
DIPLOMARBEIT

Herr B. Eng. SFI
Tom Henschel

Modernisierung und Verifizierung einer Umlaufbiegevorrichtung

Mittweida, 2022

Fakultät Ingenieurwissenschaften

DIPLOMARBEIT

Modernisierung und Verifizierung einer Umlaufbiegevorrichtung

Autor:

Herr B. Eng. SFI

Tom Henschel

Studiengang:

Maschinenbau

Seminargruppe:

MB20w1-A

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Kristin Hockauf

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. Markus Hoffmann

Einreichung:

Mittweida, 22.02.2022

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2022

Faculty engineering

DIPLOMA

Modernization and verification of a rotary bending device

author:

Mr. B. Eng. IWE

Tom Henschel

course of studies:

mechanical engineering

seminar group:

MB20w1-A

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Kristin Hockauf

second examiner:

Dipl.-Ing. Markus Hoffmann

submission:

Mittweida, 22.02.2022

defence/ evaluation:

Mittweida, 2022

Bibliografische Beschreibung:

Henschel, Tom:

Modernisierung und Verifizierung einer Umlaufbiegevorrichtung - 2022 –
10, 92, 9 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften,
Diplomarbeit 2022

Referat:

Diese Arbeit setzt sich mit der Modernisierung einer vorhandenen Umlaufbiegeprüfmaschine auseinander. Dabei wird auf unterschiedliche Herangehensweisen der Lagerung eines solchen Aufbaus eingegangen und in der Theorie ausgelegt. Anschließend wird eine Verifizierung sowie ein Ringversuch beispielhaft anhand zweier verfügbarer Umlaufbiegemaschinen durchgeführt, um die Abweichungen zwischen den Maschinen zu ermitteln und miteinander zu vergleichen.

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen	VIII
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Belastungsarten	3
2.2 Der Wöhlerversuch	4
2.3 Versuchsführung	6
2.4 Einflüsse auf die Dauerfestigkeit	7
2.5 Werkstoffgrundlagen	9
3 Problemstellung und Zielsetzung	11
3.1 Aufbau und Wirkungsweise der UBM200	12
3.2 Erzeugen des Biegemoments	16
4 Variantenvergleich	21
4.1 Variante 1: Wälzlager	23
4.2 Variante 2: Gleitlager	26
4.3 Variante 3: Luftlager	27
5 Konstruktive Umgestaltung	31
5.1 Baugruppen	31
5.1.1 Loslagerplatte	31
5.1.2 Festlagerplatte	40
5.1.3 Bodengruppe	45
5.1.4 Krafteinleitung	50
5.2 Wirkungsweise	55
5.3 Stückliste	58

6	Festigkeitsnachweis	61
6.1	<i>Modalanalyse</i>	61
7	Verifikation	65
7.1	<i>Vorbereitung</i>	66
7.2	<i>Durchführung</i>	71
7.3	<i>Auswertung und Ermittlung des Korrekturfaktors</i>	73
8	Ringversuch	75
8.1	<i>Vorbereitung</i>	75
8.2	<i>Durchführung</i>	78
8.3	<i>Auswertung und Vergleich</i>	78
8.3.1	Vergleich der PM3-16 und der PM3-20	78
8.3.2	Vergleich der Modi der PM3-20.....	81
8.3.3	Vergleich zwischen PM3-16 und PM3-20 nachgeregelt.....	83
9	Fazit und Ausblick	85
Literatur	.....	87
Anlagen	.....	91
Anlagen, Teil 1	.....	I
Anlagen, Teil 2	.....	III
Anlagen, Teil 3	.....	V
Selbstständigkeitserklärung	.....

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spannungsverhältnisse R im Spannungs-Zeit-Verlauf [1]	3
Abbildung 2: Die σ -N-Kurve (Wöhlerdiagramm) [1]	5
Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung des Perlschnurverfahrens (links) und des Horizontenverfahrens (rechts) [3]	6
Abbildung 4: Einflüsse auf die Wöhlerlinie	8
Abbildung 5: Bruchfläche eines Ermüdungsbruches [1]	10
Abbildung 6: Aufbau der UBM 200	12
Abbildung 7: Detailansicht der Bodenplatte	14
Abbildung 8: Auflagefläche der Luftlagerung	15
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Drei- bzw. Vier-Punkt-Biegung [10]	16
Abbildung 10: Aufbauschema Methode 1 (oben) und Methode 2 (unten) [11]	17
Abbildung 11: Aufbauschema nach Methode 3 [11]	18
Abbildung 12: Verlauf des Biegemomentes und der Querkraft bei fester Einspannung....	18
Abbildung 13: Verlauf des Biegemomentes und der Querkraft bei 4-Punkt-Biegung	19
Abbildung 14: Schema für die Lagerung der Platten	21
Abbildung 15: Schema für die Linearbewegung	22
Abbildung 16: Schema für die Lasteinleitung	22
Abbildung 17: Flanschlagereinheit [12]	23
Abbildung 18: Kugelrolle [13]	23
Abbildung 19: Gleitlagerplatte aus einer Kupferlegierung [14]	24

Abbildung 20: Prismenführung aus einer Kupfelegierung bzw. C45 Stahl [14]	24
Abbildung 21: Drylin Linear-Schwenkführung [15].....	25
Abbildung 22: originaler Anschlusspunkt des Kraftarmes	25
Abbildung 23: Loslagerplatte mit integriertem Anflanschpunkt.....	26
Abbildung 24: Umsetzung als Kastensystem	26
Abbildung 25: Prinzipieller Aufbau einer aerostatischen Führung [16]	27
Abbildung 26: Konstruktion Bodenplatte und Metapor	27
Abbildung 27: Aufbau belüftete Bodenplatte	28
Abbildung 28: Integrierte Metapor Platten	28
Abbildung 29: Konzeptaufbau der UBM200	29
Abbildung 30: Baugruppe Loslagerplatte.....	31
Abbildung 31: Technische Zeichnung der Loslagerplatte.....	32
Abbildung 32: Technische Zeichnung des Kraftarms	33
Abbildung 33: Technische Zeichnung des Steges.....	35
Abbildung 34: Biegemoment infolge der Querkraft [19].....	35
Abbildung 35: Auswahl der Metapor-Werkstoffe (Portec, 2022).....	36
Abbildung 36: Technische Zeichnung der kleinen Metaporplatte	38
Abbildung 37: Technische Zeichnung des Zapfens.....	39
Abbildung 38: Baugruppe Festlagerplatte	40
Abbildung 39: Ermittlung der Bohrungsposition nach der Verschiebung.....	40
Abbildung 40: Technische Zeichnung der Festlagerplatte.....	41
Abbildung 41: Technische Zeichnung des Kraftarmes	42
Abbildung 42: Technische Zeichnung der großen Metapor-Platten	43

Abbildungsverzeichnis	V
Abbildung 43: Endbearbeitung der Lagerplatten im Zusammenbau	44
Abbildung 44: Schwerpunkt der Festlagerplatte	44
Abbildung 45: Baugruppe Bodengruppe.....	45
Abbildung 46: Technische Zeichnung der Bodenplatte	46
Abbildung 47: Technische Zeichnung des Zapfenaufnahmebockes	48
Abbildung 48: Toleranzen nach ISO 286 [23].....	49
Abbildung 49: Baugruppe Krafteinleitung	50
Abbildung 50: Technische Zeichnung der Verbindungswelle	51
Abbildung 51: Technische Zeichnung der Rändelmutter	52
Abbildung 52: Schnittansicht der Handrad-Verstellung	53
Abbildung 53: Technische Zeichnung des Lagergehäuses	53
Abbildung 54: Technische Zeichnung des Lagerdeckels	54
Abbildung 55: Konzept und Schnittansicht der Prüfachse.....	55
Abbildung 56: Direktspannzange Typ 574E mit Steilkegel [26].....	55
Abbildung 57: Ausschnitt zum Festziehen der Zugspannzangen.....	56
Abbildung 58: seitliche Darstellung der variablen Prüflängen	56
Abbildung 59: Beispielhafte Darstellung der ausgelenkten Lagerplatten von oben.....	57
Abbildung 60: Amplituden in der Nähe der Eigenfrequenz [30].....	62
Abbildung 61: Fließschema der Verifizierung	65
Abbildung 62: Form- und Lagetoleranzen für eine mit DMS applizierte Probe [11].....	68
Abbildung 63: schematische Probenformen [11]	69
Abbildung 64: Technische Zeichnung der Verifizierungsprobe	70
Abbildung 65: Eingespannte DMS-applizierte Probe; links: PM3-16, rechts: PM3-20	72

Abbildung 66: Draufsicht auf die Prüfmaschinen Sincotec 3-16 (links) und Sincotec PM3-20 (rechts).....	76
Abbildung 67: Technische Zeichnung der Umlaufbiegeprobe	77
Abbildung 68: Ermittelte Zeitfestigkeitsgerade der PM3-16, ohne Durchläufer	79
Abbildung 69: Ermittelte Zeitfestigkeitsgerade der PM3-20, ohne Nachregelung	79
Abbildung 70: Vergleich der Zeitfestigkeitsgeraden von PM3-16 und PM3-20	80
Abbildung 71: Ermittelte Zeitfestigkeitsgerade der PM3-20, mit Nachregelung	81
Abbildung 72: Vergleich der beiden Modi der PM3-20	82
Abbildung 73: Vergleich der PM3-16 und der PM3-20 - nachgeregelt	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufbau der Maschine	13
Tabelle 2: Vergleich der Führungen	47
Tabelle 3: Auszug der Stückliste	59
Tabelle 4: Werkstoffkennwerte der verwendeten Materialien	61
Tabelle 5: Eigenfrequenzen der Baugruppen	63
Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung 42CrMo4 in %.....	66
Tabelle 7: Festigkeitswerte von Vergütungsstählen	67
Tabelle 8: Auszug der Dokumentation, Durchlauf 1 von 6	72

Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen

A	Querschnitt
A_E	Einspannquerschnitt
ATB	Motorenhersteller
A2	Festigkeitsklasse nicht rostender Schrauben
bzw.	beziehungsweise
C	Dynamische Tragzahl
C₀	Statische Tragzahl
ca.	circa
c_F	Korrekturfaktor
d	Durchmesser
DIN	Deutsches Institut für Normung
E	E-Modul
ε	Dehnung
F	Prüfkraft
f	Frequenz
f₀	Eigenfrequenz
FEM	Finite-Elemente-Methode
FLS	Flansch-Lang-Standardhöhe
F_v	Tatsächlich wirkende Kraft
F_{0max}	Maximale statische Belastung
Glg	Gleichung
HB	Härteangabe nach Brinell
Hz	Hertz
ISO	Internationale Organisation für Normung
K	Konstante zur Beschreibung der Zeitfestigkeitsgeraden
k	Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden
kg	Kilogramm
K_s	Verschleißrate
L	Länge/ Hebelarmlänge
l_e	Mindesteinschraubtiefe
L_w	Wunschlänge der Schiene
log	Logarithmus
L₁₀	Nominelle Lebensdauer
M	Moment

m	Masse
m/s²	Meter pro Quadratsekunde
M_b	Biegemoment
MPa	Megapascal
MPFZ	Gleitlagerbuchse mit Bund
MPTZ	Gleitlagerbuchse mit Flansch
µm	Mikrometer
min	Minute
MKJ	Diagramm nach Moore Kommers Jasper
mm	Millimeter
mm²	Quadratmillimeter
N	Newton
n	Anzahl
N_D	Schwingspielzahl
Nm	Newtonmeter
N/mm²	Newton pro Quadratmillimeter
P	Druck
PM3-16	Sincotec Prüfmaschine 3-16
PM3-20	Sincotec Prüfmaschine 3-20
P_Ü	Überlebenswahrscheinlichkeit
R	Spannungsverhältnis
r	Radius
R_m	Zugfestigkeit
R_{P0,2}	Dehngrenze
R_Z	Oberflächenrauheit
S	Nennbiegespannung
SKF	Svenska Kugellagerfabrik
SK40	Werkzeugaufnahme mit Steilkegel
S_{max}	maximale Nennbiegespannung
SNL	Stehlagergehäuse
S_V	Tatsächlich wirkende Nennbiegespannung
S₀	Statische Tragsicherheit
Δσ	Spannungsschwingbreite
σ_a	Spannungsamplitude
σ_i	Normalspannungskomponente
σ_m	Mittelspannung
σ_o	Oberspannung
σ_u	Unterspannung
σ_v	Vergleichsspannung

T	Temperatur
t	Gewindetiefe
T_R	Reibungszeit
T₂	Teilung der Schiene
τ	Schubspannung
U	Umdrehung
UBM 200 tc	Umlaufbiegemaschine der Firma Zwick Roell
V	Geschwindigkeit
v	Querdehnzahl
v_c	Schnittgeschwindigkeit
v_f	Vorschubgeschwindigkeit
W	Widerstandsmoment
W_i	Verschleißintensität

1 Einleitung

Täglich werden Bauteile beansprucht. Dabei treten neben statischen Belastungen, also einer Last, die bis zu einem bestimmten Punkt steigt und anschließend konstant ist, ebenfalls zyklische Beanspruchungen auf. Diese können auch bei deutlich geringerer Belastung zu erheblichen Schäden an Bauteilen führen. Genannt wird diese Erscheinung Werkstoffermüdung. Sie beschreibt einen langsamen aber ständig fortschreitenden Schädigungsprozess im Material, bei dem es zu einer Funktionsuntüchtigkeit oder sogar zum Totalausfall eines kompletten Systems kommen kann. Viele Faktoren, vor allem aus der direkten Umgebung, haben einen großen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit eines Werkstoffes.

Daher haben zyklisch belastete Bauteile nur eine begrenzte Lebensdauer. Mithilfe von Werkstoffproben, Bauteilen oder vollständigen Konstruktionen werden Ermüdungsversuche durchgeführt, um die Auswirkung der unterschiedlichsten Einflüsse zu untersuchen. Um diese Versuche realisieren zu können, sind geeignete Maschinen und spezielle Vorrichtungen einzusetzen. Es ist erforderlich, dass eine entsprechend hohe Anzahl an Prüfungen unter den gleichen Bedingungen getestet werden, damit eine statistisch gesicherte Aussage über spezielle Faktoren getroffen werden kann.

Es gibt verschiedene Verfahren, um Bauteile und Werkstoffe zu prüfen. Neben Schwingprüfmaschinen und Resonatoren werden Umlaufbiegemaschinen zur Ermittlung von Lebensdauern in vielen verschiedenen Branchen eingesetzt. Bei der Umlaufbiegung werden Rundproben, wie sie zum Beispiel an Eisenbahnwagen vorzufinden sind, bis zum Bruch oder bis zum Erreichen einer definierten Grenzschwingspielzahl geprüft. Je nach Höhe der Belastung und Eigenschaften des Werkstoffes, versagt die Probe nach unterschiedlichen Schwingspielzahlen. Die Ergebnisse werden anschließend meist anschaulich in einem Wöhlerdiagramm dargestellt und ausgewertet.

2018 wurde die Norm für die metallische Werkstoffprüfung, speziell die der Umlaufbiegung, aktualisiert, wodurch ein bereits vorhandener Prüfaufbau nicht mehr zulässig ist. Es bedarf einiger konstruktiver Änderungen, um die Maschine modernisiert wieder in Betrieb nehmen zu können und verwertbare Ergebnisse zu erzielen.

Die Zielstellung dieser Arbeit ist es, mögliche Varianten des neuen Aufbaus einer Umlaufbiegeprüfmaschine mit ihren Vor- und Nachteilen darzustellen und die normkonforme Konstruktion der gewählten Variante auszuarbeiten. Die Verifikation kann dabei nur in der Theorie beschrieben werden, da die Kosten für das Vollenden des Projektes leider nicht gedeckt werden konnten. Um dennoch einen werkstofflichen Ringversuch durchzuführen, werden die Ergebnisse von zwei ähnlichen Umlaufbiegemaschinen in drei Modi miteinander verglichen. Dieser dient als Anleitung für eine spätere Projektarbeit, die sich mit der Montage und der Verifizierung des Konzeptes auseinandersetzen könnte.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Belastungsarten

Aufgrund des Ermüdungsfestigkeitsnachweises von Materialien ist es nicht ausreichend, sich ausschließlich auf den maximal auftretenden Beanspruchungszustand zu konzentrieren und mit einem unter statischer Belastung ermittelnden Festigkeitskennwert zuzüglich eines Sicherheitsfaktors zu vergleichen. Dadurch rückt der komplette Bereich der Beanspruchung in den Vordergrund. Diese Beanspruchung bzw. die Beanspruchbarkeit wird am gebräuchlichsten durch mechanische Spannungen oder Kräfte angegeben. Reale Verläufe von Belastungen sind zeitabhängig (siehe Abbildung 1). Daraus geht hervor, dass sich Beanspruchungen im Vorzeichen ändern können. Bleibt das Vorzeichen über die Zeit gleich, werden diese schwellende Belastungen genannt. Andernfalls sind sie als wechselnde Beanspruchung deklariert. Während schwellende Normalspannungen im Druck- oder Zugbereich liegen, besitzen wechselnde Beanspruchungen Anteile von beiden Bereichen. Beim Umlaufbiegeversuch entsteht durch die Rotation der Probe eine reine Wechselbeanspruchung mit dem Spannungsverhältnis $R = -1$ an der Oberfläche des Prüflings [1].

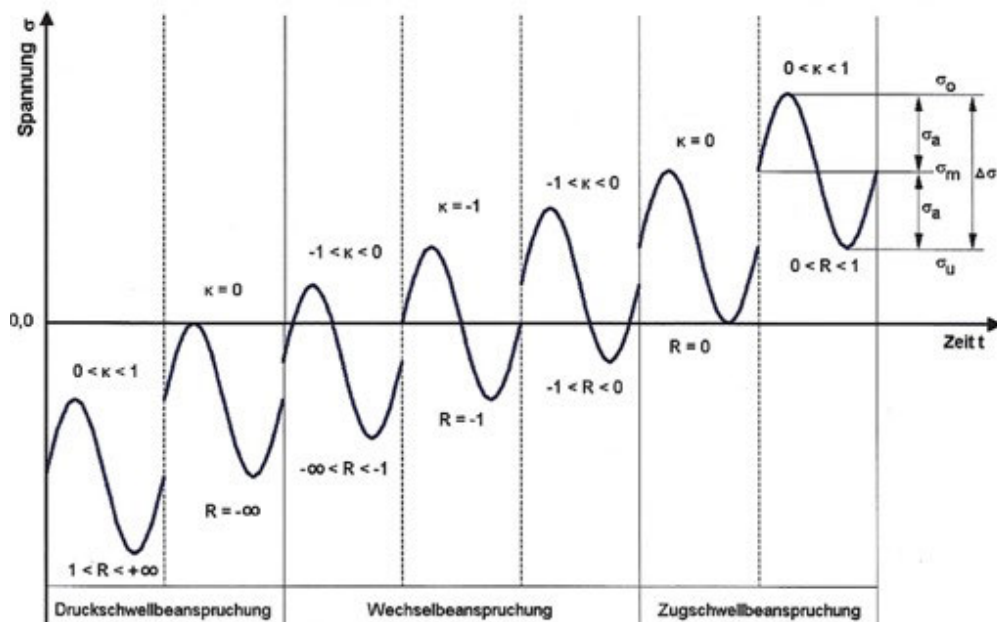


Abbildung 1: Spannungsverhältnisse R im Spannungs-Zeit-Verlauf [1]

Der Maximalwert ist im Spannungs-Zeit-Verlauf als Oberspannung σ_o bezeichnet, der Minimalwert ist als Unterspannung σ_u gekennzeichnet. Aus diesen beiden Werten lässt sich die Mittelspannung σ_m nach Glg. (2.1) ermitteln. Der Abstand zwischen der Mittelspannung und der Oberspannung bzw. Unterspannung wird als Spannungsamplitude σ_a angegeben. Die Schwingbreite $\Delta\sigma$ kennzeichnet den Abstand zwischen Ober- und Unterspannung [1].

$$\sigma_m = \frac{(\max \sigma + \min \sigma)}{2} \quad (2.1)$$

Weiterhin sind R bzw. κ als Spannungsverhältnis eine weitere wichtige Kenngröße. Sie sind für schwellende Zugbeanspruchung und wechselnde Beanspruchung mit mehr Zuganteil gleich, unterscheiden sich hingegen bei schwellender Druckbelastung und wechselnder Belastung mit mehr Druckanteil. Erreicht die Beanspruchung bei jeglichem Schwingspiel den Maximal- sowie Minimalwert, so wird sie als einstufige Belastung bezeichnet [1].

2.2 Der Wöhlerversuch

Der Wöhlerversuch wird auch häufig als Einstufen-Versuch deklariert und ist in der DIN 50100 als Dauerschwing-Versuch genormt. Er wird als die elementarste Form zur Ermittlung von Ermüdungsfestigkeiten angesehen. Das Wöhlerdiagramm, auch σ -N-Kurve genannt, beschreibt den Zusammenhang zwischen der Beanspruchbarkeit von Werkstoffen oder Konstruktionsdetails und der Schwingspielzahl N. Während dieser Prüfung wird der Prüfquerschnitt dauerhaft mit einer Belastung gleichbleibender Amplitude und einem konstanten Mittelwert beansprucht. Die Bauart und das Regelverhalten der Prüfmaschine bestimmen dabei maßgeblich die sinusförmige Beanspruchungs-Zeit-Funktion. Das Versuchsergebnis bezeichnet dabei die bis zum Schwingbruch ertragene Schwingspielzahl. Um daraus eine Wöhlerlinie zu erstellen, sind mehrere Wöhlerversuche auf unterschiedlichen Beanspruchungshöhen, den Spannungsamplituden, notwendig, wobei die Versuchsergebnisse streuen. Das bedeutet, dass die Ergebnisse als Datenpunktwolke ohne einen funktionalen Zusammenhang vorliegen. Häufig wird daraus mittels Regressionsmethoden eine Ausgleichsfunktion erstellt (siehe Abbildung 2). Bei Ermüdungsversuchen wird die Oberspannung σ_o , die Unterspannung σ_u oder die Schwingbreite $\Delta\sigma$ abhängig von der Schwingspielzahl N ermittelt. Das Wöhlerdiagramm wird dabei doppelt logarithmisch dargestellt. Jede Schwingprobe entspricht exakt einem Punkt im Graphen [2].

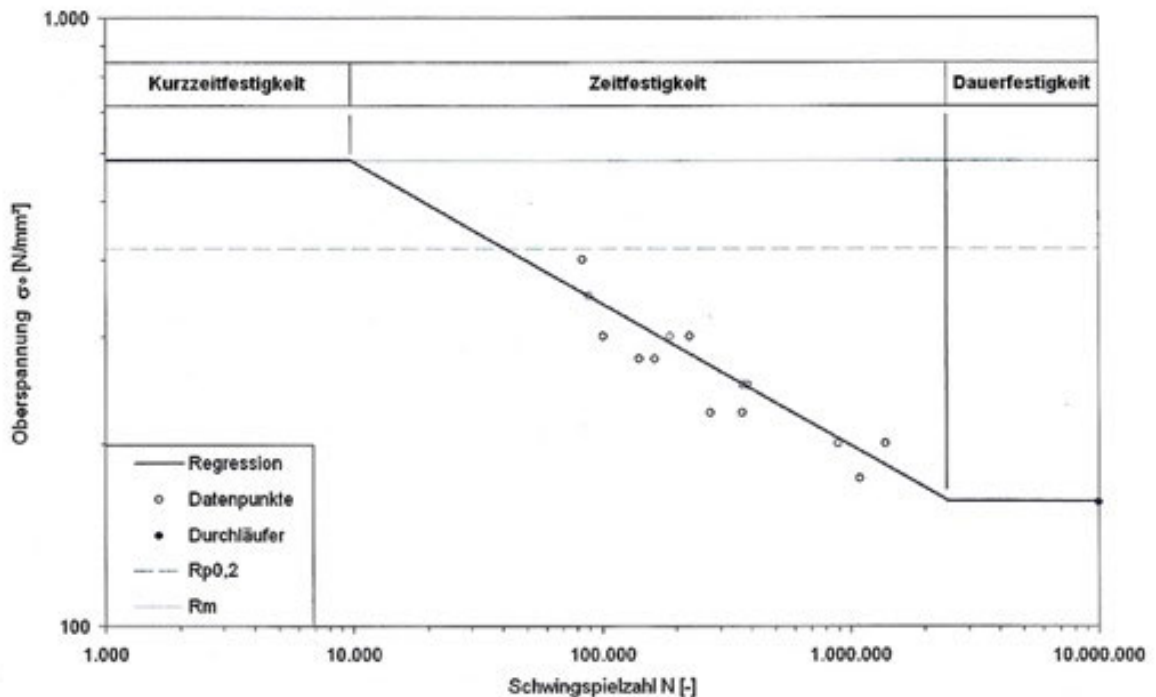


Abbildung 2: Die σ -N-Kurve (Wöhlerdiagramm) [1]

Das Wöhlerdiagramm wird in die Abschnitte Kurzzeitfestigkeit, Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit eingeteilt, obwohl die Angaben in der Wöhlerlinie nicht abhängig von der Zeit sind. Die Übergänge dazwischen sind in der Praxis fließend, werden jedoch für die rechnerische Betrachtung als Abknickpunkte, welche von mehreren Faktoren abhängen, angenommen [1].

Für eine einfache Darstellung des Kurzzeitfestigkeitsbereiches werden die statischen Festigkeitskennwerte, wie sie beispielsweise aus einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm für den jeweiligen Werkstoff hervorgehen, verwendet. Dies dient der anschaulichen Ausführung, da bei einer geringen Anzahl von Schwingspielen von einer überwiegend ruhenden Belastung ausgegangen werden kann [1].

Im Bereich der Zeitfestigkeit nimmt die Anzahl aufzunehmender Schwingspiele zu, während die Größe der aufzubringenden Spannungen ständig abnimmt. Die entstehende Gerade kann dabei nach Glg. (2.2) beschrieben werden.

$$\Delta \sigma = \left(\frac{C}{N} \right)^{\overline{m}} \quad (2.2)$$

In der Praxis werden neben der Zeitfestigkeitsgeraden zusätzliche Linien für die Überlebenswahrscheinlichkeit angegeben, welche parallel verlaufen. Vorzugsweise sind dafür Überlebenswahrscheinlichkeiten von $P_{\bar{0}} = 90\%$ und $P_{\bar{0}} = 95\%$ dargestellt. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Verteilung der einzelnen Ergebnisse um die Regressionsgerade nach der Gauß'schen Normalverteilung verläuft [1].

Der Dauerfestigkeitsbereich gibt an, dass die aufgebrauchte Spannung unendlich oft ohne Versagen des Materials ertragen werden kann. Dieser Bereich beginnt je nach Labor häufig ab $2 \cdot 10^6$, $3 \cdot 10^6$ oder erst ab 10^7 Lastwechseln. Es gibt verschiedene Ansätze zur Ermittlung der Schädigung in diesem Bereich, wie die Miner-Regeln [1].

2.3 Versuchsführung

Um die Dauerfestigkeit eines Werkstoffes zu ermitteln, gibt es verschiedene Verfahren, die eingesetzt werden können. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die Versuche nach dem Perlschnurverfahren oder dem Horizontenverfahren durchzuführen. Während beim Perlschnurverfahren für jede Spannungsamplitude nur ein Prüfling bis zur Grenzschwingspielzahl getestet wird, werden beim Horizontenverfahren mehrere Proben auf jeder Spannungsamplitude bis zum Bruch geprüft (siehe Abbildung 3) [3].

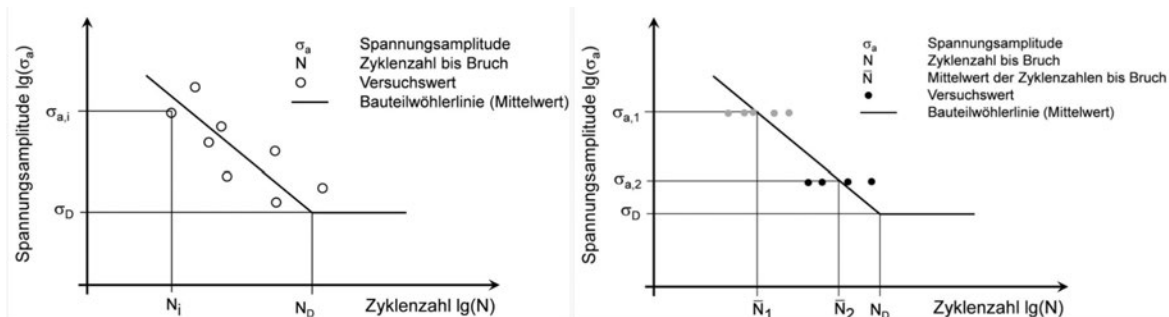


Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung des Perlschnurverfahrens (links) und des Horizontenverfahrens (rechts) [3]

Das Perlschnurverfahren wird häufig verwendet, wenn wenig über den zu prüfenden Werkstoff bekannt ist, um den mittleren Verlauf der Wöhlerlinie mit geringem Aufwand zu bestimmen. Die Ergebnisse sind dabei sehr aussagekräftig, da die Versuche über einen breiten Bereich der Wöhlerkurve platziert werden können. Die Streuungen können allerdings nur unvoreteilhaft, unter der Annahme einer von der Last unabhängigen Streuung, verwertet werden [1].

Als Vorteile des Horizontenverfahrens können dabei die gute Bestimmung der Streuung in Abhängigkeit der Last und eine äußerst genaue Möglichkeit zur Ermittlung der Neigung der Wöhlerlinie angesehen werden, wenn die Lasthorizonte weit voneinander entfernt platziert sind. Nachteilig ist lediglich die aufwendige Versuchsplanung, um die Spannungsamplituden möglichst zweckmäßig anzusetzen. Dafür wird meist spezielles Vorwissen über das Werkstoffverhalten benötigt [3].

2.4 Einflüsse auf die Dauerfestigkeit

Wie auch die Wöhlerlinie selbst, hängt die Dauerfestigkeit von unterschiedlichen Parametern ab. In Versuchen hat sich gezeigt, dass sich die Ermüdungsfestigkeit eines Werkstoffes direkt proportional zu seinen statischen Festigkeitskennwerten und dem Plastifizierungsvermögen verhält. Je höher die Festigkeitskennwerte liegen, desto höher liegen auch die Wöhlerlinien. Hinzukommen weitere materialseitige Einflüsse wie Duktilität, Korngröße, Wärmebehandlung sowie Fehlstellen und Einschlüsse im Material [1, 4].

Eine weitere Einflussgröße auf die Ermüdungsfestigkeit von Werkstoffen ist die Oberflächengüte. Durch den Herstellungs- oder Bearbeitungsprozess wirkt das erzeugte Rauheitsprofil auf der Bauteiloberfläche in Zusammenhang mit der Mikrostruktur an der Oberfläche wie eine Kerbe. Polierte Flächen weisen dabei die kleinsten Kerben und somit augenscheinlich eine höhere Festigkeit auf [2].

Die nächste große Auswirkung auf die Dauerfestigkeit haben jegliche Arten von Spannungen. Meist werden Beanspruchungen mithilfe der technischen Mechanik ermittelt, wobei strukturbedingte Spannungen außer Acht gelassen werden. Diese werden erst bei der Beanspruchbarkeit berücksichtigt, was dazu führt, dass die Wöhlerlinie bei Strukturen mit geringen lokalen Spannungskonzentrationen höher liegt als bei Strukturdetails mit erhöhten lokalen Spannungskonzentrationen. Bei Kerben, wie sie zum Beispiel bei Schweißnahtübergängen auftreten können, kommt es zu erheblich großen Spannungsspitzen. Die Höhe dieser Konzentrationen ist abhängig von der Kerbgeometrie und dem Spannungsverlauf. Dabei können die Kerben ausgerundet werden, um die Auswirkungen auf die Ermüdungsfestigkeit zu verringern. Je höher die Spannungskonzentration an den Kerben ist, desto geringer ist die Dauerfestigkeit [5].

Weiterhin entstehen Eigenspannungen bei nahezu allen Behandlungen und Fertigungsprozessen. Diese können Werte bis hin zur Streckgrenze annehmen und lassen sich in Druckeigenspannungen, welche einem Anriss entgegenwirken und sich damit positiv auswirken, sowie Zugeigenspannungen, die die Dauerfestigkeit deutlich senken können, einteilen. Bei Konstruktionen mit großen Zugeigenspannungen, wie sie beispielsweise bei Schweißnähten auftreten können, bedarf es einer thermischen oder mechanischen Oberflächennachbehandlung zum Abbau dieser Spannungen [6].

Auch die Bauteilgröße hat einen gewissen Einfluss durch verschiedene Mechanismen. Dazu zählen technologische Einflüsse, wie die Randschichtdicke und -festigkeit sowie die Oberflächenverfestigung. Die Größe des beanspruchten Volumens bestimmt, wie viele Fehlstellen im Bauteil vorkommen können, die zu einer erhöhten Belastung führen. Der Spannungsgradient gibt dabei die Stützwirkung des umliegenden Materials an. Je höher diese Stützwirkung ist, desto besser ist das Ermüdungsverhalten des Werkstoffes, wobei ein kleineres Bauteil bei gleicher Geometrie und gleichen Spannungen immer ein besseres Ermüdungsverhalten aufweist [1].

Durch Korrosion wird der tragende Querschnitt fortschreitend geschwächt, wodurch Spannungskonzentrationen an den Übergängen entstehen. Sie sind für das Entstehen von Anrissen, bei denen erhöhte Spannungen am Rissende auftreten verantwortlich und unterstützen gleichzeitig das Risswachstum [1].

Bei hohen Temperaturen sinkt neben den statischen Festigkeitskennwerten zusätzlich die Ermüdungsfestigkeit, während sie bei tiefen Temperaturen bei den meisten Materialien ansteigt. Dabei wirken sich diese allerdings sehr nachteilig auf die Neigung zum Sprödbruch aus. Die Einflüsse sind in der Abbildung 4 anschaulich dargestellt [7].

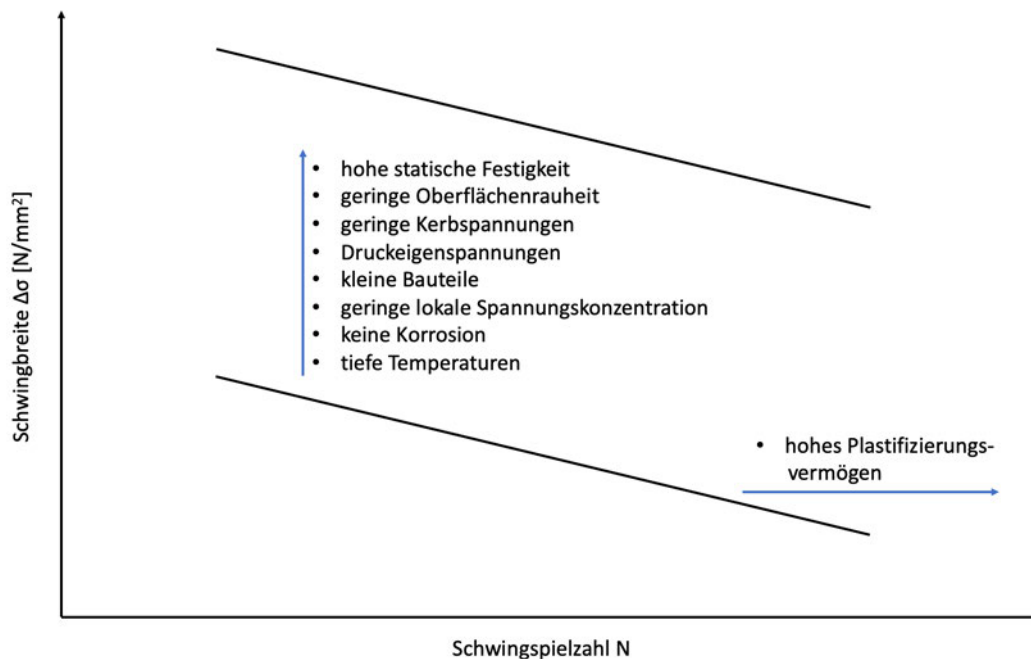


Abbildung 4: Einflüsse auf die Wöhlerlinie

Weitere Optionen zur Darstellung der Dauerfestigkeit sind das Smith-Diagramm, was zur Ermittlung und Beurteilung von experimentellen Spannungen verwendet wird und das Haigh-Diagramm, welches häufig im Maschinenbau angewendet wird. Im Schienenfahrzeugbau findet bevorzugt das Diagramm nach Moore, Kommers und Jasper (MKJ) seine Verwendung [1].

2.5 Werkstoffgrundlagen

Alle metallischen Werkstoffe weisen ein kristallines Gefüge auf, welches durch die Erstarung über das räumlich periodische Anlagern von Atomen an einen oder mehrere Kristallkeime entsteht. Diese Atome unterliegen Anziehungs- und Abstoßungskräften zueinander und bilden ein periodisches Raumgitter. Bei diesem Raumgitter ist davon auszugehen, dass das ideale Kristallgitter durch Gitterfehler in der Realität beeinträchtigt wird. Dazu gehören nulldimensionale Fehler, wie Leerstellen, Fremdatome oder Zwischengitteratome, eindimensionale Fehler, die sich in Versetzungen äußern, zweidimensionale Gitterfehler, wie Korn- und Phasengrenzen sowie Stapelfehler und dreidimensionale Fehler, bei denen eine Ansammlung von Fehlstellen, Phasen oder Einschlüssen zum Tragen kommen [8].

Es besteht für feste Körper ein direkter Zusammenhang zwischen Spannungen und Deformation nach der klassischen Elastizitätstheorie. Beim elastischen Verhalten geht die Verformung nach der Entlastung komplett zurück, während eine plastische Verformung eine dauerhafte Formänderung charakterisiert. Diese plastische Formänderung ist hauptsächlich auf Gleitung zurückzuführen. Das bedeutet, dass die vorher genannten Versetzungen im Kristallgitter dazu führen, dass benachbarte Kristallteile unter der Einwirkung von Schubspannung auf einer Gleitebene in eine längs ausgezeichnete kristallografische Richtung abgleiten. Dabei wird die Kristallstruktur nicht verändert. Dies geschieht nach Überschreiten der kritischen Schubspannung und muss ständig erhöht werden, um die Abgleitung zu vergrößern. Durch unterschiedliche Mechanismen kann es zu Neubildungen und Vermehrung der Versetzungen kommen. Bei einer zyklischen Belastung bilden sich dadurch Ermüdungsgleitbänder in oberflächennahen Werkstoffbereichen aus, welche sich in 45° zur Beanspruchungsrichtung an die Werkstoffoberfläche bewegen. Dies ist die Ebene der maximalen Schubspannung zur angelegten Normalspannung. An der Oberfläche entstehen dadurch Ex- und Intrusionen, die wie scharfe Kerben wirken und Mikrorisse initiieren, welche parallel zu den Gleitbändern verlaufen. Weitere Ursachen für eine Rissbildung an der Oberfläche sind inhomogene Beanspruchungen, die durch Biegung, Torsion oder an äußeren Kerben auftreten können sowie oberflächennahe Fehlstellen, die damit als Spannungskonzentrator wirken. Der Anriss ist somit empfindlich abhängig von der Oberflächenrauheit, dem oberflächennahen Werkstoffzustand und den Umgebungsbedingungen an der Oberfläche. Unter bestimmten Umständen ist jedoch auch eine Rissbildung im inneren des Werkstoffes an Grenzflächen möglich. Sie treten häufig an Hohlräumen oder Einschlüssen auf [8].

