

# Untersuchungen einer kohärenten Marangoni- Bénard-Konvektionszelle

Diplomarbeit in Experimentalphysik

Carsten Jäger

im Juni 1996

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der  
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Prof. Dr. med. H. Schmid-Schönbein  
Institut für  
Physiologie

Prof. Dr. rer. nat. B. U. Felderhof  
Institut für  
Theoretische Physik A

Betreuung: Jens Hektor

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Bénardzellen . . . . .	4
2.2	Strahlungsgesetze . . . . .	9
2.2.1	Plancksches Strahlungsgesetz . . . . .	9
2.2.2	Wiensches Verschiebungsgesetz . . . . .	10
2.2.3	Kirchhoffsches Gesetz . . . . .	10
2.2.4	Wärmeleitung . . . . .	12
2.3	Thermospannung . . . . .	12
2.4	Farbmetrik . . . . .	13
2.5	Subtraktive Farbmischung . . . . .	20
2.6	Photographie . . . . .	22
2.7	Mikroskop . . . . .	24
2.8	Silicone . . . . .	24
2.9	Bildverarbeitung . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Meßaufbau</b>	<b>28</b>
3.1	Der Aufbau zur Bénardzellenerzeugung . . . . .	28
3.2	Erzeugung von Monozellen . . . . .	30
3.3	Markerteilchen . . . . .	31
3.4	Kontraststeigerung durch Einfärben . . . . .	32
3.5	Photographie . . . . .	35

3.6	Wölbung der Oberfläche . . . . .	36
3.7	Stereomikroskop . . . . .	38
3.8	Temperaturmessungen . . . . .	39
3.8.1	Thermodrähte . . . . .	39
3.8.2	Verstärker für die Thermospannung . . . . .	41
3.9	Wärmestrahlung . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>48</b>
4.1	Bilder der Bénardzellen . . . . .	48
4.2	Wölbung der Oberfläche . . . . .	57
4.3	Farbveränderung . . . . .	60
4.4	Temperaturmessungen . . . . .	71
4.5	Bildverarbeitung . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung/Ausblick</b>	<b>86</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>88</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>89</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Bénardzellen aus Siliconöl mit Graphit . . . . .	1
2.1	Strömungsverhältnisse in den Bénardzellen . . . . .	7
2.2	Walzenförmige Konvektionsströmungen . . . . .	8
2.3	Gedankenexperiment über schwarzen Strahler . . . . .	11
2.4	Die Absorption einzelner Rezeptoren der menschlichen Retina . . . . .	13
2.5	Die Empfindlichkeitskurven des IBK-Systems . . . . .	14
2.6	3dimensionale Darstellung des IBK-Farbsystems . . . . .	18
2.7	Das Farbdreieck des IBK-Systems . . . . .	19
2.8	Addition zweier Exponentialkurven . . . . .	21
2.9	Bei Defokussierung wird ein Punkt auf eine Streuscheibe abgebildet . . . . .	23
2.10	Strahlengang eines Mikroskops . . . . .	24
3.1	Der Farbstoff Sudanschwarz . . . . .	33
3.2	Der Farbstoff Fettrot B . . . . .	33
3.3	Das Stativ für die Kamera . . . . .	35
3.4	Das Spiegelbild eines Schachbretts im Öl einer Monozelle . . . . .	37
3.5	Schaltplan des Verstärkers für die Thermospannung . . . . .	42
3.6	Sampln einer Sinuskurve . . . . .	43
3.7	Das Rauschen des Thermometers . . . . .	44
3.8	$\Delta T$ -Kurve einer kalten und sich abkühlenden Ölschale . . . . .	44
3.9	Der Absorptionsgrad für verschiedene Metalle . . . . .	45
4.1	Bilder mit mehreren Bénardzellen . . . . .	49

4.2	Bénardzellen nach dem Ofeneinschalten in 2,5-Minutenschritten . . . .	51
4.3	Bénardzelle mit Kippschritt von 0 bis 5 . . . . .	52
4.4	Bénardzelle mit dem 6. Kippschritt . . . . .	53
4.5	Bénardzelle mit Kippschritt von 5 bis 0 . . . . .	54
4.6	Noch einmal die ungekippte Bénardzelle, 3 Minuten später . . . . .	55
4.7	Bénardzelle mit 2° gekippt in 7,5-Sekundenschritten . . . . .	56
4.8	Strahlengang bei der Wölbung . . . . .	57
4.9	Die Wölbung des Öls . . . . .	58
4.10	Spiegelbilder des Schachbretts . . . . .	59
4.11	Das „schielende“ Objektiv . . . . .	60
4.12	Das Strahlungsspektrum von Halogenlampen . . . . .	62
4.13	Die Filtercharakteristik des Farbfilters und des Öls . . . . .	63
4.14	Transmissionskurven des Öls . . . . .	64
4.15	3dimensionale Darstellung der Öl- und Filterfarbe . . . . .	66
4.16	Farbfilter und Öl im Farbdreieck . . . . .	67
4.17	Ausschnittvergrößerung des roten Bereichs . . . . .	68
4.18	Ausschnittvergrößerung des blauen Bereichs . . . . .	69
4.19	Das Absorptionsverhalten des gefärbten Öls . . . . .	70
4.20	Frequenzverhalten des Verstärkers . . . . .	71
4.21	Reaktion auf Eingangsspannungsänderung . . . . .	72
4.22	Thermostatverursachte Temperaturschwankungen . . . . .	74
4.23	Wellenartige Temperaturfluktuationen im Öl . . . . .	75
4.24	Temperaturprofil der Öloberfläche . . . . .	76
4.25	Vergleich der Verteilung mit Gaußkurve . . . . .	78
4.26	Das unbehandelte Originalbild als Graustufenbild einer Monozelle . . .	82
4.27	Das unbehandelte Originalbild als Binärbild . . . . .	83
4.28	Nach der Anwendung der Laplacematrix . . . . .	84
4.29	Nach der Anwendung der Laplacematrix als Binärbild . . . . .	85

# Kapitel 1

## Einleitung

Seit etwa hundert Jahren beschäftigt man sich mit den Bénardzellen. H. Bénard erwärmte damals Tran in einer Schale, und beobachtete die dabei entstehenden Konvektionsströmungen. Um sie besser sehen zu können, gab er Graphit dazu. Es ist nun eine alltagsphysikalische Tatsache, daß Substanzen sich beim Erwärmen ausdehnen und dann durch den Auftrieb nach oben steigen. Es stellte sich aber heraus, daß die aus Temperaturunterschieden resultierenden Änderungen der Oberflächenspannungen wesentlich zu den Konvektionsströmungen beitragen können, bzw. sie bei flacher Tiefe der Flüssigkeit sogar dominieren. Dieses Erkenntnis stammt von C. G. M. Marangoni [1], nach dem der Effekt dann auch benannt wurde. Dabei ordnen sich unter idealen Bedingungen Bereiche zu Sechsecken in bienenwabenhörmigen Mustern, wobei das Öl in der Mitte aufsteigt, sich an der Oberfläche abkühlt, um dann am Rand des Sechsecks gemeinsam mit den angrenzenden Bénardzellen wieder abzusinken, um an der warmen Schale erneut erhitzt zu werden. Diese, durch freie Konvektion entstehenden (das heißt nur durch Temperaturdifferenzen, also nicht mechanisch angetrieben) zellenartigen Muster werden seitdem Bénardzellen genannt.

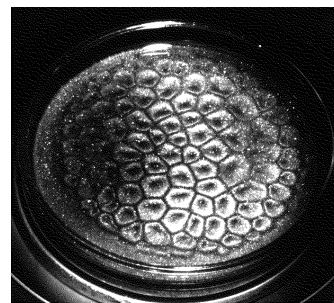


Abbildung 1.1: Bénardzellen aus Siliconöl mit Graphit

Obwohl sich seit 100 Jahren Generationen von theoretischen und experimentellen Physikern intensiv mit den Phänomenen der Bénardzellen beschäftigt haben, sind noch immer viele Rätsel ungelöst. Dabei handelt es sich um alles andere als eine rein akademische Herausforderung. An vielen Phänomenen in der Natur und Technik sind Konvektionen beteiligt. Sie treten praktisch überall dort in Erscheinung, wo Gase oder Flüssigkeiten Temperaturdifferenzen unterworfen sind. Durch ein tieferes Verständnis dieser Konvektionsströmungen würde man auch zu einem tieferen Verständnis in Natur und Technik gelangen, wo wir sie zwar beobachten bzw. nutzen, aber meist auf empirische oder phänomenologische Erfahrungen zurückgreifen müssen. Denn die Bénardzellen spielen

in den vielfältigsten Bereichen eine Rolle. Offensichtlich sind sie bei der Wetterkunde, wo die Atmosphäre bzw. die Meeresströmungen durch Konvektion angetrieben werden. Auch die Kontinentaldrift wird durch Konvektion des Erdmantels erzeugt. Sogar die Sonnenoberfläche ist in Form von Bénardzellen strukturiert, da ja auch hier aufgrund der Energieproduktion im Zentrum der Sonne starke Temperaturdifferenzen vorliegen. Die Konvektionsströmungen entstehen auch beim Trocknen von Lacken, da hier das verdunstende Lösungsmittel für Kühlung sorgt. Beim Hammerschlaglack wird diese sonst lästige Erscheinung sogar ausgenutzt, da durch die kleinen bienenwabenartigen Muster die gewünschte Rauigkeit entsteht. Beim Abkühlen einer Schmelze, wie z. B. beim Erstarren einer sehr heißen Metallschmelze, kühlt die Oberfläche überwiegend durch Wärmestrahlung ab. Auch hier treiben Temperaturdifferenzen zwischen dem noch heißen Inneren und der sich abkühlenden Oberfläche Konvektionsströmungen an. Der produktionstechnische Aspekt ist insofern von besonderer Bedeutung, da die Strömungen praktisch beim Erstarren mit eingefroren werden und die Eigenschaften des fertigen Produkts mitbestimmen. Zum anderen widmet man sich in der Forschung nun verstärkt den Möglichkeiten, Oberflächen mit Laserstrahlen zu behandeln. Die dabei entstehenden Temperaturdifferenzen führen bei einer geschmolzenen Oberfläche zu Konvektionserscheinungen.

In der Physiologie des Blutes sind zwei Aspekte für die Beschäftigung mit den Bénardzellen von Bedeutung. Einerseits gibt es natürlich auch im Blut Temperaturunterschiede. Somit sind Konvektionsströmungen sowohl im Blutkreislauf, als auch in den Apparaturen, mit denen das Blut untersucht wird, nicht auszuschließen. Es ist geplant, Bénardzellen mit Blut bilden zu lassen. Diese kann man allerdings nicht durch Erhitzen erzielen, da daß Blut hitzeempfindlich ist. Aber man kann, um Temperaturdifferenzen zu erzielen, natürlich auf der einen Seite vorsichtig erwärmen und auf der anderen Seite aktiv kühlen. Da Blut allerdings sehr empfindlich ist, altert und als Naturprodukt schlecht standardisierbar ist, macht es Sinn, erst einmal mit Siliconöl Erfahrungen zu machen, da hier die Versuche reproduzierbar und mit geringerem Aufwand durchzuführen sind.

Der andere Grund, sich in der Physiologie mit den Bénardzellen zu beschäftigen, ist ein eher philosophischer. Wenn Öl erwärmt wird, dehnt es sich aus, und die Wichte wird kleiner. Daß hier der Auftrieb als Ursache bewirkt, daß sich das Öl bewegt, ist offensichtlich. Bei dem Antrieb durch die Oberflächenspannung ist aber Ursache und Wirkung nicht mehr auseinanderzuhalten. Daß es innerhalb der Oberfläche zu Temperaturdifferenzen kommt, nur weil man unten heizt, setzt quasi voraus, daß die Konvektionsbewegung schon tätig ist. Diese Konstellation erinnert an die Frage, ob zuerst Henne oder Ei vorhanden war. Die Strömungen beeinflussen die Temperaturverhältnisse, durch die sie selbst angetrieben werden. Viele Größen, die bei diesen Bewegungen maßgeblich sind, sind selbst wieder temperaturabhängig, wie zum Beispiel die Viskosität, die die Bewegung hemmt. Es ist ein recht gleichgewichtsferner Zustand, bei dem die Wärmeströmungen selbst organisieren, wie sie die Temperaturdifferenzen ausgleichen. Durch die äußeren Umstände werden weder Art noch Ausbildung der Strömungen erzwungen. Größe und Anordnung der Walzen oder Zellen werden

durch die der Form der Schalen nicht vorweggenommen. Es ist insgesamt ein komplexes Verhalten, wo Ursache und Wirkung so verzahnt ineinander greifen, daß sie sich nicht mehr trennen lassen. Daraus resultiert ein sehr sensibles, eigenwilliges, manchmal sogar launisches Verhalten, dem man sich in Biologie und Medizin häufiger gegenüber gestellt sieht.

Die kohärente Monozelle erleichtert dieses Problem wieder. Sie ist eine sehr große, einzelne Bénardzelle in einer runden Schale. Sie wird nicht durch benachbarte Zellen gestört, und aufgrund der Größe kann man sie genauer beobachten, visualisieren bzw. Messungen an ihnen ausführen. Man kann sie entweder erzwingen, indem man die runde Schale nur punktuell zentral heizt. Man kann sie aber auch erzeugen, indem man die Geometrie – also Schalendurchmesser und Füllhöhe – geeignet wählt. Dann ist sie allerdings wieder deutlich sensibler und kann bei Störungen in mehrere Bénardzellen zerfallen.



# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Bénardzellen

Um die Konvektionsströmungen beschreiben zu können, führt man folgende Größen ein:

- das Geschwindigkeitsfeld:  $\vec{v}(x, y, z, t)$
- das Temperaturfeld:  $T(x, y, z, t)$
- den thermischen Ausdehnungskoeffizienten:  $\alpha = \frac{1}{v} \frac{dv}{dT}$
- die Beschleunigungskonstante der Schwerkraft:  $g$
- die kinematische Viskosität:  $\nu$
- die Temperaturleitfähigkeit:  $\kappa$
- die Flüssigkeitsdicke:  $d$
- die Temperaturdifferenz zwischen oben und unten:  $\Delta T = T_o - T_u$

Als hilfreich haben sich folgende einheitenlose Größen herausgestellt:

- die Rayleighzahl:  $R = g\alpha\Delta T d^3 / \nu\kappa$
- die Prandtlzahl:  $P_r = \nu / \kappa$
- das Aspektverhältnis zwischen Schalendurchmesser und Flüssigkeitsdicke:  $\Gamma = L/d$

Ausgangspunkt der Strömungsanalysen ist die Navier-Stokes-Gleichung [11]:

$$\rho \left[ \frac{\delta \vec{v}}{\delta t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p_0 + \eta \nabla^2 \vec{v} + \vec{F},$$

mit der Auftriebskraft  $\vec{F} = \rho \vec{g} V$ .

Die Bilanzgleichungen für Masse und Wärme lauten:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad \frac{\delta T}{\delta t} + (\vec{v} \cdot \nabla) T = \kappa \nabla^2 T.$$

Um die Gleichungen analytisch oder numerisch beherrschen zu können, werden Näherungen eingeführt. Die Oberbeck-Boussinesq-Näherung schränkt die Temperaturabhängigkeit auf die Dichte  $\rho$  ein und linearisiert diese zugleich:  $\rho = \rho_0(1 - \alpha \Delta T)$ .

Nach Skalentransformation und Ersetzung von  $\Theta = T - (T_u + \Delta T \cdot \frac{z}{d})$  ergibt sich:

$$\frac{\delta \Theta}{\delta t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \Theta = R v_z + \nabla^2 \Theta$$

$$\frac{\delta \vec{v}}{\delta t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = P_r [-\nabla p + \nabla^2 \vec{v} + \theta \hat{z}].$$

Für kleinere Amplituden werden die nichtlinearen Terme  $(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}$  und  $(\vec{v} \cdot \nabla) \Theta$  vernachlässigt, sodaß man die linearisierten Gleichungen erhält:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad \frac{\delta \Theta}{\delta t} = R v_z + \nabla^2 \Theta$$

$$\frac{\delta \vec{v}}{\delta t} = P_r [-\nabla p + \nabla^2 \vec{v} + \Theta \hat{z}].$$

Erwärmt sich die Flüssigkeit, dehnt sie sich aus und der Auftrieb treibt sie nach oben. Durch diesen Materialtransport wird Wärme nach oben transportiert, wobei die Viskosität  $\nu$  diesen Materialtransport hemmt. Die Wärmeleitung sorgt dafür, daß sich der Flüssigkeitsbereich abkühlen kann. Die Wärmeleitung und der Wärmefluß aufgrund von Materialtransport stehen somit in Konkurrenz. Ist die Wärmeleitung zu schnell, setzt die Bewegung der Flüssigkeit nicht ein, da die dafür nötigen Temperaturunterschiede schon von der Wärmeleitung ohne Bewegungsnotwendigkeit ausgeglichen werden können. Erst wenn ein bestimmter Wert für die Rayleighzahl überschritten ist, setzt die Konvektionsströmung ein. Wie man an der Definition der Rayleighzahl sieht, begünstigen starke Auftriebskräfte (Erdbeschleunigung  $g$  und Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$ ) die Konvektionsströmung. Die Viskosität  $\nu$  und Wärmeleitfähigkeit  $\kappa$  stehen im Nenner und hemmen die Konvektionsströmungen, bzw. sorgen dafür, daß sie erst gar nicht

entstehen. Für verschiedene Parameter ( $P_r$ ,  $\Gamma$  und andere) wurden die theoretischen und experimentellen Rayleighzahlen ermittelt. Es stellte sich heraus, daß Rayleigh somit um 1916 die richtige Lösung für die falsche Problemstellung ermittelt hatte. Seine Theorie stimmt nur für Flüssigkeiten, die keine freie Oberfläche haben, die also oben einen aufliegenden Deckel haben, der kälter ist als der Boden.

Erst 1958 entwickelte J. R. A. Pearson eine Theorie, die auf die Bénardzellen anwendbar ist. In der Rayleighzahl steht  $d^3$  im Zähler. Große Flüssigkeitstiefen begünstigen damit die Konvektionsströmung aufgrund von Auftriebskräften. Bei kleineren Flüssigkeitstiefen mit freier Oberfläche dominieren aber Oberflächeneffekte. Durch Temperaturdifferenzen ergeben sich Differenzen in der Oberflächenspannung ( $\sigma$ ). Ähnlich wie die Rayleighzahl wird die Marangonizahl definiert:

$$M = -\delta\Delta T d / \kappa \nu \rho_0,$$

wobei der thermische Oberflächenspannungskoeffizient definiert ist als:

$$\delta = \delta\sigma / \delta T < 0.$$

Die Oberflächenspannung entspricht der Energie, die man aufbringen muß, um die Oberfläche einer Flüssigkeit zu vergrößern. Die Moleküle einer Flüssigkeit bleiben im flüssigen Aggregatzustand, weil zwischen ihnen Anziehungskräfte wirken, z. B. elektrische (Reichweite  $\sim 1/r^2$ ) oder Van-der-Waals-Kräfte ( $1/r^5$ ). Um Oberfläche zu schaffen, muß man diese Kräfte überwinden – man muß Arbeit investieren. Wenn die Flüssigkeit sich durch Erwärmung ausgedehnt hat, ist ein Teil des Weges schon überwunden – man muß weniger Arbeit aufbringen. Deshalb ist der thermische Oberflächenspannungskoeffizient negativ. Eine sehr starke Oberflächenvergrößerung stellt das Verdampfen dar, dementsprechend gibt es einen Zusammenhang zwischen Oberflächenspannung und Verdampfungsenergie.

Eine Konvektionsströmung aufgrund von Oberflächeneffekten wird also begünstigt, wenn die Oberflächenspannung stark von der Temperatur abhängig ist. Viskosität und Gewicht hemmen diese Konvektion, dementsprechend stehen  $\nu$  und  $\rho_0$  im Nenner. Und auch dieser Konvektionsantrieb steht mit der Wärmeleitung in Konkurrenz, sodaß  $\kappa$  im Nenner steht.

Interessanterweise ergibt sich durch diese oberflächenangetriebene Konvektion, daß Bénardzellen auch in der Schwerelosigkeit beobachtet werden konnten, wo der auftriebsbedingte Antrieb vollständig entfällt.

In den physikalischen Blättern [12] wird ein Versuch beschrieben, wo ein ballistischer Raketenflug 13 Minuten lang Schwerelosigkeit bietet. Gezeigt ist ein rechteckiges Gefäß. „Oben“ ist die Oberfläche frei, die Flüssigkeit kann dort verdunsten und abkühlen. Die linke Wand wird geheizt, die rechte gekühlt. Die Flüssigkeit beginnt dadurch sich zu drehen, und zwar so, daß sie oben an der Oberfläche von der heißen zur kalten Seite

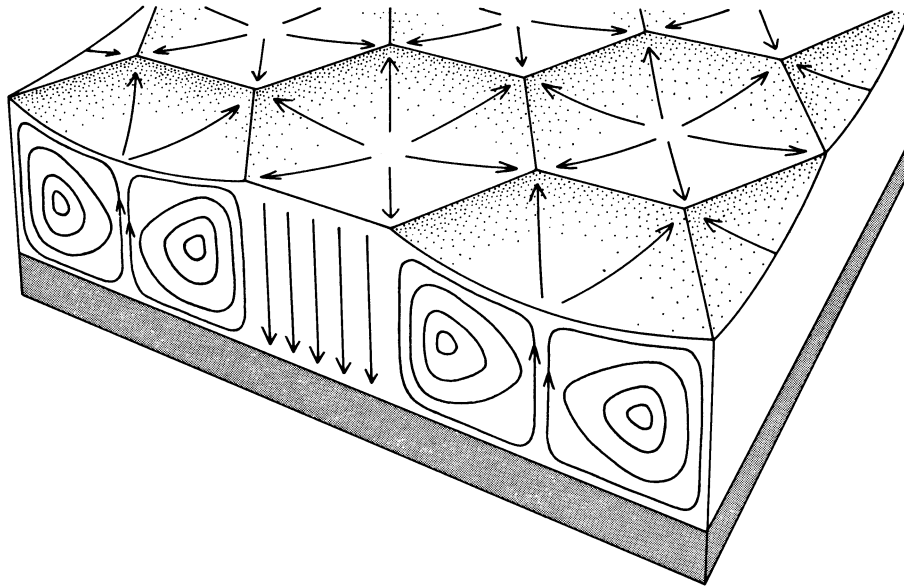


Abbildung 2.1: Strömungsverhältnisse in den Bénardzellen [1]

fließt. Durch die Bewegung müssen die dissipativen Kräfte der Viskosität überwunden werden. Es muß also eine mechanische Energiequelle geben, die diese Bewegung in Gang hält. Dadurch, daß die Flüssigkeit von der warmen zur kalten Wand fließt, wird an der kalten ständig Oberfläche vernichtet, während sie an der heißen ständig auseinandergezogen bzw. geschaffen wird. Da das Schaffen einer heißen Oberfläche billiger ist, als das Erzeugen einer kalten Oberfläche, erhält man insgesamt Energie. Die kalte Oberfläche hat eine stärkere Spannung, und zieht somit ständig die Oberfläche zu sich herüber. Dieser Vorgang hat eine große Ähnlichkeit mit Wärmekraftmaschinen, wie z. B. der Carnot-Maschine. Hier wird ein Gas in einem Kreisprozeß abwechselnd komprimiert und entspannt. Normalerweise kann man dabei keine Arbeit gewinnen, im Gegenteil, durch Reibung verliert man sie im nicht idealen Fall. Der Trick, diesen Vorgang im Sinne einer Kraftmaschine zu nutzen ist, daß man das Gas im kalten Zustand billig komprimieren kann, um dann bei der Expansion im Heißen mehr Arbeit herauszuholen. Der Oberflächenantrieb funktioniert also ähnlich, wobei hier allerdings keine Volumina sondern Oberflächen komprimiert und expandiert werden.

Bei den Bénardzellen kommt punktuell etwas heiße Flüssigkeit nach oben an die Oberfläche. Die übrige kalte Oberfläche kann mittels ihrer stärkeren Oberflächenspannung die heiße Oberfläche auseinanderziehen. Die Viskosität sorgt dafür, daß mehr heiße Flüssigkeit nachgezogen wird, um die heiße Oberfläche zu vergrößern. Hat sich dadurch ein Kamin ausbilden können, der die heiße Flüssigkeit vom geheizten Boden nach oben transportiert, gibt es ständig Nachschub. An der Oberfläche kühlt sich die Flüssigkeit beim auseinandertreiben ab (durch Verdunsten, Wärmestrahlung oder Wärmeleitung) und gewährleistet so, daß der äußere, kältere Bereich kräftiger ziehen kann, um dann

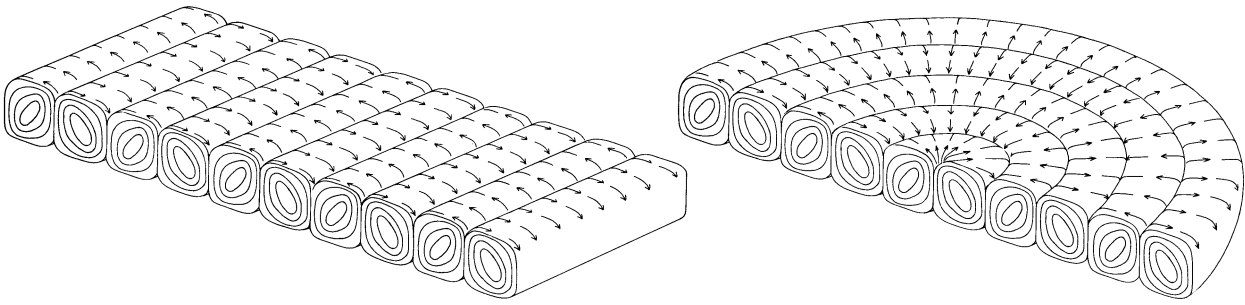


Abbildung 2.2: Walzenförmige Konvektionsströmungen [1]

wieder zu Boden sinken zu können, um erneut erwärmt zu werden. Es scheint wohl so zu sein, daß der Auftrieb erst einmal dafür sorgt, daß an einer Stelle heiße Flüssigkeit die Oberfläche erreicht, damit dieser Mechanismus in Gang kommt. Bei flachen Flüssigkeitstiefen dominieren dann aber diese Oberflächeneffekte, wodurch die bienenwabenartigen Muster erscheinen. Diese Muster entstehen dadurch, daß großflächige Zellen, die die ganze Schale ausfüllen würden, eine zu große Reibungsfläche hätten. Sie zerfallen somit in viele kleine, idealerweise gleichgroße, sechseckige Zellen, die sich dann bienenwabenartig organisieren. Jeweils in der Mitte einer Zelle kommt die Flüssigkeit heiß herauf, um dann am Rand gemeinsam mit den benachbarten abgekühlt wieder zu Boden zu sinken. Daß es gerade Sechsecke sind, ist kein Zufall, weder bei den Bénardzellen, noch bei den Bienenwaben. Beschränkt man sich bei den Zellenformen auf elementare geometrische Formen, ergibt sich, daß die einzigen gleichseitigen Polygone, die sich flächig anordnen lassen, Dreiecke, Quadrate und Sechsecke sind. Das Polygon, das dabei dem Kreis am nächsten kommt, ist das Sechseck. Es gewährleistet den gleichmäßigsten Abstand zwischen Mittelpunkt und Rand, bzw. es besitzt die größte Inhalt/Umfang-Relation. Diese Bienenwabenmuster sieht man im Experiment allerdings nur unter sehr guten Bedingungen (gleichmäßige Erwärmung, ebene Geometrie und stundenlanges Selbstorganisieren der Zellen). Unter weniger idealen Bedingungen ergeben sich in etwa gleichgroße Polygone, überwiegend 5- und 6eckig, die ein eher unregelmäßiges Muster organisieren.

Wenn die Auftriebskräfte dominieren, entstehen stattdessen walzenförmige Muster (s. Abb. 2.2). Parallel zur Wandbegrenzung entstehen Walzen, die abwechselnd mit entgegengesetztem Drehsinn rotieren, damit sie am gemeinsamen Rand jeweils gemeinsam die Flüssigkeit rauf oder runter befördern. Die in dieser Arbeit untersuchten Monozellen passen in beide Gruppen. Man kann es so interpretieren, daß die Schale gerade Zellengröße besitzt, und somit nur eine Bénardzelle darin entsteht. Oder es ist genau eine Walze, die sich der runden Schalenform angepaßt hat.

In dem Artikel [1] wird behauptet, daß sich die Oberfläche einer Bénardzelle in der Mitte nach unten wölbt. Die Begründung lautet: „Eine Besonderheit der Konvektion die durch einen Gradienten der Oberfläche hervorgerufen wird, besteht darin, daß sich die Kontur der Oberfläche ändert. In Bereichen mit erhöhter Oberflächenspannung hat

die Oberfläche die Tendenz, sich zusammenzuziehen. Infolgedessen wölbt sie sich in der Mitte einer Bénardschen Zelle nach unten, während sie am Zellenrand höhersteht. Die Schwerkraft sorgt dafür, daß die Unterschiede nicht zu kraß werden, denn die gravitationsbedingte, potentielle Energie ist bei einer ebenen Oberfläche am kleinsten. Das Zusammenspiel von Gravitation und Oberflächenspannung ist sehr komplex.“ Es ist allerdings nicht einsichtig, warum eine in der Fläche wirkende Spannung eine räumliche Verformung erzeugen soll. Wenn man eine Paukenbespannung nimmt, kann man die Spannung in der Mitte dadurch herabsetzen, indem man sie dünner schmirt. Würde sich dadurch die Bespannung wölben?

Bei geschlossenen Oberflächen gibt es keine Oberflächeneffekte, in der Schwerelosigkeit keinen Auftrieb. Auftrieb und Oberflächeneffekte treten aber in der Praxis meistens gemeinsam auf, was die theoretische und experimentelle Behandlung deutlich verkompliziert. Während sich die auftriebsangetriebenen Konvektionen selbst initialisieren, werden die oberflächenangetriebenen meistens durch den Auftrieb mitinitialisiert. Bei freien Oberflächen hat man die Wahl, ob man den entstehenden Flüssigkeitsdampf stehen läßt, sodaß er sich selbst verteilt, oder ob man ihn mit einer Vakuumpumpe absaugt. Es gibt nicht nur stabile und instabile Konvektionsströmungen, auch indifferente und überstabile (oszillierende) wurden beobachtet und theoretisch gedeutet. Der Soret-Effekt [3] entsteht, wenn als Flüssigkeiten Mischungen benutzt werden. Diese neigen dann zum Oszillieren, da das Mischungsverhältnis innerhalb der Flüssigkeit variieren kann. Bei dem Versuch, das Wetter vorherzusagen, kommt z. B. das Problem hinzu, daß die Luftfeuchtigkeit kondensieren kann (Wolkenentstehung) und dabei Wärme freigesetzt wird. Die Konvektionen sind selbstorganisiert und sehr sensibel. Die Temperaturdifferenzen sind gleichgewichtsfern und dementsprechend ist es streckenweise doch etwas gewagt, erstmal zu linearisieren, um dann weiter rechnen zu können. Zudem ist nicht immer zu überblicken, inwieweit man einfach Abhängigkeiten wegnähern darf, wie z. B. die Temperaturabhängigkeit der Viskosität, da bei der freien Konvektion jede Größe jeweils mit den anderen wechselwirkt. Alles in allem ist das Thema der freien Konvektion sehr viel komplexer, als es auf den ersten Blick erscheinen mag.

## **2.2 Strahlungsgesetze**

### **2.2.1 Plancksches Strahlungsgesetz**

Das Plancksche Strahlungsgesetz ergibt das Spektrum eines schwarzen Strahlers. Diese Spektrumsorte ist insofern allgegenwärtig, da die meisten Lichtquellen näherungsweise schwarze (oder graue) Strahler sind: die Sonne mit ihrer etwa 6500 K heißen Oberfläche, alle auf Verbrennung basierenden Lichtquellen (wobei der glühende Ruß leuchtet), bis zur Glühbirne und Halogenlampe.

$$L(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad \text{bzw.} \quad L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1}.$$

In dieser Formel verdichten sich drei Säulen der Physik:

- die Elektrodynamik, repräsentiert durch die Lichtgeschwindigkeit  $c$
- die Thermodynamik, repräsentiert durch die Boltzmann-Konstante  $k$
- die Quantenmechanik, repräsentiert durch das Plancksche Wirkungsquantum  $h$

### 2.2.2 Wiensches Verschiebungsgesetz

Man muß aber aufpassen, ob man die Planck-Kurve bezüglich der Frequenz  $\nu$  oder der Wellenlänge  $\lambda$  betrachtet. Bei der Substitution wird aus

$$L(\nu, T) = \underbrace{L(\nu, T) \frac{d\nu}{d\lambda}}_{L(\lambda, T)} d\lambda.$$

$L(\nu, T)$  und  $L(\lambda, T)$  sind also unterschiedliche Funktionen! Daher haben sie auch unterschiedliche Maxima. Bildet man die Ableitung des Planckschen Strahlungsgesetzes ergibt sich nach Nullsetzen eine transzendente Gleichung. Löst man sie, erhält man das Strahlungsmaximum bei:

$$\nu_m = (5,88 \cdot 10^{10} \text{ sK}) \cdot T \quad \text{bzw.} \quad \lambda_m = (2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ mK})/T,$$

wobei

$$L(\nu_m, T) \sim \nu_m^3 \quad \text{bzw.} \quad L(\lambda_m, T) \sim \lambda_m^{-5}.$$

### 2.2.3 Kirchhoffsches Gesetz

Der Absorptionsgrad ist definiert als:

$$\alpha = \frac{\text{absorbierte Strahlungsleistung}}{\text{einfallende Strahlungsleistung}}.$$

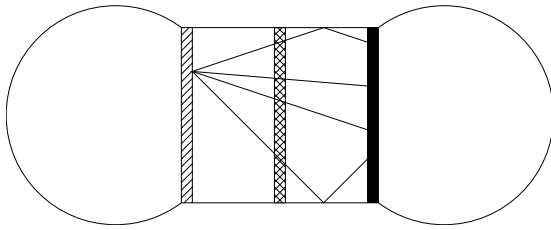


Abbildung 2.3: Gedankenexperiment über schwarzen Strahler

Um das Emissionsverhalten für Körper mit  $\alpha$  kleiner 1 zu ergründen, kann man ein Gedankenexperiment machen. Angenommen, zwei rechteckige Platten stehen sich gegenüber und haben jeweils mit einem Wärmereservoir thermischen Kontakt, die beide die gleiche Temperatur haben. Der Raum zwischen den beiden Platten wird so durch vier Spiegel begrenzt,

daß keine Strahlung entweichen kann – außerdem sind die Wärmereservoirs nach außen isoliert. Die Strahlung, die die eine Platte aussendet, kommt so zwangsläufig bei der anderen an. Der Wärmestrahlungsaustausch zwischen den beiden Platten muß ausgeglichen sein. Würde sich die eine auf Kosten der anderen erwärmen, wäre dies ein Verstoß gegen den 2. Hauptsatz der Wärmelehre (Nichtexistenz des Perpetuum mobile 2. Art). Angenommen, die eine Platte wäre völlig schwarz und die andere hätte den Absorptionsgrad  $\alpha$ , also den Reflexionsgrad  $(1 - \alpha)$ , dann ergibt sich für die Strahlungsleistungen  $\Phi$  der beiden Richtungen:

$$\Phi_{\alpha} + (1 - \alpha)\Phi_S = \Phi_S,$$

also

$$\Phi_{\alpha} = \alpha\Phi_S.$$

Schiebt man einen Spiegel zwischen die beiden Platten, der nur für einen kleinen Frequenzteil durchlässig ist, folgt:

$$\frac{d\Phi_{\alpha}}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda = \alpha(\lambda) \frac{d\Phi_S}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda,$$

also

$$\Phi'_{\alpha}(\lambda) = \alpha(\lambda)\Phi'_S(\lambda).$$

Der Emissionsgrad

$$\varepsilon = \frac{\text{emittierte Strahlungsleistung}}{\text{die Strahlungsleistung, die ein schwarzer Körper emittieren würde}} = \frac{\Phi_{\alpha}}{\Phi_S}$$

ist also gleich dem Absorptionsgrad:  $\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$ .

Zusammenfassend kann man sagen, das  $\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$  gewährleistet, daß sich ein thermisches Gleichgewicht ergibt: Wer viel nimmt, muß auch viel geben.



## 2.2.4 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung hat im Gegensatz zum strahlungsbedingten Wärmetransport eine lineare Abhängigkeit. Der Wärmestrom  $P = \frac{dQ}{dt}$  durch eine Fläche  $A$  bei der Entfernung  $\ell$  ergibt sich mit:

$$P = \lambda \frac{A\Delta T}{\ell},$$

wobei  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit ist. Formal entspricht das dem elektrischen Widerstand, wenn man  $\Delta T$  durch die Spannung  $U$  bzw. den Wärmestrom  $P$  durch den elektrischen Strom  $I$  ersetzt. Dementsprechend funktionieren die Regeln für Parallel- und Reihenschaltungen analog. Man darf sich allerdings nicht daran stören, daß der Wärmestrom eine Leistung ist, die sich im elektrischen Fall aus  $P = U \cdot I$  ergibt.

