



Dominik Leidinger, BSc.

**Konstruktion einer Korrosionsprüfkammer zum
Einbau in eine Umlaufbiegeprüfmaschine für
Korrosionsermüdungsversuche an Cr-Mn-N-
Austeniten der Ölfeld-Industrie**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch

Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik TU- Graz

Graz, April 2015

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch für die Ermöglichung und Betreuung der Diplomarbeit und für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Ebenso gilt mein Dank Dipl.-Ing. Dr.nat.tech. Bernd Holper und Ing. Walter Spruzina der Schoeller-Bleckmann Oilfield Equipment, die mich während meiner Arbeit umfassend betreut haben.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern Monika und Christian. Sie haben mir nicht nur mein Studium ermöglicht, sondern sind mir immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden.

Weiters möchte ich mich bei meinen beiden Brüdern (Manuel und Simon) und Verwandten bedanken, die mich Zeit meines Studiums immer Unterstützt und die richtigen Worte gefunden haben, um mich aufzubauen.

Zudem möchte ich meinen Studiumskollegen Florian und Philipp danken, die mich durch das ganze Studium begleitet haben.

Zuletzt möchte ich mich bei meinem Großcousin Martin Zwickl und dessen Freund Markus Schick bedanken, die mich bei der Fertigung der Prüfkammer unterstützt haben.

Kurzfassung

Die Anforderungen an die Werkstoffe, die für Explorations- und Erschließungsbohrungen von Energiequellen in der Erdkruste (Erdöl und Erdgas) verwendet werden, sind durch unter Rotation des Bohrstranges einwirkende Kräfte und Umgebungseinflüsse (korrosive Medien und Temperatur) sehr hoch. Schoeller-Bleckmann Oilfield Equipment AG (SBO) ist Weltmarktführer bei der Herstellung von Hochpräzisionsteilen für die Ölfeld-Industrie. Die Schwerpunkte sind dabei amagnetische Bohrstrangkomponenten für die Richtbohrtechnologie. Da an die einzelnen Bohrstrangkomponenten sehr hohe mechanische Anforderungen gestellt werden und eine hohe Qualität gefordert wird, werden die dafür verwendeten Werkstoffe (Cr-Mn-N-Austenite) im Unternehmen unter anderem einer Umlaufbiegeprüfung, bei der die Rotation und die dabei auf den Bohrstrang einwirkende Biegespannung simuliert wird, unterzogen.

Das Problem, das in dieser Masterarbeit behandelt wird, ist, dass die derzeitigen Umlaufbiegeprüfungen bei SBO an Umgebungsluft und nicht in temperatur- und korrosionsbeaufschlagter Umgebung geprüft werden. Dadurch ergibt sich auch die Aufgabenstellung und Forderung nach der Konstruktion einer Korrosionsprüfkammer zum Einbau in die Umlaufbiegemaschine, um die geforderten Umgebungseinflüsse auf die Werkstoffe simulieren zu können. Die dabei erreichten Werkstoffkennwerte unter Korrosion und definierten Temperaturen können nun mit jenen in Umgebungsluft verglichen werden und geben nun Aufschluss über das Verhalten des Materials in wirklichkeitsgetreuem Einsatz. Die richtige Werkstoffauswahl und zielgerichtete Weiterentwicklung von korrosionsbeständigen Werkstoffen wird durch diese Arbeit wesentlich unterstützt.

Abstract

The high requirements to the materials which are used in drilling and exploration in the earth's crust (oil, gas and geothermal wells), are reflected by both multi-axial stresses and corrosive attacks.

Schoeller-Bleckmann Oilfield Equipment AG (SBO) is world leader in the production of high precision parts for the oil field industry. The priorities of the company are non-magnetic drill string components for directional drilling. Drill string components are subjected to severe mechanical and environmental influences. As a consequence, the high quality standards are fulfilled by several lab tests. Among other facilities, a rotating bending test equipment is used to simulate the actual loads on the material.

Current rotating bending tests at SBO are done in ambient air and not at elevated temperatures or corrosive atmosphere. The aim of this work was to construct a corrosion test chamber to install it in the rotating bending machine and to simulate the environmental influences to the used material. The determined corrosion fatigue results for different environments are compared to those in ambient air and give information about the behavior of the material in realistic conditions. A proper material selection and targeted development of corrosion-resistant materials is substantially supported by this study.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | <u>EINLEITUNG</u> | 1 |
| 1.1 | ALLGEMEINES UND PROBLEMSTELLUNG | 1 |
| 1.1.1 | DIE ENTWICKLUNG DES TIEFBOHRENS | 2 |
| 1.1.2 | DIE RICHTBOHRTECHNIK | 7 |
| 1.2 | DER BOHRMEIßEL | 14 |
| 1.3 | DIE SCHWERSTANGE (DRILL COLLAR) | 17 |
| 1.3.1 | BESCHÄDIGUNG DER SCHWERSTANGE | 19 |
| 1.3.2 | SCHWERSTANGENWERKSTOFFE | 23 |
| 1.3.2.1 | Zusammensetzung, Herstellung und Eigenschaften der Schwerstangenwerkstoffe | 25 |
| 1.4 | DER UMLAUFBIEGEVERSUCH | 30 |
| 1.4.1 | FUNKTION DER VERWENDETEN UMLAUFBIEGEPRÜFMASCHINE | 31 |
| 1.5 | PRÜFKAMMERWERKSTOFFE – PTFE (TEFLON) / X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571) | 34 |
| 1.5.1 | PTFE (TEFLON) | 34 |
| 1.5.1.1 | Allgemeines | 34 |
| 1.5.1.2 | Eigenschaften | 34 |
| 1.5.1.3 | Anwendungsbeispiele | 35 |
| 1.5.2 | X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571) | 36 |
| 1.5.2.1 | Allgemeines | 36 |
| 1.5.2.2 | Eigenschaften | 36 |
| 1.5.2.3 | Chemische Zusammensetzung | 37 |
| 1.5.2.4 | Anwendungsbeispiele | 38 |
| 2 | <u>ENTWICKLUNGSPROZESS</u> | 39 |
| 2.1 | DAS “BIERGLASMODELL“ | 39 |
| 2.1.1 | ANALYSIEREN UND PLANEN | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 2.1.2 KONZIPIEREN..... | 39 |
| 2.1.2.1 Synthese..... | 40 |
| 2.1.2.2 Analyse..... | 40 |
| 2.1.3 ENTWERFEN UND AUSARBEITEN | 40 |
| 3 ANWENDUNG DES “BIERGLASMODELLS“ FÜR ENTWICKLUNG DER PRÜFKAMMER UND DES DAZUGEHÖRIGEN SYSTEMS..... | 42 |
| 3.1 ANALYSIEREN UND PLANEN DER PRÜFKAMMER..... | 42 |
| 3.1.1 PROBLEMBESCHREIBUNG | 42 |
| 3.1.2 “FRAGEN STELLEN“ | 43 |
| 3.1.3 RANDBEDINGUNGEN DEFINIEREN | 43 |
| 3.1.4 ANFORDERUNGSLISTE | 43 |
| 3.2 KONZIPIEREN DER IDEEN UND LÖSUNGEN..... | 44 |
| 3.2.1 SYNTHESE..... | 44 |
| 3.2.2 ANALYSE..... | 44 |
| 3.3 ENTWURF AUSARBEITUNG UND KONSTRUKTION DER PRÜFKAMMER BEZIEHUNGSWEISE DES SYSTEMS..... | 45 |
| 3.3.1 GRUNDFUNKTION, BESCHREIBUNG UND KONSTRUKTION DER PRÜFKAMMER | 45 |
| 3.3.2 GRUNDFUNKTION UND BESCHREIBUNG DES SYSTEMS ZUR EINBRINGUNG UND EVAKUIERUNG..... | 50 |
| 3.3.2.1 Funktionsprinzip Ejektor | 50 |
| 3.3.2.2 System der Einbringung der Na-Cl-Lösung als Nebel in Prüfkammer..... | 51 |
| 3.3.2.3 System der Evakuierung der Prüfkammer um Dichtheit dieser zu erreichen | 53 |
| 3.3.3 AUSLEGUNG UND ÜBERSCHLÄGIGE BERECHNUNG DER ABSAUGUNG UND EINBRINGUNG FÜR ABDICHTUNG DER PRÜFKAMMER | 54 |
| 3.3.4 UMBAU DER PRÜFKAMMER, ERWEITERUNG DES GESAMTEN PRÜFSYSTEMS UM SPS – STEUERUNG UND PRÜFPROZESS ENTSCHEIDENDER KOMponentEN | 57 |
| 4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN | 64 |

| | | |
|------------|--|------------------|
| 4.1 | GEPRÜFTER WERKSTOFFTYP | 64 |
| 4.2 | HERSTELLUNG DER NA-CL-LÖSUNG..... | 65 |
| 4.3 | UMLAUFBIEGEPRÜFUNGEN | 66 |
| 4.3.1 | DURCHFÜHRUNG DER UMLAUFBIEGEPRÜFUNGEN OHNE MEDIUM BEI RAUMTEMPERATUR..... | 66 |
| 4.3.1.1 | Vorbereitungen..... | 66 |
| 4.3.1.2 | Versuchsablauf..... | 66 |
| 4.3.2 | DURCHFÜHRUNG DER UMLAUFBIEGEPRÜFUNGEN MIT MEDIUM BEI EINER TEMPERATUR VON 40 – 45 °C | 67 |
| 4.3.2.1 | Vorbereitungen..... | 68 |
| 4.3.2.2 | Versuchsablauf..... | 68 |
| 4.3.3 | DURCHFÜHRUNG DER UMLAUFBIEGEPRÜFUNG MIT MEDIUM BEI EINER TEMPERATUR VON 80°C..... | 70 |
| 4.3.3.1 | Vorbereitungen..... | 70 |
| 4.3.3.2 | Versuchsablauf..... | 70 |
| 4.4 | ERGEBNISSE | 72 |
| 4.4.1 | AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE OHNE MEDIUM BEI RAUMTEMPERATUR..... | 73 |
| 4.4.2 | AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE MIT MEDIUM BEI EINER TEMPERATUR VON 40 – 45°C..... | 75 |
| 4.4.3 | AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE MIT MEDIUM BEI EINER TEMPERATUR VON 80°C..... | 77 |
| 4.5 | SCHLUSSFOLGERUNG | 79 |
| 5 | <u>ZUSAMMENFASSUNG.....</u> | <u>81</u> |
| 6 | <u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</u> | <u>81</u> |
| 7 | <u>TABELLENVERZEICHNIS</u> | <u>85</u> |
| 8 | <u>LITERATURVERZEICHNIS</u> | <u>85</u> |
| 9 | <u>ANHANG</u> | <u>89</u> |

1 Einleitung

1.1 Allgemeines und Problemstellung

Der Bedarf an fossilen Rohstoffen zur Energiegewinnung und Energieverarbeitung ist trotz bereits vieler alternativer und erneuerbarer Energien stets am Steigen, wodurch eine noch effizientere Ausbeutung von schon bekannten Lagerstätten gefordert wird. Die Erschließung von immer tiefer in der Erdkruste liegenden Energiequellen, erfordert speziell im Off-Shore-Bereich hohe Anforderungen an die Tiefbohrtechnik beziehungsweise die dabei verwendeten Werkstoffe.

Schoeller-Bleckmann Oilfield Equipment AG (SBO) ist Weltmarktführer bei der Herstellung von Hochpräzisionsteilen für die Ölfeld-Industrie. Die Schwerpunkte sind dabei amagnetische Bohrstrangkomponenten für die Richtbohrtechnologie. Da an die einzelnen Bohrstrangkomponenten sehr hohe mechanische Anforderungen gestellt werden und eine hohe Qualität gefordert wird, werden die dafür verwendeten Werkstoffe (Cr-Mn-N-Austenite) im Unternehmen unter anderem einer Umlaufbiegeprüfung, bei der die Rotation und die dabei auf den Bohrstrang einwirkende Biegespannung simuliert wird, unterzogen.

Momentan werden die Umlaufbiegeprüfungen bei SBO an der Umgebungsluft, und nicht in temperatur- und korrosionsbeaufschlagter Umgebung durchgeführt. Bei der Lösung dieses Problems soll die folgende Masterarbeit helfen. Es ergibt sich die Aufgabenstellung und Forderung nach der Konstruktion einer Korrosionsprüfkammer zum Einbau in die Umlaufbiegemaschine, um die geforderten Umgebungseinflüsse auf die Werkstoffe simulieren zu können. Die dabei erreichten Werkstoffkennwerte unter Korrosion und definierten Temperaturen können nun mit jenen in Umgebungsluft verglichen werden und geben dann Aufschluss über das Verhalten des Materials in wirklichkeitsgetreuem Einsatz. Die richtige Werkstoffauswahl und zielgerichtete Weiterentwicklung von korrosionsbeständigen Werkstoffen wird durch diese Arbeit wesentlich unterstützt.

1.1.1 Die Entwicklung des Tiefbohrens

Beim Tiefenbohren handelt es sich keinesfalls um eine neue Technologie, denn schon bereits 600 v. Chr. wurden in China Bohrungen auf Salzsole bis in etwa 500 m Tiefe mit schlagenden Bohreinrichtungen abgeteuft [1]. Auch im europäischen Altertum und Mittelalter wurden Bohrungen zur Wassergewinnung und später zur Erkundung flacher Erzgänge durchgeführt. Die Bohrteufe und die Bohrtechnologie stagnierten dann jedoch über viele Jahrhunderte. Erst die im Zuge der Industrialisierung aufkommende Suche von Rohstoffen (Eisenerz, Kali und Steinkohle), forcierte die Entwicklung der Tiefbohrtechnik. Hierbei wurden bereits Tiefen von 2000 m erreicht [1]. Das im 19. Jahrhundert aufkommende Fördern von Erdöl und Erdgas, vor allem in den USA, wirkte sich revolutionär auf die Tiefbohrtechnik aus [2]. Dabei wurde zur Exploration und Erschließung etwaiger Lagerstätten das Rotary-Bohrverfahren entwickelt, welches einen wichtigen Entwicklungsschritt in der Technologie bedeutete [1]. Im Jahre 1901 wurde dann die erste Rotary-Bohranlage für eine Tiefbohrung auf Erdöl an der Golfküste eingesetzt [2]. Mit seiner ständigen Weiterentwicklung der Anlagentechnik zählt dieses Verfahren heute noch zu den beherrschenden Bohrverfahren, womit bei kommerziellen Bohrungen Teufen von mehr als 9000 m erreicht wurden. Die größte Tiefe wurde mit der Bohrung Kola SG 3 bereits 1984 unter Anwendung des Rotary- und Turbinenbohrens in der UDSSR erreicht und betrug 12066 m [1].

Das Rotarybohren ist ein gleichzeitig drehendes und spülendes Bohrverfahren. Die Übertragung der Drehbewegung beziehungsweise der Kraft vom Obertage-Antrieb zum Bohrmeißel erfolgt über ein Hohlgestänge. Durch dieses wird während des Bohrbetriebes laufend eine speziell entwickelte Spülflüssigkeit zur Bohrlochsole gepumpt, um das Werkzeug zu kühlen und den vom Meißel erzeugten Bohrschmamt im Ringraum, zwischen Gestänge und Bohrlochwand zu Tage zu fördern. Durch den infolge des Spülstromes aufbauenden Druck wird ein Einbrechen der Bohrlochwand verhindert. Bei der Spülung handelt es sich im Allgemeinen um eine Tonsuspension, deren Eigenschaften so entwickelt wurden, dass eine wasserdichte Haut entlang der Bohrwandung entsteht, welche das Bohrloch auskleidet [2], [3]. Abbildung 1 zeigt die

schematische Darstellung der Funktion der Spülung in einem Bohrloch mit Bohrmeißel und Verrohrung.

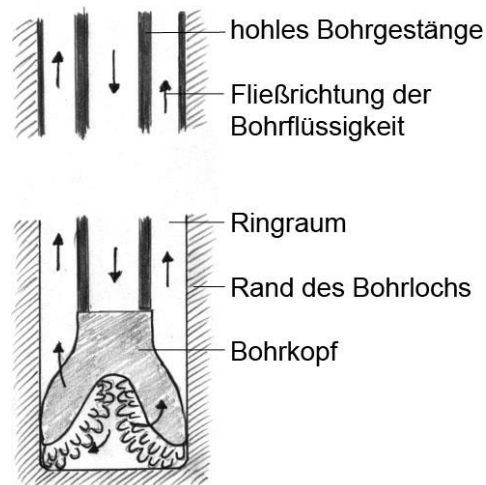


Abbildung 1: Schematische Darstellung Spülungsfunktion im Erdölbohrloch mit Bohrmeißel und Bohrgestänge [4]

In Abbildung 2 ist eine typische Rotary-Bohranlage abgebildet und setzt sich aus folgenden Hauptkomponenten zusammen:

- Bohrmeißel (meist als Rollenmeißel ausgeführt, für höhere Lebensdauer und größere Bohrfortschritte werden aber auch diamantbesetzte Bohrkronen eingesetzt)
 - darüber angeordnete Schwerstangen (dickwandige Rohre als Teil des Bohrstranges)
 - Hohlbohrgestänge (dünnwandige Rohre)
 - Mitnehmerstange (kantig ausgeführt, um die Drehbewegung des Drehtisches auf die Stange übertragen zu können)
 - Spülkopf (dessen Bügel am Bohrhaken des Flaschenzuges befestigt ist)
- [1],[2],[5]

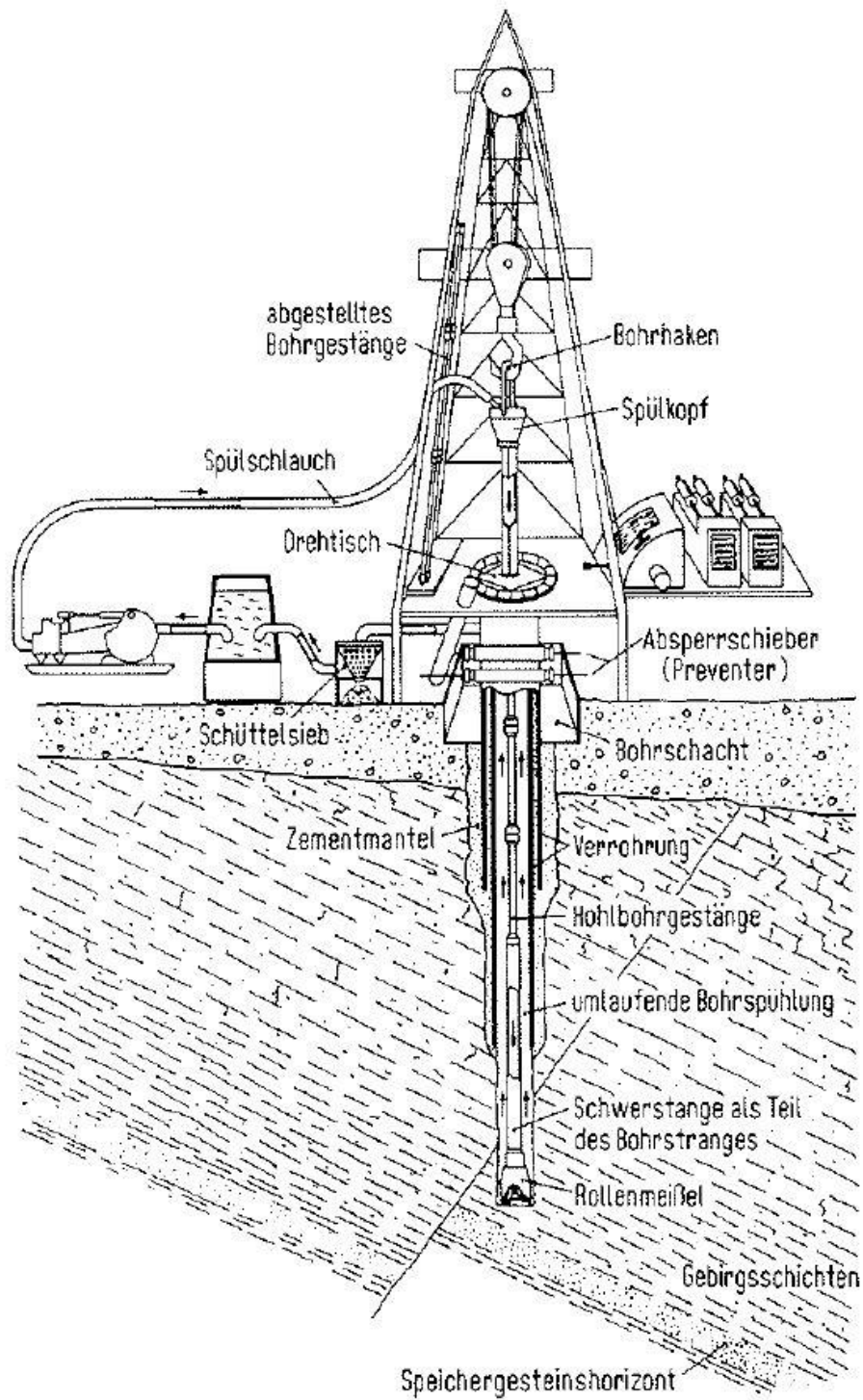


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Rotary-Bohranlage [1]

Abbildung 3 zeigt den typischen Aufbau, beziehungsweise die Zusammensetzung eines Bohrstranges mit Bohrmeißel.

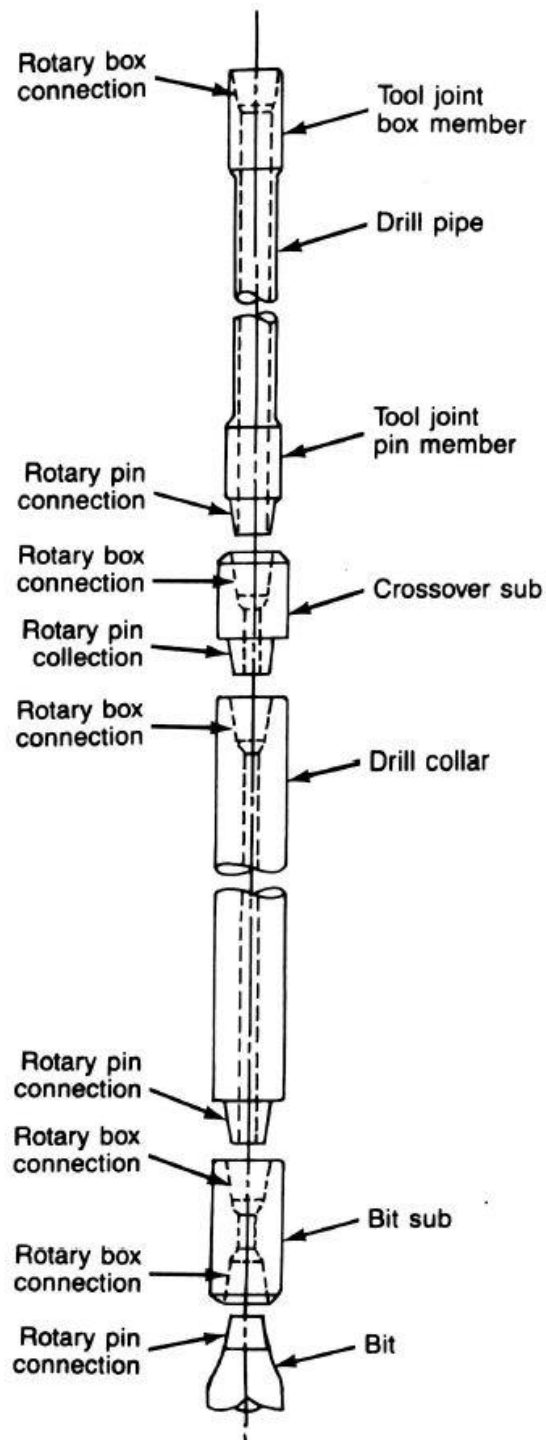


Abbildung 3: Typische Zusammensetzung eines Bohrstranges [6]

Um kostengünstiger arbeiten und gleichzeitig einen höheren Bohrfortschritt erzielen zu können, wurde bereits vor Beginn des 2. Weltkrieges in der Sowjetunion die Technik des Turbinenbohrens entwickelt [7],[8],[9]. Die Bohreinrichtung hat einen sehr ähnlich Aufbau wie die Rotary-Garnitur und das Prinzip beruht dabei auf der direkten Kraftübertragung vom Motor auf das Bohrwerkzeug. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, handelt es sich bei der Maschine meist um eine mehrstufige Turbine, deren Rotor mit dem Meißel gekoppelt ist. Angetrieben wird der Rotor über das Spülmittel, wobei aber Menge und Druck auf den gewünschten Bohrfortschritt angepasst werden müssen. Während der Meißel angetrieben wird, steht der Bohrstrang still oder dreht sich als Reaktion auf das Antriebsmoment langsam mit. Der Grund dafür, dass sich das Bohren mit Turbinen gegenüber dem Rotary-Antrieb nicht durchgesetzt hat, ist zum einen der ungünstige Drehzahlbereich (600 – 900 U/min) für den Rollenmeißel, der schlechte Wirkungsgrad und zum Teil die Standzeit der Dichtelemente der Turbine [7],[9].

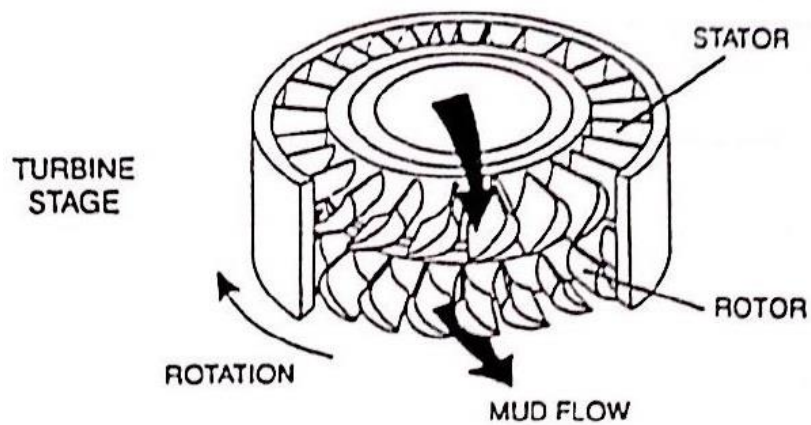


Abbildung 4: Wirkungsweise einer Bohrturbine [7]

Mit dem Ende der sechziger Jahre wurde durch die Entwicklung von hydrostatischen Direktantrieben eine bessere Alternative zu den Turbinen geschaffen [10]. Diese neu entwickelten, hydrostatischen Motoren, welche nach dem Moineau-Prinzip arbeiten, eigneten sich ausgezeichnet für die Richtbohrtechnik und ersetzten nach und nach die bis dahin verwendeten Turbinen [10]. Diese Moineau-Motoren erlauben das Arbeiten mit Rollenmeißeln in einem Drehzahlbereich von 200 – 500 U/min bei einem Wirkungsgrad von mehr als 50% [7],[9]. In Abbildung 5 ist eine schematische Darstellung eines solchen Moineau-Motors zu sehen.

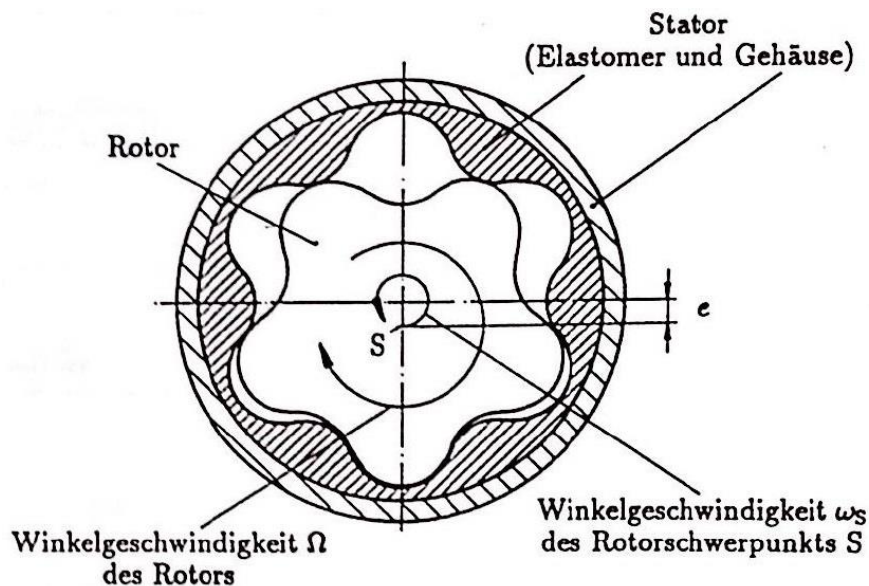


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Moineau-Motors [11]

1.1.2 Die Richtbohrtechnik

Kommerzielle Bohrungen von mehr als 5000 m zur Exploration und Erschließung von Kohlenwasserstofflagerstätten sind heute nichts Ungewöhnliches mehr. Im Off-Shore-Bereich werden bis zu 60 Bohrungen von einer Plattform aus auf Öl- und Gasfelder erschlossen, um damit die Lagerstätten mit hoher Rentabilität ausbeuten zu können. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, werden ab einer bestimmten Tiefe die Bohrungen gezielt abgelenkt, wenn zum Beispiel aus geologischen oder

geographischen Gründen an Ort und Stelle eine Bohrung nicht durchgeführt werden kann[1].

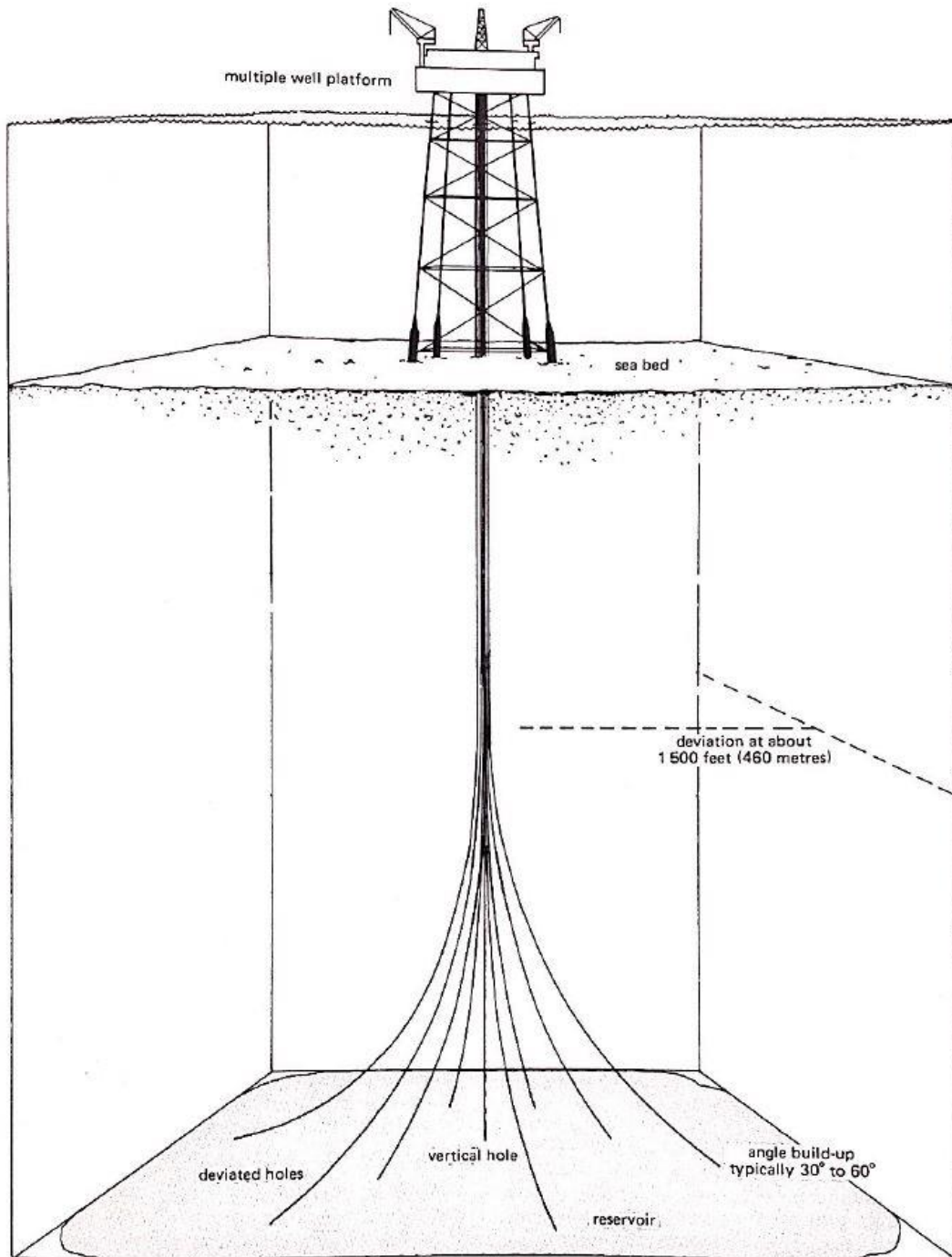


Abbildung 6: Schematische Darstellung von Richtungsbohrungen ausgehend von einer Off-Shore-Plattform [12]

In der Richtbohrtechnik ist es außerdem möglich, den Bohrstrang in die Horizontale abzulenken, wodurch Zielpunkte mit bis zu 3000 m Entfernung erreicht werden

können, wie in Abbildung 7 zu sehen ist. Der dazu erforderliche Neigungsaufbau einer in die Horizontale umzulenkende Bohrung kann steil oder allmählich erfolgen. Zum Beispiel ergibt sich bei einer Ablenkung von 10°/10 m für den Ablenkbereich ein Radius von 6 m, wogegen ein Neigungsaufbau von 1°/10 m einen Ablenkradius von 600 m ergibt [1].

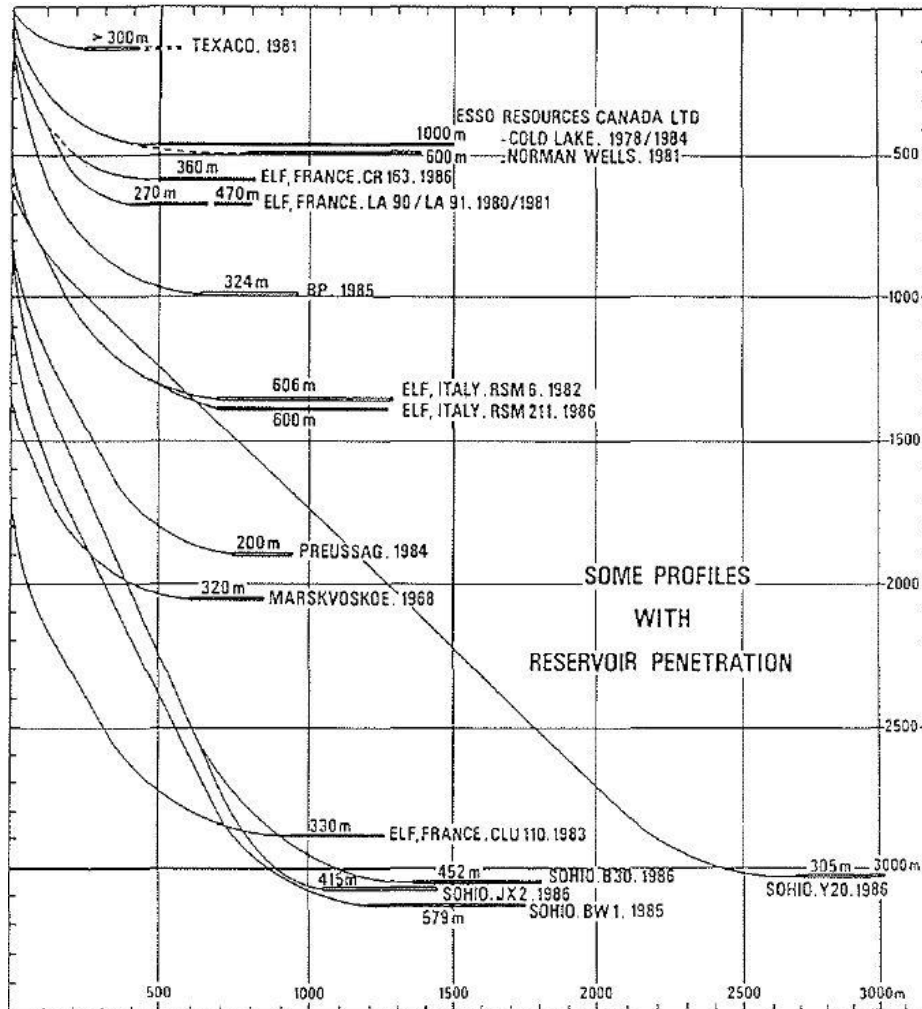


Abbildung 7: Übersicht weitreichender Horizontalbohrungen [1]

Sowohl Bohrungen, die ab einer bestimmten Tiefe abgelenkt werden, als auch geradlinig verlaufende, übertiefe Senkrechtbohrungen, sind besonders anspruchsvolle Varianten in der Tiefbohrtechnik, wodurch der Richtbohrtechnik eine große technische Bedeutung zukommt. Die Ablenkung des Bohrstranges, beziehungsweise des Bohrmeißels, kann mit verschiedensten Techniken bewerkstelligt werden, wobei man zwischen einer gewollten und ungewollten Ablenkung des Bohrmeißels unterscheiden muss. Die Letztere tritt dann auf, wenn ein Wechsel der geologischen Formation (zum Beispiel das Auftreffen des Meißels von einer weichen auf eine harte Gesteinsschicht) nicht senkrecht, sondern unter einem steileren Winkel zur Bohrachse erfolgt. Das dabei entstehende "Abgleiten" des Bohrmeißels entlang des Formationswechsels muss entweder von der Bohrplattform, oder durch spezielle Bohreinrichtungen korrigiert werden. Durch die Belastung des Bohrmeißels und/oder über die Drehtischgeschwindigkeit (bei Bohrmotoren die Turbinendrehzahl) kann eine Erhöhung beziehungsweise Verringerung der Bohrlochkrümmung erreicht werden. Entsteht während des Bohrvorganges ein zu großer Neigungsaufbau oder eine zu hohe Winkelabweichung von der Vertikalen, so kann schon eine Reduzierung der Meißelbelastung zu einer Verringerung der Neigung als Folge des Pendeleffektes helfen [5],[7].

Soll eine gezielte Ablenkung sowie ein schneller Neigungsaufbau vorgenommen werden, so wird eine mechanische Einrichtung verwendet. Eine der ältesten Methoden stellt dabei der sogenannte Ablenkkeil (Whipstock) dar. Die Funktion dieser Ablenkeinrichtung ist in Abbildung 8 dargestellt. Dazu wird ein Keil in die Bohrlochsohle eingebracht, danach mit einem kleineren Bohrmeißel etwa 5 m weiter gebohrt und nach einer Richtungskontrolle wird dann die Bohrung bis auf den vollen Querschnitt erweitert. Mit Hilfe dieser Methode können große Neigungen des Bohrloches erzielt werden. Eine weitere Methode der Richtungsänderung ist die Verbindung eines Neigungsüberganges (bent sub = leicht geneigter Abschnitt eines Bohrgestänges) mit einem Vorort-Antrieb (downhole drilling motor), wobei aber nur leichte Neigungsänderungen möglich sind (siehe Abbildung 9) [3],[5],[13].

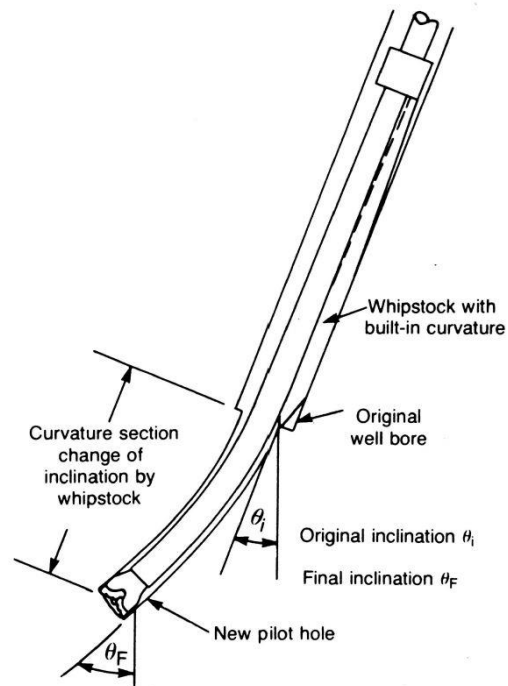


Abbildung 8: Funktionsweise der mechanischen Ablenkeinrichtung (Whipstock) [5]

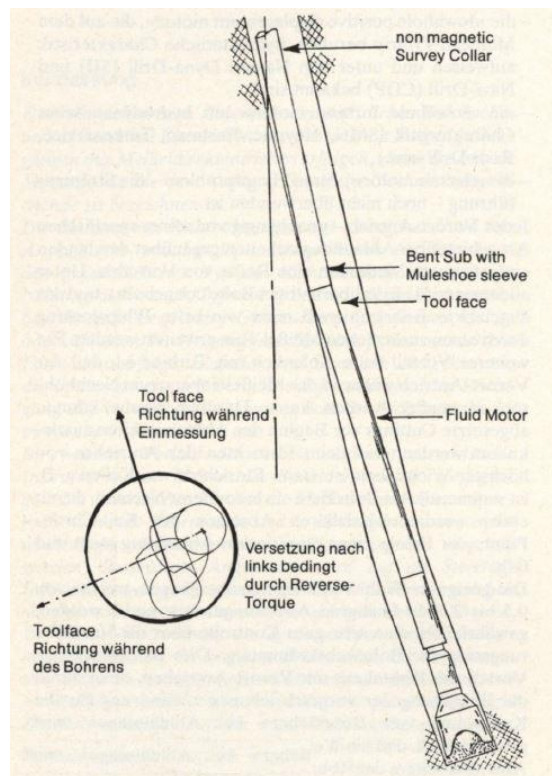


Abbildung 9: Funktionsweise Vorort-Antrieb mit Bent-Sub [13]

Damit erfolgreiche Bohrfortschritte von weitreichenden Richtbohrungen erzielt werden können, sind neben der richtigen Auswahl geeigneter Ablenkwerkzeuge und Meißel-Direktantriebe, zuverlässig arbeitende Messeinrichtungen notwendig. Je mehr Daten über die laufende Bohrung verfügbar sind, desto schneller kann einem Abweichen des Bohrplanes entgegen gewirkt werden. Da zu Beginn der Richtbohrtechnik der Bohrstrang für durchzuführende Messungen gestoppt werden musste, war immer mit erheblichen Verzögerungszeiten zu rechnen. Die mussten dann während der Auswertung der Daten wieder aufgeholt werden, in dem die Bohrung vorangetrieben wurde. Die Tatsache, dass durch dieses Messverfahren keine Echtzeitmessungen vorlagen, führte in den 70er Jahren zur Entwicklung von neuen Mess- und Datenübertragungssystemen [7].

