

3. Experimentaufbau

3.1 Die Küvette

Der Aufbau einer offenen Küvette mit rechteckiger Geometrie ist bereits in [Metzger86, Metzger94] beschrieben worden. Bei dieser Küvette sind zwei Seiten als Thermoden ausgelegt, die anderen beiden dienen als Beobachtungsfenster. Wird eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Thermoden angelegt und die Küvette mit einer Flüssigkeit gefüllt, so daß sich an der oberen Öffnung der Küvette eine freie Oberfläche bildet, kann der Aufbau als Modell für eine Halbzone beim Kristallziehen im offenen Boot oder als Modell für das Kristallziehen in Czochralski-Tiegel dienen.

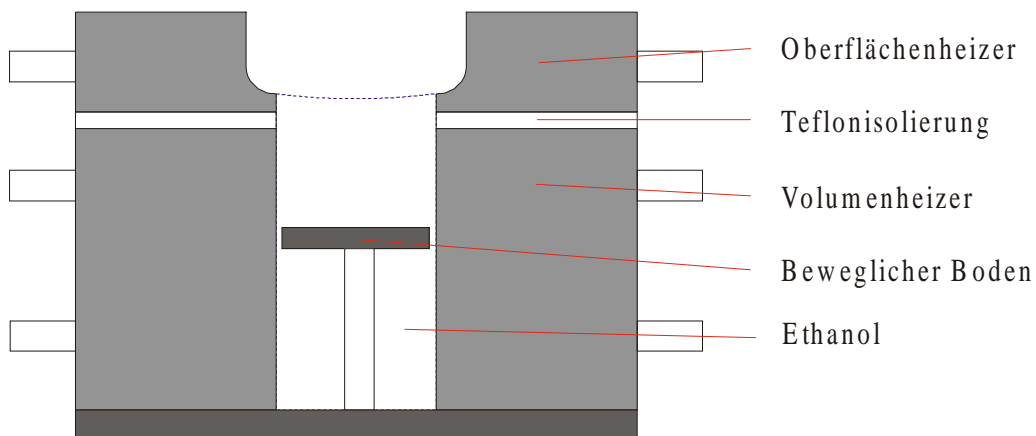



Abb. 3.1 Skizze der Küvette mit rechteckiger Geometrie.

 Photographie auf CD.

Die Thermoden der Küvette bestehen aus zwei getrennten Teilen: Die Oberflächenheizer und die Volumenheizer. Die Oberflächenheizer sind einen Millimeter stark und bestimmen vorwiegend die Temperaturverteilung an der Oberfläche der Experimentierflüssigkeit. Sie sind durch eine ebenfalls einen Millimeter starke Teflonplatte von den Volumenheizern thermisch isoliert. Die Volumenheizer decken den Rest der Thermoden ab und bestimmen vorwiegend die Temperaturverteilung im Volumen der Experimentierflüssigkeit. Sowohl die Oberflächen- als auch die Volumenheizer sind aus Kupfer mit innenliegender Heizspirale gefertigt und werden mit Wasserthermostaten auf konstanter Temperatur gehalten. In Oberflächen- und Volumenheizer sind in einer Bohrung Thermowiderstände (PT100) so eingebaut, daß sie sich

nahe an der Experimentierflüssigkeit befindet und die Temperatur der eigentlichen Thermode messen. Die Breite der Thermoden beträgt 40 mm.

Abmessungen der Küvette	
Küvettenlänge (= Spaltbreite) L	20 mm (16 mm; 12 mm)
Küvettenbreite B	41 mm (35 mm)
Schichtdicke d	20 mm
Seitenverhältnis $A = L/d$	1 (0,8; 0,6)

Abb. 3.2 Abmessungen der verwendeten Küvette.

Die beiden Seitenteile sind aus 2 mm starkem Quarzglas gefertigt und erlauben so optische Beobachtungen senkrecht zur Hauptstromrichtung. Sie sind so eingebaut, daß sich eine Spaltbreite (=Küvettenlänge) der Küvette von $L=20$ mm ergibt. Im Gegensatz zum Original von METZGER sind sie mit *Gomastit* eingeklebt. Dies erlaubt gegenüber der Silikondichtung eine bessere Passung an den Stoßkanten und bietet durch das Fehlen eines Befestigungsrahmen ein besseres Blickfeld.

Der Boden der Küvette ist beweglich eingebaut und kann auf Schichtdicken der Experimentierflüssigkeit von 0 mm bis 40 mm eingestellt werden. Sofern nicht besonders erwähnt, war der Boden auf eine Schichtdicke von $d=20$ mm eingestellt, so daß sich ein Seitenverhältnis von $A = 1$ ergibt.

Als Experimentierflüssigkeit wurde Ethanol (C_2H_5OH) eingesetzt. Die niedrige Oberflächenspannung führt zu guter Löslichkeit vieler oberflächenaktiver Stoffe. Aufgrund der niedrigen Oberflächenspannung reichern sich Verunreinigungen nicht an der Oberfläche an. Ethanol ist stark hygroskopisch und wird dadurch schnell durch Wasser verunreinigt.

Stoffdaten Ethanol		0 °C	20 °C	30 °C	40 °C
Dichte ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	806	789,4	781,0	772,4
$\frac{d\rho}{dT}$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3\text{K}}$	0,83	0,84	0,86	
Oberflächenspannung σ	$\frac{\text{N}}{\text{m}}$	0,0245	0,02275	0,0219	0,0210
$\frac{d\sigma}{dT}$	$\frac{\text{N}}{\text{mK}}$		0,0009	0,0009	0,0009
spez. Wärme c_p	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	2,2	2,414	2,5	2,6
Wärmeleitfähigkeit λ	$\frac{\text{J}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}}$	0,172	0,166	0,162	0,159
therm. Diffusivität α	$10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	9,7	8,7	8,3	7,9
dyn. Viskosität η	$10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$	1,773	1,20	1,003	0,834
kin. Viskosität ν	$10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	2,2	1,52	1,28	1,08
Prandtlzahl Pr		23	17	15	14

Abb. 3.3 Stoffdaten von Ethanol [Metzger86]

Als Benetzungssperre wurde Teflon auf die Oberseite von Thermoden und Quarzfenster aufgetragen. Dabei wurden die Kanten zwischen den nicht zu benetzenden Oberseiten und den zu benetzenden Seiten so geschliffen, daß eine scharfe Kante entsteht, wobei die eine Seite unbehandelt, die andere mit Benetzungssperre versehen ist. Da so die unbehandelten Seiten vollständig, die mit Teflon beschichteten Oberseiten jedoch nicht vom Ethanol benetzt werden,

wird die Flüssigkeitsoberfläche an diesen Kanten *gepinnt*, d.h. es befindet sich exakt bis zu der entsprechenden Kante Ethanol.

