

Klebetests für den P2-Spurdetektor

Robin Stoklaßa

08.07.2024

Bachelor of Education

Johannes Gutenberg Universität Mainz

Matrikel-Nr.: 2772202

Fach: Physik

Erstprüfer: Prof. Dr. Niklaus Berger

Zweitprüferin: Prof. Dr. Lucia Masetti



JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ

Erklärung

gemäß § 18 Abs. 6 und § 15 Abs. 8 der Ordnung für die Prüfung im lehramtsbezogenen Bachelorstudiengang an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (POLBA, ggf. POLBA-Dijon), bzw. § 18 Abs. 5 und § 15 Abs. 10 der Ordnung für die Prüfung im Masterstudiengang für das Lehramt an Gymnasien (POLMA, ggf. POLMA Dijon, iPOLMA-Dijon).

Hiermit erkläre ich, Robin Johannes Stoklaß (Matr.-Nr.: 2772202),
dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel (einschließlich elektronischer Medien und Online-Quellen) benutzt habe. Mir ist bewusst, dass ein Täuschungsversuch oder ein Ordnungsverstoß vorliegt, wenn sich diese Erklärung als unwahr erweist. § 18 Absatz 3 und 4 der o. g. Ordnungen gilt in diesem Fall entsprechend.

G1137 Schöneck, 08.07.2024
Ort, Datum

Robin Stoklaß
Unterschrift

Auszug aus § 18 o. g. Ordnungen: Versäumnis, Rücktritt, Täuschung, Ordnungsverstoß

(3) Versucht die Kandidatin oder der Kandidat das Ergebnis einer Prüfung durch Täuschung oder Benutzung nicht zugelassener Hilfsmittel zu beeinflussen, gilt die betreffende Prüfungsleistung als mit „nicht ausreichend“ (5,0) absolviert (...)

(4) Die Kandidatin oder der Kandidat kann innerhalb einer Frist von einem Monat verlangen, dass Entscheidungen nach Absatz 3 Satz 1 und 2 vom jeweils zuständigen Prüfungsausschuss überprüft werden. Belastende Entscheidungen sind der Kandidatin oder dem Kandidaten unverzüglich schriftlich mitzuteilen, zu begründen und mit einer Rechtsbehelfsbelehrung zu versehen. Der Kandidatin oder dem Kandidaten ist vor einer Entscheidung Gelegenheit zur Äußerung zu geben.

Zusammenfassung

Im Zuge des P2-Experiments [5] soll der elektronenschwache Mischungswinkel für Impulsüberträge bei niedriger Energieskala mit einer bisher unerreichten Genauigkeit bestimmt werden. Der elektronenschwache Mischungswinkel wird auch Weinbergwinkel genannt und ist ein freier Parameter des Standardteilchenmodells. Dafür werden polarisierte Elektronen an einem unpolarisiertem Wasserstofftarget elastisch gestreut. Zur Bestimmung des Weinbergwinkels muss auch der Impulsübertrag der gestreuten Elektronen bestimmt werden. Hierfür wiederum müssen die Trajektorien in einem starken Magnetfeld gemessen werden, wofür ein Spurdetektor gebaut werden soll. Dieser besteht aus High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors, kurz HV-MAPS [5], welche auf dünne Polyimidstreifen geklebt werden sollen [22]. Zum Kleben wird ein Kleberoboter verwendet.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Klebestrategie für den UV-Kleber DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 zu entwickeln. Bisher wird der Zwei-Komponenten-Kleber Araldite[®] 2011 verwendet, dieser weist jedoch große Nachteile wie eine langsame Härtezeit und eine kurze Tropfzeit von 45-60 Minuten auf[13]. Bei früheren Tests zeigte sich der Araldite[®] 2011 als leichter dosierbar und deutlich stärker als der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621. Bei diesen Tests wurde ein Jet-Dispenser für den Kleberoboter genutzt, wobei jedoch festgestellt wurde, dass der Kleber schwer zu dosieren ist [2]. Deswegen wurde der Jet-Dispenser später gegen einen Hochpräzisionsdispenser ausgetauscht und weitere Kleber aus der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Reihe angeschafft, welche eine größere Viskosität aufweisen als der Basis Kleber der Reihe.

In den Tests, in denen Parameter gesucht und die Klebefähigkeiten der Kleber geprüft wurden, zeigte sich, dass vor allem der Kleber DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT als Alternative für den Araldite[®] 2011 in Frage kommt. Der einzige Nachteil an dem Kleber und den gefundenen Einstellungen ist eine große Menge Kleber pro Tropfen, welche zu einer dicken Klebschicht führt. Dieses zusätzliche Material kann negative Einflüsse auf die Präzision der Impulsmessung im P2-Experiment haben.

Während den Tests wurden weitere Erkenntnisse gesammelt, beispielsweise wurden Probleme mit dem Distanzsensor des Kleberoboters identifiziert, welche durch die Verwendung einer schwarzen Oberfläche gelöst werden konnten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Das Standardmodell	5
2.1	Marieteilchen	5
2.2	Kraftteilchen	6
2.3	Elektronenschwacher Mischungswinkel	6
3	Das P2-Experiment	8
3.1	Bestimmung des Weinbergwinkels	8
3.2	Der Experimentaufbau	10
3.3	Der Spurendetektor	11
4	Der Klebroboter	12
4.1	Überblick	12
4.2	Die Motoren und Achsen	12
4.3	Die Werkzeuge des Roboters	14
4.4	Der Dosierer	15
4.5	Die Kleber	16
4.6	Der Arbeitsbereich	17
5	Bestimmung von Klebparametern	17
5.1	Die Parameter	18
5.1.1	Interne Parameter	19
5.1.2	Externe Parameter und andere Faktoren	20
5.2	Beschreibung des Testverfahrens	21
5.3	Ergebnisse der Tests mit Araldite [®] 2011	25
5.4	Ergebnisse der Tests mit DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621	29
5.5	Diskussion der Ergebnisse und Beobachtungen	31
5.5.1	Analyse der Tests mit Araldite [®] 2011	31
5.5.2	Analyse der Tests mit DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621	36
5.5.3	Massenmessung und Vergleich	38
5.6	Mögliche zukünftige Tests	39
6	Krafttests	39
6.1	Vorgehen und Probleme	39
6.1.1	Aufgetretene Schwierigkeiten	42
6.2	Ergebnisse	46
6.3	Diskussion der Ergebnisse und Beobachtungen	48
6.4	Vergleich und Ausblick	51
7	Fazit	52

A	Abbildungen	59
B	Tabellen	62
C	Danksagung	66

1 Einleitung

Das P2-Experiment hat das Ziel, bei der Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik, kurz SM, zu helfen und nach Abweichungen von dem und neuer Physik außerhalb des SM zu suchen. Das SM ist die beste physikalische Beschreibung des Mikrokosmos. Es weißt jedoch noch viele Lücken auf, so wird beispielsweise die Gravitation in dem SM nicht berücksichtigt. Deswegen wird das Teilchenmodell bis heute getestet, wobei viele Vorhersagen aus der Theorie im Experiment bestätigt werden konnten. Das P2-Experiment hat das Ziel, den elektroschwachen Mischungswinkel für niedrige Energiebereiche mit einer möglichst großen Genauigkeit zu ermitteln. Der elektroschwache Mischungswinkel, auch Weinbergwinkel genannt, ist ein Parameter des SM, welcher nicht durch das SM selbst hervorgesagt werden kann. Er taucht in verschiedenen Zusammenhängen des SM auf, wodurch eine genaue Bestimmung über einen großen Energiebereich dazu beiträgt, die Gültigkeit des SM weiter zu bestätigen und dabei helfen kann, dieses noch zu erweitern. Um den Weinbergwinkel zu bestimmen, sollen polarisierte Elektronen an einem unpolarisierten flüssigen Wasserstofftarget unter geringem Impulsübertrag gestreut werden. Dabei wird die Polarität des Elektronenstrahls ständig geändert, wodurch dank der Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung eine Asymmetrie entsteht, die gemessen werden kann.

Um eine ausreichend hohe Präzision zu erreichen, müssen 10^{18} Elektronen gestreut und vermessen werden [5]. Selbst mit einem Elektronenstrahl mit einem Strom von 150 μV dauert dies 10^4 Stunden. Wegen dem extremen zeitlichen Aufwand, der dafür nötig ist, soll in Mainz der MESA (Mainz Energy-Recovering Superconducting Accelerator) gebaut werden, welcher auch für andere Experimente zur Verfügung stehen soll. Da zur Bestimmung des Weinbergwinkels auch der genaue Impulsübertrag der Elektronen bekannt sein muss, muss die Trajektorie der Elektronen in einem starken Magnetfeld gemessen werden. Hierfür soll ein Spurdetektor angefertigt werden, welcher aus acht Modulen mit insgesamt 4320 "High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors" (HV-MAPS), besteht [5]. Die HV-MAPS sollen möglichst einheitlich und mit hoher Präzision auf Polyimidstreifen geklebt werden. Für den Klebevorgang wurde ein Kleberoboter gebaut, sowie nach geeigneten Klebern und Klebestrategien gesucht. Der Kleber Araldite[®] 2011 hat sich als Standardkleber eingebürgert, weist jedoch einige Nachteile, beispielsweise eine lange Aushärungszeit, auf, weshalb nach Alternativen gesucht wurde. Hierbei wurde der UV-Kleber DYMAX[®] Multi-Cure[®] und insbesondere das Modell DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 als eine gute Alternative erkannt [1].

Diese Bachelorarbeit handelt von der Suche nach einer Klebestrategie für das Kleben der HV-MAPS. Das grundlegende Ziel hierbei besteht daraus, gute Klebe- und Härteparameter für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] zu finden, mit denen es möglich sein soll, die HV-MAPS möglichst stabil mit einer gleichbleibenden Menge Kleber zu befestigen. Diese Strategie soll mit einer Klebestrategie für den Araldite[®] 2011 verglichen werden. Solche Tests wurden bereits vorher, beispielsweise von Jana Weyrich [2], durchgeführt. Seitdem wurde der Kle-

beroboter teilweise umgebaut, wodurch die gefundenen Parametersets nicht mehr funktionieren. Somit ist das Ziel dieser Bachelorarbeit, neue Parameter zu finden. Darüber hinaus werden zusätzliche Krafttests für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] ausgeführt. Es werden auch bisher nicht getestete Untervarianten des DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 betrachtet.

2 Das Standardmodell

2.1 Materieteilchen

Im Standardmodell (SM) existieren 12 Materieteilchen. Da sie alle einen Spin von $\frac{1}{2}$ aufweisen, handelt es sich dabei um Fermionen. Jegliche sichtbare Materie des Universums besteht aus diesen Teilchen. Sie sind aufgeteilt in zwei Gruppen, die Gruppe der Leptonen und die Gruppe der Quarks. Des Weiteren können die Materieteilchen einer von drei Familien zugeordnet werden. Die Struktur ist in Abbildung 1 zu sehen. Die Teilchen aus den Familien II und III haben signifikant höhere Massen als die Teilchen aus der Familie I. Teilchen aus höheren Familien sind in der Lage, in die leichteren Teilchen der niedrigeren Familien zu zerfallen. Da dieser Zerfallprozess ständig stattfindet, besteht die sichtbare Materie heutzutage nahezu ausschließlich aus den Teilchen der ersten Familie.

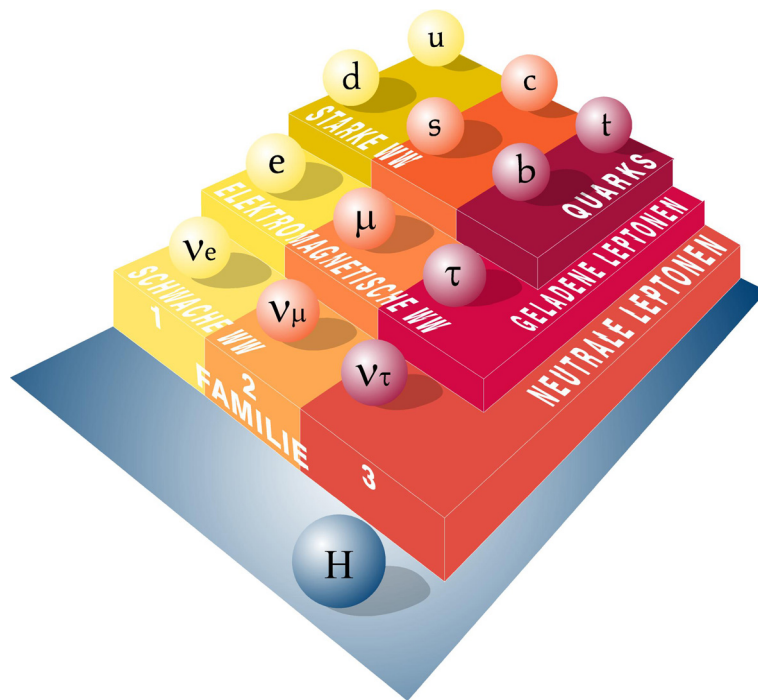


Abbildung 1: Elementare Fermionen im SM [3].

Die Quarks weisen eine elektrische Ladung sowie eine starke Farbladung auf. Es existieren die Up- und Down-Quarks in Familie I, die Charm- und Strange-Quarks in Familie II sowie die Top- und Bottom-Quarks in Familie III. Zu den Leptonen gibt es in jeder Familie ein elektrisch neutrales und ein negativ geladenes Elementarteilchen. In der ersten Familie befinden sich das Elektron und das zugehörige Elektron-Neutrino. In Familie II findet sich das Myon und das Myon-Neutrino und in Familie III befindet sich das Tau und das Tau-Neutrino. Des Weiteren gibt es zu allen Elementarteilchen Antiteilchen mit gleicher Masse aber entgegengesetzter elektrischer und Farbladung.

2.2 Kraftteilchen

Neben den Materieteilchen gibt es Kraftteilchen, Bosonen mit ganzzahligem Spin. Dadurch, dass Materieteilchen diese Kraftteilchen austauschen, wirken zwischen ihnen die Grundkräfte, welche im SM bekannt sind. Hierbei betrachten wir vier Vektorbosonen, welche einen Spin von 1 aufweisen, sowie das Higgs als Skalarboson mit Spin 0. Das Higgs ist in Abbildung 1 mit H gekennzeichnet und Teil des Higgs-Mechanismus, der dafür verantwortlich ist, dass Elementarteilchen eine Masse aufweisen. Die Gluonen tragen selbst die Farbladung und sind die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung. Diese hält Nukleonen zusammen und wirkt über die kurze Reichweite von 10^{-3} fm. Photonen sind die Vermittler der elektromagnetischen Kraft und weisen keine Ladung auf. Die elektromagnetische Kraft wirkt auf eine unbegrenzte Reichweite. Gluonen und Photonen sind masselos.

Die Z und W-Bosonen sind Austauschteilchen der schwachen Kraft mit einer Masse von ungefähr 100 GeV. Die W-Bosonen besitzen unterschiedliche elektrische Ladungen, während Z-Bosonen immer neutral sind. Die schwache Kraft koppelt auch zwischen ungeladenen Teilchen und ist beispielsweise für den radioaktiven β -Zerfall verantwortlich. Sie wirkt auf kurze Reichweiten ähnlich stark wie die elektromagnetische Kraft, wird aber schon bei leichter Reichweitenerhöhung deutlich schwächer und wirkt insgesamt nur über eine Reichweite von einem Angström. Es wurden noch keine Kraftteilchen gefunden, welche für die Gravitation verantwortlich sind.

Während Wechselwirkungen kann sich die Teilchensorte ändern. Dabei werden wie in der klassischen Physik viele Erhaltungsgrößen eingehalten. Die schwache Kraft verstößt gegen einige dieser Erhaltungsgrößen. Sie ist beispielsweise paritätsverletzend. Die elektromagnetische Kraft sowie die schwache Kraft konnten auf eine gemeinsame elektroschwache Kraft zurückgeführt werden [4].

2.3 Elektronenschwacher Mischungswinkel

Der elektroschwache Mischungswinkel θ_W , auch Weinbergwinkel genannt, ist ein freier Parameter des SM, der aus der Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen Kraft folgt. Der Weinbergwinkel kann nicht vorhergesagt, sondern nur experimen-

tell bestimmt werden. Er ist abhängig von der Energieskala, wie in Abbildung 2 zu sehen. Die Messungen des SLC (SLAC Linear electron positron Collider), des LEP (Large Electron-Positron Collider) und des LHC (Large Hadron Collider) ermöglichten die Vorhersage des theoretischen Verlaufs aus Abbildung 2. Der Weinbergwinkel tritt in vielen Zusammenhängen auf und ist somit ein wichtiger Präzisionstest für die Gültigkeit des SM. Darüber hinaus trägt eine Präzisionsmessung des Weinbergwinkels dank dieser Zusammenhänge zu der Suche nach neuer Physik bei [6].

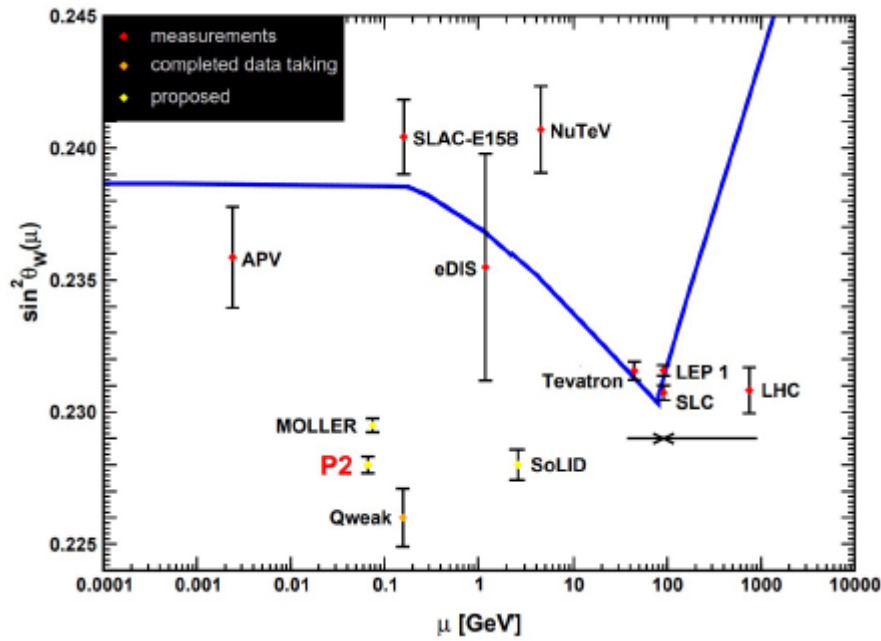


Abbildung 2: Der quadrierte Sinus des Weinbergwinkels in Abhängigkeit vom Impulsübertrag. Hierbei gibt die blaue Kurve den erwarteten Verlauf und die roten Punkte bereits durchgeführte Messungen an. Die gelben Punkte stehen für geplante Messungen und wurden willkürlich nach unten verschoben.[5]

Die elektroschwache Kraft wird durch die vier Bosonen $W^{+,-,0}$ sowie B vermittelt. Diese sind alle vier Masselos. Im Zuge der elektroschwachen Symmetriebrechung erhalten die elektrisch geladenen Bosonen W^{+} und W^{-} eine Masse, während sich die neutralen Bosonen W^0 und B sich zum masselosen Photon γ und zum Massiven Boson Z mischen. Diese Mischung wird gegeben durch:

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_W) & \sin(\theta_W) \\ -\sin(\theta_W) & \cos(\theta_W) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ W^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma \\ Z \end{bmatrix}$$

Mathematisch gesehen ist die Transformationsmatrix eine zweidimensionale Rotationsmatrix, deren Rotationswinkel der Weinbergwinkel ist [7].

3 Das P2-Experiment

Für das P2 Experiment wird der Elektronenbeschleuniger MESA benutzt, welcher in Mainz gebaut wird. Dieser liefert einen Elektronenstrahl mit einer Energie von 155 MeV und einer Stromstärke von 150 μA [5]. Im P2-Experiment soll der Weinbergwinkel zu einer Genauigkeit von 0.14% für einen niedrigen Impulsübertrag bestimmt werden. Diese Genauigkeit wird durch eine hohe Laufzeit von 10000 h und somit eine hohe Anzahl gemessener Elektronen sowie einer Luminosität von $L = 2.38 \cdot 10^{39} \frac{1}{\text{cm}^2\text{s}}$ erreicht. Bei einer Abweichung von der blauen Kurve aus Abbildung 2 kann dank der hohen Präzision auf andere Modelle geschlossen werden und damit nach neuer Physik außerhalb des SM gesucht werden.

3.1 Bestimmung des Weinbergwinkels

Zur Bestimmung des Weinbergwinkels werden longitudinal polarisierte Elektronen auf ein unpolarisiertes Wasserstoffziel geschossen, wo sie elastisch an Protonen gestreut werden. Die elastische Streuung eines Elektrons kann sowohl durch die elektromagnetische Kraft und somit durch ein masseloses Photon als auch durch die schwache Kraft durch ein massives Z-Boson vermittelt werden. Dieser Prozess ist in Abbildung 3 zu sehen. Die elektromagnetische Kraft dominiert hierbei den Streuvorgang.

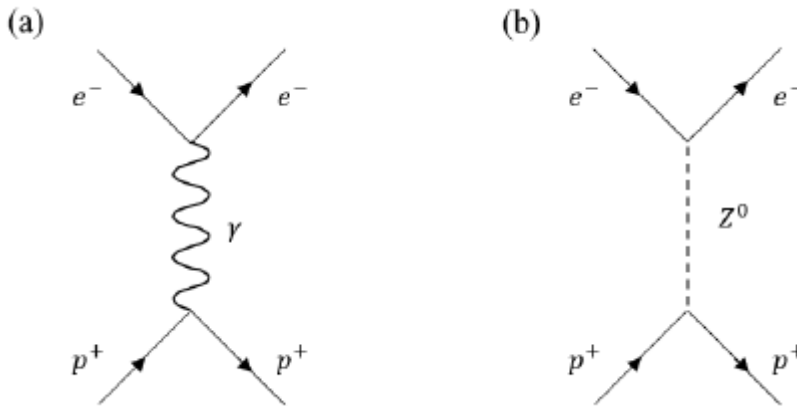


Abbildung 3: Feynman-Diagramme für die elastische Streuung eines Elektrons an einem Proton in niedrigster Ordnung. a) zeigt die den Photonaustausch. b) zeigt den Austausch des Z-Bosons unter der schwachen Kraft [5].

Der Elektronenstrahl, welcher die Elektronen liefert, ändert seine Polarisation mit einer Frequenz von ungefähr einem Kilohertz. Da die schwache Ladung paritätsverletzend ist, sorgt eine Änderung der Polarisation für eine Asymmetrie, welche aufgenommen werden kann. Diese Asymmetrie ist definiert als

$$A^{PV} = \frac{d\sigma_{ep}^+ - d\sigma_{ep}^-}{d\sigma_{ep}^+ + d\sigma_{ep}^-} \quad (1)$$

wobei es sich bei $d\sigma_{ep}^\pm$ um den differentiellen Wirkungsquerschnitt für die Elektronen positiver und negativer Helizität handelt. Bei dem angestrebten geringem Impulsübertrag ist auch die erwartete Asymmetrie mit $\langle A^{PV} \rangle = (39.94 \pm 0.56)$ ppb gering. Es lässt sich mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung angewandt auf die folgenden Formeln berechnen, dass eine Genauigkeit von 1.4% für die Asymmetrie erreicht werden muss, um die angestrebte Gesamtgenauigkeit von 0.14% für den Weinbergwinkel zu erhalten. Um diese Genauigkeit zu erreichen, ist eine hohe Anzahl von 10^{18} gemessenen Elektronen nötig. Auch mit dem Elektronenstrahl mit $150\mu A$ sind noch ungefähr 10^4 Stunden Laufzeit nötig.

