

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit wurde verfasst von Martin Duft, Student der Hochschule Anhalt in Köthen in der Fachrichtung Maschinenbau.

Die Arbeit befasst sich mit dem Thema „Entwicklung einer Vorrichtung zum Orbitalschweißen eines dünnwandigen PP-Rohres mit einer PP-Endkappe“.

Es ist die Abschlussarbeit für das Bachelorstudium.

Die Arbeit befasst sich anfangs mit der Herstellung und den Eigenschaften des zu verarbeitenden Werkstoff PP. Anschließend werden Verbindungsverfahren für Kunststoffe erläutert und ein geeignetes Verfahren ausgewählt, danach die dafür nötigen Prozessparameter ermittelt und die Konstruktion der Versuchseinrichtung beschrieben. Um diese Werte zu erhalten sind verschiedene Messungen mit dem verwendeten Material vorgenommen und analysiert wurden. Abschließend sind anhand der gesammelten Erkenntnisse die durchgeführten Versuche ausgewertet und die nötigen Veränderungen an der Konstruktion beschrieben.

Die Arbeit wurde im Jahr 2013 erstellt.

Bernburg
Dessau
Köthen



Hochschule Anhalt
Anhalt University of Applied Sciences

emw

Fachbereich
Elektrotechnik, Maschinenbau
und Wirtschaftsingenieurwesen

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering (B. Eng.)

Martin Duft

Vorname Nachname

Maschinenbau, 2009, 4051362

Studiengang, Matrikel, Matrikelnummer

Thema:

**Entwicklung einer Vorrichtung zum Orbital-
schweißen eines dünnwandigen PP-Rohres mit
einer PP-Endkappe**

Prof. Hilmar Killmey

Vorsitzende(r) der Bachelorprüfungskommission

Dr. Andreas Rittel

1. Prüfer(in)

Prof. Hilmar Killmey

2. Prüfer(in)

24. 09. 2013

Abgabe am

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis.....	IV
1 Motivation und Zielsetzung.....	1
1.1 Einleitung in die Aufgabenstellung.....	1
1.2 Ausgangsbedingungen und Zielsetzung der Arbeit.....	2
2 Stand von Wissenschaft und Technik.....	3
2.1 Kunststofftechnik.....	3
2.1.1 Herstellung von PP.....	3
2.1.2 Eigenschaften von PP.....	5
2.2 Formgebung von Kunststoff.....	6
2.3 Verbinden von Kunststoffteilen.....	7
2.3.1 Kleben von Kunststoffen.....	7
2.3.2 Mechanische Verbindungen von Kunststoffen.....	8
2.3.3 Schweißen von Kunststoffen.....	10
3 Schweißen von dünnwandigem PP-Rohr.....	11
3.1 Auswahl möglicher Schweißtechniken.....	11
3.1.1 Warmgasschweißen.....	11
3.1.2 Reibschweißen.....	11
3.1.3 Heizelementschweißen.....	12
3.1.4 Strahlungsschweißen.....	13
3.1.5 Wahl des geeignetsten Verfahrens.....	15
3.2 Laser.....	16
3.2.1 Laserarten und Laserstrahlerzeugung.....	16
3.2.2 Sicherheitsmaßnahmen.....	17
3.3 Bestimmung der Prozessparameter.....	19
3.3.1 Parameter des Lasers.....	19
3.3.2 Bestimmung der Schweißparameter.....	19
3.4 Konstruktion der Versuchseinrichtung.....	22
3.4.1 Grundlegende Konstruktion.....	22
3.4.1.1 Lagerung des Rohres.....	23

3.4.1.2	Lagerung der Endkappe.....	23
3.4.1.3	Antrieb.....	25
3.4.1.4	Sicherheitsvorkehrungen.....	25
3.4.2	Auswertung der Versuche.....	26

4 Zusammenfassung und Ausblick..... 30

Literaturverzeichnis.....	V
Quellenverzeichnis.....	V
Geräte und Programme.....	VI

Anlagen VII

A.	Werkstoffdatenblatt von PP.....	VII
B.	Datenblatt des Lasers.....	X
C.	Datenblatt DSC Anlage.....	XI
D.	unbearbeitete Transmissionsmessung.....	XIII

Selbstständigkeitserklärung

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

PP	Polypropylen
PE	Polyethylen
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Nd	Neodym
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
N ₂	Stickstoff
He	Helium
IR	Infrarot
F	nötige Fügekraft [N]
P	maximale Leistung des Lasers [W]
h	Höhe der Schweißnaht [mm]
D _{Schw}	Außendurchmesser der Schweißnaht [mm]
d _{schw}	Innendurchmesser der Schweißnaht [mm]
Q _{ges}	nötige Gesamtwärme zum Schweißen [J]
Q ₁	Wärmemenge bis zum Schmelzpunkt [J]
Q ₂	Wärmemenge für Schmelzvorgang [J]
Q ₃	Wärmemenge bis zur Schweißtemperatur [J]
c	spezifische Wärmekapazität von PP $\left[\frac{J}{g \cdot K}\right]$
m	Masse der Schweißnahtschmelze [g]
V _{Schm}	Volumen der Schweißnaht [cm ³]
ρ	Dichte von PP $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$
c _s	spezifische Schmelzwärme von PP $\left[\frac{J}{g}\right]$
T ₁	Raumtemperatur [°C]
T ₂	Schmelztemperatur von PP [°C]
T ₃	Schweißtemperatur [°C]
t _{Laser}	Dauer des Lasereinsatzes [s]
P _{Laser}	verwendete Laserleistung [W]
n _{min}	minimal nötige Drehzahl des Werkstücks $\left[\frac{1}{min}\right]$
T	Transmissionsgrad der PP-Probe [%]
A	Absorptionsgrad der PP-Probe [%]
I	Transmissionswert bei Laserwellenlänge [mm]
I ₀	Leermessung bei Laserwellenlänge [mm]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 01 Erste Schweißversuche.....	2
Abbildung 02 Schwarze PE-Kappe nach Schweißversuch.....	2
Abbildung 03 Mögliche Strukturen von PP.....	3
Abbildung 04 Mögliche Katalysatorpaarungen für Ziegler-Natta-Verfahren.....	4
Abbildung 05 Reaktion zur Bildung der Übergangskomplexe.....	4
Abbildung 06 Kettenwachstum mithilfe der Übergangskomplexe.....	5
Abbildung 07 Peak der zweiten Aufheizung der DSC-Messung von PP.....	5
Abbildung 08 Funktionsprinzip einer Nietverbindung.....	9
Abbildung 09 Darstellung einer Schnappverbindung.....	10
Abbildung 10 Aufbau eines Handschweißgerätes.....	11
Abbildung 11 Prinzip des Gegeneinanderreißschweißens.....	12
Abbildung 12 Prinzip Heizelementmuffenschweißen.....	12
Abbildung 13 Direktes Laserstrahlstumpfschweißen.....	14
Abbildung 14 Durchstrahlschweißen.....	14
Abbildung 15 Schematische Darstellung Laserstrahlerzeugung.....	16
Abbildung 16 Reflexion und Austritt der Lichtenergie.....	16
Abbildung 17 Einteilung der Laserklassen.....	18
Abbildung 18 Strahlenspektrum.....	19
Abbildung 19 Schweißnahtskizze.....	20
Abbildung 20 Grundrahmen mit Rippen.....	22
Abbildung 21 Rollenlager für PP-Rohr.....	23
Abbildung 22 Bemaßte Anpressrolle.....	24
Abbildung 23 Anordnung der Anpressrollen.....	24
Abbildung 24 Position des Antriebsmotors.....	25
Abbildung 25 Strahlenfang und Deckelverriegelung.....	26
Abbildung 26 DSC Kurven von PP und PE, zweite Aufheizung.....	27
Abbildung 27 Transmissionskurven.....	28
Abbildung 28 Schweißergebnis mit PP-Kappe.....	29
Abbildung 29 Angepasste Kappengeometrie.....	29
Abbildung 30 Holzmodell der Anpressrollen.....	30

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Einleitung in die Aufgabenstellung

In der modernen Fügetechnik gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten eine lösbare oder nicht lösbare Verbindung zwischen zwei oder mehreren Komponenten herzustellen. Das Schweißen ist heutzutage eine der wichtigsten Techniken um eine nicht lösbare Verbindung bei Metallen zu gewährleisten. Auch in der Kunststofftechnik hat das Schweißen einen hohen Stellenwert erreicht. Kunststoffe sind künstlich hergestellte Werkstoffe, die mit chemischen Verfahren entweder durch Umwandlung von Naturstoffen oder häufiger aus niedermolekularen Stoffen synthetisch aufgebaut werden. Kunststoffe bestehen aus langkettigen organischen Molekülverbindungen, den Makromolekülen.

Besonders an schwer zugänglichen Stellen oder bei komplizierten Nahtgeometrien wird dann oft das Laserschweißen eingesetzt. Die häufigste Variante ist dabei das Überlappverfahren. Da mit dem Laserstrahl die Wärme genau an der Schweißnaht freigesetzt wird, können sehr schmale und stabile Nähte erzielt werden. Da beim Laserschweißen im Vergleich zu anderen Varianten des Schweißens wenig Energie benötigt wird, kommt es nur zu einer kleinen Wärmeeinflusszone und dadurch werden die Gefügeveränderungen gering gehalten, genauso wie der Verzug, der beim Schweißen entsteht. Aufgrund dieser Tatsache wird eine hohe Schweißgeschwindigkeit erzielt, bei einer ebenfalls hohen Qualität der Schweißnaht, was das Laserschweißen zu einem sehr wirtschaftlichen Verfahren macht.

Wie auch jedes andere Verfahren hat das Laserschweißen aber auch einige Nachteile. Diese sind unter anderem die hohen Anschaffungskosten für eine solche Schweißanlage, sowie die umfangreichen Schutzmaßnahmen, die aufgrund der Laserstrahlung ergriffen werden müssen, denn gerade bei energiereichen Lasern wie z.B. CO₂-Lasern kann schon ein Teil der Strahlung durch Streuung oder Reflexion schwere Verletzungen bei unzureichenden Schutzmaßnahmen bewirken.

1.2 Ausgangsbedingungen und Zielsetzung der Arbeit

Diese Arbeit dient dazu eine Vorrichtung zu entwickeln, die es ermöglicht ein dünnwandiges PP-Rohr auf beiden Seiten mit einer PP-Kappe zu verschließen. Dieser Vorgang soll später auch für eine größere Stückzahl wiederholbar sein.

Die Aufgabe der Vorrichtung ist es, das Rohr mit den beiden Kappen gas- und flüssigkeitsdicht zu verschließen. Das Rohr hat einen Durchmesser von 50 mm und eine Wanddicke von 0,8 mm und besteht aus transluzentem PP. Die Kappen sind in der Entwicklungsphase als Drehteile aus grauem oder schwarzem PP gefertigt. Später sind sie jedoch als Spritzgussteile geplant, um kostengünstig eine hohe Stückzahl mit gleicher Qualität zu erhalten.

Um einen funktionstüchtigen Prototyp herstellen zu können, muss erstens ein geeignetes Fügeverfahren ermittelt werden, woran sich dann die Auslegung und Konstruktion der Vorrichtung orientieren kann. Des Weiteren werden die nötigen Parameter, die zum Fügen der Teile nötig sind, durch Berechnungen und entsprechende Versuche bestimmt.

Die im Vorfeld der Arbeit durchgeführten Schweißversuche zeigen eine unfertige Nahtstelle. Die beiden Fügepartner waren mit bloßem Auge gut miteinander verbunden, sobald jedoch eine kleine Kraft auf die Nahtstelle einwirkt, lösen sich die Fügepartner sofort wieder voneinander. Es kam zu keiner vollständigen Schweißnaht, die Teile sind nur durch das thermische Dehnungsverhalten des Kunststoffes miteinander verbunden (aufgeschrumpft). Wie in Abb. 01 zu sehen ist, wurde das PP-Rohr durch die Wärmeeinwirkung des Lasers verformt. Das Material der Kappe bleibt jedoch fast unverändert (siehe Abb. 02). Diese Ausbildung der Nahtstelle lässt nur zwei Schlüsse zu, entweder wurde das Material der Kappe nicht aufgeschmolzen, oder die Nahtstelle wurde mit einer zu geringen oder sogar mit gar keiner Fügekraft beaufschlagt, wodurch es zu keiner festen Verbindung kam. Ersteres scheint aufgrund der Kappenoberfläche wahrscheinlicher.



Abb. 01: Erste Schweißversuche
(Quelle: Foto, Eigenerstellung)



Abb. 02: Schwarze PE-Kappe
nach Schweißversuch
(Quelle: Foto, Eigenerstellung)

2. Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Kunststofftechnik

2.1.1 Herstellung von PP

Für die Herstellung von Kunststoffen gibt es drei verschiedene Verfahren. Diese sind die Polymerisation, die Polykondensation und die Polyaddition. PP wird durch das Verfahren der Polymerisation hergestellt. Diese Verfahren ist eine Kettenreaktion, bei dem sich ungesättigte Moleküle (Monomere), miteinander verbinden und dabei langkettige Makromoleküle entstehen. Diese Makromoleküle, auch Polymere genannt, bilden dann den eigentlichen Kunststoff. Polymere werden nach ihrem Polymerisationsgrad (Molekülkettenlänge) unterschieden. Bei der Polymerisation ist es jedoch nicht möglich nur Polymere von einem bestimmten Polymerisationsgrad herzustellen. Bei der Synthese gibt es immer eine Streuung des Polymerisationsgrades. Es ist aber möglich durch Zusätze und Überwachung des Prozesses die Streuung sehr gering zu halten. Es ist wichtig, da von dem Polymerisationsgrad eines Polymers auch seine Eigenschaften sehr stark abhängen, genauso wie von dem strukturellen Aufbau des Polymers (siehe Abb. 03).

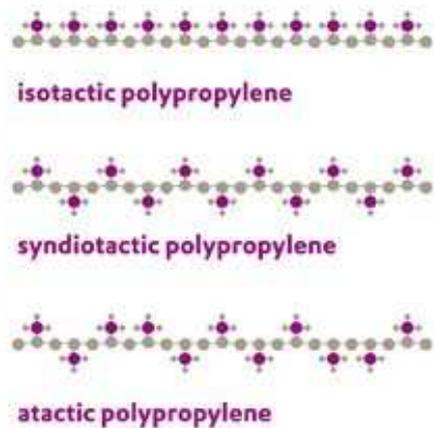


Abb. 03: Mögliche Strukturen von PP
(Quelle: (vgl.) EVONIK Industries, 22.08.2013 [08].)