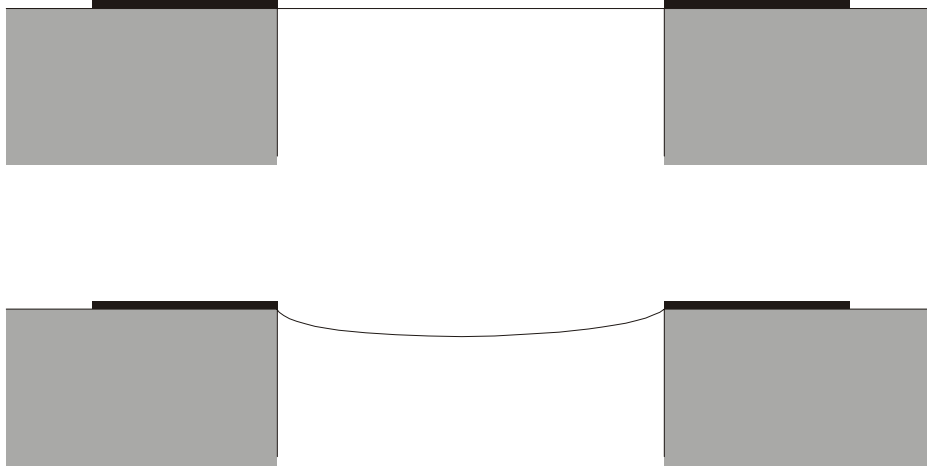


Abb. 3.4 Festlegung ("pinning") der freien Oberfläche an der Kontaktlinie der Thermode bei exakter Füllung und bei Unterfüllung der Küvette. Schwarz eingezeichnet ist die auf der Oberseite der Thermoden angebrachte Benetzungssperre.

Dies gilt ebenfalls dann, wenn die Küvette nicht exakt mit Ethanol befüllt ist, sondern leicht unterfüllt ist. Bei Unterfüllung bildet sich an den Seitenwänden und an den Thermoden ein Meniskus, der bis zur Kante reicht. Durch das *pinning* der Flüssigkeitsoberfläche ist die Form dieses Meniskus nur von den Stoffdaten und der Unterfüllung abhängig und kann reproduziert werden. Es kann also ein definierter Benetzungswinkel zwischen freier Oberfläche und der Grenze der Thermode eingestellt und reproduziert werden.

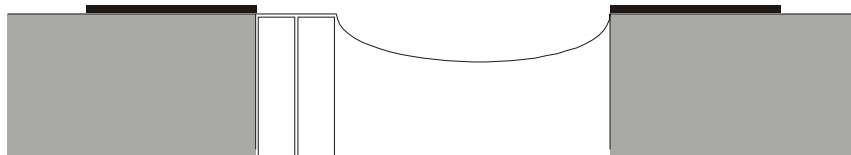


Abb. 3.5 Reduktion der Spaltbreite durch Einsetzen von Kupferplatten.

Um die Länge und Breite der Küvette zu verändern kann der Innenraum der Küvette durch Kupfer- bzw. Acrylglas- und Teflonplatten eingeschränkt werden. Dabei werden Kupferplatten

mit einer Stärke von 4 mm an der heißen Thermode eingesetzt um die Spaltbreite von 20 mm auf 16 mm und 12 mm zu reduzieren. Die Kupferplatten sind nicht teflonbeschichtet und werden überflutet. Die Flüssigkeitsform ist dann an der heißen Thermode nicht klar definiert. Die Form der Flüssigkeitsoberfläche an der heißen Seite ist jedoch für die meisten Messungen in dieser Arbeit nicht von Bedeutung.

Die Acrylglas- und Teflonplatten werden eingesetzt um die Breite der Küvette zu verringern. Dabei wird Acrylglas auf der Seite verwendet, durch die optische Untersuchungen durchgeführt werden sollen. Es sind Küvettenbreiten von $B=41$ mm bis $B=29$ mm in Schritten von 3 mm möglich.

Die Verdunstungsraten für Ethanol bei der eingesetzten Küvette schwanken in Abhängigkeit der angelegten Temperaturdifferenz und mittleren Temperatur zwischen ca. 1 ml/h bis über 6 ml/h. Um die sehr langen Meßzeiten von typischerweise einer Stunde, die in dieser Arbeit für Thermoelementmessungen benötigt wurden, zu erreichen, ist es notwendig, kontinuierlich verdunstetes Ethanol zu ersetzen. Dazu wird Ethanol aus einer Spritze, deren Kolben mit einer Mikrometerschraube angetrieben wird, zunächst in den Raum unterhalb des Küvettenbodens gefüllt. Dabei dringt bereits thermalisiertes Ethanol zwischen Boden und den Küvettenwänden in das eigentliche Küvettenvolumen ein.