Die Asymmetrie wird im SM beschrieben durch [5]

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

Hierbei ist G_F die Fermikonstante, Q^2 der Impulsübertrag, α_m die elektromagnetische Kopplung, $Q_w(p)$ die schwache Ladung des Protons und $F(E_i, Q^2)$ der energieabhängige Strukturfaktor. Die unbestimmten Größen hier sind der Impulsübertrag, die schwache Ladung und der Strukturfaktor. Die Strukturfaktor kann in drei Summanden aufgeteilt werden:

$$F(E_i, Q^2) = F^{EM}(E_i, Q^2) + F^A(E_i, Q^2) + F^S(E_i, Q^2) \quad (3)$$

Dabei ist $F^{EM}(E_i, Q^2)$ abhängig von den elektrischen und magnetischen Strukturfaktoren der Elektronen und Protonen. $F^A(E_i, Q^2)$ ist abhängig vom axialen Strukturfaktor des Protons. $F^S(E_i, Q^2)$ ist abhängig vom isospin-brechenden Formfaktor sowie von den elektrischen und magnetischen Formfaktor der Nukleonen. Indem man diese Summe in Gleichung 2 einsetzt und die Klammer auflöst, kann man die Asymmetrie in vier Summanden aufteilen:

$$A^{PV} = A^{Qw} + A^{EM} + A^A + A^S \quad (4)$$

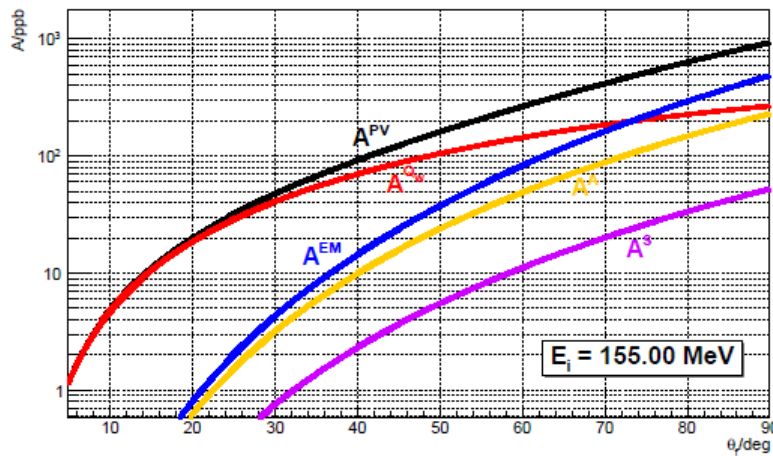


Abbildung 4: Abhängigkeit der einzelnen Summanden von A von Streuwinkel θ_f . [5]

Abbildung 4 zeigt die Abhängigkeit der einzelnen Summanden von dem Streuwinkel der Elektronen θ_f . Für den angestrebten Impulsübertrag beträgt $\theta_f = 35^\circ$, womit der Summand A^{Q_w} überwiegt und der Strukturfaktor $F(E_i, Q^2)$ vernachlässigt werden kann, ohne einen zu großen Fehler zu erzeugen. Aus dem Verlauf des Graphen geht auch der erwartete Wert der Symmetrie $\langle A^{PV} \rangle = (39.94 \pm 0.56)$ ppb hervor. Somit sind die Einzigen Unbekannten in Gleichung 2 die schwache Elektronenladung $Q_w(p)$ und der Impulsübertrag Q^2 . Durch eine Vermessung des Impulsübertrags kann die schwache Elektronenladung aus der Gleichung bestimmt werden und aus dieser der Weinbergwinkel berechnet werden.

3.2 Der Experimentaufbau

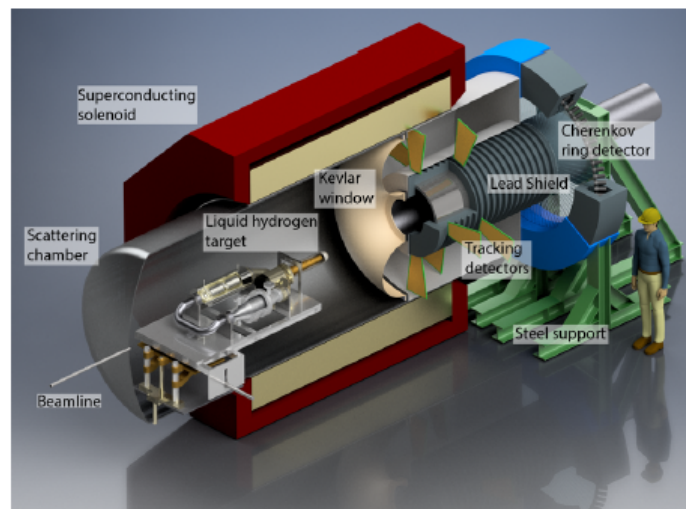


Abbildung 5: Aufbau des P2-Experiments [5].

Abbildung 5 zeigt den Aufbau des P2-Experiments. Das Wasserstofftarget ist 60cm lang. Da es im Experiment zu einer extremen Wärmeentwicklung im Wasserstofftarget kommt, muss dieses einer extrem hohen Leistung standhalten können. Darüber hinaus muss die Geometrie des Wasserstofftargets eine Streuung der Elektronen um einen Winkel zwischen 25° und 45° ermöglichen, wobei der gesamte Aufbau so geplant sein muss, dass die Elektronen nach der Streuung so wenige Materialien wie möglich durchdringen.

Die erwartete Streuung der Elektronen wurde mit Hilfe von Computersimulationen bestimmt. Die Elektronen werden nach der Streuung mithilfe eines magnetischen Feldes abgelenkt, wie in Abbildung 6 zu sehen. Zusätzlich wird eine Abschirmung genutzt, damit der Cherenkov-Detektor nicht von freigesetzten Photonen erreicht werden kann. Darüber hinaus sorgt das magnetische Feld dafür, dass nur die von den Protonen gestreuten Elektronen die Detektoren erreichen, während die Elektronen, welche durch die sogenannte

Møllerstreuung gestreut werden, sich entlang der Achse weiterbewegen. Um nur die gewollten Elektronen abzufangen, sind die Detektoren am Rand angebracht.

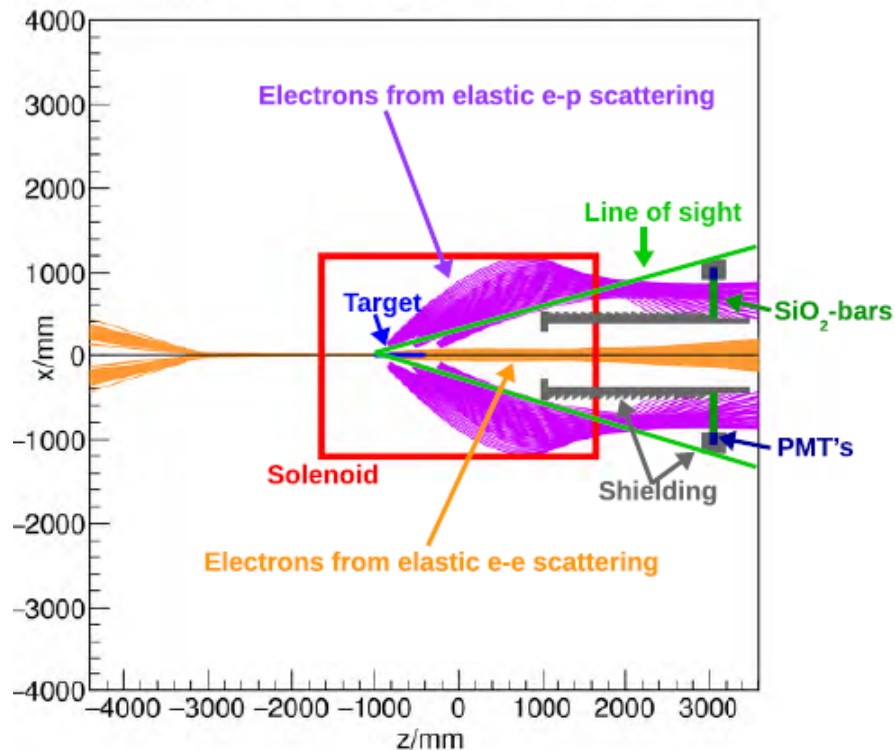


Abbildung 6: Simulation der Trajektorien gestreuter Elektronen. Die an den Protonen gestreuten Elektronen sind in lila, die an anderen Elektronen gestreuten Elektronen gelb eingetragen [5].

3.3 Der Spurendetektor

Um den Impulsübertrag der gestreuten Elektronen zu bestimmen, wird der Spurdetektor, welcher in Abbildung 6 als Tracking Detectors bezeichnet wird, verwendet. Er bestimmt die Trajektorien der Elektronen im Magnetfeld und daraus den Impulsübertrag. Dieser besteht aus 8 Modulen, welche aus je zwei Lagen zusammengesetzt sind und je 15° des gesamten azimuthalen Winkels umfassen. Jede dieser Lagen besteht aus 270 High-Voltage Monolithic Active Pixel Sensors (HV-MAPS). Insgesamt werden 4320 HV-MAPS benötigt. Werden diese HV-MAPS von den gestreuten Elektronen passiert, kommt es zu einem Signal, das gemessen und der Position zugeordnet werden kann, an der das Teilchen die HV-MAPS passiert hat.

Die HV-MAPS sind rechteckig mit 20×22 mm Seitenlänge. Sie sind mitsamt Elektronik zum Auslesen der Daten nur 50 µm dick. Derart dünne Sensoren sind notwendig, da die Elektronen wegen dem niedrigen Impuls schnell erneut gestreut und gebremst werden, wenn sie weitere Materialien passieren. Zusätzlich sind die HV-MAPS strahlenhart. Zur Befestigung werden die HV-MAPS auf dünne Polyimid-Streifen geklebt, welche wiederum auf einem PCB-Rahmen befestigt sind. Pro Lage werden 26 dieser Polyimid-Streifen verwendet. Die Polymidstreifen weisen dünne Kupferbahnen auf, um die HV-MAPS mit Spannung zu versorgen und die Daten zu leiten.

Um die HV-MAPS auf den Polyimidstreifen zu befestigen, wird Kleber genutzt. Dieser Kleber selbst sollte möglichst dünn sein, sollte Scherkräften standhalten, welche durch die Temperaturschwankungen und Feuchtigkeit während dem Experiment aufkommen und muss strahlenhart sein. Zum Kleben der HV-MAPS wird ein Kleberoboter verwendet, welcher eigens für das Experiment gebaut wurde.

4 Der Kleberoboter

4.1 Überblick

Die Abbildung 7 zeigt den Aufbau des Roboters. Der zentrale Teil des Roboters wird in der Abbildung tool head, auf deutsch Werkzeugkopf genannt. Er verfügt über einen Vakuumgreifer (Gripper), einen Halter für die Klebekartusche, eine Kamera und einen Laserdistanzsensor. Der Schaltschrank (switching cabinet) beinhaltet die Motortreiber, welche die Achsen des Kleberoboters ansteuern. Sowohl die Treiber als auch die Achsen wurden von der Jenny-Science AG angefertigt. Der Kleberoboter wird mit einem pneumatischen System betrieben, welches durch die pneumatics box gesteuert wird. Die dafür nötige Druckluft wird von der in Abbildung 7 eingetragenen pressure source geliefert. Der Zeit-Druck-Dosierer (Dispenser) gibt Druck auf die Klebekartusche. Der Roboter kann bis auf wenige Einstellungsmöglichkeiten, wie das Vakuum, welches in Abschnitt 5.1 beschrieben wird, von dem Computer angesteuert werden. Die Arbeitsfläche ist eine 400 × 400 × 50 mm Granitplatte von Planolith mit einer Glattheit von 1.89 µm.

4.2 Die Motoren und Achsen

Der Roboter verfügt über vier Achsen, die alle von der Jenny-Science AG produziert wurden. Diese Achsen ermöglichen es, den Roboter zu bewegen und seine aktuelle Position zu bestimmen. Die x-Achse ist eine LINAX Lxs 400F60 Achse. Die y-Achse ist ein Portal bestehend aus zwei Achsen des Modells LINAX Lxu 320F60. Bei der z-Achse handelt es sich um eine Achse des Modells LINAX Lxc 85F10. Als vierte Achse hat der Roboter eine Rotationsachse für den Greifer. Sie hat die Modellnummer ROTAX Rxxpv 1.5T40 [9]. Die Achsen werden von XENAX Xvi 75V8 Motorcontroller angesteuert, welche ebenfalls von

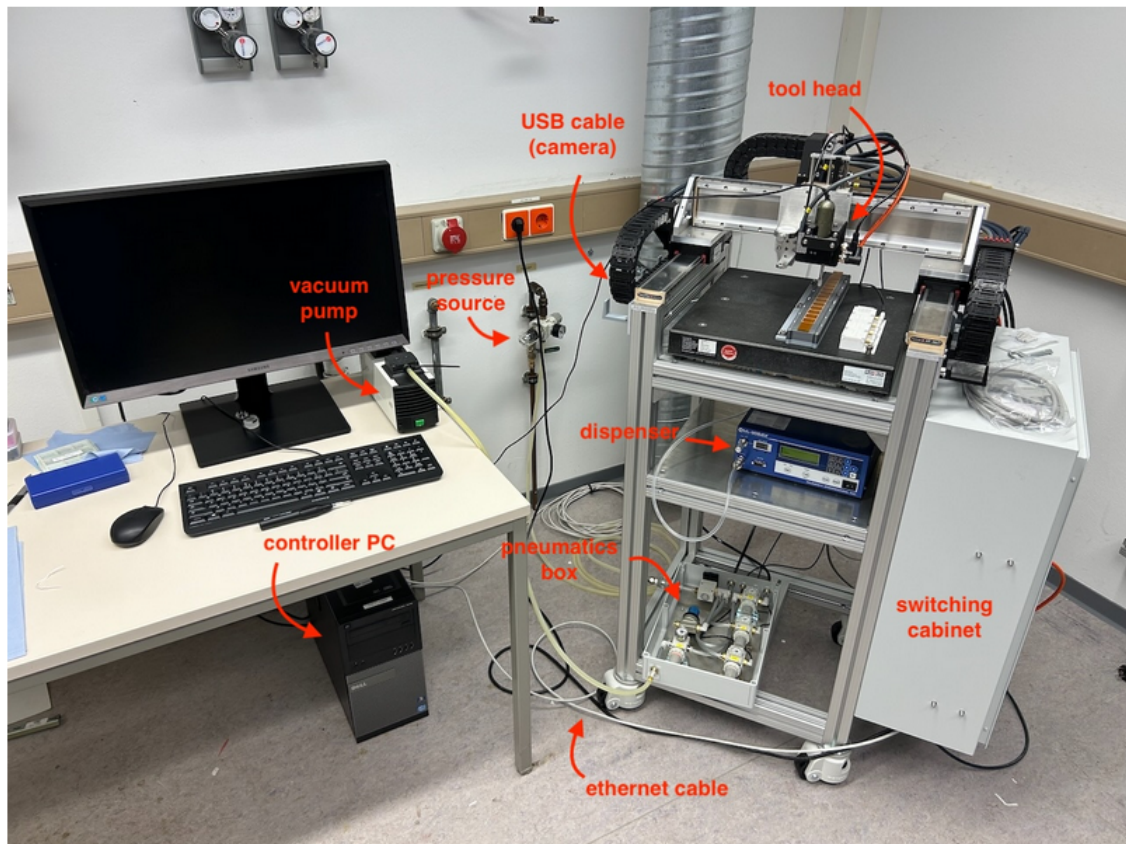


Abbildung 7: Überblick über den Kleberoboter [7].

der Jenny Science AG produziert werden und per Ethernet mit dem Computer angesteuert werden können. Um die beiden y-Achsen anzusteuern, werden zwei der Motorcontroller als Master und Slave verwendet. Das heißt, dass nur der Master Programme und Befehle vom Computer erhält und diese an den Slave weitergibt. Hierbei kann es zu einer Verzögerung von 0.45 ms kommen.[8]

Tabelle 1: Eigenschaften der Linearachsen.[9]

Achse	x	y	z
Modell	Lxs 400F60	Lxu 320F60	Lxc 85F10
Auflösung[$\frac{\mu\text{m}}{\text{Ink}}$]	1	1	1
Max. Kraft[N]	180	180	30
Genauigkeit[Ink]	± 10	± 12	± 7
Wiederholungsgenauigkeit[Ink]	± 5	± 5	± 1.5

Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Eigenschaften der verschiedenen Achsen. Die Achsen messen zurückgelegte Position und zurückgelegten Distanzen in sogenannten Inkrementen.

Ein Inkrement entspricht ungefähr einem Mikrometer. Beim Starten muss eine Referenzfahrt durchgeführt werden, damit die Controller die Position des Kleberoboters bestimmen können. Der Nullpunkt liegt in Abbildung 7 in der hinteren linken Ecke. Im Koordinatensystem des Roboters verläuft die x-Achse nach rechts und die y-Achse nach vorne. Die z-Achse hat ihren Ursprung ganz oben und verläuft nach unten. Der Kleberoboter hat einprogrammierte Softlimits, welche er nicht überschreiten darf. Jedoch kann es bei der Referenzfahrt passieren, dass der Kleberoboter aus den Softlimits herausfährt, wenn er sich zu nahe an diesen befindet. Solange die Motoren abgeschaltet sind, kann der Kleberoboter per Hand von ungünstigen Positionen wegbewegt werden, sind die Motoren angeschaltet, halten sie den Kleberoboter an seiner Position.

4.3 Die Werkzeuge des Roboters

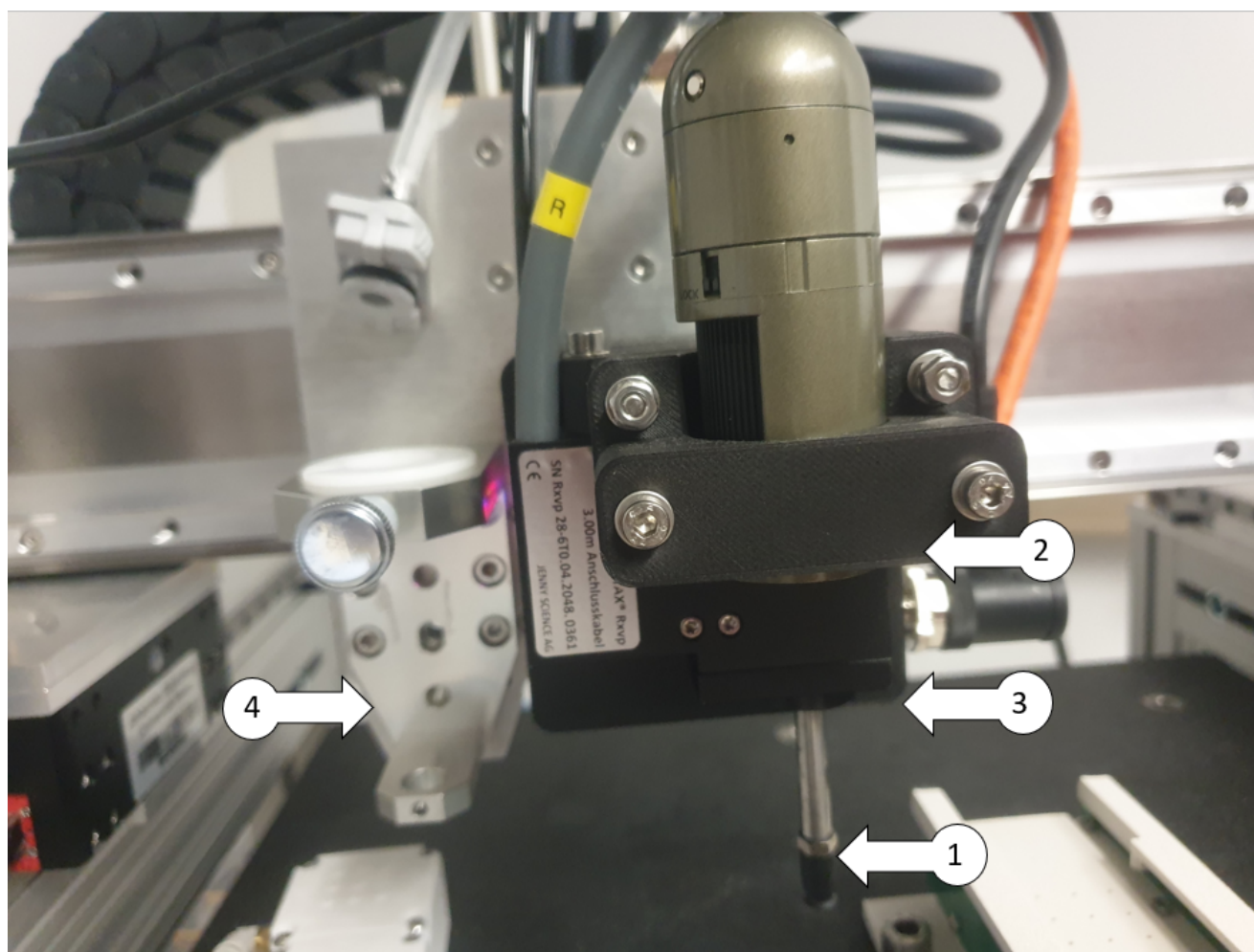


Abbildung 8: Die Werkzeuge des Kleberoboters. 1 ist der Greifer. 2 ist die Kamera. 3 ist der Laserdistanzsensor und 4 ist die Halterung für die Klebekartusche, welche über den Schlauch mit dem Dosierer verbunden wird.

Die Kamera ist über USB angeschlossen. Sie erlaubt es, die Arbeitsfläche mithilfe der Benutzeroberfläche des Roboters in Nahaufnahme zu sehen und die Klebetropfen mit einer möglichst hohen Genauigkeit zu platzieren. Der Dosierer wird später genauer erklärt. In diesem Bild ist die Kartuschenhalterung leer. In den Halter lässt sich eine Kartusche einsetzen und mit dem Dosierer über den Schlauch verbinden, welcher über der Halterung zu sehen ist. Der Greifer ist an der ROTAX Rxxpv 1.5T40 Rotationsachse von der Jenny Science AG befestigt. Diese ist mit einem Anschluss für eine Vakuumpumpe ausgestattet, wodurch der Kleberoboter in der Lage ist, Gegenstände aufzunehmen, zu drehen und mit der in Tabelle 1 angegebenen Genauigkeit zu platzieren. Die Rotationsachse arbeitet ebenfalls mit Inkrementen, wobei 64000 Inkremente einer Umdrehung entspricht. Sie hat eine Wiederholungsungenauigkeit von ± 20 μm [10].

Der Laserdistanzsensor dient rein zur Distanzmessung zur unter ihm liegenden Oberfläche. Er wurde von Baumer hergestellt und hat die Modellnummer OM70-L0070.HH0048.EK. Der Laserdistanzsensor kann Distanzen von 30 bis 70 Millimetern messen. Der Laserstrahl hat eine Wellenlänge von 660 nm und einen Durchmesser von 1 mm bei einer Distanz von 30 mm, welcher sich bis zur Distanz von 70 mm auf 0.66 mm verkürzt. Die Genauigkeit beträgt abhängig vom Abstand 0.7 μm bis 1 μm . Der Laser weist eine Linearabweichung von $\pm 0.06\%$ auf [11]. Bei der Bedienung des Kleberoboters werden meist mindestens der Laser, die Kamera und der Dosierer gebraucht. Um einen Endeffektor zu benutzen, muss der Roboter erst auf dieses Werkzeug wechseln, wobei es auf die Position des zuvor ausgewählten Werkzeugs fährt. Dies funktioniert nicht, wenn der Roboter dabei die Softlimits überschreiten muss. Da die Werkzeuge teils weit auseinander liegen, ist dadurch der Bereich, in dem Klebetropfen platziert werden können weniger als halb so groß wie der von den Softlimits selbst eingegrenzte Bereich.

4.4 Der Dosierer

Der Dosierer ist ein ML-808GX-CTR viskositäts-variabler Hochpräzisions-Dispenser von MUSASHI Engineering Inc. Er ist in Abbildung 9 zu sehen. Die Hauptfunktion des Dosierers ist, den eingestellten Druck über das gewählte Zeitintervall auf die angeschlossene Kartusche auszuüben. Er verfügt über einen manuellen sowie einen timed Modus. Im manuellen Modus wird solange Druck ausgeübt, wie man den Dis-Knopf am Dispenser betätigt. Im timed-Modus wird der Druck für das eingestellte Intervall aufrechterhalten. Einstellbar sind zwischen 20 und 800 kPa Druck über ein Zeitintervall zwischen 0.01 und 999.90 Sekunden. Die Einstellungen können auf verschiedenen Kanälen gespeichert werden [12].

Der Dosierer kann über die Benutzeroberfläche für den Kleberoboter angesteuert werden. Er verfügt über 400 verschiedene Kanäle, auf denen verschiedene Einstellungen gespeichert werden können. Einige Funktionen können nicht über die Benutzeroberfläche angesteuert werden, wie die Möglichkeit, zwischen den beiden Modi hin und her zu schalten. Wird der Dispenser über die Benutzeroberfläche angesteuert, während er sich im manuellen Modus befindet, führt dies dazu, dass der eingestellte Druck dauerhaft ausgeübt wird.



Abbildung 9: Bild des Dosierers.

4.5 Die Kleber

Der Kleber, der standardmäßig genutzt wird, ist der Araldite[®] 2011. Hierbei handelt es sich um einen Zwei-Komponenten-Kleber, der durch Hitzeeinwirkung gehärtet werden kann. Er weist eine Tropfzeit von 100 Minuten auf und härtet nach der Mischung bei Raumtemperatur in sieben Stunden aus [13]. Der Araldite[®] 2011 wird schon länger in der Hochschulphysik verwendet. Er ist strahlenhart, lässt sich gut dosieren und hält großen Krafteinwirkungen stand. Jedoch weist der Araldite[®] 2011 für das P2-Experiment auch einige Nachteile auf. Da die HV-MAPS keiner Hitze über 70[°]C ausgesetzt werden können, muss der Kleber bei Raumtemperatur härten, was sieben Stunden dauert. Für diese Zeit ist der Arbeitsbereich nicht verfügbar und es können keine weiteren HV-MAPS geklebt werden. Darüber hinaus hat der Araldite[®] 2011 nach der Mischung eine begrenzte Tropfzeit. Zum Zeitpunkt der Mischung weist der Araldit eine Viskosität von 40 Pa.s auf, jedoch nimmt diese Viskosität stetig zu, wodurch es schwieriger wird, den Araldite[®] 2011 über längere Zeit richtig zu dosieren. Nach Ablauf der Tropfzeit sind sowohl die genutzte Kartusche als auch die genutzte Dosiernadel unbrauchbar, weswegen der verbleibende abgefüllte Kleber mitsamt Kartusche und Nadel entsorgt werden müssen [13].

