

Was interessiert den Physiker heute an Fluiden?

Einleitung

Das Gebiet der einfachen und komplexen Fluide und das Studium ihrer physikalischen Eigenschaften hat im Verlauf des letzten Jahrzehnts international ein stark zunehmendes Interesse gefunden. In diesem Beitrag sollen einige ausgewählte neuere Entwicklungen skizziert werden. Diese beziehen sich einerseits auf die Eigenschaften neuartiger Materialien auf dem Felde der komplexen Fluide und andererseits auf Fragen des Nichtgleichgewichtsverhaltens von einfachen und komplexen Fluiden unter dem Einfluß einer äußeren Kraft oder eines äußeren Feldes. Letztere erlauben es, fluide Systeme wohlkontrolliert aus dem Gleichgewicht zu treiben. Die hierbei auftretende Strukturbildung ist aus mindestens zwei Gründen interessant: Einerseits tragen die entstehenden Strukturen universelle Züge, d. h. Erkenntnisse über sehr verschiedene Systeme sind, nach einem generalisierenden Zwischenschritt, übertragbar. Dies betrifft z. B. die Beschreibung von Defekten in konvektiven Strukturen im Vergleich zu solchen in Gläsern oder bei der gerichteten Erstarrung in Festkörpern. Der Vorteil der Hydrodynamik in diesem Beispiel besteht darin, daß sie präzisere Experimente erlaubt, die zudem noch schneller ablaufen als in Gläsern. Andererseits spielen Anwendungen bei der Untersuchung von strukturbildenden Systemen eine wichtige Rolle. Als Beispiele seien an dieser Stelle Schmierfilme in Gleitlagern, Strömungen um die Tragflü-

Im letzten Jahrzehnt hat das Studium von flüssigen Systemen in der Physik ein Comeback erlebt. Besonders erwähnenswert erscheinen hierbei neuere Entwicklungen aus dem Bereich der hydrodynamischen Instabilitäten und dem Einsatz von Turbulenz sowie aus dem Gebiet der komplexen Fluide, wie elektrorheologische Fluide und flüssigkristalline Elastomere. Dies betrifft sowohl grundlegende Fragen als auch die Anwendungen.

gel von Flugzeugen und um Schiffsrümpfe sowie die hydrodynamischen Strukturen in porösen Medien erwähnt, wie sie bei der Ölgewinnung auftreten. Das Interesse an komplexen Materialien hängt ganz wesentlich damit zusammen, daß Strukturen zunehmender Komplexität eine höhere Chance bieten, neuartige Eigenschaften zu finden, die sowohl von grundsätzlicher physikalischer als auch von materialwissenschaftlicher Bedeutung sein können.

Was die Eigenschaften neuartiger Materialien auf dem Gebiet der komplexen Fluide anbelangt, werden wir insbesondere zwei besonders bemerkenswerte Gruppen diskutieren, nämlich die flüssigkristallinen Elastomere einerseits sowie die magneto- und elektrorheologischen Fluide auf der anderen Seite.

Flüssigkristalline Elastomere entstehen dadurch, daß ein Polymer vernetzt wird, welches Seitenketten mit einer flüssigkristallbildenden Gruppe besitzt: Elastomere resultieren aus der Vernetzung von Polymeren und besitzen einen endlichen statischen Schermodulus. Zu den Elastomeren zählen z. B. Gele und Gummis. Flüssigkristallphasen treten in zahlreichen stäbchenförmigen organischen Verbindungen zwischen der isotrop flüssigen Phase (in welcher Positions- und Orientierungsordnung in allen Raumrichtungen kurzreichweitig sind) und der kristallinen Phase (Positions- und Orientierungsordnung sind langreichweitig) auf. In Flüssigkristallen (vgl. z. B. [1]) sind Positionen und Orientierungen der Moleküle nur teilweise langreichweitig geordnet (z. B. nur langreichweitige Orientierungsordnung). Bei der Gruppe der magneto- und elektrorheologischen Fluide handelt es sich um Suspensionen von magnetischen bzw.

polarisierbaren Teilchen im Mikrometerbereich. Diese können durch Anlegen eines magnetischen bzw. elektrischen Feldes reversibel von einer fluiden in eine feste Phase überführt werden. Da sich dieser Prozeß sehr genau kontrollieren läßt, ergeben sich z. B. Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Prozeßsteuerung.

Auf dem Gebiet der Strukturbildung in einfachen und komplexen Fluiden, einem Sektor, der von grundsätzlichem Interesse für das Verständnis von Nichtgleichgewichtsphänomenen ist, wurden ebenfalls eine Reihe von interessanten Fragen aufgeworfen und teilweise beantwortet.

Ein Beispiel: Gibt es Mechanismen bei der Bildung periodischer Strukturen weit weg vom thermischen Gleichgewicht, die gewährleisten, daß immer eine bestimmte Wellenlänge für die Einheitszellen, wie z. B. Konvektionsrollen oder Wirbel, ausgewählt wird? Es stellt sich heraus, daß diese Frage für eine große Klasse von Situationen bejaht werden kann. Dies wurde zunächst theoretisch gezeigt und in der Folge für die Taylor-Instabilität (eine einfache Flüssigkeit in der Lücke zwischen zwei konzentrischen Zylindern wird durch Rotation des inneren oder beider Zylinder einem äußeren Drehmoment unterworfen) und die Rayleigh-Bénard-(RB-) Instabilität (eine dünne Schicht einer einfachen Flüssigkeit wird von unten geheizt) experimentell bestätigt. Wir diskutieren, daß schon beim Einsatz der ersten strukturbildenden Instabilität vielfältig verschiedenes Verhalten auftreten kann, z. B. laufende Wellen, lokalisierte Strukturen vor einem räumlich homogenen Hintergrund, ein Wettbewerb zwischen verschiedenartigen Instabilitäten sowie

Dr. Helmut R. Brand, Universität-Gesamthochschule Essen, Fachbereich Physik, Universitätsstraße 5, W-4300 Essen 1.

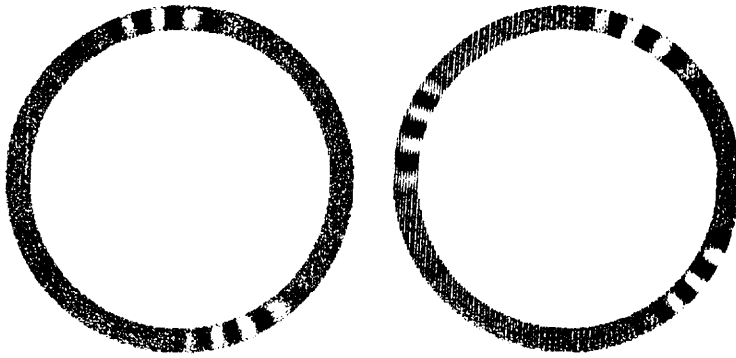


Abb. 1: Koexistierende lokalisierte Zustände in der Nähe des Einsatzes von Konvektion in Mischungen von Ethanol und Wasser. Blick von oben auf die annulusförmige (Annulus: der Raum zwischen zwei konzentrischen Kreisringen) Konvektionszelle. Auf dem linken Bild erkennt man zwei lokalisierte Zustände, auf dem rechten drei. Die Einhüllende dieser lokalisierten Strukturen besitzt qualitativ dieselbe Form wie die in Abb. 2 gezeigten Pulse. Das Verhältnis von Höhe zu Breite zu Umfang der Konvektionszelle beträgt 1:2:63. (Bild von J. J. Niemela, G. Ahlers und D. S. Cannell, University of California, Santa Barbara)

Strukturen, die ungeordnet sind in Raum und Zeit.

