



# **Bachelorarbeit**

## **„Polyurethan zur Innenbeschichtung von Stahlrohren“**

zur Erlangung des akademischen Grades

des Bachelor of Engineering

Studiengang Kunststofftechnik BKT10

Fachbereich Ingenieurwissenschaften

der Hochschule Merseburg (FH)

Vorgelegt bei Prof. Dr. B. Langer (Erstgutachter)

und Prof. Dr. I. Kotter (Zweitgutachter)

Abgabetermin 16.2.17

von Johannes May

Matrikelnummer: 17736

## Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften

Prof. Dr. Beate Langer  
Eberhard-Leibnitz-Str. 2  
06217 Merseburg  
Tel + 49 3461 46-2726  
Fax +49 3461 46-2592



### Aufgabenstellung für die Bachelorarbeit

**Thema:** Polyurethan zur Innenbeschichtung von Stahlrohren

<b>Bearbeiter:</b>	Johannes May
<b>Themenstellender Hochschullehrer:</b>	Prof. Dr.-Ing. Beate Langer
<b>Wissenschaftlicher Betreuer:</b>	Prof. Dr.-Ing. Ines Kotter, Polymer Service GmbH Merseburg, An-Institut der HoMe
<b>Betriebliche Betreuer:</b>	Dipl.-Ing. Andreas Desch, TIP TOP OBERFLÄCHEN- SCHUTZ, ELBE GmbH, Wittenberg

Metallbehälter und Rohrleitungen werden häufig zum Zwecke des Schutzes vor Korrosion und Abrasion innen beschichtet. Meist erfolgt diese Beschichtung als Gummierung, wobei die Abrasionsstabilität nicht immer den Anforderungen genügt. Als Alternative zur Gummierung können Polyurethanwerkstoffe verwendet werden, deren Eigenschaften sich durch Variation der Verarbeitungsbedingungen und Zusammensetzung gezielt einstellen lassen. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll ein geeigneter Polyurethanwerkstoff anhand eines geforderten Anforderungsprofils ausgewählt werden und eine praktikable Technologie zur Innenbeschichtung von Stahlrohren und -rohrbögen erarbeitet werden.

Die Bachelorarbeit umfasst im Einzelnen folgende Teilaufgaben:

1. Literaturstudie in rezensierten Fachzeitschriften zum Eigenschaftsniveau von Polyurethanwerkstoffen, die sich zur Innenbeschichtung von Stahlrohren eignen sowie zur Technologie der derzeit dafür industriell genutzten Verfahren,
2. Auswahl und technologische Erprobung erfolgversprechender Polyurethanwerkstoffe im Heißgießverfahren mit Hilfe von dem Anforderungsprofil entsprechender Prüfmethoden; Variation von Temperatur und Zeit bei der Herstellung der Prüfkörper,
3. Auswertung der Ergebnisse und Zusammenstellung von Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen,
4. Schriftliche Abfassung der Bachelorarbeit entsprechend den Vorgaben für die Erstellung einer wissenschaftlichen Arbeit.

Prof. Dr. Regina Walter  
Vorsitzende des Prüfungsausschusses

Prof. Dr. Beate Langer  
Themenstellender Hochschullehrer

## Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Technologie zur Innenbeschichtung von Stahlrohren mit Polyurethanwerkstoffen.....	5
2.1	Grundlagen der Polyurethane.....	5
2.2	Die Materialien und Haftsysteme von TIPTOP .....	12
2.2.1	Materialien.....	12
2.2.2	Haftsysteme .....	13
2.3	Temperzeit und deren Bedeutung in der Industrie .....	14
2.4	Anforderungsprofil und Prüfung von Elastomeren Polyurethanen.....	16
2.5	Formbau und bestehende Probleme beim Gießen.....	19
2.6	Derzeit für Rohrrinnenbeschichtung verwendete Technologie .....	21
3.	Experimentelles.....	24
3.1	Vorüberlegungen und Vorauswahl zu den Polyurethanen .....	24
3.2	Prüfkörper; deren Herstellung und allgemeiner Fertigungsablauf .....	25
3.3	Durchführung der Prüfungen.....	28
4.	Auswertung.....	35
4.1	Prüfungen zur mechanischen Belastbarkeit .....	36
4.2	Auswertung der Hydrolyseprüfung .....	46
4.3	Auswertung der Haftfestigkeit .....	50
4.4	Ansätze zur Entwicklung und Ausführung der Gießform bzw. des Heißgießverfahrens für die Stahlrohrinnenbeschichtung und Vergleich zu anderen Formen der Beschichtung mit PU.....	53
5	Fazit.....	61

# 1 Einleitung

Das Thema der Arbeit ist die Innenbeschichtung von Stahlrohren mit Hilfe des Heißgießverfahrens, wie es von dem Unternehmen TIPTOP Oberflächenschutz Elbe GmbH praktiziert wird. Ausschlaggebend für die Themenstellung war ein Auftrag, den das Unternehmen aufgrund fehlender Technologie weiter vergeben musste. Bezüglich einer Technologie liegen dem Unternehmen weder Erfahrungswerte zu den eigenen Materialien, noch zur Formgebung oder der Gestaltung des Gießvorgangs vor.

Die Möglichkeit, Rohre mit der Technologie des Heißgießens zu beschichten, sollte vor allem die Langlebigkeit der Rohre erhöhen und aufgrund der Vielseitigkeit bzw. Anpassungsfähigkeit von Polyurethanen eine Option für verschiedene Medien und Temperaturen sein. Diese Technologie könnte dem Unternehmen TIPTOP Oberflächenschutz Elbe GmbH einen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Mitbewerbern sichern. Bisher werden Rohre, vor allem aber Rohrbögen mit unterschiedlichen Materialien und Verarbeitungsmechanismen beschichtet, je nach Einsatzgebiet, Größe des Rohres und wirtschaftlichen Möglichkeiten.

Diese Arbeit soll einen Einblick in die Welt der Polyurethane geben. Beginnend mit den Grundbegriffen werden Eigenschaften, Verwendung und Herstellung von Polyurethan erläutert. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird eine Analyse der von TIPTOP Oberflächenschutz Elbe GmbH verwendeten Materialien durchgeführt und auf Kompatibilität zur Anwendung als Innenbeschichtung geprüft. Dazu werden sowohl die mechanischen Eigenschaften als auch das Verhalten bei medialen Einflüssen zur Bewertungsgrundlage hinzugezogen. Eigenschaften, welche untersucht werden, sind beispielsweise Abrieb und Hydrolysebeständigkeit, die als Grundfaktoren Einfluss auf die Lebensdauer bei Verschleißanwendungen haben. Auch Zugfestigkeit, Reißdehnung und Härte sind zu einer Charakterisierung notwendige Eigenschaften. Neben dem Vergleich der bisherigen Formen der Beschichtung spielt die Suche nach Lösungsansätzen für die Gestaltung der neuen Gießform eine zentrale Rolle. All dies sind theoretische Vorüberlegungen, die weitere Tests und Anwendungen in der Praxis erfordern.

## 2 Technologie zur Innenbeschichtung von Stahlrohren mit Polyurethanwerkstoffen

### 2.1 Grundlagen der Polyurethane

Polyurethane sind Polymere, welche aus einer Polyadditionsreaktion von Polyolen und Polyisocyanaten entstehen. Sie bilden eine für die Polyurethane charakteristische Urethan-Gruppe.

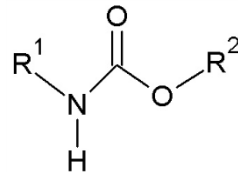


Bild 2.1.1: Urethan-Gruppe

Polyurethane aus einem Diol und einem Diisocyanat bilden lineare Polyurethane. Es gibt allerdings auch die Möglichkeit, vernetzte Polyurethane herzustellen. Durch die starke Variierbarkeit in der Herstellung der Polyurethane ergibt sich ein breites Anwendungsfeld für dieses Material. Die Tatsache, dass Polyurethane als Schaumstoffe und als nicht-zellige Produkte verfügbar sind, erhöhen weiterhin die Bereiche der Anwendung. Bild 2.2.2 liefert eine Übersicht zu den aktuellen Zustandsformen:

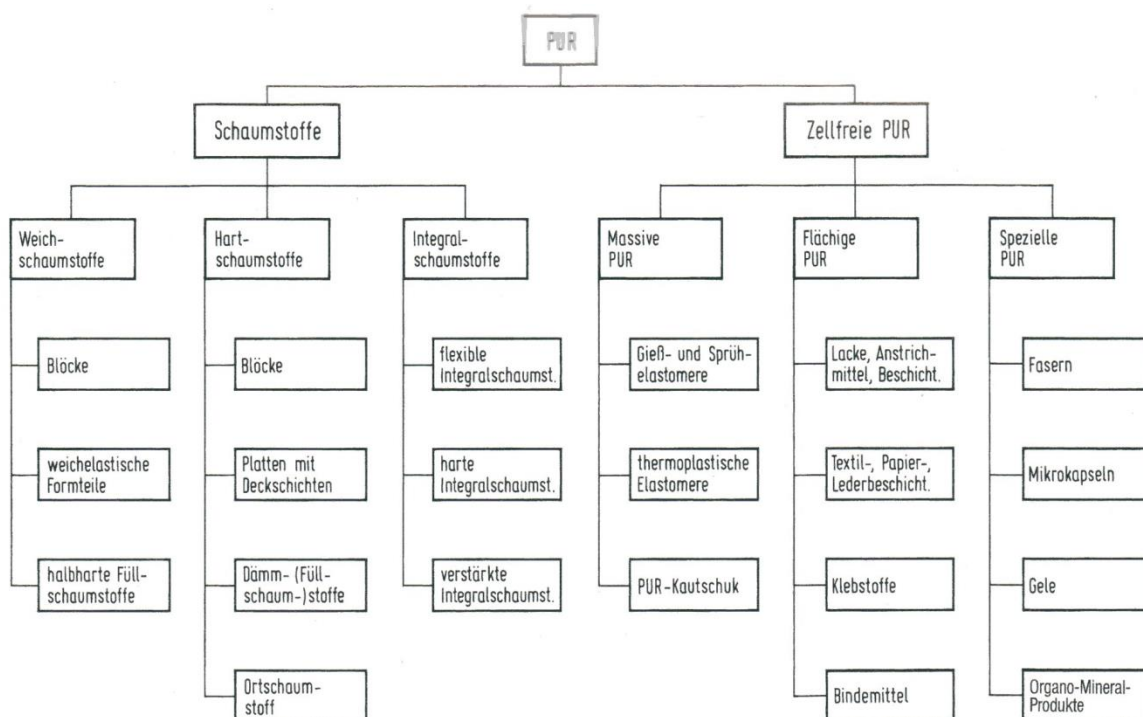


Bild 2.1.2: aktuelle Zustandsformen PU [1]

Anwendungen:

Zu den jeweiligen Zustandsformen gehören dementsprechend auch verschiedene Anwendungen. Die Wichtigsten sind hier zusammengefasst:

- Weichblockschaumstoffe: Die Weichblockschaumstoffe sind wohl die bekannteste Anwendung von Polyurethan. Sie sind für Matratzen, Fahrzeuginnenausstattung und Polstermöbel, sowie im Haushalt, der Textilindustrie oder aber auch als Verpackungsmaterial einsetzbar. Weitere Anwendungen sind: Aquarienfilter, Bälle, Dichtungen, Filter in der Industrie, Schallabsorption usw.
- Hartschaumstoffe: Schwerpunkt bei der Verwendung von Hartschaumstoffen ist die Kälte-/Wärmedämmung. Mittlerweile werden sie aber auch vermehrt im Fahrzeugbau eingesetzt. In geringeren Mengen kommen Hartschaumstoffe bei Möbeln, Sportartikeln, in der Solartechnik oder sogar im Berg- und Tiefbau vor. Weitere Anwendungen sind: Altbausanierungen, Behälter, Fensterbänke, Erdöltanks, Industriehallenbau, Kühlfahrzeuge, Surfbretter, Warmwasserspeicher usw.
- Integralschaumstoffe: Integralschaumstoffe sind eine Verbindung zwischen den Hart- und Weichschaumstoffen. Dabei sind die innen liegenden Bestandteile des Produkts meist eine Art Weichschaum und die Randbereiche ein Hartschaummaterial. Es besteht aber auch die Möglichkeit, die mikrozellularen Strukturen so zu verringern, dass die Randbereiche in ein massives Formteil übergehen. Weitere Anwendungen sind: Armaturen, Büromöbel, Eishockey-Ausrüstung, Schuheinbauteile, Zweiradsättel, Skier, Kinossessel, Kfz: Außenleisten, Griffe, Kotflügel, Lenkräder, Spoiler usw.
- Gieß- und Sprüh-Elastomere: Die Elastomere werden vor allem in jenen industriellen Bereich eingesetzt, wo hohe Anforderungen an Eigenschaften wie Abrieb, Belastbarkeit, Dämpfung- und Korrosionsschutz gestellt werden. Anwendungen sind: Bauwerk-Abdichtungen, Energieabsorbiersteile, Hydrozyklone, Skateboardrollen, Spiralwindsichter, Schalldämmung, Siebe, Beschichtungen für Walzen und Trommeln usw.
- Thermoplastische PUR-Elastomere (TPU): Die TPU's werden wie Thermoplaste hergestellt und sind diesen sehr ähnlich. Es gibt sie als Spritzgussartikel, Hohlkörper durch Blasformtechnik, Folien, natürlich auch allgemeine Haushaltsartikel. Weitere Anwendungen sind Fußballschuh-Sohlen, Kondome, Ohrmarken bei Kühen, Schläuche, Siebe usw.

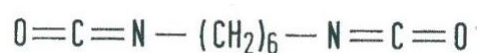
- PUR-Lacke: PUR-Lacke dienen zur Beschichtung von Oberflächen wie Holz, Mineralien, Fahrzeuge und Schiffe. Weitere Anwendungen sind: Bau-Anstriche, Möbel, Parkett, Korrosionsschutz, Elektroisolierlacke usw.
- PUR-Klebstoffe und Bindemittel: Die Klebstoffe werden zum Verbinden von Materialien verwendet, wogegen die Bindemittel bei der Werkstoffherstellung Einsatz finden (Spanplatten, Kernsandbindung). Weitere Anwendungen für Bindemittel sind: Gesteinsverfestigung, Glasfaserschlichte, Gießerei-Kerne. Anwendungen im Bereich der Klebstoffe sind: Bekleidungen, Kfz: Innenverkleidung, Kunststoffverarbeitung usw.
- Eine kleine Gruppe sind PUR-Fasern, welche vor allem in der Textilindustrie vorkommen.

[1;2]

Wie schon erwähnt, wird Polyurethan durch die Reaktion von mehreren Komponenten hergestellt. Dabei besteht die Möglichkeit, alle Komponenten in einem Arbeitsgang zu vermischen (One-Shot-Verfahren) oder aber in einem zweistufigen Verfahren (Prepolymerverfahren) vorzugehen. Im Prepolymerverfahren wird ein Polyol mit einem Überschuss Diisocyanat umgesetzt und erst danach wird ein Vernetzer zugegeben. Das Prepolymerverfahren wird meistens in der Herstellung von PUR-Elastomeren angewendet. Bei PUR-Elastomeren ist die am häufigsten vertretene Technik das Gießen der Reaktionsmasse. Das Aushärten der Produkte erfolgt je nach System und Ausgangsmaterial durch Erwärmung in einem Ofen oder bei Raumtemperatur. Es wird dann von heißhärtenden oder kalthärtenden Gießsystemen gesprochen. Im Bereich der Beschichtung muss Augenmerk auf die im Vorgang angewendeten Haftsyste-me und deren Verbindungsart mit dem zu beschichtenden Material gelegt werden. Andere Produkte wie Schaumstoffe werden überwiegend in einem kontinuierlichen One-Shot-Prozess gefertigt. Im Falle von kaltgegossenem PUR-Elastomeren kann auch mit dem One-Shot-Prozess gearbeitet werden. Das Prepolymerverfahren wird ansonsten nur noch für TPU's oder PUR-Kautschuke angewendet.

Die Chemie der Polyurethane basiert auf nur wenigen Grundtypen der Isocyanate. Die wichtigsten sind in Bild 2.2.3 aufgelistet:

HDI

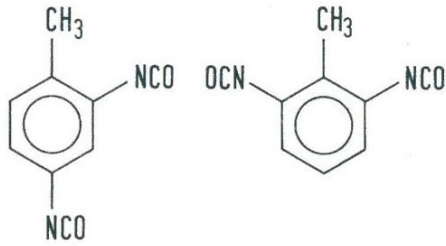


Hexamethylendiisocyanat



TDI

Toluylendiisocyanat



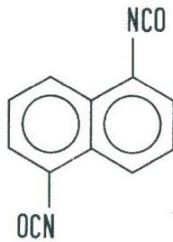
Toluylen-2,4-diisocyanat + Toluylen-2,6-diisocyanat

80% + 20% = TDI 80/20

65% + 35% = TDI 65/35

NDI

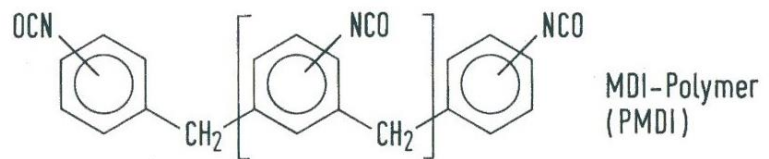
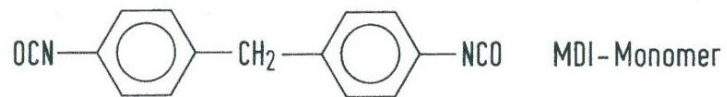
Naphthylendiisocyanat



Naphtylen-1,5-diisocyanat

MDI

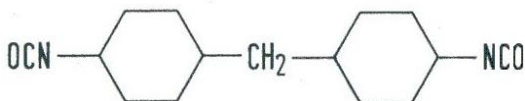
Diphenylmethandiisocyanat



Diphenylmethan-4,4'-diisocyanate

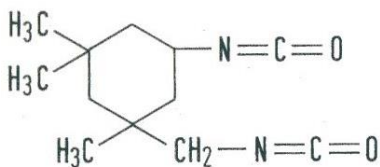
H12MDI

Diisocyanatodicyclohexyl-  
methan



IPDI

Isophorondiisocyanat



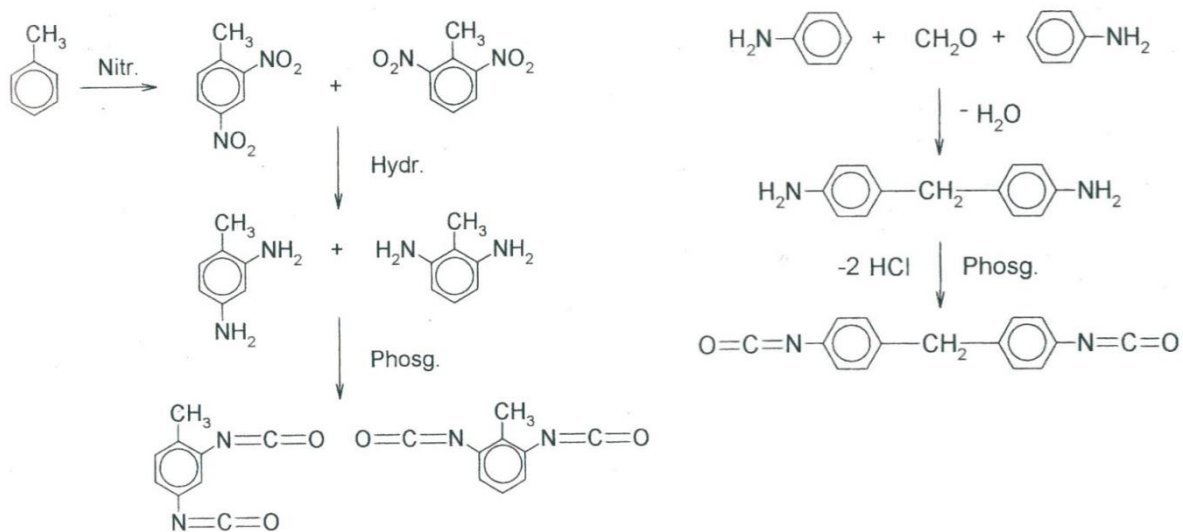
Isophorondiisocyanat

Bild 2.2.3: technisch bedeutsame Isocyanate [1]



In der Industrie sind die Isocyanate TDI und MDI von größter Bedeutung. Dabei wird, von der reinen Menge betrachtet, mehr MDI mehr als TDI verarbeitet. Die Herstellung des TDI beruht dabei auf einer Nitrierung Toluols. Im Anschluss folgt die Hydrierung zu Diamintoluol und als letzter Schritt die Phosgenierung zu TDI. Das MDI dagegen wird durch die Kondensationsreaktion von Nitrobenzol und Anilin mit Formaldehyd und anschließender Phosgenierung synthetisiert.

In Bild 2.2.4 ist die Synthese von TDI und MDI dargestellt



2.2.4: Synthese von TDI (links) und MDI (rechts) [1]

Die andere Komponente bei der PUR-Herstellung ist ein Polyol. Erst durch die Polyole und deren Vielfalt kann das volle Potenzial der Einsatzgebiete erschlossen werden. Es gibt zwei große Gruppen: die Polyetherpolyole und die Polyesterpolyole. Die Polyether bilden dabei den größeren Anteil in der Verwendung. Beide Ausgangsstoffe haben charakteristischen Einfluss auf die Eigenschaften der Polyurethane. Ein großer Faktor ist die im Polyol enthaltene Ether- oder Ester-Bindung. Aber auch die Länge der Ketten, deren Struktur und eventuell vorhandene Gruppen oder Verzweigungen sind maßgebend. Polyetherpolyole werden zum Beispiel aus Glykolen, Trimethylpropan, Glycerin, aber auch aus Sorbit, Zucker oder Stärkehydrolysaten synthetisiert [1]. Die Ausgangsstoffe für die Polyesterpolyole dagegen sind zum Beispiel verschiedene Säuren wie Adipinsäure, Terephtalsäure aber auch Phtalsäureanhydrid oder Dirole wie Glykol, Butandiol-1,4 (wichtiger Vertreter) und Glycerin. Da die Polyesterpolyole in ihrer Herstellung in den meisten Fällen teurer sind und die Verarbeitbarkeit durch eine höhere Viskosität schwieriger ist, werden sie, wie angedeutet, weniger verwendet als die Polyetherpolyole. Polyurethane auf Esterbasis haben gegenüber denen auf Etherbasis ent-

scheidende Vorteile im Bereich der mechanischen Belastbarkeit so wie der Festigkeit. Des weiteren sind sie unempfindlicher gegen Photooxidation. Polyetherurethane sind vergleichsweise weniger anfällig für Angriffe durch Hydrolyse [1;2;3]. In allen Fällen können durch gezielte Auswahl der Ausgangskomponenten die Eigenschaften in die eine oder andere Richtung verlagert werden. Auch werden in den meisten Herstellungsverfahren Zusatzstoffe und Hilfsstoffe eingebaut, um die Eigenschaftskompositionen weiter zu optimieren. Zu diesen zählen Katalysatoren, Tenside, Treibmittel (nur für Schäumprozesse), Flammschutzmittel oder Alterungsschutzmittel [4]. Kettenverlängerer oder Vernetzer bilden in diesem Fall eine eigene Gruppe unter den Hilfsstoffen. Polyurethane können mit Hilfe von Alkoholen wie Butandiol, Glycerin oder Trimethylpropan, welche mehr als eine OH-Gruppe besitzen vernetzt oder „verlängert“ werden. Diese sind der Gruppe der OH-Vernetzer /Kettenverlängerer zu zuordnen. Die zweite Gruppe der Vernetzer bilden die NH<sub>2</sub>-Vernetzer/Kettenverlängerer. Die Vernetzung erfolgt hier mit Diaminen. Vernetzer oder Kettenverlängerer werden gebraucht, um die Netzwerke im Herstellungsprozess gezielt zu beeinflussen. Durch eine Veränderung der Netzwerkdichte kann direkt Einfluss auf das Eigenschaftsniveau des entstehenden Polyurethans genommen werden. Die Verbindungen in den Polyurethanen sind je nach Vernetzertyp eine Urethan- oder Harnstoffverbindung. Auch das nimmt Einfluss auf die Eigenschaften des Polyurethans.

