

Borosilikatglas und Wasserstoff

Ist eine reine Wasserstoffnutzung in der Borosilikatglasverarbeitung im Handwerk des Glasapparatebauers möglich?

Inhalt

1.	Vorwort	3
2.	Einleitung	3
3.	Gegebenheiten	4
3.1.	Relevante Kennzahlen von Wasserstoff im Vergleich zu Erd- und Propangas	
3.2.	Voraussetzung – vorhandene Brennertechnik	6
3.3.	Mögliche Flammenbilder mit Zenitbrenner	7
3.4.	Sicherheit	9
4.	Konzeptionierung10	Λ
٠. 4.1.	Erarbeitung Konzept	
4.2.	Welche Tätigkeiten kommen in Betracht?	
4.3.	Wie soll dokumentiert werden	
5.	Grundtechniken	3
5.1.	Zusammenfassung14	4
5.2.	Vorbereitung der Grundtechniken10	6
5.3.	Biegen1	7
5.4.	Kugelblasen18	8
5.5.	Axiales Zusammensetzen	9
5.6.	Koaxiales Zusammensetzen	C
5.7.	Schlaucholiven mit Formzange formen	1
5.8.	Wendeln wickeln22	2

6.	Glasapparate	23
6.1.	Zusammenfassung	24
6.2.	Schlenkgefäße	26
6.3.	Kurzweg-Destillationsapparat mit Verteilerspinne	
6.4.	Chromotografiesäule mit Filterplatte	29
6.5.	Stickstoff/Vakuum-Verteilerrechen	30
6.6.	Intensivkühler	31
6.7.	NMR-Rohre verlängern	32
7.	Ansprechpartner	33

1. Vorwort

Aufgrund der politischen Situation im Jahr 2022 kann eine dauerhafte Versorgung mit Erdgas nicht sichergestellt werden und auch ein komplettes Ausbleiben der Verfügbarkeit ist denkbar. Daher wurde angeregt, dass die Glasbläserwerkstatt der Universität Leipzig / Fakultät Chemie und Mineralogie einen Notfallplan erstellt, um die Lehre und Forschung in den universitären Laboren weiterhin zu ermöglichen. Dazu soll geprüft werden, welchen Service die Werkstatt aufrechterhalten kann und wo es zu welchen Einschränkungen kommen könnte.

In der Werkstatt werden überwiegend Glasapparate aus Borosilicatglas 3.3 hergestellt, geändert und repariert. Dazu verarbeitet der Glasapparatebauer Rohmaterialien in Form von Glasröhren, -stäben und -bändern, so wie Halbzeuge, beispielsweise Verbindungsstücke, Hähne und Ventile entsprechend weiter. Für diese Weiterverarbeitung stehen den Handwerkern unterschiedlichste Brennertechniken zur Verfügung, die mit den bisher bewährten Medien, wie Erdgas, Sauerstoff (O₂) und Druckluft funktionieren. Daher die brisante Fragestellung: Was passiert, wenn die Erdgasversoraung abbricht?

Wenn man sich damit tiefer beschäftigt, rückt auch die Fragestellung in den Fokus: Kann Wasserstoff das Erdgas vollständig ersetzen? Können Werkstätten somit klimaneutraler werden?

Mit diesen Fragestellungen setzten sich die Glasapparatebauer der Universität Leipzig Stephan Eckert und Marko Wende auseinander.

2. Einleitung

Lasertechniken, 3D-Druck und andere Techniken sind im Glasapparatebauer-Handwerk noch nicht vollumfänglich entwickelt und deren Einsatz, laut jetzigem Kenntnisstand, noch nicht verbreitet. Daher muss die klassische Heißbearbeitung von Borosilikatglas weiterhin mit Flammen erfolgen. Eine Alternative zu Erd- und Propangas ist der Wasserstoff (H₂). Weil sich die Wasserstoffflamme in Temperatur, Aussehen, Form, Verhalten, und Verbrauch von den fossilen Brennstoffen unterscheidet, ist ein Herantasten im Umgang mit dem Borosilikatglas nötig. Herr Eckert und Herr Wende haben bereits Erfahrungen mit Wasserstoffflammen in ihrer täglichen Arbeit sammeln können. Anfänglich gedacht um Quarzglas bearbeiten zu können, welches hohe Temperaturen in der Bearbeitung benötigt. Mittlerweile unterstützt ein Wasserstoff-Handbrenner auch die Bearbeitung von Borosilikatglasröhren an der Drehmaschine die täglich anfallenden Arbeiten.

Daher vertiefen die Glasapparatebauer der Universität Leipzig die Thematik: was ist alles mit einer Wasserstoffflamme in der Borosilikatglasbearbeitung möglich?

3. Gegebenheiten

3.1.	Relevante Kennzahlen von Wasserstoff im Vergleich zu Erd- und Propangas	5
3.2.	Voraussetzung – vorhandene Brennertechnik	6
3.3.	Mögliche Flammenbilder mit Zenitbrenner	7
3.4.	Sicherheit	9

3.1. Relevante Kennzahlen von Wasserstoff im Vergleich zu Erd- und Propangas

		Wasserstoff	Erdgas	Propan
Selbstentzündungstemperatur:		585 °C	640 °C	470 °C
Verbrennungstemperatur mit Luft:		2318 °C	1970 °C	1925 °C
Verbrennungste	emperatur mit Sauerstoff:	>3000 °C	2860 °C	2850 °C
Bearbeitungs-	Transformationstemperatur		525 °C	
bereich von	Erweichungstemperatur	825 °C		
Borosilikatglas	Verarbeitungstemperatur		1260 °C	
Brennwert:		141,80 MJ/kg	55,50 MJ/kg (Methan)	50,35 MJ/kg
Heizwert:		119,96 MJ/kg	50,00 MJ/kg (Methan)	46,35 MJ/kg
Spezifische Wärmekapazität:		14,3 kJ/kg · K	2,16 kJ/kg·K (Methan)	2,43 kJ/kg · K
Max. Flammengeschwindigkeit:		346 cm/s	n.b.	450 cm/s
Vollständige Verbrennung:		H ₂ + 0,5 O ₂ → H ₂ O + Energie	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O +$ Energie	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O +$ Energie

"Der Brennwert berücksichtigt sowohl die notwendige Energie zum Aufheizen der Verbrennungsluft und der Abgase als auch die Kondensationsenthalpie der bei der Abkühlung kondensierenden Flüssigkeiten, insbesondere des bei der Verbrennung von wasserstoffhaltigen Brennstoffen entstehenden Wassers. Im Gegensatz dazu bezeichnet der Heizwert die Energie, die bei der Verbrennung und anschließenden Abkühlung auf die Ausgangstemperatur des brennbaren Gemisches frei wird, wobei das Verbrennungswasser noch gasförmig vorliegt. Der Heizwert von wasserstoffreichen Brennstoffen ist deshalb deutlich geringer als deren Brennwert, und zwar um den Betrag der Kondensationsenthalpie des bei der Verbrennung gebildeten Wassers." (Quelle Wikipedia)

Je kleiner allerdings das Verhältnis von Heizwert und Brennwert ist, desto mehr Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf ist in der Flamme gebunden. Das sollte grundsätzlich zu einem erhöhten Wärmeübergang auf das Glas führen, da feuchtes Gas eine deutlich höhere Wärmekapazität als trockenes Gas hat. Wasserstoff sollte bei gleicher Heizleistung bei der Verbrennung etwa die doppelte Wassermenge wie bei Propan freisetzen, Methan macht eine leicht "feuchtere" Flamme als Propan.

