeigt, neben der Rekonstruktion obiger Objektwelle der zu untersuchende Vorgang in dem Versuchsraum

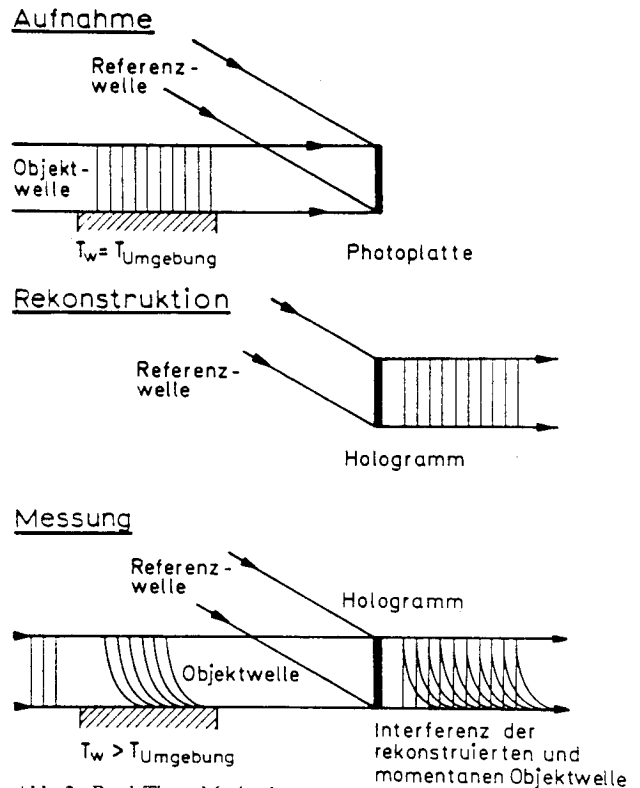
ausgelöst. Die nun die Meßkammer durchdringende, momentane Lichtwelle wird im Vergleich zur ersten Aufnahme zusätzlich nur noch durch Änderungen aus diesem Transportvorgang beeinflusst.

Die Interferenz erfolgt durch Überlagerung dieser momentanen mit der rekonstruierten Objektwelle hinter dem Hologramm, es entsteht dabei ein Interferenzstreifen-system, welches das durch den Transportvorgang hervorgerufene Temperatur- bzw. Konzentrationsfeld beschreibt.

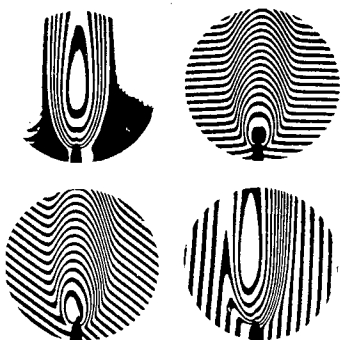
Die sich einstellenden Streifenmuster werden mit einer Kamera kontinuierlich aufgezeichnet und sind somit einer Auswertung zugänglich. Dabei wird die Kamera so justiert, daß sie die Modellmitte scharf abbildet, da dann der Einfluß von Abbildungsfehlern, die durch Lichtstrahlablenkung in einem Brechzahlfeld entstehen, minimiert werden [8].

2.2 Auswertung der Interferenzbilder

In der Interferometrie existieren zwei Möglichkeiten, die durch Temperatur- bzw. Konzentrationsunterschiede etc. bewirkte Änderung eines Brechzahlfeldes anzuzeigen [3, 9]. Ist der optische Aufbau so justiert, daß der Durchdringungswinkel der rekonstruierten und der momentanen Objektwelle gegen null geht, werden eventuelle Phasenverschiebungen zwischen diesen Lichtbündeln durch entstehende Interferenzstreifen angezeigt. Im Spezialfall einer ebenen Verteilung stellen diese Linien zugleich die Orte gleicher Brechzahl dar. Wird hingegen mit einem endli-



**Abb. 3.** Real-Time-Methode



**Bild 4.** Interferenzbild um eine Gasflamme ohne (links oben) und mit Streifenvorgabe verschiedener Orientierung

chen Durchdringungswinkel gearbeitet, so resultiert hieraus noch vor Auslösung des Meßeffectes ein Interferenzstreifenmuster mit einem vom obigen Winkel abhängigen Streifenabstand. Ändert sich während der Messung die optische Weglänge zwischen Meß- und Vergleichsstrahl, äußert sich dieses in einer Auslenkung des „vorgegebenen“ Liniensystems.

Das Bild 4 erlaubt einen direkten Vergleich der Interferogramme, die sich entsprechend den genannten Auswertverfahren ergeben; als Beispiel wurden Interferenzen um eine Gasflamme gewählt.

Durch die Verwendung der Finite Fringe Field-Technik erleiden die Interferogramme zwar einen gewissen Anschaulichkeitsverlust, eine Steigerung des Auswertaufwandes ist darüber hinaus auch zu verzeichnen, im Falle dreidimensionaler, komplexer Brechzahlverteilungen ist es jedoch unerlässlich, mit vorgegebenen Interferenzstreifen zu arbeiten. Neben weiteren hier nicht genannten Eigenschaften kommt vor allem der Möglichkeit, die Informationsdichte pro Interferenzbild den Erfordernissen einer numerischen Auswertung anpassen zu können, eine entscheidende Bedeutung zu. Je nach Wahl des Durchdringungswinkels läßt sich die Anzahl der Interferenzlinien steigern, deren Auslenkung diskrete Meßsignale darstellen.

Der Zusammenhang zwischen den den Interferenzbildern zu entnehmenden Gangunterschieden und dem gesuchten Brechungsindexfeld wird durch die folgende Integralgleichung hergestellt:

$$\phi = \int_{S_i} (n(x, y, z) - n_{\infty}) ds \quad (1)$$

In dieser Grundgleichung der holographischen wie auch der klassischen Interferometrie ist  $n_{\infty}$  der einheitliche Brechungsindex, der bei der Aufnahme der Vergleichswelle vorgelegen hat, während mit  $n(x, y, z)$  der aktuelle Brechungsindex des Fluids in dem zu untersuchenden Meßvolumen bezeichnet wird.