Die momentane Bewegungsrichtung und die permanente Ortsbestimmung des Bohrwerkzeuges im dreidimensionalen Raum bezeichnet man als Navigation. Dabei werden die drei Richtungsgrößen Azimut, Neigung und Toolface (die Kraft am Meißel oder die Ausrichtung des Knickstücks) präzise bestimmt. Auch die Übertragung dieser Informationen an die Oberfläche beinhaltet die Navigation. Mit MWD-Technik (Measurement While Drilling) bezeichnet man die Technik, bei der meißelnahe Informationen während des Bohrvorganges gemessen werden. Es muss also der Bohrprozess für den Messvorgang nicht unterbrochen werden [14]. Zusätzlich können dabei die Daten der Orientierung des Bohrloches, der Formationseigenschaften (Porösität), der Bohrparameter (Meißeldrehzahl, Meißellast, Drehmoment), sowie des Bohrlochzustandes (hydrostatischer Druck und Bohrlochsolentemperatur) im Echtzeitverfahren gemessen und übertragen werden [7]. Die MWD-Systeme bestehen aus Sensor oder Messwertaufnehmer, der Messwertverarbeitung und dem Übertragungselement, das die gemessenen Größen codiert mittels Übertragungsmedium an die Oberfläche überträgt. Neben den elektrischen (mit kabelgebundenen Verfahren), akkustischen und elektromagnetischen Systemen hat sich das Spüldruckpulsverfahren zur Datenübermittlung durchgesetzt. Abbildung 10 zeigt die gesamte Einbausituation einer Messwerterfassungs- und Messwertübertragungseinrichtung in einer Schwerstange, welche während des Bohrvorganges unmittelbar über, beziehungsweise hinter dem Bohrmeißel angeordnet ist. In dieser Schwerstange

sind neben den Richtungssensoren auch noch die Regelungselektronik, die Pulsatoreinheit zur Erzeugung der Druckimpulse und die gesamte Energieerzeugung (Turbine und Generator) untergebracht [7].

Measured values:

Azimuth, Drift, Tool Face

Accuracy of measurement:

$\pm 1^\circ$, $\pm 0.1^\circ$, $\pm 1^\circ$

Temperature resistance:

125°C

Operating range:

200 – 1,000 gpm

Data recording:

String rotation must stop for 30 seconds, then the data are recorded, while drilling may continue.

Data transmission:

approx. 3 minutes

Note:

Tool face data can be transmitted continuously, with the system being always restarted from the surface.

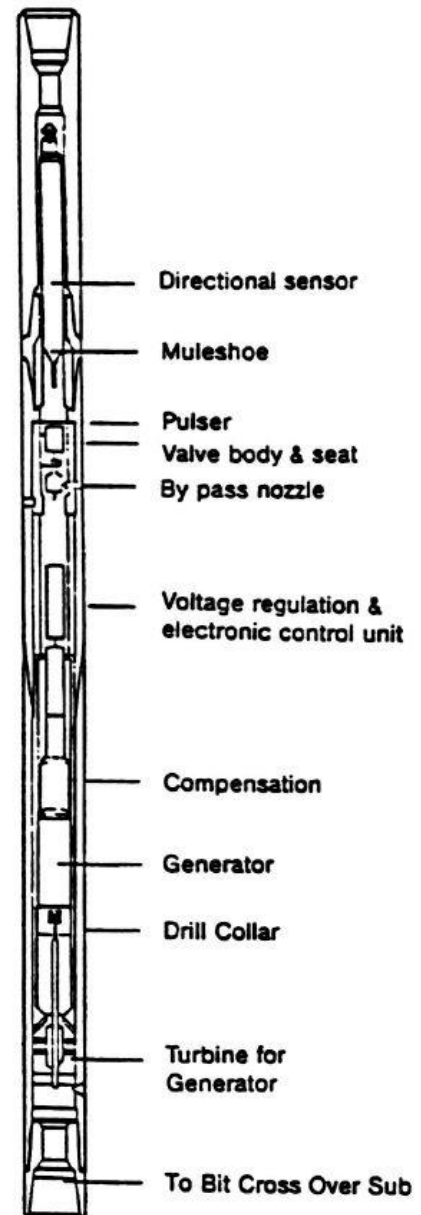


Abbildung 10: Schematischer Aufbau der Einbausituation des MWD-Systems [7]

Um die Daten aufnehmen zu können, muss die Bohrung für 30 Sekunden gestoppt werden, wobei bei dem weiteren Bohrbetrieb die Übertragung der Daten nach ca. 3 Minuten abgeschlossen ist. Aus dem Grund, dass in dieser Schwerstange sehr teure und hochwertige Mess-, Regel-, Energieversorgungs- und Datenübertragungssysteme verbaut werden, sind die Anforderungen an den für dieses Bauteil verwendeten Werkstoff sehr hoch [7].

1.2 Der Bohrmeißel

Was beim Tiefbohren die wichtigste Komponente beim Bohrstrang ist, ist schwierig herauszuheben, aber der Bohrmeißel ist dabei bestimmt eines der wichtigsten Werkzeuge, da die richtige Auswahl des Meißels sich auf die Bohrkosten auswirkt. Die Anzahl der für ein Loch verwendeten Bohrköpfe variiert stark je nach Tiefe, Art der angetroffenen Formation (hart oder weich), auftretenden Problemen und weiteren Faktoren. Unter guten Bedingungen kann man mit einem Meißel mehrere hundert Meter tief bohren bevor er getauscht werden muss. Es kann aber auch passieren dass man nur wenige Meter bohrt und auf eine harte oder abrasive Gesteinsschicht trifft. Sobald der Meißel im Loch ist, ist es außerdem sehr wichtig dass man mit der richtigen Belastung auf den Bohrkopf und der für den gewählten Meißel erforderlichen Rotationsgeschwindigkeit arbeitet. Der am Häufigsten verwendete Bohrmeißel war der Stahl-Zahn-Rollen-Meißel/Drei-Rollen-Meißel (milled-tooth bit), bei welchem die Zähne auf die einzelnen Rollen gefräst sind. Diese Kegel sind an den Beinen des Meißelkörpers auf einer Welle versetzt gelagert, um die Schneidwirkung zu erhöhen, wobei die Lager der Kegel freie Drehbarkeit gewährleisten (siehe Abbildung 11). Für harte, abrasive Formationen wurde der Einsatz-Zahn-Rollen-Meißel (insert bit), der anstatt der aufgefästen Zähne eingesetzte Hartmetallzähne hat, entwickelt. Der restliche Aufbau ist dabei gleich wie beim Stahl-Zahn-Rollen-Meißel (siehe Abbildung 12). Eine weitere Entwicklung war der Diamantbohrer (diamond bit), welcher immer mehr an Bedeutung in der Öl- und Gasindustrie gewann. Dieser besitzt viele kleine Industriediamanten, welche in einer Stahlmatrix eingesetzt sind und hat keine beweglichen Teile. Historisch wurden diese für harte Formationen, bei der Forderung nach sehr geringen Bohrraten oder einer

großen Lebensdauer des Meißels eingesetzt und waren/sind eine gute Alternative zu den Drei-Rollen-Meißel bei Routine-Bohrungen (siehe Abbildung 13). Auch bei den Diamantbohrern wurden weitere Entwicklungsschritte vorgenommen in dem zum Beispiel polykristalline Diamantpresslinge in dem Meißel eingesetzt wurden (polycrystalline diamond compact bit), welcher für weiche bis mittel-harte Gesteinsschichten verwendet wurde/wird. Solch ein Bohrmeißel ist im Betrieb ähnlich zu einem herkömmlichen Bohrkopf, in dem der Felsen durch Schabwirkung entfernt wird. Die neue eingesetzten polykristallinen Zähne ragen aus dem Bohrkopf etwas weiter heraus als die Diamanten in einem gewöhnlichen Diamant-Bohrer, die ihm die Fähigkeit geben, weichere Formationen zu bohren, ohne zu verstopfen (siehe Abbildung 14) [5].

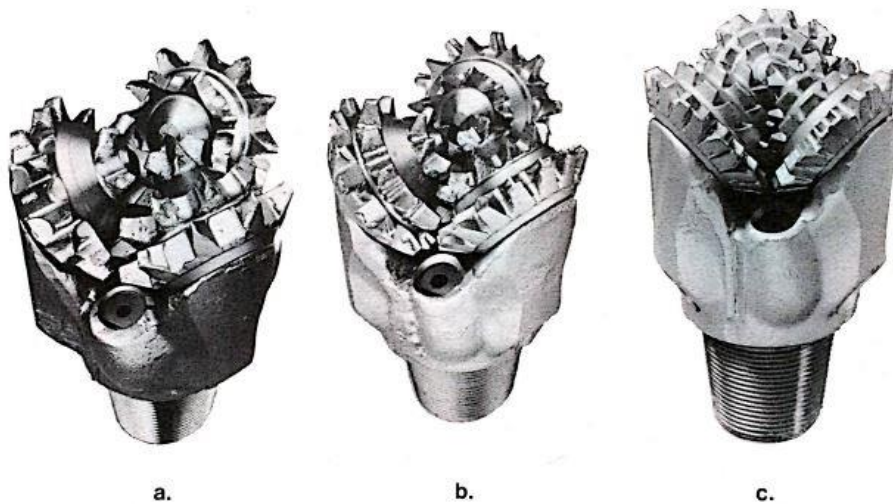


Abbildung 11: Stahl-Zahn-Rollen-Meißel (milled-tooth bit) a) für weiche Gesteinsschichten, b) für weiche bis mittlere Gesteinsschichten, c) für harte, abrasive Gesteinsschichten [5]

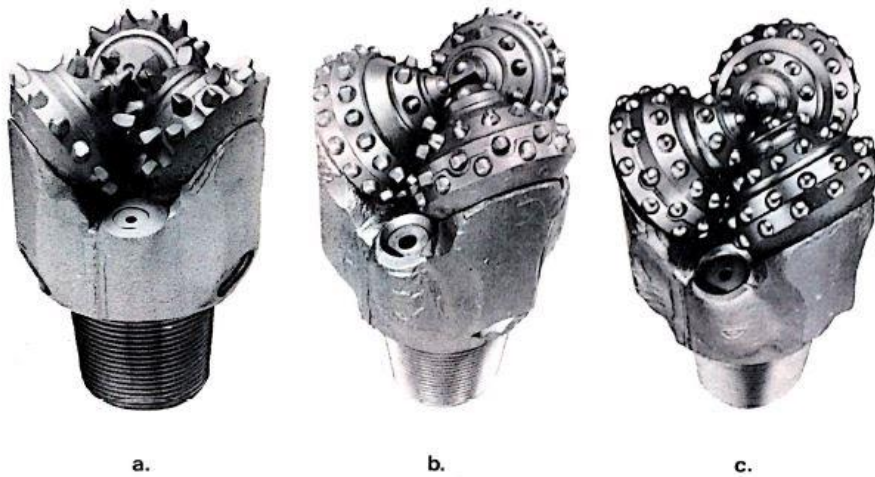


Abbildung 12: Einsatz-Zahn-Rollen-Meißel (insert bit) a) für weiche Gesteinsschichten, b) für mittlere bis harte Gesteinsschichten, c) für harte, abrasive Gesteinsschichten [5]

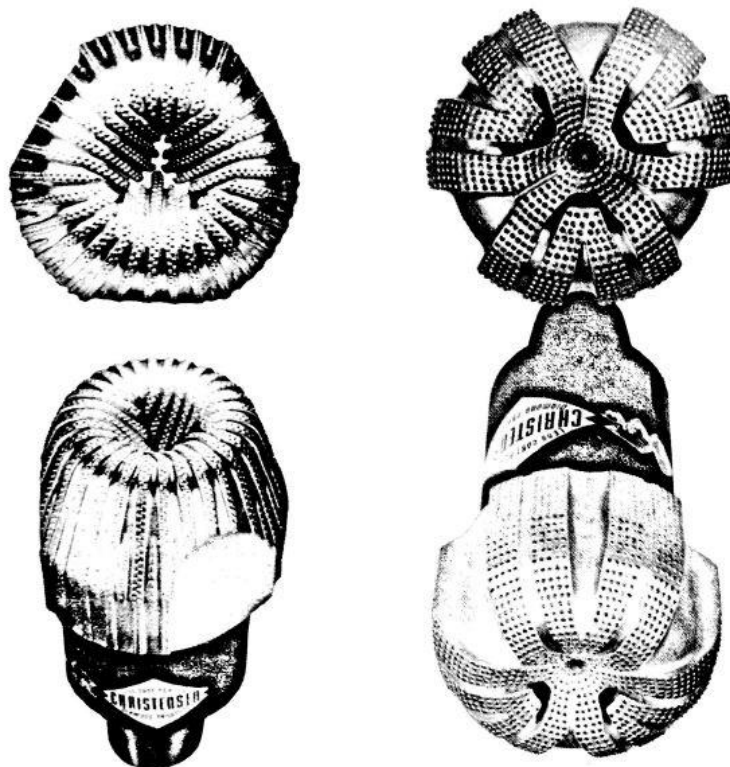


Abbildung 13: Diamant-Bohrer (diamond bits) [5]



Abbildung 14: Polycrystalliner Diamantbohrer (polycrystalline diamond compact bits) [5]

1.3 Die Schwerstange (drill collar)

Die durchschnittlichen Bohrfortschrittsraten sind je nach verwendetem Werkzeug und den geologischen Gesteinsformationen im Durchschnitt 2 bis 10 m/h. Es kann aber auch vorkommen, dass durch einen Formationswechsel plötzlich die Bohrleistung auf unter 0,8 m/h abfällt. Um diesem schlechten Bohrfortschritt entgegenwirken zu können, muss entweder ein anderer Meißel verwendet, oder die Kraft auf dem Bohrer erhöht werden. Die Kraftaufbringung auf das Werkzeug erfolgt über die sogenannten Schwerstangen (dickwandige Rohre/drill collar). Zusätzlich besitzen diese dickwandigen Rohre teilweise integrierte Stabilisator-Elemente und haben die Aufgabe, den Meißel in der Bohrlochsohle während des Bohrens zu stabilisieren und dem Pendeleffekt (der Drang des Ausrichtens beim Richtbohren des Bohrstranges in die Vertikale, hervorgerufen durch die Gravitation) entgegen zu wirken. Abbildung 15 zeigt schematisch den Pendeleffekt. Schwerstangen, wie der Name schon sagt, erzeugen die zum Bohren erforderliche Kraft über ihr Gewicht. Die aufzubringenden

Gewichtskräfte liegen zwischen 200 kN bis 400 kN. Werden jedoch große Bohrmeißel verwendet, können Kräfte mit bis zu 500 kN und mehr auftreten um die gewünschte Bohrleistung zu erzielen. Die Schwerstangen unterliegen während des Bohrbetriebes einem hohen abrasiven Verschleiß, womit ein Gewichtsverlust verbunden ist, was bei der Gewichtsrechnung und Auslegung der Bohrung zu berücksichtigen ist. Um eine Gewichtskraft von 200 kN aufbringen zu können, müssen zum Beispiel 17 Schwerstangen mit den Abmessungen 6 ¼“ x 2 ¼“ und einer jeweiligen Länge von 9 m übereinander hinter dem Bohrmeißel angeordnet werden. Typische Abmessungen für solche drill collar sind:

| | |
|-------------------|-----------|
| Innendurchmesser: | 44,45 mm |
| Außendurchmesser: | 158,75 mm |
| Gewicht: | 12 kN |
| Länge: | 9 m |

Damit es nicht zu einem Ausknicken des Bohrgestänges über den Schwerstangen kommt, muss das Gewicht genau berechnet werden, denn diese Bohrstangen haben eine wesentlich kleinere Wandstärke als die der Schwerstangen. Abbildung 16 zeigt die Auswirkungen der Wahl des richtigen Schwerstangengewichtes auf das Bohrgestänge. Würden die Bohrröhre ausknicken, so würden die Verschleißerscheinungen erheblich sein. Durch die zusätzlichen Biegegewichtsbelastungen entstehen hauptsächlich im Rohrbereich und weniger an den Verbindungsstellen der Rohre Ermüdungsbrüche [7], [15], [16].

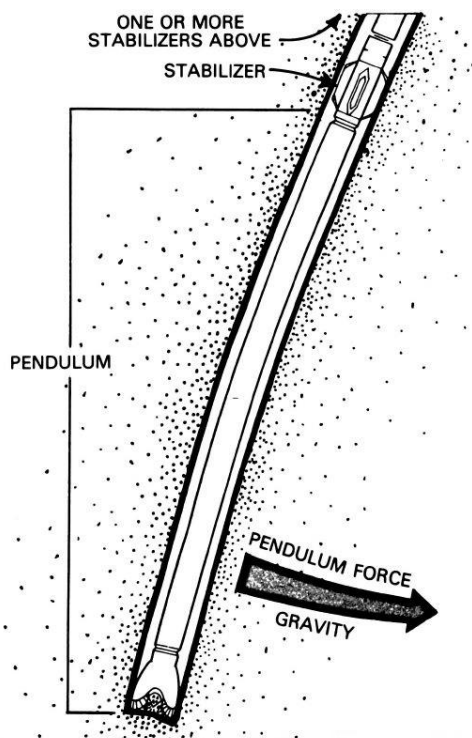


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Pendeleffektes [16]

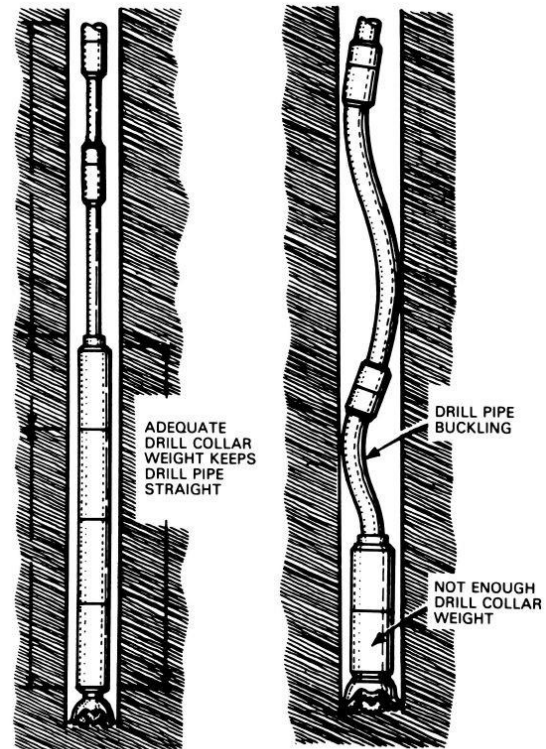


Abbildung 16: Auswirkungen der Wahl des Schwerstangengewichtes auf das Bohrgestänge [16]

1.3.1 Beschädigung der Schwerstange

Bei den Bohrgestängen treten die meisten Beschädigungen im Rohr auf, wogegen bei den Schwerstangen die größten Schäden im Bereich der Verbindung der einzelnen Stangen vorkommen. Dies liegt daran, dass beim Gestänge die Wandstärke in der Mitte des Rohres viel dünner als beim Verbindungsstück ist, und daher dieses dort eine geringere Steifigkeit besitzt. Infolge der Biegewechselbeanspruchungen treten daher Dauerbrüche, beziehungsweise Ermüdungsbrüche im Gestänge selbst und nicht an den Verbindungselementen auf. Anders ist die Situation jedoch bei den Schwerstangen, da die häufigsten Biegebeanspruchungen in den Verbindungsstücken auftreten und dort die Gewinde direkt in die Stange hineingeschnitten sind. Durch die dort auftretenden Spannungskonzentrationen und der durch das Gewinde vorherrschenden Kerbwirkung, handelt es sich an dieser Stelle um den schwächsten Teil der Schwerstange (siehe Abbildung 17). Jede Stange besitzt zwei dieser Stellen. An dem

Zapfen (pin) und der Muff (box) der Verschraubung treten dabei die größten Spannungskonzentrationen auf (siehe Abbildung 18) [17].

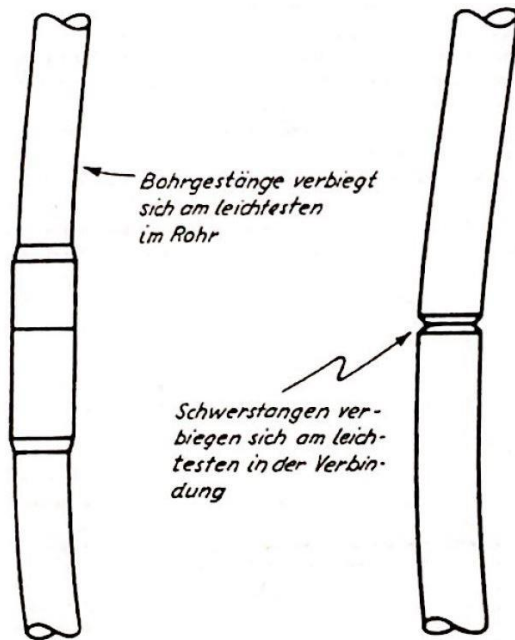


Abbildung 17: Schematische Darstellung/Gegenüberstellung von Bohrstrang und Schwerstangen mit den Positionen an denen Dauerbrüche beobachtet werden [17]

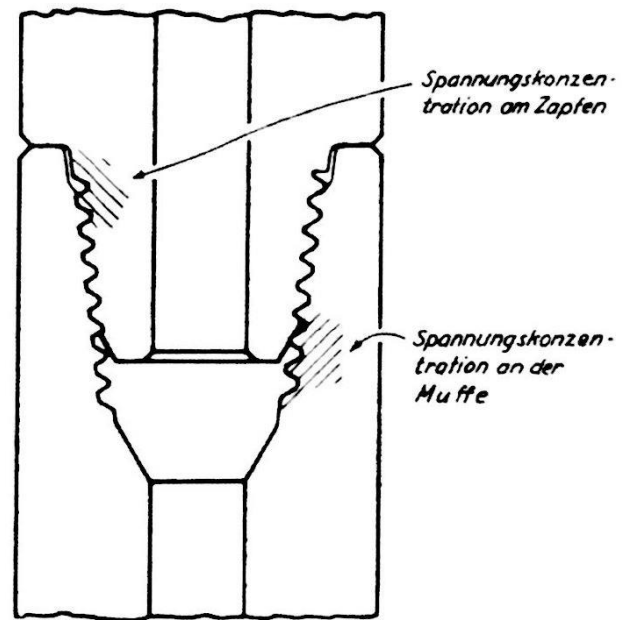


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Schwerstangenverbindung mit den Bereichen der höchsten Spannungskonzentration [17]

Nur wenn die Schwerstangenverbindung richtig verschraubt wurde, unterstützt die Schulter den Zapfen so, dass der Zapfen durch das Muffengewinde starr gehalten wird. Daraus ergibt sich eine Schwachstelle an dem Gewindeauslauf der Muffe im Bereich des Zapfenendes. Zwischen dem ersten und zweiten Gewindegang an der Schulterseite des Zapfengewindes befindet sich eine weitere Schwachstelle, an der vermehrt Ermüdungsbrüche zu beobachten sind. Wurde die Verschraubung der Schwerstangenverbindung ordnungsgemäß durchgeführt, so kommt es zuerst an der Verbindungsmuffe zum Bruch. Andererseits führt eine mangelnde Verschraubung oder ein Lockern der Verbindung während des Bohrbetriebes zum Bruch an einer anderen Stelle. Bei rotierender Schwerstange verbiegt sich die Verbindung und der Zapfen neigt sich auf Grund der ungenügenden Abstützung hin und her (siehe Abbildung 19) [16], [17], [18].

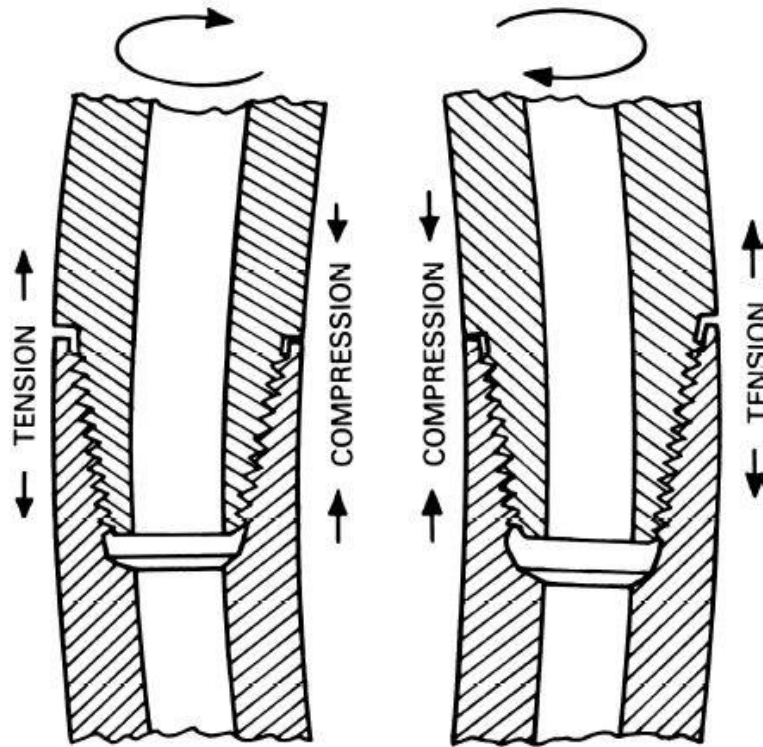


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Zapfenbewegung und Abheben der Schultern bei ungenügender Verschraubung [16]

In lockeren Verbindungen kommt es normalerweise an der Schulterseite in der Nähe des Zapfenanfanges im ersten oder zweiten Gewindegang zum Bruch (siehe Abbildung 20). Manchmal bricht aber auch die Muffe etwa im dritten oder vierten Gewindegang und nicht wie normal am Muffengrund (siehe Abbildung 21). Das passiert, wenn die Muffenschulter zu dünn und so schwach ausgeführt ist, dass sie die Biegebeanspruchung durch den Zapfen nicht auf Dauer ertragen kann. Durch die ständige Hin- und Herbewegung entsteht außerdem ein Abdichtungsproblem im Gewinde und an der Schulter, sodass das Schmiermittel weggespült und die Gewinde zu „Fressen“ (durch hohe Reibung verursachte Wärmeentwicklung, die zum Verschweißen der Haftstellen im Gewinde führt) beginnen [17].

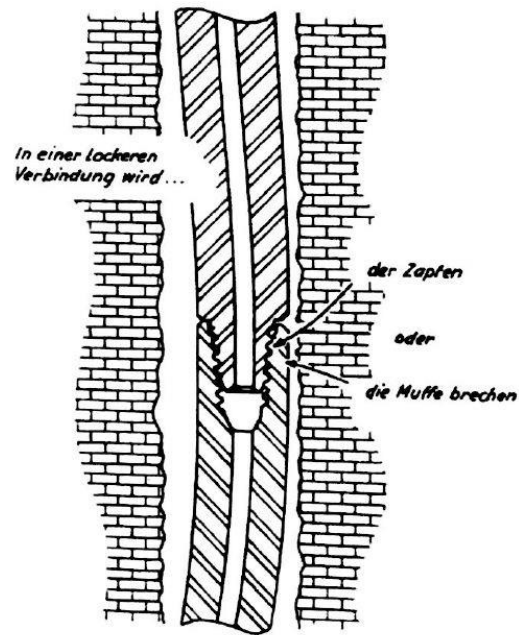


Abbildung 20: Schematische Darstellung einer lockeren Verbindung [17]

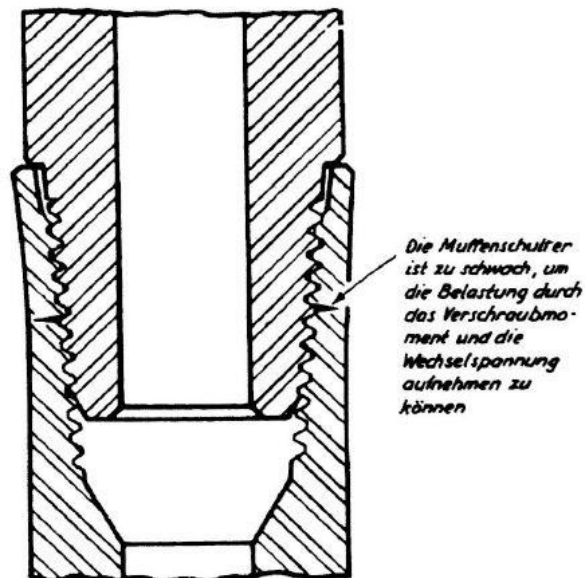


Abbildung 21: Schematische Darstellung einer schwachen Muffenschulter [17]

Neben den Spannungskonzentrationen an den Verbindungen der Schwerstangen, treten auch an den glatten Bereichen Spannungsspitzen auf. Dies geschieht durch die in den MWD-Systemen verwendeten Mess- und Energieversorgungstools zur Richtungskontrolle, welche in den Schwerstangen in Kerben, Bohrungen und Nuten

verbaut sind. Da sich diese Bauteile am untersten Ende des Bohrstranges befinden und ein Totalversagen umfangreiche Fangarbeiten mit sich bringen würden, müssen sich sowohl die Verbindungselemente, als auch die glatten Schwerstangenbereiche einer immer wiederkehrenden Wartung und Inspektion unterziehen. Zusätzlich zu den mechanischen Beanspruchungen sind speziell die im Off-Shore-Bereich eingesetzten Schwerstangen extremen korrosiven Einflüssen ausgesetzt. Da dort das zur Verfügung stehende Meerwasser als Spülmittel eingesetzt wird, führt dies zu lokalen Korrosionserscheinungen (Lochfraß) und in Kombination mit den einwirkenden äußeren Belastungen zu Spannungsriss- und Schwingungsrisskorrosion [7], [17],[19].

1.3.2 Schwerstangenwerkstoffe

Durch die hohen Anforderungen bezüglich ihrer Beständigkeit gegenüber korrosiver und mechanischer Schädigungsmechanismen, müssen sehr hoch qualitative Werkstoffe hinsichtlich ihrer Verarbeitung und des Legierungsaufbaues verwendet werden. Da für die Orientierungsmessung das irdische Magnetfeld verwendet wird, müssen diese Materialien zusätzlich noch antimagnetisch sein, was die zur Verfügung stehende Werkstoffpalette erheblich eingrenzt. Die für die antimagnetischen Schwerstangen verwendeten Materialien reichen von Ni-Basis-Legierungen über Cu-Be-Legierungen, bis hin zu austenitischen Cr-Ni- bzw. Cr-Mn-Stählen. Werkstoffe wie Aluminium und Sonderbronzen werden aus Korrosionsgründen ausgeschlossen. Ni-Basis-Legierungen und Cu-Be-Bronzen besitzen zwar eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit und nichtmagnetische Eigenschaften, jedoch beschränkt sich ihr Einsatz aus Kostengründen auf das Notwendigste. 80% der momentan eingesetzten antimagnetischen Schwerstangen basieren auf Cr-Mn und Cr-Mn-N-Legierungen. Schoeller-Bleckmann Oilfield Equipment AG (SBO) in Ternitz (Österreich) ist Weltmarktführer bei der Herstellung von diesen Hochpräzisionsteilen. Aus Kostengründen werden im Bohrstrang aber ebenso "schwarze" Schwerstangen eingebaut. Ein typischer Werkstoff ist dafür der Vergütungsstahl AISI 4145 (42 CrMo 4). Dieses Material weist zwar im vergüteten Zustand sehr hohe statische mechanische Kennwerte auf, jedoch befinden sich vor

allem in chloridhaltiger Umgebung seine zyklischen Festigkeitseigenschaften weit unter denen der austenitischen Cr-Mn-Stählen. Zu berücksichtigen ist aber, dass die Verwendung von hochfesten, magnetisierbaren Stählen für die Messung der Bohrlochneigung ausschlaggebend ist. Ferromagnetische Bohrstrangelemente verstärken bei großen Neigungen die magnetische Ortsmissweisung (Deklination = ist der Winkel zwischen der magnetischen und der geographischen Nordrichtung). Daher benötigt man für große Neigungen längere antimagnetische Schwerstangensektionen [7].

Es kann aber auch vorkommen, dass trotz der Verwendung von nichtmagnetisierbaren Werkstoffen Missweisungen auftreten. Dies kann durch sogenannte "Hot Spots" (magnetisierbare Einschlüsse), welche sich im Inneren oder an der Oberfläche der Schwerstange befinden, und zu Kompassfehlern von bis zu 4° und mehr führen, geschehen. Durch fehlerhafte metallurgische Prozessführung, Legierungstechnik oder dem Verbleib von ferromagnetischen Stoffen aus der mechanischen Fertigung, können solche Störzonen entstehen und sind für den Bohrbetrieb natürlich nicht geeignet. Mit Permeabilitätstastern oder mit dem Differenzsondenverfahren, können solche ferromagnetischen Bereiche geortet werden. Die magnetische Permeabilität μ wird als Maß für die Nichtmagnetisierbarkeit eines Werkstoffes gewählt [7], [20], [21], [22].

$$\mu = \frac{B}{H}$$

B...magnetische Induktion

H...magnetische Feldstärke

beziehungsweise die relative magnetische Permeabilität μ_r .

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Die technische Grenze für die zulässige Magnetisierbarkeit bei “nichtmagnetisierbaren Schwerstangen“, ermittelt bei einer Feldstärke von 80 A/cm, liegt bei einer relativen Permeabilität von $\mu_r \leq 1,01$ [20].

1.3.2.1 Zusammensetzung, Herstellung und Eigenschaften der Schwerstangenwerkstoffe

Die zurzeit bei SBO hergestellten antimagnetischen Schwerstangen und Bohrstrangkomponenten umfassen mehrere Legierungssysteme und erstrecken sich von Cr-Mn-N- und Cr-Ni-N-Legierungen bis hin zu Ni-Basis-Werkstoffen. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Legierungssysteme mit den Markenbezeichnungen gegenüber gestellt [7].

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung von Cr-Mn-N- und Cr-Ni-N-Legierungen für Schwerstangen in Masseprozent (HS = High Strength) [23], [24]

| Marke | C | Mn | Cr | Mo | N | Ni |
|-------|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| P 530 | max. 0,05 | 18,50–20,00 | 13,00–14,00 | 0,40–0,60 | 0,25-0,40 | max. 2,00 |
| P 550 | max. 0,06 | 20,50–21,60 | 18,30-20,00 | min. 0,50 | min. 0,60 | min. 1,40 |

Die Herstellung der Schwerstangen erfolgt in einem Elektrolichtbogenofen, worin die Stähle aufgeschmolzen werden. Durch die Zugaben von stickstoffreichen Vorlegierungen, welche aus Fe-Mn-N (3 – 4% N) und Fe-Cr-N (3 – 6% N) bestehen, werden die Hauptlegierungselemente (Cr, Mn und N) eingestellt. Hierbei weist eine Charge ein typisches Schmelzgewicht von ca. 50 t auf. Man ist dabei zusätzlich noch bestrebt, den Kohlenstoffgehalt der Stähle, aufgrund der steigenden Anforderung der Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion, gering zu halten. Dazu werden Stähle zusätzlich in einem Lichtbogenofen aufgeschmolzen und danach in einem VOD – Konverter (Vacuum Oxygen Decarburisation) weiter behandelt, um den Kohlenstoffgehalt zu senken. Bei diesem Verfahren wird eine Lanze fast bis zum Boden des Konverters eingetaucht (Schmelzbadtiefe ca. 3 m) und das Schmelzbad aufgestickt, indem Inertgas eingeblasen wird. Dabei entsteht am Boden ein ferrostatischer Druck von mehr als 2 atm, welcher die Löslichkeit, beziehungsweise die Aufnahme von Stickstoff in die Schmelze unterstützt, und somit eine kohlenstoffärmere Schmelze bewirkt. Danach wird der Stahl im steigenden Guß in Kokillen vergossen. Es besteht noch die Möglichkeit den Stahl in einer ESU – Anlage (Elektro Schlacke Umschmelz-Anlage) umzuschmelzen, bevor die spanlose Formgebung vorgenommen wird, um eine noch höhere Reinheit des Werkstoffes zu erreichen [7], [25].

Die in Tabelle 1 angeführten Stähle haben Warmumformtemperaturen von 900°C bis 1150°C. Wenn das Schmieden, beziehungsweise die Warmumformung vor dem Erreichen der Grenztemperatur von 900°C abgeschlossen werden kann, so wird der Rohling der Schwerstange in einem Wasserbad abgeschreckt. Dies kommt meistens bei einer glatten Schwerstange vor. Handelt es sich jedoch um eine Schwerstange, in welche Stabilisatoren eingebaut werden, das heißt es kommen unterschiedliche

Durchmesser und Durchmessersprünge vor, so kann es vorkommen, dass der Schmiedevorgang erst unter 900°C abgeschlossen wird. Wenn dieser Fall eintritt, muss das Bauteil lösungsgeglüht werden und es erfolgt keine rasche Abkühlung, da die Gefahr besteht, dass sich bereits Chromnitride in der Stange gebildet haben und das Korrosionsverhalten (Spannungsrisskorrosion und interkristalline Korrosion) negativ beeinflussen. Die dabei herrschende Lösungsglühtemperatur liegt dabei zwischen 1020°C – 1070°C. Nach diesem Prozess wird die Schwerstange mit Wasser rasch abgekühlt. Vor der spanenden Fertigung werden bestimmte Schwerstangenbereiche, im Speziellen der Bereich des Gewindezapfens (pin) und der Gewindemuffe (box), einer Kaltumformung durch Schmieden unterzogen, um höhere Festigkeiten zu erzielen. Mit den zunehmenden Festigkeitsanforderungen wurden die Kaltumformgrade von 6% auf 12% erhöht, wobei ein Umformgrad von 18% der Schwerstange über ihre gesamte Länge nicht mehr unüblich ist. Eine 15%ige Querschnittsreduktion von handelsüblichen Schwerstangen ist ein typischer Wert für die Umformgrade. Die damit bei dem Werkstoff P 550 erreichbaren Zugfestigkeiten beispielsweise liegen in einem Bereich von 1050 MPa bis ca. 1100 MPa und es sind Streckgrenzen mit bis zu 1050 MPa möglich. Tabelle 2 zeigt die angeführten mechanischen Kennwerte der in Tabelle 1 angegebenen Schwerstangenwerkstoffe, welche mit Hilfe der Kaltumformung gewährleistet werden. Dabei beziehen sich die dadurch ergebenden Kennwerte auf Proben, welche parallel zur Schwerstangenachse und mit einem Randabstand von einem Zoll des Schwerstangenrohrlings entnommen wurden. Sind alle festigkeitssteigernden Methoden und alle nachfolgenden spanenden sowie spanlosen (Hämmern, Kugelstrahlen,...) Bearbeitungen abgeschlossen, so verspricht die Schwerstange eine relative Permeabilität von $\mu_r \leq 1,001$ [7].

Tabelle 2: Gewährleistete mechanische Kennwerte von Schwerstangenstählen nach 15%iger Kaltumformung; Probenlage: 1" Abstand vom Rand und parallel zur Schwerstangenachse; (1 ksi = 6,895 MPa) [23], [24]

| Marke | R_{p0,2} [MPa] (ksi) | R_m [MPa] (ksi)] | A₄ [%] | Z [%] | Härte HB10 | Dauerfestigkeit bei R = -1 [MPa] (ksi) |
|--------------|---|---|-----------------------------|-----------------|-----------------------|---|
| P 530 | 827 (120) | 896 (130) | 25 | 50 | 285 – 365 | 345 (50) |
| P 550 | 965 (140) | 1034 (150) | 20 | 50 | 350 - 430 | 414 (60) |

R_{p0,2}...0,2% Dehngrenze

R_m...Zugfestigkeit

A_x...Bruchdehnung (x Proportionalitätsfaktor)

Z...Brucheinschnürung

R...Spannungsverhältnis (R = $\sigma_{min}/\sigma_{max}$)

Nachdem die Stangen der Kaltumformung unterzogen wurden, werden diese zerspanend bearbeitet, wobei zu Beginn der Außendurchmesser überdreht werden muss, um die Schwerstangen für die Bohrung des Innendurchmessers zentrieren zu können. Bei fix montiertem Bauteil erfolgt die Bohrung auf Tieflochbohrreinrichtungen, wobei das Bohrwerkzeug rotiert und die Bearbeitung von beiden Seiten gleichzeitig durchgeführt wird. Je nach Kundenwunsch werden zusätzlich noch Bohrungen und Nuten für Feinmechanik- und Elektronikbauteile vorgesehen. Zur Aufnahme von verschleißbeständigen Einsätzen werden ebenfalls Bohrungen im Bereich der Stabilisatoren eingearbeitet. Die Außenflächen werden kugelgestrahlt und die Innenflächen (Bohrung) gehämmert, um die Beständigkeit der Oberflächen gegen Spannungsrisskorrosion zu erhöhen. Hierbei wird eine zusätzliche Verbesserung der Ermüdungseigenschaften erreicht. Um Gewindefressern entgegenzuwirken, wird im Bereich der Schwerstangenverbindungen (Gewinde) ebenfalls die Oberfläche verfestigt. Dabei ist noch zu erwähnen, dass Cr-Mn-Stähle gegenüber Cr-Ni-Stähle einen höheren Widerstand gegenüber Gewindefresser aufweisen, wobei aber letztgenannte Stähle in chloridhaltigen Medien ein besseres Korrosionsverhalten

zeigen. Dadurch ist man bei Cr-Mn-Varianten bestrebt, den Stickstoffanteil im Stahl so hoch wie möglich zu halten.