Die Kontrolle des Flüssigkeitsfüllstandes der Küvette erfolgt auf zwei Arten:

1. Eine Metallspitze wird mit einer Mikrometerschraube auf die Oberfläche herabgesenkt bis sie die Oberfläche berührt und sich ein sichtbarer Meniskus bildet. Dazu wird zunächst die Küvette exakt gefüllt. Die exakte Füllung wird dadurch überprüft, daß keine Verzerrungen in der Reflexion eines Gitters durch die Flüssigkeitsoberfläche beobachtet werden. Der Ablesewert der Mikrometerschraube dient dann als Nullpunkt für weitere Messungen. Die Genauigkeit dieser Messung liegt bei etwa 10 μm .
2. Die Flüssigkeitsoberfläche wird durch die Küvette mit einem geringen Winkel von unten durch eine stark vergrößernde Videokamera beobachtet. Die durch Laserlicht beleuchteten Tracerteilchen in der Experimentierflüssigkeit spiegeln sich durch Totalreflexion an der Flüssigkeitsoberfläche. Die Spiegelebene wird mit Markierungen auf dem Videoschirm verglichen. Die Markierungen wurden vorher mit Methode 1 gewonnen. Die Genauigkeit dieser Meßmethode liegt bei 50 μm bis 100 μm , erlaubt aber eine aktive Kontrolle des Füllstandes der Küvette.

Im Laufe der Experimente stellte sich heraus, daß es günstiger ist, Oberflächenheizer und Volumenheizer auf die gleiche Temperatur einzustellen. In diesem Fall werden keine Temperaturosillationen in der Hauptrolle der thermokapillaren Konvektion beobachtet [Metzger86]. Um in diesem Fall Artefakte durch die isolierende Teflonschicht zwischen Oberflächenheizer und Volumenheizer auszuschließen, wurde später diese Isolationsschicht entfernt und beide Heizer mit dem selben Thermostaten betrieben.

3.2 Lichtzeigermessungen

Mit einem Lichtzeigeraufbau kann die Amplitude einer Oberflächenoszillation absolut bestimmt werden. Dazu wird eine Laserstrahl auf einen Knotenpunkt der oszillierenden Flüssigkeitsoberfläche gesetzt. Der reflektierte Strahl wird mit einem Strahlteiler aus dem Strahlengang reflektiert und mit einer Streuscheibe aufgefangen. Das auf dem Schirm entstehende Bild und ein Maßstab auf dem Schirm wird von einer Videokamera aufgenommen.

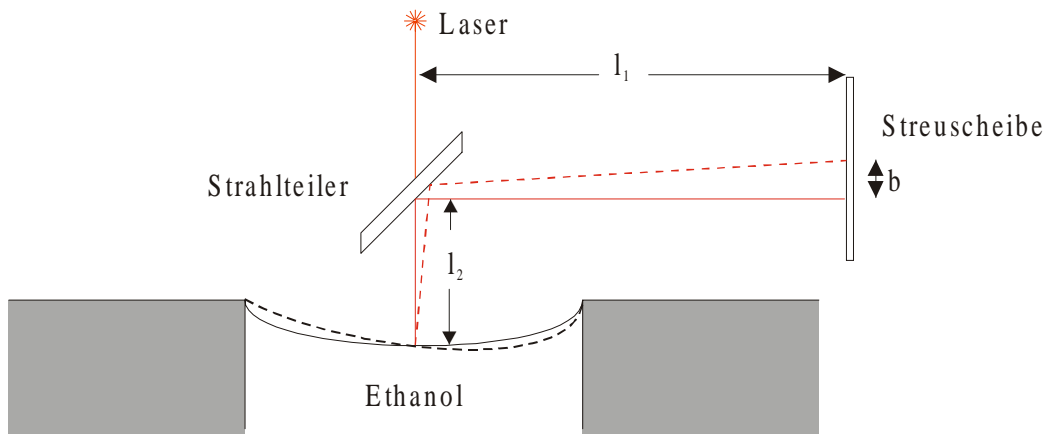


Abb. 3.6 Messung von Oberflächenoszillationen mit Lichtzeigermethode.

 Photographie auf CD.

Unter der Annahme, daß nahe an einem Knotenpunkt gemessen wird, an dem die Auslenkung der Flüssigkeitsoberfläche deutlich kleiner ist als die Veränderung der Steigung s der Flüssigkeitsoberfläche, ergibt sich die Steigung zu:

$$s = \frac{b}{2 \cdot l}$$

mit $l = l_1 + l_2 = 451 \text{ mm}$ der Weg des reflektierten Strahls von der Flüssigkeitsoberfläche bis zum

Schirm und b der Auslenkung des reflektierten Strahls aus der Ruhelage auf dem Beobachtungsschirm.

Geht man für die Grundschiwingung der Oberfläche in Richtung des Temperaturgradienten von einem sinusförmigen Verlauf

$$z = \frac{A}{2} \cos \left(\left(x - \frac{L}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{L} \right) \quad (\text{vgl. Kap. 2.10})$$

mit A der Amplitude der Oberflächenschiwingung, $L = 20 \text{ mm}$ der Spaltbreite der Küvette und x der Position in Richtung des Temperaturgradienten aus, also

$$\frac{d}{dx} z = -\frac{A}{2} \frac{\pi}{L} \sin \left(\left(x - \frac{L}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{L} \right),$$

so ergibt sich unter der Annahme einer Knotenlinie bei

$$x = L/2 = 10 \text{ mm}$$

die Amplitude der Oberflächenschiwingung als

$$A = -\frac{2 \cdot L}{\pi} \frac{d}{dx} z$$

und damit zu

$$A = -\frac{L \cdot b}{\pi \cdot l}.$$

3.3 Stroboskopische Shadowgraph-Apparatur

Bei der Shadowgraphmethode wird die Oberfläche der Experimentierflüssigkeit durch flächig reflektiertes Licht abgebildet. Betrachtet man planparallel auf eine Oberfläche einfallendes Licht, so wird dessen reflektierter Anteil je nachdem ob die Oberfläche konkav oder konvex geformt ist, gebündelt oder zerstreut. Betrachtet man das reflektierte Licht auf einem Schirm oder durch eine Streuscheibe, so erscheinen die Bereiche konkaver Oberflächenkrümmung heller, solche mit konvexer Krümmung dunkler. Ist die Oberfläche zwar eben, wird aber gegenüber der Nullage gekippt, wird die Abbildung entsprechend auf dem Schirm versetzt dargestellt.