Als eines der Prototypensysteme für all diese Verhaltensweisen hat sich die konvektive Instabilität in der Mischung zweier mischbarer Flüssigkeiten herausgestellt, die auftritt, wenn eine dünne Schicht einer solchen Mischung von unten geheizt wird. Ein anderes experimentelles System, welches in letzter Zeit mehr und mehr in das Zentrum des Interesses rückt, ist die elektrohydrodynamische Instabilität in nematischen Flüssigkristallen. Diese tritt auf, wenn man ein elektrisches Feld

an eine dünne Schicht eines nematischen Flüssigkristalls anlegt. Ein besonderer Vorteil dieses Systems liegt darin, daß man leicht ein großes Aspektverhältnis (Verhältnis von Breite bzw. Länge der Schicht zur Höhe) erreichen kann. Aufgrund dieses Vorteils wird es überhaupt erst möglich, die Rolle der Dynamik von Defekten auf den Einsatz von zeitlicher und räumlicher Unordnung gezielt und wohlkontrolliert zu untersuchen.

Hydrodynamische Instabilitäten

Bei dem Studium von thermischer getriebener Konvektion in der Mischung zweier mischbarer Flüssigkeiten ist z. B. an Ethanol/Wasser oder an die normalfluide Mischung von ^3He und ^4He zu denken. In diesen tritt bereits im Wärmeleitungs-zustand ein Konzentrationsgradient auf, und zwar aufgrund der dissipativen Kreuzkopplung zwischen Variationen in der Temperatur und der Konzentration (Soret-Effekt). Die Geometrie der experimentellen Anordnung entspricht der der RB-Instabilität, bei der eine dünne Schicht einer einfachen Flüssigkeit von unten geheizt wird.

Die Vorteile des Studiums dieser Anordnung sind ganz ähnlich wie die der RB-Instabilität: Man hat eine gut kontrollierbare Anordnung und kann mit hoher Genauigkeit den von außen angelegten Temperaturgradienten (in dimensionslosen Einheiten Rayleigh-Zahl genannt) kontrollieren, und somit sind die Resultate gut reproduzierbar. Gegenüber der RB-Instabilität, die als Prototyp für Strukturbildung im Detail von Physikern über die letzten zehn Jahre experimentell untersucht wurde [2], besitzt die konvektive Instabilität in Mischungen eine Reihe von Vorzügen. Während bei der RB-Instabilität als erste räumliche Struktur nur stationäre Rollen auftreten können, ist es bei Konvektion in Mischungen möglich, sehr viel reichhaltigeres Verhalten zu bekommen, da eine zusätzliche Erhaltungsgröße – die Konzentration einer Komponente –

und somit eine zusätzliche dynamische Gleichung ins Spiel kommt. So können in der Nähe des Einsatzes der ersten räumlichen Struktur bei Konvektion in Mischungen laufende oder stehende Wellen auftreten, und der Einsatz kann entweder mit kontinuierlich von Null anwachsender Amplitude oder diskontinuierlich (hysteretisch) erfolgen. Des weiteren ist ein Wettbewerb zwischen zwei verschiedenen Instabilitäten (z. B. zwischen einer stationären Rollenstruktur und laufenden Wellen) am Einsatz möglich – der Fall einer sogenannten „Kodimension-zwei-Verzweigung“; in der Regel – z. B. für den Einsatz von thermischer Konvektion in einfachen Flüssigkeiten – wird der strukturlose Zustand (z. B. der Wärmeleitungs-zustand) instabil entweder gegen zeitunabhängige oder zeitabhängige Störungen eines ganz bestimmten Typs. Ist es jedoch – wie z. B. im Falle der thermischen Konvektion in Mischungen – möglich, zwei Parameter zu variieren, so gelingt es häufig für eine bestimmte Kombination der Werte der beiden äußeren Parameter, denselben Schwellwert für den Einsatz zweier verschiedener Instabilitäten zu erhalten. Ferner können in hinreichend großen Behältern auch räumlich und zeitlich ungeordnete Strukturen in Schwellnähe, d. h. in der Nähe des Einsatzes der ersten Instabilität, auftreten.

Der Preis, den man hierfür bezahlen muß, ist der, daß im Vergleich zur RB-Instabilität mehr dimensionslose Parameter im System auftreten, nämlich vier anstelle von zwei, wenn man von dem geometrischen Faktor des Aspektverhältnisses absieht. Einer dieser beiden zusätzlichen Parameter, nämlich das Separationsverhältnis (der dimensionslos gemachte Soret-Koeffizient), beeinflusst ganz wesentlich, welche räumliche Struktur am Einsatz beobachtet wird.

Ein entscheidender Vorteil des Auftretens reichhaltigen Verhaltens in der Nähe des Einsatzes der ersten räumlichen Struktur ist der, daß man dort leichter als weit oberhalb der Schwelle mit theoretisch

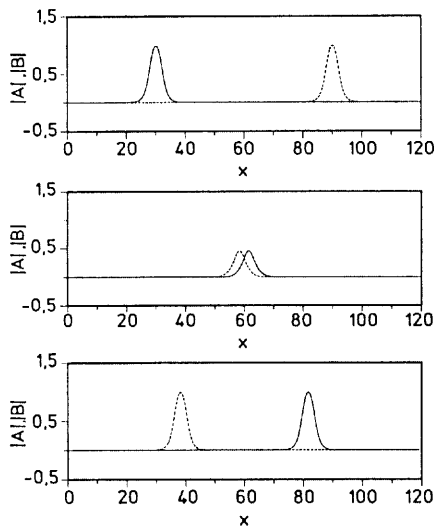


Abb. 2: Bei einem schwach hysteretischen Übergang vom Wärmeleitungs-zustand zu thermischer Konvektion via laufende Wellen gibt es in Schwellennähe stationäre lokalisierte Lösungen der mit diesem Übergang assoziierten Amplitudengleichung. Diese Abbildung zeigt die Wechselwirkung zweier solcher lokalisierten Lösungen für den Fall der totalen Durchdringung. Die Einhüllende der nach rechts laufenden Wellen (A) ist als durchgezogene Linie gezeichnet, die der nach links laufenden Welle (B) als gestrichelte Kurve. a) Die beiden lokalisierten Lösungen vor der Wechselwirkung, b) während der Wechselwirkung und c) nach der Wechselwirkung. Die lokalisierten Lösungen besitzen nach dem Stoß dieselbe Fläche und Höhe wie vor der Wechselwirkung. (Nach [4])

schen Betrachtungen vergleichen kann, da es in Schwellnähe eine geeignete Methode gibt, die Strukturbildung zu beschreiben. Benutzt werden für solche Situationen in getriebenen Systemen weit weg vom Gleichgewicht Amplitudengleichungen, die man als Analoga auffassen kann zu zeitabhängigen Ginzburg-Landau-Gleichungen, wie sie aus der Statistik der Gleichgewichtsphasenübergänge bekannt sind.