Die Struktur des fertigen Polyurethans lässt sich vereinfacht wie folgt darstellen:

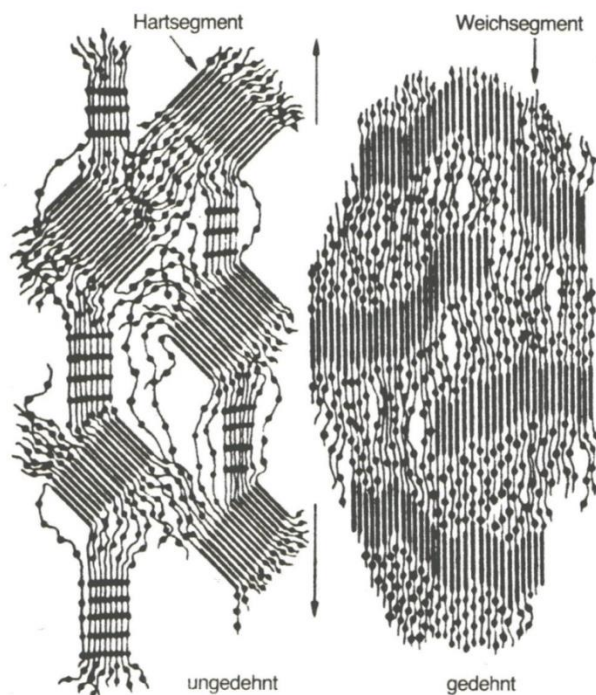


Bild 2.2.5: Schematischer Aufbau PU [4]

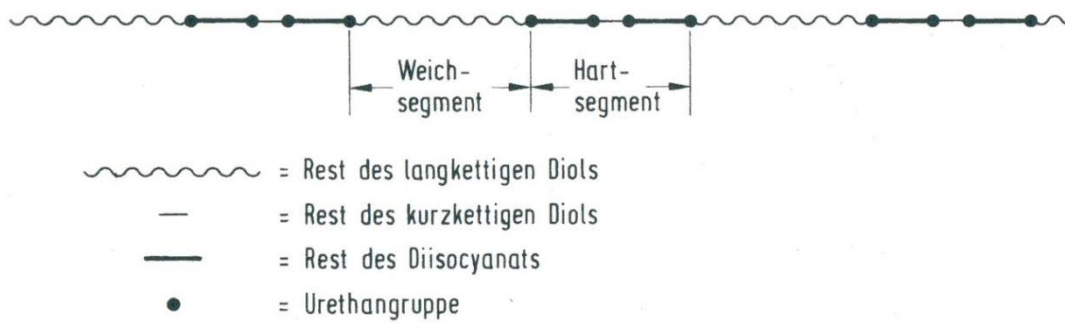


Bild 2.2.6: Schematischer (idealer) Aufbau PU [1]

Polyurethan wird durch Maschinen mit unterschiedlichen Techniken verarbeitet. Es gibt Niederdruck- und Hochdruckmaschinen oder sogar eine Kombination von beidem. Niederdruckmaschinen nutzen Rührwerke auf mechanischer Basis um die Komponenten des Prozesses zusammenzuführen und zu mischen (geringer Druck). Die Hochdruckmaschinen vermischen die Ausgangskomponenten durch ihre kinetische Energie beim Einspritzen in die Mischkammer d.h. bei hohem Druck. Diese Technik hat ihren Ursprung im Gegenstromprinzip. Bei der Niederdruckvariante handelt es sich um Drücke bis zu einem Maximum von 40 bar. Hochdruckmaschinen arbeiten im Normalfall mit Drücken von 100 bis 300 bar [2]. Die Nutzung des Maschinentyps hängt von den Edukten der Reaktion und der weiterführenden Verarbeitung ab, da hier auf den Gesamtdurchsatz der Maschinen geachtet werden muss. Üblicherweise sind Niederdruckmaschinen für höherviskose Rohstoffe und einen niedrigen Durchsatz zu verwenden und niedrigviskose Rohstoffe mit einem hohen Durchsatz für die Hochdruckvariante. So können damit auch hochreaktive Systeme im Prozess Anwendung finden. Der weiterführende Prozess nach dem Mischvorgang in der Maschine ist je nach Produkt sehr unterschiedlich. Deshalb erfolgt hier nur ein kurzer Überblick über die Varianten der Weiterverarbeitung. Die bekanntesten Versionen der Weiterverarbeitung liegen im Bereich der Schaumstoffherstellung, z.B. das Auftragen der Reaktionsmasse auf Transportbänder, um eine kontinuierliche Produktion zu gewährleisten (Weichschaumstoff) [1]. Der Schaumstoff wird dann je nach Bedarf geschnitten oder bearbeitet. Eine weitere Möglichkeit ist das Eintragen in eine Form. Dies wird sowohl bei Gießverfahren von Elastomeren als auch bei Hartschaumprodukten angewendet. Polyurethan kann ebenfalls zu Granulat verarbeitet werden, welches wiederum in verschiedenen Spritzgussverfahren eingesetzt wird. Es kann auch ein unvulkanisierter PUR-Kautschuk hergestellt werden, der dann wie in der Kautschukverarbeitung bearbeitet und vulkanisiert wird. PUR-Fasern werden mit den üblichen Prozessen für Synthesefasern entwickelt. Die große Vielfalt der Polyurethane basiert auf der breiten chemikalischen Herstellungsmethodik und der darauf aufbauenden Weiterverarbeitung in allen Bereichen der Industrie.

## 2.2 Die Materialien und Haftsysteme von TIPTOP

Für die Rohrrinnenbeschichtung mit Hilfe des Heißgießverfahrens werden bei der Firma, bei der die praktischen Arbeiten zur vorliegenden Bachelorarbeit durchgeführt wurden, der TIP-TOP Oberflächenschutz Elbe GmbH, drei Polyurethane und zwei Haftsysteme gestellt, die auf ihre Funktionalität für diese Aufgabe geprüft werden müssen. Eine Rolle spielt dabei die Temperzeit und die damit zusammenhängende Wirtschaftlichkeit im Bezug auf die Fertigungszeit. Die zwei Haftsysteme werden zusätzlich geprüft um zu ermitteln ob die Temperzeit auch hier wesentlichen Einfluss nimmt.

Die Stoffe, welche geprüft werden, sind die folgenden (die Namen sind firmeninterne Bezeichnungen).

### 2.2.1 Materialien

#### AU 85-Material

AU 85 ist ein Polyurethan auf Polyesterbasis mit einer Härte von  $85\pm 5$  Shore A. Die für die Herstellung verwendeten Ausgangskomponenten sind ein TDI-Prepolymer und ein Vernetzer auf Diaminbasis. Hauptbestandteile sind aromatische Polyisocyanate und 2,4/2,6-Diisocyanat-toluol. Der Vernetzer dagegen besteht aus 3,5-Dimethylthio-2,4/2,6-Toluendiamine (1705-Firmeninterne Bezeichnung).

#### EU 90-Material modifiziert

Das EU 90-Material ist ein Polyurethan, welches im Gegensatz zu den beiden anderen eine Etherverbindung besitzt und eine Härte von  $90\pm 5$  Shore A. Ausgang für die Herstellung sind TDI-Prepolymer und der selbe Vernetzer auf Diaminbasis wie im AU 85-Material.

#### G 85-Material

Der dritte in Betracht gezogene Werkstoff ist G 85. G 85 ist ein Polyester bildendes Polyurethan. Die Härte liegt bei  $85\pm 5$  Shore A. Es besteht aus einem MDI-Prepolymer und dem weit verbreiteten Vernetzer 1,4-BDO (1,4-Butandiol). Im MDI-Prepolymer sind die Verbindungen von Diphenylmethan-2,4 und 4,4-Diisocyanat, sowie Methylendiphenyldiisocyanat-

Oligomere vorhanden. Im Fall von G-Material muss, um die Reaktion in Gang zu setzen, ein Katalysator angewendet werden. Dieser besteht aus Polypropylenglykol (Hauptbestandteil), Diethylenglykol, Tertiäres Amin und einer organischen Säure.

In der Verarbeitung sollte darauf geachtet werden, welches Material verwendet wird, da hier Unterschiede auftreten und damit auf verschiedene Umstände im Prozess eingegangen werden muss. Gemeinsam ist allen zur Verfügung stehenden Isocyanaten, dass diese hoch reaktiv sind, vor allem aber stark feuchtigkeitsanfällig. Das bedeutet, dass in der gesamten Prozessführung, sowie während der Lagerung, der Kontakt mit Wasser und möglichst auch mit Luftfeuchtigkeit zu vermeiden ist. Ein oft sichtbares Merkmal durch vorab erfolgten Kontakt mit Wasser sind Bläschen im Endprodukt. Weiterhin haben alle Materialien ein Gesundheitsrisiko, welches zu beachten gilt. AU und EU sind sich in den sonstigen verarbeitungstechnischen Parametern sehr ähnlich. Anders verhält es sich dagegen mit dem G-Material. Dieses ist wesentlich stärker temperaturanfällig. Geringe Temperaturschwankungen im Verarbeitungsprozess sind bereits an der Optik der Oberfläche schnell zu erkennen, zum Beispiel Fließfehler oder Verfärbungen (weißliche Stellen). Da zusätzlich ein Katalysator verwendet werden muss, ist dieses MDI-System wesentlich reaktiver. Die Topfzeit (s.Seite 25) fällt dadurch wesentlich geringer aus als bei den anderen Systemen. Hier ist es nötig, eine Gießmaschine zu verwenden, welche eine hohen Durchsatz aufweist, um die Vernetzung im Gesamtkörper zu gewährleisten.

### **2.2.2 Haftsyste**

Es werden zwei verschiedene Haftsyste in Betracht gezogen: das Zwei-Komponenten- und das Ein-Komponenten-Haftsystem. Diese Systeme haben sich bisher im Gebrauch bewährt und werden auch in dem Anwendungsfall der Rohrrinnenbeschichtung als erste Option gewählt. Eine ausreichend starke Haftung ist notwendig, um das Ablösen des Werkstoffs von der Stahloberfläche zu vermeiden und somit den vorzeitigen Ausfall des in Betrieb genommenen Rohres. Die Verbindungsart wirkt mit diesen Systemen nicht wie eine physikalische Klebeverbindung sondern wie eine chemische Verbindung zum Stahl.

## Haftsystem 1: 1960/5960

Haftsystem 1 ist ein zwei-komponentiges Haftsystem. Die Bestandteile der ersten Komponente sind Butanon, Ethanol (Hauptbestandteil), Methanol und Phenol. Die der zweiten Komponente sind 2-Methoxy-1-Methylacetat, 2-Methoxypropylacetat, Butanon (Hauptbestandteil), Ethylbenzol und Xylol. Die Komponenten werden nacheinander mit maximal einer halben Stunde Verzögerung aufgetragen.

## Haftsystem 2: Cilbond

Bei diesem Haftsystem handelt es sich um ein ein-komponentiges System. Es besteht aus den Stoffen Butanon, Toluol und Xylol, wobei Butanon den Hauptbestandteil ausmacht. Die Verarbeitungszeit (Zeit zum Trocknen) beträgt maximal 30 min.

Es muss bei allen Haftsystemen darauf geachtet werden, dass keine Verunreinigungen vor und nach dem Auftragen zu erkennen sind. Da bei Haftsystem 1 ein wiederholtes Auftragen der Komponenten notwendig ist, entsteht eine Zeitverzögerung, die dieses System störanfällig für zusätzliche Verunreinigungen werden lässt. Daher gilt Haftsystem 2 als die wirtschaftlichere und unempfindlichere Variante der beiden Systeme.

## 2.3 Temperzeit und deren Bedeutung in der Industrie

**Definition:** Als Tempern bezeichnet man allgemein das Erhitzen eines Stoffs über einen gewissen Zeitraum. Dabei kann es sich um Stunden oder auch Tage handeln. Das Tempern ist ein Vorgang, der zur Verbesserung der Eigenschaften im Material verwendet wird. Es kann sich um Spannungsabbau, Kristallstrukturverbesserung oder Gefügeveränderung handeln.

Das Tempern beschreibt in vielen Bereichen der Werkstoffkunde das gleiche Prinzip der Temperaturerhöhung. Wesentliche Unterschiede bestehen in der Temperatur, der Zeit und im Effekt, je nachdem um welches Material es sich handelt. Dabei könnte man zwischen physikalischem und chemischem Tempern unterscheiden.

Verschiedene Anwendungen existieren beispielsweise vor allem auf dem Gebiet der Glasherstellung, bei Gusseisen, bei verschiedenen Thermoplasten und Duromeren (Harze). In der

Glasherstellung wird als Tempern die Erwärmung des Formteils bis kurz unterhalb vom oberen Kühlpunkt bezeichnet. Damit werden Spannungen im Glas abgebaut [5]. Aber auch die Abkühlphase ist im Bereich des Temperns wichtig. So können mit schnellem Abkühlen bewusst Spannungen zwischen der Außenschicht und dem inneren Bereich eingebracht werden oder durch langsames Abkühlen Spannungen komplett vermieden werden. Bei Gusseisen wird auf bis zu 1050°C über 4 – 6 Tage erhitzt um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern (Temperguss) [6;7]. Das Tempern bei Thermoplasten verändert die innere Struktur. Wie beim Glas wird dabei die bei der Formgebung entstandene Eigenspannung abgebaut, aber es setzt auch der Effekt der Nachkristallisation ein [8;9]. Durch diesen wird die kristalline Struktur erhöht, wogegen die amorphen Bereiche abnehmen. Dieser Aspekt begünstigt meist die Verbesserung von Eigenschaften wie Härte, Abrieb oder Steifigkeit. Die Dichte wird ebenfalls erhöht. Damit verbunden kann es zu Nachschwindung kommen und deshalb zum Verzug des Bauteils. Diese Vorgänge können als das physikalische Tempern verstanden werden, da es in den meisten Fällen eine Veränderung der räumlichen Strukturen und der inneren Ordnung beschreibt. Für Duromere (Harze) und viele PU-Elastomere beschreibt das Tempern (auch Härten) eher die Temperaturerhöhung, um die chemischen Prozesse schneller ablaufen zu lassen oder sogar um zu gewährleisten, dass diese Prozesse überhaupt bis zum Ende reagieren. Die Reaktionen, die dabei ablaufen sind Vernetzungsreaktionen [10], welche je nach Ausgangsmaterial einen Tempervorgang benötigen oder nicht. Doch beim Tempern werden nicht nur die chemischen Vorgänge weiter begünstigt sondern zum Teil auch die räumliche Ordnung, wenn auch in wesentlich geringerem Maße als bei den oben genannten Stoffen. Wie erwähnt, können manche Polyurethane auch bei Raumtemperatur vernetzen, jedoch werden dann nicht die optimalen Eigenschaften erreicht. Außerdem ist die Beschleunigung des Vernetzungsvorgangs ein wesentlicher wirtschaftlicher Aspekt.

Bei dem in dieser Arbeit zu untersuchenden Stoffen kann das Polyesterurethan (G-Material) auch bei Raumtemperatur ausreagieren. Da Hauptaugenmerk auf die Temperung gelegt wird, wird das Ausreagieren bei Raumtemperatur in der Praxis allerdings oft vernachlässigt.

Man geht davon aus, dass die Haftung zum Stahl mit Hilfe der Haftvermittler 24 Stunden benötigt, um die chemische Verbindung zu entwickeln. Da bisher keine verlässlichen Daten zur Haftung auf Stahl und dessen Verbindung zum Tempervorgang bestehen, wird das für die Rohrrinnenbeschichtung ausgewählte Material auch auf diesen Vorgang geprüft.



## 2.4 Anforderungsprofil und Prüfung von Elastomeren Polyurethanen

Ausgehend von dem für die Anwendung der Rohrrinnenbeschichtung erwarteten Anforderungen an den Werkstoff wurde ein Anforderungsprofil erstellt. Das zu prüfende Eigenschaftsprofil, welches die Werkstoffe erreichen müssen, ist folgendes:

Härte	85±5 Shore A
Dehnung	≥ 400%
Festigkeit	≥ 30 MPa
Weiterreißwiderstand	≥ 12 N/mm
Elastizität	≥ 45%
Abrieb	< 50 mm <sup>3</sup>
Haftung auf Stahl	≥ 12 N/mm
Hydrolysebeständigkeit	

Dabei kommt es speziell auf den Abriebwert an, aber auch auf die Hydrolysebeständigkeit. Dies sind die beiden Eigenschaften, die den abrasiven Medien, die durch das Rohr transportiert werden, den größten Widerstand leisten und damit die Langlebigkeit der Beschichtung und des Rohres an sich stark erhöhen. Diese Langlebigkeit ist jedoch auch abhängig von den übrigen Eigenschaften, die sich gegenseitig beeinflussen. Daher wurde das allgemeine Eigenschaftsprofil erstellt.

Es werde folgende Prüfungen angewendet:

Härte (Shore-A) : DIN ISO 7619-1 [11]

Die Härte wird hier mit dem Verfahren nach Shore-A geprüft. Bei Shore Härteprüfung wird ein Interder in das Material gedrückt. Je tiefer dieser eindringt, umso weicher ist das Material. Bei Shore Prüfungen handelt es sich um eine Standardprüfung zur schnellen Ermittlung der grundlegenden Qualität eines Materials. Da hier mit einem Handgerät gearbeitet werden kann, ist nur ein geringer Aufwand notwendig. Des weiteren ist die Prüfung zerstörungsfrei und kann an fertigen Bauteilen angewendet werden. Zusammen mit der visuellen Prüfung der Oberfläche bildet die Härteprüfung nach Shore den ersten Anhaltspunkt für die Qualität der von TIPTOP hergestellten Bauteile. Für Elastomere sind nicht alle Härteprüfungen geeignet, da Elastomere zu spontaner Rückstellung neigen. Viele der Standardhärtemessungen basieren

auf der Messung des verursachten Eindrucks. Dies ist bei Elastomeren im geringeren Härtebereich meist nicht möglich, aufgrund der schnellen Rückstellung.

Zugversuch: DIN 53504 [12]

Der Zugversuch ist eine Standardprüfung, um sowohl die Festigkeit als auch die Dehnung eines Prüfkörpers zu bestimmen. Dazu wird ein Schulterstabprüfkörper in eine Zugprüfmaschine eingespannt. Dieser wird durch eine Zugkraft belastet und auseinandergezogen. Dadurch lässt sich die maximale Dehnung und die Festigkeit eines Stoffes ermitteln. Dies ist eine der wichtigsten Prüfungen, um die mechanischen Merkmale zu beurteilen.

Weiterreißwiderstand: DIN ISO 34-1, Methode B [13]

In der Prüfung des Weiterreißwiderstandes wird mit der Norm DIN ISO 34-1 gearbeitet. Dabei findet die Methode B, welche sich auf die Prüfkörperform bezieht, Anwendung. Diese Prüfkörper besitzen einen kleinen Bogen, der in der Mitte des Radius 2 mm weit eingeschnitten wird. In der Prüfung wird ermittelt, wie stark der Widerstand des Materials gegen ein Weiterreißen eines vorhandenen Schnittes ist. So kann abgeschätzt werden, wie sich Schnittbeschädigungen im Betrieb auf die Lebensdauer der Beschichtung auswirken.

Rückprallelastizität: DIN 53512 [14]

Die Rückprallelastizität dient zur Beurteilung eines Materials bei einer Stoßbeanspruchung und ist ein Maß für das Dämpfungsverhalten [15]. Dabei wird ein Prüfkörper von ca. 12 mm Dicke von einem Pendelhammer mit einer bestimmten Geschwindigkeit getroffen und der Rückprall gemessen. Die Kenntnis der Rückprallelastizität ist bei dem Transport von Materialien eine wichtige Kennzahl, um zum Beispiel das Verhalten in Rohrbögen zu beurteilen wenn das Material durch die Trägheit auf die Beschichtung trifft.

Abrieb: DIN ISO 4649 [16]

In der Prüfung des Abriebs geht es um das Abtragen von Material unter kontrollierten Bedingungen. Dabei wird ein definierter Zylindrischer Prüfkörper mit einem Durchmesser von 16 mm und einer Dicke von mindestens 6 mm eine vorgegebene Strecke über ein Schmirgelpapier bewegt um den Masseverlust und damit den Volumenverlust zu bestimmen. Je geringer dieser Volumenverlust ausfällt, umso größer ist der Widerstand gegen Abrieb. Dies ist eine der wichtigsten Kennzahlen um die Lebensdauer eines Produktes oder Stoffes abzuschätzen, da der Transport von Material eine Verschleißbeschichtung benötigt.

Haftung auf Stahl: In Anlehnung an DIN ISO 813 [17]

Für diese Prüfung wird ein auf Stahl aufgebrachter Polyurethanstreifen mit 30 mm (25 mm nach Norm) Breite und 6 mm Dicke von der Grundfläche getrennt. Gemessen wird dabei die Kraft die nötig ist um das Material zu lösen, bei einem Winkel von 90°. Um ein Beschichtungsverfahren und dessen Qualität zu beurteilen, ist diese Prüfung ein grundlegendes Mittel.

Hydrolysebeständigkeit: Verfahren von TIPTOP Oberflächenschutz Elbe GmbH in Anlehnung an DIN ISO 1817 [18]

In der Hydrolysebeständigkeitsprüfung werden Prüfkörper über den Zeitraum von 28 Tagen in dem Medium gelagert. Nach dieser Zeit wird kontrolliert, wie sich die Maße und die Dichte geändert haben. Dabei werden auch Veränderungen des Aussehens und der Härte erfasst.

Wichtig in der Prüfung von Polyurethanen ist das Verständnis der inneren Struktur. Polyurethan weist je nach Härte andere Eigenschaften auf. Polyurethan, dessen Härtewerte sich mit dem Shore-A-Verfahren bestimmen lassen, verhält sich meist wie ein Elastomer. Bei PUR-Werkstoffen, dessen Härte im Shore-D-Verfahren bestimmt wird, ist das Werkstoffverhalten dem eines Duromers ähnlich. Typisch für Elastomere ist das spontan reversible Verhalten. Die Proben werden aufgrund ihrer als Standard angegebenen Härte von 85±5 Shore-A noch in den Elastomerbereich gezählt und damit auch wie diese geprüft. Wichtig ist hierbei das allen Kunststoffen gemeinsame eigene Merkmal der Viskoelastizität und der bei Elastomeren vorkommenden schnellen Zurückstellung. Viskoelastizität ist ein Zusammenspiel aus viskosen und elastischen Anteilen im Material, welche zusätzlich auch temperatur- und zeitabhängig sind [9]. Daher muss beim Prüfen von Polymeren wie Polyurethan auch auf diese Relation eingegangen werden. Im Material entsteht bei Belastung eine zeitverzögerte Gleichgewichtseinstellung. Diese kann sogar nach der Belastung auftreten. So müssen die Prüfungen speziell auf die Anforderungen des Materials angepasst werden. Also spielen Zeit und Temperatur während der Belastung eine entscheidende Rolle. Die Werte können stark variieren, sollte zwischen einer schnellen oder langsamen Belastung gewählt werden. Bei plötzlicher Belastung verhält sich das Material eher spröde, bei langsamer Belastung eher zäh [19].

## 2.5 Formbau und bestehende Probleme beim Gießen

Ein Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit dem Aspekt der Technologie, mit dem die Beschichtung der Rohre im Inneren bewerkstelligt werden soll. Das Anforderungsprofil kann durch die von TIPTOP gegebenen Werkstoffe und Haftmittel erfüllt werden. Diese Aussage basiert auf der langjährigen Erfahrung der Mitarbeiter im Betrieb. Die im Betrieb verwendete Technologie zum Verarbeiten von Polyurethanen ist das Heißgießen. Durch diese Methode der Verarbeitung können die Werkstoffe höhere mechanische Kennwerte erreichen. Nur ist diese Methode mit einigen Nachteilen verarbeitungstechnischer Natur versehen. Der größte Nachteil dieser Technik ist die bei fast allen Produkten notwendige Form. Aber auch die Größe der zu beschichtenden oder zu gießenden Produkte ist ein zu berücksichtigender Faktor. Die Verarbeitung basiert auf dem Gießen bei höheren Temperaturen und mit meist langsamer vernetzenden Ausgangsstoffen als bei den üblichen Kaltgießverfahren. Im Kaltgießverfahren werden meistens Stoffe benutzt, die so schnell vernetzen, dass sie aufgesprüht werden können und daher keine Form benötigen. Eine andere Variante beim Kaltgießen ist das normale Gießen mit Form, allerdings ohne die Form zu erhitzen wie beim Heißgießen. Hier erkennt man bereits den höheren Arbeitsaufwand des Heißgießens. Das Ziel ist es jedoch eine Möglichkeit der Rohrrinnenbeschichtung mit diesem Verfahren zu gewährleisten, da die Werte welche beim Heißgießen erreicht werden für diesen Anwendungsfall zum Einsatz kommen sollen.

Der wohl wichtigste Einfluss auf die Innenbeschichtung von Rohren ist die Form. Der Kunde hat nicht nur das Anforderungsprofil für die gewünschten Eigenschaften angegeben, sondern auch die Vorgabe, dass eine glatte Oberfläche ohne Kanten oder sichtbare Bearbeitungsstellen vorhanden sein soll. Außerdem muss die Beschichtungsdicke ohne Bearbeitung möglichst genau sein. Diese Vorgaben sind problematisch. In den meisten Verarbeitungen wird Polyurethan mit einem Übermaß gegossen, welches dann auf das Fertigmaß bearbeitet wird, wie für Walzen und Trommeln. So wird sicher gestellt, dass keine zusätzlichen Formen benötigt werden. Das verlorene Material wiegt weder die Kosten für die Formen noch den dafür benötigten Lagerraum auf. Auch sind die Formen nicht so exakt im Bezug auf das Fertigmaß. Sollte direkt auf Fertigmaß gegossen werden, besteht die Wahrscheinlichkeit, dass nicht überall die geforderte Dicke der Beschichtung erreicht wird, beispielweise durch leichtes Verrutschen der Form. Der Präzision sind hier Grenzen gesetzt.

