



## Masterarbeit

# Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von Sprays

erstellt für

**Institut für Verfahrenstechnik des industriellen  
Umweltschutzes**

**Vorgelegt von:**

Markus Ludwig Kofler  
0235027

**Betreuer/Gutachter:**

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing.Dr.techn. Christian Weiß  
Dipl.-Ing. Martin Dopler

Leoben, 28. Februar 2011



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

## **AFFIDAVIT**

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

## **DANKSAGUNG**

Ich möchte mich an dieser Stelle bei den Personen bedanken, die mir bei der Erarbeitung dieser Masterarbeit geholfen haben.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. DI. Dr. techn. Christian Weiß vom Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes der Montanuniversität Leoben und besonders Herrn DI Martin Dopler von der Firma Mepura für die Betreuung meiner Arbeit.

Außerdem bedanke ich mich bei meiner Freundin Nina Neuhold und meiner gesamten Familie für ihre Unterstützung

## **Kurzfassung**

### **Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von Sprays**

Beim Zerstäuben von Flüssigkeiten ist das Wissen über den Tropfenzerfall von wesentlicher Bedeutung; beispielsweise wenn konkrete Partikelgrößen produziert werden sollen. Zum optimalen Verständnis der Zerfallskinetik ist es notwendig, die für das menschliche Auge zu schnell ablaufenden Prozesse mit einem Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem visuell zu erfassen. Der theoretische Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit dem technischen Hintergrund der Kamera, die es gestattet Aufnahmen bis 128.000 Bilder pro Sekunde zu tätigen, sowie mit den Themenbereichen Optik und Belichtung. Dabei werden verschiedene technische Möglichkeiten der Fotografie mit Hinblick auf deren projektbezogenen Vor- und Nachteile aufgezeigt. Des Weiteren werden Aspekte der Spraykinetik dargestellt und erläutert. Im praktischen Teil soll zu Beginn mit einer digitalen Spiegelreflexkamera die geeignete Belichtung für den geplanten Versuch gefunden werden. In einem zweiten Schritt werden Aufnahmen von Wassersprays mit einer digitalen Hochgeschwindigkeitskamera getätigt. Diese werden anschließend dargestellt und analysiert.

## **Abstract**

### **High Speed Cinematography of Sprays**

For atomization of liquids, it is necessary to device knowledge about the time constants and rates of droplet generation. Exemplarily, this is an important aspect for quality control in powder production via atomization of melts. For understanding the droplet kinetics of sprays, high-speed cameras are essential for recording the fast processes which cannot be detected by the human eye. The theoretical part of this diploma thesis engages in the technical background of the camera, which within the investigated experiment is able to take pictures at frame rates up to 128.000 pictures per second. Moreover, optical and illumination components will also be discussed. Different technical options of photography will be identified with a view of the project-oriented benefits and disadvantages. Furthermore, basic aspects of spray kinetics are demonstrated and explained. In the practical part of this thesis, an adequate illumination is found with a digital reflex camera for the main experiment. In the experiment section pictures will be taken of water-sprays with a digital high-speed camera. The picture outputs are shown and analyzed.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>4</b>
1.1 Problemstellung .....	4
1.2 Zielsetzung .....	4
<b>2 GRUNDLAGEN .....</b>	<b>6</b>
2.1 Physikalische Grundlagen .....	6
2.1.1 Geometrische Optik.....	6
2.1.2 Fotometrie .....	7
2.2 Grundlagen der industriellen Bildverarbeitung .....	11
2.2.1 Beleuchtung [10].....	12
2.2.2 Optik [10] .....	12
2.2.3 CCD/CMOS Kamera .....	13
<b>3 MAKROFOTOGRAFIE – OBJEKTIVSYSTEME .....</b>	<b>15</b>
3.1 Grundsätzliche Aspekte der Makrofotografie [1] .....	15
3.1.1 Schärfentiefe .....	15
3.1.2 Belichtung.....	16
3.1.3 Objektdistanz.....	16
3.2 Möglichkeiten zur Realisierung von Makro- und Mikroaufnahmen.....	16
3.2.1 Makroobjektive .....	17
3.2.2 Umkehrringe .....	17
3.2.3 Telekonverter [3].....	18
3.2.4 Zwischenringe und Balgengerät .....	18
3.2.5 Lupenobjektive [3] .....	20
3.2.6 Mikroskopobjektive .....	21
3.3 Zusammenfassung .....	23
<b>4 BELICHTUNGSSYSTEME .....</b>	<b>24</b>
4.1 Grundlagen zur Belichtung [8] .....	24
4.1.1 Allgemeines .....	24
4.1.2 Blendenzahl.....	25
4.1.3 Leuchtdichte des Objekts .....	26
4.1.4 Beleuchtungsstärke in der Bildebene .....	26
4.1.5 Belichtung H .....	28



4.2	Empfindlichkeit von Bildsensoren .....	29
4.2.1	Spektrale Empfindlichkeit von Bildsensoren.....	29
4.2.2	ISO-Empfindlichkeit von Bildsensoren .....	31
4.3	Beleuchtung .....	33
4.3.1	Beleuchtungstechniken [20] .....	33
4.3.2	Einteilung der Lichtquellen [8] .....	33
4.3.3	Anwendung von Stroboskopen zur Highspeed-Fotografie .....	34
4.3.4	Laser .....	36
4.3.4.1	Grundlagen zu Lasern [25] .....	37
4.3.4.2	Argonionenlaser [25] .....	38
4.3.4.3	Neodym-YAG-Laser .....	40
4.3.5	Anwendung des Lasers zur Highspeed-Fotografie .....	41
<b>5</b>	<b>KAMERASYSTEME .....</b>	<b>43</b>
5.1	Digitale Spiegelreflexkamera [28] .....	43
5.1.1	Wichtige Kenndaten einer Digitalen Kamera.....	43
5.1.2	Wichtige Effekte und Eigenschaften der digitalen Kameras .....	44
5.2	Highspeed-Videokameras.....	45
5.2.1	Analoge Highspeed-Kameras [20].....	45
5.2.2	Digitale Highspeed-Kameras [20].....	46
5.2.3	Wichtige Spezifikationen für Highspeed-Kameras .....	47
<b>6</b>	<b>AUSWAHL DER KOMPONENTEN FÜR DIE VERSUCHS-DURCHFÜHRUNG 50</b>	
6.1	Objektiv.....	51
6.2	Belichtungssystem .....	52
6.3	Kamerasystem .....	53
6.3.1	DSR-Kamera .....	53
6.3.2	Highspeed-Kamera.....	54
<b>7</b>	<b>VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....</b>	<b>58</b>
7.1	Versuche mit der Nikon D90 .....	58
7.1.1	Versuch 1 .....	58
7.1.2	Versuch 2 .....	63
7.1.3	Interpretation der Ergebnisse .....	69
7.2	Versuch mit der Photron Fastcam.....	70
<b>8</b>	<b>BERECHNUNGSERGEBNISSE UND VERGLEICH MIT DEN MESSDATEN ...</b>	<b>83</b>
8.1	Theoretische Zerstäubungs-Charakteristiken .....	83
8.2	Exemplarische Berechnungsergebnisse .....	96



<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>102</b>
<b>10</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>104</b>
10.1	Literatur.....	104
10.2	Abkürzungsverzeichnis .....	107
10.3	Tabellen .....	107
10.4	Abbildungen .....	108
<b>11</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>I</b>

# 1 Einleitung

Im Rahmen der Entwicklung komplexer technischer Prozesse, die gegenwärtig sowohl großindustriell als auch im Labormaßstab zur Anwendung kommen, nimmt die industrielle Bildverarbeitung eine bedeutende Rolle ein. Viele Produktionsanlagen, wie beispielsweise das Schmelzesprühen zur Erzeugung von Metallpulver, werden mit Geschwindigkeiten betrieben, die es dem menschlichen Auge nicht mehr ermöglichen gewisse technische Abläufe zu erfassen

Im Zuge dieser Masterarbeit soll als Modellsystem in einer Zweistoffdüse Wasser mit Druckluft zerstäubt werden. Aufgabe ist es, die entstehenden Tropfen visuell mit Hilfe eines geeigneten Kamerasystems zu erfassen. Mit den gewonnenen Aufnahmen können auftretende Effekte bei der Zerstäubung betrachtet, beschrieben und verstanden werden.

## 1.1 Problemstellung

Bei der Zerstäubung von Metallschmelze mit Hilfe einer Düse werden feine Partikel gebildet. Hierbei ist die Tropfenbildungskinetik hinsichtlich Zerfalls-, Eiformungs-, Erstarrungs- und Oxidationszeit theoretisch bekannt.

Um nun Effekte der Zerstäubung genauer zu analysieren, werden Bildaufnahmen vom Zerstäubungsprozess und den einzelnen Partikeln benötigt, um diese mit den theoretisch errechneten Werten zu vergleichen. Aufgrund der gegebenen Umstände lässt sich dies jedoch nicht mit herkömmlichen Kameratechniken realisieren. Zum einen muss das Aufnahmesystem in der Lage sein, scharfe Bilder bei derart hohen Geschwindigkeiten (von 5 [m/s] bis zu 150 [m/s] und mehr) zu erfassen, zum anderen muss ein geeignetes Objektiv für die benötigte Vergrößerung (Partikel von  $\sim 100$  [ $\mu\text{m}$ ]) gefunden werden.

Probleme ergeben sich unter anderem bei der Belichtung, da bei Objektiven mit starker Vergrößerung erhebliche Lichtverluste akzeptiert werden müssen. Will man Spraypartikel scharf abbilden, muss zusätzlich eine sehr kurze Belichtungszeit der Kamera gewährleistet sein, was wiederum zu einem verminderten Lichteintrag führt. Ein weiterer limitierender Faktor bei der Auswahl des Systems ist der Arbeitsabstand<sup>1)</sup>, da sich dieser bei starker Vergrößerung erheblich verringert.

## 1.2 Zielsetzung

Es sollen im Vorfeld verschiedenste Möglichkeiten hinsichtlich Makro- und Mikroaufnahmen überprüft und erörtert werden. Ist ein geeignetes System gefunden, das sowohl die gewünschten Vergrößerungen zulässt als auch hinsichtlich der Belichtung den Anforderungen entspricht, soll dieses mit einer handelsüblichen Digitalkamera zuerst scharfe Abbildungen der einzelnen Spraypartikel erstellen. Zur Vereinfachung des Versuchsaufbaus wird Wasser mit Luft zerstäubt. Im Anschluss erfolgen Aufnahmen mit Hilfe einer High-Speed

---

<sup>1)</sup> Abstand zwischen Objektiv und abzubildendem Motiv



Kamera. Die gewonnenen Bilder sollen ausgewertet und Effekte bzw. Vorgänge der Zerstäubung beschrieben und mit den theoretisch errechneten Werten verglichen werden.

## 2 Grundlagen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit einzelnen Begriffen der Physik und der industriellen Bildverarbeitung, welche zum allgemeinen Verständnis in Hinblick auf die Auswahl der geeigneten Komponenten für die Versuchsdurchführung benötigt werden.

### 2.1 Physikalische Grundlagen

#### 2.1.1 Geometrische Optik

Die geometrische Optik beschäftigt sich grundsätzlich mit der Ausbreitung von Lichtstrahlen und deren Wechselwirkung mit Objekten, die sehr viel größer sind als die Wellenlänge des Lichtes selbst [1]. So ein Objekt kann beispielsweise eine Sammellinse sein, wie sie unter anderem in herkömmlichen Objektiven verwendet wird. Dieses optische System ist in der Lage, reelle Abbildungen eines Gegenstandes am Bildsensor<sup>1)</sup> zu erzeugen.

Wichtig bei der Auswahl der richtigen Optik sind der Abbildungsmaßstab und die Brennweite. Diese beiden Begriffe werden anhand Abbildung 1 erläutert.

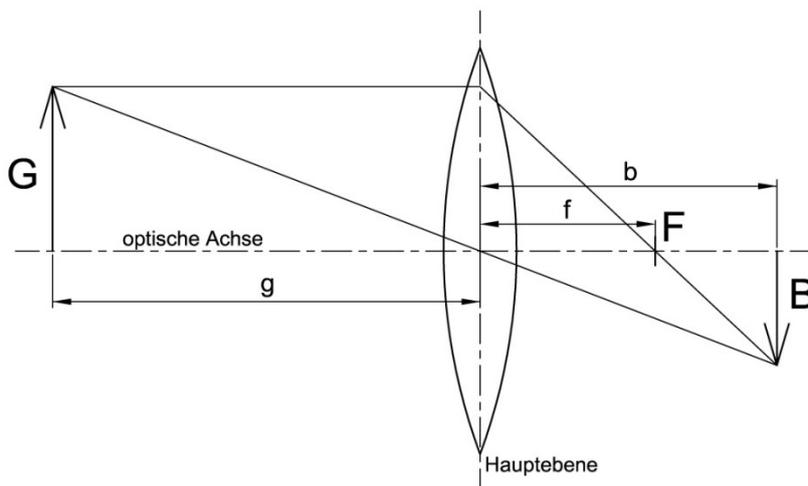


Abbildung 1: Bildkonstruktion an einer schmalen Sammellinse [2]

G entspricht der tatsächlichen Gegenstandsgröße in der Natur und B bezeichnet die Bildgröße am Sensor (Chip) der Kamera. Der Gegenstand befindet sich dabei im Abstand  $g$  (Gegenstandsweite) zur Linse. Die Lichtstrahlen sammeln sich im Brennpunkt F, wobei die Brennweite  $f$  die Entfernung zwischen Hauptebene (Linse) und Brennpunkt darstellt. Die Bildweite  $b$  bezeichnet den Abstand des Sensors zur Hauptebene.

Der Abbildungsmaßstab  $\beta$  ist wie folgt definiert [3]:

$$\beta = \frac{B}{G} \quad (1)$$

<sup>1)</sup> Bei digitalen Kameras; entspricht dem Fotofilm bei analogen Geräten

Abbildung 2 lässt erkennen, dass sich bei der Wahl eines Objektivs mit größerer Brennweite auch der Abbildungsmaßstab vergrößert ( $F \rightarrow F'$  und  $B \rightarrow B'$ ). Derselbe Effekt kann durch Verringerung der Gegenstandsweite (Arbeitsabstand) erzielt werden ( $G \rightarrow G''$  und  $B \rightarrow B''$ ).

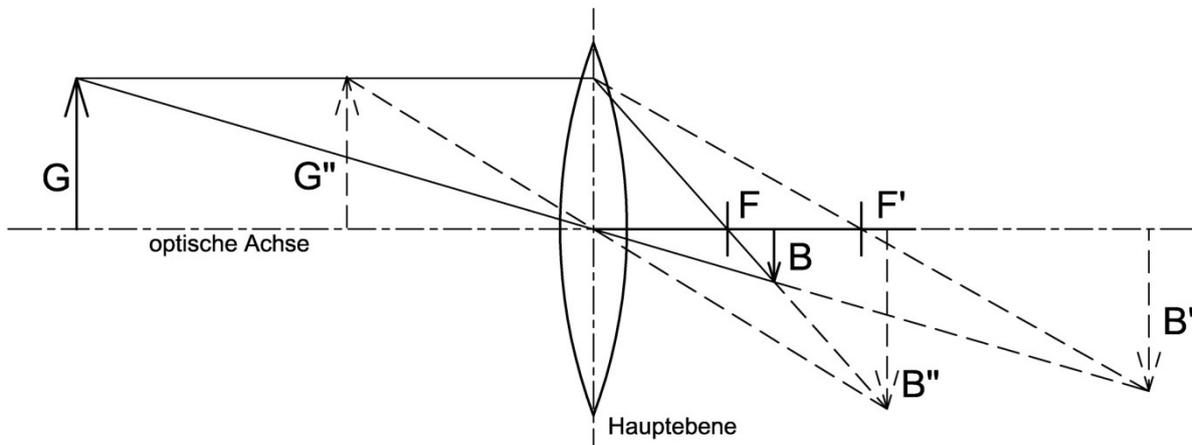


Abbildung 2: Abhängigkeit der Bildgröße von Brennweite und Gegenstandsweite

## 2.1.2 Fotometrie

Die Fotometrie beschäftigt sich mit der zahlenmäßigen Beschreibung des Lichtes. Wie bereits im Kapitel Einführung erwähnt, ist für die Abbildung von Wassertropfen im Mikrometerbereich eine der Optik angepasste Lichtquelle von wesentlicher Bedeutung. Da verschiedene Hersteller von Beleuchtungssystemen auch unterschiedlichste Angaben zur „Lichtstärke“ tätigen, ist es wichtig, die einzelnen Systeme vergleichen zu können. Ebenso muss ein Zusammenhang zwischen der „Lichtstärke“ und der Lichtempfindlichkeit des Kamerasystems hergestellt werden (siehe dazu Kapitel 4 Belichtungssysteme).

## Das Spektrum des Lichtes

Für das menschliche Auge sichtbares Licht entspricht einer Wellenlänge von ca. 380-780 [nm] (siehe Abbildung 3).

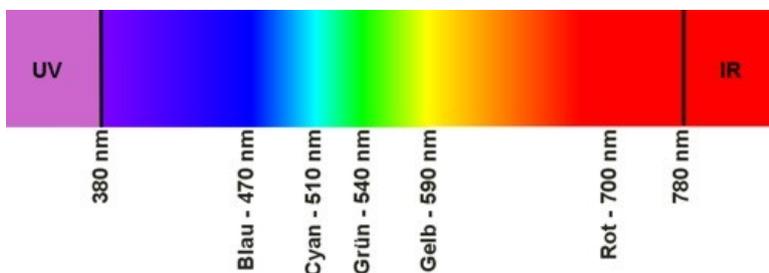


Abbildung 3: Spektrum des sichtbaren Lichtes [4]

Auch Farbsensoren von Digitalkameras arbeiten in diesem Bereich. Diese filtern jedoch Rot ab einer Wellenlänge von 700 [nm] und Violett unterhalb von 420 [nm] [5]. Diese Tatsache ist

besonders bei der Auswahl eines Lasers zur Erzeugung der Lichtquelle zu beachten, da dieser nur eine ganz bestimmte Wellenlänge abhängig von seiner Bauart emittiert.

### Lichtstrom [1]

Als Lichtstrom  $\Phi_v$  mit der Einheit Lumen [lm] bezeichnet man diejenige Strahlungsleistung, die eine Lichtquelle im Bereich des sichtbaren Lichtes abgibt.

$$\phi_v = \eta * P \quad (2)$$

Die Lichtausbeute  $\eta$  in [lm/W] wird als Wirkungsgrad der Lichtquelle betrachtet. P entspricht ihrer elektrischen Leistung. Der Lichtstrom orientiert sich an der physiologischen Helligkeitsempfindung des menschlichen Auges (siehe Abbildung 4), das heißt, er wird nicht wie eine physikalische Energie oder Leistung betrachtet.

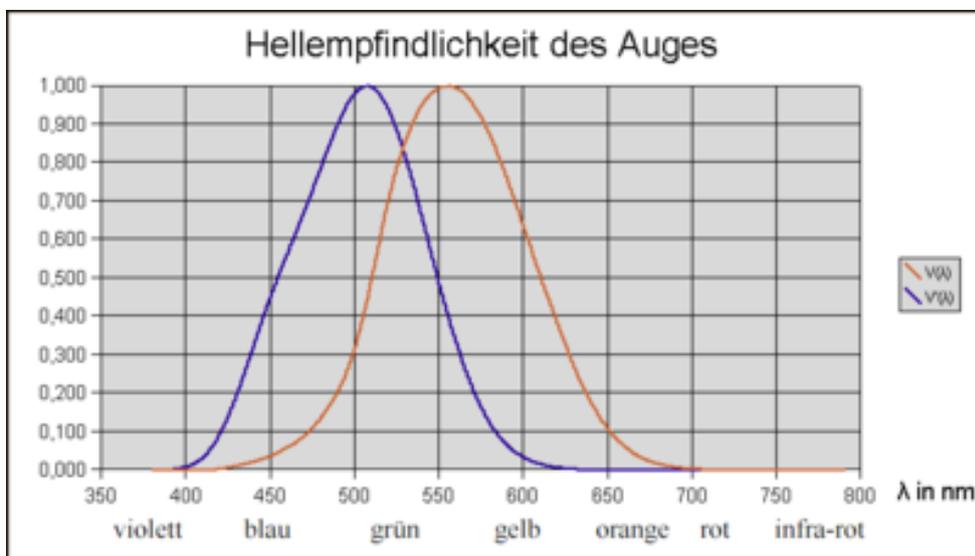


Abbildung 4: Hellempfindlichkeitskurve für Nacht- (blau) und Tagsehen (rot) [6]

Abbildung 4 zeigt bei Tageslicht (rote Kurve) ein Maximum bei ca. 550 [nm] Wellenlänge, das grünem Licht entspricht.

Tabelle 1 verdeutlicht den Lichtstrom und gibt Lumen-Werte für einige gängige Lichtquellen an.

Tabelle 1: Vergleich herkömmlicher Lichtquellen und deren Lichtstrom [1]

Lichtquelle	Lichtstrom
Leuchtdiode	0,01 [lm]
Glühlampe 60 [W]	600 [lm]
Glühlampe 100 [W]	1500 [lm]
Leuchtstoffröhre 40 [W]	2300 [lm]

## Lichtstärke [1]

Da Lichtquellen in unterschiedliche Richtungen verschiedenartig abstrahlen, kann alleine mit dem Begriff Lichtstrom nicht vernünftig gearbeitet werden. Aussagekräftiger ist die Bezeichnung Lichtstärke  $I_v$  mit der Einheit Candela [cd]. Diese berechnet sich aus dem Lichtstrom, der in einen bestimmten Raumwinkel abgestrahlt wird, wie folgt:

$$I_v = \frac{\text{Lichtstrom}}{\text{Raumwinkel}} = \frac{\phi_v}{\Omega} \left[ \frac{\text{lm}}{\text{sr}} \right] \quad (3)$$

Der Raumwinkel  $\Omega$  wird in Steradian [sr] angegeben und bezeichnet die Fläche des Segmentes einer Kugeloberfläche geteilt durch den Radius zum Quadrat der Kugel (siehe Abbildung 5).

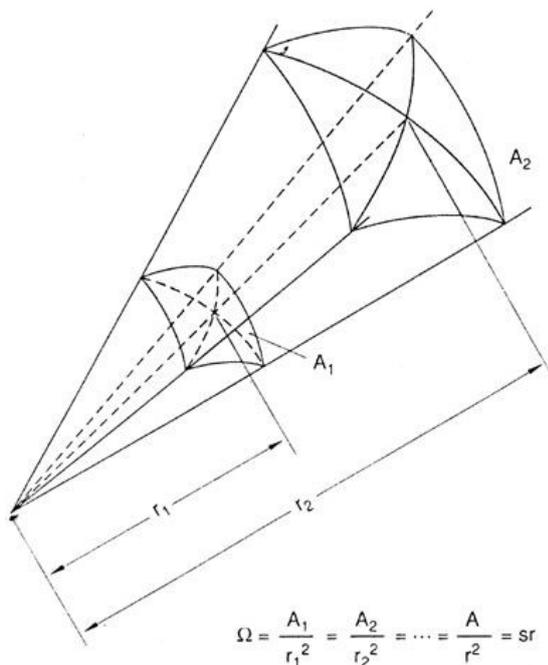


Abbildung 5: Berechnung des Raumwinkels (Steradian) [7]

Zur Verdeutlichung sei erwähnt, dass eine kleine Kerze beispielsweise eine Lichtstärke von rund 1 [cd] erzeugt.

## Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke  $E_v$  mit der Einheit Lux [lx] beschreibt, wie ein Lichtempfänger beleuchtet wird. Sie ist ein Maß für die Helligkeit und gibt an, wie viel Lichtstrom auf eine gewisse Fläche trifft [1]:

$$E_v = \frac{\text{Lichtstrom}}{\text{Fläche}} = \frac{\phi_v}{A} \left[ \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right] \quad (4)$$

Durch Umformen von Gleichung 4 mit Hilfe der Gleichung 3 erhält man Gleichung 5:

$$E_v = \frac{\phi_v}{A} = \frac{I_v * \Omega}{A} = \frac{I_v}{r^2} \quad (5)$$

Anhand Gleichung 5 erkennt man, dass bei gleichbleibender Lichtstärke  $I_v$  einer Lichtquelle die Beleuchtungsstärke einer Fläche mit dem Quadrat des Abstandes  $r$  zu der Lichtquelle abnimmt. [1]

Der Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und der Entfernung der Lichtquelle wird als fotometrisches Entfernungsgesetz bezeichnet und ist in Abbildung 6 verdeutlicht.

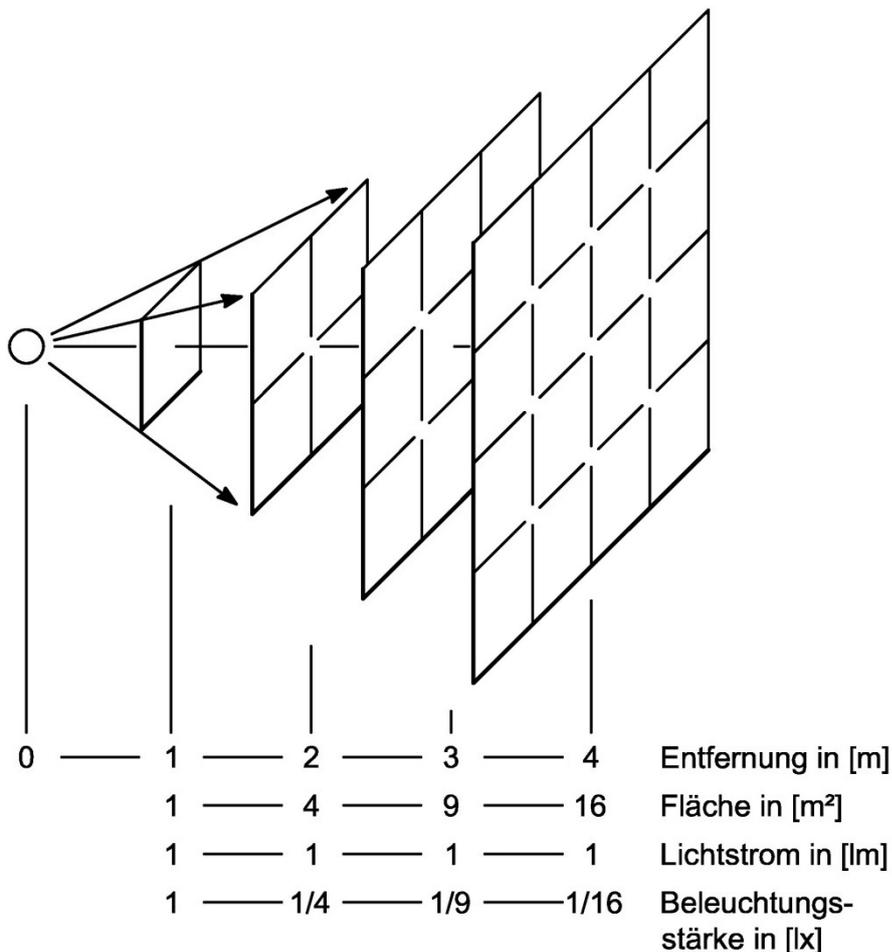


Abbildung 6: Fotometrisches Entfernungsgesetz [8]

Die Beleuchtungsstärke stellt die wichtigste Lichtgröße bei der Fotografie dar, da sie direkt Aufschluss über die Helligkeit gibt, die auf den Bildsensor einer Kamera fällt. Des Weiteren ist die Beleuchtungsstärke abhängig von der Entfernung der Lichtquelle. Sie lässt somit unmittelbare Vergleiche verschiedenster Lichtquellen zu und hilft daher bei der Auswahl eines geeigneten Beleuchtungssystems. [1]

Einige typische Werte für die Beleuchtungsstärke werden in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Vergleich herkömmlicher Lichtquellen und deren Lichtstrom [1]

Lichtverhältnis	Beleuchtungsstärke
Mondloser Sternenhimmel bei Nacht	0,0005 Lux
Dämmerlicht nach Sonnenuntergang	1 Lux
Straßenbeleuchtung	10 Lux
Bürobeleuchtung	500 Lux
Bedeckter Himmel im Sommer	10.000 Lux
Mittagssonnenlicht im Sommer	100.000 Lux

### Leuchtdichte [1]

Die Leuchtdichte  $L$  in  $[\text{cd}/\text{m}^2]$  gibt an, wie viel Licht (Lichtstrom) von einer gewissen Oberfläche in eine Richtung abgestrahlt wird (siehe Gleichung 6). Je kleiner die Fläche der Lichtquelle bei gleichbleibender Lichtstärke  $I_v$  ist, desto stärker wird das Licht empfunden.

$$L = \frac{I_v}{A} \left[ \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right] \quad (6)$$

Tabelle 3 beinhaltet einige Lichtquellen und deren durchschnittliche Werte für die Leuchtdichte.

Tabelle 3: Vergleich herkömmlicher Lichtquellen und deren Lichtstrom [1]

Lichtquelle	Leuchtdichte
Nachthimmel	0,001 $[\text{cd}/\text{m}^2]$
Kerzenflamme	5.000 $[\text{cd}/\text{m}^2]$
100 [W] Glühlampe klar	10.000.000 $[\text{cd}/\text{m}^2]$
Sonne am Mittag	1.600.000.000 $[\text{cd}/\text{m}^2]$

## 2.2 Grundlagen der industriellen Bildverarbeitung

Die industrielle Bildverarbeitung stellt eine Branche dar, die sich so stark wie kaum eine andere in den letzten Jahren entwickelt hat. Vor allem Fortschritte im Bereich der Rechner- und Bildsensortechnik eröffnen neue Möglichkeiten [9]. Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über die wichtigsten Begriffe der industriellen Bildverarbeitung geben, die für den praktischen Teil der Arbeit benötigt werden.

Grundlegend für eine erfolgreiche Bildaufnahme, insbesondere bei derart hohen Geschwindigkeiten wie jener der Spraypartikel ( $\sim 150$   $[\text{m}/\text{s}]$ ) sowie den erforderlichen Vergrößerungen, ist eine geeignete Kombination der einzelnen Komponenten.

Prinzipiell besteht ein Bildaufnahmesystem aus folgenden Bestandteilen:

- Beleuchtung
- Optik
- CCD/CMOS Kamera
- Steuerung und Auswertung

### **2.2.1 Beleuchtung [10]**

Die Beleuchtung ist ein wesentlicher Bestandteil eines Bildaufnahmesystems. Hierzu stehen je nach Anforderung verschiedenste Lichtquellen wie z.B. Leuchtstoffröhren, Glühlampen, Xenonröhren oder Kaltlichtquellen<sup>1)</sup> sowie Diodenquellen zur Verfügung. Bei High-Speed-Aufnahmen ist sehr häufig blitzartige Beleuchtung notwendig, um ein scharfes Standbild von schnell bewegten Objekten zu erhalten. Dafür eignen sich besonders Halogen- und Kaltlichtlampen, die ein punktförmiges, sehr helles Licht aussenden.

Eine weitere Möglichkeit ist die Belichtung mit Hilfe eines Lasers. Dieser liefert punktuell bei konstanter Wellenlänge eine stabile Lichtstärke, auch über größere Entfernungen.

### **2.2.2 Optik [10]**

Es gibt verschiedene Arten von Objektiven, die je nach Anwendungsfall und Aufgabe zum Einsatz kommen.

#### **Entozentrische Objektive [10]**

Entozentrische Objektive werden am häufigsten eingesetzt. Sie entsprechen der menschlichen Perspektive, da sie nahe Objekte groß und ferne Objekte klein abbilden. Es gibt entozentrische Objektive als Festbrennweiten- und als Zoomobjektivausführung.

#### **Telezentrische Objektive [10]**

Telezentrische Objektive kommen hauptsächlich bei Vermessungsaufgaben zum Einsatz. Es wird keine Perspektive auf die Kamera übertragen, das heißt unterschiedlich weit entfernte Objekte erscheinen am Bildsensor gleich groß (siehe Abbildung 7 auf Seite 13). Gegenstände, die sich außerhalb des Telezentriebereichs befinden, werden unscharf abgebildet.

---

<sup>1)</sup> Als Kaltlichtquelle bezeichnet man eine Lichtquelle mit stark reduziertem Infrarotanteil



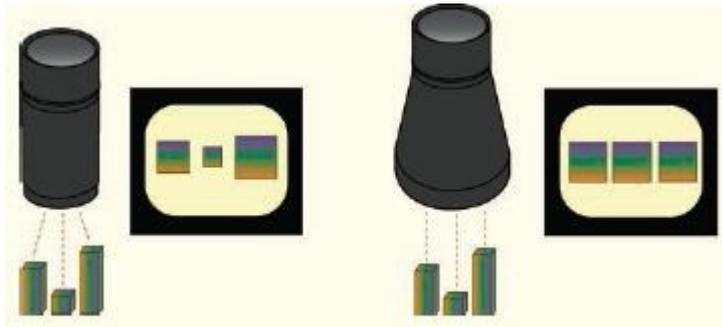


Abbildung 7: Vergleich entozentrische (links) und telezentrische (rechts) Aufnahme [11]

### Hyperzentrische Objektive

Hyperzentrische Objektive sind Spezialobjektive, die nur sehr selten Anwendung finden. Mit ihnen werden ferne Objekte größer dargestellt als näher liegende. Die Linse bei hyperzentrischen Objektiven ist wesentlich größer als das abzubildende Objekt. Aufnahmen können nur bei viel Licht und sehr geringen Arbeitsabständen erfolgen.

### 2.2.3 CCD/CMOS Kamera

Bei der Vielfalt an Digitalkameras, die sich heute am Markt befinden, ist es oft schwer die richtige Wahl zu treffen. Eine prinzipielle Unterscheidung erfolgt auf Grund des Chips in CCD<sup>1)</sup>- oder CMOS<sup>2)</sup>-Bildsensoren.

CCD-Sensoren detektieren die auftreffenden Photonen mittels Photodioden. Das Auslesen der Informationen erfolgt durch Verschieben der Ladungspakete zum Ausleseverstärker, wo diese Ladungen in eine Spannung umgewandelt werden und somit als Videosignal zur Verfügung stehen (siehe Abbildung 8) [10]. Der größte Teil der Verarbeitung erfolgt bei CCD-Sensoren in den elektronischen Bauteilen der Kamera [12].

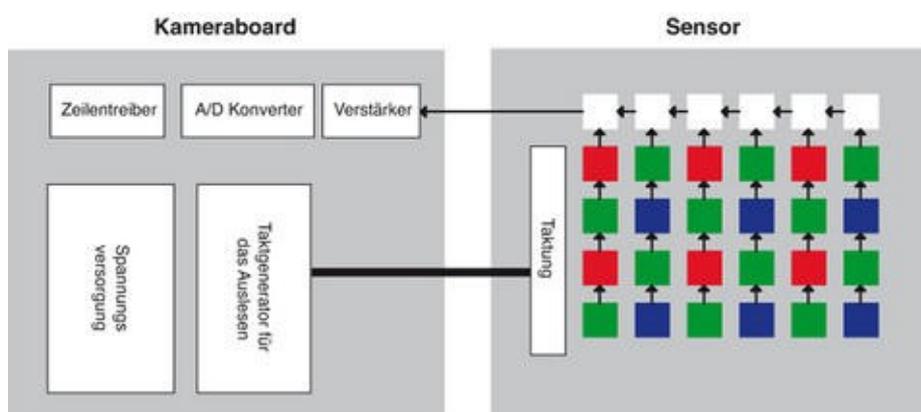


Abbildung 8: Funktionsprinzip eines CCD-Sensors[12]

<sup>1)</sup> Charge-Coupled Devices

<sup>2)</sup> Complementary Metal Oxide Semiconductor

Anders als beim CCD-Sensor werden am CMOS-Sensor die Photonen direkt über Transistoren im Pixel in Spannungen umgewandelt. Mit Hilfe eines Analog/Digital-Wandlers erfolgt die Verarbeitung dieser Spannungen in ein brauchbares Videosignal (siehe Abbildung 9) [12]. Somit können Kamerafunktionen direkt am CMOS-Sensor integriert werden, sodass Einchip-Lösungen möglich sind [10].

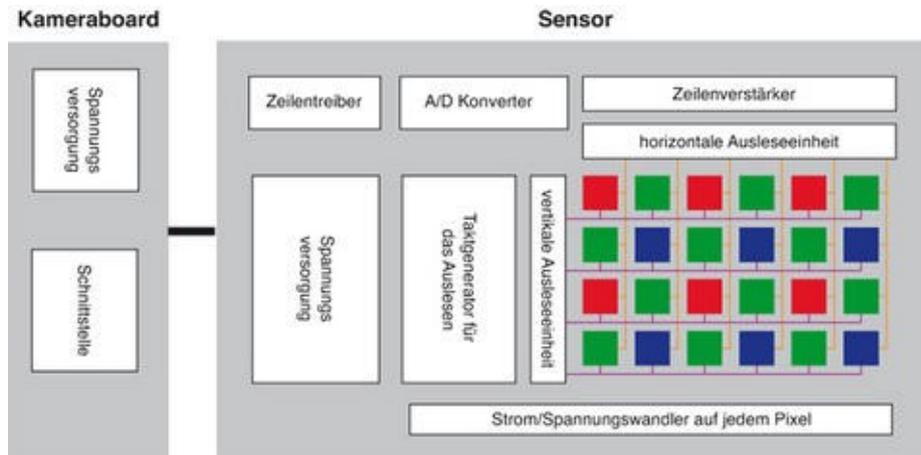


Abbildung 9: Funktionsprinzip eines CMOS-Sensors[12]

Die Gemeinsamkeit beider Sensortypen liegt darin, dass proportional zur auftreffenden Lichtmenge Elektronen erzeugt werden.

Als die wichtigsten Kriterien für die Auswahl des Bildsensors bei High-Speed-Aufnahmen gelten dessen Empfindlichkeit sowie seine Geschwindigkeit. Bei CMOS-Sensoren ist die Empfindlichkeit sehr hoch, was sich wiederum verstärkt als Bildrauschen bemerkbar macht. Dieser Nachteil kann allerdings durch eine spezielle Verschaltung (Active Pixel Sensor, APS) minimiert werden. Darüber hinaus sind CMOS-Sensoren in der Lage Signale schneller zu verarbeiten, da alle Funktionen direkt am Chip integriert sind. Diese Tatsache nutzen moderne High-Speed-Kamerasysteme, bei denen eine rasche Signalverarbeitung nötig ist, um entsprechend hohe Bildraten zu erhalten. Im Vergleich zu CMOS-Sensoren verfügen CCD-Sensoren über eine höhere Lichtempfindlichkeit. Sie können daher kürzer belichtet werden, benötigen aber länger, um die Daten zu verarbeiten [12].