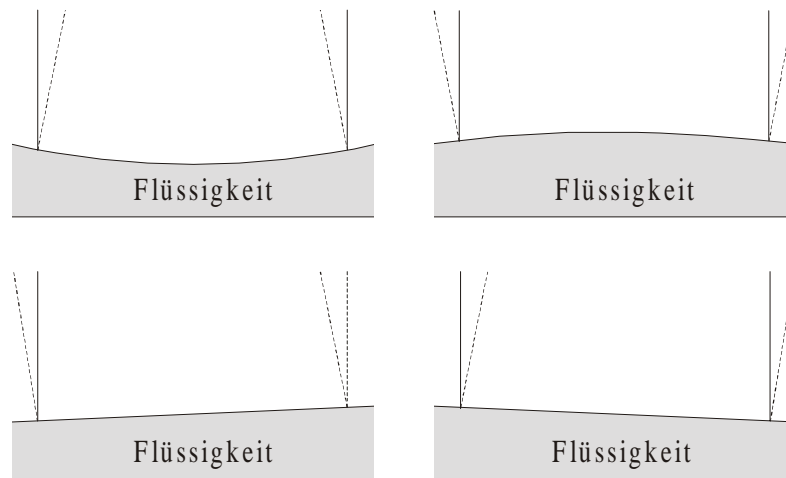


Abb. 3.7 Fokussierung/Defokussierung bei Krümmung der Oberfläche und Versetzung der Abbildung bei vorhandener Oberflächensteigung.

Während der Experimente war die Flüssigkeitsoberfläche nicht eben, sondern durch die Unterfüllung mit Meniskusbildung konkav gekrümmt, so daß sich eine starke Fokussierung des einfallenden Lichts ergibt. Gleichzeitig wird die Abbildung stark verzerrt. Dabei kann die Krümmung in grober Näherung als Überlagerung einer sphärischen und einer zylindrischen Krümmung angesehen werden. Um die Abbildung zu entzerren wird nicht wie üblich mit parallel einfallendem Licht gearbeitet. Statt dessen wird ein Laserstrahl an einem Raumfilter defokussiert. Dieser wird in einer Entfernung plaziert, bei der das von der Oberfläche reflektierte Licht senkrecht zur Hauptstromrichtung der Küvette weitgehend parallel ist. Entlang der Hauptstromrichtung ist die Oberfläche stärker gekrümmt, so daß in dieser Richtung weiterhin eine starke Bündelung auftritt. Diese wird mit einer Zylinderlinse im Strahlengang des reflektierten Lichts kompensiert. Insgesamt erhält man so ein ausreichend verzerrungsfreies Bild.

Durch mehrfache Reflexion im Strahlteiler, der zur Auslenkung des reflektierten Lichtes dient, bilden sich "Geisterbilder". Wird die Oberfläche nicht oder nur wenig ausgelenkt, sind die Geisterbilder und das Originalbild weitgehend deckungsgleich. Bei größeren Störungen der Oberfläche macht sich der Unterschied zwischen den Bildern stärker bemerkbar. Insbesondere bei Auslenkungen entlang der Hauptstromrichtung in der Küvette wird der Effekt dadurch verstärkt, daß Geisterbild und Originalbild unterschiedlich auf die Zylinderlinse fallen und damit deutlich unterschiedlich auf die Streuscheibe projiziert werden.

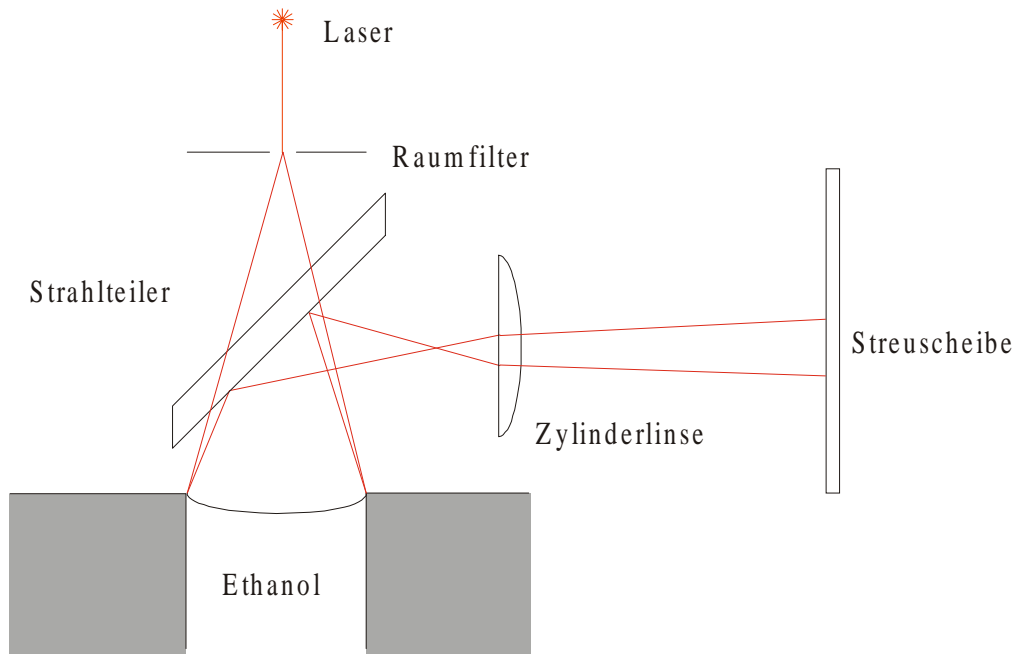



Abb. 3.8 Aufbau der Shadowgraph-Apparatur.

 Photographie auf CD.

Die im Experiment auftretenden Oberflächenschwingungen sind mit zwischen 5 Hz und 9 Hz (Hauptfrequenz 7 Hz) liegenden Frequenzen zu schnell um sie direkt mit einer aufgezeichneten Videosequenz zu analysieren. Kommerzielle Videosysteme arbeiten mit 25 Bildern pro Sekunde, so daß eine Oberflächenschwingung in 3-4 Bilder aufgelöst wird. Versuche zeigten, daß die Beleuchtungsstärke der Shadowgraph-Apparatur nicht für den Einsatz einer naß-chemischen Hochgeschwindigkeitskamera ausreichend ist. Um die nötige Zeitauflösung zu erreichen wurde der Shadowgraph in einem stroboskopischen Mode betrieben. Dazu wird ein Halbleiterlaser mit einer Leistung von 30 mW verwendet, der bei einer einstellbaren Frequenz Impulse von etwa 1 ms Dauer abstrahlt. Die Pulsfrequenz des Lasers wurde auf die Hauptfrequenz der Oberflächenoszillation eingestellt, so daß ein fast stehendes Bild erzeugt wurde und die Oszillation in Zeitlupe dargestellt wurde. Dabei wird das Bild der Streuscheibe mit einer Videokamera aufgenommen und anschließend digitalisiert. Die durch das stroboskopische Verfahren entstehenden Dunkelphasen werden am Rechner entfernt.

