



Masterarbeit

Zum Thema

„Auslegung und Konstruktion eines mobilen Teststandes zur Messung der spektralen Homogenität“

Verfasser: Igor Polyakov

Studiengang: Maschinenbau, Mechatronik, Physiktechnik

Studienrichtung: Maschinenbau

Eingereicht am: 18.05.2016

Betreuer in der Hochschule: Klaus-Vitold Jendertka

Hochschule Merseburg

Eberhard-Leibnitz-Str. 2, 06217 Merseburg

Betreuer im Unternehmen: Rico Meier

Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP

Otto-Eißfeldt-Straße 12, 06120 Halle

Aufgabenstellung!

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Zuhilfenahme unzulässiger Hilfsmittel angefertigt zu haben. Wörtliche oder dem Sinne nach übernommene Ausführungen sind gekennzeichnet, sodass Missverständnisse über die geistige Urheberschaft ausgeschlossen sind. Diese Arbeit war bisher noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung in gleicher oder ähnlicher Fassung.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	3
Abkürzungen	6
Tabellenverzeichnis.....	7
Abbildungen	8
1 Einleitung	10
1.1 Problemstellung	11
1.2 Verwendung des Sonnensimulators	11
1.3 Zu untersuchenden Bestrahlungseinheiten bei Fraunhofer CSP	12
1.3.1 Der Lightsoaker von der Firma Atonometrics mit der Bezeichnung „Continuous solar simulator and light soaking chamber for PV modules“	13
1.3.2 Der Sonnensimulator von der Firma Berger Lichttechnik GmbH mit der Bezeichnung „Berger pulsed solar simulator system PSS 8“	13
1.3.3 Klimakammer mit der Bestrahlungseinrichtung von der Firma CTS GmbH mit der Bezeichnung „CTS CWL-60/46“	14
2 Konstruktive Vorbereitungen vor dem Entwurf.....	15
2.1 Die Abmessungen und der Nachbau des Lightsoakers in CATIA Assembly Design ..	15
2.2 Die Abmessungen und der Nachbau des Messtisches von der Flasheranlage in CATIA Assembly Design.....	16
2.3 Die Abmessungen und der Nachbau der Aufschub-Rampe vor der CTS-Klimakammer.....	17
3 Konzipierung des zweiachsigen Linearantriebes für die Bewegung des Messkopfes	18
4 Befestigung der Linearmodulen miteinander und Zusammenbau zu einem Zweiachsensystem.....	19
5 Problembeschreibung bei der Entwicklung des Teststandes	21
6 Ansatz zur konstruktiven Lösung der Aufgabe.....	23
7 Der vorläufige Entwurf des Gestells für den mobilen Teststand.....	24
8 Entwurf des Rahmens zur Befestigung des Zweiachsensystems mit der Hubsäule.....	28
9 Entwurf eines Verbindungselements (Platte) zwischen dem Rahmen und der Hubsäule ..	29
10 Konzipierung eines Zusatzgestells für die Gerätschaften.....	31
11 Kollisionsanalyse in der Prüfbaugruppe Flasheranlage- Teststand	32
12 FEM Berechnung der Achsendurchbiegung in CATIA Generative Structural Analysis ..	33
13 Statische Untersuchungen des Teststandes bei verschiedenen Lagen.....	36
13.1 Positionsbestimmung des Linearmoduls CKR-090 zur Minimierung der Wirkung des Drehmomentes auf die Hubsäule	36
13.2 Berechnung des auf die Verbindungsplatte wirkenden Drehmomentes	38

13.3	Berechnung der erforderlichen Schubkraft, um den Teststand auf die Rampe zu bringen.....	39
14	Entwurf einer Drehvorrichtung für das Zweiachsensystem.....	41
15	Elemente der Konstruktion zur Gewährleistung der Sicherheit bei der Bedienung des Teststandes	43
16	Montageanleitung für den Teststand.....	46
16.1	Aufbauanleitung für das Gestell.....	46
16.2	Aufbau des Zusatzgestells	53
16.3	Aufbauanleitung für das Zweiachsensystem.....	54
17	Zusammenfassung und Ausblick	60
	Quellen-und Literaturverzeichnis	61
	Anhang A: Analytische Berechnung der relevanten mechanischen Größen	62
	Anhang B: Zeichnungsableitungen der Fertigungsteile.....	69
	Anhang C: Materialkosten	76
	Anhang D: Lastenheft für das Projekt Teststand.....	77

Abkürzungen

AM
IEC
NIR
PV
STC
UV

Air Mass
International Electrotechnical Commission
Nahes Infrarot
Photovoltaik
Standard Test Conditions
Ultraviolettstrahlung

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einzelteile der Baugruppe 1 des Gestells.....	47
Tabelle 2: Befestigungselemente für die Baugruppe 1.....	47
Tabelle 3: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 2.....	49
Tabelle 4: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 3.....	50
Tabelle 5: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 4.....	51
Tabelle 6: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 5.....	52
Tabelle 7: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 6.....	53
Tabelle 8: Einzelteile der Baugruppe 7 des Rahmens	55
Tabelle 9: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 8.....	57
Tabelle 10: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 9.....	58
Tabelle 11: Verbindungs- und Sicherungselemente	59

Abbildungen

Bild 1: Fraunhofer Technikum.....	12
Bild 2: Atonometrics Lightsoaker	13
Bild 3: Berger Lichttechnik Flasher	14
Bild 4: CTS Klimakammer	15
Bild 5: Atonometrics Sonnensimulator Nachbau (ohne Türen).....	16
Bild 6: Berger Flasher, Nachkonstruktion des Messtisches	17
Bild 7: Die Rampe vor der CTS-Klimakammer.....	18
Bild 8: Verbindungssystem 2x-y	19
Bild 9: Verbindungssystem 2x-z	19
Bild 10: Verbindungssystem x-z	19
Bild 11:Verbindungsplatte.....	20
Bild 12: Schnittdarstellung der Verbindungstelle.....	20
Bild 13: Schnittdarstellung des Lightsoakers (Bild 5 Ansicht von links).....	21
Bild 14: Simulation-Zweiachsensystem auf dem Messtisch	22
Bild15: Abstand des Messfühlers von der Wand.....	22
Bild 16: Mehrstufige Hubsäule-Alpha Colonne der Firma RK Rose+Krieger GmbH /3/.....	25
Bild 17: Entwurf des Gestells.....	26
Bild 18: Test Simulation in der Berger Lichttechnik Anlage.....	27
Bild 19: Das Gestell mit einer Aussparung.....	28
Bild 20: Rahmen zur Lagerung des Zweiachsensystems.....	29
Bild 21: Die Drehbare Lagerung des Rahmens	30
Bild 22: Das Zusatzgestell	31
Bild 23: Simulation der Messung in Berger Flasheranlage.....	32
Bild 24: Die maximale Absenktiefe der Hubsäule	33
Bild 25: Die Anfangsbedingungen bei FEM-Berechnung	34
Bild 26: FEM-Analyse der Achsenbiegung.....	35
Bild 27: Schwerpunktlage des Zweiachsensystems.....	37
Bild 28: Vereinfachte Skizze zum Bild 27.....	37
Bild 29: Kräftegleichgewicht um die Drehachse A.....	38
Bild 30: Kräfteparallelogramme auf einer schiefen Ebene	39
Bild 31: Handseilwinde (1), schwenkbare Umlenkrolle (2) und zwei unbewegliche Umlenkrollen (3)	42
Bild 32: Öse und Haken auf dem Rahmen.....	42
Bild 33: Sicherheitsgerüst um die Hubsäule	43
Bild 34: Sicherung des Rahmens gegen Verschiebungen. (1) Nutenstein, (2) Profil des Rahmens (3), Sicherungsschraube, (4) Befestigungsprofil.....	44
Bild 35: Sicherung des Zusatzgestells in senkrechter Lage	45
Bild 36: Verschraubung des Zusatzgestells mit dem Hauptgestell.....	45
Bild 37: Sicherung des Zusatzgestells in waagerechter Lage	45
Bild 38: Explosionsdarstellung des Gestells. Baugruppe 1	47
Bild 39: Befestigung des Profils 300. Baugruppe 2 (a).....	48
Bild 40: Befestigung des Profils 300. Baugruppe 2 (b).....	49
Bild 41: Befestigung von zwei Profilen 460.....	49
Bild 42: Befestigung von Stabilisierungsprofilen. Baugruppe 4	51
Bild 43: Befestigung der Verbindungsplatte zu der Hubsäule. Baugruppe 5	52
Bild 44: Explosionsdarstellung des Zusatzgestells. Baugruppe 6	53
Bild 45: Hilfsvorrichtung zur Montage von Zweiachsensystem.....	54

Bild 46: Rahmen für Befestigung der Linearmodule. Baugruppe 7.....	55
Bild 47: Vorgehensweise bei der Montage des Rahmens auf der Hilfsvorrichtung. Baugruppe 8	56
Bild 48: Verbindung des Linearmoduls MKR-060 mit der Verbindungsplatte. Baugruppe 8 ..	57
Bild 49: Verbindung des Linearmoduls CKR-090 mit dem Tischteil. Baugruppe 9	58
Bild 50: Skizze zur Berechnung der maximalen Durchbiegung und der Biegespannung	62
Bild 51: Die Biegelinie der Aufhängungsachse	66
Bild 52: Zerlegung des Systems in zwei Lastfälle nach dem Superpositionsprinzip	66

1 Einleitung

Das Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik, auch in der Kurzbezeichnung CSP genannt, ist eine Einrichtung der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. und hat ihren Sitz in Halle. Das CSP ist 2007 von den Fraunhofer-Instituten für Werkstoffmechanik IWM und für solare Energiesysteme ISE inmitten des industriellen Zentrums der deutschen Photovoltaikfertigung, des »Solarvalley Mitteldeutschland«, gegründet worden. /1/ Am 19 September 2013 wurde in Halle das neue Forschungsgebäude des Fraunhofer CSP mit den neuen Büros, Technika und Laboren, ausgestattet mit den modernsten Forschungs- und Auswertungsgeräten, eingeweiht. Bei dem Fraunhofer CSP arbeiten bis zu 85 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die mit ihrem Know-How den Kunden aus der Industrie und dem Dienstleistungssektor zur Verfügung stehen. Die Dienstleistungs-, Forschungs- und Entwicklungsprojekte sind auf den Bedarf der Auftraggeber abgestimmt. Die Forschungsaktivitäten des Fraunhofer CSP gehen jedoch über die reine Auftragsabwicklung hinaus. Die vom Bundesforschungsministerium beigesteuerte Grundfinanzierung und Projektförderung ermöglicht eine auftragsunabhängige Forschung in Technologiebereichen, denen eine hohe Zukunftsrelevanz beigemessen wird. Das Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik betreibt angewandte Forschung in den Themengebieten der Siliziumkristallisation, Solarwaferfertigung, Solarzellencharakterisierung und der Modultechnologie. Schwerpunkte sind die Zuverlässigkeitsbewertung von Solarzellen und Modulen unter Labor- und Einsatzbedingungen sowie die elektrische, optische, mechanische und mikrostrukturelle Material- und Bauteilcharakterisierung. Die Forschung und Entwicklung ist in sechs Themenbereichen organisiert: Diagnostik von Solarzellen, Siliziumwafer, Modultechnologie, Modulzuverlässigkeit, Kristallisationstechnologie und Siliziumrecycling.

Die vorliegende Masterarbeit ist die Fortsetzung der Arbeit, die während des zweimonatigen Praktikums bei dem Fraunhofer CSP im Bereich Modulzuverlässigkeit durchgeführt wurde, in der es sich um die Entwicklung einer Testvorrichtung für die Messung der spektralen Homogenität des Sonnensimulators handelte. Die Aufgabenstellung des Praktikums wurde in der Masterarbeit insofern ausgeweitet, dass die Anwendbarkeit der Vorrichtung auf zwei weitere Sonnensimulatoren erweitert wurde. Die Notwendigkeit einer solchen Testvorrichtung ist dadurch begründet, dass die Strahllampen der Sonnensimulatoren mit der Nutzungszeit altern und somit ihr Strahlungsspektrum und ihre Strahlungshomogenität verändern. Die Testvorrichtung soll die Vermessung der Strahlungshomogenität von diesen Sonnensimulatoren mit einer hohen Zuverlässigkeit automatisiert messen, um den Kalibrierungsbedarf für die Sonnensimulatoren festzustellen.

1.1 Problemstellung

Bei der Bestrahlung des PV-Moduls ist es wichtig, dass die Strahlungshomogenität über der ganzen Modulfläche konstant bleibt. Die modernen Sonnensimulatoren erfüllen diese Forderung, müssen aber nach einiger Zeit neu kalibriert werden. Die Kalibrierung erfolgt bei externen Firmen wie zum Beispiel TÜV Rheinland, was mit hohem Transportaufwand verbunden ist. Aus diesem Grund entstand die Idee eine eigene Testvorrichtung zu entwickeln, die für die Nutzung im Technikum des Fraunhofer Instituts vorgesehen ist. Die Schwierigkeit der Aufgabe besteht darin, dass die Testvorrichtung bei mehreren Testanlagen eingesetzt werden muss. Die Testanlagen für PV-Module im Technikum unterscheiden sich recht stark in dem Aufbau und dem Wirkprinzip. Für die Messung der spektralen Homogenität wird ein Spektrometer der Firma Tec5 AG verwendet, das verschiedene Werte bei der Bestrahlung aufzeichnet und digital auf dem Bildschirm des Computers in Form von Graphen ausgibt. Dieses Spektrometer ist modular aufgebaut, wobei jede Komponente auf einer Kassette integriert ist und kann leicht ausgewechselt werden. Die weitere Herausforderung besteht darin, dass der Sensorkopf mit dem Spektrometer mittels eines Glasfaserkabels verbunden ist, das bei der Biegung einen kritischen Biegeradius nicht unterschreiten darf.

1.2 Verwendung des Sonnensimulators

Um eine PV-Anlage überhaupt aufbauen und in Betrieb nehmen zu können, muss sie der Norm IEC 61215 entsprechen. Diese internationale Norm legt die IEC-Anforderungen für die Bauartegnung und Bauartzulassung terrestrischer photovoltaischer Module fest, die für den Langzeitbetrieb in gemäßigten Freiluftklimaten geeignet sind. /2/ Um eine PV-Anlage klassifizieren zu können, werden unter anderem die Angaben über die Leistung, Lichtalterung und das Strom-Spannungs-Verhalten benötigt. Weil es nicht möglich ist unter realen Umweltbedingungen reproduzierbare Tests durchzuführen, werden die Messungen unter STC-Bedingungen (Einstrahlungsleistung 1000 W/m^2 , Zelltemperatur von 25 °C und AM-1,5 Standardspektrum) durchgeführt. Daher werden künstliche Lichtquellen, die sogenannten Sonnensimulatoren oder auch Flasher, mit konstanter Einstrahlungsleistung und einem konstanten Spektrum eingesetzt. An den Sonnensimulator werden hauptsächlich drei Anforderungen gestellt. Auf der Prüfebene des PV-Moduls dürfen die Werte für zeitliche und räumliche Unregelmäßigkeiten des Lichtfeldes ein bestimmtes Maß nicht überschreiten. Der Flasher soll auch über eine längere Zeitperiode ständig unveränderte Bedingungen aufweisen. Die möglichst genaue Übereinstimmung mit dem Sonnenspektrum ist auch ein wesentliches Kriterium eines Sonnensimulators. Die Sonnensimulatoren werden nach DIN

EN 60904-9 in die Klassen A, B und C mit jeweils drei oben genannten Kategorien unterteilt. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Sonnensimulatoren hinsichtlich ihrer Homogenität der Bestrahlungsstärke, Erzeugung des möglichst realen Sonnenspektrums und Zeitbeständigkeit, zu vermessen. Mithilfe eines Spektrometers kann die Homogenität der Bestrahlungsstärke gemessen werden. Für die Messung werden zwei Spektrometer verwendet: PGS (Plangitter-Spektrometer) NIR 1.7 tc mit einem Spektralbereich von 960-1690 nm und MCS (Multi-Channel-Spektrometer) UV-NIR mit einem Spektralbereich von 195-1020 nm. Der Sensorkopf des Spektrometers nimmt innerhalb einer rechteckigen Messfläche die Messwerte für die Strahlungsstärke auf.

1.3 Zu untersuchenden Bestrahlungseinheiten bei Fraunhofer CSP

Alle zu untersuchenden Bestrahlungseinheiten befinden sich im Technikum des Fraunhofer-Instituts und sind dort stationär aufgestellt. Das sind Metallhalogenid-Lampen Light Soaking Chamber¹ von der Firma Autonometrics, Xenonlampen Flasher² von der Firma Berger Lichttechnik GmbH und Metallhalogenid Lampen-Sonnensimulator von der Firma ATLAS, der sich in einer Klimakammer befindet.



Bild 1: Fraunhofer Technikum.

¹Abgekürzt wird als Lightsoaker bezeichnet

²Weiter im Text wird nur als Flasher bezeichnet

1.3.1 Der Lightsoaker von der Firma Atonometrics mit der Bezeichnung „Continuous solar simulator and light soaking chamber for PV modules“.

Dieser Lightsoaker erzeugt künstliches Licht zur Belichtung von PV-Modulen bei stationären Tests. Das System kann für verschiedene Tests genutzt werden, die eine mittlere oder lange Belichtungszeit erfordern. Es können PV-Module bis zu einer maximalen Fläche von $2 \times 1,7 \text{ m}^2$ belichtet werden, gleichzeitig kann eine I-U-Kennlinie aufgenommen werden. Das Licht wird von Metallhalogenid Lampen mit einer Bestrahlungsstärke von 600 bis 1100 W/m^2 erzeugt.



Bild 2: Atonometrics Lightsoaker

1.3.2 Der Sonnensimulator von der Firma Berger Lichttechnik GmbH mit der Bezeichnung „Berger pulsed solar simulator system PSS 8“

Das ist ein Sonnensimulator der Klasse AAA. Dies bedeutet, dass er alle drei Anforderungen nach DIN EN 60904-9 erfüllt, und zwar: eine 1000 W/m^2 konstante Bestrahlungsstärke während der Testdauer, die einheitlich konstanten Werte für die ganze Betriebsdauer der Lampe und die Einhaltung des globalen Spektrums von 1,5 AM. Maximale Belichtungsfläche beträgt $2600 \times 2000 \text{ mm}^2$ und wird 12 ms lang durch eine Xenon-Lichtquelle geblitzt. Der

Flasher befindet sich 4,6 m über dem Tisch, auf dem das zu untersuchende PV-Modul liegt. Der Tisch befindet sich in einer Kammer mit den Abmessungen 6,8x3x3 m³, dessen innere Wände mit einer diffusen Reflexionsschicht bedeckt sind. Die Kammer hat eine Schiebetür, die nach dem Auflegen des PV-Moduls auf den Tisch zugeschlossen wird, um bei dem Test die Messergebnisse von dem Umgebungslicht nicht zu beeinflussen.



Bild 3: Berger Lichttechnik Flasher

1.3.3 Klimakammer mit der Bestrahlungseinrichtung von der Firma CTS GmbH mit der Bezeichnung „CTS CWL-60/46“

Die CTS Klimakammer ist eine der größten Klimakammern Deutschlands für die Photovoltaikindustrie mit den Prüfraumabmessungen von 3,5x3,5x3,8 m³ und einem Prüfraumvolumen von 46m³. In dieser Kammer können verschiedene Umweltbedingungen mit Temperaturen von -60 °C bis 100 °C und relativer Luftfeuchtigkeit von 10 bis 95% simuliert werden. Ein integrierter Sonnensimulator von der Firma ATLAS GmbH ermöglicht Leistungsmessung und UV-Alterungsprüfung von PV-Modulen. Das Sonnensimulationssystem besteht aus acht „SolarConstant“ Lichtquellen die auf einem beweglichen Gestell platziert sind. Die Leuchten bestehen aus Metallhalogenid-Lampen mit einer Leistung von 2500 W für je vier Lampen und 4000 W für je vier weitere Lampen. Zusätzlich sind sie mit den optischen Filtern für die Anpassung an das Sonnenspektrum

ausgestattet. Der Sonnensimulator hat eine sog. BBA Klassifizierung: B-spektrale Übereinstimmung mit der Sonne, B-Einheitlichkeit, A-Zeitbeständigkeit.



Bild 4: CTS Klimakammer

2 Konstruktive Vorbereitungen vor dem Entwurf.

Vor dem eigentlichen Entwurf der mobilen Messeinrichtung müssen zuerst die erforderlichen Abmessungen der PV-Modul-Testeinrichtungen bestimmt werden. In CATIA wurden die Teile der Anlagen, die für den Entwurf relevant waren, maßstäblich konstruiert, damit die Funktionalität des mobilen Teststandes getestet werden kann.

2.1 Die Abmessungen und der Nachbau des Lightsoakers in CATIA Assembly Design

Dieser Sonnensimulator hat die Abmessungen $207 \times 237 \times 122 \text{ cm}^3$ und ist 9cm vom Boden angehoben. Seine Arbeitsfläche beträgt $230 \times 180 \text{ cm}^2$ und wird von zwei Sicherheitstüren verdeckt. Das PV-Modul wird zwischen zwei Halterungen, auf denen jeweils vier U-förmige

Profile angebracht sind, befestigt. Die obere Halterung ist frei in der Ebene verschiebbar. Der Abstand von der Glasscheibe bis zum U-förmigen Profil beträgt circa 9,5 cm und der Sensorkopf des Spektrometers soll sich zwischen diesen U-Profilen bewegen. Im unteren Bereich der Anlage sind drei Türfallen so an das Rechteckige Profil angebracht, dass sie aus dem vorderen Rahmen, den die Aluminiumprofile bilden, hinausragen. Dieses konstruktive Element verhindert, dass die Messeinrichtung direkt zur unteren Kante angelehnt werden kann. Das Einbauelement in der Mitte, von dem das graue Kabel nach oben ausgeht (s. Bilder 2 und 5), muss später bei der Programmierung der Linearachsensteuerung berücksichtigt werden. In CATIA wurden alle für den Entwurf des Teststandes relevanten Teile nachgebaut.

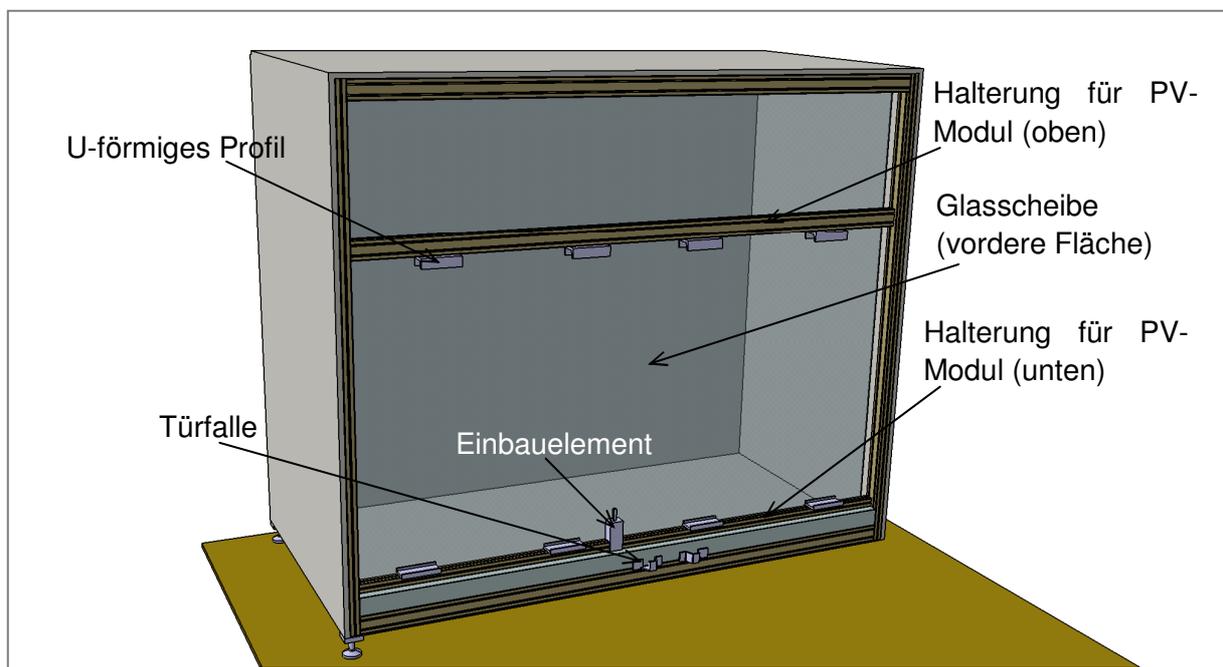


Bild 5: Atonometrics Sonnensimulator Nachbau (ohne Türen)

2.2 Die Abmessungen und der Nachbau des Messtisches von der Flasheranlage in CATIA Assembly Design

Der Tisch dieser Anlage (s. Bilder 3 und 6) besteht aus zwei parallelen Profilen, die aus dem Abdeckturm hinaus laufen, und drei Profilen, die ein Kreuz unter dem Flasher bilden. Diese Profile werden von sieben Profilsäulen gestützt. Eine von ihnen steht unter den gekreuzten Profilen. Seitlich wird der Tisch vorne und hinten zusätzlich durch Streben gesichert, die mit den Eckpfeilern des Abdeckturmes verbunden sind. Auf dem Tischprofil rechts unten ist ein Rahmen aus zwei Profilen angebracht, auf dem sich eine breite Platte für Messgeräte

befindet. Unten knapp über dem Fußboden ist eine Kabelleiste zwischen zwei Ecksäulen befestigt. Der Abstand vom Fußboden bis zur Oberfläche des Tisches beträgt 98,5 cm. Der Abstand zwischen zwei parallel verlaufenden Profilen beträgt 131 cm. Während der Untersuchung des PV-Moduls wird dieses auf den Messtisch gelegt und mit seinen Anschlüssen an die Messgeräte angeschlossen. Der Transport des Solarmoduls zur Flasheranlage erfolgt durch ein bewegliches Gestell und das Abladen erfolgt per Hand mithilfe von vier oder sechs Helfern je nach Gewicht des PV-Moduls. Der Aufbau der Flasheranlage ist sehr ungünstig um das Solarmodul direkt vom Transportwagen auf den Messtisch zu verladen. Aus diesem Grund wurde der untere Teil der Flasheranlage vermessen und maßstabsgerecht in CATIA nachgebaut.

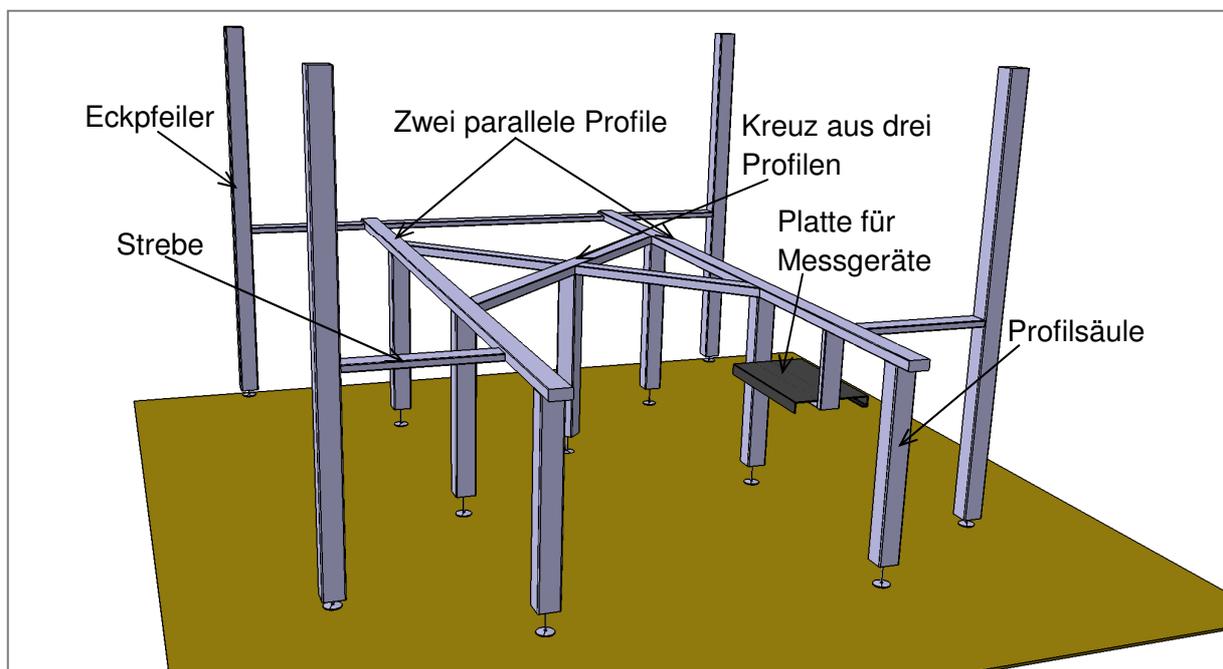


Bild 6: Berger Flasher, Nachkonstruktion des Messtisches

2.3 Die Abmessungen und der Nachbau der Aufschub-Rampe vor der CTS-Klimakammer.

Vor der CTS-Klimakammer ist eine Rampe platziert, um die PV-Module und den ATLAS Sonnensimulator in die Kammer hinein zu befördern. Die Rampe hat ein Gefälle von circa 11 Grad und ist 88 cm lang. Die beiden flachen 120x40 mm Profile können gegeneinander verschoben werden, so dass der Abstand zwischen ihnen geändert werden kann.