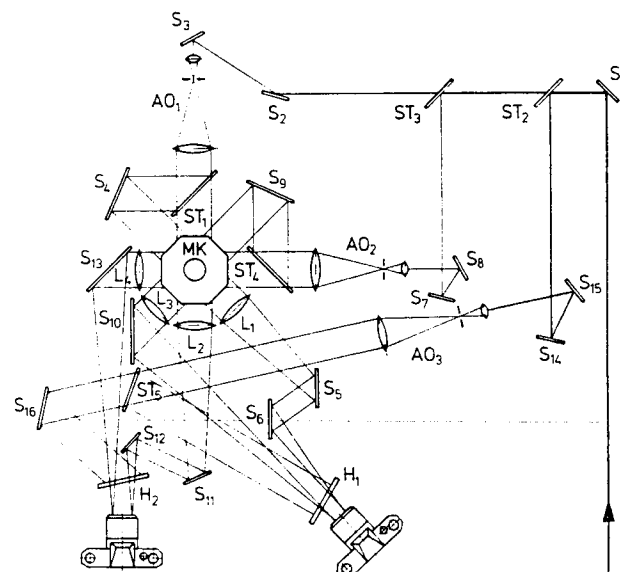
Für allgemeine, dreidimensionale Brechzahlfelder ist die Gl. (1) auf analytischem Wege nicht lösbar; vielmehr sind nur numerische Methoden geeignet, die Integralglei-

chung nach der gesuchten Brechzahldifferenz zu invertieren, wobei hinreichend Meßwerte  $\phi$  aus mehreren Blickrichtungen zur Verfügung stehen müssen [5]. Auf diesen Teil der Auswertung soll jedoch zugunsten einer detaillierten Beschreibung der Meßergebnisse verzichtet werden. Es sei lediglich darauf hingewiesen, daß die Integralgleichung auf ein zweidimensionales Problem zurückgeführt werden kann, wenn bei der Auswertung die Veränderungen über die Behälterhöhe nur in diskreten Schnittebenen erfaßt werden. Liegen diese „Höhenschnitte“ hinreichend dicht, läßt sich jedoch weiterhin die gesamte, dreidimensionale Struktur erfassen.

Die Umrechnung der auf diese Weise ermittelten Brechzahldifferenzen in Temperatur- oder Konzentrationswerte stellt dann keine Schwierigkeit dar, wenn diese Abhängigkeit – z. B. durch Refraktometermessungen – ermittelt wurde. Voraussetzung für die Zulässigkeit dieser Umrechnung ist aber, daß bei der Versuchsdurchführung eine Brechzahländerung nur infolge einer Größe bewirkt worden ist. Aus diesem Grunde und vor allem der leichteren experimentellen Handhabung bietet es sich an, die zu untersuchenden Konzentrationsfelder durch Temperaturunterschiede zu simulieren. Da sich beide Verteilungen bei Mischvorgängen nach Nagata [7] ähnlich verhalten, ist es erlaubt, die bestehende Analogie auszunutzen. Die folgenden Ausführungen beschränken sich deshalb ausschließlich auf Temperaturfelder.

### 2.3 Das holographische Interferometer

Im Mittelpunkt des erstellten holographischen Interferometers (Bild 5) befindet sich der Meßbehälter, in dem die zu untersuchenden Mischvorgänge ablaufen. Dieser wird von vier unterschiedlichen Objektwellen aus einem gesamten Winkelbereich von 135 Grad durchstrahlt.



**Bild 5.** Strahlengang des Interferometers mit 4 Objektwellen

Zur Unterdrückung von Lichtbrechungen an gekrümmten Glasflächen ist die äußere Berandung des Behälters achteckig ausgeführt, so daß jedes Lichtstrahlbündel auf eine planparallele Eintrittsfläche trifft. Lediglich der innere, zylindrische Teil stellt demnach die Nachbildung eines Rührgefäßes dar. Um eine **Brechung der Lichtwellen nicht an dessen Innenwänden auszuschalten**, werden nur **Einstrahlungen untersucht die exakt den gleichen Brechungsindex wie die verwendete Glassorte besitzen**.

Der weitere Strahlengang des optischen Aufbaues, der zur Aufzeichnung instationärer Vorgänge eine kontinuierliche Beobachtung und Speicherung der daraus resultierenden Interferenzerscheinungen erlaubt, sei im folgenden kurz beschrieben: Als kohärente Lichtquelle dient ein Argon-Ionen-Laser (Leistung 1,5 W bei  $\lambda = 514,5$  nm), dessen Strahl mit dem Umlenkspiegel  $S_1$  zunächst ausgerichtet wird; die Ausblendung der Referenzwelle sieht der variable Strahlteiler  $ST_2$  vor. Mit einem zusätzlichen Strahlteiler  $ST_3$  wird der für die Objektwelle verbleibende Anteil in zwei um je 90 Grad versetzte Beleuchtungsstrahlengänge aufgeteilt, durch Mikroskopobjektive aufgeweitet und mit Mikrolochblenden in den Brennpunkten dieser Objektive gefiltert. Durch geeignete Zentrierung erzeugen Plankonvexlinsen aus den gefilterten, divergenten Strahlenbüscheln **zwei Parallelstrahlen** mit gleicher Intensität über den **Durchmessern**, welche nunmehr **140 mm** betragen. Die Strahlteilerplatten  $ST_1$  und  $ST_4$  (Transmission: Reflektion = 50 : 50) blenden je einen weiteren Parallelstrahl aus, die nach Reflektion an den Spiegeln  $S_4$  und  $S_9$  um 45 Grad zu den ursprünglichen Objektwellen versetzt ebenfalls das Meßvolumen MK durchlaufen. Eine Vorfokussierung wird durch die Linsensysteme  $L_1$  und  $L_4$  erreicht, so daß es möglich ist, nach entsprechender Umlenkung mit Spiegeln hoher Oberflächengüte zwei Objektwellen nebeneinander auf einer Hologrammfläche zu speichern.

