

KfK 4855
April 1991

Teststand Cometos

Berichtsteil I
Messungen Palettenlage
Verformungsmessungen unter
statischer Last

U. Schygulla
Projekt Heißdampfreaktor Sicherheitsprogramm /
Handhabungstechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
**Projekt Heißdampfreaktor Sicherheitsprogramm/
Handhabungstechnik**

KfK 4855

TESTSTAND COMETOS

BERICHTSTEIL I

- Messungen Palettenlage
- Verformungsmessungen unter
statischer Last

U. Schygulla

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1**

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe wurde ein Robotersystem zum Bearbeiten von Gußteilen entwickelt. Dieses modular aufgebaute System besteht aus einem kartesischen Portalroboter zum Vermessen der Gußteile, einem zweiten baugleichen Portalroboter zum Putzen der Gußteile und einem neuentwickelten Knickarmroboter zum Trennen der Steiger.

Um das tatsächliche Bewegungsverhalten des Meß- und des Bearbeitungsroboters zu bestimmen, wurden an diesen umfangreiche Messungen zur

- absoluten Werkstücklage bzgl. des Roboterkoordinatensystems
- statischen Verformung der Roboterachse
- absoluten Wiederholgenauigkeit des Tool Center Point
- Bahnabweichung des Tool Center Point
- Schwingungsanregung

durchgeführt. Im vorliegenden Berichtsteil I wird die Durchführung der Messungen für die

- absolute Werkstücklage bzgl. des Roboterkoordinatensystems
- statische Verformung der Roboterachse

beschrieben und die Meßergebnisse werden dokumentiert.

Die Messungen wurden mit einem Lasermeßsystem sehr hoher Auflösung durchgeführt, welches in der Lage ist, alle 6 Freiheitsgrade simultan zu erfassen.

Test facility COMETOS.

Report part I

- Measurements of the absolute position of the workpiece
- Measurements of the static deflection of the robot arm

Abstract

A test facility for fettling has been installed at the Nuclear Research Center Karlsruhe. This modular system consists of one cartesian measuring robot in portal version, a second cartesian fettling robot in portal version and a new developed articulated arm robot for abrasive cutting of feeders.

To determine the real behaviour of motion of all robots extensive measurements were performed as follows:

- absolute position of the workpiece referring to the robot coordinate system
- static deflection of the robot arm
- absolute position accuracy of the tool center point
- path deviation of the tool center point
- vibration behaviour

This report presents the procedure of measurement and the experimental results of

- the absolute position of the workpiece referring to the robot coordinate system
- the static deflection of the robot arm

The measurements were realized with a new developed laser-measurement-system of high resolution, which allows to record all 6 degrees of freedom simultaneously.

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
2.	MESSUNGEN PALETTENLAGE	3
2.1	Vorgehensweise	3
2.2	Ergebnisse	5
3.	VERFORMUNGSMESSUNGEN UNTER STATISCHER LAST	9
3.1	Belastungsmessungen am Bearbeitungsroboter (KuKa)	10
3.1.1	Meßaufbau und Belastungseinrichtungen	10
3.1.2	Durchführung der Messungen und Meßergebnisse	16
3.1.3	Auswertung und Diskussion	18
3.2	Belastungsmessungen am Schräggelenkroboter (NOELL)	36
3.2.1	Meßaufbau und Belastungseinrichtungen	36
3.2.2	Durchführung der Messungen und Meßergebnisse	43
	ANLAGEN	44
	LITERATURVERZEICHNIS	

1. EINLEITUNG

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe wurde ein Robotersystem zum Gußputzen, bestehend aus 2 Portalrobotern (KUKA-Roboter) und einem Knickarmroboter (NOELL), aufgebaut. In den Arbeitsbereichen der 3 Roboter sollen Paletten mit darauf aufgespannten Werkstücken zur Vermessung und Bearbeitung fixiert werden. Ein Portalroboter dient der Vermessung der Werkstücke. Die damit ermittelten Geometriedaten werden als Basis für die Programme der beiden Bearbeitungsroboter verwendet. Zwischen den Robotern findet somit ein Materialfluß von Vermessungs- zum Bearbeitungsroboter statt.

Um die Bearbeitungsdaten vom Meßroboter zum Putzroboter transformieren zu können, muß die absolute Lage der Paletten bezüglich der Roboter bekannt sein. Zudem ergeben sich mehrere Fragen nach dem tatsächlichen Verhalten der Geräte, die nur durch Messungen beantwortet werden können. Sie betreffen die **Wiederholgenauigkeit**, die **Abweichungen von der absoluten Position**, wie auch die **Bahnabweichungen** und das **Verhalten unter Last**. Dazu kommen die Abweichungen bei der **Palettenfixierung** und der **Schwingungsanregung** durch Unwucht am Bearbeitungswerkzeug (Schleifmaschine).

Mit Kenntnis der Abweichungen lassen sich Rückschlüsse auf die zu erwartenden Toleranzen bei der Bearbeitung schließen, wobei durch entsprechende Maßnahmen eine teilweise Kompensation⁵ und damit eine größere Bearbeitungsgenauigkeit erreicht werden kann.

Im Rahmen einer 1. Meßkampagne im Juli 1989, konnten nur die beiden Portalroboter vermessen werden, weil der Schräggelenkmanipulator noch nicht einsatzfähig war. Damals wurden alle relevanten Portalrobotern charakterisierenden Größen wie

- absolute Palettenlage bezgl. der Roboter
- Wiederholgenauigkeit
- Bahnabweichung
- Schwingungsanregung

meßtechnisch bestimmt und in /1/ dokumentiert. Auf der Grundlage

der Meßergebnisse wurden die Parameter der Robotersteuerung optimiert.

In einer 2. Meßkampagne im April 1990, konnten dieselben Kenngrößen an allen drei Robotern nochmals überprüft bzw. neu ermittelt werden. Sie betrafen die Messung der Palettenlage, das Verhalten der Roboter unter statischer und dynamischer Last sowie Schwingungsuntersuchungen durch Unwucht am Bearbeitungsroboter.

Bei statischer Belastung war von Interesse, inwieweit sich die Struktur linear verformt und wie groß die absoluten Verformungen sind. Bei dynamischer Belastung sollte der Einfluß der Verfahrgeschwindigkeit und der aufgetragenen Last auf die Verformung untersucht werden. Die Schwingungsuntersuchungen sollten Aufschluß darüber bringen, welche Eigenfrequenzen an der Roboterhand auftreten.

Vorliegender Bericht besteht somit aus drei Teilen mit folgendem Inhalt:

- Teil 1:** - Messung Palettenlage
- Verformungsmessungen unter statischer Last
- Teil 2:** - Verformungsmessungen unter dynamischer Last
- Teil 3:** - Schwingungsmessungen

2. MESSUNGEN PALETTENLAGE

2.1 Vorgehensweise

Voraussetzung für die Übertragbarkeit der Bearbeitungsdaten vom Meßroboter zum Putzroboter ist die genaue Lage der Palette bezüglich des jeweiligen Roboters. Um sowohl die Position als auch die Orientierung der Palette bestimmen zu können, muß die Lage von mindestens drei Punkten auf der Palette bekannt sein.

Diese drei Raumpunkte werden im vorliegenden Fall durch die Mittelpunkte dreier Kugeln repräsentiert. Gewählt wurden hierbei Präzisionskugeln mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Oberflächengüte von 1 m. Diese Kugeln wurden mittels entsprechender Konstruktionen so auf einer Meßpalette befestigt, daß sie durch die "Roboterhände" erreichbar sind.

Zur Ermittlung des tatsächlichen Kugelmittelpunktes wurde zunächst ein geschätzter Mittelpunkt in ein Computerprogramm eingegeben. Unter Zuhilfenahme dieser Information wurde ein Roboterprogramm erstellt, welches die Abtastung der Kugel in mehreren Ebenen aus einer vorher festgelegten Anfahrrichtung ermöglichte. Jede einzelne Kugel wurde in 3 Ebenen mit 10 Punkten je Ebene abgetastet. Aufgrund der Abschaltpunkte des taktilen Sensors - eine Reproduzierbarkeit von $< 1 \mu\text{m}$ wird seitens des Hersteller garantiert - wurde der entsprechende Kugelmittelpunkt errechnet. Diese Koordinaten wurden bei der folgenden Messung als geschätzter Kugelmittelpunkt eingegeben, um somit eine rekursive Verbesserung des Meßergebnisses zu erreichen.

Entsprechend ihrer Lage auf der Meßpalette wurden die Kugeln im Folgenden mit dem Zusatz vl (vorne links), hl (hinten links), und vr (vorne rechts) bezeichnet. Dabei ist zu bemerken, daß die Abtastebenen bei den Kugeln hl und vr waagerecht, d.h. in der x, y -Ebene des Roboters liegen, wohingegen sich die Abtastebenen bei der Kugel vl in der y, z -Ebene befanden. Von den drei möglichen Roboterkoordinatensystemen wurde das "WORLD - Koordinatensystem"

verwendet. Der TCP (Tool-Center-Point) des Roboters lag dabei in der Mitte der Tasterkugel.

Ein automatisches Anfahren der Meßkugeln und abspeichern der angefahrenen Koordinaten war beim Schräggelenkroboter nicht möglich. Wegen der komplexen Schräggelenkkinematik lief der Roboterarm im automatischen Abtastbetrieb immer wieder in Raumgrenzen. Die Messungen wurden aus diesem Grunde im Handbetrieb durchgeführt, d.h.:

- mit Hilfe der Handsteuerung der R500 fuhr man mit sehr kleiner Geschwindigkeit mit dem taktilen Geber an die Kugel heran
- berührte der Taster die Kugeloberfläche, stoppte man den Roboterarm und notierte die Koordinaten in WORLD
- angefahren wurden bei jeder der Kugeln vier signifikante Punkte. Die Anfahrriichtung war parallel zu xR/yR/zR - Richtung des Roboterkoordinatensystems, sodaß man die Koordinaten des Kugelmittelpunktes durch Addition bzw. Subtraktion des Kugel- und Tasterradius ermitteln konnte (Kugelradius 25 mm; Taster-radius 7 mm).

Die Koordinaten des Kugelmittelpunktes lassen sich im Automatikbetrieb auf 0,1 mm, im Handbetrieb auf 1 mm angeben. Das Meßverfahren ist ausführlich in /1/ beschrieben, insbesondere der Einfluß der Meßpunkte und Messungen auf den Meßfehlern.

Da die Meßangeln ortsfest auf der Meßplatte befestigt sind, müssen die Strecken zwischen den Kugelmittelpunkten konstant sein. Somit sind für alle Roboter nahezu gleiche Abstandswerte zu erwarten.

	Meßroboter (KuKa)	Bearbeitungs- Roboter (KuKa)	Bearbeitungs- Roboter (NOELL)
	mm	mm	mm
Strecke vl-hl	580.25	582.11	571.88
Strecke vl-vr	737.88	745.36	731.13
Strecke hl-vr	896.75	893.51	860.09

2.2 Ergebnisse

Ergebnisse der Messungen am Meßroboter

	x	y	z	A	B	C
lpktg_s_vr	2300.00	1168.00	799.00	90.00	90.00	0.00
lpkt_2_vr	2493.00	1120.00	790.00	90.00	90.00	0.00
lpkt_km_vr	2492.80	1168.53	792.38	90.00	90.00	0.00
lkol_pkt_vr	2560.00	1168.00	790.00	90.00	90.00	0.00
!_Kugel_1	2493.53	1168.22	789.84	0.00	0.00	0.00
!_Kugel_2	2493.55	1168.22	789.86	0.00	0.00	0.00

	x	y	z	A	B	C
lpkt_gs_hl	2998.00	1844.00	755.00	0.00	90.00	0.00
lpkt_2_hl	3080.00	1780.00	755.00	0.00	90.00	0.00
lpkt_km_hl	3078.93	1845.88	744.40	0.00	90.00	0.00
lkol_pkt_hl	3120.00	1845.00	743.00	0.00	90.00	0.00
!_Kugel_3	3078.95	1845.92	742.94	0.00	0.00	0.00
!_Kugel_4	3078.95	1845.91	742.89	0.00	0.00	0.00

	x	y	z	A	B	C
lpkt_gs_vl	2487.00	1851.00	1054.00	181.00	181.00	0.00
lpkt_2_vl	2588.00	1700.00	1054.00	181.00	181.00	0.00
lpkt_km_vl	2591.79	1850.63	1054.36	181.23	181.14	-0.30
lkol_pkt_vl	2591.00	1850.00	988.00	181.00	181.00	0.00
!_Kugel_5	2589.45	1850.33	1054.45	0.00	0.00	0.00
!_Kugel_6	2589.47	1850.31	1054.48	0.00	0.00	0.00

Bemerkungen:

vr	-	Kugel vorne rechts
vl	-	Kugel vorne links
hl	-	Kugel hinten links
pktgs	-	Grundstellung
pkt2	-	2. Anfahrtpunkt
kolpkt	-	Kollisionspunkt
pktkm	-	geschätzter Kugelmittelpunkt
!_Kugel_(X)	-	berechneter Kugelmittelpunkt
!_Kugel_(X+1)	-	iterative verbesserter Kugelmittelpunkt

(alle Angaben in mm / Grad)

Ergebnisse der Messungen am Putzroboter

	x	y	z	A	B	C
2pktg_s_vr	1080.00	1226.00	770.00	0.00	90.00	0.00
2pkt_2_vr	1207.00	1090.00	770.00	0.00	90.00	0.00
2pkt_km_vr	1207.80	1226.54	769.42	0.00	90.00	0.00
2kol_pkt_vr	1280.00	1226.00	770.00	0.00	90.00	0.00
!_Kugel_7	1208.66	1226.62	769.75	0.00	0.00	0.00
!_Kugel_8	1208.61	1226.60	769.80	0.00	0.00	0.00

	x	y	z	A	B	C
2pkt_gs_hl	1650.00	1903.00	723.00	0.00	90.00	0.00
2pkt_2_hl	1792.00	1690.00	723.00	0.00	90.00	0.00
2pkt_km_hl	1792.70	1903.83	722.22	0.00	90.00	0.00
2kol_pkt_hl	1870.00	1903.00	723.00	0.00	90.00	0.00
!_Kugel_9	1790.64	1902.83	721.81	0.00	0.00	0.00
!_Kugel_10	1790.63	1902.85	721.78	0.00	0.00	0.00

	x	y	z	A	B	C
2pkt_gs_vl	1300.00	1918.00	1100.00	900.00	0.00	0.00
2pkt_2_vl	1300.00	1840.00	1036.00	900.00	0.00	0.00
2pkt_km_vl	1300.47	1918.30	1036.56	900.00	0.00	0.00
2kol_pkt_vl	1300.00	1918.00	966.00	900.00	0.00	0.00
!_Kugel_11	1299.51	1917.63	1033.99	0.00	0.00	0.00
!_Kugel_12	1299.54	1917.62	1033.98	0.00	0.00	0.00

Bemerkungen:

vr	-	Kugel vorne rechts
vl	-	Kugel vorne links
hl	-	Kugel hinten links
pktgs	-	Grundstellung
pkt2	-	2. Anfahrtspunkt
kolpkt	-	Kollisionspunkt
pktkm	-	geschätzter Kugelmittelpunkt
!_Kugel_(X)	-	berechneter Kugelmittelpunkt
!_Kugel_(X+1)	-	iterative verbesserter Kugelmittelpunkt

(alle Angaben in mm / Grad)

Ergebnisse der Messungen am Schräggelenkroboter

Kugel	Meßpunkt	x	y	z	A	B	C
vr	1	-744.37	-785.54	-862.27	-90.88	-0.83	0.37
vr	2	-744.33	-757.12	-862.21	-90.88	-0.83	0.37
vr	3	-772.22	-814.74	-862.18	-90.88	-0.83	0.37
vr	4	-772.18	-786.70	-832.91	-90.88	-0.83	0.37
Kugelmittelpkt-		772.87	-785.93	-804.41			

