

Entwicklung einer Klebestrategie für den Bau des P2-Spurdetektors

von

Jana Weyrich

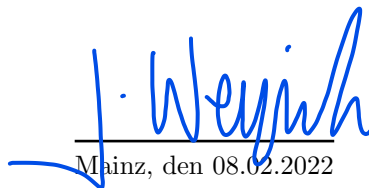


JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ

Bachelorarbeit in Physik
vorgelegt dem Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik (FB 08)
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
am 8. Februar 2022

1. Gutachter: Prof. Dr. Niklaus Berger
2. Gutachter: Prof. Dr. Frank Maas

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.



Mainz, den 08.02.2022

Jana Weyrich
AG Berger
Institut für Kernphysik
Staudingerweg 9
Johannes Gutenberg-Universität
D-55128 Mainz
jaweyric@students.uni-mainz.de

Zusammenfassung

Das P2-Experiment ist ein Hochpräzisionstest des Standardmodells der Teilchenphysik, bei dem der elektroschwache Mischungswinkel bei niedrigem Impulsübertrag gemessen wird. Dazu werden polarisierte Elektronen an einem unpolarisierten flüssigen Wasserstofftarget elastisch gestreut. Zur Bestimmung des Impulsübertrags muss die Trajektorie der gestreuten Elektronen exakt bekannt sein. Dafür kommt ein Spurdetektor zum Einsatz, der aus 4320 HV-MAPS (High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors) besteht, welche auf 464 Polyimid-Streifen geklebt werden. Zum Kleben und Platzieren der HV-MAPS wird ein eigens dafür konstruierter Roboter verwendet, an dem ein Jet-Dispenser angebracht ist.

In dieser Arbeit wurde das Ansaugsystem des Roboters erfolgreich angeschlossen und in Betrieb genommen. Zudem wurden zwei Epoxidharze (*Araldite® 2011* und *DYMAX® Multi-Cure® 6-621*) auf ihre Eigenschaften und ihr Verhalten beim Kleben mit dem Jet-Dispenser untersucht. Zuerst sollte ein optimiertes Parameter-Set für den Dispenser zum Dosieren der Kleber gefunden werden. Dafür wurden Klebetropfen ausgewählter Parameter-Sets optisch auf ihre Fläche und die Anzahl ihrer Satelliten untersucht. Damit wurde eine Vorauswahl an Parameter-Sets getroffen, für die die Massen der Tropfen ermittelt wurden. Mittels der Massen und deren Fehler wurde dann ein optimiertes Parameter-Set bestimmt. Mit diesem Parameter-Set wurde letztlich untersucht, wie viel Kraft benötigt wird, um die festgeklebten Testobjekte von der Oberfläche zu lösen. Für diese Tests wurden unterschiedliche Aushärtemethoden und Klebemuster getestet. Dabei wurde festgestellt, dass *Araldite® 2011* mit dem momentanen Aufbau fester und zuverlässiger klebt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Einführung in das Standardmodell	2
2.1	Elektroschwacher Mischungswinkel	3
2.2	Parität und Helizität	4
3	Das P2-Experiment	4
3.1	Messprinzip	4
3.2	Spurdetektor und HV-MAPS	6
3.2.1	Kleben der HV-MAPS	7
4	Aufbau des Kleberoboters	7
4.1	Allgemeiner Aufbau des Kleberoboters	7
4.2	Die Achsen des Roboters	9
4.3	Der Dispenser	10
4.4	Das pneumatische System	12
5	Die Ventilinsel	14
5.1	Aufbau der Ventilinsel	14
5.2	Steuerung der Ventilinsel	14
6	Messungen mit <i>Araldite® 2011</i>	16
6.1	Suche nach geeigneten Dispense-Parametern	16
6.1.1	Beschreibung der Parameter	16
6.1.2	Durchführung der Parametersuche	17
6.2	Analyse der Parametersuche	19
6.3	Bestimmung der Masse eines Tropfens für verschiedene Parame-ter-Sets	27
6.3.1	Beschreibung der Messmethode	27
6.3.2	Analyse der Massen	29
6.4	Krafttests	32
6.4.1	Durchführung der Krafttests	32
6.4.2	Analyse der Krafttests	35
7	Messungen mit <i>DYMAX® Multi-Cure® 6-621</i>	37
7.1	Bestimmung der Masse eines Tropfens für verschiedene Para-meter-Sets	38
7.1.1	Beschreibung der Messmethode	39
7.1.2	Analyse der Massen	40
7.2	Krafttests	42
7.2.1	Durchführung der Krafttests	42
7.2.2	Analyse der Krafttests	43
8	Vergleich zwischen <i>Araldite® 2011</i> und <i>DYMAX® Multi-Cure® 6-621</i>	45
9	Fazit und Ausblick	46
A	Skizzen	53
B	Grafiken	54
B.1	Statistik der Massen	54
C	Screenshots vom Web-Interface WebMotion®	61

INHALTSVERZEICHNIS

D Tabellen	63
D.1 Statistik der Krafttests	63
E Danksagung	68

1 Einleitung

Das Standardmodell (SM) ist das etablierteste Modell in der Teilchenphysik und beschreibt den uns bekannten Mikrokosmos sehr gut. Es geht auf die Elementarteilchen und den fundamentalen Wechselwirkungen zwischen diesen ein. Die primäre Entwicklung des SM war in den Jahren 1961-1973 [1]. Das SM wird heute noch getestet und untersucht, denn es beschreibt zwar viele Effekte im Mikrokosmos und konnte das Higgs-Teilchen erfolgreich voraussagen, aber es lässt noch viele Fragen unbeantwortet; so kann beispielsweise die Asymmetrie zwischen Materie und Anti-Materie im Universum sowie die Herkunft dunkler Materie und dunkler Energie nicht erklärt werden. Zudem wird die Gravitation, die im Alltag eine große Rolle spielt, nicht berücksichtigt. Am SM mussten auch Anpassungen durchgeführt werden, beispielsweise wurden die Neutrinos als masselos angenommen. Das wurde durch die beobachtbaren Neutrinooszillationen widerlegt und musste im SM integriert werden.

Ziel vieler Experimente der Teilchenphysik ist daher nach Physik jenseits des SM zu suchen. Dies geschieht in Messungen bei hohen Energien als auch in Hochpräzisionsmessungen und stellt die Physiker*innen vor neue Herausforderungen.

Das P2-Experiment ist eine Hochpräzisionsmessung des elektroschwachen Mischungswinkels (auch Weinberg-Winkel genannt) und soll nach Fertigstellung des Mainz Energy-Recovering Superconducting Accelerator (MESA) in Mainz starten. Der Weinberg-Winkel ist einer der 18 freien Parameter des SM. Die Untersuchung des Mischungswinkels mit der bisher unerreichten Präzision im P2-Experiment ist eine gute Möglichkeit Theorien und Vorhersagen, die das SM für niedrige Energieskalen beinhaltet, zu überprüfen. Der Weinberg-Winkel soll mittels der Streuung von polarisierten Elektronen an einem unpolarisierten flüssigen Wasserstofftarget bei niedrigem Impulsübertrag ermittelt werden. Zur Bestimmung des Impulsübertrages muss die Trajektorie der gestreuten e^- genau bekannt sein. Um die Teilchenbahn präzise zu vermessen, wird ein Spurdetektor, bestehend aus acht Detektormodulen mit insgesamt 4320 „High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors“ (HV-MAPS), verwendet. Diese HV-MAPS sollen keiner Temperatur über 80°C ausgesetzt werden und möglichst einheitlich auf Polyimidstreifen geklebt werden. In einem Detektormodul sind 16 Polyimidstreifen verbaut.

Für das Kleben und Platzieren dieser Sensoren wird ein eigens dafür konstruierter Roboter zum Einsatz kommen. Dieser soll in der Lage sein, die HV-MAPS mittels Unterdruck anzusaugen und präzise auf die Polyimidstreifen zu kleben. Diese Bachelorarbeit behandelt das Aufkleben der HV-MAPS. Es werden mehrere Kleber vorgestellt und ihre Vor- und Nachteile analysiert. Es wird auch auf die Klebesystematik eingegangen und wie zuverlässig und reproduzierbar das Verfahren zum Aufkleben der HV-MAPS ist. Zudem wurde ein System zum Ansaugen und Platzieren der HV-MAPS montiert und angeschlossen.

Zu Beginn der Arbeit wird eine kurze Einführung in das Standardmodell der Teilchenphysik gegeben. In Kapitel 3 wird das P2-Experiment vorgestellt. Danach folgt eine Beschreibung der Ventilinsel und ihrer Steuerung. Kapitel 6 und 7 gehen auf die beiden verwendeten Kleber und ihre Vor- und Nachteile beim Dosieren ein. In Kapitel 8 wird ein Vergleich zwischen den Klebern gezogen. Abschließend wird ein Fazit und ein Ausblick gegeben.

2 Einführung in das Standardmodell

Das Standardmodell (SM) vereint die Erkenntnisse der Teilchenphysik in einem konzeptionell einfach zu verstehenden Modell. Aus theoretischer Sicht ist das SM eine Quantenfeldtheorie und gehört somit nicht mehr zur klassischen Physik. Das SM beschreibt die elementaren Wechselwirkungen (schwache, starke und elektromagnetische) zwischen den bekannten Fundamentarteilchen. Diese sind die Quarks, die Leptonen, die Eichbosonen und die Skalarbosonen. Quarks und Leptonen haben den Spin $\frac{1}{2}$. Sie sind somit Fermionen und unterliegen der Fermi-Dirac-Statistik sowie dem Pauli-Prinzip. Die Fermionen sind die Materie-Teilchen und bilden die uns bekannte Materie. Zu den Leptonen gehören die Elektronen, die Myonen und die Tauonen, diese sind elektrisch geladen, und die jeweiligen Neutrinos, diese sind ungeladen. Die Quarks tragen eine starke Farbladung und eine elektrische Ladung. Die Leptonen unterliegen zudem der schwachen Wechselwirkung. Wie in Abb. 1 zu erkennen ist, lassen sich die Quarks und Leptonen in drei Generationen, bestehend aus je zwei Teilchen, unterteilen. Auffällig ist, dass die Masse äquivalenter Teilchen mit der Generation signifikant zunimmt. Diese Massenhierarchie lässt sich nicht durch das SM erklären. Weiterhin gibt es zu jedem Materie-Teilchen ein Anti-Teilchen, welches die gleiche Masse hat wie das Fermion, aber entgegengesetzte Ladungen (elektrische und starke Farbladung) annimmt.

Die Eichbosonen haben den Spin 1 und die Skalarbosonen haben den Spin 0. Somit sind sie Bosonen, die der Bose-Einstein-Statistik unterliegen. Die Bosonen werden als Wechselwirkungs-Teilchen bezeichnet, da sie die Wechselwirkung zwischen den Teilchen übertragen. Sie unterteilen sich in Vektorbosonen, auch Eichbosonen genannt, und Skalarbosonen. Zu den Vektorbosonen gehören die Gluonen, Photonen, Z-Bosonen und W-Bosonen. Die Gluonen tragen selbst die Farbladung und sind die Austausch-Teilchen der starken Wechselwirkung. Die Photonen sind ungeladen und sind die Austausch-Teilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung. Die Austausch-Teilchen der schwachen Wechselwirkung sind die Z- und W-Bosonen und haben eine Masse von ca. 100 GeV. Die W-Bosonen sind elektrisch geladen, das Z-Boson ist elektrisch neutral. Das Higgs-Boson ist ein Skalarboson. Es gehört zum Higgs-Mechanismus, der dafür verantwortlich ist, dass die Elementarteilchen ihre Masse erhalten. Das Higgs-Boson, sowie die Gluonen und Photonen haben keine Masse.

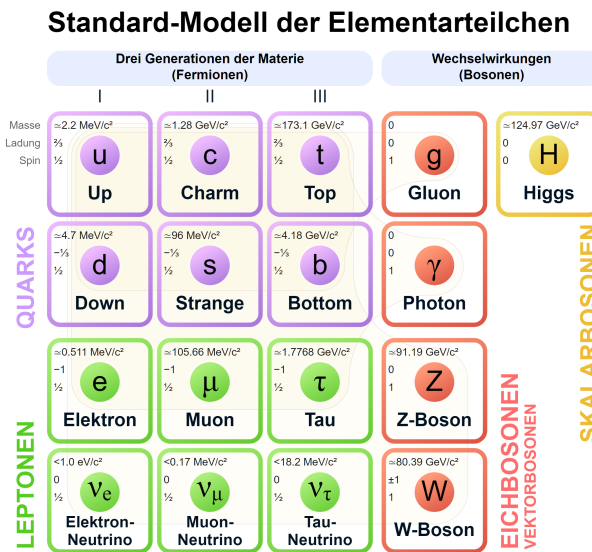


Abbildung 1: Schematische Gliederung und Darstellung der im Standardmodell vorkommenden Fundamentarteilchen [2].

Die starke Wechselwirkung hält Nukleonen zusammen und hat nur eine Reichweite von etwa 10^{-3} fm [3]. Grund dafür ist Confinement, das bedeutet, dass sich farbgeladene Teilchen zu einem farbneutralen Zustand zusammen tun. Die elektromagnetische Wechselwirkung reicht unendlich weit. Das liegt daran, dass die Photonen ungeladen und masselos sind. Die schwache Wechselwirkung ist für Zerfallsprozesse verantwortlich. Für sehr kurze Abstände ist die schwache Wechselwirkung so stark wie die elektromagnetische Wechselwirkung, ansonsten ist sie viel schwächer als die starke und die elektromagnetische Wechselwirkung. Zudem hat sie nur eine geringe Reichweite von unter einem Angström, die durch die hohen Massen der Z- und W-Bosonen bedingt ist.

Anders als bei der klassischen Physik kann sich während der Wechselwirkung die Teilchensorte ändern. Jedoch gibt es auch hier, wie in der klassischen Physik, Erhaltungsgrößen. Zu diesen gehören Energie- und Impulserhaltung, sowie Ladungserhaltung und Leptonenfamilienzahl-Erhaltung und noch einige mehr.

Die schwache Wechselwirkung ist die einzige der vier fundamentalen Wechselwirkungen, die bestimmte Erhaltungsgrößen verletzt. Zu diesen gehören unter anderem die Paritäts- und CP-Erhaltung. Unter CP-Invarianz wird verstanden, dass die physikalischen Zusammenhänge unverändert bleiben, wenn das System im Raum gespiegelt und alle Teilchen durch ihre Antiteilchen ersetzt werden.

2.1 Elektroschwacher Mischungswinkel

Aus der Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung zu der elektroschwachen Wechselwirkung folgt der elektroschwache Mischungswinkel als ein Parameter, welcher experimentell bestimmt werden muss. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse aus früheren Experimenten, sowie die geplante Genauigkeit bevorstehender Experimente. Die blaue Kurve ist der theoretisch vorhergesagte Verlauf des Mischungswinkel in Abhängigkeit des Impulsübertrages. Der theoretische Verlauf wurde aus den Messungen des Large Electron-Positron Collider (LEP) und des SLAC Linear electron positron Collider (SLC) entwickelt. Hierbei wurde der Mischungswinkel über den Zerfall von Z-Bosonen gemessen.

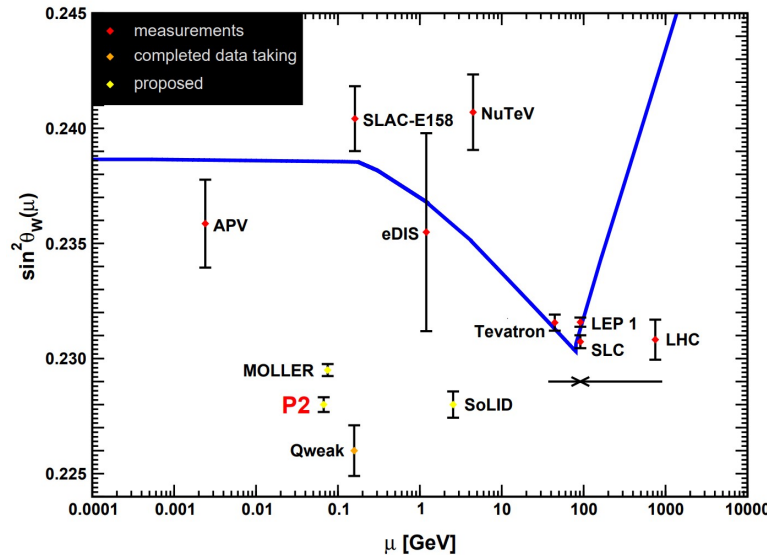


Abbildung 2: Der Weinbergwinkel $\sin^2 \theta_W$ in Abhängigkeit des Impulsübertrages. Die gelben Datenpunkte sind zukünftige Messungen und wurden in dieser Grafik willkürlich nach unten verschoben. Die Fehlerbalken stellen die Ungenauigkeit der Experimente dar. Die blaue Kurve ist der theoretisch berechnete Verlauf [4].

Die elektroschwache Wechselwirkung wird durch die vier masselosen Bosonen W^1, W^2, W^3 und B vermittelt. Mischzustände dieser Bosonen sind dann die nachweisbaren Bosonen, W^\pm , Z und γ . Die neutralen Teilchen der schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung ergeben sich aus der Mischung des B und W^3 :

$$\begin{pmatrix} \gamma \\ Z^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_W & \sin \theta_W \\ -\sin \theta_W & \cos \theta_W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B^0 \\ W^0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Aus mathematischer Sicht ist diese Transformationsmatrix eine zweidimensionale Rotationsmatrix um den Winkel θ_W .

2.2 Parität und Helizität

Die Parität ist eine Symmetriegröße, die ein System gegenüber einer Raumspiegelung hat. In der klassischen Physik muss die Parität immer erhalten sein. Auch die starke und elektromagnetische Wechselwirkung erhalten diese. Die schwache Wechselwirkung und somit auch die elektroschwache Wechselwirkung sind jedoch paritätsverletzend. Dies lässt sich mittels der Helizität erklären. Unter Helizität wird die Projektion des Spins eines Teilchen auf seinen Impuls verstanden. Sie ist durch

$$h = \frac{\vec{S} \cdot \vec{p}}{|\vec{p}|} \quad (2)$$

definiert. Die Z - und W^\pm -Bosonen koppeln verschieden stark an links- (positive Helizität) und rechtshändige (negative Helizität) Fermionen. Die Händigkeit der Teilchen bei einem Streuprozess beeinflusst somit den Wirkungsquerschnitt. Bei einem paritätserhaltenden Streuprozess würde erwartet werden, dass die Händigkeit der Teilchen keinen Einfluss auf den Wirkungsquerschnitt hat.

3 Das P2-Experiment

Der für das P2-Experiment benötigte Elektronenstrahl wird vom Elektronenbeschleuniger MESA bereit gestellt. Dieser wird zur Zeit in Mainz gebaut und drei Experimenten zur Verfügung stehen, dem „MESA Gas Internal target eXperiment“ (MAGIX), dem DarkMESA und dem P2-Experiment. Der bereitgestellte Elektronenstrahl hat eine Energie von 155 MeV, einen Elektronenstrom von 150 μA und kann mit einer Frequenz von etwa 1 kHz seine Polarität ändern [4].

Das Hauptziel des P2-Experiments ist es den elektroschwachen Mischungswinkel $\sin^2 \theta_W$ bei einem niedrigen Impulsübertrag von $Q^2 = 4.5 \cdot 10^{-3} \text{ GeV}^2$ mit einer Genauigkeit von 0.14% zu messen. Durch den geringen Impulsübertrag und der hohen Präzision unterscheidet es sich von anderen bereits stattgefundenen Experimenten, wie in Abbildung 2 zu sehen ist. Erreicht wird das durch eine sehr hohe Luminosität von $L = 2.38 \cdot 10^{39} \frac{1}{\text{cm} \cdot \text{s}}$ und einer Strahlzeit von 10 000 h. Durch den kleinen Fehler auf die Messwerte kann bei einer Abweichung von der erwarteten blauen Kurve auf andere Modelle geschlossen werden, wie etwa den Einfluss von dunklen Photonen. Diese Hochpräzisionsmessung soll also Aufschluss darüber geben, ob es neue Physik jenseits des Standardmodells gibt.

3.1 Messprinzip

Der Weinberg-Winkel kann nicht direkt gemessen werden, sondern muss aus messbaren Größen berechnet werden. In diesem Experiment wird der Mischungswinkel $\sin^2 \theta_W$ gemessen, indem

ein Elektronenstrahl, dessen Polarisation sich mit 1 kHz ändert, auf ein unpolarisiertes ℓH_2 -Target geschossen wird. Die Elektronen werden elastisch an den Protonen gestreut. Die elastische Streuung eines Elektrons an einem Proton kann durch die schwache oder die elektromagnetische Wechselwirkung vermittelt werden. Letztere dominiert den Streuvorgang. Abbildung 3 zeigt die Feynman Diagramme beider Streuprozesse.

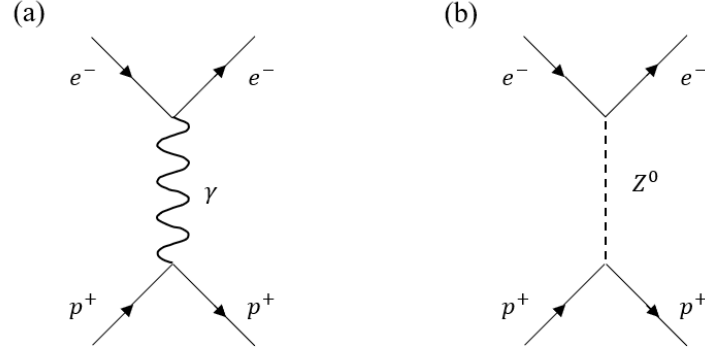


Abbildung 3: Feynman Diagramme für die elastische Streuung eines Elektrons an einem Proton. Unter der elektromagnetischen Wechselwirkung wird ein Photon ausgetauscht (a). Unter der schwachen Wechselwirkung wird ein Z^0 -Boson ausgetauscht (b).

Da der schwache Prozess paritätsverletzend ist, sollte eine Asymmetrie zwischen den unterschiedlich polarisierten Elektronen auftreten, da eine Änderung der Polarisation, eine Änderung der Händigkeit bedeutet. Diese Asymmetrie ist durch

$$A^{PV} = \frac{d\sigma_{ep}^+ - d\sigma_{ep}^-}{d\sigma_{ep}^+ + d\sigma_{ep}^-} \quad (3)$$

gegeben. $d\sigma_{ep}^\pm$ ist dabei der differentielle Wirkungsquerschnitt für die Streuung der Elektronen mit positiver/negativer Helizität. Dieser differentielle Wirkungsquerschnitt wird von einem ringförmigen Cherenkov-Detektor aufgenommen. Für das P2-Experiment liegt die erwartete Asymmetrie bei $\langle A^{PV} \rangle = (39.94 \pm 0.56) \text{ ppb}$ mit einem relativen Fehler von 1.4 %. Diese Asymmetrie ist sehr gering, weshalb eine hohe Anzahl an gestreuten Elektronen benötigt wird. Diese wird durch eine hohe Luminosität und eine lange Messdauer erreicht [4].

Über die Asymmetrie lässt sich die schwache Ladung des Protons berechnen. Diese wird benötigt, um den Mischungswinkel zu bestimmen. Die folgenden Gleichungen setzen die Asymmetrie und die schwache Ladung, sowie die schwache Ladung und den elektroschwachen Mischungswinkel in Relation zueinander:

$$A^{PV} = \frac{-G_F Q^2}{4\pi\alpha_{em}\sqrt{2}} (Q_W(p) - F(E_i, Q^2)) \quad [4] \quad \text{mit} \quad Q_W(p) = 1 - 4\sin^2\theta_W. \quad (4)$$

Dabei ist G_F die Fermi-Konstante und $F(E_i, Q^2)$ der Strukturfaktor. Der Strukturfaktor ist für kleine Impulsüberträge Q^2 unterdrückt. Das ist einer der Gründe weswegen ein kleiner Impulsübertrag beim P2-Experiment gewählt wurde. Die schwache Ladung des Protons $Q_W(p)$ ist im SM unterdrückt und deshalb sensitiv gegenüber neuer Physik. Durch eine Bestimmung der schwachen Ladung lässt sich der Mischungswinkel etwa zehnmal genauer bestimmen als bei vorherigen Messungen.

3.2 Spurdetektor und HV-MAPS

Zur Bestimmung des Weinberg-Winkels wird zusätzlich der Impulsübertrag Q^2 der gestreuten Elektronen benötigt. Die Elektronen werden nach der Streuung von einem 0.6 T starken Magnetfeld abgelenkt und passieren den Spurdetektor.

Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, ist der Spurdetektor wie folgt aufgebaut: Der Detektor besteht aus acht Modulen, jedes Modul hat zwei Lagen mit jeweils 270 HV-MAPS [4]. Die acht Doppelsegmente, angeordnet in zwei Ebenen, decken jeweils 15° des azimutalen Winkels ab. Dadurch sollen obere, untere, sowie linke und rechte Asymmetrien erfasst werden. Der große Abstand zwischen den zwei Detektorebenen ohne streuendes Material ist notwendig, da die Elektronen einen sehr kleinen Impuls haben und deshalb stark streuen.

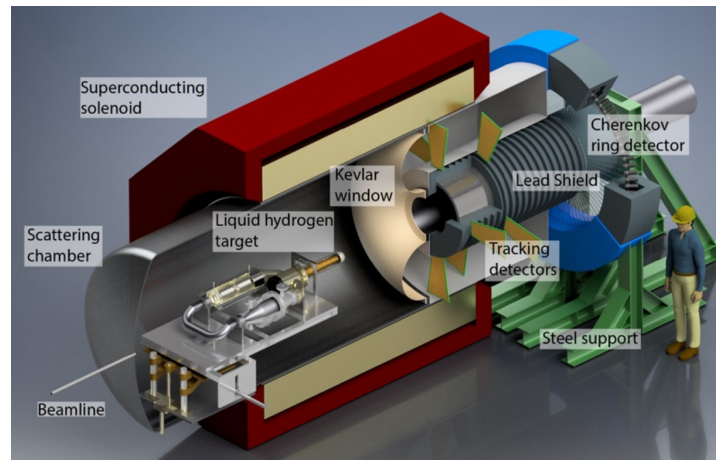


Abbildung 4: Schematische Darstellung des P2-Aufbaus. Die Spurdetektoren sind die „Tracking detectors“ (hier gelb dargestellt)[4].

Detektiert wird der genaue Ort und Zeitpunkt des Passierens des Detektors. Aus den vier Punkten, an denen die Elektronen den Detektor treffen, lässt sich die Spur der Elektronen rekonstruieren und damit der Impulsübertrag und der Streuwinkel berechnen. Die Treffer werden von den HV-MAPS aufgezeichnet, die den Kern des Spurdetektors ausmachen.

Die HV-MAPS bestehen aus Silizium mit einer n-dotierten Wanne in einem p-dotierten Substrat. In der entstehenden Raumladungszone am pn-Übergang liegen keine freien Ladungen vor. Wird eine Spannung in Sperrrichtung angelegt, vergrößert sich die Raumladungszone und kann zur Detektion geladener Teilchen genutzt werden. Beim Durchqueren der Raumladungszone erzeugt das geladene Teilchen ein Elektronen-Loch-Paar. Die angelegte Spannung trennt dieses Paar und es fließt ein Strom, der gemessen werden kann. Die HV-MAPS haben eine Fläche von $(20\text{ mm} \times 22\text{ mm})$ und eine Dicke von $50\text{ }\mu\text{m}$ mitsamt der Ausleseelektronik. Da Vielfachstreuung vermieden werden soll, eignen sich diese Sensoren aufgrund ihrer geringen Materialdicke [5, 6].

In Abbildung 5 ist die untere Lage eines Detektormoduls skizziert. Die HV-MAPS werden auf sehr dünne Polyimid-Streifen, welche an einem PCB-Rahmen befestigt sind, geklebt. 8 Streifen mit insgesamt 270 HV-MAPS werden für eine Lage benötigt. Für das ganze Experiment müssen also 4320 HV-MAPS verklebt werden. Über die Polyimid-Streifen werden Spannungen und Signale übertragen. Die elektrischen Verbindungen werden über Single point Tape automated bonding (SP-TAB)¹ hergestellt. Die HV-MAPS müssen also präzise auf die Polyimid-Streifen geklebt werden. Das Kleben der HV-MAPS muss mehreren Anforderungen genügen und wird daher im nächsten Abschnitt näher erläutert.

¹Verfahren zur Kontaktierung roher Halbleiter-Chips (integrierter Schaltkreis) direkt auf der Leiterplatte.

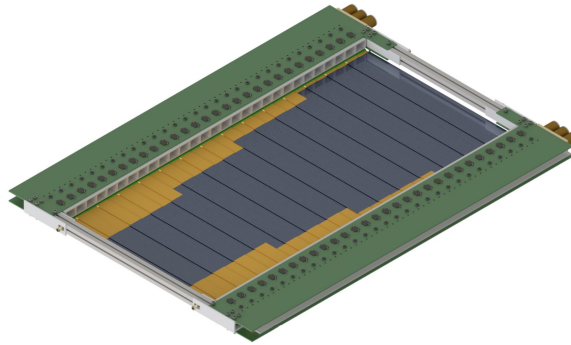


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Detektormoduls. Dargestellt ist nur die untere Lage des Detektors. Die orangenen Flächen stellen die Polyimid-Streifen dar auf denen die HV-Maps, hier grau gezeichnet, aufgeklebt werden. Die Polyimid-Streifen sind an dem hier grünen PCB-Rahmen befestigt [5].

3.2.1 Kleben der HV-MAPS

Sowohl der Klebeprozess, als auch die Suche nach einem geeigneten Kleber bergen viele Herausforderungen. Der Kleber muss strahlenhart sein und die Dosier- sowie Aushärtemethode sollte an den eigens zum Kleben der HV-MAPS gebauten Roboter angepasst werden. In dieser Arbeit werden zwei Kleber, welche strahlenfest sind, näher untersucht.

