

# Kapitel 3

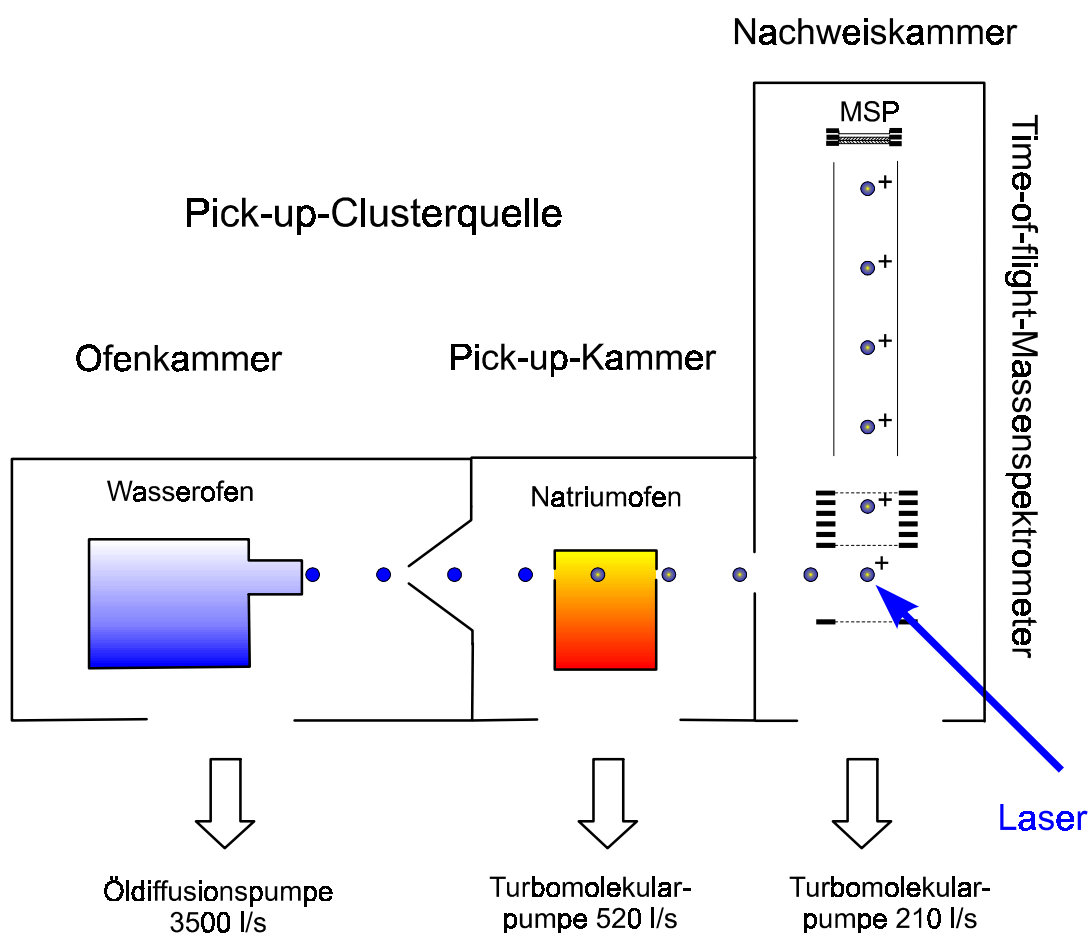
## Experimenteller Aufbau

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Eigenschaften von Natrium-Wasser-Clustern untersucht. Die Beschreibung des experimentellen Aufbaus gliedert sich wie folgt: Zunächst wird die Molekularstrahlapparatur und die im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute Clusterquelle beschrieben. Eine allgemeine Darstellung der Steuerung des Experiments und der Datenaufnahme schließt sich an. Die verwendeten Methoden der Depletion- und der Pump-Probe-Spektroskopie erfordern leichte Modifikationen des optischen Aufbaus und der Steuerung des Experiments. Die spezifischen Veränderungen und die jeweils verwendeten Lasersysteme werden im letzten Abschnitt beschrieben.

### 3.1 Die Molekularstrahlapparatur

Die schematisch im vertikalen Schnitt in Abbildung 3.1 dargestellte Vakuumapparatur besteht aus drei Kammern: Die erste Kammer, die auch als Ofenkammer bezeichnet wird, beherbergt den Wasserofen, in der zweiten Kammer befindet sich der Natriumofen und in der letzten Kammer werden die Cluster ionisiert und massenselektiert nachgewiesen.

