

Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering,

Montanuniversität Leoben



DIPLOMARBEIT

KONSTRUKTION, BAU UND INBETRIEBNAHME

EINER KOMBINIERTEN

TORSIONS- UND REIBSCHWEISSANLAGE

Gerald Figala

Studienrichtung Montanmaschinenwesen

Mai 2008

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, 16.5.2008

Gerald Figala

Danksagung

An dieser Stelle darf ich mich für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit am Lehrstuhl für Umformtechnik sehr herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Bruno Buchmayr bedanken.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Dipl.-Ing. Dr.mont. Bernhard Buchner, für die bemühte Unterstützung bei der Verfassung meiner Diplomarbeit, sowie für die Durchsicht und Korrektur meiner Arbeit bedanken.

Weiters bedanke ich mich bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Umformtechnik für die herzliche Einbindung. Im Speziellen möchte ich meinen Dank Herrn Ralf Ambrosch, Herrn Martin Dirscher und Herrn Clemens Planitzer für die Unterstützung bei der fertigungstechnischen Umsetzung und bei der Montage der Torsions- und Reibschweißanlage aussprechen.

Ganz besonderen Dank gilt meinen Eltern, Christine und Gerd Figala, die mich bei meinem beschrittenen Lebensweg unterstützten und mir mein Studium „Montanmaschinenwesen“ an der Montanuniversität Leoben ermöglichten.

Für die schönen Zeiten in der Montanstadt Leoben und während meines Studiums, sowie für die Unterstützung auch in schweren Lebenslagen möchte ich mich bei meiner Freundin, Susanne Priesch, meinen Freunden und meinen Kommilitonen bedanken.

Ich bin sehr glücklich und stolz auf die Menschen, die ich zu meinen Freunden zählen darf.

In meine Danksagung möchte ich auch die Europäische Union, die Republik Österreich und das Land Steiermark für die Finanzierung, sowie die Firmen Bernecker + Rainer Industrie-Elektronik GmbH, OSWALD REGELBARE ELEKTROMOTOREN, Lenze GmbH und Eibl Hydraulic & Drives OEG für ihre großzügige finanzielle Unterstützung und ihr bereitgestelltes Know-how einbeziehen.

Kurzfassung

Der Lehrstuhl für Umformtechnik beschäftigt sich unter anderem mit der numerischen Simulation von Umformprozessen und der Entwicklung von Verbundwerkstoffen für Leichtbaukonstruktionen. In diesem Zusammenhang ergab sich die Notwendigkeit zur Ermittlung von Fließkurven bei hohen Umformgraden mittels des Torsionsversuches sowie die Modellierung des Walzplattierens mittels des Modellversuches „Reibschweißen“. Da am Lehrstuhl keine geeigneten Prüfvorrichtungen zur Durchführung entsprechender Versuche vorhanden waren, und Torsionsversuch und Reibschweißprozess vom Ablauf her gesehen ähnliche Prozesse sind, lag die Idee nahe, eine kombinierte Anlage zu konstruieren, auf der die Durchführung beider Versuche möglich ist.

Diese Arbeit beschreibt einleitend die Ableitung der Forderungen, die sich aus dem Pflichtenheft ergeben, sowie die Dimensionierung der Anlage und die Auswahl der Antriebe. Die Konzeption der Kernvorrichtung erfolgte mittels eines Black-Box-Modells, dessen Komponenten in einem nachgelagerten Schritt konstruktiv umgesetzt wurden. Bereits in der Konzeptphase wurde die Anlage in ein Sicherheitskonzept eingebunden. Nach dem Abschluss der Konstruktion der Kernvorrichtung erfolgte die Konzeption und konstruktive Umsetzung der Hilfs- und Anbauteile, die einerseits der Erfüllung der Forderungen aus dem Pflichtenheft dienen und andererseits eine benutzerfreundliche Bedienung der Maschine sicherstellen sollten. Abschließend erfolgte die Auslegung der Maschinensteuerung und der Anlagenelektrik. Während des gesamten Projektes wurde besonderes Augenmerk auf die Umsetzung der Maschinenrichtlinie gelegt.

Ergebnis der Arbeit ist die Realisierung einer kompakten Prüfanlage für Kalt- und Warmtorsionsversuche sowie für Reibschweißversuche. Die Anlage bietet eine breite Auswahlmöglichkeit der Versuchsparametrierung und der Versuchsdurchführung. Bei der Inbetriebnahme zeigten sich gute Ergebnisse bei der Durchführung der unterschiedlichen Versuche, allerdings wurde noch Verbesserungspotential im Bereich der Probeneinspannung sowie in der Anlagensteuerung aufgezeigt.

Abstract

The chair of metal forming is very engaged in numerical simulation of metal forming processes and in the development of composite materials for lightweight constructions. In this context, it arose the need for research into stress strain curves up to high strains by means of torsion tests and for the physical simulation of cladding by rolling using rotation 'friction welding' as a reference model. Due to the lack of availability of such devices at the institute and due to the fact that torsion test and friction welding are similar processes, it was decided to design a combined testing facility.

The whole construction was set by a black-box-model, which fulfills all the requirements of both processes. Furthermore at the draft phase, a user-friendly und safe design was postulated for the engine and the control system. During the whole time of the project the European machinery directive was implicated.

During the master thesis, a compact testing facility for cold und hot torsion tests as well as friction welding test could be realized. The facility provides a broad variety of testing parameters and a flexible testing operation. After the successful beginning of operation many useful results could be obtained under different testing conditions. In the next future, some improvements of clamping the samples und controlling the machine will be performed.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Danksagung	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	IX
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Torsionsprüfung	3
2.1.1 Umformtechnische Grundlagen	3
2.1.2 Versuche zur Ermittlung von Fließkurven	7
2.1.3 Ermittlung von Fließkurven durch die Torsionsprüfung	8
2.1.4 Allgemeine Anforderungen an eine Torsionsprüfanlage	9
2.2 Reibschweißen	10
2.2.1 Technologie des Reibschweißens	10

2.2.2	Prozessphasen des Reibschweißens	11
2.2.3	Einteilung der Reibschweißprozesse	13
2.2.4	Einteilung der Reibschweißanlagen	13
3	Aufgabenstellung	15
3.1	Pflichtenheft	15
3.2	Lastenheft	16
4	Konzeption der Anlage	18
4.1	Mechanisches Anlagenkonzept	18
4.1.1	Konzept für Rotationsantrieb	19
4.1.2	Konzept für die axiale Druckaufbringung	21
4.1.3	Konzept für das Axialführungssystem	23
4.2	Messkonzept	25
4.3	Mechanisches Sicherheitskonzept	27
5	Konstruktive Umsetzung	29
5.1	Aufbau des Führungssystems in Axialrichtung	29
5.2	Konstruktion der verfahrbaren Mittelkonsole	32
5.2.1	Konstruktive Lösung der Probenaufnahme	33
5.2.2	Detailkonstruktion zur Momentenmessung für den Torsionsversuch	34
5.2.3	Detailauslegung der Anbindung des Hydraulikzylinders	36

5.3	Detailauslegung der Elektromotoranbindung	37
5.4	Schutzeinhausung der Vorrichtung	39
5.5	Hilfselemente	39
5.5.1	Bodenplatte und Anbindung der Führungsvorrichtung	40
5.5.2	Kühlanlage	43
5.5.3	Induktoranbau	44
5.5.4	Maschinentischkonstruktion	45
5.6	Vollständige Darstellung der Prüfmaschine	47
6	Umsetzung der Maschinenrichtlinie	52
6.1	Konformitätsprüfungsprozess	52
6.2	Gefahrenanalyse	55
6.3	Ausständige Arbeiten im Konformitätsprüfungsprozess	60
7	Maschinensteuerung	61
7.1	Allgemeine Anforderungen	61
7.1.1	Anforderungen an die Funktionalität	61
7.1.2	Anforderungen an die Sicherheitsfunktionen	63
7.2	Umsetzung der Hardware	64
7.2.1	Schnittstelle für den Anwender	64
7.2.2	Auswahl der Steuerungseinheit	66
7.2.3	Umsetzung der Sicherheitstechnik	67

7.3	Umsetzung der Software	68
8	Auslegung und Umsetzung der Elektrik und der Steuerung	71
8.1	Leistungselektrik	71
8.2	Steuerelektrik	75
8.3	Schutzelektrik	76
9	Inbetriebnahme	79
9.1	Torsionsversuch bei Raumtemperatur	79
9.2	Warmtorsionsversuch	81
9.3	Reibschweißversuch	82
10	Schlussresümee	87
10.1	Stärken und Schwächen der Anlage	87
10.2	Optimierungsmöglichkeiten der Anlage	88
10.3	Zeitlicher Aufwand	89
10.4	Kostenverteilung	90
	Abbildungsverzeichnis	91
	Tabellenverzeichnis	94
	Literaturverzeichnis	95

Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis

Tabelle 1: Tabelle der verwendeten lateinischen Formelzeichen.

Zeichen	Bedeutung	Einheit
A	Querschnitt	mm^2
A_0	Ausgangsquerschnitt	mm^2
d	Durchmesser	mm
E	Elastizitätsmodul	N/mm^2
F	Kraft	N
F_{Stauch}	Stauchkraft	N
I_n	Nennstrom	A
k	Schubfließgrenze	N/mm^2
k_f	Fließspannung	N/mm^2
l	Länge	mm
l_0	Ausgangslänge	mm
l_1	Endlänge	mm
M_t	Torsionsmoment	Nm
n	Umdrehungen	min^{-1}
p_{Reib}	Reibdruck	N/mm^2
p_{Stauch}	Stauchdruck	N/mm^2
R	Außenradius	mm
r	Radius	mm
R_e	Streckgrenze	N/mm^2
R_m	Zugfestigkeit	N/mm^2
$R_{p0,2}$	0,2 % Dehngrenze (Ersatzstreckgrenze)	N/mm^2
r_t	Abstand Wägezelle-Drehpunkt Probe	mm
S_{Dmin}	Mindestsicherheit gegen Dauerbruch	1
t	Zeit	s

Tabelle 2: Tabelle der verwendeten griechischen Formelzeichen.

Zeichen	Bedeutung	Einheit
α_k	Kerbformzahl	1
γ_R	Verdrillung	1
ε	Dehnung	1
Θ	Verdrehwinkel	°
ϑ	Temperatur	°C
μ	Reibkoeffizient	1
σ	Spannung	N/mm ²
σ_{max}	maximale Spannung	N/mm ²
σ_{nenn}	Nennspannung	N/mm ²
$\sigma_{V,M}$	Vergleichsspannung nach v. Mises	N/mm ²
σ_{vorh}	vorhandene Spannung	N/mm ²
σ_{zdSch}	Schwellfestigkeit bei Normalspannung	N/mm ²
σ_{zul}	zulässige Spannung	N/mm ²
τ	Schubspannung	N/mm ²
τ_{max}	maximale Schubspannung	N/mm ²
φ	Umformgrad	1
$\dot{\varphi}$	Formänderungsgeschwindigkeit	s ⁻¹
$\varphi_{V,M}$	Vergleichsumformgrad nach v. Mises	N/mm ²

Tabelle 3: Tabelle der verwendeten tiefgestellten Indizes.

Indizes/Abkürzung	Bedeutung
0	Ausgangswert
1	Endwert
<i>d</i>	Druckbeanspruchung
<i>M</i>	v. Mises
<i>max</i>	Maximalwert
<i>min</i>	Minimalwert
<i>n</i>	Nennwert
<i>nenn</i>	Nennwert
<i>Sch</i>	Schwellfestigkeit
<i>V</i>	Vergleichswert
<i>vorh.</i>	vorhanden
<i>z</i>	Zugbeanspruchung, z-Achse
<i>zul</i>	zulässig

Tabelle 4: Tabelle der verwendeten Abkürzungen.

Zeichen	Bedeutung
A	Aufenthaltsdauer
Abb.	Abbildung
Abs.	Absatz
bzw.	beziehungsweise
CAD	computer-aided design
CE	Communauté Européenne
DC	Gleichstrom
E	Eintrittswahrscheinlichkeit
EG	Europäische Gemeinschaft
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
GSA	grundlegende Sicherheitsanforderung
h	Hinweis in der Bedienungsanleitung
k	konstruktive Sicherheitsmaßnahme
LsfUT	Lehrstuhl für Umformtechnik
M	Möglichkeit des Ausweichens
MRL	Maschinenrichtlinie
MSV	Maschinensicherheitsverordnung
ÖNORM	Österreichische Norm
P	Prinziparten
R	Risiko
RT	Raumtemperatur
S	Schaden
s	steuerungstechnische Sicherheitsmaßnahme
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
TORA	Torsionsprüf- und Reibschweißanlage
WEZ	Wärmeeinflusszone
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung und Zielsetzung

In den letzten Jahren gewann die Bauteil- und Prozessoptimierung, besonders im Bereich der Umformtechnik, immer mehr an zentraler Bedeutung. Durch die praxisnahe Simulation von Prozessabläufen im Vorfeld der Serienfertigung sind heutzutage anspruchsvollere und exaktere Endprodukte möglich. Der Lehrstuhl für Umformtechnik (LsfUT) an der Montanuniversität Leoben legt in der wissenschaftlichen Forschung seine Schwerpunkte in den Bereich der Verbesserung von Bauteilen und Werkzeugen am Sektor der Fertigungstechnik. Zu den Werkzeugen der Optimierung gehören unter anderem die numerische Simulation von Umform- und Fertigungsprozessen, sowie die metallkundliche Charakterisierung der Umformbarkeit und Fertigbarkeit. Die numerische Simulation von Fertigungsabläufen steht sehr eng mit möglichst genauen und seriös gewonnenen Materialkennwerten in Verbindung. Speziell zur Fließkurvenermittlung verschiedener Metalle und deren Legierungen stehen dem LsfUT automatisierte Prüfmaschinen zur Verfügung, die die gewünschten Fließkurvenverläufe mit Hilfe des Stauchversuches und des Zugversuches ermitteln. Als Ergänzung der bestehenden Prüfeinrichtungen und zur Vertiefung der Forschungsmöglichkeiten auf diesem Gebiet lag die Anschaffung einer Torsionsprüfanlage nahe. Die Torsionsprüfung liefert neben der Zug- und Stauchprüfung aussagekräftige und ergänzende Daten für die Fließkurvenermittlung von verschiedenen Werkstoffen.

Einen weiteren Forschungsschwerpunkt am LsfUT bildet das Walzplattieren unterschiedlicher Metalle, ein Prozess, der dem Verfahren des Pressschweißens zuzuordnen ist. Um die komplexen Zustände während des Walzplattierens experimentell vereinfacht darstellen und untersuchen zu können, wurde der Entschluss gefasst, den Walzprozess mittels des Modellversuchs „Reibschweißen“ (ebenfalls ein Pressschweißverfahren) abzubilden.

Der Reibschweißprozess stellte im vorigen Jahrhundert einen wichtigen Schweißprozess unter den Pressschweißverfahren dar. Diese unkomplizierte Fügetechnik wurde weltweit primär zur Verbindung von gleichen oder unterschiedlichen Werkstoffen am Gebiet des Schwermaschinenbaus eingesetzt. Durch die Weiterentwicklung anderer Schweißverfahren, die flexibler und effektiver

einzusetzen waren, wurde das Reibschweißverfahren jedoch verdrängt.

Da eine Torsionsprüfeinrichtung und eine Reibschweißanlage vom Aufbau und von den Komponenten her gesehen sehr eng miteinander verwandt sind, lag die Idee nahe, beide Maschinentypen in einer Anlage zu vereinen. Mit dieser Anlage könnte einerseits durch die Ermittlung von Fließkurven die Forschung am Sektor der umformtechnischen Simulation weiter ausgebaut werden und andererseits wäre eine tiefer greifende Untersuchung von Pressschweißverbindungen unter exakten Steuerungsparametern möglich.

Die Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit umfasst daher die Konzeption, die Konstruktion und den Zusammenbau sowie die Inbetriebnahme einer kombinierten Torsionsprüf- und Reibschweißanlage (TORA). Die Zielsetzung beinhaltet eine geeignete Konstruktion, die beiden Verfahren gerecht wird und eine weiterführende wissenschaftliche Untersuchung am Gebiet der Prozesssimulation und der Pressschweißverfahren zulässt. Weiters wird eine Umsetzung des vorgegebenen Pflichten- und Lastenheftes (siehe Kapitel 3.1 und 3.2) vorausgesetzt. Im Anschluss an den Konzeptions- und Konstruktionsteil der Arbeit folgt die Koordination der mechanischen Fertigung der Anlage mit der Montage und die Inbetriebnahme. Auf dem praktischen Teil der Arbeit baut eine Dokumentation und eine zusammenfassende Abhandlung zu diesem Thema in Form einer Diplomarbeit auf.

2 Grundlagen

2.1 Torsionsprüfung

Beim Torsionsversuch, der auch als Verdrehversuch bezeichnet wird, wird ein zylindrischer Probestab um seine Längsachse verdreht, um dabei das Drehmoment M_t in Abhängigkeit vom Verdrehwinkel Θ zu messen. Basierend auf diesen beiden Größen wird die Fließkurve des jeweiligen Werkstoffes ermittelt [1].

2.1.1 Umformtechnische Grundlagen

Der *Umformgrad* φ , der auch als logarithmische Formänderung bezeichnet wird, ist ein Maß für die plastische Formänderung. Da in der Regel in der Umformtechnik die elastischen Formänderungsanteile vernachlässigt werden und nur der plastische Anteil betrachtet wird, definiert sich der Umformgrad φ wie folgt [2]:

$$d\varphi = \frac{dl}{l}, \quad (2.1)$$

$$\varphi = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln l_1 - \ln l_0 = \ln \frac{l_1}{l_0}, \quad (2.2)$$

wobei sich der Umformweg aus der jeweiligen Länge l bezogen auf die Längenänderung dl zusammensetzt. Die Länge l_0 entspricht der Ausgangslänge der Probe und l_1 beschreibt die Länge der Probe nach dem Versuch. Der Zahlenwert der logarithmischen Formänderung ist positiv bei Zunahme der Abmessungen (z.B.: Zugversuch) und negativ bei Abnahme der Abmessungen (z.B.: Stauchversuch).

Aus dem Umformgrad φ ergibt sich durch die Ableitung nach der Zeit t die logarithmische *Formänderungsgeschwindigkeit* $\dot{\varphi}$ [2]:

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}. \quad (2.3)$$

Im Gegensatz dazu wird die *Dehnung* ε durch das Integral über die Längenänderung dl und der Ausgangslänge l_0 ermittelt [2]:

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l_0}, \quad (2.4)$$

$$\varepsilon = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0}. \quad (2.5)$$

Zwischen dem Umformgrad φ und der Dehnung ε besteht die nachstehende mathematische Beziehung:

$$\varphi = \ln(\varepsilon + 1). \quad (2.6)$$

Die *Fließspannung* k_f ist die im einachsigen Spannungszustand ermittelte Normalspannung, die im Werkstoff die kritische zum Fließen erforderliche Schubspannung hervorruft.

Für die Fließspannung eines Materials sind im Allgemeinen folgende Parameter verantwortlich [1, 3]:

- Werkstoff (d.h. das Material selbst, seine Eigenschaften, seine Legierungsbestandteile, sein Gefügebau und sein Herstellungsprozess),
- Temperatur ϑ bei der Fließkurvenermittlung,
- Umformgrad φ bei der Untersuchung,
- Formänderungsgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ beim Versuch.

Somit ergibt sich für die Fließspannung k_f folgende Funktion:

$$k_f = f(\text{Werkstoff}, \vartheta, \varphi, \dot{\varphi}). \quad (2.7)$$

Im Unterschied zum einachsigen Spannungszustand hängt beim mehrachsigen Spannungszustand der Eintritt des Fließens nicht mehr nur von *einer* Spannung, sondern von einer *Kombination aller Spannungen* ab. Für diesen Fall gibt es zwei grundlegende Plastizitätstheorien:

- Schubspannungshypothese nach Tresca,
- Gestaltänderungsenergiehypothese nach v. Mises.

Die Schubspannungshypothese geht davon aus, dass der Werkstoff an einer bestimmten Stelle des Werkstückes bleibende Formänderungen erleidet, wenn die größte an dieser Stelle wirkende Schubspannung τ_{max} einen kritischen Wert erreicht hat. Somit ergibt sich mit der werkstoffunabhängigen Schubfließgrenze k die Fließbedingung

$$\tau_{max} = k. \quad (2.8)$$

Die Berechnung der *Schubfließspannung* k laut Tresca erfolgt mit der Formel [1, 2]:

$$k = \frac{k_f}{2}. \quad (2.9)$$

Die Gestaltänderungsenergiehypothese nach v. Mises geht hingegen davon aus, dass ein Fließen im Werkstoff auftritt, wenn die elastische Gestaltänderungsenergie einen kritischen Wert erreicht hat. Die Schubfließspannung k wird nach v. Mises folgendermaßen berechnet [1, 2]:

$$k = \frac{k_f}{\sqrt{3}}. \quad (2.10)$$

Fließkurven (siehe Abbildung 2.1 (a)) werden in der Umformtechnik zur Charakterisierung des Umformverhaltens eines Werkstoffes herangezogen. Die Fließkurve ergibt sich aus der Darstellung der Fließspannung k_f über dem Umformgrad φ und ermöglicht eine Aussage über die Werkstoffverfestigung durch den Umformprozess. Sie bildet die Grundlage für die Berechnung umformtechnischer Zielgrößen, wie erforderliche Umformkräfte, Energien, Leistungen und auch örtlicher Größen wie Spannungen, Formänderungen und Temperaturen [1, 3].

Um die nach verschiedenen Verfahren ermittelten Fließkurven miteinander vergleichen zu können, werden die in den jeweiligen Verfahren auftretenden Spannungen und Formänderungen auf die Vergleichsspannung und den Vergleichsumformgrad umgerechnet [1, 3]. Da die Fließspannung als Werkstoffgröße vom Verfahren der Ermittlung unabhängig ist, müssten theoretisch alle Prüfverfahren für denselben Werkstoff dieselbe Fließkurve liefern. In der Praxis ergeben sich jedoch erhebliche Unterschiede in den einzelnen Kurvenverläufen. Deshalb sollten in der Simulation die Spannungen und Umformverhältnisse möglichst dem tatsächlichen Umformprozess entsprechen.

Der Kurvenverlauf im *Spannungs-Dehnungs Diagramm* (siehe Abbildung 2.1 (b)) wird durch den Zugversuch mit einer genormten Werkstoffprobe ermittelt. Die Ordinatenwerte der (fiktiven) Spannung σ , bezogen auf den Ausgangsquerschnitt A_0 der Probe, werden gegen die Längenänderung, d.h. der Dehnung ε entlang der Probenlängsachse, aufgetragen. Die Spannungs-

Dehnungs-Kurve beginnt mit einem geradlinigen Anstieg, dem so genannten Hook'schen Bereich. Für diesen Bereich gilt der lineare Zusammenhang:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (2.11)$$

Im Anschluss an die Hook'sche Gerade stellt sich ein plastischer Bereiche ein. Beim Kurvenhöhepunkt kommt es zu einer Probeneinschnürung und zum Abfall der Kurve [4].

Die Abbildung 2.1 vermittelt den Unterschied zwischen der oben beschriebenen Fließkurve und dem im Maschinenbau geläufigen Spannungs-Dehnungs Diagramm.

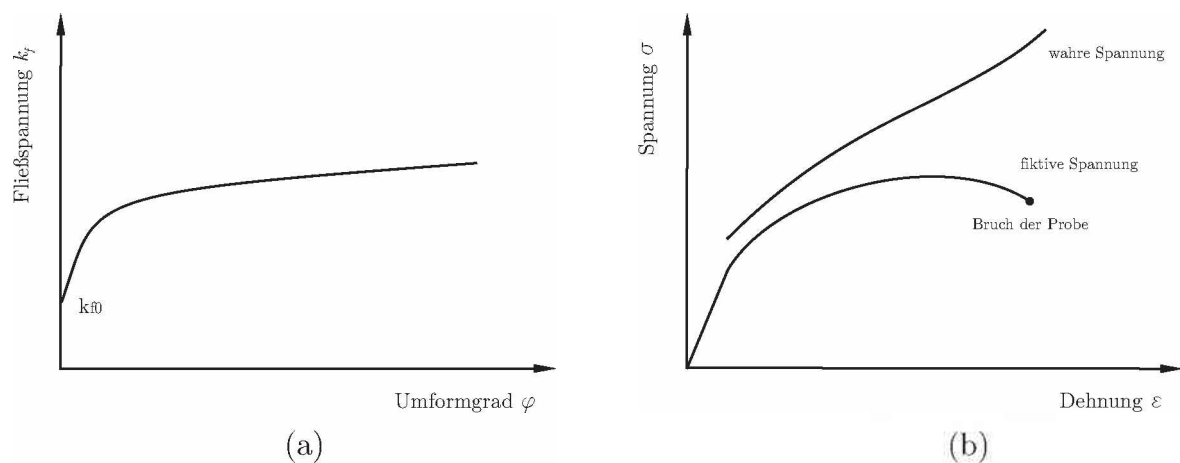


Abbildung 2.1: (a) Fließkurve: In Abhängigkeit des Werkstoffes und seiner Eigenschaften, sowie von den äußeren Parametern, wie Temperatur, Umformgrad und der Umformgeschwindigkeit, ergeben sich unterschiedlichste Fließkurven, die sich auf den aktuellen Probenquerschnitt beziehen [3]. (b) Spannungs-Dehnungs Diagramm: Im Unterschied zur Darstellung der Fließkurve setzt sich der Kurvenverlauf aus einem elastischen und einem plastischen Teil zusammen. Die Spannungsberechnung σ bezieht sich auf den Ausgangsquerschnitt A_0 der Probe (fiktive Spannung). Die wahre Spannung σ_w errechnet sich aus dem momentanen Querschnitt A der in der Probe vorherrscht [5].

Im Gegensatz zum Fertigungstechniker bzw. Umformtechniker benötigt der Konstrukteur das Spannungs-Dehnungs-Diagramm, da ihn vorwiegend das elastische Werkstoffverhalten interessiert. Für den Umformtechniker hingegen ist die Fließkurve eines Werkstoffes ausschlaggebend.

2.1.2 Versuche zur Ermittlung von Fließkurven

Die ideale Fließkurve stellt die Fließspannung k_f als Funktion des Umformgrades φ bei konstanter Umformgeschwindigkeit und Temperatur dar. Die Forderung nach einer konstanten Umformgeschwindigkeit verlangt oft nach einer variablen Werkzeuggeschwindigkeit, da sich bei der Prüfung meist die Probengeometrie und somit der Umformgrad ändert (z.B. Zugversuch oder Stauchversuch).

Beim *Zugversuch* werden Rund- oder Flachproben in Längsrichtung durch kontinuierlich steigende Zugkräfte bis zum Bruch der Probe belastet. Die dabei auftretende Zugkraft und die Dehnung der Probe werden bis zum Versagen der Probe gemessen. Die Spannung σ im Querschnitt und der Umformgrad φ können dadurch ermittelt werden. Die einfache Versuchsanordnung wird nicht durch etwaige unerwünschte Reibungseinflüsse gestört und konstante Umformgeschwindigkeiten lassen sich leicht durch servohydraulisch bzw. servoelektrisch gesteuerte Anlagen bewerkstelligen. Diese Art der Werkstoffprüfung ist jedoch nur auf geringe Umformgrade beschränkt, da nur im Bereich der Gleichmaßdehnung ein einachsiger Spannungszustand vorliegt [1, 3].

Der *Zylinderstauchversuch* wird an einer schlanken, zylindrischen Probe durch Aufbringen von Druckkräften in Richtung der Zylinderachse durchgeführt. Ähnlich wie beim Zugversuch werden Stauchkraft und der Weg der Stauchwerkzeuge aufgezeichnet und dadurch der Umformgrad ermittelt. Bei der Durchführung ist auf eine ausreichende Schmierung zwischen Werkzeug und Probenzylinder zu achten, um Versuchsverfälschungen durch Reibung möglichst gering zu halten. Weiters sollte das Höhen-Durchmesserverhältnis der Probe zwischen 1,6 bis 2,0 liegen, um das Knicken einer zu schlanken Probe zu verhindern [1, 3].

Der *Flachstauchversuch* wird bei einer plattenförmigen Probe durchgeführt, die durch zwei schmale, rechteckige Stempelwerkzeuge belastet wird (siehe Abbildung 2.2). Die Fließkurve wird aus Stauchkraft und Werkzeugweg ermittelt [1, 3].

Beim *Torsionsversuch* wird ein zylindrischer Probestab um seine Längsachse bis zum Bruch der Probe tortiert, dabei wird das dafür benötigte Drehmoment M_t in Abhängigkeit vom Verdrehwinkel Θ ermittelt. Aus diesen beiden aufgenommenen Größen lässt sich der Fließkurvenverlauf bestimmen. Vorteil des Verdrehversuches ist die Möglichkeit, den Versuch bei hohen Umformgraden und Umformgeschwindigkeiten durchzuführen. Weiters kommt es zu keinen unerwünschten Reibungseinflüssen zwischen dem Werkzeug und der Probe. Nachteilig wirkt sich die Tatsache

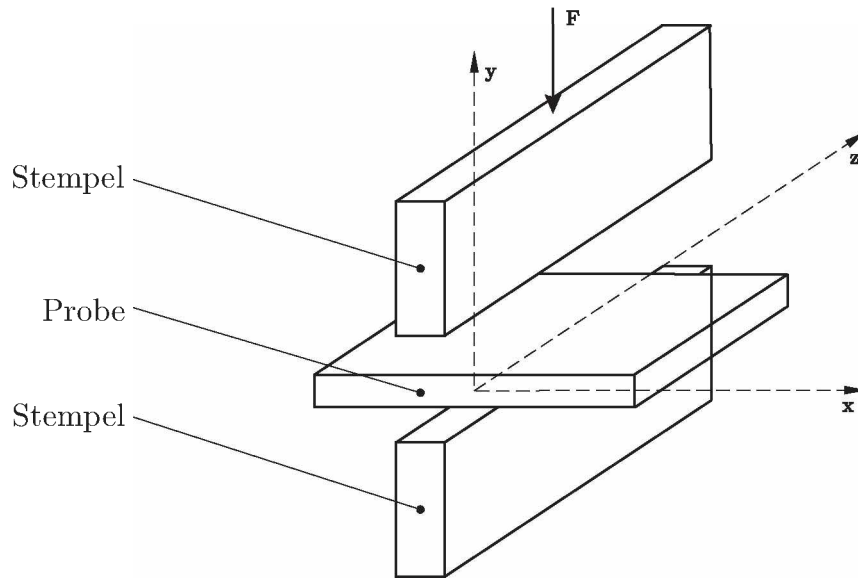


Abbildung 2.2: Flachstauchversuch: Die plattenförmige Probe wird mittels zweier schmaler, rechteckiger Stempel belastet. Die Fließkurve wird rechnerisch aus Stauchkraft und Stempelweg ermittelt [1, 3].

aus, dass beim Torsionsversuch der Umformgrad von der Probenmitte zum Rand hin zunimmt, d.h. mit zunehmender Verdrehung weitet sich die plastische Randzone zum elastischen Probeninneren hin aus [1, 3].