Es schließt sich ein Lebensdauerintervall an das Stadium der Rissbildung an. In diesem entwickelt sich aus der anfänglichen Risspopulation der Hauptriss, der zum Bruch führt. Während des Kurzrisstadiums wird die Rissausbreitung durch die Nennbelastung gesteuert und ist durch eine Wechselwirkung der Rissspitze mit dem Werkstoffgefüge gekennzeichnet. Sobald der Riss eine Abmessung von circa einem Millimeter aufweist, gilt er als Makroriss. Mit diesem Übergang erfolgt ebenso eine Änderung der mikroskopischen Rissausbreitungsebene. Der Verlauf des Ermüdungsrisses folgt anschließend der Ebene

mit der größten Hauptnormalspannung, also 90° statt 45° . Die hohen Beanspruchungen an der Rissspitze erzwingen eine Vielfachgleitung und eine immer weiterführende Rissausbreitung. Durch die ständige Wechselbelastung schreitet der Riss beim Zuganteil weiter fort, während er bei der Druckbelastung durch Zudrücken gehemmt wird. Dieses Verhalten macht sich ebenfalls im Bruchbild durch Wellenlinien, den sogenannten Rast- oder Schwingungslinien, auf der Bruchfläche bemerkbar, die senkrecht zur örtlichen Rissausbreitung verlaufen (siehe Abbildung 5). Weiterhin ist diese Fläche durch eine verformungsarme, glatte, sprödebruchartige Oberfläche gekennzeichnet. Im weiteren Verlauf der Beanspruchung wird der Querschnitt des Werkstoffes immer weiter verringert, bis es schließlich zum kompletten Bruch kommt. Die Oberfläche des Restbruches ist abhängig von der Duktilität des Werkstoffes. Bei spröden Werkstoffen ist der Restbruch sprödebruchartig, während er bei duktilen Werkstoffen wie ein Verformungsbruch erscheint, bei dem plastische Deformationen erkennbar sind [8].

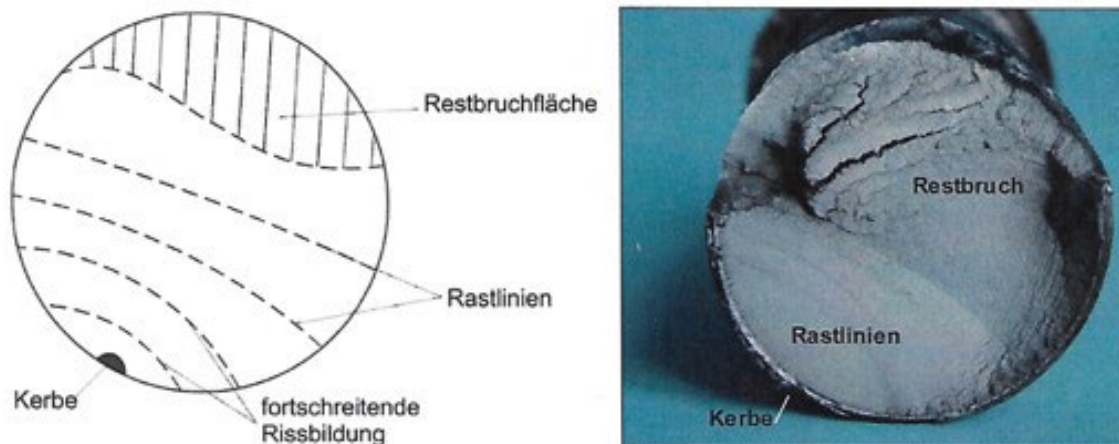


Abbildung 5: Bruchfläche eines Ermüdungsbruches [1]

3 Problemstellung und Zielsetzung

Dieses Kapitel erläutert den Prüfaufbau der vorhandenen Umlaufbiegevorrichtung, deren Wirkungsweise und der sich daraus ergebenden Problemstellung, aufgrund der Aktualisierung der Normung für Umlaufbiegeversuche. Diese wird im Anschluss unter der Betrachtung der statischen Systeme sowie dem Unterschied einer Vier-Punkt-Biegung zu einem statischen Biegebalken näher verdeutlicht.

3.1 Aufbau und Wirkungsweise der UBM200

Die vorhandene Umlaufbiegeprüfmaschine UBM 200 tc (siehe Abbildung 6) ist von der Marke Zwick Roell. Sie wird beim Umlaufbiegeversuch nach DIN 50113 zur Ermittlung der Biegewechselfestigkeit bei Rundproben und beim Dauerschwingversuch nach DIN 50100 verwendet. Die Probe wird bei beiden Anwendungen wechselnd beansprucht. Die höchste Beanspruchung findet dabei an der Probenoberfläche der Prüflinge statt. Als Besonderheit ist das hohe Biegemoment zu nennen, welches sich auf 200 Nm beläuft, während die anderen Maschinen ein maximales Biegemoment von 100 Nm aufbringen können [9].

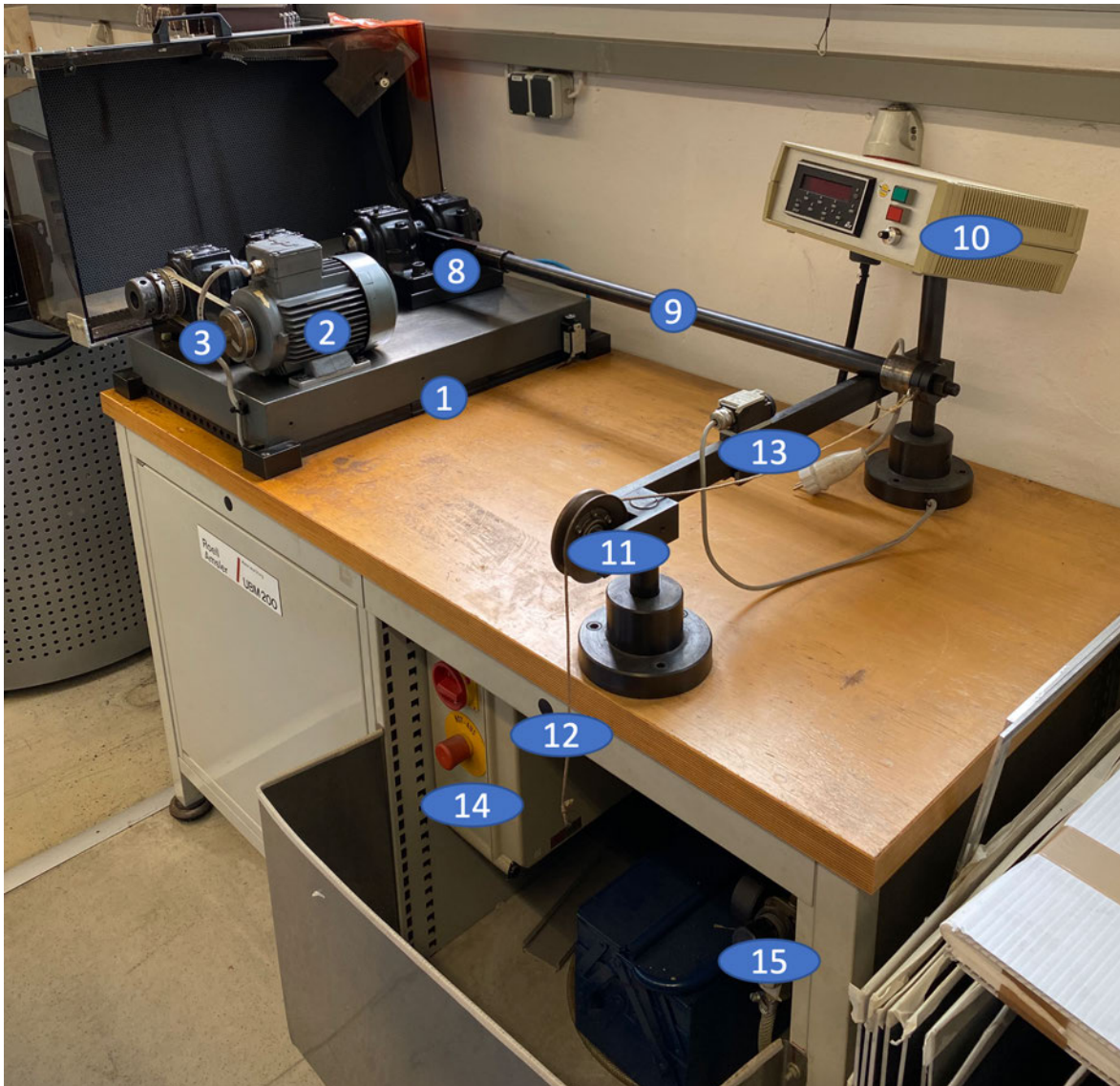


Abbildung 6: Aufbau der UBM 200

Der Aufbau der Prüfmaschine besteht aus folgenden Komponenten (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Aufbau der Maschine

Nr.	Bauteil
1	Bodenplatte mit Dämpfungsmatte
2	ATB-Motor
3	Riementrieb
4	Einspannung bzw. Spannzangen
5	SKF-Lagerböcke SNL 511-609
6	Drehzahlsensor
7	Anschluss der Luftleitungen
8	Verbindung Kraftarm - Loslagerplatte
9	Kraftarm
10	Zyklen-Anzeige
11	Umlenkrolle mit Seil zur Lasteinleitung
12	Erzeugung des Biegemomentes mittels Gewichtskraft (Masse)
13	Ausschalter bei Bruch
14	Frequenzumrichter mit Startschalter und Not-Aus
15	Druckluftversorgung

Die gesamte Konstruktion befindet sich auf einer Holztischplatte (siehe Abbildung 7), wobei die metallische Bodenplatte (1) mit einer Matte gedämpft ist und an den Ecken durch Winkel fest mit der Tischplatte verbunden ist. Die Anzeige und die Schiene sind ebenfalls auf der Tischplatte verschraubt. Der Motor (2) treibt in dieser Konstruktion mithilfe des Riementriebes (3) direkt daneben eine Welle an, an welcher sich die Einspannung (4) und die jeweiligen Spannzangen (4) befinden. Die Lagerung der Welle erfolgt in zwei Lagerböcken (5). Damit ist die antreibende Seite als Baugruppe fest mit der Bodenplatte verschraubt und dient somit als Festlager. Der Motor wird mittels Frequenzumrichter (14) angesteuert und kann dabei die Drehzahl beliebig variieren. Sobald eine Probe eingespannt ist, wird diese ebenfalls mit der eingestellten Drehzahl angetrieben. Die Welle, inklusive der Einspannung und der Probe, wird auch hier in den beiden Lagerböcken gehalten.

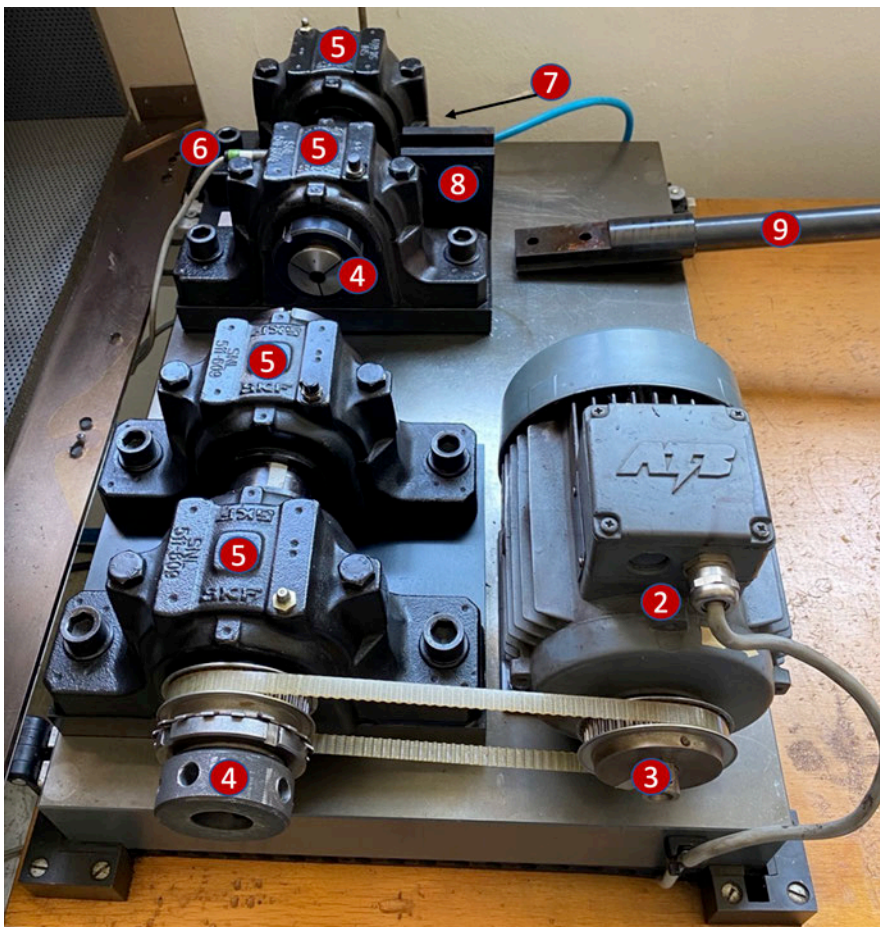


Abbildung 7: Detailansicht der Bodenplatte

Im Gegensatz zur antreibenden Seite ist die angetriebene Loslagerplatte mittels eines Luftfilms auf der Bodenplatte gleitgelagert. Die beiden Druckluftanschlüsse (7) befinden sich hierbei auf der Hinterseite des Aufbaus und sind in Reihe geschaltet. Der voreingestellte Druck am Manometer (15) unter dem Tisch wird in zwei Luftkanäle im Inneren der kleinen Lagerplatte aufgeteilt, welche durch eine extra Drossel geteilt sind. Die Ausströmung verläuft über vier Kreisflächen und jeweils einem Kreisring auf der Unterseite (siehe

Abbildung 8). Der Drehzahlsensor (6) misst dabei über einen kleinen Zapfen, welcher auf der Welle angebracht ist, die vorherrschende Drehzahl auf der nicht angetriebenen Seite zwischen den Lagerböcken. Über diese wird die Zyklenzahl ermittelt und an der Anzeige (10) ausgegeben. Des Weiteren lässt sich darüber die Grenzschwingspielzahl einstellen. Die weiteren Funktionen sind schwer nachvollziehbar, da keine Anleitungen dazu vorliegen.



Abbildung 8: Auflagefläche der Luftlagerung

Der Kraftarm (9) ist mit zwei Bolzen (8) an der luftgelagerten Loslagerplatte exakt auf gleicher Höhe der Probenachse befestigt. Die andere Seite des Armes liegt frei beweglich auf einer Ablageschiene, auf der ein Not-Aus-Schalter (13) angebracht ist. Sobald die Probe bricht und der Kraftarm eine zu große Auslenkung erfährt, stößt er an den Schalter und beendet die Prüfung. Um jetzt eine Auslenkung über den Kraftarm auf die Probe zu übertragen, wird eine Schnur an den Kraftarm über eine Umlenkrolle (11), neben dem Tisch mit einem Eimer (12), verbunden, welcher mit vorher definiertem Gewicht, meist in Form von kleinen Stahlkugeln, gefüllt wird. Insgesamt beträgt der Abstand zwischen der Prüfachse und der aufgebrachten Gewichtskraft 1000 mm.

Aufgrund dessen wird die Kraft über den Arm in diesem Zustand nur auf die Loslagerseite ausgelenkt. Das bedeutet, es liegt keine Vier-Punkt-Biegung vor, da die antreibende Seite starr mit der Bodenplatte verbunden ist. Bis zur Erscheinung der überarbeiteten DIN 50113 war dies noch zulässig. Die überarbeitete Norm besagt allerdings, dass bei einer Umlaufbiegeprüfung die Kraftaufbringung bzw. Übertragung ausdrücklich mit einer Vier-Punkt-Biegung aufzuwenden ist.

3.2 Erzeugen des Biegemoments

In der früheren Ausgabe der DIN 50113:1982-03 sind keine spezifischen Anforderungen an die Kraftaufbringung festgelegt. Das bedeutet, es gab die Systeme der symmetrischen Drei-Punkt-Biegung, der asymmetrischen Drei-Punkt-Biegung und der Vier-Punkt-Biegung (siehe Abbildung 9).

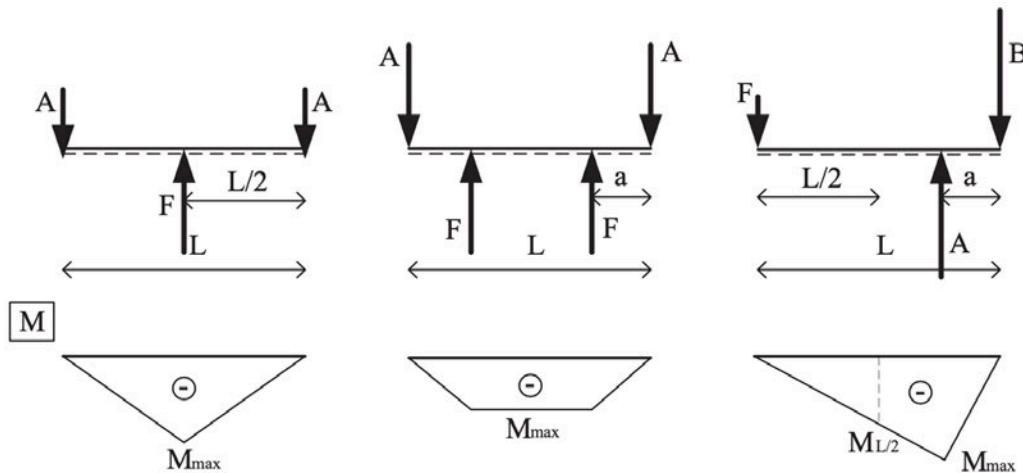


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Drei- bzw. Vier-Punkt-Biegung [10]

Mit der Aktualisierung der DIN-Norm 50113:2018 – Prüfung metallischer Werkstoffe - sind eine große Anzahl an Bedingungen und Forderungen an die Umlaufbiegetechnik hinzugekommen. Sie beschreibt das Verfahren der Umlaufbiegung und bildet mit den Formeln der Nennbiegespannung S nach Glg. (3.1) und des Widerstandsmomentes W nach Glg. (3.2) die Grundlagen zur Berechnung.

$$S = \frac{M}{W} \quad (3.1)$$

$$W = \frac{\pi d^3}{32} \quad (3.2)$$

Es existieren unterschiedliche Bauarten von Prüfmaschinen, bei denen ein konstanter Biegemomentenverlauf innerhalb der Prüflänge ohne überlagerte Querkraft mittels einer Vier-Punkt-Biegung erzeugt wird. Nach der überarbeiteten DIN 50113 sind drei Methoden zur Erzeugung des Biegemomentes zulässig. Die erste Variante beinhaltet dabei zwei Methoden, welche mit einer Vorspannung der Hebelarme arbeiten. Die schematischen Abbildungen aus der Norm zeigen den Unterschied der Konstruktionen [11].

Die erste Methode der Variante Eins (siehe Abbildung 10) stellt die Erzeugung des Biegemomentes nach Glg. (3.3) durch Vorspannen der Hebelarme mittels Feder da, während bei der zweiten Methode das Moment nach Glg. (3.4) durch Gewichtskräfte und Seilumlenkung entsteht [11].

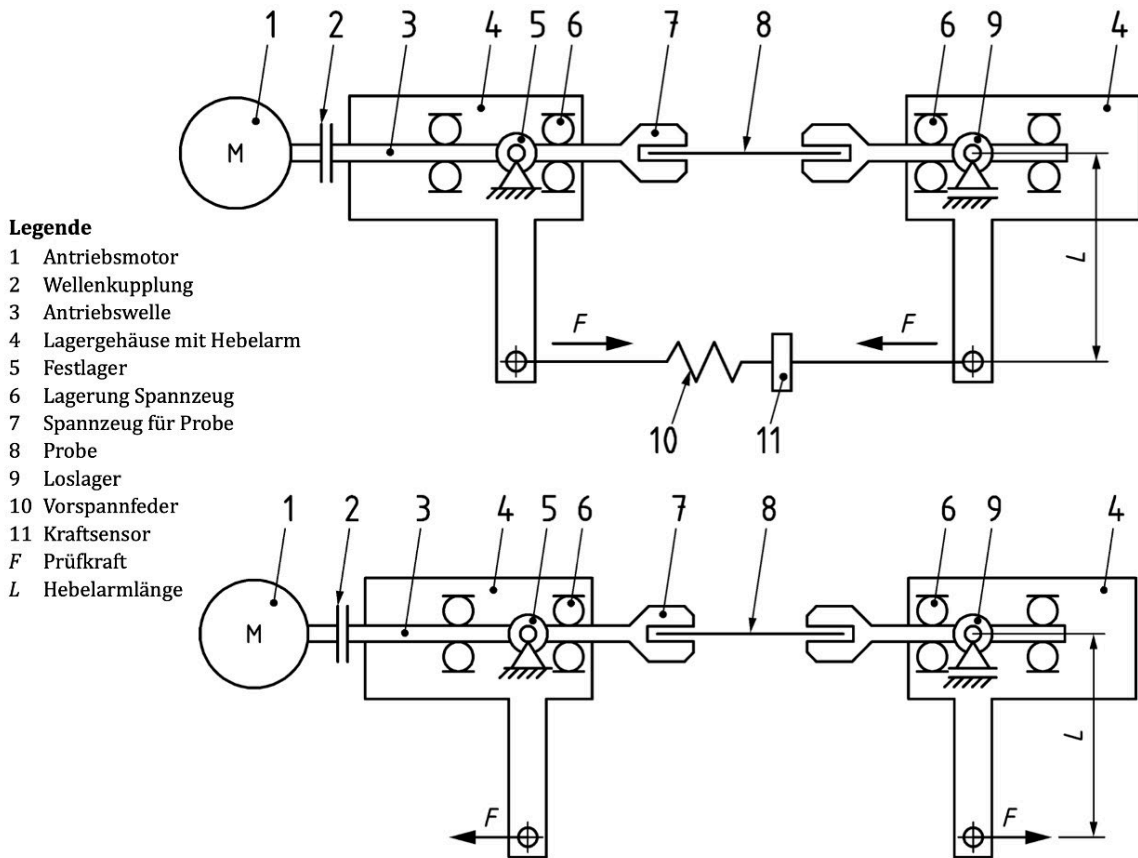


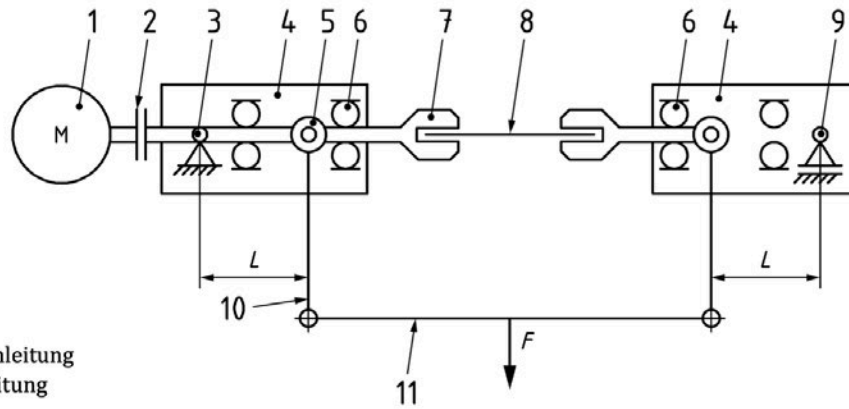
Abbildung 10: Aufbauschema Methode 1 (oben) und Methode 2 (unten) [11]

$$M = F \cdot L \quad (3.3)$$

Die zweite Variante (siehe Abbildung 11) ähnelt dem bisherigen Aufbau. Das Biegemoment der Prüfmaschine wird durch eine Gewichtskraft erzeugt, allerdings sind dabei die Pendelstützen mit einem Querträger und dem Fest- bzw. Loslager verbunden.

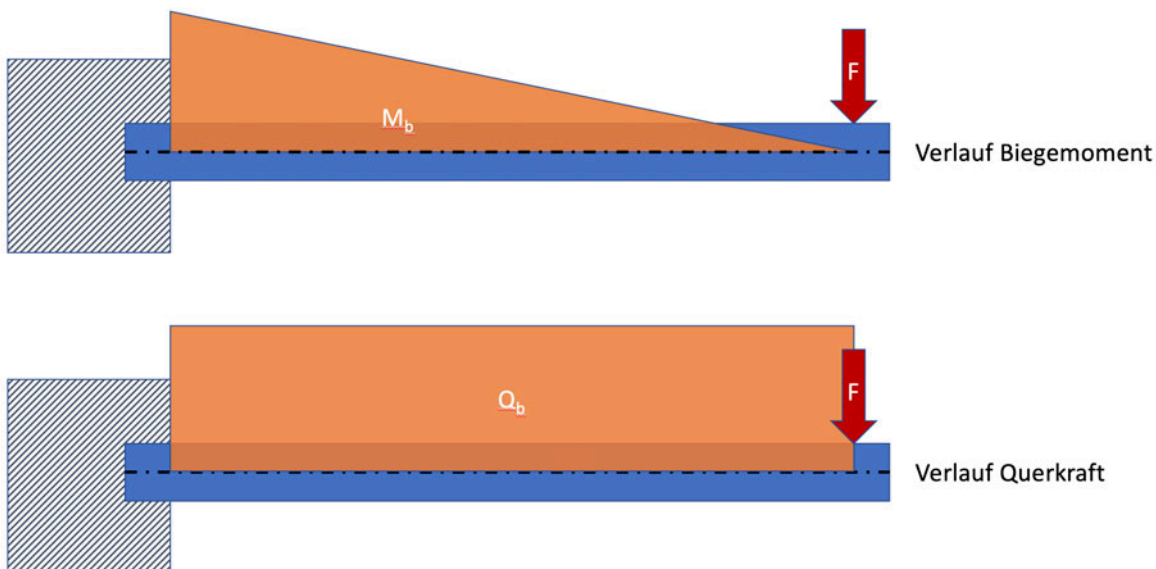
Legende

- 1 Antriebsmotor
- 2 Wellenkupplung
- 3 Festlager
- 4 Lagergehäuse
- 5 Einleitung Prüfkraft
- 6 Lagerung Spannzeug
- 7 Spannzeug für Probe
- 8 Probe
- 9 Loslager
- 10 Pendelstütze zur Krafteinleitung
- 11 Querträger zur Lasteinleitung
- F Prüfkraft
- L Hebelarmlänge

**Abbildung 11: Aufbauschema nach Methode 3 [11]**

$$M = \frac{F}{2} \cdot L \quad (3.4)$$

Das Problem des aktuellen Aufbaus bestand darin, dass die Festlagerseite einer Einspannung gleicht, da sie starr mit der Bodenplatte verschraubt ist und dadurch keinerlei Freiheitsgrade zulässt. Der Unterschied wird ersichtlich, wenn die Verläufe der Biegemomente der beiden Lagerungen miteinander verglichen werden. In Abbildung 12 ist zu erkennen, dass das Biegemoment vom Angriffspunkt der Kraft bis zum Einspannungspunkt stetig steigt, während die Probe (blau) durch eine Querkraft über die gesamte Prüflänge zusätzlich belastet wird.

**Abbildung 12: Verlauf des Biegemomentes und der Querkraft bei fester Einspannung**

Im Gegensatz dazu schreibt die oben genannte Norm vor, die Probe mit konstantem Moment über die gesamte Prüflänge zu belasten, ohne dass eine überlagerte Querkraft anliegt (siehe Abbildung 13).

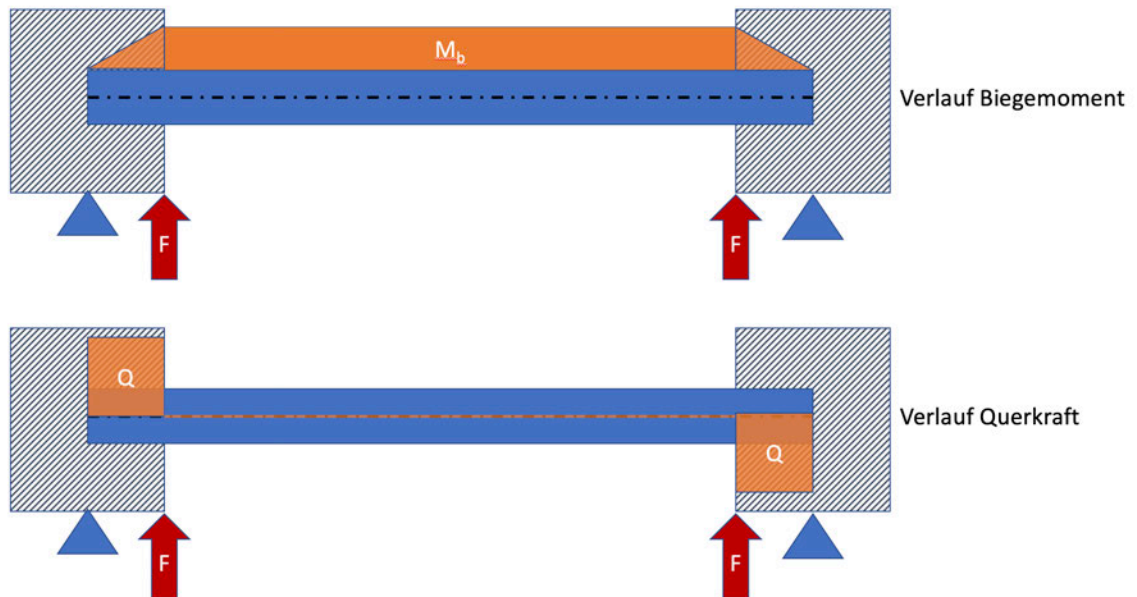


Abbildung 13: Verlauf des Biegemomentes und der Querkraft bei 4-Punkt-Biegung

Es ist daher notwendig, dieses Problem des fehlenden Freiheitsgrades, nämlich die Drehung in der Ebene, zu beheben, um die geforderten Eigenschaften der Belastung normgerecht zu erfüllen. Die weiteren Inhalte der Norm, wie die Verifizierung, die Probengeometrie und die Auswertung werden in den Kapiteln 7 und 8 genauer aufgeführt.

4 Variantenvergleich

Um die zuvor genannten Probleme zu beheben, gibt es verschiedene Ansätze zur Konstruktion der neuen Maschine. Grundsätzlich sind dabei drei problematische Baugruppen ausschlaggebend, welche verändert werden müssen. Dabei handelt es sich um die Lagerung der Platten (siehe Abbildung 14), die Linearbewegung (siehe Abbildung 15) und die Krafteinleitung (siehe Abbildung 16). Um einen groben Überblick der einzelnen Varianten zu vermitteln, sind diese schematisch dargestellt.

Die Entwicklung und Ausarbeitung des Konzeptes haben dabei eine Menge unterschiedlicher Stufen durchlaufen. Alle Varianten lassen dabei unter Umständen auch eine Kombination untereinander zu.

Die Randbedingungen legen den Fokus neben der Lagerung dabei auf eine neue Variante der Krafteinleitung, da das Auflegen von Gewichten nicht mehr zeitgemäß erscheint und unpraktisch ist. Damit ist eine kompaktere Bauweise geplant und eine veränderte Ausrichtung auf dem Tisch, während die Funktion einer Umlaufbiegevorrichtung mit 200 Newtonmetern nicht verringert wird.



Abbildung 14: Schema für die Lagerung der Platten

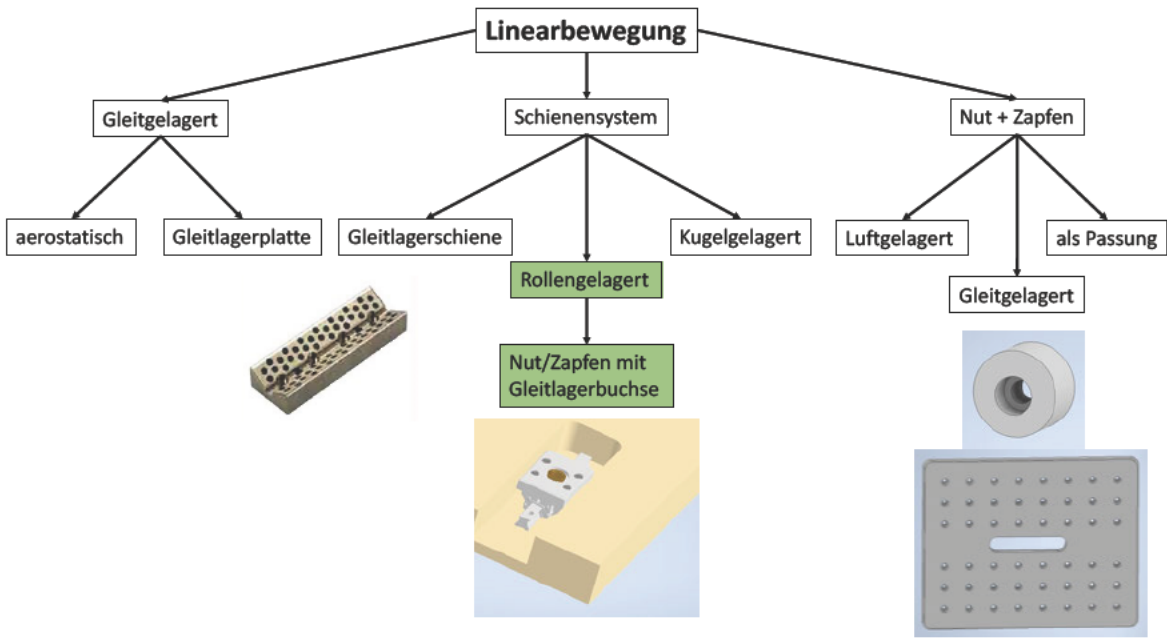


Abbildung 15: Schema für die Linearbewegung

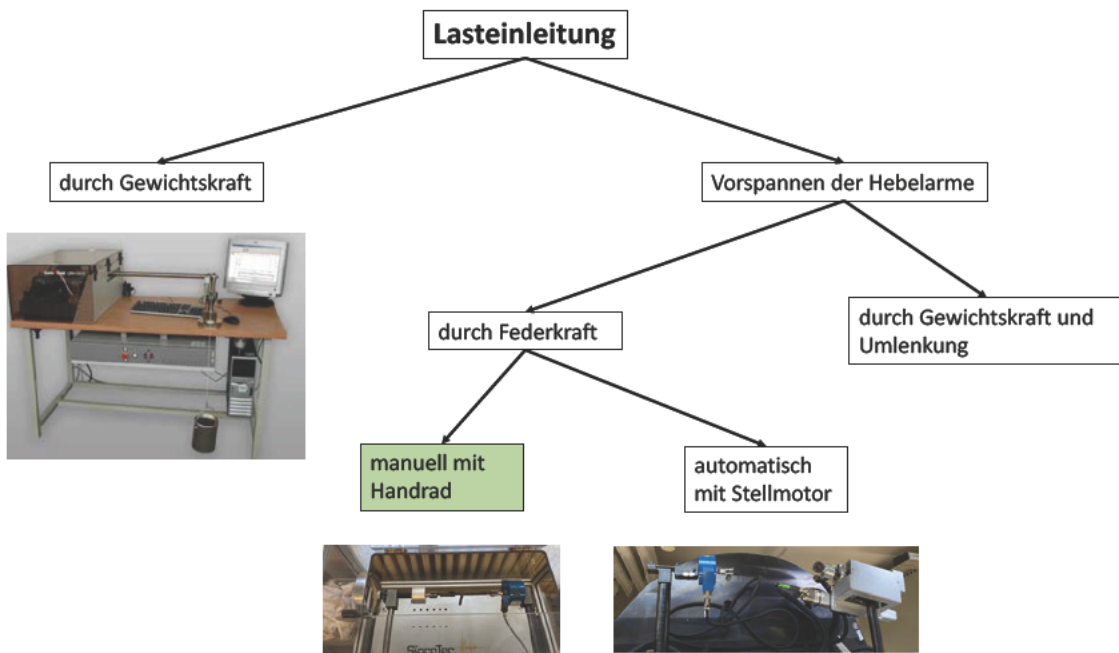


Abbildung 16: Schema für die Lasteinleitung

4.1 Variante 1: Wälzlager

Die Realisierung des Konzepts ist mittels einfacher Wälzlagertechnik möglich. Dazu lässt sich ein Flanschlager (siehe Abbildung 17) auf die Bodenplatte montieren, um darauf die Platte für das Festlager zu konstruieren. Der Nachteil dabei ist, dass die Höhe des Aufbaus sehr stark ansteigt, was mit dem Einlassen des Flanschlagers in die Bodenplatte vermindert werden könnte. Um die Linearbewegung dabei zu gewährleisten, muss das Flanschlager auf der Loslagerseite auf einer Schiene befestigt werden, welche wiederum einen erhöhten Bauraum zur Folge hat. Durch die Ausmaße des Lagers wird der Schlitten auf der Schiene ebenfalls eine gewisse Breite einnehmen, um das Gewicht der Konstruktion zu stemmen.



Abbildung 17: Flanschlagereinheit [12]

Damit kommt es zu einem weiteren Nachteil. Die Loslagerplatte lässt sich symmetrisch konstruieren, da die beiden Lagerböcke die Größe der Platte vorrangig definieren und der Schwerpunkt der Platte dadurch sehr zentral liegt. Auf Seiten der Festlagerplatte kommt es, bedingt durch die Montage des Motors auf der Platte, zu einer Verlagerung des Schwerpunktes, wodurch das Lager ebenfalls stark beeinträchtigt wird. Um dieses Ungleichgewicht aufzuheben, ist es möglich, Kugelrollen (siehe Abbildung 18) an der Unterseite zu befestigen. Es ist aber denkbar, dass sich diese nach einiger Zeit im Prüfbetrieb stark verschleifen, da sie nur eine kleine Bewegung ausführen, bei der sie durch die Gewichtskräfte stark belastet werden und sich sozusagen einlaufen.



Abbildung 18: Kugelrolle [13]

Eine Alternative dazu wäre eine Gleitlagerplatte (siehe Abbildung 19), die durch Festschmierstoff aus Graphit, anstatt Öl, nahezu wartungsfrei ist. Diese kann ebenfalls an die Unterseite der Lagerplatte angebracht werden, um das Kippmoment aufzufangen und sich auf der Bodenplatte mittels Gleitreibung zu bewegen, ohne große Schäden durch Verschleiß zu erfahren.