Jede Polymerisation besteht aus drei Reaktionsteilschritten. Es beginnt mit der Startreaktion, welche den Ausgangsstoff für die weitere Reaktion vorbereitet, indem die vorhandene Doppelbindung im Monomer aufgespalten wird und somit in einen reaktiven Zustand überführt wird. Je nachdem welche Art von Teilchen die Startreaktion auslöst, wird in vier Polymerisationsarten unterschieden. Es gibt die radikalische, die kationische und die anionische Polymerisation und die Polymerisation mit Übergangsmetallverbindungen. Nach der Startre-

aktion beginnt sofort die Kettenfortpflanzungsreaktion, bei der sich die einzelnen Monomere miteinander verbinden. Im Fall von PP ist der Ausgangsstoff Propen. Der zweite Schritt läuft selbstständig ab und dauert so lange an bis entweder der gesamte Ausgangsstoff verbraucht ist oder der dritte Schritt, die Abbruchreaktion, eingeleitet wird. Für die industrielle Nutzung von Bedeutung ist allerdings hauptsächlich das isotaktische PP (siehe Abb.03). Dieses wird nach dem Ziegler-Natta-Verfahren hergestellt, bei dem Übergangsmetallverbindungen aus Titan und Aluminium zum Einsatz kommen. Vereinfacht dargestellt läuft die Polymerisation nach folgendem Schema ab (Abb. 04 bis 06). Um isotaktisches PP zu erhalten sind bestimmte Katalysatoren nötig, die die einzelnen Monomere entsprechend anordnen können. Abb. 04 zeigt zwei mögliche Katalysatorpaare für die Reaktion, welche dann die Übergangsmetallverbindungen erzeugen, zum Ersten Titan(III)-chlorid, das zusammen mit Diethylaluminiumchlorid verwendet wird und zum Zweiten Titan(IV)-chlorid, welches mit Triethylaluminium zur Anwendung kommt.

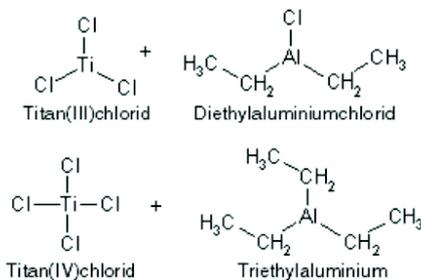


Abb. 04: Mögliche Katalysatorpaarungen für Ziegler-Natta-Verfahren

(Quelle: (vgl.) Freie Universität Berlin, 22.08.2013 [09].)

Als Erstes bilden die beiden Katalysatoren je einen Übergangskomplex, an dem sich dann ein Monomer anlagern kann (siehe Abb. 05).

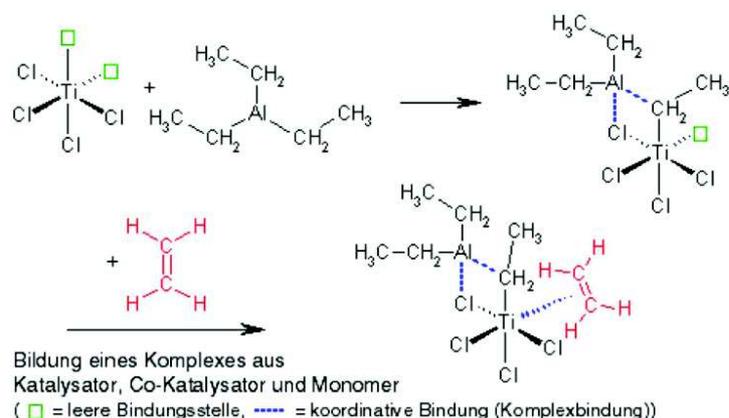


Abb. 05: Reaktion zur Bildung der Übergangskomplexe

(Quelle: (vgl.) Freie Universität Berlin, 22.08.2013 [09].)

Mithilfe dieses Komplexes läuft dann das Kettenwachstum ab (siehe Abb. 06), bei dem die Ausrichtung der Moleküle entsprechend gesteuert wird. Es läuft bis die Monomere aufge-

braucht sind oder die Abbruchreaktion eingeleitet wird, und somit am Ende das isotaktische PP vorliegt.

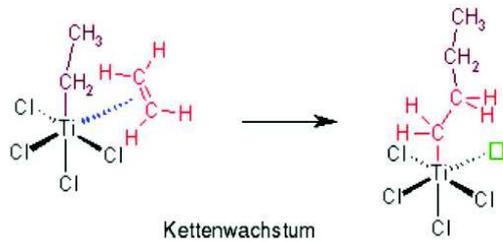


Abb. 06: Kettenwachstum mithilfe der Übergangskomplexe
(Quelle: (vgl.) Freie Universität Berlin, 22.08.2013 [09].)

2.1.2 Eigenschaften von PP

PP ist ein teilkristalliner Thermoplast und gehört zur Gruppe der Polyolefine und wird durch Polymerisation hergestellt. Die Eigenschaften durch Polymerisation hergestelltem PP hängen sehr stark von dem vorhandenen Polymerisationsgrad des Produktes ab. Die Eigenschaften werden deshalb nur in Wertebereichen angegeben. Die exakten Werte für ein vorliegendes Produkt werden meist vom Hersteller angegeben oder sind selbst zu ermitteln. PP ist der leichteste aller Kunststoffe und dabei auch einer der härtesten. Er hat jedoch eine geringe Kratzfestigkeit und wird bei Kälte spröde. Was ihn aber für die Industrie sehr interessant macht, ist dass er durch seinen hohen Schmelzpunkt im Vergleich zu anderen Kunststoffen eine hohe Wärmebeständigkeit besitzt. Weiterhin ist er lebensmittelecht und sterilisierbar.

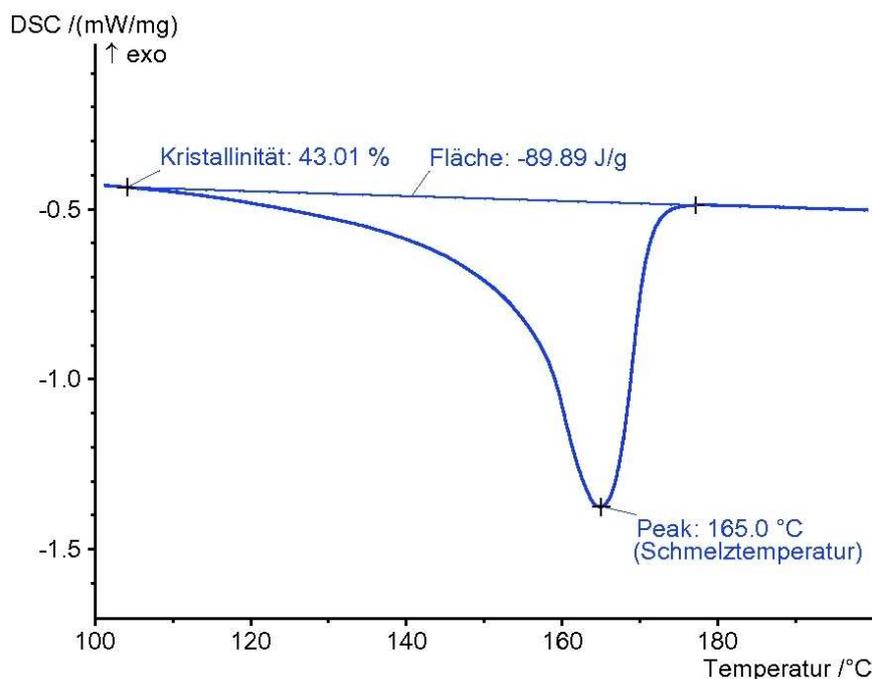


Abb. 07: Peak der zweiten Aufheizung der DSC-Messung von PP
(Quelle: DSC-Gerät, Ergebnis Eigenmessung [10].)

Die Abb. 07 zeigt einen Auszug aus der DSC-Messung des PP-Rohres. DSC steht für Differential Scanning Calorimetry. Die Messung wurde mit einem Gerät der Firma Netsch von Typ DSC 200 F3 Maia durchgeführt (siehe Anhang). Bei einer DSC-Messung wird eine kleine Probe, von wenigen mg, mit einem Vergleichspräparat in einem eingestellten Heizintervall auf eine vorher festgelegte Temperatur, die über dem Schmelzpunkt des Materials liegen sollte, aufgeheizt. Danach wird die Probe wieder abgekühlt, ein zweites Mal aufgeheizt und letztendlich wieder abgekühlt. Die Messwerte, die bei der zweiten Aufheizung entstehen, zeigen die Materialeigenschaften. Die Daten, die bei der ersten Aufheizung entstehen, zeigen, im Vergleich mit der zweiten, mögliche entstandene Materialfehler in den Fertigungsschritten des Materials auf. In dieser Messung wurden drei wichtige Charakteristiken des Stoffes bestimmt. Die Schmelztemperatur, eine für das Schweißen wichtige Information, liegt bei genau 165,0 °C und wird durch die Spitze des Peaks gekennzeichnet. Die spezifische Schmelzwärme wird durch die Fläche unter der Kurve bestimmt. Sie beträgt 89,89 J/g. PP ein teilkristalliner Stoff, da er sich aus kristallinen und amorphen Teilen zusammensetzt. Der Anteil des kristallinen Teils wird durch die Kristallinität angegeben und hat einen direkten Einfluss auf die spezifische Schmelzwärme. Sie beträgt 43,01 %. Mit steigender Kristallinität, wird auch die spezifische Schmelzwärme größer, da für das Aufbrechen der kristallinen Struktur mehr Energie benötigt wird als für die amorphe Struktur. Wie dem Datenblatt des Herstellers zu entnehmen ist, handelt es sich bei diesem PP um ein Homopolymer, d.h. es besitzt einen isotaktischen Aufbau. Der übliche kristalline Anteil bei solch einem PP beträgt üblicher Weise zwischen 45 und 65 %. Somit besitzt das hier verwendete PP einen relativ geringen kristallinen Anteil, wodurch für den Schweißvorgang weniger Energie benötigt wird.

2.2 Formgebung von Kunststoff

Die Formgebung bei Kunststoffen kann auf verschiedenen Arten erfolgen, die häufigsten Varianten sind Extrudieren, Blasformen und Spritzgießen.

Beim Extrudieren wird ein kontinuierliches Produkt erzeugt, dies kann ein Halbzeug, ein Rohr oder eine Folie sein. Eine Extrusionsanlage besteht grundsätzlich aus folgenden Baugruppen. Der Extruder, wo der Kunststoff plastifiziert wird, drückt den flüssigen Kunststoff durch eine Düse, in der die Formgebung erfolgt. Daran schließt sich die Kühlung an, die den Kunststoff unter seinen Schmelzpunkt abkühlt. Anschließend kommt der Abzug, der den Kunststoff zur Konfektionierung befördert, wo er auf die gewünschte Abmessung geschnitten wird.

Das Blasformen besteht aus zwei Arbeitsschritten, zuerst wird in einem Extruder die kontinuierliche Grundform eines Schlauches hergestellt. Diese wird dann in die nötige Länge geschnitten und in die Blasform geführt. Der Kunststoff bleibt dabei weich und verformbar. Anschließend wird ein Blasdorn in den Schlauch geführt und die endgültige Form mittels Druckluft erstellt.

Das Spritzgießen ist ein zyklisches Verfahren und eignet sich sehr gut für die Massenherstellung, selbst bei komplizierten Formteilen. Der Kunststoff wird hier ebenfalls zuerst in einem Extruder plastifiziert. Anschließend wird er in die vorher gefertigte Form gespritzt und kühlt dann unter anhaltenden Druck in der Form ab. Nachdem der Kunststoff ausreichend abgekühlt ist, wird die Form geöffnet und das fertige Werkstück ausgeworfen.

2.3 Verbinden von Kunststoffteilen

Kunststoffteile können genau wie alle anderen Werkstoffe durch drei Hauptverfahren miteinander verbunden werden. Diese sind das Kleben, das Schweißen und das mechanische Verbinden. Alle drei Verfahren haben ihre Vor- und Nachteile gegenüber den anderen Verfahren. Die Art nach der Teile miteinander gefügt werden, richtet sich immer nach dem Anwendungsfall, denn nicht jedes Verfahren ist für alle Anwendungen gut geeignet bzw. in manchen Fällen gar nicht realisierbar.

2.3.1 Kleben von Kunststoff

Das Kleben ist ein Verfahren zum Herstellen von unlösbaren Verbindungen. Dieses Verfahren wird beim Verbinden von Kunststoffteilen aus mehreren Aspekten immer wichtiger. Erstens lassen sich dadurch auch nicht oder schlecht schweißbare Kunststoffe miteinander verbinden, zweitens sind mehr Werkstoffkombinationen möglich und drittens hat das Kleben von Kunststoffen eine hohe Wirtschaftlichkeit.

Klebverbindungen werden mit Klebstoffen hergestellt, welche nichtmetallische Werkstoffe sind. Die Fügeteile werden mit diesen durch Flächenhaftung miteinander verbunden, ohne dabei eine wesentliche Gefügeänderung in den Teilen zu erzeugen. [01]

Die Stärke der Verbindung hängt in erster Linie von Kohäsion und Adhäsion der Fügestelle ab. Adhäsion ist die Bindungskraft, die an den Grenzflächen vom Klebstoff und zu klebenden Fügeteil entsteht. Sie beruht auf elektromagnetischen Wechselwirkungen zwischen Klebstoff und Fügeteil. Wenn sich an der Fügeoberfläche positive oder negative Ladungsanhäufungen bilden, wird dieser als polar bezeichnet. Je stärker die polare Ausbildung ist, umso stärker ist auch die Adhäsion. Kohäsion ist die Bindungskraft im Klebstoff selbst und hängt

somit vom chemischen Aufbau des Klebstoffes ab. Es ist nicht möglich jeden Kunststoff zu verkleben. Es müssen bestimmte Voraussetzungen gegeben sein, damit eine stabile Verbindung entsteht. Ein wichtiger Punkt dabei ist die Polarität des Kunststoffes. Sie wirkt sich auf die Oberflächenspannung aus und verändert somit die Benetzbarkeit und Löslichkeit der Füge­teile. Die Löslichkeit ist ein Maß dafür, ob der Klebstoff in die Oberfläche des Kunststoff­teils eindiffundieren kann. Ein gut zu verklebender Kunststoff sollte also eine ausgeprägte Polarität und ein gutes Maß an Benetzbarkeit und Löslichkeit besitzen.

Ein weiterer Punkt ist das deformationsmechanische Verhalten der zu f­ügenden Teile. Da Kunststoffe aufgrund ihres geringen Elastizitätsmoduls unter mechanischer Spannung meist eine starke Verformung aufweisen, muss diese von der Naht bzw. vom Klebstoff aufgenommen werden. Um Spannungsinhomogenitäten zu vermeiden sollten sich die Fügepartner ähnlich stark verformen lassen.

Der Klebstoff selbst kann aus einer Vielzahl von Kunststoffen hergestellt sein. Die wichtigsten Eigenschaften eines Klebgrundstoffes sind die Polarität und eine hohe Kohäsion. Die Oberflächenspannung sollte geringer sein als die des Füge­teils, um eine gute Benetzung zu erzielen.

Zur Charakterisierung eines Klebstoffes zählt auch der Abbindemechanismus. Der kann entweder physikalisch oder chemisch sein. Physikalisch sind hauptsächlich Schmelz-, Abkühl- und Verdunstungsvorgänge. Beim chemischen Abbinden hingegen entsteht die Verbindung durch eine chemische Reaktion im Klebstoff. Dies kann eine Polymerisation, Polyaddition oder Polykondensation sein.