Der erste Kleber ist der Zwei-Komponenten-Kleber *Araldite® 2011*, welcher schon in anderen Experimenten eingesetzt wurde. Der zweite Kleber ist der *DYMAX® Multi-Cure® 6-621*, der von der ATLAS Kollaboration hinsichtlich der Strahlenfestigkeit getestet und für geeignet befunden wurde [7]. Die Viskosität vom *Araldite® 2011* liegt bei $30 - 50 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [8] und vom *DYMAX® Multi-Cure® 6-621* bei $800 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ [9]. Damit ist der *Araldite® 2011* sehr viel viskoser. Zudem härtet er bei Raumtemperatur innerhalb von zwei Stunden aus. Der *DYMAX® Multi-Cure® 6-621* kann mittels Hitze, UV-Licht oder eines Aktivators desselben Herstellers ausgehärtet werden.

Der Kleber sollte gleichmäßig gesetzt und wiederholbar zu platzieren sein. Um das Kleben für die große Menge an HV-MAPS zu systematisieren wurde ein Roboter gebaut, der im folgenden Kapitel vorgestellt wird.

4 Aufbau des Kleberoboters

Der Kleberoboter soll ein gleichmäßiges Positionieren und Kleben der HV-MAPS auf die Polyimid-Streifen gewährleisten. Dieses Kapitel beschreibt den Roboter und seine Funktionsweise. Im ersten Abschnitt wird auf den allgemeinen Aufbau des Roboters eingegangen. Danach werden die Achsen und die an ihnen befestigten Geräte näher erläutert. In Abschnitt 4.3 wird der Dispenser beschrieben, der für das Dosieren des Klebers verantwortlich ist. Zum Schluss wird das pneumatische System dargelegt.

4.1 Allgemeiner Aufbau des Kleberoboters

Der Roboter misst $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$. Er besteht aus einer Konstruktion aus Aluminiumprofilen, das auf vier Rollen bewegt werden kann. In diesem Gerüst befinden sich ein Computer, eine Vakuumpumpe, eine Ventilinsel, die Servocontroller zur Steuerung der Achsen des Roboters, ein Netzwerk-Switch, sowie der Jet-Dispenser und ein Netzteil. Auf dem Gerüst sind eine Granitplatte und die beweglichen Achsen der Jenny Science AG befestigt. Ganz oben ist ein Monitor für den Computer befestigt. Der Aufbau ist in Abbildung 6 zu erkennen.

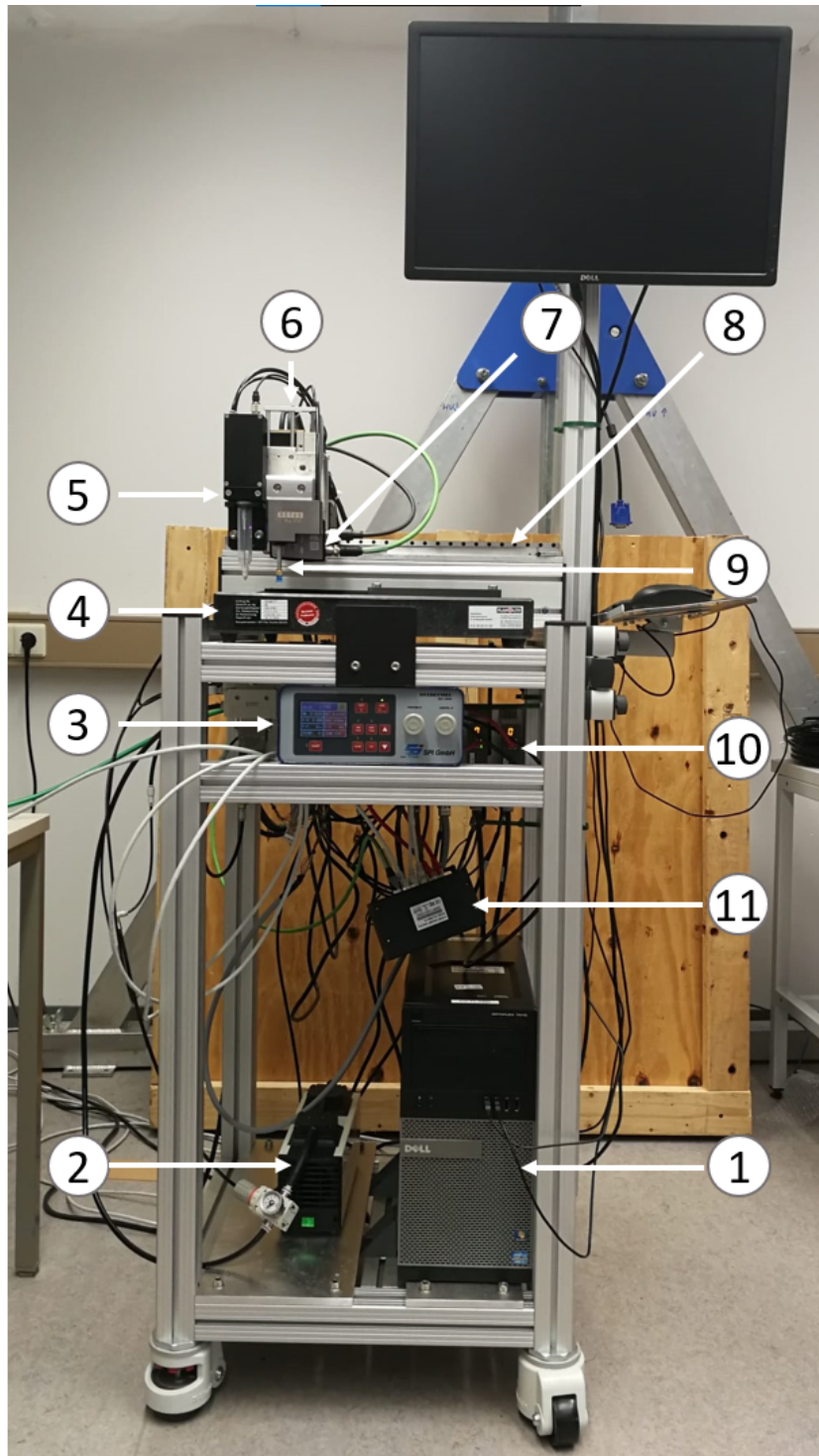


Abbildung 6: Frontansicht des Kleberoboters. Dabei ist (1) der Computer, (2) die Vakuumpumpe, (3) das Jet-Dispenser-Steuergerät, (4) die Granitplatte, (5) Dispenser-Einheit, (6) die z-Achse, (7) der Laserdistanzsensor, (8) die x-Achse, (9) die r-Achse mit dem montierten Vakuumgreifer, (10) die Servocontroller und (11) der Netzwerk-Switch.

Die Granitplatte hat eine Fläche von $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ mit einer definierten Ebenheit von weniger als $2\text{ }\mu\text{m}$ Abweichung vom Mittel und dient als Arbeitsfläche. In die Platte sind neun M8 Gewinde eingelassen zum Befestigen benötigter Halterungen für die Testobjekte. Die Gewinde haben einen Abstand von 5 cm zum Rand der Platte und 15 cm zum nächsten Nachbarn. Die Achsen sind vom Schweizer Hersteller Jenny Science AG. Es sind insgesamt vier Achsen montiert, die im nächsten Abschnitt beschrieben werden.

4.2 Die Achsen des Roboters

Es gibt drei Linearachsen für die x-, y- und z-Richtung, die jeweils aus den LINAX[®] Linearmotor-Achsen der Jenny Science AG bestehen. An der z-Achse ist eine Rotationsachse angebracht, die aus einer ROTAX[®] Drehmotor-Achse besteht. Wichtige Eigenschaften sowie Parameter für die Achsen sind in Tabelle 1 aufgezählt und sind den jeweiligen Datenblättern [10, 11] entnommen.

Tabelle 1: Parameter für die LINAX[®] Linearmotor-Achsen und die ROTAX[®] Drehmotor-Achse der Jenny Science AG. Für die LINAX[®] Achsen entspricht ein Inkrement (Ink) einem Mikrometer. Für die ROTAX[®] Achse entsprechen $64\,000\text{ Ink}$ 360° . Die angegebene maximale Kraft für die Rotationsachse bezieht sich auf die axiale Kraft.

Achse	x	y	z	r
Typ	Lxs 400F60	Lxu 320F60	Lxc 85F10	Rxvp
Hub [mm]	400	320	85	-
max. Geschwindigkeit [$\cdot 10^6\text{ Inks}^{-1}$]	4.0	3.8	2.5	1500
max. Kraft [N]	60	60	10	180
max. Drehmoment [mNm]	-	-	-	110
Genauigkeit [Ink]	± 10	± 12	± 7	$< \pm 10$
Wiederholgenauigkeit [Ink]	$< \pm 1.5$	$< \pm 1.5$	$< \pm 1.5$	$< \pm 10$
Auflösung [μmInk^{-1}]	1	1	1	20.25

In Abbildung 7 ist eine Nahaufnahme des Arbeitsbereichs zu sehen. Die Achsen sind so angeordnet, dass die y-Achse das Gewicht des Dispensers für den Kleber, verbauter Einzelteile (Kabel, Schrauben,...), der z-Achse und der Rotationsachse tragen muss. Damit es durch das entstehende Drehmoment zu keiner ungewollten Auslenkung kommt, wurde eine Verstärkung an die y-Achse angebracht. Dem Drehmoment an der x-Achse, das durch die y-Achse entsteht, wird durch keine externe Verstärkung entgegengewirkt. Wie in Abbildung 7 zu erkennen ist, sind an der z-Achse die Rotationsachse, die Dispenser-Einheit und der Laserdistanzsensor befestigt. Die Dispenser-Einheit befindet sich in Abbildung 7 an der rechten Seite der z-Achse. Auf der linken Seite ist die Rotationsachse angebracht. An dieser ist ein Vakuumgreifer montiert, mit dem später die Glasplättchen, die als Ersatz für die HV-MAPS dienen, angesaugt werden. Hinter der Rotationsachse ist ein Laserdistanzsensor der Marke Baumer vom Typ OM70-L0070.HH0048.EK verbaut. Sein Messbereich liegt zwischen 30 mm und 70 mm , die Genauigkeit liegt bei $4\text{ }\mu\text{m}$ [12].

Dem zusätzlichen Gewicht an der z-Achse wirkt ein integrierter Gewichtskompensator vom Typ *Geko Lxc 85F10* entgegen. Dieser ist für ein Gewicht bis zu 3 kg ausgelegt und arbeitet mit Druckluft. Der benötigte Druck von etwa 3.6 bar [13] wird über einen Druckminderer eingestellt. Der Gewichtskompensator unterstützt die z-Achse bei ihren Bewegungen so, dass die z-Achse auch bei ausgeschaltetem Strom ihre Position halten kann.

Jede Achse kann über ihren eigenen XENAX[®] Xvi 75V9 Ethernet Servocontroller angesteuert werden. Diese bieten eine Ethernet TCP/IP-Schnittstelle. Die Servocontroller und der Laserdistanzsensor sind jeweils mit einem Ethernetkabel mit einem Netzwerk-Switch verbunden. Von diesem Switch führt ein weiteres Ethernetkabel an einen Computer. Dadurch lassen sich die Achsen und der Laserdistanzsensor über das lokale Netzwerk mit dem Computer steuern.

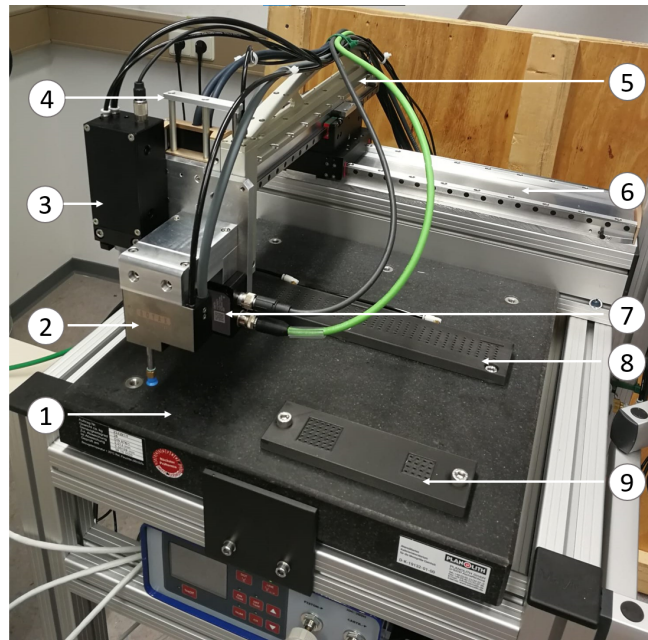


Abbildung 7: Nahaufnahme des Arbeitsbereichs des Kleberoboters. Dabei ist (1) die Granitplatte, (2) die r-Achse mit dem montierten Vakuumsauger, (3) die Dispenser-Einheit, (4) die z-Achse, (5) die y-Achse, (6) die x-Achse, (7) der Laserdistanzsensor, und (8) sowie (9) sind 3D-gedruckte Unterlagen auf denen die Polyimidstreifen und Glasplättchen während der Tests platziert sind.

Die Steuerung der Achsen erfolgt durch das Web-Interface WebMotion[®] von Jenny Science AG. Damit lassen sich schneller einfache Programme, die nur eine Achse betreffen, schreiben und kurze Bewegungsanweisungen übergeben. Soll mit einem Programm mehrere Achsen gesteuert werden, kann das Web-Interface nicht mehr benutzt werden. Für solche Programme wurde eine eigene C++ und Python Bibliothek angelegt. Diese befindet sich im Git-Repository labdev [14] für das Detektorlabor. Mit dem Computer können die Programme über Windows Subsystem for Linux abgerufen werden. Ziel ist es, den Roboter in naher Zukunft über einen Raspberry Pi mittels einer eigenen C++ Bibliothek zu betreiben.

Ein Netzteil, das unterhalb der Granitplatte angebracht ist, liefert eine Spannung von 24 V und einen Strom von 20 A für die oben beschriebenen Geräte.

4.3 Der Dispenser

Das Jet-Dispenser-Steuergerät ist vom Typ *Jet DISPENSER JDC-200H*. Es ist für den Kolbendruck und den Kartuschendruck, welche an der Dispenser-Einheit vom Typ *SG-JE 100* anliegen, verantwortlich.

Das Steuergerät ist vorne am Aluminiumrahmen montiert. Die Vorderseite ist in Abbildung 8 zu sehen. Auf der linken Seite befindet sich ein LCD-Display auf dem die eingestellten Parameter gezeigt werden. Direkt darunter befindet sich die Taste mit dem Aufdruck *SHOT*. Beim betätigen dieser Taste wird der Dispenser ausgelöst und Kleber ausgegeben. Ganz rechts befinden sich zwei Drehregler. Damit kann der Kolbendruck (*Piston-P./P-P*) und der Kartuschendruck (*Cartr.-P./C-P*) eingestellt werden. In der Mitte sind acht Tasten. Mit den beiden oberen kann auf den Dot-Modus oder den Line-Modus geschaltet werden. Beim Dot-Modus wird beim betätigen der *SHOT*-Taste eine konstante Anzahl an Schüssen vom Kleber ausgegeben. Beim Line-Modus wird solange Kleber ausgegeben wie die Taste gedrückt ist. Mit den sich darunter befindenden Tasten lassen sich die On-time, die Off-time, die Anzahl an

4 AUFBAU DES KLEBEROBOTERS

Schüssen und der Channel einstellen. Dafür wird eine der vier Tasten mit der Aufschrift *ON TIME*, *OFF TIME*, *NUM* oder *CH* betätigt. Mit den Pfeiltasten kann dann der Wert des jeweiligen Parameters verändert werden. Mit *NUM* wird die Anzahl der Schüsse im Dot-Modus eingestellt und mit *CH* wird der Channel eingestellt. Die On-time und die Off-time werden mit *ON TIME* und *OFF TIME* eingestellt.



Abbildung 8: Nahaufnahme des Jet-Dispensers-Steuergeräts.

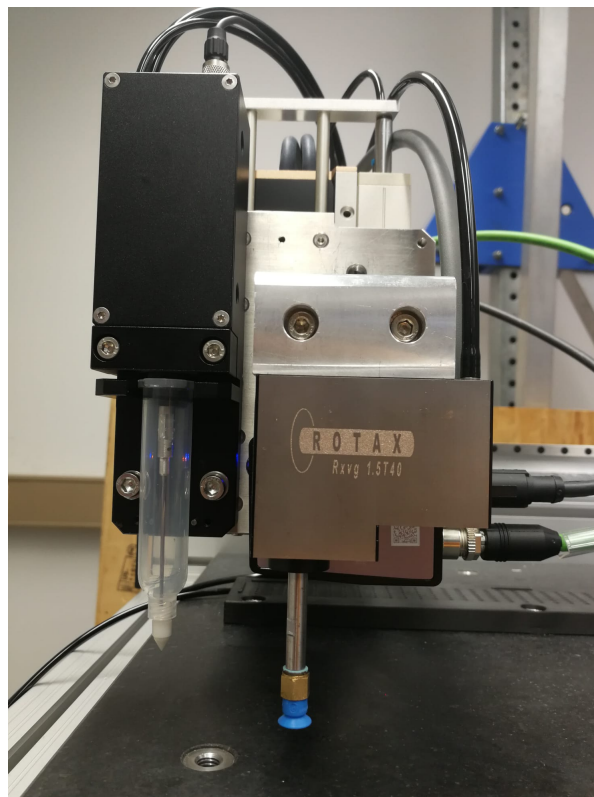


Abbildung 9: Nahaufnahme der z-Achse, der Dispenser-Einheit, der Rotationsachse und des Saugnapfes.

Die On-time ist die Zeit, die der Kolben durch die Druckluft erst nach oben und dann wieder nach unten beschleunigt wird. Unter der Off-time wird die Zeit zwischen zwei Schüssen verstanden. Die Off-time ist demnach erst relevant, wenn die Anzahl an Schüssen größer als 1 ist. Ein Channel ist ein Set an Parametern. Jeder Channel kann individuell eingestellt werden.

Die Dispenser-Einheit befindet sich an der z-Achse. Die Kartusche kann abgenommen und mit Kleber befüllt werden. Die Spitze der Dispenser-Einheit ist eine Keramikdüse, die an die Kartusche geschraubt wird. Die Öffnung der Düse hat einen Durchmesser von 150 μm . In Abbildung 9 ist die Dispenser-Einheit mit samt der verwendeten Keramikdüse abgebildet.

Das Arbeitsprinzip des Jet-Dispensers ist wie folgt: Der Kolben, der in der Mitte der Kartusche positioniert ist, berührt die Düse, wenn er an der untersten Position der Abwärtsbewegung ist. Es soll pro Abwärtsbewegung ein Tropfen herausgeschossen werden. Das geschieht durch den Impuls des Kolbens während der Abwärtsbewegung. Der Impuls wird auf den Kleber übertragen, der an der Düse austritt. Der Kleber schießt dann heraus.

4.4 Das pneumatische System

Der Dispenser, die Ventilinsel und die Gewichtskompensation benötigen Druckluft. Diese kommt aus einem Druckluftventil an der Wand. Über einen daran befestigten Druckminderer können bis zu 6 bar eingestellt werden.

Abbildung 10 zeigt eine Skizze des pneumatischen Systems. Zwischen dem Druckluftventil an der Wand und dem Jet-Dispenser-Steuergerät, der Gewichtskompensation und der Ventilinsel ist ein Schalter verbaut, welcher der Sicherung dient. Das Jet-Dispenser-Steuergerät ist in der Skizze grün umrandet und wird vereinfacht durch zwei Druckminderer dargestellt. Mit dem Steuergerät lassen sich an der Dispenser-Einheit der Kolben- und Kartuschendruck einstellen. Zwischen dem Schalter und dem Druckkompensator befindet sich ein Druckminderer, der auf 3.6 bar gestellt ist wie in Kapitel 4.2 bereits erwähnt.

Zum Ansaugen der Testobjekte, der Polyimid-Zuschnitte und Glasplättchen, wird Unterdruck benötigt. Dieses wird durch eine Vakuumpumpe erzeugt.

Die Ventilinsel ist in der Skizze rot und blau umrandet. Der rot umrandete Teil der Ventilinsel ist ein Magnetventilmodul. An der Insel sind momentan drei dieser Ventilmodule angeschlossen. Je nach Gebrauch kann die Ventilinsel um weitere neun Magnetventilmodule ergänzt werden. Aus Übersichtsgründen wurde nur eines dargestellt. Die Ventilinsel benötigt Überdruck zum Schalten der Ventile. Der Druck wird über einen Druckminderer auf 2.5 bar gestellt. Weiterhin ist die Ventilinsel mit der Vakuumpumpe verbunden. Zwischen der Ventilinsel und der Vakuumpumpe ist ebenfalls ein Druckminderer eingebaut. Dieser ist während der Anwendung voll aufgedreht und geht bis zu -100 kPa . Die Vakuumpumpe selbst erzeugt einen Druck von ca. -90 kPa . Die Ventilinsel wurde im Rahmen dieser und David Anthofers Bachelorarbeit [15] angeschlossen sowie in Betrieb genommen und wird deshalb im Kapitel 5 genauer beschrieben.

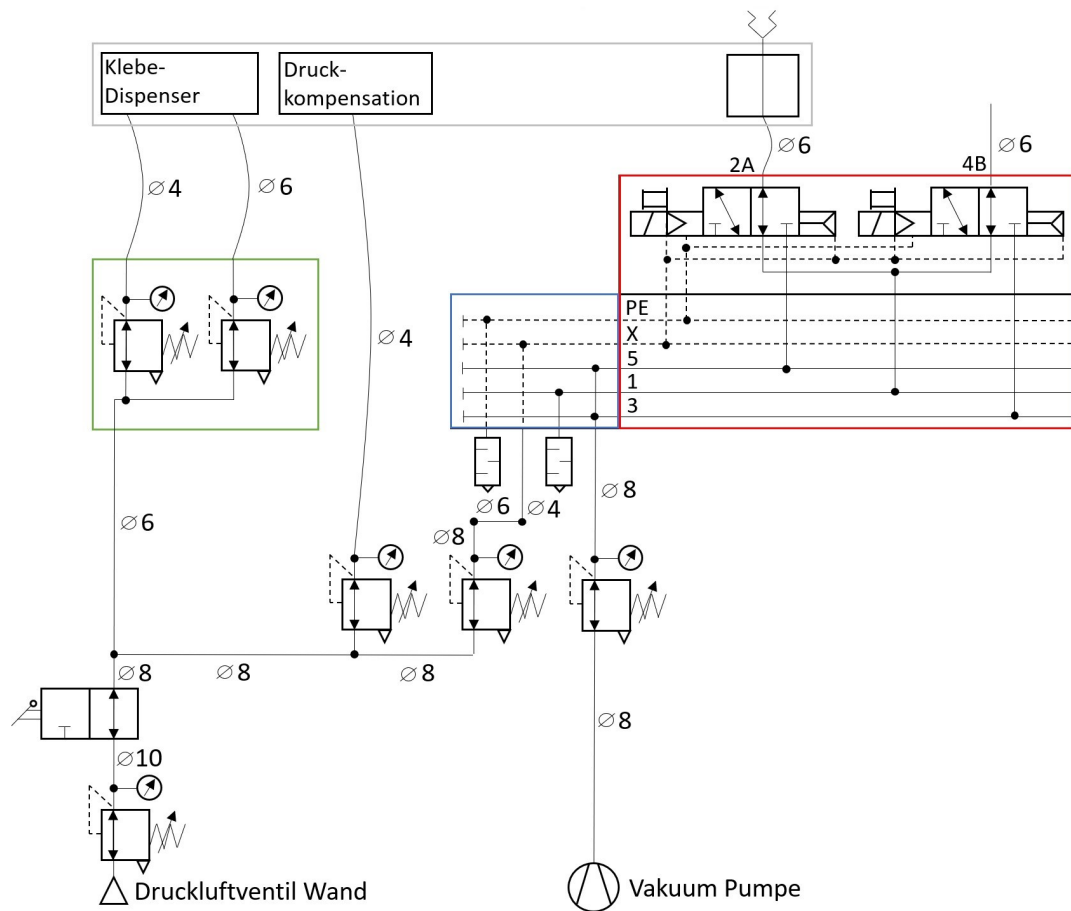


Abbildung 10: Schaltskizze für das pneumatische System des Kleberoboters. Grün umrandet ist das Jet-Dispenser-Steuerg r t. Das wurde vereinfacht durch zwei Druckminderer dargestellt. Blau und rot umrandet ist die Ventilinsel. Der blau umrandete Teil ist das Steuerm dul. Rot umrandet ist das Magnetventilmodul. Aus Übersichtsgründen ist nur eines von drei angeschlossenen Magnetventilmodulen dargestellt. Der Durchmesser der Schläuche ist in mm gegeben. Die Schalldämpfer sind an Anschluss PE und 1 des Steuerm duls angeschlossen.

5 Die Ventilinsel

Die Ventilinsel soll das Ansaugsystem des Roboters vervollständigen. Bis jetzt konnte der Roboter an verschiedene Positionen im Bereich der Arbeitsflächeplatte fahren, war aber nicht in der Lage, Testobjekte anzusaugen und an einer anderen Position abzusetzen. Die Ventilinsel soll zudem dazu dienen, die Polyimid-Streifen anzusaugen, damit sich die Position dieser während dem Aufkleben der Testobjekte nicht verschiebt.

5.1 Aufbau der Ventilinsel

Die Ventilinsel ist an der Seite der Stützstruktur des Roboters angebracht. Sie besteht aus einem SY30M-11A1-C8 Steuermodul und drei druckgesteuerten Magnetventilmodulen des Modells SY3B00R-5U1. Jedes Magnetventilmodul besteht aus zwei Magnetventilen, welche jeweils einen Ausgang und zwei Eingänge haben. Das Steuermodul hat vier Anschlüsse, 1, 3/5, X und PE. Die Eingänge der Magnetventilmodule sind jeweils mit Anschluss 1 oder Anschluss 3/5 des Steuermoduls verbunden. Durch einen Elektromagneten wird gesteuert, mit welchem der Eingänge der Ausgang des Ventils verbunden ist. Da das Magnetventil druckgesteuert ist, wird zur Schaltung des Ventils noch ein Pilotventil benötigt. Dieses Pilotventil, welches in der Ventilinsel verbaut ist, ist mit dem Anschluss X verbunden und benötigt einen bestimmten Druck. Der Druck soll laut Hersteller mindestens 2.5 bar betragen und mindestens 1 bar über dem Arbeitsdruck liegen [16]. Der Arbeitsdruck befindet sich für die Versuchsreihen, die in dieser Arbeit durchgeführt wurden, unter dem Atmosphärendruck. Somit kann der Druck für die Pilotventile wie in Abschnitt 4.4 bereits erwähnt auf 2.5 bar gestellt werden. Der Druck wird über einen Druckminderer eingestellt und wird von der Druckluftversorgung des Gebäudes geliefert. Zur Entlüftung der Pilotventile sind diese mit dem Anschluss PE des Steuermoduls verbunden. An diesem Anschluss und dem Anschluss 1 liegt Außendruck an. Wie in Abbildung 10 dargestellt, liegt an den Anschlüssen PE und 1 jeweils ein Schalldämpfer an, um den Prozess des Druckausgleichs zu dämpfen. Anschluss 3/5 ist an die Vakuumpumpe angeschlossen. Damit liegt an dem Anschluss ein Unterdruck an.

An dem Ausgang eines Magnetventils kann somit zwischen Außendruck und Unterdruck geschaltet werden. Standardmäßig sind die Ausgänge der Magnetventile mit Anschluss 1 des Steuermoduls verbunden, damit an diesen ohne Ansteuerung Außendruck anliegt. Der erste Ausgang des ersten Magnetventilmoduls (beschriftet als Ausgang 2A in Abbildung 10) ist an dem Vakuumgreifer, der an der r-Achse montiert ist, angeschlossen. Dadurch können die Testobjekte angesaugt und wieder abgesetzt werden. Die restlichen Magnetventile können genutzt werden, um für Tests benötigte Halterungen oder Messinstrumente mit Unterdruck zu versorgen. In dieser Arbeit wurden zwei Ausgänge benutzt, um die Polyimid-Streifen während der Tests anzusaugen und diese somit auf ihrer Position zu halten.

5.2 Steuerung der Ventilinsel

Zur Steuerung der Ventilinsel werden General Purpose Input/Output (GPIO) Pins verwendet. Das Jet-Dispenser-Steuerggerät sowie die Servocontroller werden ebenfalls durch Anschlüsse mit solchen Pins gesteuert. Das Steuermodul der Ventilinsel hat einen DSUB-25-Anschluss mit 25 GPIO Pins. 24 dieser Pins können dazu genutzt werden um die Magnetventile anzusteuern. Somit können bis zu zwölf Magnetventilmodule an ein Steuermodul angebracht werden. Einer der GPIO Pins, Pin Nr. 13, wird als Masse verwendet. Der Servocontroller hat einen Anschluss mit 27 GPIO Pins. Die ersten 8 Ausgänge sind der Signalausgabe zugewiesen. An ihnen kann eine Spannung von 0 V oder 24 V angelegt werden. Pin Nr. 25 und Pin Nr. 10 sind der Masse zugewiesen. Der Anschluss des Jet-Dispenser-Steuerggeräts umfasst 4 Pins. Damit kann das Abschießen bzw. Absetzen der Klebetropfen automatisiert gesteuert werden, allerdings müssen die Parameter noch am Jet-Dispenser-Steuerggerät selbst eingestellt werden.

