



Christina Ornig

**Entwicklung und Konstruktion eines Prüfstandes
zur Kalibrierung der Messtechnik von Antriebswellen**

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades einer Diplomingenieurin

Studienrichtung: Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau
Verkehrstechnik [F748]

Technische Universität Graz

Durchgeführt am Institut für Fahrzeugtechnik
und in der Firma PJ Messtechnik GmbH

Beurteiler: Dipl.-Ing. Dr.techn. Univ.-Doz. A. Eichberger

Betreuer: Dipl.-Ing. C. Lex

FTG

Graz 2012

Gesperrt bis Mai, 2014

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am _____ .

(Unterschrift)

DANKSAGUNG

Zu allererst möchte ich mich bei der Firma PJ Messtechnik GmbH und ihren Mitarbeitern bedanken, die mir erst ermöglicht haben, diese Arbeit zu verfassen. Sie sind mir alle mit Rat und Tat sofort zur Seite gestanden, wenn es nötig war und waren eine große Unterstützung für mich. Besonderer Dank gilt dabei Herrn Dr. Martin Joch, für seine Unterstützung und Einbringung in diese Arbeit.

Für die engagierte Betreuung der Arbeit möchte ich mich auch besonders bei Dipl.-Ing. Cornelia Lex des Instituts für Fahrzeugtechnik bedanken, die mich gut beraten hat und immer ein offenes Ohr für mich hatte.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei meinem Lebenspartner und einem sehr guten Freund dafür bedanken, dass sie mich durch diese Arbeit begleitet und tatkräftig unterstützt haben.

Zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mich während des gesamten Studiums nicht nur in finanzieller Hinsicht unterstützt haben und mir somit das Studium ermöglicht haben und bei allen weiteren hier nicht genannten Personen, die mich während meines Studiums begleitet haben.

KURZFASSUNG

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und Konstruktion eines Prüfstandes zur automatisierten Kalibrierung von Drehmoment- und Drehzahlsensoren für Antriebswellen (Halbachsen, Kardanwellen etc.).

Zur inhaltlichen Planung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses wurde die Vorgehensweise nach VDI-Richtlinien Nr.2221 gewählt. Nach genauer Betrachtung der Anforderungen wurde ein Konzept mit Hilfe des morphologischen Kasten erstellt, in welchem der Prüfstand aus einem Modul zur Drehmomentkalibrierung und einem zur Drehzahlkalibrierung besteht.

Dieses Konzept wurde anschließend konstruktiv umgesetzt.

Nach vollständiger Durchführung der erforderlichen Messreihen am Prüfstand werden die Messdaten aus der Antriebswelle ausgelesen und gelangen weiter zur Auswertung. Um automatisch ein Werkzeugeignis für den jeweiligen Prüfling erstellen zu können, wurde eine Auswertesequenz in einer dafür geeigneten Signalanalyse-Software geschrieben.

Auf diese Weise können die Antriebswellen direkt vor Ort beim Hersteller überprüft und mit einem Werkzeugeignis versehen werden, was dem Entwickler der zu analysierenden Antriebswelle finanziell und bezüglich der Lieferzeit entgegen kommt.

ABSTRACT

Subject of this thesis is the development and design of a test bed to calibrate torque and speed sensors of drive shafts automatically.

The planning of the development and design processes was done according to the guidelines of VDI No. 2221. After the clarification of all requirements, a concept has been prepared using the morphological box. For this purpose the test bed contains one module for torque-calibration and one for speed-calibration.

Afterwards this concept was designed.

If the data acquisition of all necessary measurements on the test bed is finished, the measurement data is read out from the drive shaft for further evaluation. For an automatic preparation of a factory certification, an evaluation sequence was developed in a signal analysis software.

By this means drive shafts can be tested on-site and the factory certification can be handed over immediately. This results in financial and time of delivery benefits for the developer of the drive shaft.

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	1
1.1. Motivation zur Entwicklung eines Kalibrierprüfstands für i-Shafts	1
1.2. Ziel der Arbeit	3
1.3. Allgemeine Grundlagen	5
1.3.1. Allgemeine Definition von Antriebswellen	5
1.3.2. Allgemeine Definition Kalibrierung und Messunsicherheit	6
1.3.3. Kalibrieren von Drehmomentaufnehmern	8
1.3.4. Kalibrieren der Drehzahl	9
1.3.5. Das Wirkprinzip der Dehnungsmessstreifen und die Wheatstone'sche Brückenschaltung	10
1.4. Systembeschreibung Datenlogger und i-Shaft	13
1.4.1. Allgemeiner Messaufbau und Funktionsweise des i-Shafts	14
1.4.2. Einsatz der i-Shafts	18
1.4.3. Abschätzung der Empfindlichkeit der Wheatstone'schen Brücken- schaltung	18
2. KONZEPTIONIERUNG	20
2.1. Anforderungen an den Prüfstand	20
2.1.1. Funktionale und technische Anforderungen	20
2.1.2. Nicht Funktionale Anforderungen	22
2.2. Anforderungen an die automatisierte Ausgabe eines formellen Kalibrierpro- tokolls	22
2.2.1. Anforderungen an die Arbeitsanweisung zum Kalibriervorgang	22
2.2.2. Auslegung des Antriebsmotors bzw. der Antriebssteuerung des Prüf- standes	23
2.3. Konzepterstellung	24
2.3.1. Umsetzung des morphologischen Kasten zur Lösungsfindung	25
2.3.2. Vergleich der entstehenden Gesamtlösungsvarianten	29

3. AUSFÜHRUNG UND KONSTRUKTION	32
3.1. Modul Drehmoment	33
3.1.1. Einleitung des Drehmoments mittels Getriebe	34
3.1.2. Anbindung des Prüflings	36
3.1.3. Referenzmessung mittels Drehmomentaufnehmer	36
3.1.4. Ausleiten des Drehmoments mittels starrer Konsole	38
3.2. Modul Drehzahl	39
3.2.1. Antrieb mit Hilfe eines Elektromotors	40
3.2.2. Lagerung des Prüflings	42
3.2.3. Referenzdrehzahlmessung mittels Drehgeber	43
3.2.4. Anbindung des Prüflings	44
3.3. Modul Rahmen	45
3.3.1. Aufbau Variante 1 Schweißkonstruktion:	45
3.3.2. Aufbau Variante 2 Baukastensystem:	48
3.3.3. Schweißkonstruktion versus Baukastensystem: Vergleich und Ent- scheidung	51
3.4. Ausführung gesamter Prüfstand	52
3.4.1. Anbindung des Moduls Drehmoment	53
3.4.2. Anbindung des Moduls Drehzahl	60
3.4.3. Gesamtüberblick	62
3.5. Sicherheit	64
4. KALIBRIERVORGANG UND PROTOKOLLERSTELLUNG	66
4.1. Kalibriervorgang am Prüfstand	66
4.1.1. Vorbereitungen vor der Kalibrierung des Prüflings	66
4.1.2. Einbau des Prüflings in die Kalibriereinrichtung	68
4.1.3. Ablauf Drehmomentkalibrierung	69
4.1.4. Ablauf Drehzahlkalibrierung	71
4.2. Auswertung der Kalibrierungen	73
4.2.1. Eingabe und Einlesen der Daten	73
4.2.2. Auswertung der Drehmomentkalibrierung	75
4.2.3. Auswertung der Drehzahlkalibrierung	78
4.3. Bestimmung der relativen erweiterten Messunsicherheit U_{MG} des Drehmo- mentmessgeräts	79
4.4. Kalibrierprotokoll	79
5. FAZIT / AUSBLICK	86
LITERATURVERZEICHNIS	88

TABELLENVERZEICHNIS	90
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	91
A.ANHANG	I
A.1. Explosionszeichnungen	I
A.2. Ergebnisse der FE-Berechnungen	IV
A.2.1. kurze Einspannung	IV
A.2.2. lange Einspannung	V
A.2.3. Berechnete Hauptnormalspannungen	VI
A.2.4. Berechnete Spannungskomponenten	X
A.3. Fertigungszeichnungen	XII

1. EINLEITUNG

Die Erfassung der für den Autorennsport (Formel 1, Rallye, etc.) charakteristischen, dynamischen und mechanischen Belastungen, welchen die Antriebswellen der Rennfahrzeuge im Einsatz ausgesetzt werden, ist für die Weiterentwicklung dieser von wesentlicher Bedeutung. Um die entsprechenden Daten völlig unabhängig vom restlichen Fahrzeug messen und erfassen zu können, wurde das sogenannte i-Shaft entwickelt.

In diesem völlig autarken System wurde eine Kombination aus Messsensoren und Datenlogger realisiert, mit der es möglich ist, das Drehmoment und die Drehzahl einer Antriebswelle zu messen und die erfassten Daten zu speichern. Mit Hilfe dieser Daten ist es in weiterer Folge möglich auch auf die Leistung des Motors zu schließen, welche ebenfalls eine Schlüsselgröße zur Entwicklung neuer Fahrzeugkomponenten darstellt.

Da ein solches i-Shaft nach der Installation der Messausrüstung und des Datenloggers kalibriert werden muss, damit eine korrekte Datenerfassung möglich ist, ist es notwendig einen dafür ausgerüsteten Kalibrierprüfstand zu entwickeln. Die Entwicklung, Konstruktion und schließlich die Anwendung eines solchen Prüfstandes ist das Thema dieser Arbeit.

1.1. MOTIVATION ZUR ENTWICKLUNG EINES KALIBRIERPRÜFSTANDS FÜR I-SHAFTS

Einer der Gründe i-Shafts zu bauen, ist die Tatsache, dass es für Hersteller von Komponenten für Rennfahrzeuge sehr schwierig ist an Informationen über die Eingangsdaten wie Motorleistung, Drehmoment und Drehzahl zu kommen. Seitens der Motorenentwickler unterliegen diese Daten oft strenger Geheimhaltung und werden nur ungern bis gar nicht preisgegeben. Für die Entwickler von Antriebswellen ist ein i-Shaft daher eine gute Alternative, um die für sie wichtigen Daten trotzdem erfassen zu können.

Ein weiterer Vorteil ist die Unabhängigkeit davon, wo und wie genau die Antriebswellen eingesetzt werden. Also kann der Kunde mit den eingebauten i-Shafts jede beliebige Rennstrecke damit fahren und den Wagen inklusive seiner Komponenten austesten, ohne Einzelheiten dazu preisgeben zu müssen. Der Entwickler der Antriebswellen erhält so trotzdem alle für ihn wichtigen und möglichst realitätsnahen Daten.

Um die Lieferzeiten und die Kosten der i-Shafts für die Auftraggeber möglichst gering zu halten, ist es von Vorteil einen Kalibrierprüfstand direkt am Herstellungsort der i-Shafts zu bauen. Derzeit werden die i-Shafts extern kalibriert, was einen erheblichen Mehraufwand und höhere Kosten verursacht. Der Aufwand bei der Herstellung wird geringer und man erhält eine unmittelbare Rückmeldung, ob das System richtig bzw. ausreichend genau misst.

1.2. ZIEL DER ARBEIT

Ziel der Arbeit ist es einen Prüfstand zur Kalibrierung der messtechnischen Ausrüstung von Antriebswellen (i-Shaft) zu konzeptionieren, konstruieren und schließlich nach Zusammenbau desselben, in Betrieb zu nehmen. Weiters soll ein Konzept für die genaue Durchführung der Kalibrierung erstellt werden. Um automatisiert einen Kalibrierschein zu erstellen, wird eine entsprechende Software entwickelt und eine normgerechte Vorlage eines solchen Kalibrierscheins erstellt.

Zur Gewährleistung der sicheren und korrekten Handhabung des fertigen Prüfstandes soll ebenfalls eine entsprechende Arbeitsanweisung verfasst werden, welche dem Bedienpersonal dann zur Verfügung gestellt wird.

Inhaltliche Planung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses

Wesentlich ist am Anfang der Arbeit auch die inhaltliche Planung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses. Dabei ist es zweckmäßig den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess in Hauptphasen zu unterteilen [Pahl u. a., 2007]:

- Planen und Klären der Aufgabe (informative Festlegung)
- Konzipieren (prinzipielle Festlegung)
- Entwerfen (gestalterische Festlegung)
- Ausarbeiten (herstellungstechnische Festlegung)

Zur genaueren Gliederung der Arbeitsschritte wurde das Modell aus der VDI-Richtlinie Nr. 2221 herangezogen (siehe Abbildung 1.1). Diese Richtlinie behandelt allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlagen des methodischen Entwickelns und Konstruierens technischer Systeme und Produkte und wird in der Literatur oft als Leitlinie für ein Vorgehen in der Praxis herangezogen.

Wie in Abbildung 1.1 ersichtlich ist ein scharfes Trennen der Hauptarbeitsschritte nicht immer möglich, da unter Anderem auch ein Vor- oder Rückspringen zwischen den Arbeitsschritten erfolgt. Z.B. kann für erst später in der Entwurfsphase erkennbare Nebenfunktionen ein erneutes Suchen nach Lösungsprinzipien nötig sein, oder in der Phase des Konzipierens bereits eine Gestaltungsuntersuchung notwendig sein [Pahl u. a., 2007].

Die Unterteilung in Hauptarbeitsschritte bzw. Hauptphasen ist ein in der Praxis gängiges Hilfsmittel. Es ist ebenfalls Ziel dieser Arbeit diese theoretischen Grundlagen anzuwenden, um ein gutes Ergebnis zu erreichen.

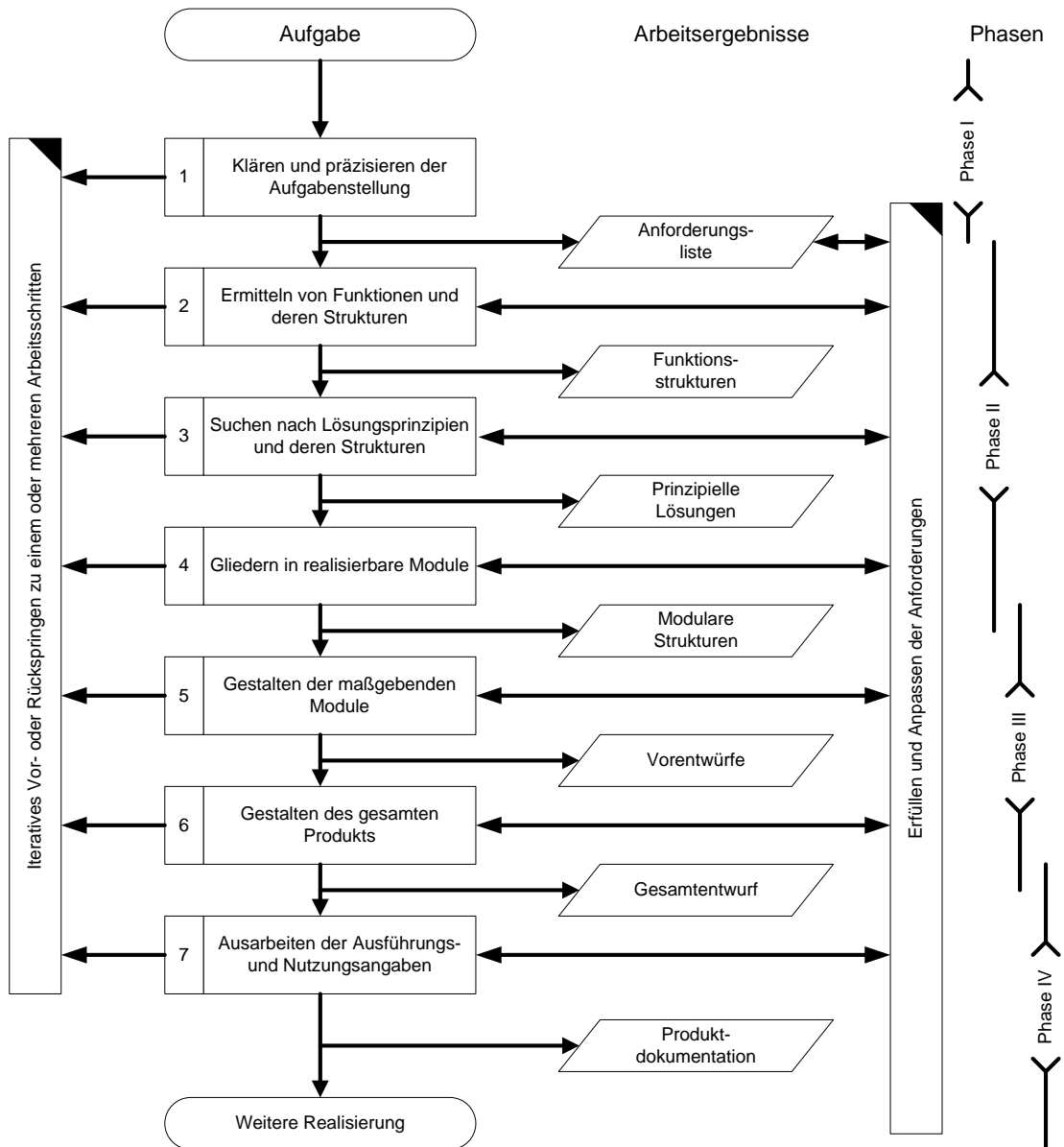


Abbildung 1.1.: Hauptarbeitsschritte vom Planen bis zur Realisierung [VDI-2221, 1993]

1.3. ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

Zum besseren Verständnis werden in diesem Kapitel für die Arbeit wichtige Begriffe definiert und allgemeine Grundlagen zum Thema Kalibrierung von Drehmoment und Drehzahl behandelt.

1.3.1. ALLGEMEINE DEFINITION VON ANTRIEBSWELLEN

Bei räumlicher Trennung von Getriebe und Achsantrieb werden zur Überbrückung des Zwischenraums sogenannte Gelenkwellen oder auch Antriebswellen eingesetzt. Diese kommen auch zwischen dem Achsdifferenzial und den Rädern zum Einsatz. Wenn die Achsen nicht in einer Flucht liegen, müssen die Wellen durch Gelenke verbunden werden. Zusätzlich muss ein Längenausgleich vorhanden sein, damit Toleranzen, Elastizitäten und kinematische Einflüsse ausgeglichen werden. [Braess und Seiffert, 2007]

Für Antriebswellen zwischen Getriebe und Achsantrieb werden zum Ausgleich der Winkelbewegungen Kardangelenke, Gleichlaufgelenke oder Gelenkscheiben verwendet. Zwischen Achsdifferenzial und den Rädern werden wiederum andere Arten von Gelenken bzw. Wellen verwendet. Hier müssen sowohl Winkel- und Längsausgleich bei Federbewegungen und elastokinematischen Radstellungsveränderungen als auch durch den Radeinschlag bedingte Beugewinkel ausgeglichen werden. Durchgesetzt haben sich hier Kugelgelenke wie z.B. das Rzeppagelenk und Tripodegelenke.

Rzeppagelenke bestehen aus einem Außenring und einem Innenring mit gegenläufigen Schrägnuten. Ein Käfigring hält sechs oder acht Kugeln. Mit diesem Gelenk sind Beugewinkel bis zu 48° und Verschiebewege bis zu 50 mm möglich. Das Tripodegelenk besteht aus einem Innenring mit drei sternförmig angeordneten Lagerzapfen auf denen Rollen gelagert sind. Die Führung der Rollen übernehmen drei Längsbahnen in einer Außenglocke [Heißing u. a., 2011]. Tripodegelenkwellen lassen größere Verschiebewege zu, haben aber kleinere Beugewinkel von nur bis zu 26° . Abbildung 1.2 zeigt Beispiele für ein Rzeppagelenk in fester und verschiebbarer Ausführung bzw. ein Beispiel für ein verschiegbares Gleichlauftripodegelenk.

Umgangssprachlich und weit verbreitet werden diese Antriebswellen auch als „Halbachsen“ bezeichnet. Der Fehler liegt hier darin, dass eine Achse lediglich eine Trag- oder Lagerfunktion hat und im Gegensatz zu einer Welle kein Drehmoment überträgt.

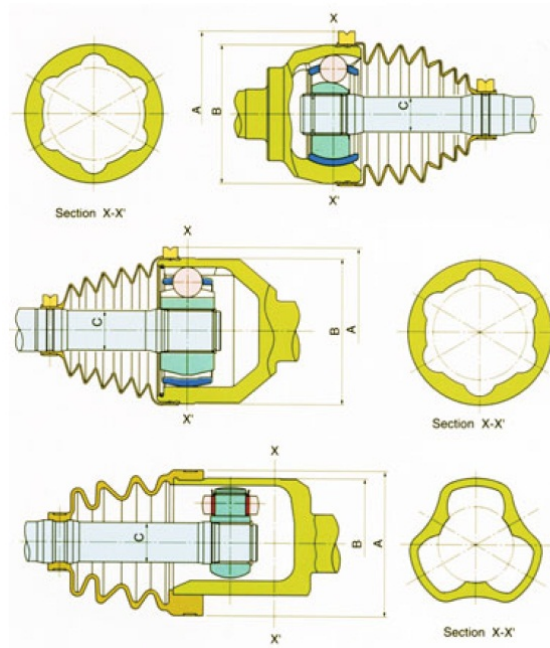


Abbildung 1.2.: Beispiele für Rzeppagelenk fest/verschiebbar (oben) und Gleichlauf-Tripodegelenk verschiebbar (unten) [Heifing u. a., 2011]

1.3.2. ALLGEMEINE DEFINITION KALIBRIERUNG UND MESSUNSICHERHEIT

Zwischen dem angezeigten und dem wahren Wert einer Messgröße gibt es grundsätzlich immer systematische Abweichungen.

Systematische Messabweichungen haben während der Messung einen konstanten Betrag mit einem bestimmten Vorzeichen oder unterliegen nur einer sehr langsamen Veränderung, was zu einer immer gleichen, zeitlich konstanten Differenz des Messwerts vom wahren Wert führt. Sie sind durch Wiederholungen der Messungen unter gleichen Bedingungen nicht erkennbar [Mühl, 2012].

Ursache kann z.B. ein unvollkommener Abgleich der Messeinrichtung sein, sodass bei jedem Messvorgang der Messwert für eine bestimmte Messgröße vom Messgerät beispielsweise immer um 3% zu hoch angezeigt wird [Mühl, 2012].

Eine Aufgabe der Kalibrierung ist die Erfassung dieser systematischen Abweichungen. Hinzu kommt beim elektrischen Messen nichtelektrischer Größen die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Eingangsgröße und dem elektrischen Ausgangssignal. Die Kalibrierung ist also das Ermitteln des Zusammenhangs zwischen der Ausgangsgröße eines Messgeräts und dem richtigen Wert der Eingangsgröße [Braunschweig, 1989].

In der Norm ist der Begriff Kalibrierung folgendermaßen definiert:

„Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Meßwert (...) oder Erwartungswert (...) der Ausgangsgröße (...) und dem zugehörigen wahren (...) oder richtigen Wert (...) der als Eingangsgröße (...) vorliegenden Meßgröße (...) für eine betrachtete Meßeinrichtung (...) bei vorgegebenen Bedingungen.“ [DIN-1319-1, 1995]

Erst die Kalibrierung und deren ausreichend häufige Wiederholung ermöglicht es dem Messtechniker in die Zuverlässigkeit seiner Messergebnisse zu vertrauen [Braunschweig, 1989].

Wichtig bei jeder Kalibrierung, die von Unternehmen durchgeführt werden, die nach ISO 9000¹ zertifiziert worden sind, ist der Rückführbarkeitsnachweis auf die nationalen Normale zur Qualitätssicherung eigener Produkte [Schicker und Wegener, 2002].

„Der Rückführbarkeitsnachweis ist erbracht, wenn ein Messmittel oder eine Messeinrichtung mit einer Referenz kalibriert wurde, die wiederum in einer ununterbrochenen Kette bis hin zum Nationalen Normal kalibriert wurde.“ [Schicker und Wegener, 2002]

Ein wichtiger Kennwert für die Qualität und Genauigkeit von Messungen ist die Messunsicherheit. Diese muss für jeden Messprozess abgeschätzt werden [ÖNORM-EN-ISO-10012, 2003].

Für die Messunsicherheit gibt die Norm ebenfalls eine genaue Definition an:

„Kennwert, der aus Messungen (...) gewonnen wird und zusammen mit dem Meßergebnis (...) zur Kennzeichnung eines Wertebereiches für den wahren Wert der Meßgröße dient“ [DIN-1319-1, 1995]

Weiter wird darauf hingewiesen, dass die Messunsicherheit von der Messabweichung deutlich zu unterscheiden ist, da Letztere lediglich die Differenz zwischen einem Messwert und dem wahren Wert darstellt. Die Messabweichung kann gleich Null sein, ohne dass dies bekannt ist, was sich wiederum in einer Messunsicherheit größer als Null ausdrücken würde [DIN-1319-1, 1995].

¹ISO 9000: „Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe“

1.3.3. KALIBRIEREN VON DREHMOMENTAUFNEHMERN

Genaue Angaben zum Ablauf der Kalibrierung von statischen Drehmomentaufnehmern liefern die Richtlinie des Deutschen Kalibrierdienstes DKD-R 3-5² und die Norm DIN 51309³. Dabei stellt die Richtlinie des Deutschen Kalibrierdienstes eine Ergänzung zur Norm DIN 51309 dar.

Prinzipiell gelten die Richtlinien des Deutschen Kalibrierdienstes nur für Kalibrierlaboratorien, die auch von der Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes akkreditiert sind. Da der Prüfstand jedoch nicht für ein solches akkreditiertes Laboratorium entwickelt werden soll, wird der Kalibriervorgang nur in Anlehnung an diese Regelwerke ausgearbeitet.

Nach EN 1024⁴ handelt es sich in dem in dieser Arbeit betrachteten Fall um eine nicht spezifische Prüfung, welche laut Norm folgendermaßen definiert ist:

„Vom Hersteller nach ihm geeignet erscheinenden Verfahren durchgeführte Prüfungen, durch die ermittelt werden soll, ob die nach einem bestimmten Verfahren hergestellte Erzeugnisse den in der Bestellung festgelegten Anforderungen genügen.“ [DIN-EN-10204, 1995]

Für nicht spezifische Prüfungen ist ein Werkszeugnis zu erstellen, in welcher der Hersteller bestätigt, dass die gelieferten Erzeugnisse den Vereinbarungen bei der Bestellung entsprechen. Er gibt ebenso die Prüfergebnisse auf der Grundlage nicht spezifischer Prüfung an [DIN-EN-10204, 1995]. Welche Daten geprüft werden und welcher Prüfablauf vorgeschrieben wird, wird vom Hersteller selbst für jedes Produkt festgelegt. Wenn geprüfte Kenngrößen messtechnische Eigenschaften beschreiben, kann das Prüfprotokoll auch als Kalibrierschein gesehen werden [Schicker und Wegener, 2002].

Allgemein wird ein Drehmomentmessgerät als das gesamte Gerät vom Drehmomentaufnehmer bis einschließlich dem Anzeigegerät definiert [DIN-51309, 2005]. Sowohl in den DKD-Richtlinien, als auch in der Norm DIN 5139 wird der Prüfling anfangs mit dem zu prüfenden Drehmoment mehrmals vorbelastet, um das Entlastungskriechen zu bestimmen und etwaigen Setzungseffekten entgegenzuwirken, und anschließend werden für das Wechseldrehmoment mehrere, stufenweise ausgeführte Auf- und Abwärtsmessreihen durchgeführt.

²DKD-R 3-5: „Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechselmomente“

³DIN 51309: „Werkstoffprüfmaschinen - Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Drehmomente“

⁴EN 1024: „Arten von Prüfbescheinigungen“

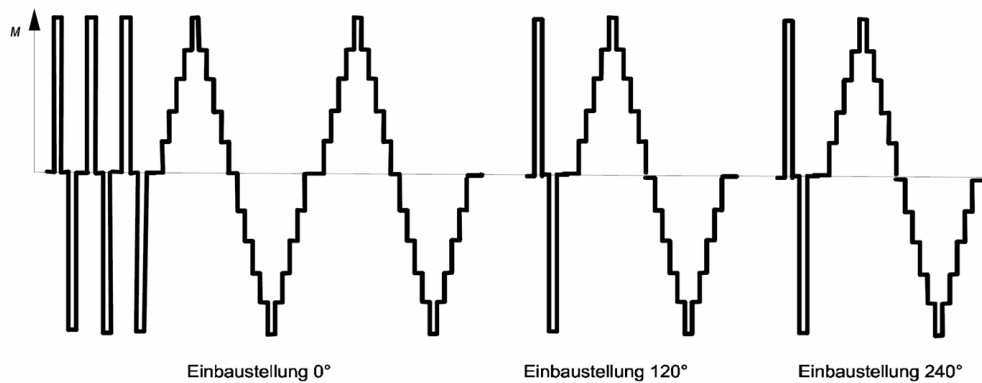


Abbildung 1.3.: Beispiel der Vorbelastungen und Messreihen für die Klassen 0,2 und 0,5 bei Kalibrierungen nach Punkt 3.3 [DKD-R-3-5, 1998]

Dieser Vorgang wird dann für verschiedene Einbauwinkel wiederholt. Einen Überblick über die Kalibrierabläufe bei separater Wechseldrehmomentkalibrierung nach DKD-R 3-5 gibt Abbildung 1.3.

Nach der Durchführung der Messreihen werden Kennwerte berechnet mit deren Hilfe der Drehmomentaufnehmer dann klassifiziert wird (siehe Tabelle 3 - Klassifizierungsmerkmale der Drehmomentmessgeräte [DIN-51309, 2005]). Es existieren sieben verschiedene Klassen. Werden alle Kriterien einer Klasse erfüllt, so wird das Drehmomentmessgerät dieser zugeordnet.

Je höher die Klasse, desto höher die Grenzwerte der Klassifizierungskriterien, die eingehalten werden müssen.

1.3.4. KALIBRIEREN DER DREHZAHL

Die Messung der Drehzahl erfolgt mittels statischem Beschleunigungsaufnehmer, wodurch die Zentripetalbeschleunigung erfasst wird und dann entsprechend auf die Drehzahl geschlossen werden kann (genauerer siehe nachfolgendes Kapitel 1.4.1).

Eine Kalibrierung der Drehzahl ist nötig, da eine genaue Lage des Beschleunigungssensors auf der Platine selbst und auch eine genaue Bestimmung der Lage der Platine im Inneren der Welle nicht gewährleistet werden kann. Somit dient die Kalibrierung zur Herstellung einer Beziehung zwischen Drehzahl und Beschleunigung.

Für die Kalibrierung dieser Messgröße gelten die gleichen Prüfbedingungen, wie für Drehmomentaufnehmer. Es muss hier ebenfalls lediglich ein Werkszeugnis erstellt werden. Der genaue Kalibrierablauf wird vom Hersteller bestimmt.

Prinzipiell wird der Kalibrierablauf ähnlich dem Ablauf für Wechseldrehmomente durchgeführt werden. Auch hier wird der Prüfling stufenweise mit der Drehzahl in Aufwärts- und Abwärtsmessreihen beaufschlagt werden. Eine Vorbelastung auf Nenndrehzahl wird allerdings nicht nötig sein, da es hier keine Setzungseffekte oder ähnliches zu berücksichtigen gibt.

1.3.5. DAS WIRKPRINZIP DER DEHNUNGSMESSSTREIFEN UND DIE WHEATSTONE'SCHE BRÜCKENSCHALTUNG

Da die Messung des Drehmoments am i-Shaft mit Dehnungsmessstreifen (DMS) durchgeführt wird, erklärt dieses Kapitel kurz das Wirkprinzip von DMS und stellt die Wheatstone'sche Brückenschaltung vor.

Das Wirkprinzip der Dehnungsmessstreifen:

Voraussetzung für eine Dehnungsmessung mittels Dehnungsmessstreifen ist eine innige Verbindung zwischen DMS und Messobjekt, welche mit Hilfe spezieller Kleber realisiert wird. Es existiert eine Vielzahl an verschiedenen Arten der DMS. Hier werden allerdings nur elektrische Widerstands-DMS bzw. metallische DMS genauer betrachtet, da nur solche im i-Shaft zum Einsatz kommen.

Vom Messobjekt wird die Dehnung auf den DMS übertragen und verursacht so eine messbare Veränderung ihres elektrischen Widerstandes. Diese Wirkungsweise der metallischen DMS beruht auf dem von Wheatstone und Thomson entdeckten Dehnungswiderstands-Effekt elektrischer Leiter. [Hoffmann, 1987]

Bei mechanischer Beanspruchung, wie z.B. Torsion, ändert der elektrische Leiter seinen Widerstand aufgrund der Verformung des Leiters selbst und aufgrund der Änderung des spezifischen Widerstandes des Leiterwerkstoffes infolge von Gefügeänderungen. [Hoffmann, 1987] Über die Widerstandsänderung kann so direkt auf die Dehnung und damit auch auf die vorherrschende Spannung geschlossen werden.

Die Wheatstone'sche Brückenschaltung:

Der englische Naturwissenschaftler Sir Charles Wheatstone (1802 - 1875) entdeckte im Jahre 1843 eine Schaltung, mit deren Hilfe die genaue Messung elektrischer Widerstände möglich wurde und unter dem Namen „Wheatstone'sche Brückenschaltung“ bekannt wurde. [Hoffmann, 1987] Diese Brückenschaltung eignet sich hervorragend zur Bestimmung der relativen Widerstandsänderungen von DMS.

Abbildung 1.4 zeigt die Wheatstone'sche Brückenschaltung in zwei unterschiedliche Darstellungsweisen.

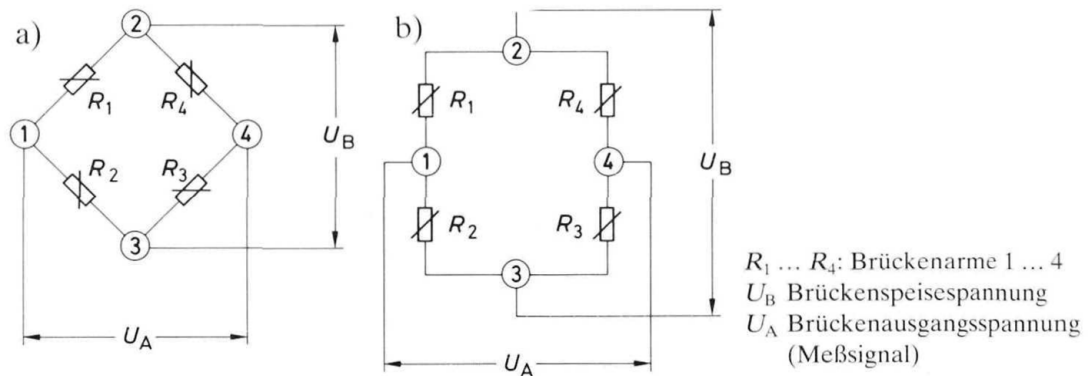


Abbildung 1.4.: Wheatstone'sche Brückenschaltung in unterschiedlicher Darstellungsweise [Hoffmann, 1987]

Es gibt die Möglichkeit diese Brückenschaltung auf zwei Arten, nämlich als

- Vollbrücke (siehe Abbildung 1.4) oder als
- Halbbrücke

auszuführen.