In der Ofenkammer wird ein Clusterstrahl durch Überschallexpansion von Wasserdampf in das Vakuum erzeugt und mit einem Skimmer kollimiert. Die Wassercluster durchqueren eine mit Natriumdampf gefüllte Zelle und nehmen Natriumatome auf. Die so erzeugten neutralen Mischcluster werden in der Nachweiskammer mit La-



**Abbildung 3.1:** Schematische Darstellung der Clusterapparatur im vertikalen Schnitt. Der Clusterstrahl wird durch Überschall-expansion erzeugt und nach 25 mm durch einen Skimmer kollimiert. Nach einer weiteren Flugstrecke von 260 mm durchqueren die Wassercluster einen Natriumofen (Durchmesser 25 mm), wo sie einzelne Atome einfangen. Die Natrium-Wasser-Komplexe werden nach 280 mm photoionisiert und in einem Flugzeit-Massenspektrometer nach ihrer Masse selektiert.

serlicht ionisiert und in einem linearen Time-of-Flight Massenspektrometer (TOF) in der zweistufigen Wiley-McLaren Anordnung massenselektiert [WM55]. In dem Time-of-Flight-Massenspektrometer werden die Ionen der Ladung  $q$  mit einem elektrischen Feld abgezogen und besitzen damit die kinetische Energie  $q \cdot U$ .  $U$  bezeichnet die Potentialdifferenz zwischen dem Entstehungsort der Ionen und dem Potential der sich anschließenden feldfreien Flugstrecke. Die Ionen besitzen somit eine Geschwindigkeit, die von ihrer spezifischen Ladung  $m/q$  abhängt. Als Ionennachweis dienen Micro-Sphere-Plates (MSP). Ionen die auf die Oberfläche eines MSPs auftreffen, lösen Elektronen aus, die bei ihrem Weg durch das MSP weitere Elektronen ausschlagen. So kommt es zu einer Verstärkung um einen Faktor von bis zu  $10^8$ . Als Meßsignal wird ein Ionenspektrum in Abhängigkeit von der Flugzeit aufgenommen.

Die Ofenkammer kann durch ein Ventil von den beiden folgenden Kammern abgetrennt werden. Die Saugleistung der benutzten Pumpen sowie der Druck in den Kammern während des Betriebs sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Eine ausführlichere Beschreibung der Vakuumapparatur und des Ionennachweis findet sich bei P. Brockhaus [Bro97].

### 3.1.1 Die Clusterquelle

Die Clusterquelle wurde im Rahmen dieser Arbeit konzipiert und aufgebaut, und sie wird im folgenden beschrieben. Freie neutrale Natrium-Wassercluster  $[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_n]$  wurden erstmals im Rahmen der Dissertation von C. P. Schulz in einem Molekularstrahl-experiment erzeugt [Sch87]. Hierbei handelte es sich auch um eine sogenannte Pick-up-Quelle, bei der ein Natriumstrahl in die Expansionszone eines gepulsten Wasser-Argon-Überschallstrahls injiziert wurde. In dieser Anordnung konnten erstmals das Ionisationspotential der  $\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_n$ -Cluster bis  $n = 5$  bestimmt werden. Diese Experimente wurden von C. Nitsch im Rahmen ihrer Dissertation mit einer leicht veränderten Quelle weitergeführt, und mit dieser Anordnung wurde das Ionisationspotential bis  $n = 25$  bestimmt [Nit93]. Die spektroskopische Untersuchung eines elektronisch angeregten Zustands und die Untersuchung von Komplexen mit mehr als einen Natriumatom sind mit diesem Aufbau aufgrund einer zu geringen Clusterdichte im Strahl nicht möglich. Die Anforderungen an eine neue Natrium-Wasser-Clusterquelle bestehen also in einer höheren Clusterintensität und in der Erzeugung von Komplexen, die mehr als ein Natri-

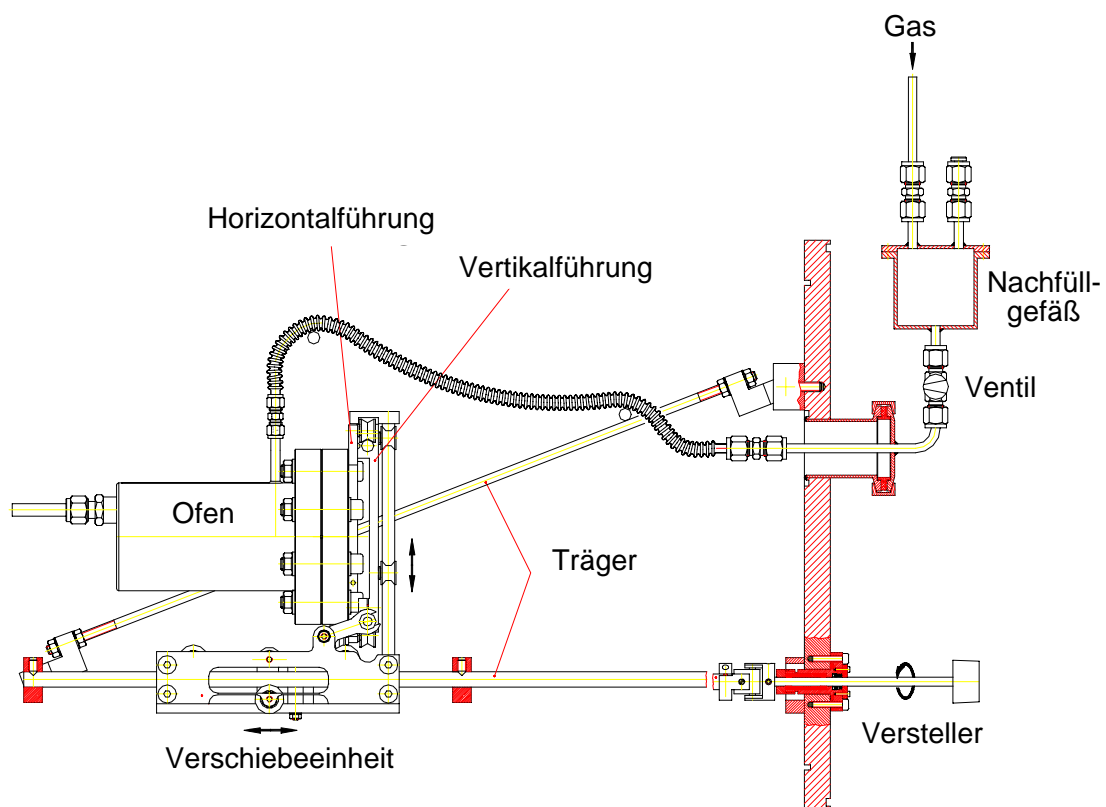
umatom enthalten. Zudem soll die Quelle während des Experiments stabil und einfach zu bedienen sein.