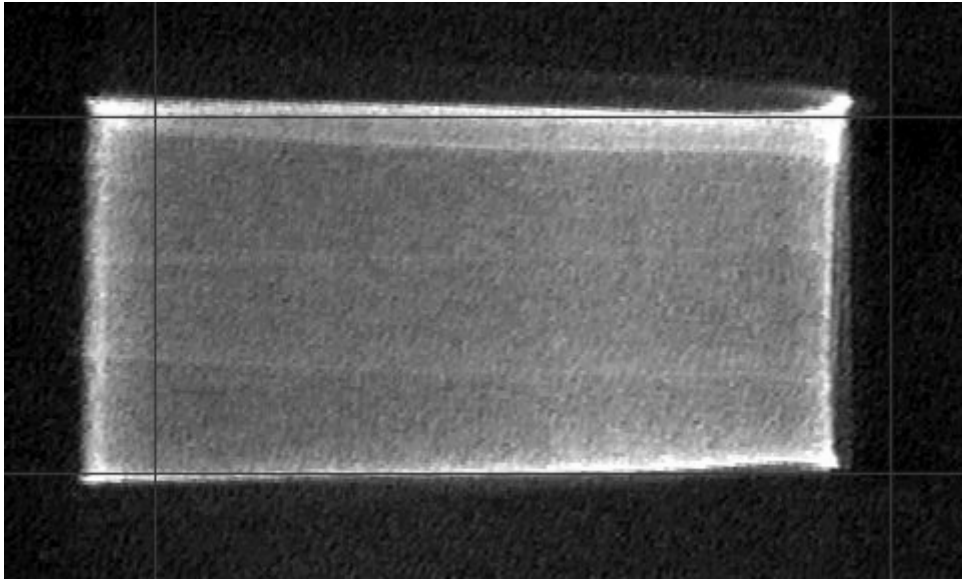


Abb. 3.8 Mit dem stroboskopischen Mode der Shadowgraph-Apparatur aufgenommene Flüssigkeitsoberfläche. Die Flüssigkeitsoberfläche wurde durch eine kurze externe Anregung zur Schwingung der Mode $m=1$ angeregt. Man erkennt die Versetzung der Abbildung in horizontaler Richtung, die dem Auftreten einer Oszillation entlang der y-Achse der Küvette entspricht. Damit korrespondierend hellt sich durch die fokussierende Wirkung der bei der Oszillation jeweils leicht unterfüllten Küvettenhälfte die linke oder rechte Bildhälfte auf. Die Optik der Shadowgraph-Apparatur gleicht eine sphärische Oberflächenkrümmung aus. Da die Flüssigkeitsoberfläche die Form eines cosinus-hyperbolicus hat, erscheinen die Begrenzungen der Oberfläche durch die fokussierende Wirkung der großen Oberflächenkrümmung in diesem Bereich hell hervorgehoben. Als rote Linien eingezeichnet ist die Lage der Ränder, wenn sich die Oberfläche in Ruhe befindet.

 Videofilm auf CD.

3.4 Thermoelementmessungen

Im Laufe der Experimente stellte sich heraus, daß Temperaturoszillationen im Bereich des Meniskus der Experimentierflüssigkeit an der kalten Thermode von großem Interesse sind. Der Querschnitt des Meßvolumens ist dabei kleiner als 1 mm. Die Größe der oszillierenden Strukturen liegen bei ca. 150 μm bis unter 20 μm und bei Frequenzen zwischen 5 Hz und 21 Hz.

Zur Messung der Temperaturosillationen wurde ein ungemanteltes NiCr/Ni-Thermoelement verwendet, dessen Drähte jeweils 50 μm und dessen Schweißpunkt 180 μm groß sind.

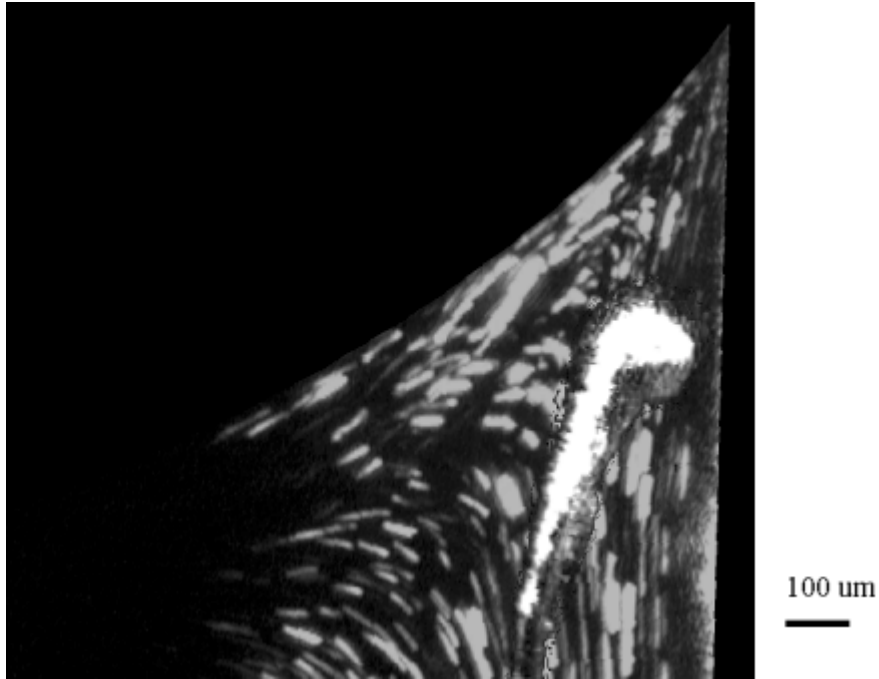


Abb. 3.9 Etwa 1,1 mm breiter und 1,0 mm hoher Ausschnitt des Meniskusbereichs an der kalten Thermode. Mit der Flüssigkeit bewegen sich Schwebeteilchen, die durch einen Lichtschnitt nahe der kalten Wand beleuchtet werden und durch ihre Spuren die Stromlinien sichtbar machen. Das Thermoelement ist zwischen einem auftretenden Wirbel im Meniskus und der kalten Wand platziert, so daß es empfindlich für zeitabhängige Strömung des Wirbels und für entlang der kalten Wand wandernde Temperaturschlieren ist.