Kugel	Meßpunkt	x	y	z	A	B	C
vl	1	-842.28	-1465.23	-598.36	-90.88	-0.83	0.37
vl	2	-871.15	-1437.86	-598.27	-90.88	-0.83	0.37
vl	3	-871.32	-1495.37	-598.71	-90.88	-0.83	0.37
vl	4	-871.39	-1466.16	-571.36	-90.88	-0.83	0.37
Kugelmittelpkt-		816.78	-1466.8	-542.86			

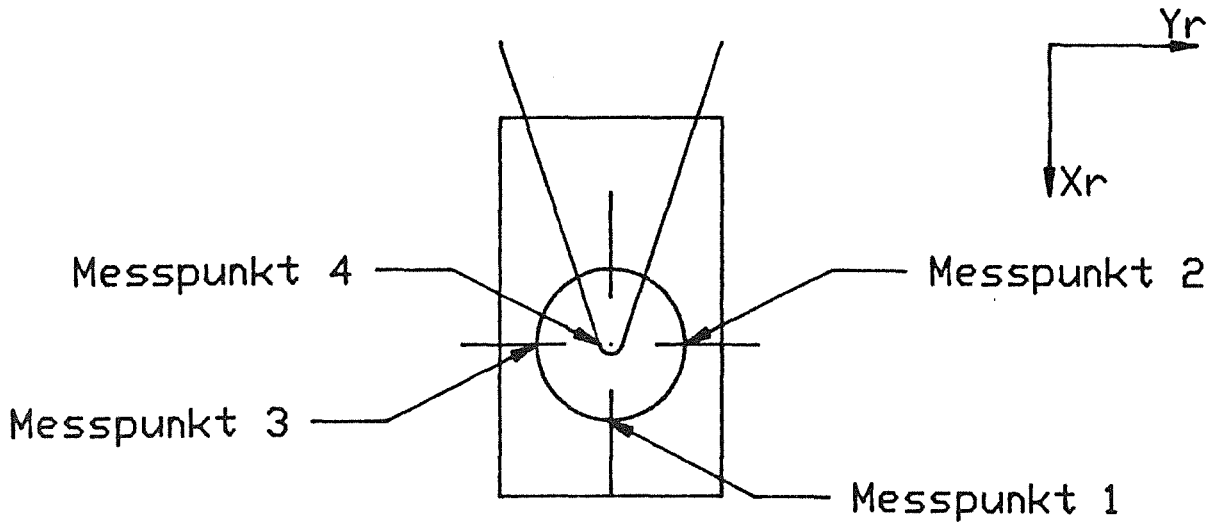
Kugel	Meßpunkt	x	y	z	A	B	C
hl	1	-1325.56	-1463.91	-809.36	-90.88	-0.83	0.37
hl	2	-1354.50	-1463.78	-909.35	-90.88	-0.83	0.37
hl	3	-1354.48	-1494.68	-909.31	-90.88	-0.83	0.37
hl	4	-1354.43	-1465.59	-880.70	-90.88	-0.83	0.37
Kugelmittelpkt-		1297.06	-1466.18	-852.21			

Bemerkungen:

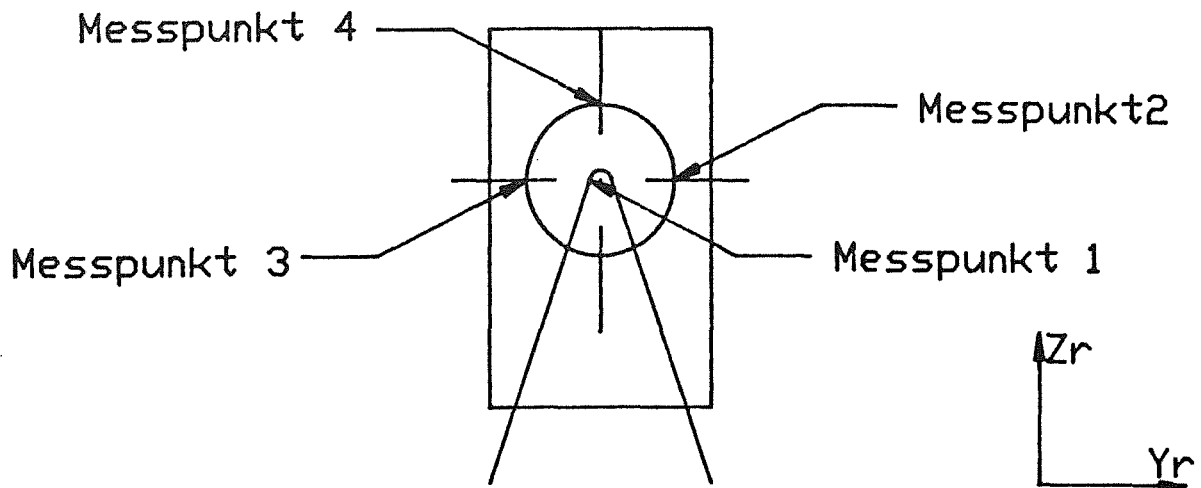
vr - Kugel vorne rechts
 vl - Kugel vorne links
 hl - Kugel hinten links

(alle Angaben in mm bzw. Grad; die Position der Meßpunkte auf der Kugeloberfläche sind in Anlage 2.1 zu sehen)

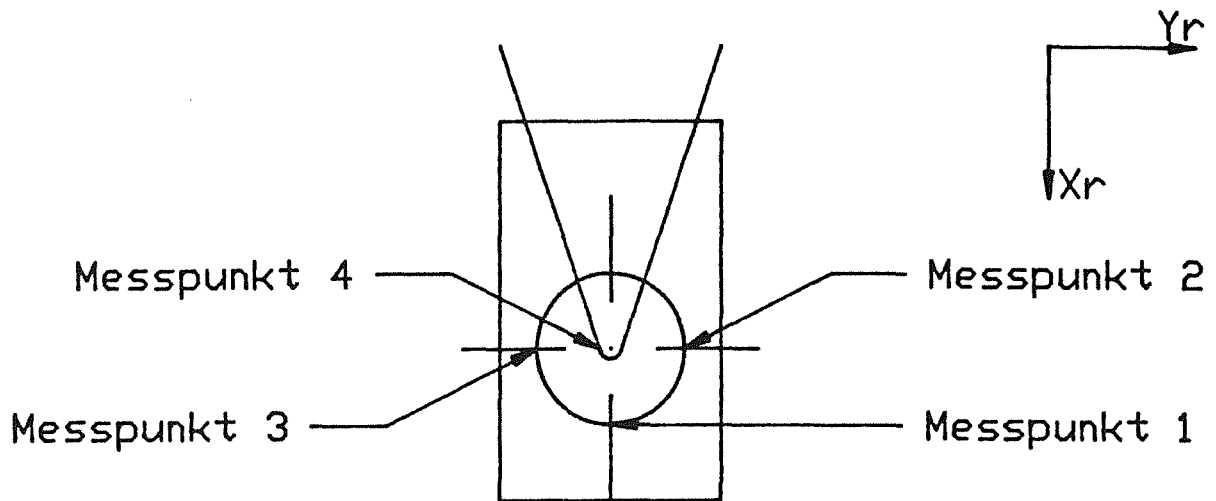
Kugel vorne rechts



Kugel vorne links



Kugel hinten links



Anlage 2.1

Position der Messpunkte auf den Kugeloberflächen (Noell)

3. VERFORMUNGSMESSUNGEN UNTER STATISCHER LAST

Ziel dieser Belastungsmessungen ist es, das elastische Verformungsverhalten des Roboters zu bestimmen. Dieses wird erreicht, indem die Roboterhand im statischen Zustand mit in mehreren Stufen aufgebrauchten Kräften belastet und die Verschiebungen und Orientierungsänderungen gemessen werden.

Parallel zu diesen Messungen werden FE-Rechnungen durchgeführt. Diese Meßergebnisse dienen somit als Input für die Modellierung des Systems.

Die Messungen wurden mit einem Lasermeßsystem der Firma POLYTEC durchgeführt. Das Meßsystem besteht aus einem Laser- und einem Reflektorkopf. Zwischen den beiden Komponenten spannt der Laserstrahl im Arbeitsraum des Roboters eine Referenzgerade auf. Bei Bewegungen des Reflektorkopfes werden die Abweichungen von der Referenzgeraden gemessen. Die Auflösung des Meßsystems beträgt 1 μ m. Die Funktionsweise ist ausführlicher in /1/ erläutert.

3.1 Belastungsmessungen am Bearbeitungsroboter (KUKA)

Am Bearbeitungsroboter wurden zwei Belastungsversuche durchgeführt. Die z-Achse des Roboters wurde parallel zur yR- und zR-Achse des Roboterkoordinatensystems belastet. Damit ist bei diesem karthesischen System eine Zuordnung zwischen zu untersuchenden Achse und Belastungsrichtung zu erkennen.

- Belastung in yR-Richtung führt hauptsächlich zur Verformung der zR-Achse des Roboters
- Belastung in zR-Richtung führt hauptsächlich zur Verformung der yR-Achse des Roboters

Die Kräfte wurden stufenweise über spezielle Belastungseinrichtungen auf die Roboterhand aufgebracht. Im folgenden werden die Belastungseinrichtungen anhand von Skizzen näher erläutert und die Meßergebnisse dokumentiert.

3.1.1 Meßaufbau und Belastungseinrichtungen

In Anlage 3.1.1 sind die geometrischen Verhältnisse für diese zwei Belastungsfälle zu sehen. Von Bedeutung für die Interpretation der Meßdaten ist die Lage der drei Koordinatensysteme zueinander

xR/yR/zR	-	Roboterkoordinatensystem (WORLD)
xH/yH/zH	-	Hilfskoordinatensystem (JOINT4)
xL/yL/zL	-	Laser bzw. Meßkoordinatensystem
A/B/C	-	Nick-/Gier-/Rollwinkel

Die Position und Orientierung der Roboterhand ergibt sich aus

xR + 1888,58	A	+ 178,06
yR + 2090,29	B	+ 1,31
zR + 1366,41	C	+ 91,71

für beide Belastungsrichtung yR und zR

(Angaben in WORLD)

Belastungseinrichtung: positive yR-Richtung

Die Belastungseinrichtung ist in **Anlage 3.1.2** einzusehen. An einer Platte, die zwischen Nachgiebigkeit und Werkzeugaufnahme montiert war, wurde ein Adapterstück angeschraubt. An diesem Adapterstück war eine Kraftmeßdose und ein Stahlseil befestigt. Das Stahlseil wurde über eine Umlenkrolle geführt. An dessen Ende befand sich eine Stabkonstruktion (**Eigengewicht 10 kg**) aus Eisen, in die man die einzelnen Gewichte einhängen konnte. Die Umlenkrolle war mit 8 Schrauben auf einem Profilträger befestigt, der mit mehreren Schraubzwingen rutschfest an den Stützen des Portalroboters festgeklemmt war. Die Umlenkrolle aus PVC war geführt und gelagert. Das Stahlseil wurde mit einer Wasserwaage horizontalisiert. Die Kraftrichtung verlief parallel zur positiven yR-Richtung des Roboterkoordinatensystems. An die oben erwähnte Platte war der Reflektorkopf des Meßsystems angeschraubt.

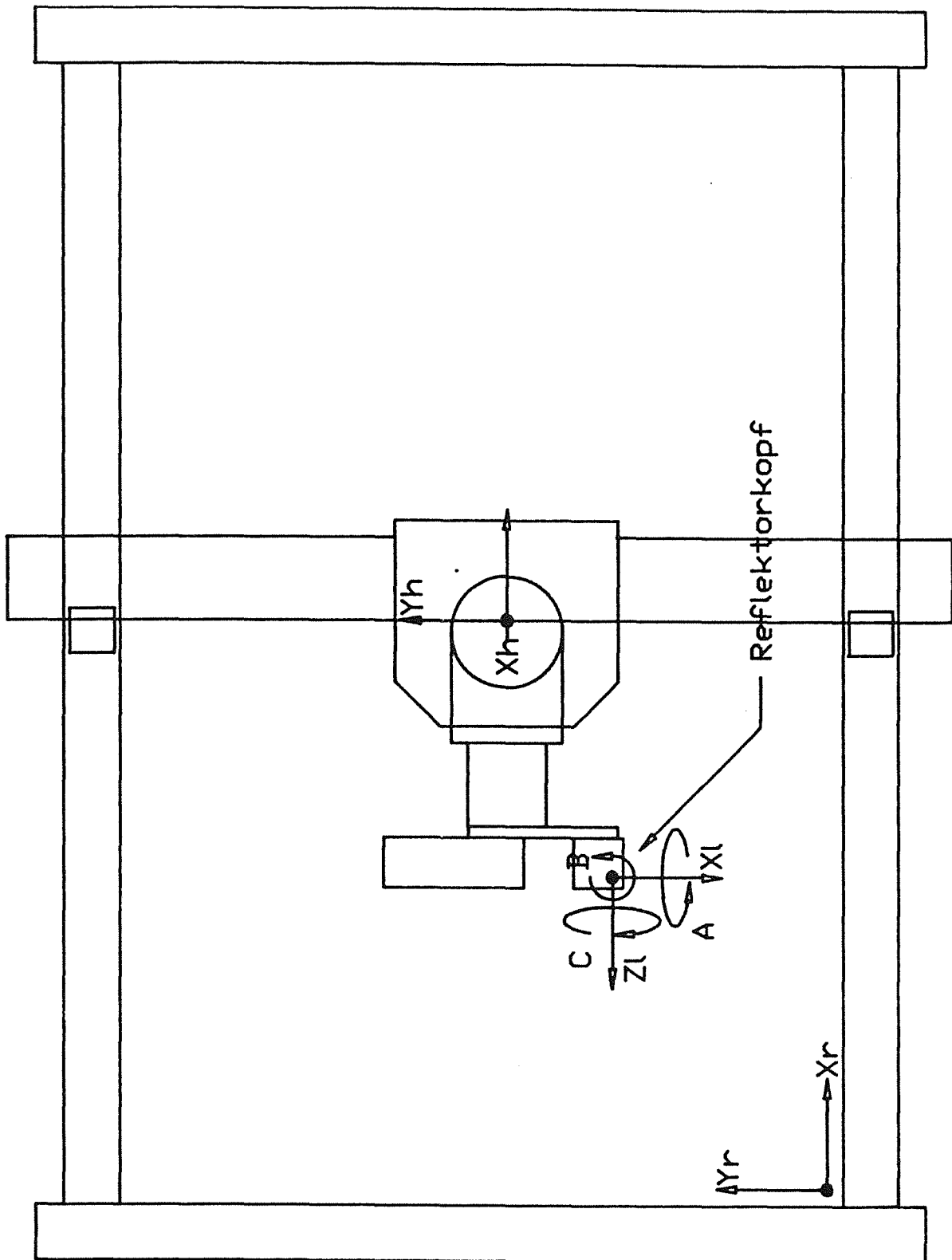
Da der Meßpunkt nicht mit dem Kraftangriffspunkt identisch ist, ergaben sich zusätzliche Hebelarme, die zur Berechnung der Momente und zur Interpretation der gemessenen Verschiebungen notwendig sind. In **Anlage 3.1.2** ist die Geometrie an der Roboterhand im Detail zu sehen. Die zusätzlichen Hebelarme des Kraftangriffs- und des Meßpunktes sind bezüglich des Hilfskoordinatensystems angegeben.