3.2. Voraussetzung – vorhandene Brennertechnik

Die Werkstatt verfügt über einen Tischbrenner "Zenit" mit einem 40 mm Brennerkopf und einen "Mini-Handbrenner" mit unterschiedlichen aufschraubbaren Düsen, dieser auch als Tischmodel dienen kann. Sowie einen weiteren Handbrenner mit unterschiedlichen Düsen. Beide ersteren Brenner sind von der Firma Herbert Arnold GmbH. Alle genannten Brenner sind für die Wasserstoffverbrennung vorgesehen. Angeschafft wurden diese ursprünglich für die Bearbeitung von Quarzglas. Weil die Quarzglasbearbeitung in der Glasbläserwerkstatt weniger vorkommt, wurde von einer Anschaffung eines Energie-Sparapparat abgesehen und ist somit nicht vorhanden.

Tischbrenner "Zenit"



Minibrenner als Tisch- und Handbrenner

Handbrenner mit aufschraubbaren Düsen











3.3. Mögliche Flammenbilder mit Zenitbrenner

Die Glasapparatebauer verwenden eine Vielzahl von Flammen. Je nach Bearbeitungsmethode kann man über die Einstellrädchen am Brenner die Flammen fließend einstellen. Dabei sind Brauseflammen, Formflammen und Schmelzflammen die am häufigsten verwendeten Flammen.



Eine Brauseflamme dient mehr dem Vor-, Zwischen- und Nachwärmen der Werkstücke. Da kein Druckluftanschluss am Wasserstoff-brenner anliegt, konnte auf sie nicht zurückgegriffen werden. Eine reine Wasser-stoffflamme mit minimaler Sauerstoff-zuführung musste für diese Tätigkeiten reichen.

Die Form- und Schmelzflamme ist eine eigene Definition der Werkstatt und bezieht sich auf die Tätigkeit. Wobei auch hier die Flammen und Tätigkeiten fließend ineinander überlaufen. Auch entscheidend ist die Drehtechnik der Werkstücke, mit welcher Flamme bevorzugt gearbeitet wird.

Auffällig ist bei den Flammen, dass die die Temperatur schnell in der Flammenlänge geringer wird. Das hat zu folge, dass die geeignete Bearbeitungsposition von vornherein gut eingeschätzt werden muss, oder man muss flexibler mit der Position des Glases in der Flamme umgehen. Was bei den Tests auch als vorteilhaft angesehen wurde.

Folgende Flammen sind mit H₂ möglich gewesen:

Formflammen

... sollen das Glas auf eine Temperatur 825-1000 °C erhitzen, damit es geformt werden kann.

Dabei können sich auch benachbarte Bereiche leicht erhitzen und in die endgültige Form mit übergehen.

Mit einer geringeren Sauerstoffmenge werden die Schmelzflammen erreicht.

Mögliche Tätigkeiten

- Feuerpolieren
- □ Spitzen ziehen
- Aufheizen von Ansatzstellen
- Übergänge von Ansätzen formen
- □ Biegen
- Kugeln blasen

Schmelzflammen

... sollen das Glas bis auf 1260 °C erhitzen, damit das Material in sich und mehrere Werkstücke miteinander verschmelzen.

Ein erhitzen der umliegenden Glasbereiche soll gering bleiben.

Mit entsprechender Sauerstoffsättigung werden die Schmelzflammen erreicht.

Mögliche Tätigkeiten

- Spitzen ausrichten
- □ Spitzen/Rohre abziehen
- Rohre Verengen
- Axiales Ansetzen von Röhren
- □ Koaxiales Ansetzen von Röhren
- □ Einschmelzen mehrerer Röhren
- Materialsammeln für größere Kugeln
- Runde und flache Böden

Formflamme				
Aussehen	Draufsicht	Seitenansicht		
kleinste				
lange u. schmale		A Community of the Comm		
lange u. mittelschmale		Communication of the second		
mittelbreite		To the state of th		
breite	444	The second secon		

Schmelzflamme Aussehen Draufsicht Seitenansicht				
Aussehen	Seitenansicht			
Kleine und spitze		Consideration of the state of t		
lange u. spitze		A second framework		
lange u. schmale		of the parties of the		
mittelbreite		To see the property of the second		
breite		A commission of the control of the c		

3.4. Sicherheit

Bevor die Tests "Borosilikatglasbearbeitung ausschließlich mit Wasserstoffbrennern" erfolgen kann, müssen die Gefahren, die von H2 ausgehen, erkannt, darauf sensibilisiert und entsprechend abgestellt werden. Die Gefahren sind:

Gefahr	Entstehung	Vermeidung
Explosions- und Verbrennungsgefahr	 H₂ ist Farb- und Geruchslos und kann sich im Raum sammeln H₂-Flamme ist kaum sichtbar und kann unbemerkt erlöschen Im entsprechendem Mischungsverhältnis mit O₂ explosiv 	 Wasserstoffflaschenlagerung im Innenraum nur in Sicherheitsschränken mit entsprechender Entlüftung Versorgungsleitungen ausgelegt für H₂ müssen vorhanden sein Die Räume müssen mit Wasserstoffsensoren mit Warnsystem ausgestattet sein Flammenrückschlagventile an Entnahmestellen für H₂ und O₂ Der Arbeitsplatz muss mit einer Lüftungsanlage ausgestattet sein Einhaltung der vom Hersteller angegebene Drücke
Wasserstoffversprödung	 In festen Versorgungsleitungen In Armaturen In Brennerschläuche In Brennern 	 Sämtliche Materialien müssen für Wasserstoff ausgelegt sein Regelmäßige Wartung, Kontrollen und die Verwendungslaufzeiten beachten

Sicherheitselemte in der Werkstatt der Universität Leipzig:



Wasserstofflagerung im Sicherheitsschrank



Sauerstofflagerung im Außenlager



Wasserstoffentnahme mit Druckminderer und Rückschlagventil



Sauerstoffentnahme mit Druckminderer u. Rückschlagventil



Wasserstoffbrenner "Zenit" mit entsprechenden Schläuchen



Lüftungshaube (1), Frischluftzuvor (2) und H2-Sensor (3)

4. Konzeptionierung

4.1.	Erarbeitung Konzept	11
4.2.	Welche Tätigkeiten kommen in Betracht?	11
4.3.	Wie soll dokumentiert werden	12

4.1. Erarbeitung Konzept

Beide Glasapparatebauer gehen Gedanklich die Glasapparate, die häufig gefertigt, geändert und repariert werden, durch. Das sind beispielsweise diverse Destillationsapparate, Wärmeaustauscher, Schlenkkolben und -gefäße, Vakuumverteilerrechen, Doppelwandreaktoren, Chromotographiesäulen, Tropftrichter, diverse Kleinteile und Risse/Sternchen-Reparaturen. Dabei treten immer wieder die Fragenauf:

- □ Ist die Flamme nicht zu heiß?
- □ Sprinat das Glas, wenn es so schnell viskos wird?
- ⊼ Kann man das Glas mit H₂ entsprechend Vor-, Zwischen- und Nachwärmen?
- Uie verhält sich die Spannung nah an der Bearbeitungszone ohne Nachwärmen?
- □ Wie ist der Wasserstoff- und Sauerstoffverbrauch?
- □ Sind die bekannten Erdgasflammenbilder auf den Wasserstoffbrenner zu übertragen?
- Was für Auswirkungen hat der Wassereintrag in den Werkstücken?

Man ist sich schnell einig, dass jeder für sich, Stück für Stück sich vortasten muss. Die Erfahrungen müssen zuerst in den Grundtechniken gesammelt werden, bevor komplexe Glasapparate gefertigt und repariert werden können. Man einigte sich auf folgendes:

4.2. Welche Tätigkeiten kommen in Betracht?

Grundtechniken (je zwei Versuche)			
□ Biegen: o aus Glasrohr Ø $10/1,5 \rightarrow 120^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/U$			
	o aus Glasrohr Ø 17/1,8 → 120° / 90° / 45°		
	o aus Glasrohr Ø 26/2,0 → 120° / 90°		
Kugel blasen:	o Kugelleiste mit 3 Kugeln (Ø 32/ L 37) aus Rohr Ø 16/1,5		
	 Aus Rohr Ø 26/2,0 eine Kugel Ø 50 einseitig blasen 		
	 Aus Rohr Ø 26/2,0 eine Kugel Ø 50 mit Doppelspitze blasen 		
□ Axiales Ansetzen:	o Ø 6/1,0 mit Ø 6/1,0		
	o Ø 15/1,8 mit Ø 15/1,8		
	o Ø 30/2,0 mit Ø 30/2,0		
	o Ø 30/2,0 mit Ø 17/1,8		
□ Seitliches Ansetzen:	o Ø 20/1,8 mit Ø 9/1,5		
	o Ø 20/1,8 mit Ø 15/1,8		
□ Schlaucholiven formen:	o Mit Formzange		
□ Wendeln wickeln:	o Auf Wickeldorn		

Glo	Glasapparate (je zwei Versuche)			
	Schlenkgefäße			
	Kurzweg-Destillationsapparat mit Verteilerspinne			
	Chromotographiesäule mit Filterplatte			
	Stickstoff/Vakuum-Verteilerrechen			
	Intensivkühler			
	NMR-Rohre verlängern			

4.3. Wie soll dokumentiert werden

Um die gesammelten Erfahrungen entsprechend dokumentieren zu können, wurden für jede Methode, Technik und Werkstück ein Protokoll erstellt. Damit alles einheitlich und vergleichbar ist, einigte man sich auf folgende Punkte:

- □ Ermittlung des Verbrauchs (hier konnte man nur den Druckverlust an der analogen H₂ und O₂ Messuhr ablesen)
- □ Verwendeten Materialien
- □ Verwendete Techniken

- Flammeneinstellung in Größe, Aussehen und Merkmalen
- Bearbeitungspositionen in der Flamme
- Spannungsverhalten
- Fazit



Damit die Kenntnisse nicht vergessen werden oder sogar miteinander verschwimmen, ist ein Laptop Nahe des Arbeitsplatzes eingerichtet wurden. Mit Hilfe einer Software für freischreibbare Notizen (OneNote) und der eigenen Smartphone-Kamera, welches sich mit dem Laptop drahtlos synchronisiert konnte schnell und übersichtlich dokumentiert werden. Die Gedanken und Stichpunkte wurden am PC-Arbeitsplatz anschließend ausformuliert.

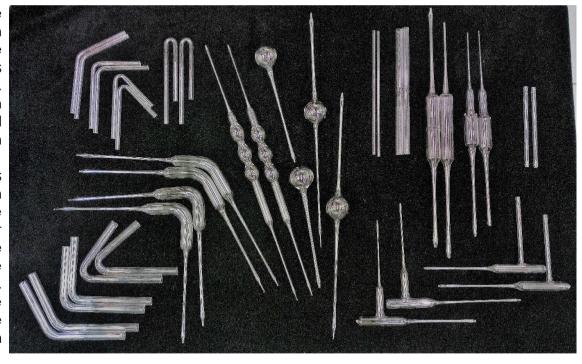
Nach Beendigung der Grundtechniken und nach der Herstellung der Glasapparate werteten beide Glasapparatebauer ihre Mitschriften und Beobachtungen aus. Daraus entwickelte man dieses Dokument.

5. Grundtechniken 5.1. 5.2. 5.3. 5.4. 5.5. 5.6. 5.7. Schlaucholiven mit Formzange formen......21 5.8.

5.1. Zusammenfassung

Mit entsprechenden Kenntnissen und Erfahrungen ist die Borosilikatglasbearbeitung mit den glaspparatebauerischen Grundtechniken gut möglich. Das Glas erreicht schnell die entsprechende Viskosität und ist auch schnell verschmolzen. Dass es manchmal noch zu flüssig wird, ist mit steigender Erfahrung, insbesondere im Umgang mit der Einstellung des Brenners, und ein Anpassen der eigenen Drehtechnik beherrschbar und ausbaufähig. Mit dem Einsatz von Drehmaschinen können Schwierigkeiten im Drehen weiter minimiert werden.

Beim Aufheizen von zu verschmelzende Werkstücksenden muss aufgepasst werden, dass diese nicht schäumen, was aber auch mit steigenden Erfahrungen umgänglicher wird. Die befürchtete erhöhte Wärmestrahlung zur Hand und Umgebung hin, ist nicht festgestellt wurden. Entsprechend "kühl" bleiben auch die Bearbeitungsbereiche um die Bearbeitungszone, so dass diese sich nicht zu stark verformen. Jedoch muss man damit rechnen, dass das viskose Glas in diesen Bereichen schnell die Hitze an die umliegenden Zonen verliert und gefühlt rascher fest wird. Eine erhöhte Spannung konnte dennoch, bei den Übungsstücken nicht festgestellt werden.