Dadurch ergeben sich folgende Vorteile:

- Cr-Mn-Legierungen weisen eine höhere Löslichkeit von N als Cr-Ni-Stähle auf
- Die Verwendung von N ist bedeutend kostengünstiger als von Ni
- Durch N wird das austenitische Gefüge stabilisiert und gleichzeitig die Stabilität gegenüber Kaltverformung erhöht
- Zusätzlich erhöht N das Kaltverfestigungspotential und verbessert somit gleichzeitig die mechanischen und zyklischen Eigenschaften
- N verbessert den Korrosionswiderstand gegenüber Spalt- und Lochkorrosion

Trotz des großen Anteils von Stickstoff und der zusätzlichen Oberflächenbehandlungen, kommt es durch den Einsatz von hoch chloridhaltigen Spülflüssigkeiten zu korrosiven Angriffen der Schwerstangen. Ni-Basis-Legierungen erweisen sich im Gegensatz zu den bereits erwähnten Cr-Mn- und Cr-Ni-Legierungen als höchst korrosionsbeständig. Da mit diesem Werkstoff sehr hohe Materialkosten verbunden sind, beschränkt man seinen Einsatz auf Spezialteile im Schwerstangenstrang. INCOLOY 925 ist als typischer Vertreter so einer speziellen Ni-Basis-Legierung zu nennen und ihre chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 3 angegeben. Bei den mechanischen Kennwerten dieser Legierung können zum Vergleich jene der herkömmlichen Werkstoffe nach 15%iger Kaltumformung heran gezogen werden, wobei nach dem Lösungsglühen und anschließender Ausscheidungshärtung eine Dehngrenze und Zugfestigkeit von 793 MPa (115 ksi), beziehungsweise 1172 MPa (170 ksi) garantiert wird. Bezüglich der Einschnürung und Bruchdehnung werden $Z = 50\%$ beziehungsweise $A_4 = 20\%$ gewährleistet [7].

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung der speziellen Ni-Basis-Legierung INCOLOY 925 für die Ölfeldtechnik in Masseprozent [7]

| C | Si | Mn | Cr | Mo | Fe | Ti | Al | Nb | Cu | Ni |
|--------------|-------------|-------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|------|
| max. 0,03 | max. 0,5 | max. 1,0 | 19,5 – 22,5 | 2,5 – 3,5 | min. 22,0 | 1,9 – 2,3 | 0,1 – 0,5 | max. 0,5 | 1,5 – 3,0 | Rest |

1.4 Der Umlaufbiegeversuch

Zur Untersuchung und Prüfung der Werkstoffkennwerte der Schwerstangenwerkstoffe für die Ölfeldtechnik, werden diese im Labor einer Umlaufbiegeprüfung unterzogen, bei welcher die Rotation und Biegung des Bohrstranges simuliert wird. Dazu wird die Schwingfestigkeit unter Umlaufbiegebeanspruchung auf einem Umlaufbiegeprüfstand ermittelt. Dabei wird grundsätzlich eine Probe mit definierten Abmessungen ein- oder zweiseitig eingespannt und mit einer bestimmten Drehzahl in Rotation versetzt. Zusätzlich wird eine definierte Last aufgebracht, um die wechselnden Beanspruchungen zu erreichen. Je nach Einspannung (einseitig oder zweiseitig) muss man zwischen zwei Funktionsprinzipien unterscheiden. Bei der einseitigen Spannung der Probe (Dreipunktbiegung) wird das frei drehende Ende belastet, wodurch sich durch den Hebelarm ein linear verlaufender Momentenanstieg ergibt. Durch die auftretende Querkraft wird der Probenquerschnitt geringfügig noch auf Schub beansprucht. Wird die Probe an beiden Seiten gespannt, so müssen die Einspannungen kipfbar ausgeführt sein, weil das Biegemoment an beiden Seiten eingeleitet wird. Dadurch ergibt sich ein konstanter Verlauf (Vierpunkt-Biegung) im Bereich der Probe und die Beanspruchung ist querkraftfrei. Abbildung 22 zeigt das Funktionsprinzip so einer Vierpunkt-Umlaufbiegemaschine [26].

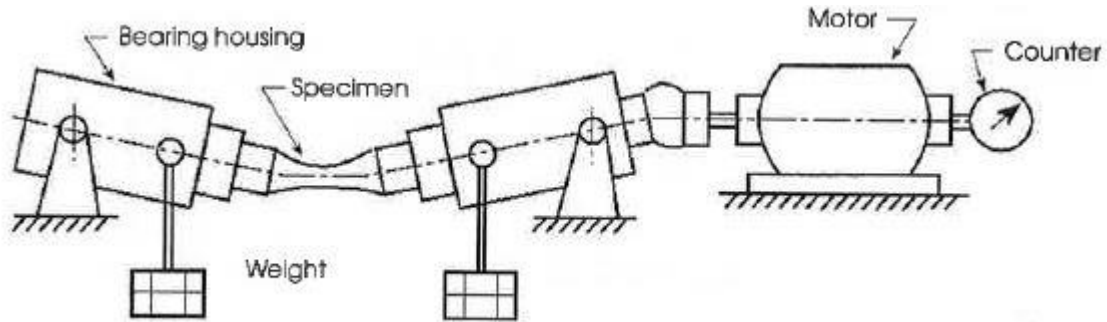


Abbildung 22: Funktionsprinzip einer Vierpunkt-Umlaufbiegeprüfmaschine [26]

1.4.1 Funktion der verwendeten Umlaufbiegeprüfmaschine

Die bei SBO zur Prüfung der Schwingfestigkeit verwendete Umlaufbiegemaschine ist von der Firma Zwick/Roell, die ein sehr namhafter Hersteller in Sachen Betriebsfestigkeitsprüfung ist. Bei dieser Maschine werden Probestäbe mit definierten Abmessungen (siehe Abbildung 23 und Tabelle 4) auf beiden Seiten über die gesamte Einspannlänge D in die Spannzangen der Prüfmaschine eingespannt.

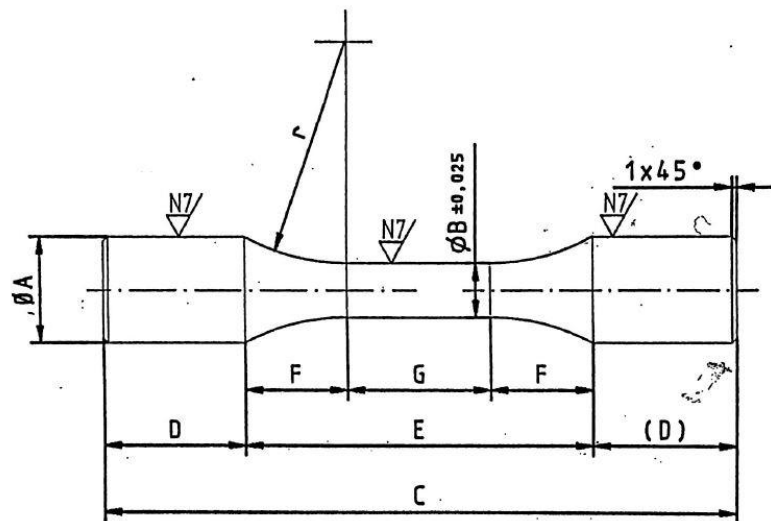


Abbildung 23: Skizze der UBM-Probestäbe mit definierten Abmessungen

Tabelle 4: Definierte Abmessungen für die UBM-Probestäbe bei SBO

| A | B | C | D | E | F | G | r | Fläche |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------|
| ø14 - h9 | ø8 | 150 | 45 | 60 | 15,198 | 29,60 | 40 | 50,266 |

Die rechte Spannzange ist in Lagerschalen gelagert, diese wiederum fest auf der Bodenplatte montiert (Festlager) und wird von einem Motor über einen Riemen mit einer definierten Drehzahl von 3000 U/min angetrieben. Auf der linken Seite ist die Zange ebenfalls in Lagerschalen gelagert, jedoch sind diese auf einer luftgelagerten Platte montiert (Luftlager), um die Biegebewegung ausüben zu können. Über einen Hebelarm, welcher mit dem Luftlager verbunden ist, wird eine definierte Kraft aufgebracht, sodass zum Beispiel eine permanente Spannung von 690 MPa im Prüfungsquerschnitt herrscht. Ein Counter zählt dabei solange die Umdrehungen, bis die Probe abreißt. Die bei diesem Versuch erreichten Umdrehungen unter einer gewissen Belastung sind ein Maß für die Schwingfestigkeit des Werkstoffes. Abbildung 24 zeigt die bei SBO verwendete Umlaufbiegeprüfmaschine von Zwick/Roell mit den wichtigsten Bauteilen und ihren Funktionen. Eine nach 143418 Lastwechseln und einer Spannung von 690 MPa gebrochene Probe ist in Abbildung 25 zu sehen.

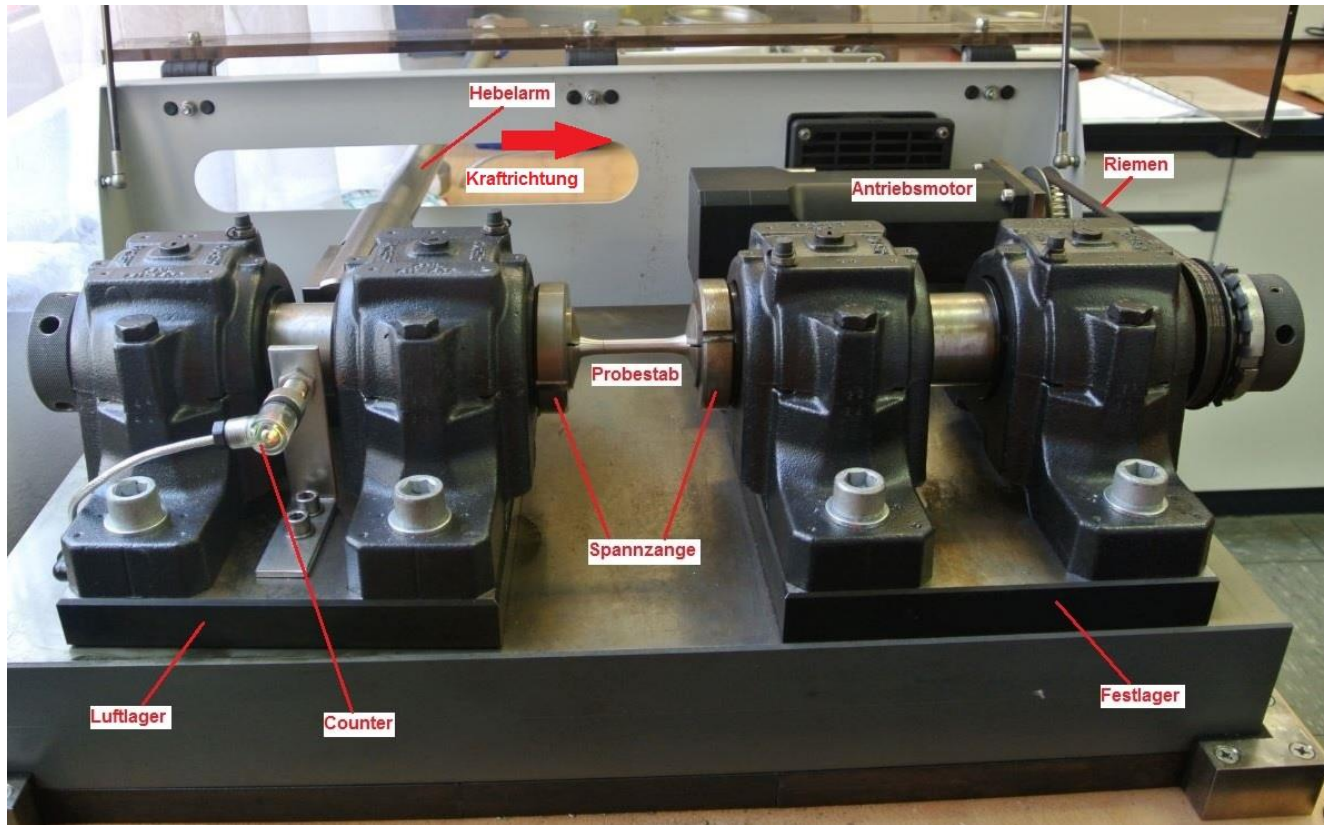


Abbildung 24: Beschreibung der Umlaufbiegemaschine mit eingespannter Probe vor Versuchsbeginn



Abbildung 25: Bruch einer UBM-Probe nach 143418 Lastwechseln und einer Spannung von 690 MPa

1.5 Prüfkammerwerkstoffe – PTFE (Teflon) / X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571)

Für die in Kapitel 1.4.1 “Funktion der verwendeten Umlaufbiegeprüfmaschine“ beschriebene Umlaufbiegeprüfmaschine wurde eine Korrosionsprüfkammer, auf Grund seiner guten technischen und chemischen Beständigkeit, aus PTFE und Edelstahl (1.4571) gefertigt.

1.5.1 PTFE (Teflon)

1.5.1.1 Allgemeines

PTFE (Polytetrafluoroethylen) ist ein Kunststoff, der durch Kettenpolymerisation hergestellt wird und hochteilkristallin ist. Er gehört in die Gruppe der so genannten Thermoelaste, da er beim Erwärmen nicht schmelzbar-flüssig, sondern in der Regel gummiartig-weich wird. Dieser Kunststoff ist kaum benetzbar, daher haftfeindlich (antiadhäsiv) und extrem unpolar. PTFE ist beinahe unbrennbar, hat sehr große Temperaturanwendungsbereiche, ausgezeichnete elektrische Isoliereigenschaften und eine sehr gute Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse und chemische Flüssigkeiten [27].

1.5.1.2 Eigenschaften

Polytetrafluorethylen besitzt eine gute Schlagzähigkeit, jedoch eine niedrige Härte, Festigkeit, Steifigkeit und auch die Verschleißfestigkeit ist mäßig. Dafür besitzt es ausgezeichnete Gleiteigenschaften und sein antiadhäsives Verhalten ist sehr ausgeprägt, was bedeutet, dass es von Flüssigkeiten nicht benetzt wird und auch andere klebrige Stoffe nicht auf seiner Oberfläche haften. Weiters weist der Werkstoff bei Raumtemperatur eine relativ geringe Wärmeleitfähigkeit von $0,25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ auf. Die Einsatzgrenzen des Werkstoffes liegen zwischen -200°C bis 250°C , wobei er kurzfristig auch 300°C ausgesetzt werden kann. Beim Erhitzen von PTFE auf 327°C wird der Kristallitschmelzpunkt T_m erreicht und bei 400°C tritt unter Bildung von gesundheitsschädlichen Dämpfen die Zersetzung ein. Dieser Werkstoff erleidet eine Umwandlung der Kristallstruktur bei 19°C was beim Erwärmen eine 1,2%ige Vergrößerung des Volumens bewirkt. Ungefärbtes PTFE ist undurchsichtig weiß und in dünnen Schichten leicht durchscheinend. Es wird nur von Fluor und geschmolzenen Alkalimetallen angegriffen und ist gegenüber allen üblichen

Chemikalien resistent. Auch seine Gasdurchlässigkeit ist zum Beispiel bei Folien relativ hoch. Weiters ist der Werkstoff sehr gut beständig gegen Spannungsrissbildung und Witterungseinflüsse. PTFE ist also als Spezialkunststoff einzuordnen und muss auch bei der spanenden Verarbeitung richtig gehandhabt werden, da bei Temperaturen von 400°C giftige Gase entstehen. Auch die Maschinen und Werkzeuge zur Bearbeitung müssen aus korrosionsbeständigen Materialien bestehen [27], [28].

1.5.1.3 Anwendungsbeispiele

Maschinenbau:

- Faltenbälge, Dehnungselemente, Dichtungen, Gewindedichtbänder, Lager, Armaturen, Kolbenringe

Elektrotechnik:

- Schalterteile für Hochspannung, Drahtisolierungen, Kabelisolierungen, Elektrische Isolierteile (zum Beispiel Flächenheizleiter)

Chemische Industrie:

- Auskleidungen von Behälter, chemische Apparate, Hähne, Pumpen, Ventile, Filterkörper, chemische Laborgeräte

Architektur:

- Für Zelte PTFE-Beschichtungen auf ungewobenen Glasfasern

Bauwesen:

- Auflager und Gleitlager zum Verschieben von Bauwerken (zum Beispiel Brücken)

Antiadhäsive Beschichtungen:

- Industrie: Beschichtungen mit abweisender Oberfläche und Transportbänder (zum Beispiel für heiße oder klebrige Güter in der Lebensmittel-, Schweiß-, Kunststoff-, Klebstoff-, Gummitechnik)
- Haushalt: Backformen, Bügeleisen, Bratpfannen [27]

1.5.2 X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571)

1.5.2.1 Allgemeines

Bei diesem Werkstoff handelt es sich um einen Ti - legierten nichtrostenden austenitischen Stahl (Edelstahl), der in die Stahlgruppe V4A eingeordnet wird. Die internationale Bezeichnung für diese Werkstoffgruppe, welche sich an die US-amerikanische Normung anlehnt, wird mit Typ 316 bezeichnet [29], [30].

1.5.2.2 Eigenschaften

Nichtrostende austenitische Stähle zeichnen sich mit der Besonderheit aus, dass sie eine hohe Duktilität und gleichzeitig hohe Kaltverfestigung besitzen. Außerdem weisen sie eine sehr gute Beständigkeit gegenüber Lokalkorrosion in chloridhaltigen Medien auf. Tabelle 5 zeigt die physikalischen Eigenschaften, Tabelle 6 die Warmformgebung, Wärmebehandlung und das Gefüge, und Tabelle 7 die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes bei Raumtemperatur [29], [30].

Tabelle 5: Physikalische Eigenschaften X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571) bei 20°C [30]

| Dichte bei 20 °C | Elastizitätsmodul bei 20°C | Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C | spez. Wärmekapazität bei 20 °C |
|--------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Kg/dm ³ | N/mm ² | W/ mK | J/Kg K |
| 8,0 | 200000 | 15 | 500 |

Tabelle 6: Warmformgebung, Wärmebehandlung und Gefüge von X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571) [30]

| Warmformgebung | | Wärmebehandlung AT (lösungsgeglüht), Gefüge | | |
|----------------|---------------|---|---------------|--------------------------------------|
| Temperatur °C | Abkühlungsart | Temperatur °C | Abkühlungsart | Gefüge |
| 1150 bis 850 | Luft | 1030 bis 1110 | Wasser, Luft | Austenit mit geringen Ferritanteilen |

Tabelle 7: Mechanische Eigenschaften von X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571) bei Raumtemperatur [30]

| Erzeugnisform | Dicke mm _{max} | Dehngrenze | | Zugfestigkeit R _m N/mm ² | Bruchdehnung | | Kerbschlagarbeit (ISO-V) Raumtemperatur ≥ 10 mm Dicke | |
|-----------------------------------|----------------------------|---|---|--|----------------------------------|---------------------------------|--|----------------------------|
| | | 0,2% R _{p0,2} N/mm ² _{min} | 1% R _{p1,0} N/mm ² _{min} | | A % _{min} (längs) | A % _{min} (quer) | J _{min} (längs) | J _{min} (quer) |
| Halbzeug, Stäbe und Profile | 160 | 200 | 235 | 500 – 700 | 40 | - | 100 | - |

1.5.2.3 Chemische Zusammensetzung

Tabelle 8 zeigt die Chemische Zusammensetzung des Werkstoffes mit den wichtigsten Legierungselementen in Massen %.

Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung (in Masse %) von X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571) [30]

| Erzeugnisform | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Ti |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|-----------------|---------------|-----------------|--------------------|
| Halbzeug, Stäbe und Profile | ≤ 0,08 | ≤ 1,00 | ≤ 2,00 | ≤ 0,045 | ≤ 0,030 | 16,50- 18,50 | 2,00- 2,50 | 10,50- 13,50 | 5xC bis 0,70 |

1.5.2.4 Anwendungsbeispiele

Der nichtrostende austenitische Stahl ist in der Industrie sehr weit verbreitet und wird in den verschiedensten Anwendungsbereichen, wo hohe Ansprüche an den Werkstoff, insbesondere bezüglich seiner Korrosionsbeständigkeit, gestellt werden, eingesetzt. Wie zum Beispiel:

- Bauverkleidungen, Türen, Fenster und Armaturen
- Offshoremodule
- Tanks und Rohre für Chemietanker
- Lagerung und Landtransporte von Chemikalien, Nahrungsmitteln und Getränken
- Pharmazie-, Kunstfaser-, Papier- und Textilanlagen
- Druckbehälter [30]

2 Entwicklungsprozess

2.1 Das “Bierglasmodell“

Für die Entwicklung, beziehungsweise Ideenfindung und Generierung der in dieser Arbeit entworfenen Lösung für eine Korrosionsprüfkammer zum Einbau in die in Abschnitt 1.4.1 beschriebenen Umlaufbiegemaschine, wurde das “Bierglasmodell“ verwendet (siehe Abbildung 26). Dieses Modell ist in die drei Hauptebenen Analysieren/Planen, Konzipieren und Entwerfen/Ausarbeiten gegliedert, welche in den folgenden Abschnitten weiter erläutert werden.

2.1.1 Analysieren und Planen

In der Anfangsphase des Modells wird eine etwas unklare Aufgabenstellung, wie in dieser Arbeit zum Beispiel die Konstruktion einer Korrosionsprüfkammer, in den Raum gestellt, aus welcher dann mit problemorientiertem Analysieren und Planen das Problem auf den Punkt gebracht wird. Dieses “Auf den Punkt“ bringen, was der Übergang zur zweiten Phase ist, kann mit den folgenden Unterpunkten sehr gut bewerkstelligt werden:

- Problembeschreibung
- Fragen zum Problem stellen
- Anforderungsliste erstellen
- Randbedingungen definieren
- Funktionsstruktur erstellen

2.1.2 Konzipieren

Die Konzipierungsphase, die nach dem “Auf den Punkt“ bringen folgt, teilt sich wiederum in Synthese und Analyse auf.

2.1.2.1 Synthese

Hierbei werden durch lösungsorientierte Synthese mit Verwendung der aufgezählten “Werkzeuge“ hunderte Ideen gefunden, welche danach beschrieben, skizziert und ihre Vor- und Nachteile erläutert werden:

- Analyse bestehender Systeme, Patente
- Mind Mapping, Brainstorming
- Morphologischer Kasten
- Konstruktionskataloge

2.1.2.2 Analyse

Nach der Synthese werden in der Analyse untaugliche Ideen ausgeschieden und die restlichen Ideen problemorientiert bewertet.

Dies geschieht zum Beispiel durch:

- Paarweiser Vergleich
- Bewertungsliste
- Modifikation der Anforderungsliste

Bei der Auswahl der vielversprechenden Ideen wird als Werkzeug dann das “Bauchgefühl“ herangezogen.

2.1.3 Entwerfen und Ausarbeiten

Am Ende des Entwicklungsprozesses stehen nur noch wenige Konzepte zur Verfügung, die dann entworfen und ausgearbeitet werden. Es werden nur noch wenige oder auch nur eine Idee vorangetrieben und durch Iteration und Modifikation der Anforderungsliste kristallisiert sich eine Endlösung heraus, welche das Problem lösen beziehungsweise den Anforderungen der Problemstellung gerecht werden sollte.

Der Entwicklungsprozess - „Bierglasmodell“

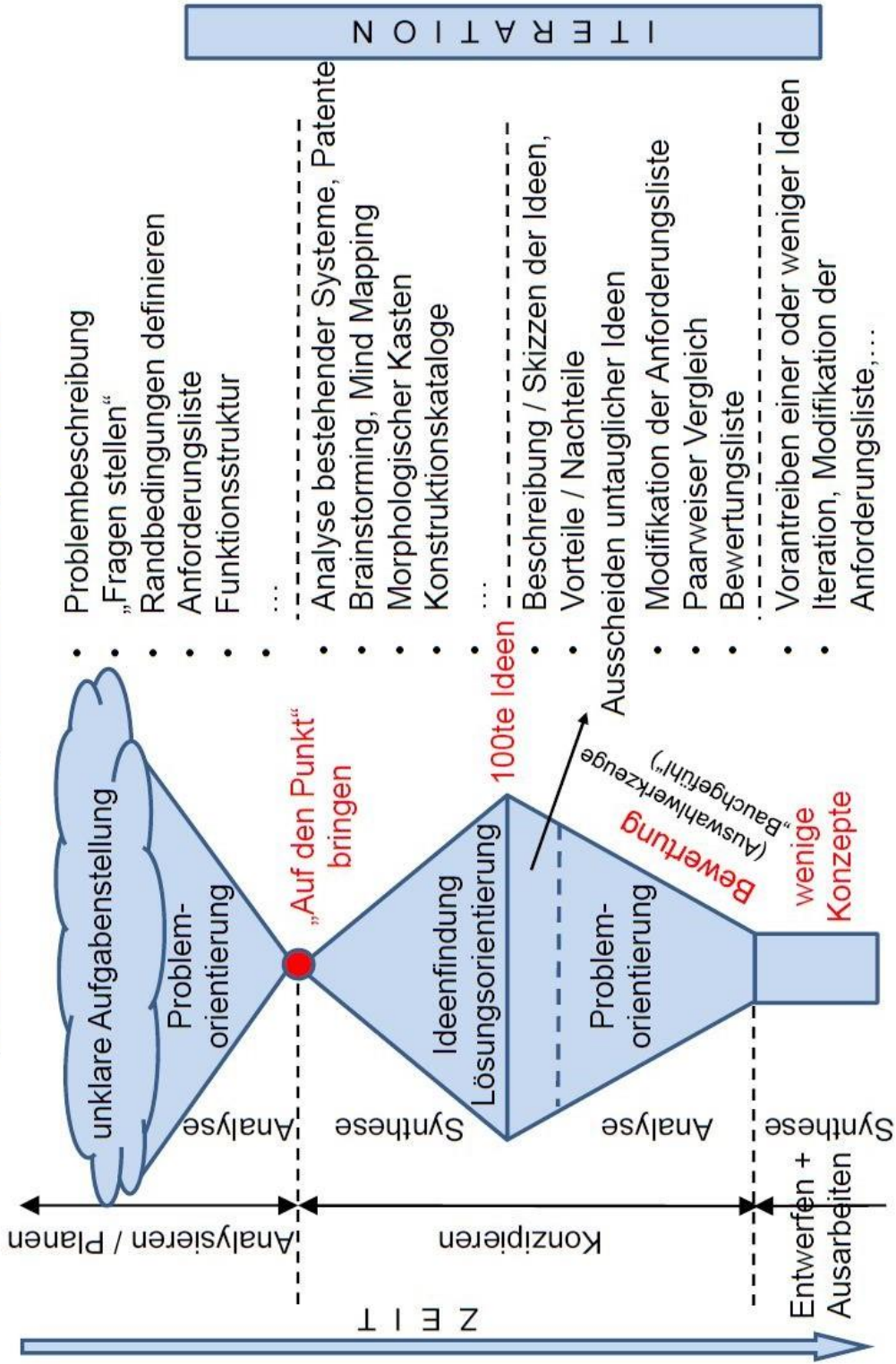


Abbildung 26: Bierglasmodell für Entwicklungsprozess [36]

3 Anwendung des “Bierglasmodells“ für Entwicklung der Prüfkammer und des dazugehörigen Systems

Wie in Abschnitt 2.1 das Modell schon erklärt wurde, wurde es auch für die Entwicklung der Idee beziehungsweise der Lösung für die Korrosionsprüfkammer herangezogen.

3.1 Analysieren und Planen der Prüfkammer

Bei der Problemstellung handelt es sich darum, eine Korrosionsprüfkammer zum Einbau in die in Abschnitt 1.4.1 beschriebenen Umlaufbiegemaschine zu konstruieren.

3.1.1 Problembeschreibung

Die in der Umlaufbiegemaschine eingespannten Proben (siehe Abschnitt 1.4.1) rotieren mit einer Drehzahl von zirka 3000 U/min und bewegen sich zusätzlich normal zur Achsrichtung durch die Biegung nach hinten bis nach gewisser Zeit der Bruch der Probe eintritt. Ein weiteres Problem stellt die Baugröße dar, da zwischen den beiden Spannanzgen, in welche die Probe eingespannt wird, nur 60 mm Platz ist obwohl die eigentliche Prüflänge der Probe 29,60 mm beträgt. In diese Kammer soll eine Na-Cl-Lösung mit einem Chlorid-Gehalt von 80000 ppm, das entspricht 8 Gew.-% Cl eingebracht werden, um die Korrosionsbeaufschlagung der zu prüfenden Werkstoffe zu gewährleisten. Zusätzlich soll in der Prüfkammer während des Prüfvorganges eine Temperatur von 80°C herrschen. Um die Umlaufbiegeprüfmaschine jedoch nicht durch einen korrosiven Angriff durch Austreten des einzubringenden Mediums zu zerstören, muss eine völlige Dichtheit der Kammer gewährleistet sein. Da die Taktzeit der durchgeführten Prüfungen sehr groß ist, sollte der Ein- und Ausbau der Proben in die Kammer und gleichzeitig in die Prüfmaschine schnell und einfach erfolgen und bedienungsfreundlich sein. Um die Prüfergebnisse nicht zu verfälschen sollte die Abdichtung berührungsarm, beziehungsweise nahezu berührungsfrei sein, damit nicht zusätzlich Kräfte/Momente und dadurch Spannungen auf den Prüfling aufgebracht werden.

3.1.2 “Fragen stellen“

Um die Problemstellung auf den Punkt zu bringen, müssen gewisse Fragen beantwortet werden:

- Aus welchem Material soll die Prüfkammer bestehen (korrosionsbeziehungsweise säurebeständig und temperaturbeständig)?
- Dreht sich die Prüfkammer mit oder soll sie still stehen?
- Wie wird berührungsarm, beziehungsweise nahezu berührungslos abgedichtet?
- Wie wird die Kammer fixiert, beziehungsweise gespannt?
- Wie soll das Medium eingebracht und wieder abgeführt werden oder bleibt es generell in der Prüfkammer?
- Welchen Zustand soll das Medium haben (flüssig, nebelartig oder tropfenförmig auf die Prüffläche aufgebracht)?
- Wie wird die Na-Cl-Lösung aufgeheizt, sodass 80°C in der Kammer herrschen?

Mit der Beantwortung dieser Fragen und der in Folge definierten Randbedingungen engt sich das Feld ein und es kann eine Anforderungsliste erstellt werden.

3.1.3 Randbedingungen definieren

- Die Umgebungstemperatur in dem Raum in dem die Prüfmaschine steht beträgt zirka 20°C (wichtig für Mediumserhitzung).
- Probe rotiert in Prüfmaschine mit 3000 U/min und bewegt sich normal zur Achsrichtung nach hinten bis zum Bruch (wichtig für Abdichtung).
- Maximale Länge der Kammer 55 mm da Spannweitenabstand 60 mm beträgt und keine Berührung mit diesen erfolgen soll.
- Völlige Dichtheit muss gewährleistet werden, damit die Prüfmaschine nicht durch korrosiven Angriff beschädigt wird.

3.1.4 Anforderungsliste

Nachdem die Problem beschrieben, die gestellten Fragen beantwortet und die Randbedingungen definiert wurden, kann das Problem, beziehungsweise die

Anforderungen an die Kammer, mit Hilfe einer Anforderungsliste auf den Punkt gebracht werden.

Anforderungsliste:

- Prüfkammerwerkstoff: temperaturbeständig und säurebeständig (PTFE, Edelstahl 1.4571).
- Prüfkammerbewegung: steht still (Probe rotiert in Kammer).
- Abdichtung: mit Luft (Sperrluftdichtung, umgekehrte Sperrluftdichtung, Labyrinthdichtung,...).
- Fixierung: Kammer auf Bodenplatte der Prüfmaschine spannen (Elektromagnet, Spannhaken, Spanneisen, Exzenterspanner, Schwenkspanner).
- Medium: wird permanent neu in Kammer eingebracht und danach wieder abgeführt.
- Lösung: wird zerstäubt als Na-Cl-Nebel in Prüfkammer auf Prüfling aufgebracht.
- Na-Cl-Lösung: wird in einem Heizschlauch aufgeheizt und dann in Kammer eingebracht.
- Probe: soll vor Prüfung und nach Bruch leicht ein- beziehungsweise ausgebaut werden können.

3.2 Konzipieren der Ideen und Lösungen

3.2.1 Synthese

Bei der Analyse bestehender Systeme, beziehungsweise Patente, wurden keine Erfolge erzielt, da es eine Prüfkammer oder ein System in dieser Art und Weise noch nicht gibt und daher ein völlig neuartiges System oder eine Anordnung von bestimmten Komponenten entwickelt werden muss.

3.2.2 Analyse

In der Analyse sind durch paarweisen Vergleich, Bewertung einzelner Ideen und Modifikation der Anforderungsliste einige untaugliche Ideen, wie zum Beispiel die Abdichtung (Sperrluftdichtung, Labyrinthdichtung) oder die Fixierung der Kammer

(Spannhaken, Spanneisen, Exzenterspanner, Schwenkspanner) ausgeschieden. Es hat sich jedoch dadurch eine Idee, beziehungsweise eine Lösung einer Prüfkammer und eines dazugehörigen System herauskristallisiert, was im folgenden Absatz beschrieben wird.

3.3 Entwurf Ausarbeitung und Konstruktion der Prüfkammer beziehungsweise des Systems

Die Prüfkammer ist mit einem dazugehörigem Einbringungs- und Abführungssystem, welches für den korrosiven Angriff der Proben und die Abdichtung der Kammer zuständig ist, gekoppelt und wird in den nächsten Abschnitten näher erläutert.

3.3.1 Grundfunktion, Beschreibung und Konstruktion der Prüfkammer

Für den Prüfkammerwerkstoff wurde PTFE (Teflon) gewählt, da dieses Material säurebeständig und temperaturbeständig bis zu 250°C ist. Außerdem hat dieser Werkstoff sehr gute Gleiteigenschaften im Falle, dass die Probe während der Rotation in Kontakt mit der Prüfkammer kommen sollte. Zur Befestigung, beziehungsweise der Spannung der Kammer auf der Bodenplatte der Prüfmaschine wurden Elektromagneten gewählt, da diese sehr einfach ein- oder auszuschalten sind und der Prüfmaschinenboden nicht beschädigt, oder bei Verwendung anderer Fixierungselemente, zum Beispiel angebohrt werden muss. Ein weiterer Vorteil der Verwendung von PTFE in Kombination mit den Elektromagneten ist die Flexibilität der Kammer auf der Bodenplatte, da Teflon sehr leicht ist und durch die Magneten keine Spannelemente im Weg sind, welche die Beweglichkeit der Kammer beim Ein- und Ausbau der Proben einschränken würde. Diese Elektromagneten werden in das Fundament der Prüfkammer eingeschraubt (siehe Abbildung 27) und die dazugehörigen Kabel in einem extra dafür vorgesehenen Kabelkanal (siehe Abbildung 28) verlegt. Die Abdichtung der Prüfkammer erfolgt über ein speziell für die Kammer und ihren Anforderungen entwickeltes System. Da die Probe in der Kammer nicht nur rotiert sondern auf einer Seite der Probe auch eine biegende Bewegung nach hinten, also normal zur Rotationsachse erfährt, ist eine berührungslose Abdichtung eine große Herausforderung. Bewerkstelligt wurde dies grundsätzlich mit einer mitbeweglichen Luftspaltabdichtung. Die Grundidee dabei ist,

dass aus der Prüfkammer mehr abgesaugt wird, als an Na-Cl-Lösung eingebracht wird. Zwischen der Probe und der Prüfkammer, beziehungsweise zwei handelsüblichen Wellendichtringen, welche zweckentfremdet wurden, da sie berührungslos eingesetzt werden, herrscht ein kleiner Dichtspalt. Bei genügend Unterdruck, der durch eine Absaugung erzeugt wird, wird nicht nur der einzubringende Na-Cl-Nebel abgesaugt, sondern zusätzlich durch den kleinen Spalt, Luft von der Umgebung in die Kammer gesaugt, was somit eine Abdichtung der Kammer bewirkt. Die Wellendichtringe sitzen in dem Gehäuse links und rechts der Prüfkammer. Auf der rechten Seite ist der Ring fix im Gehäuse eingebaut, da dort nur eine Rotation der Probe stattfindet und lediglich die Aufgabe hat, einen kleinen Spalt zwischen der Probe und dem Dichtring zu gewährleisten (siehe Abbildung 28). An der linken Seite ist dieser Wellendichtring jedoch beweglich und normal zur Rotationsachse über Federn und speziellen Backen, welche das Ausknicken der Feder bei Rotation der Dichtung verhindern sollen, gelagert (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30). Da dort die Biegung und damit die Bewegung der Probe stattfindet, kann sich somit der Dichtspalt mitbewegen und ein zusätzliches Einbringen einer Prüfungsergebnis verfälschenden Kraft oder Spannung verhindert werden. Auch das Ein- und Ausbauen der Proben ist durch die Wellendichtringe ganz einfach, da der Prüfling nur durch die Kammer geschoben und in die Spannzangen der Umlaufbiegemaschine eingespannt werden muss. Das Fundament ist zusätzlich an der linken Seite der Prüfkammer noch abgeschrägt, um die Bewegung der luftgelagerten Spannzange, welche die Biegung der Probe einleitet, nicht zu behindern.

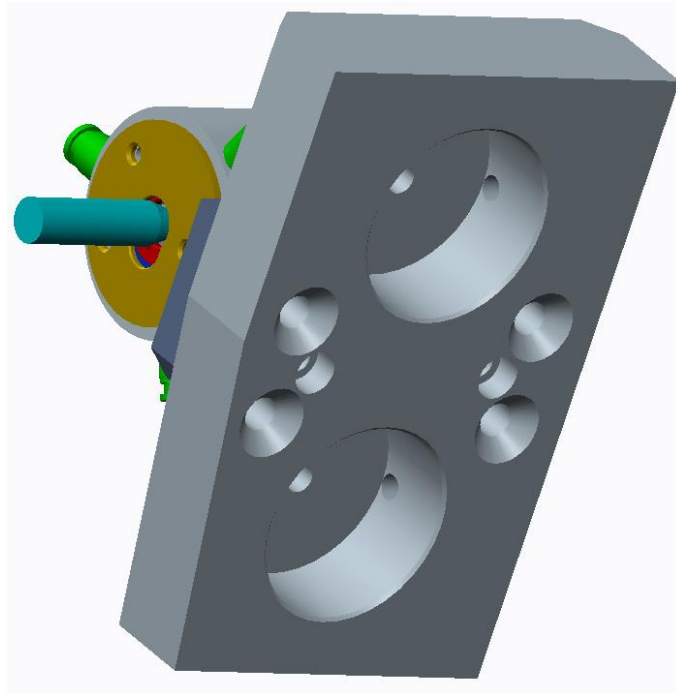


Abbildung 27: Fundament der Prüfkammer mit Ausnehmungen für Elektromagneten

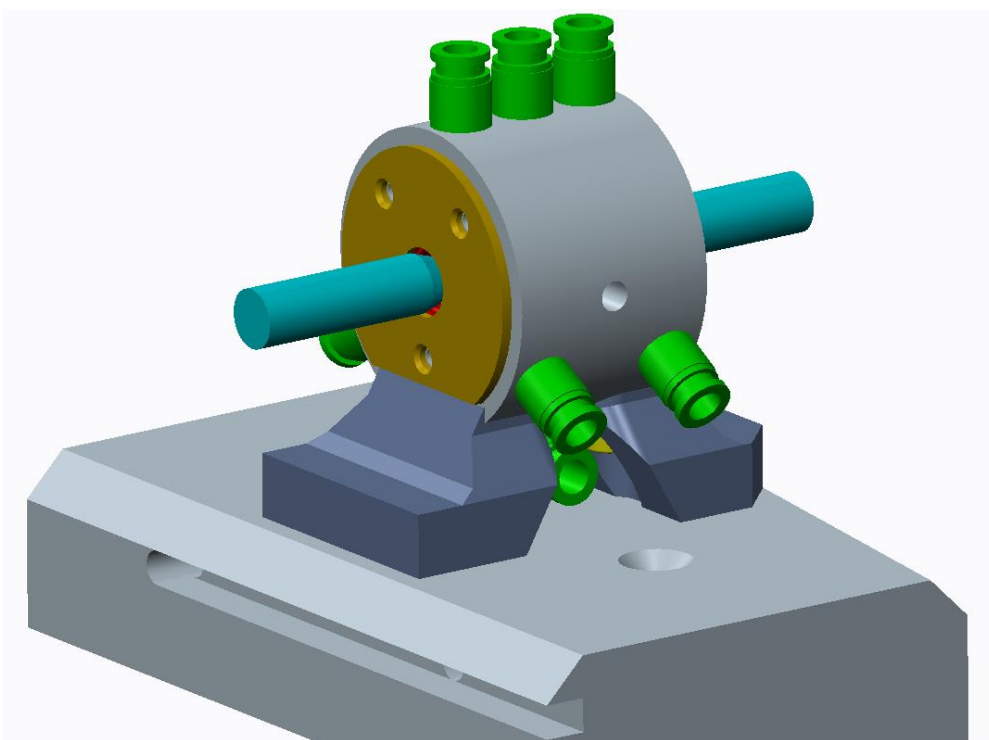


Abbildung 28: Rechte Seite der Prüfkammer, in welche die Dichtung fest eingebaut ist (keine Biegung der Probe nur Rotation) mit Kabelkanal für Elektromagneten

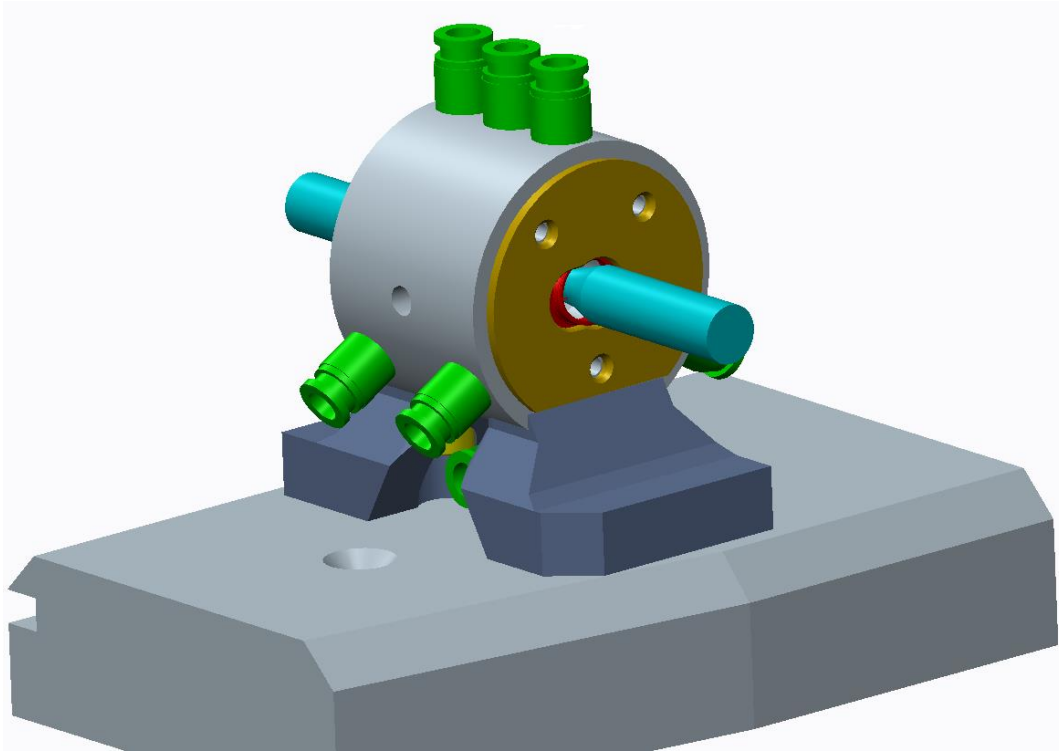


Abbildung 29: Linke Seite der Prüfkammer an der die Biegung stattfindet mit Probe und Deckel

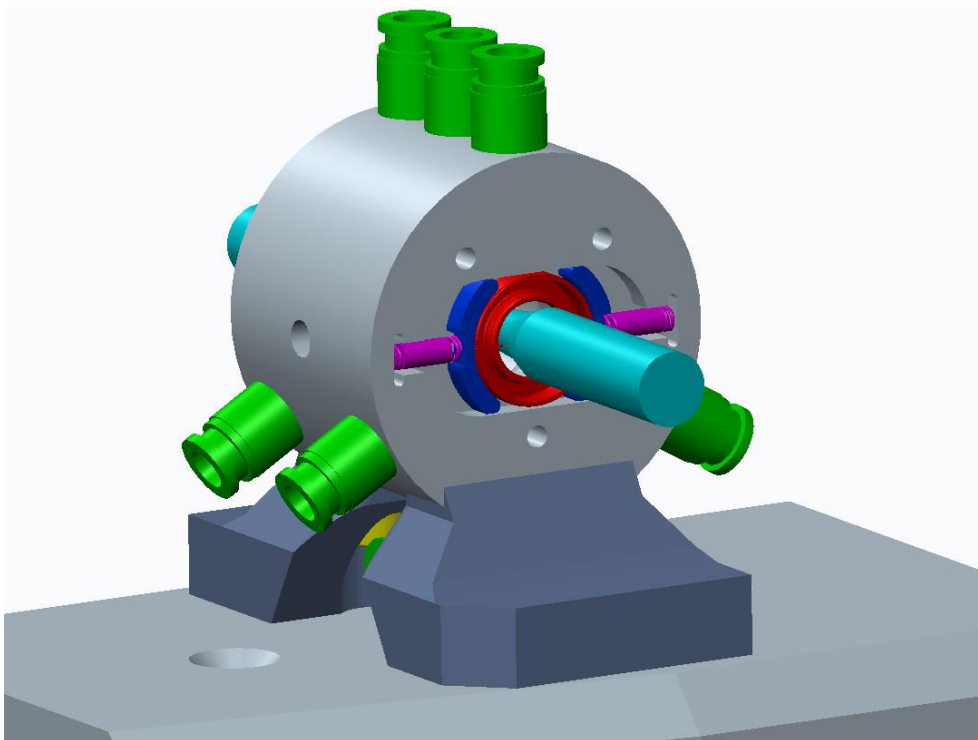


Abbildung 30: Federgelagerte Dichtung über Backen für Biegebewegung der Probe (linke Seite)

Um eine gleichmäßige Absaugung und Dichtheit zu erreichen, wird in der Prüfkammer an drei primären Stellen (am linken Ende, in der Mitte und am rechten Ende) abgesaugt, wobei am linken Ende wiederum dreimal um 120° versetzt, in der Mitte nur an der Unterseite und am rechten Ende wieder dreimal um 120° versetzt die Absaugstützen angeordnet sind (siehe Abbildung 28 und Abbildung 29). Die Einbringung der Na-Cl-Nebels erfolgt ausschließlich in der Mitte der Prüfkammer, an all den anderen Anschlussstutzen wird abgesaugt. Abbildung 31 zeigt einen 2D - Längsquerschnitt durch die Prüfkammer an dem zu sehen ist, wo das Medium eingebracht und abgesaugt wird und, dass die Füße der Prüfkammer mit der Kammer selbst und dem Fundament verschraubt werden.