Meßpunkt - $x_M/y_M/z_M$
Kraftangriffspunkt - $x_K/y_K/z_K$

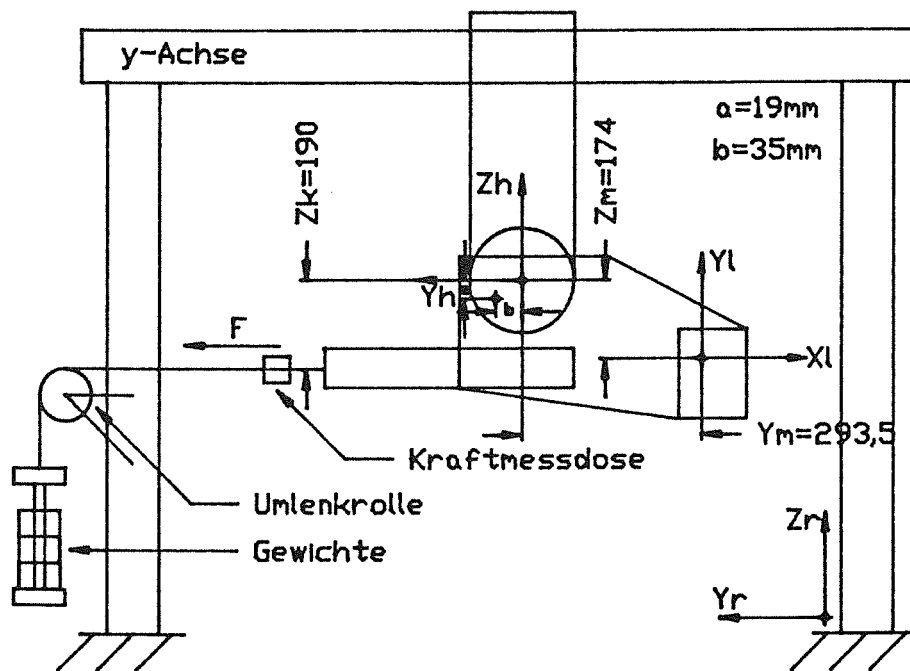
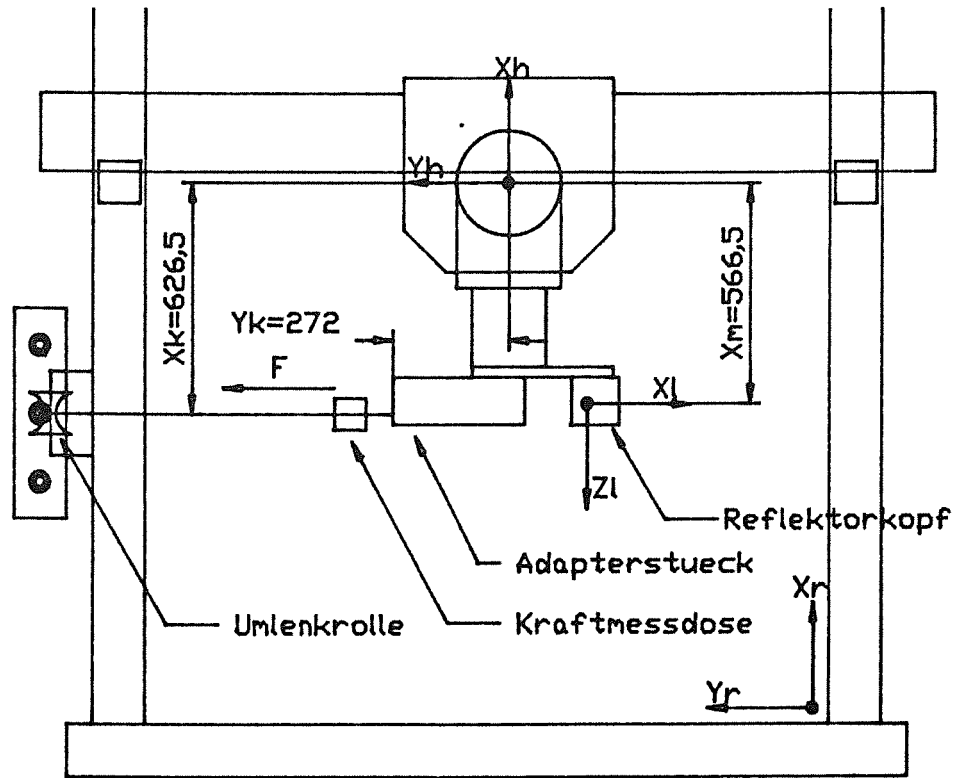
Belastungseinrichtung: negative zR-Richtung

Die Belastungseinrichtung sah folgendermaßen aus. An das Adapterstück in **Anlage 3.1.3** wurde eine Konstruktion aus zwei Schienen und drei Gewindestangen montiert. Die Gewichte wurden stufenweise in diese Konstruktion hineingehängt. Das Eigengewicht der Konstruktion betrug **16,6 kg**.

Während der Messungen wurden die einzelnen Gewichte symmetrisch aufgelegt, so daß sich die Position des Kraftangriffspunktes nicht änderte. Die Kraftrichtung verlief für die Laststufe 0 parallel zur zR-Achse des Roboter-Koordinatensystems. Auch hier war der Meßpunkt nicht mit dem Kraftangriffspunkt identisch. Die sich zusätzlich ergebenden Hebelarme zur Momentberechnung sind **Anlage 3.1.3** zu entnehmen.

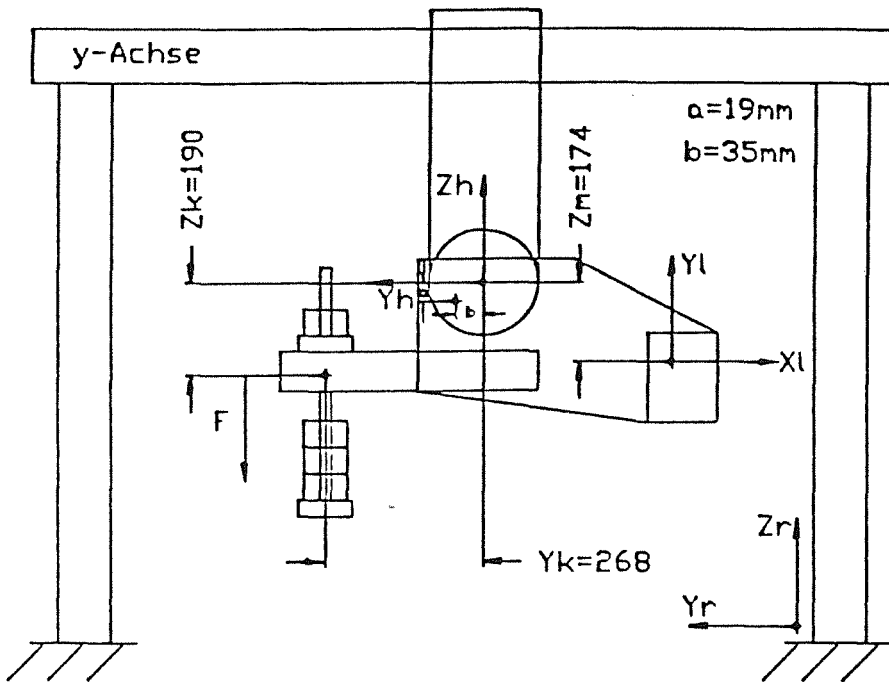
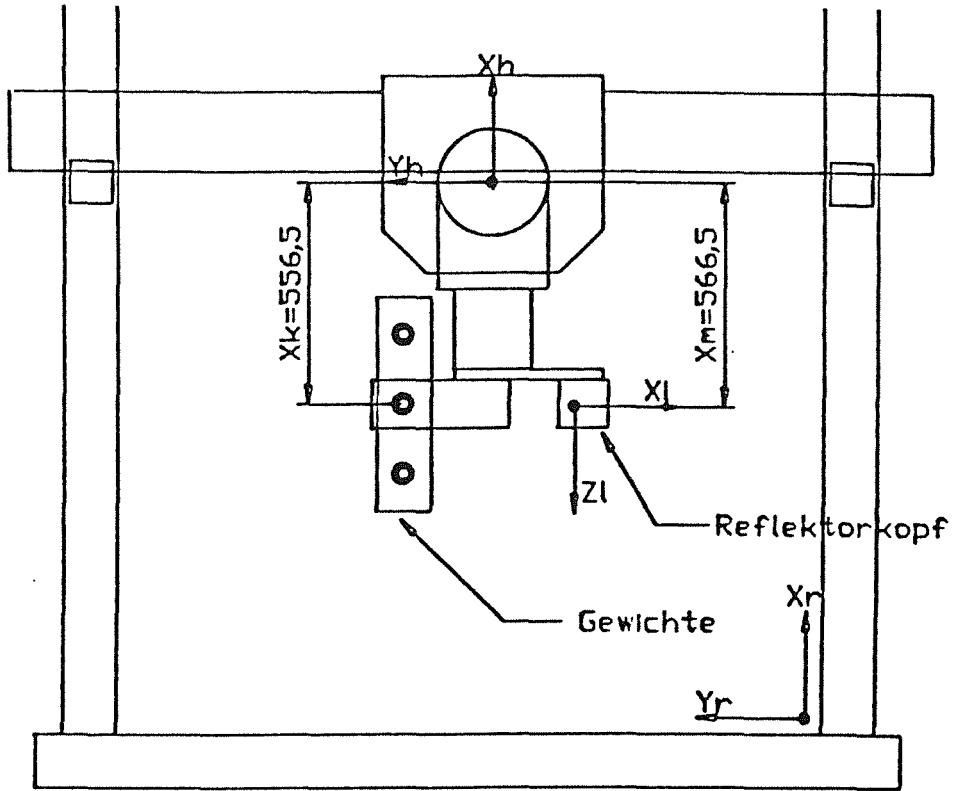


Anlage 3.1.1 Position des Koordinatensystems für beide statischen Belastungsversuche



Anlage 3.1.2

Geometrie der Roboterhand mit
Belastungseinrichtung für y_R - Richtung



Anlage 3.1.3

Geometrie der Roboterhand mit
Belastungseinrichtung für zR-Richtung

3.1.2 Durchführung der Messungen und Meßergebnisse

Durchführung

Der Reflektorkopf wurde an der Roboterhand befestigt. Der Laser wurde entsprechend auf dem Reflektorkopf ausgerichtet. Die Gewichte wurden in 20 kg Stufen bis max. 240 kg aufgelegt. Nach jeder erneuten Belastungsstufe ließ man einen Zeitraum von ungefähr 30 Sekunden verstreichen, bevor man den Meßwert aufzeichnete und die Anzeige der Kraftmeßdose abgelesen hat. Dadurch sollten die Messungen beeinflussende Schwingungseffekte ausgeschlossen werden.

Vor jeder Versuchsreihe wurde der Roboter mit Hilfe der entsprechenden Belastungseinrichtung mit 240 kg belastet. Der Zweck dieser Vorversuche war es, das vorhandene Spiel der Schrauben, Passungen, Lager usw. zu eliminieren. Es sollten die elastischen Verformungen der Struktur und nicht bleibende Verschiebungen der Komponenten an der Roboterhand gemessen werden.

Meßergebnisse

Die Meßergebnisse sind in **Anlage 3.1.4-8** zu sehen. Die Größen $X_L/Y_L/Z_L$ sind die gemessenen absoluten Verschiebungen im Laserkoordinatensystem. A/B/C sind die dazugehörigen absoluten Orientierungen (A = Nickwinkel, B = Gierwinkel, C = Rollwinkel).

Das Vorzeichen der X_L, Y_L -Verschiebungen ist folgendermaßen definiert.

Der Laserstrahl ist die Referenz im Raum. Bewegt sich die Roboterhand und somit das Laserkoordinatensystem in die positive X_L -Richtung so erhält man wegen des ortsfesten Laserstrahls abnehmende X_L -Werte. Die Betrachtung der Y_L -Verschiebungsrichtung ist analog. Ebenso lassen sich die Werte für die Orientierungen A, B, C interpretieren. Die Vorzeichenregel für die Größen X_L, Y_L, A, B, C entspricht einem Rechtssystem (**Anlage 3.1.1**).

Das Vorzeichen der Verschiebung in Z_L -Richtung ist anders definiert, weil diese Meßwerte das Interferometer liefert. Hier ist der Startwert 0. Eine Verschiebung der Roboterhand in positive Z_L -Richtung liefert positive Meßwerte.

Die Messungen sind Relativmessungen. Die Größe der ersten X_L/Y_L -Meßwerte hängt von der Justierung des Reflektorkopfes ab. Bei Belastungsversuchen in negativer Z_R -Richtung wurde keine Kraftmeßdose verwendet.

In **Anlage 3.1.9-13** sind die Meßergebnisse in aufbereiteter Form zu sehen. Aufgetragen sind die relativen Verschiebungen und die relativen Orientierungen über der Belastung. Der erste Meßwert wurde als Bezugswert verwendet, die weiteren Meßwerte als Inkremente dazuaddiert. Aus den Kurven entnimmt man, daß sich die Struktur linear verformt. Der Maximalwert der Verschiebung beträgt für die jeweilige Zugrichtung

YR - 7,85 mm

ZR - 2,8 mm

Differenzen treten zwischen den Meßwerten der Kraftmeßdose und den dazugehörigen aufgelegten Gewichten auf, wie in **Anlage 3.1.14-15** zu erkennen ist. Der Meßfehler der Kraftmeßdose beträgt 0,2 % vom Endwert, was einem Gewicht von +/- 300 g entspricht.

Die Differenz zwischen den Werten der Kraftmeßdose und den aufgelegten Lasten müßte ein konstanter Wert sein, der dem Eigengewicht der Belastungsrichtung entspricht. Durch eine ungünstige Konstruktion der Umlenkrolle rieb das Stahlseil an der Umlenkrollenhalterung, so daß dadurch aufgetretene Reibungseffekte diese Differenzen verursacht haben könnten. Bei nachträglichen Kontrollmessungen mit derselben Belastungseinrichtung wurde der oben genannter Effekt nicht beobachtet. Die Differenz zwischen Kraftmeßdosenanzeige und aufgelegter Last entsprach einem Offset, der mit dem Eigengewicht der Belastungseinrichtung identisch war.

3.1.3 Auswertung und Diskussion

In diesem Abschnitt sollen die Meßergebnisse anhand eines Belastungsversuches des Bearbeitungsroboters KuKa ausgewertet und diskutiert werden.