Abbildung 19: Gleitlagerplatte aus einer Kupferlegierung [14]

Wie bereits beschrieben ist die Linearbewegung über ein Schienensystem möglich. Eine weitere Alternative diesen Freiheitsgrad zuzulassen, ist die Montage einer Gleitlagerführung, bei der es eine Prismenführung inklusive Schlitten (siehe Abbildung 20) ermöglicht, die Probe über Gleitlagerung einzuspannen.



Abbildung 20: Prismenführung aus einer Kupferlegierung bzw. C45 Stahl [14]

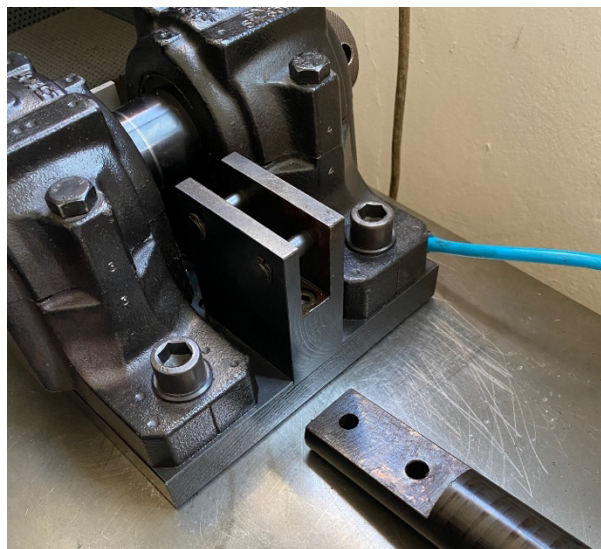
Die letzte Auswahlmöglichkeit besteht in einem Linear-Schwenktisch (siehe Abbildung 21). Dieser ist in der Lage ein Biegemoment von über 200 Newtonmetern aufzunehmen, wirkt sich jedoch negativ auf die Größe des Bauraumes aus. Dabei lässt sich die notwendige Schwenkbewegung ebenfalls realisieren. Diese genannten Umsetzungen der Linearbewegung können bei jeder möglichen Variante angewandt werden.



drylin® W Linear- /Schwenkführung.

Abbildung 21: Drylin Linear-Schweführung [15]

Um die Kosten gering zu halten, sollten so viele Bauteile wie möglich aus dem alten Aufbau wiederverwendet oder als Ausgangsbauteil genutzt werden. Die Festlagerplatte muss neu erstellt werden, da der Motor auf dieser Platte befestigt werden muss. Um die Loslagerplatte für diese Variante anzupassen, muss sich die Konstruktion um 180° drehen. Das bedeutet, die Lagerböcke müssen getauscht werden, damit sich der Anschlusspunkt des Hebelarms auf der richtigen Seite befindet (siehe Abbildung 22).

**Abbildung 22: originaler Anschlusspunkt des Kraftarmes**

Die Loslagerplatte könnte dadurch 100%ig wiederverwendet werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, die Platte mit integriertem Anflanschpunkt für den Hebelarm aus einem Block zu fertigen, was die Steifigkeit der Konstruktion erhöhen würde und für genauere

Ergebnisse sorgt. Der Bearbeitungsaufwand für diese Überlegung ist allerdings hoch, da nahezu 50% Verschnitt entstehen würde (siehe Abbildung 23).

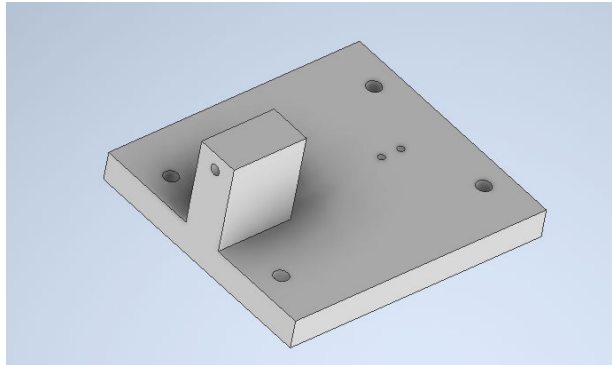


Abbildung 23: Loslagerplatte mit integriertem Anflanschpunkt

Eine wesentlich einfachere Konstruktion ist mithilfe eines Kastensystems zu erstellen. Dabei wird ein Kasten um die Lagerböcke aus Aluminium oder Stahl konstruiert, welcher ebenfalls auf der Bodenplatte gelagert sein muss. Über je einen Hebelarm am Kasten lassen sich diese dann auslenken und das gewünschte Biegemoment auf die Probe übertragen. Als Vorlage dienen dazu bestehende Umlaufbiegemaschinen (siehe Abbildung 24), welche einen hohen Materialaufwand aufweisen und großen Bauraum benötigen.

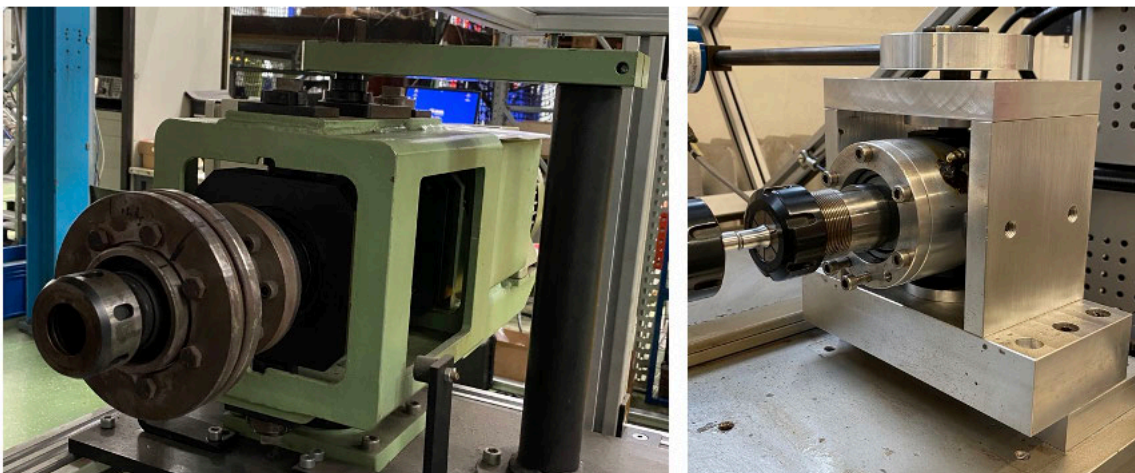


Abbildung 24: Umsetzung als Kastensystem

4.2 Variante 2: Gleitlager

Nachdem bei der Variante mit der Wälzlagerung bereits oft die Verwendung von Gleitlagern in Frage kommt, ist auch eine Lagerung komplett mit Gleitlagerplatten und deren Prismenführung umsetzbar. Dafür ist es notwendig, die Platten entweder an der Unterseite der Festlager- und Loslagerplatte anzubringen oder eine ausreichende Fläche innerhalb der Bodenplatte zu bearbeiten, um die Gleitlagerplatten in dieser zu versenken.

Ein weiterer Lösungsvorschlag war die Lagerung mittels eines Zapfens und der dazugehörigen Nut, mit Wahl einer geeigneten Passung. Allerdings erscheint diese Umsetzung nicht sinnvoll für eine Lagerung in diesem Maßstab, unter solch großen Belastungen.

4.3 Variante 3: Luftlager

Durch die bereits vorhandene aerostatische Lagerung der Loslagerplatte, ist es möglich, nur die Festlagerplatte so umzugestalten, dass sie ebenfalls luftgelagert arbeiten kann. Dafür werden die Lagergehäuse neben dem Motor auf eine Stahlplatte geschraubt. Die Höhe orientiert sich dabei an der Höhe der Loslagerseite. In diese Platte müssen Kanäle eingebracht werden, um die Lagerung durch Druckluft zu gewährleisten (siehe Abbildung 8 und 25).

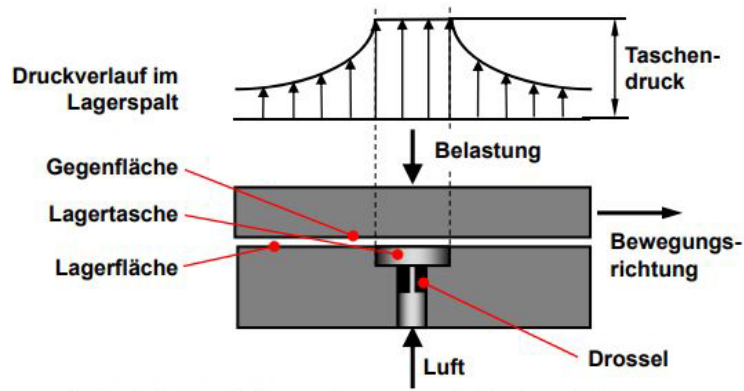


Abbildung 25: Prinzipieller Aufbau einer aerostatischen Führung [16]

Die nächste Möglichkeit ist, die Bodenplatte so zu gestalten, dass sie mithilfe von Druckluft jeden Gegenstand, der sich auf dieser Oberfläche befindet, anhebt. Dafür gibt es großporige, luftdurchlässige Materialien aus verschiedenen Werkstoffen, zum Beispiel Metapor. Dieses Material ermöglicht eine flächige Luftlagerung oder eine flächige Vakuumanwendung. Dabei werden alle Gegenstände auf der Fläche festgehalten. Die Metapor-Platten werden nach Herstellerangaben in die Bodenplatte eingelassen, abgestützt, verklebt und verschraubt. Über Druckluftanschlüsse an den Seiten der Bodenplatte werden sie mit Luft versorgt, welche über die komplette Fläche ausströmt und die Lagerplatten anhebt (siehe Abbildungen 26 und 27).

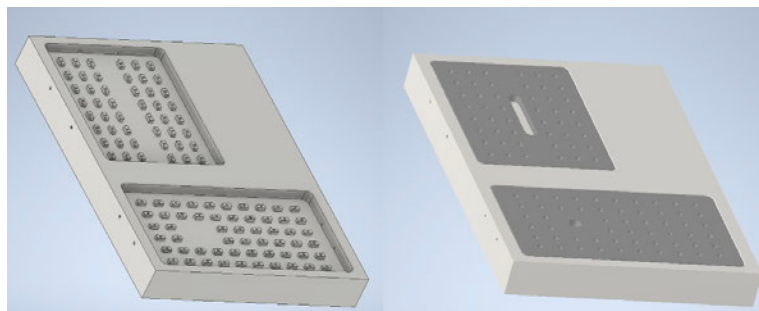


Abbildung 26: Konstruktion Bodenplatte und Metapor

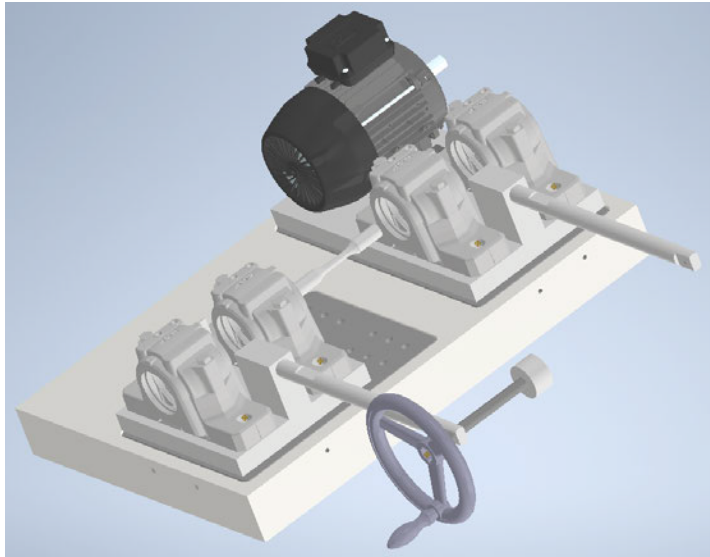


Abbildung 27: Aufbau belüftete Bodenplatte

Ein großer Nachteil ergibt sich aus der Fläche. Um die Lagerplatten von unten anzuheben, ist ein großes Volumen an Druckluft notwendig, wobei ständig Luft an der Loslagerplatte vorbei in die Umgebung abgegeben wird. Um den Wirkungsgrad zu erhöhen, werden die Metapor-Platten an die Unterseiten der Lagerplatten montiert und über deren Fläche ausgelegt (siehe Abbildung 28).

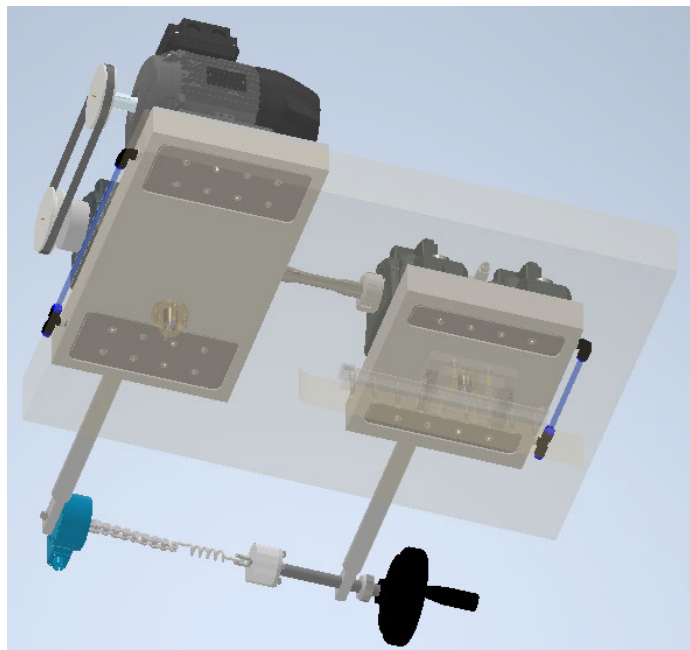


Abbildung 28: Integrierte Metapor Platten

Nach reichlicher Überlegung und Absprachen fiel schlussendlich die Wahl auf eine Mischung von allen Varianten (siehe Abbildung 29). Die Lagerplatten sollen mithilfe einer Luftlagerung aerostatisch betrieben werden, um die Reibungskräfte komplett zu verhindern und höchstpräzise Ergebnisse zu erzielen. Dabei sind Gleitlagerbuchsen mit Fest-

schmiermittel verwendet, die in der Bodenplatte und in einem Aufnahmebock eingepresst werden, um die Drehbewegung zu ermöglichen. Das Gegenstück bildet ein Zapfen mit einer genauen Passung. Die Linearbewegung erfolgt über ein Schienensystem, auf dessen Reiter die Zapfenaufnahme montiert wird. Damit sind alle nötigen Freiheitsgrade erfüllt.

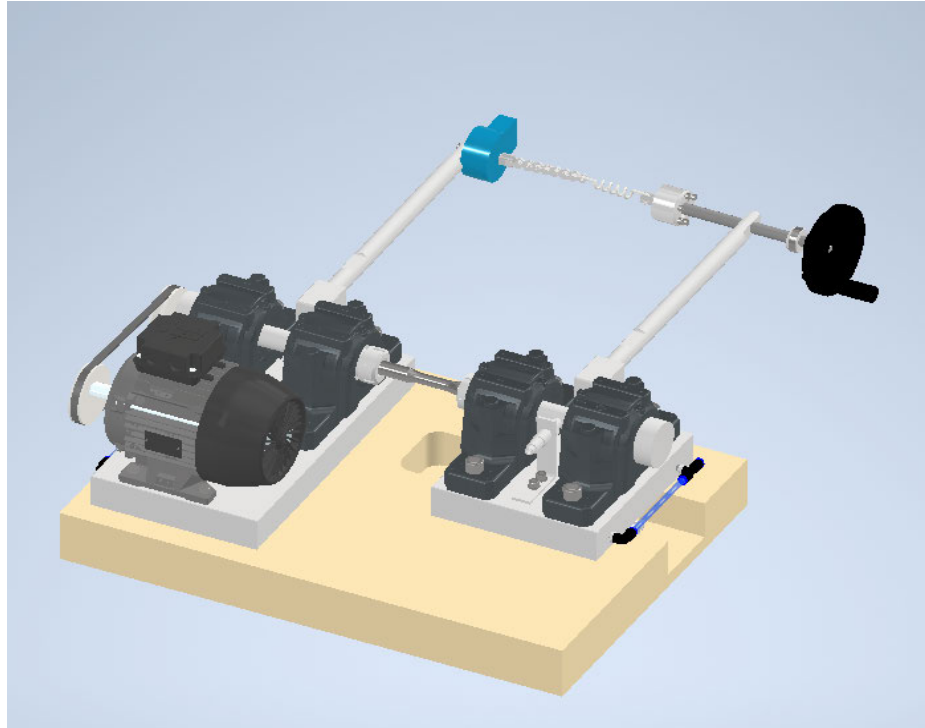


Abbildung 29: Konzeptaufbau der UBM200

5 Konstruktive Umgestaltung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Konstruktion nach vorgegebenen Anforderungen und dem festgelegten Platz der Prüfmaschine. Die Ansprüche an den neuen Aufbau der Prüfmaschine sind:

- den Bauraum zu verkleinern, zu zentralisieren und günstig auf dem Maschinentisch zu positionieren,
- die Bedienung für den Werkstoffprüfer beim Wechseln der Proben zu erleichtern,
- die Hebelarme zu verkürzen und
- die Änderung der Krafteinleitung von Gewichten auf Federkraft.

5.1 Baugruppen

5.1.1 Loslagerplatte

Die Baugruppe der Loslagerplatte (siehe Abbildung 30) besteht aus der Lagerplatte (1), den SKF-Lagerböcken (2), dem Steg (3), dem Kraftarm (4), den Metapor-Platten (5), dem Zapfen (6) und dem dazugehörigen Befestigungsmaterial sowie den Druckluftanschlüssen (7). Sie besitzt die Gesamtabmessungen von 650 x 254 x 190 mm und wiegt in der Zusammenstellung ca. 33 Kilogramm. Aufgrund des symmetrischen Aufbaus liegt der Schwerpunkt nur knapp außerhalb des zentralen Punktes, wo sich der Zapfen befindet.

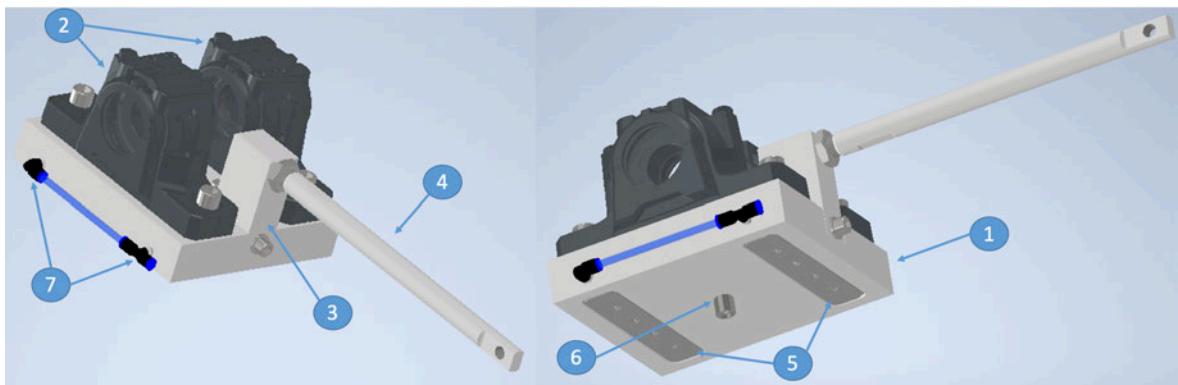


Abbildung 30: Baugruppe Loslagerplatte

Die Lagerplatte (siehe Abbildung 31) und der Steg sind aus dem korrosionsbeständigen Werkzeugstahl X33CrS16, welcher häufig für Formaufbauplatten genutzt wird. Er ist hochlegiert und weist nach dem Vergüten eine Festigkeit von über 950 N/mm² und eine Härte zwischen 280 bis 325 HB auf. Durch seinen Schwefelzusatz ist er gut spanbar [17].

Der Kraftarm und der Zapfen bestehen aus dem korrosionsbeständigem Kaltarbeitsstahl X38CrMo16, welcher die gleichen Festigkeitswerte besitzt. Durch seine hohe Korrosionsbeständigkeit wird er vermehrt im Formenbau verwendet [17].

Aus diesem Grund sind alle Schraubverbindungen ebenfalls mit korrosionsbeständigen Schrauben ausgelegt, um bei der Montage und Verwendung der Maschine die Bildung von Rost zu vermeiden. Da die Maschine im trockenen Labor aufgestellt wird, sind nicht-rostende Stahlschrauben mit der Festigkeit A2 ausreichend. Die Mindestanschraubtiefen sind eingehalten (siehe Anlagen Teil 1).

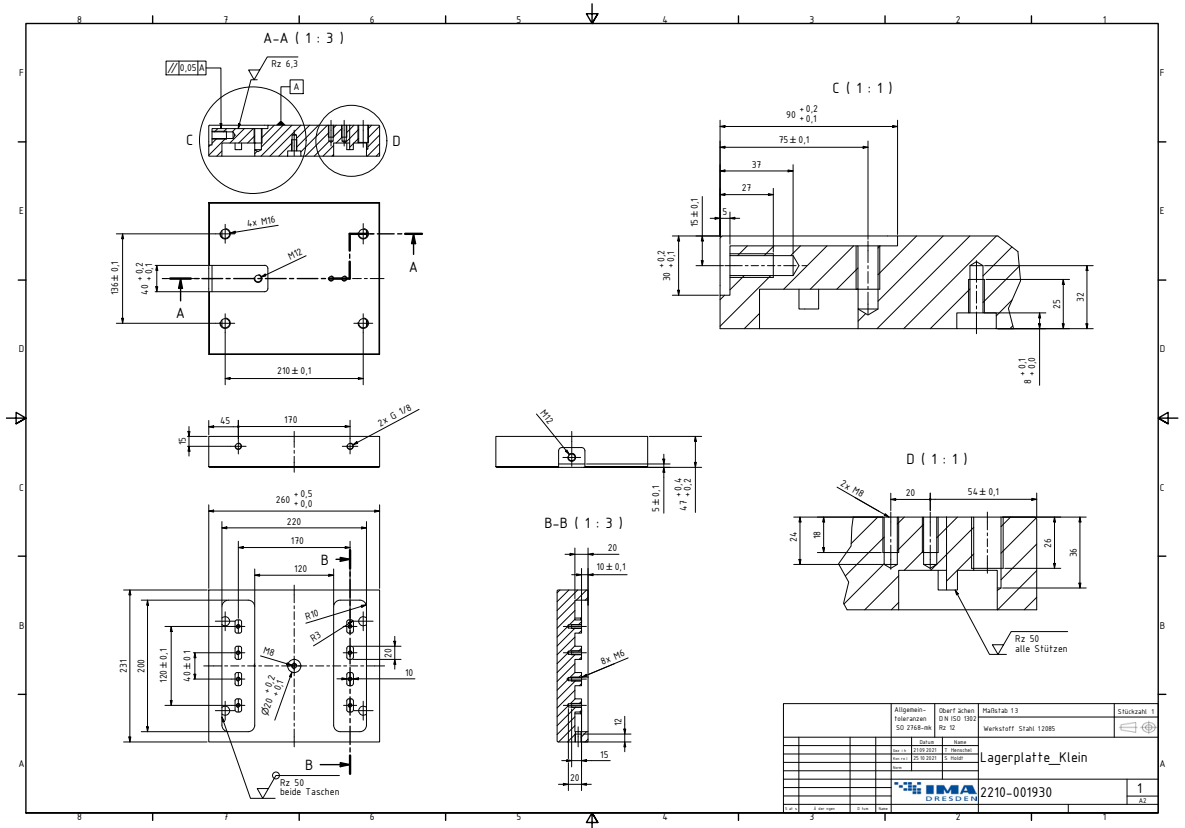


Abbildung 31: Technische Zeichnung der Loslagerplatte

Die SKF-Lagerböcke werden mit jeweils zwei DIN ISO 4762 M16 x 50 Zylinderschrauben mit Innensechskant und den dazugehörigen ISO 7089 Unterlegscheiben auf der Lagerplatte montiert. Dazwischen wird der Blechhalter für den Drehzahlsensor mit zwei M8 x 20 Zylinderkopfschrauben mit niedrigem Kopf befestigt.

Um den Kraftarm (siehe Abbildung 32), mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Länge von 415 mm, mit der Loslagerplatte zu verbinden, ist ein Steg von oben und von der Seite mit zwei DIN 4762 M12 x 25 Zylinderkopfschrauben mit Innensechskant auf Unterlegscheiben nach ISO 7089 zu befestigen. Die eingefräste Nut in der Lagerplatte stellt dabei einen Formschluss her, wobei die Ecken fertigungsbedingt mit einem Radius von fünf Millimetern abgerundet werden. Der Kraftarm besitzt ein M16 x 1 Feingewinde, welches um 25 mm in den Steg geschraubt wird. Durch das Feingewinde ist ein genaues Einstellen der Stange möglich, um die Achse der Krafteinleitung fluchtend zueinander auszurichten. Des Weiteren besitzt ein Feingewinde einen höheren Anpressdruck bei gleichem Drehmoment und eine erhöhte Selbsthemmung bei Vibrationen, die bei diesem Aufbau eine Rolle spielen [18].

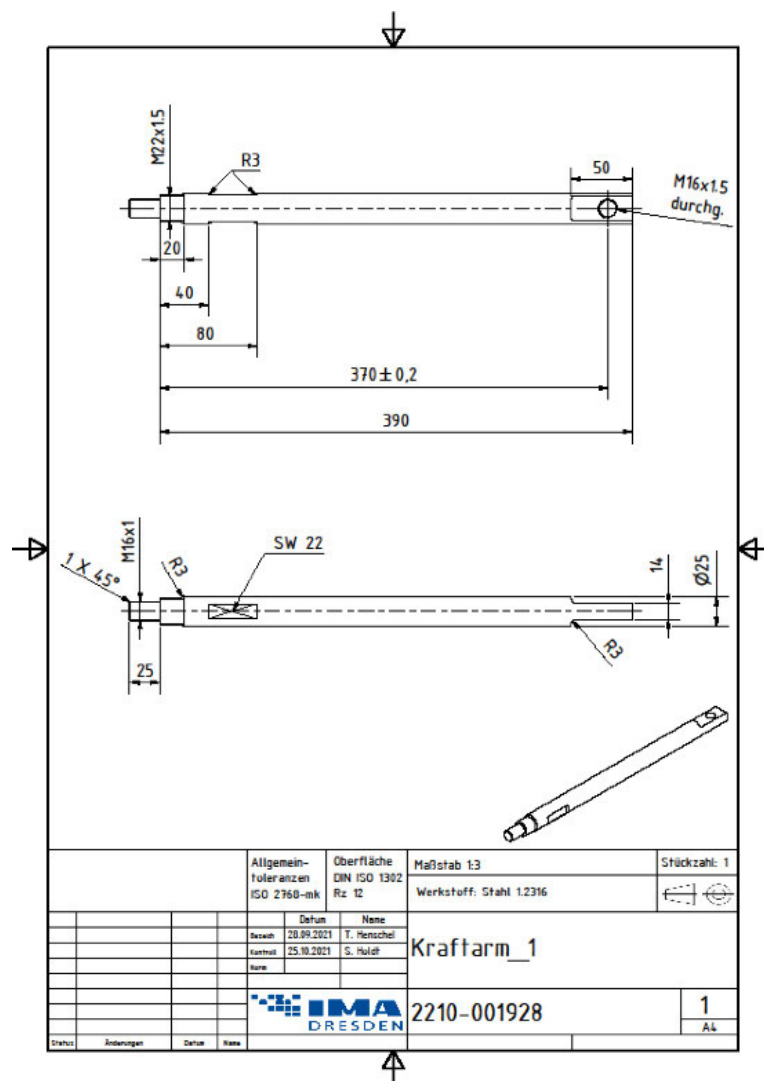


Abbildung 32: Technische Zeichnung des Kraftarms

Die angegebene Schlüsselweite von 22 mm unmittelbar am Anflanshpunkt hilft dabei, die notwendige Kraft aufzubringen. Um ein Lösen der Schraubverbindung weiterhin zu verhindern, wird eine Kontermutter mit einem M22 x 1,5 Feingewinde mit dem Kraftarm verbunden und bei der Montage fest an den Steg geschraubt. Dafür ist das M16 x 1 Feingewinde vorgesehen, welches sich an das Gewinde der Kontermutter anschließt. Am anderen Ende des Kraftarmes ist auf der plan bearbeiteten Montagefläche eine Durchgangsbohrung mit einem Feingewinde M16 x 1,5 angebracht, um die Gewindestange der Krafeinleitung aufzunehmen. Die Montagefläche ist dabei so dimensioniert, dass die eine Rändelschraube plan anliegen kann. Alle Kanten sind mit einem Radius von drei Millimetern abgerundet, um einen besseren Kraftfluss und damit eine geringere Kerbwirkung zu erzielen.

Da der Steg (siehe Abbildung 33) in die Lagerplatten um fünf Millimeter eingelassen ist, muss die Höhe des Anschraubpunktes des Kraftarmes beachten werden. Diese muss bei Fest- und Loslagerplatte ein Maß von 75 mm einhalten, damit sie auf einer Ebene mit der Prüfebene der Probe stehen. Wenn dies der Fall ist, treten im Prüfling keinerlei Biegekräfte aufgrund des Gewichtes der Baugruppe Krafeinleitung auf (siehe Abbildung 34).

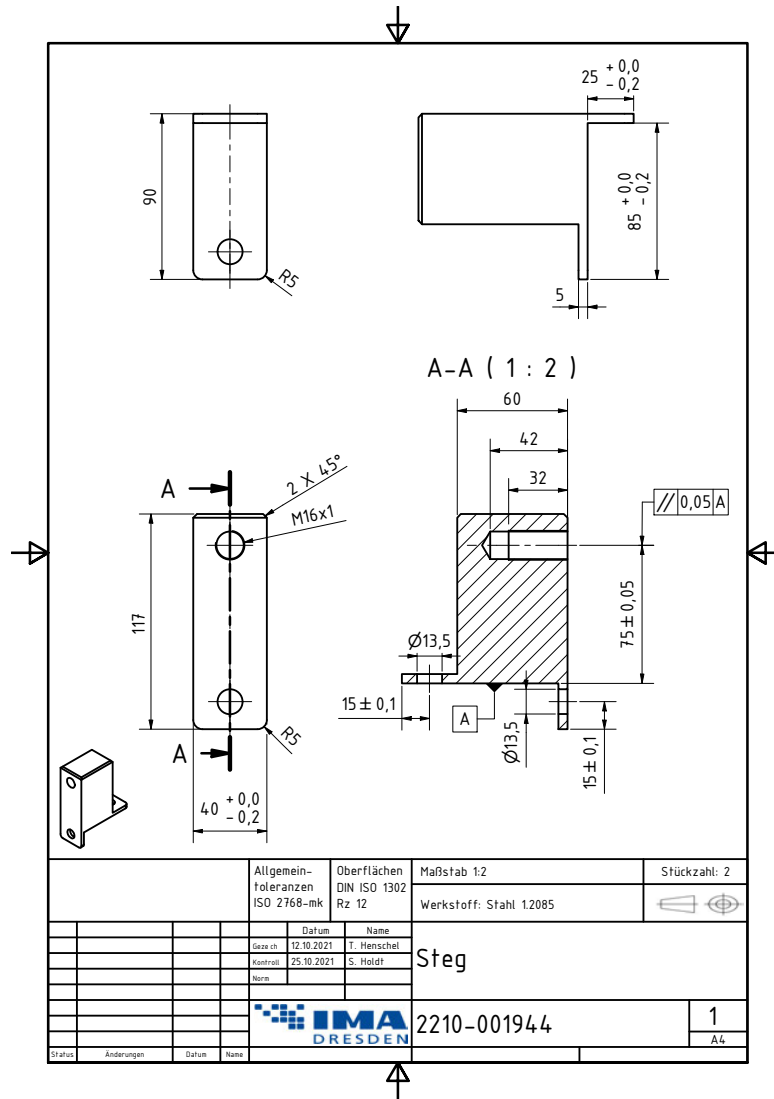


Abbildung 33: Technische Zeichnung des Steges

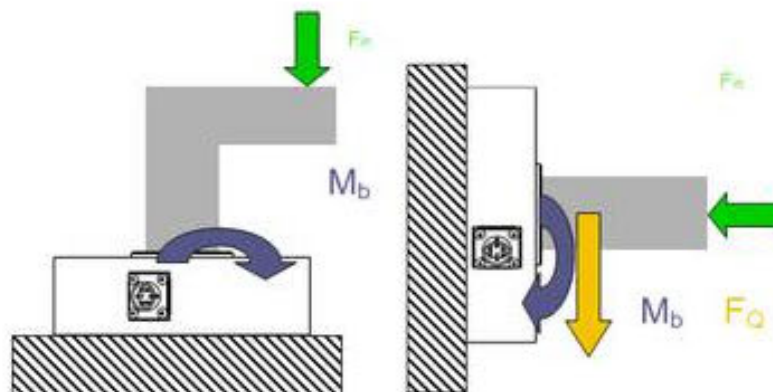


Abbildung 34: Biegemoment infolge der Querkraft [19]

Um die Loslagerplatte auf der Bodenplatte beweglich zu gestalten, soll sie mithilfe von Druckluft angehoben werden, um einen Luftfilm zwischen diesen zu erzeugen. Der große Vorteil dieser Luftlagerung, welche in aerostatische und aerodynamische unterschieden werden kann, ist die berührungslose Bewegung. Die Bauteile verschleifen nicht bei Benutzung. Dazu sind an der Unterseite der Loslagerplatte zwei Platten mit luftdurchlässigem Material, dem Metapor, eingelassen. Bei der Werkstoffwahl sind mehrere Eigenschaften zu beachten:

- eine gute Zerspanbarkeit des Werkstoffes,
- eine hohe Luftdurchlässigkeit, welche durch die Bearbeitung unbeeinflusst bleibt,
- die Einhaltung der geforderten Toleranzen bezüglich Form und Lage während des Fertigungsverfahrens und
- die Vermeidung einer chemischen Verbindung zwischen Lagerwerkstoff und Schmiermedium [20].

Metapor bietet dabei eine große Auswahl an porösen Werkstoffen, die für die Verwendung in Frage kommen, da diese einen entscheidenden Vorteil besitzen. Sie sind rundum auf jeder Fläche wirksam, das bedeutet, dass das komplette Bauteil dreidimensional mit Luft durchströmbar ist. Zur Auswahl stehen Aluminium BC 100 AL, nichtrostender Stahl ES 240 INOX und die keramischen Werkstoffe CE 100 White und MC 100 White (siehe Abbildung 35). Schlussendlich fiel die Wahl auf MC 100 White. Aufgrund der geringen Härte und der erhöhten Neigung zu Beschädigungen ist das Aluminium für diese Anwendung unzureichend. Der Einsatz des nichtrostenden Stahls wird ebenfalls ausgeschlossen, da er sich nicht zur Luftlagerung eignet. Das Probestück aus MC 100 White wurde nach Herstellerangaben bearbeitet, um die Luftdurchlässigkeit zu testen. Die spanende Bearbeitung mit einem Fräser ist ohne Einschränkung möglich, solange darauf geachtet wird, dass es sich um eine Trockenbearbeitung, mit oder ohne Absaugung der Späne, handelt, da sonst die Poren verkleben und keine Luft durchlassen. Die empfohlenen Bearbeitungsparameter sind in Anlage Teil 1 enthalten [21].



Abbildung 35: Auswahl der Metapor-Werkstoffe (Portec, 2022)

Es bleibt aber weiterhin ein gewisses Risiko beim Umgang mit dem Material, da Keramik zum Spröbruch neigt und auch nicht mit Stößen belastet werden kann. Weiterhin ist darauf zu achten, dass keinerlei Flüssigkeiten mit den Metapor-Platten in Berührung kommen, da sich sonst die luftdurchlässigen Poren schließen und erst wieder mit einer spannenden Bearbeitung freigelegt werden können.

Die Auslegung erfolgt dabei über die Flächenpressung nach Glg. (5.1), da diese Lagerung keine radiale Anwendung realisiert, sondern nur dafür gedacht ist, das Gesamtgewicht der Platten von der Bodenplatte anzuheben.

$$F = P \cdot A \quad (5.1)$$

Um daraus die notwendige Fläche zu ermitteln, wird die Gleichung nach A umgestellt. Folglich ergibt sich bei einem minimal angenommenen Arbeitsdruck P von 0,2 bar und einer Gewichtskraft F der Baugruppe von 330 N eine Fläche A von 16.500 mm², welche auf die beiden Flächen aufgeteilt wird. Durch die Bohrlöcher und die Außenradien beläuft sich die Austrittsfläche der porösen Oberfläche auf zweimal 8300 mm². Die Form dieser Flächen ist dabei frei wählbar. Um allerdings einen hohen Verschnitt des Metapor zu vermeiden, sind diese rechteckig, mit abgerundeten Ecken, konstruiert. Es ist auch möglich, diese als Kreis in den vier Ecken der Lagerplatte mit jeweils einem Luftdruckanschluss anzuordnen, was allerdings einen höheren Fertigungsaufwand und Verschnitt bedeutet. In der Loslagerplatte sind zwei Nuten mit einem Schruppfräser ausgefräst, um dem Araldit-Kleber später möglichst viel Fläche zwischen den Platten zu bieten. Außerdem werden Stützflächen von 20 x 10 x 10 mm, mit einem Abstand von 20 mm zueinander, in der Loslagerplatte stehen gelassen, damit die Metapor-Platte (siehe Abbildung 36) auf diesen abgestützt, verklebt und jeweils mit vier DIN 6912 M6 x 20 Zylinderkopfschrauben mit niedrigem Kopf verschraubt werden können. Diese müssen komplett versenkt sein, somit werden keine Unterlegscheiben verwendet. Neben der Befestigung der Metapor-Platten über die Stützflächen werden sie zusätzlich mit einer 0,5 mm breiten Fuge rundum mit Araldit verklebt.

Durch die Höhe der Stützen entsteht eine Luftkammer zwischen Lagerplatte und Metapor von 10 mm. Dieser Bereich wird genutzt, um die Druckluft barrierefrei über zwei Druckluftanschlüsse an der Seitenwand der Lagerplatte einzuführen. Daran wird ein L- und T-Steckanschluss mit einem G1/8" Gewinde befestigt, welche mit Druckluftschläuchen mit einem Durchmesser von acht Millimetern verbunden werden. Dazwischen wird ein Drosselventil gesteckt, um eine mögliche Differenz der Drücke in den Kammern auszugleichen.