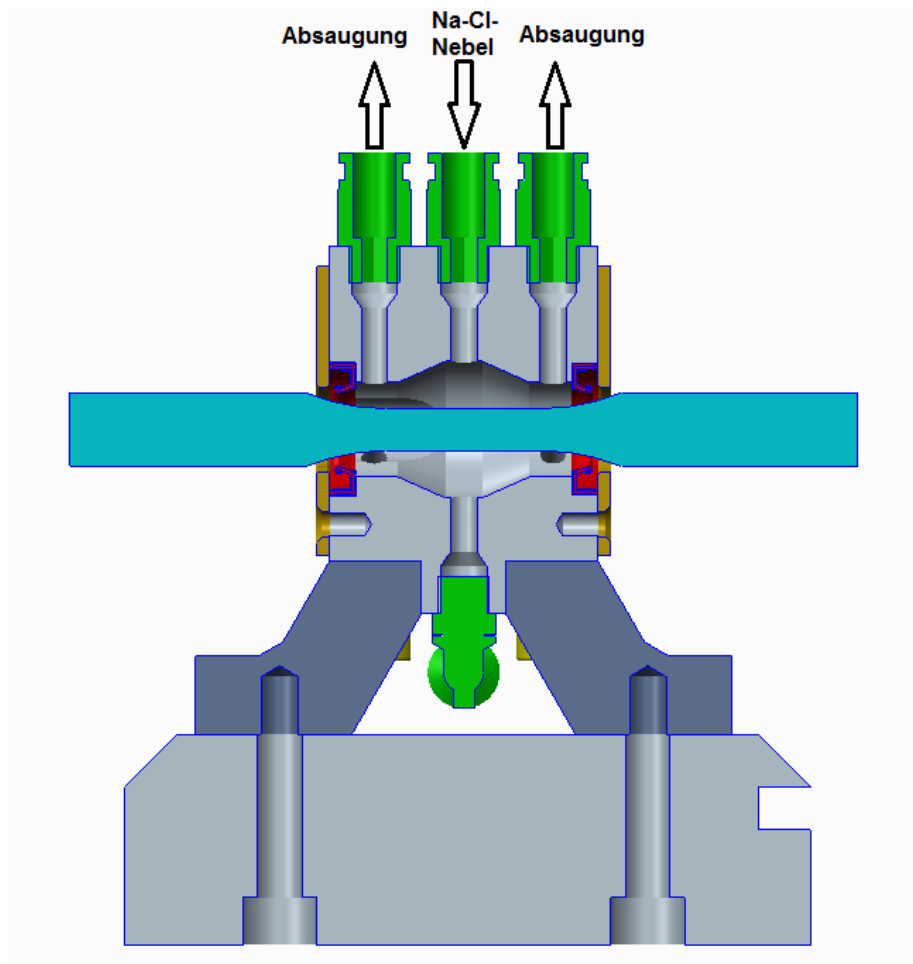


Abbildung 31: Längsquerschnitt durch Prüfkammer mit Anschlussstutzen für Einbringung und Absaugung

3.3.2 Grundfunktion und Beschreibung des Systems zur Einbringung und Evakuierung

Damit der gewünschte Effekt der Korrosionsprüfung in der dafür entwickelten Kammer auch erreicht wird, wurde für die Einbringung und gleichzeitige Evakuierung zur Dichtheit der Prüfkammer ein spezielles System, beziehungsweise eine Anordnung von bestimmten Bauteilen, vorgenommen. Bei den dafür verwendeten Bauteilen handelt es sich hauptsächlich um Komponenten aus der Pneumatik, mit welchen dieser Effekt erzielt werden soll. Die grundlegenden Ideen der zu verwendenden Pneumatik - Bauteile wurden in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen SMC (spezialisiert auf Pneumatik) generiert. Bedeutendste Komponente bei dem System ist dabei der Ejektor, mit welchem der Effekt der Absaugung, Dichtheit der Kammer und gleichzeitig die Einbringung der Na-Cl-Lösung in die Prüfkammer bewerkstelligt werden soll. Die Funktion des Ejektors wird im nächsten Abschnitt näher beschrieben.

3.3.2.1 Funktionsprinzip Ejektor

Ein Ejektor ist ein rein pneumatisch betriebener Vakuum-Erzeuger, der nach dem Venturi-Prinzip arbeitet. Abbildung 32 zeigt den Aufbau eines solchen Ejektors. Dabei wird die Druckluft beim Anschluss (A) in den Ejektor eingeleitet und sie durchströmt eine Düse (B). Unmittelbar nach der Treibdüse entsteht ein Unterdruck, wodurch Luft durch den Vakuum-Anschluss (C) angesaugt wird. Die angesaugte Luft und die Druckluft werden danach vermischt und treten gemeinsam über den Ausgang (D) aus [31].

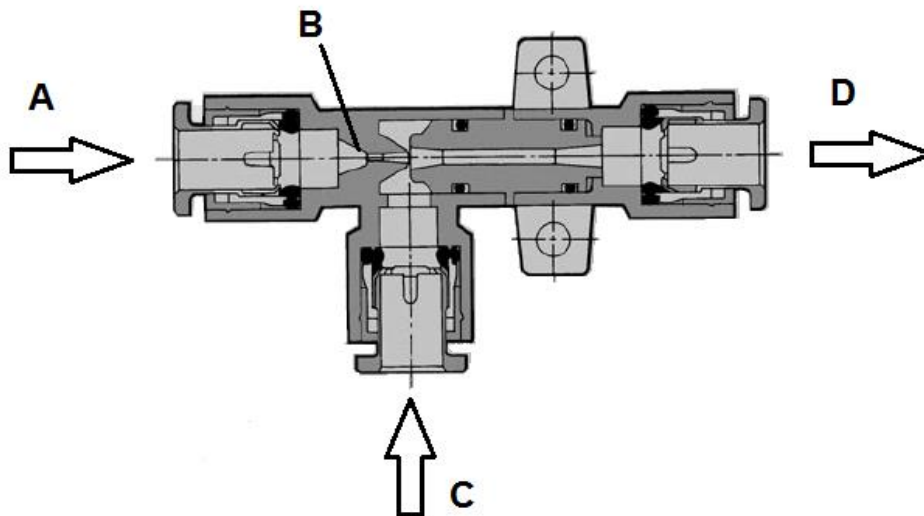


Abbildung 32: Funktionsprinzip Ejektor [32]

3.3.2.2 System der Einbringung der Na-Cl-Lösung als Nebel in Prüfkammer

Der prinzipielle Aufbau der Einbringung der Na-Cl-Lösung ist in Abbildung 33 schematisch dargestellt. Dabei hängt das gesamte System an einer Druckluftversorgungsleitung. Der erforderliche Druck, der für den Ejektor benötigt wird, um das Medium von einem Behälter heraus zu saugen (3 – 4 bar), wird über einen Druckregler mit Manometer eingestellt. Über ein direkt gesteuertes 3/2 Wege-Magnetventil wird der Durchfluss der Druckluft ein- oder ausgeschaltet und somit auch die Einbringung des korrosiven Mediums ein- oder ausgeschaltet. Ein Rückschlagventil verhindert als Sicherheit zusätzlich noch ein Rücklaufen der Lösung in das 3/2 Wegeventil, wenn die Anlage abgeschaltet wird. Wie schon erwähnt, saugt der Ejektor die Na-Cl-Lösung aus einem Behälter und fördert das dabei entstandene Luft-Na-Cl Gemisch zur Prüfkammer. Dort wird das Gemisch über eine speziell dafür konstruierte Düse mit Hülse (siehe Abbildung 34 und Abbildung 35), welche in der Mitte der Prüfkammer bei dem Anschlussstutzen eingeschraubt wird (siehe Abbildung 36), fein zu einem Na-Cl-Nebel zerstäubt. Damit der Tropfen, beziehungsweise die Dichte des Nebels eingestellt werden können, wurde in der Saugleitung des Ejektors zusätzlich noch ein Drosselventil vorgesehen. Durch die Rotation der Probe und dem zerstäubten Medium wird die gesamte Prüffläche der

Probe mit der korrosiven Lösung benetzt und das zu untersuchende Material den zu simulierenden Umgebungseinflüssen ausgesetzt.

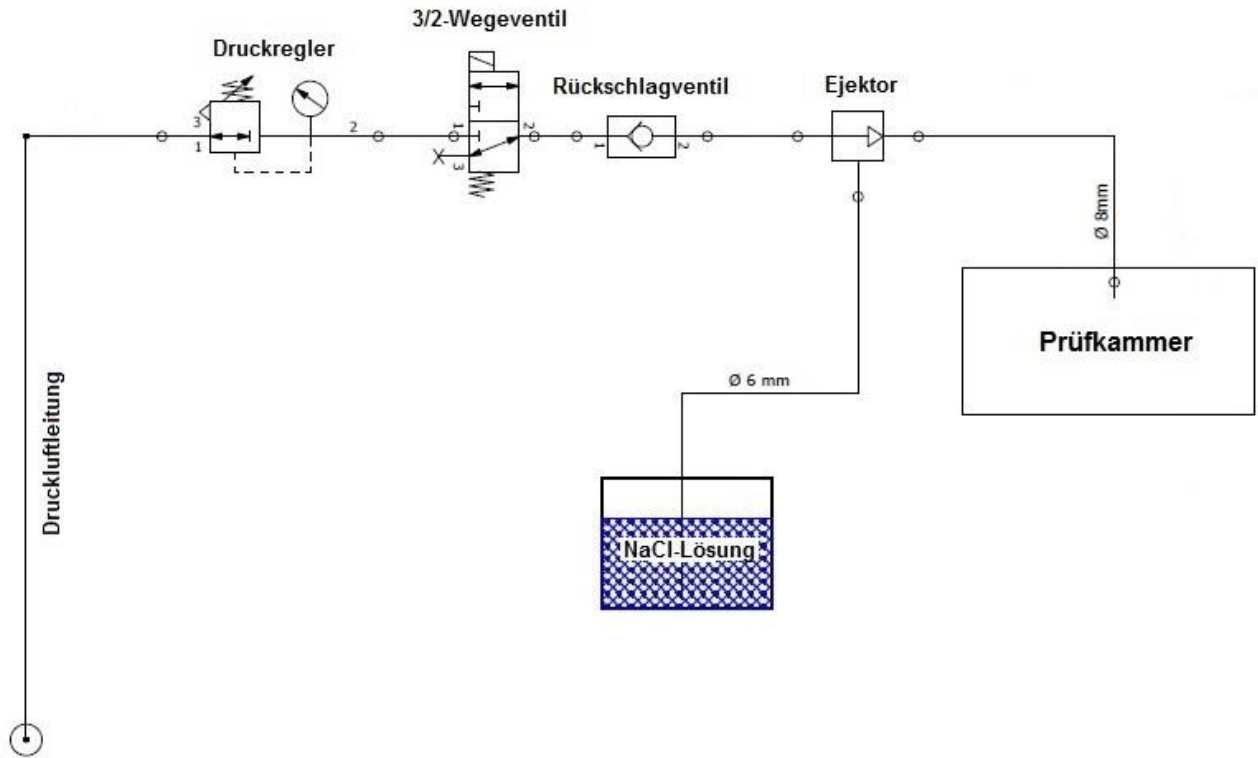


Abbildung 33: Grundsätzlicher Aufbau der Einbringung der Na-Cl-Lösung in die Prüfkammer

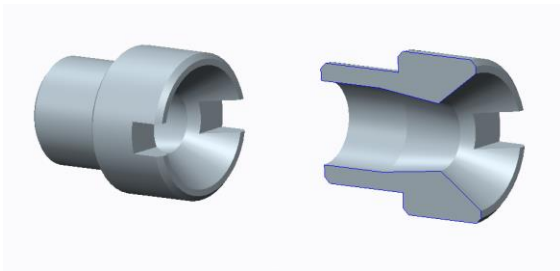


Abbildung 34: Zerstäuberdüse

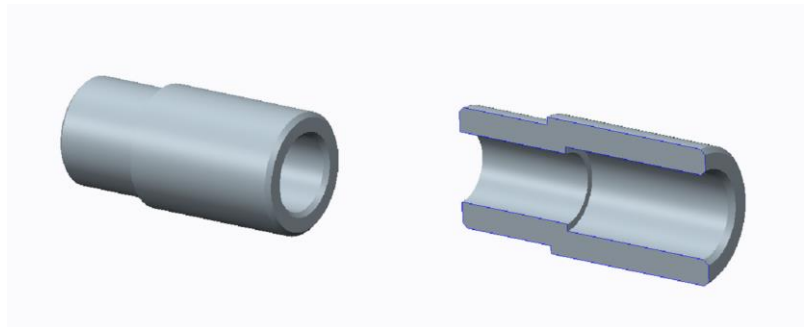


Abbildung 35: Hülse für Zerstäuberdüse

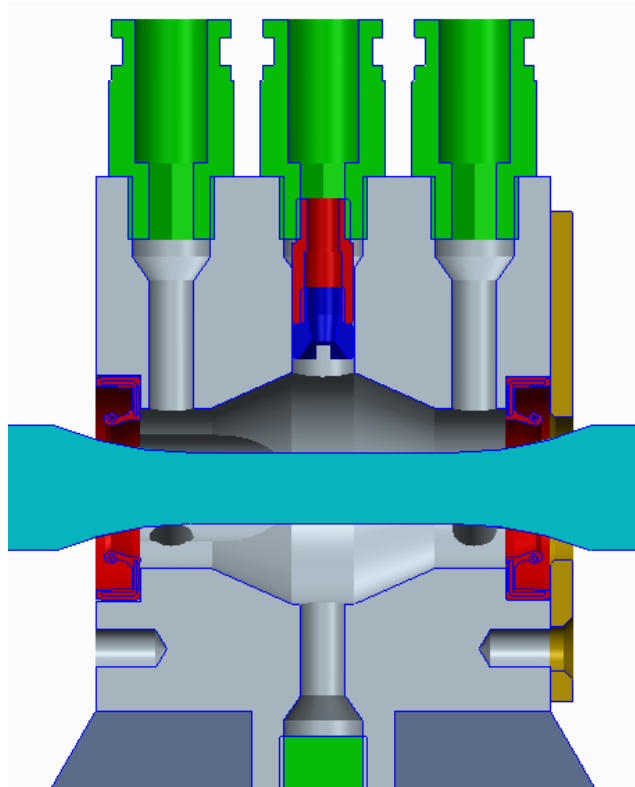


Abbildung 36: Einbausituation der Zerstäuberdüse

3.3.2.3 System der Evakuierung der Prüfkammer um Dichtheit dieser zu erreichen

Der prinzipielle Aufbau der Absaugung und damit die Abdichtung der Kammer ist in Abbildung 37 schematisch dargestellt. Es hängt wieder das gesamte System für die Absaugung an der gleichen Druckluftversorgungsleitung wie das System der Einbringung, bei welcher der erforderliche Druck für den Ejektor (5 - 6 bar zum Evakuieren der Kammer) über einen Druckregler mit Manometer eingestellt wird. Über ein direkt gesteuertes 3/2 Wege-Magnetventil wird der Durchfluss der Druckluft ein oder ausgeschaltet und somit die Absaugung des korrosiven Mediums und damit die Abdichtung der Kammer ein- oder ausgeschaltet. Ein Rückschlagventil verhindert als Sicherheit zusätzlich noch ein Rücklaufen der Lösung in das 3/2 Wegeventil, wenn die Anlage abgeschaltet wird.

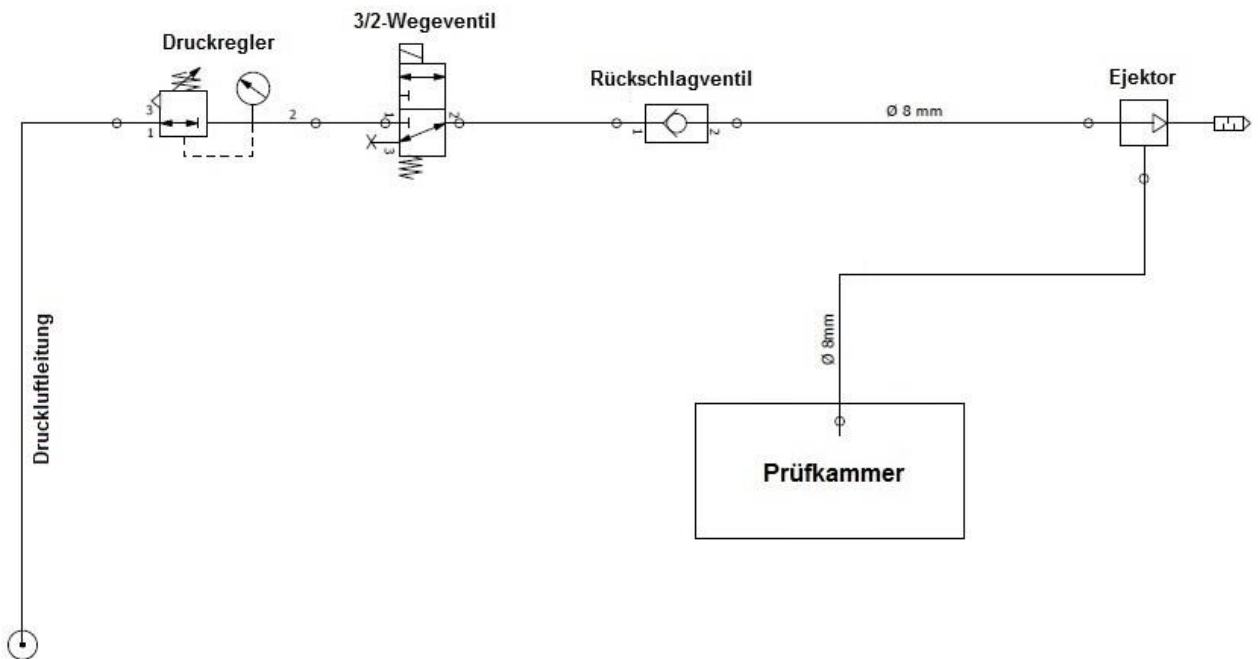


Abbildung 37: Grundsätzlicher Aufbau der Absaugung und damit Abdichtung der Prüfkammer

3.3.3 Auslegung und überschlägige Berechnung der Absaugung und Einbringung für Abdichtung der Prüfkammer

Damit das gesamte System der Einbringung und Absaugung auch richtig funktioniert und keine Lösung aus der Prüfkammer tritt, wurde eine überschlägige Berechnung und Auslegung, sowie die Auswahl der richtigen Ejektoren vorgenommen. Die zugrunde liegende Forderung dabei ist, dass aus der Prüfkammer mit dem Ejektor mehr abgesaugt wird, als an Na-Cl-Nebel in die Kammer eingebracht wird, damit nicht nur das Medium abgesaugt, sondern zusätzlich durch den Luftspalt, welcher zwischen Dichtung und Probe entsteht, Luft (Leckage) aus der Umgebung in die Kammer gesaugt und damit abgedichtet wird. Um die Berechnung durchführen zu können, wurde mit Hilfe der Firma SMC eine Vorauswahl von Ejektoren für Einbringung und Absaugung vorgenommen. Dabei wurde für die Einbringung des Mediums ein Ejektor der Type ZH10L und aus Sicherheitsgründen zur Erzeugung eines genügend großen Unterdruckes für die Absaugung, drei Ejektoren der Type ZH13L gewählt. Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen die Entlüftungs-Kennlinien der beiden Ejektoren. Dabei ist ersichtlich, dass der ZH10L bei Betreibung mit 4 bar

(0,4 MPa) einen Luftverbrauch von $\dot{V}_{\text{Ein,Luft}} = 40$ l/min hat, welchen er als Na-Cl-Luft Gemisch in Form eines Nebels, welcher durch die Zerstäuberdüse erzeugt wird, in die Kammer fördert. Weiters wurde durch einen Test des Ejektors mit Wasser für die Einbringung, mit einer Drossel in der Ansaugleistung des Mediums, ein Durchfluss von $\dot{V}_{\text{Ein,H}_2\text{O}} = 0,05$ l/min für die "richtige" Dichte des Nebels eingestellt und festgelegt. Der ZH13L dagegen hat bei dem Betrieb mit 5 bar (0,5 MPa) eine Ansaugleistung von $\dot{V}_{\text{Aus,Luft}} = 75$ l/min. Da aber für die Absaugung 3 Ejektoren vorgesehen werden, entsteht dabei eine Ansaugleistung von 3×75 l/min und ergibt somit $\dot{V}_{\text{Aus,Luft}} = 225$ l/min.

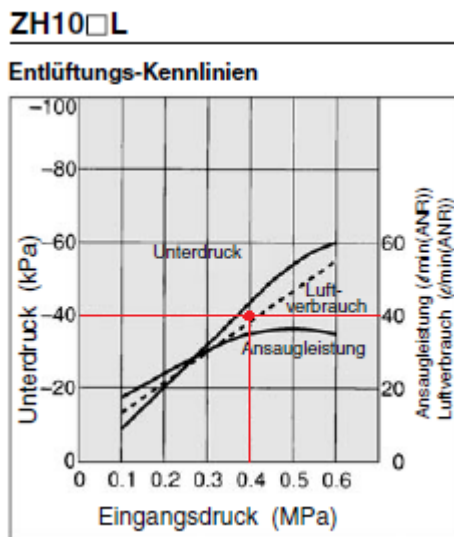


Abbildung 38: Kennlinie für Ejektor Einbringung ZH10L [32]

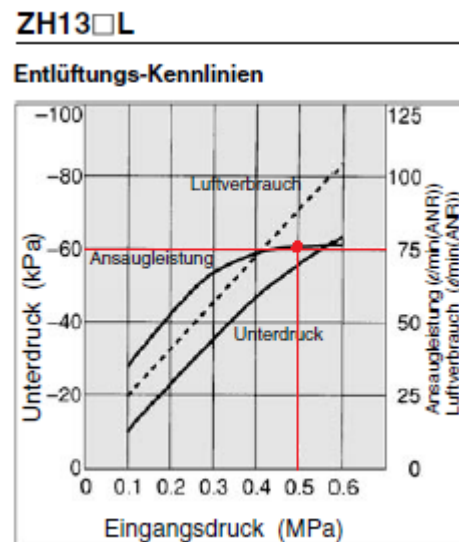


Abbildung 39: Kennlinie für Ejektor Absaugung ZH13L [32]

Für die überschlägige Berechnung wurde noch eine Vereinfachung getroffen. Das Na-Cl-Luft Gemisch setzt sich durch den Ejektor der Einbringung aus $\dot{V}_{\text{Ein,Luft}} = 40$ l/min Luft und $\dot{V}_{\text{Ein,H}_2\text{O}} = 0,05$ l/min Na-Cl zusammen. Da aber $\dot{V}_{\text{Ein,Luft}} = 40$ l/min \gg $\dot{V}_{\text{Ein,H}_2\text{O}} = 0,05$ l/min, wurde die Berechnung näherungsweise mit Luft durchgeführt, da die Dichte des Gemisches über das Drosselventil variabel eingestellt werden kann. Daraus folgt die Vereinfachung: $\rho_{\text{Ein}} = \rho_{\text{Aus}} = \rho_{\text{Luft}}$. Für die Berechnung der Kammer wurde die Kontinuitätsgleichung und die in Abbildung 40 dargestellte Berechnungsskizze herangezogen. Daraus ergibt sich der Volumenstrom \dot{V}_{Leck} ,

welcher durch den Dichtspalt zwischen Dichtung und Probe aus der Umgebung in die Kammer gesaugt wird und somit diese auch abdichtet. Berechnung siehe unten:

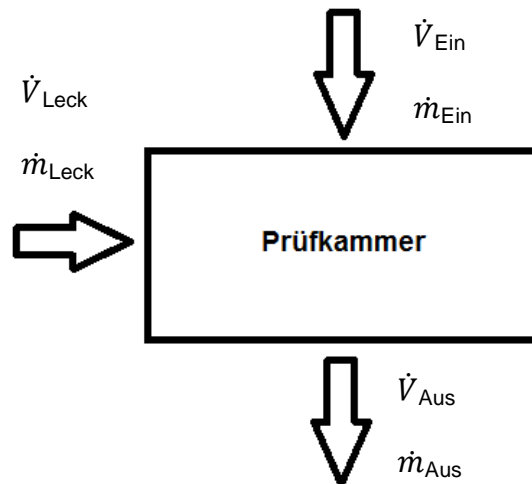


Abbildung 40: Berechnungsskizze für Kontinuitätsgleichung

Kontinuitätsgleichung:

$$\sum \dot{m} = 0$$

$$\dot{m} = \dot{V} * \rho$$

$$\dot{m}_{Ein} - \dot{m}_{Aus} + \dot{m}_{Leck} = 0$$

$$\dot{m}_{Leck} = \dot{m}_{Aus} - \dot{m}_{Ein} = \dot{V}_{Aus} * \rho_{Aus} - \dot{V}_{Ein} * \rho_{Ein}$$

$$\dot{V}_{Leck} \rho_{Luft} = \dot{V}_{Ein} * \rho_{Luft} - \dot{V}_{Aus} * \rho_{Luft}$$

$$\dot{V}_{Leck} = \dot{V}_{Ein} - \dot{V}_{Aus} = 40 \text{ l/min} - 225 \text{ l/min} = - 185 \text{ l/min}$$

Es werden somit, wie in der Berechnung ermittelt, 185 l/min Luft von der Umgebung durch die beiden Dichtspalte in die Prüfkammer gesaugt und dichten diese somit ab, sodass kein korrosives Medium nach außen tritt.

3.3.4 Umbau der Prüfkammer, Erweiterung des gesamten Prüfsystems um SPS – Steuerung und Prüfprozess entscheidender Komponenten

Die grundsätzliche Funktion der Einbringung und Evakuierung der Prüfkammer wurde in den Abschnitten 3.3.2.2 und 3.3.2.3 erläutert. Da jedoch zusätzlich zu der korrosiven Umgebung zur Prüfung der Materialien noch eine bestimmte Umgebungstemperatur von 80°C gefordert wird, wurde das System der Einbringung um spezielle Bauteile erweitert beziehungsweise umgebaut. Um den ganzen Prüfungsablauf zu vereinfachen, beziehungsweise nicht unkontrolliert von statten gehen zu lassen, wurde die gesamte Steuerung des Prüfsystems in einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) zusammengeführt. Diese SPS wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Fertigungstechnik (IFT) der Technischen Universität Wien (TU - Wien) erstellt und diese steuert, regelt und kontrolliert den gesamten Ablauf des Prüfungsvorganges. Die beiden Systeme der Einbringung und Absaugung wurden zusammengeführt und werden von einer Druckluftleitung versorgt. Da die Druckluft, die vom Kompressor des Unternehmens bereitgestellt wird, Öl enthält, wurde gleich am Beginn der Versorgungsleitung ein Ölabscheider, bestehend aus Luftfilter, Mikrofilter und Submikrofilter eingebaut. Diese Filterung der Druckluft ist notwendig, um die Korrosionsbeaufschlagung und damit die Prüfergebnisse nicht zu verfälschen. Die Einbringungsleitung wurde um einen Druckschalter, der den Druck kontrolliert, erweitert. Von der SPS wird über das 3/2 – Wegeventil die Luftzufuhr ein- oder ausgeschaltet und von dem Druckschalter überwacht. Bei keinem oder zu geringem Druck ist die Einbringung des Mediums nicht gewährleistet. Um eine Temperatur von 80°C in der Prüfkammer zu schaffen, wurde in der Leitung für die Einbringung vor dem Ejektor ein Lufterhitzer eingebaut. Da die Temperatur sofort abfallen würde wenn man heißer Luft mit einem kalten Medium mischt, wurde zusätzlich in die Ansaugleitung des Ejektors ein Heizschlauch für die Erwärmung der Na-Cl-Lösung eingebaut. Bei den ersten Versuchen der Einbringung des heißen Mediums in die Kammer wurde durch die Expansion des Luft-Na-Cl-Nebels ein Temperaturabfall beziehungsweise ein Abkühlung festgestellt und es war nicht möglich eine konstante Temperatur von 80°C zu erreichen. Um die gewünschte Forderung der Umgebungstemperatur zu erreichen wurde eine weitere Modifikation der Prüfkammer bezüglich des Materials, der Erhitzung der gesamten

Kammer und der Einbringung des Mediums vorgenommen. Dabei wurde für den Prüfkammerwerkstoff X6CrNiMoTi17-2-2 (Edelstahl 1.4571) gewählt, da dieses Material auch säurebeständig und korrosionsbeständig ist. Außerdem lässt er sich mit seiner Wärmeleitfähigkeit von $15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ sehr gut aufheizen und konstant auf Temperatur halten. Die Kammer wurde für die Erhitzung zusätzlich mit 4 Heizpatronen, welche in der Mitte der Prüfkammer radial um 90° versetzt eingebaut wurden erweitert. Des Weiteren wurde für die Einbringung des Mediums der Ejektor gegen eine Membranpumpe getauscht. Dadurch findet nun keine Expansion des Luft-Na-Cl-Nebel mehr statt, da jetzt eine reine Na-Cl-Lösung direkt auf die Prüffläche der Probe gespritzt wird. Der Luftherhitzer, welcher bei den ersten Versuchen zur Erhitzung der Luft des Einbringungsejektors verwendet wurde, wird nun für die Erhitzung der Luft, welche durch den Dichtspalt in die Kammer gesaugt wird verwendet. Dadurch wird eine weitere Gefahr der Abkühlung durch kalte angesaugte Umgebungsluft vermieden. Nun kann die gesamte Kammer auf 80°C aufgeheizt und bei konstanter Temperatur gehalten werden. Um das gesamte System der Einbringung (Membranpumpe, Durchflusssensor, Proportionalventil und Heizschlauch) vor Verschmutzungen aus dem Tank zu schützen, wurde ein Feinfilter adaptiert. Zusätzlich wurden die Prüfkammer und die beiden Deckel etwas größer ausgeführt. Auch die Form und Geometrie wurden leicht abgeändert. Um die Kammer von der Umlaufbiegemaschine in Bezug auf die Temperatur zu entkoppeln und nicht die Maschine mit zu erhitzen, wurden die Füße und das Fundament der Prüfkammer bei dem "alten" Werkstoff PTFE (Teflon) belassen, da dieses Material ebenfalls säurebeständig, temperaturbeständig bis 250°C ist und eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit von $0,25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ aufweist. Die Temperaturregelung in der Prüfkammer wird über die SPS gesteuert, indem einerseits in der Kammer ein Thermoelement eingebaut ist und den Luftherhitzer und Heizschlauch regelt und andererseits ein PT100 Temperaturfühler die Temperatur der beheizten Kammer regelt, sodass eine Temperatur von 80°C Umgebungstemperatur im Inneren der Prüfkammer erreicht und gehalten wird. Die Abbildung 41, Abbildung 42, Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen die umgebaute beziehungsweise erweiterte Prüfkammer mit den Heizpatronen und den Bohrungen für das Thermoelement und den PT100 Temperaturfühler. Das Medium wird von dem Ejektor durch einen Heizschlauch aus

einem Behälter gesaugt und durchläuft zusätzlich sowohl ein Proportionalventil, in dem der Durchfluss gesteuert wird, als auch einen Durchflussmesser, in dem dieser gemessen wird. Beide Bauteile werden wieder von der SPS gesteuert, beziehungsweise ausgelesen. An dem Behälter befindet sich außerdem noch ein kapazitiver Füllstandssensor, der den Flüssigkeitsstand der Lösung misst und an die Steuerung zur Überwachung weiter gibt. Die Kontrolle des Druckes sowie das Ein- und Ausschalten der Luftzufuhr für die Absaugung über das 3/2 – Wegeventil funktioniert gleich wie bei der Einbringung, wobei die Absaugung hierbei über drei Ejektoren bewerkstelligt wird, um die Kammer abzudichten und den Na-Cl-Nebel aus dieser zu evakuieren. Die aus der Prüfkammer abgesaugte Lösung wird in einen externen Behälter gefördert und nicht mehr verwendet, da sich am Ende des gesamten Prüfprozesses die Konzentration verändert haben könnte. Auch die Elektromagneten, die für die Fixierung der Prüfkammer zuständig sind und die Umlaufbiegemaschine, werden von der SPS angesteuert, beziehungsweise in diese für die Steuerung und Regelung des Systems miteingebunden. Durch die Speicher-Programmierbare-Steuerung wird wie beschrieben der gesamte Prüfvorgang gesteuert und überwacht. Abbildung 45 zeigt schematisch die gesamte erweiterte Prüfanlage mit der SPS. Wird zum Beispiel kein Druck oder ein zu geringer Druck an einem Druckschalter gemessen, so schaltet die Anlage sofort ab, beziehungsweise lässt sich das System nicht starten, da dann entweder die Absaugung oder Einbringung nicht funktioniert. Auch bei Überhitzung des Luftherhitzers, des Heizschlauches oder bei zu hoher Temperatur in der Prüfkammer wird das System abgeschaltet. Sollte der Füllstandssensor in dem Behälter einen bestimmten Grenzwert messen, wird zuerst vorgewarnt und beim Erreichen eines kritischen Füllstandes schaltet die Anlage ebenfalls ab. Sind die Elektromagneten nicht magnetisiert und die Kammer damit nicht fixiert und gespannt, lässt sich das System ebenfalls nicht starten. Bricht nach erfolgreicher Prüfung des Materials die Probe nach einer gewissen Anzahl von Umdrehungen, sendet die Umlaufbiegemaschine an die SPS ein Signal und schaltet die gesamte Prüfanlage ab. Abbildung 46 zeigt schematisch das Funktionsflussdiagramm für die SPS vom Start der Anlage bis zum Bruch der Probe und damit zur Abschaltung des Prüfsystems.