In der Ebene der Hologrammplatte  $H_1$  und  $H_2$  werden durch Justierung des Spiegels  $S_{16}$  bzw. der Strahlteilerplatte  $ST_5$  die auf gleiche Weise aufgeweiteten, parallelen Referenzwellen den Objektwellen überlagert. Die Angleichung der Intensitäten gelingt mit den erwähnten variablen Strahlteilern, dessen Transmission bzw. Reflektion kontinuierlich verstellbar ist.

Neben der Möglichkeit zwei Objektwellen auf einer Fotoplatte speichern zu können, wofür auch nur je eine Referenzwelle benötigt wird, zeichnet sich der beschriebene holographische Aufbau noch durch weitere Vorteile aus. Die optischen Weglängen der Referenz- bzw. Objektwellen sind gleich lang, so daß nur geringe Anforderungen an die Kohärenzlänge des Lasers gestellt werden brauchen. Durch die **Fokussierung der Objektwellen bereits vor dem Hologramm** vergrößert sich die pro Fläche zur Verfügung stehende **Lichtenergie**. Infolge der beschränkten Laserleistung, die sich bereits für eine solche Anzahl diskreter Strahlengänge noch dazu mit relativ großen Durchmessern als zu gering herausgestellt hat, kann nur

auf diesem Wege ausreichend Energie zur Belichtung der Fotoplatte einerseits und zum Abfotografieren der makroskopischen Interferenzbilder andererseits bereitgestellt werden.

Denn die Forderung nach kurzen Belichtungszeiten stellt sich zusätzlich, da die zu untersuchenden Vorgänge stark instationär sind. Einen weiteren, positiven Aspekt stellt die Möglichkeit dar, die Interferenzbilder derjenigen Objektwellen, die auf einem Hologramm gespeichert sind, auch gleichzeitig mit einer Motorkamera aufzeichnen zu können.

### 3 Ergebnisse

Die Mischungsuntersuchungen wurden in dem Modell eines Rührbehälters ( $H = D = 100$  mm) ohne Einbauten, in dem sich ein Scheibenrührer befindet, durchgeführt. Zur Verhinderung einer Trombe besitzt das Gefäß eine obere Abdeckung, die u. a. eine Zulaufeinrichtung aufnimmt. Letztere ermöglicht die absatzweise Zugabe entsprechend temperierten Fluids zu der im Versuchsraum vorliegenden Flüssigkeit gleicher Zusammensetzung. Der Ausgleich der Rührwirkung kann interferometrisch sichtbar gemacht und mit Kameras kontinuierlich aufgezeichnet werden.

#### 3.1 Mischwirkung im Bereich kleiner Re-Zahlen

Die Interferenzbilder des 0°-Blickwinkels veranschaulichen in den Bildern 6a–d einen solchen Transportvorgang bei einer relativ geringen Rührerdrehzahl. Die Re-Zahl errechnet sich hiermit zu  $Re \approx 200$ .

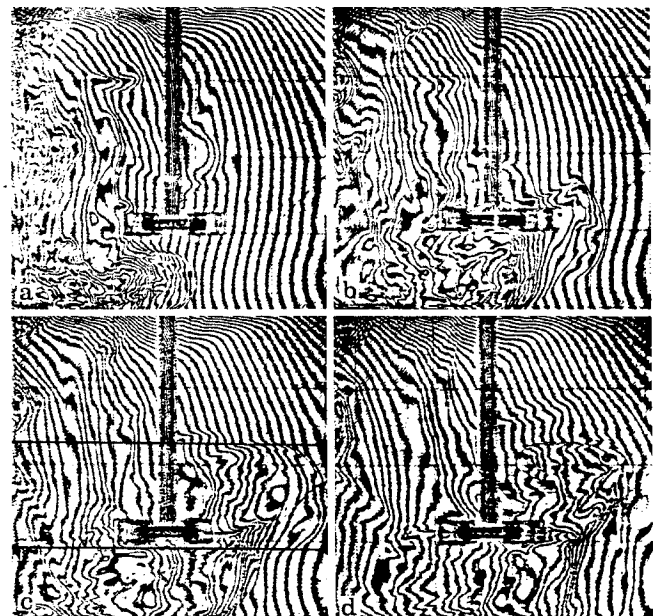
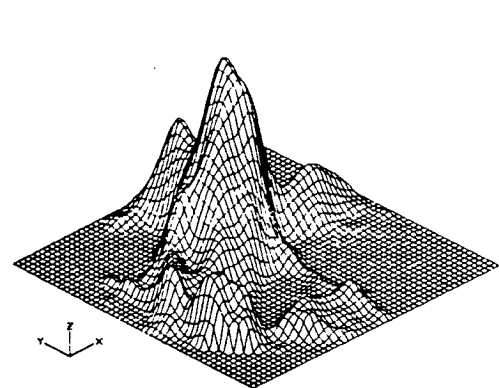
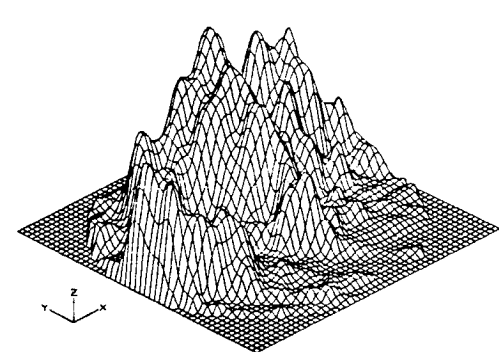
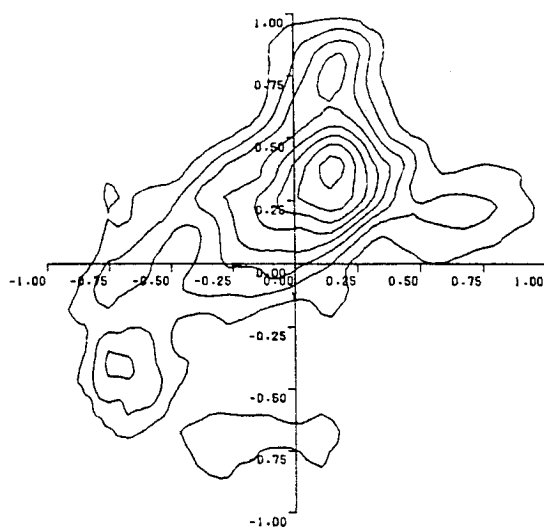