Das Brückenmessverfahren ermöglicht eine relativ einfache Kompensation von Störgrößen. Je nachdem, ob eine Halb- oder Vollbrücke zum Einsatz kommt, muss sich eine Messgrößenänderung gegensinnig auf zwei oder auch alle vier Brückenwiderstände auswirken. Die Sensorsignale und somit auch die entstehenden Widerstandsänderungen ΔR sind zu meist jedoch sehr kleine Größen, sodass eine Verstärkung der Brücken-Diagonalspannung notwendig ist. [Hoffmann, 2002]

Die Vollbrücke hat unter Anderem die Vorteile der höchsten mit Brückenschaltungen erzielbaren Empfindlichkeit, eine größere Ausgangsspannung und eine automatische Kompensation von Störeffekten. Zum Beispiel wird der Einfluss der Temperatur weitgehend kompensiert, da diese auf alle Widerstände gleichsinnig wirkt.

Die Halbbrücke enthält im Gegensatz zur Vollbrücke nur zwei messende DMS, was eine kleinere Messspannung und eine niedrigere Empfindlichkeit im Vergleich zur Vollbrücke zur Folge hat.

Bei Beanspruchung einer Welle auf Torsion verlaufen die Hauptnormalspannungen unter einem Winkel von $\pm 45^\circ$ zu den Mantellinien (Linien parallel zur Wellenlängsachse). Werden nun DMS in V-Form unter demselben Winkel angebracht, so wird es möglich

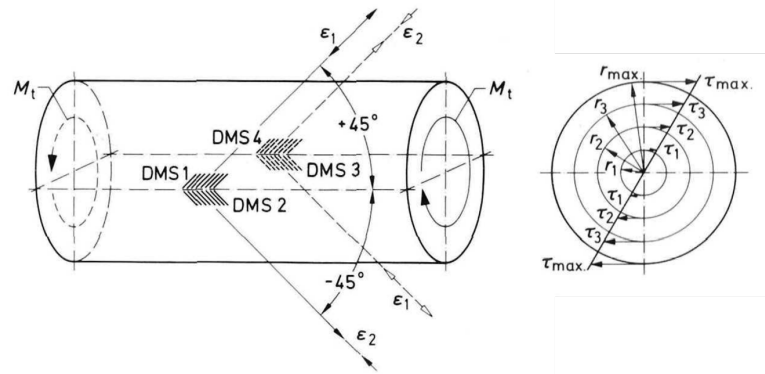


Abbildung 1.5.: Torsionswelle mit in den Hauptdehnungsrichtungen applizierten DMS und deren Anordnung in der Brückenschaltung bei Verwendung spezieller X-Rosetten (links). Verteilung der Torsionsspannung über den Querschnitt (rechts). [Hoffmann, 1987]

die durch die Normalspannungen erzeugten Dehnungen zu messen (siehe Abbildung 1.5) [Hoffmann, 1987].

In der Literatur finden sich detaillierte Erklärungen zur Entstehung und zum Verlauf der Hauptnormalspannungen in einem Torsionsstab (vergleiche [Hagedorn, 2006] und Normalspannungshypothese in [Mayr, 2008]).

1.4. SYSTEMBESCHREIBUNG DATENLOGGER UND I-SHAFT

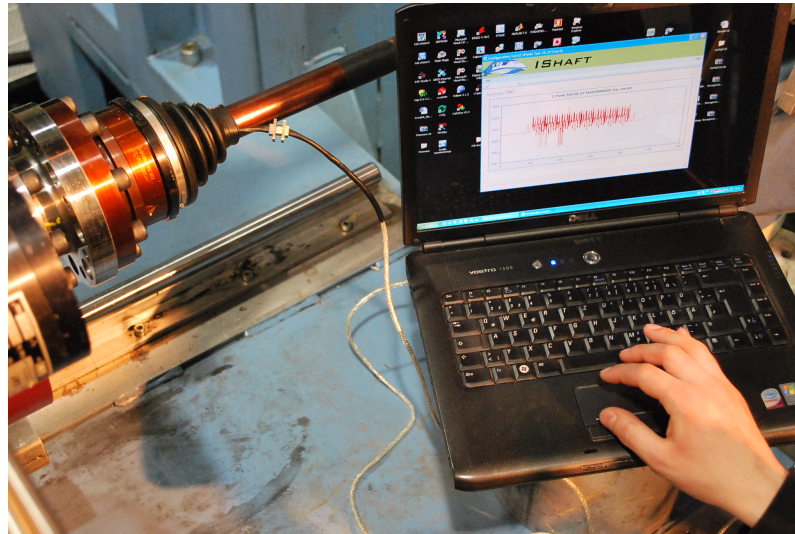


Abbildung 1.6.: Auslesen der Daten eines i-Shafts

Mit dem i-Shaft wird eine Lastdatenmessung (Drehmoment, Drehzahl) von für den Rennsport charakteristisch belasteten Antriebswellen, wie Halbachsen und Kardanwellen (z.B. Formel 1, Rallye,...), in einer integrierten Form als völlig autarkes System, also ohne Telemetrie, realisiert. Damit ist es möglich, Drehmoment und Drehzahl an der Welle zu messen und die Daten mittels Datenlogger ebenfalls direkt in der Welle zu speichern. Dabei sind sowohl die Sensorik und Messelektronik, als auch der Datenspeicher inklusive der elektrischen Versorgung im Innenraum der Welle installiert.

Auf diese Weise ausgerüstet kann sichergestellt werden, dass die Daten ohne Ausfall, Verzerrung oder sonstigen Störungen, wie es bei Funkübertragung oft der Fall ist, in Echtzeit aufgezeichnet werden können. Eine Auswertung der Daten simultan mit dem Einsatz ist dadurch zwar nicht mehr möglich, jedoch für diesen Fall ohnehin nicht erforderlich, da die Auswertung erst nach der Aufzeichnung stattfindet.

Für das Messen der Drehzahl gibt es mehrere Gründe:

- Die Drehzahl wird erfasst.
- Über die Drehzahl kann mit Hilfe des ebenfalls gemessenen Drehmoments auf die Leistung geschlossen werden.
- Mit Hilfe des Drehzahlverlaufs kann das Drehmomentsignal mit weiteren Daten und Messsignale synchronisiert werden, die vom Entwickler der Antriebswellen zusätzlich noch erfasst werden.

1.4.1. ALLGEMEINER MESSAUFBAU UND FUNKTIONSWEISE DES I-SHAFTS

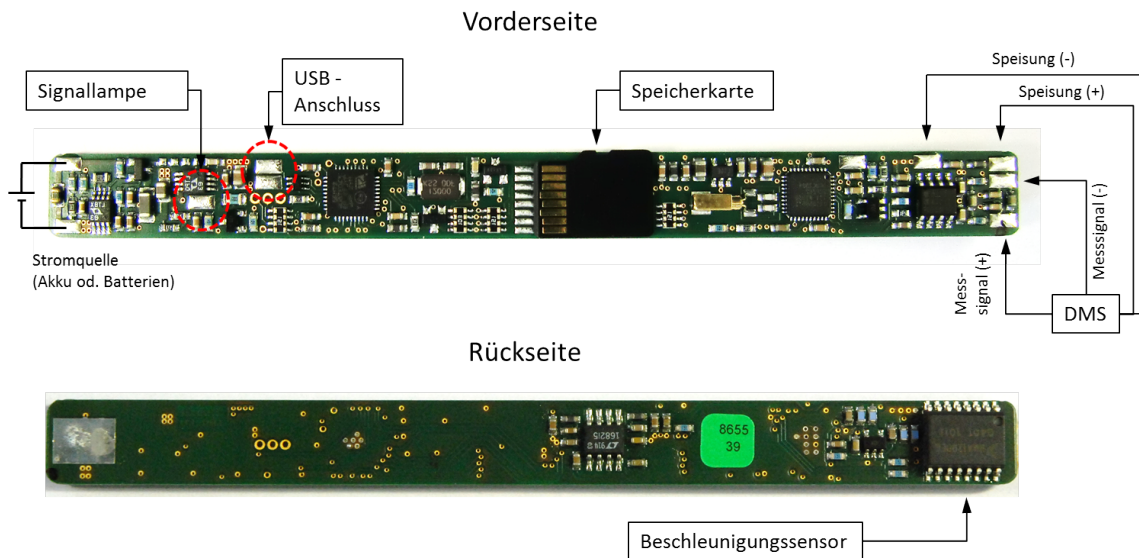


Abbildung 1.7.: Anschlussbelegung i-Shaft

Zur Messung des Drehmoments wird an der Innenseite der Welle eine Dehnungsmessbrücke angebracht, welche die der Torsion entsprechende Verformung der Welle misst. Anhand der bekannten Geometrie der Welle und deren Werkstoffeigenschaften kann das auftretende Drehmoment berechnet werden.

Vor dem Einsatz des i-Shaft wird eine Berechnung der auftretenden Dehnungen bzw. Spannungen bei einem vordefinierten Moment durchgeführt, um so die Empfindlichkeit der Brückenschaltung bestimmen zu können (siehe Kapitel 1.4.3). Es wird also die bei einem bestimmten Drehmoment auftretende Ausgangsspannung abgeschätzt und so die Vorverstärkung des Messsignals auf einen entsprechenden Wert gesetzt.

Nach der Kalibrierung wird das während der Versuche auftretende Messsignal von der Messelektronik bearbeitet und als Drehmomentsignal direkt im Datenlogger gespeichert. In Abbildung 1.7 ist das i-Shaft inklusive Speicherkarte, Mikrocontroller, Beschleunigungssensor, etc. sowie zugehöriger Anschlussbelegung dargestellt.

Zur Erfassung der Drehzahl wird ein Beschleunigungssensor zur Messung der Zentripetalbeschleunigung im Inneren der Welle angebracht. Nach Auslesen des Signals wird dieses mittels zugehöriger Software in ein Drehzahlsignal umgerechnet.

Die Umrechnung erfolgt basierend auf folgende Formeln:

Zentripetalbeschleunigung a :

$$a = \omega^2 \cdot r = \left(\frac{n \cdot \pi}{30}\right)^2 \cdot r \quad (1.1)$$

rAbstand des Beschleunigungssensors zur Wellenmitte

ωWinkelgeschwindigkeit

nDrehzahl

Umrechnung auf Drehzahl n :

$$n = \sqrt{\frac{a}{r} \cdot \left(\frac{30}{\pi}\right)^2} \quad (1.2)$$

Die Messsignale (Drehzahl und Drehmoment) werden zeitsynchron aufgezeichnet und direkt als Rohsignale im Datenlogger gespeichert. Die Synchronität der beiden Messsignale ist also gewährleistet.

Die Vorrichtung zur Aufzeichnung der Messdaten besteht aus mindestens einem Sensor, einer Stromquelle und der Messelektronik, die die Signale der Sensoren bearbeitet. Die Messelektronik verfügt über einen Datenspeicher, der mit einer von außen zugänglichen, lösbaren Schnittstelle verbunden ist. Auf diese Weise wird es möglich bei Stillstand der Welle die Daten auszulesen oder sogar die Stromquelle zu laden bzw. Zugriff zur Messelektronik zu erlangen.

Abbildung 1.8 ist eine stark vereinfachte Darstellung des schematischen Aufbaus des i-Shaft. Hier erkennt man die Funktionsweise des i-Shafts, angefangen bei den Sensoren zur Messung der Verformung aufgrund des Drehmoments und zur Messung der Zentripetalbeschleunigung aufgrund der herrschenden Drehzahl, über die Filterung und Digitalisierung des Signals bis hin zur Speicherung und Auslesung der Messdaten.

Über USB-Anschluss ist es nicht nur möglich die gespeicherten Daten auszulesen. Mittels eigens dafür entwickelter Software können die Verstärkungsfaktoren der DMS-Brücke direkt eingestellt werden. Dem System steht ein größerer Spannungsbereich für das Messsignal zur Verfügung, als die Dehnungen in der DMS-Brücke als Differenzspannung zwischen den Brückenweigen erzeugen. Um den gesamten Bereich ausnützen zu können bzw. um ein größeres Ausgangssignal zu erhalten wird die Differenzspannung verstärkt.

Zur Digitalisierung des Messsignals ist es notwendig, dass die Differenzspannung stets einen positiven Wert hat. Die Nulllage des Messsignals wird deshalb über einen Offset auf den halben Wert des zur Verfügung stehenden Spannungsbereichs angehoben.

Durch mögliche Abweichungen des Messsignals von der Nulllage der Brückenquerspannung kann es zu einem Signalverlust kommen, wenn der mögliche Spannungsbereich über- bzw. unterschritten wird. Daher wird ein Nullabgleich über einen weiteren Verstärker direkt an der Brücke durchgeführt.

Die mehrfache Filterung des Signals dient dazu, mögliche Störsignale vorab bereits herauszufiltern.

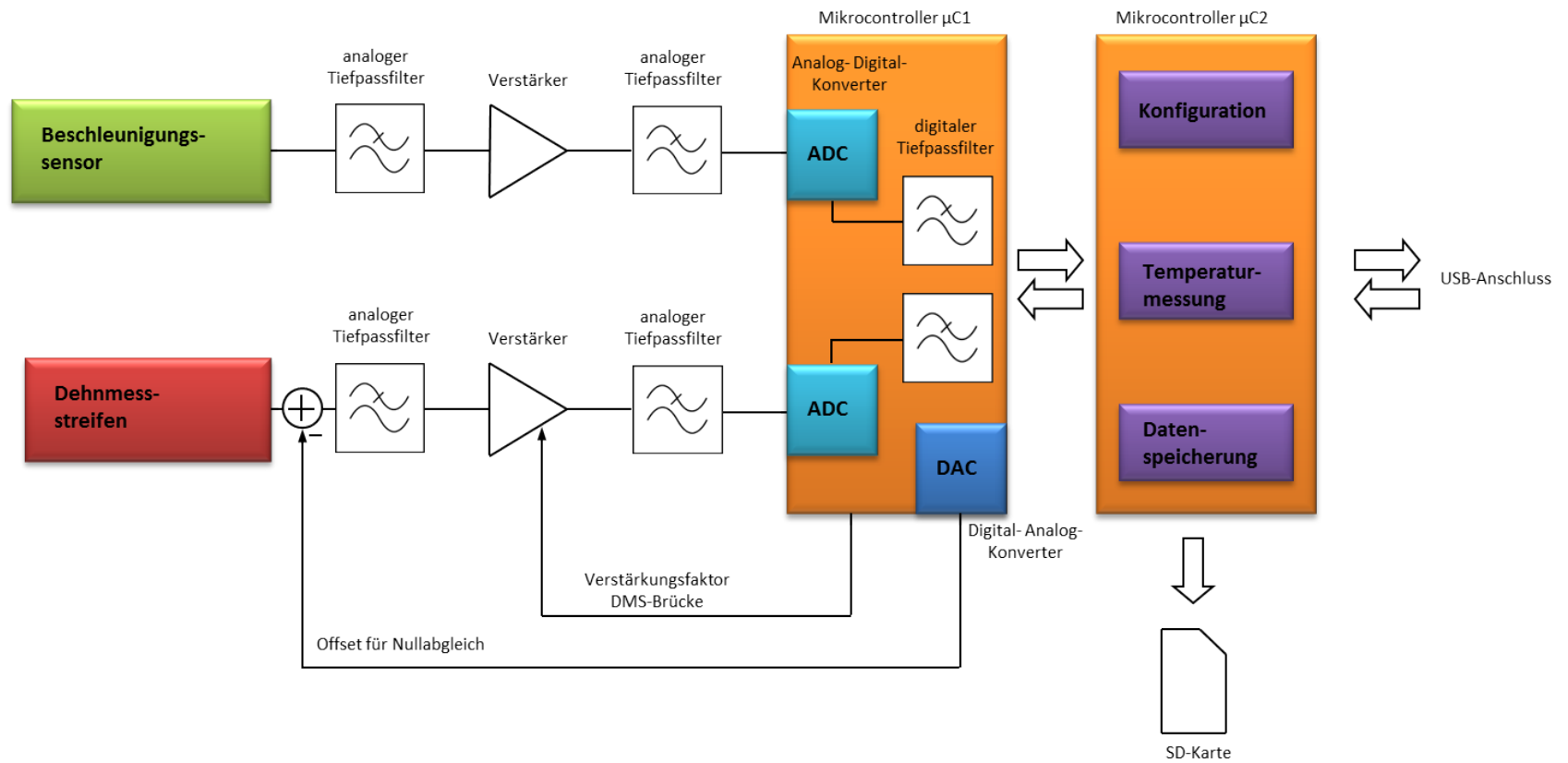


Abbildung 1.8.: schematischer Aufbau des i-Shaft

1.4.2. EINSATZ DER I-SHAFTS

Prinzipiell können alle Arten von Antriebswellen, wie z.B. Kardanwellen oder Halbachsen, zu i-Shafts umgebaut werden. Von Vorteil ist, wenn die Wellen als Hohlwellen ausgeführt sind, damit die Messausrüstung vollständig im Inneren installiert werden kann.

Ist dies nicht der Fall, kann die Messausrüstung auch an der Außenseite appliziert werden, was unter Anderem eine geringfügige Änderung in der Berechnung der maximalen Spannungen zufolge hat (z.B.: Die Berechnung des Flächenträgheitsmoments vereinfacht sich durch Wegfallen von d_i).

Zurzeit werden i-Shafts im Bereich Rennsport eingesetzt, also im Gebiet Formel X und Rallye. In Zukunft sollen diese auch im Bereich der PKWs angewendet werden.

1.4.3. ABSCHÄTZUNG DER EMPFINDLICHKEIT DER WHEATSTONE'SCHEN BRÜCKENSCHALTUNG

Es wird meist eine DMS-Halbbrücke zur Messung des Drehmoments verwendet, daher wird in den Formeln von einer DMS-Halbbrücke ausgegangen. Bei Verwendung einer DMS-Vollbrücke müssen die Formeln an den notwendigen Stellen noch entsprechend angepasst werden.

Angaben zum Prüfling (Input Berechnung):

- erwartetes Höchstmoment M_t
- Außendurchmesser Welle d_a
- Innendurchmesser Welle d_i
- Wandstärke b
- Querkontraktionszahl ν
- Schubmodul G
- k-Faktor der Dehnungsmessstreifen k

Dehnungen zufolge des angreifenden Drehmoments:

Polares Flächenträgheitsmoment:

$$I_p = \frac{\pi}{32} (d_a^4 - d_i^4) [mm^4] \quad (1.3)$$

Schubspannung am Innenradius der Hohlwelle:

$$\tau_i = \frac{M_t}{I_p} \cdot \frac{d_i}{2} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (1.4)$$

aus τ_i resultierende, angezeigte Dehnung:

$$\epsilon_a = \frac{\tau_i}{G} \left[\frac{\mu m}{m} \right] \quad (1.5)$$

Bei einer DMS-Halbbrücke können die Hauptdehnungen (DMS-Gitter in 45° zur Symmetrieachse angeordnet) zu ϵ_a zusammengefasst werden, da die Absolutbeträge gleich sind. Die tatsächliche Dehnung entspricht der Hälfte von ϵ_a [Hoffmann, 1987].

Berechnung der Empfindlichkeit der Wheatstone'schen Brückenschaltung:

Ausgangssignal U_M der DMS-Halbbrücke bei angreifendem Moment:

$$U_M = k \cdot \frac{\epsilon_a}{4} \left[\frac{mV}{V} \right] \quad (1.6)$$

2. KONZEPTIONIERUNG

In diesem Kapitel werden die ersten drei Arbeitsschritte durchlaufen, siehe Abbildung 1.1:

- 1.) Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung
- 2.) Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen
- 3.) Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen

2.1. ANFORDERUNGEN AN DEN PRÜFSTAND

Anfangs werden die Rahmenbedingungen und die Anforderungen an den Prüfstand aufgestellt. Neben den technischen Anforderungen ergeben sich auch nicht funktionale Anforderungen, wie die Sicherheit des Bedienpersonals.

2.1.1. FUNKTIONALE UND TECHNISCHE ANFORDERUNGEN

Um eine ausreichende Kalibrierung der Messausrüstung des i-Shafts durchführen zu können, soll der zu realisierende, kalibrierbare Bereich des Drehmoments zwischen 1000 Nm und 2500 Nm bzw. der Bereich der Drehzahl zwischen 1000 U/min und 2500 U/min liegen.

Der Kalibrierablauf wird in Anlehnung an die Richtlinie des Deutschen Kalibrierdienstes DKD-R 3-5¹, welche unter anderem auf die Norm DIN 51309² verweist, durchgeführt, wodurch ein stufenweises Einleiten des Drehmoments in beide Drehrichtungen erforderlich ist.

Wie in Kapitel 1.3.3 beschrieben, wird das i-Shaft nach DIN 51309 klassifiziert. In diesem Fall wurde vom Hersteller festgelegt, dass eine Zuordnung des i-Shafts in Klasse 1, 2 oder 5 ausreichend ist. Je nachdem, wie die Klassifizierungsmerkmale des überprüften i-Shafts aussehen, wird dieses dann einer dieser drei Klassen zugeteilt (Details siehe Kapitel 4).

Eine wichtige Anforderung an das Einleiten des Drehmoments ist es, nach Möglichkeit ein „reines Drehmoment“ einzuleiten. Allgemein definiert ist das Drehmoment das Produkt aus Hebelarm und Kraftkomponente senkrecht zum Hebelarm [Weltner, 2008].

¹DKD-R 3-5: „Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente“

²DIN 51309: „Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Drehmomente“

Wird ein Drehmoment auf diese Weise erzeugt, so ist die das Drehmoment hervorrufende Kraft diesem überlagert, sodass es sich nicht mehr um ein „reines“ Drehmoment handelt, sondern um zwei gleichzeitig wirkende Größen nämlich Kraft und Drehmoment. Um eine physikalische Größe einzeln und möglichst unbeeinflusst von anderen Größen darzustellen, muss also die Kraft eliminiert werden ohne das Drehmoment zu verlieren und damit ein „reines“ Drehmoment zu erzeugen [Röske, 2008]. Dieses Problem kann gelöst werden, indem darauf geachtet wird, das Drehmoment durch die Verwendung eines Kräftepaars (zwei gleich große, entgegengesetzt gerichtete Kräfte) zu erzeugen.

Von wesentlicher Bedeutung ist auch die Dauer des Kalibriervorgangs. Der Kalibriervorgang sollte so effizient wie möglich gestaltet werden, damit keine unnötigen Kosten durch Verzögerungen entstehen und die Lieferzeit des i-Shafts nicht übermäßig beeinflusst wird.

Da der Prüfstand vorrangig für Antriebswellen aus der Formel X und Rallye verwendet werden wird, ändern sich die Länge und der Durchmesser nicht nur aufgrund des Typs (Halbachse oder Kardanwelle), sondern auch je nach Fahrzeug. Eine einfache Anpassung des Prüfstandes auf die Prüflingslänge und den Durchmesser ist daher unbedingt notwendig.

Folgende Längen müssen berücksichtigt werden:

- minimale Prüflingslänge: 150 mm
- maximale Prüflingslänge: 1600 mm bei Option Kardanwelle und 1000 mm, wenn nur Halbachsen kalibriert werden sollen

Die minimale Prüflingslänge ist so gewählt, dass der Prüfstand drehmomentseitig auch für Torsionsstäbe eingesetzt werden kann. Die Einspannung des Prüflings muss so gewählt werden, dass dieser während des Kalibriervorganges nicht beschädigt werden kann. Gerade im Rennsport ist es wichtig, die Antriebswellen vor Vorschädigungen zu schützen. Vor der Werkstoffwahl der Bauteile des Prüfstandes muss eine Abschätzung der auftretenden Kräfte und der daraus resultierenden Momente und Spannungen durchgeführt werden.

2.1.2. NICHT FUNKTIONALE ANFORDERUNGEN

Eine wichtige Anforderung ist, sich in der Nähe befindende Personen vor dem Kontakt mit drehenden Teilen zu schützen, während der Prüfstand in Betrieb ist. Entsprechende Abdeckungen der drehenden Teile sind unbedingt vorzusehen. Zusätzlich ist das Anbringen eines Notausschaltknopfs, zum Auslösen eines geeigneten Notaus-Szenarios notwendig. Etwaige Sicherheitsvorschriften (wie Maschinenrichtlinie 2006/42/EG und ÖNORM EN ISO 12100³) müssen berücksichtigt werden.

Die Baugröße des Prüfstandes sollte außerdem möglichst gering gehalten werden, damit eine leichte Unterbringung gewährleistet werden kann.

2.2. ANFORDERUNGEN AN DIE AUTOMATISIERTE AUSGABE EINES FORMELLEN KALIBRIERPROTOKOLLS

Die Erstellung und die genauere Ausführung des automatisierten Kalibrierprotokolls soll in Anlehnung an die Richtlinie des Deutschen Kalibrierdienstes DKD-5⁴, realisiert werden.

Die Software zur Durchführung der Kalibrierung und zur Erstellung des Kalibrierprotokolls muss den vorher eingestellten Verstärkungsfaktor des Signals ausgeben, um das Optimieren des Messbereichs zu erleichtern.

2.2.1. ANFORDERUNGEN AN DIE ARBEITSANWEISUNG ZUM KALIBRIERVORGANG

Zur korrekten Handhabung des Prüfstandes und zur richtigen Durchführung der Kalibrierung muss eine Arbeitsanweisung erstellt werden, welche beide Bereiche abdecken soll. Einerseits muss diese eine Bedienungsanleitung des Prüfstandes an sich enthalten und andererseits soll die Verwendung der Software klar erklärt werden. Zusätzlich soll auch auf Warnungen und Hinweise zur Gewährleistung der Sicherheit des Bedienpersonals und anderen anwesenden Personen während des Betriebs Wert gelegt werden.

Ein Kapitel sollte die Berechnung zur Bestimmung der Brückenempfindlichkeit enthalten, da diese vorangehende Abschätzung des Verstärkungsfaktors zur Voreinstellung des Signals am i-Shaft von der Software nicht ersetzt werden wird. Details zur Abschätzung der Empfindlichkeit der Messbrücke befinden sich in Kapitel 1.4.3.

³ÖNORM EN ISO 12100: „Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsgrundsätze - Risikobewertung und Risikominderung“

⁴DKD-5: „Anleitung zum Erstellen eines DKD-Kalibrierscheins“

2.2.2. AUSLEGUNG DES ANTRIEBSMOTORS BZW. DER ANTRIEBSSTEUERUNG DES PRÜFSTANDES

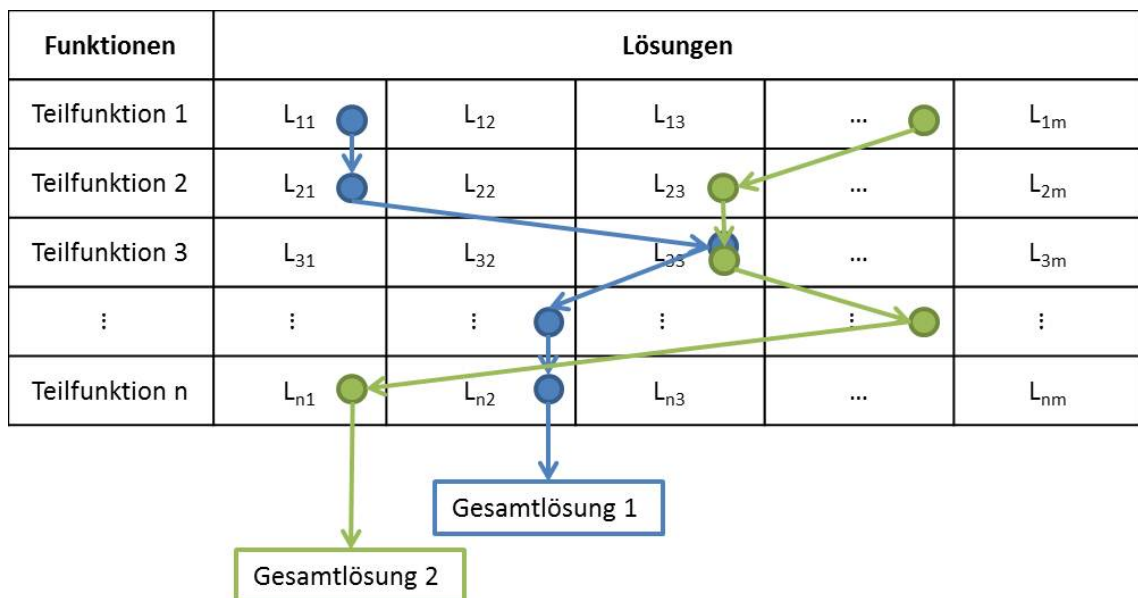
Der Antriebsmotor muss so gesteuert werden können, dass bestimmte Drehzahlen im Bereich von 1000 U/min und 2500 U/min so exakt wie möglich gehalten werden können, um die Genauigkeit der Kalibrierung zu gewährleisten.

Wenn möglich sollte die Ansteuerung automatisiert ablaufen, um die Verweildauer an den vorgesehenen Drehzahlstufen bei Möglichkeit gleich lang zu halten. Ein kontinuierlicher Übergang zwischen den Stufen ist ebenfalls wünschenswert.

2.3. KONZEPTERSTELLUNG

Um alle in Kapitel 2.1 aufgeführten Anforderungen bestmöglich zu erfüllen ist es zunächst erforderlich ein passendes Konzept auszuarbeiten. Die Hauptfunktion des Prüfstands, also die Messausrüstung des i-Shafts nach Drehzahl und Drehmoment zu kalibrieren, wird dazu in Teilfunktionen gegliedert und für jede dieser Teilfunktionen werden Lösungen ausgearbeitet. Für jede Teilfunktion entsteht so eine Fülle an Lösungen, die dann miteinander kombiniert werden, um die Gesamtfunktion des Prüfstands zu erfüllen.

Als Methode der systematischen Kombination der Lösungsansätze wurde das von Fritz Zwicky als morphologischer Kasten bezeichnete Ordnungsschema verwendet [Zwicky, 1971]. Dafür werden in Zeilen die Teilfunktionen und die dazugehörigen Lösungen eingetragen. Anschließend wird für jede Teilfunktion eine Lösung aus dieser Zeile ausgewählt und alle Teillösungen zu einer Gesamtlösung verknüpft. Dadurch entsteht eine Vielfalt an theoretischen Gesamtlösungsvarianten [Pahl u. a., 2007]. Abbildung 2.1 zeigt das prinzipielle Vorgehen bei der Kombination von Teillösungen zur Findung von Gesamtlösungen.



die wichtigsten Merkmale und Eigenschaften der Lösungen in den morphologischen Kästen mit einzutragen. Dadurch werden gut verträgliche Kombinationen begünstigt. [Pahl u. a., 2007]

2.3.1. UMSETZUNG DES MORPHOLOGISCHEN KASTEN ZUR LÖSUNGSFINDUNG

Die wichtigsten Anforderungen an den Prüfstand wurden nun in Teilfunktionen untergliedert und jeweils mehrere Lösungen zugeordnet. In Abbildung 2.2 ist der daraus resultierende morphologische Kasten dargestellt. Die jeweils kursiv angeführten Zusätze unter den Lösungen sollen einen besseren Überblick über die Verträglichkeit und Machbarkeit bzw. über die Vor- und Nachteile der Lösungen geben.

Teilfunktionen	Lösungen								
Position des Prüflings	Waagrecht (<i>Eigengewicht d. Prüflings erzeugt Biegespannungen</i>)					Senkrecht (<i>keine aufwendige Lagerung, da Eigengewicht als Axialkraft auftritt</i>)			
Aufbringen des Drehmoments	Drehmoment- vervielfältiger (<i>Mittels Hebel über ein Getriebe; reines Drehmoment; nur eine Drehrichtung</i>)	Hebelarm und Gewichte (<i>einseitige Belastung -> keine reines Drehmoment</i>)	Einleitung direkt über ein Getriebe (<i>reines Drehmoment; manuelle Betätigung</i>)	Hebel od. Kurbel in Kombination mit Getriebe (<i>manuell; geringere Genauigkeit</i>)	Hebelarm mit Laufgewichten (<i>einseitige Belastung</i>)	Hebelarm mit Seilzug- bzw. Drucksystem (<i>zweiseitige Belastung -> reines Drehmoment</i>)	direkt über Motor (<i>reines Drehmoment</i>)	zwei Motoren gegeneinander drehend (<i>reines Drehmoment</i>)	Seilzug und Gewichte über Umlenkrollen (<i>senkrechte Positionierung möglich</i>)
Messen des Drehmoments	bekannte Gewichte und bekannter Hebelarm (<i>einmalige Kalibrierung, schwere Gewichte nötig</i>)	Kraftaufnehmer (<i>vorzugsweise Präzisions- kraftaufnehmer für höhere Messgenauigkeit</i>)	Drehmoment-aufnehmer (<i>Messflansch, Messwelle; Anschaffung teuer</i>)	berührungsloses Messen z.B. mittels PCME (<i>ferromagnet. Material notwendig</i>)	direkt vom Motor/Antrieb ablesen (<i>geringere Genauigkeit</i>)	dehnungs-kontrollierte Gelenke (<i>spiralförmige Anordnung der DMS</i>)	Kombination aus Hebel mit Gewichten und Hebel mit Kraftaufnehmer (<i>einfache Kalibrierung der Kraftaufnehmer mittels Gewichte</i>)		
Lagerung (hebelseitig)	Aerostatisch (<i>nur bis 1000 Nm wirtschaftlich</i>)	Hydrostatisch (<i>auch bei höheren Drehmomenten anwendbar</i>)	magnetisch		keine Lagerung		Gleitlager (<i>hohes Reibmoment</i>)		Wälzlager (<i>Reibmoment nachteilig</i>)
Antrieb/Motor Drehmomentkalib.	Schrittmotor (<i>Drehmoment u. Drehzahl getrennt einleiten</i>)		Servomotor (<i>moment-, geschwindigkeits- u. positionsgeregelt, kombinierbar</i>)		manuell antreiben (<i>hohe Drehzahlen u. Drehmomente nur mittels Getriebe vernünftig realisierbar</i>)			kein zusätzlicher Antrieb zur Aufbringung des Drehmoments	
Drehzahlaufbringung	manuell mit entsprechender Übersetzung			mittels Verbrennungsmotor (<i>für Labor ungeeignet</i>)			mittels Elektromotor		
Antrieb Drehzahl	Einphasenmotor (<i>kleine Baugröße</i>)		Drehstrommotor		Schrittmotor		Servomotor		
Räuml. Gestaltung	Keine räumliche Trennung der Drehmoment- und Drehzahlkalibrierung				Räumliche Trennung der beiden Kalibriervorgänge				
Kalibrierung des Prüfstands	mittels Hebel + Gewichte (<i>schwere Gewichte nötig, einmalige Kalibrierung</i>)			Drehmoment- bzw. Kraftaufnehmer (<i>Kalibrierung in regelmäßigen Abständen erforderlich</i>)			Motorsteuerung		
Drehzahlmessung	Mechanisch (<i>z.B. über Zahnräder</i>)		Optisch (<i>Inkremental- bzw. Drehimpulsgeber; Laser</i>)		Induktiv			Generatorisch (<i>aufwendig</i>)	

Abbildung 2.2.: Morphologischer Kasten zur Auswahl eines Grundkonzeptes

Gemeinsam mit Fachexperten wurden die Vor- und Nachteile mehrerer Lösungswege abgewogen und durchdacht. Daraus ergaben sich zwei Lösungen, die als geeignet befunden wurden und daher genauer betrachtet wurden. Abbildung 2.3 zeigt die Kombination der Teillösungen zu den beiden Gesamtlösungsvarianten.