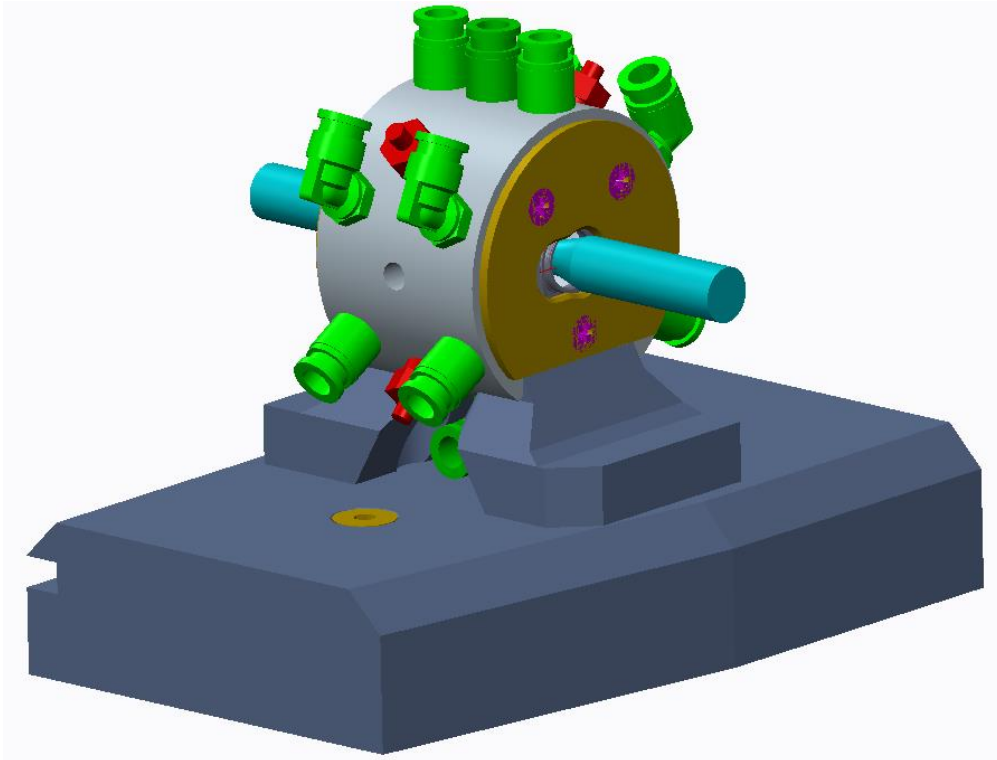


Abbildung 41: Umgebaute und erweiterte Prüfkammer mit Heizpatronen und Heißluftanschlüsse

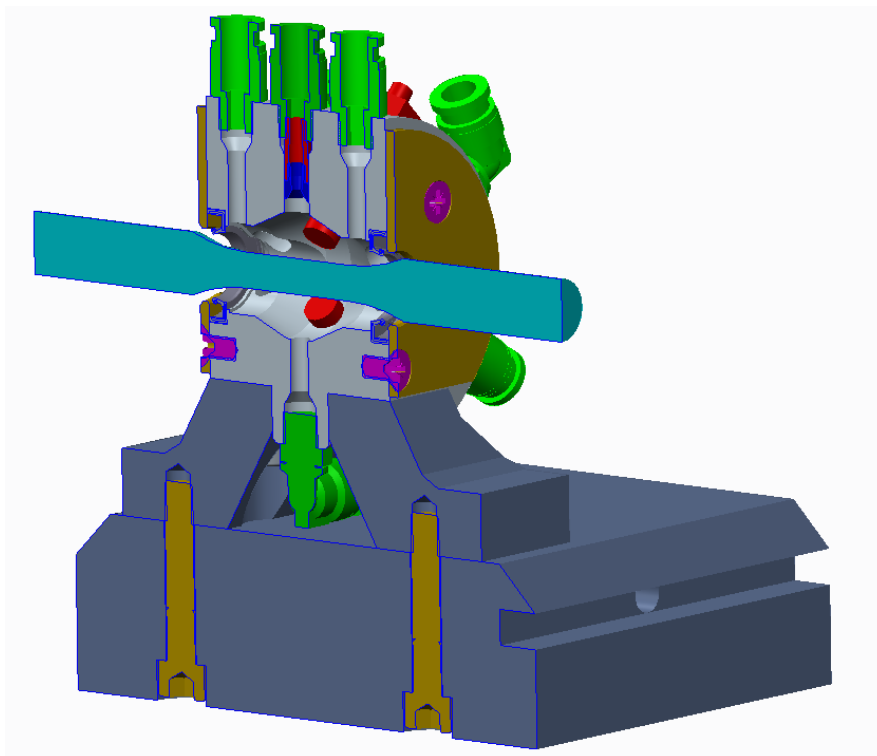


Abbildung 42: Längsschnitt durch Prüfkammer (Vorderansicht)

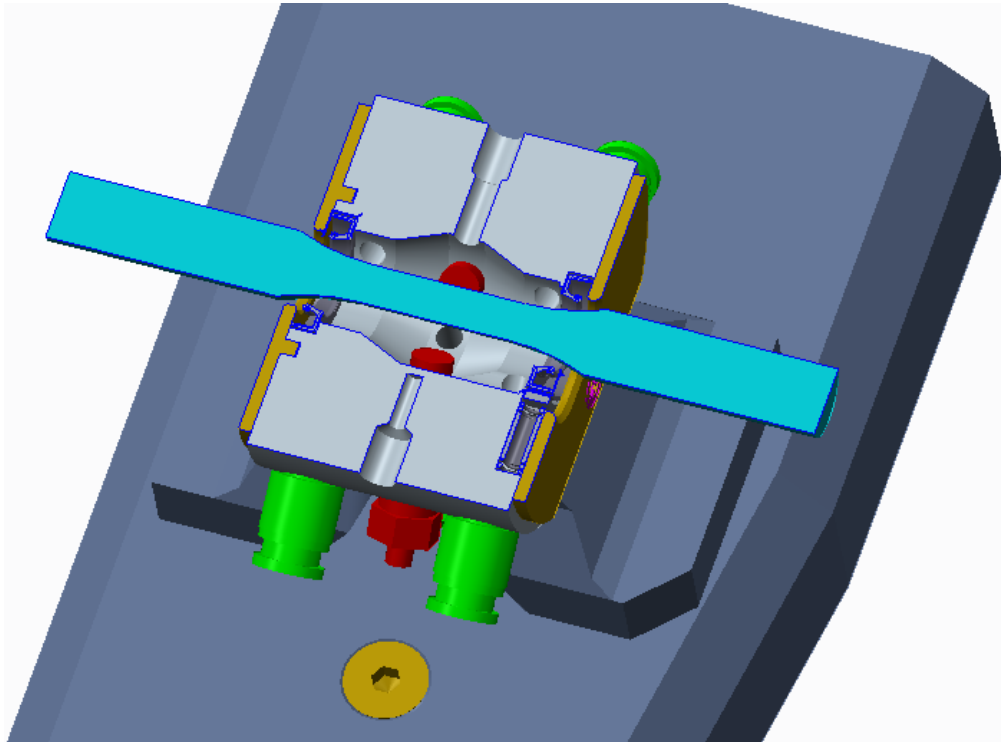


Abbildung 43: Längsschnitt durch Prüfkammer (Draufsicht) mit Bohrungen für Thermoelement und PT100
Temperaturfühler

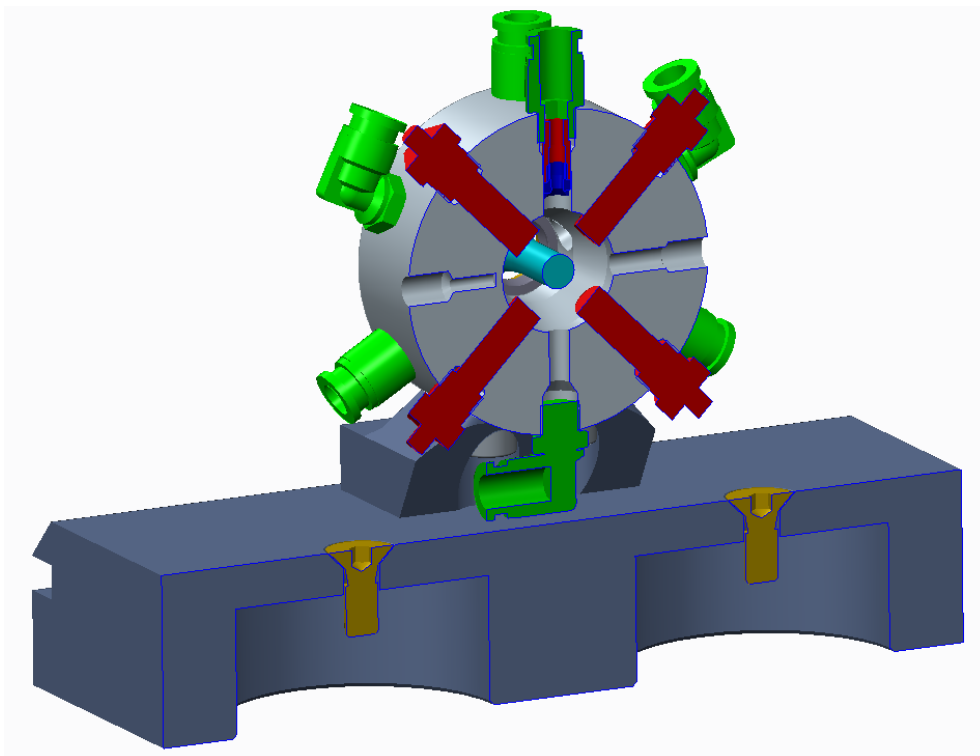


Abbildung 44: Querschnitt durch Prüfkammer mit Einbausituation der Heizpatronen

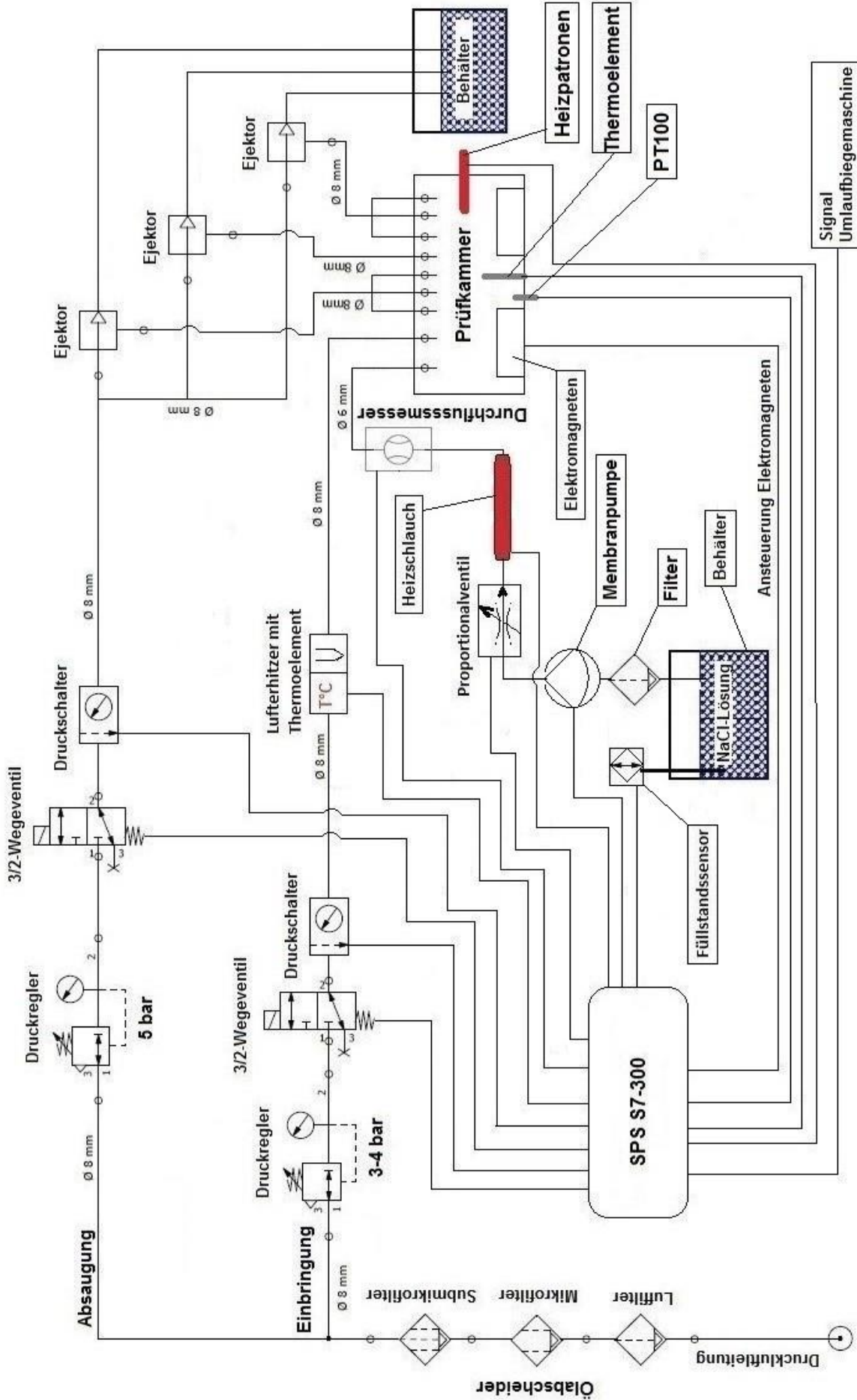


Abbildung 45: Schematische Darstellung des gesamten erweiterten Systems

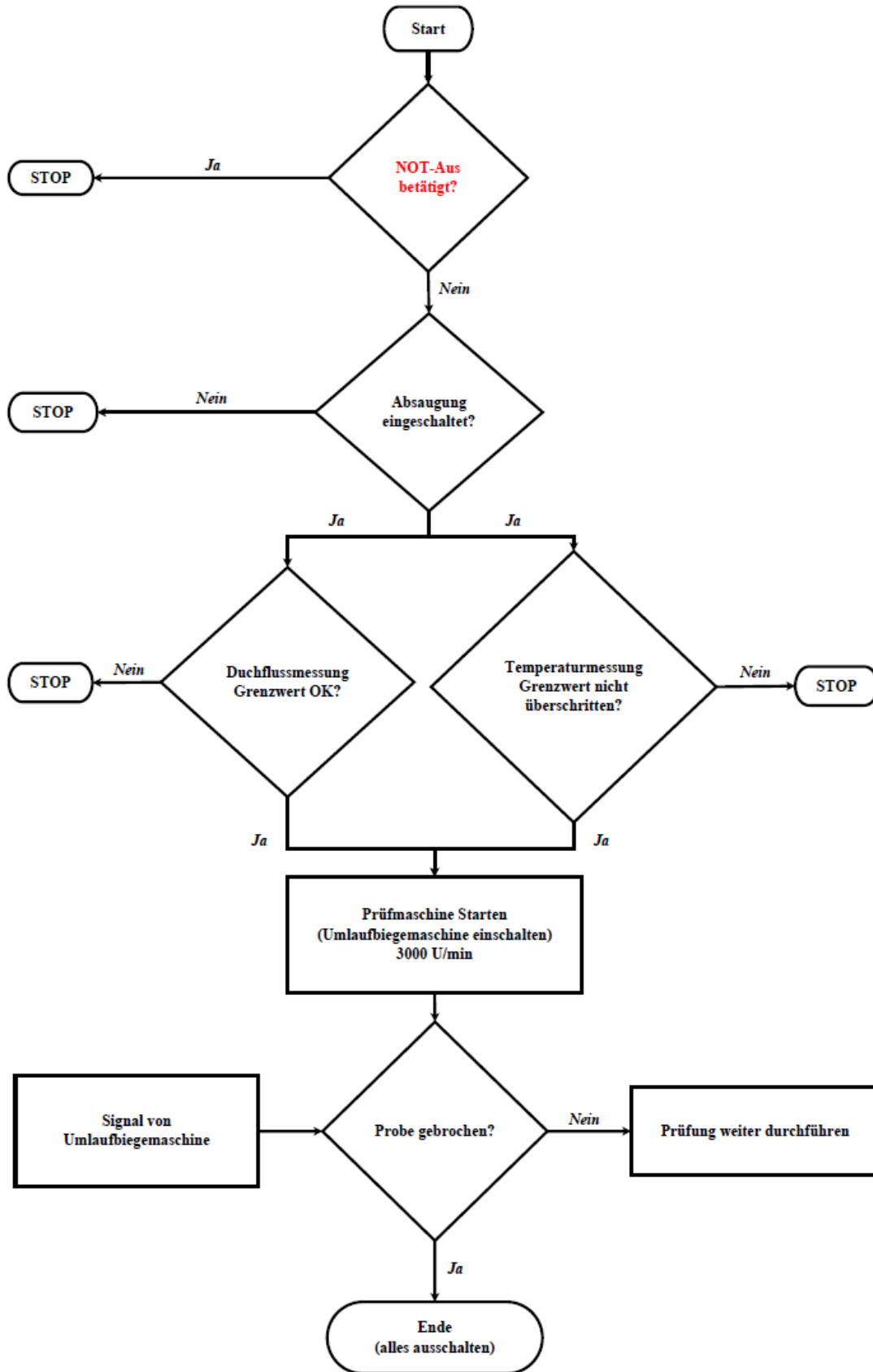


Abbildung 46: Funktionsflussdiagramm für SPS

4 Experimentelle Untersuchungen

Dazu wurden Proben aus der Schmelze des Werkstoffs P550 herausgeschnitten und auf die richtige Probengeometrie gedreht. Die experimentellen Untersuchungen wurden in der Umlaufbiegemaschine einerseits ohne und andererseits mit Medium, also ohne und mit korrosivem Angriff des Materials und bei verschiedenen Belastungen der Proben durchgeführt. Dabei wurden die ersten Prüfungen bei Raumtemperatur an der Atmosphäre durchgeführt. Danach wurden weitere Proben bei einer Temperatur von 40 – 45°C und zusätzlichem Beaufschlagen des Materials mit dem Medium (Na-Cl-Lösung) untersucht. Zu guter Letzt wurden Prüfungen bei 80°C mit dem Medium durchgeführt. Die dadurch entstandenen Einflüsse der künstlich geschaffenen Umgebung (heiß und korrosiv) auf die Werkstoffkennwerte können somit mit jenen ohne diese Umgebung verglichen werden.

4.1 Geprüfter Werkstofftyp

Bei dem untersuchten Werkstofftyp handelt sich um den P550, welcher im Unternehmen bei SBO zur Herstellung von Schwerstangen verwendet wird. Tabelle 9 zeigt nochmal die chemische Zusammensetzung des geprüften Werkstoffes P550 mit der Stangennummer G6003.

Tabelle 9: Chemische Zusammensetzung des geprüften Werkstoffes P550 mit Stangennummer G6003 in Masseprozent [33]

| Marke | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | N |
|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|------|------|------|
| P 550 | 0,045 | 0,17 | 21,28 | 0,02 | 0,001 | 18,37 | 0,53 | 1,78 | 0,67 |

4.2 Herstellung der Na-Cl-Lösung

Für die Durchführung der Korrosionstests wurde von dem Unternehmen eine Na-Cl-Lösung mit einem Chlorid-Gehalt von 80000 ppm, das entspricht 8 Gew.-% Cl festgelegt. Dadurch ergibt sich durch nachfolgende Berechnung eine 13,2 Gew.-% Na-Cl-Lösung. Zusätzlich sollte die Lösung einen pH-Wert von 8 aufweisen.

Berechnung:

Molmassen:

$$M_{\text{Cl}} = 35,45 \text{ g/mol}$$

$$M_{\text{Na}} = 22,99 \text{ g/mol}$$

$$M_{\text{NaCl}} = 58,44 \text{ g/mol}$$

8 Gew.-% Cl entsprechen in einem kg der Lösung 80 g.

$$\frac{80 \text{ g Cl}}{35,45 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 2,2567 \text{ mol Cl}$$

Um die geforderten 80000 ppm zu erreichen, müssen 2,2567 mol Cl in einem kg der Lösung enthalten sein. Dazu werden 2,2567 mol NaCl gelöst.

$$2,2567 \text{ mol NaCl} \times 58,44 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 131,88 \text{ g NaCl}$$

Es werden dazu gerundet 132 g NaCl in 868 g deionisiertem Wasser gelöst, damit sich gesamt 1000 g Lösung ergeben, welche einen Na-Cl-Gehalt von 13,2 Gew.-% aufweist. Da der pH-Wert der Lösung danach zwischen 6 und 7 liegt wird unter Rühren und gleichzeitigem Messen mittels eines pH-Meters NaOH zugegeben, bis sich ein pH-Wert von 8 einstellt [34].

4.3 Umlaufbiegeprüfungen

4.3.1 Durchführung der Umlaufbiegeprüfungen ohne Medium bei Raumtemperatur

Da dabei kein korrosiver Angriff des Materials geplant wurde, wurden die Versuche wie bisher im Unternehmen an der Atmosphäre bei Raumtemperatur durchgeführt. Um eine Tendenz des Werkstoffverhaltens zu bekommen, wurden die Umlaufbiegeversuche mit unterschiedlichen Belastungen (abgestuft von 100 bis 50 ksi (690 bis 345 MPa)) der Proben durchgeführt.

4.3.1.1 Vorbereitungen

Vor dem Start der Versuche wird die Belastung beziehungsweise das Gewicht für die jeweilig gewünschte Spannung in dem Prüfquerschnitt der Probe festgelegt.

4.3.1.2 Versuchsablauf

Die Probe wird in die Spannzangen der Umlaufbiegemaschine eingespannt und mittels Spanschlüssel fixiert. Danach wird die Maschine gestartet und nach Erreichen einer konstanten Drehzahl von 3000 U/min. das im Vorhinein definierte Gewicht, für die gewünschte Spannung im Prüfquerschnitt der Probe, an den Hebelarm der Umlaufbiegemaschine gehängt um die Belastung einzuleiten. Ein Counter, welcher mit einem Computer gekoppelt ist, zählt dann bis zum Bruch der Probe die erreichten Lastwechsel. Je nach Belastungsgewicht beziehungsweise Spannung in dem Prüfquerschnitt werden mehr oder weniger Lastwechsel erreicht. Abbildung 47 zeigt den Versuch der durchgeführten Umlaufbiegeprüfung ohne Medium bei Raumtemperatur.

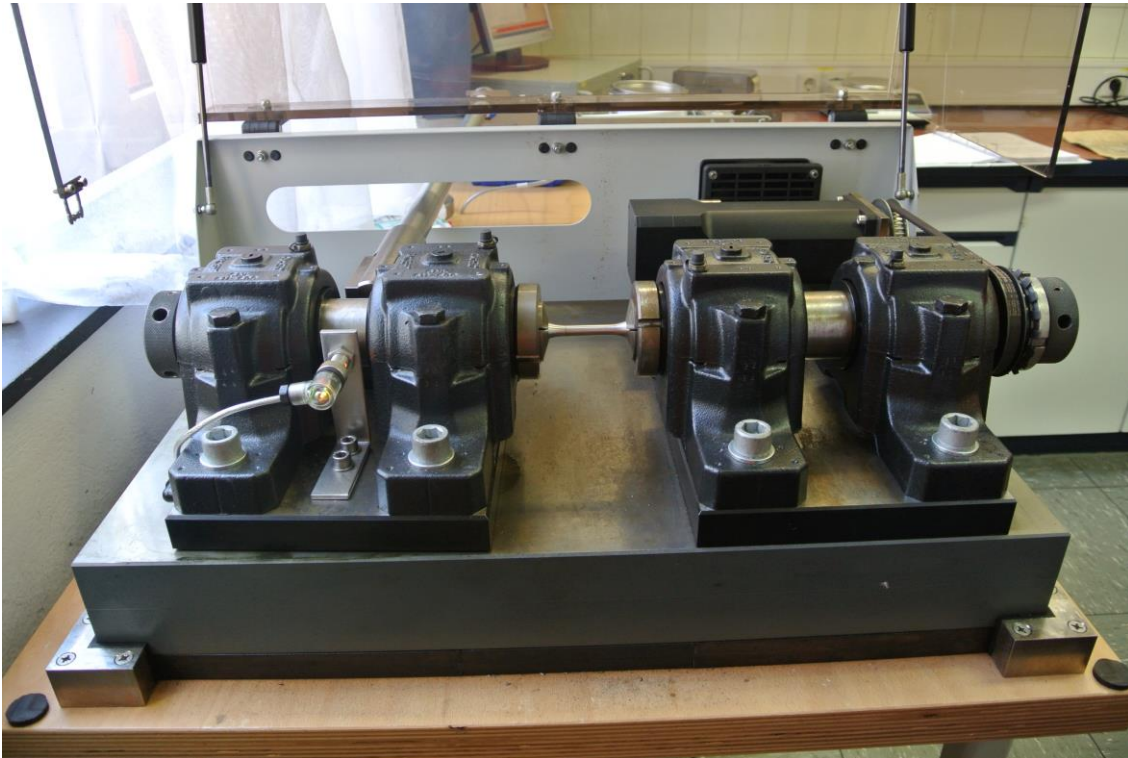


Abbildung 47: Umlaufbiegeprüfungen ohne Medium bei Raumtemperatur

4.3.2 Durchführung der Umlaufbiegeprüfungen mit Medium bei einer Temperatur von 40 – 45 °C

Diese Versuche wurden mit der vorläufigen Prüfkammer, welche aus PTFE hergestellt wurde, durchgeführt. Hierbei wurden die Materialproben bei einer Temperatur von 40 – 45°C mit Beaufschlagung der 13,2 Gew.-% Na-Cl-Lösung geprüft. Für die Menge des Mediums mit der man das Material beaufschlagt hat, wurden 30 – 40 ml/min eingestellt beziehungsweise gewählt. Um die Werte der Versuchsreihen vergleichen zu können, wurden die Proben ebenfalls mit unterschiedlichen Belastungen, wie in der vorher gegangenen Versuchsreihe an der Atmosphäre (abgestuft von 100 bis 40 ksi (690 bis 276MPa)), belastet.

4.3.2.1 Vorbereitungen

Vor dem Start der Versuche wird die wie in Abschnitt 4.2 berechnete Na-Cl-Lösung hergestellt und die Belastung beziehungsweise das Gewicht für die jeweilig gewünschte Spannung in dem Prüfquerschnitt der Probe festgelegt. Danach wird das Medium in den Tank der Steuerung für die Prüfkammer eingefüllt und diese in die Umlaufbiegemaschine adaptiert. Gleich darauf wird die Steuerung beziehungsweise werden die Temperatursensoren, Absaugleitungen und die Leitung für den Zulauf der Na-Cl-Lösung angesteckt, sodass die Steuerung und Prüfkammer start- und funktionsbereit sind.

4.3.2.2 Versuchsablauf

Die Probe wird durch die Prüfkammer gesteckt, in die Spannzangen der Umlaufbiegemaschine eingespannt und mittels Spanschlüssel fixiert. Danach wird an der Steuerung der Prüfkammer die gewünschte Temperatur und der gewünschte Durchfluss des Mediums, also die Menge an Na-Cl-Lösung mit welcher man das Material beaufschlagen möchte, eingestellt. Nachdem alle Einstellungen vorgenommen wurden, wird an der Steuerung der Start Knopf betätigt wodurch die Aufheizung des Mediums, der Luft und die Einbringung beziehungsweise Absaugung des Mediums gestartet wird. Sobald die gewünschte Temperatur in der Prüfkammer erreicht wurde, wird die Maschine gestartet. Nach Erreichen einer konstanten Drehzahl von 3000 U/min. wird das im Vorhinein definierte Gewicht, für die gewünschte Spannung im Prüfquerschnitt der Probe, an den Hebelarm der Umlaufbiegemaschine gehängt um die Belastung einzuleiten. Ein Counter, welcher mit einem Computer gekoppelt ist, zählt dann bis zum Bruch der Probe die erreichten Lastwechsel. Je nach Belastungsgewicht beziehungsweise Spannung in dem Prüfquerschnitt werden mehr oder weniger Lastwechsel erreicht. Nach dem Bruch der Probe wird die Maschine und die Prüfkammer automatisch abgeschaltet. Abbildung 48 und Abbildung 49 zeigen den Versuch der durchgeführten Umlaufbiegeprüfung mit Medium bei einer Temperatur von 40 – 45 °C.

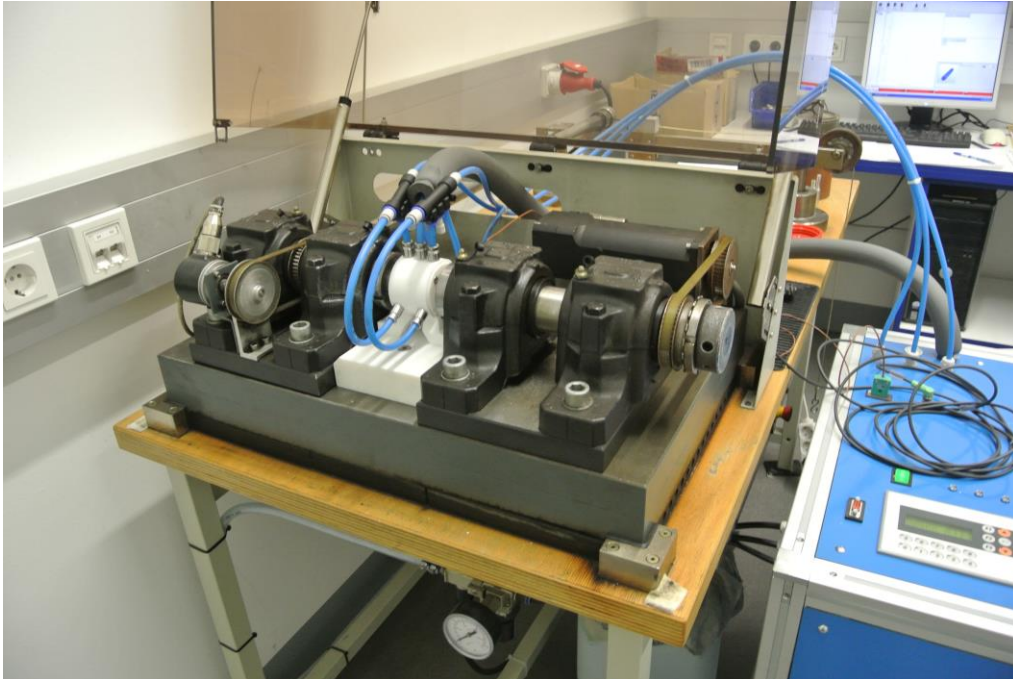


Abbildung 48: Umlaufbiegeprüfungen mit Medium bei einer Temperatur von 40 – 45 °C vor dem Start der Prüfanlage

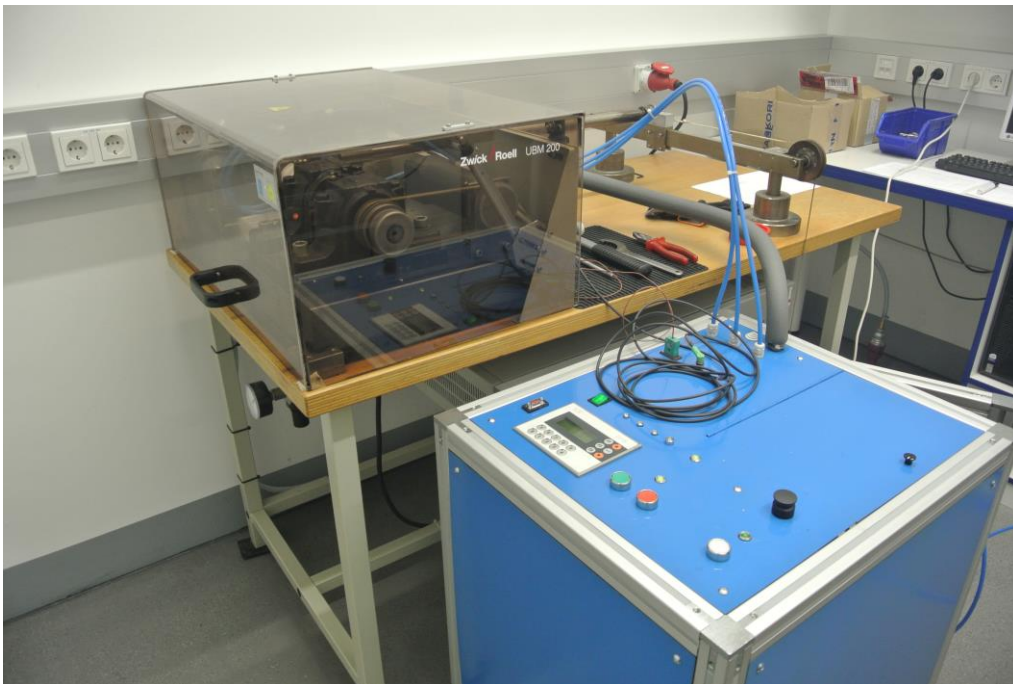


Abbildung 49: Umlaufbiegeprüfungen mit Medium bei einer Temperatur von 40 – 45 °C während des Betriebes

4.3.3 Durchführung der Umlaufbiegeprüfung mit Medium bei einer Temperatur von 80°C

Diese Versuche wurden mit der neuen Prüfkammer, welche aus X6CrNiMoTi17-2-2 (Edelstahl 1.4571) hergestellt wurde durchgeführt, da bei der Kammer aus PTFE die erreichbare Temperatur mit 45°C begrenzt war. Dabei wurden die Materialproben bei einer Temperatur von 80°C mit Beaufschlagung der 13,2 Gew.-% Na-Cl-Lösung geprüft. Für die Menge des Mediums mit der man das Material beaufschlagt hat, wurden 30 – 40 ml/min eingestellt beziehungsweise gewählt. Um die Werte der Versuchsreihen vergleichen zu können, wurden die Proben ebenfalls mit unterschiedlichen Belastungen, wie in den vorher gegangenen Versuchsreihen an der Atmosphäre und mit Medium bei einer Temperatur von 45-45°C (abgestuft von 100 bis 40 ksi (690 bis 276MPa)), belastet.

4.3.3.1 Vorbereitungen

Vor dem Start der Versuche wird die wie in Abschnitt 4.2 berechnete Na-Cl-Lösung hergestellt und die Belastung beziehungsweise das Gewicht für die jeweilig gewünschte Spannung in dem Prüfquerschnitt der Probe festgelegt. Danach wird das Medium in den Tank der Steuerung für die Prüfkammer eingefüllt und diese in die Umlaufbiegemaschine adaptiert. Gleich darauf wird die Steuerung beziehungsweise werden die Temperatursensoren, Absaugleitungen und die Leitung für den Zulauf der Na-Cl-Lösung angesteckt, sodass die Steuerung und Prüfkammer start- und funktionsbereit sind.

4.3.3.2 Versuchsablauf

Die Probe wird durch die Prüfkammer gesteckt, in die Spannzangen der Umlaufbiegemaschine eingespannt und mittels Spannschlüssel fixiert. Danach wird an der Steuerung der Prüfkammer die gewünschte Temperatur und der gewünschte Durchfluss des Mediums, also die Menge an Na-Cl-Lösung mit welcher man das Material beaufschlagen möchte, eingestellt. Nachdem alle Einstellungen vorgenommen wurden, wird an der Steuerung der Start Knopf betätigt wodurch die Aufheizung der Kammer über die Heizpatronen, die Aufheizung des Mediums und der Luft, und die Einbringung beziehungsweise Absaugung des Mediums gestartet

wird. Sobald die gewünschte Temperatur in der Prüfkammer erreicht wurde, wird die Maschine gestartet. Nach Erreichen einer konstanten Drehzahl von 3000 U/min. wird das im Vorhinein definierte Gewicht, für die gewünschte Spannung im Prüfquerschnitt der Probe, an den Hebelarm der Umlaufbiegemaschine gehängt um die Belastung einzuleiten. Ein Counter, welcher mit einem Computer gekoppelt ist, zählt dann bis zum Bruch der Probe die erreichten Lastwechsel. Je nach Belastungsgewicht beziehungsweise Spannung in dem Prüfquerschnitt werden mehr oder weniger Lastwechsel erreicht. Nach dem Bruch der Probe wird die Maschine und die Prüfkammer automatisch abgeschaltet. Abbildung 50 zeigt den Versuch der durchgeführten Umlaufbiegeprüfung mit der neuen Prüfkammer mit Medium bei einer Temperatur von 80°C.



Abbildung 50: Umlaufbiegeprüfungen mit neuer Prüfkammer mit Medium bei einer Temperatur von 80°C

4.4 Ergebnisse

Um die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen richtig interpretieren zu können, wurde für jede Versuchsreihe eine Wöhlerkurve erstellt. Die Wöhlerkurve gibt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit den Bruch oder die Dauerfestigkeit eines Werkstoffes an. Diese Kurve setzt sich aus dem Spannungsausschlag σ_a , der durch die Belastung und Rotation der Probe entsteht, und den erreichten Lastspielzahlen N , welche auf einer logarithmischen Skala bis zum Bruch der Probe dargestellt werden, zusammen. Tritt jedoch nach einer gewissen Anzahl von Lastspielen, der sogenannten Grenzlastspielzahl N_G , kein Bruch ein, wird das geprüfte Material für dauerhaft befunden. Die Grenzlastspielzahlen sind werkstoffabhängig und liegen für Stahl bei 10^7 Lastspielen. Findet ein Bruch der Probe jedoch vor der Grenzlastspielzahl statt, so handelt es sich um eine bestimmte Zeitfestigkeit des Materials [35].

4.4.1 Auswertung der Ergebnisse ohne Medium bei Raumtemperatur

In Tabelle 10 sind die einzelnen Versuche mit den Proben, der jeweiligen Belastung und den dabei erreichten Lastwechseln dargestellt. Um einen Vergleich der Werkstoffkennwerte zu haben, sind in dieser Tabelle auch noch die Werte einer anderen Schmelzenerprobung mit einer Belastung von 80 ksi (550 MPa) eingetragen. Dabei ist zu sehen, dass die Vergleichswerte der Schmelzenerprobung genau dazwischen liegen und die Tendenz des Werkstoffes annähernd gleich verläuft. Abbildung 51 zeigt die Werte der Ergebnisse in Form einer Wöhlerkurve. Abbildung 52 zeigt ein Bild mit den gebrochenen Proben bei den unterschiedlichen Belastungen.

Tabelle 10: Ergebnisse der Umlaufbiegeprüfung ohne Medium bei Raumtemperatur

| | | $0,098 \times D^3$ | Prüfspannung σ | | $\sigma \times W : 9810$ [kg] | | |
|-------|-----------|-------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------------------|-------------------------|-------|
| Probe | D [mm] | W [mm ³] | Stress [MPa] | Stress [ksi] | Gewicht [kg] | Bruchlast- spielzahl | Bruch |
| OK 1 | 7,99 | 49,99 | 690 | 100 | 3,516 | 143418 | ja |
| OK 2 | 7,99 | 49,99 | 621 | 89 | 3,164 | 230131 | ja |
| OK 3 | 8,00 | 50,18 | 550 | 80 | 2,813 | 323441 | ja |
| OK4 | 7,99 | 49,99 | 483 | 70 | 2,461 | 374549 | ja |
| OK5 | 7,99 | 49,99 | 621 | 91 | 3,164 | 233960 | ja |
| OK6 | 7,99 | 49,99 | 483 | 70 | 2,461 | 484072 | ja |
| OK7 | 8,00 | 50,18 | 414 | 60 | 2,118 | 1540607 | ja |
| OK8 | 8,00 | 50,18 | 550 | 80 | 2,813 | 478822 | ja |
| OK9 | 7,99 | 49,99 | 414 | 60 | 2,110 | 1154148 | ja |
| OK10 | 7,99 | 49,99 | 345 | 50 | 1,758 | 3260729 | ja |
| OK11 | 8,00 | 50,18 | 345 | 50 | 1,765 | 2786878 | ja |
| | | | | | | | |
| SM1 | 8,00 | 50,18 | 550 | 79 | 2,813 | 397596 | ja |
| SM2 | 8,00 | 50,18 | 550 | 81 | 2,813 | 418089 | ja |

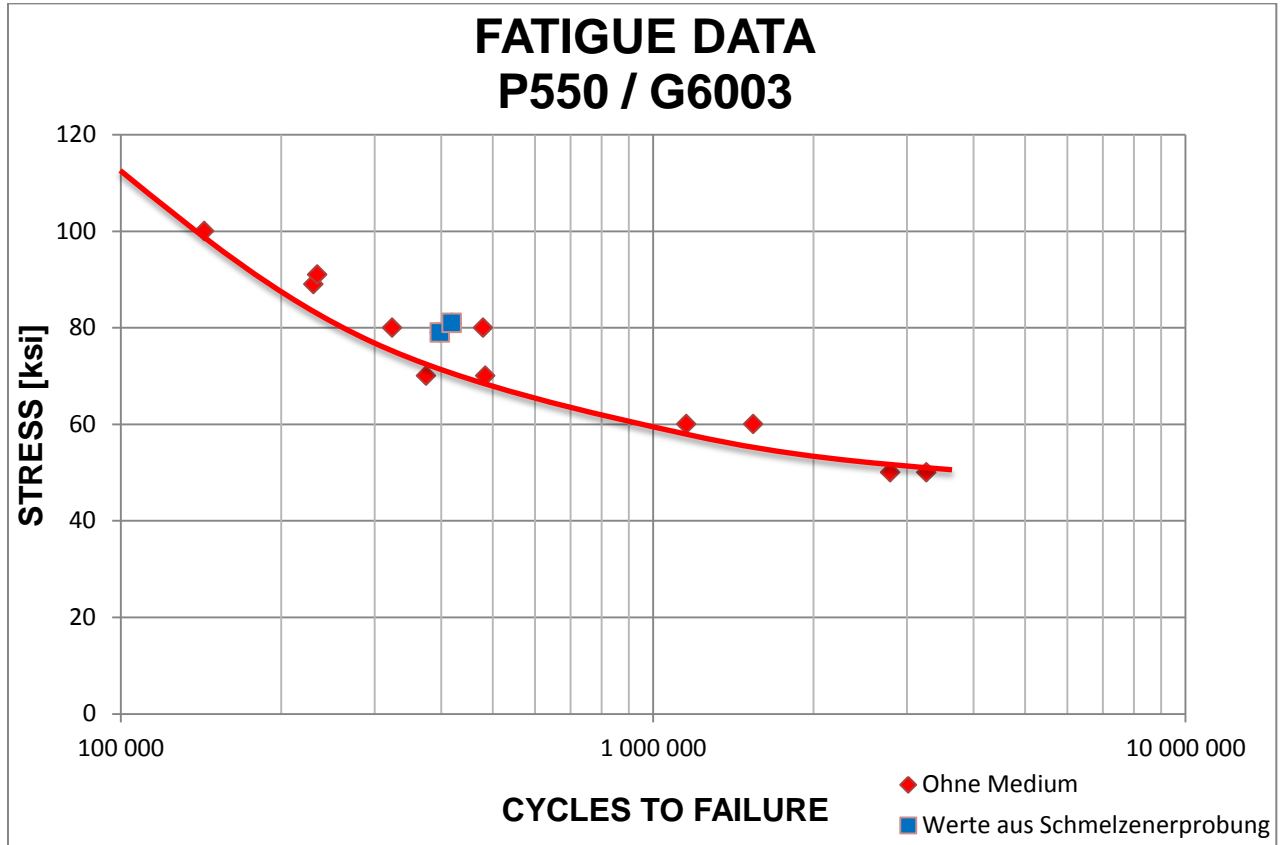


Abbildung 51: Ermüdungskurve (Wöhlerkurve) der Umlaufbiegeversuche ohne Medium bei Raumtemperatur

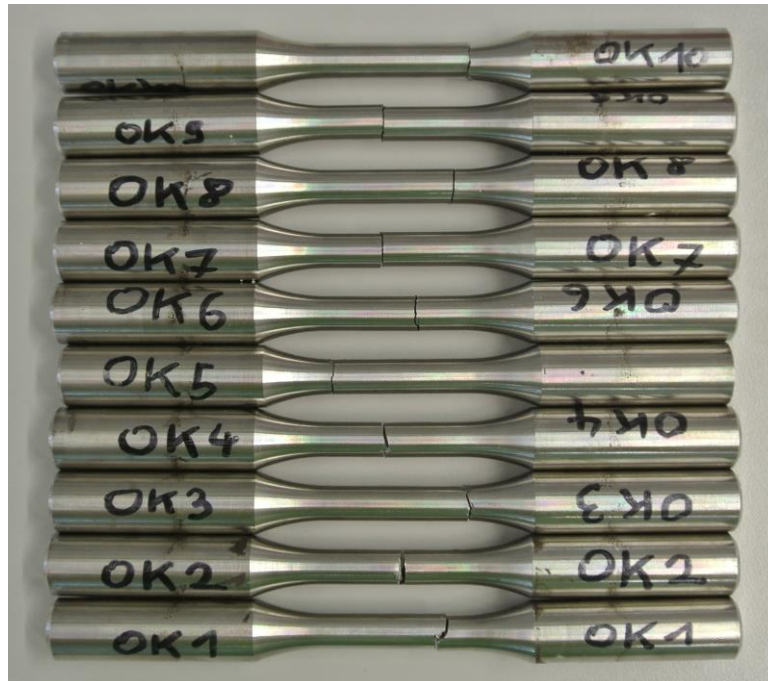


Abbildung 52: Gebrochene Proben ohne Medium bei Raumtemperatur

4.4.2 Auswertung der Ergebnisse mit Medium bei einer Temperatur von 40 – 45°C

In Tabelle 11 sind die einzelnen Versuche mit den Proben, der jeweiligen Belastung und den dabei erreichten Lastwechseln dargestellt. Auch hier sind zum Vergleich die Werte der Schmelzenerprobung ohne Medium bei Raumtemperatur mit einer Belastung von 80 ksi (550 MPa) eingetragen. Dabei ist zu sehen, dass mit Beaufschlagung des Mediums und einer Temperatur von 40 – 45°C die Proben deutlich früher reißen und nicht so viele Lastwechsel wie bei der ersten Versuchsreihe ohne Medium und Raumtemperatur aushalten. Abbildung 53 zeigt die Werte der Ergebnisse in Form einer Wöhlerkurve. Abbildung 54 zeigt ein Bild mit den gebrochenen Proben bei den unterschiedlichen Belastungen.