Als Meßverstärker dient derselbe Verstärker wie er schon in [Hintz99] verwendet wurde. Dabei wurde einer der eingebauten Tiefpässe entfernt.

Im Verstärker befindet sich ein Tiefpaß mit einer Grenzfrequenz von 12 Hz. Dieser dient zur Reduktion von eingestreuten Signalen mit einer Frequenz von 50 Hz vor der Signalverstärkung. Gleichzeitig wird die Amplitude höherfrequenter Nutzsignale reduziert. Dadurch, daß die Verstärkung des Signals bei 50 Hz kleiner ist als bei niedrigeren Frequenzen *erhöht* diese Maßnahme das Verhältnis zwischen Nutzsignal und dem durch die Einstreuung bei 50 Hz erzeugtem Rauschen. Die Nachweisgrenze für Temperaturosillationen wird entsprechend erniedrigt, obwohl die absolute Signalamplitude sinkt.

Trotzdem liegt die Amplitude der Einstreuung bei 50 Hz gut 50-fach über der Amplitude der Nutzsignale (sie entsteht vorwiegend dadurch, daß das Thermoelement nicht gemantelt und damit auf einigen Zentimeter Länge nicht gegen Einstrahlungen geschirmt ist). Um die Nutzsignale von der Einstreuung zu trennen, muß die Einstreuung durch digitale Fourierfilterung entfernt werden. Dazu ist eine Abtastrate etwas über der doppelten Frequenz der Einstreuung notwendig.

Aufgenommen wurden die Meßsignale mit einer 12 bit Analog-Digital-Wandlerkarte (ADC) die mit einer Abtastrate von 1613 Hz arbeitet. Dabei wurden 16 aufeinanderfolgende Meßwerte summiert, so daß sich eine effektive Abtastrate von 100,8 Hz ergibt.

Um fehlerhafte Signale im Fourierspektrum zu unterdrücken, die durch Fremdsignale mit einer Frequenz oberhalb der halben Abtastrate entstehen (Aliasing), wurde ein weiterer passiver Tiefpaß direkt vor dem Eingang des ADC eingebaut. Idealerweise soll dieser Filter *alle* Signale jenseits der halben Abtastrate unterdrücken. In den meisten Anwendungen wird die Grenzfrequenz des Filters auf die Hälfte oder ein Viertel der Abtastrate gesetzt. Da dabei Signale bei dieser Grenzfrequenz nur um den Faktor 1,4 bzw. 2,2 reduziert werden ist dies für empfindliche Messungen ungenügend. Die Grenzfrequenz sollte deutlich niedriger liegen; gewählt wurde ein Filter mit einer Grenzfrequenz von 2,5 Hz (1/40 der Abtastrate), der Signale bei der halben Grenzfrequenz um den Faktor 20 reduziert.

Ein Nutzsignal mit einer Frequenz von 20 Hz wird entsprechend mit dem Faktor 1/8 verstärkt. Ein bei 20 Hz liegendes Aliassignal, das eine reale Frequenz von 80 Hz hat, wird um den Faktor 1/32 verstärkt. Das Verhältnis zwischen realen Signalen und Aliassignalen bei 20 Hz liegt also bei 1:4. Damit ist eine Trennung zwischen realen und Aliassignalen möglich.

Auch durch diesen Filter werden die Amplituden der Nutzsignale verringert. Da der größte Beitrag zum Rauschen nicht durch den ADC sondern durch Rauschen der zu messenden Temperaturoszillation und durch Rauschen des Thermoelementverstärkers entsteht, bleibt das Signal-zu-Rausch-Verhältnis nahezu unverändert. Das heißt, es wird die absolute Signalstärke verringert - bei 20 Hz ist das Signal ohne Filter etwa acht mal größer als mit Filter -, die Nachweisgrenze für Signale bleibt aber gleich.

Sind aus einer Messung alle Nutzsignale identifiziert, kann der Tiefpaß entfernt werden, so daß die Amplitude von hochfrequenten Nutzsignalen größer und damit besser meßbar ist. Im Laufe der Arbeit wurde daher sowohl mit als auch - wenn die Frequenzlage von realen und Aliassignalen bekannt war - ohne Tiefpaß gearbeitet.

Der Temperaturbereich von 1,2 K wurde auf 65536 Werte aufgeteilt was eine rechnerische Auflösung von 18 $\mu\text{K/bit}$ entspricht. Die anschließenden Fouriertransformationen geschahen mit *Origin 4.1* mit einem *Welch*-Fenster nach Abzug des Mittelwertes von den Daten. Durch diesen Mittelwertabzug entstehen am Anfang und am Ende des Datensatzes relativ zur Länge des Datensatzes (typischerweise ca. 300.000 Werte) nur kleine Sprünge. Diese werden durch das Welch-Fenster weiter vermindert. In der Praxis treten keine Aliasingeffekte auf.