In Abbildung 32 im Anhang ist ein Kabelplan für das Verbindungskabel zwischen dem Jet-Dispenser-Steuerggerät, dem XENAX[®] Xvi 75V9 Ethernet Servocontroller und dem Steuer-

modul der Ventilinsel skizziert. Dieses Kabel wurde in Zusammenarbeit mit David Anthofer [15] angefertigt. Als Basis diente ein 26 poliges PLC Kabel der Jenny Science AG [17]. Zur Zeit wird nur der Servocontroller der z-Achse verwendet, da dessen acht Ausgabepins für die drei angeschlossenen Magnetventilmodule und das angeschlossene Jet-Dispenser-Steuergerät ausreichend sind. Die GPIO-Steckverbindungen der anderen Xenax Servocontroller können zur Steuerung weiterer Magnetventile verwendet werden. Für das Steuergerät wird nur ein Ausgabepin benötigt. Der erste Ausgabepin des Servocontrollers ist, wie in Abbildung 32 zu erkennen, mit dem Jet-Dispenser verbunden. Die übrigen sieben Ausgabepins sind an das Steuermodul der Ventilinsel angeschlossen. Der zweite Ausgabepin ist an das erste Magnetventil des ersten Moduls angeschlossen. Dieses wird verwendet um den Vakuumgreifer an der Rotationsachse anzusteuern. Ausgabepin 3 bis 8 sind an die Magnetventilmodule 2, 3 und 4 angeschlossen. Da es noch kein viertes Magnetventil gibt, können die Ausgabe Pins sieben und acht noch nicht verwendet werden. Das zweite Magnetventil des ersten Moduls ist nicht angeschlossen, da es nicht benötigt wird. Das Steuergerät und der Servocontroller sind noch zusätzlich an die Massen (GND) des Servocontrollers angeschlossen um den Stromkreis zu vervollständigen.

Zur Ansteuerung der Magnetventile und des Jet-Dispensers mussten die Ausgabepins noch eingestellt werden. Für die Ausgabepins der Magnetventile wurde die Einstellung SINK/SOURCE gewählt. Das bedeutet, wenn die Aktivität des Pins auf HIGH eingestellt ist, liegt eine Spannung von 24 V an dem Pin an und es fließt Strom. Ist die Aktivität des Pins auf LOW eingestellt, liegt eine Spannung von 0 V an. Die interne Verschaltung des Jet-Dispenser-Steuergeräts bedingt, dass der zum Jet-Dispenser gehörende Pin eine Stromsenke sein muss. Für die Einstellung des Ausgabepins wurde deshalb SINK gewählt. Das bedeutet, dass bei LOW Strom fließt und der Dispenser dann aktiv ist.

Diese Änderung wurde über das WebInterface des Servocontrollers eingestellt. Im Menü unter *application* wurde der Unterpunkt *command line* ausgewählt. Der Kommandozeile wurde der Befehl SOT (Set Output Type) übergeben. Diesem Befehl muss eine Bit-Maske mit 16 Bits übergeben werden. Jedem Output werden zwei Bit-Werte zugeordnet. Ist der erste Bit-Wert auf 0 gesetzt und der zweite Bit-Wert auf 1, befindet sich der Output in der SINK/SOURCE Einstellung. Das ist bei den Magnetventilen der Fall. Sind beide Bit-Werte auf 0 gesetzt, handelt es sich bei dem Output um eine Stromsenke, wie bei dem Jet-Dispenser. Dem SOT Befehl wurde deshalb die Dezimalzahl 43688 übergeben, welcher der Bit-Maske 10101010101000 entspricht.

Welche Spannung an den Ausgabepins anliegt kann über das WebInterface gesteuert werden. Eine Möglichkeit ist im Menü *application* den Unterpunkt *i/o* auszuwählen. Wird eine Box ausgewählt, wird die Aktivität des Pins bei einer Stromquelle auf HIGH gesetzt und bei einer Stromsenke auf LOW. Der Pin liefert dann einen Strom bzw. nimmt Strom auf und ist somit aktiv. Das bedeutet für die Magnetventile, dass sie mit der Vakuumpumpe verbunden sind und an ihren Ausgängen Unterdruck anliegt. Für den Jet-Dispenser bedeutet dies, dass Kleber ausgegeben wird. Durch das Abwählen der Box wird der Pin bei einer Stromquelle auf LOW gesetzt und bei einer Stromsenke auf HIGH. An den Magnetventilen liegt wieder Außendruck an und der Jet-Dispenser ist deaktiviert. In Abbildung 11 ist ein Screenshot des WebInterfaces zu sehen an dem Output 2 aktiviert ist.

Eine weitere Möglichkeit zum Setzen der Pins bieten die Befehle SO, CO und SOA, die der Kommandozeile im Menüpunkt *command line* übergeben werden können. Dem Befehl SO (Set Output) wird die Nummer des Ausgabepins übergeben. Wird dieser Befehl aufgerufen wird die Aktivität bei einer Stromquelle auf HIGH bzw. bei einer Stromsenke auf LOW gesetzt. Der Befehl CO (Clear Output) setzt die Aktivität bei einer Stromquelle auf HIGH und bei einer Stromsenke auf LOW. Dem Befehl SOA (Set Output Activity) wird eine Bit-Maske mit 8 Bits übergeben. Jedem Output wird ein Bit zugeordnet. Der Bit-Wert 1 setzt die Aktivität bei einer Stromquelle auf HIGH und bei einer Stromsenke auf LOW. Der Bit-Wert 0 setzt die Aktivität dann bei einer Stromquelle auf LOW und auf HIGH bei einer Stromsenke.

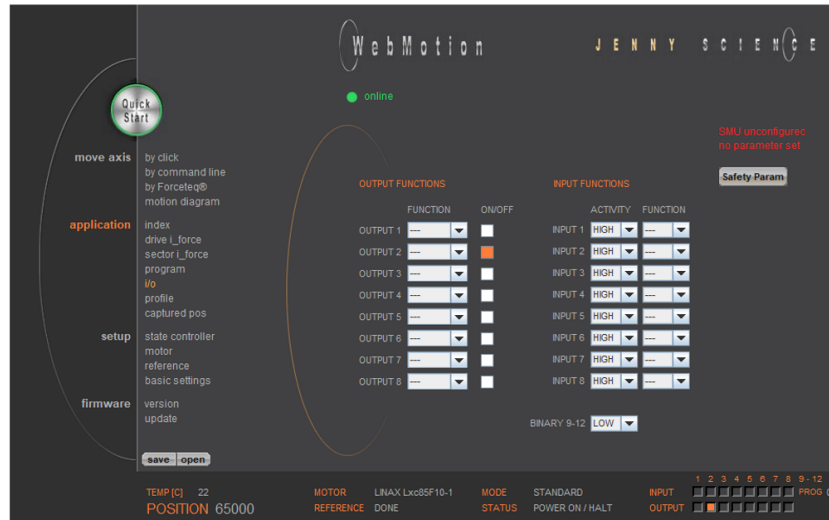


Abbildung 11: Screenshot des WebInterfaces WebMotion®. Zusehen ist das Menü zur Einstellung der Outputs des Xenax Servocontrollers. Aktiviert ist Output Pin 2. Der Vakuumgreifer ist mit dem Unterdruck verbunden.

Die Ausgabepins können zusätzlich durch C++ oder Python Programme gesteuert werden. Dafür wurde der SOA-Befehl in der C++ und der Python Bibliothek implementiert [14].

6 Messungen mit Araldite® 2011

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus den Tests mit dem Araldite® 2011 analysiert. Zuerst mussten geeignete Parameter für den Jet-Dispenser gefunden werden, um den Kleber aufzutragen. Eine Vorauswahl geeigneter Dispense-Parameter erfolgte durch eine optische Inspektion der Klebetropfen. Mit diesen Parametern wurde dann das Volumen der Klebetropfen bestimmt, anhand dessen dann ein optimiertes Parameter-Set festgelegt wurde. Dafür wurden die Klebetropfen auf eine helle Glasfasermatte dosiert. Dieses Parameter-Set wurde genutzt, um die Krafttests durchzuführen.

6.1 Suche nach geeigneten Dispense-Parametern

Zum Kleben der HV-Maps wird der zuvor erwähnte Roboter benutzt. Dabei wird der Kleber mit dem in Kapitel 4.3 beschriebenen Jet-Dispenser dosiert und mit den Achsen des Roboters platziert. Es gibt insgesamt sechs Parameter (On-time t_{on} , Off-time t_{off} , Anzahl an Schüssen Num , Distanz zwischen der Düse und der Klebeoberfläche d , Kolbendruck p_P , Kartuschen-druck p_C), die verändert werden können. Die Einflüsse der Parameter auf die Dosierung des Klebers, sowie die allgemeine Vorgehensweise beim Durchführen einer Testreihe werden im Folgenden erläutert.

6.1.1 Beschreibung der Parameter

Der erste verstellbare Parameter ist die On-time. Eine höhere On-time bedeutet, dass mehr Zeit vergeht zwischen der Aufwärtsbewegung und der Abwärtsbewegung des Kolbens. Der Kleber hat mehr Zeit in die Düse zu fließen. Zudem wird der Kolben länger beschleunigt und die Distanz zur Düse wird erhöht. Dadurch wird auch der Impulsübertrag auf den Kleber erhöht. Es wird mehr Kleber dosiert.

Die Off-time, also die Zeit zwischen zwei Schüssen, wird erst relevant, wenn die Anzahl der Schüsse größer als eins ist oder der Dispenser im Line-Modus ist. Je kürzer die Off-time, desto weniger Kleber kann in die Spitze der Düse fließen. Es wird also weniger Kleber herausgeschossen. Ist die Off-time zu kurz, kann es sein, dass nur Luft herausgedrückt wird.

Eine Erhöhung der Anzahl der Schüsse führt zu einer Zunahme der dosierten Klebermenge. Je größer die Distanz zwischen Düse und Oberfläche ist, desto höher ist der Einfluss der umgebenden Luft und desto größer die Abweichung von der tatsächlichen Position des Tropfen zur anvisierten Position. Zudem kann dadurch auch ihr Impuls verändert werden und somit ihre endgültige Form. Die Distanz sollte also gering gehalten werden.

Der Kolbendruck beeinflusst die Beschleunigung des Kolbens. Ist der Kolbendruck hoch, so ist die Beschleunigung groß und somit auch der Impulsübertrag auf den Kleber. Wenn der Impulsübertrag zu groß ist, können kleine Ableger beim Aufschlag entstehen, was verhindert werden soll. Ist der Impulsübertrag jedoch zu klein, wird der Kleber aber nicht abgeschossen. Der Kartuschendruck ist der Druck im inneren der Kartusche. Er darf nicht zu hoch und nicht zu gering sein. Ist er zu hoch, so kann es passieren, dass der Kleber aus der Düse austritt, ohne dass der Kolben bewegt wurde. Wenn der Druck jedoch zu gering ist, kann der Kleber nicht in die Düse fließen. Es tritt das selbe Problem auf wie bei einer zu niedrigen Off-time.

Es wird ersichtlich, dass die Parameter sich gegenseitig beeinflussen. Wenn nun ein Parameter geändert wird, müssen die anderen angepasst werden. Die Parameter hängen zudem sehr stark von dem Kleber und seinen Eigenschaften, vor allem der Viskosität und der Oberflächenreibung, ab.

6.1.2 Durchführung der Parametersuche

Das initiale Set an Parametern wurde durch eine systematische Suche gefunden. Es wurde anfangs ein Parameter-Set in einem sinnvollen Bereich gewählt und durch mehrere Iterationen optimiert. Dafür wurde immer ein Parameter verändert, während die anderen festgehalten wurden. Da aber die Parameter einander beeinflussen, mussten beim Verändern eines Parameters die anderen Parameter, die schon eingestellt wurden, nochmals nachjustiert werden. Es konnte beobachtet werden, dass der Kleber sich aufgrund seiner hohen Viskosität nicht abschießen lässt. Bei einem Set, das im Folgendem als das initiale Parameter-Set bezeichnet wird, wurde beobachtet, dass sich ein Tropfen bildet, aber in den meisten Fällen wieder zurück in die Düse gezogen wird. Deshalb wurde sich dafür entschieden, dass der Tropfen, anders als beim *DYMAX® Multi-Cure® 6-621* [13], nicht abgeschossen wird. Stattdessen wird die Kartusche mit der Düse nahe an die Oberfläche gefahren, danach wird der Kleber herausgeschossen und die z-Achse wieder nach oben gefahren. Der Tropfen wird demnach praktisch abgesetzt. Eine Skizze dieses Vorgangs befindet sich in Abbildung 12. Dadurch wird auch der Einfluss der umgebenden Luft minimiert. Das initiale Parameter-Set ist

$$p_P = 513 \text{ kPa} \quad p_C = 517 \text{ kPa} \quad t_{On} = 0.0130 \text{ s} \quad d = 73 \text{ 600 Ink.}$$

Um zu überprüfen, ob dieses Set auch das beste ist, wurden weitere Parameter-Sets, welche für die Analyse im nächsten Abschnitt untersucht werden sollen, durch Iteration angefertigt. Diese Parameter-Sets wurden jeweils in einem Parameter gegenüber dem initialen Parameter-Set verändert. Die anderen Parameter wurden festgehalten. Für die Variation in einem Parameter, die als eine Testreihe definiert wird, wurden jeweils zehn Tests gemacht, d.h. es wurden zehn unterschiedliche Werte von dem zu variierendem Parameter eingestellt. Pro Test wurden 20 Tropfen ausgewertet. Insgesamt wurden hierfür fünf Testreihen aufgenommen. Die Parameter, welche verändert wurden, waren der Kolbendruck, der Kartuschendruck, die On-time, die Anzahl an Tropfen und der Abstand zwischen Düse und Oberfläche.

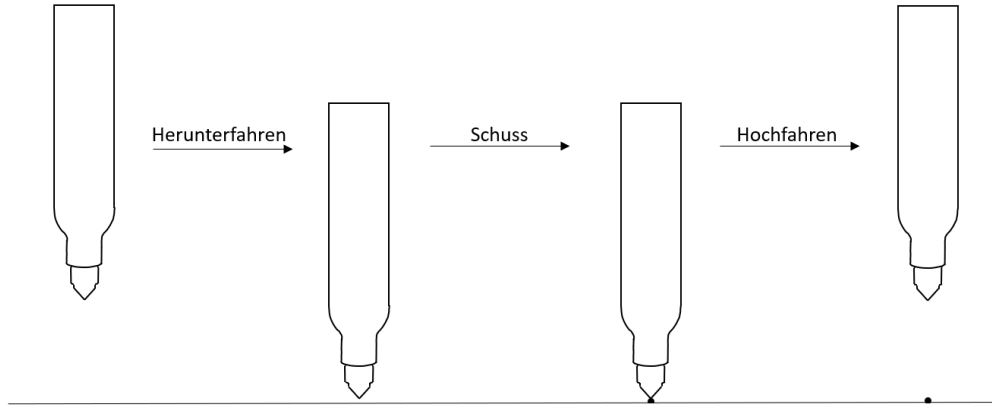


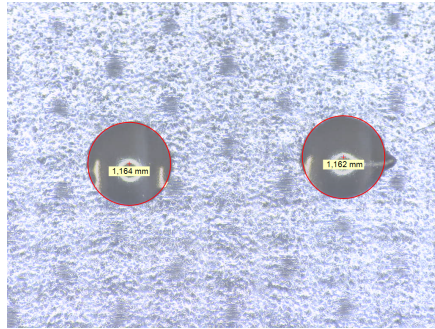
Abbildung 12: Skizze des Vorgangs, wie der Araldite abgesetzt wird. Die Kartusche fährt bis kurz vor die Oberfläche, setzt dann einen Schuss und fährt dann wieder hinauf.

Zur Analyse der Tropfen wurde ein optisches Mikroskop des Modells DMS1000 [18] des Herstellers Leica benutzt. Mit diesem Mikroskop wurden Bilder der Tropfen in 6.25-facher Vergrößerung aufgenommen. Das Mikroskop ist an einen Computer angeschlossen, auf dem die Software zur Bildauswertung, Leica Application Suite (LAS), installiert ist. Mit dieser Software lassen sich händisch Kreise über das Bild legen. Der Durchmesser der Kreise wird von der Software angegeben. Der Fehler für den Durchmesser pro Tropfen wurde auf $\Delta d = 0.04 \text{ mm}$ geschätzt. Dieser Fehler resultiert im Wesentlichen daraus, dass der Kreis händisch und per Augenmaß auf das Bild des Tropfens platziert wurde. Der Kalibrierungsfehler des Mikroskops und der Fehler der Software LAS liegt einige Größenordnungen darunter und wurde hier deshalb nicht berücksichtigt.

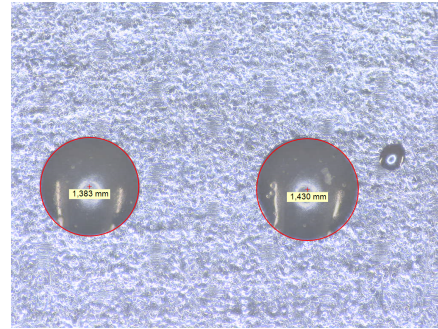
Allgemein soll das Materialbudget im Detektor so gering wie möglich gehalten werden, damit unter anderem Mehrfachstreuung verhindert wird. Der Kleber sollte also möglichst ohne eingeschlossene Luftbläschen und Staubpartikel geklebt werden. Zudem sollte immer die selbe Klebermenge dosiert werden und die Dicke des Klebers gleich sein. Dafür eignen sich kreisförmige Tropfen mit gleichem Radius und konstanter Masse. Die Masse wird im Abschnitt 6.3 berechnet. Beim Analysieren der Klebetropfen konnte beobachtet werden, dass die Tropfen nicht immer kreisförmig sind, sondern die Fläche oft auch einer Ellipse ähnelt, wie in Abbildung 13 (a) zu erkennen ist. Bei einer Ellipse wird die Fläche mit $A = \pi r_1 r_2$ berechnet, bei einem Kreis mit $A = \pi r^2$.

Des Weiteren wird der Tropfen auch durch das Verhältnis e der Halbachsen der Ellipse charakterisiert. Die Halbachsen können bestimmt werden, indem mit der Auswertesoftware zwei Kreise über den Tropfen gelegt werden. Der erste Kreis mit Radius r_1 liegt im Inneren der Ellipse und der zweite Kreis mit Radius r_2 schließt den ganzen Tropfen ein. Das Verhältnis e ist dann durch $e = \frac{r_1}{r_2}$ gegeben. Für $e = 1$ entspricht die Fläche des Tropfens einem Kreis.

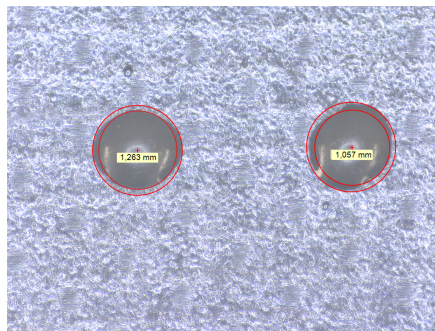
Weiterhin konnte beobachtet werden, dass sich kleine Ableger des Klebers neben dem Haupttropfen befanden. Diese Ableger werden im weiteren Verlauf als Satellit bezeichnet. Es konnten zwei Kategorien von Satelliten beobachtet werden, wie es auch beim *DYMAX® Multi-Cure® 6-621* [13] der Fall war. Zu der ersten Kategorie zählen alle Satelliten, die noch mit dem Haupttropfen verbunden sind. Die Satelliten, welche nicht mehr mit dem Haupttropfen verbunden sind, gehören zur zweiten Kategorie. Abbildung 13 zeigt eine Aufnahme von Tropfen, die Satelliten beider Kategorien aufweisen sowie kreisförmig sind oder einer Ellipse ähneln. Satelliten sollten vermieden werden, da ihre Größe von vielen Faktoren abhängt und deshalb nicht exakt vorhergesagt werden kann. Zudem sorgen sie dafür, dass der Kleber nicht mehr symmetrisch und homogen für jeden HV-MAPS verteilt ist, da die Position der Satelliten ebenfalls nicht vorhergesagt werden kann.



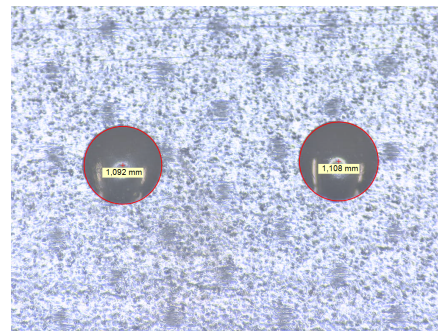
(a) Der rechte Tropfen weist einen Satelliten der Kategorie 1 auf.



(b) Der rechte Tropfen weist einen Satelliten der Kategorie 2 auf.



(c) Beide Tropfen haben die Form einer Ellipse.



(d) Beide Tropfen haben annähernd die Form eines Kreises.

Abbildung 13: Beispielhafte Bestimmung der Fläche der Tropfen und der Anzahl der Satelliten für *Araldite® 2011*. Aufgenommen wurden die Bilder mit dem Leica DMS1000 [18] Mikroskop und ausgewertet mit der LAS Software.

6.2 Analyse der Parametersuche

In Abbildung 14, 15 und 16 sind die Ergebnisse für die Fläche, das Halbachsenverhältnis und die Anzahl der Satelliten dargestellt unter Variation der verschiedenen Parameter. Für jeden Wert auf der x-Achse wurden 20 Tropfen ausgewertet. Für Abbildung 14 und 15 (jeweils (a) bis (e)) ist ein Datenpunkt der Mittelwert 20 einzelner Messwerte und der angegebene Fehler der Fehler des Mittelwertes. Dieser ist durch $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ gegeben. σ ist dabei die Standardabweichung und N ist die Anzahl der Messwerte (hier $N = 20$).

Die wichtigste Kenngröße, die zum Ausschluss eines Parameter-Sets führt, ist die Anzahl der Satelliten. Es wurde beobachtet, dass die Satelliten anders entstehen als beim Abschießen von *DYMAX® Multi-Cure® 6-621*. So entstehen beim Abschießen von *DYMAX® Multi-Cure® 6-621* die Satelliten in der Luft, indem sie sich dort vom Tropfen lösen. Beim Araldite hingegen bleibt der Kleber beim Absetzen an der Düse hängen und zieht einen dünnen Faden, wenn die Dispenser-Einheit wieder hochgefahren wird. Löst sich der Faden, so kann es sein, dass er nicht zum Klebetropfen gezogen wird, sondern kippt. Wenn die Spitze des Fadens zuerst die Oberfläche berührt, setzt sich ein kleiner Tropfen ab. Der Rest des Fadens wird aufgrund der starken Kohäsion zum Haupttropfen gezogen. Wenn mehr als die Spitze des Fadens aufkommt, so ist die Form des Satelliten eine Linie und kein Kreis mehr.

Es ist deutlich zu erkennen, dass Satelliten der Kategorie 1 seltener auftreten als Satelliten der Kategorie 2. Dies erscheint sinnvoll, da, wenn der Faden kippt, sich die Spitze nicht direkt am Haupttropfen absetzt.

Wie in Abbildung 16 (b) zu erkennen ist, nimmt die Anzahl der Satelliten mit zunehmenden Kartuschendruck zu. Sie steigt von 0 Satelliten bei den Drücken 495 kPa bis 517 kPa auf 3 Satelliten bei dem Druck 535 kPa. 15 % der Tropfen sind somit ungeeignet. Dieses Verhalten lässt sich möglicherweise dadurch erklären, dass bei größerem Kartuschendruck der Kleber schneller in die Düse nachfließt. Wird der Kleber nun abgesetzt, bleibt er eher mit dem Kleber in der Düse verbunden und es entsteht ein längerer Faden, welcher dann kippen kann.

Für zunehmenden Kolbendruck steigt die Anzahl der Satelliten ebenfalls. Je höher der Kolbendruck, desto größer ist der Impulsübertrag auf den Kleber. Dass die Anzahl der Satelliten mit zunehmenden Kolbendruck steigt, könnte daran liegen, dass bei größerem Impulsübertrag der Kleber nicht nur auf die Oberfläche gesetzt wird, sondern auch auf die Außenseite der Düse gedrückt wird. Dadurch entsteht beim Hochfahren der Jet-Dispense-Einheit ebenfalls ein längerer Faden. Je mehr Kleber an der Düse hängt, desto länger wird der Faden.

Die On-time hat ebenfalls einen Einfluss auf den Impulsübertrag auf den Tropfen. Je höher die On-time ist, desto größer ist auch der Impulsübertrag. Es wurde erwartet, dass die Anzahl der Satelliten für die Variation der On-time ein ähnliches Verhalten zeigt wie bei der Variation des Kolbendrucks. Das ist jedoch nicht der Fall: Die Anzahl der Satelliten schwankt stark und hat für den Wert $t_{\text{On}} = 11.5 \text{ ms}$ ein Maximum. 8 Tropfen weisen Satelliten auf, was eine Rate von 40 % ist und demnach zu hoch.

Für die Variation der Anzahl der Schüsse (Num) steigt die Anzahl der Satelliten bis zu dem Wert $Num = 3$. Danach sinkt die Anzahl der Satelliten wieder. Mehr Schüsse pro abgesetzten Tropfen bedeuten mehr Kleber. Da die Düse sehr nah an der Oberfläche ist, bedeutet mehr Kleber, dass dieser sich seitlich an der Düse absetzt wie bei einem zu hohen Kolbendruck. Eine Erklärung für das Maximum bei $Num = 3$ könnte sein, dass dort die Kohäsion noch nicht groß genug ist, um den Kleber direkt wieder zum Haupttropfen zu ziehen, sondern sich ein Faden bildet, welcher dann kippt. Wird die Anzahl an Schüssen weiter erhöht, befindet sich so viel Kleber auf der Oberfläche, dass die Kohäsionskraft groß genug ist, dass kein Faden mehr entsteht und somit kein Satellit.

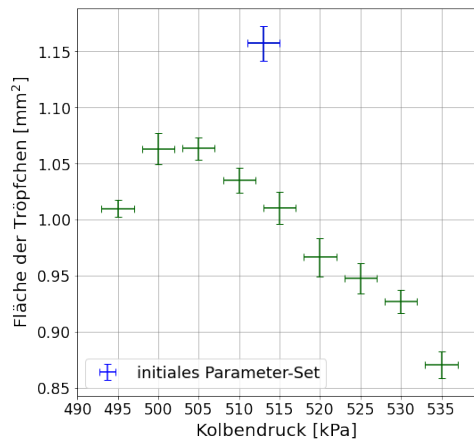
Für größer werdenden Abstand zur Oberfläche (also kleiner werdenden Abstand zwischen Düse und Nullpunkt (0 Ink)), wird die Anzahl an Satelliten größer. Bei einem geringen Abstand zur Oberfläche bleibt der Kleber seitlich an der Düse hängen. Beim Hochfahren der Düse entsteht dann ein Faden, der kippt.

Die Fläche der Tropfen in Abhängigkeit des zu veränderten Parameters ist in Abbildung 14 zu sehen. Für einen höheren Kolbendruck nimmt die Fläche ab. Da der Kleber ein nichtnewtonsches Fluid ist, wird vermutet, dass die innere Reibung bei größerem Druck nicht linear zunimmt. Wird der Impulsübertrag auf den Kleber erhöht, wird somit weniger Kleber ausgegeben, da der Widerstand höher ist. Ebenso nimmt die Fläche mit zunehmender Satellitenanzahl ab. Der Peak beim initialen Parameter-Set kann nicht erklärt werden, konnte aber reproduziert werden.

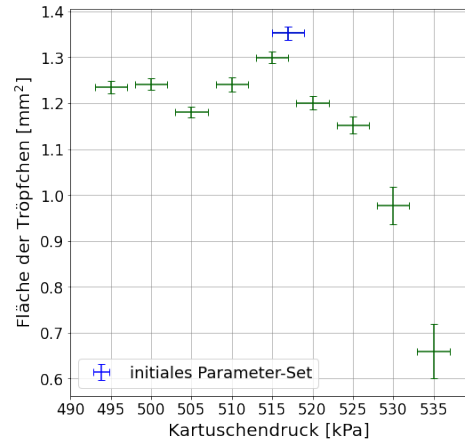
Für zunehmenden Kartuschendruck nimmt die Fläche der Tropfen bis zum initialen Kartuschendruck zu und dann ab. Das erscheint sinnvoll, da ab diesem Wert die Anzahl der Satelliten zunimmt, also eine geringere Klebermenge im Haupttropfen vorhanden ist.

Die Fläche nimmt für die Variation der On-time erst ab, bis sie bei $t_{\text{On}} = 12 \text{ ms}$ ein Minimum hat, und nimmt dann wieder zu. Die Abnahme könnte wie beim zunehmenden Kolbedruck damit begründet werden, dass der Kleber ein nichtnewtonsches Fluid ist und die innere Reibung somit bei größerem Druck nicht linear zunimmt. Der Anstieg könnte daran liegen, dass der Kleber mehr Zeit hat in die Düse zurückzuffließen.