Wie bereits erwähnt gibt es Kunststoffe, die sich nur schwer oder gar nicht verkleben lassen. Zu dieser Gruppe zählen unter anderen Polyacetale und Polyolefine. Somit gehört auch PP in diese Gruppe der schwer klebbaren Kunststoffe, da es sich hierbei um ein Polyolefin handelt. Um die Benetzbarkeit von PP zu erhöhen, müssen die Füge­teile durch chemische Verfahren wie Beizen oder physikalische Verfahren wie Beflammen oder Corona-Entladung vorbehandelt werden. Es lassen sich dennoch keine hochwertigen und dauerhaften Verbindungen herstellen. Somit ist das Kleben für PP kein geeignetes Verfahren. [02]

2.3.2 Mechanische Verbindungen von Kunststoffen

Mechanische Verbindungen von Kunststoffen können lösbar oder unlösbar ausgeführt werden. Die am häufigsten verwendeten Verbindungsarten sind Niete, Schrauben und Schnappverbindungen.

Das Nieten von Kunststoffen kommt zum Einsatz, wenn unterschiedliche Kunststoffe miteinander gefügt werden sollen, sich aber nicht schweißen oder kleben lassen. Um mögliches

Korrodieren zu vermeiden werden Kunststoffniete anstelle der üblichen Metallniete verwendet. Diese können dann genau wie die metallischen kalt oder warm gestaucht werden. Beim Kaltstauchen können Neuorientierungen im Werkstoff entstehen, die die Temperaturempfindlichkeit der Fügestelle sogar erhöhen können.

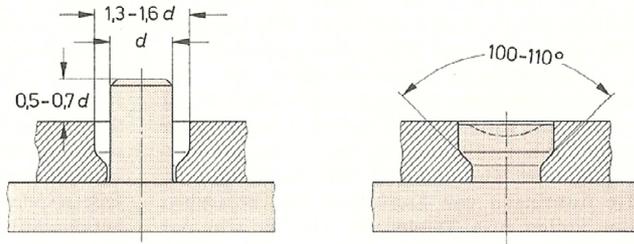


Abb. 08: Funktionsprinzip einer Nietverbindung

(Quelle: Schwarz; Ebeling; Lüpke: Kunststoffverarbeitung, 1991, S. 223 [03].)

Beim Warmstauchen entstehen weniger Spannungen im Niet, wodurch auch längere Niete und zugleich dünnere Niete verwendet werden können. Jedoch wird durch das Erwärmen und Abkühlen die Dauer, die zum Herstellen der Verbindung benötigt wird, erhöht.

Somit ist das Kaltstauchen die wirtschaftlichere Verbindungsart. Eine Nietverbindung ist nicht gas- und flüssigkeitsdicht. Um dies zu erreichen müssen Kleb- oder Dichtstoffe zusätzlich in die Verbindung eingebracht werden, was zur Folge hat, dass der Fertigungsaufwand und die Kosten steigen.

Schraubverbindungen sind die am meisten verwendeten lösbaren Verbindungen bei Kunststoffen. Sie werden hauptsächlich bei Flanschverbindungen eingesetzt. Die Schrauben und Muttern sind hierbei meist aus Metall, können aber auch aus Kunststoff gefertigt sein. Wenn Kunststoff zum Einsatz kommt, dann wird die Schraube mit einem Rundgewinde gefertigt, um Kerbwirkungen zu vermeiden. Die Schraubverbindung wird bei höheren Beanspruchungen als die Nietverbindung eingesetzt, deshalb muss hierbei die Relaxation des Kunststoffes berücksichtigt werden. Dadurch ist oft ein mehrmaliges Nachziehen der Verbindung nötig.

Die Verwendung von selbstschneidenden Metallschrauben ist nur bei zähen Kunststoffen möglich. Diese Art der Verschraubung sollte nicht zu oft gelöst werden, um eine sichere Verbindung zu gewährleisten. Diese ist jedoch eine sehr wirtschaftliche Verbindungsart, da sie schnell und einfach hergestellt werden kann. Wenn ein häufiges Lösen aber notwendig ist, dann werden metallische Gewindeeinsätze eingesetzt. Diese wurden früher mit eingespritzt, heute werden diese immer häufiger mit einem Ultraschallfeld eingerüttelt.

Um eine Schraubverbindung gas- und flüssigkeitsdicht zu machen, müssen auch hier Dicht- oder Klebstoffe mit eingebracht werden.

Schnappverbindungen funktionieren nach dem zähelastischen Verhalten der unterschiedlichen Kunststoffe. Sie sind sehr einfach und wirtschaftlich herzustellen, jedoch ist ihre Kraftübertragung begrenzt. Diese Art der Verbindung wird meist bei Behälterverschlüssen und Zierleisten verwendet.

Eine Verbindung wird hergestellt, indem eine vorstehende Wulst, Haken o.ä. in eine Hinterschneidung greift (siehe Abb. 09).

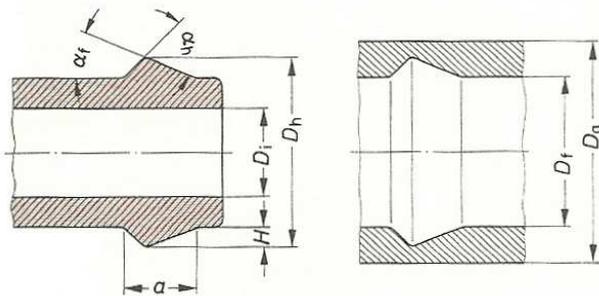


Abb. 09: Darstellung einer Schnappverbindung

(Quelle: Schwarz; Ebeling; Lüpke: Kunststoffverarbeitung, 1991, S. 225 [03].)

Diese Verbindung kann sowohl lösbar als auch unlösbar ausgeführt werden. Die Verformung, die durch das Herstellen der Verbindung hervorgerufen wird, sollte 50 % der Dehnung die an der Streckgrenze vorliegt, nicht überschreiten. Diese Art der Verbindung ist nicht gas- und flüssigkeitsdicht. [03]

2.3.3 Schweißen von Kunststoffen

Nach der DIN 1910 Teil 1 gehören alle Kunststoffschweißverfahren zu den Pressschweißverfahren und sind in dieser wie folgt definiert. Kunststoffschweißen ist das Vereinigen von thermoplastischen Kunststoffen unter Anwendung von Wärme und Kraft ohne oder mit Schweißzusatz. Das Kunststoffschweißen ist im Apparate- und Rohrleitungsbau, sowie bei der Verarbeitung von Verpackungsfolien ein wichtiges Fügeverfahren.

Theoretisch sind alle thermoplastischen Kunststoffe schweißbar. Jedoch hängt die technische Durchführbarkeit von der Struktur und der Molekülmasse und somit der Kettenlänge ab. Dadurch kann es sein, dass theoretisch schweißbare Stoffe wegen ihres Molekülaufbaues und einer zu großen Kettenlänge technisch nicht schweißbar werden. Grundsätzlich lassen sich nur gleiche Thermoplaste miteinander verschweißen, es sei denn zwei Verschiedene ähneln sich in den Bedingungen, wie sie in den plastischen Zustand übergehen.

Für ein gutes Schweißergebnis müssen jedoch nicht nur die Fügepartner geeignet sein, sondern auch die Schweißparameter müssen genau richtig eingehalten werden um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Dazu gehören Schweißtemperatur, Schweißkraft und

Temperatureinwirkzeit. Der Schweißvorgang ist in die grundsätzlichen Fertigungsschritte Plastifizieren, Fügen und Verfestigen einzuteilen, welche in den nachfolgenden Schweißarten noch näher beschrieben werden. [04]

3 Schweißen von dünnwandigem PP-Rohr

3.1 Auswahl möglicher Schweißtechniken

3.1.1 Warmgasschweißen

Das Warmgasschweißen ist ein Verfahren, das einen Wärmeträger benötigt. Als Wärmeträger wird in der Regel elektrisch aufgeheizte Luft verwendet, bei einigen Kunststoffen wird aber auch mit Inertgasen gearbeitet. Das Gas wird hierbei erst im Handstück, dem sogenannte Thermoplasthandschweißgerät, erwärmt und wird dann durch die Düse an die Schweißstelle geführt (siehe Abb. 13).

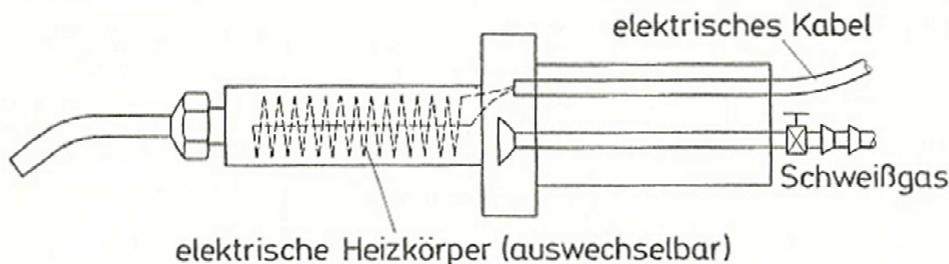


Abb. 10: Aufbau eines Handschweißgerätes

(Quelle: Schwarz; Ebeling; Lüpke: Kunststoffverarbeitung, 1991, S. 205 [04].)

Beim Warmgasschweißen wird fast ausschließlich mit Zusatzmaterial geschweißt. Dabei ist es wichtig die Fügeflächen des Grundwerkstücks und den Zusatzwerkstoff gleichzeitig und gleichmäßig zu plastifizieren. Die Schweißtemperatur kann hier durch Regeln der Heizleistung, der Luftmenge, dem Abstand der Düse und der Schweißgeschwindigkeit beeinflusst werden, somit muss eine genau Abstimmung all dieser Faktoren erfolgen, um eine gute Schweißnaht zu erhalten.

3.1.2 Reibschweißen

Beim Rotationsreibschweißen, welches bei runden Teilen angewendet wird, wird das Plastifizieren der Fügeflächen durch Reibungswärme gegeneinander oder gegen ein spezielles Reibelement erreicht. In der Abb. 14 wird das Gegeneinanderreiben dargestellt.

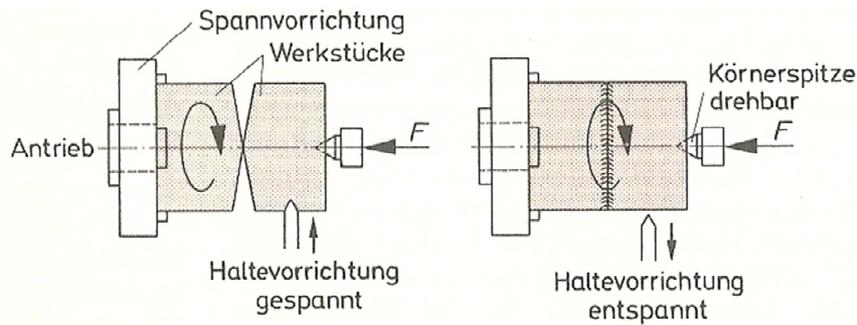


Abb. 11: Prinzip des Gegeneinanderreißschweißens

(Quelle: Schwarz; Ebeling; Lüpke: Kunststoffverarbeitung, 1991, S. 209 [04].)

Das eine Füge teil rotiert in der Spannvorrichtung und das andere wird mit einer definierten Kraft darauf angedrückt. Durch diese Kraft passen sich die Fügeflächen zum Beginn des Prozesses aneinander an und die Wärmeentwicklung steigt dann stark an. Nach der vollständigen Plastifizierung wird die Haltevorrichtung entfernt und beide Teile rotieren dann gemeinsam. Die Fügekraft wird weiter aufrecht gehalten bis die endgültige Form erreicht ist und eine ausreichende Abkühlung erfolgt ist.

3.1.3 Hezelementschweißen

Beim Hezelementschweißen werden die Fügeflächen vorwiegend durch elektrisch beheizte metallische Elemente erwärmt. Diese Erwärmung kann direkt oder indirekt erfolgen. Bei diesem Verfahren wird meist kein Zusatzstoff verwendet. Es wird hauptsächlich bei Polyolefinen angewendet. Beim direkten Hezelementschweißen werden die gereinigten Fügeflächen gegen das Hezelement gedrückt bis eine ausreichende Plastifizierung eingetreten ist. Danach werden die Füge teile schnellst möglichst vom Hezelement entfernt und gegeneinander gedrückt.

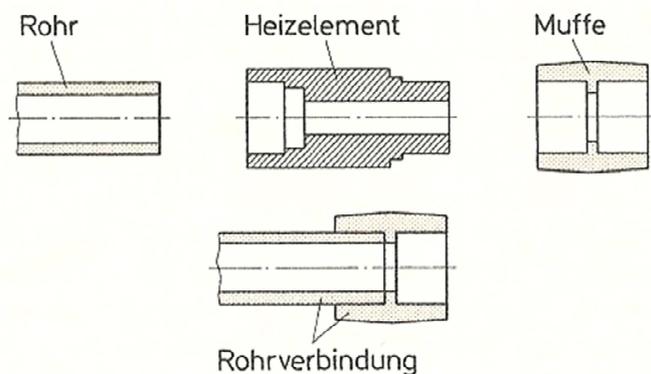


Abb. 12: Prinzip Hezelementmuffenschweißen

(Quelle: Schwarz; Ebeling; Lüpke: Kunststoffverarbeitung, 1991, S. 203 [04].)

Bei Rohren kommt meist das sogenannte Heizelementmuffenschweißen zum Einsatz. Hierbei wird das Heizelement, das an das Rohr und Muffe angepasst ist, meist elektrisch aufgeheizt. Die Füge­teile werden auf bzw. in das Heizelement gesteckt und dann plastifiziert. Danach werden die Füge­teile vom Heizelement getrennt und ineinander gesteckt. Ein Nachteil des direkten Heizelements­schweißens ist, dass es trotz einer entsprechenden Antihaf­tschichtung des Heizelementes dazu kommen kann, dass der Kunststoff beim Entfernen vom Heizelement teilweise haften bleiben kann und es somit zum Fädenziehen kommt.

3.1.4 Strahlungsschweißen

Bei diesem Verfahren basiert der Energieeintrag auf Strahlung. Man unterteilt dieses Verfahren in zwei Gruppen, dem indirekten Heizelements­schweißen, wobei die Wärmestrahlung von einem Heizelement kommt, diese wird in einem geringen Abstand von etwa 0,5 – 1 mm gehalten. Dieser Abstand muss ständig korrigiert werden, weil sich die Füge­teile aufgrund der Wärme ausdehnen. Die zweite Gruppe ist Schweißen mittels Licht- oder Laserstrahlen. Bei den Lichtstrahlschweißens wird der Kunststoff zur Vorbereitung durch gebündelte Lichtstrahlen berührungslos aufgeschmolzen. Dieses Verfahren kann sowohl bei transparenten als auch bei nicht transparenten Kunststoffen angewendet werden. Es wird in das direkte und das indirekte Lichtstrahlschweißen unterschieden. Beim direkten Verfahren wird die Strahlungsenergie direkt auf die Füge­fläche gelenkt und beim indirekten wird die Energie durch die Füge­teile zur Füge­fläche transportiert. Das Laserschweißen bei Kunststoffen erlangte erst im letzten Jahrzehnt zunehmend an Beachtung, in der Metallverarbeitung ist schon seit längerer Zeit im Einsatz. Beim Kunststoffschweißen bietet es gegenüber den anderen Verfahren viele Vorteile, wie z.B. ein sehr kleine Wärmeeinflusszone, das berührungslose Erwärmen, ein geringer Schmelzaustrieb und fast beliebige Nahtgeometrie. Das Laserstrahlschweißen wird bei Kunststoffen in zwei Varianten unterteilt. Zum einen in das Laserstumpfschweißen, wobei die Füge­flächen der beiden Füge­teile direkt mit dem Laserstrahl bestrahlt und plastifiziert werden (siehe Abb. 16) und dem Laser-Durchstrahlschweißen, wobei der erste Füge­partner einen hohen Transmissionsgrad für den Laserstrahl besitzt und der zweite darunter liegende Partner einen geringen besitzt und somit die Energie des Laserstrahl absorbiert (siehe Abb. 17).