Durch das raschere Erreichen der Viskosität und durch die kleineren Bearbeitungsbereiche bei gleichen Schmelzbedingungen, wie mit anderen Flammen aus fossilen Brennstoffen, sehen die Endergebnisse besser aus. Es wird geschlussfolgert, dass es an wenigeren Arbeitsschritten und einer Reduzierung möglicher Ausbesserungsversuche liegen könnte.

Mit dem Wassereintrag durch offene Werkstücke muss man umgehen lernen. Mit entsprechender Positionierung der Bearbeitungsstellen zur Flamme, sowie mit Verschließen aller nichtgebrauchter Öffnungen des Werkstückes, kann ein hineinfauchen der Flamme verhindert werden. Ebenso positiv wirkt sich das Vorwärmen des Glases auf den Wassereintrag durch die Wasserstoffflamme aus. Wasser kann nicht im Inneren kondensieren.

Da H₂ so viel Energie hat, könnte die Bearbeitung von Kleinstteilen problematisch werden. Eine Abschließende Aussage kann jedoch nicht getroffen werden, da diese Thematik nicht in der bisherigen Testphase berücksichtigt wurde.

Festzuhalten ist, dass der vorhandene Brenner für die Quarzglasbearbeitung ausgelegt ist und nicht für die Borosilikatglasbearbeitung. Für letzteres müssen andere Bedürfnisse definiert und von den Brennerherstellern umgesetzt werden. Bedürfnisse sind:

- Bessere Feinjustierung im Ein- und Umstellen der unterschiedlichsten Flammen nötig
- Angepasstes Flammendesign in Form und in der Durchmischung ist nötig

- □ Eine noch schmalere kleine spitze Schmelzflamme ist nötig
- Brauseflamme ist nötig
- Flammenstabilisierung durch eventuell Druckluft nötig

Die Wasserstoffnutzung für den Glasapparatebau im Borosilikatglasbereich scheint übertrieben. Weil viel der vorhandenen Energie nicht ausgenutzt wird. Für den Einsatz von H₂ spricht die kohlenstofffreie Verbrennung, einzige vorhandene Energieform ohne fossile Brennstoffe und die Aussicht das in großen Mengen grüner H₂ produziert werden könnte, welcher unbedingt preisgünstig eingekauft werden müsste.

Beide Glasapparatebauer verbrauchten insgesamt 184 bar Wasserstoff und 51 bar Sauererstoff. Jedoch geht ein Teil der verbrauchten Menge zu Lasten der Fotodokumentation des Berichtes und des Ausprobierens im Sammeln von Erfahrungen und Kenntnissen. Ein Energie-Sparapparat scheint unumgänglich zu sein, um den Verbrauch zu reduzieren.

Die Glasapparatebauer der Werkstatt können keine fundierte allgemeine Auskunft über die Wirtschaftlichkeit geben. Dafür müsste die Testung über einen längeren Zeitraum werkstattalltäglicher sein. Daher wird sich die Glasbläserwerkstatt der Universität Leipzig mit einer weiteren Testung im Bereich Bau und Reparatur von Glasapparaten beschäftigen.

Diese definierten glasapparatebauerischen Grundtechniken, an denen sich die Glasapparatebauer mittels Wasserstoffbrennern ausprobieren wollen, war:

□ Biegen: ○ aus Glasrohr Ø 10/1,5

120° / 90° / 45° / U

aus Glasrohr Ø 17/1,8

o 120° / 90° / 45°

aus Glasrohr Ø 26/2,0

o 120° / 90°

□ Kugel blasen: ○ Kugelleiste mit 3 Kugeln (Ø 32/ L 37) aus Rohr Ø 16/1,5

Aus Rohr Ø 26/2,0 eine Kugel Ø 50 einseitig blasen

Aus Rohr Ø 26/2,0 eine Kugel Ø 50 mit Doppelspitze blasen

Axiales Ansetzen: \circ Ø 6/1,0 mit Ø 6/1,0

Ø 15/1,8 mit Ø 15/1,8 Ø 30/2,0 mit Ø 30/2,0 Ø 30/2,0 mit Ø 17/1,8

Seitliches Ansetzen: 0 Ø 20/1,8 mit Ø 9/1,5

Ø 20/1,8 mit Ø 15/1,8

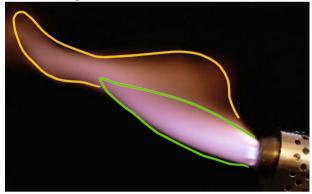
 $\ \square$ Schlaucholiven formen: \circ Mit Formzange

□ Wendeln wickeln: ○ Auf Wickeldorn

Die Testergebnisse folgen auf den nächsten Seiten.

5.2. Vorbereitung der Grundtechniken

Beide Glasapparatebauer fingen jeder für sich mit den Vorbereitungen an. Das waren Materialauswahl, Material kürzen, Ränder feuerpolieren, Spitzen ziehen, Spitzen ausrichten und Löcher rauspusten. Bei diesen Tätigkeiten machten sich beide, mit dem Wasserstoffbrenner im Umgang mit Borosilikatglas vertraut.



Beide arbeiteten mit verschiedenen Formflammen. Weil diese flackern und formunstabil sind, musste man sich erst einmal daran gewöhnen. (gelber Bereich ist ungewohnt) Mit etwas erhöhter Sauerstoffzugabe stabilisierte sich die Flamme etwas, wurde aber auch gleich deutlich heißer. Zum Ausrichten der Spitzen nutzte man spitze Schmelzflammen.

Das Glas erreichte zum Teil sehr schnell die gewünschte Viskosität und manchmal auch darüber hinaus. Mit angepasster Drehtechnik und etwas mehr Entfernung zum Brennerkopf war ein vernünftiges Arbeiten möglich. Auffällig war beim Spitzenziehen, dass der Übergang vom Glasrohr zur Spitze sehr kurz war. Vermutlich, weil die benachbarten Bearbeitungszonen sich nicht so schnell mit aufheizten, wie es mit Erdgasbrennern gewohnt war.

Bei diesen Arbeiten ist kein erhöhtes Spannungsbild erkennbar gewesen. Auch haben die Borosilikatglasröhren das rasche Aufheizen problemlos überstanden.