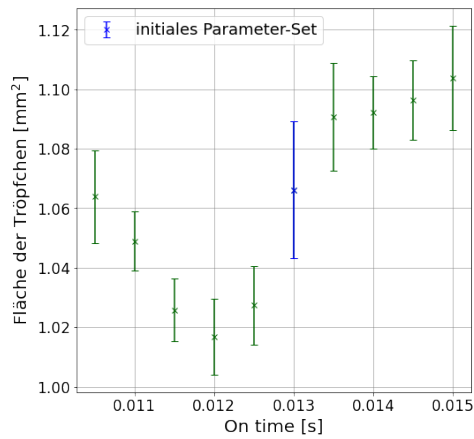
Bei der Anzahl der Schüsse $Num = 2$ hat die Fläche ein Minimum und steigt dann an. Für eine größere Menge an Kleber ist auch die Fläche größer. Dass das Minimum bei $Num = 2$ und nicht bei $Num = 1$ liegt, könnte daran liegen, dass bei zwei Schüssen gerade so viel Kleber heraus kommt, dass ein Teil abgesetzt wird, aber eine kleine Menge Kleber an der Düse hängen bleibt. Bei einem Schuss ist dies noch nicht der Fall, da die Adhäsionskraft zur Oberfläche



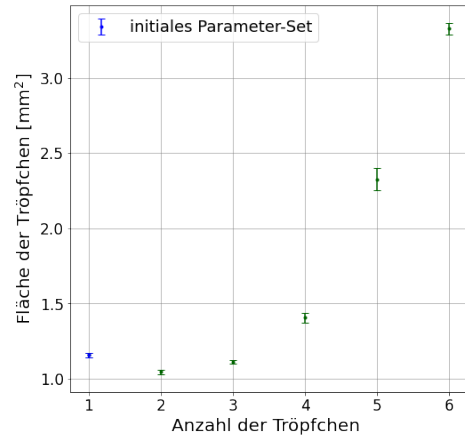
(a) Fläche der Tropfen in Abhängigkeit des Kolbendrucks



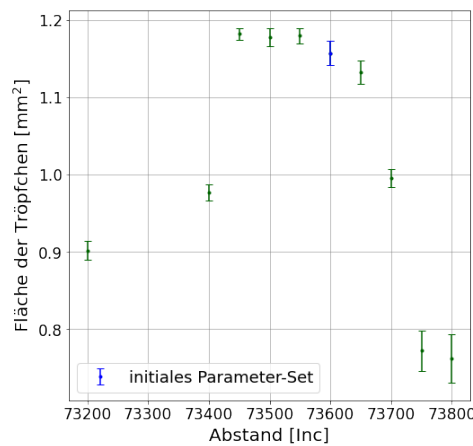
(b) Fläche der Tropfen in Abhängigkeit des Kartuschendrucks



(c) Fläche der Tropfen in Abhängigkeit der On-time

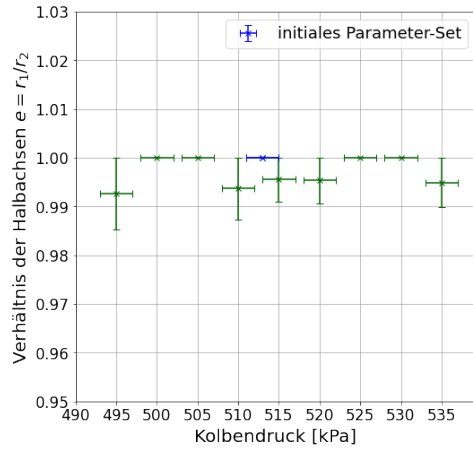


(d) Fläche der Tropfen in Abhängigkeit der Anzahl der dosierten Tropfen

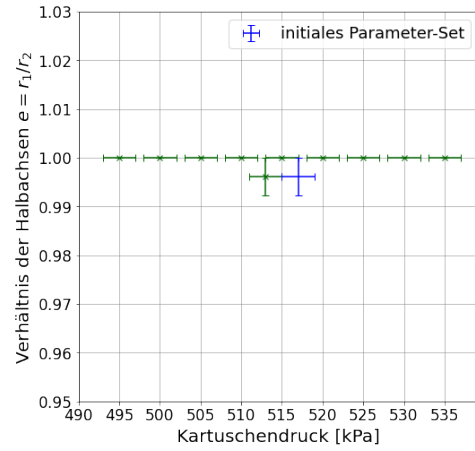


(e) Fläche der Tropfen in Abhängigkeit des Abstand zur Oberfläche

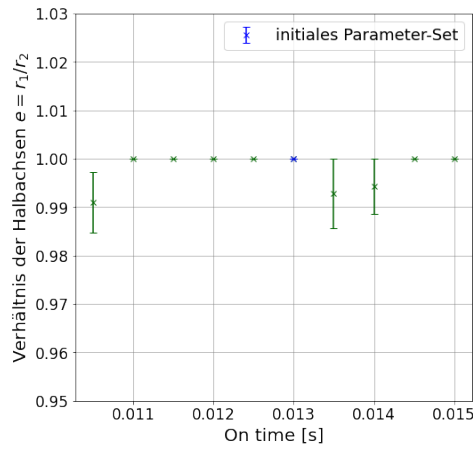
Abbildung 14: Fläche der Tropfen in Abhängigkeit des Kolbendrucks, des Kartuschendrucks, der On-time, der Anzahl der dosierten Tropfen und des Abstandes



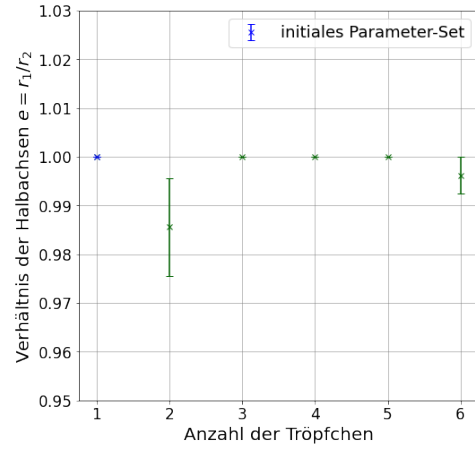
(a) Verhältnis der Halbachsen der Tropfen in Abhängigkeit des Kolbendrucks



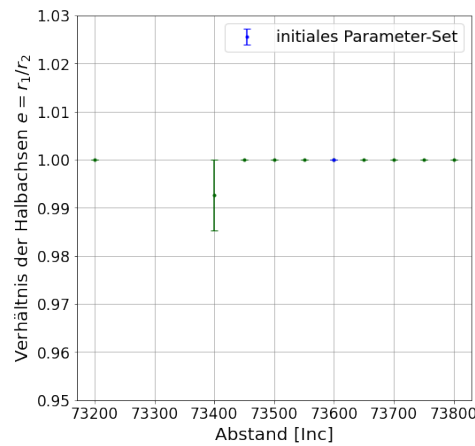
(b) Verhältnis der Halbachsen der Tropfen in Abhängigkeit des Kartuschendrucks



(c) Verhältnis der Halbachsen der Tropfen in Abhängigkeit der On-time

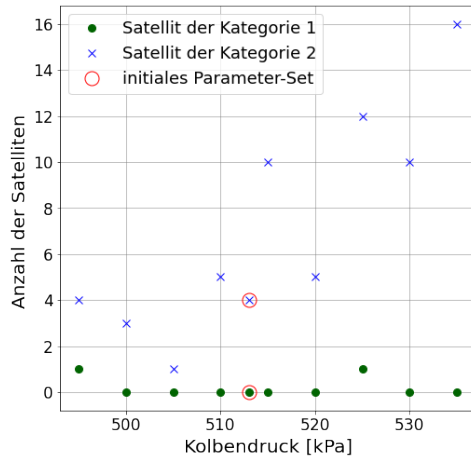


(d) Verhältnis der Halbachsen der Tropfen in Abhängigkeit der Anzahl der dosierten Tropfen

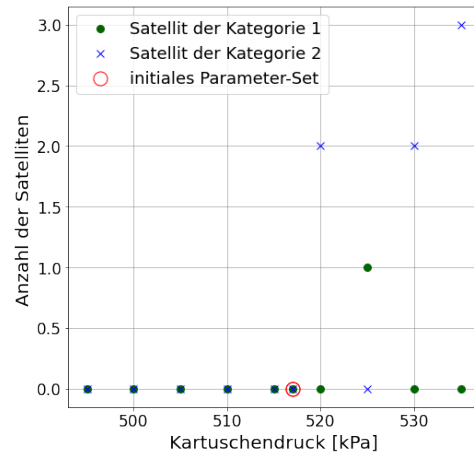


(e) Verhältnis der Halbachsen der Tropfen in Abhängigkeit des Abstand zur Oberfläche

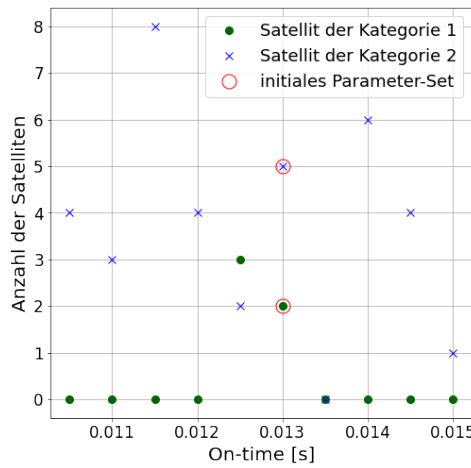
Abbildung 15: Verhältnis der Halbachsen der Tropfen in Abhängigkeit des Kolbendrucks, des Kartuschendrucks, der On-time, der Anzahl der dosierten Tropfen und des Abstandes



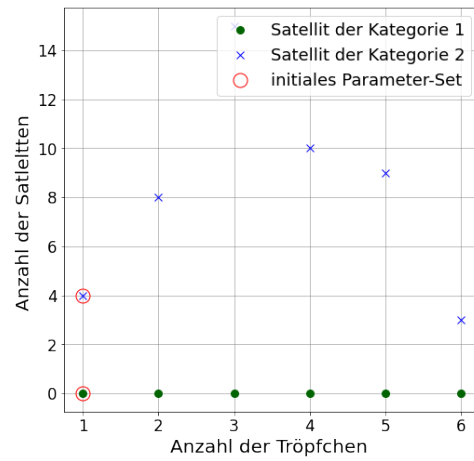
(a) Anzahl der Satelliten in Abhängigkeit des Kolbendrucks



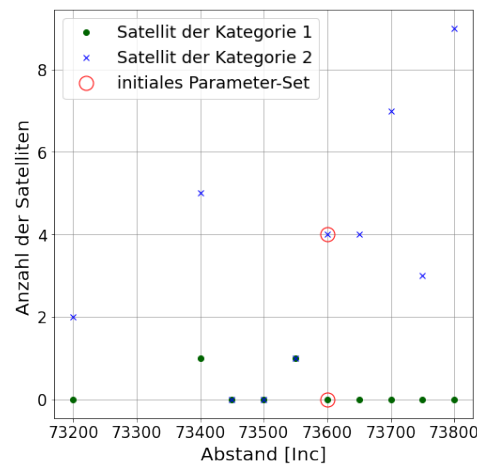
(b) Anzahl der Satelliten in Abhängigkeit des Kartuschenendrucks



(c) Anzahl der Satelliten in Abhängigkeit der On-time



(d) Anzahl der Satelliten in Abhängigkeit der Anzahl der dosierten Tropfen



(e) Anzahl der Satelliten in Abhängigkeit des Abstandes zur Oberfläche

Abbildung 16: Anzahl der Satelliten in Abhängigkeit des Kolbendrucks, des Kartuschenendrucks, der On-time, der Anzahl der dosierten Tropfen und des Abstandes

größer ist als die Kohäsionskraft des Klebetropfens.

Bei Abständen vom Nullpunkt zwischen 73 450 Ink und 73 650 Ink gibt es ein Plateau an dem die Fläche maximal ist (siehe Abbildung 15). Für größere und kleinere Abstände ist die Fläche wieder kleiner. Für große Abstände zwischen Düse und Oberfläche wird der Kleber nicht mehr vollständig abgesetzt, sondern bleibt an der Düse zurück. Wenn die Düse zu nah an der Oberfläche ist, blockiert die Oberfläche den Ausgang der Düse und es kann nur wenig Kleber hinaustreten, die Fläche ist dementsprechend kleiner. Somit wird deutlich, dass es einen Mindest- und Maximalabstand zum Setzen der Tropfen gibt.

Das Verhältnis der Halbachsen ist für fast alle Testreihen $e = 1$ und variiert maximal um $\Delta e = 0.01$ ab. Für die Testreihe, bei der die Anzahl der Schüsse variiert wird, gibt es einen Ausreißer bei $Num = 2$. Hier liegt das Verhältnis der Halbachsen bei $e = 0.986 \pm 0.010$. Hier entstehen die Ellipsen nicht beim schrägen Abschießen wie beim *DYMAX® Multi-Cure® 6-621*, sondern dadurch, dass der Kleber nicht richtig verläuft. Die Oberfläche, auf die der Kleber gesetzt wurde, hat kleine Defekte, wie zum Beispiel Mikrorisse, in die der Kleber hinein fließt. Dadurch dehnt sich der Kleber nicht gleichmäßig aus.

Für den Bau des Spurdetektors werden viele Klebetropfen hintereinander gesetzt, wobei eine hohe Wiederholungsgenauigkeit für die Größe der Tropfen wichtig ist. Deshalb wird die Fläche von 100 nacheinander gesetzten Tropfen untersucht. Abbildung 17 zeigt zwei Messungen mit dem initialen Parameter-Set. Dabei wurden jeweils 100 Tropfen in zwei Reihen à 50 Tropfen gesetzt. Zu erkennen ist, dass die Fläche erst ansteigt und ab Tropfen 20 ein Plateau erreicht. Dieses Verhalten wiederholt sich ab Tropfen 50, wenn eine neue Reihe beginnt und lässt sich möglicherweise dadurch erklären, dass bei größeren Scherkräften die Viskosität abnimmt und somit mehr Kleber dosiert wird. Dies ist unter dem Begriff Strukturviskosität bekannt. Eine weitere Möglichkeit ist, dass die ständige Bewegung des Kolbens Wärme erzeugt. Durch die Wärme nimmt die Viskosität des Klebers ab. Dass die Kurve dadurch erzeugt wird, dass erst die Düse benetzt wird, ist unwahrscheinlich, da die Kurve sich nach 50 Tropfen wiederholt, aber die Düse nicht abgewischt wird.

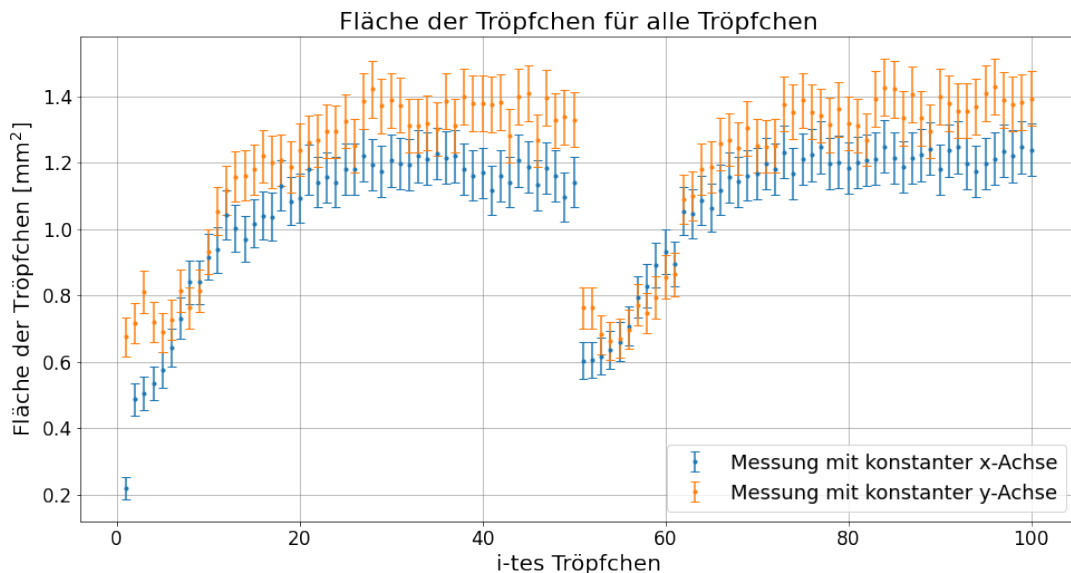


Abbildung 17: Abhängigkeit der Fläche des Tropfens von der Nummer des Tropfens für den *Araldite® 2011*. Es wurden zweimal hundert Tropfen gesetzt. Es ist deutlich zu sehen, dass mit der Anzahl der Tropfen die Fläche zunimmt, bis sie bei Tropfen 25 ein Plateau erreicht.

Um dieses Verhalten näher zu untersuchen, wurden die Messungen mit weiteren Parameter-Sets wiederholt. Es zeigt, dass fünf Parameter-Sets den oben gestellten Anforderungen, dass die Tropfen möglichst kreisförmig sind und wenige Satelliten auftreten, genügen. Diese Parameter-Sets sind in Tabelle 2 aufgelistet. Zudem wurde ein Parameter-Set (Parameter-Set 6) gewählt, dass am deutlichsten von den anderen Parameter-Sets abweicht, da untersucht werden sollte, ob stark veränderte Parameter wesentliche Einflüsse auf die Fläche und Anzahl der Satelliten haben.

Tabelle 2: Aufzählung der Parameter-Sets, die zur Massenbestimmung der Tropfen ausgewählt wurden. Die Anzahl der Schüsse wurde dabei immer auf $Num = 1$ gesetzt. Die Off-time ist deshalb irrelevant. Die Fehler auf die Drücke betragen jeweils $\Delta p = 3 \text{ kPa}$. Die Fehler von Abstand und On-time sind durch $\Delta d = 10 \text{ Ink}$ und $\Delta t_{\text{On}} = 0.0001 \text{ s}$ gegeben. Parameter-Set 5A ist das initiale Parameter-Set.

Parameter-Set	d [Ink]	p_P [kPa]	p_C [kPa]	t_{On} [s]
1A	73600	495	517	0.0130
2A	73600	513	495	0.0130
3A	73600	513	517	0.0150
4A	73600	495	495	0.0150
5A	73600	513	517	0.0130
6A	73600	530	530	0.0150

Das Verhalten, welches in Abbildung 17 zu sehen ist, konnte in den Messungen mit den ausgewählten Parameter-Sets nicht reproduziert werden. Da zunächst die Füllhöhe nicht kontrolliert wurde, wurden die Messungen mit einer größeren Füllhöhe wiederholt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt. Auch für diese Messungen konnte die Kurve nicht reproduziert werden.

Die Vermutung ist, dass weitere Parameter, welche im Rahmen des gegebenen Aufbaus (z.B. Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit) nicht kontrolliert werden konnten, das Verhalten des Klebers beim Dosieren beeinflussen. Es empfiehlt sich, hierzu weitere Tests durchzuführen.

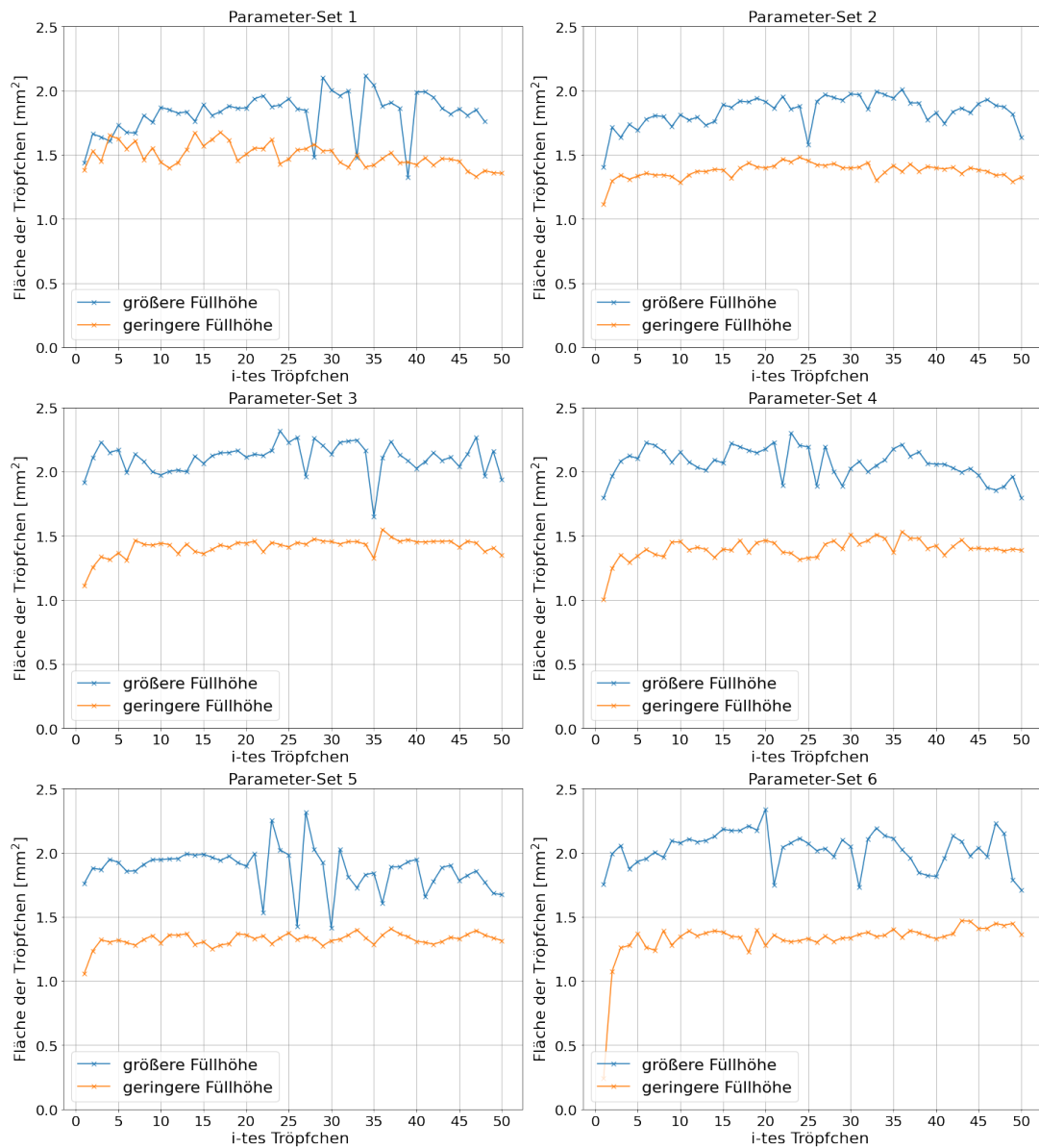


Abbildung 18: Abhängigkeit der Fläche für unterschiedliche Füllhöhen für den *Araldite®* 2011. Jeder Grafik zeigt ein anderes Parameter-Set. Es wurden 50 Tropfen hintereinander gesetzt. Dargestellt ist die Fläche in Abhängigkeit der Nummer des Tropfens. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

6.3 Bestimmung der Masse eines Tropfens für verschiedene Parameter-Sets

In diesem Abschnitt soll die Masse eines Tropfens bestimmt und analysiert werden. Zur Analyse der Massen wurden sechs Parameter-Sets ausgewählt, die in Tabelle 2 aufgelistet sind und für geeignet befunden wurden.

6.3.1 Beschreibung der Messmethode

Für die Messung wurden pro Parameter-Set 20 Tropfen gesetzt. Diese wurden dann, nachdem sie ausgehärtet waren, unter das Konfokalmikroskop μ surf sensor E 350 HDR [19] gelegt. Pro Tropfen wurde ein Bild aufgenommen. Der Datensatz, welcher vom Auswertungsprogramm gespeichert wurde, gibt das Höhenprofil der Oberfläche in x-, y- und z-Koordinaten und eine Mask wieder. Die Messintervalle der x- und y-Werte sind $\delta x = 1.35007 \mu\text{m}$ und $\delta y = 1.34845 \mu\text{m}$. Die Mask dient dazu ungültige Datenpunkte (Mask = 0) und gültige Datenpunkte (Mask = 1) voneinander zu unterscheiden. So sind zum Beispiel die in Abbildung 19 ringförmig um den Tropfen angeordneten Punkte mit z-Koordinate $18.491 \mu\text{m}$ ungültig. Um dennoch mit diesem Datensatz die Masse bestimmen zu können, wurden die ungültigen Daten für konstantes y linear in einer Dimension interpoliert, da die Datensätze zu groß waren, um sie in 2 Dimensionen mit der gegebenen Software zu interpolieren. Dafür wurde die Funktion `scipy.interpolate.interp1d` benutzt. Eine Darstellung eines interpolierten Datensatzes befindet sich in Abbildung 19 (b). Die Interpolation dient jedoch nicht dazu die Messwerte hinsichtlich ihrer Streuung zu glätten, sondern nur ungültige Datenpunkte (Mask = 0) zu ersetzen.

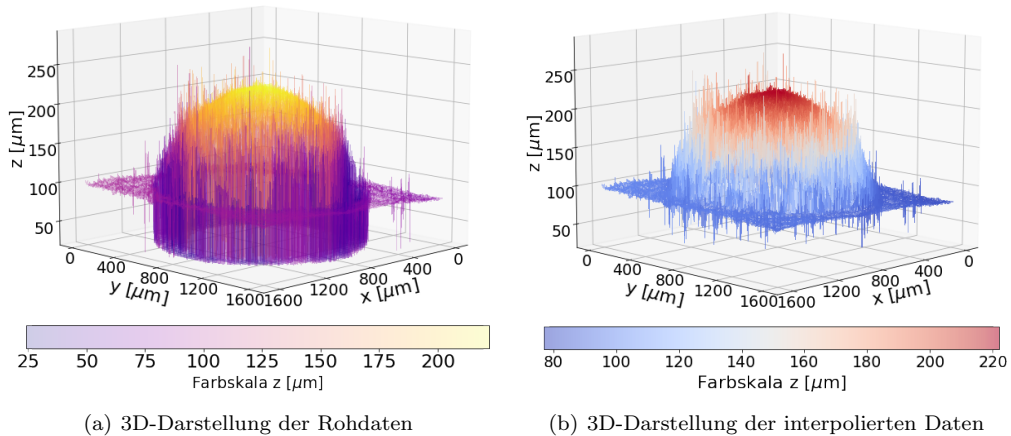


Abbildung 19: 3D-Darstellung der Rohdaten und der interpolierten Daten für das Parameter-Set 1.

Das Volumen lässt sich dann über

$$V_{\text{Ges}} = \sum_i V_i = \sum_i z_i \cdot \delta x \cdot \delta y \quad (5)$$

berechnen, wobei z_i aus dem interpolierten Datensatz stammt. Als Fehler wurde die Differenz der Obersumme und der Untersumme gewählt:

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{Ges}} &= |V_{\text{Ges}+} - V_{\text{Ges}-}|, & \text{mit} \\ \Delta V_{\text{Ges}+} &= \sum_i \max(z_{i+1}, z_i) \cdot \delta x \cdot \delta y & \text{und} \\ \Delta V_{\text{Ges}-} &= \sum_i \min(z_{i+1}, z_i) \cdot \delta x \cdot \delta y. \end{aligned} \quad (6)$$

Weiterhin ist gut zu erkennen, dass ein Offset in Form einer Ebene vorkommt. Dieser Offset ist die Oberfläche, auf der die Tropfen gesetzt wurden. Um das Volumen eines Tropfens zu bestimmen muss das Volumen, dass durch die Ebene entsteht, noch abgezogen werden. Dafür wurde mit Hilfe von `scipy.optimize.curve_fit` an die vier Kanten der Oberfläche eine Ebene gefittet. Die Fitfunktion (Annahme einer ebenen Oberfläche) hat die Form

$$z_{\text{Ebene}}(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + f_0.$$

Die Fit-Parameter sind a , b und f_0 . Um die Güte des Fits zu bestimmen, wurde aus dem χ^2 -Wert des Fits dessen reduziertes χ^2 berechnet. Diese beiden sind durch

$$\begin{aligned} \chi^2 &= \sum_i \left(\frac{(z_{\text{Ebene},i}(x, y) - z_i)^2}{\Delta z_i^2} \right) \quad \text{und} \\ \chi_{\text{red}}^2 &= \frac{\chi^2}{d} \quad \text{mit} \quad N_{\text{dof}} = N_{\text{Mess}} - N_{\text{Para}} \end{aligned} \quad (7)$$

gegeben. z sind die interpolierten z-Werte und N_{dof} die Anzahl der Freiheitsgrade, welche über die Differenz der Anzahl der Datenpunkte und der Anzahl der Fit-Parameter berechnet wird. Der Fehler, der mit dem Konfokalmikroskop gemessenen z-Werte, beträgt $\Delta z = 0.01 \mu\text{m}$. In den Messwerten kann jedoch beobachtet werden, dass die Höhendifferenz zweier benachbarter Werte sehr stark streut. Die z-Werte scheinen somit einen größeren Fehler aufzuweisen, weshalb im weiteren der Fehler auf $\Delta z = 1 \mu\text{m}$ geschätzt wurde.

Das Volumen der Ebene kann dann über das Flächenintegral

$$\begin{aligned} V_{\text{Ebene}} &= \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} z_{\text{Ebene}}(x, y) \, dx \, dy \\ &= \left(\frac{1}{2} a (x_{\max} - x_{\min}) + \frac{1}{2} b (y_{\max} - y_{\min}) + f_0 \right) (y_{\max} - y_{\min}) (x_{\max} - x_{\min}) \end{aligned}$$

mit dem Fehler

$$\Delta V_{\text{Ebene}} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \Delta a (x_{\max} - x_{\min})^2 (y_{\max} - y_{\min}) \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \Delta b (y_{\max} - y_{\min})^2 (x_{\max} - x_{\min}) \right)^2},$$

gegeben durch Gauß'sche Fehlerfortpflanzung, berechnet werden. Die Fehler der x- und y-Werte sind klein im Vergleich zu den Fehlern der Fit-Parameter und können daher vernachlässigt werden.

Für das Volumen eines Tropfens folgt

$$V_{\text{Tropfen}} = V_{\text{Ges}} - V_{\text{Ebene}}. \quad (8)$$

Der Fehler wird mittels Gauß'scher Fehlerfortpflanzung berechnet und ist durch

$$\Delta V_{\text{Tropfen}} = \sqrt{\Delta V_{\text{Ges}}^2 + \Delta V_{\text{Ebene}}^2} \quad (9)$$

gegeben.

Aus dem Volumen wurde dann mittels der Dichte $\rho = 1.08 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ [8] über die Relation

$$m = V_{\text{Tropfen}} \cdot \rho \quad \text{mit} \quad \Delta m = \Delta V_{\text{Tropfen}} \cdot \rho \quad (10)$$

die Masse berechnet. Für die Dichte ist vom Hersteller kein Fehler angegeben.