Um eine weitere Verbesserung des Signal zu Rausch-Verhältnisses zu erreichen wurden für die Fourieranalysen Meßzeiten von typischerweise einer Stunde verwendet. Das heißt, es wird eine Rauschreduktion über 362.880 Werte durchgeführt. Dabei wurde das Rauschen bei 5 Hz auf etwa 3,5 bit, bei 8 Hz auf etwa 1 bit und bei 20 Hz auf 0,1 bit (ohne Tiefpaß etwa 1 bit) reduziert. Es ergibt sich für das Meßsystem eine rechnerische Amplitudendynamik von 1:20.000 bis 1:600.000 und ein meßbarer Frequenzbereich von $3 \cdot 10^{-3}$ Hz bis 50 Hz. Ohne Mittelung durch die Fourieranalyse weist das Meßsignal ein Rauschen von etwa 1.200 Bit auf, d.h. mit der Meßanordnung ist es möglich, Signale mit einem Signal zu Rausch-Verhältnis von weniger als 1:1.000 zu messen. Rechnerisch ergibt sich eine Auflösung des Meßsystems von etwa 0,3 μK , in der Praxis lassen sich Signale von etwa 1 μK nachweisen.

Mit dem Umrechnungsfaktor zwischen Temperatur und Spannung des Thermoelementes von 41 $\mu\text{V/K}$ können mit den Frequenzgängen aus Abb. 3.10 die ADC-Werte in Amplituden der Temperaturosillationen umgerechnet werden.

Diese Umrechnung ist aus zwei Gründen nicht aussagekräftig:

- Die Temperaturosillationen treten in der Flüssigkeit als *Schliere* auf, die örtlich begrenzt ist. Dabei entsteht die gemessene Temperaturosillation durch ein räumliches Wandern dieser Temperaturschliere. Der bei dieser Bewegung vom Thermoelement erfaßte Temperaturgradient ist dabei von der exakten Position des Thermoelementes abhängig.

Insbesondere aufgrund der geringen Ausdehnung der oszillierenden Strömungsstruktur in dieser Arbeit, ist eine Reproduzierbarkeit der Position des Thermoelementes nicht gewährleistet (siehe auch Abb. 3.9).

- Es sei eine gaußförmige Schliere betrachtet:

$$T = T_0 + \Delta T \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \frac{x^2}{\sigma^2}}$$

mit einer Amplitude von ΔT und einer Breite von σ . Das Thermoelement befinde sich an einer Position $x_0 \approx \frac{\sigma}{2} > 0$, so daß der Temperaturgradient $\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x_0} < 0$ ist (und für die angenommene Verteilung stärker als linear mit zunehmendem x sinkt).

Aufgrund seiner Ausdehnung (eindimensionale Betrachtung; das Thermoelement wird als würfelförmig angesehen) mittelt das Thermoelement über einen Bereich D und mißt

$$T_{tc} = \frac{1}{D^3} \int_{x_0}^{x_0+D} \int_{y_0}^{y_0+D} \int_{z_0}^{z_0+D} T dx dy dz = T_0 + \frac{\Delta T}{D} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{x_0+D} e^{-\frac{1}{2} \frac{x^2}{\sigma^2}} dx$$

Verändert die Schliere ihre Position um Δx , so mißt das Thermoelement eine Temperaturdifferenz von

$$\Delta T_{tc} = \frac{1}{D} \int_{x_0}^{x_0+D} T dx - \frac{1}{D} \int_{x_0+\Delta x}^{x_0+\Delta x+D} T dx$$

Ist die Ausdehnung der Schliere kleiner als die Ausdehnung des Thermoelementes $\Delta x < D$, so ergibt sich

$$\Delta T_{tc} = \frac{1}{D} \int_{x_0}^{x_0+\Delta x+D} T dx < \frac{2}{D} \int_{x_0}^{x_0+D} T dx$$

Es entsteht also eine weitere Signaldämpfung durch die Mittelung des Gradienten entlang der x -Achse des Thermoelementes. Diese ist um so größer, je kleiner die Bewegung der Schliere relativ zur Ausdehnung des Thermoelementes ist.

Die Verstärkung des Thermoelementes liegt in der Größenordnung von

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x + D}{D} - 1 \right)$$

Die größte in dieser Arbeit betrachtete oszillierende Konvektionsstruktur hat eine Ausdehnung von etwa $140 \mu\text{m}$ und oszilliert mit etwa 1,7% ihrer Ausdehnung (vgl. Kap. 5.2 und Kap. 5.5), so daß sich $\alpha \sim 6 \cdot 10^{-3}$ ergibt. Für die kleinste beobachtete Konvektionsrolle ergibt sich $\alpha \sim 9 \cdot 10^{-4}$.

Bei der Präsentation der Daten wurde daher auf eine Kalibrierung verzichtet. Angegeben werden die gemessenen ADC-Werte als willkürliche, lineare Einheit.

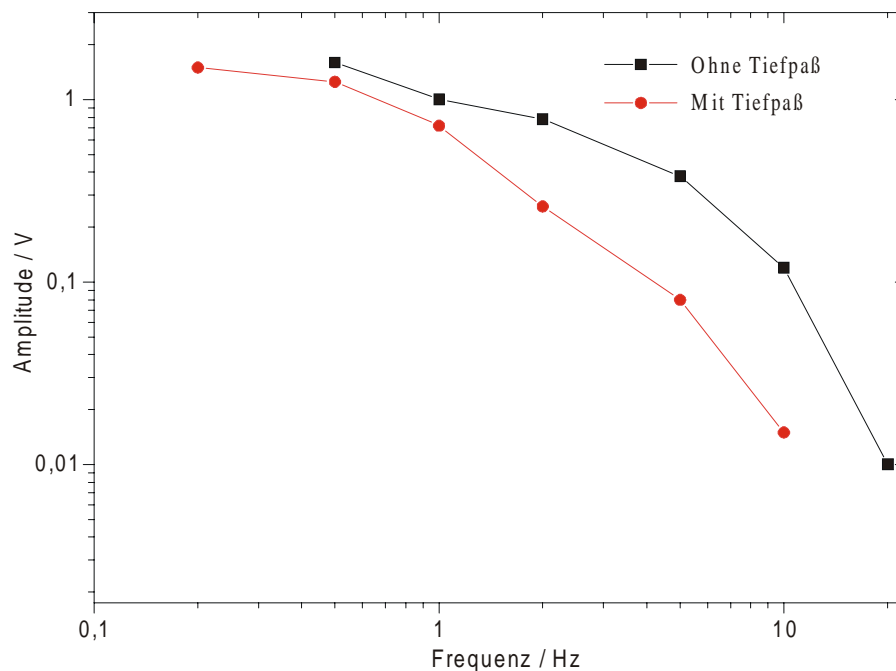


Abb. 3.10 Frequenzgang des Thermoelementes mit Thermoelementverstärker. Die schwarze Linie zeigt das Verhalten ohne eingebauten Tiefpaß bei 2,5 Hz, die rote Linie bei aktivem Tiefpaß.