Als mögliche Alternative zum Araldite[®] 2011 wird die DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Serie in Betracht gezogen [1]. Auch diese Kleber sind strahlenhart und sie können auf drei Arten gehärtet werden. Zu einem gibt es die Möglichkeit, einen Aktivator zu nutzen. Hierfür nutzt man optimalerweise ein 15-30 zu 1 Verhältnis von Kleber zu Aktivator. Der Aktivator soll als Film aufgetragen werden, was der Kleberoboter selbst nicht bewerkstelligen kann. Wegen der geringen Menge verwendeten Klebstoffes ist es händisch schwierig, den Aktivator richtig zu dosieren [14]. Die zweite Möglichkeit ist die Härtung mithilfe von Hitze einwirkung und die dritte Möglichkeit die Härtung mit UV-Licht. Da die HV-MAPS der für die Hitze einwirkung nötigen Temperatur nicht standhalten, wird die Härtung mit Hilfe des UV-Lichts bevorzugt. Bisher wurde nur der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Grundkleber getestet, welcher jedoch durch eine Viskosität von nur 800cP große Nachteile mit sich brachte [15]. Deswegen wurden weitere Kleber dieser Reihe in Betracht gezogen. Der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T hat eine Viskosität 3.500cP [16], der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT weist eine Viskosität von 14000 cP [17] auf und der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 GEL erreicht eine Viskosität von 25000 cP [18]. Alle DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Kleber besitzen eine Dichte von $1.08 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$.

4.6 Der Arbeitsbereich

In Abbildung 10 ist die Arbeitsfläche mit zwei Vakuumbänken zu sehen. Mit Hilfe von zwei großen Schrauben können die Vakuumbänke auf dem Arbeitsbereich fixiert werden. Auf den Vakuumbänken können mit Hilfe von Unterdruck Materialien fixiert werden, auf denen Klebetropfen platziert werden sollen. Dadurch wird verhindert, dass sich die Position dieser Materialien während dem Klebevorgang verändert. Die weiße Vakuumbank rechts im Hintergrund ist unterteilt in vier Abschnitte, die alle einzeln an Vakuumpumpen angeschlossen werden müssen. Die größere Vakuumbank vorne kann mit nur einem Anschluss versorgt werden, bringt dafür aber einen geringeren Unterdruck auf die selbe Fläche auf.

Zum Härten des DYMAX[®] Multi-Cure[®] wurden an der vorderen Vakuumbank UV-LEDs von Würth Elektronik angebracht, deren Spektralbereich zwischen 375 nm und 425 nm liegt [19]. Der Aufbau ist noch neu, weswegen es aktuell nur möglich ist, die LEDs mit Hilfe von den Schrauben, mit denen sie befestigt sind, auf eine andere Höhe umzustellen und das nur ungenau. Die Höhe ist wichtig, damit der Kleber möglichst direkt vom UV-Licht bestrahlt wird. Auch ein Kühlsystem fehlt, weswegen die LEDs nur mit 200 mA von bis zu möglichen 500 mA betrieben werden können. Dies sorgt für eine geringere Intensität und somit eine längere nötige Beleuchtungsdauer.

5 Bestimmung von Klebparametern

Das Hauptziel der Parametersuche ist es, Klebparameter zu finden, welche erlauben, den Kleber mit einer gleichbleibenden Menge pro Tropfen aufzutragen. Dafür wird der beschrie-

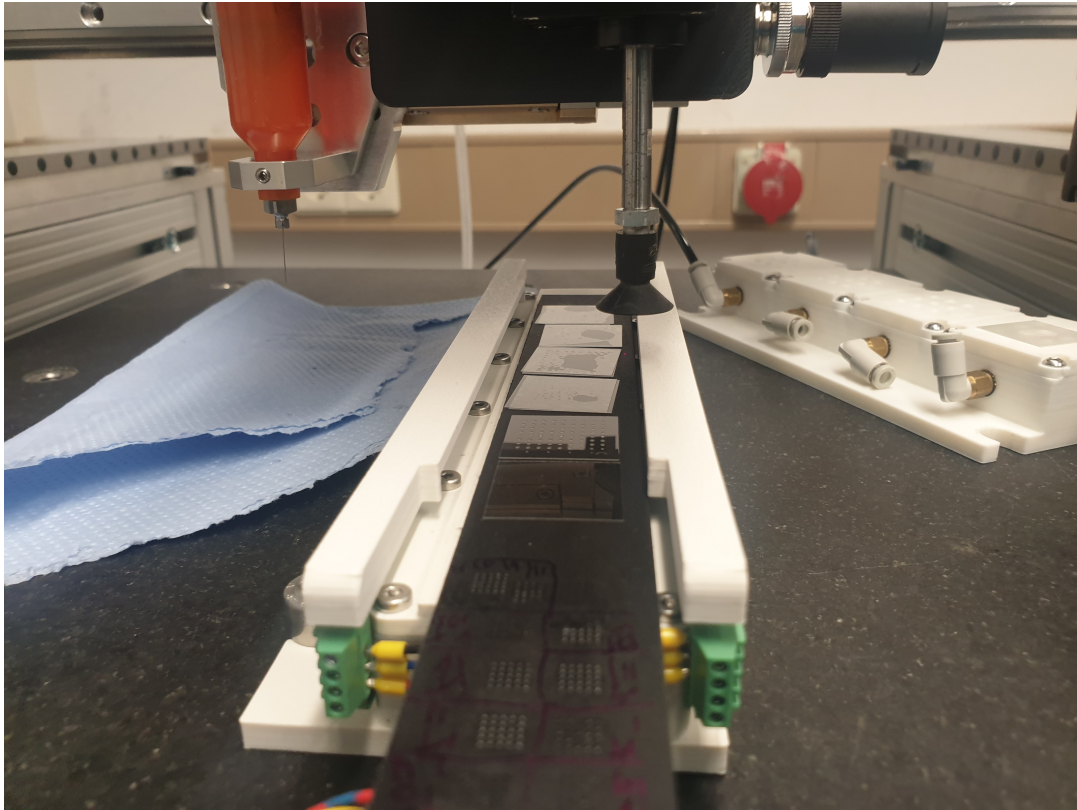


Abbildung 10: Arbeitsbereich mit zwei Vakuumbänken und LEDS.

bene Kleberoboter genutzt. Hierbei ging es nicht darum, das perfekte Set an Parametern zu finden, sondern verschiedene Sets, welche das Hauptziel zufriedenstellend erfüllen und in den folgenden Krafttests weiter getestet werden sollen.

Es gibt eine große Zahl von Zufallseffekten, die sich nicht kontrollieren lassen und für verschiedenste Problemen, unvermeidbare Abweichungen und Änderungen der Qualität von Parametern über die Zeit führen können. Zusätzlich gibt es viele Effekte, welche sich zwar kontrollieren lassen, aber deren Einfluss auf die Parametersuche möglicherweise nicht direkt auffällt. Dies alles führt zu vielen Herausforderungen bei der Suche und der Auswertung der Parametern, welche während und am Ende des Kapitels weiter diskutiert werden.

5.1 Die Parameter

Die Parameter werden in zwei Gruppen unterteilt. Interne Parameter sind Parameter, welche in der UI des Kleberoboters oder an dem Dispenser eingestellt werden können. Die internen Parameter beinhalten unter anderem die Parameter, welche für die Parametersuche angepasst wurden. Ein paar interne Parameter wurden jedoch über die ganze Versuchsreihe selten oder gar nicht geändert, da diese eine kleinere Rolle für die Größe der Klebetropfen zu spielen scheinen und die weiteren Untersuchungen dieser Parameter den Rahmen spre-

gen würden. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese Parameter einen größeren Einfluss haben als erwartet, weshalb sie in der Auswertung ebenfalls genannt werden.

Die externen Parameter sind Parameter, welche man nicht direkt an der UI oder dem Dispenser einstellen kann. Die Parameter, um die es hier geht, lassen sich dennoch zumindest in bestimmten Grenzen manipulieren. Die meisten externen Parameter sind deutlich komplexer als die internen Parameter, da es sich nicht um einfache Zahlenwerte handelt. Externe Parameter wurden teils im Zuge der Bachelorarbeit angepasst, aber nicht genauer untersucht, da auch diese den Rahmen der Arbeit sprengen würden.

5.1.1 Interne Parameter

Folgende Parameter zählen für diesen Versuch als interne Parameter:

Dispenser-Druck, Dispenser-Intervall, Dispenser-Standarddruck, On-Delay, Off-Delay, Wartehöhe, Wartezeit, Distanzcheck, Höhe

Zum Platzieren eines Klebetropfens fährt die Kartusche nah an die Oberfläche, dann gibt der Dispenser Druck auf den Kleber um einen Klebetropfen abzusetzen, woraufhin die Kartusche ein kleines Stück nach oben fährt und kurz wartet, bevor sie auf die ursprüngliche Höhe zurückkehrt.

Der Dispenser-Druck ist in Kilopascal angegeben und gibt an, mit wie viel Druck der Kleber aus der Kartusche in die Dosiernadel gedrückt wird. Das Dispenser-Intervall, zukünftig kurz mit Intervall bezeichnet, gibt an, wie lange der Druck auf den Klebstoff angewandt wird. Dies sind die beiden Werte, welche im Fokus der Experimentierreihe stehen. Der Dispenser-Standarddruck kann durch das Rad am Dosierer eingestellt werden. Dadurch ist es möglich, dauerhaft einen Unterdruck auf den Kleber zu legen, wodurch eine Zugkraft auf den Kleber wirkt. Dies wird zukünftig als Vakuum bezeichnet. Das Vakuum kann bis zu -20kPa erreichen. Für die Tests war nur der Bereich bis zu -1 kPa interessant. Da nur eine Nachkommastelle für den Unterdruck auf dem Dosierer angezeigt wird, ist der eingestellte Unterdruck in dem betrachteten Bereich ungenau.

On-Delay bestimmt, wie lange die Kartusche direkt über der Oberfläche bleibt, nachdem der Druck auf den Kleber angewandt wurde. Off-Delay bestimmt, wie lange der Roboter nach der Rückkehr in die ursprüngliche Position wartet, bevor der nächste Befehl durchgeführt wird. Beide Werte können Einfluss auf die Tropfen nehmen, da sie dem Kleber Zeit geben, in die Nadel zu laufen oder durch angelegten Unterdruck aus der Nadel gesaugt zu werden. Diese Einflüsse wurden als vernachlässigbar angenommen und die Werte für die Parameter während der Testreihe kaum verändert.

Die Wartehöhe und Wartezeit sind Parameter, welche direkt zu Beginn der Tests zur Benutzeroberfläche des Kleberoboters hinzugefügt wurden. Diese Parameter erlauben es, die

Klebekartusche ein kleines Stück nach oben zu fahren und dann kurz zu warten. Die Wartezeit gibt dabei die Höhe an, auf der die Dosiernadel pausiert und die Wartezeit gibt die Zeit an, für die die Nadel pausiert. Der Sinn dahinter ist, als Satelliten [2] bekannte Fehler zu verhindern, welche durch einen sich lösenden und umkippenden Klebefaden entstehen. Die Effektivität dieser Methode wurde von der ATLAS-Group gezeigt. Diese Parameter wurden in der ersten Phase des Testprozesses mit untersucht und später konstant gehalten.

Distanzcheck basiert nicht auf Zahlenwerten, sondern ist entweder aktiviert oder deaktiviert. Ist er aktiviert, misst der Roboter die Distanz zur Fläche, auf die der Tropfen abgesetzt werden soll vor dem Absetzen des Klebetropfens. Optimalerweise sollte das aktivieren dieser Funktion die Qualität des Klebevorgangs verbessern. Um dies zu prüfen, wurde auch dieser Parameter genauer untersucht. Die Höhe gibt an, wie nah an die Oberfläche die Nadel zum Absetzen des Klebetropfens fährt. Der Parameter wurde jedoch während der Tests aus der UI entfernt und standardmäßig auf 100 Mikrometer gesetzt, weswegen er später nicht mehr direkt untersucht wird.

5.1.2 Externe Parameter und andere Faktoren

Externe Parameter bezeichnen alle beeinflussbaren äußeren Effekte. Direkt getestet werden hier auch verschiedene Dosiernadeln welche in verschiedenen Größen und Formen verfügbar sind und von MUSASHI Engineering Inc. produziert wurden. Hier ist vor allem die Dicke der Öffnung interessant, aber auch andere Faktoren wie die Länge der Nadel und die Form an sich haben Auswirkungen auf die Klebetropfen. Weitere erwähnenswerte externe Parameter umfassen die verwendeten Kartuschen, welche durch mikroskopische Unförmigkeiten zu Fehlern führen können. Für Araldite[®] 2011 wurden komplett durchsichtige Kartuschen verwendet, für die verschiedenen Varianten des DYMAX[®] Multi-Cure[®] wurden Kartuschen genutzt, welche UV-Licht abschirmen. Für jeden Kleber der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Reihe wurde eine Kartusche verwendet, während für den Araldite[®] 2011 nach jedem Klebevorgang die Kartuschen gewechselt werden mussten. Da ansonsten keine verschiedenen Arten von Kartuschen genutzt wurden, werden diese in den Messungen nicht weiter erwähnt. Auch die Testfläche für die Klebprobe stellt einen wichtigen Parameter dar. Es handelt sich um mehrere Platten aus FR-4, eine Klasse von Verbundwerkstoffen bestehend aus Epoxidharz und Glasfasergewebe. Dieser Parameter wird in der Diskussion genauer besprochen.

Der zentrale Einflussfaktor sind die verschiedenen Kleber, für die einzeln nach guten Parametern gesucht wurde. Die untersuchten Kleber umfassen den Araldite[®] 2011 und den DYMAX[®] Multi-Cure[®]. Die Nachteile des Araldite[®] 2011 gegenüber dem DYMAX[®] Multi-Cure[®] wurden bereits in Kapitel 4.5 beschrieben. Der DYMAX[®] Multi-Cure[®] wurde in früheren Tests für die ATLAS-Group als möglicher Ersatzkleber ausgewählt [1] und von Jana Weyrich genauer untersucht [2]. In diesen Tests zeigten sich jedoch verschiedene Probleme mit dem UV-Kleber. Seine geringe Viskosität erschwerte es, den Kleber ordent-

lich zu dosieren und aufgrund eines für die Situation nicht optimalen Setups der LEDs, was zusammen mit Mangel an Material und Zeit zu nicht zufriedenstellenden Ergebnissen bezüglich der Klebeleistung des DYMAX[®] Multi-Cure[®] führte. Seitdem wurden mehrere die in Kapitel 4.5 beschriebenen Unterkategorien für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 besorgt und die LEDs wie in Abbildung 10 zu sehen aufgebaut. Der Fokus bei den Klebern liegt somit auf einer ausführlicheren Untersuchung der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Klebereihe, während der Araldite[®] 2011 als Vergleichskleber betrachtet wird.

5.2 Beschreibung des Testverfahrens

Zuerst wurde der Araldite[®] 2011 untersucht. Bei der Untersuchung des Araldites wurden die externen Parameter konstant gehalten, nur das Nadelmodell wurde während der Versuche gewechselt. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass regelmäßig die Kartusche und die Nadel gewechselt werden mussten. Die ersten Tests mit dem Araldite[®] 2011 dienten zur Orientierung und zum Kennenlernen der Testmethode. Der Araldite[®] 2011 wurde somit nicht nur als Vergleich zum DYMAX[®] Multi-Cure[®] getestet, sondern auch, um bei der Messung auftretende Probleme erkennen zu können, bevor der DYMAX[®] Multi-Cure[®] selbst getestet wurde.

In der ersten Übungsphase wurden 21 verschiedene Parametersets getestet. Von diesen wurden einige Sets ein zweites Mal getestet. Manche Sets wurden einmal mit aktiviertem Distanzcheck und einmal ohne getestet. Diese Sets wurden mit den Nummern 1-21 durchnummeriert. Wurde ein Set mit und ohne Distanzcheck getestet, bekam es die zusätzliche Kennzeichnung .1 für kein Distanzcheck und .2 für die Verwendung des Distanzchecks. Anfangs wurden diese Kennzeichnungen auch für andere Wiederholungsgründe genutzt, beispielsweise um Pausen seit dem letzten Klebevorgang zu reduzieren oder den verbleibenden Kleber an der Spitze abzuwischen. Wurde ein Set zweimal getestet, wurde der Test zusätzlich mit 2. Versuch benannt. Mit der Kamera des Kleberoboters waren fehlerhafte Tropfen sofort zu erkennen, was eine Vorauswahl ermöglichte. Mit Hilfe dieser Vorauswahl wurde ein Parameterset gewählt und für dieses der Parameter Vakuum angepasst. Die meisten Klebproben bestehen aus einem 5×5 Tropfenmuster mit je einem Millimeter Abstand zwischen den Tropfen. Für das Set 21 wurde ein 10 × 10 Muster getestet, um zu sehen, ob längere Prozeduren die Ergebnisse beeinflussen.

Nach der Durchführung der Grobtests wurden die besseren Ergebnisse unter einem Digitalmikroskop von KEYNECE betrachtet. Dieses erlaubt es, Kreise um die beobachteten Objekte zu ziehen und so den Radius der Tropfen zu vergleichen. Des Weiteren werden fehlerhafte Tropfen hier deutlicher sichtbar. Während der Tests sind fünf Arten von fehlerhaften Tropfen aufgetreten. Zu einem gibt es zwei Arten von Satelliten, bei denen es sich um kleine Klebeablagerungen handelt, die nicht direkt Teil des Haupttropfens sind.

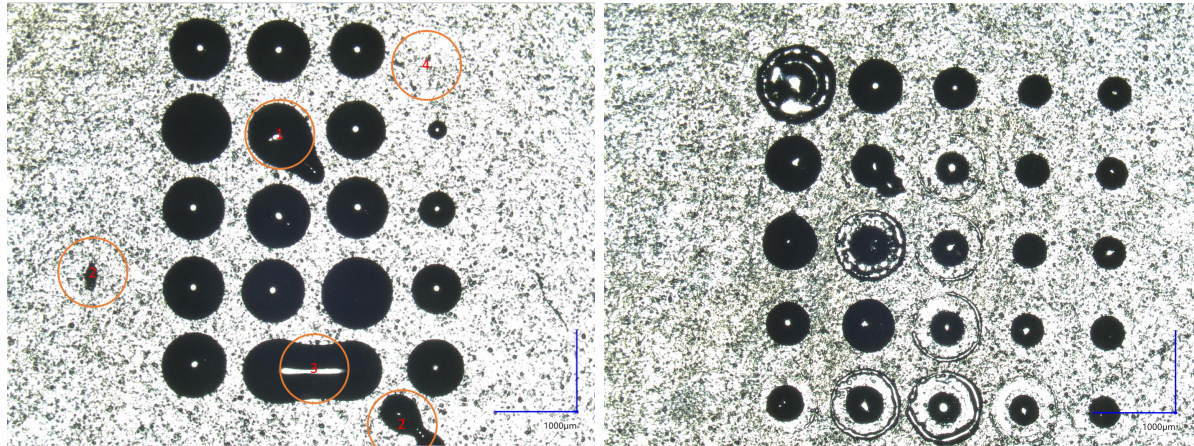


Abbildung 11: Sample 2 und 8.2. Links zu sehen ist Sample 8.2. Hervorgehoben sind: 1. Ein Satellit erster Ordnung relativ in der Mitte des Bilds. 2. Satelliten zweiter Ordnung am linken und am unteren Rand. 3. Zwei zusammengelaufene Tropfen unten im Bild. 4. Ein fehlender Tropfen oben rechts. Rechts zu sehen ist Sample 2: Dieses Sample zeigt viele verschiedene Ausprägungen von Ringen. Interessant sind hier vor allem der erste Tropfen (oben Links) und der zweite Tropfen in der dritten Reihe, da hier die Ringe noch mit den Haupttropfen verbunden sind.

Satelliten erster Ordnung sind kleine Ablagerung direkt am Rand der Tropfen, Satelliten zweiter Ordnung wiederum sind Ablagerungen, welche keine Haupttropfen direkt berühren. Der dritte Fehler ist ein Phänomen, bei dem sich Ringe um einen deutlich zu kleinen oder anstelle eines Tropfens bilden. Bei dem vierten Fehler handelt es sich um mehrere Tropfen, welche ineinandergelaufen sind. Der letzte und fünfte aufgetretene Fehler ist das komplette Ausbleiben von Tropfen. Die beiden Bilder 11 zeigen Proben (hier Samples genannt), welche nicht genauer untersucht wurden, da sie zu den frühen Tests zählen und viele Fehler aufweisen. Die Fehlertypen selbst sind in diesen Samples gut veranschaulicht.

Parametersets mit vielen Fehlern wurden von den genaueren Untersuchungen ausgeschlossen. Bei den anderen Proben wurden die Fehler als Auswahlkriterium vernachlässigt. Das Hauptkriterium zur Auswahl war, wie konsistent die Tropfen dosiert wurden, also wie groß der Unterschied in ihrer Menge war. Hierfür wurde der Radius aller Tropfen einer Probe gemessen und aus den Werten der statistische Mittelwert sowie die statistische Standardabweichung berechnet. Es wurden sowohl die absolute als auch die relative Standardabweichung betrachtet. Die relative Standardabweichung berechnet sich durch $d\sigma = \frac{\sigma}{\bar{r}}$, wobei $\bar{r}$ der durchschnittliche Radius ist.

Ein Problem, welches hierbei auftritt ist die Form der Tropfen. Die ideale Form eines Tropfens ist rund oder elliptisch. Jedoch fällt bei genauerer Untersuchung auf, dass die meisten Tropfen von einer runden und sogar einer elliptischen Form abweichen. Die Messmethode, bei der ein Kreis um die Tropfen gezogen wird, geht davon aus, dass die Tropfen in einer perfekten, runden Form vorliegen. Um dieses Problem zu umgehen, kann ein Innenkreis und ein Außenkreis gezogen werden und aus diesen der durchschnittliche Radius des Tropfens bestimmt werden, wie in Abbildung 12 zu sehen. Diese Methode ist jedoch ex-

trem aufwändig, da jeder Tropfen erst in Nahaufnahme betrachtet werden muss, um die zwei Kreise halbwegs genau ziehen zu können. Dadurch wird es nötig, im Bild des Digitalmikroskops für jeden Tropfen zu zoomen, was den Arbeitsaufwand insgesamt mehr als verdreifacht. Deswegen wurden Parameter nur mit dieser Methode untersucht, wenn sie bereits mit der ungenaueren Messung gute Ergebnisse geliefert haben. Durch das Ziehen zweier Kreise kann man einen Grad für die Unförmigkeit der Tropfen definieren. In dieser Arbeit wurde hierfür die Differenz zwischen Außen- und Innenkreis jedes Tropfens genommen und daraus ein statistischer Mittelwert berechnet. Auch hier wurde zusätzlich die relative Unförmigkeit bezüglich des Radius ermittelt. Die Unförmigkeit dient hierbei nicht als Hauptkriterium für die Wahl von Parametern, sondern als ein Nebenkriterium welches zusätzlich zur Dosierungskonsistenz betrachtet werden kann.