## 3 Makrofotografie – Objektivsysteme

### 3.1 Grundsätzliche Aspekte der Makrofotografie [1]

Durch technische Entwicklungen im Bereich der Spiegelreflexkameras in den letzten Jahren, stellt es selbst für Laien kein Problem dar, brauchbare Schnappschüsse zu erhalten. Will man jedoch Aufnahmen im Makro- oder sogar Mikrobereich tätigen, so fallen oft sogenannte Komfortfeatures wie Autofokus, Belichtungs- oder Offenblendmessung weg. Der Grund liegt darin, dass es bei derartigen Fotografien oft keinen Sinn macht, solche Features einzusetzen. Des Weiteren ist auch das meiste Makrozubehör schlichtweg nicht auf dem neuesten Stand der Technik, um solche Annehmlichkeiten verwenden zu können. Folgende Aspekte sind bei extremen Nahaufnahmen unbedingt zu beachten:

- Schärfentiefe
- Belichtung
- Objektdistanz
- Stativ

#### 3.1.1 Schärfentiefe

Die Schärfentiefe stellt bei Makroaufnahmen ein generelles Problem dar, da diese mit zunehmendem Abbildungsmaßstab im Makrobereich verschwindend klein wird. Bei geringer Schärfentiefe können in den Raum ragende Objekten nicht mehr völlig scharf abgebildet werden (siehe Abbildung 10).

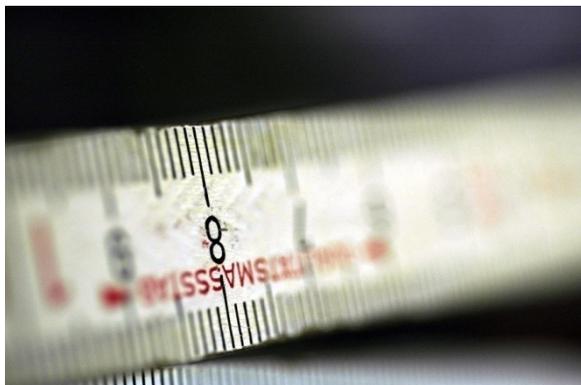


Abbildung 10: Aufnahme mit geringer Schärfentiefe

Der Schärfentiefenbereich wird durch folgende Faktoren beeinflusst [13]:

- Je größer die Brennweite, desto kleiner der Schärfentiefebereich
- Je kleiner die Blende, desto größer der Schärfentiefebereich
- Je größer die Aufnahmedistanz, desto größer der Schärfentiefebereich
- Je kleiner das Sensorformat, desto größer der Schärfentiefebereich

Bei der Aufnahme von Sprays im Mikrometerbereich muss mit relativ geringen Objektdistanzen gearbeitet werden, um die gewünschte Vergrößerung zu erreichen. Ebenso

sollte die Blende möglichst weit geöffnet sein, um eine ausreichende Belichtung des Sensors zu gewährleisten. Diese Tatsachen wirken sich generell schlecht auf den Schärfentiefebereich aus. Da Spraypartikel jedoch eine Größe im Bereich von Mikrometern aufweisen, sollte es aufgrund der Schärfentiefe kein Problem sein eine gute Aufnahme zu erhalten. Tropfen im Hintergrund können jedoch nicht mehr scharf abgebildet werden.

### 3.1.2 Belichtung

Herkömmliche, auf die Kamera montierte Blitzgeräte, oder sogar Umgebungslicht sind meist nicht ausreichend für eine optimale Belichtung. Insbesondere bei High-Speed Aufnahmen von schnell bewegten, mikroskopisch kleinen Objekten ist es schwer, scharfe Aufnahmen zu erhalten. Anstatt Auflicht zu verwenden, muss hier mit anderen Verfahren (z.B. Ringblitzen etc.) gearbeitet werden, um eine genügende Belichtung des Sensors sicher zu stellen. Denkbar ist auch der Einsatz von unkonventionellen Lichtquellen wie z.B. eines Lasers, welche die nötige Leistung besitzen, um den Bildsensor in kürzester Zeit zu belichten (siehe Kapitel 4 Belichtungssysteme).

### 3.1.3 Objektdistanz

Bei der Verwendung von Makrozubehör ist insbesondere auf die Objektdistanz zu achten. Große Abbildungsmaßstäbe können nur durch geringe Abbildungsdistanzen erreicht werden. Dieser Tatsache kann mit Objektiven größerer Brennweite entgegengewirkt werden (vgl. hierzu Tabelle 4).

Tabelle 4: Einfluss der Brennweite auf die Naheinstellgrenze<sup>1)</sup> [1]

Objektivbrennweite <sup>1)</sup>	Naheinstellgrenze bei 1:1 <sup>2)</sup>
50 [mm]	18,9 [cm]
105 [mm]	31,3 [cm]
180 [mm]	46,0 [cm]

1) Objektivhersteller Fa. Sigma; EX DG MAKRO Objektive

2) Entspricht dem Abbildungsmaßstab am Sensor

In Hinblick auf Wasserspray-Aufnahmen ist es wichtig eine gewisse Aufnahmedistanz einzuhalten, um das technische Equipment zu schützen und einen Linsenbeschlag zu vermeiden. Lässt sich die erforderliche Distanz nicht einhalten, müssen sowohl Objektiv als auch Kamera mit geeigneten Maßnahmen vor Nässe geschützt werden.

## 3.2 Möglichkeiten zur Realisierung von Makro- und Mikroaufnahmen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den einzelnen technischen Möglichkeiten, die es gibt, um Makro- und auch Mikroaufnahmen abzubilden. Darüber hinaus sollen die jeweiligen

<sup>1)</sup> Mindestabstand vom Objekt zur Sensorebene, damit das Objektiv noch scharf abbildet



technischen Grenzen jedes einzelnen Systems aufgezeigt werden, um anschließend eine geeignete Auswahl für die Sprayversuche zu treffen.

### 3.2.1 Makroobjektive

Als Makroobjektive werden jene Objektive verstanden, die einen Abbildungsmaßstab von 1:2 oder 1:1 erreichen (siehe Abbildung 11). Diese Vergrößerungen werden durch eine besonders kleine Naheinstellgrenze, also den kleinsten Abstand, in dem das Objektiv noch scharfstellen kann, erreicht. Praktisch alle Makroobjektive zeichnen sich durch eine feste Brennweite aus, welche in den Bereichen 50 [mm], 100 [mm] und 200 [mm] liegt [14].



Abbildung 11: Makroobjektiv Fa. Sigma 180mm F3,5 EX DG / HSM

In der Regel liegt der freie Arbeitsabstand von 50 [mm] Objektiven bei ca. 6-7 [cm] und bei einer Festbrennweite von rund 100 [mm] bei ca. 12-16 [cm] (gültig bei Abbildungsmaßstäben von 1:1). Erst mit einem Makroobjektiv mit rund 200 [mm] Brennweite können Abstände von rund 26 [cm] realisiert werden, was sich für die Sprayfotografie als günstig erweist [3].

### 3.2.2 Umkehrringe

Steht kein Makroobjektiv zur Verfügung oder werden größere Abbildungsmaßstäbe (ab 1:1) benötigt, können Umkehrringe (Retroadapter) (siehe Abbildung 12 auf Seite 18) verwendet werden. Hierbei wird ein Objektiv in Umkehrstellung (Retrostellung) mit Hilfe des Umkehrings an der Kamera befestigt.



Abbildung 12: Umkehrring (Retrostellung)

Mit der Retrostellung (siehe Abbildung 11) können mit einem Objektiv mit einer Brennweite von 35 [mm] bereits Abbildungsmaßstäbe von 1:1 erreicht werden [1]. Bei einer Brennweite von 18 [mm] werden sogar Vergrößerungen von ca. 4:1 möglich [3].

Der Vorteil von Umkehrringen gegenüber Zwischenringen und Balgengeräten (siehe Kapitel 3.2.4) liegt darin, dass diese Alternativen mit Auszugsverlängerung arbeiten, was mit einem Lichtverlust einhergeht. Ein Retroadapter ermöglicht den Fotografen jedoch auch bei großem Abbildungsmaßstab noch mit höherer Lichtstärke zu arbeiten [1]. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei Objektiven in Retrostellung relativ große freie Arbeitsabstände eingehalten werden können. Diese entsprechen in etwa dem Abstand von der Filmebene zur rückwertigen Kameralinse bei normal Objektiven. Somit ist z.B. der freie Arbeitsabstand eines 50 [mm] Objektivs in Retrostellung je nach Bauart zwischen 4 und 5 [cm] [15].

### 3.2.3 Telekonverter [3]

Telekonverter (siehe Abbildung 13) stellen eine gute Möglichkeit dar, den Abbildungsmaßstab eines Makroobjektivs zu vergrößern. Übliche Bauformen arbeiten mit dem Faktor 1,4 oder 2 und werden zwischen Objektiv und Kamera gesetzt. Dies bedeutet, dass beim Einsatz eines Telekonverters mit dem Faktor 2 Abbildungsmaßstäbe von 2:1 möglich werden (vorausgesetzt das Makroobjektiv kann mit Maßstab 1:1 abbilden). Ebenso verändert sich die Brennweite des Objektivs um den angegebenen Faktor, der Arbeitsabstand bleibt jedoch gleich. Allerdings hat dieses System einen Lichtverlust (von 1-2 Blenden) und eine Verringerung der Abbildungsleistung zur Folge.



Abbildung 13: Telekonverter Fa. Sigma 2,0x EX DG

Prinzipiell eignen sich Telekonverter gut, um die Vergrößerung des Objektivsystems noch einmal um den jeweiligen Faktor (max. 2) zu verändern. Bei der Planung des Objektivsystems für die Sprayverdüsung, muss jedoch der Lichtverlust über die Belichtungsquelle ausgeglichen werden, um in etwa gleiche Ergebnisse zu erzielen.

### 3.2.4 Zwischenringe und Balgengerät

#### Zwischenringe [3]

Da Zwischenringe (siehe Abbildung 14) keine Linsen enthalten, wird im Gegensatz zu Telekonvertern die Brennweite des Objektivs nicht verändert. Durch das Einsetzen eines oder mehrerer Zwischenringe, die beliebig kombiniert werden können, zwischen Kamera und Objektiv, wird der Bildsensor in Bezug auf die Hauptebene nach hinten verlegt. Dies führt zu einer Verringerung der Naheinstellgrenze des verwendeten Objektivs und somit zu einer Vergrößerung des Abbildungsmaßstabs.



Abbildung 14: Zwischenringe [16]

Da Zwischenringe einer Auszugsverlängerung entsprechen, kann über eine einfache geometrische Beziehung (siehe Kapitel 2 Optik) die prozentuell zu erzielende Vergrößerung berechnet werden [2]:

$$\beta = \frac{B}{G} = \frac{x}{f} \quad (7)$$

In Gleichung 7 entspricht  $x$  der Auszugsverlängerung, also der Breite des Zwischenrings, und  $f$  der Brennweite des Objektivs.

Als Nachteil erweist sich der Lichtverlust, der durch stärkere Belichtungsquellen oder längeren Belichtungszeiten des Bildsensors wieder ausgeglichen werden kann.

### Balgengerät [3]

Im Grunde hat ein Balgengerät (siehe Abbildung 15 auf Seite 20) dieselbe Funktion wie ein Zwischenring, nur dass die Auszugsverlängerung stufenlos einstellbar ist. Außerdem kann mit einem Balgengerät ein Auszug bis zu 20 [cm] erreicht werden. In Kombination mit einem geeigneten Objektiv erzielt man sehr hohe Abbildungsmaßstäbe jenseits von 1:1.



Abbildung 15: Balgengerät

Es kann praktisch jedes Objektiv mit einem Balgen verwendet werden. Besonders gut eignen sich allerdings Objektive in Umkehrstellung (mit Festbrennweiten zwischen 28 und 50 [mm]) oder Makroobjektive, da sie hohe Abbildungsmaßstäbe erreichen.

Tabelle 5 zeigt erreichbare Abbildungsmaßstäbe in Abhängigkeit der Brennweite und der Auszugsverlängerung mit Zwischenringen bzw. Balgengerät.

Tabelle 5: Erreichbare Abbildungsmaßstäbe mit Zwischenringen bzw. Balgengerät [8]

			BRENNWEITE - MILLIMETER						
m	VZ <sup>1)</sup>	%	16	25	50	100	180		
ABBILDUNGSMASSSTAB	1,0	1:1	100	16	25	50	100	180	AZV <sup>2)</sup>
	2,0	2:1	200	64	100	200	400	720	OE <sup>3)</sup>
	3,0	3:1	300	32	50	100	200	360	AZV
				72	113	225	450	810	OE
	4,0	4:1	400	48	75	150	300	540	AZV
				85	133	267	533	960	OE
	5,0	5:1	500	64	100	200	400	720	AZV
				100	156	313	625	1125	OE
				80	125	250	500	900	AZV
				115	180	360	720	1296	OE

1) Verhältniszahl des Abbildungsmaßstabes

2) Nötige Auszugsverlängerung in [mm] (Zwischenring, Balgengerät)

3) Objektentfernung in [mm] (Distanz vom Gegenstand zur Filmebene; näherungsweise)

Tabelle 5 lässt erkennen, dass Zwischenringe den Abbildungsmaßstab bei Objektiven mit geringer Brennweite am stärksten beeinflussen. Zu berücksichtigen ist jedoch der freie Arbeitsabstand (Objektentfernung abzüglich Objektivbrennweite), der sich mit wachsender Vergrößerung und sinkender Brennweite deutlich verkürzt. Ansonsten gelten dieselben Probleme bezüglich des Lichtverlusts, die bereits im Kapitel „Zwischenringe“ beschrieben werden.

### 3.2.5 Lupenobjektive [3]

Werden besonders hohe Abbildungsleistungen und Maßstäbe gefordert, können Lupenobjektive (siehe Abbildung 16) die richtige Wahl sein.



Abbildung 16: Lupenobjektiv Luminar von Zeiss

Lupenobjektive sind für den Gebrauch am Balgengerät konstruiert und lösen das Vielfache eines Vergrößerungsobjektes auf. In Abhängigkeit der Brennweite werden so verschiedene Abbildungsmaßstäbe realisiert. Ein großer Nachteil besteht im freien Arbeitsabstand zwischen Aufnahmeobjekt und Frontlinse, da sich dieser mit Abnahme der Brennweite und damit einhergehender steigender Abbildungsvergrößerung drastisch verringert.

Abbildung 17 zeigt die max. Vergrößerung und den freien Arbeitsabstand in Zusammenhang mit der Objektivbrennweite anhand von Lupenobjektiven der Baureihe Luminar, hergestellt von der Firma Zeiss.

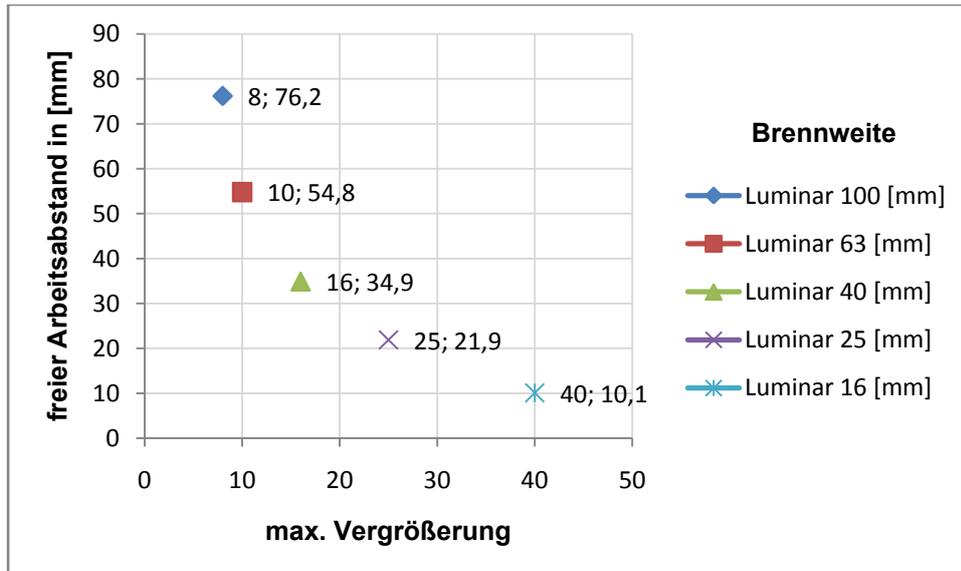


Abbildung 17: Vergrößerung und Arbeitsdistanz von Zeiss Luminar Objektiven [17]

Anhand Abbildung 17 ist ersichtlich, dass bei starker Vergrößerung, z.B. mit dem Zeiss Luminar mit einer Brennweite von 25 [mm], nur mehr ein freier Arbeitsabstand von ca. 22 [mm] zur Verfügung steht. Besonders bei Sprayaufnahmen ist diese kurze Distanz äußerst problematisch. Hierbei ist zu erwähnen, dass die angegebenen Vergrößerungen Maximalwerte darstellen. So ist beispielsweise das Luminar mit 100 [mm] Brennweite optimal bei einem Abbildungsmaßstab von 2:1 korrigiert, das Luminar mit 16 [mm] hingegen erzielt bei 14-facher Vergrößerung die beste Abbildungsleistung. Beim Einsatz von Objektiv und Balgengerät muss für sehr viel Licht gesorgt werden, um den Bildsensor ausreichend zu belichten.

### 3.2.6 Mikroskopobjektive

Spezielle Mikroskopobjektive (siehe Abbildung 18) kommen häufig in der industriellen Bildverarbeitung zum Einsatz. Sie zeichnen sich durch ihre großen Abbildungsmaßstäbe bei akzeptabler Arbeitsdistanz aus.



Abbildung 18: 12x Zoom Objektivsystem der Fa. Navitar

Der Vorteil dieser Mikroskopobjektive liegt darin, dass aufgrund der Modulbauweise genau das gewünschte System ausgewählt werden kann. Auf diese Weise lässt sich ein passendes Objektiv finden, das hinsichtlich des Arbeitsabstands, des Vergrößerungsbereichs, der Pixelauflösung sowie der Tiefenschärfe genau auf die jeweiligen Anforderungen angepasst ist.

Für die Aufnahme von verdüsten Spraypartikel ist ebenso die Kombination eines Mikroskopobjektivs mit einem telezentrischen Objektiv denkbar, da mehrere Partikel in verschiedenen Bildtiefen scharf abgebildet werden. Jedoch muss bei der Anwendung mit telezentrischen Objektiven mit einem deutlich reduzierten Abbildungsmaßstab (max. 2-fache Vergrößerung [11]) das Auslangen gefunden werden. (siehe Kapitel 2.2.2 Grundlagen der industriellen Bildverarbeitung).

Abbildung 19 zeigt verschiedene 12x Zoom Objektivsysteme der Fa. Navitar und vergleicht diese hinsichtlich des freien Arbeitsabstands und möglicher Vergrößerung.

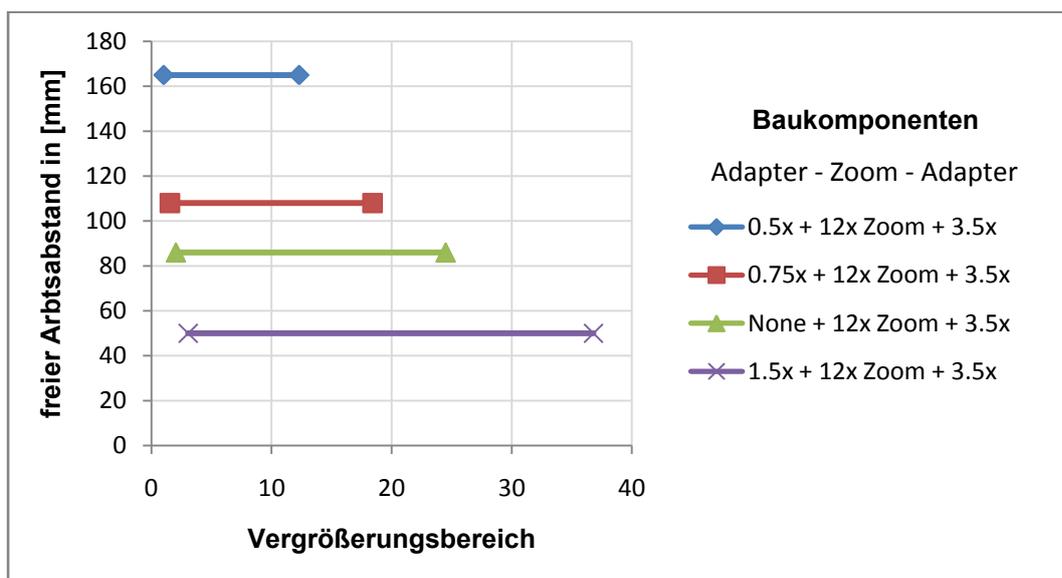


Abbildung 19: Vergleich hinsichtlich Arbeitsdistanz und Vergrößerung von 12x Zoom Objektivsystemen der Fa. Navitar [11]

Objektivsysteme, wie in Abbildung 18 gezeigt, erlauben starke Vergrößerungen bei geeignetem Arbeitsabstand. Somit können versprühte Wasserpartikel gut am Kamerasensor abgebildet werden. Auch hier gilt es, eine sehr starke Belichtung des Chips zu gewährleisten, da solche Objektivsysteme erheblich Licht benötigen. Weiters muss die Größe des Bildsensors beachtet werden, da diese Systeme oft nur für bis zu 2/3“ Format abbilden.

### **3.3 Zusammenfassung**

Aufgrund der in diesem Kapitel erläuterten Objektivsysteme und Komponenten für Makroaufnahmen ergeben sich einige Möglichkeiten, um brauchbare Abbildungsvergrößerungen zu erzielen. Besonders zu beachten ist hierbei der freie Arbeitsabstand zwischen Motiv und Frontlinse sowie der Lichtverlust der einzelnen Komponenten. Eine starke Vergrößerung des Motivs erfordert grundsätzlich eine Verkürzung des Arbeitsabstandes und eine stärkere Lichtquelle, um die optischen Verluste auszugleichen. Somit muss für die jeweilige Situation eine Kompromisslösung gefunden werden. Ein genauer Vergleich der einzelnen Objektivsysteme sowie eine Überprüfung der Tauglichkeit hinsichtlich Abbildung von Wassersprays werden in Kapitel 5 angestellt.

## 4 Belichtungssysteme

Die Belichtung stellt einen wesentlichen Aspekt bei Bildaufnahmen jeglicher Art dar. Erst die passende Beleuchtung in Kombination mit einem geeigneten Objektiv- und Kamerasystem ermöglichen Aufnahmen, die die gewünschten Details sichtbar darstellen.

Dieses Kapitel beschäftigt sich grundlegend mit den wesentlichen Eigenschaften von Bildsensoren, sowie den unterschiedlichen technischen Möglichkeiten zur deren Belichtung.

### 4.1 Grundlagen zur Belichtung [8]

#### 4.1.1 Allgemeines

Unter Belichtung  $H$  versteht man den Vorgang der Bestrahlung eines Bildsensors oder einer fotografischen Schicht. Sie ist das Produkt aus der Beleuchtungsstärke  $E'$  am Film (im Gegensatz zur Objektbeleuchtungsstärke  $E$ ) und der Zeitdauer  $t$  ihrer Einwirkung, was der Belichtungszeit entspricht (siehe Gleichung 8).

$$H = E' \cdot t \quad (8)$$

Die am Objekt vorherrschende Beleuchtungsstärke  $E$  sowie der Reflexionsgrad des Fremdleuchters sind wesentliche Einflussgrößen für die Leuchtdichte, die wiederum Beleuchtungsstärke  $E'$  am Sensor bildet. Daher muss beachtet werden, dass nur ein kleiner Teil des vom Gegenstand ausgestrahlten Lichtstroms vom Objektiv aufgefangen und auf die Sensorebene weitergeleitet wird.

Folgende Faktoren bestimmen den Anteil des aufgefangenen Lichtstroms, der als Beleuchtungsstärke am Sensor wirksam wird:

- Fläche der Eintrittspupille
- Brennweite
- Transmissionsgrad des Objektivs

Abbildung 20 zeigt ein Flussdiagramm zur Belichtung mit den verschiedensten genannten Vorgängen und Einflussfaktoren.

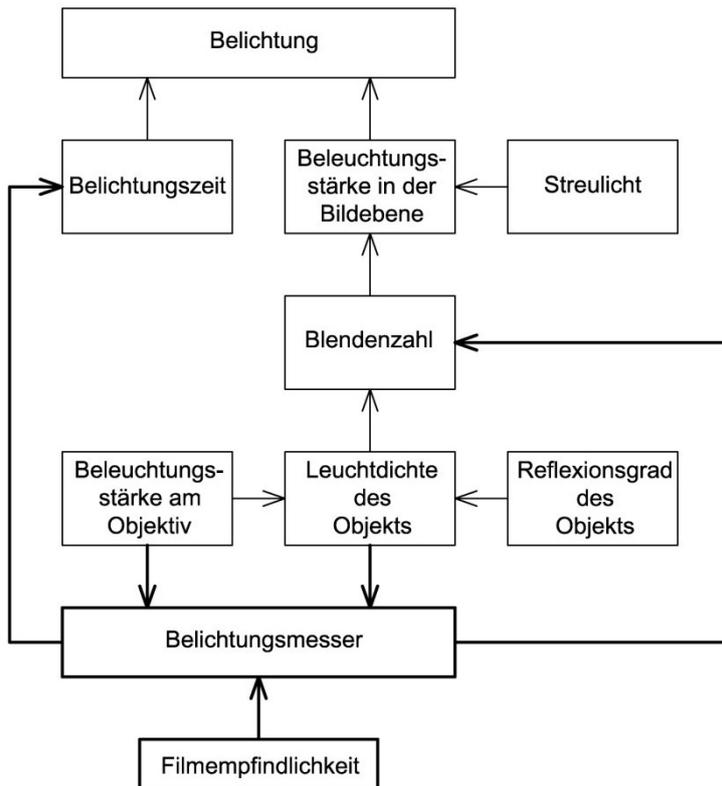


Abbildung 20: Flussdiagramm zur Belichtung von Bildsensoren [8]

Die stark ausgezogenen Linien in Abbildung 20 kennzeichnen den Bereich der Belichtungsmessung. Diese ermittelt die Leuchtdichte eines Objektes. Die Messung erfolgt entweder direkt (Objektmessung) oder indirekt indem die Beleuchtungsstärke am Gegenstand selbst gemessen wird. Herkömmliche Kamertypen arbeiten heutzutage fast ausschließlich mit der direkten Objektmessung. Anhand dieser Bestimmung gibt die Kamera die Blendenzahl sowie die Belichtungszeit vor, um eine optimale Belichtung für das jeweilige Szenario zu gewährleisten.

#### 4.1.2 Blendenzahl

Eine wichtige Komponente des Objektivs einer Kamera ist die sogenannte Aperturblende. Diese bestimmt aufgrund ihres Öffnungsdurchmessers den auf den Sensor fallenden Lichtstrom und somit die Beleuchtungsstärke  $E'$ . Eine wichtige Größe stellt die Blendenzahl  $k$  dar (siehe Gleichung 9):

$$k = \frac{f}{D_{EP}} \quad (9)$$

Diese errechnet sich aus der Brennweite  $f$  und dem Durchmesser der Eintrittspupille  $D_{EP}$  des Objektivs. Hat ein Gegenstand dieselbe Leuchtdichte, so ist aufgrund dieser Definition ungeachtet der Objektivbrennweite immer dieselbe Beleuchtungsstärke am Bildsensor



vorhanden. Eine größere Blendenzahl bewirkt eine Verringerung der Blendenöffnung und umgekehrt. Die Abstufung der einzelnen Blendenzahlen (5,6 – 8 – 11 – 16 – 22 – 32,...) ist so eingeteilt, dass beim Öffnen der Blende um eine ganze Stufe die Belichtung verdoppelt wird.

Mit der Blendenzahl  $k$  wird jedoch der Transmissionsgrad (entspricht dem Lichtverlust) des Objektivs nicht berücksichtigt. Dieser hat eine spezielle Bedeutung in der Filmtechnik aufgrund häufiger Objektivwechsel, hat jedoch nur eine untergeordnete Bedeutung bei Makroaufnahmen von Sprays und soll nur der Vollständigkeit wegen erwähnt werden.

### 4.1.3 Leuchtdichte des Objekts

Jeder Gegenstand hat eine bestimmte Leuchtdichte  $L$  in  $[\text{cd}/\text{m}^2]$ , die uns ermöglicht das Objekt zu sehen oder fotografisch abzubilden. Diese Größe lässt sich mit Hilfe der Beleuchtungsstärke  $E$  und dem Reflexionsgrad  $\rho$  nach Gleichung 10 berechnen (siehe auch Kapitel 2.1.2 Fotometrie).

$$L = \frac{E * \rho}{\pi} \quad (10)$$

Der Reflexionsgrad  $\rho$  eines abzubildenden Objekts wird in Prozent mit einer Zahl zwischen 0 und 1 und gibt das Reflexionsvermögen eines Stoffes an.

In den meisten Fällen ist bei einer Aufnahme eine Vielzahl von Objekten unterschiedlicher Leuchtdichte vorhanden. Somit interessiert auch das Verhältnis der einzelnen Leuchtdichten zueinander (Leuchtdichteverhältnis). Ist beispielsweise die Leuchtdichte an der hellsten Stelle 50  $[\text{cd}/\text{m}^2]$  und an der dunkelsten Stelle 2  $[\text{cd}/\text{m}^2]$ , so spricht man von einem Leuchtdichteverhältnis von 25:1. Wird dieser Wert logarithmisch ausgedrückt, so spricht man vom Objektumfang ( $\log 25 = 1,4$ )

### 4.1.4 Beleuchtungsstärke in der Bildebene

Wie schon in diesem Kapitel erwähnt, ist die Beleuchtungsstärke  $E'$  in der Bildebene (am Bildsensor) maßgebend für die Belichtung des Bildsensors. Sie wird von bestimmten Faktoren des Objektivs (z.B. Blende, Transmissionsgrad,...) beeinflusst (siehe Gleichung 11 auf Seite 27).



$$E' = \frac{L * \pi * (a - f)^2 * \tau * C * h * \cos^4(\Theta)}{4 * k^2 * a^2} \quad (11)$$

- E'... Beleuchtungsstärke in der Filmebene
- L... Leuchtdichte des Objekts
- a... Objektentfernung
- f... Brennweite des Objektivs
- $\tau$ ... Transmissionsgrad des Objektivs
- C... Korrekturfaktor für das Kamerastreulicht
- h... Vignettierungsfaktor
- $\theta$ ... Winkel zw. der optischen Achse und einem seitlichen Bildpunkt
- k... Blendenzahl

Der Korrekturfaktor für das Kamerastreulicht C kann bei modernen Kameras mit C=1,03 angenommen werden und ist nicht mit dem Korrekturfaktor für Streulicht im Objektiv oder aufgrund heller Flächen im oder außerhalb des Gegenstandes zu verwechseln. Die Beschneidung der Eintrittspupillenfläche für Objektpunkte am Rande des Objektfeldes wird über den Vignettierungsfaktor h berücksichtigt und tritt vorrangig bei Weitwinkelobjektiven auf (für Makro daher h=1). Um die natürliche Helligkeitsabnahme für Punkte außerhalb der optischen Achse zu beachten, wird der Faktor  $\cos^4(\theta)$  herangezogen (bei durchschnittlichen Verhältnissen gilt näherungsweise  $\theta=12^\circ$ ). Der Transmissionsgrad für Objektive kann mit einem Wert von  $\tau=0,9$  angenommen werden.

Fasst man die physikalischen Eigenschaften des Objektivs und die Objektentfernung wie in Gleichung 12 zusammen

$$q = \left( \frac{a - f}{a} \right)^2 * \frac{\pi}{4} * \tau * C * h * \cos^4(\Theta) \quad (12)$$

ergibt sich für die Beleuchtungsstärke in der Filmebene Gleichung 13.

$$E' = q * \frac{L}{k^2} \quad (13)$$

Jede vorherrschende Leuchtdichte eines Gegenstandspunktes bewirkt eine gewisse Beleuchtungsstärke im gegenüberliegenden Bildpunkt am Sensor. Da die Belichtungszeit für jeden Punkt praktisch gleich ist, werden aufgrund unterschiedlicher Beleuchtungsstärken die einzelnen Sensorpunkte auch dementsprechend stark oder schwach belichtet.

Ebenso wie der Objektumfang kann auch das Verhältnis der Beleuchtungsstärke am Sensor angegeben werden. Dieses wird als Belichtungsumfang bezeichnet. Wird der Belichtungsumfang wie der Objektumfang logarithmisch angeführt und das Streulicht im Objektiv vernachlässigt, so haben diese beiden Größen denselben Wert. Entspricht also das Leuchtdichteverhältnis der Motivstellen 25:1 so gilt das Verhältnis 25:1 ebenso für die



Beleuchtungsstärke. In der Praxis jedoch ist der Belichtungsumfang immer kleiner als der Objekumfang. Das Verhältnis von Objekumfang zu Belichtungsumfang wird anschaulich in Blendenstufen ausgedrückt. Wie in Kapitel 4.1.1 Blendenzahl besprochen, bewirkt eine Blendenstufe eine Verdopplung bzw. Halbierung der Beleuchtungsstärke. So beträgt beispielsweise das Umfangverhältnis 2:1 bei einem und 4:1 bei zwei Blendenschritten (das entspricht einem Objekumfang von 0,3 bzw 0,6).

### 4.1.5 Belichtung H

Maßgebende Faktoren für die Belichtung sind die Leuchtdichte, der Reflexionsgrad des Gegenstandes, die Blendenzahl sowie die Belichtungszeit. Mit Hilfe der Gleichungen 8 und 13 für die Beleuchtungsstärke in der Bildebene erhält man die Kamera-Belichtungsgleichung (Gleichung 14):

$$H = \frac{q * L * t}{k^2} \tag{14}$$

In Gleichung 14 wird ersichtlich, dass ausschließlich die in diesem Kapitel behandelten Größen sowie gewisse Minderungsfaktoren, die aufgrund des Objektivs entstehen können, auf die Belichtung Einfluss nehmen. Daher hat die Belichtung keinerlei Auswirkung auf die Empfindlichkeit des Filmes oder des Bildsensors.

Anhand eines Beispiels soll erläutert werden, wie bei gegebenem Reflexionsgrad und gegebener Objektbeleuchtungsstärke die Belichtung aufgrund von Blendenzahl und Belichtungszeit verändert werden kann (siehe Abbildung 21).

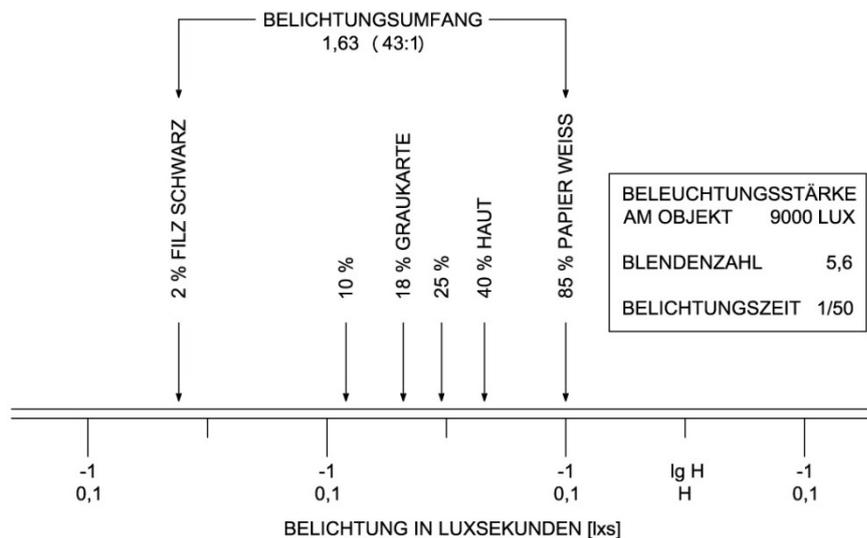


Abbildung 21: Darstellung von Belichtung H und Belichtungsumfang [8]



Als Motiv dient ein schwarzer Filz mit einem Reflexionsgrad  $\rho$  von 0,02 und weißes Papier mit einem  $\rho$  von 0,85. Diese Werte bilden die obere und untere Beleuchtungsstärke. Somit kann der Belichtungsumfang ermittelt werden:

$$\frac{85}{2} = 43 : 1 \Rightarrow \log(43) = 1,63$$

Weiters soll die Belichtung in [lux] des weißen Papiers am Sensor berechnet werden. Die Leuchtdichte des Gegenstandes erhält man mit Hilfe der Gleichung 10 und der bekannten Belichtungsstärke am Objekt (9000 Lux):

$$L = \frac{E * \rho}{\pi} = \frac{9000 * 0,85}{\pi} = 2435 [cd / m^2]$$

Schließlich kann unter Verwendung von Gleichung 14 bei gegebener Belichtungszeit (1/50 [s]) und der Blendenzahl ( $k=5,6$ ) unter Berücksichtigung der Objektivverluste ( $q=0,65^1$ ) die Belichtung auf der Filmebene berechnet werden:

$$H = \frac{q * L * t}{k^2} = \frac{0,65 * 2435 * \frac{1}{50}}{5,6^2} = 1,00 [luxs]$$

Wird im selben Beispiel die Blendenöffnung um 2 Stufen vergrößert ( $k=2,8$ ), so würde das weiße Blatt Papier am Bildsensor eine Belichtung von 4 [luxs] aufweisen, wobei der Belichtungsumfang gleich bliebe.

## 4.2 Empfindlichkeit von Bildsensoren

### 4.2.1 Spektrale Empfindlichkeit von Bildsensoren

Bildsensoren sind prinzipiell Strahlungsempfänger, die für elektromagnetische Strahlung empfindlich sind und die Fähigkeit aufweisen, diese in ein Signal umzuwandeln, das wiederum weiterverarbeitet werden kann (siehe hierzu auch Kapitel 2.2.3 CCD/CMOS Kameras). Wie die Netzhaut des Auges haben auch Bildsensoren eine relative Empfindlichkeit für die einzelnen Wellenlängen der auftreffenden Strahlung (relative spektrale Empfindlichkeit) [8].

Beim Betrachten von Abbildung 22 auf Seite 30 wird ersichtlich, dass die Kurven der lichtelektrischen Empfänger von der Charakteristik des menschlichen Auges abweichen. Dies bedeutet, dass die auftreffende Strahlung von jedem Empfänger mit einem anderen Ausgangssignal bewertet wird [8].

<sup>1)</sup> Dieser Wert gilt bei durchschnittlichen Verhältnissen bei der Annahme der 80-fachen Objektentfernung im Verhältnis zur Objektivbrennweite.