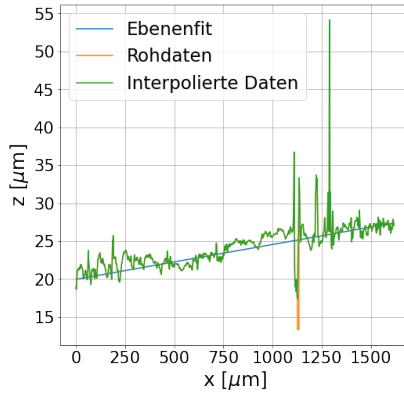
Weiterhin wurde der Korrelationskoeffizient $\rho_{\text{M},\text{F}}$ zwischen der Masse und der Fläche der Tropfen gebildet. Er ist durch

$$\rho_{\text{M},\text{F}} = \frac{\text{cov}(\text{M},\text{F})}{\sigma_{\text{M}}\sigma_{\text{F}}}$$

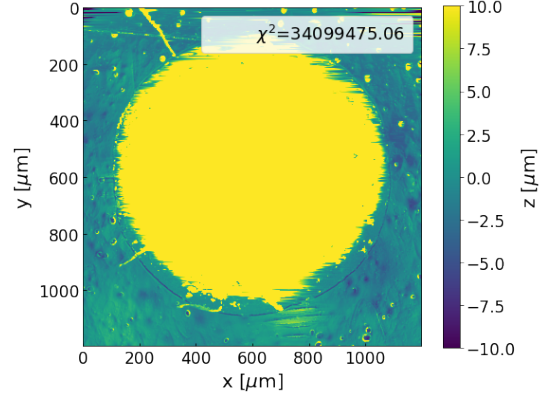
gegeben. Dabei ist $\text{cov}(\text{M},\text{F})$ die Kovarianz zwischen der Masse und der Fläche und σ_{M} sowie σ_{F} die Standardabweichung der Masse sowie der Fläche. Zur Berechnung der Korrelation wurde die numpy-Funktion `numpy.corrcoef()` verwendet. Die Werte von $\rho_{\text{M},\text{F}}$ liegen zwischen -1 und 1 . Für $\rho_{\text{M},\text{F}} = 1$ sind die Komponenten des Zufallsvektors maximal korreliert, für $\rho_{\text{M},\text{F}} = -1$ maximal antikorreliert und für $\rho_{\text{M},\text{F}} = 0$ unkorreliert. Der Korrelationskoeffizient wurde berechnet, um zu überprüfen, ob die Fläche eines Tropfens zur Approximation der Masse dienen kann.

6.3.2 Analyse der Massen

Bevor die Massen betrachtet werden, sollte die Güte der Ebenenfits analysiert werden. Die χ_{red}^2 -Werte liegen für alle Fits weit über 1 in einem Bereich zwischen $1 \cdot 10^3$ und $4 \cdot 10^7$. Da der Fehler für die z-Werte recht großzügig gewählt wurde, kann das nicht der Grund sein. Vielmehr liegt es daran, dass die aufgenommenen Werte auf keiner Gerade beziehungsweise Ebene liegen, sondern die Werte schwanken. Kleine Schwankungen resultieren aus der Rauheit der Oberfläche, auf der die Klebetropfen gesetzt wurden, große Schwankungen daraus, dass die helle Oberfläche das Licht des Konfokalmikroskops stark reflektiert und es deshalb zur Streuung der Werte kommt. Weiterhin können Schwankungen durch Partikel (zum Beispiel Staub) auf der Oberfläche entstehen. Abbildung 20 (a) zeigt einen Querschnitt der Messwerte entlang der y-Achse für Tropfen 11 aus dem Parameter-Set 1A. Darin ist gut zu erkennen, dass einige Punkte aus der Ebene stark abweichen. Um sich trotzdem davon zu überzeugen, dass der Fit gut ist, wurde die Differenz der interpolierten Daten zum Ebenenfit für jeden einzelnen Tropfen gebildet und graphisch dargestellt. Abbildung 20 (b) zeigt für Tropfen 11 aus Parameter-Set 1A so eine Darstellung. Wie gut zu erkennen ist, schwankt die Differenz für die Punkte in der Ebene um den Wert 0 herum. Somit stellt die gefittete Ebene die tatsächliche Ebene gut dar.



(a) Höhenprofil der Ebene entlang einer Kante für ein festes y . Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.



(b) Projektion der Differenz der interpolierten Daten zum Ebenenfit auf die xy -Ebene.

Abbildung 20: Projektion der Differenz der interpolierten Daten zum Ebenenfit auf die xy -Ebene und das Höhenprofil der Ebene entlang einer Kante für ein festes y für Tropfen 11 des Parameter-Sets 1A. Die Farbskala für die z -Werte reicht von $-10\mu\text{m}$ bis $10\mu\text{m}$, damit Abweichung zwischen der gefitteten Ebene und der interpolierten Daten besser zu erkennen sind.

Die Durchschnittsmasse eines Tropfens für das jeweilige Parameter-Set ist in Tabelle 3 gegeben. Ebenso ist die durchschnittliche Fläche eines Tropfens und der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche aufgeführt. Eine graphische Darstellung der Streuung der Massen für Parameter-Set 2A, sowie der Korrelation zwischen der Masse und der Fläche befindet sich in Abbildung 21. Die graphischen Darstellungen der anderen Parameter-Sets befinden sich im Anhang B.

Tabelle 3: Gewichteter Mittelwert der Masse sowie der Fläche eines Tropfens und der Fehler auf diese. $\rho_{M,F}$ gibt die Korrelation zwischen den Massen der einzelnen Tropfen und der Fläche dieser an. Zur Bestimmung der Korrelation und des gewichteten Mittelwerts wurden 20 Tropfen pro Parameter-Set ausgewertet.

Parameter-Set	\bar{m} [mg]	$\Delta\bar{m}$ [mg]	$\frac{\Delta\bar{m}}{\bar{m}}$ [%]	\bar{A} [mm ²]	$\Delta\bar{A}$ [mm ²]	$\rho_{M,F}$
1A	0.11220	± 0.00837	± 7.46	25.2183	± 1.5785	0.5643
2A	0.09500	± 0.00636	± 6.69	26.0126	± 1.6165	0.7286
3A	0.10120	± 0.00843	± 8.33	27.2961	± 1.6553	0.9281
4A	0.10014	± 0.00978	± 9.77	27.5511	± 1.6635	0.9180
5A	0.09458	± 0.01001	± 10.58	26.8618	± 1.6428	0.9038
6A	0.09719	± 0.00831	± 8.55	30.7302	± 1.7569	0.7930

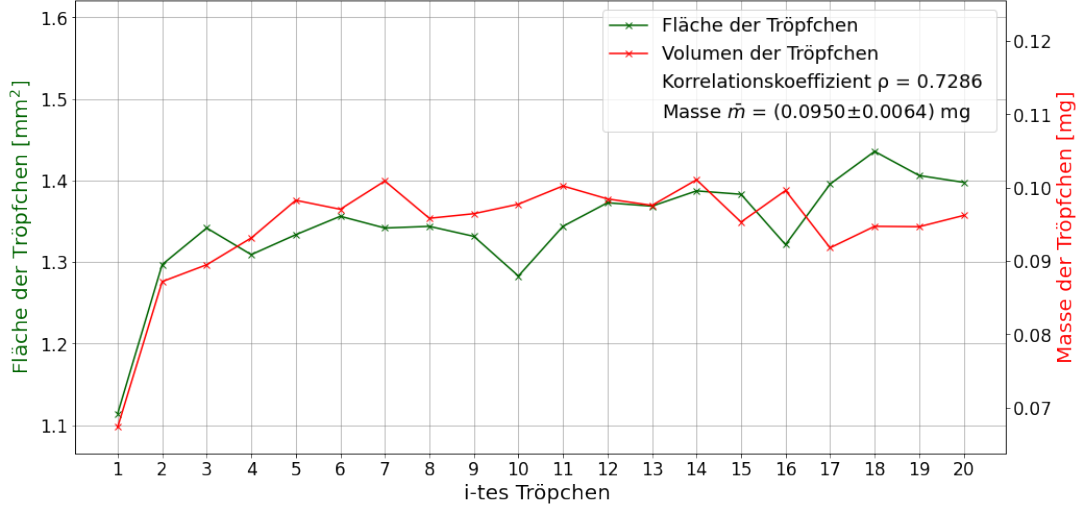


Abbildung 21: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 2A. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

Wie in Tabelle 3 zu erkennen ist, sind die Massen und die Flächen für den *Araldite® 2011* innerhalb einer Testreihe, bis auf den Ausreißer bei Parameter-Set 1A, korreliert. Damit ist das Verhalten der Fläche für die Tropfen eine gute Approximation für das Verhalten der Masse innerhalb einer Testreihe. Allerdings wird auch ersichtlich, dass die Flächen und Massen verschiedener Testreihen nicht mehr korreliert sind, denn die Testreihe mit der größten Durchschnittsmasse hat die kleinste Durchschnittsfläche. Der Korrelationskoeffizient für den Mittelwert der Masse \bar{m} und der Fläche \bar{A} ,

$$\rho_{M,F} = -0.4232,$$

bestätigt dies.

Weiterhin kann in Abbildung 13 erkannt werden, dass in den Klebetropfen Luftbläschen eingeschlossen sind. Diese Luftbläschen konnten in den Rechnungen nicht berücksichtigt werden und sorgen demnach dafür, dass die berechnete Masse etwas höher ist als die tatsächliche Masse. Auch der Fehler auf die Masse steigt dadurch.

Die Masse wurde zur Wahl eines geeigneten Parameter-Sets betrachtet. Für diese Wahl ist nicht nur die Masse eines Tropfens selbst von besonderem Interesse, sondern ebenfalls die Streuung der Masse, wenn mehrere Tropfen hintereinander dosiert werden. Denn das Materialbudget im Detektor soll so gering wie möglich gehalten werden, allerdings soll das Materialbudget auch konstant für jeden HV-MAPS sein. Werden diese Überlegungen in Betracht gezogen, wird ersichtlich, dass Parameter-Set 2 das geeignetste ist, da hier der Fehler auf den Mittelwert und somit auch die Streuung der Masse über mehrere Tropfen hinweg am geringsten und auch die Durchschnittsmasse eines Tropfens gering ist.

6.4 Krafttests

Der Kleber soll später zuverlässig die HV-MAPS an die Polyimid-Streifen kleben. In diesem Abschnitt soll bestimmt werden, wieviel Kraft aufgewendet werden muss, damit sich ein Glasplättchen löst, das auf einen quadratischen Polyimid-Zuschnitt geklebt wurde. Dafür wurden der Roboter und das Web-Interface der z-Achse verwendet. Für den Kleber wurden zwei verschiedene Dosiermöglichkeiten und fünf verschiedene Klebemuster getestet. Dazu wurden die Testreihen mit Parameter-Set 2 durchgeführt, da hier der relative Fehler auf den Mittelwert der Masse am geringsten ist.

6.4.1 Durchführung der Krafttests

Eine Testreihe besteht aus zehn festgeklebten Glasplättchen. Die Glasplättchen haben die Maße $22\text{ mm} \times 22\text{ mm} \times 80\text{ }\mu\text{m}$ und eignen sich somit gut für die Tests als Ersatz für die HV-MAPS. Zum Kleben der Glasplättchen wurde ein C++-Programm benutzt, das David Anthofer eigens für diese Tests geschrieben hat. Dafür wurden die zehn Polyimid-Zuschnitte (Maße: $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$) nebeneinander auf die 3D-gedruckte Halterung (zu sehen in Abbildung 7 mit Nummer 8) gelegt und mittels Unterdruck angesaugt. Die Glasplättchen wurden auf die Halterung mit Nummer 9 in Abbildung 7 gelegt. Dem Programm wurden dann die x- und y-Werte des Mittelpunktes des Glasplättchens und der Kaptonzuschnitte übergeben. Diese Mittelpunkte wurden mit bloßem Auge ausgewählt und durch keinen Algorithmus bestimmt.

Für das Abziehen der Glasplättchen wurde ein kurzes Programm auf dem Web-Interface WebMotion® geschrieben. Dafür wurde im Menü unter *application* im Unterpunkt *program* bei dem Kasten *New* die Nummer 3 ausgewählt. Das Programm setzt sich aus folgenden Befehlen zusammen:

- 1) SET OUTPUT 2
- 2) EXECUTE INDEX 1
- 3) WAIT TIME 50 ms
- 4) EXECUTE INDEX 2
- 5) CLEAR OUTPUT 2

Index 1 und 2 wurden im Menü unter *application-index* eingestellt und sind in Tabelle 4 gelistet. Screenshots des Web-Interfaces befinden sich im Anhang C.

Tabelle 4: Indices, die definiert wurden, um die Glasplättchen von den Polyimid-Zuschnitten zu lösen.

Index	Beschleunigung [$1000 \frac{\text{Ink}}{\text{s}^2}$]	Geschwindigkeit [$\frac{\text{Ink}}{\text{s}}$]	Abstand [Ink]	Typ
1	2500	50000	70377	ABS
2	2500	1000	60000	ABS

Das Programm setzt die angeschlossenen Outputs der Ventilinsel am Anfang so, dass nur der Saugnapf mit dem Unterdruck verbunden ist. Danach wird die z-Achse bis zum Glasplättchen heruntergefahren (INDEX 1), 50 ms gewartet und dann langsam hochgefahren (INDEX 2). Die Polymid-Zuschnitte wurden dafür mittels doppelseitigem Klebeband auf eine Metallplatte geklebt, welche dann händisch festgehalten wurde. Des Weiteren bietet WebMotion® zusätzlich die Möglichkeit im Menü unter *move axis* im Unterpunkt *motion diagram* die Kraft auf die entsprechende Achse des Roboters aufnehmen zu lassen. Dafür muss *record new* und *LFORCE* ausgewählt werden. Um dann das Programm zu starten, muss der Kommandozeile

pg3 übergeben werden. Zurückgegeben wird die Position und der benötigte Strom zum Zeitpunkt t , um die Achse zu bewegen. Die Messdauer beträgt 8000 ms. Um aus dem Strom die Kraft, die auf die Achse wirkt, zu berechnen, wird der Strom mit der angegebenen *FORCE CONSTANT* λ_{FC} multipliziert. Es folgt

$$F_z = \lambda_{FC} \cdot I \quad \text{mit} \quad \lambda_{FC} = 28 \times 10 \text{ mA} \times 1 \text{ N}.$$

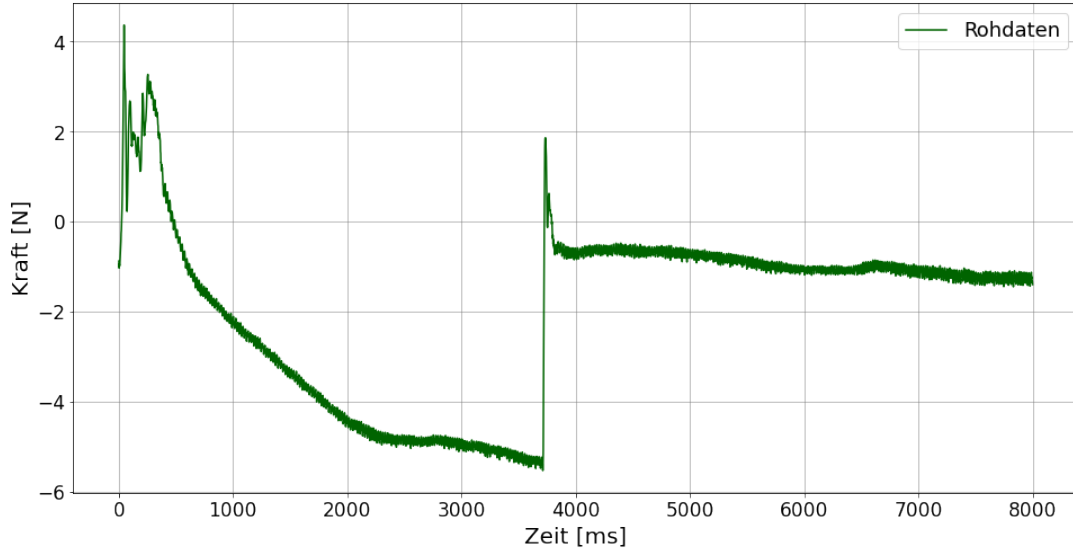


Abbildung 22: Kraft, die auf den Arm der z-Achse wirkt, aufgetragen gegen die Zeit für Test 1.

In Abbildung 22 ist die Kraft, die auf die z-Achse wirkt, gegen die Zeit aufgetragen. Wie gut zu erkennen ist, sind die y-Werte stark verrauscht. Um diesem Rauschen entgegenzuwirken wurde der gleitende Mittelwert 10-ter Ordnung gebildet. Dieser ist durch

$$\bar{F}_j^{10} = \frac{1}{10} \sum_{i=j-9}^j F_i$$

definiert, wenn die Kraft F diskret in der Zeit ist. Abbildung 23 zeigt wie eine mit diesem Mittel geglättete Kurve aussieht.

Das Glasplättchen löst sich, wenn die Kraft auf die z-Achse betragsmäßig am größten ist, also bei der in Abbildung 23 dargestellten Kurve im Minimum. Die Spitze und das darauffolgende Nachschwingen, die nach dem plötzlichen Ablösen des Glasplättchens auftreten, resultieren daraus, dass der Roboter verzögert auf die plötzlich geringere benötigte Kraft reagiert und sich dementsprechend einpendeln muss. Zur Bestimmung der Kraft, die benötigt wird, um das Glasplättchen zu lösen, wird deshalb das Minimum der Kurve gesucht. Das Minimum wurde über die numpy-Funktion `numpy.minimum()` gefunden. Der Fehler ist dann gegeben durch den Fehler auf den gleitenden Mittelwert in diesem Punkt. Wie in Abbildung 23 zu erkennen ist, geht die Kraft, welche an der z-Achse anliegt, nicht auf 0 zurück. Das liegt vermutlich an der Gewichtskraft. Vom Minimum der Kurve muss dieser Offset abgezogen werden, um die Kraft zu erhalten, die benötigt wird, um das Glasplättchen zu lösen. Der Offset wurde berechnet, indem der Mittelwert von den 250 Werten nach dem Sprung gebildet wurde. Dieser ist in rot in Abbildung 23 eingezeichnet. Der Fehler für den Offset wurde für alle Berechnungen auf $\Delta F_{\text{Offset}} = 0.3 \text{ N}$ gesetzt, da der Offset nicht konstant ist, sondern mit zunehmender Höhe

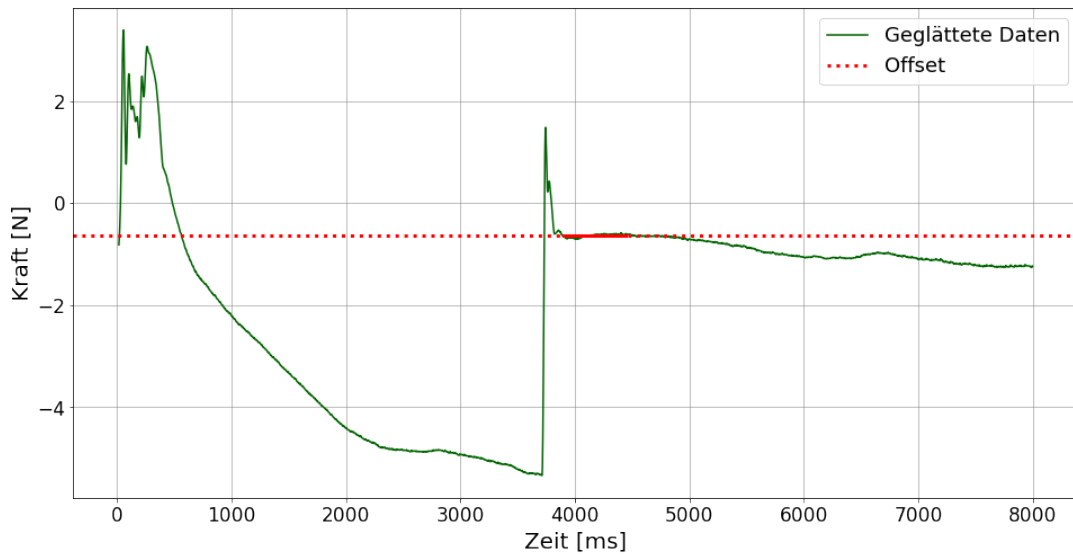


Abbildung 23: Darstellung der durch den gleitenden Mittelwert geglätteten Daten. In rot eingezeichnet ist der Offset, der von dem Minimum abgezogen werden muss, um die Kraft zum Ablösen der Glasplättchen zu erhalten.

des Saugnapfes zur Oberfläche abnimmt. Die Kraft zum Ablösen der Glasplättchen ist folglich durch

$$F = -(F_{\min} - F_{\text{Offset}})$$

gegeben. Das Minus kommt daher, dass die Kraft auf das Glasplättchen entgegengesetzt zur Kraft auf die z-Achse ist.

In den Krafttests wurde für den Zwei-Komponenten-Kleber *Araldite® 2011* untersucht, inwiefern die Menge an Klebepunkte und die Anordnung dieser die Kraft zum Ablösen der Glasplättchen beeinflusst. Die verschiedenen Klebemuster sind in Abbildung 24 skizziert. Statt mehrere Tropfen auf eine Stelle zu setzen, wurden Muster geklebt, um den Rotationsfreiheitsgrad zu fixieren.

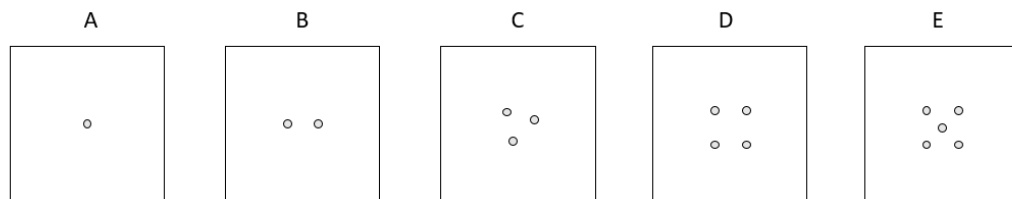


Abbildung 24: Skizze von den Klebemustern. Der Abstand für die Tropfen voneinander im Muster B beträgt $5\,\mu\text{m}$. Der Abstand zwischen den nächst-benachbarten Tropfen für die Muster C und D ist $3\,\mu\text{m}$. Klebemuster E ist identisch mit Klebemuster D mit einem zusätzlichen Tropfen in der Mitte des Quadrates.

Der Zweikomponenten-Kleber härtet innerhalb von zwei Stunden nach der Mischung beider Komponenten aus. Das würde bedeuten, dass alle zwei Stunden während der Produktion des Spurdetektors der Kleber gewechselt und die Düse gereinigt werden müsste. Das wäre sehr zeitintensiv. Eine Möglichkeit, dies zu umgehen, ist es, die Komponenten des Klebers nacheinander zu setzen. Dies wurde ebenfalls in den Krafttests untersucht. Insgesamt wurden für den *Araldite® 2011* sechs Testreihen aufgenommen. In Tabelle 5 wird ein Überblick

über die verschiedenen Testreihen gegeben. Für jede Testreihe wurden zehn Glasplättchen auf Polyimid-Zuschnitte geklebt.

Tabelle 5: Überblick der durchgeführten Krafttests für den *Araldite® 2011*. Die Klebemuster sind in Abbildung 24 skizziert.

Test	Parameter-Set	Vorgehen	Klebemuster
1	2A	Komponenten gemischt setzen	A
2	2A	Komponenten nacheinander setzen	A
3	2A	Komponenten gemischt setzen	B
4	2A	Komponenten gemischt setzen	C
5	2A	Komponenten gemischt setzen	D
6	2A	Komponenten gemischt setzen	E

6.4.2 Analyse der Krafttests

Tabelle 6 listet für alle Tests, welche mit dem *Araldite® 2011* durchgeführt wurden, die Kraft auf, die aufgewendet werden musste, um die Glasplättchen von den Polyimid-Zuschnitten zu lösen. Die angegebene Kraft ist der Mittelwert von zehn einzelnen Messungen. Es muss erwähnt werden, dass in manchen Fällen nicht alle der zehn Glasplättchen gelöst werden konnten. Stattdessen hat sich der Saugnapf vom Glasplättchen gelöst. Für diese Messungen wurde also die Kraft aufgenommen bei der der Saugnapf sich löste. Diese Messungen wurden ebenfalls beim Berechnen des Mittelwertes und seines Fehlers berücksichtigt. Es sollte also beachtet werden, dass die Tests, bei denen die Anzahl nicht gelöster Glasplättchen größer 0 ist, der Wert der maximalen Kraft zum Lösen der Glasplättchen höher liegt als der angegebene Wert in Tabelle 6 und der Fehler zu gering ist. Im Anhang D.1 sind für alle Krafttest aufgelistet, welches Glasplättchen sich gelöst hat und, welches nicht.

Tabelle 6: Mittelwerte der benötigten Kraft zum Ablösen der Glasplättchen. Der Fehler ist durch den Fehler auf den Mittelwert gegeben.

Test	Parameter-Set	F [N]	ΔF [N]	Anzahl nicht gelöster Glasplättchen
1	2A	3.51	0.35	0
2	2A	4.26	0.12	3
3	2A	4.45	0.28	6
4	2A	4.87	0.09	9
5	2A	4.94	0.01	10
6	2A	4.96	0.02	10

Es ist gut zu erkennen, dass die Kraft, welche zum Ablösen eines Glasplättchens benötigt wird, und die Anzahl nicht gelöster Glasplättchen mit zunehmender Tröpfchenanzahl steigt. Zudem ist es für den verwendeten Aufbau unwesentlich, ob vier oder fünf Tropfen gesetzt werden, da der Saugnapf sich löst, bevor die Kraft zum Ablösen der Glasplättchen erreicht wird.

Weiterhin nimmt der Fehler des Mittelwerts mit steigender Anzahl an Klebetropfen ab. Das liegt daran, dass die Anzahl nicht gelöster Glasplättchen zunimmt und der berechnete Fehler deshalb kleiner ist als der tatsächliche Fehler.

Für Test 2 und Test 3 ist die Menge an Kleber gleich. Allerdings würde erwartet werden, dass die Kraft zum Ablösen eines Glasplättchen für Test 2 geringer ist, da hier die Komponenten nacheinander dosiert wurden, das Vermischen beider Komponenten durch das Aufeinanderdrücken von den Glasplättchen und den Polyimid-Zuschnitten erfolgte und die Komponenten dementsprechend schlechter gemischt waren. Dies konnte auch gemessen werden, innerhalb ihrer Unsicherheiten sind die Werte jedoch gleich. Da jedoch auch signifikant mehr Glasplättchen

nicht gelöst werden konnten, wenn die Komponenten zuvor vermischt wurden, ist davon auszugehen, dass die Glassplättchen, die mit diesem Klebeszenario geklebt wurden, besser haften. Dies könnte auch an der Geometrie der Punkte aus Test 3 liegen. Die zwei Tropfen wurden nicht aufeinander, sondern nebeneinander gesetzt.

Ein Verhalten, das für das Ablösen der Glasplättchen beobachtet werden konnte, ist in Abbildung 25 zu sehen. Diese Abbildung zeigt den Verlauf der auf die z-Achse wirkende Kraft in der Zeit. Wie gut zu erkennen ist, kommt es im Minimum nicht immer zu einem ruckartigen Ablösen des Glasplättchens, sondern erst nach verzögerter Zeit in der die Kraft minimal abnimmt. Dies könnte daran liegen, dass es ähnlich wie bei der Dehnung von Festkörpern nach der plastischen Verformung erst nochmal einen Einschnürungsbereich gibt, bevor es zum Bruch kommt.

Ein weiteres Verhalten, das beobachtet werden konnte, ist in Abbildung 26 dargestellt. Wird die Kraft nicht in der Mitte des Klebemusters angesetzt, so löst sich das Plättchen in mehreren Phasen von dem Polyimid-Zuschnitt. Es wird erst die Seite des Glasplättchens gelöst, an der der Saugnapf zieht, und dann die andere Seite. Dieses Verhalten konnte nur für die Klebemuster B bis E beobachtet werden.

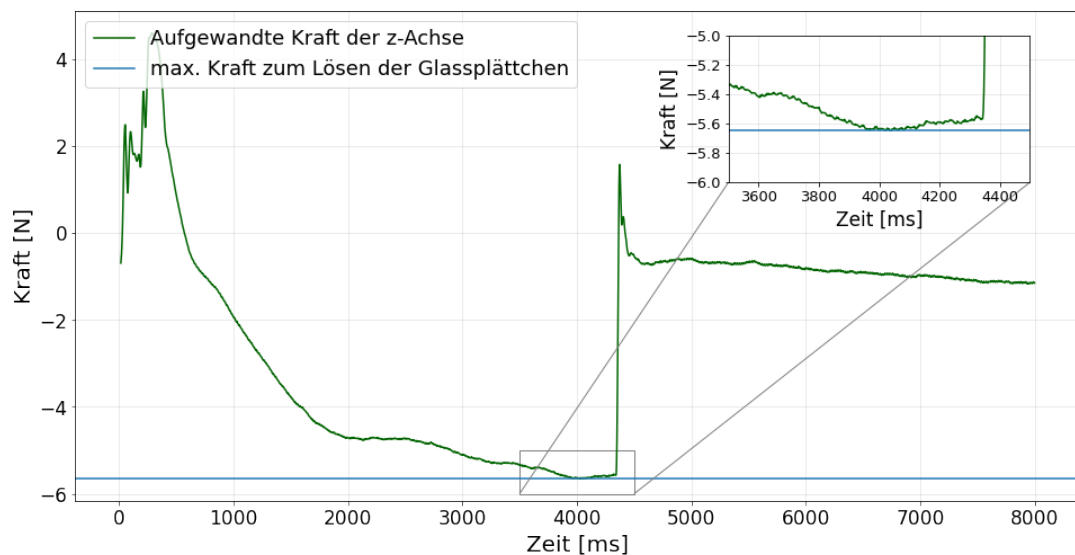


Abbildung 25: Kraft der z-Achse aufgetragen gegen die Zeit. Der Bereich des Ablösens wird vergrößert dargestellt.