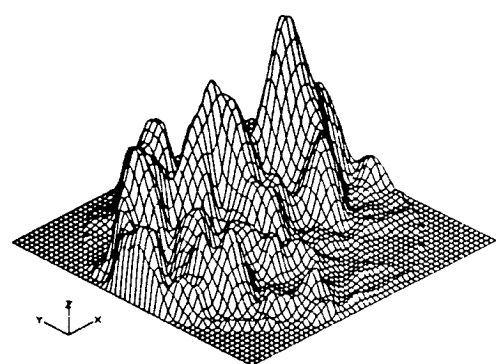
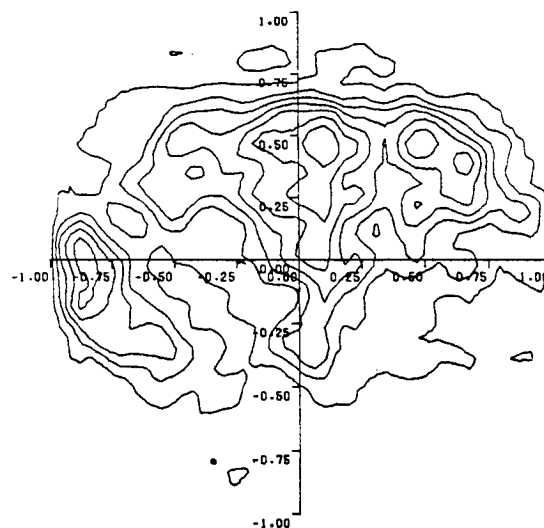
Bild 6a–d. Interferenzbilder des 0°-Blickwinkels zu verschiedenen Zeitpunkten: a  $t = 2$  s; b  $t = 4$  s; c  $t = 6$  s; d  $t = 9$  s.



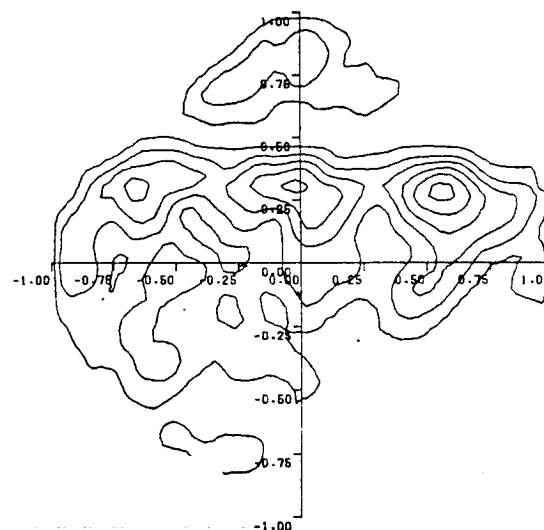
**a**  $\Delta T_{\max} = 0.68 \text{ K}$   
 $\Delta T_{L \rightarrow L} = 0.08 \text{ K}$



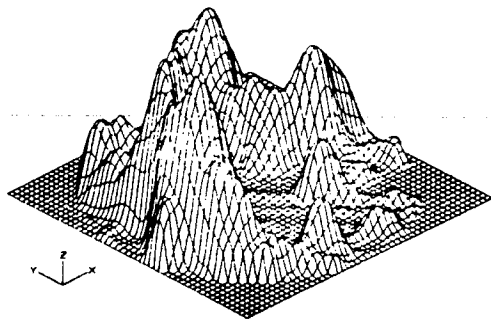
**b**  $\Delta T_{\max} = 0.63 \text{ K}$   
 $\Delta T_{L \rightarrow L} = 0.08 \text{ K}$



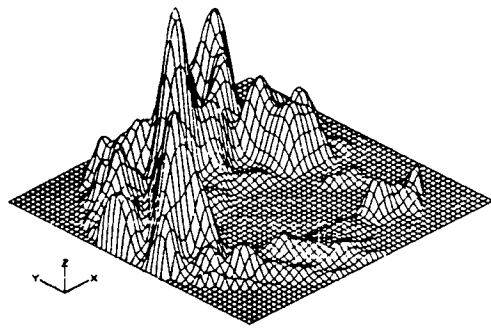
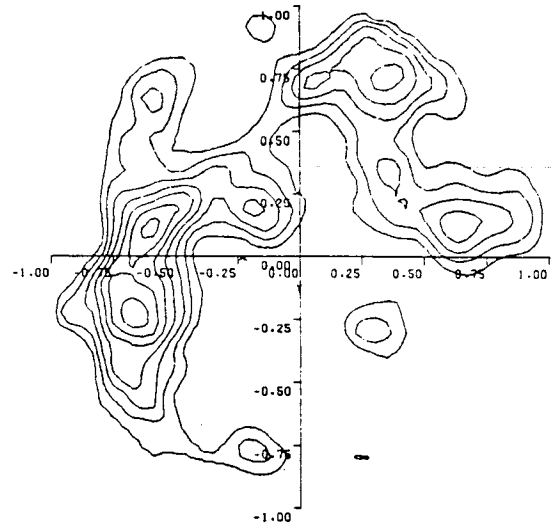
**c**  $\Delta T_{\max} = 0.46 \text{ K}$   
 $\Delta T_{L \rightarrow L} = 0.08 \text{ K}$