Die glatte Oberfläche kann durch eine komplett geschlossene Form, welche aus einem Stück

besteht, erreicht werden oder durch anschließendes Polieren der Fläche. Aus diesem Umstand entsteht das nächste Problem der Rohrrinnenbeschichtung. Denn sollte die Form aus einem Stück sein, kann die Entformung bei längeren geraden Rohren oder bei Rohrbögen nicht gewährleistet werden, ohne das Material der Beschichtung zu beschädigen. Deshalb ist es nötig, eine Form aus mehreren Teilen zu erstellen, was allerdings wieder eine Nacharbeit an den Berührungsstellen der Werkzeugteile zur Folge hat. Hier ist der Durchmesser und die Länge der Rohre ausschlaggebend. Sollte das Rohr zu schmal oder zu lang sein, können nicht alle Stellen von Hand bearbeitet werden, da sie nicht zu erreichen sind. Dabei ist zu bedenken, dass das Material welches transportiert wird, Unebenheiten selbst abschleifen kann. Die glatte Oberfläche soll nur gewährleisten, den Transport ungehindert zu zulassen. Sollten also Kanten durch die mehrteilige Form entstehen, so ist es besser, wenn diese in Transportrichtung verlaufen als senkrecht dazu.

Ein weiterer Aspekt, der beachtet werden muss, ist die Länge der Rohre. Rohrbögen und gerade Rohre müssten im Optimalfall stehend gegossen werden, da im Liegen die vollständige Befüllung und auch die Entlüftung beim Gießvorgang nicht gegeben ist. Damit verbunden, muss beachtet werden, wie die Temperung und auch der Gießvorgang selber gestaltet werden kann. Ein Transport des vorgeheizten Rohres und der Form ist liegend möglich, so dass außerhalb des Ofens das Gießen stattfinden kann. Sobald aber eine große Menge Material gegossen wurde, ist das Bewegen risikobehaftet. Bei der Bewegung kann sich Material, das noch nicht vernetzt wurde oder aber noch keine Verbindung zum Haftsystem hat, ablösen und damit einen Gießfehler erzeugen. Daher werden große Trommeln direkt im Ofen gegossen, um das durch die Trägheit des Materials verursachte Ablösen zu vermeiden. Dazu kommt, dass die Größe des Ofens gleichzeitig der Rohrlänge eine Grenze vorgibt. Im Fall des stehenden Gießens muss nicht nur die Höhe des Ofens mindestens der Länge des Rohres entsprechen, sondern auch noch genug Platz bieten um die Befüllung des Rohres zu gewährleisten.

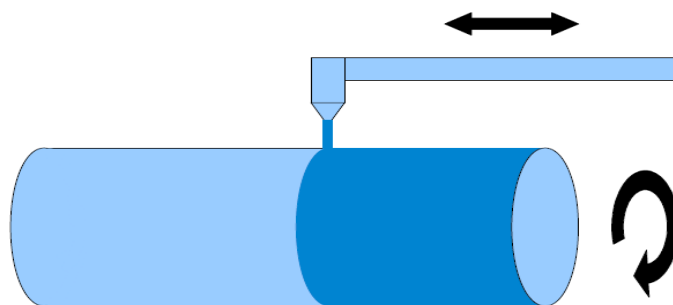
Aus dem stehenden Gießen ergibt sich noch ein Sachverhalt, der die Formgebung maßgeblich beeinflusst. Dieser Sachverhalt ergibt sich aus dem hydrostatischen Druck, der auf dem Boden bzw. den Seitenwänden der Form lastet. Die Form muss in der Lage sein, diesem zu widerstehen und auch Gradbildung, welche durch den hohen Druck begünstigt wird, zu minimieren. Eine mehrteilige Form muss so geschaffen sein, dass sie im Rohr an ihrem Platz bleibt und gleichzeitig genug Gegendruck aufbaut, um dem Austreten von Gießmaterial keine Möglichkeit zu bieten.

## 2.6 Derzeit für Rohrrinnenbeschichtung verwendete Technologie

Die gängige Variante der Rohrrinnenbeschichtung ist der Rotationsguss, manchmal auch Schleuderguss genannt.

Der Rotationsguss oder das Rotationsformen ist dabei eher aus der Bearbeitung von Thermoplasten bekannt. Das Verfahren beschreibt das Einfüllen einer Schmelze in einen Hohlkörper. Dieser wird verschlossen und beginnt zu rotieren. Der Thermoplast erstarrt dann an der Wand des Hohlkörpers. Diese Form der Bearbeitung unterscheidet sich allerdings vom Rotationsguss in der Polyurethanverarbeitung.

Der Rotationsguss wird für Polyurethan-Elastomere angewendet, vor allem für die Beschichtung von Trommeln, Walzen und Rollen, aber auch Außen- und Innenbeschichtung von Rohren. Es gibt jedoch Unterschiede in der Art und Weise des Auftrags oder in den verwendeten Polyurethanen, je nach Hersteller und zu beschichtendem Grundkörper. Grundsätzlich kann dabei zwischen zwei Typen unterschieden werden. Beide basieren auf der Rotation des Grundkörpers (Trommel, Rohr usw.) und dem gleichmäßigen Auftragen des Materials auf die Oberfläche, bis die gewollte Schichtdicke erreicht ist. Der Arm der Maschine kann dabei vor und zurück bewegt werden, um die komplette Länge der Oberfläche zu erreichen.

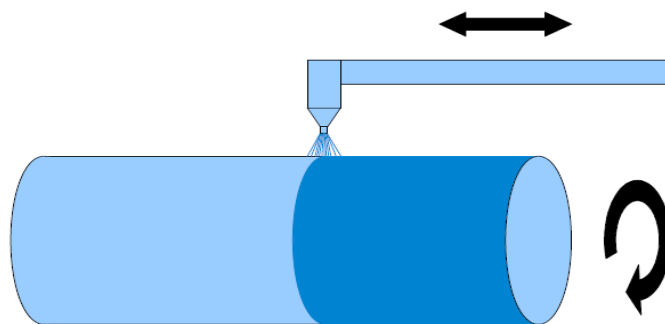


Skizze 2.6.1: Rotationsgießen

Der erste Typ des Auftrags ähnelt dem tatsächlichen Gießen. Es wird ein kontinuierlicher Gießaustrag auf die sich rotierende Oberfläche gelegt. Ein schnell vernetzendes Polyurethan verhindert das Abtropfen. So wird ein „Strang“ nach dem nächsten aufgebracht. Es besteht auch die Möglichkeit mehrere Schichten zu legen, um die Dicke je nach Belieben zu erhöhen [20]. Nachteil dieser Form der Beschichtung ist die Bildung einer Art Wellenprofil, welches eine Nachbearbeitung der Oberfläche durch Schleifen und Polieren nötig macht. Durch die Nachbearbeitung ist diese Form der Beschichtung nicht geeignet für die Rohrrinnenbeschichtung.

tung, für den Fall der Vorgabe, dass keine Nachbearbeitung vorgenommen werden darf. Der Vorteil ist die Verwendung bekannter Gießmaschinen aus dem Formgießen.

Der zweite Typ ist ein Sprühverfahren. Der Aufbau bleibt dabei gleich, nur die Auftragsart ändert sich. Statt einem langsamer austretenden Gießstrang wird das Material auf die zu beschichtende Fläche gesprüht. Dies wird sowohl für die Außenbeschichtung von Körpern angewendet, als auch für die Innenbeschichtung. Vorteil ist hier die sehr genaue Schichtdicke und die glatten Oberflächen, die mit dieser Methodik erreicht werden. Der Nachteil ist die benötigte Sprühvorrichtung. Hier kann zwischen zwei Typen unterschieden werden. Entweder wird das zu beschichtende Element (Rolle, Walze, Rohr etc.) oder die Sprühvorrichtung selbst gedreht.



Skizze 2.6.2 Rotationsgießen mit Sprühvorrichtung

Die Materialien, die für die beiden Gießtechniken verwendet werden, sind sehr schnell vernetzende Ausgangskomponenten, meist auch mit Katalysator. Das Material muss dementsprechend schnell vernetzen, damit es direkt an der aufgetragenen Fläche haftet und nicht abtropft oder verläuft. Dabei kann auch die Rotation des Körpers eine Rolle spielen. Vor allem beim ersten Typ kann ein zu schnelles Rotieren die Wahrscheinlichkeit für Gießfehler erhöhen. Es wird deshalb eher mit höherviskosen Materialien gearbeitet. Die Sprühverfahren dagegen benötigen nicht so hochviskose Ausgangskomponenten, da diese sonst die Verarbeitung erheblich erschweren würden. Aber in allen Fällen ist die schnelle Vernetzung ein Kennzeichen des Rotationsgießens.

Eine der ältesten Beschichtungen vor allem für Wassertransporte wie Trinkwasser, Brauchwasser oder Kühlwasser ist die Auskleidung mit Zementmörtel [21]. Die Auftragungsmethode ist das Ausschleudern oder das Rotationsschleuderverfahren. Das Ausschleudern ähnelt der Auftragstechnik des Rotationsgießens mit PU. Entweder wird der Austrag durch eine mit einer Drehvorrichtung versehenen Lanze aufgesprüht (geschleudert) oder das Rohr selbst dreht



sich. Das Rotationsschleuderverfahren ähnelt dem Rotationsgießen von Stahlrohren selber. Eine Lanze gibt einen konstanten Austrag in das Rohr. Das Rohr dreht sich dabei. Durch die Zentrifugalkraft wird das Material an die Innenseite des Rohres gedrückt, wo es sich verdichtet und aushärtet [22].

Ein weitere Form der Beschichtung ist die Beschichtung mit Thermoplasten. Auch hier gibt es unterschiedliche Methoden des Auftragens, welche natürlich auch abhängig vom verwendeten Polymer ist. Für PVC-H wird beispielweise ein Rohr aus dem Polymer in das Stahlrohr eingezogen und verklebt [23]. Die Anpassung ist dabei relativ schwierig und es muss sehr genau gearbeitet werden. Eine ähnliche Variante ist das Einlegen mehrerer konzentrischer Schläuche in das Rohr. Mit Hilfe von Druck und Wärme, meist in Form von Dampf, werden die Schläuche miteinander verbunden und bilden ein einziges festes Rohr unabhängig von der Stahlrohrgeometrie. So eignet sich dieses Verfahren vor allem für Rohrbögen, Schlingen oder ähnliches [24]. Ein ähnliche Methode ist die Verwendung des Memory-Effektes der Polymere. Hierfür wird ein Polymerschlauch in gestreckter Form in ein Rohr eingebracht. Der Außendurchmesser des gestreckten Schlauches ist kleiner als der des Innendurchmessers des Rohres. Anschließend wird auch mit Druck und Wärme gearbeitet. Sobald die Glasübergangstemperatur überschritten wird, gehen die Moleküle wieder in den Ausgangszustand zurück. Im Ausgangszustand ist der Außendurchmesser des Schlauches größer als der Innendurchmesser des Stahlrohres [25].

Die älteste Beschichtungsform von Stahlrohren erfolgt mit Bitumenbeschichtung. Auch hier wird mit einem Schleuder- oder Spritzverfahren gearbeitet [23]. Allerdings ist die Verwendung dieser Beschichtungsform, aufgrund der ungenügenden Eigenschaften stark zurück gegangen und wurde durch andere Beschichtungen ersetzt [26].

Gummi kann so wie Polyurethan auf das jeweilige Medium, welches transportiert wird, angepasst werden durch verschiedene Grundtypen und Additive. Polyurethan weist allerdings in den meisten bisherigen Einsätzen eine höhere Lebensdauer auf.

Bei dieser Form der Beschichtung werden unvulkanisierte Gummibahnen geschnitten und auf die zuvor mit Haftvermittler bestrichene Oberfläche im Inneren der Rohre gelegt. Diese werden dann Druck ausgesetzt, in Form von Anpressen oder Anrollen, um Luftblasen unterhalb der Gummischicht zu entfernen. In Autoklaven werden diese dann vulkanisiert und im Anschluss noch durch Schleifen nachbearbeitet.

Eine weitere Form der Beschichtung, vor allem für die Verschleißschutzauskleidung, erfolgt mit Schmelzbasalt. Schmelzbasalt ist hoch abriebfest, deshalb wird es vor allem bei der Förderung von Kohlenstaub, Flugstaub, Asche und ähnlichem eingesetzt. Trotz der guten Abriebfestigkeit, kann es vor allem durch Stoßbeanspruchungen (Prallverschleiß) zum Versagen der Beschichtung kommen [27]. Bei der Auskleidung werden vorgegossene Formteile im Rohr verspannt und mit Zement vergossen [23].

Die Auskleidung auf Harzbasis, meist mit Epoxidharz, wird mit verschiedenen Methoden aufgebracht: entweder über vorgefertigte unvernetzte Bahnen, die ähnlich wie bei einer Gummiauskleidung verlegt werden [28], oder über Pulverbeschichtungen, bei denen das Epoxid in Pulverform aufgesprüht wird [29]. Nach dem Auftrag wird die Beschichtung im Rohr erwärmt. Das Pulver erreicht seinen Schmelzpunkt. Zeitgleich mit dem Schmelzen beginnt auch schon die Vernetzung des Harzes. Mit dieser Methode sind jedoch nur geringe Schichtdicken möglich, was die Langlebigkeit verringert, da in der Anwendung ein konstante Abrasion auftritt.

### **3. Experimentelles**

#### **3.1 Vorüberlegungen und Vorauswahl zu den Polyurethanen**

Bevor die Prüfkörper aus den jeweiligen Komponenten hergestellt werden, gibt es Vorüberlegungen die zu den Prüfungen und den fertigen Polyurethanen gemacht werden müssen. Worauf kommt es bei einer Beschichtung im Inneren von Rohren an? Welchen Belastungen muss das Material standhalten? Kommen die Polyurethane in der Auswahl überhaupt an diese Anforderungen heran?

Wie im theoretischen Teil der Materialsysteme und Haftsyste me angesprochen, sind diese in ihrer Verarbeitung und chemischen Struktur unterschiedlich. Diese sollen miteinander verglichen werden, doch bereits bei der ersten Betrachtung ist eine essentielle Differenz im Eigenschaftsniveau zu erkennen. Daraus lässt sich auch die Vorauswahl für die weitergehenden Prüfungen ableiten. Entscheidend ist die bekannte chemische Struktur der Polyurethane. Bei zwei Vertretern handelt es sich um ein Polyestersystem und nur bei einem um ein Polyethersystem. Dies ist ein wichtiger Punkt in der Hydrolysebeständigkeit. Die Polyesterurethane sind wesentlich anfälliger für Hydrolyse [1;3;30]. Man erkennt also schon in der Vorüberlegung welches Material sich für den allgemeinen Anwendungsfall der Rohrrinnenbeschichtung

eher eignet. Natürlich kann man in manchen Fällen nur einen Feststoff transportieren (Quarzsand). So würden auch die Polyesterurethane in Frage kommen. Doch der bisher überwiegende Teil der Anwendung stellt der Transport von Flüssigkeiten dar.

Der Aufbau der Prüfungen ist deshalb so konzipiert, dass ein Vergleich der Polyurethane auf das gegebene Anforderungsprofil stattfindet. Darauf folgt der Vergleich der Hydrolyseprüfung für die Polyurethane. Bei der Temperzeit handelt es sich um die Zeit von 8, 12, und 16 Stunden. Die Haftung auf Stahl spielt dabei noch einmal eine gesonderte Rolle. Für alle Systeme und für ein Polyurethan mit allen Temperzeiten wird auch ein Vergleich beider Haftsyste-me angestrebt.

### **3.2 Prüfkörper; deren Herstellung und allgemeiner Fertigungsablauf**

Der Fertigungsablauf für die Prüfkörper entspricht der üblichen Herstellung von Formgießteilen. Lediglich für die Haftung auf Stahl muss ein Beschichtungsverfahren angewendet werden. Für das Gießen werden Niederdruckgießmaschinen genutzt. Dabei werden zuerst die Ausgangskomponenten auf Verarbeitungstemperatur gebracht. Währenddessen werden auf die Stahlplatten bereits die Haftsyste-me aufgetragen. Diese wurden vorher gestrahlt mit Stahlkies, im Anschluss mit Luftdruck gereinigt und mit Ethylacetat abgewaschen, um übrig gebliebene Stahlkörner zu entfernen. Das Ethylacetat dient aber auch zur Entfernung von Verunreinigungen wie Fette oder Öle, die die Haftung erheblich beeinflussen würden. Ein Bereich der Platte wird dabei nicht mit Haftmittel benetzt um an dieser Stelle das gewollte Ablösen zu gewährleisten. Das Strahlen ist ein nötiger Arbeitsschritt um leichte Oberflächenschäden im Stahl zu beseitigen und auch um die Oberfläche zu vergrößern, so dass die Haftsyste-me eine stärkere Verbindung zu Stahl bilden können. Für die übrigen Platten werden Gießformen in unterschiedlichen Dicken benötigt. Es werden zwei Platten mit zwei Millimetern, drei mit 6 Millimetern und eine mit 12 Millimetern Dicke gegossen. Die Formen werden vor dem Gießen mit Trennmittel eingerieben und im nächsten Schritt auf den Gießtischen auf Gießtemperatur gebracht. Der Gießtisch hat eine Temperatur von 120°C. Die Formen weisen eine Temperatur zwischen 110°C und 115°C auf. Erst wenn diese erreicht ist, erfolgt der eigentliche Gießvorgang. Da es sich um geringe Mengen Material handelt, wird nicht direkt aus der Maschine gegossen sondern per Hand mit einem Messbecher. Dabei muss auf die unterschiedliche Topfzeit bei jedem Material geachtet werden.

Die Topfzeit beschreibt die Zeit, in der das Polyurethan noch verarbeitbar ist und damit die

Geschwindigkeit der Vernetzung. Jedoch wird in der Topfzeit noch nach zwei weiteren Kriterien unterschieden. Die Zeit, in der das Material noch flüssig ist und damit vergossen werden kann und die Zeit vom Gießende bis zur Entformung. Gewünscht ist natürlich eine lange Gießzeit und im Anschluss eine kurze Verweilzeit in der Form.

Die Verarbeitungszeiten für die jeweiligen Polyurethane sind 6 – 7 Minuten für AU, die Entformungszeit dagegen ist bedeutend länger und liegt bei ca. 30 Minuten. Sowohl für EU als auch für das G stehen 4 bis maximal 6 Minuten für die Verarbeitung zur Verfügung. Die Entformungszeiten dagegen liegen zwischen 20 – 30 Minuten. Die jeweiligen Zeiten sind stark abhängig von der Formtemperatur, von dem Gussgewicht und von der gewünschten Härte des Polyurethans.

Während die Vernetzungen in der Form stattfinden, wird die Oberfläche mit einem Brenner erhitzt. Dies verhindert das Bilden von Oberflächenfehlern wie Bläschen. Allerdings kann dies nur kurz nach dem Gießen angewendet werden, da sonst das Material schon zu stark vernetzt ist.



**Bild 3.2.1: Gießvorgang, leichte Blasenbildung (untere Form) (links); Auflösen der Bläschen durch Brenner (rechts)**

Wenn die Vernetzungsvorgänge stattgefunden und die Prüfplatten die Topfzeit überschritten haben, können diese entformt und im Anschluss getempert (ca. 115°C) werden. Nach dem Tempern werden die Platten aus dem Ofen entnommen und bei Raumtemperatur und relativer Luftfeuchte von ca. 50% gelagert. Der Zeitpunkt der Prüfkörperherstellung erfolgt dann zwei bis drei Wochen nach Temperungsende. In der Zeit der Lagerung gehen die Vernetzungsprozesse weiter. Der Hersteller der Ausgangskomponenten gibt den Hinweis, die fertigen Gießteile noch zwei bis drei Wochen lagern zu lassen, um die maximalen Eigenschaften zu erreichen. Anzumerken ist, dass die Prüfplatten aus denen die Prüfkörper hergestellt werden, in einer offenen Form gegossen werden. Das bedeutet dass Dickenunterschiede in der Prüfplatte existieren. Demnach sind die 6 mm Platten in den meisten Fällen dicker als 6 mm. Auch die für die Haftfestigkeit vorgesehenen Platten haben eine größere Dicke als 6 mm. Aber auch innerhalb der Platten gibt es Schwankungen.

Hergestellt wurden die Platten an unterschiedlichen Tagen, da die Materialbefüllung der Maschinen mit dem Fertigungsplan der PU-Abteilung übereinstimmen muss. Auch wurde jedes Polyurethan mit unterschiedlichen Maschinen vergossen.

Die Herstellung der Prüfkörperformen erfolgt dann nach unterschiedlichen Methoden. Es muss speziell darauf geachtet werden, dass dabei keine allzu starke Wärmeentwicklung entsteht, die das Material schädigen könnte. Je nach Dicke der Prüfplatte und Form der Prüfkörper werden diese ausgestanzt (Weiterreißwiderstandsprüfung, Zugversuch), ausgebohrt (Abriebtest), gespalten (Rückprallelastizität) oder gesägt (Hydrolyseprüfung). Für die Probekörper der Haftfestigkeitsprüfung wird in einer offenen Form gegossen wie in den anderen Verfahren, es wird allerdings eine Stahlplatte untergelegt, die beschichtet wird. Um das Lösen des Materials zu gewährleisten wird ein spezieller Stoff zwischen Stahlplatte und Beschichtung gebracht, der eine Verbindung verhindert. Nach dem Herstellungsprozess wird lediglich noch der Einschnitt von 30 mm Breite mit einem Messer vollzogen.

Jeder Prüfkörper wurde vor den Prüfungen über Nacht im Prüflabor gelagert um die entsprechende Konditionierung zu erreichen.

### 3.3 Durchführung der Prüfungen

#### Shore-A Härte (DIN ISO 7619-1):

Um die Shore A Härte zu messen wird ein Handdurometer verwendet. Die zu prüfenden Platten müssen dabei eine Dicke von  $\leq 6$  mm haben und nach Möglichkeit parallele, glatte Oberflächen besitzen. Die Dicke wird benötigt um den Einfluss des Untergrundes zu minimieren bzw. auszuschließen. Der Abstand der einzelnen Messungen muss mindestens 12 mm vom Rand betragen und jeweils 6 mm von den anderen Prüfstellen. Es werden in jedem Fall 5 Prüfungen für Vorder- und Rückseite durchgeführt, da durch die offene Form leichte Abweichungen entstehen können. Je Prüfung wird zwischen 3 und 15 s belastet. Da es sich nicht um vulkanisiertes Elastomer handelt welches mit 3 s getestet wird, sondern um elastomeres Polyurethan, wird sowohl mit 3 s als auch mit 15 s getestet um einen Vergleich anzustreben.

Es wird das Shore-A Handdurometer angewendet. Die Anpresskraft beträgt 12,5 N, der Interder ist eine Nadel mit stumpfer Spitze und einem Öffnungswinkel von 35°. [11]

Zusätzlich zu den Prüfungen mit dem Handdurometer wurden noch ein paar Vergleichswerte mit einem elektronischen Härteprüfgerät durchgeführt (Typ: SHA.D3). Dieses ermittelt je Prüfung 3 Härtewerte und bildet bereits den Mittelwert zur Bestimmung der Härte. Hier beträgt die Prüfzeit nur jeweils 3 s.



Bild 3.3.1: Gerät zur Härtemessung SHA.D3

#### Zugversuch (DIN 53504):

In der Prüfung des Zugversuchs wurde eine Zwick Universalprüfmaschine für die S2 Prüfstäbe verwendet. Nach Ausstanzen der Prüfkörper wurde die Dicke gemessen und im Anschluss die Messmarken für die Längenaufzeichnung aufgebracht. Dazu war es nötig, die Oberfläche

der Prüfstäbe aufzurauen. Für die Längenaufzeichnung wurde ein berührungsloses Messsystem verwendet.

Der Prüfkörper wird mit den Schultern zwischen den Einspannklemmen eingespannt. Dabei ist darauf zu achten, den Stab parallel zur Zugachse zu befestigen. Im Anschluss wird bei einer Vorspannung von  $< 0,1$  MPa und einer Vorschubgeschwindigkeit von  $< 50$  mm/min angefahren. Danach beginnt das Messsystem die aufgebrachten Markierungen zu finden und die Länge  $L_0$  zu bestimmen. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 200 mm/min. Es wird während der Prüfung die Kraft und damit die Spannung, sowie die Dehnung aufgezeichnet. Durchgeführt werden 5 Prüfungen je Material [12].