Tabelle 11: Ergebnisse der Umlaufbiegeprüfung mit Medium bei einer Temperatur von 40 – 45°C

| Probe | D [mm] | 0,098 x D ³ W [mm ³] | Prüfspannung σ | | $\sigma \times W : 9810$ [kg] | Bruchlast- spielzahl | Bruch |
|-------|-----------|---|-----------------------|-----------------|----------------------------------|-------------------------|-------|
| | | | Stress [MPa] | Stress [ksi] | Gewicht [kg] | | |
| MK 1 | 7,99 | 49,99 | 690 | 100 | 3,516 | 86981 | ja |
| MK 2 | 8,00 | 50,18 | 621 | 90 | 3,176 | 103503 | ja |
| MK 3 | 7,98 | 49,80 | 550 | 80 | 2,792 | 122540 | ja |
| MK 4 | 7,99 | 49,99 | 483 | 70 | 2,461 | 199417 | ja |
| MK 5 | 7,99 | 49,99 | 414 | 60 | 2,110 | 409959 | ja |
| MK 6 | 8,00 | 50,18 | 550 | 80 | 2,813 | 176041 | ja |
| MK 7 | 8,00 | 50,18 | 414 | 60 | 2,118 | 290754 | ja |
| MK 8 | 8,00 | 50,18 | 414 | 60 | 2,118 | 225361 | ja |
| MK 9 | 7,99 | 49,99 | 276 | 40 | 1,406 | 1202961 | ja |
| | | | | | | | |
| SM1 | 8,00 | 50,18 | 550 | 79 | 2,813 | 397596 | ja |
| SM2 | 8,00 | 50,18 | 550 | 81 | 2,813 | 418089 | ja |

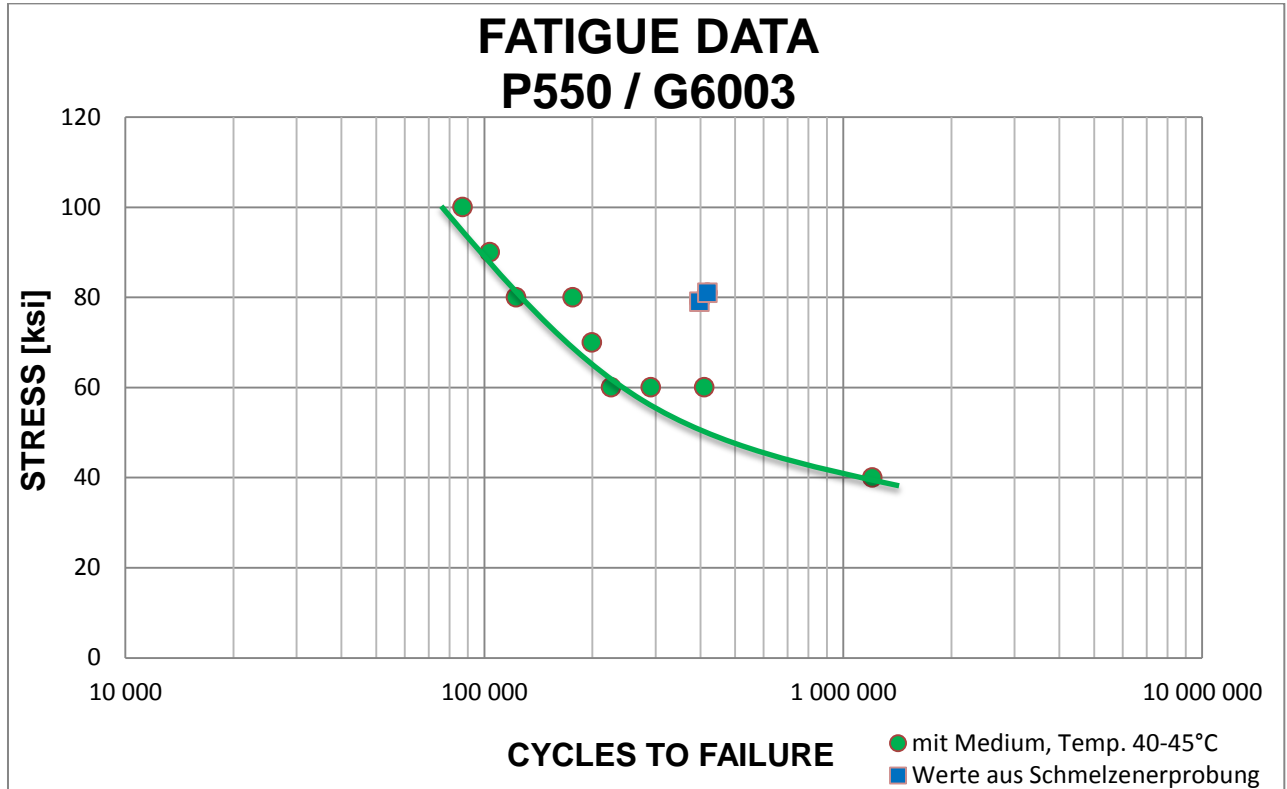


Abbildung 53: Ermüdungskurve (Wöhlerkurve) der Umlaufbiegeversuche mit Medium bei einer Temperatur von 40 - 45°C



Abbildung 54: Gebrochene Proben mit Medium bei einer Temperatur von 40 - 45°C

4.4.3 Auswertung der Ergebnisse mit Medium bei einer Temperatur von 80°C

In Tabelle 12 sind die einzelnen Versuche mit den Proben, der jeweiligen Belastung und den dabei erreichten Lastwechseln dargestellt. Auch hier sind zum Vergleich die Werte der Schmelzenerprobung ohne Medium bei Raumtemperatur mit einer Belastung von 80 ksi (550 MPa) eingetragen. Dabei ist zu sehen, dass mit Beaufschlagung des Mediums und einer Temperatur von 80°C die Proben, gleich wie bei den Versuchen bei 40 – 45°C, deutlich früher reißen und nicht so viele Lastwechsel wie bei der ersten Versuchsreihe ohne Medium und Raumtemperatur aushalten. Abbildung 55 zeigt die Werte der Ergebnisse in Form einer Wöhlerkurve. Abbildung 56 zeigt ein Bild mit den gebrochenen Proben bei den unterschiedlichen Belastungen.

Tabelle 12: Ergebnisse der Umlaufbiegeprüfung mit Medium bei einer Temperatur von 80°C

| | | $0,098 \times D^3$ | Prüfspannung σ | | $\sigma \times W : 9810$ [kg] | | |
|-------|-----------|-------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------------------|-------------------------|-------|
| Probe | D [mm] | W [mm ³] | Stress [MPa] | Stress [ksi] | Gewicht [kg] | Bruchlast- spielzahl | Bruch |
| 80_1 | 7,99 | 49,99 | 690 | 100 | 3,516 | 69140 | ja |
| 80_2 | 7,99 | 49,99 | 621 | 90 | 3,164 | 244461 | ja |
| 80_3 | 7,99 | 49,99 | 550 | 80 | 2,803 | 163117 | ja |
| 80_4 | 8,00 | 50,18 | 483 | 70 | 2,470 | 206596 | ja |
| 80_5 | 8,00 | 50,18 | 414 | 61 | 2,118 | 268563 | ja |
| 80_6 | 8,00 | 50,18 | 345 | 51 | 1,765 | 770365 | ja |
| 80_7 | 8,00 | 50,18 | 414 | 61 | 2,118 | 223213 | ja |
| 80_8 | 8,00 | 50,18 | 276 | 40 | 1,412 | 915256 | ja |
| 80_9 | 8,00 | 50,18 | 345 | 49 | 1,765 | 775285 | ja |
| 80_10 | 7,99 | 49,99 | 276 | 40 | 1,406 | 1443582 | ja |
| | | | | | | | |
| SM1 | 8,00 | 50,18 | 550 | 79 | 2,813 | 397596 | ja |
| SM2 | 8,00 | 50,18 | 550 | 81 | 2,813 | 418089 | ja |

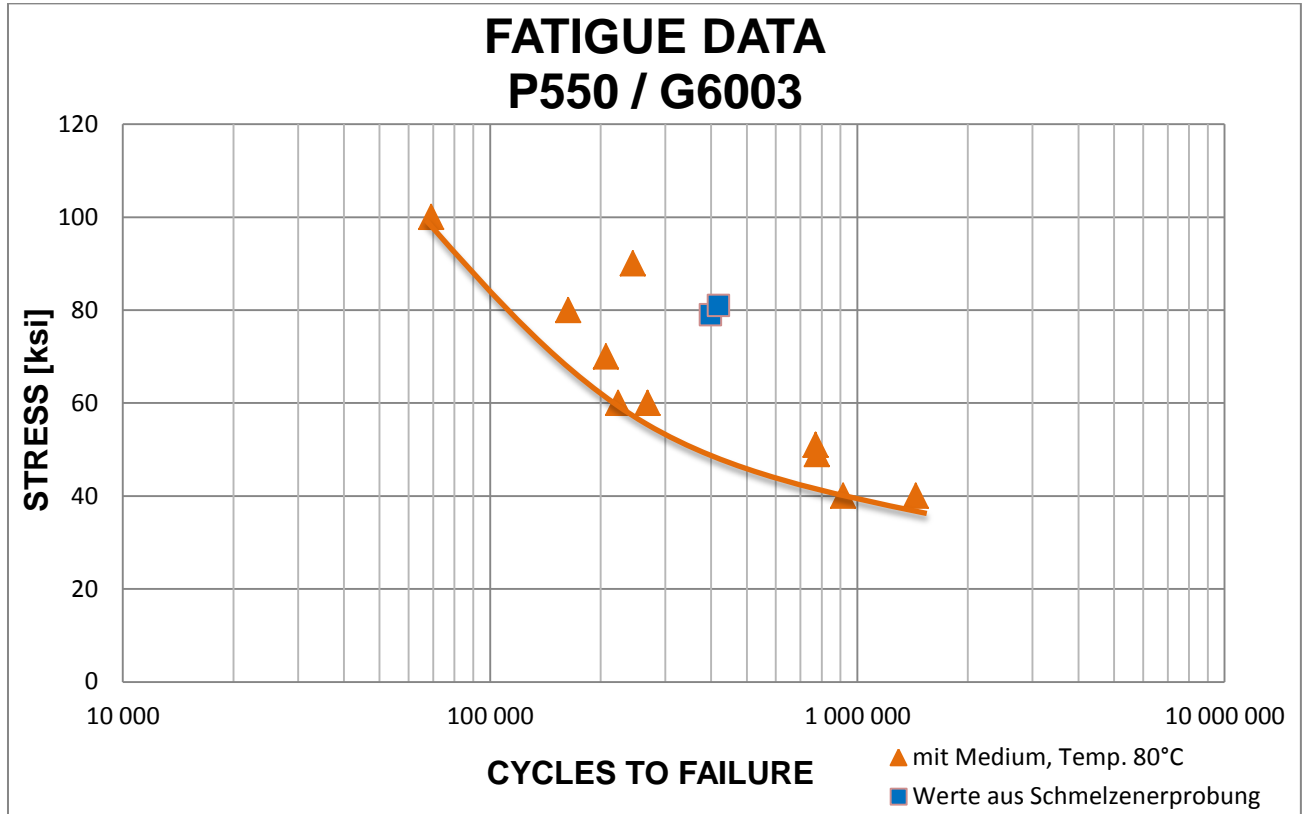


Abbildung 55: Ermüdungskurve (Wöhlerkurve) der Umlaufbiegeversuche mit Medium bei einer Temperatur von 80°C



Abbildung 56: Gebrochene Proben mit Medium bei einer Temperatur von 80°C

4.5 Schlussfolgerung

Bei den durchgeführten Versuchen zeigt sich, dass durch die Beaufschlagung der Proben mit dem Medium (13,2 Gew.-% Na-Cl-Lösung, 80000 ppm Cl) und den unterschiedlichen Temperaturen (40-45°C und 80°C) sich die Lebensdauer der Proben stark reduziert. Es zeigen sich für die ermittelten Wöhlerkurven des betrachteten Werkstoffes keine ausgeprägten Dauerfestigkeiten ab. Die Kurven verlaufen über weite Bereiche parallel. Dabei kommt es im korrosiven Medium bei erhöhter Temperatur von 40-45°C und 80°C zu einem Abfall um circa 20 ksi (138 MPa), was eine signifikante Beeinflussung des Ermüdungsverhaltens ist. Die unterschiedlichen Temperaturen der Versuche haben dabei keinen Unterschied der Ergebnisse gezeigt. Abbildung 57 zeigt ein Vergleichsdiagramm mit den durchgeführten Versuchen ohne Medium bei Raumtemperatur und mit Medium bei 40-45°C und bei 80°C. Dabei ist ersichtlich, dass die Kurven der Versuche mit Medium bei den unterschiedlichen Temperaturen sehr ähnliche Verläufe aufweisen. Daraus ergibt sich die Erkenntnis, dass im betrachteten Untersuchungsbereich die Temperaturänderung von 40°C eine untergeordnete Rolle spielen dürfte.

FATIGUE DATA P550 / G6003

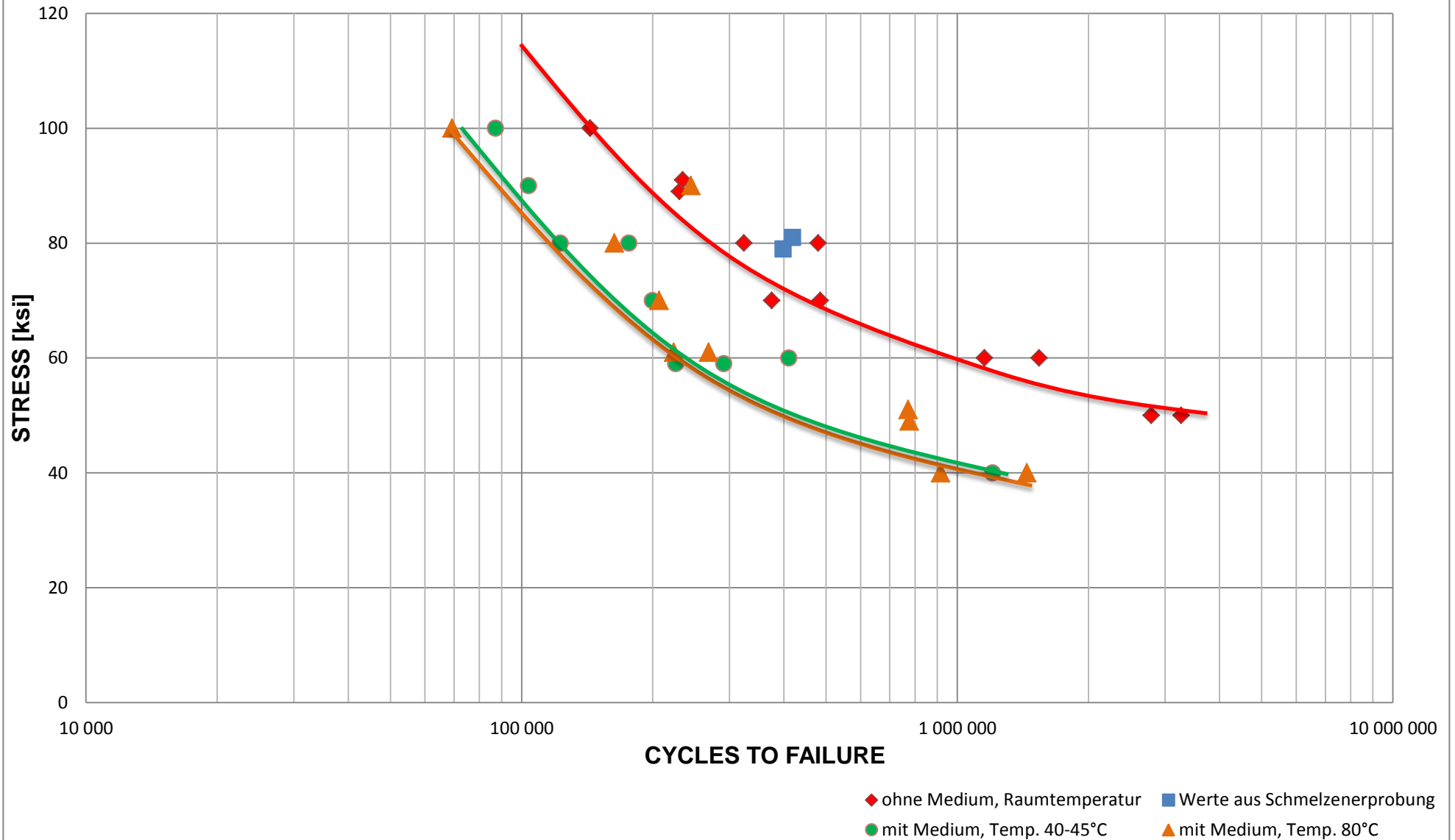


Abbildung 57: Vergleichsdiagramm der durchgeführten Versuche

5 Zusammenfassung

In den gezeigten Versuchen wurde eine neu entwickelte Korrosionsprüfkammer für die Installation in eine Umlaufbiegemaschine für Korrosionsermüdungstests erfolgreich eingesetzt, um das Materialverhalten in Atmosphäre beziehungsweise in heißer korrosiver Umgebung zu vergleichen. In Letzterer wurde eine Verschlechterung der Materialeigenschaften erkannt. Es kommt dabei in korrosiver Umgebung (Na-Cl, R = -1, 80000 ppm, 40-45° C) zu einem Abfall um circa 20 ksi (138 MPa), was eine signifikante Beeinflussung des Ermüdungsverhaltens ist. Bei den Versuchen in korrosiver Umgebung mit erhöhter Temperatur (Na-Cl, R = -1, 80000 ppm, 80° C) wurde keine weitere Reduzierung der Lebensdauer der Proben festgestellt sondern tendenziell die gleichen Werte wie bei den Versuchen bei 40-45°C erzielt. Die Reduzierung der Lebensdauer ist also unter den gegebenen Untersuchungsbedingungen auf das Medium zurück zu führen und nicht erkennbar von der Temperatur abhängig.

6 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Schematische Darstellung Spülfunktion im Erdölbohrloch mit Bohrmeißel und Bohrgestänge [4]..... | 3 |
| Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Rotary-Bohranlage [1] | 4 |
| Abbildung 3: Typische Zusammensetzung eines Bohrstranges [6] | 5 |
| Abbildung 4: Wirkungsweise einer Bohrturbine [7] | 6 |
| Abbildung 5: Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Moineau-Motors [11] | 7 |
| Abbildung 6: Schematische Darstellung von Richtungsbohrungen ausgehend von einer Off-Shore-Plattform [12]..... | 8 |
| Abbildung 7: Übersicht weitreichender Horizontalbohrungen [1] | 9 |
| Abbildung 8: Funktionsweise der mechanischen Ablenkeinrichtung (Whipstock) [5] | 11 |
| Abbildung 9: Funktionsweise Vorort-Antrieb mit Bent-Sub [13] | 11 |
| Abbildung 10: Schematischer Aufbau der Einbausituation des MWD-Systems [7]... | 13 |

Abbildung 11: Stahl-Zahn-Rollen-Meißel (milled-tooth bit) a) für weiche Gesteinsschichten, b) für weiche bis mittlere Gesteinsschichten, c) für harte, abrasive Gesteinsschichten [5] 15

Abbildung 12: Einsatz-Zahn-Rollen-Meißel (insert bit) a) für weiche Gesteinsschichten, b) für mittlere bis harte Gesteinsschichten, c) für harte, abrasive Gesteinsschichten [5] 16

Abbildung 13: Diamant-Bohrer (diamond bits) [5]..... 16

Abbildung 14: Polycrystalliner Diamantbohrer (polycrystalline diamond compact bits) [5] 17

Abbildung 15: Schematische Darstellung des Pendeleffektes [16]..... 19

Abbildung 16: Auswirkungen der Wahl des Schwerstangengewichtes auf das Bohrgestänge [16] 19

Abbildung 17: Schematische Darstellung/Gegenüberstellung von Bohrstrang und Schwerstangen mit den Positionen an denen Dauerbrüche beobachtet werden [17]20

Abbildung 18: Schematische Darstellung der Schwerstangenverbindung mit den Bereichen der höchsten Spannungskonzentration [17] 20

Abbildung 19: Schematische Darstellung der Zapfenbewegung und Abheben der Schultern bei ungenügender Verschraubung [16] 21

Abbildung 20: Schematische Darstellung einer lockeren Verbindung [17] 22

Abbildung 21: Schematische Darstellung einer schwachen Muffenschulter [17] 22

Abbildung 22: Funktionsprinzip einer Vierpunkt-Umlaufbiegeprüfmaschine [26] 31

Abbildung 23: Skizze der UBM-Probestäbe mit definierten Abmessungen 31

Abbildung 24: Beschreibung der Umlaufbiegemaschine mit eingespannter Probe vor Versuchsbeginn..... 33

Abbildung 25: Bruch einer UBM-Probe nach 143418 Lastwechseln und einer Spannung von 690 MPa 33

Abbildung 26: Bierglasmodell für Entwicklungsprozess [36]..... 41

Abbildung 27: Fundament der Prüfkammer mit Ausnehmungen für Elektromagneten 47

Abbildung 28: Rechte Seite der Prüfkammer, in welche die Dichtung fest eingebaut ist (keine Biegung der Probe nur Rotation) mit Kabelkanal für Elektromagneten 47

| | |
|--|----|
| Abbildung 29: Linke Seite der Prüfkammer an der die Biegung stattfindet mit Probe und Deckel..... | 48 |
| Abbildung 30: Federgelagerte Dichtung über Backen für Biegebewegung der Probe (linke Seite) | 48 |
| Abbildung 31: Längsquerschnitt durch Prüfkammer mit Anschlussstutzen für Einbringung und Absaugung | 49 |
| Abbildung 32: Funktionsprinzip Ejektor [32]..... | 51 |
| Abbildung 33: Grundsätzlicher Aufbau der Einbringung der Na-Cl-Lösung in die Prüfkammer..... | 52 |
| Abbildung 34: Zerstäuberdüse..... | 52 |
| Abbildung 35: Hülse für Zerstäuberdüse | 52 |
| Abbildung 36: Einbausituation der Zerstäuberdüse | 53 |
| Abbildung 37: Grundsätzlicher Aufbau der Absaugung und damit Abdichtung der Prüfkammer..... | 54 |
| Abbildung 38: Kennlinie für Ejektor Einbringung ZH10L [32] | 55 |
| Abbildung 39: Kennlinie für Ejektor Absaugung ZH13L [32]..... | 55 |
| Abbildung 40: Berechnungsskizze für Kontinuitätsgleichung..... | 56 |
| Abbildung 41: Umgebaute und erweiterte Prüfkammer mit Heizpatronen und Heißluftanschlüsse | 60 |
| Abbildung 42: Längsschnitt durch Prüfkammer (Vorderansicht)..... | 60 |
| Abbildung 43: Längsschnitt durch Prüfkammer (Draufsicht) mit Bohrungen für Thermoelement und PT100 Temperaturfühler..... | 61 |
| Abbildung 44: Querschnitt durch Prüfkammer mit Einbausituation der Heizpatronen | 61 |
| Abbildung 45: Schematische Darstellung des gesamten erweiterten Systems | 62 |
| Abbildung 46: Funktionsflussdiagramm für SPS..... | 63 |
| Abbildung 47: Umlaufbiegeprüfungen ohne Medium bei Raumtemperatur | 67 |
| Abbildung 48: Umlaufbiegeprüfungen mit Medium bei einer Temperatur von 40 – 45 °C vor dem Start der Prüfanlage..... | 69 |
| Abbildung 49: Umlaufbiegeprüfungen mit Medium bei einer Temperatur von 40 – 45 °C während des Betriebes..... | 69 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 50: Umlaufbiegeprüfungen mit neuer Prüfkammer mit Medium bei einer Temperatur von 80°C | 71 |
| Abbildung 51: Ermüdungskurve (Wöhlerkurve) der Umlaufbiegeversuche ohne Medium bei Raumtemperatur | 74 |
| Abbildung 52: Gebrochene Proben ohne Medium bei Raumtemperatur | 74 |
| Abbildung 53: Ermüdungskurve (Wöhlerkurve) der Umlaufbiegeversuche mit Medium bei einer Temperatur von 40 - 45°C | 76 |
| Abbildung 54: Gebrochene Proben mit Medium bei einer Temperatur von 40 - 45°C | 76 |
| Abbildung 55: Ermüdungskurve (Wöhlerkurve) der Umlaufbiegeversuche mit Medium bei einer Temperatur von 80°C..... | 78 |
| Abbildung 56: Gebrochene Proben mit Medium bei einer Temperatur von 80°C | 78 |
| Abbildung 57: Vergleichsdiagramm der durchgeführten Versuche..... | 80 |
| Abbildung 58: Stückliste für Korrosionsprüfkammer | 89 |
| Abbildung 59: Federgelagerte Dichtung in Prüfkammer | 100 |
| Abbildung 60: Zusammengebaute Prüfkammer mit Isometrieansicht von rechts ... | 100 |
| Abbildung 61: Zusammengebaute Prüfkammer mit Isometrieansicht von links..... | 101 |
| Abbildung 62: Zusammengebaute Prüfkammer mit Ansicht von rechts | 101 |
| Abbildung 63: Zusammengebaute Prüfkammer mit Ansicht von links | 102 |
| Abbildung 64: Zusammengebaute Prüfkammer mit Isometrieansicht von links..... | 102 |
| Abbildung 65: Prüfkammer eingebaut in Umlaufbiegeprüfmaschine Isometrieansicht von rechts | 103 |
| Abbildung 66: Prüfkammer eingebaut in Umlaufbiegeprüfmaschine Vorderansicht | 103 |
| Abbildung 67: Gesamtes Prüfsystem (SPS-Steuerung) für Prüfkammer mit Umlaufbiegeprüfmaschine | 104 |
| Abbildung 68: Gesamtes Prüfsystem (SPS-Steuerung) für Prüfkammer mit Umlaufbiegeprüfmaschine | 104 |

7 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung von Cr-Mn-N- und Cr-Ni-N-Legierungen für Schwerstangen in Masseprozent (HS = High Strength) [23], [24] | 26 |
| Tabelle 2: Gewährleistete mechanische Kennwerte von Schwerstangenstählen nach 15%iger Kaltumformung; Probenlage: 1" Abstand vom Rand und parallel zur Schwerstangenachse; (1 ksi = 6,895 MPa) [23], [24] | 28 |
| Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung der speziellen Ni-Basis-Legierung INCOLOY 925 für die Ölfeldtechnik in Masseprozent [7]..... | 30 |
| Tabelle 4: Definierte Abmessungen für die UBM-Probestäbe bei SBO | 32 |
| Tabelle 5: Physikalische Eigenschaften X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571) bei 20°C [30]36 | |
| Tabelle 6: Warmformgebung, Wärmebehandlung und Gefüge von X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571) [30] | 37 |
| Tabelle 7: Mechanische Eigenschaften von X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571) bei Raumtemperatur [30]..... | 37 |
| Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung (in Masse %) von X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571) [30] | 37 |
| Tabelle 9: Chemische Zusammensetzung des geprüften Werkstoffes P550 mit Stangennummer G6003 in Masseprozent [33] | 64 |
| Tabelle 10: Ergebnisse der Umlaufbiegeprüfung ohne Medium bei Raumtemperatur | 73 |
| Tabelle 11: Ergebnisse der Umlaufbiegeprüfung mit Medium bei einer Temperatur von 40 – 45°C..... | 75 |
| Tabelle 12: Ergebnisse der Umlaufbiegeprüfung mit Medium bei einer Temperatur von 80°C..... | 77 |

8 Literaturverzeichnis

- [1] H. Rischmüller, "Tiefbohrtechnik - Ein Schlüsselinstrument in der Energiewirtschaft," *Die Geowiss.*, vol. 10, pp. 317–323, 1990.
- [2] G. Prikel, "Tiefbohrgeräte," Springer Verlag, Leoben, 1957.

- [3] H. Cambefort, *Bohrtechnik - Tief-, Gründgs- und Erkundungsbohrungen*. Wiesbaden: Bauverlag G.mb.H, 1964.
- [4] [Http://blog.schlimmchen.de/?p=279](http://blog.schlimmchen.de/?p=279), “No Title.” .
- [5] J. L. Kennedy, *Fundamentals of Drilling-Rechnology and Economicx*. 1983.
- [6] B. D. Craig, *Pracitcal Oil-Field Metallurgy*. Tulsa, Oklahoma 74101: PennWell Publishing Company, 1984.
- [7] M. Panzenböck, “Ermüdungsverhalten stickstofflegierter Cr-Mn-Austenite,” Montanuniversität Leoben, Leoben, 1995.
- [8] R. A. Joannessjan, “Neue Richtungen in der Entwicklung der Technik des Turbinenbohrens,” *Erdoel-Erdgas-Zeitschrift*, vol. 82, pp. 308–313, 1966.
- [9] R. Jürgens and C. Marx, “Neue Bohrmotoren für die Erdölindustrie,” *Erdoel-Erdgas-Zeitschrift*, vol. 95, pp. 132–140, 1979.
- [10] H. Völker, “Verwendung von Bohrmotoren in Verbindung mit Diamant- und Stratapax-Meißeln zum Leistungsbohren,” *Erdoel-Erdgas-Zeitschrift*, vol. 100, pp. 280–284, 1984.
- [11] G. Heisig, “Zum statischen und dynamischen Verhalten von Tiefbohrsträngen in räumlich gekrümmten Bohrlöchern,” Technische Universität Braunschweig, 1993.
- [12] H. Whitehead, *A-Z of Offshore Oil and Gas*. 1983.
- [13] K. Burger, E. und Winkler, “Richtbohren - Methoden und Anwendungen,” *Erdoel-Erdgas-Zeitschrift*, vol. 96, pp. 104–111, 1980.
- [14] M. Bauer and W. Freeden, *Handbuch Tiefe Geothermie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

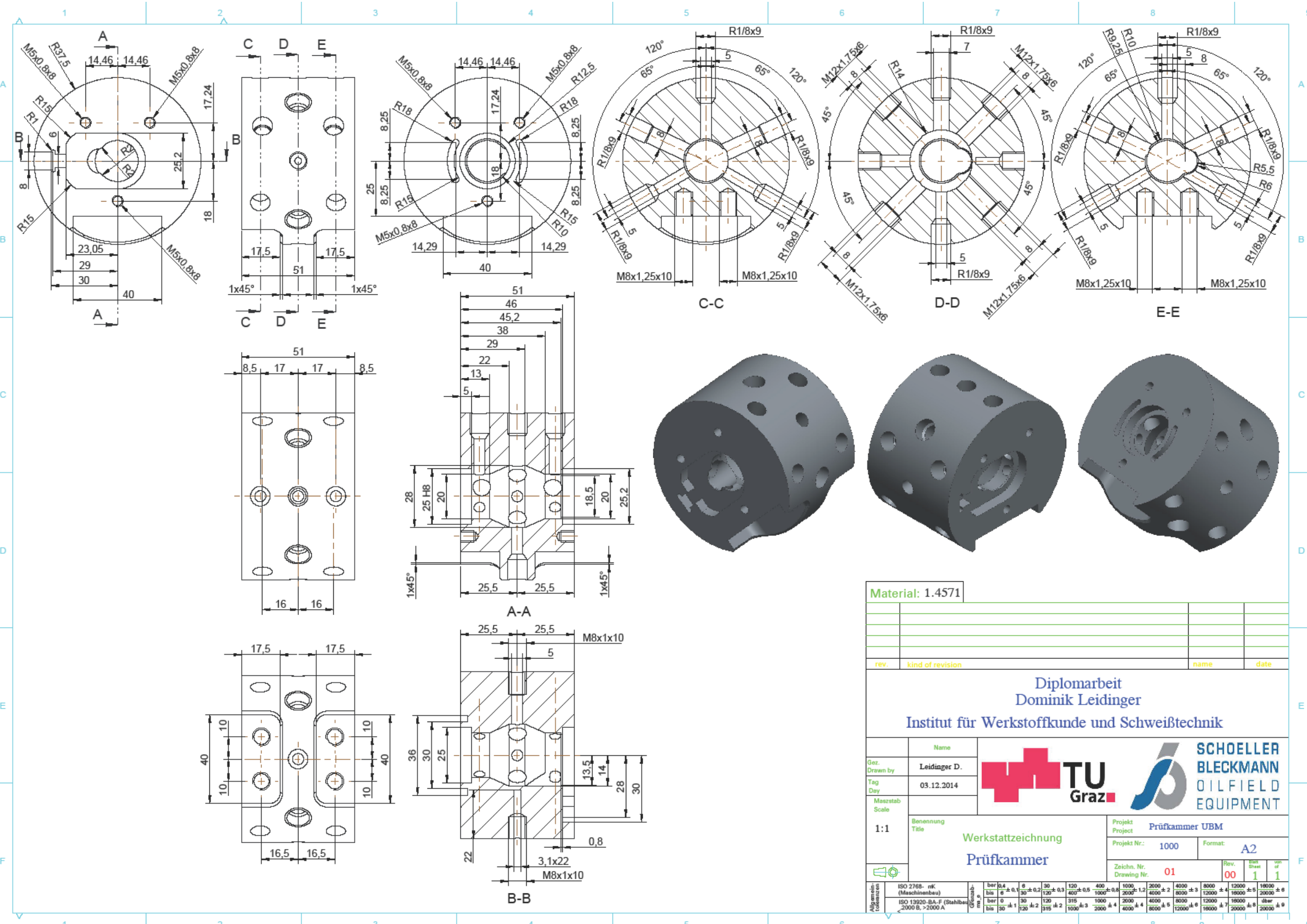
- [15] S. Karlic, “Ermüdung von Bohrgestänge,” *Erdoel-Erdgas-Zeitschrift*, vol. 98, pp. 416–421, 1982.
- [16] C. Kruse, *The Drill Stem*. Texas: Petroleum Extension Service, 1981.
- [17] H. M. Rollins, “Anleitung zur zweckmäßigen Behandlung von Schwerstangen,” *Erdoel-Erdgas-Zeitschrift*, vol. 78, pp. 595–606, 1962.
- [18] D. W. Brinegar and S. T. Crews, “Using Large Drill Collars Successfully,” *J. Pet. Technol.*, pp. 999–1006, 1970.
- [19] H. Knipp, “Inspektionserfahrungen mit Tooljoints und Schwerstangen,” *Erdoel-Erdgas-Zeitschrift*, vol. 85, pp. 18–20, 1969.
- [20] H. Kohl, “Die Prüfung nicht magnetisierbarer Schwerstangen auf ihre Nichtmagnetisierbarkeit,” *Erdoel-Erdgas-Zeitschrift*, vol. 97, pp. 388–394, 1981.
- [21] J. Buckstegge and H. Wolters, “Untersuchungen zum Nachweis von magnetischen ‘Hot Spots’ in nichtmagnetisierbaren Schwerstangen.”
- [22] H. Pohl, “Beitrag zum para- und ferromagnetischen Verhalten austenitischer Stähle nach Kaltformgebung,” Montanuniversität Leoben, Leoben, 1985.
- [23] B. Holper, “Schoeller Bleckmann Oilfield Technology Technical Information Data sheet P530,” Hauptstrasse 2, 2630 Ternitz, Austria, 2013.
- [24] B. Holper, “Schoeller Bleckmann Oilfield Technology Technical Information Data sheet P 550,” Hauptstrasse 2, 2630 Ternitz, Austria, 2013.
- [25] [Http://www.sms-siemag.com/de/126.html](http://www.sms-siemag.com/de/126.html), “VOD - Konverter (Vacuum Oxygen Decarburisation).”
- [26] W. Eichlseder, “Betriebsfestigkeitsversuch,” Montanuniversität Leoben.
- [27] W. Kaiser, *Kunststoffe für Ingenieure, Von der Synthese bis zur Anwendung*, 3 Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2011.

- [28] J. Blumm, a. Lindemann, M. Meyer, and C. Strasser, “Characterization of PTFE Using Advanced Thermal Analysis Techniques,” *Int. J. Thermophys.*, vol. 31, no. 10, pp. 1919–1927, Oct. 2008.
- [29] Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, Postfach 10 22 05, and 40013 Düsseldorf, “Merkblatt 893 Edelstahl Rostfrei für die Wasserwirtschaft.”
- [30] THYSSENKRUPP MATERIALS EUROPE GMBH, Technischer Verkauf / Qualitätsmanagement, Postfach 120208, and 45313 Essen, “Datenblatt X6CrNiMoTi17-12-2 (1.4571),” pp. 3–6.
- [31]
[Http://de.schmalz.com/produkte/vakuumkomponenten/allgemeineinfos/00366/index.html.de](http://de.schmalz.com/produkte/vakuumkomponenten/allgemeineinfos/00366/index.html.de), “Vakuum-Erzeuger.” .
- [32] SMC, “Datenblatt EJEktoren der Firma SMC.”
- [33] C. Kopinits, “Schoeller Bleckmann Oilfield Technology Technical Material certification 3.1 Certificate acc. EN 10204,” Hauptstrasse 2, 2630 Ternitz, Austria, 2013.
- [34] A. Visser, “persönliche Kommunikation zur Berechnung der Na-Cl-Lösung,” Montanuniversität Leoben, 2014.
- [35] W. Weißbach, *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*, 14th ed. Braunschweig: Viewegs Fachbücher der Technik, 2001, p. 380.
- [36] M. Bader, “Der Entwicklungsprozess - ‘Bierglasmodell,’” Technische Universität Graz.

9 Anhang

| Pos. | Stück | Benennung | Kurzbezeichnung / Norm | Bemerkung | Werkstoff | |
|-------------------|----------|--|--|---|--------------|--|
| 1 | 1 | Prüfkammer | Rd. 75 x 51 | gedreht und gefräst | 1.4571 | |
| 2 | 1 | Fuß links | Platte 60 x 43 x 33 | gefräst und gebohrt | PTFE | |
| 3 | 1 | Fuß rechts | Platte 60 x 43 x 33 | gefräst und gebohrt | PTFE | |
| 4 | 1 | Fundament | Platte 200 x 132 x 40 | gefräst und gebohrt | PTFE | |
| 5 | 1 | Deckel schwimmend | Rd. 70 x 2,5 | gedreht und gebohrt | 1.4571 | |
| 6 | 1 | Deckel fest | Rd. 70 x 5,25 | gedreht, gefräst und gebohrt | 1.4571 | |
| 7 | 2 | Backen für Feder | Platte 25 x 8,25 x 4,75 | gefräst | PTFE | |
| 8 | 1 | Zerstäuberdüse | Rd. 6,8 x 8 | gedreht | 1.4571 | |
| 9 | 1 | Hülse für Zerstäuberdüse | Rd. 6,8 x 14 | gedreht | 1.4571 | |
| 10 | 2 | Wellendichtring | 14 – 25 - 5 | Typ A | NBR | |
| 11 | 1 | Probe für UBM | Rd. 14 x 150 | von SBO bereitgestellt | | |
| 12 | 2 | Druckfeder | d = 0,45 L ₀ = 23,6 D _e = 4,95 n = 11,8 | Fa. Hennlich | 1.4310 | |
| 13 | 4 | Innensechskantschraube | DIN 912 – M8 x 20 | | A4 | |
| 14 | 2 | Innensechskantschraube | DIN 912 – M8 x 40 | | A4 | |
| 15 | 4 | Innensechskantschraube | DIN 7991 – M10 x 50 | | A4 | |
| 16 | 2 | Innensechskantschraube | DIN 7991 – M8 x 20 | | A4 | |
| 17 | 6 | Sechskantschraube | DIN 965 – M5 x 10 | | A4 | |
| 18 | 7 | Gerade Steckverschraubung mit Innensechskant | Push-in D _m 8 Gewinde R1/8 | Fa. SMC | Edelstahl | |
| 19 | 1 | Einschraubwinkel 360° schwenkbar | Push-in D _m 8 Gewinde R1/8 | Fa. SMC | Edelstahl | |
| 20 | 4 | Hochleistungsheizpatrone | 70 W/230V, D = 8 mm, L = 40 mm, Gew. M12 | Fa. Volton | Edelstahl | |
| Stückliste | | | | | | |
| | | | | Allgemeintoleranz ISO 2768 | | Maßstab: |
| | | | | | | |
| | | | | Datum | Name | Benennung: Konstruktion einer Korrosionsprüfkammer zum Einbau in eine Umlaufbiegemaschine für Korrosionsermüdungsversuche an Cr-Mn-N Austeniten der Ölfeld-Industrie |
| | | | Bearb. | 03.01.2015 | Leidinger D. | |
| | | | Gepr. | | | |
| | | | Norm | | | |
| | | | | Technische Universität Graz Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik | | Zeichnungsnummer: Blatt 1 / 1 |
| Zu st | Änderung | Datum | Name | Matr.Nr.: 0730769 | File: | |

Abbildung 58: Stückliste für Korrosionsprüfkammer

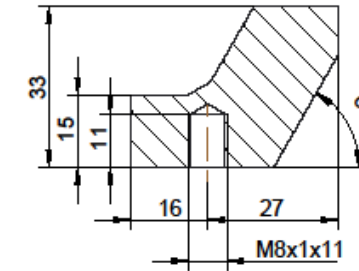
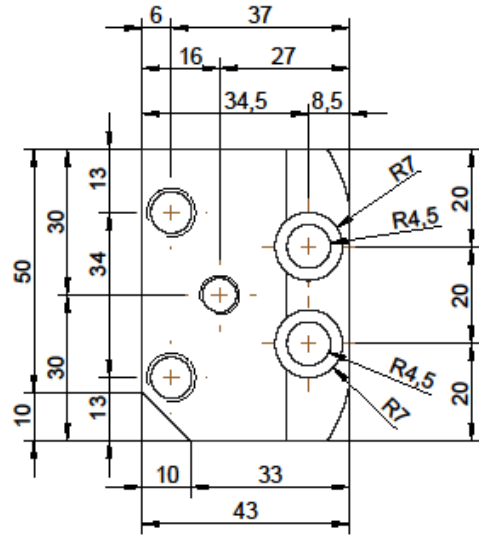


Material: 1.4571

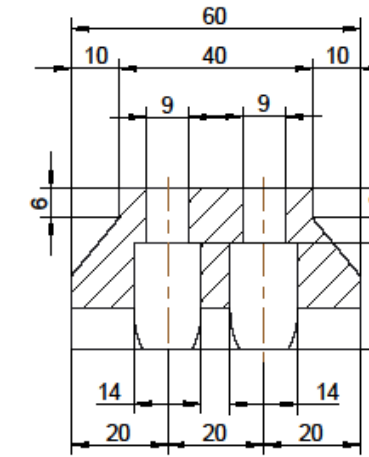
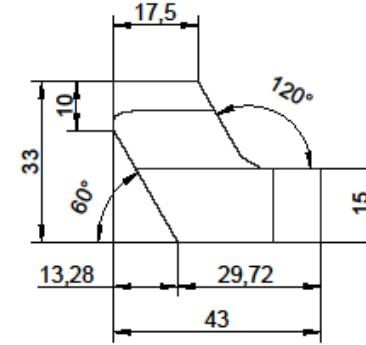
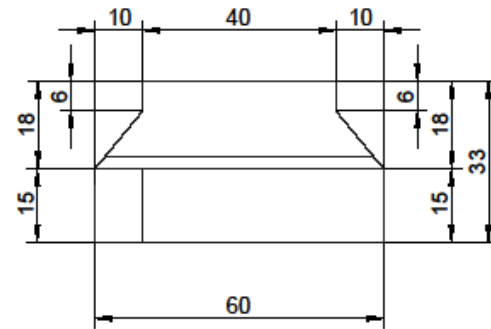
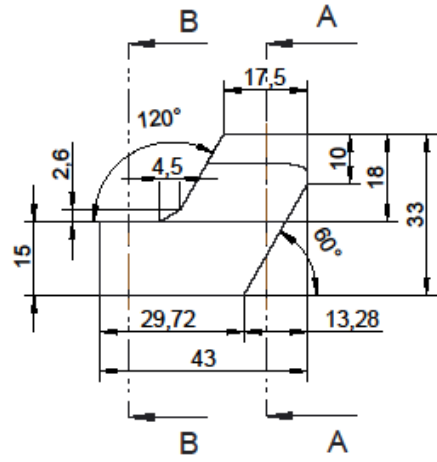
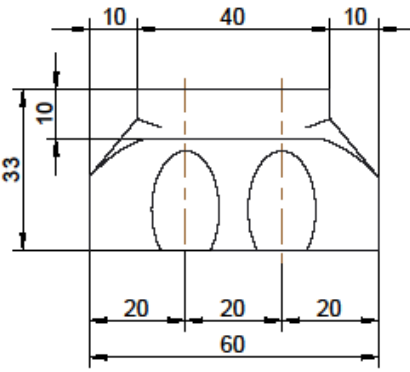
| rev. | kind of revision | name | date |
|------|------------------|------|------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Diplomarbeit
Dominik Leidinger
Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