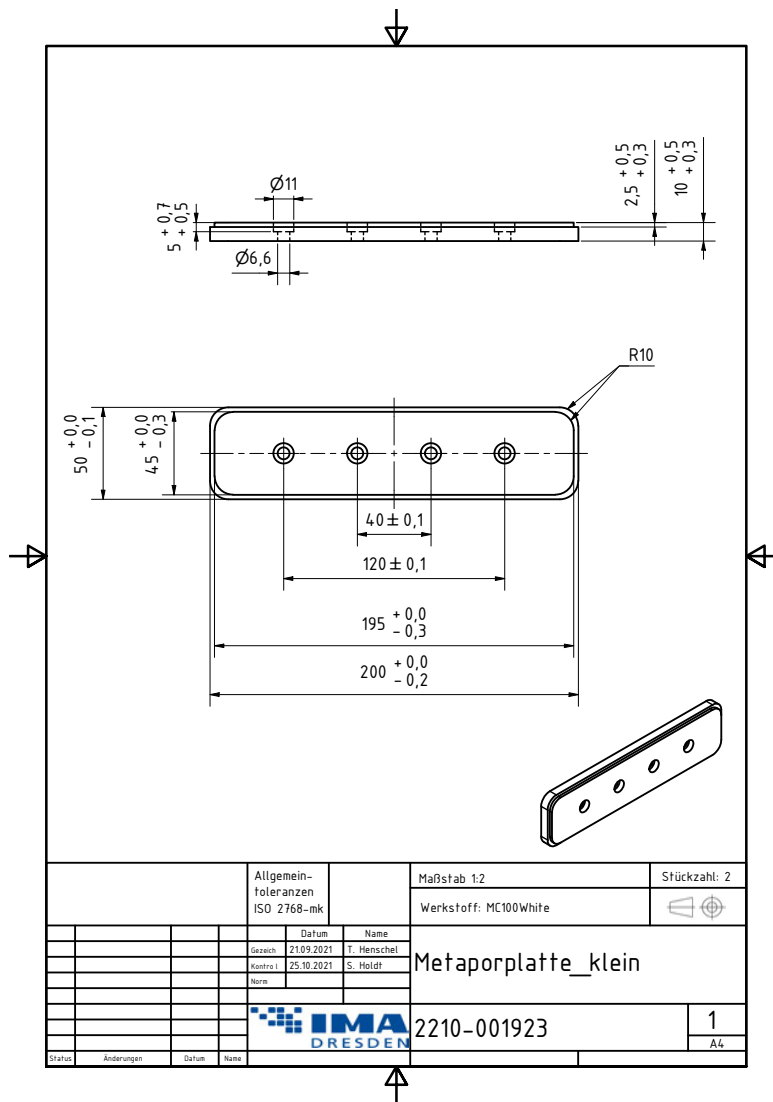


Abbildung 36: Technische Zeichnung der kleinen Metaporplatte

Um die Drehbewegung zu gewährleisten und zu verhindern, dass sich die Lagerplatten von selbst frei über die Bodenplatte bewegen, wenn sie mit Druckluft beaufschlagt sind, ist ein Zapfen (siehe Abbildung 37) an der Unterseite exakt im Angriffspunkt der eingehenden Kräfte mittig unter den Lagerböcken der Lagerplatte mit einer DIN 6912 M8 x 30 Zylinderkopfschraube mit niedrigem Kopf und einer flachen Unterlegscheibe nach DIN 7092 montiert. Dieser wird durch eine Passung des Außendurchmesser von 20g6 in der Gleitlagerbuchse in einem Aufnahmebock auf der Schienenführung geführt.

In Kapitel 5.1.3 wird näher auf die Passungen eingegangen. Der Zapfen ist um fünf Millimeter in der Lagerplatte eingelassen, wodurch die effektive Länge der Lagerung 20 mm auf dem Außendurchmesser beträgt.

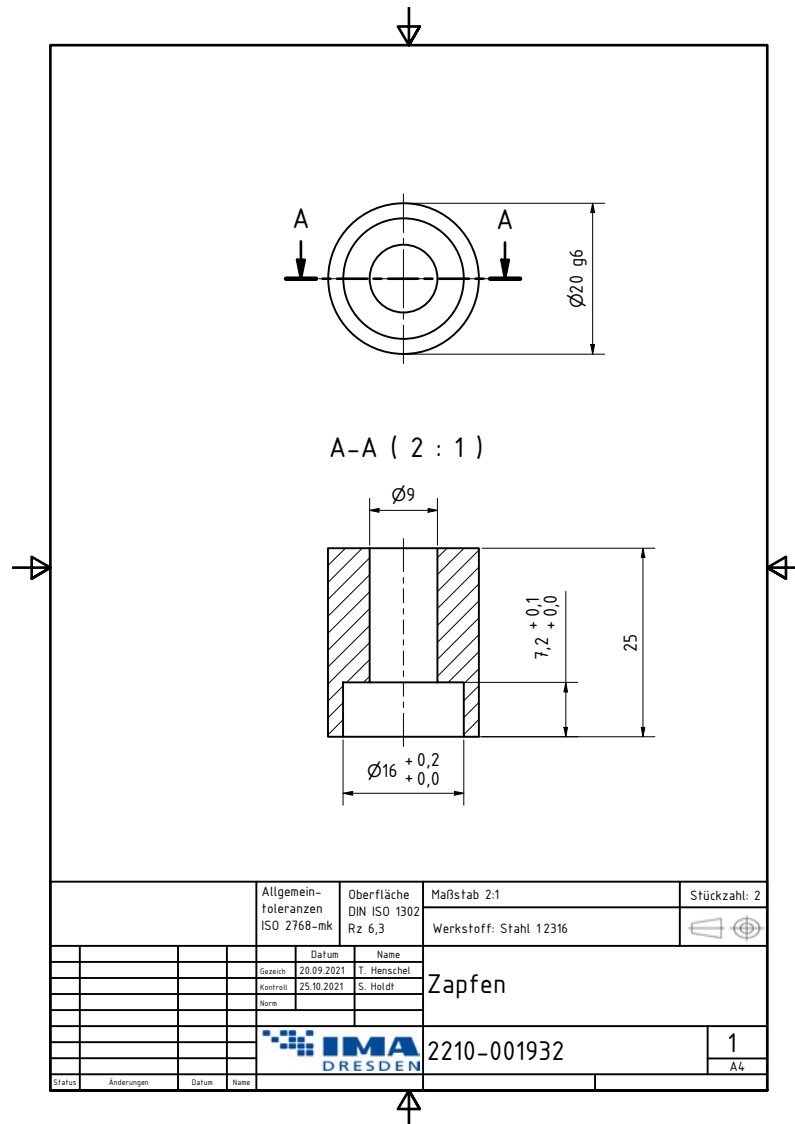


Abbildung 37: Technische Zeichnung des Zapfens

5.1.2 Festlagerplatte

Die Baugruppe der Festlagerplatte (siehe Abbildung 38) besteht aus der Lagerplatte (1), dem Motor (2), dem Riementrieb (3), der SKF-Lagerböcke (4), dem Steg (5), dem Kraftarm (6), den Metapor-Platten (7), dem Zapfen (8), dem dazugehörigen Befestigungsmaterialien, wie Schrauben, Unterlegscheiben und den Druckluftanschlüssen (9).

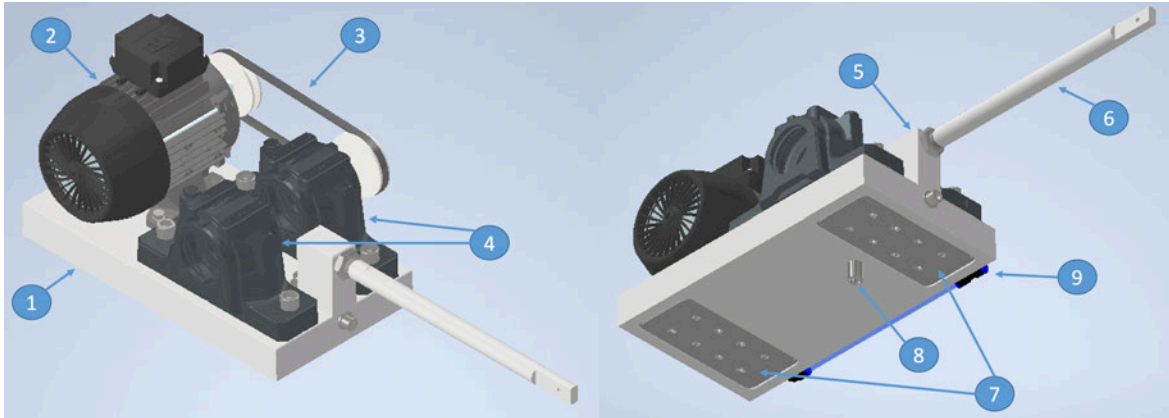


Abbildung 38: Baugruppe Festlagerplatte

Um die Funktion der Umlaufbiegung normgerecht umzusetzen, ist es notwendig, den Motor von der Bodenplatte auf die Lagerplatte zu setzen, damit die Platte direkt um einen Punkt rotieren kann. Dadurch belaufen sich die Abmessungen der Lagerplatte auf 850 x 254 x 277 mm. Bei der Positionierung gab es mehrere Möglichkeiten. Allerdings erweist sich die vorhandene Position am besten, da der Riementrieb keinerlei Modifizierung benötigt, sondern lediglich über die Bohrung auszurichten ist. Die Verschiebung der Position auf die Platte (siehe Abbildung 39) ist über den Satz des Pythagoras an das Originalmaß angepasst. Den Motor um 180° zu drehen ist eine Möglichkeit, um die Probeneinspannung dem Einrichter zu erleichtern, was allerdings sehr auf das Gewicht der Baugruppe schlagen würde. In diesem Zustand beträgt das Gewicht der Baugruppe ca. 60 kg. Auch die Möglichkeit den Motor direkt an die Prüfachse zu montieren, um Bauraum, Gewicht und den Riementrieb zu sparen, hat den Nachteil, dass die Funktion der Probeneinspannung verloren geht, wodurch eine Alternative dazu gebraucht werden würde.

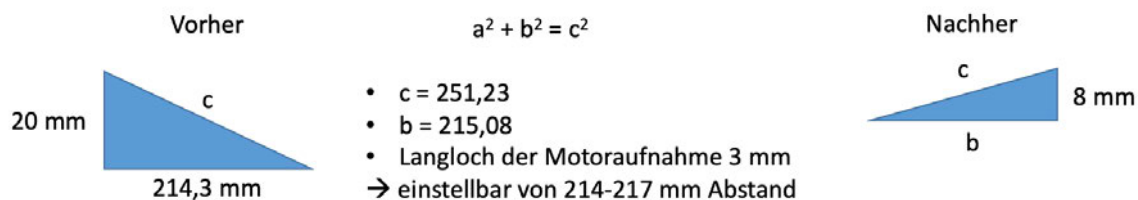


Abbildung 39: Ermittlung der Bohrungsposition nach der Verschiebung

Der Motor wird dabei mit vier DIN 6912 M8 x 20 Zylinderkopfschrauben mit niedrigem Kopf auf ISO 7092 flachen Scheiben der kleinen Form befestigt, während die SKF-Lagerböcke erneut mit jeweils zwei DIN ISO 4762 M16 x 50 Zylinderschrauben mit Innensechskant und den dazugehörigen ISO 7089 Unterlegscheiben auf der Festlagerplatte (siehe Abbildung 40) montiert werden.

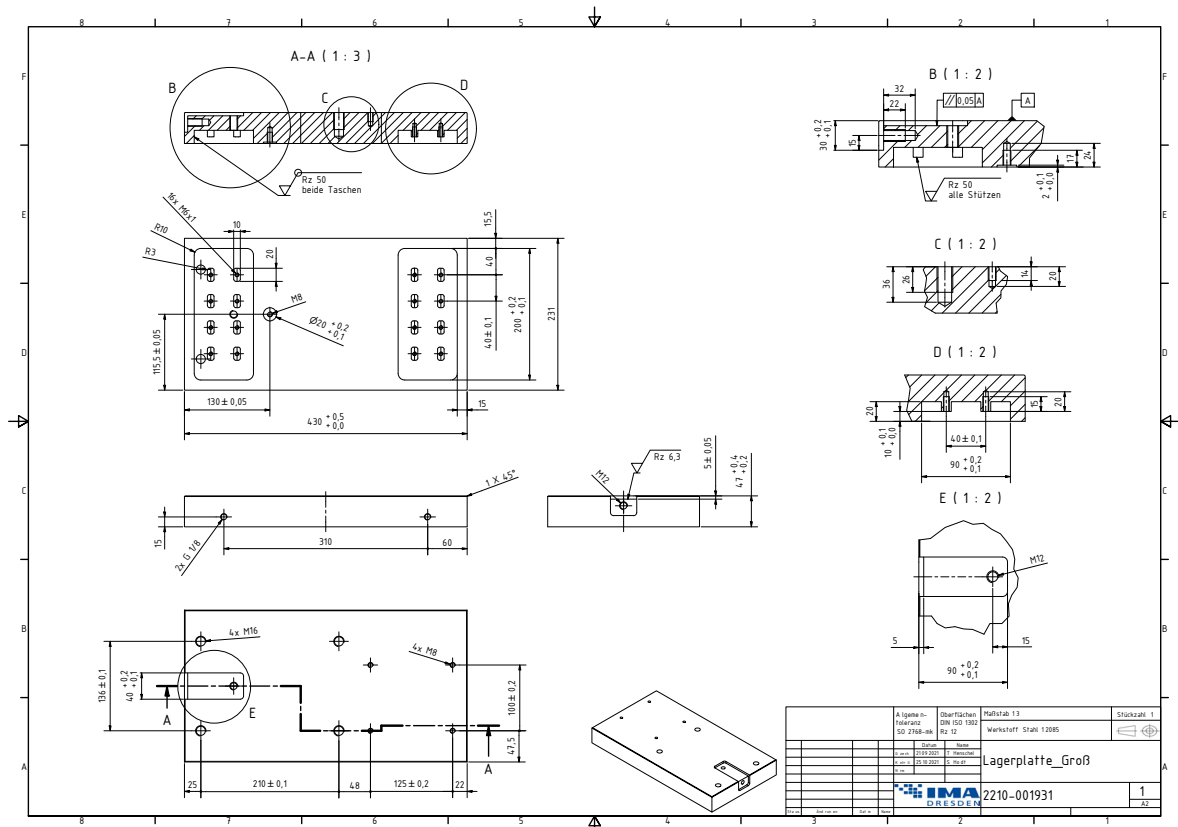


Abbildung 40: Technische Zeichnung der Festlagerplatte

Um auch hier den Kraftarm mit der Festlagerplatte zu verbinden, ist der Steg von oben und von der Seite mit zwei DIN 4762 M12 x 25 Zylinderkopfschrauben mit Innensechskant auf Unterlegscheiben nach ISO 7089 zu montieren. Der Kraftarm an dieser Platte ist ähnlich ausgelegt, wie an der Loslagerplatte. Der Unterschied liegt hierbei an der größeren Montagefläche und einer Durchgangsbohrung mit dem Durchmesser 6,6 mm, um mit einer DIN 6912 M6 x 20 Zylinderkopfschraube mit niedrigem Kopf auf einer DIN 7093-1 flachen großen Unterlegscheibe die Kraftmessdose direkt plan anliegend an der Zugstange (siehe Abbildung 41) zu montieren.

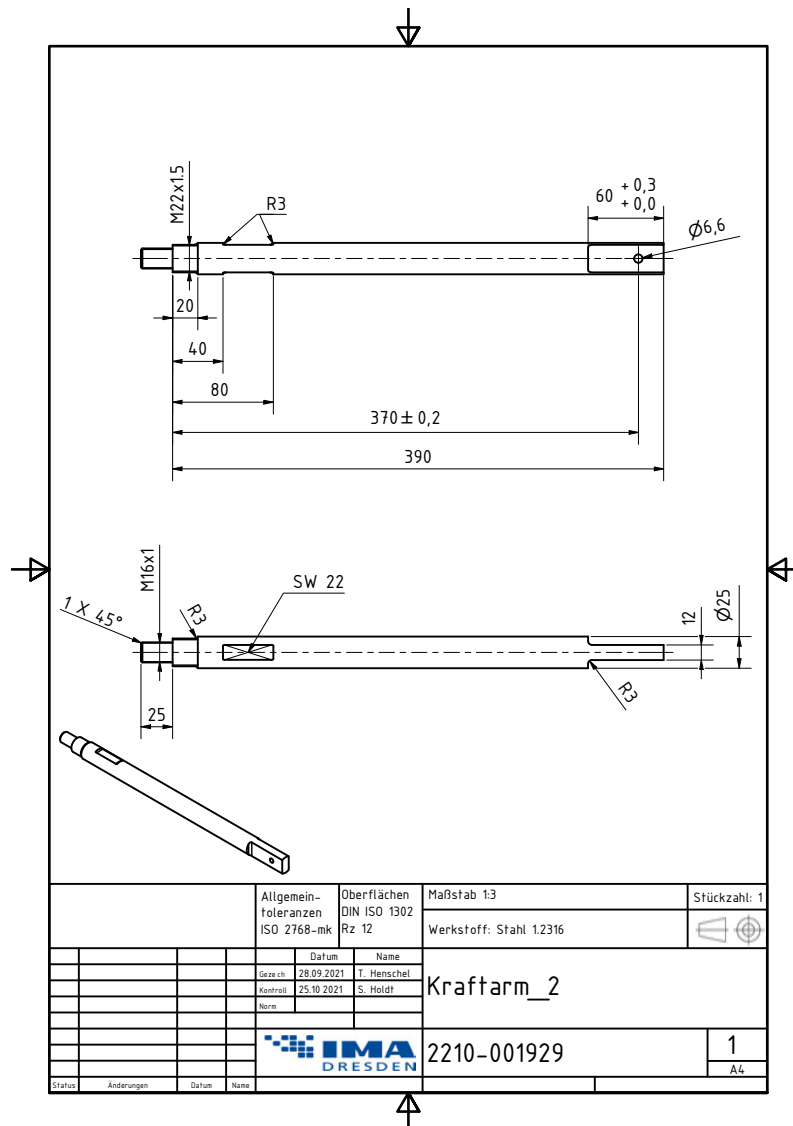


Abbildung 41: Technische Zeichnung des Kraftarmes

An der Unterseite der Festlagerplatte sind ebenso wie bei der Loslagerplatte die Metapor-Platten (siehe Abbildung 42) und der Zapfen montiert. Nach Glg. (5.1) der Flächenpressung entsteht bei einem angenommenen Arbeitsdruck P von 0,2 bar und einer Gewichtskraft F von 600 N eine Fläche A von 30.000 mm². Diese teilt sich auf beide Seiten der Lagerplatte mit je 15.730 mm² auf. Die Metapor-Platten werden wiederum auf die Stützflächen, welche die gleichen Maße wie bei der Loslagerplatte aufweisen, verklebt und aufgrund der größeren Fläche mit jeweils acht DIN 6912 M6 x 20 Zylinderkopfschrauben mit niedrigem Kopf befestigt sowie über die äußere Fuge mit Araldit verklebt. An die Lagerplatte wird erneut ein Winkelsteckanschluss mit einem G1/8" und acht Millimeter Schlauchanschluss und ein T-Steckanschluss mit zwei acht Millimeter Schlauchanschlüssen an der Seitenwand mittels eines G1/8" Gewindes montiert. Sollten die beiden Anschlüsse nicht genügen, ist es möglich, weitere Gewindebohrungen und Anschlüsse anzubringen.

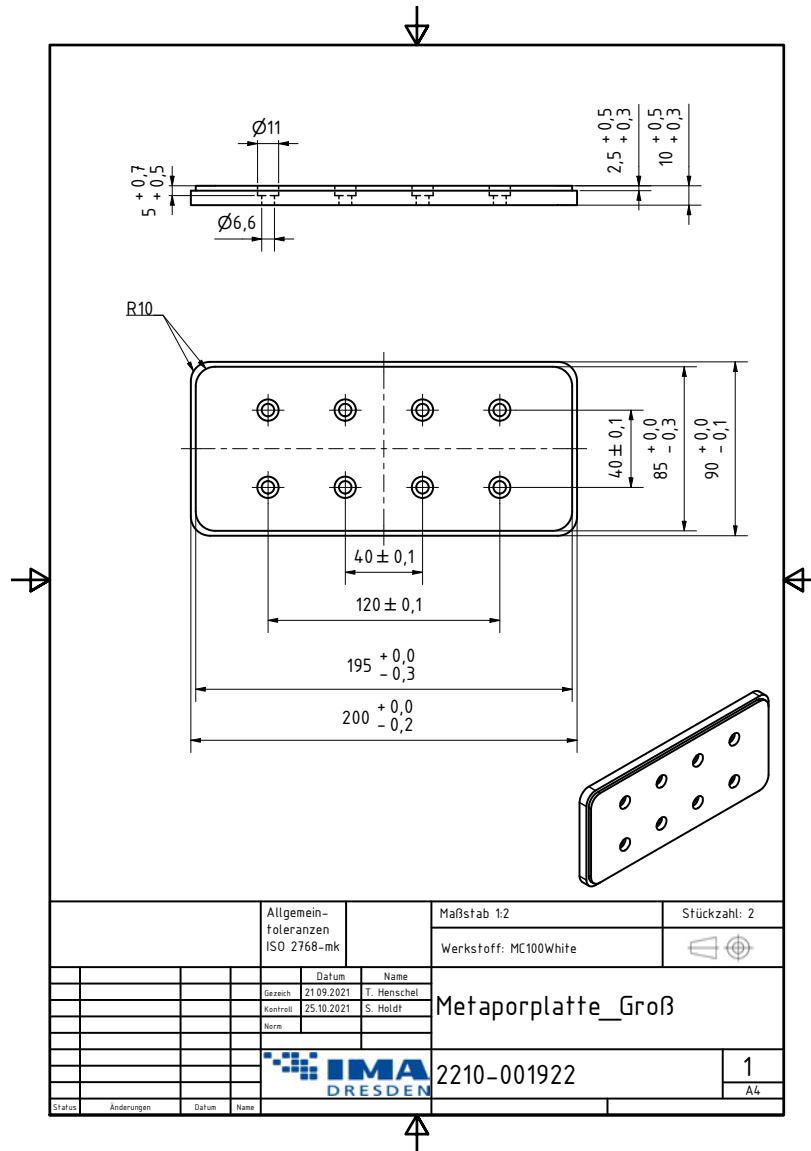


Abbildung 42: Technische Zeichnung der großen Metapor-Platten

Nachdem die porösen Platten an den Unterseiten der Lagerplatten montiert sind, weisen sie ein Aufmaß von 0,5 mm auf. Da sie bei der Herstellung abgesägt werden, sind die Poren auf dieser Seite verschlossen und müssen erst durch eine spanende Bearbeitung erneut geöffnet werden. Daher werden beide Lagerplatten in einer Aufspannung endbearbeitet, um eine genaue Höhe, Oberflächenqualität und Planheit zu gewährleisten (siehe Abbildung 43).

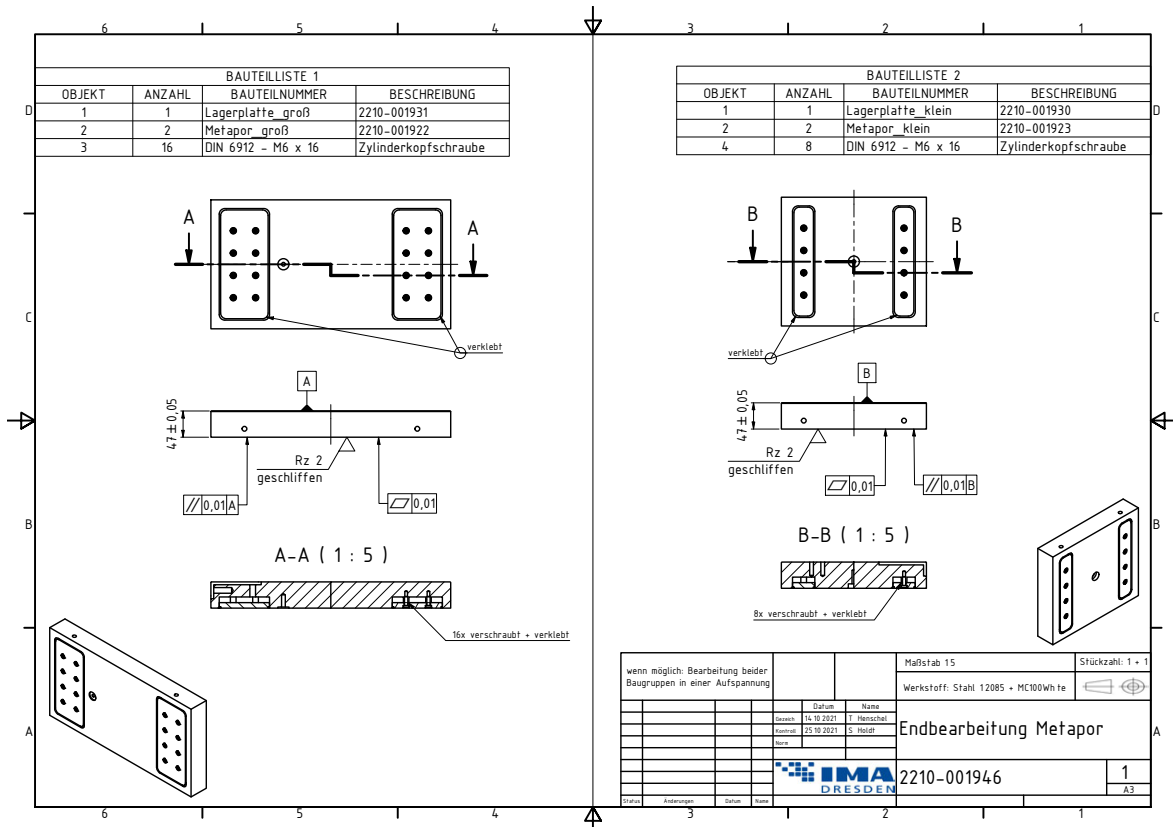


Abbildung 43: Endbearbeitung der Lagerplatten im Zusammenbau

Anders als bei der Loslagerplatte, liegt der Schwerpunkt der Festlagerbaugruppe aufgrund des Motorengewichtes neben dem Zapfen (siehe Abbildung 44). Trotzdem soll die Festlagerplatte ebenfalls über einen Zapfen geführt werden, wie die Loslagerplatte. Für einen Ausgleich soll dabei der Luftdruck über die Flächen des luftdurchlässigen Materials sorgen, welche bei dieser Konstruktion möglich weit außen angeordnet sind. Die Bohrungen der M16 Schrauben der SKF-Lagerböcke ragen dabei in die Flächen der Luftkammer. Dies ist allerdings beim ursprünglichen Aufbau mittels Luftkanälen auch der Fall. Diese Bohrungen sind durch die Gewinde der montierten M16 Schrauben luftdicht verschlossen, wodurch auch bei der neuen Konstruktion kein Luftdruck verloren gehen kann.

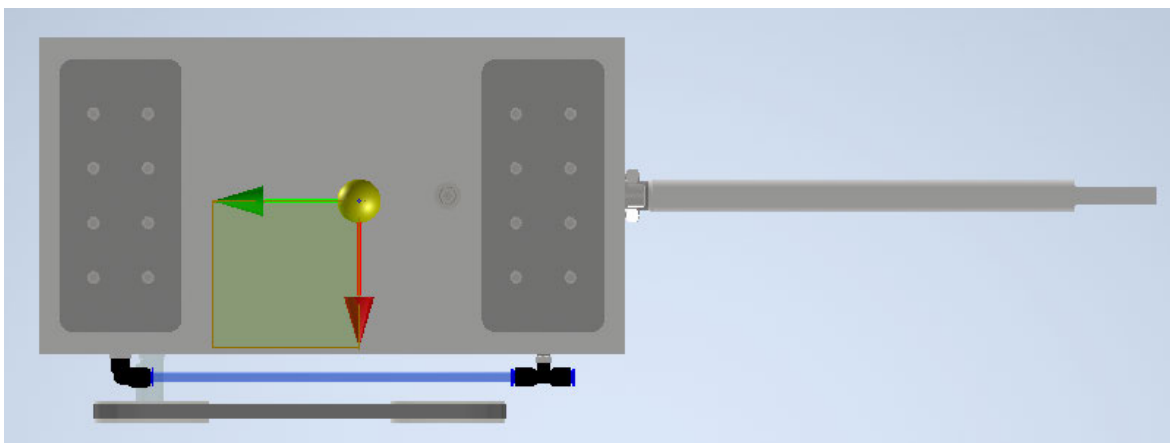


Abbildung 44: Schwerpunkt der Festlagerplatte

5.1.3 Bodengruppe

Die Baugruppe der Bodengruppe (siehe Abbildung 45) besteht aus der Bodenplatte (1), der Rollschienenführung (2), dem Aufnahmebock (3), den Gleitlagerbuchsen (4) und dem dazugehörigen Befestigungsmaterial sowie einer Gummiplattendämpfung unter der Bodenplatte, um die auftretenden Schwingungen zu verringern.

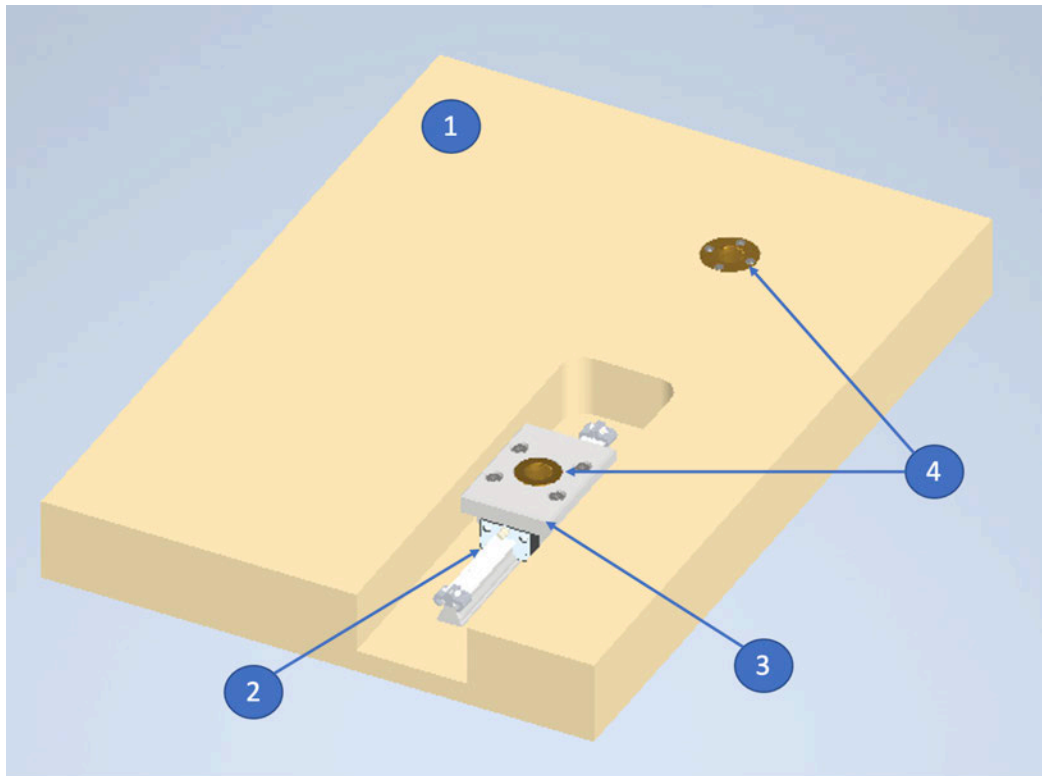


Abbildung 45: Baugruppe Bodengruppe

Die Bodenplatte muss neu konstruiert werden, da eine größere Probengeometrie eine größere verstellbare Länge über das eingelassene Schienensystem voraussetzt. Damit besitzt sie die Abmessungen von 700 x 500 x 75 mm. Die Oberfläche muss eine sehr genaue Parallelität und Planheit (siehe Abbildung 46) aufweisen sowie eine sehr hohe Oberflächenrauheit, um eine ausgeglichene Luftlagerung flächenhaft zu gewährleisten. Dazu wird die obere Seite der Platte geschliffen.

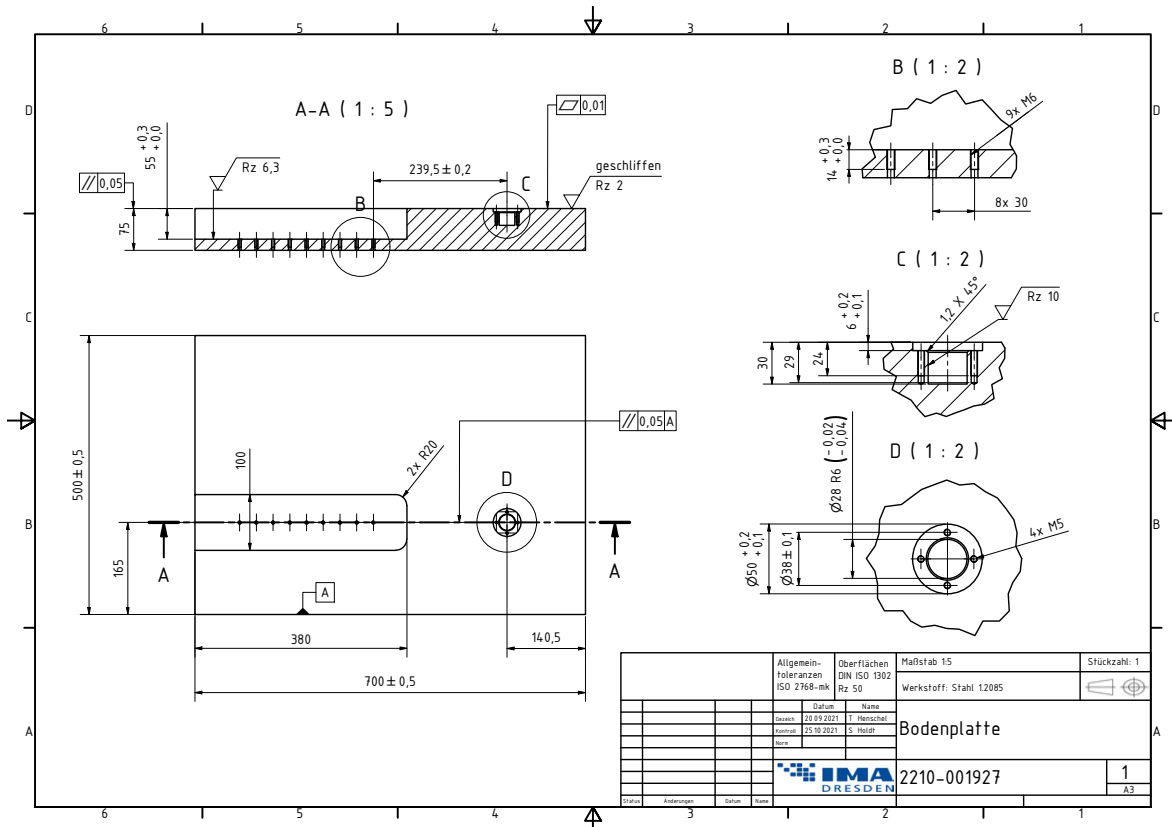


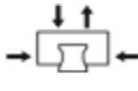

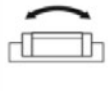
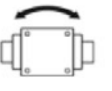
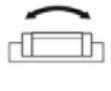
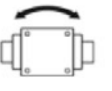
Abbildung 46: Technische Zeichnung der Bodenplatte

Damit es möglich ist Proben von unterschiedlichen Längen einzurichten, während die Achsen der Lagerböcke dabei gleichzeitig auf gleicher Höhe bleiben, ist das Schienensystem in die Bodenplatte eingelassen. Dabei wurde die Rollschienenführung mit einer Länge von 266 mm nach Glg. (5.2) der Firma Bosch Rexroth gewählt, da die Montageeinheiten sehr kompakt ausfallen und somit keine große Aufbauhöhe benötigen.

$$L = \left(\frac{LW}{T_2} \right) \cdot T_2 - 4 \quad (5.2)$$

Der Vorteil gegenüber zu Kugelschienenführungen ist der verringerte Verschleiß aufgrund der Nutzung von Rollen. Die Tragzahlen und Tragmomente fallen bei der Rollschiene meist etwas geringer als die der Kugelschiene aus (siehe Tabelle 2). Sie bietet trotzdem ausreichende Sicherheit für die zu erwartenden Belastungen der Gewichtskraft und des auftretenden Momentes. Das System Flansch-Lang-Standardhöhe, kurz FLS, besteht aus der Rollschiene R180523131 und dem Rollenwagen R18532312X mit der internen Größe 25. Die komplette Aufbauhöhe beträgt dabei 36 mm. Befestigt wird die Schiene mittels neun ISO 4762 M6 x 25 Zylinderkopfschrauben in der dafür vorgesehenen Nut. Dabei ist darauf zu achten, dass die Bohrungen in einer Flucht mit der Gleitlagerbuchse (siehe Abbildung 46 „D“) liegen, da dies die Angriffspunkte der Konstruktion sind [22].

Tabelle 2: Vergleich der Führungen [22]

Ausführung	Größe	Masse	Tragzahlen (N)		Tragmomente (Nm)			
								
		m	C	C ₀	M _t	M _{t0}	M _L	M _{L0}
FLS - Kugel	25	0,9	37300	52500	530	750	340	490
FLS - Rollen	25	0,93	36800	76400	480	990	470	970

Die statische Tragfähigkeit wird nach Glg. (5.3) berechnet und muss nach den Einsatzbedingungen einen Sicherheitsfaktor von mindestens fünf bis acht aufweisen. Mit der Gewichtskraft von 600 N ergibt sich ein überdimensionierter Faktor von über 100. Daher ist die Wahl der Vorspannungsklasse eher unwesentlich, da keinerlei Überbelastungen auftreten werden [22].

$$S_0 = \frac{C_0}{F_{0max}} \quad (5.3)$$

Die nominelle Lebensdauer der Rollenschienenführung ergibt sich aus Glg. (5.4), unter gleichen Bedingungen, bei laufenden Lagerungen, mit heute allgemein verwendetem Werkstoff, mit normaler Herstellerqualität und üblichen Betriebsbedingungen. Sie steht für eine 90%ige Erlebenswahrscheinlichkeit der errechneten Lebensdauer und beträgt in diesem Fall $6,6 \cdot 10^{11}$ Meter [22].

$$L_{10} = \left(\frac{C}{F}\right)^{\frac{10}{3}} \cdot 10^5 \quad (5.4)$$

Die Dynamikwerte der Variante FLS sind für die Geschwindigkeit mit vier Metern pro Sekunde und für die Beschleunigung mit 150 m/s^2 angegeben. Diese Werte sind weniger bedeutsam, da die Schiene nur bei der Einspannung bewegt wird und nicht aktiv bei der Umlaufbiegeprüfung mitwirkt [22].

Als Genauigkeitsklasse der Rollenschiene und des Rollenwagens sind jeweils die Klasse Superpräzise gewählt, da diese eine Toleranz von $\pm 10 \text{ }\mu\text{m}$ auf das Höhenmaß aufweisen, um einen Höhenunterschied der Lagerplatten zu minimieren [22].