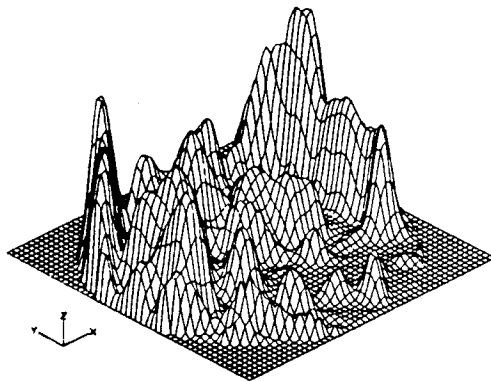
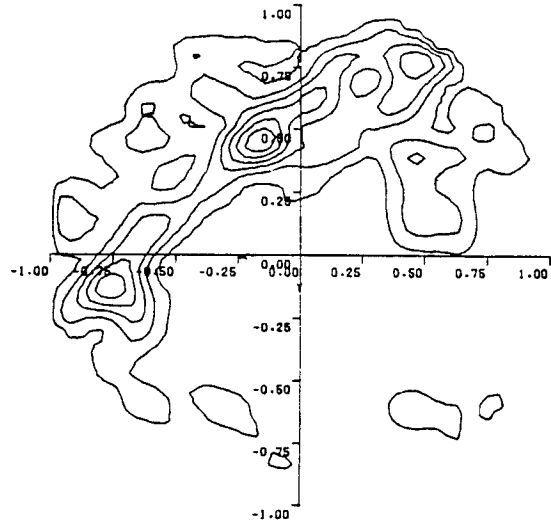
**Bild 7 a-c.** Instationäre Temperaturverteilung in der Ebene 1 bei  $Re \approx 200$ ; **a**  $t = 6 \text{ s}$ ; **b**  $t = 9 \text{ s}$ ; **c**  $t = 12 \text{ s}$



a  $\Delta T_{\max} = 0.33 \text{ K}$   
 $\Delta T_{L-L} = 0.04 \text{ K}$



b  $\Delta T_{\max} = 0.55 \text{ K}$   
 $\Delta T_{L-L} = 0.08 \text{ K}$



c  $\Delta T_{\max} = 0.26 \text{ K}$   
 $\Delta T_{L-L} = 0.04 \text{ K}$

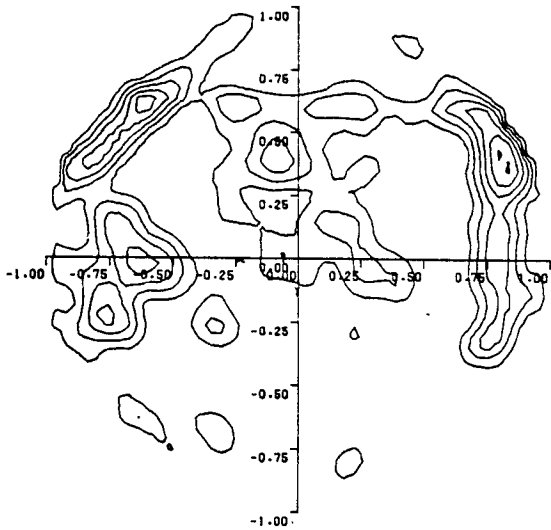


Bild 8 a-c. Instationäre Temperaturverteilung in der Ebene 2 bei  $Re \approx 200$ : a  $t=6 \text{ s}$ ; b  $t=9 \text{ s}$ ; c  $t=12 \text{ s}$

Der eintretende Freistrahл wird auch in der Rührerebene – dem Gebiet der größten auftretenden Geschwindigkeiten – nur sehr wenig beeinflusst.

Zwei Sekunden nach Versuchsbeginn hat nahezu das gesamte Feed den Behälterboden erreicht. Die heftige Verwirbelung der vorgegebenen und zusätzlich entstandenen, geschlossenen Interferenzlinien lassen auf eine unverändert hohe Temperaturdifferenz schließen.

Infolge der unterhalb der Rührwelle vergleichsweise stärker ausgeprägten, axialen und radialen Geschwindigkeiten [5] werden Teile dieses „kalten Ballens“ angehoben und sowohl in radialer wie auch axialer Richtung über den Behälterquerschnitt verteilt. Unter Berücksichtigung der gewählten Zeitschritte ist bereits den Interferogrammen zu entnehmen, daß besonders die axiale Förderung unterhalb des Rührorgans schneller als oberhalb verläuft, welches auf eine unterschiedlich gute Durchmischung schließen läßt.

Entsprechend diesen Beobachtungen soll im folgenden ein Vergleich der instationären Temperaturverteilungen in zwei Höhenschnitten erfolgen, die jeweils für die genannten Bereiche charakteristisch sind: die Ebenen sind in Bild 8c durch waagerechte Linien skizziert.

Den Bildern 7a–c können die Temperaturfelder in der Höhe 1 direkt unterhalb des Rührers in Abhängigkeit der Zeit entnommen werden. Sechs Sekunden nach Versuchsbeginn ist hier noch ein recht scharf begrenztes Übertemperaturgebiet erkennbar, während im darauffolgenden Zeitraum hauptsächlich eine Verteilung über einen größeren Behälterquerschnitt erreicht wird. Ein Abbau der hohen Temperaturdifferenzen hat hingegen noch nicht in nennenswerter Weise stattgefunden. Diese Ausbreitung und damit die Schaffung einer größeren Austauschfläche ist nach Nagata [7] die Voraussetzung für einen beschleunigten Temperaturengleich, der bereits im dritten Zeitschritt (Bild 7c) ausgewiesen wird.