Wichtig sind die Werte der maximalen Spannung, der Reißspannung und der Reißdehnung. Im Falle der Polyurethanwerkstoffe entspricht der Wert der Zugfestigkeit der Reißspannung. Die Berechnungen sind wie folgt [31]:

Zugfestigkeit/Reißfestigkeit:

$$\sigma_{max/R} = \frac{F_{max/R}}{A_0}$$

- $\sigma_{max}$  Zugfestigkeit, in MPa oder N/mm<sup>2</sup>
- $\sigma_R$  Reißfestigkeit, in MPa oder N/mm<sup>2</sup>
- $F_{max}$  Höchstkraft, in N
- $F_R$  Kraft beim Reißen, in N
- $A_0$  Anfangsquerschnitt, in mm<sup>2</sup>

Reißdehnung:

$$\varepsilon_R = \frac{L_R - L_0}{L_0}$$

- $\varepsilon_R$  Reißdehnung, in %
- $L_R$  Messlänge beim Reißen, in mm
- $L_0$  Anfangslänge, in mm



Bei der Prüfung des EU 12h wurde eine Probe wiederholt, da sich in diesem Falle eine Markierung für Dehnungsmessung gelöst hat.

### Weiterreißwiderstand (DIN ISO 34-1):

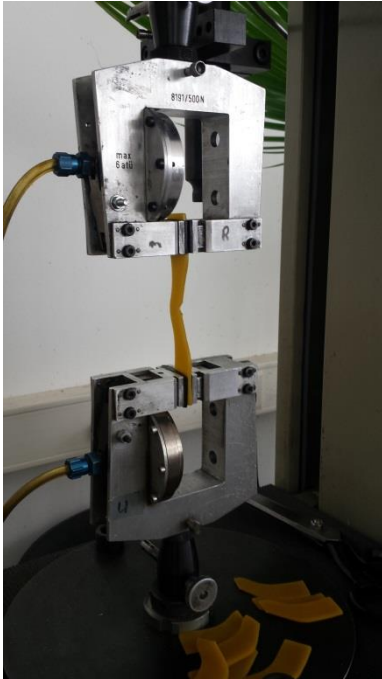


Bild 3.3.2: Weiterreißprüfung

Wie für die Zugprüfung wurde auch für den Weiterreißwiderstand eine Universalprüfmaschine in Anspruch genommen. Die Prüfkörper sind die Bogen-Prüfkörper nach Methode B und der Prozedur (b), das heißt mit einem Einschnitt von 2 mm.

Die Prüfung beginnt mit dem Einspannen des Prüfkörpers. Die Probe wird bis zum Zerreißen auseinander gezogen. Im Verlauf der Prüfung wird dabei nur die Kraft und der Messweg aufgenommen, mit einer Prüfgeschwindigkeit von 500 mm/min. Entscheidend für die Berechnung des Weiterreißwiderstand sind die maximale Kraft und die Dicke der Probe. Wie im Zugversuch werden auch hier fünf Prüfungen für jedes Material durchgeführt.[13]

### Rückprallelastizität (DIN 53512):

Für die Rückprallelastizität wurde ein Rückprallgerät verwendet. Es handelt sich dabei um einen Pendelhammer, welcher mit einer definierten Kraft auf den Prüfkörper schlägt. Nach dem Aufschlag wird der Pendelhammer aufgrund des Rückstoßes ausgelenkt. Diese Auslenkung dient als Berechnungsgrundlage für die Rückprallelastizität.

Der Pendelhammer besitzt einen Durchmesser von 15 mm und ein Gewicht von 0,255 kg. Die Länge des Pendels ist mit 200 mm definiert.

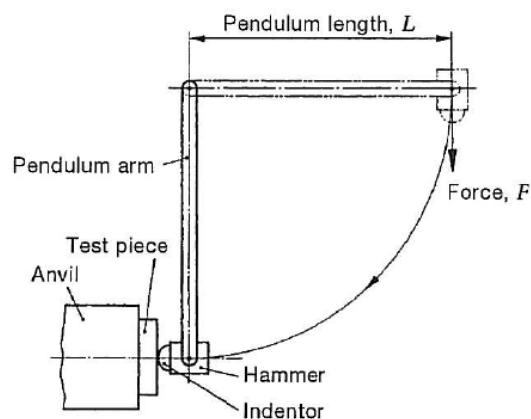


Bild 3.3.3: Schematische Darstellung des Pendelhammers [14]



**Bild 3.3.4:** Gerät zur Messung der Rückprallelastizität

Zur Vorbereitung der Prüfung wird der Prüfkörper eingespannt. Geprüft werden fünf Prüfkörper. Dies sollte so geschehen, dass kein Verrutschen möglich ist. Die verwendeten Prüfkörper besitzen eine Dicke von ca. 6 mm und haben damit eine Abweichung in

den zu erwartenden Ergebnissen, da als Standarddicke 12,5 mm in der Norm angegeben ist. Es ist jedoch zulässig die 6 mm zu prüfen. Nach dem Einspannen wird die Prüfung gestartet. Der Pendelhammer wird fünf mal angehoben und fallen gelassen. Die Maschine arbeitet dabei voll automatisch und gibt am Ende den durchschnittlichen Wert der Rückprallelastizität an [14]. Die Berechnung erfolgt über folgende Formel:

Rückprallelastizität:

$$R = 100 \frac{h_R}{h_0}$$

- R Rückprallelastizität
- $h_R$  Rückprallhöhe
- $h_0$  Anfangshöhe

**Abrieb** (DIN ISO 4649):

Die Prüfung des Abriebs erfolgt mit einer Abriebprüfmaschine. Die Abriebprüfmaschine folgt im Aufbau der Norm. Sie besteht aus einem Objektträger und einem drehbaren Zylinder auf dem ein Schmirgelpapier mit definierter Schärfe aufgebracht ist. Der Zylinder hat einen Durchmesser von 150 mm und eine Länge von ca. 500 mm. Zusätzlich muss der Zylinder eine Geschwindigkeit von  $40 \text{ min}^{-1}$  aufweisen. Der Objektträger muss seitwärts verschiebbar sein, so dass der Probekörper die Länge des Zylinders abfahren kann. Es ist auch nötig, dass der Probekörper 2 mm aus seiner Halterung heraus ragt. Daher muss der Objektträger in der Lage

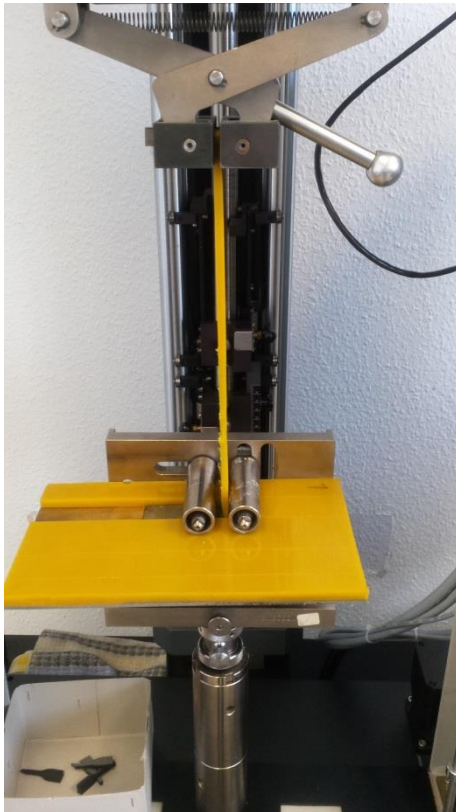
sein, den Probekörper mit einem Durchmesser von 16 mm und einer Mindestdicke von 6 mm zu halten und die eben gewünschten 2 mm abstehen zu lassen. Ein gewisser Abstand ist notwendig da im Falle von sehr wenig abriebfesten Materialien ein großer Volumenverlust stattfindet und damit die Wahrscheinlichkeit besteht, dass der Objektträger selbst bereits den Zylinder berührt.



**Bild 3.3.5: Abriebprüfung**

Bevor die eigentlichen Prüfkörper der Abriebprüfung unterzogen werden, muss die Prüfung mit einem Referenzelastomer drei mal durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Vorprüfungen dienen später dazu, die Angriffsschärfe des Schmirgelbogens zu bestimmen. Erst danach werden die regulären Prüfkörper für die Durchführung verwendet. Im Anschluss erfolgen noch einmal drei Prüfungen an einem Referenzelastomer. Die Anpresskraft beträgt in diesem Fall 10 N und der zurückgelegte Weg muss 40 m betragen. Zwischen den Prüfungen der einzelnen Körper wird der Schmirgelbogen mit einer Bürste oder einer Maschine mit Saugschlauch gereinigt, da sich ansonsten zu viele Materialreste im Schmirgelbogen sammeln und die Angriffsschärfe reduzieren.[16]

### **Haftung auf Stahl** (in Anlehnung an DIN ISO 813):



**Bild 3.3.6: Haftung auf Stahl (AU)**

Für die Haftung auf Stahl wurden jeweils zwei Platten für jeden Werkstoff und Haftmittel vorbereitet. Auf jeder Platte sind zwei Streifen für die Prüfung eingeschnitten. Es werden also jeweils vier Prüfungen durchgeführt. Verwendet wird eine Universalprüfmaschine mit dem entsprechenden Aufsatz, der für diese Prüfung notwendig ist. Es ist darauf zu achten, dass mit dem Aufsatz die 90° Schälwinkel erreicht werden. In Abweichung zur DIN ISO 813 wird das von TIPTOP Elbe standardisierte Verfahren angewandt. Der eingeschnittene Streifen ist 30 mm statt 25 mm breit und die Laufgeschwindigkeit der Traverse beträgt 100 mm/min statt 50 mm/min. Die Durchführung beginnt mit dem Einlegen der Platte in die dafür vorgesehene Vorrichtung mit dem Einspannen des Materialstreifens in die Klemme. Es folgt ein kleiner Einschnitt mit einem scharfen Messer an der Berüh-

rungsebene von Stahlplatte und Polyurethan. Dann wird die Prüfung gestartet, bis zum Abreißen des Materials oder bis die Länge der Platte ausgeschöpft ist. Aufgezeichnet wird die Trennkraft, welche sich aus der Kraft zum Lösen geteilt durch die Breite des eingeschnittenen Streifens ergibt.[17]

### **Hydrolysebeständigkeit** (Verfahren von TIPTOP Oberflächenschutz Elbe GmbH in Anlehnung an DIN ISO 1817):

In der Hydrolyseprüfung werden fünf Prüfkörper betrachtet. In jeden der Prüfkörper ist ein Loch gebohrt um ihn auf die Halterung zu stecken, sowie eine Markierung in Form von abgeschnittenen Ecken, so dass die Prüfkörper den Messwerten zugeordnet werden können. Geprüft wird mit destilliertem Wasser bei 60°C über einen Zeitraum von 28 Tagen. Es wird zu Beginn das Gewicht, die Härte, die Dicke und die Dichte gemessen. Diese Messungen werden nach 7 Tagen und nach 14 Tagen wiederholt, sowie nach 28 Tagen, wenn die Prüfung beendet ist. Bei den Gefäßen handelt es sich um Glasgefäße mit ausreichend großem Volumen, die das fünfzehnfache des Volumens der Probekörper umfassen. Die Probekörper werden auf ein

Glasgestell gesteckt und dann mit dem Gestell in das Gefäß gegeben. Dann ist das Gefäß mit der Flüssigkeit zu füllen. Dabei sollte darauf geachtet werden möglichst wenig Luftblasen am Probekörper entstehen zu lassen. Die Probekörper benötigen genügend Abstand zu den anderen Probekörpern sowie zur Außenwand der Gefäße. Auch die Messung des PH-Werts wird durchgeführt. Erst im Anschluss sind die Gefäße mit einem Deckel zu verschließen. Hierbei sollte möglichst wenig Luft im Gefäß verbleiben und die Prüfkörper sind vollständig mit Flüssigkeit zu bedecken. Um die gewünschte Temperatur zu erreichen, werden Temperieröfen verwendet. Es muss regelmäßig kontrolliert werden, wie groß der Flüssigkeitsverlust während der Prüfung ist, um die gewünschte Menge an Flüssigkeit zu erhalten. Zu diesem Zweck ist destilliertes Wasser aufzufüllen, welches durch Absorption oder Verdunstung verloren gegangen ist.



**Bild 3.3.7: Hydrolysegefäß**

Nach 7 Tagen sind die Prüfkörper das erste mal nach dem Eintauchen zu prüfen. Dazu sind die Gefäße aus dem Ofen zu nehmen. Im Anschluss werden die Prüfkörper aus der Flüssigkeit entnommen und mit lauwarmen Leitungswasser abgewaschen. Danach wird sämtliche Flüssigkeit abgetrocknet. Da ein Vergleich mit den Ausgangswerten bei 23°C angestrebt wird, sind die Prüfkörper ca. 1 Stunde bei Labortemperatur konditioniert. Erst dann erfolgt die Messung von Gewicht, Härte, Dicke und Dichte. Auch der PH-Wert und die optische Veränderung der Prüfliquidität bzw. der Prüfkörper wird festgehalten. Dann werden die Prüfkörper wieder, wie beschrieben eingetaucht und im Ofen gelagert. Dieser Vorgang wird wiederholt für die festgelegten Prüftage.[18]

Es ist darauf zu achten, dass die Prüfkörper nach Möglichkeit eine sehr ähnliche Dicke haben. Was bei dem Großteil der Prüfplatten nicht möglich ist. Für zwei der EU Platten sind sehr ähnliche Werte, was die Dicke betrifft, erreicht worden. Für AU, G und die 12 Stunden getemperte EU Platte konnte dies nicht realisiert werden. Augenmerk wird aber eher auf die Änderung der Härte und der Quellung gelegt. Diese sind in diesem Fall besser zu vergleichen als die Änderung der Abmaße.



#### **4. Auswertung**

Die Auswertung gestaltet sich zum Teil schwierig, da durch die offene Form mit der die Prüfplatten gegossen wurden eine unregelmäßige Dicke der Platten entsteht. Dies hat leichte Abweichungen in der Härtemessung, der Hydrolyseprüfung, bei der Haftung auf Stahl und der Rückprallelastizität zur Folge. Für die Auswertung der Weiterreißwiderstände oder des Zugversuchs wurden einheitliche 2 mm Platten verwendet. Auch bei der Abriebprüfung spielt dies eine eher untergeordnete Rolle, da hier nur auf die 2 mm Abstand geachtet wird, die der Prüfkörper aus der Halterung heraus ragen muss.

Es ist prinzipiell festzuhalten, dass es sich bei der gewünschten Anwendung um einen Verschleißschutz handelt. Das bedeutet, die durch die Prüfungen erhaltenen Werte sind nur eine grobe Richtlinie, denn selbst das Anforderungsprofil, welches vorgegeben wurde ist womöglich keine Optimallösung. Denn die einzelnen Werkstoffe besitzen unter Umständen bessere Verschleißresistenz mit einem anderen Anforderungsprofil. Auch bieten die für sich einzelnen Untersuchungen nur bedingt Hinweise auf die Eignung der Stoffe in diesem Gebiet. Die jeweiligen Polyurethane sind in ihrer Funktion ein Verschleißschutz, allerdings wurden diese Werkstoffe in einem Fall der Rohrrinnenbeschichtung mit abrasiven und hydrolytisch wirkenden Transportgütern nicht erprobt. Es gibt bereits Polyurethane die für die Rohrrinnenbeschichtung Anwendung finden. Da die Variationsfülle der unterschiedlichen Polyurethane, sowie die bisher fast nur in den Bereich des Schleudergusses fallende Auftragsmethodik, sich von den hier benutzen Verbindungen differenzieren, kann man keine sehr genauen Prognosen über die Lebensdauer der Beschichtung machen.

Die Auswertung bezieht sich lediglich auf unterschiedliche Temperzeiten. Die Temperatur selber wurde bei der Herstellung der Prüfplatten nicht verändert. Grund dafür ist parallel laufende Fertigung von Produkten. Eine Änderung der Temperatur im Temperofen hätte demnach auch Auswirkungen auf die Eigenschaften der zeitgleich getemperten Produkte.

## 4.1 Prüfungen zur mechanischen Belastbarkeit

Wie in Abschnitt 3.1 bereits erläutert, basiert die Vorauswahl auf der angenommenen Hydrolysestabilität des Polyethers EU. Dennoch wird in diesem Abschnitt der Arbeit ein Vergleich der verschiedenen Materialien mit einer Temperzeit von 16 Stunden durchgeführt, also zunächst AU-, G- und 16h-EU-Material und zusätzlich dann der Vergleich der unterschiedlichen Temperzeiten des EU. Die Hydrolyseprüfung mit den jeweiligen Messergebnissen wird im Abschnitt 4.2 berücksichtigt.

Schon während der ersten Prüfungen haben sich die Vermutungen bestätigt. Das G-Material besitzt die besten mechanischen Eigenschaften bei Betrachtung der Anforderungen. EU und AU liegen darunter in ähnlichen Bereichen, jedes mit eigenen Vor- und Nachteilen. Im Folgenden sind die Ergebnisse festgehalten:

**Tabelle 4.1.1: Ergebnisse für 16 h Temperzeit**

<b>Material</b>	<b>H<sub>A</sub> 3 s</b> [Sh-A]	<b>H<sub>A</sub> 15 s</b> [Sh-A]	<b>σ</b> [MPa]	<b>ε</b> [%]	<b>ΔV<sub>rel</sub></b> [mm <sup>3</sup> ]	<b>T<sub>s</sub></b> [N/mm]	<b>R</b> [%]
<b>AU</b>	82,2	79	36,6	435	31,1	36,39	27,6
<b>s</b>	1,0	0,82	5,4	18	5,4	3,16	1,3
<b>G</b>	87,9	86,5	42,4	525	12,2	52,73	39,4
<b>s</b>	0,7	0,53	5,1	26	1,9	2,38	1,9
<b>EU</b>	87,8	85,6	26,2	353	22,9	31,83	48,4
<b>s</b>	0,5	0,52	5,6	14,4	6,3	4,1	0,6

Wie bereits erwähnt, entsprechen die Ergebnisse tendenziell den Erwartungen. Die Werte für die unterschiedlichen Polyurethane AU, G und EU sind der Tabelle 4.1.1 zusammengefasst. Jedes der Polyurethane wurde mit 16 Stunden getempert.

Ganz eindeutig liegt das Polyester G mit den physikalischen Prüfwerten weit vor den anderen verwendeten Polyurethanen und erreicht das Anforderungsprofil der Werte in den meisten Fällen. Lediglich die Elastizität liegt 5% unter dem geforderten Wert. Besonders auffällig dabei ist die im Zugversuch ermittelte Zugfestigkeit und Reißdehnung. Diese liegen sowohl im Bezug auf die Anforderung als auch im Vergleich mit EU weit darüber.



Tabelle 4.1.2: Ergebnisse für unterschiedliche Temperzeiten EU

Material	H <sub>A</sub> 3 s	H <sub>A</sub> 15 s	σ	ε	ΔV <sub>rel</sub>	T <sub>s</sub>	R
Temperz.	[Sh-A]	[Sh-A]	[MPa]	[%]	[mm <sup>3</sup> ]	[N/mm]	[%]
<b>EU 8h</b>	83,5	81,2	28,0	425	34,2	22,43	47,4
s	0,5	0,79	2,1	4	7,7	3,33	1,2
<b>EU 12h</b>	84,8	82,2	23,0	381	28,5	24,1	46,9
s	0,8	0,52	3,5	20,4	5,4	2,81	2,0
<b>EU 16h</b>	87,8	85,6	26,2	353	22,9	31,83	48,4
s	0,5	0,52	5,6	14,4	6,3	4,1	0,6

Die unterschiedlichen Temperzeiten des EU zeichnen ein interessantes Bild (Tabelle 4.1.2). Die Vermutung, dass sich die Temperzeit von 8 Stunden sich erheblich negativ auf die Gesamtqualität auswirkt, kann durch die durchgeführten Tests und deren Auswertung nicht vollständig bestätigt werden. So sind die ermittelten Werte aus dem Zugversuch, entgegen der Erwartung, für die 8 Stunden Temperzeit in einem besseren Bereich und sogar näher an (Zugfestigkeit) bzw. über (Reißdehnung) dem Anforderungsprofil.

Härte:

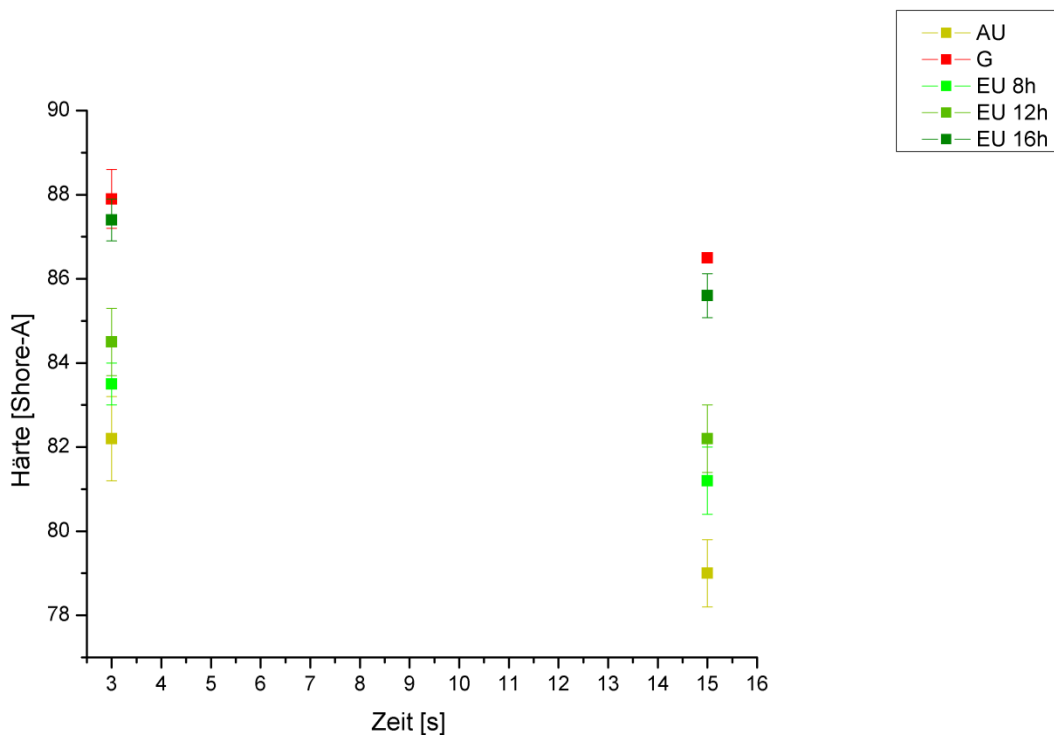


Diagramm 4.1.1: Härte-Zeit-Diagramm

**Tabelle 4.1.3: Härtewerte**

	AU	G	EU 8h	EU 12h	EU 16h
<b>3 s</b>	82,2	87,9	83,5	84,8	87,8
<b>s</b>	1,0	0,7	0,5	0,8	0,5
<b>3 s (elekt.)</b>	82,1	89,0	81,5	83,1	86,1
<b>s</b>	0,5	0,4	0,4	0,5	0,3
<b>15 s</b>	79	86,5	81,2	82,2	85,6
<b>s</b>	0,82	0,53	0,79	0,52	0,52

In der Tabelle 4.1.3 sind neben den per Hand gemessenen Ergebnissen auch die Ergebnisse der Prüfung durch das elektronische Härtemessgerät SHA.D3 aufgeführt. Diese liegen beim EU zwischen denen von Hand gemessenen 3 s bzw. 15s. Für AU entspricht es dem bei 3 s und für das G-Polyurethan sogar noch über dem bei 3 s bei 89 Shore-A. Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Messung per Hand eine gewisse Ungenauigkeit besitzt. Ebenso ist es Tatsache dass die Härte auch innerhalb der Platte Unterschiede aufweisen kann. Der Vergleich der Härteprüfung von 3 s und 15 s ist in dem Diagramm 4.1.1 aufgeführt. Je länger geprüft wird umso geringer wird die Härte aufgrund der viskolelastischen Eigenschaften des Polyurethans. Während der Prüfung ist bereits ab 10 Sekunden zu erkennen, dass die Härte nur noch in einem geringen Maße einer Änderung unterliegt. Im Durchschnitt liegt die Änderung bei 2,3 Punkten. Dabei ist die größte Änderung bei dem TDI-Polyester AU zu verzeichnen. Die wenigsten Auswirkungen sind beim G-Material auszumachen. Die Unterschiede für die auf die Temperzeiten geprüften EU-Ethern liegen in einem ähnlichem Bereich. Dadurch lässt sich bereits ein Rückschluss auf die Eigenschaften der Polyurethane ziehen.