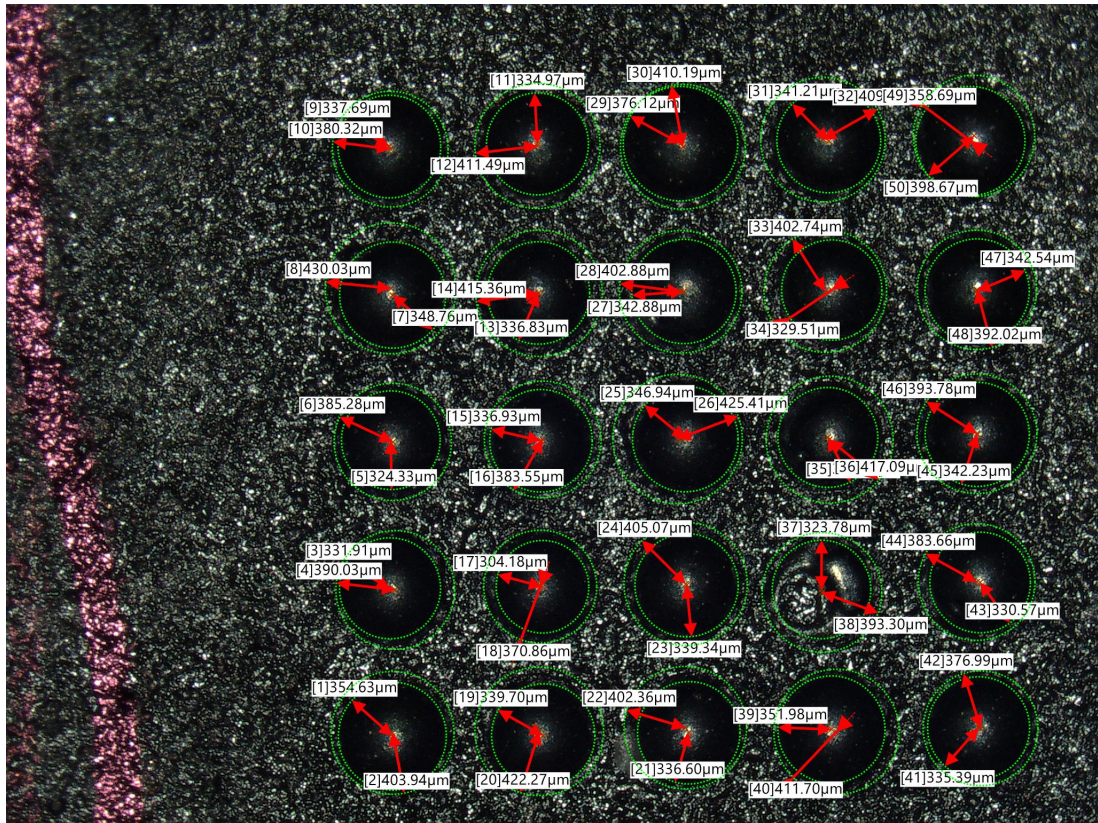


Abbildung 12: Beispiel für die präzise Messung eines Samples mit Innen- und Außenkreis für jeden Tropfen.

Die ersten 21 Sets sowie die Vakuumtestreihe wurden nach einer Filterung mit bloßem Auge anhand von Fehlern mit der oben beschriebenen groben Messmethode untersucht. Daraufhin wurde das beste Set gewählt und für dieses drei weitere Testreihen durchgeführt, in denen je ein Parameter variiert wurde, wobei die restlichen Parameter konstant blieben. Bei diesen Testreihen wurde darauf geachtet, eine Testreihe innerhalb von einer Stunde zu

schaffen, damit die Kartusche nicht währenddessen gewechselt werden muss. Es wurde erst der Höhenparameter, dann der Druckparameter und dann das Intervall variiert. Hierbei wurde das nach Betrachtung per Kleberoboterkamera beste Ergebnis der vorherigen Tests übernommen. Für die Testreihen wurden einfachere und kürzere Notationen genutzt, damit diese leichter auf den genutzten Glasplatten neben den einzelnen Proben notiert werden konnten. Die Vakuumtestreihe wurde mit v, die Höhentestreihe mit h, die Drucktestreihe mit p (für preassure) und die Intervalltestreihe mit i notiert. Hierbei wurde jedes Sample einmal ohne und einmal mit aktiviertem Distanzcheck erstellt. Samples, welche ohne Distanzcheck erstellt wurden, erhielten ein a) hinter ihrer Nummer, die Samples mit Distanzcheck erhielten ein b). Wurde ein Set zweimal getestet, wurde .2 direkt hinter die Nummer geschrieben. Letztendlich wurden die erstellten Samples mit dem Mikroskop erst mit der Methode mit einem Kreis (Grobauswertung) und die besten Kandidaten schließlich nochmal mit Innen- und Außenkreis (Feinauswertung) untersucht.

Die DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Kleber wurden nach einem leicht geänderten System gemessen. Zwischen den Araldite[®] 2011 und den DYMAX[®] Multi-Cure[®] Tests wurden ein paar Kleinigkeiten an den Testbedingungen geändert. So wurde ein Lack der Marke LabIR-Paint verwendet, um eine dunklere Oberfläche zu erhalten. Der Vergleich ist gut Anhand von den Abbildungen 11 und 12 zu sehen. Diese Maßnahme war vor allem dafür da, die Relevanz der Distanzmessung zu reduzieren, weshalb diese nur noch selten in der DYMAX[®] Multi-Cure[®] Testreihe beachtet wurde. Des Weiteren wurde der Parameter Höhe wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben als eigener Parameter entfernt und ist nur noch durch Änderungen der Distanzkoordinate einstellbar. Diese dient dazu, die Nadelhöhe gegenüber dem Laser zu synchronisieren. Deswegen wurde die Höhe hier ebenfalls kaum noch beachtet.

Wegen der hohen Anzahl der zu testenden Klebstoffe wurden die Tests pro Klebstoff durch kleinere Testreihen reduziert. In der ersten Phase der Tests wurden Parameter, die für den Araldite[®] 2011 funktionierten, ausgewählt. Diese wurden dann unverändert sowie für eine starke Abweichung der Parameter Druck, Intervall und Vakuum in jede Richtung für jeden der vier Klebstoffe getestet, wobei jeder Parameter variiert wurde, während die beiden anderen Parameter konstant blieben. Die entstandenen Samples wurden erst anhand von hoher Fehlerzahl, deutlich sichtbarer Inkonsistenz und aus anderen Gründen, welche später genauer diskutiert werden, gefiltert und dann mit dem Mikroskop untersucht. In der zweiten Phase wurden die jeweils besten Werte für jeden Kleber übernommen und ebenfalls wieder drei Proben pro Messreihe aufgenommen, wobei die gewählten Grundparameter für die Messreihen mitgezählt werden, dieses Mal mit deutlich kleineren Abweichungen. Die Proben wurden hierbei mit den Namen der Grundprobe aus dem ersten Teil der Tests mit dem DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 gefolgt von einer römischen Ziffer bezeichnet. Bei der Bezeichnung der Parameter wurden die Klebernamen abgekürzt mit B, T, VT, und GEL. Dabei steht B für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Basiskleber, während die anderen drei Bezeichnungen mit den Endungen der Kleberbezeichnungen übereinstimmen. Nach

den Grobtests wurde einer der vier Kleber ausgeschlossen, da die Dosierung mit diesem grundlegend nicht funktioniert hat.

Zum Abschluss wurden die Massen der Tropfen für die besten Parametersets bestimmt. Hierfür wurde eine Präzisionswaage genutzt, welche bis zu einem Milligramm präzise messen kann.

5.3 Ergebnisse der Tests mit Araldite[®] 2011

Als erstes wurden die 21 hier aufgelisteten Grundparameter getestet.

Tabelle 2: Grundparameter des Araldite[®] 2011. 2 und 4 nutzen die selben Parameter wie 1 und 3 mit aktivem Distanzcheck. Das Vakuum war dauerhaft auf 0 kPa. 3.2 ist ein Zweitversuch zu 3.*: Zweitversuche, bei denen die Nadel vor dem Versuch vom Klebetropfen gereinigt oder die Zeit verkürzt wurde, damit der Kleber sich nicht zu sehr ansammelt. Ab 13 bis 16 wurde hier die Tropfzeit überschritten. Der Off-Delay ist 500 ms für die ersten 4, 0 ms für Sample 5-12 und 1000 ms für den Rest. Der On-Delay ist 0 ms für die ersten zwei und alle Samples ab 17.2, 50 ms für die Samples 3-11 und 1000 ms für die Samples 12-17.

Sample	Druck [kPa]	Intervall [ms]	Höhe [mm]	Nadel [mm]	Zwischenhöhe [mm]	Zwischenzeit [ms]	Zusatzsamples
1	160	75	0.128	0.25	0	0	2
3	200	50	0.178	0.25	0	0	4, 3.2
5	120	250	0.02	0.25	0	0	-
6	120	250	0.02	0.25	0.1	1000	-
7	120	250	0.02	0.25	10	1000	-
8	200	50	0.178	0.25	1	1000	8.2*
9	200	50	0.178	0.25	1	2000	-
10	200	50	0.178	0.25	2	2000	-
11	200	50	0.02	0.25	1	2000	-
12	200	50	0.01	0.25	1	2000	12.2*
13	150	75	0.01	0.25	1.5	2000	-
14	200	75	0.005	0.25	1.5	2000	14.2
15	250	75	0.005	0.25	1.5	2000	-
16	250	150	0.005	0.25	1.5	2000	-
17	160	75	0.128	0.25	2	1000	2. Versuch
17.2	160	75	0.128	0.25	2	1000	2. Versuch
18	160	75	0.228	0.25	2	1000	-
19	160	75	0.128	0.25	1	1000	2. Versuch+ 19.2
20	160	75	0.128	0.2	1	1000	20.2 + 2. Versuche
21	160	75	0.128	0.2	1	1000	21.2

Sample 21 beinhaltet wie bereits erwähnt 100 Tropfen statt den üblichen 25. Die Linien trennen einzelne Tage, an denen gemessen wurde voneinander. Im folgenden sind in einer Tabelle die Ergebnisse für die Messung des Radius mitsamt Fehler und der Standardabweichung angegeben. Für die Standardabweichung selbst wird kein Fehler gegeben, da dieser am einfachsten mithilfe von mehreren Standardabweichungen zu bestimmen wäre. Diese benötigen eine große Zahl an Samples mit den selben Parametern, welche den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden. Relevant ist hier die absolute sowie relative Standardabweichung

Tabelle 3: Auswertung der Grundparameter des Araldite[®] 2011. Die fehlerhaften Tropfen werden in folgendem Format angegeben: (Satelliten erster Ordnung/Satelliten zweiter Ordnung/Ringe/Anzahl zusammengelaufene Tropfe*Anzahl Einzeltropfen in dem Tropfen/Fehlende Tropfen). Grundparameter, die hier nicht stehen, wurden in der Vorauswahl aussortiert. Anmerkung: Bei den Samples der 19er Reihe kam es zu einer Fehlskalierung des Mikroskops. Diese wurde rausgerechnet, kann aber trotzdem zu Fehlern führen.

Sample	Fehlerhafte Tropfen	Mittlerer Radius [μm]	Fehler Radius [μm]	Standard- abweichung [μm]	relative Abweichung
19	0	353.93	1.63	8.15	0.02
19 2.Versuch	5(0/0/5/0/0)	358.26	1.65	8.21	0.02
19.2	4 (1/3/0/0/0)	332.16	3.07	15.63	0.05
20	5(0/0/5/0/0)	166.66	3.12	15.59	0.09
20 2.Versuch	1(0/1/0/0/0)	166.10	2.33	11.65	0.07
20.2	2(0/0/2/0/0)	317.47	7.25	36.23	0.11
20.2 2.Versuch	0	334.40	5.77	28.85	0.09
21	6(2/2/0/1*2/0)	369.22	1.86	18.63	0.05
21.2	9(0/1/8/0/0)	297.56	3.22	32.12	0.11

Es folgen nun grafische Darstellungen der daraufhin durchgeführten Testreihen, in denen die absolute Standardabweichung gegen den variierten Wert aufgetragen wird. Auch hier wird kein Fehler für die Standardabweichung angegeben, dafür aber für den variierten Wert. Als Fehler für Druck und Vakuum wird der Digit-Wert von 0.1 kPa genommen. Für den Intervallfehler wird der Digitwert von einer Millisekunde genutzt. Für den Höhenfehler werden sowohl der Wiederholungsfehler der Achse von 1.5 μm als auch der maximale Fehler des Distanzmessers von 1 μm betrachtet. Die Höhe bestimmt sich aus gemessener Distanz addiert mit der eingetragenen Verschiebung. Mit der gaußschen Fehlerfortpflanzung folgt ein Fehler von $\delta h = \sqrt{1 \mu\text{m}^2 + 2.25 \mu\text{m}^2} \approx 1.82 \mu\text{m}$.

In den folgenden Plots stehen grüne Marker für Tests mit Distanzcheck, orangene für Tests ohne Distanzcheck. Die auf 0 μm gesetzten Werte stehen für verworfene Samples. On-Delay ist dauerhaft gewählt als 0ms, der Nadeldurchmesser als 0.2 mm, Off-Delay als 1000 ms, Wartehöhe als 1 mm und Wartezeit als 1000 ms.

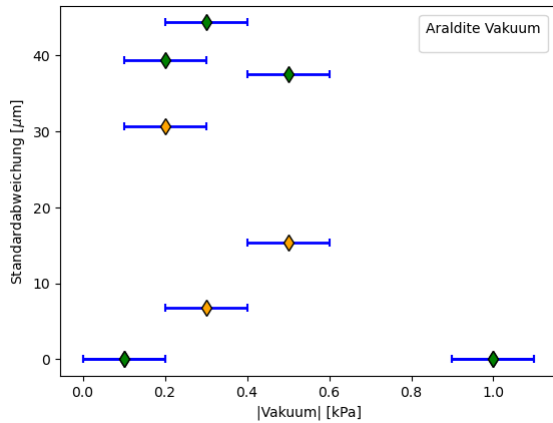


Abbildung 13: Araldite® 2011 Testreihe Vakuum. Das Minimum liegt bei -0.3 kPa mit einer Standardabweichung von $6.82 \mu\text{m}$. Feste Parameter: Druck= 160 kPa, Dauer= 75 ms, Höhe= 0.128 mm

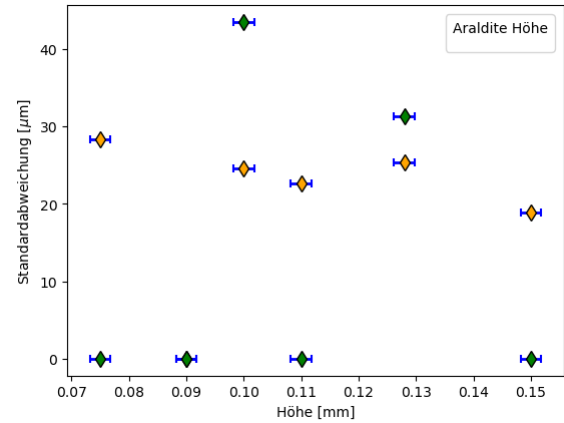


Abbildung 14: Araldite® 2011 Testreihe Höhe. Das Minimum liegt bei 0.15mm mit einer Standardabweichung von $18.93 \mu\text{m}$. Feste Parameter: Druck=160 kPa, Dauer= 75 ms, Vakuum= -0.3 kPa (-0.2 kPa für $h = 0.1$ mm)

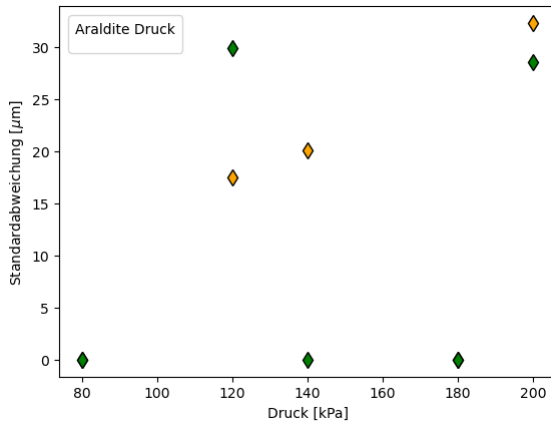


Abbildung 15: Araldite® 2011 Testreihe Druck. Das Minimum liegt bei 120 kPa mit einer Standardabweichung von $17.50 \mu\text{m}$. Feste Parameter: Vakuum= -0.3 kPa, Dauer= 75 ms, Höhe= 0.1 mm

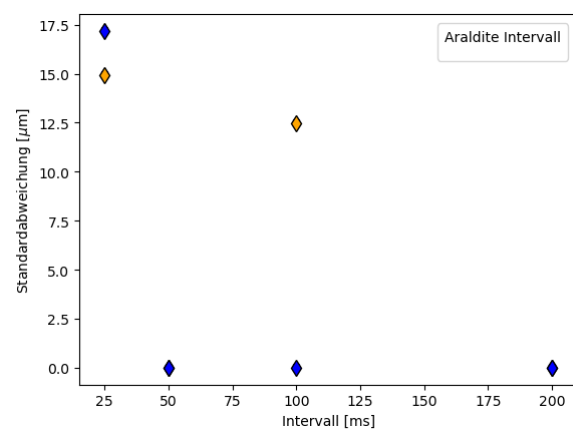


Abbildung 16: Araldite® 2011 Testreihe Intervall. Das Minimum liegt bei 100 ms mit einer Standardabweichung von $12.46 \mu\text{m}$. Feste Parameter: Druck= 160 kPa (200 kPa für blaue, nur für 25 ms getestet.), Höhe= 0.1 mm, Vakuum= -0.3 kPa. Distanzprüfung ist in jedem Sample gescheitert.

Nun werden die Parametersets vorgestellt, welche als die besten Parameter für den Araldite erkannt wurden. Zuerst werden die Parameter vorgestellt, dann die Standardabweichung der Tropfenradien sowie deren Unförmigkeit. Viele Parameter sind für alle Sets gleich. Dabei handelt es sich um:

Vakuumm: -0.3 kPa, Nadeldurchmesser: 0.2 mm, Off-Delay: 1000 ms, On-Delay: 0 ms, Zwischenhöhe: 1 mm, Zwischenzeit: 1000 ms

Tabelle 4: Die besten gefundenen Parameter für den Araldite[®] 2011.

Sample	Druck [kPa]	Intervall [ms]	Höhe [mm]
i1 a)	160	25	0.1
i3 a)	160	100	0.1
p1 a)	120	75	0.1
p2 b)	200	75	0.1
v3 a)	160	75	0.128

Tabelle 5: Die Ergebnisse zu den besten gefundenen Parameter für den Araldite[®] 2011. F. steht für Fehler, Abw. für Abweichung, Unf. für Unförmigkeit rel. für reative und abs. für absolute. Die fehlerhaften Tropfen werden in folgendem Format angegeben: (Satelliten erster Ordnung/Satelliten zweiter Ordnung/Ringe/Anzahl zusammengelaufene Tropfen* Anzahl Einzeltropfen in dem Tropfen/Fehlende Tropfen.)

Sample	Tropfen- fehler	Radius [μm]	F. Radius [μm]	abs. Abw. [μm]	rel. Abw.	abs. Unf. [μm]	F. abs. Unf. [μm]	rel. Unf.	F. rel. Unf.
i1 a)	0	315.084	2.997	14.983	0.048	28.623	1.641	0.091	0.006
i3 a)	1(1/0/0/0/0)	421.215	3.05	415.253	0.036	28.686	2.066	0.068	0.005
p1 a)	0	372.365	4.198	20.992	0.056	31.823	2.058	0.085	0.006
p2 b)	1(1/0/0/0/0)	412.756	5.580	27.898	0.068	37.183	1.945	0.090	0.005
v3 a)	1(0/1/0/0/0)	293.406	1.434	7.166	0.024	27.68	1.40	0.094	0.005

Als letztes ist die Masse der einzelnen Tropfen in den Samples interessant. Hierbei wurden mehrere Tropfen auf eine Glasplatte aufgetragen und damit die Masse bestimmt. Die Anzahl wurde im Versuch, die Genauigkeit zu verbessern variiert.

Tabelle 6: Masse der Araldite[®] 2011 Klebetropfen. Die Messung ist aufgrund der Präzision der Waage von einem Milligramm und äußerer Einflüsse ungenau.

Sample	Anzahl Tropfen	Masse [mg]	Fehler [mg]	pro Tropfen [mg]	Fehler/Tropfen [mg]
i1 a)	225	1	1	0.0044	0.0045
i3 a)	300	4	1	0.0133	0.034
p1 a)	100	3	1	0.030	0.010
p2 b)	100	6	1	0.060	0.010
v3 a)	100	5	1	0.050	0.010

5.4 Ergebnisse der Tests mit DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621

Im folgenden sind die drei Messreihen für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] dargestellt. Zwischen den Grob- und den Feintests wurden die anderen Parameter geändert. Die ausgewählten Parameter werden später nochmal aufgelistet. Die Parameter On-Delay: 0 ms Off-Delay: 250 ms Zwischenhöhe: 1 mm und Zwischenzeit 1000 ms wurden konstant gehalten. Alle drei Kleber (Basis, Thick, Very Thick) sind in den selben Plots zu sehen, wobei der Rautenmarker den Basiskleber markiert, der Kreismarker den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T und das umgedrehte Dreieck den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT. Gezeigt werden alle Sets, bei denen explizit der Parameter der Reihe geändert wurde oder bei dem es sich um eine Variation der Basisparameter handelt. Der Distanzcheck wurde hier nicht mehr so oft untersucht. Gründe dafür werden in der im nächsten Abschnitt folgenden Diskussion genannt. Einige Werte wurden in Grob- und Feintests teils mit unterschiedlichen anderen Parametern getestet und weisen deswegen mehrere Ergebnisse auf. Der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 GEL wird nicht beachtet, weil die Tests mit diesem keine guten Ergebnisse geliefert haben.

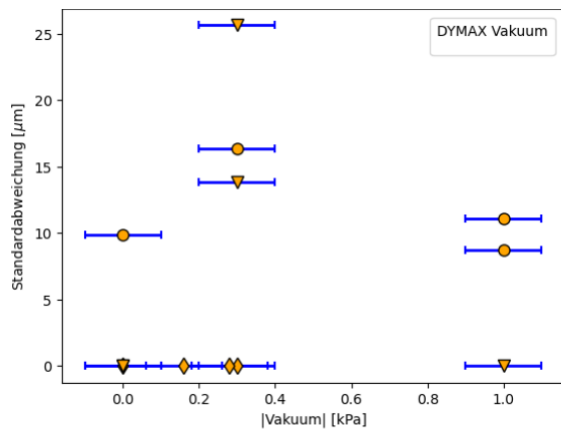


Abbildung 17: DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Testreihe Vakuum. Die Messungen mit dem Basiskleber sind allesamt fehlgeschlagen.

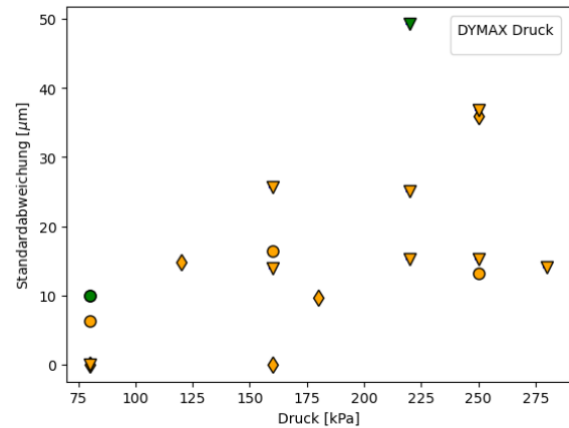


Abbildung 18: DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Testreihe Druck.

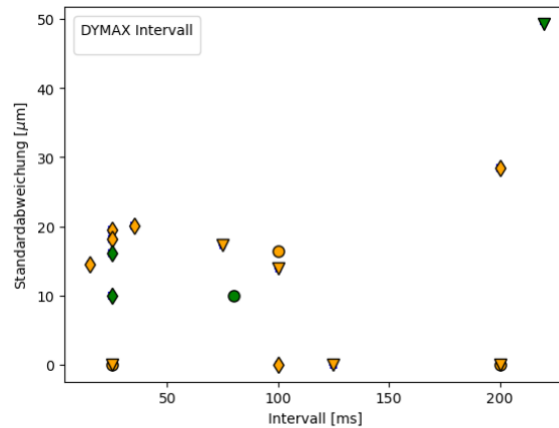


Abbildung 19: DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Testreihe Intervall.

Im den folgenden Tabellen 7 und 8 werden die besten Parameter für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 vorgestellt. Daraufhin wird in der Tabelle 9 auf der übernächsten Seite das Ergebnis der Massenmessung vorgestellt.

Tabelle 7: Die besten gefundenen Parameter für den DYMAX[®] Multi-Cure[®]. Die Höhe kann nicht mehr genau eingestellt werden, spielte aber trotzdem für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT eine wichtige Rolle. (Die Voreinstellung ist 0.1 mm). B steht hier für den Basiskleber, T und VT jeweils für DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T und DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT.

Sample	Vakuum [kPa]	Druck [kPa]	Intervall [ms]	Nadel [mm]	Höhe [mm]
B i1 V	-0.29	180	25	0.13	0.1
VT p1 II	-0.3	280	100	0.21	0.15
T v1 a)	-1	160	100	0.13	0.1
T v1 b)	-1	160	100	0.13	0.1
T p2 a)	0	80	100	0.13	0.1
T p2 b)	0	80	100	0.13	0.1

Tabelle 8: Die Ergebnisse zu den besten gefundenen Parameter für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621. F. steht für Fehler, Abw. für Abweichung, Unf. für Unförmigkeit, rel. für reative und abs. für absolute. Die fehlerhaften Tropfen werden in folgendem Format angegeben: (Satelliten erster Ordnung/Satelliten zweiter Ordnung/Ringe/Anzahl zusammengelaufene Tropfen*Anzahl Einzeltropfen in dem Tropfen/Fehlende Tropfen.)