Große Cluster und hohe Clusterintensitäten werden durch einen hohen Expansionsdruck des Gases erreicht (vergleiche Gleichung 2.5). In der alten Anordnung beschränkt die Raumtemperatur den Dampfdruck des Wassers. In der neuen Anordnung wird ein höherer Wasserdampfdruck erzeugt, da das Wasser in einem Ofen in der Vakuumkammer aufgeheizt wird. Neu ist zudem, daß die Cluster die Natriumatome *in* einer Gaszelle aufnehmen. Dazu wurde ein Natriumofen so in der Vakuumapparatur angeordnet, daß dessen Ein- und Austrittsöffnungen sich auf der Strahlachse des Wassermolekularstrahls befinden. Das Pick-up-Verfahren in einer Gaszelle ist eine sehr effiziente Methode, da die Gasdichte  $n_0$  im Ofen immer größer als die Dichte des zugehörigen Atomstrahls ist. Vorteilhaft in dieser Anordnung ist zudem, daß sich  $n_0$  direkt über die Temperatur der Zelle bzw. des Ofens regeln läßt. Die Öfen sind in zwei Kammern untergebracht, die durch ein Ventil voneinander getrennt werden können. Dies bietet die Möglichkeit, Arbeiten am Wasserofen durchzuführen, z. B. die Düse auszutauschen, ohne den Natriumofen zu belüften.

### 3.1.1.1 Der Wasserofen

Der Wasserofen ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Er setzt sich aus einem Kessel, in dem das Wasser erhitzt wird, und einer Düseneinheit zusammen. Der Kessel besteht aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 70 mm, das an der Vorderseite verschweißt ist. Als Rückwand dient ein CF-63 Flansch, der mit dem Ofen verschraubt wird. In die vordere Wand des Kessels ist eine 8 mm Gyrolokverschraubung eingeschweißt, mit der verschiedene Düsenaufsätze verschraubt werden können. Die Clusterverteilung in einem Überschallstrahl wird stark von dem Düsendurchmesser und der Geometrie der Düse beeinflusst. Um hier möglichst flexibel zu sein, wurde die Düseneinheit des Wasserofens so konzipiert, daß Düsen leicht austauschbar sind. In dieser Arbeit werden Aufsätze mit Lochdüsen mit einem Durchmesser von 50  $\mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  und mit einer konisch geformten Düse mit einem Durchmesser von 100  $\mu\text{m}$  und einem Öffnungswinkel von  $\alpha = 15.6^\circ$  benutzt.

Der Kessel und die Düseneinheit werden getrennt beheizt und sind mit Tem-



**Abbildung 3.2:** Darstellung des im Rahmen dieser Arbeit gebauten Wasserofens. Es kann sowohl reiner Wasserdampf als auch ein Gemisch aus Wasserdampf und einem Trägergas in das Vakuum expandiert werden. Das Trägergas wird über eine Vakuumdurchführung und einen Welschlauch in den Ofen geleitet. Mit Hilfe eines außerhalb der Kammer angebrachten Nachfüllgefäßes kann Wasser während des Betriebs nachgefüllt werden. Der Ofen ist über eine Verschiebeeinheit während des Betriebs im Vakuum in drei Raumrichtungen verstellbar.

peraturfühlern (PT-100) versehen. Als Heizung des Kessels dient ein 2 mm starkes Thermokoaxial-Kabel. Um die Wärmeleitung zwischen Thermokoaxial-Kabel und Kessel zu verbessern, ist eine spiralförmige Spur mit 1 mm Durchmesser und 2 mm Abstand ausgefräst, in die das Heizkabel gelegt wurde. Typische Heizströme im Experiment haben einen Wert von 0,5 bis 3 A. Ein Mantel aus 1 mm dickem Stahlblech sorgt für eine homogene Wärmeverteilung. Die Düse wird mit einem 1 mm starken Thermokoaxial-Kabel geheizt. Es ist um ein 25 mm langes Röhrchen mit 8.3 mm Durchmesser gewickelt. Das Rohr mit seiner Heizung kann einfach über die Düseneinheit geschoben werden, so daß nicht jede der benutzten Düsen mit einem Heizdraht versehen werden muß. Der Ofen kann maximal bis auf eine Temperatur von 200° C geheizt werden, was einem Wasserdampfdruck von 10 bar entspricht.