## Spannung und Dehnung:

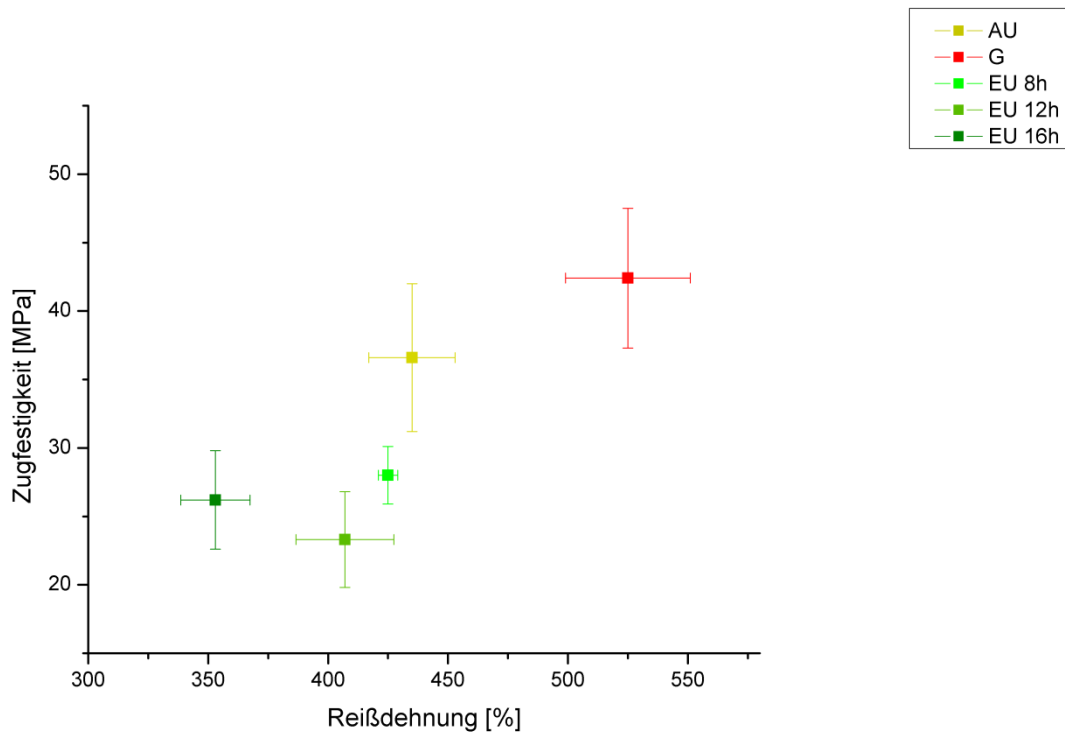


Diagramm 4.1.2: Zugfestigkeit-Reißdehnungs-Diagramm

Die durch den Zugversuch ermittelten Werte wurden im Zugfestigkeit-Reißdehnungs-Diagramm festgehalten (Diagramm 4.1.2). Hier kann ein weiterer Eindruck vom Eigenschaftsniveau der Polyurethane gewonnen werden. Wie zu erwarten, sind die Werte der Polyester entsprechend höher als die des Polyethers. Sowohl G als auch AU liegen über dem geforderten Anforderungsprofil von 30 MPa und 400 %.

Alle EU Varianten sind vom Wert der Spannung in einem ähnlichen Bereich. In der Dehnung besteht allerdings ein großer Unterschied und erstreckt sich über 353% für 16 Stunden Temperatur bis hinzu 425% für 8 Stunden. Auch ist die Spannung des 16 Stunden getemperten EU ein wenig geringer. Diese liegt 1,8 MPa darunter. Für 12 Stunden sind es 5 MPa. Die Ergebnisse aus dem Zugversuch widersprechen dem Ausgang der anderen Prüfungen. Denn in diesen ist eine klare Steigerung der mechanischen Eigenschaften zu erkennen, je höher die Temperaturzeit liegt. Eine Erklärung für dieses Verhalten erfolgt nach der Auswertung der einzelnen Diagramme.

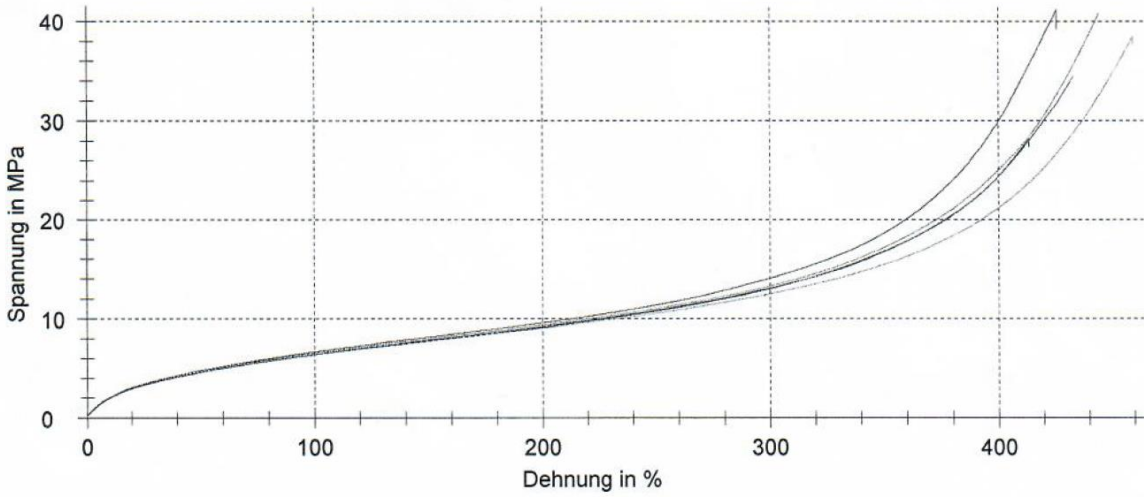


Diagramm 4.1.3 Spannungs-Dehnungs-Diagramm (AU-Material)

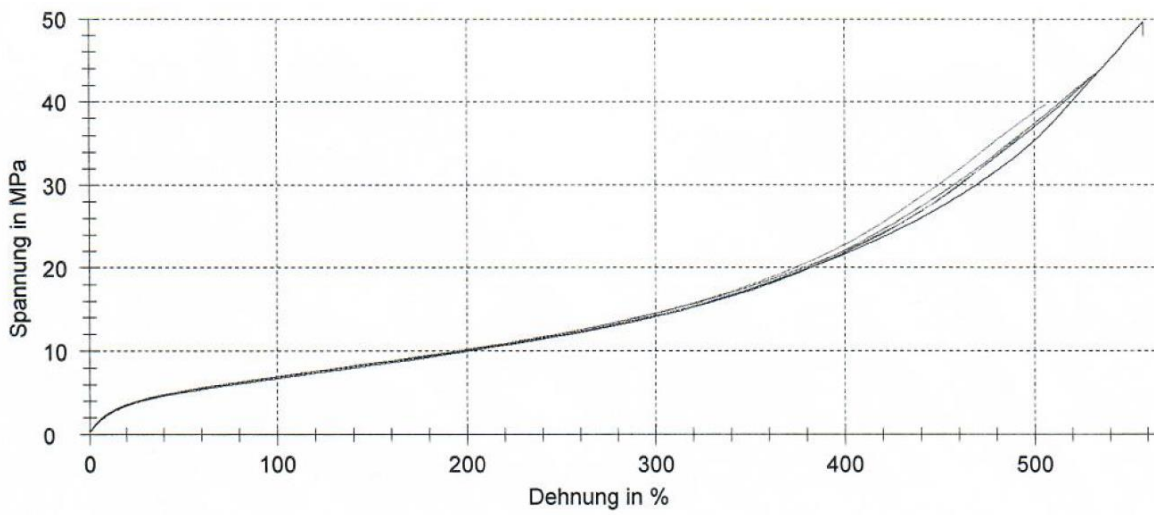


Diagramm 4.1.4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (G-Material)

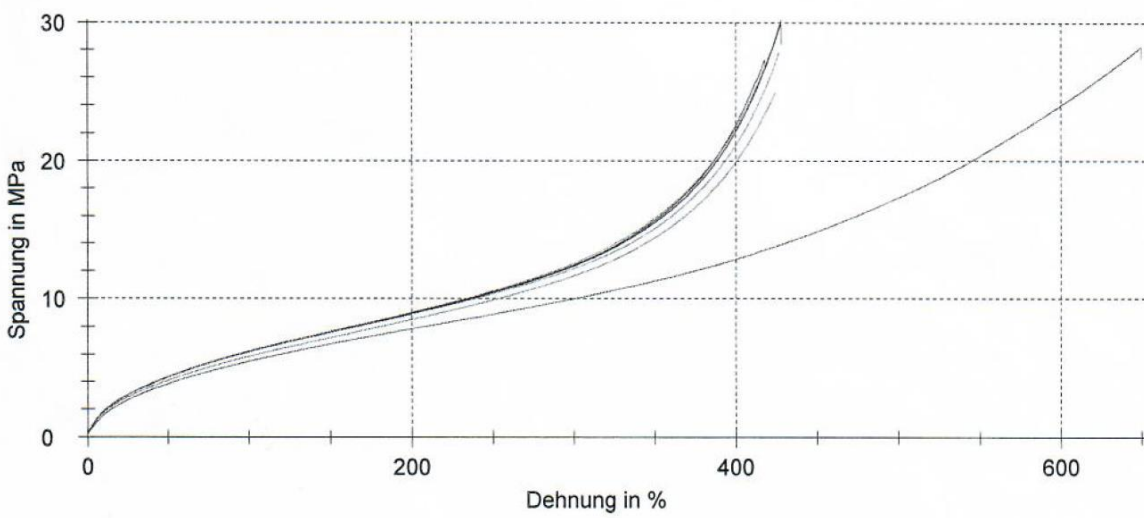


Diagramm 4.1.5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (EU Material; 8 h getempert)

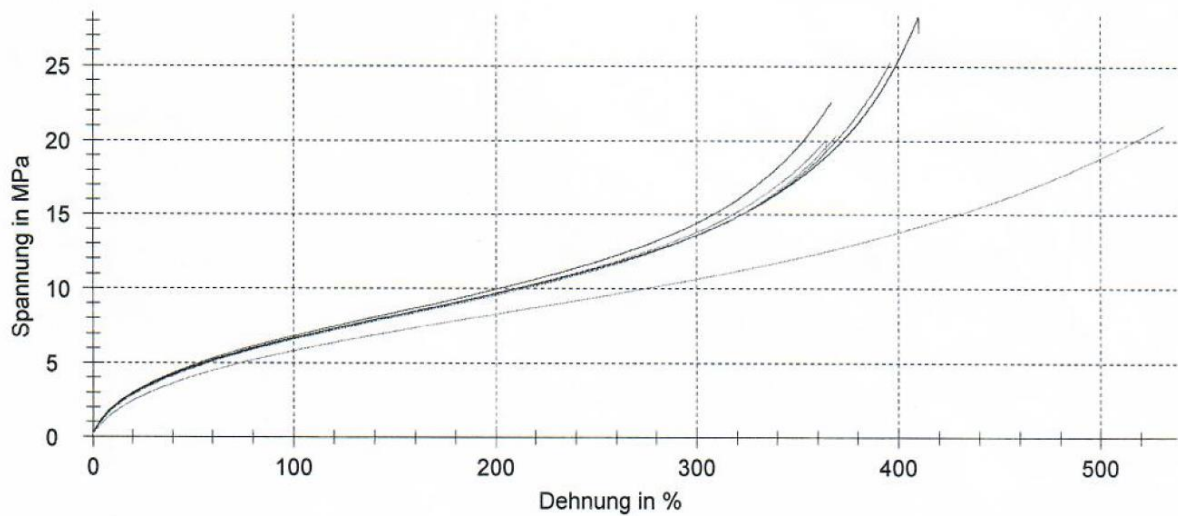


Diagramm 4.1.6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (EU-Material; 12 h getempert)

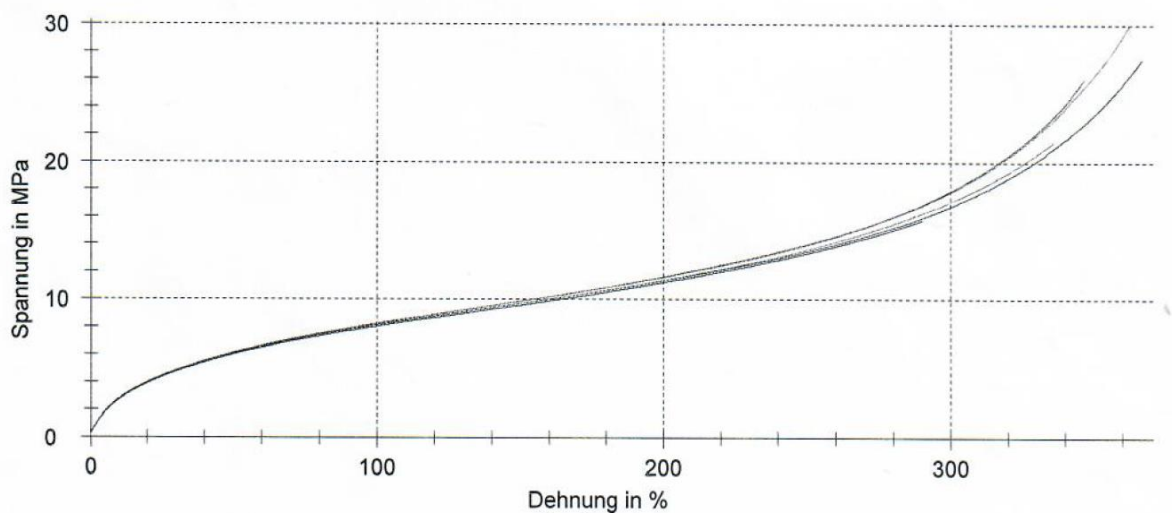
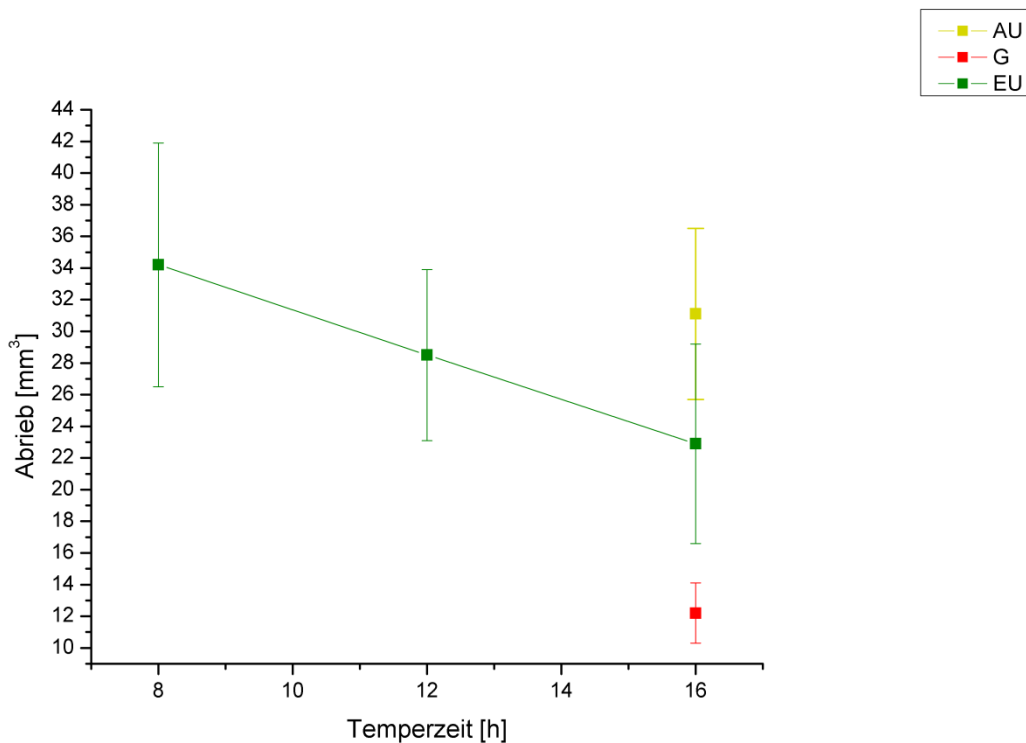


Diagramm 4.1.7: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (EU-Material; 16 h getempert)

Abrieb:

Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, wird auf den Abrieb durch den Anwendungsfall besonderes Augenmerk gelegt. Der Abrieb liegt bei jedem der geprüften Polyurethane im Anforderungsbereich. Auch das mechanisch weniger belastbare Polyether zeigt gute Werte, sogar im nicht vollständig getemperten Zustand. Es existiert eine konstante Verringerung des Abriebs, je länger die Platte im Ofen gelagert wurde (Diagramm 4.1.8). Gefordert waren unter  $50 \text{ mm}^3$  Abrieb, das G-Material liegt bei  $12,2 \text{ mm}^3$ .

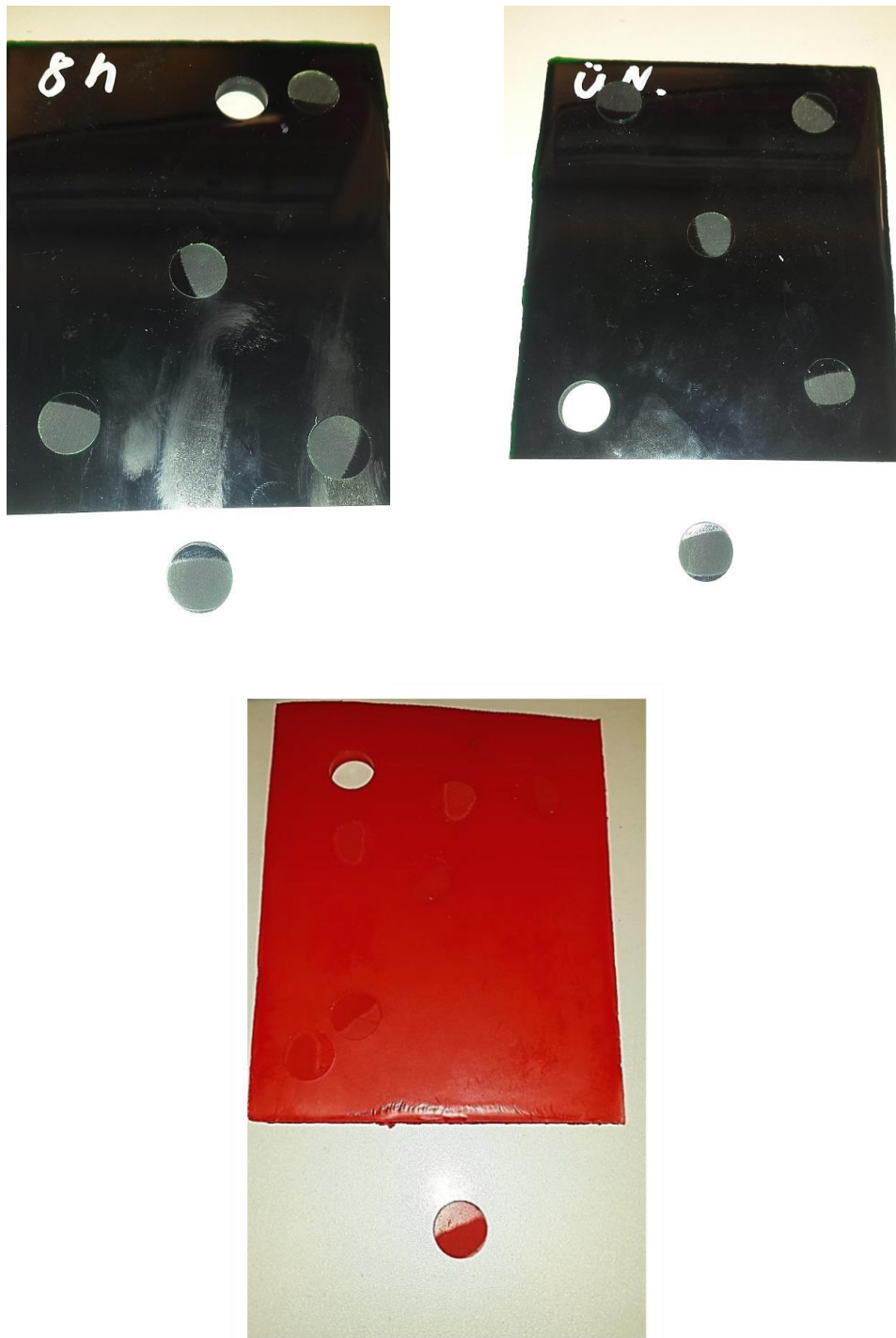


**Diagramm 4.1.8: Abrieb-Temperzeit-Diagramm**

Die durch die Abriebprüfung ermittelten Werte sind bei der geforderten Härte allerdings nicht aussagekräftig. Vor allem beim G und 16 Stunden EU Polyurethan. Durch die Härte bietet das Material einen großen Widerstand der Anpresskraft gegenüber. Somit liegt der Prüfkörper nicht vollständig auf dem mit Schleifpapier beschichteten Zylinder auf. Da ein Teil der Fläche nicht durch den Schleifvorgang betroffen ist, kann von einer Verfälschung der Ergebnisse ausgegangen werden. Allerdings wirkt durch die geringere Auflage ein größerer Druck auf die beschliffene Fläche, so dass in diesem Bereich mehr Material abgetragen wurde. Dies hat jedoch nur geringen Einfluss auf die Prüfergebnisse.

Wie auf den Bildern (Bild 4.1.1) zu erkennen ist, sind für das G-Material schätzungsweise zwischen 25 % und 50 % der Fläche nicht abgeschliffen. Für die Oberfläche des EU (8 Stunden) ca. 10 % bis 30 % und für EU (16 Stunden) ca. 20 % bis 40 %. Diese Werte sind grobe Schätzungen und keinesfalls als korrekt zu betrachten. Sie dienen lediglich zur Veranschaulichung. Denn selbst wenn man den durch die Prüfung ermittelten Wert um den Prozentsatz erhöht, bleibt man in akzeptablen Grenzen für die Anforderung. So wäre der Wert des G-Polyurethans bei einer Verdopplung der Fläche  $24,4 \text{ mm}^3$ . Für EU (16 Stunden) bei  $38,2 \text{ mm}^3$ , wenn es sich um 60 %, der mit dem Schleifpapier in Kontakt gekommen Fläche handelt. Bei

jedem der Polyurethane bleibt der Abrieb unter  $50 \text{ mm}^3$ . Auch das Bild des Diagramms bleibt in der Form wie in Diagramm 4.1.3, nur liegen die Werte insgesamt höher.



**Bild 4.1.1: Prüfplatten mit Abriebprüfkörper nach dem Versuch; EU 8h (links), EU 16h (rechts), G (unten)**

## Rückprallelastizität und Weiterreißwiderstand:

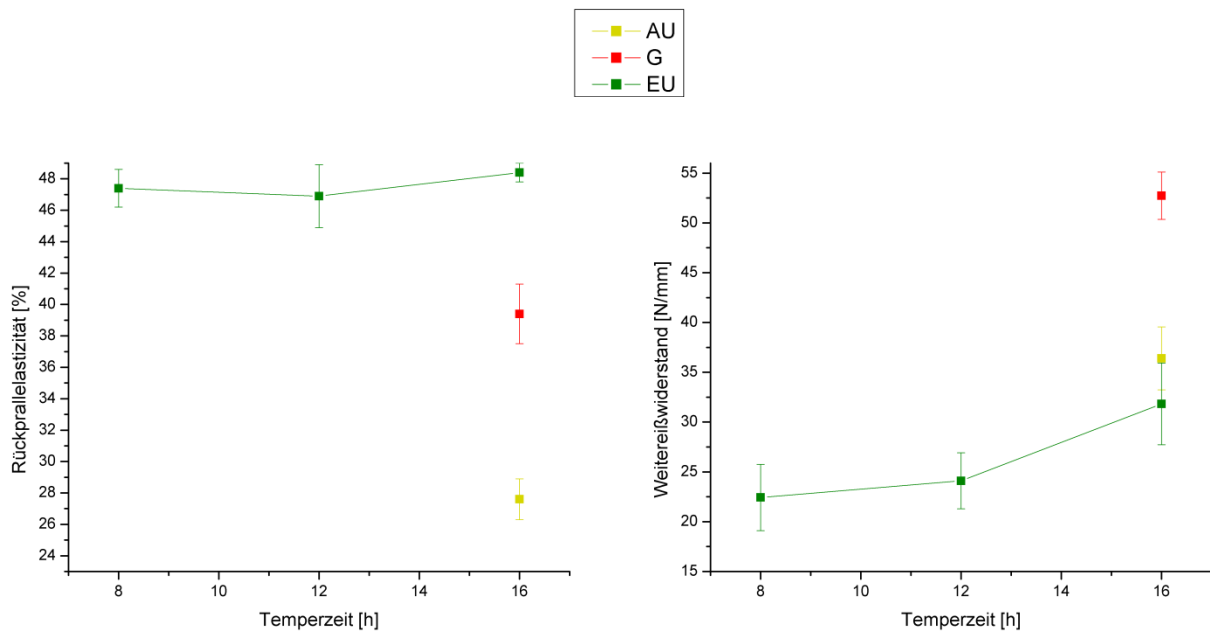


Diagramm 4.1.9: Rückprallelastizität-Temperatur-Diagramm (links)

Diagramm 4.1.10: Weiterreißwiderstand-Temperatur-Diagramm (rechts)

Die Rückprallelastizität ist ein Maß für das Dämpfungsverhalten eines Stoffes und damit für die Relaxationszeit. Wie aus dem Diagramm 4.1.4 zu entnehmen ist, besitzt EU die höchste Rückprallelastizität. Der Unterschied zwischen den einzelnen Temperstufen des EU ist jedoch nur gering. AU besitzt mit einem Abstand von 11,8 %-Punkten die geringste Elastizität. Darauf folgt das G-Material mit 39,4 %.