Gesamtlösungsvariante A:

Diese Lösungsvariante (in Abbildung 2.3 grün dargestellt) setzt sich aus folgenden Teillösungen zusammen:

- 1.) waagrechte Positionierung des Prüflings
- 2.) Einleitung des Drehmoments direkt über ein Getriebe
- 3.) Messung des Drehmoments mittels Drehmomentaufnehmer
- 4.) Keine zusätzliche Lagerung des Prüflings hebelseitig
- 5.) Antrieb zur Drehmomentkalibrierung erfolgt manuell
- 6.) Drehzahlaufbringung mittels Elektromotor
- 7.) Antrieb zur Drehzahlkalibrierung erfolgt mittels Drehstrommotor
- 8.) Räumliche Trennung der beiden Kalibriervorgänge
- 9.) Prüfstandskalibrierung erfolgt durch Kalibrierung der Sensoren (Drehmomentaufnehmer,...)
- 10.) Drehzahlmessung erfolgt optisch

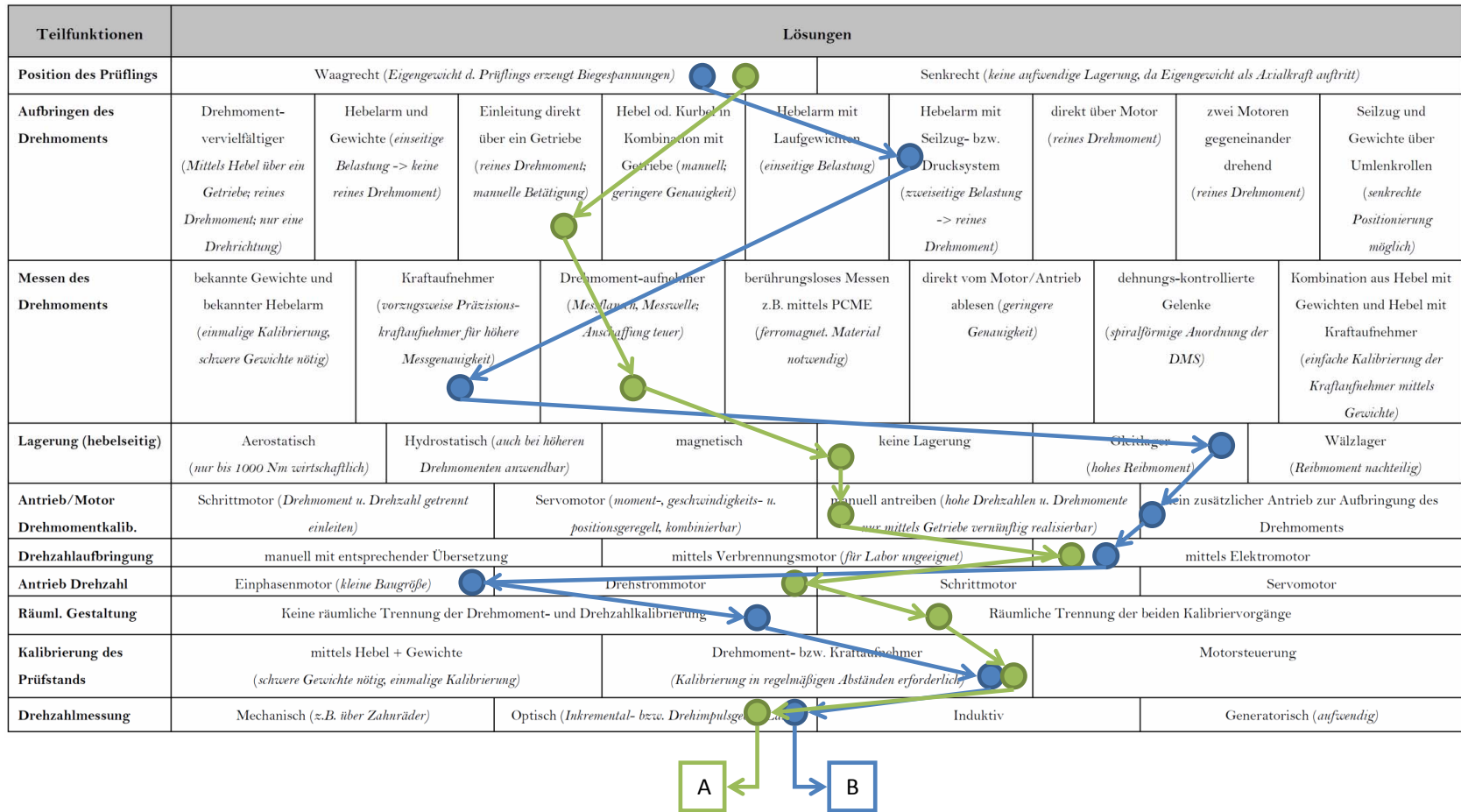


Abbildung 2.3.: Zwei Varianten der Gesamtlösung

Gesamtlösungsvariante B:

Die zweite Lösungsvariante (in Abbildung 2.3 blau dargestellt) enthält folgende Teillösungen:

- 1.) waagrechte Positionierung des Prüflings
- 2.) Aufbringen des Drehmoments mittels Hebelarm in Kombination mit einem Seilzug- oder Drucksystem
- 3.) Messen des Drehmoments mittels Kraftaufnehmer
- 4.) Lagerung des Prüflings hebelseitig mittels Wälzlager
- 5.) kein zusätzlicher Antrieb zur Drehmomenterzeugung notwendig
- 6.) Drehzahlaufbringung mittels Elektromotor
- 7.) Antrieb zur Drehzahlkalibrierung erfolgt mittels Einphasenmotor
- 8.) keine räumliche Trennung der Drehmoment- und Drehzahlkalibrierung
- 9.) Prüfstandskalibrierung erfolgt durch Kalibrierung der Sensoren (Kraftaufnehmer,...)
- 10.) Drehzahlmessung erfolgt optisch

Die Kompatibilität der Teilfunktionen untereinander wurde während der Auswahl bereits berücksichtigt. Da hier nur grob die wichtigsten Funktionen zur Erfüllung der Anforderungen aufgliedert wurden, bleibt die genaue konstruktive Umsetzung noch relativ frei. Dadurch ergeben sich nur geringe bis keine Unverträglichkeiten zwischen den Lösungen zu den jeweiligen Teilfunktionen. In Lösungsvariante A und B sind etwaige Kollisionen mit berücksichtigt worden.

2.3.2. VERGLEICH DER ENTSTEHENDEN GESAMTLÖSUNGSVARIANTEN

Als Entscheidungshilfe wurde ein Vergleich der beiden Varianten durchgeführt:

ad 1.): Die waagrechte Position des Prüflings wurde für beide Varianten gewählt, da die Biegespannungen, verursacht durch das eher geringe Eigengewicht der Prüflinge (bis ca. 4-5 kg), gut durch entsprechende Lagerung kompensiert, oder je nach Anforderung an die Genauigkeit des Prüfstands sogar vernachlässigt werden können.

Vorteile bei einer waagrecht Position sind die leichtere Zugänglichkeit des Prüflings und die einfachere Einleitung des Drehmoments und der Drehzahl.

ad 2.): Sowohl Variante A (Einleitung des Drehmoments über ein Getriebe) als auch Variante B (Einleitung des Drehmoments über Hebelarme in Kombination mit Seilzug- oder Drucksystem) erfüllen die Anforderung ein „reines“ Drehmoment einzuleiten.

Im Laufe der Konzeptionierungsphase wurde noch eine weitere Anforderung an den Prüfstand gestellt: In Zukunft soll die Möglichkeit bestehen, Torsionsstäbe auf Drehmoment kalibrieren zu können, die bei aufgebrachtem Maximaldrehmoment einen Verdrehwinkel von bis zu 360° aufweisen können. Variante B kann dadurch diese Anforderung nicht mehr erfüllen. Aufgrund des für diese Variante notwendigen Hebels zur Aufbringung des Drehmoments können nur kleine Verdrehwinkel des Prüflings realisiert werden.

ad 3.): In diesem Punkt unterscheiden sich nur die Methoden der Referenzmessung, welche keinen nennenswerten Vor- oder Nachteil gegenüber der jeweils anderen Methode aufweist.

ad 4.): Eine Lagerung mittels Wälzlager wurde bei Variante B gewählt, da sie hier die einfachste und am wenigsten aufwendige Form der Lagerung darstellt und die Anforderungen an die Genauigkeit trotz dadurch eingeleiteter Biegespannungen immer noch eingehalten werden kann.

Da durch die räumliche Trennung der Kalibriervorgänge in Variante A die Möglichkeit besteht, die Lagerung mittels Wälzlager nur auf der Seite der Drehzahlkalibrierung zu verwenden und auf der Drehmomentseite darauf zu verzichten, ist die Genauigkeit der Messungen weiterhin gewährleistet. Für die Drehzahlkalibrierung spielt die Lagerung keine nennswerte Rolle in Bezug auf die Messung dieser.

ad 5.): Mit einem entsprechenden Getriebe kann in Variante A das Drehmoment manuell aufgebracht werden. In Variante B ist zusätzlich zum Hebelsystem kein Antrieb nötig.

ad 6.) und 7.): Der Antrieb zur Drehzahlkalibrierung erfolgt bei beiden Varianten mittels Elektromotor. Hier unterscheiden sich die Varianten lediglich in der Ausführung des Motors.

ad 8.): Variante B sieht keine räumliche Trennung der beiden Kalibriervorgänge vor. Damit eine Drehzahlkalibrierung möglich ist, müsste hier der Hebelarm zur Drehzahlkalibrierung „abgekoppelt“ werden, damit dieser den Kalibriervorgang nicht behindert.

Der Vorteil dieser Variante ist die Platz- und die Zeitersparnis, da der Prüfling nur einmal eingebaut und ausgerichtet werden muss. Aufgrund der komplexeren Konstruktion eines Prüfstandes ohne räumliche Trennung der Kalibriervorgänge ist jedoch Variante A zu bevorzugen.

ad 9.): Die Kalibrierung des Prüfstandes selbst erfolgt im Rahmen der regelmäßigen Kalibrierung der Referenzsensoren.

ad 10.): Die Drehzahlmessung erfolgt bei beiden Varianten mittels Inkrementalgeber als einfachste und leicht zu realisierende Variante der Drehzahlmessung.

Aus dem Vergleich der beiden Varianten miteinander geht hervor, dass Gesamtlösungsvariante A die zu bevorzugende Variante ist. Nur diese Variante erfüllt alle Grundanforderungen an die Funktionen des Prüfstandes und ermöglicht eine einfachere Realisierung als Gesamtlösungsvariante B (Vergleiche Punkt 2 und 8).

3. AUSFÜHRUNG UND KONSTRUKTION

Dieses Kapitel behandelt die Konstruktion und Ausführung des Prüfstandes selbst.

In der Entwurfsphase wird der Prüfstand in drei Module unterteilt, um die Konstruktion einerseits übersichtlicher zu gestalten und andererseits zu ermöglichen die Vielzahl an Komponenten dem entsprechenden Modul seiner Funktion nach eindeutig zuzuordnen zu können.

- Modul Drehmoment
- Modul Drehzahl
- Modul Rahmen

Diese Vorgehensweise entspricht der VDI-Richtlinien Nr. 2221, welche als Arbeitsschritte 4 und 5 das Gliedern in realisierbare Module und das Gestalten der maßgebenden Module vorsieht (vergleiche Abbildung 1.1).

3.1. MODUL DREHMOMENT

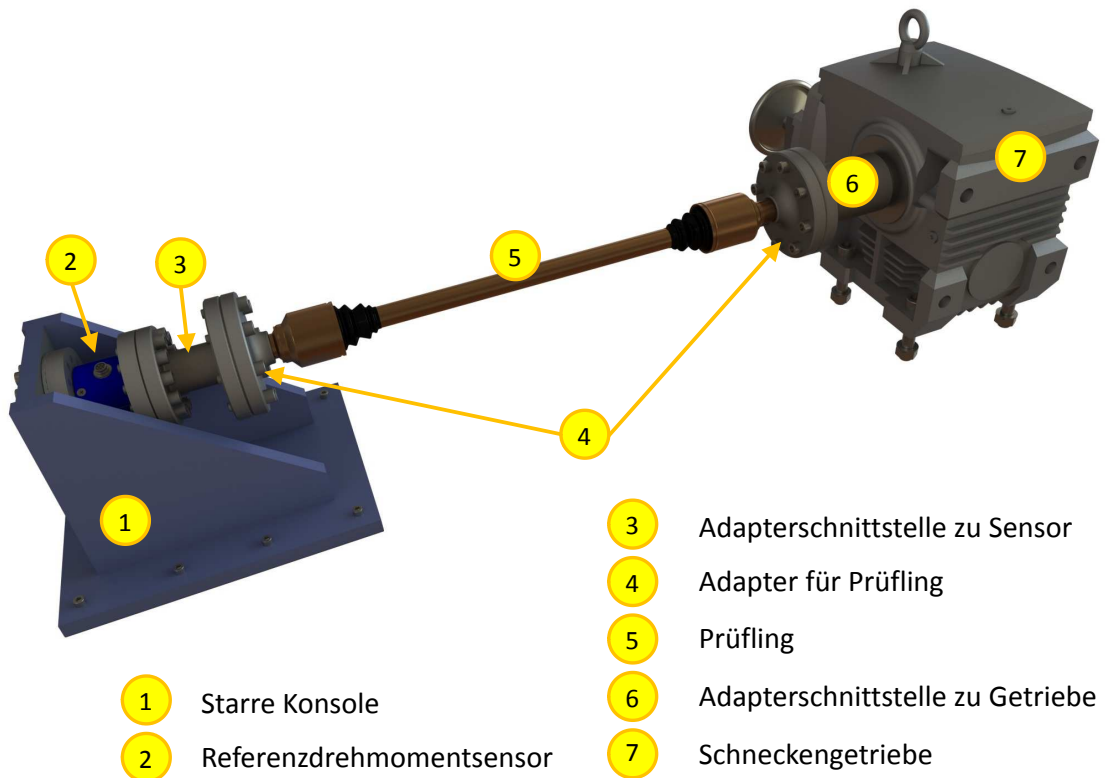


Abbildung 3.1.: Konstruktionsmodell des Moduls Drehmoment

Das Modul Drehmoment (vergleiche Abbildung 3.1) umfasst die Drehmomenteinleitung in den Prüfling (in Abbildung 3.1 rechts dargestellt), die Vorrichtung zum Einbau des Prüflings, die Referenzmessung des Drehmoments, sowie die Aufnahme des Drehmoments auf der anderen Seite des Prüflings (in Abbildung 3.1 links dargestellt). Wie in Kapitel 2.3.1 unter Gesamtlösungsvariante A aufgeführt, soll die Einleitung des Drehmoments rein über ein Getriebe erfolgen und die Referenzmessung mittels Drehmomentaufnehmer realisiert werden.

3.1.1. EINLEITUNG DES DREHMOMENTS MITTELS GETRIEBE

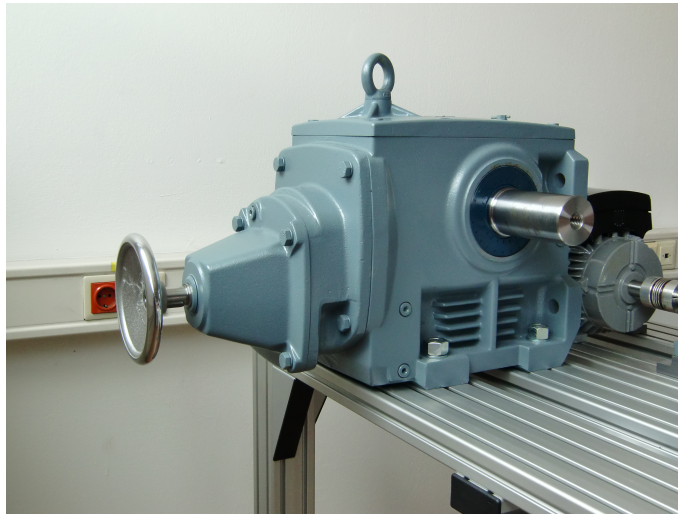


Abbildung 3.2.: Schneckengetriebe der Firma Nord GmbH & Co. KG

Das zur Einleitung des Drehmoments erforderliche Getriebe muss folgende Anforderungen erfüllen:

- Aufbringung des Drehmoments in beide Drehrichtungen möglich
- Ein Wechsel der Drehrichtung bei Höchstlast muss möglich sein, damit ein Übergang von Aufwärtsmessreihe in Abwärtsreihe (siehe Kapitel 1.3.3) und umgekehrt durchführbar ist.
- Selbsthemmende Eigenschaften, um das Drehmoment auf den gewünschten Stufen beliebig lange aufrecht erhalten zu können
- Eine ausreichend hohe Übersetzung, um 2500 Nm manuell aufbringen zu können bzw. ein Drehmoment dieser Größenordnung zu liefern

Diese Anforderungen erfüllt ein Schneckengetriebe (Abbildung 3.2) mit folgenden technischen Eigenschaften:

Tabelle 3.1.: Technische Daten Schneckengetriebe

Hersteller	Getriebebau NORD GmbH & Co. KG
Typ	SK43125-W
Übersetzung	236,58
max. Abtriebsdrehmoment	3312 Nm bei $n_1 = 0 \text{ 1/min}$
Antriebswelle	$\varnothing 24 \text{ mm}$
Abtriebswelle	$\varnothing 60 \text{ mm}$
Gewicht	ca. 128 kg
Getriebeausführung	Fußausführung
Zubehör	Handrad $\varnothing 160 \text{ mm}$

Die Anbindung des Prüflings am Getriebe erfolgt über eine Adapterschnittstelle, welche auf der einen Seite an die Abtriebswelle des Getriebes angepasst wurde. Die Momentübertragung erfolgt über eine Passfederverbindung an der Welle.

3.1.2. ANBINDUNG DES PRÜFLINGS

Zur Aufnahme des Prüflings werden beidseitig spezielle Adapter verwendet, welche mit dem Prüfling mitgeliefert werden. Diese weisen die entsprechende Gegenverzahnung auf. Die Prüflinge stammen aus dem Rennsport. Aufgrund dieser speziellen Anwendung werden keine genormten Verzahnungen verwendet (siehe Abbildung 3.3).

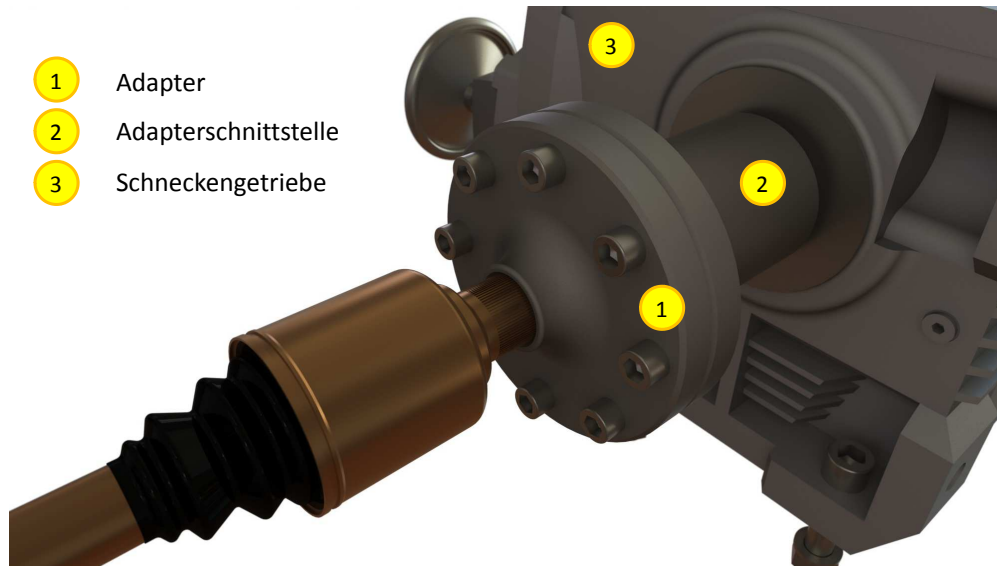


Abbildung 3.3.: Adapter zur Aufnahme des Prüflings am Schneckengetriebe

Um den Adapter befestigen zu können, weisen die Adapterschnittstellen ein entsprechendes Lochbild auf, welches unabhängig von der Verzahnung des Adapters immer gleich bleibt. Eine Sicherung gegen axiales Verschieben des Prüflings ist nicht nötig, da zu keiner Zeit während der Kalibriervorgänge Axialkräfte aufgebracht werden.

3.1.3. REFERENZMESSUNG MITTELS DREHMOMENTAUFNEHMER

Die Referenzmessung erfolgt auf der dem Getriebe gegenüberliegenden Seite, da einerseits Verdrehungen bis zu 360° laut Anforderungen möglich sein sollen, wodurch die Messung des Drehmoments hier am sinnvollsten ist. Andererseits kann nur so sichergestellt werden, dass das gesamte eingeleitete Drehmoment über den Prüfling und somit über die Messausrüstung geleitet wird und nur das tatsächlich am anderen Ende auch ankommende Drehmoment als Referenz herangezogen wird.

Zur Messung des Referenzdrehmoments wird ein Drehmomentaufnehmer mit ausreichendem Messbereich und Genauigkeit verwendet. In der Regel sollte der Referenzaufnehmer mindestens ein Zehntel genauer messen als der zu kalibrierende Aufnehmer. Für

diese Anwendung eignet sich ein statischer Drehmomentsensor mit beidseitigem Flansch. Die technischen Daten des Drehmomentaufnehmers können der nachfolgenden Tabelle 3.2 entnommen werden.

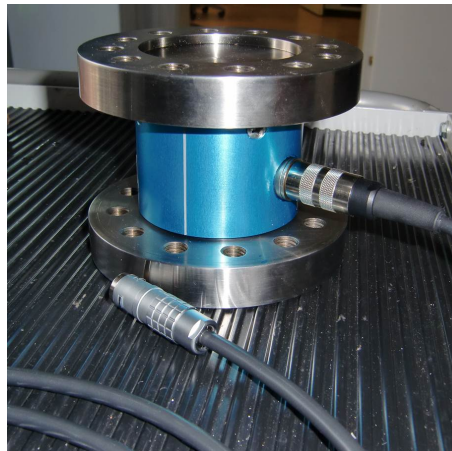


Abbildung 3.4.: Statischer Drehmomentsensor der Firma Lorenz Messtechnik GmbH

Tabelle 3.2.: Technische Daten Drehmomentaufnehmer

Hersteller	Lorenz Messtechnik GmbH
Typ	DF-30
Messbereich	5000 Nm
Genauigkeitsklasse	0,1 %
Nennkennwert (S)	1,00 mV/V
Gebrauchsmoment	130 %
Grenzmoment (statisch)	150 %
Bruchmoment (statisch)	> 300 %
Verdrillwinkel bei Nennlast	< 0,2°
Schutzart (DIN EN 60529)	< IP 50
Anschlussstecker	6 polig

Die Adapterschnittstelle auf dieser Seite weist zusätzlich zum Lochbild für den Adapter ein Lochbild für den Drehmomentaufnehmer auf. Die beiden Adapterschnittstellen müssen eigens für den Prüfstand angefertigt werden. Um die Messung nicht durch Biegemomente, Querkräfte oder Reibung zu verfälschen wird hier auf eine zusätzliche Lagerung des Prüflings verzichtet [Schicker und Wegener, 2002].

3.1.4. AUSLEITEN DES DREHMOMENTS MITTELS STARRER KONSOLE

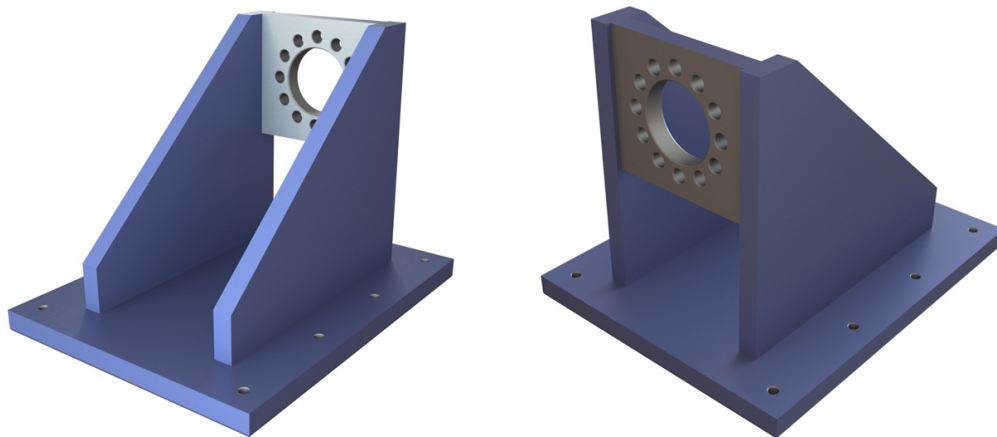


Abbildung 3.5.: starre Konsole zur Aufnahme des Drehmomentsensors

Der Drehmomentsensor ist an einer starren Konsole befestigt, welche eine ausreichende Steifigkeit aufweist, damit keine Verformungen auftreten, welche die Messgenauigkeit des Sensors beeinträchtigen könnten. Sie ist so ausgeführt, dass das eingeleitete Drehmoment in den Rahmen wieder ausgeleitet wird. Die Verteilung der resultierenden Kräfte wird so gestaltet, dass auch im Rahmen nur geringe elastische Verformungen auftreten können (siehe Kapitel 3.4).

Um diese Anforderungen erfüllen zu können, wurde eine Schweißkonstruktion erstellt und angefertigt, welche in Abbildung 3.5 dargestellt ist. Um Fluchtungsfehler möglichst gering zu halten, wurden die ausschlaggebenden Flächen mit den passenden Form- und Lagetoleranzen nach DIN ISO 1101 versehen (siehe Anhang A.3 Fertigungszeichnung Nr. 007_00).

3.2. MODUL DREHZAHL

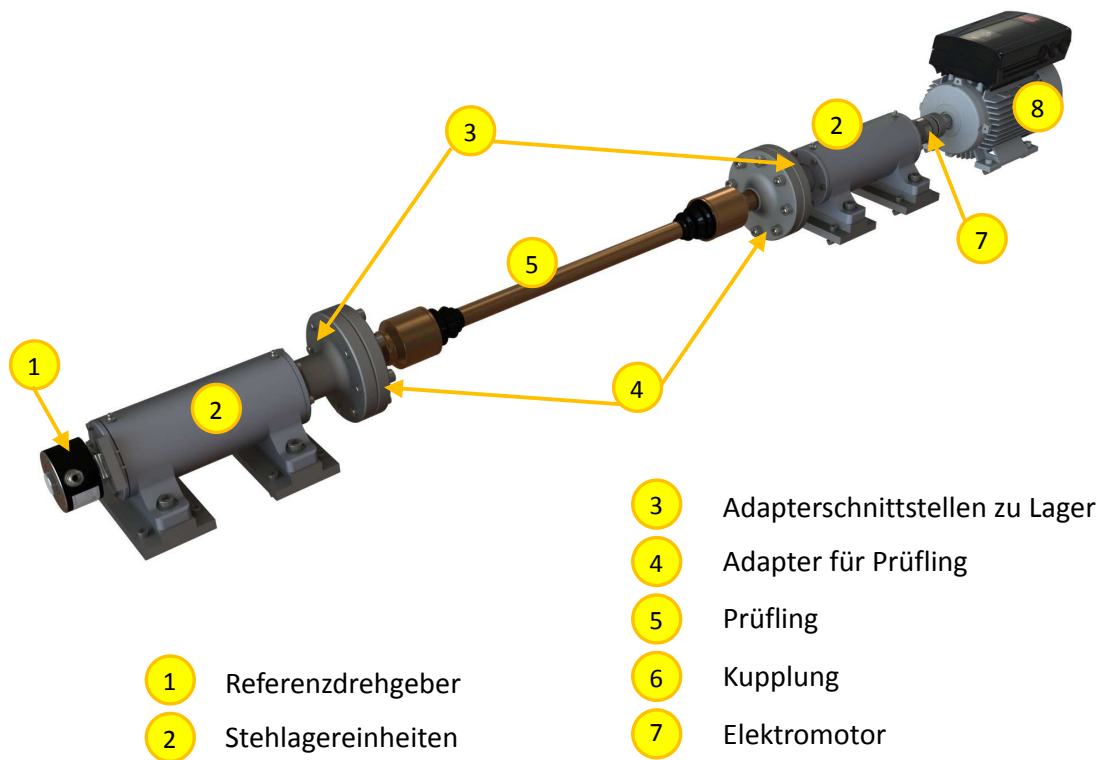


Abbildung 3.6.: Konstruktionsmodell des Moduls Drehzahl

Das Modul Drehzahl umfasst den Antrieb, um den Prüfling auf vorgegebene Drehzahlen von bis zu 2500 U/min zu bringen. Es beinhaltet weiters die Anbindung des Prüflings, dessen Lagerung und das Messen der Referenzdrehzahl.

3.2.1. ANTRIEB MIT HILFE EINES ELEKTROMOTORS

Aus Kapitel 2.3.1 geht hervor, dass sich als Antrieb am besten ein Elektromotor eignet. Damit die Zeitspanne bis zum Erreichen der geforderten Drehzahlen kurz gehalten werden kann und das Antriebsmoment des Motors groß genug ist, um die Massenträgheit des Prüflings und die daraus entstehende Reibung in den Lagern zu überwinden, wurde das Modell der Firma Danfoss Ges.m.b.H ausgewählt (siehe Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3.: Technische Daten Elektromotor

Hersteller	Danfoss Ges.m.b.H.
Typ	FCM 315
Motorleistung	1,5 kW
Motordrehmoment (4 polig)	9,6 Nm
Gewicht	20 kg
Versorgungsspannung	380-480 V
Drehzahl bei 400 V	3000 U/min
Drehzahlgenauigkeit	> +/- 15 %

Ein weiteres Kriterium, sich für diesen Elektromotor zu entscheiden, war die Tatsache, dass die Steuerung bereits inkludiert ist. Ein einfaches Ansteuern des Motors kann über eine passende Schnittstelle mittels Laptop erfolgen, wodurch der genaue Ablauf der Kalibrierung im Voraus geplant und später sogar automatisiert mittels dafür entwickelter Software durchgeführt werden kann.

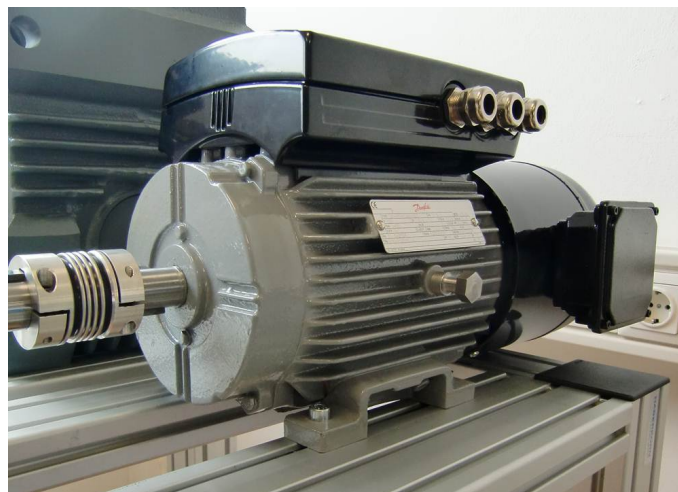


Abbildung 3.7.: Elektromotor des Herstellers Danfoss Ges.m.b.H.

Zum Ausgleich etwaiger axialer, lateraler und angularer Wellenverlagerungen zwischen der Antriebswelle des Motors und der Welle des Stehlagergehäuses ist eine Metallbalgkupplung vorgesehen, die dafür die notwendigen Eigenschaften besitzt und eine exakte

Übertragung des Drehmoments gewährleistet. Tabelle 3.4 enthält einen Auszug der technischen Daten der Kupplung.

An beiden Seiten der Kupplung kann der passende Durchmesser gewählt werden und die Bohrung ist jeweils mit der zur Welle passenden Passfedernut versehen (siehe Abbildung 3.9). Die Montage erfolgt beidseitig mittels Klemmnaben.

Tabelle 3.4.: Technische Daten Metallbalgkupplung

Hersteller	R+W Antriebselemente GmbH
Typ	BKL
Nenn Drehmoment	18 Nm
möglicher Bohrungsdurchmesser	8-28 mm
Gewicht	ca. 0,16 kg
axialer Ausgleich	± 1 mm
lateraler Ausgleich	$\pm 0,2$ mm
angularer Ausgleich	$\pm 1^\circ$

3.2.2. LAGERUNG DES PRÜFLINGS

Die Lagerung setzt sich aus zwei Stehlagereinheiten zusammen, bestehend aus jeweils zwei Rillenkugellagern, einem Gehäuse und einer bereits eingebauten Welle (siehe Abbildung 3.8).

Für die Drehzahlkalibrierung wurden anfangs bis in die Konstruktionsphase Drehzahlen von bis zu 10000 U/min gefordert, wodurch die unten angeführten Lager ausgewählt wurden. Zu einem späteren Zeitpunkt, bereits nach Lieferung der Lager wurden die Anforderungen auf eine maximale Drehzahl von 2500 U/min geändert, wodurch die hier verwendete Lagerung nun überdimensioniert ist.

Da der Prüfstand nur zur Kalibrierung, also nicht im Dauerlauf betrieben werden wird und die Stückzahl der voraussichtlich damit kalibrierten Prüflinge gering genug ist, um die Lebensdauer der Lager nur bedingt zu beeinträchtigen, wurde auf eine Anpassung der Lagerung auf die niedrigere Drehzahl verzichtet.

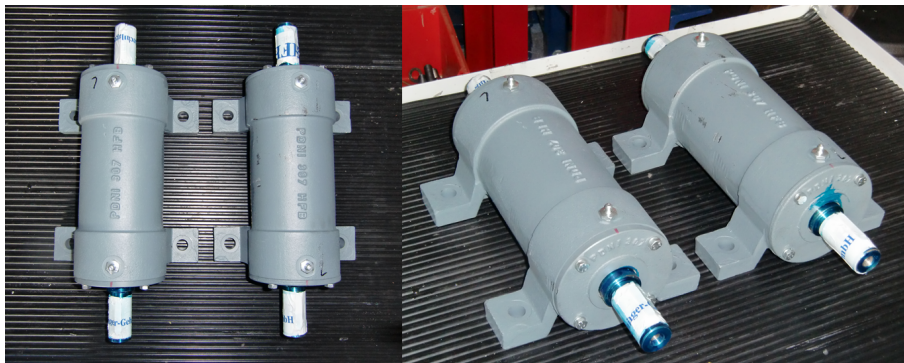


Abbildung 3.8.: Verwendete Stehlagereinheiten

Tabelle 3.5.: Technische Daten Stehlagereinheiten

Hersteller	FAG OEM und Handel Aktiengesellschaft
Typ	VRE307-F
Typ Rillenkugellager	2x 6307-C3
integrierte Welle	∅ 28 mm
Bezugsdrehzahl	9900 U/min

3.2.3. REFERENZDREHZAHLMESSUNG MITTELS DREHGEBER

Zur Messung der Referenzdrehzahl dient ein inkrementaler Drehgeber (siehe Abbildung 3.9), welcher am Wellenstumpf der dem Motor gegenüber liegenden Stehlagereinheit mittels Klemmring angebracht ist und sich am Stehlagergehäuse über eine Momentenstütze abstützt (siehe Abbildung 3.10). Die Anbringung gestaltet sich einfach, da die passende Größe für den Wellenstumpf der Lagereinheit vorhanden ist und lediglich die in der Welle vorhandene Passfeder entfernt werden muss.