2.1.3 Ermittlung von Fließkurven durch die Torsionsprüfung

Bei der Auswertung des Torsionsversuches ergeben sich, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, folgende geometrische Zusammenhänge:

$$R \cdot \Theta = \gamma_R \cdot l \Rightarrow \gamma_R = \Theta \cdot \frac{R}{l} \quad (2.12)$$

Für das zur Verdrehung nötige Drehmoment M_t ergibt sich der nachstehende Ansatz unter der Annahme eines ideal plastischen Materialverhaltens (k =konstant):

$$dM_t = F \cdot r = \tau \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \cdot r \cdot dr = \tau \cdot 2 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot dr, \quad (2.13)$$

$$M_t = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^R \tau(r) \cdot r^2 \cdot dr \Rightarrow \quad (2.14)$$

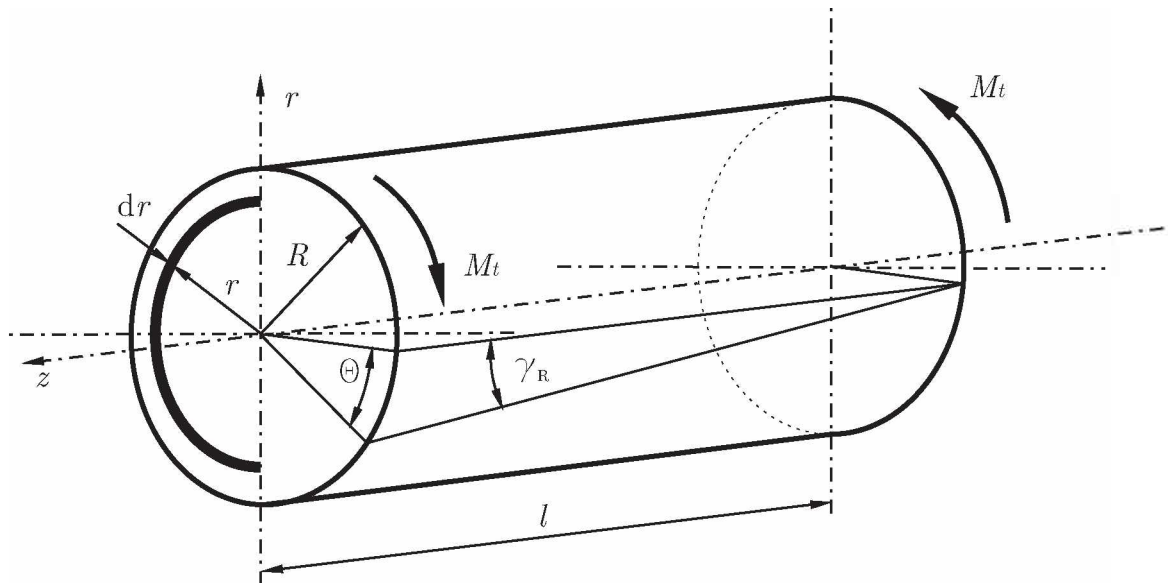


Abbildung 2.3: Torsionsprobe: Graphische Darstellung der geometrischen Zusammenhänge bei einer Torsionsprobe.

$$M_t = \frac{2 \cdot \pi \cdot \tau \cdot R^3}{3}. \quad (2.15)$$

Durch Umformung dieser Gleichung erhält man:

$$\tau = \frac{3 \cdot M_t}{2 \cdot \pi \cdot R^3}. \quad (2.16)$$

Durch diese Gleichung ist ein einfaches Auswerten des Verdrehversuches möglich. Da beim Verdrehversuch im Probenquerschnitt keine Normalspannungen auftreten, gilt für die Vergleichsspannung und die logarithmische Formänderung nach von Mises [1, 3, 6–8]:

$$\sigma_{V,M} = k_f = \sqrt{3} \cdot \tau, \quad (2.17)$$

$$\varphi_{V,M} = \frac{\gamma_r}{\sqrt{3}}. \quad (2.18)$$

2.1.4 Allgemeine Anforderungen an eine Torsionsprüfanlage

Die Anforderungen an eine Torsionsprüfanlage lassen sich in zwei Teilbereiche unterteilen:

1. die maschinenbaulichen und
2. die messtechnischen Anforderungen.

Aus maschinenbaulicher Sicht muss der Antrieb der Anlage über ein ausreichendes Drehmoment verfügen. Das Drehmoment muss von Anfang der Messung an bereitgestellt werden können. Weiters bedarf es einem breiten Drehzahlfeld, um den Versuch mit einem ausreichend großen Spektrum an Umformgeschwindigkeiten durchführen zu können.

Die Anforderung an die Messtechnik besteht in der Ermittlung des Verdrehwinkels Θ bis zum Bruch der Probe und der Erfassung des Torsionsmoments M_t der Probe. Weiters ist eine Messfrequenz von mindestens 200 Hz erforderlich.

2.2 Reibschweißen

2.2.1 Technologie des Reibschweißens

Die Technologie des Reibschweißens zählt zu den Pressschweißverfahren, wobei die dazu nötige Energie durch Reibungskräfte und Druck aufgebracht wird. Der Reibschluss wird durch die Plastifizierung und durch örtliches Verformen der Fügeteile erreicht [9, 10].

Der Reibschweißprozess dient zum Herstellen einer nichtlösbaren, dauerhaften Verbindung von üblicherweise rotationssymmetrischen Metallproben. Die Verbindung zwischen gleichen oder auch verschiedenen Metallen wird durch Einbringung von Reibungswärme, die eine Plastifizierung beider Metalle hervorruft, und durch das spontane Aufbringen von Druckkraft mit abrupter Abkühlung erreicht [9–11].

Durch das Pressschweißverfahren ist es möglich, eine homogene und ganzflächige Schweißverbindung ohne Zuhilfenahme von weiteren Zusatzwerkstoffen herzustellen. Außerdem sprechen kurze Schweißzeiten zwischen den Fügeteilen und eine gute Qualität der Schweißnaht für dieses Verfahren.

Nachteilig wirkt sich das Auftreten eines Schweißwulstes aus, der in weiterer Folge spanend nachbearbeitet werden muss. Dadurch ergibt sich zusätzlich zu den hohen Investitionskosten einer Reibschweißanlage ein unerwünschter Materialverlust [9–11].

2.2.2 Prozessphasen des Reibschweißens

Der Reibschweißprozess lässt sich in vier Hauptphasen sowie in eine Vorbereitungs- und eine Nachbearbeitungsphase unterteilen. In der Vorbereitungsphase können die zu verschweißenden Metallteile ohne besondere Vorbehandlung oder Reinigung der Fügeflächen in die dafür vorgesehenen Spannvorrichtungen, im Allgemeinen Drei- oder Vierbackenspannfutter, aufgenommen werden [9, 10, 12, 13].

Die vier Hauptphasen des eigentlichen Schweißprozesses lassen sich, wie in Abbildung 2.4 erläutert, wie folgt beschreiben [9, 12–14]:

1. Im ersten Prozessschritt wird eines der beiden Metallteile auf die gewünschte Drehzahl beschleunigt. Zeitgleich beginnt die Zustellung des anderen Teils in axialer Richtung.
2. In dieser Phase findet die erste Berührung der Fügeflächen statt. Aufgrund der Relativbewegung zwischen den Fügeteilen und dem Druckanstieg durch die axiale Zustellung kommt es zu einem Temperaturanstieg in den beiden Berührflächen.
3. Das Material wird durch die Reibungswärme plastisch und weicht unter dem anstehenden Druck zur Seite aus. Dadurch kommt es zur Bildung eines Schweißwulstes und zu einer Längenreduktion der beiden Teile. Nach ausgiebigem und homogenem Energieeintrag erfolgt ein abruptes Abbremsen der Spindel bis zum Stillstand.
4. Bei stillstehender Spindel werden die Teile unter erhöhtem Druck zusammengepresst und die Materialtemperatur sinkt kontinuierlich ab. Am Ende des Prozesses fällt die Temperatur der Schweißnaht gegen Raumtemperatur und die Schweißteile sind fest miteinander verbunden.

Sollte aus konstruktiven oder optischen Gründen die Forderung nach einer ebenen Oberfläche ohne Schweißnahtüberhöhung (Schweißwulst) bestehen, muss der ausgebildete Wulst spanend in der Nachbearbeitungsphase überarbeitet werden [12].

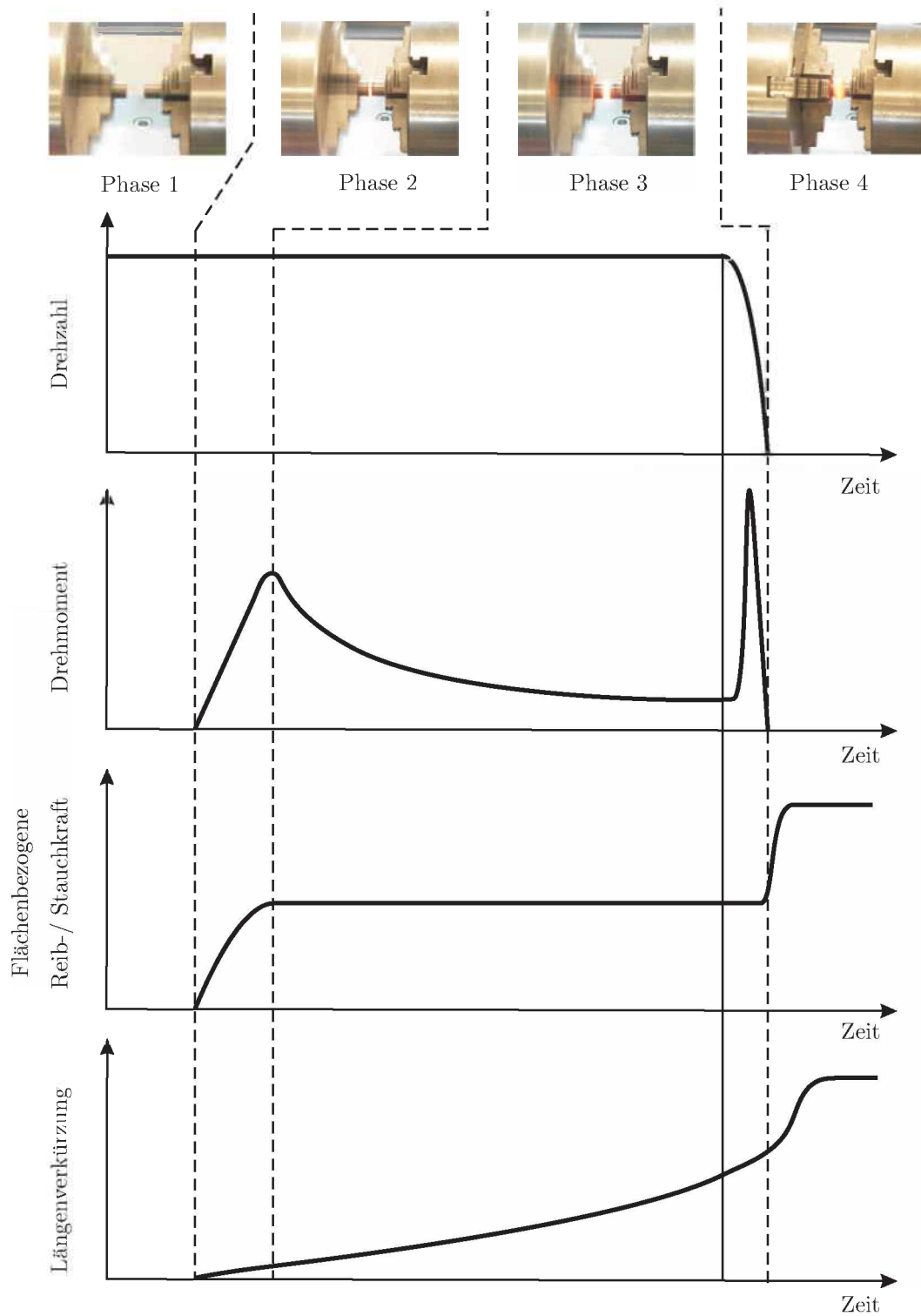


Abbildung 2.4: Reibschweißprozess: Zusätzlich zur graphischen Veranschaulichung der 4 Prozessphasen des Reibschweißens spiegelt dieses Diagramm die Drehzahl, das Drehmoment, die flächenbezogene Reib-/Stauchkraft, sowie die Längenverkürzung der beiden Probenlängsachsen über die Zeit wider [9, 12, 14].

2.2.3 Einteilung der Reibschweißprozesse

Alle Reibschweißtechniken unterscheiden sich in der Art der Energieeinbringung, doch sie weisen in Bezug auf die Wärmeeinbringung (Prozessphase 1 und 2 des Kapitels 2.2.2) folgendes Grundprinzip auf:

1. Mindestens ein Teil der beiden Metallteile wird in Bewegung versetzt. Bei dieser Bewegung handelt es sich meist um Rotationsbewegung, außer die zu verschweißenden Teile sind nicht rotationssymmetrisch. In diesem Fall wird die nötige Energie durch eine oszillierende Reibbewegung eingebracht.
2. Das stillstehende Gegenstück wird in Richtung des bewegten gepresst, wodurch Reibungswärme entsteht, die bis zur Plastifizierung des Materials gesteigert wird.

Wie die Abbildung 2.5 zeigt, kann dieses oben beschriebene Grundprinzip der Energieeinbringung technisch in verschiedensten Varianten umgesetzt werden [12–14].

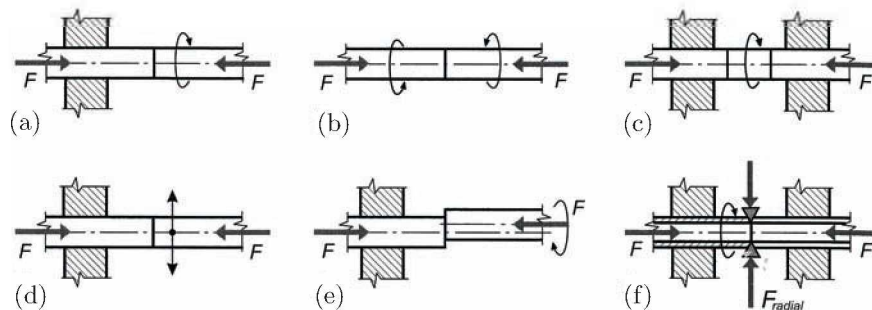


Abbildung 2.5: Unterschiedliche Möglichkeiten der Wärmeeinbringung beim Reibschweißen: (a) Rotationsbewegung eines Bauelements; (b) gegenläufige Rotationsbewegung; (c) zwei Probenhälften werden gegen ein separat rotierendes Zwischenstück gepresst; (d) durch oszillierende Reibbewegungen; (e) durch exzentrische Reibbewegung; (f) Radialreibschweißen [10].

2.2.4 Einteilung der Reibschweißanlagen

Reibschweißanlagen werden vom mechanischen Aufbau her gesehen in zwei Gruppen unterteilt, die sich im Antrieb unterscheiden:

- Reibschweißanlagen mit kontinuierlichem Antrieb und
- Reibschweißanlagen mit variabel gesteuertem Antrieb.

Die Abbildung 2.6 zeigt den schematischen Aufbau einer Reibschweißanlage mit kontinuierlichem Antrieb und den entsprechenden Komponenten. Die Drehzahlvorgabe (siehe Abbildung 2.4) in der Startphase wird durch ein Getriebe mit einer Kupplung eingestellt. In der Abbremsphase dient zur Drehzahlsteuerung eine Bremsanlage. In Hinblick auf die zuvor angesprochene Wärmeeinbringung entspricht der Maschinentyp der Reibschweißtechnik in Abbildung 2.5 (a) [10, 12, 13].

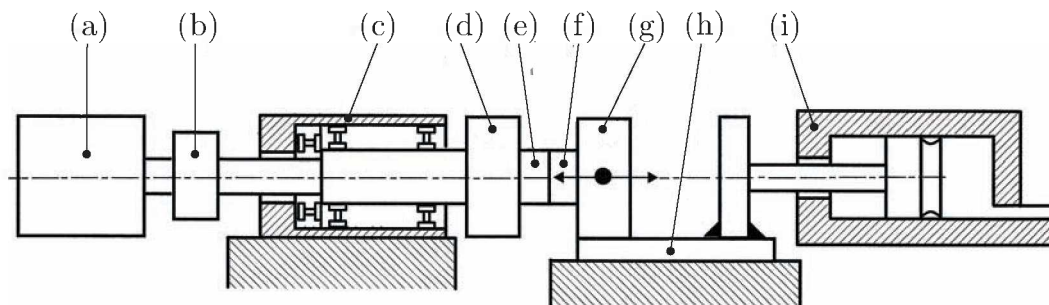


Abbildung 2.6: Schematischer Aufbau einer Reibschweißanlage: (a) Motor; (b) Kupplung mit Bremse; (c) Spindelkopf; (d) Spannvorrichtung für rotierendes Probenteil; (e) zylindrische Probe rotierend, (f) zylindrische Probe feststehend; (g) Spannvorrichtung für den feststehenden Probenteil; (h) Schlitten; (i) Hydraulikzylinder für die Axialverschiebung [10].

Durch den technischen Fortschritt bietet sich heute die Möglichkeit einer variablen Drehzahlsteuerung (z.B. durch den Einsatz eines Servomotors in Verbindung mit einem Servoumrichter). Die genaue Vorgabe der Drehzahl bietet eine bestmögliche Prozesssteuerung bei kontinuierlicher Qualität [14, 15].

3 Aufgabenstellung

3.1 Pflichtenheft

In erster Linie stand bei Auslegung und Konstruktion der Anlage die kombinierte Verwendbarkeit als Torsionsprüf- und Reibschweißanlage im Vordergrund. Großer Wert wurde auf die Automatisierung und die Variabilität der Prozessparameter gelegt.

Als Probengeometrie wurde sowohl für den Torsionsprüf- als auch für den Reibschweißprozess eine zylindrische Rundprobe vorgesehen. Laut Vorgabe ist ein Durchmesser d der Proben von 10 mm bei der Torsionsprüfung und ein maximaler Durchmesser d von 20 mm bei der Reibschweißanwendung vorgesehen.

Um beim Torsionsversuch auch Warmtorsionskurven messen zu können, wurde eine induktive Erwärmung gefordert. Weiters musste die Anlage über eine automatisierte Kühlanlage verfügen, um an der Torsionsprobe das „Einfrieren“ des metallischen Gefüges zu ermöglichen. Auch beim Reibschweißprozess wurde im Bedarfsfall eine Kühlung der Probe im Bereich der Schweißnaht gewünscht.

Die Aspekte der Umsetzung der Maschinenrichtlinie (MRL) und der Maschinensicherheitsverordnung (MSV) waren von Anfang an in die Konzeption und Konstruktion der Anlage einzubeziehen. Ziel der Einhaltung dieser Verordnungen war eine CE-Kennzeichnung der Maschine. Zusätzlich zur Einhaltung der gesamten Sicherheitsverordnungen wurde eine ergonomische Konstruktion angestrebt.

Anschließend an die Auslegungs- und Konstruktionsphase war die Projektabwicklung mit der Vergabe der Fertigungsaufträge an private Unternehmen Teil der Arbeit. Die Montage der Anlage hatte am Lehrstuhl für Umformtechnik der Montanuniversität Leoben zu erfolgen. Die Inbetriebnahme und die Automation wurden institutsintern vorgenommen. In die Arbeit waren eine technische Dokumentation der Projektdaten und die Erstellung einer Betriebsanleitung der Anlage miteinzubinden.

3.2 Lastenheft

Aus Recherchen und Vergleichen mit bestehenden Anlagen, die für die Torsionsprüfung oder die Reibschweißtechnologie ausgelegt waren, ergaben sich die nachstehenden Berechnungen zur Anlagenauslegung:

Für die *Torsionsprüfung* wurde eine Probenlänge l von 50 mm und ein Probendurchmesser d von 10 mm als Probengeometrie (siehe Abbildung 2.3) vorgegeben.

Weiters wurde eine Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ von mindestens 20 s^{-1} gefordert. Wenn man von einem Durchmesser von 10 mm ausgeht, ergibt sich für die vorgegebene Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ eine erforderliche Drehzahl von:

$$n = \frac{\dot{\varphi} \cdot l \cdot 60}{\pi \cdot r} = 3819,71 \text{ min}^{-1}. \quad (3.1)$$

Bei der Berechnung der Schubfließspannung ging man von der Nickel-Basis-Legierung L306 (Werkstoffnummer 2.4631, Zusammensetzung NiCr20TiAl) als Probenmaterial mit einer Fließspannung k_f von 624 N/mm^2 aus. Daraus ergibt sich nach Tresca die Schubfließspannung k von:

$$k = \frac{k_f}{2} = 312 \text{ N/mm}^2. \quad (3.2)$$

Aus der berechneten Schubfließspannung lässt sich das erforderliche Drehmoment

$$M_t = 2 \cdot \tau \cdot \pi \cdot \frac{r^3}{3} = 81,68 \text{ Nm} \quad (3.3)$$

ermitteln.

Bei der *Reibschweißanwendung* wird ein maximaler Durchmesser d von 20 mm gefordert. Weiters ist bei der Reibschweißanwendung in der Prozessphase 2 (siehe Abbildung 2.4) ein Reibdruck p_{Reib} von 120 N/mm^2 bei einem angenommenen Reibungskoeffizienten $\mu = 0,5$ vorzusehen. Für diese Art der Anwendung ergibt sich ein erforderliches Drehmoment von

$$M_t = \mu \cdot 2 \cdot p_{Reib} \cdot \pi \cdot \frac{r^3}{3} = 125,66 \text{ Nm}. \quad (3.4)$$

Die Stauchkraft F_{Stauch} , die am Ende des Reibschweißprozesses aufgebracht wird (Phase 4 in Abbildung 2.4), soll mindestens einen Druck p_{Stauch} von 400 N/mm^2 erzeugen. Bei einem Probenquerschnitt A von:

$$A = r^2 \cdot \pi = 314,16 \text{ mm}^2 \quad (3.5)$$

ergibt das eine Stauchkraft F_{Stauch} von:

$$F_{Stauch} = p_{Stauch} \cdot A = 125,66 \text{ kN.} \quad (3.6)$$

Generell geht aus diesen Berechnungen hervor, dass hinsichtlich des Drehmoments der Reibschweißprozess und in Bezug auf die Drehzahl der Torsionsversuch die bestimmenden Systemvoraussetzungen liefern.

Weitere wichtige Parameter wie Umformgrad, Versuchstemperatur, Reibdauer, Reibdruck, Stauchdruck oder Stauchzeit werden je nach Material und anderen Randbedingungen direkt dem Versuch angepasst [2, 12–15].

4 Konzeption der Anlage

4.1 Mechanisches Anlagenkonzept

In der Eingangsphase der Anlagenkonstruktion wurde ein allgemeines Anlagenkonzept erstellt, auf dem die Konstruktion und die Detailauslegung schrittweise aufbauen. Das ausgearbeitete Konzept diente zur groben Festlegung und zur Absteckung der konstruktiven Rahmenbedingungen.

Das Anlagenkonzept baut auf den Daten und Vorgaben des in Kapitel 3.1 erläuterten Pflichtenheftes und auf das in Kapitel 3.2 beschriebenen Lastenheftes auf. Weiters wurden die grundlegenden Anforderungen des Torsionsversuches (Kapitel 2.1) und die des Reibschweißprozesses (Kapitel 2.2) in das Konzept einbezogen. Die generellen Anforderungen an die Maschine wurden in der Abbildung 4.1 graphisch zu einem Black-Box-Modell zusammengefasst. Das Modell gliedert sich in folgende Einzelpunkte:

Maschinentisch Die Aufgabe des Maschinentisches ist es, der eigentlichen Prüfanlage einen stabilen Stand und dem Bediener eine ergonomische Arbeitshöhe zu bieten. Weiters bildet der Tisch den Rahmen und die Einhausung für alle zusätzlichen Nebenaggregate.

koaxiale Führung Die koaxiale Führung hat exakt nach der Längsachse der Proben zu erfolgen.

Rotationsantrieb Die Anlage muss sowohl für die Torsionsprüfung als auch für den Reibschweißvorgang mit einem Rotationsantrieb ausgestattet sein, der das benötigte Drehmoment und die geforderte Drehzahl bereitstellt.

Probeneinspannung Die Proben müssen schnell und einfach wechselbar sein.

Vorschubbewegung Über die Vorschubbewegung in axialer Richtung wird eine Stauchkraft erzeugt, die den Anpressdruck beim Reibschweißvorgang erzeugt.

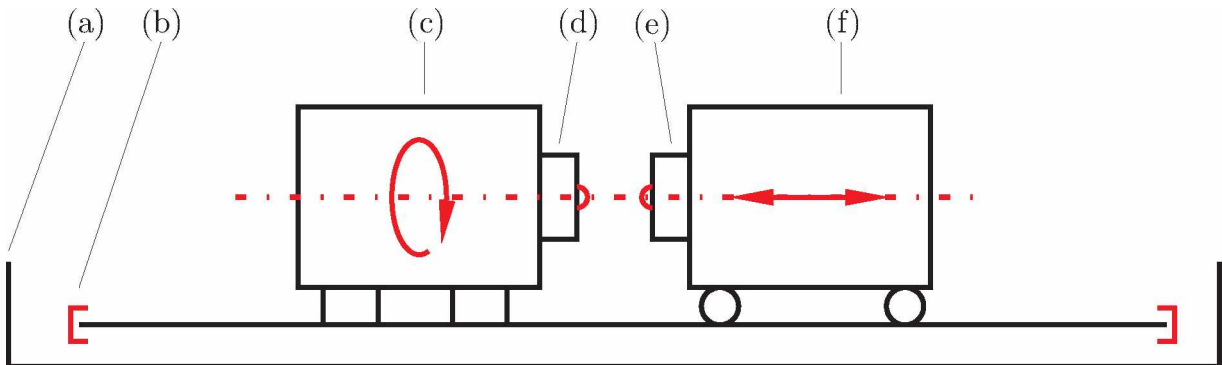


Abbildung 4.1: Black-Box-Modell der Torsions- und Reibschweißanlage: (a) Maschinentischkonstruktion; (b) koaxiale Führung; (c) Rotationsbewegung; (d) und (e) Probeneinspannung; (f) Vorschubbewegung.

4.1.1 Konzept für Rotationsantrieb

Der Antrieb für die Rotationsbewegung muss in der Lage sein, für den Torsionsversuch und den Reibschweißprozess folgende Punkte zu erfüllen:

- Das nötige Drehmoment M_t für die Herstellung einer Reibschweißverbindung muss aufgebracht werden können.
- Der Antrieb muss in der Lage sein, das geforderte Drehmoment und die gewünschte Drehzahl innerhalb von 0,5 s zu erreichen.
- Der Torsionsversuch muss bei konstanten Umformgeschwindigkeiten $\dot{\varphi}$ durchführbar sein.
- In den Prozessphasen 1-4 (siehe Abbildung 2.4) des Reibschweißens muss es möglich sein, dass die Regelung der Drehzahl nach einer exakten und vordefinierten Drehzahlkurve erfolgt.
- Der Antrieb muss für beide Anwendungen voll automatisierbar sein können; eine Integration in eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) muss möglich sein.

Zur Erzeugung der Rotationsbewegung stehen prinzipiell drei Antriebsvarianten zur Auswahl:

- Verbrennungskraftmaschine bestehend aus einem Otto- oder einem Dieselmotor, der in Verbindung mit einem Getriebe steht,

- hydraulischer Antrieb umgesetzt durch Hydromotor und
- elektrischer Antrieb mittels Elektromotors.

Der kraftstoffbetriebene *Verbrennungsmotor* bietet in Bezug auf Drehmoment und Leistung genügend Potential. Schwachpunkte weist diese Antriebsvariante in der Start- und bei der Abbremsphase auf. Der Motor kann in der Startphase nicht von Anfang an das benötigte Drehmoment und die gewünschte Drehzahl aufbringen. In der Abbremsphase agiert der Antrieb zu träge. Um trotzdem die Versuche mit dem vorgeschriebenen Drehmoment und der Drehzahl starten zu können, wäre der Einbau einer Kupplung erforderlich. Der Auslaufvorgang des Verbrennungsmotors könnte mit einer Bremse verkürzt werden. Neben den Problemen des Start- und Haltevorganges und der Automatisierbarkeit bereitet die Abgasentsorgung weitere Komplikationen [16].

Der Einsatz eines *Hydromotors* ist an eine Hydraulikflüssigkeitsversorgung durch eine Pumpe gebunden. Durch die Vermeidung der Abgasproblematik und seiner Folgen kann nur eine Elektropumpe zur Versorgung eingesetzt werden. Die Drehzahl- und die Drehmomentsteuerung können auf drei Arten bewerkstelligt werden: Die erste Möglichkeit besteht aus einem herkömmlichen Hydromotor mit einer Elektropumpe. Hierzu muss das System mit Servoventilen ausgestattet werden. Die anderen beiden Möglichkeiten bestehen in der Verwendung eines Hydromotors mit Verstellpumpe oder eines Servomotors und eines Servoumrichters. Eventuell muss zusätzlich für die Ausführung des Stoppvorganges die Maschine mit einer Bremsanlage ausgerüstet werden [17, 18].

Ein herkömmlicher *Elektromotor* weist beim Ansprechverhalten, d.h. bei der Drehmoment- und bei der Drehzahlentwicklung, und besonders im Auslaufvorgang Schwächen auf. Das träge Verhalten kann jedoch durch die Verwendung eines Servomotors in Kombination mit einem Servoumrichter, der im permanenten Kontakt über eine Resolverleitung zum Servomotor steht, verhindert werden. Durch die Kombination Servomotor und Servoumrichter ist eine exakte Steuerung und Automation gewährleistet. Weiters würden zusätzliche Bauteile, wie Kupplung und Bremse entfallen [5, 16, 19].