Bei einer Krafteinwirkung auf EU-Material stellt sich die hierbei verformte Fläche schnell auf elastische Weise zurück. Dies sorgt für einen höheren Rückprall des in diesem Fall verwendeten Pendelhammers. Für AU oder G kann entweder davon ausgegangen werden, dass lediglich die Rückstellung der inneren Struktur mehr Zeit in Anspruch nimmt, oder aber dass zu der elastischen Verformung ein größerer Teil der plastischen Verformung stattfindet und daher die Elastizität nicht die Werte des Polyethers erreicht. Für den Anwendungsfall könnte daraus geschlossen werden, dass das EU im Falle von Stoßbeanspruchung, wie es durchaus beim Transport von Stoffen vorkommt, länger in der Ausgangsform bleibt.

Die bessere Rückprallelastizität könnte auf eine geringere Kristallinität als bei den Polyestern AU und G zurückzuführen sein. Diese Aussage deckt sich mit der Tatsache dass EU eine geringe Dichte hat und damit einen höheren Anteil an amorphen Bereichen. Amorphe Bereiche sind nicht so dicht gepackt wie kristalline und besitzen damit eine geringere Dichte.



Der Weiterreißwiderstand zeigt das typische Bild, der bisher im Unternehmen bekannten Prüfungsauswertungen. Das G-Polyurethan liegt mit fast 52,73 N/mm weit über den Werten der anderen Stoffe. Darauf folgt AU mit 36,39 N/mm und EU mit 31,83 N/mm. Je geringer dann die Temperzeit des EU wird, umso geringer werden auch die im Versuch gemessenen Werte des Weiterreißwiderstandes.

Die Auswertungsdaten der mechanischen Prüfungen sind im Bezug auf die im Zugversuch erhaltenen Daten widersprüchlich. Das länger getemperte EU besitzt schlechtere Werte als das nur 8 Stunden getemperte. Entweder handelt es sich hier um einen Messfehler oder aber um die Tatsache, dass aufgrund eines Fehlers die EU Platten nicht am selben Tag gegossen wurden. Dementsprechend könnte die Zeit, die das Material in der Maschine war, der Auslöser sein. Bisher hat sich im Unternehmen herausgestellt, dass frisches Material meist bessere mechanische Werte erreicht als wiedererwärmtes. Es besteht die Möglichkeit, dass aufgrund der längeren Zirkulation bei erhöhten Temperaturen das Ausgangsmaterial thermisch geschädigt wird und damit bereits die vom Endprodukt erwarteten Eigenschaften verändert werden. Die bisher durchschnittlich erreichten Werte für die Prüfung sind im Zugfestigkeit-Reißdehnung-Diagramm (Diagramm 2.1.) dargestellt.

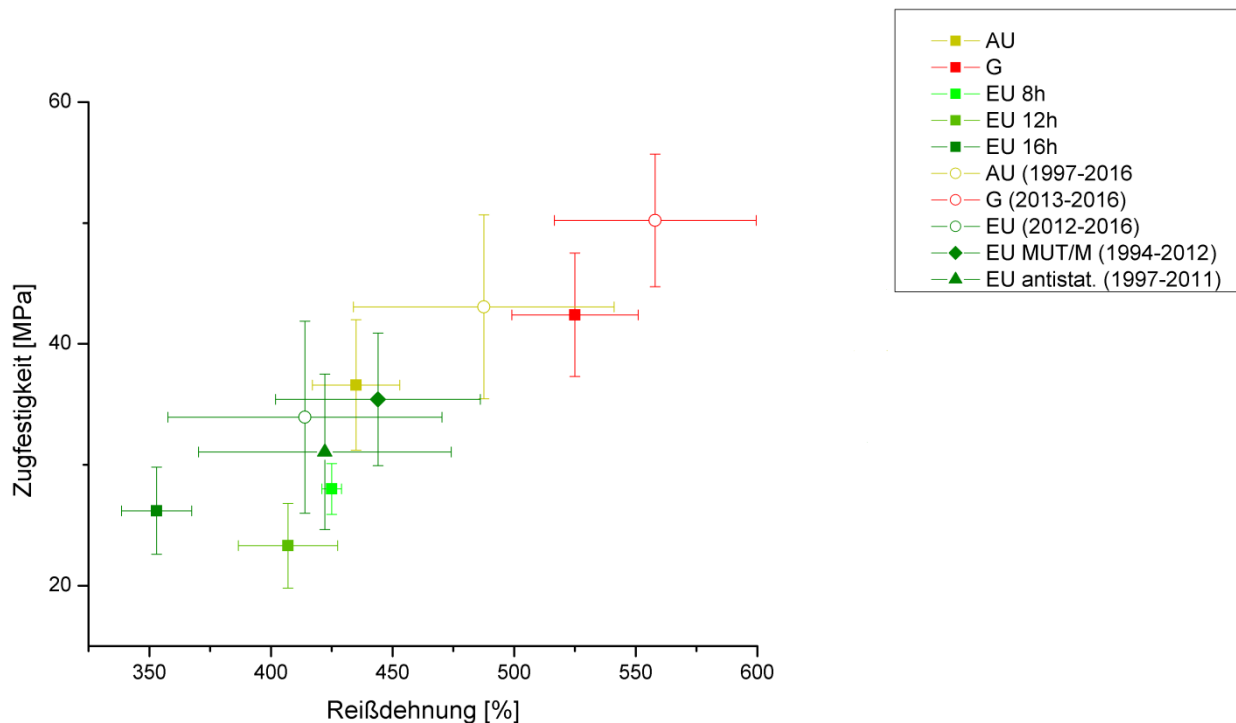


Diagramm 2.1.11: Zugfestigkeit-Reißdehnung-Diagramm

Hier werden die Durchschnittswerte der bisher aufgezeichneten Ergebnisse für EU, AU und G dargestellt, aber auch weitere EU Variationen. Dazu zählen EU mit einem Antistatikum und das EU Material nicht mit 1705 sondern einem anderen Vernetzer (Mut/M). Mut/M wurde im Versuch nicht verwendet, da die Abriebwerte höher liegen.

## 4.2 Auswertung der Hydrolyseprüfung

Die Hydrolyseprüfung bildete zeitlich den Abschluss, der für die Bewertung der Materialien absolvierten Tests. Wichtig ist hierbei, wie sich die einzelnen Proben in dem Umgebungsmedium von destilliertem Wasser verhalten. Dabei geht es in diesem Fall nur um eine erste Einschätzung, ob die jeweiligen Polyurethane dem Medium widerstehen können oder ob bereits starke Veränderungen in Dichte, Masse und Härte auftreten. Auch die Färbung des Umgebungsmediums ist ein ausschlaggebender Faktor der Beurteilung. Sollte sich das Medium verändern, ist davon auszugehen, dass sich Stoffe aus den Proben diffundieren. Dies wäre ein Kriterium für verändernde Maßnahmen in Bezug auf eingemischte Stoffe, wie sie zum Beispiel zur Farbgebung dienen.

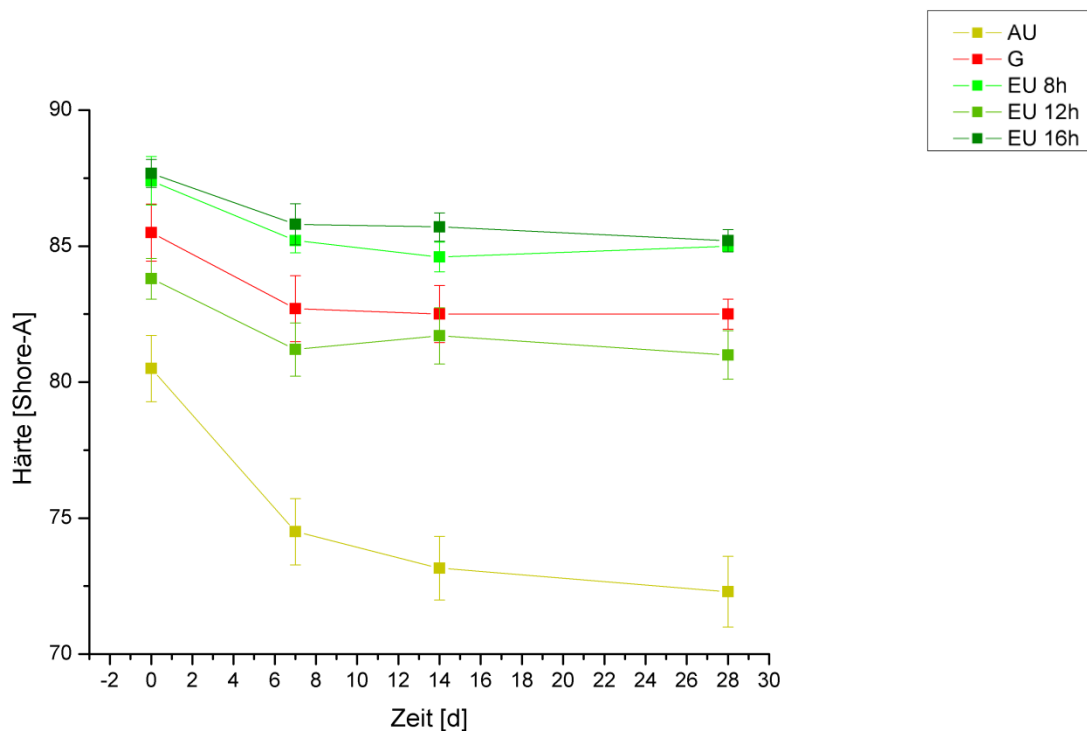


Diagramm 4.2.1: Härte-Zeit-Diagramm

Die Härteprüfung wurde als einzige Kontrolle der mechanischen Werte durchgeführt. Diese ist schnell zu überprüfen und benötigt keine speziellen Vorrichtungen oder Prüfkörperformen, die mit denen in der Hydrolyseprüfung verwendeten Gefäße und Objektträger in Konflikt kommen. Des Weiteren ist hierbei nicht der absolute Wert entscheidend, sondern die Veränderung der Härte über die Dauer der Prüfung, denn diese ist ausschlaggebend für den Dauergebrauch des Materials in einem medienbelasteten Anwendungsgebiet. Die Ausgangshärte ist für Polyurethane über das Mischverhältnis anzupassen. Daher besteht bereits die Möglichkeit, die Anfangshärte so zu wählen, dass der Abfall der Härte ausgeglichen werden kann.

Die hier im Versuch zu beurteilenden Polyurethane verhalten sich weitestgehend erwartungsgemäß. Laut Diagramm 4.2.1 beginnen alle bei der ersten Messung mit den geforderten  $85 \pm 5$  Shore-A. Dabei ist AU mit 80,5 Sh-A am niedrigsten und EU (16 Stunden) mit 87,7 Sh-A am höchsten. Wie zu vermuten war, fällt die Härte nach den ersten 7 Tagen in destilliertem Wasser bei  $60^\circ\text{C}$  ab. Zurückzuführen ist dies auf die einsetzende Quellung in den Randbereichen des Polyurethans. Dabei wirkt das Wasser wie ein Weichmacher und lagert sich zwischen den Ketten ein. Der Intender des Handmessgeräts kann dadurch leichter und tiefer eindringen. Da es sich hier um vernetzte Polyurethane handelt, ist dieser Vorgang der Quellung durch die Engmaschigkeit behindert und verlangsamt das Vordringen des Wassers in das Innere des Materials, sobald die Außenbereiche mit dem Medium gequollen sind. Das erklärt den starken Abfall der Härte in den ersten Tagen und die Verringerung dessen in den folgenden Tagen, da die Aufnahmefähigkeit des Polyurethans ein Maximum erreicht und das folgende Wasser nur weiter in das Innere transportiert werden kann.

Für alle EU und für das G-Polyurethan sind die gemessenen Ergebnisse nach den 7 Tagen annähernd konstant mit nur geringen Abweichungen, wie z.B. EU 12h nach 14 Tagen. AU hat jedoch auch nach den ersten 7 Tagen eine erkennbare Verschlechterung der Härte. Dies könnte seine Ursache in stärkeren Quellungsvorgängen haben oder in der allen Polyestern eigenen schlechten Hydrolysebeständigkeit. Das heißt, die im Polyurethan enthaltenen Esterverbindungen werden durch angreifendes Wasser hydrolysiert und die Ketten gespalten. Mit der Verringerung der Kettenlänge erfolgt zeitgleich ein Abfall der mechanischen Eigenschaften. Diese Hydrolyse ist dabei autokatalytisch. Sowohl G als auch AU unterliegen diesem Prozess der Kettenspaltung stärker als EU, nur ist das AU scheinbar am anfälligsten für die Verringerung der Eigenschaften durch eben jene chemische Reaktion.

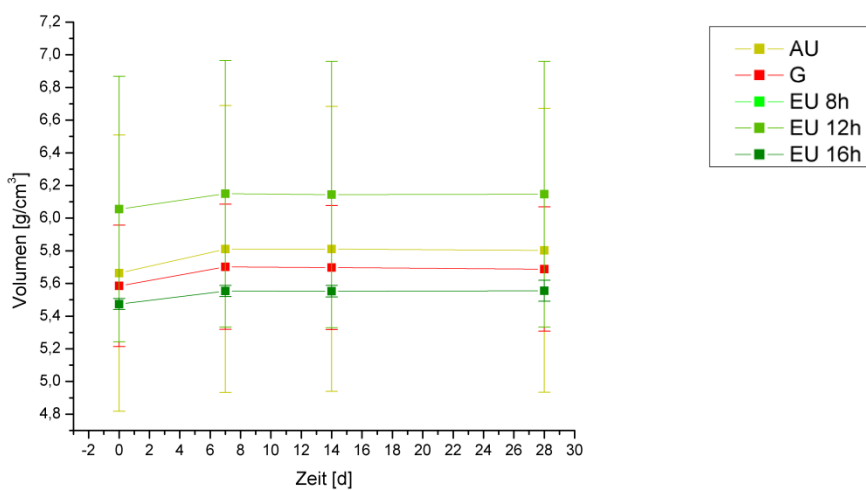
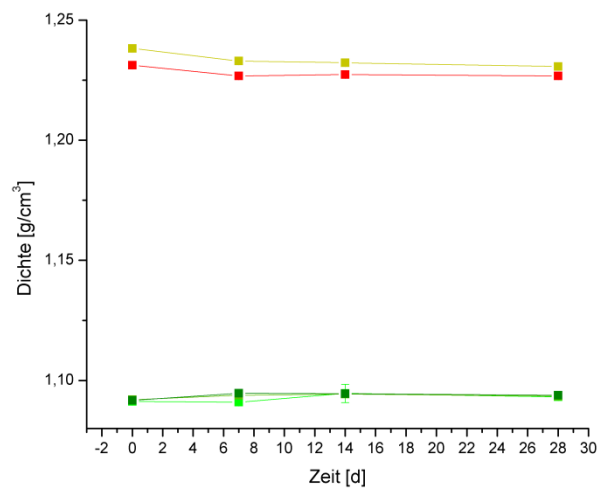
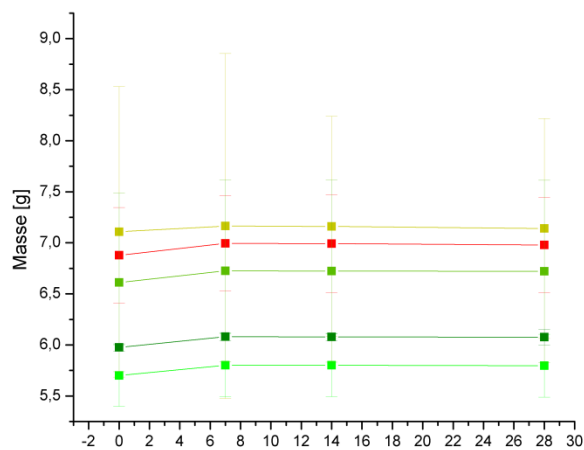


Diagramm 4.2.2: Masse-Zeit-Diagramm (links)

Diagramm 4.2.3: Dichte-Zeit-Diagramm (rechts)

Diagramm 4.2.4: Volumen-Zeit-Diagramm (unten)

Wie in den Diagrammen der Masse/Dichte/Volumen-Zeit-Diagramme (Diagramm 4.2.2-4.2.4) zu sehen ist, beginnen alle Stoffe mit einer Steigerung der Masse bis zur Überprüfung nach 7 Tagen. Ebenso steigt das Volumen. Dies sind Hinweise auf die bereits erwähnte Wasseraufnahme in den Außenbereichen der Stoffe. Jedoch existiert ein Unterschied im Wasseraufnahmeverhalten zwischen Polyether und Polyester. Im Falle der Polyether steigt die Dichte an, für die Polyester nimmt diese über den Zeitraum einer Woche ab. Im Fall der Polyether nehmen diese also prozentual mehr an Gewicht zu als an Volumen. Die Dichte steigt von  $1,0916 \text{ g/cm}^3$  durchschnittlich auf  $1,0944 \text{ g/cm}^3$  nach 14 Tagen (Mittelwert aller EU-Proben). Für die Polyester AU beträgt die Dichte zu Beginn  $1,2382 \text{ g/cm}^3$ , für G  $1,2312 \text{ g/cm}^3$ . Nach den 14 Tagen sinken diese auf  $1,2323 \text{ g/cm}^3$  und  $1,2273 \text{ g/cm}^3$ .

Die hohen Standardabweichungen werden durch die unterschiedlichen Dicken in den Platten hervorgerufen. Auch sind die Platten zu Unterscheidungszwecken in der Geometrie leicht verändert.



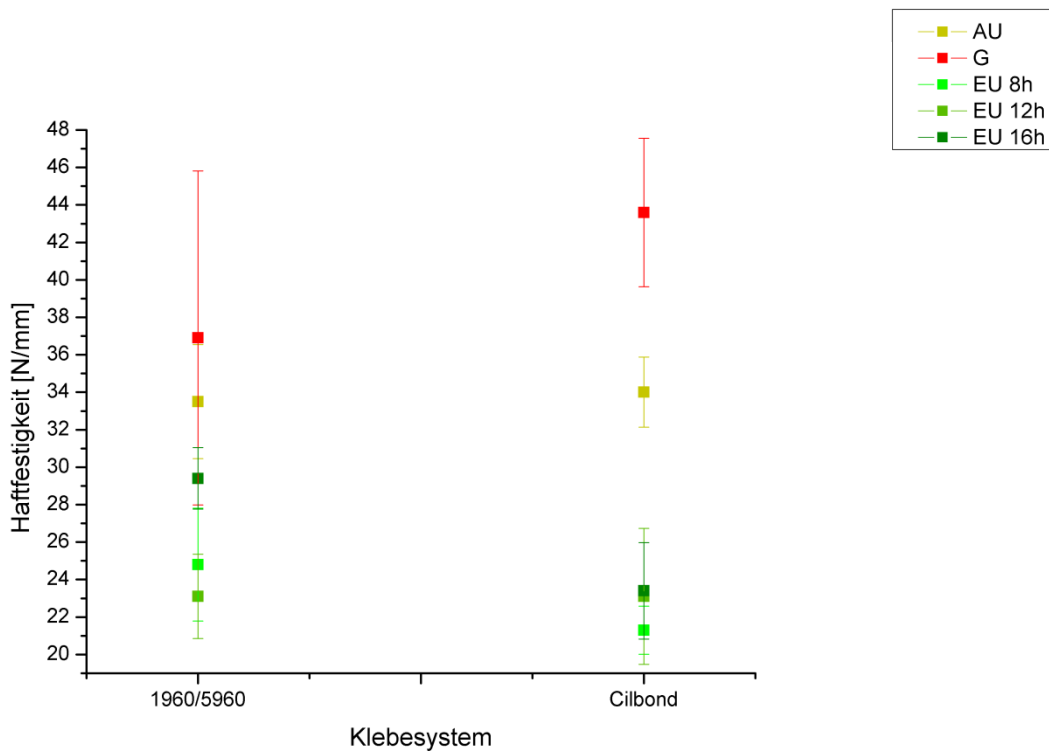
Bild 4.2.1: AU, G Gefäße nach 28 Tagen

Im Bild 4.2.1 sind einmal die farbliche Veränderungen des Mediums nach 28 Tagen festgehalten. Dies bezieht sich auf die beiden Hydrolyseprüfungen der Polyesterurethane AU und G. Für EU 12h gab es auch eine sehr leichte Änderung der Farbe des Mediums, wobei eher von einer fast unmerklichen Eintrübung zu sprechen ist, als von einer wirklichen Farbänderung.

Für AU ändert sich jedoch nicht nur das Medium, auch die Farbe der Prüfkörper unterliegt diesem Einfluss. Die ursprüngliche Farbe ist ein dunkles Gelb. Nach der Prüfungszeit haben alle Prüfkörper eine braune Färbung angenommen.

### 4.3 Auswertung der Haftfestigkeit

Die Bestimmung der Haftfestigkeit erfolgte für jedes Polyurethan und zu jeder Temperzeit an zwei Haftsyste­men.



Im Falle der Klebesysteme kann bereits durch einen Blick auf das Diagramm 4.3.1 eine deutliche Aussage für die einzelnen Testmaterialien getroffen werden. Für die Polyesterurethane spielt es zum Erreichen der geforderten Haftfestigkeit keine Rolle, welches der Haftsyste­me verwendet wird, da für beide die Haftfestigkeiten weit über 12 N/mm liegen. Jedoch beträgt die Differenz zwischen 1960/5960 und Cilbond für das G-Material 6,7 N/mm. Cilbond sorgt für eine bessere Haftfestigkeit. Die Standardabweichung für 1960/5960 ist viel höher, also ist nicht nur der Mittelwert geringer sondern auch die Verteilung sehr unvorhersehbar, weshalb es sich hierbei nicht bewährt.

Die Haftfestigkeit von AU liegt für 1960/5960 bei 35,5 N/mm und für Cilbond bei 34,0 N/mm. Die Unterschiede sind gering, weshalb sich im Anwendungsfall beide Haftsyste­me als brauchbar erweisen. Dementsprechend ist diese Information nicht unbedingt von technischer Bedeutung für das Unternehmen, jedoch von wirtschaftlicher und produktionstechnischer Relevanz. Bisher wurde für die Beschichtung mit AU 1960/5960 angewendet, welches ein Zwei-Komponenten-System ist. Wie im Abschnitt 2.2.2 bereits beschrieben wurde, ist die

Verwendung eines Zwei-Komponenten-Systems sowohl störanfälliger als auch unwirtschaftlicher, da zwei Ausgangskomponenten gekauft und aufgetragen werden müssen, was die Produktionsgeschwindigkeit verringert und damit zusätzliche Kosten verursacht. Um diese Möglichkeit der Produktionssteigerung anzuwenden, müssen jedoch in Zukunft noch mehrere Tests durchgeführt werden.

Die Ergebnisse für EU liegen unter denen der übrigen Polyurethane. Dies betrifft jedoch nur die gemessenen Werte, welche auch alle über dem Anforderungsniveau liegen. Denn hier handelt es sich nicht um ein Abschälen der Beschichtung von Stahlgrund, sondern um ein sehr frühes Abreißen im Streifen. Dies ist für alle Prüfungen des EU der Fall, unabhängig vom Haftsystem.

In den Bildern 4.1.1 und 4.1.2 sind Beispiele für eine abgeschlossene Haftfestigkeitsprüfung dargestellt. Das Haftsystem 1960/5960 besitzt eine grüne Farbe was die Betrachtung bei auch grünem Polyurethan leicht erschwert. Bei genauer Betrachtung können jedoch auch hier in manchen Fällen Ablösungen des Polyurethans auf der Stahlplatte erkannt werden.



**Bild 4.3.1: Haftfestigkeit geprüft (1960/5960) ; G Probe 1 (links); AU Probe 3 (mitte); EU 8h Probe 1 (rechts)**





Bild 4.3.2: Haftfestigkeit geprüft (Cilbond); G Probe 2 (links); AU Probe 2 (mitte); EU 12h Probe 4 (rechts)

Da die Schicht des Haftmittels nur sehr gering ist, kann nicht aussagekräftig unterschieden werden zwischen Trennung von Elastomer zu Haftmittel oder Haftmittel zu Trägerplatte.