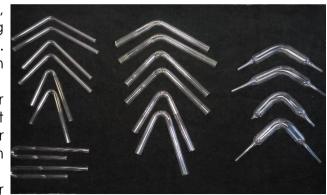
5.3. Biegen

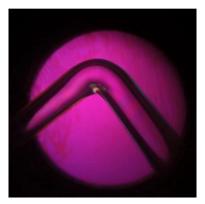


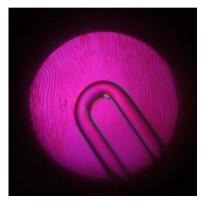
Zum Biegen wurden überwiegend Formflammen verwendet. Weil diese flackern, arbeitete Gab-2 mit etwas mehr O₂, musste jedoch zügiger das Glas gleichmäßig drehen und auch schnell die Flamme verlassen, damit das Glas nicht zu flüssig wird. Beim Biegen der 26er Rohre war das schnelle Erreichen bis hin zur benötigten Bearbeitungsviskosität von Vorteil.

Es wurde festgestellt, umso größer der Durchmesser des Glasrohres ist und umso spitzer der werdende Winkel, dass die Flammenbreite nicht ausreicht, um genügend breit das Material zu erwärmen. Daher musste man durch hin und her wandern in der Flamme den Bearbeitungsbereich vergrößern. Eine Brauseflamme wie beim Erdgasbrenner, wäre angenehmer.

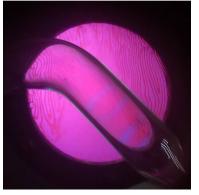
Bei abschließender Betrachtung der gebogenen Glasrohre unterm Spannungsprüfer konnte man minimale Spannung erkennen.











5.4. Kugelblasen



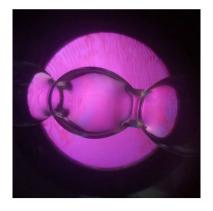
Zum Kugelblasen wurde anfänglich mit einer Schmelzflamme Material gesammelt und anschließend mit einer Formflamme die Kugeln aufgeblasen. Die homogene Wandstärkenverteilung und auch die Schnelligkeit bis hin zur finalen Dimension und Form war beeindruckend. Voraussetzung ist ein gleichmäßig schnelles rotieren des Glases in der Flamme.



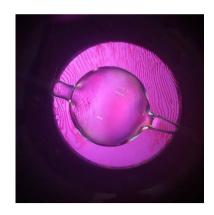
Auffällig war, dass bei der Kugelleiste der Abstand zur vorigen Kugel eingehalten werden konnte. Sprich die Bereiche neben der Bearbeitungsstelle behielten ihre Form. Auch bei den Kugeln mit gezogenen und ausgerichteten Spitzen, verformte sich diese nicht. Die Wärmestrahlung zu den Händen war spürbar. Ob es mit einer Wasserstoffflamme höher ist, kann aktuell nicht beurteilt werden.



Bei abschließender Betrachtung der gepusteten Kugeln unterm Spannungsprüfer konnte man minimale Spannung neben der Bearbeitungszonen erkennen. Die Kugeln selber zeigten keine auf.







5.5. Axiales 7usammensetzen

Beim axialen Ansetzen wurden anfänglich mit einer leichten Formflamme die Materialenden aufgeheizt, mit einer Schmelzflamme verschmolzen und letztendlich der homogene Übergang mit einer Formflamme bewerkstelligt. Jedoch muss mit jeder Flamme das O₂ nachgeregelt und zusätzlich nochmal nachjustiert werden, was auf Dauer hinderlich ist.

Aufgepasst werden muss beim Aufheizen der Materialenden. Diese werden schnell zu heiß und fangen an zu schäumen.



Ebenso unangenehm ist der Wassereintrag. Umso größer die Öffnungen sind umso höher ist dieser im Rohr. Verringern lässt es sich durch äußerliches Aufheizen des gesamten Werkstückes und bei der Positionierung der anzusetzenden Rohre in der Flamme.



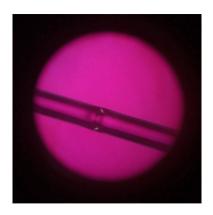
Das Umsetzen beim Fügen der 6er Rohre mit der kleinstmöglichen spitzen Schmelzflamme war nicht so gut, da der Bearbeitungsbereich zu breit war. Hier stößt der Zenitbrenner an seine Grenzen. Genau das Gegenteil trifft beim Fügen großer Rohre zu. Hier ist das Verschmelzen mit kleinen Schmelzflammen absolut von Vorteil, vorausgesetzt die Rotation der Werkstücke ist gleichmäßig. Die Fügestellen können klein gehalten werden.

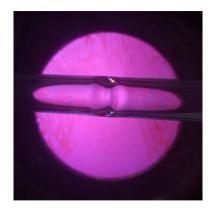
Der runde Übergang beim axialen Zusammensetzen unterschiedlich dimensionierter Rohre bedarf erhöhte Aufmerksamkeit und angepasste Flammeneinstellung, sowie Handhabung. Schnell erweitert sich das größere Rohr im Durchmesser. (Das

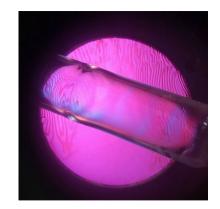
wurde auch bei der Ausformung runder Böden in den Vorbereitungsarbeiten festgestellt.)
Mit entsprechenden Erfahrungen lassen sich axiale Ansetze gut mit einem Wasserstoffbrenner umsetzen. Bekannt ist dies den Glasapparatebauern

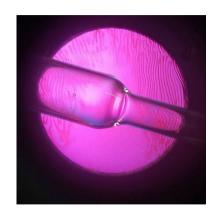
von Arbeiten an der Drehmaschine mit Wasserstoffhandbrenner-Unterstützung.

Bei abschließender Betrachtung der Ansatzstellen unterm Spannungsprüfer konnte man minimale Spannung neben den Bearbeitungszonen erkennen.









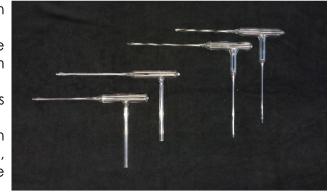
5.6. Koaxiales Zusammensetzen

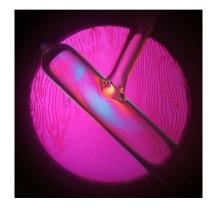
Beim koaxialen Zusammensetzen traten ähnliche Beobachtungen wie beim axialen Zusammensetzen auf.

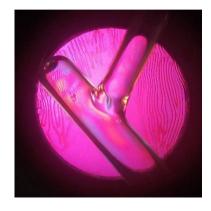
Aufgefallen ist, dass das Loch beim Herauspusten mit der kleinstmöglichen spitzen Schmelzflamme beim ersten Versuch viel zu groß wurde. Der Bearbeitungsbereich war schnell zu groß. Mit erhöhtem Tempo konnte das Loch kleiner gehalten werden.