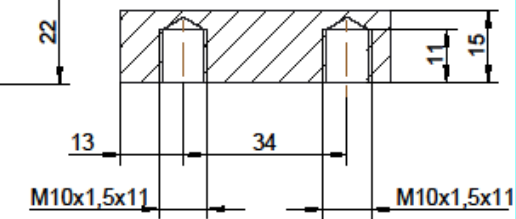
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|-----------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------------------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <p>Gez. Drawn by: Leidinger D.</p> <p>Tag Day: 03.12.2014</p> <p>Masstab Scale: 1:1</p> <p>Benennung Title: Werkstattzeichnung Prüfkammer</p> | <p>Name: TU Graz</p> <p>Logo: SCHOELLER BLECKMANN OILFIELD EQUIPMENT</p> | <p>Projekt Project: Prüfkammer UBM</p> <p>Projekt Nr.: 1000</p> <p>Format: A2</p> <p>Zeichn. Nr. Drawing Nr.: 01</p> <p>Rev. 00</p> <p>Blatt Sheet: 1</p> <p>von of: 1</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Allgemein-toleranzen</p> <table border="1"> <tr> <td>ISO 2768- mK (Maschinenbau)</td> <td>h7/k6</td> <td>h8/k7</td> <td>h9/k8</td> <td>h10/k9</td> <td>h11/k10</td> <td>h12/k11</td> <td>h13/k12</td> <td>h14/k13</td> <td>h15/k14</td> <td>h16/k15</td> <td>h17/k16</td> <td>h18/k17</td> <td>h19/k18</td> <td>h20/k19</td> <td>h21/k20</td> <td>h22/k21</td> <td>h23/k22</td> <td>h24/k23</td> <td>h25/k24</td> <td>h26/k25</td> <td>h27/k26</td> <td>h28/k27</td> <td>h29/k28</td> <td>h30/k29</td> </tr> <tr> <td>ISO 13920-BA-F (Stahlbau >2000 A)</td> <td>h7/k6</td> <td>h8/k7</td> <td>h9/k8</td> <td>h10/k9</td> <td>h11/k10</td> <td>h12/k11</td> <td>h13/k12</td> <td>h14/k13</td> <td>h15/k14</td> <td>h16/k15</td> <td>h17/k16</td> <td>h18/k17</td> <td>h19/k18</td> <td>h20/k19</td> <td>h21/k20</td> <td>h22/k21</td> <td>h23/k22</td> <td>h24/k23</td> <td>h25/k24</td> <td>h26/k25</td> <td>h27/k26</td> <td>h28/k27</td> <td>h29/k28</td> <td>h30/k29</td> </tr> </table> | | | ISO 2768- mK (Maschinenbau) | h7/k6 | h8/k7 | h9/k8 | h10/k9 | h11/k10 | h12/k11 | h13/k12 | h14/k13 | h15/k14 | h16/k15 | h17/k16 | h18/k17 | h19/k18 | h20/k19 | h21/k20 | h22/k21 | h23/k22 | h24/k23 | h25/k24 | h26/k25 | h27/k26 | h28/k27 | h29/k28 | h30/k29 | ISO 13920-BA-F (Stahlbau >2000 A) | h7/k6 | h8/k7 | h9/k8 | h10/k9 | h11/k10 | h12/k11 | h13/k12 | h14/k13 | h15/k14 | h16/k15 | h17/k16 | h18/k17 | h19/k18 | h20/k19 | h21/k20 | h22/k21 | h23/k22 | h24/k23 | h25/k24 | h26/k25 | h27/k26 | h28/k27 | h29/k28 | h30/k29 |
| ISO 2768- mK (Maschinenbau) | h7/k6 | h8/k7 | h9/k8 | h10/k9 | h11/k10 | h12/k11 | h13/k12 | h14/k13 | h15/k14 | h16/k15 | h17/k16 | h18/k17 | h19/k18 | h20/k19 | h21/k20 | h22/k21 | h23/k22 | h24/k23 | h25/k24 | h26/k25 | h27/k26 | h28/k27 | h29/k28 | h30/k29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ISO 13920-BA-F (Stahlbau >2000 A) | h7/k6 | h8/k7 | h9/k8 | h10/k9 | h11/k10 | h12/k11 | h13/k12 | h14/k13 | h15/k14 | h16/k15 | h17/k16 | h18/k17 | h19/k18 | h20/k19 | h21/k20 | h22/k21 | h23/k22 | h24/k23 | h25/k24 | h26/k25 | h27/k26 | h28/k27 | h29/k28 | h30/k29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



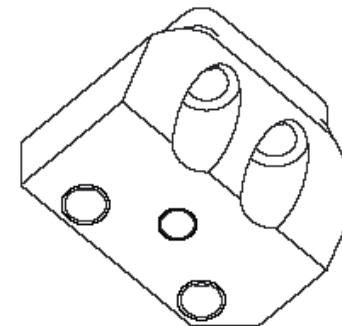
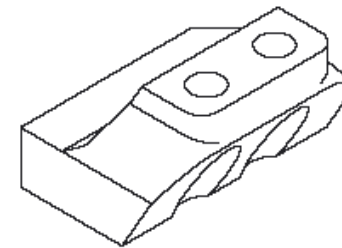
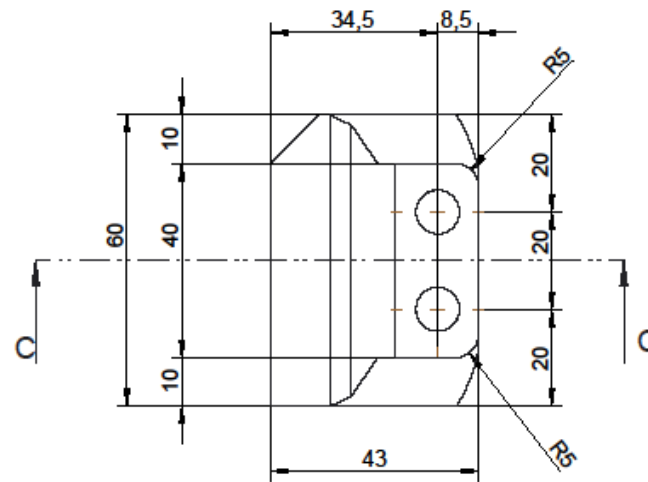
C-C



A-A



B-B



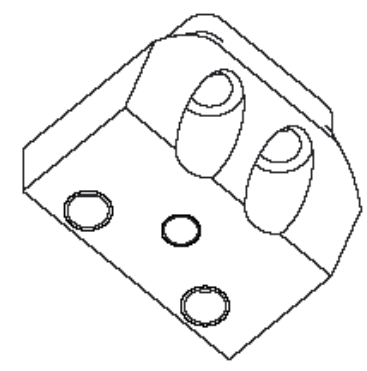
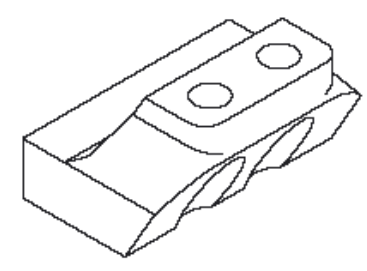
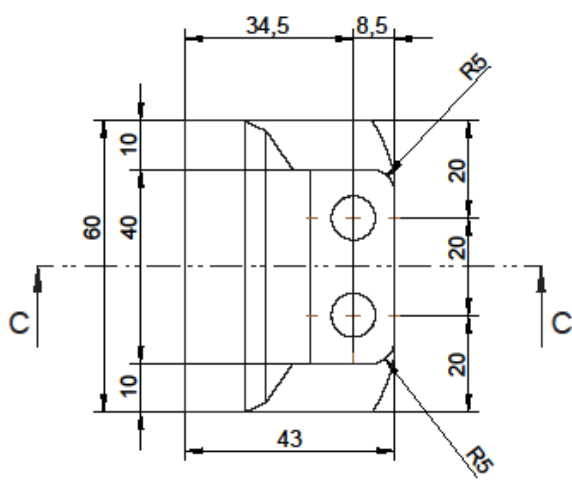
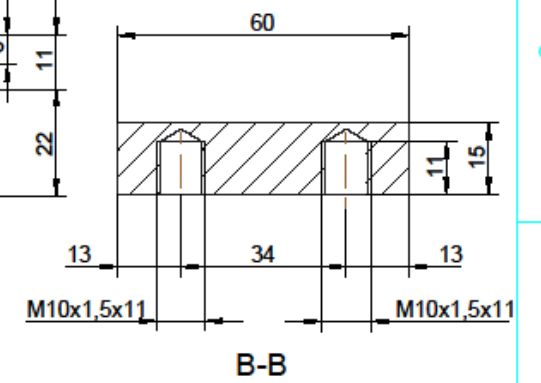
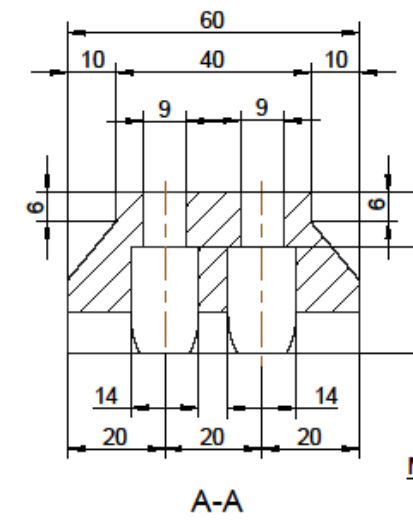
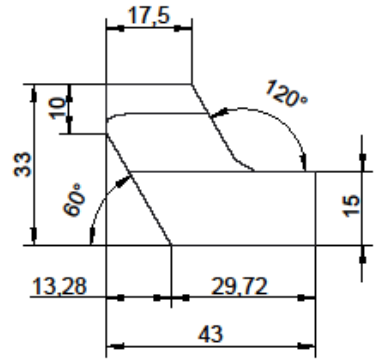
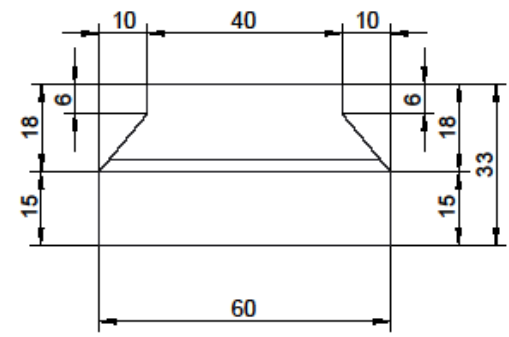
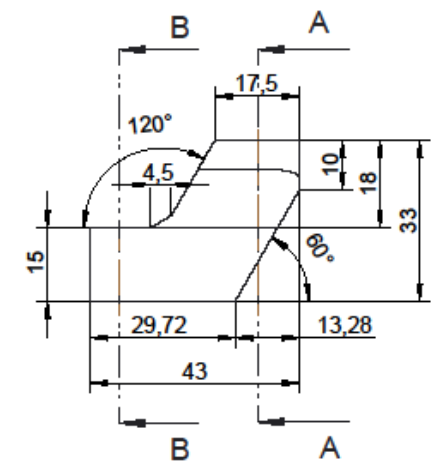
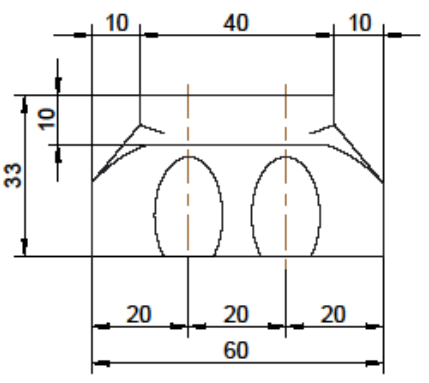
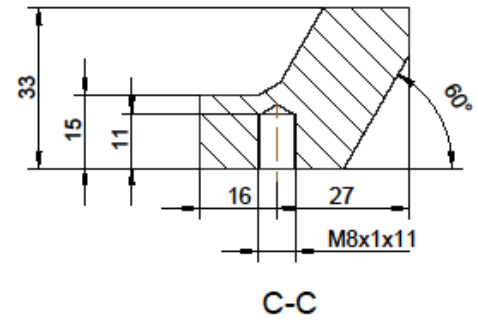
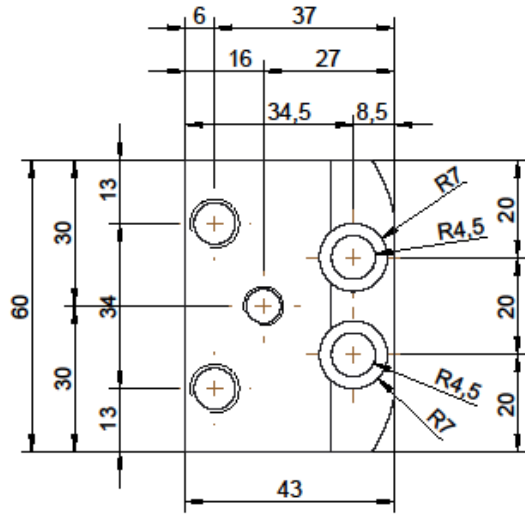
Material: PTFE

| rev. | kind of revision | name | date |
|------|------------------|------|------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Diplomarbeit
Dominik Leidinger
Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

| | | | |
|---------------|----------------------|--|-----------------------------------|
| Gez. Drawn by | Name Leidinger D. | | |
| Tag Day | 14.02.2014 | | |
| Masstab Scale | 1:1 | Benennung Title Werkstattzeichnung Fuß links | Projekt Project Prüfkammer UBM |
| | | Projekt Nr.: 1000 | Format: A2 |
| | | Zeichn. Nr. Drawing Nr. 02 | Rev. 00 |
| | | | Rev. 1 |
| | | | Rev. 1 |

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| ISO 2768- mK (Maschinenbau) | ISO 13920-BA-F (Stahlbau >2000 B, >2000 A) | ISO 2768- mS | ISO 2768- mN | ISO 2768- mK | ISO 2768- mH | ISO 2768- mF | ISO 2768- mD | ISO 2768- mC | ISO 2768- mB | ISO 2768- mA |
| 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.2 |
| 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 12000 | 16000 | 20000 | 25000 | 30000 | 40000 | 50000 |



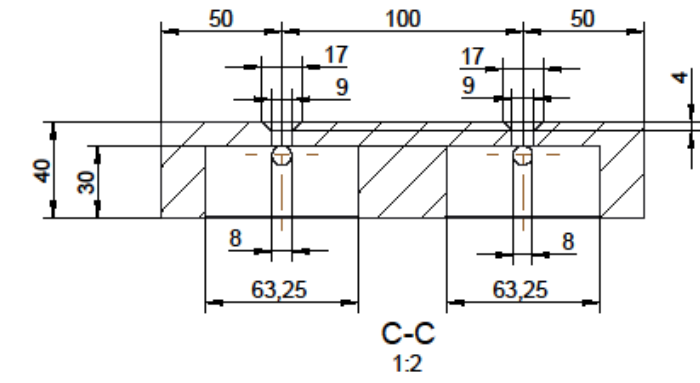
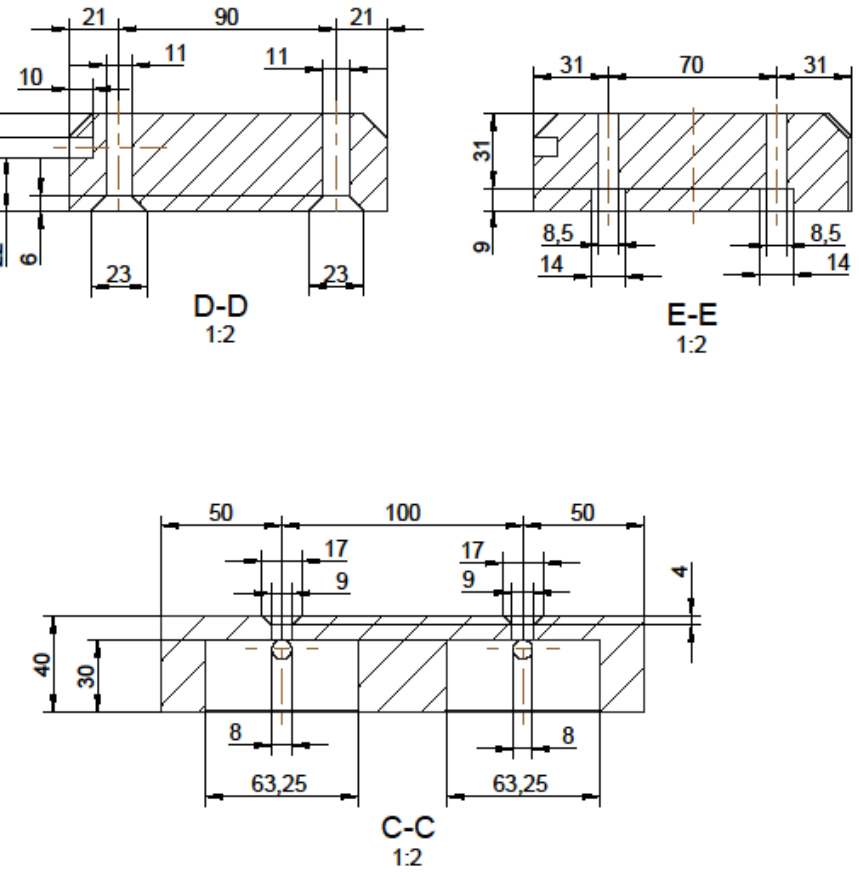
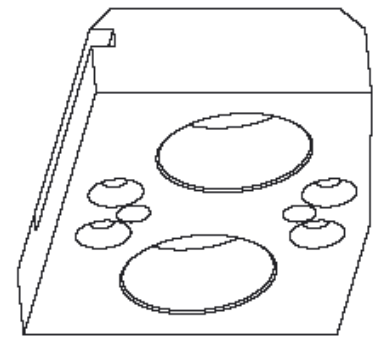
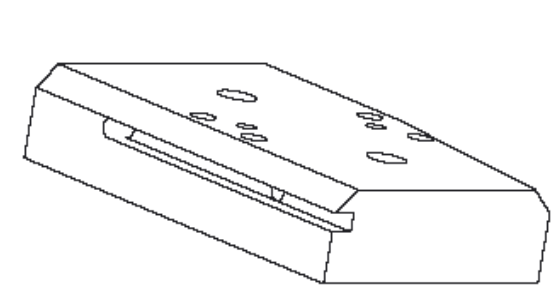
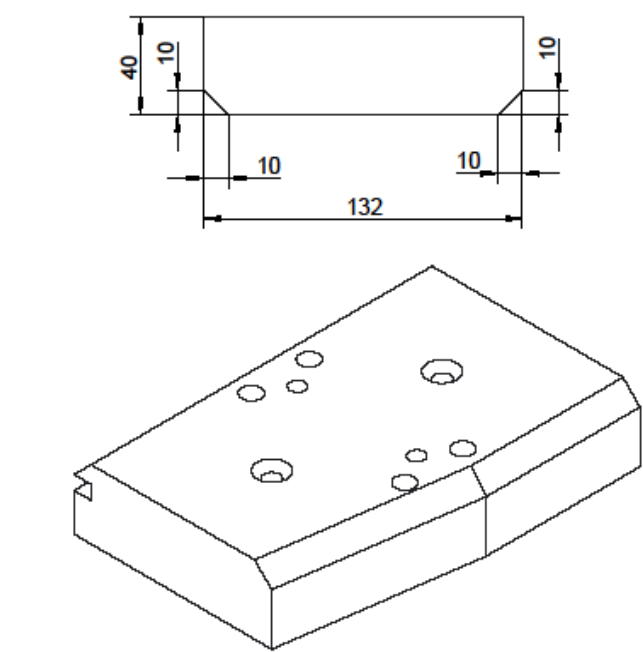
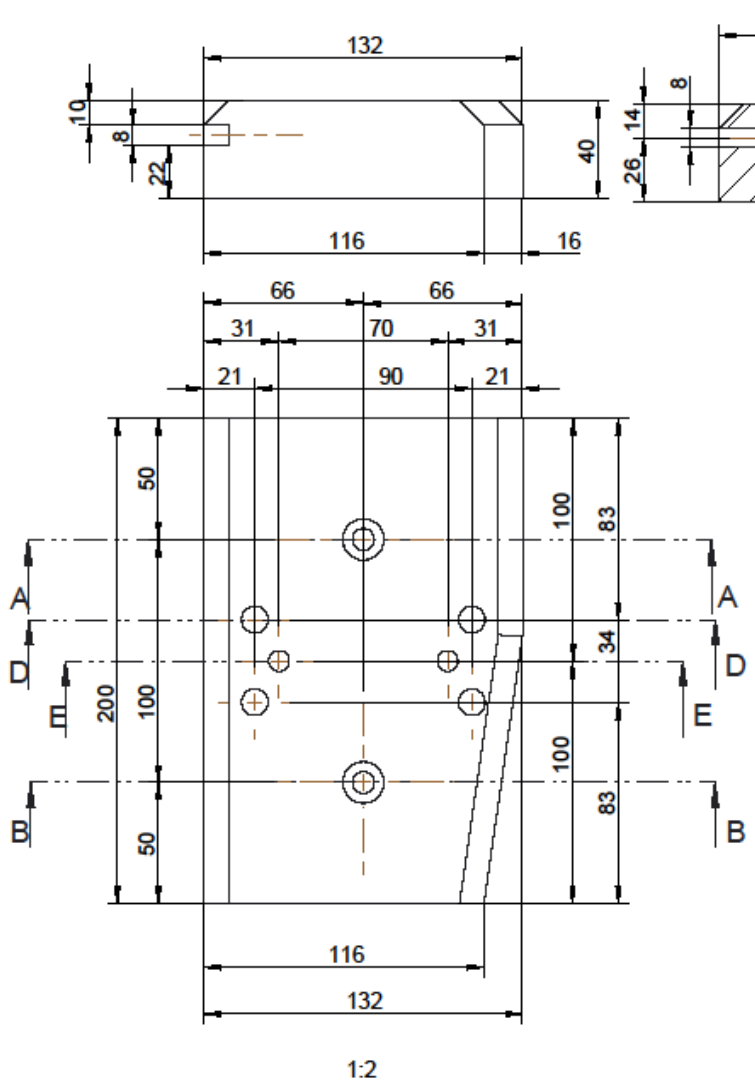
Material: PTFE

| rev. | kind of revision | name | date |
|------|------------------|------|------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

**Diplomarbeit
Dominik Leidinger
Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik**

| | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------|
| Name | Leidinger D. | |
| Gez. Drawn by | Leidinger D. | |
| Tag Day | 14.02.2014 | |
| Masstab Scale | 1:1 | |
| Benennung Title | Werkstattezeichnung Fuß rechts | |
| Projekt Project | Prüfkammer UBM | Format: A2 |
| Projekt Nr.: | 1000 | Format: A2 |
| Zeichn. Nr. Drawing Nr. | 03 | Rev. 00 |
| | | 1 of 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|------|------|
| ISO 2768- mK (Maschinenbau) | ber 0,4 bis 0,1 | ± 0,1 | ± 0,2 | ± 0,3 | ± 0,5 | ± 0,8 | ± 1,2 | ± 2 | ± 3 | ± 5 | ± 8 |
| ISO 13920-BA-F (Stahlbau >2000 A) | ber 0 bis 30 | ± 0,3 | ± 0,5 | ± 1 | ± 2 | ± 3 | ± 4 | ± 6 | ± 8 | ± 12 | ± 20 |



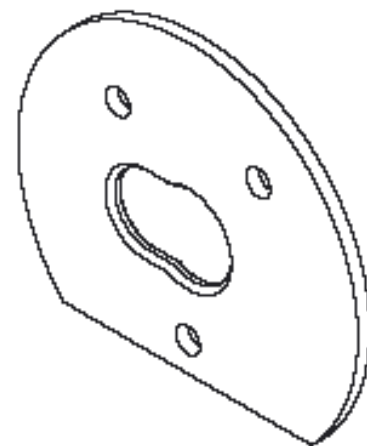
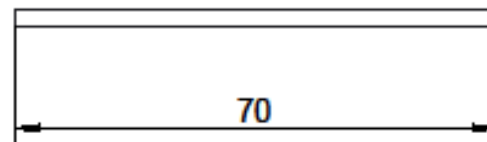
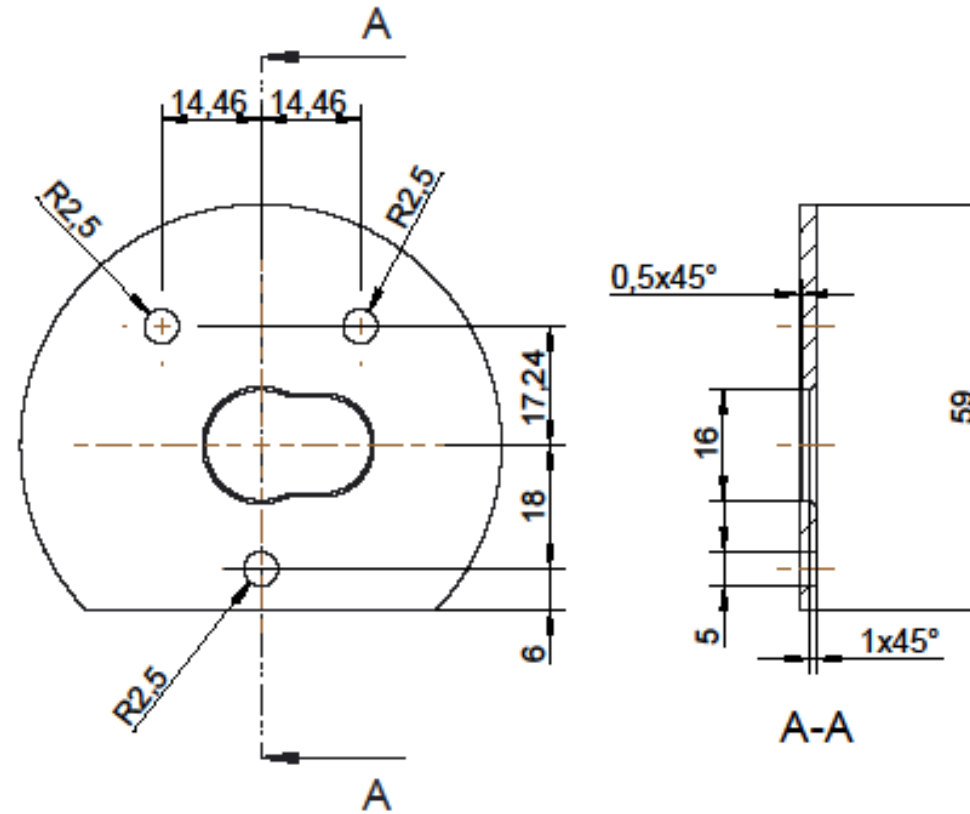
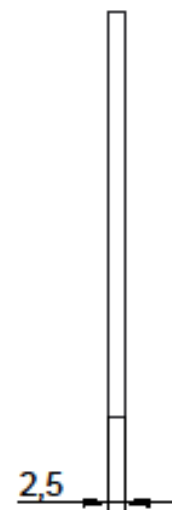
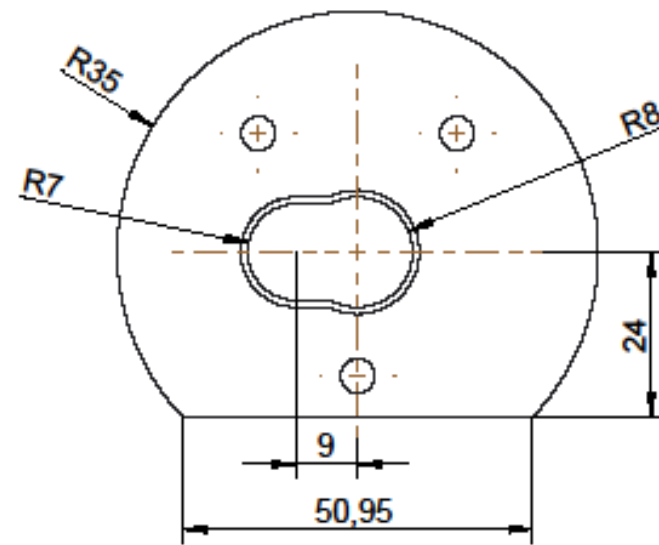
Material: PTFE

| rev. | kind of revision | name | date |
|------|------------------|------|------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Diplomarbeit
Dominik Leidinger
Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

| | | |
|-------------------------|---------------------------------|---|
| Gez. Drawn by | Leidinger D. |   |
| Tag Day | 14.02.2014 | |
| Benennung Title | Werkstattzeichnung Fundament | |
| Projekt Project | Prüfkammer UBM | |
| Projekt Nr.: | 1000 | Format: A2 |
| Zeichn. Nr. Drawing Nr. | 04 | Rev. 00 |
| Blatt Sheet | 1 | von of 1 |

| ISO 2768- mK (Maschinenbau) | ISO 1920-BA-F (Stahlbau >2000 B, >2000 A) | Übersch. mK, s | ber 0,4 bis 0,8 | 6 bis 30 | 30 bis 120 | 120 bis 400 | 400 bis 1000 | 1000 bis 2000 | 2000 bis 4000 | 4000 bis 8000 | 8000 bis 12000 | 12000 bis 18000 | 18000 bis 20000 |
|-----------------------------|---|----------------|-----------------|----------|------------|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| ±0,1 | ±0,1 | ±0,1 | ±0,1 | ±0,1 | ±0,1 | ±0,1 | ±0,1 | ±0,1 | ±0,1 | ±0,1 | ±0,1 | ±0,1 | ±0,1 |
| ±0,2 | ±0,2 | ±0,2 | ±0,2 | ±0,2 | ±0,2 | ±0,2 | ±0,2 | ±0,2 | ±0,2 | ±0,2 | ±0,2 | ±0,2 | ±0,2 |
| ±0,3 | ±0,3 | ±0,3 | ±0,3 | ±0,3 | ±0,3 | ±0,3 | ±0,3 | ±0,3 | ±0,3 | ±0,3 | ±0,3 | ±0,3 | ±0,3 |
| ±0,5 | ±0,5 | ±0,5 | ±0,5 | ±0,5 | ±0,5 | ±0,5 | ±0,5 | ±0,5 | ±0,5 | ±0,5 | ±0,5 | ±0,5 | ±0,5 |
| ±0,8 | ±0,8 | ±0,8 | ±0,8 | ±0,8 | ±0,8 | ±0,8 | ±0,8 | ±0,8 | ±0,8 | ±0,8 | ±0,8 | ±0,8 | ±0,8 |
| ±1,0 | ±1,0 | ±1,0 | ±1,0 | ±1,0 | ±1,0 | ±1,0 | ±1,0 | ±1,0 | ±1,0 | ±1,0 | ±1,0 | ±1,0 | ±1,0 |
| ±1,2 | ±1,2 | ±1,2 | ±1,2 | ±1,2 | ±1,2 | ±1,2 | ±1,2 | ±1,2 | ±1,2 | ±1,2 | ±1,2 | ±1,2 | ±1,2 |
| ±1,5 | ±1,5 | ±1,5 | ±1,5 | ±1,5 | ±1,5 | ±1,5 | ±1,5 | ±1,5 | ±1,5 | ±1,5 | ±1,5 | ±1,5 | ±1,5 |
| ±2,0 | ±2,0 | ±2,0 | ±2,0 | ±2,0 | ±2,0 | ±2,0 | ±2,0 | ±2,0 | ±2,0 | ±2,0 | ±2,0 | ±2,0 | ±2,0 |
| ±3,0 | ±3,0 | ±3,0 | ±3,0 | ±3,0 | ±3,0 | ±3,0 | ±3,0 | ±3,0 | ±3,0 | ±3,0 | ±3,0 | ±3,0 | ±3,0 |
| ±4,0 | ±4,0 | ±4,0 | ±4,0 | ±4,0 | ±4,0 | ±4,0 | ±4,0 | ±4,0 | ±4,0 | ±4,0 | ±4,0 | ±4,0 | ±4,0 |
| ±5,0 | ±5,0 | ±5,0 | ±5,0 | ±5,0 | ±5,0 | ±5,0 | ±5,0 | ±5,0 | ±5,0 | ±5,0 | ±5,0 | ±5,0 | ±5,0 |
| ±7,0 | ±7,0 | ±7,0 | ±7,0 | ±7,0 | ±7,0 | ±7,0 | ±7,0 | ±7,0 | ±7,0 | ±7,0 | ±7,0 | ±7,0 | ±7,0 |
| ±10,0 | ±10,0 | ±10,0 | ±10,0 | ±10,0 | ±10,0 | ±10,0 | ±10,0 | ±10,0 | ±10,0 | ±10,0 | ±10,0 | ±10,0 | ±10,0 |



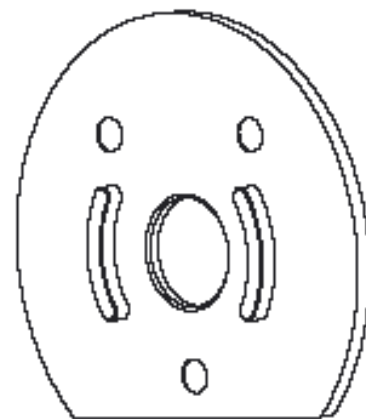
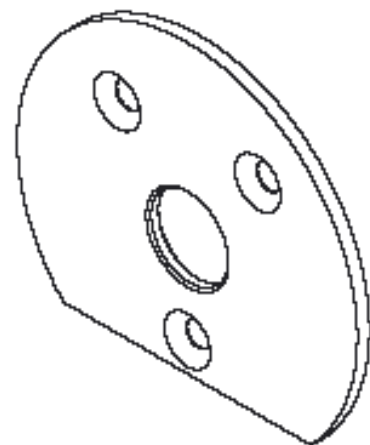
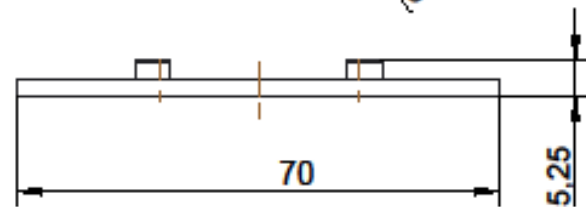
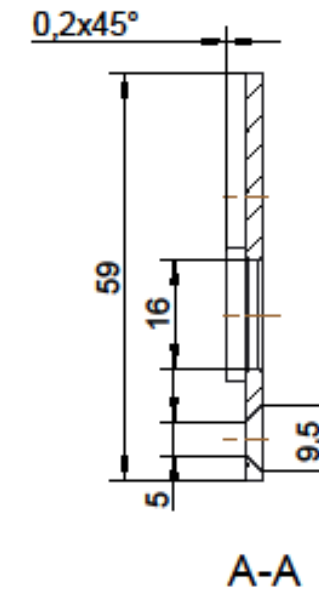
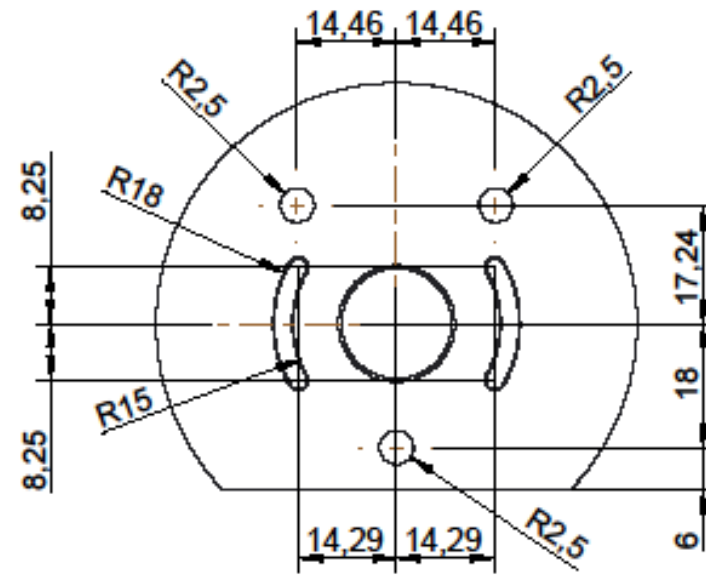
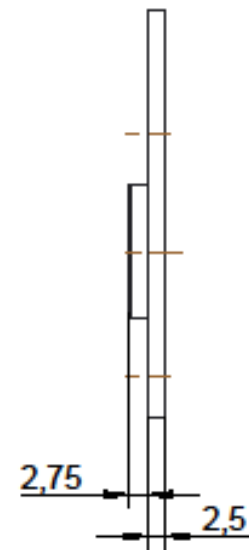
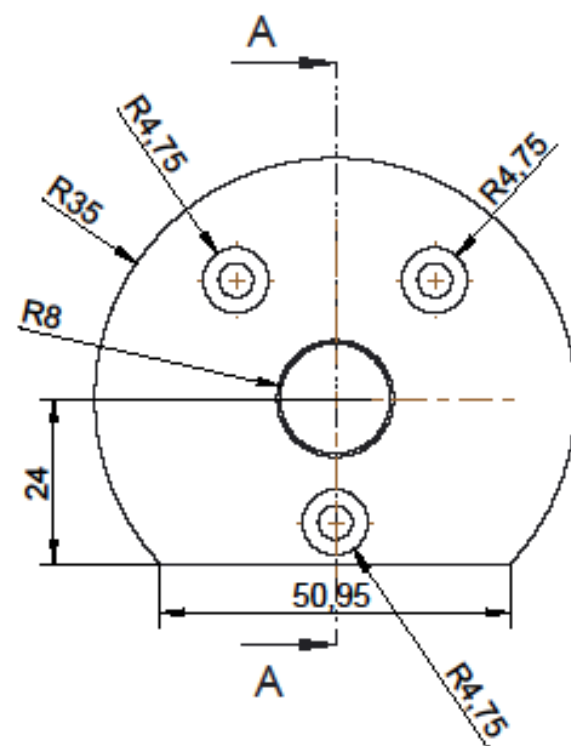
Material: 1.4571

| rev. | kind of revision | name | date |
|------|------------------|------|------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Diplomarbeit
Dominik Leidinger
Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

| | | |
|---|----------------------|---|
| Gez. Drawn by | Name Leidinger D. |   |
| Tag Day | 03.12.2014 | |
| Masstab Scale | 1:1 | |
| Benennung Title Werkstattzeichnung Deckel schwimmend | | Projekt Project Prüfkammer UBM |
| | | Projekt Nr.: 1000 Format: A3 |
| | | Zeichn. Nr. Drawing Nr. 05 Rev. 00 Blatt Sheet 1 von of 1 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---|------------------|------------|--------------|------------|-------------|--------------|--------------|---------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Allgemein- toleranzen | ISO 2768- mK (Maschinenbau) | Grenzab- maße | ber bis | 0,4 ± 0,1 | 6 ± 0,2 | 30 ± 0,3 | 120 ± 0,5 | 400 ± 0,8 | 1000 ± 1,2 | 2000 ± 2 | 4000 ± 3 | 8000 ± 4 | 12000 ± 5 | 18000 ± 6 |
| | ISO 13920-BA-F (Stahlbau) <2000 B, >2000 A | | ber bis | 0 ± 1 | 30 ± 2 | 120 ± 2 | 315 ± 2 | 1000 ± 3 | 2000 ± 4 | 4000 ± 4 | 8000 ± 5 | 12000 ± 6 | 18000 ± 7 | 20000 ± 8 |



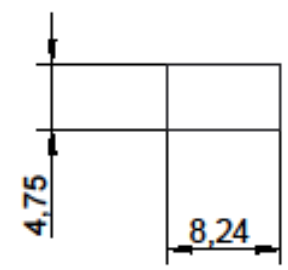
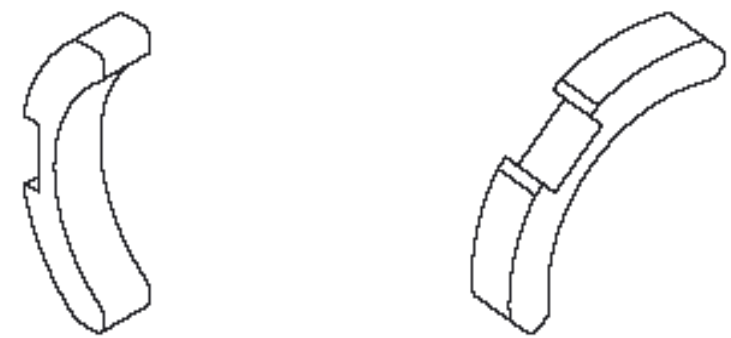
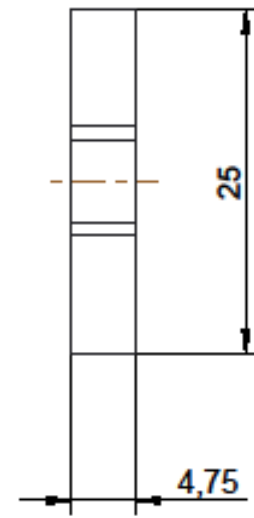
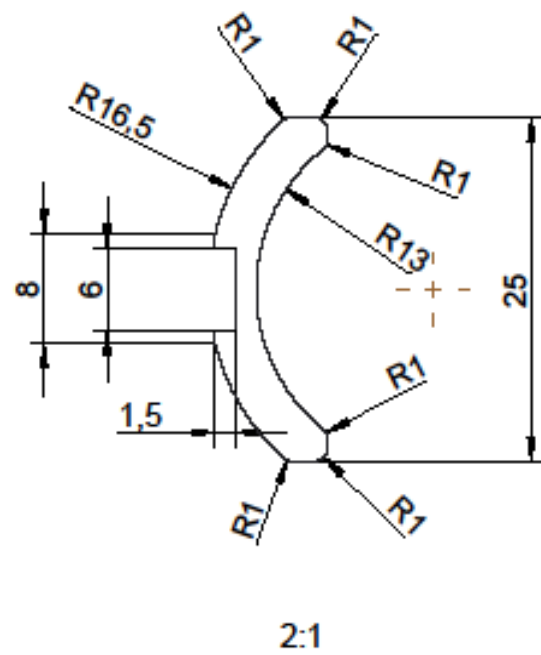
Material: 1.4571

| rev. | kind of revision | name | date |
|------|------------------|------|------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Diplomarbeit
 Dominik Leidinger
 Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

| | | |
|-----------------|-----------------------------------|---|
| Gez. Drawn by | Name Leidinger D. |   |
| Tag Day | 03.12.2014 | |
| Masstab Scale | 1:1 | Projekt Project Prüfkammer UBM |
| Benennung Title | Werkstattzeichnung Deckel fest | Projekt Nr.: 1000 Format: A3 |
| | | Zeichn. Nr. Drawing Nr.: 06 Rev. 00 Blatt Sheet 1 von of 1 |



| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---|-----------------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Allgemein- toleranzen | ISO 2768- mK (Maschinenbau) | Grenzab- mäh- e | ber 0,4 | 6 | 30 | 120 | 400 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 12000 | 18000 | 18000 |
| | ISO 13920-BA-F (Stahlbau) <2000 B, >2000 A | | bis 0,1 | 30 | 120 | 315 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 12000 | 18000 | 20000 | über |
| | | | bis 0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 | ±0,8 | ±1,2 | ±2 | ±3 | ±4 | ±5 | ±6 | ±6 |
| | | | bis 0 | ±2 | ±2 | ±3 | ±4 | ±4 | ±5 | ±6 | ±7 | ±8 | ±8 | ±9 |