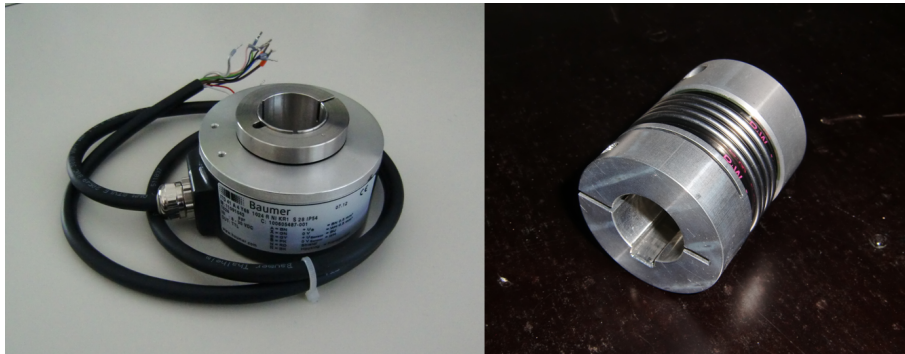


Abbildung 3.9.: Verwendeter inkrementaler Drehgeber und Metallbalgkupplung

Tabelle 3.6.: Technische Daten Drehgeber

Hersteller	Baumer Thalheim GmbH & Co. KG
Typ	ITD 41 A 4 Y68
Impulszahl	1024
Betriebsspannung	8...30 VDC
Hohlwelle	Ø 28 mm

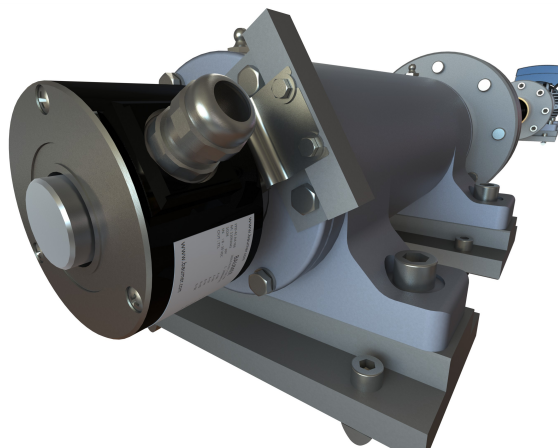


Abbildung 3.10.: Position des Drehgebers im Konstruktionsmodell

3.2.4. ANBINDUNG DES PRÜFLINGS

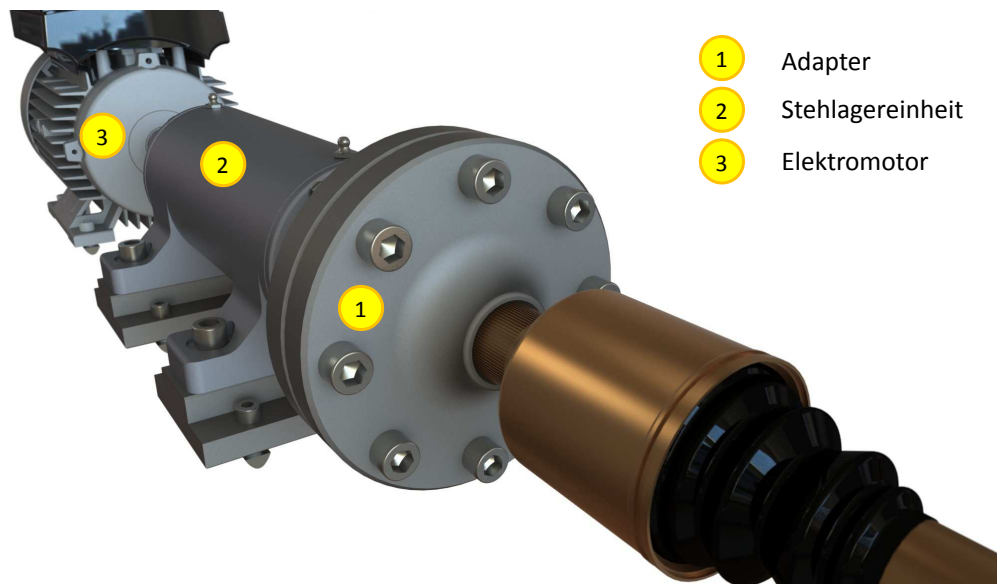


Abbildung 3.11.: Adapter zur Aufnahme des Prüflings an der Stehlagereinheit

Die Anbindung des Prüflings mittels Adapter und entsprechenden Adapterschnittstellen zu den integrierten Lagerwellen erfolgt analog dem Modul Drehmoment (vergleiche Abbildung 3.3 mit Abbildung 3.11).

In Anhang A.1 befinden sich Explosionsdarstellungen zu den Modulen Drehmoment (Abbildung A.1) und Drehzahl (Abbildung A.2) zur besseren Übersicht, über die in den beiden Modulen verbauten Komponenten.

3.3. MODUL RAHMEN

Die Module Drehzahl und Drehmoment werden am Modul Rahmen angebunden, wodurch eine gewisse Abhängigkeit der Ausführung des Rahmens von den verwendeten Komponenten entsteht und vice versa. Das Modul beinhaltet nicht nur die Anbindung der Komponenten, sondern soll auch die Längenanpassung an den Prüfling im Bereich von 150 mm bis 1600 mm ermöglichen.

Da es hier viele Möglichkeiten der Ausführung gibt wurden zwei naheliegende Varianten ausgewählt und auskonstruiert:

- Variante 1: Schweißkonstruktion aus Formrohren
- Variante 2: Baukastensystem der item Industrietechnik GmbH

Eine wesentliche Anforderung an den Rahmen ist es, die Verformung desselben aufgrund des eingeleiteten Drehmoments gering zu halten. Wird die Verformung zu groß, so können dadurch Querkräfte oder Biegemomente in den Prüfling eingeleitet werden, was das Messergebnis verfälschen würde. Daher wurde darauf geachtet, dass der Rahmen entsprechend steif ausgeführt wird.

3.3.1. AUFBAU VARIANTE 1 SCHWEISSKONSTRUKTION:

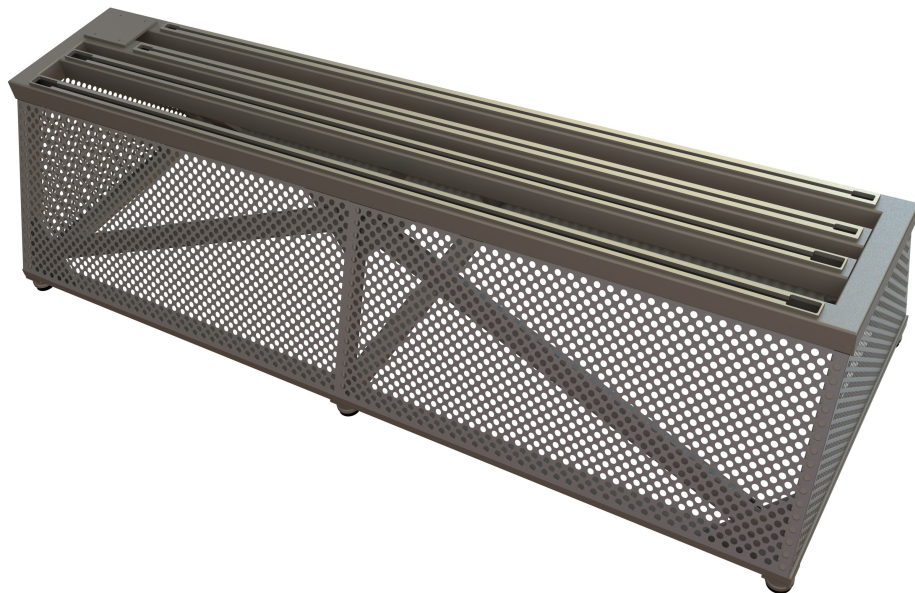


Abbildung 3.12.: Schweißkonstruktion aus Formrohren

Die erste Variante des Rahmens, wie in Abbildung 3.12 dargestellt, ist eine Schweißkonstruktion aus Formrohren. Die Formrohre wurden gewählt, um die Längenanpassung an die Prüflinge über T-Nuten realisieren zu können, die direkt in den Formrohren verlaufen. Wie in Abbildung 3.13 ersichtlich, werden diese Nuten direkt in die Formrohre gefräst, wodurch eine Verschiebung über die ganze Länge des Prüfstandes möglich wird. Der Prüfstand kann nun stufenlos auf jeden beliebigen Prüfling angepasst werden.

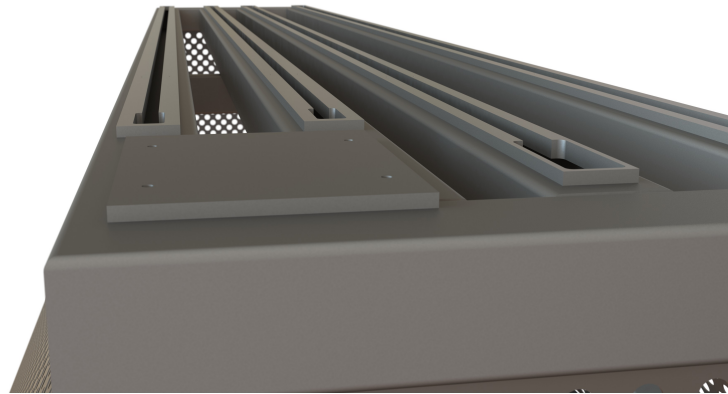


Abbildung 3.13.: T-Nuten zur stufenlosen Längenanpassung

Damit nicht jedes Mal alle Komponenten des Prüfstandes neu ausgerichtet werden müssen, was einen erheblichen Mehraufwand darstellen würde, werden das Schneckengetriebe, der Elektromotor über eine fixe Platte (siehe Abbildung 3.13) und die motorseitig montierte Stehlagereinheit fix am Rahmen montiert. Dadurch ist nur ein einmaliges Ausrichten dieser Komponenten vor der Inbetriebnahme erforderlich. Zur Sicherstellung der richtigen Montage sind an den entsprechenden Stellen Positionswinkel angebracht, dessen Position durch vordefinierte Bohrungen vorgegeben wird.

Ein Grund sich für eine Schweißkonstruktion aus Formrohren zu entscheiden ist die relativ freie Gestaltungsmöglichkeit, die sich dadurch für den Rahmen ergeben. Dadurch ist es unter anderem möglich, die vertikal verlaufenden Formrohre unter einem Winkel von ca. 65° einzubauen, um das Schwingungsverhalten während der Drehzahlkalibrierung zu verbessern und die Steifigkeit zu erhöhen. Die Vorgehensweise das Schwingungsverhalten mit einem kleineren Winkel als 90° positiv zu beeinflussen wurde von Fachexperten auf dem Gebiet des Prüfstandbaus empfohlen.

Zur Entkoppelung des Prüfstandes vom Fundament des Aufstellorts werden schwingungsdämpfende Maschinenfüße angebracht.

Die diagonal verlaufenden Streben sollen die Steifigkeit an der durch das Drehmoment hoch beanspruchten Mitte des Rahmens erhöhen (vergleiche Abbildung 3.12). Eine er-

höhte Beanspruchung in der Mitte des Prüfstands ist zu erwarten, da der Großteil der Prüflinge aus Halbachsen besteht. Trotz unterschiedlicher Längen nehmen die Halbachsen meist annähernd die halbe Prüfstandslänge in Anspruch, wodurch das Drehmoment dann ungefähr in der Mitte des Prüfstands ausgeleitet werden wird.

Die Anfertigung einer solchen Schweißkonstruktion vor allem in Hinblick auf das Fräsen von T-Nuten bei einer Formrohlänge von über 3 m (vergleiche Hauptabmessungen des Rahmens in Tabelle 3.8) kann nur von wenigen Betrieben realisiert werden. Weiters ist ein Umgestalten des Prüfstands, sollte dies erforderlich sein, bei dieser Variante nicht einfach zu gestalten, weshalb noch eine zweite Variante des Rahmens betrachtet wurde.

3.3.2. AUFBAU VARIANTE 2 BAUKASTENSYSTEM:



Abbildung 3.14.: Rahmen aus Modulen des Baukastensystems der Firma item Industrietechnik GmbH

Die zweite Variante des Rahmens ist eine Konstruktion bestehend aus dem Systembaukasten für den Maschinenbau der item Industrietechnik GmbH (siehe Abbildung 3.14). Hier können aus einer Vielfalt an Produkten die passenden Komponenten ausgewählt werden und nach Montageanleitung miteinander verbunden und verbaut werden. Die Grundelemente bestehen aus stranggepressten Aluminium-Profilen, die so gestaltet sind, dass die höchstmögliche Festigkeit im Verhältnis zum Materialeinsatz erzielt wird [item, 2007].

Tabelle 3.7.: Mechanische Daten der Grundelemente [item, 2007]

Kurzzeichen	Al Mg Si 0,5 F 25
Werkstoffnummer	3.3206.72
Zugfestigkeit Rm	min. 245 N/mm^2
Fließgrenze Rp0,2	min. 195 N/mm^2
Dichte	2,7 kg/dm^3
Elastizitätsmodul E	70000 N/mm^2
Schubmodul G	25000 N/mm^2

Abbildung 3.15 zeigt den Querschnitt der verwendeten Profile. Jedes Profil weist Nuten auf, wodurch eine flexible Befestigung der Komponenten über Nutensteine ermöglicht wird.

Alle Standardprofile weisen einfallende Nutflanken auf, wodurch eine Vorspannung der Nutflanken im elastischen Bereich des Materials aufgebracht wird. Dadurch wird erreicht, dass die Befestigungsschraube in jedem Betriebszustand eine Vorspannung hat, welche ei-

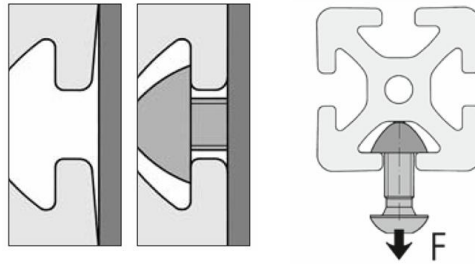


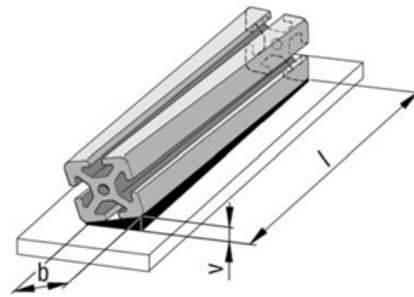
Abbildung 3.15.: Vorspannung durch einfallende Nutflanken (links) und Querschnitt des Aluminium-Profils (rechts)

ne schwingungssichere Verbindung ermöglicht. [item, 2007]

Zur Dämpfung der durch die Drehzahlkalibrierung in den Rahmen und damit auch ins Fundament eingebrachten Schwingungen werden spezielle Dämpfungseinsätze in die Stellfüße eingelegt.

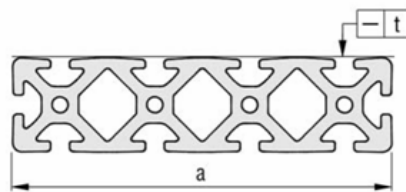
Der Hersteller gibt die folgende Toleranzen bzw. Formabweichungen wie Geradheits- und Ebenheitstoleranzen nach DIN EN 12020 Teil 2 [item, 2007] an (siehe Abbildung 3.16).

Verwindung



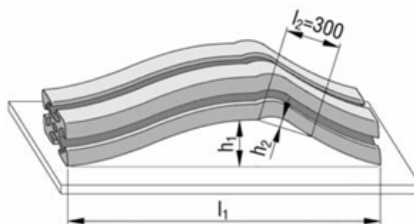
b [mm]		Verwindungstoleranz v bei Längen l [mm]					
		bis 1.000	bis 2.000	bis 3.000	bis 4.000	bis 5.000	bis 6.000
-	25	1,0	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0
25	50	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0	2,0
50	75	1,0	1,2	1,2	1,5	2,0	2,0
75	100	1,0	1,5	1,8	2,2	2,5	3,0
100	125	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5	3,0
125	150	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5	3,0
150	200	1,5	1,8	2,2	2,6	3,0	3,5
200	300	1,8	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
300	320	2,0	2,0	3,5	4,0	4,5	5,0

Geradheits-toleranz quer



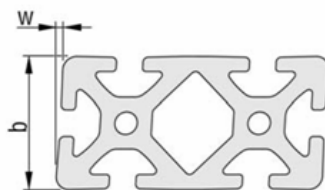
Breite a [mm]		Geradheitstoleranz t [mm]
über	bis	
0	80	0,3
80	120	0,4
120	160	0,5
160	240	0,7
240	320	1,0

Geradheits-toleranz längs



Länge l ₁ [mm]	h ₁ [mm]	Toleranzen
		h ₂
bis 1.000	0,7	Auf jeden Längenabschnitt l ₂ = 300 mm darf die Abweichung h ₂ höchstens 0,3 mm betragen
bis 2.000	1,3	
bis 3.000	1,8	
bis 4.000	2,2	
bis 5.000	2,6	
bis 6.000	3,0	

Winkeltoleranz



Breite b [mm]		Winkeltoleranz w ± [mm]
über	bis	
0	20	0,2
20	40	0,4
40	80	0,6
80	120	0,8
120	200	1,2
200		1,5

Abbildung 3.16.: Toleranzen der Aluminium-Profile [item, 2007]

3.3.3. SCHWEISSKONSTRUKTION VERSUS BAUKASTENSYSTEM: VERGLEICH UND ENTSCHEIDUNG

Um sich für eine Variante zu entscheiden wurden die Vor- und Nachteile dieser unterschiedlichen Konstruktionen näher betrachtet.

Durch die maximale Prüflingslänge von 1600 mm und durch die Aufteilung der Kalibriervorgänge in zwei Module (Drehmoment und Drehzahl) ergeben sich für die beiden Varianten folgende Hauptabmessungen (alle Daten wurden aus den Konstruktionsmodellen entnommen):

Tabelle 3.8.: Hauptabmessungen des Rahmens Schweißkonstruktion (Variante 1) und Baukastensystem (Variante 2)

Hauptabmessungen	Variante 1	Variante 2
Länge	3020 mm	3020 mm
Breite	1100 mm	670 mm
Höhe	823 mm	883 mm
Masse	345 kg	210 mm

Auffallend ist, dass die Variante aus Alu-Profilen sowohl schmaler, als auch leichter ausfällt, als die Schweißkonstruktion. Das höhere Gewicht und der breitere Stand der Schweißkonstruktion wirken sich positiv auf das Schwingungsverhalten aus.

Da das Baukastensystem aufgrund der vorgegebenen Komponenten weniger Freiheiten in der Konstruktion erlaubt als eine Schweißkonstruktion, ist es nicht möglich hier ebenfalls eine Verstrebung unter einem geringeren Winkel als 90° auszuführen.

Ein weiterer Nachteil des Baukastensystems ist der niedrigere Elastizitätsmodul des Materials, wodurch dieses Gefahr läuft, sich unter den während der Kalibrierung auftretenden Kräften stark zu verformen. Eine stärkere Verstrebung zur Erhöhung der Steifigkeit der Konstruktion ist also notwendig.

Für das Baukastensystem und durch das dabei verwendete Material ergeben sich jedoch auch einige Vorteile gegenüber einer Schweißkonstruktion aus Formrohren:

- Die Komponenten sind untereinander kompatibel und können einfach kombiniert und miteinander werden.
- Eine schwingungssichere Verbindung zwischen den Komponenten ist laut Hersteller wegen der einfallenden Nutflanken gegeben (vergleiche Kapitel 3.3.2).
- Die Montage der Bauteile kann einfach durchgeführt werden.
- Jederzeit kann der Rahmen mit anderen Komponenten einfach ergänzt werden.

- Wenn gefordert kann der Rahmen auch wieder zerlegt werden. Dadurch wird ein etwaiger Transport der Bauelemente erleichtert.

Aufgrund der oben genannten Vorteile und da sich ein Rahmen aus Elementen des Baukastensystems für ausreichend kostengünstig erwies, fiel die Entscheidung zugunsten der zweiten Variante aus Alu-Profilen aus. Ein Angebot für die Schweißkonstruktion wurde nicht mehr eingeholt.

3.4. AUSFÜHRUNG GESAMTER PRÜFSTAND

In diesem Kapitel wird der 6. Arbeitsschritt der VDI-Richtlinien Nr. 2221 durchgeführt: Gestalten des gesamten Produkts.

Nachdem als Rahmen die Ausführung mit den Komponenten des Baukastensystems gewählt wurde, werden die drei Module miteinander kombiniert. Dabei stehen die Anbindung und die kollisionsfreie Kombination derselben im Vordergrund.

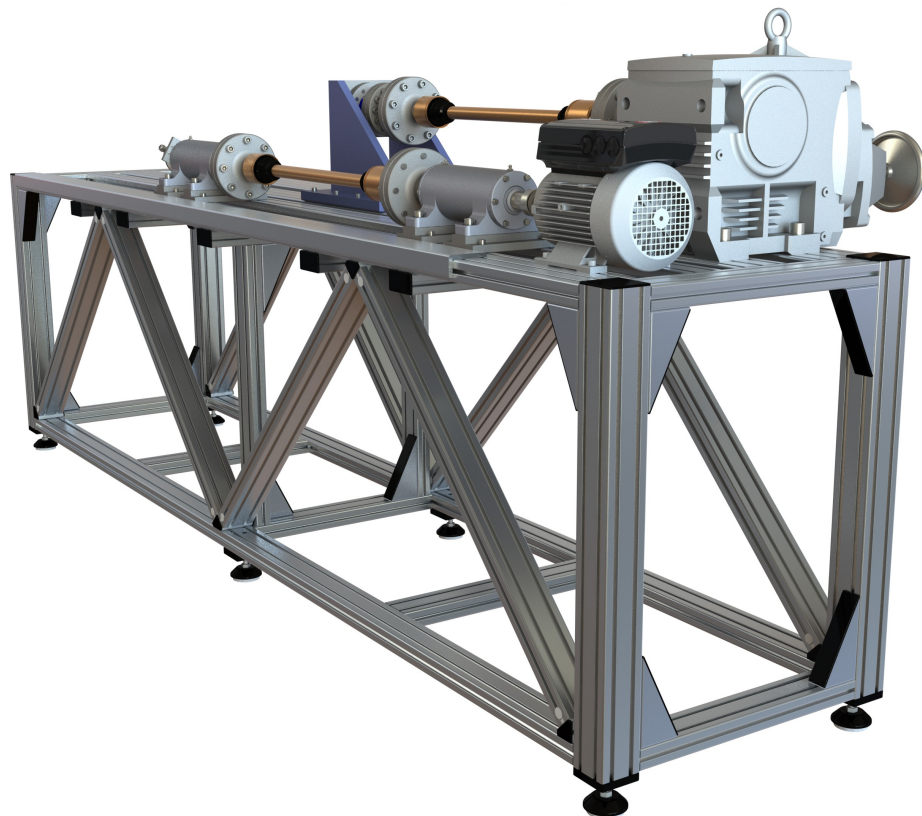


Abbildung 3.17.: Ausführung des gesamten Prüfstands

3.4.1. ANBINDUNG DES MODULS DREHMOMENT

Die Anbindung des Moduls Drehmoment gestaltet sich seitens des Getriebes relativ einfach, da dieses für das hohe Moment vom Hersteller entsprechend ausgelegt ist, wodurch nur mehr eine geeignete Befestigung am Rahmen überlegt werden musste.

Da sich das Schneckengetriebe auf der fixen Seite des Prüfstandes befindet, weil es sich durch sein hohes Eigengewicht zur flexiblen Einstellung der Prüflingslänge nicht eignet, wurden hier Durchgangsbohrungen im Rahmen vorgesehen. Die Größe der Durchgangsbohrungen (für Schrauben mit 20 mm Durchmesser) ist vom Getriebehersteller vorgegeben. Um die Positionierung der Bohrungen für die Fertiger des Rahmens zu erleichtern, und da die Verschiebung der starren Konsole über die vorhandenen Nuten durchgeführt werden soll, wurden die Bohrungen genau mittig in den Nuten angesetzt.

Die starre Konsole wurde speziell für diese Anwendung konstruiert. Daher mussten vor der finalen Ausführung noch Berechnungen angestellt werden. Diese werden im Folgenden aufgeführt.

Vorabschätzung der Schweißnähte:

Für diese Anwendung ausreichend und aufgrund der Geometrie der Konsole wurde als Verbindung der T-Stoß mit doppelseitiger Kehlnaht zur Befestigung der Grundplatten ausgewählt. Auch die Schweißverbindung zwischen den beiden Seitenplatte und der Zwischenplatte zur Aufnahme des Drehmomentsensors wurde als Kehlnaht ausgeführt.

Der Vorteil dieser Art der Schweißverbindung ist die einfache Ausführung und die günstige Herstellung, da nur geringe Vorbereitungsarbeiten an den Anschlussplatten durchgeführt werden müssen.

Um die auftretenden Spannungen in den Schweißnähten vorab abzuschätzen wurden Berechnungen nach [Künne, 2007] durchgeführt.

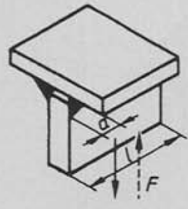
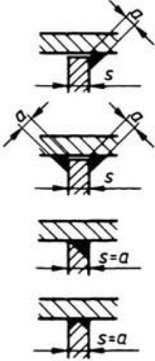
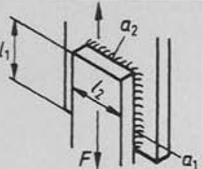
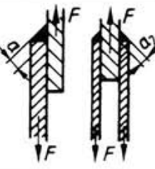
Beanspruchung	Anordnung	Nahtform	Nennspannung in der Naht	Nahtfläche bzw. -widerstandsmoment
Zug Druck			$\sigma_N = \frac{F}{A_N}$ $\sigma_N = -\frac{F}{A_N}$ Gl. (5.7)	$A_N = a \cdot l$ bzw. $A_N = \sum a \cdot l$
Schub			$\tau_N = \frac{F}{A_N}$ Gl. (5.8)	$A_N = a \cdot l$ bzw. $A_N = \sum a_1 \cdot l_1 + \sum a_2 \cdot l_2$

Abbildung 3.18.: Berechnung der Nennspannungen bei Kehlnähten [Künne, 2007]

Nennspannungen zufolge der durch das Drehmoment eingebrachten Kräfte (siehe Abbildung 3.19):

Schubbeanspruchung (Zwischenplatte zur Aufnahme des Drehmomentsensors):

- Nahtdicke: $a = 20\text{mm}$
- Nahtlänge: $l = 140\text{mm}$
- max. Drehmoment: $M_{max} = 2500\text{Nm}$

$$F_1 = \frac{M_{max}}{2 \cdot x_1} = \frac{2500 [\text{Nm}]}{2 \cdot 0,075 [\text{m}]} = 16667 [\text{N}] \quad (3.1)$$

$$A_N = a \cdot l = 20 [\text{mm}] \cdot 140 [\text{mm}] = 2800 [\text{mm}^2] \quad (3.2)$$

$$\tau_N = \frac{F_1}{A_N} = \frac{16667 [\text{N}]}{2800 [\text{mm}^2]} = 6 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (3.3)$$

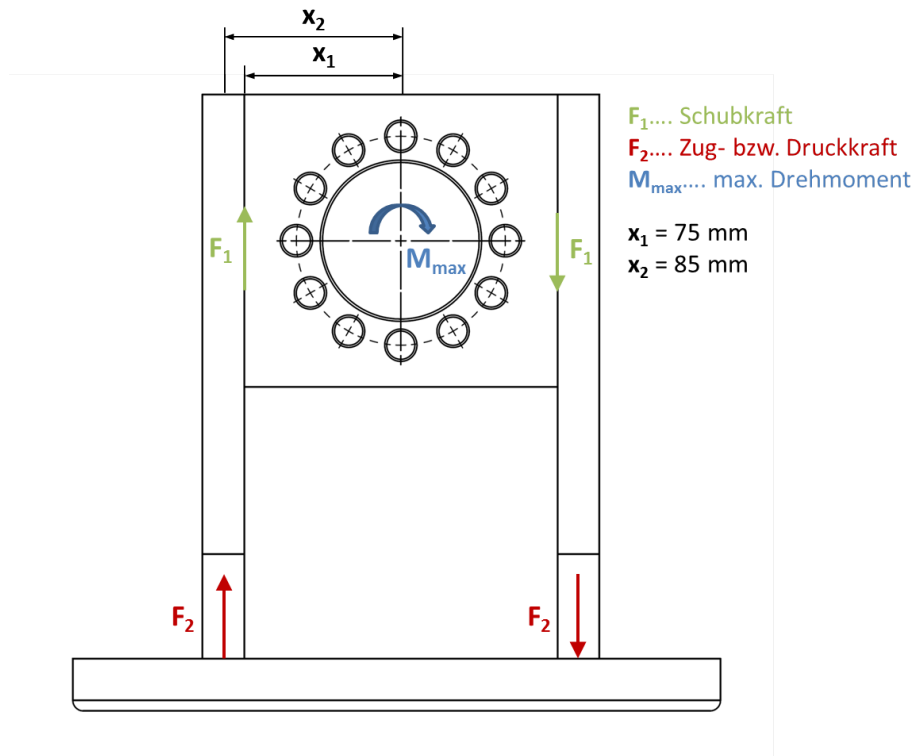


Abbildung 3.19.: an starrer Konsole wirkende Kräfte

Zug- bzw. Druckbeanspruchung (Seitenplatten auf Grundplatte):

- Nahtdicke: $\sum a = 10 \text{ mm}$
- Nahtlänge: $l = 300 \text{ mm}$
- max. Drehmoment: $M_{max} = 2500 \text{ Nm}$

$$F_2 = \frac{M_{max}}{2 \cdot x_2} = \frac{2500 \text{ [Nm]}}{2 \cdot 0,085 \text{ [m]}} = 14706 \text{ [N]} \quad (3.4)$$

$$A_N = \sum a \cdot l = 10 \text{ [mm]} \cdot 300 \text{ [mm]} = 3000 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.5)$$

$$\sigma_N = \frac{F_2}{A_N} = \frac{14706 \text{ [N]}}{3000 \text{ [mm}^2\text{]}} = 4,9 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (3.6)$$

Wie man Abbildung 3.20 entnehmen kann, ist die zulässige Spannung von 135 N/mm^2 für Kehlnähte um einiges höher, als die berechneten und daher halten die Schweißnähte den Beanspruchung verursacht durch das Drehmoment stand.

Nahtart	Bild	Nahtgüte	Spannungsart	Stahlsorte				Gleichung
				S235JRG2 (St37-2)		S235J2G3 (St52-3)		
				H	HZ	H	HZ	
Stumpfnah Doppel-HV-Naht (K-Naht) HV-Naht	5.25 5.26 5.33c 5.31	alle Nahtgüten	Druck und Biegedruck	160	180	240	270	(5.1) (5.2) (5.4)
		Nahtgüte nachgewiesen ¹⁾	Zug und Biegezug					
Doppel-HY-Naht (K-Stegnaht)	5.33			135	150	170	190	(5.5) (5.7) (5.9)
Kehlnähte	5.30 5.33a	alle Nahtgüten	Druck und Biegedruck	135	150	170	190	(5.3) (5.12) (5.21)
			Zug und Biegezug					
Alle Nähte			Schub in Nahrichtung					(5.6) (5.23)
Kehlnähte			Vergleichs- spannung					

¹⁾ Freiheit von Rissen, Binde- und Wurzelfehlern und Einschlüssen. Die Nahtgüte ist durch Durchstrahlungs- oder Ultraschalluntersuchung nachgewiesen.

Abbildung 3.20.: Zulässige Spannungen in N/mm^2 für Schweißnähte nach DIN 18800 T1, Geschweißte Stahlbauten für vorwiegend ruhende Beanspruchung [Künne, 2007]

Nachweis der starren Konsole mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente:

Zur groben Abschätzung der Festigkeit und der Verformungen durch Betrachtung der während der höchsten Beanspruchung auftretenden Spannungen in der Konsole und im Rahmen wurden Berechnungen nach der Methode der Finiten Elemente (FE-Methode) durchgeführt. Dafür wurde das FE-Programm Patran von MSC Software GmbH verwendet.

Da es sich um eine grobe Abschätzung handelt, wurden nur die Konsole selbst und die beiden Streben, an denen die Konsole befestigt wird modelliert. Zur Betrachtung verschiedener Einbausituationen wurde einmal die gesamte Länge der Streben und einmal ein kürzeres Stück der Streben modelliert und dann dem Drehmoment ausgesetzt.

Die betrachteten Szenarien sind in den Abbildungen A.3 bis A.6 in Anhang A.2 dargestellt. Abbildung A.3 und A.5 zeigen das jeweilige Modell mit kurzer und langer Einspannung. Die verschiedenen Farben dienen rein der besseren Übersicht über die modellierten Komponenten. Hier ist noch keine Deformation dargestellt.

Die Abbildung darunter (A.4 bzw. A.6) stellt die Deformation des Modells dar. Der darüber angeführte Wert gibt die Größe der höchsten Verformung des Modells an (in A.4 sind es 0,29 mm und in A.6 19 mm).

Diese Abbildungen dienen dem Vergleich der Verformungen bei kurzer Einspannung und bei langer Einspannung. Es wird schnell deutlich, dass die Verformung bei kurzer Einspan-

nung deutlich geringer ausfällt, als bei einer langen.

Exemplarisch sind in Abbildung 3.22 Ergebnisse der Berechnung der wirkenden Hauptnormalspannungen bei einer Last von 2500 Nm für die Gesamtlänge der Streben und für eine kurze Einspannung dargestellt.

Man kann gut sehen, dass die Streben ohne Abstützungen bei einer langen Einspannung sehr große Verformungen erleiden. Die starre Konsole ist in ihrer Festigkeit so steif ausgeführt, dass diese sich unter Höchstlast nur kaum verformt, jedoch hohe Spannungsspitzen in den Rahmen einbringen kann (siehe Abbildung A.9 und A.10, Anhang A.2). Diese wiederum spiegeln sich in den hohen Spannungen auf der Unterseite der starren Konsole wieder, die durch die Verformung des Rahmens also durch die so entstehenden Auflagerkräfte eingebracht werden.