## 2.3 Thermospannung

Unterschiedliche Metalle haben unterschiedliche Austrittsarbeiten. An den Lötstellen entstehen dadurch Kontaktspannungen. Bildet man einen Stromkreis, sind die Kontaktspannungen entgegengesetzt – es fließt kein Strom. Das ändert sich, wenn zwischen den beiden Lötstellen eine Temperaturdifferenz besteht. Dann wirkt die Thermospannung:

$$U_{\text{th}} \approx a\Delta T.$$

Sie ist nur näherungsweise linear – will man es genauer haben, kann man eine quadratische Abhängigkeit mit hinzunehmen, oder man schlägt die Spannungen in Tabellen nach.

Die Thermospannungen liegen im Größenordnungsbereich von einigen  $\mu\text{V}/\text{K}$ . Man kann sie aber nicht aufgrund dieser Kleinheit verharmlosen. Lötstellen und Metalldrähte haben bei kurzen, dicken Drähten sehr kleine Widerstände, sodaß dennoch große Ströme fließen können und damit beachtliche Energien im Spiel sein können. Natürlich stellt die Thermospannung keine Verletzung des Energiesatzes dar. Den reversiblen Carnot-Prozeß kann man in zwei Richtungen betreiben. Läßt man die Wärmeenergie vom warmen Reservoir zum kalten fließen, kann man mechanische Arbeit abzweigen, und ihn als Wärmekraftmaschine nutzen. Wenn man dagegen mechanische Arbeit investiert, kann man Wärmeenergie vom Kalten ins Warme pumpen. Die Thermospannung ist, abgesehen von den ohmschen Verlusten, auch reversibel, nur daß hier statt der mechanischen Arbeit elektrische Arbeit auftritt. Die Wärmekraftmaschinenrichtung wird durch den Thermospannungseffekt beschrieben. Die Wärmepumpenrichtung wird Peltier-Effekt genannt, obwohl beide Effekte eigentlich dieselbe Ursache haben. Setzt man die Thermospannung ein, um Temperaturdifferenzen zu messen, muß man darauf achten, daß möglichst keine Ströme fließen. Denn wenn sie fließen, mißt man zwar immer noch die Temperaturdifferenz der beiden Lötstellen – aber der Peltier-Effekt

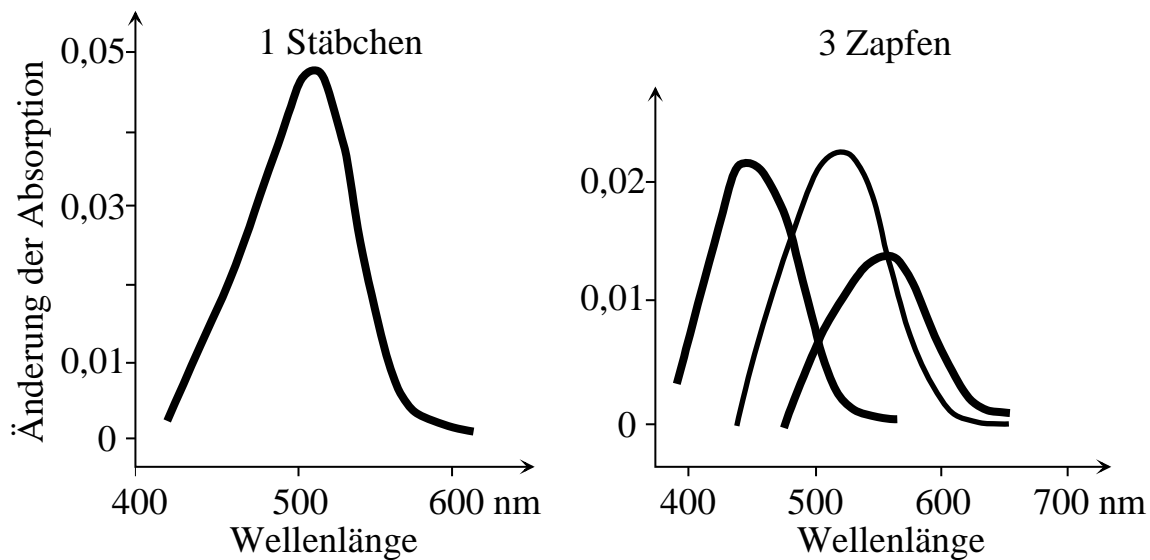


Abbildung 2.4: Resultate mikrospektrophotometrischer Messungen der spektralen Absorption einzelner Rezeptoren der menschlichen Retina (Operationspräparate). Es sind die Differenzspektren (Differenz der spektralen Absorption vor und nach der Bleichung) dargestellt [26].

sorgt dafür, daß die heiße Lötstelle gekühlt und die kalte erhitzt wird. Obwohl die Thermoelemente keinen Innenwiderstand im üblichen Sinn besitzen, darf man sie bei Temperaturmeßzwecken aus diesem Grund dennoch nicht belasten.

## 2.4 Farbmatrik

Das menschliche Auge besitzt zwei verschiedene Arten von Lichtrezeptoren. Die Stäbchen sind für das Nachtsehen zuständig. Sie liefern nur schwarzweiße Bilder („Nachts sind alle Katzen grau“). Bei größerer Helligkeit sind die drei verschiedenen Zapfenarten für das farbige Tagsehen verantwortlich. Für das Photographieren ist nur das Tagsehen von Bedeutung. Wenn ein Spektrum vom Auge wahrgenommen wird, werden die Zapfen gereizt. Für die 3 verschiedenen Zapfenarten ergeben sich 3 Werte. Diesen Tripel nennt man Farbvalenz. Da man ein kontinuierliches Spektrum in bezug auf die Wellenlänge als beliebig fein auffassen kann, bildet man ein  $\infty$ -dimensionales Spektrum auf einen Tripel ab. Dies bedeutet natürlich eine ungeheure Datenreduktion. Somit ist es eine Einbahnstraße – von der Farbvalenz kommt man nicht mehr zurück zum Spektrum. Die Zapfenarten werden rot, grün und blau genannt. Man stellt sich das so vor, daß sich die Farbvalenz  $\vec{F}$  eines Spektrums  $S(\lambda)$  durch die Empfindlichkeiten  $(p(\lambda), d(\lambda), t(\lambda))$  der Zapfen wie folgt ergibt:

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} P \\ D \\ T \end{pmatrix} = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \begin{pmatrix} p(\lambda) \\ d(\lambda) \\ t(\lambda) \end{pmatrix} \cdot S(\lambda) d\lambda .$$

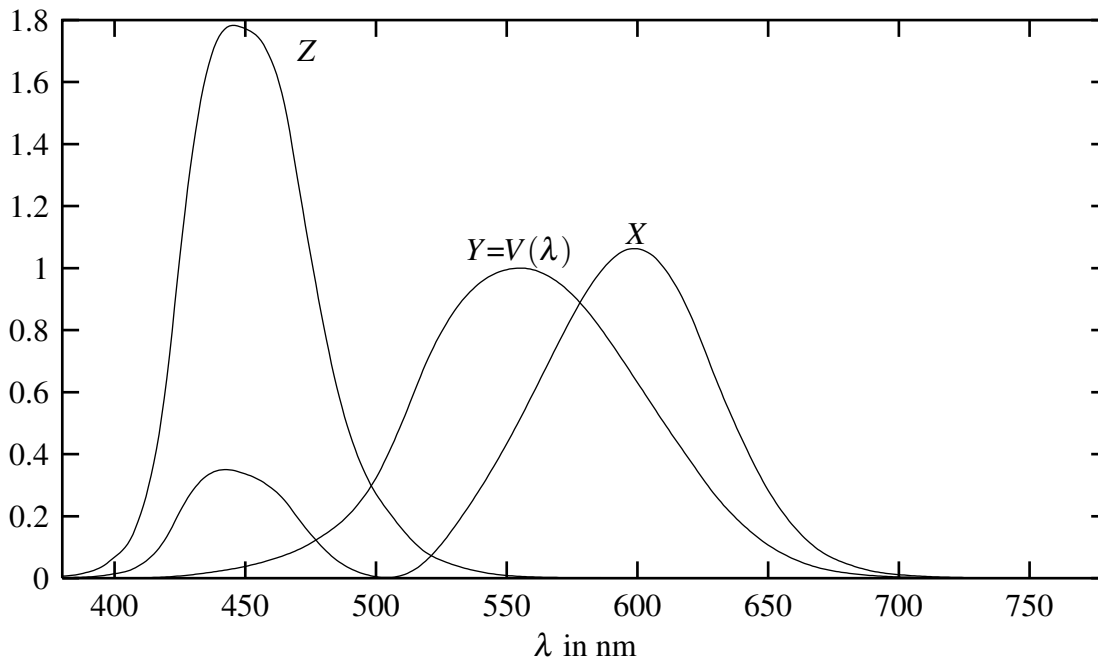


Abbildung 2.5: Die Empfindlichkeitskurven des IBK-Systems

Die Helligkeit ergibt sich dann, indem jede Zapfensorte einen gewissen Helligkeitsfaktor ( $h_p, h_d, h_t$ ) besitzt:

$$H = h_p \cdot P + h_d \cdot D + h_t \cdot T .$$

Die Farbvalenz ist also eine lineare Größe. Die Helligkeit stellt in diesem 3dim. linearen Raum eine Schar paralleler Ebenen dar – jeweils alle Farbpunkte gleicher Helligkeit liegen in einer Ebene.

Allerdings ist nicht nur die Empfindlichkeit der Zapfen entscheidend. Es ist bekannt, daß Menschen, denen man wegen einer Erkrankung am grauen Star die Augenlinse entfernen mußte, UV-A-Licht sehen können. Dieses Licht wird normalerweise schon in der Hornhaut des Auges absorbiert und gelangt somit erst gar nicht zu den Zapfen. Es gibt die verschiedensten Methoden, die Empfindlichkeitskurven zu ermitteln. Helligkeitsvergleiche, Flimmertests, Versuche mit Farbenblinden, denen eine Zapfensorte fehlt und direkte Untersuchungen der Zapfen ergeben alle unterschiedliche Ergebnisse. Glücklicherweise hat man sich international auf ein System geeinigt – das IBK-System (Abb. 2.5). Man kann im 3dim. Farbraum die Basis des Koordinatensystems willkürlich wählen. Fährt man die Spektralkurve im 3dim. Raum mit der Wellenlänge als Parameter ab, ergeben sich die Empfindlichkeiten der jeweiligen Basis. Das IBK-System hat die Basis X, Y, Z. Die Koordinate Y ist so gewählt, daß sie der Helligkeitskurve des Auges entspricht. Man hat also den Vektor genommen, der auf den Ebenen gleicher Helligkeit senkrecht steht. Die anderen beiden Vektoren hat man so gewählt, daß keine negativen Empfindlichkeiten entstehen. Die Fläche unter den jeweiligen Kurven ist gleich groß.

Es fällt auf, daß die  $X$ -Kurve zwei Maxima besitzt. Das große Maxima im roten und das kleinere am kurzwelligen Ende des sichtbaren Spektrums sorgt dafür, daß das kurzwellige Licht violett wirkt. Violett entsteht auch beim Mischen von blau und rot. Aus der Empfindlichkeit der Zapfen läßt sich dieser Effekt nicht ableiten, man vermutet, daß die Nervenzellen direkt an der Netzhaut diese rechnerische Veränderung bewirken.

Die spiegelbildliche Doppelseite (Abb. 2.6) zeigt die 3dim. Kurve des IBK-Systems. Man sieht ein 3dim. Bild, wenn man mit dem rechten Auge das rechte Bild anschaut, und sich einen kleinen Spiegel so vor daß linke Auge hält, daß man das linke Bild über das rechte bringt. Da man normalerweise das Farbdreieck 2dim. darstellen möchte, projiziert man:

$$x = X/(X + Y + Z) \quad y = Y/(X + Y + Z).$$

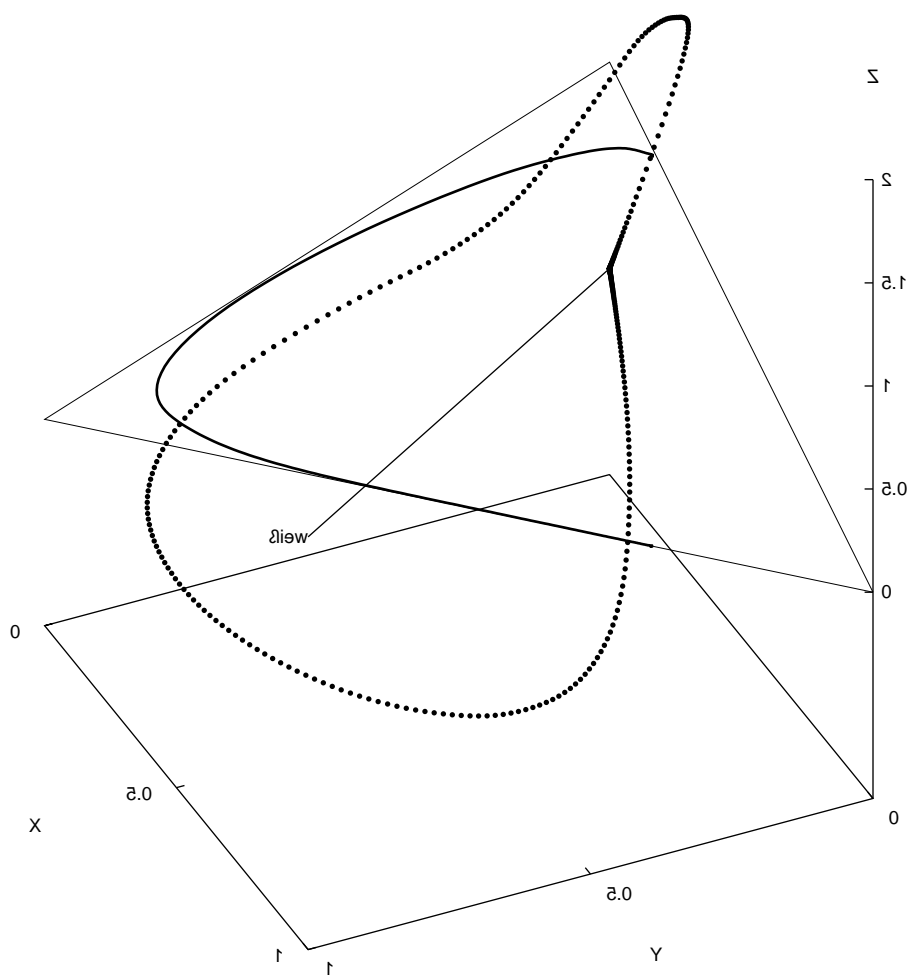
Anschaulich bedeutet dies, daß man den Schnittpunkt der Verbindungslinie zwischen Ursprung und Farbpunkt mit der eingezeichneten  $(1, 0, 0)$ ,  $(0, 1, 0)$ ,  $(0, 0, 1)$ -Ebene ermittelt, um ihn dann in  $Z$ -Richtung auf die  $X$ - $Y$ -Ebene zu projizieren.

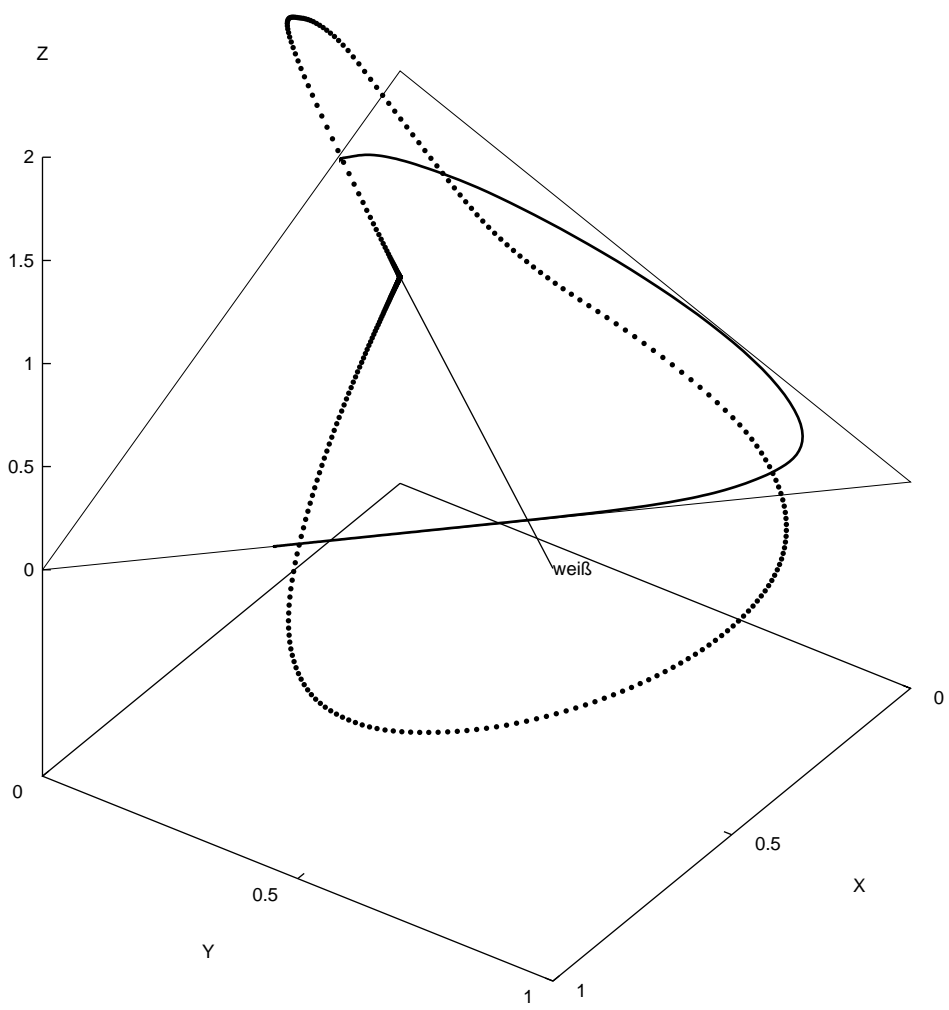
Additive Farbmischung liegt vor, wenn Spektren überlagert werden. Dies kann auch dadurch auftreten, daß die Farbreize räumlich oder zeitlich so eng beieinander liegen, daß das Auge sie nicht mehr trennen kann (z. B. Farbfernseher). Die Farbvalenz ergibt sich mittels linearer Operationen aus dem Spektrum. Addiert man Spektren, ergibt sich die neue Farbvalenz aus der Addition der Farbvalenzen dieser Spektren. Die Tripel zu addieren ist natürlich wesentlich einfacher, als die Spektren erst zu addieren, um dann wieder 3 Integrationen auszuführen.

Geht man kontinuierlich von einem Spektrum zu einem anderen über, hat das gemischte Spektrum eine Farbvalenz, die zwischen den Farbvalenzen der ursprünglichen Spektren liegt. Im 3dim. Farbraum und in der 2dim. Projektion entstehen Verbindungsgeraden. Ein Spektrum, in dem alle Wellenlängen mit gleicher Energie beteiligt sind, nennt man „weiß“. Da die Flächen unter den  $X, Y, Z$ -Empfindlichkeiten gleich groß sind, ist die Weißgerade im 3dim. Farbraum die Raumdiagonale. Für das 2dim. Farbdreieck ergibt sich wegen  $1/(1 + 1 + 1)$  der Weißpunkt bei  $(1/3, 1/3)$ .

Nun fällt auf, daß die Spektralkurve im Farbdreieck konvex ist. Da sich aber alle Spektren als Kombinationen der spektralen Linien auffassen lassen, ergeben sich auch für die Farbvalenzen diese Kombinationen. Alle Mischungen liegen somit innerhalb dieser konvexen Kurve. Es gibt eigentlich keine physikalische oder physiologische Notwendigkeit dafür, daß die Spektralkurve konvex ist. Da es aber so ist, bildet die Spektralkurve den Rand der möglichen Farbvalenzen. Die Verbindungslinie zwischen dem untersten blauen Punkt und dem untersten roten Punkt entspricht den Farbvalenzen, die bei der Mischung dieser beiden Punkte entsteht. Sie wird Purpurlinie genannt. Für jede Spektrallinie ergibt sich eine Farbvalenz, die am Rand liegt. Aber für die am Rand liegenden Farbvalenzen der Purpurlinie gibt es keine entsprechende Wellenlänge, sie entstehen rein durch Mischen.

Die am Rand liegenden Farbvalenzen werden vollständig gesättigt genannt, Weiß dagegen besitzt die Sättigung null. Auf der Verbindungsgerade zwischen Weiß und dem Rand steigt die Sättigung, z. B. von Weiß, über Rosa nach Rot. Allen Punkten auf dieser Geraden ordnet man den gleichen Farbton zu. Man charakterisiert ihn entweder durch den Winkel in Relation zum Weißpunkt, oder durch die Wellenlänge, bei der diese Gerade die Spektralkurve schneidet (funktioniert natürlich nicht bei der Purpurlinie). Der Farbton, der in Relation zum Weißpunkt genau gegenüberliegt, ist die Komplementärfarbe, da man durch Mischen der Farbe mit ihrer Komplementären wieder weiß erhält. Die Einteilung, welche Wellenlängen oder Farbtöne wie benannt werden, ist recht willkürlich. Nirgendwo wird geregelt, wo z. B. Gelb anfängt oder aufhört. Es ist auch Konvention, ob man zwischen Blau und Grün noch Türkis einfügt, oder nicht. Neben der Möglichkeit, der Farbvalenz die entsprechenden  $X, Y, Z$ -Koordinaten zuzuordnen, kann man sie also durch die 3 Größen Farbton, Farbsättigung und Intensität beschreiben. Beim 2dim. Farbdreieck bleibt die Intensität unberücksichtigt.





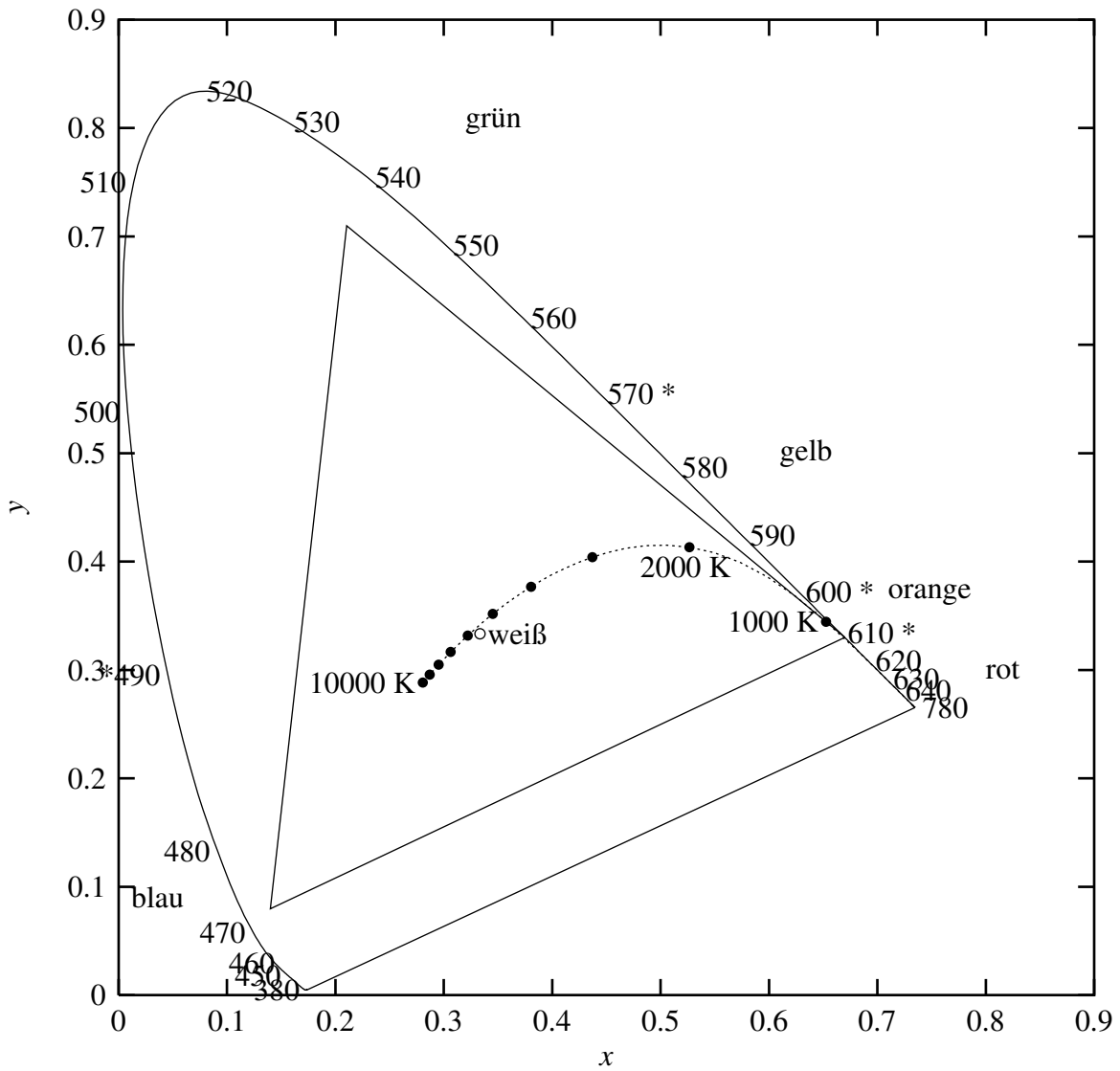


Abbildung 2.7: Das Farbdreieck des IBK-Systems. Eingezeichnet ist die Schwarze-Strahler-Kurve und das Farbdreieck des RGB-Systems. Die Sternchen an den nm-Zahlen entsprechen den ungefähren Farbgrenzen der angegebenen Farben.



Im Farbdreieck ist das kleinere Farbdreieck des RGB-Systems eingetragen. Es ist das amerikanische Farbsystem für NTSC-Farbfernseher. Die drei Punkte ergeben sich aus den Farbvalenzen der eingesetzten Leuchtfarben. Es können wieder nur die Farben dargestellt werden, die innerhalb dieser drei Punkte liegen. Bei der Wahl der drei Leuchtfarben wurde einerseits darauf geachtet, das Dreieck möglichst weit aufzuziehen. Andererseits darf man aber nicht zu tief in den roten oder blauen Bereich absinken, da das Auge dort deutlich weniger empfindlich wird und man sehr viel Watt bräuchte, um einen Lichtreiz zu erzielen. Die Transformation vom XYZ- zum RGB-System ergibt sich über die Matrix [27]:

$$\begin{pmatrix} 1.910 & -0.532 & -0.288 \\ -0.985 & 2.000 & -0.028 \\ 0.058 & -0.118 & 0.898 \end{pmatrix}.$$

Die Transformation vom RGB- zum IHS-System ( $I$  für die Intensität,  $H$  für den Farbton und  $S$  für die Sättigung) ist nicht mehr linear. Sie lautet [27]:

$$\begin{pmatrix} I \\ V \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} & 2/\sqrt{6} \\ 1/\sqrt{6} & -2/\sqrt{6} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$$H = \arctan\left(\frac{W}{V}\right) \quad S = \sqrt{V^2 + W^2}.$$

Zusätzlich wurde die Schwarze-Strahler-Kurve eingezeichnet. Sie ist insofern von Bedeutung, da die meisten Lichtquellen auf dieser Kurve liegen (bei den thermischen Strahlern ergibt sich das näherungsweise von selbst). Der Grund ist, daß wir Menschen nur solches Licht als natürlich ansehen, das auf dieser Kurve liegt. Obwohl Glühlampenlicht schon recht gelb ist, wird dies vom Auge mit einem automatischen Weißabgleich kompensiert. Während wir bei heller Beleuchtung kältere Farbtöne (entspricht höherer Temperatur des schwarzen Strahlers) erwarten, gibt es Warmtonlampen für geringere Helligkeiten.

## 2.5 Subtraktive Farbmischung

Die subtraktive Farbmischung entsteht, wenn Licht ein Filter durchleuchtet, nachdem es schon einen anderen Filter passiert hatte. Die Transmission beider Filter zusammen ergibt sich aus:

$$t_{\text{beide}}(\lambda) = t_{\text{erster}}(\lambda) \cdot t_{\text{zweiter}}(\lambda).$$

Danach müßte diese Farbmischung eigentlich multiplikativ genannt werden. Nach Logarithmisieren werden aus den Multiplikationen Additionen. Da der Transmissionskoeffizient zwischen 0 und 1 liegt, ist sein Logarithmus negativ. Somit ist der

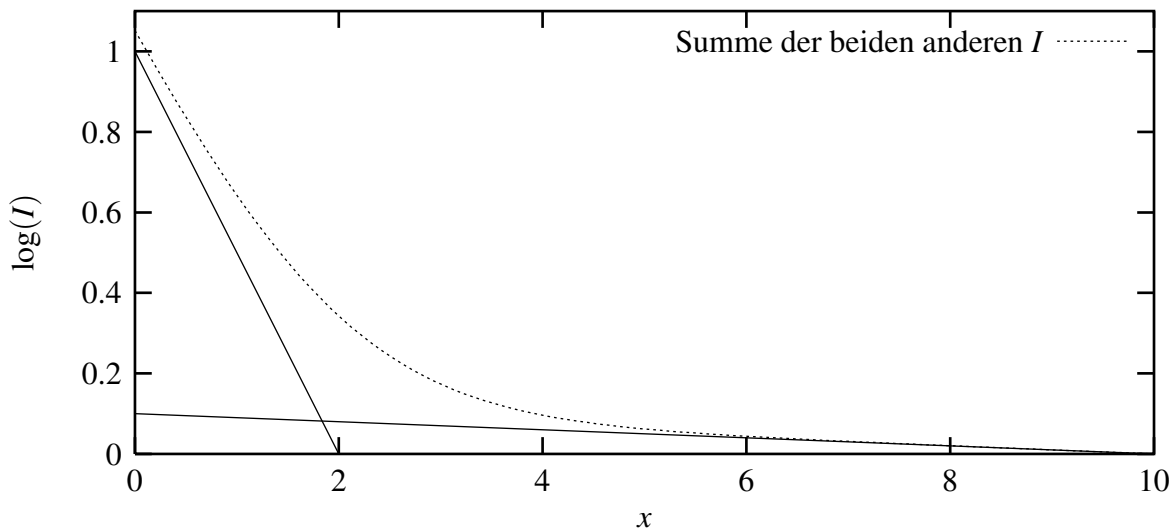


Abbildung 2.8: Addiert man zwei Exponentialkurven, entsteht keine neue Exponentialkurve

Name subtraktiv nachvollziehbar. Jeder zusätzliche Filter absorbiert zusätzlich und zieht Licht ab. Da Licht, was schon absorbiert wurde, nicht noch einmal absorbiert werden kann, ergibt sich eine geometrische Reihe. Im kontinuierlichen Fall ergibt sich ein exponentieller Abfall – das Lambert-Beer-Gesetz lautet:

$$I(x) = I(0) \cdot e^{-\alpha x}.$$

Trägt man das halblogarithmisch auf, ergibt sich wieder eine Gerade. Aber nur, wenn der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  bei allen Wellenlängen konstant bleibt! Ansonsten ist das Verhalten nach dem Integrieren über das Spektrum nicht mehr linear und wird sehr kompliziert. Die Abb. 2.8 zeigt was passiert, wenn eine stark vertretene Wellenlänge stark absorbiert wird, während eine schwach vertretene Wellenlänge nur schwach absorbiert wird.

Kombiniert man zwei Farbfilter, ergibt sich die neue Farbvalenz nicht aus den Farbvalenzen der Einzelfilter. Um die neue Farbvalenz ausrechnen zu können, benötigt man wieder die vollständige Information der einzelnen Spektren. Diese kann man aber nicht aus den Tripel der Farbvalenzen berechnen. Häufig ist ausprobieren die schnellste Methode.

Dieses nichtlineare Verhalten ist streckenweise sehr eigenartig und macht den Photographen besonders bei Leuchtstoffröhrenlicht die Arbeit schwer. Die modernen Energiesparleuchtstoffröhren haben kein kontinuierliches Spektrum mehr, sondern 3 Spektrallinien: eine grüne, damit die Helligkeit gewährleistet ist, und jeweils eine blaue und rote, um die gewünschte Farbtemperatur zu erreichen. Die jeweiligen Farbempfindlichkeiten der Filme sind plötzlich nur in bezug auf diese drei Spektrallinien entscheidend.

Weichen diese Empfindlichkeiten hier von denen des Auges ab (auf die die Leuchtstoffröhren abgestimmt sind), werden die Bilder farbstichig. Für thermische Strahler gibt es Geräte, die die Farbtemperatur messen können – bei Leuchtstoffröhren versagen sie. Zwei Gegenstände, die unter einer Lampe die gleiche Farbvalenz haben, müssen nicht unbedingt das gleiche Reflexionsspektrum haben. Unter anderen Lichtverhältnissen können sich die beiden Gegenstände in der Farbe unterscheiden!

## 2.6 Photographie

Ursprünglich war die lichtempfindliche Schicht des Aufnahmematerials nur für Blau und Violett empfindlich [33]. Es gelang dann, den Film durch Anfärben des Bromsilbers mit geeigneten Farbstoffen, sogenannten Sensibilisatoren, auch für Grün und Gelb empfindlich zu machen. Diese rotblinden Filme heißen orthochromatisch. Später konnte man Filme herstellen, die auch für Rot empfindlich waren, und sich an die Empfindlichkeit des Auges anpassen ließen. Diese Filme nennt man panchromatisch. Hochpanchromatische Filme dagegen haben eine übertriebene Rotempfindlichkeit.

Die Filme unterscheiden sich zunächst durch verschiedene Empfindlichkeiten. Man setzt die weniger empfindlichen Filme ein, wenn man dank ihrer feineren Körnung eine höhere Auflösung erreichen will. Die Empfindlichkeit wird in ASA oder DIN angegeben. Während sich ASA proportional zur Empfindlichkeit verhält, ist DIN ein logarithmisches Maß (3 DIN entsprechen einer Oktave, ähnlich wie Dezibel). Die Filme unterscheiden sich in der Schwärzungskurve, die auch als Gammakurve bezeichnet wird. Aus ihr ergibt sich die Einteilung in weiche (kontrastlose) und harte (kontrastreiche) Filme.

Ein rotblinder, also orthochromatischer Film wäre bei den Aufnahmen angenehm gewesen. Im Handel sind allerdings nur noch panchromatische Filme erhältlich. Es gibt zwar noch eine kleine Nische für orthochromatische Filme bei der Reproduktion von Schwarzweiß-Vorlagen, wo Farbtreue keine Rolle spielt. Aber diese Filme sind sehr unempfindlich, feinkörnig und extrem hart. Ansonsten wurde die Schwarzweiß-Photographie und ihre Filme von der Farb-Photographie mehr und mehr verdrängt. Inzwischen gibt es sogar Farbfilme für die Schwarzweiß-Photographie, die nur eine „Farbe“ haben. Technisch gesehen sind es Farbfilme, sodaß sie, wie die anderen Farbfilme, im Automaten entwickelt werden, wodurch die Handarbeit in der Dunkelkammer wegfällt.

Bei den Farbdiafilmen muß man sich je nach Farbtemperatur der Beleuchtung für einen Tageslicht- oder Kunstlichtfilm entscheiden. Will man mit der falschen Filmsorte ein Dia machen, kann man versuchen, mit Farbfilter den Farbstich zu kompensieren. Profis haben dieses Problem nicht. Für jedes Motiv legen sie den passenden Film ein und schießen ihn komplett durch. Nur bei Neonlicht fangen sie an zu tricksen. Bei Negativfilmen gibt es keine Differenzierung für die Farbtemperaturen. Hier werden die

Farbstiche bei der Belichtung der Photos ausgeglichen. Es gibt aber die Unterscheidung in Filme für kurze oder lange Belichtung.

Insgesamt haben Negative selbst eine bessere Qualität als Dias, da die Technologie der Umkehrfilme komplizierter ist. Daher werden in dieser Arbeit Negativfilme eingesetzt. Man kann sie auch mit einem Diascanner scannen und nötigenfalls softwaremäßig invertieren. Macht man Photos von den Negativen, hat man natürlich wieder Verluste.

Die Objektive unterscheiden sich zunächst einmal in der Brennweite. Bei Zoom-Objektiven ist die Brennweite variabel, allerdings sind sie sehr teuer und haben dennoch schlechtere optische Eigenschaften als Objektive mit konstanter Brennweite. In dieser Arbeit kommt ein Makroobjektiv zum Einsatz. Makroobjektive werden benutzt, wenn man sehr nah an das Objekt herangehen will. Es gibt eigentlich keine prinzipiellen Unterschiede zu den normalen Objektiven. Bei den normalen kann man, wenn sie sich nicht weit genug ausfahren lassen, mit Zwischenringen nachhelfen. Allerdings werden bei den nahen Abständen die Linsenfehler deutlicher. Makroobjektive sind daher aufwendiger korrigiert und unterscheiden sich von den normalen Objektiven im wesentlichen durch den Preis.