Aus Anlage 3.1.2 ist zu ersehen, daß durch das Aufbringen der Kraft an der Werkzeugaufnahme die z-Achse des Roboters sowohl auf Biegung, als auch auf Torosion belastet wurde. Die resultierende vom Meßsystem erfaßte Verschiebung beinhaltet beide Anteile:

- Verschiebung verursacht durch Biegung der z-Achse
- Verschiebung verursacht durch Torosion der z-Achse

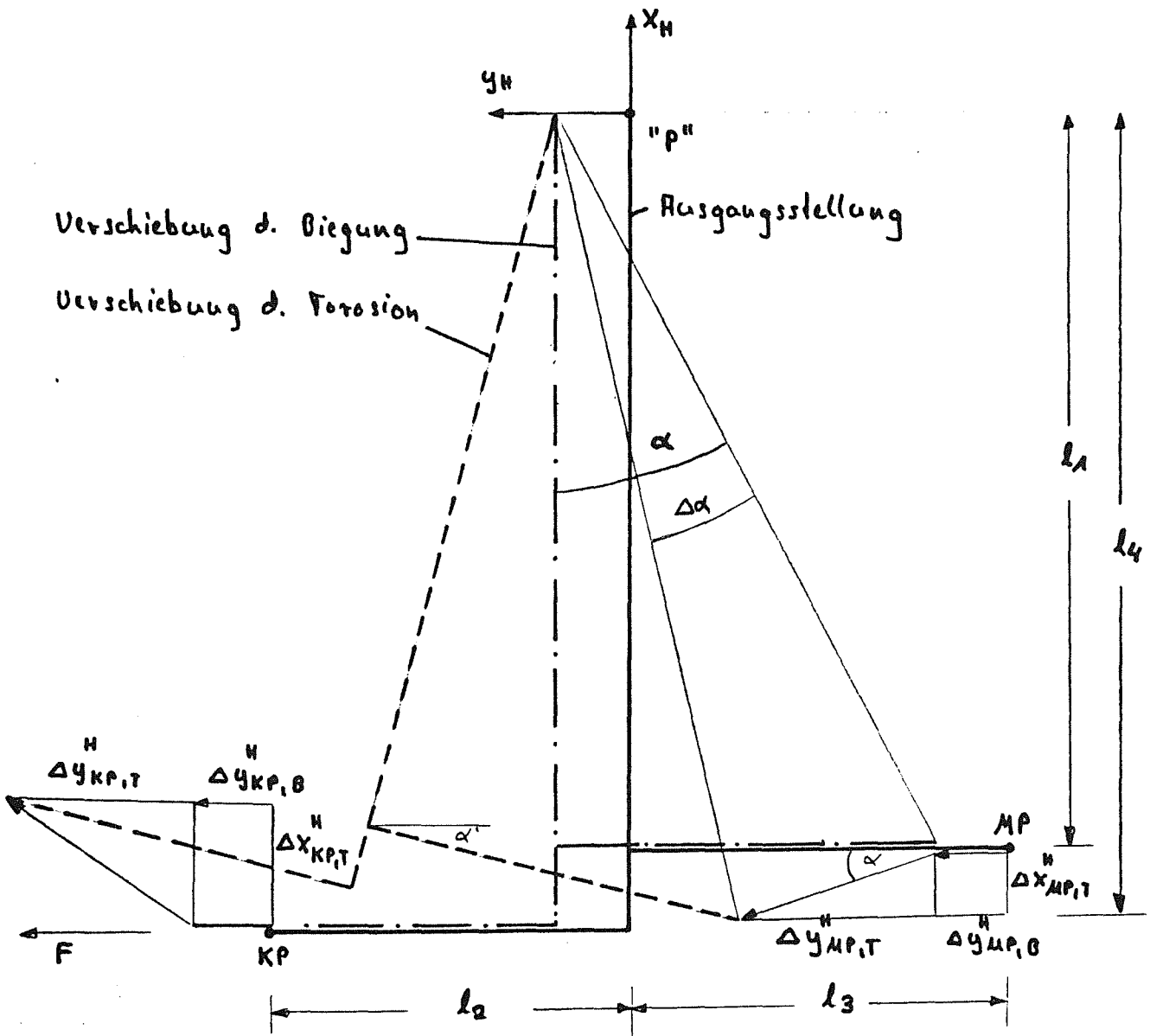
Wenn sich die Anteile rechnerisch separieren lassen, so kann man für die z-Achse sowohl eine Biegefestigkeit, als auch eine Torosionssteifigkeit angeben. Da der Kraftangriffspunkt nicht mit dem Meßpunkt identisch ist, muß eine zusätzliche Umrechnung erfolgen, die im Folgenden aufgeführt wird.

In folgender Skizze ist die Verformung der z-Achse idealisiert dargestellt. Es ist eine Draufsicht auf den Bearbeitungsroboter. Der Punkt "P" ist die Verbindung der z-Achse mit dem letzten Roboterarm (Gelenk 5). Die Länge l_4 enthält die Komponenten

- Kraftmomentensensor
- Nachgiebigkeit
- Werkzeugaufnahme.

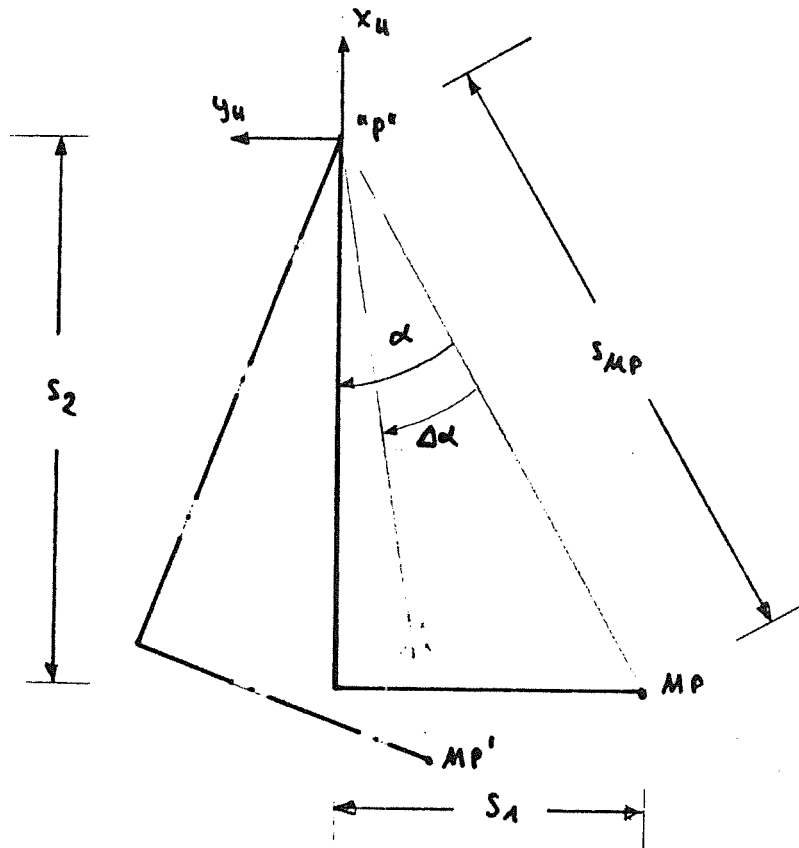
Zur Bestimmung der einzelnen Anteile der Verschiebung wurden folgende Annahmen gemacht:

- die Längen l_1 bis l_4 verhalten sich wie starre Stäbe; eine Relativbewegung zwischen den Stäben wird nicht zugelassen
- durch die Kraft F tritt eine Biegung
 - in y_H -Richtung,
 - Torosion um den Punkt "P" auf
- eine Verschiebung des Punktes "P" in x_H -Richtung tritt nicht auf



Geometrie und Verformungsverhalten an der Roboterhand

- a) Bestimmung der Verschiebung des Meßpunktes MP verursacht durch Torosion : Belastungsfall aus Anlage 3.1.5



$$X_{MP,0}^H = -S_{MP} \cos \alpha$$

Ausgangspunkt

$$Y_{MP,0}^H = -S_{MP} \sin \alpha$$

$$X_{MP,1}^H = -S_{MP} \cos [\alpha - | \Delta \alpha |]$$

ausgelenkte Stellung

$$Y_{MP,1}^H = -S_{MP} \sin [\alpha - | \Delta \alpha |]$$

$$\text{mit } S_{MP} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} = 637.3 \text{ mm}$$

$$\alpha = \arctan [S_1/S_2] = 27.4^\circ$$

$$\Delta Y_{MP,T}^H = |Y_{MP,1}^H - Y_{MP,0}^H|$$

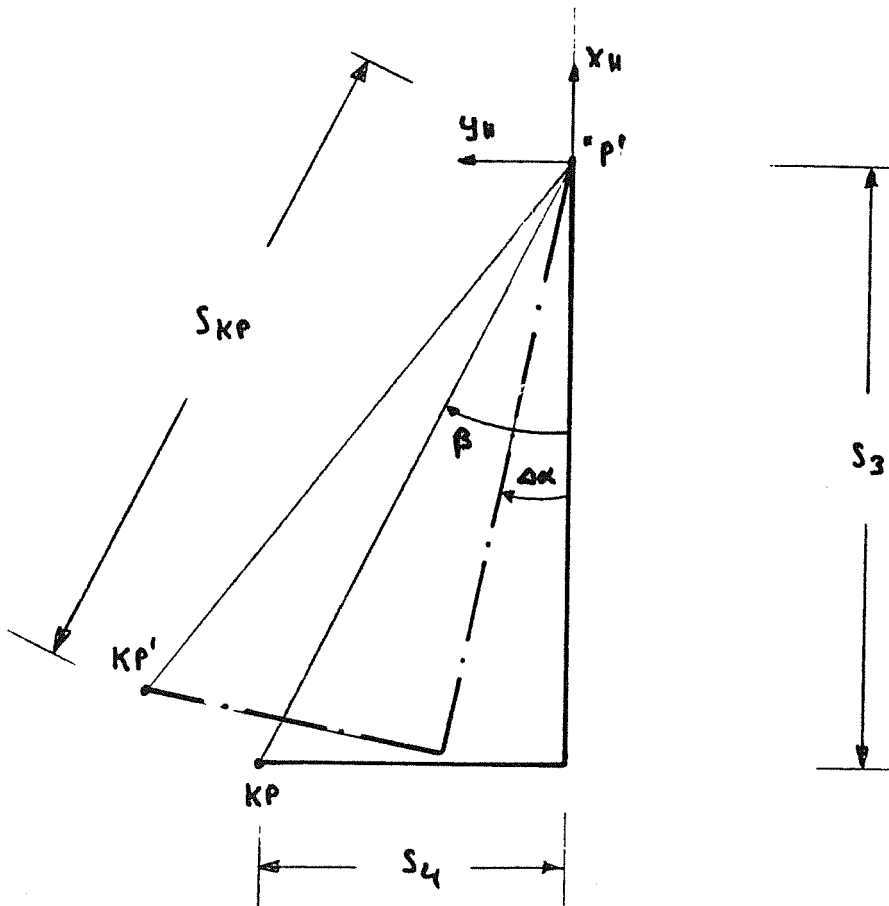
$$\Delta X_{MP,T}^H = |X_{MP,1}^H - X_{MP,0}^H|$$

b) Bestimmung der Verschiebung des Meßpunktes verursacht durch Biegung

$$\Delta Y_{MP,B}^H = | \Delta Y_{MP,MEB}^H - \Delta Y_{MP,T}^H |$$

$$\Delta X_{MP,B}^H = | \Delta X_{MP,MEB}^H - \Delta X_{MP,T}^H |$$

c) Bestimmung der Verschiebung des Kraftangriffspunktes verursacht durch Torsion



$$X_{KP,0}^H = S_{KP} \cos \beta$$

Ausgangsstellung

$$Y_{KP,0}^H = S_{KP} \sin \beta$$

$$X_{KP,1}^H = S_{KP} \cos [\beta - | \Delta \alpha |]$$

ausgelenkte Stellung

$$Y_{KP,1}^H = S_{KP} \sin [\beta - | \Delta \alpha |]$$

$$\begin{aligned} \text{mit } S_{KP} &= \sqrt{S_3^2 + S_4^2} = 682.5 \text{ mm} \\ \beta &= \arctan [S_4/S_3] = 23.48^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Y_{KP,T}^H &= \left| Y_{KP,1}^H \right| - \left| Y_{KP,0}^H \right| \\ \Delta X_{KP,T}^H &= \left| X_{KP,1}^H \right| - \left| X_{KP,0}^H \right| \end{aligned}$$

d) Bestimmung der Verschiebung des Kraftangriffspunktes verursacht durch Biegung

$$\begin{aligned} Y_{KP,B}^H &= Y_{MP,B}^H \\ X_{KP,B}^H &= (-1) X_{MP,B}^H = 0 \end{aligned}$$

Setzt man in die in den Punkten a - d aufgestellten Gleichungen die Meßdaten aus Anlage 3.1.5 ein, so erhält man für die Verschiebungen des Meß- und Kraftangriffspunktes bezüglich des Koordinatensystems X_H, Y_H folgende Werte:

Meßpunkt "MP"		Kraftangriffspunkt "KP"	
$Y_{MP,T}^H = 3.6 \text{ mm}$		$Y_{KP,T}^H = 3.92 \text{ mm}$	Y_H -Richtung
$X_{MP,T}^H = 1.8 \text{ mm}$		$X_{KP,T}^H = 1.9 \text{ mm}$	X_H -Richtung
$Y_{MP,B}^H = 1.53 \text{ mm}$		$Y_{KP,B}^H = 1.53 \text{ mm}$	Y_H -Richtung
$X_{MP,B}^H = -0.08 \text{ mm}$		$X_{KP,B}^H = +0.08 \text{ mm}$	X_H -Richtung

Bemerkenswert ist, daß die Verschiebung verursacht durch Torsion 70 % der Gesamtverschiebung ausmacht.

Nimmt man die vorher aufgestellte Annahme zu Hilfe, daß eine Verschiebung des Punktes "P" in X_H -Richtung nicht auftritt, so muß die gemessene Verschiebung des Meßpunktes in x_H -Richtung allein durch die Torsion verursacht worden sein.

$$X_{MP,MEß}^H = X_{MP,T}^H$$

Dieses ist jedoch nicht der Fall, weil die Differenz beider Größen den Wert -0.08 mm ergibt (siehe Tabelle). Hier ist eine Inkonsistenz der Meßdaten festzustellen. Mögliche Ursachen dieser Inkonsistenz sind:

- ungenaue Angaben der Längen l_1 bis l_4 , d.h. ungenaue Geometriedaten der Roboterhand
- mögliche Verformungen der Roboterhand, so daß die erste oben genannte Annahme nicht mehr gültig ist
- Einfluß der relativen Verschiebungen zwischen z-Achse und y-Achse

Da im Augenblick eine Überprüfung mit Korrektur der Daten nicht möglich ist, soll eine 2. Meßkampagne im Frühjahr 1991 gestartet werden, welche diese Inkonsistenzen beseitigt und darüberhinaus weitere Erkenntnisse über das statische Verformungsverhalten des Bearbeitungsroboters geben soll.

Grundsätzlich kann man folgende Ergebnisse festhalten:

- Das Verformungsverhalten des Bearbeitungsroboters KuKa ist linear
- die maximalen Verschiebungen in Zugrichtung (y_R -Richtung) betragen im Mittel 7.85 mm bezogen auf eine maximale Belastung von 0 bis 220 kg
- Die Verschiebung in Zugrichtung verursacht durch Torsion ist anteilmäßig sehr groß, kann aber nicht eindeutig quantitativ bestimmt werden.