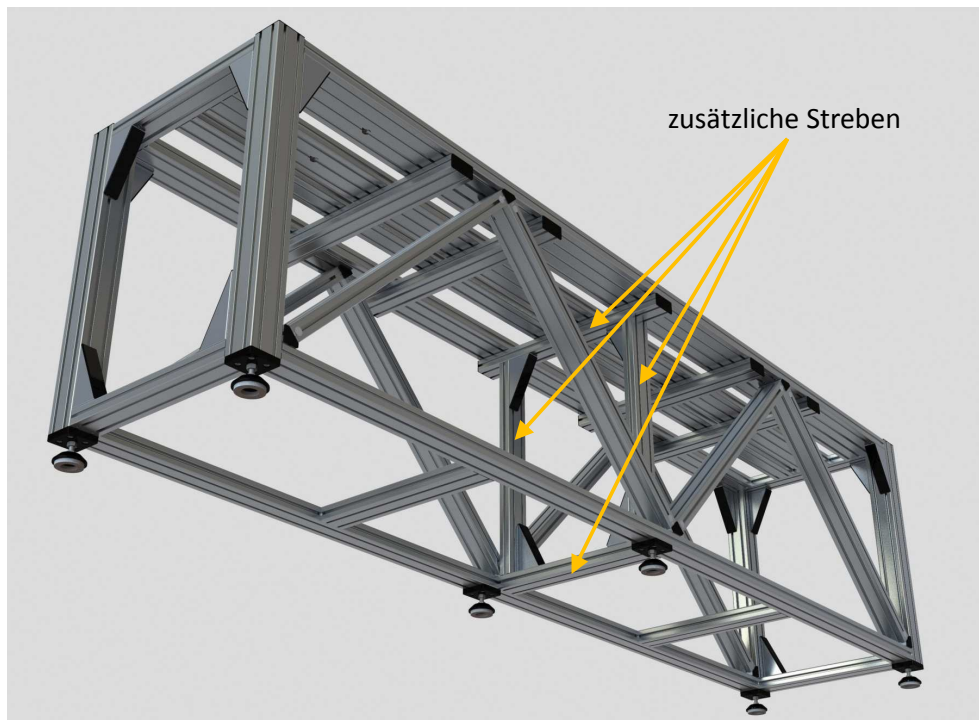


Abbildung 3.21.: Zusätzliche Verstrebungen im mittleren Bereich des Rahmens

Es ist also unbedingt erforderlich, die Streben des Rahmens in regelmäßigen Abständen ausreichend abzustützen, um derartige Verformungen zu vermeiden. Des Weiteren wurde daraufhin die Geometrie der Auflagefläche der Konsole am Rahmen noch optimiert.

Aus den Berechnungen geht auch hervor, dass die Verstrebung zur Unterstützung der langen Streben, an denen die Aufbauten montiert werden sollen, vor allem in der Mitte möglichst steif ausgeführt werden muss.

Die Kalibrierung von Halbachsen stellt den ungünstigsten Belastungsfall dar, da dabei die starre Konsole annähernd in der Mitte des Prüfstands steht. Daher wurde der Rahmen auf diese maximale Belastung ausgelegt. Abbildung 3.21 zeigt die zusätzliche Verstrebung, welche nach der FE-Berechnung noch hinzugefügt wurde, um eine ausreichende Steifigkeit zu erreichen.

Zur Überprüfung der Berechnung der Schweißnähte wurden die im FE-Modell am höchsten belasteten Stellen bezüglich der dort vorherrschenden Spannungen betrachtet. Obwohl hier höhere Spannungen als in der Vorabschätzung der Schweißnähte (siehe oben) berechnet wurden, so liegen die Spannungen immer noch deutlich unter den zulässigen Werten der Spannungen an Schweißnähten nach DIN 18800 T1¹, welche die zulässigen Spannungen für Schweißnähte von geschweißten Stahlbauten für vorwiegend ruhende Beanspruchungen angibt (vergleiche Abbildung 3.20 mit Anhang A.2.4).

¹DIN 18800-1: „Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion“

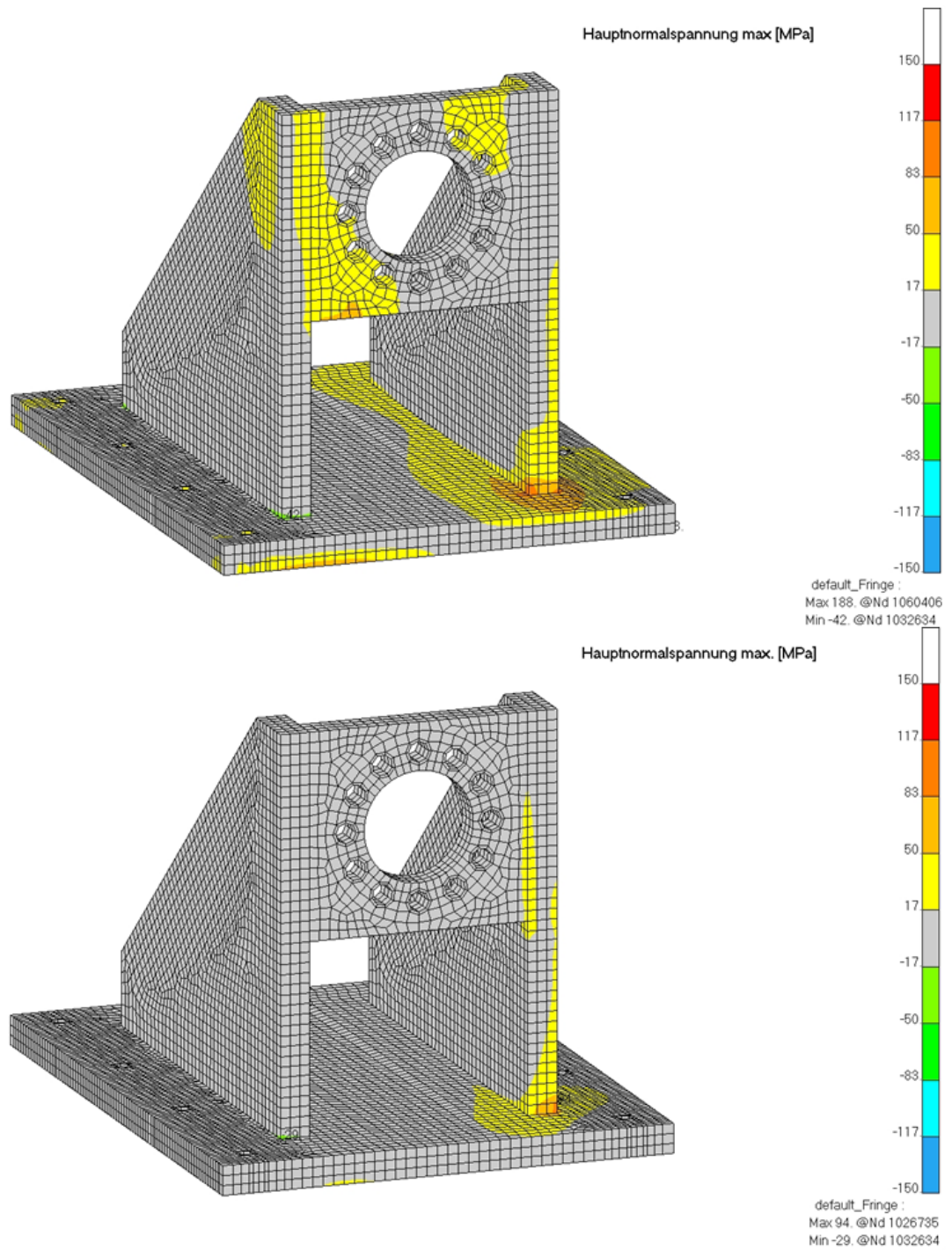


Abbildung 3.22.: Beispiel der Ergebnisse der FE-Berechnungen der auftretenden Hauptnormalspannungen, lange Einspannung (oben), kurze Einspannung (unten)

Anbindung der starren Konsole an den Rahmen:

Um ein Verschieben der Konsole zur Längeneinstellung zu ermöglichen, wird diese über Schrauben und Nutensteine mit dem Rahmen verbunden, sodass sie entlang der Nuten flexibel ist.

Zur Auswahl der Schrauben wurde eine Abschätzung der dort wirkenden Kräfte durchgeführt.

Schraubenauswahl:

durch das Drehmoment eingeleitete Kraft:

$$F = \frac{M_{max}}{x} = \frac{2500 [Nm]}{0,26 [m]} = 9615 [N] \quad (3.7)$$

auf vier Schrauben pro Seite aufgeteilt:

$$F_{proSchraube} = \frac{F}{4} = \frac{9615 [N]}{4} = 2404 [N] \quad (3.8)$$

Laut Schraubenberechnung nach VDI-Richtlinien Nr. 2230 wurde als Schraubendurchmesser 8 mm bei einer Festigkeitsklasse von 8.8 überschlägig ermittelt [VDI-2230, 2003].

3.4.2. ANBINDUNG DES MODULS DREHZAHL

Beim Aufbauen des Moduls Drehzahl am Rahmen ist besonders darauf zu achten, dass erstens die Achshöhe möglichst genau eingehalten wird, und zweitens die Ausrichtung in Querrichtung möglichst exakt und einfach durchzuführen ist.

Wie auch beim Modul Drehmoment wird eine Seite des Moduls Drehzahl fix montiert und die andere flexibel über Nuten verschiebbar gehalten. Als fixe Seite bieten sich der Motor mitsamt Kupplung und der ersten Stehlagereinheit an, um bei Längenänderungen so wenige Komponenten wie möglich verschieben zu müssen. Diese Komponenten werden auf derselben Seite wie das Schneckengetriebe montiert. Einmal exakt ausgerichtet, werden diese nicht mehr verschoben.

Angleichen der unterschiedlichen Achshöhen:

Bei den Stehlagereinheiten und beim Elektromotor handelt es sich, wie in den vorigen Kapiteln schon erwähnt, um Zukaufteile, wodurch sich die Achshöhe nur bedingt beeinflussen lässt. Daher ergab sich eine ungleiche Achshöhe. Der Motor weist eine höhere Achshöhe auf als die beiden Stehlagereinheiten.

Um alle Komponenten auf eine Höhe zu bringen wurden dafür Zwischenstücke angefertigt, welche unter den Lagern montiert werden. Gleichzeitig wird mit den Zwischenstücken eine Montage der Stehlagereinheiten in denselben Nuten wie der Motor ermöglicht. In Abbildung 3.23 ist die Anbindung des Moduls dargestellt.

Ausrichten der flexiblen Stehlagereinheit in Querrichtung:

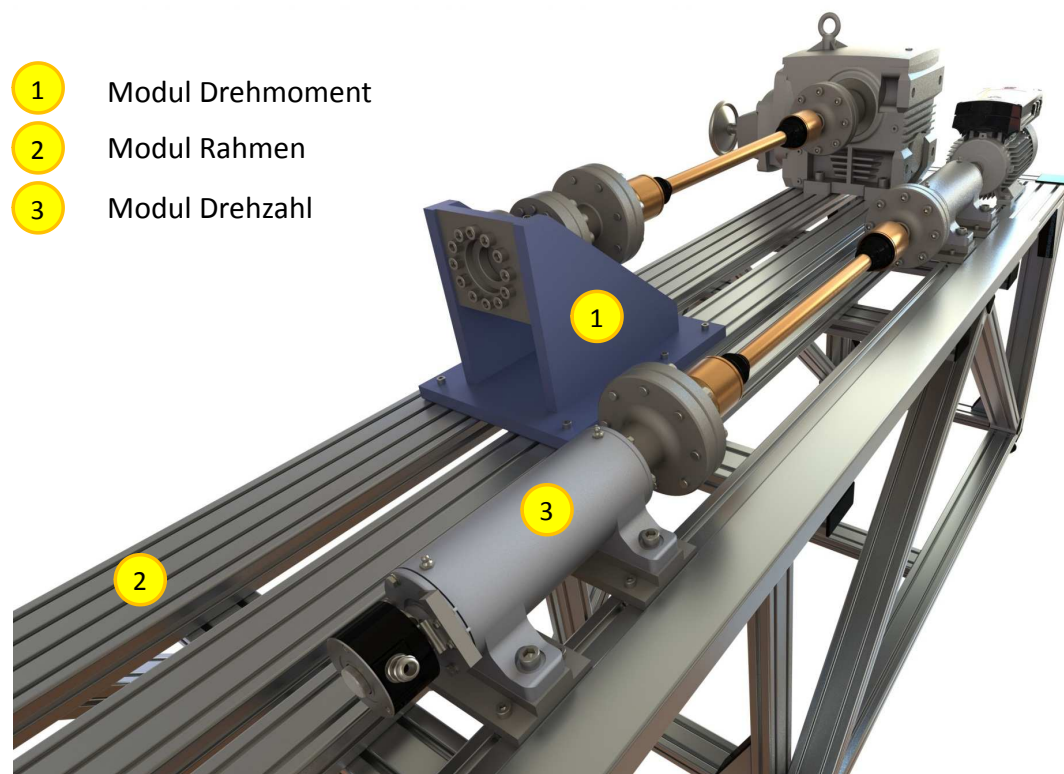


Abbildung 3.23.: Anbindung des Moduls Drehzahl an den Rahmen

Bei der Drehzahlkalibrierung ist es besonders wichtig, dass sich alle Komponenten in einer Flucht befinden, um Schwingungen möglichst gering zu halten.

Das Ausrichten der flexiblen Stehlagereinheit in Querrichtung wird daher durch eine Führungsschiene erleichtert. Entlang dieser Schiene können die Zwischenstücke an einer Seite über den ganzen flexiblen Bereich des Prüfstandes ausgerichtet werden (siehe Abbildung 3.23).

3.4.3. GESAMTÜBERBLICK

Abbildung 3.24 zeigt den gesamten Prüfstand von oben. Hier erkennt man die genaue Anordnung und Ausrichtung der einzelnen Module und der Komponenten.

Auf der linken Seite der Abbildung befinden sich die fixen Komponenten, wie das Schneckengetriebe, der Motor und die fixe Stehlagereinheit und auf der rechten Seiten kann die Position der flexiblen Einheiten auf die Prüflingslänge angepasst werden.

Beispielhaft wurde hier eine Halbachse als Prüfling ins Modell eingebaut, wodurch deutlich wird, wo sich die flexiblen Komponenten des Prüfstands meist befinden werden.

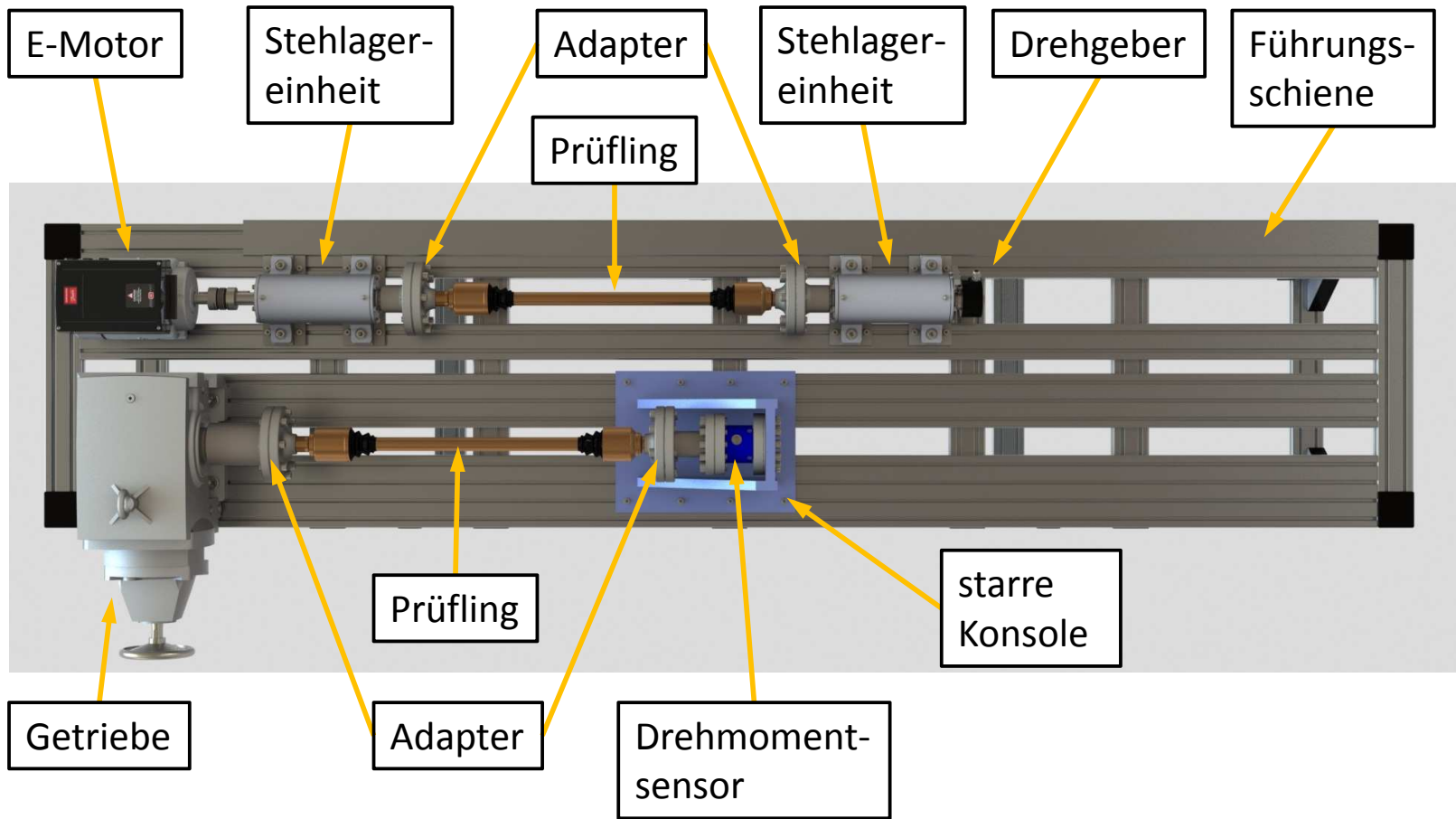


Abbildung 3.24.: Gesamtüberblick Prüfstand: Ansicht von oben

3.5. SICHERHEIT

Eine wichtige nicht funktionale Anforderung an den Prüfstand stellt die Sicherheit desselben dar. Bei diesem Prüfstand handelt es sich wie in ÖNORM EN ISO 12100 beschrieben, um eine Maschine, die mit einem Antriebssystem ausgestattet ist und von der mindestens ein Teil beweglich ist, wodurch diese Norm zur Anwendung kommt [ÖNORM-EN-ISO-12100, 2010].

Sicherheit wird in dieser Norm folgendermaßen definiert:

“Der Begriff der Sicherheit von Maschinen betrachtet die Fähigkeit einer Maschine, ihre vorgesehene(n) Funktion(en) während ihrer Lebensdauer auszuführen, wobei das Risiko hinreichend vermindert wurde.“ [ÖNORM-EN-ISO-12100, 2010]

Hier wird unter anderem darauf hingewiesen, dass vor allem der Konstrukteur bereits vor der Inbetriebnahme durch eine inhärente sichere Konstruktion, die Risiken deutlich mindern bzw. Gefährdungen sogar ganz beseitigen kann.

Wenn Gefährdungen z.B. durch drehende Teile nicht vermieden werden können, wie es hier der Fall ist, so sind entsprechende Schutzmaßnahmen zu treffen, beispielsweise in Form von einer verriegelten trennenden Schutzeinrichtung.

Eine solche Schutzeinrichtung soll ein Starten der Maschine so lange nicht zulassen, solange diese Schutzeinrichtung nicht geschlossen wurde. Wenn die trennende Schutzeinrichtung während der gefährdenden Maschinenfunktion geöffnet wird, wird ein Stoppbefehl ausgelöst, wodurch die Maschine sofort zum Stehen veranlasst wird, und sich erst wieder nach Verriegeln starten lässt.

Laut Norm sind vom Konstrukteur folgende Schutzmaßnahmen zu treffen [ÖNORM-EN-ISO-12100, 2010]:

- Schritt 1: Inhärente sichere Konstruktion
- Schritt 2: Technische Schutzmaßnahmen und ergänzende Schutzmaßnahmen
- Schritt 3: Benutzerinformation
 - an der Maschine(Warnzeichen, Signale, Warneinrichtungen)
 - im Benutzerhandbuch

Um den minimalen Anforderungen gerecht zu werden, wurde zunächst ein Schaltschrank angebracht, welcher sowohl einen Schalter zum Abschalten der gesamten Stromversorgung

des Prüfstands enthält, als auch einen Notausschalter, welcher ein sofortiges Stoppen der Maschine bewirkt. Der Schaltschrank ist in Abbildung 3.25 dargestellt.



Abbildung 3.25.: Schaltschrank mit Notausschalter, zentralem Ein-/Aus-Schalter und Signallampe

Es wird so sichergestellt, da während der ersten Tests bereits die wichtigsten Schutzmaßnahmen eingehalten werden können. Nach der endgültigen Inbetriebnahme des Prüfstands und vor Freigabe des Prüfstands für das Personal zur Kalibrierung der Antriebswellen, müssen unbedingt noch weitere Schutzvorrichtungen installiert werden. Beispielsweise muss ein Berührungsschutz, zum Schutz des Bedienpersonals vor drehenden Teilen angebracht werden, der fix mit der Maschine verbunden ist, sodass diese Schutzvorrichtung vom Personal nicht umgangen werden kann.

4. KALIBRIERVORGANG UND PROTOKOLLERSTELLUNG

Im Folgenden werden der genaue Ablauf der Kalibrierungen am Prüfstand, das Einlesen der Daten in die Analyse-Software und die Berechnung der Ergebnisse geschildert. Am Ende wird ein Protokoll automatisiert von der Software erstellt und ausgegeben.

Dieses Kapitel entspricht laut VDI-Richtlinien Nr. 2221 dem Arbeitsschritt Nr. 7: „Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben“ und somit dem letzten der Hauptarbeitsschritte.

4.1. KALIBRIERVORGANG AM PRÜFSTAND

In diesem Kapitel wird erklärt, welche Vorbereitungen für den Kalibriervorgang zu treffen sind, wie der Prüfling einzuspannen ist, und wie die beiden Module (Drehmoment und Drehzahl) für die Kalibrierung zu bedienen sind.

4.1.1. VORBEREITUNGEN VOR DER KALIBRIERUNG DES PRÜFLINGS

Laut DIN 51309 sind vor der Durchführung der Kalibrierung einige Vorbereitungen zu treffen. Die zur Erstellung eines Werkzeugnisses und zur Funktionsüberprüfung Sinnvollen wurden übernommen.

Anzeigegerät

Das Anzeigegerät ist nach Herstellerangabe einzustellen. Alle variablen Einstellungen sind zu protokollieren [DIN-51309, 2005]. Jedoch besitzt das i-Shaft kein Anzeigegerät in diesem Sinn, da dieses lediglich die Messdaten aufzeichnet und man die Messdaten erst nach den Messungen und nach Auslesen der Daten anzeigen kann, werden die Einstellungen am Anzeigegerät der Referenznehmer protokolliert.

Ziffernanzeige bzw. Auflösung r

Hier wird ein Ziffernschritt der letzten sich bewegenden Ziffer auf dem Ziffernanzeigegerät als die Auflösung r angesehen [DIN-51309, 2005]. Da der Aufnehmer, wie oben erwähnt, kein Anzeigegerät in diesem Sinn hat, so wird die Auflösung nachträglich aus der Nullmessung (siehe unten: Aufnehmernullwert I_s) bestimmt. Die Auflösung r wird später in der Berechnung der relativen erweiterten Messunsicherheit verwendet.

Temperatenausgleich

Vor der Kalibrierung ist bei angelegter Speisespannung ein Temperaturgleichgewicht zwischen dem Aufnehmer und der Umgebung abzuwarten. Die Umgebungstemperatur ist zu protokollieren und im Werkszeugnis anzugeben.

Aufnehmernullwert I_s

Vor Einbau des Prüflings in den Prüfstand ist der Anzeigewert des mechanisch unbelasteten Aufnehmers in vertikaler Lage zu protokollieren. Das heißt, es muss vor Einbau des Prüflings eine Nullmessung durchgeführt werden, wodurch der gemessene Wert im Datenlogger des i-Shaft gespeichert wird. Dafür wird der Prüfling in eine vertikale, unbelastete Position gebracht.

Weitere Vorbereitungen

Zusätzlich zu den in der Norm DIN 51309 vorgegebenen Vorbereitungen müssen folgende Daten und Berechnungen vorliegen, bevor der Prüfling kalibriert werden kann:

- Angaben zum Prüfling:
 - Art des Prüflings (Halbachse, Kardanwelle oder Torsionsstab)
 - Nenndrehmoment M_E
 - Nenndrehzahl n_E
- Abschätzung der Empfindlichkeit der Wheatstone'schen Brückenschaltung nach Kapitel 1.4.3 zur Bestimmung des Verstärkungsfaktors der Brückenschaltung des i-Shaft.

Die Abschätzung der Empfindlichkeit der Brückenschaltung dient der Voreinstellung des Verstärkungsfaktors zur Kalibrierung der gesamten Messkette des i-Shaft und nicht nur des Aufnehmers selbst.

4.1.2. EINBAU DES PRÜFLINGS IN DIE KALIBRIEREINRICHTUNG

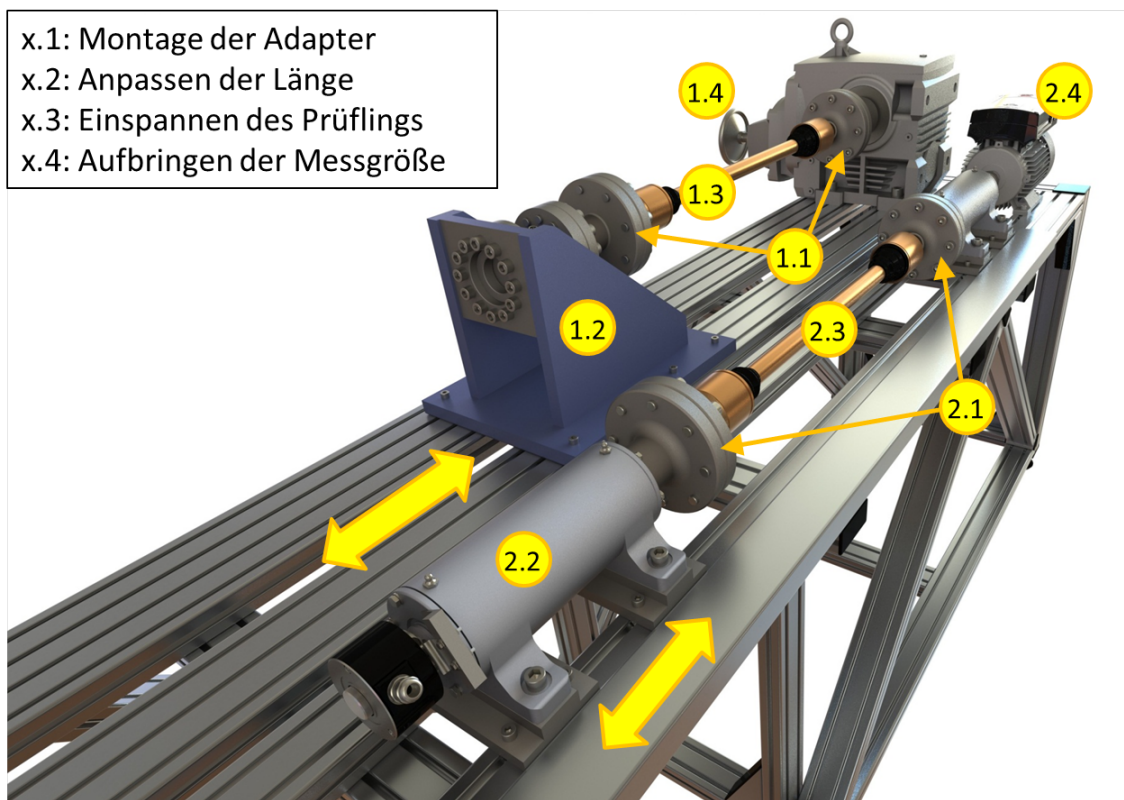


Abbildung 4.1.: Überblick über den Prüfstand zur Kalibrierung

Der Einbauvorgang erfolgt bei beiden Kalibriervorgängen für Drehmomentkalibrierung und Drehzahlkalibrierung bis auf leichte Abweichungen analog. Eine Übersicht über die wichtigsten Schritte gibt Abbildung 4.1. Die Nummern 1.x stehen für die Drehmomentkalibrierung und die Nummern 2.x für die Drehzahlkalibrierung.

- *Schritt x.1:* Vor Einbau des Prüflings müssen die mitgelieferten Adapter mit der passenden Verzahnung an den gekennzeichneten Stellen montiert werden.
- *Schritt x.2:* Die starre Konsole des Moduls Drehmoment (1.2) und die Stehlagereinheit (2.2) sind flexibel und müssen auf die Länge des Prüflings eingestellt werden. Hierzu werden die Befestigungsschrauben gelockert und die beiden Komponenten entlang der Nuten verschoben. Zur genaueren Ausrichtung der Stehlagereinheit muss darauf geachtet werden, dass nach der Ausrichtung kein Spalt zwischen den Füßen des Lagers und der seitlichen Führungsschiene mehr vorhanden ist.
- *Schritt x.3:* Der Prüfling kann nun eingebaut werden indem er in die beiden zuvor montierten Adapter eingeführt wird. Bei diesem Vorgang wird die flexible Komponente (1.2 bzw. 2.2) nachjustiert, sodass ein axialer Anschlag gegeben ist und der

Prüfling sich in axialer Richtung nur mehr leicht bewegen lässt. Anschließend werden die Befestigungsschrauben mit einem Anziehmoment von 25 Nm festgezogen. (Das Anziehmoment ist vom Hersteller des Rahmens vorgegeben und darf nicht überschritten werden!)

- *Schritt x.4:* Die Komponenten 1.4 und 2.4 dienen der Aufbringung von Drehmoment bzw. Drehzahl, dessen genaue Durchführung in den nächsten Kapiteln beschrieben wird.

4.1.3. ABLAUF DREHMOMENTKALIBRIERUNG

Als Kalibrierverfahren wurde ein Verfahren ähnlich der eigenständigen Kalibrierung für Wechseldrehmoment nach DKD-Richtlinie DKD-R 3-5¹ gewählt. Dieses wird, wie in den folgenden Schritten beschrieben, durchgeführt (vergleiche [DKD-R-3-5, 1998]):

Einbaustellungen

Der Prüfling ist in verschiedenen Einbaustellungen durch Drehen des Aufnehmers um 120° um die Messachse zu kalibrieren. Bei Klasse 1, 2 und 5 gibt die Norm DIN 51309 zwei verschiedene Einbaustellungen vor: 0° und 120°.

Vorbelastungen

Nach Einbau des i-Shaft ist dieses dreimal und nach jeder Änderung der Einbaustellung einmal bis zum Endwert des zu kalibrierenden Messbereichs M_E vorzubelasten. Diese werden ebenfalls aufgezeichnet. Folgender Ablauf ist dabei einzuhalten (siehe Abbildung 4.2):

$$0 \Rightarrow +M_E \Rightarrow 0 \Rightarrow -M_E \Rightarrow 0$$

Durchführung der Kalibrierung

Aus dem vom Hersteller geforderten Klassenbereich von Klasse 1, 2 oder 5 ergibt sich eine Messreihe je Einbaustellung mit einer Mindestanzahl von insgesamt sechs Drehmomentstufen, wobei drei für zunehmendes und drei für abnehmendes Drehmoment zu sehen sind (siehe Abbildung 4.2). Folgende Stufenhöhen sollen dafür gewählt werden:

für Aufwärtsmessreihen:

$$+20\% M_E \Rightarrow +60\% M_E \Rightarrow +100\% M_E$$

¹DKD-R 3-5: „Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente“

für Abwärtsmessreihen:

$$-20\% M_E \Rightarrow -60\% M_E \Rightarrow -100\% M_E$$

Details zum schematischen Kalibrierablauf zeigt Abbildung 4.2.

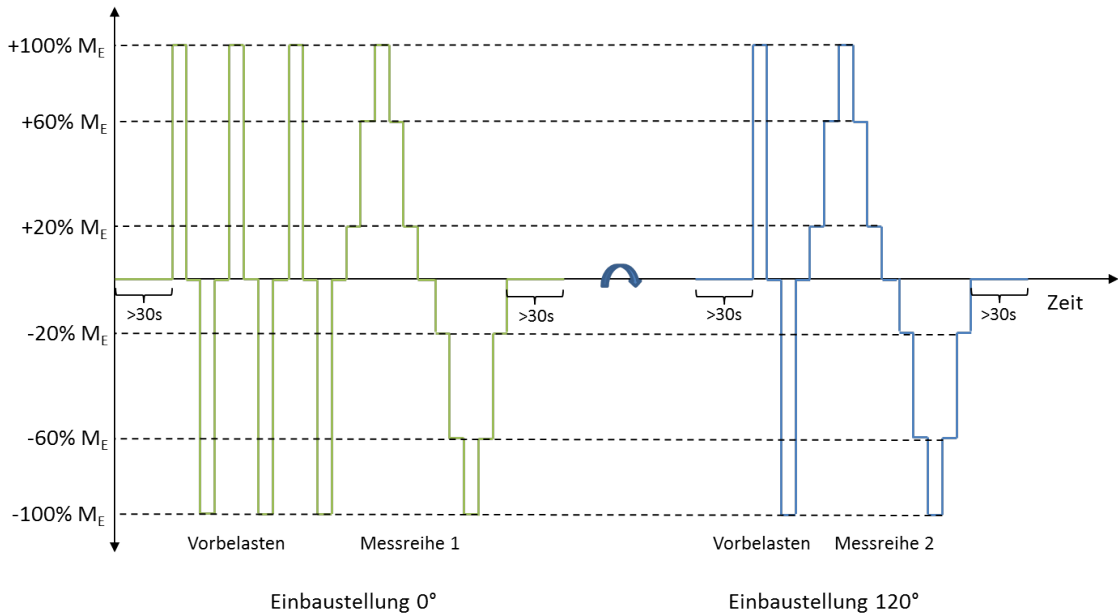


Abbildung 4.2.: Kalibrierablauf des i-Shaft

Das Drehmoment wird durch Drehen des am Schneckengetriebe montierten Handrades aufgebracht. Eine gleichmäßige und langsame Drehbewegung ist empfehlenswert, da es für die Auswertung wichtig ist, dass die Drehmomentstufen möglichst genau eingehalten werden können.

Hier ist es ebenfalls wichtig, dass die Zeitspannen zwischen zwei aufeinander folgende Drehmomentstufen möglichst gleich sind (z.B. 30 s).

Nachdem der Prüfling kein Anzeigegerät in diesem Sinne besitzt, wird darauf geachtet, dass die Dauer der Drehmomentstufen während einer Kalibrierung möglichst gleich ist. Bei der Auswertung der Messdaten des Prüflings wird dann der Mittelwert jeder einzelnen Stufe als „Anzeigewert“ herangezogen.

Hierfür ermittelt die Auswertesequenz die Stellen an denen das Messsignal ungefähr den Wert der betrachteten Drehmomentstufe hat ($\pm 5\%$ der Drehmomentstufe) und schneidet diese Stücke aus dem Messsignal zur Mittelwertberechnung heraus. Um nur das Messsignal bei Stillstand des Handrades des Schneckengetriebes zu bekommen, werden 2 Sekunden am Anfang und am Ende des Signalstücks noch zusätzlich weggeschnitten. Danach wird

aus den so erhaltenen Signalstücken jeweils der Mittelwert gebildet.