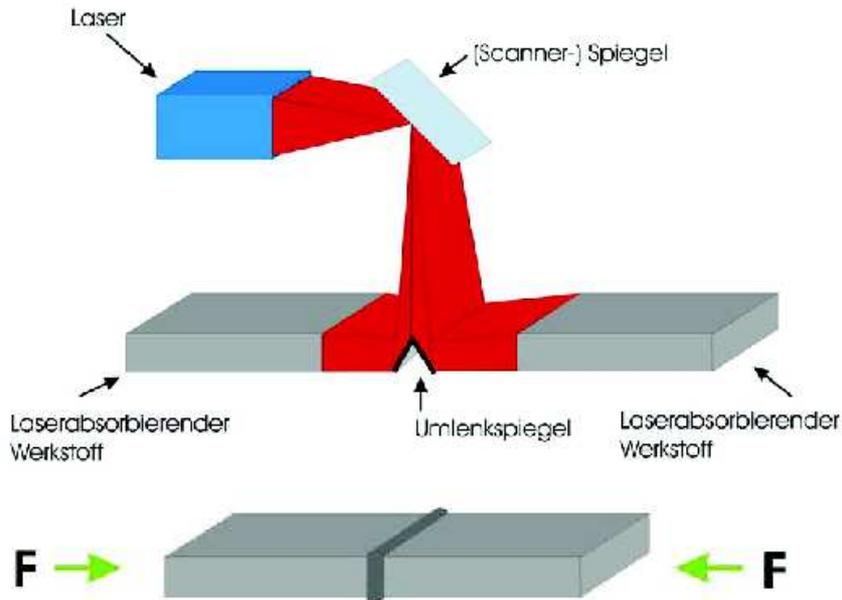


Abb. 13: Direktes Laserstrahlstumpfschweißen

(Quelle: (vgl.) Rosenberger S.; Hopftner M.: Wolf-Technologieseminar 08.09.2005, S. 3 [11].)

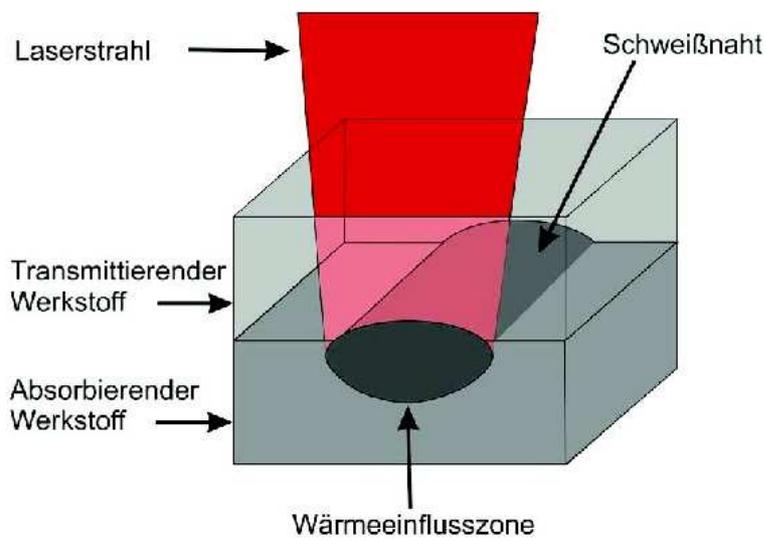


Abb. 14: Durchstrahlschweißen

(Quelle: (vgl.) Rosenberger S.; Hopftner M.: Wolf-Technologieseminar 08.09.2005, S. 4 [11].)

3.1.5 Wahl des geeigneten Verfahrens

Das Warmgasschweißen ist für das Orbitalschweißen des dünnwandigen PP-Rohr ungeeignet, weil bei einem Überlappstoß, wie hier erforderlich, eine Gegenlage erfolgen sollte, um eine stabile Schweißnaht zu erzielen. Des Weiteren ist der Dickenunterschied zwischen Kappe und Rohr sehr groß, wodurch es wahrscheinlich ist, dass ein großer Teil des Rohres plastifiziert, bevor auch die Kappe ausreichend plastifiziert wird. Außerdem wird mit einem Zusatzstoff gearbeitet und von Hand geschweißt, was bei großen Stückzahlen, wie hier gefordert ist, unwirtschaftlich ist.

Das Reibschweißen ist ebenfalls nicht für diesen Fall geeignet. Auch hier sind die unterschiedlichen Dicken von Kappe und Rohr das ausschlaggebende Problem wie oben. Sobald das Rohr anfängt zu plastifizieren, sinkt die erzeugte Reibungswärme stark ab. Auch die Formhaltung der Rohrs ist nicht mehr gewährleistet.

Beim Heizelementschweißen tritt dasselbe Problem wie beim Reibschweißen auf. Wenn das Rohr plastifiziert wird, wird aufgrund der geringen Wanddicke der gesamte Abschnitt des Rohres plastifiziert. Beim Trennen des Rohres vom Heizelement kann die Formstabilität nicht mehr gewährleistet werden.

Das Laserstrahlschweißen eignet sich für die hier geforderte Anwendung am besten, da es nahezu jede Nahtgeometrie ermöglicht, eine geringe Wärmeeinflusszone besitzt und eine sehr präzise Nahtführung ermöglicht. Weiterhin gibt es die Möglichkeit zum Durchstrahlschweißen, bei dem die gefügten Teile in Endposition plastifiziert und verschweißt werden. Bei Letzterem ist das PP-Rohr der Transmittierende Werkstoff und die Verschlusskappe der Absorbierende Werkstoff (siehe Abb. 14).

Somit fällt die Entscheidung zugunsten des Durchstrahlschweißens mit einem Laser. Als Nächstes müssen die Einzelnen Prozessparameter bestimmt werden. Da es sich um das Laserschweißen einer Rundnaht handelt, erfolgt zunächst die Bestimmung der zu drehenden Teile, entweder wird der Laserstrahl und somit auch der Laser um das feststehende PP-Rohr herum geführt, oder das PP-Rohr wird gedreht und der Laser ist dann feststehend. Letzteres ermöglicht eine geringere Baugröße der Versuchseinrichtung und lässt sich konstruktiv und technologisch einfacher umsetzen, deshalb erfolgt während des Schweißvorgangs eine kontinuierliche Drehung des PP-Rohres. Im Folgenden werden alle nötigen Parameter für den Schweißvorgang ermittelt.

3.2 Laser

3.2.1 Laserarten und Laserstrahlerzeugung

Ein Laser, kurz für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, besteht grundsätzlich aus drei Bestandteilen, erstens dem Lasermedium, welches das Laserlicht aussendet, zweitens einer Pumpe, die das Medium anregt und mit Energie versorgt und drittens einen Resonator, der die einzelnen Laserphotonen sortiert und so für die Gleichmäßigkeit und Kohärenz des Laserstrahls verantwortlich ist. Dies ist in der Abb. 10 schematisch dargestellt.

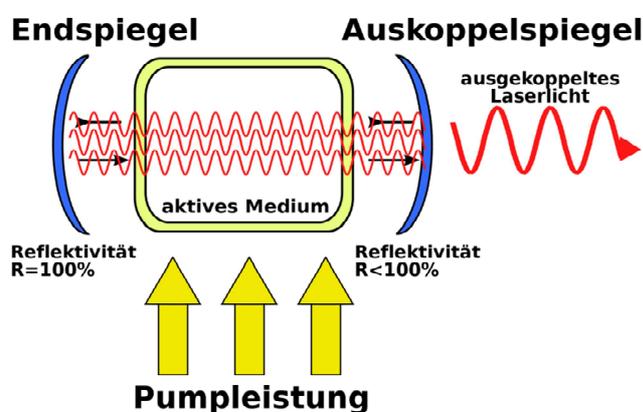


Abb. 15: Schematische Darstellung Laserstrahlerzeugung
(Quelle: Wikipedia, Laser, 20.08.2013 [10].)

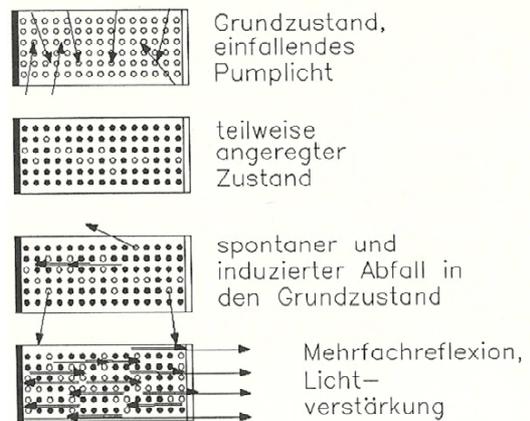


Abb. 16: Reflexion und Austritt der Lichtenergie
(Quelle: Dorn L.; Grutzeck H.; Jafari S., Schweißen und Löten mit Festkörperlaser S. 6 [05].)

Die Elektronen des Lasermediums werden durch die Pumpleistung angeregt und auf ein höheres Energieniveau gebracht. Von diesem Niveau fallen sie wieder in ihr Ursprüngliches zurück und geben dabei Lichtenergie ab. Die Wellenlänge des Lasers hängt vom Medium ab und dem charakteristischen Energieniveauunterschied der Elektronen des Materials. Diese Strahlung wird im Resonator immer wieder reflektiert. Die Strahlung kann den Resonator nur in einer Richtung in Form eines Laserstrahls verlassen. Dieser kann dann noch durch verschiedene Sammel- oder Fokussierlinsen verfeinert werden (siehe Abb. 11).

Laser können in verschiedenen Gruppen unterteilt werden, z.B. nach dem Betriebsmedium, der Art der Anregung des Medium oder die Art des Laserstrahl. Die gängigste Einteilung erfolgt nach dem laserfähigen Betriebsmedium, demnach ergibt sich die Einteilung in Festkörper-, Gas- und Flüssigkeitslaser. Bei der Einteilung nach der Art der Anregung des Lasermediums, unterteilt man in die Anregung durch den pn-Übergang bei Halbleiterlasern, die Anregung durch Licht bei Festkörperlaser und durch Gasentladung bei Gaslasern. Bei der

Art des Laserstrahls wird in Laser mit Pulsbetrieb, quasikontinuierlichen sowie den kontinuierlichen Betrieb unterteilt.

Festkörperlaserkavitäten besitzen üblicherweise eine Abmessung von etwa 10 cm Länge und 1 cm im Durchmesser. Sie erzeugen entweder Licht im sichtbaren Bereich oder in der Nähe des sichtbaren Bereichs. Beim Festkörperlaser werden die den Laserstrahl erzeugenden Atome oder Ionen in Kristalle bzw. Gläser eingelagert, die für den Laserstrahl transparent sind. Diese eingelagerten Atome oder Ionen werden durch das sogenannte Pumplicht auf ein höheres energetisches Niveau gepumpt. Die so energetisch angehobenen Elektronen fallen danach wieder auf ein geringeres Niveau herab, wobei sie das Laserlicht aussenden. Zum Beginn der Materialbearbeitung wurden hauptsächlich Rubinlaser eingesetzt, da diese als erste verfügbar waren und eine ausreichende Leistung erzielten. Trotz ihres Namens ist hierbei eine Chromverbindung das aktive Material, welches in den Rubin dotiert ist. Jedoch liegt ihr Wirkungsgrad aufgrund der hohen Pumpleistung unter 1 %. Somit hat sich aufgrund der höheren Leistung und Wirkungsgrad der Nd-Laser durchgesetzt. Bei diesem Laser ist die seltene Erde Neodym das aktive Lasermaterial. Wenn diese in einen Yttrium-Aluminium-Granat-Einkristall dotiert wird, erreicht der dann sogenannte Nd:YAG-Laser einen Wirkungsgrad von 3 bis 3,5 %.

Gaslaser unterscheiden sich in erster Linie durch ihre geringere Dichte des Lasermediums und die verschiedenen Möglichkeiten Pumpenergie zuzuführen. Das Pumpen mit Licht ist aufgrund der geringen Absorption des Lichtes im Gas nicht möglich, deshalb werden die Gaslaser grundsätzlich mittels Gasentladung angeregt, wie z.B. mit Lichtbögen oder Hochfrequenzanregung. Aufgrund der geringeren Dichte des Lasermediums sind die Laserkavitäten etwa 10 mal länger als die beim Festkörperlaser. Als Lasermedium wird z.B. ein Gemisch aus CO₂, N₂ und He eingesetzt. Der Vorteil des CO₂-Lasers liegt in seiner hohen möglichen Ausgangsleistung und seinem höheren Wirkungsgrad von ca. 15 %. Nachteile sind der technisch hohe Aufwand für die Anregung und Kühlung des Gases und seine langwellige Strahlung von 10,6 µm die sich mit herkömmlichen optischen Linsenstoffen nicht fokussieren lässt. [05]

Flüssigkeitslaser werden aufgrund ihrer geringen Anwendung hier nicht betrachtet.

3.2.2 Sicherheitsmaßnahmen

Der Umgang mit Laser erfordert hohe Sicherheitsmaßnahmen. Jeder Laser wird einer entsprechenden Schutzklasse zugeteilt (siehe Abb. 12). Mit steigender Klasse steigen auch das Gefahrenpotential und somit auch die damit verbundenen Sicherheitsmaßnahmen an. Der für diese Aufgabe zu verwendete Laser entspricht der Schutzklasse 4 und gehört somit zur

höchsten Gefährdungsklasse. Er arbeitet im nicht sichtbaren Bereich und besitzt eine hohe Leistungsdichte. Aufgrund seiner Klassifizierung darf der Laser nur in einem abgegrenzten und überwachten Bereich betrieben werden, um eine unzulässige und unbeabsichtigte Bestrahlung zu verhindern, oder mit einem Schutzgehäuse nachgerüstet werden. Im Allgemeinen gefährden Laser in dieser Klasse in hohem Maße Augen und Haut durch den Laserstrahl selbst, sowie dessen Reflektion und Streuung.

Klasse 1	im Normalbetrieb ¹ harmlos	keine Massnahmen nötig
Klasse 1M	ohne optische Instrumente harmlos	Personen mit optischen Instrumenten warnen
Klasse 2	für einen Augenblick harmlos	nicht absichtlich in den Strahl blicken, nicht auf Gesichter zielen
Klasse 2M	ohne optische Instrumente wie Klasse 2	Personen mit optischen Instrumenten warnen
Klasse 3A	aufgehoben	wie Klasse 1M oder 2M behandeln
Klasse 3R	reduziert gefährlich	nur von geschultem Personal betreiben lassen
Klasse 3B ²	Direktstrahl für Augen gefährlich, Streustrahlung nicht	Laserschutzbeauftragten bestimmen Bereich baulich abgrenzen und Zutritt kontrollieren Laser am Eingang deklarieren nur von geschultem Personal betreiben lassen ev. Laserschutzbrille tragen
Klasse 4 ²	Strahl für Augen und Haut gefährlich Streubild ev. für Augen gefährlich Brandgefahr	Massnahmen wie bei Klasse 3B, ev. zusätzlich Schutzausrüstung für Körperteile nötig

Abb. 17: Einteilung der Laserklassen

(Quelle: *Swissphotonics: Achtung Laserstrahl*, 2013, S. 6 [07].)