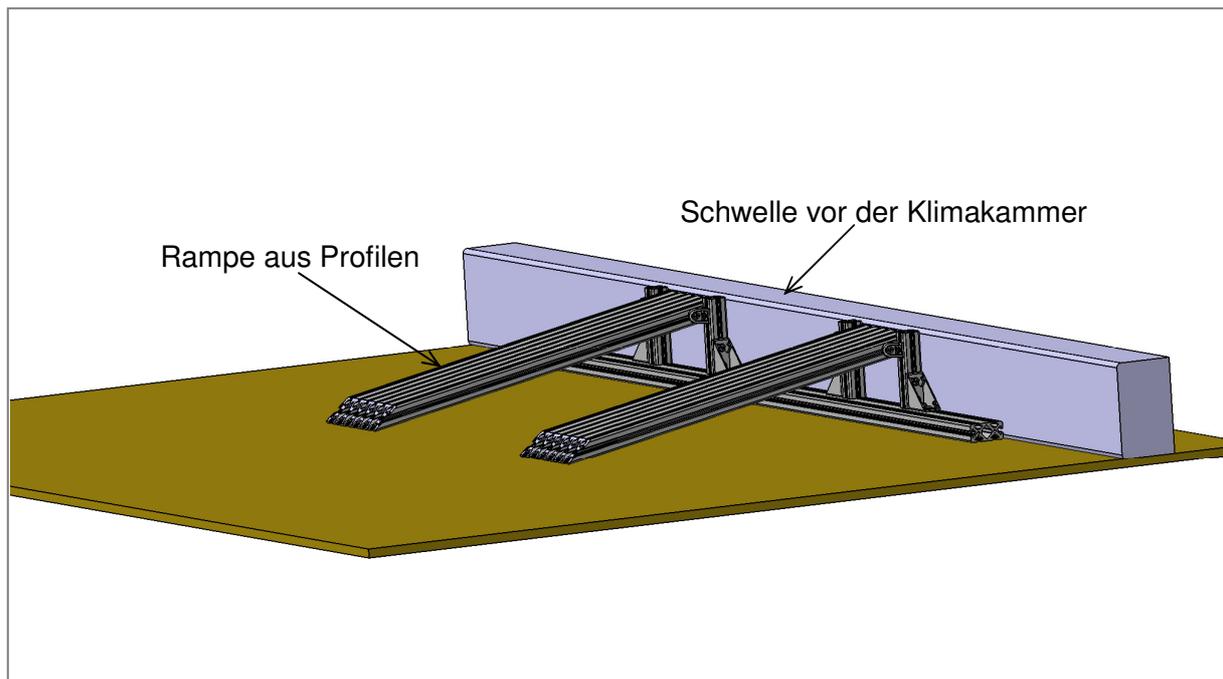


Bild 7: Die Rampe vor der CTS-Klimakammer

3 Konzipierung des zweiachsigen Linearantriebes für die Bewegung des Messkopfes

Für die Messung der Bestrahlungshomogenität in der Ebene wurden die Linearachsen der Firma Bosch Rexroth ausgewählt. Dabei gibt es drei mögliche Konstellationen der Lineareinheiten zueinander, um eine Bewegung in der Ebene zu verwirklichen. Bei der ersten Anordnung dienen zwei Linearachsen als eine Führung und die dritte als Beförderung für die Platte. Bei der zweiten Anordnung befindet sich ein Linearmodul in der Mitte des Verbindungssystems und agiert als eine Führung, während das zweite Linearmodul die Platte in zwei Richtungen bewegt. Bei der dritten Anordnung stehen zwei Linearmodule horizontal und parallel zueinander und treten in der Rolle der Führung für die dritte Lineareinheit auf. Auf den Bildern 8-10 /3, S. 160/ sind die beschriebenen Fälle dargestellt.

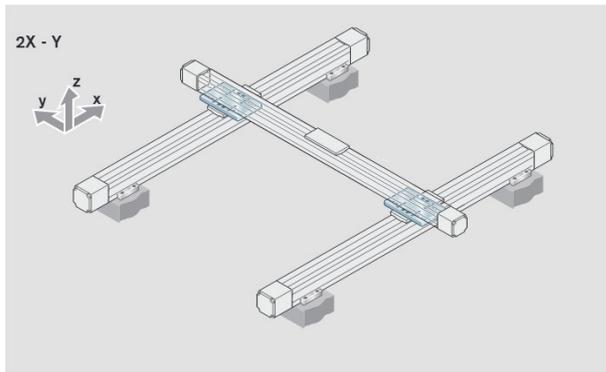


Bild 8: Verbindungssystem 2x-y

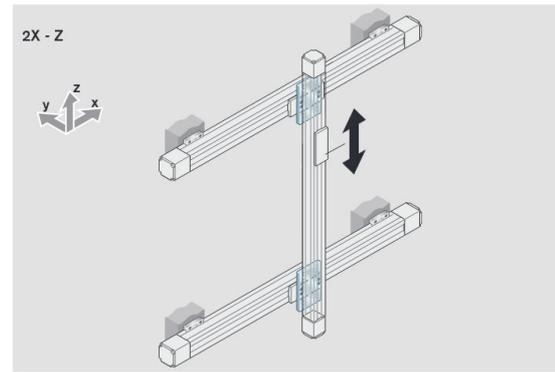


Bild 9: Verbindungssystem 2x-z

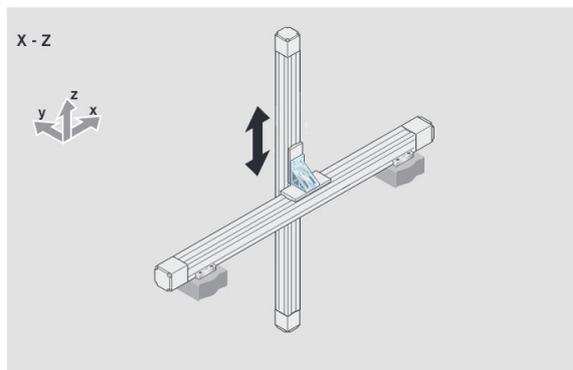


Bild 10: Verbindungssystem x-z

Von diesen drei Möglichkeiten kommt nur die erste Anordnung in Frage, weil bei dem Verbindungssystem 2x-z die Synchronwelle für den gleichen Lauf der Lineareinheiten sich seitlich von der Symmetrieachse platzieren würde. Bei dem Verbindungssystem x-z wären zusätzlich noch zwei seitlich angebrachte Linearführungen notwendig. Das ist mit einem erheblichen Montage- und Kalibrierungsaufwand verbunden. Als Führung für die Anordnung 2x-y werden zwei Linearmodule MKR-065 mit einem Riementrieb und als Antrieb für die Platte wird das Compact- Linearmodul CKR-090 mit einem Riementrieb ausgewählt. Um die Linearmodule miteinander zu synchronisieren, wird eine Verbindungswelle mit einer Membrankupplung ausgewählt.

4 Befestigung der Linearmodulen miteinander und Zusammenbau zu einem Zweiachsensystem

Da es die Befestigungszubehör nur für die gleichartigen Linearmodule gibt, wurde das erforderliche Verbindungselement zwischen zwei Linearmodulen unterschiedlicher Modelle extra entworfen. Das Linearmodul MKR-065 hat eine bewegliche Tischplatte mit zwei 5,2mm

Nuten für verschiedenen Aufbauten. Die Lineareinheit CKR-090 hat auf der unteren Seite zwei Befestigungsnuten für ein Spannstück mit der Bohrung für M4 Schraube. Um die beiden Linearmodule miteinander zu verbinden, wurde eine Verbindungsplatte so ausgelegt, dass sie sowohl mit MKR-065 als auch mit CKR-090 verbunden werden kann. Auf dem Bild 11 ist diese Platte abgebildet. Sie hat die Abmessungen 16x90x125 mm und hat jeweils vier Nuten an zwei Seiten, die für Spannstücke gedacht sind. Auf der Platte sind noch zwei Reihen von Senkungen (Bild 11) für M5 Zylinderschrauben angebracht. Die Zylinderschrauben werden in die Vierkantschrauben (Bild 12), die in die Nuten von der Tischplatte des MKR-065 eingesenkt sind, eingedreht. Mittels dieser Platte und der Synchronwelle (s. Bild 14) werden drei Linearachsen zu einem Zweiachsensystem verbunden.

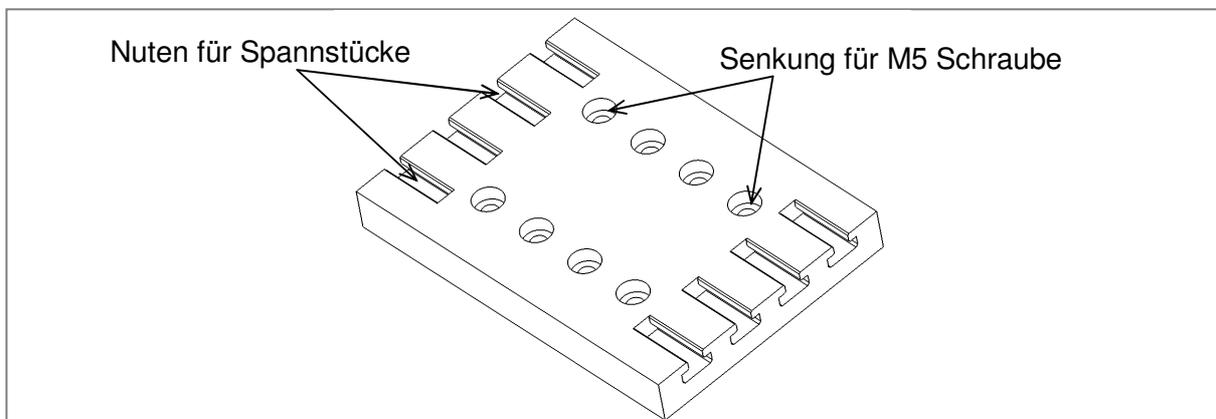


Bild 11: Verbindungsplatte

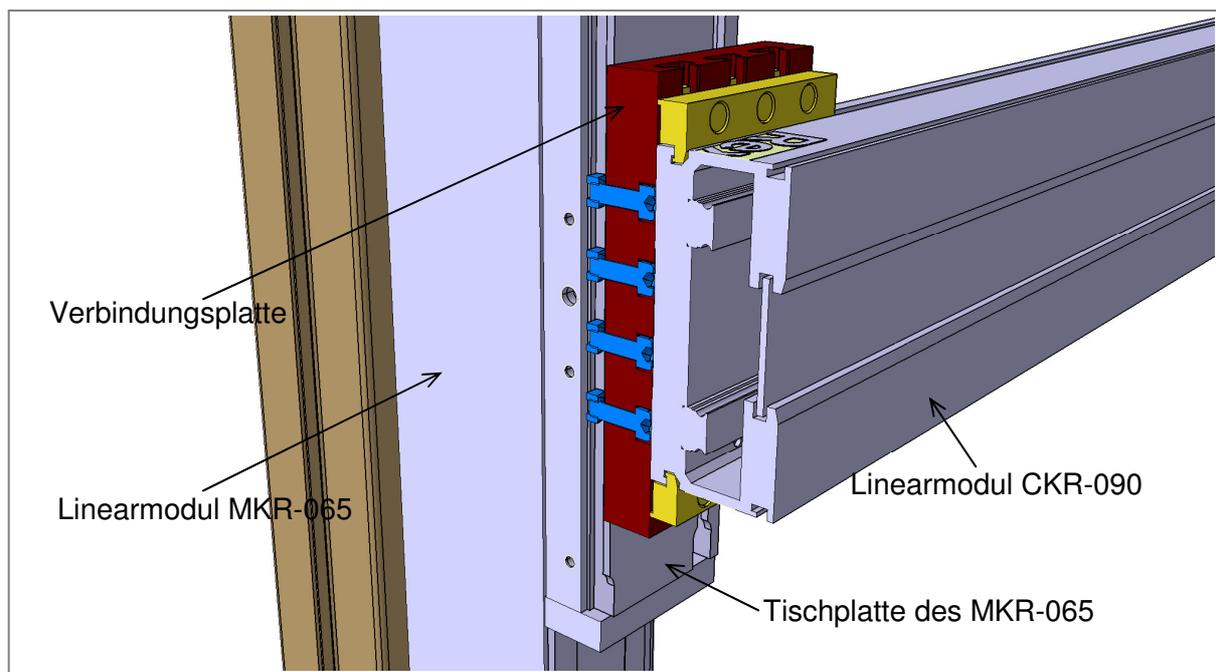


Bild 12: Schnittdarstellung der Verbindungstelle

5 Problembeschreibung bei der Entwicklung des Teststandes

In diesem Abschnitt wird beschrieben, welche konstruktiven Einschränkungen bei dem Entwurf des mobilen Teststandes zu beachten sind. Die erste einschränkende Bedingung tritt während der Untersuchung des Lightsoakers auf. Die Tischplatte der Linearachse, auf der der Sensor steht, muss sich in einem bestimmten Abstand (118,5 mm) von der Glasscheibe des Lightsoakers befinden. Das ist allerdings, bedingt durch die technische Charakteristiken des Sonnensimulators und des Zweiachsensystems, nicht ohne Hilfsmittel möglich. Als ein solches Hilfsmittel wird ein Adapter, der den geforderten Abstand einhalten soll, auf die Tischplatte des Linearmoduls montiert. Damit dieser Adapter nicht zu lang wird, muss die Messeinrichtung so nah wie möglich an den äußeren Rahmen des Sonnensimulators angelehnt werden. Das Bild 13 verdeutlicht den oben genannten Sachverhalt.

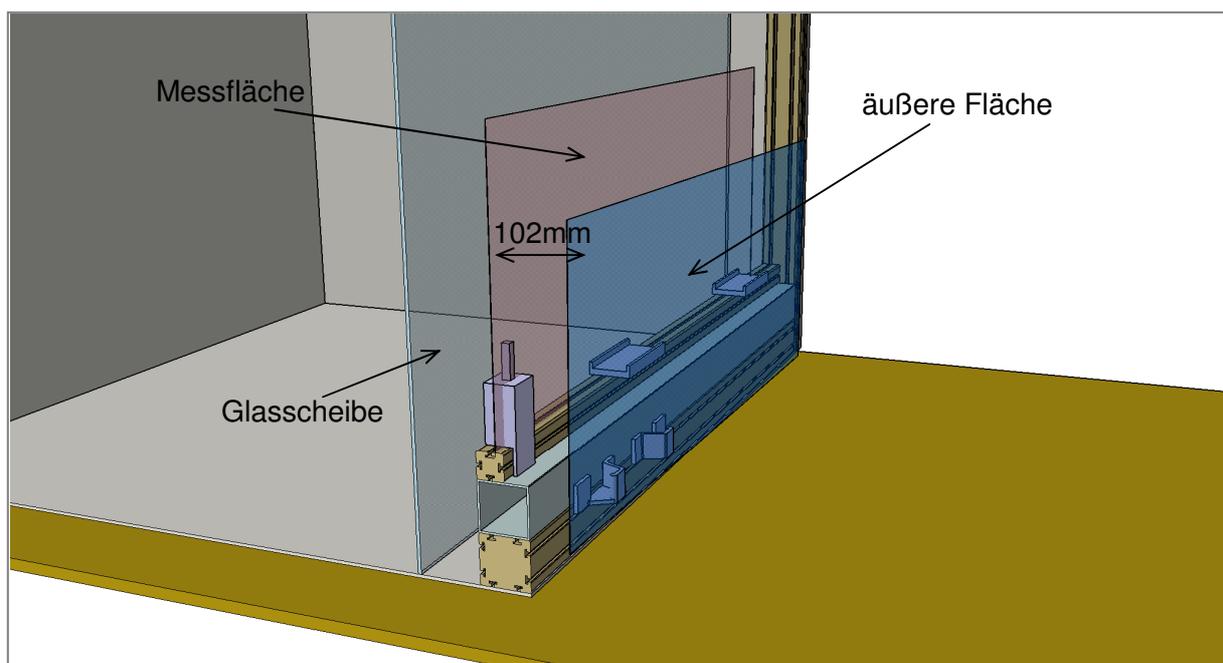


Bild 13: Schnittdarstellung des Lightsoakers (Bild 5 Ansicht von links)

Die zweite Einschränkung in der Konstruktion wird durch den ungünstigen Aufbau des Messtisches des Berger-Sonnensimulators verursacht. Bei der Untersuchung dieses Sonnensimulators muss das Zweiachsensystem auf dem Messtisch der Flasheranlage aufliegen und vollständig innerhalb der Abdeckwände liegen. Das bedeutet, dass das Gestell auf dem sich das Zweiachsensystem befindet, zum einen in den Abdeckschacht hinein geschoben und zum anderen auf die Höhe des Messtisches abgesenkt werden muss. Die Kreuzform des Messtisches lässt wenige Möglichkeiten ein Gestell zu entwerfen, das den oben genannten Anforderungen genügen würde. Zudem beinhaltet die Konstruktion der

Flasheranlage eine Geräteplatte die ein Hindernis für die Bewegung des Gestells darstellt. Aus dem Bild 3 (S.14) wird ersichtlich, dass die Kabelleiste ein weiteres störendes Bauteil darstellt, welches nur wenige Zentimeter über dem Boden angebracht wurde. Diese Kabelleiste muss entfernt werden, um erst an die Messstelle mit dem Gestell gelangen zu können. Auf dem Bild 14 ist das auf dem Messtisch positionierte Zweiachsensystem in der Konstruktionsumgebung von CATIA dargestellt.

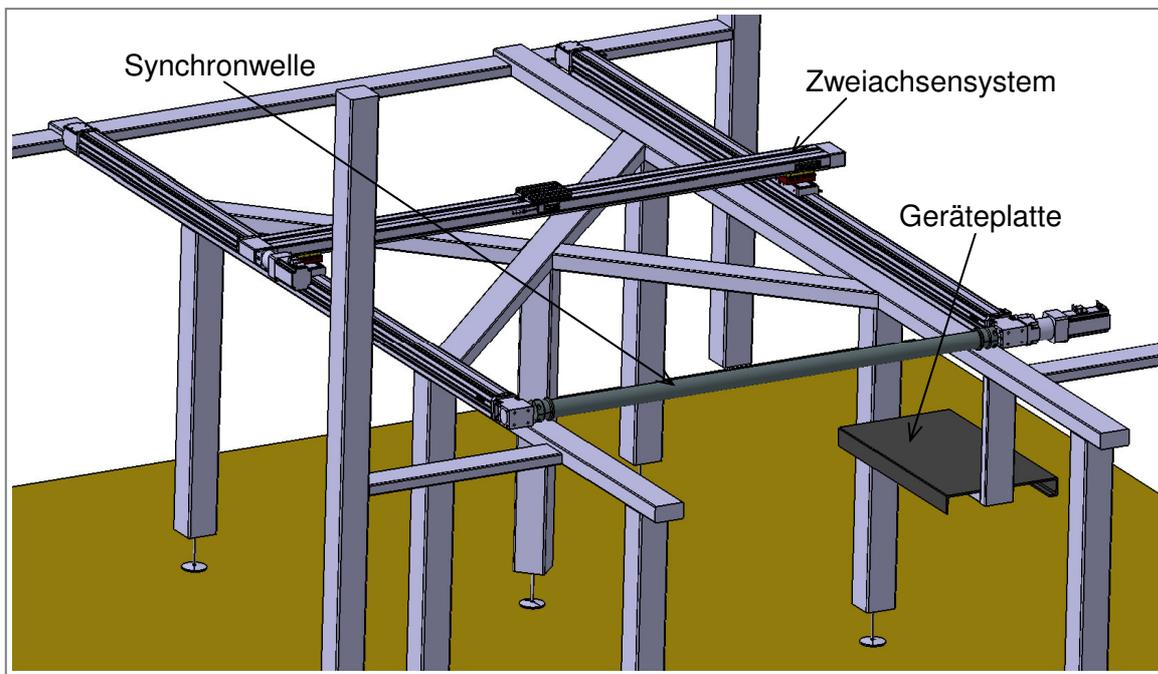


Bild 14: Das Zweiachsensystem auf dem Messtisch

Die dritte Einschränkung, die die Gestalt des Teststandes beeinflussen wird, gibt die CTS-Klimakammer vor. Der Messfühler des Spektrometers muss während der Messung in der Klimakammer 170 cm von der Oberfläche des Lampengehäuses des ATLAS Sonnensimulators entfernt sein. Die Klimakammer hat von einer Wand bis zur gegenüberliegenden Wand einen Abstand von 350cm und der Abstand von der Oberfläche des Lampengehäuses bis zum äußeren Rand des Einrichtungsgestells beträgt ca. 123 cm. Bei der Annahme, dass das Einrichtungsgestell an die Wand der Klimakammer angelehnt ist, ergibt sich der maximale Abstand von der Tischplatte des Linearmoduls bis zur Klimakammerwand zu 57 cm. Auf dem Bild 15 ist die schematische Darstellung der Klimakammer, des ATLAS-Sonnensimulators und des Messfühlers dargestellt.

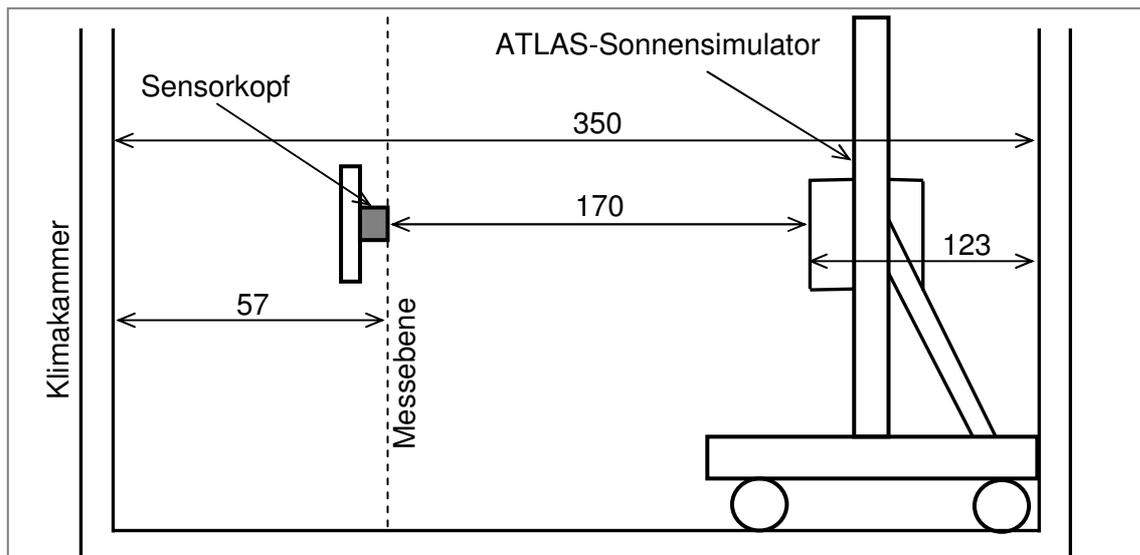


Bild15: Abstand des Messfühlers von der Wand

6 Ansatz zur konstruktiven Lösung der Aufgabe

Zuerst wird der Bauraum ermittelt, der bei der Konstruktion eingehalten werden muss. Der Bauraum wird aus folgenden Angaben ermittelt: der Abstand des Messfühlers von der Klimakammer von 57 cm ergibt die minimale Breite des Bauraumes. Die Vergrößerung des Abstandes von 57 cm würde die Entfernung des Sensorkopfes von der Messfläche des Lightsoakers bedeuten. Die maximale Länge des Bauraumes ergibt sich aus dem Abstand zwischen zwei parallelen Linearmodulen des Zweiachsensystems. Die Höhe des Bauraumes setzt sich aus der Länge des Linearmoduls und der Höhe H des zukünftigen Gestells zusammen. Die Abmessungen des Bauraumes belaufen sich auf folgende Werte: Breite=57 cm, Länge=161,5 cm und Höhe=252,4cm+ H . Das Gestell wird drei Funktionen erfüllen müssen. Das Transportieren, das Schwenken um 90° und das Absenken des Zweiachsensystems auf den Messtisch. Als eine weitere Anforderung, muss das Gestell mindestens so schmal ausgelegt werden (siehe Bild 3), dass die Breite des Gestells den Abstand zwischen zwei parallelen Profilen des Messtisches der Flasheranlage nicht übersteigt. Die Absenkfunktion und die kleinen Abmessungen besitzt von den allen möglichen Hubgeräten nur die Hubsäule. Die Hubsäule muss auch über einen ausreichend langen Hub verfügen, damit das Zweiachsensystem in senkrechter Position noch über dem Boden hängt. Um das Zweiachsensystem aus der senkrechten in die waagerechte Position zu kippen, müssen die Linearmodule drehbar gelagert werden. Da die Linearmodule nur die Möglichkeit eines Anschlusses an einen Träger haben, ist es sinnvoll das Zweiachsensystem mit einer tragenden Rahmenkonstruktion zu verbinden, die mehr Platz für konstruktive

Gestaltung bittet. Für die Konstruktionselemente der Einrichtung kommen entweder Hohlprofile aus Stahl, die geschweißt werden, oder Strebenprofile mit Nuten für die Befestigungselemente in Frage. Die Strebenprofile erlauben eine nachträgliche Veränderung in der fertigen Konstruktion. Die Konstruktion muss noch Raum für das Spektrometer und eventuell noch andere Messgeräte zur Verfügung stellen, die bei der Messung in der Nähe des Teststandes platziert werden müssen. Dafür muss eine freie Abstellfläche zu Verfügung stehen, die aber wegen des knappen Raumes in der Klimakammer in Form einer Hubladebühne ausgelegt werden soll. Für die Beförderung des Teststandes von dem Abstell- zu dem Messplatz werden unten zum Gestell die Rollen befestigt. Die Rampe, mit derer Hilfe der Teststand in die Klimakammer transportiert werden wird, stellt ein Risiko für die Rollen und die gesamte Konstruktion dar, weil in der geneigten Position andere Kräfte als bei der normalen Ausrichtung der Messeinrichtung wirken. Eine mögliche Lösung dieses Problems ist die Verwendung eines Hubwagens. Dafür muss das Gestell entsprechende Griffstellen für die Zinken des Hubwagens aufweisen.

7 Der vorläufige Entwurf des Gestells für den mobilen Teststand

Das Hauptelement des Gestells ist die Hubsäule, die das Zweiachsensystem mit dem Messkopf trägt. Eine für die vorliegenden Konstruktionsanforderungen passende Hubsäule wird von der Firma RK Rose+Krieger Automatisierungstechnik GmbH hergestellt. Die so genannte Teleskophubsäule hat einen quadratischen Querschnitt und besteht aus drei Führungsstufen. Diese Hubsäule ist selbsthemmend sogar unter maximaler Belastung und kann die exzentrischen Lasten aufnehmen. Die maximale Druck- bzw. Zugkraft beträgt 3000 N bei einer maximalen Hubgeschwindigkeit von 18 mm/s. Die Hubsäule bleibt bei einem Drehmoment von 200 Nm noch funktionsfähig. Die Einbaulänge der Hubsäule beträgt 820 mm. Die Einbaulänge zusammen mit dem größten Hub von 700 mm ergibt eine Länge von 1,52 m. Die Masse der Hubsäule beträgt 14 kg. Die Hubsäule kann über eine Schnittstelle mit unterschiedlichen Eingabegeräten, wie SPS, PC oder Handbedienung, angesteuert werden.

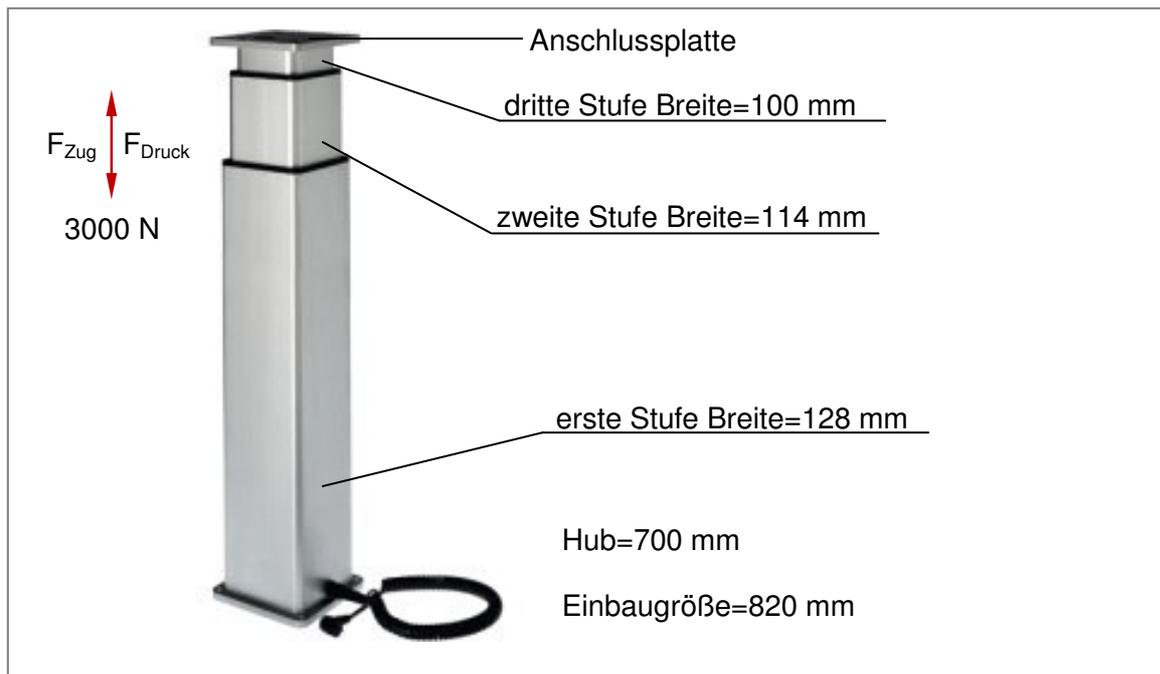


Bild 16: Mehrstufige Hubsäule-Alpha Colonne der Firma RK Rose+Krieger GmbH /4/

Für die Konstruktionselemente werden Montageprofile der Firma Bosch Rexroth ausgewählt. Aus den Profilen 45x60 mm wird die Plattform für die Hubsäule und den Befestigungsrahmen für die Rollen konstruiert. Die Hubsäule wird in der Mitte des Befestigungsrahmens platziert. Die Rollen werden aus dem Norelem-Onlinekatalog ausgesucht und die CAD-Datei für die Konstruktion heruntergeladen. Es wurden zwei Lenkrollen, von denen eine mit einem Feststeller ausgestattet ist, ausgewählt. Der Durchmesser der Rollen beträgt 100 mm und der Abstand von der Befestigungsplatte bis zum Boden beträgt 125 mm. Die maximale Tragfähigkeit jeder Rolle beträgt 200 kg. Auf dem Bild 17 ist die Konstruktion des Gestells ohne die Verbindungselemente zwischen Profilen, zwischen Profilen und der Hubsäule und zwischen dem Gestell und den Rollen dargestellt.