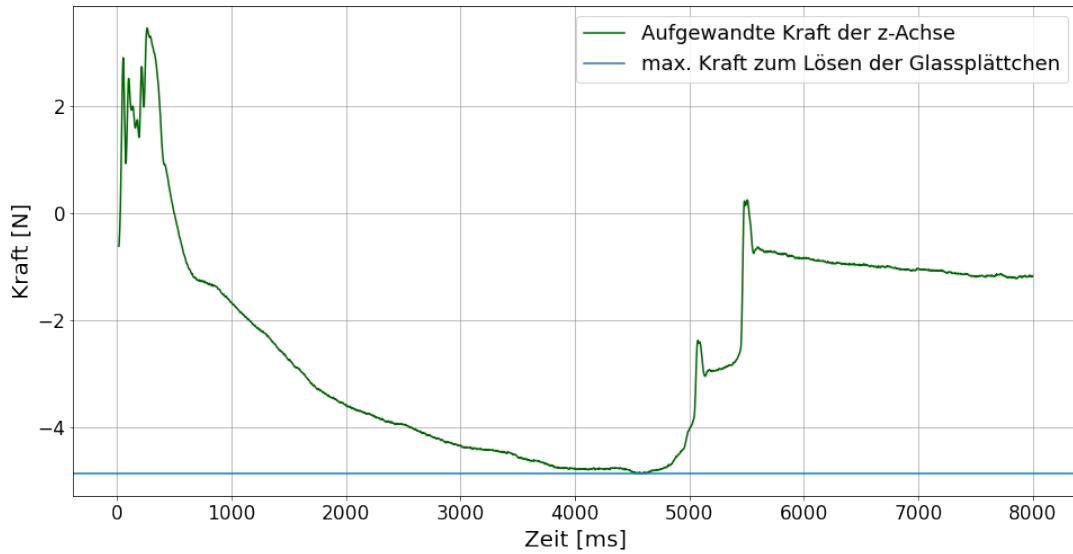


Abbildung 26: Kraft der z-Achse gegen die Zeit. Bei der Messung hat der Saugnapf nicht in der Mitte des Klebemusters angestzt, sonder leicht versetzt davon. Das Resultat ist, dass eine Stufe in der Kurve zu erkennen ist.

Der *Araldite[®] 2011* klebt somit zuverlässig die Glasplättchen an die Polyimid-Zuschnitte. Es empfiehlt sich mindestens 3 Tropfen in den dargestellten Mustern zu verwenden, da damit sichergestellt ist, dass das Glasplättchen an den Polyimid-Zuschnitten kleben bleibt. Zudem bietet das aufeinanderfolgende Kleben der Komponenten eine gute Alternative um zu umgehen, dass der Kleber innerhalb von zwei Stunden aushärtet. Dieses Verfahren sollte dennoch näher getestet und verfeinert werden. Weiterhin bietet es sich an weitere Tests mit mehr Saugkraft des Saugnapfes durchzuführen. Dies ließe sich durch eine leistungsfähigere Vakuumpumpe erreichen.

7 Messungen mit *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621*

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus der Volumenmessung und den Krafttests für den Dymax-Kleber analysiert. Die Parametersuche der Start-Parameter wurde in „*Calibration of a glueing robot for assembly of the P2 tracking detector*“ [13] in Kapitel 3.3.2 durchgeführt und kann dort nachgelesen werden. Wichtig zu erwähnen ist, dass der Kleber eine sehr geringe Viskosität hat und kleine Veränderungen des initialen Parameter-Sets,

$$p_P = 70 \text{ kPa} \quad p_C = 25 \text{ kPa} \quad t_{On} = 0.0150 \text{ s} \quad d = 70\,000 \text{ Ink.}$$

keine bis nur wenig Einflüsse auf die Anzahl der Satelliten haben. Deswegen wurde dieses Parameter-Set als Ausgangspunkt für weiterführende Tests benutzt.

Auch hier sollte das Verhalten der Fläche der Tropfen untersucht werden, wenn 100 Tropfen hintereinander abgeschossen werden. Dafür wurden zwei Reihen à 50 Tropfen hintereinander mit dem initialen Parameter-Set abgeschossen. Das Verhalten der Fläche ist in Abbildung 27 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Fläche stärker streut als beim *Araldite[®] 2011*. Das liegt an der geringeren Viskosität des Klebers. Dadurch verläuft der Kleber beim Dosieren sofort. Zudem ist die Fläche des Klebers anfälliger für Erschütterung und kleine Defekte auf der Oberfläche. Diese Effekte sorgen dafür, dass der Kleber besser oder schlechter verläuft.

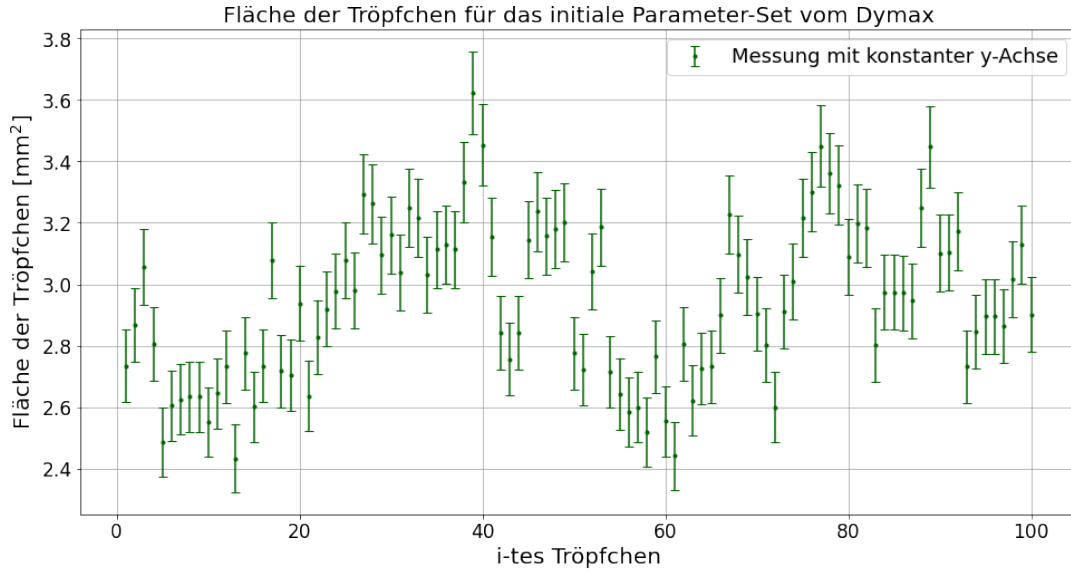


Abbildung 27: Abhängigkeit der Fläche des Tropfen, für die Nummer des Tropfens für den *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621*. Es wurden 100 Tropfen für das initiale Parameter-Set abgeschossen.

7.1 Bestimmung der Masse eines Tropfens für verschiedene Parameter-Sets

Zur Überprüfung der Abhängigkeit der Masse von den gewählten Parametern wurden weitere Parameter-Sets neben dem initialen Parameter-Set aufgenommen. Dafür wurde das initiale Parameter-Set in einem Parameter um einen bestimmten Wert nach oben und nach unten variiert. Eine Auflistung dieser Parameter-Sets befindet sich in Tabelle 7. In diesen Versuchsreihen wurde der Abstand zwischen Düse und Oberfläche gegenüber den Tests in der Bachelorarbeit von Patrick Riederer [13] verringert, um die Anzahl der Satelliten zu minimieren und den Tropfen weniger dem Einfluss der umgebenden Luft auszusetzen.

Tabelle 7: Aufzählung der Parameter-Sets, die zur Massenbestimmung der Tropfen ausgewählt wurden. Die Anzahl der Schüsse war dabei immer $Num = 1$. Die Off-time ist deshalb irrelevant. Die Fehler der Drücke betragen jeweils $\Delta p = 3 \text{ kPa}$. Die Fehler des Abstands und der On-time sind jeweils durch $\Delta d = 10 \text{ Ink}$ und $\Delta t_{On} = 0.0001 \text{ s}$ gegeben. Parameter-Set 7D ist das initiale Parameter-Set.

Parameter-Set	d [Ink]	p_P [kPa]	p_C [kPa]	t_{On} [s]
1D	70000	65	25	0.0150
2D	70000	75	25	0.0150
3D	70000	70	20	0.0150
4D	70000	70	30	0.0150
5D	70000	70	25	0.0125
6D	70000	70	25	0.0175
7D	70000	70	25	0.0150

7.1.1 Beschreibung der Messmethode

Die Messmethode gleicht der in Abschnitt 6.3.1. Allerdings ist die Fläche eines Tropfens vom *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* deutlich größer als beim *Araldite[®] 2011*, da er eine geringere Viskosität hat und deshalb schneller und stärker verläuft. Aufgrund dessen mussten pro Tropfen vier Bilder aufgenommen werden, da das Konfokalmikroskop einen Messbereich von $1.617\text{ mm} \times 1.615\text{ mm}$ pro Bild hat. Diese Bilder wurden dann vom Auswerteprogramm zusammengesetzt (auch „Stitching“ genannt). Das Gesamtvolumen wurde dann wie in Abschnitt 6.3.1 über die Formeln 5 und 6 bestimmt. In Abbildung 28 ist zu erkennen, dass es zu Fehlern beim Stitching kommt. Dadurch sieht es so aus, als sei der Offset aus vier Ebenen zusammengesetzt. Die Fit-Funktion aus dem Abschnitt 6.3.1 muss deshalb angepasst werden,

$$\begin{aligned} z_{\text{Ebene}}(x, y) = & \frac{1}{4}(ax + by + c) \cdot \left(\operatorname{erf} \left(\frac{-(x - x_0)}{\Gamma} \right) + 1 \right) \cdot \left(\operatorname{erf} \left(\frac{-(y - y_0)}{\Gamma} \right) + 1 \right) \\ & + \frac{1}{4}(dx + ey + f) \cdot \left(\operatorname{erf} \left(\frac{-(x - x_0)}{\Gamma} \right) + 1 \right) \cdot \left(\operatorname{erf} \left(\frac{y - y_0}{\Gamma} \right) + 1 \right) \\ & + \frac{1}{4}(gx + hy + k) \cdot \left(\operatorname{erf} \left(\frac{x - x_0}{\Gamma} \right) + 1 \right) \cdot \left(\operatorname{erf} \left(\frac{-(y - y_0)}{\Gamma} \right) + 1 \right) \\ & + \frac{1}{4}(lx + my + n) \cdot \left(\operatorname{erf} \left(\frac{x - x_0}{\Gamma} \right) + 1 \right) \cdot \left(\operatorname{erf} \left(\frac{y - y_0}{\Gamma} \right) + 1 \right). \end{aligned}$$

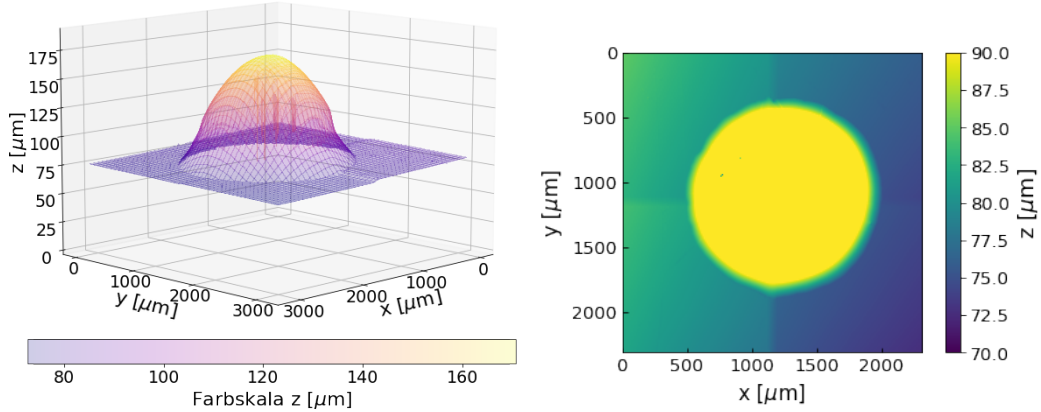
Insgesamt hat der Fit 15 Fit-Parameter, $a, b, c, d, e, f, g, h, k, l, m, n, x_0, y_0$ und Γ , die Breite. Für diese Fits wurde ebenfalls χ^2_{red} mit Gleichung 7 ermittelt. Zum Berechnen des Volumens, das durch den Offset entsteht, wurde folgende Formel verwendet,

$$V_{\text{Ebene}} = \sum_i V_i = \sum_i z_{\text{Ebene},i} \cdot \delta x \cdot \delta y.$$

Die Intervallbreiten δx und δy sind unverändert. Für den Fehler folgt

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{Ebene}} &= |V_{\text{Ebene}_+} - V_{\text{Ebene}_-}|, & \text{mit} \\ \Delta V_{\text{Ebene}_+} &= \sum_i \max(z_{\text{Ebene},i+1}, z_{\text{Ebene},i}) \cdot \delta x \cdot \delta y & \text{und} \\ \Delta V_{\text{Ebene}_-} &= \sum_i \min(z_{\text{Ebene},i+1}, z_{\text{Ebene},i}) \cdot \delta x \cdot \delta y. \end{aligned}$$

Das Volumen des Tropfens lässt sich dann wie zuvor mit Gleichung 8 und 9 und die Masse mit Gleichung 10 berechnen. Dichte vom *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* beträgt $1.15 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ [9]. Hier wurde ebenfalls wie in Abschnitt 6.3.2 der Korrelationskoeffizient zwischen Masse und Fläche der Tropfen bestimmt.



(a) 3D-Darstellung der Rohdaten.

(b) Projektion der z-Werte auf die xy-Ebene. Deutlich zu erkennen sind die vier Aufnahmen, aus denen die Bilder zusammengesetzt wurden.

Abbildung 28: 3D-Darstellung der Rohdaten und die Projektion der z-Werte auf die xy-Ebene für das Parameter-Set 7. Die Farbskala für die z-Werte reicht von 70 μm bis 90 μm , damit die vier Ebenen (Stitchingfehler) besser zu erkennen sind.

7.1.2 Analyse der Massen

Zuerst soll die Güte der Ebenenfits untersucht werden. Auch hier ist χ^2_{red} größer als 1, liegt jedoch in einem Bereich zwischen 60 und $1 \cdot 10^4$, selten im Bereich von $1 \cdot 10^4$ bis $2 \cdot 10^6$. Um auch hier sicherzustellen, dass die gefittete Ebene das Offset gut abbildet, wurde ebenfalls die Differenz der interpolierten Daten zu der gefitteten Ebene betrachtet. Ein Beispiel davon ist in Abbildung 29 zu sehen. Die Differenz schwankt zwischen -3 und 3. Damit bildet die gefittete Ebene das Offset gut ab. Dass die χ^2_{red} besser sind als für die Ebenenfits beim *Araldite[®] 2011*, liegt daran, dass die Werte nicht so verrauscht sind. Das Rauschen ist stärker für eine helle reflektierende Oberfläche. Für den *Araldite[®] 2011* wurden die Tropfen auf eine helle Glasfasermatte platziert. Die Tropfen vom *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* wurde auf dunkle Polyimid-Streifen platziert. Diese reflektieren nicht so stark wie die weiße Unterlage.

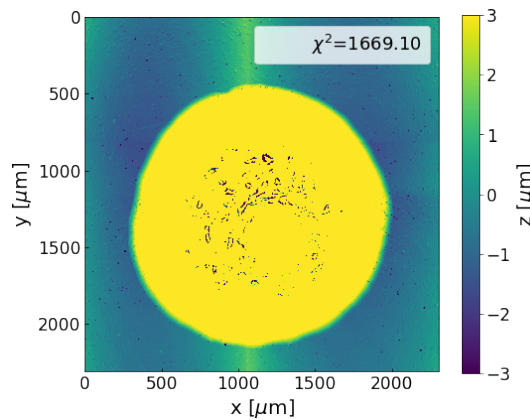


Abbildung 29: Projektion der Differenz der interpolierten Daten zum Ebenenfit auf die xy-Ebene für Tropfen 1 des Parameter-Sets D2.

Tabelle 8: Gewichteter Mittelwert und dessen Fehler. $\rho_{M,F}$ gibt die Korrelation zwischen den Massen der einzelnen Tropfen und der Fläche dieser an. Zur Bestimmung der Korrelation und des gewichteten Mittelwerts wurden 20 Tropfen ausgewertet.

Parameter-Set	\bar{m} [mg]	$\Delta\bar{m}$ [mg]	$\frac{\Delta\bar{m}}{\bar{m}}$ [%]	A [mm ²]	ΔA [mm ²]	$\rho_{M,F}$
1D	0.06445	± 0.00131	± 2.03	4.5504	± 0.0708	0.7486
2D	0.07221	± 0.00099	± 1.37	4.3957	± 0.0577	0.1368
3D	0.07125	± 0.00078	± 1.10	3.9182	± 0.0719	-0.1715
4D	0.07672	± 0.00085	± 1.11	4.5198	± 0.0743	0.1827
5D	0.07133	± 0.00094	± 1.32	4.4487	± 0.0754	0.1498
6D	0.07784	± 0.00089	± 1.14	4.4739	± 0.0648	0.3880
7D	0.04700	± 0.00124	± 2.63	2.6531	± 0.0365	0.2728
7D	0.14495	± 0.00300	± 2.07	1.4323	± 0.0107	-0.2387

In Tabelle 8 ist die Durchschnittsmasse und die Durchschnittsfläche eines Tropfens für das jeweilige Parameter-Set sowie der Korrelationskoeffizient zwischen Masse und Fläche gegeben. Es wird deutlich, dass die Massen und die Fläche nicht miteinander korrelieren. Das liegt vermutlich daran, dass der Kleber eine sehr geringe Viskosität hat. Wird er dosiert, verläuft er sofort. Kleine Defekte auf der Oberfläche sowie Erschütterungen sorgen dafür, dass der Kleber besser oder schlechter verläuft. Zum Aushärten mussten die Glasplättchen zum Ofen transportiert werden. Dabei kommt es zu Erschütterungen. Somit dient die Fläche eines Tropfens für den *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* nicht als gute Approximation für die Masse eines Tropfens. Abbildung 30 verdeutlicht dies. Im Anhang B.1 befinden sich die graphischen Darstellungen der Massen und Flächen der Tropfen für die restlichen Parameter-Sets.

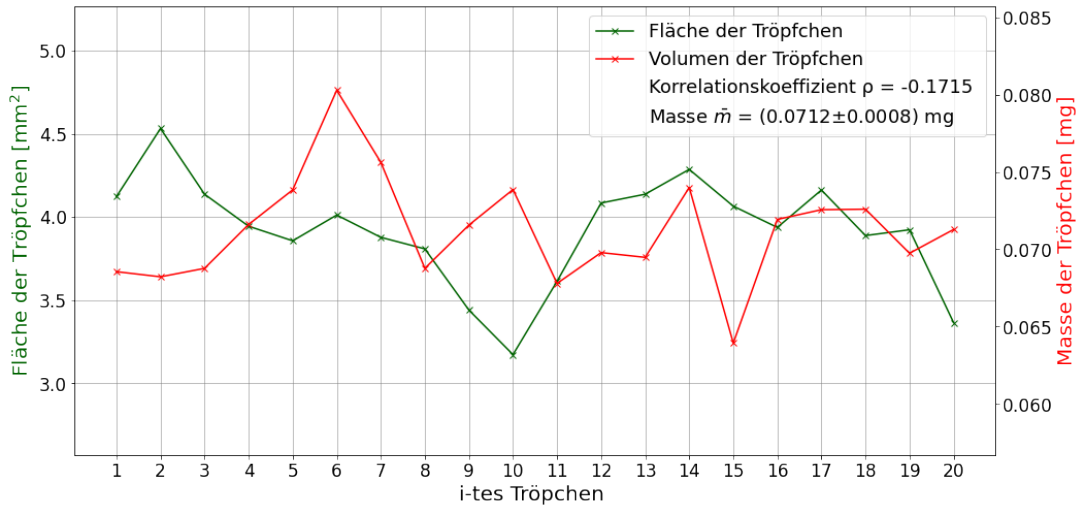


Abbildung 30: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 3D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

Die Parameter-Sets 1D bis 6D wurden zum selben Zeitpunkt dosiert. Die Massen liegen alle nahe beieinander im selben Größenbereich. Parameter-Set 7D wurde zweimal zu unterschiedlichen Zeitpunkten dosiert. Die Massen dieser Messungen liegen nicht im selben Bereich wie die Massen der vorhergegangenen Parameter-Sets, aber in der selben Größenordnung. Daraus kann geschlossen werden, dass die Massen von Größen oder Einflüssen abhängen, die noch nicht kontrolliert werden. Diese Einflüsse könnten Umwelteinflüsse, Staub o.ä. in der Kartusche und Düse sowie die Füllhöhe sein.

Die Massen für den Dymax, die in der Bachelorarbeit von Patrick Riederer [13] berechnet wurden, liegen zwischen 0.0615 mg und 0.0645 mg. Die Massen wurden nicht mit Hilfe des Konfokalmikroskops berechnet, sondern mittels einer Waage. Dafür wurden 30 Tropfen in ein kleines Gefäß gegeben. Somit konnte nicht berechnet werden, wie stark die Masse der Tropfen mit jedem Schuss schwankt. Die mit dem Konfokalmikroskop berechneten Werte sind bis auf die zweite Messungen mit dem Parameter-Set 7D alle etwas größer, liegen aber noch in der selben Größenordnung. Hier wird nochmals deutlich, dass die Massen von Parametern abhängen, die noch nicht kontrolliert wurden. Hierzu sollten weitere Tests durchgeführt werden.

Für die nächsten Tests wurde Parameter-Set D3 ausgewählt, da der Fehler auf den Mittelwert bei diesem Parameter-Set prozentual am geringsten ist. Dieses Parameter-Set genügt somit am besten den Anforderungen, die in Abschnitt 6.3.2 bereits erwähnt wurden. Parameter-Set 7D wurde ebenfalls für die Krafttests verwendet.

7.2 Krafttests

Der Dymax-Kleber ist besonders interessant, da er theoretisch über mehrere Stunden verwendet werden kann, ohne dabei auszuhärten. Zudem besteht bei ihm die Möglichkeit die Glasplättchen noch auf der Halterung, auf denen die Kaptonzuschnitte liegen mit UV-Licht, auszuhärten. Die Testreihen wurden für zwei Parameter-Sets, Parameter-Set 3 und 7, durchgeführt.

7.2.1 Durchführung der Krafttests

Die Durchführung der Krafttests für den *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* und die Berechnung der Kraft, die zum Lösen der Glasplättchen aufgebracht werden muss, erfolgt wie in Abschnitt 6.4.1. Allerdings wurden beim *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* verschiedene Aushärtethoden untersucht und nicht wie beim *Araldite[®] 2011* das Setzen verschiedener Klebemuster.

Der *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* lässt sich auf verschiedene Weisen aushärten. Eine Möglichkeit ist, den Kleber mittels Hitze auszuhärten. Dafür wurden die fesgeklebten Glasplättchen bei 120 °C für 30 Minuten und bei 50 °C für 24 Stunden in einen Ofen gelegt. Zudem bietet der Hersteller einen Aktivator für diesen Kleber an. Mittels diesem härtet der Kleber von alleine aus. Dafür wurde der Aktivator mit einem mitgelieferten Pinsel oder mit dem Jet-Dispenser vor dem Kleber auf die Kaptonzuschnitte aufgetragen. Diese Testreihen wurden dann über Nacht zum Aushärten ausgelegt. Die letzte Methode zum Aushärten des *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621*, die getestet wurde, war, den Kleber mit UV-Licht zu bestrahlen. Dafür wurden vom Hersteller Vishay[®] LEDs vom Typ VLMU3500-405-120 eingesetzt. Diese LEDs haben eine Wellenlänge von 405 nm mit einer Leistung von 780 mW bei 500 mA [20]. Die Testobjekte wurden für 180 s mit den LEDs bestrahlt. Eine Skizze der Anordnung der Testobjekte und der LEDs ist in Abbildung 31 zu sehen. Die Mittelpunkte der Glasplättchen sind jeweils 4.57 µm voneinander entfernt. Gegenüber der Testobjekte befindet sich jeweils eine LED. Die LEDs strahlten von oben durch die Glasplättchen auf den Kleber. Zur besseren Simulation von HV-MAPS wurden für eine weitere Testreihe die Glasplättchen schwarz angesprüht. Zum Aushärten dieser Testreihe wurden ebenfalls die LEDs verwendet. Dafür wurden diese händisch auf die Höhe zwischen dem Polyimid-Zuschnitt und der Glasplättchen gehalten. In Tabelle 9 sind die einzelnen Testreihen aufgezählt.

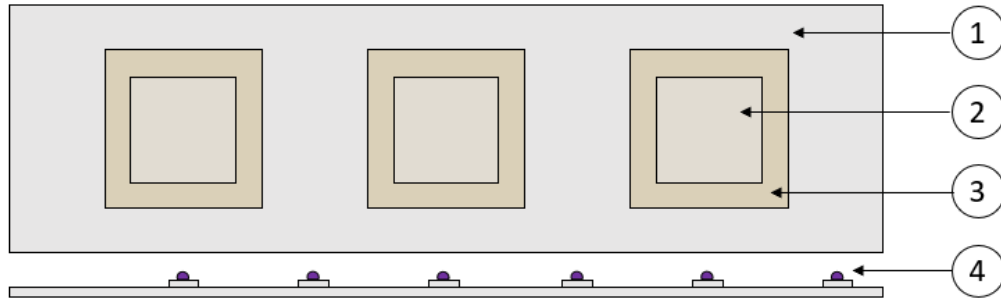


Abbildung 31: Skizze der Anordnung der LEDs und der Testobjekte. Mit Nummer 1 ist die Unterlage zum Ansaugen der Kaptonzuschnitte (Nummer 2) beschriftet. Die Gläsplättchen sind mit Nummer 3 und die LEDs mit Nummer 4 beschriftet. Die Anordnung der LEDs wurden für einen anderen Aufbau konzipiert. Es konnten nicht die ganzen LEDs beim Aushärten ausgenutzt werden, da sechs Kaptonzuschnitte nicht nebeneinander gepasst haben.

Tabelle 9: Überblick der durchgeführten Krafttests für den *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621*.

Test	Parameter-Set	Aushärtmethode
7	3D	120 °C, 30 min
8	3D	50 °C, 24 h
9	3D	Aktivator
10	3D	LEDs
11	3D	LEDs (angesprühte Glasplättchen)
12	7D	120 °C, 30 min
13	7D	50 °C, 24 h
14	7D	Aktivator
15	7D	LEDs

7.2.2 Analyse der Krafttests

Die Durchschnittskraft zum Ablösen der Plättchen für jeden Test mit *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* ist in Tabelle 10 angegeben, dabei wurden für die Tests pro Glasplättchen jeweils ein Tropfen gesetzt. Es wird deutlich, dass die Kraft stark von der Aushärtmethode abhängt.

Tabelle 10: Mittelwerte der benötigten Kraft zum Ablösen der Glasplättchen. Der Fehler ist durch den Fehler auf den Mittelwert gegeben. Bei Test 11 konnte der Kleber nicht ausgehärtet werden, weshalb keine Krafttests durchgeführt werden konnten.

Test	Parameter-Set	F [N]	ΔF [N]	Anzahl nicht gelöster Glasplättchen
7	3D	3.87	0.29	3
8	3D	3.47	0.27	4
9	3D	3.02	0.48	2
10	3D	2.24	0.28	0
11	3D	/	/	/
12	7D	4.42	0.31	7
13	7D	2.12	0.40	0
14	7D	1.61	0.34	0
15	7D	1.69	0.19	0

Für die Tests, bei denen die Glasplättchen bei 120 °C für 30 Minuten zum Aushärten in den Ofen gelegt wurden, ist die Kraft, die zum Ablösen benötigt wird, am größten. Diese Aushärtmethode kann jedoch für die HV-MAPS nicht verwendet werden, da diese keiner Temperatur über 80 °C über einen längeren Zeitraum ausgesetzt werden dürfen. Diese Aushärtmethode wurde aber dennoch als Vergleich aufgenommen.

Für die Tests, bei denen die Testobjekte für 24 Stunden bei 50 °C zum Aushärten in den Ofen gelegt wurden, wird eine etwas geringere Kraft zum Ablösen der Glasplättchen benötigt. Die HV-MAPS können dieser Temperatur problemlos ausgesetzt werden. Allerdings ist der Kleber sehr dünnflüssig. Beim Transport der Polyimidstreifen von der Arbeitsfläche zum Ofen führen kleinste Erschütterungen dazu, dass sich die HV-MAPS verschieben, was nicht gewollt ist.

Bei den Tests 9 und 14 wurde der Kleber mittels dem Aktivator ausgehärtet. Für Test 14 wurde der Aktivator mit dem Jet-Dispenser aufgetragen. Für Test 9 wurde der Aktivator vorher auf die Polyimid-Zuschnitte gepinselt. Das angegebene Mischverhältnis von 1 zu 16 für den Aktivator und den Kleber konnte für beide Tests nicht eingehalten werden, da der Aktivator nicht so fein aufgetragen werden konnte. Es zeigt sich trotzdem, dass der Kleber hart wurde. Zudem hat das Auftragen des Aktivators mittels eines Pinsels bessere Ergebnisse hervorgebracht als das Auftragen mit Hilfe des Jet-Dispensers. Der Grund dafür könnte sein, dass der Kleber und der Aktivator eine größere Kontaktfläche haben, wenn der Aktivator aufgepinselt wird. Es empfiehlt sich weitere Tests durchzuführen, bei denen der Aktivator dünner auf die Polyimidstreifen aufgetragen wird. Des Weiteren wurde nicht getestet, wie lange der Kleber aushärten muss, bevor die Polyimidstreifen bewegt werden können, ohne, dass sich die HV-MAPS verschieben. Dies sollte auch in weiteren Tests untersucht werden. Sollte es so sein, dass der Kleber mehrere Stunden zum Aushärten braucht, empfiehlt sich auch diese Methode nicht, da die Polyimid-Streifen bewegt werden müssen oder die Arbeitsfläche über die Zeit nicht benutzt werden kann.