Ein besonders reizvolles Phänomen, welches bisher nur teilweise verstanden ist, wird in Abb. 1 gezeigt: man erkennt dort in der Aufsicht auf eine ringförmige konvektive Zelle zwei bzw. drei lokalisierte Bezirke von Konvektion, während der Rest der Zelle weiterhin im Wärmeleitungszustand (strukturloser, grauer Hintergrund) ist. Innerhalb dieser konvektierenden Bereiche treten laufende konvektive Rollen auf, wohingegen die beiden Begrenzungslinien eine zeitlich feste Position einnehmen. Dieser lokalisierte Zustand hat für diesen Wertebereich des Separationsverhältnisses eine feste Länge, die von einem Experiment zum nächsten ungeändert bleibt [3]. Wird der von außen angelegte Temperaturgradient erhöht, so füllt sich die ganze Zelle mit laufenden Wellen, während bei einer Erniedrigung des Gradienten der Wärmeleitungszustand wiederhergestellt wird.

Der ganze Vorgang spielt sich in unmittelbarer Nähe der Schwelle für Konvektion ab und zeigt Hysterese. Der Endzustand wird erreicht nach einer ca. zehnstündigen Periode, während der der Puls als Ganzes mit abnehmender Geschwindigkeit läuft. Der lokalisierte Zustand ist somit kein transienter Vorgang, sondern stellt ein stationäres Phänomen dar. Er ist somit qualitativ verschieden von der Tröpfchenbildung am Flüssig-Gas-Übergang, da dort ein Tröpfchen entweder anwächst, bis der ganze Behälter gefüllt ist, oder ganz verschwindet.

Lokalisierte Lösungen mit fester Länge lassen sich im Rahmen der oben erwähnten Amplitudengleichungen erhalten für einen hysteretischen Übergang zu laufenden Wellen. Die Existenz lokalisierter Lösungen legt die Frage nahe, wie derartige Objekte bei Stoßvorgängen reagieren, ob z. B. solitonähnliches Verhalten möglich ist. Eine Simulation der gekoppelten Amplitudengleichungen für links- und rechtslaufende Wellen [4] zeigt, daß in Abhängigkeit von Stärke und Vorzeichen der Kopplung von links- und rechtslaufenden Wellen drei qualitative Möglichkeiten auftreten: i) für eine hinreichend stark stabilisierende Kopplung ergibt sich eine totale Vernichtung

der lokalisierten Lösungen; ii) für weniger stark stabilisierende Kopplung ist eine totale Durchdringung möglich (vgl. Abb. 2); hierbei bleiben Höhe und Fläche der Pulse unverändert durch den Stoß; iii) für destabilisierende Kopplung füllt die Lösung den ganzen Behälter aus. Im Rahmen der Amplitudengleichungen bleibt allerdings unklar, warum die lokalisierten Lösungen im Experiment nach Abklingen der transienten Bewegung als Ganzes im Laborsystem in Ruhe sind. Neben diesen lokalisierten Lösungen fester Länge sind für andere Wertebereiche des Separationsverhältnisses auch stationäre lokalisierte Lösungen variierbarer Länge beobachtet worden [5], deren Existenz bis heute unverstanden ist.

Während bei der Ausbildung von räumlich-zeitlichen Strukturen in der Nähe des Einsatzes der ersten Instabilität sich deutlich abzeichnet, welchen Zugang man zur Beschreibung der beobachteten Phänomene verwenden sollte, wird der richtige Blickwinkel für die Interpretation der experimentellen Beobachtungen bei höheren Rayleigh-Zahlen – d. h. bei größeren Werten der äußeren Kraft – noch gesucht. Ein interessanter neuer Zugang in dieser Richtung wird derzeit am Beispiel der thermischen Konvektion in einer kubischen Zelle, die mit gasförmigem Helium gefüllt ist, in Chicago verfolgt [6]. Dort

geht es insbesondere um die quantitative Charakterisierung der in diesem Experiment beobachteten Phänomene, die mit dem Auftreten der Turbulenz verknüpft sind. Derzeit wird nun versucht, zur Charakterisierung der Vorgänge im turbulenten Regime Konzepte heranzuziehen, wie man sie in der Nähe des thermischen Gleichgewichts entwickelt hat. Dazu gehören im linearen Bereich kollektive Moden und Elementaranregungen, wie sie aus der Hydrodynamik vertraut sind (propagierende bzw. diffusive Moden) sowie im nichtlinearen Bereich lokalisierte Anregungen (Solitonen, Domänenwände und dergleichen).

Als Kandidaten für derartige Anregungen wurden identifiziert [6]: Wellen in den Grenzschichten in der Nähe der oberen und unteren Platte des Behälters sowie Spiralwirbel und thermische „Plumes“ (pilzförmige Strukturen, die von der Randschicht emittiert werden) im Volumen. In [6] werden diese Anregungen als kohärent bezeichnet, sobald sie eine Lebensdauer besitzen, die vergleichbar mit der Zeit für eine Durchquerung der experimentellen Zelle ist. Man hofft nun, die Phänomene durch quantitative Charakterisierung dieser „kohärenten“ Anregungen sowie durch Untersuchung ihrer Wechselwirkung statistisch behandeln zu können. Damit sollte es dann möglich