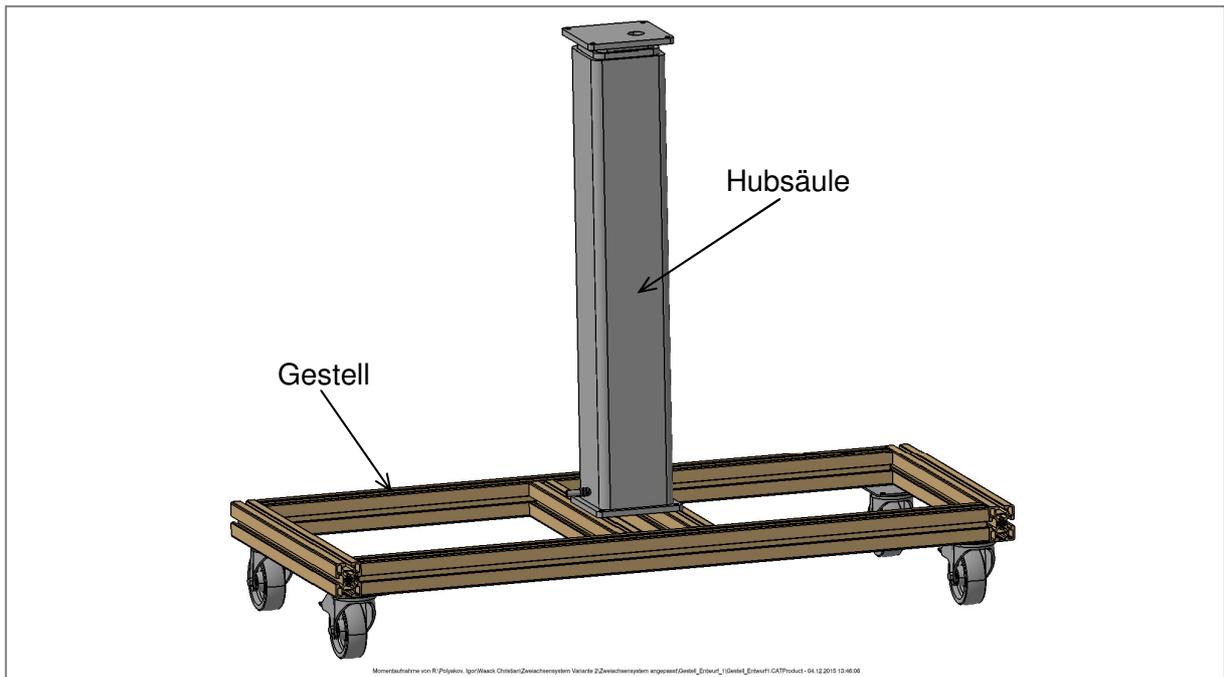


Bild 17: Entwurf des Gestells

Die Hubsäule wird in den Zeiten zwischen den Tests in der Flasheranlage, für die das Zweiachsensystem um 90° gedreht und abgesenkt werden soll, in einem ausgefahrenen Zustand bleiben. Wie hoch die Hubsäule ausfahren muss und an welcher Stelle das Zweiachsensystem gelagert werden soll, um das Zweiachsensystem in einer senkrechten Position über dem Boden zu halten und in einer waagerechten Position komplett in den Abdeckschacht zu passen, hängt davon ab, wie weit das Gestell in die Testanlage hineinfahren kann. In einer technischen Auslegung der Baugruppen Teststand und Flasheranlage wurden der erforderliche Hubweg und die Lage der Aufhängung ermittelt. Das Bild 18 zeigt die Auslegung des Teststandes und der Flasheranlage in einer Prüfbaugruppe.

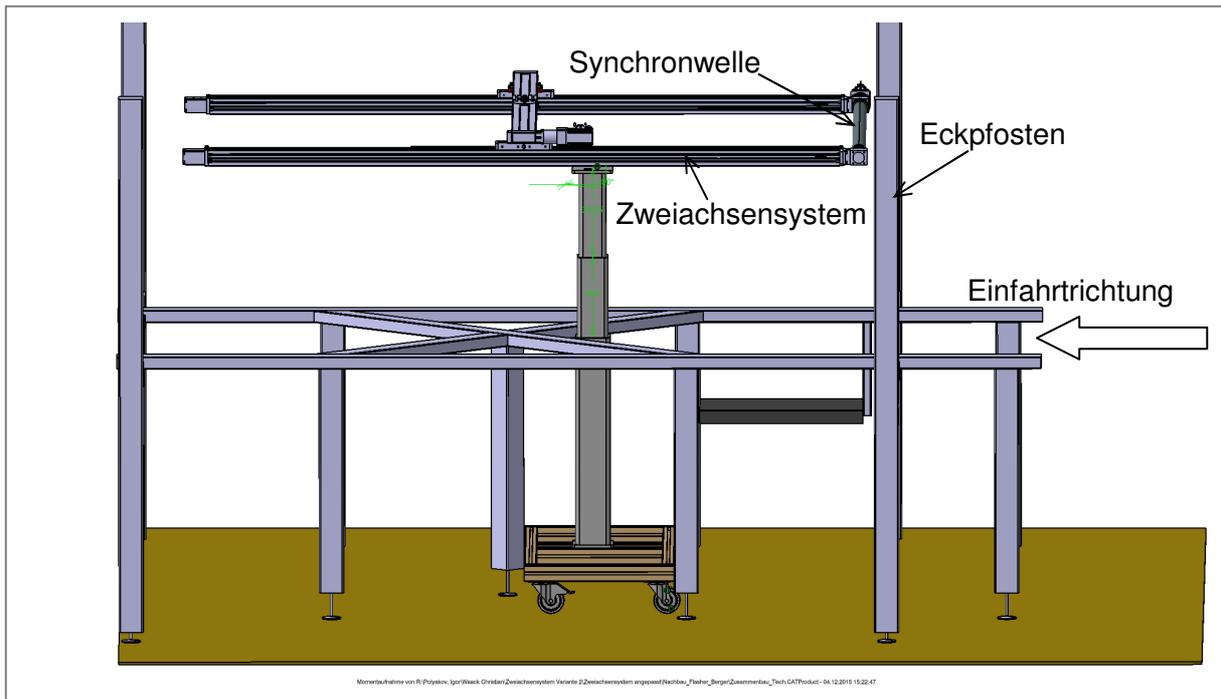


Bild 18: Prüfbaugruppe: Teststand und Flascheranlage

Der Abstand von einem Eckpfosten der Flascheranlage bis zum nächsten beträgt 2700 mm und die Länge des Zweiachsensystems beläuft sich auf ca. 2524 mm. Dies stellt eine Bewegungsfreiheit von 176mm dar. Bei einem Fahrweg der Hubsäule von ca. 634 mm, einer Aufhängung des Zweiachsensystems ca. 1510 mm vom unteren Teil der Linearachse und der Einschubposition des Gestells in die Anlage bis zum Anschlag, passt das Zweiachsensystem gerade noch in den Abdeckschacht hinein. Der Abstand des oberen Teils des Zweiachsensystems, an dem die Synchronwelle angebracht ist (Bild 18), bis zum Eckpfosten beträgt nur 30 mm. Da die Genauigkeit der Nachkonstruktion der Anlage auf $\pm 1\text{cm}$ geschätzt wird, wird zur Sicherheit dieser Abstand noch erhöht. Das kann erreicht werden, indem entweder die Aufhängung des Zweiachsensystems erhöht wird oder das Gestell so verändert wird, dass es noch weiter bis zum Aufstoßen mit der mittleren Stützsäule geschoben wird. Es wird die letztere Vorgehensweise bevorzugt, weil jede Verschiebung der Aufhängung weiter von der Mitte zur Erhöhung des Ungleichgewichtes bei der waagerechten Lage des Zweiachsensystems führen wird. Das führt zu einer höheren Belastung auf die Hubsäule. Bei der Rollbewegung des Gestells über dem Fußboden wird es, bei jeder Unebenheit des Bodenbelags, zur Entstehung von Drehmomenten führen, die der Hubsäule schaden könnten. Das veränderte Gestell ist auf dem Bild 19 abgebildet. In der Mitte vorne wird eine Aussparung angebracht, um zusätzlich 120 mm freie Strecke bis zum Stoß mit der Stützsäule zu verschaffen.

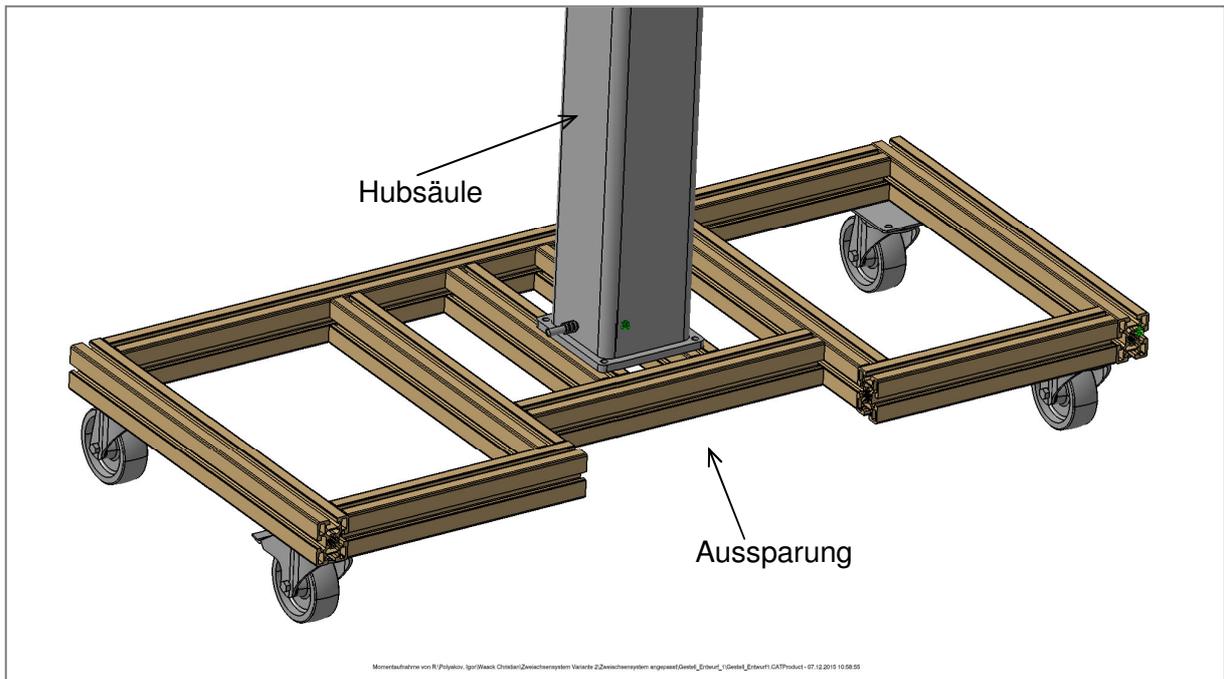


Bild 19: Das Gestell mit einer Aussparung

Die Profile müssen miteinander mit Hilfe von Winkeln und Schrauben verbunden werden. Diese Verbindungselemente sind nicht in der Baugruppe vorhanden, weil die Gestalt von dem Gestell sich während der Konstruktion noch mehrmals verändern wird. Um das Zweiachsensystem auf die Hubsäule zu integrieren und um es zu stabilisieren, wird es mit einem Rahmen aus Profilen verbunden. Die Aufbaubeschreibung des Rahmens erfolgt im achten Kapitel.

8 Entwurf des Rahmens zur Befestigung des Zweiachsensystems mit der Hubsäule.

Der Rahmen erfüllt zwei Funktionen: zum einen ermöglicht er die Anbringung von Konstruktionselementen für die drehbare Lagerung des Zweiachsensystems und zum anderen werden die Linearachsen ausgerichtet sowie gegen die Verschiebung zueinander gesichert. Um den Rahmen mit dem Zweiachsensystem zu verbinden wurde eine spezielle Verbindungsplatte entworfen, die mit Hilfe von vier Spannstücken zur Linearachsen befestigt wird. Der Rahmen hat eine Länge von 2340 mm und eine Breite von 1595 mm. An der Stelle, an der das Zweiachsensystem gelagert werden soll, wird der Rahmen mit zwei 30 mm im Durchmesser Bohrungen versehen. Die Bohrungen sind für die Achse vorgesehen, die eine Drehung um 90° realisieren wird. Eine Zarge des Rahmens hat in der Mitte einen

rechteckigen Vorsprung, um in der senkrechten Position nicht mit der Hubsäule zu kollidieren. Auf dem Bild 20 ist der Rahmen mit den vier Verbindungsplatten dargestellt.

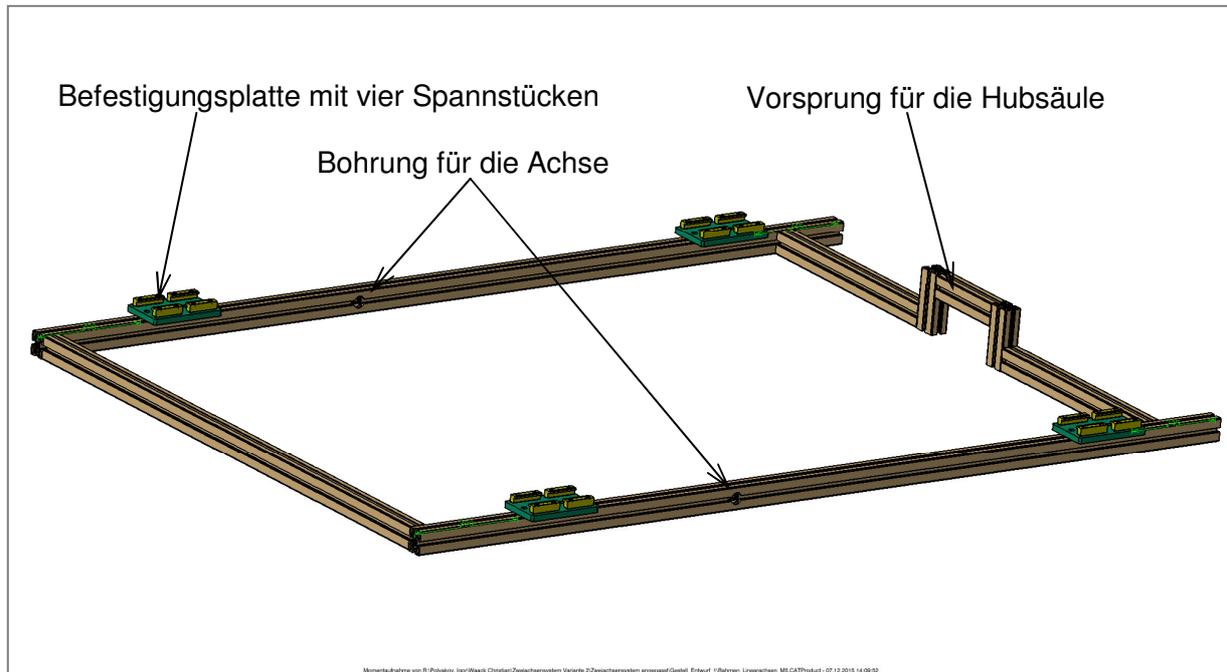


Bild 20: Rahmen zur Lagerung des Zweiachsensystems

Die Verbindungsplatte wird mit Hilfe von vier M8 Schrauben mit dem Profil verbunden. Auf der Platte sind zusätzlich acht M6 Gewindebohrungen angebracht worden, um die Spannstücke zu befestigen. Der Vorsprung im Rahmen dient auch als ein Anschlag, damit eine senkrechte Position gesichert wird. In die Bohrungen wird die Achse geschoben, die mittig bezüglich der Hubsäule angebracht wird. Diese Achse wird auf der Platte der Hubsäule drehbar gelagert. Die Beschreibung der Achsenlagerung erfolgt im Kapitel neun.

9 Entwurf eines Verbindungselements (Platte) zwischen dem Rahmen und der Hubsäule.

Als ein Verbindungsglied zwischen dem Rahmen mit den Lineareinheiten und der Hubsäule dient eine Platte, an die zwei Gehäuselagereinheiten angeschraubt werden. Das Gehäuselager besteht aus einem abgedichteten, einreihigen Kugellager mit einem Außenring, welcher in das Gehäuse montiert ist. Die Platte ist 15 mm dick und hat vier Bohrungen für die M8 Schrauben zur Verbindung mit der Hubsäulenplatte und vier

Bohrungen für die M10 Schrauben zur Verbindung für die zwei Gehäuselagereinheiten. Die Platte hat auf einer Seite eine Verlängerung mit einem Langloch zur Befestigung des Rahmens in der horizontalen Position. Dazu wird auf dem Rahmen eine zusätzliche Strebe angebracht, in der Mitte derer ein Winkel platziert wird, der durch eine Schraube mit der Platte verbunden wird. Als Achse dient eine Gewindestange mit einem Durchmesser von 30mm. Die Gewindestange verläuft durch die Gehäuselager und wird an den Enden mit dem Rahmen verschraubt. Auf dem Bild 21 sind die Platte und die Gehäuselagereinheit dargestellt.

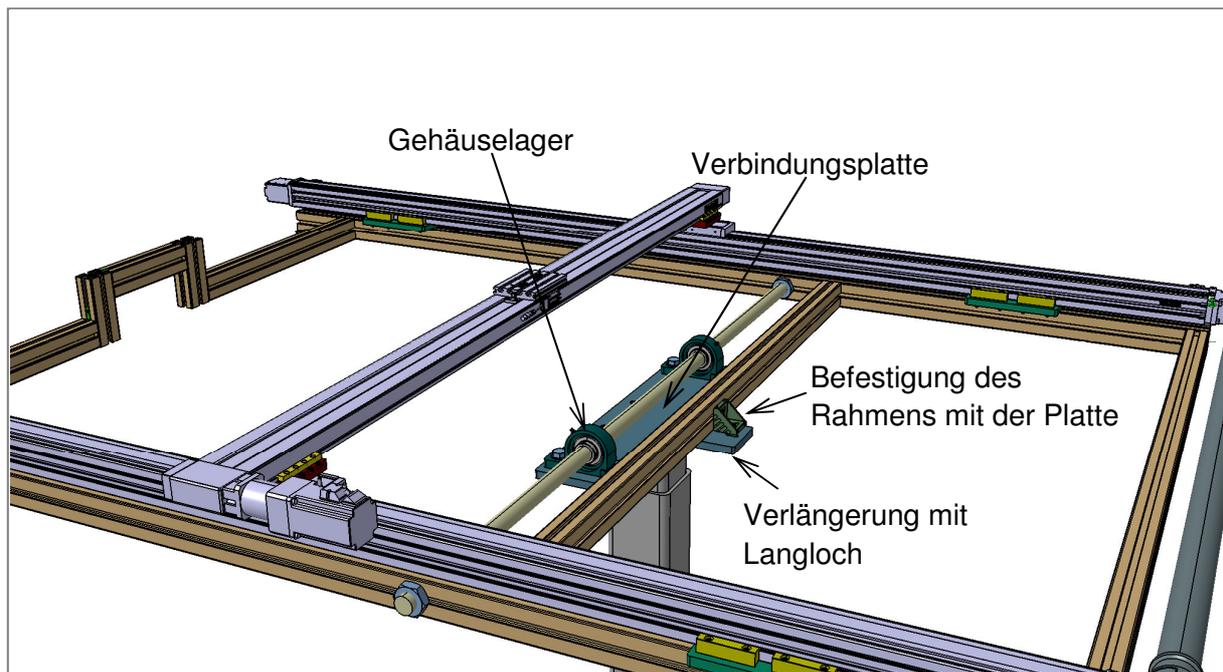


Bild 21: Die Drehbare Lagerung des Rahmens

Die Platte und die Achse sind in der gesamten Konstruktion die meist beanspruchten Teile. In der waagerechten Lage des Rahmens wird die Verbindungsplatte auf Biegung beansprucht, die dazu führt, dass die Hubsäule ein Drehmoment erfährt. Die Achse wird in der senkrechten Position unter dem Gewicht von Lineareinheiten und dem Rahmen verbogen. Das kann zur Hemmung bei dem Schwenken des Rahmens führen.

10 Konzipierung eines Zusatzgestells für die Gerätschaften

Die Erforderlichkeit eines Zusatzgestells ist dadurch begründet, dass die Steuerungen der Lineareinheiten, der Hubsäule und des Spektrometers nicht auf dem Hauptgestell platziert werden können. Des Weiteren trägt das Zusatzgestell zur besseren Stabilität der Gesamteinrichtung bei. Das Zusatzgestell wird so ausgelegt, dass es bei der Messung in der Klimakammer, wenn ein Abstand von nur 570 mm von der Wand bis zum Sensor bleibt (siehe Bild 15), in die senkrechte Position verstellt wird. In diesem Fall müssen die Gerätschaften von dem Zusatzgestell geräumt werden. Das Gestell besteht aus vier Profilen, die so miteinander verbunden sind, dass die Rollen auf dem gleichen Niveau mit den Rollen des Hauptgestells sich befinden und in der senkrechten Position nicht aus dem Bauraum des Teststandes hinausragen. An einem Ende haben die Profile Bohrungen für eine drehbare Lagerung des Zusatzgestells. In die Nuten der Profile wird eine 5mm dicke Aluminiumplatte eingeschoben, die in einen Rahmen eingefasst wird. Der Rahmen besteht aus vier Schutzgitterprofilen, die durch vier Eckstücke gehalten werden. Das Abstellblech wird mit Hilfe von vier Nutensteinen in der Nut gesichert. Auf dem Bild 22 ist das Zusatzgestell gezeigt.

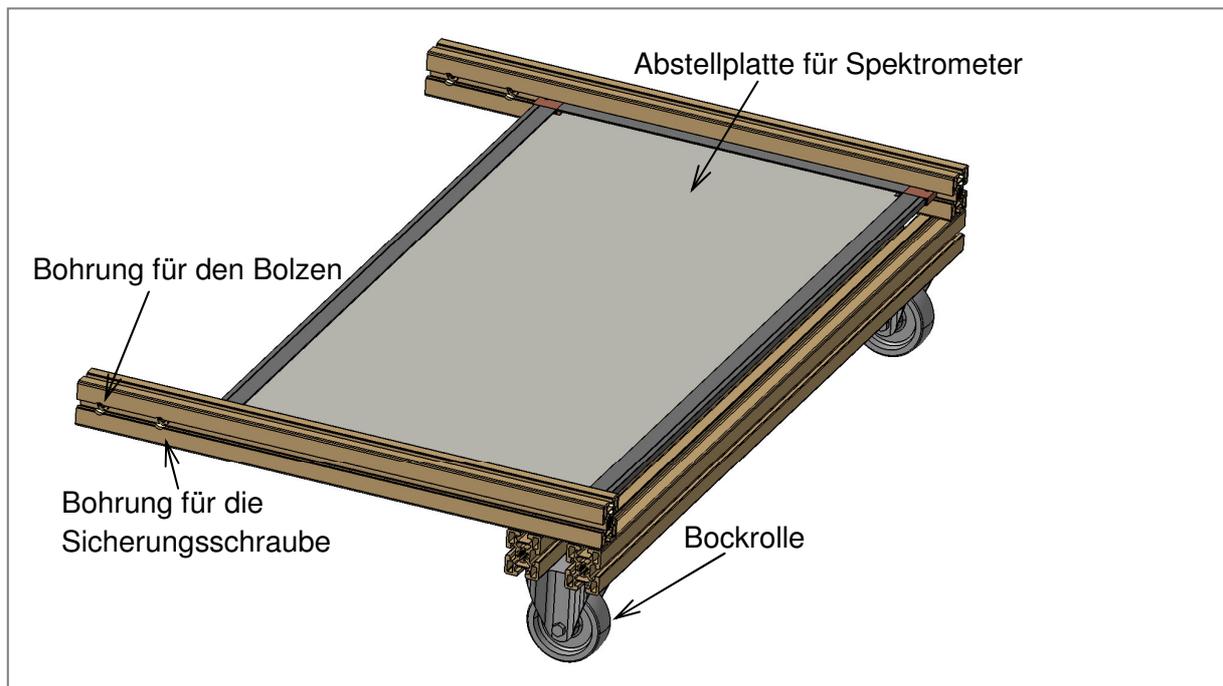


Bild 22: Das Zusatzgestell

Um das Zusatzgestell mit dem Hauptgestell zu vereinigen, werden zwei Profile mit den entsprechenden Bohrungen an den Seiten des Hauptgestells angebracht. Um das Gestell in

senkrechter Lage zu fixieren, wird ein Winkel als eine Bewegungssperre (Bild 35 S.45) auf das Hauptgestell montiert.

11 Kollisionsanalyse in der Prüfbaugruppe Flasheranlage-Teststand

Die Funktionalität des Teststandes wird bei einer Kollisionsanalyse in der Prüfbaugruppe Flasheranlage-Teststand geprüft. Der Teststand wird bis zum Zusammenstoß mit der mittleren Säule des Messtisches geschoben und die Hubsäule wird auf die Höhe des Tisches abgesenkt. Auf dem Bild 23 ist die Kollisionsanalyse des Messtandes mit der Flasheranlage dargestellt.

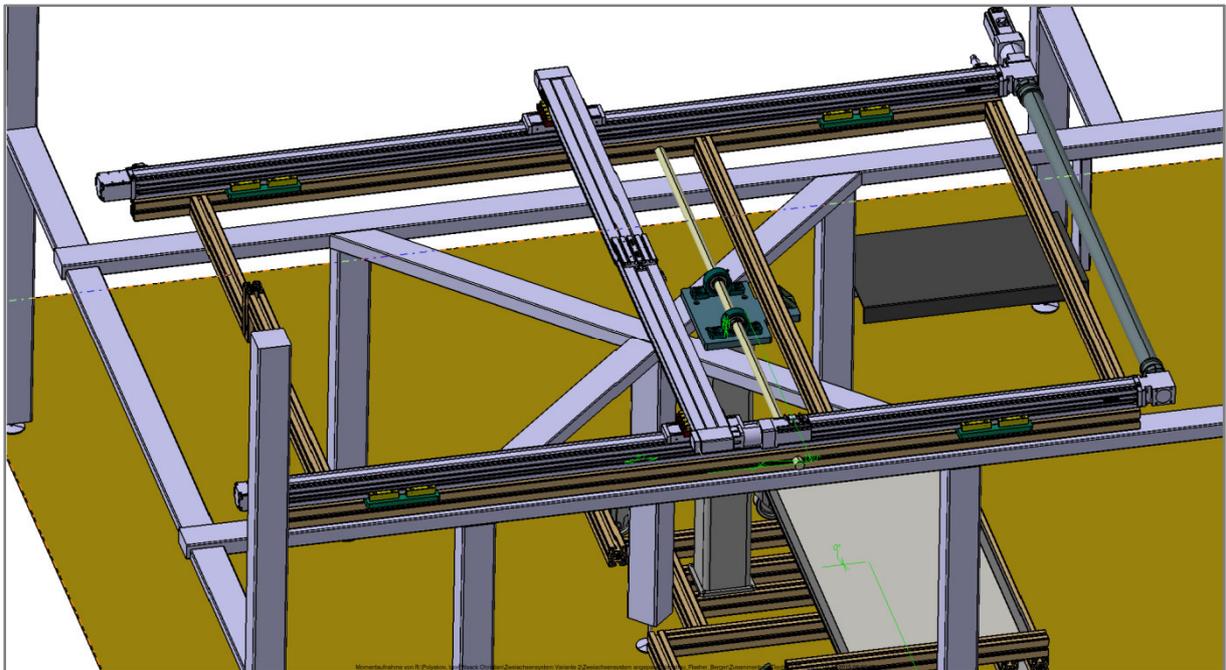


Bild 23: Kollisionsanalyse in der Prüfbaugruppe

Bei dieser Analyse wird festgestellt, dass der Rahmen bei der komplett eingefahrenen Teleskopsäule einen Abstand von 46,5 mm vom Tisch aufweist. Wenn der Rahmen nicht auf dem Messtisch aufliegen würde, würde es bei der Bewegung des Linearmoduls ein ständig seine Richtung wechselndes Drehmoment um die Aufhängungsachse auftreten, das zu einer hohen Belastung der Hubsäule führen würde. Um diesen Abstand zu verringern wird das Gestell so umgestaltet, dass die Hubsäule um 60mm tiefer abgesenkt wird. Das wird dadurch erreicht, dass Profile auf denen die Hubsäule steht, von unten an das Gestell angebracht werden. Dank dieser Veränderung wird der Abstand von dem Rahmen bis zum Tisch auf 26,5 mm reduziert. Eine weitere Absenkung der Hubsäule wird durch die Kollision

zwischen dem Tisch und Verbindungsplatte verhindert. Um diesen Abstand zu überbrücken werden Unterlegplatten verwendet. Auf dem Bild 24 ist die Kollisionsanalyse mit dem geänderten Gestell abgebildet. Auf den Profilen des Messtisches verlaufen jeweils zwei weiße Streifen aus einem Kunststoff (siehe Bild 3) für die besseren Gleiteigenschaften beim Schieben des PV-Moduls in die Flasheranlage. Die Streifen haben einen halbkreisförmigen Querschnitt mit einem ungefähren Radius von 5mm. Deshalb ist der Abstand zwischen dem Rahmen und dem Tisch in Wirklichkeit noch kleiner als 26,5 mm.