Positionsabweichungsdaten

Meßdatei : 20210007
 Belastungsversuch : statisch (1)
 Roboter : KUKA2
 Datum : 14-05-90
 Anzahl der Meßwerte : 11
 Geschwindigkeit (%) : 0
 Last (kg) : 220
 Lastrichtung (WORLD) : positiver yR-Richtung
 Lastauflage : abnehmend von 220 bis 0 kg

Nr.	aufg. Last kg	Kraftmeßd. kg	x mm	y mm	z mm
1	220	-	-0.880	+1.650	0.000
2	190	212	-1.020	+1.650	-0.060
3	160	183	-1.880	+1.570	-0.450
4	140	155	-2.690	+1.470	-0.800
5	120	143	-3.150	+1.410	-0.990
6	100	111	-4.970	+1.150	-1.720
7	80	96	-5.370	+1.120	-1.910
8	60	75	-6.080	+1.060	-2.200
9	40	54	-7.030	+0.950	-2.200
10	20	31	-8.080	+0.850	-
11	0	10	-9.300	+0.720	-

Nr.	aufg. Last kg	Kraftmeßd. kg	A Grad	B Grad	C Grad
1	220	-	+0.324	-0.306	8.593
2	190	212	+0.322	-0.318	8.577
3	160	183	+0.310	-0.389	8.493
4	140	155	+0.299	-0.451	8.433
5	120	143	+0.292	-0.486	8.388
6	100	111	+0.275	-0.624	8.327
7	80	96	+0.267	-0.658	8.311
8	60	75	+0.256	-0.717	8.300
9	40	54	+0.243	-0.802	8.314
10	20	31	+0.230	-0.893	8.311
11	0	10	+0.217	-0.992	8.330

- Bemerkung:
- Steifigkeitsbestimmung
statische Belastung zur Bestimmung der Schrauben
und Lagerspiele
 - Nr.: 1 Kraftmeßdosenwert nicht plausibel
 - Nr.: 10,11 Interferometerwert nicht plausibel (Z-
Wert)
 - Gewicht der Belastungseinrichtung 10 kg

Anlage 3.1.4 Meßergebnisse in Tabellenform

Positionsabweichungsdaten

Meßdatei : 20220007
 Belastungsversuch : statisch (2)
 Roboter : KUKA2
 Datum : 14-05-90
 Anzahl der Meßwerte : 12
 Geschwindigkeit (%) : 0
 Last (kg) : 220
 Lastrichtung (WORLD) : positiver y-Richtung
 Lastauflage : zunehmend von 0 bis 220 kg

Nr.	aufg. Last kg	Kraftmeßd. kg	x mm	y mm	z mm
1	0	5	-9.330	+0.710	-
2	20	32	-8.670	+0.760	-
3	40	52	-7.840	+0.820	-
4	60	70	-7.170	+0.870	37.840
5	80	92	-6.350	+0.960	37.830
6	100	109	-5.670	+1.000	37.980
7	120	128	-4.920	+1.060	38.310
8	140	146	-4.250	+1.140	38.600
9	160	168	-3.380	+1.270	38.980
10	180	185	-2.750	+1.350	39.260
11	200	203	-2.040	+1.430	39.560
12	220	-	-	-	-

Nr.	aufg. Last kg	Kraftmeßd. kg	A Grad	B Grad	C Grad
1	0	5	+0.217	-0.993	8.339
2	20	32	+0.227	-0.936	8.340
3	40	52	+0.239	-0.869	8.329
4	60	70	+0.251	-0.813	8.307
5	80	92	+0.264	-0.738	8.301
6	100	109	+0.274	-0.681	8.306
7	120	128	+0.285	-0.621	8.328
8	140	146	+0.292	-0.568	8.332
9	160	168	+0.301	-0.497	8.363
10	180	185	+0.308	-0.447	8.395
11	200	203	+0.316	-0.393	8.459
12	220	-	-	-	-

Bemerkung:

- Nr.1,2,3 Interferometerwert (Z-Wert) nicht plausibel
- Nr. 12 220 kg Last nicht aufgebracht
- Nr. 4-12 Interferometer stabilisierte sich erst bei dem Wert 37.840

Positionsabweichungsdaten

Meßdatei : 20230007
 Belastungsversuch : statisch (1)
 Roboter : KUKA2
 Datum : 14-05-90
 Anzahl der Meßwerte : 12
 Geschwindigkeit (%) : 0
 Last (kg) : 220
 Lastrichtung (WORLD) : negativer z-Richtung
 Lastauflage : abnehmend von 220 bis 0 kg

Nr.	aufg. Last z kg mm	Kraftmeßd. kg	x mm	y mm
1	220	-	-7.230	- 2.490 0.000
2	200	-	-7.140	- 2.750 0.250
3	180	-	-7.030	- 3.030 0.510
4	160	-	-7.060	- 3.370 0.760
5	140	-	-6.950	- 3.640 1.010
6	120	-	-6.820	- 3.920 1.270
7	100	-	-7.160	- 4.200 1.510
8	80	-	-7.050	- 4.470 1.770
9	60	-	-6.920	- 4.740 2.030
10	40	-	-6.740	- 5.020 2.340
11	20	-	-6.540	- 5.250 2.620
12	0	-	-6.310	- 5.480 2.910

Nr.	aufg. Last kg	Kraftmeßd. kg	A Grad	B Grad	C Grad
1	220	-	-0.400	-0.199	7.650
2	200	-	-0.360	-0.201	7.660
3	180	-	-0.314	-0.202	7.704
4	160	-	-0.266	-0.208	7.737
5	140	-	-0.223	-0.209	7.775
6	120	-	-0.177	-0.211	7.814
7	100	-	-0.127	-0.209	7.849
8	80	-	-0.074	-0.216	7.898
9	60	-	-0.021	-0.220	7.944
10	40	-	+0.040	-0.228	7.999
11	20	-	+0.094	-0.230	8.043
12	0	-	+0.156	-0.234	8.109

Bemerkung: - Elimination von Schrauben und Lagerspiel
 - Gewicht der Belastungseinrichtung 16,6 kg

Positionsabweichungsdaten

```

Meßdatei           : 20240007
Belastungsversuch  : statisch (2)
Roboter            : KUKA2
Datum              : 14-05-90
Anzahl der Meßwerte : 12
Geschwindigkeit (%) : 0
Last (kg)          : 220
Lastrichtung (WORLD) : negativer z-Richtung
Lastauflage        : zunehmend von 0 bis 220 kg
    
```

Nr.	aufg. Last kg	Kraftmeßd. kg	x mm	y mm	z mm
1	0	-	-2.140	+0.270	0.000
2	20	-	-2.290	+0.460	-0.240
3	40	-	-2.390	+0.710	-0.490
4	60	-	-2.520	+0.940	-0.740
5	80	-	-2.650	+1.170	-1.000
6	100	-	-2.780	+1.450	-1.260
7	120	-	-2.930	+1.710	-1.540
8	140	-	-3.050	+1.990	-1.820
9	160	-	-3.200	+2.270	-2.090
10	180	-	-3.350	+2.540	-2.350
11	200	-	-3.510	+2.850	-2.650
12	220	-	-3.670	+3.080	-2.950

Nr.	aufg. Last kg	Kraftmeßd. kg	A Grad	B Grad	C Grad
1	0	-	+0.144	-0.231	7.915
2	20	-	+0.105	-0.232	7.026
3	40	-	+0.056	-0.244	7.883
4	60	-	+0.011	-0.221	7.854
5	80	-	-0.033	-0.218	7.810
6	100	-	-0.088	-0.212	7.791
7	120	-	-0.138	-0.209	7.771
8	140	-	-0.192	-0.205	7.773
9	160	-	-0.248	-0.198	7.756
10	180	-	-0.300	-0.195	7.757
11	200	-	-0.359	-0.189	7.737
12	220	-	-0.418	-0.184	7.724

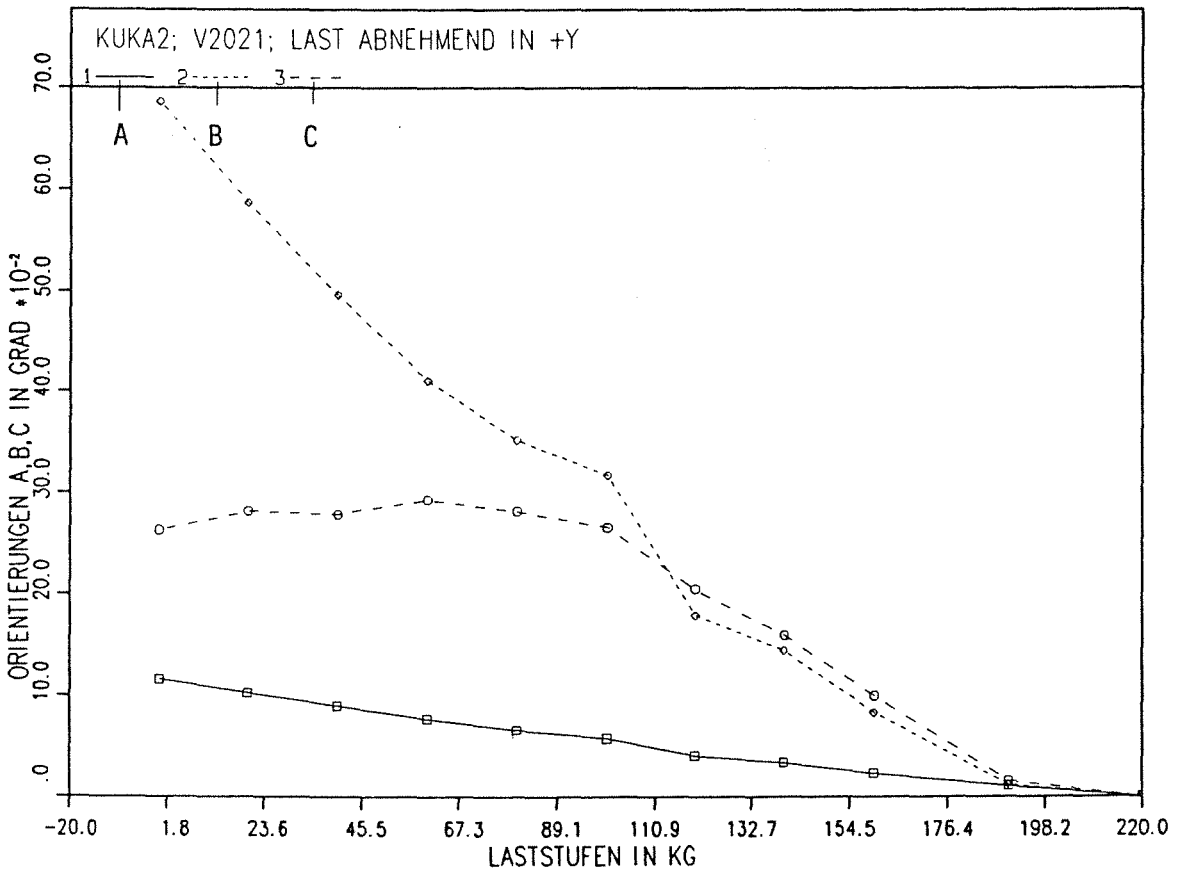
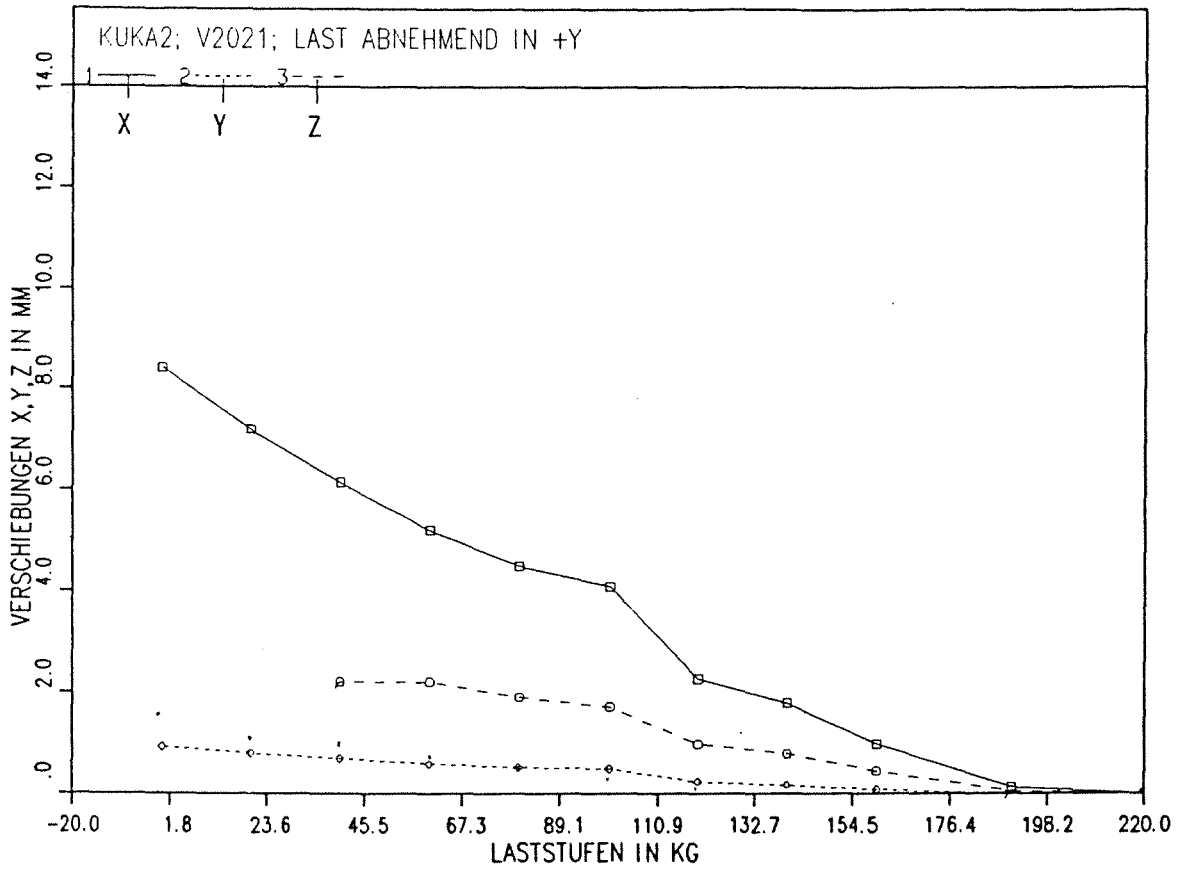
Positionsabweichungsdaten

```

Meßdatei           : 20250007
Belastungsversuch : statisch (3)
Roboter            : KUKA2
Datum              : 14-05-90
Anzahl der Meßwerte : 12
Geschwindigkeit (%) : 0
Last (kg)          : 220
Lastrichtung (WORLD) : negativer z-Richtung
Lastauflage        : abnehmend von 220 bis 0
(kg)
    
```

Nr.	aufg. Last kg	Kraftmeßd. kg	x mm	y mm	z mm
1	220	-	-3.680	+3.080	0.000
2	200	-	-3.600	+2.830	0.250
3	180	-	-3.500	+2.570	0.510
4	160	-	-3.400	+2.310	0.770
5	140	-	-3.280	+2.040	1.030
6	120	-	-3.170	+1.780	1.310
7	100	-	-3.050	+1.530	1.570
8	80	-	-2.960	+1.260	1.840
9	60	-	-2.790	+0.970	2.120
10	40	-	-2.630	+0.730	2.400
11	20	-	-2.430	+0.500	2.680
12	0	-	-2.190	+0.280	3.000

Nr.	aufg. Last kg	Kraftmeßd. kg	A Grad	B Grad	C Grad
1	220	-	-0.423	-0.182	7.714
2	200	-	-0.300	-0.186	7.700
3	180	-	-0.333	-0.189	7.685
4	160	-	-0.291	-0.192	7.682
5	140	-	-0.244	-0.194	7.691
6	120	-	-0.196	-0.196	7.690
7	100	-	-0.146	-0.204	7.688
8	80	-	-0.097	-0.209	7.723
9	60	-	-0.038	-0.216	7.756
10	40	-	+0.015	-0.222	7.787
11	20	-	+0.076	-0.229	7.861
12	0	-	+0.134	-0.233	7.894