Auf diesem Rollenwagen werden die vier vorhandenen M8 Gewinde verwendet, um darauf den Zapfenaufnahme (siehe Abbildung 47) mithilfe von DIN 6912 M8 x 20 Zylinderkopfschrauben mit niedrigem Kopf zu montieren. Die Randabstände sind dabei eingehalten (siehe Anlage Teil 1). Dieser Rollenwagen hat die Aufgabe den Zapfen über eine eingepresste Gleitlagerbuchse zu führen. Die Höhe des kompletten Schienensystems darf dabei die Oberfläche der Bodenplatte nicht überschreiten, da die Loslagerplatte sonst höher steht als die Festlagerplatte und die Luftlagerung damit nicht realisiert werden kann. Somit endet das Schienensystem zwei Millimeter unter der Loslagerplatte, um ausreichend Toleranz zu erhalten.

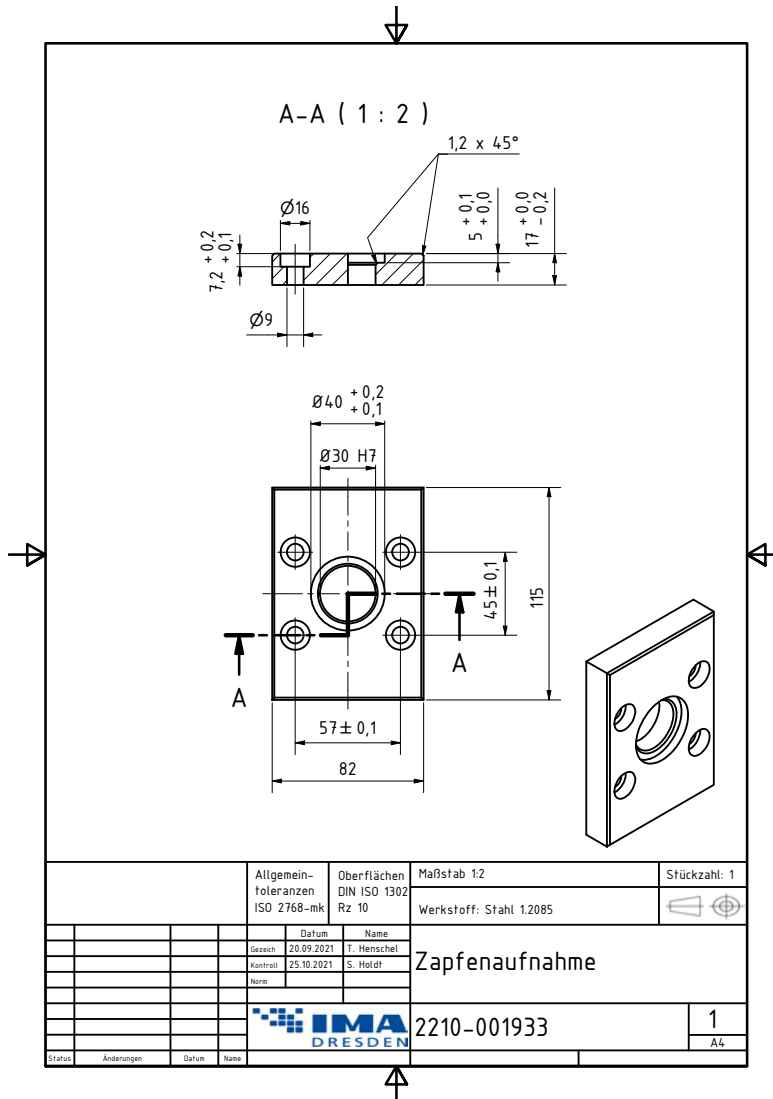


Abbildung 47: Technische Zeichnung des Zapfenaufnahmebockes

Die Gleitlagerbuchsen von Misumi bestehen aus einer hochfesten Messinglegierung und besitzen eine Festschmierstoffeinlagerung. Im Gegensatz zu Wälzlagern wird die Bewegung durch Gleiten anstelle von rollenden Kugeln umgesetzt, wodurch größere Traglasten aufgrund der größeren Auflagefläche aufgenommen werden können. Sie eignen sich für lineare und rotative Bewegungen und gelten durch ihren Festschmierstoff als wartungsfrei. Es muss kein externes Schmieresystem verwendet werden, dadurch wird Bauraum gespart und Kosten gesenkt. Je nach Anwendung gibt es verschiedene Einflüsse auf die Lebensdauer solcher Buchsen, wie zum Beispiel die Oberflächenrauigkeit der Welle, die Gleitgeschwindigkeit, der Oberflächendruck, die Bewegungsart und die Drehzahl. Bei Verwendung der UBM200 kommt es lediglich zu einer Schwenkbewegung ohne nennenswerte Auslenkung im Prüfbetrieb, wodurch eine konkrete Berechnung nur schwer durchzuführen ist. Die allgemeine Gleichung der Lebensdauer bzw. der geschätzten Verschleißintensität W_i wird nach Glg. (5.5) ermittelt. Dabei spielen die spezifische Verschleißrate K_s , der Oberflächendruck P und die Geschwindigkeit V während der Rei-

bungszeit T_R eine Rolle. Der maximal zulässige Flächendruck der Buchsen aus Kupferlegierung liegt bei 29 N/mm^2 [14].

$$W_i = K_s \cdot P \cdot V \cdot T_R \quad (5.5)$$

Die Gleitlagerbuchse MPTZ 20-25 wird direkt in die Bodenplatte eingepresst und am Flansch mit vier M5 x 16 Zylinderschrauben mit Innensechskant verschraubt, während die Buchse MPFZ 20-15 in die Zapfenaufnahme gepresst wird. Dazu ist eine Passung zwischen Außendurchmesser der Buchse und Bohrungsdurchmesser der Aufnahmepunkte zu wählen. Bei der Verbindung Bodenplatte - Gleitlagerbuchse ist eine Presspassung von 28R6 und 28h7 vorgegeben, welche ein minimales Übermaß von $0,003 \text{ mm}$ und maximales Übermaß von $0,037 \text{ mm}$ aufweist (siehe Abbildung 48) [14].

Die Verbindung zwischen Zapfenaufnahme - Gleitlagerbuchse verwendet hingegen eine Presspassung von 30H7 und 30r6, was zu einem minimalen Übermaß von $0,007 \text{ mm}$ und maximalem Übermaß von $0,041 \text{ mm}$ führt (siehe Abbildung 48). Eine solche Paarung gilt als geringes Übermaß und wird häufig für Lagerbuchsen in Gehäusen verwendet [14].

Die Passung zwischen den Zapfen und den Buchsen beträgt jeweils 20H7 und 20g6. Dies ist eine Spielpassung mit einem maximalen Spiel von $0,041 \text{ mm}$ und einem minimalen Spiel von $0,007 \text{ mm}$ (siehe Abbildung 48). Eine solche Passung wird oft bei Gleitlagern verwendet und gilt als gut gleitfähig [14].

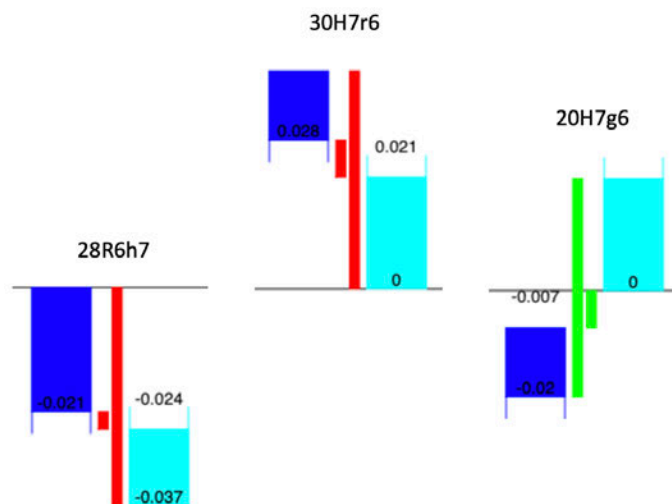


Abbildung 48: Toleranzen nach ISO 286 [23]

5.1.4 Krafteinleitung

Die Baugruppe der Krafteinleitung (siehe Abbildung 49) besteht aus dem Handrad (1), der Verbindungswelle (2), der Rändelmutter (3), einer Lagerung (4), einer Feder (5), einer Kette (6) und der Kraftmessdose (7). Die Bauteile werden jeweils mit den Kraftarmen verbunden.

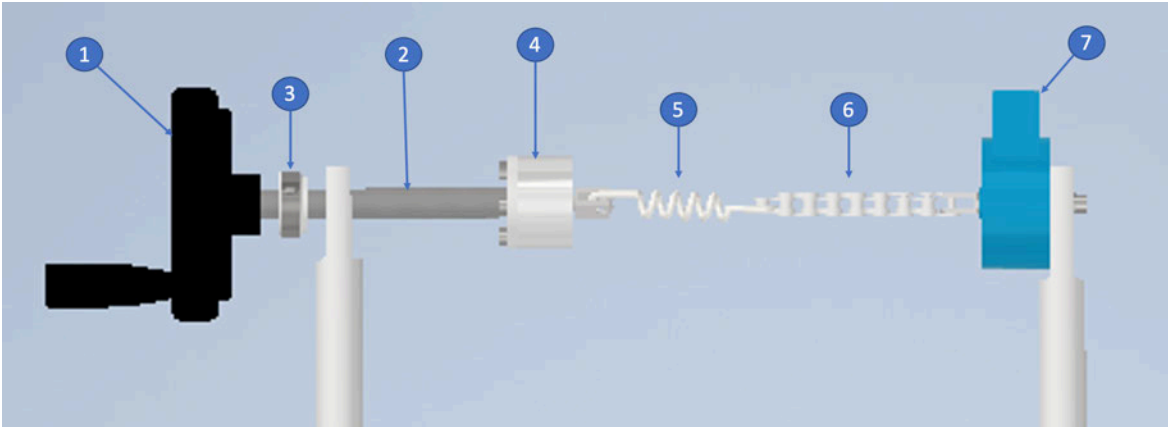


Abbildung 49: Baugruppe Krafteinleitung

Das Handrad ist aus Phenol, hat einen Außendurchmesser von 125 mm und besitzt einen klappbaren Griff, um die Gefahr einer Verstellung während der Prüfung zu verringern. Es wird über einen Vierkant an die Verbindungswelle (siehe Abbildung 50) gesteckt und mit einer DIN 6912 M6 x 20 Zylinderkopfschraube und einer flachen Unterlegscheibe der großen Ausführung nach ISO 7093-1 auf einer Länge von 24,8 mm verschraubt. Die Verbindungswelle entsteht aus einem Normteil, einer Gewindestange nach DIN 975, ebenfalls aus nichtrostendem Stahl mit einem M16 x 1,5 Feingewinde, welches sich über eine Länge von 144 mm erstreckt.

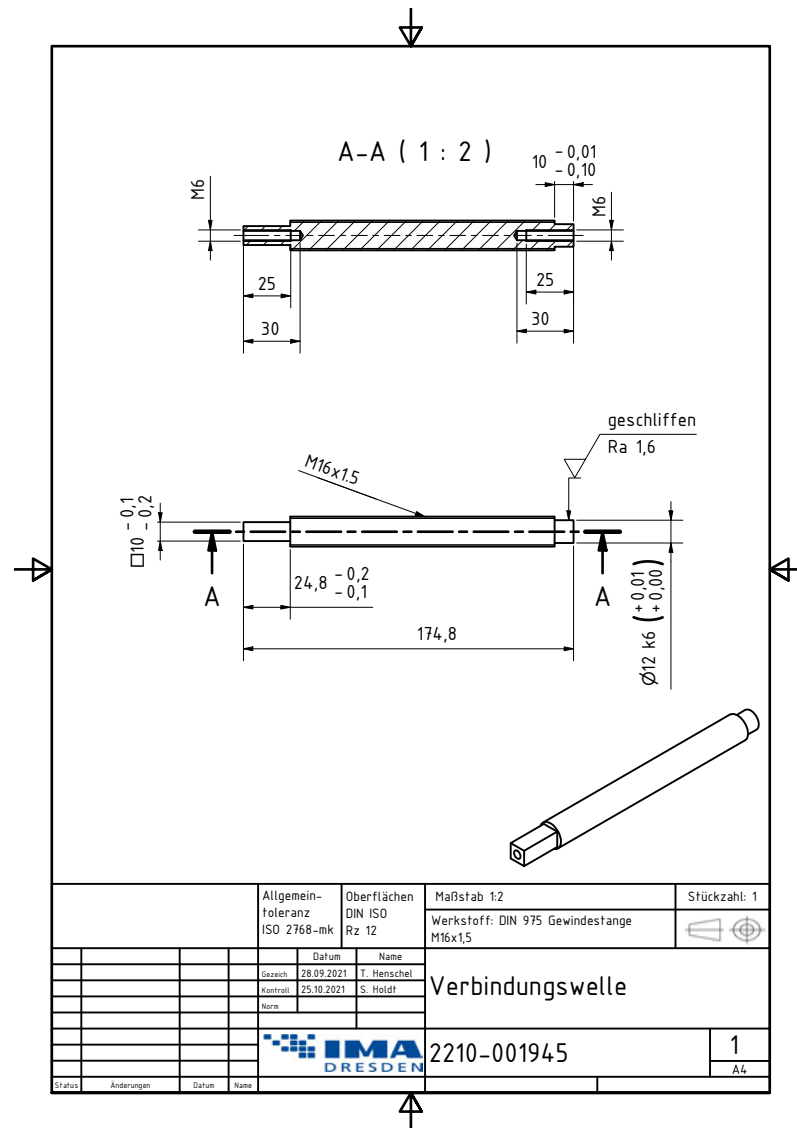


Abbildung 50: Technische Zeichnung der Verbindungswelle

Auf dieser Stange wird eine Rändelmutter aus X38CrMo16 als Kontermutter verwendet, um ein Verstellen der Prüfkraft während einer Prüfung zu verhindern. Diese Rändelmutter (siehe Abbildung 51) muss extra angefertigt werden, da es sich mit der Größe des Feingewindes nicht um ein Normteil handelt. Sie weist den Außendurchmesser von 35 mm auf, wodurch sie gut in der Hand liegt. Die Fläche dieses Durchmessers wird gerändelt nach DIN 82 achsparallel mit einer Tiefe von 0,8 mm, um die Griffbarkeit zu erhöhen [24].

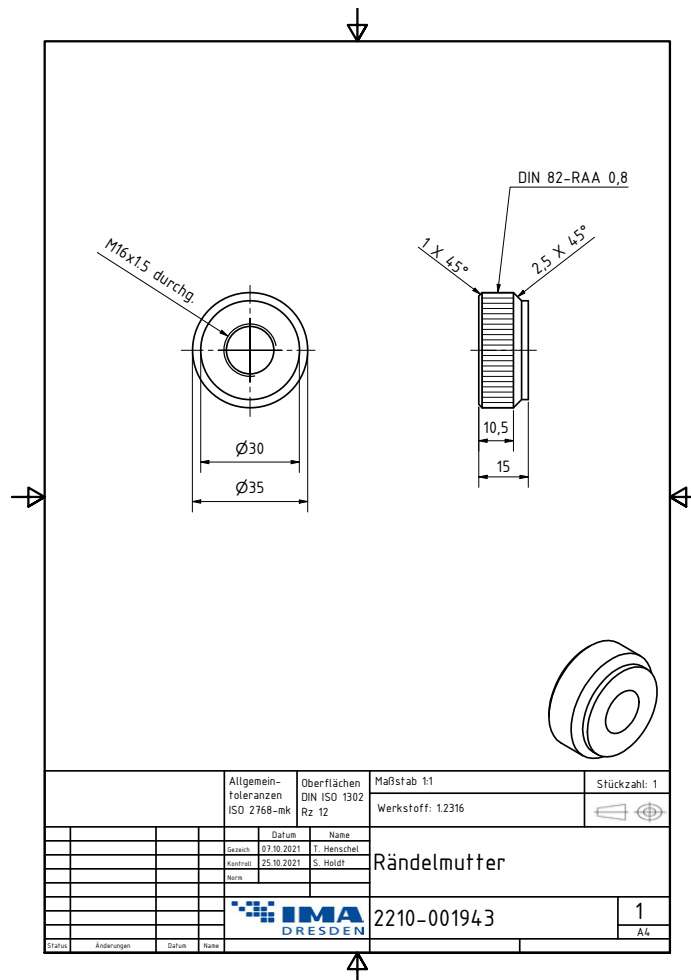


Abbildung 51: Technische Zeichnung der Rändelmutter

Auf der gegenüberliegenden Seite des Handrads befindet sich eine Lagerung. Diese ist notwendig, um die Drehbewegung der Achse beim Einstellen der Prüfkraft über das Handrad auf der gesamten Länge zu verhindern, da die Rotationsbewegung sonst bis zur Kraftmessdose und der Kraftarme übertragen wird. Diese Baugruppe besteht aus einem Gehäuse und einem Deckel aus dem Werkstoff AlMg3 sowie eines einreihiges Schrägkugellager nach DIN 628, mit dem Außendurchmesser von 32 mm, dem Innendurchmesser von 12 mm und einer Breite von 10 mm. Im Schnittbild (siehe Abbildung 52) wird deutlich, dass das Wälzlager mit einer Übergangspassung von 12H7 und 12k6, bei der ein Übermaß sowie ein Spiel gleichermaßen wahrscheinlich auftreten, auf der Verbindungswelle leicht aufgepresst wird und der innere Ring des Lagers durch eine Unterlegscheibe der großen Ausführung nach DIN 7093-1 und einer Zylinderkopfschraube M6 x 20 nach DIN 6912 festgehalten wird. Der äußere Ring sitzt im Gehäuse (siehe Abbildung 53) mit einer Übergangspassung von 32N6 und 32h7, wobei ein Übermaß wahrscheinlicher auftritt, welches mittels leichter Hammerschläge zu fügen ist. Er wird durch die innere Kreisfläche mit dem Durchmesser von 32 mm und einer Aufbaudicke von 2,5 mm des Deckels (siehe Abbildung 54) zusammengehalten. Deckel und Gehäuse werden mit sechs DIN 6912 M5 x 14 Zylinderkopfschrauben auf einem Kreisring mit dem Durchmesser 40 mm verschraubt.

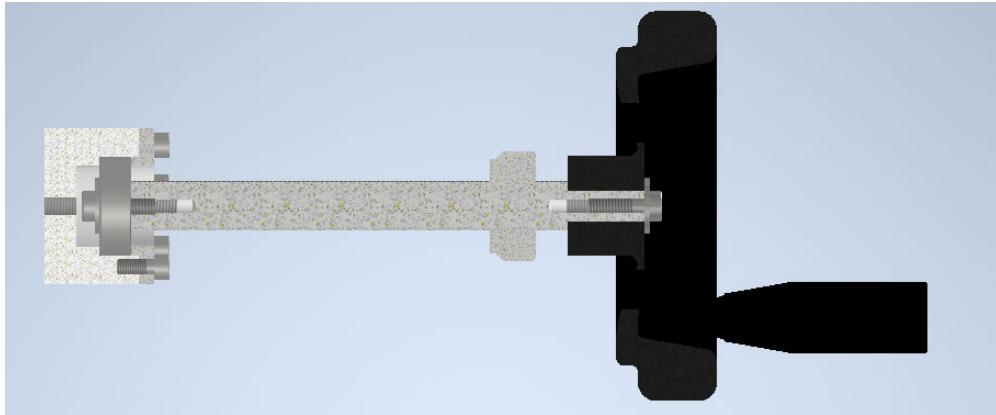


Abbildung 52: Schnittansicht der Handrad-Verstellung

Bei der Krafteinleitung werden die Zugkräfte von 500 N nicht überschritten. Die kleinsten Schrauben der Konstruktion, die Zylinderkopfschrauben M5 x 14 mit niedrigem Kopf der Festigkeitsklasse A2 nach DIN 6912, sind in dieser Baugruppe verbaut. Sie besitzen eine Dehngrenze $R_{P0,2}$ von mindestens 210 N/mm^2 . Damit beträgt die niedrigste Querschnittsfläche ca. 19 mm^2 und besitzt eine achtfache Sicherheit gegen plastische Verformung.

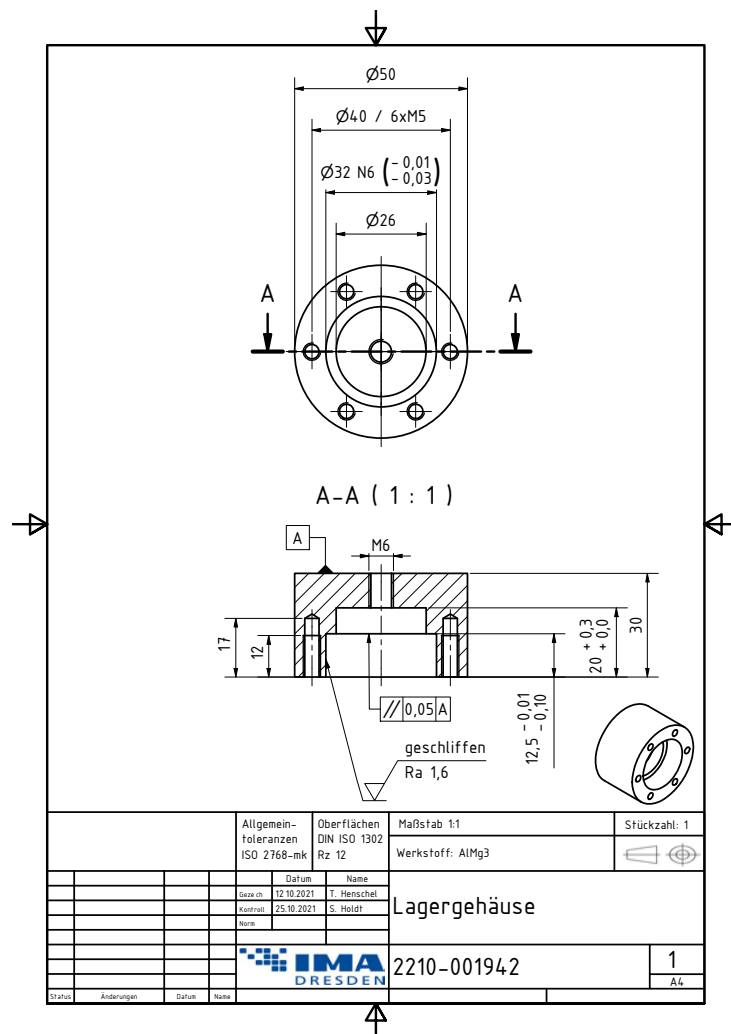


Abbildung 53: Technische Zeichnung des Lagergehäuses

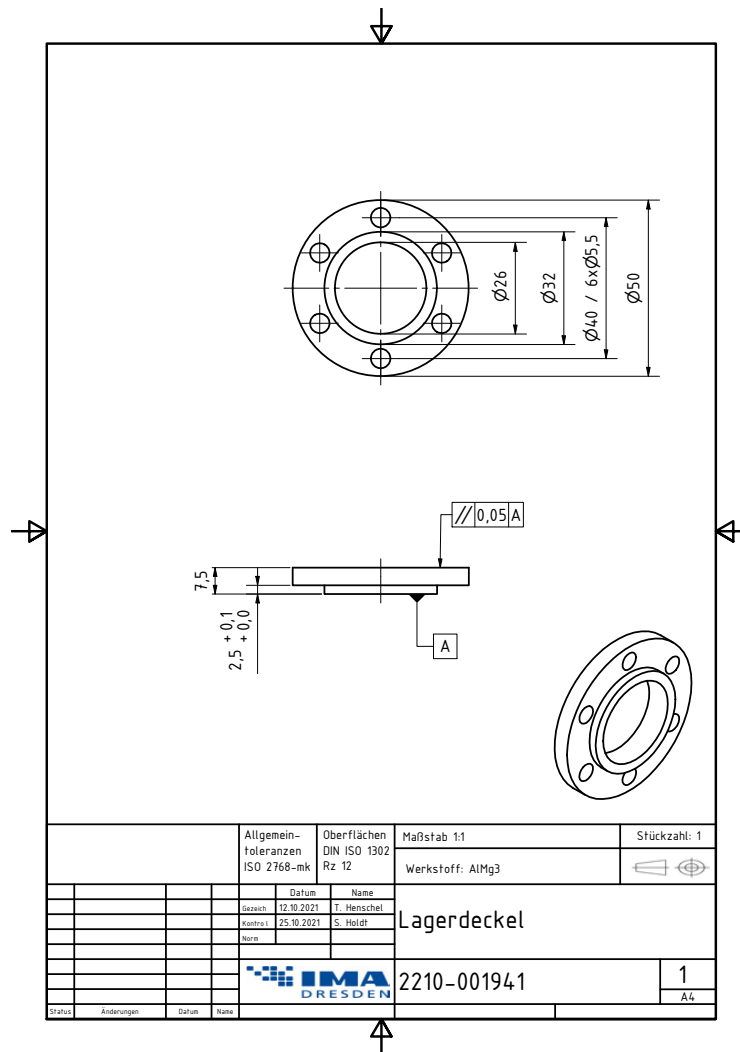


Abbildung 54: Technische Zeichnung des Lagerdeckels

Weiterhin besitzt das Lagergehäuse ein zentral angeordnetes M6 Gewinde, um daran einen Gabelkopf zur Aufnahme der Feder zu montieren. Die Feder wird durch eine Kette mit der Kraftmessdose verbunden. Dafür kommt eine Shadow Interlock Halflink Fahrradkette aus einem CrMo-Stahl zum Einsatz, da diese eine maximale Zugbelastung von 15000 N ertragen kann und durch ihre halben Kettenglieder die Probeneinspannung erleichtert. Die Kraftmessdose der Marke Interface mit einem Messbereich von 0 – 500 N ist für Zug- und Druckkräfte dauerschwingfest bei vollen Lastwechseln ausgelegt [25].

5.2 Wirkungsweise

Im zusammengebauten Zustand besteht das Konzept (siehe Abbildung 55) aus den Baugruppen der Bodengruppe (1), der Festlagerplatte (2), der Loslagerplatte (3), der Krafteinleitung (4) sowie einer Umlaufbiegeprobe (5).

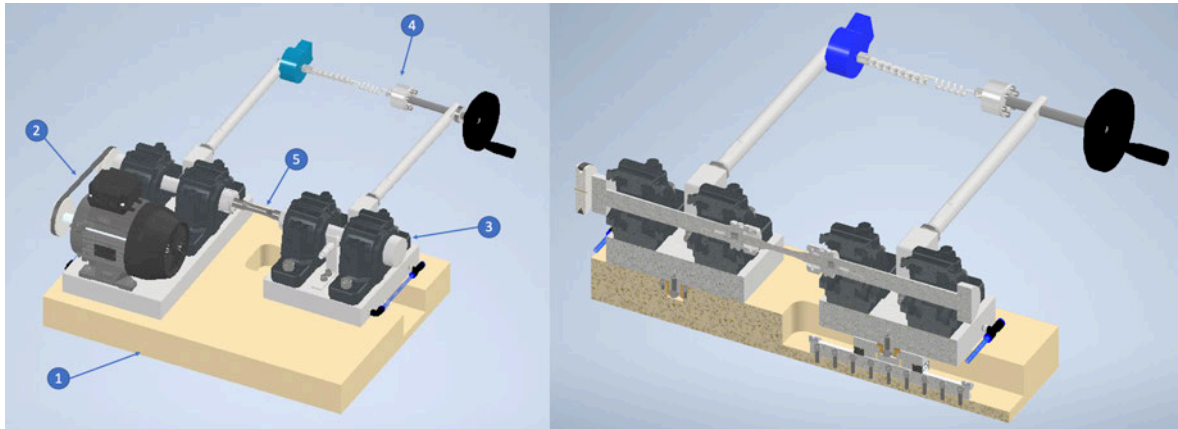


Abbildung 55: Konzept und Schnittansicht der Prüfachse

Bevor die eigentliche Prüfung der Probe mit dieser Konstruktion beginnen kann, muss sie im jeweiligen Einspannfutter fest eingespannt werden. Dabei handelt es sich bei dieser Variante um Zugspannzangen (siehe Abbildung 56), welche durch das Sägezahngewinde S20 x 2 über die schon vorhandene Hohlwelle an beiden Enden der Prüfachse an einem Aufsatz festgezogen werden (siehe Abbildung 57). Diese Spannzangen sind präzisionsgeschliffen, hoch verschleißfest, in mehreren Ausführungen erhältlich und passend für Werkzeugaufnahmen vom Typ SK 40 [26].



Abbildung 56: Direktspannzange Typ 574E mit Steilkegel [26]

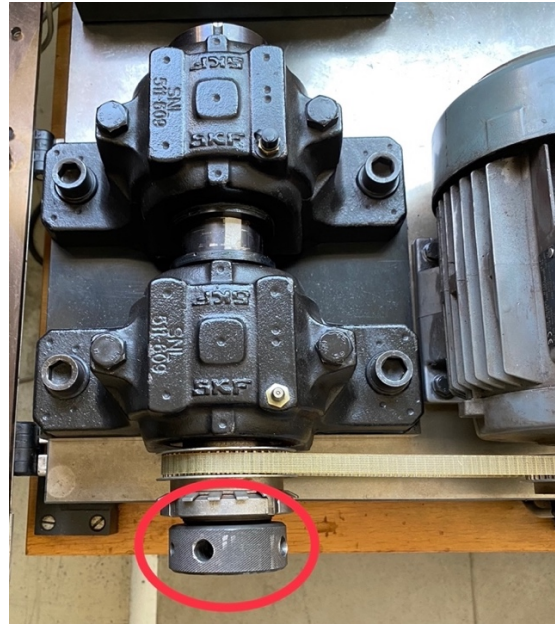
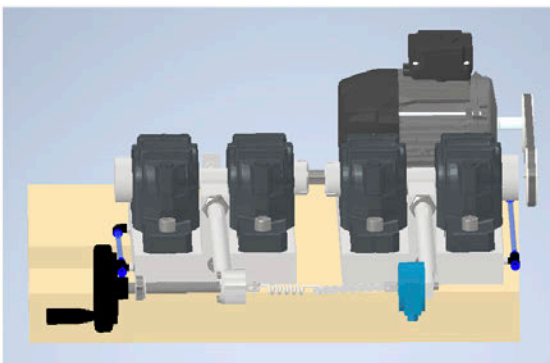
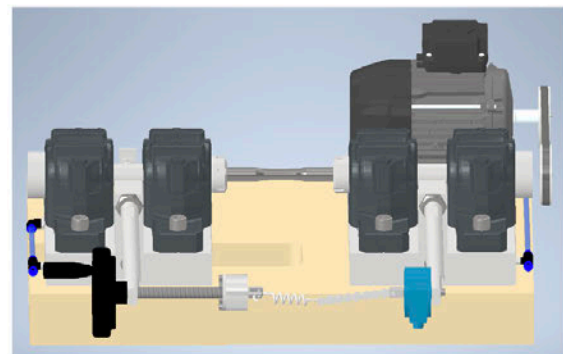


Abbildung 57: Ausschnitt zum Festziehen der Zugspannzangen

Um die Proben einzuspannen, muss die Anlage mit Druckluft betrieben werden, um eine mögliche Beschädigung der empfindlichen Metapor-Platten an der Unterseite der Lagerplatte zu verhindern. Wenn sich diese im Schwebезustand mit einer Spalthöhe von 0,2 bis einem Millimeter befinden, kann die Loslagerplatte mittels der Rollenschieneführung bewegt werden, um eine saubere und passgenaue Einstellung der Prüflänge einzustellen. Dabei beträgt der Luftdurchsatz 1,4 Liter pro Quadratzentimeter pro Minute bei einem Druck von einem Bar, bei Verwendung einer 10 mm dicken Metapor-Platte. Durch die gewählte Länge der Schiene von 266 mm lassen sich Prüflängen von 22 mm bis hin zu 147 mm realisieren (siehe Abbildung 58) [27].



Geringster Abstand: 22 mm
Zwischen Spannзangen = Prüflänge



Größter Abstand: 147 mm
Zwischen Spannзangen = Prüflänge

Abbildung 58: seitliche Darstellung der variablen Prüflängen

Um der Anwendung einer Umlaufbiegemaschine gerecht zu werden, treibt der Motor, welcher auf der antreibenden Festlagerplatte montiert ist, die Prüfachse über einen Riementrieb mit einer wählbaren Frequenz an. Diese kann vorher frei über den Frequenzumrichter eingestellt werden. Meistens wird eine Frequenz von 30 oder 50 Hz angestrebt. Dadurch wird die Probe über die Zugspannzangen ebenfalls mit gedreht.

Anschließend werden Kette und Feder zwischen den Kraftarmen eingebracht, um die Verbindung der Kraftereinleitung zu gewährleisten. Mithilfe des Handrades erfolgt die Einstellung der geforderten Prüfkraft, die über die Kraftmessdose gemessen und angezeigt wird. Die Rändelmutter fungiert dabei als Kontermutter und wird an den Kraftarm der Loslagerplatte geschraubt, damit sich das Gewinde während der Prüfung nicht verstellen kann und die eingestellte Kraft erhalten bleibt.

Dadurch wird die Baugruppe Kraftereinleitung zusammengezogen. Dieses Zusammenziehen bewirkt eine Auslenkung der Lagerplatten (siehe Abbildung 59) in ihrem Lagersitz. Die Stahlzapfen werden in ihrer Gleitlagerbuchse bewegt.

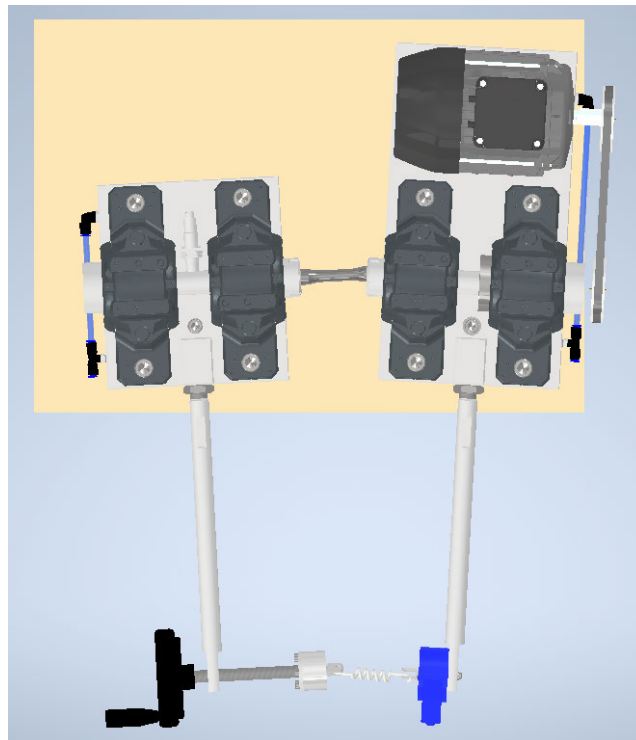


Abbildung 59: Beispielhafte Darstellung der ausgelenkten Lagerplatten von oben

Die Auslenkung bewirkt dabei das geforderte Biegemoment, welches über die Kraftarme auf die Lagerplatten gelenkt und vollständig über die Prüflänge der Probe konstant aufgetragen wird, wie es die DIN 50113 nach Abbildung 13 verlangt.

Über den Drehzahlsensor an der Loslagerplatte und einer Noppe an der Welle zwischen den Lagerböcken wird die Schwingspielzahl aufgenommen. Die Prüfung endet, wenn es zum Bruch der Probe kommt, die vorher festgelegte Grenzschiwingspielzahl erreicht ist,

oder es zu einem Not-Aus Signal der Maschine kommt. Hierfür muss im System hinterlegt sein, dass die Abschaltung der Maschine erfolgt, sobald die Prüfkraft schlagartig erhöht wird, es zu einer Havarie im Druckluftnetz kommt, bei der die Luftlagerung ausfällt und die Konstruktion auf die Bodenplatte fällt oder der Not-Aus-Schalter betätigt wird.

5.3 Stückliste

Auf Grundlage dieser Konstruktion und Neugestaltung des Aufbaus entsteht die angelegte Stückliste (siehe Anlage Teil 1). Sie unterteilt sich in Fertigungsteile und Zukauf- bzw. Normteile.

Die Kosten für die Fertigungsteile sind abhängig vom Material, der Lieferzeit und sind auf 5000 € geschätzt. Für das Befestigungsmaterial ist der Preis je Teil mit einem Euro angesetzt, wodurch sich der Gesamtpreis auf 100 € beläuft. Die Kosten für die Steuerungs- und Regeltechnik sind nicht absehbar, da diese davon abhängen, welche Baugruppen und Bauteile des vorhandenen Aufbaus verwendet werden können. Hierfür sind ca. 4000 € veranschlagt. Für die Bestellungen der Zugspannzangen, des Schienensystems, der Kraftmessdose und der Dämpfungsplatten liegen Angebote vor.