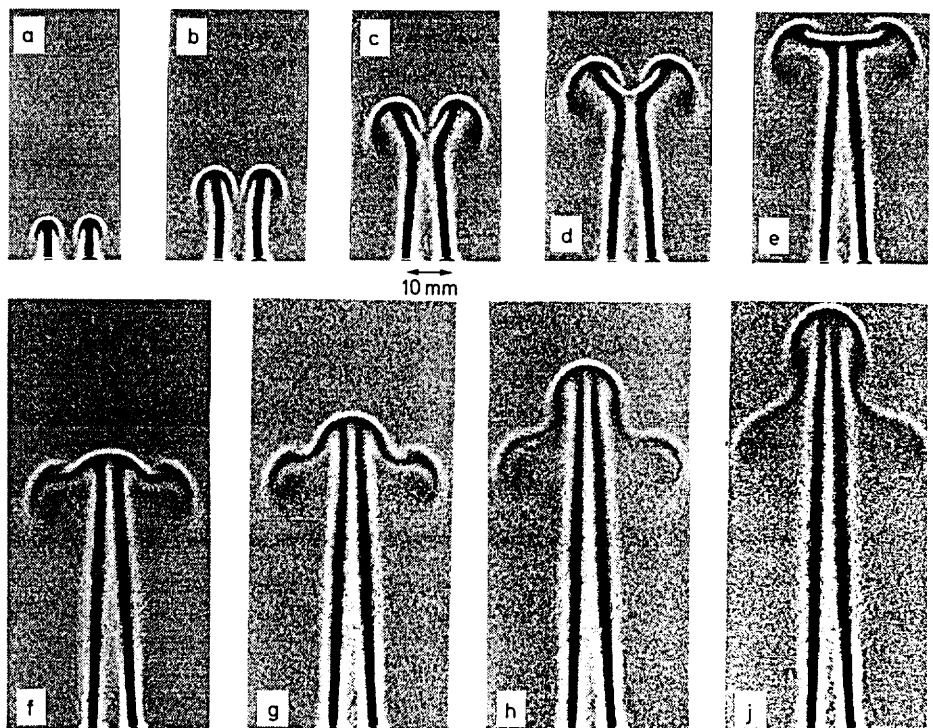


Abb. 3: Der zeitliche Verlauf der Wechselwirkung zweier laminarer thermischer „Plumes“: a) $t = 3,9$ s, b) 9,0 s, c) 15,8 s, d) 20,0 s, e) 24,3 s, f) 28,4 s, g) 30,9 s, h) 34,6 s, i) 38,5 s. In a) ist die Wechselwirkung noch schwach. In d) und e) vereinigen sich die Stämme der „Plumes“. In i) bleibt nur noch ein Hut in Wachstumsrichtung übrig, während die beiden alten zur Seite weggegangen sind. (Nach [7])

werden, die über viele Größenordnungen in der äußeren Kraft beobachteten Skalengesetze zu untermauern.

Als erster Schritt in dieser Richtung wurde die zeitliche Entwicklung (bzgl. Größe, Geschwindigkeit und Temperatur) einzelner thermischer „Plumes“ sowie ihre Wechselwirkung untersucht [6]. Ein Beispiel für den zeitlichen Verlauf der symmetrischen Wechselwirkung zweier laminarer „Plumes“ zeigt Abb. 3. Diese laminaren „Plumes“ werden durch Heizelemente am Boden eines mit dem zu untersuchenden Fluid gefüllten Glasbehälters erzeugt. Solange die Größe der „Plumes“ kleiner ist als ihr Abstand, zeigen sie nur eine geringe Wechselwirkung (Abb. 3a). Als Funktion der Zeit bewegen sich die Hüte der „Plumes“ auseinander, die Stämme nähern sich einander an (Abb. 3c) und verschmelzen (Abb. 3d, e). Die alten Hüte gehen zur Seite weg, und eine einzige neue Front entwickelt sich (Abb. 3i).

Das zeitliche Anwachsverhalten einer einzigen laminaren „Plume“ sowie die Anfangsstadien der Wechselwirkung zweier „Plumes“ lassen sich durch ein Modell beschreiben, welches die „Plumes“ als Quellen und Senken in einem homogenen Fluß betrachtet [7]. Inwieweit dieses Modell auch auf die thermischen „Plumes“ anwendbar ist, die man im turbulenten Bereich beobachtet [6], wird sich wohl in naher Zukunft zeigen.

Ein Schritt weg von den einfachen, wohlkontrollierbaren Systemen in einfachen Fluiden und in Mischungen in Schwellnähe und hin zur Untersuchung von Vorgängen mit höherer Komplexität zeichnet sich derzeit auf dem Gebiet der autokatalytischen chemischen Reaktionen ab (als

klassisches Beispiel sei an die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion erinnert). Die als Phänomene endlicher Dauer auftretenden Vorgänge, wie sich konzentrisch ausbreitende Wellen und Spiralwellen [8], zeigen in dünnen Schichten eine Ankopplung an konvektive Vorgänge [9]. Betrachtet man Schichten, die gegenüber der Luft offen sind, so beobachtet man eine Kopplung zwischen chemischer Reaktion und der durch Oberflächenspannung induzierten Marangoni-Instabilität. In Abb. 4 zeigen wir einen derartigen Vorgang. Durch Öffnen des Behälters wird ein Übergang von einer wohlgeordneten laminaren Struktur zu einer räumlich ungeordneten Struktur induziert.

Aber selbst wenn man Schichten zwischen festen Platten anschaut, stellt sich eine Kopplung der autokatalytischen chemischen Reaktion an konvektive Vorgänge in wäßriger Lösung als wesentlich heraus. Diese Kopplung entsteht dadurch, daß während dieser propagierenden Reaktion laterale Konzentrationsgradienten auftreten, die ihrerseits Konvektionsrollen anfangen. Diese wiederum wirken auf die chemische Reaktion zurück, wodurch ein Rückkopplungskreis entsteht.

Das Studium solcher Wechselwirkungen erscheint insbesondere dann wichtig, wenn man einen Schritt weg von der Strukturbildung in rein hydrodynamischen Systemen und hin zur Strukturbildung in autokatalytisch chemischen und letztendlich auf der nächsten Stufe biologischen Systemen unternehmen will. Unter anderem stellen sich Fragen wie die nach den Ursachen der ausgewählten Wellenlänge der auftretenden Struktur, nach der Symmetrie des ausgewählten Musters sowie danach, ob ein reguläres oder ein räumlich ungeordnetes Muster

ausgewählt wird; und dann auch die Frage, inwieweit diese Selektionskriterien von der Kopplung an die Konvektion einerseits sowie von der Variation der Parameter in der chemischen Reaktion andererseits beeinflußt werden. In methodischer Hinsicht besteht hier die Herausforderung insbesondere darin, für transiente Phänomene Selektionsmechanismen aufzufinden und gegeneinander abzugrenzen.

Komplexe Fluide

Wie manchmal auch beim Studium klassischer Instabilitäten noch Überraschungen auftreten können, sei am Beispiel der Rayleigh-Taylor-Instabilität mit magnetischen Fluiden besprochen. Klassischerweise wird bei der Rayleigh-Taylor-Instabilität eine Schicht einer Flüssigkeit mit höherer Dichte auf eine solche mit einer geringeren Dichte aufgebracht und dann die Dynamik des Prozesses verfolgt, an dessen Ende sich die Flüssigkeit höherer Dichte unter der mit der geringeren Dichte befindet. Man untersucht also intrinsisch transiente Vorgänge. Die Rayleigh-Taylor-Instabilität spielt insbesondere auch im Hinblick auf Anwendungen in der Geophysik eine wichtige Rolle. So wird sie unter anderem für die Entstehung von Salzstöcken verantwortlich gemacht [10].