Aufgrund dieses hohen Gefährdungspotentials muss für einen ausreichenden Schutz gesorgt werden, durch Abschirmung des Laserstrahls im Arbeitsbereich, tragen von Schutzkleidung und Schutzbrille, sowie verhindern von unbefugtem Betreten des Arbeitsbereichs. Die Abschirmung muss so ausgeführt sein, dass sobald sie geöffnet oder entfernt wird, der Laser sich selbstständig sofort abschaltet. Das bedeutet, dass jeder Öffnungsmechanismus mit einem Notschalter gekoppelt werden muss. Ist die Abschirmung aus konstruktiven Gründen nicht möglich, muss der Arbeitsbereich abgeschirmt werden. Das bedeutet der Laser muss in einem separaten Raum betrieben werden, in dem sich nur eine vorgeschriebene Anzahl an Personen befinden darf, die ausreichend geschützt sind. Der Betrieb des Lasers muss von außerhalb des Bereiches erkennbar sein, z.B. durch eine Warnleuchte. Sobald jemand während des Laserbetriebs den Arbeitsraum betritt, muss es zu einer Notabschaltung des Lasers kommen.

Bei einem CO₂-Laser ist die Netzhaut des menschlichen Auges nicht gefährdet, da der Laser im mittleren Infrarotbereich von 10600 nm arbeitet. Für diesen Bereich sind die für Menschen durchsichtig scheinenden Materialeien undurchsichtig, d.h. sie wirken als Sperrfilter für den Strahl. Somit wirkt bei CO₂-Laser jegliche Brille mit durchsichtigen Teilen als Schutz vor der Streustrahlung des Lasers. Bei Hochleistungslasern im Kilowattbereich kann eine normale Brille jedoch durch einen reflektierten Strahl in kürzester Zeit zerstört werden. Des

Weiteren sollte ein geeigneter Strahlenfänger eingesetzt werden, dies kann z.B. eine gekühlte Metallplatte oder ein Graphitziel sein. [07]

3.3 Bestimmung der Prozessparameter

3.3.1 Parameter des Lasers

Es wird ein CO₂-Laser mit einer Länge von 700 mm und einem Durchmesser von 50 mm verwendet. Er benötigt eine Zündspannung von 22 kV und arbeitet mit einer Spannung von 15 kV und einer Stromstärke von 18 mA. Der erzeugte Laserstrahl besitzt eine Wellenlänge von 10600 nm, was bedeutet, dass er im mittleren Infrarotbereich arbeitet und der Laserstrahl somit für das menschliche Auge nicht sichtbar ist (siehe Abb. 18).

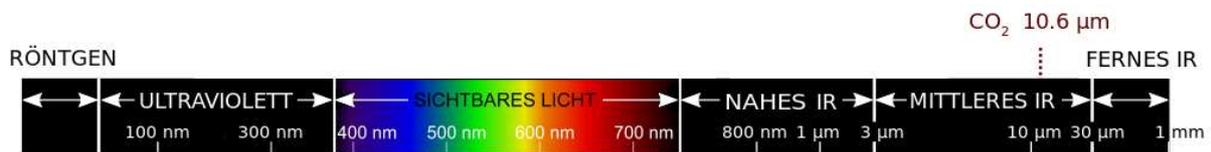


Abb. 18: Strahlenspektrum

(Quelle: (vgl.) Wikipedia, Laser, 20.08.2013 [10].)

Der Laserstrahl hat beim Verlassen des Lasers einen Durchmesser von 1,95mm und wird nicht fokussiert, deshalb ist der genaue Abstand des Lasers zum Werkstück für die geforderte Anwendung irrelevant. Der Laserstrahl kann eine maximale Leistung von $P = 40 \text{ W}$ erreichen, wobei er einer Abweichung von bis zu $\pm 5 \%$ unterliegt. Der Laser erreicht nach dem Einschalten seine eingestellte Arbeitsleistung in einer Zeit von $\leq 1 \text{ ms}$. Der Laser kann bei Temperaturen von $-10 - 40 \text{ °C}$ und bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85% eingesetzt werden.

3.3.2 Bestimmung Schweißparameter

Um eine optimale Schweißnaht zu erzielen müssen vorab einige Parameter bestimmt und festgelegt werden. Dazu gehören, die Leistung des Lasers, die Dauer des Laserstrahleinsatzes, die Anpresskraft, die Drehzahl des Antriebsmotors und die Schweißzeit.

Der Laser wird anfangs nur mit 50% seiner Leistung betrieben. Dies entspricht somit einer Leistung von $P_{\text{Laser}} = 20 \text{ W}$, um das Material nicht versehentlich zu verbrennen. Die Leistung kann später noch erhöht werden, um eine geringere Schweißzeit zu erreichen. Als Ausgangsbedingung für die ersten Versuche und zur Berechnung der Startbedingungen wird im Folgenden die Leistung mit $P_{\text{Laser}} = 20 \text{ W}$ angenommen.

Zuerst wird eine Abschätzung des Schmelzvolumens der Naht bestimmt.

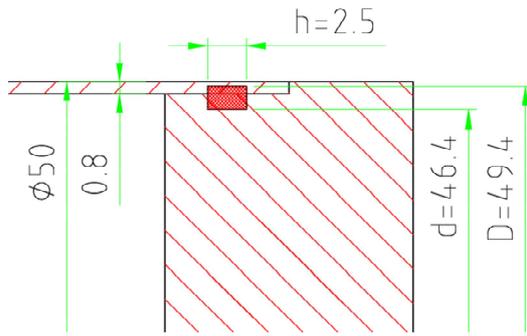


Abb. 19: Schweißnahtskizze

(Quelle: AutoCAD Mechanical 2006, Eigenerstellung [13].)

Für die Berechnungszwecke wird der Aufschmelzbereich als ein Hohlzylinder angenommen. Dieser ist etwas mehr in die Kappe verlagert, da dort die Energie des Lasers absorbiert wird. Somit entspricht das zu schmelzende Volumen einem Hohlzylinder mit den Maßen: $D_{Schw} = 49,4 \text{ mm}$; $d_{Schw} = 46,4 \text{ mm}$; $h = 2,5 \text{ mm}$

Das Schmelzvolumen ergibt sich somit aus der Formel für das Volumen eines Hohlzylinders:

$$V_{Schm} = \frac{\pi \cdot h}{4} \cdot (D_{Schw}^2 - d_{Schw}^2) \quad (01)$$

$$V_{Schm} = \frac{\pi \cdot 2,5 \text{ mm}}{4} \cdot [(49,4 \text{ mm})^2 - (46,4 \text{ mm})^2]$$

$$V_{Schm} = 564,31 \text{ mm}^3 = 0,564 \text{ cm}^3$$

Nachdem das vorhandene Schmelzvolumen bestimmt wurde, wird jetzt die benötigte Wärmemenge für den Schweißvorgang bestimmt. Die Schmelztemperatur wurde mittels der DSC-Messung ermittelt und beträgt $165 \text{ }^\circ\text{C}$. Diese Temperatur wird für den Schweißvorgang noch um $25 \text{ }^\circ\text{C}$ überschritten, um das vollständige Aufschmelzen zu gewährleisten.

Die erforderliche Wärmemenge ergibt sich somit aus drei Teilmengen, erstens die zum Erwärmen des Stoffes bis zum Schmelzpunkt benötigte Wärme, Zweitens die Wärme, die für den Schmelzvorgang nötig ist, und drittens die Wärme, die für die weitere Erwärmung um $25 \text{ }^\circ\text{C}$ benötigt wird.

$$Q_{ges} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (02)$$

$$Q_1 = c \cdot m \cdot \Delta T_{12} \quad (03)$$

$$m = \rho \cdot V_{Schm} \quad (04)$$

$$Q_1 = c \cdot \rho \cdot V_{Schm} \cdot (T_2 - T_1) \quad (05)$$

$$Q_1 = 1,7 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} \cdot 0,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 0,564 \text{ cm}^3 \cdot (165 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$Q_1 = 125,12 \text{ J}$$

$$Q_2 = c_s \cdot m \quad (06)$$

$$Q_2 = c_s \cdot \rho \cdot V_{\text{Schm}} \quad (07)$$

$$Q_2 = 90 \frac{\text{J}}{\text{g}} \cdot 0,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 0,564 \text{ cm}^3$$

$$Q_2 = 45,68 \text{ J}$$

$$Q_3 = c \cdot \rho \cdot V_{\text{Schm}} \cdot (T_3 - T_2) \quad (08)$$

$$Q_3 = 1,7 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} \cdot 0,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 0,564 \text{ cm}^3 \cdot (190 \text{ °C} - 165 \text{ °C})$$

$$Q_3 = 21,57 \text{ J}$$

$$Q_{\text{ges}} = 125,12 \text{ J} + 45,68 \text{ J} + 21,57 \text{ J}$$

$$Q_{\text{ges}} = 192,37 \text{ J}$$

Die Dauer des Laserstrahlbeschusses ergibt sich aus dem Quotient von benötigter Wärme zu zugeführter Wärme.

$$t_{\text{Laser}} = \frac{Q_{\text{ges}}}{P_{\text{Laser}}} \quad (09)$$

$$t_{\text{Laser}} = \frac{192,37 \text{ J}}{20 \text{ W}} = \frac{192,37 \text{ J}}{20 \frac{\text{J}}{\text{s}}}$$

$$t_{\text{Laser}} = 9,6185 \text{ s}$$

Um die gesamte Schweißnaht aufzuschmelzen muss der Laser für 10 s eingeschaltet sein, mit einer 50%igen Leistung von $P_{\text{Laser}} = 20 \text{ W}$.

Die theoretische Bestimmung der nötigen Anpresskraft hängt von mehreren Parametern ab. Ein wichtiger Punkt hierbei ist die Viskosität der Schmelze, die von der Kettenlänge des Materials abhängt, diese kann jedoch je nach Herstellungsladung stark variieren und ist somit immer wieder neu zu bestimmen. Des Weiteren hängt die Anpresskraft von der genauen Nahtform und der Anpassung der Anpressrolle an diese ab. Somit muss die optimale Anpresskraft erst noch in Versuchen ermittelt werden.

Die Drehzahl des Antriebes hat keinen großen Einfluss auf die Schweißzeit und die Dauer des Laserbeschusses. Sie sollte aber so schnell gewählt werden, dass sich der Laserstrahl

nicht zu tief in das Material brennt bzw. dieses verbrennt. Da die Dauer des Beschusses nur 10 s beträgt sollte sich das Rohr in dieser Zeit ca. 15 - 20 mal gedreht haben.

$$n_{\min} = \frac{15}{t_{\text{Laser}}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \quad (10)$$

$$n_{\min} = \frac{15}{10 \text{ s}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}$$

$$n_{\min} = 90 \frac{1}{\text{min}}$$

Daraus ergibt sich also eine aufgerundete Drehzahl von ca. 100 Umdrehungen pro Minute.

3.4 Konstruktion der Versuchseinrichtung

3.4.1 Grundlegende Konstruktion

Die Konstruktion der Versuchseinrichtung benötigt einen Grundrahmen, an dem alle für den Schweißvorgang relevanten Teile befestigt werden. Dieser Grundrahmen muss formstabil sein und genügend Möglichkeiten für das Anbringen aller Teile besitzen. Daher wird für den Rahmen ein gleichschenkliges Winkelprofil verwendet. Diese Profile besitzen auch bei kleineren Abmessungen und somit einem relativ geringen Gewicht eine gute Stabilität. Des Weiteren bilden sie aufgrund ihrer Geometrie eine exakte Eckverbindung, an denen sich hervorragend Abdeckungen anbringen lassen. Der Grundrahmen wird in einer L-Form ausgeführt, um dem Laser sowie dem PP-Rohr genügend Platz zu bieten, aber auch gleichzeitig das Gesamtgewicht und den Materialeinsatz der Einrichtung so gering wie möglich zu halten.

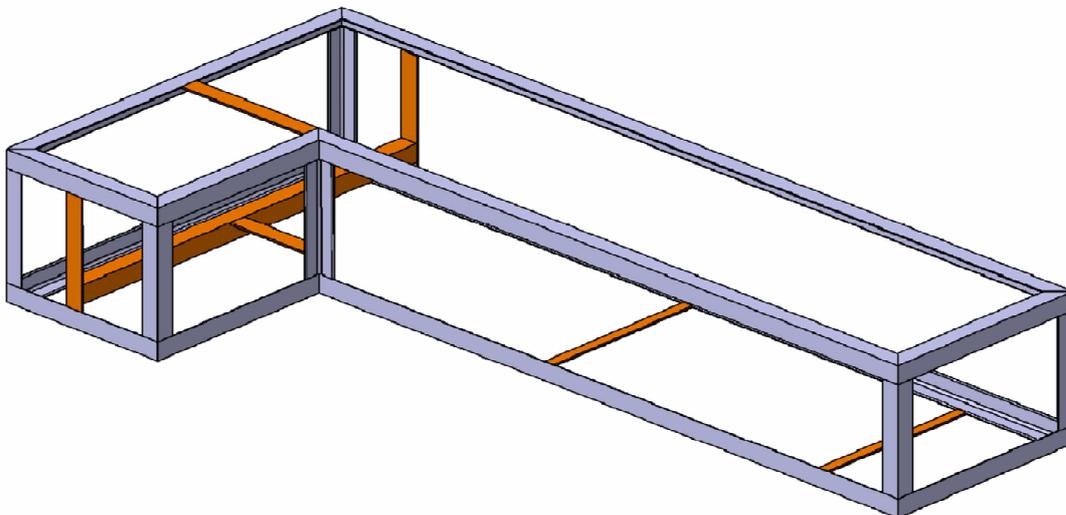


Abb. 20: Grundrahmen mit Rippen

(Quelle: CATIA V5R19, Eigenerstellung [14].)

An den Grundrahmen werden Profile und Rippe eingebracht, die in Abb. 20 orange eingefärbt sind, an denen sich die Plattform für den Laser und den Antrieb anbringen lassen, sowie auch die Lagerungen für das PP-Rohr und der Verschluss für den Deckel. Der linke Bereich des Grundrahmens bietet Platz für den Laser und in dem rechten Teil ist das ca. 2 m lange PP-Rohr untergebracht.

3.4.1.1 Lagerung des PP-Rohres

Da das spätere PP-Rohr eine ungefähre Länge von 2 m besitzt, muss dieses mehrfach gelagert werden, um ein Durchhängen des Rohres zu vermeiden, denn ein Durchhängen würde die für die Schweißung nötige Drehung unrund werden lassen. Um keine unnötige Reibung zu erzeugen, wird das Rohr auf Rollen gelagert.