Die Tests, bei denen am wenigsten Kraft aufgewendet werden muss um die Glasplättchen zu lösen, sind für die jeweiligen Parameter-Sets die Tests, bei denen die LEDs zum Aushärten benutzt wurden. Zwischen Test 10 und 15 herrscht eine große Diskrepanz. Das könnte daran liegen, dass die Tests zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt wurden und die Klebermenge geschwankt hat. Ein weiterer Faktor könnte sein, dass die LEDs eine gewisse Zeit brauchen um die benötigte Leistung zu erbringen. Für Test 11 wurden ebenfalls LEDs zum Aushärten verwendet. Die Glasplättchen waren allerdings schwarz angesprüht, um die HV-MAPS besser zu simulieren. Die LEDs mussten so platziert werden, dass sie von der Seite durch die Lücke zwischen dem Polyimid-Zuschnitt und dem Glasplättchen scheinen konnten. Aufgrund dessen, dass die Halterung von den LEDs für einen anderen Aufbau konstruiert wurden, mussten die LEDs händisch an die Halterung gehalten werden. Die Glasplättchen haben nicht auf den Polyimidstreifen gehalten, der Kleber wurde nicht hart. Da die Aushärtmethode mittels UV-Licht den Vorteil bietet, die HV-MAPS in kurzer Zeit auf der Arbeitsfläche auszuhärten, sollten weitere Tests mit einer besseren Ausrichtung der LEDs und einer längeren Belichtungszeit durchgeführt werden.

Werden die Fehler der Mittelwerte betrachtet, ist zu erkennen, dass die Fehler für die Tests, bei denen die LEDs zum Aushärten benutzt wurden, am geringsten sind. Daraus folgt, dass für diese Aushärtmethode die Kraft zum Ablösen der Glasplättchen nicht so stark schwankt wie für die anderen Aushärtmethode.

Weiterhin konnten für einige Tests mit dem *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* ebenfalls das Verhalten wie in Abbildung 26 beobachtet werden, obwohl nur ein Tropfen gesetzt wurde. Grund dafür ist, dass der Dymax sich wegen seiner niedrigen Viskosität großflächig verteilt. Wird die Kraft von dem Saugnapf nicht in der Mitte angesetzt, führt dies zum stufenweisen Ablösen des Glasplättchens. Das Verhalten aus Abbildung 25 konnte ebenfalls gesehen werden. Auch hier wird angenommen, dass der Kleber eine Art von Einschnürungsbereich hat.

8 Vergleich zwischen *Araldite[®] 2011* und *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621*

Nun sollen die beiden Kleber, welche untersucht und analysiert wurden, hinsichtlich ihrer Eigenschaften beim Verkleben mit dem Jet-Dispenser verglichen werden.

Beide Kleber sind strahlenhart und lassen sich mit dem Jet-Dispenser dosieren und platzieren. Der *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* hat eine sehr viel geringere Viskosität mit $800 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ [9]. Die Viskosität vom *Araldite[®] 2011* liegt bei $30 - 50 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [8]. Zum Vergleich, die Viskosität von Wasser liegt bei $1.0087 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ [21]. Zum Abschießen des *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* werden deshalb ein geringerer Kartuschen- und Kolbendruck gebraucht. Der *Araldite[®] 2011* kann aufgrund seiner hohen Viskosität mit dem Jet-Dispenser nicht abgeschossen werden, sondern muss abgesetzt werden. Zudem werden ein viel höherer Kartuschen- und Kolbendruck benötigt.

Da der *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* eine geringere Viskosität hat und abgeschossen wird, entstehen mehr Satelliten, deren Größe und Platzierung nicht kontrolliert werden können.

Aufgrund dessen, dass der *Araldite[®] 2011* abgesetzt werden muss, ist die Masse der Tropfen empfindlicher gegenüber dem Abstand zwischen der Düse und der Oberfläche als beim *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621*. Beim *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* hängt die Masse der Tropfen nicht vom Abstand ab, jedoch die Fläche. Je größer der Abstand, desto eher ist die Fläche nicht mehr kreisförmig. Ob sich damit die Anzahl der Satelliten erhöht, wurde nicht getestet, wird aber vermutet.

Beim *Araldite[®] 2011* ist für jedes Parameter-Set der Fehler auf den berechneten Mittelwert der Masse größer als die Fehler der Mittelwerte bei den Messungen mit dem *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621*. Somit streuen die Massen für den *Araldite[®] 2011* stärker. Die stärkere Streuung kann aber auch an den eingeschlossenen Luftbläschen liegen. Für den *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* hingegen sind die Massen nicht konstant für das selbe Parameter-Set, wenn die Tropfen nicht zur selben Zeit dosiert werden. Dieses Verhalten ist nicht gewollt und sollte näher untersucht werden. Ob dies beim *Araldite[®] 2011* auch der Fall ist, wurde nicht untersucht.

Araldite[®] 2011 ist ein Zwei-Komponenten-Kleber. Nach dem Mischen beider Komponenten härtet er bei Raumtemperatur innerhalb von zwei Stunden aus. Es gibt keine Möglichkeit die aneinander geklebten Objekte in geringerer Zeit auf der Arbeitsfläche auszuhärten. Das bedeutet, dass die Polyimid-Zuschnitte mit den aufgeklebten HV-MAPS, bevor der Kleber ausgehärtet ist, bewegt werden müssten. Die HV-MAPS könnten sich verschieben. Zudem muss beim Kleben alle zwei Stunden die Düse gereinigt und die Kartusche gewechselt werden, da der Kleber in der Kartusche aushärtet. Letzteres kann umgangen werden, indem die Komponenten nacheinander gesetzt werden. Der *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* kann bei Hitze ausgehärtet werden, aber auch mittels eines Aktivators und LEDs. Letztere bieten den Vorteil, dass der Kleber innerhalb weniger Minuten auf der Arbeitsfläche ausgehärtet werden kann. Das bietet den Vorteil, dass die HV-MAPS vor dem Aushärten des Klebers nicht bewegt werden müssten. Somit kommt es zu keinen Verschiebungen der HV-MAPS.

Der *Araldite[®] 2011* klebt zuverlässiger als der *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621*. Für die Krafttests bei denen 4 und mehr Tropfen mit dem *Araldite[®] 2011* in einem Muster geklebt wurden, hat sich kein Glasplättchen gelöst. Die für den Versuchsaufbau geeignetste Aushärtmethode für das Kleben mit dem *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* benötigt die geringste Kraft zum Lösen der Glasplättchen. Generell liegt die Kraft zum Lösen der Glasplättchen für den *Araldite[®] 2011* höher als für den *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621*. Es kommt hinzu, dass die Aushärtmethode für den *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621*, welche die meiste Kraft zum Lösen der Glasplättchen benötigt, nicht geeignet ist, da die HV-MAPS bei der Temperatur beschädigt werden.

Werden die Fehler der Mittelwerte der Kraft zum Lösen der Glasplättchen betrachtet, so stellt sich heraus, dass der Fehler für die Messung mit dem *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621*, ausgehärtet mit den LEDs, und für die Messung mit dem *Araldite[®]*, bei der die Komponenten nacheinander abgesetzt wurden, am geringsten ist. Somit schwankt hier die Kraft zum Lösen

der Testobjekte am wenigsten. Den höchsten Fehler haben die Tests, bei denen der Aktivator zum Aushärten des *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* verwendet wurde. Diese Aushärtmethode ist demnach am unzuverlässigsten.

Des Weiteren lässt sich der Jet-Dispenser bei Verwendung von *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* einfacher und schneller reinigen. Die Düse konnte nach den Messungen vor Ort gereinigt werden, ohne zu verstopfen. Beim *Araldite[®] 2011* war das häufig nicht der Fall. Die Düse musste regelmäßig mit Schwefelsäure ausgekocht werden.

Zusammenfassend haben beide Kleber ihre Vor- und Nachteile. Aus praktischen Gründen, wie etwa dem Aushärten und Säubern, wird Dymax bevorzugt. Jedoch hat Araldite in den Krafttest ein zuverlässigeres Verhalten gezeigt und hat insgesamt stärker geklebt.

9 Fazit und Ausblick

Diese Arbeit hatte das Ziel, eine Klebestrategie für den P2-Spurdetektor zu entwickeln. Dafür wurden zwei Kleber auf ihre Eigenschaften beim Kleben mit dem Jet-Dispenser untersucht. Zum Kleben der HV-MAPS wurde ein Roboter konstruiert, der in der Lage ist die HV-MAPS anzusaugen, den Kleber auf eine gegebene Position zu setzen und die HV-Maps darauf zu platzieren.

In dieser Arbeit wurde das Ansaussystem des Roboters angeschlossen und in Betrieb genommen. Danach wurden für den Zwei-Komponenten-Kleber-*Araldite[®] 2011* Parameter-Sets gesucht mit dem dieser sich mit dem Jet-Dispenser, der am Roboter montiert ist, dosieren lässt. Das hat sich aufgrund der hohen Viskosität als schwieriger herausgestellt als eigentlich erwartet.

Danach wurde für beide Kleber die Masse für die einzelnen Tropfen für verschiedene Parameter-Sets gemessen. Das hatte zum Ziel jeweils ein geeignetes Parameter-Set für die Kleber zu finden. Das Auswahlkriterium war, dass die Fläche der Tropfen kreisförmig ist, das Parameter-Set nur wenige Satelliten aufweist und der Fehler der Mittelwerte der Massen für 20 Tropfen der kleinste ist. Damit sollte sichergestellt werden, dass für jeden HV-MAPS die selbe Menge an Kleber verwendet wird, sodass die Vielfachstreuung, die durch den Kleber, generell durch überflüssiges Material im Detektor, entsteht, bei jedem Detektor-Chip gleich ist. Es hat sich herausgestellt, dass der *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* eine geringere Streuung der Masse hat, da für jedes Parameter-Set der Fehler der Masse geringer war als der Fehler der Masse für den *Araldite[®] 2011*. Jedoch hat sich auch herausgestellt, dass die Klebemenge beim Dosieren vom *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* von einem noch unkontrollierten Parameter abhängt, da die Durchschnittsmasse eines Tropfens für Messungen, die zu unterschiedlichen Zeiten mit dem selben Parameter-Set aufgenommen wurden, von einander abweichen.

Abschließend wurde untersucht, wie viel Kraft zum Lösen der festgeklebten Testobjekte benötigt wird. Für den *Araldite[®] 2011* wurde untersucht, wie sich verschiedene Klebemuster und demnach auch größere Klebermengen auf das Klebeverhalten auswirken. Zudem wurde untersucht, ob sich auch die verschiedenen Komponenten des Klebers nacheinander absetzen lassen. Für den *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* wurde getestet, wie sich unterschiedlich Aushärtmethoden auf die Klebestärke auswirken.

Es hat sich herausgestellt, dass Klebemuster mit drei und mehr Tropfen *Araldite[®] 2011* zuverlässige Ergebnisse in den Krafttests liefern. Von besonderem Interesse war beim *DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621* die Aushärtmethode mittels den LEDs. Diese Aushärtmethode bietet den Vorteil, dass die Objekte in wenigen Minuten auf der Arbeitsfläche ausgehärtet werden können. Allerdings benötigt die Aushärtmethode mit den LEDs die geringste Kraft zum Ablösen der Glasplättchen. Eventuell könnten die Glasplättchen erst mit den LEDs ausgehärtet werden und dann nochmal für 24 Stunden in den Ofen gelegt werden. So wird gewährleistet, dass sich die HV-MAPS beim Transport nicht verschieben, diese aber dennoch gut an den Polyimid-Streifen kleben.

Ergänzend sollten weitere Tests zu den Massen beider Kleber aus den zuvor genannten Gründen durchgeführt werden. Es sollten zudem zusätzliche Krafttests für den *Araldite® 2011* aufgenommen werden, bei denen die Komponenten des Klebers nacheinander platziert werden, da diese Methode den Vorteil bietet über mehrere Stunden den Kleber zu benutzen, ohne alle 2 Stunden die Kartusche und Düse zu wechseln. Ebenso sollten weitere Krafttest mit dem *DYMAX® Multi-Cure® 6-621* durchgeführt werden. Hier würden sich neben weiteren Tests mit UV-Licht auch Tests anbieten, bei denen verschiedene Muster gesetzt werden. Das konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt werden, da nicht mehr genug Zeit und Kleber vorhanden war.

Literatur

- [1] Weltmaschine. *Das Standardmodell der Teilchenphysik*. Website. abgerufen am 07. November 2021. URL: www.weltmaschine.de/physik/standardmodell_der_teilchenphysik/.
- [2] Wikipedia. *Standardmodell der Teilchenphysik — Wikipedia, die freie Enzyklopädie*.
- [3] Bogdan Povh u. a. *Teilchen und Kerne - Eine Einführung in die physikalischen Konzepte*. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2014.
- [4] Dominik Becker u. a. “The P2 experiment”. In: *The European Physical Journal A* 54.11 (2018). DOI: 10.1140/epja/i2018-12611-6.
- [5] Marco Zimmermann. “Particle Rate Studies and Technical Design Development for the P2 Silicon Pixel Tracking Detector”. Doktorarbeit. Universität Mainz, 2019. DOI: 10.25358/OPENSOURCE-2344.
- [6] Ivan Perić. “A novel monolithic pixelated particle detector implemented in high-voltage CMOS technology”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 582.3 (2007), S. 876–885. DOI: 10.1016/j.nima.2007.07.115.
- [7] L. Poley u. a. “Alternative glues for the production of ATLAS silicon strip modules for the Phase-II upgrade of the ATLAS Inner Detector”. In: *Journal of Instrumentation* 11.05 (2016), P05017–P05017. DOI: 10.1088/1748-0221/11/05/p05017.
- [8] Huntsman. *Araldite® 2011 Technical data sheet*. 2021.
- [9] DYMAX® Corporation. *Multi-Cure®*. 2021.
- [10] Jenny Science AG. *Datenblatt LINAX®*. 2021.
- [11] Jenny Science AG. *Datenblatt ROTAX® Rxvp (vacuum pressure)*. 2020.
- [12] Baumer. *Betriebsanleitung OM70 - High Performance Distanzsensoren mit Ethernet-Schnittstelle*. 2021.
- [13] Patrick Riederer. “Calibration of a glueing robot for assembly of the P2 tracking detector”. Bachelorarbeit. Universität Mainz, 2021.
- [14] Lars Steffen Weinstock. *Git-Repository labdev*. Website. zuletzt abgerufen am 26. Januar 2022. URL: <https://gitlab.rlp.net/lweinsto/labdev/-/tree/master>.
- [15] David Anthofer. “Entwicklung eines Pick-and-Place-Systems für den Bau des P2-Spurdetektors”. Bachelorarbeit. Universität Mainz, 2022.
- [16] SMC. *Series Catalog*. 2012.
- [17] Jenny Science AG. *PLC Kabel geschirmt 26 Pol*.
- [18] Leica Microsystems. *Leica DMS1000 Benutzerhandbuch*. 2021.
- [19] NanoFocus AG. *Technische Dokumentation µsurf sensor E 350 HDR*.
- [20] Vishay. *VLMU3500-...-120 Vishay Semiconductors*. 2021.
- [21] Wasser Wissen. *Viskosität*. Website. zuletzt abgerufen am 01. Februar 2022. URL: <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/v/viskositat.htm>.

Abbildungsverzeichnis

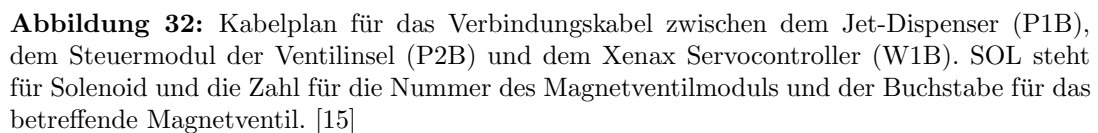
1	Schematische Gliederung des Standardmodells der Teilchenphysik	2
2	Der Weinberg-Winkel $\sin^2 \theta_W$ in Abhängigkeit des Impulsübertrages.	3
3	Feynman Diagramme für die elastische Streuung eines Elektrons an einem Proton.	5
4	Schematische Darstellung des P2-Aufbaus.	6
5	Schematische Darstellung eines Detektormoduls.	7
6	Frontansicht des Kleberoboters.	8
7	Nahaufnahme des Arbeitsbereichs des Kleberoboters.	10
8	Nahaufnahme des Jet-Dispensers-Steuergeräts.	11
9	Nahaufnahme der z-Achse, der Dispenser-Einheit, der Rotationsachse und des Saugnapfes.	11
10	Schaltskizze für das pneumatische System des Kleberoboters.	13
11	Screenshot des WebInterfaces WebMotion [®] des Menüs <i>application-i/o</i>	16
12	Skizze des Vorgangs, wie der Araldite abgesetzt wird.	18
13	Beispielhafte Bestimmung der Fläche der Tropfen und der Anzahl der Satelliten für <i>Araldite[®] 2011</i>	19
14	Fläche der Tropfen in Abhängigkeit des Kolbendruck, des Kartuschendrucks, der On-time, der Anzahl der dosierten Tropfen und des Abstandes	21
15	Verhältnis der Halbachsen der Tropfen in Abhängigkeit des Kolbendruck, des Kartuschendrucks, der On-time, der Anzahl der dosierten Tropfen und des Abstandes	22
16	Anzahl der Satelliten in Abhängigkeit des Kolbendruck, des Kartuschendrucks, der On-time, der Anzahl der dosierten Tropfen und des Abstandes	23
17	Abhängigkeit der Fläche des Tropfens von der Nummer des Tropfens für den <i>Araldite[®] 2011</i> für 100 Tropfen.	24
18	Abhängigkeit der Fläche für unterschiedliche Füllhöhen für den <i>Araldite[®] 2011</i> . Jeder Grafik zeigt ein anderes Parameter-Set. Es wurden 50 Tropfen hintereinander gesetzt. Dargestellt ist die Fläche in Abhängigkeit der Nummer des Tropfens. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	26
19	3D-Darstellung der Rohdaten und der interpolierten Daten für das Parameter-Set 1.	27
20	Projektion der Differenz der interpolierten Daten zum Ebenenfit auf die xy-Ebene und das Höhenprofil der Ebene entlang einer Kante für ein festes y für Tropfen 11 des Parameter-Sets 1A.	30
21	Masse und Volumen der Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 2A.	31
22	Kraft, die auf den Arm der z-Achse wirkt, aufgetragen gegen die Zeit für Test 1.	33
23	Darstellung der durch den gleitenden Mittelwert geglätteten Daten des Krafttests 1.	34
24	Skizze von den Klebemustern für den <i>Araldite[®]</i>	34
25	Kraft der z-Achse aufgetragen gegen die Zeit. Der Bereich des Ablösens wird vergrößert dargestellt.	36
26	Kraft der z-Achse gegen die Zeit (Stufenhaftes Ablösen).	37
27	Abhängigkeit der Fläche des Tropfens, für die Nummer des Tropfens für den <i>DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621</i> . Es wurden 100 Tropfen für das initiale Parameter-Set abgeschossen.	38
28	3D-Darstellung der Rohdaten und die Projektion der z-Werte auf die xy-Ebene für das Parameter-Set 7.	40
29	Projektion der Differenz der interpolierten Daten zum Ebenenfit auf die xy-Ebene für Tropfen 1 des Parameter-Sets D2.	40
30	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 3D.	41
31	Skizze von der Anordnung der LEDs und der Testobjekte.	43

32	Kabelplan für das Verbindungskabel zwischen dem Jet-Dispenser, dem Steuermodul der Ventilinsel und dem Xenax Servocontroller.	53
33	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 1A. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	54
34	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 2A. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	54
35	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 3A. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	55
36	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 4A. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	55
37	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 5A. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	56
38	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 6A. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	56
39	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 1D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient ρ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	57
40	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 2D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	57
41	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 3D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	58
42	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 4D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	58

43	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 5D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	59
44	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 6D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	59
45	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 7D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	60
46	Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 7D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.	60
47	Screenshot des Web-Interfaces WebMotion [®] des Menüs <i>application-program</i> . .	61
48	Screenshot des Web-Interfaces WebMotion [®] des Menüs <i>application-index</i> zur Einstellung des Index 1	61
49	Screenshot des Web-Interfaces WebMotion [®] des Menüs <i>application-index</i> zur Einstellung des Index 2	62
50	Screenshot des Web-Interfaces WebMotion [®] des Menüs <i>move axis-motion diagram</i>	62

Tabellenverzeichnis

1	Parameter für die LINAX [®] Linearmotor-Achsen und die ROTAX [®] Drehmotor-Achse der Jenny Science AG.	9
2	Aufzählung der Parameter-Sets, die zur Massenbestimmung der Tropfen vom <i>Araldite[®] 2011</i> ausgewählt wurden.	25
3	Gewichteter Mittelwert der Masse sowie der Fläche eines Tropfens vom <i>Araldite[®] 2011</i>	30
4	Definition der Indizes 1 und 2.	32
5	Überblick der durchgeführten Krafttests für den <i>Araldite[®] 2011</i>	35
6	Mittelwerte der benötigten Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für den <i>Araldite[®] 2011</i>	35
7	Aufzählung der Parameter-Sets, die zur Massenbestimmung der Tropfen vom <i>DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621</i> ausgewählt wurden.	38
8	Gewichteter Mittelwert der Masse sowie der Fläche eines Tropfens vom <i>DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621</i>	41
9	Überblick der durchgeführten Krafttests für den <i>DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621</i>	43
10	Mittelwerte der benötigten Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für den <i>DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621</i>	43
11	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 1.	63
12	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 2.	63
13	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 3.	63
14	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 4.	64
15	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 5.	64
16	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 6.	64
17	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 7.	65
18	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 8.	65
19	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 9.	65
20	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 10.	66
21	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 12.	66
22	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 13.	66
23	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 14.	67
24	Kraft zum Ablösen der Glasplättchen für Testreihe 15.	67



B Grafiken

B.1 Statistik der Massen

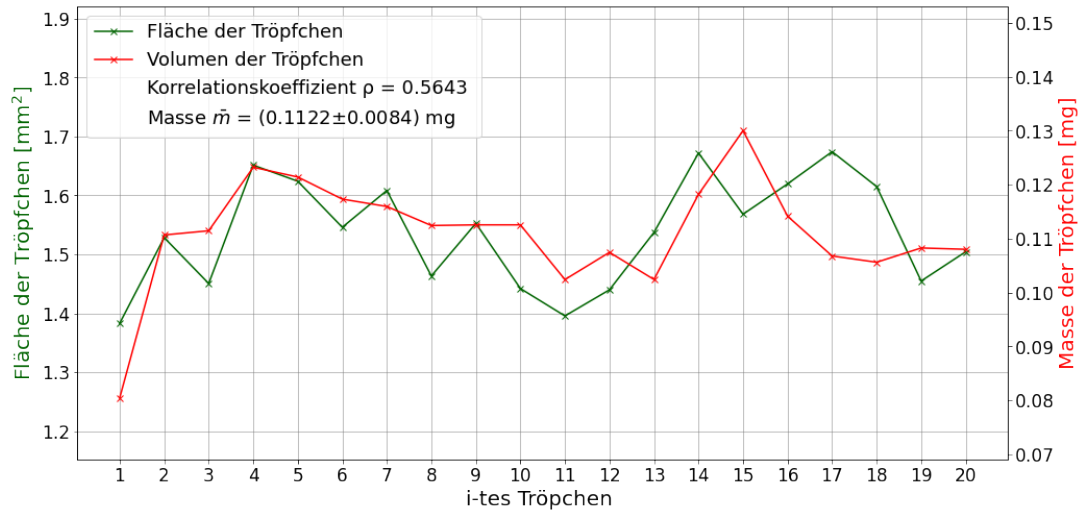


Abbildung 33: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 1A. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

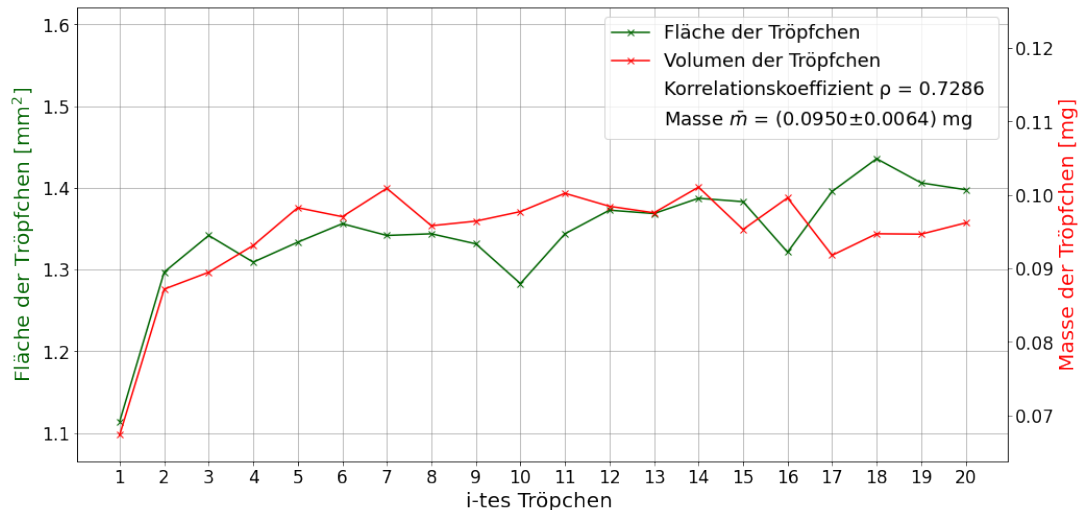


Abbildung 34: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 2A. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

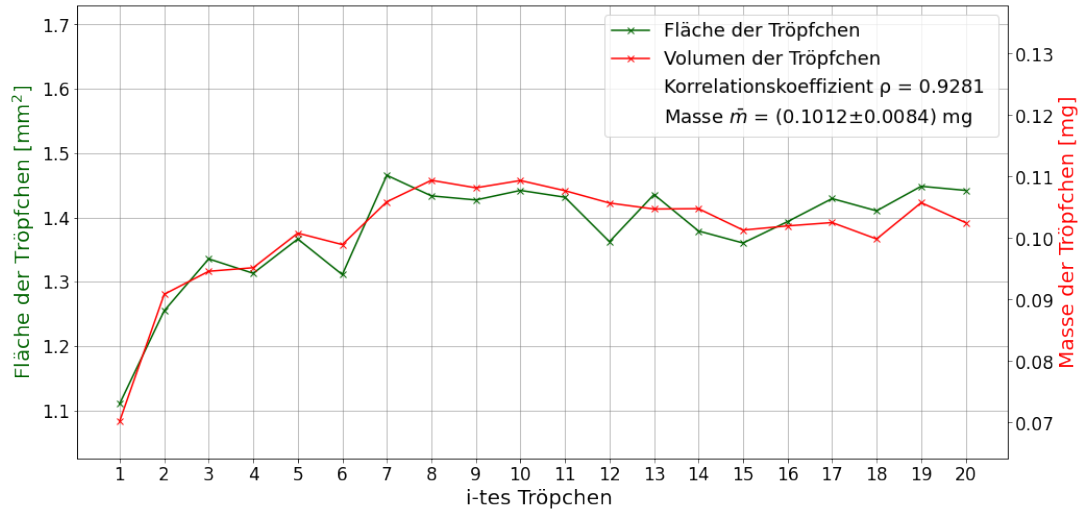


Abbildung 35: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 3A. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

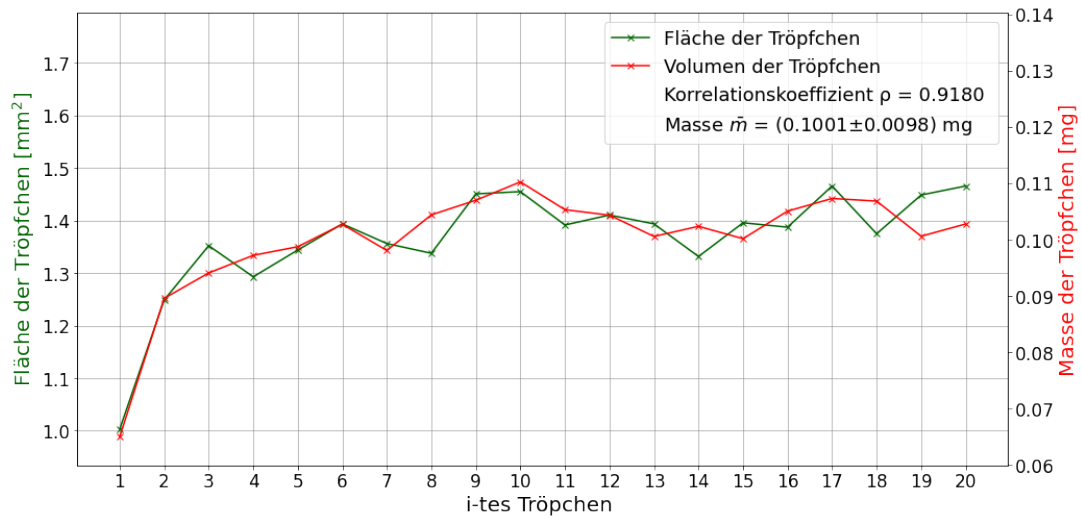


Abbildung 36: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 4A. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