Durch die genannten Vorzüge des elektrischen Antriebs mit einem Servomotor und durch positive Erfahrungen im Vorfeld fiel die Auswahl auf diese Variante. Die Firma *Lenze GmbH* stellte konkret für diese Anlage eine Komponentenkombination zusammen, die aus dem Servomotor QD13.3-4FR-Resolve TS265 der Firma *OSWALD REGELBARE ELEKTROMOTOREN* und

dem Servoumrichter 9300 der Firma *Lenze GmbH* bestand.

4.1.2 Konzept für die axiale Druckaufbringung

Die Wärmeeinbringung beim Reibschweißprozess (siehe Abbildung 2.4) wird durch Relativbewegungen zwischen den Fügeflächen und durch aufgebrachte Druckkraft auf diese Flächen bewerkstelligt. Nach dieser Plastifizierungsphase findet der eigentliche Fügeprozess unter einem abrupten Druckkraftanstieg statt. Um diese zwei Druckstufen erzeugen zu können, muss ein axialer Vorschub entlang der Längsachsen der Proben möglich sein. Diese axiale Verschiebemöglichkeit bietet zusätzlich höheren Komfort bei der Probeneinspannung, da der Arbeitsraum für den Bediener vergrößert wird [12–15].

Zum Anforderungsprofil des Antriebes der axialen Vorschubbewegung zur Aufbringung der Druckkraft gehören jene Punkte:

- genaue Regelung des Anpressdruckes und
- zwei umschaltbare und vordefinierte Druckstufen.

Um eine hohe Prozessqualität und Präzision bei der Druckkraftaufbringung, d.h. bei der Vorschubbewegung zu gewährleisten, stehen für die technische Ausführung einer exakten und stabilen Axialbewegung folgende zwei Antriebsvarianten zur Auswahl:

- elektrischer Antrieb durch einen Spindeltrieb oder ein
- hydraulischer Antrieb mit einem Hydraulikzylinder.

Für die Ausführung mit einem *elektrischen Spindeltrieb* sprechen im Allgemeinen der geräuscharme und gedämpfte Lauf, sowie die kompakte und solide Ausführung. Negativ wirkt sich die Gleitreibung zwischen den Zahnflanken aus, die einen stärkeren Verschleiß, eine höhere Verlustleistung und dadurch einen geringeren Wirkungsgrad verursachen. Gegen einen generellen Antrieb durch einen gesteuerten Elektromotor spricht nichts. Nur bedarf es bei einem Stillstand unter Last bei einem Spindeltrieb einer permanenten Haltekraft. Diese Haltekraft mit einem

Elektromotor zu erzeugen ist technisch nicht realisierbar [5, 19].

Dem gegenüber steht ein *Hydraulikzylinder*, der von einer elektrischen Hydraulikpumpe versorgt wird. Die Steuerung des Zylinders kann entweder über Servoventile, einer Verstellpumpe oder mit einem Motor samt Umrichter bewerkstelligt werden [5, 17–19].

Obwohl der Hydraulikzylinder in Kombination mit Motor und Umrichter die teurere Variante ist, fiel die Wahl auf die Hydraulikanlage, da höhere Druckkräfte erreicht werden können und das Problem der Haltekraft, wie beim Schneckengetriebe, nicht gegeben ist. Bei der Ausführung der Linearbewegung wurde auf die Komplettlösung der Firma *Eibl Hydraulic & Drives OEG* zurückgegriffen. Die Hydraulikanlage bestehend aus dem E-Motor 100LB-4 der Firma *ELVEM*, einer Zahnradpumpe, einem 16 Liter Öltank mit Rücklauffilter, einem 4/3 Wege Ventil, sowie Druckbegrenzungsventil. Zur Motorsteuerung wurde ein Frequenzumrichter mit Frequenzfilter eingesetzt. In der Abbildung 4.2 ist der Hydraulikplan abgebildet, der die Verschaltung der angegebenen Einzelkomponenten darstellt.

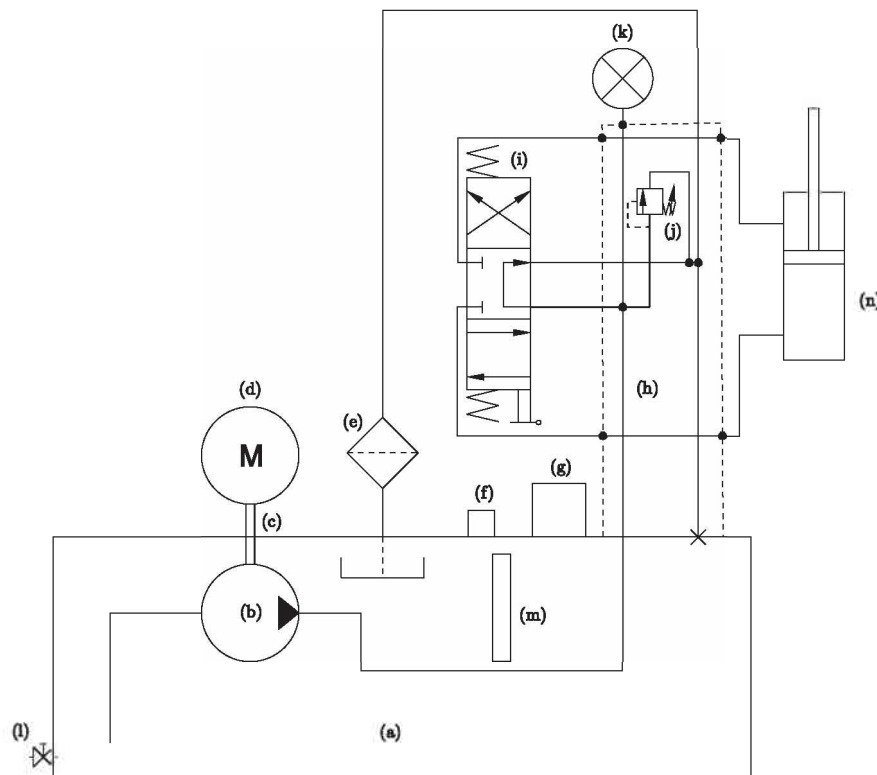


Abbildung 4.2: Hydraulikplan: Die Hydraulikanlage wurde wie im Plan dargestellt angeschlossen und besteht aus folgenden Teilen: (a) Tank 16 Liter; (b) Zahnradpumpe; (c) Kuppelung; (d) Elektromotor; (e) Rücklauffilter; (f) Niveauschalter; (g) Einfüll- und Entlüftungsfilter; (h) Grundplatte; (i) 4/3 Wegeventil; (j) Druckbegrenzungsventil; (k) Manometer; (l) Ablasskugelhahn; (m) Ölstandsanzeige; (n) doppeltwirkender Hydraulikzylinder.

4.1.3 Konzept für das Axialführungssystem

Da eine axiale Führung der Proben für das Aufbringen der Druckkraft notwendig ist, hat das Axialführungssystem die Aufgabe, eine koaxiale Führung der Probekörper zu gewährleisten. Anforderung an das Axialführungssystem:

- hohe Führungsgenauigkeit,
- Leichtgängigkeit und geringe Reibungsverluste und
- hohe Stabilität gegen die auftretenden Momente.

Zur Umsetzung der oben genannten Anforderungen wurden zwei Konstruktionsvarianten näher ausgearbeitet:

- Führung über ein Schienensystem und
- Führung über ein Säulengestell.

Für ein *Schienensystem* sprechen hohe Präzision der Linearführung und exzellente Laufruhe durch geringe Reibungsverluste. Negativ wirken sich sehr hohe Anschaffungskosten und die mangelnde Fähigkeit Momente aufzunehmen auf diese Konstruktionsvariante aus. Der Nachteil der Momentenempfindlichkeit schlägt sich außerdem auf die Festigkeit und die Stabilität des Gesamtsystems nieder [5, 19–22].

Eine *Säulenführung* ist bei Präzision und Führungsgenauigkeit mit dem Schienensystem vergleichbar. Nachteilig wirken sich allerdings die höheren Reibungswiderstände aus. In Bezug auf die Steifigkeit und die Stabilität der Konstruktion ist die Säulenvariante die bessere Lösung [5, 19–22].

Durch die Aspekte der höheren Stabilität gegenüber Momentenbelastung und der zusätzlichen Fähigkeit, die axiale Stauchkraft aufzunehmen, wurde das Säulensystem (siehe Abbildung 4.3) als Axialführungssystem gewählt. Eine horizontale Einbaulage des Säulensystems ergab sich durch die einfachere Sammlung und Ableitung der Kühlflüssigkeit als es bei einer stehenden Ausführung machbar wäre. Die koaxiale Führung der Probe im Säulensystem besteht aus einem verschiebbaren Zwischenstück. Die Hauptaufgaben des Zwischenstückes liegen in der Aufnahme

der Proben, der Drehmomentmessung und der Stauchkraftmessensorik, sowie in der Anbindungsmöglichkeit an den Hydraulikkolben.

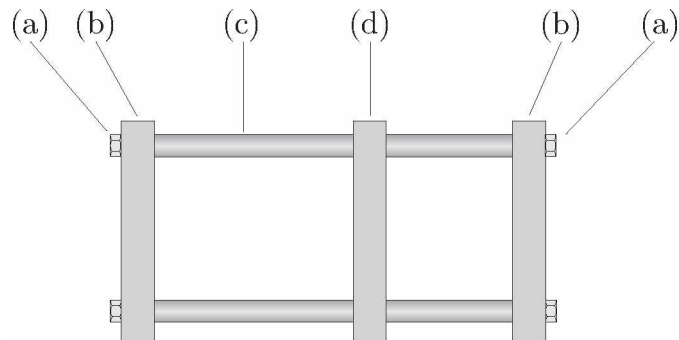


Abbildung 4.3: Säulengestell: Das Säulengestell besteht aus den Komponenten (a) Schraubenbefestigung durch Schraubenmutter; (b) Befestigungsplatte; (c) Säulen; (d) verfahrbare Zwischenplatte.

Anforderung an die Geometrie dieser Zwischenkonsole ist die biegesteife Ausführung, die auch einen möglichst großen Zugriffsraum für die Probenplatzierung bieten sollte.

Die nachstehenden Geometrievarianten wurden diesbezüglich ausgearbeitet:

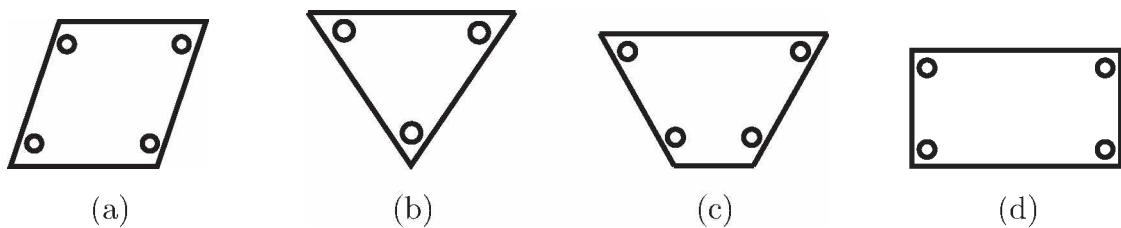


Abbildung 4.4: Geometrievarianten der Zwischenplatte: (a) rhombusförmige Platte für seitliche Bedienung; (b) Dreiecksform; (c) Trapezform; (d) rechteckige Geometrie der Platte für die Bedienung von oben.

Die Wahl der Plattengeometrie fiel auf die in Abbildung 4.4 (d) dargestellte Rechtecksform, da eine Spiegelsymmetrie auf der x- und y-Achse vorliegt, die sich positiv auf die Steifigkeit auswirkt. Außerdem wird ein ausreichend großer Arbeitsraum geboten. Zudem ist die Rechtecksform eine leicht zu fertigende Geometrie, die dadurch auch die günstigste Variante ist.

Die möglichst reibungsfreie Lagerung der verfahrbaren Mittelkonsole auf dem Säulengestell kann mit zwei Lagerungsvarianten ausgeführt werden:

- Gleitlagerung oder
- Kugellagerung.

Bei der *Gleitlagerung* werden Gleitlagerbuchsen eingeklebt und mit verschraubbaren Klemmen fixiert. Die Gleitlagerbuchsen weisen hohe Präzision und Laufruhe auf [5, 19].

Die *Kugellagerung* besteht aus gehärteten Kugeln, die spiralförmig in einen zylindrischen Käfig eingebettet sind. Die Kugellagerkäfige werden über die Führungssäulen geschoben und ermöglichen somit den Rollvorgang der beweglichen Mittelkonsole. Die Kugellager zeichnen sich durch eine robuste Ausführung und eine hohe Lebensdauer aus [5, 19].

Die Lagerung der Platte auf den Säulen des Axialführungssystems wurde mittels Kugellagern bewerkstelligt, da diese Lager verschleißfester sind als die Gleitlagerbuchsen. Ein weiterer wichtiger Vorteil liegt in dem geringeren Reibungswiderstand durch die Abrollbewegung der einzelnen Kugeln. Somit wird beim horizontalen Aufbau der Anlage eine möglichst geringe Verfälschung der Messwerte bei der Kraftmessung erzielt.

4.2 Messkonzept

Um Fließkurven aufnehmen bzw. um einen qualitativ hochwertigen Reibschweißprozess durchführen zu können, bedarf es der Aufnahme und numerischen Umsetzung folgender Prozessgrößen:

- Stauchkraftmessung F_{Stauch} [N],
- Momentenmessung M_t [Nm],
- Verdrehwinkelmessung Θ [°],
- Temperaturmessung [°C].

Die *Stauchkraft* wird mit Hilfe einer Kraftmessdose (siehe Abbildung 4.6) zwischen Hydraulikzylinderkolbenstange und der verfahrbaren Zwischenplatte gemessen. Die Stauchkraft selbst stellt

eine wichtige Prozessgröße im Reibschweißprozess dar. Einerseits ist der Stauchdruck mit der Reibbewegung für die Wärmeeinbringung verantwortlich, andererseits wird ein höherer Stauchdruck am Ende des Reibschweißprozesses für die Herstellung der Schweißverbindung benötigt. In der Kraftmessdose erfolgt durch die aufgebrachte Belastung eine elastische Verformung, die über Dehnungsmessstreifen, deren elektrischer Widerstand sich mit der Dehnung ändert, in eine Änderung einer elektrischen Spannung umgewandelt wird. Über einen Messverstärker wird die Änderung der elektrischen Spannung und damit die Längenveränderung registriert und somit auf die aufgebrachte Kraft umgerechnet.

Die Messung des *Drehmoments* wird beim Torsionsversuch benötigt und durch eine Wägezelle, wie in Abbildung 4.5 und 4.6 dargestellt, vorgenommen. Die Wägezelle misst die auf die Zelle ausgeübte Kraft und arbeitet dabei mit dem gleichen Verfahren wie die Kraftmessdose, nur unterscheidet sie sich im mechanischen Aufbau. Das Torsionsmoment M_t , das auf die Probe wirkt, lässt sich durch die Multiplikation der von der Wägezelle gemessenen Kraft F mit dem Abstand zum Drehpunkt der Probe r_t ermitteln. Im Konkreten heißt das [23]:

$$M_t = F \cdot r_t. \quad (4.1)$$

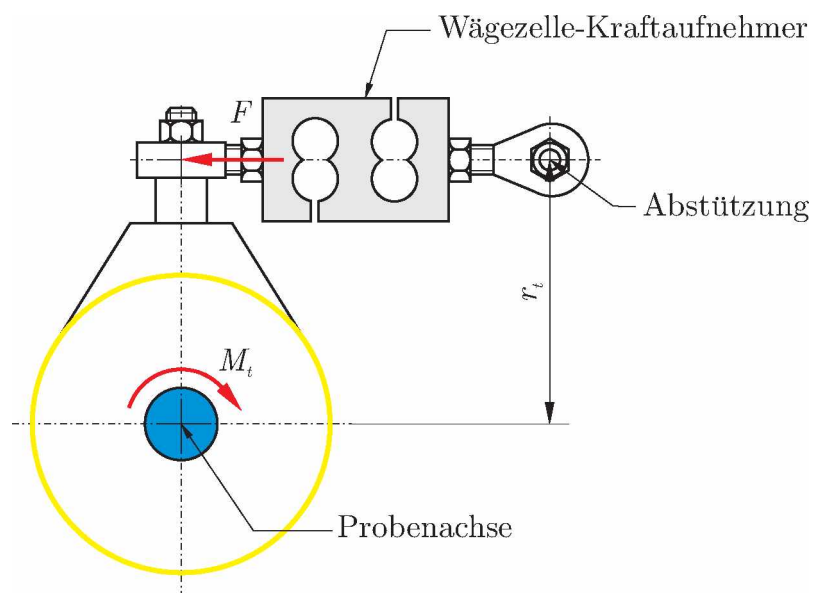


Abbildung 4.5: Momentenmessung: Das Torsionsmoment M_t , das auf die Probe wirkt, lässt sich durch den Einsatz einer Wägezelle bestimmen [23].

Der *Verdrehwinkel* Θ , der beim Torsionsversuch benötigt wird, lässt sich durch einen Drehgeber ermitteln. Der Drehgeber, der im Servomotor integriert ist, übermittelt die erforderlichen Daten über die Resolverleitung zum Servoumrichter, der die gewünschten Daten verarbeitet und ausgibt.

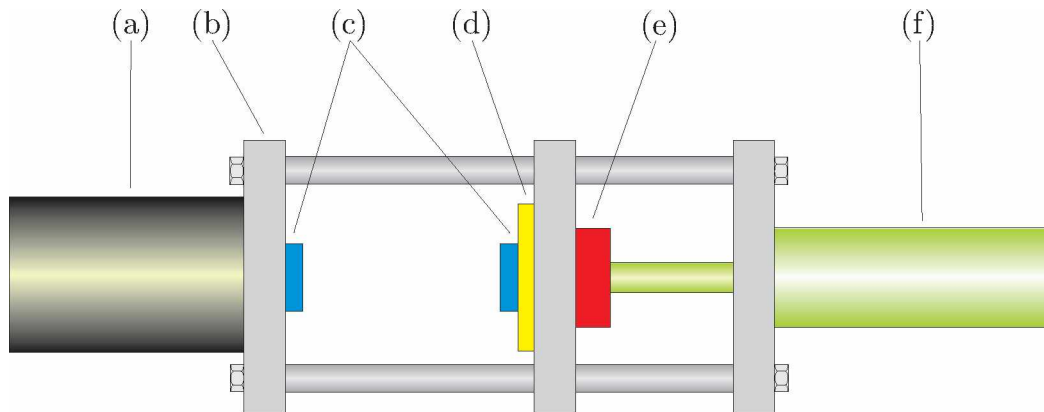


Abbildung 4.6: Messaufbau: (a) Rotationsantrieb mit integriertem Drehgeber; (b) Säulengestell; (c) Probenaufnahmen; (d) Drehmomentmesser; (e) Kraftmessdose; (f) Hydraulikzylinder.

Die Messung der *Temperatur* wird bei der Durchführung von Warmtorsionsversuchen benötigt. Bei dieser Versuchsanordnung wird der Verdrehversuch an einem gleichmäßig erwärmten Probestück durchgeführt. Dadurch können Warmfließkurven bei gewünschten Temperaturen ermittelt werden. Die Temperaturmessung selbst erfolgt durch Thermoelemente, die direkt an der Werkstoffprobe angebracht werden.

4.3 Mechanisches Sicherheitskonzept

Das mechanische Sicherheitskonzept der Anlage hat zum Ziel, Gefahren, die zu Verletzungen oder schweren Unfällen führen, im Vorfeld, d.h. schon in der Konstruktionsphase, auszuschalten.

Im Konformitätsfeststellungsprozess (siehe Kapitel 6.1) werden die angewendeten Sicherheits-

vorkehrungen im Rahmen der Sicherheitsanalyse genau erörtert und auf ihre Tauglichkeit hin untersucht. In der Konzeptphase wurde besonderes Augenmerk auf

- eine Hydraulikstempelbegrenzung und
- eine Schutzeinhausung

gelegt.

Die *Hydraulikstempelbegrenzung* verhindert Quetschverletzungen oder Abtrennungen im Bereich der Hände beim Wechseln der Proben zwischen den beiden Probenaufnahmen. Im Genaueren heißt das, dass bei voll ausgefahrenem Hydraulikstempel, der für die Axialbewegung der Probenaufnahme verantwortlich ist, ein Mindestabstand von 50 mm zwischen den Probenaufnahmen besteht.

Eine *Schutzeinhausung* der Maschine schirmt die gesamte Maschine gegenüber ihrer Umwelt ab. Der Schutz erfüllt diesbezüglich zweierlei Aufgaben: Einerseits verhindert die Abschirmung in Verbindung mit einer Sicherheitszuhaltung einen unbefugten Eingriff in den Arbeitsraum und andererseits gewährleistet sie im Betrieb Schutz vor wegspritzenden Flüssigkeiten, rotierenden Wellen oder weggeschleuderten Teilen.

5 Konstruktive Umsetzung

5.1 Aufbau des Führungssystems in Axialrichtung

Wie im Kapitel 4.1.3 beschrieben, wurde ein Führungssystem mit Säulen gewählt, auf dem eine verfahrbare, rechteckige Zwischenkonsole in axialer Richtung bewegbar ist. Mit dieser Ausführung ist beim Reibschweißen eine koaxiale Bewegung der beiden Proben möglich, wodurch der Anpressdruck geregelt wird.

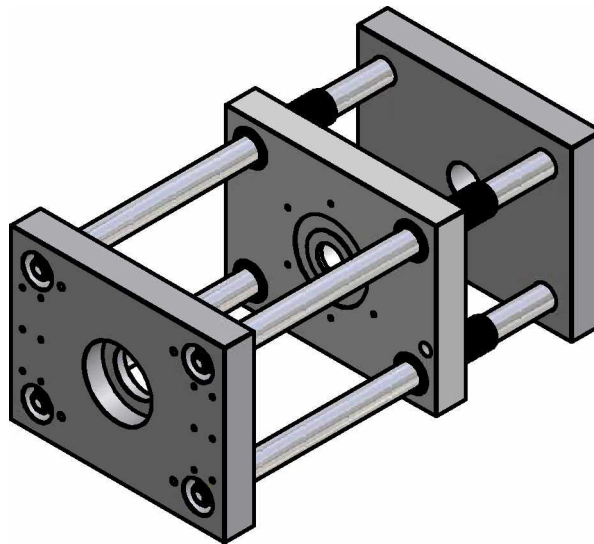


Abbildung 5.1: Axialführungssystem: Durch ein Führungssystem mit vier Säulen und einer verfahrbaren Mittelkonsole ist eine präzise koaxiale Bewegung der Proben beim Reibschweißen möglich.

Als Material der einzelnen Säulen kam der Werkstoff 1.2379 mit der Zusammensetzung X155CrVMo121 zum Einsatz. Um den Anpressdruck der Kugeln des Lagers standhalten zu können, war eine polierte Oberfläche mit einer Oberflächenhärte von ca. 60 – 62 HRC nötig [24, 25].

Der Festigkeitsnachweis wurde wie folgt laut DIN 743 durchgeführt [5, 20, 21]. Bei diesem Nach-

weis wird die vorhandene Spannung σ_{vorh} im Bauteil berechnet. Diese errechnete Spannung σ_{vorh} muss kleiner oder zumindest gleich der zulässigen Spannung σ_{zul} des jeweiligen Werkstoffes sein.

$$\sigma_{vorh} \leq \sigma_{zul} \quad (5.1)$$

Für die Betriebssicherheit wurde der Faktor S_{Dmin} mit 2 gewählt. Der Faktor 2 gewährleistet eine doppelte Sicherheit für die Konstruktion. Beim verwendeten Werkstoff stellt sich die Schwellfestigkeit bei einer Normalspannung σ_{zdSch} von 325 N/mm² [20] ein. Die Schwellfestigkeit σ_{zdSch} entspricht in diesem konkreten Fall der zulässigen Spannung σ_{zul} , die für den obigen Nachweis herangezogen wird.

$$\frac{F}{A} = \frac{4 \cdot F}{d^2 \cdot \pi} \leq \frac{\sigma_{zdSch}}{S_{Dmin}} \Rightarrow \frac{4 \cdot 120000 \text{ N}}{d^2 \cdot \pi} \leq \frac{325 \text{ N/mm}^2}{2} \quad (5.2)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 120000 \text{ N}}{\pi \cdot 162,5 \text{ N/mm}^2}} = 30,66 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Für die Konstruktion des Säulengestelles heißt das, dass pro Säule ein Durchmesser von 7,66 mm erforderlich ist, um die Axialkraft von 120 kN aufnehmen zu können. Der für die Konstruktion gewählte Durchmesser von $d = 40$ mm ist somit zulässig. Für die Einspannung der Säulen in die beiden Halterungsplatten ergeben sich zwei Konstruktionsvarianten:

- Gewindesäulen direkt in die Platten verschraubt oder
- Säulen mit Mutternverschraubung an der Rückseite.

Bei der Ausführung der Konstruktion mit *Gewindesäulen* werden die Säulen direkt wie Schraffen in Bohrungen mit Innengewinden in die Gegenplatten geschraubt. Bei dieser Variante muss ein Säulenende mit einem Rechtsgewinde und das andere Ende mit einem Linksgewinde gefertigt werden, um gleichzeitig beim Einschrauben in die beiden Platten gleichmäßigen Vorschub zu erzielen. Ein weiterer Nachteil ist der schwierige Zusammenbau, da alle vier Säulen gleichzeitig in die Halterungsplatten eingeschraubt werden müssen.

Bei der Variante der *Säulen mit Mutternverschraubung* werden die Säulen durch Zentrierbohrungen in der Gegenplatte geführt, die eine Passung von H6 aufweisen, und mit Muttern befestigt. Für diese Lösung sprechen die einfachere Fertigung und die bei weitem leichtere Montage.

Auf Grund der Montagevorteile kam die Variante mit beidseitigem Rechtsgewinde und der Verschraubung mit einer Mutter zum Einsatz.

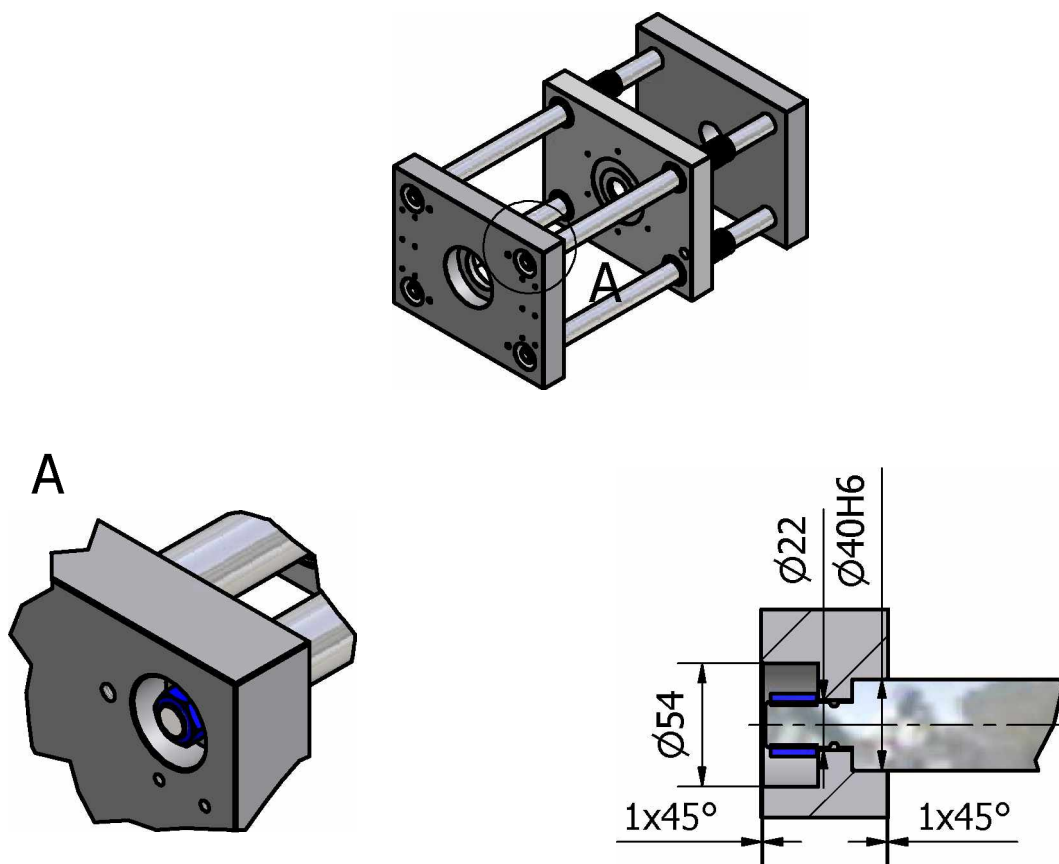


Abbildung 5.2: Befestigung der Säulen an den Grundplatten: Die vier Säulen wurden mit beidseitigem Rechtsgewinde gefertigt und mit Muttern in die Platten verschraubt.

Durch die Querschnittsverringering im Bereich des Gewindes und des Gewindeauslaufes erfolgt auf Grund der Kerbwirkung ein neuer Festigkeitsnachweis nach DIN 743 [5, 20, 21]:

Der Festigkeitsnachweis bei einer Kerbgeometrie vergleicht die maximal im Kerbgrund auftretende Spannung σ_{max} mit der für den Werkstoff zulässigen Streckgrenze $R_{p0,2}$. Die errechnete Maximalspannung σ_{max} muss kleiner gleich der jeweiligen Streckgrenze $R_{p0,2}$ sein, um der Bauteilsicherheit zu entsprechen.

$$\sigma_{max} \leq R_{p0,2} \quad (5.4)$$

Die Maximalspannung im Kerbgrund σ_{max} errechnet sich bei der Säulenkonstruktion der Anlage aus der vorhandenen Normalspannung σ multipliziert mit der Kerbformzahl α_k . Die Kerbformzahl α_k ist ein Tabellenwert, der vom Kerbgrunddurchmesser, vom Säulendurchmesser, vom Kerbradius, von der Bauteilquerschnitt und von der Belastungsart abhängig ist.

$$\alpha_k \cdot \sigma_{nenn} \leq R_{p0,2} \quad (5.5)$$

$$\alpha_k \cdot \frac{F}{A} = 2,1 \cdot \frac{4 \cdot 30000 \text{ N}}{(16,4 \text{ mm})^2 \cdot \pi} \leq 355 \text{ N/mm}^2 \quad (5.6)$$

$$298,22 \text{ N/mm}^2 \leq 355 \text{ N/mm}^2 \quad (5.7)$$

Da die maximal auftretende Spannung σ_{max} unter der Streckgrenze $R_{p0,2}$ liegt, ist der Gewindegang laut DIN 76 – 1 des M20 Gewindes der Führungssäulen zulässig [5, 20, 21].