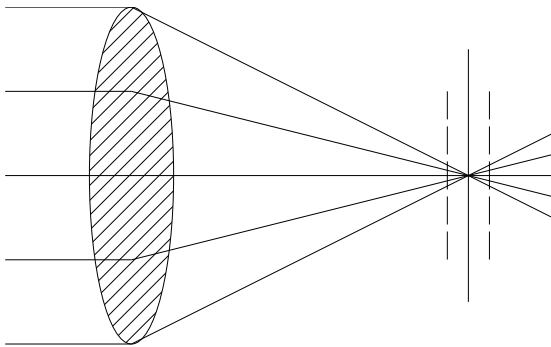


Abbildung 2.9: Bei Defokussierung wird ein Punkt auf eine Streuscheibe abgebildet

Die Blendenzahl ist der Quotient aus Brennweite durch Blendendurchmesser [33]. Bei einer größeren Brennweite steigt die zu beleuchtende Filmfläche quadratisch. Wird im gleichen Maße der Blendendurchmesser erhöht, steigt auch die Blendenöffnungsfläche quadratisch. Bei gleicher Blendenzahl ergeben sich also die gleichen Belichtungsverhältnisse. Die Blendenöffnungsfläche läßt sich in Stufen verändern. Jede Stufe bedeutet eine Halbierung. Als Blendenzahlen er-

geben sich somit  $2^{n/2}$ , bzw. 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22 und 32. Bei lichtstarken Objektiven auch 2. Die beste Auflösung, das entspricht der größten Schärfe, erreicht man mit einer mittleren Blende. Das Maximum liegt bei Blende 8, bzw. 5.6 bei gut korrigierten, lichtstarken Objektiven. Vergrößert man die Blende, machen sich die Linsenfehler stärker bemerkbar – bei kleinerer Blende werden die Beugungsfehler der Blende größer. Daß das Optimum bei der Blendenzahl 8 oder 5.6 liegt, gilt allerdings nur, wenn man eine Ebene auf die Filmebene projiziert, und exakt fokussiert. Wenn man die Blende verkleinert, steigt die Tiefenschärfe, da die Streuscheibe sich mitverkleinert. Ungenaue Fokussierung ist so weniger tragisch. Man braucht dafür allerdings genügend viel Licht.

## 2.7 Mikroskop

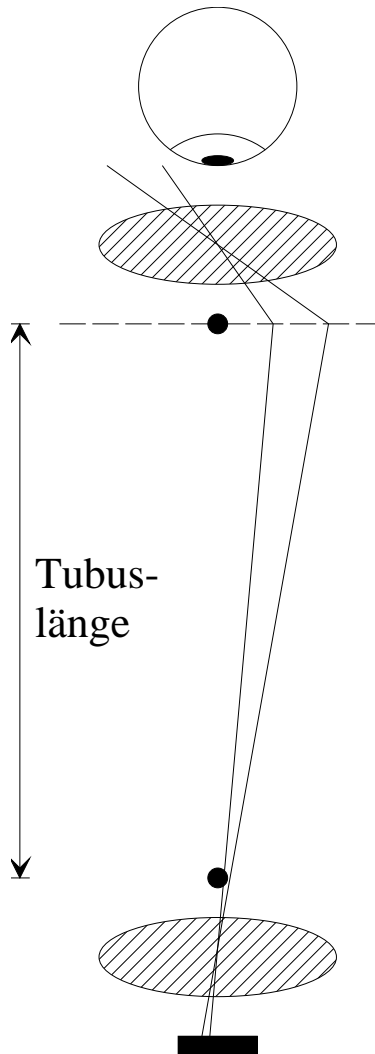


Abbildung 2.10: Strahlengang eines Mikroskops

Die Vergrößerung eines Mikroskops ergibt sich aus dem Produkt der jeweiligen Vergrößerungen von Okular und Objektiv. Die Tubuslänge ist die Entfernung der einanderzugewandten Brennpunkte von Objektiv und Okular. Die Vergrößerung des Objektivs ergibt sich aus  $\frac{\text{Tubuslänge}}{\text{Brennweite}}$ . Das Okular ist eine Lupe, mit dem man sich das reelle Zwischenbild anschaut. Die Lupe hat zwei Aspekte. Altersweitsichtige Menschen benutzen eine Lupe nicht unbedingt zum Vergrößern, sondern um das virtuelle Bild im Unendlichen abzubilden, da ihr Auge nicht mehr auf die Nähe akkomodieren kann. Als Normnahpunkt wurden 25 cm festgelegt [20]. Die Lupenvergrößerung gibt also an, um wieviel man den Gegenstand größer sieht in Relation dazu, daß er 25 cm weit entfernt wäre. Die Vergrößerung des Seh winkels einer Lupe ergibt sich für das virtuelle Bild im Unendlichen mit  $\frac{25 \text{ cm}}{\text{Brennweite}}$ . Geht man mit der Lupe näher an das Objekt heran, wird das Bild noch größer und das virtuelle Bild kommt näher. Beim Mikroskop fokussiert man einerseits mit dem Abstand Objekt zu Objektiv, zum anderen akkomodiert das Auge. Wenn man über längere Zeit arbeiten will, fokussiert man so, daß das Auge entspannt in die Ferne akkomodieren kann. Blickt man regelmäßig auf den Tisch (um z. B. das Objekt zu zeichnen), fokussiert man dagegen auf die Tischentfernung, damit man das Auge nicht ständig neu akkomodieren muß. Die Vergrößerung wird dadurch etwas größer.

## 2.8 Silicone

Silicone sind Kunststoffe, mit Silizium und Sauerstoff als Kettenglieder in Verbindung mit organischen Substituenten (häufig Methylgruppen). Je nachdem, an wievielen Si–O–Si-Bindungen jeweils ein Siliziumatom beteiligt ist, entstehen verschiedene Strukturen und Eigenschaften [31]. Bei einer Bindung entstehen verhältnismäßig kleine Moleküle. Man nennt sie Siliconöl. Bei zwei Bindungen entstehen Ketten, diese Silicone sind als Silicongummi bekannt. Bei drei Bindungen entstehen infolge starker Vernetzungen

Siliconharze. Quarz bzw. Quarzglas mit vier Bindungen zählt man dann allerdings nicht mehr zu den Siliconen. Die Silicone zeichnen sich gegenüber den vergleichbaren Kohlenstoffverbindungen durch hohe Temperaturbeständigkeit und chemische Trägheit aus. Zudem sind sie stark wasserabweisend. Da ihnen hohe Temperaturen nichts ausmachen, kamen alle 3 Silicone zum Einsatz. Die Befürchtung: „Ähnliches löst sich in Ähnlichem“ war unbegründet – das Siliconharz läßt sich nicht durch heißes Siliconöl angreifen. Es war als Isolierspray (es wurde aber eher zum Fixieren und Kleben benutzt) verfügbar, das sich aufgrund von Polymerisation vernetzt und verfestigt.

Daß das Siliconöl so inert ist, daß es sich durch keine harmlosen Lösungsmittel lösen läßt, ist nicht ganz risikolos. Hat man es verschüttet oder verspritzt, kann man es eigentlich nur verreiben, in der Hoffnung, daß der Film immer dünner wird. Ist es erst einmal heiß, kann es erstaunlich gut kriechen, sodaß alles mit einem dünnen Ölfilm überzogen wird. Während Bénard damals Tran benutzt hat, benutzt man heutzutage meist Siliconöl. Es muß also auch Vorteile haben, Siliconöle einzusetzen. Sie altern nicht, sind chemisch inert, haben einen sehr hohen Flammpunkt (größer 300 °C) und sind in vielen Viskositäten im Handel erhältlich. Liest man die Datenblätter der jeweiligen Siliconölhersteller, erkennt man, daß es ihnen darauf ankommt, verschiedene Viskositäten anzubieten. Es werden Diagramme dargestellt, wie man Siliconöle verschiedener Viskositäten mischen kann, um jede beliebige Viskosität zu erreichen. Die Hersteller legen Wert darauf, daß ihr Öl so inert und rein ist, daß man es in Nahrungsmitteln einsetzen kann (als Trennmittel), da es den Verdauungstrakt inert passiert. Sie werden häufig als Hydrauliköl, Trennmittel und, dank Ihrer wasserverdrängenden Wirkung, zur elektrischen Isolation eingesetzt. Es wird aber nicht vertieft, woraus sie chemisch genau bestehen. Es wird nicht gesagt, ob die Moleküle gleich sind, oder ob es sich um Mischungen verschiedener Siliconmolekülsorten handelt.

## 2.9 Bildverarbeitung

Als Bildmatrix werden fast ausschließlich quadratische Pixel benutzt. Es liegt daran, daß den Scannern und Druckern quadratische Koordinatensysteme zugrunde liegen. Das war nicht immer so. Nadeldrucker konnten z. B. in der Horizontalen nur jedes zweite Mal schießen. Somit kann in der nächsten Zeile entschieden werden, ob man in der gleichen Phase bleibt oder in die Zwischengitterplätze schießt. Dadurch lassen sich Rundungen besser nachbilden. Beim rechtwinkligen Koordinatensystem hat jeder Pixel 4 direkte Nachbarn, mit denen er eine jeweils gemeinsame Kante hat (4er-Nachbarschaft). Es gibt noch zusätzlich 4 Pixel, mit denen er jeweils eine Ecke gemeinsam hat (8er-Nachbarschaft). Eine Alternative wäre eine bienenwabenartige Matrix. Hier hat jedes Pixel 6 gleichberechtigte Nachbarn. Für rotationsinvariante Probleme wäre dies die überlegene Matrix. Sie wird aber in der Praxis in der Regel nicht angewandt. Drucker mit einer bienenwabenartigen Matrix könnten nicht gleichzeitig vertikale und horizontale gerade Striche sauber darstellen.

Die meisten Scanner beherrschen 256 verschiedene Graustufen (bei farbigen Scans für jede der 3 Farben) – das entspricht einer Farbtiefe von 8 Bit. Zwar können Menschen nicht 256 verschiedene Grautöne wahrnehmen, aber bei einer linearen Anordnung können wir erst bei 256 Graustufen auch im hellen Bereich keine Stufen mehr wahrnehmen.

Gaußmatrizen werden häufig für eine Faltung eingesetzt, um die Auflösung zu reduzieren, damit die kleineren Bilder in den Speicher passen, bzw. um Rauschen wegzumitteln. Die Gaußfunktion im Ortsraum hat den Vorteil, daß sich auch im Frequenzraum eine Gaußkurve ergibt, sodaß sich in beiden Räumen eine gleichmäßige Transformation ergibt. Man benutzt meist die binomialen Matrizen, da die Rechner schneller mit Integerzahlen rechnen können. Eine Binomialverteilung hat eine Standardabweichung von  $\sqrt{\frac{n}{4}}$ , der Index der eindim. Matrix läuft somit von 0 bis  $n$ . Die eindim. Binomialmatrix wächst also näherungsweise quadratisch bei Vergrößerung der Standardabweichung – im 2dim. ergibt sich schon eine Abhängigkeit mit der 4. Potenz. Glücklicherweise lassen sich 2dim. Binomialmatrizen in eine vertikale und eine horizontale Binomialmatrix separieren, wodurch sich der Rechenaufwand reduzieren läßt. Faltungen sind kommutativ, sodaß es keine Rolle spielt, in welcher Reihenfolge man sie anwendet. Bei sehr großen Faltungsmatrizen kann es sich lohnen, stattdessen im Frequenzraum die entsprechende Multiplikation auszuführen. Allerdings muß dafür eine Fouriertransformation berechnet werden.

Wenn sich Strukturen im größeren Zusammenhang erst auf einer niedrigeren Auflösungsstufe deuten lassen, kann es sinnvoll sein, eine Gaußpyramide zu berechnen [28]. Wenn man mit einer Binomialmatrix der Standardabweichung 1 das Bild abfährt (eine  $5 \times 5$ -Faltungsmatrix), sagt das Abtasttheorem, daß sich die Schärfe und damit die Auflösung halbiert. Wenn man jede 2. Zeile und jede 2. Spalte wegläßt, hat das Bild nur noch 1/4 der Ursprungsgröße. Wiederholt man dies mit dem verkleinerten Bild, entspricht die Binomialmatrix mit der Standardabweichung 1 im Ursprungsbild schon einer Faltung mit der Standardabweichung von 2. Man kann also in den höheren Ebenen auf kleineren Bildern auch mit kleinen Matrizen weitreichende Wirkung erzielen – dadurch sinkt der Rechenaufwand. Man kann dies rekursiv fortsetzen, und erhält damit eine Gaußpyramide. Alle Ebenen zusammen haben nur 1/3 der Größe des Originalbildes. Wenn man an den Zwischenbildern nicht interessiert ist, braucht man für die Berechnung pro Bild sogar nur 5 Zeilen im Speicher zu halten.

Mit dem Tracer-Algorithmus [30] kann man Konturen abfahren. Er ist sehr einfach. Er beginnt an einer Stelle der Kontur und läuft z. B. mit einem Linksdrall so lange die Kontur rechts herum ab, bis er den Ausgangspunkt wieder erreicht hat. Merkt man sich, in welcher Richtung (rauf oder runter) es weiterging, kann man beim horizontalen Durchfahren entscheiden, ob die Punkte innerhalb oder außerhalb der Kontur liegen.

Die Hough-Transformation wird eingesetzt, um Geraden aufzuspüren. Es werden für verschiedene Winkel und Abstände Geraden durch das Bild gelegt, und jeweils die gesetzten Pixel gezählt, die auf diesen Geraden liegen. Man transformiert also ein kartesisches Koordinatensystem in eine Funktion, deren Parameter Winkel und Abstand

vom Ursprung sind. Liegt auf einer derartigen Gerade eine Linie, so findet man hier ein lokales Maximum.

Als erste Ableitung wird häufig der Sobeloperator eingesetzt:

$$S_1 = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad S_2 = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}.$$

Man könnte zwar auch  $2 \times 2$ -Matrizen benutzen, aber man meidet sie, da sie die Werte für die Zwischengitterplätze ermitteln. Bei  $S_1$  entspricht die 1-2-1-Folge in der Vertikalen einer binomialen Glättung, die das Rauschen reduziert, aber in der Horizontalen nicht die Ableitung verwischt. Für die Diagonalenableitungen gibt es:

$$S_3 = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad S_4 = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}.$$

Bei  $S_1$  und  $S_2$  ergibt sich bei einem Gradienten von 1 (ein Bild mit der Folge 1, 0, -1) folglich der Wert  $\frac{1}{8}((1 + 2 + 1) - (-1 - 2 - 1)) = 1$ . Hat das Bild in der Diagonalen eine Folge von 1, 0, -1, hat sie einen Gradienten von  $\frac{1}{1/\sqrt{2}} = 1,41$ , da der Abstand der Diagonalen dichter ist. Bei den diagonalen Sobel-Operatoren ergibt sich  $\frac{1}{8}((1 + 1 + 2 \cdot 2) - (-1 - 1 - 2 \cdot 2)) = 1,5$ . Der Unterschied zwischen 1,5 und 1,41 wird toleriert, da die Rechner mit Integerzahlen schneller rechnen können.

Eine rotationsinvariante zweite Ableitung erhält man aus der Differenz zweier Gaußmatrizen unterschiedlicher Standardabweichung. Die kleinste dieser Laplacematrizen ergibt sich mit:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 16 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & -12 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Neben der zweiten Ableitung sind andere Interpretationen möglich. Die Gaußmatrize glättet die Bilder, die Details fallen weg – sie werden unschärfer, bzw. die hohen Frequenzen werden unterdrückt. Zieht man nun vom Ursprungsbild ein derartig geglättetes Bild ab, enthält das Differenzbild die Details, bzw. die hohen Frequenzen. Eine andere Interpretationsmöglichkeit ist die Umkehrung der Gaußmatrix. Bei der Gaußmatrix sinkt die Schärfe, da man die Nachbarpixel addiert – zieht man sie bei der Laplacematrix ab, kann man sie erhöhen. Die Laplacematrizen werden häufig angewandt, um Kanten zu detektieren.



# Kapitel 3

## Meßaufbau

### 3.1 Der Aufbau zur Bénardzellenerzeugung

Der eingesetzte Ofen ist eine der üblichen Herdplatten, die in Labors benutzt werden. Er ist mit einem Thermostat ausgestattet und ermöglicht Temperaturen bis 300 °C. Da die Bénardzellen sensibel auf Neigung reagieren, steht der Ofen auf einem kleinen Tischchen mit Dreifuß. Die Füße sind jeweils durch Drehen höhenverstellbar, sodaß man den Ofen mit einem Wasserwagenauge eben ausrichten kann.

Die Heizspirale liegt kreisförmig in der Herdplatte. In der Mitte und außen wird nicht geheizt. Damit die Herdplatte dennoch eine möglichst gleichmäßige Temperatur hat, ist sie aus einer gut wärmeleitenden Spezialaluminiumlegierung. Trotzdem war die Temperatur zu ungleichmäßig – sowohl zeitlich, durch das stoßweise Heizen des Thermostats, als auch räumlich, auf der Platte. Um dies weiter auszugleichen, wurde eine rechteckige Aluminiumplatte auf den Ofen gelegt. Um eine gleichmäßige Wärmeübertragung auf die Petrischalen mit dem Öl zu gewährleisten, darf die Oberfläche auf keinen Fall Erhabenheiten aufweisen. Sie wurde erst mit gröberem, dann mit feinem Schmirgelpapier naß geschliffen und dann mit Scheuerpulver nachpoliert. Die eine Seite wurde schwarz lackiert, um das Streulicht beim Photographieren zu reduzieren. Als Lackspray kam ein wärmebeständiger Speziallack zum Einsatz, mit dem sonst Motoren angemalt werden. Auch diese Lackschicht wurde geschliffen, damit sie so dünn wie möglich ist, um die Wärmeleitfähigkeit nicht zu beeinträchtigen. Als Alternative hätte man sie auch schwarz eloxieren lassen können. Aber der Aufwand wäre deutlich größer gewesen.

Die Petrischalen sind aus Steriplan und hatten meist einen Durchmesser von 5 cm (bzw. 6 cm Außendurchmesser der Deckelschale). Kleinere Petrischalen mit einem Außendurchmesser von nur 4 cm wären interessant gewesen, sind aber im Handel nicht mehr erhältlich. Die Glaspetrischalen werden immer stärker von den billigeren Kunststoffpetrischalen verdrängt. Diese müssen nicht mehr gespült werden, da sie nach Gebrauch weggeworfen werden. Bei biologisch gefährlichen Kulturen werden die Schalen gleich

mit verbrannt. Da diese Schalen nicht temperaturbeständig sind, kamen sie allerdings nicht in Frage. Besser wären Petrischalen aus Duranglas, da sie unempfindlich gegen Temperatursprünge sind. Leider sind sie deutlich teurer, und damit im Handel selten anzutreffen – daher müßte man hiervon große Mengen bestellen. Man muß die Steriplanschalen zum Vorheizen nach ganz außen auf die rechteckige Aluminiumplatte stellen, damit sie nicht springen. Allerdings vertragen auch die Steriplanschalen die plötzliche Erwärmung von Zimmertemperatur auf 150 °C „meistens“.

Um eine möglichst gute Wärmeübertragung zu erreichen, kann man Wärmeleitpaste einsetzen. Diese Wärmeleitpasten werden in der Elektrotechnik benutzt, um die Wärme besser auf die Kühlkörper zu übertragen. Bei den auftretenden Temperaturen wird die Paste allerdings sehr weich bis flüssig und neigt zur Geruchsbildung. Sie ist allerdings nicht weiter notwendig, da man regelmäßig Siliconöl verspritzt oder verschüttet und somit alles von einer dünnen Siliconölschicht überzogen ist. Drückt man die Petrischale fest auf die eben geschliffene Aluminiumplatte, saugt sie sich fest.

Es wurde Siliconöl<sup>1</sup> mit einer Viskosität von 500 cSt benutzt<sup>2</sup>. Das Thermostat wurde fast immer auf 150 °C eingestellt, da sich dann die Bénardzellen am günstigsten verhielten. Bei niedrigeren Temperaturen ist die Konvektion zu langsam – man sieht kaum, daß sich was bewegt. Zudem ist das Öl nicht schnell genug, um die Markerteilchen mitzureißen. Wird es deutlich heißer (300 °C), fängt das Öl an zu qualmen und zu riechen. Zusätzlich wird die Verdunstung größer, sodaß Öl an der Apparatur und den Beobachtern kondensiert.

Eine Messung ergab, daß die Ölschale nach 5 Stunden bei einer Temperatur von 150 °C insgesamt um 0,2 mg leichter wurde. Obwohl die Toleranz der eingesetzten, recht empfindlichen Waage etwa 0,3 mg beträgt, lag das Verdunsten bei dieser Temperatur also unterhalb der Nachweisgrenze<sup>3</sup>.

150 °C sind noch recht harmlos. Die Wärmestrahlung ist noch erträglich. Zudem kann man die Petrischalen noch mit der bloßen Hand anfassen, wenn man schnell genug ist, und nicht zu fest zupackt. Will man sie länger festhalten, ist dies problemlos mit einem Lederhandschuh möglich.

Der ganze Aufbau steht im Abzug. Das hat zwei Vorteile. Einerseits kann man alle drei Scheiben der Abzugsvorrichtung herunterziehen, sodaß die Bénardzellen nicht durch Zug beeinflußt werden. Zum anderen kann man notfalls das Absauggebläse aktivieren, wenn sich eine Substanz als nicht hitzebeständig erweist.

---

<sup>1</sup>Dow Corning 200 Fluid der Firma Serva.

<sup>2</sup>Die Si-fremde Einheit der kinematischen Viskosität Stokes ist definiert durch  $St = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . Ein cSt entspricht also  $\text{mm}^2/\text{s}$ .

<sup>3</sup>Eine Verfälschung kann sich dadurch ergeben, daß Staub ins Öl fallen kann. Um eine Gewichtsänderung durch Fingerabdrücke zu vermeiden, wurde die Schale nur mit einer Zange angefaßt.

## 3.2 Erzeugung von Monozellen

Will man nur eine große Zelle in der Petrischale erzeugen, kann man dies dadurch erzwingen, indem man sie zentral heizt. Das zentrale Heizen ist leicht zu realisieren: Man stellt die Schale auf einen wenige Millimeter hohen, groschengroßen Metallzylinder. Auf diese Art war es bei jeder verfügbaren Petrischalengröße von 5 bis 9 cm möglich, Monozellen zu erzeugen. Allerdings muß man gerade bei den großen Schalen dafür sorgen, daß die Petrischale absolut eben liegt, da man sonst schon bei kleinen Kippwinkel große Füllhöhendifferenzen erhält. Ansonsten sind diese erzwungenen Monozellen eher unspektakulär. Laufen sie erst einmal, sind sie kaum noch zu stören oder zu beeinflussen. Es liegt wohl daran, daß das zentrale Heizen eine Zelle erzwingt – die Alternative, in mehrere Zellen zu zerfallen, existiert nicht.

Man kann sie aber auch aufgrund der Geometrie erzeugen. Ab einer genügend hohen Füllhöhe entsteht nur eine Zelle in der kleinen Schale. Je näher man an die kritische Füllhöhe, ab der die Monozelle entsteht, herankommt, desto empfindlicher wird sie. Man kann sich dieser kritischen Füllhöhe von beiden Seiten nähern. Nähert man sich ihr von Oben, läuft sie eigentlich stabil, läßt sich aber z. B. durch Kippen der Schale stören. Wie in der Einleitung erwähnt, wird die oberflächenangetriebene Konvektionsströmung durch Temperaturdifferenzen verursacht, die sie selbst verursacht. Daher braucht sie eine Initialisierung. Bei genügend hoher Füllhöhe ist die Monozelle so stabil, daß sie durch eine auftriebsangetriebene Konvektion oder durch eine zufällige Fluktuation initialisiert wird. Unterschreitet man die kritische Füllhöhe, ist die Zelle instabil. Ist man knapp darunter, kann man sie initialisieren, und zuschauen, wie sie wieder zusammenbricht. Man kann sie auf zweierlei Methoden initialisieren. Einerseits kann man sie, wie beschrieben, kurzfristig zentral heizen. Andererseits kann man es durch Anblasen erreichen. Bläst man von oben exakt senkrecht ganz vorsichtig auf die Mitte des Öls, zieht man die Oberfläche auseinander, und erreicht so die Initialisierung. Man braucht etwas Übung – es ist nicht entscheidend, wie kräftig man bläst. Es reicht aus, ganz wenig zu blasen – es ist entscheidend, daß man exakt senkrecht zur Öloberfläche bläst und die Reaktionen der Oberfläche dabei beobachtet.

Da man erkennt, ob man die kritische Füllhöhe knapp unter- oder überschreitet, kann man sie logarithmisch suchen. Man halbiert dabei jeweils die dazugegebene oder weggenommene Menge und nähert sich so sukzessiv der Grenze. Das Hinzutropfen aus einer Pipette ist gut zu quantifizieren. Leider ist das Wegnehmen ungenau. Wenn man eine Pipette füllt, und dann wieder entleert, bleibt eine nicht unerhebliche Menge in der Pipette. Durch die große Viskosität haftet das Öl an der Glasfläche. Es dauert einige Stunden, bis man sich der kritischen Füllhöhe auf Tröpfchenniveau (ein Tropfen entspricht etwa 8 mg) nähert. Eine der Schalen, mit einer Füllhöhe ganz knapp unter der kritischen, lief nach dem Anblasen jeweils eine 1/2 bis 3/4 Stunde weiter, um dann doch wieder zusammenzubrechen. Die stabilen Zellen zeigen bei Störungen eine Hysterese. Laufen sie erst einmal, muß man etwas kräftiger stören, damit sie zusammenbrechen.

Nimmt man die Störung wieder weg, braucht sie einige Sekunden bis Minuten, um sich wieder als Monozelle zu organisieren.

### 3.3 Markerteilchen

Man muß Markerteilchen in das Öl geben, damit man die Strömungen beobachten kann. Bénard gab damals Graphit dazu. Heutzutage benutzt man meist Aluminiumstaub, da er heller ist. Die Suche nach alternativen Substanzen, die man als Markerteilchen einsetzen könnte, verlief frustrierend. In den Labors gab es eine große Auswahl von Substanzen. Waren sie zu fein, wurde das Öl nur trübe. Sind die Partikel größer, wird der Wichteunterschied zum Öl entscheidend. Die meisten waren zu schwer – sie sanken zu Boden und blieben liegen. Leider stellte sich heraus, daß viele Substanzen nicht wärmebeständig sind. Die leichten schwammen oben und trieben nach außen, wo sie am Rand hängen blieben. Zudem muß man aufpassen, was man in das 150 °C heiße Öl gibt. Ein ganz kleiner Tropfen Wasser verursacht einen siedeverzugsähnlichen Knall, und das Öl spritzt aus der Schale. Die einzige Substanz, die noch wärmebeständig ist, und von der Strömung mitgerissen wird, war Aktivkohle. Die Aktivkohlepartikel drehen sich und funkeln dadurch. Trajektorien kann man damit nicht verfolgen. Zudem altert die Aktivkohle. Nach einigen Tagen verklumpen die Aktivkohlepartikel, da sie sich ineinander verhaken. Die Recherche nach dem im Metallklack eingesetzten Flitter ergab, daß es sich dabei um den schon bekannten Aluminiumstaub handelt.

Die Gemeinsamkeit von Graphit und Aluminiumstaub offenbart sich unterm Mikroskop: Beide haben Plattenstruktur. Bei Graphit ist das bekanntlich auf die chemische Struktur zurückzuführen. Der Aluminiumstaub ist plattenförmig, da die Aluminiumoxydschicht härter ist als Aluminium. Wird die Oberfläche herausgerissen, erhält man eine durchsichtige Oxydschicht mit Metallbeschichtung, wodurch sich die enorme Spiegelwirkung ergibt. Obwohl Aluminium mit einer Dichte von 2,7 g/cm<sup>3</sup> und Graphit mit 2,25 [17] deutlich schwerer sind als das Siliconöl (0,8 bis 0,9), werden sie von der Strömung mitgerissen. Der Grund ist, daß die plattenförmigen Partikel trotz kleiner Volumina dennoch eine große Fläche haben. Damit bieten sie der Strömung eine große Angriffsfläche, zum anderen kann man sie gut sehen. Da sich die Platten plan zur Oberfläche ausrichten, kommt die Spiegelwirkung voll zur Geltung.

Man muß eine größere Menge von den Markerteilchen ins Öl geben, damit man die Strömungen beobachten kann. In dem Bereich, wo das Öl in den Bénardzellen nach oben strömt, häufen sich die Markerteilchen am Boden auf. Die Höhe dieser Haufen kann die Hälfte der Füllhöhe erreichen. Schiebt man mit einem Spatel diese Haufen schnell woanders hin, oder teilt sie, richten sich die Bénardzellen nach diesen Haufen. Die Markerteilchen sind also keine reinen Indikatoren für die Strömung – sie sind an der Strömungsbildung mit beteiligt. Man hat ein neues, selbstorganisiertes System geschaffen. Um den Einfluß der Markerteilchen zu reduzieren, wurden zwei Methoden entwickelt. Einerseits kann man die Markerteilchen verkleinern, sodaß weniger

Material am Boden herumliegt. Zum anderen kann man den Kontrast erhöhen, um auch bei weniger Teilchen die Strömung beobachten zu können. Die Zerkleinerung der Markerteilchen ist recht einfach. Man verrührt dafür den Aluminiumstaub im Öl und hält es in das Ultraschallbad. Im Öl ist der Aluminiumstaub zudem deutlich einfacher zu handhaben. Im unverrührten Zustand neigt er zum Stauben, und es soll möglich sein, durch Wasserkontakt eine Staubexplosion zu verursachen. Es bleibt zwar noch ein kleiner Haufen von zu großen Teilchen, die von der Strömung nicht mitgerissen werden. Aber diesen Haufen kann man mit einer Pipette absaugen, wodurch die großen Teilchen wegselektiert werden.

Daß man durch eine Kontraststeigerung nur noch einen Bruchteil der ursprünglichen Menge von Markerteilchen zugeben muß, fiel auf, als Aktivkohle und Aluminiumstaub zusammen in das Öl gegeben wurden. Man kann dabei den hellen Aluminiumstaub beobachten, wie er von der Strömung mitgenommen wird, während die schwarze Aktivkohle das Licht von unteren Schichten absorbiert, sodaß der störende Untergrund unterdrückt wird. Allerdings neigt die Aktivkohle, wie schon erwähnt, zum Altern. Andererseits stört ihr, wenn auch nur dunkles, Funkeln. Zudem besteht auch bei ihr die Möglichkeit, daß sie auf dem Boden herumliegt und damit die Strömung stört. Um diese Probleme zu lösen, wurde ein Farbstoff gesucht, der sich auflöst.

### **3.4 Kontraststeigerung durch Einfärben**

Der Kontraststeigerung kommt eine große Bedeutung zu. Will man die Trajektorien der Markerteilchen mittels Langzeitaufnahme photographieren, kommt es zu einer Komplikation: Die Markerteilchen, die sich bewegen, belichten ständig eine neue Stelle auf dem Film; während die Markerteilchen, an denen man nicht interessiert ist, da sie bewegungslos am Boden herumliegen, ständig die selbe Stelle auf dem Film belichten. Auf dem Bild dominieren dementsprechend die Markerteilchen, die am Boden herumliegen. Durch Kontraststeigerung kann man diesen störenden Untergrund dämpfen oder sogar ausschalten.

Die Suche nach einem schwarzen Farbstoff erwies sich schwerer als erwartet. In den Labors waren viele Farbstoffe vorhanden. Es zeigte sich, daß die wasserlöslichen Farbstoffe überhaupt nicht im Öl löslich waren, was zu erwarten war. Von den fettlöslichen Farbstoffen lösten sich manche. Aber selbst die, die sich lösten, lösten sich nur schlecht.

Indem man einen Porzellangegegenstand in eine rußende Flamme hält, kann man Ruß produzieren. Verreibt man das Öl mit dem Ruß, wird es tiefschwarz. Erhitzt man dann das Öl, ergibt sich eine Überraschung: Der Ruß verklumpt viel schneller als die Aktivkohle – nach wenigen Minuten bilden sich große Klumpen, und nach einer 1/4 Stunde schwimmen die Klumpen oben im inzwischen klaren Öl.

Es stellte sich heraus, daß die Histologie eine große Auswahl an fettlöslichen Farbstoffen bot. Sudanschwarz läßt sich recht gut lösen. Im kalten Zustand sind die Farbteilchen

noch in kolloidal-trüber Form verteilt, wodurch eine trübe, violette Flüssigkeit entsteht. Erhitzt man die Schale, ergibt sich wieder eine Überraschung: Das Öl wird tiefrot. Löst man den Farbstoff in Methanol, färbt er dagegen intensiv schwarz.

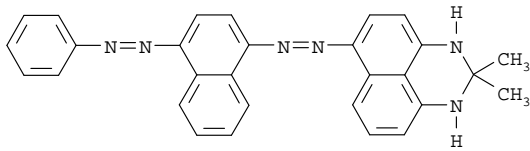


Abbildung 3.1: Der Farbstoff Sudanschwarz

Die Vermutung, daß sich Schwarz durch ein Gemisch von verschiedenen Farbstoffen ergibt, und daß nur der rote in Lösung gegangen ist, ließ sich durch die Farbstoffformel wiederlegen (Abb. 3.1). Allerdings ist aus der Chemie bekannt, daß die Farbe

eines Farbstoffes milieuhängig sein kann – das Mittel, in dem man ihn löst, hat einen Einfluß auf seine Farbe. Da Altöl schon von Natur aus schwarz ist, wurde versucht, mit Altöl Bénardzellen zu bilden. Aber das Altöl war nicht so schwarz wie erhofft. Es entstanden walzenförmige Konvektionen, die durch plötzliche, vermutlich durch Siedeverzug entstehende Gasentwicklungen gestört wurden. Es roch trotz Abzugsgebläse, sodaß diese Möglichkeit nicht weiter verfolgt wurde. Das in den Labors eingesetzte Öl für die Ölbäder verhielt sich ähnlich.

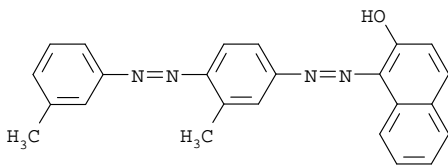


Abbildung 3.2: Der Farbstoff Fettrot B

Die Suche nach einem schwarzen Farbstoff wurde eingestellt. Wenn man eine farbige Flüssigkeit durch einen Farbfiler betrachtet, könnte sich schwarz ergeben. Somit wurden jeweils von allen verfügbaren Farbstoffen Lösungen angesetzt und durch alle verfügbaren Farbfiler betrachtet.

Von allen möglichen Kombinationen war nur eine überzeugend: Fettrot B durch einen Blaufiler betrachtet.

Allerdings gibt es bei der Löslichkeit dieses Farbstoffes ein Problem. Daß man den Lösungsvorgang durch Erwärmung beschleunigen kann, ist bekannt. Dieser Farbstoff hat aber zusätzlich die Eigenschaft, im Heißen besser löslich zu sein. Bei 150 °C oder sogar bei 200 oder 300 °C löst sich sehr viel von diesem Farbstoff. Bei Zimmertemperatur flockt er wieder aus. Daß Problem ist, daß der noch ungelöste Farbstoff empfindlich auf Wärme von mehr als 100 °C reagiert. Ihn dennoch in Lösung zu bringen, ist arbeitsintensiv. Man erhitzt vorsichtig unter ständigem Rühren so lange, bis er anfängt, festzubrennen bzw. zu riechen. Dann hält man ihn in ein Ultraschallbad, um die Farbstoffklumpen zu zerschlagen. Diese Arbeitsschritte wiederholt man ständig, wobei sich die Temperatur ständig steigern läßt. Hat man anfangs zuviel Farbstoff hinzugegeben, kann man den Überschuß durch Zentrifugieren entfernen. Kühlt das Öl wieder ab, flockt der Farbstoff innerhalb weniger Stunden wieder aus.

Den ausgeflockten Farbstoff wieder in Lösung zu bringen, ist nicht so schwierig. Man kann die Petrischale außen auf die Aluminiumplatte stellen, damit er sich allmählich löst. Damit ist das Problem, daß die Steriplanpetrischalen keine Temperatursprünge vertragen, nicht weiter tragisch. Der Farbstoff färbt das Öl mit steigender Intensität erst gelblich, um dann über alle Orangetöne hinweg intensiv rot zu werden. Dieses

eigenartige Verhalten läßt sich, wie in der Auswertung gezeigt, physikalisch erklären. Dieses Farbenspiel zeigen auch die Markerteilchen, je nachdem wie tief sie im Öl liegen. Somit erhält man über die Farbe eine Information über die Tiefe und somit einen guten 3dim. Eindruck. Strahlt man die Petrischale mit blauem Licht an, leuchten die Markerteilchen auf der orangen Oberfläche intensiv blau.

Will man mit Langzeitbelichtung die Trajektorien der Oberfläche photographieren, kann man den Untergrund mit einem Blaufilter komplett ausblenden. Trotzdem hat man, im Gegensatz zum schwarz gefärbten Öl die Möglichkeit, durch daß Öl hindurchzuschauen. So kann man erkennen, ob irgendetwas hineingefallen ist, bzw. kann überschüssige Markerteilchen am Boden mit der Pipette absaugen. Daß der Farbstoff zu Beginn des Heizens erst langsam in Lösung geht, ist nicht weiter tragisch. Da er sich erst allmählich auflöst, gibt die Farbverteilung am Boden die Muster der Bénardzellen wieder, obwohl die Strömungsgeschwindigkeit noch nicht ausreicht, die Markerpartikel mitzureißen.

Insgesamt muß man durch die Kontraststeigerung in Relation zu den ungefärbten Bénardzellen um Größenordnungen weniger von den Markerteilchen in das Öl geben, um die Strömungen beobachten zu können. Ohne Farbstoff gibt man eine Spatelschaufel von dem Aluminiumstaub in das Öl, damit man etwas sehen kann. Mit dem Farbstoff braucht man nur einmal kurz mit dem Spatel in das, mit Ultraschall zerkleinerte Aluminiumstaub/Öl-Gemisch zu tippen, um es dann in das gefärbte Öl zu verrühren.