Warum ist es nun interessant, eines der beiden Fluide, nämlich das obere, durch ein magnetisches Fluid, eine nicht-Newtonsche Flüssigkeit zu ersetzen? Dazu sei zunächst daran erinnert, daß es sich bei magnetischen Fluiden um Suspensionen von magnetischen Eindomänenteilchen handelt. Diese magnetischen Fluide lassen sich dann durch äußere Magnetfelder leicht in ihrem Verhalten beeinflussen [11].

Studiert man die Rayleigh-Taylor-Instabilität unter Verwendung eines magnetischen Fluides [12] als dichtere Komponente zunächst ohne äußeres Magnetfeld, so beobachtet man das klassische Verhalten: zunächst eine sinusoidale Modulation der Flüssigkeitsschicht, dann für spätere Zeiten eine Aufsteilung aufgrund nichtlinearer Effekte und schließlich das Abschnüren von Flüssigkeitströpfchen der schwereren Komponente in der leichteren.

Was sich bei nun Verwendung von magnetischen Fluiden drastisch beeinflussen läßt, ist sowohl die aus linearen Überlegungen folgende charakteristische Wellenlänge der beobachteten transienten Struktur als auch die Zeitskala der ablaufenden Prozesse. Zu den klassisch vor-

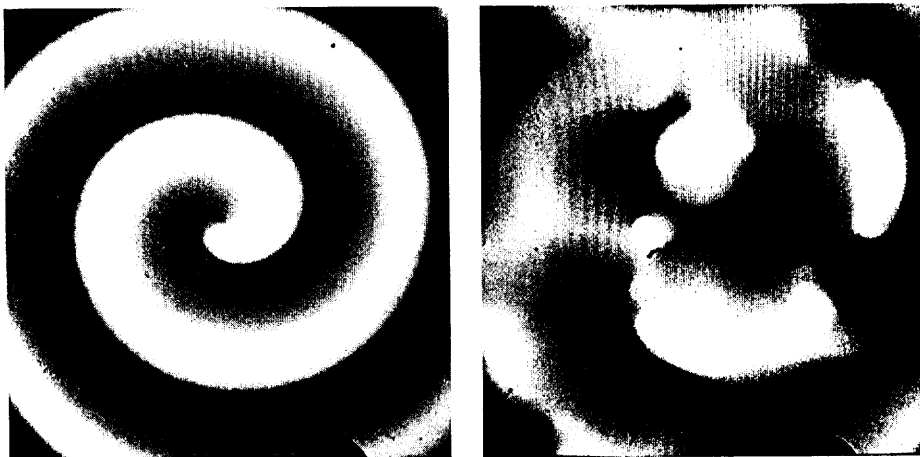


Abb. 4: Das linke Bild zeigt in Draufsicht eine Spirale, wie sie bei autokatalytischen Reaktionen vom Belousov-Zhabotinsky-Typus auftritt. Das rechte Bild zeigt die Veränderung der Struktur unter dem Einfluß von Marangoni-Konvektion infolge von Verdunstung an der Oberfläche. (Bild von S. C. Müller, MPI für Ernährungsphysiologie, Dortmund)

handenen Kräften, nämlich der Gravitationskraft (infolge des Dichtegradienten) und der Oberflächenspannung, tritt nun in magnetischen Fluiden die Möglichkeit hinzu, als weitere Kraft die von einem äußeren Magnetfeld herrührende ins Spiel zu bringen. Für ein Magnetfeld senkrecht zur Schicht ergibt sich dann mit Hilfe der Kräftebilanz, daß die charakteristische Wellenzahl für die anfänglichen Transienten quadratisch mit der Stärke des Magnetfelds zunimmt und die entsprechende Zeitskala für den Ablauf der Strukturbildung proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge bzw. umgekehrt proportional zur achten Potenz der Stärke des äußeren Magnetfelds ist [12]. Dies wird in Abb. 5 für den Fall gezeigt, daß eine dünne Schicht (ca. $75 \mu\text{m}$) eines Ferrofluids auf eine dicke Glycerinschicht aufgebracht wird. Schon durch moderate Felder von der Größenordnung 100 G nimmt die Zahl der Peaks um mehr als zwei Größenordnungen zu, d. h. durch geeignete Wahl des Fluids und ein zusätzliches äußeres Feld können sowohl die Längen- als auch die Zeitskalen der Strukturbildung bei der Rayleigh-Taylor-Instabilität drastisch geändert werden.

Ist man bereit, den Eindomänencharakter der suspendierten Teilchen aufzugeben, und betrachtet Teilchen im Mikrometerbereich (z. B. Polystyrolpartikel mit Fe_2O_3 -Teilchen an der Oberfläche), so ergeben sich weitere interessante Eigenschaften dieser magnetorheologische Fluide genannten Suspensionen [13, 14]. Diese können durch Anlegen eines moderaten Magnetfelds (von der Größenordnung 1 kG) mit einer Reaktionszeit von ungefähr 10^{-2} s – ähnlich wie die im nächsten Abschnitt zu besprechenden elektrorheologischen (ER-) Fluide – einen Phasenübergang flüssig-fest zeigen und bieten daher ähnliches Potential für Anwendungen wie die ER-Fluide.

Bei den ER-Fluiden handelt es sich um Suspensionen polarisierbarer Teilchen mit einem mittleren Durchmesser von ca. $1 \mu\text{m}$ in einem dielektrischen Medium [15, 16]. Der Haupteffekt, den diese ER-Fluide zeigen, ist der folgende: Legt man ein äußeres elektrisches Feld von der Größenordnung 1 kV/mm an eine Probe einer solchen Suspension an, so wird diese fest, d. h. sie besitzt im Feld eine endliche Fließ-(Plastizitäts-)grenze. Der hierbei auftretende Prozeß ist reversibel; durch Variation der Stärke des äußeren elektrischen Feldes kann der Fluiditätsgrad der Suspension gezielt verändert werden.