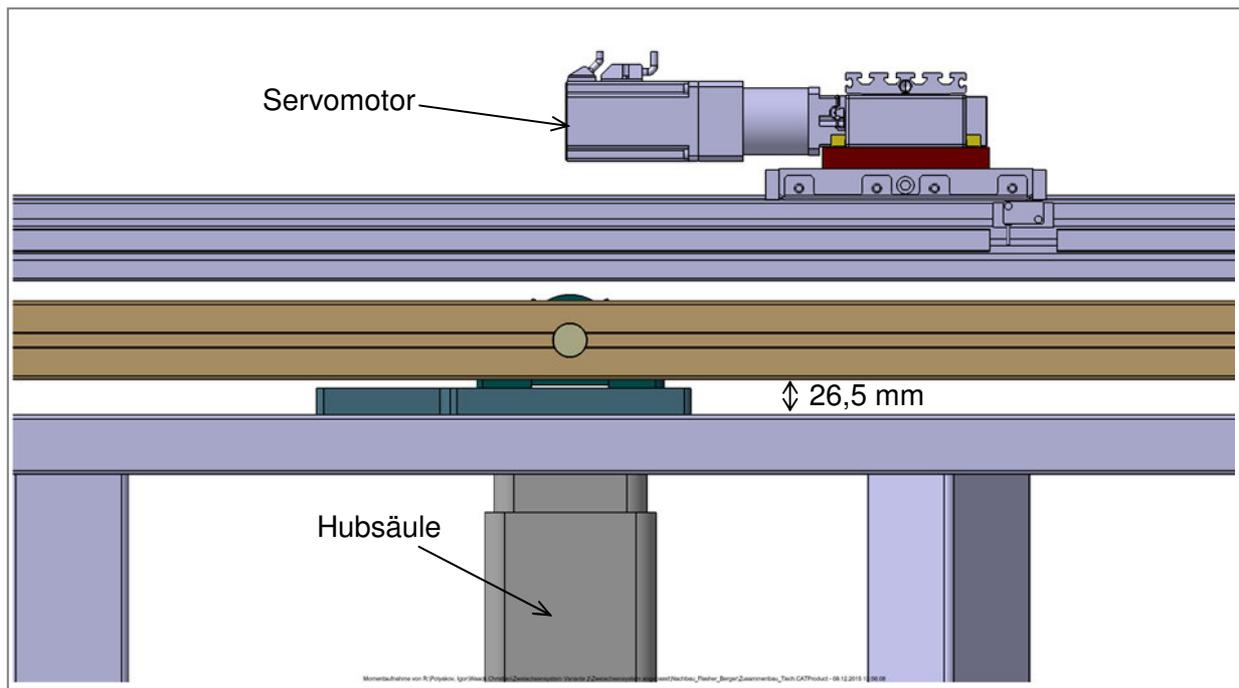


Bild 24: Der minimale Abstand zwischen dem Rahmen und dem Tisch

12 FEM Berechnung der Achsendurchbiegung in CATIA Generative Structural Analysis

Die Gehäuselager können laut Herstellerangaben die Fluchtungsfehler der Welle bis zu $\pm 5^\circ$ auszugleichen. Mit Hilfe der FEM-Analyse wurde die maximale Durchbiegung der Welle berechnet und mit den Herstellerangaben verglichen. Des Weiteren wurde die maximale Biegespannung der Welle ermittelt und mit der zulässigen Spannung verglichen. Auf die Achse wirkt die Gewichtskraft von den drei Linearmodulen und dem Rahmen. Die Masse der Linearmodule einschließlich der Servomotoren und der Synchronwelle beträgt 60 kg. Die Masse des Rahmens errechnet sich nach der Formel 3kg/m für die 45x60-er Profile mal die Länge der Profile. Bei einer Gesamtlänge von 9,383m ergibt sich die Masse des Rahmens

zu 28,2 kg. Somit ist die Gesamtlast, die auf die Achse näherungsweise symmetrisch wirkt, gleich 88,2 kg. Zur Sicherheit wird die Gesamtmasse als 100 kg angenommen, weil die Masse von Verbindungselementen nicht berücksichtigt wurde. Simuliert wird die Baugruppe bestehend aus der Verbindungsplatte, dem Gehäuselager und der Achse. Zuerst werden die Anfangsbedingungen festgelegt und die verteilte Last auf die Welle vorgegeben. Die Verbindungsplatte und die Gehäuselager werden fest eingespannt und für die Verbindungseigenschaft zwischen Welle und Gehäuselager wird die Presspassverbindung ausgewählt. Die Last von 1000 N wird in z-Richtung gerichtet. Für die Vernetzung der Bauteile wird der lineare Elementtyp ausgewählt und die Feinheit des Netzes bei der Welle und den Gehäuselagern auf 3 mm gesetzt. Auf dem Bild 25 sind die Anfangsbedingungen für die FEM-Berechnung der ausgewählten Baugruppe gezeigt.

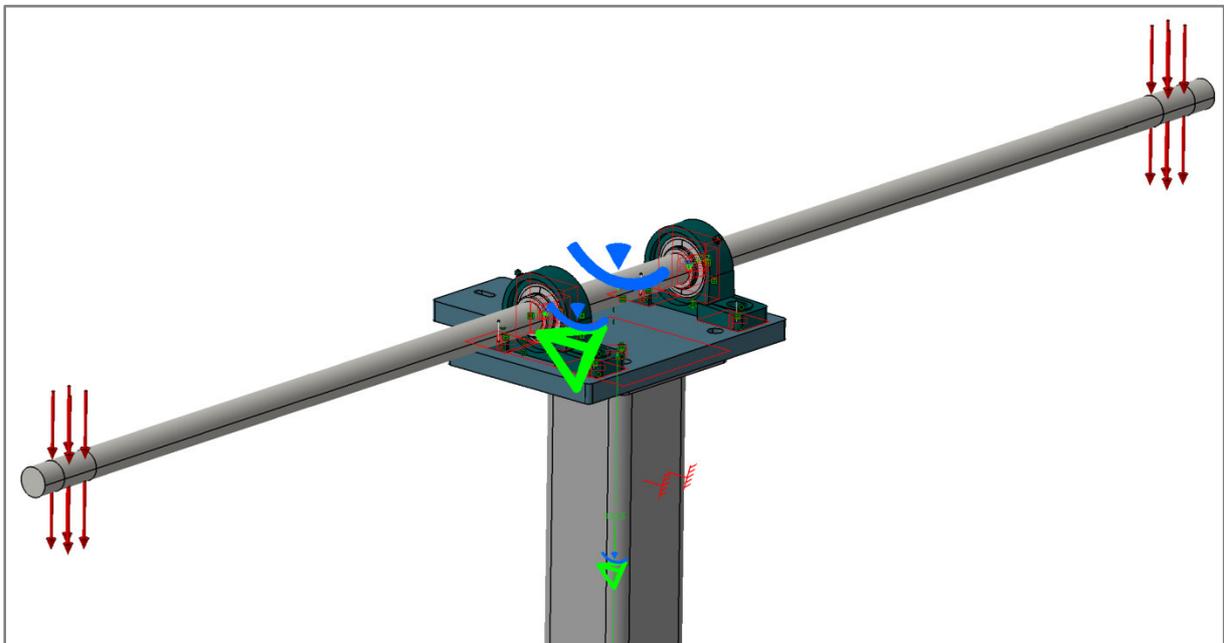


Bild 25: Die Anfangsbedingungen bei FEM-Berechnung

Die FEM-Analyse ergab folgende Werte für maximale Biegespannung und Amplitude:

$$\sigma_{max} = 1,46 \times 10^8 \frac{N}{m^2} = 146 \frac{N}{mm^2}$$

$$w_{max} = 5mm$$

Der Fluchtungswinkel errechnet sich aus dem Tangens der maximalen Amplitude geteilt durch den Abstand von dem Gehäuselager bis zum Ende der Achse.

$$\tan \alpha = \frac{5mm}{705,3mm} \quad \alpha \approx 0,4^\circ < 5^\circ$$

Dieser Fluchtungsfehler ist viel kleiner als der vorgegebene Wert von 5° und wird von dem Lager ausgeglichen. Als Material für die Achse wurde der Maschinenbaustahl S235JR mit der Streckgrenze von 235 N/mm² ausgewählt.

Die zulässige Spannung errechnet sich nach der Formel:

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_{grenz}}{\nu} \quad (1)$$

ν -Sicherheitszahl gegen Fließen mit dem Wert von 1,5

$$\sigma_{zul} = \frac{235 \text{ N/mm}^2}{1,5} = 156,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} > 146 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \sigma_{max}$$

Zur größeren Sicherheit ist es angemessen einen Rundstahl aus dem Werkstoff S275JR oder S355JR zu bestellen oder den Abstand zwischen den Lagern zu vergrößern. Die analytische Berechnung (Siehe Anhang A1 u. A2 S.62) ergab für den Abstand 200 mm den Wert 136 N/mm². Auf dem Bild 26 ist das Ergebnis der FEM-Analyse der Achsenbiegung dargestellt.

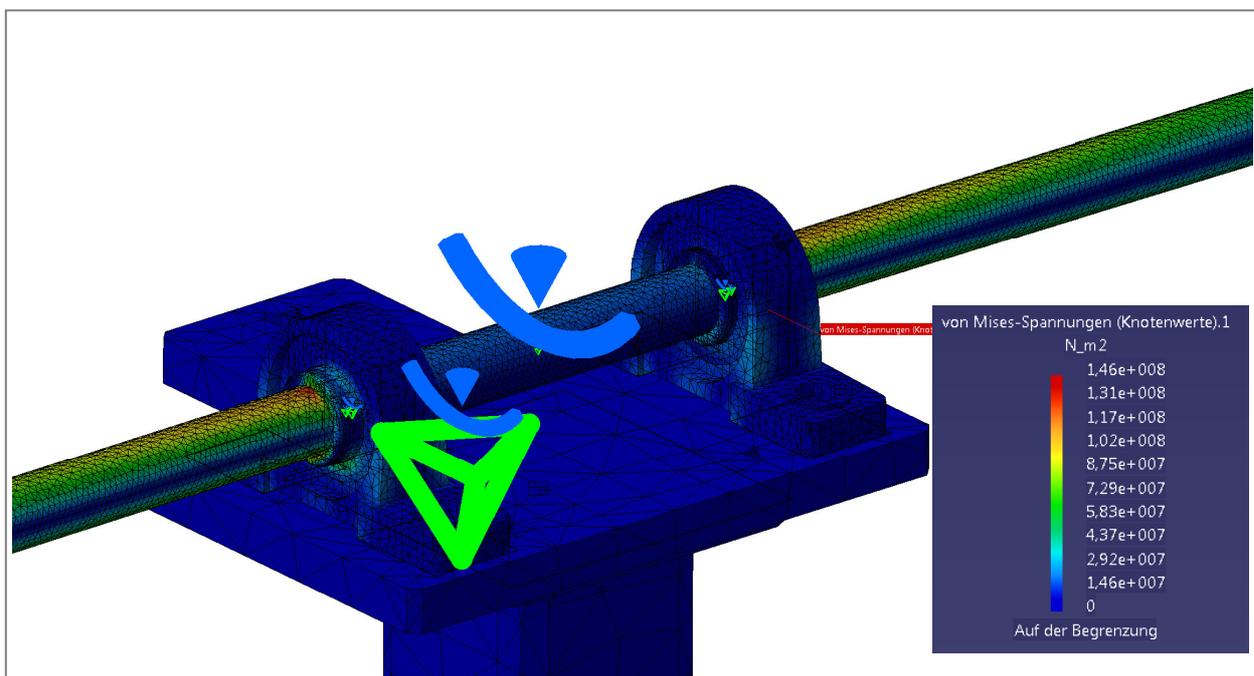


Bild 26: FEM-Analyse der Achsenbiegung

13 Statische Untersuchungen des Teststandes bei verschiedenen Lagen

13.1 Positionsbestimmung des Linearmoduls CKR-090 zur Minimierung der Wirkung des Drehmomentes auf die Hubsäule

Bei den Messungen in der Flasheranlage wird der Rahmen mit den Linearachsen um 90° gedreht und in dieser Position befestigt. Aufgrund der unsymmetrischen Position der Achse bezüglich des Rahmens wirkt ein Drehmoment auf die Verbindungsplatte und somit auch auf die Hubsäule, an die der Rahmen zur Positionsstabilisierung angeschraubt wird. Das Bild 27 verdeutlicht diesen Umstand. Es wurde der Schwerpunkt des Zweiachsensystems ohne die CKR-090 Linearachse bezüglich eines Punktes P in CATIA bestimmt und die Abstände von diesem Punkt bis zu dem Schwerpunkt G und der Achse A. Die Massen M_1 des Zweiachsensystems ohne CKR-090 und m_2 des Linearmoduls sind bekannt, woraus sich eine Gleichgewichtsgleichung bezüglich des Punktes P aufstellen lässt, um die Länge r des Hebelarms bezüglich des Drehpunktes A zu errechnen, damit das System im Gleichgewicht bleibt. Auf dem Bild 28 ist die Skizze zu dieser Aufgabe dargestellt. Der Hebelarm r ist 1809 mm lang. Dieser Wert ist größer als der Abstand von der Achse bis zum äußeren Rand des Linearmoduls, der nur 910 mm beträgt. Das bedeutet, dass die Lineareinheit CKR-090 um einen größeren Abstand von der Achse A entfernt werden soll, als es der Hubweg der MKR-060 Linearmodule zulässt. Deswegen soll die Lineareinheit CKR-090, wenn sich das Zweiachsensystem im waagerechten Zustand befindet, soweit wie möglich zu den Enden der MKR-060 Module verfahren werden.

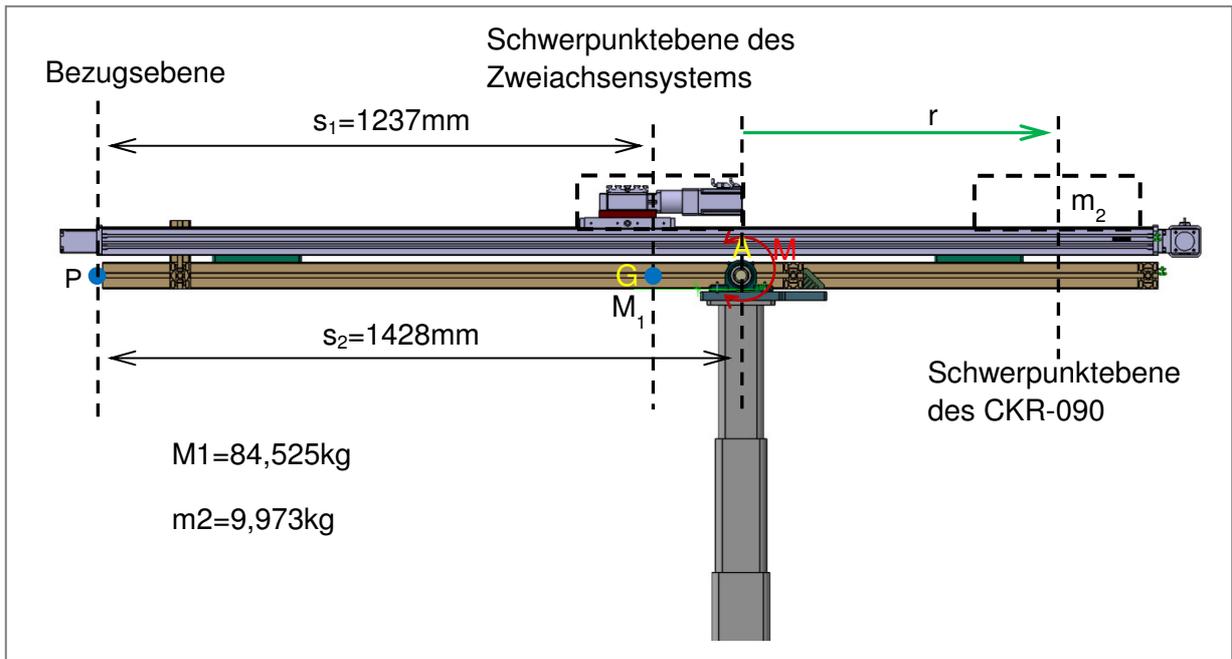


Bild 27: Schwerpunktlage des Zweiachsensystems

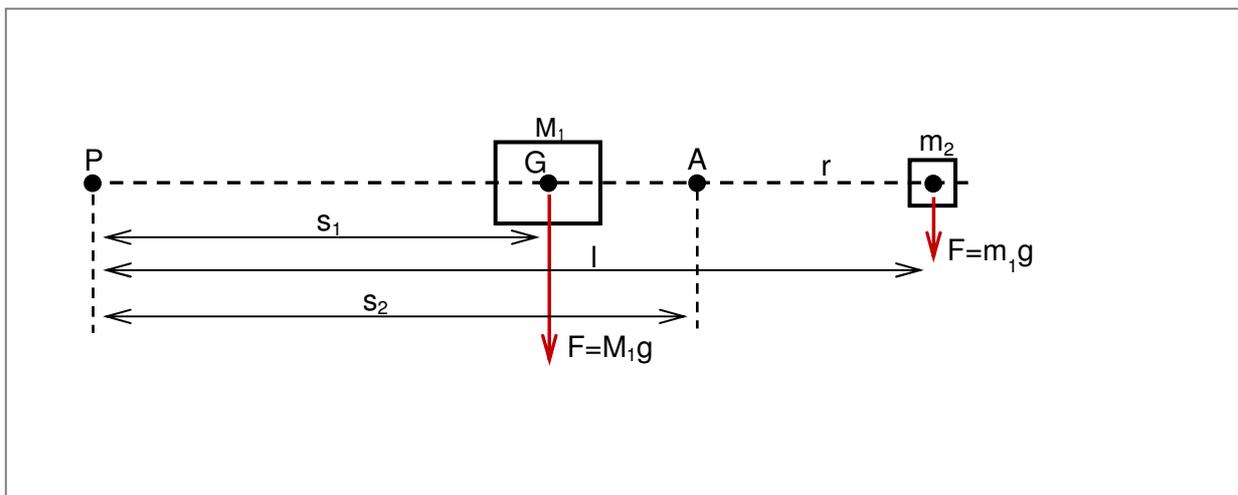


Bild 28: Vereinfachte Skizze zum Bild 27

$$gM_1(s_2 - s_1) = gm_2(l - s_2) \quad (2)$$

$$l = \frac{M_1(s_2 - s_1)}{m_2} + s_2 = \frac{84,525\text{kg}(1428 - 1237)\text{mm}}{9,973\text{kg}} + 1428\text{mm} = 3046\text{mm}$$

$$r = l - s_2 = 3046\text{mm} - 1428\text{mm} = 1618\text{mm}$$

13.2 Berechnung des auf die Verbindungsplatte wirkenden Drehmomentes

Ausgehend aus der Tatsache, dass das Zweiachsensystem nicht in den Gleichgewichtszustand bezüglich der Drehachse gebracht werden kann, greift an der Verbindungsplatte eine Kraft F an. In CATIA wurde der Abstand s_1 von dem Schwerpunkt des Zweiachsensystems bis zur Achse A und von der Achse bis zur Verbindungsstelle des Rahmens mit der Verbindungsplatte s_2 bestimmt. Das Bild 29 zeigt die beschriebene Situation.

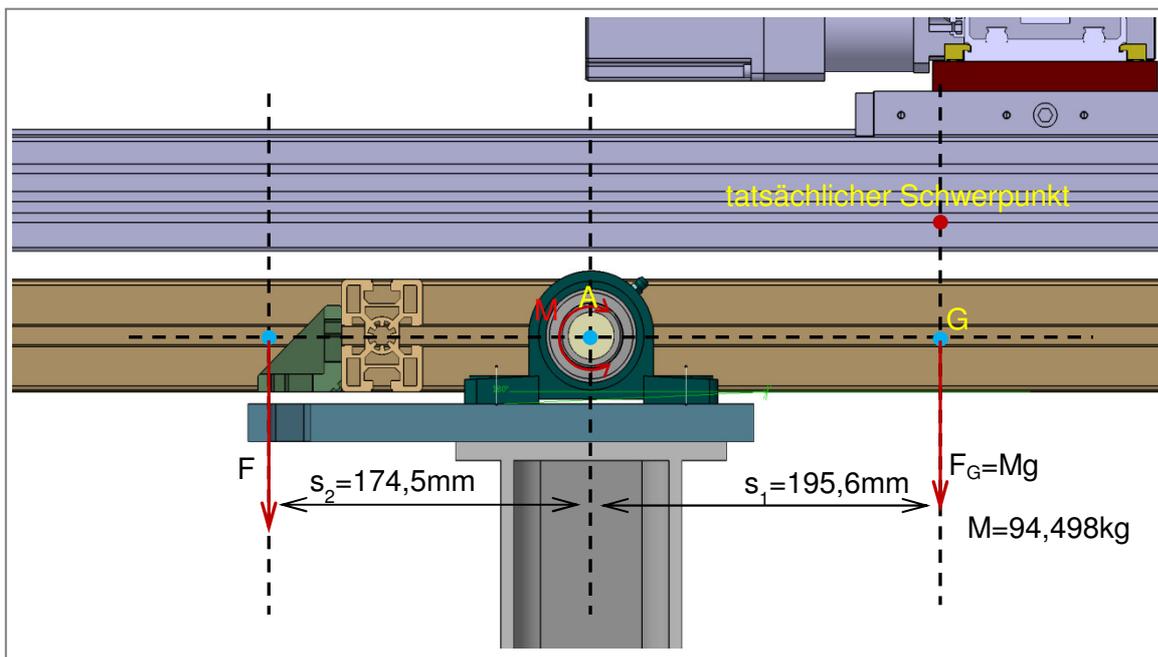


Bild 29: Kräftegleichgewicht um die Drehachse A

Aus der Gleichgewichtsbedingung auf dem Bild 29 ergibt sich die Kraft zu:

$$F_G s_1 = M g s_1 = F s_2 \quad (3)$$

$$F = \frac{M g s_1}{s_2} = \frac{94,5 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot 195,6 \text{ mm}}{174,5 \text{ mm}} = 1059,2 \text{ N}$$

$$M = s_2 F = 0,174 \text{ m} \cdot 1059,2 \text{ N} = 184,3 \text{ Nm}$$

Die Hubsäule kann ein Drehmoment von 200 Nm ertragen. Dieser Wert ist größer als der ausgerechnete Wert. Trotzdem muss zur Sicherheit eine zusätzliche Befestigung zum Gewichtsausgleich angebracht werden. Zum Gewichtsausgleich kann auch eine Handseilwinde, die auf das Gestell montiert wird, verwendet werden.

13.3 Berechnung der erforderlichen Schubkraft, um den Teststand auf die Rampe zu bringen.

Die Rampe besteht aus einem 40x240x840 mm Profil, das an einem Ende unter einem Winkel von circa 29° abgesägt ist, damit die Rollen nicht auf die Kante aufprallen.

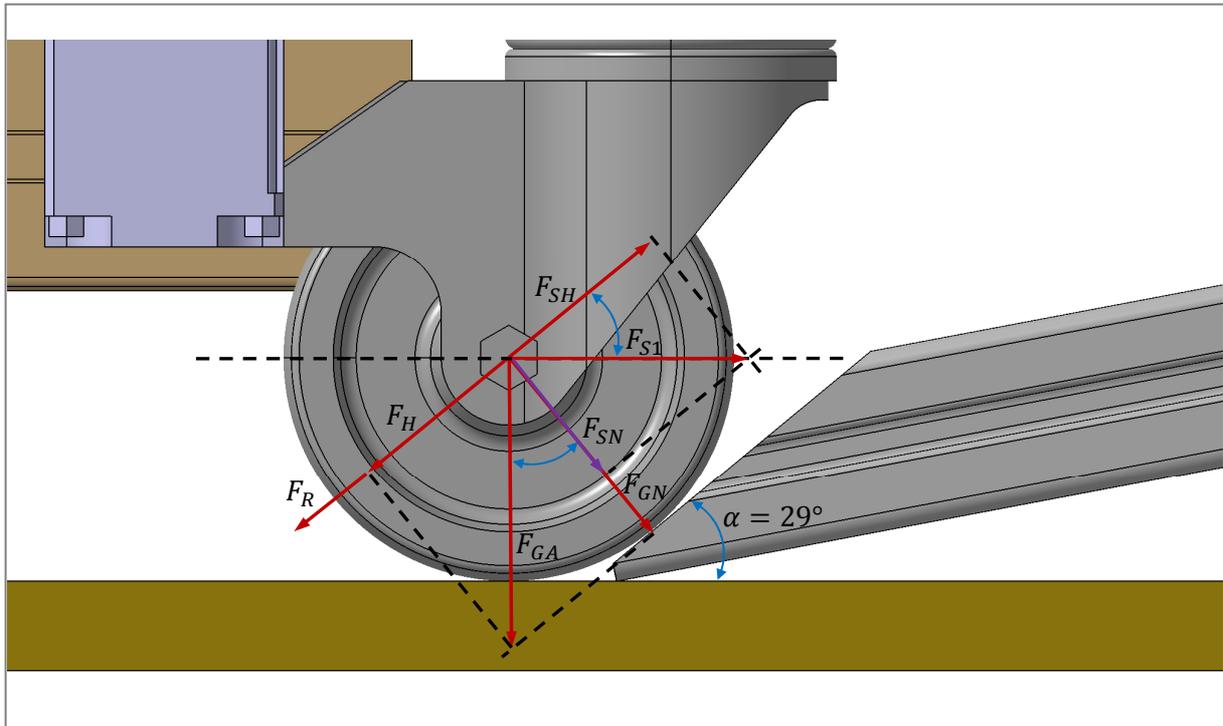


Bild 30: Kräfteparallelogramme auf einer schiefen Ebene (für vordere Rolle)

Die Kraft F_{S1} ist die Schubkraft, die auf die vordere Rolle wirkt. Die Kräfte F_{S2} und F_{S3} sind die Schubkräfte, die auf die mittlere und hintere Rolle wirken müssen, um die Rollreibung zu überwinden. Die Gesamtschubkraft errechnet sich aus der Formel 4:

$$F_S = F_{S1} + F_{S2} + F_{S3} \quad (4)$$

Die Gewichtskraft von der Vorrichtung verteilt sich nicht gleich auf die drei Paare von Rollen. Die vordere Rolle nimmt die größte Belastung auf, dagegen nimmt die hintere Rolle die kleinste Belastung auf. Die Berechnung der Gewichtsverteilung auf die Rollen ist im Anhang (A3, S.66) ausführlich vorgeführt. Zur Vereinfachung wurde das Gestell als ein Biegebalken mit einer konstanten Biegesteifigkeit EI aufgefasst, der dreifach aufgelagert ist. Auf diesen Balken wirkt eine der Gewichtskraft äquivalente Kraft F , die genau entlang der Kraftlinie der Gewichtskraft auf den Balken wirkt. Die Lagerabstände sind gleich den Abständen zwischen den Drehachsen der Rollen. Wegen der statischen Unbestimmtheit eines solchen Systems, wird zur Bestimmung der Lagerkräfte das Superpositionsprinzip angewandt. Aus bekannten Lagerkräften F_{GA} , F_{GB} und F_{GC} wird die mindestens erforderliche Schubkraft F_S

ausgerechnet, die nötig ist, um die Vorrichtung auf die Rampe zu schieben. Auf dem Bild 30 ist die vordere Rolle zusammen mit den auf sie wirkenden Kräften dargestellt. Die Gewichtskraft F_{GA} wird in zwei Komponenten zerlegt: Hangabtriebskraft F_H und Normalkraft F_{GN} . Bei der Anwendung der Schubkraft F_S wirkt auf die vordere Rolle die Teilschubkraft F_{S1} , die sich auch in zwei Komponenten zerlegt: Hangauftriebskraft F_{SH} und Normalkraft F_{SN} . Zusätzlich wirkt eine Rollreibungskraft auf die Rolle, die mit der Hangabtriebskraft in eine Richtung wirkt. Die Rollreibungszahl μ_r zwischen dem Rad aus Kunststoff und der Aluminiumrampe ist nicht bekannt. Die Rollreibungszahl ist aus Erfahrung viel kleiner als Haftreibung- und Gleitreibungszahl, deshalb wird für Rollreibungszahl ein Wert von 0,1 angenommen. Aus dem Kräftegleichgewicht im Bild 30 lassen sich folgende Gleichungen aufstellen:

$$F_{S1} = \frac{F_{SH}}{\cos \alpha}, \quad F_{SH} = F_R + F_H, \quad F_R = \mu_r \cdot F_N, \quad F_N = F_{SN} + F_{GN} \quad (5)$$

Aus den trigonometrischen Verhältnissen der Kräfte zueinander ergeben sich folgende Zusammenhänge für F_H , F_{SN} und F_{GN} :

$$F_H = F_{GA} \sin \alpha, \quad F_{SN} = F_{S1} \sin \alpha, \quad F_{GN} = F_{GA} \cos \alpha \quad (6)$$

Einsetzen dieser Gleichungen in 5 für F_{SH} liefert:

$$F_{SH} = \mu_r \cdot (F_{S1} \sin \alpha + F_{GA} \cos \alpha) + F_{GA} \sin \alpha \quad (7)$$

Einsetzen der Gleichung 7 in 5 für F_{S1} ergibt folgenden Ausdruck:

$$F_{S1} = \frac{\mu_r \cdot (F_{S1} \sin \alpha + F_{GA} \cos \alpha) + F_{GA} \sin \alpha}{\cos \alpha} \quad (8)$$

Das Auflösen dieser Gleichung nach F_{S1} ergibt die gesuchte Schubkraft für die Rolle 1:

$$F_{S1} = F_{GA} \left(\frac{\mu_r \cos \alpha + \sin \alpha}{\cos \alpha - \mu_r \sin \alpha} \right) \quad (9)$$

Mit den bekannten Werten für F_{GA} (siehe Anhang A3), $\mu_r=0,1$ und α (Bild 30) ergibt sich folgender Wert:

$$F_{S1} = 1142,4N \left(\frac{0,1 \cos 29^\circ + \sin 29^\circ}{\cos 29^\circ - 0,1 \sin 29^\circ} \right) = 791,3N$$

Die Teilschubkräfte F_{S1} und F_{S2} errechnen sich nach den folgenden Formeln:

$$F_{S2} = F_{GB} \cdot \mu_r, \quad F_{S3} = F_{GC} \cdot \mu_r \quad (10)$$

Wegen einer kleinen Rollreibungszahl sind die Schubkräfte für die Rollen B und C, die auf dem Fussboden stehen, unverhältnismäßig klein:

$$F_{S2} = 784N \cdot 0,1 = 78,4N, \quad F_{S3} = 20,6N \cdot 0,1 = 2N$$

Die Addition der Teilkräfte ergibt die Gesamtschubkraft zu:

$$F_S = 791,3N + 78,4N + 2N = 871,7N$$

14 Entwurf einer Drehvorrichtung für das Zweiachsensystem.

Wegen eines hohen Gewichts des Zweiachsensystems (ca. 100 kg) ist es angebracht, aus Sicherheitsgründen und zur Minimierung des Kraftaufwandes bei der Handhabung des Drehmechanismus eine Drehvorrichtung auf dem Gestell zu installieren. Das Hauptteil dieser Vorrichtung ist eine Handseilwinde mit einem Brems- und Getriebemechanismus. Die Handseilwinde wird auf einer Plattform geschraubt, die ihrerseits auf dem Zusatzgestell platziert wird. Um die Trommel der Handseilwinde ist ein 5 mm starkes Stahlseil gewickelt, das am Ende einen Befestigungshaken hat. Dieser Haken wird mit dem auf dem Rahmen des Zweiachsensystems befestigten Rundstahlbügel eingehakt. Der Rundstahlbügel wird mit einer Adapterplatte mit Hilfe von M10 Muttern befestigt, die mit dem Rahmen durch zwei M8 Schrauben in der Mitte oben befestigt wird. Das Stahlseil wird mittels einer Umlenkrolle mit einer Schwenkfunktion oder mittels zwei um 90° zueinander gedrehten Seilrollen umgelenkt. Die Umlenkung des Seils ist nötig, weil bei der Rotation des Zweiachsensystems die Befestigungsstelle ihre Position ständig wechselt und das Seil sich an diese Veränderung anpassen soll. Die schwenkbare Umlenkrolle wird auf einer Adapterplatte befestigt, die selbst in der Mitte der Befestigungsplattform angebracht wird. Bei der Drehung des Hebels der Handseilwinde wird das Zweiachsensystem aus seiner vertikalen Lage in die horizontale Lage gedreht, wobei das gespannte Seil den Winkel zwischen der Ebene des Gestells und der vertikalen Ebene ändert. Die schwenkbare Umlenkrolle folgt, aufgrund der drehbaren Lagerung, dieser Bewegung des Seils. Es gibt noch eine Möglichkeit der Seilumlenkung mit Hilfe von zwei unbeweglichen Seilrollen. Die Umlenkfunktion von zwei festen Seilrollen besteht darin, dass eine Rolle das Seil um 90° umlenkt und es in die zweite Rolle leitet, die wegen ihrer senkrechten Position zum Zweiachsensystem, das Seil um sich wickelt. Die Plattform mit den Rollen und der Seilwinde ist am äußeren Rand des Zusatzgestells befestigt, damit der Drehhebel der Seilwinde einen freien Raum zur Drehung hat. Bei dem Aufbau der Hebeeinrichtung muss beachtet werden, dass der Haken mit dem Stahlseil untrennbar verbunden ist, was dazu führt, dass bei der Verschraubung von Stelzen der Umlenkrolle mit der Adapterplatte das Seil sich zwischen den Stelzen befinden soll. Die

Hebeeinrichtung muss bei der Verwendung des Teststandes in der Klimakammer abgeschraubt werden, da das Zusatzgestell in die senkrechte Position umgeklappt werden muss. Auf den Bildern 31 und 32 sind die Handseilwinde, zwei Möglichkeiten der Seilumlenkung und eine Öse für den Haken abgebildet.