Ein weiteres Problem ist der begrenzte Frequenzgang des Thermoelementes. Abb. 3.10 zeigt den Frequenzgang bei Bestrahlung des Thermoelementes mit 30 mW rotem Laserlicht (Grenzfrequenz des Lasers: 2 kHz). Man erkennt die deutliche Tiefpaßeigenschaft des

Thermoelementes. Die Grenzfrequenz liegt bei ca. 0,5 Hz bis 1 Hz; bei 20 Hz ist das Signal des Thermoelementes ca. 100 mal kleiner als bei 1 Hz. Der Vergleich mit dem Frequenzgang des Thermoelementverstärkers (bei inaktivem 2,5 Hz-Tiefpaß) in Abb. 3.11 zeigt, daß dies eine Eigenschaft des Thermoelementes und nicht des Verstärkers ist. Die Grenzfrequenz entspricht nicht den Berechnungen von [Benkert77], die eine etwa um den Faktor 10 höhere Grenzfrequenz bei ca. 10 Hz bei der Ankopplung eines Thermoelementes an ein Wasserbad voraussagen.

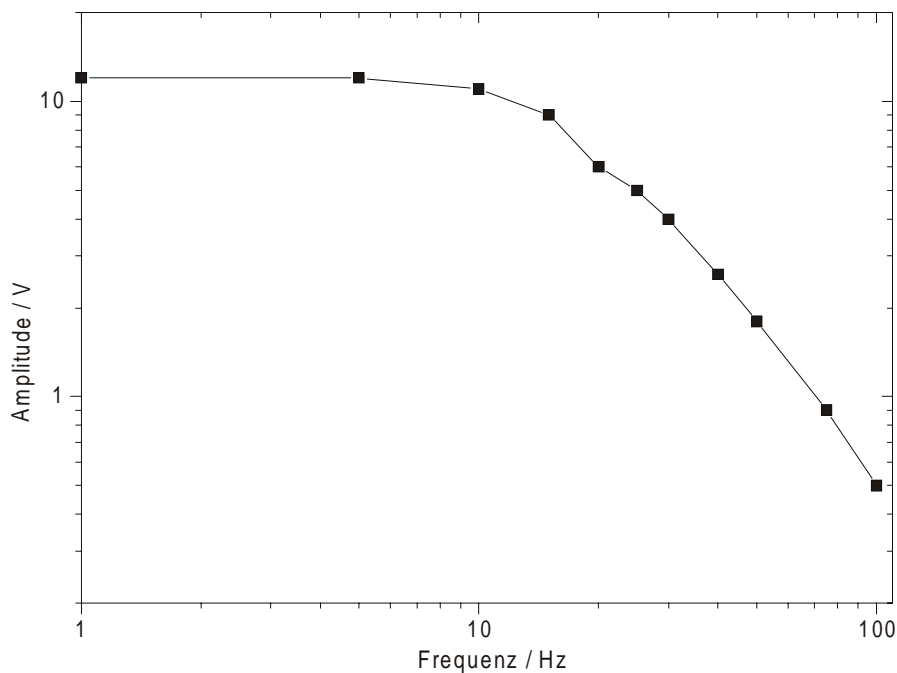


Abb. 3.11 Frequenzgang des Thermoelementverstärkers ohne Thermoelement, das heißt bei Anlegen einer definierten Spannung anstelle des Thermoelementes an den Eingang des Verstärkers.

Die folgende Rechnung zeigt die Größenordnung der Dämpfung des Meßsystems in der Praxis:

Für die mittlere gemessene Konvektionsrolle wird eine Signalamplitude von etwa 1,4 bit (ca. 25 μK) bei etwa 8 Hz gemessen. Nach dem Frequenzgang (ohne Tiefpaß) ergibt sich ein Verstärkungsfaktor von ca. 1/6, nach den Überlegungen zum Einfluß der Größe des Thermoelementes ein zusätzlicher Faktor von $2 \cdot 10^{-3}$. Damit ergibt sich ein Meßwert für die Temperaturoszillation von ca. 82 mK (vgl. Kap. 5.5, Abb. 5.38).

3.5 Strömungsvisualisierung mit Tracerteilchen

Für Beobachtungen der Strömung im Meniskus an der kalten Thermode wurde mit einer stark vergrößernden Optik mit einer Videokamera in einem Bereich von etwa 1 mm x 1 mm nahe an der Grenze zwischen Thermode und Flüssigkeitsoberfläche die Bewegung von Schwebeteilchen in der Experimentierflüssigkeit beobachtet. Verwendet wurde dazu Schleifpulver aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) mit einem Durchmesser von 3 μm . Diese Schwebeteilchen haben mit 4 g/cm^3 eine wesentlich höhere Dichte als Ethanol. Ihre Sinkgeschwindigkeit und Abweichung von den Stromlinien ist durch ihren geringen Radius für die durchgeführten Experimente niedrig.

Beleuchtet wurden die Tracer in der Mittelebene der Küvette mit einem HeNe-Laser mit einer Ausgangsleistung von 5 mW. Der verwendete Laser hat einen Strahldurchmesser von ca. 1 mm. Dadurch entsteht ein Beobachtungsvolumen von einer Breite von ca. 1 mm nahe an der kalten Thermode und auf der Mittelebene der Küvette oder bei anderen Experimenten 5 mm vom Sichtfenster entfernt. Die Tiefe des beleuchteten Volumens entspricht ebenfalls ca. 1 mm; durch die geringe Tiefenschärfe der Kamera wird eine Schicht mit einer Tiefe von ca. 100 μm beobachtet.