Abbildung 22 zeigt den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad des Auges im Vergleich mit einigen anderen lichtelektrischen Empfängermaterialien (Si, Se, Ge).

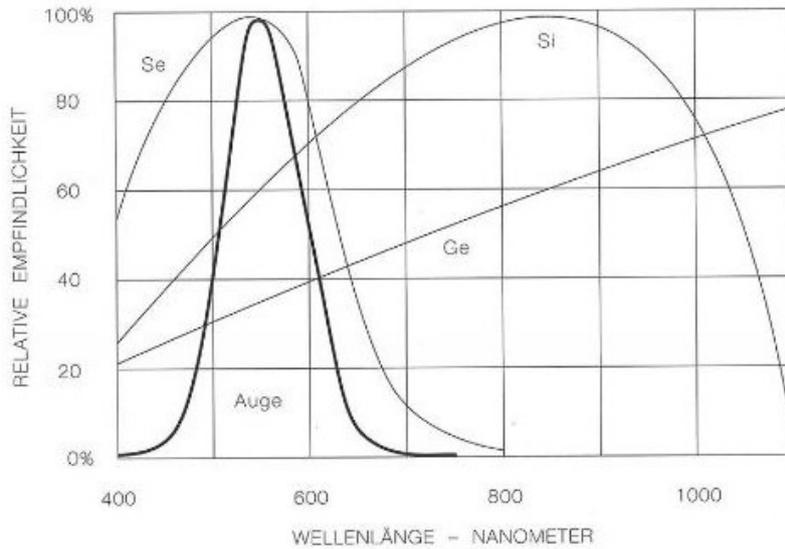


Abbildung 22: Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges und einiger lichtelektrischer Empfängermaterialien [8]

CCD- sowie CMOS-Bildsensoren werden aus Silizium gefertigt, da sich dieses Material auf ein sehr breites Lichtspektrum helligkeitsempfindlich erweist.

So können handelsübliche Bildsensoren jenseits von 780 [nm] in den nahen Infrarotbereich sehen, während das menschliche Auge ein Farbspektrum von ca. 380 [nm] (violett) bis 780 [nm] (dunkelrot) erfasst. (vgl. Abbildung 23) [18].

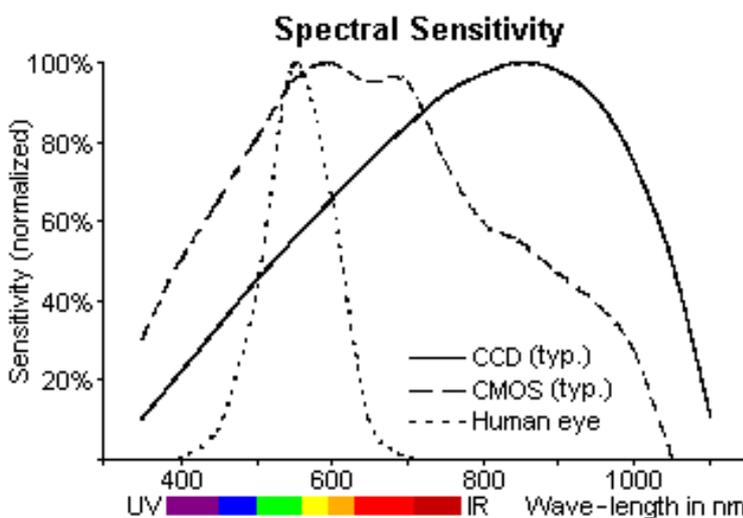


Abbildung 23: Spektrale Empfindlichkeit, Vergleich menschliches Auge und CCD/CMOS Sensoren [18]

Die charakteristische Kurve von CCD Sensoren entspricht in etwa jener des reinen Siliziums, während CMOS Sensoren ein breiteres Maximum hin zu kürzeren Wellenlängen aufweist.



Diese Tatsache wird durch die flachere Struktur des CMOS Chips sowie der geringeren Eindringtiefe des kurzwelligen Lichts verursacht [18].

#### 4.2.2 ISO-Empfindlichkeit von Bildsensoren

Die ISO-Empfindlichkeit ist ein Maß für die Verstärkung der Lichtsignale am digitalen Sensor. Gemeinsam mit der Belichtungszeit und der Blende sorgt diese für eine korrekte Belichtung. Gängige ISO-Empfindlichkeiten reichen bei handelsüblichen Digitalkameras von ISO 50 bis ISO 6400, wobei die Angabe linear erfolgt. Wird also der ISO-Wert verdoppelt, so erhöht sich auch die Lichtempfindlichkeit des Sensors um den Faktor zwei. Die Belichtungszeit kann so bei ansonsten gleichen Bedingungen halbiert werden, um dieselbe Belichtung des Chips zu erreichen. Der unangenehme Nebeneffekt bei hohen Empfindlichkeiten ist die damit verbundene Verstärkung des Bildrauschens (siehe Abbildung 24) [19].

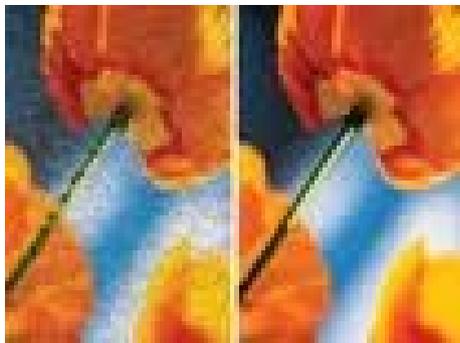


Abbildung 24: Bildrauschen (links) aufgrund einer hohen ISO-Empfindlichkeit

Dieses Bildrauschen entsteht durch die dauerhafte Grundspannung, welche auf den einzelnen lichtempfindlichen Dioden des Kamerachips herrscht. Bei Tageslicht oder guter Ausleuchtung wird diese Grundspannung überdeckt. Bei schwachem Licht ist der Fotograf oft gezwungen mit einer hohen ISO-Empfindlichkeit zu arbeiten. In dieser lichtsensiblen Einstellung der Kamera wird jedes noch so schwache Signal (auch die Grundspannung) weitergegeben, was sich dann als bunte Pixel am Foto bemerkbar macht (besonders bei Langzeitaufnahmen).

Im Folgenden soll nun ein Zusammenhang zwischen der ISO-Empfindlichkeit, der Belichtungszeit und einer physikalischen Größe von Licht gefunden werden, um die Auswahl der richtigen Lichtquelle zu erleichtern sowie die geeigneten Kameraeinstellungen zu eruieren.

Die Belichtung  $H$  in [lux\*s] kann, wie bereits angegeben mit der Kamera-Belichtungsgleichung ermittelt werden [8]:

$$H = \frac{q * L * t}{k^2} \quad (15)$$

$L$  entspricht hierbei der Leuchtdichte in [cd/m<sup>2</sup>] eines remittierenden Objektes, das fotografiert wird. Die effektive Blende wird in der Gleichung 15 durch  $k$  berücksichtigt, wobei

die Belichtungszeit der Variable  $t$  entspricht. Der Faktor  $q$  (in der Regel  $b=0,650$ ) ergibt sich aus den verschiedenen physikalischen Eigenschaften des verwendeten Objektivs sowie einer Objektdistanz, die dem 80-fachen der Brennweite und einem Objektivachsen-Winkel von  $12^\circ$  entspricht<sup>1)</sup>.

Für digitale Sensoren und Farbumkehrfilme gilt Gleichung 16 zur Berechnung der ISO-Empfindlichkeit.

$$ISO(ASA) = \frac{10}{H} = \frac{10}{E' \cdot t} \quad (16)$$

Anhand Gleichung 16 wird ein direkter Zusammenhang zwischen der ISO-Empfindlichkeit (entspricht ASA), der Belichtungszeit  $t$  und der Beleuchtungsstärke am Sensor  $E'$  in [lx] ersichtlich (siehe Abbildung 25).

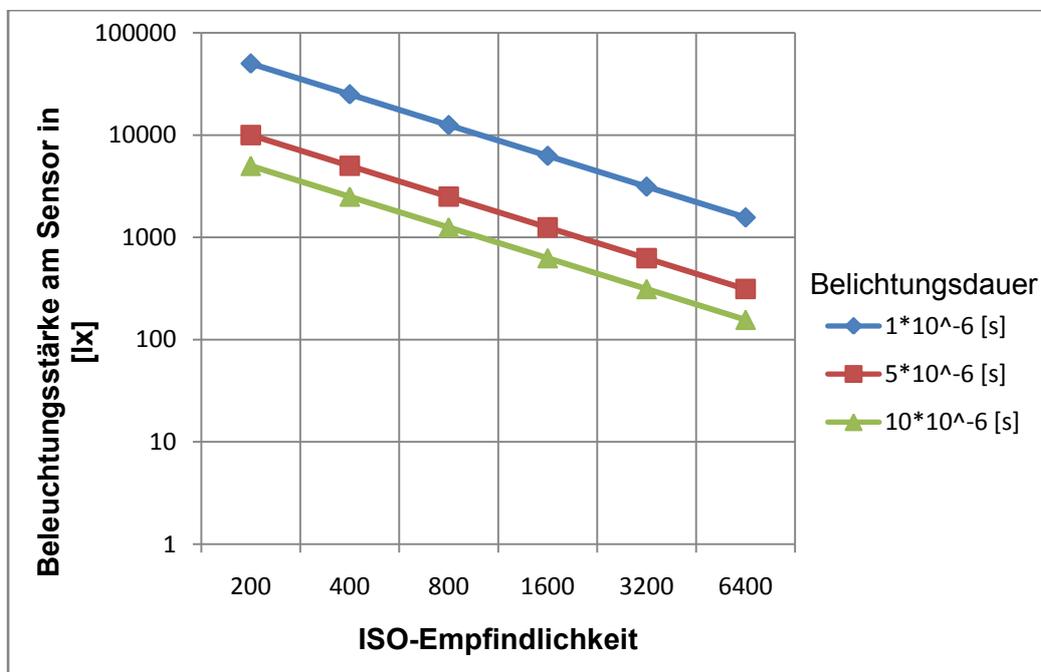


Abbildung 25: Zusammenhang ISO-Empfindlichkeit, Lux und Belichtungsdauer

Um nun Wassertropfen mit einer Geschwindigkeit von rund 150 [m/s] im Bild „einzufrieren“, sind extrem kurze Belichtungszeiten nötig. Daher werden, wie aus Abbildung 25 ersichtlich, hohe Sensorempfindlichkeiten und starke Belichtung gefordert. Qualitativ hochwertige Digitalkameras erreichen Verschlusszeiten von  $1/4000$  bis  $1/8000$  [s]. Das bedeutet, dass in dieser Zeit der Tropfen noch immer ca. 2 [cm] Wegstrecke zurücklegt und sich daher eine scharfe Aufnahme mit einer kontinuierlichen Lichtquelle äußerst problematisch darstellt. Somit müssen bei derart hohen Tropfengeschwindigkeiten entweder High-Speed Kameras eingesetzt und/oder schnell aufblendende Lichtquellen verwendet werden.

<sup>1)</sup> ISO-Messvorschrift

## 4.3 Beleuchtung

Dieses Kapitel behandelt vorrangig Lichtquellen und deren Einsatzmethoden zur High-Speed Aufnahme von Sprays. Bei hohen Geschwindigkeiten, wie sie bei Zerstäubungsvorgängen auftreten, werden an die Beleuchtung besondere Anforderungen hinsichtlich Lichtleistung und Handhabung gestellt, um detailgetreue Bilder zu erhalten.

### 4.3.1 Beleuchtungstechniken [20]

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um das Objekt in das sprichwörtlich richtige Licht zu rücken:

- **Hintergrundbeleuchtung** hinter dem Objekt belichtet den Bildsensor direkt. Dies ist meistens bei Sprays nützlich, wenn eine bildbasierende Größenermittlung vorgenommen wird. Gegenüber dem ausgeleuchteten Hintergrund erscheinen diese Partikel am Bild als schwarze Punkte. Aus diesem Grund ist diese Beleuchtungsmethode nur selten für die Visualisierung geeignet. Dient als Lichtquelle ein Laser, kann die Art Hintergrundbeleuchtung ebenfalls nicht angewendet werden, da aufgrund der hohen Energiedichte des Laserstrahls der Bildsensor Schaden nähme.
- **Frontbeleuchtung** des Objektes ist eine praktikable Anwendung, wenn der Zugang zur Aufnahmeszene nur von einer bestimmten Seite möglich ist. Allerdings erfasst der Bildsensor nur das reflektierte und zerstreute Licht, wodurch diese Methode bei Highspeed-Aufnahmen ausschließlich mit sehr starken Lichtquellen zielführend ist (z.B. Laser). Frontbeleuchtung wird am häufigsten bei alltäglichen Fotografien (z.B. Portraits) mit Hilfe des Kamerablitzes eingesetzt.
- **Flächenbeleuchtung** (sheet lightning) wird benutzt um durch komplizierte dreidimensionale Flüssigkeitsströmungen, wie Sprays, zu schneiden. Am häufigsten wird diese Methode bei optischen Messverfahren (z.B. Geschwindigkeits- und Partikelverteilungsmessung) eingesetzt. Flächenbeleuchtung ist die einzige Technik, die nur von Lasern sinnvoll realisiert werden kann (siehe Kapitel. 4.3.4 Laser).

### 4.3.2 Einteilung der Lichtquellen [8]

Prinzipiell lassen sich Lichtquellen bzw. Selbstleuchter in künstliche und natürliche (z.B. Sonne) Lichtquellen einteilen. Künstliche Selbststrahler erzeugen Licht aufgrund von Energiezufuhr. Elektronen eines Stoffes werden angeregt und auf ein höheres Energieniveau gebracht. Fallen diese Elektronen wieder auf ihren ursprünglichen Zustand zurück, so werden Energiequanten in Form von elektromagnetischer Strahlung emittiert. Abbildung 26 (auf Seite 34) zeigt eine Übersicht der einzelnen Lichtquellen.

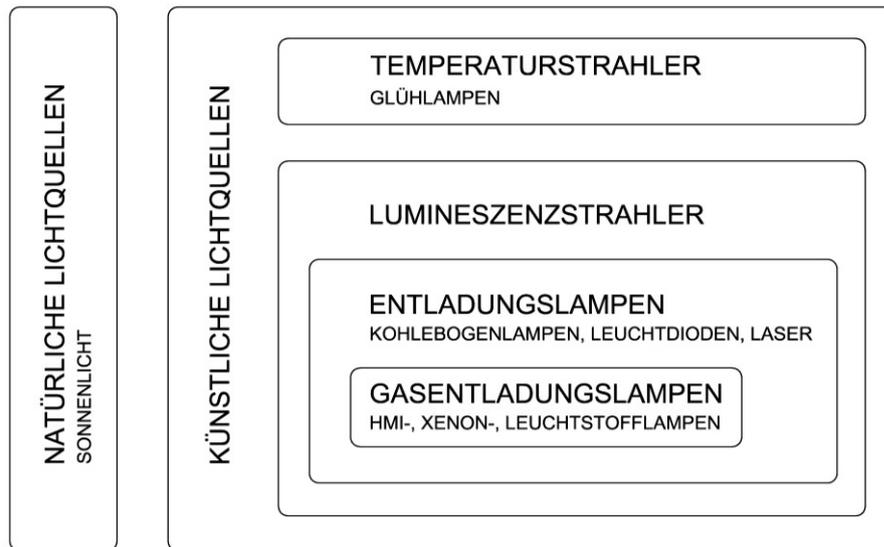


Abbildung 26: Einteilung der Lichtquellen [8]

Unter Temperaturstrahlern werden Glüh- und Halogenlampen verstanden, bei denen ein gewendelter Wolframdraht erhitzt und somit Licht emittiert wird (z.B. Glühlampe) [21]. Diese Strahler sind für High-Speed Aufnahmen aufgrund ihrer technischen Grenzen jedoch nicht geeignet und hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Entladungslampen hingegen erzeugen Licht aufgrund eines Stromflusses durch ionisiertes Gas oder Metalldampf [25]. Zu ihnen gehören auch Blitzröhren, wie sie beispielsweise in Stroboskop-Anwendungen finden.

Bei den sogenannten Lichtblitz-Stroboskopien werden Xenon-Blitzlampen oder auch Leuchtdioden eingesetzt. Diese erzeugen Lichtblitze in regelmäßigen zeitlichen Abständen, indem die erforderliche Energie in einem Kondensator bereitgestellt und mittels eines Hochspannungsimpulses getriggert wird. Üblicherweise haben solche Blitzlampen eine eingeschränkte Lebensdauer von rund  $10^8$  Blitzen. Professionelle Geräte erreichen eine Blitzdauer im Bereich von ungefähr 6  $\mu\text{s}$ . Stroboskope mit LED's als Lichtquelle haben den Vorteil höherer Blitzfolgen und kürzerer Blitzdauer, erreichen jedoch wesentlich geringere Blitzenergien [22].

Lasere sind aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften (z.B. Lichtintensität,...) und Handhabung bestens geeignet, um schnell ablaufende Prozesse zu visualisieren und werden daher in Kapitel 4.3.4 genauer behandelt.

### 4.3.3 Anwendung von Stroboskopien zur Highspeed-Fotografie

Stroboskope werden bei schnell ablaufenden Prozessen eingesetzt, um die Bewegung des Objektes, das aufgenommen werden will, zu stoppen. Somit erfasst der Bildsensor der Kamera nur jenes Bild, das für diesen während des kurzen Lichtblitzes sichtbar wird. Eine Verdeutlichung dieses Vorgangs zeigt Abbildung 27 (Seite 35).

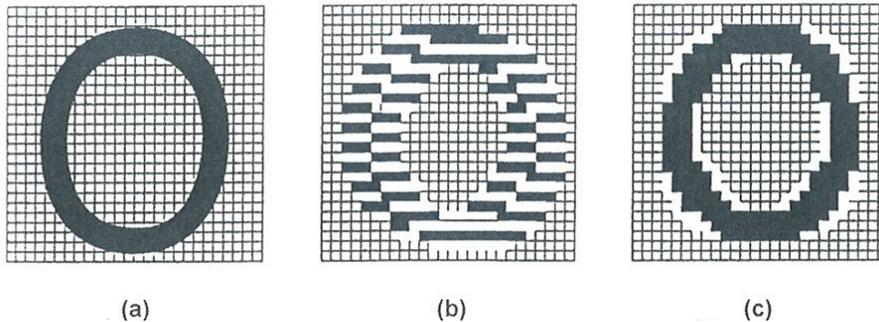


Abbildung 27: Bildeffekte bei der Aufnahme bewegter Objekte [23]

Bild (a) zeigt das tatsächliche Aufnahmeziel, das sich in Bewegung nach rechts befindet. Ohne Stroboskop erfolgt, hohe Geschwindigkeit des Objektes und zu geringe Verschlusszeit des Kamerasystems vorausgesetzt, eine Verzerrung der Aufnahme wie in Bild (b) ersichtlich. Bild (c) ergibt sich am Bildsensor, wenn die Bewegung eines Objekts mit Hilfe eines Lichtblitzes eingefroren wurde.

Zu beachten ist, dass Stroboskope in Verbindung mit Hochgeschwindigkeits-Aufnahmen wenn möglich gegenüber der Kamera positioniert werden sollten, um eine ausreichende Belichtung zu gewährleisten. Ein möglicher Versuchsaufbau eines solchen Systems wird in Abbildung 28 dargestellt.

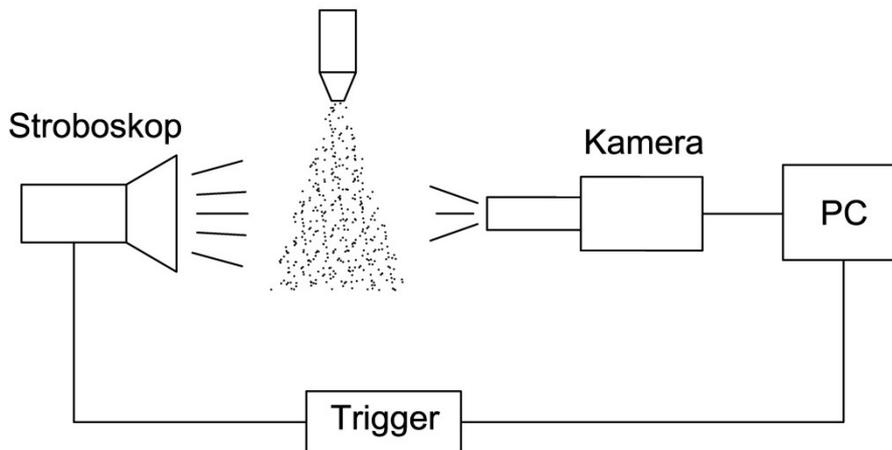


Abbildung 28: Möglicher Versuchsaufbau zur Aufnahme von Sprays mit Stroboskop

Der Trigger dient der zeitlichen Abstimmung des Auslösers der Kamera mit dem erzeugten Blitz des Stroboskops. Somit entstehen Aufnahmen wie beispielsweise in Abbildung 29 ersichtlich.

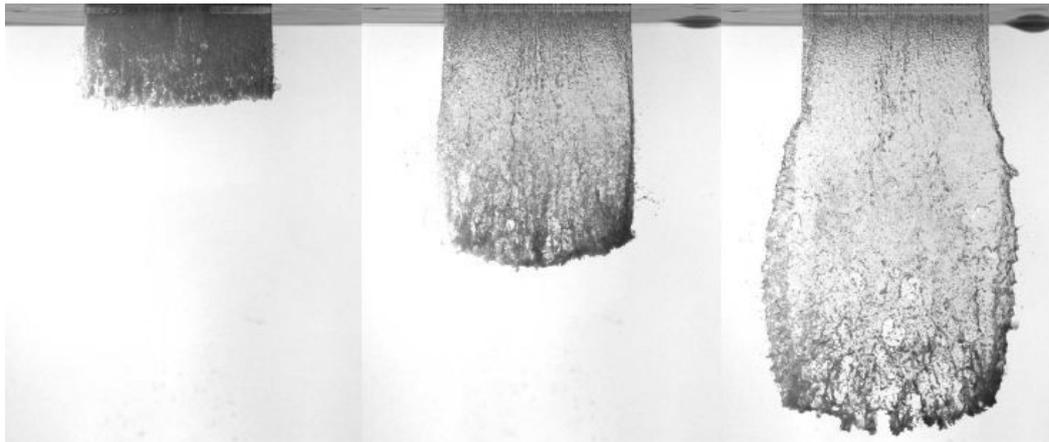


Abbildung 29: Zerstäubung von Benzin mit einer rotierenden Düse (100x60 [mm] Bildgröße) [24]

Abbildung 29 wurde mit einer PCO Sensicam und einem Nikon 55mm Makroobjektiv realisiert. Die Belichtung bewerkstelligte ein im Hintergrund positioniertes Faseroptik Panel, das mit einem Xenon Blitzlichterzeuger verbunden wurde. Der zeitliche Abstand der einzelnen Aufnahmen liegt bei 1 [ms]. [24]

Bei der Zerstäubung von Metallschmelzen beispielsweise stößt ein solches System allerdings rasch an seine technischen Grenzen, da hierbei zur Beobachtung der Vorgänge aufgrund der Lichtundurchlässigkeit der Schmelze nicht mit einem Durchlichtverfahren (wie in Abbildung 31) sondern oft mit Auflicht gearbeitet werden muss, was wiederum die Belichtung des Bildsensors drastisch reduziert.

#### 4.3.4 Laser

Laser eröffnen viele Möglichkeiten hinsichtlich Highspeed-Videoaufnahmen, da sie schnell und kontrollierbar hohe Energie emittieren. Besonders Impulslaser bilden eine gute Alternative zu herkömmlichen Stroboskopen, da diese Lichtimpulse mit der Dauer von mehreren Femtosekunden erzeugen können, um so schnell bewegte Objekte einzufrieren. [20]

Um nun die benötigte Pulsdauer für eine gelungene Einzelaufnahme abzuschätzen, benötigt man eine charakteristische Größe,  $d$ , und die Geschwindigkeit  $v$  des Objektes. Die Laserpulsdauer  $t$  sollte kurz genug sein, sodass sich das zu erfassende Objekt nicht weiter bewegt als 10% seiner charakteristischen Größe (siehe Gleichung 17). [20]

$$t \leq \frac{d}{10 * v} \quad (17)$$

Diese 10% sind willkürlich gewählt, jedoch notwendig, möchte man qualitative Messungen erhalten. Da die kleinsten Partikel, die optisch erfasst werden können bei rund 1 [ $\mu\text{m}$ ] liegen und maximale Geschwindigkeiten auf der Erde von 10 [km/s] denkbar sind, benötigt man theoretisch Laser mit einer Pulsdauer von 10 [ps]. Dies bedeutet, dass Laser, die im

Femtosekundenbereich arbeiten, niemals für Highspeed-Aufnahmen benötigt werden. Im Normalfall reicht eine Pulsdauer im Bereich von 1 [ns] bis 1000 [ns]. [20]

Aus den vorhin genannten Gründen soll in dieser Arbeit noch näher auf Lasertechnik und deren Einsatzmöglichkeiten hinsichtlich Spray-Aufnahmen eingegangen werden.

#### 4.3.4.1 Grundlagen zu Lasern [25]

Laser bewirken eine Verstärkung von spontan emittierendem Licht durch induzierte Emission. Dies bedeutet, dass die Rückkehr eines Atoms von einem angeregten in einen tieferliegenden Zustand auch durch die äußere Einwirkung einer Lichtwelle induziert werden kann. Dieser Vorgang wird in Abbildung 30 näher erläutert.

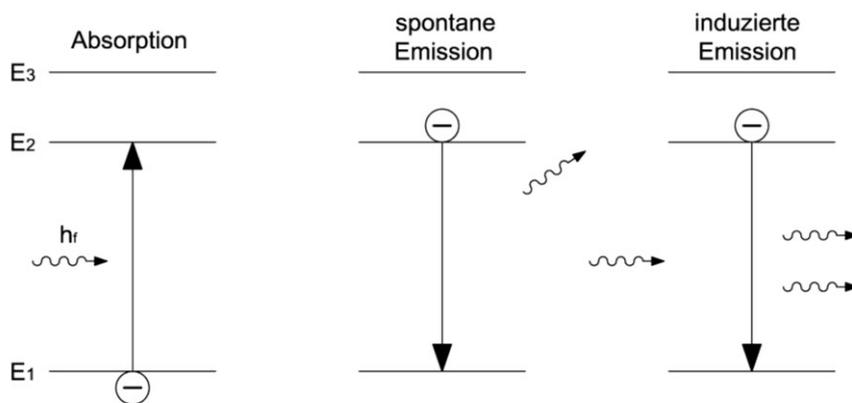


Abbildung 30: Prinzip der induzierten Emission [25]

Bei der Absorption wird mit Hilfe eines Photons ( $h_f$ ) ein Elektron in ein höheres Energieniveau befördert, wobei das Photon verschwindet. Das so angeregte Elektron geht nach einer gewissen Zeit wiederum in einen niedrigeren Energiezustand über und emittiert dabei ein Photon (spontane Emission wie z.B. bei der Fluoreszenz), das in eine beliebige Richtung ausstrahlt. Trifft ein Photon nun auf ein weiteres angeregtes Elektron entsteht ein zweites Photon und das einfallende Licht wird somit verstärkt [25]. Anders als bei der spontanen Emission, wobei in statistisch verschiedene Richtung emittiert wird, wird bei der induzierten Emission das erzeugte Photon in Ausbreitungsrichtung des einfallenden Quants abgestrahlt (vgl. dazu Abbildung 30).

Um zu erreichen, dass induzierte Emissionsprozesse überwiegen, muss entweder sichergestellt werden, dass der Verstärkungsfaktor des Materials groß genug ist (Superstrahler), oder es erfolgt ein mehrfacher Durchgang der Photonen durch das verstärkende Material (durch Anordnung von Spiegeln).

Laser können aufgrund verschiedenster Merkmale klassifiziert werden. Meist erfolgt eine Einteilung aufgrund des Aggregatzustandes des Lasermaterials in

- Festkörperlaser,
- Flüssigkeitslaser,
- Gaslaser,
- Freie-Elektronen-Laser,

oder nach Art der Anregung des Lasermaterials in

- optisch gepumpte Laser (Blitzlampe, kont. Lampe, Leuchtdiode),
- elektronenstrahlgepumpte Laser,
- Gasentladungslaser (Glimm-, Bogen-, Hohlkathodenentladungen),
- Injektionslaser (Anregung aufgrund eines Stromdurchgangs in einem Halbleiter),
- chemische Laser (chem. Reaktion),
- gasdynamische Laser
- und nuklear gepumpte Laser (Anregung durch Strahlung).

Der Betrieb eines Lasers kann entweder gepulst oder kontinuierlich (oft bezeichnet als „cw“ für continuous wave) erfolgen. Bei gepulsten Lasern sind insbesondere charakteristische Größen wie Pulsenergie, Pulsdauer und zeitlicher Abstand der Pulse von Bedeutung. Im Anhang (siehe Tabelle 38) befindet sich eine Aufstellung der wichtigsten Laser mit den dazugehörigen Wellenlängen, Betriebsart und mittlerer Leistungen.

In der Technik wird sehr häufig der Neodym-YAG-Laser (Festkörperlaser) verwendet, der sowohl kontinuierlich – meist mit Hilfe einer Krypton-Bogenlampe angeregt – als auch im gepulsten Betrieb mit einer Xenonblitzlampe optisch gepumpt wird. Daher soll sowohl diese Bauform, als auch der Argonionenlaser näher behandelt werden, da letzterer bei den praktischen Versuchen zur Anwendung kommt.

#### **4.3.4.2 Argonionenlaser [25]**

Der Argonionenlaser gehört zu der Gruppe der Edelgasionenlaser und bildet den Hauptvertreter dieses Lasertyps. Diese werden kontinuierlich betrieben (cw) und emittieren Licht am stärksten bei einer Wellenlänge von 450-520 [nm] wie in Abbildung 31 ersichtlich (vgl. hierzu auch Tabelle 38 im Anhang).

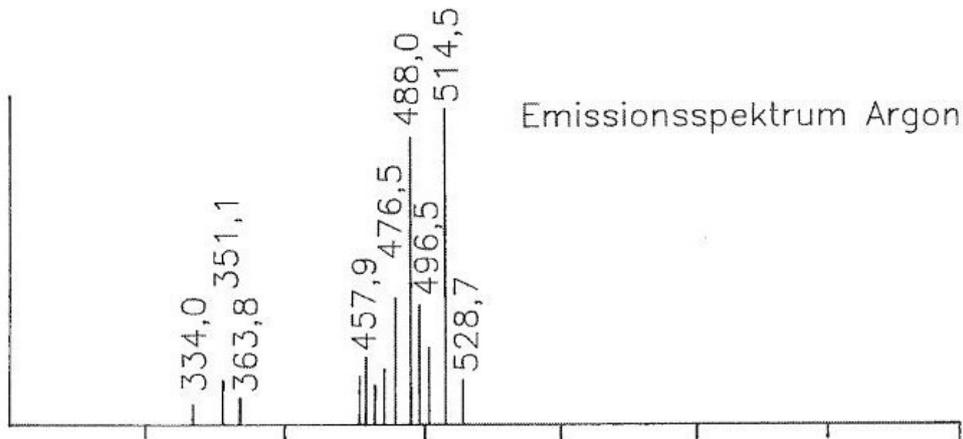


Abbildung 31: Emissionsspektrum von Argon in [nm] in Abhängigkeit der relativen Laserleistung [25]

Aufgrund der hohen Leistungsdichte, die für eine effektive Anregung (erfolgt über Elektronenstoß) der Argonionen erforderlich ist (Elektronendichte bei  $10^{14}$  [ $\text{cm}^{-3}$ ]), wird ein erheblicher technischer Aufwand bei der Konstruktion des Entladungsrohres betrieben. Diese Rohre bestehen aufgrund der erforderlichen hohen Wärmeleitfähigkeit vorwiegend aus Keramik und sind wassergekühlt, da sich das Gas auf bis zu 5000 [K] erhitzen kann (siehe Abbildung 32).

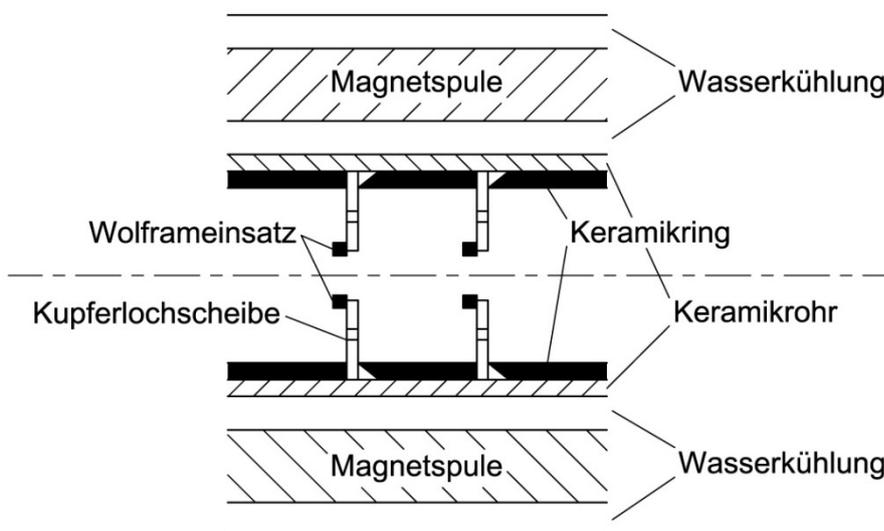


Abbildung 32: Entladungsrohr des Argonionenlasers [25]

Mit Hilfe von Lochscheiben aus Wolfram, die über Halterungen aus Kupfer die Wärme an das Keramikrohr abgeben, wird die Entladung geführt. Um das Entladungsrohr befindet sich eine Magnetspule zur Erzeugung eines Magnetfeldes. Dieses ist notwendig, da aufgrund der hohen Elektronendichte die Elektronen radial nach außen gedrückt werden. Um nun die Bewegung der Elektronen wieder auf die Achse zu konzentrieren, bedient man sich der über dem Magnetfeld erzeugten Lorenz-Kraft, welche senkrecht zur Achse einwirkt. Die Emission sowie die Selektion einzelner Wellenlängen wird mittels breitbandiger Laserspiegel und eines Prismas bewerkstelligt.

Hinsichtlich der Belichtung von High-Speed Aufnahmen eignen sich  $\text{Ar}^+$ -Laser besonders gut, da die stärksten Emissionslinien des Lasers im höchsten spektralen Empfindlichkeitbereich von CMOS-Sensoren liegen. Den einzigen Nachteil stellt der kontinuierliche Betrieb des Lasers dar, da so mit Hilfe dieser Lichtquelle kein Einfrieren von schnell bewegten Bildern ermöglicht wird.

#### 4.3.4.3 Neodym-YAG-Laser

Der Neodymlaser zählt zu den wichtigsten Festkörperlasern und wird am häufigsten mit Hilfe eines Neodym-YAG<sup>1)</sup>-Kristalls realisiert. Aufgrund seiner Eigenschaften wie z.B. der hohen Verstärkung kann der YAG-Kristall, welcher üblicherweise mit 0,7 [Gew.-%] Nd dotiert ist, sowohl kontinuierlich als auch gepulst eingesetzt werden. [25]

Abbildung 33 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Nd:YAG-Lasers.

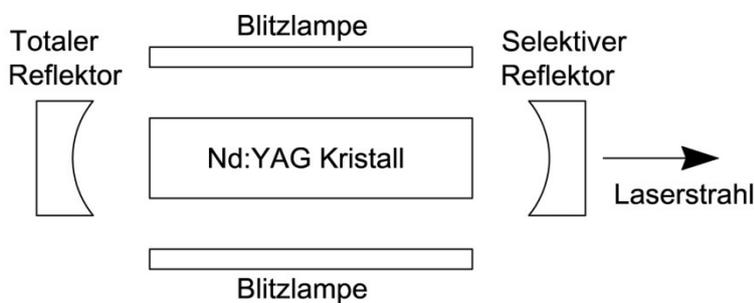


Abbildung 33: Schema eines Nd:YAG-Lasers [26]

Die Wellenlänge des emittierten Lichts liegt, die Kühlung des Kristalls vorausgesetzt, im nahen Infrarotbereich bei 1,06 [ $\mu\text{m}$ ]. Im Pulsbetrieb erfolgt die Anregung des Kristalls mit Hilfe von Blitzlampen (einfachste Art) oder bei kontinuierlichen Pumpen<sup>2)</sup> mit einer sogenannten Güteschaltung<sup>3)</sup> oder Modenkopplung. Mit Hilfe dieser Technik kann die Dauer der Laserpulse gegenüber der Anregungsdauer wesentlich verkürzt werden, was den Einsatz bei sehr schnell ablaufenden Prozessen begünstigt. [25]

Am häufigsten wird dieser Laser im quasikontinuierlichen Betrieb, also mit einer großen Pulswiederholrate betrieben. Mit Hilfe der Frequenzverdopplung eines Nd:YAG-Lasers kann eine grüne Lichtquelle mit 532 [nm] erzeugt werden, die sich für optische Anwendungen als zweckdienlich erweist. [27]

<sup>1)</sup>  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ... Yttrium-Aluminium-Granat

<sup>2)</sup> Anregen eines optisch aktiven Mediums (hier Kristall) mit Hilfe einer Energiequelle

<sup>3)</sup> Optischer Baustein zur Erzeugung von Laserpulsen mit hoher Intensität bei gepulsten Lasern

### 4.3.5 Anwendung des Lasers zur Highspeed-Fotografie

Für die Highspeed-Abbildung stehen eine ganze Reihe verschiedenster Laser zur Verfügung. Grundsätzlich muss eine vernünftige Wahl zwischen Pulsenergie, Pulsdauer sowie Pulswiederholrate und Kosten getroffen werden. Eine Auflistung geeigneter Lasertypen befindet sich in der nachstehenden Tabelle 6. [20]

Tabelle 6: Gängige Lasertypen zur Highspeed-Fotografie [20]

Lasertyp	Wellenlänge	Pulslänge	Max. Pulswiederholrate	Pulsenergie
	[nm]	[ns]	[Hz]	[mJ]
Kupferdampfaser	511 + 578	10-30	50.000	0,5-5
CW gepumpter Q-switched <sup>1)</sup> YAG	532	120-450	50.000	0,5-5
Blitzlicht gepumpter Q-switched YAG	532	10-20	5-50 & 20.000.000 (Pulsüberhöhung)	10-500
Argonionenlaser mit Pulsformer	488 + 514	Abhängig vom Pulsformer typische Laserleistung 5-10 [W]		
Diodenlaser	808	500-100.000	5.000 & 400.000 (Pulsüberhöhung)	0,09-17,5

1) Q-switched ist eine andere Bezeichnung für Güteschaltung

Besonders für die Abbildung von Sprays und Flüssigkeitsströmungen eignen sich solche Lasersysteme. Ein möglicher Versuchsaufbau wird in Abbildung 34 dargestellt.