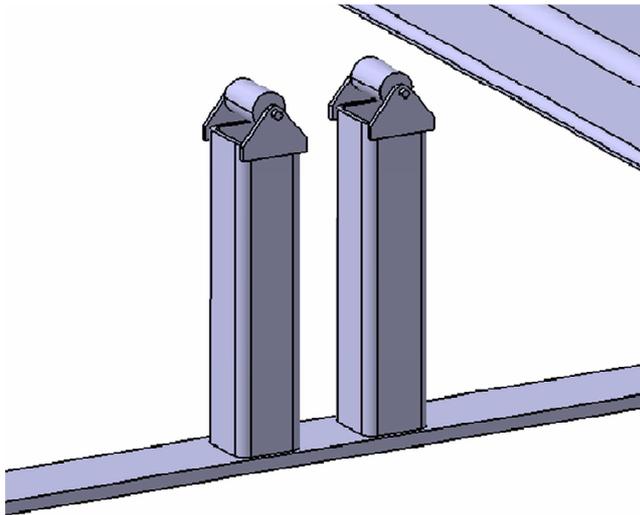


Abb. 21: Rollenlager für PP-Rohr

(Quelle: CATIA V5R19, Eigenerstellung [14].)

Aufgrund der Länge des PP-Rohres wird diese Rollenlagerung zweimal ausgeführt. Einmal am Ende des PP-Rohres und ein zweites Mal in der Mitte des Rohres. Die Lagerung besteht aus einem quadratischen Hohlprofil an dessen Ende die Rollen angebracht sind. Diese Lagerkonstruktion wird jeweils auf die in Abb. 20 orange gefärbten Rippen aufgeschweißt.

3.4.1.2 Lagerung der Endkappe

Die Lagerung der Endkappe ist die wichtigste Baugruppe der Konstruktion, da dort der Schweißvorgang stattfindet. Die Lagerung muss so ausgeführt sein, dass der Laserstrahl ungehindert auf die Schweißstelle treffen kann. Die für die Schweißung notwendige Fügekraft muss an der Lagerung einstellbar sein, um die optimale Fügekraft experimentell ermit-

Rohres nicht verändert wird. Dadurch hat man für den nächsten Versuch die identische Fügkraft wie vorher und kann einfacher eine Anpassung der Kraft vornehmen.

3.4.1.3 Antrieb

Der Antrieb für die ersten Versuche bestand aus einem Scheibenwischermotor mit einem Gewindeaufsatz (in Abb. 24 grün eingefärbt). Auf dieses Gewinde werden die Probekappen aufgeschraubt, durch diese Verbindung wird die Drehung für die Versuche erzeugt. Dieser Motor wurde auch für die Versuche während der Bearbeitung dieser Arbeit verwendet, deshalb wird dieser mit einer Art Platzhalter auf einer entsprechenden Plattform in der Konstruktion berücksichtigt (siehe Abb. 24), da der Motor, der für die fertige Vorrichtung verwendet werden soll, noch nicht bekannt ist. Der endgültige Motor muss als Aufnahme eine Art Spannvorrichtung besitzen, die zu der Form der endgültigen Endkappe passt und diese ausreichend zentral fixiert.

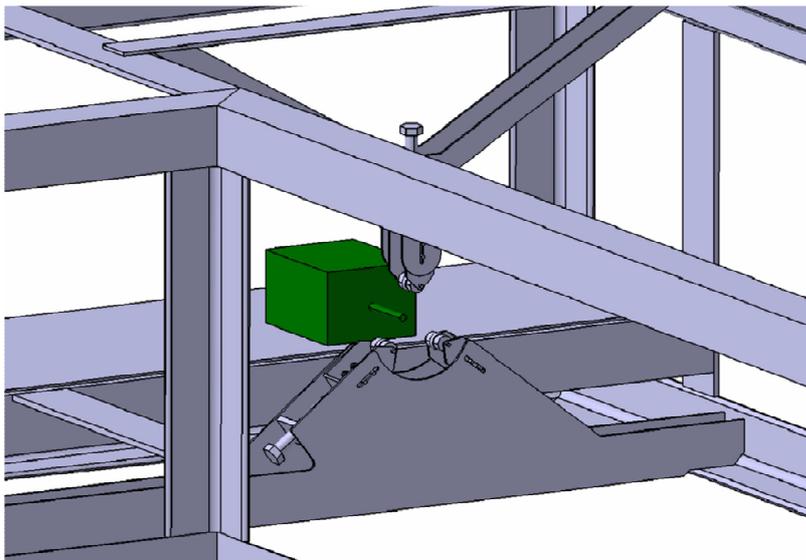


Abb. 24: Position des Antriebsmotors

(Quelle: CATIA V5R19, Eigenerstellung [14].)

3.4.1.4 Sicherheitsvorkehrungen

Da der verwendete Laser der Klasse 4 entspricht, muss vor der ersten Inbetriebnahme der Versuchseinrichtung ein Laserschutzbeauftragter bestimmt werden, der für die Sicherheits-einhaltung an der Einrichtung verantwortlich ist. Weiterhin sind von konstruktiver Seite her einige Sicherheitsmaßnahmen notwendig. Dazu gehört eine Abschirmung der Versuchseinrichtung, diese wird dadurch erreicht, dass die gesamte Konstruktion mit Abdeckblechen verkleidet wird und somit keine Streustrahlung nach außen dringen kann. Diese Abdeckble-

che werden mit dem Grundrahmen verschraubt. Aufgrund dieser Abdeckung ist ein weiterer Schutz durch entsprechende Schutzkleidung und einer Schutzbrille während des Betriebs nicht nötig. Diese wären jedoch empfehlenswert, falls es zu einer unvorhersehbaren Störung der Versuchseinrichtung kommt und der Laserstrahl dadurch durch die Abdeckung nach außen dringt. Im normalen Betrieb wird das Durchbrechen der Abdeckung durch einen Strahlenfang verhindert, welcher wie in Abb. 25 (orange gefärbt) hinter dem Werkstück aber vor den Abdeckblechen angeordnet ist. Dieser Strahlenfang kann z.B. aus einem Schamottestein bestehen.

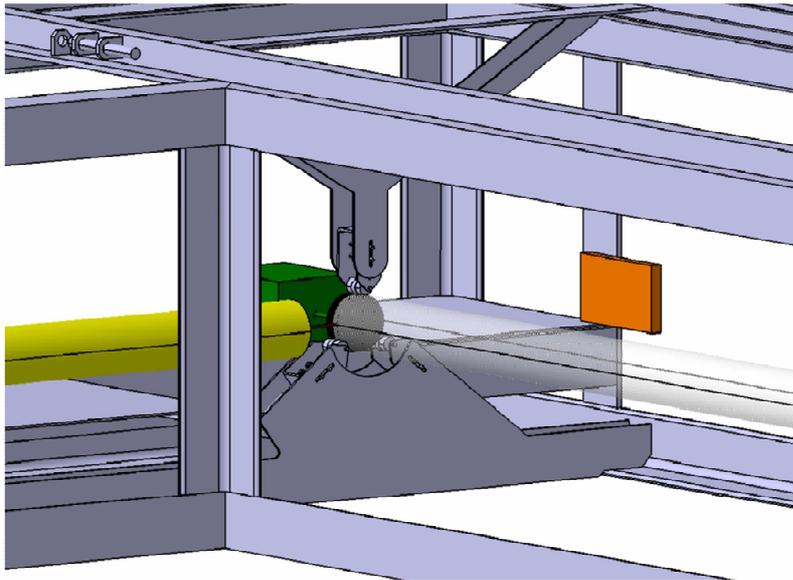


Abb. 25: Strahlenfang und Deckelverriegelung

(Quelle: CATIA V5R19, Eigenerstellung [14].)

Ein weiterer Punkt ist die Verriegelung der Deckelklappe die in Abb. 25 oben links zu sehen ist. Sie muss mit einem Endlagenschalter gekoppelt werden, welcher erst im verriegelten Zustand den Betrieb des Lasers ermöglicht und sobald die Verriegelung bei laufendem Laser gelöst wird, eine Notabschaltung auslöst. Weitere nötige Schutzmaßnahmen, die konstruktiv jedoch nicht mit eingebunden sind, sind eine Notabschaltung, die außerhalb der Versuchseinrichtung angebracht werden muss, um eine sofortige Abschaltung bei Störfälle durch das Betriebspersonal zu gewährleisten. Eine deutliche Kennzeichnung für den Bereich, in dem sich die Versuchseinrichtung befindet, die den Betrieb des Lasers kennzeichnet, z.B. durch eine Warnleuchte, ist ebenfalls noch hinzuzufügen.

3.4.2 Auswertung der Versuche

Aufgrund der schlechten Verbindung zwischen dem PP-Rohr und der PE-Endkappe wurde von beiden Materialien eine DSC-Messung durchgeführt (siehe Abb. 26). Die Messung zeigt, dass die Schmelzpunkte der beiden Stoffe um fast 35 °C auseinanderliegen. Diese Differenz

ist u.a. ausschlaggebend dafür, dass keine Schweißverbindung zustande gekommen ist. Des Weiteren kommt hinzu, dass die Molekülstruktur beider Stoffe es erschwert sich ineinander zu verknäulen. Somit wurden keine weiteren Versuche mehr mit den PE-Endkappen durchgeführt.

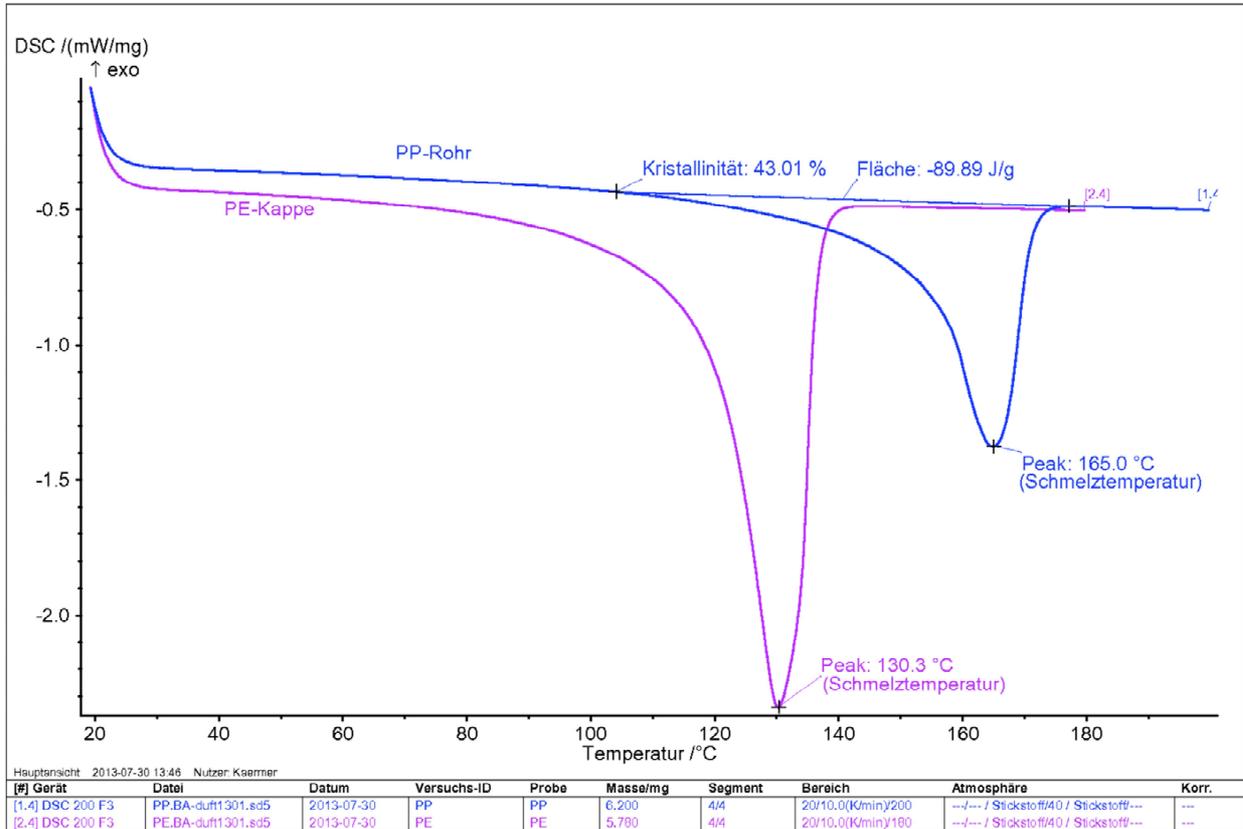


Abb. 26: DSC Kurven von PP und PE, zweite Aufheizung

(Quelle: DSC-Gerät, Ergebnis Eigenmessung [12].)

Des Weiteren weist, wie auf Abb. 02 (schwarze Kappe) erkennbar, die Endkappe fast keine Veränderung der Oberfläche auf, was darauf hindeutet, dass nicht genügend Energie bis zur Kappenoberfläche transportiert wurde. Aufgrund dieser Tatsache wurde eine Transmissionsmessung des PP-Rohrmaterials durchgeführt (Abb. 27). Die Messung beinhaltet den Bereich von 10000 nm bis zu 11000 nm und umfasst somit die Wellenlänge des für den Schweißensatz vorgesehenen Lasers. Sie wurde an einer Messeinrichtung der Hochschule Anhalt aufgenommen. Diese Einrichtung ist ein nicht näher bezeichnetes älteres Modell und gibt die Messergebnisse nur als eine gezeichnete Kurve auf Papier aus. Sie besteht aus einem Antrieb, einer einstellbaren Erzeugerquelle der benötigten Strahlung, einem Messapparat für Strahlung, einem Verstärker und einer Schreibnadel. Ausgehend von der eingegebenen Startwellenlänge, die an der Strahlungsquelle eingestellt wird, werden die nachfolgenden Wellenlängen nacheinander gemessen. Zwischen der Strahlenquelle und dem Messapparat wird die Messprobe platziert und der Messapparat nimmt die durch die Probe

transmittierte Strahlung auf. Dieses Messergebnis wird durch den Verstärker an die Schreibnadel geschickt und dort aufgezeichnet. Die somit aufgezeichnete obere Kurve wurde ohne ein Probenstück aufgenommen und entspricht der Leermessung. Die untere Kurve zeigt die Transmission der PP-Probe. Um die prozentuale Transmission zu bestimmen, muss das Verhältnis zwischen den beiden Kurven gebildet werden.