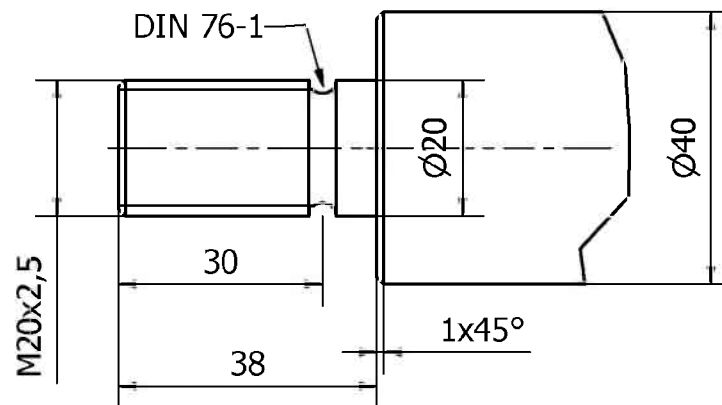


Abbildung 5.3: Gewindedetail der Führungssäule: Die Verschraubung erfolgt über ein M20 Außengewinde mit einem Gewindegang laut DIN76 – 1 [24].

Durch den Festigkeitsnachweis im Säulenquerschnitt und im Gewindegang ist die Betriebsfestigkeit der Axialführungsstruktur bewiesen.

5.2 Konstruktion der verfahrbaren Mittelkonsole

Die Hauptaufgaben der verfahrbaren Mittelkonsole liegen in:

- Aufnahmemöglichkeit und Fixierung der Probe,
- Anbindung der Momentenmessung und
- Verbindung des Hydraulikkolbens mit der Kraftmessungsvorrichtung.

Diese Anforderungen an die Mittelkonsole und deren Konstruktionsdetails werden in den nachstehenden Unterkapiteln einzeln und detailliert behandelt.

5.2.1 Konstruktive Lösung der Probenaufnahme

Die Probenaufnahme muss einen guten Halt der beiden Probenkörper garantieren, um ein Durchrutschen der Proben beim Torsionsversuch und ein Abgleiten in axialer Richtung zu verhindern. Weiters muss es dem Bediener möglich sein, ohne großen Aufwand einen zügigen und einfachen Wechselvorgang der Probenkörper durchzuführen. Auf der Basis dieser Anforderungen standen folgende fünf Aufnahmevarianten zur Auswahl:

- Keil- oder Zahnwellenverbindung,
- Klemmverbindung,
- Kegelsitz mit Selbsthemmung,
- Welle-Nabenverbindung mit Passfeder, sowie
- die Einspannung in ein Backenfutter.

Grundsätzlich sind *Keil- oder Zahnwellenverbindungen*, sowie *Klemmverbindungen* für die Probeneinspannung rein technisch gesehen möglich. Praktisch betrachtet sind Keil- oder Zahnwellenverbindungen von der Fertigung her viel zu aufwendig, da bei Untersuchungen in größerer Stückzahlen die Vorbearbeitung jeder Probe zu aufwendig wäre und daher keine Wirtschaftlichkeit gegeben ist. Bei lösbaren Klemmverbindungen, die z.B. per Hand über eine Mutter angezogen bzw. gelöst werden müssten, wäre der zeitliche Aufwand für den Bediener zu groß und zu umständlich [5].

Die Verbindungsvariante mit einem *Kegelsitz mit Selbsthemmung* findet primär bei Ständerbohrmaschinen und Fräsmaschinen bei der Werkzeugaufnahme ihre Anwendung. Vorteil dieser Konstruktionsvariante ist die schnelle Einspannung mit geringem Werkzeugaufwand und die gute Fixierung in axialer und radialer Richtung. Da aber Werkzeug und Werkzeugaufnahme einen Kegelsitz mit aufwendigen Passungen aufweisen müssen, ist diese Variante für die Probenaufnahme von Seiten der Fertigung zu unwirtschaftlich [5, 19, 24].

Die *Welle-Nabenverbindung mit Passfeder* bietet in Bezug auf die Gefahr des Durchdrehens der Probe neben der Keil- oder Zahnwellenverbindung die beste Sicherheit. Nachteil ist jedoch die spanende Vorbearbeitung jeder Probe mit einer Nut für die Passfeder. Weiters ist bei dieser Variante eine beim Reibschweißprozess unerwünschte Verschiebung in axialer Richtung möglich. Auch die Anpassung an verschiedene Durchmesser könnte nur durch speziell an den Proben-durchmesser angepasste Adapterstücke erfolgen [5, 19, 24].

Die Möglichkeit, die Einspannung mit einem *Drei- oder Vierbackenfutter*, wie bei einer Drehmaschine zu bewerkstelligen, stellt eine einfache und günstige Variante dar. Primärer Vorteil ist der rasche Probenwechsel, der unbearbeiteten Proben, der mit geringem Werkzeugaufwand durchgeführt werden kann. Zusätzlich wird der Probenkörper in axialer und radialer Richtung fixiert. Nachteilig wirken sich jedoch die schwächeren Fixierungskräfte auf die Einspannung der Proben aus [5, 19, 24].

Da beim Einsatz von einem Backenfutter die Probe weder spanend bearbeitet werden muss noch anderswertig vorbehandelt wird, fiel die Wahl auf die Variante mit einem Dreibackenfutter.

5.2.2 Detailkonstruktion zur Momentenmessung für den Torsionsversuch

Wie im Kapitel 4.2 beschrieben, wird die Momentenmessung beim Torsionsversuch mit einer Wägezellenkonstruktion durchgeführt, die auf der Mittelkonsole platziert ist [23].

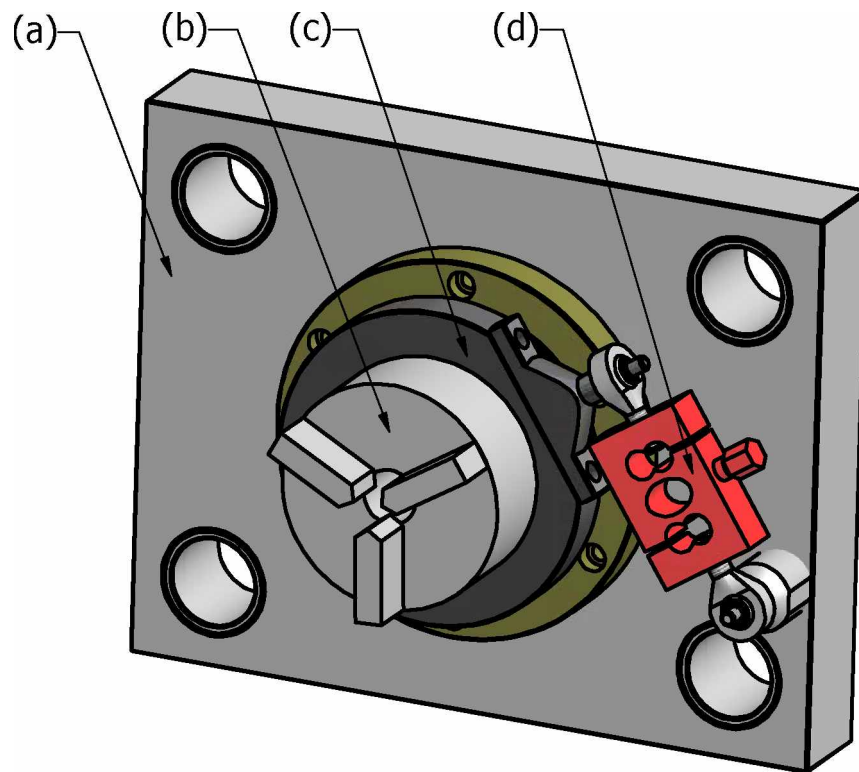


Abbildung 5.4: Torsionsmomentenmesskonstruktion: An der Mittelkonsole (a) wird das Drehmoment über das Dreibackenfutter (b), in das die Probe eingespannt wird, mittels der Welle (c) auf die Wägezelle (d) übertragen und dort in ein Messsignal umgesetzt [23].

Die Messeinheit (siehe Abbildung 4.5) ist mittels eines Adapters auf einer Welle montiert, auf dem ein Dreibackenfutter verschraubt ist, in das die Probe eingespannt wird. Die Abstützung der Wägezelle erfolgt über ein Gegenstück, das in der Mittelkonsole verschraubt wird. Um eine möglichst reibungsfreie Drehbewegung der Welle zu gewährleisten, ist diese mit einem Radialkugellager gelagert. Weiters ist zur Aufnahme der axialen Belastungen ein Axialwälzlager eingebaut, das mit einem Zentrierring fixiert wird. Zur Abdichtung der Lagereinheiten ist der Zentrierring mit einer Gummidichtung versehen. Die komplette Wellenkonstruktion mit Torsionsmomentenmesseinheit ist mit einer Mutter an der Mittelkonsole fixiert.

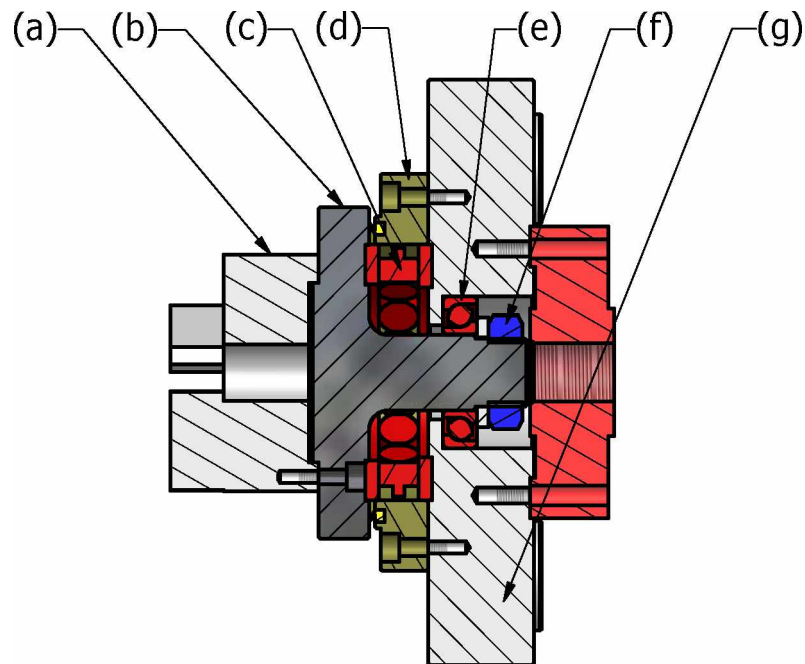


Abbildung 5.5: Konstruktion zur Messung des Torsionsmomentes: Die Konstruktion setzt sich aus folgenden Teilen zusammen: (a) Dreibackenfutter, (b) Welle, (c) Axiallager, (d) Zentrierung mit Gummidichtung, (e) Radiallager, (f) Verschraubung durch eine Mutter, (g) Mittelkonsole.

5.2.3 Detailauslegung der Anbindung des Hydraulikzylinders

Da mittels Vorschubs, der durch die Hydraulikeinheit bewerkstelligt wird, der Anpressdruck auf die Proben gesteuert wird, ist bei der Anbindung an die Mittelkonsole eine Kraftmessdose (siehe Kapitel 4.2) vorzusehen. Wie in der Abbildung 5.6 gezeigt, wird die Kraftmessdose mit der Mittelkonsole verschraubt und die Hydraulikkolbenstange kann mit Hilfe eines Adapterstückes mit der Messeinheit verbunden werden.

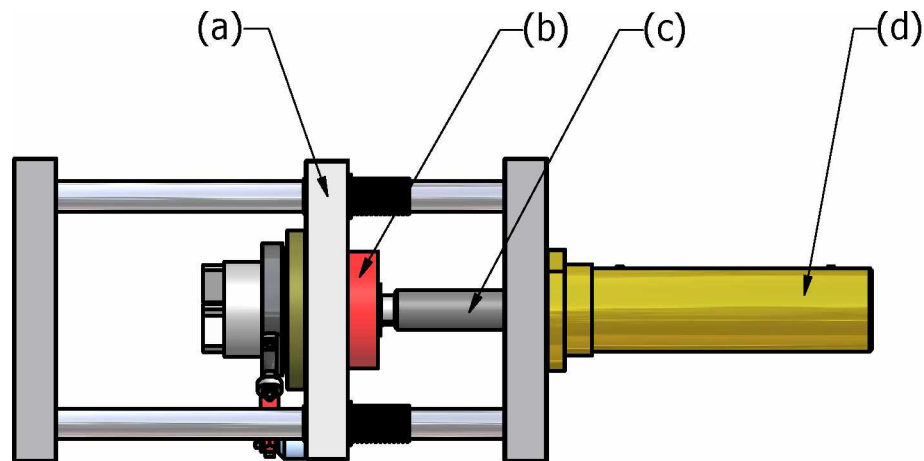


Abbildung 5.6: Hydraulikanbindung: Die Konstruktion setzt sich aus folgenden Teilen zusammen: (a) Mittelkonsole; (b) verschraubte Kraftmessdose; (c) Kolbenstange mit Adapterstück zur Anbindung an die Kraftmessdose; (d) Hydraulikzylinder.

5.3 Detailauslegung der Elektromotoranbindung

Der Anbindungsadapter bildet das Verbindungsglied zwischen Probenaufnahme und der Motorwelle, über die das benötigte Drehmoment übertragen wird. Dieses Bauteil lässt sich grundsätzlich mit folgenden Verbindungsvarianten ausführen [5, 19]:

- mit einer kraftschlüssigen Verbindung oder
- mit einer formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindung.

Die *kraftschlüssigen Verbindungen* wie Pressverbände, Kegelerbindungen oder Keilverbindungen sind preiswert und einfach herzustellen. Diese Verbindungen entstehen durch das Fügen von Teilen, die durch Verspannung der Komponenten über die Fügefläche eine gleichmäßige Flächenpressung erzeugen und dadurch können Kräfte übertragen werden. Deren Einsatzgebiete sind meist nichtlösbare Verbindungen wie bei Schwungscheiben, Riemenscheiben oder Kuppelungsanbindungen [5, 19].

Die Anbindung der Probenaufnahme zur Motorwelle kann auch *formschlüssig* durch eine Passfedern-, eine Keilwellen- oder durch eine Zahnwellenverbindung bewerkstelligt werden. Diese genannten Verbindungsvarianten weisen ähnliche Eigenschaften auf wie kraftschlüssige Verbindungen.

gen, nur besitzen sie den Vorteil, dass sie leicht zu montieren und demontieren sind [5, 19].

Da der Elektromotor von der Herstellerfirma mit einer Motorwelle mit Passfeder ausgeliefert wird, wurde diese Verbindungsart bei der Elektromotoranbindung der Torsions- und Reibschweißanwendung angewandt.

Die Konstruktion besteht aus einer Hohlwelle, die mittels einer genormten Passfeder formschlüssig an die Motorwelle montiert ist. Die Hohlwelle wird radial durch ein Radialkugellager gelagert und unmittelbar nach diesem durch einen Sicherungsring gesichert. Ein Axialkugellager, das durch einen Ring zentriert und durch eine Dichtung vor äußeren Einflüssen geschützt ist, leitet die axialen Kräfte ab. Die Probenaufnahme wird mit Hilfe eines Zentrierringes koaxial mit dem Adapter verschraubt.

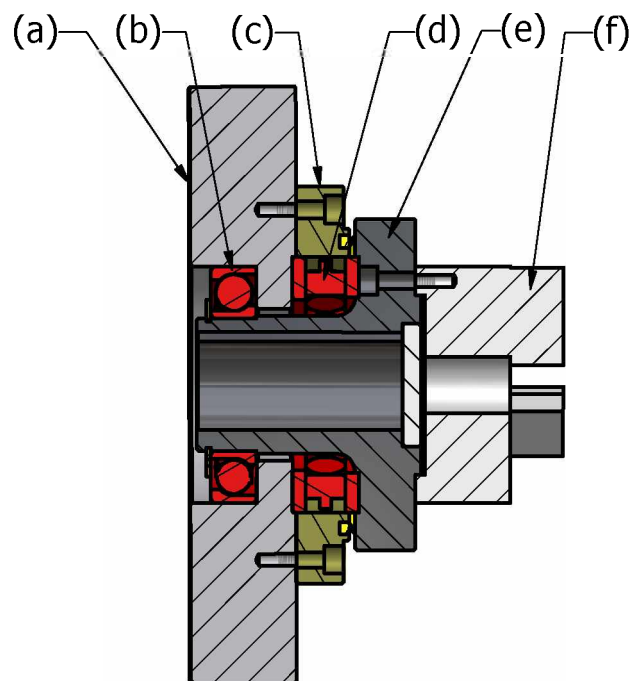


Abbildung 5.7: Schnittdarstellung der Elektromotoranbindung: Die Konstruktion setzt sich aus folgenden Teilen zusammen: (a) Gegenplatte motorseitig; (b) Radiallager; (c) Zentrierring mit Gummidichtung; (d) Axiallager; (e) Hohlwelle; (f) Dreibackenfutter.

5.4 Schutzeinhausung der Vorrichtung

Um den Bediener vor weggeschleuderten Teilen oder wegspritzenden Flüssigkeiten zu schützen, wurde die komplette Vorrichtung mit einer Schutzeinhausung umgeben. Die Einhausung besteht, wie in Abbildung 5.8 veranschaulicht, aus einem Aluminiumprofilgerüst, in das Aluminiumplatten eingebaut sind. Im Bereich der Probeneinspannung wurde eine Schutztüre mit durchschlagsicherem Polycarbonatglas vorgesehen, um einen möglichst sicheren Betrieb und einfachen Probenwechsel zu gewährleisten. Zusätzlich ist die Schutztüre über ein redundantes System automatisch ver- und entriegelbar, um den unbefugten Zugriff während des Prüfvorganges zu unterbinden und dadurch ein maximales Maß an Sicherheit herzustellen.

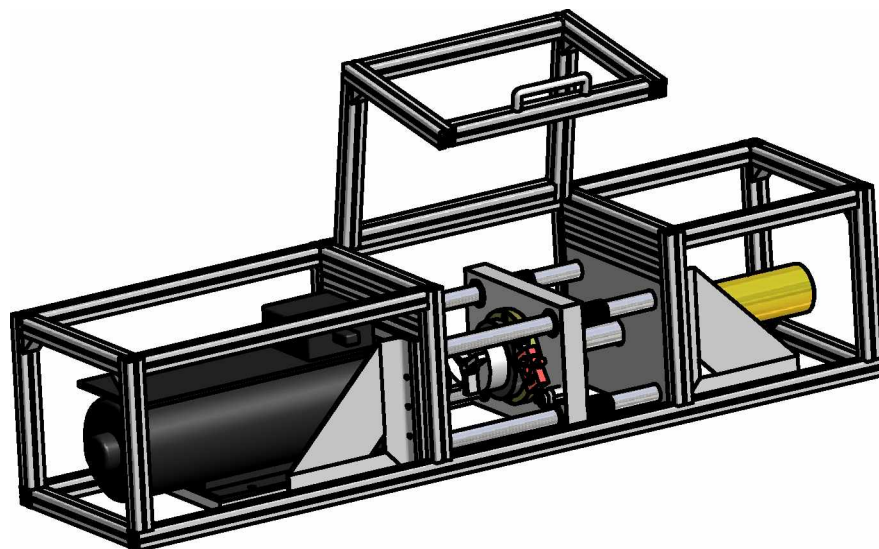


Abbildung 5.8: Schutzeinhausung der Maschine: Die Schutzeinhausung besteht aus einem Aluminiumprofilgerüst, in das Aluminiumplatten bzw. Polycarbonatglasscheiben eingelegt sind. In der angeführten Abbildung wurde auf Grund der besseren Darstellungsmöglichkeit auf das Einzeichnen der Aluminiumplatten verzichtet.

5.5 Hilfselemente

Dieses Kapitel baut auf die konstruktive Auslegung der Prüfvorrichtung auf und behandelt die Anlagenelemente, die zur Erfüllung der Forderungen aus den Kapiteln 3.1 Pflichten- und 3.2

Lastenheft zusätzlich erforderlich sind. Bei den beschriebenen Komponenten handelt es sich um Zusatzelemente, die zur Prozessoptimierung bzw. zu Prozesserweiterung benötigt werden, oder um Teile, die zur besseren Verwirklichung des Gesamtprojektes dienen.

5.5.1 Bodenplatte und Anbindung der Führungsvorrichtung

Da die Führungsvorrichtung der TORA einen stabilen Untergrund benötigt, ist die Anbindung an eine massive Bodenplatte erforderlich. Neben der Anbindung der Führungsvorrichtung mit der verfahrbaren Mittelkonsole an die Bodenplatte gehören zusätzlich die Anbindungsmöglichkeit für

- den Elektromotor,
- die Schutzeinhausung und
- den Maschinentisch geschaffen.

Zur Forderung einer stabilen und soliden Anbindung der oben genannten Komponenten an die Bodenplatte werden an die Bodenplatte und deren Konstruktion folgende Bedingungen gestellt:

- die Bodenplatte muss eine plane Oberfläche und steife Ausführung für die Anbindung an die Führungsvorrichtung bieten;
- im Bereich des Fahrweges der Mittelkonsole muss ein Auffangbecken für die Kühlflüssigkeit vorhanden sein;
- die problemlose Ableitung der Kühlflüssigkeit ohne weitere Pumpe wird angestrebt;
- im Bereich des Hydraulikzylinders und des Elektromotors sind Ausnehmungen für die Anbindung an die Hydrauliköl- bzw. Stromversorgung vorzusehen.

Bei der Werkstoffwahl der Bodenplatte kam eine Platte aus Stahl zur Anwendung, da durch dessen hervorragenden Festigkeitseigenschaften und durch gute Bearbeitbarkeit des Materials selbst und der Oberfläche ein idealer Untergrund für die Führungskonstruktion geboten wird. Zudem ist Stahl für eine Vielzahl von verschiedenen Verbindungstechniken geeignet.

Für die eigentliche Anbindung der Führungsvorrichtung an die Bodenplatte ergeben sich die folgenden drei Verbindungsvarianten:

- Schweißverbindung zwischen den beiden Komponenten,
- Verschraubung von unten, oder
- Verschraubung der Führungsvorrichtung mit der Bodenplatte über eine Hilfskonstruktion.

Durch die negativen Auswirkungen der Wärmeeinflusszone beim *Schweißprozess* ist die Variante der Schweißverbindung (siehe Abbildung 5.9) nicht einsetzbar. Durch den hohen Wärmeeintrag in den Grundwerkstoff und durch die schnelle Abkühlung kommt es zum Schweißverzug der Fügeiteile. Dieser Schweißverzug führt unter anderem zu einem Verlust der Genauigkeit.

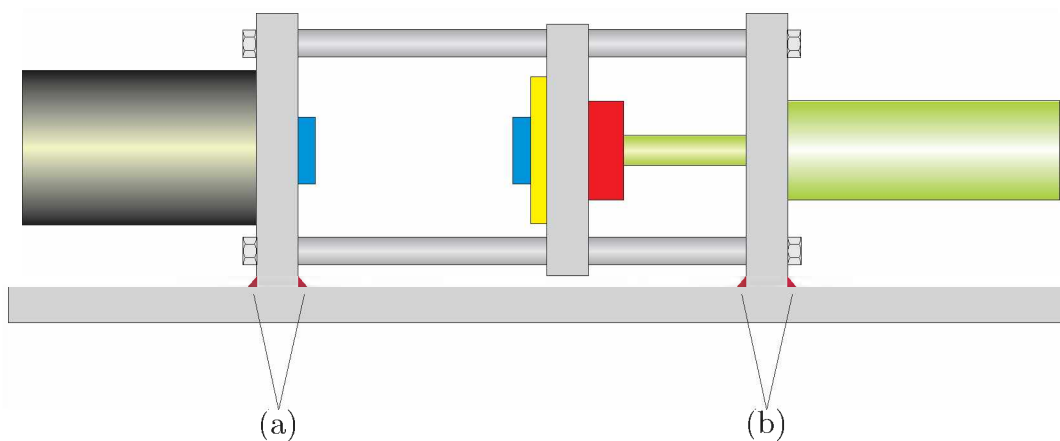


Abbildung 5.9: Anbindung der Führungsvorrichtung an die Bodenplatte durch eine Schweißkonstruktion: Durch die Anordnung einer durchgehenden Schweißnaht an den Punkten (a) und (b) ist die Anbindung an die Bodenplatte zu bewerkstelligen.

Die *Verschraubung von unten* durch eine Bohrung in der Bodenplatte in eine Gewindebohrung, die in der Führungsvorrichtung eingebracht ist, ist technisch gut zu realisieren (siehe Abbildung 5.10). Diese Variante birgt aber den Nachteil, dass beim unkontrollierten Austritt von Kühl- oder Hydraulikflüssigkeit diese durch die Bohrung in der Bodenplatte auf andere unterhalb angebrachte Maschinenkomponenten gelangen kann und diese beschädigt.

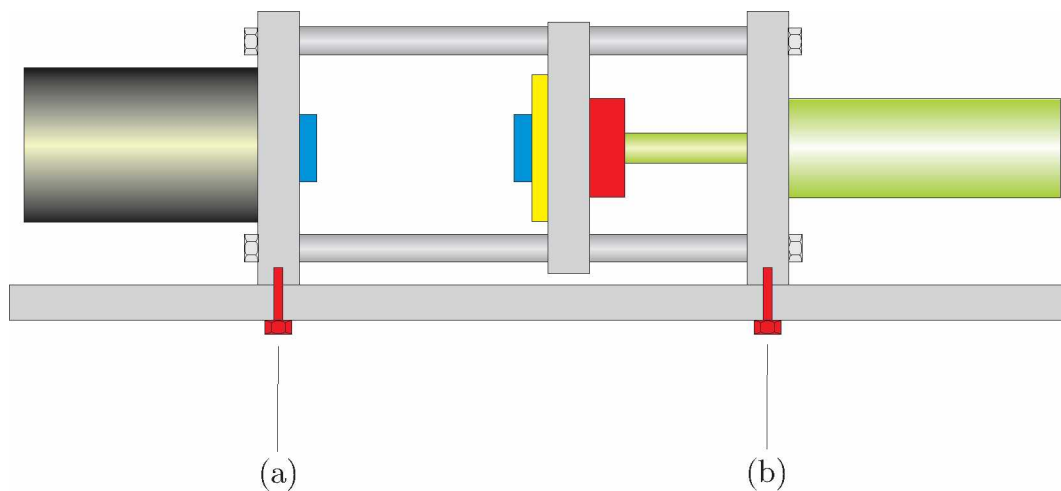


Abbildung 5.10: Anbindung der Führungsvorrichtung an die Bodenplatte durch eine Schraubverbindung in den Punkten (a) und (b).

Bei der dritten Variante erfolgt die *Verschraubung über eine Hilfskonstruktion*. Im Näheren heißt das, dass durch einen Stahlwinkel die Führungsvorrichtung mit der Bodenplatte verschraubt würde. Vorteil dieser Version ist es, dass die Gewindebohrungen die Bodenplatte nicht zur Gänze durchbohren und dass die Schrauben nur auf Zug/Druck belastet sein würden. Nachteile bergen die hohen fertigungstechnischen Anforderungen an die Präzision der geschweißten Stahlwinkeln. Trotz der höheren Material- und Fertigungskosten kam auf Grund der besseren Kraftübertragung und Anbindungsmöglichkeit die Variante mit den Stahlwinkeln zur Anwendung (siehe Abbildung 5.11).

Beim Anbau der Schutzeinhausung wurde auf Klemmsteine, die sich in das Aluminiumprofil einhaken und mit der Bodenplatte verschraubt werden, zurückgegriffen.

Auch der Elektromotor wurde mit der Grundplatte in die Bodenplatte verschraubt. Die Abbildung 5.11 veranschaulicht den Aufbau der gewählten Anbindungen.

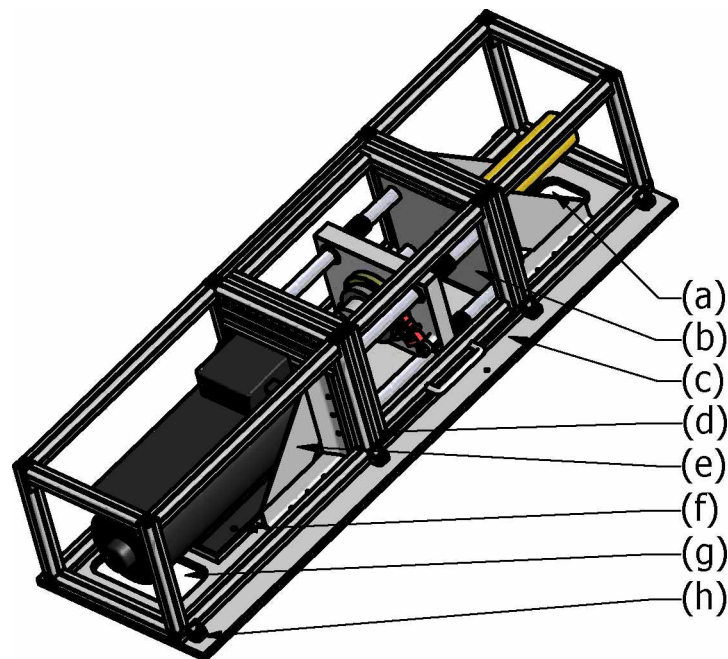


Abbildung 5.11: Anbindung der Führungsvorrichtung und Schutzeinhausung an die Bodenplatte: (a) Ausnehmung für Hydraulikleitungen; (b) Führungsvorrichtung; (c) Bodenplatte; (d) Schutzeinhausung; (e) Winkelkonstruktion; (f) Elektromotoranbindung; (g) Ausnehmung für Elektroleitungen; (h) Bohrung für Klemmsteinhalterung.