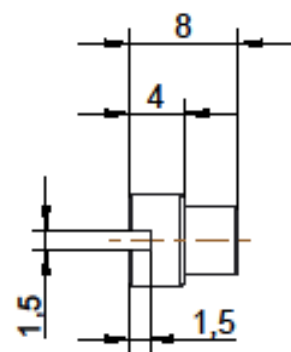
Material: PTFE

| rev. | kind of revision | name | date |
|------|------------------|------|------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

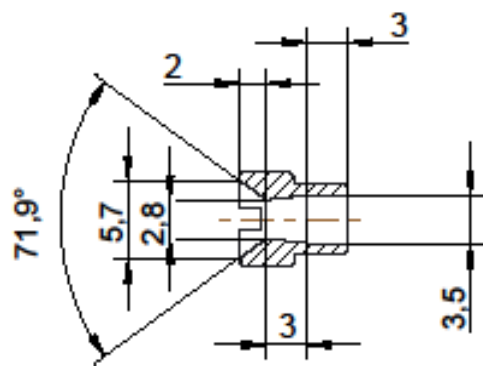
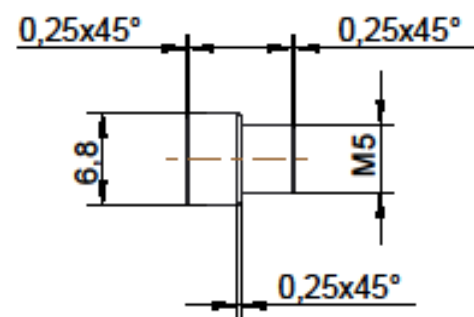
**Diplomarbeit
Dominik Leidinger
Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik**

| | | |
|---|----------------------|---|
| Gez. Drawn by | Name Leidinger D. |   |
| Tag Day | 12.05.2014 | |
| Masstab Scale | 2:1 | |
| Benennung Title Werkstattzeichnung Backen für Feder | | Projekt Project Prüfkammer UBM Projekt Nr.: 1000 Format: A3 Zechn. Nr. Drawing Nr. 07 Rev. 00 Blatt Sheet 1 von of 1 |

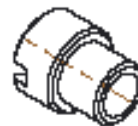
| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---|------------------|------------------------|---------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Allgemein- toleranzen | ISO 2768- mK (Maschinenbau) | Grenzab- maße | ber 0,4 bis 6 ± 0,1 | 6 30 ± 0,2 | 30 120 ± 0,3 | 120 400 ± 0,5 | 400 1000 ± 0,8 | 1000 2000 ± 1,2 | 2000 4000 ± 2 | 4000 8000 ± 3 | 8000 12000 ± 4 | 12000 18000 ± 5 | 18000 20000 ± 6 |
| | ISO 13920-BA-F (Stahlbau) < 2000 B, > 2000 A | | ber 0 bis 30 ± 1 | 30 120 ± 2 | 120 315 ± 2 | 315 1000 ± 3 | 1000 2000 ± 4 | 2000 4000 ± 4 | 4000 8000 ± 5 | 8000 12000 ± 6 | 12000 18000 ± 7 | 18000 20000 ± 8 | über 20000 ± 9 |



2:1



A-A



Material: 1.4571

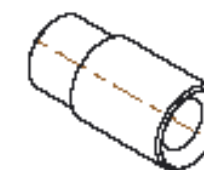
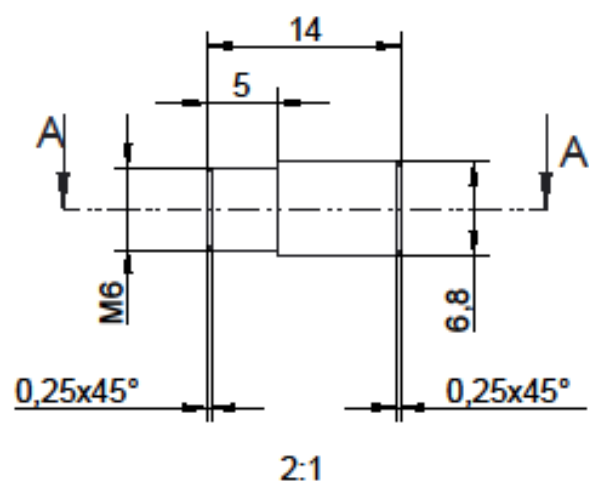
| rev. | kind of revision | name | date |
|------|------------------|------|------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Diplomarbeit
Dominik Leidinger

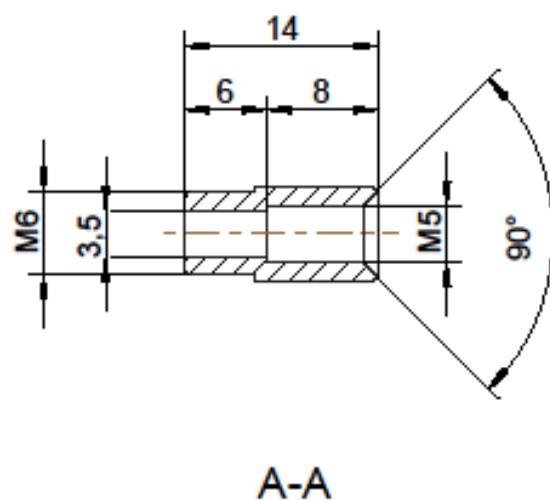
Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

| | | |
|-----------------|--|---|
| Gez. Drawn by | Name Leidinger D. |   |
| Tag Day | 12.05.2014 | |
| Masstab Scale | 2:1 | |
| Benennung Title | <p>Werkstattzeichnung Zerstäuberdüse d=2,8</p> | |
| Projekt Project | Prüfkammer UBM | Projekt Nr.: 1000 |
| Format | A3 | Zeichn. Nr. Drawing Nr. 08 |
| Rev. | 00 | Blatt über von 1 1 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---|------------------|------------|--------------|------------|-------------|--------------|--------------|---------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Allgemein- toleranzen | ISO 2768- mK (Maschinenbau) | Größenzahl mm | ber bis | 0,4 ± 0,1 | 6 ± 0,2 | 30 ± 0,3 | 120 ± 0,5 | 400 ± 0,8 | 1000 ± 1,2 | 2000 ± 2 | 4000 ± 3 | 8000 ± 4 | 12000 ± 5 | 18000 ± 6 |
| | ISO 13920-BA-F (Stahlbau) <2000 B, >2000 A | | ber bis | 0 ± 1 | 30 ± 2 | 120 ± 2 | 315 ± 2 | 1000 ± 3 | 2000 ± 4 | 4000 ± 4 | 8000 ± 5 | 12000 ± 6 | 18000 ± 7 | 20000 ± 8 |



2:1



A-A

Material: 1.4571

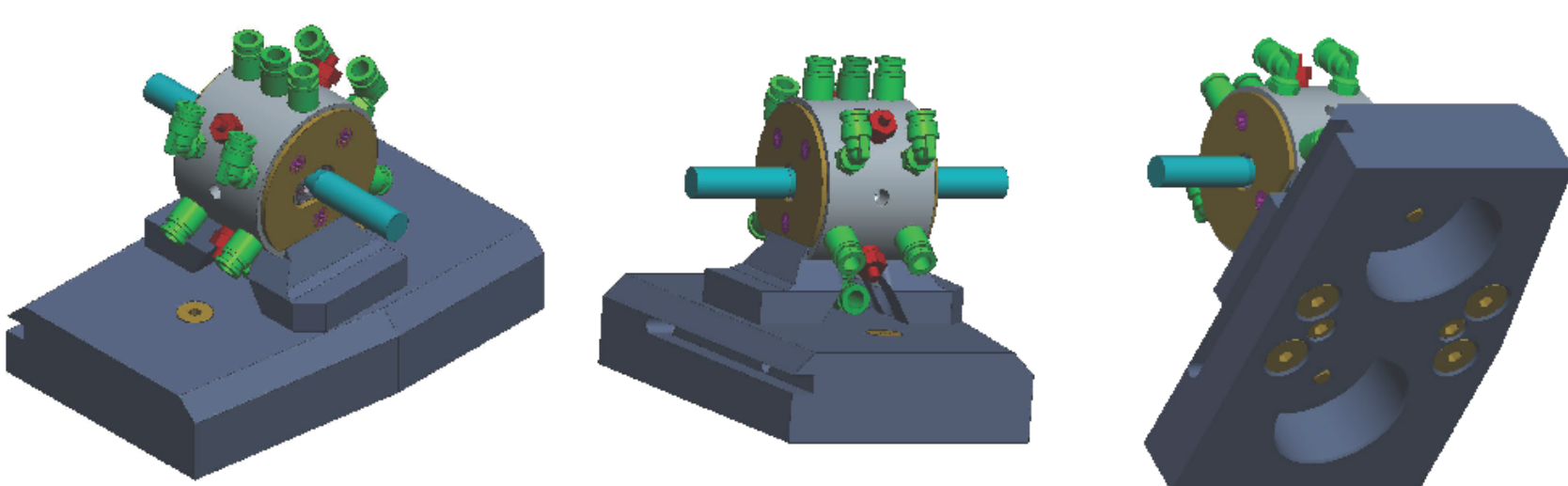
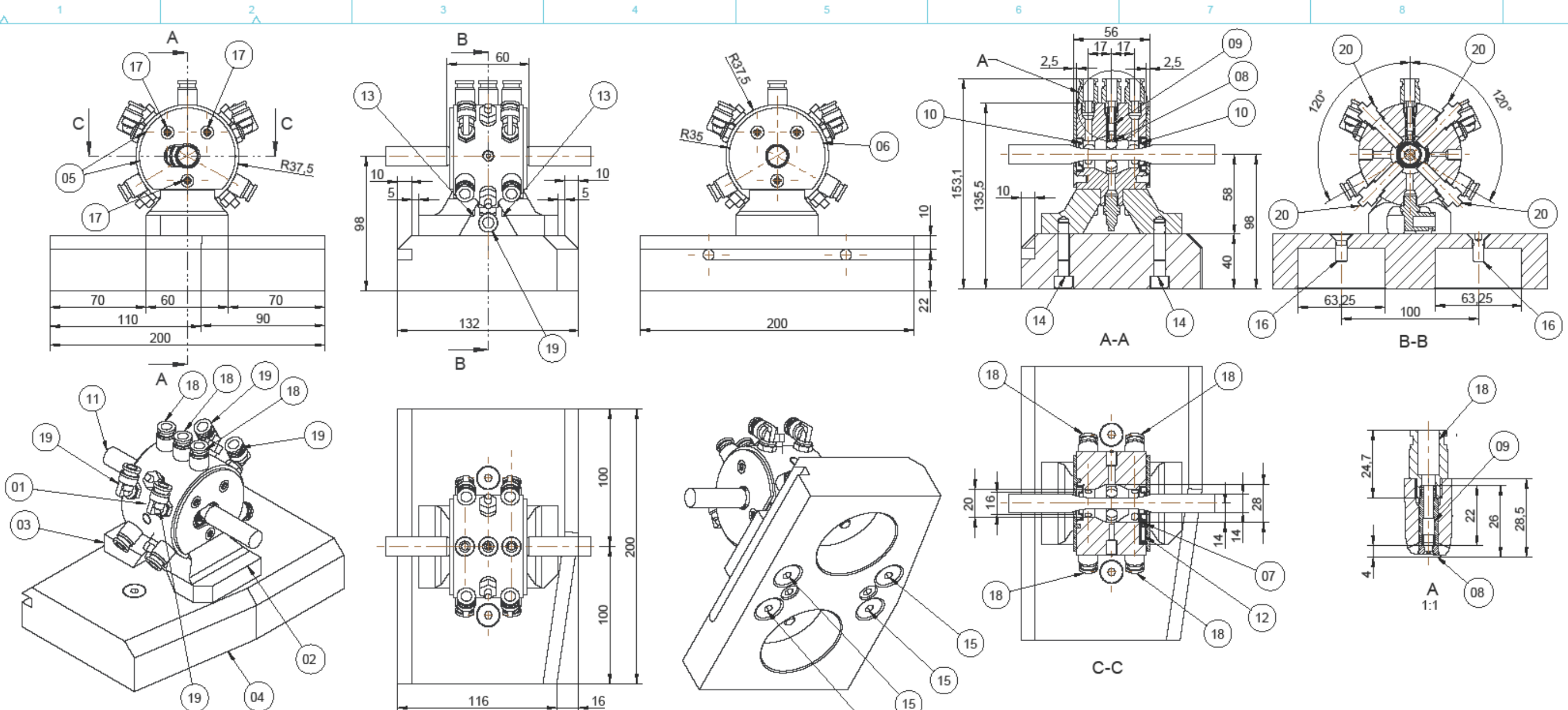
| rev. | kind of revision | name | date |
|------|------------------|------|------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Diplomarbeit
Dominik Leidinger

Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

| | | |
|---|----------------------|---|
| Gez. Drawn by | Name Leidinger D. |   |
| Tag Day | 18.06.2014 | |
| Masstab Scale | 2:1 | |
| Benennung Title Werkstattzeichnung Hülse für Zerstäuberdüse l = 14 mm | | Projekt Project Prüfkammer UBM |
| | | Projekt Nr.: 1000 |
| | | Format: A3 |
| | | Zeichn. Nr. Drawing Nr. 09 |
| | | Rev. 00 |
| | | Blatt Sheet 1 |
| | | von of 1 |



| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---|------------------|-------------|----------|-----------|-----------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| Allgemein- toleranzen | ISO 2768- mK (Maschinenbau) | Grenzab- maße | ber 0,4 | 6 | 30 | 120 | 400 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 12000 | 18000 |
| | ISO 13920-BA-F (Stahlbau) <2000 B, >2000 A | | bis 6 ± 0,1 | 30 ± 0,2 | 120 ± 0,3 | 400 ± 0,5 | 1000 ± 0,8 | 2000 ± 1,2 | 4000 ± 2 | 8000 ± 3 | 12000 ± 4 | 18000 ± 5 | 20000 ± 6 |
| | | | ber 0 | 30 | 120 | 315 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 12000 | 18000 | 20000 |
| | | | bis 30 ± 1 | 120 ± 2 | 315 ± 2 | 1000 ± 3 | 2000 ± 4 | 4000 ± 4 | 8000 ± 5 | 12000 ± 6 | 18000 ± 7 | 20000 ± 8 | über 20000 ± 9 |



Material: 1.4571, PTFE

| rev. | kind of revision | name | date |
|------|------------------|------|------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Diplomarbeit
Dominik Leidinger
Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

| | | |
|-------------------------|--------------|---|
| Name | Leidinger D. |   |
| Gez. Drawn by | Leidinger D. | |
| Tag Day | 06.03.2015 | Projekt Prüfchamber UBM Projekt Nr.: 1000 Format: A2 |
| Masstab Scale | 1:2 | Benennung Title Werkstattzeichnung Zusammenstellung |
| Zeichn. Nr. Drawing Nr. | 10 | Rev. 00 Blatt Sheet 1 von of 1 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|
| ISO 2768- nk (Maschinenbau) | ISO 19820-BA, F (Stahlbau >2000 A) | ISO 2768- nk | ISO 19820-BA, F (Stahlbau >2000 A) | ISO 2768- nk | ISO 19820-BA, F (Stahlbau >2000 A) | ISO 2768- nk | ISO 19820-BA, F (Stahlbau >2000 A) | ISO 2768- nk | ISO 19820-BA, F (Stahlbau >2000 A) | ISO 2768- nk | ISO 19820-BA, F (Stahlbau >2000 A) |
| 0,4 | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,2 |
| 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 |
| 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 |
| 12000 | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 | 12000 |
| 18000 | 18000 | 18000 | 18000 | 18000 | 18000 | 18000 | 18000 | 18000 | 18000 | 18000 | 18000 |
| 20000 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 | 20000 |



Abbildung 59: Federgelagerte Dichtung in Prüfkammer

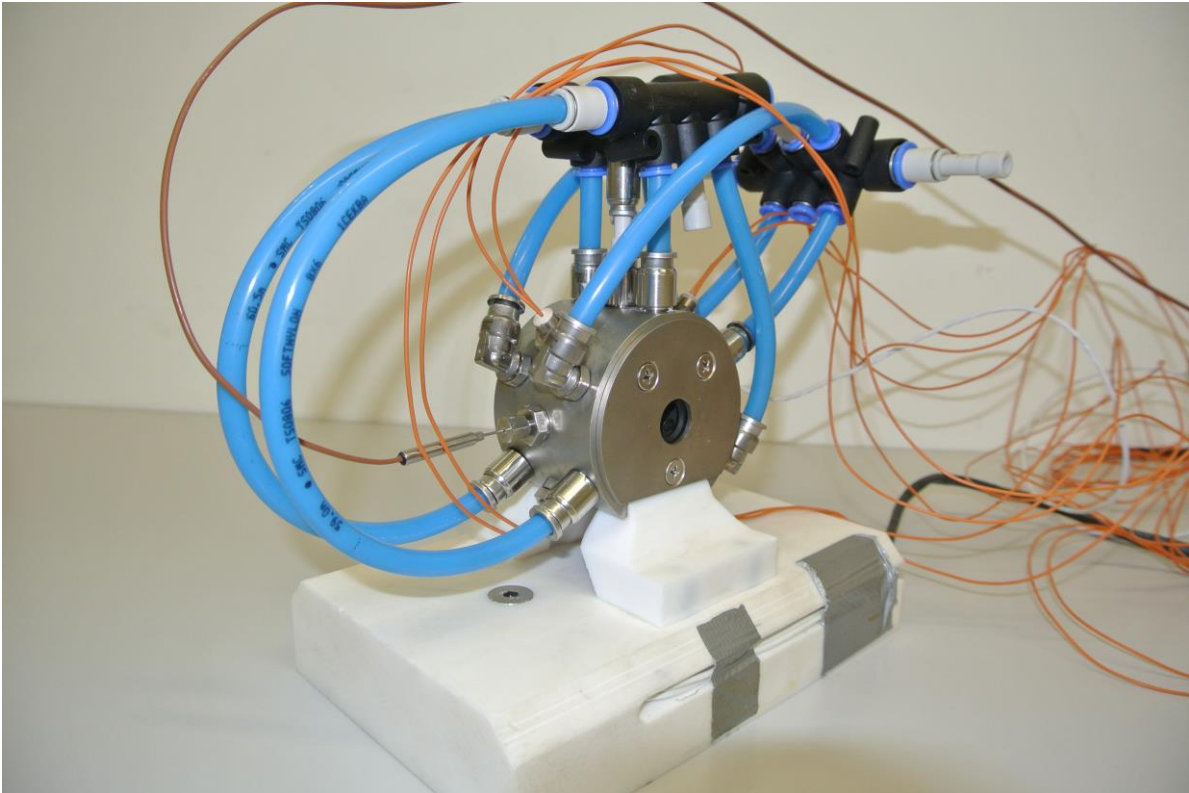


Abbildung 60: Zusammengebaute Prüfkammer mit Isometrieansicht von rechts

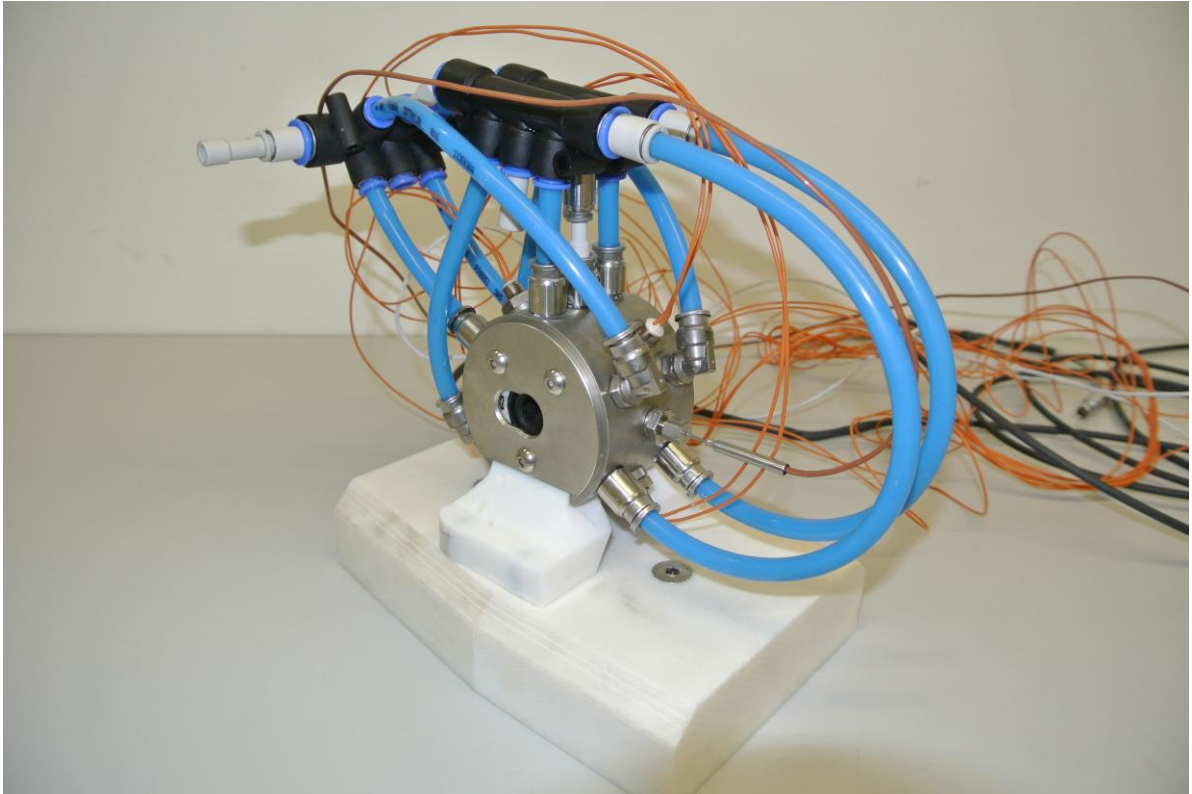


Abbildung 61: Zusammengebaute Prüfkammer mit Isometrieansicht von links

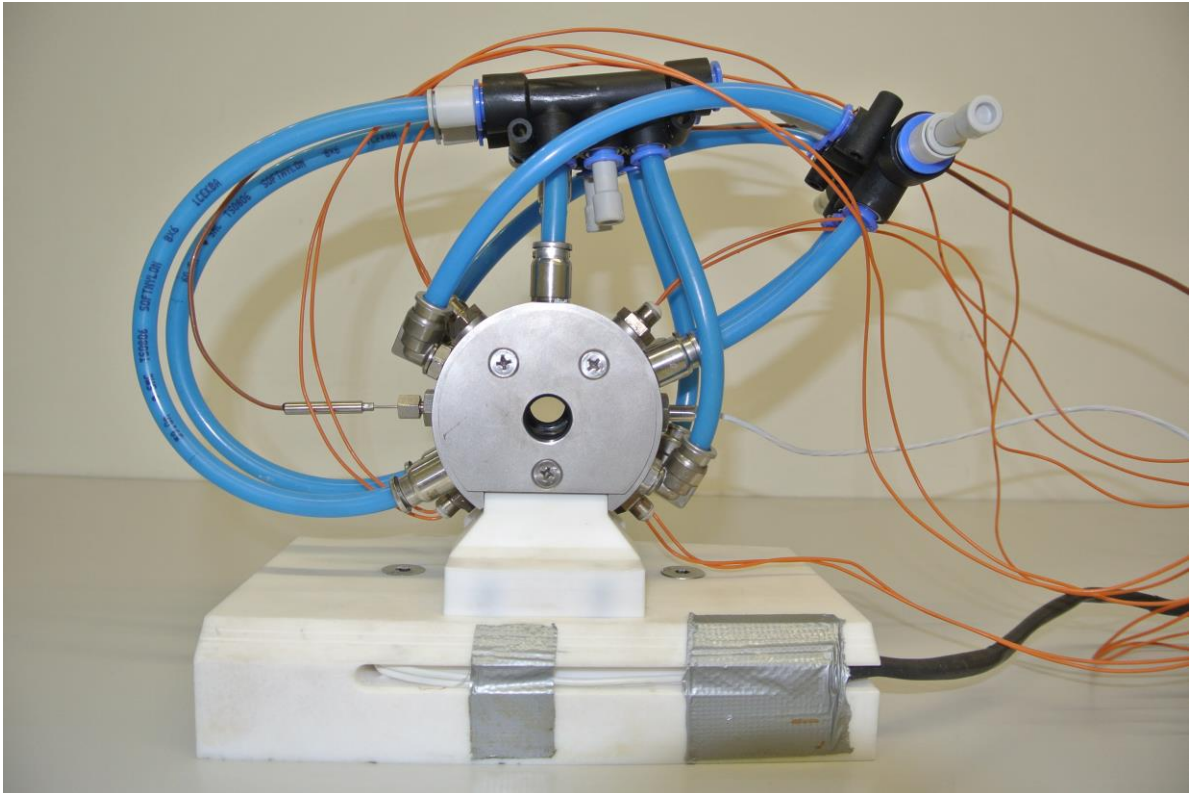


Abbildung 62: Zusammengebaute Prüfkammer mit Ansicht von rechts

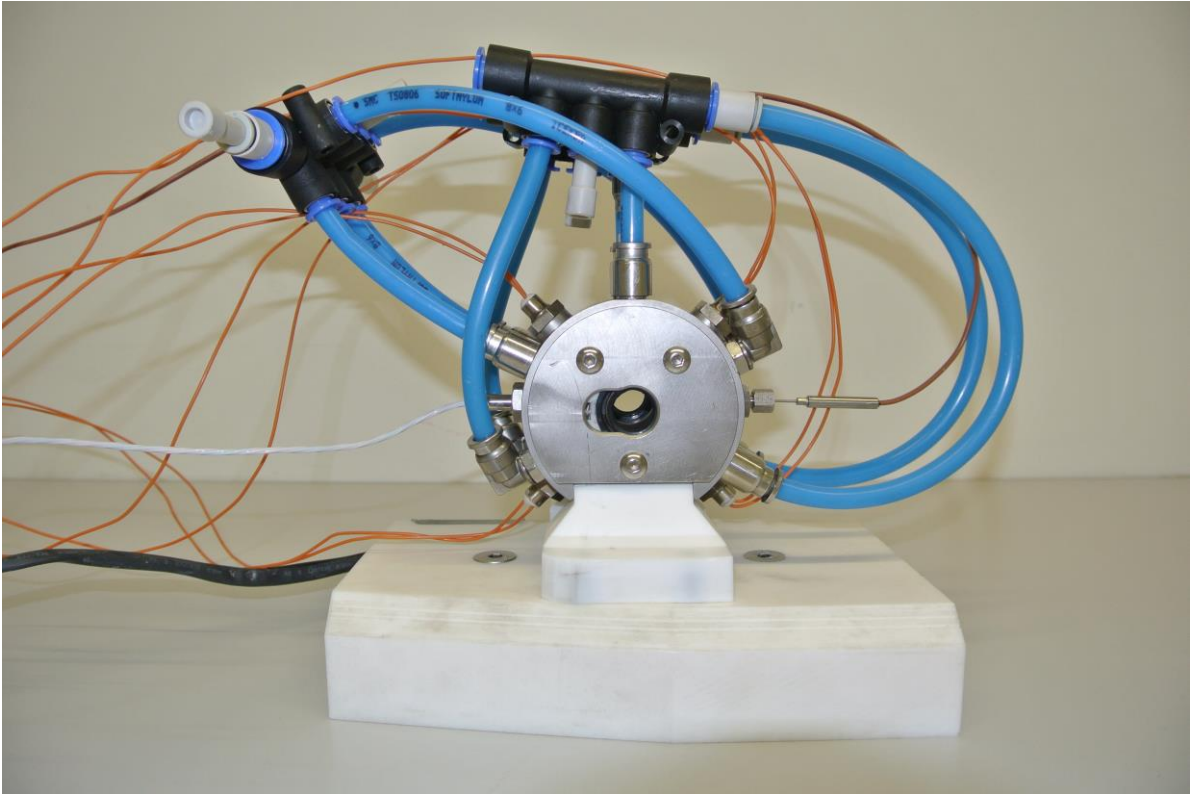


Abbildung 63: Zusammengebaute Prüfkammer mit Ansicht von links

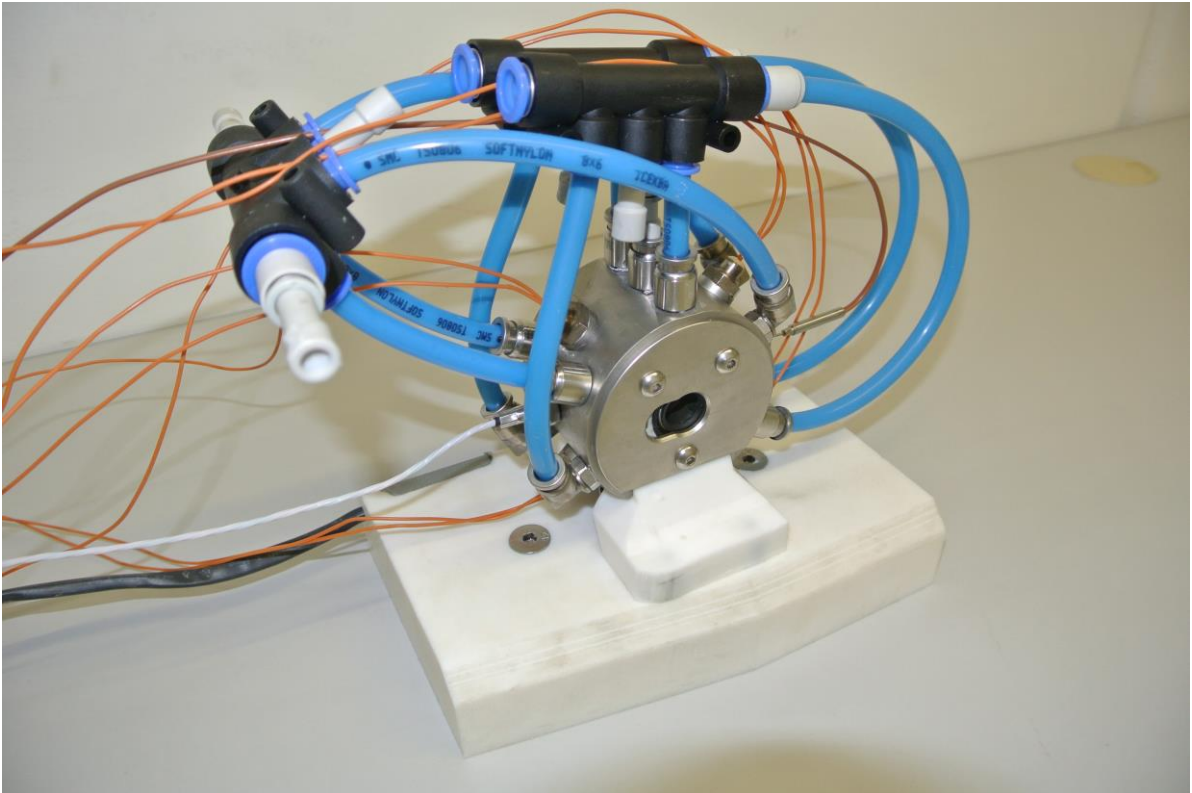


Abbildung 64: Zusammengebaute Prüfkammer mit Isometrieansicht von links

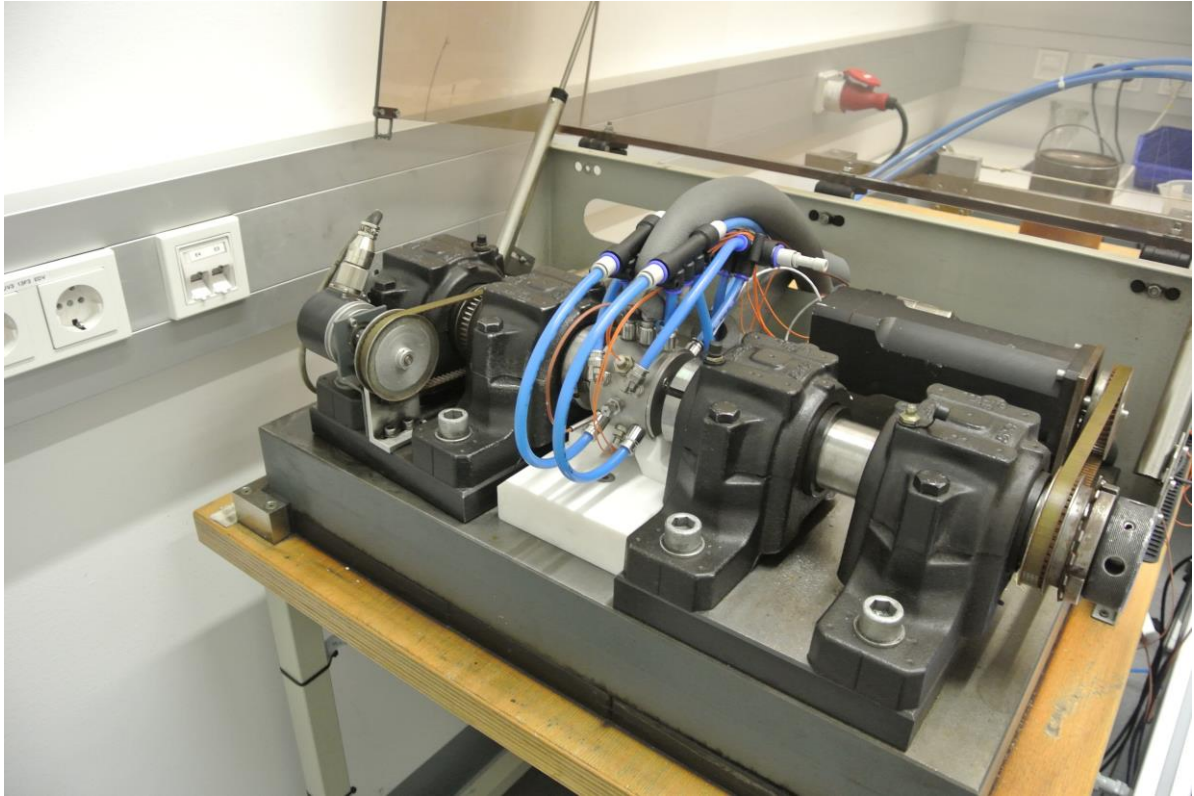


Abbildung 65: Prüfammer eingebaut in Umlaufbiegeprüfmaschine Isometrieansicht von rechts

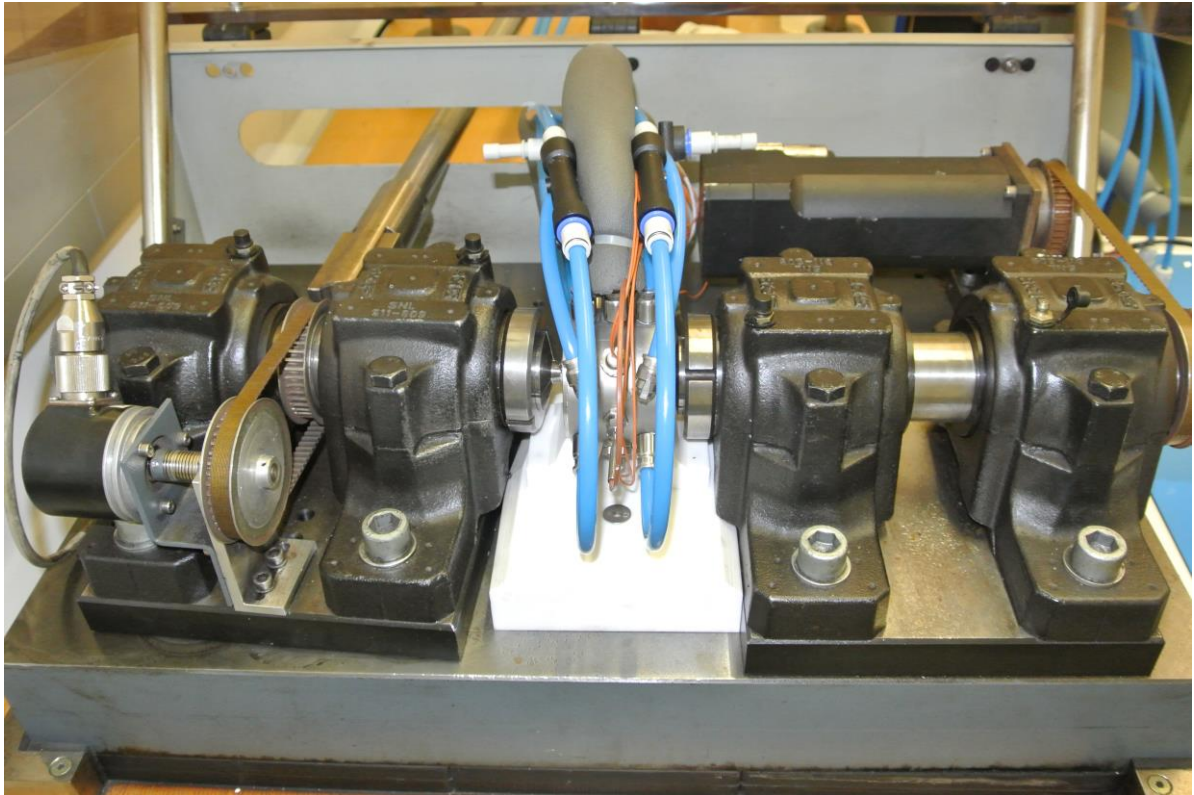


Abbildung 66: Prüfammer eingebaut in Umlaufbiegeprüfmaschine Vorderansicht

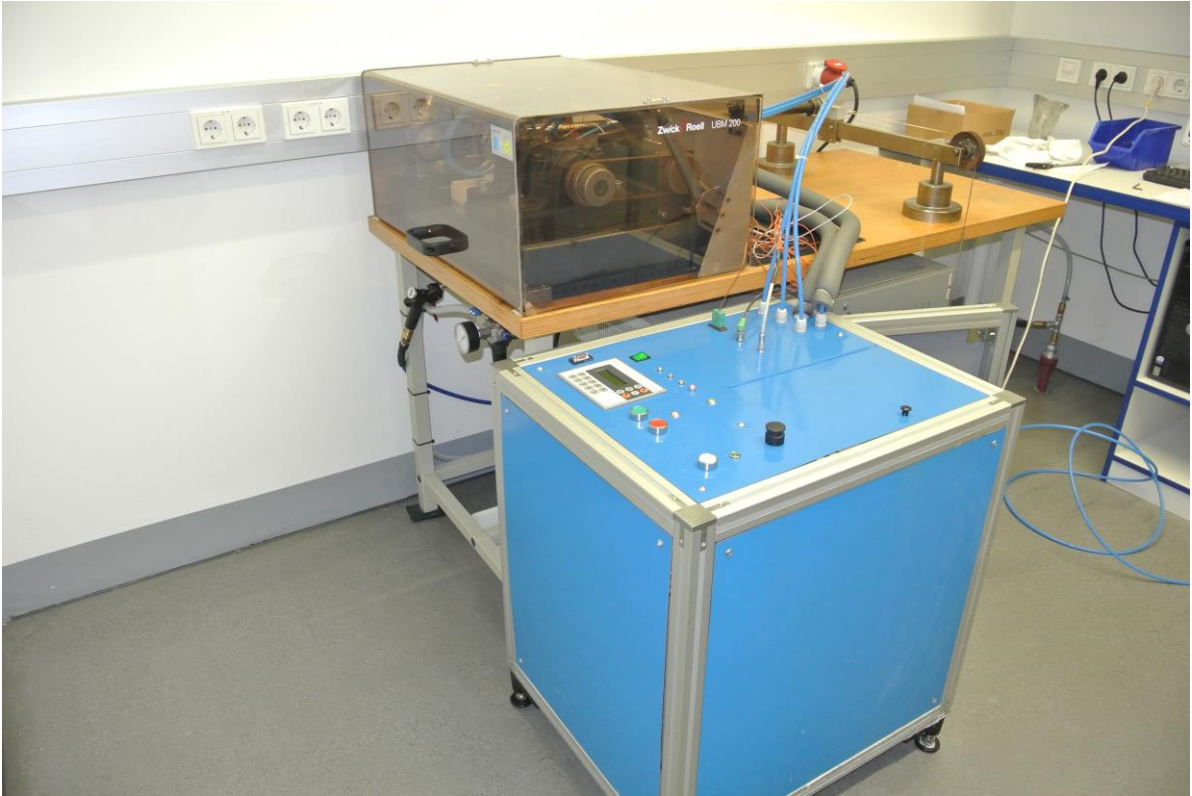


Abbildung 67: Gesamtes Prüfsystem (SPS-Steuerung) für Prüfkammer mit Umlaufbiegeprüfmaschine



Abbildung 68: Gesamtes Prüfsystem (SPS-Steuerung) für Prüfkammer mit Umlaufbiegeprüfmaschine