Unklar ist allerdings, inwieweit dieser Farbstoff die physikalischen Eigenschaften, wie z. B. Viskosität und Oberflächenspannung, beeinflußt. Bei oberflächenaktiven Substanzen, wie z. B. ein Tropfen Spülmittel in Wasser, können auch kleine Mengen große Wirkung zeigen. Es fiel auf, daß bei den ungefärbten, mit viel Markersubstanz angerührten Bénardzellen und Monozellen mit Aktivkohle oder Graphit einfacher zu erzielen sind, als mit Aluminiumstaub. Dieser Eindruck läßt sich schlecht quantifizieren, da man die Markerteilchen nicht austauschen kann. Es ist nicht auszuschließen, daß diese Markerteilchen die mechanischen Eigenschaften des Öls verändern.

## 3.5 Photographie

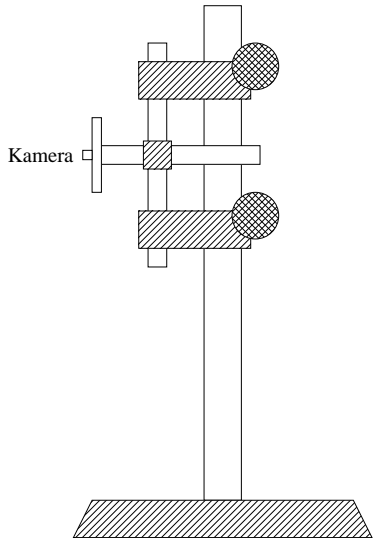


Abbildung 3.3: Das Stativ für die Kamera

Ein gewöhnliches Photographenstativ ließ sich aufgrund der Sperrigkeit nicht in den Abzug stellen. Ein übliches, höhenverstellbares Laborstativ neigte allerdings zum Schwingen. Das Problem ließ sich durch eine doppelte Führung verhindern, sodaß man zwei Drehknöpfe hat, um die Höhe zu variieren. Um der Verwacklung vorzubeugen, wurde mittels Fernauslöser fotografiert.

Durch Langzeitaufnahmen kann man die Trajektorien der Markerteilchen visualisieren. Da sich die Teilchen aber bewegen, belichten sie ständig eine neue Stelle des Filmes. Um dennoch eine genügende Schwärzung auf dem Film zu erreichen, muß man extrem Überbelichten. Da die Bénardzellen überwiegend oberflächenangetrieben sind, ist eine, vom Untergrund ungestörte, 2dim. Visualisierung der Oberfläche interessant. Mit dem eingefärbten Öl ist es möglich, bis auf die Oberfläche alles

andere komplett auszublenden. Da es rotblinde Filme leider nicht mehr gibt, wird stattdessen eine blaue Glasfilterplatte vor das Objektiv geschoben. Diese schluckt 6 Blenden Licht, es kommt also nur noch  $1/64$  des einfallenden Lichtes durch. Diese Glasfilterplatte<sup>4</sup> ist so intensiv blau, daß man eine Stunde hindurchschauen kann, ohne daß der Weißabgleich des Auges kompensieren kann, daß man nur Blau sieht. Es wurde eine Aluminiumhalterung gefertigt, die sich vor das Objektiv schrauben läßt. Hat sich das Auge noch nicht an das dunkle Blau gewöhnt, ist es im wesentlichen sehr dunkel. Damit man das Objektiv dennoch fokussieren kann, kann man die quadratische Filterplatte aus der Halterung herausziehen.

Hat man zwar schon die Lichtverhältnisse, aber noch nicht das Objekt, wird beim Photographieren eine Graukarte eingesetzt, um die Belichtung einstellen zu können. In Relation zur Graukarte muß man wegen der sich bewegenden Markerteilchen um 7 bis 8 Blenden überbelichten. Da die blaue Filterplatte zusätzlich 6 Blenden schluckt, braucht man trotz Langzeitbelichtung von 2 Sekunden und weit geöffneter Blende (Blendenzahl 4) extrem viel Licht. Es wurden zwei Kaltlichtquellen mit jeweils 150 Watt eingesetzt. Eine Kaltlichtquelle ist eine Reflektorhalogenlampe, deren Licht über schwanenhalsartige Glasfaserbündel geführt wird. Die Wärmestrahlung wird durch die Glasfasern absorbiert, sodaß dieses Licht kaum aufheizt. Am Ende gibt es ein Linsensystem, das als Fokussierer – oder genauer Defokussierer – wirkt, um zu verhindern, daß jede Glasfaser einzeln projiziert wird. Diese Lampen sind insofern hervorragend, als daß sie einen sauberen kreisförmigen Spot produzieren. Auf die Petrischalen mit 5 cm Durchmesser werden also 300 Watt Halogenlicht gestrahlt. Eine Sonne [18] entspricht

<sup>4</sup>Von der Firma Schott: Typ BG12, 50 × 50 mm groß und 3,0 mm dick.



1 kW/m<sup>2</sup>. Das entspricht in etwa der Strahlungsleistung, die am Äquator mittags auf eine senkrechte weiße Fläche fällt. Schon diese Helligkeit ist für das menschliche Auge unerträglich hoch. Auf die Petrischale fällt somit die 153fache Strahlungsleistung der Sonne. Da der Wirkungsgrad von Halogenlicht<sup>5</sup> geringer ist, als der der Sonne, ergibt sich insgesamt eine Helligkeit von 42 Sonnen. Der Wirkungsgrad dürfte durch die Glasfaserbündel nur unwesentlich verringert werden.

Um die Spiegelwirkung des Aluminiumpulvers auszunutzen, muß man möglichst senkrecht auf die Ölfläche leuchten. Man darf allerdings nicht zu senkrecht strahlen, da man sonst das Spiegelbild der Lichtquelle im Öl sieht. Strahlt man mit einer Lampe leicht schief auf das Öl, ergibt sich, daß das Bild, je nach Seite, gleichzeitig über- und unterbelichtet ist. Mit einer zweiten Lampe, die zwei Schwanenhälse hat, ließ sich mit insgesamt 3 Spots das Problem beheben.

Daß man im Blauen photographiert und mit Halogenlampen beleuchtet, ist nicht optimal. Glühlampen erzeugen wesentlich mehr rotes als blaues Licht. Der Versuch, mit einer Quecksilberhochdruckdampf Lampe zu leuchten, brachte allerdings keinen Vorteil, da der Spot nicht so exakt ausgeleuchtet wurde. Wie schon erwähnt, ergab sich sonst keine andere Farbstoff/Farbfiler-Kombination, mit der man im Blauen oder Grünen hätte photographieren können.

### 3.6 Wölbung der Oberfläche

Eine Lupe bildet einen in die 2. Brennweite gestellten Gegenstand auf der anderen Seite wieder in der 2. Brennweite ab. Bei einem Hohlspiegel ergibt sich diese Situation für den Mittelpunkt des Wölbradius. Die einfache Brennweite liegt also beim Spiegel genau auf der Hälfte zwischen dem Mittelpunkt des Wölbradius und seiner Spiegelfläche. Für Wölbspiegel (die z. B. im Straßenverkehr an unübersichtlichen Stellen aufgestellten werden) ergibt sich, daß das virtuelle Bild für Gegenstände, die sich zwischen 2. Brennweite bis Unendlich befinden, zwischen dem Wölbradius des Spiegels und der Hälfte zwischen diesem und der Spiegelfläche abgebildet werden.

Wie man an dem Bild 3.4 erkennt, wird das Spiegelbild im Öl in dem Bereich, wo das Öl der Monozelle heraufkommt, verzerrt und verkleinert dargestellt. Die Oberfläche ist also nach oben gewölbt, und nicht nach unten, wie in den Grundlagen 2.1 erwähnt. Das Öl wurde mit Sudanschwarz dunkel und trübe eingefärbt, damit man nicht durch das zweite Spiegelbild gestört wird, daß sich aus dem Übergang von Petrischale zum Öl ergibt. Schaut man sich diese Wölbung genauer an, erkennt man, daß sie unruhig zittert. Dieses Vibrieren äußert sich beim Photographieren bei längerer Belichtung durch eine Unschärfe, wobei sich das Zittern wegmittelt. Will man stattdessen eine Momentaufnahme des Zitterns festhalten, hätte man blitzen können. Allerdings sind

---

<sup>5</sup>Halogenlicht erzeugt 26 lm/W, die Sonne 95 lm/W.

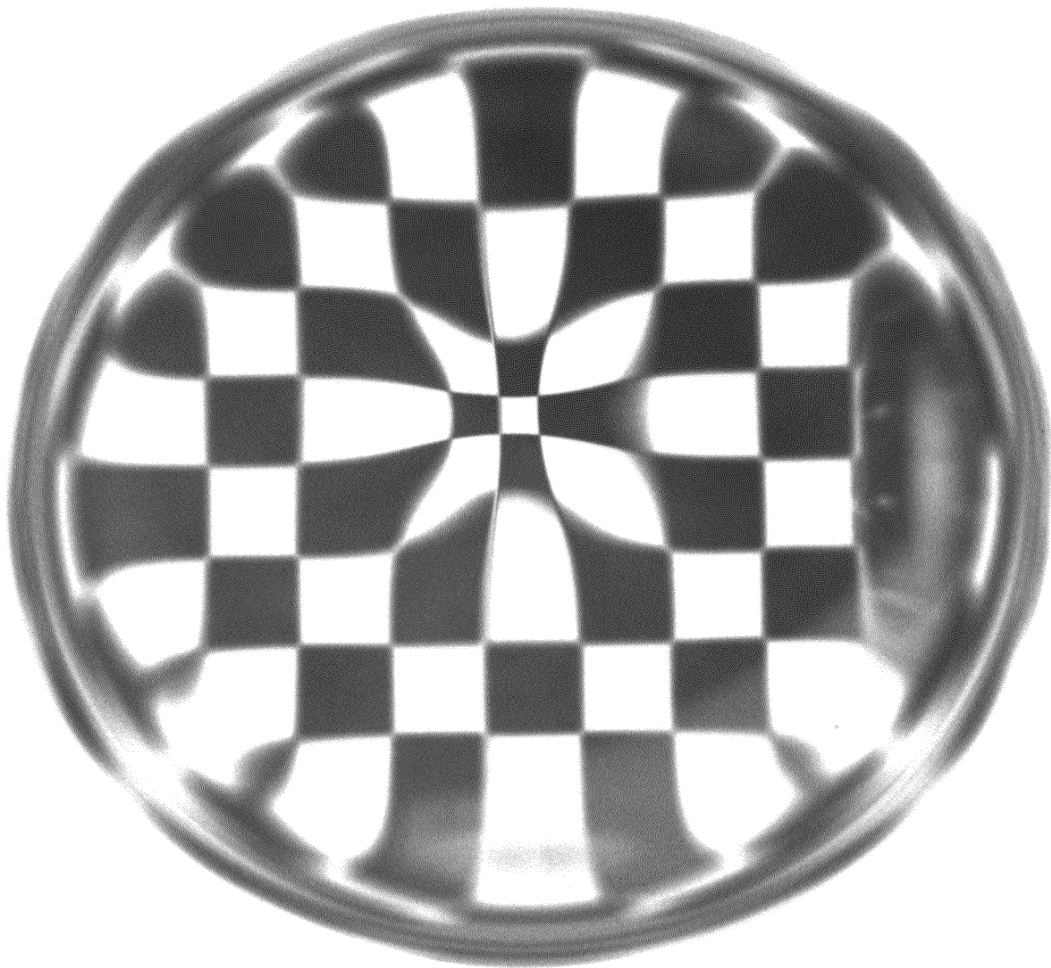


Abbildung 3.4: Das Spiegelbild eines Schachbretts im Öl einer Monozelle

die Lichtverhältnisse dann ungewöhnlich. Es gibt zwar Belichtungsmesser, mit denen man beim Probelblitzen die Helligkeit ermitteln kann, allerdings müßte die Kamera selbst mit ihrer Mittenintegralmessung die Helligkeit messen. Denn nur sie sieht das Spiegelbild, um das es geht.

Die vibrierende, sprudelnde Wölbung widerspricht der Vorstellung, daß es sich um eine stationäre Strömung handelt. Sie erinnert an die Situation, die sich ergibt, wenn man einen Gartenschlauch nur ganz schwach aufdreht, und ihn genau senkrecht so nach oben hält, sodaß der Strahl wieder in sich selbst zurückfällt.

### 3.7 Stereomikroskop

Es stand ein Stereomikroskop zur Verfügung. Die Einfärbung hilft auch hier, um eine Information über die Tiefe zu erhalten. Aufgrund der Wölbung ergibt sich allerdings, daß in dem interessanten Bereich, wo daß Öl nach oben kommt, alles am schaukeln ist. Zudem neigt das Stereomikroskop aufgrund der Wölbung zum Schielen. Man kann versuchen, dies durch den verstellbaren Augenabstand zu kompensieren. Aber das Schaukeln der vibrierenden Wölbung macht einem zu schaffen: man wird seekrank, wenn das Gleichgewichtsorgan und das Auge sich widersprechende Ergebnisse liefern<sup>6</sup>. Der Vorteil, daß das Stereomikroskop stereoskopisch einen 3dim. Eindruck erreicht, wird durch die vibrierende Wölbung fast vollständig verhindert.

Die Aluminiummarkerteilchen brauchen je nach Zelle für den Weg von der Mitte bis nach außen 20 bis 30 Sekunden. Am Boden entlang brauchen sie allerdings je nach Größe doppelt bis dreimal so lang. Das liegt daran, daß sie ständig auf dem Boden aufstoßen und sich dadurch auf eine „polternde“ Art und Weise fortbewegen. Auf dem kleinen Häufchen, der in dem Bereich der Bénardzellen entsteht, wo das Öl nach oben strömt, bleiben sie meist erst liegen. Sie richten sich danach langsam auf und beginnen zu tänzeln, bis sie von der Strömung erfaßt, nach oben beschleunigt werden.

Für gewöhnlich versucht man, durch Hin- und Herdrehen ein möglichst scharfes Bild zu erhalten. Am Bild kann man allerdings nicht erkennen, ob man knapp über oder unter der Fokusebene liegt: es ist auf die gleiche Art und Weise unscharf. Im Gegensatz zu einer Kamera hat der Mensch aber noch eine Chance, durch unbewußt sehr schnell durchgeführtes Akkomodieren zu ermitteln, ob man knapp oberhalb oder unterhalb der Fokusebene liegt (wie in den Grundlagen ausgeführt, schaut man sich mit einer Lupe ein Zwischenbild an, daß verschieden weit entfernt liegen kann). Aber selbst nach tagelangem Trainieren schafft man es nicht, das Markerteilchen innerhalb der einen Sekunde, in der es aufsteigt, nicht zu verlieren.

Man hat nur die Möglichkeit, ein auf dem Boden liegendes Teilchen zu beobachten, bis es beginnt, von der Aufwärtsströmung erfaßt zu werden. Wenn man dann die

---

<sup>6</sup>Auf einem Schiff wird geschaukelt, aber die Kajüte sieht fest aus.

Beschleunigung der Teilchen kennt, kann man das Mikroskop mitbeschleunigen. Hatte man das Teilchen dabei immer im Fokus, hat man die richtige Beschleunigung gefunden. Durch Versuche ergab sich, daß die Teilchen erst gleichmäßig beschleunigt werden, und bis knapp zur Oberfläche sehr schnell werden. Kurz vor der Oberfläche muß man nahezu schlagartig abbremsen, da die Teilchen dann zur Seite ausweichen, um aus dem Gesichtskreis des Mikroskops verschwinden. Die Zentrifugalkräfte dieses abrupten Abbiegens könnten erklären, warum die Oberfläche sich nach oben wölbt.

Es war allerdings nicht möglich, Markerteilchen zu beobachten, die wieder absinken. Sie sinken zu dicht an der Glaswand der Petrischale entlang, sodaß man sie mit der Mikroskopoptik nicht betrachten kann.

## **3.8 Temperaturmessungen**

### **3.8.1 Thermodrähte**

Die üblichen Thermometer sind zu groß. Hält man sie ins Öl, brechen die Strömungen zusammen. Auf Thermoelementen basierende Thermometer messen nur mit ihrer kleinen Lötstelle. Allerdings sind die meisten kommerziellen Thermometer nur für Temperaturen bis 70 oder 100 °C ausgelegt. Es gibt auch welche, die auch höhere Temperaturen messen können, aber sie sind extrem teuer und dennoch ungenau. Es liegt daran, daß es beim Temperaturmessen mit Thermospannung zu großen Konflikten kommt. Einerseits kann man mit der Thermospannung nur Temperaturdifferenzen ermitteln. Anstatt die andere Lötstelle auf eine Normtemperatur zu bringen, wird meistens die Temperatur dieser Lötstelle durch ein Widerstandsthermometer ermittelt. Man hat also zwei Thermometer, eins mißt die Temperaturdifferenz, das andere die Vergleichstemperatur. Die eigentliche Temperatur wird dann aus beiden berechnet. Das andere Problem ist, daß man nicht nur an den beiden Lötstellen Thermospannungen erhält. Jeder Übergang verursacht Thermospannungen: Benutzt man Thermodrähte aus Nickel, gibt es einen Nickel-Lötzinn-, einen Lötzinn-Platinenkupfer-, ein Kupfer-Operationsverstärkerbeinchen- und einen Operationsverstärkerbeinchen-Silizium-Übergang, und zurück. Haben alle diese Übergänge die gleiche Temperatur, heben sich alle Spannungen weg. Das heißt, daß jede Temperaturdifferenz innerhalb des Schaltungsaufbaus für Thermospannungen sorgt! Besonders problematisch wird das ganze, wenn man Materialien einsetzt, die in der thermoelektrischen Spannungsreihe nicht zwischen den beiden, eigentlich zum Messen bestimmten Metallen liegen, sondern weit davon entfernt.

Thermospannungselemente werden auch eingesetzt, um die, bei Metallschmelzen vorkommenden, sehr hohen Temperaturen zu messen. Dafür kommen hochschmelzende, aber sehr teure Platinmetalle zum Einsatz. Außerhalb des heißen Bereichs ersetzt man

sie dann aus Kostengründen für die Zuführung bis zum Meßgerät durch Metalle, die in der Spannungsreihe möglichst dicht dranliegen.

Die oberflächenangetriebenen Konvektionen werden durch Temperaturdifferenzen der Oberfläche verursacht. Man kann die Thermospannungselemente benutzen, um diese Temperaturdifferenzen zu messen, da die Lötstellen sehr klein sind. Der erste Versuch, mit zwei, gegeneinander in Reihe geschalteten kommerziellen NiCr-Ni-Thermodrähten die Temperatur zu messen, schlug fehl. Da die Metalldrähte die Wärme besser leiten, als der Wärmeübergang von Öl zur Lötstelle, wirken die Drähte praktisch als Kühlkörper. Man mißt zwar die Differenztemperatur zwischen den beiden Lötstellen, aber die Lötstellen haben nicht mehr die Temperatur des sie umgebenden Öls. Mit dieser Anordnung konnte man die Eintauchtiefe ermitteln, aber keine Temperaturdifferenzen des Öls. Zwischen 1 mm und 2,5 cm Eintauchtiefe ergab sich eine Temperaturdifferenz von etwa 10 °C. Die Drähte hatten einen Durchmesser von 0,33 mm. Bei physiologischen Temperaturen fällt dieser Effekt nicht weiter auf, da die Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und zu messender Temperatur nicht so groß ist.

Damit man die Wärmeleitung der Drähte, und damit deren Kühlwirkung, reduzieren kann, wurden dünnere NiCr- und Ni-Drähte von 0,1 mm besorgt<sup>7</sup>. Zwar ergibt sich dadurch eine verringerte Querschnittsfläche des Drahtes. Aber auch die Wärmeübertragungsfläche zwischen Öl und Draht wird kleiner. Man kann jetzt zwar die Drähte 1/3 so tief ins Öl hineinhaltend, dann ergeben sich aber die gleichen Temperaturverhältnisse wie bei den dicken Drähten. Da sowohl Querschnittsfläche des Drahtes als auch Wärmeübertragungsfläche zwischen Öl und Draht quadratisch, also um den Faktor 0,1 kleiner werden, ergeben sich wieder die gleichen Temperaturen. Im analogen elektrischen Fall ergeben sich ja auch die gleichen Spannungen, wenn man alle Widerstände um den gleichen Faktor verkleinert. Diese, auf 1/3 reduzierte Eintauchtiefe änderte das Problem nicht prinzipiell.

Man kann allerdings die Temperatur der Drähte an die zu messenden Temperaturdifferenzen anpassen. Es ergibt sich, daß die Temperatur des Drahtes nur auf den letzten Millimetern einen Einfluß auf die Temperaturmessung hat. Ab 2 cm Entfernung hat eine Erhitzung der Drähte überhaupt keinen Einfluß mehr. Man kann die Drähte nicht auf thermostatgesteuerten Heizkörpern befestigen, da deren Temperaturschwankungen die Messung verfälschen würden. Das Problem läßt sich durch PTC-Widerstände lösen. Das sind Widerstände mit einem positiven Temperaturkoeffizienten – bei Erwärmung vergrößert sich also deren Widerstand. Legt man Spannung an diese PTCs, werden sie als ohmsche Verbraucher warm. Dadurch wird ihr Widerstand größer, wodurch sie nicht mehr weiter heißer werden – es ergibt sich eine Gleichgewichtstemperatur. Die meisten PTCs werden als Temperatursensoren eingesetzt. Zwar kann man mit allen PTCs auch heizen, aber es gibt, extra für diesen Aufgabenbereich entwickelte, spezielle PTCs. Ihre Widerstands-Temperaturkurve ist so gestaltet, daß sie für eine festgelegte Spannung eine bestimmte Temperatur sauber halten.

---

<sup>7</sup>Von der Firma Isabellenhütte.

Es kamen PTCs zum Einsatz<sup>8</sup>, die mit 30 Volt 130 °C erreichen. Sie haben etwa die Form und Größe einer Suppenlinse. Thermodrähte kann man zusammenschweißen, löten oder einfach verdrillen. Die 0,1-mm-Drähte werden allerdings gelötet, da sie beim Schweißen wegtropfen können. Zahnprothesentechniker haben die Möglichkeit, mit einer millimeterdünnen Lötflamme zu löten. Die Drähte wurden unter Spannung übereinandergekreuzt und zur Rotglut erhitzt. Universallot wurde kurz dagegengetippt, wodurch die Drähte zusammenkleben. Mit einem Scherchen kann man an den Drähten entlanggleiten und direkt an der Lötstelle abschneiden. Unter der Lupe erkennt man, daß die Lötstelle tatsächlich nur 0,1 mm groß ist. Das Universallot sieht man nicht. Durch die Kapillarwirkung wird es zwischen die beiden Drähtchen gezogen und verklebt sie. Da man die Widerstände der Thermodrähte kennt, kann man überprüfen, ob der Kontakt gegeben ist.

Um mit zwei Thermoelementen Temperaturdifferenzen zu messen, müssen sie gegeneinander in Reihe geschaltet werden. Man braucht also eine Zuführung des einen Materials zur Lötstelle, ein kurzes Verbindungsstück des anderen Materials zur zweiten Lötstelle, und dann wieder eine Zurückführung des ersten Materials zum Meßgerät. Da das Kupfer der Platine in der Spannungsreihe in etwa in der Mitte zwischen Ni und NiCr liegt, spielt es keine Rolle, welches Metall man für die Zuführung, und welches für das kurze Verbindungsstück benutzt – der Fehler ist beide Male gleich groß.

Auf die PTCs wurden mit einem speziellen, wärmebeständigen Epoxy-2-Komponentenkleber kleine, nasenartige Erhebungen modelliert. Dann wurden die Thermodrähte um die PTCs gewickelt, wobei man aufpassen muß, daß sich die beiden verschiedenen Drähte nicht berühren, da man sonst eine Parallelschaltung von Spannungsquellen erhält. Das ganze wurde dann mit Siliconspray fixiert. Um die feinen Drähtchen zu schützen, wurden sie in steife Teflonschläuchchen geschoben. Die Teflonschläuchchen und die Stromzuführung der PTCs wurden mit Silicongummi auf Novotextstückchen<sup>9</sup> aufgeklebt, die man festklemmen kann. Die Klemmen befinden sich an biegsamen Ärmchen, die man an einem Stativ mit einem Drehknopf rauf und runter fahren kann.

### 3.8.2 Verstärker für die Thermospannung

Die Abbildung 3.5 zeigt den Schaltplan des Verstärkers. Ein Grad Temperaturdifferenz ergibt bei NiCr-Ni im Temperaturbereich zwischen von 100 bis 200 °C etwa 40,0 µV Thermospannung<sup>10</sup>. Der Verstärker verstärkt um den Faktor 1000, da sich mV-Spannungen durch handelsübliche Multimeter messen lassen. Da die langen Thermodrähte praktisch als Antennen wirken, werden die hohen Frequenzen zunächst durch einen Tiefpaß (16 Hz Grenzfrequenz) gedämpft.

<sup>8</sup>Hersteller: Siemens, C 1011 Δ A80 (bei Conrads bestellbar).

<sup>9</sup>Novotex ist ein wärmebeständiges, leinengewebeverstärktes, pertinaxähnliches Material, das z. B. beim Motorenbau Verwendung findet.

<sup>10</sup>Nach Tabellenwerk [16] bzw. DIN 43710.

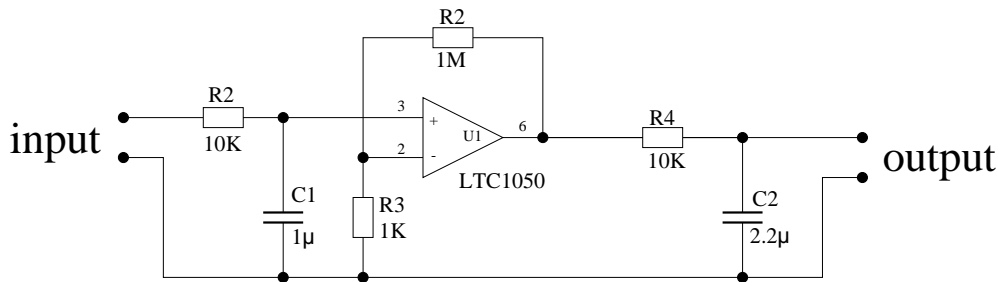


Abbildung 3.5: Schaltplan des Verstärkers für die Thermospannung

Mit Operationsverstärkern kann man invertierende und nichtinvertierende Verstärker konstruieren. Hier kommt der nicht-invertierende zum Einsatz, da man die Thermospannung, wie in den Grundlagen dargelegt, nicht belasten darf. Der spannungsgeteilte Ausgang wird dabei auf den negativen Eingang rückgekoppelt. Da der Operationsverstärker die Differenz seiner beiden Eingänge um den Faktor  $A_D = 10^5$  verstärkt, fällt hier kaum Spannung ab. Durch die Rückkopplung ergibt sich, daß der Ausgang eine so hohe Spannung ausgeben muß, daß sie spannungsgeteilt am negativen Eingang so groß wird, daß sie der positiven Eingangsspannung entspricht. Bei der Thermospannung fließt also nur der Strom, der sich aus dem Widerstand  $R_1$  und der um den Faktor  $10^{-5}$  kleineren Spannung ergibt.

Der Rückkopplungsfaktor [23] ergibt sich aus der Spannungsteilung:

$$k = \frac{R_3}{R_4 + R_3} \approx \frac{R_2}{R_4}.$$

Die Verstärkung ergibt sich aus dessen Kehrwert. In diesem konkreten Fall hat man also eine Verstärkung von 1000. Durch die Näherung ist sie eigentlich um 0,1 % größer. Durch den, wenn auch kleinen, Spannungsabfall zwischen den Eingängen des Operationsverstärkers ergibt sich insgesamt eine etwas kleinere Verstärkung  $A$ :

$$A = \frac{A_D}{1 + kA_D},$$

Da im konkreten Fall der Schleifenfaktor  $g = kA_D \approx 100$  ist, ergibt sich ein um etwa 1 % kleinerer Verstärkungsfaktor. Aber die eigentlichen Fehlerquellen sind die beiden Widerstände. Die eingesetzten Widerstände haben eine Fehlertoleranz von 1 % und einen zu vernachlässigenden Temperaturkoeffizienten von 50 ppm/K. Insgesamt hat man also einen systematischen Fehler von insgesamt 2 %.

Die Operationsverstärker haben im Eingangsbereich eine Offsetspannung. Man kann versuchen, diese mit einem Potentiometer abzugleichen. Allerdings fiel auf, daß der zunächst eingesetzte Präzisionsoperationsverstärker dennoch eine Drift von bis zu 10  $\mu$ V aufwies. Dies ist z. B. auf Temperaturdrift zurückzuführen. Er wurde dann gegen einen chopperstabilisierten Operationsverstärker ausgetauscht. Diese Operationsverstärker gleichen sich selbst, durch einen internen Oszillator gesteuert, ab [23]. Mit

einer Frequenz von einigen kHz ermittelt er im Wechsel seinen eigenen Nullpunkt, speichert diesen in einem Kondensator ab, und korrigiert damit seinen Hauptverstärker. Es ergab sich zwar immer noch ein kleiner Offset, der blieb aber konstant und ließ sich herausrechnen.

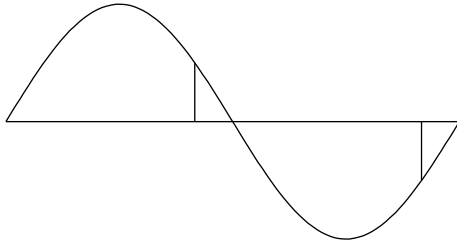


Abbildung 3.6: Sampeln einer Sinuskurve

Schaut man sich mit einem Oszilloskop das Ausgangssignal an, sieht man einerseits Netzbrumm mit einer Amplitude von 20 mV, und andererseits die Chopperfrequenz mit 21 mV. Daher wurde noch ein Tiefpaß mit einer Grenzfrequenz von 7 Hz hinter den Operationsverstärkerausgang geschaltet, der den Brumm auf 3 mV reduziert. Die hohe Chopperfrequenz wird komplett unterdrückt. Die Ausgangsspannungen wurden mittels einer

AD-Karte von einem PC aufgenommen. Die benutzte AD-Karte hat von  $-1$  bis  $1$  Volt eine Auflösung von 12 Bit. 10 Bit ergeben etwa den Faktor 1000, ein Bit wird für das Vorzeichen benötigt, sodaß man mit  $0,5$  mV auflösen kann. Um den verbleibenden Netzbrumm zu eliminieren, wurde mit einem geraden Vielfachen der Netzfrequenz gesampelt. Dadurch ist gewährleistet, daß man jeweils den entsprechenden Wert aus dem Tal und dem Berg der Sinuskurve erhält, sodaß sie sich wegmitteln lassen. Dafür muß man dann eine  $1/50$  Sekunde, oder ein Vielfaches dieser Zeit, aufintegrieren. Es wurde mit  $500$  Hz gesampelt, und  $5$  mal pro Sekunde der aufintegrierte Wert ermittelt.

Das Bild 3.7 zeigt das Rauschen dieser Anordnung. Es ergibt sich eine Standardabweichung von  $0,2$  mV. Dieser Wert ist kleiner als die Spannung, die die AD-Karte auflösen kann. Das ist nur dadurch möglich, daß jeweils  $500$  Werte gemittelt werden, wodurch insgesamt ein um  $\sqrt{500}$  genauerer Wert entstehen könnte. Es läßt sich nicht entscheiden, ob das Rauschen von der AD-Karte oder dem Thermometer herrührt. Für die  $5$  mal pro Sekunde gemessene Temperatur ergibt sich daraus eine Standardabweichung von  $0,005$  °C.

Das Bild 3.8 zeigt eine Testmessung, mit der überprüft wurde, ob das System Temperaturdifferenzen mißt. Gemessen wird die Temperaturdifferenz, zwischen einer kalten und sich abkühlenden Ölschale. Taucht man die Temperatursensoren nicht in eine Flüssigkeit, reagieren sie schon auf die Wärmestrahlung eines sich nähernden Fingers.



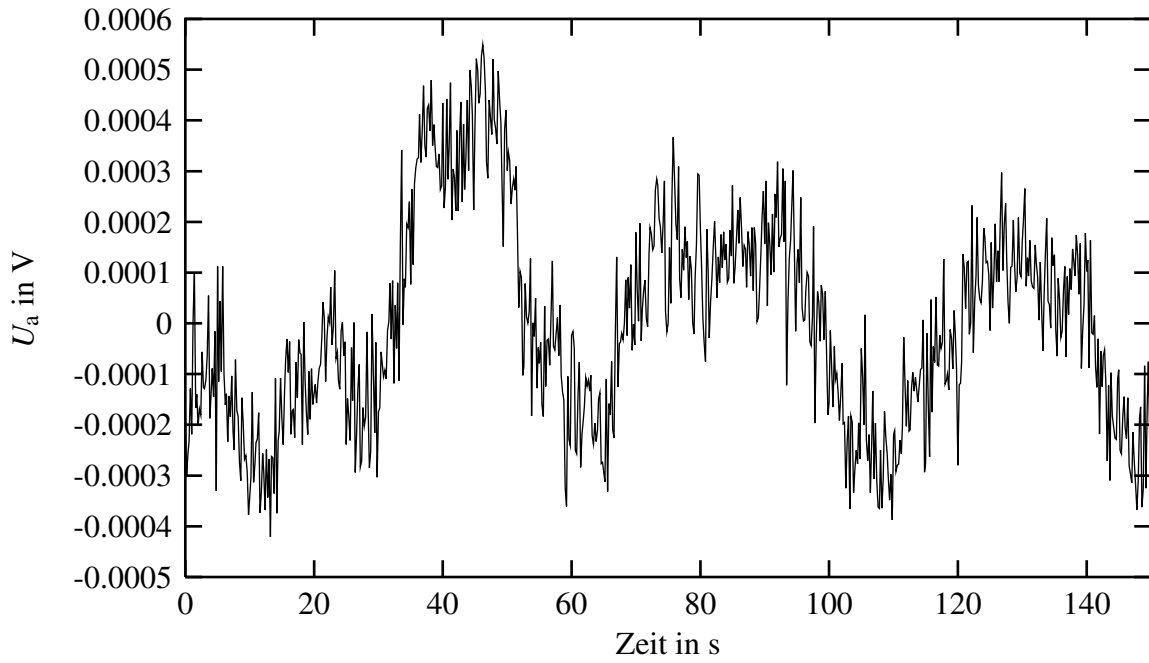


Abbildung 3.7: Das Rauschen des Thermometers

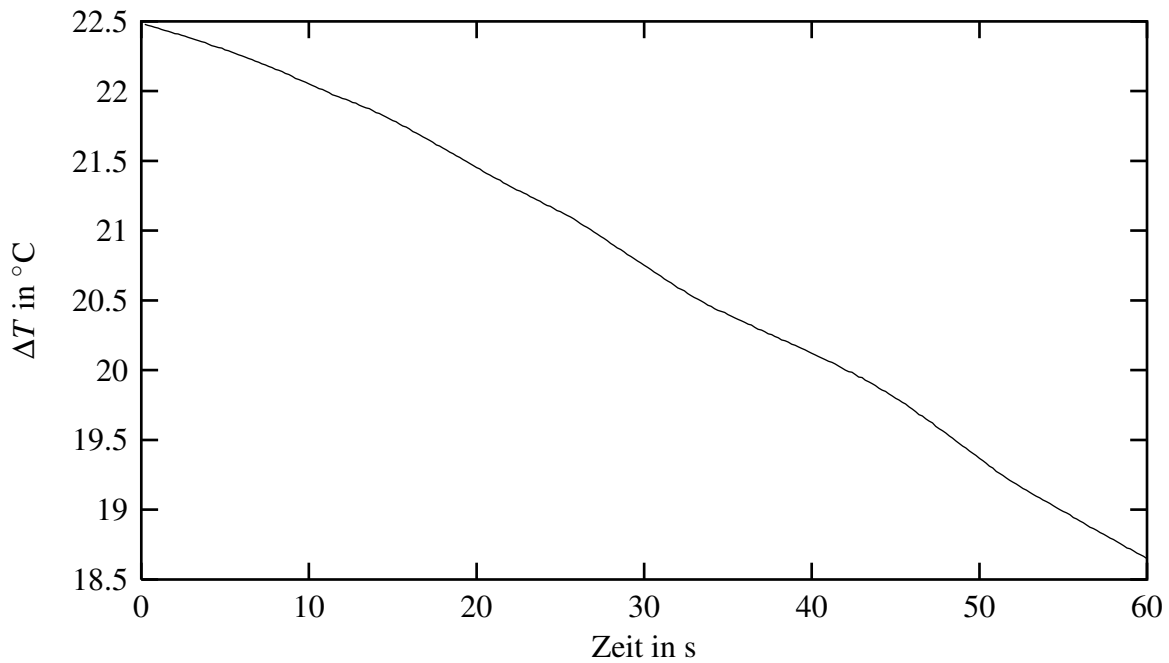


Abbildung 3.8: Die Temperaturdifferenzkurve zwischen einer kalten und einer sich abkühlenden Ölschale

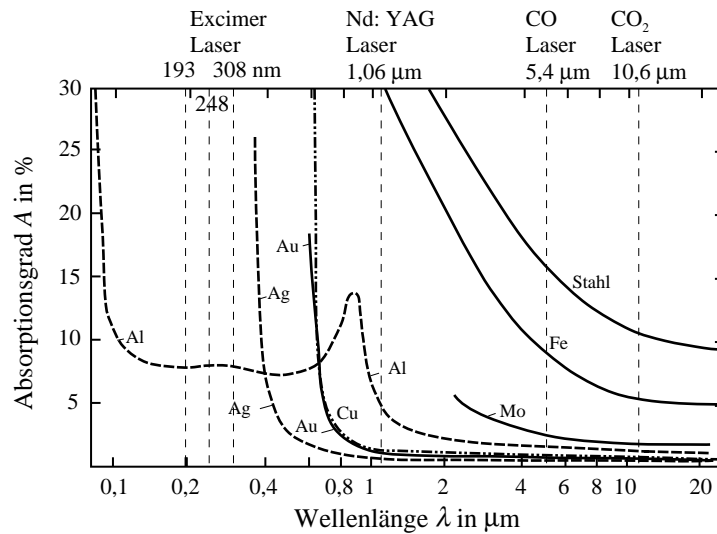


Abbildung 3.9: Der Absorptionsgrad für verschiedene Metalle als Funktion der Wellenlänge [24]

### 3.9 Wärmestrahlung

Die rechteckige Aluminiumplatte hat eine schwarze und eine naturbelassen-glänzende Seite. Dreht man sie um, fällt ein seltsamer Effekt auf. Hat man eine Schale, die auf der glänzenden Seite als Monozelle läuft, bricht sie, auf die schwarze Seite gestellt, zusammen. Dreht man die Platte wieder um, kommt sie wieder.