Um die relative Nullpunktabweichung f_0 später ermitteln zu können muss nach völliger Entlastung laut DIN 51309 mindestens noch weitere 30 Sekunden aufgezeichnet werden. Erst danach darf die Messung beendet und die Einbaustellung geändert werden.

Vor Beginn jeder Messreihe muss ein Nullabgleich durchgeführt werden. Dafür ist es notwendig, das Anschlusskabel des i-Shaft beim Einbau des Prüflings so zu führen, dass es leicht zugänglich ist, um einen Nullabgleich durchführen zu können.

Wurde die Kalibrierung in beiden Einbaustellungen erfolgreich durchgeführt, so kann der Prüfling in das Modul Drehzahl wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben eingebaut werden.

4.1.4. ABLAUF DREHZAHLKALIBRIERUNG

Die Durchführung der Messreihen zur Drehzahlkalibrierung ist ähnlich der Drehmomentkalibrierung (siehe Kapitel 4.1.3) wobei statt des Drehmomentendwert M_E die Nenndrehzahl n_E zur Bestimmung der Drehzahlstufen verwendet wird. Vorbelastungen werden nicht vorgenommen und auf ein Drehen des Prüflings in eine zweite Einbaustellung wird verzichtet. Abbildung 4.3 veranschaulicht den Kalibriervorgang zur Drehzahlkalibrierung.

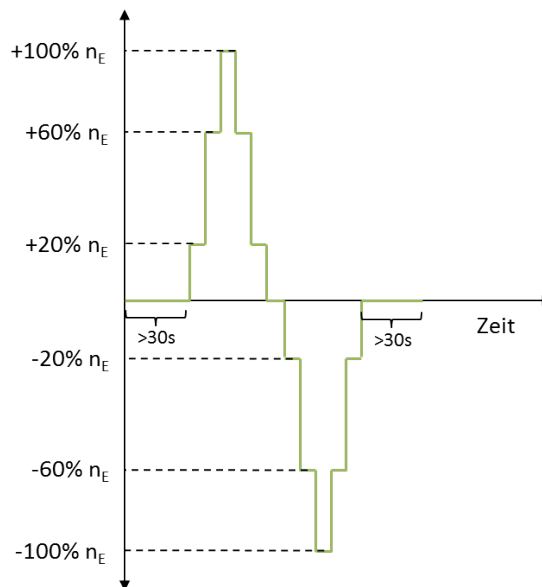


Abbildung 4.3.: Kalibrierablauf zur Drehzahlkalibrierung

Prinzipiell dient das Modul Drehzahl der Prüfung, ob der Verstärkungsfaktor des Beschleunigungsaufnehmers richtig eingestellt ist, und um systematische Abweichungen aufzudecken.

4.1.4.1. BEDIENUNG DER SOFTWARE ZUR MOTORSTEUERUNG

Das PJM Motion Control Tool, entwickelt von der Firma PJ Messtechnik GmbH, ist eine auf Java basierende Software zur Steuerung von Elektromotoren. Sie eignet sich hervorragend für den in diesem Prüfstand eingebauten Motor, da diese Software bereits für einen Elektromotor derselben Baureihe eingesetzt wird und auf diesen Motorentyp abgestimmt ist.

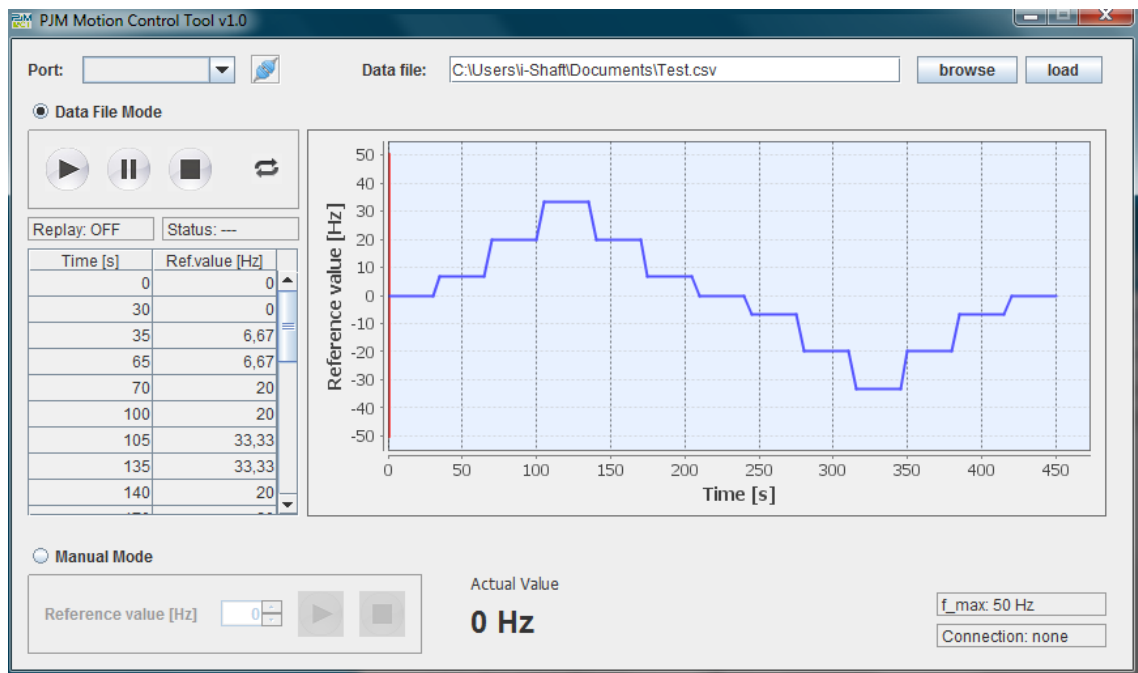


Abbildung 4.4.: Benutzeroberfläche des PJM Motion Control Tool

Abbildung 4.4 zeigt die Benutzeroberfläche der Software. Unter „Data File:“ kann eine Datei des Typs CSV eingelesen werden. In dieser Datei kann der Ablauf der Kalibrierung schon vorab über die Verweildauer und die der Drehzahl äquivalenten Frequenz des Elektromotors festgelegt werden.

Daraus ergibt sich eine zweisepaltige Tabelle (Zeit und Frequenz), welche über den Button „Load“ eingelesen wird.

Diese Tabelle erscheint dann auf der linken Seite und wird nach Starten des Programms schrittweise von oben nach unten durchgeführt. Als Beispiel wurde eine Kalibration mit einem Messbereichsendwert von 2000 U/min gewählt, was einer Frequenz von 33,3 Hz entspricht. Die Stufen entsprechen den in Kapitel 4.1.3 aufgezählten, prozentuellen Werten.

Auf der rechten Seite befindet sich eine Grafik, die die Angaben der Tabelle veranschaulicht und in welcher man den zeitlichen Fortschritt durch eine vertikale, rote Linie

beobachten kann. Man kann in dieser Grafik erkennen, dass ein Sprung zwischen den Drehzahlen mit einer gleichmäßig steigenden Rampe angefahren wird, also nicht der idealen Darstellung am Anfang von Kapitel 4.1.4 entspricht.

Der Motor kann jeder Zeit auch, während die Tabelle gerade abgefahren wird, über einen „Stopp“-Button angehalten werden. Das Tool würde auch ein Wiederholen des in der Tabelle vorgegebenen Ablaufes über eine Endlosschleife ermöglichen, was für die hier gewünschte Anwendung eher nebensächlich ist, da hier keine Dauertests durchgeführt werden.

Mit dieser Software ist es also möglich den Kalibriervorgang bereits vorher genau festzulegen und dann völlig automatisiert über die Motorsteuerung durchlaufen zu lassen.

4.2. AUSWERTUNG DER KALIBRIERUNGEN

Die Auswertung der Kalibrierung erfolgt mittels einer für diese Kalibrierung eigens erstellten Auswertesequenz, geschrieben für die Signalanalyse-Software FAMOS der Firma imc Meßsysteme GmbH. Nach Eingabe der Prüflingsdaten, der Daten der Referenzaufnehmer, der Umgebungsbedingungen etc. wird die Auswertung automatisiert durchgeführt.

4.2.1. EINGABE UND EINLESEN DER DATEN

Um die Auswertung zu starten müssen vorab einige Daten eingegeben werden. Dies geschieht über ein Excel-File, einer sogenannten „Startmappe“. Sie enthält alle Daten, die der Auswertesequenz zur Verfügung gestellt werden müssen wie z.B. Metadaten des Prüflings und anwendungsspezifische Daten. Ein Beispiel der Eingabemaske ist in Abbildung 4.5 zu sehen.

Mit grün gekennzeichnete Felder müssen für jeden Prüfling separat ausgefüllt werden. Blassgrüne Felder müssen nur bei der ersten Kalibrierung ausgefüllt werden und dann aktualisiert werden, wenn sich etwas ändert (z.B. die Angaben zu den Referenzsensoren).

Die Auswertesequenz wird anschließend bei geöffneter Startmappe gestartet und liest die angegebenen Daten in die Analyse-Software ein. Mit Hilfe der Startmappe können auch mehrere Kalibriervorgänge hintereinander ausgewertet werden. Dadurch ist es möglich auch mehrere Antriebswellen zeitoptimiert zu kalibrieren, indem zuerst die Kalibriervorgänge mehrerer Wellen am Prüfstand durchgeführt werden können und die Auswertung erst danach für alle gemeinsam gestartet wird.

Anzahl Kalibrierungen	2	1	2
MD	Name Kalibrierfile	iShaft_0001	iShaft_0002
Angaben zum Prüfobjekt	Gegenstand	i-Shaft	i-Shaft
	Hersteller	PJ Messtechnik GmbH	PJ Messtechnik GmbH
	Typ	Halbachse	Kardanwelle
	Fabrikat/Serien Nr. (PJM)	iShaft_0001	iShaft_0002
	Prüfschein Nr.	2012-05-03_iShaft_0001	2012-05-03_iShaft_0002
Angaben zum Prüfer	Prüfer	Nachname	Ornig
		Vorname	Christina
	Abnahme	Nachname	Joch
		Vorname	Martin
Datum der Prüfung (TT.MM.JJJJ)	03.05.2012	03.05.2012	
Verwendetes Referenzmessmittel Drehmoment	Referenzsensor	DF-30	DF-30
	Hersteller	Lorenz Messtechnik	Lorenz Messtechnik
	Fabrikat/Serien Nr.	109185	109185
	Überprüft von	Isbjakow	Isbjakow
	Kalibrierung gültig bis	06.02.2014	06.02.2014
Verwendetes Referenzmessmittel Drehzahl	Referenzsensor	ITD 41 A 4 Y68	ITD 41 A 4 Y68
	Hersteller	Baumer GmbH	Baumer GmbH
	Fabrikat/Serien Nr.	11091043	11091043
	Überprüft von	Müller	Müller
	Kalibrierung gültig bis	30.12.2013	30.12.2013
Umgebungsbedingungen	Temperatur (in °C)	21.9	21.9
	Luftfeuchte (in % rel.)	34.5	34.5
Prüfkonfiguration	CP-Name	CP 42	CP 42
	CP-Seriennummer	008596044	008596044
	CP-Hardware-Revision	1.05	1.05
	Firmware	4.44	4.44
Messbereich	Messbereich Prüfling min (in Nm)	0	0
	Messbereich Prüfling max (in Nm)	2000	1000
	Messbereich Prüfling min (in U/min)	0	0
	Messbereich Prüfling max (in U/min)	1500	2500
Referenz Drehmoment	Verstärker	1-M-X460	1-M-X460
	Verstärker SN	088019008132	088019008132
	Brückenspeisespannung	5VDC	5VDC
	Filter (Hz; Butterworth HD)	200	200
Referenz Drehzahl	Verstärker	1-M-X460	1-M-X460
	Verstärker SN	088019008132	088019008132
Gültigkeit Kalibrierschein	Jahr	2012	2012
	Monat	11	11
Angaben Aufnehmer			
Auflösung r	Ziffernschritt der letzten sich bewegenden Ziffer	0.1	0.1
	Skalierfaktor (scale)	1 Digit = 0.97782 Nm	1 Digit = 0.48891 Nm
Verstärkungsfaktoren	Verstärkungsfaktor grob	2	4
	Verstärkungsfaktor fein	106	106
	Verstärkungsfaktor kombiniert	207.25	414.5

Abbildung 4.5.: Beispiel Startmappe zur Eingabe der für die Auswertung erforderlichen Daten

4.2.2. AUSWERTUNG DER DREHMOMENTKALIBRIERUNG

Mittels Signalanalyse-Software FAMOS werden die Kalibrierergebnisse mit der dazugehörigen relativen Messunsicherheit und die Kennwerte zur Klassifizierung des i-Shaft mit den Formeln aus der DKD-Richtlinie DKD-R 3-5² und aus der Norm DIN 51309:1998-02³ berechnet. Sie werden im Folgenden angegeben.

Kalibrierergebnis X_{rw} und mechanische Remanenz t

Das Kalibrierergebnis je Drehmomentstufe wird aus dem Mittelwert der Anzeigewerte aus den Auf- und Abwärtsmessreihen aller Einbaustellungen, reduziert um den halben Remanenzwert, berechnet [DKD-R-3-5, 1998].

$$\bar{X}_j = \frac{1}{2} (I_j + I'_j) - I_{0,j} \quad (4.1)$$

$$X_{rw} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\bar{X}_j) - \frac{t}{2} \quad (4.2)$$

X_{rw}	.....	Kalibrierergebnis einer Drehmomentstufe
t	.....	mechanische Remanenz der Drehmomentstufe
I_j	.....	Anzeigewerte bei zunehmendem Drehmoment
I'_j	.....	Anzeigewerte bei abnehmendem Drehmoment
$I_{0,j}$	.....	Anzeigewert vor Belastung in Einbaustellung j (Nullwert)
\bar{X}_j	.....	Mittelwert der Anzeigewerte in Einbaustellung j
n	.....	Anzahl der Messreihen bei verschiedenen Einbaustellungen

Die mechanische Remanenz ist ein typischer Kennwert für den Drehmomentaufnehmer. Dieser errechnet sich aus dem doppelten Wert der Summe der Mittelwerte aller nullwertkorrigierten Nullanzeigen nach Entlastung aus Rechtsdrehmoment aller Vorbelastungen und aller Einbaustellungen. Das heißt zur Mittelwertberechnung werden die drei Nullanzeigen aus der dreifachen Vorbelastung für die Einbaustellung bei 0° jeweils nach dem Aufbringen des Rechtsdrehmoments und die Nullanzeige aus der einfachen Vorbelastung bei 120° nullwertkorrigiert.

Der doppelte Wert der Summe der Mittelwerte ist in Anhang A der DKD-Richtlinie DKD-3-5 ausführlich erklärt.

²DKD-R 3-5: „Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente“

³DIN 51309:1998-02: Werkstoffprüfmaschinen - Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Drehmomente

$$t = \frac{2}{n} \sum_{j=1}^n \bar{X}_{0,j} \quad (4.3)$$

- $\bar{X}_{0,j}$ Mittelwert der nullwertkorrigierten Nullanzeigen nach Entlastung
aus Vorbelastungen durch Rechtsdrehmoment
 n Anzahl der Messreihen bei verschiedenen Einbaustellungen

Relative Spannweite b_w

Die relativen Spannweiten in verschiedenen Einbaustellungen werden für jede Drehmomentstufe aus den Mittelwerten der Aufwärts- und Abwärtsmessungen errechnet, wobei X_{max} bzw. X_{min} die in verschiedenen Einbaustellungen gemessenen Extremwerte der Mittelwerte darstellen [DKD-R-3-5, 1998]. Sie entspricht der relativen Vergleichspräzision, welche ein Klassifizierungsmerkmal darstellt.

$$b_w = \left| \frac{\bar{X}_{max} - \bar{X}_{min}}{X_{rw}} \right| \cdot 100\% \quad (4.4)$$

- b_w relative Spannweite jeder Drehmomentstufe
 \bar{X}_{max} Maximum der Mittelwerte aus Auf- und Abwärtsreihe
 \bar{X}_{min} Minimum der Mittelwerte aus Auf- und Abwärtsreihe

Relative Nullpunktabweichung f_0

Zur Berechnung der relativen Nullpunktabweichung wird die Nullpunktanzeige vor jeder Messreihe und nach jeder Messreihe (30 s nach völliger Entlastung) in jeder Einbaustellung aufgezeichnet [DKD-R-3-5, 1998].

$$f_0 = \max \left| \frac{I_f - I_0}{X_E} \right| \cdot 100\% \quad (4.5)$$

- f_0 relative Nullpunktabweichung für jede Einbaustellung
 I_f Anzeigewert 30 Sekunden nach völliger Entlastung
 X_E Anzeigewert bei Messbereichsendwert M_E

Relative Umkehrspanne bei Wechseldrehmoment h_w

Die relative Umkehrspanne errechnet sich als Mittelwert der Absolutwerte der relativen Differenzen zwischen den Anzeigen der Aufwärts- und Abwärtsreihen für jede Drehmomentstufe bezogen auf den Absolutwert des Kalibrierergebnis je Drehmomentstufe [DKD-R-3-5, 1998].

$$h_w = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |I_j - I'_j|}{|X_{rw,j}|} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

h_w relative Umkehrspanne für jede Drehmomentstufe
 n Anzahl Aufwärts- und Abwärtsmessreihen verschiedener Einbaustellungen

Relative Interpolationsabweichung f_a

Zur Berechnung der relativen Interpolationsabweichung muss zunächst die Interpolationsgleichung (bzw. Ausgleichsfunktion) bestimmt werden. Diese wird durch eine Gleichung ersten Grades ohne Absolutglied beschrieben.

Sie muss so bestimmt werden, dass die Summe der Quadrate der absoluten Abweichungen im kalibrierten Messbereich ein Minimum ergibt. Die Gleichung muss im Protokoll angegeben werden [DKD-R-3-5, 1998].

Lineare Gleichung ersten Grades:

$$Y = X \cdot A + B \quad (4.7)$$

Y Anzeigewert bei Kalibrierdrehmoment
 X Kalibrierdrehmoment
 $B = 0$ Absolutglied (Gerade geht durch Koordinatenursprung)
 A zu ermittelnder Kalibrierwert

Bestimmung des Koeffizienten A nach der Methode der kleinsten Quadrate [Hartung u. a., 2005]:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (4.8)$$

Ist die Interpolationsgleichung bestimmt, so wird für jede Drehmomentstufe mit Hilfe dieser Gleichung die relative Interpolationsabweichung für den Anzeigewert in Abhängig-

keit vom Drehmoment ermittelt [DKD-R-3-5, 1998].

$$f_a = \frac{X_{rw} - X_a}{X_a} \cdot 100\% \quad (4.9)$$

f_a relative Interpolationsabweichung für jede Drehmomentstufe
 X_a aus Ausgleichsfunktion berechneter Anzeigewert bei Kalibrierdrehmoment

Durch die Bestimmung des Interpolationskoeffizienten A können in weiterer Folge bei Bedarf auch die Verstärkungsfaktoren der Brückendifferenzspannung optimiert werden.

Weiteres Vorgehen

Alle aus den oben genannten Formeln erhaltenen Ergebnisse gelangen weiter zur Klassifizierung des Prüflings.

Da es sich lediglich um ein Werkszeugnis und nicht um einen Kalibrierschein eines akkreditierten Kalibrierlaboratoriums handelt, wird auf eine Auswertung in Hinblick auf Kenngrößen wie Linearität und Hysterese verzichtet.

4.2.3. AUSWERTUNG DER DREHZAHLKALIBRIERUNG

Zur Auswertung der Drehzahlkalibrierung werden die Anzeigewerte bei den jeweiligen Drehzahlstufen ermittelt und im Werkszeugnis in einer Tabelle aufgelistet.

Um den Verstärkungsfaktor des Beschleunigungsaufnehmers bei Bedarf zu optimieren, wird für die Anzeigewerte der Drehzahlstufen ebenfalls eine Interpolationsgleichung ermittelt. Die Bestimmung erfolgt analog zur Interpolationsgleichung des Drehmoments (siehe Gleichung ersten Grades nach der Methode der kleinsten Quadrate in Kapitel 4.2.2). Auch diese Gleichung ist im Protokoll angeführt.

4.3. BESTIMMUNG DER RELATIVEN ERWEITERTEN MESSUNSICHERHEIT U_{MG} DES DREHMOMENTMESSGERÄTS

Die relative erweiterte Messunsicherheit U_{MG} des Drehmomentmessgeräts (i-Shaft) wurde nach den Angaben der DKD-Richtlinie DKD-R 3-5⁴ berechnet. Zur Berechnung der Messunsicherheit für jede Drehmomentstufe i gibt die Richtlinie folgende Formel an:

$$U_{MG,i} = |t| + k \cdot u_{MG,i} \quad (4.10)$$

$U_{MG,i}$ relative erweiterte Messunsicherheit des Drehmomentmessgeräts
 $k = 2$ zweifache Standardabweichung
 $u_{MG,i}$ relative erweiterte Messunsicherheit für jede Kalibrierstufe i

Die relative Messunsicherheit für jede Kalibrierstufe i für Klassen 1 bis 5 wird wie folgt berechnet.

$$u_{MG,i}^2 = \frac{1}{12} f_0^2 + \frac{1}{4} b_{w,i}^2 + \frac{1}{24} f_{a,i}^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{r}{M_{K,i}} \right)^2 \quad (4.11)$$

4.4. KALIBRIERPROTOKOLL

Wenn alle Berechnungen zur Auswertung der Kalibrierungen durchgeführt und die Messunsicherheit bestimmt wurde, wird ein Werkszeugnis erstellt.

Der Gegenstand der Kalibrierung, der Typ des Prüflings (Halbachse, Kardanwelle oder Torsionsstab) sowie der Hersteller und die zugehörige Seriennummer des i-Shaft werden auf der ersten Seite (siehe Abbildung 4.6) des Werkszeugnisses angegeben.

Weiters sind der Kalibrierbereich des Drehmoments bzw. der Drehzahl und die Prüfscheinnummer gegeben. Unten auf der ersten Seite sieht man den Prüfer sowie den Abnehmer des Werkszeugnisses und das Ausstellungsdatum.

Seite 2 (siehe Abbildung 4.7) enthält Angaben zu den verwendeten Referenzmitteln, zur Prüfkfiguration, den Umgebungsbedingungen während der Messungen und zum Aufnehmer selbst. Die Gültigkeitsdauer des Werkszeugnisses ist hier ebenfalls aufgeführt.

Die dritte Seite (siehe Abbildung 4.8) gibt das Kalibrierverfahren und die Kalibrieranordnung zur Drehmomentkalibrierung an (Einbaulage des Prüflings). Kalibrierergebnisse

⁴DKD-R 3-5: Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente

und relative Messunsicherheit werden tabellarisch aufgelistet.

Zur Klassifizierung des Drehmomentaufnehmers nach DIN 51309 sind die Kennwerte unter Punkt 5.2 des Werkzeugnisses angeführt. Die Kennwerte sind im Detail:

- die relative Vergleichspräzision b_w
- die relative Nullpunktabweichung f_0
- die relative Umkehrspanne h_w
- die relative Interpolationsabweichung f_a

Diese Kennwerte (siehe Abbildung 4.9) werden von der Auswertesequenz in der Analyse-Software mit den Grenzwerten in Tabelle 3, Klassifizierungsmerkmale der Drehmomentmessgeräte, aus der Norm DIN 51309 verglichen. Dadurch kann der Drehmomentaufnehmer einer Klasse von 1 bis 5 zugeteilt werden.

Überschreitet der Drehmomentaufnehmer die Grenzwerte der Klasse 5, so wird dies im Werkzeugnis mit einem roten „failed“ gekennzeichnet. In diesem Fall müssen Nacharbeiten durchgeführt werden. Ein grünes „passed“ bedeutet, dass das i-Shaft funktioniert und unter den Grenzwerten der Klasse 5 liegt.

Unter Punkt 5.4 sind die linearen Interpolationsgleichungen zu den Anzeigewerten des Drehmoments und der Drehzahl angegeben mit deren Hilfe in weiterer Folge die Verstärkungsfaktoren bei Bedarf optimiert werden können.

Auf der letzten Seite (siehe Abbildung 4.10) befinden sich die nullwertkorrigierten Messdaten, die während der Drehmomentkalibrierung erfasst wurden. Die Tabelle darunter enthält die nullwertkorrigierten Messdaten der Drehzahlkalibrierung.

Nullwertkorrigiert bedeutet, dass die Werte jeweils um den Nullwert $I_{0,j}$ reduziert wurden.



PJS-Systems Lokalisierungstechnik GmbH

Werkzeugnis - I-Shaft*factory test certificate - I-Shaft*

Werkzeugnis Nummer (Number of factory test certificate): 2012-05-03_iShaft_0001

Gegenstand <i>Object</i>	i-Shaft
Hersteller <i>Manufacturer</i>	PJ Messtechnik GmbH
Typ <i>Type</i>	Halbachse
Kalibrierbereich Drehmoment <i>Calibration range torque</i>	0 bis 2000 Nm
Kalibrierbereich Drehzahl <i>Calibraion range speed</i>	0 bis 1500 U/min
Interne Serien-Nr. <i>Internal Serial number</i>	iShaft_0001
Anzahl der Seiten <i>Number of pages</i>	5
Prüfschein Nummer <i>Number of verification certificate</i>	2012-05-03_iShaft_0001

Dieses Werkzeugnis darf nur vollständig und unverändert weitergegeben werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen unserer ausdrücklichen Genehmigung.

This factory test certificate may not be reproduces other than in full except with our permission.

Prüfer ORNIG Christina
Tester

Abnahme JOCH Martin
Release

Datum 03.05.2012
Date

Abbildung 4.6.: Beispiel für automatisiert erstelltes Werkzeugnis Seite 1/5



PJS-Systems Lokalisierungstechnik GmbH

Werkzeugnis - I-Shaft*factory test certificate - I-Shaft*

Werkzeugnis Nummer (Number of factory test certificate): 2012-05-03_iShaft_0001

Verwendete Referenzmittel /*Verification equipment***Referenzmittel für Drehmoment /***Torque test unit*

Referenzsensor: DF-30

Reference sensor:

Überprüft von: Isbjakow

Checked by:

Hersteller: Lorenz Messtechnik

Manufacturer:

Kalibrierung gültig bis: 06.02.2014

Calibration valid until:

Fabrikat / Serien-Nr.: 109185

*Serial Number:***Referenzmittel für Drehzahl /***Speed test unit*

Referenzsensor: ITD 41 A 4 Y68

Reference sensor:

Überprüft von: Müller

Checked by:

Hersteller: Baumer GmbH

Manufacturer:

Kalibrierung gültig bis: 30.12.2013

Calibration valid until:

Fabrikat / Serien-Nr.: 11091043

*Serial Number:***Prüfkonfiguration /***Verification Configuration***Referenz / Reference:**

Verstärker: 1-M-X460

Amplifier:

Filter: 200 Hz (Butterworth HD)

Filter:

Verstärker Seriennummer: 088019008132

Amplifier serial number:

Brückenspeisespannung: 5VDC

*Bridge excitation voltage:***Umgebungsbedingungen /***Ambient Conditions*

Umgebungstemperatur: 21.9 °C

Ambient temperature:

Luftfeuchte: 34,5 % rel.

*Humidity:***Gültigkeit Werkzeugnis /***Validity of fabrication test certificate*Ende (Monat / Jahr) *end of (month/year)* 2012 / 11**Angabe zum Aufnehmer /***Transducer Data*

Nullsignal Is (Drehmoment): 0.03 Nm

Zero signal Is (torque):

Nullsignal Is (Drehzahl): 0.03 U/min

Zero signal Is (speed):

Skalierfaktor: 1 Digit = 0.97782 Nm

Scale:

Verstärkungsfaktor grob (Gain 2): 2

Amplification factor coarse (Gain 2):

Verstärkungsfaktor fein (Gain 1): 106

Amplification factor fine (Gain 1):

Verstärkungsfaktor kombiniert (v-real): 207.25

Amplification factor combined (v-real):

Abbildung 4.7.: Beispiel für automatisiert erstelltes Werkzeugnis Seite 2/5



PJS-Systems Lokalisierungstechnik GmbH

Werkzeugnis - I-Shaft

factory test certificate - I-Shaft

Werkzeugnis Nummer (Number of factory test certificate): 2012-05-03_iShaft_0001

- 1. **Kalibrierverfahren /** *Calibration procedure:* In Anlehnung an DIN 51309:1998-02 und DKD-R 3-5 /
On the basis of DIN 51309:1998-02 and DKD-R 3-5
- 2. **Kalibrieranordnung /** *Calibration installation:* Einbaulage horizontal / *Horizontal position of the device*
- 3. Berechnete Werte sind um die jeweilige Nullanzeige reduziert *Calculated values are reduced by the respective zero signa*
- 4. Die Ergebnisse sind in der letzten Stelle gerundet. / *The calculated values are rounded in the last decimal.*
- 5. **Auswertung /** *Analysis:*
- 5.1 **Kalibrierergebnisse /** *Calibration results:*

Drehmoment / Torque in [Nm]	Kalibrierergebnis / Calculation result in [Nm]	rel. Messunsicherheit* / rel. uncertainty* in [%], k=2
Rechtsdrehmoment / clockwise torque		
0.00	0.00	
400.00	399.95	0.0086
1200.00	1200.02	0.0033
2000.00	1999.95	0.0042
Linksdrehmoment / anticlockwise torque		
0.00	0.00	
-400.00	-400	0.0043
-1200.00	-1200.01	0.0034
-2000.00	-1999.97	0.0037

*bei linearer Ausgleichsfunktion / using linear interpolation equation

Abbildung 4.8.: Beispiel für automatisiert erstelltes Werkzeugnis Seite 3/5



PJS-Systems Lokalisierungstechnik GmbH

Werkzeugnis - I-Shaft

factory test certificate - I-Shaft

Werkzeugnis Nummer (Number of factory test certificate): 2012-05-03_iShaft_0001

5.2 Kennwerte nach DIN 51309 / Classification criteria according to DIN 51309:

Werte / Values in Nm	bw in %	f0 in %	hw in %	fa in%
2000.00	0.0003	--	--	-0.0037
1200.00	0.0005	--	0.0051	0.0008
400.00	0.0013	--	0.0195	-0.0141
0.00	--	0	--	--
0.00	--	0.0002	--	--
-400.00	0.0016	--	0.0129	-0.0009
-1200.00	0.0007	--	0.0021	-0.0001
-2000.00	0.0002	--	--	-0.0026

5.3 Klassifizierung nach DIN 51309/ Classification according to DIN 51309:

Klasse Aufnehmer: 1 **passed**

Classification transducer:

5.4 Interpolationsgleichung / Interpolation equation:

5.4.1 Drehmoment / Torque (in Nm):

$$Y = 1.00001 X$$

Anzeigewert / Displayed Value Interpolationskoeffizient / Interpolation coefficient Referenzwert / Reference value

5.4.2 Drehzahl / Speed (in U/min):

$$Y = 1.00001 X$$

Anzeigewert / Displayed Value Interpolationskoeffizient / Interpolation coefficient Referenzwert / Reference value

Abbildung 4.9.: Beispiel für automatisiert erstelltes Werkzeugnis Seite 4/5

Werkzeugnis - I-Shaft

factory test certificate - I-Shaft

Werkzeugnis Nummer (Number of factory test certificate): 2012-05-03_iShaft_0001

6. Messdaten Drehmomentmessungen / *Measuring data torque measurements:*

Werte / Values in Nm	1. Vor- belastung / preloading 0°	2. Vor- belastung / preloading 0°	3. Vor- belastung / preloading 0°	Messreihe / measurements 0°		Vor- belastung / preloading 120°	Messreihe / measurements 120°	
0.00	0.00	0.01	-0.05	0.07	-0.02	0.00	0.07	-0.02
400.00	--	--	--	399.99	399.91	--	399.99	399.914
1200.00	--	--	--	1199.99	1200.05	--	1200	1200.06
2000.00	1999.95	1999.93	1999.94	1999.95	1999.95	1999.94	1999.95	1999.95
0.00	-0.04	0	0.01	-0.02	0	0.01	-0.02	0
-400.00	--	--	--	-399.98	-400.03	--	-399.97	-400.023
-1200.00	--	--	--	-1200.03	-1200	--	-1200.02	-1199.99
-2000.00	-2000	-1999.96	-2000.03	-1999.97	-1999.97	-2000.02	-1999.97	-1999.97

7. Messdaten Drehzahlmessungen / *Measuring data speed measurements:*

Werte / Values in U/min	Rechtsdrehend / clockwise		Linksdrehend / anticlockwise	
	ansteigende Drehzahl / increasing speed	fallende Drehzahl / decreasing speed	ansteigende Drehzahl / increasing speed	fallende Drehzahl / decreasing speed
0.00	0	0.13	0.13	0.01
300.00	300.01	299.95	-299.94	-299.99
900.00	900.02	900.09	-899.93	-899.93
1500.00	1499.97	1499.97	-1500.01	-1500.01

Abbildung 4.10.: Beispiel für automatisiert erstelltes Werkzeugnis Seite 5/5

5. FAZIT / AUSBLICK

Im Allgemeinen hat sich im Laufe dieser Arbeit gezeigt, dass sich ein Vorgehen nach VDI Richtlinien Nr. 2221 als sehr nützlich erwiesen hat. Die Unterteilung in einzelne, vordefinierte Phasen und Arbeitsschritte hilft sehr, sich ans Wesentliche zu halten, sich genaue Ziele zu setzen und effektiv gute Ergebnisse zu erzielen. Es ist daher bei jeder Entwicklung und Konstruktion empfehlenswert, sich schon zu Beginn eine passende Struktur zu Recht zu legen.

Erste Testläufe und die endgültige Inbetriebnahme des Prüfstands sind im Laufe der nächsten Monate 2012 geplant. Danach wird sich zeigen, ob der Ablauf der Kalibrierung oder die Bedienung des Prüfstands noch optimiert werden müssen.

Ein mögliches Verbesserungspotential kann sich im Ablauf der Kalibrierung ergeben. Die Erfahrung und die Routine im Umgang mit dem Prüfstand wird zeigen, ob und wie die Kalibriervorgänge noch zeitoptimierter durchgeführt werden können.

Jedenfalls müssen noch die entsprechenden Sicherheitsvorrichtungen konzipiert, konstruiert und angebracht werden, bevor der Prüfstand für den Betrieb freigegeben wird. Dringend notwendig ist eine geeignete Abdeckung aller drehenden Teile, die fix mit dem Prüfstand verbunden ist. Die Verriegelung dieser Abdeckung muss an die Motorsteuerung gekoppelt sein, sodass ein sofortiger Stopp des Motors ausgelöst wird, wenn die Verriegelung während der Kalibrierung geöffnet wird. Weiters darf ein Starten des Motors erst wieder möglich sein, wenn die Verriegelung geschlossen ist.

Nur so kann gewährleistet werden, dass das Bedienpersonal ausreichend vor Verletzungen geschützt ist und nicht in der Lage ist, die Sicherheitsvorrichtungen zu umgehen.