Sample	Tropfen- fehler	Radius [μm]	F. Radius [μm]	abs. Abw. [μm]	rel. Abw.	abs. Unf. [μm]	F. abs. Unf. [μm]	rel. Unf.	F. rel. Unf.
B i1 V	0	169.756	1.866	9.329	0.055	69.961	3.288	0.412	0.020
VT p1 II	1(0/0/1/0/0)	369.882	2.513	12.565	0.034	61.687	2.989	0.167	0.009
T v1 a)	0	245.907	2.217	11.084	0.045	55.505	3.098	0.226	0.013
T v1 b)	0	228.544	2.949	14.742	0.065	56.407	1.838	0.247	0.008
T p2 a)	0	171.405	1.991	9.955	0.058	63.400	3.425	0.370	0.020
T p2 b)	0	190.606	2.002	10.007	0.053	60.744	2.576	0.319	0.014

Tabelle 9: Masse der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Klebetropfen. Die Messung ist aufgrund der Präzision der Waage von einem Milligramm und äußerer Einflüsse ungenau.

Sample	Anzahl Tropfen	Masse [mg]	Fehler [mg]	pro Tropfen [mg]	Fehler/Tropfen [mg]
B i1 V	100	1	1	0.01	0.01
T v1 a)	100	5	1	0.05	0.01
T p2 a)	100	2	1	0.02	0.01
VT p1 II	100	4	1	0.04	0.01

5.5 Diskussion der Ergebnisse und Beobachtungen

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse der Parametersuche analysiert und Probleme besprochen, welche beim Testvorgang aufgetreten sind sowie Möglichkeiten genannt, diese Probleme zu lösen.

5.5.1 Analyse der Tests mit Araldite[®] 2011

Über die ersten Samples hinweg wurden viele fehlerhafte Tropfen beobachtet und die Entstehung der Fehler untersucht. So kam es vor allem bei den ersten Samples, aber auch häufig später noch zu Ringen. Über den Verlauf der Messungen stellte sich heraus, dass bei einer zu geringen Höhe Kleber, der sich am Rand der Nadel abgelagert hat, als Ring abgesetzt wird. Der Rand der Nadel verhindert aufgrund der geringen Höhe, dass Kleber in dem Bereich des Randes selbst abgesetzt wird. Dadurch wird nur Kleber im Bereich der Öffnung und der außen an dem Rand angelagerte Kleber abgesetzt.

Satelliten traten hin und wieder auf, was mit einer zu hohen Höhe zusammenzuhängen

scheint. Das Hinzufügen der Zwischenhöhe und der Zwischenzeit erlaubte es, Satelliten, die durch das Reißen des von der Nadel gezogenen Klebefadens entstehen, zu verhindern. Bei einigen Samples, besonders bei Sample 8-11 war ein Phänomen zu beobachten, bei dem ein paar hintereinander abgesetzte Tropfen eine gleichbleibende Größe hatten und es danach zu einer Vergrößerung und Fehlern wie Satelliten oder zusammengelaufenen Tropfen kam, woraufhin die Tropfen deutlich kleiner wurden oder komplett fehlten. Dieses Muster wiederholte sich zyklisch. Sample 8 ist im Bild 20 zu sehen. Diese Beobachtung zusammen mit einer Beobachtung der Spitze zeigte, dass sich während dem Klebeprozess Kleber an der Spitze ansammelt, der dann abgesetzt wird. Sammelt sich mehr Kleber an der Spitze als abgesetzt wird, kommt es aufgrund der Schwerkraft irgendwann dazu, dass der gesamte Tropfen abfällt, was zu größeren Klebetropfen führt. Danach befindet sich erstmal kein Kleber mehr an der Spitze und die folgenden Tropfen werden kleiner. In den Pausen zwischen den einzelnen Tropfen durch die Schwerkraft mehr Kleber an der Spitze angesammelt, was zur Entstehung des Effekts beiträgt. Umgekehrt kann es passieren, dass mehr Kleber abgesetzt wird als sich an der Spitze sammelt, wodurch die Tropfen kleiner werden. Die Lösung dieses Problems lag in dem bis zur Vakuumtestreihe ignorierten Vakuumparameter, welcher den angesammelten Kleber wieder in die Kartusche saugen soll.

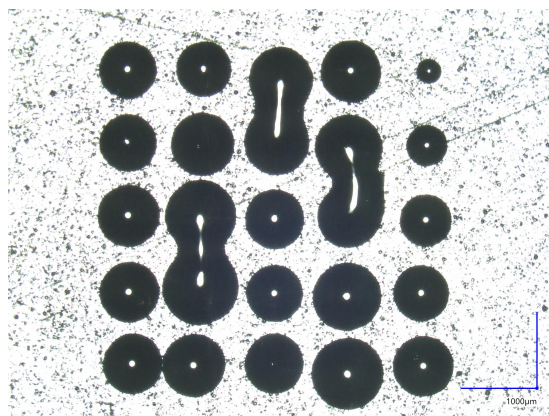


Abbildung 20: Araldite® 2011 Sample 8. Zu sehen ist, dass vor allem am Anfang jeder 5 Tropfen deutlich kleiner war, während die Tropfen 4, 9, 8 und 13 ineinandergelaufen sind, da sie zu groß wurden.

Zwei weitere am zweiten Testtag aufgefallene Probleme beinhalten den Startzustand und die Viskositätsänderung. Wie viel Kleber sich vor Absetzen des ersten Tropfens einer Probe an der Spitze angesammelt hat, beeinflusst die Größe der ersten paar Tropfen signifikant. Auf die späteren Tropfen zeigt sich hierbei ein kleinerer Einfluss. Ist das Sample von einem der oben beschriebenen Zyklen betroffen, bestimmt der Startzustand vor allem, an welchem Punkt des Zyklus das Sample startet. Um das Problem zu lösen, kann man den Klebetropfen vor Setzen des Samples von der Spitze abwischen. Dies führt jedoch für einige

Parameter zu Leerstellen. Aus diesem Grund sollte auch nach jedem Kleberwechsel manuell Druck auf die Kartusche gegeben werden, bevor die Samples erstellt werden, damit sich Kleber in der Nadel ansammelt. Der Araldite[®] 2011 wurde ab Sample 13 über die Tropfzeit hinaus genutzt. Es zeigte sich als Folge eine kleinere Zahl Satelliten, aber eine deutlich größere Zahl an fehlenden Tropfen.

Bei den Parametern 17-19 konnte das Auftreten von Ringen am Anfang der Samples wegen einer Nichtreinigung der Spitze beobachtet werden. Es wurde vermutet, dass die Ringe durch den während den Klebepausen am Rand der Spitze angesammelten Kleber entstanden sind. Spätere Samples zeigten, dass die Verwendung einer Spitze mit geringerem Durchmesser von 0.2 mm statt 0.25 mm dafür sorgt, dass man zwischen den Samples länger warten konnte, ohne dass sich Ringe bilden. Die kleinere Nadel sorgte jedoch auch für inkonsistentere und vor allem unförmigere Tropfen. Darüber hinaus wurde mit Parameterset 21 getestet, ob das Problem bei 100 Tropfen auch während des Klebevorgangs zurückkehrt, was für 21 ohne Distanzcheck nicht der Fall war. Mit dem Distanzcheck ergaben sich schlechtere Ergebnisse, die aber auf allgemeine Probleme mit der Funktion zurückgeführt werden können, welche später noch erläutert werden. Auch hier lag die Lösung im Vakuumparameter. Das beste Sample des Tages war Sample 19, in dem die 0.25 mm Nadel verwendet wurde. Bei der Untersuchung der 19-er Proben kam es zu einer Fehlskalierung des Mikroskops. Dies kann passieren, wenn man den Zoom manuell am Mikroskop einstellt und dabei das Rad zur Einstellung nicht bis zum Anschlag dreht. Die Fehlskalierung wurde durch Multiplikation der Ergebnisse mit 2 rausgerechnet. Es ist davon auszugehen, dass hierbei weitere Ungenauigkeiten zu Stande kamen.

Die Vakuum-Messreihe erreichte ihren Optimalwert für -0.3 kPa. V5 mit einem Vakuum von -1 kPa machte im Bild einen guten Eindruck, jedoch zeigte sich schon beim Kleben, dass ein Risiko für Fehler wie fehlende Tropfen bestehen kann. Bei dem ersten Test mit -0.1 kPa kam es gehäuft zu Satelliten. Vermutlich wirkte hier das Vakuum dem Sinn der Wartehöhe und Wartezeit entgegen. Wegen der Zugkraft konnte sich der Faden dieser Vermutung folgend nicht während der Wartezeit lösen, sondern riss erst, als der Kleberoboter weiter hochgefahren ist. Ab -0.2 kPa Vakuum trat dieses Problem nicht mehr auf. Es ist davon auszugehen, dass der Klebefaden hier vom Vakuum angesaugt werden konnte. Das Vakuum selbst war in der Lage, die zuvor festgestellten Probleme zu verringern. V3 a) war das insgesamt beste Parameterset für Araldite[®] 2011 mit dem einzigen Nachteil, dass ein winziger Satellit entstanden ist. Des Weiteren kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Parameterset durch Zufallseffekte so gut war. Ein späteres Set H 1a) verwendete die selben Parameter, wurde jedoch nicht optimal vorbereitet, wie im nächsten Abschnitt erklärt wird. In späteren Tests stellte sich heraus, dass das Vakuum mit einer 0.25 mm Nadel deutlich schlechtere Ergebnisse produzierte als mit einer 0.2 mm Nadel.

Bei der Höhe zeigte sich eine leichte Besserung der Ergebnisse mit zunehmender Höhe. Hierbei wurden keine besonders hohen Werte betrachtet, es ist jedoch zu vermuten, dass

ab einem bestimmten Wert die Luft zwischen Nadel und Klebefläche eine immer größere Rolle spielt. Die Luft ist ebenfalls ein externer Parameter, der einen unkontrollierbaren zufälligen Einfluss auf die Messung erzeugt. Bei der ersten Messung H 1a) $h = 0.128$ mm ist ein kleiner Ausreißer zu sehen. Dies lag an der Menge angesammelten Klebers in der Spitze. Hier wurde vergessen, erst Druck auf den Kleber zu geben, damit dieser sich in der Spitze sammeln kann, was zu fehlenden bis kleinen Tropfen zu Beginn führte. Die Tropfen, die offensichtlich davon betroffen waren, wurden in der Auswertung ignoriert. Die weiteren Messreihen wurden alle gemeinsam ausgewertet, weswegen die Höhe im folgenden nach Augenmaß gewählt und auf 0.1 mm gesetzt wurde.

Auch wichtig ist, dass der Höhenfehler, welcher genutzt wurde, nur im Optimalfall gilt. Nahezu jede Messung zeigte schlechtere Ergebnisse für den aktivierten Distanzcheck als für den deaktivierten Distanzcheck, wobei der Unterschied in der Qualität signifikant war. In der letzten Messreihe zeigte sich für den Distanzcheck ein Muster, bei dem Tropfen in der selben Spalte ungefähr gleich groß waren, während sich die verschiedenen Spalten extrem unterschieden, wie in Bild 21 zu sehen ist. Die Klebefläche besteht aus mehreren Schichten von Platten aus Epoxidharz und Glasfasergewebe, welche eigens für die Klebetests zurechtgeschnitten wurden. Bei der spezifischen verwendeten Platte waren besonders viele Schnittspuren zu sehen, welche in die Richtung der konsistenten Tropfen zeigten. Somit ist zu vermuten, dass der Distanzmesser durch Reflexionseffekte der Glasplatten nicht richtig funktionierte. Dies ist vor allem für Tests mit Distanzcheck, aber auch für Tests ohne Distanzcheck ein großes Problem, da die Distanz mindestens einmal gemessen werden muss, um die z-Koordinate zu bestimmen, an der die Nadel den Kleber absetzen soll. Somit beinhaltet jede Messung neben dem berechneten Höhenfehler von ≈ 1.82 μm einen zufälligen Fehler des Distanzmessers, der scheinbar in Extremfällen bis zu einen Millimeter erreichen kann. Das Problem wurde für die DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Tests mit Hilfe eines LabIR-Paint-Lacks gelöst, der auf die Platten aufgetragen wurde. Dieser brachte andere Probleme mit sich, welche später diskutiert werden.

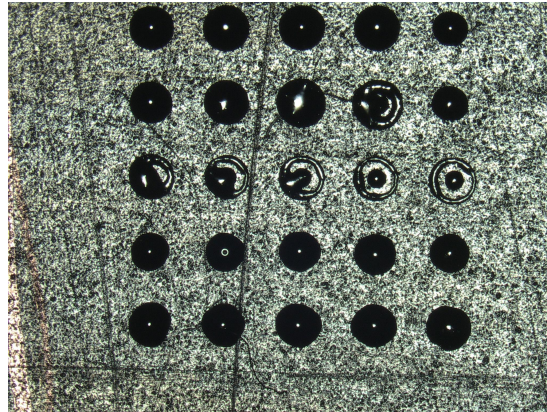


Abbildung 21: Araldite[®] 2011 Sample i4 b. Zu sehen ist ein an die Zeilen angepasstes Muster. (Unter dem Mikroskop sind die Samples gegenüber der Kamera des Gluebots um 90 Grad gedreht, deswegen ist im Text von Spalten die Rede.)

Der Druck zeigte die besten Ergebnisse für 120 kPa und schwächer werdende Ergebnisse für höhere Werte. Hierbei hätte eine Änderung der Höhe scheinbar positive Auswirkungen gezeigt, wie an dem besseren Ergebnis p2 b) für 200 kPa mit Distanzcheck zu sehen ist. Dieses Parameterset ist als das beste Araldite[®] 2011-Set unter der Verwendung von Distanzcheck ausgewählt worden. Es ist zu beachten, dass diese Parameter vergleichsweise große Tropfen von über 400 μm erzeugen. Große Tropfen erschweren die Dosierung und erhöhen den Materialverbrauch. Sie erlauben dafür, mit weniger Klebepunkten eine große Menge Kleber zu setzen, was unter anderem zeitlich einen Vorteil bietet. Der Test für 80 kPa hat Ergebnisse erzeugt, welche bereits mit bloßem Auge aussortiert werden konnten. Der lineare Zusammenhang setzt sich unterhalb eines bestimmten Werts somit nicht mehr fort. Per bloßem Auge wurden alle getesteten Werte ausgeschlossen und die vorher genutzten 160 kPa gewählt.

Die Intervalltests wurden leider durch den Distanzcheck ruiniert. Das beste Ergebnis ergab sich hier für ein Intervall von 100 ms. Ein weiteres Problem, welches vor allem unter dem Mikroskop unter Ringlicht ersichtlich war, waren Fremdkörper auf der Glasplatte. Da die Radien der Tropfen in einer Größenordnung von $10^2 \mu\text{m}$ liegen, ist bereits ein Haar dick genug, um einen signifikanten Unterschied in der Form der Tropfen ausmachen zu können. Es ist dementsprechend wichtig, die Testfläche möglichst sauber zu halten. Abgesehen davon haben die erfolgreich durchgeführten Intervalltests alle zu vergleichsweise guten Werte geführt.

Unter den besten Parametern, welche in 4 und 5 erläutert werden, ist v3 a) mit einer relativen Abweichung von 0.024 am besten. Zu bedenken ist jedoch, dass der einzige Zweittest deutlich schwächere Ergebnisse brachte, aber auch nicht zuverlässig genug durchgeführt

wurde. i3 a) ist mit einer relativen Abweichung von 0.036 immer noch extrem stabil, und hat mit 0.068 (gegen 0.094) eine deutlich bessere relative Unförmigkeit. Die relative Unförmigkeit ist kein entscheidender Faktor, kann aber auf Zufallseinflüsse hinweisen, welche die Parameter weniger stabil gestalten können. Die Tatsache, dass das Set i1 a) mit einer relativen Abweichung von 0.048 ebenfalls überdurchschnittlich stabil ist, weist darauf hin, dass die festen Parameter der Intervalltestreihe auch über mehrere Proben stabil sind. Alle in diesen Tabellen aufgelisteten Sets sind gut genug, um verwendet werden zu können, sowohl von der absoluten als auch der relativen Abweichung.

5.5.2 Analyse der Tests mit DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621

Bei den ersten Auswertungen des DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 sind direkt einige Probleme aufgetreten. Zu Beginn waren die LEDs noch nicht eingebaut und die Samples wurden mehrere Tage aufbewahrt, in der Hoffnung durch Umgebungslicht zu härten. Bereits in dieser Phase aber auch beim Transport zum Mikroskop wurden einige Tropfen verwaschen. Dies zog sich in späteren Tests durch, da dort die Dauer zum Härten des Klebers unterschätzt wurde. Darüber hinaus kam es zu Problemen mit den Lichtverhältnissen, da der Kleber unter dem Mikroskop schwarz erschien und der verwendete Lack ebenfalls schwarz war. Dadurch war es deutlich schwerer, Kreise zu ziehen und die Tropfen zu erkennen. Das Ringlicht macht es leichter, Tropfen zu erkennen, zeigt sie aber von der Seite, wodurch vorher nicht sichtbare Unebenheiten zu sehen sind, was die Unförmigkeit erhöht. In den Bilder 22 und 23 sind Beispieletropfen unter Ring- und Koaxiallicht zu sehen. Für die ersten drei Samples wurde der Aktivator zum Härten genutzt, jedoch stellte sich schnell heraus, dass dies aufgrund der schwierigen Dosierung des Aktivators und vor allem fehlenden Druck nicht funktionierte. Dadurch war die Qualität der Proben zu gering und diese wurden bereits vor der Messung aussortiert.

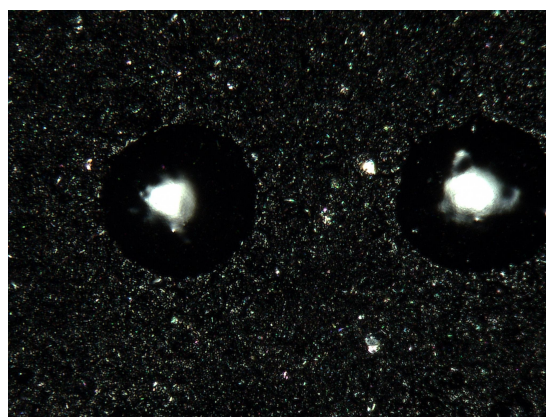


Abbildung 22: Tropfen unter Koaxiallicht. Diese Tropfen haben besseren Kontrast als viele andere DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Tropfen.

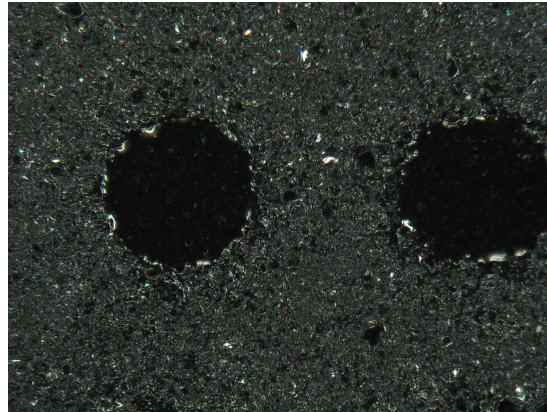


Abbildung 23: Tropfen unter Ringlicht. Hierbei handelt es sich um die selben Tropfen wie in der vorherigen Abbildung.

In den folgenden Grobtest des Basisklebers zeigte sich, dass das Sample für 80 kPa Druck fehlschlug. Dies kann an den bereits beschriebenen allgemeinen Problemen gelegen haben. Mit der Kamera des Kleberoboters zeigten sich kaum Unterschiede bezüglich des Drucks. Im Feintest zeigte eine leichte Erhöhung des Drucks für ein niedrigeres Intervall eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse. Das Intervall gab für 25 ms und später in den Feintests für 15 ms das beste Ergebnis. Allgemein sorgt die geringe Viskosität für eine hohe Unförmigkeit. Um Probleme durch zu schnell nachfließenden oder abgesaugten Kleber zu verhindern, muss das Vakuum auf etwas weniger als -0.3 kPa gestellt werden. In früheren Tests schlugen viele Parameter wegen der zu hohen Viskosität fehl. Ein geringes Intervall reduziert den Radius der Tropfen auf unter $200\text{ }\mu\text{m}$. Dadurch, dass die Tropfen so klein sind, zerfließen sie kaum. Trotzdem sind die meisten Tropfen nicht ansatzweisen rund. Das beste Set für den Basiskleber erreichte seinen besten Parameter mit Bi1 V mit einer relativen Abweichung von 0.055 was wegen der kleinen Radien einer geringen absoluten Abweichung von $9.329\text{ }\mu\text{m}$ entspricht.

Der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T zeigte in den Grobtests besonders gute Ergebnisse. Das Vakuum machte keine großen Unterschiede und wurde als irrelevant für den Kleber angenommen. In den späteren Krafttests kam es jedoch zu einer Situation, in der die Tropfen nach einigen Tests deutlich zu klein wurden. Es ist zu vermuten, dass das Vakuum mit der Zeit Luft in die Kartuschen saugt, welche anstelle des Klebers abgesetzt wird. Deswegen ist zu empfehlen, ein möglichst geringes Vakuum zu nutzen. Das Problem ist noch nicht für Vakuumwerte von -0.3 kPa aufgetreten, jedoch konnte beobachtet werden, dass auch dabei langsam Luft in die Kartusche gesaugt wird. Ein niedrigerer Druck sorgte für bessere Ergebnisse als ein höherer Druck. Letztendlich trat ein Problem bei der Intervall-Messung auf, da Kleber zwischen der Nadel und der Kartuschenöffnung austreten konnte. Dies passierte insgesamt zwei mal. Die Ursache des Problems wurde leider nicht gefunden, es ist aber davon auszugehen, dass die Nadeln sich in das Gewinde der Kartusche gefräst und dadurch das Problem verursacht haben. Aufgrund der guten Ergebnisse wurden hier statt Feintests Korrekturtests durchgeführt, also Wiederholungstests zu den

bereits durchgeführten Tests. Die Auswertung der Korrekturtests ergaben deutlich größere Standardabweichungen für die beiden Tests, was an der Verwendung von Ring- statt Koaxiallicht liegen kann. Das Sample T v1 hatte im Korrekturtest einen um 13 μm kleineren Radius, was im Bereich von den 250 μm des ersten Tests eher klein ist. Das Sample T p2 weist einen signifikanten Unterschied auf. Dies weist auf zufällige äußere Einflüsse hin. Der Kleber fällt dadurch auf, dass er für viele Parameter besonders konsistente Samples produziert und ist somit der Favorit unter den getesteten Klebern. Die Änderungen über längere Zeit sind jedoch bedenklich und sollten weiter untersucht werden.

Der VT gab in den Feintests die besten Ergebnisse mit einer relativen Abweichung von 0.034. Die Absolute Abweichung von 12.565 μm ist deutlich schwächer, da der Radius mit $369.882 \pm 2.513 \mu\text{m}$ extrem groß ist. Die Grobtests waren zu größeren Teilen unbrauchbar, weil sie verschmiert wurden und die ersten Samples allgemein keine guten Ergebnisse liefern. Ein Wechsel von der 0.13 mm Nadel auf eine 0.21 mm Nadel gab es bessere Ergebnisse. Allgemein zeigten sich hier die besten Ergebnisse für extrem hohen Druck. Der Test für ein hohes Intervall wurde leider verwischt, eine Verringerung des Intervalls führte zu deutlich schlechteren Ergebnissen. Nachdem bei den Feintests größere Probleme auftraten, stellte sich heraus, dass dieser Kleber für gute Ergebnisse eine größere Höhe braucht. Dafür wurde die Distanzkoordinate um 50 μm nach oben gesetzt. Da die ersten Tests besser funktionierten und die Probleme erst nach Nutzung des Distanzchecks auftraten, ist davon auszugehen, dass dieser auch mit dem Lack nicht optimal funktioniert. Für den ersten Feintest traten seltsame Bergstrukturen auf den Tropfen auf. Diese hängen möglicherweise auch mit der geringen Höhe zusammen. In späteren Tests wurde die Höhe einzeln angepasst, bis die abgesetzten Testtropfen gut funktionierten.

Später traten Probleme auf, bei denen der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 nicht aus der Kartusche gedrückt werden konnte. Es stellte sich heraus, dass Kleber am unteren Ende der Kartusche trotz UV-Schutzkartusche härter wurde. Um dieses Problem zu umgehen, sollte man vor Befestigen der Nadel eine kleine Menge Kleber mit einem Tuch auffangen. Je nach Klebemenge, welche man pro Tropfen dosieren will, kann man den Basiskleber für kleine Tropfen, den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T für mittlere Tropfen oder den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT für große Tropfen verwenden.

5.5.3 Massenmessung und Vergleich

Bei der Messung des Massen wurden 100 oder mehr Tropfen auf einer Platte aus dünnem Glas aufgebracht und mit einer Waage gemessen. Die Waage ist auf einen Milligramm genau und die Klebetropfen wiegen zusammen nicht mehr als 6 Milligramm, weswegen kleinste äußere Einflüsse wie Schmutz die Ergebnisse komplett verfälschen können. Jana Weynrich [2] hat eine alternative Methode genutzt, welche das Volumen der Tropfen bestimmt, jedoch ist diese Methode enorm aufwändig und übersteigt den Rahmen dieser Arbeit. Während der Massenmessung traten die Probleme mit dem hart gewordenen UV-Kleber auf, welche die Zeit und Umstände für Messungen erneut erschwerten.