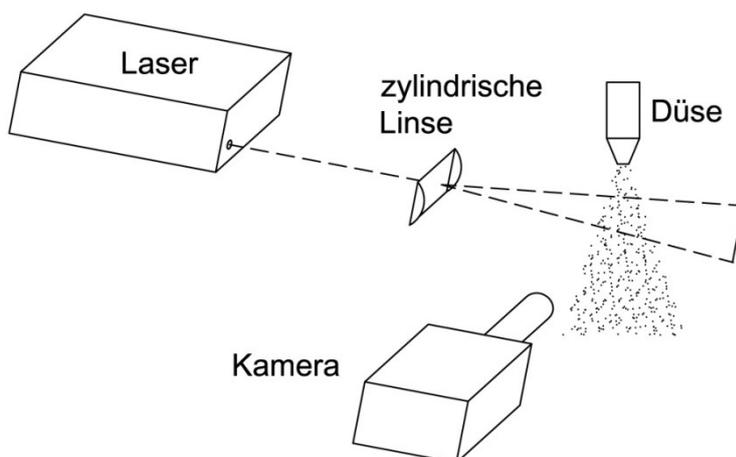


Abbildung 34: Anwendungsbeispiel für Highspeed-Aufnahmen mit Laser

Hierbei wird beispielsweise mit Hilfe einer zylindrischen Linse der Laserstrahl zu einer zweidimensionalen Ebene aufgefächert. Die Kamera wird im rechten Winkel zu dieser Laserfläche positioniert, was eine genaue zweidimensionale Abbildung des Sprays oder der

Flüssigkeitsströmung in der Laserstrahlebene ermöglicht. Im Pulsbetrieb kann der Auslöser der Kamera mit dem Laserstrahl getriggert werden, um die gewünschten Aufnahmen zu erhalten (bei Einzelaufnahme von Vorteil). Mit solcher Versuchsaufstellung können beispielsweise Aufnahmen, wie in Abbildung 35 ersichtlich, gewonnen werden.

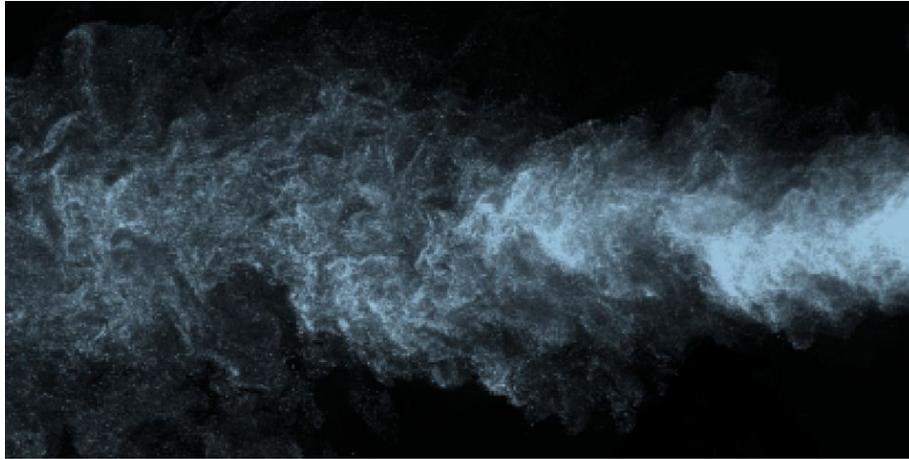


Abbildung 35: Spraypartikel eines Inhalators mit aufgefächertem Laserstrahl belichtet [20]

Allgemein ist anzumerken, dass sich die Anwendung eines Lasers für Highspeed-Aufnahmen aufgrund der technischen Möglichkeiten (CW, Puls, Energie, Lichtintensität, Handling) als äußerst effektiv erweist und wenn möglich Alternativen vorzuziehen ist. Besonders die geringe Laserstrahlabweichung kann sehr nützlich sein, wenn beispielsweise Bilder von weit entfernten Objekten (z.B. bei Explosionen) aufgenommen werden sollen. Des Weiteren wird die Belichtungszeit von der Pulsdauer bestimmt und hängt daher nicht von der minimalen Verschlusszeit der Kamera ab. [20]

## 5 Kamerasysteme

Neben dem Kameraobjektiv und der richtigen Beleuchtung bildet die Kamera die dritte wichtige und komplexeste Komponente zur Realisierung von Highspeed-Aufnahmen. Prinzipiell muss zwischen Kameras unterscheiden werden, die für die Fotografie geeignet sind und zwischen Videokameras, die komplexe Bewegungen von Zerstäubungsvorgängen aufzeichnen können. Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über digitale Spiegelreflexkameras sowie Highspeed-Videokameras vermitteln.

### 5.1 Digitale Spiegelreflexkamera [28]

Digitale Spiegelreflexkameras werden auch häufig als DSLR (engl. Für Digital single-lens reflex) oder DSR (Digitale Spiegelreflex) Kameras bezeichnet. Im Wesentlichen gelten sowohl für digitale als auch für analoge DSR-Kameras dieselben Grundlagen. Einen entscheidenden Unterschied bildet jedoch der digitale Sensor, welcher eine sofortige Betrachtung des Bildes ermöglicht und den sogenannten Schwarzschildeffekt ausschließt<sup>1)</sup>. Dieser tritt bei der Belichtung von chemischen Filmen (insbesondere bei Farbfilmen) auf und besagt, dass sich die Aufnahmehelligkeit nicht linear zur Belichtungszeit verhält. Um nun bei analogen Kameras diesen Effekt, der mit einer Unterbelichtung des Bildes einhergeht, zu vermeiden, muss die Aufnahme länger belichtet werden.

#### 5.1.1 Wichtige Kenndaten einer Digitalen Kamera

Um die richtige DSR-Kamera auszuwählen sind folgende Spezifikationen von großer Bedeutung:

- Sensorchip
- Sensorformat
- Auflösung
- Pixelgröße
- ISO-Empfindlichkeit
- Minimale Verschlusszeit

In gängigen Digitalkameras kommen fast ausnahmslos CMOS oder CCD Chips zur Anwendung. Da jedoch CMOS Chips in der Herstellung billiger und qualitativ mit CCD Technik vergleichbar sind, kommen fast nur mehr erstere zum Einsatz. Die am Chip befindlichen einzelnen Pixel sind stark von den einfallenden Photonen (Licht) abhängig, da nur diese weiterverarbeitet werden können. Daher werden auf die Pixel kleine Linsen, sogenannte Mikrolinsen, gesetzt, um selbst Photonen, die zwischen den Pixeln auftreffen würden, einfangen zu können. Die nähere Funktionsweise von CCD/CMOS Chips wurde in Kapitel 2.2.3 erläutert.

---

<sup>1)</sup> Daher verhält sich bei DSR-Kameras die Aufnahmehelligkeit so gut wie linear zur Belichtungszeit



Auflösung, Chipgröße und Pixelgröße stehen in direkten Zusammenhang. Kennt man beispielsweise die Chipgröße (wird von allen Herstellern angegeben) sowie die maximale Auflösung kann man rasch auf die Pixelgröße schließen.

ISO-Empfindlichkeit und minimale Verschlusszeit sind wichtige Spezifikationsgrößen in Hinblick auf Highspeed-Fotografie. Besonders bei kurzen Belichtungszeiten im Bereich von  $10^{-3}$  [s] werden sehr hohe ISO-Empfindlichkeiten benötigt, um ein Objekt abzulichten. Gute DSR-Kameras wie zurzeit am Markt erhältlich, erreichen Werte von 6400 und sogar bis 12800 ASA. Wird mit gepulsten Lichtquellen gearbeitet, so ist die minimale Verschlusszeit nicht von wesentlichem Interesse, da die Belichtungsdauer durch die Pulsdauer limitiert wird. Beabsichtigt man kontinuierliche Lichtquellen zu verwenden, so stehen Kameras mit Verschlusszeiten bis zu  $16.000 \text{ [s}^{-1}\text{]}$  (Profibereich) zur Verfügung. Wird bei Zerstäubung von Wasser eine Partikelgeschwindigkeit von  $150 \text{ [m/s]}$  angenommen, erkennt man, dass Belichtungszeiten von  $8000 \text{ [s}^{-1}\text{]}$  alleine nicht ausreichen, um ein scharfes Standbild zu erhalten. Diese Tatsache führt unweigerlich zur Verwendung geeigneter Belichtungssysteme (siehe Kapitel 4) und/oder Highspeed-Videokameras (siehe Kapitel 5.2).

### 5.1.2 Wichtige Effekte und Eigenschaften der digitalen Kameras

Im folgenden Teil sollen die wichtigsten Effekte und Eigenschaften, die bei der digitalen Fotografie auftreten, erläutert werden.

#### Dunkelstrom

Dunkelstrom ist ein Effekt, der sowohl bei CMOS wie auch CCD Sensoren auftritt, wobei eine thermische Belichtung des Chips erfolgt. Dieser ist von der Belichtungszeit und der Außentemperatur bestimmt und steigt direkt proportional zu diesen Einflussgrößen. Aufgrund der Temperatur entstehen freie Elektronen, welche die einzelnen Pixel des Chips belichten (siehe Abbildung 36).



Abbildung 36: Dunkelstromeffekt aufgrund Erwärmung durch linksseitig liegenden Ausleseverstärker [28]

Besonders bei Massenprodukten kann die verbaute Elektronik den Sensor zusätzlich erwärmen, wodurch solche Kameras oft nicht für Langzeitbelichtungen bei hoher ISO-Empfindlichkeit geeignet sind. Um diesen Effekt zu minimieren, werden hochempfindliche Kameras (z.B. Astrokameras) gekühlt.

## Flatfield

Aufgrund der Tatsache, dass nicht alle Pixel am Sensorchip die gleiche Empfindlichkeit aufweisen und optische Einflüsse<sup>1)</sup> auftreten, kann es zu einer mehr oder weniger unterschiedlichen Belichtung kommen. Weisen einzelne Bausteine eine äußerst geringe Lichtempfindlichkeit auf, so spricht man von toten Pixeln. Verhindern lassen sich solche Effekte mit Hilfe einer Flatfield-Aufnahme. Hierbei wird eine weiße Fläche, die gleichmäßig beleuchtet ist, fotografiert und anschließend von der Originalaufnahme dividiert. Mit dieser Methode lassen sich so auch winzige Staubkörner am Sensor ausgleichen. Wenn keine Vignettierung vorhanden ist, genügt es, wenn üblicherweise einmal pro Saison eine Flatfield-Aufnahme gemacht wird. Ansonsten (v.a. bei großen Sensorformat) sollte eine Flatfield für jede Aufnahmeserie vorgenommen werden.

## Farbfilterarray

Bei DSR-Kameras ist auf dem Chip ein Farbfilterarray aufgebracht. Farbfilterarrays ermöglichen keine reinen schwarz/weiß Aufnahmen und senken die Quanteneffizienz (Lichtempfindlichkeit), was jedoch mit Mikrolinsen wieder ausgeglichen werden kann. Die gewonnenen Chipinformationen müssen zuerst durch Interpolation der farbigen Pixel berechnet werden, um ein Farbbild zu erhalten.

## Farbrauschen

Aufgrund der notwendigen Interpolation durch das Farbfilterarray kommt es zu einem Farbrauschen im Bild. Durch die Weichzeichnungsfilterfunktion spezieller Nachbearbeitungssoftware am PC kann diesem Effekt entgegengewirkt werden.

## 5.2 Highspeed-Videokameras

William Henry Fox Talbot (1852) machte das erste Highspeed-Video, indem er eine schnell rotierende Seite der *Times*, die mit einem Zündfunken belichtet wurde, fotografierte. Der Text der Zeitung war deutlich und scharf am Negativ abgebildet. Besonders nach der Erfindung des Lasers, ein gutes Jahrhundert später, eröffneten sich völlig neue Möglichkeiten für Highspeed-Prozesse hinsichtlich Abbildung und Messverfahren. [20]

### 5.2.1 Analoge Highspeed-Kameras [20]

Analoge Kameras nutzen einen fotografischen Film als Aufnahmemedium. Aus Kostengründen sowie Gründen des Handlings, ist es sehr mühsam mit Analogtechnik zu arbeiten. Trotzdem werden auch heute noch analoge Kameras eingesetzt da diese, die richtige Bauart vorausgesetzt, Bilder rascher erfassen können als die schnellsten elektronischen Highspeed-Kameras.

---

<sup>1)</sup> sogenannte Vignettierung, da die Lichtausbeute durch Streulichtbelende, Adapter oder zu kleine Fangspiegel am Rand des Bildes kleiner ist als in der Mitte



Nachfolgend soll ein kurzer Überblick über die wichtigsten analogen Highspeed-Kameras gegeben werden:

- **Konventionelle Hochgeschwindigkeits-Filmkameras** basieren auf dem herkömmlichen Filmkameradesign. Das eingelegte Filmmmedium wird bei jeder einzelnen Belichtung gestoppt, wodurch diese Technik mit 500 [fps]<sup>1)</sup> beschränkt ist.
- **Drehprismenkameras** benutzen ein rotierendes Prisma, welches mit dem bewegten Film synchronisiert ist und so das Bild auf diesem ablichtet. Bei einer Beleuchtung mit kurzen Laserimpulsen wird das Prisma nicht benötigt, da die Pulsrate die Belichtungszeit bestimmt. Der Film benötigt ca. eine Sekunde, um die volle Geschwindigkeit zu erreichen, wobei anschließend typischerweise zwei Sekunden Aufnahmezeit zur Verfügung stehen. Mit dieser Technik können Videos mit 10.000 – 20.000 [fps] gedreht werden.
- **Trommelkameras** haben eine vakuumierte Kammer (Trommel), in der ein 35 [mm] Film mit einer Länge von rund 1 [m] am inneren Umfang eingelegt wird. Diese Trommel rotiert mit ca. 300 [U/s]. Währenddessen wird das Bild von der Linse auf den Film projiziert. Mit dieser Technik können Bildraten von bis zu 50.000 [fps] realisiert werden.
- **Drehspiegelkameras** erreichen Bildraten von bis zu 25.000.000 [fps] (Firma Cordin). Laser mit genügend Pulsenergie können jedoch mit derart hohen Geschwindigkeiten nicht mithalten

### 5.2.2 Digitale Highspeed-Kameras [20]

Aufgrund der Handhabung haben digitale Kamerasysteme in den letzten Jahren begonnen, den Highspeed-Sektor zu dominieren. Insbesondere die Fähigkeit der Datenspeicherung und der digitalen Nachbearbeitung machen diese Kameras interessant für jegliche Anwendung.

Verschiedene Techniken, auch in Kombination, kommen zum Einsatz und sollen näher erläutert werden:

- **CCD Sensoren** wandeln Licht in Elektronen um, die in Kondensatoren gespeichert werden. Als limitierender Faktor für Kameras dieser Bauart gilt die Auslesegeschwindigkeit der einzelnen Pixel.
- **CMOS Technologie** nutzt Fototransistoren anstatt Kondensatoren. CMOS Chips weisen eine geringere Lichtempfindlichkeit als CCD Technik auf, was jedoch mit integrierten Schaltkreisen und höherer Auslesegeschwindigkeit ausgeglichen werden kann.
- **On-chip Pixelspeicher** haben mehrere Pixelsätze auf dem gleichen Sensor. Ein Pixelsatz ist lichtempfindlich, während die anderen eine Lichtsperrung aufweisen. Nach jeder einzelnen Belichtung wird das Bild von den lichtempfindlichen auf die

---

<sup>1)</sup> [fps]... Frames per second (Bilder pro Sekunde)



nichtempfindlichen Pixel übertragen. Dieser Vorgang wird in der Zeit zwischen 200 [ns] und 1 [ $\mu$ s] bewerkstelligt und ermöglicht so hohe Bildraten.

- **Image-splitting** erfolgt mit Hilfe eines Strahlteilers, der das ankommende Bild auf 2 bis 8 eigenständige Sensoren aufspaltet. Diese Technik garantiert die schnellsten Aufnahmen von bis zu 100.000.000 [fps]. Als nachteilig erweisen sich dabei die extrem hohen Kosten sowie die eingeschränkte Bildspeicherung.

### 5.2.3 Wichtige Spezifikationen für Highspeed-Kameras

Die Auswahl der Highspeed-Kamera richtet sich vordergründig nach den finanziellen Möglichkeiten. Allerdings sollten einige Aspekte beachtet werden, um zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten:

- Geschwindigkeit des zu erfassenden Objektes
- Bildaufnahmegeschwindigkeit
- Auflösung (Pixel) in Abhängigkeit der Bildrate
- Anzahl der Bilder, die gespeichert werden können
- Pixelgröße am Sensor
- Lichtempfindlichkeit

Diese Aufzählung stellt nur die wichtigsten Kriterien dar. Weitere Funktionen wie z.B. Triggerfähigkeit usw. müssen individuell je nach Anwendung berücksichtigt werden. Die nötige Bildgeschwindigkeit der Kamera hängt von der Objektgeschwindigkeit (z.B. bei Zerstäubungsprozessen) ab und kann rasch mit Gleichung 19 aus Kapitel 4.3.4 abgeschätzt werden.

Zur Ermittlung der gewünschten Auflösung benötigt man ebenfalls die Objektgröße und die Pixelgröße des Sensors. Möchte man beispielsweise Wassertropfen mit 200 [ $\mu$ m] mit einem Abbildungsmaßstab 1:1 auf einem Bildsensor mit einer Pixelgröße von 20 [ $\mu$ m] ablichten, so erhält man ein Bild dieses Tropfens von 10x10 Pixel (würde der Tropfen rechteckig sein). Zu beachten ist, dass Hersteller primär die maximale Auflösung bei einer gewissen Bildrate angeben. Wird die Aufnahmegeschwindigkeit erhöht, verringern sich dementsprechend die Auflösung und der zu betrachtende Bildausschnitt.

Einen wichtigen Aspekt stellt auch die Lichtempfindlichkeit des eingebauten Sensors dar. Da die Belichtung des einzelnen Bildes mit der Bildrate stark abnimmt, ist es wichtig, Kameras mit hoher Empfindlichkeit auszuwählen und/oder dementsprechende Belichtungstechniken zu verwenden.

Tabelle 7 zeigt eine Auflistung von Highspeed-Kameras, wobei die meisten ein Vielfaches der angegebenen Geschwindigkeit bei reduzierter Auflösung erreichen.

Tabelle 7: Auflistung einiger Highspeed-Kameras inkl. wichtiger Spezifikationsdaten [20]

Kameratyp	Hersteller <sup>1)</sup>	Maximale Auflösung [Pixel]	Geschw. bei max. Auflösung [fps]	Anzahl der gespeicherten Bilder	Pixel pro Sekunde in Millionen
Highspeed CCD	Roper Motionscope (auch: NAC, Weinberger, Photon)	512 x 512	250	2048	65
Günstig - CMOS	Vosskuhler HCC 1000	1000 x 1000	462	512	462
Highspeed CMOS (Stand der Technik <sup>2)</sup> )	Vision Research Phantom 5 (auch: NAC, Roper, Photon)	1024 x 1024	1.000	4096	1.048
Highspeed CMOS (neue Generation <sup>2)</sup> )	Vision Research Phantom 7	800 x 600	6.000	8400	2.880
Analog, Trommelkamera	Cordin 317	2400 x 1800	13.500	52	58.000
2-Bild PIV-Kamera <sup>3)</sup> (on-chip Speicher)	PCO Sensicam (auch: Roper, Hammamatsu)	1280 x 1024	5.000.000	2	6.600.000
Split-image, Multisensor (mit on-chip Speicher)	Cordin 220 (auch: PCO, Hadland)	1300 x 1030	100.000.000	8	134.000.000

1) Keine Vollständigkeit; Hersteller nur als Beispiel genannt

2) Stand Oktober 2002

3) PIV ... Particle Image Velocimetry

Aufgrund des hohen Preises solcher Highspeed-Kamerasysteme ist eine vorausschauende Planung und Auswahl unumgänglich. Besonders schnelle Kameras haben den Nachteil, dass diese nur eine geringe Anzahl von Bildern speichern können. Für viele Anwendungen bilden auf CMOS-Chips basierende Systeme einen guten Kompromiss zwischen Geschwindigkeit, Auflösung und Bildspeicherung.

## 6 Auswahl der Komponenten für die Versuchs-durchführung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die benötigten Grundlagen sowie die einzelnen Komponenten zur Realisierung von Highspeed-Aufnahmen von Sprays erarbeitet. Abbildung 37 zeigt die Abhängigkeiten dieser Komponenten zueinander sowie wichtige Spezifikationen, die berücksichtigt werden müssen.

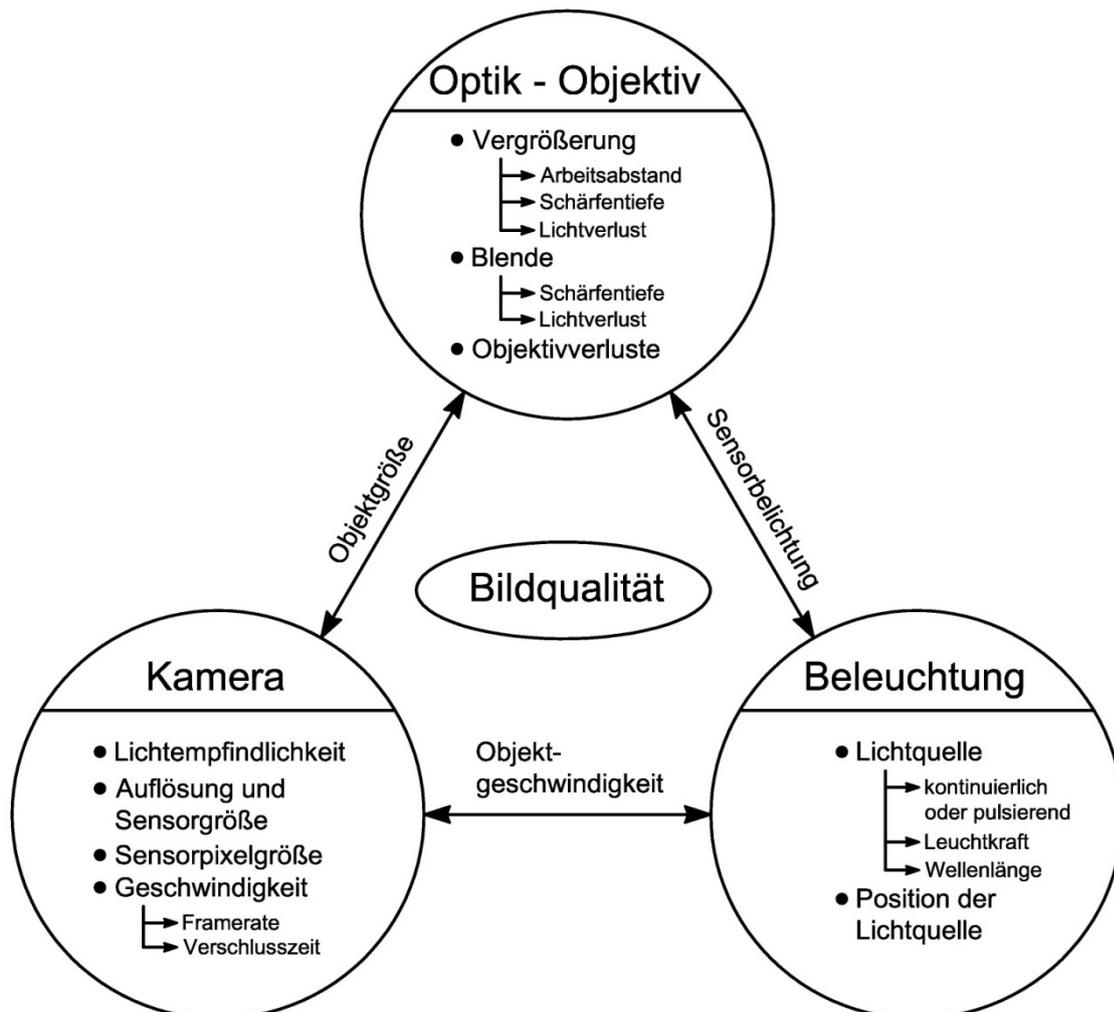


Abbildung 37: Abhängigkeit der Bildqualität von den einzelnen Komponenten

Die Wechselwirkungen zwischen Objektiv, Beleuchtung und der Kamera ergeben schließlich die Bildqualität. Die Objektgeschwindigkeit bestimmt maßgeblich die Auswahl der Kamera und der Beleuchtung. Hohe Partikelgeschwindigkeiten (z.B. bei der Zerstäubung von Wasser) erfordern kurze Verschlusszeiten (bei DSR-Kameras) bzw. hohe Frameraten (bei Videokameras) sowie eine große Leuchtkraft der Lichtquelle, um in kürzester Zeit den Sensor ausreichend zu belichten. Bei der Wahl eines Lasers muss die Wellenlänge auf die Sensorempfindlichkeit des Chips abgestimmt werden. Ebenso ist es unabdinglich, Lichtverluste aufgrund der Optik mit der Wahl der richtigen Lichtquelle zu kompensieren. Besonders Makro- oder Mikroaufnahmen benötigen eine lichtintensive Optik. Nachfolgend sollen die einzelnen Komponenten für den Versuchsaufbau erläutert und spezifiziert werden.

## 6.1 Objektiv

Ein wesentliches Entscheidungskriterium bei der Wahl des Objektivs ist die gewünschte Vergrößerung. Bei der Aufnahme von Sprays erweisen sich Objektive mit großer Brennweite als vorteilhaft, da diese größere Arbeitsabstände bei guter Vergrößerung erlauben, wodurch allerdings der Schärfentiefebereich leidet.

Für die einzelnen Versuche wurde ein TAMRON SP AF 180 F/3.5 MAKRO herangezogen (siehe Abbildung 38).



Abbildung 38: Tamron SP AF 180 F3.5

Tabelle 8 enthält die wichtigsten Spezifikationsdaten für das ausgewählte Objektiv.

Tabelle 8: Spezifikationsdaten des Objektivs [29]

Spezifikation - Tamron SP AF 180mm F3,5	
Brennweite	180 [mm]
Max. Abbildungsmaßstab	1:1
Kürzeste Einstellungsentfernung	0,47 [m]
Kleinste Blende	32
Lichtstärke <sup>1)</sup>	3,5

1) Bezeichnet die max. Blendenöffnung

Aufgrund der Einstellungsentfernung, des Abbildungsmaßstabes und der Lichtstärke eignet sich dieses Objektiv einigermaßen für die Aufnahme von Wassersprays.

Zusätzlich zum Makroobjektiv wurden bei manchen Aufnahmen Zwischenringe als Auszugsverlängerung mit einer Gesamtlänge von 136 [mm] eingesetzt. Somit konnte der Abbildungsmaßstab von 1:1 auf ca. 2:1 verbessert werden (bei dementsprechendem Lichtverlust). Der Vorteil dieser Zwischenringe ist die Fähigkeit, elektronische Daten (z.B. für Autofokus) an das Kameragehäuse weiterzuleiten.

## 6.2 Belichtungssystem

Besonders bei Highspeed-Aufnahmen im Makrobereich werden außergewöhnlich hohe Anforderungen an die Belichtungstechnik gestellt. Aus diesem Grund kommt bei den Versuchsreihen ein Argon-Ionenlaser der Firma Ion Laser Technology (siehe Abbildung 39) zum Einsatz.

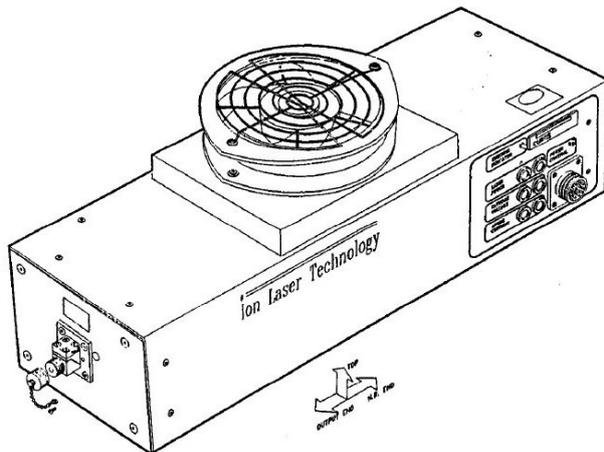


Abbildung 39: ILT 5500A Ar<sup>+</sup>-Laser

In Tabelle 9 sind die wichtigsten Spezifikationsdaten für den ILT 5500A zusammengefasst.

Tabelle 9: Spezifikationsdaten des ILT 5500A [30]

Spezifikation - ILT 5500A	
Ausgangsleistung	500 [mW]
Wellenlänge	457 - 514 [nm]
Laserstrahlabweichung	0,95 [mrad]
Laserstrahldurchmesser	0,82 [mm]
Betriebsweise	kontinuierlich (CW)

Der Vorteil dieses kontinuierlichen Lasers liegt in der Wellenlänge des emittierten Lichtes, da diese genau im größten Empfindlichkeitsbereich von CMOS-Chipsensoren liegt. Aufgrund dieser Tatsache und der hohen Ausgangsleistung verfügt der Ar<sup>+</sup>-Laser über gute Voraussetzungen, um eine ausreichende Belichtung des Bildsensors bei Highspeed-Aufnahmen zu gewährleisten. Die Entfernung des Gerätes zum Aufnahmeobjekt spielt bei der Lasertechnik keine wesentliche Rolle (wegen der äußerst geringen Strahlaufweitung), was die Handhabung beim Versuchsaufbau deutlich vereinfacht. Der Nachteil dieses Systems besteht darin, dass es nicht möglich ist, den Ar<sup>+</sup>-Laser im Pulsbetrieb zu verwenden, jedoch kann dies durch eine sehr schnelle Highspeed-Kamera ausgeglichen werden.

Beim Betrieb eines Lasers ist besonders auf die persönliche Schutzausrüstung zu achten, so ist es unumgänglich während der Handhabung spezielle Laserschutzbrillen zu tragen, welche die Wellenlänge des Laserstrahls filtern.

### 6.3 Kamerasystem

Bei den Versuchen kommen zwei verschiedene Systeme zur Anwendung: Zuerst werden Aufnahmen mit einer DSR-Kamera gemacht, um die Fähigkeit des Beleuchtungssystems zu testen und ein Gefühl für Licht und Optik zu bekommen. Im zweiten Teil der Versuche kommt eine Highspeed-Videokamera zur Anwendung, um die Zerstäubungsvorgänge räumlich und zeitlich erfassen zu können.

#### 6.3.1 DSR-Kamera

Im ersten Teil der Versuche wird eine Nikon D90 Kamera verwendet (siehe Abbildung 40). Mit einer hohen ISO-Empfindlichkeit erfüllt diese digitale Spiegelreflexkamera die gewünschte Anforderung. Natürlich ist auch die Kompatibilität bezüglich Datenübertragung und Autofokus mit dem Tamron Makroobjektiv gegeben.



Abbildung 40: Nikon D90 Gehäuse (ohne Objektiv)

Tabelle 10 enthält die wichtigsten Spezifikationsdaten für die ausgewählte DSR-Kamera.

Tabelle 10: Spezifikationsdaten der DSR-Kamera [31]

Spezifikation - Nikon D90	
Sensortyp	CMOS
Sensorformat	23,6 x 15,8 [mm]
Effektive Auflösung	12,3 Millionen Pixel
Maximale Bildgröße	4.288 x 2.848 Pixel
Verschlusszeiten	1/4.000 [s] - 30 [s]
ISO-Empfindlichkeit	bis ISO 6400

Im Folgenden soll nun am Beispiel der Nikon D90 untersucht werden, inwieweit es möglich ist mit einer DSR-Kamera einen Tropfen mit einem Durchmesser von 100 [µm] bei einer ungefähren Geschwindigkeit von 10 [m/s], abzubilden:

In Verbindung mit dem Tamron Objektiv wird ein Abbildungsmaßstab von 1:1 am Bildsensor erreicht. Daher wird ein Wassertropfen mit seiner tatsächlichen Größe am Chip abgebildet. Aus dem Sensorformat von 23,6 x 15,8 [mm] und einer effektiven Auflösung von 4.288 x 2.848 Pixeln resultiert eine Sensorpixelgröße von rund 5,5 [µm] (siehe Abbildung 41).

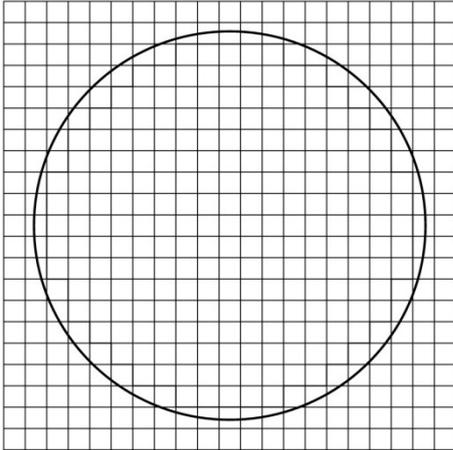


Abbildung 41: Pixelabbildung eines idealen Wassertropfens am D90-Sensor

Bei einem perfekten Standbild erhält man so eine Aufnahme mit ungefähr 220 Pixeln im Bereich des Wassertropfens. Möchte man noch kleinere Tropfen im Bereich von z.B. 5 [µm] betrachten, wird sofort klar, dass mit einem 1:1 Makroobjektiv kein Auslangen gefunden werden kann. Solche Tropfen würden gerade noch mit einem Pixel dargestellt. Um bei solch kleinen Objekten dieselbe Auflösung zu erhalten, müssen Mikroskop-Objektive mit ca. 20facher Vergrößerung (entspricht einem Abbildungsmaßstab von 20:1) verwendet werden.

Um die Verschlusszeit der Kamera zu bewerten, kann Gleichung 17 [20] aus Kapitel 4.3.4 herangezogen werden:

$$t \leq \frac{d}{10 * v}$$

Folglich würde theoretisch bei einem Tropfendurchmesser von 100 [µm] bei einer Geschwindigkeit von 10 [m/s] eine Belichtungszeit von 1/1.000.000 [s] benötigt. Das ist um den Faktor 250 kürzer als der Auslöser der Kamera ermöglicht. Somit wird verdeutlicht, dass mit handelsüblichen DSR-Kameras keine qualitativ hochwertigen Highspeed-Aufnahmen gemacht werden können.

### 6.3.2 Highspeed-Kamera

Für die Erstellung der Highspeed-Videos im zweiten Versuchsteil wird eine Photron Fastcam SA 1.1 (Abbildung 42) verwendet. Diese mit einem CMOS-Chip versehene Kamera ist in die

mittlere Klasse der zur Verfügung stehenden Highspeed-Kameras einzuordnen (siehe Tabelle 8 in Kapitel 5).



Abbildung 42: Photron Fastcam SA1.1

Ebenso wie bei der Nikon D90 kann das Tamron Makroobjektiv auf diese Kamera montiert werden. Zu beachten ist jedoch, dass die Funktionen wie Autofokus oder Autoblende nicht mehr übertragen werden und daher mit der Hand zu justieren sind.

Tabelle 11 enthält die wichtigsten Spezifikationsdaten für die ausgewählte Highspeed-Kamera.

Tabelle 11: Spezifikationsdaten der Photron Fastcam SA1.1

Spezifikation - Photron Fastcam SA1.1	
Sensortyp	CMOS
Pixelgröße am Sensor	20 [µm]
Maximale Auflösug <sup>1)</sup>	1.024 x 1.024 Pixel
Minimale Verschlusszeit	1 [µs]
Bildrate	bis 675.000 [fps]
ISO-Empfindlichkeit	ISO 6400 (monochrom)

1) bis 5.400 [fps]

Wie bereits erwähnt, ist die maximale Auflösung stark von der Bildwiederholrate abhängig und verringert sich dementsprechend bei steigender Aufnahmegeschwindigkeit. Die Fastcam SA1.1 erreicht die volle Auflösung bis 5.400 [fps]. Tabelle 12 gibt einen Überblick der Auflösung in Abhängigkeit der Bildrate. Ebenso wird die tatsächliche Bildgröße am Sensor angegeben, um ein Gefühl für den Bildausschnitt zu erhalten. Da der Abbildungsmaßstab mit der gewählten Optik bei 1:1 (ohne Zwischenringe) liegt, ist die Sensorgröße gleichsam auch als Ausschnitt in natura zu betrachten.

Tabelle 12: Maximale Auflösung inklusive Bildgröße in Abhängigkeit der Bildrate

Framerate	Maximale Auflösung		Bildgröße am Sensor	
	Horizontal	Vertikal	Horizontal	Vertikal
[fps]	[Pixel]	[Pixel]	[mm]	[mm]
1.000	1.024	1.024	20,48	20,48
10.000	768	768	15,36	15,36
12.000	768	640	15,36	12,80
15.000	768	512	15,36	10,24
30.000	512	352	10,24	7,04
54.000	320	256	6,40	5,12
100.000	320	128	6,40	2,56
180.000	128	128	2,56	2,56
250.000	128	80	2,56	1,60

Tabelle 12 zeigt deutlich die Grenzen der Highspeed-Kamera in Bezug auf die maximale Auflösung in Pixel bei Erhöhung der Bildrate pro Sekunde. Während eine Aufnahme mit 1.000 Bildern pro Sekunde 1024x1024 Bildpunkte enthält und das volle Sensorformat zur Verfügung steht, erhält man beispielweise bei 54.000 Bildern pro Sekunde nur mehr eine Auflösung von 320x128 Pixel, was einem Bild von 6,40x5,12 [mm] am Bildsensor entspricht.

Wie bereits im Versuch mit der DSR-Kamera soll die Auflösung eines Tropfens mit 100 [µm] graphisch dargestellt werden (siehe Abbildung 43). Die Sensorpixelgröße ist bei der Fastcam, wie aus der Spezifikationstabelle ersichtlich, mit 20 [µm] angegeben.