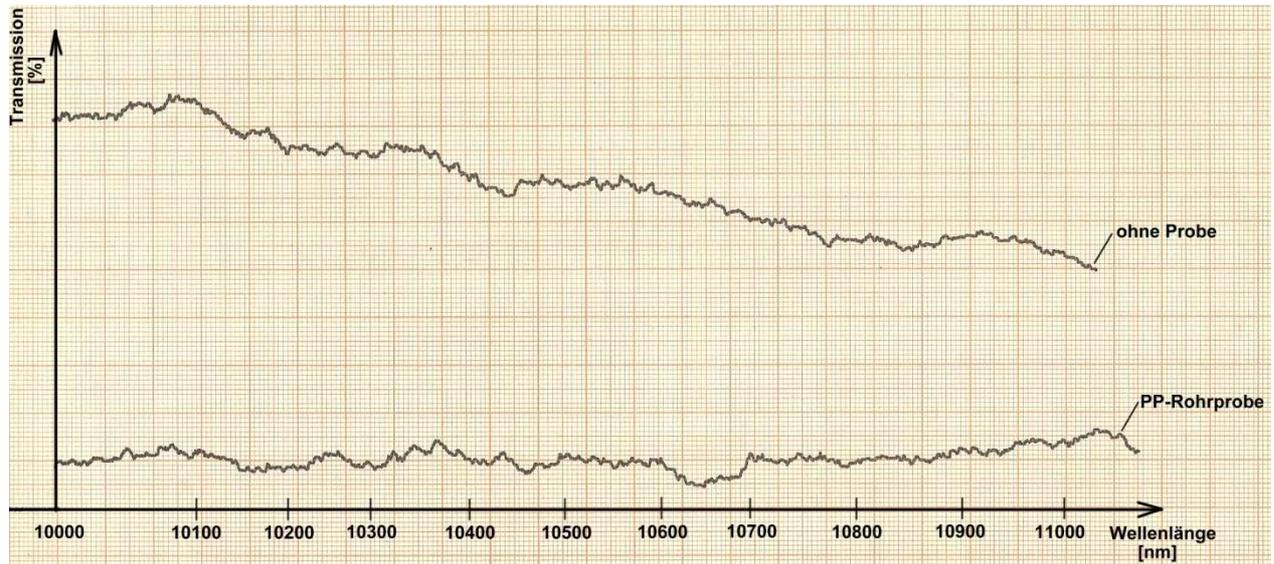


Abb. 27: Transmissionskurven

(Quelle: Transmissionsmessgerät, Ergebnis Eigenmessung [15].)

Für den Arbeitsbereich des Lasers (10600 nm) ergibt sich für die Kurve der PP-Probe ein Ausschlag von $I = 10 \text{ mm}$ und für obere Kurve ein Wert von $I_0 = 66 \text{ mm}$. Daraus lässt sich die Transmission und Absorption des PP-Rohres für den Laserstrahl bestimmen.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (11)$$

$$T = \frac{10 \text{ mm}}{66 \text{ mm}} \cdot 100 \%$$

$$T = 15,15 \%$$

$$A = 100 \% - T \quad (12)$$

$$A = 100 \% - 15,15 \%$$

$$A = 84,15 \%$$

Somit ergibt sich eine Absorption von 84,15 % des Laserstrahls durch das PP-Rohr. Dies erklärt, warum das Material der Kappe fast keine Anzeichen einer Wärmeeinwirkung zeigt.

Aus diesen Gründen müssen verschiedene Anpassungen des Schweißverfahrens an diese Gegebenheiten erfolgen. Deshalb wird zuerst die Kappe für weitere Versuche ebenfalls aus PP gefertigt. Als Nächstes erfolgt eine Anpassung des Verfahrensablaufs. Da der Laserstrahl nur sehr abgeschwächt durch das Rohrmaterial hindurch kommt, kann das Plastifizieren bei-

der Fügeiteile nicht im gefügten Zustand erfolgen. Deshalb muss der Laser zuerst das Material der Kappe plastifizieren, dann wird der Laser kurzzeitig abgeschaltet und das Rohr über die Kappe geführt. Der Laser wird wieder eingeschaltet und plastifiziert jetzt das Rohrmaterial vollständig an der Schweißnaht, bevor das Material wieder erstarrt. Nachdem das Rohr auf die Kappe geführt wurde, werden auch die Anpressrollen sofort angedrückt. Die Versuche die nach diesem Verfahren durchgeführt wurden, zeigen augenscheinlich eine gute Verbindung der beiden Teile, wie in Abb. 28 zu sehen ist. Die beiden Teile sind nicht mehr mit bloßer Handkraft voneinander trennbar, wie es bei den Versuchen mit den PE-Kappen der Fall war.



Abb. 28: Schweißergebnis mit PP-Kappe
(Quelle: Foto, Eigenerstellung)

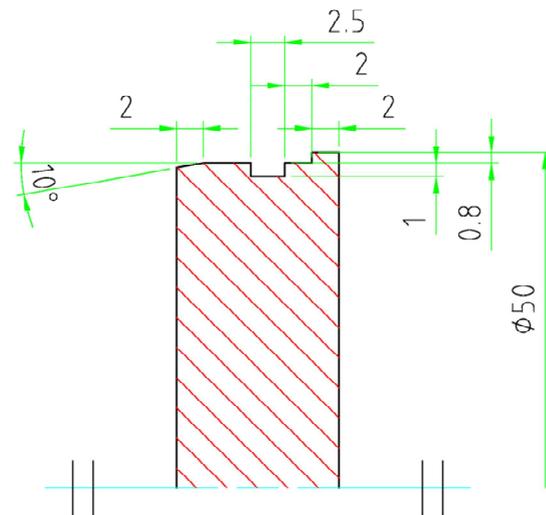


Abb. 29: Angepasste Kappengeometrie
(Quelle: AutoCAD Mechanical 2006, Eigenerstellung [13].)

Diese Art des Schweißvorganges erfordert jedoch auch noch eine Anpassung der Kappenform, sie kann nicht mehr wie in Abb. 02 ausgeführt werden, weil das plastifizierte Material der Kappe sonst beim Aufstecken des Rohres weggeschoben würde. Somit muss die Kappe wie in Abb. 29 ausgeführt werden um dies zu vermeiden. Die Anpressrollen müssen dementsprechend ebenfalls an die Nutform der PP-Kappe angepasst werden, um eine gute Kraftübertragung in die Schweißnaht und somit eine gute Verbindung zu gewährleisten

4. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Problematik des Laserschweißens eines dünnwandigen PP-Rohres bearbeitet, in dessen Verlauf die Konstruktion einer Versuchseinrichtung erfolgte. Das Prinzip dieser Konstruktion wurde dann in einzelnen Versuchen getestet. Zur Testung dieses Funktionsprinzips wurde ein Modell gebaut (siehe Abb. 30), welches aufgrund der gesammelten Erkenntnisse der durchgeführten Materialanalysen während dessen Fertigung, nicht mehr zum Einsatz kam, weil das Verfahren aufgrund der Ergebnisse der Analysen geändert werden musste.



Abb. 30: Holzmodell der Anpressrollen

(Quelle: Foto, Eigenerstellung)

Die gesammelten Erkenntnisse aus den Analysen zeigen, dass zuerst das Material der Kappe ohne das Rohr plastifiziert werden muss, anschließend die Kappe aufgesteckt wird und dann ebenfalls plastifiziert wird. Dies muss jedoch so schnell erfolgen, dass das Material der Kappe nicht bereits wieder erstarrt, bevor das Rohr plastifiziert wurde. Anschließend wird die Naht dann sofort mit einer Fügekraft beaufschlagt, bis die Schweißnaht vollständig ausgebildet ist. Dafür genügen zwei konstruktive Änderungen an der Versuchseinrichtung. Erstens können die Anpressrollen nicht mehr einzeln angepresst werden, das würde zu lange dauern und das Kappenmaterial wäre erstarrt, bevor eine ausreichend gleichmäßige Fügekraft auf die Naht einwirken kann. Eine schnelle und einfache Lösung dieses Problems ist die Verwendung eines Dreibackenfutters, auf dessen Backen die Anpressrollen befestigt werden. Die Betätigung des Mechanismus zum Öffnen und Schließen der Backen muss

lediglich außerhalb der Abdeckung der Versuchseinrichtung gelegt werden, damit die Anpressrollen sicher und schnell an die Schweißnaht geführt werden, und es möglich ist das PP-Rohr auf die Kappe zu schieben. Das Verschieben des Rohres während des Schweißvorgangs beinhaltet die zweite konstruktive Veränderung. Für diesen Vorgang muss ein Mechanismus eingebaut werden, welcher das Rohr verschieben kann. Dies kann mithilfe eines elektronisch oder manuell gesteuerten Druckzylinders erfolgen, der es schnell und einfach ermöglicht das Rohr in der Vorrichtung zu verschieben.

Eine Weiterentwicklung der Konstruktion in Hinsicht auf eine Automatisierung wäre sinnvoll, da diese PP-Rohre später in größeren Stückzahlen mit Kappen verschlossen werden sollen. Dies könnte durch eine automatisierte Steuerung aller Komponenten der Versuchseinrichtung geschehen, in der jeder Vorgang zeitlich gespeichert und ausgeführt wird. Der Betreiber der Einrichtung muss dann nur noch die Verschlusskappe und das Rohr platzieren, den Startknopf drücken und warten bis die fertig verbundenen Teile wieder entnehmbar sind.

Literaturverzeichnis

- [01] Michaeli W. [Hrsg.]: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. 5.Aufl., Hanser 2006, S.201 ff.
- [02] Schwarz, O.; Ebeling, F.W.; Lüpke, G.: Kunststoffverarbeitung Vogel Buchverlag, 6, Würzburg, 1991, S.215 ff.
- [03] Schwarz, O.; Ebeling, F.W.; Lüpke, G.: Kunststoffverarbeitung Vogel Buchverlag, 6, Würzburg, 1991, S.223 ff.
- [04] Schwarz, O.; Ebeling, F.W.; Lüpke, G.: Kunststoffverarbeitung Vogel Buchverlag, 6, Würzburg, 1991, S.201 ff.
- [05] Dorn, L.; Grutzeck, H.; Jafari, S.: Schweißen und Löten mit Festkörperlasern Springer-Verlag, Berlin u.a., 1992, S. 17 ff.
- [06] Schrader, W.: Kunststoffhalbzeug-Verarbeitung und Schweißung VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1970

Quellenverzeichnis

- [07] swissphotonics [Hrsg.] Downloadbereich
<http://www.swissphotonics.net/libraries.files/AchtungLaserstrahl.pdf>
(18.08.2013, 16:18 Uhr), Gespeichert als: Achtung Laserstrahl.pdf, S. 12 ff.
- [08] EVONIK INDUSTRIES, Olefin polymerization catalysts
<http://catalysts.evonik.com/product/catalysts/en/catalyst-brands/products/olefin-polymerisation-catalysts/pages/default.aspx>
(22.08.2013, 14:59 Uhr)
- [09] freie Universität Berlin, Herstellung von Kunststoffen
<http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/polysons.htm#natta>
(22.08.2013, 15:12 Uhr)

- [10] Wikipedia, Laser
<http://de.wikipedia.org/wiki/Laser> (20.08.2013, 14:25 Uhr)
- [11] wolf-produktionssysteme [Hrsg.] Veröffentlichungen
<http://www.wolf-roduktionssysteme.de/veroeffentlichungen/technologieseinar05/vortrag2.pdf>
(20.08.2013, 8:22 Uhr), Gespeichert als Kunstspoffschweißen_Wolf.pdf

Verwendete Geräte und Programme

- [12] DSC 200 F3 Maia, Hochschule Anhalt, 2013, Durchführung von Materialmessungen
- [13] AutoCAD Mechanical 2006, 2-D Konstruktionsprogramm, Eigenerstellung von Skizzen
- [14] CATIA V5R19, 3-D Konstruktionsprogramm, Eigenerstellung von Bildern und Zeichnungen
- [15] Transmissionsmessgerät, Hochschule Anhalt, 2013, Durchführung von Materialmessungen

Anlagen

A:

Basell - Moplen HP400H - Polypropylene, Homopolymer

<https://polymers.lyondellbasell.com/portal/binary/com.vignette.vps.base...>

Moplen HP400H

Polypropylene, Homopolymer

Product Description

Moplen HP400H is a homopolymer for extrusion applications. *Moplen* HP400H exhibits easy processability and a good stiffness/impact balance at ambient temperature. The main applications of *Moplen* HP400H are thermoformed tubs and containers, medium draw trays and blister packs, flowerpots and small extrusion blow moulded bottles. It is suitable for compounding.

Product Characteristics

Status	Commercial: Active
Test Method used	ISO
Availability	Europe, Africa-Middle East
Processing Method	Extrusion Thermoforming, Extrusion Blow Molding, Extrusion Compounding
Typical Customer Applications	Caps & Closures, Housewares, Opaque Containers

Typical Properties	Method	Value	Unit
Physical			
Density	ISO 1183	0.9	g/cm ³
Melt flow rate (MFR) (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	2	g/10 min
Melt volume flow rate (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	2.7	cm ³ /10min
Mechanical			
Tensile Modulus	ISO 527-1, -2	1400	MPa
Tensile Stress at Yield	ISO 527-1, -2	34	MPa
Tensile Strain at Break	ISO 527-1, -2	>50	%
Tensile Strain at Yield	ISO 527-1, -2	11	%
Impact			
Charpy unnotched impact strength (23 °C, Type 1, Edgewise)	ISO 179	No Break	kJ/m ²
(0 °C, Type 1, Edgewise)		90	kJ/m ²
Charpy notched impact strength (23 °C, Type 1, Edgewise, Notch A)	ISO 179	4	kJ/m ²
Hardness			
Ball indentation hardness (H 358/30)	ISO 2039-1	70	MPa
Thermal			
Heat deflection temperature B (0.45 MPa) Unannealed	ISO 75B-1, -2	80	°C
Vicat softening temperature (B50 (50°C/h 50N))	ISO 306	80	°C
(A50 (50°C/h 10N))		150	°C
Optical			
Haze (1 mm)	ASTM D 1003	45	%
Gloss (60°)	ASTM D 2457	107	%

Notes

Typical properties; not to be construed as specifications.

Further Information**Moplen HP400H**

Conveying: Conveying equipment should be designed to prevent production and accumulation of fines and dust particles that are contained in polymer resins. These particles can under certain conditions pose an explosion hazard. We recommend the conveying system used is equipped with adequate filters, is operated and maintained that no leak develops and adequate grounding exists at all times.

Health and Safety: The resin is manufactured to the highest standards but, special requirements apply to certain applications such as food end-use contact and direct medical use. For specific information on regulatory compliance contact your local representative.

Workers should be protected from the possibility of skin or eye contact with molten polymer. Safety glasses are suggested as a minimal precaution to prevent mechanical or thermal injury to the eyes.

Molten polymer may be degraded if it is exposed to air during any of the processing and off-line operations. The products of degradation have an unpleasant odour. In higher concentrations they may cause irritation of the mucus membranes. Fabrication areas should be ventilated to carry away fumes or vapours. Legislation on the control of emissions and pollution prevention must be observed. If the principles of sound manufacturing practice are adhered to and the place of work is well ventilated, no health hazards are involved in processing the resin.

The resin will burn when supplied with excess heat and oxygen. It should be handled and stored away from contact with direct flames and/or ignition sources. In burning the resin contributes high heat and may generate a dense black smoke. Starting fires can be extinguished by water, developed fires should be extinguished by heavy foams forming an aqueous or polymeric film. For further information about safety in handling and processing please refer to the Material Safety Data Sheet.

Storage:

The resin is packed in 25 kg bags or in bulk containers protecting it from contamination. If it is stored under adverse conditions, i. e. if there are large fluctuations in ambient temperature and the atmospheric humidity is high, moisture may condense inside the packaging. Under these circumstances, it is recommended to dry the resin before use. Unfavourable storage conditions may also intensify the resin's slight characteristic odour.