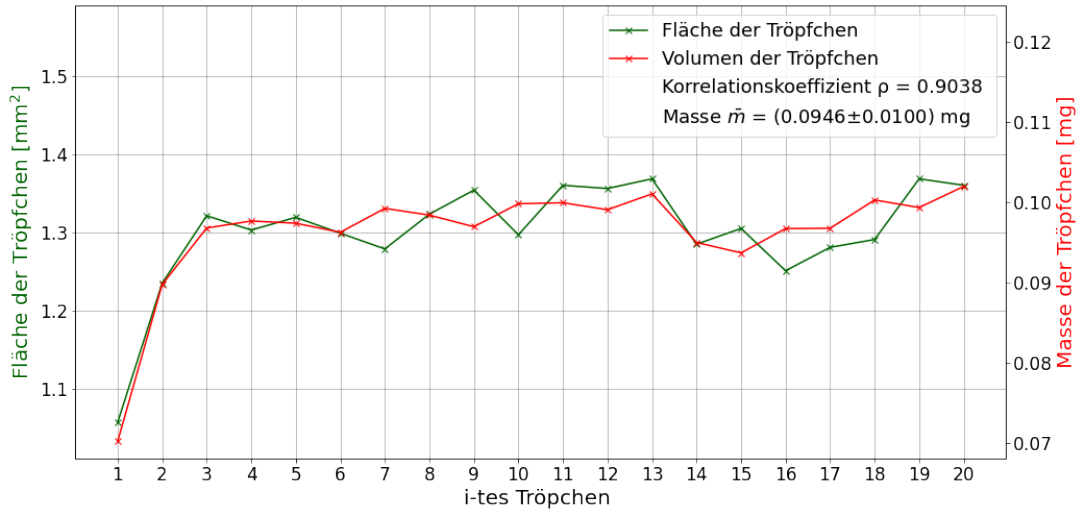


Abbildung 37: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 5A. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

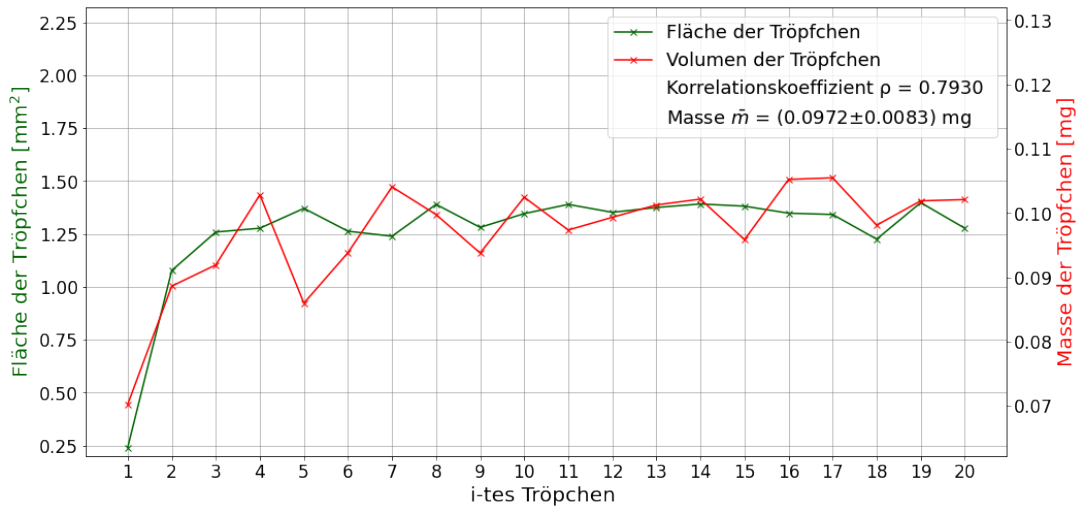


Abbildung 38: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 6A. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

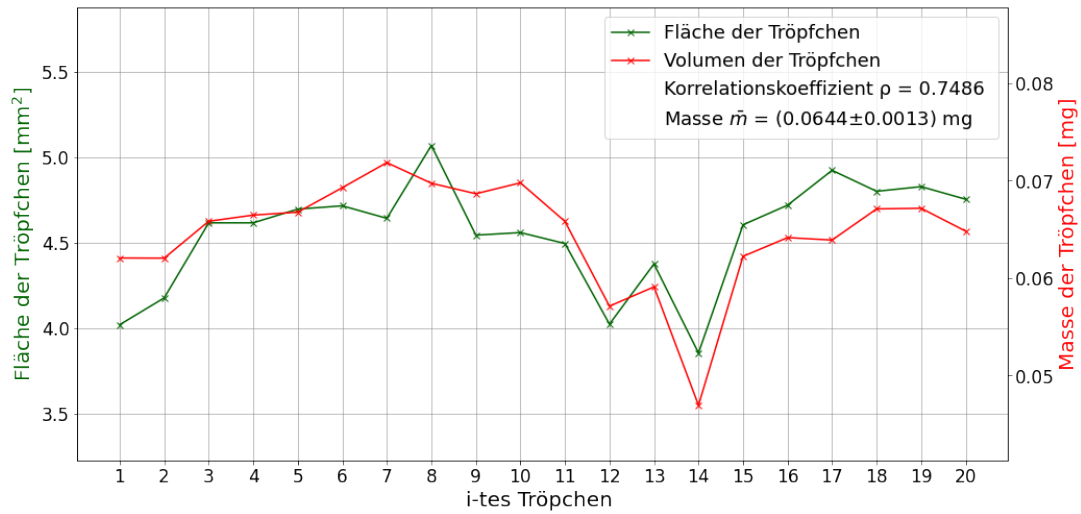


Abbildung 39: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 1D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient ρ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

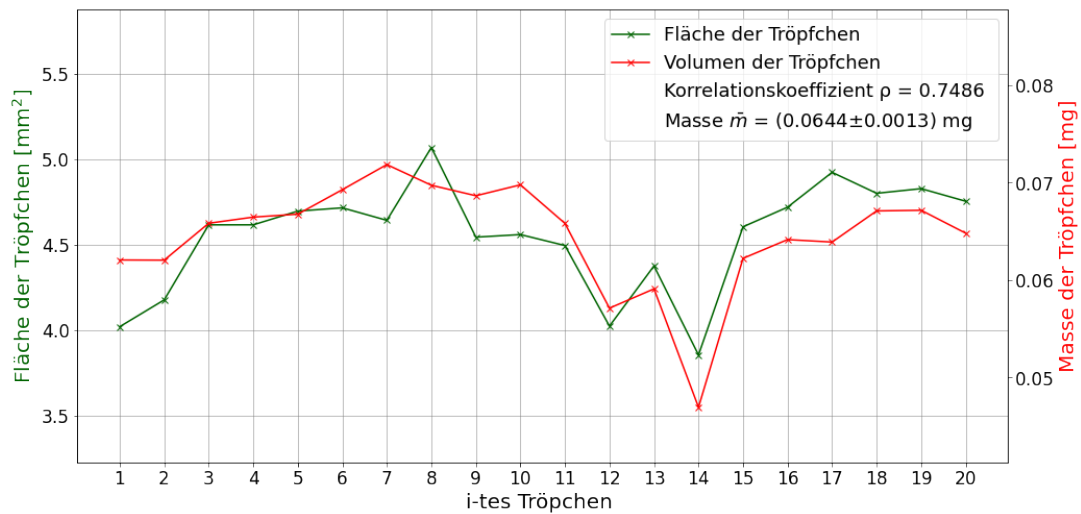


Abbildung 40: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 2D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

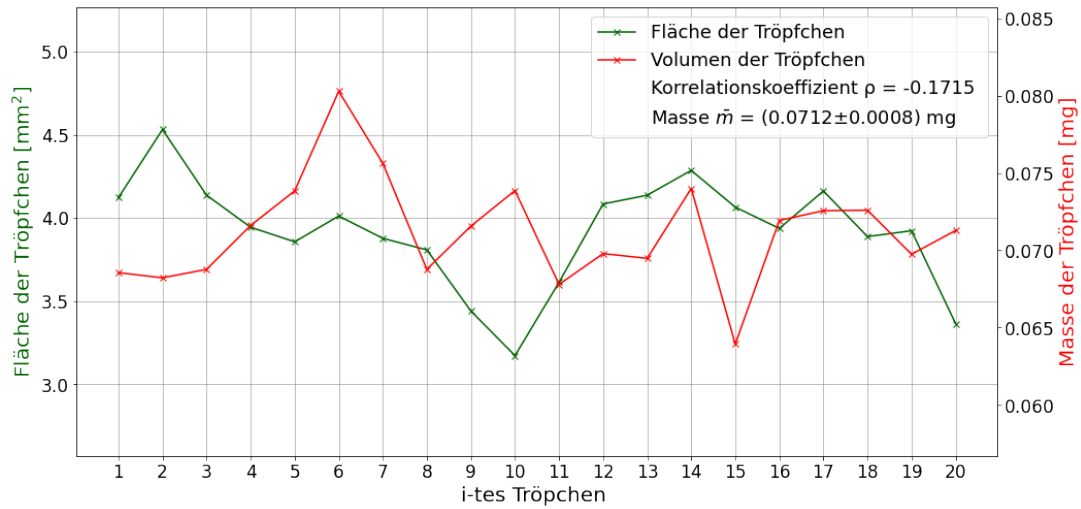


Abbildung 41: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 3D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

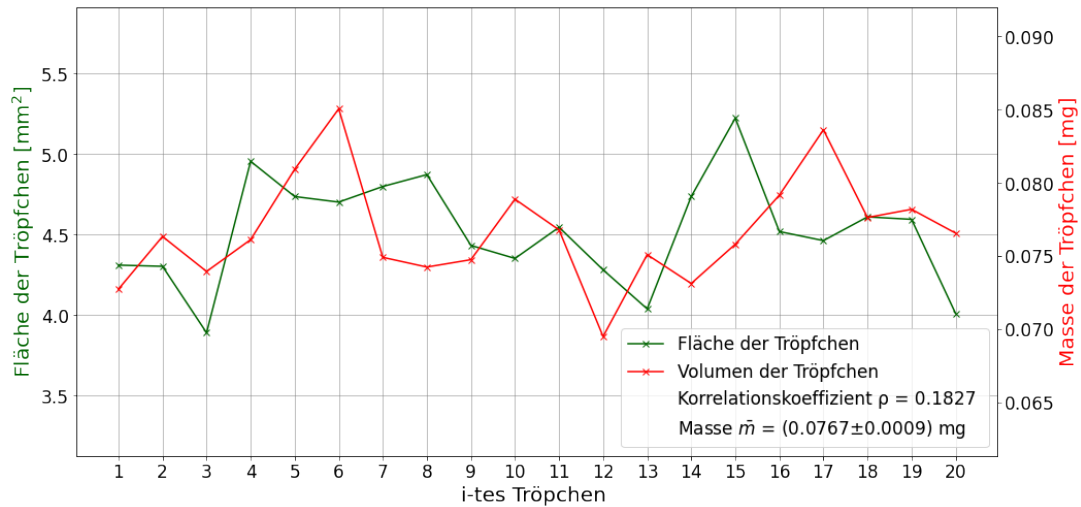


Abbildung 42: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 4D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

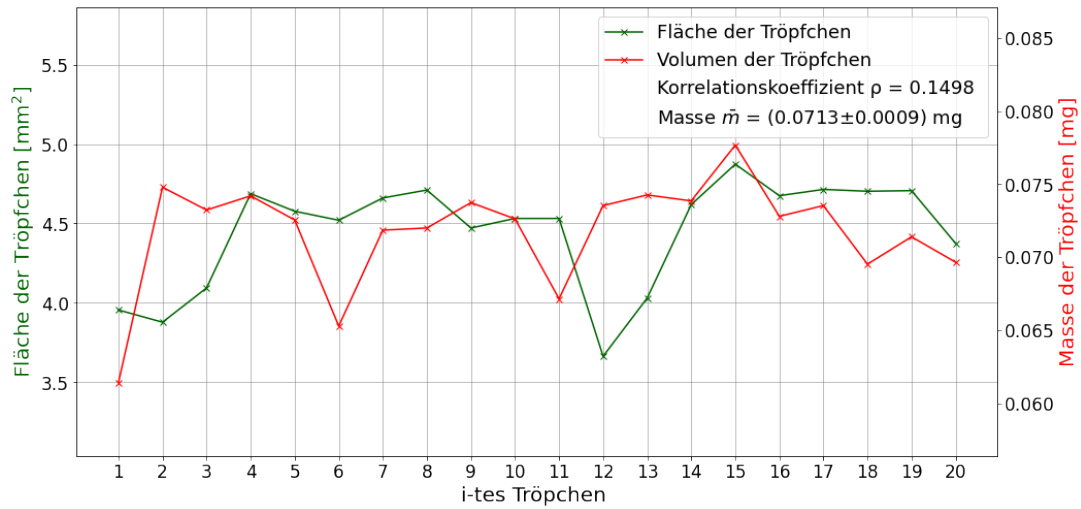


Abbildung 43: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 5D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

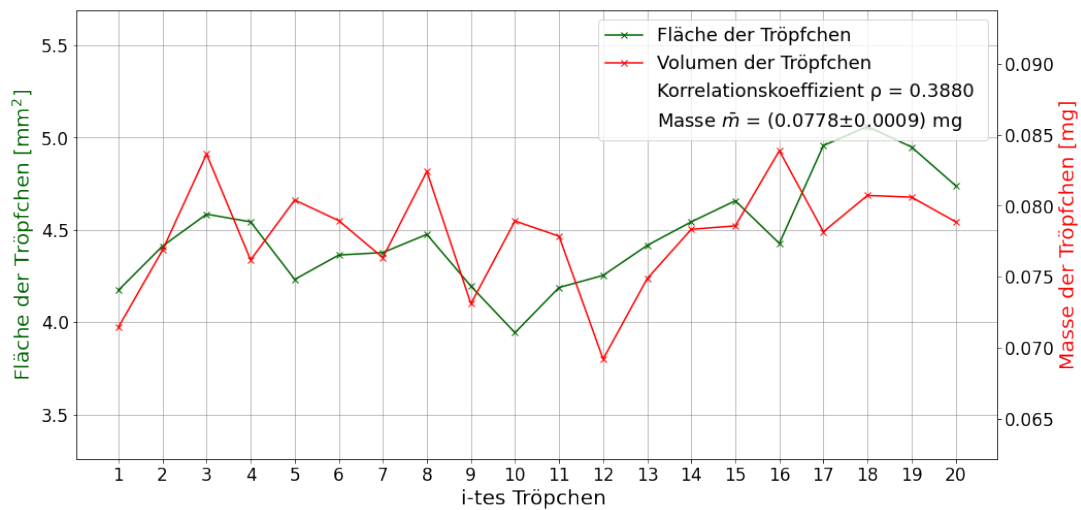


Abbildung 44: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 6D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

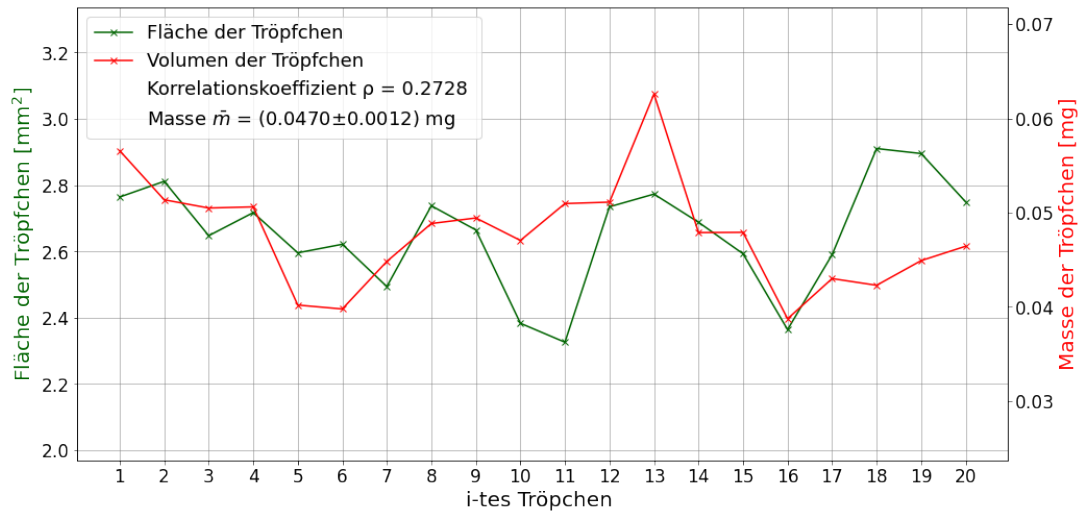


Abbildung 45: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 7D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

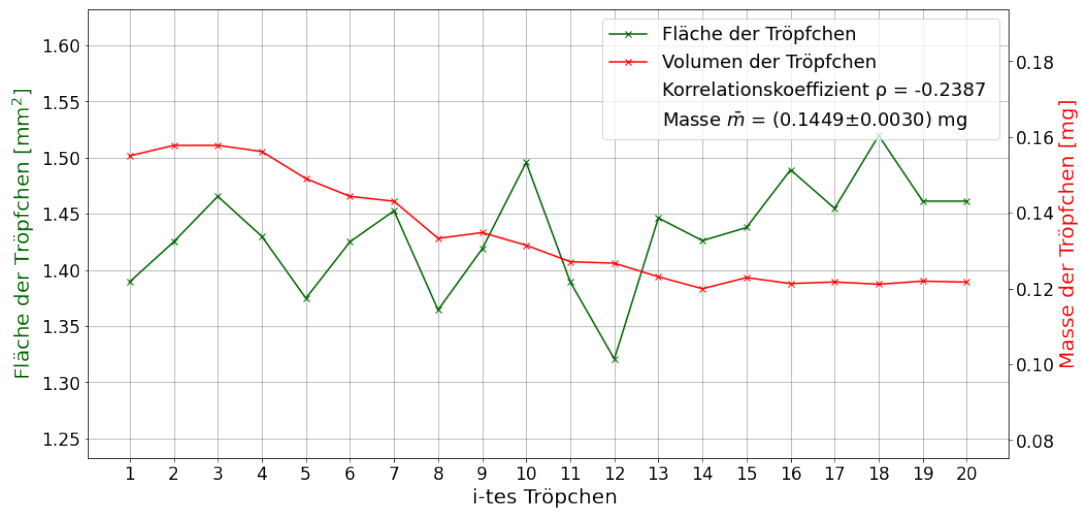


Abbildung 46: Masse und Volumen der Tropfen für alle 20 Tropfen der Testreihe mit Parameter-Set 7D. Zusätzlich angegeben ist der Korrelationskoeffizient $\rho_{M,F}$ zwischen der Masse und der Fläche. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide y-Achsen jeweils auf den Mittelwert und die Standardabweichung normiert. Die Fehlerbalken werden aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt.

C Screenshots vom Web-Interface WebMotion®



Abbildung 47: Screenshot des Web-Interfaces WebMotion®. Zusehen ist das Menü zur Einstellung des Programms. Angezeigt wird Programm 3.



Abbildung 48: Screenshot des Web-Interfaces WebMotion®. Zusehen ist das Menü zur Einstellung der Indices. Angezeigt wird Index 1.



Abbildung 49: Screenshot des Web-Interfaces WebMotion®. Zusehen ist das Menü zur Einstellung der Indices. Angezeigt wird Index 2.

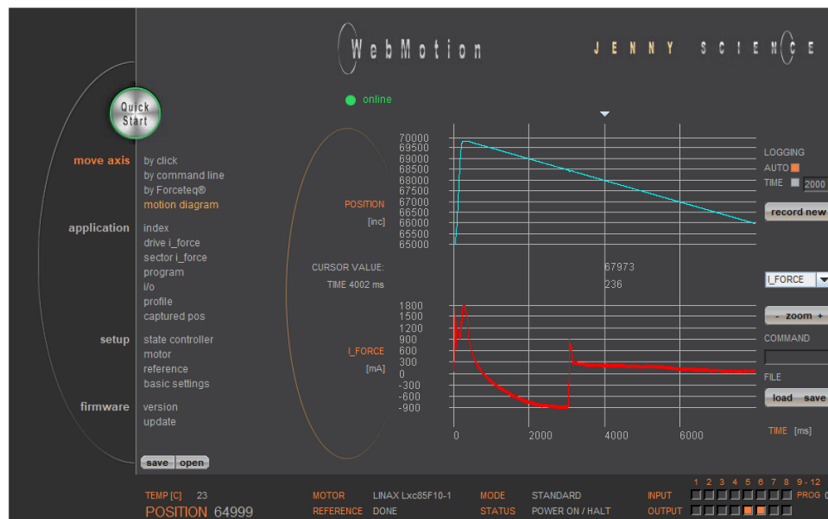


Abbildung 50: Screenshot des Web-Interfaces WebMotion® des Unterpunktes *motion diagram*. Damit werden die Daten dargestellt, die aufgenommen werden. Zusehen ist die Kurve, die bei einem Krafttest entsteht.

D Tabellen

D.1 Statistik der Krafttests

Tabelle 11: Kraft der Krafttests für Testreihe 1. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 1	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test1.1	-4.7	± 0.3	✓	×
Test1.2	-1.28	± 0.3	✓	×
Test1.3	-4.15	± 0.3	✓	×
Test1.4	-4.18	± 0.3	✓	×
Test1.5	-4.23	± 0.3	✓	×
Test1.6	-3.85	± 0.3	✓	×
Test1.7	-2.95	± 0.3	✓	×
Test1.8	-1.95	± 0.3	✓	×
Test1.9	-3.8	± 0.3	✓	×
Test1.10	-3.95	± 0.3	✓	×

Tabelle 12: Kraft der Krafttests für Testreihe 2. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 2	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test2.1	-4.08	± 0.3	✓	×
Test2.2	-4.67	± 0.3	×	✓
Test2.3	-3.57	± 0.3	✓	×
Test2.4	-4.15	± 0.3	✓	×
Test2.5	-4.0	± 0.3	✓	×
Test2.6	-4.48	± 0.3	×	✓
Test2.7	-4.63	± 0.3	×	✓
Test2.8	-4.6	± 0.3	✓	×
Test2.9	-3.86	± 0.3	✓	×
Test2.10	-4.57	± 0.3	✓	×

Tabelle 13: Kraft der Krafttests für Testreihe 3. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 3	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test3.1	-3.89	± 0.3	✓	×
Test3.2	-2.22	± 0.3	✓	×
Test3.3	-4.17	± 0.3	✓	×
Test3.4	-5.01	± 0.3	×	✓
Test3.5	-4.97	± 0.3	×	✓
Test3.6	-5.06	± 0.3	×	✓
Test3.7	-4.94	± 0.3	×	✓
Test3.8	-4.95	± 0.3	×	✓
Test3.9	-5.0	± 0.3	×	✓
Test3.10	-4.3	± 0.3	✓	×

D TABELLEN

Tabelle 14: Kraft der Krafttests für Testreihe 4. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 4	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test4.1	-4.98	± 0.3	×	✓
Test4.2	-4.07	± 0.3	✓	×
Test4.3	-4.88	± 0.3	×	✓
Test4.4	-5.04	± 0.3	×	✓
Test4.5	-4.98	± 0.3	×	✓
Test4.6	-4.98	± 0.3	×	✓
Test4.7	-5.04	± 0.3	×	✓
Test4.8	-4.96	± 0.3	×	✓
Test4.9	-4.95	± 0.3	×	✓
Test4.10	-4.87	± 0.3	×	✓

Tabelle 15: Kraft der Krafttests für Testreihe 5. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 5	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test5.1	-4.86	± 0.3	×	✓
Test5.2	-4.94	± 0.3	×	✓
Test5.3	-4.94	± 0.3	×	✓
Test5.4	-4.92	± 0.3	×	✓
Test5.5	-4.93	± 0.3	×	✓
Test5.6	-4.9	± 0.3	×	✓
Test5.7	-4.95	± 0.3	×	✓
Test5.8	-4.99	± 0.3	×	✓
Test5.9	-4.94	± 0.3	×	✓
Test5.10	-4.97	± 0.3	×	✓

Tabelle 16: Kraft der Krafttests für Testreihe 6. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 6	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test6.1	-4.92	± 0.3	×	✓
Test6.2	-4.84	± 0.3	×	✓
Test6.3	-4.98	± 0.3	×	✓
Test6.4	-5.02	± 0.3	×	✓
Test6.5	-5.01	± 0.3	×	✓
Test6.6	-4.99	± 0.3	×	✓
Test6.7	-4.95	± 0.3	×	✓
Test6.8	-4.97	± 0.3	×	✓
Test6.9	-4.94	± 0.3	×	✓
Test6.10	-4.92	± 0.3	×	✓

D TABELLEN

Tabelle 17: Kraft der Krafttests für Testreihe 7. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 7	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test7.1	-3.9	± 0.3	✓	×
Test7.2	-4.13	± 0.3	✓	×
Test7.3	-3.77	± 0.3	✓	×
Test7.4	-4.83	± 0.3	×	✓
Test7.5	-4.79	± 0.3	×	✓
Test7.6	-2.26	± 0.3	✓	×
Test7.7	-4.82	± 0.3	×	✓
Test7.8	-2.56	± 0.3	✓	×
Test7.9	-3.25	± 0.3	✓	×
Test7.10	-4.43	± 0.3	✓	×

Tabelle 18: Kraft der Krafttests für Testreihe 8. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 8	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test8.1	-3.16	± 0.3	✓	×
Test8.2	-2.87	± 0.3	✓	×
Test8.3	-3.85	± 0.3	✓	×
Test8.4	-4.77	± 0.3	×	✓
Test8.5	-3.68	± 0.3	✓	×
Test8.6	-3.24	± 0.3	✓	×
Test8.7	-4.44	± 0.3	✓	×
Test8.8	-3.06	± 0.3	✓	×
Test8.9	-3.77	± 0.3	✓	×
Test8.10	-1.8	± 0.3	✓	×

Tabelle 19: Kraft der Krafttests für Testreihe 9. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 9	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test9.1	-1.25	± 0.3	✓	×
Test9.2	-4.8	± 0.3	×	✓
Test9.3	-4.76	± 0.3	×	✓
Test9.4	-0.70	± 0.3	✓	×
Test9.5	-2.69	± 0.3	✓	×
Test9.6	-1.91	± 0.3	✓	×
Test9.7	-3.94	± 0.3	✓	×
Test9.8	-1.9	± 0.3	✓	×
Test9.9	-4.57	± 0.3	✓	×
Test9.10	-3.72	± 0.3	✓	×

D TABELLEN

Tabelle 20: Kraft der Krafttests für Testreihe 10. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 10	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test10.1	-1.69	± 0.3	✓	×
Test10.2	-3.16	± 0.3	✓	×
Test10.3	-2.49	± 0.3	✓	×
Test10.4	-2.73	± 0.3	✓	×
Test10.5	-3.2	± 0.3	✓	×
Test10.6	-2.48	± 0.3	✓	×
Test10.7	-0.98	± 0.3	✓	×
Test10.8	-0.98	± 0.3	✓	×
Test10.9	-2.46	± 0.3	✓	×

Tabelle 21: Kraft der Krafttests für Testreihe 12. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 12	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test12.1	-4.79	± 0.3	×	✓
Test12.2	-4.88	± 0.3	×	✓
Test12.3	-4.88	± 0.3	×	✓
Test12.4	-4.88	± 0.3	×	✓
Test12.5	-4.88	± 0.3	×	✓
Test12.6	-4.81	± 0.3	×	✓
Test12.7	-3.24	± 0.3	✓	×
Test12.8	-2.08	± 0.3	✓	×
Test12.9	-4.8	± 0.3	✓	×
Test12.10	-4.98	± 0.3	×	✓

Tabelle 22: Kraft der Krafttests für Testreihe 13. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 13	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test13.1	-1.01	± 0.3	✓	×
Test13.2	-2.47	± 0.3	✓	×
Test13.3	-1.55	± 0.3	✓	×
Test13.4	-4.0	± 0.3	✓	×
Test13.5	-1.33	± 0.3	✓	×
Test13.6	-1.62	± 0.3	✓	×
Test13.7	-4.39	± 0.3	✓	×
Test13.8	-2.73	± 0.3	✓	×
Test13.9	-0.72	± 0.3	✓	×
Test13.10	-1.37	± 0.3	✓	×

D TABELLEN

Tabelle 23: Kraft der Krafttests für Testreihe 14. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 14	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test14.1	-0.95	± 0.3	✓	×
Test14.2	-2.31	± 0.3	✓	×
Test14.3	-0.8	± 0.3	✓	×
Test14.4	-3.58	± 0.3	✓	×
Test14.5	-2.81	± 0.3	✓	×
Test14.6	-1.12	± 0.3	✓	×
Test14.7	-1.1	± 0.3	✓	×
Test14.8	-0.95	± 0.3	✓	×
Test14.9	-0.83	± 0.3	✓	×

Tabelle 24: Kraft der Krafttests für Testreihe 15. Angegeben wird, ob sich das Plättchen gelöst hat. Wenn es sich nicht gelöst hat, ist der Vakuumgreifer abgegangen

Test 15	F [N]	ΔF [N]	Glasplättchen hat sich gelöst	Glasplättchen hat sich nicht gelöst
Test15.1	-1.08	± 0.01	✓	×
Test15.2	-1.07	± 0.01	✓	×
Test15.3	-1.34	± 0.01	✓	×
Test15.4	-0.98	± 0.01	✓	×
Test15.5	-1.98	± 0.01	✓	×
Test15.6	-2.64	± 0.01	✓	×
Test15.7	-1.73	± 0.01	✓	×
Test15.8	-2.55	± 0.01	✓	×
Test15.9	-1.69	± 0.01	✓	×
Test15.10	-1.81	± 0.01	✓	×

E Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich während meiner Arbeit unterstützt haben.

Allen voran möchte ich mich bei Prof. Niklaus Berger für die Aufnahme in seine Arbeitsgruppe bedanken und die Zeit und Hilfe, die er mir bot.

Ich möchte auch meinen Dank an die Arbeitsgruppe aussprechen, die mir hilfreiche Antworten und Anmerkungen während der Meetings gegeben hat. Hier möchte ich vor allem Lars Steffen Weinstock danken, der mich während dieser Zeit betreut hat, und Peter Bernhard, der mir alle Fragen zum Roboter beantworten konnte.

Außerdem möchte ich noch Tobias Sparmann für das Korrekturlesen meiner Arbeit danken, sowie Simon Fröhlich, der mir alle Fragen zum Programmieren beantwortet hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei David Anthofer bedanken, mit ihm wurde es im Labor nie langweilig. Zudem möchte ich mich bei ihm bedanken, da er mir die C++-Programme für die Klebetests geschrieben hat.

Zu guter Letzt danke ich meinen Freunden und meiner Familie, die mich während dieser Zeit unterstützt und Mut zugesprochen haben.