5.5.2 Kühlanlage

Die Kühlanlage wird vom technischen Standpunkt her sowohl für die Torsionsprüfung als auch für den Reibschweißprozess benötigt. Bei Warmtorsionsprüfungen ist es durch eine schnelle Abkühlung des Probekörpers möglich, das metallische Gefüge „einzufrieren“ und dieses anschließend metallographisch auszuwerten. Auch beim Reibschweißversuch können durch Anwendung der Kühlanlage die Wärmeeinflusszone und die Gefügeentwicklung in der Schweißnaht beeinflusst werden.

Da bei dieser speziellen Prozessanwendung eine hohe Kühlwirkung und keine Schmierwirkung verlangt wird, kann bei der Wahl des Schmiermittels auf die Gruppe der nichtwassermischbaren Kühlschmierstoffe verzichtet werden. Diese Kühlschmierstoffe sind Mineralöle ohne/mit chemischen Zusätzen, die einen Schmierfilm aufbauen, der unter anderem den Vorteil hat, Korrosionsaufkommen zu verhindern. Nachteilig wirken sich allerdings die schlechteren Kühleigenschaften auf den Einsatzzweck aus. In diesem Fall eignen sich wassermischbare

Kühlschmiermittel oder mineralölfreie Lösungen besser, da sie idealere Kühleigenschaften aufweisen und der Nebeneffekt der Schmierung im Hintergrund steht. Im einfachsten Fall könnte klares Leitungswasser verwendet werden [26].

Die verwendete Kühlmittelanlage wird mit einem Elektromotor betrieben, der automatisch je nach Verwendungszweck eingeschaltet wird. Die Pumpe entnimmt das Kühlmedium aus einem in der Anlage integrierten Tank, der ein Volumen von 4,5 Liter fasst. Die Flüssigkeit wird über einen flexiblen Kunststoffschlauch zu einem verstellbaren dreikanäligen Verteiler gepumpt, der das Kühlmittel zu den entsprechenden Stellen befördert. Der Rücklauf erfolgt über ein ca. zwei Liter fassendes Auffangbecken, das in die Bodenplatte der Konstruktion eingelassen ist. Von diesem Sammelbecken aus fließt auf Grund des Höhenunterschiedes die Kühlflüssigkeit durch einen Kunststoffschlauch über einen Filter wieder in den Kühlmitteltank. Die genaue Lage des Kühlmittel tanks ist in Abbildung 5.13 graphisch dargestellt.

5.5.3 Induktoranbau

Um bei der Torsionsprüfung (siehe Kapitel 2.1.3) von Metallproben auch Warmtorsionskurven aufnehmen zu können, kam bei der technischen Umsetzung eine induktive Erwärmung der Probe zum Einsatz. Bei Induktionswärmeanlagen wird mit Hilfe eines Frequenzgenerators und eines Schwingkreises eine hochfrequente Wechselspannung erzeugt. Der in einer wassergekühlten Spule (Induktor) fließende Wechselstrom erzeugt ein hochfrequentes elektromagnetisches Feld, welches im elektrisch leitenden Probenstück, das mit dem Induktor umschlungenen ist, eine Selbstinduktionsspannung hervorruft. Diese Spannung erzwingt wiederum einen Stromfluss im Metall in geschlossenen Bahnen parallel zur Oberfläche und in entgegengesetzter Stromflussrichtung zum Induktorwechselstrom. Das metallische Probenstück im Induktorbereich wird somit zur Sekundärwicklung eines Kurzschlusslufttransformators. Die Wärme selbst wird direkt und lokal in der Probe durch Wirbelstromverluste erzeugt [27].

Die Aufstellung einer Induktoranlage erfolgt mittels eines leicht montier- und demontierbaren Zusatztisches (siehe Abbildung 5.12 und 5.13), auf dem auch verschiedene Induktoranlagentypen verwendet werden können.

5.5.4 Maschinentischkonstruktion

Neben der Aufgabe, der gesamten Anlage einen stabilen und waagrechten Stand zu geben, hat die Maschinentischkonstruktion folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Anbaumöglichkeit der Bodenplatte,
- Montageplattform für den Leistungs- und den Steuerschaltschrank der Elektrik,
- Leckölwanne und Fixierungsmöglichkeit der Hydraulikanlage, sowie der Kühlmittelanlage,
- eine Anpassung an die gegebenen Untergrundverhältnisse.

Da bei der Bodenplatte die gesamte Führungsvorrichtung der Anlage und die Schutzeinhausung der Maschine auf eine Stahlplatte aufgesetzt und mit dieser verbunden wird, kann die Stahlplatte direkt mit der Tischkonstruktion von unten verschraubt werden.

Durch zusätzlich in die Hauptkonstruktion eingeschweißte Zwischenträger lassen sich für die beiden verschiedenen Schaltkästen individuelle Montageplattformen schaffen, die den unterschiedlichen Modellgrößen gerecht werden und eine direkte Verschraubung zulassen.

Beim Einsatz einer Hydraulikanlage bzw. einer Kühlvorrichtung ist mit einem geringen konstruktionsbedingten Leckageverlust zu rechnen. Um das Hydrauliköl bzw. das Kühlmittel geregelt zu sammeln und die Umwelt vor schädlichen Einflüssen zu schützen, wird im Bereich unter den Montageträgern eine geschweißte Ölwanne vorgesehen. Diese Wanne verfügt über ein Fassungsvermögen von 14 Liter und ermöglicht die fachgerechte Entsorgung der anfallenden Flüssigkeiten. Mit Hilfe einer variablen Höhenverstellung kann ein sicherer Stand an jedem Aufstandspunkt der Anlage erreicht werden. Zusätzlich lässt sich ein leichtes Gefälle von mindestens 3 % im Sammelbecken der Kühlflüssigkeit für den Rücklauf ausführen. Die aus den Aufgaben heraus gewählten konstruktiven Ausführungen sind in den Abbildungen 5.12 und 5.13 dargestellt.

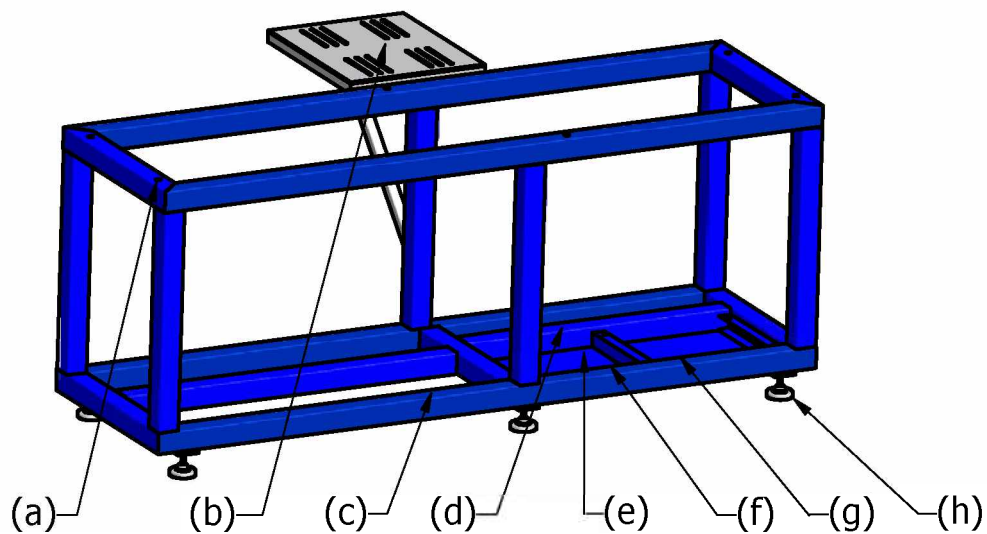


Abbildung 5.12: Konstruktion des Maschinentisches: Die Konstruktion sieht für folgende Anbauteile Montagemöglichkeiten vor: (a) Bodenplatte; (b) Induktor; (c) Leistungsschaltschrank; (d) Steuerschaltschrank; (e) Leckölwanne; (f) Montagemöglichkeit Kühlanlage; (g) Montage-träger Hydraulikaggregat; (h) Höhenverstellung.

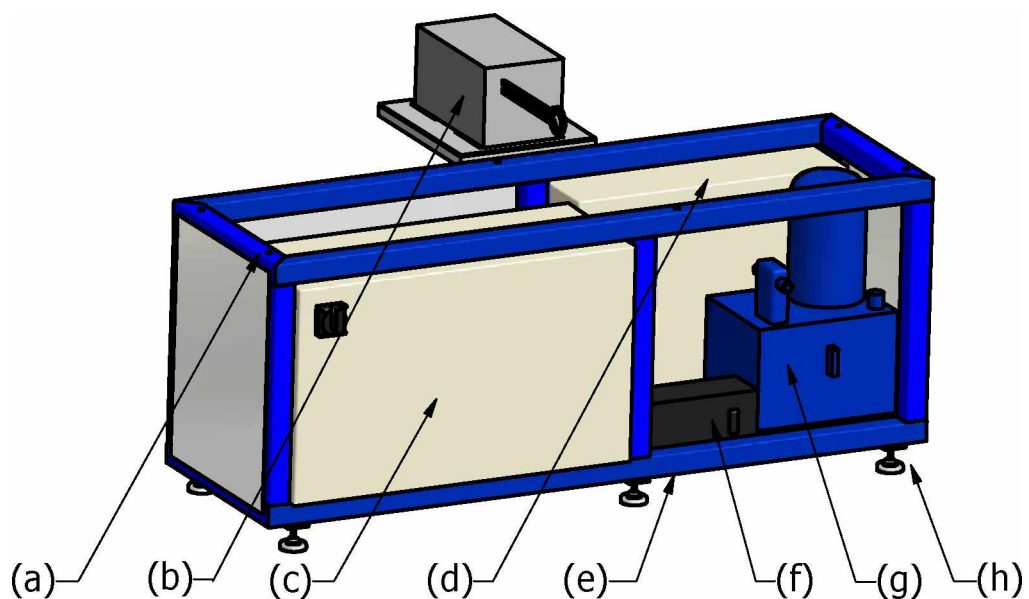


Abbildung 5.13: Maschinentisch mit eingebauten Maschinenelementen: Die Maschinentisch-konstruktion sieht für die nachstehenden Maschinenelemente Anbaumöglichkeiten vor: (a) Bo-denplatte; (b) Induktor; (c) Leistungsschaltschrank; (d) Steuerschaltschrank; (e) Leckölwanne; (f) Kühlanlage; (g) Hydraulikaggregat; (h) Nivellierfüße.

5.6 Vollständige Darstellung der Prüfmaschine

In diesem Kapitel wird an Hand zweier isometrischer Ansichten der TORA der Endstand der konstruktiven, steuerungstechnischen und sicherheitstechnischen Gesamtumsetzung gezeigt.

In Abbildung 5.14 sind deutlich der Maschinentisch mit dem Leistungsschaltschrank und den Aluminiumschutzblechen zu erkennen. Oberhalb befindet sich die Bodenplatte und die auf ihr montierte Schutzeinhausung mit geschlossener Schutztüre. Im rechten oberen Teil des Bildes ist das herausgeklappte Bedienpanel für die Anlagensteuerung und die Signalsäule abgebildet, wie es näher in Kapitel 7 beschrieben wird.

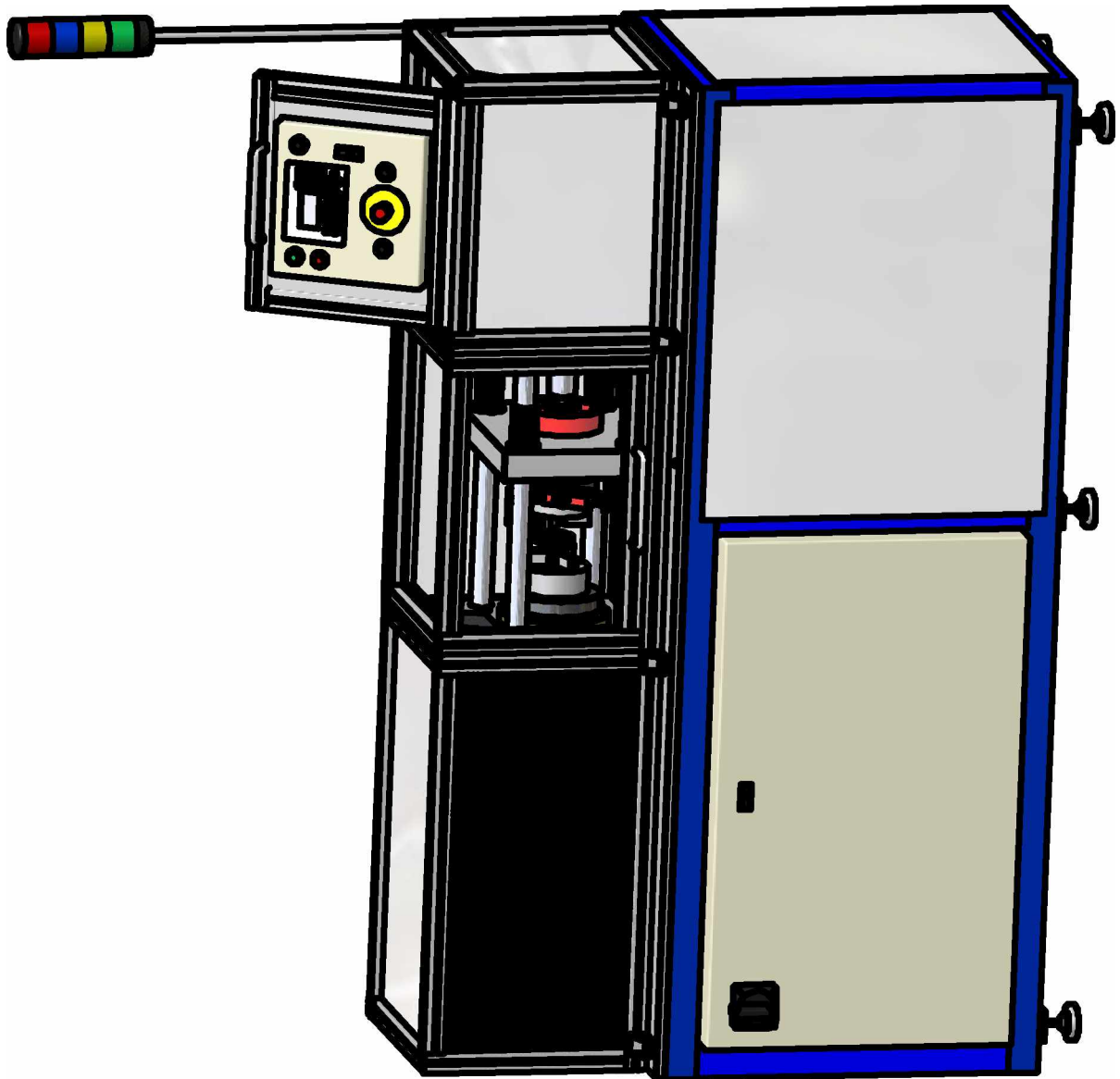


Abbildung 5.14: Isometrische Ansicht der Vorderfront: Die Abbildung spiegelt den Endstand der konstruktiven, steuerungstechnischen und sicherheitstechnischen Gesamtumsetzung der TO-RA wider.

In der Abbildung 5.15, die die Hinterfront der Anlage zeigt, ist der im Maschinentisch integrierte Steuerschaltschrank im Maschinentisch und die Umsetzung der Induktoranbaues, sowie der Induktor selbst sehr gut zu erkennen.

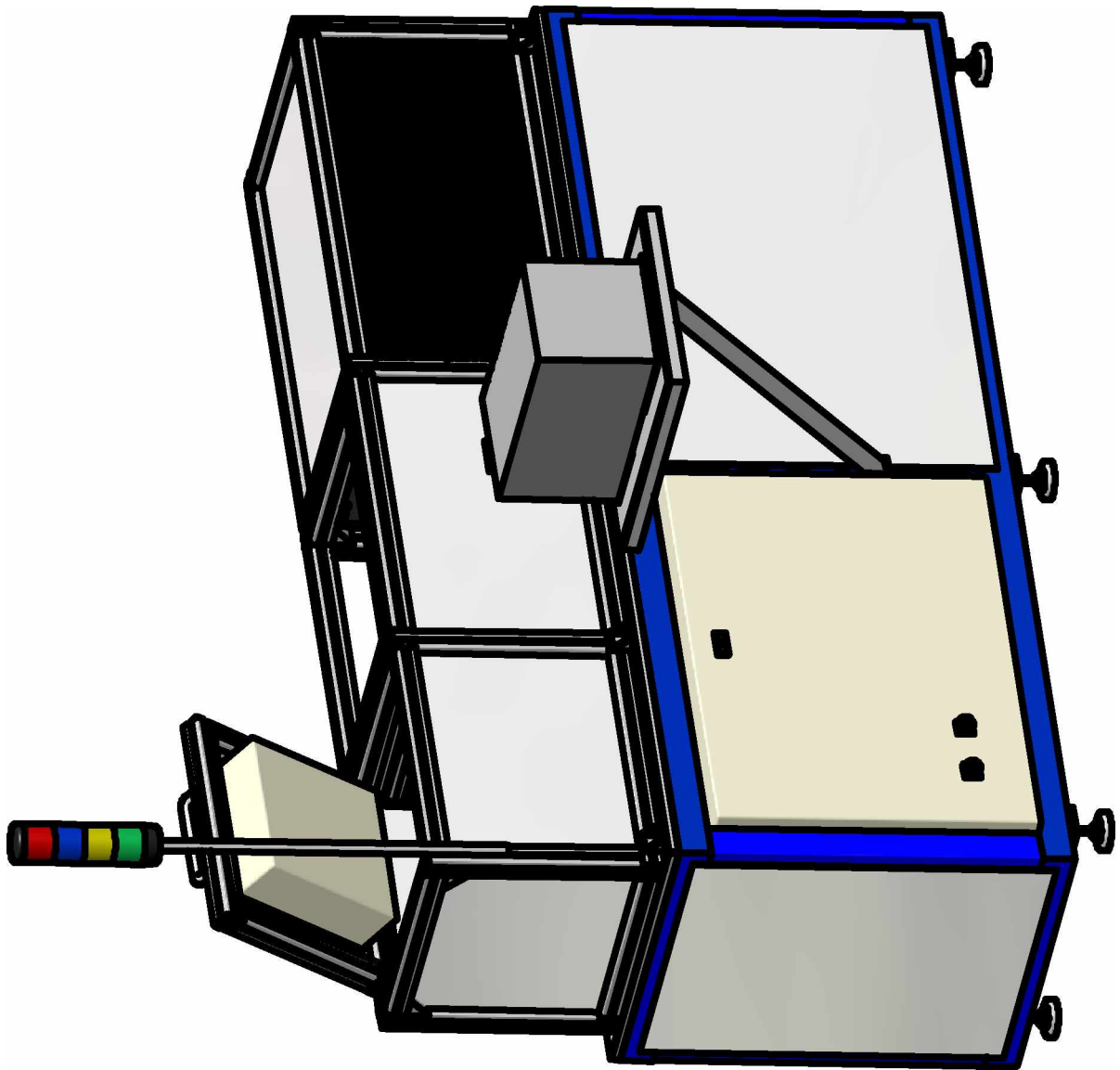
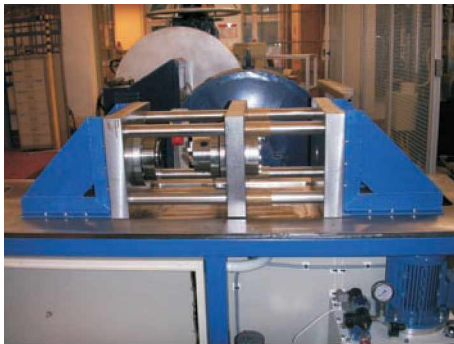


Abbildung 5.15: Isometrische Ansicht der Hinterfront: An der Hinterfront der Anlage befindet der Steuerschaltschrank, sowie der Anbau für den Induktor .

In der Abbildung 5.16 wird der reale Endzustand der Anlage als Vergleich mit dem CAD-Planungsmodell (siehe Abbildung 5.14) angeführt. Weiters sind einige der Konstruktionsdetails, die in Kapitel 5 erläutert wurden, in Abbildung 5.17 näher veranschaulicht.



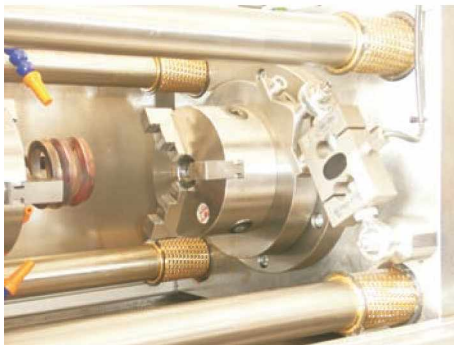
Abbildung 5.16: Foto der realen Anlage: Dieses Foto soll den direkten Vergleich zwischen dem CAD-Planungsmodell 5.14 mit der realen Ausführung ermöglichen.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 5.17: Fotos einiger Konstruktionsdetails: (a) Säulengestell mit verfahrbarer Mittelkonsole; (b) Hohlwelle mit Dreibackenfutter, Kühlvorrichtung und Induktorschleife; (c) verfahrbare Mittelkonsole mit Dreibackenfutter und Wägezelle zur Torsionsmomentenmessung; (d) Anlage mit eingespannten Reibschweißproben (Induktor ausgeschwenkt).

6 Umsetzung der Maschinenrichtlinie

Bei der Maschinenrichtlinie (MRL) handelt es sich um europäisches Recht, das das Inverkehrbringen von Maschinen innerhalb der Europäischen Union (EU) regelt und vereinheitlicht.

Die MRL sieht für Produkte innerhalb der EU die Durchführung eines Konformitätsverfahrens zur Sicherstellung der Erfüllung der Mindestsicherheitsanforderungen vor, das zu dokumentieren ist. Hauptziel bei der Umsetzung der Forderungen der MRL sind die Einhaltung, Beibehaltung oder die Verbesserung des in den Mitgliedsstaaten der EU bestehenden Sicherheitsniveaus für Maschinen.

Die MRL findet in Österreich ihre Umsetzung in der Maschinen-Sicherheitsverordnung (MSV) und ist gültig für Maschinen die laut §3 Abs. 4 wie folgt definiert sind: *Eine Maschine ist eine Gesamtheit von miteinander verbundenen Teilen (Komponenten) oder Vorrichtungen, von denen mindestens eines beweglich ist, sowie gegebenenfalls von Betätigungseinrichtungen, Steuer- und Energiekreisen usw., die für eine bestimmte Anwendung, wie die Verarbeitung, die Behandlung, die Fortbewegung und die Aufbereitung eines Werkstoffes zusammengefügt sind* [28].

6.1 Konformitätsprüfungsprozess

Wenn ein Produkt einer oder mehreren Richtlinien nach Artikel 95 des EG-Vertrags unterliegt, darf es nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn ein Konformitätsprüfungsprozess mit abschließender CE-Kennzeichnung durchgeführt wurde. Die CE-Kennzeichnung erlaubt dem Inverkehrbringer, ein Produkt in allen Mitgliedsstaaten der EU in Verkehr zu bringen. Die CE-Kennzeichnung signalisiert die Einhaltung der grundlegenden Sicherheitsanforderungen (GSA), aber verpflichtet nicht zur Einhaltung der (harmonisierten) Normen [28]. Somit ist die Kennzeichnung keine Qualitätsgarantie, sondern bescheinigt nur die Einhaltung von Mindestanforderungen.

Die Feststellung der Konformität eines Produktes erfolgt durch den Hersteller bzw. den Inver-

kehrbringer und besteht aus den folgenden Punkten, die für die TORA durchgeführt wurden, da die Anlage in mehreren Punkten unter Artikel 95 des EG-Vertrages fällt:

1. *Einstufung des Produktes*

Da die TORA unter anderem aus beweglichen Komponenten besteht, ist sie klar als Maschine einzustufen, die zur Prüfung von Werkstoffproben bzw. zur Herstellung einer Reibschweißverbindung dient.

2. *Klärung der Anwendung weiterer Richtlinien*

Bei der Konzeption, der Konstruktion und der steuerungstechnischen Umsetzung wurden die nachstehenden Normen verwendet:

- Maschinenrichtlinie 98/37/EG
- Niederspannungsrichtlinie 93/68/EWG
- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) 89/336/EWG

3. *freiwillige Anwendung von Normen*

Bei den freiwillig angewandten Normen handelt es sich bei der TORA im Konkreten um die folgenden:

- ÖNORM EN 12100-1 2004 Sicherheit von Maschinen- Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze- Teil 1: Grundsätzliche Terminologie, Methodik
- ÖNORM EN 12100-2 2004 Sicherheit von Maschinen- Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze- Teil 2: Technische Leitsätze
- ÖNORM EN 1050 1997 Sicherheit von Maschinen- Leitsätze zur Risikobeurteilung
- ÖNORM EN 954-1 1997 Sicherheit von Maschinen- Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen- Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze
- ÖNORM EN 418 1993 Sicherheit von Maschinen NOT-AUS-Einrichtungen, funktionelle Aspekte- Gestaltungsleitsätze
- ÖNORM EN 1037 1996 Sicherheit von Maschinen- Vermeidung von unerwartetem Anlauf
- ÖNORM EN 60204-1 1998 Sicherheit von Maschinen- Elektrische Ausrüstung von Maschinen- Teil 1: Allgemeine Anforderungen

- ÖNORM EN 60529+A1 2000 Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)
- ÖNORM EN 982 1996 Sicherheit von Maschinen- Sicherheitstechnische Anforderungen an fluidtechnische Anlagen und deren Bauteile- Hydraulik

4. *Erstellung einer Gefahrenanalyse*

Die genaue Durchführung der Gefahrenanalyse wird im Kapitel 6.2 beschrieben.

5. *Zusammenstellung einer technischen Dokumentation*

Die technische Dokumentation ist laut MRL Anhang IV bzw. der MSV §9 und den angewandten Richtlinien vom Inverkehrbringer zu erstellen und ist im Falle einer Einstufung als „gefährliche Maschine“ von der Behörde zu sichten und zu genehmigen.

6. *Bereitstellung einer Betriebsanleitung*

Die Betriebsanleitung besteht im Allgemeinen aus den Warn- und Sicherheitshinweisen laut Gefahrenanalyse, der Maschinenteil- und Funktionsbeschreibung, den Vorschriften zur Versuchsdurchführung, den technischen Daten der Anlage, den Schaltplänen sowie der Konformitätserklärung.

7. *benannte Stellen einbeziehen*

Da die Anlage laut der MRL Anhang IV bzw. der MSV §9 nicht unter die Klassifizierung einer gefährlichen Maschine fällt, sind keine weiteren verschärfende Konformitätsrichtlinien mit einzubeziehen.

8. *Ausstellung der Konformitätserklärung und Kennzeichnung durch das CE-Zeichen*

Nach positivem Abschluss des Konformitätsverfahrens ist die betreffende Maschine mit einer genormten CE-Kennzeichnungsplakette zu versehen und die schriftliche Bescheinigung in der Betriebsanleitung anzuführen.

Nach der vollständigen Durchführung des Konformitätsprozesses ist der Inverkehrbringer berechtigt, die bewertete Maschine innerhalb der EU ohne weitere Auflagen und Prüfungen zu vermarkten und zu betreiben.

6.2 Gefahrenanalyse

Die Gefahrenanalyse ist eine der effektivsten und besten Möglichkeiten, strukturiert Gefahren aufzudecken und zu verringern. Nach der konkreten Gefahrenanalyse und der Absteckung des Gefahrenpotentials sowie des Verletzungsausmaßes wird nach einer passenden Schutzmaßnahme gesucht und die bestehende Gefahr nach der Schutzmaßnahmenanwendung neu evaluiert, um die Wirksamkeit zu überprüfen.

Anhand einer Liste von möglichen Gefahren laut Norm EN 1050 wird untersucht, ob die angeführten Gefahren auf der entsprechenden Maschine auftreten. Bei jeder konkret bestehenden Gefahr wird zuerst die Gefahrenquelle angegeben und in einer Tabelle vermerkt. Im Anschluss wird anhand der Tabelle 6.1 die Bewertung des Schadens (S), die Aufenthaltsdauer (A), die Möglichkeit des Ausweichens (M), die Eintrittswahrscheinlichkeit (E) ermittelt und in Bereichsklassen eingeteilt, die wiederum tabellarisch erfasst werden.

Tabelle 6.1: Bewertungsschema zur Gefahrenanalyse, wie es am LsfUT Verwendung findet: In der nachstehenden Tabelle werden die für die Gefahrenanalyse erforderlichen Abkürzungen angeführt und die Einstufung in die Bereichsklassen aufgezeigt.

S	A	M	E
Schaden	Aufenthaltsdauer	Möglichkeit des Ausweichens	Eintrittswahrscheinlichkeit
1...keine Verletzung	1...selten/nie	1...möglich	1...unmöglich/ unwahrscheinlich
3...Bagatellverletzung	5...gelegentlich	5...unter bestimmten Bedingungen	5...möglich/ wahrscheinlich
6...reversible Verletzung	10...häufig	10...unmöglich	10...sicher
10...irreversible Verletzung			

Die Risikoeinschätzung (R) ist eine Kombination aus dem Schadensausmaß und der Wahrscheinlichkeit des Eintritts des Schadens. Am LsfUT wurde das Risiko nach folgender Formel berechnet:

$$R = S \cdot \text{rnd}(\sqrt[3]{A \cdot M \cdot E}), \quad (6.1)$$

wobei $\text{rnd}(x)$ die Rundung auf eine ganze Zahl bedeutet. Ein Risiko gilt als niedrig bzw. als nicht vorhanden bei $R = 1$ und gilt als hoch, wenn $R = 100$.