Tabelle 4.3.1 Beurteilung der Haftfläche

	AU	G	EU 8h	EU 12h	EU 16h
1960/5960 1	RC/CS Br	RC/CS R	RC/CS Br	RC/CS Br	Br
1960/5960 2	RC/CS Br	RC/CS R	RC/CS Br	RC/CS Br	Br
1960/5960 3	RC/CS	RC/CS R Br	RC/CS Br	RC/CS Br	RC/CS Br
1960/5960 4	RC/CS Br	RC/CS R Br	RC/CS Br	RC/CS Br	RC/CS Br
Cilbond 1	RC/CS	RC/CS R Br	RC/CS Br	RC/CS Br	RC/CS Br
Cilbond 2	RC/CS	RC/CS R Br	RC/CS Br	RC/CS Br	RC/CS R Br
Cilbond 3	RC/CS	RC/CS R	RC/CS Br	RC/CS Br	RC/CS Br
Cilbond 4	RC/CS	RC/CS R	RC/CS R Br	RC/CS R Br	RC/CS Br

- Br – Bruch des Elastomerstreifens (keine Normbezeichnung)
- R – Trennung im Elastomer
- RC – Trennung zwischen Elastomer und Haftmittel
- CS – Trennung zwischen Haftmittel und Trägerplatte



In einigen Versuchen können bei der Betrachtung der auf der Trägerplatte vorhandenen Streifen, Reste vom Elastomer registriert werden. Dies gilt für alle Prüfungen mit G-Material, unabhängig vom Haftmittel. Es handelt sich dabei um sehr kleine Teile vom Elastomer, die bei der Schälprüfung herausgelöst wurden. Dies gilt auch für jeweils einen von vier Probestreifen des EU (8,12 und 16 Stunden) mit Cilbond. Reste von Elastomer auf der Trägerplatte sind ein Zeichen für eine gute Haftfestigkeit, da selbst das Material der Belastung nicht standhalten kann und diese zur Zerstörung des Elastomers führt, noch vor der Auflösung der Bindung zum Stahl.

#### 4.4 Ansätze zur Entwicklung und Ausführung der Gießform bzw. des Heißgießverfahrens für die Stahlrohrinnenbeschichtung und Vergleich zu anderen Formen der Beschichtung mit PU

Die Beschichtung mit dem Heißgießverfahren für die Rohrinneinnenseite gestaltet sich als sehr schwierig. Je nach den Abmaßen des Rohres treten verschiedene Probleme auf die es zu lösen gilt. Auch die Geometrie spielt dabei eine Rolle wie gerade Rohre oder Rohrbögen. Dabei gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten. Die Geometrien sind genormt [32].

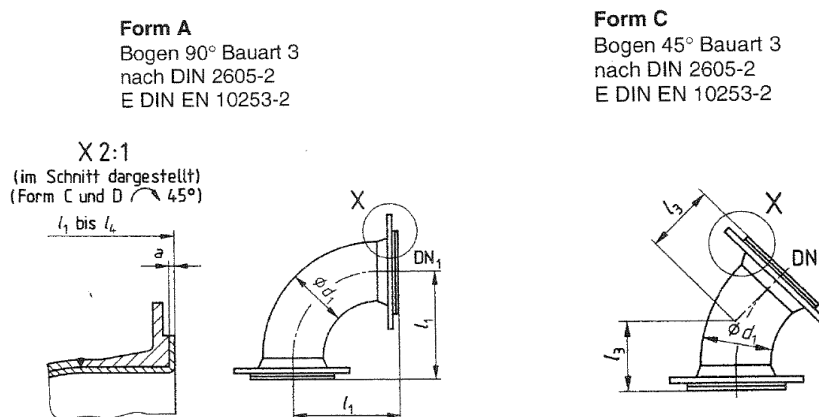


Bild 4.4.1: Formen für Flanschrohre [32]

In diesem Abschnitt möchte ich versuchen, einen Blick auf die Möglichkeiten einer Werkstoffherstellung dieser Problematik zu werfen. Wie in Abschnitt 2.5 bereits aufgeführt, beziehen sich die Probleme des Gießens auf die Werkzeugentformung, die Nachbearbeitung bei Gratbildung, den Gießvorgang an sich, die Formstabilität, das Material und die Haftfestigkeit. Bei

Rohren kann es sich jedoch nicht nur um ein einfaches Rohr handeln, sondern um Rohre mit Flanschverbindungen, um weitere Anbindungen zu ermöglichen. Über allem steht aber immer der Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit.

Es besteht natürlich die Möglichkeit, auf bereits existierende Technologien zurückzugreifen. Dazu zählt in der Polyurethanverarbeitung vor allem das Sprühen von Polyurethan an die Innenwände des Rohres. Dies ist gängige Praxis für gerade Rohre und Rohrbögen. Es ist eine wirtschaftliche und einfache Methode des Beschichtens. Doch auch diese Technik besitzt ihre Grenzen und Probleme. Das automatische Sprühen über eine Maschine funktioniert wie in 2.5 beschrieben. Eine Art Lanze wird zusammen mit der Sprühvorrichtung zentriert im Rohr positioniert. Es besteht die Möglichkeit das Rohr zu drehen oder es dreht sich die Sprühvorrichtung. Hier existiert bereits eine Beschränkung für die Geometrie. Gerade Rohre können gedreht werden, allerdings keine Rohrbögen. Für Rohrbögen ist es weiterhin von Nachteil wenn sich die Sprühvorrichtung dreht. Je nach Geometrie können Probleme in der Schichtdicke auftreten. Des weiteren müsste wie beim Heißgießen getempert werden. Bei kleinen Gießmengen ist das möglich, für größere Rohre kann der Transport zum Ablösen der Beschichtung von der Stahlwand führen. Bei kleinen Rohren mit einem geringen Durchmesser kann das Sprühen auch nicht effektiv angewandt werden, da die Distanz von Sprühkopf zu Wand nicht groß genug ist und damit die Vernetzung zu spät einsetzen bzw. die Verteilung des Polyurethans nicht gegeben ist.

Für das Unternehmen TIPTOP würde es wirtschaftlich bedeuten eine sprühfähige Gießmaschine zu erwerben und die zusätzlich benötigten neuen Ausgangskomponenten für schnelle Vernetzungen, womit ein erhöhter Lagerplatzverbrauch verbunden ist. Dazu kommt eine Vorrichtung zum drehen der Rohre falls dies beim Sprühkopf der Gießmaschine nicht möglich ist.

Eine weitere experimentelle Form der Beschichtung könnte ein Gießverfahren, welches dem Stahlguss (genannt Schleuderguss) von Walzen oder Ringen ähnelt, sein [33]. In dieser Form der Gießens wird ein Zylinder mit der Schmelze gefüllt. Der Zylinder dreht sich dabei mit einer so hohen Geschwindigkeit, dass das Material durch die Zentrifugalkraft an die Seiten gedrückt wird. Dort bleibt es so lange haften, bis die Schmelze erstarrt.

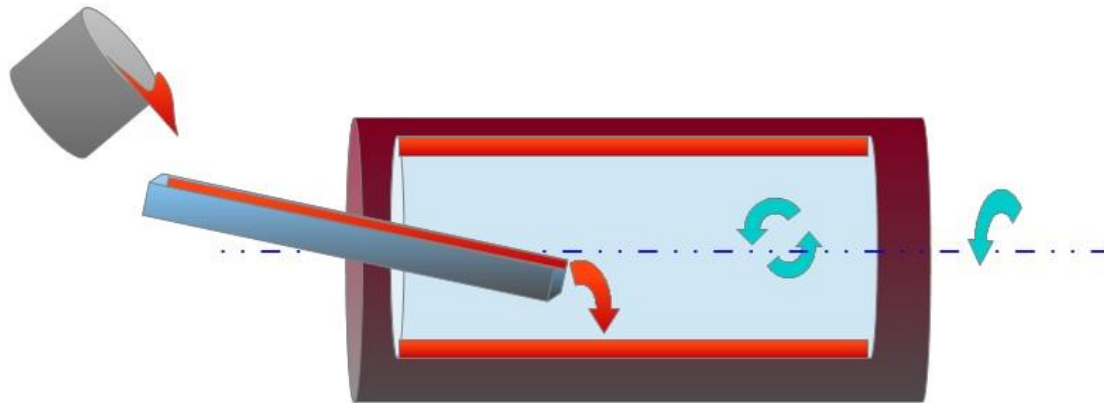


Bild4.4.2: Schleuderguss von Stahlrohren [33]

Für diese Technologie ist keine Form nötig, ähnlich wie beim Sprühen von Polyurethan, denn es kann mit einer normalen Gießmaschine gearbeitet werden und vermutlich auch mit den bereits getesteten und in Verwendung befindlichen Polyurethanen. Dabei bin ich in der Literaturrecherche auf keinerlei Informationen gestoßen, wie sich die Vernetzungsreaktion von Polyurethan bei wirkender Zentrifugalkraft verhält. Die Verbindung von Polyurethan zum Haftvermittler und dieser wiederum zur Oberfläche ist ebenfalls nicht erprobt. Es besteht die Möglichkeit, dass die Zentrifugalkraft auf die zwei Flüssigkeiten und auch auf die Additive eine trennende Wirkung besitzt, aufgrund der Dichteunterschiede. Selbst bei einem geringen Einfluss dieser Größe, ist es bereits ein Nachteil. Unter diesen Umständen besteht die Chance, dass das Material nicht optimal gemischt wird. Eine zu schnelle Vernetzung kann dabei hinderlich sein, da das Gemisch nicht vollständig im Rohr verteilt sein könnte. Je länger sich das Rohr allerdings dreht, umso größer ist die Trennung der Komponenten. Weiterhin können durch diese Technologie nur gerade Rohre und Rohrstücke bearbeitet werden. Für Flanschen müsste eine jeweils passende Form als Abdeckung an den Enden zum Einsatz kommen. Für diese Form der Beschichtung müsste in Abdeckungen für die Enden der Rohre, sowie eine Drehvorrichtung investiert werden, die eine ausreichende Zentrifugalkraft erzeugen kann. Die Vorteile wären eine glatte nicht zu bearbeitende Fläche, eine sehr genaue Schichtdicke und vergleichsweise geringe Anschaffungskosten. Jedoch ist dieses Verfahren nicht getestet.

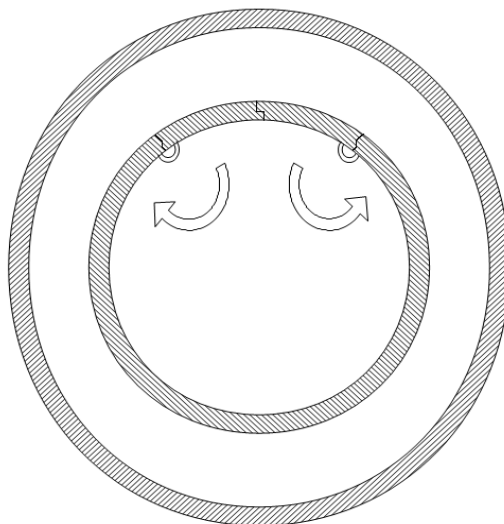
Die letzte Technologie ist die Beschichtung mit dem Standardverfahren des Heißgießens. Diese ist in Handhabung und im Ergebnis ein sicheres Vorgehen um den gewünschten Anforderungen zu entsprechen. Jedoch ist die Entwicklung einer geeigneten Form und das jeweilige Einpassen der Form vor dem Gießprozess (abhängig vom Formaufbau und Abmessungen des Rohres) mit größerem Aufwand verbunden. Gerade Rohre könnten mit einer Form gegossen

werden, welche aus einem Stück bestehen. Der Aufwand der Entformung ist hier erheblich größer als für eine geteilte Form. Es würde sich um ein zylinderförmiges Blech handeln, welches dann nach dem Gießen heraus gedrückt wird. Diese Technik würde aber nur bis zu einer bestimmten Länge oder einem bestimmten Durchmesser des Rohres funktionieren, da sonst die Kontaktfläche von Form zu Polyurethan zu groß werden würde und die benötigte Kraft zum Entformen zu hoch ist. Außerdem kann eine Beschädigung der Oberfläche nicht ausgeschlossen werden.

Um dies zu vermeiden ist eine Form nötig, welche sich nach innen klappen lässt. Ob diese nun aus einem Stück oder mehrteilig ist, spielt in diesem Fall keine Rolle, solange der Durchmesser verringert werden kann, um eine beschädigungsfreie Entformung zu gewährleisten.

Im folgenden werden zwei Varianten für die Gestaltung der Form eines geraden Rohres vorgestellt. Bei Rohrbögen kommt es durch die Krümmung zu zusätzlichen Problemen der Entformung.

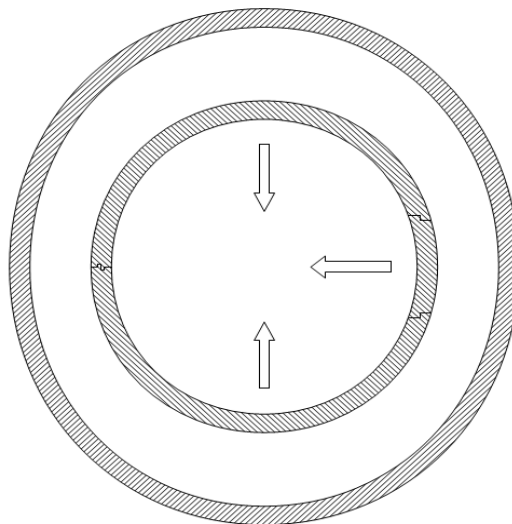
Die erste Variante (Skizze 4.4.1) besteht aus drei Einzelkomponenten, welche durch Scharniere verbunden sind. Diese lassen sich nur bis zu einem bestimmten Winkel ausklappen. Zusammen bilden sie einen hohlen Zylinder. Die Komponenten bestehen dabei aus Blechen. Durch die Scharniere ist es möglich, zwei dieser Bleche nach innen zu ziehen und somit vom Polyurethan zu lösen.



Skizze 4.4.1: Form mit Scharnieren

Dies kann lediglich bei geraden Rohren zur Anwendung kommen. In Rohrbögen ist es nicht möglich, die Einzelteile zu klappen. Für Flanschenden müsste ein zusätzlicher Formaufsatz gefunden werden.

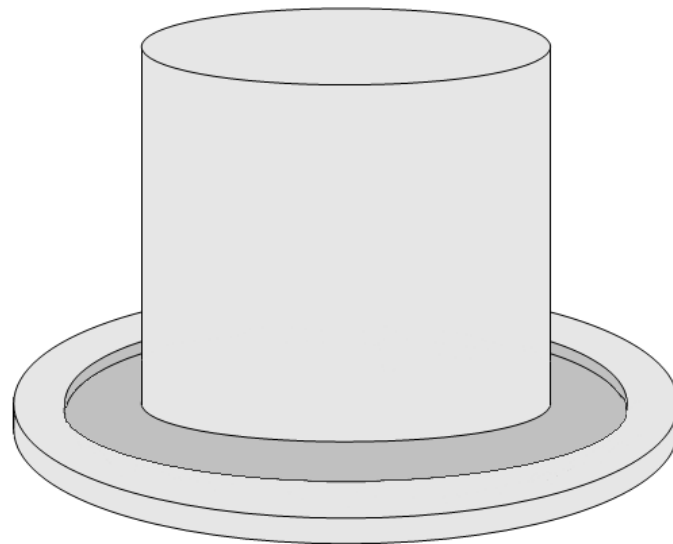
Die zweite Form (Skizze 4.4.2) besteht aus einzelnen Blechen, die ebenfalls zusammen einen hohlen Zylinder bilden. Nur sind diese nicht, wie oben beschrieben, miteinander verbunden. Für gerade Rohre besteht diese Form ebenfalls aus drei Komponenten, mit formschlüssigen Enden. Im Prinzip werden zwei der Teile zusammengesteckt, welche einen Großteil des Zylinders ausmachen. Dann wird ein schmalerer Streifen eingelegt, der sich auch leicht wieder entfernen lassen muss, aber dennoch eine geringe Gradbildung beim Gießen ermöglichen sollte.



Skizze 4.4.2: Form aus Einzelbögen

Weitere Probleme sind die Zentrierung der Form und der entstehende Druck welcher durch das noch nicht ausgehärtete Polyurethan verursacht wird. Je nach Länge des Rohrs, muss die Form diesem Druck standhalten, vor allem wenn die Rohre stehend gegossen werden sollen, was sowohl Vor- als auch Nachteile mit sich bringt. Vorteile des stehend Gießens ist die wichtige Entlüftung, welche durch liegendes Gießen lediglich über die Formgebung ermöglicht werden kann [34]. Dies führt aber auch zu erheblichem Aufwand in der Gestaltung. Auch die Befüllung ist stehend kein Problem, während das Liegen eine einfache Befüllung unmöglich macht. Dafür sind dem stehend Gießen aufgrund der Höhe der vorhandenen Öfen bereits Grenzen gesetzt. Auch der hydrostatische Druck in der Form nimmt mit steigender Länge stark zu. Dieser führt wiederum verstärkt zu Gratbildung oder sogar zum Versagen der Form.

Ein Ansatz zur Lösung (Skizze 4.4.3) für die Zentrierung, als auch für den hohen Druck am Boden des Rohres könnte über einen geeigneten Formboden gefunden werden. Zur Vereinfachung ist das Rohr ohne Flanschenden. Für den Boden des Werkzeugs wird in eine Platte eine Nut eingearbeitet. Diese besitzt einen Außendurchmesser der dem Außendurchmesser des Rohres und einen Innendurchmesser der dem Innendurchmesser der Form entspricht. Zur Stabilisierung und als Gegendruck wird ein Zylinder (Länge abhängig vom jeweiligen Rohr und Berechnungen) mit der Abmessung des Innendurchmessers der Form in der Mitte aufgebracht, so dass die Nut des Formbodens direkt in den Zylinder übergeht. Die Verbindungsstellen werden mit Silikon abgedichtet, so wird auch hier Gratbildung und die Gefahr des Verrutschens verringert. Nachteil einer Abdichtung mit Silikon oder ähnlichem ist das versehentliche Hineindrücken des Abdichtmaterials in die zu befüllende Seite der Form. Dies hätte Eindruckstellen in der Beschichtung zur Folge. Eine bessere, wenn auch aufwendigere Herangehensweise wäre, die formschlüssigen Verbindungsstellen mit einer festen Silikon- oder Gummidichtungslippe zu versehen. Dabei kann es sich beim Gummi um einen NBR handeln. Dieser kann Unternehmensintern hergestellt werden und ist sowohl ölbeständig als auch temperaturbeständig bis 100°C [35]. Um bessere Bearbeitung zu gewährleisten müssten die Bleche in diesen Bereichen dicker sein.

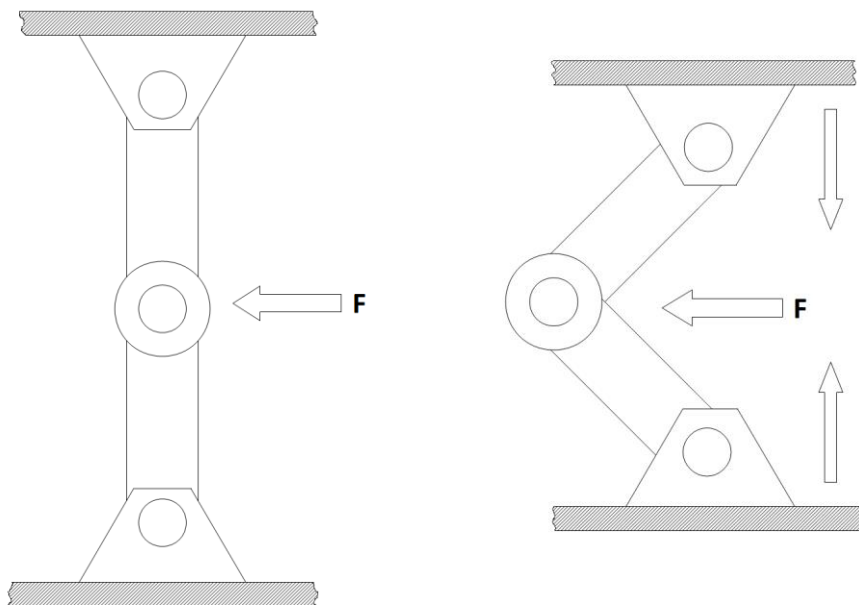


Skizze 4.4.3: Boden der Form mit Dorn

Der Zylinder der Bodenplatte sollte dabei kein massiver Kern, sondern lediglich mit Verstrebungen im Inneren verstärkt sein. Damit wäre jedoch nur ein Teil des Rohres gegen den Tie-

fendruck gesichert. Je nach Länge des Rohres muss auch in anderen Bereichen eine Schutzmöglichkeit gegen den Druck der Befüllung gefunden werden. Gleichzeitig müssen aber auch die Bleche selber zusammen halten, solange noch kein Material in der Kavität ist.

Für dieses Problem gibt es mehrere Gedankenmodelle. Eine einfache Lösung für die Halterung der einzelnen Bleche wären Schnellverschlüsse, welche über die Länge der Form in regelmäßigen Abständen eingesetzt werden und die Bleche nicht nur verbinden sondern auch durch das Zusammenziehen die Lücken zwischen diesen verkleinern. Ähnlich könnten Verschlüsse mit Schraubverbindungen arbeiten. Diese wären jedoch nur für kurze Rohrvarianten geeignet, da sonst die Montage einen zu großen Aufwand bereitet. Eine weiterer Weg um die Bleche zu verbinden, gleichzeitig Stabilität einzubringen und zusätzlich eine Hilfe beim Entformen zu bieten, wären bewegliche Winkel (Skizze 4.4.4). Die Winkel werden innerhalb der Form angebracht und verbinden die jeweils gegenüber liegende Formwand, was hier ein jeweils anderes Blech ist. Die angebrachten Winkel sollten einen Mechanismus besitzen, der sie bei  $180^\circ$  versteift, so dass während einer Bewegung der Form oder im Gießvorgang kein Zusammenklappen möglich ist. Sobald das Material vernetzt und damit ausgehärtet ist, kann die Versteifung gelöst werden und durch eine Krafteinwirkung auf das Gelenk des Winkels, könnte die Form leichter von der Beschichtung gelöst werden.



Skizze 4.4.4: Scharniere als Entformungshilfe

Auch ein geeignetes Trennmittel sollte ausgewählt werden. Dabei wird nach Polyurethan, Geometrie, Fertigungsverfahren, Temperaturen und Oberflächenqualität ausgewählt. Sollte ein unpassendes Trennmittel verwendet werden, kann es zum einen zu einer erschwerten Entformung führen, bei der die Beschichtung durchaus Beschädigungen davon tragen kann oder zu Oberflächenfehlern [36].

Der Tiefendruck könnte auch mit einem anderen Material behoben werden. Wenn die Vernetzungszeit gering ist, könnte der bereits gegossene Teil noch während der Durchführung vernetzen. Die hohe Viskosität führt zu einer verminderten Fließfähigkeit. Durch diese wird bei hohem Druck das Polyurethan nicht so leicht in die Zwischenräume des Werkzeugs gedrückt. Es muss dann eine Anpassung für das richtige Verhältnis zwischen Vernetzungsgeschwindigkeit und Formfüllung erfolgen. Dabei ist es vor allem wichtig, dass die Vernetzung nicht zu schnell oder die Befüllung zu langsam verläuft, da es sonst zu Fehlern in der Verbindung innerhalb des Polyurethans kommen kann. Nachteil wäre eine neue Anschaffung, Tests des neuen Polyurethans und eine hohe Unsicherheit bei der Befüllung.

Eine weitere experimentelle Methode, um dem Schweredruck entgegen zu wirken, wäre eine Art Ballon, der mit einer Flüssigkeit vergleichbarer Dichte im Inneren zeitgleich zum Werkzeug gefüllt wird. Somit gleichen sich die jeweiligen Schweredrucke aus. Eine solche Herangehensweise ist auch mit einem höherem Aufwand verbunden, da auch eine Maschine zum Füllen und zum Absaugen der Flüssigkeit bereit gestellt werden muss. Zusätzlich müsste der Ballon aus einem gut dehnbaren Material bestehen, welches Temperaturen von bis zu 120°C widerstehen kann.

Die Zentrierung am oberen Ende des Rohres könnte mit einfachen Klemmen bewerkstelligt werden.

Die Investitionen für das Heißgeißverfahren bei Stahlrohren beziehen sich vor allem auf die Formen und einen höheren Ofen, falls Rohre über 2 m Länge gefertigt werden sollen. Da Nacharbeit im großem Umfang mit herkömmlichen Mitteln nicht umsetzbar ist, muss immer direkt auf Fertigmaß gegossen werden. Aufgrund der Vielzahl von Rohren, die sich in Länge, Durchmesser, Beschichtungsdicke usw. unterscheiden, kann nur ein Werkzeug für eine Art Rohr verwendet werden. Deshalb wäre es ein großer wirtschaftlicher Einsatz für den Lagerplatz der Werkzeuge und die jeweilige Herstellung der Werkzeuge. Die Herstellungskosten sollten auf die Stückzahlen der Rohre umgelegt werden. Dies führt zu einer enormen Preis-



steigerung bei geringen Bestellmengen und damit zur Frage, ob der jeweilige Kunde bereit ist, dies in Kauf zu nehmen.