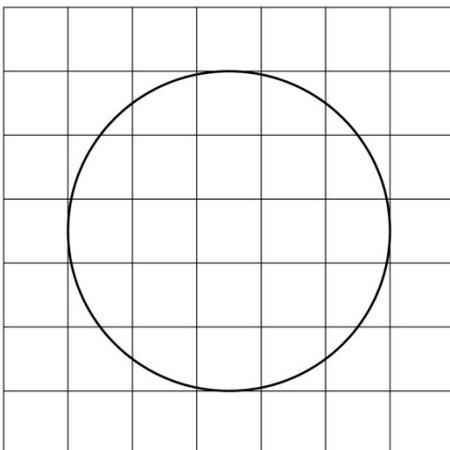


Abbildung 43: Pixelabbildung eines idealen Wassertropfens am Fastcam SA1.1-Sensor

Betrachtet man Abbildung 43, so erkennt man, dass bei der Highspeed-Kamera nur mehr 13 volle Pixel zur Verfügung stehen (Abbildungsmaßstab 1:1 vorausgesetzt). Somit müsste die Optik mindestens einen Abbildungsmaßstab von rund 4:1 ermöglichen, um dieselbe

Auflösung wie bei der Nikon D90 zu erhalten. Die großen Pixel am Sensor sind nötig, um eine hohe Lichtempfindlichkeit zu erreichen, die bei Kameras dieser Art eine wesentliche Rolle spielt. Zum Ausgleich schafft die Highspeed-Kamera jedoch die Verschlusszeit von 1  $[\mu\text{s}]$  und ermöglicht so gute Aufnahmen von schnell ablaufenden Prozessen wie der Zerstäubung von Wasser (sehr gute Belichtung vorausgesetzt).

## 7 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführungen gliedern sich prinzipiell in zwei Teile. Der erste Teil beinhaltet die Vorversuche mit der Nikon D90 Kamera und dient zum einen dazu, ein Gefühl zwischen Lichtempfindlichkeit, Blende und Verschlusszeit zu erhalten. Zum anderen soll die Beleuchtung getestet werden, um die Eignung dieses Systems für die Highspeed-Anwendung unter Beweis zu stellen. Der zweite und wichtigste Teil beschäftigt sich mit dem eigentlichen Versuch unter Verwendung der Highspeed-Videokamera. Theoretische Grundlagen zur Zerstäubungskinetik werden erörtert und mit den visuellen Ergebnissen verglichen.

### 7.1 Versuche mit der Nikon D90

#### 7.1.1 Versuch 1

Der erste Versuch dient einerseits dazu, sich mit der Kamera vertraut zu machen, andererseits einen Fotovergleich bei verschiedenen Verschlusszeiten und Sensorempfindlichkeiten zu erlangen. Des Weiteren soll auch der Abbildungsmaßstab der Bilder mit dem Makroobjektiv und zusätzlichen Zwischenringen ermittelt werden. Ebenso ist der Lichtverlust durch Zwischenringe bzw. sehr kurze Verschlusszeiten von Interesse. Bei allen Aufnahmen wird die Kamera auf manuelle Bedienung eingestellt, um die Werte für die ISO-Empfindlichkeit, Blende und Verschlusszeit frei wählen zu können.

Alle Bilder werden mit der Nikon D90 Kamera und dem Tamron SP AF 180 F3.5 Makroobjektiv fotografiert (Spezifikation siehe Kapitel 6)

#### Ermittlung des Abbildungsmaßstabes

Um den Abbildungsmaßstab zu ermitteln, benötigt man die Größe des Bildsensors sowie eine Referenzgröße am Bild selbst. Hierzu wird eine Schieblehre verwendet, die durch ihre feine Skaleneinteilung eine relativ genaue Ermittlung des Abbildungsmaßstabes erlaubt (siehe Abbildung 44).

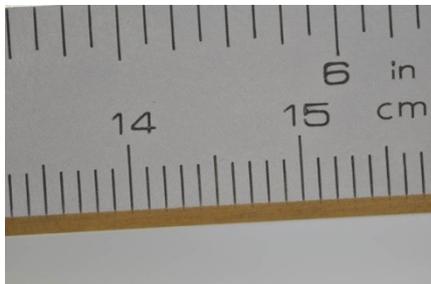


Abbildung 44: Aufnahme zur Ermittlung des Abbildungsmaßstabes

Tabelle 13: Aufnahmebedingungen für Abbildung 44

ISO-Empfindlichkeit	ISO 200
Verschlusszeit	1/10 [s]
Blende	5,6
freier Arbeitsabstand	26 [cm]

Am Bild befinden sich ca. 2,5 [cm] der Schieblehre, wobei der Bildsensor eine Länge von 2,36 [cm] aufweist. Verwendet man Gleichung 1 aus Kapitel 2.2.1 lässt sich mit diesen Abmessungen der Abbildungsmaßstab wie folgt ermitteln:

$$\beta = \frac{B}{G} = \frac{2,36}{2,5} = \frac{1}{1,06} = 0,94$$

Der errechnete Maßstab (1:1,06) entspricht in etwa der maximalen Vergrößerung des Makroobjektivs (1:1)

### Ermittlung des Abbildungsmaßstabs mit Zwischenringen

Es soll nun der Unterschied zwischen einer Makroaufnahme unter Verwendung einer Auszugsverlängerung (Zwischenringe - ZR) und ohne dieser dargestellt werden.

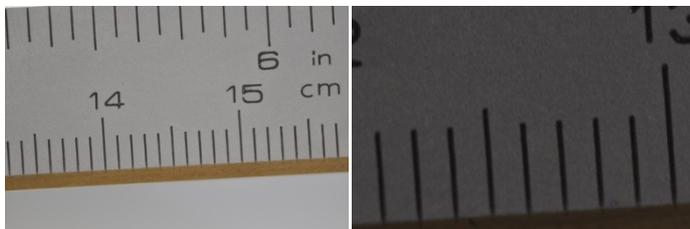


Abbildung 45: Bild links: ohne ZR; Bild rechts: mit 136 [mm] ZR

Tabelle 14: Aufnahmebedingungen für Abbildung 45

	Bild links	Bild rechts
ISO-Empfindlichkeit	ISO 200	ISO 200
Verschlusszeit	1/10 [s]	1/10 [s]
Blende	5,6	5,6
freier Arbeitsabstand	26 [cm]	19 [cm]
Abbildungsmaßstab	1:1,06	2,36:1

Betrachtet man Abbildung 45, zeigt sich deutlich eine Vergrößerung um das 2,4 fache mit dem einhergehenden Belichtungsverlust bei gleichbleibender ISO-Empfindlichkeit. Um

diesen Lichtverlust auszugleichen, muss die Kameraempfindlichkeit erhöht werden. Dies ist sichtbar in Abbildung 46.

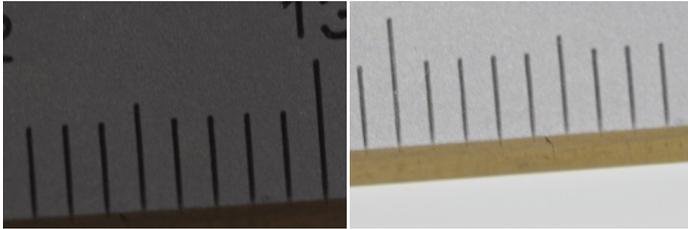


Abbildung 46: Aufnahmen bei unterschiedlicher ISO-Empfindlichkeit

Tabelle 15: Aufnahmebedingungen für Abbildung 46

	Bild links	Bild rechts
ISO-Empfindlichkeit	ISO 200	ISO 1600
Verschlusszeit	1/10 [s]	1/10 [s]
Blende	5,6	5,6
freier Arbeitsabstand	19 [cm]	19 [cm]
Abbildungsmaßstab	2,36:1	2,36

Allerdings zeigt der Vergleich in Abbildung 46, dass eine deutliche Erhöhung der ISO-Empfindlichkeit nötig ist, um 136 mm Zwischenringe belichtungstechnisch auszugleichen. Somit wird es schwierig mit sehr kurzen Verschlusszeiten bei solchen Verhältnissen zu arbeiten.

### **Bildhelligkeit in Abhängigkeit von ISO-Empfindlichkeit und Verschlusszeit**

Die folgenden Fotos, die bei Tageslicht (Labor) mit dem Makroobjektiv (ohne Auszugsverlängerung) mit unterschiedlichen Verschlusszeiten und ISO-Empfindlichkeiten aufgenommen wurden, verdeutlichen den Unterschied in der Bildhelligkeit verdeutlichen. Der freie Arbeitsabstand betrug bei allen Aufnahmen ca. 26 [cm] und die Blende F/5.6.



Abbildung 47: ISO 200 Aufnahmen bei unterschiedlicher Verschlusszeit

Tabelle 16: Aufnahmebedingungen für Abbildung 47

	Bild links	Bild rechts
ISO-Empfindlichkeit	ISO 200	ISO 200
Verschlusszeit	1/10 [s]	1/100 [s]
Blende	5,6	5,6
freier Arbeitsabstand	26 [cm]	26 [cm]

Während bei einer Verschlusszeit von 1/10 [s] (Bild links) eine gut belichtete Abbildung entsteht, zeigt sich bei 1/100 [s] (Bild rechts) eine deutliche Unterbelichtung.

Abbildung 48 zeigt eine Bildserie bei maximaler ISO-Empfindlichkeit der Kamera von ISO 6400 mit den Verschlusszeiten (von links nach rechts) 1/800 [s], 1/1600 [s] sowie 1/3200 [s].

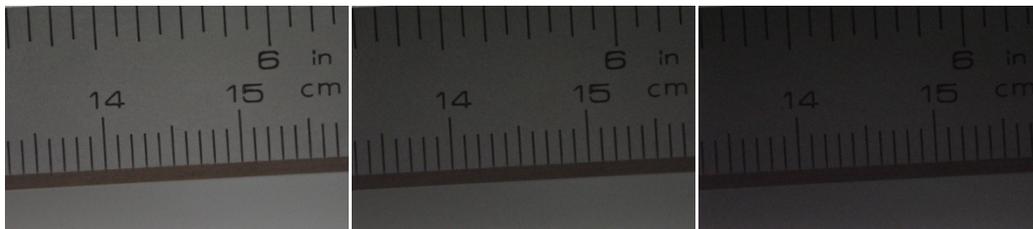


Abbildung 48: ISO 6400 Aufnahmen bei unterschiedlicher Verschlusszeit

Tabelle 17: Aufnahmebedingungen für Abbildung 48

	Bild links	Bild Mitte	Bild rechts
ISO-Empfindlichkeit	ISO 6400	ISO 6400	ISO 6400
Verschlusszeit	1/800 [s]	1/1600 [s]	1/3200 [s]
Blende	5,6	5,6	5,6
freier Arbeitsabstand	26 [cm]	26 [cm]	26 [cm]

Als Faustregel gilt, dass bei Verdoppelung der ISO-Empfindlichkeit die Belichtungszeit um den Faktor 2 verkürzt werden kann, um dieselbe Bildhelligkeit zu erlangen. Aber wie in den vorangehenden Artikeln besprochen, trägt nicht nur die Verschlusszeit negativ zur Belichtung bei, diese wird auch wesentlich von der Objektivblende beeinflusst.

### **Einfluss der Blende auf die Bildhelligkeit**

Die Blende regelt den Lichtdurchlass einer Kamera. Je größer die Blendenzahl, desto größer ist die Schärfentiefe, aber es fällt auch weniger Licht auf den Bildsensor. Die folgenden Aufnahmen in Abbildung 49 sollen den Einfluss der Blende auf die Bildhelligkeit darstellen. Alle Aufnahmen erfolgten bei Tageslicht (Labor) mit einem ISO-Wert von 200 und einer

Verschlusszeit von  $1/10$  [s], wobei die Blende (Bild von links nach rechts) zuerst auf 5,6, 10 und schließlich auf 16 eingestellt wurde.



Abbildung 49: Aufnahmen bei unterschiedlicher Blendenzahl

Tabelle 18: Aufnahmebedingungen für Abbildung 49

	Bild links	Bild Mitte	Bild rechts
ISO-Empfindlichkeit	ISO 200	ISO 200	ISO 200
Verschlusszeit	$1/10$ [s]	$1/10$ [s]	$1/10$ [s]
Blende	5,6	10	16
freier Arbeitsabstand	26 [cm]	26 [cm]	26 [c16m]

Wird Abbildung 49 betrachtet, erkennt man eine mehr oder weniger starke Unterbelichtung des fotografischen Bildes aufgrund der Verengung der Blende.

### **Einfluss einer direkten Objektbelichtung auf die Bildhelligkeit**

Folgende Aufnahmereihen (siehe Abbildung 50) zeigen das Motiv bei einer Blende von 5,6.



Abbildung 50: Aufnahmen bei direkter Motivbeleuchtung (Mitte und rechts)

Tabelle 19: Aufnahmebedingungen für Abbildung 50

	Bild links	Bild Mitte	Bild rechts
ISO-Empfindlichkeit	ISO 6400	ISO 6400	ISO 200
Verschlusszeit	$1/4000$ [s]	$1/4000$ [s]	$1/4000$ [s]
Blende	5,6	5,6	5,6
freier Arbeitsabstand	26 [cm]	26 [cm]	26 [cm]

Das Bild links entstand bei einer Verschlusszeit von  $1/4000$  [s] und einer ISO-Empfindlichkeit von ISO 6400. Trotz der hohen Empfindlichkeit ist dieses Bild stark unterbelichtet. Wird das Motiv jedoch mit einer Taschenlampe beleuchtet (Bild Mitte), so kann man schon von einer leichten Überbelichtung sprechen. Schlussendlich lässt sogar das rechte Bild, das bei extremen Kameraeinstellungen mit einer ISO-Empfindlichkeit von ISO 200 und der maximalen Verschlusszeit der Kamera von  $1/4000$  [s] entstand und mit einer handelsüblichen Taschenlampe ausgeleuchtet wurde, Details erkennen.

Folglich können mit Hilfe eines Lichteintrags auch Aufnahmen mit kurzer Verschlusszeit und niedriger ISO-Empfindlichkeit realisiert werden.

### 7.1.2 Versuch 2

Versuch zwei soll nun die Eignung eines Lasers (siehe Spezifikation Kapitel 6) zu Belichtungszwecken unter Beweis stellen. Alle Aufnahmen wurden mit der Nikon D90, dem Tamron Makroobjektiv und dem Ar<sup>+</sup>-Laser der Firma Ion-Laser-Technology produziert.

#### Versuchsanordnung A

Bei der ersten Versuchsanordnung (siehe Abbildung 51 und 52) wird die Strahlrichtung des Ar<sup>+</sup>-Lasers senkrecht zur Sprayrichtung geführt. Der Strahl wird fotografiert. Über ein Sprührohr wird der Spray (Luft/Wasser) mit Hilfe eines Ventilators abgesaugt. Die Abtrennung des Wassers von der Luft erfolgt über einen Wasserabscheider. Anschließend werden die aufgetrennten Spraykomponenten Wasser und Luft ins Freie geführt. Die Bereitstellung der Druckluft erfolgt mittels eines Kompressors.

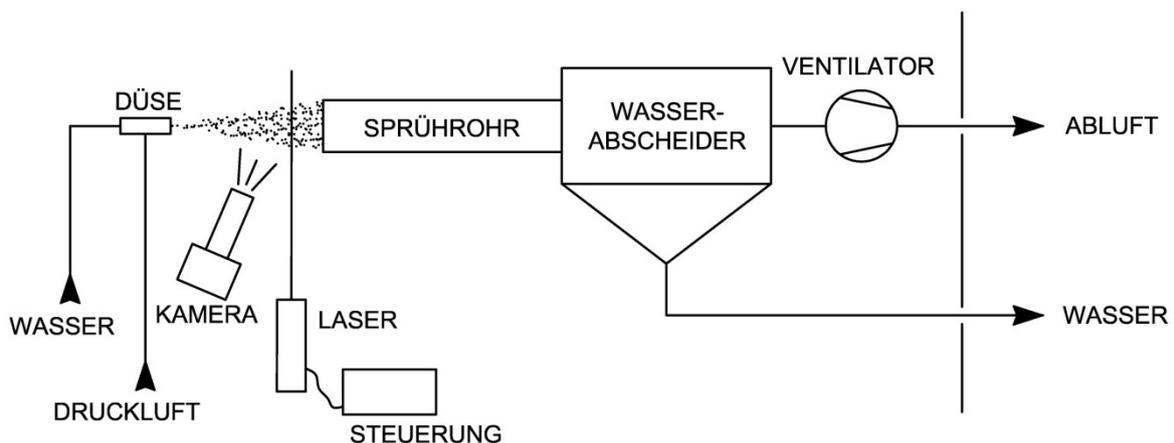


Abbildung 51: Versuchsaufbau A; Nikon D90 (Ansicht von oben)

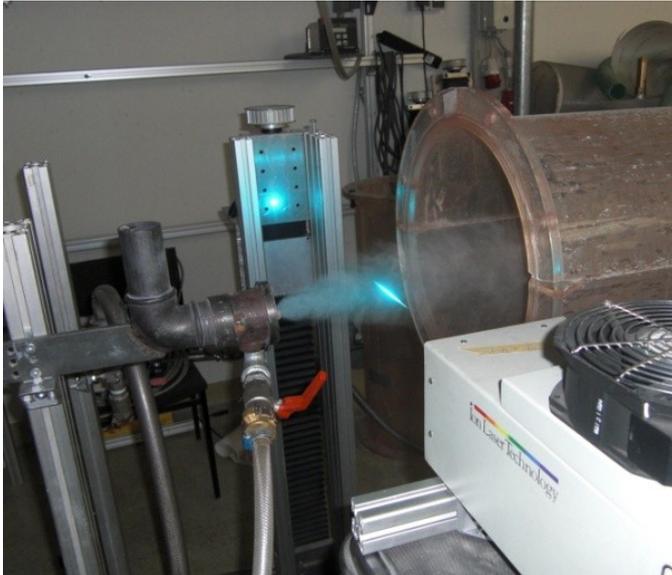


Abbildung 52: Laserstrahlführung im Spray

Die Kamera wird auf den Laserstrahl im Spray gerichtet und fokussiert. Der freie Arbeitsabstand zwischen der Frontlinse des Makros und der aufgenommenen Partikel beträgt bei allen Fotos ca. 26 [cm]. Wichtig beim Umgang mit Laserstrahlen ist das Tragen einer speziellen Schutzbrille, welche die emittierte Wellenlänge herausfiltert. Bei einer ISO-Empfindlichkeit von ISO 6400, einer Blende von 4,5 und einer Verschlusszeit von 1/4000 [s] konnte Abbildung 53 fotografiert werden.

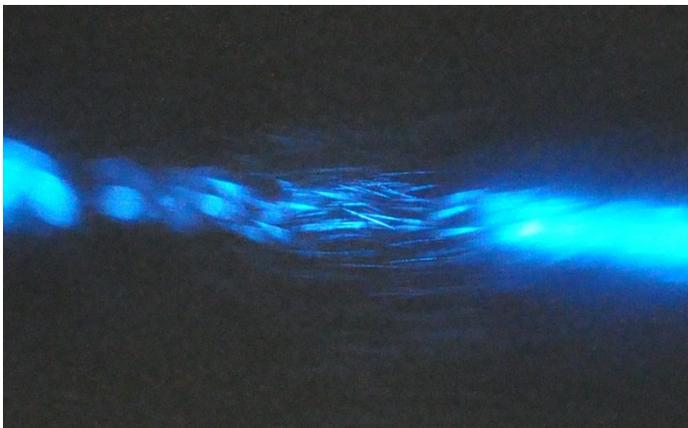


Abbildung 53: Aufnahme von im Flug befindlichen Tropfen mit einem Laserstrahl belichtet

Tabelle 20: Aufnahmebedingungen für Abbildung 53

ISO-Empfindlichkeit	ISO 6400
Verschlusszeit	1/4000 [s]
Blende	4,5
freier Arbeitsabstand	26 [cm]

Aufgrund der Makroaufnahme mit weit geöffneter Blende ist der schmale Schärfentiefenbereich in der Mitte des Bildes deutlich zu erkennen.

### Versuchsanordnung B

Prinzipiell entspricht die zweite Versuchsanordnung jener der ersten, jedoch wird die Laserstrahlführung so verändert, dass diese genau auf den Düsenauslass zielt. Ebenso fokussiert die Kamera genau auf den belichteten Auslass (siehe Abbildung 54).

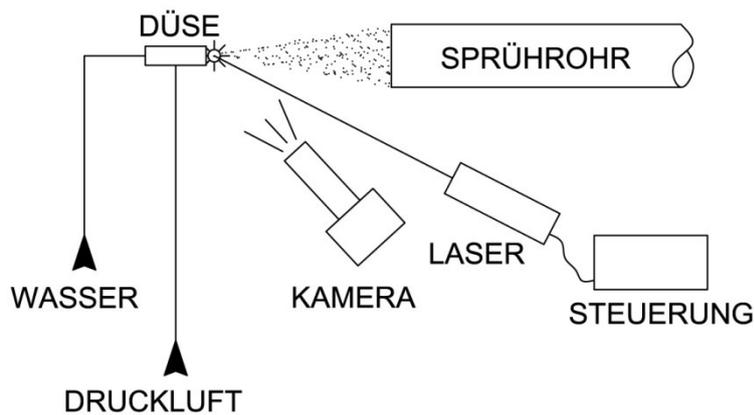


Abbildung 54: Versuchsanordnung B; Nikon D90 (Ansicht von oben)

Bei dieser Laserstrahlanordnung wird zuerst nur mit Wasser ohne Zerstäubungsluft gearbeitet, wobei die Kamera auf ISO 200 gestellt wird. Abbildung 55 zeigt eine Aufnahme dieser Düse bei einer Blende von 5,6 und einer Verschlusszeit von 1/4000 [s]

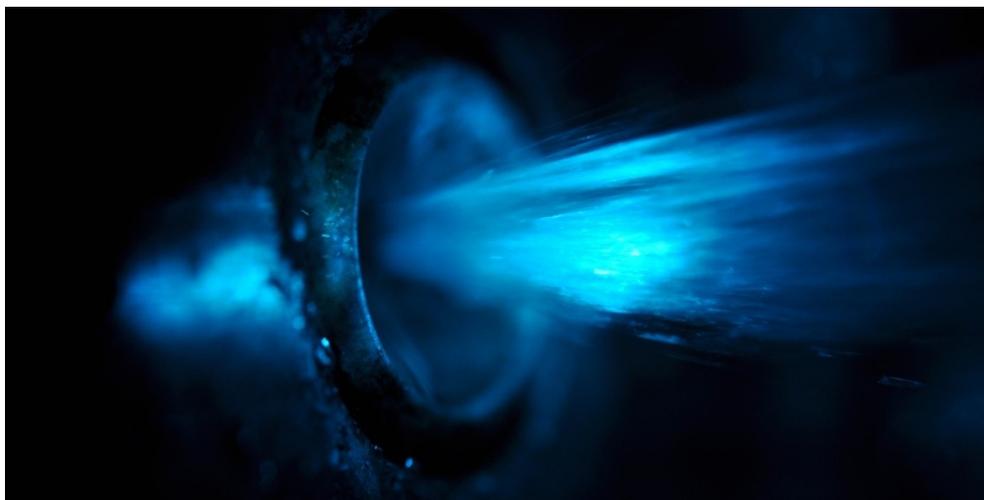


Abbildung 55: Aufnahme der Düse ohne Zerstäubungsluft

Tabelle 21: Aufnahmebedingungen für Abbildung 55

ISO-Empfindlichkeit	ISO 200
Verschlusszeit	1/4000 [s]
Blende	5,6
freier Arbeitsabstand	26 [cm]

Anhand Abbildung 55 erkennt man, dass trotz schwacher Sensorempfindlichkeit und maximaler Verschlusszeit (1/4000 [s]) gut belichtete Fotos entstehen konnten.

Als nächster Schritt erfolgt die Verdüsung des Wassers mit Luft, wobei auch die Blende immer weiter geschlossen wird um die technischen Grenzen der Kamera herauszufinden.

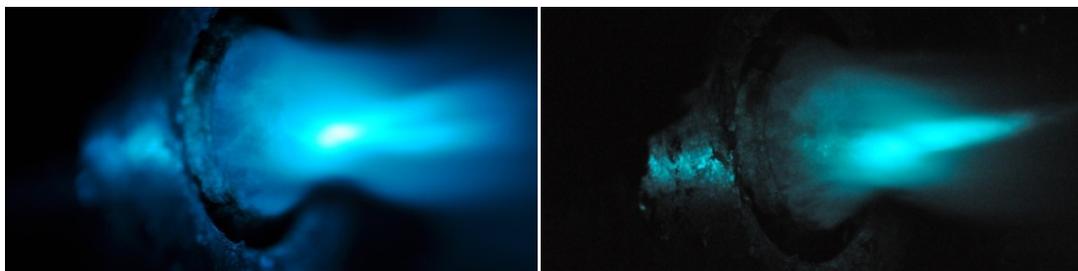


Abbildung 56: Aufnahme der Düse mit Zerstäubungsluft bei unterschiedlicher Blende

Tabelle 22: Aufnahmebedingungen für Abbildung 56

	Bild links	Bild rechts
ISO-Empfindlichkeit	ISO 200	ISO 6400
Verschlusszeit	1/4000 [s]	1/4000 [s]
Blende	5,3	51
freier Arbeitsabstand	26 [cm]	26 [cm]

Die Aufnahmen in Abbildung 56 zeigen, dass beim Schließen der Blende bis F/51 eine ausreichende Belichtung des Sensors vom Laser gewährleistet werden kann (bei maximaler ISO-Empfindlichkeit). Aufgrund der feinen Tropfenbildung und der zu hohen Geschwindigkeit (für die Nikon D90) durch die Zerstäubungsluft, lassen sich keine Details des Sprays erkennen.

Beim Fotografieren der Abbildungen 55 und 56 wurde immer außerhalb des hellsten Punktes im Bild fokussiert. Folgende Aufnahme zielt genau auf den lichtintensivsten Teil der Aufnahmeszene (siehe Abbildung 57).

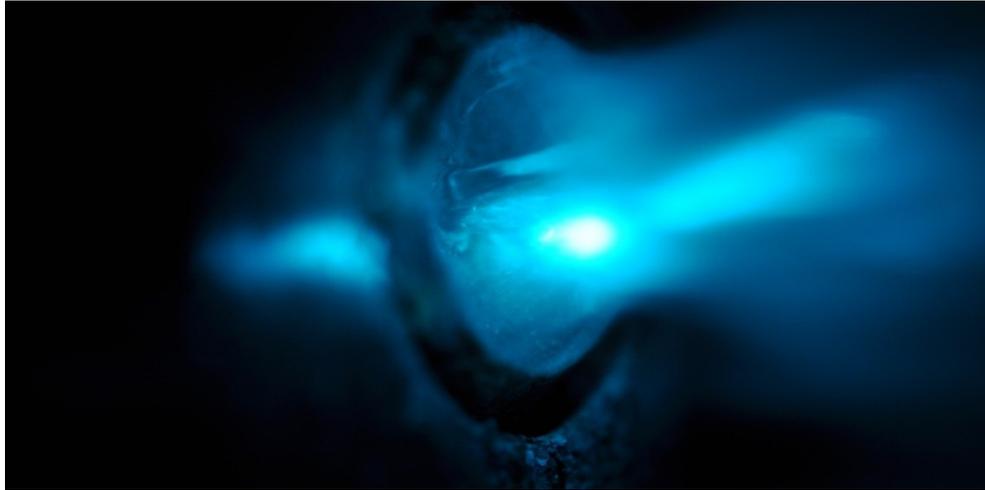


Abbildung 57: Düse mit Zerstäubungsluft; direkte Fokussierung auf den hellsten Bereich

Tabelle 23: Aufnahmebedingungen für Abbildung 58

ISO-Empfindlichkeit	ISO 200
Verschlusszeit	1/4000 [s]
Blende	5,6
freier Arbeitsabstand	26 [cm]

In Abbildung 57 können bereits Details am Düsenaustritt erkannt werden. Bei einer Einstellung der ISO-Empfindlichkeit von ISO 200 und bei maximaler Verschlusszeit erhält man trotz der extremen Aufnahmebedingungen gut belichtete Fotos.

### Versuchsanordnung C

Als dritte Versuchsanordnung soll die Kamera senkrecht zur Strahlrichtung aufgestellt werden, wobei der Laserstrahl wiederum direkt auf die Düsenöffnung gerichtet ist (siehe Abbildung 58 und 59).

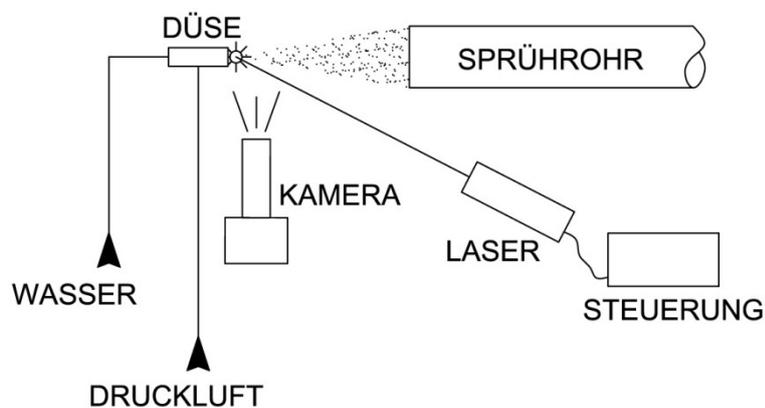


Abbildung 58: Versuchsanordnung C; Nikon D90 (Ansicht von oben)



Abbildung 59: Versuchsanordnung C

Wie aus Abbildung 60 ist, können mit dieser Versuchskonfiguration bei ISO 200 und maximaler Verschlusszeit auch ohne Spiegelung des Laserstrahls an der Düse gut belichtete Aufnahmen entstehen.



Abbildung 60: Partikel unmittelbar nach der Düse mit Laserstrahl belichtet

Tabelle 24: Aufnahmebedingungen für Abbildung 60

ISO-Empfindlichkeit	ISO 200
Verschlusszeit	1/4000 [s]
Blende	9
freier Arbeitsabstand	26 [cm]

In Abbildung 60 sind die einzelnen Partikel, die kurz nach der Düse von der Kamera erfasst werden, deutlich erkennbar. Aufgrund der zu geringen Verschlusszeit werden die einzelnen Tropfen als Linie abgebildet. Obwohl die Belichtung durch den Laserstrahl nur indirekt (ohne Reflexion an der Düse) erfolgt, können qualitativ gute Aufnahmen auch bei einer geringen ISO-Empfindlichkeit von ISO 200 und einer Blende von F/9 gemacht werden.

### 7.1.3 Interpretation der Ergebnisse

Betrachtet man die einzelnen Fotos aus Kapitel 7.1.2 in Kombination mit den Aufnahmeparametern, kommt man hinsichtlich des Highspeed-Versuches mit der Photron Fastcam zu folgendem Schluss:

Die Hochgeschwindigkeitskamera Photron SA1.1 hat eine maximale Sensorempfindlichkeit von 6400 ASA (monochrom). Dieser Wert entspricht der 32fachen Belichtung des Sensors von ISO 200, wie sie bei den meisten Versuchen vorherrschte. Das bedeutet, dass Aufnahmen der gleichen Qualität (monochrom) auch mit einer um den Faktor 32 verkürzten Belichtungszeit aufgenommen werden können (entspricht 128000 Bilder/Sek.). Somit entspricht der Laser als Belichtungssystem den Anforderungen für die Highspeed-Videoaufnahme.

#### Abschätzen der Tropfengeschwindigkeit im Spray

Kennt man die tatsächliche Bildgröße einer Aufnahme, so kann man aufgrund der belichteten Tropfen, die bei Einzelaufnahmen als mehr oder weniger gerade Linien dargestellt werden, durch Ausmessen den zurückgelegten Weg ermitteln (siehe Abbildung 61). Mit Kenntnis der Expositionszeit (Verschlusszeit) lässt sich die Geschwindigkeit ermitteln.

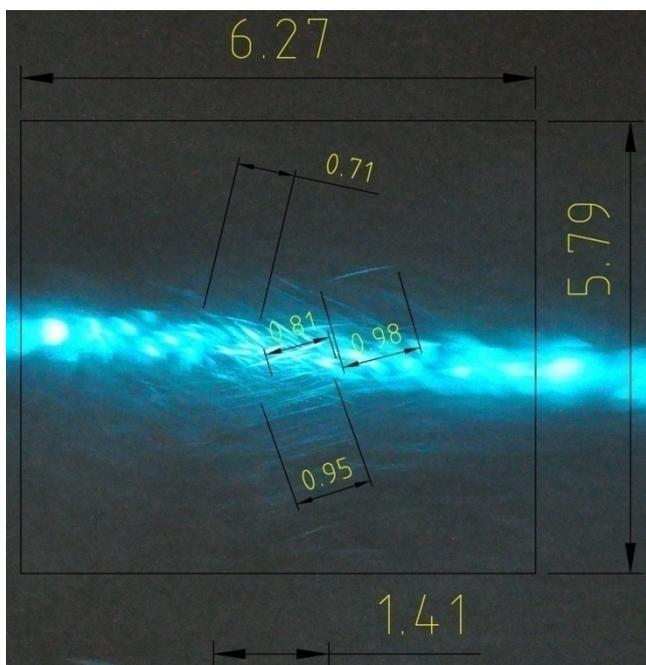


Abbildung 61: Ermittlung der Wegstrecke einiger Partikel

Repräsentativ werden vier „Partikellinien“ im Bild abgemessen und eine durchschnittliche Wegstrecke von 0,86 [mm] errechnet.

Mit Hilfe der Geschwindigkeitsgleichung (Gleichung 18) erfolgt ein Abschätzen der durchschnittlichen Partikelgeschwindigkeit:

$$v_{TROPFEN} = \frac{s}{t} = \frac{0,86 * 10^{-3} [m]}{\frac{1}{4000} [s]} = 3,44 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (18)$$

Hierbei ist die Möglichkeit zu beachten, dass die zurückgelegte Wegstrecke der Partikel länger sein könnte als die sichtbare, belichtete Linie. Dies ist zum einen durch die Tiefenschärfe, die in Abbildung 61 mit 1,4 [mm] bewertet wurde, zu begründen, zum anderen könnte der Tropfen eine Flugbahn außerhalb des Laserstrahls einschlagen.

## 7.2 Versuch mit der Photron Fastcam

Im ersten Versuchsteil konnte die Eignung des Lasers hinsichtlich der Belichtung unter Beweis gestellt werden. Der Versuch mit der Photron Fastcam dient nun einerseits dazu, Zerstäubungsprozesse visuell, zeitlich und räumlich zu erfassen, andererseits soll im Rahmen der Datenauswertung ein Vergleich zu den theoretisch errechneten Werten erfolgen.

In dieser Versuchsreihe kommt die Photron Fastcam zum Einsatz. Mit dieser Kamera können Highspeed-Videoaufnahmen gemacht werden, die eine genaue zeitliche und räumliche Analyse einzelner Zerstäubungsphänomene zulassen. Grundsätzlich ist zu beachten, dass bei Erhöhung der Bildrate zwar immer mehr Details sichtbar werden, sich aber auch der Bildausschnitt drastisch verringert. Die verhältnismäßige Änderung des Bildausschnittes ist in Abbildung 87 im Anhang zu sehen.

### Versuchsanordnung A

Im Rahmen der Versuchsanordnung A (siehe Abbildung 62) wird die Strahlrichtung des Ar<sup>+</sup>-Lasers genau auf den Düsenausgang gerichtet. Mit einem Druckminderer (PIC) an der Druckluft und einem Durchlaufreglers (FIC) kann der Volumenstrom von Wasser und Luft an der Düse variabel eingestellt werden. Der Spray (Luft/Wasser) wird über ein Sprührohr mit Hilfe eines Kompressors, wie bereits in Versuch 2, abgesaugt. Die Abtrennung des Wassers von der Luft erfolgt wiederum über einen Wasserabscheider. Die aufgetrennten Spraykomponenten Wasser und Luft werden anschließend ins Freie geführt.

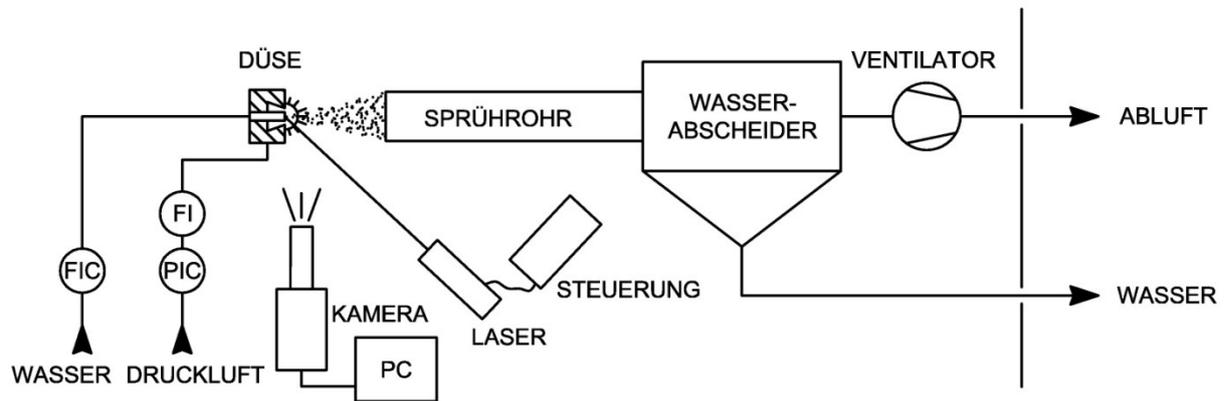


Abbildung 62: Versuchsanordnung A; Photron Fastcam (Ansicht von oben)

Nacheinander werden in diesem Kapitel fotografische Ausschnitte der Videoaufnahmen gezeigt. Der Volumenstrom von Luft und Wasser sowie der Luftdruck im System können von den einzelnen Messgeräten abgelesen werden. Die Düsenaustrittsgeschwindigkeit der Zerstäubungsluft wird anhand der Gleichungen 30-32 errechnet. Der Gammakorrekturwert beschreibt die softwaremäßige Aufhellung des Bildes. Bei einem Wert von 1 erfolgt keine Nachbearbeitung der Bildhelligkeit während die Abweichung des Faktors in Richtung 0 eine digitale Aufhellung bedeutet.

### Aufnahme 1

Aufnahme 1 in Abbildung 63 zeigt eine Probeaufnahme bei sehr niedriger Bildrate (10.000 [fps]). Dadurch kann ein relativ großer Bildausschnitt betrachtet werden. Die Verdüsung erfolgte mit einem minimalem Volumenstrom an Luft.