In der Tabelle 6.2 wird anhand eines konkreten Beispiels der Gefahrenanalyse, die bei der TORA durchgeführt wurde, die genaue Vorgehensweise erklärt. Weiters wird im Anschluss in der Tabelle 6.3 die Wirksamkeit der gewählten Schutzmaßnahmen überprüft. Die Norm EN 1050 beleuchtet unter der ersten Gefahrengruppe die mechanische Gefährdungen durch Maschinen. Als ersten Unterpunkt 1.1 wird die Gefährdung durch Quetschen angeführt. Diese Gefahr besteht bei der TORA beim Zusammenfahren der Backenfutter im Arbeitsraum (siehe Tabelle 6.2 NR. 1.1a) und beim Auseinanderfahren der Backenfutter im Bereich zwischen Kraftmessdose und Grundplatte der Säulen (siehe Tabelle 6.2 NR. 1.1b). Wie die Abbildung 6.1 zeigt, kann es in beiden Fällen zu Quetschungen an den Fingern und/oder der Hand kommen. Da diese Verletzungen beim Einwirken von einer Kraft bis 125 kN irreversibel sein können, wird der Schaden mit 10 beurteilt. Die Aufenthaltsdauer entspricht im Fall 1.1a abermals 10, da der Bediener permanent in diesem Bereich zum Wechseln der Proben arbeiten muss. Die Aufenthaltsdauer wird im Fall 1.1b mit 5 beurteilt, da der Bereich zwischen Kraftmessdose und Grundplatte nicht zum allgemeinen Arbeitsraum zählt, aber der Bediener unmittelbar an diesem gefährlichen und variablen Zwischenraum zu arbeiten hat. Die Ausweichmöglichkeit und die Eintrittswahrscheinlichkeit wurden in beiden Fällen mit 5 bewertet. Gründe dafür sind, dass ein Ausweichen aufgrund der geringen Vorschubgeschwindigkeit des Hydraulikkolbens möglich ist und weil sich die Ereigniswahrscheinlichkeit zwischen unmöglich und sicher befindet. Im genaueren heißt das, dass ein Eintreten der Gefährdung nicht auszuschließen ist, aber nicht mit Sicherheit eintritt. Durch die Auswertung der Formel (6.1) ergibt sich für die Gefahr 1.1a ein Risiko von $R = 60$ und für die Gefahr 1.1b ein Risiko von $R = 50$.

Tabelle 6.2: Gefahrenanalyse: Beispielhafte Bewertung zweier Gefahren ohne Schutzvorrichtung.

NR.	Risiko/Gefahr	Mögliche Verletzung	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>M</i>	<i>E</i>	<i>R</i>
1.1a	Gefährdung durch Quetschen	Quetschung der Finger und/oder der Hand zwischen den Futterbacken durch zusammenfahrende Futter	10	10	5	5	60
1.1b	Gefährdung durch Quetschen	Quetschung der Finger und/oder der Hand zwischen Kraftmessdose und Grundplatte der Säulen durch auseinanderfahrende Futter	10	5	5	5	50

Nach der erfolgten Abschätzung des Risikos ohne Schutzmaßnahmen erfolgt die Entschärfung der Gefahr durch geeignete Mittel. Dies kann auf drei Prinziparten (*P*) geschehen:

1. mit konstruktiven Schutzeinrichtungen (*k*), wo dies nicht möglich ist
2. mit steuerungstechnischen Einrichtungen (*s*), wo dies nicht ausreicht
3. durch Verbote, Gebote, oder durch Hinweise in der Bedienungsanleitung (*h*).

Anschließend wird nach der Wahl der geeignetsten Schutzmaßnahmen das Risiko erneut unter Berücksichtigung der angewandten risikominimierenden Vorkehrungen evaluiert (siehe Tabelle 6.3).

Im gegebenen Fall wurde als konstruktiv/steuerungstechnische Schutzmaßnahme vor der Gefahr 1.1a eine Sicherheitseinhausung mit Schutztüre und Sicherheitszuhaltung und als konstruktive Schutzmaßnahme eine Begrenzung des Futterabstandes vorgesehen (siehe Abbildung 6.1). Durch die Begrenzung des Futterabstandes ist es nicht mehr möglich, den Abstand der Futter unter 50 mm zu verringern, da an diesem Punkt die Kolbenstange des Hydraulikzylinders voll ausgefahren ist. Aus diesem Grund sind irreversible Verletzungen der Finger oder der Hände nicht

mehr möglich und der Schaden kann von 10 auf 6 reduziert werden. An der Aufenthaltsdauer ändert sich trotz Einsatz der Schutzmaßnahmen nichts. Durch die Schutzmaßnahmen ist eine Ausweichmöglichkeit eindeutig gegeben und wird mit 1 bewertet. Die Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit bleibt bei 5, da ein Unfall nicht mit letzter Sicherheit ausgeschlossen werden kann.

Die Gefahr 1.1b wird wie 1.1a mit einer konstruktiv/steuerungstechnischen Kombination aus Sicherheitseinhausung mit Schutztüre und Sicherheitszuhaltung reduziert. Da bei einem Ausfall oder einer Manipulation der Sicherheitseinhausung mit Schutztüre und Sicherheitszuhaltung der Schaden nicht gemindert werden kann und der Arbeitsraum der selbe ist, bleibt der Schaden mit 10 und die Aufenthaltsdauer mit 10 beurteilt. Durch die gesetzten Maßnahmen ist ein Ausweichen möglich. Die Eintrittswahrscheinlichkeit bleibt mit 5 bewertet, da ein Versagen der Schutzmaßnahme und somit ein Unfall nicht mit letzter Sicherheit ausgeschlossen werden kann.

Tabelle 6.3: Gefahrenanalyse mit Schutzmaßnahmen: Beurteilung der Gefahr aus Tabelle 6.2 unter Anwendung der vorgesehenen Schutzmaßnahmen.

NR.	Beschreibung Schutzmaßnahme	P	S	A	M	E	R
1.1a	-Sicherheitseinhausung mit Schutztüre und Sicherheitszuhaltung -Begrenzung des Futterabstandes	k/s k	6	10	1	5	24
1.1b	-Sicherheitseinhausung mit Schutztüre und Sicherheitszuhaltung	k/s	10	5	1	5	30

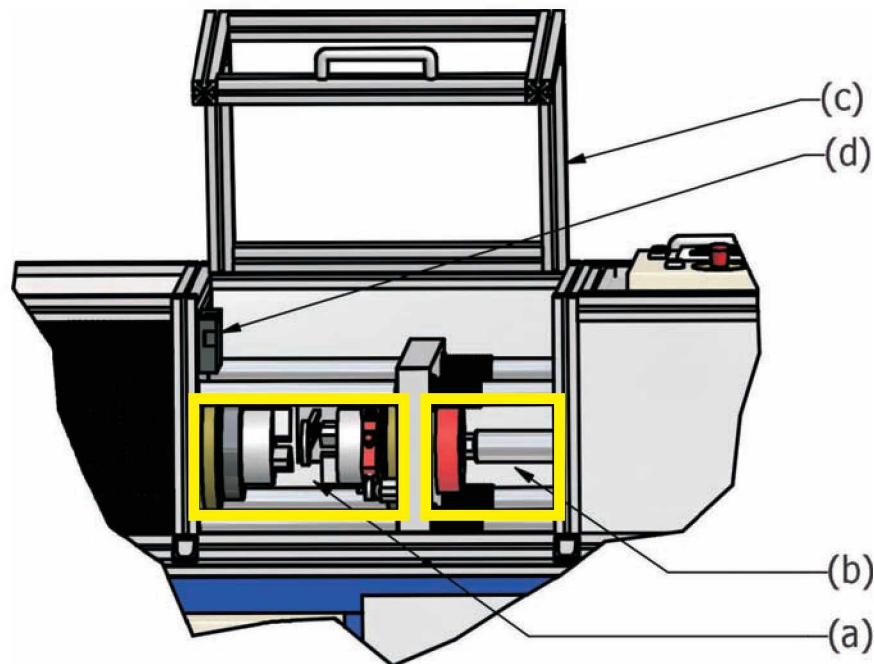


Abbildung 6.1: Gefahrenquellen und Schutzmaßnahmen: Laut Gefahrenanalyse stellten sich die Stellen (a) und (b) als Gefahrenquellen heraus. Zu den Schutzmaßnahmen gegen diese Gefahrenquellen gehören (c) die Sicherheitseinhausung mit Schutztüre und (d) die Sicherheitszuhaltung, sowie die Begrenzung des Futterabstandes.

Nach der erneuten Evaluierung ergibt sich durch den Einsatz der Schutzmaßnahmen das bestehende Restrisiko. Das Restrisiko ist das Risiko, das nach der Anwendung von Schutzmaßnahmen verbleibt. Durch den direkten Vergleich des Risikos von Tabelle 6.2 mit dem Restrisiko nach der Gefahrenminimierung in Tabelle 6.3 lassen sich die Bewertung und die Sinnhaftigkeit der Schutzmaßnahme(n) beurteilen und im Bedarfsfall weiter verbessern.

Im vorliegenden Fall wird bei der Gefährdung NR. 1.1a das Risiko von 60 durch den Einbau einer Sicherheitseinhausung mit Schutztüre und Sicherheitszuhaltung (siehe Kapitel 5 und 8) auf das Restrisiko von 24 reduziert. Beim Risiko 1.1b ist eine Risikoreduzierung von $R = 50$ auf $R = 30$ durch die Montage einer Sicherheitseinhausung mit Schutztüre und Sicherheitszuhaltung erreicht worden. Im Konkreten heißt das, dass im Fall 1.1a die Gefahrensituation durch den Einsatz von konstruktiven und konstruktiv/steuerungstechnischen Möglichkeiten das Risiko über die Hälfte reduziert werden konnte. Da im Fall 1.1b nur mit einer konstruktiv/steuerungstechnischen Maßnahme gearbeitet wurde, konnte das Restrisiko nicht so drastisch reduziert werden wie im Fall

1.1a. Trotzdem konnte die Gefahrenstelle entschärft werden und die Sinnhaftigkeit der Schutzmaßnahme bewiesen werden.

Da ein Restrisiko und der Grad der Verletzung jedoch trotz der Schutzmaßnahmen bestehen, empfiehlt sich ein entsprechender Gefahrenhinweis auf der Maschine und in der Betriebsanleitung.

6.3 Ausständige Arbeiten im Konformitätsprüfungsprozess

Um der TORA die CE-Kennzeichnungsplakette zu verleihen, bedarf es eines zur Gänze abgeschlossenen Konformitätsverfahrens (siehe Kapitel 6.1). Da die TORA ein Prüfstand ist, der speziell für den Lehrstuhl für Umformtechnik entwickelt und gebaut wurde und nicht an andere Abnehmer weder in Österreich noch in anderen EU-Staaten verkauft wird, wurde vorläufig auf folgende Prüfungen im Konformitätsprozess verzichtet:

- Isolationsprüfung nach EN 60204-1
- Spannungsprüfung nach EN 60204-1
- Prüfung auf Restspannung nach EN 60204-1
- Druckprüfung der Hydraulikanlage bis zum Maximaldruck
- Prüfung der elektrischen und elektronischen Komponenten
- Messung des von der Maschine ausgehenden Luftschalles
- Anbringung eines Typenschildes mit genauen Angaben zu Maschine.

7 Maschinensteuerung

7.1 Allgemeine Anforderungen

7.1.1 Anforderungen an die Funktionalität

Im Allgemeinen muss die Maschinensteuerung für die Durchführung von:

- Kalttorsionsversuch,
- Warmtorsionsversuch und
- Reibschweißversuch

ausgelegt sein. Die Ablaufsteuerung der drei Versuche verläuft wie in Diagramm 7.1 dargestellt. Für den *Kalttorsionsversuch* wird mit einer Wägezellenkonstruktion das Torsionsmoment M_t und mit dem Drehgeber des Elektromotors der Verdrehwinkel Θ gemessen. Bei der Ermittlung von Warmfließkurven durch den *Warmtorsionsversuch* muss eine Versuchsdurchführung innerhalb eines vorgegebenen Temperaturfeldes durchführbar sein. Nach dem Warmversuch muss der Probekörper für die Gefügekonservierung kontrolliert abgekühlt werden können.

Der bei weitem komplexere *Reibschweißprozess* verlangt zumindest die Messung und das kontrollierte Aufbringen der Stauchkraft F_{Stauch} , die durch die Verwendung von einer Kraftmessdose ermittelt wird. Um einen qualitativ hochwertigen Prozessablauf wie in Abbildung 2.4 dargestellt, sicherzustellen, muss eine Parametrierung von Drehzahl, Drehmoment und Stauchkraft F_{Stauch} möglich sein.

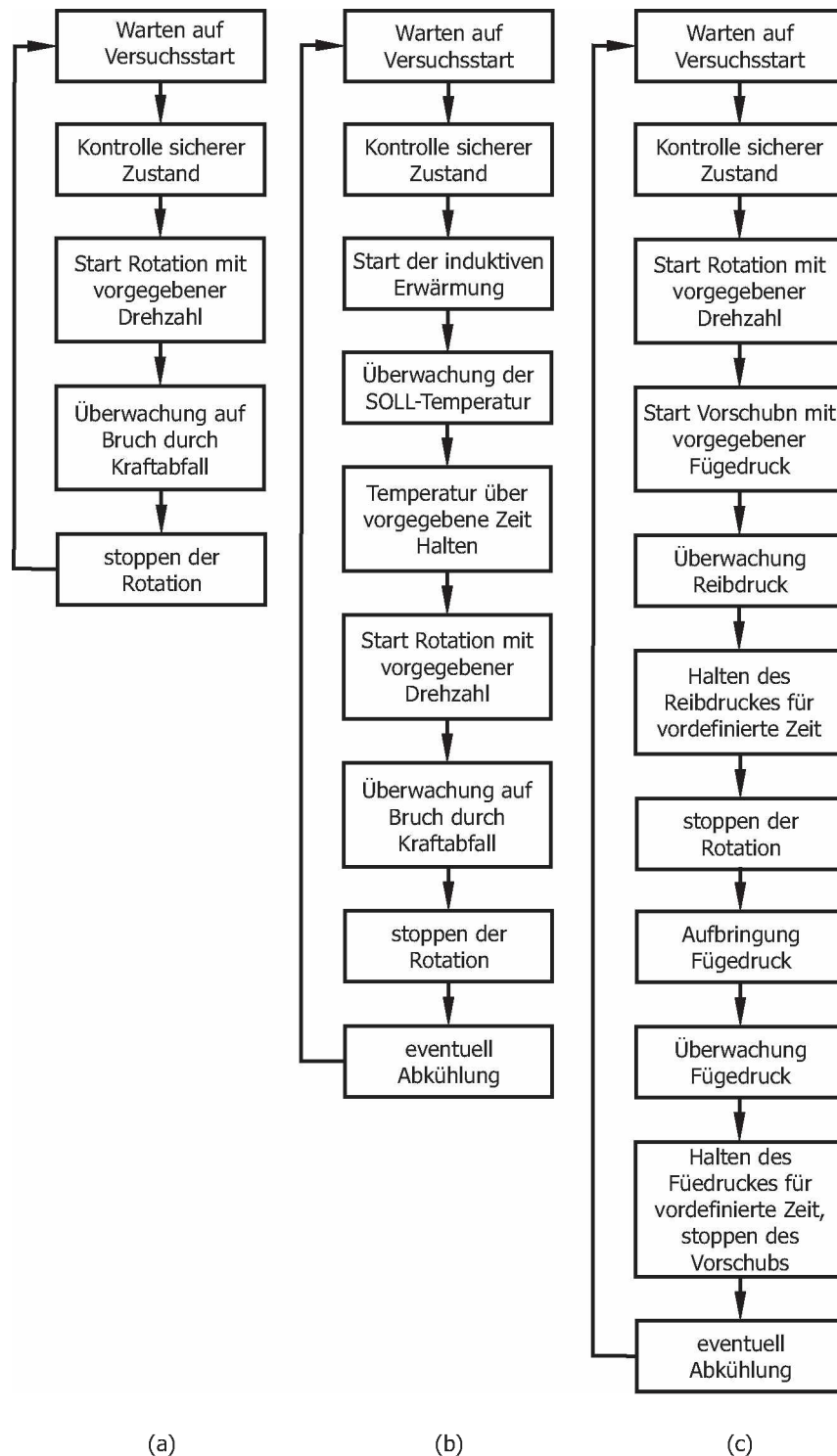


Abbildung 7.1: Ablaufdiagramm TORA: Das dargestellte Diagramm zeigt den Versuchsablauf für den (a) Kalttorsions-, den (b) Warmtorsionsversuch und den (c) Reibschweißversuch.

Die Steuerungsstruktur selbst ist im Kapitel 7.3 näher beschrieben. Neben der normgerechten und sicherheitstechnisch korrekten Auslegung muss dem Bediener auch ein ergonomisch angepasster Arbeitsplatz geboten werden. Die Gestaltung und Ausrichtung der Bedienelemente wirken sich direkt auf die physische Belastung des Personals aus, die daraus resultierenden Gefahren sind laut Risikoanalyse (siehe Kapitel 6.2) einzustufen. Aus diesem Grund wurde diese Problematik im Konformitätsprüfungsprozess besonders berücksichtigt und bestmöglich gelöst.

7.1.2 Anforderungen an die Sicherheitsfunktionen

In Kapitel 6.1 kristallisierten sich die konstruktiven steuerungstechnischen Maßnahmen (Kontrolle der Stellung der Schutztüre) bzw. die steuerungstechnischen Schutzeinrichtungen (Not-Aus-Schalter und der Schutz vor Wiederanlaufen) als die effektivsten Sicherheitsverbesserungen heraus. Bei der Einzelbewertung, wie es die ÖNORM EN 954-1 *Sicherheit von Maschinen- Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen- Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze* vorsieht, wurde die erforderliche Leistungsfähigkeit (Schutzkategorie) jeder steuerungstechnischen Maßnahme mit Hilfe eines Risikographen (siehe Abbildung 7.2) ermittelt. Dabei wird im ersten Schritt die Ernsthaftigkeit der Verletzung ermittelt, anschließend die Gefährdungsexposition beurteilt und abschließend die Möglichkeit der Vermeidung ermittelt. Diese Vorgangsweise der Gefahrenbeurteilung führt zur Feststellung der geringsten Schutzkategorie für die entsprechende steuerungstechnischen Maßnahmen. Für die Maßnahmen

- bewegliche, trennende Schutzeinrichtung mit Sicherheitszuhaltung und
- Not-Aus-Schaltung

ergab sich aus dieser Betrachtung die Schutzkategorie 4. Dies ergab sich durch die Bewertung der Gefahr laut Risikograph 7.2, da die unter Umständen auftretende Versetzung, wie z.B. Quetschungen, als schwere Verletzung (S2) eingestuft werden muss. Bei schweren Versetzungen ist weiters die Gefährdungsexposition zu eruieren. Da der Benutzer bei der TORA im Betriebsfall permanent im unmittelbaren Maschinenkontakt steht, gilt die Gefährdungsexposition als häufig bis dauernd (F2). Bei der Betrachtung, ob die Vermeidung der Verletzung möglich wäre, ergab die Bewertung, dass eine Vermeidung kaum möglich ist (P2). Somit haben die Schutzmaßnahmen der TORA den höchsten Anforderungen zu entsprechen (Kategorie 4).

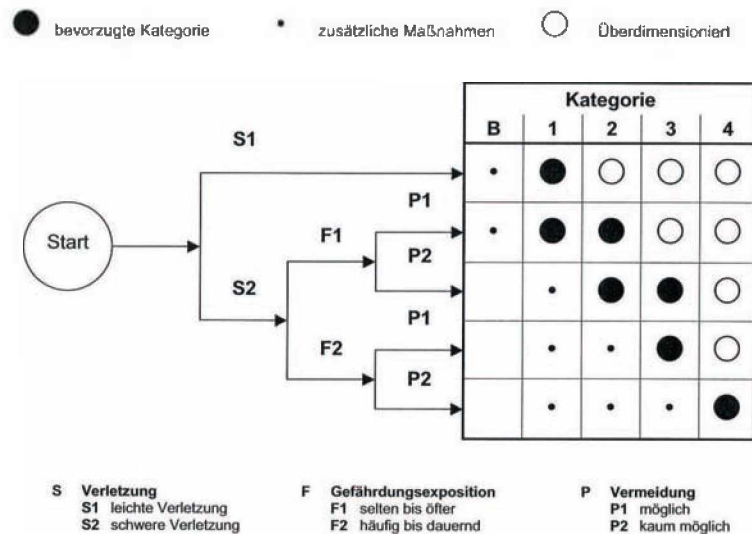


Abbildung 7.2: Risikograph laut ÖNORM EN 954-1: Bei der Ermittlung der Schutzkategorie einer steuerungstechnischen Maßnahmen wird die entsprechende Gefährdung bewertet. Im ersten Schritt wird die Ernsthaftigkeit der Verletzung ermittelt, anschließend wird die Gefährdungsexposition beurteilt und abschließend die Möglichkeit der Vermeidung ermittelt. Diese Vorgangsweise der Gefahrenbeurteilung führt zur Feststellung der geringsten Schutzkategorie für die entsprechende steuerungstechnische Maßnahme.

7.2 Umsetzung der Hardware

7.2.1 Schnittstelle für den Anwender

Als Schnittstelle zwischen Maschine und Anwender sind ein Bedienpanel und eine Signalsäule vorgesehen. Das Bedienpanel ist in einem Schaltschrank untergebracht und ist für den Bediener schwenkbar ausgeführt, um den ergonomischen Anforderungen gerecht zu werden. Im Schaltschrank sind, wie laut Norm vorgeschrieben, ein EIN-, ein AUS-Schaltknopf und ein NOT-AUS-Schalter, sowie zusätzlich jeweils ein Schalter für das Öffnen und das Schließen der Vorrichtung und eine Entriegelungstaste für den Sicherheitszuhälter der Schutztüre verbaut. Weiters verfügt der Bediener über ein Bedienfeld, das zur Steuerung und zur Kommunikation mit der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) benutzt wird. Dieses SPS-Bedienfeld ermöglicht eine autarke Bedienung der Anlage und Parametrierung der einzelnen Versuche, ohne dass ein wei-

terer Messrechner benötigt wird.

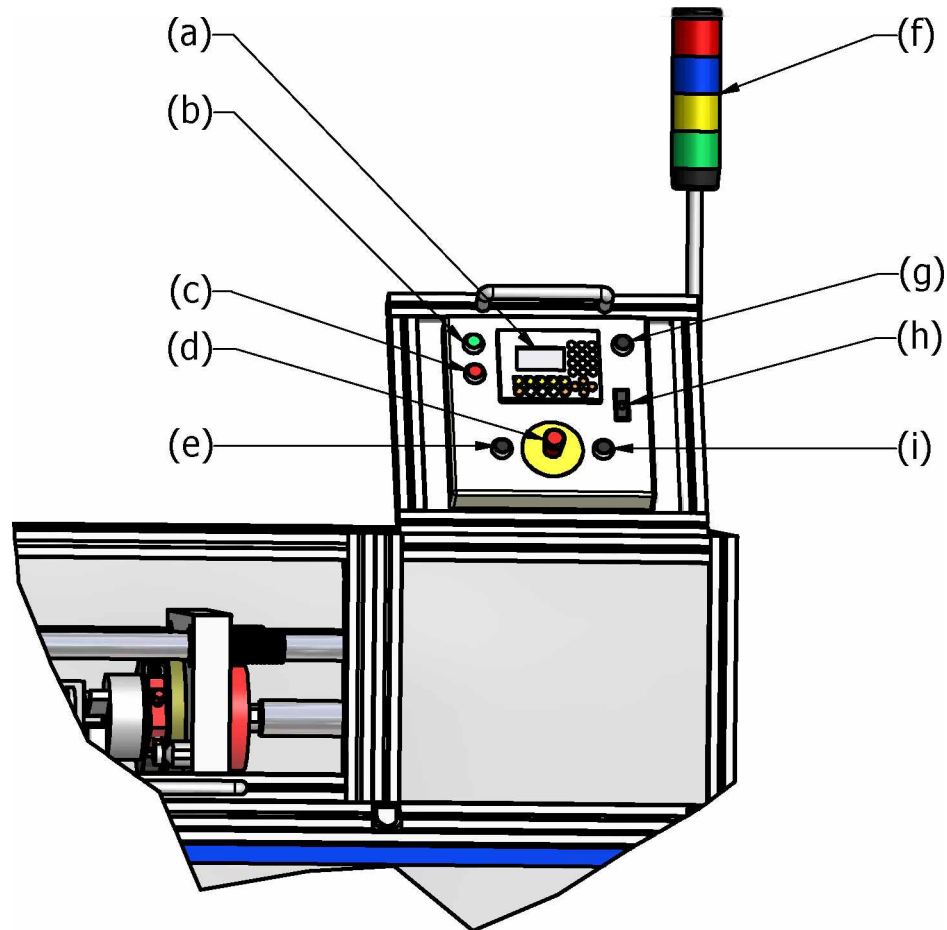


Abbildung 7.3: Bedienpanel und Signalsäule der TORA: Als Schnittstelle zwischen der Maschine und dem Anwender dienen ein Bedienpanel und eine Signalsäule (f) mit farbigen Leuchtelementen. Das Bedienpanel ist in einem eigenen Schaltschrank untergebracht, der aus folgenden Einzelteilen besteht: (a) SPS-Bedienfeld, (b) EIN-Schaltknopf, (c) AUS-Schaltknopf, (d) NOT-AUS-Schalter, (e) Vorschubschaltknopf, (g) Entriegelungstaste, (h) Schaltkastenverriegelung, (i) Rückschub.

Die optische Statusanzeige der Anlage wird über eine Signalsäule mit farbigen Leuchtelementen verwirklicht. Die Signalsäulenanzeige mit dem Farbcode ist bei allen Maschinen am Lehrstuhl für Umformtechnik vereinheitlicht und signalisiert somit für Benutzer und andere beschäftigte Personen von der Maschine ausgehende Gefahren. Der Anlagenstatus wird über den Farbcode in Tabelle 7.1 dargestellt.

Tabelle 7.1: Farbcode der Statusanzeige der TORA: Der Anlagenstatus wird über eine Signalsäule mit farbigen Leuchtelementen dargestellt.

Farbe	Anlagenstatus
ROT	Not-Aus
BLAU	Automatikmodus
GELB	Induktor in Betrieb
GRÜN	Spannung liegt an

7.2.2 Auswahl der Steuerungseinheit

Da die Umsetzung der Anforderungen an die Steuerung der Anlage nur mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) möglich ist, die allerdings nur der Schutzkategorie B entspricht [29], muss die SPS hinter speziellen Sicherheitsschaltgeräten angeschlossen werden, die der Kategorie 4 entsprechen (siehe Kapitel 7.1.2). Diese hierarchische Schaltung von SPS und Sicherheitsschaltgeräten garantiert auch bei einem internen Fehler der SPS Handhabungssicherheit bei der Verwendung der Anlage. Die Sicherheitsschaltgeräte kontrollieren und überwachen permanent die oben genannten Sicherheitsfunktionen auf ihren Status.

Die Anlagensteuerung wurde mit Hilfe eines *Bernecker + Rainer Industrie-Elektronik GmbH (B&R) Systems* umgesetzt, da am Lehrstuhl mit diesem Anlagentyp gute Erfahrungen gemacht wurden und andere Versuchsanlagen mit einem ähnlichen System der Firma *B&R* betrieben werden. Als Herzstück der SPS kam die Zentraleinheit CP1485 mit einem Celeron 400 Prozessor mit einer Zykluszeit von 400 μ s zum Einsatz. Um Ein- und Ausgänge lesen bzw. schreiben zu können, wurde diese Zentraleinheit durch entsprechende Input- und Outputmodule ergänzt.



Abbildung 7.4: Zentraleinheit der SPS: Die zentrale Recheneinheit der SPS besteht aus einem Celeron 400 Prozessor, der in die Zentraleinheit CP1485 der Firma *B&R* zum Einsatz kommt.

Die SPS muss in der Lage sein, die in der Tabelle 7.2 angegebenen Parameter aufzunehmen bzw. auszugeben.

Für die Erfassung der digitalen Eingänge wurden Module mit der Bezeichnung DI6371 ausgewählt. Pro Modul können hier 6 digitale 24 VDC Sensoren in 2-Leitertechnik angeschlossen werden. Obwohl zur Zeit nur sechs digitale Eingänge benötigt werden, wurden zur Abdeckung zukünftiger Aufgaben ein weiteres derartiges Modul verbaut. Das Setzen der digitalen Ausgänge erfolgt mit zwei Modulen vom Typ DO6322, die das exakte Gegenstück zu den digitalen Eingangsmodulen darstellen. Der Input von Motordrehzahl, Wegaufnehmer, Normalkraft und Tangentialkraft erfolgt über ein analoges Modul vom Typ AI4632 mit einer digitalen Wandlerauflösung von 16 Bit. Bei der Temperaturmessung kam ein Modul vom Typ AT6402 zum Einsatz. Dieses analoge Modul ist in der Lage, die Werte von sechs Thermoelementen in einer digitalen Wandlerauflösung von ebenfalls 16 Bit zu verarbeiten. Der analoge Output erfolgt über ein Modul, das dem Gegenstück zum Modul AI4632 entspricht.

7.2.3 Umsetzung der Sicherheitstechnik

Bei der Umsetzung der Hardware für die Sicherheitstechnik kam ein System bestehend aus zwei Sicherheitsschaltgeräten der Firma *Pilz* zum Einsatz, die intern redundant abgesichert arbeiten. Ein Sicherheitsschaltgerät steht im permanenten Kontakt mit dem Magnetschalter und der Sicherheitszuhaltung der Schutztüre. Es registriert den Zustand der Schutztüre. Das andere baugleiche Gerät ist für die Überwachung des NOT-AUS-Schalters und für die Steuerung bei einer Auslösung verantwortlich. Sollte im Betriebsfall einer der beiden Sensoren anzeigen, dass die

Schutztüre geöffnet ist oder der NOT-AUS-Schalter betätigt wird, wird vom Sicherheitsschaltgerät die Anlage elektronisch gesteuert still gesetzt und mit einer wählbaren Verzögerung der Leistungsteil über die Schütze physisch getrennt. Somit sind diese Bauteile für die Überwachung der Schutztüre mit Sicherheitszuhaltung, die Trennung der Leistungselektrik sowie für die Steuerung bei Notabschaltung verantwortlich. Die genaue Verschaltung der Sicherheitssteuergeräte findet sich im Schaltplan der Leistungselektrik (siehe Abbildung 8.1). Der Induktor ist von der automatischen Abschaltung im beim Öffnen der Schutztüre nicht betroffen, da die Induktoranlage nur vor dem Frequenzumrichter von der Leistung getrennt werden kann. Somit würde die komplette Induktionsanlage bei jedem Öffnen der Schutztüre abgeschaltet und müsste nach jedem Schließen der Schutztüre neu in Betrieb genommen werden.

7.3 Umsetzung der Software

Über die Menüstruktur (siehe Abbildung 7.5), die über das SPS-Bedienfeld visualisiert und parametrierbar ist, ist eine Durchführung des Torsions- und Reibschweißversuchs möglich. Die Menüführung im SPS-Bedienfeld ist wie in Abbildung 7.5 aufgebaut und beginnt mit der Auswahl des Versuches, der sich in *Torsionsversuch KALT*, *Torsionsversuch WARM* und *Reibschweißen* unterteilt. Im zweiten Schritt erfolgt die Parametrierung des gewählten Versuches. Nach der abgeschlossenen Parametrierung erfolgt der Versuchsstart. Im laufenden Versuch wird der Versuchsstatus angezeigt und der Bediener hat die Möglichkeit, den Vorgang abubrechen oder einen Nothalt einzuleiten.