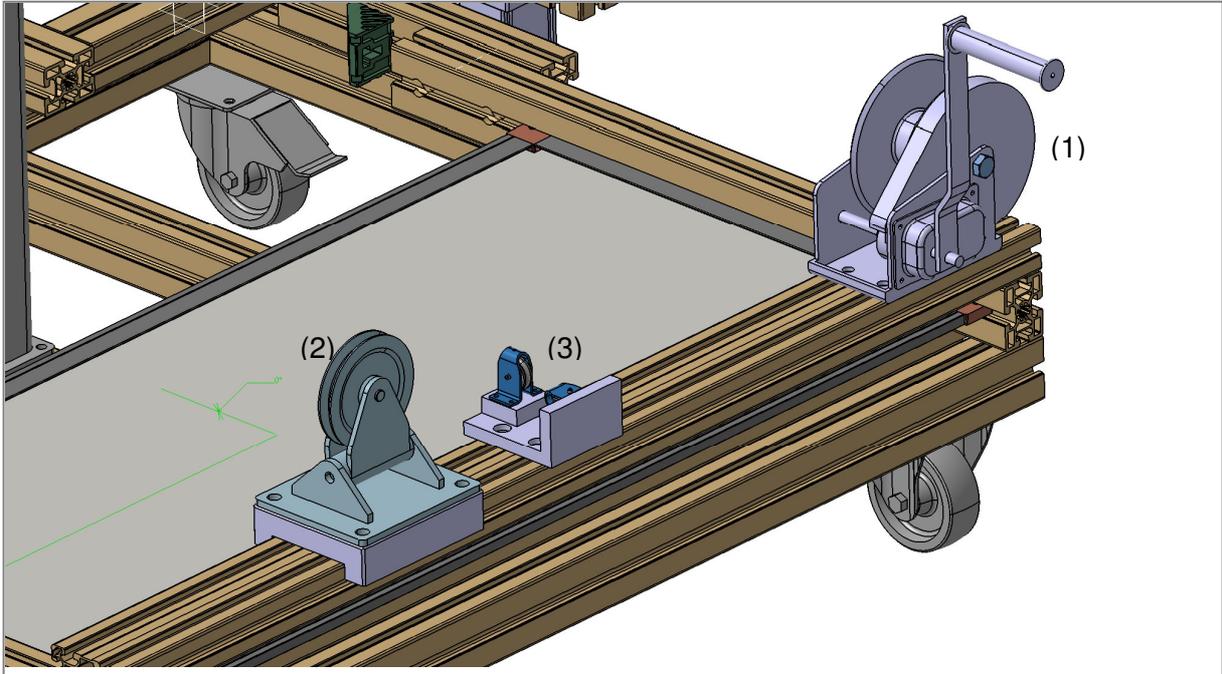


Bild 31: Handseilwinde (1), schwenkbare Umlenkrolle (2) und zwei unbewegliche Umlenkrollen (3)

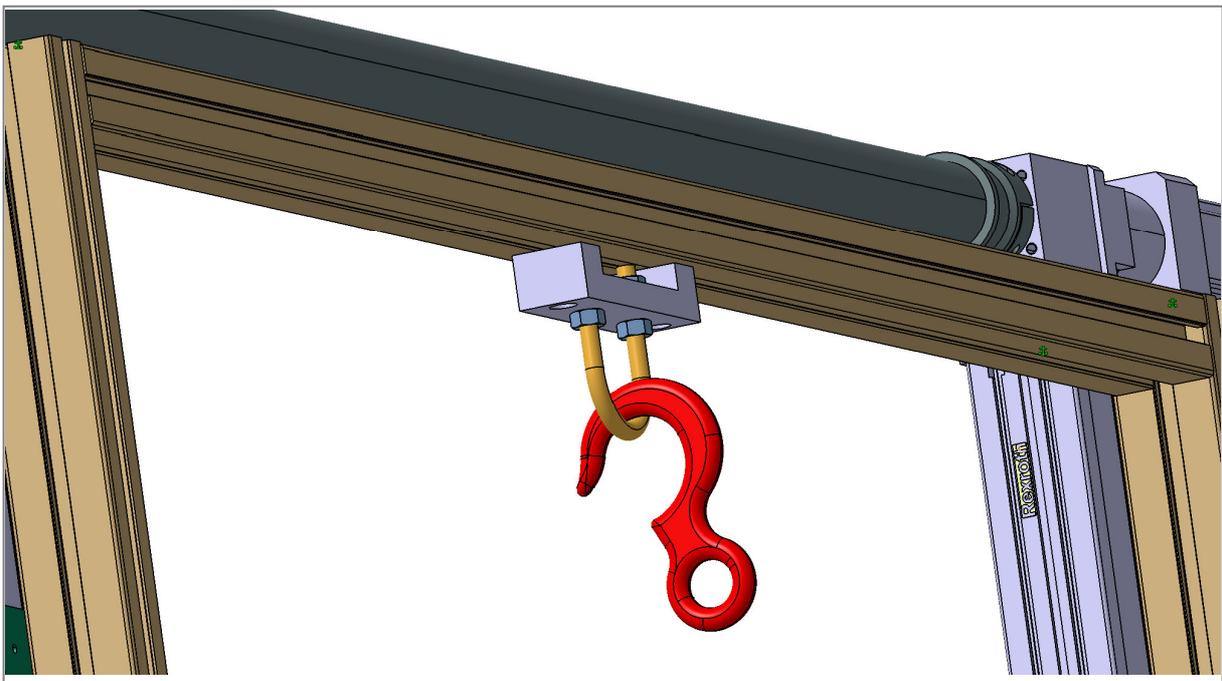


Bild 32: Öse und Haken auf dem Rahmen

15 Elemente der Konstruktion zur Gewährleistung der Sicherheit bei der Bedienung des Teststandes

Bei dem Entwurf des Teststandes werden mehrere Elemente der Konstruktion als Sicherungsteile konzipiert. In diesem Abschnitt werden der Aufbau und die Funktionalität solcher Sicherungsteile näher erläutert. Zur Verkleinerung des möglichen Kippmomentes auf die Hubsäule, das infolge von zufälligen Stößen, des Ungleichgewichtszustandes im Moment des Drehens des Zweiachsensystems oder während des Transports der Testvorrichtung entstehen könnte, werden auf dem Gestell aus paarweise gekreuzten 45x45 Profilen um die Hubsäule herum eine Art des Gerüsts errichtet. Dieses Gerüst gibt der Hubsäule, ergänzend zur Befestigung des Flansches mit den Schrauben an das Gestell, einen zusätzlichen Halt. Auf dem Bild 33 ist das Stabilisierungsgerüst dargestellt.

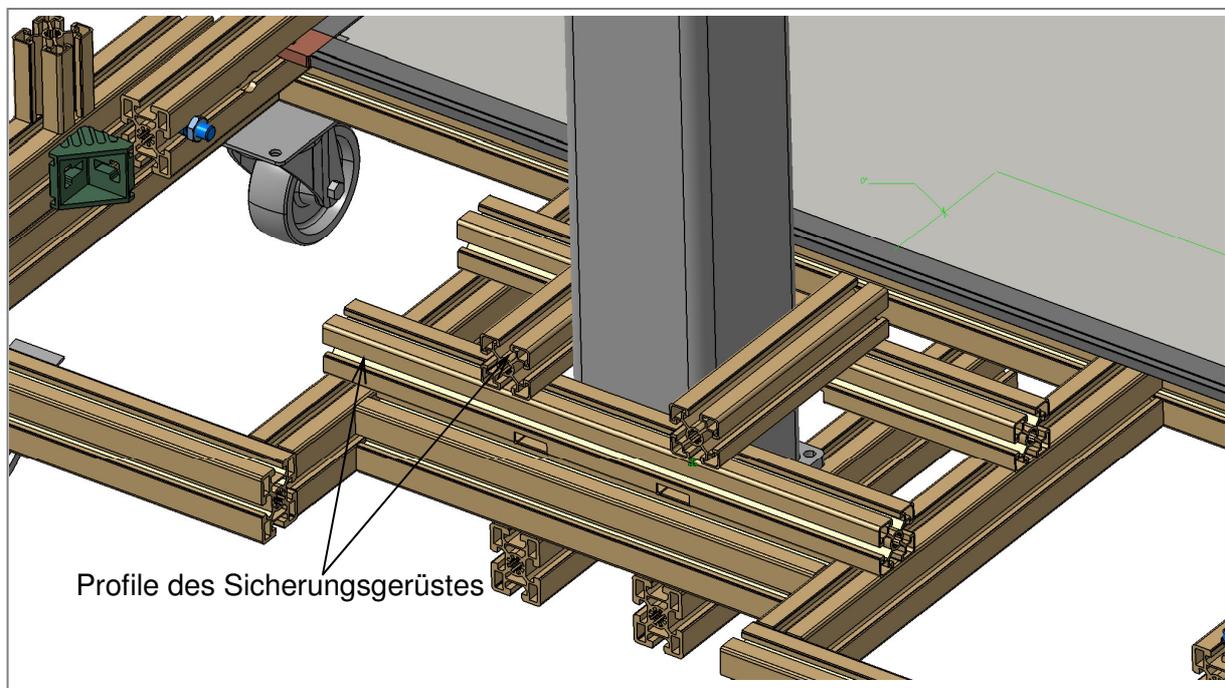


Bild 33: Sicherheitsgerüst um die Hubsäule

Ein weiteres unumgängliches Sicherungselement ist ein kurzes Profil auf dem Gestell an das der Rahmen des Zweiachsensystems angeschraubt wird, wenn der Teststand im Betrieb ist oder zum Messplatz befördert wird. Das Profil steht auf der abgesägten Fläche auf dem Gestell und ist 3mm vom dem Rahmen entfernt. Das Linearmodul fährt ab und bremst mit einer Beschleunigung, die die Trägheitskräfte hervorruft, die eine, neben dem Eigengewicht, weitere Belastung auf die Achse ausüben. Ein weiterer Aspekt, der für diese konstruktive Lösung spricht, ist eine mögliche Beeinträchtigung der Messergebnisse infolge der kleinen Schwingung des Zweiachsensystems auf der Achse. Als Verbindungselement zwischen dem Rahmen und dem Profil dient ein 45x45 Winkel, der auf dem Rahmen so befestigt wird, dass

er genau neben dem Profil steht, wenn das Zweiachsensystem senkrecht steht. In der Nut des Profils sind drei Nutensteine eingelegt, von denen zwei zwischen einem unbefestigten Nutenstein mit einem Gewindebolzen fixiert sind. Auf diese Weise wird verhindert, dass der Nutenstein von der Befestigungsstelle verrutscht. Auf dem Bild 34 ist die Schnittdarstellung dieser Befestigung gezeigt.

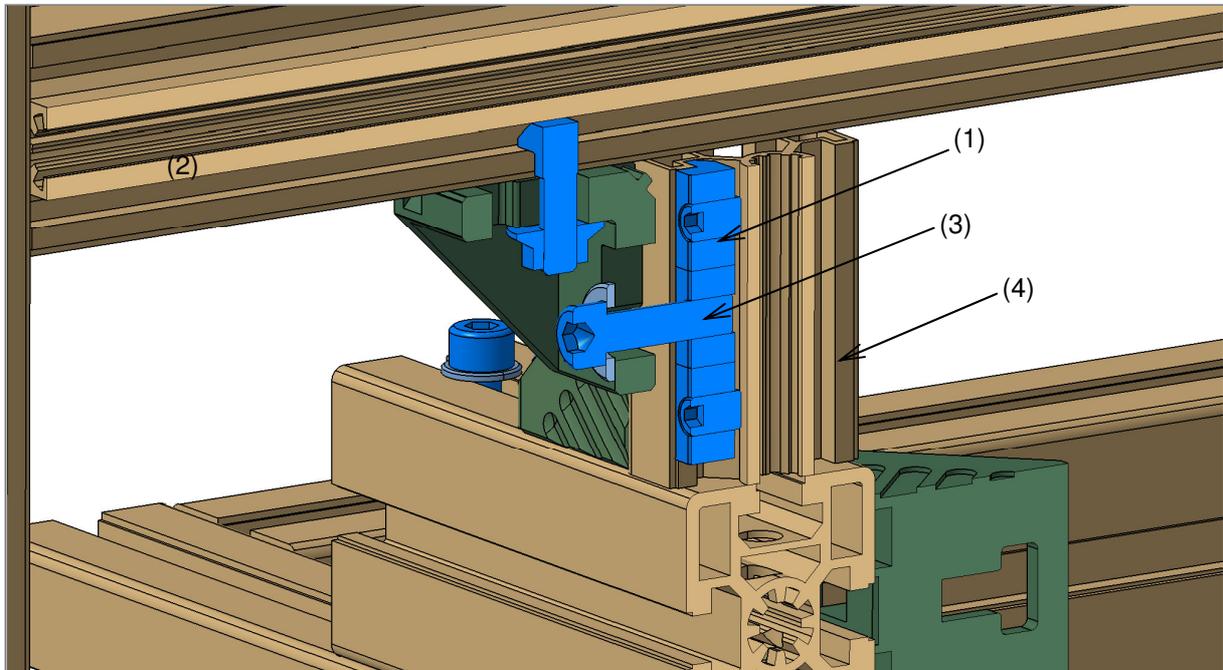


Bild 34: Sicherung des Rahmens gegen Verschiebungen. (1) Nutenstein, (2) Profil des Rahmens (3), Sicherungsschraube, (4) Befestigungsprofil.

Das Zusatzgestell muss in seiner umgeklappten Lage auch gesichert werden. Dafür wird auf dem Rahmen ein 50x50 Winkelset genau gegenüber dem Profil des Zusatzgestells platziert und mit einer Zylinderschraube befestigt. Das Bild 35 zeigt diese Sicherung. Wenn das Zusatzgestell in die waagerechte Position gebracht wird, erhöht sich die Stabilität der Vorrichtung durch zwei zusätzliche Auflagepunkte. Damit die Rollen einen festen Halt mit dem Boden haben muss das Zusatzgestell in dieser Position ausreichend gesichert werden. Für die Sicherung wird eine M16 Schraube und ein Winkelset verwendet. Die Schraube geht durch das Profil an das, mit Hilfe eines Bolzens, das Zusatzgestell drehbar angeschlossen ist und durch das Zusatzgestell selbst. Das Winkelset mit einer M8 Schraube, die in den Nutenstein im Profilmut eingedreht wird, wird an das Hauptgestell angeschraubt. In diesem Fall wird auch der Nutenstein in Profilmut durch zwei seitlich vom ersten der angebrachten Nutensteine in fixierter Lage gehalten. Das Winkelset besteht aus einem 50x50 Winkel, einer M8 Hammerschraube, einer Bundmutter und einer Zylinderschraube mit einer M10 Scheibe. Auf dem Bild 36 ist die Sicherung des Zusatzgestells durch die Schraube und ein Winkelset gezeigt.

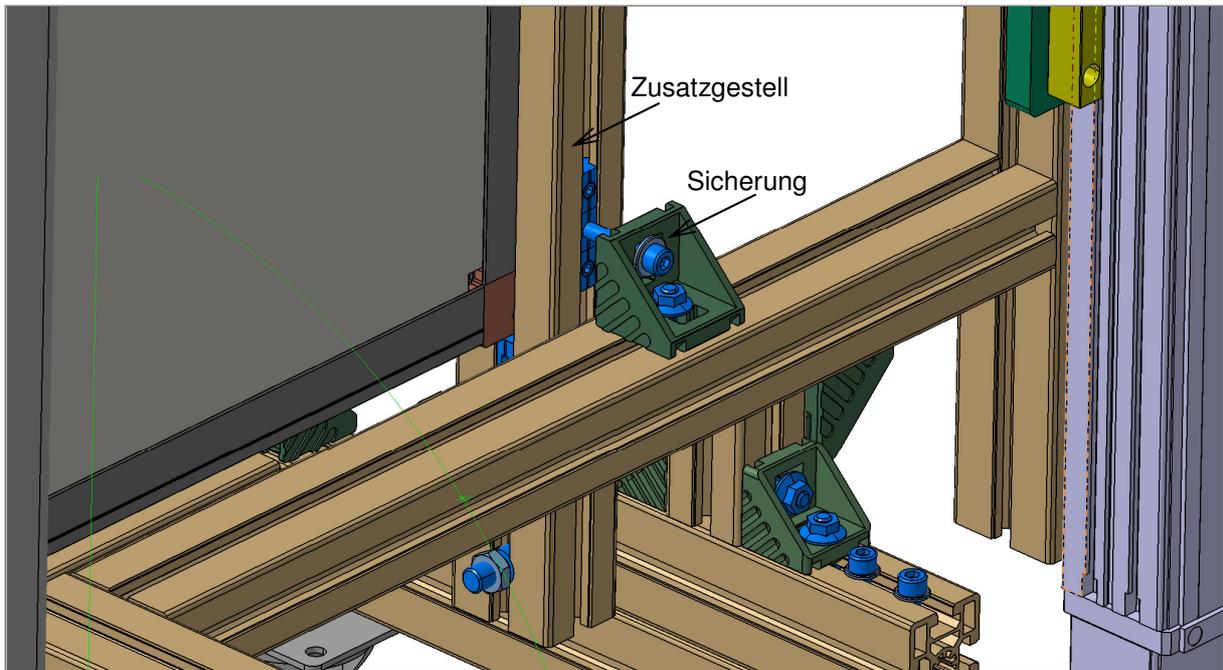


Bild 35: Sicherung des Zusatzgestells in senkrechter Lage

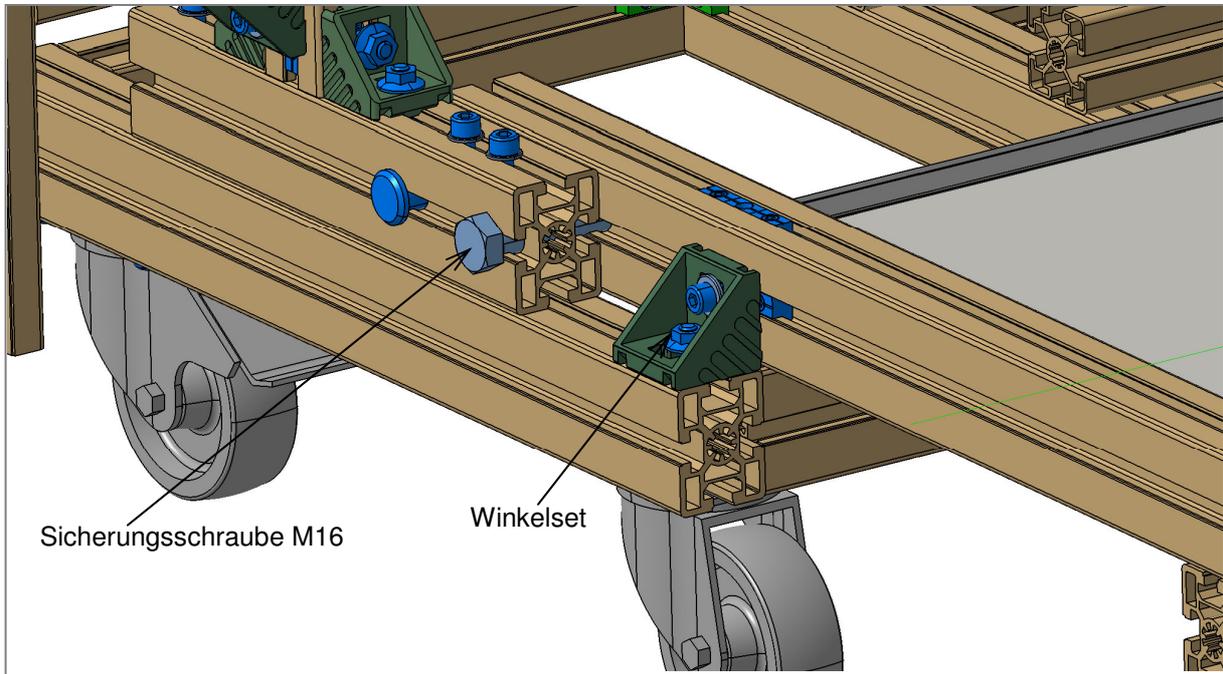


Bild 36: Verschraubung des Zusatzgestells mit dem Hauptgestell

16 Montageanleitung für den Teststand

16.1 Aufbauanleitung für das Gestell

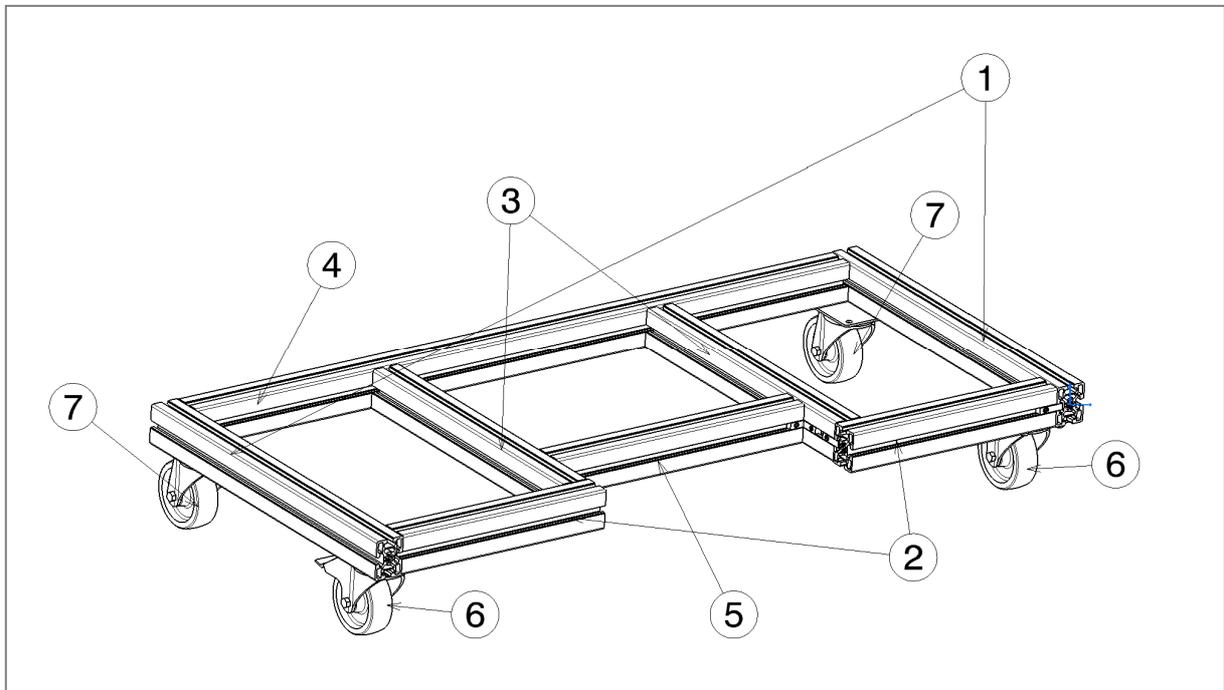


Bild 37: Bauelemente des Gestells. Baugruppe 1

Der Aufbau beginnt mit der Zusammensetzung des unteren Teils des Gestells, der aus acht Profilen besteht, von denen drei doppelt vorkommen. An den Ecken, an den jeweils zwei Profile aufeinander stoßen, werden vier Rollen an die jeweils drei Stellen mit den Profilen verbunden (s. Bild 37). Angefangen wird mit dem Profil 1 (s. Bild 38), in dessen Nut vier Innenwinkel eingeschoben werden. Es werden jeweils zwei unterschiedliche Innenwinkel benötigt, ein Winkel wird (Nummer 9) außen und der zweite (Nummer 10) innen bezüglich des Profils 2 befestigt. Zuerst werden Profile 1 und 4, mit Hilfe von Gewindestiften, (s. Tabelle 1) miteinander verbunden. In die Nut des Profils 4 müssen zwei Nutensteine für die nachfolgende Befestigung des Profils 17 (s. Bild 41) eingelegt werden. Im nächsten Schritt werden zwei Innenwinkel (Nummer 10) in das Profil 3 eingeschoben. Danach werden zwei nach außen ragende Teile der Innenwinkel von Profil 3 in der Nut von Profil 4, wie in einer Führung bewegt. Genauso wird das zweite Profil 3 in die Befestigungsposition gebracht. Des Weiteren werden vier Innenwinkel Nummer 10 zusammen mit zwei Nutensteinen in die Nuten des Profils 5 eingelegt und das Profil zwischen den beiden Profilen 3 eingeschoben. Danach kann das zweite Profil 1 mit dem Profil 4 verbunden werden. Im vorletzten Schritt werden jeweils zwei unterschiedliche Innenwinkel in die beiden Profile 3 eingelegt und nacheinander die beiden Profile 2 in die Befestigungsposition geschoben. Profile werden,

wie auf dem Bild 37 ausgerichtet und danach mit Gewindestiften miteinander verschraubt.
Der Abstand des Profils 5 vom Profil 4 ergibt sich aus der Länge des Profils 3.