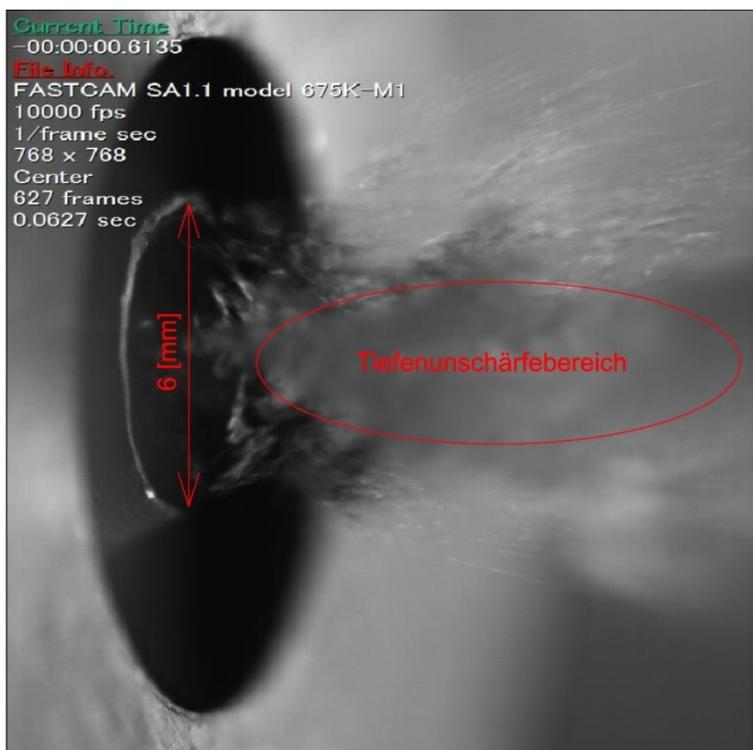
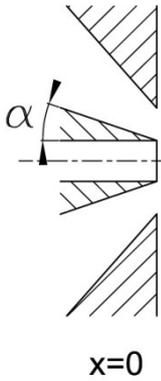


Abbildung 63: Highspeed-Aufnahme 1

Tabelle 25: Aufnahmebedingungen für Abbildung 63

Highspeed-Aufnahme 1			
Framerate	[fps]	10.000	
Auflösung	Pixel	768x768	
Bildgröße <sup>1)</sup>	[mm]	15,36x15,36	
Gammakorrektur	[-]	1	
Abbildungsmaßstab	[-]	1:1	
øD Außendüse	[mm]	12,3	
ød Innendüse	[mm]	6	
Düsenwinkel $\alpha$	[°]	19	
Volumenstrom Luft	[Nm <sup>3</sup> /h]	0,3	
Druck Luft (abs.)	[bar]	1	
Austrittsgeschwindigkeit Luft	[m/s]	0,4	
Volumenstrom Wasser	[l/h]	135	
Austrittsgeschwindigkeit Wasser	[m/s]	11,9	

1) Die Angabe bezieht sich auf die Bildgröße am Kamerasensor

Abbildung 63 zeigt sehr deutlich den stark eingeschränkten Schärfentiefenbereich. Aufgrund der niedrigen Bildrate erfolgt zwar eine gute Belichtung, aber die Wassertropfen erscheinen noch als verschwommene Linien. Trotz dieser Tatsache lassen sich mehr Details als in den Aufnahmen der Nikon-Kamera erkennen.

**Aufnahme 2 (Bildserie)**

In Aufnahme 2 (siehe Abbildung 64) gelten grundsätzlich dieselben Bedingungen wie in Aufnahme 1. Hier wird allerdings die Bildrate drastisch (auf 100.000 [fps]) erhöht, um Details am Düsenaustritt sichtbar zu machen.

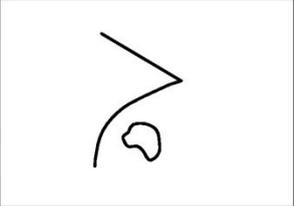
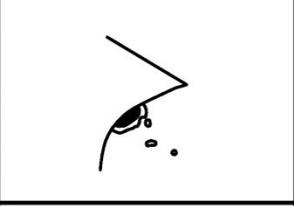
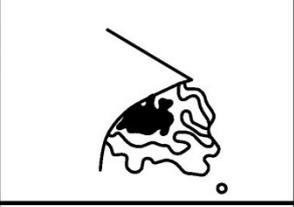
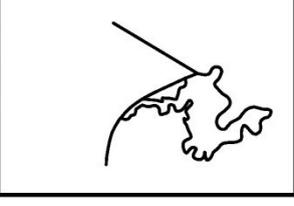
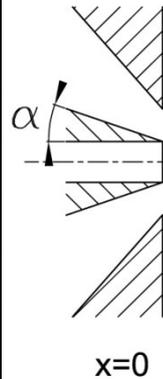
		① 0 [s]
		② 0,00009 [s]
		③ 0,00014 [s]
		④ 0,00017 [s]
		⑤ 0,00021 [s]
		⑥ 0,00025 [s]
		⑦ 0,0003 [s]

Abbildung 64: Highspeed-Aufnahme 2 (Bildserie)

Tabelle 26: Aufnahmebedingungen für Abbildung 64

Highspeed-Aufnahme 2 (Bildserie)		
Framerate	[fps]	100.000
Auflösung	Pixel	320x128
Bildgröße <sup>1)</sup>	[mm]	6,40x2,56
Gammakorrektur	[-]	0,5
Abbildungsmaßstab	[-]	1:1
øD Außendüse	[mm]	12,3
ød Innendüse	[mm]	6
Düsenwinkel $\alpha$	[°]	19
Volumenstrom Luft	[Nm <sup>3</sup> /h]	0,3
Druck Luft (abs.)	[bar]	1
Austrittsgeschwindigkeit Luft	[m/s]	0,4
Volumenstrom Wasser	[l/h]	135
Austrittsgeschwindigkeit Wasser	[m/s]	11,9



1) Die Angabe bezieht sich auf die Bildgröße am Kamerasensor

Beim betrachten der Bildserie der Aufnahme 2 sind Unregelmäßigkeiten am Düsenrand zu erkennen. Es erfolgt ein Aufreißen des Wasserstroms an der Düse aufgrund des Zerstäubungsgases in einem Bruchteil einer Tausendstelsekunde. Es hat den Anschein als würde sich ein Loch ausbilden, das stetig anwächst, bis es wieder zerfällt (Bild 7). Auffallend ist die äußerst geringe Tiefenschärfe. Gerade am oberen Düsenrand lassen sich deutliche Strukturen erkennen. Zur besseren Anschauung werden in Abbildung 64 daneben die Konturen des Aufreißens an der Düse in nachgezeichneter Form dargestellt.

### Aufnahme 3

Für Aufnahme 3 wird eine Düse mit einem Durchmesser von 2 [mm] verwendet (siehe Abbildung 65). Im Unterschied zu den vorangegangenen Aufnahmen wird der Volumenstrom der Zerstäubungsluft deutlich erhöht und der Wasserdurchsatz reduziert.

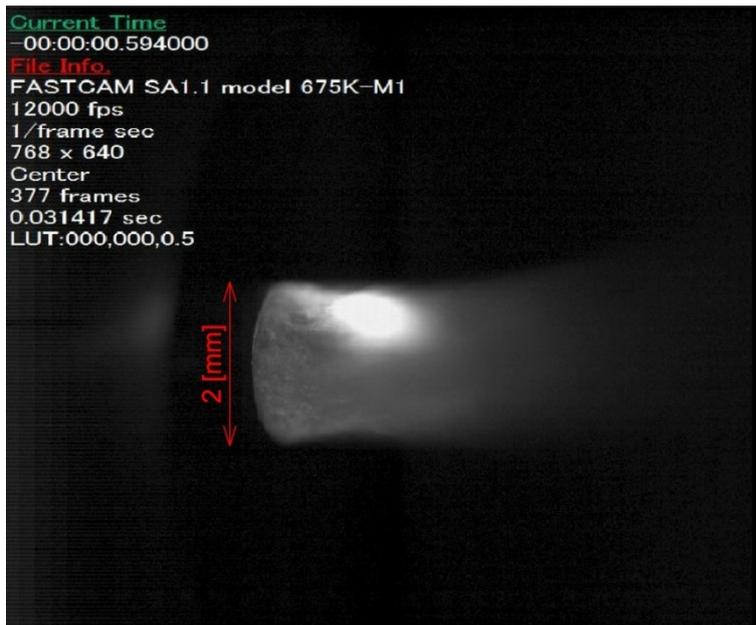


Abbildung 65: Highspeed-Aufnahme 3

Tabelle 27: Aufnahmebedingungen für Abbildung 65

Highspeed-Aufnahme 3			
Framerate	[fps]	12.000	<p>x=0</p>
Auflösung	Pixel	768x640	
Bildgröße <sup>1)</sup>	[mm]	15,36x12,8	
Gammakorrektur	[-]	0,5	
Abbildungsmaßstab	[-]	1,6:1	
øD Außendüse	[mm]	12,3	
ød Innendüse	[mm]	2	
Düsenwinkel α	[°]	0	
Volumenstrom Luft	[Nm <sup>3</sup> /h]	180	
Druck Luft (abs.)	[bar]	1	
Austrittsgeschwindigkeit Luft	[m/s]	190	
Volumenstrom Wasser	[l/h]	50	
Austrittsgeschwindigkeit Wasser	[m/s]	4,4	

1) Die Angabe bezieht sich auf die Bildgröße am Kamerasensor

Wiederum ist auch in dieser Einstellung wenig Detailvielfalt zu erkennen, was auf die niedrige Bildrate von 12.000 [fps] zurückzuführen ist. Somit wird in Aufnahme 4 die Bildrate auf 54.000 [fps] erhöht, um einen genaueren Einblick auf das Geschehen am Düsenaustritt zu erhalten.

**Aufnahme 4 (Bildserie)**

In der Bildserie der vierten Aufnahmeeinstellung wird die 2 [mm] Düse um 3 [mm] nach innen versetzt (siehe Abbildung in Tabelle 33).

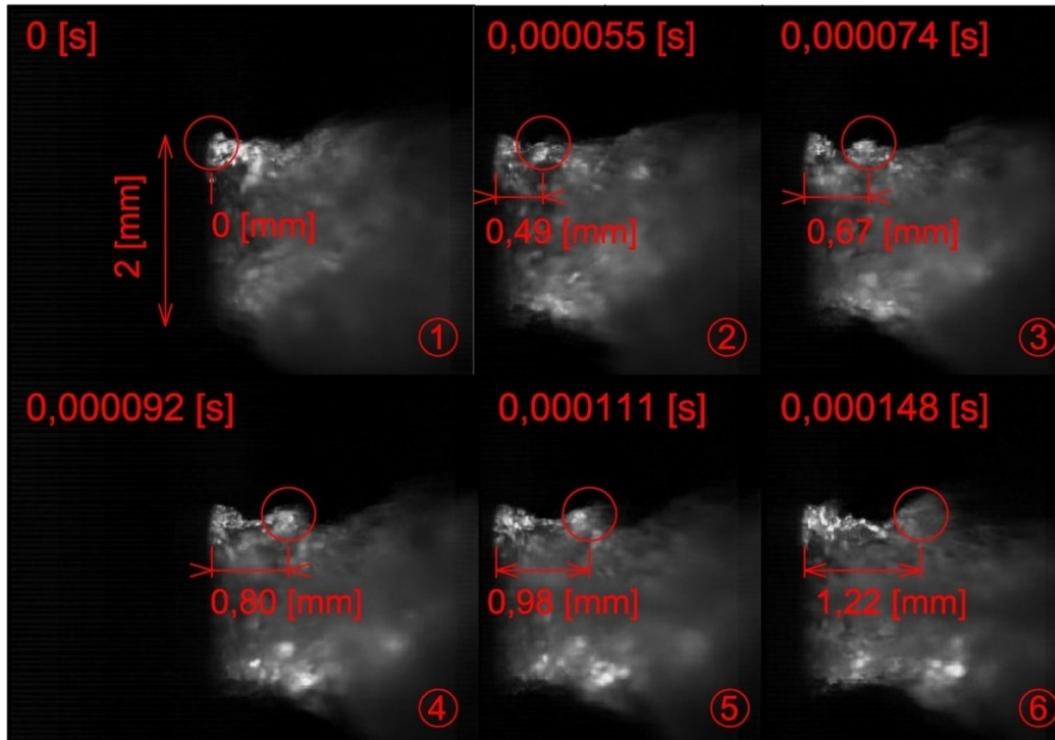


Abbildung 66: Highspeed-Aufnahme 4.1 (Bildserie)

Tabelle 28: Aufnahmebedingungen für Abbildung 66

Highspeed-Aufnahme 4.1 (Bildserie)		
Framerate	[fps]	54.000
Auflösung	Pixel	320x256
Bildgröße <sup>1)</sup>	[mm]	6,40x5,12
Gammakorrektur	[-]	0,765
Abbildungsmaßstab	[-]	1,3:1
øD Außendüse	[mm]	12,3
ød Innendüse	[mm]	2
Düsenwinkel $\alpha$	[°]	0
Volumenstrom Luft	[Nm <sup>3</sup> /h]	180
Druck Luft (abs.)	[bar]	1
Austrittsgeschwindigkeit Luft	[m/s]	190
Volumenstrom Wasser	[l/h]	90
Austrittsgeschwindigkeit Wasser	[m/s]	7,96

1) Die Angabe bezieht sich auf die Bildgröße am Kamerasensor



Beim Betrachten von Abbildung 66 wird deutlich der Effekt der Kelvin-Helmholtz-Instabilität erkennbar. Am Düsenaustritt entstehen Scherwellen, die nach einer Wegstrecke von rund 1,2 [mm] in feinste Partikel zerfallen. Dieser in Abbildung 66 dargestellte Vorgang ereignet sich in  $148 \cdot 10^{-6}$  [s] (Bild 1-6). Somit ergibt sich eine rechnerische Geschwindigkeit der Wellenausbreitung von 8,2 [m/s]. Diese Geschwindigkeit entspricht einem Wert, der nur geringfügig höher als die Austrittsgeschwindigkeit des Wasserstrahls ist (7,96 [m/s]). Da jedoch die Gasgeschwindigkeit deutlich höher als die Wassergeschwindigkeit ist, erfolgt eine Beschleunigung an der Scherschicht.

Abbildung 67 zeigt einen Vergleich der Kelvin-Helmholtz-Instabilität bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen. Bild 1 in Abbildung 67 gleicht Bild 4 in Abbildung 66. In Bild 2 wurde der Volumenstrom des Zerstäubungsgases von 180 auf 270 [Nm<sup>3</sup>/h] erhöht.

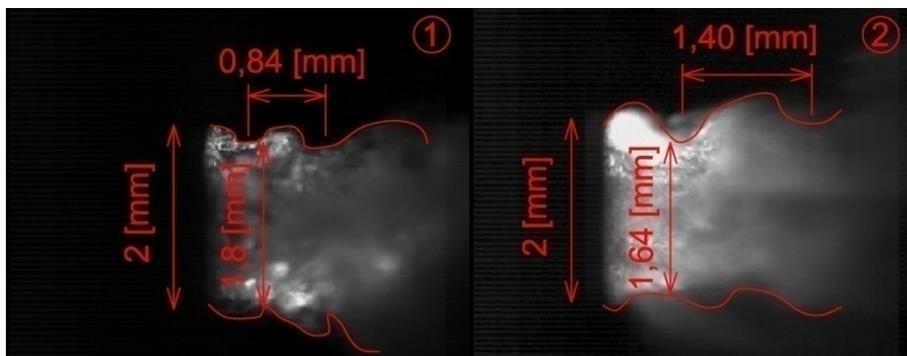


Abbildung 67: Highspeed-Aufnahme 4.2

Tabelle 29: Aufnahmebedingungen für Abbildung 67

Highspeed-Aufnahme 4.2		Bild 1	Bild 2	Düse
Framerate	[fps]	54.000	54.000	
Auflösung	Pixel	320x256	320x256	
Bildgröße <sup>1)</sup>	[mm]	6,40x5,12	6,40x5,12	
Gammakorrektur	[-]	0,765	0,56	
Abbildungsmaßstab	[-]	1,3:1	1,3:1	
øD Außendüse	[mm]	12,3	12,3	
ød Innendüse	[mm]	2	2	
Düsenwinkel α	[°]	0	0	
Volumenstrom Luft	[Nm <sup>3</sup> /h]	180	270	
Druck Luft (abs.)	[bar]	1	2	
Austrittsgeschwindigkeit Luft	[m/s]	190	286	x=-3
Volumenstrom Wasser	[l/h]	90	90	
Austrittsgeschwindigkeit Wasser	[m/s]	7,96	7,96	

1) Die Angabe bezieht sich auf die Bildgröße am Kamerasensor

Deutlich zu erkennen sind die längere Wellenperiode sowie tiefere Wellentäler bzw. eine größere Amplitude bei höherem Gasvolumenstrom in Bild 2. Allgemein verhält sich die Strömung in Bild 2 unruhiger und ungleichmäßiger als in Bild 1.

### Aufnahme 5

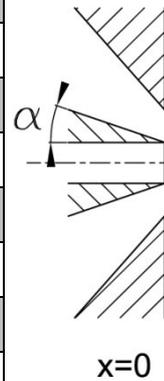
Als nächstes folgt eine Aufnahme mit 136 [mm] Zwischenringen zwischen Kamera und Makroobjektiv, um die Vergrößerung darzustellen. Somit kann ein Abbildungsmaßstab von 2 erreicht werden (siehe Abbildung 68). Allerdings ist aufgrund der Zwischenringe auch ein höherer Lichtverlust in Kauf zu nehmen.



Abbildung 68: Highspeed-Aufnahme 5

Tabelle 30: Aufnahmebedingungen für Abbildung 68

Highspeed-Aufnahme 5		
Framerate	[fps]	10.000
Auflösung	Pixel	768x768
Bildgröße <sup>1)</sup>	[mm]	15,36x15,36
Gammakorrektur	[-]	0,675
Abbildungsmaßstab	[-]	2:1
øD Außendüse	[mm]	12,3
ød Innendüse	[mm]	6
Düsenwinkel $\alpha$	[°]	19
Volumenstrom Luft	[Nm <sup>3</sup> /h]	31
Druck Luft (abs.)	[bar]	1
Austrittsgeschwindigkeit Luft	[m/s]	42
Volumenstrom Wasser	[l/h]	140
Austrittsgeschwindigkeit Wasser	[m/s]	12,4



1) Die Angabe bezieht sich auf die Bildgröße am Kamerasensor

Der relativ hohe Volumenstrom an Wasser in Bezug auf die Zerstäubungsluft führt zu einem längeren Zerfallsweg des Wassers (in Abbildung 68 ca. 3[mm]). Deutlich ist die stärkere Vergrößerung zu erkennen, die eine höhere Detailauflösung zulässt.

### Aufnahme 6

In Aufnahme 6 werden ebenfalls Zwischenringe mit einer Gesamtbreite von 136 [mm] verwendet, wobei die Düse mit 2 [mm] Innendurchmesser zur Anwendung kommt. Es soll der Unterschied bei verschiedenem Volumenstrom an Wasser dargestellt werden.

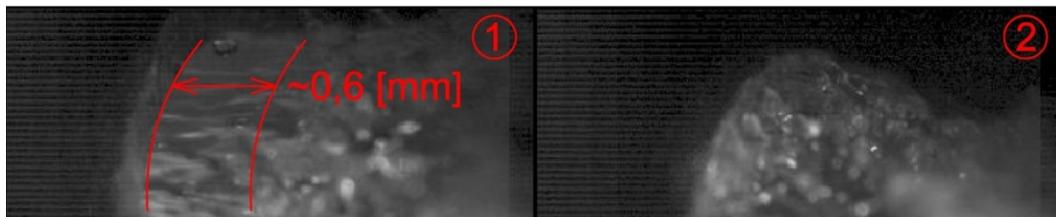
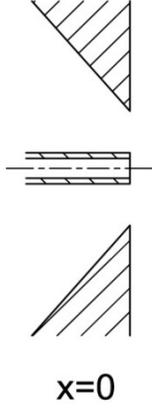


Abbildung 69: Highspeed-Aufnahme 6

Tabelle 31: Aufnahmebedingungen für Abbildung 69

Highspeed-Aufnahme 6		Bild 1	Bild 2	Düse
Framerate	[fps]	100.000	100.000	
Auflösung	Pixel	320x128	320x128	
Bildgröße <sup>1)</sup>	[mm]	6,40x2,56	6,40x2,56	
Gammakorrektur	[-]	0,71	0,71	
Abbildungsmaßstab	[-]	2:1	2:1	
øD Außendüse	[mm]	12,3	12,3	
ød Innendüse	[mm]	2	2	
Düsenwinkel $\alpha$	[°]	0	0	
Volumenstrom Luft	[Nm <sup>3</sup> /h]	180	160	
Druck Luft (abs.)	[bar]	2	1	
Austrittsgeschwindigkeit Luft	[m/s]	190	170	
Volumenstrom Wasser	[l/h]	240	80	
Austrittsgeschwindigkeit Wasser	[m/s]	21,2	7,1	

1) Die Angabe bezieht sich auf die Bildgröße am Kamerasensor

Bei einem Volumenstrom von 240 [l/h] bleibt eine relativ ungestörte, laminar wirkende Strömung bis ca. 0,6 [mm] nach dem Düsenaustritt erhalten, bis diese zu zerfallen beginnt (Bild 1). Anders in Bild 2, wo der Flüssigkeitsdurchsatz relativ gering eingestellt wird, was dazu führt, dass der Strahl direkt Gasströmung gestört wird.

## Versuchsordnung B

Im Rahmen der letzten Versuchsordnung B (siehe Abbildung 70) wird die Strahlrichtung des Ar<sup>+</sup>-Lasers senkrecht zur Sprayrichtung geführt. Die sich im Flug befindlichen Spraypartikel werden gefilmt.

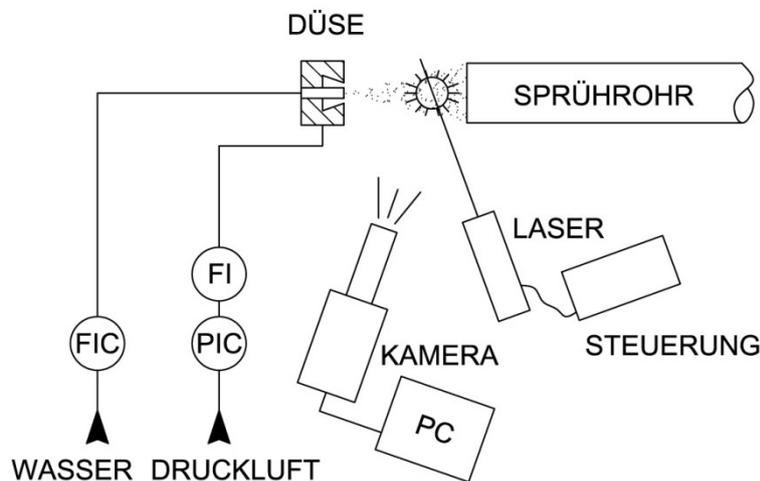


Abbildung 70: Versuchsordnung B; Photron Fastcam (Ansicht von oben)

### Aufnahme 7 (Bildserie)

Bei Aufnahme 7 können einzelne, verschieden große Tropfen ca. 15-20 [cm] nach dem Düsenaustritt beobachtet werden (siehe Abbildung 71).

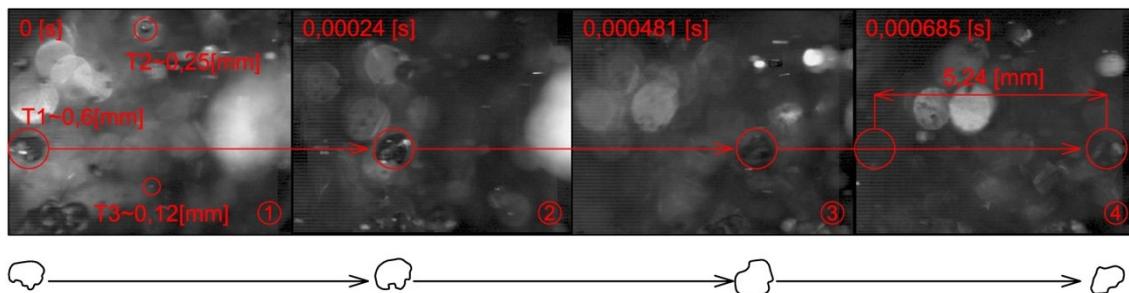


Abbildung 71: Highspeed-Aufnahme 7.1 (Bildserie)

In Bild 1 werden drei Tropfen mit 0,12, 0,25 und 0,6 [mm] Durchmesser markiert. Die Bahn des Tropfens T1 kann bis Bild 4 weiterverfolgt werden, wobei dieser eine Wegstrecke von 5,2 [mm] in einer Zeit von  $685 \cdot 10^{-6}$  [s] zurücklegt. Daraus ergibt sich eine errechnete Geschwindigkeit von 7,7 [m/s]. Dies bedeutet, dass sich der Tropfen aufgrund der geringen Luftgeschwindigkeit bereits in der Phase der Geschwindigkeitsabnahme (vgl. Tabelle 38: Austrittsgeschwindigkeit Wasser von 8,8 [m/s]) befindet.

Abbildung 72 zeigt die Ablösung eines Tropfens von einem Ligament mit einer ungefähren Länge von 1,1 [mm] in einem Bruchteil einer Tausendstelsekunde. Zur Verdeutlichung wurden die Konturen nachgezeichnet.

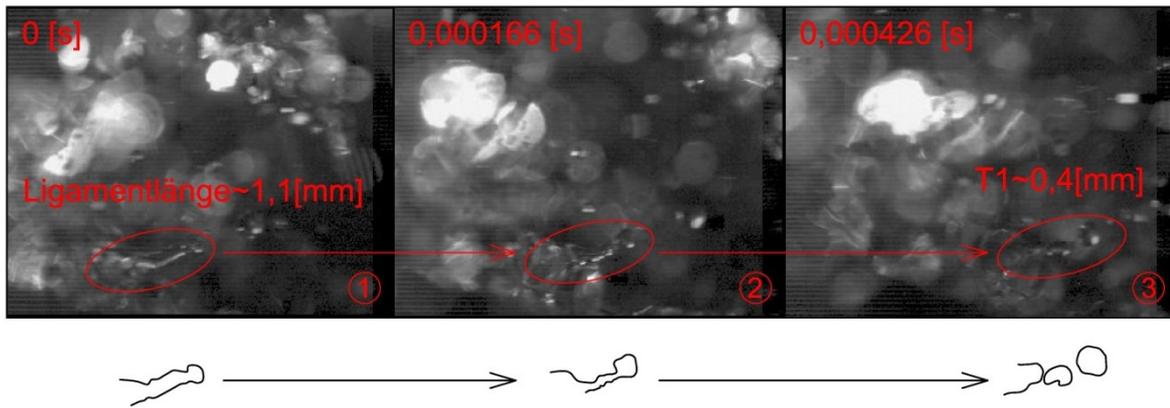


Abbildung 72: Highspeed-Aufnahme 7.1 (Bildserie)

Nach der Ablösung entsteht ein Tropfen mit einem Durchmesser von rund 0,4 [mm].

Tabelle 32: Aufnahmebedingungen für Abbildung 71 und 72

Highspeed-Aufnahme 7		
Framerate	[fps]	54.000
Auflösung	Pixel	320x256
Bildgröße <sup>1)</sup>	[mm]	6,40x5,12
Gammakorrektur	[-]	0,86
Abbildungsmaßstab	[-]	1:1
øD Außendüse	[mm]	12,3
ød Innendüse	[mm]	6
Düsenwinkel $\alpha$	[°]	19
Volumenstrom Luft	[Nm <sup>3</sup> /h]	20
Druck Luft (abs.)	[bar]	1
Austrittsgeschwindigkeit Luft	[m/s]	21
Volumenstrom Wasser	[l/h]	100
Austrittsgeschwindigkeit Wasser	[m/s]	8,8

1) Die Angabe bezieht sich auf die Bildgröße am Kamerasensor

## 8 Berechnungsergebnisse und Vergleich mit den Messdaten

### 8.1 Theoretische Zerstäubungs-Charakteristiken

Während sich die vorhergehenden Kapitel zum größten Teil mit der Fotografie bzw. der Highspeed-Technik sowie den Grundlagen zur Belichtung - insbesondere durch Lasersysteme - befassen, betrachtet dieses Kapitel wesentliche Aspekte der Zerstäubung von Flüssigkeiten wie Metallschmelze oder Wasser. Zur Bewertung solcher Prozesse können bezugnehmend auf die Spraypartikel verschiedenste Faktoren herangezogen werden:

- Gasgeschwindigkeit am Düsenaustritt
- Deformation der Flüssigkeitsoberfläche und Kelvin-Helmholtz-Instabilität
- Partikelbeschleunigung; Relaxationszeit
- Zerfallszeit
- Sphäroidisierungszeit
- Erstarrungszeit
- Oxidationszeit

Am Beispiel einer Aluminiumschmelze und Wasser sollen die charakteristischen Zeitmaße des Zerstäubungsvorganges analysiert werden. Als Zerstäubungsgas dient Stickstoff. Hierfür sind alle relevanten Stoffdaten in Tabelle 33 bis 36 zusammengestellt.

Tabelle 33: Verwendete Stoffdaten von Aluminium als Zerstäubungsflüssigkeit

Stoffdaten der Zerstäubungsflüssigkeit			Aluminium
Dichte der Schmelze	$\rho_F$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2300
Dynamische Viskosität	$\eta_F$	[Pas]	0,001
Oberflächenspannung	$\sigma_F$	[N/m]	0,18
Schmelzetemperatur	$T_F$	[K]	1033
Schmelzpunkt	$T_s$	[K]	933
Schmelzwärme	$\Delta H_s$	[J/kg]	398000
Spez. Wärmekapazität	$c_{pm}$	[J/(kgK)]	767
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_F$	[W/(mK)]	235

Tabelle 34: Verwendete Stoffdaten von Wasser als Zerstäubungsflüssigkeit

Stoffdaten der Zerstäubungsflüssigkeit			Wasser
Dichte	$\rho_F$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1000
Dynamische Viskosität	$\eta_F$	[Pas]	0,001
Oberflächenspannung	$\sigma_F$	[N/m]	0,072
Temperatur	$T_F$	[K]	283
Schmelzpunkt	$T_s$	[K]	273
Schmelzwärme	$\Delta H_s$	[J/kg]	3340000
Spez. Wärmekapazität	$c_{pF}$	[J/(kgK)]	4187
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_F$	[W/(mK)]	0,587

Tabelle 35: Verwendete Stoffdaten von Luft als Zerstäubungsgas

Stoffdaten des Zerstäubungsgases			Luft
Temperatur	$T_G$	[K]	273
Dichte	$\rho_G$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1,29
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_G$	[W/(mK)]	0,0262
Dynamische Viskosität	$\eta_G$	[Pas]	$17,1 \cdot 10^{-6}$
Spez. Wärmekapazität	$c_{pG}$	[J/(kgK)]	1005

### Dimensionslose Kennzahlen zur Beschreibung des Zerstäubungsvorganges

Gleichung 19 zeigt die Reynolds-Zahl (Re-Zahl) welche das Verhältnis der an den Strömungsteilchen angreifenden Trägheitskräften zu den Zähigkeitskräften (Reibungskräften) angibt. Des Weiteren kann anhand der Re-Zahl erkannt werden, ob sich eine Strömung laminar oder turbulent verhält. Je größer die Re-Zahl, umso anfälliger wird eine laminare Strömung gegen Störungen, bis diese schlussendlich in den turbulenten Bereich umschlägt (bei  $Re \sim 2300$ ).

$$Re = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Zähigkeitskräfte}} = \frac{\rho_G * v_R * d_m}{\eta_G} \quad (19)$$

Die Stoffdaten  $\rho_G$  und  $\eta_G$  beziehen sich auf das verwendete Zerstäubungsgas. Die charakteristische Geschwindigkeit  $v_R$  entspricht der relativen Geschwindigkeit zwischen dem Gas und dem Partikel mit der charakteristischen Abmessung  $d_m$  (Tropfendurchmesser).

Aus Gleichung 20 ist die Weber-Zahl (We-Zahl) ersichtlich. Diese ist ein Maß für die Tropfenverformung. Je größer die We-Zahl, umso größer sind die Trägheitskräfte des anströmenden Mediums, welche gegen die Oberflächenkraft des Tropfens wirken und somit die Deformation der Kugelform begünstigen.



$$We = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Oberflächenspannung}} = \frac{\rho_G * v_R^2 * d_m}{\sigma_F} \quad (20)$$

Die Dichte  $\rho_G$  bezieht sich auf das Zerstäubungsgas. Wie schon bei der Re-Zahl muss auch hier für die Geschwindigkeit  $v_R$  der relative Wert zwischen dem umgebenden Medium und dem Tropfen mit einem Durchmesser  $d_m$  und einer Oberflächenspannung von  $\sigma_F$  eingesetzt werden. Die We-Zahl ist ein wichtiges Kriterium beim Zerstäuben von Flüssigkeiten. Üblicherweise findet bei einem errechneten Wert von  $We < 22$  kein Tropfenzerfall mehr statt.

Als weitere dimensionslose Kennzahl wird in Gleichung 21 die Ohnesorge-Zahl (Oh-Zahl) angegeben. Diese ist ein Maß für den Zähigkeitseinfluss bei der Verformung von Tropfen. Sie kann aus der Re-Zahl und der We-Zahl errechnet werden.

$$Oh = \frac{\text{Zähigkeitskräfte}}{\text{Oberflächenkräfte}} = \frac{\eta_G}{\sqrt{\rho_G * \sigma_F * d_m}} = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (21)$$

### Gasgeschwindigkeit am Düsenaustritt

Um die Gasgeschwindigkeit am Düsenaustritt abzuschätzen, muss zuerst der kritische Druck am Düsenaustritt berechnet werden (siehe Gleichung 22) [32]:

$$p_{krit} = p_1 * \left( \frac{2}{\chi + 1} \right)^{\frac{\chi}{\chi - 1}} \quad (22)$$

Der Druck  $p_1$  entspricht hierbei dem absoluten Anlagendruck vor der Düse.  $\chi$  bezeichnet den Isentropenexponenten des Gases (bei Luft  $\chi=1,4$ ).

Die Geschwindigkeit am Düsenaustritt lässt sich über die Kontinuitätsgleichung mit Hilfe des Massenstroms  $m$ , der Gasaustrittsfläche  $A_2$  und der dort vorherrschenden Dichte  $\rho_2$  (nach Gleichung 23) ermitteln [32]:

$$v_2 = \frac{m}{A_2 * \rho_2} \quad (23)$$

Ist das Verhältnis zwischen  $p_{krit}$  und  $p_1$  bekannt, kann aus der Literatur [32] das Verhältnis zwischen  $T$  und  $T_{krit}$  (Bei Luft  $T/T_{krit}=f(\chi)=0,83$ ) recherchiert werden. Die Berechnung der Dichte des Zerstäubungsgases erfolgt mit Hilfe der Gleichung 24 [32] ( $R$  entspricht der Gaskonstante):

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R * T_2} \quad (24)$$

### Deformation der Flüssigkeitsoberfläche und Kelvin-Helmholtz-Instabilität

Weist ein Strömungsprofil einen oder mehrere Wendepunkte auf, wie es z.B. nach einer Düse vorkommt, so kann sich eine sogenannte Kelvin-Helmholtz-Instabilität entwickeln [33]. Diese basiert auf der Tatsache, dass sich bei Fluiden mit unterschiedlicher Geschwindigkeit eine instabile Scherschicht ausbildet.

Zur Verdeutlichung des Phänomens werden zwei inkompressible Fluide am Düsenaustritt mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ( $v_1$  und  $v_2$ ) betrachtet (Abbildung 73).

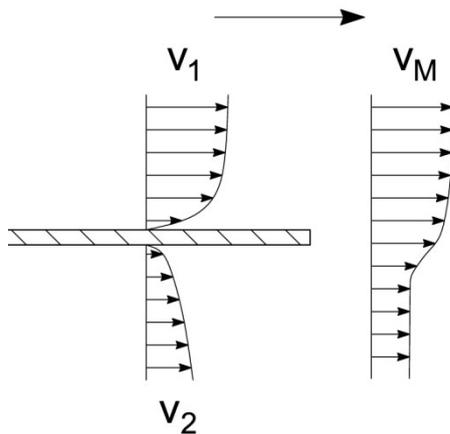


Abbildung 73: Entstehung einer Scherschicht [33]

Verlassen beide Fluide die Düse (Grenzschicht), so bildet sich zwischen den Strömungsgebieten eine freie Scherschicht, die durch die mittlere Relativgeschwindigkeit zwischen den Schichten charakterisiert ist. Diese Entwicklung der Scherschicht unter Einwirken einer Störung wird durch die Kelvin-Helmholtz-Instabilität beschrieben.

Bei der Annahme, dass die Scherschicht unendlich dünn ist (Abbildung 74) und sich das Bezugssystem mit  $v_M$  mitbewegt, lenkt die Scherschicht stationär nach oben aus.

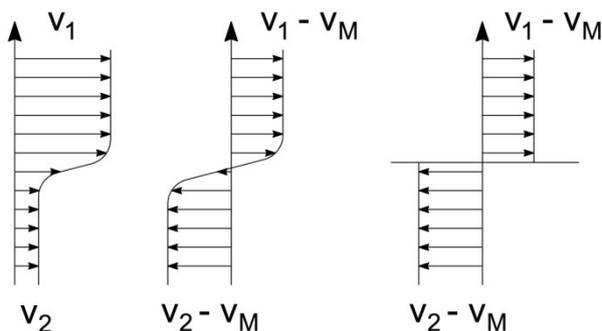


Abbildung 74: Idealisierung der Scherschicht [33]

Laut der Bernoulli-Gleichung entsteht im oberen Gebiet wegen der schnelleren Strömung ein statischer Unterdruck. Gleichzeitig weist der untere Bereich einen statischen Überdruck auf, was zu einer destabilisierenden Kraft nach oben führt. Außerdem stellt sich die Scherschicht wegen der Geschwindigkeitsdifferenz auf und es resultiert letztlich eine sinusförmige Verwelling der Grenze zwischen der schnelleren (in Abbildung 74 oben) und der langsamen

(in Abbildung 74 unten) Fluidschicht. Diese Wellenbildung wird als Kelvin-Helmholtz-Instabilität bezeichnet.

Die Amplitude dieser dann sinusförmig ausgelenkten Scherschicht wächst an, was schließlich zu einer Aufwicklung derselben führen kann (siehe Abbildung 75).

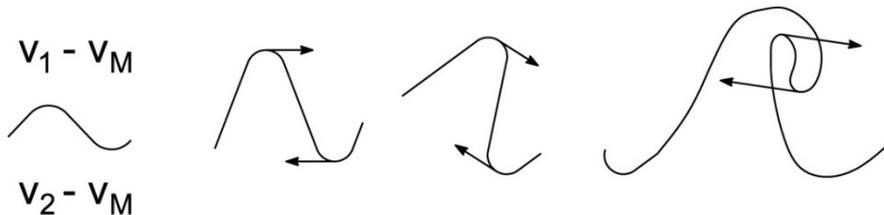


Abbildung 75: Aufwicklung der Scherschicht [33]

Abbildung 76 zeigt die Auslenkung der entstehenden Wellen und wichtige Größen zur Klassifizierung dieser.