Zum mikroskopischen Mechanismus dieses feldinduzierten Festwerdens gibt es

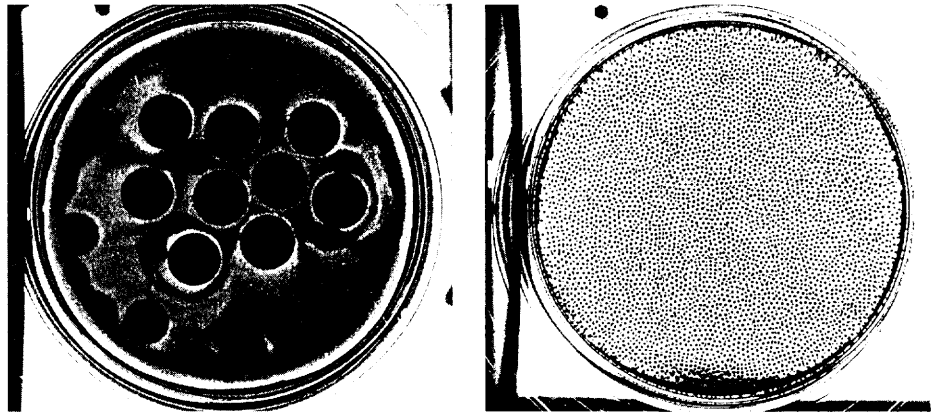


Abb. 5: Der Einfluß eines senkrecht zur Schichtebene angelegten äußeren Magnetfeldes auf die Rayleigh-Taylor-Instabilität mit einer dünnen Schicht ($d = 75 \mu\text{m}$) eines magnetischen Fluids als Komponente mit höherer Dichte. Die Rayleigh-Taylor-Instabilität tritt auf, wenn eine Schicht eines Fluids höherer Dichte auf eine solche eines Fluids geringerer Dichte aufgebracht wird. Infolge der durch die Dichtedifferenz bedingten Gravitationskraft wird eine Instabilität mit charakteristischer Wellenlänge und Zeitskala angefaßt. Gezeigt ist in Draufsicht die Struktur ohne äußeres Magnetfeld H nach 35 Stunden (links) und für $H = 100 \text{ G}$ nach zwei Minuten (rechts). Man erkennt deutlich den drastischen Einfluß des äußeren Magnetfelds auf die charakteristischen Längen- und Zeitskalen. (Nach [12])

verschiedene Modellvorstellungen, bei denen entweder induzierte Dipolkräfte oder die Eigenschaften von Wasserbrücken eine wichtige Rolle spielen [15, 16]. Was auf einer Längenskala von ca. $100 \mu\text{m}$ bei Anlegen eines elektrischen Feldes passiert, läßt sich auf Abb. 6 erkennen: Die suspendierten Teilchen bilden Ketten, die vorzugsweise in Richtung des äußeren Feldes orientiert sind (S. 63 ff. in [16]). Im Feld wird das vorher isotrope Material also stark anisotrop. Ganz ähnliche Vorgänge spielen sich wahrscheinlich bei den magnetorheologischen Fluiden in einem äußeren Magnetfeld ab. Was mikroskopisch unter dem Einfluß dynamischer äußerer Scherkräfte in den ER-Fluiden passiert, ist bis heute ziemlich unklar. Naturgemäß können die Teilchen dann nicht Ketten zwischen den beiden Elektroden bilden. Möglich erscheint z. B. eine feldinduzierte Clusterbildung [15] oder auch das Auftreten ei-

ner ungeordneten Zone ohne Kettenbildung (S. 231 ff. in [16]).

ER-Fluide sind für Anwendungen von Interesse, da sich mit ihnen hydraulische Ventile, Stoßdämpfer, Kupplungen sowie Kontrollsysteme zur Steuerung von Robotern und dergleichen konstruieren lassen. Diese Anwendungen werden dadurch ermöglicht, daß der Prozeß der Verfestigung sich auf eine Zeitskala von ca. 10^{-3} s bis 10^{-2} s abspielt. Vom grundsätzlichen Standpunkt aus betrachtet sind die ER-Fluide ein weiteres Beispiel aus der Klasse der nicht-Newtonschen Fluide, die außergewöhnliches Fließverhalten besitzen, hier als Funktion des elektrischen Feldes bzw. bei den magnetorheologischen Fluiden als Funktion des Magnetfeldes.

Eine weitere wichtige Klasse von komplexen Fluiden, die sowohl für die Anwendungen Potential haben als auch von

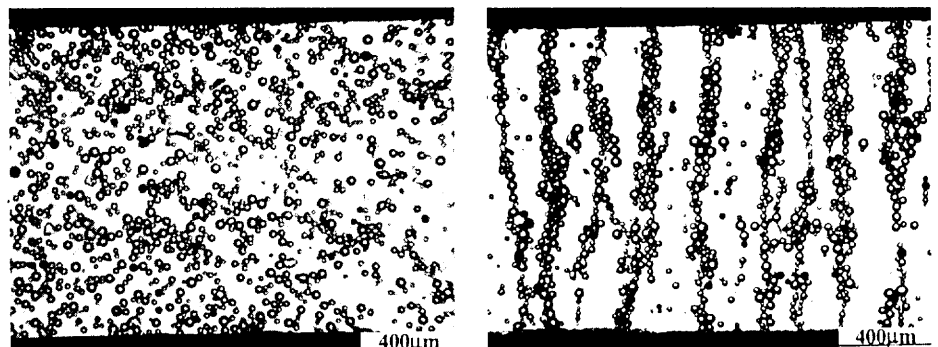


Abb. 6: Der Einfluß eines elektrischen Feldes auf die mikroskopische Struktur eines elektrorheologischen Fluids. Das verwendete Fluid besteht aus Glasperlen mit einem Durchmesser von $27 \mu\text{m}$ in Silikonöl. Im Bild links die ungeordnete Struktur ohne äußeres elektrisches Feld E , rechts mit einem Feld $E = 1,5 \text{ kV/mm}$ (in der Abbildung in vertikaler Richtung). Der Anteil der Glasperlen beträgt $40 \text{ Vol.}\%$. Man sieht deutlich, wie sich die Glasperlen in Fasern bzw. Ketten vorzugsweise in Richtung des äußeren Feldes ausrichten. (Nach H. Conrad, M. Fisher und A. F. Spencer, S. 63–81 in [16])

grundsätzlichem Interesse sind, bilden die flüssigkristallinen Elastomere. Diese neuartigen Materialien, die vor ca. zehn Jahren synthetisiert wurden [17], sind eine Kombination von Flüssigkristallen und Elastomeren, wobei man in klassischen Elastomeren (wie z. B. Gummis) die Makromoleküle der Polymere permanent vernetzt.

Bei Flüssigkristallen handelt es sich um Substanzen, die in ihren Eigenschaften zwischen isotropen Fluiden (kurzreichweitige Positions- und Orientierungsordnung) und klassischen Kristallen (langreichweitige Positionsordnung) stehen, und die teilweise bzgl. ihrer Orientierungen bzw. ihrer Positionen langreichweitige Ordnung aufweisen. Um flüssigkristalline Elastomere herzustellen, werden flüssigkristallbildende Gruppen mit Hilfe eines Spacers mit dem Polymerrückgrat verknüpft. Unter einem Spacer versteht man in diesem Zusammenhang eine Gruppe (z. B. vom Alkyltyp), die je nach Länge einen bestimmten Abstand zwischen dem Polymerrückgrat und den flüssigkristallinen Bausteinen herstellt. Je nach Wahl der kontinuierlich variierbaren Vernetzungsdichte ergeben sich bei schwacher Vernetzung gelartige Substanzen und bei starker Vernetzung Hartgummis.