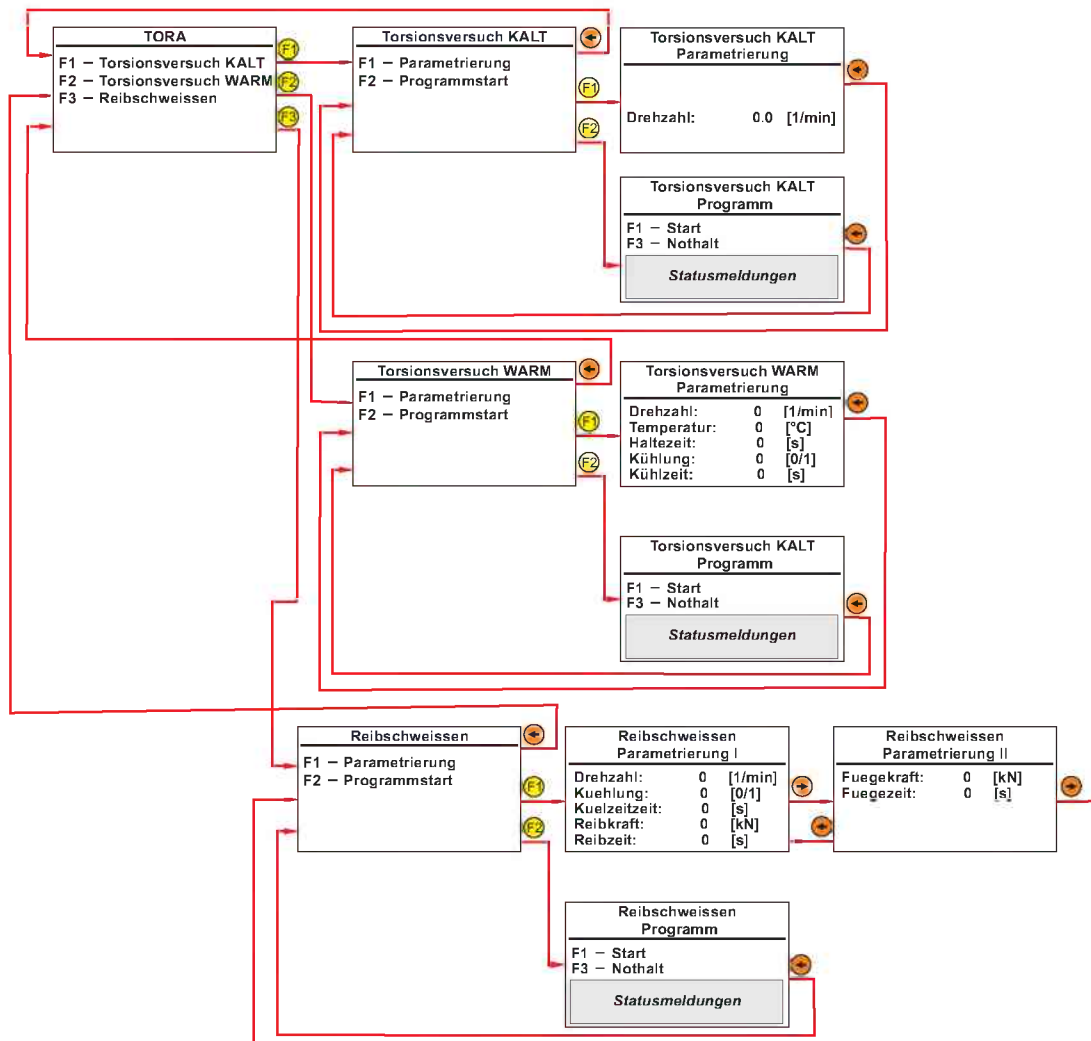


Abbildung 7.5: Menüstruktur der TORA: Die abgebildete Menüstruktur stellt den Ablauf der Menüfolge der Anlage von der Wahl des Versuchs, über die Parametrierung, bis zum Versuchsstart dar.

Die Ablaufsteuerung 7.1 der einzelnen Prozesse wurde in Form einer Finite State Machine implementiert und umgesetzt. Die Programmierung der softwaretechnischen Arbeiten wurde von einer Gruppe von Studenten der Montanuniversität Leoben im Zuge eines Semesterprojektes übernommen und verwirklicht.

Tabelle 7.2: Ein- und Ausgänge des Steuersystems: Die SPS muss im Stande sein, die aufgelisteten Parameter aufzunehmen bzw. auszugeben.

Funktion	Signalart	Modulart
Taste „Vorrichtung Schließen“	digital input	DI6371
Taste „Vorrichtung Öffnen“	digital input	
Antrieb Spindel betriebsbereit	digital input	
Antrieb Hydraulikzylinder betriebsbereit	digital input	
Status Sicherheitsschaltgerät „NOT-AUS“	digital input	
Status Sicherheitsschaltgerät „SCHUTZTÜRE“	digital input	
Ventilstellung „Vorrichtung Öffnen“	digital output	DO6322
Ventilstellung „Vorrichtung Schließen“	digital output	
Reglerfreigabe Rotationsbewegung	digital output	
Reglerfreigabe Linearbewegung	digital output	
Regler Induktor	digital output	
Reset Sicherheitsschaltgerät „SCHUTZTÜRE“	digital output	
Signalleuchte „Automatikbetrieb“	digital output	
Drehzahl-Istwert Rotationsbewegung	analog input	AI4632
Istwert Wegaufnehmer	analog input	
Istwert Normalkraft	analog input	
Istwert Tangentialkraft	analog input	
Thermoelement 1	analog input	AT6402
Thermoelement 2	analog input	
Thermoelement 3	analog input	
Sollwert Rotationsbewegung	analog output	AO4632
Sollwert Linearbewegung	analog output	
Sollwert Induktor	analog output	

8 Auslegung und Umsetzung der Elektrik und der Steuerung

Die Anlagenelektrik der kombinierten Torsions- und Reibschweißanlage lässt sich in drei Bereiche unterteilen:

- Leistungsteil,
- Schutz- und
- Steuerteil

der Anlage. Die Teilbereiche Leistungs- und Steuerteil der Elektrotechnik sind in separaten Schaltschränken platziert. Diese Trennung der Einzelkomponenten dient zur Abschirmung der Steuerteile gegen störende Ströme des Leistungsteiles und zudem ist die Einbaumöglichkeit von zwei kompakten Schaltschränken bei weitem einfacher. Die Schutzelektrik und deren Komponenten teilen sich auf beide Schaltschränke auf. Die Sicherheitssteuerung und die Überwachung sind im Steuerteil untergebracht und der mechanisch arbeitende Teil der Schutzelektrik befindet sich im Leistungsschaltschrank.

8.1 Leistungselektrik

Der *Leistungsteil* der Maschine besteht aus den Antrieben für die Rotations- und die Linearbewegung, dem Pumpenmotor der Kühlanlage für das „Einfrieren“ des Gefüges in der Probe, der Motorlüftung, der Fremdlüftung für den Schaltschrank, dem Induktor für die Probenerwärmung, sowie der Versorgung der Schutz- und Steuerungselektrik. Die Tabelle 8.1 spiegelt eine Zusammenfassung der oben genannten Verbraucher und deren technische Daten wider.

Tabelle 8.1: Tabelle der elektrischen Endverbraucher im Leistungsteil der Anlagenelektrik: Die Tabelle zeigt eine Übersicht der Endverbraucher der Anlage und ihrer wichtigsten technischen Kenndaten.

Verbraucher	Bemerkung	Leistung [kW]	Nennstrom [A]
E-Motor Rotationsantrieb	<i>OSWALD REGELBARE ELEKTROMOTOREN</i> QD13.3-4FR-Resolve TS265	36	68
E-Motor Linearbewegung	<i>ELVEM</i> 100LB-4	3	6,47
E-Motor Kühlung	<i>Knuth</i>	0,09	0,2
Fremdlüftung E-Motor	<i>OSWALD REGELBARE ELEKTROMOTOREN</i> A2D240-AA02-06.2	0,07	0,16
Lüftung Schaltschrank (6 Stk.)	<i>Fanolis S.p.A</i> FBF	0,02	1
Induktionsanlage	<i>iew</i> TTH10	10	32
Steuerungs- und Schutzelektrik	Versorgung Netzteil <i>B&R</i> Anlage	0,644	2,6
Frequenzumrichter Linienbewegung	<i>KEB</i> 12.F5.C1B	0,37	1,8
Servoumrichter Rotationsbewegung	<i>Lenze</i> EVS9330	45	89

Anhand dieser Tabelle und der Kennwerte der einzelnen Verbraucher im Anlagensystem konnte unter Berücksichtigung der Norm ÖVE EN 60204-1 und der Sicherheitsvorschriften der Maschinenrichtlinie ein Schaltplan (siehe Abbildung 8.1) für die Anlage angefertigt werden.

In der Tabelle 8.2 sind die verwendeten Kabelquerschnitte für die auftretenden Nennströme I_n laut Norm ÖVE EN 60204-1 zusammengefasst.

Tabelle 8.2: Kabelquerschnitte laut Norm ÖVE EN 60204-1: Basierend auf der ÖNORM werden bei der Verlegeart B2, die für mehradrige Leitungen in Elektroinstallationsrohren oder -kanälen gültig ist, die angeführten Kabelquerschnitte bei entsprechendem Nennstrom vorgeschrieben.

Kabelquerschnitt [mm ²]	Nennstrom I_n [A]	Verlegeart
0,5	4	B2
1,5	13	B2
2,5	20	B2
6	35	B2
25	80	B2

Zur Absicherung des Stromnetzes der Anlage muss ein Fehlerstromschutzschalter, kurz FI-Schalter, installiert werden. Der FI Schalter basiert auf dem Prinzip eines Summen-Stromwandlers. Dieser Wandler summiert alle Ströme vorzeichenrichtig auf und trennt die Stromzufuhr, wenn die Summe nicht innerhalb einer genormten Toleranzgrenze liegt. Da Umrichter über eine höhere Fehlerstromtoleranz verfügen als die restlichen Verbraucher der Anlage, werden zusätzlich zu dem umrichtertauglichen FI-Schalter (300mA Fehlerstrom) alle anderen Verbraucher mit einem verbrauchergerechten FI-Schalter (30mA Fehlerstrom) abgesichert.

Vor dem Servo- und dem Frequenzumrichter muss jeweils noch ein Frequenzfilter installiert werden, der unerwünschte Signalanteile abschwächt oder unterdrückt. Nach den beiden Umrichtern und vor der Induktionsanlage befinden sich auf jedem Kabelstrang noch zwei Sicherheitsschütze, die für die physikalische Trennung des Stromflusses herangezogen werden und somit als redundantes Sicherheitsabschaltsystem im Notfall dienen. Ein Sicherheitsschutz arbeitet mit zwei Schaltstellungen. In der Grundstellung ist kein Stromfluss möglich, da eine Feder die Kontakte permanent trennt. In der Arbeitsstellung wird mit einem Steuerstrom eine Magnetspule aktiviert, die mit ihrem Magnetfeld die mechanisch getrennten Kontakte zusammenführt und somit den Stromfluss ermöglicht.

Zusätzlich muss ein Motorschutzschalter bei der Kühlung und bei dem Motorlüfter vorgesehen

werden. Der Motorschutzschalter schützt den Motor vor thermischer Überlastung, die von einer mechanischen Überbelastung oder beim Ausfall einer Phase auftreten kann.

Unter Berücksichtigung der Normen und der sicherheitstechnischen Aspekte wurde der Schaltplan (Abbildung 8.1) angefertigt.

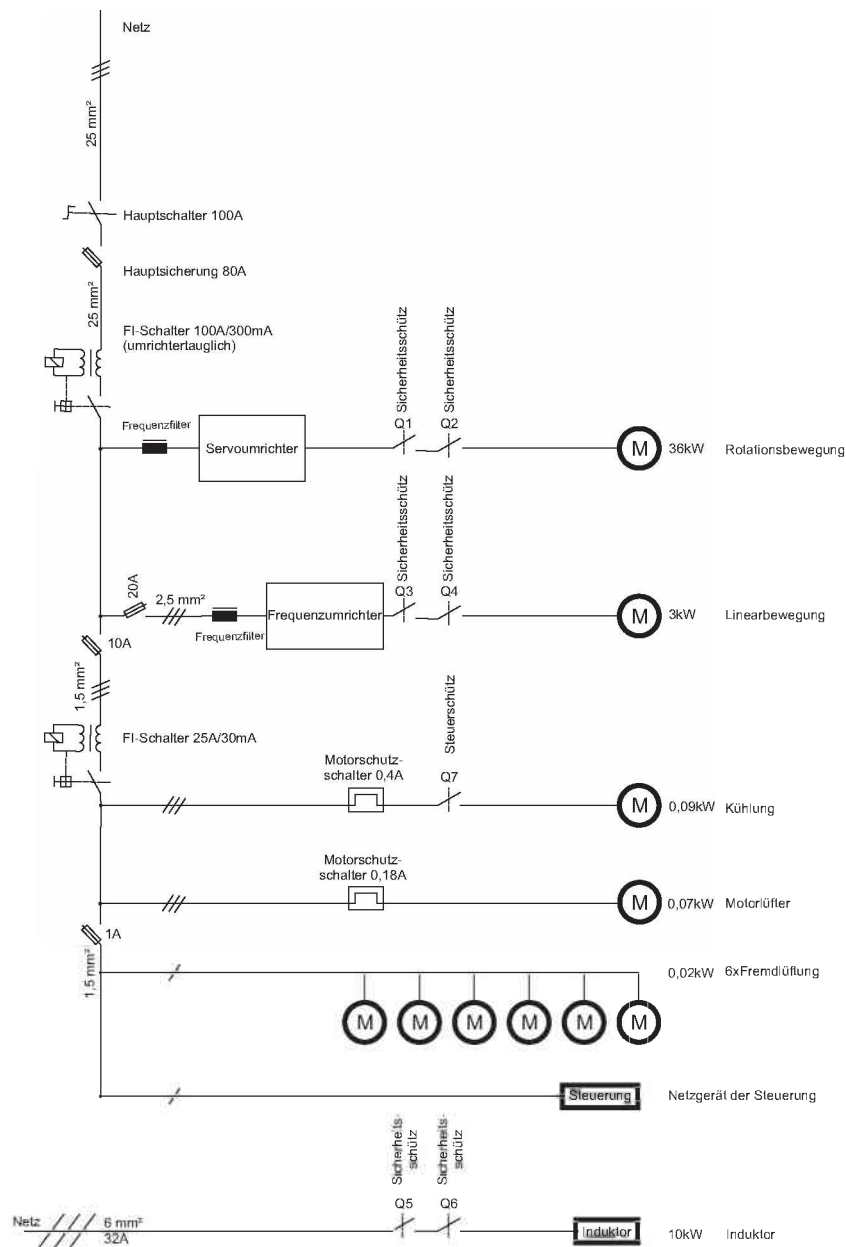


Abbildung 8.1: Schaltplan der Leistungselektrik der Anlage: Der Schaltplan zeigt die Leitungsquerschnitte, die Sicherungen und die Schutz- und Steuereinrichtungen bis zu den entsprechenden Endverbrauchern.

8.2 Steuerelektrik

Das Herzstück der Steuerelektrik ist eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), die die Anlage selbst und den Ablauf der Versuche steuert (siehe Abbildung 7.1). Die Bedienung der SPS erfolgt über ein SPS-Bedienfeld, das im schwenkbar gelagerten Bedienpanel untergebracht ist (siehe Kapitel 7.2.1). Durch die Aufnahme einer Vielzahl von eingehenden analogen oder digitalen Daten und deren Verarbeitung, sowie deren Ausgabe in Input- und Outputmodulen (siehe Kapitel 7.2.2) kann eine exakte Steuerung vorgenommen werden. Zu den Aufnahmeinstrumenten des Messsystems zählen der Wegaufnehmer, der Resolver, die Torsions- und die Normalkraftmessdose. In der Tabelle 8.3 sind die Komponenten der Steuerelektrik und ihre wichtigsten Kenndaten aufgelistet. Die eingehenden Messsignale müssen zusätzlich mittels Messverstärker für die SPS aufbereitet werden.

Tabelle 8.3: Tabelle der elektrischen Endverbraucher im Steuerteil der Anlagenelektrik: Die Tabelle zeigt eine Übersicht der im Steuerteil der Anlage verwendeten Komponenten und ihrer wichtigsten technischen Kenndaten.

Verbraucher	Bemerkung	Leistung [W]	Nennstrom [A]
SPS	<i>B&R</i>	7	2,2
Steuerpanel	<i>B&R</i> PW 35	6	0,09
Messverstärker 2 Stück	<i>HBM</i> AE 301	3	0,125
Messverstärker	<i>HBM</i> AE 501	2,4	0,1

8.3 Schutzelektrik

Bei der Umsetzung der Maschinenrichtlinie (MRL) und der Maschinensicherheitsverordnung (MSV) wird primär eine Steigerung der Maschinensicherheit schon in der Konstruktionsphase angestrebt. Sollten trotz der konstruktiven Maßnahmen immer noch Sicherheitslücken bestehen, werden diese dann durch steuerungstechnische Komponenten ausgeschlossen (siehe Kapitel 7). An die Schutzelektrik, die aus einem redundanten System besteht, werden folgende Anforderungen gestellt:

- der Leistungsteil der Anlage muss mit einem NOT-AUS Taster gestoppt werden können. Bei der Notabschaltung muss im ersten Schritt der Antrieb gesteuert abgestellt werden und anschließend müssen in einem vordefinierten Zeitintervall die restlichen Verbraucher abgeschaltet werden (Stopp-Kategorie 1);
- die Schutztüre der Maschineneinhausung muss bei Manipulationsversuchen ähnlich wie beim NOT-AUS Taster alle Endverbraucher außer dem Induktor vom Netz nehmen; der Induktor ist von dieser Zwangsabschaltung nicht betroffen, da die Induktoranlage bei jedem Probenwechsel betroffen wäre und neu gestartet werden müsste.
- die Schutztüre muss während eines Versuchsvorganges automatisch zugehalten werden;
- die Abschaltung der gefährlichen Antriebe und des Induktors muss über zwei Abschaltwege erfolgen, d.h. die Abschaltung muss über die Umrichtersteuerung und über eine physische Trennung erfolgen;
- die physische Trennung hat über ein Sicherheitsschütz zu erfolgen. Zusätzlich wird dieses Schütz durch ein weiteres seriell geschaltetes Schütz abgesichert und die Schaltstellung der Schütz wird aus sicherheitstechnischen Gründen überprüft.

Die oben angeführten Forderungen an die Schutzelektrik wurden mit Hilfe von fertigen Sicherheitssteuergeräten in der Anlage umgesetzt, da diese den geforderten Sicherheitsstandards voll entsprechen und den Auflagen der Normen und Richtlinien gerecht werden. Die verwendeten Sicherheitsschaltgeräte sind auch für das Ansprechen der Sicherheitsschütz zuständig, die eine physische Trennung der Leitungen vornehmen. In der Tabelle 8.4 sind die Komponenten der Schutzelektrik und ihre wichtigsten Kenndaten aufgelistet.

Tabelle 8.4: Tabelle der Schutzgeräte der Anlagenelektrik: Die Tabelle zeigt eine Übersicht der Schutzgeräte, die in der Anlage verwendet wurden und gibt ihre wichtigsten technischen Kenndaten wieder.

Verbraucher	Bemerkung	Leistungs- aufnahme [W]	Nenn- strom [A]	Schalt- leistung [W]
Sicherheitsschaltgerät 2 Stück	<i>Pilz</i> AE 501	4,0	0,4	-
Sicherheitsschütz 2 Stück	<i>Moeller</i> DILM65	0,5 Haltebetrieb	65	30.000
Sicherheitsschütz 2 Stück	<i>Moeller</i> DILM40	0,5 Haltebetrieb	40	18.500
Sicherheitsschütz 2 Stück	<i>Moeller</i> DILM150	2,1 Haltebetrieb	150	75.000

Die Abbildung 8.2 zeigt den Schaltplan der Schutzelektrik mit ihren Einzelkomponenten und deren interner Verschaltung.

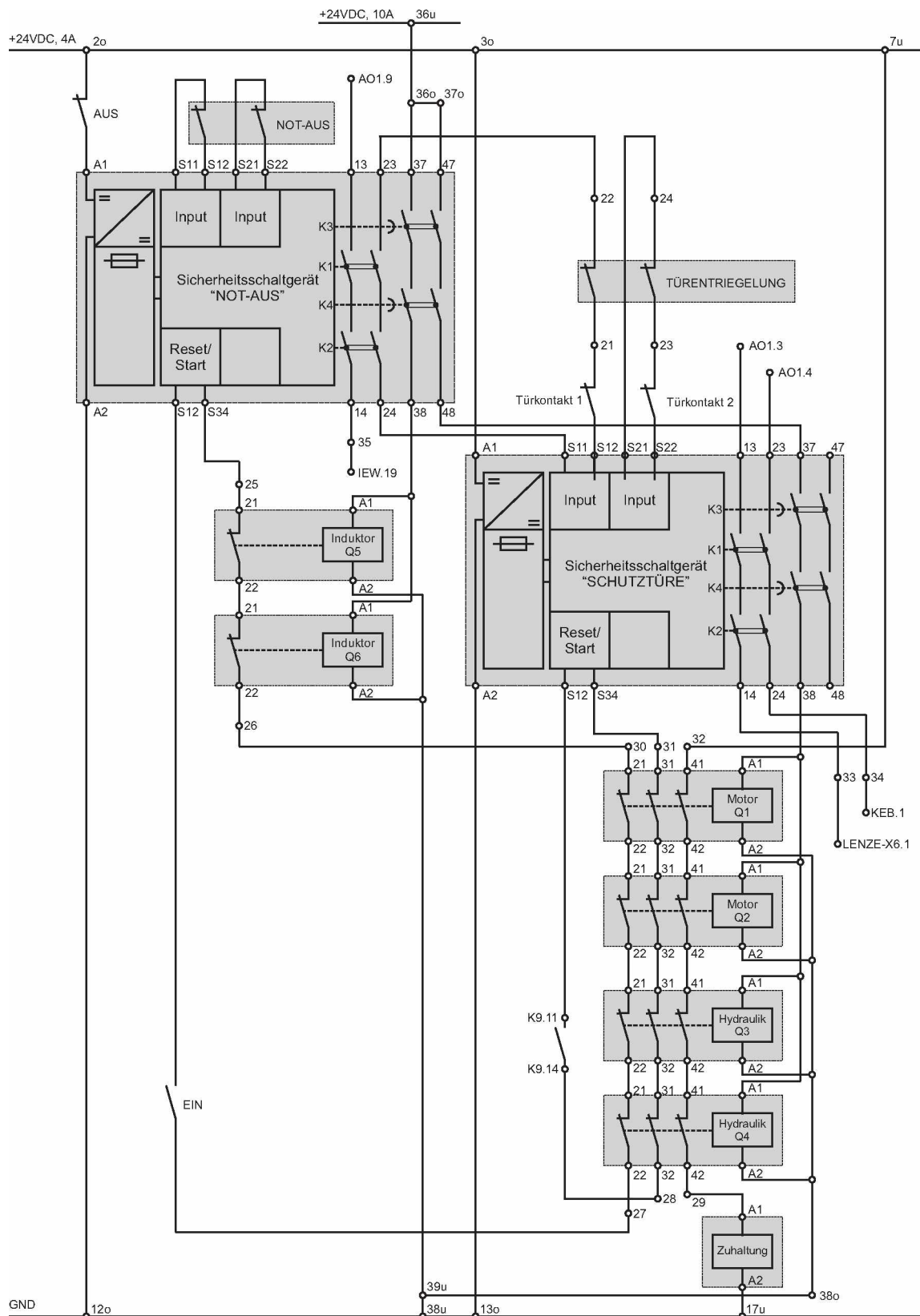


Abbildung 8.2: Schaltplan der Schutzelektrik der Anlage: Der dargestellte Schaltplan gibt die Schutzelektrik mit ihren Einzelkomponenten und ihren internen Verschaltung wider.

9 Inbetriebnahme

In diesem Kapitel wird die Inbetriebnahme der fertiggestellten Prüfmaschine, wie sie in Abbildung 5.16 dargestellt ist, beschrieben. Bei der Inbetriebnahme wurden schrittweise folgende Tests vorgenommen:

- Überprüfung der Grundfunktionen der Anlage,
- einwandfreie Funktionsweise der Sicherheitsschaltgeräte und der dazugehörigen Komponenten, sowie
- Durchführung von Torsions- und Reibschweißversuchen.

Bei der Überprüfung der *Grundfunktionen* der Anlage wurde der Rotationsantrieb, der Vorschub und das Kühlsystem getestet. Es konnten weder beim Elektroantrieb, noch bei der Hydraulikanlage und deren Zusatzaggregaten oder beim Kühlsystem Unregelmäßigkeiten in Bezug auf Steuerung, Parametrierung, Funktion oder Fluiddichtheit festgestellt werden.

Auch bei der *Anlagensicherheitsüberprüfung*, bei der die Funktion der Sicherheitsschaltgeräte, das Ansprechen der Schütze, das Auslösen des NOT-AUS-Schalters, die Zuhaltung und die Kontrolle der Schutztüre überprüft wurden, konnten keine Mängel festgestellt werden.

Um die geforderten *Betriebsarten* überprüfen zu können, wurde ein Kalttorsionsversuch, ein Warmtorsionsversuch, sowie Reibschweißversuche mit Aluminiumproben durchgeführt (siehe Kapitel 9.1 bis 9.3).

9.1 Torsionsversuch bei Raumtemperatur

Bei der Durchführung des Torsionsversuches bei Raumtemperatur (RT) wurden hantelförmige Aluminiumproben mit der Werkstoffbezeichnung AA7075 (siehe Abbildung 9.1) verwendet.

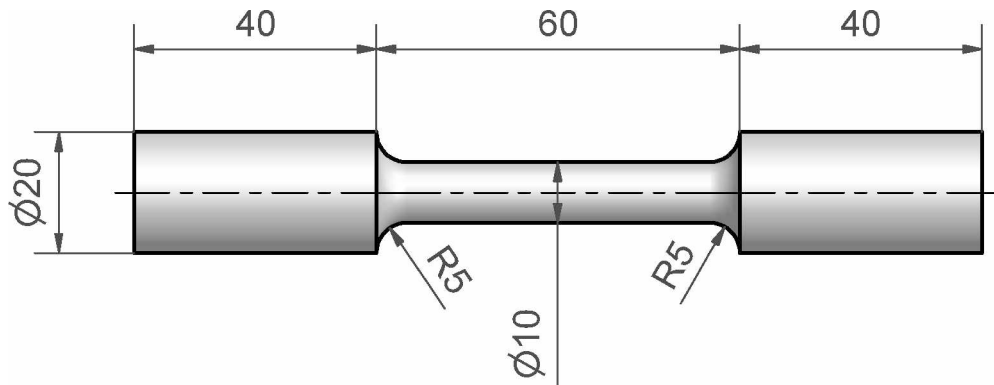


Abbildung 9.1: Probenkörpergeometrie der Torsionsprobe: Für die Durchführung des Torsionsversuches wurden Aluminiumprobenkörper mit der dargestellten Geometrie verwendet.

Beim Kalttorsionsversuch wurde die Umdrehungsanzahl mit 60 min^{-1} festgelegt. Daraus ergab sich durch den Probendurchmesser von 10 mm und der Probenlänge von 60 mm eine Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ von:

$$\dot{\varphi} = \frac{n \cdot \pi \cdot r}{l \cdot 60} = \frac{60 \text{ min}^{-1} \cdot \pi \cdot 5 \text{ mm}}{60 \text{ mm} \cdot 60} = 0,262 \text{ s}^{-1}. \quad (9.1)$$

Beim Versuch selbst wurde das Torsionsmoment und der Verdrehwinkel gemessen. Die Auswertung der Daten ergeben durch das Auftragen des Verdrehwinkels auf der Abszisse und durch das Schneiden des entsprechend gemessenen Torsionsmoments auf der Ordinate den Torsionsmomentenverlauf (siehe Abbildung 9.2).

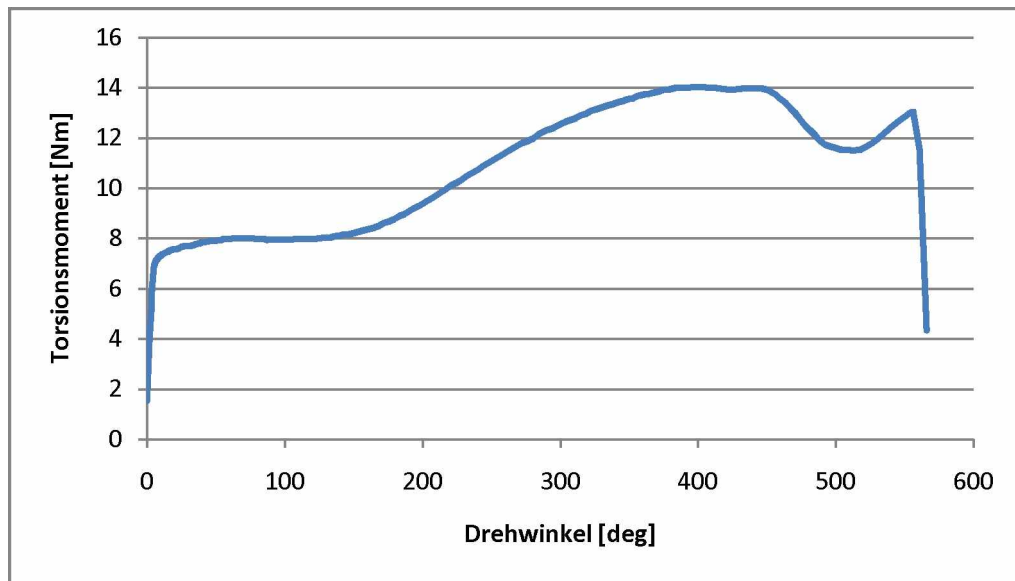


Abbildung 9.2: Torsionsmomentenverlauf beim Kalttorsionsversuch: Die Versuchsdurchführung erfolgte bei RT und einer Umdrehungsanzahl von 60 min^{-1} . Als Probenkörper stand eine hantelförmige Probe (siehe Abbildung 9.1) aus dem Werkstoff AA7075 zur Verfügung.