Basierend auf dieser Liste kommt für das Projekt UBM200 zu Gesamtkosten in Höhe von 12.443,36 € (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Auszug der Stückliste

Lfd. Nr.	Stückzahl	Bezeichnung	Gesamtpreis
1	2	Metapor_Groß	5.000,00 €
2	2	Metapor_Klein	
3	1	Bodenplatte	
4	1	Kraftarm_1	
5	1	Kraftarm_2	
6	1	Lagerplatte_Klein	
7	1	Lagerplatte_Groß	
8	2	Zapfen	
9	1	Zapfenaufnahme	
10	1	Lagerdeckel	
11	1	Lagergehäuse	
12	1	Rändelmutter	
13	2	Steg	
14	1	Verbindungswelle	
15	2	Endbearbeitung_Metapor		100,00 €
16	8	ISO 4762 Zylinderschraube, Innensechskant, D 6 -100 M 16 x 50	
17	8	ISO 7089 Flache Scheibe normale Reihe, A2 200 HV 16 / 17 x 30 x 3	
18	2	DIN 6912 Zylinderschraube mit niedrigem Kopf, ISK, A2 M 8 x 30	
19	10	DIN 6912 Zylinderschraube mit niedrigem Kopf, ISK, A2 M 8 x 20	
20	12	ISO 7092 Flache Scheibe kleine Reihe, A2 200 HV 8 / 8,4 x 15 x 1,6	
21	24	DIN 6912 Zylinderschraube mit niedrigem Kopf, ISK, A2 M 6 x 16	
22	9	ISO 4762 Zylinderschraube, Innensechskant, A4 -80 M 6 x 25	
23	1	DIN 975 / DIN 976 Gewindestange Edelstahl A2 Feingewinde, M16 x 1,5	
24	3	DIN 6912 Zylinderschraube mit niedrigem Kopf, ISK, A2 M 6 x 20	
25	3	ISO 7093-1 Flache Scheibe große Reihe, A2 200 HV 6	
26	4	ISO 4762 Zylinderschraube, Innensechskant, A4 -80 M 12 x 25	
27	4	ISO 7089 Flache Scheibe normale Reihe, A2 200 HV 12 / 13 x 24 x 2,5	
28	10	DIN 6912 Zylinderschraube mit niedrigem Kopf, ISK, A2 M 5 x 14	
29	2	ISO 8675 Sechskantmutter, niedrige Form, Fase, Fein, A2 M 22 x 1,5	
30	1	Handrad mit Klappgriff	76,85 €
31	1	Gleitlagerbuchse MPTZ 20-25	17,54 €
32	1	Gleitlagerbuchse MPFZ 20-15	9,57 €
33	1	PVC-Gewebeschlauch 9 (3/8")x15mm, 15mtr. mit Kupplung & Stecker	39,65 €
34	2	Winkel-Steckanschluss G 1/8"-8mm, IQS-Standard	5,42 €
35	2	T-Steckanschluss G 1/8"-8mm, IQS-Standard	8,68 €
36	1	Polyurethan-Schlauch 8 x 5 mm, blau (5m)	5,70 €
37	1	Steck-Mehrfachverteiler, 2-fach G 1/4"-8mm, IQS-Standard	9,08 €
38	2	Drosselrückschlagventil 8mm Steckanschluss	33,04 €
39	1	Schräggugellager einreihig, DIN 628, 12x32x10mm, offen	30,90 €
40	1	Vakuumschleifplatte Metapor MC 100 White	410,00 €
41	4	Araldit Doppelkartusche 50ml	58,00 €
42	1	Klebepistole für Doppelkartusche 50ml	59,00 €
43	1	Araldit Mischrohr	1,60 €
44	1	Rollenschiene R180523131	125,16 €
45	1	Rollenwagen R18532312X	284,63 €
46	2	Spannhülse 574 E 20,00 Rund	208,96 €
47	2	Spannhülse 574 E 16,00 Rund	208,96 €
48	1	Interface Kraftaufnehmer	1.207,85 €
49	2	Gabelkopf M6 x 1	390,00 €
50	-	Steuer-/Regelungstechnik (Anzeige, Kabel, Sensoren)	4.000,00 €
51	3	Gummi-Dämpfungs-Lochstreifen	152,77 €
		Gesamt:	12.443,36 €

6 Festigkeitsnachweis

Äußere Kräfte und Schwingungen belasten jede einzelne Komponente. Die Festigkeiten werden dabei mit einer Finite Elemente Methode (FEM) betrachtet, bei der das Werkstoffverhalten von Stahl als Modell mit einem E-Modul von 210 MPa und der Querdehnzahl ν von 0,3 verwendet wird. Als Grundlage für eine solche Bewertung gilt die Gestaltänderungshypothese nach Mises für dreidimensionale Spannungen. Diese wird auch Vergleichsspannung δ_V genannt und berechnet sich nach Glg. (6.1) [28].

$$\delta_V = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2 - \delta_x\delta_y - \delta_y\delta_z - \delta_z\delta_x + 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (6.1)$$

Sie berücksichtigt eine höhere Empfindlichkeit von duktilen Werkstoffen gegenüber Schubspannungen und lässt sich mit den Kennwerten aus einem Zugversuch vergleichend beurteilen. Dazu sind in Tabelle 4 die Werkstoffkennwerte der verwendeten Materialien zusammengefasst.

Tabelle 4: Werkstoffkennwerte der verwendeten Materialien [17]

Werkstoff	E-Modul in Mpa	Streckgrenze in Mpa	Zugfestigkeit in Mpa	Bruchdehnung in %
X33CrS16	210	750 ... 950	950 ... 1100	5
X38CrMo16	210	750 ... 950	950 ... 1100	5
AlMg3	70	80 ... 140	190 ... 250	14
X5CrNi18-10	200	450	700	0,4*d
X5CrNiMo17-12-2	200	600	800	0,3*d

6.1 Modalanalyse

Da nahezu alle Maschinen während des Betriebes dynamischen Belastungen ausgesetzt sind, welche Schwingungen verursachen, gibt es die Möglichkeit, das Strukturverhalten mittels Modalanalyse zu quantifizieren. Mithilfe dieser Analyse können Faktoren wie Materialermüdung und Funktionssicherheit ermittelt werden. Dafür gibt es in der experimentellen Anwendung eine Systemanalyse, bei der die inneren Verhältnisse ermittelt und ein Dynamikmodell erstellt werden sowie eine Signalanalyse, in welcher die Schwingungsursachen lokalisiert werden können [29].

In diesem theoretischen Fall werden die zuvor genannten Baugruppen mithilfe der Software Inventor über die integrierte Funktion der Belastungsanalyse auf ihre Eigenfrequenzen überprüft.

Die Eigenfrequenz f_0 beschreibt die Frequenz, mit der ein technisches System, mit einer Masse und einem Freiheitsgrad, nach einer einmaligen Anregung beginnt zu schwingen. Sie ist von der Geometrie, dem Aufbau, der Masse und den Materialeigenschaften abhängig. Innerhalb eines Systems kann es durch eine große Anzahl an Bauteilen oder Baugruppen zu vielen unterschiedlichen Eigenfrequenzen kommen, welche im ungünstigsten Fall zu Resonanz führen. Dabei liegt die Erregerfrequenz nah an der Eigenfrequenz des angeregten Systems (siehe Abbildung 60). Die Amplitude der Resonanzschwingung ist immer maximal und führt zur Resonanzkatastrophe, bei der das System zerstört wird [28].

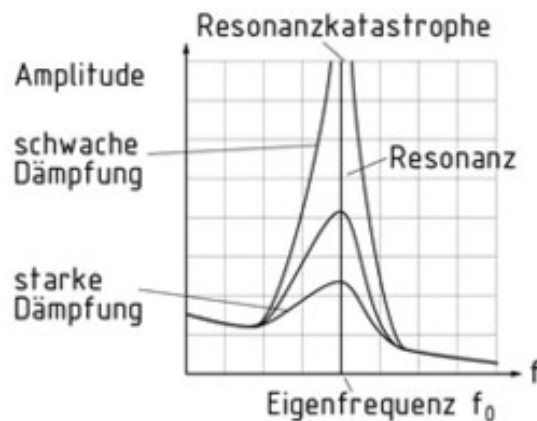
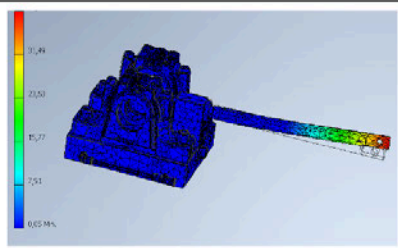
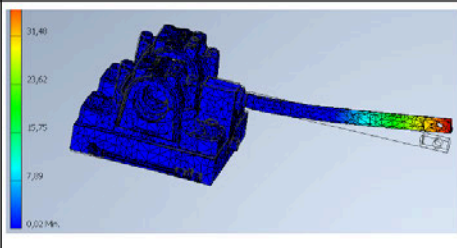
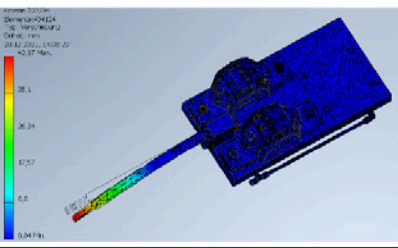
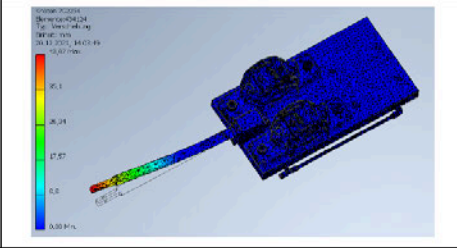
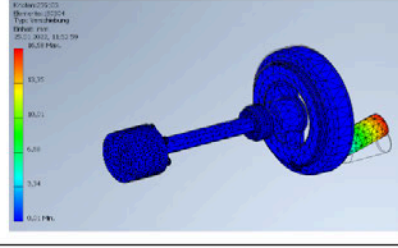
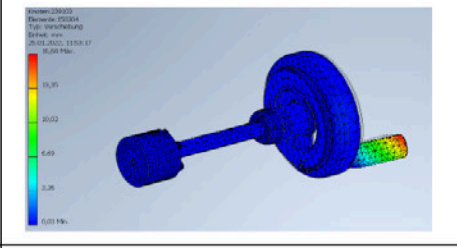
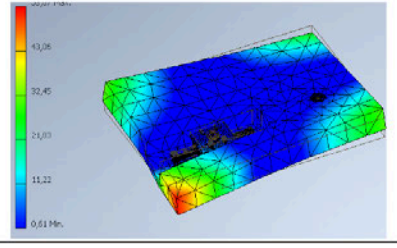
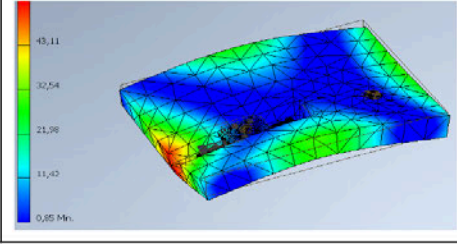


Abbildung 60: Amplituden in der Nähe der Eigenfrequenz [30]

Die Ergebnisse der Modalanalyse der einzelnen Baugruppen zeigen jeweils zwei Eigenfrequenzen an, bei denen es zu Resonanz kommen kann, wenn die Maschine exakt bei diesen Frequenzen betrieben wird (siehe Tabelle 5). Bei der Umsetzung dieses Konzeptes ist es ratsam, eine experimentelle Untersuchung an der aufgebauten Maschine durchzuführen, um die genauen Frequenzen zu ermitteln. Die Baugruppe der Festlagerplatte wird dabei auf größere Differenz stoßen, da die Software das Modell des Motors nicht berechnen kann und die ermittelten Ergebnisse daher abweichen werden.

Tabelle 5: Eigenfrequenzen der Baugruppen

Baugruppe	Frequenz 1 in Hz	Frequenz 2 in Hz
Loslagerplatte	150,34 	160,06 
Festlagerplatte	131,78 	134,06 
Krafteinleitung	65,57 	163,86 
Bodengruppe	554,76 	763,59 

Bei der Umlaufbiegeprüftechnik werden erfahrungsgemäß häufig Frequenzen zwischen 30 Hz und 50 Hz angestrebt. Die Baugruppen weisen nach FEM-Modalanalyse keine Eigenfrequenz unter 100 Hz auf, bis auf die Krafteinleitung. Diese könnte mit einer Eigenfrequenz von 65,57 Hz zu Resonanz führen, was bedeutet, dass der Aufbau nicht exakt bei dieser Frequenz betrieben werden sollte. Wie der Abbildung in der Tabelle zu entnehmen, stellt der Handgriff des Handrads die kritische Stelle dar, welcher jedoch während des Prüfvorgangs eingeklappt ist. Dadurch kann es zu einer Veränderung der Frequenz kommen. Weiterhin ist in dieser Betrachtung keine Kette, Feder oder Kraftmessdose enthalten, was ebenfalls eine Differenz zur tatsächlichen Eigenfrequenz bedeuten wird.

Bei der Benutzung der Maschine muss daher darauf geachtet werden, wie sich die Schwingungen der Baugruppe auf den Aufbau auswirken und sollten gegebenenfalls experimentell überprüft werden.

7 Verifikation

Die Verifikation einer Umlaufbiegeprüfmaschine ist in der DIN 50113 festgelegt. Sie beschreibt in mehreren Schritten die Vorbereitung, Dokumentation und die Durchführung. Dazu wird eine Probe verwendet, welche mit zwei Dehnmessstreifen auf der Oberfläche des Prüfdurchmessers appliziert ist. Bei diesem Vorgang wird die auftretende Differenz zwischen der aufgetragenen Prüfkraft F und der tatsächlich wirkenden Kraft F_V ermittelt, um einen Korrekturfaktor zu bestimmen. Dieser wird bei der Auswertung einer Umlaufbiegeprüfung nach DIN 50100 in der Dokumentation ergänzt und in die Berechnung einbezogen. Das nachfolgende Schema (siehe Abbildung 61) stellt den Umfang der Verifizierung dar, welcher in den nächsten Unterkapiteln genauer erläutert wird.

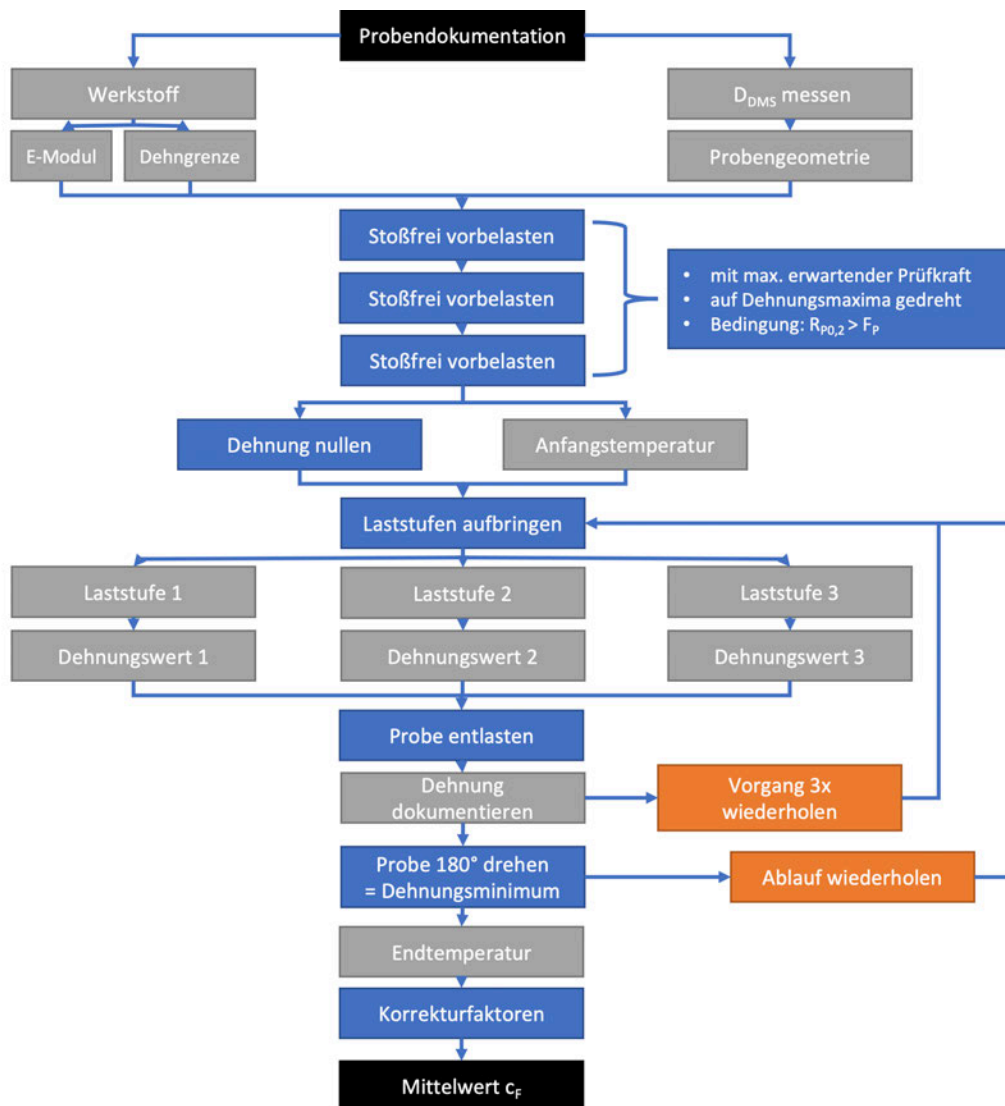


Abbildung 61: Fließschema der Verifizierung

7.1 Vorbereitung

Die Wahl eines geeigneten Werkstoffes für die Verifizierungsprobe richtet sich hauptsächlich nach den Festigkeitskennwerten des Materials, nach Vergütungszustand und der chemischen Beständigkeit, hinsichtlich einer nicht-rostenden Stahlsorte. Weiterhin ist es von Vorteil, wenn der Prüfling häufiger als ein einziges Mal genutzt werden kann und gleichzeitig kurzfristig zu beschaffen ist, um die Bearbeitungskosten zu senken. Der vorgeschlagene nichtrostende martensitische Stahl X3CrNiMo13-4 ist nicht auf Lager, somit stehen vorläufig zwei Stähle zur Auswahl. Diese Alternativen sind entweder der nichtrostende austenitische Stahl X2CrNi18-9 oder der nichtrostende Stahl X90CrMoV18. Allerdings sind die Festigkeitswerte beider Stähle nicht sonderbar hoch. Der Stahl X2CrNi18-9 weist im Lieferzustand eine Dehngrenze $R_{p0,2}$ von etwa 145 N/mm^2 auf, während der Stahl X90CrMoV18 eine Dehngrenze von 550 N/mm^2 besitzt. Damit wurde die Verwendung dieser Stähle verworfen. Schlussendlich fiel die Wahl auf den Vergütungsstahl 42CrMo4, da dieser neben seinen hohen Festigkeitswerten eine hohe Verfügbarkeit auf dem Markt aufweist. Durch verschiedene Wärmebehandlungen kann er vergütet werden und erhält eine Festigkeit von $750 - 1300 \text{ N/mm}^2$ mit einer Dehngrenze von ebenfalls über 750 N/mm^2 . Daher ist er allerdings nur bedingt schweißgeeignet und nicht für Schweißkonstruktionen ohne Nachbehandlung vorgesehen. Dieser Stahl wird im Maschinen- und Automobilbau bei höchst beanspruchten Bauteilen verwendet, welche gleichzeitig eine hohe Zähigkeit erfordern, wie beispielsweise Achsschenkel, Pleuelstangen, Getriebeteile und Ritzel. Das Problem bei diesem Stahl ist die chemische Unbeständigkeit. Die chemische Beständigkeit eines Werkstoffes wäre erst ab einem Chromgehalt von 10 - 12% gegeben (siehe Tabelle 6). Daher ist es notwendig, bei der Lagerung und der Verwendung der Probe darauf zu achten, dass keinerlei Feuchtigkeit oder Beschädigungen zur Entstehung von Korrosion führen können [31].

Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung 42CrMo4 in % [31]

42CrMo4 1.7225	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
min.	0,38		0,60			0,90	0,15
max.	0,45	0,40	0,90	0,025	0,035	1,20	0,30

Die Berechnung der Biegespannung erfolgt je nach gewählter Variante der Kraftaufbringung. In diesem Fall wird die Last nach DIN 50113 Variante Eins (siehe Abbildung 10) aufgebracht. Die zu ermittelnden Werte und alle zur Dokumentation geforderten Daten werden in einem Excel-Dokument festgehalten.

Die tatsächlich wirkende Nennbiegespannung S_V wird nach Glg. (7.1) aus dem E-Modul des Werkstoffes und der gemessenen Dehnung berechnet [11].

$$S_V = E \cdot \varepsilon \quad (7.1)$$

Das E-Modul ist dabei aus einem Zugversuch zu ermitteln. Alternativ kann dafür auch ein Tabellenwert eingesetzt werden, solange die Herkunft extra dokumentiert ist. In die Berechnung geht es dabei mit 210 MPa ein (siehe Tabelle 7) und wird in der Excel Tabelle mit Quellenangabe eingetragen [11].

Tabelle 7: Festigkeitswerte Vergütungsstähle [32]

Vergütungsstähle, DIN EN 10 083-1 - vergütet														
Werkstoffname	Werkstoff Nr.	alte Bez.	d _B	R _m	R _{p0,2}	Sig _{zd,W}	Sig _{zd,Sch}	Sig _{b,W}	Sig _{b,Sch}	Tau _{t,W}	Tau _{t,Sch}	A [%]	E-Modul	G-Modul
C22E	1,1151	Ck22	16	500	340	200	320	250	375	150	235	20	210000	81000
C25E	1,1158		16	550	370	220	350	275	410	165	255	19	210000	81000
C30E	1,1178	Ck30	16	600	400	240	385	300	450	180	275	18	210000	81000
C35E	1,1181		16	630	430	250	400	315	470	190	300	17	210000	81000
C40E	1,1186	Ck40	16	650	460	260	415	325	490	200	320	16	210000	81000
C45E	1,1191		16	700	490	280	450	350	525	210	340	14	210000	81000
C50E	1,1206		16	750	520	300	480	375	560	220	360	13	210000	81000
C55E	1,1203		16	800	550	320	510	400	600	240	380	12	210000	81000
C60E	1,1221		16	850	580	340	545	425	635	250	400	11	210000	81000
28Mn6	1,1170.	28Mn6	16	800	590	320	510	400	600	240	410	13	210000	81000
38Cr2	1,7003		16	800	550	320	510	400	600	240	380	14	210000	81000
46Cr2	1,7006		16	900	650	360	575	450	675	270	450	12	210000	81000
34Cr4	1,7033		16	900	700	360	575	450	675	270	460	12	210000	81000
37Cr4	1,7034		16	950	750	380	610	475	710	285	485	11	210000	81000
41Cr4	1,7035		16	1000	800	400	640	500	750	300	510	11	210000	81000
25CrMo4	1,7218		16	900	700	360	575	450	675	270	460	12	210000	81000
34CrMo4	1,7220.	34CrMo4	16	1000	800	400	640	500	750	300	510	11	210000	81000
42CrMo4	1,7225		16	1100	900	440	705	550	825	330	560	10	210000	81000
50CrMo4	1,7228		16	1100	900	440	705	550	825	330	560	9	210000	81000
36CrNiMo4	1,6511		16	1100	900	440	705	550	825	330	560	10	210000	81000
34CrNiMo6	1,6582		16	1200	1000	480	770	600	900	360	610	9	210000	81000

Mithilfe der tatsächlich wirkenden Nennbiegespannung lässt sich die tatsächlich wirkende Kraft F_V für die erste Variante nach Glg. (7.2) berechnen. Der Hebelarm L ist vorher aus der Dokumentation der Umlaufbiegemaschine zu entnehmen oder zu ermitteln. Dieser beträgt bei der neuen Konstruktion exakt 500 mm [11].

$$F_V = \frac{S_V \pi d^3}{32 L} \quad (7.2)$$

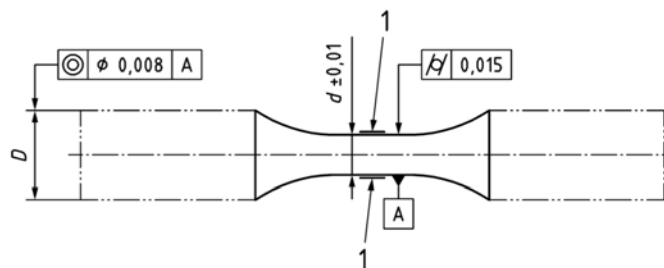
Das daraus entstehende Verhältnis zwischen der tatsächlich wirkenden Kraft F_V nach Glg. (7.2) und der Prüfkraft F ergibt sich somit aus Glg. (7.3) [11].

$$c_F = \frac{F}{F_V} \quad (7.3)$$

Mit diesem Faktor ist die Prüfkraft F zu korrigieren, um die resultierende Nennbiegespannung S nach Glg. (7.4) zu ermitteln [11].

$$S = \frac{F}{c_F} \frac{32 L}{\pi d^3} \quad (7.4)$$

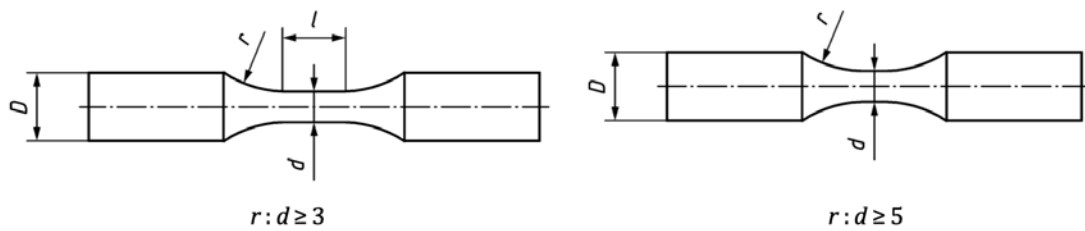
Die Verifikation der Nennbiegespannung S erfolgt dabei mithilfe einer Rundprobe, welche vor der Durchführung mit zwei gegenüberliegenden Dehnmessstreifen appliziert wurde. Bei der Wahl einer passenden Geometrie für diese Probe gilt es ebenfalls einige werkstoffliche und geometrische Vorschriften einzuhalten. Dazu zählen die Form- und Lagetoleranzen (siehe Abbildung 62) und die am häufigsten verwendeten Probenformen (siehe Abbildung 63) [11].



Legende
1 DMS

Abbildung 62: Form- und Lagetoleranzen für eine mit DMS applizierte Probe [11]

Innerhalb der Messstrecke haben die Proben einen kreisförmigen Querschnitt und können dabei glatt oder gekerbt sein. Weitere Einzelheiten über die Form und die Maße sind nicht festgelegt, sondern hängen vom Versuchszweck, den vorhandenen Prüfmaschinen und Einspannungen ab. Innerhalb einer Versuchsreihe müssen die Proben die gleiche Geometrie, Größe und Grenzabweichung des Durchmessers aufweisen, während das Material aus einer Charge stammen sollte, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen [11].

**Legende**

D Durchmesser der Probeneinspannung

d Durchmesser der Probe im Prüfbereich

r Radius im Übergang vom Prüfquerschnitt zum Einspannquerschnitt

l Länge des Prüfbereichs

Abbildung 63: schematische Probenformen [11]

Aufgrund der hohen Belastung auf die Probe während der Prüfung mit maximal 200 Nm, ist es zweckmäßiger einen Prüfquerschnitt zu wählen, welcher überdimensioniert ist. Damit lässt sich die Probe aus 42CrMo4 mehrfach verwenden, was eine Voraussetzung für die Werkstoffwahl war. Somit wird sie nicht bei der ersten Verifizierung an ihre Grenze gebracht. Für diesen Werkstoff wird ein E-Modul von 210 MPa und eine Dehngrenze $R_{P0,2}$ von 800 N/mm² im vergüteten Zustand angegeben. Die Werte, inklusive ihrer Quelle, müssen dokumentiert sein.

Die Wahl fiel daher auf einen Prüfdurchmesser von 15 mm über eine Prüflänge von 70 mm. Dieser Durchmesser ist zu Beginn zu messen, im Dokument festzuhalten, bevor die Dehnmessstreifen anzubringen sind. Er beträgt 15,011 mm.

Der Übergangsradius von Prüfquerschnitt zu Einspannquerschnitt beläuft sich auf 65 mm (siehe Abbildung 64). Übersichtshalber ist die technische Zeichnung der Verifizierungsprobe im Dokument eingefügt [11].

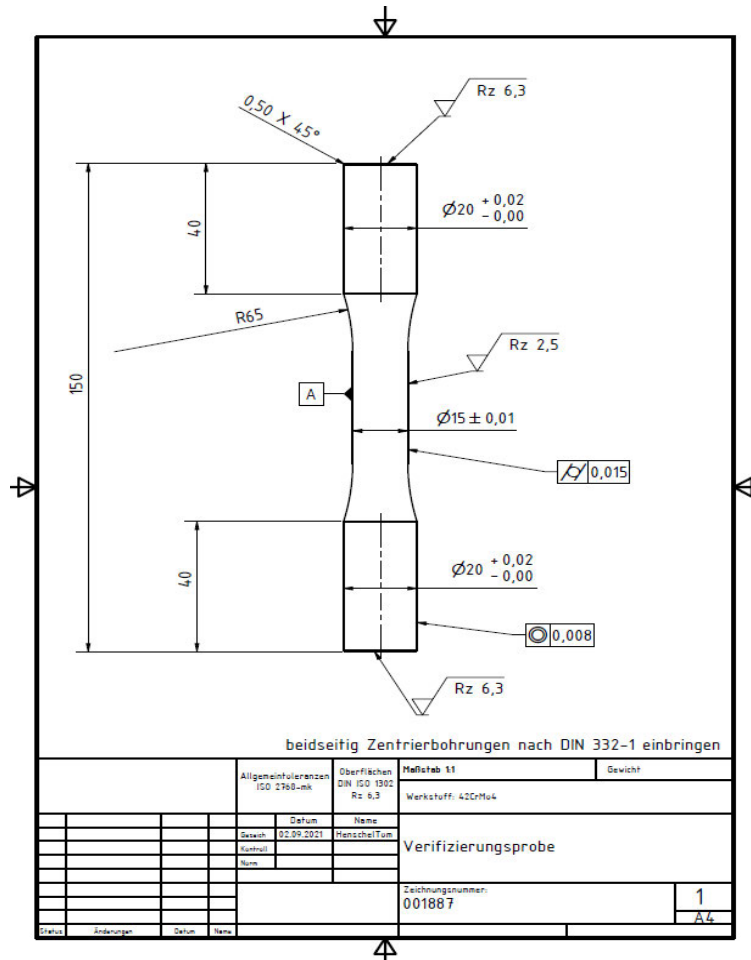


Abbildung 64: Technische Zeichnung der Verifizierungsprobe

Für das Einspannverhältnis nach Glg. (7.5 bzw. 7.6) ist je nach Werkstoff eine Richtspanne vorgegeben. Diese Werte dienen nur als Empfehlung und nicht als Bedingung. Bei duktilen Werkstoffen soll der Wert zwischen 1,5 bis zwei liegen, während er bei spröden Werkstoffen zwischen 2,5 und drei liegen sollte. Die Sprödigkeit ist ein Maß für die Verformbarkeit. Allerdings versagen spröde Werkstoffe bereits nahe der Elastizitätsgrenze, ohne nennenswerte plastische Verformung und damit ohne Anzeichen zu brechen. Sie besitzen meistens eine hohe Härte, dürfen aber nicht auf Stoß beansprucht werden und sind anfälliger bei tiefen Temperaturen. Die Formel des Querschnittes wird dabei durch die Glg. (7.7) beschrieben [11, 33].

$$\frac{A_E}{A} = 1,5 \text{ bis } 2 \quad \text{bzw.} \quad \frac{A_E}{A} = 2,5 \text{ bis } 3 \quad (7.5 \text{ bzw. } 7.6)$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad (7.7)$$

Wird ein Einspanndurchmesser von 20 mm und Prüfdurchmesser von 15 mm verwendet, ergibt sich daraus ein Verhältnis von 1,7. Der Einspannquerschnitt beträgt 314,16 mm² und der Prüfquerschnitt 178,54 mm². Der Stahl kann je nach Vergütungszustand eher duktil oder spröd ausgelegt sein [11].

Wie in Abbildung 63 dargestellt, besteht die geometrische Bedingung zwischen Radius und Prüfdurchmesser nach Glg. (7.8) [11].

$$r : d \geq 3 \quad (7.8)$$

Mit dem gewählten Prüfdurchmesser von 15 mm und einem Radius von 65 mm ergibt sich der Vergleichswert von 4,3. Damit ist die Voraussetzung aus Glg. (7.8) erfüllt.

Neben diesen Bedingungen sind außerdem noch die Probenbezeichnung und die Temperatur zu Beginn sowie am Ende der Verifizierung anzugeben. Die Oberflächenrauheit R_z beträgt 2,85 Mikrometer (siehe Anlage Teil 2).

7.2 Durchführung

Da der Umbau auf die modifizierte Umlaufbiegevorrichtung nicht erfolgt, wird die Verifizierung beispielhaft an den beiden Prüfmaschinen Sincotec Power Robe, intern PM3-16 genannt, und Sincotec Power Rotabend, intern PM3-20 genannt, durchgeführt, um den Ablauf darzustellen, der als Anleitung für das erstellte Konzept genutzt werden kann. Die Krafteinleitung bei diesen Maschinen erfolgt bauartbedingt nicht über das Auflegen von Gewichten, sondern auch durch Verändern der Federvorspannkraft. Wichtig ist es darauf zu achten, dass während der gesamten Verifizierung die Prüfkraft nicht dazu führt, dass die Fließgrenze des Werkstoffes überschritten wird. In diesem Fall darf die maximale Nennbiegespannung S_{\max} nach Glg. (7.9) nicht größer sein als die Dehngrenze $R_{P0,2}$ des Werkstoffes 42CrMo4 [11].

$$S_{\max} < R_{P0,2} \quad (7.9)$$

Die Dehngrenze $R_{P0,2}$ ist mit 800 N/mm² doppelt so groß, wie die Nennbiegespannung S_{\max} mit 400 N/mm² und erfüllt somit das Kriterium mit ausreichender Sicherheit. Um die Verifizierung normgerecht durchzuführen, müssen die Laststufen den kompletten Prüfkraftbereich der Maschine abdecken. Dazu ist es notwendig, dass mindestens drei Laststufen innerhalb dieses Bereiches liegen. Um den Korrekturfaktor am Ende bestimmen zu können, werden ebenfalls je drei Laststufen angefahren [11].

Zu Beginn der Verifizierung wird die Verifizierungsprobe in die Maschine eingespannt und dreimal in der höchsten Stufe stoßfrei belastet. Die beiden Dehnmessstreifen geben dabei jeweils einen Dehnungswert in Mikrometer je Meter über eine Software aus. Währenddessen wird das Dehnungsmaxima durch Drehen der Probe ermittelt. Diese Position wird für die folgenden Schritte beibehalten (siehe Abbildung 65).

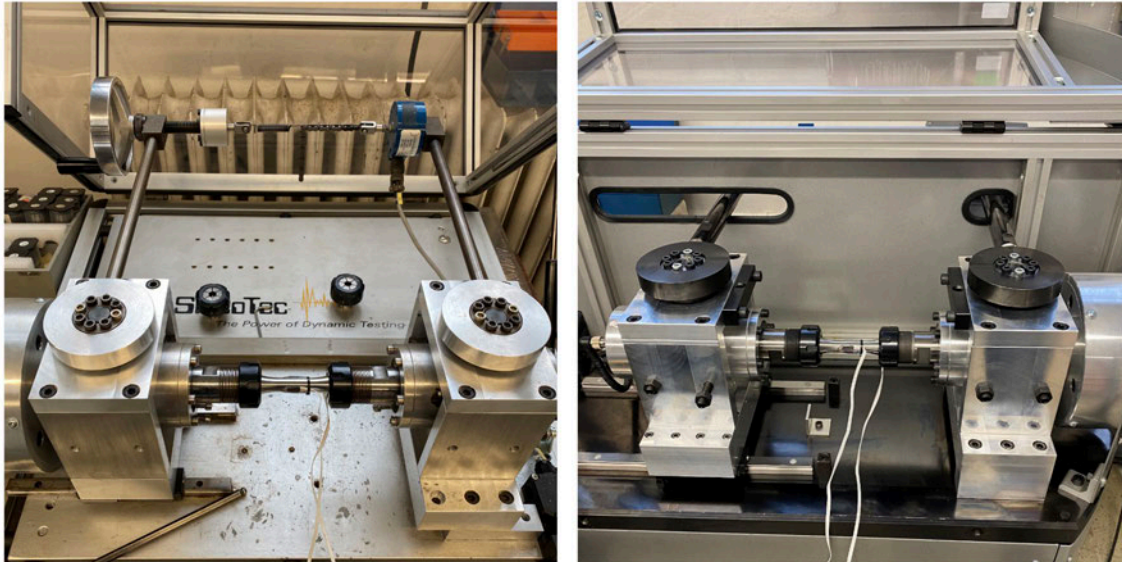


Abbildung 65: Eingespannte DMS-applizierte Probe; links: PM3-16, rechts: PM3-20

Anschließend beginnt die eigentliche Durchführung, bei der die drei einzelnen Laststufen mithilfe der Federvorspannkraft angefahren werden. Bei der ersten Laststufe wird ein Biegemoment M_b von 10 Nm bei einer theoretischen Prüfkraft F_P von 25 N eingestellt und der angezeigte Dehnungswert notiert. Anschließend folgt die zweite Laststufe mit 50 Nm Biegemoment und 125 N Prüfkraft sowie die dritte Laststufe mit dem Maximalbiegemoment von 100 Nm bei einer Kraft von 250 N. Die Dehnungswerte werden dokumentiert (siehe Tabelle 8). Nachfolgend wird die Probe entlastet und die Dehnung in der Tabelle aufgenommen. Damit ist der Prüfbereich abgedeckt.

Tabelle 8: Auszug der Dokumentation, Durchlauf 1.1 (PM3-16)

Durchlauf 1.1	Prüfkraft	erwartetes Biegemoment	Dehnung	tatsächliche Nennbiegespannung	tatsächliche Kraft	Korrekturfaktor	Nennbiegespannung
Laststufe	F_P in N	M_b in Nm	ϵ	S_N in N/mm ²	F_N in N	C_F	S in N/mm ²
1	25	10	0,000181	38,01	31,448	0,7950	47,813
2	125	50	0,000718	150,78	124,749	1,0020	150,477
3	250	100	0,001424	299,04	247,413	1,0105	295,945
Dehnung nach Entlastung:			0,000007				

Dieser Vorgang ist dreimal komplett zu wiederholen. Nach Abschluss dieser drei Vorgänge wird die Probe um 180° gedreht, um das Dehnungsminimum zu erreichen. Der komplette Ablauf beginnt erneut in dieser Position, mit jeweils drei Laststufen mit dreimaliger Wiederholung, während auch diese Werte dokumentiert werden [11].

7.3 Auswertung und Ermittlung des Korrekturfaktors

Nach der Durchführung und Dokumentation der Daten aus Kapitel 7.1 und Kapitel 7.2 liegen 18 Werte für die Dehnung der Probe vor sowie 18 einzelne Korrekturfaktoren pro Prüfmaschine (siehe Anlage Teil 2). Aus den Beträgen aller Korrekturfaktoren wird dann der arithmetische Mittelwert c_F mittels Glg. (7.10) errechnet. Dieser muss bei der Auswertung nach DIN 50100 bei allen folgenden Umlaufbiegeversuchen mit der jeweiligen Maschine aufgeführt werden [11].

$$c_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |c_{F,i}| \quad (7.10)$$

Der Korrekturfaktor, welcher sich aus den Einzelmesswerten für die PM3-16 zusammensetzt, beträgt 1,0123. Im Durchschnitt ist daher die Prüfkraft mit der tatsächlich wirkenden Kraft nahezu identisch. Auffällig sind hauptsächlich die einzelnen Faktoren im ersten Versuchsdurchlauf. Bei höheren Biegemomenten gleichen sich die Maximal- und Minimalwerte größtenteils aus. Durch die Aufnahme von mehr als drei Laststufen und deren Dehnungswerten könnte die Streuung niedriger ausfallen und die auftretenden Spitzen damit noch glätten.

Der Korrekturfaktor der Prüfmaschine PM3-20 beläuft sich hingegen auf einen Wert von 0,9484. Für diese größere Abweichung sorgen ebenfalls die ermittelten Ergebnisse im ersten Durchlauf, insbesondere bei der niedrigsten Laststufe. Die Dehnungswerte sind dabei deutlich höher als bei der Maschine PM3-16.

Die höchste Dehnung nach Entlasten der Verifizierungsprobe ist auf die größte einwirkende Belastung zurückzuführen, wobei die Probe auf der PM3-20 allgemein geringere Dehnungswerte aufweist. Dies liegt an der geringeren Laufzeit der Maschine im Gegensatz zur PM3-16, die schon deutlich länger eingesetzt wird. Dadurch sind die Lager der PM3-20 weniger verschlissen und das Elastizitätsmodul der Probe sorgt dafür, dass sie nach der Entlastung mehr in ihren Ausgangszustand gelangt, während dieser Vorgang bei der PM3-16 gehemmt wird.