Durch die beschriebene Kombination erhält man Materialien mit Eigenschaften, wie sie weder von gewöhnlichen Gummis noch von den üblichen niedermolekularen Flüssigkristallen vertraut sind [18]. Insbesondere ist es möglich, durch einfache mechanische Verformungen wie Zug oder Scherung elektrische und optische Eigenschaften zu beeinflussen und umgekehrt.

Als Beispiele seien erwähnt eine statische Formänderung von schwachvernetzten Proben im elektrischen Feld sowie das Auftreten von elektromechanischen Eigenschaften wie Piezoelektrizität und Flexoelektrizität (bei letzterer handelt es sich um das Auftreten von elektrischen Feldern als Funktion einer räumlichen Variation der mittleren Vorzugsrichtung der flüssigkristallbildenden Moleküle). Daneben sind auch die spannungsoptischen Eigenschaften, wie sie in Abb. 7 gezeigt werden, bemerkenswert: Durch Anlegen einer mechanischen Spannung werden Proben relativ hoher Dicke (von der Größenordnung 1 cm), die vorher undurchsichtig waren, durchsichtig. Dies läßt sich qualitativ dadurch verstehen, daß im nematischen Elastomer ohne äußere mechanische Deformation die mittlere Vorzugsrichtung der flüssigkristallbildenden Seitenketten eine Polydomänenstruktur aufweist, in der Licht durch die thermischen Fluktuationen der räumlich variierenden

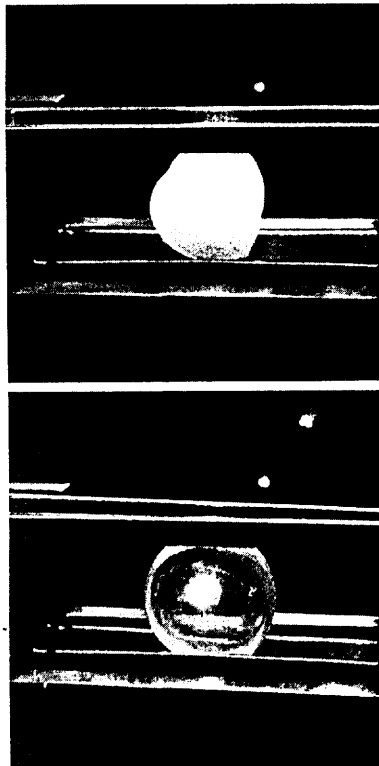


Abb. 7: Der Einfluß eines statischen, uniaxialen Drucks auf die optischen Eigenschaften eines flüssigkristallinen Elastomers. Oben eine unbelastete Probe von 9 mm Dicke und 12 mm Durchmesser. Das flüssigkristalline Elastomer ist trübe, da viele Domänen unterschiedlicher Orientierung der flüssigkristallinen Ordnung vorhanden sind. Unten der Einfluß eines uniaxialen Drucks: Die Domänen werden ausgerichtet, und das flüssigkristalline Elastomer wird durchsichtig, wenn man es parallel zur optischen Achse betrachtet. (Nach [19])

mittleren Orientierung der Moleküle stark gestreut wird [1]. Deren Bezirke werden dann durch Anlegen eines Zugs oder Drucks ausgerichtet [18] und führen so zur Ausbildung einer Monodomäne, in der die mittlere Orientierung der Moleküle einheitlich ist [1]. Mit flüssigkristallinen Elastomeren lassen sich Fasern und Folien herstellen, welche eine hohe optische Durchlässigkeit besitzen. Daneben zeigen sie stark nichtlineare optische Eigenschaften. Diese wie auch die bereits erwähnten elektromechanischen Eigenschaften eröffnen ein Potential für eine Reihe von Anwendungen. Ferner sind dünne Filme dieser anisotropen Materialien als Trennmembrane verwendbar [18].

Vom grundsätzlichen Aspekt aus sei hervorgehoben, daß flüssigkristalline Elastomere die Möglichkeit bieten, die Eigenschaften der elastomeren bzw. polymeren Freiheitsgrade besser zu verstehen, da man leicht an die flüssigkristallbildenden Seitenketten mit elektrischen und magnetischen Feldern ankoppeln kann. Aufgrund der Tatsache, daß man die Wechselwirkung zwischen Seiten- und Haupt-

ketten durch Variation des Spacers nahezu beliebig abändern kann, sollten sich dann auch neue Einsichten über das Verhalten des Netzwerks gewinnen lassen. Es sei noch erwähnt, daß die Untersuchung der dynamischen Eigenschaften von flüssigkristallinen Elastomeren gerade erst einsetzt und sicher noch manches unerwartete Ergebnis zutage fördern dürfte.

Ausblick

Derzeit zeichnen sich bei der physikalischen Untersuchung der makroskopischen Eigenschaften von einfachen und komplexen Fluiden mehrere Hauptstoßrichtungen ab.

Bei den hydrodynamischen Instabilitäten in einfachen Fluiden geht es darum, das Verhalten weit oberhalb der Schwelle quantitativ zu beschreiben. Als vielversprechender Zugang hierfür zeichnet sich für die räumlich geordneten Strukturen insbesondere die Phasendynamik ab, das Analogon der Hydrodynamik aus der Physik der kondensierten Materie für strukturbildende Nichtgleichgewichtssysteme [20]. Wie bei der Ableitung von dynamischen Gleichungen für die hydrodynamischen Variablen (Erhaltungsgrößen und Variable, die mit spontan gebrochenen kontinuierlichen Symmetrien verknüpft sind) im Bereich der Hydrodynamik kondensierter Systeme, so untersucht man in der Phasendynamik das niederfrequente, langwellige Antwortverhalten eines vorgegebenen Grundzustands. Im Rahmen der klassischen Hydrodynamik ist hier z. B. an die normal- und superfluide Phase des ^4He zu denken, für die Phasendynamik z. B. an Rollenstrukturen oder hexagonale Patterns. Die Rolle der Atome und der Moleküle in der Hydrodynamik wird hier von den Einheitszellen (z. B. Wirbel, Hexagone usw.) übernommen. Da man an einer Kontinuumsbeschreibung interessiert ist, erfordert die Anwendbarkeit dieses Zugangs hinreichend viele Einheitszellen und somit große Behälter. Ganz ähnlich wie in der Hydrodynamik findet man im linearisierten Bereich diffusive und propagative Anregungen. Mit diesem Zugang ist es selbst weit oberhalb des Einsatzes der ersten Instabilität möglich, Fragen der Wellenlängen- und Musterselektion quantitativ zu studieren.