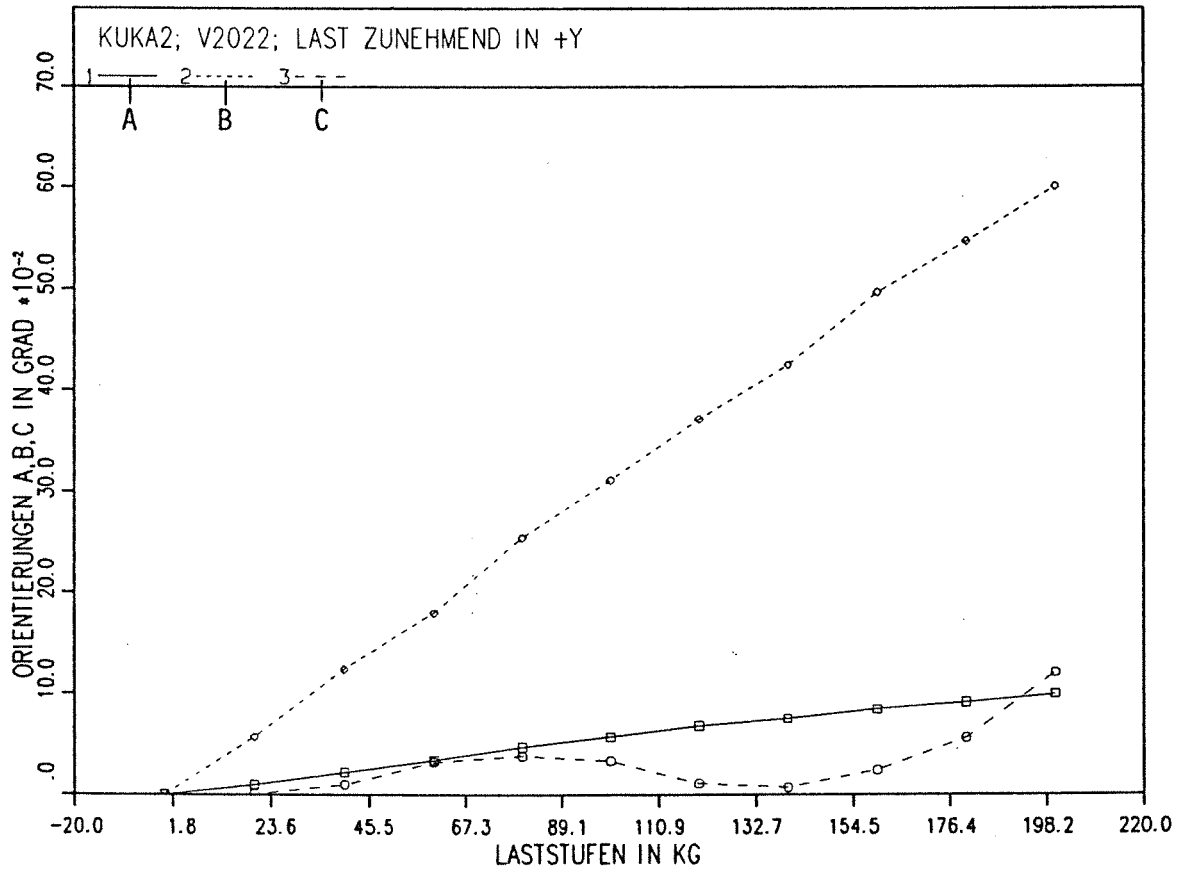
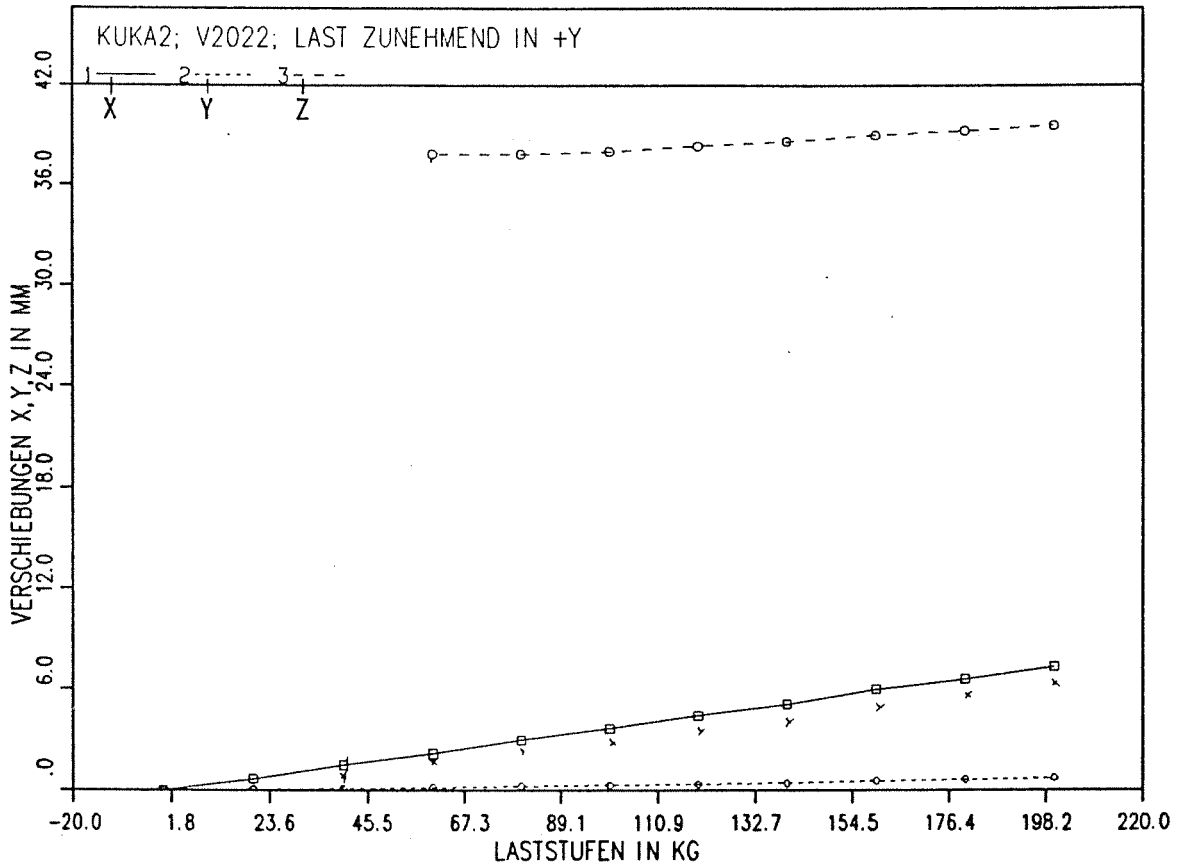
Anlage 3.1.9

Relative Verschiebung (oben)
Relative Orientierung (unten)

FILE= 2022 (0300)0001.SCHY:2IMG2

USEH= .SCHY

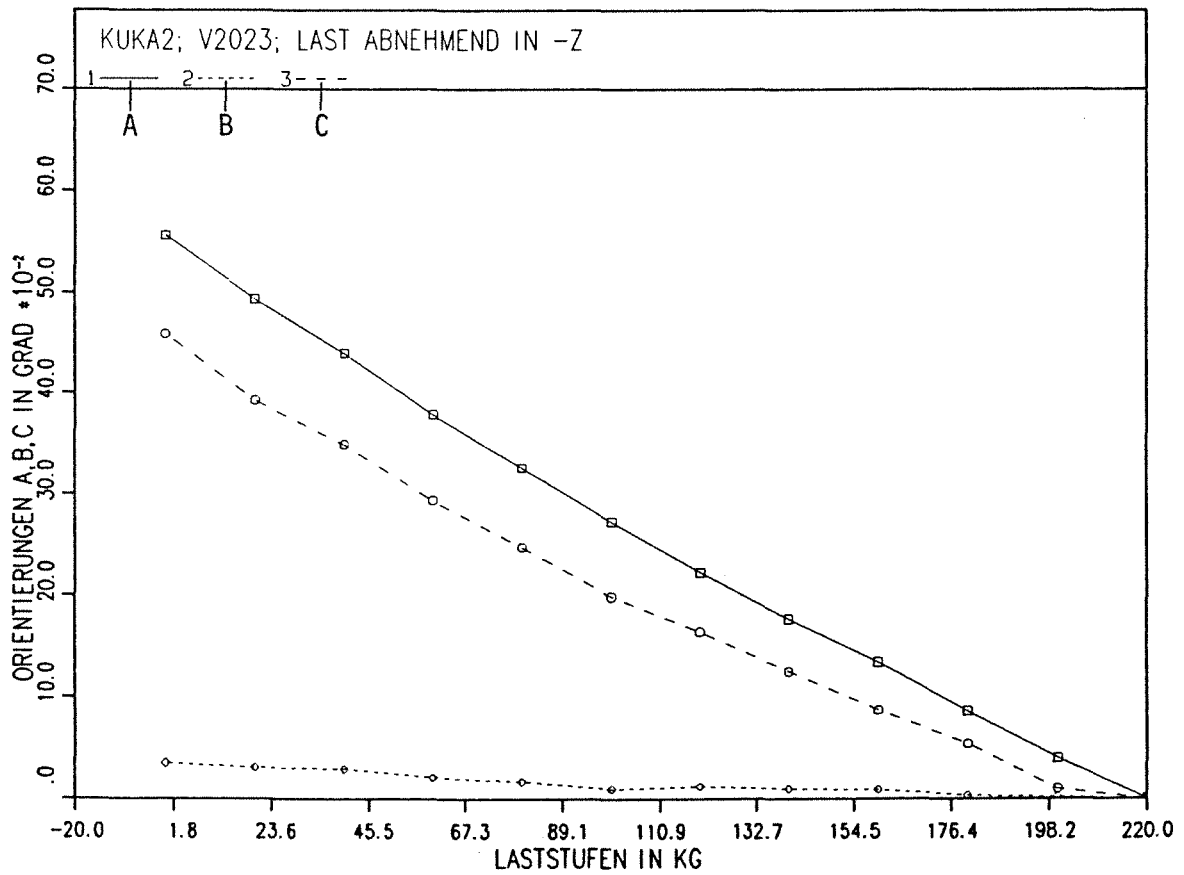
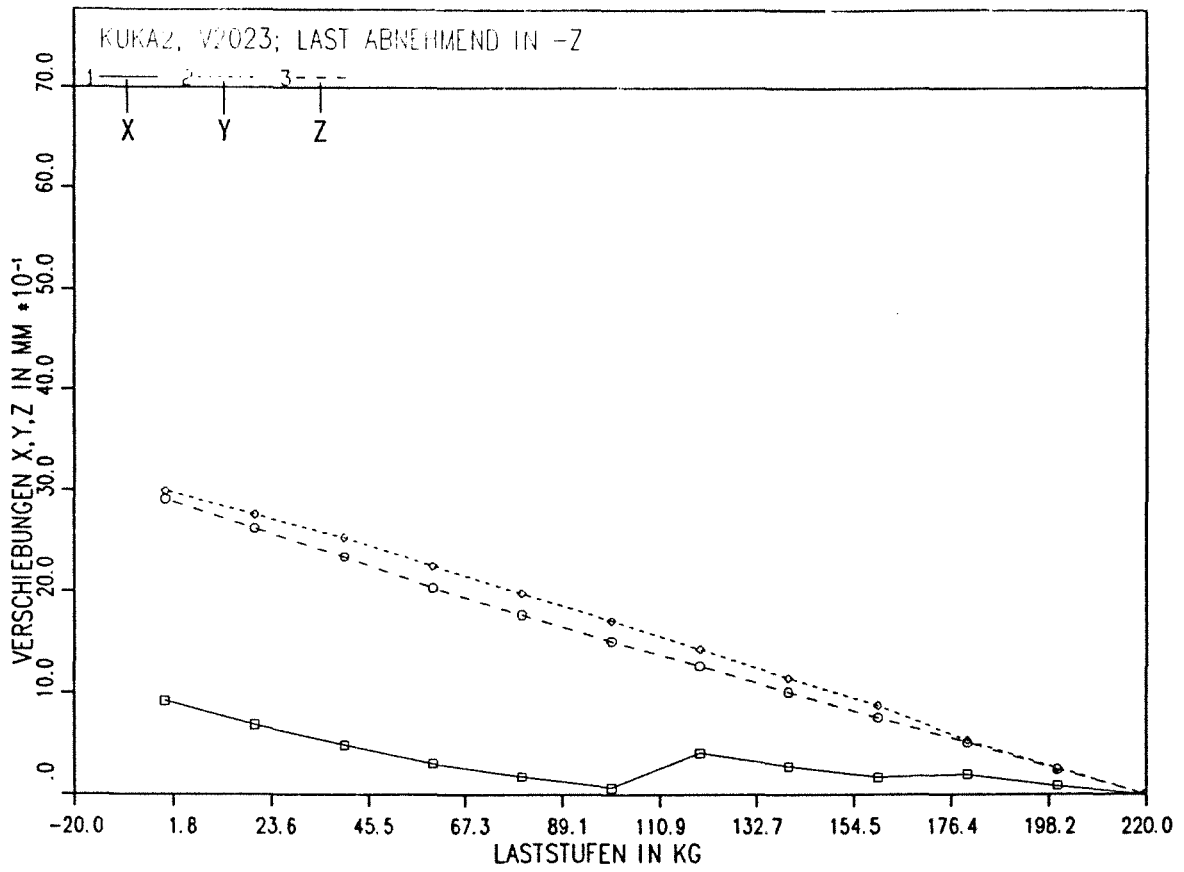
23. 6. 1990



Anlage 3.1.10

Relative Verschiebung (oben)

Relative Orientierung (unten)

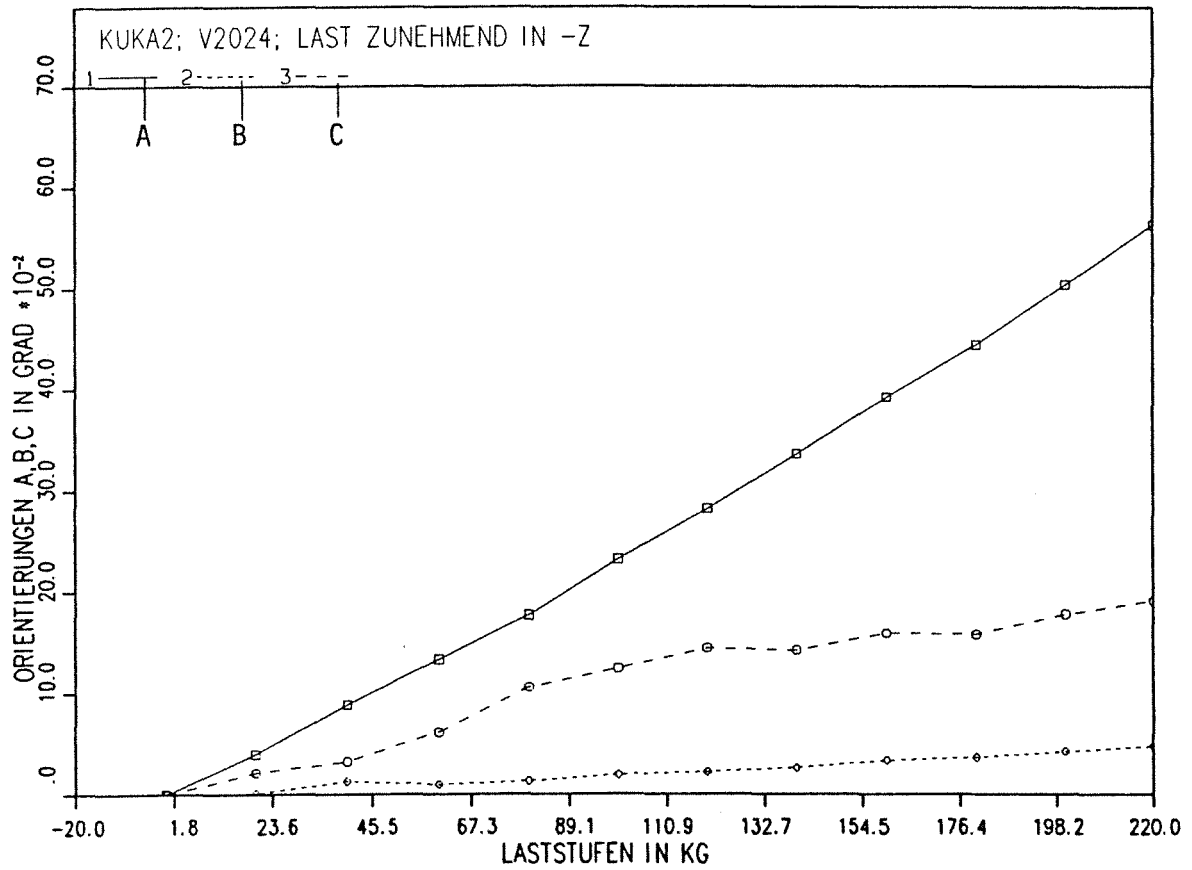
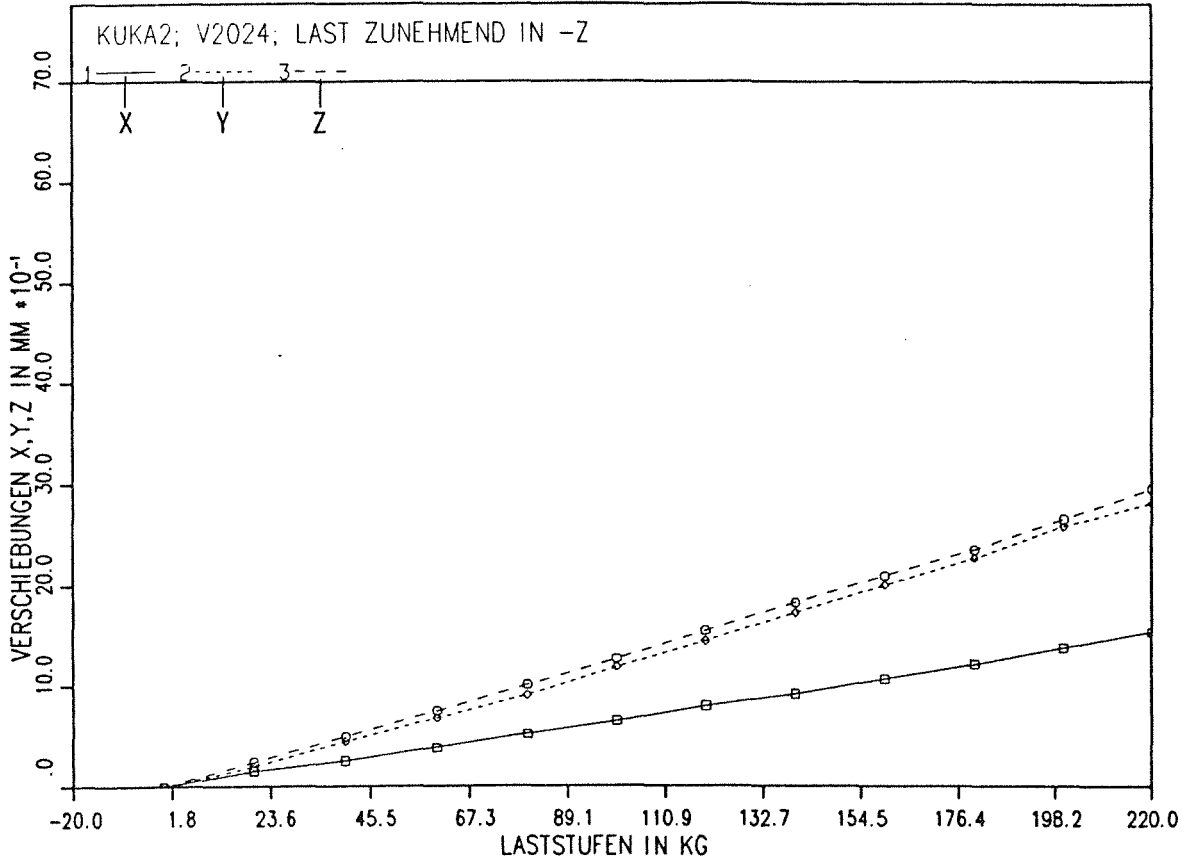