## **5 Fazit**

In der Literatur sind kaum Hinweise darauf zu finden, dass Polyurethane in der Innenbeschichtung von Rohren mit dem Heißgießen beschichtet werden. Lediglich das Sprühen von Polyurethan wird in diesem Zusammenhang erwähnt. Es lässt den Eindruck entstehen, dass die Technologie entweder zu schwer umzusetzen und zu preisintensiv ist, oder bisher nur geringes Interesse geweckt hat und daher in keinerlei Quelle genannt wird. Das Heißgießen für Walzen und Trommelbeläge sowie der Formguss werden öfter beschrieben in Einsatzmöglichkeit und Funktion. Tatsächlich wird eine objektive Bewertung einer solchen Beschichtungsform ohne Vergleichsliteratur schwierig, da hier eine völlig eigene Bewertung der durch die Materialprüfung gewonnenen Daten, bis hin zu den Ansätzen der Formentwicklung erfolgt. Dabei sind die gewonnenen Ergebnisse durchaus kritisch zu betrachten, ebenso wie die vorgegangenen Anforderungen des Kunden, worauf der Entwurf einer realistischen Beschichtungsform basiert. Um eine fortlaufende Entwicklung der Innenbeschichtung zu gewährleisten, müssen die Ansätze in der Praxis umgesetzt werden, wenn auch nur in kleinem Maßstab. Eine letztendliche Einsatzmöglichkeit und Praxistauglichkeit können nur nach solchen Untersuchungen festgelegt werden und selbst dann ist die Wirtschaftlichkeit nicht bestätigt, da diese vom Kundeninteresse und der jeweiligen Konjunktur der vermutlich vorwiegend chemisch orientierten Industrie abhängt. Rohre mit großem Durchmesser lassen sich kostengünstiger und schneller mit Hilfe der Sprühverfahren beschichten. Lediglich für Rohre, deren Durchmesser für die Lanzen der Sprühvorrichtung zu klein sind und deshalb standardmäßig mit Gummi beschichtet werden müssen, könnte dies ein mögliches lukratives Einsatzgebiet sein.

Durch eine Reflexion der Messergebnisse, der hier zur Verfügung stehenden Polyurethane, lassen sich jedenfalls Aussagen zum Eigenschaftsniveau machen. Bei der Auswertung der Ergebnisse ist es offensichtlich, dass lediglich EU aufgrund der Hydrolysestabilität für den Einsatz der Rohrinnenbeschichtung in Frage kommt. Jedoch mit schlechteren Ergebnissen zu den mechanischen Eigenschaften als im voraus erwartet. Allerdings bezieht sich dies lediglich auf die Anfrage einer einzigen Firma, welche die Rohrbeschichtung für einen Nasseinsatz verwenden wollte. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass andere Kunden ein Interesse an

dieser Form der Technologie haben könnten und von Firma zu Firma andere Spezifikationen und Anwendungsgebiete zu berücksichtigen sind. Daher sind die anderen Polyurethane nicht vollends aus der Entwicklung ausgeschlossen.

Diese Arbeit beleuchtet nur einen kleinen Teil. Um auch zukünftige Materialien bzw. auch die vorhandenen besser zu beurteilen, sollten die Prüfmethode, vor allem im Zusammenhang mit der Hydrolysestabilität, weiter ausgebaut werden. Die ledigliche Überprüfung der Härte als einzigen mechanischen Kennwert unter Hydrolyseeinfluss ist nicht genug um eine endgültige Auswertung der Veränderung durch das Umgebungsmedium zu erhalten. Es sollten weiterführend noch verschiedene Prüfungen durchgeführt werden. So zum Beispiel sollten Materialprüfungen ohne Angriff eines Mediums, wie sie in dieser Arbeit beschrieben wurden, noch mit Einfluss eines Mediums untersucht werden. Dabei ist es zu empfehlen sowohl mehrere Zeitintervalle der Einwirkung von Medien als auch Temperaturstufen mit einzubeziehen.

Dem bei TITOP Elbe gegebenen Ablauf der Hydrolyseprüfung ist kritisch zu sehen, insbesondere aufgrund der Verweilzeit der Prüfkörper vor den jeweiligen Untersuchungen. Entweder es wird direkt im Anschluss, mit möglichst geringer Temperaturänderung geprüft um ein Verhalten bei der jeweiligen Temperatur zu erhalten oder aber nach einer längeren Konditionierung an Normstandards, um dann eine Aussage über die zeitweise Einwirkung von Temperatur und Medium zu erhalten und eventuell wie stark reversibel dies ist. Da auch Einsatzbedingungen von bis zu 40°C zu erwarten sind, sollte die erste Variante für diese in Betracht gezogen werden.

Polyurethan ist ein vielseitig einsetzbarer Werkstoff, welcher aufgrund seiner Eigenschaften in vielen Bereichen der Industrie geschätzt wird. Vor allem aber für Beschichtungen ist Polyurethan weit verbreitet mit stetig steigender Nachfrage. „Bis 2021 sollen Beschichtungen aus PUR die meistverwendeten sein“ [37]. Es ist also von Vorteil hier zu investieren, da der Markt wächst. Jedoch muss vorsichtig abgewogen werden, ob die Innenbeschichtung mit Hilfe des Heißgießverfahrens bei Stahlrohren eine sinnvolle Entwicklung ist oder nicht. Denn trotz der Vorteile, die ein System dieser Art zu bieten hat, sind ebenso Nachteile, die meist wirtschaftlicher Natur sind, vorhanden. „Der höhere Preis für Material und Technologie bremse den Siegeszug von PUR“ [37]. Dafür ist die Innenbeschichtung von Rohren ein passendes Beispiel.

## Literaturverzeichnis

---

- 1 Uhlig; Polyurethan Taschenbuch. 3. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2006. ISBN 3-446-40307-8
- 2 Becker / Braun; Kunststoffhandbuch Polyurethane. 2. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 1983. ISBN 3-446-13614-2
- 3 H. Makki / K. Adema / E. Peters / J. Laven / L. van der Ven / R. van Benthem / G. de With; Quantitative spectroscopic analysis of weathering of polyesterurethane coatings. Elsevier, 2015
- 4 O. Schwarz; Kunststoffkunde. 4. Auflage. Würzburg: Vogel Verlag, 1992. ISBN 3-8023-1449-2
- 5 H. Scholze; Glas, Natur, Struktur und Eigenschaften. 3. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1988. ISBN 3-540-18977-7
- 6 <http://www.chemie.de/lexikon/Tempern.html> ; Thema: Tempern. Stand: 27.9.2016
- 7 R. Laska / Ch. Felsch; Werkstoffkunde für Ingenieure. 3. Auflage. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 1992. ISBN 3-528-24173-X
- 8 W. Hellerich / G. Harsch / S. Haenle; Werkstoff- Führer Kunststoffe. 7. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 1996. ISBN 3-446-17617-9
- 9 B. Langer: Skript zur Vorlesung „Polymerwerkstoffe“, Hochschule Merseburg, 2011/2012
- 10 <http://www.r-g.de/wiki/Harze:Tempern/Warmh%C3%A4rten>;  
Thema: Tempern/Wärmehärten. Stand : 27.9.16
- 11 Elastomere oder thermoplastische Elastomere – Bestimmung der Eindringhärte – Teil 1: Durometer-Verfahren (Shore-Härte) (DIN ISO 7619-1:2010)
- 12 Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch (DIN 53504:2009)
- 13 Elastomere oder thermoplastische Elastomere – Bestimmung des Weiterreißwiderstandes – Teil 1: Streifen-, winkel-, bogenförmige Probekörper (DIN ISO 31-1:2004; englische Version)
- 14 Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung der Rückprall-Elastizität (DIN 53512:2000; englische Version)
- 15 E. Jenkel / E. Klein; Die Bestimmung von Relaxationszeit aus der Rückprallelastizität. Aus dem Institut für theoretische Hüttenkunde und physikalische Chemie der Technischen Hochschule Aachen (1952)

- 
- 16 Elastomere oder thermoplastische Elastomere – Bestimmung des Abriebwiderstandes mit einem Gerät mit rotierender Zylindertrommel (DIN ISO 4649:2014)
  - 17 Elastomere oder thermoplastische Elastomere – Bestimmung der Haftfestigkeit zu starren Materialien – 90°-Schälverfahren (DIN ISO 813:2011)
  - 18 Elastomere – Bestimmung des Verhaltens gegenüber Flüssigkeiten (DIN ISO 1817 Entwurf:2005)
  - 19 B. Langer: Skript zur Vorlesung „Kunststoffprüfung“, Hochschule Merseburg, 2012
  - 20 Baulé; Ribbon Coating. Informationsmaterial der Firma Baulé für TipTop Oberflächenschutz Elbe GmbH
  - 21 H.-J. Kocks; Zementmörtelauskleidung von Rohren aus Eisenwerkstoffen. 3R international. Ausgabe 44. Essen: Vulkan-Verlag GmbH, 2005
  - 22 <https://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-5010/Kap2.pdf>; Thema: Grundlagen der Herstellung und des Einsatzes von ZM-Auskleidung für den Trinkwassertransport. Stand: 28.9.2016
  - 23 G. Wossog / W. Manns / G. Nötzold; Handbuch für den Rohrleitungsbau. 9. Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik, 1990. ISBN 3-341-00477-7
  - 24 G. White; Patent US 5180458 A; Method of lining of metallic tubes using a plurality of concentric flexible tubes of thermoplastic polymer. Veröffentlicht: 19.1.1993
  - 25 B. Atkins / B. Harper; Patent US 3429954A; Method of making a polymer-lined Pipe. Veröffentlicht: 25.2.1969
  - 26 A. Samimi / S. Zarinabadi; Application Polyurethane as Coating in Oil and Gas Pipelines. International Journal of Science and Engineering Investigations, Ausgabe 1, Thema 8, 08.2012. ISSN 2251-8843
  - 27 [http://www.keramverband.de/keramik/pdf/03/sem03\\_4\\_01.pdf](http://www.keramverband.de/keramik/pdf/03/sem03_4_01.pdf); H. Albert; Thema: Keramischer Rohrverschleiß. Stand 4.10.2016
  - 28 Beschichtung und Auskleidung aus organischen Werkstoffen zum Schutz von industriellen Anlagen gegen Korrosion durch aggressive Medien – Teil 4: Auskleidungen für Bauteile aus metallischen Werkstoffen (DIN EN 14879-4:2002)
  - 29 J. Pietschmann; Industrielle Pulverbeschichtungen: Grundlagen, Anwendungen, Verfahren. 2. Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2013 ISBN 3-528-13380-5
  - 30 A. Pegoretti / L. Fambri / A. Penati / J. Kolarik, Hydrolytic Resistance of Model Poly(ether urethane ureas) and Poly(ester urethane ureas), 1998

- 
- 31 W. Weißbach; Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. 12. Auflage. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 1998. ISBN 3-528-94019-0
  - 32 Flansch-Rohre und Flansch-Formstücke aus Stahl und Gusseisen mit Auskleidung (DIN2848:2002)
  - 33 <http://www.esw.co.at/de/technologie/prozess.php>  
Thema: Walzenproduktion, Herstellungsprozess; Firma ESW. Stand 28.11.16
  - 34 M. Heckert; PUR Anwenderseminar, Thema: Das formgebende Werkzeug und Werkzeugreinigung. KuZ Leipzig, 2014.
  - 35 Bayer AG; Handbuch für die Gummi-Industrie. 2. Auflage. Leverkusen: Bayer AG, 1991.
  - 36 H. Rosenbleck-Schmidt; PUR Anwenderseminar, Thema: Trennmittel in der PUR-Verarbeitung. KuZ Leipzig, 2014.
  - 37 K Zeitung; Artikel: Gefragte Beschichtungen. Ausgabe 16 vom 26.8.2016, Seite 2

## Anhang

### Beispiele für verwendete Prüfprotokolle:

<b>Zwick / Roell</b>		02.03.16						
<b>Prüfprotokoll</b>								
Kunde	: REMA TIP TOP	Art und Bezeichnung :						
Auftrags-Nr.	: 1	Werkstoff : AU						
Prüfnorm	: DIN 53504 - Schulterstab S2	Prüfer :						
Vorkraft	: 0,1 MPa							
Prüfgeschwindigkeit	: 200 mm/min							
Messlänge Standardweg	: 20 mm							
<b>Prüfergebnisse:</b>								
Nr	Probenkennung	$\sigma_{max}$ MPa	$\sigma_R$ MPa	$\epsilon_R$ %	$\sigma_{100}$ MPa	$\sigma_{300}$ MPa	a mm	$A_0$ mm <sup>2</sup>
1	1	41,2	41,2	426	6,7	14,0	1,969	7,87
2	1	40,8	40,8	445	6,5	13,2	2,007	8,03
3	1	28,2	28,2	414	6,4	13,0	2,026	8,10
4	1	38,4	38,4	459	6,3	12,5	2,006	8,02
5	1	34,5	34,5	433	6,4	13,0	2,001	8,00
<b>Seriengrafik:</b>								
<p>The graph shows five stress-strain curves for different test specimens. The y-axis is labeled 'Spannung in MPa' and ranges from 0 to 40. The x-axis is labeled 'Dehnung in %' and ranges from 0 to 400. All curves start at the origin and show a non-linear, increasing trend. The curves are very similar, with slight variations in peak stress and elongation at break.</p>								
<b>Statistik:</b>								
Serie	$\sigma_{max}$ MPa	$\sigma_R$ MPa	$\epsilon_R$ %	$\sigma_{100}$ MPa	$\sigma_{300}$ MPa	a mm	$A_0$ mm <sup>2</sup>	
n = 5								
x	36,6	36,6	435	6,5	13,1	2,002	8,01	
s	5,4	5,4	18	0,1	0,6	0,02083	0,08	
v	14,75	14,75	4,03	2,07	4,37	1,04	1,04	

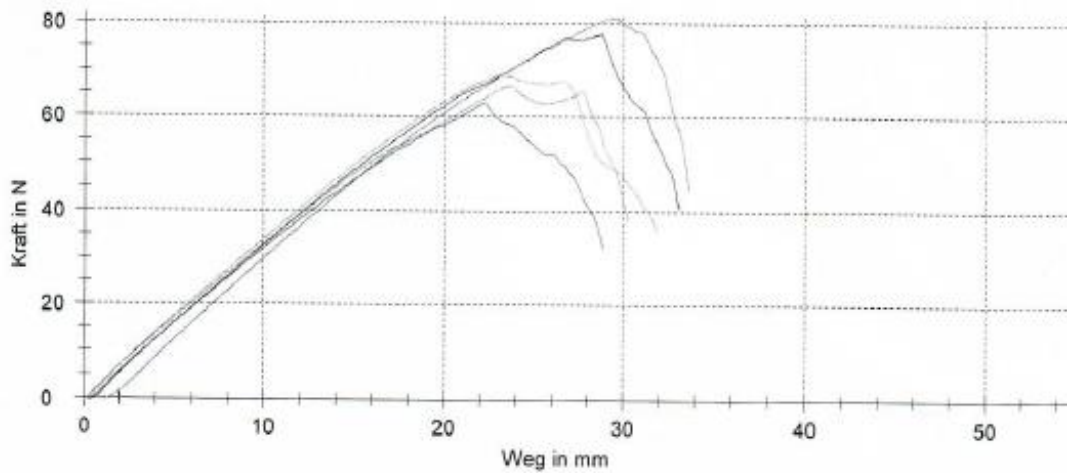
## Prüfprotokoll

Kunde : REMA TIP TOP GmbH      Werkstoff : AU  
 Auftrags-Nr. : 1                      Prüfmethode : Methode B  
 Prüfnorm : DIN ISO 34-1            Probentyp : Winkelprobe mit Einschnitt  
 Prüfgeschwindigkeit : 500 mm/min

### Prüfergebnisse:

Nr	Probenkennung	WRF N/mm	F <sub>max</sub> N	Messweg Beginn mm	d mm
1	1	33,06	62,8	2,9	1,9
2	1	35,05	66,6	3,0	1,9
3	1	38,86	77,7	3,3	2
4	1	34,46	68,9	3,2	2
5	1	40,54	81,1	3,4	2

### Seriengrafik:



### Statistik:

Serie n = 5	WRF N/mm	F <sub>max</sub> N	Messweg Beginn mm	d mm
med	35,05	68,9	3,2	2
x	36,39	71,4	3,2	1,96
R	7,48	18,3	0,5	0,1
s	3,16	7,69	0,2	0,05477
v	8,69	10,77	6,31	2,79



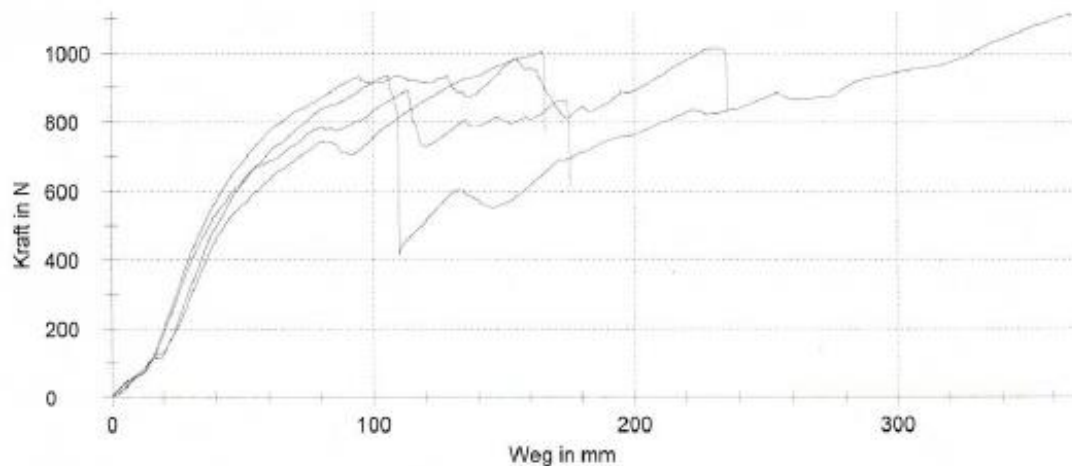
## Prüfprotokoll

Kunde : Klebesystem :  
Auftrags-Nr. : 1960/5960 Vulkanisation :  
Bauteil : Prüfer : Johannes May  
Werkstoff : AU Bemerkung :  
Bez. Probeplatte : 1  
Prüfart : Zug  
Vorkraft : 5 N  
Prüfgeschwindigkeit : 100 mm/min

### Prüfergebnisse:

Nr	Messweg Beginn mm	Messweg Ende mm	F <sub>max</sub> N/mm	F <sub>mit</sub> N/mm	F <sub>min</sub> N/mm	a <sub>0</sub> mm	b <sub>0</sub> mm
1	95,1	236,1	33,7	30,5	27,1	7,5	30
2	60,9	175,4	29,7	26,5	20,4	7,5	30
3	18,6	366,6	37,2	25,8	3,82	7,5	30
4	18,4	165,9	33,5	23,7	4,25	7,5	30

### Seriengrafik:



### Statistik:

Serie	Messweg Beginn mm	Messweg Ende mm	F <sub>max</sub> N/mm	F <sub>mit</sub> N/mm	F <sub>min</sub> N/mm	a <sub>0</sub> mm	b <sub>0</sub> mm
n = 4							
$\bar{x}$	47,8	236,0	33,5	26,6	13,9	7,5	30
s	37,6	92,5	3,05	2,87	11,7	0,000	0,000
v [%]	78,71	39,18	9,10	10,76	84,30	0,00	0,00



Werkstoff : AU - PUR - gelb  
 Rezeptur-Nr.:  
 Vulkanisationsparameter: 16h - 100°C

Lfd.- Nr.: 027 / 2016  
 L-A - Nr.: Test - PUR

Medium: dest. H2O  
 Mediumwechsel: nein

Prüftemperatur: 60°C  
 Prüfbeginn: 16.03.2016

Blatt - 1

6 mm - Proben		Termine	Probe 1		Probe 2		Probe 3		Mittelwert
				Δ in %		Δ in %		Δ in %	Δ in %
Gewicht in g	Nullwert	16.03.16	8,7195		6,5006		5,8270		
	7 Tage	23.03.16	8,9166	2,26	6,6409	2,16	5,9500	2,11	2,18
	14 Tage	30.03.16	8,9128	2,22	6,6372	2,10	5,9462	2,05	2,12
	28 Tage	13.04.16	8,8926	1,99	6,6169	1,79	5,9297	1,76	1,85
	56 Tage	11.05.16							
	70 Tage	25.05.16							
	90 Tage	14.06.16							
Härte in Shore A	Nullwert	16.03.16	82	ΔShore A	81	ΔShore A	81	ΔShore A	
	7 Tage	23.03.16	75	-7	75	-6	75	-6	75,0
	14 Tage	30.03.16	75	-7	73	-8	73	-8	73,7
	28 Tage	13.04.16	73	-9	74	-7	72	-9	73,0
	56 Tage	11.05.16							
	70 Tage	25.05.16							
	90 Tage	14.06.16							
Dicke in mm	Nullwert	16.03.16	8,00	Δ in mm	6,25	Δ in mm	5,50	Δ in mm	
	7 Tage	23.03.16	8,10	0,10	6,30	0,05	5,60	0,10	0,08
	14 Tage	30.03.16	8,10	0,10	6,30	0,05	5,60	0,10	0,08
	28 Tage	13.04.16	8,15	0,15	6,30	0,05	5,60	0,10	0,10
	56 Tage	11.05.16							
	70 Tage	25.05.16							
	90 Tage	14.06.16							
Dichte in g/ml	Nullwert	16.03.16	1,237	Δ in g/cm³	1,237	Δ in g/cm³	1,239	Δ in g/cm³	
	7 Tage	23.03.16	1,232	-0,005	1,232	-0,005	1,234	-0,005	-0,005
	14 Tage	30.03.16	1,230	-0,007	1,232	-0,005	1,233	-0,006	-0,006
	28 Tage	13.04.16	1,230	-0,007	1,228	-0,009	1,231	-0,008	-0,008
	56 Tage	11.05.16							
	70 Tage	25.05.16							
	90 Tage	14.06.16							
Volumen in ml	Nullwert	16.03.16	7,049	Δ in %	5,255	Δ in %	4,703	Δ in %	
	7 Tage	23.03.16	7,238	2,68	5,390	2,57	4,822	2,52	2,59
	14 Tage	30.03.16	7,246	2,80	5,387	2,52	4,823	2,54	2,62
	28 Tage	13.04.16	7,230	2,57	5,388	2,54	4,817	2,42	2,51
	56 Tage	11.05.16							
	70 Tage	25.05.16							
	90 Tage	14.06.16							
Beurteilung			0 Tage	7 Tage	14 Tage	28 Tage	56 Tage	70 Tage	90 Tage
	pH-Wert		5,96	4,18	3,89	3,84			
	Mediumfarbe		klar	rosé gelblich	rosé gelblich	gelb			
	Optische Beurteilung der Prüfkörper nach Medienbelastung			keine... (Oberfläche klebt)	Farbänderung dunkler	Farbänderung dunkelgelb			
			A=beständig (0-5) B=bedingt beständig (5-10) C=nicht beständig (> 10) D=vorzeitig abgebrochen						

Qualität	Gewicht G1 (mg)	Gewicht G2 (mg)	Gewichtsverlust (G1-G2) m (mg)	Gewichtsverlust Mittelwert (G1-G2)m (mg)	Dichte ρ (mg/mm³)	Volumen-	DIN-	Schleif-	Bemerkungen
						Verlust Mittelwert (G1-G2)m ρ (mm³)	Abrieb (G1-G2)m 200 ρ (mm³) S		
2.03 AG									
	2156	1944	212						
Test g.	2155	1952	203	206,3					
	2136	1932	204						
AU	1877	1842	35	38,8	1240		31,1	200,9	
	1848	1805	43						
	1890	1842	48						
	1887	1856	31						
	1780	1743	37						
G	1750	1732	18	14,6	1235		11,8		
	1724	1759	15						
	1786	1775	11						
	1497	1483	14						
	1461	1446	15						
EU	1619	1604	15	25,2	1095		22,9		
AGh	1747	1724	23						
	1717	1692	25						
	1516	1484	32						
	1862	1831	31						
EU	1300	1261	39	31,4	1095		28,5		
12h	1362	1337	25						
	1563	1537	26						
	1595	1560	35						
	1514	1482	32						
EU	1810	1783	27	37,6	1095		34,2		
8h	1548	1502	46						
	1608	1566	42						
	1521	1478	43						
	1542	1512	30						
G	1894	1879	15	15,5	1235		12,5	200,9	
	1616	1600	16						
Test g.	1944	1737	207	195,6					
	1952	1760	192						
	1932	1744	188						

## **Versicherung**

Ich versichere, dass die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig angefertigt und mich anderer als der im Verzeichnis angegebenen Hilfsmittel nicht bedient habe.

---

Datum

Johannes May