Die Düsentemperatur sollte mindestens 10 – 15° C über der Kesseltemperatur liegen. Sinkt die Düsentemperatur auf die Kesseltemperatur oder darunter ab, kondensiert der Wasserdampf im Düsenröhrchen. Das flüssige Wasser wird durch den Dampfdruck im Kesselinneren aus der Düse herausgedrückt und bildet einen Eiszapfen vor der Düse, der durch starkes Heizen der Düse zu beseitigen ist. Gleiches geschieht, wenn der Ofen bis über die Düsenkante mit Wasser gefüllt wird.

Zusätzlich zur Expansion des reinen Wasserdampfs, kann der Molekularstrahl unter Verwendung eines Trägergases expandiert werden. Dazu wird dem Wasserofen ein Gas über einen Wellschlauch zugeführt.

Der Ofen kann auch während des Betriebs durch eine externe Nachfüllvorrichtung befüllt werden. Außerhalb der Vakuumkammer befindet sich ein Nachfüllgefäß mit drei Zuleitungen. In der ersten befindet sich ein Edelgas, die zweite mündet in einer Blindverschraubung und wird zum Wassereinfüllen benutzt, und die dritte führt über ein Ventil, das nur zum Nachfüllen geöffnet wird, zum Wasserofen. Das Gas in der ersten Zuleitung drückt das eingefüllte Wasser gegen den im Ofen herrschenden Dampfdruck in den Kessel. Da nur Wasser und kein Gas in den Ofen gelangen soll, befindet sich zwischen Füllgefäß und Ventil ein transparentes Röhrchen aus Teflon. Hier ist der Übergang von Wasser zu Gas gut erkennbar, und das Ventil kann rechtzeitig geschlossen werden.

Der Wasserofen kann während des Betriebs in allen drei Raumrichtungen verstellt werden, was die Justage des Systems erheblich vereinfacht. Der Molekularstrahl legt

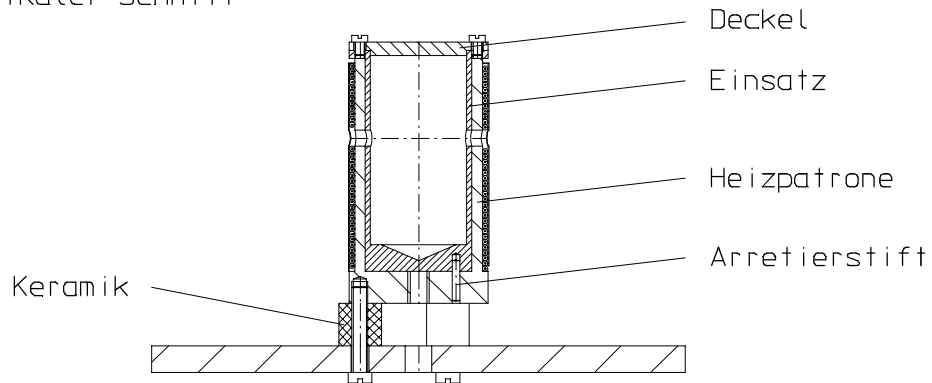
von der Düse bis zum Ionisationsort 590 mm zurück und muß nach 285 mm und 310 mm Flugstrecke die Eintrittsblenden des Natriumofens von 3 mm Durchmesser passieren. Liegt der tatsächliche Strahl nicht genau auf der vorgesehenen Strahlachse, geht Ionensignal im Experiment verloren. Insbesondere konische Düsen, die nicht ganz symmetrisch geformt sind, erzeugen einen Molekularstrahl, der von der vorgesehenen Strahlachse in der Apparatur abweicht.