Es gibt vier verschiedene Deutungsmöglichkeiten:

1. Die schwarze Farbe ist unebener als das blanke Aluminium.
2. Die schwarze Farbe behindert den horizontalen Temperausgleich.
3. Durch die größere Wärmestrahlung sorgt die schwarze Fläche für eine bessere Wärmeübertragung auf die Petrischale.
4. Die Wärmestrahlung wird vom Öl absorbiert.

Die erste Möglichkeit kann widerlegt werden, indem man Aluminiumfolie zwischen die schwarze Fläche und die Petrischale legt. Diese rauhe Oberfläche wirkt wie die blanke Aluminiumseite. Die zweite Möglichkeit ist unwahrscheinlich, da das, in Relation zur dünnen Farbe, viel dickere Petrischalenglas viel stärker den horizontalen Temperausgleich behindert. Der zusätzliche, kleine Beitrag der dünnen Farbe dürfte sich nicht auswirken.

Monozellen brechen zusammen, wenn man die Temperatur erhöht. Es könnte also sein, daß die schwarze Seite eine bessere Wärmeübertragung auf das Petrischalenglas liefert. Das Wiensche Verschiebungsgesetz ergibt für die 140 °C der rechteckigen

Aluminiumplatte ein Maximum der Wärmestrahlung bei etwa 7  $\mu\text{m}$ . Die Abb. 3.9 zeigt, das Aluminium hier mit 2 % nahezu nicht absorbiert bzw. emittiert. Schwarze Lacke dagegen sind meist durch Ruß geschwärzt, und damit in allen Wellenlängenbereichen schwarz, da das Licht in der zerklüfteten Form des Rußes so lange labyrinthartig hin und her reflektiert wird, bis es absorbiert wird.

Es könnte aber auch die 4. Möglichkeit zutreffen, daß es zu einer zusätzlichen Wärmeübertragung auf das Öl kommt. Bei der theoretischen Behandlung der Bénardzellen wird zwar die Wärmekonvektion und Wärmeleitung berücksichtigt, aber die Wärmestrahlung wird meist ignoriert. Sie spielt keine Rolle, wenn der Absorptionskoeffizient der Flüssigkeit 0 oder 1 ist. Dann kann die Wärme nicht über Distanz übertragen werden. Liegt er aber irgendwo dazwischen, könnte die Wärmestrahlung bedeutend werden.

Um den Absorptionskoeffizienten ermitteln zu können, wurde eine Thermosäule eingesetzt. Eine Thermosäule besteht aus einigen, in Reihe geschalteten Thermoelementen, damit sich die Spannung erhöht. Die Thermoelemente sind schwarz gefärbt, damit sie die gesamte auf sie fallende Strahlungsleistung absorbieren können. Die Zimmertemperatur bzw. die Temperatur des Gehäuses spielt in zweierlei hinsicht eine Rolle. Einerseits ist sie die Vergleichstemperatur der gemessenen Temperaturdifferenz. Andererseits kühlt sich die geschwärzte, absorbierende Fläche durch Wärmeleitung zum Gehäuse ab. Die Temperaturdifferenz, die sich dabei im Gleichgewicht ergibt, ist proportional zur eingestrahnten Wärmestrahlung.

Aus Gewindestangen und drei Sperrholzplatten mit kreisförmigen Löchern wurde ein kegelförmiger Tunnelblick gebaut. Um die Wärmekonvektion der Luft zu unterbinden, bläst ein Gebläse durch die Sperrholzplatten. Hält man die Petrischale zwischen den heißen Ofen mit der schwarzen Fläche, kann man ihre Absorption ermitteln.

Da fast alle Stoffe in dem untersuchten Wellenlängenbereich absorbieren<sup>11</sup>, war keine Küvette verfügbar, mit der man das Absorptionsverhalten hätte messen können. Daher wurde das Emissionsverhalten des Öls untersucht. Eine Petrischale wurde innen mit Aluminiumfolie ausgekleidet. Zwischen Aluminiumfolie und Schale wurde Wärmeleitpaste gegeben. Diese Schale hatte tatsächlich nur eine Emission von etwa 5 %. Füllt man dann unterschiedliche Ölfüllstandshöhen in diese Schale, sollte man die zunehmende Emissionsfähigkeit des Öls ermitteln können.

Die Messung schlug fehl. Einerseits ist die Thermosäule sehr empfindlich auf Änderung ihrer Gehäusetemperatur. Sie reagiert auf jeden Luftzug, Wärmekonvektion der Luft und die Wärmestrahlung des menschlichen Körpers. Aber das eigentliche Problem war der thermostatgesteuerte Ofen. Die Temperaturschwankungen machen sich aufgrund der  $T^4$ -Abhängigkeit der Strahlungsleistung überdeutlich bemerkbar. Man konnte bei höheren Ölfüllständen erkennen, daß die Schwankungen mit mehr Öl immer besser ausgeglichen wurden. Da die Kurven nicht aufgezeichnet werden konnten, war eine Auswertung nicht

---

<sup>11</sup>Ausnahmen sind NaCl, Si und Ge.

möglich. Man hatte den Eindruck, daß sich schon bei 1/2 mm Füllhöhe eine ähnlich große Absorption ergab, wie bei der komplett gefüllten Schale.

Es machte den Eindruck, daß die Petrischale Wärmestrahlung durchläßt (10 %). Es kann aber sein, daß sich die Schale erwärmt hat, und damit selbst strahlt. Man kann das zwar unterscheiden, indem man choppt, also vor oder hinter der Petrischale regelmäßig etwas dazwischen schiebt. Wird die Wärmestrahlung durchgestrahlt, macht es keinen Unterschied, ob man vor oder hinter der Schale choppt. Erwärmt sich die Schale aufgrund der absorbierten Wärmestrahlung und strahlt selbst, macht es einen Unterschied, weil das Abkühlen der Schale träger ist. Aber bei den Wärmeschwankungen des Ofens ließ sich das nicht auseinanderhalten.

# Kapitel 4

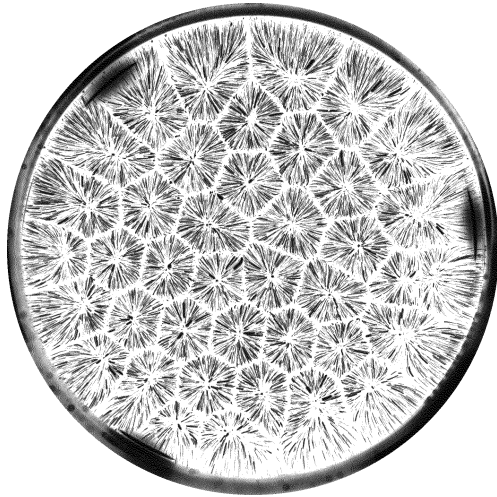
## Auswertung

### 4.1 Bilder der Bénardzellen

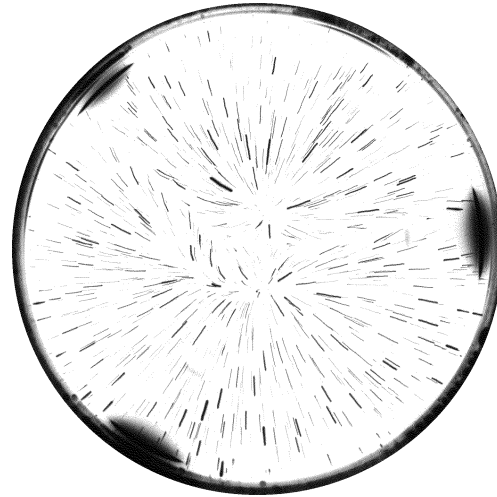
Die nachfolgenden Bilder sind alle Langzeitbelichtungen von 2 Sekunden. Es sind Negative, sodaß das durch den Blaufilter schwarze Öl hell erscheint, und die leuchtenden Markerpartikel auf ihrer Bahn den Film schwärzten. Das Bild 4.1.1 zeigt Bénardzellen in einer Petrischale mit sehr niedriger Füllhöhe. Auch bei höheren Füllhöhen ergeben sich beim allmählichen Erwärmen der Petrischalen zunächst mehrere, ungeordnete, kleine Zellen. Obwohl die Markerteilchen noch nicht mitgerissen werden, kann man das an dem noch nicht gelösten, ausgeflockten Farbstoff am Boden erkennen. Die größeren dieser Zellen werden auf Kosten der kleineren immer größer, bis nur noch 3 (s. Bild 4.1.3) oder 4 (s. Bild 4.1.4) übrig bleiben. Bei diesem Übergangszustand werden die Aluminiumpartikel schon mitgerissen, sodaß man die Trajektorien verfolgen kann. Ist die Füllhöhe hoch genug, daß sich eine Monozelle ausbilden kann, wird eine der Zellen immer größer, und zehrt die anderen allmählich auf. Symmetrische Doppelzellen wurden nie beobachtet, das Bild 4.1.2 zeigt zwei stark deformierte Zellen.

Daß die 3er- und 4er-Zellen etwas unsymmetrisch sind, liegt an den Petrischalen. Dreht man sie, drehen sich die Unsymmetrien mit. Es liegt wohl an der Produktionsweise von Glas. Das zunächst heiße und noch weiche Glas verformt sich während der Abkühlungsphase. Zum Beispiel müssen dicht schließende Gefäßverschlüsse geschliffen werden. Zwar kann man Glasscheiben extrem gerade produzieren. Aber bei ihnen gibt es den Trick, daß sie auf einem Zinnbad schwimmend produziert werden, und man sie auf diesem Zinnbad schwimmend abkühlen läßt.

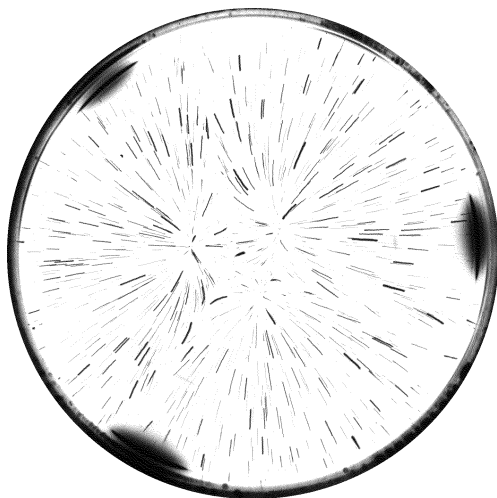
Alle Bilder wurden mit dem 125-ASA-Film Ilford FP4 photographiert (2 Sekunden bei Blende 4). Das Fokussieren ist durch den dunklen Blaufilter schwierig, besonders wenn man vorher in das rote Öl geschaut hat, und dadurch geblendet ist. Ein empfindlicherer Film, und damit eine kleinere Blende bzw. eine größere Tiefenschärfe, wären interessant. Denn dadurch entsteht bei der Defokussierung eine nicht so große Streuscheibe. Der



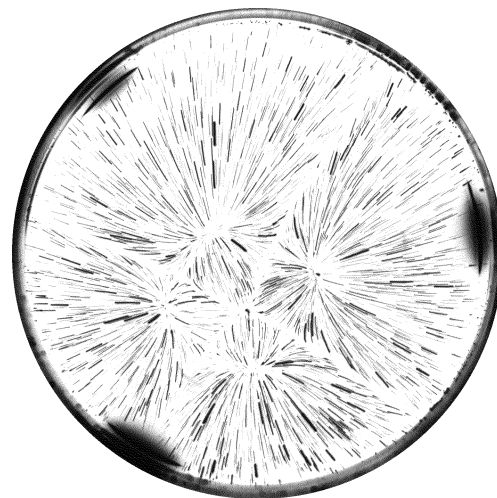
1: mehrere Bénardzellen



2: zwei Bénardzellen



3: drei Bénardzellen



4: vier Bénardzellen

Abbildung 4.1: Die Bilder zeigen Petrischalen mit mehreren Bénardzellen. Symmetrische Doppelzellen (o. r.) wurden nie beobachtet.

Versuch, den Kodak-Film 5053 TMY von 400 ASA beim Entwickeln auf 800 ASA zu ziehen, war nicht überzeugend. Einerseits leidet dabei die Qualität (gröbere Körnung), andererseits war die Empfindlichkeitssteigerung nicht so groß wie erwartet. Will man den Film beim Entwickeln empfindlicher ziehen, kann er nicht mit normal zu entwickelnden Filmen zusammen entwickelt werden. Der Aufwand, daß dieser Film einzeln entwickelt werden muß, wird nicht durch das Ergebnis gerechtfertigt.

Der Ilford XP2 ist ein schwarzweißer Farbfilm. Er hat eine sehr weiche Schwärzungskurve, sodaß er ohne Änderung als 200-, 400- und 800-ASA-Film benutzt wird. Obwohl dieser Film empfindlicher sein müßte, ergab sich im Vergleich zum FP4 keine Verbesserung. Das kann entweder an der unterschiedlichen Schwärzungskurve, oder an Unterschieden in der spektralen Empfindlichkeitskurve liegen. Zudem hatte der Diascanner Probleme mit ihm, da das Filmmaterial des Farbfilms von Natur aus dunkler ist. Der FP4 brachte im Vergleich zu den anderen Filmen die besten Ergebnisse, solange man exakt fokussiert. Hat man unvorsichtigerweise in das beleuchtete Öl geschaut, muß man halt eine viertel Stunde abwarten, damit das Auge nicht mehr geblendet ist. Hat man bei der Beleuchtungsprobe mit der Graukarte direkt in die mit 42 Sonnen beleuchtete Fläche geschaut, oder hat man die nicht geschwärzte Aluminiumplattenseite benutzt, und in die Reflexion einer Lampe geschaut, ist ein Weiterarbeiten nicht mehr möglich.

Die Bilderserie 4.2 zeigt eine Petrischale in 2,5-Minutenschritten, nachdem der Ofen eingeschaltet wurde. Man erkennt, wie sich die Zellen langsam selbst organisieren, und sich die Monozelle später durchsetzt.

Die dann folgenden 4 Seiten zeigen eine Petrischale in 3-Minutenschritten, während sie in 6 Schritten auf insgesamt  $2^\circ$  nach rechts gekippt wird. Durch Wiegen wurde über die Dichte (unter Berücksichtigung des Wärmeausdehnungskoeffizienten ergibt sich eine Dichte von  $0,88 \text{ g/cm}^3$ ) für die Füllhöhe ein Wert von  $0,75 \text{ cm}$  ermittelt. Bei dem Kippwinkel von  $2^\circ$  ergibt sich links eine Flüssigkeitshöhe von  $0,66 \text{ cm}$  und rechts von  $0,84 \text{ cm}$ . Die erste Seite zeigt die Schritte 0 bis 5; die zweite Seite den 6. Schritt mit dem maximalen Kippwinkel von  $2^\circ$ . Die dritte Seite zeigt die Kippwinkel von 5 bis 0 in umgekehrter Reihenfolge, damit man diese Seite mit der ersten Seite vergleichen kann. Deutlich sieht man die Hysterese, daß die Monozelle es nicht so schnell schafft, sich neu zu organisieren. Die vierte Seite zeigt noch einmal die ungekippte Schale, 3 Minuten später. Man sieht, daß die Monozelle sich wieder durchsetzt.

Die letzte Bildserie 4.7 zeigt die Bénardzellen in 7,5-Sekundenschritten, nachdem sie plötzlich um  $2^\circ$  gekippt wurden.

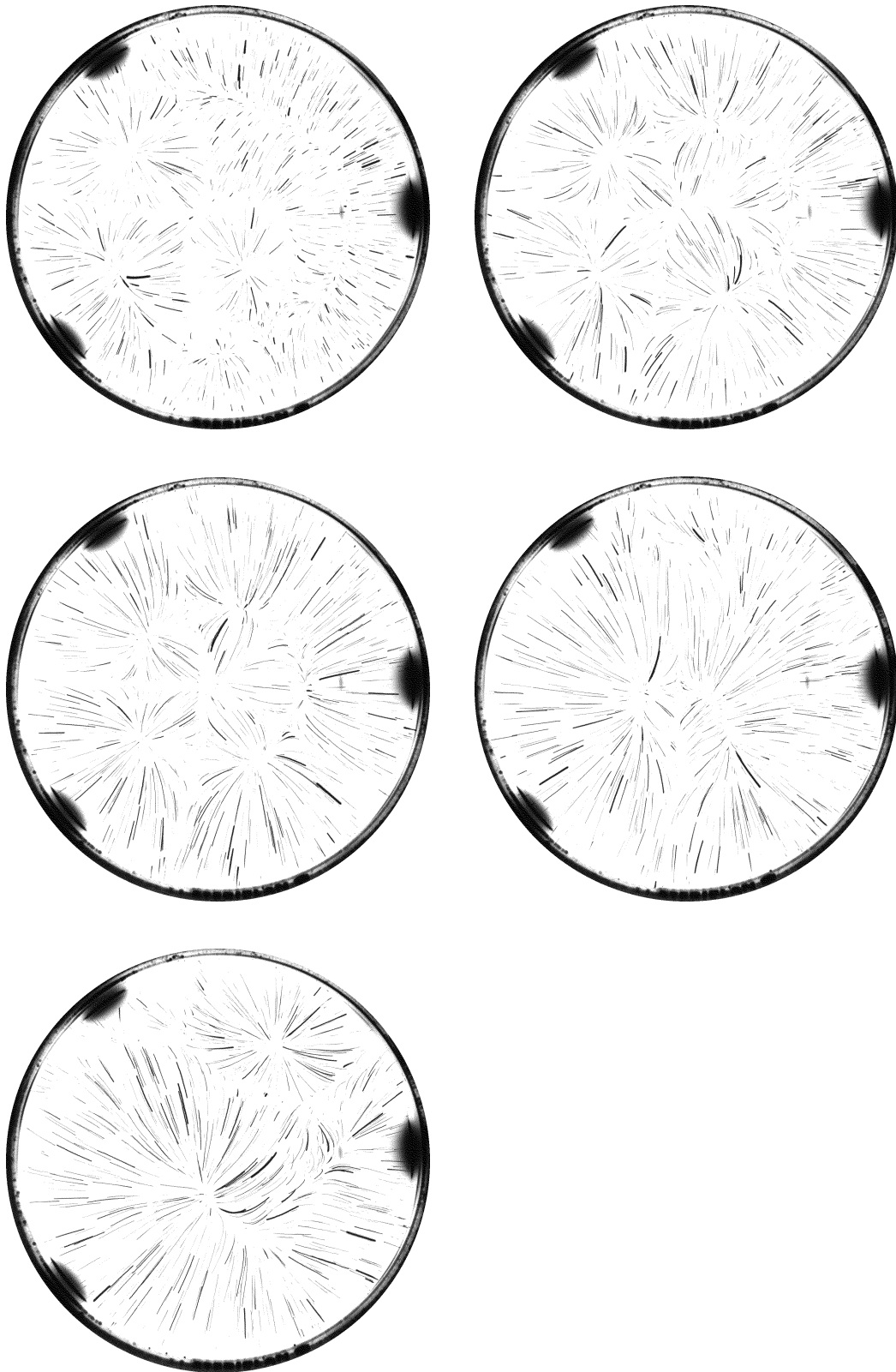


Abbildung 4.2: Bénardzellen nach dem Einschalten des Ofens in 2,5-Minutenschritten



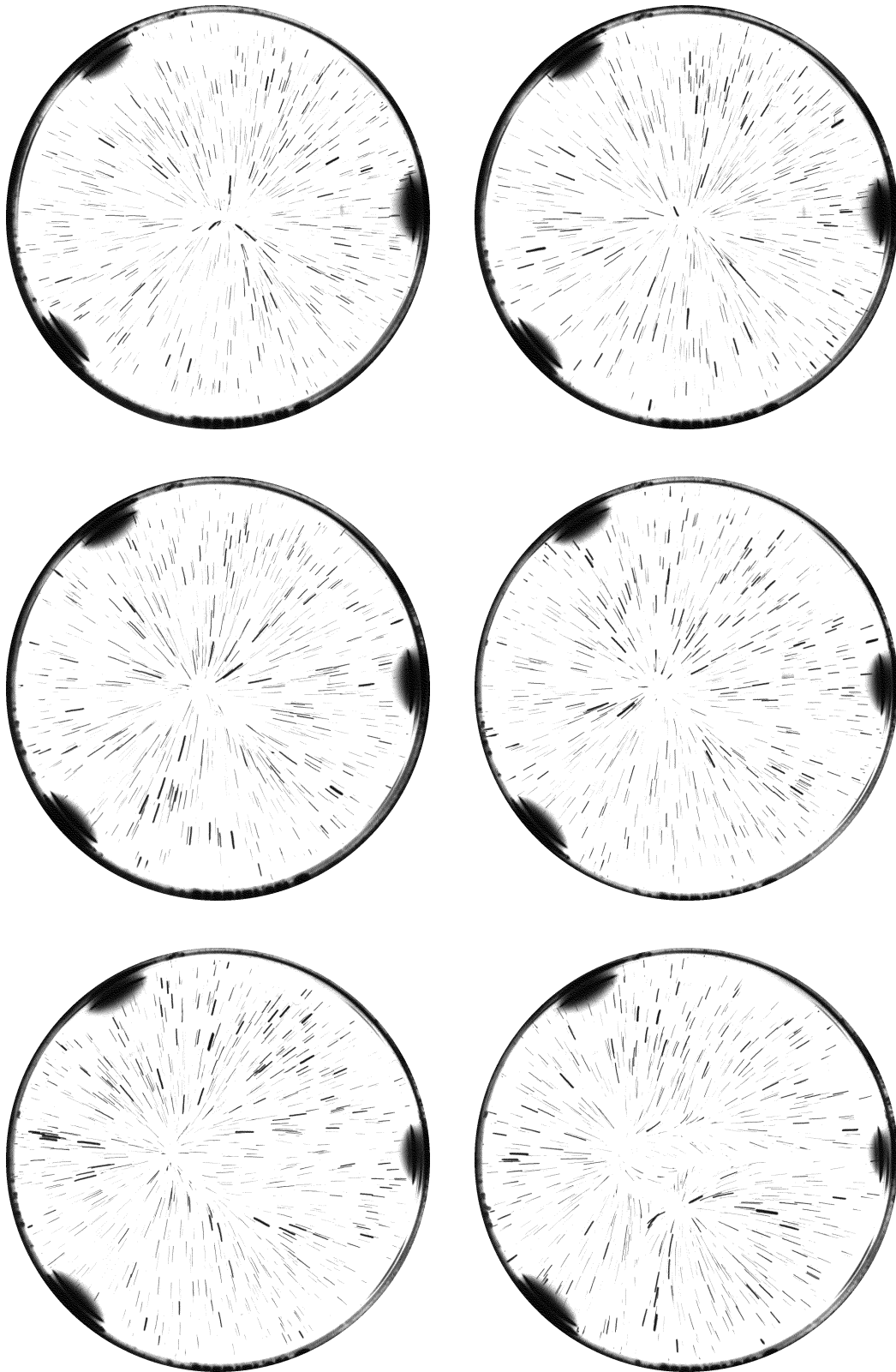


Abbildung 4.3: Bénardzelle mit Kippschritt von 0 bis 5

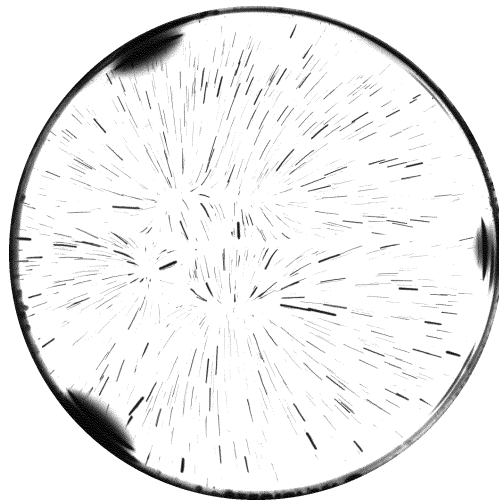


Abbildung 4.4: Auf diesem Bild erreicht die Bénardzelle mit dem 6. Kippschritt den maximalen Kippwinkel von  $2^\circ$ . Die nächste Seite zeigt die Kippwinkel von 5 bis 0 in umgekehrter Reihenfolge, damit man diese Seite mit der vorherigen Seite vergleichen kann. Deutlich sieht man die Hysterese, da die Monozelle es nicht so schnell schafft, sich neu zu organisieren.

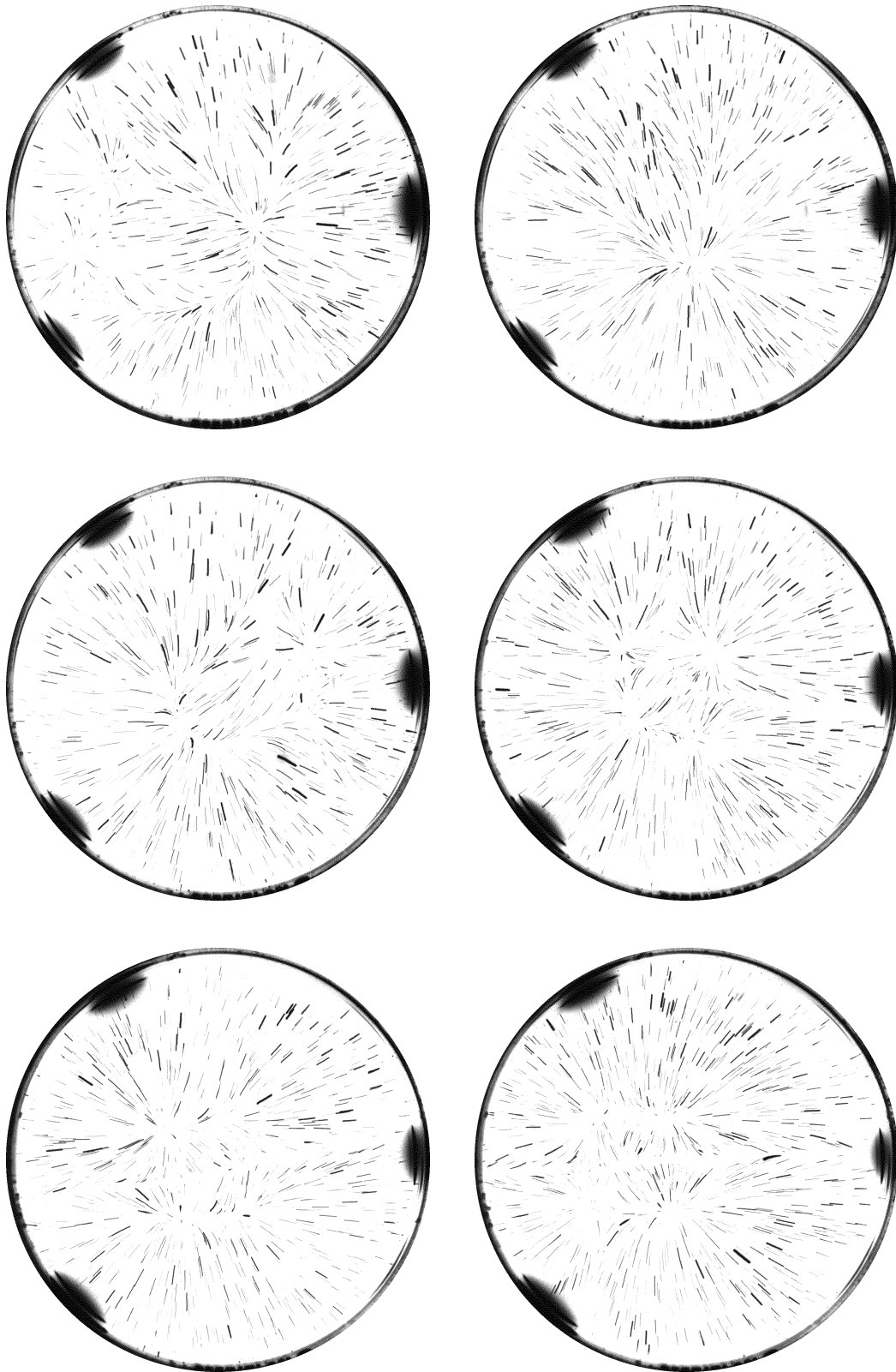


Abbildung 4.5: Bénardzelle mit Kippschritt von 5 bis 0

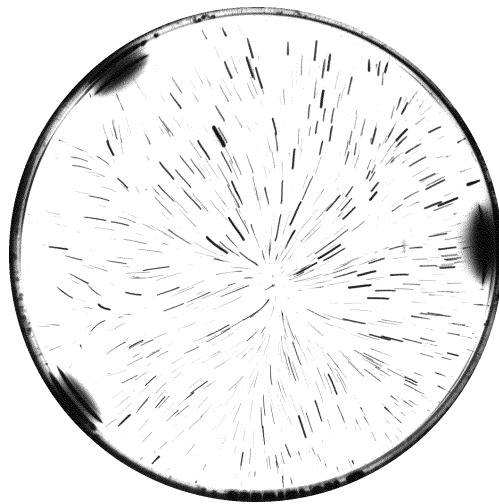


Abbildung 4.6: Dieses Bild zeigt noch einmal die ungekippte Bénardzelle, allerdings 3 Minuten später. Man erkennt, daß sich die Monozelle allmählich wieder durchsetzt.

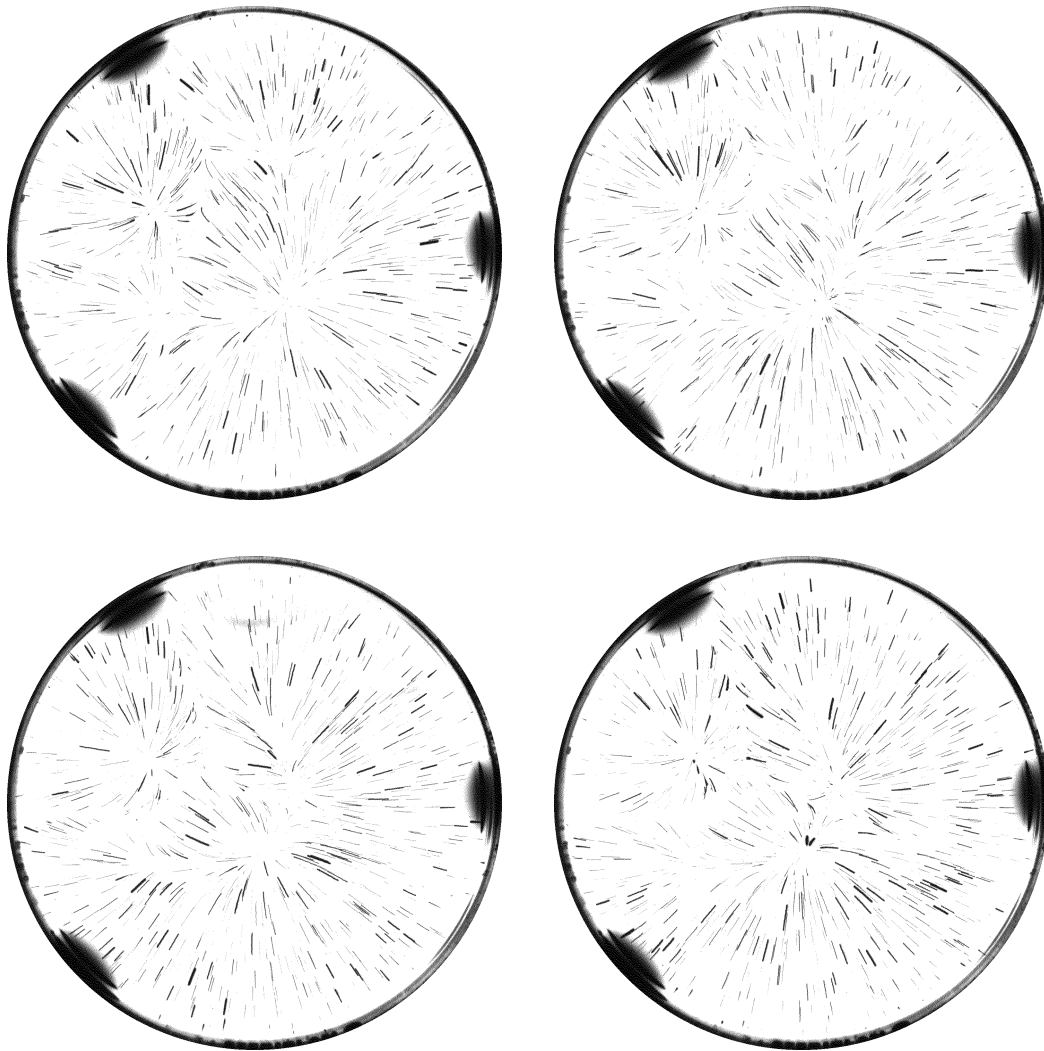


Abbildung 4.7: Die Schale wurde um  $2^\circ$  gekippt. Die Bilder wurden in 7,5-Sekundenschritten photographiert. Man erkennt, daß die Zelle links unten allmählich von der Zelle unten rechts aufgezehrt wird. Möchte man, daß die Trajektorienstücke der aufeinanderfolgenden Bilder aneinanderpassen, könnte man den Winder einsetzen (der Film würde automatisch vollgeschoßen). Dabei könnte man auch eine kleinere Dauerbelichtungszeit wählen, da man den Verlauf der Trajektorie aus der Abfolge rekonstruieren könnte.

## 4.2 Wölbung der Oberfläche

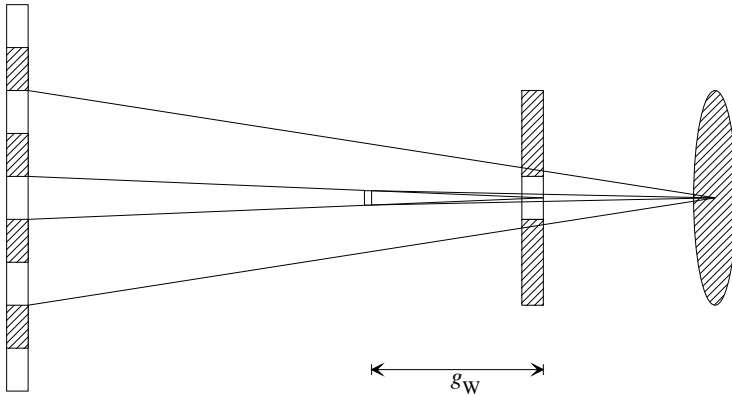


Abbildung 4.8: Strahlengang bei der Wölbung

Um die Wölbung der Öl-  
oberfläche auszumessen,  
wurde das schon im Ka-  
pitel Meßaufbau gezeigte  
Bild 3.4 ausgewertet. Es  
wurde ein Spiegelbild  
eines 17 cm großen  
Schachbrettes in 80 cm  
Entfernung photographiert.  
Die nebenstehende Skizze  
zeigt aus Übersichtlich-  
keitsgründen nicht die

reflektierende, sondern die entsprechend transmittierende Situation. Die Bezeichnung der Variablen folgt der üblichen Konvention: Gegenstände werden mit  $G$ , Bilder mit  $B$  benannt; die kleinen Buchstaben entsprechen den dazugehörigen Distanzen. Die Indizes stehen für S wie Schachbrett, T für den Topf mit Öl und W für das gewölbte Bild.  $f$  ist die Brennweite des Objektivs,  $w$  die Brennweite der wölbspiegelartigen Öloberfläche,  $\ell$  der Objektiv-Film-Abstand,  $r$  der Öl-Objektiv-Abstand und  $s$  der Schachbrett-Öl-Abstand.

Aus den Gleichungen:

$$g_S = s + g_T$$

$$\frac{B_S}{\ell} = \frac{G_S}{g_S}$$

$$\frac{B_T}{\ell} = \frac{G_T}{g_T}$$

folgt

$$g_T = \frac{s}{\frac{B_T}{B_S} \cdot \frac{G_S}{G_T} - 1} = 23,7 \text{ cm.}$$

Aus

$$\frac{B_S}{B_W} \cdot \frac{G_W}{G_S} = \frac{g_W + g_T}{s + g_T}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{-g_W} = \frac{1}{-w}$$

$$G_W = G_S \cdot \frac{g_W}{s}$$

folgt

$$g_W = \frac{g_T}{\frac{B_W/8}{B_W} \left(1 + \frac{g_T}{s}\right) - 1} = 11,7 \text{ cm}$$

$$w = \frac{1}{\frac{1}{-s} + \frac{1}{g_w}} = 13,6 \text{ cm.}$$

Der Wölbradius ist genau doppelt so groß, hat also 27,3 cm. Für die Brennweite einer Lupe gilt:

$$\frac{1}{f_\ell} = (n - 1) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Die Brechzahl  $n$  des Öls ist temperaturabhängig. Für die hier eingesetzte Temperatur ergibt sich  $n = 1,35$  und somit eine Brennweite von 75,9 cm, bzw 1,3 Dioptrien. Dies ist die Lupenwirkung, die beim Blick durch das Stereomikroskop die Probleme verursacht.