Anlage 3.1.11

Relative Verschiebung (oben)

Relative Orientierung (unten)

23. 8. 1990 13:46:42 USER= .SUNY FILE= ...:U52:\$UDD:.SCHY:z



FILE= c:\k2\...:UDD: .SCHY:2024)

13:49:07

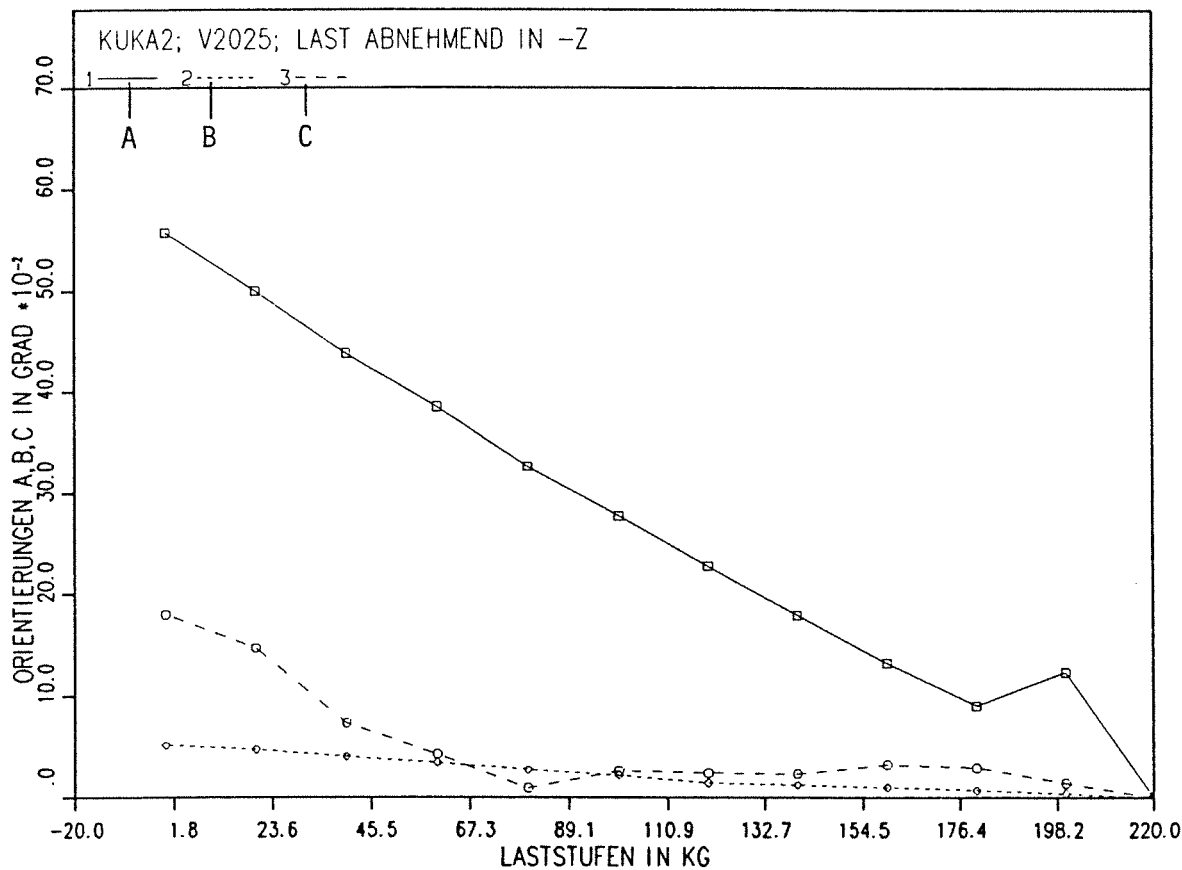
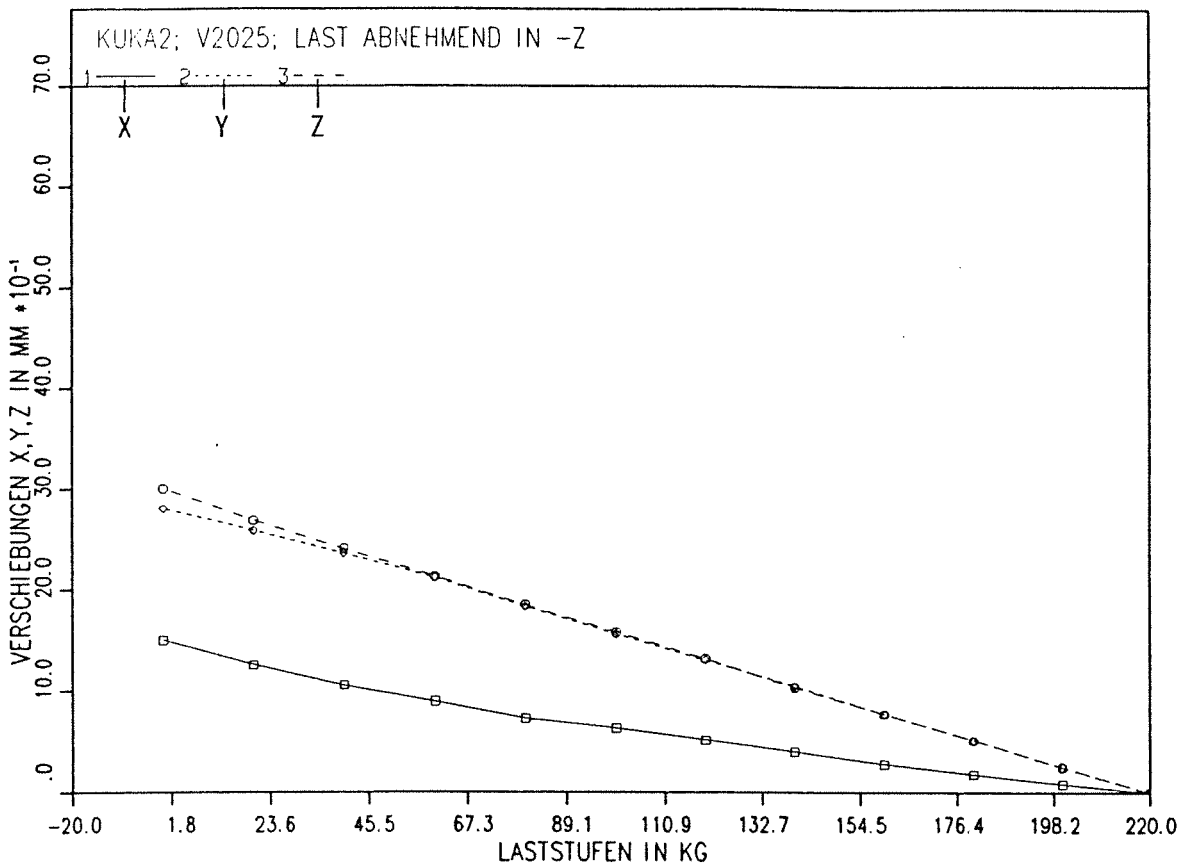
1990



Anlage 3.1.12

Relative Verschiebung (oben)

Relative Orientierung (unten)



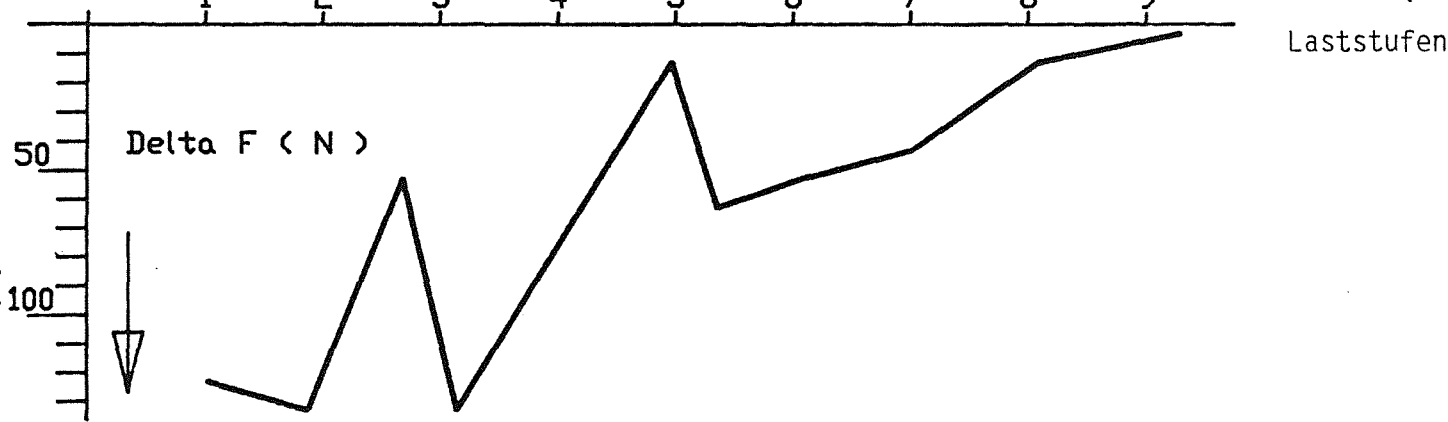
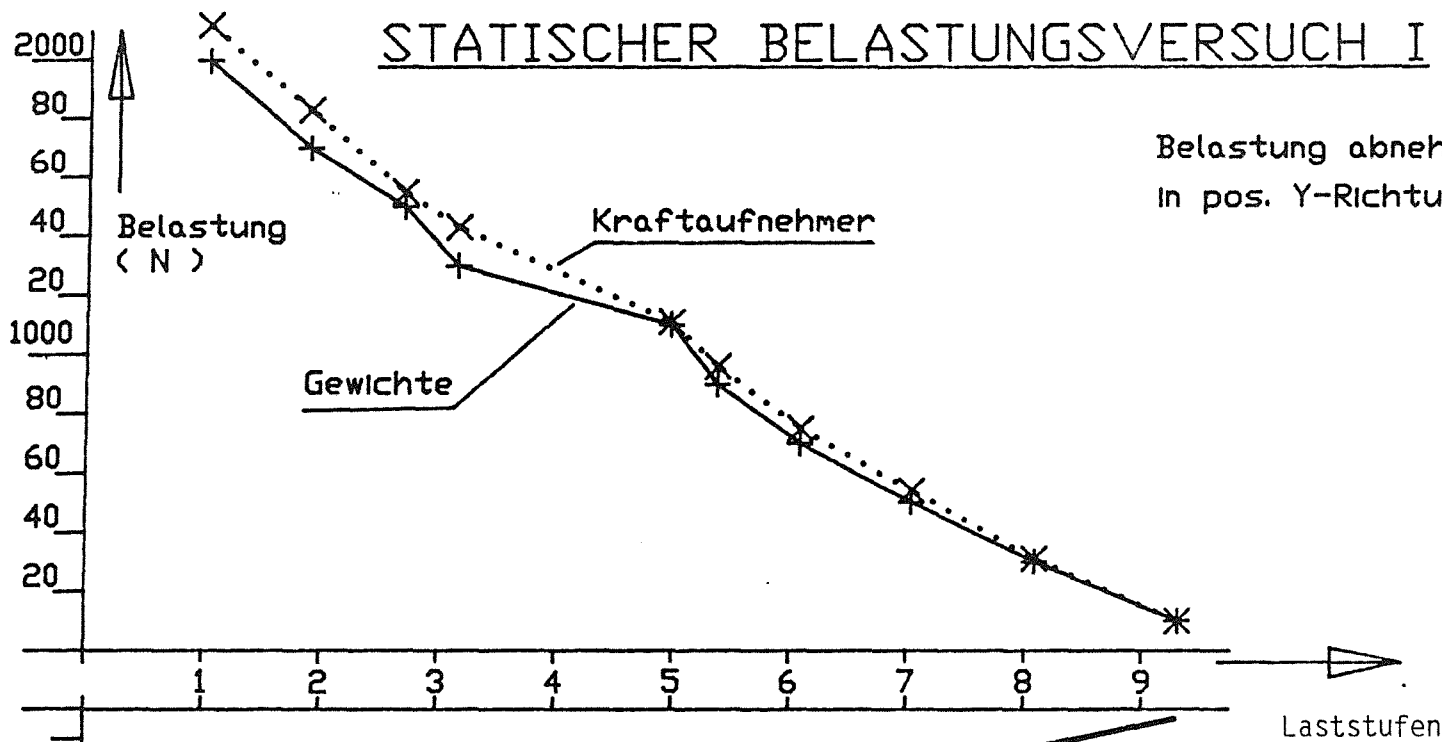
Anlage 3.1.13

Relative Verschiebung (oben)
Relative Orientierung (unten)