### 3.1.1.2 Der Natriumofen

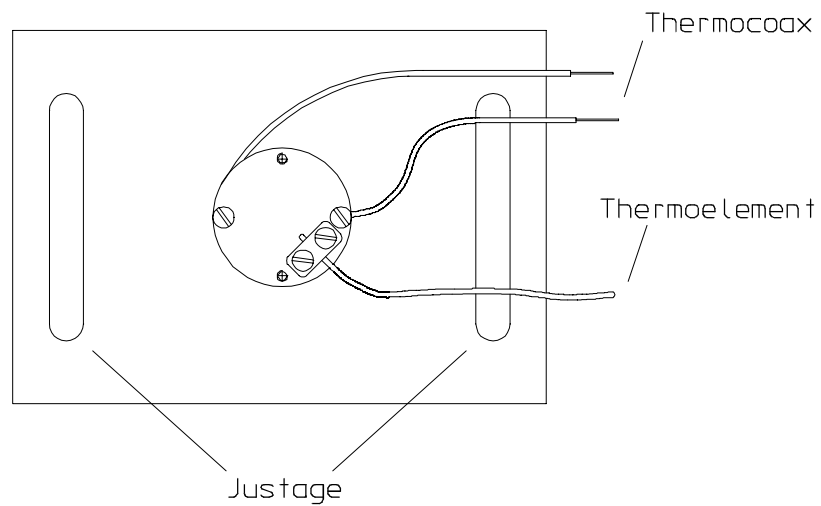
Der Natriumofen ist in Abbildung 3.3 im vertikalen Schnitt und in der Draufsicht dargestellt. Aufgrund der großen Reaktivität von Natrium und der relativ großen Eintritts- und Austrittsöffnungen des Ofens (3 mm) besteht der Natriumofen aus zwei Einheiten, einer Heizpatrone und einem Einsatzgefäß. Dies bietet den Vorteil, daß die Heizpatrone in der Kammer auf die Strahlachse justiert werden kann, während das Gefäß mit dem Natrium erst unmittelbar vor dem Evakuieren in die Kammer gebracht wird. Ein weiterer Vorteil dieses Designs ist, daß die Substanz während des Experiments schnell gewechselt werden kann. Nur das Innengefäß wird ausgetauscht, die Justage des Ofens bleibt erhalten. Der Einsatz besitzt einen Außendurchmesser von 20 mm und eine Wandstärke von 1 mm. Zwei gegenüberliegende Bohrungen ( $d = 3$  mm) dienen als Eintritts- und Austrittsöffnung für den Molekularstrahl. Der Einsatz wird durch einen Deckel verschlossen, der mit zwei Schrauben befestigt wird. Zusätzlich befinden sich um  $90^\circ$  versetzt dazu zwei Gewindebohrungen im Deckel. Hier können Schrauben eingedreht werden, um den Deckel vom Einsatz zu lösen. Dies ist notwendig, da der obere Teil des Ofens nach der Messung zuerst erkaltet und der Natriumdampf dort kondensiert. Der Temperaturfühler wird mit zwei Schrauben zwischen dem Deckel und einem kleinen Stück Metallblech befestigt.

Das Gefäß paßt genau in eine Heizpatrone, die mit 1 mm starkem Thermokoaxial-Heizdraht umwickelt ist. Es wird durch einen Stift am inneren Boden der Heizpatrone positioniert, so daß die Öffnungen der Gefäße übereinanderliegen. Die Heizpatrone ist durch drei Schrauben mit der Grundplatte verbunden. Um die Wärmeleitung zur Ofenhalterung zu minimieren, wurden Keramikhülsen zwischen Ofen und Grundplatte benutzt. Die Grundplatte kann über Langlöcher senkrecht zur Molekularstrahlachse in der Vakuumkammer justiert werden.

a) vertikaler Schnitt



b) Draufsicht



**Abbildung 3.3:** Der Natriumofen besteht aus einer Heizpatrone und einem Einsatz. Der Einsatz wird erst kurz vor dem Evakuieren in die Kammer gebracht, um eine starke Oxidation des Natriums zu verhindern.



Wird der Ofen höher als auf eine Temperatur von  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  geheizt, kondensierte der Natriumdampf sichtbar an den Wänden und Fenstern in der Kammer. Bei Messungen zur Depletionspektroskopie unter diesen Bedingungen, mußte das Einkoppelfenster der Laserstrahlung beheizt werden ( $T \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Im Experiment wird der Ofen vorwiegend mit  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  betrieben, um die Turbomolekularpumpe nicht zu stark mit Natrium zu kontaminieren.