Der Araldite[®] 2011 bietet mit den besten Parametern geringere Standardabweichungen als der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621, die schwächeren Parametersets, die ebenfalls als gut genug bewertete wurden, sind bei beiden Klebern ähnlich gut gelungen. Der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 zeigt allgemein eine höhere Unförmigkeit, was wahrscheinlich an dem ungünstigeren Kontrast zur Testfläche liegt. Dadurch könnten auch die Abweichungen des DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 schlechter werden. Im Vergleich macht der Araldite[®] 2011 somit einen besseren Eindruck. Für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 wurden ebenfalls Parameter gefunden, welche verwendet werden können und ihn aufgrund der genannten Nachteile des Araldite[®] 2011 gegenüber dem DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 zum Favoriten machen.

5.6 Mögliche zukünftige Tests

In diesem Abschnitt werden einige mögliche Untersuchungen zur Ergänzung und Verbesserung der gefundenen Ergebnisse benannt. Es wird angenommen, dass eine relative Standardabweichung von 0.07 oder weniger (für die besten Parametersets 0.05 oder weniger) ausreichend präzise ist. Diese Annahme kann in zukünftigen Tests überprüft werden. Darüber hinaus kann die Stabilität vieler Parameter bei einer Wiederholung nach längerer Zeit inklusive eines Tausches der Nadel oder Kartusche, Neustart des Kleberoboters und anderen Faktoren noch weiter untersucht werden. Um Parameter weiter zu optimieren, können Werte noch weiter gesenkt oder erhöht werden, als es in diesen Tests der Fall war. Auch Tests mit dem Distanzsensor zur Prüfung und Verbesserung von dessen Qualität können durchgeführt werden und Möglichkeiten gesucht werden, die Genauigkeit des Sensors zu verbessern. Die Untersuchung der Parametersets mit einer genaueren Methode zur Messung der Masse ist ebenfalls empfehlenswert.

6 Krafttests

In diesem Abschnitt geht es um die Krafttests, auch Pulltests genannt. Das Ziel hierbei ist zu untersuchen, wie viel Zugkraft die Kleber unter verschiedenen Bedingungen standhalten können. Auch hier wird der Araldite[®] 2011 mit dem DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 verglichen. Für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 sind bei den bisherigen Tests kaum zufriedenstellende Ergebnisse gefunden worden. Das Ziel in diesem Abschnitt ist dementsprechend, Bedingungen zu finden, unter denen der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 eine ähnliche oder deutlich bessere Haltekraft erreicht als der Araldite[®] 2011.

6.1 Vorgehen und Probleme

Die Krafttests werden mithilfe der z-Achse des Kleberoboters durchgeführt. Dafür wird die Forceteq[®] Kraftmesstechnologie verwendet. Es handelt sich hier um Funktionen, wel-

che in den XENAX[®] Controllern der Achsen eingebaut sind. Diese weisen einen Fehler von 0.25 N auf sowie einen Fehler von 0.5 N um den Nullpunkt [20]. Die verschiedenen Kleber werden genutzt, um Glasplatten mit ungefähr 22 mm Seitenlänge zusammenzukleben. Diese werden von der hinten im Bild 10 zu sehenden Vakuumbank festgehalten, der Gripper greift die Platten von oben und versucht, die obere Platte zu lösen. Während des Vorgangs wird die Kraft in Abständen von einer Millisekunde gemessen. Hierfür wurde ein Programm mit Python geschrieben.

Frühere Tests haben bereits gezeigt, dass die Bestwerte der Kleber auf diese Art nicht überprüft werden können, da die verwendete Vakuumpumpe die maximal verwendbare Kraft einschränkt und die Kraft, welche der Kleber aushält, nicht darüber hinaus gemessen werden kann.

Insgesamt wurden 42 verschiedene Proben aufgenommen. Für den Araldite[®] 2011 wurden 6 Tests durchgeführt, bei denen 6 verschiedene Klebemuster getestet wurden. Dafür wurde Parameterset v3 a) verwendet und jedes Muster zweimal geklebt. Die Muster sind in Abbildung 24 zu sehen. Ursprünglich hatten die Tropfen in der inneren Ebene, einen Abstand von 5 mm zur Mitte, während die Tropfen der äußeren Ebene einen Abstand von 10 mm zu Mitte aufwiesen. In Muster 1 befanden sich die unteren Tropfen 2 mm unterhalb und 4 mm links bzw. rechts von der Mitte, der obere Tropfen befand sich 5 mm über der Mitte. Die Proben wurden hierbei doppelt erstellt.

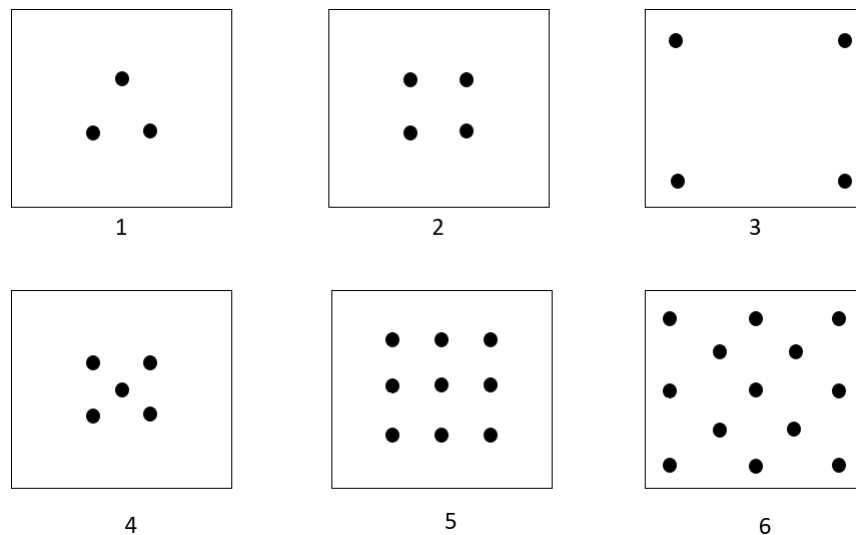


Abbildung 24: Araldite[®] 2011 Klebemuster.

Mit der ersten Araldite[®] 2011-Testreihe wurden auch die bevorzugten Klebemuster für

den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 festgelegt. Für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621, den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T und den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT wurden je zwei Messreihen aufgenommen. Für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T wurde das Parameterset T v1 a) getestet, welches wegen aufgetretener Probleme in der Wiederholung mit einem Vakuum von 0 kPa statt -1 kPa genutzt wurde. In der ersten Messreihe wurde die Zeit bestimmt, welche nötig ist, um den Kleber per UV-Licht zu härten. Hierbei wurden drei Zeitpunkte mit jeweils zwei Proben getestet. Das gewählte Klebemuster ist ein zentriertes 9×9 Vierecksmuster mit einem Abstand von je 2 mm zwischen den Tropfen. Für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 wurde das Muster nur einmal geklebt, da bei dem Versuch, die Klebetropfen durch einen zweiten Durchgang zu vergrößern, Probleme auftraten, welche später noch diskutiert werden. Gesucht wurde hierbei die kürzeste Zeit, in der die Kleber zuverlässig härten. Dabei wurden die LEDs mit 200 mA Strom versorgt. Dies liegt unter der vom Hersteller angegebenen Leistung von 500 mA, was am fehlenden Kühlsystem liegt. Testreihen mit dem Aktivator wurden nicht durchgeführt, da dieser schwierig zu dosieren ist und teurer ist als die UV-Härtung, was die UV-Härtung zur bevorzugten Härtemethode macht.

In der zweiten Messreihe wurden zwei weitere Klebemuster mit der optimalen untersuchten Härtezeit getestet. Zu jedem Klebemuster wurden zwei Proben angefertigt. Ein Klebemuster besteht aus 3×3 Tropfen und ein Muster aus 6×6 Tropfen. Die Abstände zwischen den Tropfen sind hierbei 3 mm. Hierzu wird die Masse des verwendeten Klebers aus der im vorherigen Abschnitt bestimmten Masse pro Tropfen berechnet werden. Das Programm gibt zum Abschluss der Krafttests den Betrag der erreichten Höchstkraft aus. Die Kraft selbst ist negativ, weil die gemessene Kraft entlang der z-Achse nach oben und somit in negative z-Richtung wirkt. Darüber hinaus erstellt das Programm eine Liste der gemessenen Werte, welche mit einem anderen Pythonprogramm in ein Zeit-Kraft-Diagramm umgewandelt werden kann. Bei den Messungen kommt es zu einem Rauschen. Um dieses loszuwerden, glättet das Programm vor Erstellung der Graphen die Werte. Dafür werden jeweils 10 ausgegebene Werte genommen und deren Mittelwert bestimmt. Als Ergebnis wird das Minimum des nicht geglätteten Graphen angegeben. Der Fehler des Minimums ergibt sich aus einem fünftel des statistischen Fehlers der Werte in dem Glättungsintervall des Minimums. Dieser wird für die Tabellenwerte mit dem Auflösungsfehler von 0.25 N addiert. Der Unterschied zwischen geglättetem und nicht geglättetem Graph ist in den Abbildungen 25 und 26 zu sehen.

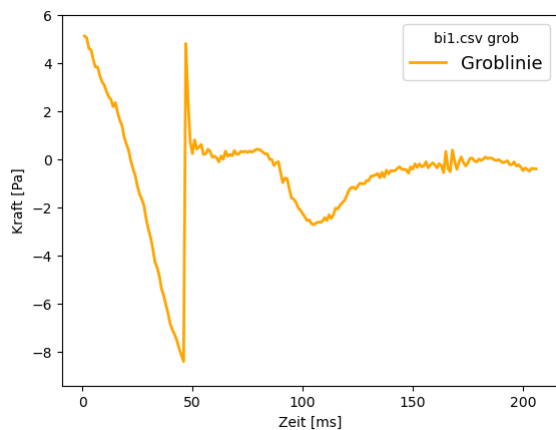


Abbildung 25: DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621
10 Min mit Rauschen.

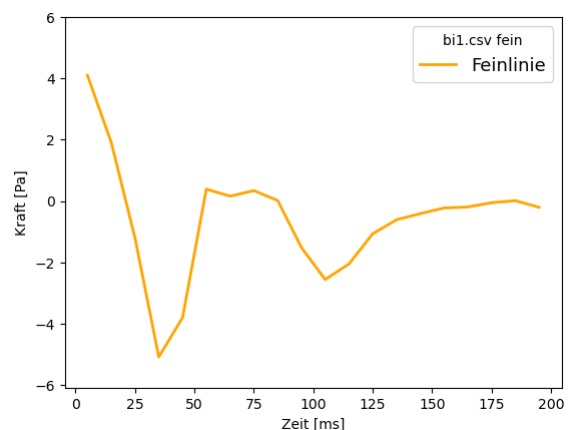


Abbildung 26: DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621
10 Min glatt.

Die untere Zacke im Graphen ist das untersuchte Minimum, bei dem der Kleber oder die Vakuumpumpe nicht mehr gehalten hat. Danach fährt der Roboter wieder nach oben und bleibt auf der Zielposition stehen, wobei es zu einer Einschwenkung kommt.

6.1.1 Aufgetretene Schwierigkeiten

Leider waren die Einstellungen des Programms nicht optimal gewählt. Bevor die Kraft gemessen wird, muss die Achse diese kalibrieren. Auf dem Kalibrierungsweg wird eine positionsabhängige Konstante berechnet, welche die Kraft für diese Höhe ohne äußere Einflüsse auf 0N setzt. Als Weg war ein Gebiet 20000 Inkremente über der Testprobe eingestellt, wodurch in dem für diese Tests relevanten Bereich die Kalibrierung nicht wie gewollt funktioniert hat. Des Weiteren wurde die Position nicht zusätzlich zur Kraft aufgenommen, da die Befürchtung bestand, dass durch Schwankungseffekte bestimmte Positionen mehrfach angefahren werden, was einen unschönen Graphen zu Folge hätte. Für das Ablesen der Messwerte wäre ein Zeit gegen Kraft Graph ausreichend gewesen, er ermöglicht aber keine Vergleich zwischen verschiedenen Tests, wenn sich Einstellungen unterscheiden oder Fehler auftreten. Für die zweite Testreihe wurde der Ort mit aufgenommen und zu jedem Test ein zweiter Graph erstellt, welcher die Kraft gegen den Ort aufträgt. Die Kraft gegen Zeit-Graphen, welche im Leerlauf mit und ohne korrekt eingestellter Kalibrierung erstellt wurden, werden im folgenden gezeigt.

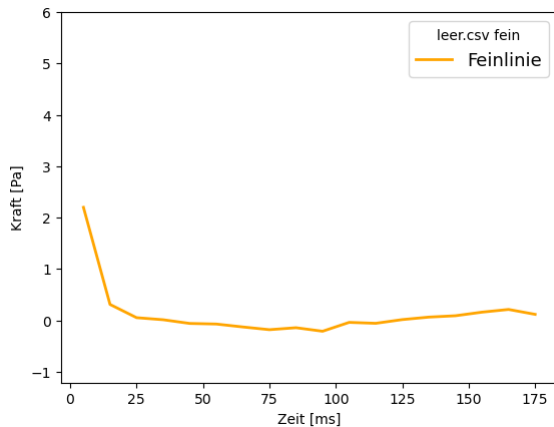


Abbildung 27: Leerlauf, korrekte Kalibrierung.

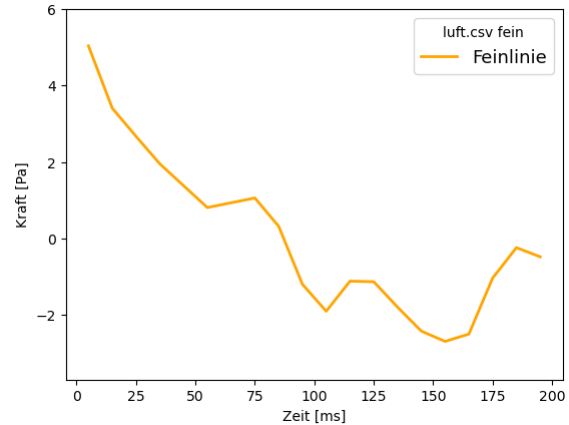


Abbildung 28: Leerlauf, falsche Kalibrierung.

Graphen wie der in Abbildung 26 zeigen die Kraftspitze meist bei um die 30 ms. Dies kann für alle Messungen der ersten Runde außer die letzten drei Tests des DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT angenommen werden, da die Geschwindigkeit, Beschleunigung und der Fahrtweg hier nicht geändert wurden. Dementsprechend kann versucht werden, einen Abschätzungsfehler 1.7 ± 0.15 N, welcher aus 28 abgelesen wurde, von dem Endergebnis abzuziehen. Alleine durch die Dauer des Zugprozesses gegenüber dem Leerlauf ergeben sich hierbei bereits Fehler, womit die Ungenauigkeit größer wird. Für die ersten Testergebnisse wird der Fehler durch die Umrechnung deswegen auf 0.3 N geschätzt. Der Gesamtfehler ist die Summe des angegebenen Fehlers von 0.25 N sowie einem Fünftel des statistischen Fehlers über alle Werte in dem geglätteten Intervall, in dem das Minimum liegt. Zusätzlich wird für die betroffenen Messungen der Kalibrationsfehler addiert. Der statistische Fehler ist aufgrund der Peak-Form des Graphen deutlich zu groß, weswegen er nicht komplett eingerechnet wird.

Für die zweiten Tests mit Araldite[®] 2011 mit richtig eingestellter Kalibrierung wurden kleinere Abstände von 3 mm und 7 mm zur Mitte gewählt. Für Muster 1 wurde ein Abstand von 3.75 mm zum oberen Punkt und 3.5 mm nach links bzw. rechts sowie 2.25 mm nach unten für die unteren Punkte von der Mitte aus gewählt. Dadurch liegen alle 3 Punkte auf einem 3×3 -Muster mit 3 mm zwischen den Tropfen und sind alle gleich weit von der Mitte entfernt. Es wurden nicht alle Tests mit dem korrigierten Programm wiederholt. Dies hat mehrere Gründe. Zu einem waren viele Klebproben stark genug, damit der Kleberoboter diese nicht lösen konnte. Dies liegt an der relativ schwachen Vakuumpumpe, während der Tests zeigte sich jedoch auch ein Einfluss der Kraft zwischen dem genutzten Saugnapf und dem Gripper selbst. Mit einer stärkeren Pumpe wurde zwar ein höheres Maximum erreicht, jedoch löste sich mehrfach der Saugnapf vom Gripper. Wenn eine Probe mit dieser maximal erreichbaren Kraft nicht gelöst werden kann, kann mit den Krafttests die Kraft,

welcher der Kleber standhält nicht bestimmt werden. Ob dies geschieht ist nicht von der Kalibrierungsmethode abhängig, weshalb es theoretisch für alle betroffenen Proben reicht, einmal zu bestimmen, welche Kraft maximal erreicht werden kann. Hier liegt das erste Problem, welches bei der Wiederholung der Messungen auftrat. Die große Vakuumpumpe war für die ersten Messungen geliehen worden und war für die Wiederholung der Messungen nicht verfügbar. Das erreichte Minimum mit der stärkeren Pumpe und dem Offset von 1.7 N rausgerechnet, beträgt 13.472 ± 1.057 N. Mit der schwächeren Pumpe liegt es bei ungefähr 8.2 ± 0.49 N. Die Referenzgraphen sind im folgenden zu sehen.

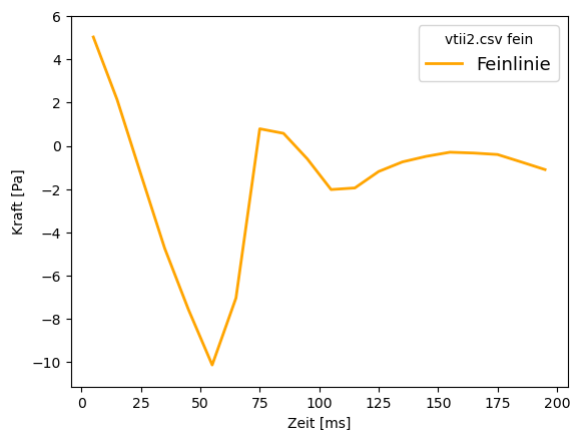


Abbildung 29: DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT 8 Minuten Härtezeit geglättet. Dieser Graph wurde als Musterbeispiel für die maximal zu erreichende Kraft unter falscher Kalibrierung betrachtet.

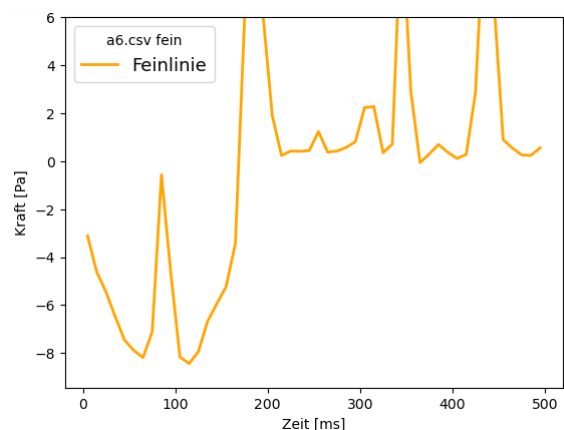


Abbildung 30: Araldite[®] 2011 Muster 6. Dieser Graph wurde als Musterbeispiel für das Minimum unter falscher Kalibrierung betrachtet, wobei das erste Minimum gewählt wurde. Dieses ist nach dem Orts-Zeit-Graph, der in Abbildung 32 gezeigt wird der gesuchte Peak.

Am Ende des erste Testdurchgangs wurde versucht, den Saugnapf durch Klebeband mit dem Gripper zu verbinden. Dies erhöhte die maximale Kraft erfolgreich um mehr als 3 N, jedoch kam es zu technischen Problemen, möglicherweise da das Klebeband die Rotationsachse blockierte, weswegen diese Methode zur Erhöhung des Maximums verworfen wurde. Im Anschluss an diese Versuche kam es zu weiteren technischen Problemen, wobei unklar ist, ob diese mit den Versuchen mit Klebeband zusammenhingen oder nicht. Durch eine Reihe von Versuchen, die Fehlerquellen zu finden sowie Neustarts stellte sich ein Problem ein, welches den zweiten Messdurchlauf nahezu durchgängig beeinflusste. Irgendetwas blockierte die z-Achse und sorgte so für einen erhöhten Kraftaufwand. Der Graph 27 wurde als erstes am Tag der Wiederholungsmessung aufgenommen und funktionierte wieder normal, jedoch trat das Problem während des Herstellens der neuen Proben erneut auf. In Graph 31 wird ein geglätteter Leerdurchlauf nach auftreten des Problems gezeigt. Die Peaks verdeutlichen dabei Orte eines besonders starken Rauschens mit Tendenz nach oben im ungeglätteten Graphen.

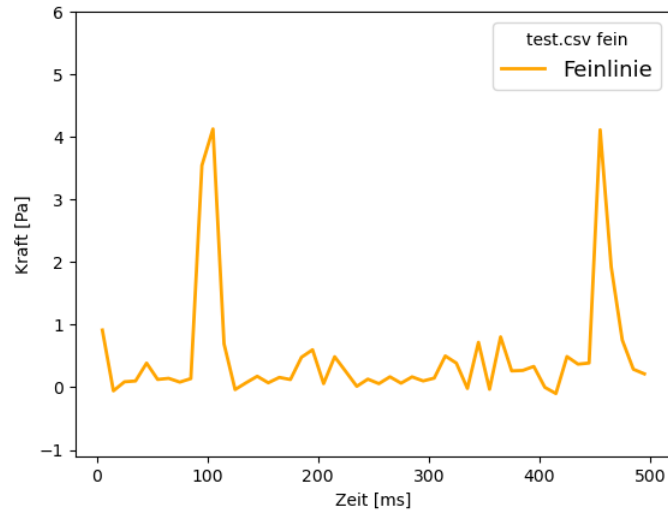


Abbildung 31: Test nach auftreten des Problems mit der Z-Achse im Leerlauf.

Für manche Samples wie dem 1. mit dem Araldite[®] 2011 getesteten Muster reicht die Glättung des Graphen, um die störenden Maxima loszuwerden. Deswegen wurde für Tests aus dem zweiten Durchgang der Minimalwert des geglätteten Graphen genutzt. Bei den meisten Tests kam es scheinbar kurz nach oder vor dem gesuchten Peak zu einem Rauschen, womit diese nur mit einem großen Fehler von mindestens $2N$ angenommen werden können oder im Fall der Zeitmessungen zum DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T komplett verworfen werden mussten. In wenigen Fällen wie dem von Muster 6 hilft der Ort-Kraft-Graph bei der Bestimmung des richtigen Maximums. Im folgenden werden Ergebnisse aus beiden Durchgängen vorgestellt und diskutiert.

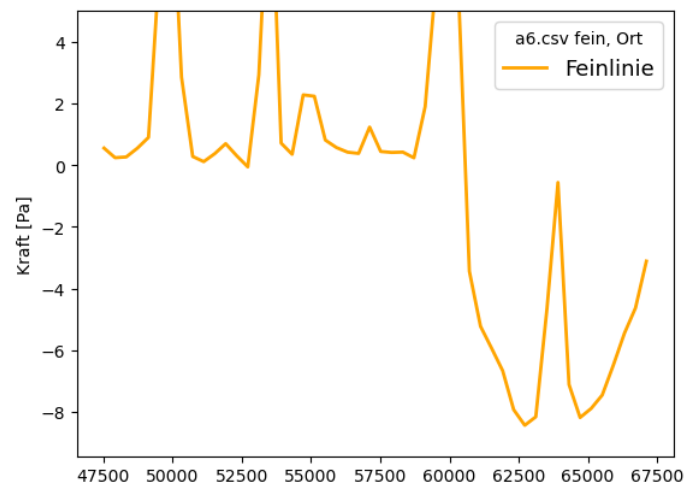


Abbildung 32: Araldite[®] 2011 Muster 6 abhängig vom Ort.

6.2 Ergebnisse

Zuerst werden die Ergebnisse für die Pulltests mit dem Araldite[®] 2011 genannt. In der Spalte Status werden hierbei drei Gruppen unterschieden. Die Gruppe der starken Proben (s) beinhaltet Proben, bei denen sich der Saugnapf von der Probe oder dem Greifer gelöst hat, bevor der Kleber nachgeben konnte. Die Glasplatten hier haben sich also gar nicht gelöst. Die Gruppe der schwachen Proben (w) beinhaltet Proben, welche sich alleine durch Aktivieren des Greifers bereits vor der eigentlichen Messung gelöst haben. Die Kraft für diese Proben wird wegen dem zu frühen Nachgeben des Klebers nicht vom Krafttest aufgenommen, weswegen sie auf 0 N gesetzt wird. Die Gruppe der mittleren Proben (m) beinhaltet Proben, welche sich während des eigentlichen Krafttests gelöst haben. Die Tests mit r am Ende sind Zweittests, bei denen die Kraft absichtlich nicht in der Mitte des Musters angesetzt wurde. Die Dateien wurden mit denen von Messreihe 2 überschrieben, weshalb der statistische Fehler nicht bekannt ist und auf 0.3N geschätzt wird, wodurch sich ein Gesamtfehler von 1 N ergibt.