Die Bedenken, dass beim koaxialen Drehen die Wasserstoffflamme für die Hand gefährlicher wird, als mit einer Erdgasflamme, hat sich nicht bestätigt.

Bei abschließender Betrachtung der seitlichen Ansatzstellen unterm Spannungsprüfer konnte man deutlich Spannungen erkennen. Bei dieser Konstruktion ist die Spannung nicht bedenklich. Erwähnt sei, dass kein Nachwärmen in der Flamme nach dessen Fertigstellung erfolgt ist. Ein Nachwärmen würde die Intensität der Spannungsringe minimieren.







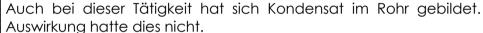
5.7. Schlaucholiven mit Formzange formen

Beim Formen von Schlaucholiven mittels einer Formzange wurde eine schmale Formflamme mit etwas mehr O₂ zur Stabilisierung der Flamme verwendet.

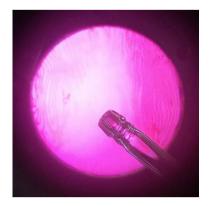
Auch bei dieser Tätigkeit ist ein zügigeres Arbeiten nötig. Vor allem muss man schnell genug mit der Zange im Werkstück sein, sonst ist eine Ausformung nicht mehr möglich. Mit entsprechender Kenntnis kann damit umgegangen werden.



Weil mit dem verwendeten Rollbock kein ausweichen aus der Flamme möglich war und somit die Wasserstoffflamme weiter das Werkzeug und die Schlaucholive trifft, kann diese sich beim Herausziehen der Zange wieder verformen. Ein Energie-Sparapparat könnte Abhilfe schaffen. Auch würde ein solches die Temperaturbelastung auf die Formzange reduzieren. Ein erhöhter Verschleiß des Werkzeuges konnte nach vier Versuchen nicht festgestellt werden.

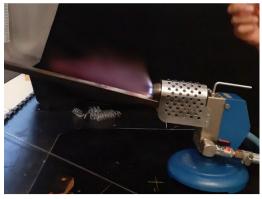








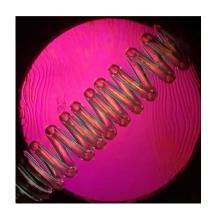
5.8. Wendeln wickeln



Mit einer Wasserstoffflamme und minimaler Sauerstoffzugabe konnte das Glasrohr, geführt und gelagert auf einer Schiene, auf den Wickeldorn gezogen werden. Das Glas erreichte zwar schnell die benötigte Viskosität. Dafür man musste man schneller drehen. Dennoch ließ sich das Glas "gleichmäßig" wickeln. Nur die flackernde und hin und her wandernde Flamme war extrem störend und verhinderte einen kontinuierlichen Wickelprozess.

Bei abschließender Betrachtung der Wendel unterm Spannungsprüfer konnte man nichts Besorgniserregendes feststellen.





6. Glasapparate

6.1.	Zusammenfassung	24
6.2.	Schlenkgefäße	26
6.3.	Kurzweg-Destillationsapparat mit Verteilerspinne	27
6.4.	Chromotografiesäule mit Filterplatte	29
6.5.	Stickstoff/Vakuum-Verteilerrechen	30
6.6.	Intensivkühler	31
6.7.	NMR-Rohre verlängern	32

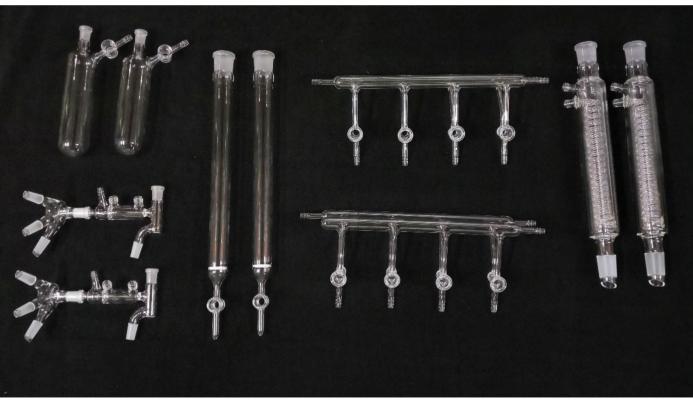
6.1. Zusammenfassung

Die Herstellung der Glasapparate ausschließlich mit Wasserstoffbrennern verlief positiv. Es konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Zum einen waren die Bearbeitungsbereiche minimal gehalten, beim Fin- und Durchschmelzen waren weniger Wiederholungen nötig und die Überaänae unterschiedlicher Dimensionen schnell erreicht. Die Schmelzflammen brachten das Glas schnell auf die benötiaten Temperaturen. Auch konnte man bei den Schmelzflammen die unterschiedlich heißen Zonen gezielt nutzen. Dazu sind iedoch ein anaepasstes Drehverhalten und erhöhte Erfahrungswerte der Temperaturzonen der Flamme notwendia. Man muss wissen, dass alle benötiate Temperaturen auch die O₂/H₂-Flamme aufweist und dass durch die sehr hohe Anfanastemperatur am Brennerkopf, zuzüalich Flammenaeschwindiakeit. der Temperaturabfall enorm ist. Die Flamme kann schnell zu heiß, aber auch zu kühl werden.

schnell zu heiß, aber auch zu kühl werden.
Nach wie vor empfanden die Glasapparatebauer, dass die Luftzufuhr fehlt, die kleine Spitzflamme länger sein könnte und dass die Nachjustierung des O₂-Einstellrädchen besser sein könnte.
Der Wassereintrag durch die H₂-Flamme in offenen Ansatzstellen stellte kein Problem mehr da. Das großflächige Vorwärmen verhinderte, dass Feuchtigkeit im Inneren kondensierte. Auch die Position der offenen Ansatzstelle zur Flamme war angepasst, um ein Hineinfauchen der Flamme zu minimieren. Dieses großflächige Vor- und Zwischenwärmen der Bearbeitungsstellen hatte zu Folge, dass die Spannungsbilder minimale bis bearbeitungstypische Spannungsringe aufwiesen. Aber Obacht beim Zwischen- und Nachwärmen! Die Bearbeitungsstellen können sich schnell verformen

Beide Glasapparatebauer verbrauchten für diese Glasapparate 236 bar Wasserstoff und 126 bar Sauerstoff (Sauerstoffangabe ist verfälscht, da jeweils der Kollege mit Erdgasbrennern parallel gearbeitet und eigens Sauerstoff verbraucht hat). Auch hier sind sich beide einig, dass ein Energie-Sparapparat den Verbrauch minimieren kann.