Beide Prüfmaschinen wurden an einem Tag bei identischer Temperatur nacheinander verifiziert, wodurch Einwirkungen der Umgebung unerheblich sind. Aufgrund der Nutzung der gleichen Probe, ist ein Einfluss der Geometrie, der Oberflächenrauheit und des Materials auf das Ergebnis ausgeschlossen. Eventuell ist der Rundlauf der Probe nicht 100%ig gegeben, wodurch es zu einem Unterschied der beiden DMS-Werte kommen kann. Allerdings ist dieser Umstand durch die Fertigung auszuschließen. Des Weiteren waren die Spannfutter für die Verifizierungsprobe und der Einrichter gleichbleibend.

Als Einflussfaktor kann die Position der beiden Dehnungsmesstreifen maßgebend sein. Falls sie nicht exakt auf einer Ebene gegenüber geklebt wurden, nehmen sie unterschiedlich hohe Dehnungen auf.

Obwohl beide Umlaufbiegevorrichtungen einen identischen Aufbau besitzen, muss die vorhandene Abweichung zwischen den Korrekturfaktoren auf Seite der Maschinen vorherrschen. Maßgeblich sind dabei die unterschiedlichen Krafteinleitungen. Während das Biegemoment der PM3-16 manuell mit dem Handrad eingestellt wird, richtet es bei der PM3-20 ein Stellmotor automatisch ein. Auch die Bauteile innerhalb der Krafteinleitung, wie die Kette oder die Feder, können für eine Abweichung sorgen. Diese sollten allerdings eine deutlich geringe Auswirkung haben.

Aufgrund der größten Abweichungen im Bereich der niedrigen Laststufe, bedarf es einer weiteren Überprüfung der Dehnungswerte bei geringeren eingestellten Momenten, um herauszufinden, wie erheblich die Unterschiede sind und ob Korrekturen dahingehend durchgeführt werden müssen.

8 Ringversuch

Ein Ringversuch ist ein in sich geschlossener Eignungstest von einer Gruppe von Teilnehmern. Er unterstützt die externe Qualitätssicherung für Messverfahren und Prüflaboratorien. Dafür werden einheitliche Proben der gleichen Charge mit identischen Verfahren untersucht. Beim Vergleich der Ergebnisse lassen sich Aussagen zur Prüfqualität untereinander treffen. Zudem werden sie zur Validierung von Vorschriften von Messverfahren verwendet [34].

In diesem speziellen Fall dient er zum internen Vergleich von Umlaufbiegeprüfmaschinen aus unterschiedlichen Baujahren, welche zudem unterschiedliche bauspezifische Eigenschaften, wie die Kraftereinleitung, aufweisen. Da die äußeren Bedingungen neben den Proben identisch sind, werden die hauptsächlichen Unterschiede der jeweiligen Maschine sichtbar.

8.1 Vorbereitung

Bei diesem Versuch handelt es sich um den Vergleich zwischen der Sincotec PM3-16 und der Sincotec PM3-20, wie sie schon bei der Verifizierung verwendet wurden. Der Hauptunterschied der Maschinen liegt in der jeweiligen Kraftereinleitung. Während bei der Sincotec PM3-16 die Prüfkraft manuell mittels eines Handrades eingestellt und mit einer Kontermutter gegen Verstellen gesichert wird, ähnlich dem Aufbau in Kapitel 5.1.4 beschrieben, besitzt die Sincotec PM3-20 einen elektrischen Stellmotor (siehe Abbildung 66). Über diesen wird das Biegemoment am Display der Maschine eingestellt und das System skaliert demzufolge die geforderte Prüfkraft. Je nach gewähltem Modus kann der Stellmotor während einer Prüfung die Prüfkraft selbstständig nachregeln oder diese über den gesamten Prüfzeitraum konstant halten, wie ursprünglich eingestellt. Damit ist ein Vergleich der beiden Umlaufbiegeprüfmaschinen möglich sowie eine Gegenüberstellung der beiden Modi der moderneren Sincotec.



Abbildung 66: Draufsicht auf die Prüfmaschinen Sincotec 3-16 (links) und Sincotec PM3-20 (rechts)

Wie auch schon bei der Verifizierung gewählt, besteht die Probe aus dem Stahl 42CrMo4. Es werden 30 Proben aus einer Charge nach der Probengeometrie (siehe Abbildung 67) hergestellt und die Oberflächenrauheit R_z durch zwei Stichproben aufgenommen. Sie betragen 3,63 und 3,77 Mikrometer (siehe Anlage Teil 3). Die Geometrie hält dabei neben den geforderten Form- und Lagetoleranzen nach Abbildung 62 auch die Bedingung des Radienverhältnisses nach Glg. (7.8) mit 6,5 ein. Nur der empfohlene Richtwert des Spannverhältnisses nach Glg. (7.6) wird mit dem Faktor vier für spröde Werkstoffe überschritten. Pro Maschine werden sieben Rundproben auf Umlaufbiegung geprüft. Die verbliebenen Prüflinge werden aufbewahrt, um sie im Projekt UBM200 zu nutzen. Somit ist die Voraussetzung, die Verwendung von einheitlichen Proben wieder gegeben.

Damit sind die erforderlichen Voraussetzungen, Proben der gleichen Charge, aus demselben Werkstoff, mit der gleichen Vorbehandlung, derselben Oberflächenrauheit und Geometrie, bei gleicher Belastungsart sowie gleichen äußeren Einflüssen, erfüllt [8].

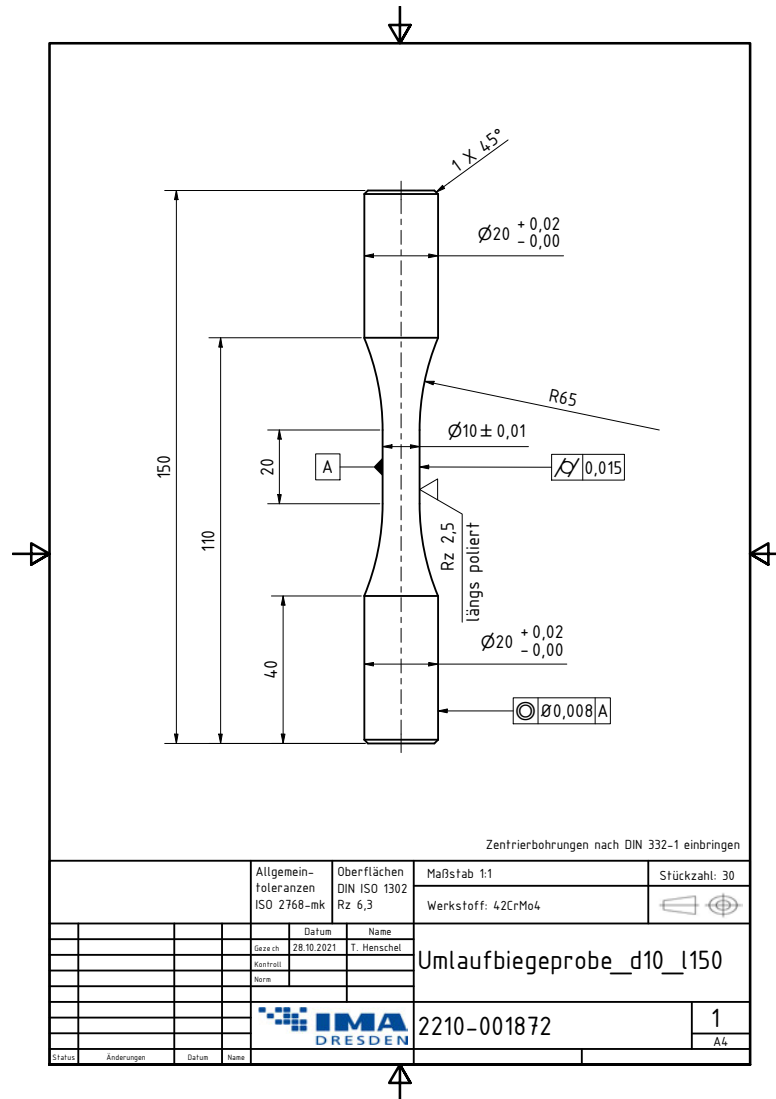


Abbildung 67: Technische Zeichnung der Umlaufbiegeprobe

Um einen geeigneten Wert zu Beginn der Versuchsreihe zu finden, wird die Prüfspannung erfahrungsgemäß anhand der Zugfestigkeit gewählt. Der übliche Bereich liegt dabei zwischen $\sigma_{Start} = R_m \cdot 0,4$ und $\sigma_{Start} = R_m \cdot 0,6$.

Bei einer Zugfestigkeit R_m von 42 CrMo4 mit etwa 1000 N/mm^2 wird danach die erste einzustellende Nennspannung von 550 N/mm^2 ausgewählt. Alternativ kann durch eine bereits bestehende Wöhlerkurve des Werkstoffes ein möglicher Anfangswert bestimmt werden.

8.2 Durchführung

Vor Beginn der Prüfung wird der Prüfdurchmesser jeder Rundprobe vermessen und im System hinterlegt. Anschließend werden sie in der jeweiligen Prüfmaschine mit den eingegebenen Parametern bis zum Probenbruch geprüft. Beim Erreichen des Ausfallkriteriums, in diesem Fall dem Bruch des Prüflings, wird die erreichte Schwingspielzahl dokumentiert. Falls die Probe die zuvor festgelegte Grenzschaingpielzahl von $3 \cdot 10^6$ erreicht, gilt diese als Durchläufer nach DIN 50100 [35].

Der Ringversuch wird mithilfe des Perlschnurverfahrens, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, durchgeführt, da diese Vorgehensweise eine geringe Versuchsplanung voraussetzt und die Versuche gleichzeitig über einen weiten Bereich der Wöhlerlinie platziert werden können. Wichtig dabei ist, dass die eingestellten Lashorizonte bei allen Maschinen gleich sind, damit sie untereinander vergleichbar bleiben. Sie liegen im Bereich zwischen 550 N/mm^2 und 700 N/mm^2 . Damit werden die Ergebnisse der Zeitfestigkeitsgerade untersucht. Die dabei erreichten Schwingspielzahlen sind in der Anlage Teil 3 enthalten.

8.3 Auswertung und Vergleich

Die Zeitstandfestigkeitsgeraden werden dabei in einem Wöhlerdiagramm dargestellt, wobei die Gerade durch das Logarithmieren nach Glg. (8.1) dargestellt wird. Durch Anwendung einer Regressionsanalyse kann der Parameter K , die Konstante zur Beschreibung der Zeitfestigkeitsgerade, und k , die Neigung der Gerade, angegeben werden.

$$\log N = \log K - k \cdot \log \sigma_a \quad (8.1)$$

8.3.1 Vergleich der PM3-16 und der PM3-20

Die erste aufgenommene Zeitfestigkeitsgerade der Prüfmaschine PM3-16 kann durch die Formel $\log N = 23,25 - 6,50 \cdot \log \sigma_a$ beschrieben werden. Bei der reinen Betrachtung von Werkstoffen ist die angegebene Streuung von 0,05 bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 10% bzw. 90% erfahrungsgemäß gut (siehe Abbildung 68). Ein Prüfling gilt durch das Erreichen der Grenzschaingpielzahl von $3 \cdot 10^6$ bei der Spannungsamplitude von 550 N/mm^2 als Durchläufer und wird somit nicht in der Auswertung nach DIN 50100 berücksichtigt. Da dieser Vergleich allerdings als interner Ringversuch gilt und dieser Durchläufer einen großen Einfluss auf die Auswertung hat, wird er bei der Gegenüberstellung im Diagramm aufgeführt, um eine bessere Vergleichbarkeit zu erzielen. Durch Hinzufügen dieses Wertes ergibt sich eine Gerade nach der Formel $\log N = 242,12 - 13,21 \cdot \log \sigma_a$ mit einer Streuung von 0,34 (siehe Anlage Teil 3) [36].

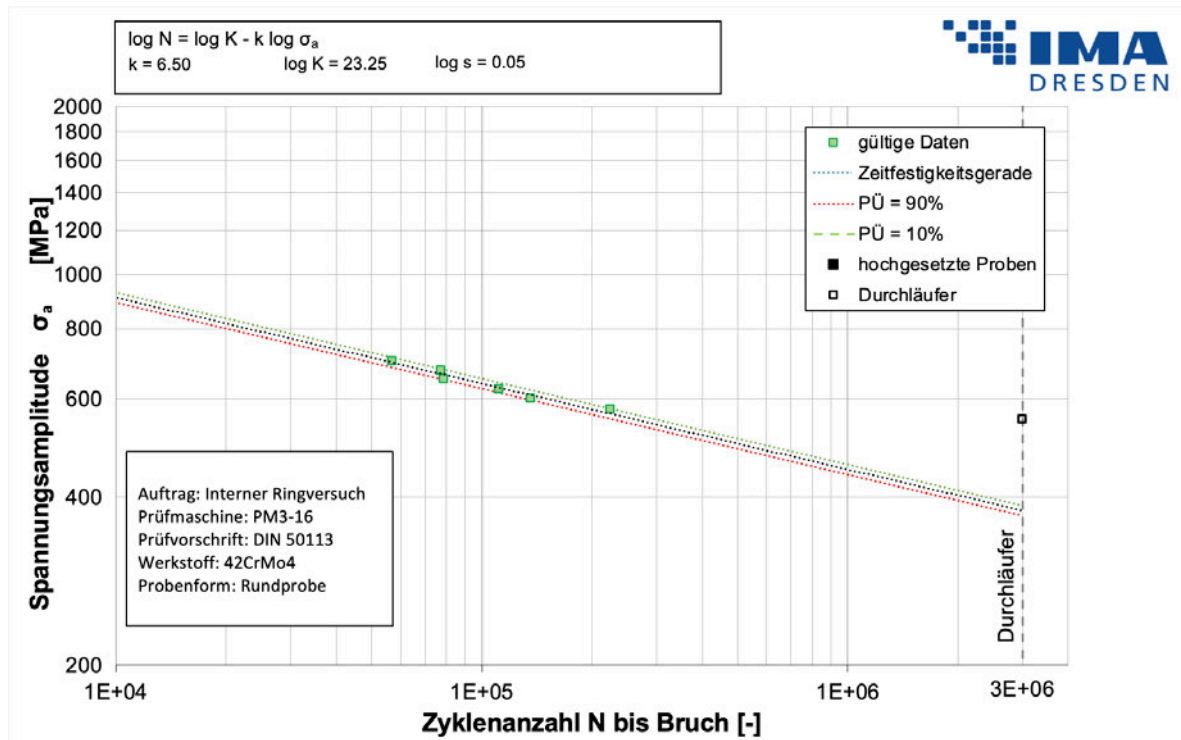


Abbildung 68: Ermittelte Zeitfestigkeitsgerade der PM3-16, ohne Durchläufer

Mithilfe der ermittelten Ergebnisse der Prüfmaschine PM3-20 ohne Nachregeln entsteht eine Zeitfestigkeitsgerade nach der Formel $\log N = 32,48 - 9,82 \cdot \log \sigma_a$ mit einer Streuung von 0,09 (siehe Abbildung 69). Alle Proben sind nach DIN 50100 auswertbar.

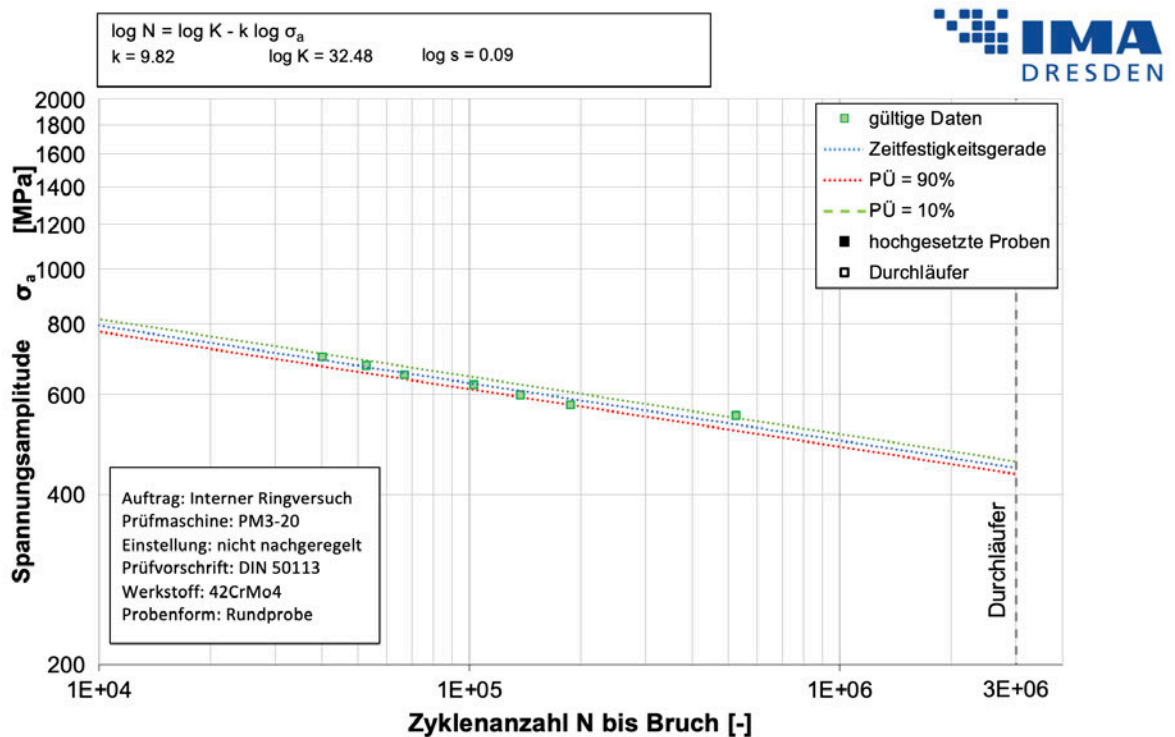


Abbildung 69: Ermittelte Zeitfestigkeitsgerade der PM3-20, ohne Nachregelung

Die ermittelten Ergebnisse der erreichten Zyklenzahlen beider Umlaufbiegeprüfmaschinen liegen nah beieinander (siehe Abbildung 70), wodurch ihre Regressionsgeraden ebenfalls annähernd deckungsgleich ausfallen.

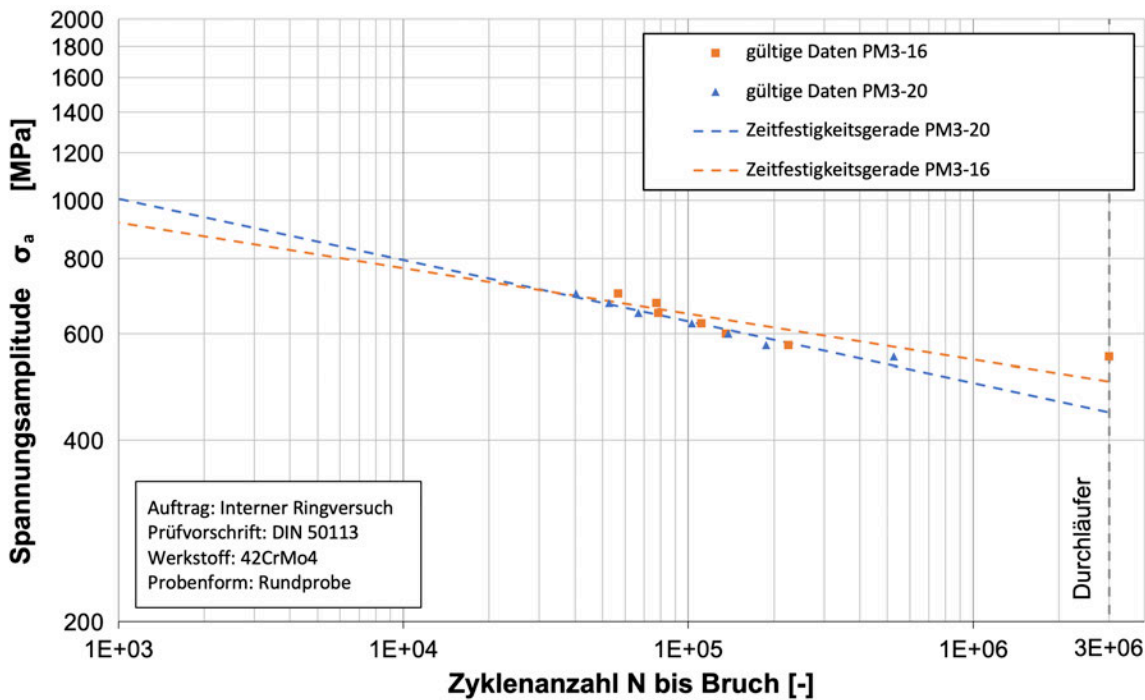


Abbildung 70: Vergleich der Zeitfestigkeitsgeraden von PM3-16 und PM3-20

Dabei ist auffällig, dass nahezu alle Prüflinge, welche mit der Prüfmaschine PM3-20 belastet wurden, eher versagt haben als die, die auf der Maschine PM3-16 geprüft worden sind. Lediglich die Probe, die bei einer Spannungsamplitude von 600 MPa getestet wurde, ertrug knapp 2.300 Lastwechsel mehr, was auf die Streuung der Ergebnisse zurückzuführen ist.

Besonders auf dem niedrigen Lasthorizont von 550 MPa wird der Unterschied deutlich, da die Probe auf der PM3-16 ohne Versagen durchgelaufen ist, während die Probe auf der PM3-20 nach mehr als einer halben Million Schwingspielen versagt hat. Dies zeigt weiterhin, dass dort der Übergang von der Zeitfestigkeit zur Dauerfestigkeit beginnt. Da in diesem Bereich die Kerbwirkung der Oberflächenrauheit stark zunimmt, wird auch diese einen großen Einfluss haben. Dies wird allerdings nicht in die Auswertung einbezogen, da die Oberflächenrauheit nicht von jeder Probe aufgenommen wurde.

Bezugnehmend auf die vorangegangene Verifikation, lassen sich deren Ergebnisse auf den Ringversuch übertragen. Dabei kam hervor, dass die Prüfmaschine PM3-20 ständig eine erheblich erhöhte Belastung auf die Probe überträgt, was die zeitigeren Probenbrüche auf dieser Maschine erklärt. Alle Proben waren aus dem gleichen Material, der gleichen Charge und bei identischen Umgebungsbedingungen geprüft, was einen Einfluss auf die Ergebnisse ausschließt. Geringe Streuungen können unter Umständen durch den

bauartspezifischen Aufbau, wie der unterschiedlichen Kraftaufbringung und deren Bauteilen, auftreten, welche sich allerdings nicht so extrem auswirken können.

8.3.2 Vergleich der Modi der PM3-20

Das dritte Wöhlerdiagramm zeigt die Zeitfestigkeitsgerade der Prüfmaschine PM3-20 (siehe Abbildung 71) mit Nachregelung der Prüfkraft mithilfe der Formel $\log N = 24,89 - 7,11 \cdot \log \sigma_a$. Die Streuung beträgt 0,05.

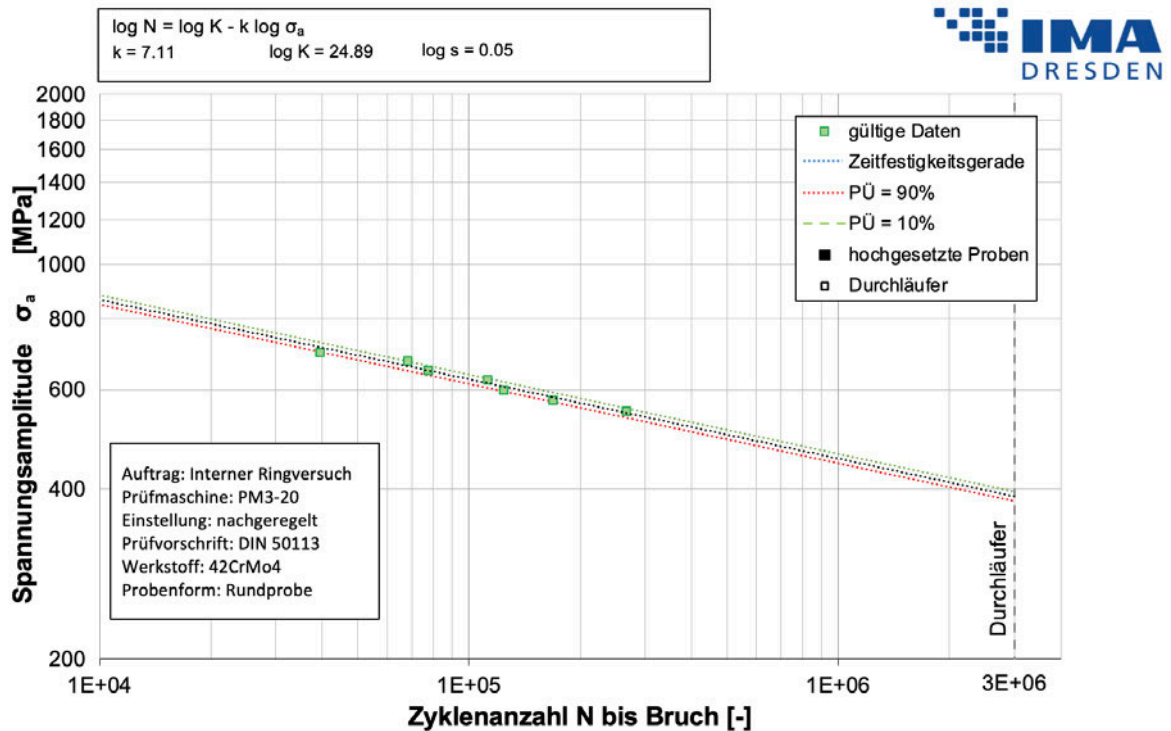


Abbildung 71: Ermittelte Zeitfestigkeitsgerade der PM3-20, mit Nachregelung

Der Vergleich der Zeitfestigkeitsgeraden (siehe Abbildung 72) veranschaulicht den Unterschied der Prüfmaschine PM3-20 zwischen dem Modus mit Nachregelung und ohne Nachregeln des Biegemomentes. Das System der Maschine skaliert die Prüfkraft automatisch auf den Wert anhand des eingegebenen Moments.

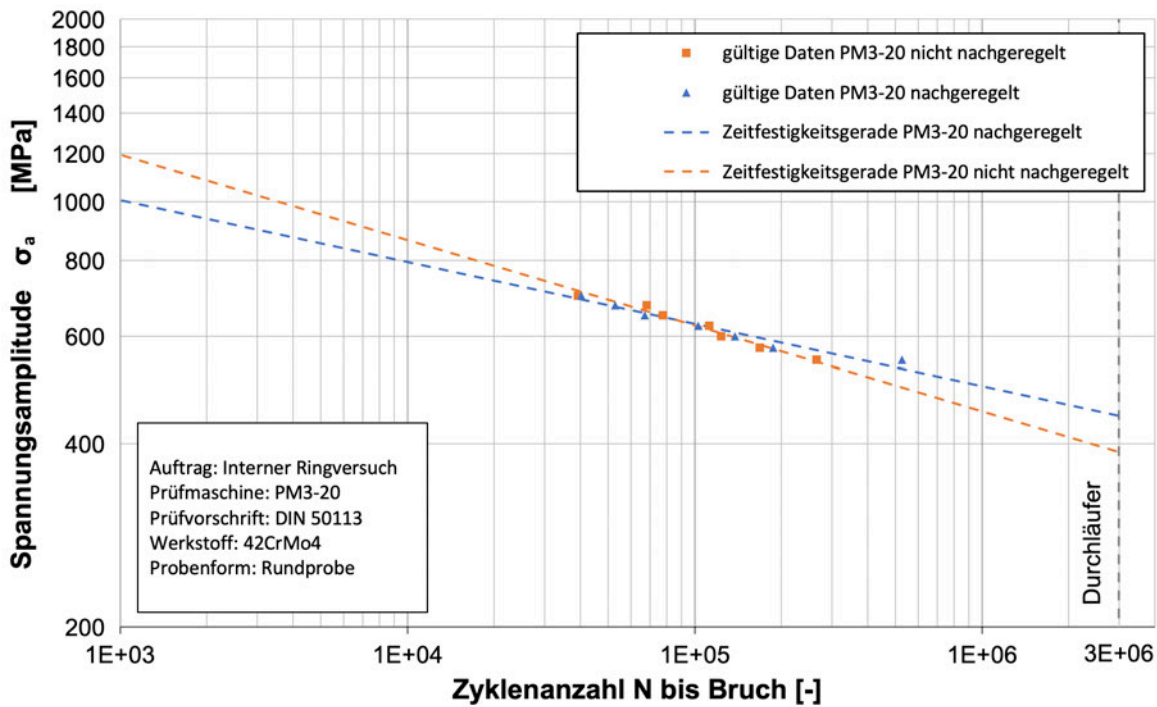


Abbildung 72: Vergleich der beiden Modi der PM3-20

Bei hohen Amplituden liegen die Resultate nah beisammen. Die Effekte der Nachregelung kommen nicht bei geringen Lastwechseln zum Tragen, da in diesen Bereichen die Proben hauptsächlich kraft- und werkstoffbedingt versagen. Der Unterschied des Nachregelns wird erst bei den unteren Lasthorizonten und einer hohen Zyklusanzahl deutlich. Hierbei erträgt die Probe eindeutig mehr Lastwechsel als der Prüfling im nachgeregelten Modus, was eine stärker fallende Gerade zur Folge hat. Bei geringeren Spannungsamplituden haben Oberflächenrauheit und Prüfaufbau im Übergangsbereich zwischen Zeit- und Dauerfestigkeit einen größeren Einfluss.

Das E-Modul ist direkt proportional vom anfallenden Biegemoment abhängig, während das Biegemoment indirekt proportional zum geometrieabhängigen Widerstandmoment im Verhältnis steht. Dadurch kommt es bei der nicht nachgeregelten Probe während der Rissbildung zum Steifigkeitsabfall. Dieser sorgt gleichzeitig für die Verringerung der Biegespannung im Prüfquerschnitt und des Biegemoments, wodurch die Probe erheblich mehr Lastwechsel erträgt.

Im Gegensatz dazu führt das Nachregeln zu einer konstant anhaltenden Belastung durch das Biegemoment. Sobald dieses nicht sinkt, wenn die Probe weicher wird und es zur Rissbildung kommt, führt es durch den abnehmenden Querschnitt und der langsam sinkenden Prüfkraft zu einem exponentiellen Spannungsanstieg, wodurch die Rundprobe prompt versagt. Damit orientiert sich dieser Modus näher an der realen Belastung. Diese Erscheinung ist mit dem Unterschied der wahren Spannung zur technischen Spannung zu begründen.

In den meisten Fällen sind die Festigkeiten nicht die tatsächlich auftretenden, wahren Spannungen, sondern Rechenwerte aus Prüfkraft und Ausgangsquerschnitt, die technischen Spannungen. Die wahre Spannung ermittelt sich dabei aus der derzeitigen Prüfkraft auf den momentanen Querschnitt. Dieser Sachverhalt ist ebenfalls bei der wahren und technischen Dehnung zu beachten.

Um diesen Vorgang präziser darzustellen, ist es zweckmäßiger eine größere Anzahl von Rundproben bei geringeren Spannungsamplituden nahe der Dauerfestigkeit zu prüfen, um die Unterschiede zu verdeutlichen.

8.3.3 Vergleich zwischen PM3-16 und PM3-20 nachgeregelt

Beim Vergleichen zwischen den Ergebnissen der PM3-16 ohne den Durchläufer und der PM3-20 im nachgeregelten Modus, ist schon anhand der beiden entstandenen Formeln erkennbar, dass die Ergebnisse und deren Festigkeitsgeraden nahezu deckungsgleich verlaufen (siehe Abbildung 73). Die Streuung beträgt in beiden Fällen 0,05.

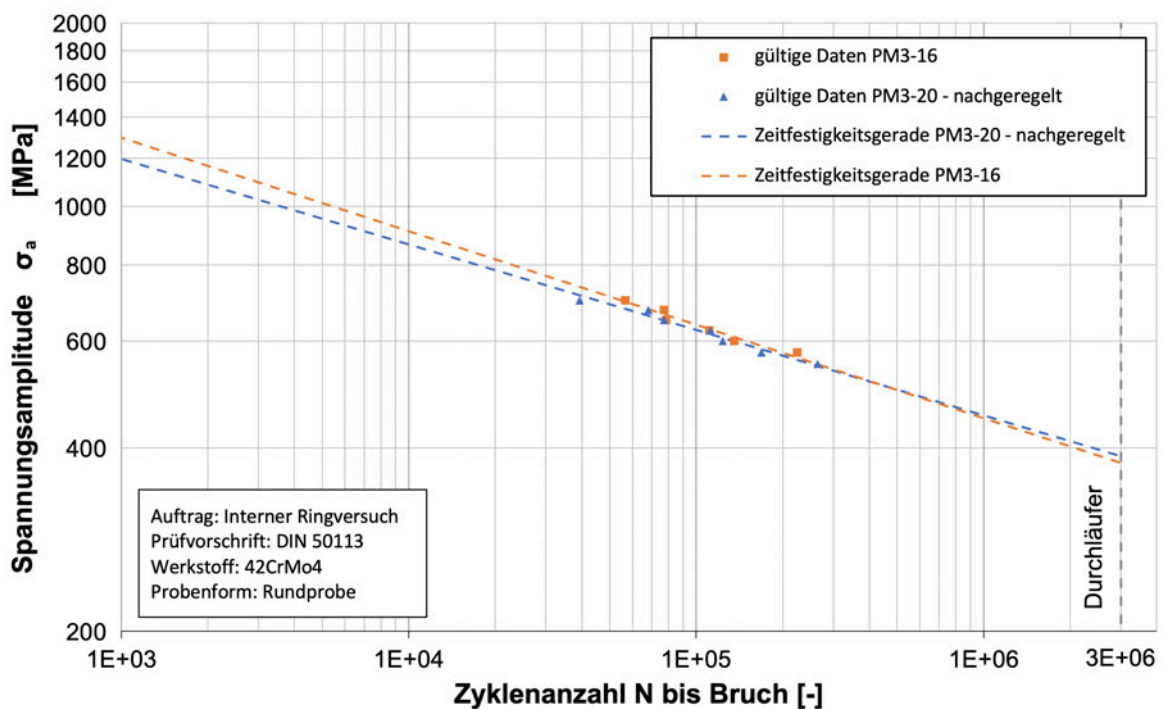


Abbildung 73: Vergleich der PM3-16 und der PM3-20 - nachgeregelt

Dadurch lässt sich abschließend sagen, dass die beste Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Maschinen untereinander mit diesen Einstellungen erreicht wird. Die Abweichungen, welche in der Verifizierung und dem Ringversuch aufgetreten sind, lassen sich mit diesen Voraussetzungen am besten ausnivellieren und haben dadurch insgesamt im praktischen Betrieb eine ähnlich hohe Aussagekraft.

9 Fazit und Ausblick

Mit der Aktualisierung der Norm wurde eine Grundlage geschaffen, um die Ergebnisse zwischen Prüflaboren zu vereinheitlichen, da sie den Aufbau und die Krafteinleitung der Umlaufbiegeprüftechnik vorschreibt. Dadurch kommt es allerdings zu verzerrten Ergebnissen, die weniger aussagekräftig sind, weil im realitätsnahen Umfeld neben der rein wechselnden Belastung, meist zusätzlich überlagernde Querkräfte an Bauteilen auftreten. Diese werden bei Versuchen nach dieser neuen Norm, aufgrund des querkräftfreien Biegemoments nicht mit einbezogen und ausgewertet.

Nachdem es leider nicht möglich war, das Konzept vom Papier in die Wirklichkeit zu übertragen und damit Umlaufbiegeversuche nach der Verifizierung durchzuführen, könnte diese Arbeit die Grundlage sein, um das Projekt zu einem späteren Zeitpunkt anhand dieser Anleitung umzusetzen. Gerade die Überlegung einer luftgelagerten Umlaufbiegeprüfmaschine stellt eine interessante und einzigartige Lösung dar, da eine solche Prüfvorrichtung mit dieser Lagerart nicht üblich ist.

Um dennoch einen praktischen Teil mit in die Arbeit einfließen zu lassen, wurde eine Verifizierung und ein Ringversuch durchgeführt. Dieses erstellte Material und die Ergebnisse daraus sind gleichzeitig Grundlage zur Verifizierung und als Vergleich mit dem erstellten Konzept zu sehen, wodurch eine Vergleichbarkeit untereinander geschaffen wurde.

Bei der Verifikation stellte sich heraus, dass auch größere Differenzen von bereits vorhandenen Umlaufbiegevorrichtungen der gleichen Marke auftreten. Im Durchschnitt liegen die Differenzen nah beim Faktor Eins. Jedoch sollten die Unterschiede bei gering eingestelltem Biegemoment weiterhin beachtet werden und bedürfen gegebenenfalls einer nachträglichen Betrachtung oder Kalibrierung, um verfälschte Ergebnisse ausschließen zu können.

Diese Differenzen traten auch beim internen Ringversuch auf. Die Abweichungen wurden gerade bei geringen Belastungen und hohen Lastwechseln sichtbar. Damit die Resultate beider Maschinen möglichst exakt übereinstimmen, sollte die Umlaufbiegeprüfmaschine PM3-20 im nachgeregelten Modus betrieben werden, da die mit diesen Einstellungen ermittelten Zeitfestigkeitsgeraden nahezu deckungsgleich aufgenommen wurden.

Sollte das Projekt abschließend erneut angegangen werden, müssen hinsichtlich der Sicherheit der Maschine weitere Betrachtungen angestellt werden. Zum Beispiel könnte die Maschine mit einem Gehäuse aus Plexiglas umgeben und mit einem Sicherheitsschalter ausgestattet werden, der die Maschine nur bedienen lässt, wenn er aktiviert ist. Davon ausgenommen ist die Probeneinspannung. Dazu muss allerdings die Luftlagerung aktiv sein, während der Motor jedoch nicht in Betrieb sein darf. Weiterhin lässt sich ein Schalter an der Bodenplatte anbringen, eventuell der bereits bestehende aus Abbildung 6 Punkt 13, um die Maschine zu stoppen, sobald die Lagerplatte aufgrund des Probenbruches beginnt auszuschwenken. Schließlich sollte im System ein Not-Aus definiert werden, falls es zu einer Havarie kommen sollte und die Druckluftversorgung des Aufbaus schlagartig ausfällt. Weiterhin muss grundsätzlich eine Steuerungs- und Regeltechnik erarbeitet werden, um die Maschine in Betrieb nehmen zu können.