Tabelle 1: Einzelteile der Baugruppe 1 des Gestells

Nummer	Bauteil	Länge	Menge
1	Profil 45x60	550	2
2	Profil 45x60	345	2
3	Profil 45x60	460	2
4	Profil 45x60	1110	1
5	Profil 45x60	420	1
6	Rolle mit Feststeller	125	2
7	Lenkrolle	125	2

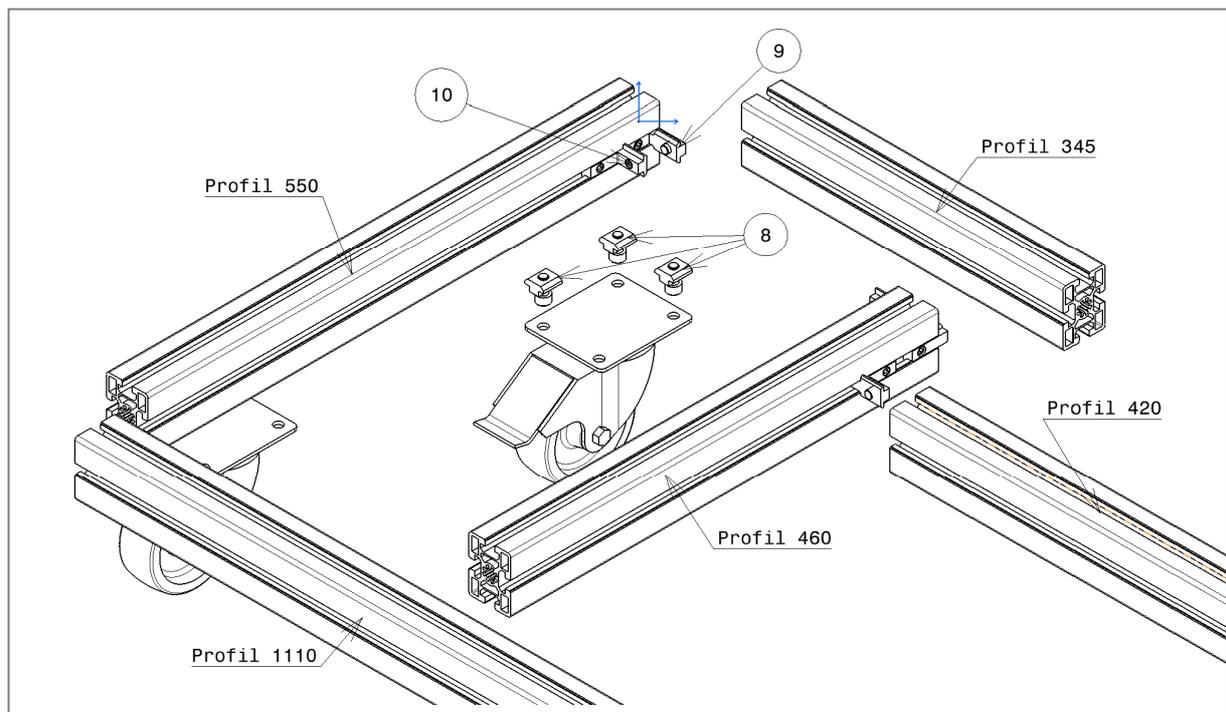


Bild 38: Explosionsdarstellung des Gestells. Baugruppe 1

Tabelle 2: Befestigungselemente für die Baugruppe 1

Nummer	Bauteil	Länge	Einzelteile	Menge
8	Befestigung	-	Nutenstein N10M8	12
		16	Zylinderschraube ISO 4762 M8	12
9	Innenwinkelset	-	Innenwinkel N10 32x38	6
		12	Gewindestift ISO 4026 M8	12
10	Innenwinkelset	-	Innenwinkel-R N10 32x38	14
		12	Gewindestift ISO 4026 M8	28

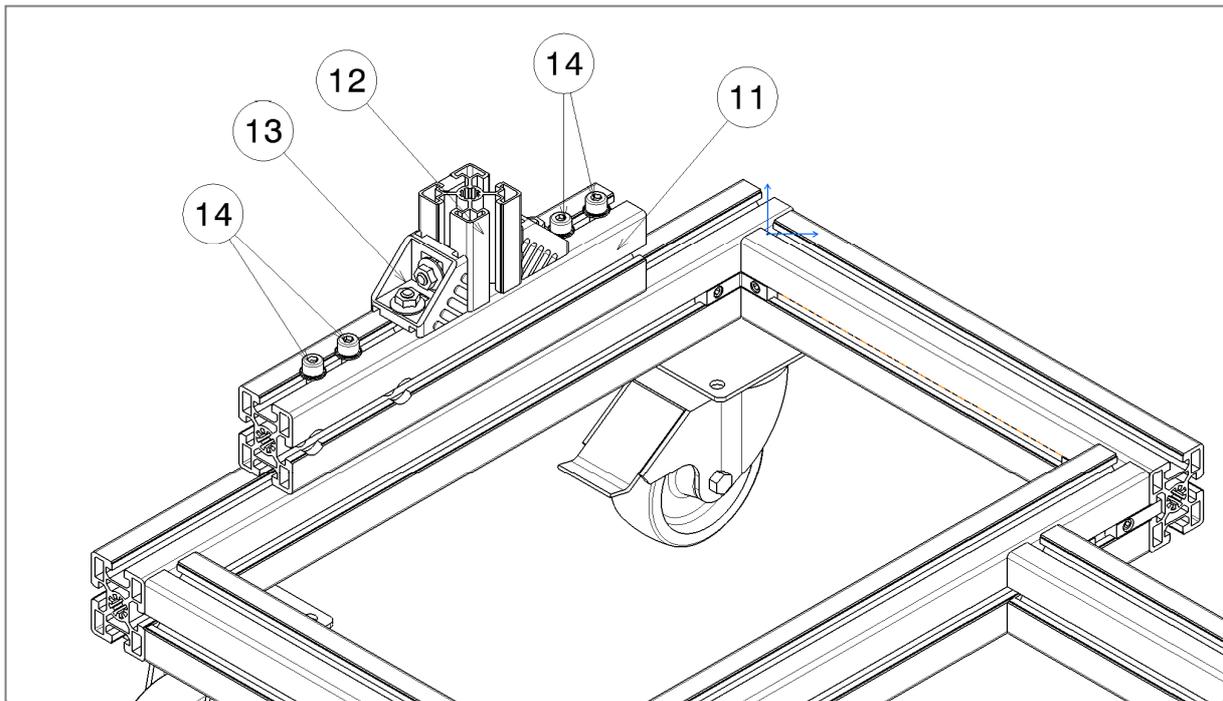


Bild 39: Befestigung des Profils 11. Baugruppe 2 (a)

Das Profil 11 erfüllt in der Konstruktion mehrere Funktionen. Als Erstes dient es als eine Drehlagerung für das Zusatzgestell. Als Zweites dient es als eine Sicherung für das Zusatzgestell und als Drittes dient das auf dem Profil 11 befestigte Profil 12 als eine Sicherung für das Zweiachsensystem. Das Profil 11 wird genau in gleichen Abständen von den beiden Seiten des Profils 1 (s. Bild 39) mit Hilfe von vier Zylinderschrauben und zwei Parallelverbindern (s. Bild 40) befestigt. Das Profil 12 wird auf dem Profil 11 in einem Abstand von 104,5 mm vom Querschnitt entfernt, der in Richtung des Profils 2 zeigt, befestigt. Der Parallelverbinder (Nummer 15) besteht aus zwei Nutensteinen und einem Gewindestift. Ein Nutenstein wird in die Nut des Profils 11 und der andere in die Nut des Profils 1 eingelegt (s. Bild 40). Mit Hilfe von einem Innensechskantschlüssel wird der Gewindestift (s. Tabelle 4) durch eine Bohrung im Profil 11 mit den beiden Nutensteinen verschraubt. Das Profil 12 wird mittels zwei Winkelsets an Profil 1 befestigt. In einer Nut des Profils 12 ist ein Set aus drei Nutensteinen für die Fixierung der Sicherungsbohrung befestigt (Nummer 16). Die Querschnittsfläche des Profils 12 muss mit der Querschnittsfläche des Nutensteins in einer Ebene liegen.

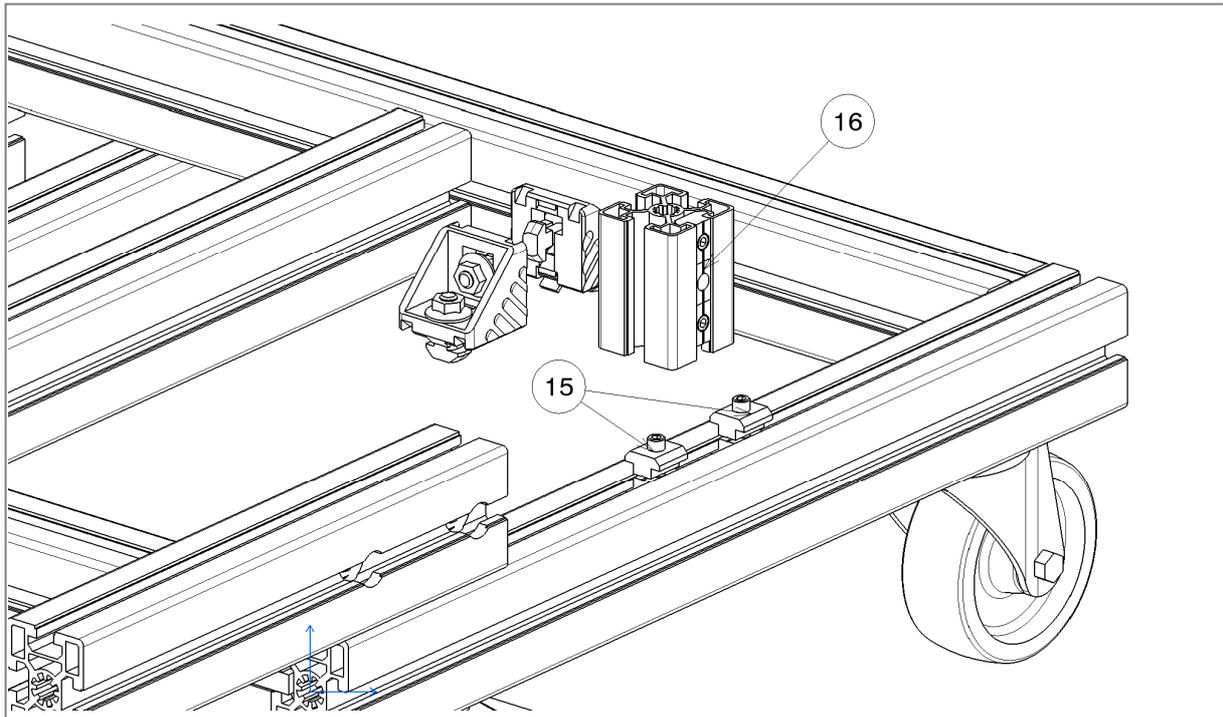


Bild 40: Befestigung des Profils 300. Baugruppe 2 (b)

Tabelle 3: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 2

Nummer	Bauteil	Länge	Einzelteile	Menge
11	Profil 45x60	300	-	2
12	Profil 45x45	70	-	2
13	Winkelset	-	Winkel 45x45	4
		25	Hammerschraube N10M8	8
		-	Bundmutter M8	8
14	Befestigung	70	Zylinderschraube ISO 4762 M8	8
		-	Nutenstein N10 M8	8
		-	Scheibe 7090 M8	8
15	Befestigung	-	Nutenstein N10M8	8
		30	Gewindestift M8	4
16	Fixierung	-	Nutenstein N10M8	6
		12	Gewindestift M8	4

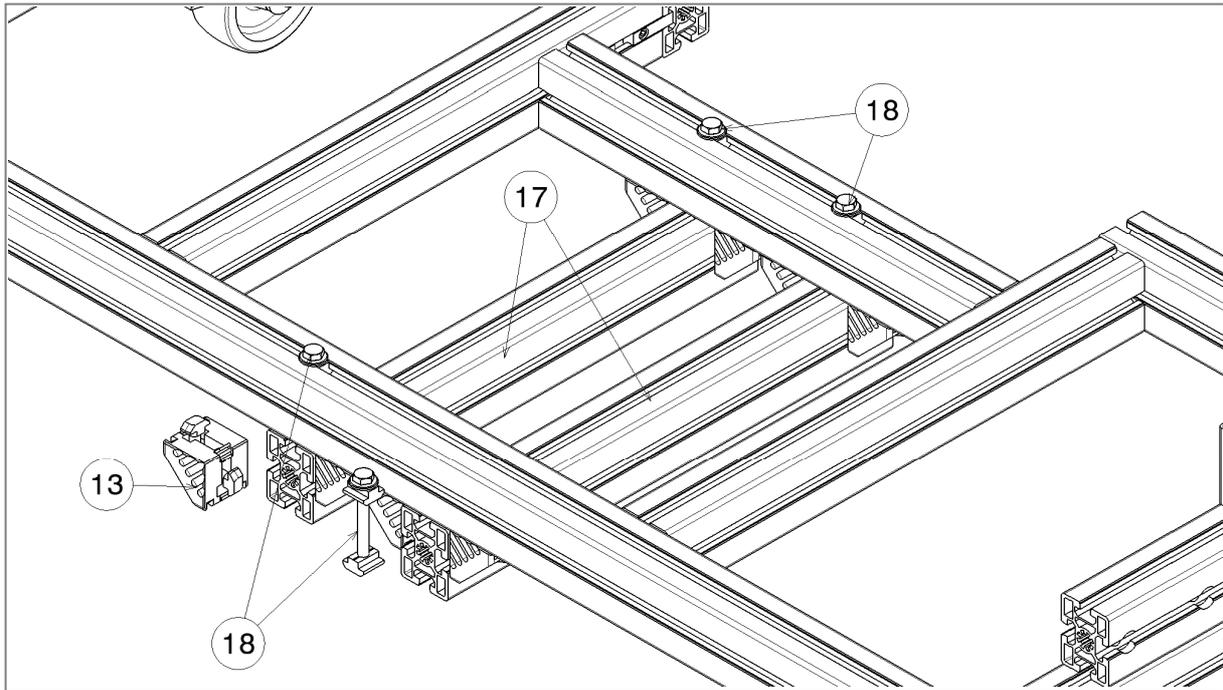


Bild 41: Befestigung von zwei Profilen 460-2 als der Sockel für die Hubsäule. Baugruppe 3

An die beiden Profile 17 wird die Hubsäule mit ihrem Flansch angeschraubt. Die Profile werden durch vier M8 Zylinderschrauben (s. Tabelle 5), die durch das Profil 4 und 5 gehen und 8 Winkelsets befestigt. Die Zylinderschraube wird in zwei Nutensteine eingedreht. Zwei Nutensteine werden jeweils in die Nute der Profile 4 und 5 eingelegt. Zwei Nutensteine werden jeweils in beide Profile 17 eingelegt (s. Bild 41).

Tabelle 4: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 3

Nummer	Bauteil	Länge	Einzelteile	Menge
17	Profil 45x60	460	-	2
13	Winkelset	-	Winkel 45x45	8
		25	Hammerschraube N10M8	16
		-	Bundmutter M8	16
18	Befestigung	75	Sechskantschraube ISO 4014 M8	4
		-	Nutenstein N10 M8	8
		-	Scheibe 7090 M10	4

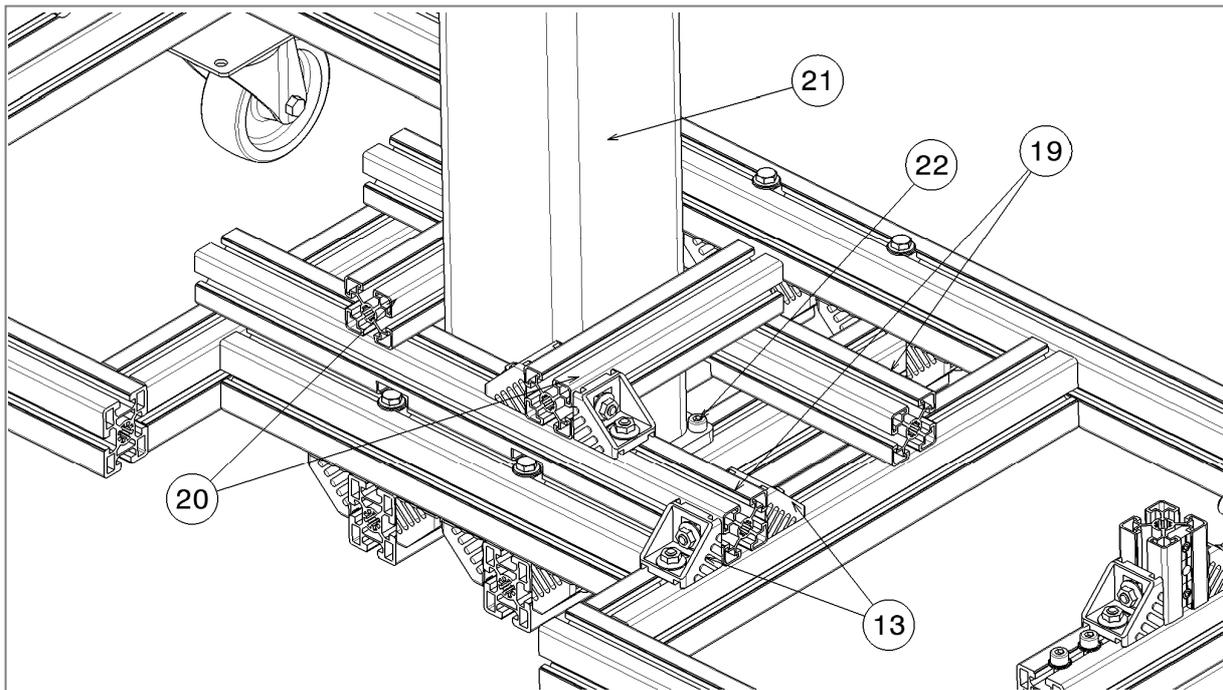


Bild 42: Befestigung von Stabilisierungsprofilen. Baugruppe 4

Vor der Befestigung der Profilen Nummer 19 und 20 (s. Bild 42) muss die Hubsäule auf dem Sockel aus zwei Profilen 17 angebracht werden. Die Hubsäule wird an den Sockel durch vier M8 Zylinderschrauben angeschraubt (s. Tabelle 6). Danach werden zwei Profile 19 an die Hubsäule angelegt und mit vier Winkelsets befestigt. Im letzten Schritt werden zwei Profile 20 auf die beiden Profile 19 quer gelegt, an die Hubsäule angelehnt und mit den Winkelsets befestigt.

Tabelle 5: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 4

Nummer	Bauteil	Länge	Einzelteile	Menge
19	Profil 45x45	510	-	2
20	Profil 45x45	218	-	2
13	Winkelset	-	Winkel 45x45	16
		25	Hammerschraube N10M8	32
		-	Bundmutter M8	32
21	Hubsäule	-	-	1
22	Befestigung	80	Zylinderschraube ISO 4762 M8	4
		-	Sechskantmutter ISO 4032 M8	4
		-	Scheibe ISO 7090 M8	4

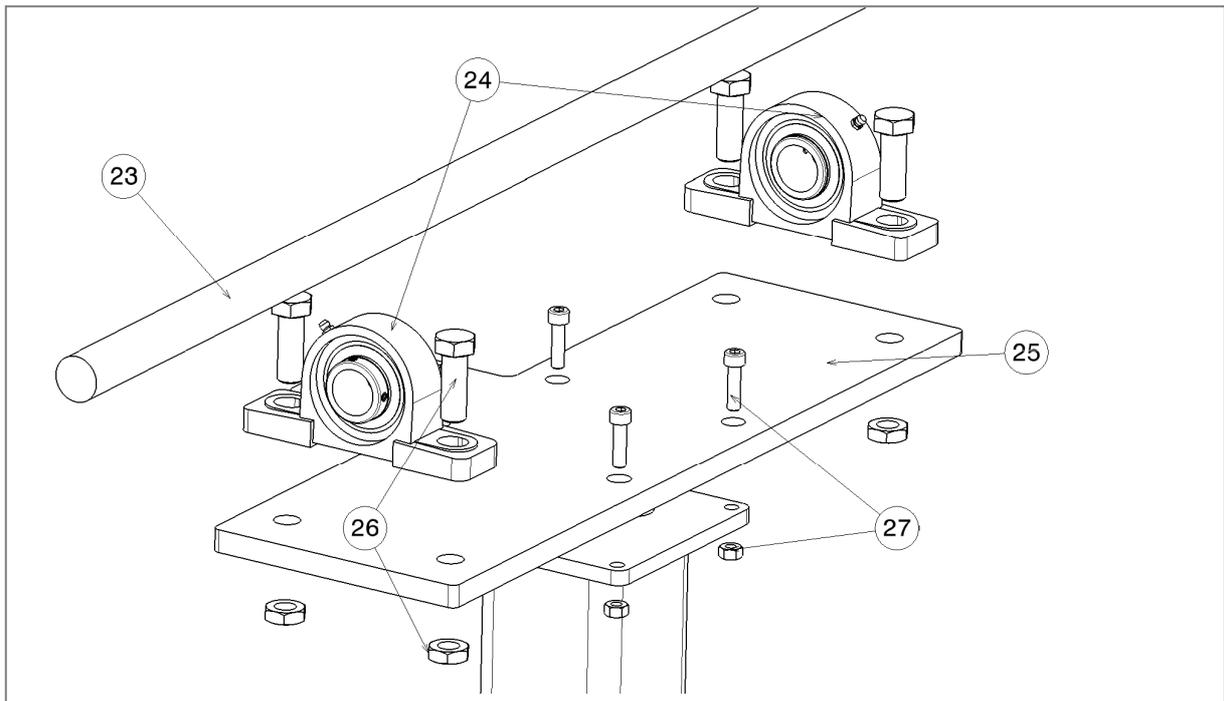


Bild 43: Befestigung der Verbindungsplatte zu der Hubsäule. Baugruppe 5

Die letzte Etappe bei dem Aufbau des Gestells ist die Montage der Verbindungsplatte auf die Hubsäule und die anschließende Anbringung von zwei Gehäuselagern für die Lagerung der Aufhängungsachse. Die Verbindungsplatte wird mit vier Zylinderschrauben (s. Tabelle 7) an den Flansch der Hubsäule angeschraubt. Danach muss die Achse durch die zwei Gehäuselager geschoben werden. Der Abstand von der äußeren Fläche des Kugellagers bis zum Achsenquerschnitt beträgt 552,8 mm. Die Gehäuselager mit der Achse werden anschließend durch M16 Schrauben (s. Tabelle 7) auf der Verbindungsplatte befestigt. Um das Gestell mit dem Zweiachsensystem zu verbinden wird eine Hilfsvorrichtung benötigt (s. Bild 45), die als eine Art Montagetisch dient. Da der Rahmen, durch den die Achse geht, konstruktionsbedingt schmaler ist als die Achse, ist der Aufbau des Rahmens nur auf der Hilfsvorrichtung möglich.

Tabelle 6: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 5

Nummer	Bauteil	Länge	Einzelteile	Menge
23	Achse	1650		1
24	Gehäuselager	-	-	2
25	Verbindungsplatte	-	-	1
26	Befestigung	45	Sechskantschraube ISO 4017 M16	4
		-	Sechskantmutter ISO 4035 M16	4
27	Befestigung	30	Zylinderschraube ISO 4762 M8	4
		-	Sechskantmutter ISO 4032 M8	4

16.2 Aufbau des Zusatzgestells

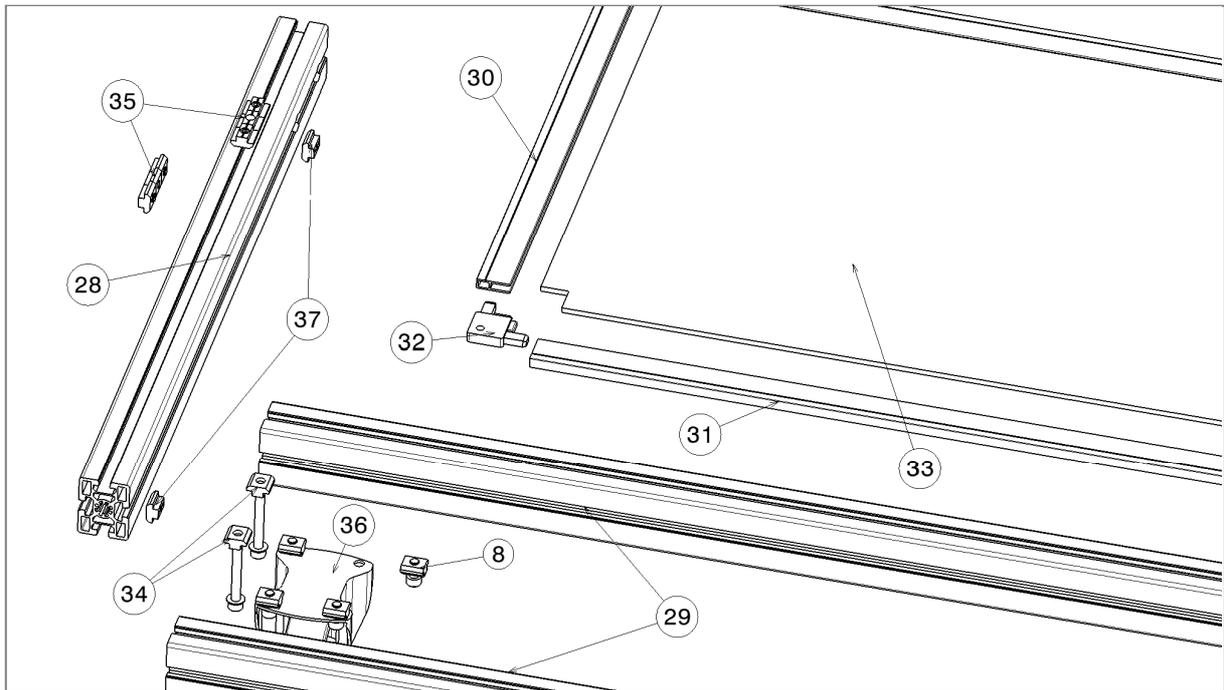


Bild 44: Explosionsdarstellung des Zusatzgestells. Baugruppe 6

Bei dem Zusatzgestell wird zuerst die Abstellplatte zusammengebaut (Nummer 30-33 s. Bild44). Diese Platte wird in die Nut des Profils 28 geschoben und mit zwei Befestigungen 37 gesichert. In das Profil 28 werden zwei Fixierungen 35 eingesteckt. Dabei muss eine Fixierung in die obere Nut in einem Abstand von 173,9 mm und die andere in die seitliche Nut in einem Abstand von 196mm von der Querschnittsfläche befestigt werden. Danach muss die Bockrolle in einem ausreichenden Abstand von den Bohrungen für Befestigung 34 an die beiden Profile 29 angeschraubt werden. Weiterhin werden die Zylinderschrauben der Befestigung 34 in die entsprechenden Bohrungen auf den Profilen 29 geschoben und oben nicht fest mit dem Nutenstein verschraubt. Schließlich werden beide Profile 28 mit fixierter Abstellplatte auf die Nutensteine der Befestigung 34 durch Schieben aufgesetzt.

Tabelle 7: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 6

Nummer	Bauteil	Länge	Einzelteile	Menge
28	Profil 45x60	700	-	2
29	Profil 45x60	1195	-	2
30	Schutzprofil	461	-	2
31	Schutzprofil	976	-	2
32	Eckstück	-	-	4
33	Platte	495x1010	-	1
34	Befestigung	70	Zylinderschraube ISO 4762 M8	4
		-	Nutenstein M8	4
		-	Scheibe ISO 7090 M8	4
35	Fixierung	-	Nutenstein M8	12

		12	Gewindestift M8	8
36	Bockrolle	-	-	2
37	Befestigung	-	Nutenstein M8	4
		16	Zylinderschraube ISO 4762 M8	4

16.3 Aufbauanleitung für das Zweiachsensystem

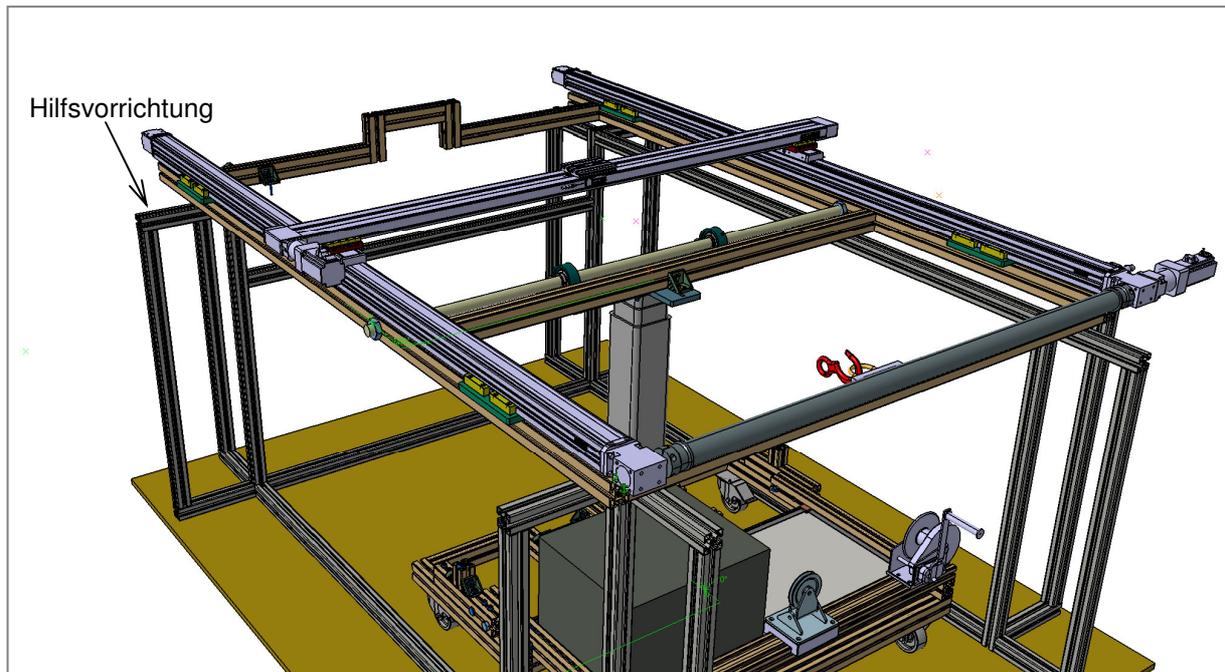


Bild 45: Hilfsvorrichtung zur Montage von Zweiachsensystem

Die Hilfsvorrichtung wird zur Erleichterung des Aufbaus des Zweiachsensystems entworfen. Der Rahmen mit den Linearmodulen ist an einer Achse aufgehängt. Deshalb muss während des Aufbaus die Achse so platziert werden, dass die Mittellinie der Achse und der entsprechenden Bohrung auf dem Rahmen zusammenfallen. Die Übereinstimmung der Mittellinien wird durch das Probieren bei gleichzeitiger Bewegung der Hubsäule und des Profils erreicht. Dank der Hilfsvorrichtung liegen die Profile, aus denen der Rahmen aufgebaut ist, auf einer Ebene und können leichter justiert werden. Die Hilfsvorrichtung ist 1045 mm hoch. Das ermöglicht dem Techniker bequem über dem Teststand zu arbeiten. Nach der Fertigstellung des Gestells wird es mittig in die Hilfseinrichtung eingefahren und die Rahmenprofile auf die Halterungen der Hilfseinrichtung aufgelegt. Der Aufbau beginnt mit einem der beiden Profile mit der Bohrung für die Achse und endet mit dem anderen Profil. Nach der Beendigung der Montage wird das in der waagerechten Position liegende Zweiachsensystem mit der Verbindungsplatte verschraubt und die Hubsäule 600 mm nach

oben verfahren. Zum Schluss wird der Teststand aus der Hilfsvorrichtung ausgefahren, die Sicherung gelöst und das Zweiachsensystem per Seilwinde in senkrechte Position gebracht.

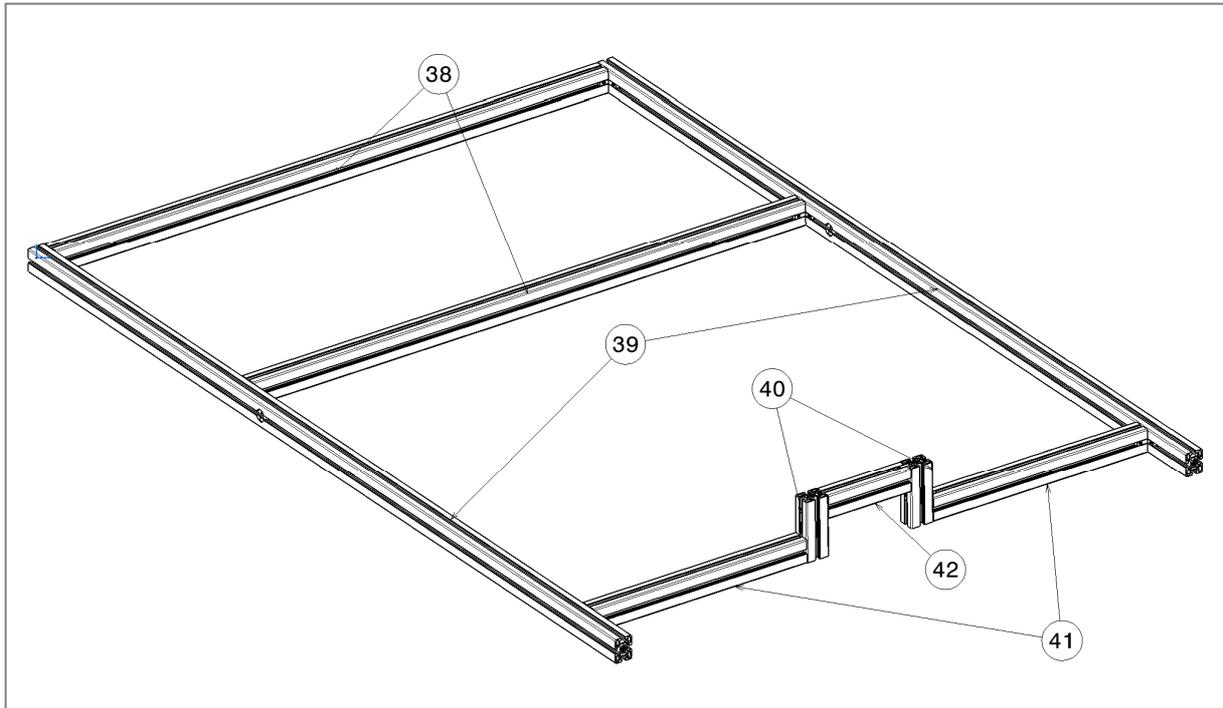


Bild 46: Rahmen für Befestigung der Linearmodule. Baugruppe 7

Der Rahmen (s. Bild 46) wird auf der Hilfsvorrichtung aufgebaut. Die Profile 40 (s. Tabelle 9), 41 und 42 werden zuerst zu einer Strebe verschraubt und dann mit den Profilen 38 und 39 auf der Hilfsvorrichtung entsprechend dem Bild 47 ausgelegt. Eins der beiden Profile 39 wird mit Innenwinkeln, zur Befestigung anderer Profile, versehen. Der Abstand zwischen den Profilen 38 beträgt 741,5 mm. Der Abstand der Strebe von dem Profilquerschnitt beträgt 150 mm. Auf die Achse wird von einem Ende die M30 Mutter eingedreht. Dann wird das Profil 39, wenn die Mittellinie von der Achse und der Bohrung übereinstimmen, so lange geschoben, bis das Ende der Achse einen Abstand von 27,5 mm von dem Profil 39 beträgt. Danach wird die zweite M30 Mutter eingedreht und gegen die erste gekontert. Danach werden die beiden Profile 38 und die Strebe so verschoben, dass die Innenwinkel in die jeweiligen Nuten der Profile passen. Die andere Seite des Rahmens wird in ähnlicher Weise montiert. Nachdem der Rahmen aufgebaut ist, werden die vier Verbindungsplatten für die Befestigung der beiden Linearmodule MKR-065 (s. Bild 48) auf den Profilen 39 montiert. Eine Platte, die näher zur Motorseite ist, befindet sich 300mm von der Fläche am Ende des Profils entfernt.