Während der nachfolgenden Rührdauer setzt sich dieser Ausgleichsprozeß fort, wobei die Übertemperaturgebiete in immer kleinere Bereiche unterteilt werden.

Diesem kontinuierlichen Temperaturengleich gegenüber ist in der Höhe 2 erst nach 9 s ein Anstieg der Temperaturdifferenzen zu verzeichnen (Bild 8a–c).

Aufgrund der angesprochenen, verlangsamten axialen Fluidbewegung oberhalb der Rührwelle setzt diese „Erhöhung“ erst zu einem verhältnismäßig späten Zeitpunkt ein. Darüber hinaus gelingt es in dieser Ebene nicht, eine gleichmäßigere Verteilung über den Behälterquerschnitt zu erreichen; vielmehr ist eine extreme Randgängigkeit, die die gewünschte Durchmischung behindert, zu beobachten.

### 3.2 Mischwirkung bei $Re \approx 1000$

Im folgenden sollen den Ausführungen des vorangegangenen Abschnittes eine Versuchsauswertung bei  $Re \approx 1000$  gegenübergestellt werden. Dieser Wert ist mit dem Erreichen

der vollausgebildeten Turbulenz in Rührapparaten identisch. Weiterhin zeigt es sich, daß für unbewehrte Behälter keine weitere Verringerung der Mischzeit möglich ist [5, 7].

Auch bei dieser Versuchsreihe ist es hilfreich, zunächst den berechneten Temperaturverteilungen qualitative Betrachtungen des Einlaufvorganges voranzustellen. Die wesentlich gesteigerte tangential Geschwindigkeitskomponente vor allem bewirkt eine sofortige Beeinflussung des eintretenden Fluids. Jenes wird unmittelbar nach dem Zulauf noch im oberen Behälterdrittel in radialer Richtung verteilt. Darüber hinaus geschieht die abwärtsgerichtete Ausbreitung in dieser Phase nicht mehr allein durch den Zulaufimpuls sondern wird durch die vertikale Geschwindigkeitskomponente in der Nähe der Rührwelle unterstützt (Bild 9b).

Im Vergleich zu den beschriebenen Untersuchungen der Re-Zahl 200 stellen sich somit völlig konträre Verhältnisse ein. Dort galt es zunächst, das bis zum Boden nahezu vollständig vorgedrungene Feed wieder „anzuheben“ und neben der radialen eine vertikale Verteilung vorzunehmen. Letztere erfolgte also vom unteren Behälterdrittel in die oberen Bereiche, in denen nur vergleichsweise geringe

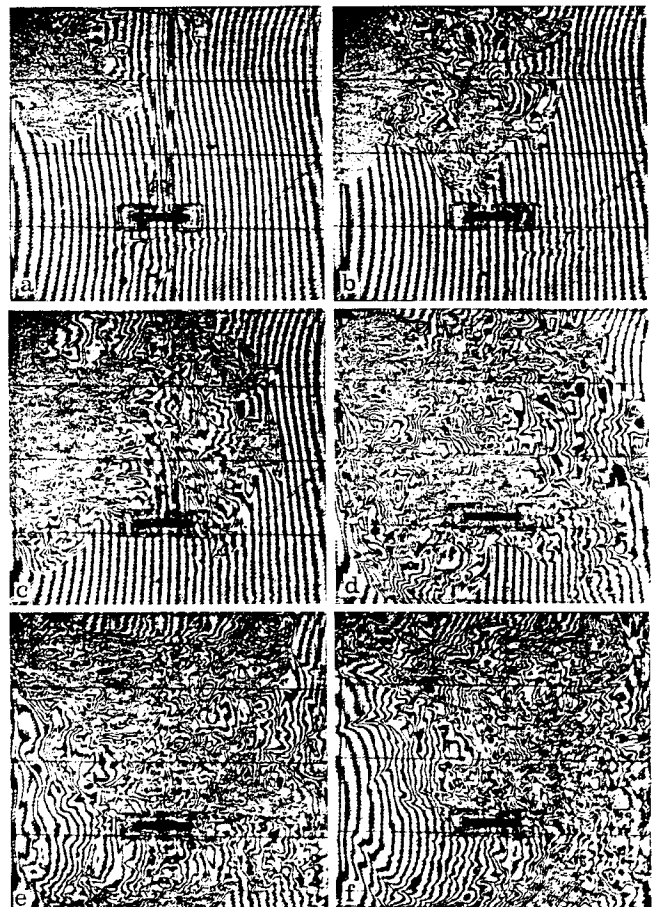
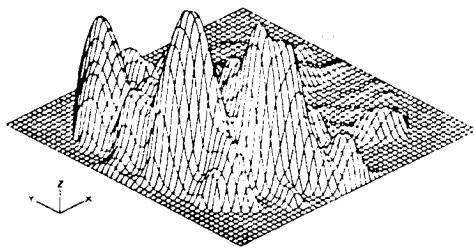
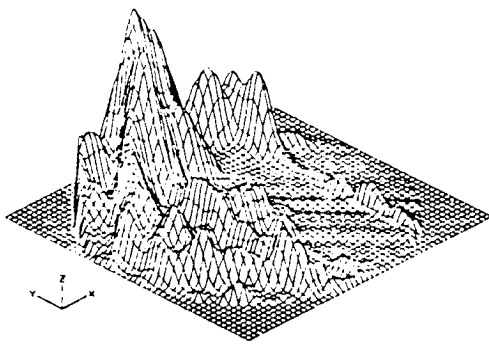
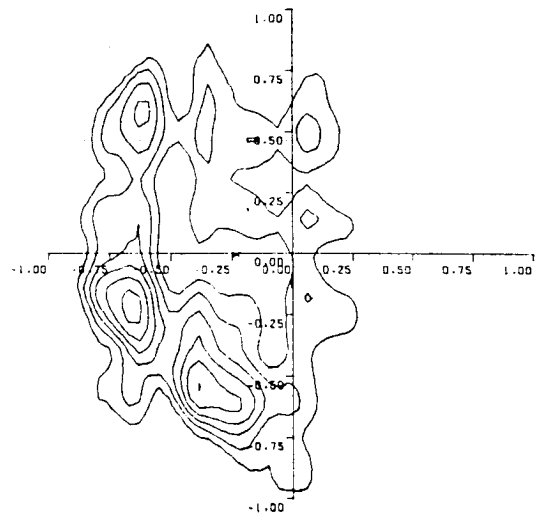