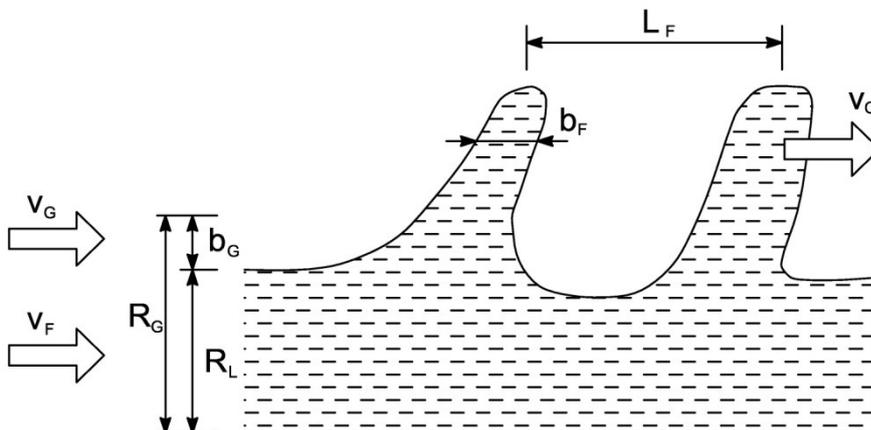


Abbildung 76: Primäre Instabilität in einem Flüssigstrahl; verursacht durch schnelleren Luftstrom [34]

Die Wellenlänge der Instabilität lässt sich durch Gleichung 25 gemäß Aliseda et al. [34] theoretisch abschätzen:

$$\lambda_F \approx 2 * \delta_G * \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_G}} \quad (25)$$

Am Düsenaustritt wird der Gas-Strom beschleunigt. Werden hierbei laminare Verhältnisse angenommen, kann  $\delta_G$  mit Gleichung 26 errechnet werden [34]:

$$\delta_G = \frac{C * b_G}{\sqrt{\text{Re}_{b_G}}} \quad (26)$$

Der Proportionalitätsfaktor C wird von der Düsenkonstruktion bestimmt.

Um dieser beschriebenen Instabilität zu entsprechen, muss  $Re_{\lambda F}$  (nicht zu verwechseln mit  $Re_{bG}$ ) größer als 10 sein (siehe Gleichung 27) [34]:

$$Re_{\lambda F} = \frac{(v_C - v_F) * L_F}{v_F} > 10 \quad (27)$$

Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit  $v_C$  wird nach Gleichung 28 berechnet [34]:

$$v_C = \frac{\sqrt{\rho_F} * v_F + \sqrt{\rho_G} * v_G}{\sqrt{\rho_L} + \sqrt{\rho_G}} \quad (28)$$

Anhand der experimentellen Ergebnisse (vgl. Abbildung 66 und zugehörige Tabelle 28) kann eine Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von 8,2 [m/s] festgestellt werden. Diese Geschwindigkeit kann theoretisch mit Gleichung 28 verglichen werden. Zu beachten ist, dass aufgrund der Düsenanordnung (siehe Grafik Tabelle 28) das Gas am Flüssigkeitsstrahl aufgestaut wird und daher eine Dichteänderung dessen erfolgt. Mit Hilfe der Bernoulligleichung (siehe Gleichung 29) sowie Gleichung 24 kann die Gasdichte im Reservoir berechnet werden.

$$p_{Reservoir} = p_0 + \frac{\rho_G}{2} * v_G^2 \quad (29)$$

Werden die in Abbildung 66 vorherrschenden Betriebsbedingungen ( $v_G=190$  [m/s],  $v_F=8,2$  [m/s],  $\rho_G=1,96$  [kg/m<sup>3</sup>]) eingesetzt, so errechnet sich ein theoretischer Wert von:

$$v_C = \frac{\sqrt{1000} * 8 + \sqrt{1,96} * 190}{\sqrt{1000} + \sqrt{1,96}} = 15,9 [m/s]$$

wobei die Bedingung  $Re_{\lambda F} > 10$

$$Re_{\lambda F} = \frac{(v_C - v_F) * L_F}{v_F} = \frac{(15,9 - 8) * 0,84 * 10^{-3}}{10^{-6}} = 6636 > 10$$

erfüllt wird. Für die Ermittlung der Reynolds-Zahl wird eine Periodenlänge  $L_F$  von 0,84 [mm] (aus Abbildung 66 in Kapitel 7.2) verwendet.

### Partikelbeschleunigung; Relaxationszeit

Am Düsenaustritt, wo die Gasgeschwindigkeit am höchsten ist, wird der gebildete Tropfen solange beschleunigt bis sich eine weitgehende Annäherung zwischen Gasgeschwindigkeit und Partikelgeschwindigkeit ergibt. Diese Zeitdauer kann als sogenannte Partikelrelaxationszeit wie folgt errechnet werden:



$$\tau_F = \frac{\rho_F * d_m^2}{18 * \eta_G} \quad (30)$$

Aufgrund der Trägheits- und Widerstandskräfte kommt es zu einer verzögerten Tropfenbeschleunigung. Kurz nachdem sich beide Geschwindigkeiten angenähert haben, erfolgt eine weitere Verlangsamung des Gases. Dabei verliert der Tropfen langsamer an Geschwindigkeit als das Gas.

Der zeitliche Geschwindigkeitsverlauf des Tropfens kann mit Gleichung 30 gemäß Delplanque et al. [35] ermittelt werden:

$$\frac{dv_{TROPFEN}}{dt} = g * \left(1 - \frac{\rho_G}{\rho_F}\right) + \frac{3}{4d_m} * \frac{\rho_G}{\rho_F} * |v_F - v_G| * (v_F - v_G) * C_{F(Re)} \quad (31)$$

Diese Gleichung setzt voraus, dass sich die einzelnen Partikel nicht gegenseitig beeinflussen und eine sphärische Form besitzen. Der  $C_{F(Re)}$  entspricht dem Strömungswiderstandskoeffizienten des Flüssigkeitstropfens. Um nun Gleichung 30 numerisch auszuwerten, wird das Geschwindigkeitsverhalten des Gases benötigt (siehe Gleichung 31) [35]:

$$v_G = v_{G,0} * \exp\left(-\frac{z}{3,04 * 10^{-4} * v_{G,0}^{1,24}}\right) \quad (32)$$

Diese Ansätze gelten für das System Aluminium/Stickstoff bei eindimensionaler Betrachtung eines Partikels, das eine Flugbahn auf der Mittelachse der Düse einnimmt. Allgemein wird diese Formel gerne bei der Zerstäubung von Metallschmelze benutzt, muss jedoch für jeden einzelnen Fall überprüft werden. Die Variable  $z$  beschreibt den axial betrachteten Abstand zur Düse.

Abbildung 77 zeigt den Einfluss der Partikelgröße auf die Geschwindigkeit der Partikel für das Stoffsystem Aluminium/Stickstoff. Ebenso wird der Geschwindigkeitsverlauf des Gases dargestellt. Die gezeigten Ergebnisse basieren auf einer Schmelzevorschubgeschwindigkeit in der Düse von 2 [m/s] und einer Gasgeschwindigkeit von 520 [m/s] (zum Zeitpunkt  $t=0$  am Düsenaustritt). [35]

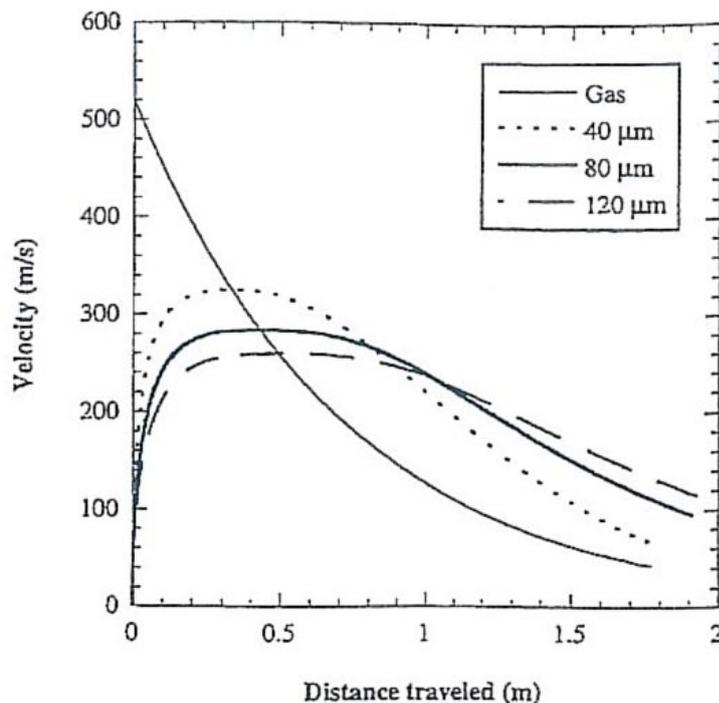


Abbildung 77: Einfluss der Partikelgröße auf die Geschwindigkeit des einzelnen Aluminiumtropfens nach Delplanque et al.[35]

Deutlich zu erkennen ist eine starke Beschleunigung der Tropfen bis eine Relativgeschwindigkeit gegenüber dem Gas von 0 [m/s] erreicht ist. Anschließend werden die Tropfen wieder gebremst, allerdings aufgrund der Trägheit langsamer als das Gas.

### Zerfallszeit

Beim Erfassen der Zerstäubungsprozesse mit Hilfe eines Kamerasystems ist die Kenntnis über die Zerfallszeit wesentlich, um eine genaue optische Fokussierung gewährleisten zu können, die bei der Beobachtung der Zerfallseffekte der Tropfen unabdingbar ist. Eine Abschätzung der Zerfallszeit  $t_b$  erfolgt mit Hilfe der Gleichungen 33 und 34 gemäß Faith et al. [36]:

$$t^* = \frac{d_m * \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_G}}}{v_R} \quad (33)$$

$$\frac{t_b}{t^*} = 5.0 \quad (34)$$

Hierbei entspricht  $t^*$  einer sogenannten normalisierten, charakteristischen Zerfallszeit, die ihre Gültigkeit nur bei sehr kleinen Ohnesorge-Zahlen behält ( $Oh < 0,1$ ). Am Beispiel Aluminium ergibt sich für einen Tropfendurchmesser von 80 [ $\mu\text{m}$ ] ein Oh von  $5,5 \cdot 10^{-3}$ . Bei Ohnesorge-Zahlen  $> 0,1$  erfolgt ein sprunghafter Anstieg der We-Zahl. Somit wird ein Aufbrechen der Tropfen und folglich ein ideales Zerstäuben verhindert [36].

Die Zerfallszeit von Wasser für unterschiedliche Tropfendurchmesser in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit wird in Abbildung 78 dargestellt. Sie errechnet sich für Tropfen mit den Eigenschaften von Wasser und Luft aus Tabelle 34 und 35 mit den Gleichungen 22 und 23.

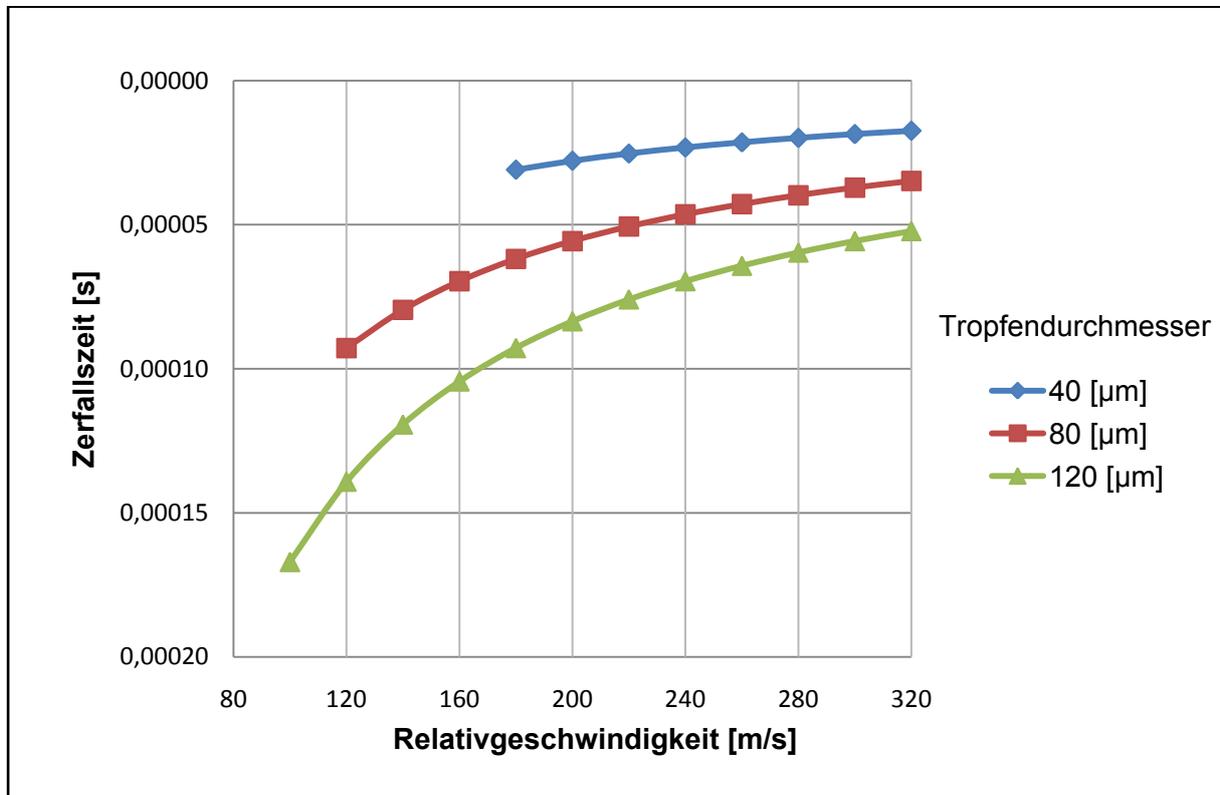


Abbildung 78: Verlauf der Zerfallszeit unterschiedlicher Wasserpartikel in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit der Tropfen in Luft.

Ist die Relativgeschwindigkeit des Tropfens im Gas (hier Luft) zu gering, wird das Weberkriterium nicht mehr eingehalten (d.h.  $We < 22$ ) und es erfolgt kein Tropfenzerfall. Daher erfolgt die graphische Darstellung der Verlaufskurven in Abbildung 78 erst ab der relativen Geschwindigkeit, bei der die Bedingung  $We > 22$  (nach Gleichung 20) erfüllt ist.

Abbildung 66 (in Kapitel 7.2) zeigt einen Zerfall der Tropfen in ungefähr 0,15 [ms]. Allerdings kann aufgrund der Schärfenuntiefe und der zu geringen Vergrößerung keine Bestimmung der Partikelgröße vorgenommen werden.

Des Weiteren zeigt Abbildung 72 (in Kapitel 7.2) einen Ligamentzerfall eines 400 [µm] großen Tropfens in ca. 0,426 [ms]. Rechnerisch ergibt sich nach Gleichung 33 und 34 für den Zerfall eines 400 [µm] großen Tropfens in Luft bei einer Gasdichte von 1,29 [kg/m<sup>3</sup>] eine Zerfallszeit von 3,7 [ms]. Die Abweichung des Ergebnisses kann dadurch begründet werden, dass der Zerfall bereits räumlich vor der Aufnahmeszene begonnen hat.

### Sphäroidisierungszeit

Die Sphäroidisierungszeit oder Einformungszeit gibt an, wie lange ein Partikel benötigt, um eine sphärische Form anzunehmen. Werden insbesondere hochviskose Flüssigkeiten oder Metallschmelze zerstäubt, entstehen zu Beginn faserförmige Teilchen. Diese sogenannten Ligamente zerfallen zu einzelnen Tropfen in jener Zeit, die die Oberflächenspannung benötigt, um das deformierte Fluidelement in eine runde Gestalt zu verwandeln (siehe Gleichung 35 gemäß Lawley [37]).

$$t_{sph} = \frac{3 \pi^2 \eta_F}{4 V \sigma_F} (R^4 - r^4) \quad (35)$$

Somit ergibt sich eine Sphäroidisierungszeit  $t_{sph}$ , wobei  $V$  dem Tropfenvolumen und  $R$  dem Tropfenradius entspricht. Der Ligamentradius  $r$  kann näherungsweise mit 30-50% von  $R$  angegeben werden. Diese Annahme begründet sich aufgrund der Beobachtungen der Schnellbild-Auswertungen (siehe Abbildung 72 in Kapitel 7.2). Die Stoffdaten  $\eta_F$  (dynamische Viskosität) und  $\sigma_F$  (Oberflächenspannung) können wiederum der Tabelle 33 für Aluminium und der Tabelle 34 für Wasser entnommen werden.

### Erstarrungszeit

Neben der Zerstäubungs- und Sphäroidisierungszeit ist die Erstarrungszeit von wesentlicher Bedeutung. Sind kugelförmige Partikel erwünscht, muss diese unbedingt größer als die Einformungszeit sein. Gleichung 36 schätzt gemäß Lawley [37] die Zeit, die zur Abgabe der Schmelzwärme von verflüssigten Metallen notwendig ist [37]:

$$t_{sol} = \frac{d_m \rho_F}{6 h_c} * \left[ c_{pF} * \ln \left( \frac{T_F - T_G}{T_s - T_G} \right) + \left( \frac{\Delta H_s}{T_s - T_G} \right) \right] \quad (36)$$

Gleichung 36 berücksichtigt den Schmelzpunkt ( $T_s$ ) sowie die Schmelzetemperatur ( $T_F$ ), die Schmelzwärme ( $\Delta H_s$ ) und die Temperatur des Zerstäubungsgases ( $T_G$ ). Zur Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten  $h_c$  wird die empirische Gleichung 37 herangezogen [37]:

$$h_c = \frac{\lambda_G}{d_m} * (2,0 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,33}) \quad (37)$$

Die Definition der Prandtl Zahl lautet:

$$Pr = \frac{\eta_G * c_{pG}}{\lambda_G} \quad (38)$$

Gleichung 36 behält allerdings nur dann ihre Gültigkeit, wenn die aufgeschmolzenen Tropfen nicht unterkühlt werden, die relative Geschwindigkeit zwischen Gas und Partikel konstant ist



und nur ein konvektiver Wärmeaustausch erfolgt. In der Praxis ändert sich jedoch die Relativgeschwindigkeit (siehe Abschnitt Partikelbeschleunigung). Um die tatsächlichen Geschwindigkeitsverläufe zu erfassen, müssen zuerst die ortsabhängige Gasgeschwindigkeit und die daraus resultierende Partikelgeschwindigkeit ermittelt werden.

Außerdem soll die Erstarrungszeit graphisch dargestellt werden. Dazu zeigt Abbildung 79 den Verlauf der Oberflächentemperatur am Al-Partikel. Abbildung 79 lässt deutlich erkennen, dass ein typischer verflüssigter Metalltropfen solange zu Unterkühlung neigt, bis seine Oberfläche die Keimbildungstemperatur erreicht hat. Anschließend weist das Partikel aufgrund der Erstarrungswärme eine konstante Oberflächentemperatur auf. Erst nach dem völligen Erstarren bis ins Tropfeninnere sinkt die Temperatur weiter ab.

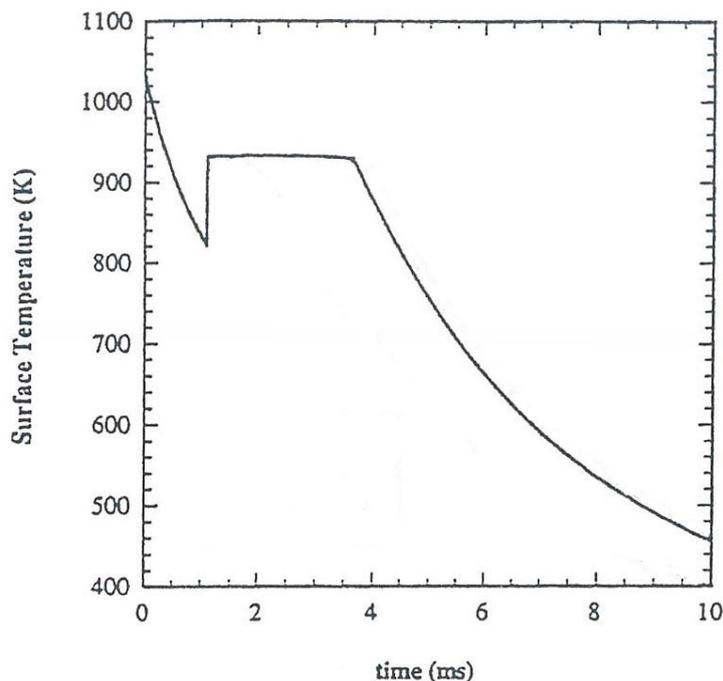


Abbildung 79: Verlauf der Tropfenerstarrung eines 80 [ $\mu\text{m}$ ] großen Al-Partikels nach Delplanque et al.[35]

Aus Abbildung 79 kann eine Erstarrungszeit von ca. 4 [ms] abgelesen werden. Dieser Wert begründet sich unter der Verwendung von Stickstoff mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 520 [m/s] und einer Temperatur von 220 [K]. Die Schmelzevorschubgeschwindigkeit beträgt 2 [m/s]. [35]

### Oxidationszeit [35]

Bei der Zerstäubung von Metallen mit einem oxidierenden Gas wie z.B. Luft kommt es zu einer Reaktion an der Tropfenoberfläche mit dem Luftsauerstoff. Ist dieses neu entstandene Metalloxid stabil, entsteht bei großer Oxidationsrate an der Partikeloberfläche eine geschlossene Oxidschicht. Außerdem wird der Tropfen durch Konvektion gekühlt und beginnt von außen nach innen zu erstarren. Somit bilden sich zu Beginn der Erstarrungsphase prinzipiell drei verschiedene Schichten im Schmelzetropfen aus (siehe

Abbildung 80). Die Trennflächen dieser oxidierten/erstarrten (oder auch oxidierten/flüssigen) Schicht bzw. der erstarrten/flüssigen Schicht wird mit  $O(t)$  und  $S(t)$  ortsmäßig angegeben.



Abbildung 80: Oxidschicht, feste und flüssige Regionen eines Schmelzetropfens (links); Ortsangabe der einzelnen Trennflächen (rechts) nach Delplanque et al.[35]

Das in dieser Arbeit von Delplanque [35] gezeigte Oxidationsmodell (siehe Gleichung 39) gilt für die Zerstäubung von Aluminium:

$$\frac{dO}{dt} = -2 * A_0 * \exp\left(\frac{Q}{\kappa * T_F}\right) * \exp\left(K_0 * \frac{p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{\kappa * T_F}\right) \quad (39)$$

Alle Größen, die in Gleichung 38 angeführt sind, werden in Tabelle 36 für Aluminium zusammengefasst. Als Zerstäubungsgas wird Luft verwendet, da mit reinem Stickstoff keine Oxidationsreaktion zustande käme.

Tabelle 36: Werte für die Berechnung der Oxidationszeit

Wichtige Kennwerte für die Oxidationszeit			Metallschmelze
			Aluminium
Schmelztemperatur	$T_F$	[K]	1033
Sauerstoffpartialdruck	$p_{O_2}$	[Torr]	150
Diffusionsgeschwindigkeit	$A_0$	[m/s]	0,00025
Aktivierungsenergie	$Q$	[J]	$2,56 * 10^{-19}$
Boltzmann-Konstante	$\kappa$	[J/K]	$1,38 * 10^{-23}$
Konstante	$K_0$	[J/Torr <sup>0,5</sup> ]	$2,227 * 10^{-20}$

Die Theorie geht davon aus, dass es sich um einen sehr dünnen Oxidfilm handelt, der sich an der Oberfläche des Partikels bildet, da die Flugzeit des Partikels bis zur vollständigen Erstarrung typischerweise nur wenige Millisekunden dauert. Somit erfolgt auch die Oxidationsreaktion in einem sehr kurzen Zeitraum. Weiters wird davon ausgegangen, dass die Oxidation über den Ionentransport durch die Oxidschicht bestimmt bzw. begrenzt wird. Bei relativ niedrigen Temperaturen ist die Diffusionsgeschwindigkeit der Ionen sehr langsam,

aber Elektronen können die Oxidschicht mit Hilfe des Tunneleffekts passieren. Das Auftreten eines elektrischen Feldes begünstigt zusätzlich den Ionentransport durch die Oxidationsschicht [35].

Die Oxidationsgeschwindigkeit ist als Wandergeschwindigkeit der Oxidationsfront zu verstehen.

## 8.2 Exemplarische Berechnungsergebnisse

Im Rahmen der Highspeed-Videoaufnahmen konnten zum einen Phänomene der Zerstäubung wie die Kelvin-Helmholtz-Instabilität beobachtet, zum anderen auch einzelne Tropfen im Flug erfasst werden. Durch die zeitliche und räumliche Bilderfassung ergibt sich eine einfache Möglichkeit, die Geschwindigkeit diverser Zerstäubungsvorgänge zu ermitteln. Besonders der Einfluss der Relativgeschwindigkeit zwischen Gas und Flüssigkeit hat einen großen Einfluss auf einzelne Effekte und konnte mit Hilfe der Highspeed-Aufnahmen gut dargestellt werden.

Zum Vergleich der Zerstäubung von Wasser und Aluminium werden die charakteristischen Zeitmaße berechnet und die Ergebnisse in Tabelle 37 aufgelistet. Als Zerstäubungsgas dient Luft mit den Stoffeigenschaften aus Tabelle 35. Die Betriebsbedingungen entsprechen jener der Schnellbildaufnahme in Abbildung 67 (Bild 2).

Tabelle 37: Vergleichende Berechnung von Zerstäubungsvorgängen

Vergleich der charakteristischen Zeitmaße der Zerstäubung von Wasser und Aluminium								
Betriebsbedingungen der Zerstäubung			Zerstäubung von Wasser in Luft			Zerstäubung von Al-Schmelze in Luft		
Gastemperatur	$T_G$	[K]	293 / 253 <sup>1)</sup>			293 / 253 <sup>1)</sup>		
Gasdruck vor Düse (abs.)	$p_G$	[bar]	2			2		
Schmelzetemperatur	$T_F$	[K]	283			1033		
Gasgeschwindigkeit	$v_G$	[m/s]	290			290		
Schmelzevorschubgeschwindigkeit	$v_F$	[m/s]	8			8		
Partikeldurchmesser	$d_m$	[ $\mu\text{m}$ ]	40	80	120	40	80	120
Dimensionslose Kennzahlen								
Reynolds-Zahl	Re	[-]	851	1702	2553	851	1702	2553
Weber-Zahl	We	[-]	57	114	171	23	46	68
Ohnesorge Zahl	Oh	[-]	0,0089	0,0063	0,0051	0,0056	0,0040	0,0032
Charakteristische Zeitmaße								
Relaxationszeit	$\tau$	[ms]	5,20	20,79	46,78	11,96	47,82	107,60
Zerfallszeit	$t_b$	[ms]	0,0197	0,0395	0,0592	0,0299	0,0599	0,0898
Sphäroidisierungszeit	$t_{\text{sph}}$	[ $\mu\text{s}$ ]	0,46	0,92	1,38	0,18	0,37	0,55
Erstarrungszeit	$t_{\text{sol}}$	[ms]	10,84	31,75	59,25	0,94	2,74	5,12
Oxidationszeit / Oxidationsgeschwindigkeit	$t_{\text{ox}} / v_{\text{ox}}$	[ms] / [ $\mu\text{m/s}$ ]	---	---	---	2,53 <sup>2)</sup> / 1,58		

1) Temperatur zur Berechnung der Erstarrungszeit; zum besseren Vergleich auch für Aluminium gewählt

2) Dieser Wert ergibt sich bei einer angenommenen Oxidschichtdicke von 4 [nm]



Um einen repräsentativen Vergleich der Erstarrungszeiten von Wasser und Aluminium zu erhalten, wird bei dieser Berechnung eine Gastemperatur von 253 [K] gewählt. Zur Veranschaulichung erfolgt ein graphischer Vergleich der einzelnen charakteristischen Zeitmaße, welche in Tabelle 37 aufgelistet werden:

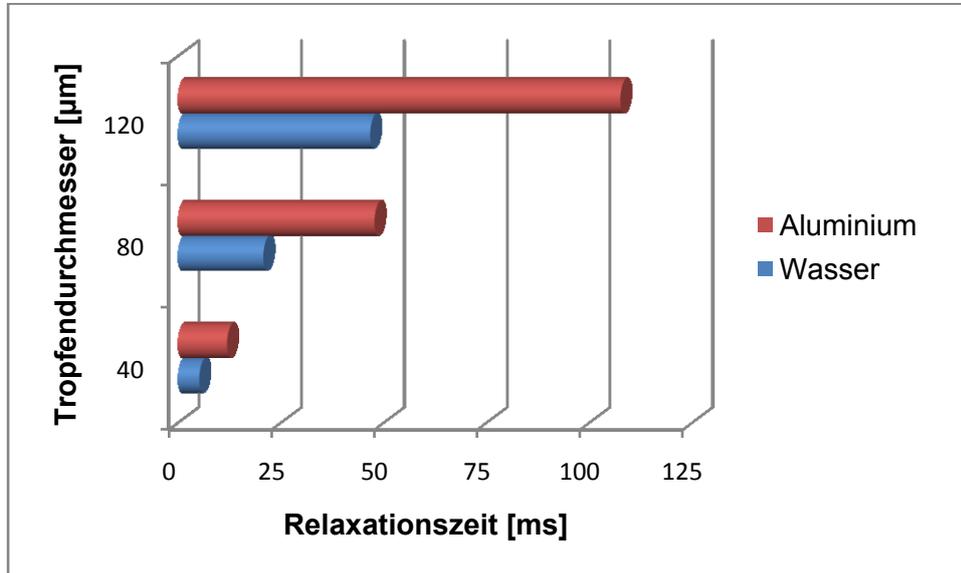


Abbildung 81: Relaxationszeit in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers und des zerstäubten Mediums

Abbildung 81 lässt erkennen, dass die Relaxationszeit von Aluminium deutlich länger als die des Wassers ist. Diese Tatsache beruht auf einer höheren Dichte von Aluminium was zu einer größeren Trägheit des Partikels führt.

Ebenso soll der Geschwindigkeitsverlauf des Zerstäubungsgases (Luft) sowie eines Aluminium- und Wassertropfens mit einem Durchmesser von 40 [μm] dargestellt werden. Mit Gleichung 40 wird die Geschwindigkeit des Gases  $v_{G(x)}$  bei der Entfernung  $x$  von der Düse berechnet, wobei  $v_{G,0}$  der Düsenaustrittsgeschwindigkeit des Gases entspricht:

$$v_{G(x)} = v_{G,0} * e^{-1,05*x} \quad (40)$$

Die Tropfengeschwindigkeit  $v_{F(x)}$  bei der Entfernung  $x$  von der Düse errechnet sich mit Gleichung 41:

$$dv_{F(x)} = v_{F(x-1)} + a * dt \quad (41)$$

Dabei kann die Beschleunigung  $a$  des Tropfens am jeweiligen Ort  $x$  mit Hilfe des Tropfendurchmessers  $d_m$ , der dynamischen Viskosität des Gases  $\eta_G$ , der Tropfenmasse  $m_F$  sowie der jeweiligen Relativgeschwindigkeit ermittelt werden (Gleichung 42):

$$a_{(x)} = 3\pi * d_m * \frac{\eta_G}{m_F} * (v_{G(x)} - v_{F(x)}) \quad (42)$$

Abbildung 82 zeigt die einzelnen Geschwindigkeitsverläufe, welche mit den Gleichungen 40 bis 42 ermittelt wurden.

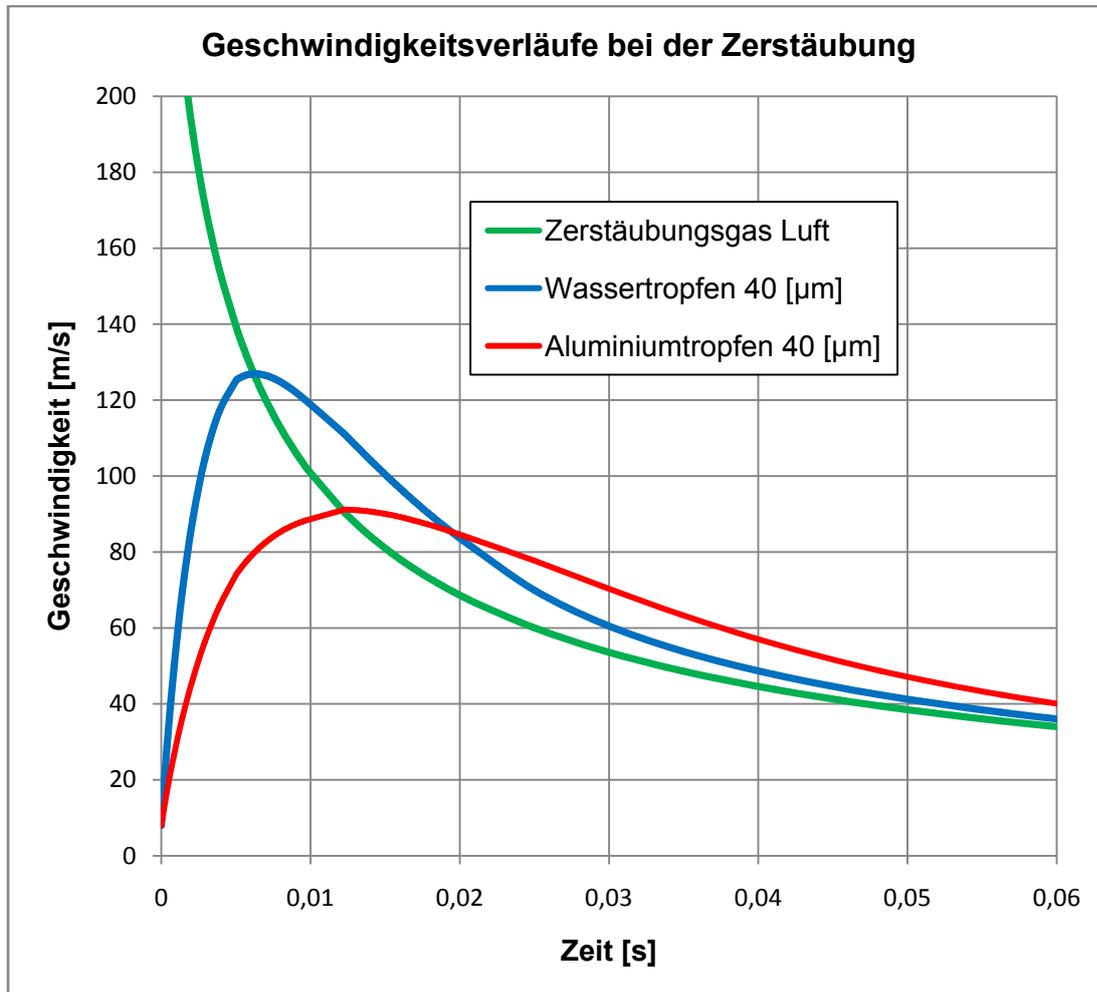


Abbildung 82: Geschwindigkeitsverlauf von Luft, Wasser und Aluminium bei der Zerstäubung ( $v_{G,0}=290$  [m/s];  $v_{F,0}=8$  [m/s])

Betrachtet man Abbildung 82 erkennt man deutlich die große Beschleunigung der Tropfen bei hohen Relativgeschwindigkeiten. Ist die Relaxationszeit erreicht, beginnen sich die einzelnen Tropfen wieder zu verlangsamen. Die Relaxationszeit, welche aus Abbildung 82 abgelesen werden kann, entspricht den errechneten Werten aus Gleichung 30, die in Tabelle 37 angeführt sind.

Abbildung 83 zeigt die Beschleunigung von Wassertropfen mit unterschiedlichen Durchmessern. Aufgrund der höheren Trägheit der größeren Tropfen kommt es zu einer verlangsamtten Beschleunigung.

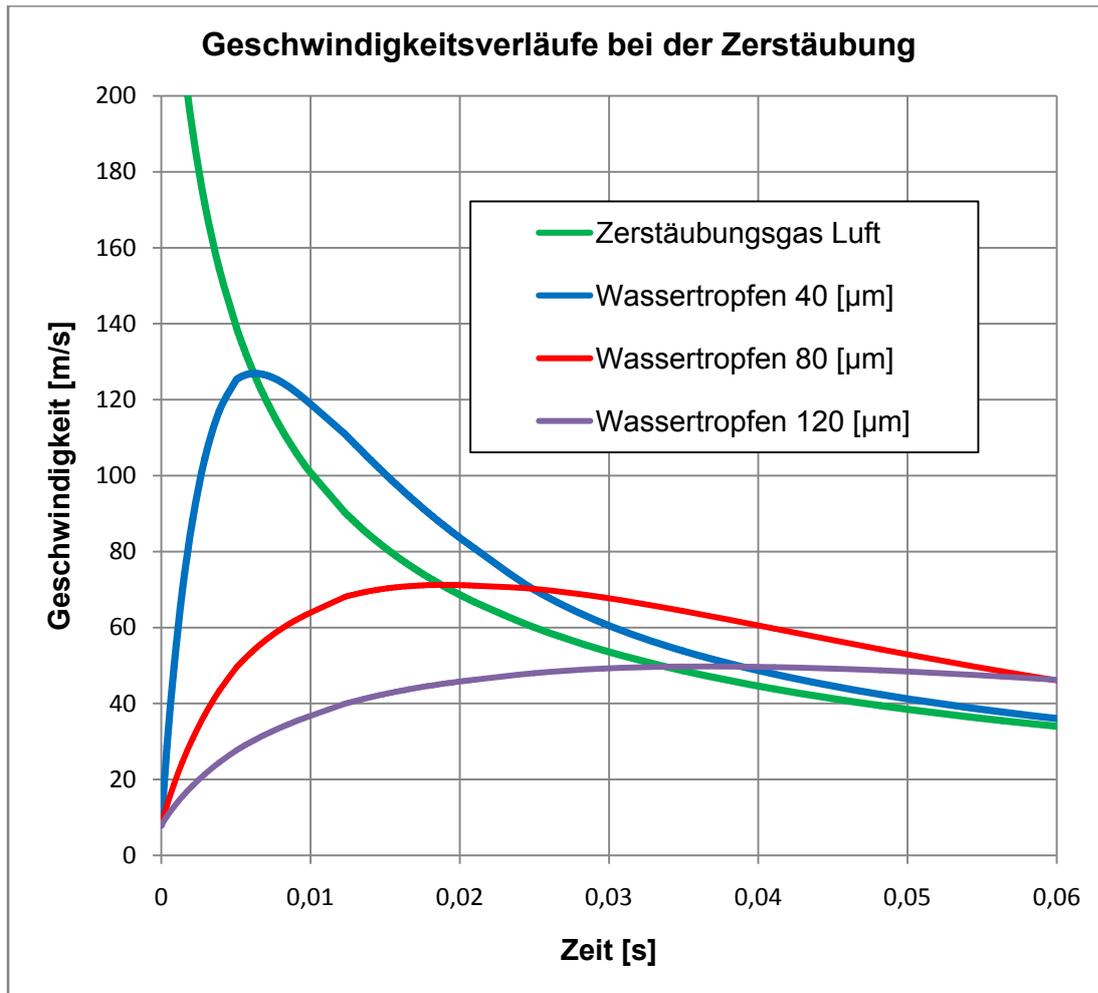


Abbildung 83: Geschwindigkeitsverlauf von Luft und Wassertropfen mit unterschiedlicher Größe bei der Zerstäubung ( $v_{G,0}=290$  [m/s];  $v_{F,0}=8$  [m/s])

In Abbildung 84 wird die Zerfallszeit von Aluminium der des Wassers gegenübergestellt.