Einzig negativ ist die Herstellung mittels Minibrenners des Stickstoff/Vakuum-Verteilerrechens aufgefallen. Dieser Brenner hatte eine deutlich zu kleine Flamme, um ausreichend Glas aufzuwärmen und homogen zu verschmelzen.



Die Herstellung der definierten Glasapparaten mittels Wasserstoffbrennern war:

- □ Schlenkgefäße
- □ Kurzweg-Destillationsapparat mit Verteilerspinne
- Chromotographiesäule mit Filterplatte
- □ Stickstoff/Vakuum-Verteilerrechen
- □ Intensivkühler
- □ NMR-Rohre verlängern

Die Testergebnisse folgen auf den nächsten Seiten.

6.2. Schlenkgefäße

Es konnten sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Bei den Vorarbeiten wurde bemerkt, dass beim Ausformen der Schlaucholive der Dorn der Formzange anfing zu glühen. Mit einem Energie-Sparapparat könnte man die Flamme rechtzeitig wegnehmen um das Glühen zu vermeiden, oder zu mindestens minimieren.

Die Ansatzstelle Hülse zum Rohr ist wie erwartet schnell und mit minimalem Bearbeitungsbereich homogen verschmolzen gewesen. Positiv gestaltete sich die Ausformung des Überganges. Da die lange und schmale Schmelzflamme unterschiedliche Temperaturzonen aufweist, besonders einen heißen inneren Kegel, konnten die unterschiedlichen Temperaturzonen ganz gezielt verwendet werden. Hierbei musste man jedoch die eigene Bearbeitungspositionen stetig anpassen.

Beim Ausformen des Bodens muss noch weitere Erfahrungen in Flammeneinstellung und Bearbeitungspositionen gesammelt werden, um ein Zusammenfall des runden Bodens zum flachen Boden auszuschließen. Wenn man ab der Hälfte der breiten Schmelzflamme arbeitet, war dennoch ein vernünftiges Ergebnis erzielt wurden.

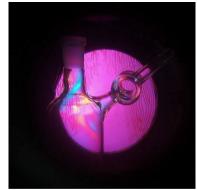
Um den Wassereintrag gering zu halten wurde darauf geachtet, dass nicht benötigte Öffnungen geschlossen sind, sowie die Ansatzstellen großflächig mit einer breiten Formflamme aufgeheizt sind. Letzteres könnte sich positiv auf die Spannungsminimierung auswirken.

Spannungen traten rund um den seitlichen Ansatz auf, welche nicht besorgniserregend sind. Es wurde mit einer breiten Formflamme nachgewärmt. Dabei war die Sorge, dass sich der Hahn verformt, so dass man eher mit aufhörte. Mit einer "Gas/Luft-Flamme" hätte man noch länger Nachwärmen können. Der Boden wies keine Spannung auf. Da mit einer breiten Formflamme die leichte Erweiterung des Glasrohres am Boden zusammenfallen gelassen wurde und somit die möglichen Spannungsringe verteilte.









6.3. Kurzweg-Destillationsapparat mit Verteilerspinne

Kurzweg-Destillationsapparat - die Herstellung verlief gut. Bei allen Arbeiten wurde darauf geachtet das der Wassereintrag möglichst gering ist. Mit entsprechendem Vor- und Zwischenwärmen gelang es fast immer. Es wurde jedoch festgestellt, dass beim Abkühlen einer Vorarbeit (befindliches Innenrohr im verschlossenen Mantel) Wasserdampf vom Anstecker im Inneren sich niederschlug. Dieser wurde zwar vorm Zusammensetzen unter Hitze entfernt, hinterließ jedoch Wasserflecke.

Bei der Vorarbeit "Scheibe zusammenschieben" musste erst Erfahrungen in der Flammeneinstellung und im Umgang des Herstellungsprozess gesammelt werden. Mit langer schmaler Formflamme konnte ausreichend Material bis zum benötigten Durchmesser zusammengedrückt werden.

Kegel

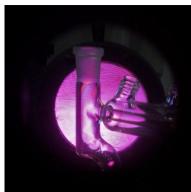
Bei den Einschmelzungen wurde überwiegend mit kleiner spitzen sowie langer schmalen Schmelzflammen gearbeitet, was schöne kleinere sichtbare Bearbeitungsstellen zufolge hatte. Hier konnte man den spitzen heißen Flammenkegel gezielt nutzen - falls nicht benötigt ging man wieder mehr in gemischtere Flammenzonen. Der spitze heiße Kegel war ebenfalls beim punktuellen Verschmelzen der Gewinderohre mit anschließendem Ausstreichen mittels Graphitstabs von Vorteil. Der "Kegel" ließ die Verbindungsstelle schnell verschmelzen und der "Hof" verhinderte einen zu extremen punktuellen Einfall des viskosen Glases.

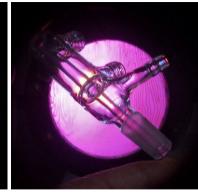
Nachgewärmt wurde mit einer breiten Formflamme. Hierbei kann sich der Glasapparat etwas verformen. Mit steigender Erfahrung, sowie mit Nutzung der Wärmstrahlung kurz nach der Flamme, könnte man das Verformen verhindern

Die minimale Spannung im Kühler ist auf gutes Nachwärmen zurückzuführen. Beim Ansatz Kühler zum Destilliervorstoß sind Spannungsringe deutlich zu erkennen gewesen, die jedoch nicht auf unmittelbaren Bruch hinweisen.





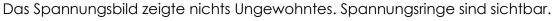


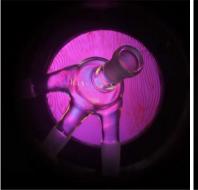


Spinne - die Herstellung verlief ebenso gut. Die Ansatzstelle Hülse zum 40er Rohr ist durch den minimalen Bearbeitungsbereich durch lange spitze Schmelzflamme schnell von statten gegangen. Der flache Übergang zum Rohr ist nahezu unverändert gewesen.

Die Ausformung des flachen Bodens ist schnell gleichmäßig verlaufen.

Beim seitlichen Ansetzen konnte mit langer spitzer Schmelzflamme das Glas schnell durchgeschmolzen werden. Probleme machten die Ausformungen der Übergänge. Hier war die Einstellung der benötigten Flamme etwas mit Ausprobieren verbunden - entweder war die Flamme zu kühl, so dass das Glas nicht gut verlief, oder die Flamme war schnell zu heiß. Was zu Folge hatte, dass man mit langer spitzer Schmelzflamme nachbessern musste. Was jedoch schnell mit gutem Ergebnis von statten ging.







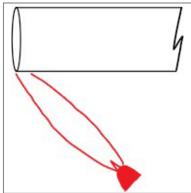




6.4. Chromotographiesäule mit Filterplatte

Ohne Komplikationen konnte die Chromotographiesäule hergestellt werden.