## 3.2 Steuerung und Datenaufnahme

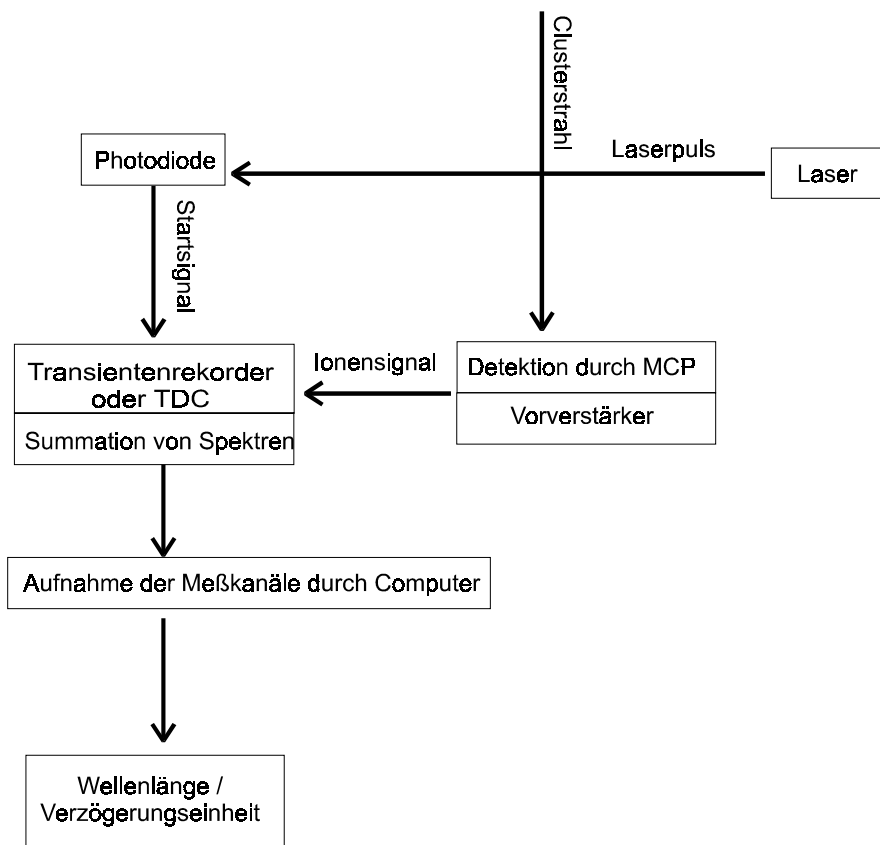
Die Steuerung und die Datenaufnahme des Experiments sind schematisch in Abbildung 3.4 dargestellt. Der Laserstrahl trifft nach Durchlaufen der Clusterapparatur auf eine Photodiode, die einen Steuerpuls als Startsignal für den Transientenrekorder liefert. Die ionischen Cluster treffen nach einer Flugzeit von einigen  $10\text{ }\mu\text{s}$  auf die Micro Sphere Plates (MSP). Das Signal der MSPs wird durch einen Vorverstärker (Novolec, Typ AD100B) um den Faktor 5 verstärkt und von einem Transientenrecorder (Fa. DSP, Typ 2001AS, Zeitauflösung  $10\text{ ns}$ , Auflösung 8 bit) aufgenommen und digitalisiert. Ist die gewünschte Anzahl von Mittelungen erfolgt, werden die Kanäle vom Rechner über eine Schnittstelle ausgelesen. In dem Meßprogramm, das in unserer Arbeitsgruppe entwickelt wurde, wird die Zeitbasis und die Anzahl der Mittelungen festgelegt. Zusätzlich können Geräte über eine IEEE Schnittstelle angesteuert werden.

Die verschiedenen benutzten Spektroskopiemethoden erfordern Modifikationen im experimentellen Aufbau, die im folgenden beschrieben werden.

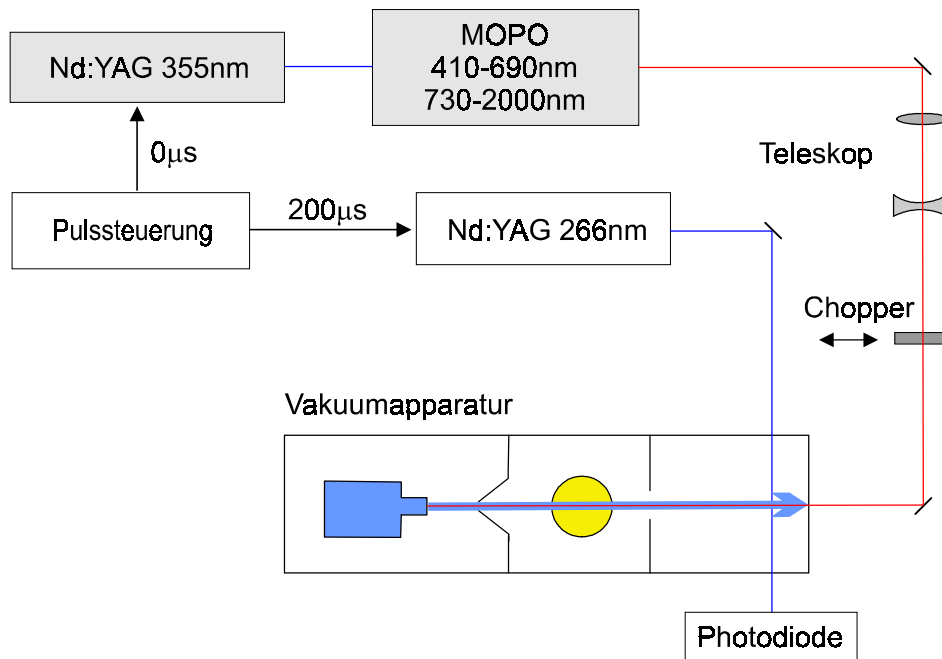
## 3.3 Lasersysteme und spektroskopische Aufbauten

### 3.3.1 Zur Depletionspektroskopie

Die Experimente zur Spektroskopie des angeregten  $\tilde{A}$ -Zustands in Natrium-Wasser-Clustern werden mit dem in Abbildung 3.5 dargestellten Aufbau zur Depletionspektroskopie durchgeführt. Die Einkopplung des gepulsten Ionisationslaserstrahls in die Apparatur erfolgt senkrecht zum Molekularstrahl. Zusätzlich wird der Strahl eines



**Abbildung 3.4:** Steuerung des Experiments: Der Laserpuls liefert über eine Photodiode das Startsignal für die Aufnahme der Flugzeitspektren an den Transientenrekorder. Das Meßprogramm liest die entsprechenden Kanäle aus und steuert den Schrittmotor der Verzögerungseinheit.