Beim Wölbradius ergibt die Fehlerrechnung, daß der Abstand des Schachbrettes zur Öloberfläche einen Fehler von 3,7 % ergibt und das Messen der Größe des Wölbildes einen Fehler von 4,3 %. Die anderen Fehler ergeben quadratisch addiert zusammen noch einmal 2 %, sodaß sich insgesamt ein Fehler von 10 % ergibt.

Man kann aus den Werten auch die Brennweite des Objektivs berechnen. Es ergeben sich 56 mm mit einem Fehler von 5 %, woran der Abstand des Schachbrettes zur Öloberfläche mit 3,75 % beteiligt ist. Da die Brennweite laut Herstellerangabe 55 mm beträgt, ist dies ein realistischer Wert.

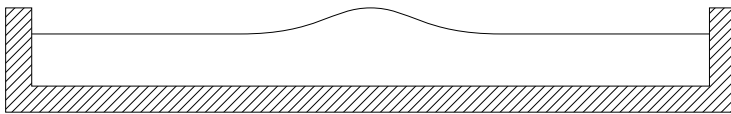


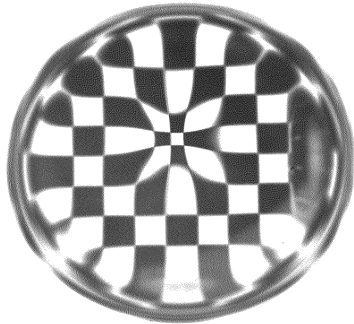
Abbildung 4.9: Die Wölbung des Öls

Bei der Wölbung des Öls gibt es ein Maximum und zwei Wendestellen. Bei den verbogenen Schachbrettlinien ergeben sich

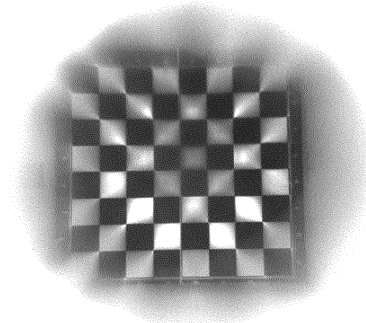
auch Wendestellen. Sie liegen in etwa auf dem Kreis, wo die Öloberfläche die Wendestellen hat. Diese Kreisfläche ist sehr schwer abzuschätzen. Für einen Radius von 0,45 cm ergibt sich insgesamt eine Wölbhöhe von 36  $\mu\text{m}$ . Da die Oberfläche nicht nur die hier untersuchte konvexe Krümmung besitzt, sondern im Übergang zum Planen auch eine konkave Krümmung hat, ist dieser berechnete Wert nur als Abschätzung der Größenordnung zu verstehen.

Das Bild ist insgesamt sehr unscharf. Das hat zwei Gründe. Einerseits vibriert die gewölbte Öloberfläche, was sich bei langen Belichtungszeit wegmittelt, wobei eine Unschärfe zurückbleibt. Andererseits ist das gewölbte Bild 33 cm weit entfernt, während das Schachbrett 105 cm weit entfernt ist. Obwohl mit der kleinsten Blende 32 photographiert wurde, kann man trotz großer Tiefenschärfe nur auf eine Entfernung fokussieren. Bei diesem Bild wurde auf das nahe, gewölbte Spiegelbild fokussiert.

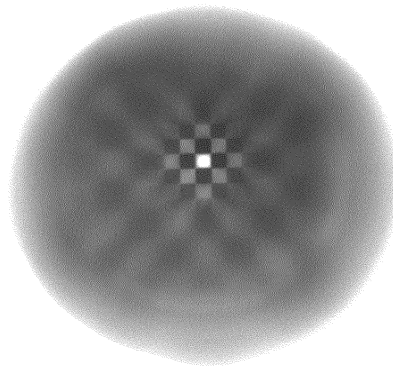
Die nachfolgenden 5 Bilder zeigen das Spiegelbild des Schachbretts bei verschiedenen Blenden. Die beiden letzten Bilder zeigen zum Vergleich das Spiegelbild des kalten Öls. Daß die Schale unterschiedlich groß dargestellt wird, liegt daran, daß der Fokus geändert wurde. Dabei verschiebt sich die Geometrie. Denn im Gegensatz zum Auge, wo ein Ringmuskel die Wölbung der Linse, und damit ihre Brennweite verändert, bleibt



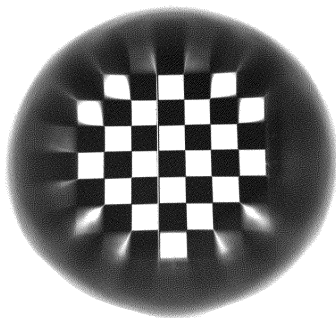
1: kleine Blende, auf nah fokussiert



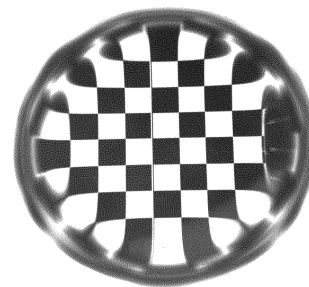
2: große Blende, auf fern fokussiert



3: große Blende, auf nah fokussiert



4: kalt, mittlere Blende



5: kalt, kleine Blende

Abbildung 4.10: Spiegelbilder des Schachbretts



bei einem Kameraobjektiv die Brennweite konstant. Stattdessen wird der Objektiv-Film-Abstand verändert.

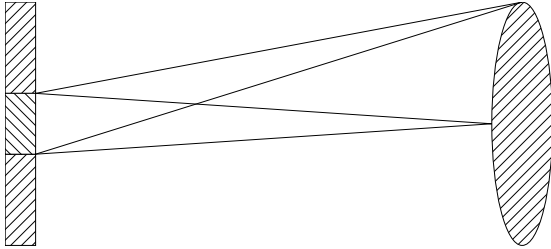


Abbildung 4.11: Das „schielende“ Objektiv

Hat man auf  $\infty$  fokussiert, entspricht der Sehwinkel dem Bildort. Wie man an der Skizze erkennt, schießt dann das Objektiv – von einer anderen Linsenposition ergibt sich ein ganz anderer Winkel. Dieser Effekt ist unabhängig von der Entfernung (wenn man mit  $\tan(x) \approx x$  nähert). Es ergibt sich nur noch aus dem planen Bereich eine konstruktive Überlagerung – die Störung wird weggemittelt und verursacht nur Unschärfe.

Beim Bild 4.10.2 erkennt man nicht, daß das gewölbte Bild kleiner wird. Die nebenstehende Skizze zeigt, wodurch dieser Effekt eintritt. Angenommen, der Durchmesser der gewölbten Fläche beträgt 0,9 cm. Die Blende 2,8 hat bei dem benutzten 55-mm-Objektiv einen Durchmesser von 2 cm. Man schaut also mit

### 4.3 Farbveränderung

Mit einem Spektrometer wurde der Extinktionskoeffizient des gefärbten Öls gemessen. Daraus ließ sich die Farbe des Öls berechnen. Das im Experiment beobachtete Farbverhalten wurde bestätigt: mit steigender Konzentration wird das Öl erst gelblich, um dann über alle Orangetöne hinweg intensiv rot zu werden. Dieses Verhalten läßt sich durch die Extinktionskurve des Öls begründen. Der blaue Bereich des Lichts wird sehr stark absorbiert. Dadurch entsteht zunächst die Komplementärfarbe von blau, also gelb. Da das rote Licht nur unwesentlich absorbiert wird, bleibt dieses bei hoher Konzentration als einziges übrig, und ergibt die intensive rote Farbe. Zwischen diesen beiden Extremen wird mehr und mehr grünes Licht absorbiert, wodurch die Farbe von gelb nach rot – also über orange – wechselt (s. Abb. 4.14).

Mit steigender Konzentration wird die Extinktionskurve des Öls proportional nach oben vergrößert. Da die Extinktion aber eine logarithmische Größe ist, ergibt sich das komplizierte, nichtlineare Verhalten. Man sieht, daß die blaue Filterplatte in den Wellenbereichen absorbiert, wo daß Öl noch transmittiert. Daher ergeben beide zusammen den abdunkelnden Effekt. Bewertet wird die verbleibende Helligkeit durch die Empfindlichkeitskurve des Auges. Daher wurde sie in das Diagramm eingezeichnet. Aus ihrem Maximum bei 555 nm wird in diesem Diagramm ein Minimum, da auf der y-Achse, dem Extinktionskoeffizienten folgend, der negative dekadische Logarithmus aufgetragen wurde.

Die folgende Doppelseite (Abb. 4.15) zeigt 3dim. neben der Spektralkurve den Farbort des Blaufilters (das Kreuzchen), bzw. die Farbkurve des Öls in Abhängigkeit vom

Lichtweg in 1-mm-Schritten (die kleinen Kringel). Die Füllhöhe der Petrischalen betrug zwar meist nur 0,75 bis 0,8 cm, dennoch wird in den nun folgenden Diagrammen jeweils ein Lichtweg bis 4 cm eingetragen. Einerseits ist der Lichtweg doppelt so groß wie die Füllhöhe der Petrischale, da das Licht von oben kommend, reflektiert diesen Weg doppelt macht. Andererseits hat das Spektrometer die Werte für die kalte, gesättigte Lösung gemessen. In die Petrischalen wurde zusätzlich ausgeflockter Farbstoff hinzugegeben, der sich erst bei Erwärmung löst. Die Farbstoffkonzentration war in den Schalen daher deutlich höher.

Sowohl die blaue Filterplatte, als auch das gefärbte Öl, liegen außerhalb des RGB-Dreiecks. Dies bedeutet, daß sich diese intensiven, extrem gesättigten Farben nicht mehr auf einem Farbmonitor darstellen lassen. Im RGB-System ergeben sich dadurch unsinnige, negative Leuchtwerte. Man kann sie zwar in das IHS-System transformieren, aber auch dieses System verhält sich seltsam. Dieses System definiert die Farbsättigung lediglich über Abstand einer Farbe zum Weißpunkt. Die konkrete Form der Spektralkurve, auf der die höchstmöglichen Sättigungen liegen, wird nicht berücksichtigt. Daher werden drei Kurven für Intensität (mit  $Y(\lambda)$  = Empfindlichkeitskurve des Auges), Farbton (die entsprechende Wellenlänge, wo die zwischen Weißpunkt und Farbe gelegte Verbindungsgerade die Spektralkurve schneidet) und die Sättigung (der Anteil der Wegstrecke, zwischen Weißpunkt und Spektralkurve) dargestellt.

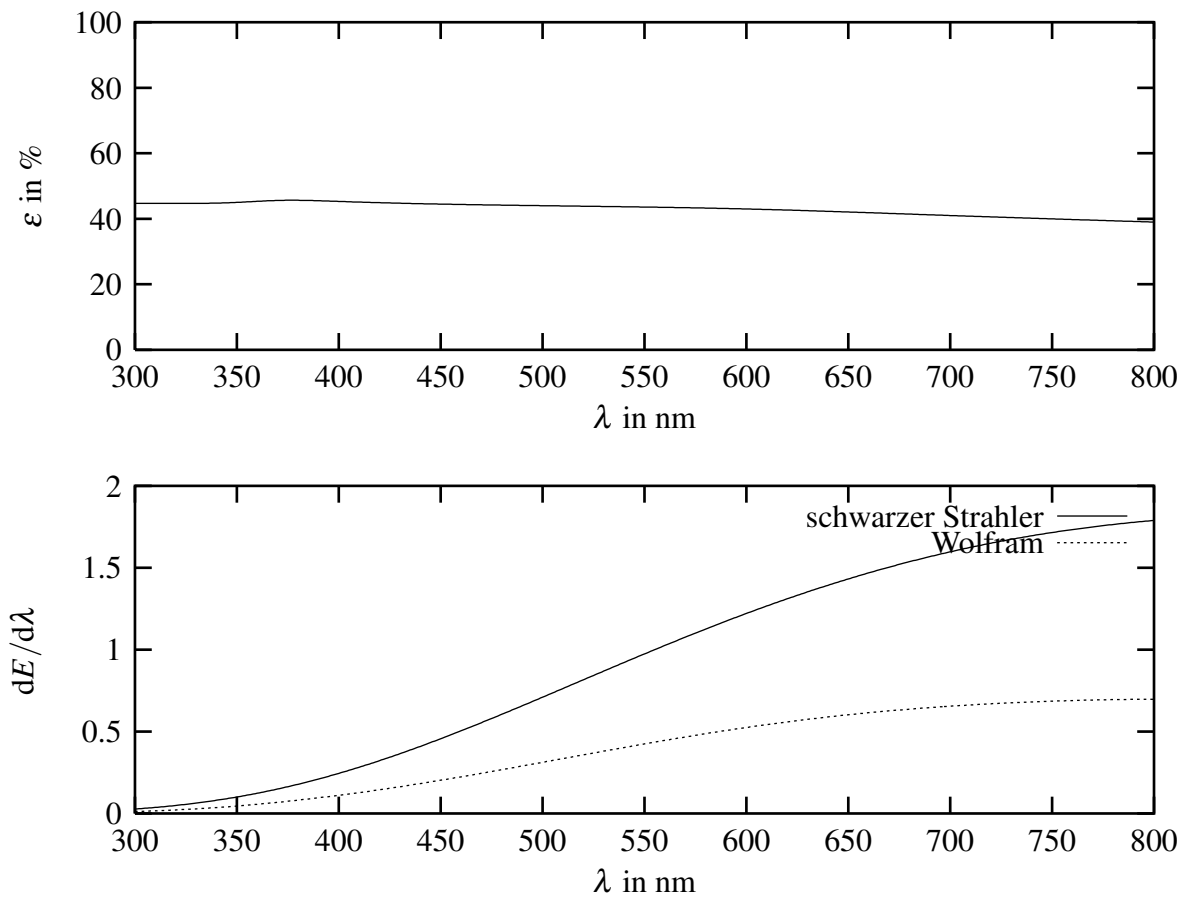


Abbildung 4.12: Bei modernen Halogenlampen hat der Wolframfaden eine Temperatur von 3300 K. Der Emissionskoeffizient des Wolframs ist temperaturabhängig [22]. Die obere Graphik zeigt den Emissionskoeffizienten für 3300 K in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Es fällt auf, daß Wolfram kein grauer Strahler ist: Es strahlt im Blauen etwas mehr als im Roten. Dadurch erreichen Halogenlampen eine etwas höhere Farbtemperatur von 3382 K. Die untere Graphik zeigt das Spektrum der Halogenlampe. Man sieht, daß wesentlich mehr rotes als blaues Licht entsteht.

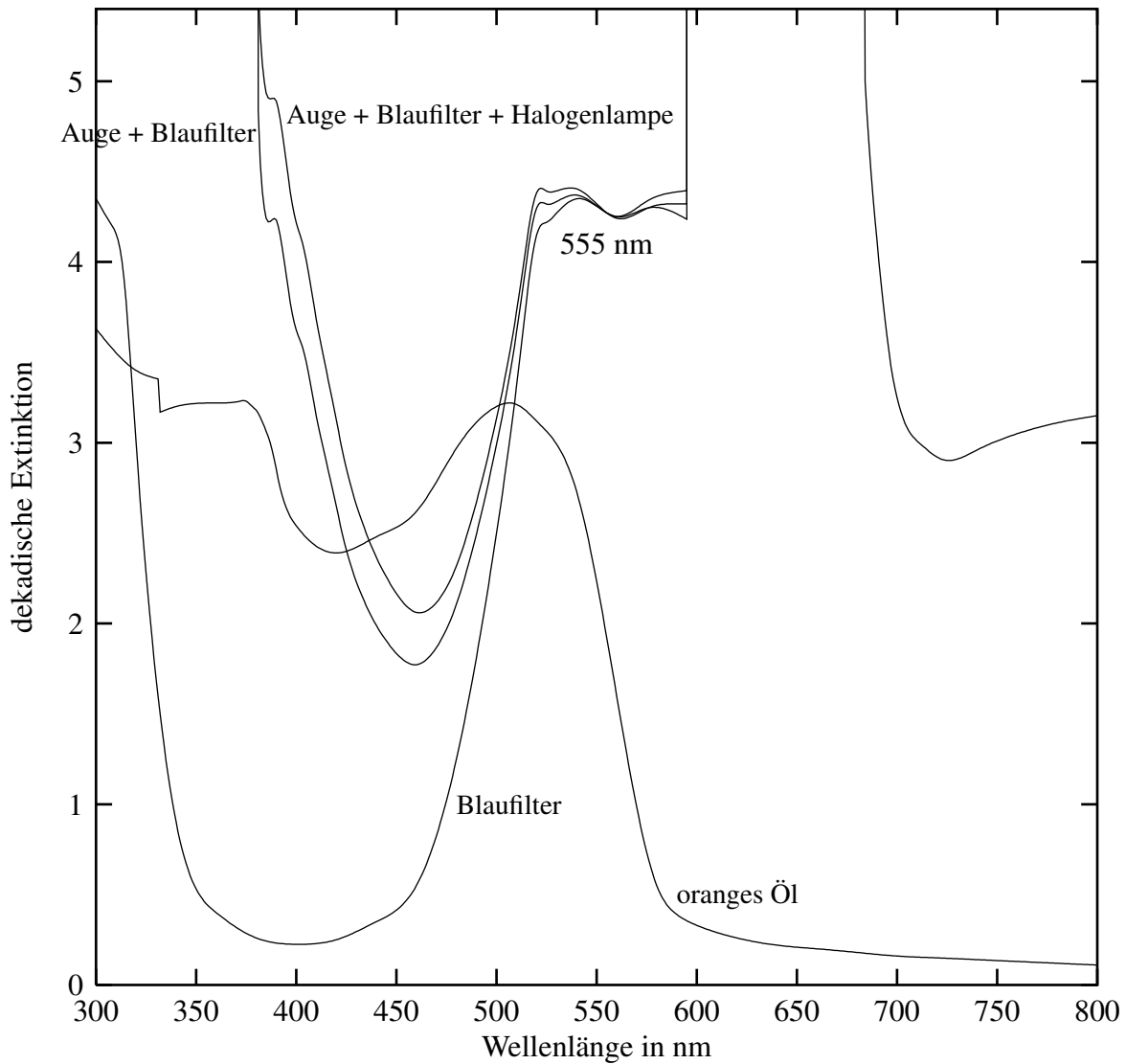


Abbildung 4.13: Die Filtercharakteristik des Blaufilters und des eingefärbten Öls: Es ist die dekadische Extinktion des Blaufilters bzw. des eingefärbten Öls (bezogen auf 1 cm) dargestellt. Zusätzlich wurde die spektrale Empfindlichkeitskurve des, durch den Blaufilter schauenden Auges dargestellt (s. 4.19), bzw. diese unter Berücksichtigung der Halogenbeleuchtung. Diese beiden Kurven wurden so normiert, daß sie an der Stelle der höchsten Empfindlichkeit des Auges (555 nm) mit der Kurve des Blaufilters zusammenfallen.

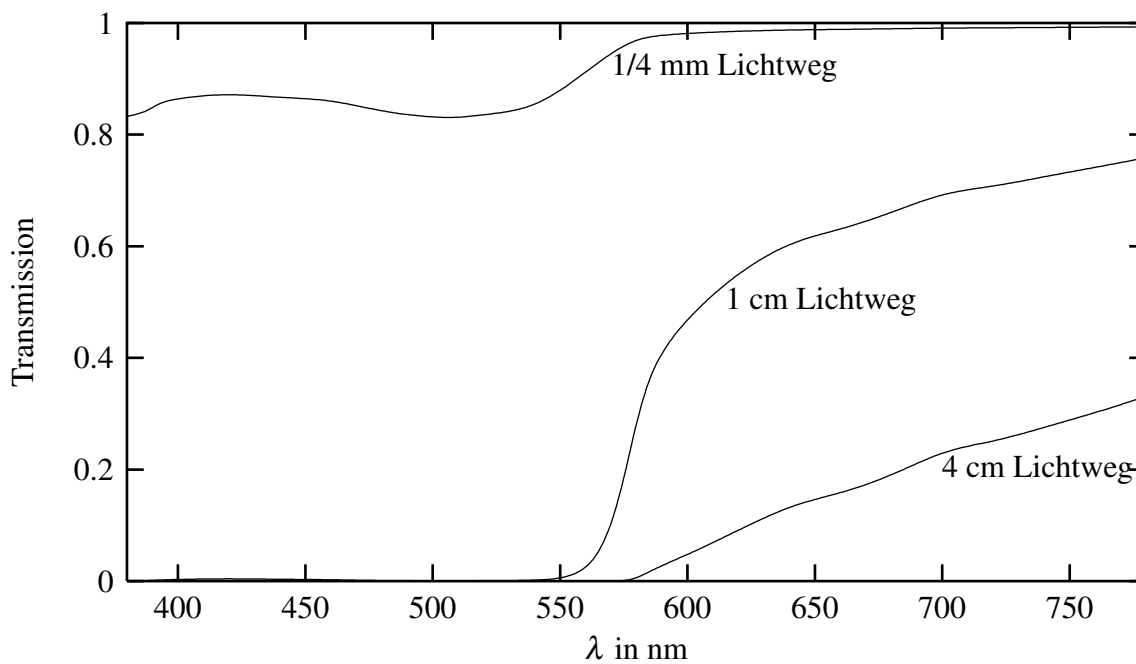
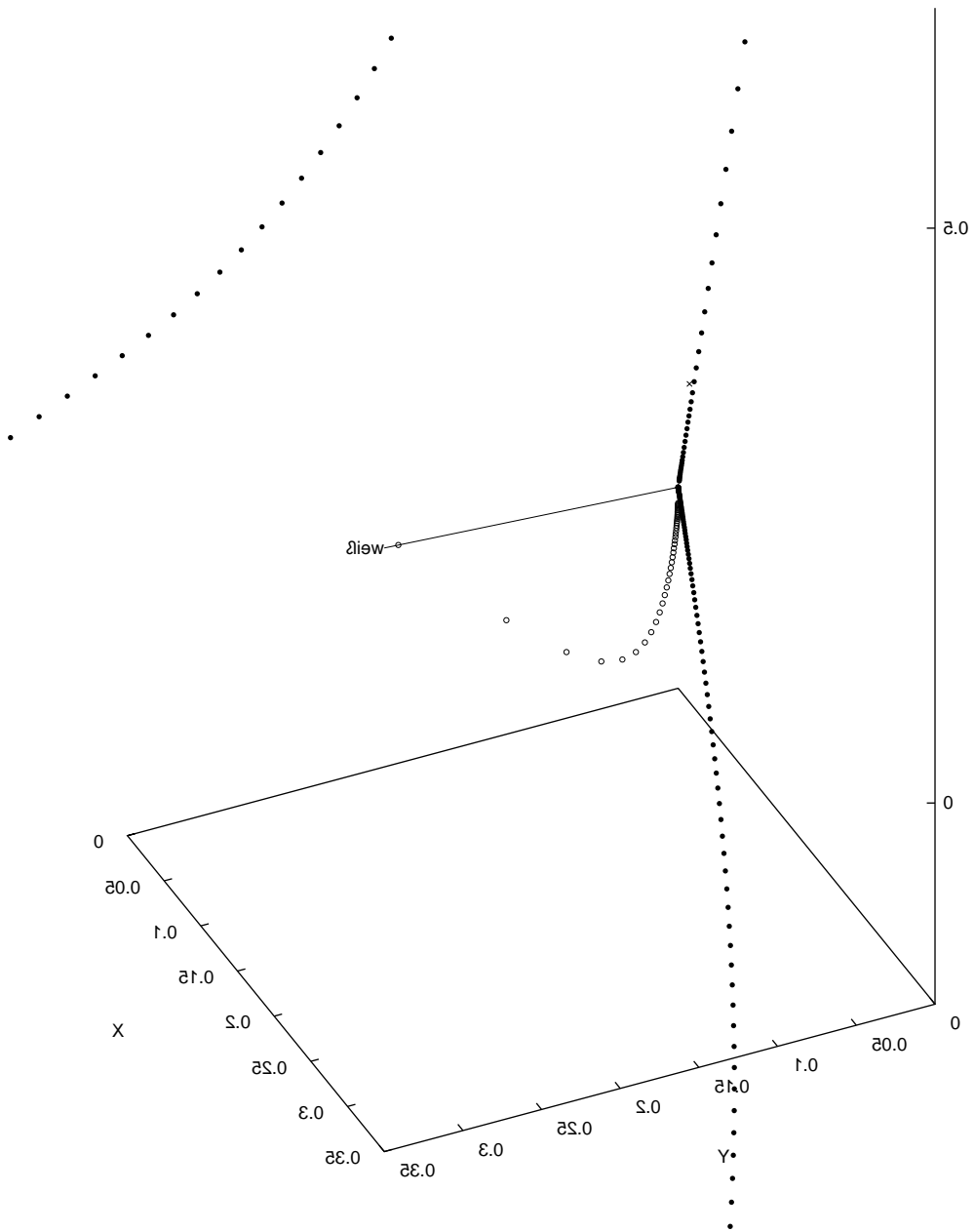
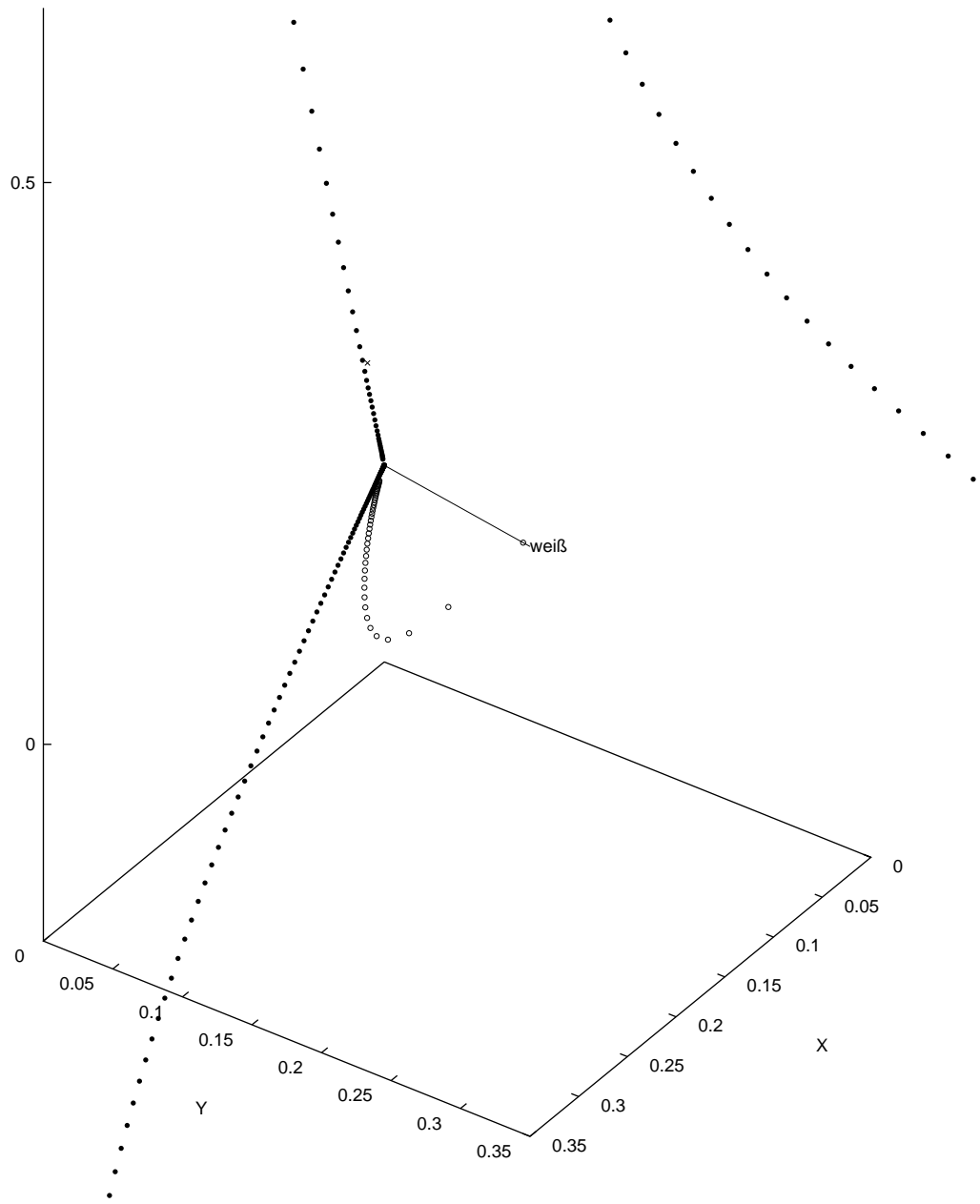


Abbildung 4.14: Die Graphik zeigt Transmissionskurven des Öls bei verschieden langem Lichtweg. Wie man sieht, ändern sich die Kurven nicht linear. Das obere Spektrum für 1 mm Lichtweg hat eine gelbe Farbvalenz, die mittlere für 1 cm ist orange, während die untere für 4 cm ein intensives Rot ergibt.





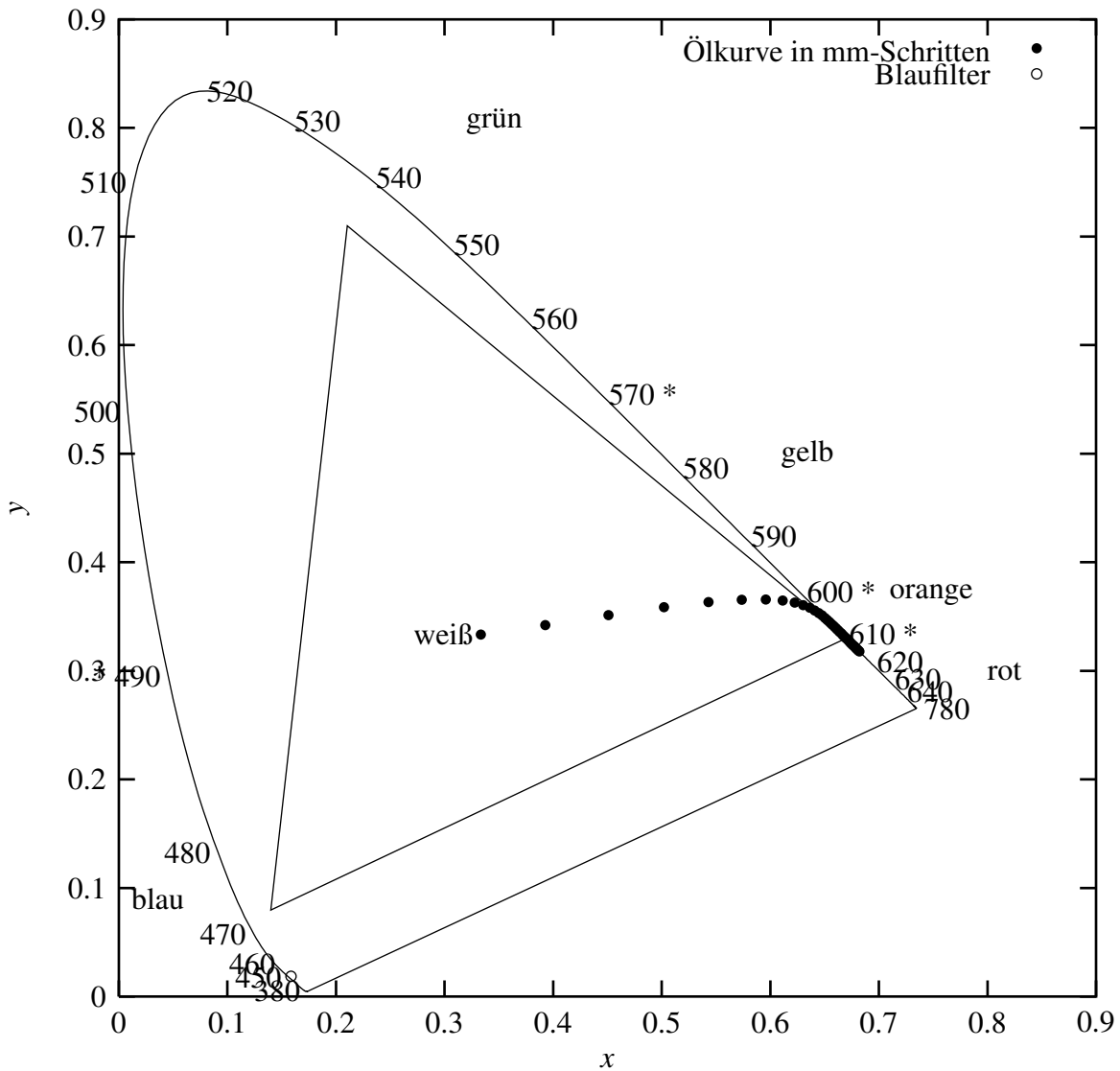


Abbildung 4.16: In das Farbdreieck wurde die Farbe des Blaufilters dargestellt, bzw. die Kurve des gefärbten Öls. Die Ölcurve beginnt im Weißen, wobei jeder Kringel 1 mm Lichtweg mehr bedeutet. Man erkennt, daß die Ölcurve zunächst auf einer gelborangen Kurve losläuft, um dann über Orange in ein stark gesättigtes, intensives Rot hineinzulaufen. Das Farbdreieck des RGB-Systems wurde eingezeichnet. Man sieht, daß sowohl der Punkt des Blaufilters, als auch das intensive Rot außerhalb dieses Dreiecks liegen. Dies bedeutet, daß diese intensiven, extrem gesättigten Farben nicht mehr auf einem Farbmonitor darzustellen sind. Die Sternchen an den nm-Zahlen entsprechen den ungefähren Farbgrößen der angegebenen Farben.



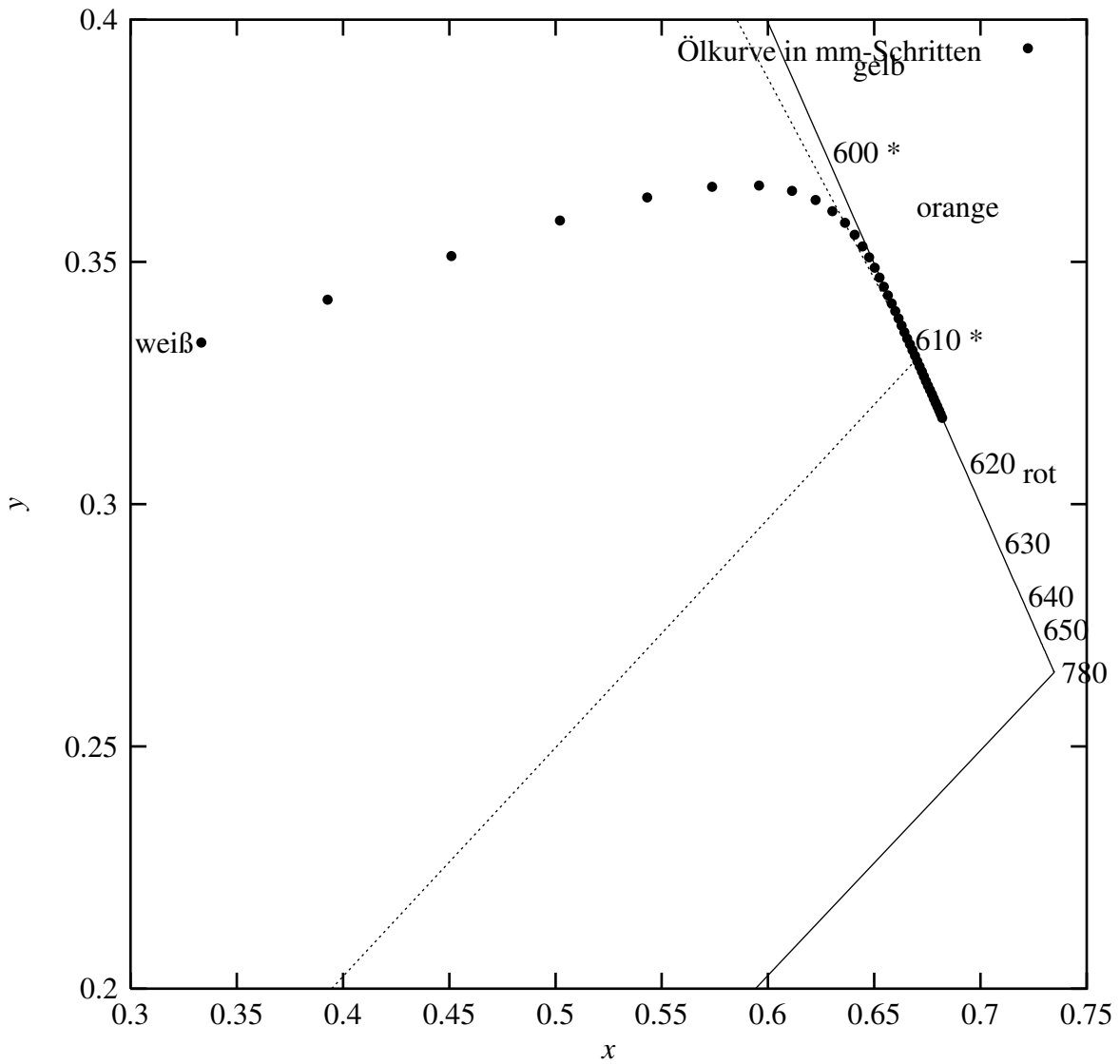


Abbildung 4.17: Ausschnittvergrößerung des roten Bereichs: Eine lineare Regression der ersten 5 mm der Ölcurve würde die Spektralkurve bei 600,1 nm schneiden, also im Gelborangen.