The resin is subjected to degradation by ultra-violet radiations or by high storage temperatures. Therefore the resin must be protected from direct sunlight, temperatures above 40°C and high atmospheric humidity during storage. The resin can be stored over a period of more than 6 months without significant changes in the specified properties, appropriate storage conditions provided. Higher storage temperatures reduce the storage time.

The information submitted is based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application, these data do not relieve processors of the responsibility of carrying out their own tests and experiments; neither do they imply any legally binding assurance of certain properties or of suitability for a specific purpose. The data do not relieve the customer from his obligation to control the resin upon arrival and to complain about faults. It is the responsibility of those to whom we supply our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.

© LyondellBasell Industries Holdings, B.V. 2012

LyondellBasell markets this product through the following entities:

- Equistar Chemicals, LP
- Basell Sales & Marketing Company B.V.
- Basell Asia Pacific Limited
- Basell International Trading FZE
- LyondellBasell Australia Pty Ltd

For the contact details of the LyondellBasell company selling this product in your country, please visit

<http://www.lyondellbasell.com/>.

Before using a product sold by a company of the LyondellBasell family of companies, users should make their own independent determination that the product is suitable for the intended use and can be used safely and legally. SELLER MAKES NO WARRANTY; EXPRESS OR IMPLIED (INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR ANY WARRANTY) OTHER THAN AS SEPARATELY AGREED TO BY THE PARTIES IN A CONTRACT.

This product(s) may not be used in:

(i) any U.S. FDA Class I, Health Canada Class I, and/or European Union Class I medical devices, without prior notification to Seller for each specific product and application; or
(ii) the manufacture of any of the following, without prior written approval by Seller for each specific product and application: U.S. FDA Class II medical devices; Health Canada Class II or III medical devices; European Union Class II medical devices; or any equivalent U.S. FDA, Health Canada, or European Union regulations pertaining to medical devices; packaging in direct contact with a pharmaceutical active ingredient and/or dosage form; and tobacco-related products and applications. This product(s) may not be used in the manufacture of any of the following applications: U.S. FDA Class III medical devices; Health Canada Class IV medical devices; European Class III medical devices; applications involving permanent implantation into the body; life-sustaining medical applications; and lead, asbestos or MTBE related applications. All references to the U.S. FDA, Health Canada and European Union regulations include another country's equivalent regulatory classification.

Users should review the applicable Material Safety Data Sheet before handling the product.

Addhere, Adflex, Adstif, Adsyl, Akoafloor, Akoalit, Alathon, Alkylate, Amazing Chemistry, Aquamarine, Aquathene, Arconate, Arcopure, Arcosolv, Arctic Plus, Arctic Shield, Avant, Catalloy, Clyrell, CRP, Crystex, Dexflex, Duopac, Duoprime, Explore & Experiment, Filmex, Flexathene, Glacido, Hifax, Histif, Hostacom, Hostalen, Ideal, Integrate, Koattro, LIPP, Lucalen, Luflexen, Lupolen, Lupolex, Luposim, Lupostress, Lupotech, Metocene, Microthene, Moplen, MPDIOL, Nerolex, Nexprene, Petrothene, Plexar, Polymeg, Pristene, Pro-Fax, Punctilious, Purell, SAA100, SAA101, Sequel, Softell, Spherilene, Spheripol, Spherizone, Starflex, Stretchene, Superflex, TBAC, Tebol, T-Hydro, Toppyl, Trans4m, Tufflo, Ultrathene, Vacido and Valtec are trademarks owned or used by the LyondellBasell family of companies.

Adsyl, Akoafloor, Akoalit, Alathon, Aquamarine, Arconate, Arcopure, Arcosolv, Arctic Plus, Arctic Shield, Avant, CRP, Crystex, Dexflex, Duopac, Duoprime, Explore & Experiment, Filmex, Flexathene, Hifax, Hostacom, Hostalen, Ideal, Integrate, Koattro, Lucalen, Lupolen, Microthene, Moplen, MPDIOL, Nexprene, Petrothene, Plexar, Polymeg, Pristene, Pro-Fax, Punctilious, Purell, Sequel, Softell, Spheripol, Spherizone, Starflex, Tebol, T-Hydro, Toppyl, Tufflo and Ultrathene are registered in the U.S. Patent and Trademark Office.

Release Date: 02 Mar 2009

B:



laser tube Specifications

	40W	50W	60W	80W	100W
Wavelength	10600nm	10600nm	10600nm	10600nm	10600nm
Beam diameter	1.95	2.2	2.5	3.5	3.8
Power output(W)	40	50	60	80	100
Triggering voltage(KV)	22	22	24	28	35
Operating voltage(KV)	15	16	16	18	20
Operating current(mA)	18	20	22	25	30
Outer diameter(mm)	50	52	55	60	60
Length (mm)	700	1000	1200	1600	1800
Power stability	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%

Laser power supply parameter

- Input voltage: AC 220V+30 or AC 110V+20 (to be specified when placing order).
- Maximum output voltage:DC25KV (40W;50W) / DC28KV (60W) / DC35KV (80W)
- Maximum output current: DC20mA (40W;50W)/ DC23mA (60W) / DC28mA (80W)
- Isolation Withstand voltage: Input-output, input-enclosure: AC2000V-10mA-60s; negative pole of output connected to enclosure.
- Protection: with well-grounded enclosure, output circuit of power supply can be open for short time (but arc between positive pole and enclosure should be avoided).
- Response time (from time of input being available to the output current being up to nominal value): ≤1ms.
- TTL voltage level control: effective voltage level can be high or low through setting.
- Protection switch: for detection of cooling water, to protect laser device; or activate with enclosure is opened.
- Laser power adjustment: (1) by adjusting the output current of power supply through resistor; (2) through PWM control (magnitude being TTL voltage level).
- Environmental requirements: temperature (-10~ 40□), relative humidity ≤85%.

C:

DSC 200 **F3** *Maia*[®] – Funktionsprinzip

Dynamische Differenz-Kalorimetrie

Die dynamische Differenz-Kalorimetrie (DDK; engl. Differential Scanning Calorimetry, DSC) ist eine der am häufigsten verwendeten Methoden im Bereich der thermischen Charakterisierung von Festkörpern und Flüssigkeiten.

Diese Methode kann zur Analyse von annähernd allen Phasenumwandlungen verwendet werden, die mit einer Energieaufnahme oder -abgabe verbunden sind.

- Schmelz-/Kristallisationsverhalten
- Festkörper-Reaktionen
- Polymorphe Umwandlungen
- Kristallinitätsgrad

- Glasübergänge
- Vernetzungsreaktionen
- Oxidationsstabilität
- Zersetzungsverhalten
- Reinheitsbestimmung
- Spezifische Wärme

Bei der Dynamischen Differenz-Kalorimetrie wird die Probe in einen Tiegel eingesetzt. Der Probentiegel und ein üblicherweise leerer Referenztiegel werden in die Messzelle (Ofen) des DSC-Systems eingebracht. Während der Messung werden Probe und Referenz einem kontrollierten Temperaturprogramm unterworfen (isotherm, Aufheizen oder Abkühlen mit konstanten Heiz-/Kühlraten).

Die Schnelligkeit der Analyse, das einfache Handling und die hohe Aussagekraft der Ergebnisse in Forschung, Entwicklung und Qualitätskontrolle sind nur einige der Vorteile dieses Analyseverfahrens. Das Gerät erfüllt praktisch alle aktuellen Normen (ASTM, DIN, ISO, etc.), die für spezifische material-, produkt- und eigenschaftsbezogene Applikationen verfügbar sind. Die dazu notwendigen Auswerterroutinen sind in der zugehörigen Software integriert.

Die DSC 200 **F3** *Maia*[®] vereint die Vorteile von modernster Technologie, hoher Empfindlichkeit und einem robusten, einfach zu bedienenden Messsystem. Der Temperaturbereich erstreckt sich von -170 °C bis 600 °C.



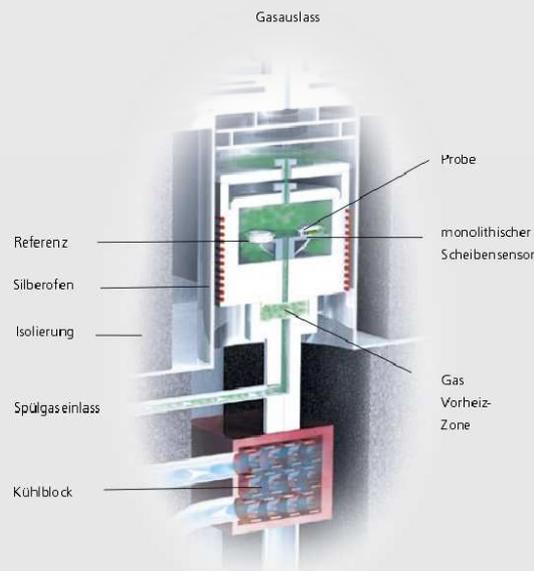
DSC 200 **F3** *Maia*[®] mit automatischem Probenwechsler

NETZSCH

Hauptmerkmale der DSC 200 **F3 Maia**® sind der neu entwickelte DSC-Wärmefluss-Sensor und ein neuer Ofen. Der Wärmestrom-Sensor der DSC 200 **F3 Maia**® vereint hohe Stabilität und optimierte Auflösung mit schneller Zeitkonstante. Die laser-gestützte Bearbeitung der Sensorscheibe und der Thermoelement-Drähte gewährleistet hohe Empfindlichkeit und optimale Langzeit-Stabilität. Der gemantelte Heizdraht im zylindrischen Silberofen umgibt den gesamten Probenraum inklusive Sensorplatte. Dadurch treten keinerlei Temperaturgradienten in oder über der Sensorscheibe auf. Diese Anordnung ermöglicht einen äußerst homogenen Wärmefluss von allen Seiten auf die Proben- und Referenztiegel und somit eine extrem stabile Basislinie, ein ausgezeichnetes Signal-Rauschverhältnis und reduziert die Kondensation von flüchtigen Probenanteilen auf ein Minimum. Schutz- und Spülgaseinrichtungen sind Standard-Merkmale des Gerätes. Für schnelle Abkühlzeiten und Tests unterhalb Raumtemperatur sind verschiedene Kühloptionen, wie z. B. Druckluft oder Flüssigstickstoff-Kühlsysteme, erhältlich. Vielseitige Gaswechsel- und Durchflussregler sind ebenfalls lieferbar. Für Routineanwendungen bieten wir einen automatischen Probenwechsler (ASC) für bis zu 20 Proben und Referenzen an – auch für unterschiedliche Tiegeltypen.

Weitere Informationen

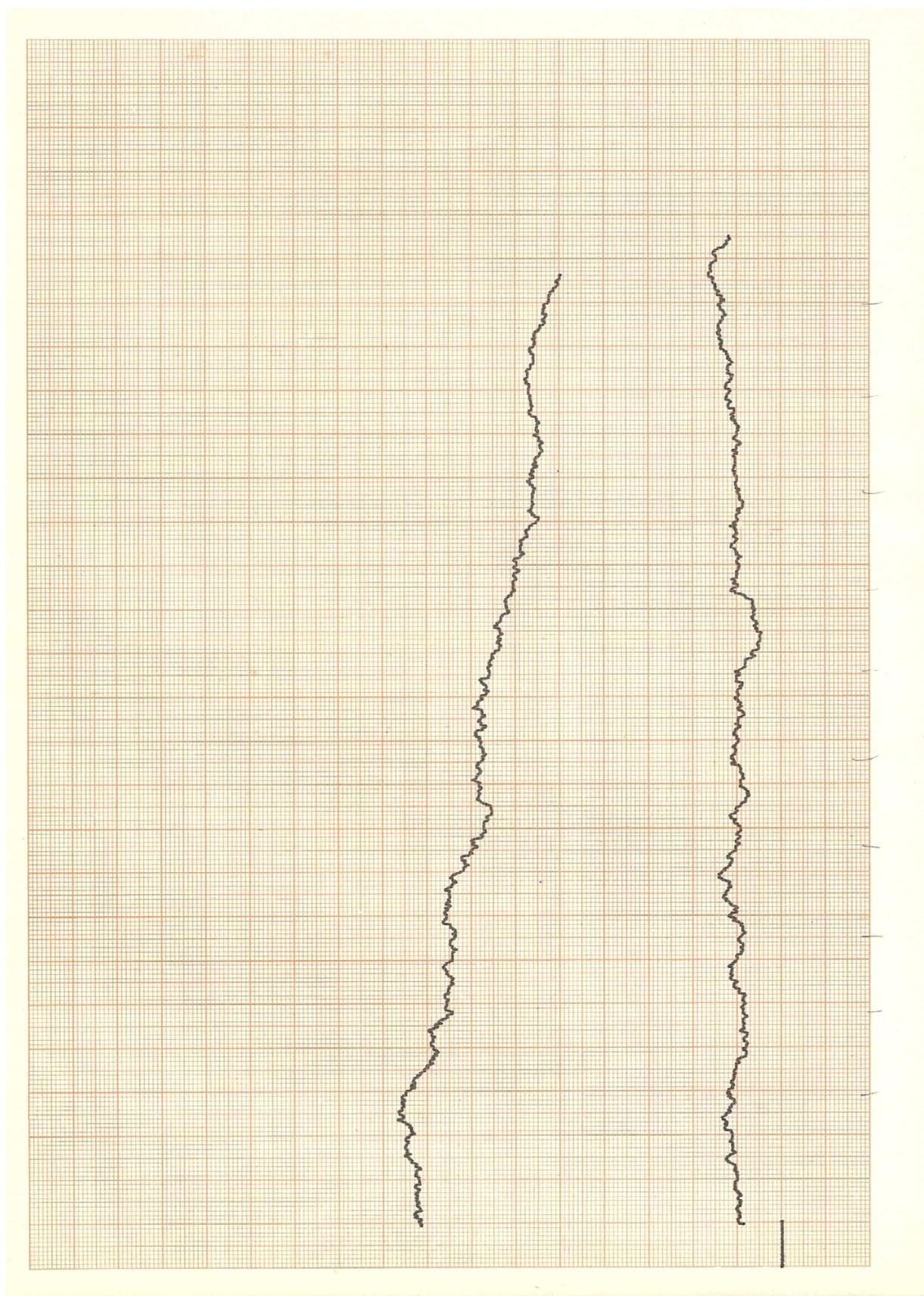
www.netzsch.com/n19091



Technische Daten

Temperaturbereich	-170 °C bis 600 °C
Aufheizraten	0,001 K/min bis 100 K/min
Abkühlraten	0,001 K/min bis 100 K/min (abh. von der Temp.)
Sensor	Wärmeflussystem
Messbereich	0 mW bis ±600 mW
Temperaturgenauigkeit	0,1 K
Enthalpiegenauigkeit	< 1 %
Kühloptionen	Druckluft (bis zu RT), Vortextube (bis zu 0 °C) LN ₂ (bis zu -170 °C), geregelte LN ₂ -Zufuhr Intracooler -40 °C oder -70 °C
Atmosphären	oxid., inert (statisch, dynamisch)
Automatischer Probenwechsler	für bis zu 20 Proben bzw. Referenzen (optional)

D:



Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbstständig verfasst, in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt wurde und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen, einschließlich der angegebenen oder beschriebenen Software, verwendet wurden.

Ort, Datum

Unterschrift