Tabelle 10: Ergebnisse Krafttests Araldite[®] 2011 aus Durchgang 1. Bei 5r wurde absichtlich am Rand angefasst.

Muster	Masse [mg]	F. Masse [mg]	max.Kraft [N]	F. Kraft [N]	Status
1	0.15	0.03	0	0	w
2	0.20	0.04	0	0	w
3	0.20	0.04	0	0	w
4	0.25	0.05	0	0	w
5	0.45	0.09	11.710	1	s
6	0.60	0.12	6.716	1	m
5r	0.45	0.09	7.823	1	m

Tabelle 11: Ergebnisse Krafttests Araldite[®] 2011 aus Durchgang 2. Tests mit einem sehr geringen Rauschen am Peak bekommen einen Fehler von 0.2 N zusätzlich angerechnet.

Muster	Masse [mg]	F. Masse [mg]	max.Kraft [N]	F. Kraft [N]	Status
1	0.15	0.03	7.132	0.490	m
2	0.20	0.04	7.750	0.484	m
3	0.20	0.04	2.709	0.489	m
4	0.25	0.05	3.049	0.520	m
5	0.45	0.09	7.484	0.483	m
6	0.60	0.12	8.200	0.490	s

Nun werden die Ergebnisse für die Mengentests mit dem DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 gelistet. Dafür wurden die besten gefundenen Zeiten genutzt. Diese sind im ersten Durch-

gang 10 Minuten für den Basiskleber, 10 Minuten für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT und 5 Minuten für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT. Im zweiten Durchgang wurden die Mengentests nur für den Basiskleber mit 5 Minuten aufgenommen. Die Tabellen 22, 23, 24 und 25 mit den genauen Ergebnissen zu den verbleibenden Zeitmessungen befinden sich im Anhang. Der zweite Durchgang des DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T wurde übersprungen, da die Qualität der Messungen durch das Problem mit der z-Achse zu gering war, die Platten haben bei dem Test alle gehalten. In den folgenden Tabellen 12 und 13 ist Muster 1 das 3×3 Muster, Muster 2 das 6×6 Muster und Muster 3 das 9×9 Muster. Jedes Muster wurde zweimal getestet.

Tabelle 12: Ergebnisse Mengentests DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Basiskleber aus Durchgang 1.

Muster	Masse [mg]	F. Masse [mg]	max.Kraft [N]	F. Kraft [N]	Status
1.1	0.09	0.09	9.022	1.028	m
1.2	0.09	0.09	0	0	w
2.1	0.36	0.36	14.762	0.759	s
2.2	0.36	0.36	0	0	w
3.1	0.81	0.81	10.094	1.079	m
3.2	0.81	0.81	8.291	1.022	m

Tabelle 13: Ergebnisse Mengentests DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Basiskleber aus Durchgang 2. Bei schwachem Rauschen im Peak und realistischen Werten wird ein Fehler von 0.4 N statt 2 N addiert.

Muster	Masse [mg]	F. Masse [mg]	max.Kraft [N]	F. Kraft [N]	Status
1.1	0.09	0.09	6.317	0.849	m
1.2	0.09	0.09	8.056	2.933	m
2.1	0.36	0.36	10.848	2.539	s
2.2	0.36	0.36	11.081	2.983	s
3.1	0.81	0.81	9.545	2.636	s
3.2	0.81	0.81	10.792	2.29	s

Tabelle 14: Ergebnisse Mengentests DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T.

Muster	Masse [mg]	F. Masse [mg]	max.Kraft [N]	F. Kraft [N]	Status
1.1	0.45	0.09	13.166	1.150	s
1.2	0.45	0.09	11.384	1.132	m
2.1	1.8	0.36	6.568	0.948	m
2.2	1.8	0.36	5.603	0.892	m
3.1	4.05	0.81	0	0	w
3.2	4.05	0.81	11.076	0.776	s

Tabelle 15: Ergebnisse Mengentests DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT.

Muster	Masse [mg]	F. Masse [mg]	max.Kraft [N]	F. Kraft [N]	Status
1.1	0.36	0.09	18.695	1.660	s
1.2	0.36	0.09	14.727	0.751	s
2.1	1.44	0.36	14.572	0.756	s
2.2	1.44	0.36	14.470	0.764	s
3.1	2.44	0.81	13.103	1.120	s
3.2	3.24	0.81	13.180	1.094	s

6.3 Diskussion der Ergebnisse und Beobachtungen

Bei den ersten Araldite[®] 2011-Tests wurden einige Muster verfälscht, weil der Kleber die Glasplatten beim Hochfahren der Kartusche mit hochgezogen hat. Dies ist später ebenfalls bei dem Versuch passiert, DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621-Muster doppelt zu erstellen, weshalb für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 nur einzelne Muster platziert wurden. Bei der Wiederholung der Araldite[®] 2011-Tests trat dieses Problem nicht auf. Dies lässt sich mit einer Nachjustierung der Höheneinstellung während den Justierungen der x und y-Koordinate bei dem zweiten Durchgang erklären. Da die ursprüngliche Höhe zu niedrig war, wurden 0.128 mm zur Distanzangabe hinzugefügt. Dies entspricht der Höhe, welche für das verwendete Parameterset ursprünglich genutzt wurde.

Nach der Erstellung des Klebemusters wurde das zweite Glasplättchen händisch mit einer kleinen Handvakuumpumpe auf dem ersten platziert. Dies führt zu Ungenauigkeiten bezüglich der Passung. Da der Druck nicht perfekt von oben wirkt, können in dem Prozess die Platten gegeneinander verschoben und die Tropfen verschmiert werden. Dieses Vorgehen sorgt für viele Ungenauigkeiten, die sich schwer regulieren lassen. Mithilfe einer guten Bilderkennung des Kleberoboters soll dieser Vorgang in Zukunft ebenfalls automatisiert

werden.

Die Proben wurden in die im letzten Abschnitt erklärten Gruppen schwach, mittel und stark eingeteilt. Proben in der schwachen Gruppe halten so schlecht zusammen, dass sie nur durch das Aktivieren der Vakuumpumpe des Grippers getrennt werden konnten. Häufig handelt es sich bei solchen Proben um Proben, die aus verschiedenen Gründen nicht von dem Kleber verbunden wurden. Proben in der starken Gruppe halten so gut zusammen, dass der Gripper oder die Vakuumpumpe nicht die Kraft aufbringen kann, diese zu lösen. Proben in der mittleren Gruppe lösen sich während dem Prozess und sind somit die einzigen Proben für die die gemessene Kraft direkt von Bedeutung ist. Die besten Muster und Bedingungen sind diejenigen, welche in der Gruppe der starken Proben zu finden sind. Oft gab es bei zwei Tests mit den selben Bedingungen Ergebnisse aus unterschiedlichen Gruppen.

Die Proben aus der starken Gruppe überschreiten alle die mit dem jeweiligen Aufbau maximal messbare Kraft und werden damit als ausreichend betrachtet. Es stellt sich jedoch die Frage, ob die im P2-Experiment durch Temperaturschwankungen wirkenden Kräfte diese maximale Kraft übersteigen, was Tests mit einer höheren möglichen Kraft erfordern würde.

Die Tests mit dem Araldite[®] 2011 zeigten verschiedenste Phänomene im Zusammenhang mit dem Klebemustern. Während die ersten vier gar nicht hielten, hielt das fünfte Klebemuster im ersten Durchgang zwei Ansätzen stand und wurde danach durch einen Kraftansatz am Rand gelöst. Das letzte Klebemuster wurde im ersten Durchgang aus Versehen am Rand gegriffen und dabei gelöst. Im zweiten Durchgang hielt es sowohl einem Ansatz in der Mitte als auch am Rand statt. Allgemein zeigte sich, dass ein komplettes Vierecksmuster besonders gut hält. Bei den Ansätzen am Rand schienen die Klebetropfen an der Stelle, an der die Kraft ansetzte, als erstes gelöst zu werden. Die anderen Tropfen konnten die Probe nicht mehr alleine halten. Werden einzelne Tropfen nicht genug von anderen Tropfen unterstützt, brechen diese zuerst, woraufhin die anderen Tropfen der Kraft noch kurz standhalten können. Dies ist an entsprechenden Kraft-Zeit-Graphen wie in Abbildung 33 zu sehen. Vermutlich ist das zentrierte 3×3 Muster hier am erfolgreichsten, weil es die wirkende Kraft in jeder Richtung abfangen konnte. Es ist davon auszugehen, dass ein weniger zentriertes Muster die Kraft für den mittleren Tropfen nicht so gut abfangen kann, wodurch dieser schneller den Halt verlieren kann, was die anderen Tropfen ebenfalls schwächt. Diese Theorie wurde nicht explizit geprüft.

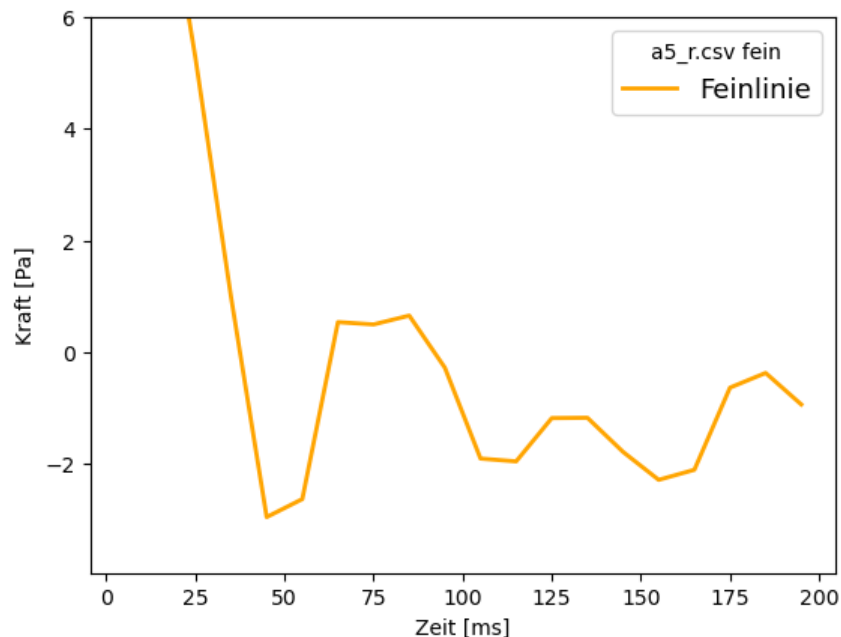


Abbildung 33: Araldite[®] 2011 Muster 5 am Rand gegriffen. Direkt nach dem Peak zeigt sich eine weitere Stelle erhöhter Kraft bei ungefähr 55 ms. Hier lösen sich die Tropfen, die sich nicht beim Peak gelöst hatten.

Bei den Tests mit dem DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Basiskleber zeigte sich im ersten Durchgang erst das Problem, dass der Kleber zwar härtete, dabei aber die Glasplatten nicht verband. Bei weiteren Tests wurde die Höhe der LEDs leicht verringert und die Platten wurden fester zusammengedrückt. Es zeigte sich, dass 10 Minuten Bestrahlung für den Basiskleber ausreichen können, jedoch waren die Ergebnisse durchmischte und es gab im ersten Durchgang Fälle von zwei Proben mit den selben Bedingungen, die in den Gruppen stark und schwach waren. Diese Unzuverlässigkeit scheint auf die Viskosität und die kleinen Tropfen zurückzuführen zu sein. Im zweiten Test hat der Kleber deutlich bessere Ergebnisse gezeigt, aber auch weiterhin Proben, welche der Kraft nicht standhalten konnten.

Es ist davon auszugehen, dass der ausgeübte Druck auf die Glasplatten eine große Rolle darin spielt, ob sich die Platten verbinden oder nicht. Wird der Kleber nicht nur zusammengedrückt sondern auch durch das Aneinanderreiben der Glasplatten verwischt, erhöht sich sowohl die Wahrscheinlichkeit, dass er beide Glasplatten verbindet als auch die Kraft, der der Kleber standhalten kann.

Der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T war bereits nach 5 Minuten in der Lage, die Platten zusammenzuhalten, erfüllte die Aufgabe aber im ersten Durchgang nicht verlässlich. Deswegen wurden 10 Minuten gewählt. Im ersten Durchgang traten ein paar Probleme auf, bei

denen die Tropfen deutlich zu klein wurden. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass Luft in die Kartusche gesaugt wurde. Es zeigte sich durch den Vergleich der beiden Proben mit dem 3×3 Muster, dass der Kleber deutlich besser hält, wenn mehrere Tropfen in der Mitte ineinanderlaufen. Zusammen mit den 6×6 -Proben, welche recht kleine Tropfen und nur mittelmäßige Ergebnisse von ungefähr $5N$ lieferten, wurde bestätigt, dass die selbe Menge Kleber zentriert einer zentrierten Kraft besser standhalten kann. Es gab deutlich bessere Ergebnisse für die Zeitmessungen im zweiten Durchgang. Diese können auf die schwächere Vakuumpumpe sowie das Ausbleiben des Problems mit der Luft zurückzuführen sein.

Der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT war der einzige Kleber, der unter allen Bedingungen in der starken Gruppe eingeordnet werden konnte. Für diesen Kleber wurde das Klebeband getestet, welches die maximale Kraft für eine 3×3 -Probe auf mehr als $18 N$ setzte. Durch eine Verringerung der Testdistanz für die letzten drei Mustertests wurden die ersten Probleme mit der z-Achse umgangen. Die Distanzverringerung hatte aufgrund der ungenauen Kalibrierungsmethode Auswirkungen auf den Verlauf der Graphen, aber nicht auf die maximal erreichbare Kraft. Da der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT nach nur 5 Minuten Härtezeit und mit nur 9 Tropfen einer Kraft von bis zu $17N$ standhalten kann, kann die tatsächlich nötige Kraft für diesen Kleber nicht erfasst werden. Deswegen wurde die Messung für den Kleber nicht mit den genaueren Werten wiederholt.

Die Viskosität und die nötige Härtezeit sowie Zuverlässigkeit stehen eindeutig im Zusammenhang. Je höher die Viskosität wurde, desto schneller härtete der Kleber und desto mehr Kraft konnte er standhalten. Weiter Gründe der erfolgreichen Tests mit dem DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT liegen wahrscheinlich in der Tropfengröße. Die großen Tropfen nehmen unter dem Druck der Glasplatten viel Platz ein und können zentrierte Kräfte abfangen. Dank der Menge und höheren Viskosität haftet der Kleber leicht an beiden Glasplatten und verbindet diese zuverlässig.

Als optimales Muster unabhängig der Klebemenge ist ein Viereckspattern anzusehen. Die Größe sollte so gewählt werden, dass die Klebetropfen nicht zu weit auseinander liegen (Beispielsweise 3 mm pro Tropfen) und das sich alle Punkte, an denen eine große Kraft ansetzen kann, innerhalb eines 3×3 Klebemusters zu finden ist. Es gibt eindeutig Eigenschaften außerhalb der Härtezeit und der Menge des Klebers, welche entscheidend sind. Beispielsweise spielt die Menge der Verschmutzungen und die Kraft, mit der die Platten zusammengedrückt wurden sowie die Verwischung des Klebers in dem Prozess eine Rolle.

6.4 Vergleich und Ausblick

Der Araldite[®] 2011 zeigte teils gute Ergebnisse, welche darauf schließen lassen, dass er durch eine Erweiterung des 3×3 Klebemuster die maximal messbare Kraft unabhängig vom Ansatzpunkt überschreitet. Der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Basiskleber zeigte im

Vergleich zum Araldite[®] 2011 unzuverlässigere Ergebnisse, während der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T bis auf die Probleme mit dem Vakuum ähnlich zuverlässig, wenn nicht etwas zuverlässiger erscheint. Der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT ist in den Krafttests der Favorit. Im zweiten Durchgang zeigten sowohl der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621, als auch der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T bessere Ergebnisse als der Araldite[®] 2011. Weiterhin zeigen sie jedoch selten Schwächen auf, womit der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT der Favorit bleibt.

Das größte Problem des DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT für das P2-Experiment besteht in der Größe der Tropfen. Dadurch ist die Klebeschicht vergleichsweise dick. In zukünftigen Tests sollte deswegen untersucht werden, ob die Klebeschicht bereits zu dick ist und wie das Problem am besten angegangen werden kann. Ein größerer Abstand zwischen den Tropfen und etwas mehr Druck beim Zusammenführen der zu verklebenden Komponenten für eine bessere Verteilung kann hier getestet werden. Es kann auch versucht werden, Aufbauten zu finden, mit denen größere messbare Kräfte erreicht werden können.

Darüber hinaus werden im Aufbau des P2-Experiments vor allem durch Temperaturänderungen und andere Effekte entstehende Scherkräfte relevant sein. Die Pulltests stellen eine Ideal-situation dar. Scherkräfte können den Kleber deutlich früher lösen. Möglicherweise sind für Scherkräfte auch andere Klebemuster als die Vierecksmuster geeignet. Die Scherkräfte sollten eine besonders hohe Priorität für folgende Tests darstellen. Die Krafttests, vor allem bezüglich der Härtedauer sollten mit den HV-MAPS selbst oder möglichst ähnlichem Material wiederholt werden, um zu testen, ob die Klebe- und Härtebedingungen mit den anderen Materialien ebenfalls funktionieren.

7 Fazit

Diese Arbeit diente dazu, eine Klebestrategie für den DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 zu entwickeln und zu zeigen, dass dieser als Alternativkleber zu dem Araldite[®] 2011 genutzt werden kann, der bisher als der Optimalkleber galt. Darüber hinaus diente diese Arbeit dazu, Parametertests mit dem ML-808GX-CTR Dispenser durchzuführen.

Während der Versuche traten viele kleinere Probleme auf, die bei der Arbeit mit dem Kleberoboter und den Klebern beachtet werden sollten. Zu vielen dieser Probleme wurden Lösungen gefunden. So stellte sich heraus, dass der Laserdistanzsensor mit bestimmten Oberflächen nicht gut funktioniert und weiter untersucht werden sollte. Eine erste getestete Lösung für das Problem besteht in der Verwendung einer schwarzen Oberfläche, welche zu einer deutlichen Verbesserung führt. Des Weiteren stellte sich heraus, dass es manchmal zu einer Härtung einer kleinen Menge des DYMAX[®] Multi-Cure[®] an der Spitze der Kartuschen kommen kann. Sollte der Klebevorgang nicht funktionieren, sollte eine kleine Menge Kleber aus der Kartusche entfernt werden.

Es zeigte sich in den Tests, dass die Implementierung der neuen Parameter Zwischenhöhe und Zwischenzeit die Anzahl der Satelliten deutlich reduzieren konnte. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Nutzung des dauerhaft angelegten Vakuums die Qualität der Proben deutlich verbessern kann. Auch wenn der Parameter für die direkte Höheneinstellung entfernt wurde, ist die Höhe eindeutig wichtig und es ist zu empfehlen, während der Kalibrierung der Positionen auch die eingestellte Höhe anzupassen.

Letztendlich zeigte sich, dass der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 und vor allem der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT in dem getesteten Rahmen dafür geeignet ist, den Araldite[®] 2011 zu ersetzen. Dabei bleibt als einzige Sorge, dass der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT eine zu dicke Klebschicht erzeugt. Dies sollte in weiteren Tests untersucht werden.

Auch die Suche nach einer genaueren Messmethode für die Masse der Tropfen oder die Messung mit dem von Jana Weynrich [2] vorgestellten System ist zu empfehlen. Darüber hinaus sind Parameter für die maschinelle Platzierung der zu klebenden Komponenten zu untersuchen, sobald die Bilderkennung des Kleberoboters weiter fortgeschritten ist. Wird mit dem DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT gearbeitet, reicht die Anwendung von genug Druck auf beide Komponenten für eine stabile Verbindung der Komponenten. Das Verhalten der Kleber unter Scherkräften muss ebenfalls untersucht werden, da diese Kräfte im fertigen Experiment auftreten werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Ingo Bloch 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 A 11.05* (2016). DOI: 10.1088/1748-0221/11/05/P05017
- [2] Jana Weyrich. “Entwicklung einer Klebestrategie für den Bau des P2-Spurdetektors”. Bachelorarbeit. Universität Mainz, 2022
- [3] Weltmaschine. *Das Standardmodell der Teilchenphysik*. Website. abgerufen am 11. Juni 2024. URL: www.weltmaschine.de/physik/standardmodell.der.teilchenphysik/.
- [4] Wolfgang Dermtröder *Experimentalphysik 4 Kern-, Teilchen- und Astrophysik 5. Auflage* Kaiserslautern: Springer Spektrum, 2016
- [5] Dominik Becker u. a. “The P2 experiment”. In: *The European Physical Journal A 54.11* (2018). DOI: 10.1140/epja/i2018-12611-6.
- [6] Wikipedia. *Standardmodell der Teilchenphysik - Wikipedia, die freie Enzyklopädie*.
- [7] Lars Steffen Weinstock. *Git-Repository labdev*. Website. zuletzt aufgerufen am 31. Februar 2100. URL: <https://gitlab.rlp.net/prisma-detlab/gluebot/-/wikis/home>
- [8] Jenny Science AG. *Anleitung XENAX[®] Xvi 75V8*. 2024.
- [9] Jenny Science AG. *LINAX[®] Technisches Datenblatt* 2024.
- [10] Jenny Science AG. *ROTAX[®] Rxvp 28-6T0.04 Technisches Datenblatt* 2024.
- [11] Baumer. *OM70-L0070.HH0048.EK Technisches Datenblatt* 2024.
- [12] MUSASHI Engineering Inc. *ML808-GX Instruction Manual*.
- [13] Huntsman. *Araldite[®] 2011[®] Technical data sheet*. 2021.
- [14] Dymax Corporation. *Dymax[®] 501-E-REV-A Activator Technical data sheet*. 2023.
- [15] Dymax Corporation. *Dymax[®] Multi-Cure[®] 6-621 Technical data sheet*. 2020.
- [16] Dymax Corporation. *Dymax[®] Multi-Cure[®] 6-621-T Technical data sheet*. 2023.
- [17] Dymax Corporation. *Dymax[®] Multi-Cure[®] 6-621-VT Technical data sheet*. 2024.
- [18] Dymax Corporation. *Dymax[®] Multi-Cure[®] 6-621-GEL Technical data sheet*. 2020.
- [19] Würth Elektronik. *WL-SUMW SMT Ultraviolet Ceramic Waterclear Technisches Datenblatt*. 2020.

- [20] Jenny Science AG. *Broschüre Forceteq[®] Signateq[®] DE V1.3* 2024
- [21] Patrick Riederer. "Calibration of a glueing robot for assembly of the P2 tracking detector". Bachelorarbeit. Universität Mainz, 2021.
- [22] 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.