Es wird empfohlen auch ein Sicherheitssystem einzubauen, das selbstständig erkennt, wenn ein Bersten des Prüflings bevorsteht bzw. passiert. Dieses könnte die Differenz der Geschwindigkeit des Motors und der am Referenzdrehgeber Gemessenen permanent während der Kalibrierung überwachen. Bei Überschreitung des für die Differenz zulässigen Werts wird dann ebenfalls ein sofortiger Stopp des Motors erwirkt.

Wie in der Einleitung schon erwähnt, sollen in Zukunft auch Antriebswellen anderer Fahrzeuge als die von Rennfahrzeugen auf diesem Prüfstand kalibriert werden können. Durch die Lösung der Anbindung des Prüflings über einen Adapter, ist es sehr einfach z.B. auch Antriebswellen von Personenkraftwagen einzuspannen. Es müssen nur mehr entsprechende Adapter gefertigt werden.

Durchaus vorstellbar ist es, auch andere Drehmomentaufnehmer und Drehzahlmesssysteme mit dem Prüfstand zu kalibrieren, als die i-Shafts. Eine passende Einspannvorrichtung mit dem passenden Lochbild kann einfach gefertigt und angebracht werden. Der Hersteller der i-Shafts hat in Zukunft eine Vielzahl an Möglichkeiten auch andere seiner Produkte, die einer Drehmoment - und/oder einer Drehzahlkalibrierung unterzogen werden müssen, auf diesem Prüfstand zu kalibrieren.

Selbst die Länge des Prüfstands, oder aber auch die Breite können aufgrund der Wahl des Baukastensystems einfach und kostengünstig angepasst werden.

Der im Zuge dieser Arbeit entwickelte Prüfstand ist ein sehr flexibles System, das allen Anforderungen zur Drehmoment- und Drehzahlkalibrierung gerecht wird und ein hohes Potential aufweist noch weiter in Richtung zusätzliche Anwendungen außer der Kalibrierung der Messtechnik von Antriebswellen entwickelt zu werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [Braess und Seiffert 2007] BRAESS ; SEIFFERT: *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 5. Auflage, Vieweg Verlag, 2007. – ISBN: 978-3-8348-0222-4
- [Braunschweig 1989] BRAUNSCHWEIG, Dipl.-Phys. E. F.: *Deutscher Kalibrierdienst (DKD) - das Bindeglied zu den nationalen Normalen*. VDI Berichte Nr. 741, 1989
- [DIN-1319-1 1995] DIN-1319-1: *Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*. 1995
- [DIN-51309 2005] DIN-51309: *Werkstoffprüfmaschinen - Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Drehmomente*. 2005
- [DIN-EN-10204 1995] DIN-EN-10204: *Metallische Erzeugnisse - Arten von Prüfscheinigungen*. 1995
- [DKD-R-3-5 1998] DKD-R-3-5: *Richtlinie DKD-R 3-5: Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Wechseldrehmomente*. 1998
- [Hagedorn 2006] HAGEDORN, Peter: *Technische Mechanik - Band 2 - Festigkeitslehre*. 4. Auflage, Verlag Harri Deutsch, 2006. – ISBN-10: 3-8171-1778-7 ISBN-13: 978-3-8171-1778-9
- [Hartung u. a. 2005] HARTUNG, Joachim ; ELPELT, Bärbel ; KLÖSENER, Karl-Heinz: *Statistik - Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. 14. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005. – ISBN-10: 3486578901 ISBN-13: 978-3486578904
- [Heißing u. a. 2011] HEISSING, Bernd ; ERSOY, Metin ; GIES, Stefan: *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*. 3. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – ISBN: 978-3-8348-0821-9
- [Hoffmann 2002] HOFFMANN, Jörg: *Taschenbuch der Messtechnik*. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, 2002. – ISBN: 3-446-21977-3
- [Hoffmann 1987] HOFFMANN, Karl: *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1987. – ASIN: B001ALAP1W

- [item 2007] ITEM: *MB Systembaukasten*. Ausgabe April, item Industrietechnik GmbH, 2007
- [Künne 2007] KÜNNE, Univ.-Prof. Dr.-Ing. B.: *Köhler/Rögnitz - Maschinenteile 1*. 10. Auflage, B.G. Teubner Verlag, 2007. – ISBN: 978-3-8351-0093-0
- [Mayr 2008] MAYR, Martin: *Technische Mechanik - Statik, Kinematik - Kinetik - Schwingungen, Festigkeitslehre*. 6. Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien, 2008. – ISBN: 978-3-446-41690-1
- [Mühl 2012] MÜHL, Professor Dr.-Ing. T.: *Einführung in die elektrische Messtechnik: Grundlagen, Messverfahren, Geräte*. 3. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN: 978-3-8351-0189-0
- [ÖNORM-EN-ISO-10012 2003] ÖNORM-EN-ISO-10012: *Messlenkungssysteme - Anforderungen an Messprozesse und Messmittel*. Europäisches Komitee für Normung, 2003
- [ÖNORM-EN-ISO-12100 2010] ÖNORM-EN-ISO-12100: *Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobewertung und Risikominderung*. Europäisches Komitee für Normung, 2010
- [Pahl u. a. 2007] PAHL, G. ; BEITZ, W. ; FELDHUSEN, J. ; GROTE, K.-H.: *Konstruktionslehre - Grundlagen*. 7. Auflage, Springer Verlag, 2007. – ISBN-10: 3-540-34060-2 ISBN-13: 978-3-540-34060-7
- [Röske 2008] RÖSKE, Dirk: *Die Messung des Drehmoments: Von der Schraube bis zur Turbinenwelle*. Heft 3, PTB-Mitteilungen 118, 2008
- [Schicker und Wegener 2002] SCHICKER, Rainer ; WEGENER, Georg: *Drehmoment richtig messen*. 1. Auflage, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 2002. – ISBN-10: 3000090150 ISBN-13: 978-3000090158
- [VDI-2221 1993] VDI-2221: *VDI-Richtlinien 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, 1993
- [VDI-2230 2003] VDI-2230: *VDI-Richtlinien Nr. 2230: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen*. Verein deutscher Ingenieure, 2003
- [Weltner 2008] WELTNER, Klaus: *Mathematik für Physiker 1 - Basiswissen für das Grundstudium der Experimentalphysik*. 13. Auflage, Springer-Verlag GmbH, 2008. – ISBN-10: 3540298428 ISBN-13: 978-3540298427
- [Zwicky 1971] ZWICKY, Fritz: *Entdecken, Erfinden, Forschen im Morphologischen Weltbild*. Auflage 1966-1971, Doemer-Knauer Verlag, 1971. – ISBN-13: 978-3426002643

TABELLENVERZEICHNIS

3.1. Technische Daten Schneckengetriebe	35
3.2. Technische Daten Drehmomentaufnehmer	37
3.3. Technische Daten Elektromotor	40
3.4. Technische Daten Metallbalgkupplung	41
3.5. Technische Daten Stehlagereinheiten	42
3.6. Technische Daten Drehgeber	43
3.7. Mechanische Daten der Grundelemente [item, 2007]	48
3.8. Hauptabmessungen des Rahmens Variante 1 und 2	51

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1. Hauptarbeitsschritte vom Planen bis zur Realisierung	4
1.2. Beispiele Seitenwellen	6
1.3. Beispiel Kalibrierablauf nach DKD-R 3-5	9
1.4. Wheatstone'sche Brückenschaltung in unterschiedlicher Darstellungsweise .	11
1.5. Torsionswelle mit in den Hauptdehnungsrichtungen applizierten DMS und Verteilung Torsionsspannung	12
1.6. Auslesen der Daten eines i-Shafts	13
1.7. Anschlussbelegung i-Shaft	14
1.8. schematischer Aufbau des i-Shaft	17
2.1. Schema des morphologischen Kasten	24
2.2. Morphologischer Kasten zur Auswahl eines Grundkonzeptes	26
2.3. Zwei Varianten der Gesamtlösung	28
3.1. Konstruktionsmodell des Moduls Drehmoment	33
3.2. Foto: Schneckengetriebe	34
3.3. Adapter zur Aufnahme des Prüflings am Schneckengetriebe	36
3.4. Foto: Statischer Drehmomentsensor	37
3.5. starre Konsole zur Aufnahme des Drehmomentsensors	38
3.6. Konstruktionsmodell des Moduls Drehzahl	39
3.7. Foto: Elektromotor	40
3.8. Foto: Stehlagereinheiten	42
3.9. Foto: inkrementaler Drehgeber und Metallbalgkupplung	43
3.10. Position des Drehgebers im Konstruktionsmodell	43
3.11. Adapter zur Aufnahme des Prüflings an der Stehlagereinheit	44
3.12. Schweißkonstruktion aus Formrohren	45
3.13. T-Nuten zur stufenlosen Längenanpassung	46
3.14. Rahmen aus Modulen eines Baukastensystems	48
3.15. Vorspannung durch einfallende Nutflanken u. Profilquerschnitt	49
3.16. Toleranzen der Aluminium-Profile [item, 2007]	50
3.17. Ausführung des gesamten Prüfstands	52
3.18. Berechnung der Nennspannungen bei Kehlnähten	54

3.19. an starrer Konsole wirkende Kräfte	55
3.20. Zulässige Spannungen an Schweißnähten nach DIN 18800 T1	56
3.21. Zusätzliche Verstrebungen im mittleren Bereich des Rahmens	57
3.22. Beispiel der Ergebnisse der FE-Berechnungen	59
3.23. Anbindung des Moduls Drehzahl an den Rahmen	61
3.24. Gesamtüberblick Prüfstand: Ansicht von oben	63
3.25. Schaltschrank mit Notausschalter	65
4.1. Überblick über den Prüfstand zur Kalibrierung	68
4.2. Kalibrierablauf des i-Shaft	70
4.3. Kalibrierablauf zur Drehzahlkalibrierung	71
4.4. Benutzeroberfläche des PJM Motion Control Tool	72
4.5. Beispiel Startmappe der Auswertesequenz	74
4.6. Beispiel für automatisiert erstelltes Werkszeugnis Seite 1/5	81
4.7. Beispiel für automatisiert erstelltes Werkszeugnis Seite 2/5	82
4.8. Beispiel für automatisiert erstelltes Werkszeugnis Seite 3/5	83
4.9. Beispiel für automatisiert erstelltes Werkszeugnis Seite 4/5	84
4.10. Beispiel für automatisiert erstelltes Werkszeugnis Seite 5/5	85
A.1. Explosionszeichnung: Modul Drehmoment	II
A.2. Explosionszeichnung: Modul Drehzahl	III
A.3. Darstellung Einspannungsbedingung kurz	IV
A.4. FE-Ergebnis: Deformation, kurze Einspannung (Frontansicht)	IV
A.5. Darstellung Einspannungsbedingung lang	V
A.6. FE-Ergebnis: Deformation, lange Einspannung (Frontansicht)	V
A.7. FE-Ergebnis: Hauptnormalspannungen, kurz und lang, Ansicht 1	VI
A.8. FE-Ergebnis: Hauptnormalspannungen, kurz und lang, Ansicht 2	VII
A.9. FE-Ergebnis: Hauptnormalspannungen, kurz und lang, Ansicht 3	VIII
A.10. FE-Ergebnis: Hauptnormalspannungen, kurz und lang, Ansicht 4	IX
A.11. FE-Ergebnis: Spannungskomponenten, kurz und lang, Ansicht 1	X
A.12. FE-Ergebnis: Spannungskomponenten, kurz und lang, Ansicht 2	XI
A.13. Fertigungszeichnung: Adapter Lagereinheit	XIII
A.14. Fertigungszeichnung: Adapter Schneckengetriebe	XIV
A.15. Fertigungszeichnung: Adapter Drehmomentaufnehmer	XV
A.16. Fertigungszeichnung: Schnittstelle Sensor - starre Konsole	XVI
A.17. Fertigungszeichnung: Zwischenstück Stehlagereinheit	XVII
A.18. Fertigungszeichnung: Befestigung Drehmomentstütze Drehgeber	XVIII
A.19. Fertigungszeichnung: starre Konsole	XIX

A. ANHANG

A.1. EXPLOSIONSZEICHNUNGEN

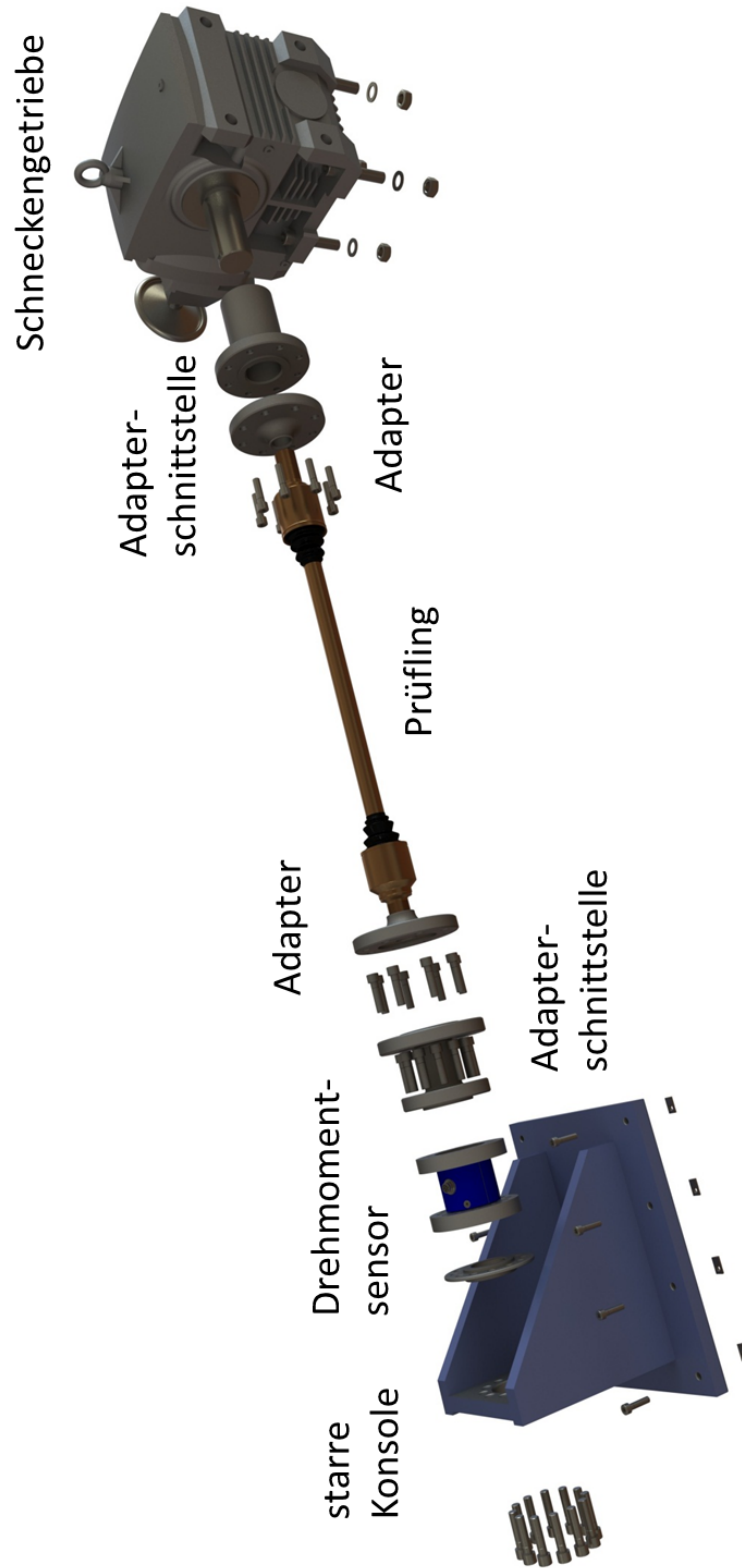


Abbildung A.1.: Komponenten Modul Drehmoment

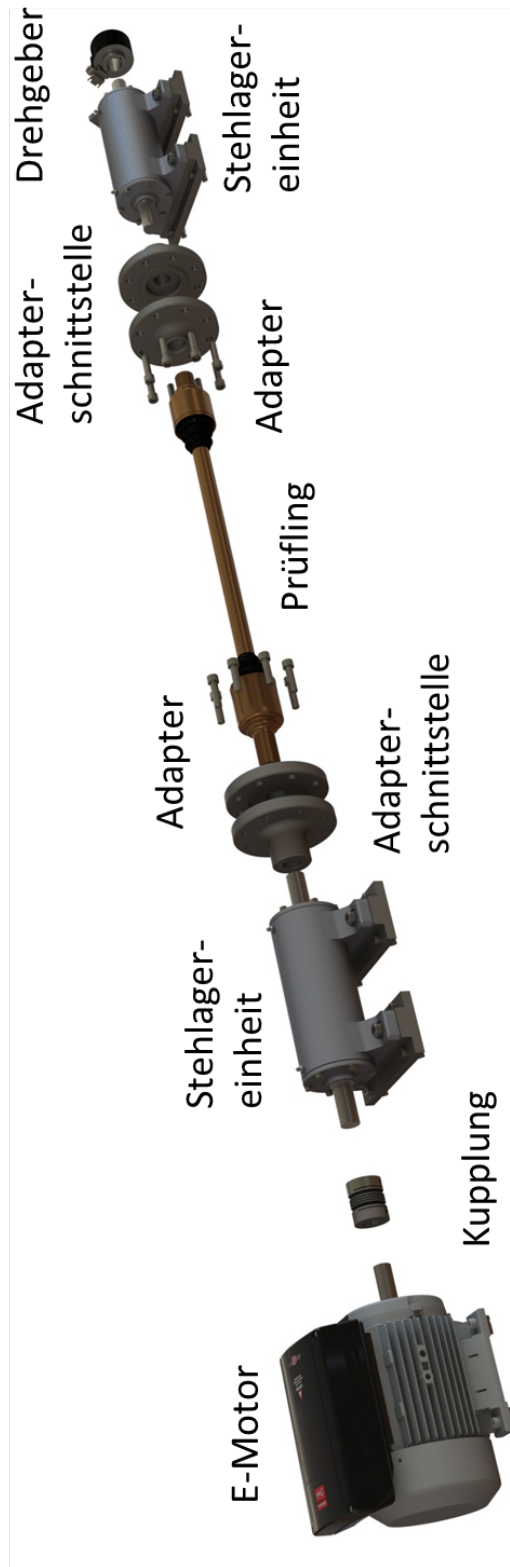


Abbildung A.2.: Komponenten Modul Drehzahl

A.2. ERGEBNISSE DER FE-BERECHNUNGEN

A.2.1. KURZE EINSpanNUNG

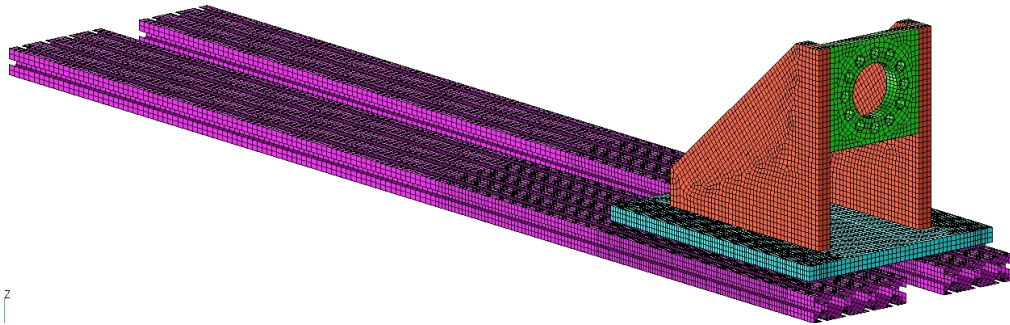


Abbildung A.3.: Darstellung Einspannungsbedingung kurz

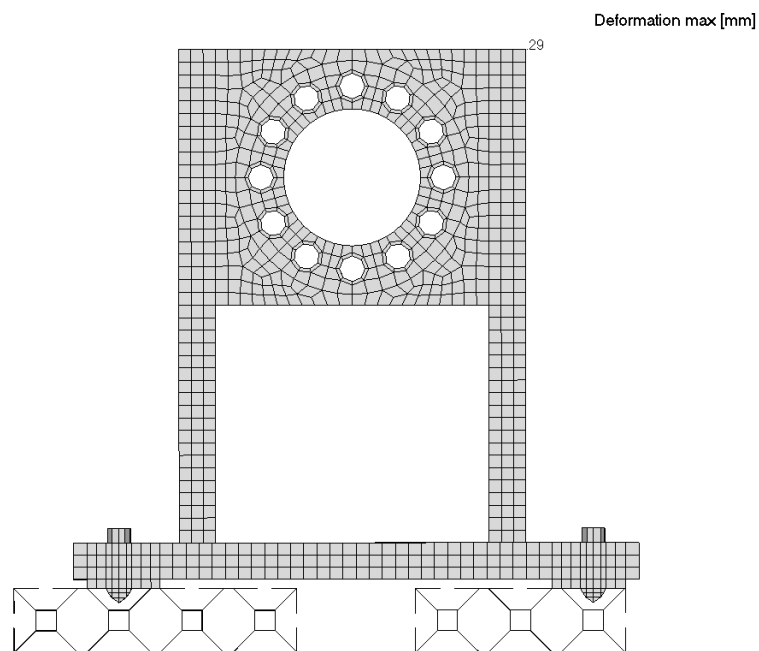
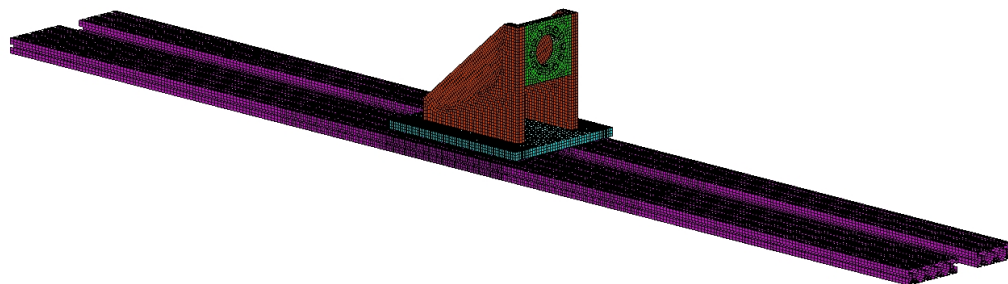


Abbildung A.4.: Frontansicht der Deformation der starren Konsole bei kurzer Einspannung

A.2.2. LANGE EINSpanNUNG



z

Abbildung A.5.: Darstellung Einspannungsbedingung lang

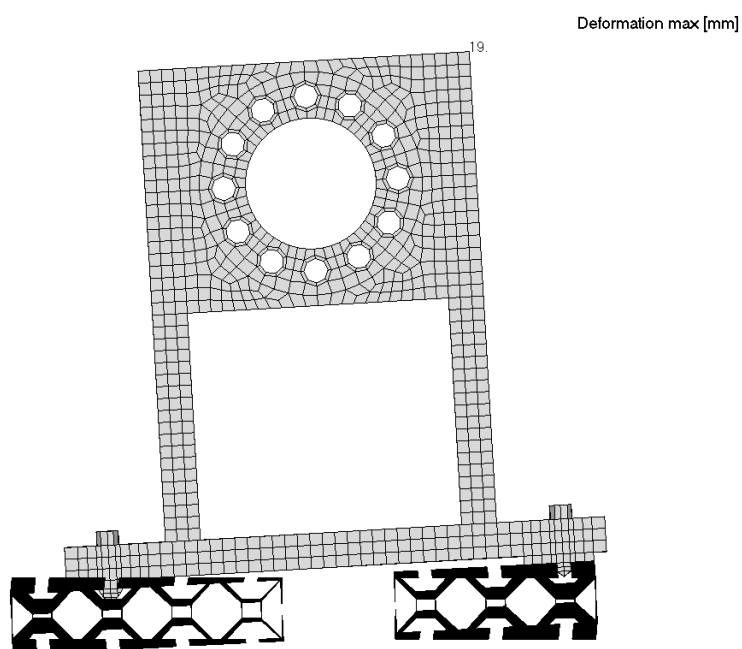


Abbildung A.6.: Frontansicht der Deformation der starren Konsole bei langer Einspannung

A.2.3. BERECHNETE HAUPTNORMALSPPANNUNGEN

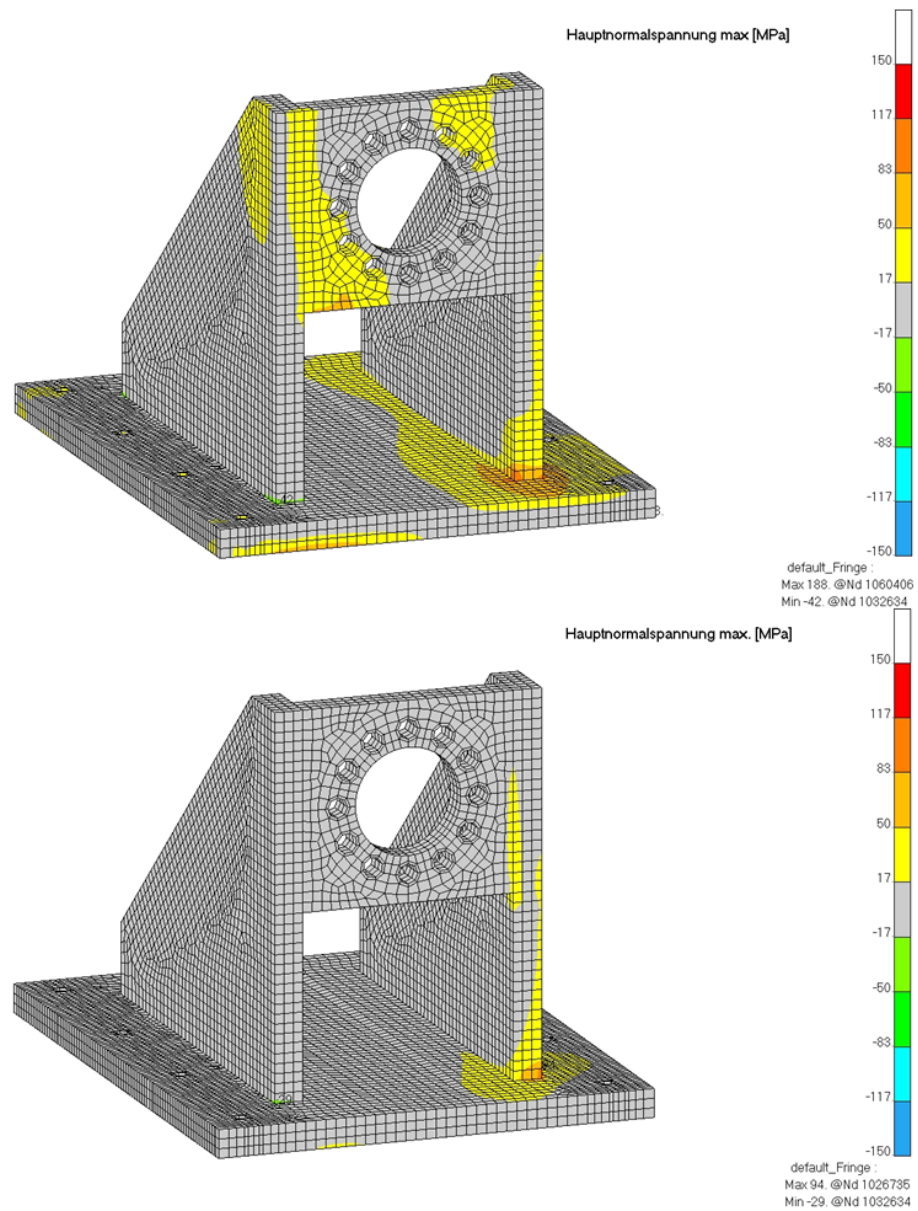


Abbildung A.7.: FE-Ergebnis: Hauptnormalspannungen bei langer (oben) und bei kurzer (unten) Einspannung; Ansicht 1

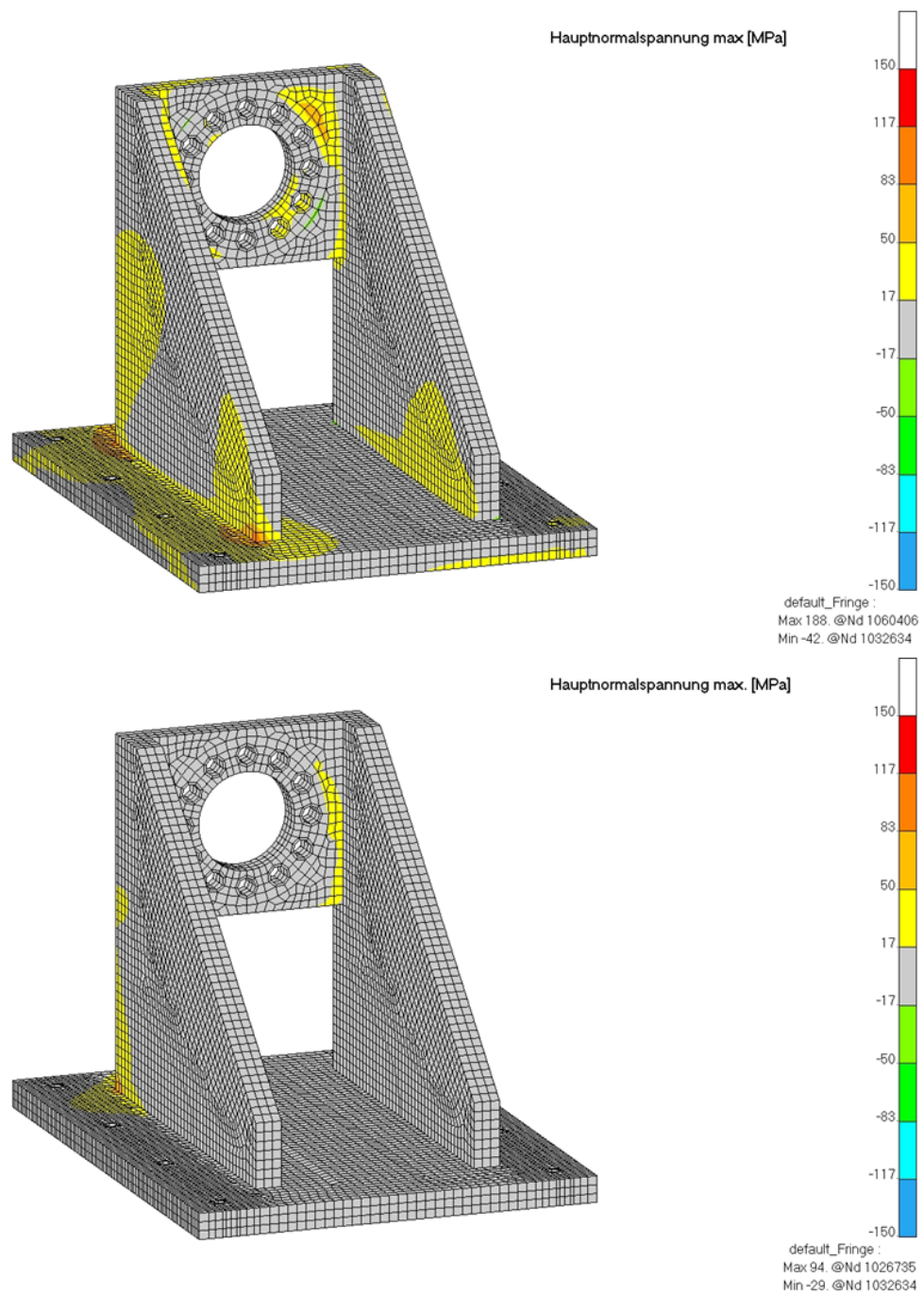


Abbildung A.8.: FE-Ergebnis: Hauptnormalspannungen bei langer (oben) und bei kurzer (unten) Einspannung; Ansicht 2

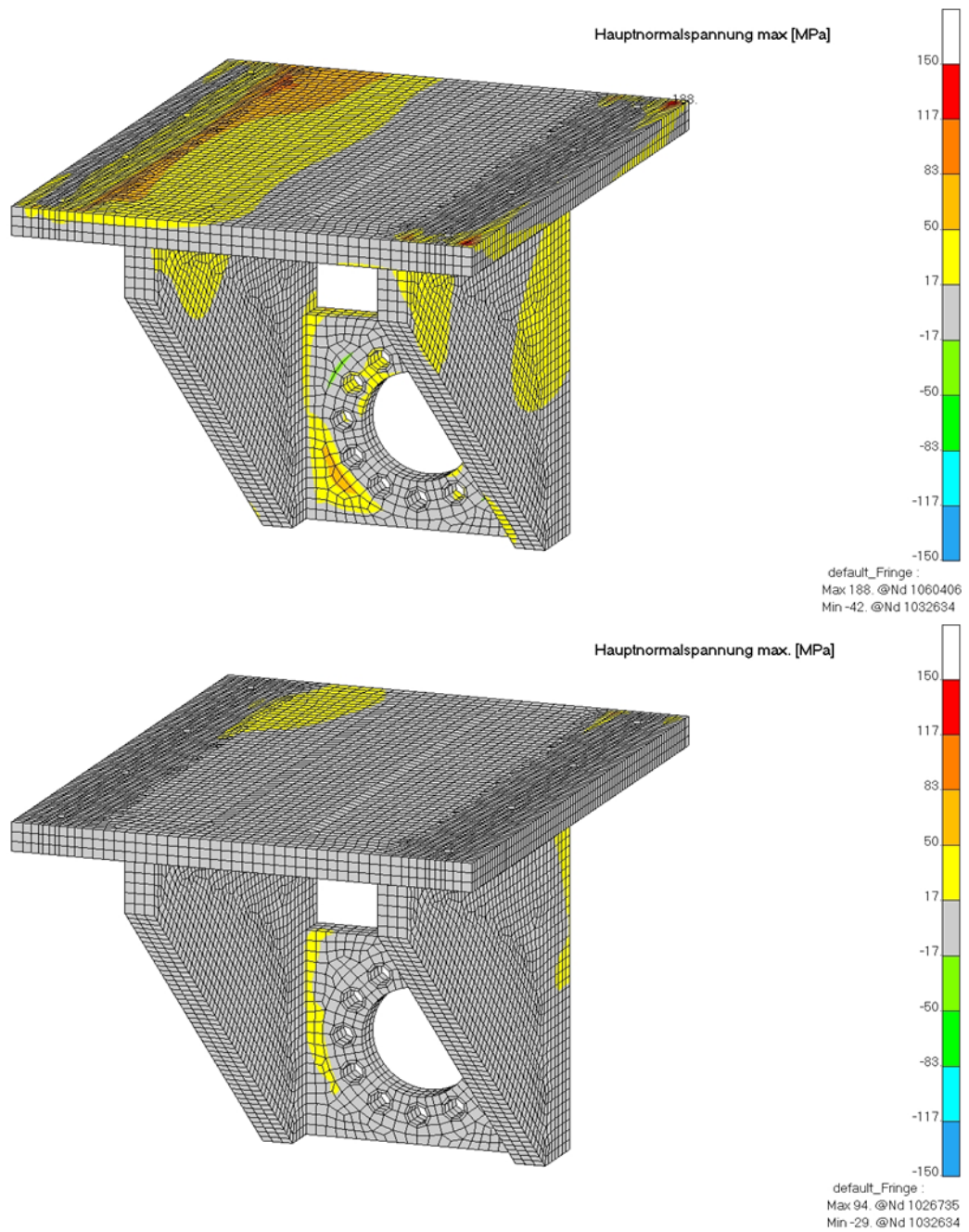


Abbildung A.9.: FE-Ergebnis: Hauptnormalspannungen bei langer (oben) und bei kurzer (unten) Einspannung; Ansicht 3