Beim Ansetzen der Hülse an das 30er Rohr musste mit dem Wassereintrag umgegangen werden. Es



wurde die Enden großflächig aufgewärmt und mit Schräghaltung des Brenners der äußerste Rand feuerpoliert und anschließend mit rechtwinkliger Position die Ansatzstellen verschmolzen werden. Dazu konnte man stets mit kleinen Schmelzflammen arbeiten. Mittels Blasschlauch konnte direkt ein Überdruck erzeugt werden, damit das Glas nicht einfällt.

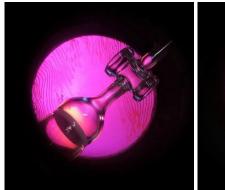
Auch bei der Filterplatte wurde großzügig rund um den Bearbeitungsbereich das Glas aufgewärmt. Eine leichte Schmelzflamme, etwas größer als die Filterplattenbreite, reichte aus, um eine entsprechende Viskosität zu erreichen, so dass das Rohr auf die Filterplatte gedrückt werden konnte. Schnell war die ganze Breite der Filterplatte

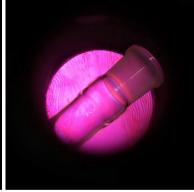
angeschmolzen. Die Poren sind sichtbar. Anschließend wurde das Glasrohrende herunter gebördelt und mit dem Einweghahn verschmolzen. Darauf war zu achten, dass die Flamme stets im rechten Winkel auf das Glas trifft um ein Ablenken der Flamme auf andere Bereiche, die sich schnell deformieren können, zu vermeiden. Zuletzt mussten die entstanden scharfen Kanten, sichtbar durch Lichtkanten vor und nach der Filterplatte, mit leichter Flamme verschmolzen und verblasen werden. Anschließend wurde wieder mit großer Schmelzflamme, großflächig rund um den eingeschmolzenen Filter, das Glas nachgewärmt.

Um die Filterplatte herum war ein breiter Spannungsring (gelber Bereich), der nicht auf baldigen Bruch hinweist. Ansonst waren kleine Spannungsringe an den Ansatzstellen, welche nicht ungewöhnlich sind.







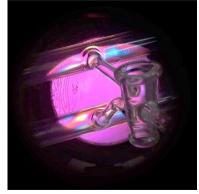


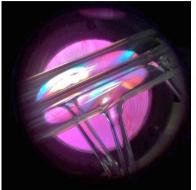
6.5. Stickstoff/Vakuum-Verteilerrechen

Die Herstellung der Verteilerrechen ist geglückt und funktionsfähig. Jedoch ist der Mini-Handbrenner für das Ansetzen der Zweiweghähne an die mit Stativmaterial befestigten Leitungsrohre nicht optimal. Zum einen ist das Vor-, Zwischen- und Nachwärmen nicht ausreichend möglich, da die Flamme viel zu klein ist. Es kommt zu häufiger Rissbildung. Alle Risse konnten dennoch wieder eingefangen werden. Zum anderen ist die Mini-Schmelzflamme punktuell zu heiß, so dass das Glas sehr schnell wegläuft. Auch ist die Ausgestaltung der Übergänge nicht gut möglich. Für diese Tätigkeiten muss ein anderer Handbrenner angeschafft werden. Ob das Weglaufen des viskosen Glases minimiert wird, ist fraglich. Die Vorarbeiten mittels H₂-Tischbrenner waren gut realisierbar gewesen.

Die fertigen Verteilerrechen weißten erhöhte Spannung auf. Eventuell erneute Rissbildung kann nicht festgestellt werden. Der Kühlprozess war erfolgreich.













6.6. Intensivkühler

Die Herstellung der Intensivkühler verlief gut. Bei einer Vorarbeit, die Wendel in das mittlere Rohr einschmelzen, schlich sich ein Konzentrationsfehler ein. Mit der langen spitzen Schmelzflamme wurde ein zu großer Bereich erhitzt und zu flüssig auf die Scheibe drauflaufen lassen, so dass das Glas an eine Wicklung anpappte. Diese Stelle konnte mit derselben Flamme jedoch gut verschmolzen werden. Diese Unachtsamkeit führte nicht zu Bruch.

Abgesehen davon konnten alle Bauteile und Röhren miteinander mit relativ kleinen Flammen, in wenigen Wiederholungen pro Methode, homogen verschmolzen werden. Die Bearbeitungsstellen sind klein. Besonders positiv wurde das an den Einschmelzungen zu den Kegelschliffen gesehen. Die Hitze war in dem kleinen Bereich ausreichend, so dass das Glas miteinander homogen verschmolz.

Nach wie vor muss die Flammeneinstellung nachjustiert werden. Ganz besonders an der Sauerstoffregelung. Es wurde viel mit heißem inneren Flammenkegel gearbeitet. Jedoch beim verstellen des Wasserstoffes war dieser wieder zu schwach oder er war zu kühl - vermutlich, weil zu viel O2 nicht mit H2 verbrannt und die Flamme abkühlte.

Durch permanentes großflächiges Zwischenwärmen war kein Wassereintrag und keine gravierende Spannung erkennbar gewesen.









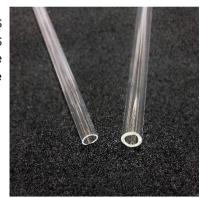


6.7. NMR-Rohre verlängern



Mit der kleinstmöglichen Einstellung, gerade so, dass eine Flamme erkennbar ist, konnte ein dünnwandiges NMR-Röhrchen mit einem 6er Rohr mit 1mm Wandstärke verbunden werden. Die Flamme hat die richtige Temperatur. Das Glas wurde nicht zu flüssig.

Kein Unterschied zur Erdgasflamme erkennbar gewesen.







7. Ansprechpartner



Verfasser und Mitwirkender des Berichtes

Stephan Eckert

Handwerksmeister im Glasapparatebauer-Handwerk Werkstattleiter

Universität Leipzig Fakultät Chemie & Mineralogie Glasbläserwerkstatt Johannisallee 29 04103 Leipzig

Tel: 0341 97 36 031

E-Mail: st.eckert@chemie.uni-leipzig.de

https://www.chemie.uni-leipzig.de/fakultaet/verwaltung-und-service/werkstaetten-der-fakultaet/



Mitwirkender des Berichtes

Marko Wende

Handwerksmeister im Glasapparatebauer-Handwerk

Universität Leipzig Fakultät Chemie & Mineralogie Glasbläserwerkstatt Johannisallee 29 04103 Leipzig

Tel: 0341 97 36 031

E-Mail: marko.wende@uni-leipzig.de

https://www.chemie.uni-leipzig.de/fakultaet/verwaltung-und-service/werkstaetten-der-fakultaet/