Tabellenverzeichnis

1	Eigenschaften der Linearachsen.	13
2	Grundparameter des Araldite [®] 2011.	25
3	Auswertung der Grundparameter des Araldite [®] 2011.	26
4	Beste Parameter des Araldite [®] 2011.	28
5	Ergebnisse Araldite [®] 2011-Parameter.	28
6	Masse der Araldite [®] 2011 Klebetropfen.	28
7	Beste Parameter des DYMAX [®] Multi-Cure [®]	30
8	Ergebnisse DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621-Parameter.	31
9	Masse der DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 Klebetropfen.	31
10	Ergebnisse Krafttests Araldite [®] 2011 Durchgang 1.	46
11	Ergebnisse Krafttests Araldite [®] 2011 Durchgang 2.	46
12	Ergebnisse Mengentests DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 Durchgang 1.	47
13	Ergebnisse Mengentests DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 Durchgang 2.	47
14	Ergebnisse Mengentests DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 T.	48
15	Ergebnisse Mengentests DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 VT.	48
16	Ergebnisse Araldite [®] 2011 Messreihe Vakuum.	62
17	Ergebnisse Araldite [®] 2011 Messreihe Höhe.	62
18	Ergebnisse Araldite [®] 2011 Messreihe Druck.	63
19	Ergebnisse Araldite [®] 2011 Messreihe Intervall.	63
20	Ergebnisse DYMAX [®] Multi-Cure [®] Grobtests.	64
21	Ergebnisse DYMAX [®] Multi-Cure [®] Feintests.	64
22	Ergebnisse Zeittests DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 Durchgang 1.	65
23	Ergebnisse Zeittests DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 Durchgang 2.	65
24	Ergebnisse Zeittests DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 T Durchgang 1.	65
25	Ergebnisse Zeittests DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 VT.	65

Abbildungsverzeichnis

1	Elementare Fermionen im SM	5
2	Der Weinbergwinkels in Abhängigkeit vom Impulsübertrag.	7
3	Feynman-Diagramme für die elastische Streuung eines Elektrons an einem Proton.	8
4	Abhängigkeit der einzelnen Summanden von A von Streuwinkel θ_f	9
5	Aufbau des P2-Experiments.	10
6	Simulation der Trajektorien gestreuter Elektronen.	11
7	Überblick über den Kleberoboter.	13
8	Die Werkzeuge des Kleberoboters.	14
9	Der Dosierer.	16
10	Arbeitsbereich mit zwei Vakuumbänken und LEDS.	18
11	Sample 2 und 8.2.	22
12	Präzisionsmessung	23
13	Araldite [®] 2011 Testreihe Vakuum	27
14	Araldite [®] 2011 Testreihe Höhe	27
15	Araldite [®] 2011 Testreihe Druck	27
16	Araldite [®] 2011 Testreihe Intervall	27
17	DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 Testreihe Vakuum	29
18	DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 Testreihe Druck	29
19	DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 Testreihe Intervall.	30
20	Araldite [®] 2011 Sample 8.	32
21	Araldite [®] 2011 Sample i4 b.	35
22	Tropfen unter Koaxiallicht.	36
23	Tropfen unter Ringlicht.	37
24	Araldite [®] 2011 Klebemuster	40
25	DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 10 Min mit Rauschen.	42
26	DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 10 Min glatt.	42
27	Leerlauf, korrekte Kalibrierung.	43
28	Leerlauf, falsche Kalibrierung.	43
29	DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 VT 12 Min.	44
30	Araldite [®] 2011 Muster 6.	44
31	Test nach Auftreten des Problems.	45
32	Araldite [®] 2011 Muster 6 abhängig vom Ort.	45
33	Araldite [®] 2011 Muster 5 am Rand gegriffen.	50
34	Araldite [®] 2011 Intervalltest Sample 1 a).	59
35	Araldite [®] 2011 Intervalltest Sample 3 a).	59
36	Araldite [®] 2011 Drucktest Sample 1 a).	59
37	Araldite [®] 2011 Drucktest Sample 2 b).	59
38	Araldite [®] 2011 Vakuumtest Sample 3 a).	60

39	DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 Feintest Sample I1 V.	60
40	DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 VT Feintest Sample p1 II.	60
41	DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 T Korrekturtest Sample v1 a).	60
42	DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 T Korrekturtest Sample v1 b).	60
43	DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 T Korrekturtest Sample p2 a).	61
44	DYMAX [®] Multi-Cure [®] 6-621 T Korrekturtest Sample p2 b).	61
45	Beispiel für zu hohe Schwankungen im Peak.	61
46	Beispiel für hohe, noch akzeptable Schwankungen im Peak.	61

A Abbildungen

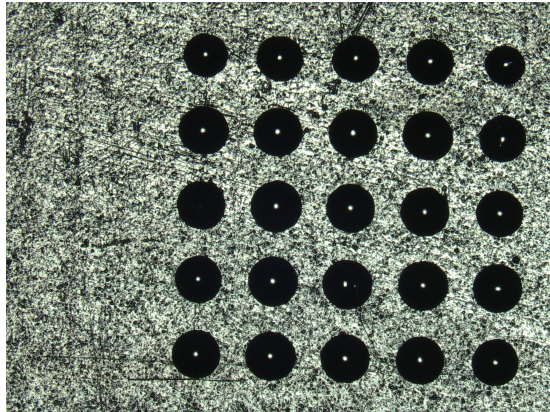


Abbildung 34: Araldite[®] 2011 Intervalltest Sample 1 a).

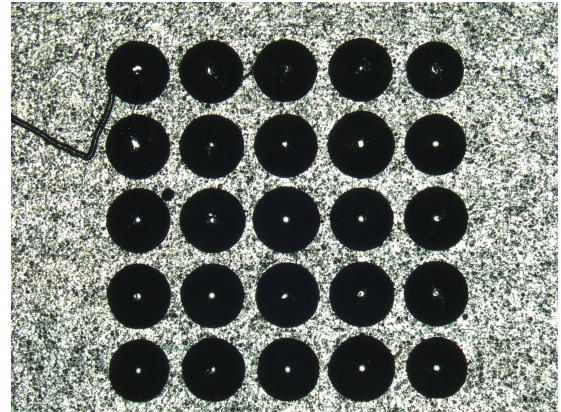


Abbildung 35: Araldite[®] 2011 Intervalltest Sample 3 a).

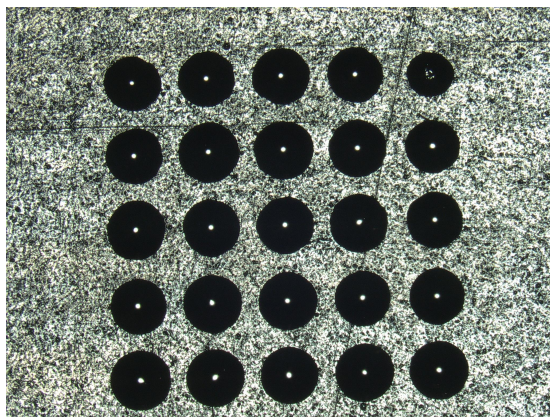


Abbildung 36: Araldite[®] 2011 Drucktest Sample 1 a).

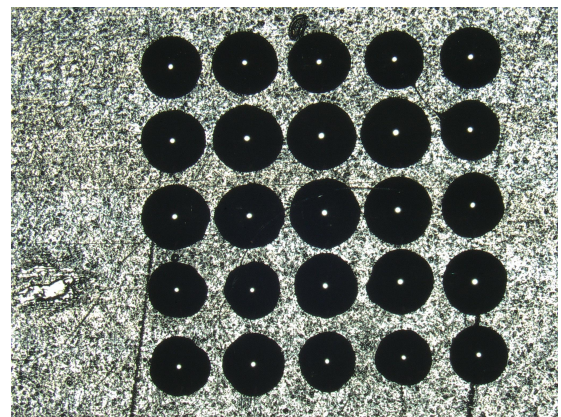


Abbildung 37: Araldite[®] 2011 Drucktest Sample 2 b).

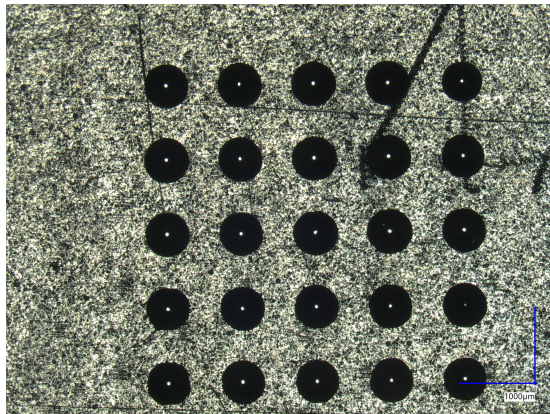


Abbildung 38: Araldite[®] 2011 Vakuumtest Sample 3 a).

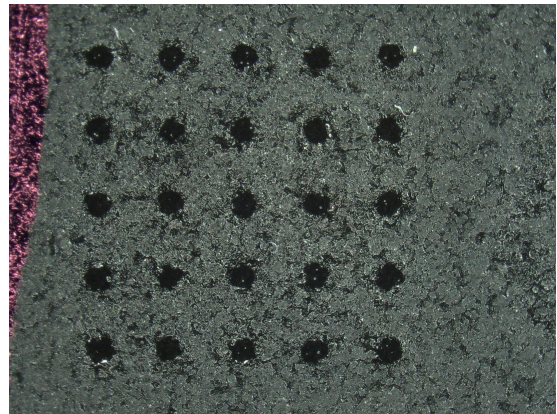


Abbildung 39: DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Feintest Sample II V.

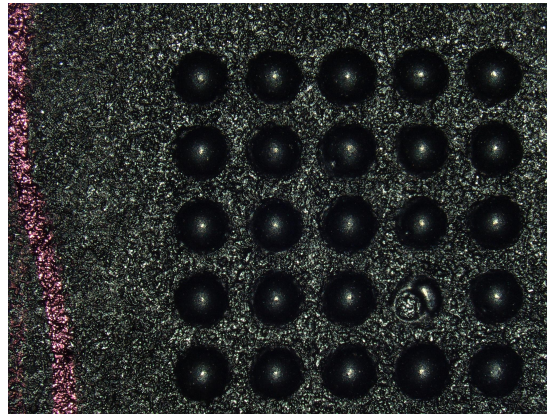


Abbildung 40: DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT Feintest Sample p1 II.

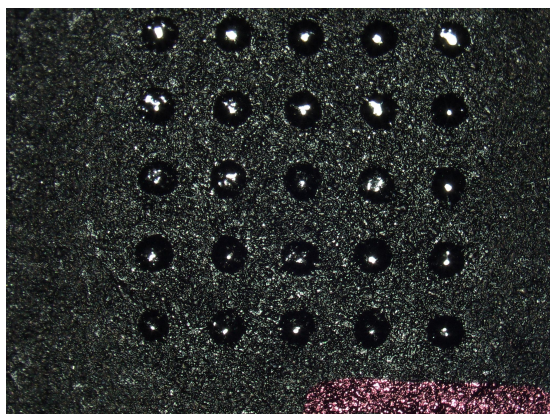


Abbildung 41: DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T Korrekturtest Sample v1 a).

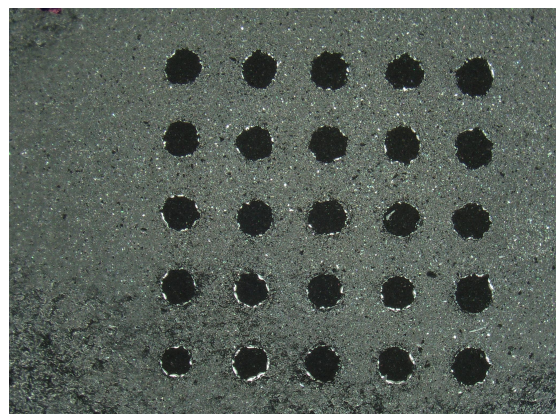


Abbildung 42: DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T Korrekturtest Sample v1 b).

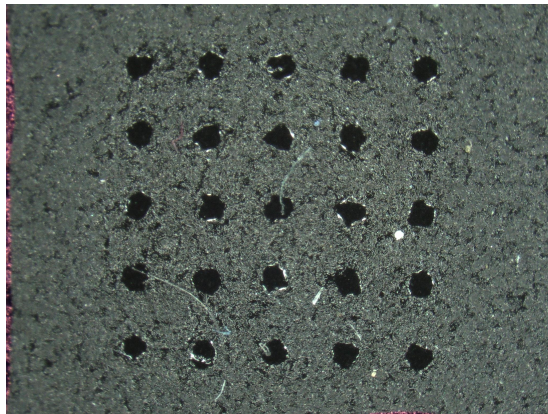


Abbildung 43: DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T Korrekturtest Sample p2 a).

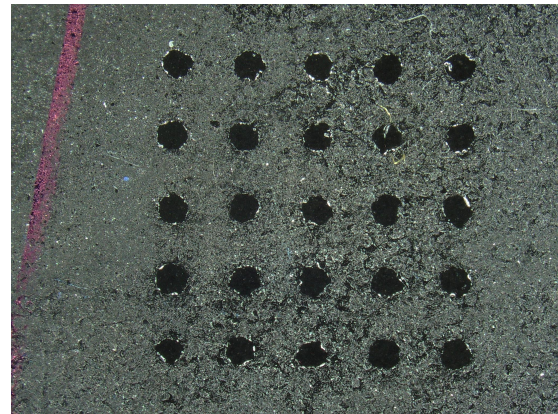


Abbildung 44: DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T Korrekturtest Sample p2 b).

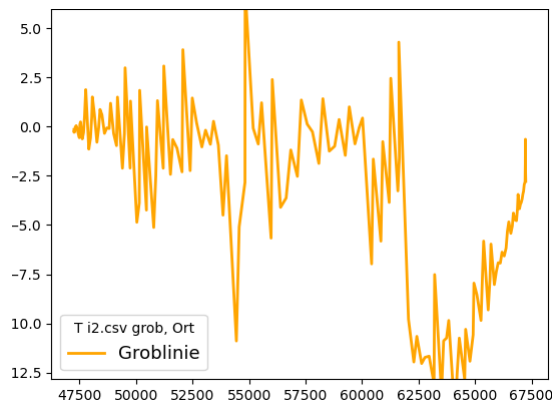


Abbildung 45: Ein Beispiel für Graphen, die wegen zu starkem Rauschen im Peak aussortiert wurden.

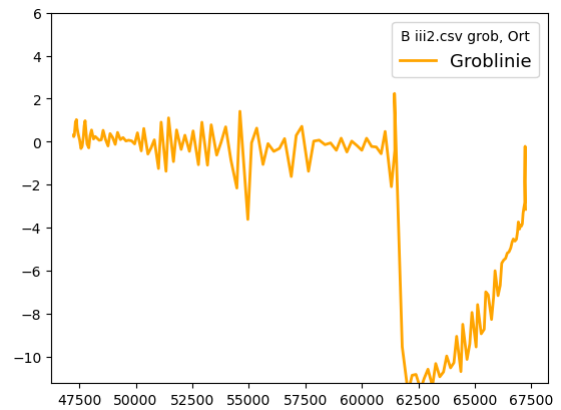


Abbildung 46: Dieser Graph ist eindeutig von dem Fehler mit der Z-Achse betroffen, wird aber nicht so stark beeinflusst, dass er aussortiert wurde. Es wurde ein Fehler von 2 N wegen des Rauschens angenommen.

B Tabellen

Tabelle 16: Die Auswertung für die Vakuumtestreihe des Araldite[®] 2011. Die Reihe wurde nur für zwei Nachkommastellen in den Grobauswertungen ausgewertet. Die Araldite[®] 2011 Präzssionsmessereien und die DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Messreihen wurden für drei Nachkommastellen ausgewertet, da zwei nicht mehr genau genug waren. Nicht aufgelistete Samples wurden vorher aussortiert, Die fehlerhaften Tropfen werden in folgendem Format angegeben: (Satelliten erster Ordnung/Satelliten zweiter Ordnung/Ringe/Anzahl zusammengelaufene Tropfen*Anzahl Einzeltropfen in dem Tropfen/Fehlende Tropfen.) Das Vakuum hat eine Fehler von 0.1 kPa

Sample	Vakuum	Tropfen- fehler	Radius	F. Radius	abs. Abw.	rel. Abw.
	[kPa]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
V2 a)	-0.2	1(0/1/0/0/0)	380.44	6.13	30.64	0.08
V2 b)	-0.2	0	336.07	7.86	39.31	0.11
V3 a)	-0.3	1(0/1/0/0/0)	285.57	1.36	6.82	0.02
V3 b)	-0.3	0	292.57	8.86	44.28	0.15
V4 a)	-0.5	1(1/0/0/0/0)	357.10	3.06	15.32	0.04
V4 b)	-0.5	1(1/0/0/0/0)	338.64	7.49	37.47	0.11

Tabelle 17: Die Auswertung für die Höhentestreihe des Araldite[®] 2011. Die Reihe wurde nur für zwei Nachkommastellen in den Grobauswertungen ausgewertet. Die Araldite[®] 2011 Präzssionsmessereien und die DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Messreihen wurden für drei Nachkommastellen ausgewertet, da zwei nicht mehr genau genug waren. Nicht aufgelistete Samples wurden vorher aussortiert, Die fehlerhaften Tropfen werden in folgendem Format angegeben: (Satelliten erster Ordnung/Satelliten zweiter Ordnung/Ringe/Anzahl zusammengelaufene Tropfen*Anzahl Einzeltropfen in dem Tropfen/Fehlende Tropfen.) Die Höhe hat einen Fehler von 1.82 μm .

Sample	Höhe	Tropfen- fehler	Radius	F. Radius	abs. Abw.	rel. Abw.
	[mm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
H1 a)	0.128	2(1/0/0/0/1)	374.57	5.68	25.40	0.07
H1 b)	0.128	0	357.80	6.52	31.28	0.09
H2 a)	0.1	0	346.38	4.92	24.55	0.07
H2 b)	0.1	2(1/1/0/0/0)	325.46	8.70	43.46	0.13
H3 a)	0.075	0	332.35	5.77	28.26	0.09
H4 a)	0.15	2(0/0/0/1*2/0)	343.70	4.34	18.93	0.06
H5 a)	0.11	1(0/0/0/0/1)	342.01	4.81	22.57	0.07

Tabelle 18: Die Auswertung für die Drucktestreihe des Araldite[®] 2011. Die Reihe wurde nur für zwei Nachkommastellen in den Grobauswertungen ausgewertet. Die Araldite[®] 2011 Präzisionsmessereihen und die DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Messreihen wurden für drei Nachkommastellen ausgewertet, da zwei nicht mehr genau genug waren. Nicht aufgelistete Samples wurden vorher aussortiert, Die fehlerhaften Tropfen werden in folgendem Format angegeben: (Satelliten erster Ordnung/Satelliten zweiter Ordnung/Ringe/Anzahl zusammengelaufene Tropfen*Anzahl Einzeltropfen in dem Tropfen/Fehlende Tropfen.). Der Druck hat einen Fehler von 0.1 kPa.

Sample	Druck [kPa]	Tropfen- fehler [μm]	Radius [μm]	F. Radius [μm]	abs. Abw. [μm]	rel. Abw. [μm]
P1 a)	120	0	373.02	3.51	17.5	0.05
P1 b)	120	4(0/0/4/0/0)	329.50	5.98	29.90	0.09
P2 a)	200	1(0/1/0/0/0)	427.41	6.46	32.29	0.08
P2 b)	200	1(1/0/0/0/0)	414.62	5.71	28.53	0.07
P4 a)	140	1(1/0/0/0/0)	381.65	4.02	20.11	0.05

Tabelle 19: Die Auswertung für die Intervalltestreihe des Araldite[®] 2011. Die Reihe wurde nur für zwei Nachkommastellen in den Grobauswertungen ausgewertet. Die Araldite[®] 2011 Präzisionsmessereihen und die DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Messreihen wurden für drei Nachkommastellen ausgewertet, da zwei nicht mehr genau genug waren. Nicht aufgelistete Samples wurden vorher aussortiert, Die fehlerhaften Tropfen werden in folgendem Format angegeben: (Satelliten erster Ordnung/Satelliten zweiter Ordnung/Ringe/Anzahl zusammengelaufene Tropfen*Anzahl Einzeltropfen in dem Tropfen/Fehlende Tropfen.). Das Intervall hat einen Fehler von 1 ms.

Sample	Intervall [ms]	Tropfen- fehler [μm]	Radius [μm]	F. Radius [μm]	abs. Abw. [μm]	rel. Abw. [μm]
I1 a)	25	0	313.57	2.99	14.95	0.05
I3 a)	100	1(0/1/0/0/0)	418.14	2.50	12.46	0.03
I5 a)	25/Druck:200 kPa	2(0/2/0/0/0)	291.57	3.44	17.18	0.06

Tabelle 20: Die Auswertung für die Grobtests der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621-Reihe. Nicht aufgelistete Samples wurden vorher aussortiert, Die fehlerhaften Tropfen werden in folgendem Format angegeben: (Satelliten erster Ordnung/Satelliten zweiter Ordnung/Ringe/Anzahl zusammengelaufene Tropfen*Anzahl Einzeltropfen in dem Tropfen/Fehlende Tropfen.)

Sample	Untersuchter Wert	Tropfen- fehler [μm]	Radius [μm]	F. Radius [μm]	abs. Abw. [μm]	rel. Abw. [μm]
B P1	250.0 ± 0.1 kPa	0	326.804	7.191	35.957	0.110
B I1 a)	25 ± 1 ms	2(2/0/0/0/0)	209.028	3.905	19.525	0.093
B I2	200 ± 1 ms	4(1/0/0/1*3/0)	312.920	6.065	28.447	0.091
B I1 b)	25 ± 1 ms	0	212.814	2.004	10.018	0.047
T B	Vis.:3500 cP	1(0/1/0/0/0)	252.136	3.278	16.386	0.065
T V1	-1.0 ± 0.1 kPa	2(0/2/0/0/0)	258.940	1.742	8.709	0.034
T V2	0.0 ± 0.1 kPa	1(1/0/0/0/0)	275.096	1.980	9.897	0.036
T P1	250.0 ± 0.1 kPa	0	314.336	2.649	13.241	0.042
T P2	80.0 ± 0.1 kPa	0	220.027	1.268	6.342	0.029
VT B a)	Vis.:14000 cP	5(0/1/0/1*4/0)	292.882	3.026	13.866	0.047
VT B2	Nadel:210.00 ± 1.82 mm	0	316.232	5.129	25.647	0.081
VT P1	250.0 ± 0.1 kPa	2(0/0/2/0/0)	386.004	3.041	15.205	0.039

Tabelle 21: Die Grobauswertung für die Feintests der DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621-Reihe. Nicht aufgelistete Samples wurden vorher aussortiert, Die fehlerhaften Tropfen werden in folgendem Format angegeben: (Satelliten erster Ordnung/Satelliten zweiter Ordnung/Ringe/Anzahl zusammengelaufene Tropfen*Anzahl Einzeltropfen in dem Tropfen/Fehlende Tropfen.)

Sample	Untersuchter Wert	Tropfen- fehler [μm]	Radius [μm]	F. Radius [μm]	abs. Abw. [μm]	rel. Abw. [μm]
B I1 I a)	I: 25 ± 1 ms	3(0/0/0/1*3/0)	229.859	4.163	18.144	0.079
B I1 I b)	I: 25 ± 1 ms	0	206.132	3.212	16.060	0.078
B I1 II	I: 15 ± 1 ms	2 (0/0/2/0/0)	170.186	2.903	14.511	0.085
B I1 III	I: 35 ± 1 ms	0	171.021	4.191	20.099	0.118
B I1 IV	P: 120.0 ± 0.1 kPa	2 (0/0/2/0/0)	165.426	2.975	14.870	0.090
B I1 V	P: 180.0 ± 0.1 kPa	0	167.626	1.937	9.685	0.058
VT P1	P: 250 ± 1 kPa	0	274.376	7.347	36.732	0.134
VT p1 II	P: 280 ± 1 kPa	1(0/0/1/0/0)	370.114	2.803	14.011	0.038
VT p1 III	P: 220 ± 1 kPa	0	344.203	3.043	15.212	0.044
VT p1 IV	I: 75 ± 1 ms	0	319.624	3.446	17.228	0.054
VT p1 III 2 a)	H: +50.00 ± 1.82 μm	0	346.973	5.019	25.090	0.072
VT p1 III 2 b)	H: +50.00 ± 1.82 μm	1(0/0/0/0/1)	264.542	10.058	49.273	0.186

Tabelle 22: Ergebnisse Zeittests DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Basiskleber aus Durchgang 1.

Zeit Min	Masse [mg]	F. Masse [mg]	max.Kraft [N]	F. Kraft [N]	Status
5	0.09	0.09	0	0	w
5	0.09	0.09	0	0	w
15	0.36	0.36	13.672	1.197	s
15	0.36	0.36	13.180	0.790	s

Tabelle 23: Ergebnisse Zeittests DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 Basiskleber aus Durchgang 2. Die Datei für B iii 1 und B ii 1 sind verschwunden. Sie wurden vermutlich aus versehen überschrieben. Der Fehler wird auf 2.490 N= 2 N+Fehler des Maximums geschätzt.

Zeit Min	Masse [mg]	F. Masse [mg]	max.Kraft [N]	F. Kraft [N]	Status
10	0.09	0.09	11.882	2.490	s
10	0.09	0.09	10.783	2.282	s
15	0.36	0.36	5.801	2.490	m
15	0.36	0.36	10.248	2.306	s

Tabelle 24: Ergebnisse Zeittests DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 T aus Durchgang 1.

Zeit Min	Masse [mg]	F. Masse [mg]	max.Kraft [N]	F. Kraft [N]	Status
7	0.09	0.09	13.180	0.790	s
7	0.09	0.09	5.803	1.035	m
15	0.36	0.36	12.983	1.192	s
15	0.36	0.36	12.952	0.776	s

Tabelle 25: Ergebnisse Zeittests DYMAX[®] Multi-Cure[®] 6-621 VT.

Zeit Min	Masse [mg]	F. Masse [mg]	max.Kraft [N]	F. Kraft [N]	Status
8	0.09	0.09	13.071	1.112	s
8	0.09	0.09	13.472	1.057	s
12	0.36	0.36	14.347	1.018	s
12	0.36	0.36	16.526	1.205	s

C Danksagung

Ich danke an der Stelle allen, die mich bei der Arbeit unterstützt haben.

An erster Stelle danke ich Prof. Niklaus Berger für die Aufnahme in der Arbeitsgruppe sowie für seine Unterstützung bei der Bachelorarbeit danken.

Auch danke ich Dr.-Ing. Lars Steffen Weinstock für seine umfassende Unterstützung und Beratung während der Experimente und der Erstellung der Bachelorarbeit.

Darüber hinaus möchte ich Prof. Lucia Masetti für die Übernahme der Zweitkorrektur und die Unterstützung bezüglich des Zugangs zu dem Raum mit dem Mikroskop danken.

Zum Schluss danke ich Jessica Höffner, für die Rücksicht und die netten Gespräche während der Zeit meiner Bachelorarbeit.