Literatur

- [1] Unterlagen zum Internationalen Schweißfachingenieur, *Hauptgebiet 3 – Konstruktion und Gestaltung*, Ausgabe 2021

- [2] Haibach, E.: *Betriebsfestigkeit*, Springer Verlag, 3. korrigierte und ergänzte Auflage, 2006

- [3] Einbock, S.: *Wöhlerlinien nach dem Perlschnurverfahren auswerten*, <https://www.einbock-akademie.de/woehlerlinien-nach-dem-perlschnurverfahren-auswerten/>, aufgerufen am 27.12.2021

- [4] Schiebold, K.: *Zerstörende Werkstoffprüfung*, Springer Verlag, 2018

- [5] Deinböck, A.; Hesse, A.-C.; Wächter, M.; Hensel, J.; Esderts, A.; Dilger, K.: *Berücksichtigung der hoch beanspruchten Schweißnahtlänge im Kerbspannungskonzept*, DVS Media, 2021

- [6] Hanke, A.: *Ermüdungsfestigkeit/ Betriebsfestigkeit*, <https://www.ing-hanke.de/fem-berechnung/ermuedungsfestigkeit/>, aufgerufen am 05.01.2022

- [7] Lang, K.-H.; Korn, M.; Rohm, T.: *Very High Cycle Fatigue Resistance of the Low Alloyed Steel 42CrMo4 in Medium- and High-Strength Quenched and Tempered Condition*, 2021

- [8] Schott, G.: *Werkstoffermüdung - Ermüdungsfestigkeit*, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart, 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, 1997

- [9] Amsler Prüfsysteme AG: *Produktinformation Umlaufbiegeprüfmaschine UBM 200 tc*, kein Datum
- [10] Huter, P.: *Entwicklung einer Umlaufbiegeprüfmaschine für die in-situ Untersuchung der Rissinitiierung und des mikrostrukturellen Rissfortschritts*, Leoben, 2011
- [11] DIN 50113:2018-12, *Prüfung metallischer Werkstoffe - Umlaufbiegeversuch*
- [12] Kugellager Express GmbH: *Flanschlager/ Flanschlagereinheit*, https://www.kugellager-express.de/flanschlager-flanschlagereinheit-ucf202-welle-15-mm?curr=EUR&gclid=Cj0KCQiAraSPBhDuARIsAM3Js4qKSxollh6AiVoH1jufQA4NLtMF9YFXbHAzS2kT8ZaGmHbUZxtJ6yoaAv-EEALw_wcB, aufgerufen am 26.10.2021
- [13] Transportprofi24 GmbH: *Kugelrolle Stahl*, <https://transportprofi24.com/kugelrolle-stahl-kugel-oe-25-4-mm-tragkraft-55-kg>, aufgerufen am 26.10.2021
- [14] Misumi Europe GmbH: *Misumi Hauptkatalog für Sondermaschinenbau*, 2021
- [15] Igus GmbH: *drylin W Linear/ Schwenkführung Studie*, 2020
- [16] Uhlmann, E.: *Führungen und Schlitten für Tische*, 2021
- [17] Meusburger Georg GmbH: *Werkstoffdatenblätter*, 2021

- [18] GSR Gustav Stursberg GmbH: *Unterschied zwischen Feingewinde und Regelgewinde*, 2021
- [19] Hottinger Brüel & Kjaer GmbH: *Einbau von Kraftaufnehmern*, 2021
- [20] Bartz, W.: *Luftlagerungen und Magnetlager: Grundlagen und Anwendungen*, Expert Verlag, 3. Auflage, 2014
- [21] Christian Wolf Feinmechanik GmbH: *Allgemeine Bearbeitungshinweise*, 2021
- [22] Bosch Rexroth AG: *Katalog Rollenschienenführung*, 2021
- [23] Mesys AG: *Passungsberechnung*, 2021
- [24] DIN 82:1973-01, *Rändel*
- [25] The Shadow Conspiracy: *Interlock Supreme Chain*, <https://theshadowconspiracy.com/mega-feature/interlock-supreme-chain/>, aufgerufen am 13.12. 2021
- [26] Hahn+Kolb Werkzeuge GmbH: *Direktspannzange*, https://www.hahn-kolb.de/Alle-Kategorien/Direktspannzange-Typ-574-E-mit-Steilkegel/1521CL04_020306021502.cyid/1521.cgid/de/DE/EUR/, aufgerufen am 01.11.2021
- [27] Portec AG: *Poröse Werkstoffe*, 2021

-
- [28] Masendorf, L.; Burghardt, R.; Wächter, M.; Esderts, A.: *Determination of Local Stresses and Strains within the Notch Strain Approach: The Efficient and Accurate Calculation of Notch Root Strains Using Finite Element Analysis*, 2021
- [29] Mahn, U.: *Praktikumsanleitung Modalanalyse*, Lehrveranstaltung Maschinenkonstruktion, 2012
- [30] Item Industrietechnik GmbH: *Resonanz*, <https://glossar.item24.com/glossarindex/artikel/item/resonanz.html>, aufgerufen am 13.12.2021
- [31] Stahlhandel Gröditz GmbH: *Werkstoffdatenblatt 42CrMo4*, 2021
- [32] Schweizer, A.: *Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagenbau*, 2021
- [33] Dücker, S.: *Duktilität und Sprödigkeit*, 2021
- [34] Qualitätssicherungs-Initiative Pathologie GmbH: *Ringversuche*, 2021
- [35] DIN 50100:2016-12, *Schwingfestigkeitsversuch – Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile*
- [36] DIN 6072:2011-06, *Luft- und Raumfahrt – metallische Werkstoffe – Prüfverfahren – Ermüdungstest mit konstanter Amplitude*

Anlagen

Teil 1	A-I
Teil 2	A-III
Teil 3	A-V

Anlagen, Teil 1

Mindesteinschraubtiefen in Millimetern							
Gewinde	Steigung P	le	x	e	t	Randabstand	Lochabstand
Berechnung		$1,0 \cdot d$	$3 \cdot P$	$5 \cdot P$	$le + x + e$	$1,2 \cdot d$	$2,2 \cdot d$
M5	0,8	5	2,4	4	11,4	6	11
M6	1	6	3	5	14	7,2	13,2
M8	1,25	8	3,75	6,25	18	9,6	17,6
M12	1,75	12	5,25	8,75	26	14,4	26,4
M16	2	16	6	10	32	19,2	35,2
G1/8	0,9	9,7	2,7	4,5	16,9	11,6	21,4

Bearbeitungshinweise Metapor:

- Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 100$ mm/min
- Schnittgeschwindigkeit $v_c = 500$ U/min
- Zustellung von einem Millimeter bis 0,5 mm (Endbearbeitung)

Produkt	ES 240 INOX	MC 100 WHITE	CE 100 WHITE	BF 100 AL
Luftdurchlässigkeit *	200%	800%	100%	100%
Anwendung				
Vakuumspannen	★★☆	★★☆	★★★★	★★☆
Luftkissen / Luftfilm	-	★★★★	★★★★	★★★★
Transparente Anwendungen	-	-	-	★☆☆
Hohe Temperaturen	★★★★	★☆☆	★☆☆	★☆☆
Geringe Oberflächenrauheit	★★☆	★☆☆	★★★★	★★☆
Hoher Oberflächenwiderstand	★★★★	★★☆	★★★★	★★☆
Porosität	29%	20%	20%	17%
Temperaturbeständigkeit	240 °C	108 °C	108 °C	108 °C
Erhältlich in 500 x 500 mm Platten	✓	✓	✓	✓

Projekt UBM 200 - Stückliste

Lfd.Nr.	Stückzahl	Inventar	Bezeichnung	Zeichnungsnummer	Material	Länge	Breite/Ø	Tiefe	EK	Preis	Artikelnummer	Shop	Lieferzeit	Kosten
1	2	0	Metapor. Groß	2210.001.922	MC100White	200.00	90.00	10.50						
2	2	0	Metapor. Klein	2210.001.923	MC100White	500.00	40.00	10.50						
3	1	0	Bodenplatte	2210.001.927	Stahl1.2085	200.00	700.00	75.00						
4	1	0	Kraftarm 1	2210.001.928	Stahl1.2316	415.00	25.00							
5	1	0	Kraftarm 2	2210.001.929	Stahl1.2316	415.00	25.00							
6	1	0	Lagerplatte Klein	2210.001.930	Stahl1.2085	260.00	231.00	47.00						
7	1	0	Lagerplatte Groß	2210.001.931	Stahl1.2085	430.00	231.00	47.00						
8	2	0	Zapfen	2210.001.932	Stahl1.2316	115.00	20.00							
9	1	0	Zapfenaufnahme	2210.001.933	AlMg3	2.50	50.00							
10	1	0	Lagerdeckel	2210.001.941	AlMg3	35.00	50.00							
11	1	0	Lagergehäuse	2210.001.942	Stahl1.2316	15.00	35.00							
12	1	0	Stegdemutter	2210.001.943	Stahl1.2085	15.00	35.00							
13	2	0	Steg	2210.001.944	DIN975	175.00								
14	1	0	Verbindungsweile	2210.001.945										
15	2	0	Endbearbeitung Metapor	2210.001.946										
16	1	1	Sensormutter		Stahl									
17	8	0	ISO 4762 Zylinderschraube Innensechskant D 6 - 300 M16 x 50											
18	8	0	ISO 7089 flache Scheibenormale Reihe A2 200 HV10 / 17 x 30 x 3											
19	2	0	DIN 6932 Zylinderschraube mit niedrigem Kopf ISK A2 M8 x 30											
20	10	0	DIN 6932 Zylinderschraube mit niedrigem Kopf ISK A2 M8 x 20											
21	12	0	ISO 7092 flache Scheibenkleine Reihe A2 200 HV 8 / 8 x 15 x 1.6											
22	24	0	DIN 6932 Zylinderschraube mit niedrigem Kopf ISK A2 M6 x 16											
23	9	0	ISO 4762 Zylinderschraube Innensechskant A4 - 80 M6 x 25											
24	1	0	ISO 4762 Zylinderschraube Innensechskant A4 - 80 M6 x 25											
25	3	0	DIN 975 / DIN 976 Gewindestange Edelstahl A2 Feingewinde M16 x 1.5											
26	3	0	ISO 7093-1 flache Scheibenreihe A2 200 HV6											
27	4	0	ISO 4762 Zylinderschraube Innensechskant A4 - 80 M12 x 25											
28	4	0	ISO 7089 flache Scheibenormale Reihe A2 200 HV 12 / 13 x 24 x 2.5											
29	10	0	DIN 6932 Zylinderschraube mit niedrigem Kopf ISK A2 M5 x 14											
30	2	0	ISO 8875 Sechskantmutter niedrigform Feine A2 M22 x 1.5											
31														
32														
33														
34														
35														
36	1	0	Handrad mit Klappgriff											
37	1	0	Gleitlagerbuchse MPTZ 20-25											
38	1	0	Gleitlagerbuchse MPTZ 20-15											
39	1	0	PVC-Gewebeschauch 9 (3/8) "x 15mm, 15mtr. mit Kupplung & Stecker											
40	2	0	Winkel-Steckschluss G 1/8" - 8mm, IDS-Standard											
41	2	0	T-Steckschluss G 1/8" - 8mm, IDS-Standard											
42	1	0	Polurethan-Schlauch 8 x 5 mm, blau (5 m)											
43	1	0	Steck-Mehrfachventil, 2-fach, G 1/4"-8mm, IDS-Standard											
44	2	0	Drosselückschlagventil 8mm Steckschluss											
45	1	0	Schlagkugellager einreihig, DIN 628, 12x32x10mm, offen											
46	1	0	Vakuumspannrolle Metapor MC100 White											
47	4	0	Kraftl. Doppelpacktasche 50ml											
48	1	0	Kraftl. Doppelpacktasche 50ml											
49	1	0	Kraftl. Doppelpacktasche 50ml											
50	1	0	Kraftl. Doppelpacktasche 50ml											
51	1	0	Kohlenentf. R16523131											
52	2	0	Rollenwagen R1652312X											
53	2	0	Spannhülse 574 E 16 00 Rund											
54	1	0	Interface Kraftbaumhalter											
55	2	0	Gabelkopf M6 x 1											
56	1	0	Steuer- und Regelungsstechnik											
57	3	0	Gummi-Dämpfungslochstreifen											
58	4	4	SKF Lagerböcke											
59	1	1	ATB Motor											
60	1	1	Riemtrieb											
61	1	1	Kette											
62	1	1	Drehzahlsensor											
63	1	1	Frequenzrichter											
Gesamt: 12.443,36 €														

Fertigungsstelle

Zukunft

↑ Artikelnummer evtl. für 1.00er Packs ↑

Anlagen, Teil 2



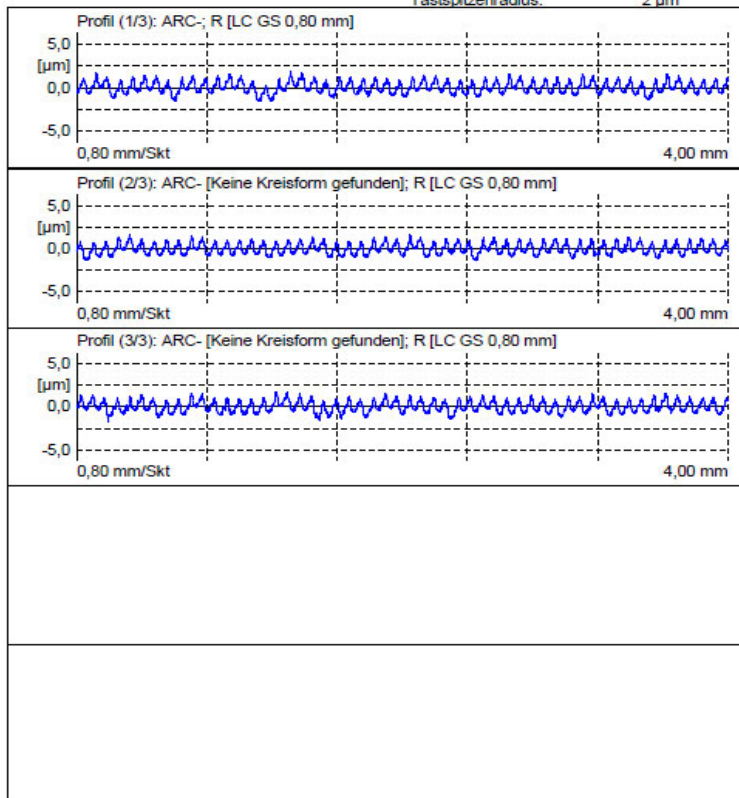
Bereich 2000
Abteilung Metalle
IMA GmbH Dresden
Postfach
01109 Dresden

Perthometer Concept 7.21 Messprotokoll



Objekt: TH-VE	1: LS 0,0 µm
Nummer:	1: LT 5,60 mm
Prüfer: Stiegel	1: LM 4,00 mm
Datum, Zeit: 31.08.2021, 09:50	1: Z 5
Bemerkung:	1: VB ±250,0 µm
Taster: MFW-250 -22	

Tastspitzenradius: 2 µm



	1	2	3	\bar{X}	S	Min	Max	R	
Ra	0,55	0,53	0,55	0,54	0,01	0,53	0,55	0,02	µm
Rz	2,92	2,65	2,97	2,85	0,17	2,65	2,97	0,32	µm
Rt	3,46	3,01	3,46	3,31	0,26	3,01	3,46	0,45	µm

Unterschrift: gez. Stiegel

Verifizierung mittels DM5 applizierter Probe										
PM3-16					PM3-20					
Werkstoff: 41CrMo4 El-MoStahl: 210000 N/mm ² Rm,2: 800 N/mm ² Rp0,2: 14.894 mm Hebelarm: 600 mm Durchföhrung: 25.01.22										
Durchlauf 1: Dehnungsmaximum Durchlauf 2: Dehnungsminimum										
Bedingung: F _r < R _{m2} WAHR: 400 < 800										
r > 3 r = 65 WAHR										
Probenbezeichnung: 2210-001372 TH, VE										
Temperaturmessung Ende: 22,4° C Arithmetischer Mittelwert der Korrekturfaktoren für die PM3-16: C _f = 1,0123										
Temperaturmessung Ende: 22,8° C Arithmetischer Mittelwert der Korrekturfaktoren für die PM3-16: C _f = 0,9484										
Durchlauf 1.1										
Laastufe	Prüfkraft F _p in N	erwartetes Biegemoment M _b in Nm	Dehnung ε	tatsächliche Nennbiegespannung S _n in N/mm ²	tatsächliche Kraft F _p in N	Korrekturfaktor G	Nennbiegespannung S in N/mm ²	erwartetes Biegemoment M _b in Nm	Dehnung ε	Nennbiegespannung S in N/mm ²
1	25	10	0,00181	38,01	31,468	0,7991	47,813	10	0,00181	47,813
2	125	50	0,00718	150,78	124,769	1,0021	150,477	50	0,00718	150,477
3	250	100	0,01424	299,94	247,413	1,0105	295,945	100	0,01424	295,945
Dehnung nach Entlastung: 0,000007										
Durchlauf 1.2										
Laastufe	Prüfkraft F _p in N	erwartetes Biegemoment M _b in Nm	Dehnung ε	tatsächliche Nennbiegespannung S _n in N/mm ²	tatsächliche Kraft F _p in N	Korrekturfaktor G	Nennbiegespannung S in N/mm ²	erwartetes Biegemoment M _b in Nm	Dehnung ε	Nennbiegespannung S in N/mm ²
1	25	10	0,00017	35,70	29,537	0,8464	42,178	10	0,00017	42,178
2	125	50	0,00726	152,46	126,139	0,9310	153,849	50	0,00726	153,849
3	250	100	0,01421	298,41	246,891	1,0126	294,699	100	0,01421	294,699
Dehnung nach Entlastung: 0,000096										
Durchlauf 1.3										
Laastufe	Prüfkraft F _p in N	erwartetes Biegemoment M _b in Nm	Dehnung ε	tatsächliche Nennbiegespannung S _n in N/mm ²	tatsächliche Kraft F _p in N	Korrekturfaktor G	Nennbiegespannung S in N/mm ²	erwartetes Biegemoment M _b in Nm	Dehnung ε	Nennbiegespannung S in N/mm ²
1	25	10	0,00164	34,44	28,494	0,8774	39,254	10	0,00164	39,254
2	125	50	0,00718	150,78	124,769	1,0020	150,477	50	0,00718	150,477
3	250	100	0,01405	295,05	244,111	1,0041	288,100	100	0,01405	288,100
Dehnung nach Entlastung: 0,000027										
Durchlauf 2.1										
Laastufe	Prüfkraft F _p in N	erwartetes Biegemoment M _b in Nm	Dehnung ε	tatsächliche Nennbiegespannung S _n in N/mm ²	tatsächliche Kraft F _p in N	Korrekturfaktor G	Nennbiegespannung S in N/mm ²	erwartetes Biegemoment M _b in Nm	Dehnung ε	Nennbiegespannung S in N/mm ²
1	25	10	0,00117	24,57	20,328	1,2398	19,978	10	0,00117	19,978
2	125	50	0,00682	143,22	118,694	1,0549	135,766	50	0,00682	135,766
3	250	100	0,01394	292,74	242,200	1,0921	283,607	100	0,01394	283,607
Dehnung nach Entlastung: 0,000099										
Durchlauf 2.2										
Laastufe	Prüfkraft F _p in N	erwartetes Biegemoment M _b in Nm	Dehnung ε	tatsächliche Nennbiegespannung S _n in N/mm ²	tatsächliche Kraft F _p in N	Korrekturfaktor G	Nennbiegespannung S in N/mm ²	erwartetes Biegemoment M _b in Nm	Dehnung ε	Nennbiegespannung S in N/mm ²
1	25	10	0,00132	27,72	22,934	1,0601	25,430	10	0,00132	25,430
2	125	50	0,00687	144,27	119,363	1,0671	137,764	50	0,00687	137,764
3	250	100	0,0137	287,70	238,030	1,0603	273,925	100	0,0137	273,925
Dehnung nach Entlastung: 0,000005										
Durchlauf 2.3										
Laastufe	Prüfkraft F _p in N	erwartetes Biegemoment M _b in Nm	Dehnung ε	tatsächliche Nennbiegespannung S _n in N/mm ²	tatsächliche Kraft F _p in N	Korrekturfaktor G	Nennbiegespannung S in N/mm ²	erwartetes Biegemoment M _b in Nm	Dehnung ε	Nennbiegespannung S in N/mm ²
1	25	10	0,00133	27,93	23,108	1,0819	25,816	10	0,00133	25,816
2	125	50	0,00687	144,27	119,363	1,0671	137,764	50	0,00687	137,764
3	250	100	0,01401	294,21	243,416	1,0770	286,482	100	0,01401	286,482
Dehnung nach Entlastung: 0,000026										

Anlagen, Teil 3

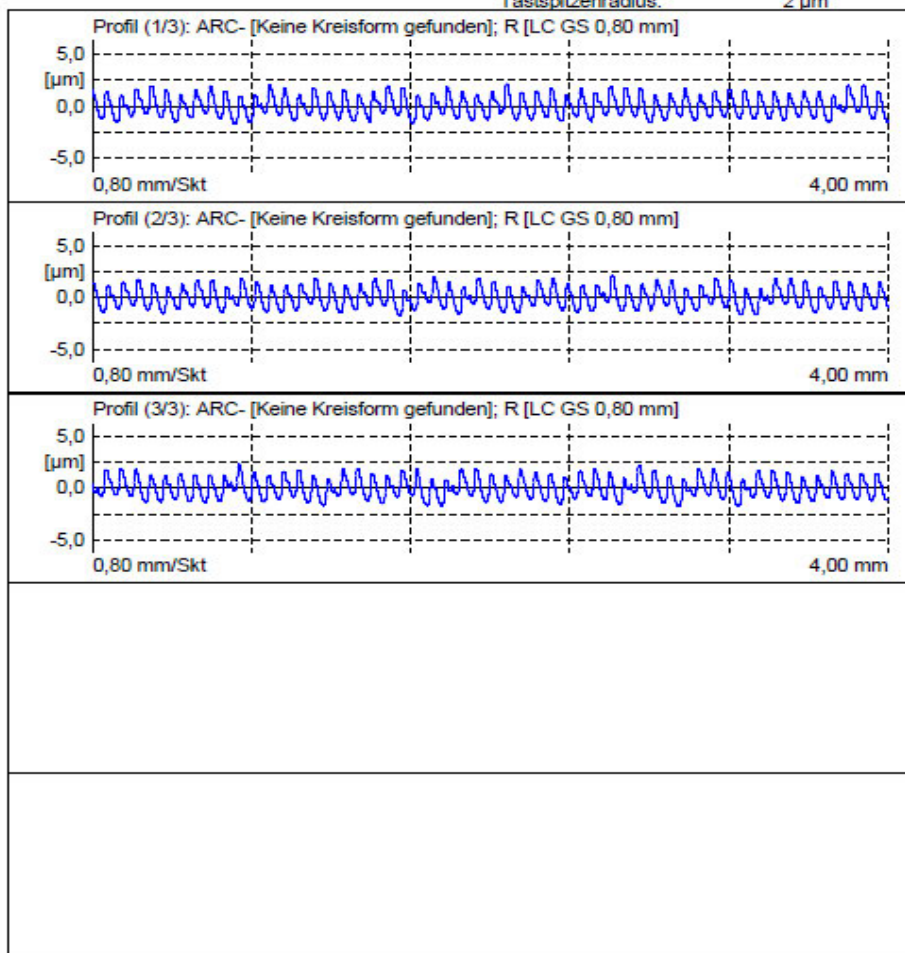
Bereich 2000
Abteilung Metalle
IMA GmbH Dresden
Postfach
01109 Dresden

Perthometer Concept 7.21 Messprotokoll



Objekt:		1: LS	0,0	µm
Nummer:	08	1: LT	5,60	mm
Prüfer:	Stiegel	1: LM	4,00	mm
Bemerkung:		1: Z	5	
Taster:	MFW-250 -22	1: VB	±250,0	µm

Tastspitzenradius: 2 µm



	1	2	3	\bar{X}	S	Min	Max	R	
Ra	0,86	0,83	0,85	0,85	0,01	0,83	0,86	0,02	µm
Rz	3,61	3,61	3,67	3,63	0,03	3,61	3,67	0,06	µm
Rt	3,82	3,92	4,12	3,95	0,15	3,82	4,12	0,29	µm

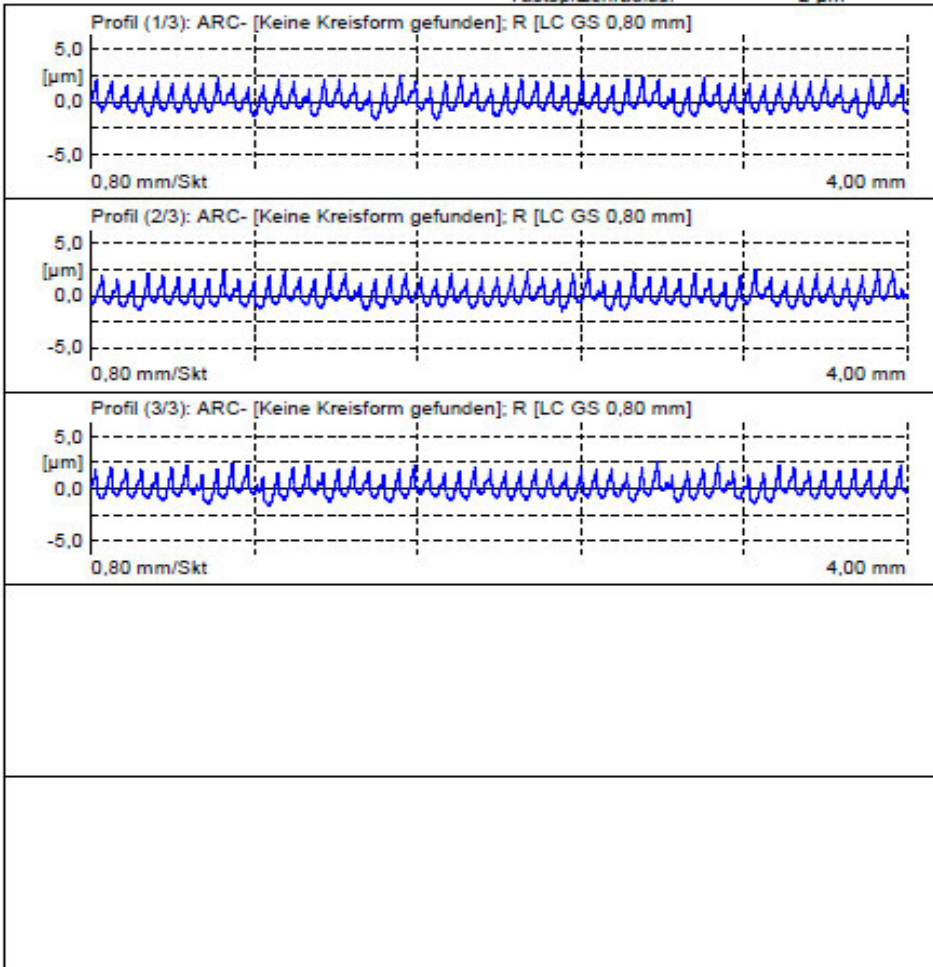
Bereich 2000
 Abteilung Metalle
 IMA GmbH Dresden
 Postfach
 01109 Dresden

Perthometer Concept 7.21
Messprotokoll



Objekt:		1: LS	0,0	µm
Numer:	18	1: LT	5,60	mm
Prüfer:	Stiegel	1: LM	4,00	mm
Bemerkung:		1: Z	5	
Taster:	MFV-250 -22	1: VB	±250,0	µm

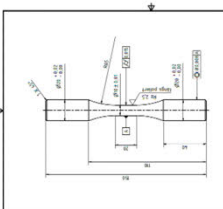
Tastspitzenradius: 2 µm



	1	2	3	\bar{X}	S	Min	Max	R	
Ra	0,72	0,71	0,71	0,71	0,01	0,71	0,72	0,01	µm
Rz	3,88	3,73	3,70	3,77	0,10	3,70	3,88	0,18	µm
Rt	4,15	4,03	4,17	4,12	0,07	4,03	4,17	0,14	µm

Ringversuch ULB-Maschinen

Material: 42 CMn 4
 Zugfestigkeit R_m : 1000 N/mm²
 Dehnbrüche $R_{m,2}$: 800 N/mm²
 Elongation: 210000 N/mm²
 Grenzschwinggeschwindigkeit: 10%



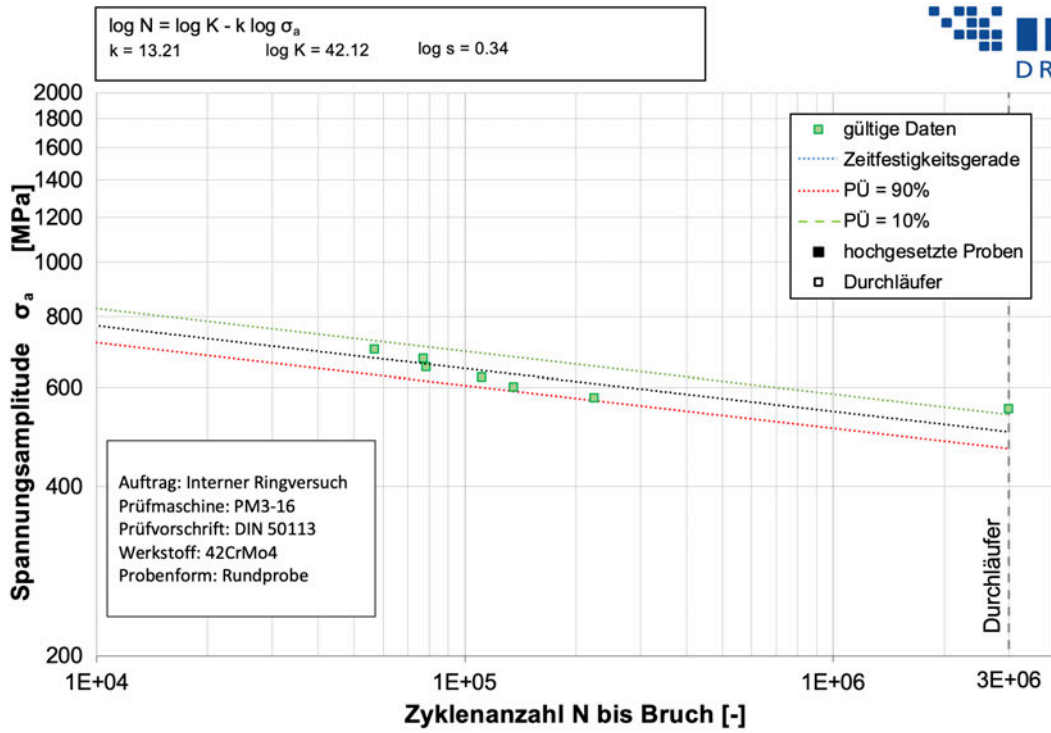
Profilmaschine SinoTec PM3-20+	
Prüfmaschine SinoTec PM3-20	Profilmaschine SinoTec PM3-20+

Lfd. Nr.	Prüfmaschine	SinoTec	PM3-20+	Prüf-Ø	D in mm	Prüffläche	A in mm ²	Nennspannung	σ in N/mm ²	Mindestspannung	σ _{min} in N/mm ²	Maximalspannung	σ _{max} in N/mm ²	Biegemoment	M _b in Nm	Hebelarm	L in mm	Prüfkraft	F in N	Korrekturfaktor c _f	tatsächliche Kraft	F _y in N	R	Schwingspielzahl	Bemerkung		
																										σ _n in N/mm ²	σ _{min} in N/mm ²	σ_{max} in N/mm^{2}	M_{b} in Nm	L in mm	F in N	F_{y} in N
1				10,0038	78,60	78,60	78,60	700	-700	700	700	0	0	0,000	0,000	400	170,32	170,32	0,9484	179,58	179,58	-1	137,966	f=50,0Hz / T=22,27°C / RH=34% / 17.01.2022 SN			
2				9,9937	78,44	78,44	78,44	600	-600	600	600	0	0	0,000	0,000	400	146,98	146,98	0,9484	154,96	154,96	-1	39,280	f=50,0Hz / T=22,27°C / RH=34% / 19.01.2022 SN			
3				10,0072	78,65	78,65	78,65	650	-650	650	650	0	0	0,000	0,000	400	159,88	159,88	0,9484	168,58	168,58	-1	77,418	f=50,0Hz / T=22,28°C / RH=33% / 19.01.2022 SN			
4				10,0007	78,55	78,55	78,55	550	-550	550	550	0	0	0,000	0,000	400	135,02	135,02	0,9484	142,36	142,36	-1	265,095	f=50,0Hz / T=22,7°C / RH=33% / 19.01.2022 SN			
5				9,9876	78,35	78,35	78,35	575	-575	575	575	0	0	0,000	0,000	400	140,60	140,60	0,9484	148,25	148,25	-1	168,553	f=50,0Hz / T=22,3°C / RH=33% / 20.01.2022 SN			
6				9,993	78,43	78,43	78,43	625	-625	625	625	0	0	0,000	0,000	400	153,08	153,08	0,9484	161,40	161,40	-1	112,099	f=50,0Hz / T=22,3°C / RH=31% / 20.01.2022 SN			
7				9,9852	78,31	78,31	78,31	675	-675	675	675	0	0	0,000	0,000	400	164,94	164,94	0,9484	173,91	173,91	-1	68,139	f=50,0Hz / T=23,1°C / RH=32% / 20.01.2022 SN			
8					0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000	400	0,00	0,00		#DIV/0!	#DIV/0!	-1					
9					0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000	400	0,00	0,00		#DIV/0!	#DIV/0!	-1					
10					0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000	400	0,00	0,00		#DIV/0!	#DIV/0!	-1					

Lfd. Nr.	Prüfmaschine	SinoTec	PM3-16	Prüf-Ø	D in mm	Prüffläche	A in mm ²	Nennspannung	σ in N/mm ²	Mindestspannung	σ _{min} in N/mm ²	Maximalspannung	σ _{max} in N/mm ²	Biegemoment	M _b in Nm	Hebelarm	L in mm	Prüfkraft	F in N	Korrekturfaktor c _f	tatsächliche Kraft	F _y in N	R	Schwingspielzahl	Bemerkung		
																										σ _n in N/mm ²	σ _{min} in N/mm ²	σ_{max} in N/mm^{2}	M_{b} in Nm	L in mm	F in N	F_{y} in N
1				9,9998	78,54	78,54	78,54	700	-700	700	700	0	0	68,718	68,718	400	171,80	171,80	1,0123	169,71	169,71	-1	56,700	f=50,0Hz / T=21,8°C / RH=32% / 31.01.2022 SN			
2				9,9808	78,24	78,24	78,24	600	-600	600	600	0	0	58,566	58,566	400	144,64	144,64	1,0123	142,88	142,88	-1	135,700	f=50,0Hz / T=21,8°C / RH=33% / 31.01.2022 SN			
3				9,9738	78,13	78,13	78,13	650	-650	650	650	0	0	63,313	63,313	400	156,36	156,36	1,0123	154,46	154,46	-1	78,500	f=50,0Hz / T=21,7°C / RH=33% / 01.02.2022 SN			
4				9,9834	78,28	78,28	78,28	550	-550	550	550	0	0	53,728	53,728	400	132,69	132,69	1,0123	131,07	131,07	-1	3,000,000	f=50,0Hz / T=21,7°C / RH=33% / 01.02.2022 SN			
5				10,466	86,03	86,03	86,03	575	-575	575	575	0	0	64,716	64,716	400	159,82	159,82	1,0123	157,88	157,88	-1	224,300	f=50,0Hz / T=21,9°C / RH=33% / 02.02.2022 SN			
6				9,9959	78,48	78,48	78,48	625	-625	625	625	0	0	61,284	61,284	400	151,35	151,35	1,0123	149,51	149,51	-1	111,200	f=50,0Hz / T=21,7°C / RH=33% / 01.02.2022 SN			
7				9,9776	78,19	78,19	78,19	675	-675	675	675	0	0	65,824	65,824	400	162,56	162,56	1,0123	160,58	160,58	-1	77,300	f=50,0Hz / T=21,7°C / RH=33% / 01.02.2022 SN			
8					0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000	400	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!	-1					
9					0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000	400	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!	-1					
10					0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000	400	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!	-1					

Profilmaschine SinoTec PM3-16	
Prüfmaschine SinoTec PM3-16	Profilmaschine SinoTec PM3-16

Lfd. Nr.	Prüfmaschine	SinoTec	PM3-16	Prüf-Ø	D in mm	Prüffläche	A in mm ²	Nennspannung	σ in N/mm ²	Mindestspannung	σ _{min} in N/mm ²	Maximalspannung	σ _{max} in N/mm ²	Biegemoment	M _b in Nm	Hebelarm	L in mm	Prüfkraft	F in N	Korrekturfaktor c _f	tatsächliche Kraft	F _y in N	R	Schwingspielzahl	Bemerkung		
																										σ _n in N/mm ²	σ _{min} in N/mm ²	σ_{max} in N/mm^{2}	M_{b} in Nm	L in mm	F in N	F_{y} in N
1				9,9998	78,54	78,54	78,54	700	-700	700	700	0	0	68,718	68,718	400	171,80	171,80	1,0123	169,71	169,71	-1	56,700	f=50,0Hz / T=21,8°C / RH=32% / 31.01.2022 SN			
2				9,9808	78,24	78,24	78,24	600	-600	600	600	0	0	58,566	58,566	400	144,64	144,64	1,0123	142,88	142,88	-1	135,700	f=50,0Hz / T=21,8°C / RH=33% / 31.01.2022 SN			
3				9,9738	78,13	78,13	78,13	650	-650	650	650	0	0	63,313	63,313	400	156,36	156,36	1,0123	154,46	154,46	-1	78,500	f=50,0Hz / T=21,7°C / RH=33% / 01.02.2022 SN			
4				9,9834	78,28	78,28	78,28	550	-550	550	550	0	0	53,728	53,728	400	132,69	132,69	1,0123	131,07	131,07	-1	3,000,000	f=50,0Hz / T=21,7°C / RH=33% / 01.02.2022 SN			
5				10,466	86,03	86,03	86,03	575	-575	575	575	0	0	64,716	64,716	400	159,82	159,82	1,0123	157,88	157,88	-1	224,300	f=50,0Hz / T=21,9°C / RH=33% / 02.02.2022 SN			
6				9,9959	78,48	78,48	78,48	625	-625	625	625	0	0	61,284	61,284	400	151,35	151,35	1,0123	149,51	149,51	-1	111,200	f=50,0Hz / T=21,7°C / RH=33% / 01.02.2022 SN			
7				9,9776	78,19	78,19	78,19	675	-675	675	675	0	0	65,824	65,824	400	162,56	162,56	1,0123	160,58	160,58	-1	77,300	f=50,0Hz / T=21,7°C / RH=33% / 01.02.2022 SN			
8					0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000	400	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!	-1					
9					0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000	400	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!	-1					
10					0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000	400	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!	-1					



Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Zwickau, den 16. Februar 2022



Tom Henschel