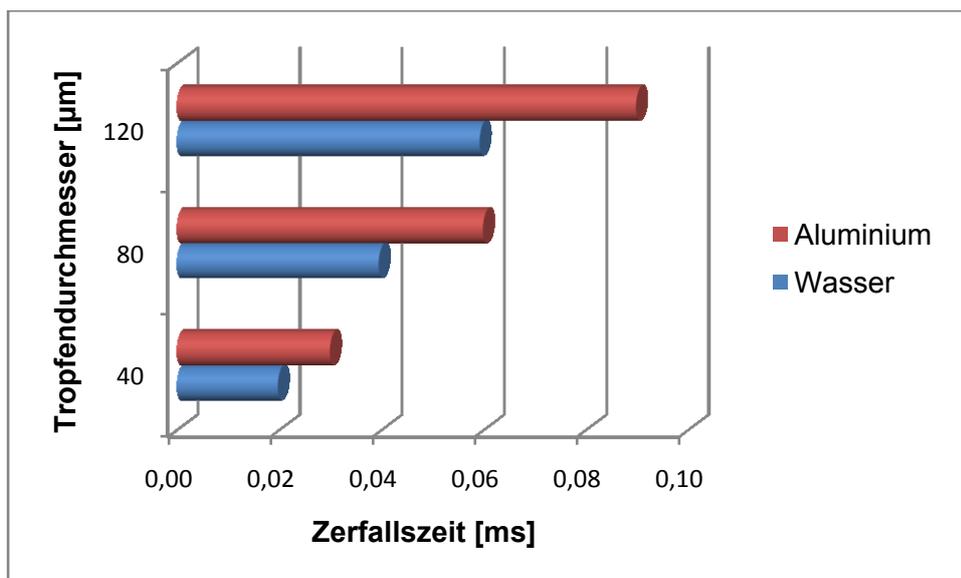


Abbildung 84: Zerfallszeit in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers und des zerstäubten Mediums



Es zeigt sich, dass Aluminium eine längere Zerfallszeit gegenüber Wasser aufweist, die auf den Dichteunterschied zurückzuführen ist.

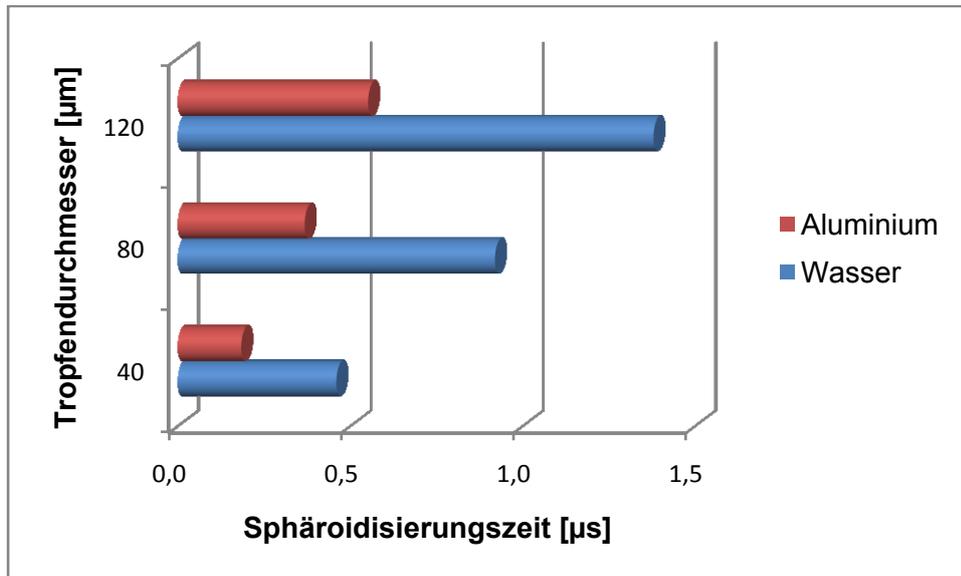


Abbildung 85: Sphäroidisierungszeit in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers und des zerstäubten Mediums

Die Sphäroidisierungszeit ist unabhängig von der Geschwindigkeit und wird hauptsächlich von der Partikelgröße, der Oberflächenspannung sowie der Viskosität der Tropfen bestimmt. Da Aluminium eine höhere Oberflächenspannung als Wasser aufweist, kann sich das Fluidelement rascher zu einer runden Gestalt formen, was in Abbildung 85 deutlich zu erkennen ist.

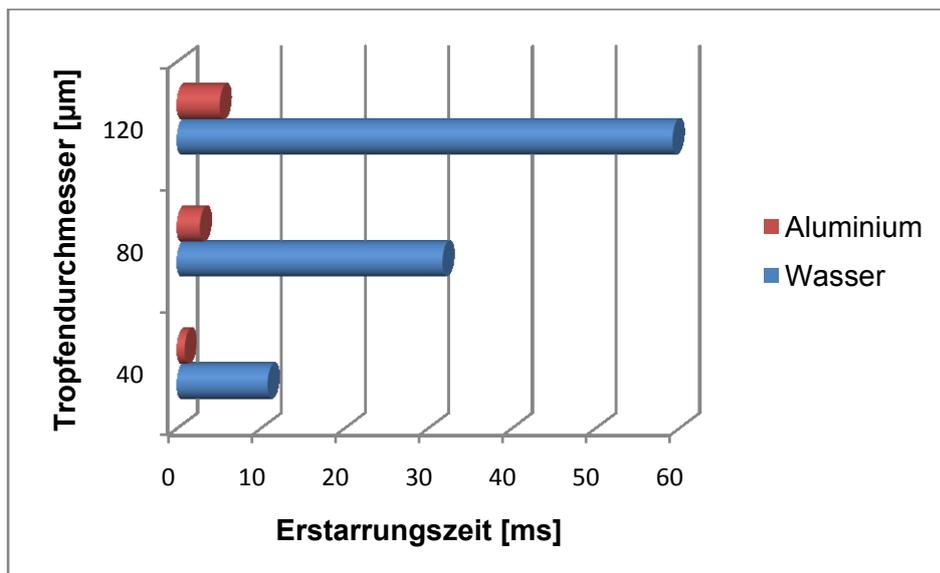


Abbildung 86: Erstarrungszeit in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers und des zerstäubten Mediums

Als letztes charakteristisches Zeitmaß wird die Erstarrungszeit von Wasser und Aluminium in Abbildung 86 verglichen. Da sich jedoch sowohl die Schmelze- als auch die

Erstarrungstemperatur der beiden Medien deutlich voneinander unterscheiden, kann die Erstarrungszeit nur bedingt verglichen werden. Aufgrund der größeren Temperaturdifferenz von Aluminium und Luft erstarrt dieses deutlich rascher als Wasser bei der selben Lufttemperatur.

Aus Sicht der Produkteigenschaften sollen bei der Zerstäubung von Metallschmelze folgende Punkte besonders beachtet werden:

- Die Zerfallszeit und die Sphäroidisierungszeit müssen wesentlich kürzer als die Erstarrungszeit sein.
- Ebenso sollte die Oxidationszeit länger als die Sphäroidisierungszeit sein, um kugelförmige Partikel gewährleisten zu können.

Bei Aluminium (und auch Wasser) sind diese Grundvoraussetzungen zumindest theoretisch gegeben, wie die Berechnungsergebnisse in Tabelle 37 zeigen.

## 9 Zusammenfassung

Zusammenfassend sind folgende Komponenten wesentlich, um geeignete Highspeed-Aufnahmen von Sprays zu erhalten:

- Kamera
- Belichtung
- Objektiv

Die Versuche mit der Nikon D90 zeigen, dass handelsübliche DSR-Kameras gut geeignet sind, um die vorgesehene Belichtung zu testen. Da die Verschlusszeit bei den üblichen Modellen jedoch mit  $1/8000$  [s] begrenzt ist, können nur schwer „eingefrorene“ Bilder bei hohen Geschwindigkeiten gemacht werden. Es besteht zwar die Möglichkeit der Verwendung einer pulsierenden Lichtquelle, um jedoch gewisse Effekte zu beobachten, werden schnelle Bildfolgen benötigt. Hier stoßen DSR-Kameras an ihre Grenzen (Serienbildaufnahme). Nur mit professionellen Highspeed-Videokameras wie der Photron Fastcam ist es möglich, die nötige Detailtiefe zu erhalten, sodass aufgrund dieser Beobachtungen Aussagen getroffen werden können. Auf diese Weise wird es möglich, theoretische Berechnungsansätze auch praktisch nachzuvollziehen. Aufgrund des Handlings empfiehlt es sich, wenn möglich, eine digitale Kamera zu wählen. Besonders die Nachbereitung der gewonnenen Daten kann mit Hilfe der entsprechenden Software sehr vereinfacht werden.

Hinsichtlich der Belichtung kommen bei hohen Geschwindigkeiten fast ausschließlich Blitzlampen oder Laser (Puls/kontinuierlich) in Frage. Laser haben den großen Vorteil, dass diese durch ihre hohe Lichtintensität, die richtige Bauart vorausgesetzt, optimal geeignet sind, um selbst bei schlechtesten Bedingungen den Sensor noch ausreichend zu belichten. Hinzu kommt, dass Blitzlampen bei Highspeed-Aufnahmen der Kamera gegenüber positioniert werden müssen. Dadurch entsteht beispielsweise beim Abbilden von Metallzerstäubungen das Problem, dass das Licht nicht die Partikel passieren kann, was zur Folge hat, dass diese nur als schwarze Punkte am Bild erscheinen. Laser hingegen können, wie es die Versuche gezeigt haben, auch indirekt beleuchten. Ebenso kann Laserlicht bezüglich Form und Richtung sehr einfach mit Hilfe optischer Bausteine verändert werden.

Das verwendete Makroobjektiv erreicht einen Abbildungsmaßstab von 1:1. Mit diesem war es möglich Effekte am Düsenaustritt zu beobachten. Auch größere Partikel im Flug konnten hiermit erfasst werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Pixelgröße am Kamerasensor (Photron Fastcam)  $20$  [ $\mu\text{m}$ ] aufweist, werden Objekte dieser Größe bei einem derartigen Abbildungsmaßstab mit einem Pixel dargestellt. Mit Zwischenringen ergab sich zwar eine Vergrößerung von 2x, um jedoch optisch in den Mikrobereich vorstoßen zu können, werden Mikroobjektive (z.B. Firma Navitar) mit Vergrößerungen von 20x-40x benötigt. Mit deren Verwendung schrumpfen allerdings der freie Arbeitsabstand und die Tiefenschärfe. Zusammenfassend gibt es derzeit keine Lösung, die maximale Vergrößerungen bei großen Arbeitsabständen und gleichsam großem Schärfebereich zulässt. Somit muss eine technisch



vertretbare Kompromisslösung gefunden werden. Zudem darf der deutliche Lichtverlust von Mikroobjektiven nicht vernachlässigt werden. Laser haben jedoch bewiesen, dass sie durchaus im Stande sind, diesen Verlust auszugleichen.

Insgesamt betrachtet decken sich die beobachteten Zerstäubungsvorgänge zum Großteil mit den theoretischen Erwartungen. Besonders die Kelvin-Helmholtz-Instabilität konnte gut aufgezeichnet werden. Auch erhielt man einen Eindruck von den Geschehnissen am Düsenaustritt bei unterschiedlichen Gas- und Liquidgeschwindigkeiten. Mit Kenntnis der Aufnahmezeit sowie des Abbildungsmaßstabs konnte eine zeitliche und räumliche Auswertung der Bilder erfolgen.

## 10 Verzeichnisse

### 10.1 Literatur

- [1] Fa. ScanDig; Strahlenoptik bzw. Geometrische Optik; [www.filmscanner.info/](http://www.filmscanner.info/); abgefragt am 06. Februar 2011
- [2] E. Baumann; Abbildungsmaßstab berechnen; [www.elmar-baumann.de/fotografie/](http://www.elmar-baumann.de/fotografie/); abgefragt am 06. Februar 2011
- [3] Langlotz B. K.; Digitale Fotopraxis, Makrofotografie; Galileo Press, Bonn, DE (2009); pp. 15-44
- [4] Puchner R.; Fotografie, Die Fotoschule; [www.puchner.org/Fotografie/technik/physik/licht.htm](http://www.puchner.org/Fotografie/technik/physik/licht.htm); abgefragt am 06. Februar 2011
- [5] Wikipedia, Die freie Enzyklopädie; CCD-Sensor; <http://de.wikipedia.org/wiki/CCD-Sensor>; abgefragt am 06. Februar 2011
- [6] Academic dictionaries and encyclopedia; <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/599680>; abgefragt am 06. Februar 2011
- [7] Fa. LEDs Com; [www.leds-com.de/index.php?page=Raumwinkel](http://www.leds-com.de/index.php?page=Raumwinkel); abgefragt am 06. Februar 2011
- [8] Jaklitsch W.; Handbuch der Laufbildfotografie; Springer, Wien, AT (2004)
- [9] Informationsdienst Wissenschaft; Ausstellung „Geschichte der Bildverarbeitung“; <http://idw-online.de/pages/de/news231756>; abgefragt am 06. Februar 2011
- [10] Bauer N.; Handbuch der Industriellen Bildverarbeitung; -Alianz Vision, Erlangen, DE (2007); pp. 22-80
- [11] Fa. Navitar, Imaging Solutions; <http://machinevision.navitar.com/catalog/>; abgefragt am 06. Februar 2011
- [12] Fa. 5Lux, Media Engineering; [www.5lux.de/fototechnik](http://www.5lux.de/fototechnik); CCD kontra CMOS; abgefragt am 06. Februar 2011
- [13] Lichtscheidl I; Universität Wien, Video; [www.univie.ac.at/video/index.htm](http://www.univie.ac.at/video/index.htm); abgefragt am 06. Februar 2011
- [14] Hohner M.; Fotografie, Makrofotografie; [www.mhohner.de](http://www.mhohner.de); abgefragt am 06. Februar 2011
- [15] Buchholz A.; Kefk Network Fotografie; [www.kefk.net/Fotografie/Praxis/Technik](http://www.kefk.net/Fotografie/Praxis/Technik); abgefragt am 06. Februar 2011



- [16] Kanitz T; Naturmakrofotografie; [www.natur-makro.de](http://www.natur-makro.de); abgefragt am 06. Februar 2011
- [17] The Macro Lens Collection Database; [www.macrolenses.de](http://www.macrolenses.de); abgefragt am 06. Februar 2011
- [18] Preiss W.; CCD und CMOS Sensor Info; [www.fen-net.de/walter.preiss/d/slomoinf.html](http://www.fen-net.de/walter.preiss/d/slomoinf.html); abgefragt am 06. Februar 2011
- [19] Timmermann O.; Fotografie und Bildbearbeitung; <http://timmermann.tv/technik/iso-empfindlichkeit.php>; abgefragt am 06. Februar 2011
- [20] Whybrew A.; Oxfordlasers; High Speed Imaging; [www.oxfordlasers.com/imaging/high\\_speed](http://www.oxfordlasers.com/imaging/high_speed); abgefragt am 06 Februar 2011
- [21] Fa. Licht.de; Beleuchtungstechnik; [www.licht.de](http://www.licht.de); abgefragt am 06. Februar 2011
- [22] Fa. Polytec; Optische Messtechnik und optische Komponenten; [www.polytec.com](http://www.polytec.com); abgefragt am 06. Februar 2011
- [23] Holst G. C.; Lomheim T. S.; CMOS/CDD Sensors and Camera Systems; Spie Press, Bellingham, Washington, USA (2007); p. 65
- [24] Goodwin M. S. Wigley G., Behaviour of transient 2-D liquid sheets; Institute for Liquid Atomization and Spray Systems (2004)
- [25] Eichler J., Eichler H.J.; Laser, Bauformen, Strahlführung, Anwendungen; Springer, Berlin Heidelberg, DE (2006)
- [26] Morawek R.; Lasertechnologie und ihre Anwendungen; [www.morawek.at/roman/papers/laser/](http://www.morawek.at/roman/papers/laser/); abgefragt am 06. Februar 2011
- [27] Young M.; Optik, Laser, Wellenleiter; Springer, Berlin, DE (1997); pp. 240-242
- [28] Fa. Intel tech; Grundlagen der CCD Fotografie mit digitalen Spiegelreflexkameras; [www.inteltech.com](http://www.inteltech.com); abgefragt am 06. Februar 2011
- [29] Fa. Tamron; Objektivsysteme; [www.tamron.eu/de/start.html](http://www.tamron.eu/de/start.html); abgefragt am 06. Februar 2011
- [30] Fa. Midwest Laser; Remanufactured Ion Laser Technology, Manual 5500A Argon Laser; [www.midwest-laser.com](http://www.midwest-laser.com); abgefragt am 06. Februar 2011
- [31] Fa. Nikon; D90 Spezifikation; [www.nikon-highlights.at/SLR/CONSUMER/D90/](http://www.nikon-highlights.at/SLR/CONSUMER/D90/); abgefragt am 06. Februar 2011
- [32] Cousin .R.; Strömung kompressibler Fluide; Skriptum Strömungstechnik 1 FH-Köln, DE (2003); pp. 8.1-8.15



- [33] Ardenne M., Musiol G, Klemradt U.; Effekte der Physik und ihre Anwendungen; Verlag Harri Deutsch, Frankfurt, DE (2005); pp. 605-608
- [34] Aliseda A., Hopfinger E.J., Lasheras J.C., Kremer D.M., Berchielli A., Conolly E.K.; Atomization of viscous and non-newtonian liquids by a coaxial, high-speed gas jet, Experiments and droplet size modeling; Int. J. Multiphase Flow; Vol. 34 (2007); pp. 161-175
- [35] Delplanque J.-P., Lavernia E.J., Rangel R.H.; Analysis of In-Flight Oxidation During Reactive Spray Atomization and Deposition Processing of Aluminium; J. Heat Transfer, Vol. 122 (2000), pp. 126-133
- [36] Faith G.M., Hsiang L.-P., Wu P.-K.; Structure and breakup properties of sprays; Int. J. Multiphase Flow; Vol. 21 (1995); pp. 99-127
- [37] Lawley A.; Atomization – The production of metal powders; MPIF, Princeton, NJ, USA (1992)

## 10.2 Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
AZV	Auszugsverlängerung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxid Semiconductor
cw	continous wave
DSR	Digitale Spiegelreflex
etc.	et cetera
Fa.	Firma
max.	maximal
OE	Objektentfernung
v.a.	vor allem
vgl.	vergleiche
VZ	Verhältniszahl
z.B.	zum Beispiel
ZR	Zwischenringe

## 10.3 Tabellen

Tabelle 1: Vergleich herkömmlicher Lichtquellen und deren Lichtstrom [1] .....	8
Tabelle 2: Vergleich herkömmlicher Lichtquellen und deren Lichtstrom [1] .....	11
Tabelle 3: Vergleich herkömmlicher Lichtquellen und deren Lichtstrom [1] .....	11
Tabelle 4: Einfluss der Brennweite auf die Naheinstellgrenze <sup>1</sup> [1] .....	16
Tabelle 5: Erreichbare Abbildungsmaßstäbe mit Zwischenringen bzw. Balgengerät [8] .....	20
Tabelle 6: Gängige Lasertypen zur Highspeed-Fotografie [20].....	41
Tabelle 7: Auflistung einiger Highspeed-Kameras inkl. wichtiger Spezifikationsdaten [20] ...	48
Tabelle 8: Spezifikationsdaten des Objektivs [29].....	51
Tabelle 9: Spezifikationsdaten des ILT 5500A [30] .....	52
Tabelle 10: Spezifikationsdaten der DSR-Kamera [31].....	53
Tabelle 11: Spezifikationsdaten der Photron Fastcam SA1.1 .....	55
Tabelle 12: Maximale Auflösung inklusive Bildgröße in Abhängigkeit der Bildrate .....	56
Tabelle 13: Aufnahmebedingungen für Abbildung 44 .....	59
Tabelle 14: Aufnahmebedingungen für Abbildung 45 .....	59
Tabelle 15: Aufnahmebedingungen für Abbildung 46 .....	60
Tabelle 16: Aufnahmebedingungen für Abbildung 47 .....	61



Tabelle 17: Aufnahmebedingungen für Abbildung 48 .....	61
Tabelle 18: Aufnahmebedingungen für Abbildung 49 .....	62
Tabelle 19: Aufnahmebedingungen für Abbildung 50 .....	62
Tabelle 20: Aufnahmebedingungen für Abbildung 53 .....	64
Tabelle 21: Aufnahmebedingungen für Abbildung 55 .....	66
Tabelle 22: Aufnahmebedingungen für Abbildung 56 .....	66
Tabelle 23: Aufnahmebedingungen für Abbildung 58 .....	67
Tabelle 24: Aufnahmebedingungen für Abbildung 60 .....	68
Tabelle 25: Aufnahmebedingungen für Abbildung 63 .....	72
Tabelle 26: Aufnahmebedingungen für Abbildung 64 .....	74
Tabelle 27: Aufnahmebedingungen für Abbildung 65 .....	75
Tabelle 28: Aufnahmebedingungen für Abbildung 66 .....	76
Tabelle 29: Aufnahmebedingungen für Abbildung 67 .....	77
Tabelle 30: Aufnahmebedingungen für Abbildung 68 .....	79
Tabelle 31: Aufnahmebedingungen für Abbildung 69 .....	80
Tabelle 32: Aufnahmebedingungen für Abbildung 71 und 72 .....	82
Tabelle 33: Verwendete Stoffdaten von Aluminium als Zerstäubungsflüssigkeit .....	83
Tabelle 34: Verwendete Stoffdaten von Wasser als Zerstäubungsflüssigkeit.....	84
Tabelle 35: Verwendete Stoffdaten von Luft als Zerstäubungsgas .....	84
Tabelle 36: Werte für die Berechnung der Oxidationszeit.....	94
Tabelle 37: Vergleichende Berechnung von Zerstäubungsvorgängen .....	96
Tabelle 38: Auflistung kommerzieller Laser nach Wellenlängen geordnet [21].....	I

## 10.4 Abbildungen

Abbildung 1: Bildkonstruktion an einer schmalen Sammellinse [2] .....	6
Abbildung 2: Abhängigkeit der Bildgröße von Brennweite und Gegenstandsweite .....	7
Abbildung 3: Spektrum des sichtbaren Lichtes [4] .....	7
Abbildung 4: Hellempfindlichkeitskurve für Nacht- (blau) und Tagsehen (rot) [6] .....	8
Abbildung 5: Berechnung des Raumwinkels (Steradian) [7] .....	9
Abbildung 6: Fotometrisches Entfernungsgesetz [8].....	10
Abbildung 7: Vergleich entozentrische (links) und telezentrische (rechts) Aufnahme [11].....	13
Abbildung 8: Funktionsprinzip eines CCD-Sensors[12] .....	13



Abbildung 9: Funktionsprinzip eines CMOS-Sensors[12] .....	14
Abbildung 10: Aufnahme mit geringer Schärfentiefe .....	15
Abbildung 11: Makroobjektiv Fa. Sigma 180mm F3,5 EX DG / HSM .....	17
Abbildung 12: Umkehring (Retrostellung) .....	17
Abbildung 13: Telekonverter Fa. Sigma 2,0x EX DG .....	18
Abbildung 14: Zwischenringe [16] .....	19
Abbildung 15: Balgengerät .....	19
Abbildung 16: Lupenobjektiv Luminar von Zeiss .....	20
Abbildung 17: Vergrößerung und Arbeitsdistanz von Zeiss Luminar Objektiven [17] .....	21
Abbildung 18: 12x Zoom Objektivsystem der Fa. Navitar .....	22
Abbildung 19: Vergleich hinsichtlich Arbeitsdistanz und Vergrößerung von 12x Zoom Objektivsystemen der Fa. Navitar [11] .....	22
Abbildung 20: Flussdiagramm zur Belichtung von Bildsensoren [8] .....	25
Abbildung 21: Darstellung von Belichtung H und Belichtungsumfang [8] .....	28
Abbildung 22: Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges und einiger lichtelektrischer Empfängermaterialien [8] .....	30
Abbildung 23: Spektrale Empfindlichkeit, Vergleich menschliches Auge und CCD/CMOS Sensoren [18] .....	30
Abbildung 24: Bildrauschen (links) aufgrund einer hohen ISO-Empfindlichkeit .....	31
Abbildung 25: Zusammenhang ISO-Empfindlichkeit, Lux und Belichtungsdauer .....	32
Abbildung 26: Einteilung der Lichtquellen [8] .....	34
Abbildung 27: Bildeffekte bei der Aufnahme bewegter Objekte [23] .....	35
Abbildung 28: Möglicher Versuchsaufbau zur Aufnahme von Sprays mit Stroboskop .....	35
Abbildung 29: Zerstäubung von Benzin mit einer rotierenden Düse (100x60 [mm] Bildgröße) [24] .....	36
Abbildung 30: Prinzip der induzierten Emission [25] .....	37
Abbildung 31: Emissionsspektrum von Argon in [nm] in Abhängigkeit der relativen Laserleistung [25] .....	39
Abbildung 32: Entladungsrohr des Argonionenlasers [25] .....	39
Abbildung 33: Schema eines Nd:YAG-Lasers [26] .....	40
Abbildung 34: Anwendungsbeispiel für Highspeed-Aufnahmen mit Laser .....	41
Abbildung 35: Spraypartikel eines Inhalators mit aufgefächertem Laserstrahl belichtet [20] .....	42

Abbildung 36: Dunkelstromeffekt aufgrund Erwärmung durch linksseitig liegenden Ausleseverstärker [28] .....	44
Abbildung 37: Abhängigkeit der Bildqualität von den einzelnen Komponenten .....	50
Abbildung 38: Tamron SP AF 180 F3.5 .....	51
Abbildung 39: ILT 5500A Ar <sup>+</sup> -Laser.....	52
Abbildung 40: Nikon D90 Gehäuse (ohne Objektiv).....	53
Abbildung 41: Pixelabbildung eines idealen Wassertropfens am D90-Sensor .....	54
Abbildung 42: Photron Fastcam SA1.1 .....	55
Abbildung 43: Pixelabbildung eines idealen Wassertropfens am Fastcam SA1.1-Sensor ....	56
Abbildung 44: Aufnahme zur Ermittlung des Abbildungsmaßstabes .....	58
Abbildung 45: Bild links: ohne ZR; Bild rechts: mit 136 [mm] ZR .....	59
Abbildung 46: Aufnahmen bei unterschiedlicher ISO-Empfindlichkeit .....	60
Abbildung 47: ISO 200 Aufnahmen bei unterschiedlicher Verschlusszeit.....	60
Abbildung 48: ISO 6400 Aufnahmen bei unterschiedlicher Verschlusszeit.....	61
Abbildung 49: Aufnahmen bei unterschiedlicher Blendenzahl .....	62
Abbildung 50: Aufnahmen bei direkter Motivbeleuchtung (Mitte und rechts) .....	62
Abbildung 51: Versuchsaufbau A; Nikon D90(Ansicht von oben) .....	63
Abbildung 52: Laserstrahlführung im Spray .....	64
Abbildung 53: Aufnahme von im Flug befindlichen Tropfen mit einem Laserstrahl belichtet .	64
Abbildung 54: Versuchsanordnung B; Nikon D90 (Ansicht von oben) .....	65
Abbildung 55: Aufnahme der Düse ohne Zerstäubungsluft.....	65
Abbildung 56: Aufnahme der Düse mit Zerstäubungsluft bei unterschiedlicher Blende.....	66
Abbildung 57: Düse mit Zerstäubungsluft; direkte Fokussierung auf den hellsten Bereich ...	67
Abbildung 58: Versuchsanordnung C; Nikon D90 (Ansicht von oben).....	67
Abbildung 59: Versuchsanordnung C.....	68
Abbildung 60: Partikel unmittelbar nach der Düse mit Laserstrahl belichtet .....	68
Abbildung 61: Ermittlung der Wegstrecke einiger Partikel .....	69
Abbildung 62: Versuchsanordnung A; Photron Fastcam (Ansicht von oben) .....	71
Abbildung 63: Highspeed-Aufnahme 1.....	71
Abbildung 64: Highspeed-Aufnahme 2 (Bildserie) .....	73
Abbildung 65: Highspeed-Aufnahme 3.....	75
Abbildung 66: Highspeed-Aufnahme 4.1 (Bildserie) .....	76

Abbildung 67: Highspeed-Aufnahme 4.2.....	77
Abbildung 68: Highspeed-Aufnahme 5.....	78
Abbildung 69: Highspeed-Aufnahme 6.....	79
Abbildung 70: Versuchsanordnung B; Photron Fastcam (Ansicht von oben) .....	81
Abbildung 71: Highspeed-Aufnahme 7.1 (Bildserie) .....	81
Abbildung 72: Highspeed-Aufnahme 7.1 (Bildserie) .....	82
Abbildung 73: Entstehung einer Scherschicht [33].....	86
Abbildung 74: Idealisierung der Scherschicht [33] .....	86
Abbildung 75: Aufwicklung der Scherschicht [33] .....	87
Abbildung 76: Primäre Instabilität in einem Flüssigstrahl; verursacht durch schnelleren Luftstrom [34] .....	87
Abbildung 77: Einfluss der Partikelgröße auf die Geschwindigkeit des einzelnen Aluminiumtropfens nach Delplanque et al.[35].....	90
Abbildung 78: Verlauf der Zerfallszeit unterschiedlicher Wasserpartikel in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit der Tropfen in Luft. ....	91
Abbildung 79: Verlauf der Tropfenerstarrung eines 80 [µm] großen Al-Partikels nach Delplanque et al.[35] .....	93
Abbildung 80: Oxidschicht, feste und flüssige Regionen eines Schmelzetropfens (links); Ortsangabe der einzelnen Trennflächen (rechts) nach Delplanque et al.[35].....	94
Abbildung 81: Relaxationszeit in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers und des zerstäubten Mediums .....	97
Abbildung 82: Geschwindigkeitsverlauf von Luft, Wasser und Aluminium bei der Zerstäubung ( $v_{G,0}=290$ [m/s]; $v_{F,0}=8$ [m/s]) .....	98
Abbildung 83: Geschwindigkeitsverlauf von Luft und Wassertropfen mit unterschiedlicher Größe bei der Zerstäubung ( $v_{G,0}=290$ [m/s]; $v_{F,0}=8$ [m/s]) .....	99
Abbildung 84: Zerfallszeit in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers und des zerstäubten Mediums.....	99
Abbildung 85: Sphäroidisierungszeit in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers und des zerstäubten Mediums .....	100
Abbildung 86: Erstarrungszeit in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers und des zerstäubten Mediums .....	100
Abbildung 87: Veränderung des Bildausschnittes bei steigender Bildrate .....	II

## 11 Anhang

Tabelle 38: Auflistung kommerzieller Laser nach Wellenlängen geordnet [21]

Wellenlänge	Bezeichnung	Betriebsart, mittlere Leistung
0,152 $\mu\text{m}$	F <sub>2</sub> -Excimerlaser	Pulse, einige W
0,192 $\mu\text{m}$	ArF-Excimerlaser	Pulse, einige W
0,222 $\mu\text{m}$	KrCl-Excimerlaser	Pulse, einige W
0,248 $\mu\text{m}$	KrF-Excimerlaser	Pulse, einige 10 W
0,266 $\mu\text{m}$	Nd-Laser, vervierfacht	Pulse, einige 0,1 W
0,308 $\mu\text{m}$	XeCl-Excimerlaser	Pulse, einige 10 W
0,325 $\mu\text{m}$	He-Cd-Laser	kont., einige mW
0,337 $\mu\text{m}$	N <sub>2</sub> -Laser	Pulse, einige 0,1 W
0,35 $\mu\text{m}$	Ar <sup>+</sup> -, Kr <sup>+</sup> -Laser	kont., 2 W
0,351 $\mu\text{m}$	XeF-Excimerlaser	Pulse, einige 10 W
0,355 $\mu\text{m}$	Nd-Laser, verdreifacht	Pulse, einige 10 W
0,38 ... 0,45 $\mu\text{m}$	GaInN-Diodenlaser	kont., 10 mW
0,3 ... 1,0 $\mu\text{m}$	Farbstofflaser	Pulse, einige 10 W
0,4 ... 0,9 $\mu\text{m}$	Farbstofflaser	kont., einige W
0,442 $\mu\text{m}$	He-Cd-Laser	kont., einige 10 mW
0,45 ... 0,52 $\mu\text{m}$	Ar <sup>+</sup> -Laser	kont., mW bis 30 W
0,51 $\mu\text{m}$	Cu-Laser	Pulse, einige 10 W
0,532 $\mu\text{m}$	Nd-Laser, verdoppelt	Pulse und kont., einige W cw
0,543 $\mu\text{m}$	He-Ne-Laser	kont., einige 0,1 mW
0,578 $\mu\text{m}$	Cu-Laser	Pulse, einige 10 W
0,628 $\mu\text{m}$	Au-Laser	Pulse, bis zu 10 W
0,632 $\mu\text{m}$	He-Ne-Laser	kont., bis zu 100 mW
0,635 ... 0,670 $\mu\text{m}$	InGaAsP-Diodenlaser	kont., 10 mW
0,647 $\mu\text{m}$	Kr <sup>+</sup> -Laser	kont., einige W
0,694 $\mu\text{m}$	Rubinlaser	Pulse, einige W
0,7 ... 0,8 $\mu\text{m}$	Alexandrit-Laser	Pulse, einige W
0,7 ... 1 $\mu\text{m}$	Ti:Saphir	Pulse und kont., einige W
0,75 ... 0,9 $\mu\text{m}$	GaAlAs-Diodenlaser	kont. und Pulse, bis 1 W
0,8 ... 2,4 $\mu\text{m}$	Cr: LiSAF u. a. vibr. Laser	kont., um 1 W
1,06 $\mu\text{m}$	Nd-Laser	kont. und Pulse, über 1000 W cw
1,15 $\mu\text{m}$	He-Ne-Laser	kont., mW
1,1 ... 1,6 $\mu\text{m}$	InGaAsP-Diodenlaser	kont. und Pulse, mW cw
1,3 $\mu\text{m}$	Jodlaser	Pulse
1,32 $\mu\text{m}$	Nd-Laser	kont. und Pulse, einige W cw
1,52 $\mu\text{m}$	He-Ne-Laser	kont., mW
1,54 $\mu\text{m}$	Er-Glaslaser	Pulse
1,73 $\mu\text{m}$	Er-Laser	Pulse
2 ... 4 $\mu\text{m}$	Xe-He-Laser	kont., mW
2,06 $\mu\text{m}$	Ho-Laser	Pulse
2,3 ... 3,3 $\mu\text{m}$	Farbzentrenlaser	kont., mW
2,6 ... 3,0 $\mu\text{m}$	HF-Laser	kont. und Pulse, bis 100 W cw
2,7 ... 3,0 $\mu\text{m}$	Bleisalz-Dioden-Laser	kont., mW
2,9 $\mu\text{m}$	Er-Laser	Pulse
3,39 $\mu\text{m}$	He-Ne-Laser	kont., mW
3,6 ... 4 $\mu\text{m}$	DF-Laser	kont. und Pulse, bis 100 W cw
5 ... 6 $\mu\text{m}$	CO-Laser	kont., 10 W
9 ... 11 $\mu\text{m}$	CO <sub>2</sub> -Laser	kont. u. Pulse, bis mehrere kW cw
5 ... 20 $\mu\text{m}$	Bleisalz-Dioden-Laser	kont., mW
40 ... 1000 $\mu\text{m}$	Ferninfrarot-Laser	kont., bis 1 W



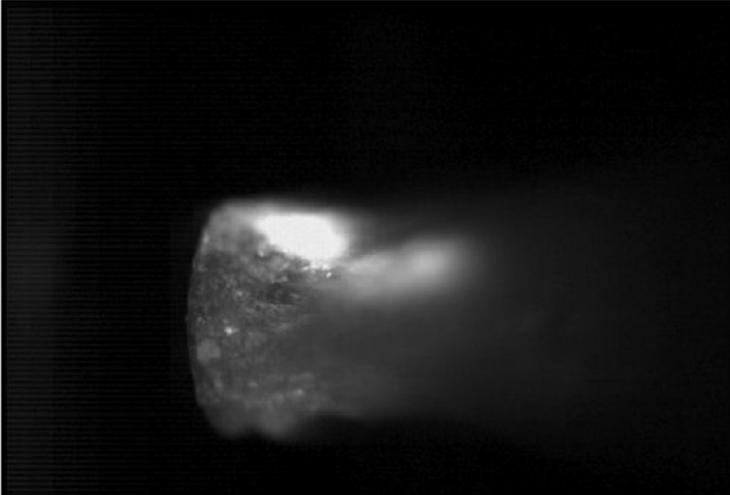
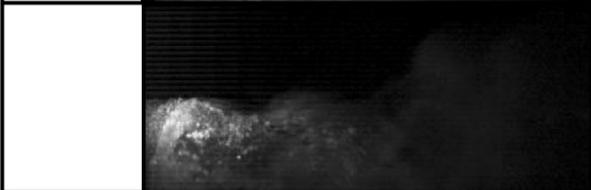
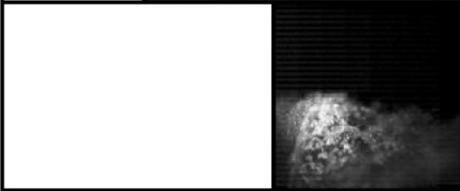
	30.000 [fps] 512x352 Pixel Gamma=0,635
	54.000 [fps] 320x256 Pixel Gamma=0,75
	100.000 [fps] 320x128 Pixel Gamma=0,615
	180.000 [fps] 128x128 Pixel Gamma=0,665
	250.000 [fps] 128x80 Pixel Gamma=0,525

Abbildung 87: Veränderung des Bildausschnittes bei steigender Bildrate