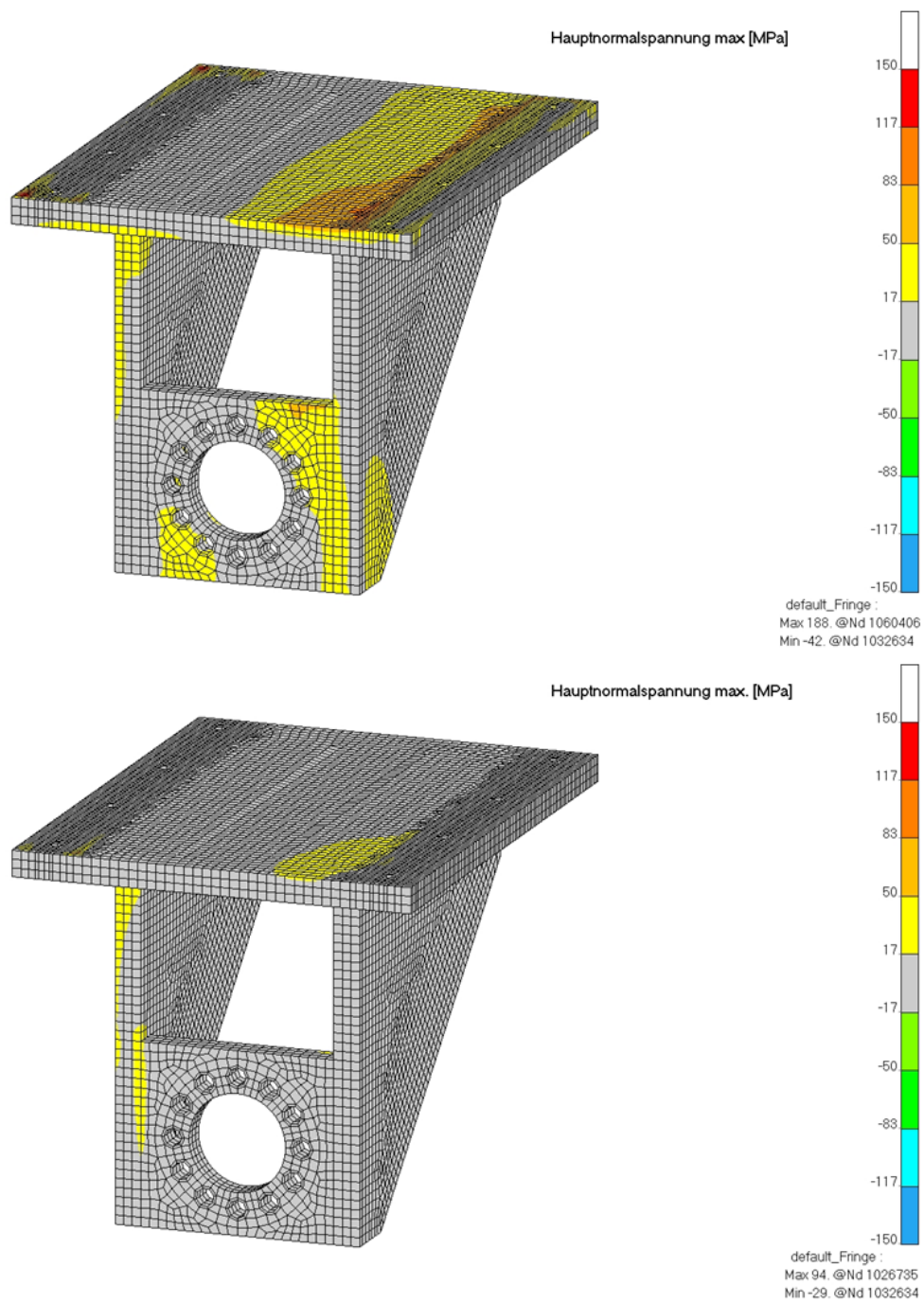


Abbildung A.10.: FE-Ergebnis: Hauptnormalspannungen bei langer (oben) und bei kurzer (unten) Einspannung; Ansicht 4

A.2.4. BERECHNETE SPANNUNGSKOMPONENTEN

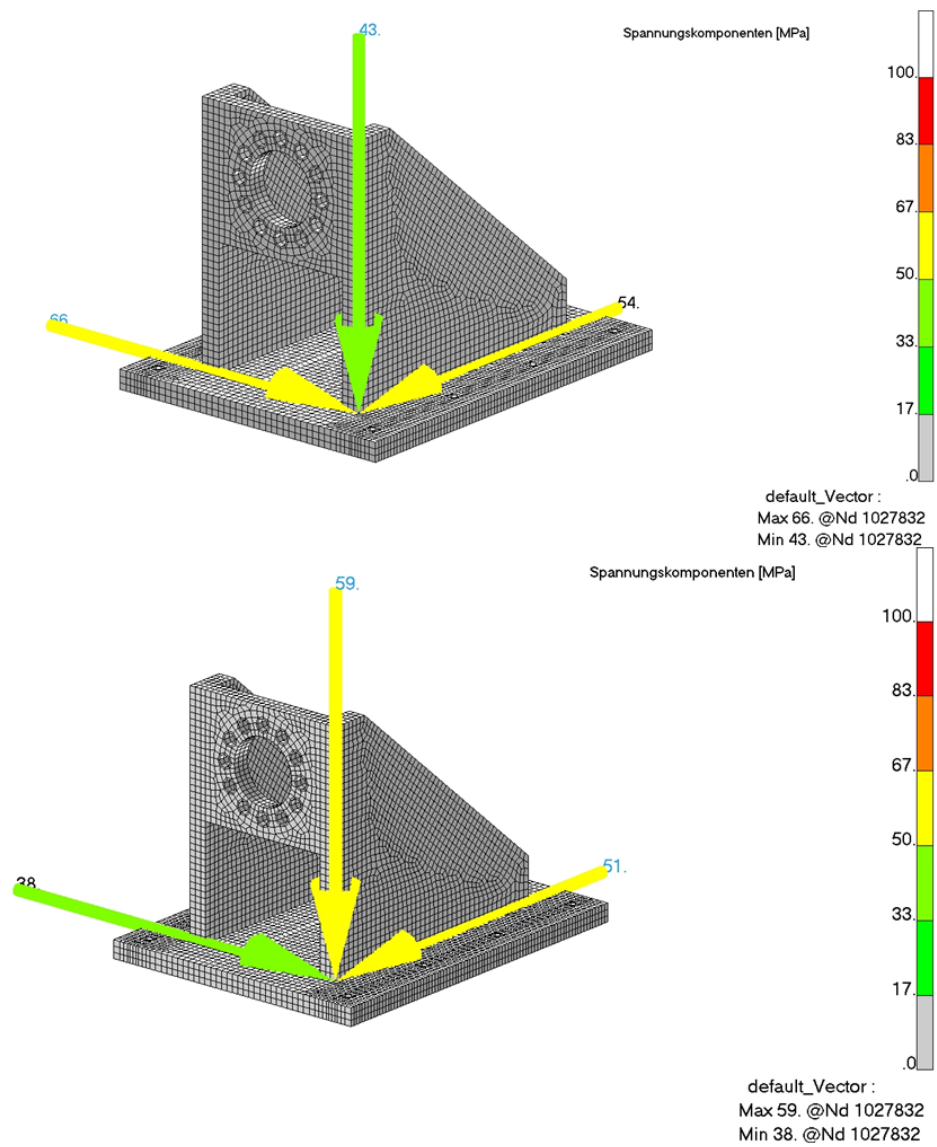


Abbildung A.11.: FE-Ergebnis: Spannungskomponenten bei langer (oben) und bei kurzer (unten) Einspannung; Ansicht 1

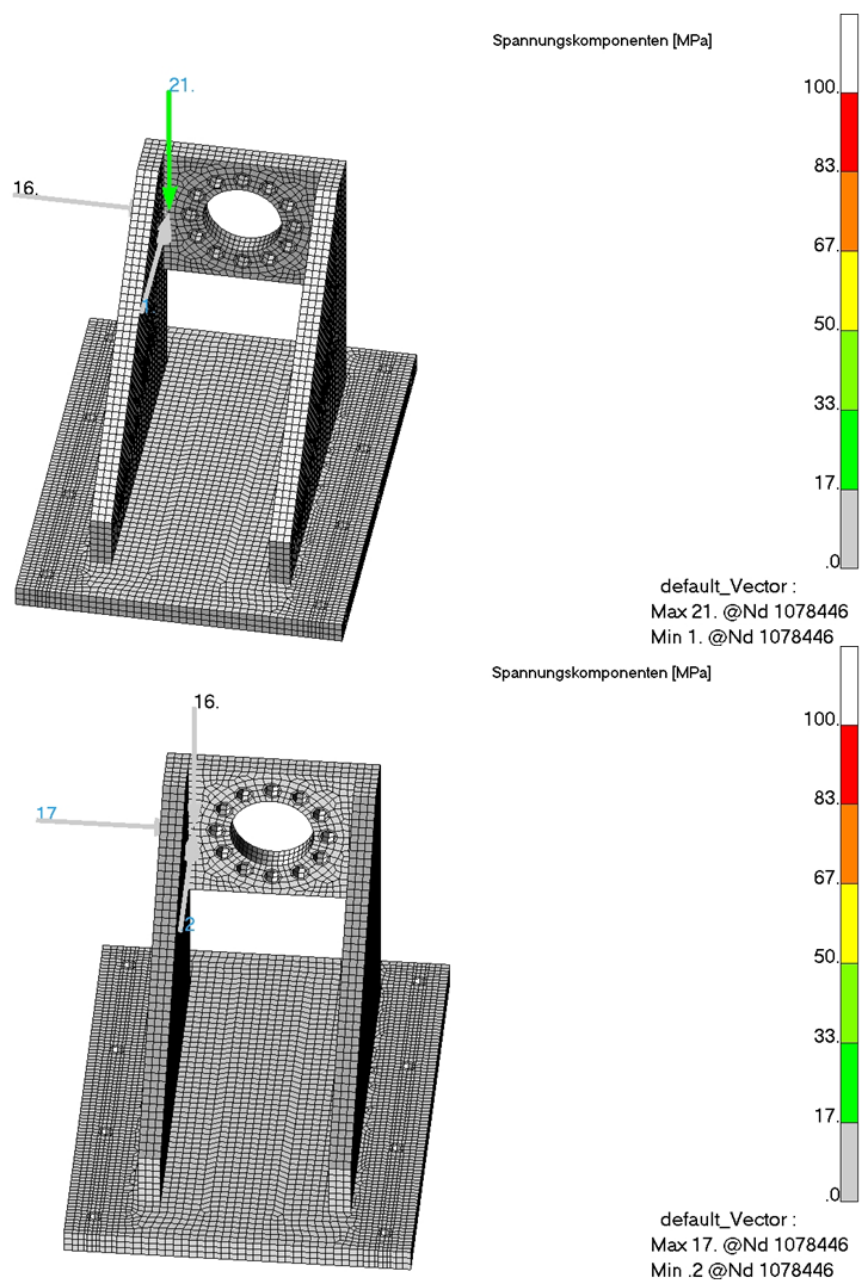


Abbildung A.12.: FE-Ergebnis: Spannungskomponenten bei langer (oben) und bei kurzer (unten) Einspannung; Ansicht 2

A.3. FERTIGUNGSZEICHNUNGEN

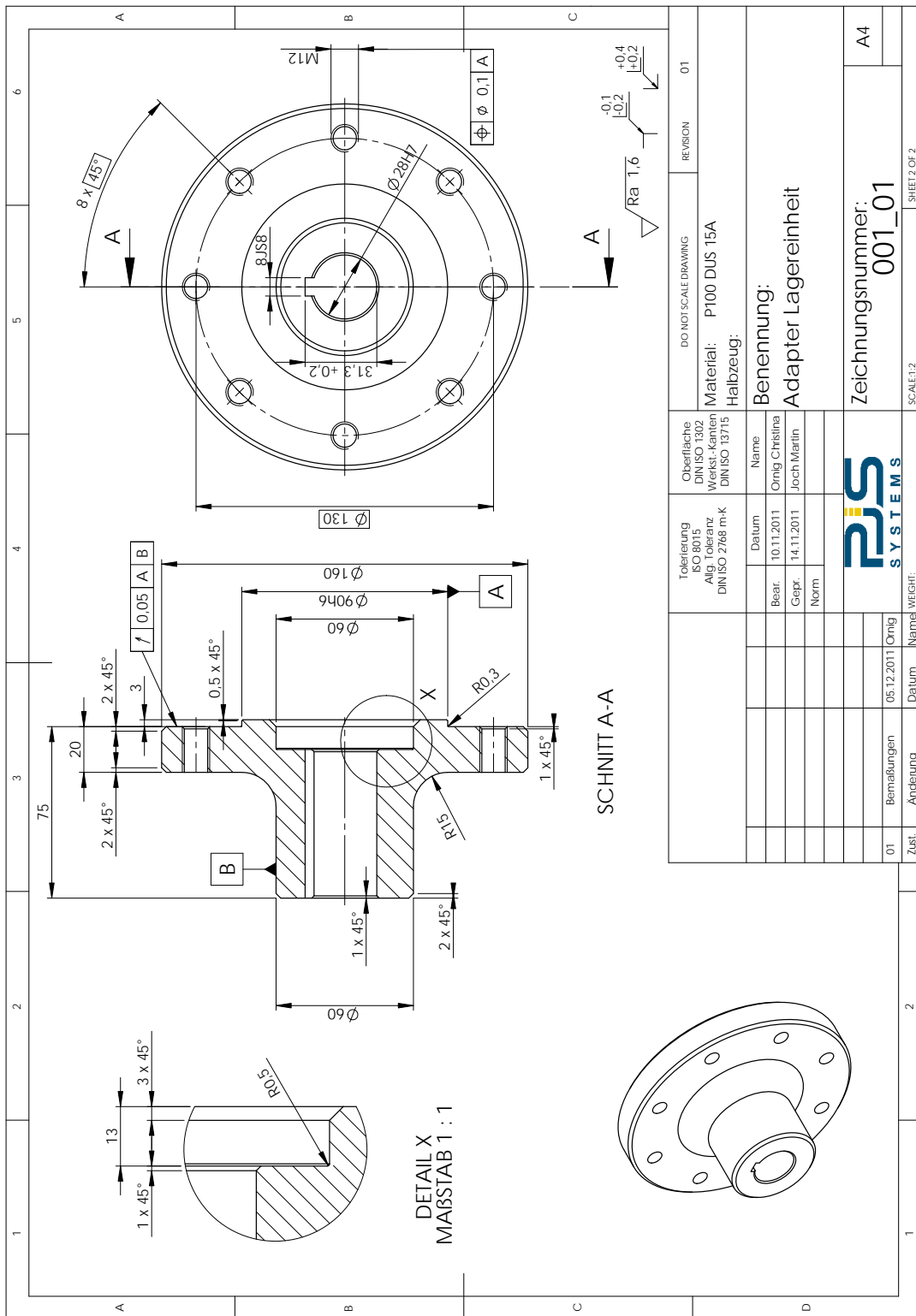


Abbildung A.13.: Adapter Lagereinheit

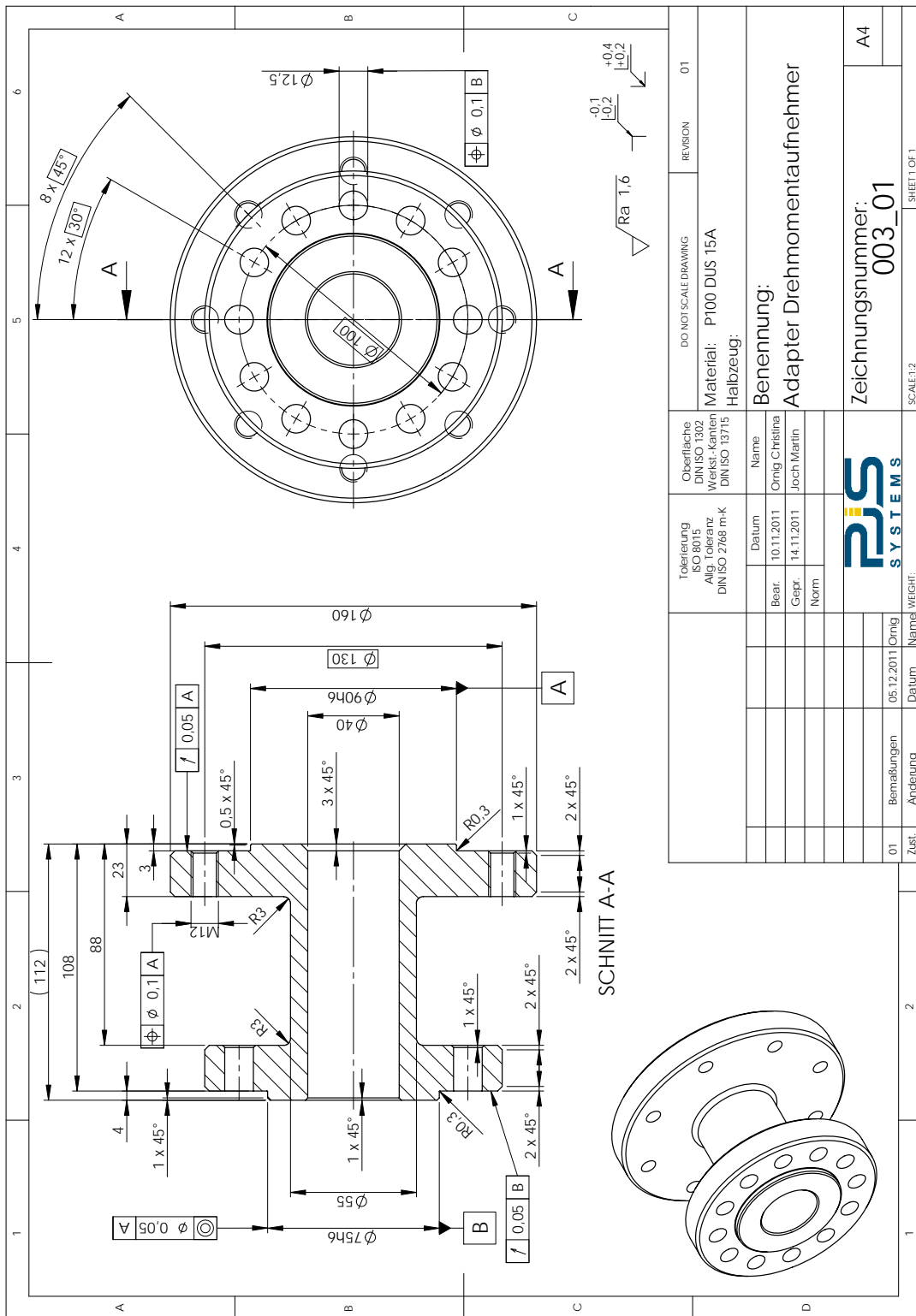


Abbildung A.15.: Adapter Drehmomentaufnehmer

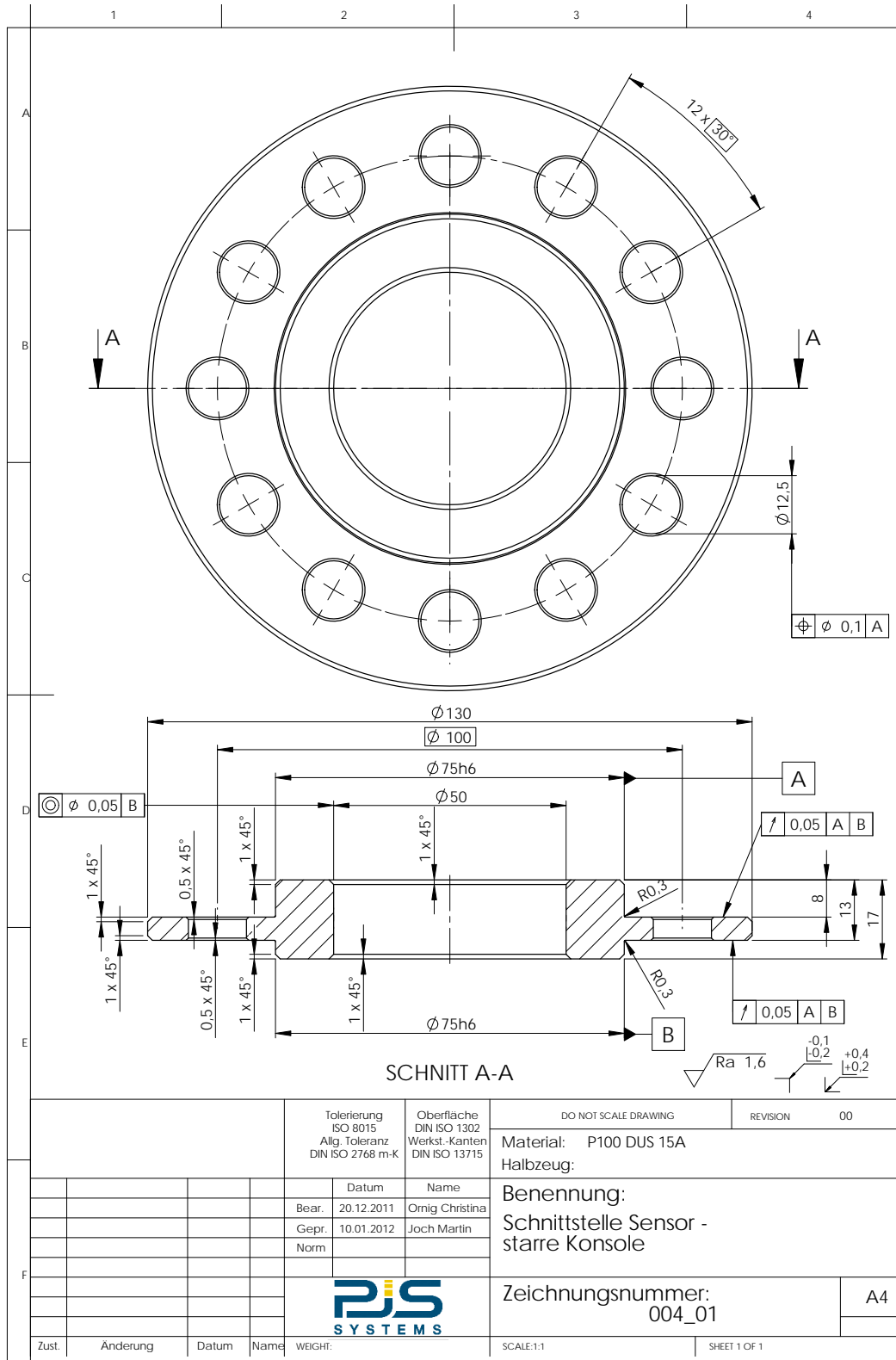


Abbildung A.16.: Schnittstelle Sensor - starre Konsole

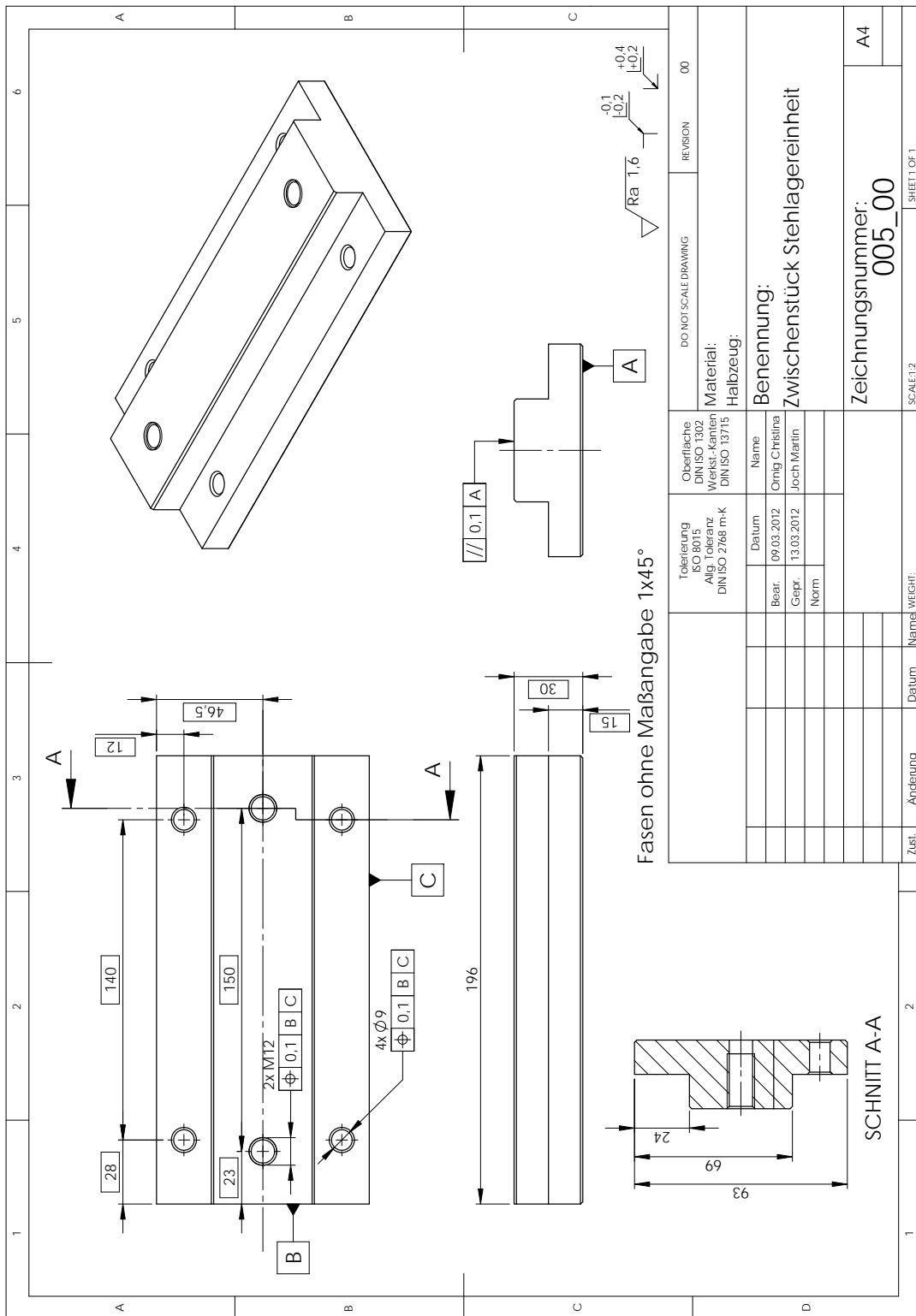


Abbildung A.17.: Zwischenstück Stehlagereinheit

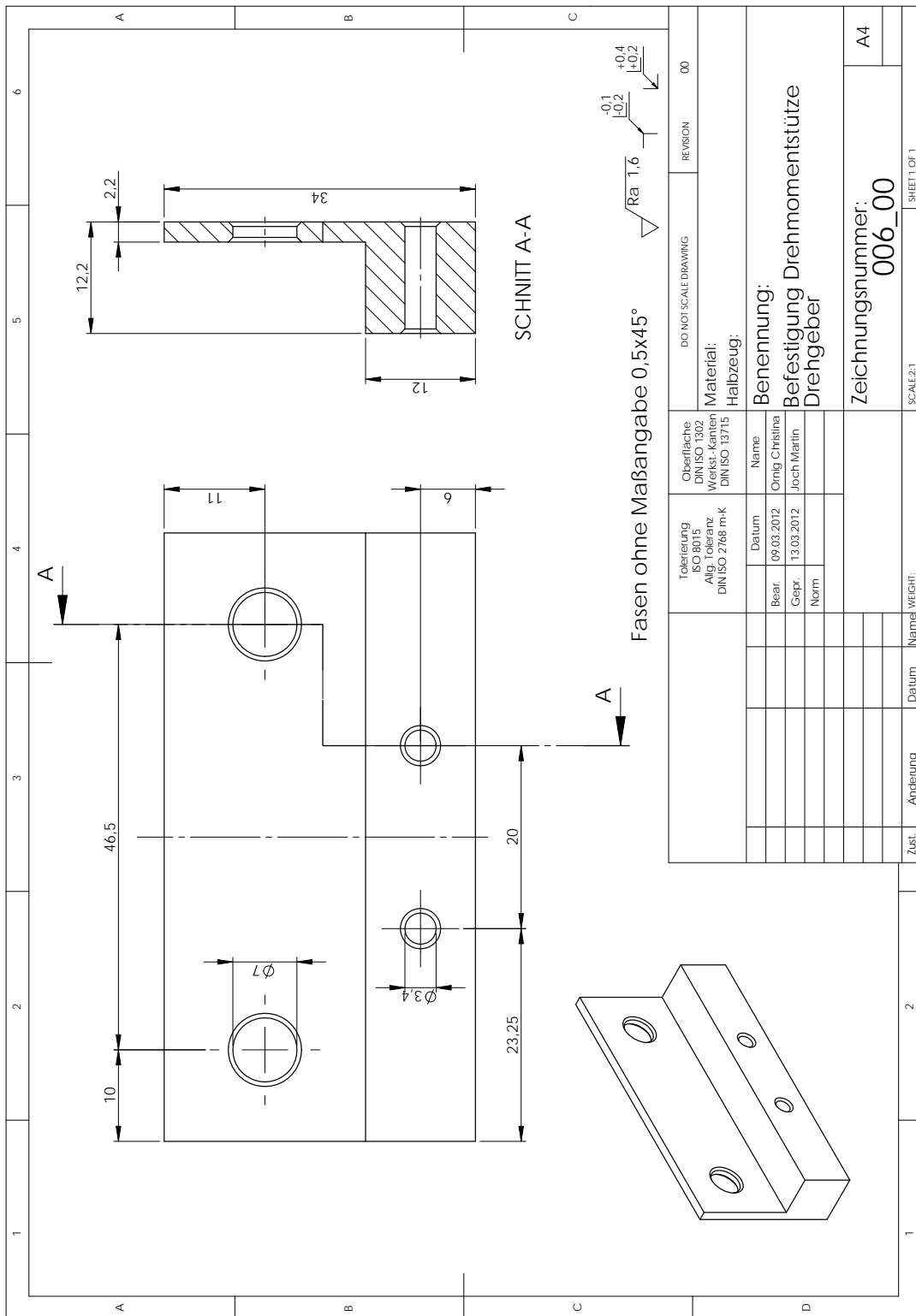
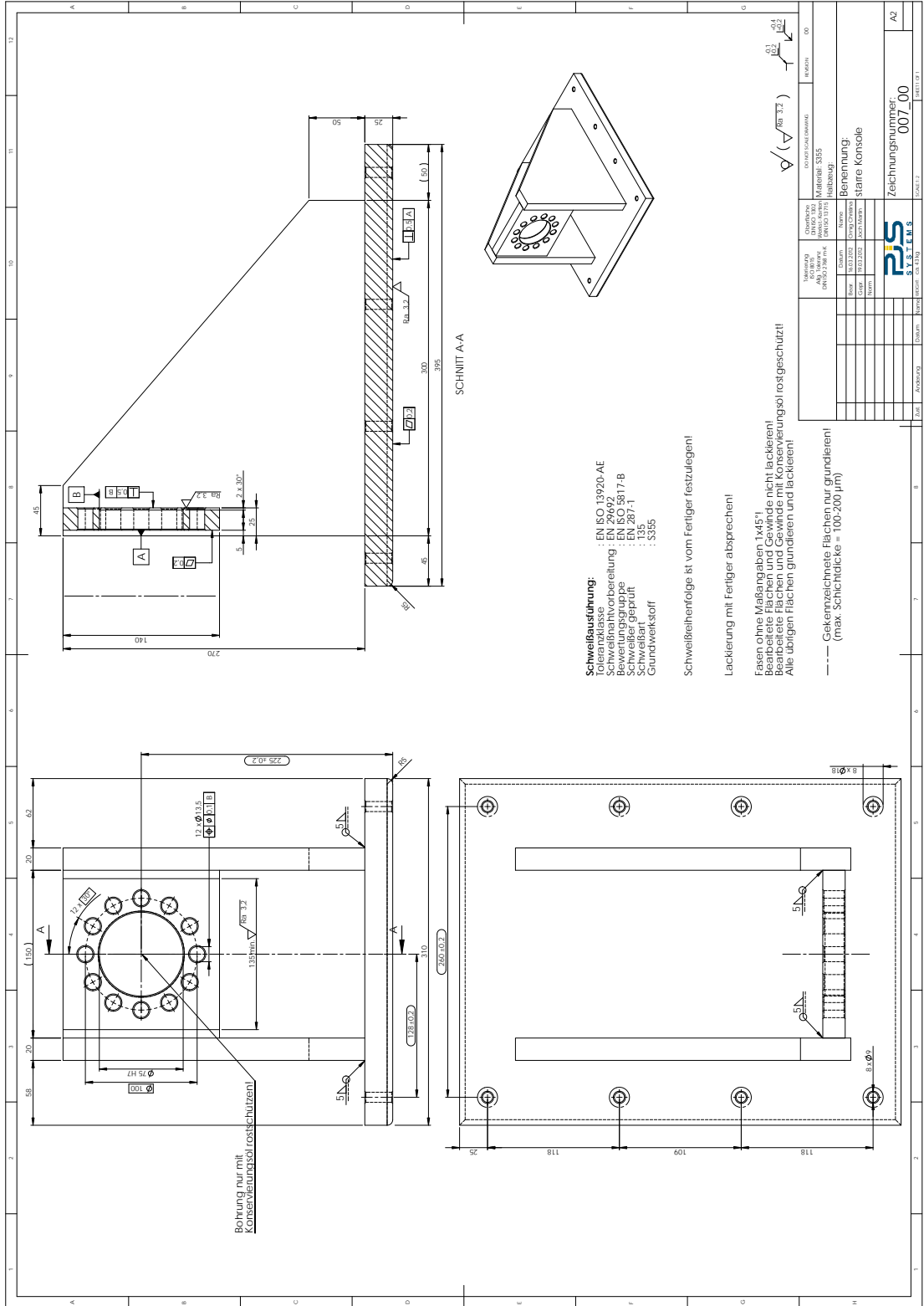


Abbildung A.18.: Befestigung Drehmomentstütze Drehgeber



Projektleitung: DR. RICHARD MAYER Projektingenieur: DR. RICHARD MAYER Projektsachbearbeiter: DR. RICHARD MAYER		Konstruktion: DR. RICHARD MAYER Konstruktion: DR. RICHARD MAYER Konstruktion: DR. RICHARD MAYER		Fertigung: DR. RICHARD MAYER Fertigung: DR. RICHARD MAYER Fertigung: DR. RICHARD MAYER	
Benennung: starre Konsole				Zeichnungsnummer: 007_00	

Abbildung A.19.: starre Konsole