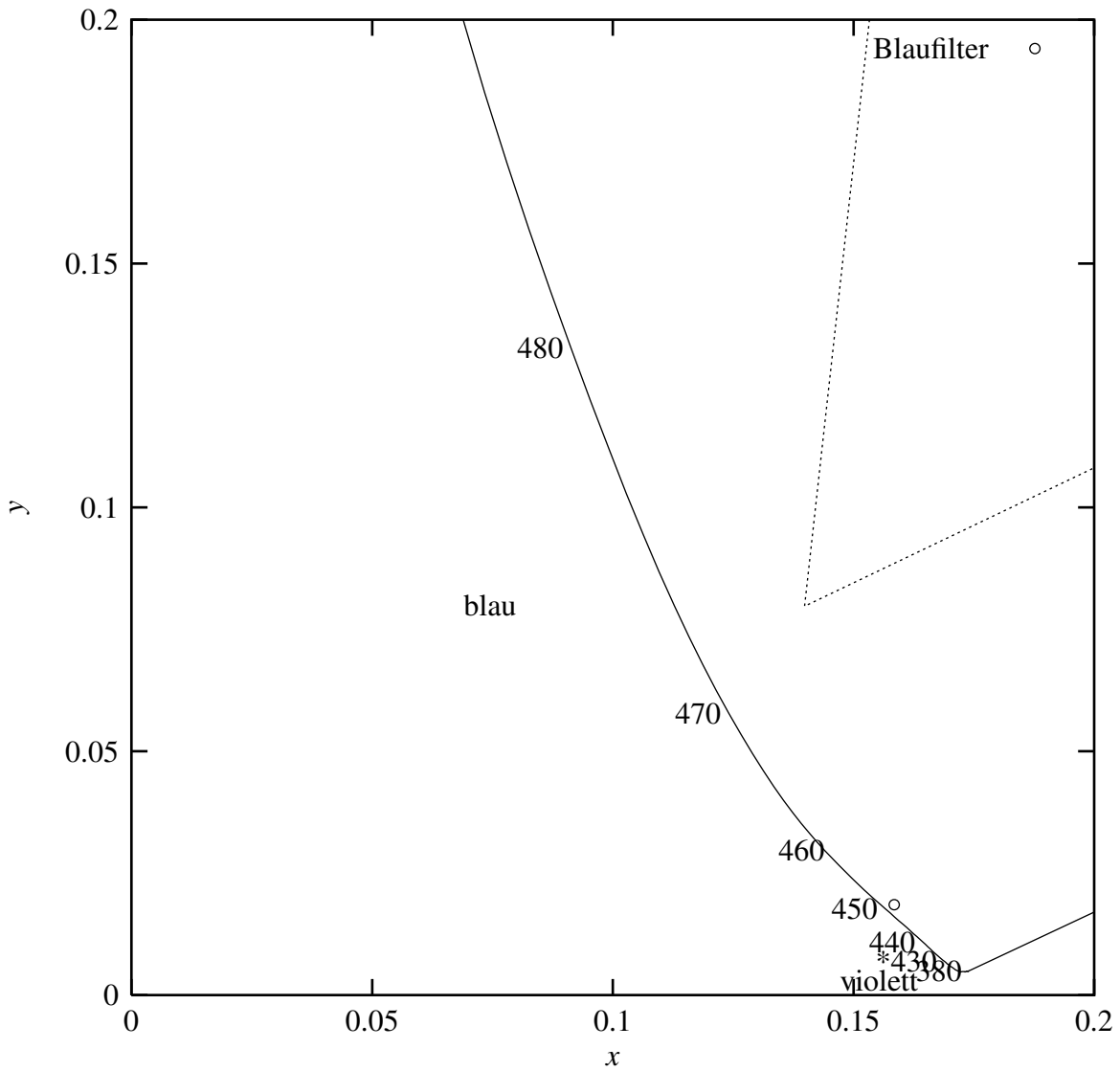


Abbildung 4.18: Ausschnittvergrößerung des blauen Bereichs: Man sieht, daß der Farbpunkt des blauen Filter sehr tief und dicht an der Spektralkurve liegt. Dies erklärt seine intensive, dunkle Färbung.

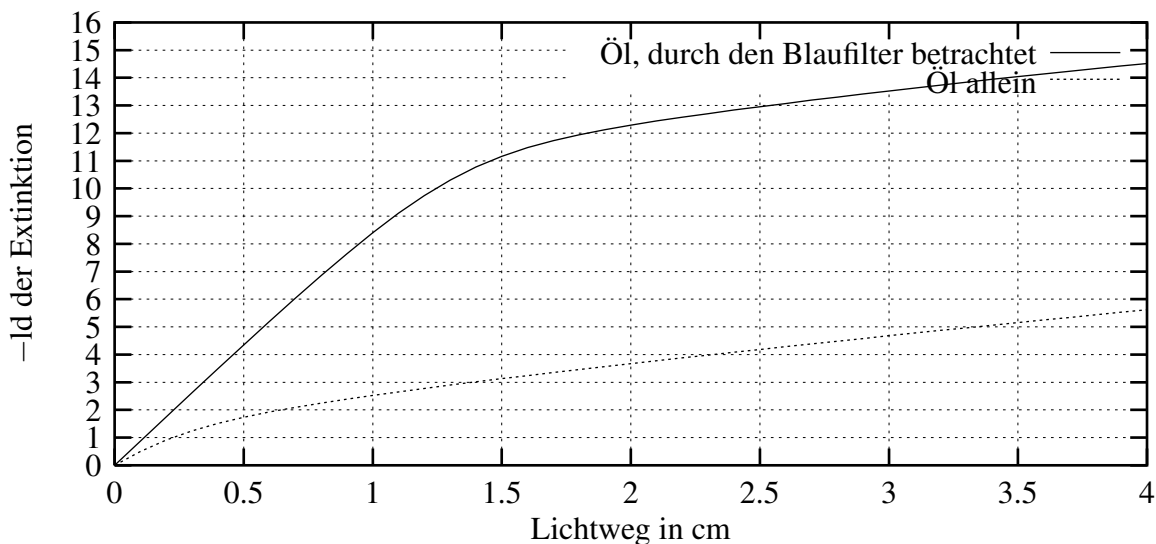


Abbildung 4.19: Diese Graphik zeigt das Absorptionsverhalten des gefärbten Öls. Auf der y-Achse wurde der Logarithmus Dualis aufgetragen, da man so die Blendenstufen ablesen kann.  $2^{14}$  entspricht bei dem durch den Blaufilter betrachteten Öl immerhin, daß nur noch  $1/16384$  des Lichts passiert. Das ist allerdings auch nötig: Die Langzeitbelichtung muß, damit die sich bewegenden Markerteilchen den Film schwärzen können, um etwa 7 bis 8 Blenden überbelichtet werden. Da man die auf dem Boden liegenden Markerteilchen nicht wahrnehmen möchte, und der Diascanner je nach dessen eingestellter Belichtungsstärke eine Graustufentiefe von 7 bis 8 Bit hat, benötigt man insgesamt diese Verminderung um 14 bis 15 2er-Potenzen.

Die Ursache für den Knick in der Blaufilterkurve wurde in Abb. 2.8 beschrieben.

Diese Kurven ergeben sich aus den Funktionen aus Abb. 4.13. Es muß dabei über das gesamte Spektrum integriert werden, wobei vorher entlogarithmisiert werden muß, um danach wieder neu zu logarithmisieren. Für das, durch den Blaufilter betrachtete Öl muß man die folgende Funktion integrieren:

$$\text{Auge mit Blaufilter} + \text{Weglänge in cm} \cdot \text{ oranges Öl.}$$

Für die Kurve ohne Blaufilter gilt analog das gleiche, nur daß man dann die Empfindlichkeitskurve des Auges benutzt (also ohne das Addieren der Blaufilterkurve).

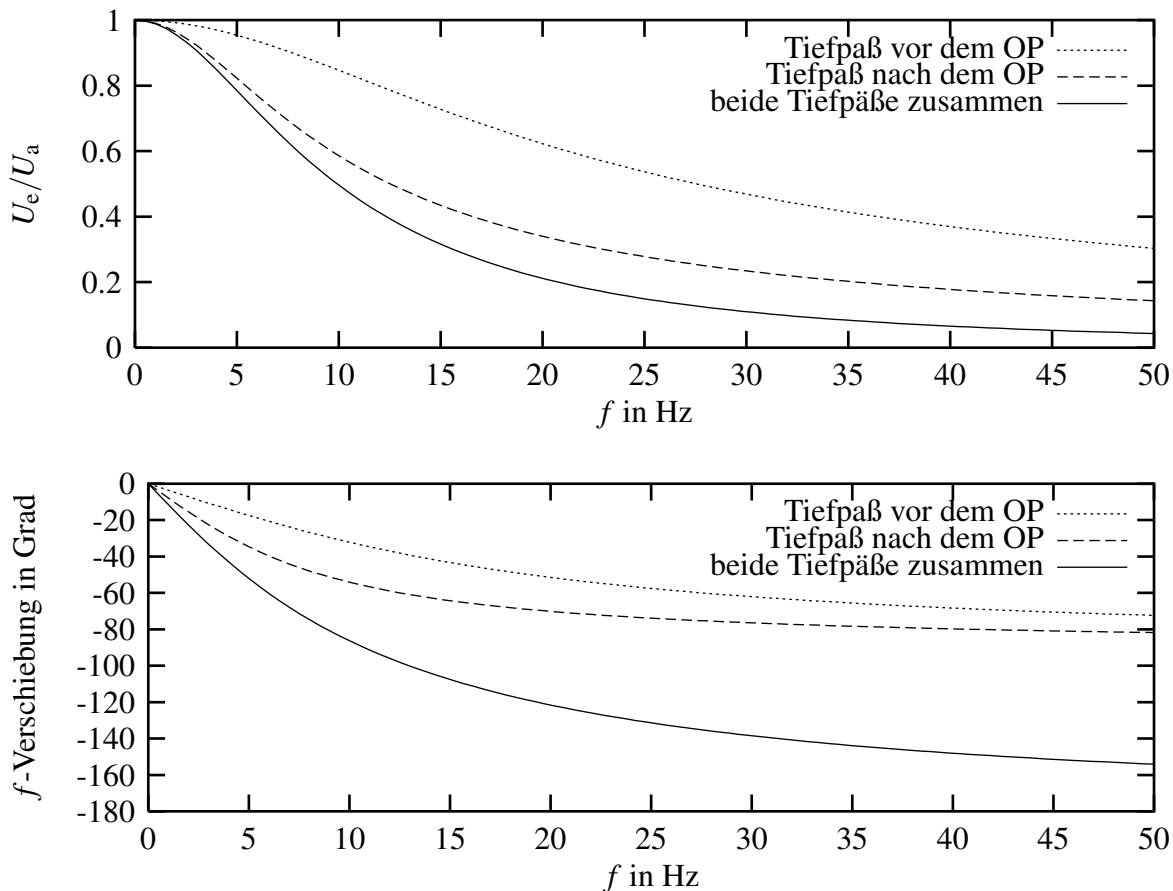


Abbildung 4.20: Das Frequenzverhalten des Verstärkers, das sich durch einen RC-Tiefpaß 2. Ordnung ergibt.

## 4.4 Temperaturmessungen

Mit einem kommerziellen Thermometer (Genauigkeit  $0,3\text{ }^\circ\text{C}$ ) auf Temperaturwiderstandsbasis wurde die Temperatur des Ofens gemessen. Dafür wurde es auf die Ofenplatte gelegt. Um den thermischen Kontakt zu gewährleisten, wurde Wärmeleitpaste eingesetzt. Alle nun folgenden Messungen beziehen sich auf eine Thermostateinstellung von  $150\text{ }^\circ\text{C}$ . Nachdem das Thermostat 20 Sekunden lang heizt, erreicht der Ofen eine Temperatur von  $167\text{ }^\circ\text{C}$ . Danach kühlt er sich langsam innerhalb von etwa 2 Minuten auf  $139\text{ }^\circ\text{C}$  ab, bis das Thermostat wieder neu heizt. Der Ofen hat also eine Temperatur von etwa  $153 \pm 14\text{ }^\circ\text{C}$ . Um eine gleichmäßigere Temperatur zu erhalten, wurde immer eine rechteckige Aluminiumplatte auf den Ofen gelegt. Auf dieser Platte ergeben sich Temperaturen von  $134\text{ }^\circ\text{C}$  bis  $128\text{ }^\circ\text{C}$ , also  $131 \pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ .

Die Thermodrähte des gebauten Differenzthermometers haben eine Dicke von nur  $0,1\text{ mm}$ . Ist eine gute Wärmeübertragung gewährleistet (z. B. wenn man die Lötstelle in

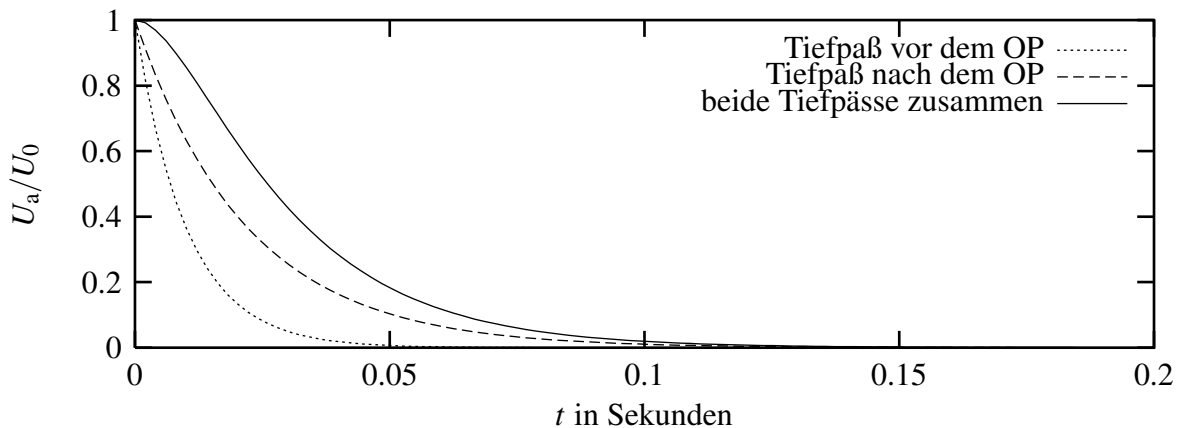


Abbildung 4.21: Die Reaktion des Verstärkerausgangs auf das Abschalten einer konstanten Eingangsspannung

eine Flüssigkeit taucht), hat es eine sehr kleine thermische Trägheit. Das ermöglicht sehr schnelle Sampleraten. Allerdings gibt es zwei Tiefpässe im Verstärker. Einen vor und einen anderen hinter dem Operationsverstärker. Da der Operationsverstärker als aktives Bauteil dafür sorgt, daß diese beiden Tiefpässe nicht miteinander wechselwirken, ergibt sich ein passiver RC-Tiefpaß 2. Ordnung [23]. Die Grenzfrequenz eines Verstärkers ist die Frequenz, bei der eine Dämpfung der Amplitude auf  $1/\sqrt{2}$  (entspricht ungefähr 3 dB) eintritt. Der erste Tiefpaß hat eine Grenzfrequenz von 16 Hz, der zweite von 7,2 Hz. Beide gemeinsam ergeben eine Grenzfrequenz von 6,2 Hz. Die Abb. 4.20 zeigt die sich daraus ergebende Dämpfung bzw. Frequenzverschiebung.

Um das Abschwingverhalten des Verstärkers zu ermitteln, wurde die Differentialgleichung gelöst. Wenn das Eingangssignal plötzlich von einer konstanten Anfangsspannung auf 0 abfällt, wird der Kondensator des ersten Tiefpasses (mit der Grenzkreisfrequenz  $\omega_1$ ) über dessen Widerstand entladen. Die Spannung ergibt sich mit:

$$U_1 = U_0 e^{-t\omega_1}.$$

Die Differentialgleichung für den zweiten Tiefpaß lautet:

$$-U_0 \omega_1 e^{-t\omega_1} = R_2 \dot{I}_2 + \frac{I_2}{C_2}.$$

Als Lösung ergibt sich:

$$U_2 = U_0 \frac{\frac{e^{-t\omega_1}}{\omega_1} - \frac{e^{-t\omega_2}}{\omega_2}}{\frac{1}{\omega_1} - \frac{1}{\omega_2}}.$$

Man sieht in Abb. 4.21 die exponentiell abfallende Spannung am ersten Tiefpaß. Die Eingangsspannung des zweiten Tiefpasses wird dadurch verzögert reduziert. Sein

Ausgangssignal sinkt daher erst später ab, fällt aber, nachdem die Ausgangsspannung des ersten Tiefpasses auf nahezu Null gefallen ist, auch nahezu exponentiell ab. Nach einer 1/30 Sekunde ist die Amplitude auf  $1/e$  abgefallen, nach 1/5 Sekunde schon auf  $1/4841$ . Diese Kurve zeigt, daß auch der Verstärker, trotz seiner Tiefpässe sehr schnell reagiert und somit das Thermometer eine sehr kleine Trägheit besitzt.

Die Abb. 4.22 zeigt die Temperaturdifferenzen auf dem Ofen, der darauf gelegten rechteckigen Aluminiumplatte und dem Öl. Die Thermoelemente wurden beim Ofen und der Aluminiumplatte mit Wärmepaste direkt auf die Platte gebracht. Es wurde jeweils die Mitte des Ofens gegen den Bereich gemessen, unter dem die Heizwendel liegt. Die kleine Rechteckfunktion zeigt die Heizphasen des Thermostats. Während auf dem Ofen noch Temperaturdifferenzen von  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  auftreten, werden diese auf der zum Temperatursgleichgewicht eingesetzten, rechteckigen Aluminiumplatte auf  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  reduziert.

Bei den Temperaturdifferenzmessungen im Öl gab es allerdings eine Überraschung. Die Abb. 4.23 zeigt die sich ergebenden Temperaturdifferenzkurven. Im Öl mißt man wellenförmige Temperaturschwankungen mit 3 bis 6 Schwingungen in der Sekunde. Der Verdacht, daß der Ofen diese Wärmefluktuationen verursacht, die dann vom Öl gedämpft werden, ließ sich überzeugend widerlegen: Wenn man den Netzstecker des Ofens zieht, bleiben die Fluktuationen. Analog ergibt sich das gleiche für die PTC-Heizkörper. Es gibt drei Möglichkeiten, woher diese Fluktuationen herkommen können:

1. Das an den Thermoelementen vorbeiströmende Öl wird gestört – es entstehen Wellen, die die Eintauchtiefe der Thermoelemente ändern und damit eine Temperaturdifferenz vortäuschen.
2. Es gibt Temperaturfluktuationen im Öl.
3. Öl bleibt an den Thermoelementen hängen, und wird regelmäßig wieder mitgespült.

Die erste Möglichkeit ist unwahrscheinlich, da man das sehen müßte. Zudem ist die Schwankung unabhängig von der „Eintauchtiefe“ (es sind nur Bruchteile eines Millimeters). Für die zweite Möglichkeit würde sprechen, daß die Kurven in dem Artikel [3] ähnlich aussehen. Dort wird der Soret-Effekt dafür verantwortlich gemacht. Er wird bei Mischungen verursacht durch Gradienten im Mischungsverhältnis. Es ist nicht bekannt, ob das eingesetzte Siliconöl eine Mischung ist, z. B. könnten unterschiedlich lange Siliconketten gemischt worden sein, um die gewünschte Viskosität zu erreichen. Zum anderen stellt natürlich das eingefärbte Öl eine Mischung aus Siliconöl und Farbstoff dar. Leider wird bei dem angesprochenen Artikel nicht klar, welche Sorte von Konvektionsmustern untersucht wurden (Walzen, Zellen oder Monozelle). Die dritte Möglichkeit bedeutet, daß die Thermoelemente Konvektionen im kleinen verursachen, die von Temperaturfluktuationen begleitet sind. Die untere Kurve von Abb. 4.23 könnte durch Überlagerung entstehen, da ja beide Thermoelemente die Öloberfläche berühren.

Die Abb. 4.24 zeigt das Temperaturprofil der Öloberfläche. Das kältere Thermoelement befand sich auf der Öloberfläche außen am Schalenrand. Es ist eigenartig, daß man eine

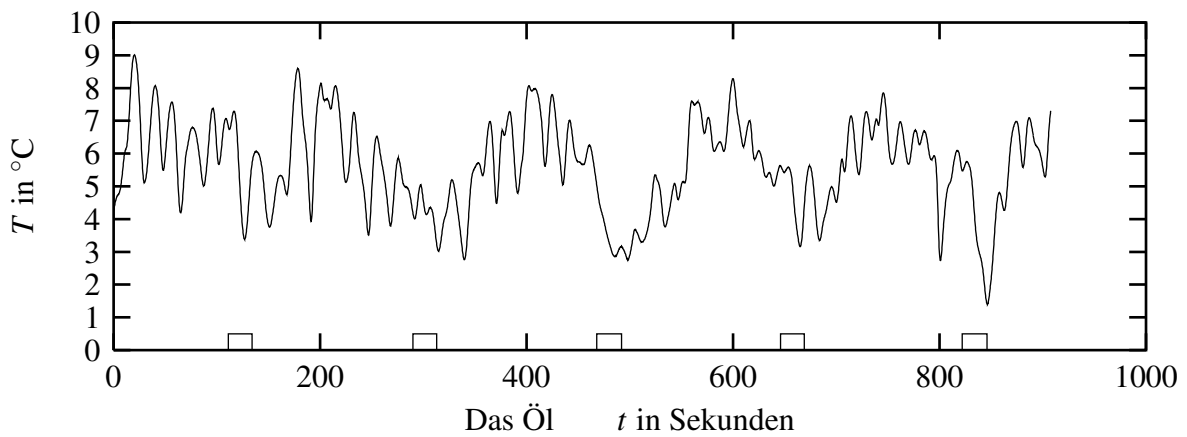
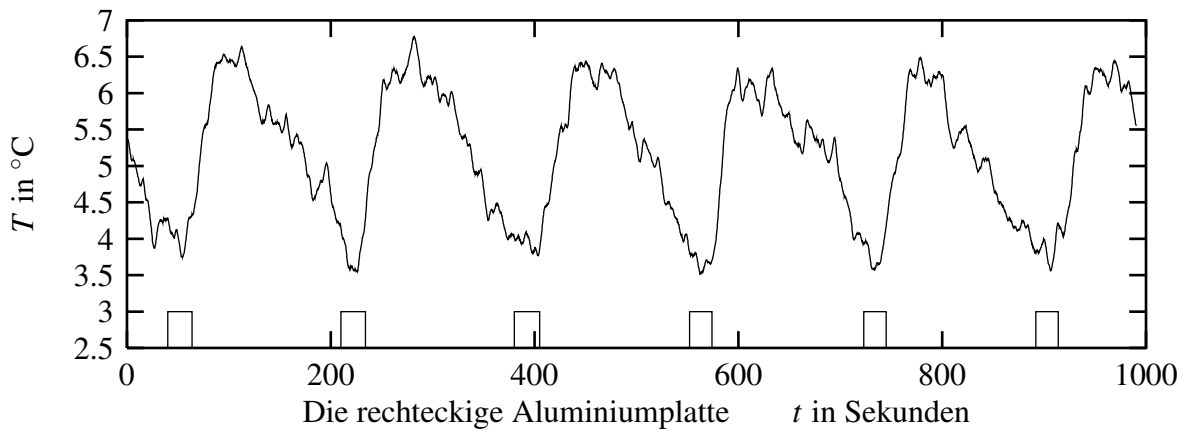
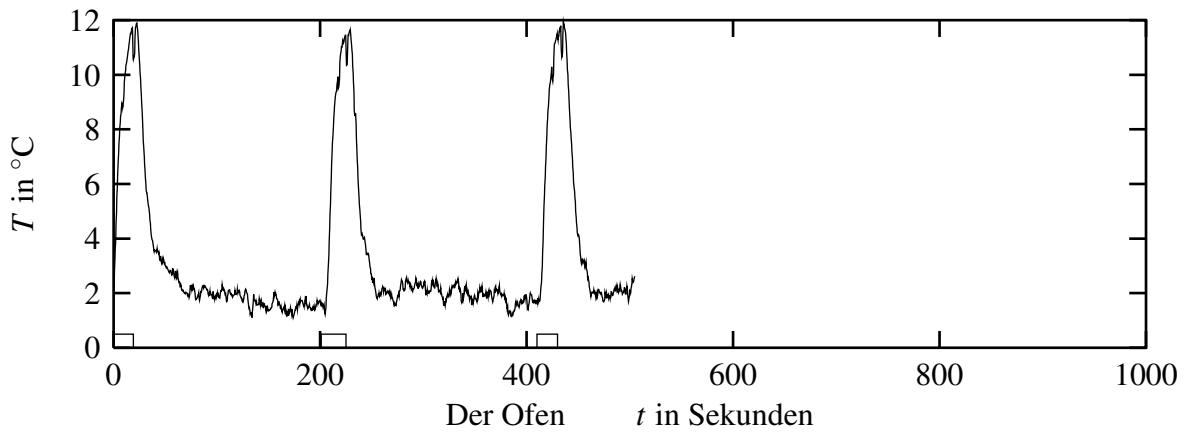


Abbildung 4.22: Mit dem Differenzthermometer wurden im 1/5-Sekundentakt die Temperaturdifferenzen auf dem Ofen, der rechteckigen Aluminiumplatte und im Öl aufgenommen. Die kleine Rechteckfunktion zeigt die Heizphasen des Thermostats.

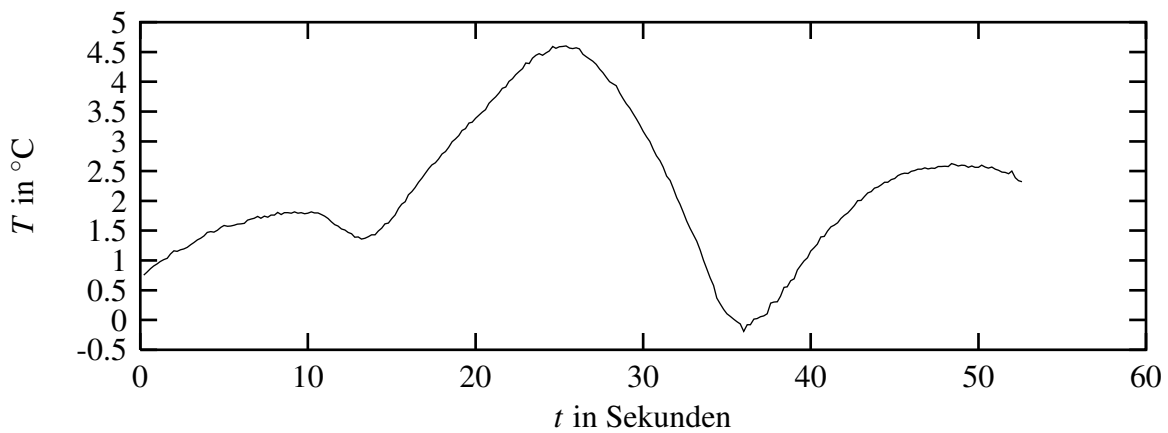
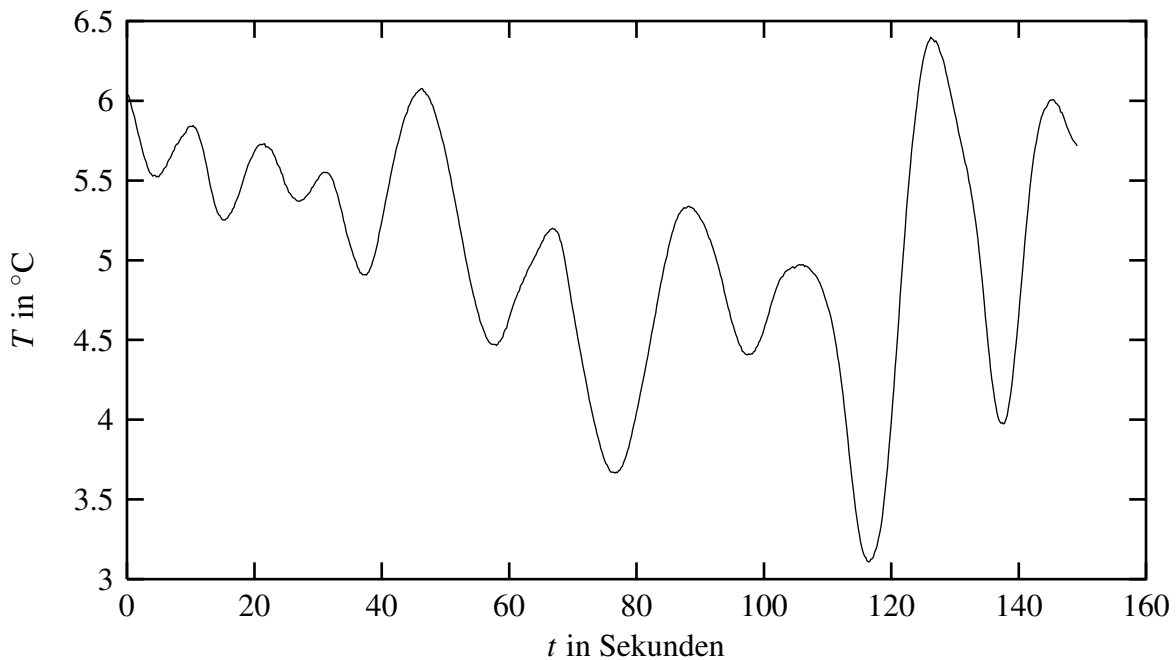


Abbildung 4.23: Die obere Graphik zeigt die im Öl gemessenen Temperaturdifferenzen (wieder im 1/5-Sekundentakt). Die Meßwerte wurden der Übersicht halber durch gerade Linien verbunden. Die Meßwerte sind tatsächlich genau so gemessen worden, die Meßwerte wurden *nicht* aufbereitet (also nicht geglättet oder durch Splines verbunden). Die untere Kurve ist nicht so regelmäßig. Es könnte sein, daß es sich um eine Überlagerung handelt, da beide Thermoelemente die Öloberfläche berühren.



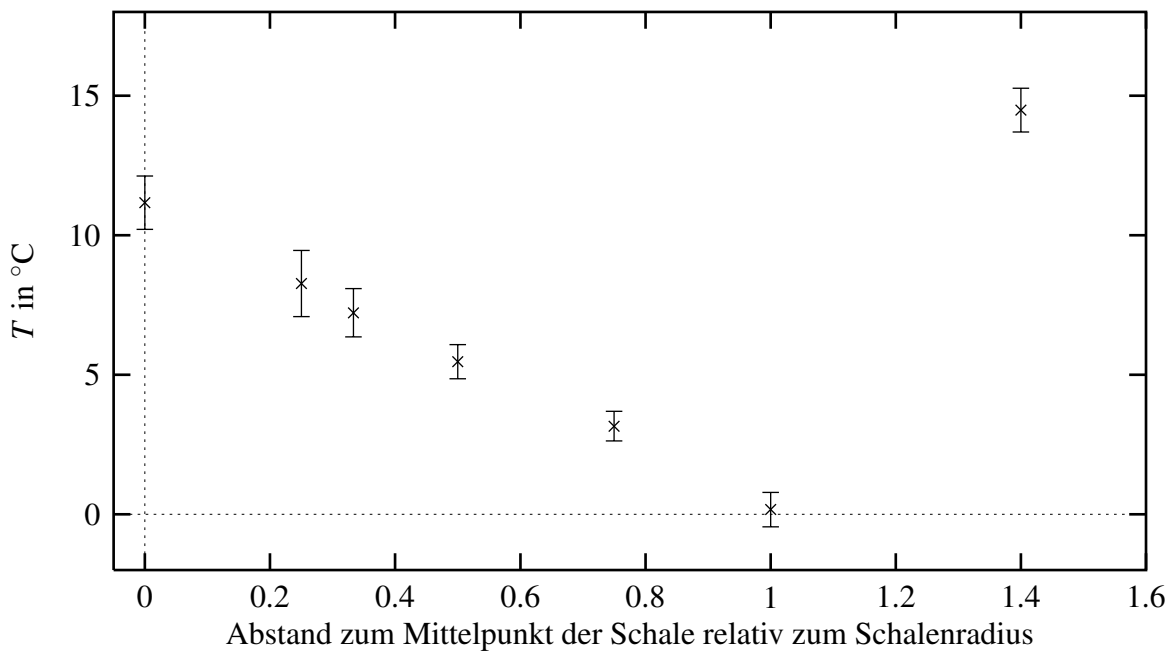


Abbildung 4.24: Die Graphik zeigt das Temperaturdifferenzprofil der Öloberfläche in Relation zum äußeren Schalenrand. Mit dem Punkt rechts außen ist die Temperaturdifferenz der Heizplatte dargestellt. Es wurden jeweils 16 Messungen von einer Minute Dauer durchgeführt. Die Balken zeigen die Größe der wellenartigen Fluktuationen (Mittelwert der Varianzen). Der Fehler der Einzelmessung betrug durchgehend  $1,1^{\circ}\text{C}$ .

Gerade durch das Profil legen könnte. Wenn das Öl gleichmäßig mit der Zeit verdunsten und damit abkühlen würde, müßte die Kurve nach oben durchgebogen sein, da das Öl in der Mitte der Monozelle schneller fließt, als am Rand. Das Öl wird nach außen hin immer langsamer, da der Umfang immer größer wird und insgesamt die gleiche Menge Öl nach außen treibt. Dieses 2dim. Modell hinkt etwas, da bei höherer Geschwindigkeit durch die Viskosität die tieferen Schichten mitgeschliffen werden und dadurch die Strömung in der Mitte der Zelle tiefer und damit wieder langsamer wird. Das ist auch der Grund, warum der millimeterdicke Kamin, in dem das Öl nach oben treibt, mit dem Mikroskop beobachtet werden kann. Nach außen hin wird die strömende Schicht sehr dünn, sodaß die Markerteilchen so dicht an dem Glasrand hinansinken, daß sie sich mit dem Mikroskop beobachten lassen. Aber man kann sich anhand der Photos der Monozellen davon überzeugen, daß die Trajektorien in der Mitte länger sind, und damit das Öl hier wesentlich schneller fließt als außen. Es gibt allerdings ein Argument, das dafür sorgen würde, daß sich das kalte Öl langsamer abkühlt als daß heiße: Über der Schale steht ein mehr oder weniger gesättigter Öldampf, der das Verdunsten an den kälteren Stellen behindert.

Es wurden jeweils 16 einzelne Messungen von jeweils einer Minute durchgeführt. Für die Einzelmessung wurde ein Fehler von  $1,1\text{ }^\circ\text{C}$  ermittelt. Es ist nun die Frage, ob sich bei der Mittelung der jeweils 16 Messungen ein Fehler für den Mittelwert mit  $1,1\text{ }^\circ\text{C}/\sqrt{16} = 0,27\text{ }^\circ\text{C}$  ergibt. Zwischen den Messungen wurden die Thermoelemente wieder aus dem Öl genommen, um sie dann wieder herunterzufahren, damit sie die Öloberfläche berühren. Wenn es ein streuender Fehler ist, erhält man durch die Mittelung desto genauere Mittelwerte, je mehr Einzelmessungen man macht. Ist es aber ein systematischer Fehler, dadurch daß man die Thermoelemente systematisch unterschiedlich ins Öl hineinhält, bleibt dieser konstant falsch, unabhängig davon, wie oft man mißt.