**Abbildung 3.5:** Aufbau zur Depletionspektroskopie: Der Anregungslaserpuls wird  $200 \mu\text{s}$  vor dem Ionisationslaserpuls antikollinear zum Molekularstrahl in die Vakuuapparatur geleitet. Die Zeitverzögerung hat zur Folge, daß die Fragmente den Strahlbereich vor der Ionisation verlassen können. Ein vom Meßprogramm gesteuerter Chopper unterbricht den Anregungslaserstrahl während der Messung. Zu jedem Meßpunkt werden Spektren mit und ohne Einstrahlung der Anregungslaserpulse aufgenommen, um daraus die Signaldezimierung zu bestimmen.

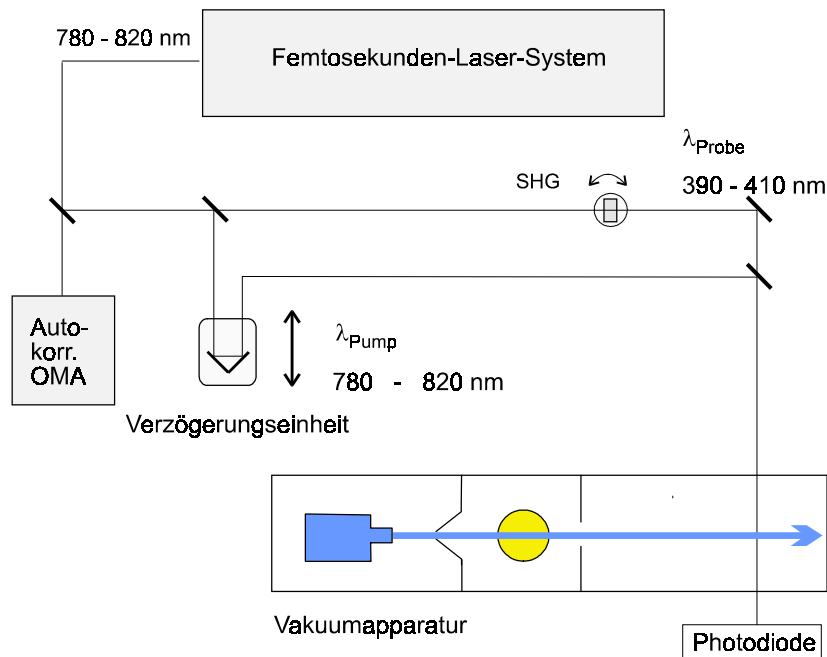
ebenfalls gepulsten Anregungslasers antikollinear zum Molekularstrahl in die Apparatur geleitet. Die Bandbreite und die Wellenlänge des Anregungslasers werden während der Messung mit einem Wavemeter (Burleigh, WA-4500) überprüft. Ein Teleskop gleicht die Divergenz des Laserstrahls aus. Beide Laserpulse sind durch einen externen Startpuls synchronisiert. Die Pulssteuerung wurde in unserem Hause gebaut, und sie kann Pulse bis zu  $999 \mu\text{s}$  verzögert voneinander ausgeben. Im Experiment wird der Anregungslaser  $200 \mu\text{s}$  vor dem Ionisationslaser angesteuert, damit die Fragmente vor der Ionisation den Strahl verlassen und nicht auf ihrer Fragmentmasse in das Spektrum eingehen. Gesteuert vom Meßprogramm unterbricht ein Chopper (engl. für Hackmesser) den zur Anregung verwendeten Laserstrahl. Zu jedem Meßpunkt werden Spektren mit und ohne Anregungslaser aufgenommen, um daraus die Signaldezimie-

zung zu bestimmen. Zur Ansteuerung des durchstimmbaren Lasers dient eine IEEE Schnittstelle.

Als *durchstimmbarer Laser* wird der MOPO 730-10 der Firma Spectra Physics benutzt. Gepumpt wird das System mit der dritten Harmonischen eines gütegeschalteten Nd:YAG Lasers ebenfalls von der Firma Spectra. Typische Werte sind eine Ausgangsleistung von 6 W bei 10 Hz Repetitionsrate und eine Pulslänge von 5–7 ns. Der MOPO, benannt nach seinem Designkonzept *Master Oscillator / Power Oscillator*, besteht aus zwei gekoppelten OPOs (*Optischer Parametrischer Oszillator*). Aus dem Masteroszillator wird durch ein Gitter schmalbandige Strahlung ausgekoppelt, die als Seedpuls im zweiten OPO wirkt. Die Bandbreite liegt laut Hersteller bei einem Wert unterhalb von  $0.2 \text{ cm}^{-1}$ . Die Pulsenergie beträgt abhängig von der Wellenlänge zwischen 30 und 80 mJ für den Signalstrahl (410–690 nm) und zwischen 5 und 40 mJ für den Idlerstrahl (730–2000 nm). Zur *Ionisation* der Komplexe wird ein kommerzieller Nd:YAG Laser (*Surelite PPS*) der Firma Continuum benutzt. Die Frequenzkonversionseinheit erzeugt wahlweise die 3. oder 4. Harmonische der Grundwelle ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ). Der Strahldurchmesser beträgt ca. 8 mm und die Pulsenergie erreicht 20 mJ bei  $\lambda = 355 \text{ nm}$  und 10 mJ bei  $\lambda = 266 \text{ nm}$ . Die Pulslänge beträgt laut Hersteller 4 bis 6 ns. Im Experiment wird der Laserstrahl unfokussiert durch eine Blende mit einem Durchmesser von 3 mm senkrecht zum Clusterstrahl in die Apparatur geleitet.