Bild 9a–f. Aus instationärem Temperaturfeld resultierende Interferogramme bei  $Re \approx 1000$ ; a  $t = 1$  s; b  $t = 2$  s; c  $t = 3$  s; d  $t = 4$  s; e  $t = 5$  s; f  $t = 6$  s

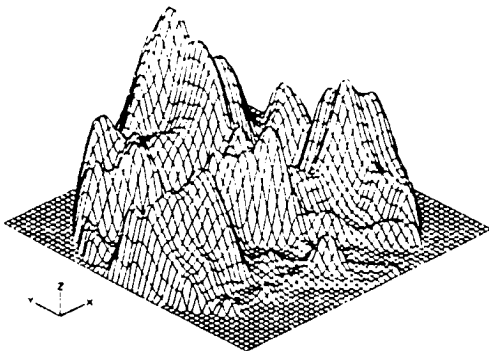
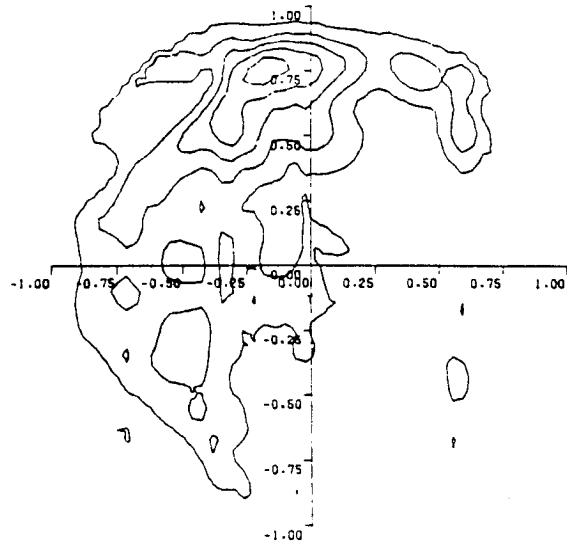




a  $\Delta T_{\max} = 0.64 \text{ K}$   
 $\Delta T_{L \rightarrow L} = 0.1 \text{ K}$



b  $\Delta T_{\max} = 0.51 \text{ K}$   
 $\Delta T_{L \rightarrow L} = 0.1 \text{ K}$



c  $\Delta T_{\max} = 0.39 \text{ K}$   
 $\Delta T_{L \rightarrow L} = 0.05 \text{ K}$

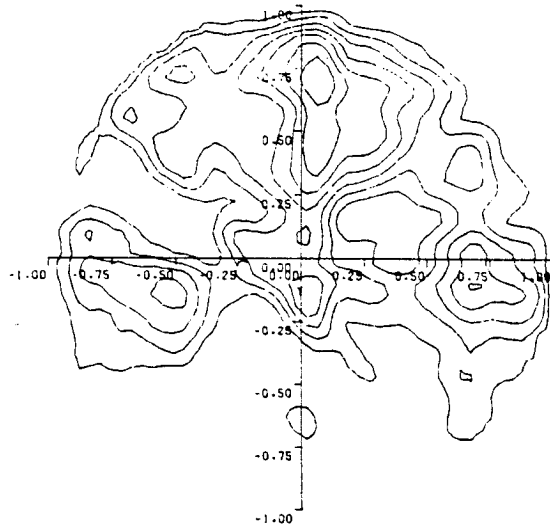
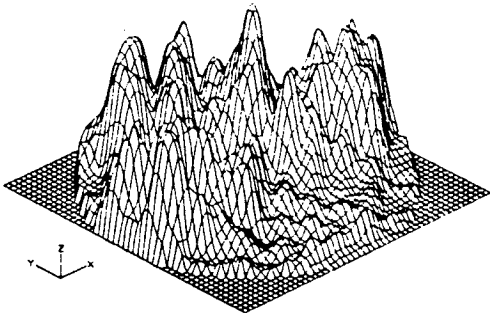
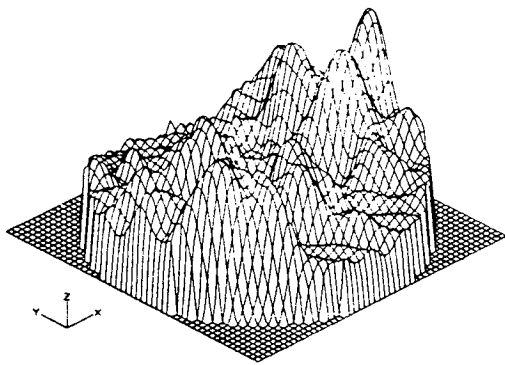
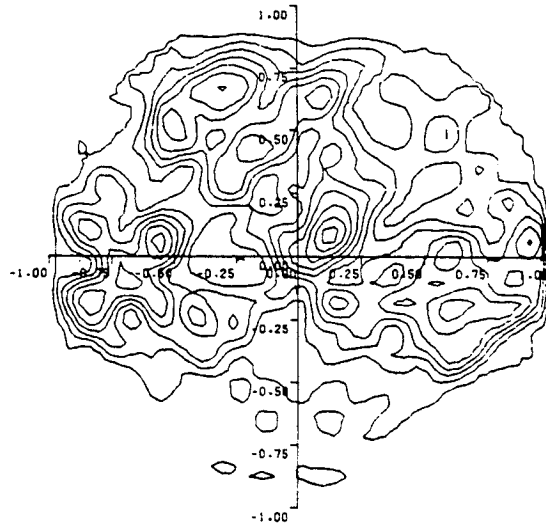