Tabelle 8: Einzelteile der Baugruppe 7 des Rahmens

Nummer	Bauteil	Länge	Menge
38	Profil 45x60	1505	2
39	Profil 45x60	2340	2
40	Profil 45x60	154	2

41	Profil 45x60	580	2
42	Profil 45x60	225	1

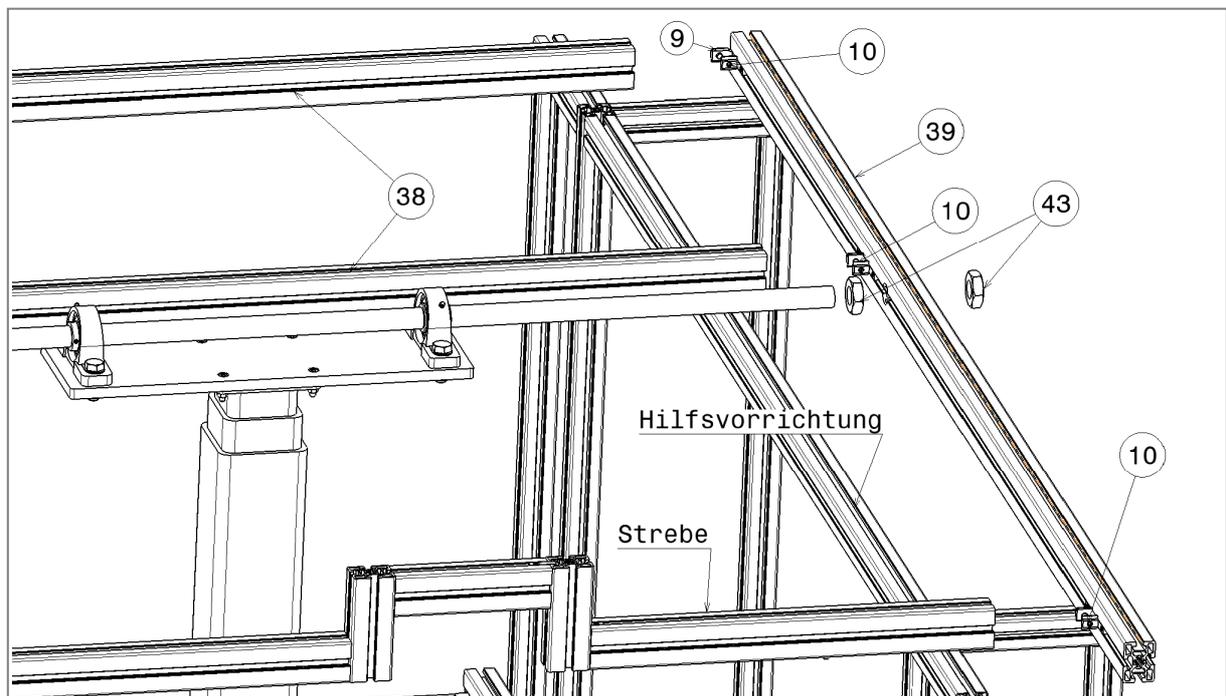


Bild 47: Vorgehensweise bei der Montage des Rahmens auf der Hilfsvorrichtung. Baugruppe 8

Die andere Platte wird in einem Abstand von 245 mm vom gegenüberliegenden Profilquerschnitt angebracht. Die Platten werden mit Hilfe der Verbindung 45 zum Profil befestigt. Danach werden auf die Platten die Linearmodule MKR-065 gelegt und mittels der Spanstücke, die mit einer herausragenden Kante mit der seitlichen Nut des Linearmoduls gekoppelt werden. Mit der Befestigung 46 (s. Tabelle 10) werden die Spannstücke gegen die Verbindungsplatte gespannt.

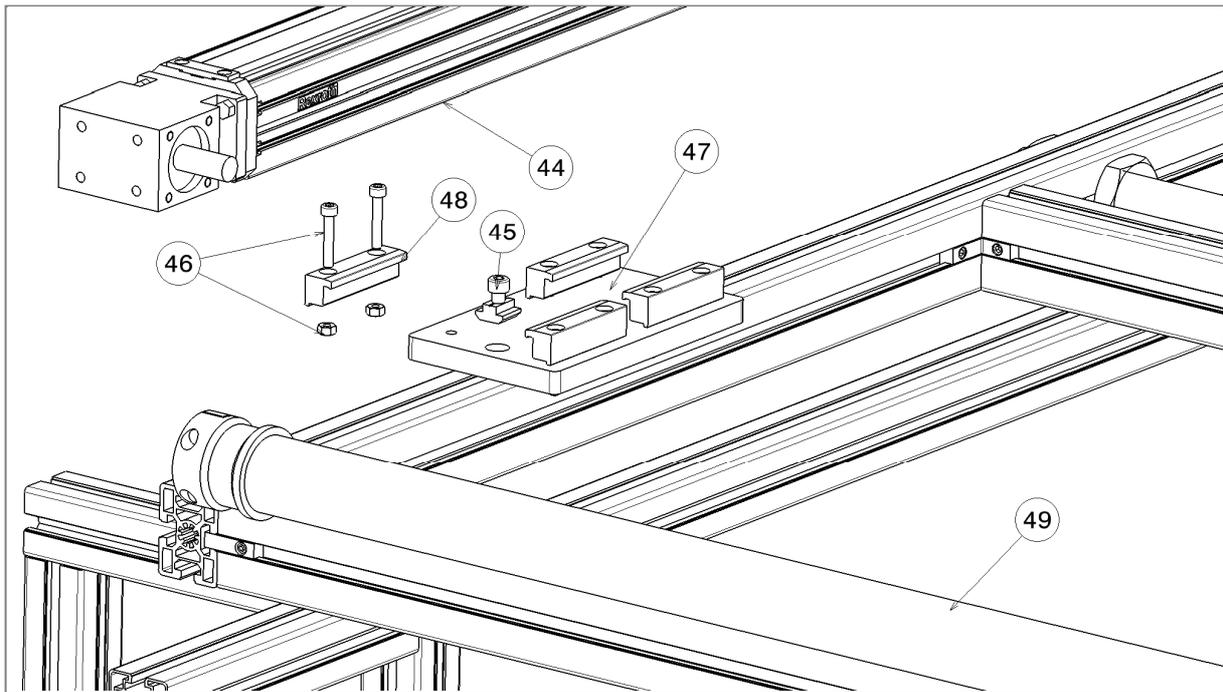


Bild 48: Verbindung des Linearmoduls MKR-060 mit der Verbindungsplatte. Baugruppe 8

Tabelle 9: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 8

Nummer	Bauteil	Länge	Einzelteile	Menge
43	Kontermutter	-	Sechskantmutter ISO 4035 M30	2
44	MKR-065	2524	-	1
45	Befestigung	16	Zylinderschraube ISO 4762 M8	16
		-	Nutenstein M8	16
46	Befestigung	35	Zylinderschraube ISO 4762 M6	32
		-	Sechskantmutter ISO 4032 M6	32
47	Platte	116x196	-	4
48	Spannstück	78	-	16
49	Synchronwelle	1445	-	1

Die Synchronwelle wird an den Zapfen für den Motor 49 (s. Bild 48) angeschlossen und anschließend das zweite Linearmodul mit dem Rahmen und mit der Synchronwelle verbunden.

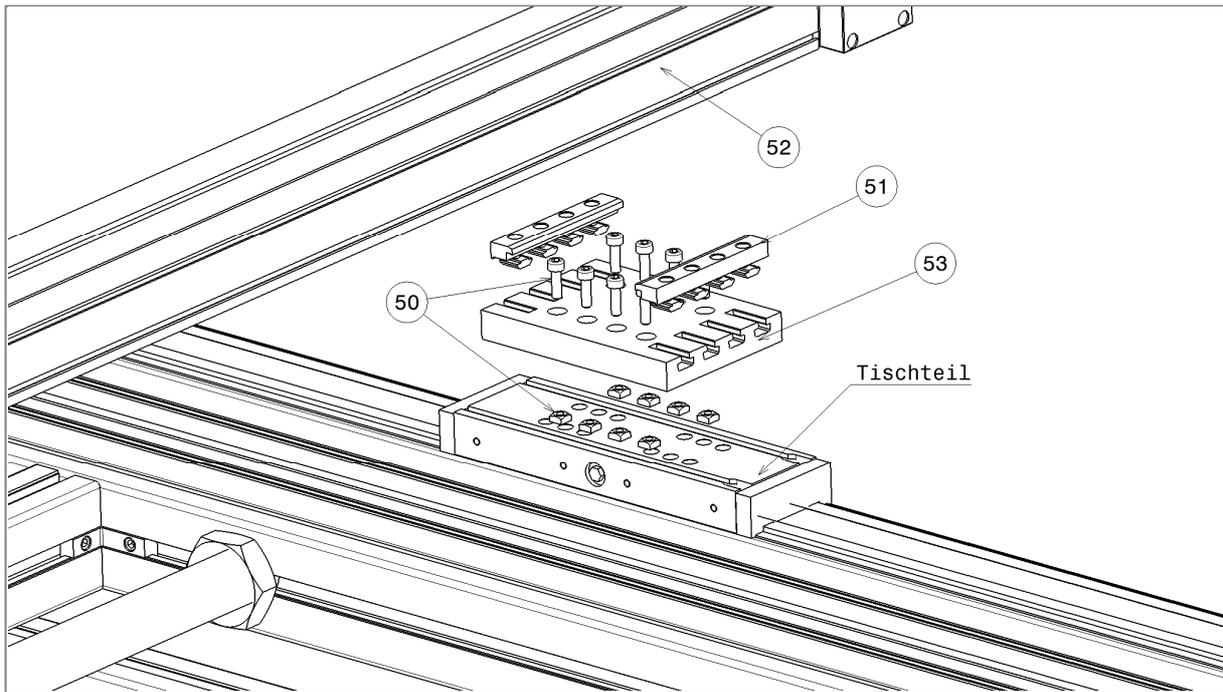


Bild 49: Verbindung des Linearmoduls CKR-090 mit dem Tischteil. Baugruppe 9

Wenn die Linearmodule MKR-060 mit dem Rahmen verbunden sind, wird das Modul CKR-090 mit dem Lauftisch verbunden (s. Bild 49). Dafür werden zuerst acht Vierkantmutter in die beiden Nuten des Tischteils (s. Tabelle 11) eingelegt. Auf den Lauftisch wird mittig die Verbindungsplatte 53 aufgelegt und mit den Zylinderschrauben befestigt. Die Nutensteine aus dem Befestigungsset 51 werden in die Nuten auf den beiden Seiten der Platte geschoben und dann das Linearmodul CKR-090 auf die Verbindungsplatte gelegt. Der Abstand zwischen der Kante des Linearmoduls und der Kante der Platte muss dabei 140mm betragen. Im letzten Montageschritt wird das Linearmodul mit Hilfe von zwei Spannstücken und acht M4 Schrauben mit dem übrigen Zweiachsensystem verbunden.

Tabelle 10: Befestigungselemente und Teile der Baugruppe 9

Nummer	Bauteil	Länge	Einzelteile	Menge
50	Befestigung	16	Zylinderschraube ISO 4762 M5	16
		-	Vierkantmutter DIN 557	16
51	Befestigungsset	87	Spannstück	4
		12	Zylinderschraube ISO 4762 M4	16
		12	Nutenstein M4	16
52	CKR-090	1858,5	-	1
53	Platte	90x125	-	2

Tabelle 11: Verbindungs- und Sicherungselemente

Nummer	Bauteil	Länge	Einzelteile	Menge
Verbindung zwischen dem Gestell und Zusatzgestell s. Bild 36				
54	Befestigung	110	Sechskantschraube ISO 4014 M16	2
		-	Sechskantmutter ISO 4035 M16	2
55	Angel	110	Bolzen DIN 1445 D16 M12	2
		-	Sechskantmutter ISO 4035 M12	2
56	Sicherung	-	Winkel 50x50	2
		25	Hammerschraube N10M8	2
		-	Bundmutter M8	2
		-	Nutenstein M8	2
		25	Zylinderschraube ISO 4762 M8	2
		-	Scheibe ISO 7079 M10	2
Sicherung des Zweiachsensystems in senkrechter Position s. Bild 34				
57	Sicherung	-	Winkel 50x50	2
		25	Hammerschraube N10M8	2
		30	Zylinderschraube ISO 4762 M8	2
		-	Bundmutter M8	2
		-	Scheibe ISO 7079 M10	2
Sicherung des Zusatzgestells in senkrechter Position s. Bild 35				
58	Sicherung	-	Winkel 50x50	1
		25	Hammerschraube N10M8	1
		50	Zylinderschraube ISO 4762 M8	1
		-	Bundmutter M8	1
		-	Scheibe ISO 7079 M10	1
Öse für den Haken s. Bild 32				
59	Öse	30	Zylinderschraube ISO 4762 M8	2
		-	Sechskantmutter ISO 4035 M8	4
		-	Nutenstein M8	2
		30x40x150	Adapterplatte	1
		H92/B62	Rundstahlbügel DIN 3570	1
Befestigungselemente und Teile der Hebeeinrichtung s. Bild 31				
60	Hebeeinrichtung	1105	Profil 40x80	1
		50	Zylinderschraube ISO 4762 M8	8
		25	Zylinderschraube ISO 4762 M8	4
		-	Sechskantmutter ISO 4035 M8	4
		16	Zylinderschraube ISO 4762 M8	4
		-	Scheibe ISO 7079 M10	4
		-	Seilwinde	1
		-	Umlenkrolle	1
-	Nutenstein M8	12		

17 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden die erzielten Ergebnisse, die nicht realisierten Anforderungen und die mögliche Weiterentwicklung des im Rahmen dieser Masterarbeit konstruierten Teststandes diskutiert. Die im Lastenheft (Anhang D S.77) formulierten Anforderungen an die Messvorrichtung wurden weitestgehend konstruktiv umgesetzt. Die Hauptfunktionen des Messstandes, wie das Anfahren des Sensors von dem Spektrometer auf die genau definierten Punkte, die Drehung des Zweiachsensystems um 90° und die anschließende Absenkung auf den Prüftisch für die Messung in der Flasheranlage sowie die Kompaktheit der Abmessungen für die Messung in der Klimakammer wurden erfolgreich realisiert. Die Sicherheit bei der Bedienung des Teststandes wurde durch mehrere Sicherheitselemente gewährleistet. Wegen des hohen Gewichts des Zweiachsensystems wurde eine an das Gestell anschraubbare Hebevorrichtung entwickelt. Für das Spektrometer wurde ein aufklappbares Zusatzgestell mit Abstellplatte entworfen, damit es nicht zu allen Messungen mitgetragen werden muss. Bei der Prüfbaugruppe Teststand und Rampe ist es schwer, die Wirkung der Kräfte auf die Rollen und die Hubsäule bei geneigter Stellung einzuschätzen. Deswegen empfiehlt es sich die Verwendung eines Hubwagens, um den Teststand in die Klimakammer zu platzieren. Die geforderte Bedingung, dass der Teststand bei drei unterschiedlichen Prüfanlagen für PV-Module eingesetzt werden muss, schränkt die konstruktiven Möglichkeiten sehr stark ein. Der Teststand wäre viel genauer an die Besonderheiten der jeweiligen Anlage angepasst, wenn für jede Anlage eine entsprechende Testvorrichtung konstruiert wäre. Die Konstruktion von gesonderten Testvorrichtungen für jede einzelne Belichtungseinheit würde jedoch mehr Kosten verursachen. Eine nicht bis zum Ende realisierte Anforderung, ist das Problem der Hin- und Rückführung des Glasfaserkabels bei der Bewegung des Sensorkopfes. Das Problem wurde nicht komplett gelöst und bleibt nur als Ansatzlösung für eine weitere Vervollständigung der Konstruktion. In dieser Hinsicht besteht noch ein weiterer Entwicklungsbedarf des Rückführungsmechanismus für Glasfaserkabel.

Quellen-und Literaturverzeichnis

/1/ <http://www.csp.fraunhofer.de/>. (kein Datum). Abgerufen am 01. 01 .2016 von <http://www.csp.fraunhofer.de/profil/>

/2/ www.vde-verlag.de. (kein Datum). Abgerufen am 23. 11. 2015 von <https://www.vde-verlag.de/normen/0126004/din-en-61215-vde-0126-31-2006-02.html>

/3/ Bosch Rexroth. (2003). *Katalog Linearmodule*. Deutschland.

/4/ www.rk-rose-krieger.com. (kein Datum). Abgerufen am 04. 12. 2015 von <http://www.rk-rose-krieger.com/deutsch/produkte/linear-technik/produkt-kenner/hubsaeulen/>

/5/Holzmann, M. S. (2014). *Technische Mechanik*. Magdeburg: Springer Vieweg.

Anhang A: Analytische Berechnung der relevanten mechanischen Größen

A1: Analytische Berechnung der Durchbiegung und der Biegespannung der Aufhängungsachse.

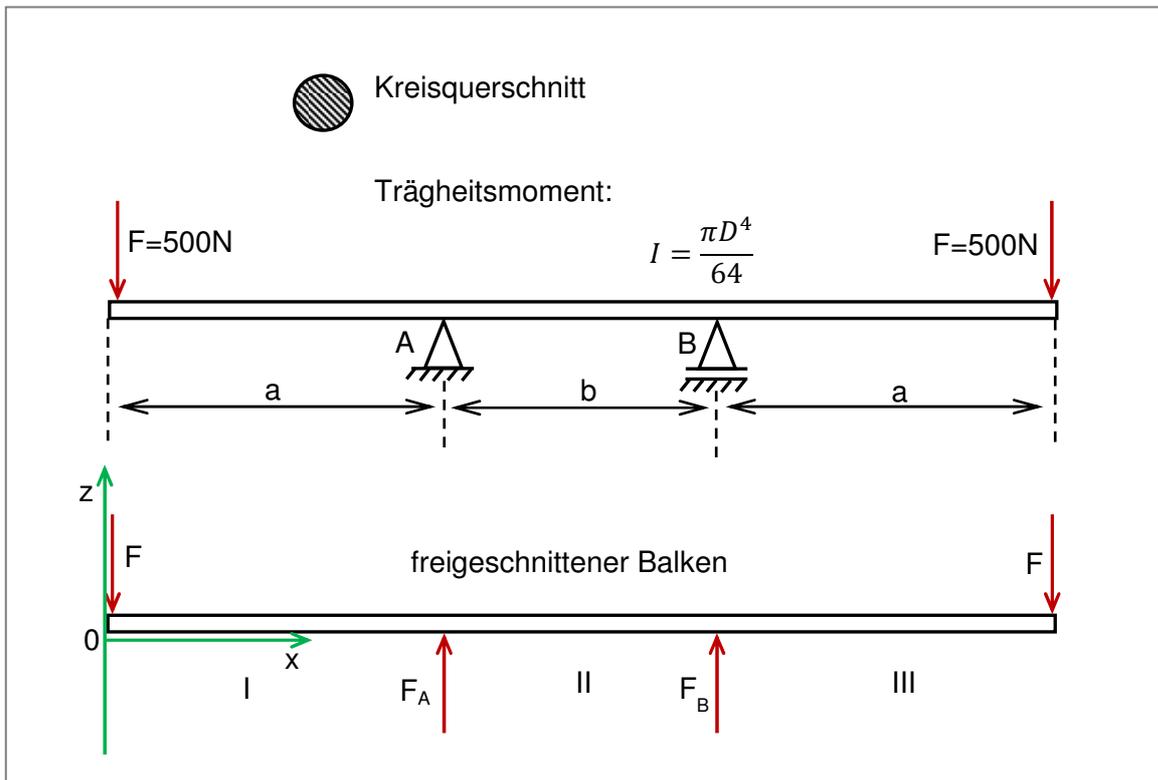


Bild 50: Skizze zur Berechnung der maximalen Durchbiegung und der Biegespannung

Berechnung der Lagerkräfte des freigeschnittenen Systems (s. Bild 50):

Kräftegleichgewicht: $F_A + F_B = 2F$

Gleichgewicht der Momente: $F_A \cdot a + F_B \cdot (a + b) - F \cdot (2a + b) = 0$

Daraus ergeben sich die Lagerkräfte zu $F_A = F_B = F$

Berechnung der Momentenverläufe in den Bereichen I, II und III

Bereich I: $0 < x < a$

$$M_1(x) + Fx = 0 \Rightarrow M_1(x) = -Fx$$

Bereich II: $a < x < a+b$

$$M_2(x) + Fx - F_A(x - a) = 0$$

$$M_2(x) = F(x - a) - Fx = Fa$$

Bereich: III $a+b < x < 2a+b$

$$M_3(x) + F(2a + b - x) = 0 \quad \Rightarrow \quad M_3(x) = -F(2a + b - x)$$

Berechnung der Gleichung der Biegelinie und der Momente:

Differentialgleichung der Biegelinie:

$$w''(x) = -\frac{M(x)}{EI}$$

Einsetzen des von der x-Richtung abhängigen Momentes des ersten Bereiches in die Differentialgleichung und zweimalige Integration liefert:

$$w_1''(x) = \frac{Fx}{EI}$$

$$w_1'(x) = \frac{Fx^2}{2EI} + C_{11}$$

$$w_1(x) = \frac{Fx^3}{6EI} + C_{11}x + C_{21}$$

Im Bereich zwei ergibt sich folgende Gleichung der Biegelinie:

$$w_2''(x) = \frac{Fa}{EI}$$

$$w_2'(x) = \frac{Fax}{EI} + C_{12}$$

$$w_2(x) = \frac{Fax^2}{2EI} + C_{12}x + C_{22}$$

Die Biegelinie des dritten Bereichs sieht folgendermaßen aus:

$$w_3''(x) = \frac{F(2a + b - x)}{EI} = \frac{F(2a + b)}{EI} - \frac{Fx}{EI}$$

$$w_3'(x) = \frac{F(2a + b)x}{EI} - \frac{Fx^2}{2EI} + C_{13}$$

$$w_3(x) = \frac{F(2a + b)x^2}{2EI} - \frac{Fx^3}{6EI} + C_{13}x + C_{23}$$

Um die sechs Integrationskonstanten zu bestimmen werden Randbedingungen benötigt. Es gibt sieben Randbedingungen, die erfüllt werden müssen um die gesuchte Biegelinie zu bestimmen:

$$\begin{aligned}
w_1(x = a) &= 0 & w_2(x = a + b) &= 0 \\
w_2(x = a) &= 0 & w_3(x = a + b) &= 0 \\
w_1'(x = a) &= w_2'(x = a) & w_2'(x = a + b) &= w_3'(x = a + b) \\
w_2'\left(x = a + \frac{b}{2}\right) &= 0
\end{aligned}$$

Die Integrationskonstanten wurden mit Hilfe des Programms Wolfram Mathematica ausgerechnet.

$$\begin{aligned}
C_{11} &= -\frac{a^2F + abF}{2EI} & C_{21} &= \frac{2a^3F + 3a^2bF}{6EI} \\
C_{12} &= -\frac{a(2a + b)F}{2EI} & C_{22} &= \frac{a^3F + a^2bF}{2EI} \\
C_{13} &= -\frac{F(3a^2 + 3ab + b^2)}{2EI} & C_{23} &= \frac{F(a + b)(4a^2 + 2ab + b^2)}{6EI}
\end{aligned}$$

Die größte Durchbiegung ergibt sich an den Enden des Biegebalkens in Bereichen I und III jeweils bei $x=0$ und $x=2a+b$. Einsetzen der Null in die Gleichung der Biegelinie des ersten Bereiches ergibt:

$$w_{max} = C_{21} = \frac{2a^3F + 3a^2bF}{6EI}$$

Die größte Biegespannung ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$\sigma(z) = \frac{M(x)}{I} z$$

Wo z ist der Abstand von der neutralen Faser des Balkenquerschnitts. Die größte Spannung tritt im äußeren Bereich des Querschnitts, der bei dem kreisförmigen Querschnitt im Abstand eines halben Durchmessers von Zentrum liegt.

$$z = \frac{D}{2} \quad I = \frac{\pi D^4}{64} \quad \sigma(z)_{max} = \frac{32M(x)}{\pi D^3}$$

A2: Darstellung der Biegelinie und Berechnung der maximalen Durchbiegung sowie maximalen Spannung im Programm Wolfram Mathematica

Um zu testen wie sich die Biegespannung und die Durchbiegung der Welle in Abhängigkeit von dem Abstand zwischen den Lagern A und B ändert, wurde in Mathematica untenstehender Quellcode erstellt. Bei einem Wert von $b=200$ und $D=30\text{mm}$ ergaben sich für die Durchbiegung und Spannung jeweils $w = -10,7\text{mm}$ und $\sigma = -136,7\text{N/mm}^2$. Die entsprechende Biegelinie ist auf dem Bild 51 gezeigt.

```

E1 = 210 000 ;
F = -500;
De = 30;
L = 1650;
b = 200;
a =  $\frac{L - b}{2}$ ;
z =  $\frac{De}{2}$ ;
J =  $\frac{\pi De^4}{64}$  // N;
Wmax =  $\frac{2 a^3 F + 3 a^2 b F}{6 E1 J}$ ;
Mlmax = F a;
σ =  $\frac{Mlmax z}{J}$ ;
Print["Trägheitsmoment=", J]
Print["Durchbiegung=", Wmax]
Print["Biegemoment=", Mlmax]
Print["Biegespannung=", σ, "  $\frac{\text{Newton}}{\text{mm}^2}$  "]

```

```

W1 = Plot[ $\frac{F}{E1 J} * \frac{x^3}{6} - \frac{a^2 F + a b F}{2 E1 J} * x + \frac{2 a^3 F + 3 a^2 b F}{6 E1 J}$ , {x, 0, a}, Axes → True,
  AspectRatio → 0.3, PlotRange → {{1650, 0}, {5, -15}},
  PlotStyle → {Thickness[0.003], RGBColor[0.8, 0, 0]}];
W2 = Plot[ $\frac{F a}{E1 J} * \frac{x^2}{2} - \frac{a (2 a + b) F}{2 E1 J} * x + \frac{a^3 F + a^2 b F}{2 E1 J}$ , {x, a, a + b}, Axes → True,
  AspectRatio → 0.3, PlotRange → {{1650, 0}, {5, -15}},
  PlotStyle → {Thickness[0.003], RGBColor[0.8, 0, 0]}];
W3 = Plot[ $\frac{F (2 a + b)}{E1 J} * \frac{x^2}{2} - \frac{F x^3}{6 E1 J} - \frac{(3 a^2 + 3 a b + b^2) F}{2 E1 J} x + \frac{(a + b) (4 a^2 + 2 a b + b^2) F}{6 E1 J}$ ,
  {x, a + b, 2 a + b}, Axes → True, AspectRatio → 0.3,
  PlotRange → {{1650, 0}, {5, -15}},
  PlotStyle → {Thickness[0.003], RGBColor[0.8, 0, 0]}];

```

```

Show[W1, W2, W3,
  Graphics[{Black, Thickness[0.003], (*LagerA*)Line[{{a - 30, -3}, {a + 30, -3}}],
    (*LagerA*)Line[{{a - 30, -3}, {a, 0}}], (*LagerA*)Line[{{a + 30, -3}, {a, 0}}],
    (*LagerB*)Line[{{a + b - 30, -3}, {a + b + 30, -3}}], (*LagerB*)
    Line[{{a + b - 30, -3}, {a + b, 0}}], (*LagerB*)Line[{{a + b - 30, -3}, {a + b, 0}}],
    (*LagerB*)Line[{{a + b + 30, -3}, {a + b, 0}}], RGBColor[0, 0, 1],
    Text["A", {a, 2}], Text["B", {a + b, 2}]}]]

```

Trägheitsmoment=39760.8

Durchbiegung=-10.7541

Biegemoment=-362500

Biegespannung=-136.755 $\frac{\text{Newton}}{\text{mm}^2}$

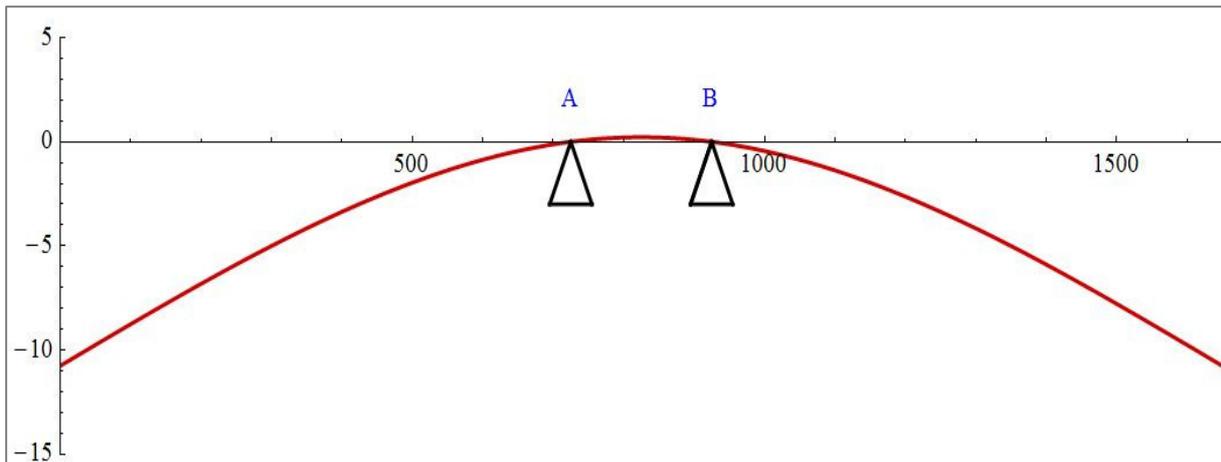


Bild 51: Die Biegelinie der Aufhängungsachse

A3: Berechnung der Gewichtskraftverteilung auf die Rollen

Das Gewicht des Teststandes belastet die Rollen nicht in gleichen Verhältnissen. Je näher sich die Rolle zum Gewichtskraftvektor befindet, desto mehr Belastung nimmt die Rolle auf. Aufgrund der Symmetrie des Gestells gegenüber der Mittellinie wird das Gestell zu einem durch die Gewichtskraft belasteten Balken auf drei Lager vereinfacht. Um die Lagerkräfte bei dem so belasteten Balken zu ermitteln, wird das Superpositionsprinzip /5, S. 176/ angewendet, bei dem die Lastfälle überlagert werden. Das Bild 52 zeigt das in zwei Lastfälle zerlegtes System.