### 3.3.2 Zur Pump-Probe-Spektroskopie

Die Experimente zur Dynamik in Natrium-Wasser-Clustern werden unter Verwendung der Pump-Probe-Technik durchgeführt. Der experimentelle Aufbau ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Zur Anregung (Pump) der Komplexe wird die Grundwelle des Titan:Saphir-Lasers und zur Ionisation (Probe) die 2. Harmonische der Grundwelle benutzt. Hierzu wird ein Teil des Laserstrahls abgetrennt und frequenzverdoppelt. Später werden die Strahlen wieder vereinigt und senkrecht zum Molekularstrahl in die Apparatur eingekoppelt. Ist die zeitliche Dauer eines Laserpulses 200 fs, so beträgt seine räumliche Ausdehnung nur  $60 \mu\text{m}$ . Es ist also beim optischen Aufbau zu beachten, daß der Pump- und der Probestrahl ungefähr gleiche Wegstrecken zur Vakuumapparatur zurücklegen. Der Pumpstrahl wird außerdem über eine Verschiebeeinheit geführt, um die Verzögerung der Pulse zueinander während der Messung zu variieren.



**Abbildung 3.6:** Aufbau zur Pump-Probe-Spektroskopie: Der Laserstrahl wird in Pump- und Probestrahl geteilt. Der Pumpstrahl wird über eine Verzögerungseinheit geführt, die die Pulse im Experiment zeitlich gegeneinander verschiebt. Der Probestrahl wird in einem SHG-Kristall frequenzverdoppelt und kollinear zum Pumpstrahl in die Vakuuapparatur eingekoppelt.

Eine IEEE Schnittstelle steuert die Verschiebeeinheit an. Alternativ zur Datenaufnahme mit dem Transientenrekorder wird das Ionensignal in den Experimenten mit sub-30 fs Laserpulsen aufgrund der geringen Zählraten mit einem TDC (Time to Digital Converter) aufgenommen. Bei diesem Verfahren gibt das Signal der Photodiode den Startpunkt der Messung an, und es wird die Zeit bis zum Eintreffen eines Ions aufgenommen. Pro Laserschuss werden die Zeiten von bis zu 8 Ereignissen gespeichert. Da bei einer geringen Zählrate weniger als 8 Ereignisse pro Laserpuls möglich sind, wird die Einzelmessung nach der Dauer einer Flugzeitmessung ( $40 \mu\text{s}$ ) abgebrochen.

Die Experimente zur Dynamik des  $\tilde{A}$ -Zustands in Natrium-Wasser-Clustern werden mit Femtosekunden-Laserpulsen in den Applikationslaboren des Max-Born-Instituts durchgeführt. Zum Einsatz kommen zwei kommerzielle Lasersysteme, deren Grundwelle und deren zweite Harmonische der Grundwelle im Experiment zum Einsatz kom-

men.

*Quantronix System:* Hier handelt es sich um ein regenerativ verstärkendes System, welches in einem Spektralbereich von 760 – 840 nm betrieben werden kann und bei 1 kHz Repetitionsrate eine Pulsenergie von 450  $\mu\text{J}$  und eine Pulsdauer von ca. 200 fs besitzt. Die Laserpulse werden in einem fs-Oszillator erzeugt. Hierbei handelt es sich um einen Titan:Saphir Laser (Spectra Physics, Tsunami), der von einem Argon-Ionen-Laser (Spectra Physics, Modell 2080) gepumpt wird. Die angegebene Pulsenergie wird unter Verwendung eines Verstärkers (Quantronix, 4810/20 RGA) erreicht.

*Femtolasers System:* Es werden weitere Experimente mit sub-30 fs Pulsen durchgeführt, die in einem kommerziellen System der Firma Femtolasers erzeugt werden. Typische Werte dieses Systems sind bei 1 kHz Repetitionsrate 1 mJ Pulsenergie und 23 fs Pulslänge. Die spektrale Breite eines Laserpulses beträgt 40 nm und die Zentralwellenlänge ist 790 nm. Das System besteht aus einem Ultrakurzpuls-Oszillator, der Pulse mit einer zeitlichen Länge von 15 fs erzeugt. Diese Pulse werden in einem Flintglas-Block auf 10 ps gestreckt. In einem CPA (Chirped Pulse Amplification) Multipass-Verstärker mit 9 Durchgängen, der mit einem frequenzverdoppelten YLF-Laser bei 1 kHz Folgefrequenz gepumpt wird, erhöht sich die Energie bis auf 1mJ. Nach der Kompression mit einem Prismenpaar werden typischerweise Pulse mit sub-30 fs Länge erreicht.