Ein Indiz dafür, daß es sich um einen streuenden Fehler handelt, wäre, daß die Verteilung normalverteilt ist. Daher wird der  $\chi^2$ -Test durchgeführt [25]. Es werden so große Klassen gebildet, daß nach der Gaußkurve 5 oder mehr Messungen in eine Klasse fallen. Das  $\chi^2$  ergibt sich aus folgender Formel:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(M_i - np_i)^2}{np_i} = \sum_{i=1}^k \frac{M_i^2}{np_i} - n,$$

mit

- $k$ : Anzahl der Klassen
- $M$ : Anzahl der in die Klasse fallenden Messungen
- $p$ : mit der Gaußkurve berechnete Anzahl

Im Zähler steht das Quadrat der Abweichung zwischen erwarteter und gemessener Anzahl. Im Nenner steht die erwartete Anzahl, die bei der Poisson-Verteilung der

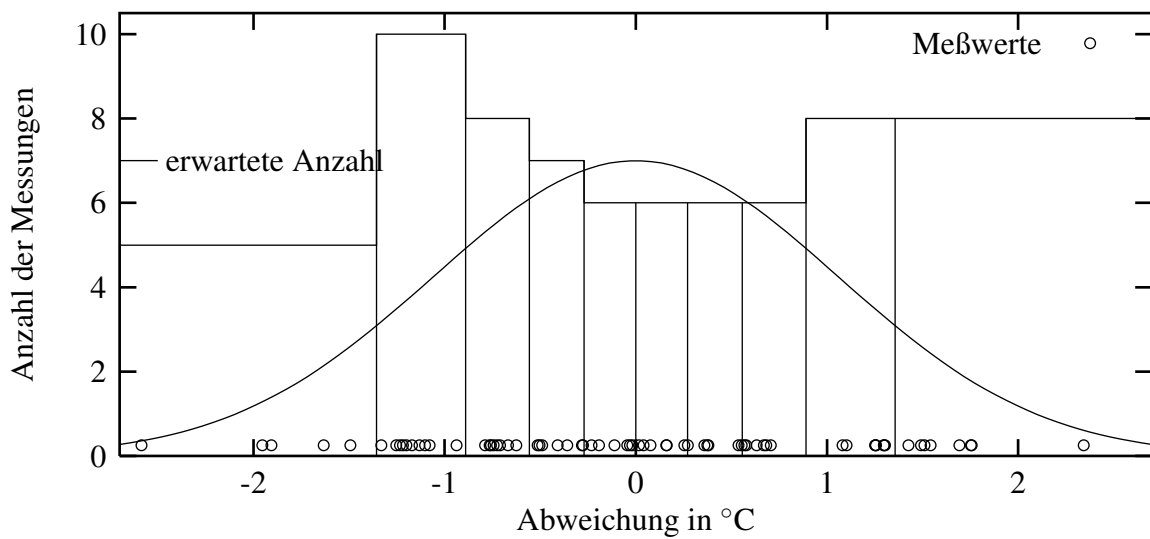
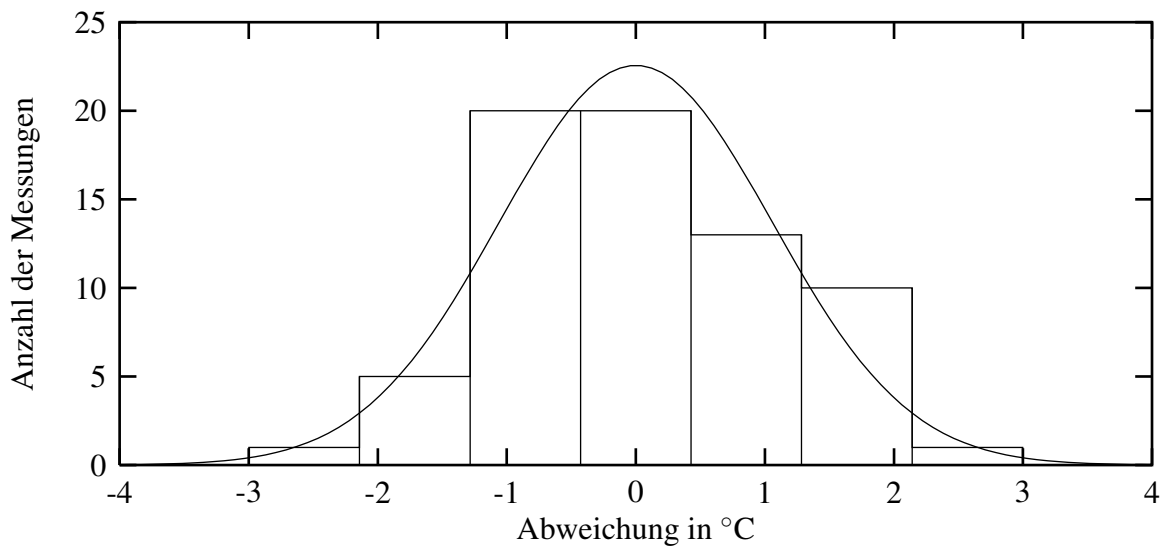


Abbildung 4.25: Die Verteilung der Meßabweichungen werden mit der Gaußkurve verglichen. Oben sind die Klassen gleich breit gewählt worden. Unten wurden die Klassen so breit gewählt, daß sie theoretisch gleichviele Messungen fassen, um den  $\chi^2$ -Test machen zu können. Die Einzelmessungen werden durch die Kringle dargestellt.

Varianz (also auch dem Fehlerquadrat) entspricht. Summiert man nun über alle Klassen, wird man in etwa einen Wert erhalten, der der Anzahl der Klassen entspricht. Ist er deutlich größer, ist die vermutete Verteilung unwahrscheinlich. Wie unwahrscheinlich sie ist, kann man in Tabellen nachschlagen [25]. Dafür braucht man neben dem  $\chi^2$ -Wert noch den Freiheitsgrad  $m = k - r - 1$ , wobei  $r$  die Anzahl der geschätzten Parameter sind (in diesem Fall zwei: Stelle und Standardabweichung der Gaußkurve). Es ergibt sich ein  $\chi^2 = 2,9$ , das kleiner ist als die 7 Freiheitsgrade. Durch diesen Test kann daher nicht widerlegt werden, daß die Fehler streuende sein könnten.

## 4.5 Bildverarbeitung

Häufig werden in der Bildverarbeitung Bilder durch Gaußmatrizen geglättet, um das Rauschen wegmitteln zu können. In den nachfolgend dargestellten Bildern wird nun das Gegenteil gemacht. Die Bilder werden durch Anwendung der kleinsten (in den Grundlagen erwähnten) Laplacematrix geschärft. Ein Pixel bleibt nur dann gesetzt, wenn die Laplacematrix  $\leq 0$  ist. Anschaulich bedeutet dies, daß er nur dann gesetzt bleibt, wenn er dunkler (oder gleich dunkel) ist, als der Mittelwert seiner unmittelbaren 8er-Nachbarschaft. Dadurch fallen Randpunkte der Trajektorien weg und das Bild wird eindeutiger. Wie die Bilder zeigen, funktioniert diese Vorgehensweise, was bedeutet, daß die Kamera und der Diascanner nicht nur Bilder mit hoher Auflösung produzieren, sondern daß diese zudem praktisch rauschfrei sind. Die dargestellten binären Bilder sind insofern von Interesse, da der Computer letztendlich doch binär entscheidet, ob ein Pixel zu einer Trajektorie gehört, oder zum Hintergrund.

Sieht man sich die Trajektorien der Markerteilchen auf den Bildern an, erkennt man einerseits dicke, kräftige Striche von den größeren Markerteilchen, aber auch dünn gepunktete, angedeutete Linien, die von kleineren, oder nicht so günstig ausgerichteten bzw. tiefer liegenden Markerteilchen herrühren. Während sich die dicken Linien mit dem Traceralgorithmus labeln lassen, könnte man die dünn gepunkteten, angedeuteten Linien durch die Hough-Transformation aufspüren. Die Hough-Transformation wird allerdings bei der hier vorliegenden Problemstellung irritiert: Gibt es parallel zu der dünnen Linie eine dicke Linie, ergibt sich für einen Punkt auf der dünneren Linie das Maximum der Hough-Transformation nicht für die gesuchte Gerade durch die Menge dieser dünnen Linien, sondern für Geraden, die diesen Punkt und einen dicken Strich beinhalten. Man kann die Hough-Transformation also eher benutzen, wenn alle Striche gleich dick wären. Da zwischen dicken und gepunkteten Linien alle Übergangsmöglichkeiten vorkommen, kann man keine Klassen einteilen, um sie gesondert zu behandeln. Auch die üblichen Treshold-Methoden scheitern an diesem Problem.

Die Methoden, mit Dilation und Erosion die einzelnen Punkte aufzublähen, damit sie zu einer Linie zusammenwachsen können, scheitern daran, daß parallele Linien, die sich vorher unterscheiden ließen, auch zusammenwachsen; genau dies will man aber vermeiden. Da wir Menschen aus den Bildern die Trajektorien unterscheiden können, ist diese Information folglich in den Bildern enthalten. Es müßten kompliziertere Clusteralgorithmen eingesetzt werden, um die Pixelgruppen jeweils in zusammengehörende Trajektorien separieren zu können.

Die Realisierung eines derartigen Programms hätte den Rahmen dieser Diplomarbeit gesprengt. Im folgenden wird nun skizziert, welche Ansätze sich in der Literatur zur Lösung des beschriebenen Problems finden ließen, bzw. welche Überlegungen sich daraus ergeben.

Im [28] wird gezeigt, wie man mittels adaptiver Filterung eine Bildverbesserung bei unvollständigen Fingerabdrücken machen kann. Erst wird durch den vertikalen und

horizontalen Sobel-Operator der Gradient bestimmt, an dem man die Ausrichtung der Striche erkennen kann. Die Ausrichtungsinformation wird innerhalb des Bildes leicht „verschmiert“, um gerade an den Stellen eine Ausrichtungsinformation zu erhalten, wo Linienstücke fehlen, damit man sie durch Fortsetzen rekonstruieren kann.

Bei den Petrischalen würde sich für dieses „Verschmieren“ die Gaußpyramide anbieten. Denn die Fourier-Transformation nimmt keine Rücksicht auf die in diesem Falle runde Bildbegrenzung. Die Fourier-Transformation arbeitet mit dem Kunstgriff, daß das Bild am Rand wieder gespiegelt fortgesetzt wird. Bei der Gaußpyramide dagegen kann man parallel ein Bild mitberechnen, das die Pixel mitzählt, die in der runden Bildbegrenzung liegen. Die anderen Bilder kann man dann damit normieren.

Sowohl wenn der Gradientenvektor nach oben, als auch nach unten zeigt, bedeutet dies, daß die Linie horizontal ausgerichtet ist. Beim „Verschmieren“, also mitteln, würde sich dieses gerade wegheben. Um das zu verhindern, wird meist erst quadriert, oder der Absolutwert genommen. Allerdings wäre die Differenz der Quadrate von vertikalem und horizontalem Sobeloperator in dem hier vorliegenden Fall die geeignetere Wahl:

$$\cos^2(\alpha) - \sin^2(\alpha) = \cos(2\alpha).$$

Führt man das ganze mit den vertikalen Sobeloperatoren aus, ergibt sich analog:

$$\cos^2(\alpha + 45^\circ) - \sin^2(\alpha + 45^\circ) = \cos(2\alpha + 90^\circ) = \sin(2\alpha).$$

Man bildet den Gradientenvektor also auf einen neuen Vektor ab, der sich doppelt so schnell dreht. Dadurch werden die genau entgegengesetzten Gradientenvektoren wieder auf die gleiche Ausrichtung des neuen Vektors abgebildet – also genau das, was man erreichen wollte. Ansonsten bliebe die Ausrichtungsinformation erhalten. Übernimmt man aus dem Ursprungsbild die Intensität, und ordnet Farbton (Ausrichtung) und Farbsättigung (Vektorlänge) diesem neuen Vektor zu, könnte man diese Information sehr anschaulich Visualisieren.

Auch bei einer horizontalen Linie ergibt sich an deren Enden ein horizontaler Gradientenvektor. Will man diese Fehlinformation (vertikale Ausrichtung?) korrigieren, kann man sich zunutze machen, daß bei einer wirklichen vertikalen Ausrichtung des Striches sich dieses Verhalten in der Vertikalen fortsetzen würde. Wendet man also auf die vertikale Ableitung z. B. den Median bezüglich der vertikalen Nachbarn an, würde man diese Fehlinformation unterdrücken.

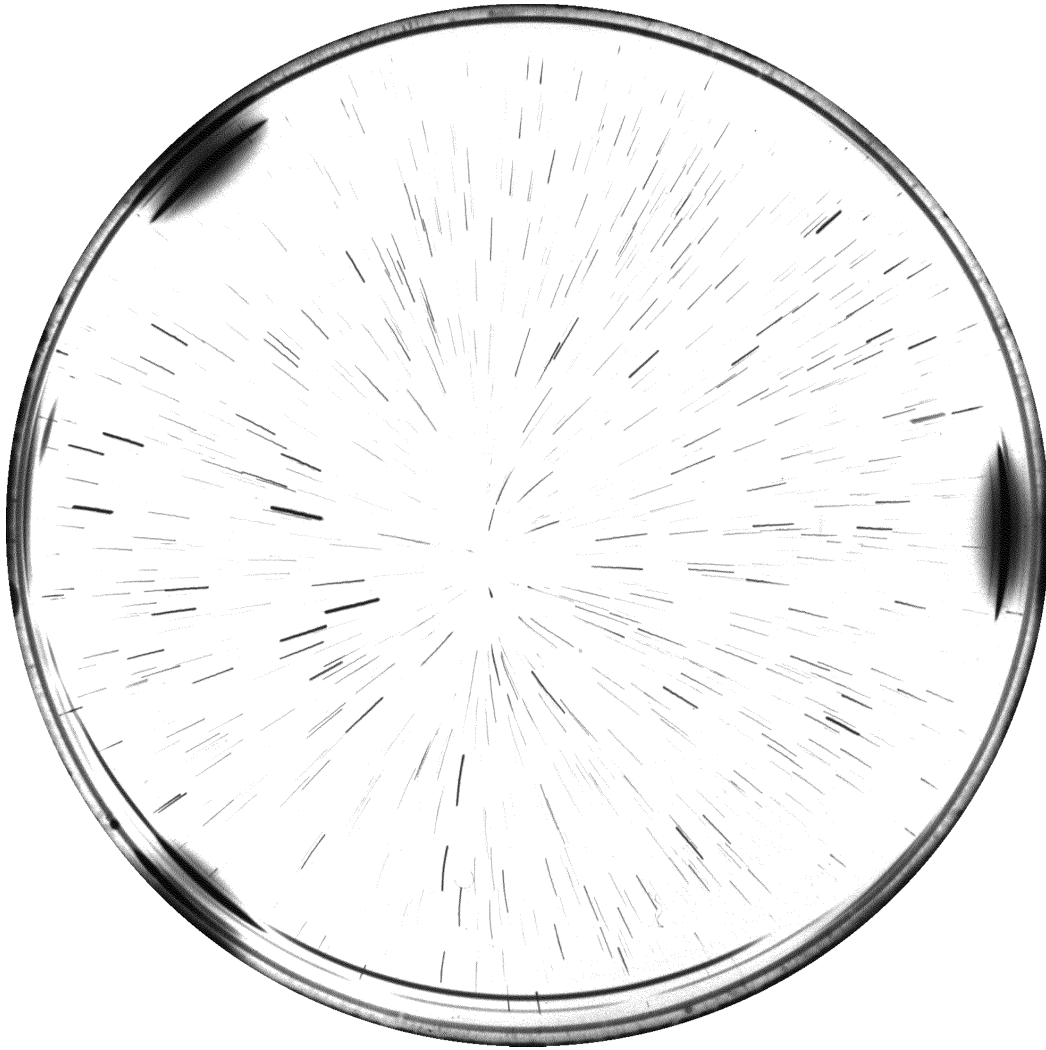


Abbildung 4.26: Das unbehandelte Originalbild als Graustufenbild einer Monozelle

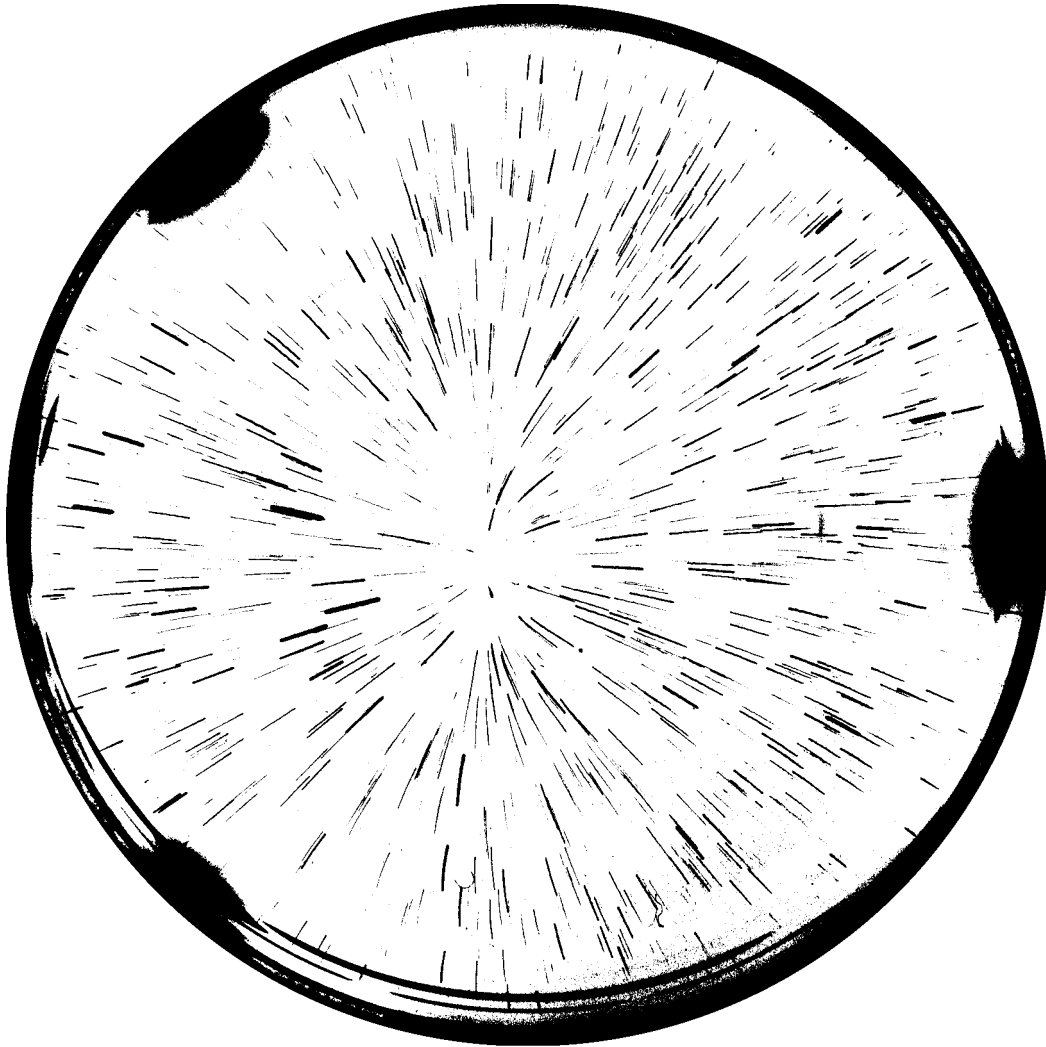


Abbildung 4.27: Das unbehandelte Originalbild als Binärbild: Es wurden alle Pixel schwarz dargestellt, die nicht absolut weiß sind, sodaß es keine Graustufen mehr gibt. Es fällt auf, daß dadurch wesentliche Information zum vorherigen Bild wegfällt. Parallel verlaufende Trajektorien, die sich vorher noch als einzelne Trajektorien auflösen ließen, werden nun undifferenziert als schwarzer Fleck dargestellt.



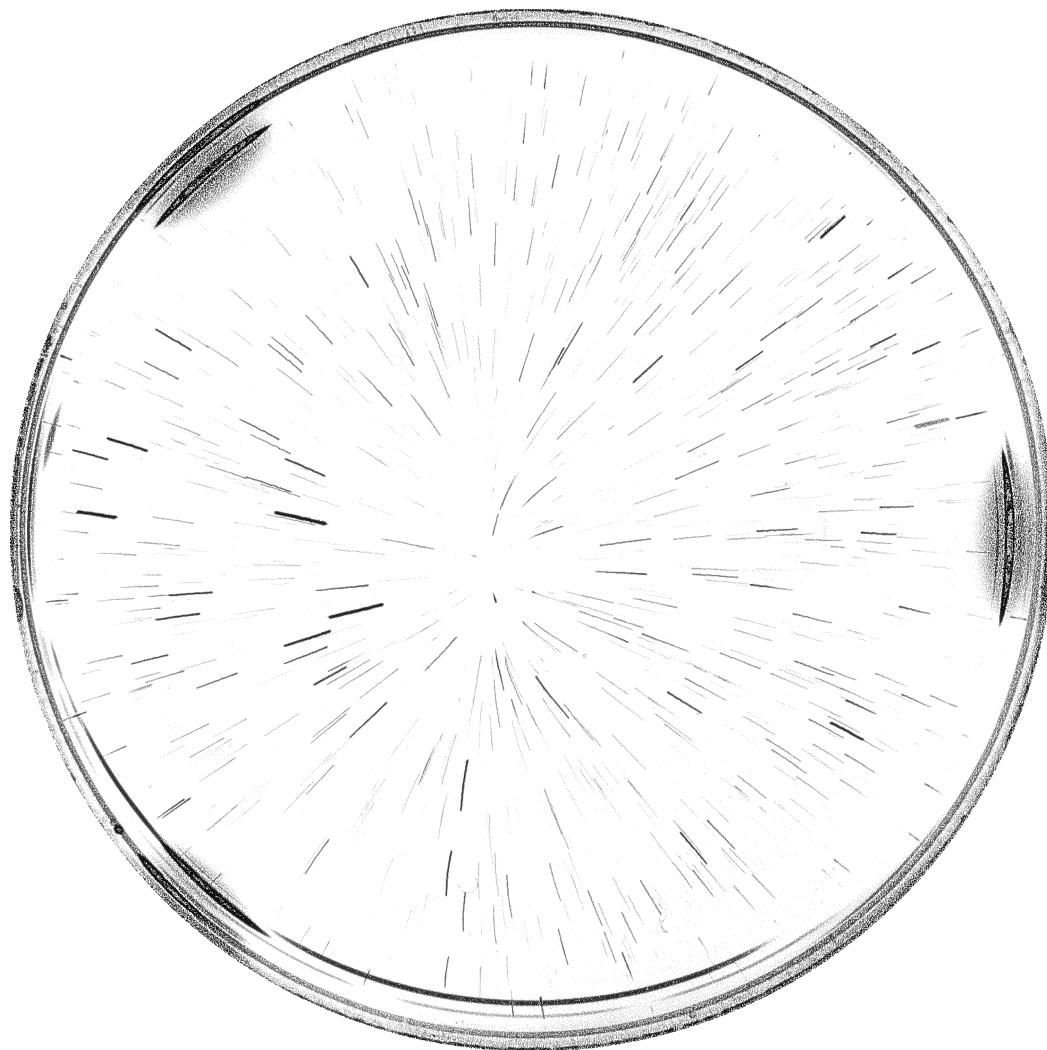


Abbildung 4.28: Nach der Anwendung der Laplacematrix auf das Originalgrastufenbild ergibt sich ein deutlich schärferes Bild. Details werden besser erkannt, Trajektorien die vorher noch undifferenzierbar zusammenhingen, können nun einzeln aufgelöst werden.

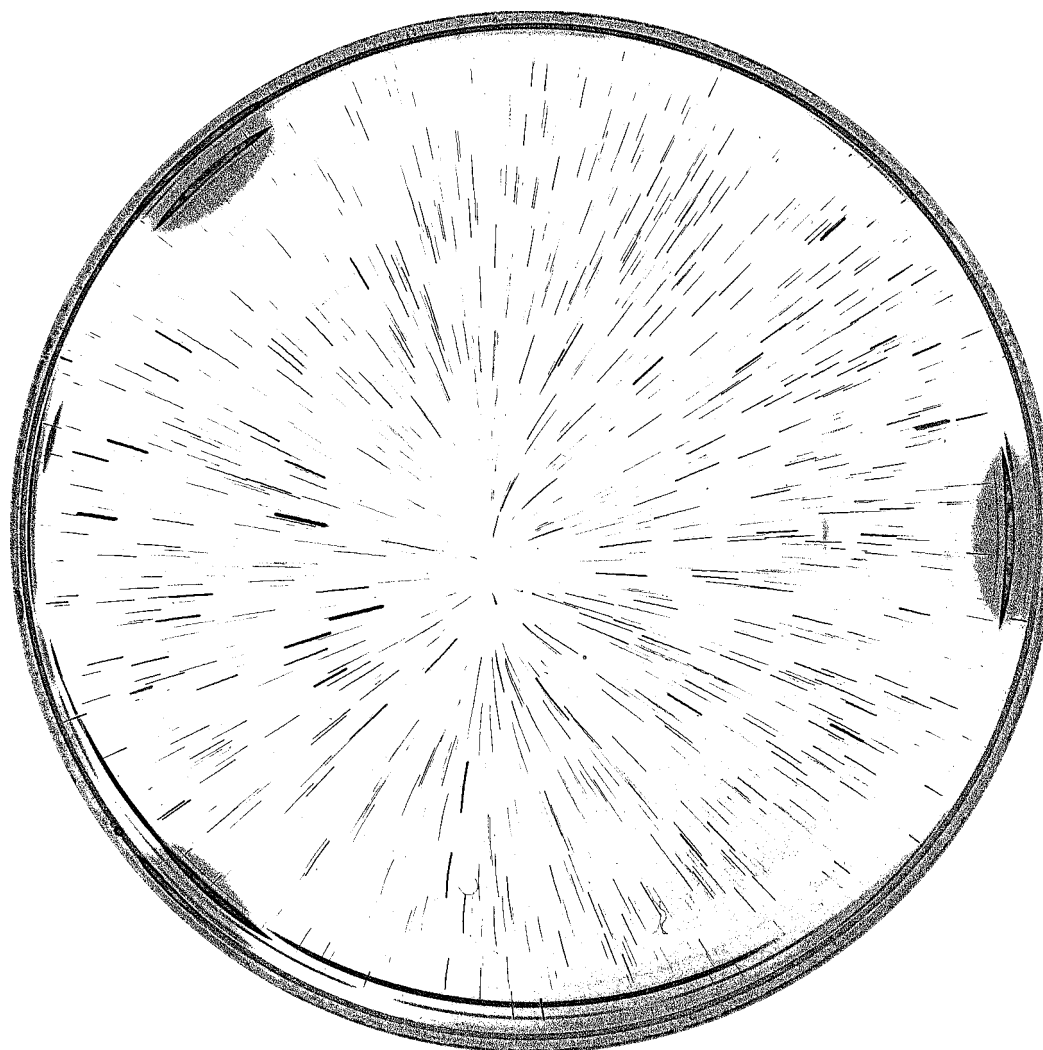


Abbildung 4.29: Das mit der Laplacematrix behandelte Bild als Binärbild: Auch hier ergibt sich in Relation zum vorherigen Bild wieder ein Informationsverlust, wenn die Graustufen wegfallen. Vergleicht man dieses Bild mit dem Binärbild des Originalbildes fällt allerdings auf, daß dieses Bild hier deutlich detailreicher ist. Der Verlust beim Übergang zum binären Bild wirkt sich hier also, wie gewünscht, nicht mehr so stark aus.

# Kapitel 5

## Zusammenfassung/Ausblick

Um die Konvektionsströmung sichtbar zu machen, werden als Indikatoren für die Strömung Markerteilchen eingesetzt. Es fiel auf, daß diese, eigentlich nur zu Indikatorzwecken eingesetzten Markerteilchen, an der Ausbildung der Konvektionsströmung in nicht unerheblicher Weise beteiligt sind. Sie häufen sich am Boden auf und beeinflussen dadurch die Konvektionsströmung. Es gelang, die notwendige Menge von Markersubstanz um Größenordnungen zu reduzieren. Einerseits durch Zerkleinerung der Markerteilchen, andererseits durch eine Kontraststeigerung, die durch das Einfärben des Öls erzielt wurde.

Leider sind auch die zerkleinerten Aluminiumpartikel in Relation zum Öl noch zu schwer, um den interessanten Zeitpunkt zu visualisieren, bei dem die oberflächenangetriebene Strömung initialisiert – die Strömung ist noch nicht schnell genug, um die Aluminiumpartikel mitzureißen. Es gibt zwar Versuche [1], Späne hitzebeständigen Kunststoffs als Markerteilchen einzusetzen. Allerdings ist nicht nur die Wichte, sondern auch die Form der Partikel entscheidend. Plattenförmige Partikel haben sich als vorteilhaft herausgestellt, sodaß man versuchen könnte, den Kunststoff zu hobeln.

Die Bénardzellen werden überwiegend durch Oberflächenkräfte angetrieben. Durch die Einfärbung und Aufnahmetechnik gelang es, die Trajektorien der Oberfläche zu photographieren, ohne dabei durch den Untergrund tieferer Markerteilchen gestört zu werden. Es wäre interessant, diese Trajektorien quantitativ mittels digitaler Bildverarbeitung auswerten zu können. Um die Trajektorien automatisch erfassen zu können, müßten Clusteralgorithmen eingesetzt werden. Diese fallen in ein schwieriges, spezielles Gebiet der Informatik, sodaß die Realisierung eines derartigen Programms den Rahmen dieser Physik-Diplomarbeit gesprengt hätte. Da nun praktisch unverrauschte Bilder hoher Auflösungsqualität vorliegen, wäre dies eine reizvolle Aufgabe für einen Informatiker.

Mit einem Mikroskop wurde der Aufstieg der Markerteilchen beobachtet und in vertikaler Richtung verfolgt. Dabei trat das Problem auf, daß sich in dieser Aufstiegszone das Öl nach oben wölbt und vibriert. Mit einem Mikroskop, das in alle drei Richtungen durch Schrittmotoren computergesteuert angetrieben wird, könnte man versuchen,

ein Teilchen im 3dim. Raum zu verfolgen und damit die Trajektorien quantitativ zu erfassen.

Aus der sich ergebenden Verzerrung eines Spiegelbildes, verursacht durch die gewölbte Öloberfläche, war es möglich, den Wölbradius zu bestimmen. Es ist bemerkenswert, daß die Öloberfläche nach oben gewölbt ist, da der Artikel [1] behauptet und begründet, daß sie nach unten gewölbt sei (s. S. 8).

Es gelang, mit sehr kleinen Thermoelementen das Temperaturprofil der Öloberfläche einer Monozelle zu messen. Dabei fielen zeitlich schwingende Fluktuationen der Temperatur auf, die eventuell auf den Soret-Effekt zurückzuführen sind (s. S. 9 u. 73). Man könnte mit höherem Aufwand versuchen, das Temperaturprofil berührungslos durch die entstehende Wärmestrahlung zu messen. Die Realisierung des auf Thermoelementen basierenden Differenzthermometers stellte aufgrund der hohen Temperaturen (130 bis 150 °C) in bezug auf die Materialwahl und die eingesetzten Techniken eine Herausforderung dar. Temperaturdifferenzen messen zu können, ist insofern von Bedeutung, da die temperaturabhängige Oberflächenspannung aufgrund von Temperaturdifferenzen innerhalb der Flüssigkeitsoberfläche Kräfte entwickelt, mit denen sie die Konvektionsströmung antreibt. Um absolute Temperaturen und nicht eine Temperaturdifferenz zu messen, bräuchte man eine exakte bzw. exakt zu messende Vergleichstemperatur. Dies bedeutet aber einen deutlich höheren Aufwand. Man könnte dann die Fluktuationen besser untersuchen, bzw. man könnte an der Petrischalenglaswand entlang die Thermodrähtchen in das Ölinnere verlegen, um 3dim. ein Profil messen zu können.

Es fiel auf, daß Monozellen, deren Füllhöhe leicht die kritische Füllhöhe (ab der sich eine Monozelle organisiert) überschreitet, zusammenbrechen, wenn man sie von der silbrig glänzenden Ofenplatte auf die schwarze Plattenseite stellt. Das Emissions- bzw. Absorptionsvermögen für Wärmestrahlung von Petrischale und Öl könnten für diesen Effekt verantwortlich sein. Der Versuch, das Emissionsvermögen von ihnen zu ermitteln, scheiterte an den Temperaturschwankungen des thermostatgesteuerten Ofens. Bei 100 °C hätte man einfach ein Wasserbad benutzen können, um für konstante Temperatur zu sorgen, aber bei den höheren Temperaturen würde eine verbesserte Temperaturkonstanz deutlich größeren Aufwand bedeuten.

Da der Versuch geplant ist, Bénardzellen aus Blut zu bilden, wäre es bedenkenswert, ob man sich an Bénardzellen auf wäßriger Basis wagt. Dadurch würden viele Schwierigkeiten entfallen bzw. vermindert werden, die durch die hohen Temperaturen auftraten.

Insgesamt manifestierte sich der Eindruck, daß die technischen und photographischen Probleme gelöst wurden, bzw. sich durch größeren Aufwand hätten lösen lassen. Die Bénardzellen dagegen neigen dazu, immer mehr Rätsel aufzugeben, je länger man sich mit ihnen beschäftigt. Dementsprechend blieb die Faszination des Phänomens der Bénardzellen auch nach der Dauer der Diplomarbeit von 1½ Jahren ungebrochen. Es wundert nicht, daß sich die Bénardzellen seit ihrer Entdeckung vor 100 Jahren einer stetigen, intensiven Forschung erfreuen.

# Danksagung

Prof. Dr. med. H. Schmid-Schönbein danke ich für die Möglichkeit zur Durchführung der Diplomarbeit.

Bei Prof. Dr. B. U. Felderhof möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates bedanken.

Dipl.-Phys. Jens Hektor gehört der Dank zur Betreuung der Diplomarbeit.

Bei Hannelore Heidtmann und Hannelore Horstkott möchte ich mich für die stetige Unterstützung bei der Bewältigung der organisatorischen und labortechnischen Probleme bedanken.

Allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe von Dr. med. Dipl.-Ing. R. Grebe danke ich für das interessante und angenehme Arbeitsklima. Um nicht Gefahr zu laufen, jemanden beim Aufzählen übersehen zu haben, werde ich diese große Gruppe nicht namentlich aufzählen.

Da die Diplomarbeit sehr interdisziplinär angelegt war, waren Gespräche mit Leuten aus anderen Bereichen sehr aufschlußreich. Ich möchte mich bedanken bei:

- Herrn Fels, dem Elektroexperten aus der Werkstatt des Klinikums
- Herrn Jorewitz aus der Zahnprothesenabteilung
- Franz Josef Kaiser, dem Photographen der Physiologie
- den Photographen der Photoabteilung des Klinikums
- den Chemikern um Eberhard Jüngling herum von Prof. Kammermeier
- Klaus Spielvogel (jetzt am Helmholtz-Institut), der vor mir mit den Bénardzellen experimentiert hat
- Prof. Genzel und Herrn Maurer vom physikalischen Praktikum
- Dr. Thomas Fischer aus der Physiologie
- allen Computerfreaks, die zwischen dem Hacken an den Tastaturen Zeit zur interhumanen Interaktion fanden
- Martin Arndt für die Durchsicht der Arbeit

Allen hier nicht ausdrücklich erwähnten, aber an der Diplomarbeit in direkter oder indirekter Form beteiligten Personen: Danke!

# Literaturverzeichnis

- [1] M. G. Velarde und C. Normand: *Konvektion*, Spektrum der Wissenschaft vom September 1980
- [2] J. R. A. Pearson: *On convection cells induced by surface tension*
- [3] J. K. Platten and G. Chavepeyer: *Oscillation motion in Bénard cell due to the Soret effect*, J. Fluid. Mech. Vol. 60
- [4] E. L. Koschmieder: *Bénard Convection*
- [5] P. H. Roberts: *Concepts in Hydrodynamic Stability Theory*
- [6] H. J. Palmer and J. C. Berg: *Convective instability in liquid pools heated from below*, J. Fluid. Mech. Vol. 47
- [7] K. R. Kirchartz and H. Oertel jr.: *Three-dimensional thermal cellular convection in rectangular boxes*, J. Fluid. Mech. Vol. 20
- [8] D. Ruelle and F. Takens: *On the Nature of Turbulence*, Commun. math. Phys. Vol. 20, Springer-Verlag
- [9] G. Nicolis: *Physics of far-from-equilibrium systems and self-organisation*, Paul Davies, The New Physics
- [10] *Ludwig Prandtl-Führer durch die Strahlungsmechanik*, Braunschweig 1990
- [11] Ein Vortrag von Paul Kolodner: *Hydrodynamische Instabilitäten*, AT&T Bell Laboratories
- [12] D. Schwabe, J. Metzger und A. Scharmann: *Marangoni-Konvektion in einem Spalt bei Mikrogravitation*, Phys. Bl. 49 (1993) Nr. 5
- [13] B. Ruck: *Ein neues laseroptisches Verfahren zur Sichtbarmachung und Echtzeit-Vektorisierung von Strömungsfeldern*, Laser und Optoelektronik 26(5)/1994
- [14] I. Prigogine: *Dialog mit der Natur*

- [15] Gerthsen/Kneser/Vogel: *Physik*, Springer-Verlag
- [16] F. Kohlrausch: *Praktische Physik*, Band 3, Stuttgart Teubner
- [17] D. Mende und G. Simon: *Physik*, VEB Fachbuchverlag Leipzig
- [18] *Brockhaus der Naturwissenschaften und der Technik*, F. A. Brockhaus Wiesbaden
- [19] H. Kuchling: *Physik*, VEB Fachbuchverlag Leipzig
- [20] Mirow: *Physikexamen*
- [21] H. Bahr: *Philips Lehrbriefe*, Band 2, Philips GmbH · Hamburg
- [22] H. Albrecht: *Optische Strahlungsquellen*, Lexica Verlag
- [23] U. Tietze und Ch. Schenk: *Halbleiter-Schaltungstechnik*, Springer-Verlag
- [24] G. Herziger und P. Loosen: *Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlen*, Carl Hanser Verlag München Wien
- [25] Bronstein und Semendjajew: *Taschenbuch der Mathematik*, Verlag Harri Deutsch
- [26] R. F. Schmidt und G. Thews: *Physiologie des Menschen*, Springer-Verlag
- [27] W. K. Pratt: *Digital Image Processing*, John Wiley & Sons
- [28] B. Jähne: *Digitale Bildverarbeitung*, Springer-Verlag
- [29] P. Haberäcker: *Digitale Bildverarbeitung*, Hanser Studienbücher
- [30] Oberschelp und Dohmen: *Schriften zur Informatik und Angewandten Mathematik: Mathematische Methoden für Bildverarbeitung und Computergraphik – Spezielle algorithmische Probleme der Computergraphik*, Bericht Nr. 149 Juli 1991, RWTH-Aachen
- [31] *Lehrbuch der Chemie*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie · Leipzig
- [32] H. Lietle: *Das Mikroskop in der Schule*, Franckh'sche Verlagshandlung Stuttgart
- [33] Werner Wurst: *Exakta, Kleinbild-Fotographie*, VEB Fotokinoverlag Halle