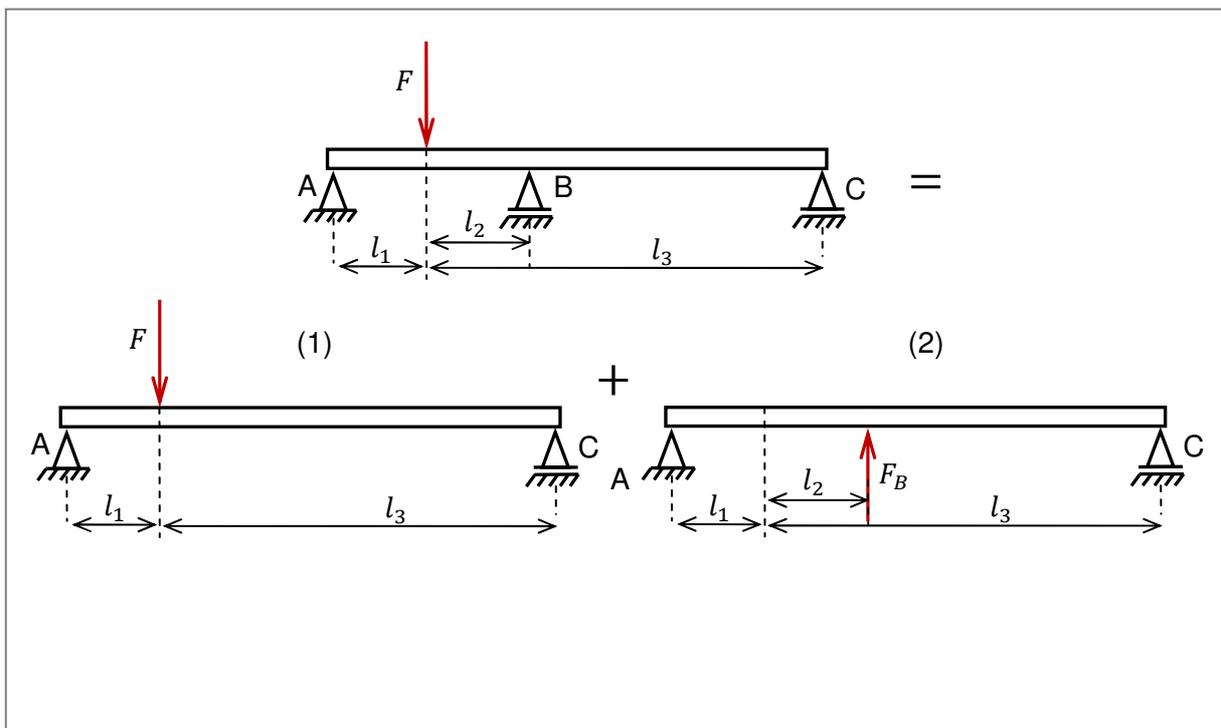


Bild 52: Zerlegung des Systems in zwei Lastfälle nach dem Superpositionsprinzip

Die Biegelinie des Lastfalls (1) wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$w_B(x) = \frac{Fab}{6EI} x \left(1 + \frac{b}{a+b} - \frac{x^2}{a(a+b)} \right)$$

In diesem Fall ist $a = l_1$ und $b = l_3$. Zuerst wird die Lagerkraft F_B aus der Biegelinie $w(x)$ ermittelt, die sich aus zwei Teilbiegelinien zusammensetzt. Danach werden aus den Gleichgewichtsbedingungen die übrigen Lagerkräfte F_A und F_C bestimmt.

$$w(x) = w_1(x) + w_2(x)$$

Die erste Teilbiegelinie wird an der Stelle $x = l_1 + l_2$ ermittelt:

$$w_1(x = l_1 + l_2) = \frac{Fl_1l_3}{6EI} (l_1 + l_2) \left(1 + \frac{l_3}{l_1 + l_3} - \frac{(l_1 + l_2)^2}{l_1(l_1 + l_3)} \right)$$

Die Biegelinie des Lastfalles (2) wird durch dieselbe Gleichung beschrieben wie oben, jedoch bei verschiedenen Parametern a und b . In diesem Fall ist $a = l_1 + l_2$ und $b = l_3 - l_2$. Die zweite Biegelinie wird ebenfalls an der Stelle $x = l_1 + l_2$ ermittelt:

$$w_2(x = l_1 + l_2) = -\frac{F_B(l_1 + l_2)^2(l_3 - l_2)}{6EI} \left(1 + \frac{l_3 - l_2}{l_1 + l_3} - \frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3} \right)$$

Aus der Randbedingung $w(x = l_1 + l_2) = 0$, weil keine Durchbiegung bei dem Lager B vorhanden ist, wird die Lagerkraft F_B ermittelt.

$$F_B = -\frac{Fl_3(l_2^2 + 2l_1(l_2 + l_3))}{2(l_1 + l_2)(l_2 + l_3)^2}$$

Aus dem Momentengleichgewicht wird der Lagerkraft F_C errechnet:

$$Fl_1 - F_B(l_1 + l_2) - F_C(l_3 + l_1) = 0$$

$$F_C = \frac{Fl_1 - F_B(l_1 + l_2)}{(l_3 + l_1)}$$

$$F_C = \frac{Fl_2(2l_1(l_2 - l_3) + l_2l_3)}{2(l_2 - l_3)^2(l_1 + l_3)}$$

Und schließlich wird aus dem Kräftegleichgewicht die Lagerkraft F_A ermittelt:

$$F_A = F - F_C - F_B$$

$$F_A = \frac{Fl_2l_3(l_2 - 2l_3)}{2(l_1 + l_2)(l_2 - l_3)(l_1 + l_3)}$$

Bei den bekannten Werten von den Längen und der Gewichtskraft ergeben sich folgende Kräfte, die auf die jeweiligen zwei Paare von Rollen wirken:

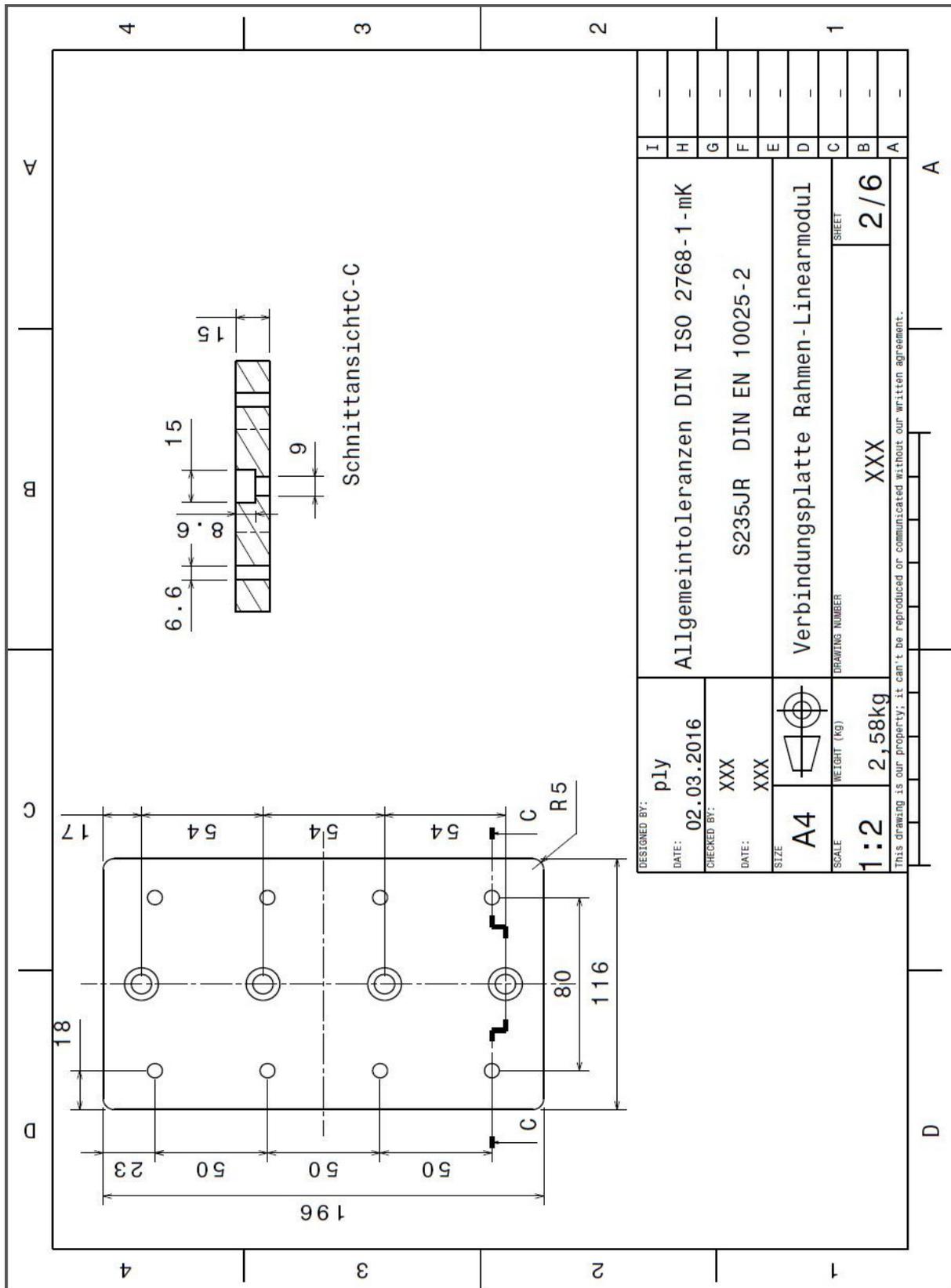
$$l_1 = 180\text{mm}, l_2 = 245\text{mm}, l_3 = 659\text{mm}$$

$$F = mg = 194,7kg \cdot 10m/s^2 = 1947N$$

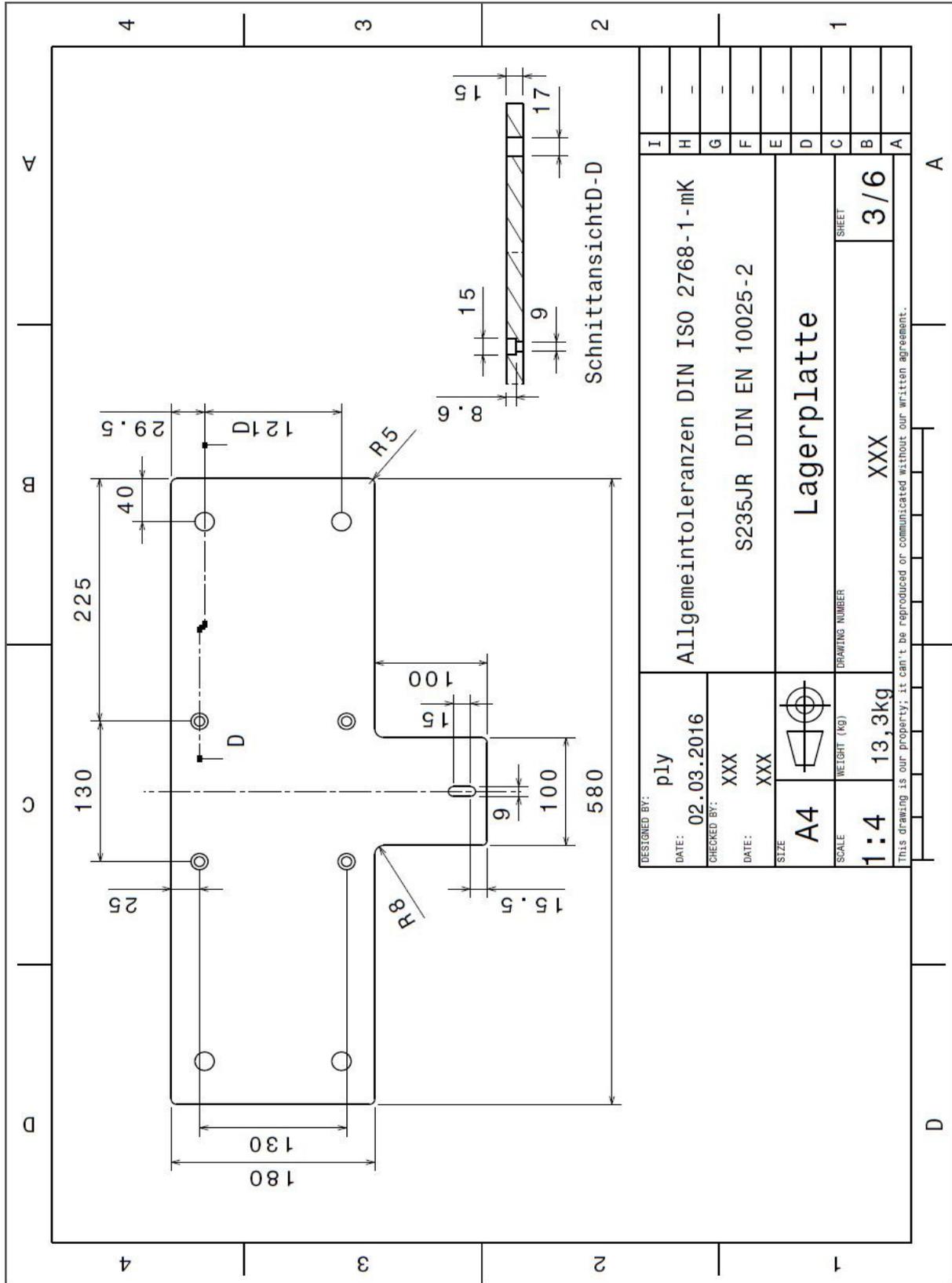
$$F_A = 1142,4N \quad F_B = 784N \quad F_C = 20,6N$$

Die berechneten Lagerkräfte haben die oben definierte Behauptung bekräftigt. Die größte Last trägt die Rolle mit dem kleinsten Abstand zur Gewichtskraftlinie und die Rolle mit dem größten Abstand zur Gewichtskraftlinie trägt die kleinste Last.

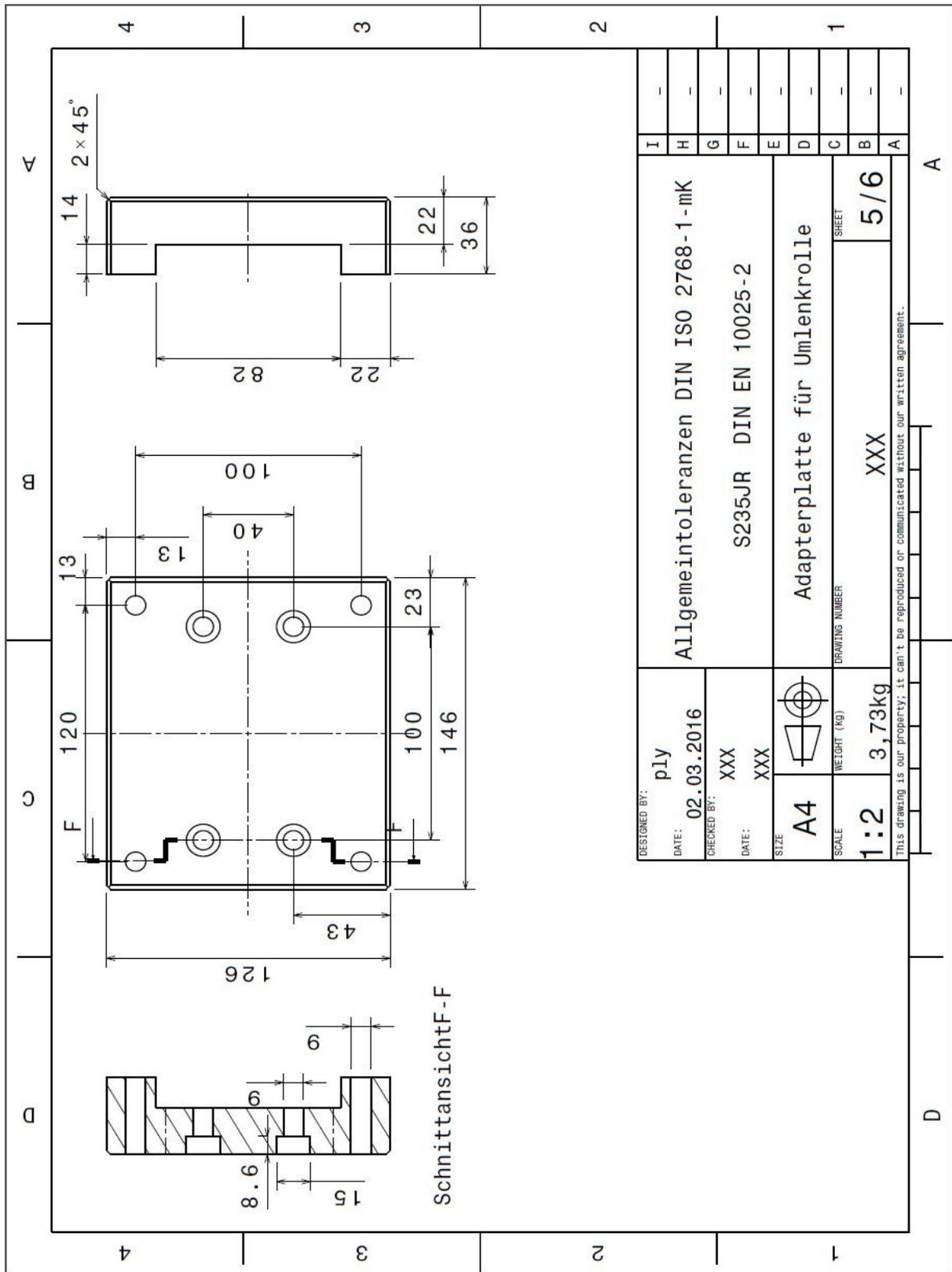
B2: Verbindungsplatte Rahmen-Linearmodul



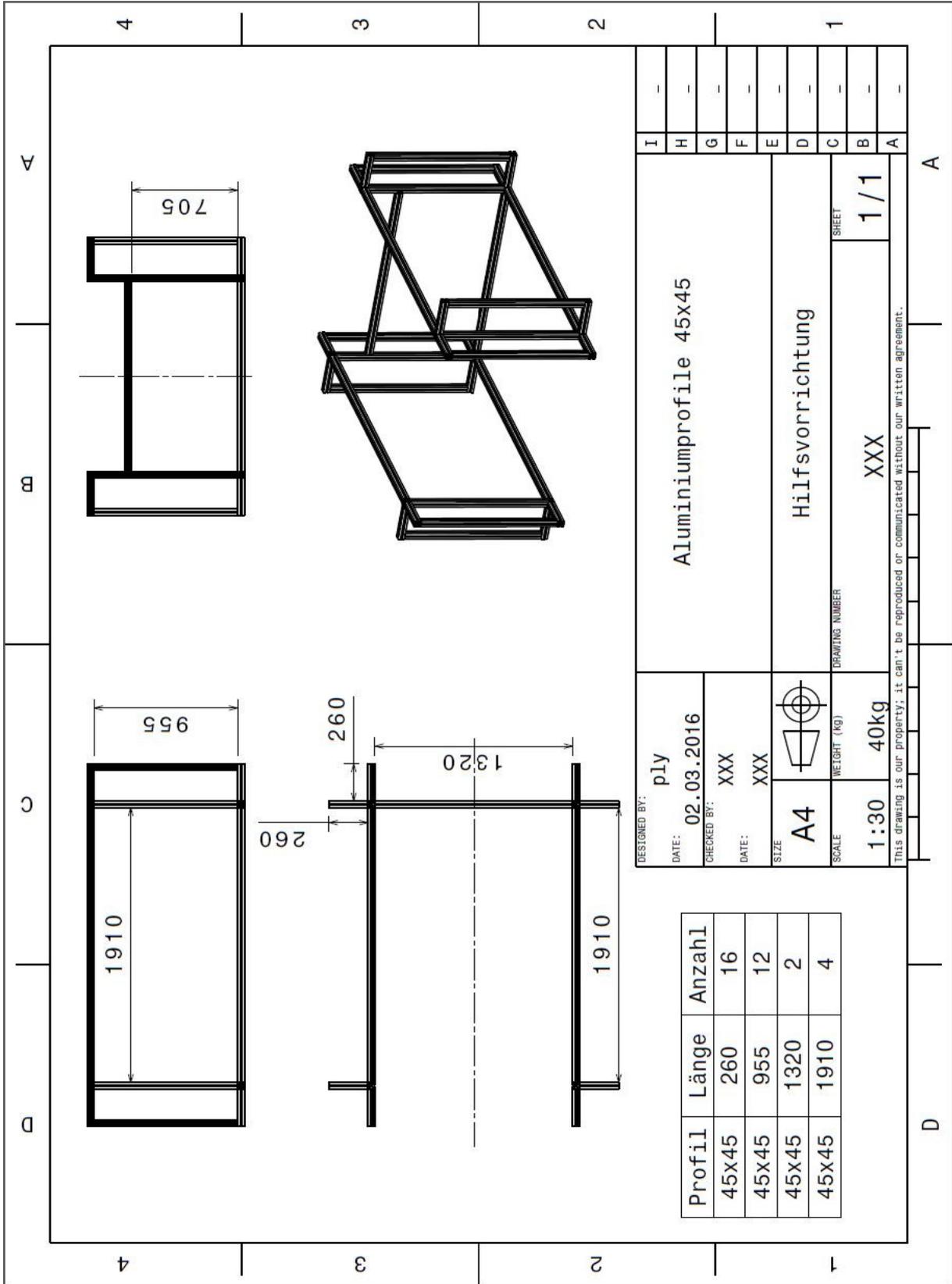
B3: Lagerplatte



B5: Adapterplatte für die Umlenkrolle



B7: Hilfsvorrichtung



DESTONED BY:	ply
DATE:	02.03.2016
CHECKED BY:	XXX
DATE:	XXX
SIZE:	A4
SCALE:	1:30
WEIGHT (KG):	40kg
DRAWING NUMBER:	XXX
SHEET:	1/1

Profil	Länge	Anzahl
45X45	260	16
45X45	955	12
45X45	1320	2
45X45	1910	4

Aluminiumprofile 45x45

Hilfsvorrichtung

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

Anhang C: Materialkosten

C1: Kostenschätzung

Diese Kostenschätzung beinhaltet keine Kosten für Fertigungsteile.

Nummer	Bezeichnung	Menge/Länge	Preis	Gesamtkosten
1	CKR-090	1	4435,32 €	4435,32 €
2	MKR-065-1	1	3425,44 €	3425,44 €
3	MKR-065-2	1	1807,76 €	1807,76 €
4	Synchronwelle	1	375,18 €	375,18 €
5	Spannstück	16	4,66 €	74,56 €
6	Umrichter-1	1	652,37 €	652,37 €
7	Firmware-1	1	189,92 €	189,92 €
8	Umrichter-2	1	621,58 €	621,58 €
9	Firmware-2	1	217,06 €	217,06 €
10	Batterybox	1	96,06 €	96,06 €
11	Leistungskabel	1	215,8 €	215,8 €
12	Geberkabel	2	60,60 €	121,2 €
13	Netzfilter	2	179,58 €	359,16 €
14	Hubsäule	1	600 €	600 €
15	Profil 45x60	19,073m	35 €/m	667,55 €
16	Profil 45x45	29,096m	23,42 €/m	681,42 €
17	Nutenstein	110	0,61€	67,1 €
18	Winkel	33	3,69 €	121,77 €
19	Innenwinkel R	28	3,68 €	103,04 €
20	Innenwinkel	12	3,70 €	44,40 €
21	Lenkrolle	2	24,32 €	48,64 €
22	Lenkrolle mit Fst.	2	38,72 €	77,44 €
23	Bockrolle	2	16,64 €	33,28 €
24	Gehäuselager	2	13,25 €	26,5 €
Summe				15.062,55 €

Anhang D: Lastenheft für das Projekt Teststand

D1: Lastenheft

1 Ausgangssituation

Die Abschätzung der elektrischen Leistungsfähigkeit von Photovoltaikmodulen erfolgt standardmäßig mit Hilfe sogenannter "Flashes": Über einen kurzen Lichtblitz (10-20 ms) wird das Modul beleuchtet und dabei die widerstandsabhängige Strom-Spannungscharakteristik (I-V-Charakteristik) aufgenommen. Aus dessen Verlauf können charakteristische Größen, wie Serienwiderstand, Kurzschlussstrom oder Füllfaktor bestimmt werden, die Aussagen über den Wirkungsgrad und den prognostizierten Modulertrag ermöglichen.

Für die Interpretation der Ergebnisse stellt sich bei diesen Versuchen jedoch die Frage, wie homogen die Modulbeleuchtung während der Messung erfolgte. Auch die Wellenlängenverteilung und der Einstrahlwinkel spielen insbesondere bei der Bewertung von Antireflexschichten eine entscheidende Rolle. Außerdem verändert sich die Abstrahlcharakteristik der Leuchtmittel im Laufe des Einsatzzeitraums. Um nachzuweisen, dass der Sonnensimulator den Anforderungen entspricht, müssen in regelmäßigen Zeitintervallen Kalibriermessungen durchgeführt werden.

2 Zielsetzung

In der studentischen Masterarbeit soll ein automatisierter Aufbau entwickelt werden, der es ermöglicht den Messkopf eines Spektrometers automatisiert zu bestimmten definierbaren Punkten im Messraum zu verfahren um dort spektrale Messungen durchzuführen.

Ziel ist es mit diesem mobilen Teststand die spektrale Homogenität von verschiedenen Bestrahlungseinheiten aus dem Bereich der Photovoltaik (Sonnensimulatoren/ Bestrahlungskammern/ Flashern) zu entwickeln. Der Zeitraum für die Bearbeitung der Aufgabe ist: 16.10.2015-29.02.2016

2.1 Musskriterien

Der Teststand muss den Arbeitssicherheitsanforderungen von dem Fraunhofer Institut genügen. Das Messsystem muss so gestaltet sein, dass sowohl sich in der Nähe befindlichen Personen, als auch Geräte keinen Schaden nehmen können. Der Spektromettermesskopf muss in einem Bereich von $2 \times 2,5 \text{ m}^2$ frei verfahren werden können. Die Anfahrungsaußgenauigkeit beträgt $< 1 \text{ mm}$. Das System darf während der Messung nicht schwingen. Das Messsystem soll selbstständig automatisiert Messpunkte anfahren können. Das System ist ausreichend steif auszulegen.

2.2 Wunschkriterien

- Optisch ansprechende Gestaltung.
- Einfachheit in der Bedienung.
- Möglichst preiswert zu beschaffen.
- Verwendung von Normteilen.
- Möglichst vielseitige Anwendung.
- Es soll möglichst wartungsfrei und stromsparend sein.
- Ökologisch nachhaltige Herstellungsbedingungen

2.3 Rahmenbedingungen

Das Prüfsystem soll an den folgenden Einrichtungen zum Einsatz kommen: Flasher, Lightsoaker und Klimmerkamer. Die Rahmenbedingungen sind durch die jeweiligen Einrichtungen vorgegeben und sollen eingehalten werden. In der Klimakammer ist zu beachten, dass der Abstand von 570 mm des Sensors von der Klimakammerwand unbedingt einzuhalten ist. Die Abmessungen der Abdeckwände des Flashers betragen 2,7x2,7 m².

2.4 Produktfunktionen

Die wichtigste Funktion des Produkts ist die genaue, wiederholbare Positionierung des Messkopfes an vordefinierten Messpunkten. Es soll an verschiedenen Bestrahlungseinheiten zum Einsatz können. Ein einfacher und sicherer Messablauf soll gewährleistet werden.

2.5 Produktleistung

Die Anforderung an die Positionierungsgenauigkeit des Sensors ist 1 mm. Die Messergebnisse dürfen von den eventuellen Schwingungen des Teststandes bei der Bewegung der Linearmodule nicht beeinflusst werden.

2.6 Produktqualität

Produktqualität	sehr wichtig	wichtig	feste Angabe
Sicherheit	x		
Interoperabilität		x	
Zuverlässigkeit	x		
Toleranz			1mm
Wiederholbarkeit	x		
Bedienbarkeit		x	
Modifizierbarkeit	x		
Stabilität	x		
Funktionalität	x		
Anpassbarkeit		x	
Kosten			<15000€

3 Produkteinsatz

3.1 Anwendungsbereiche

Der Teststand ist für den Einsatz im Fraunhofer CSP Technikum bestimmt.

3.2 Betriebsbedingungen

Der Teststand soll in einem Technikum eingesetzt werden. Ein gefahrloser unbeaufsichtigter Dauerbetrieb soll gewährleistet sein.