Der Versuch verlief planmäßig und es kam zu einer gleichmäßigen Kurvenausbildung. Nur ab einem Winkel von 445° kam es zum leichten Durchrutschen der Probe in den Futterbacken. Dies ist in Abbildung 9.2 durch das Abfallen der Kurve bei 445° zu erkennen. Nach der anschließenden Stabilisierung der Rundprobe im Futter stieg die Torsionsmomentenkurve wieder an und es kam bei 556° zum Bruch der Probe.

Abhilfe beim Problem des Durchrutschens bringt eine Verringerung der Spannfläche im Futter, um den Einspanndruck zu erhöhen, und die Steigerung des Reibkoeffizienten μ durch Sandstrahlen der Probenoberfläche im Bereich der Einspannlängen.

9.2 Warmtorsionsversuch

Der Warmtorsionsversuch wurde, wie im Kalttorsionsversuch, mit einer Aluminiumprobe aus dem Werkstoff AA7075 mit den Abmessungen wie in Abbildung 9.1 durchgeführt. Für die Messung der Temperatur wurde an die Probe ein Thermoelement angebracht. Zusätzlich musste die verfahrbare Mittelkonsole und der Hydraulikkolben entkoppelt werden, da es in einem Vorversuch durch die Wärmeausdehnungen entlang der Probenlängsachse zum Ausknicken der Probe

kam. Zur Erwärmung der Probe auf 100 °C diente der Induktor TTH10 der Firma *iew*. Die Drehzahlvorgabe von 60 min⁻¹ wurde beibehalten. Wie beim Kalttorsionsversuch wurde nach dem Auslesen der Messdaten eine Torsionsmomentenkurve erstellt (siehe Abbildung 9.3).

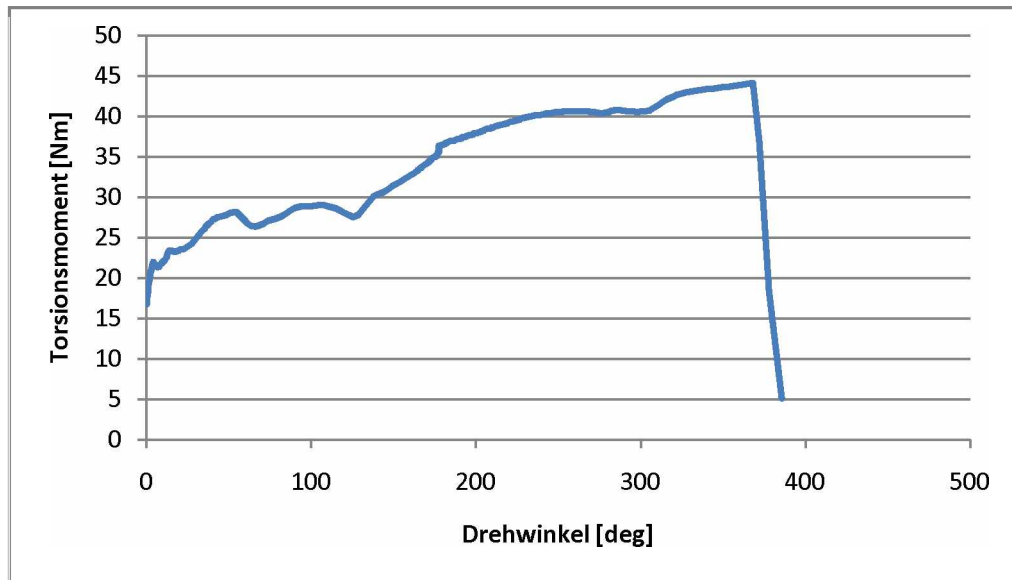


Abbildung 9.3: Torsionsmomentenverlauf beim Warmtorsionsversuch: Die Versuchsdurchführung erfolgte bei einer Temperatur von 100 °C und einer Umdrehungsanzahl von 60 min⁻¹. Als Probekörper stand eine hantelförmige Probe (siehe Abbildung 9.1) aus dem Werkstoff AA7075 zur Verfügung, an der die Temperaturmessung mit einem Thermoelement erfolgte.

Die ausgewertete Kurve zeigt eine stetig steigende Entwicklung mit leichten Einbrüchen bis zu einem Verdrehwinkel von 120°. Das Problem des unruhigen Verlaufs der Drehmomentkurve rühren vom Motor her, da dieser Schwierigkeiten hatte, das erforderliche Drehmoment aufzubringen. Ab dem Verdrehwinkel von 120° ist ein schöner Verlauf festzustellen, der bei einem Winkel von 368° durch den Bruch der Probe endet. Auch dieser Versuch konnte planmäßig abgeschlossen werden.

9.3 Reibschweißversuch

Beim Reibschweißversuch wurde die Pressschweißverbindung zwischen zwei rotationssymmetrischen Aluminiumzylindern, die einen Durchmesser von 20 mm und eine Länge von 90 mm

aufwiesen, hergestellt. Als Werkstoff wurde die Aluminiumlegierung AA6082 mit einer Zugfestigkeit R_m von 275 N/mm^2 [20] verwendet. Da keine Erfahrungswerte für die Parametrierung des ersten Versuches vorhanden waren, legte man die Versuchsparametrierung wie folgt fest:

- Drehzahl 2200 min^{-1} ,
- Reibkraft 8 kN ,
- Reibdauer 20 s ,
- Fügekraft 50 kN ,
- Fügedauer 10 s .

Bei diesem Erstversuch wurde ohne Kühlung der Proben nach dem Fügeschritt gearbeitet. Durch die intuitiv herangezogenen Werte konnte keine optimal ausgebildete, aber eine stabile material-schlüssige Pressschweißverbindung hergestellt werden (siehe Abbildung 9.4). Die Schwächen der Durchführung des Reibschweißversuches lagen in der Nachdruckphase, d.h. in der Regelung und Parametrierung des Nachdruckes. Dieses Problem liegt in der Parametrierung des Druckreglers und ist dort zu beseitigen.



Abbildung 9.4: Reibschweißverbindung zweier Aluminiumprobekörper: Die Abbildung zeigt die materialschlüssige Pressschweißverbindung von zwei beim Probeversuch verwendeten Probekörpern der Legierung AA6082 unmittelbar nach dem Fügeschritt.

Um mehr Erfahrungen bei der Parametrierung zu erlangen, wurden sechs weitere Reibschweißproben mit leicht abgeänderten Parametern hergestellt (siehe Tabelle 9.1).

Tabelle 9.1: Tabelle der Prozessparameter der hergestellten Reibschweißverbindungen: Die Tabelle zeigt die Auflistung der verwendeten Prozessparameter, wie sie bei der Herstellung der geprüften Reibschweißverbindungen verwendet wurden.

Probennummer	Drehzahl [min ⁻¹]	Reibkraft [N]	Reibzeit [s]	Fügekraft [N]	Fügezeit [s]
1	2200	8000	20	50000	10
2	2000	10000	20	20000	10
3	2000	7000	20	20000	10
4	2500	5000	20	20000	10
5	2000	7000	20	50000	10
6	2000	7000	20	50000	10
7	2000	7000	40	50000	10

Bei der Zugprüfung, der nicht nachbearbeiteten Proben vom Material AA6082, stellten sich Zugfestigkeiten R_m zwischen 73 N/mm² und 269 N/mm² ein (siehe Abbildung 9.5).

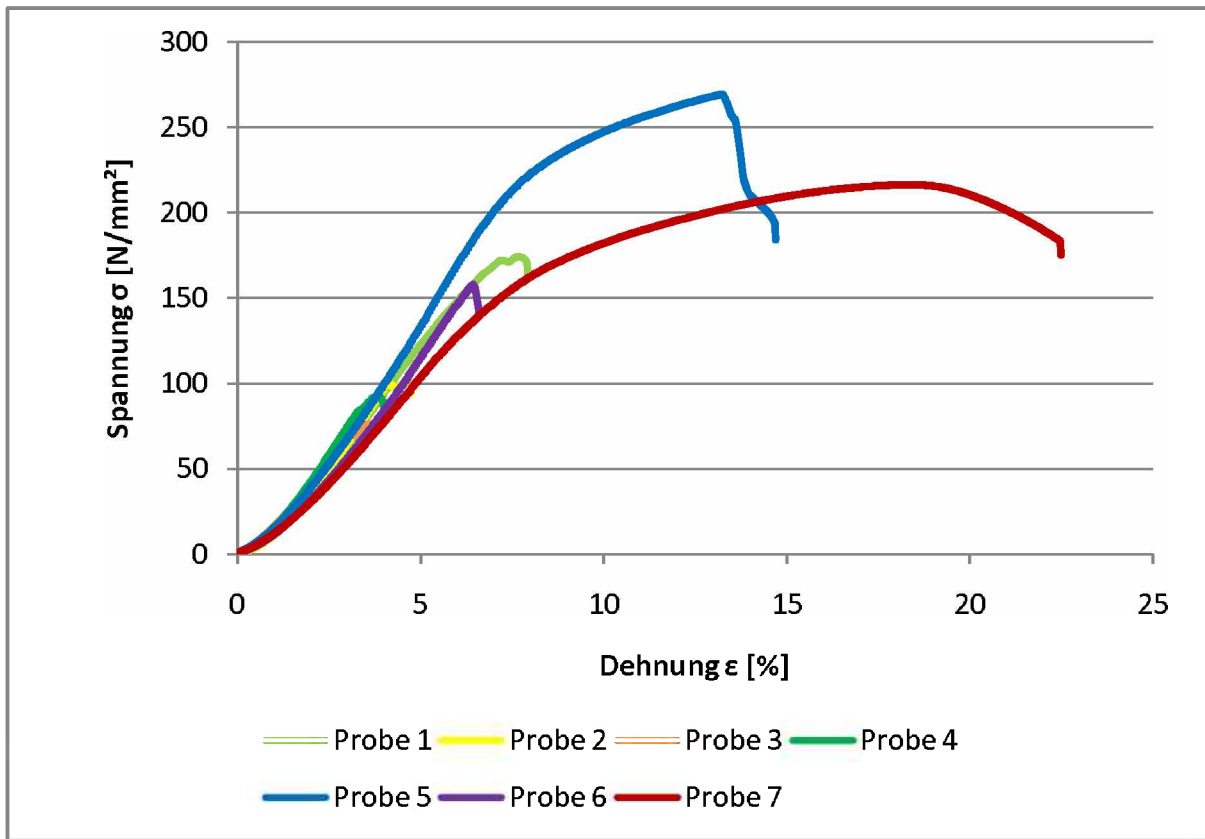


Abbildung 9.5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Reibschweißproben: Bei ersten Zugversuchen zeigte sich bei den unbearbeiteten Reibschweißproben vom Werkstoff AA6082 eine Zugfestigkeit R_m zwischen 73 N/mm^2 und 269 N/mm^2 .

Nach der durchgeführten Zugprüfung der Reibschweißproben zeigte sich teilweise eine gute Materialverschweißung über den gesamten Fügequerschnitt wie Abbildung 9.6 der Fügefläche von Reibschweißprobe Nr.1 (siehe Tabelle 9.1) repräsentativ für die getesteten Proben darstellt. Die systematische Untersuchung von Reibschweißverbindungen wird jedoch Gegenstand einer eigenständigen wissenschaftlichen Arbeit sein.



Abbildung 9.6: Fügefläche einer Reibschweißverbindung: Nach dem durchgeführten Zugversuch zeigte sich die Fügefläche an den getesteten Materialproben, wie hier repräsentativ an Probe Nr.1 (siehe Tabelle 9.1) dargestellt.

10 Schlussresümee

Mit der Torsions- und Reibschweißanlage ist es gelungen, zwei Prüfmaschinen in einer kompakten Anlage zu vereinen. Durch die offene und flexible Steuerung ist es möglich, die Maschine auch an zukünftige Anforderungen anzupassen und laufend zu optimieren. Bei der TORA konnten die in den Kapiteln 3.1 Pflichten- und 3.2 Lastenheft gestellten Ziele zum größten Teil umgesetzt und verwirklicht und im Rahmen der Inbetriebnahme gute Resultate bei der praktischen Durchführung der einzelnen Versuche erzielt werden.

10.1 Stärken und Schwächen der Anlage

Zu den Stärken der Anlage gehört in erster Linie die Möglichkeit, dass auf einer kompakten Maschine drei verschiedene Versuche mit einfach herzustellender Probengeometrie durchgeführt werden können. Weiters konnte durch die Berücksichtigung der menschlichen Ergonomie in der Konstruktionsphase sowie durch das schwenkbar ausgeführte Bedienpanel ein angenehmes, effektives und sicheres Arbeiten ermöglicht werden. Durch den Einsatz der Sicherheitseinhausung mit Schutztüre und Sicherheitszuhaltung wurde das Risiko eines Arbeitsunfalles auf ein Minimum reduziert. Bei der Bedienung der Anlage wurde auf ein leicht verständliches intuitives Menüführungssystem, das eine hohe Flexibilität der Prüfparameter ermöglicht großer Wert gelegt.

Im Bereich der Probeneinspannung liegt jedoch noch Verbesserungspotential. Teilweise traten Probleme bei der Probeneinspannung auf, da eine zu geringe Haltekraft vorhanden war und die Proben bei höheren Torsionsmomenten zum Durchrutschen neigten. Zur Lösung dieses Problems bieten sich zwei verschiedene Möglichkeiten an, ohne von der Dreibackenfuttereinspannung abzuweichen. Die erste Variante sieht eine Verringerung der Spannfläche vor, um den Einspanndruck auf die Probe zu erhöhen. Die andere Lösung besteht in der Steigerung des Reibkoeffizienten μ durch Sandstrahlen der Probenoberflächen im Bereich der Einspannlängen. Durch die beschriebenen Lösungsvarianten ist eine einfache und kostengünstige Problemlösung möglich.

Beim Warmtorsionsversuch muss eine Entkopplung von der verfahrbaren Mittelkonsole zum Hydraulikkolben vorgenommen werden, da es zum Ausknicken der Proben aufgrund der Wärmeausdehnungen entlang der Längsachse kommen kann. Derzeit erfolgt die Entkoppelung durch das Lösen der Schrauben, die die Mittelkonsole und die Kraftmessdose und somit den Hydraulikkolben verbinden. In Zukunft würde sich hierfür ein Schnellverschluss anbieten.

Weiters muss eine Optimierung der Regelparameter bei der Stauchkraftaufbringung vorgenommen werden, um die Druckphase beim Reibschweißversuch besser beherrschen zu können. Zusätzlich wäre hier der Einbau einer Drossel sinnvoll.

Schließlich müssen bei der Einstellung des Umrichters für den Elektromotor müssen noch Modifikationen vorgenommen werden, da das gesamte Torsionsmoment nicht von Anfang an zur Verfügung steht. Sollten diese Modifikationen nicht zum gewünschten Ziel führen, so müsste am Anfang des Versuches ein Freilauf des Elektromotors gewährleistet werden, um damit den Momentenanstieg bis zum gewünschten Moment zu gewährleisten.

Diese Optimierungsschritte der TORA, das Ausloten der technischen Grenzen der Anlage, sowie die Durchführung der ersten Versuchsserien und deren Parametrierungen werden jedoch Teil einer eigenen Arbeit sein.

10.2 Optimierungsmöglichkeiten der Anlage

Um beim Warmtorsionsversuch die Temperatur der Probe ohne dem Anbringen von Thermoelementen exakt messen zu können, ist eine Messung auch mit einem Pyrometer möglich. Dies hätte den Vorteil, auf die Verkabelung der Thermoelemente verzichten zu können. Die Temperaturmessung mit einem Pyrometer ist allerdings aus technischen Gründen erst ab einer Temperatur von 300 °C möglich. Zusätzlich könnte die Kühlmittelanlage noch um eine Rückschlagklappe im Leitungssystem erweitert werden, um die Kühlflüssigkeit sofort und ohne Verzögerung aufbringen zu können.

10.3 Zeitlicher Aufwand

Beim zeitlichen Aufwand von den Recherchen, der Auslegung und der Konstruktion bis hin zur Inbetriebnahme der fertigen Anlage fiel in der Projektgruppe, die aus einem Universitätsassistenten, drei Technikern und dem Autor bestand, eine Gesamtarbeitsleistung von 66 Arbeitswochen an. Der Gesamtarbeitsaufwand ist in Abbildung 10.1 genau für die entsprechenden Arbeitsabschnitt angeführt. Aus dieser prozentuellen Auflistung geht sehr deutlich hervor, dass der eigentliche Zusammenbau der extern gefertigten Einzelteile mit 62 % der Gesamtarbeitszeit am zeitintensivsten war.

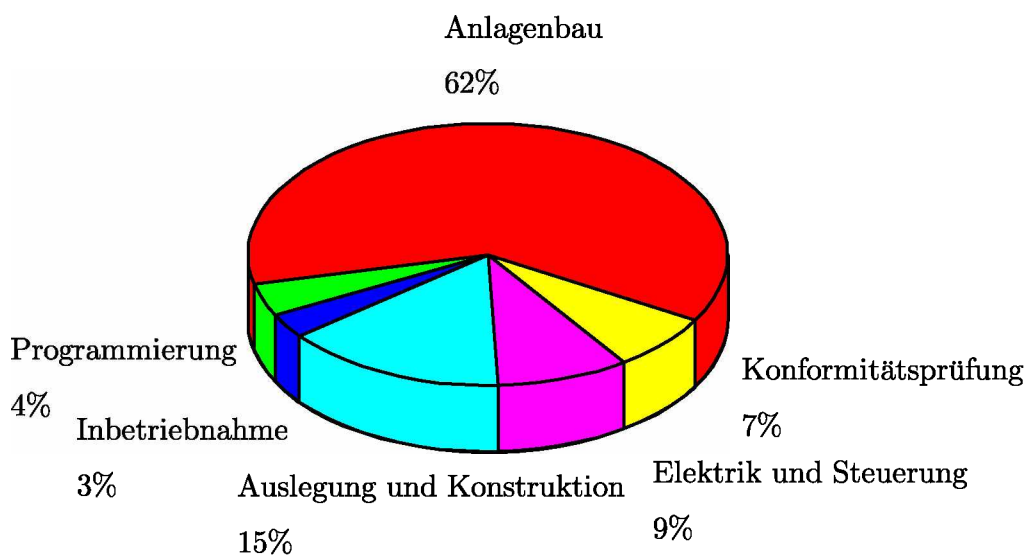


Abbildung 10.1: Prozentuelle Arbeitszeitverteilung bei der TORA: Die Gesamtarbeitszeit von 66 Arbeitswochen splittete sich in die Bereiche Recherchen, Auslegung und Konstruktion, Auslegung Elektrik und Steuerung, Konformitätsprüfungsprozess, Anlagenbau, Programmierung der Steuerung und der Inbetriebnahme auf.

Da es sich bei der TORA um einen Prototyp handelt, mussten erst wichtige Erfahrungen gesammelt werden. Aus diesem Grund und der erforderlichen Nachbesserungsarbeiten, die sich aus Mängeln in den Zusammenstellungszeichnungen der Zulieferfirmen von Hilfselementen und aus Ungenauigkeiten in den extern gefertigten Einzelteilen ergaben, entfiel der größte Arbeitsaufwand auf den Anlagenbau.

10.4 Kostenverteilung

Das Projekt TORA wurde aus Mitteln der Europäischen Union und aus nationalen Mitteln finanziert. Für die gesamte Anlage stand ein Budget von 40.000 Euro zur Verfügung. Der reine Materialwert inklusive der Fremdfertigungsaufwand der TORA beträgt insgesamt 36.905,94 Euro. Die Gesamtarbeitszeit von 66 Arbeitswochen ist nicht in diesem Budget enthalten und wurde vom Lehrstuhl für Umformtechnik gedeckt. Wie in Abbildung 10.2 veranschaulicht, fielen 70 % aller Kosten auf den Elektroantrieb, die Hydraulikanlage und die extern gefertigten mechanischen Komponenten. Die restlichen 30 % verteilen sich auf die Bereiche Sicherheit, Messtechnik und Automation der Maschine.

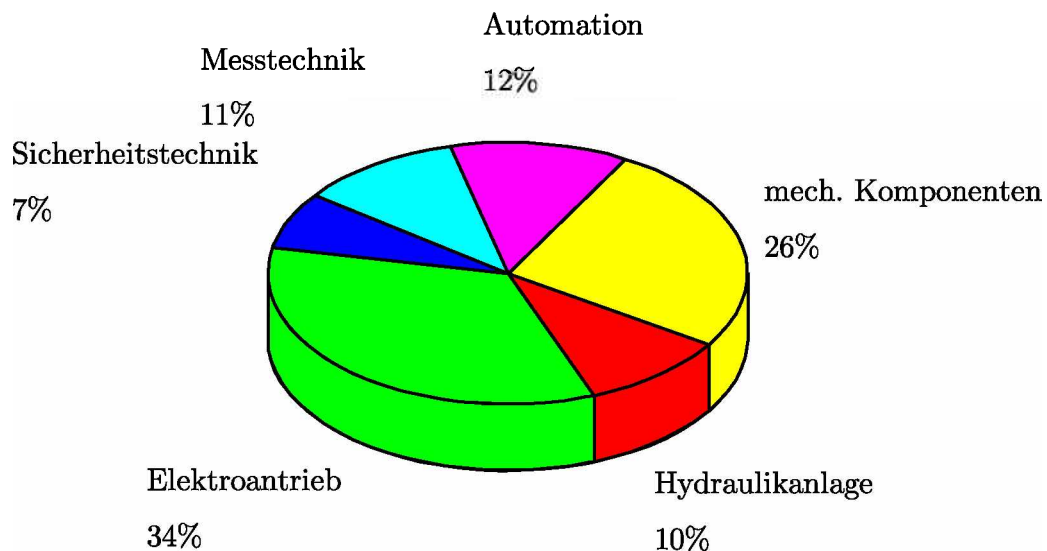


Abbildung 10.2: Prozentuelle Kostenverteilung der TORA: Die Bruttogesamtsumme der Anlage von 36.905,94 Euro verteilte sich prozentuell, wie dargestellt, auf die Bereiche mechanische Komponenten, Hydraulikanlage, Elektroantrieb, Sicherheitstechnik, Messtechnik und Automation.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Fließkurve und Spannungs-Dehnungs Diagramm	6
2.2	Flachstauchversuch	8
2.3	Torsionsprobe	9
2.4	Prozessphasen beim Reibschweißprozess	12
2.5	Möglichkeiten der Wärmeeinbringung beim Reibschweißprozess	13
2.6	Schematischer Aufbau einer Reibschweißanlage	14
4.1	Black-Box-Modell der Torsions- und Reibschweißanlage	19
4.2	Hydraulikplan	22
4.3	Säulengestell	24
4.4	Geometrievarianten der Zwischenplatte	24
4.5	Momentenmessung	26
4.6	Messaufbau	27
5.1	Axialführungssystem	29
5.2	Befestigung der Säulen an den Grundplatten	31
5.3	Gewindedetail der Führungssäule	32
5.4	Torsionsmomentenmesskonstruktion	35
5.5	Schnittdarstellung der Torsionsmomentenmesskonstruktion	36

5.6	Hydraulikanbindung	37
5.7	Schnittdarstellung der Elektromotoranbindung	38
5.8	Schutzeinhausung der Maschine	39
5.9	Anbindung der Führungsvorrichtung an die Bodenplatte durch eine Schweißkonstruktion	41
5.10	Anbindung der Führungsvorrichtung an die Bodenplatte durch eine Schraubverbindung	42
5.11	Anbindung der Führungsvorrichtung und Schutzeinhausung an die Bodenplatte	43
5.12	Konstruktion des Maschinentisches	46
5.13	Maschinentisch mit eingebauten Maschinenelementen	46
5.14	Isometrische Ansicht der Vorderfront	48
5.15	Isometrische Ansicht der Hinterfront	49
5.16	Foto der realen Anlage	50
5.17	Fotos einiger Konstruktionsdetails	51
6.1	Schutzmaßnahmen	59
7.1	Ablaufdiagramm TORA	62
7.2	Risikograph	64
7.3	Bedienpanel und Signalsäule der TORA	65
7.4	Zentraleinheit der SPS	67
7.5	Menüstruktur der TORA	69

8.1	Schaltplan der Leistungselektrik der Anlage	74
8.2	Schaltplan der Schutzelektrik der Anlage	78
9.1	Probenkörpergeometrie der Torsionsprobe	80
9.2	Torsionsmomentenverlauf beim Kalttorsionsversuch	81
9.3	Torsionsmomentenverlauf beim Warmtorsionsversuch	82
9.4	Reibschweißverbindung zweier Aluminiumprobekörper	83
9.5	Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Reibschweißproben	85
9.6	Fügefläche einer Reibschweißverbindung	86
10.1	Prozentuelle Arbeitszeitverteilung bei der TORA	89
10.2	Prozentuelle Kostenverteilung der TORA	90

Tabellenverzeichnis

1	Tabelle der verwendeten lateinischen Formelzeichen	IX
2	Tabelle der verwendeten griechischen Formelzeichen	X
3	Tabelle der verwendeten tiefgestellten Indizes	XI
4	Tabelle der verwendeten Abkürzungen	XII
6.1	Bewertungsschema zur Gefahrenanalyse des LsfUT	55
6.2	Gefahrenanalyse	57
6.3	Gefahrenanalyse mit Schutzmaßnahmen	58
7.1	Farbcode der Statusanzeige der TORA	66
7.2	Ein- und Ausgänge des Steuersystems	70
8.1	Elektrische Endverbraucher im Leistungsteil der Anlagenelektrik	72
8.2	Kabelquerschnitte laut Norm ÖVE EN 60204-1	73
8.3	Tabelle der elektrischen Endverbraucher im Steuerteil der Anlagenelektrik	75
8.4	Tabelle der Schutzgeräte der Anlagenelektrik	77
9.1	Tabelle der Prozessparameter der hergestellten Reibschweißverbindungen	84

Literaturverzeichnis

- [1] K. Lange: *Umformtechnik Grundlagen*, Springer Verlag, 2002.
- [2] B. Buchmayr: *Umformtechnik Einführung*, Skriptum am Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben, 2006.
- [3] G. Bernrath: *Weiterentwickelte Meßmethoden zur Erfassung von Werkstoffdaten für die Warmumformung*, Shader Verlag, 2000.
- [4] R. Bürgel: *Festigkeitslehre und Werkstoffmechanik*, vieweg, 2005.
- [5] D. Muhs, H. Wittel, D. Jannasch und J. Voßiek: *Roloff/Matek Maschinenelemente*, vieweg, 2005.
- [6] R. Kopp und H. Wiegels: *Einführung in die Umformtechnik*, Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1998.
- [7] H. Tschätsch: *Praxis der Umformtechnik*, vieweg, 2003.
- [8] D. Banabic, H.-J. Bunge, K. Pöhlandt und A. E. Tekkaya: *Formability of Metallic Materials*, Springer Verlag, 2000.
- [9] V. Schuler und H. Fahrenwaldt: *Praxiswissen Schweißtechnik*, vieweg, 2003.
- [10] K.-J. Matthes: *Schweißtechnik*, Fachbuchverlag in Leipzig im Hanser Verlag, 2002.
- [11] Roos und Mail: *Werkstoffkunde für Ingenieure*, Springer Verlag, 2004.
- [12] A. Neumann und D. Schober: *Reibschweißen von Metallen*, DVS-Deutscher Verein für Schweißtechnik, 1991.
- [13] V. Vill: *Reibschweißen von Metallen*, DVS-Deutscher Verein für Schweißtechnik, 1967.
- [14] *DVS Richtlinien Widerstandsschweißtechnik*, DVS-Deutscher Verein für Schweißtechnik, 2002.
- [15] *Jahrbuch Schweißtechnik 2006*, DVS-Deutscher Verein für Schweißtechnik, 2006.

- [16] R. Fischer, R. Gscheidle, U. Heider, B. Hohmann, W. Keil, J. Mann, W. Pichler, B. Schlögl, P. Siegmayer, A. Wimmer und G. Wormer: *Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik*, Europa Lehrmittel, 2005.
- [17] P. Drexler, H. Faatz, F. Feicht, H. Geis, J. Morlok, A. Krielen und N. Achten: *Projektierung und Konstruktion von Hydraulikanlagen*, Mannesmann Rexroth GmbH, 1988.
- [18] H. Exner, R. Freitag, H. Geis, R. Lang, J. Oppolzer, P. Schwab, E. Sumpf, U. Ostorff und M. Reik: *Grundlagen und Komponenten der Fluidtechnik Hydraulik*, Mannesmann Rexroth GmbH, 1991.
- [19] K.-H. Decker und K. Kabus: *Maschinenelemente*, Hanser, 2006.
- [20] D. Muhs, H. Wittel, D. Jannasch und J. Voßiek: *Roloff/Matek Maschinenelemente Tabellenbuch*, vieweg, 2005.
- [21] D. Muhs, H. Wittel, D. Jannasch und J. Voßiek: *Roloff/Matek Maschinenelemente Formelsammlung*, vieweg, 2006.
- [22] K.-H. Decker und K. Kabus: *Maschinenelemente Tabellenbuch*, Hanser, 2006.
- [23] K. Markut: *Design and Commissioning of a Rotational Forging Tribimeter*, Diplomarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2006.
- [24] U. Fischer, M. Heinzler, F. Näher, H. Paetzold, R. Gomeringer, R. Kilgus, S. Oesterle und A. Stephan: *Tabellenbuch Metall*, Europa Lehrmittel, 2006.
- [25] F. Böhler: *Stahlatlas*, Böhler AG, 2007.
- [26] H. Braun, H.-D. Dobler, W. Doll, U. Fischer, W. Günter, M. Heinzler, H. Höll, D. Ignatowitz, T. Röhrer, K. Schilling, W. Röhrer und D. Strecker: *Fachkunde Metall*, Europa Lehrmittel, 1999.
- [27] M. Schweikhart: *iew INDUCTION NEWS*, iew GmbH, März 2007.
- [28] J. Chocholous, A. Hinger und N. Winkler: *Ausbildung zur Sicherheitsfachkraft 2*, AUVA Unfallversicherungsanstalt, 2006.
- [29] W. Gräf: *Maschinensicherheit Auf der Grundlage der europäischen Sicherheitsnormen*, Hüthig Verlag Heidelberg, 2004.