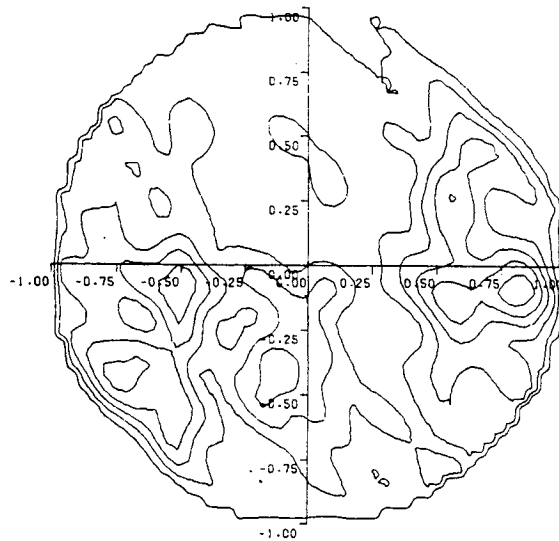
Bild 10a-e. Instationäre Temperaturverteilung in der Ebene 2 bei  $Re \approx 1000$ ; a  $t = 4 \text{ s}$ ; b  $t = 5 \text{ s}$ ; c  $t = 6 \text{ s}$ ; d  $t = 7 \text{ s}$ ; e  $t = 8 \text{ s}$



d  $\Delta T_{\max} = 0.24 \text{ K}$   
 $\Delta T_{L-L} = 0.025 \text{ K}$



e  $\Delta T_{\max} = 0.16 \text{ K}$   
 $\Delta T_{L-L} = 0.025 \text{ K}$



Geschwindigkeiten vorliegen [5] und demzufolge auftretende Temperaturdifferenzen hier nur sehr langsam abgebaut werden.

Neben einer wesentlich verbesserten radialen und axialen Vermischung oberhalb der Rührwelle, welches ebenfalls den Bildern 9 a–f in qualitativer Weise entnommen werden kann, ist nunmehr ein abwärtsgerichteter Transport des Rührorgans vorhanden. Die oberen Regionen, die u. a. aufgrund der gewählten Einbaulage des Scheibenrührers ein schlechteres Mischverhalten zeigen, werden in diesem Fall frühzeitig mit „Flüssigkeitsballen“ unterschiedlicher Temperatur beaufschlagt. Die integrale Mischzeit  $\theta_M$  verkürzt sich daher weiterhin durch die nicht mehr notwendige, vertikale Förderung, bevor in diesen Gebieten der zeitintensivere Temperatureausgleich einsetzen kann.

Zur Verdeutlichung einer weitaus effektiveren Mischwirkung der untersuchten Anordnung ist es bei diesem Betriebspunkt ausreichend, lediglich die numerisch ermittelten Temperaturfelder in dem oberen Behälterabschnitt zu diskutieren. Ähnlich der beobachteten Randgängigkeit der Temperaturdifferenzen bei kleinen Re-Zahlen ( $Re \approx 200$ ) bestehen auch bei mittleren Re-Zahlen nach längerer Rührdauer in diesem Bereich noch relativ große Temperaturunterschiede [5], welches in diesen Fällen das gewünschte Mischergebnis in nachteiliger Weise beeinflusst. Dem gegenüber wird auch bei  $Re \approx 1000$  in dem Höhenchnitt 2 eine sehr frühe, großflächige Ausbreitung der Übertemperaturgebiete erreicht, welches den Bildern 10 a–e entnommen werden kann. Da somit große Austauschflächen als Voraussetzung für einen schnellen Wärmetransport geschaffen sind, stellt sich bereits nach 8 s eine

nahezu einheitliche Mischungstemperatur ein (Bild 10e), wobei nur noch einzelne, geringe Abweichungen anzutreffen sind.

Darüber hinaus erfahren die verbleibenden Temperaturballen auch in diesen „rührerfernen“ Bereichen eine ständige Lageveränderung in Drehrichtung der Rührwelle, die bei den zuvor beschriebenen Versuchsreihen nur in unmittelbarer Nähe des Rührorgans in dieser Form zu beobachten ist.

### Literatur

1. Brauer, H.: Wärmetransport in Rührgefäßen. Wärme- Stoffübertrag. 13 (1980) 109–113
2. Francon, M.: Holographie. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1972
3. Hauf, W.; Grigull, U.: Optical methods in heat transfer. Adv. Heat Transfer 6 (1970)
4. Kiemle, H.; Roess, D.: Einführung in die Technik der Holographie. Frankfurt/Main: Akademische Verlagsges. 1964
5. Lübke, D.: Ein Meßverfahren für instationäre dreidimensionale Verteilungen und seine Anwendung auf Mischvorgänge. Diss. Univ. Hannover 1982
6. Mayinger, F.; Panknin, W.: Holography in heat and mass transfer. Tokio: Proc. of 5th Int. Heat Transfer Conference 1974
7. Nagata, S.: Mixing, principles and application. Tokio: Kodansha 1975
8. Steinberger, U.; Mayinger, F.: Untersuchung von Temperaturgrenzschichten mit Hilfe der holographischen Interferometrie. Inst. für Verfahrenstechnik, Univ. Hannover
9. Wilkie, D.; Fisher, S. A.: Measurement of temperature by Mach-Zehnder interferometry. Proc. Instr. Mech. Eng. 178 (1963) 461

Prof. Dr.-Ing. F. Mayinger  
Lehrstuhl A für Thermodynamik  
Technische Universität München  
Postfach 20 24 20  
D-8000 München 2

Dr.-Ing. D. Lübke  
BEB  
Gewerkschaften Brigitta u. Elwerath  
Betriebsführungsgesellschaft  
Riethorst 12  
D-3000 Hannover 51

Eingegangen am 18. Februar 1983