Beim Übergang zu räumlich und zeitlich ungeordneten Systemen steht die Frage im Mittelpunkt, inwieweit die Existenz und Charakterisierung langlebiger Anregungen wie „Plumes“ und dergleichen zum Verständnis von turbulenten Vorgängen beitragen kann. Daneben gibt es in-

zwischen erste Schritte im Hinblick auf die für die Ingenieurwissenschaften relevanten Systeme mit Durchfluß, wie Scherströmung und Strömung durch ein Rohr; als Prototypen für physikalische Untersuchungen bieten sich hierfür die bereits ohne mittlere Strömung sorgfältig charakterisierten Systeme wie die Bénard- und die Taylor-Instabilität an. Hier laufen derzeit die ersten experimentellen und modellhaften Studien zu den entsprechenden Systemen mit mittlerer Strömung an.

Bei der Untersuchung komplexer Fluide scheint es vor allem wichtig, ein besseres Verständnis für die mikroskopischen Vorgänge zu gewinnen, die ablaufen, wenn ein äußeres elektrisches bzw. magnetisches Feld an ein elektro- bzw. magnetorheologisches Fluid angelegt werden. Bzgl. der Untersuchung flüssigkristalliner Polymere und Elastomere haben physikalische Messungen, insbesondere die der dynamischen Eigenschaften, gerade erst begonnen. Hier wird sich bei der Modellbildung zwangsläufig die Frage stellen, welche Variablen außer den hydrodynamischen, die ja im Grenzfall beliebig großer Wellenlänge der Anregung beliebig langsam abklingen, noch in die Beschreibung einzubeziehen sind. In Betracht kommen die sogenannten makroskopischen Variablen, die langsam relaxieren. Ein klassisches Beispiel hierfür sind im Bereich der Polymerschmelzen die mit dem transienten Netzwerk verknüpften Dehnungen. Die Frage ist hierbei, inwieweit noch eine Trennung der Zeitskalen im Vergleich zu den mikroskopischen Variablen möglich ist. Daher sind noch viele Überraschungen zu erwarten. Eine der wesentlichen Herausforderungen auf diesem Gebiet besteht darin, einfache Fragen so zu stellen, daß man diesen komplexen Systemen noch erlaubt, in einfacher und interpretierbarer Weise zu antworten.

Ein Gebiet, das bzgl. physikalischer Untersuchungen erst am Anfang steht, aber sicher schnell an Bedeutung gewinnen

wird, ist das Studium von Instabilitäten und Strukturbildung in komplexen Fluiden. Hierbei ergeben sich aufgrund der größeren Zahl der auftretenden Parameter mehr Möglichkeiten, das Verhalten des Systems zu beeinflussen. Dies kann einerseits dazu verwandt werden, neue Eigenschaften des komplexen Fluids selbst kennenzulernen. Andererseits kann das Studium der Nichtgleichgewichtseigenschaften in derartigen komplexen Systemen auch dazu dienen, eine Brücke zu schlagen zur Analyse von Systemen, wie sie bisher nur in Chemie und Biologie untersucht worden sind.

*

Ich bedanke mich bei G. Ahlers, H. Conrad, H. Finkelmann, A. Libchaber, E. Moses, W. Meier, S. C. Müller und J. E. Wesfreid für die Überlassung von Bildern sowie bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung meiner Projekte.

Literatur

- [1] P. G. de Gennes: The Physics of Liquid Crystals. Clarendon Press, 3. Aufl., Oxford 1982.
- [2] G. Ahlers in D. Stein (Hrsg.): Lectures on the Sciences of Complexity. Bd. 1, S. 175. Addison-Wesley Longman 1989.
- [3] J. J. Niemela, G. Ahlers u. D. S. Cannell, Phys. Rev. Lett. **64** (1990) 1365.
- [4] H. R. Brand u. R. J. Deissler, Phys. Rev. Lett. **63** (1989) 2801; R. J. Deissler u. H. R. Brand, Phys. Lett. **A 146** (1990) 252.
- [5] P. Kolodner, D. Bensimon u. C. M. Surko, Phys. Rev. Lett. **60** (1988) 1723.
- [6] G. Zocchi, E. Moses u. A. Libchaber, Physica **A 166** (1989) 387.
- [7] E. Moses, G. Zocchi u. A. Libchaber, Bull. Am. Phys. Soc. **35** (1990) 2236, 2273; Europhys. Lett. **14** (1991) 55.

- [8] S. C. Mueller, Th. Plesser u. B. Hess, Physica **D – Nonlinear Phenomena 24** (1987) 71.
- [9] S. C. Mueller in M. Markus, S. C. Mueller u. G. Nicolis (Hrsg.): From Chemical to Biological Organization, S. 83. Springer, Heidelberg 1988.
- [10] J. A. Whitehead, Ann. Rev. Fl. Mech. **20** (1988) 61.
- [11] R. E. Rosensweig: Ferrohydrodynamics. Cambridge University Press, Cambridge 1985; K. Stierstadt, Phys. Bl. **46** (1990) 377.
- [12] J. E. Wesfreid u. T. Valet in D. G. Craighton u. F. Mainardi (Hrsg.): Dispersive Waves in Dissipative Fluids (im Druck).
- [13] G. Bossis, C. Mathis, Z. Mimouni u. C. Paparoditis, Europhys. Lett. **11** (1990) 133.
- [14] V. I. Kordonsky, Z. P. Shulman, S. R. Gorodkin, S. A. Demchuk, I. V. Prokhorov, E. A. Zaltsgendler u. B. M. Khusid, J. Magn. Magn. Mat. **85** (1990) 114.
- [15] H. Block u. J. P. Kelly, J. Phys. D: Appl. Phys. **21** (1988) 1661.
- [16] J. D. Carlson, A. F. Sprecher u. H. Conrad (Hrsg.): Proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluids. Technomic Publ. Co, Lancaster u. Basel 1990.
- [17] H. Finkelmann, H. J. Kock u. G. Rehage, Makromol. Chem. Rap. Commun. **2** (1981) 317.
- [18] H. Finkelmann, Angew. Chem. **99** (1987) 840.
- [19] W. Meier u. H. Finkelmann, Mat. Res. Soc. Bull. **XVI**, Heft 1 (1991) 29.
- [20] H. R. Brand in J. E. Wesfreid et al. (Hrsg.): Propagation in Systems Far From Equilibrium, S. 206 f. Springer, Berlin 1988; und in D. Walgraef u. N. M. Ghoniem (Hrsg.): Patterns, Defects and Instabilities, S. 25 f. Kluwer, Amsterdam 1990.

Bitte beachten Sie die Deadline **1. Dezember 1991** für Vortragsanmeldungen zu den Frühjahrstagungen 1992 (außer Agrophysik sowie Physik der Hadronen und Kerne: **31. Oktober 1991**). Diese Deadline gilt auch für Bewerbungen um Reisemittel bei aktiver Tagungsteilnahme nach dem WE-Heraeus-Förderprogramm der DPG (Näheres siehe Heft 9/1991).