STATISCHER BELASTUNGSVERSUCH I

Belastung abnehmend
in pos. Y-Richtung



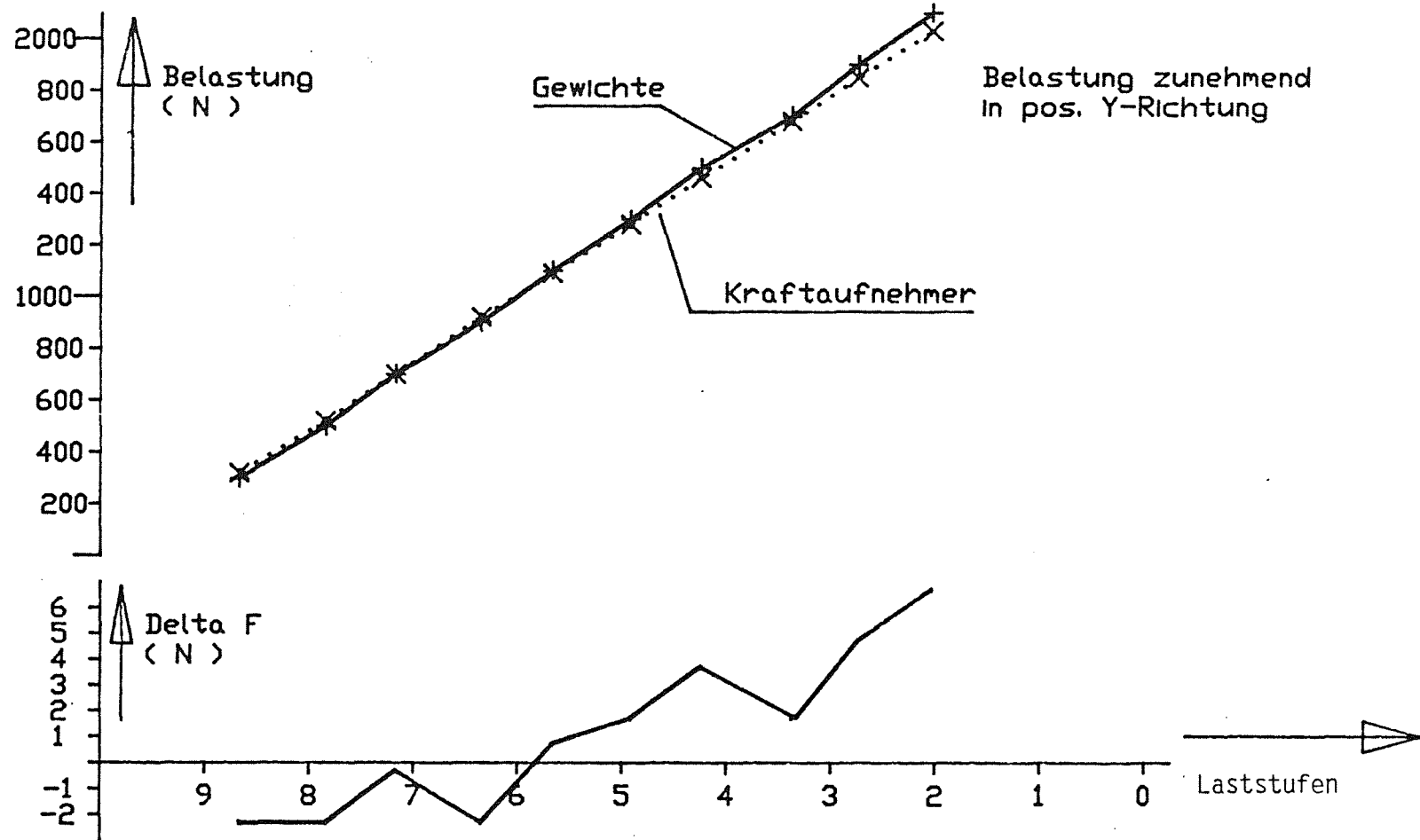
Anlage 3.1.14

Differenzwerte zwischen Kraftmessdosen-Anzeige und aufgelegter Last

STATISCHER BELASTUNGSVERSUCH II

Anlage 3.1.15

Differenzwerte zwischen Kraftmeßdosen-Anzeige
und aufgelegter Last



3.2 Belastungsmessungen am Schräggelenkroboter (NOELL)

Am Schräggelenkroboter (NOELL) wurden zwei Belastungsversuche durchgeführt. Aufgrund der komplexen Schräggelenkkinematik des Systems läßt sich keine eindeutige Zuordnung zwischen Belastungsrichtung und zu untersuchende Achse erkennen. Trotzdem wurde der Roboterarm analog zum Bearbeitungsroboter (KUKA) parallel zur xR- und yR-Achse des Roboterkoordinatensystems belastet. Die Meßergebnisse lassen nur eine integrale Aussage über das statische Verformungsverhalten zu. Ein Vergleich mit den Meßwerten des Bearbeitungsroboters (KUKA) ist deshalb nur bedingt möglich.

Die Kräfte wurden ebenfalls stufenweise über spezielle Belastungseinrichtungen auf den Roboterarm aufgebracht. Diese Belastungseinrichtungen und die damit erzielten Meßergebnisse werden im folgenden ausführlich erläutert.

3.2.1 Meßaufbau und Belastungseinrichtungen

In Anlage 3.2.1 sind die geometrischen Verhältnisse für diese zwei Belastungsfälle zu sehen. Von Bedeutung für die Interpretation der Meßdaten ist die Lage der drei Koordinatensysteme zueinander.

xR/yR/zR	-	Roboterkoordinatensystem (WORLD)
xH/yH/zH	-	Hilfskoordinatensystem (TCP-Ursprung; Maschinenkonstante 100 alle Werte zur 0)
xL/yL/zL	-	Laser bzw. Meßkoordinatensystem
A/B/C	-	Nick-/Gier-/Rollwinkel

Die Position und Orientierung der Roboterhand ergibt sich aus

xR - 1090	A	-90
yR - 1544	B	0
zR - 722	C	0

für die yR Belastungsrichtung und aus

xR - 1322	A	-90
yR - 1326	B	0
zR - 800	C	0

für die -xR Belastungsrichtung (Angaben in WORLD)

Für die yR-Belastungsrichtung verlief der Laserstrahl parallel zur yR-Richtung und für die xR-Richtung parallel zur xR-Richtung des Roboterkoordinatensystems.

Belastungseinrichtung: negative yR-Richtung

Diese Belastungseinrichtung, wie sie in Anlage 3.2.2 zu sehen ist, funktionierte ähnlich wie ein Flaschenzug. Sie bestand aus einer Führungsschiene, die an der Umhausungswand angeschraubt war. An dieser Führungsschiene war ein 3-Rollen-Schlitten beweglich montiert, der durch ein Stahlseil die aufgebrachte Last in zwei Komponenten aufteilte.

Die Lastaufbringung erfolgte jeweils symmetrisch an beiden Enden des Stahlseils. Bei statischen Belastungsversuchen wurde der Schlitten auf der Führungsschiene festgeklemmt. Wegen der engen Platzverhältnisse zwischen Roboterhand und Umhausungswand ließ sich eine Kraftmeßdose nicht plazieren. Die Kraftrichtung verlief parallel zur yR-Richtung des Roboterkoordinatensystems.

Die unterschiedlichen Positionen von Meßpunkt und Kraftangriffspunkt sind in Anlage 3.2.3 zu sehen. Die Hebelarme bezüglich des Hilfskoordinatensystems zur Berechnung der Momente und Interpretation der Verschiebung sind besonders gekennzeichnet. Die Abweichungen in x, y, z-Richtung sind bezüglich Hilfskoordinaten gegeben.

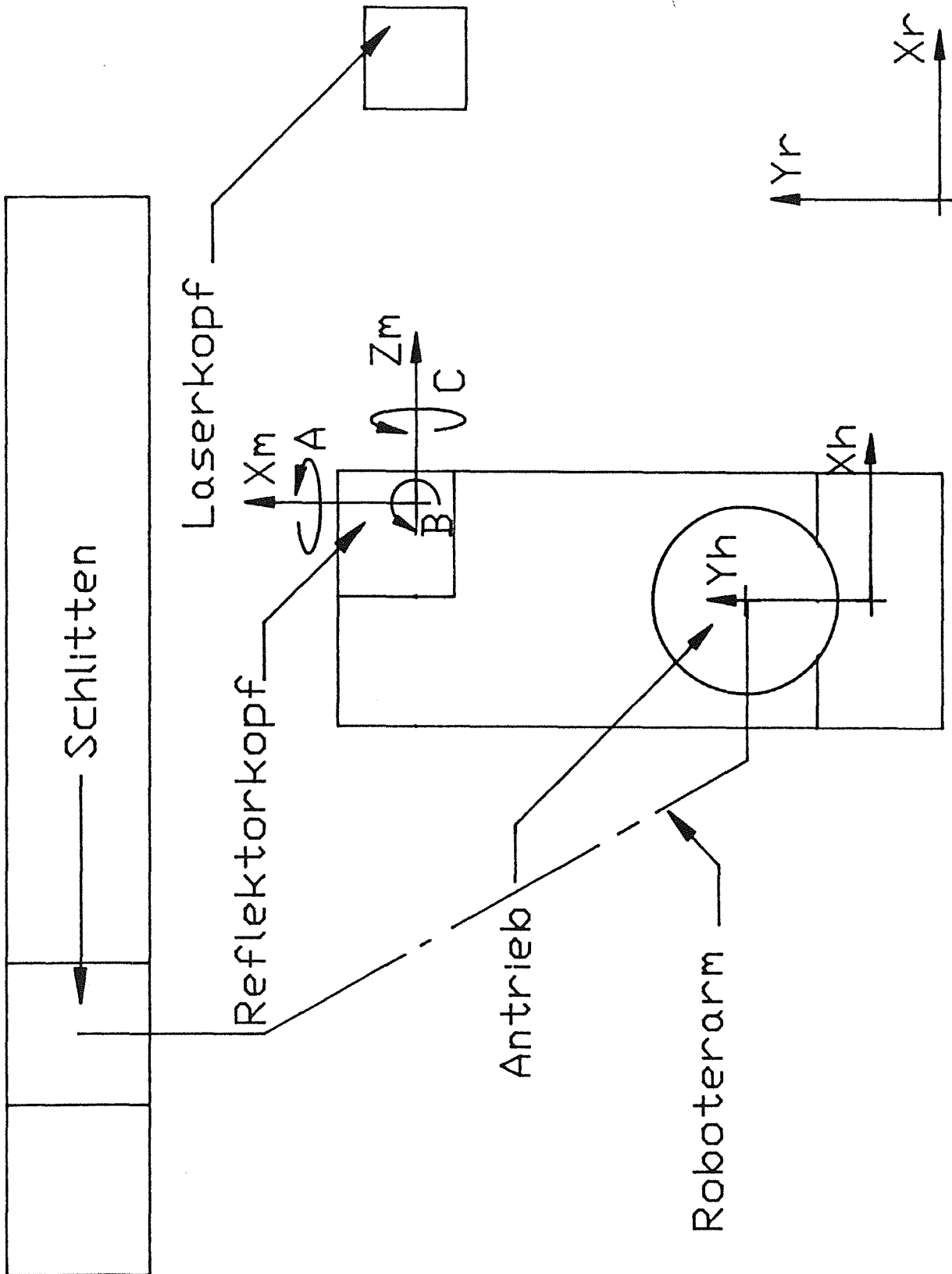
Meßpunkt	-	xM/yM/zM
Kraftangriffspunkt	-	xK/yK/zK

Belastungseinrichtung: negative xR-Richtung

Die Belastungseinrichtung ist in **Anlage 3.2.4** zu sehen. Sie war ähnlich aufgebaut wie die Portalroboter in yR-Richtung (siehe Punkt 3.1.1). Die Umlenkrolle war ebenfalls auf einer Stange (Vierkantprofil) befestigt, die an den Stützen des Portalroboters festgeklemmt war. Es wurde ein Hanfseil verwendet. Eine Kraftmeßdose wurde nicht eingesetzt. Die Kraftrichtung verlief annähernd parallel zur xR-Richtung des Roboterkoordinatensystems. Das Eigengewicht der Stahlkonstruktion, in die die Gewichte eingehängt wurden, betrug 10 kg.

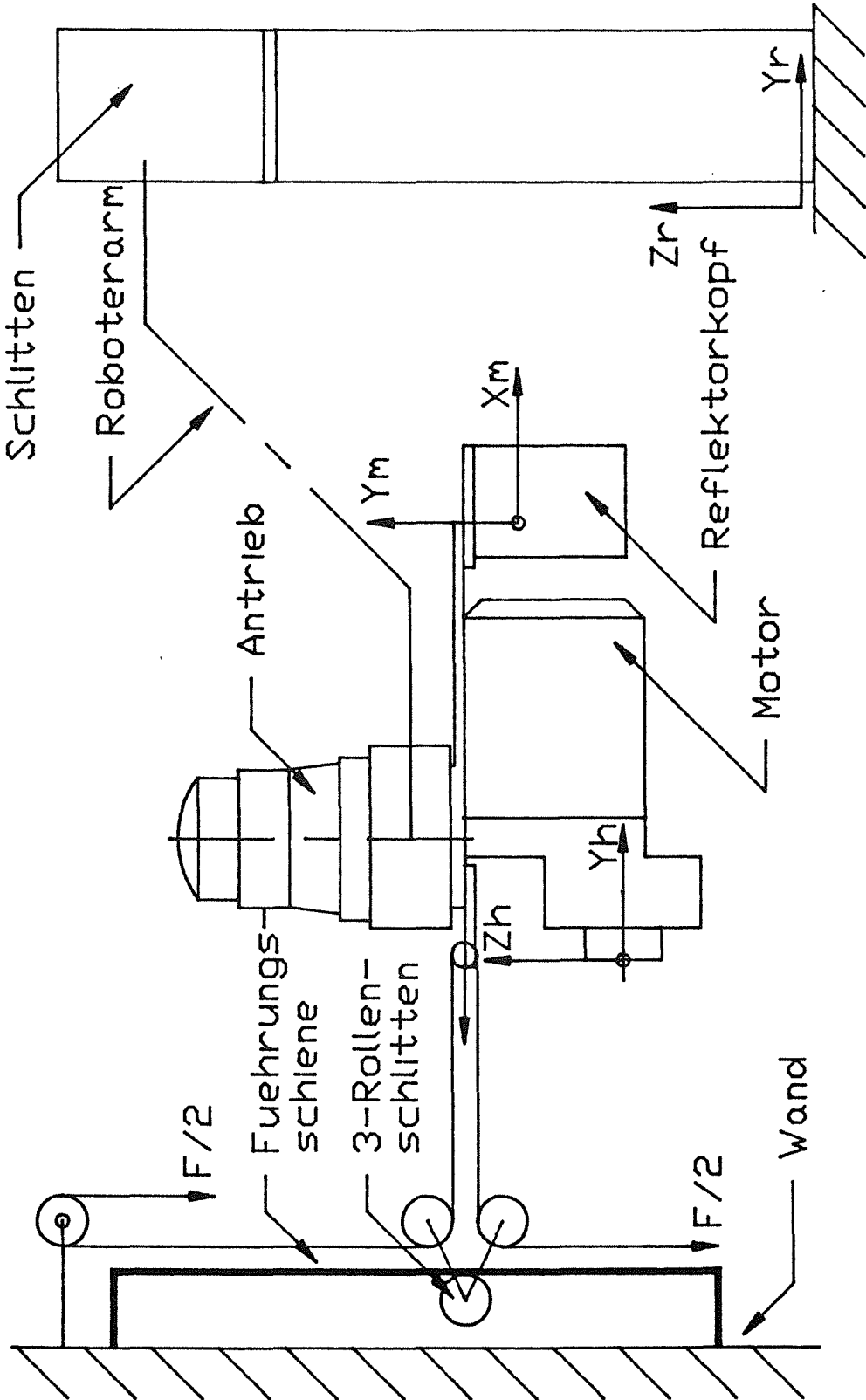
Anlage 3.2.4 zeigt im Detail die Roboterhand. Der Meßpunkt ist nicht identisch mit dem Kraftangriffspunkt. Die entsprechenden Hebelarme bezüglich eines Hilfskoordinatensystems kann man **Anlage 3.2.4** entnehmen. Alle Angaben der x, y, z-Werte sind auf das Hilfskoordinatensystem bezogen.

Meßpunkt	-	xM/yM/zM
Kraftangriffspunkt	-	xK/yK/zK



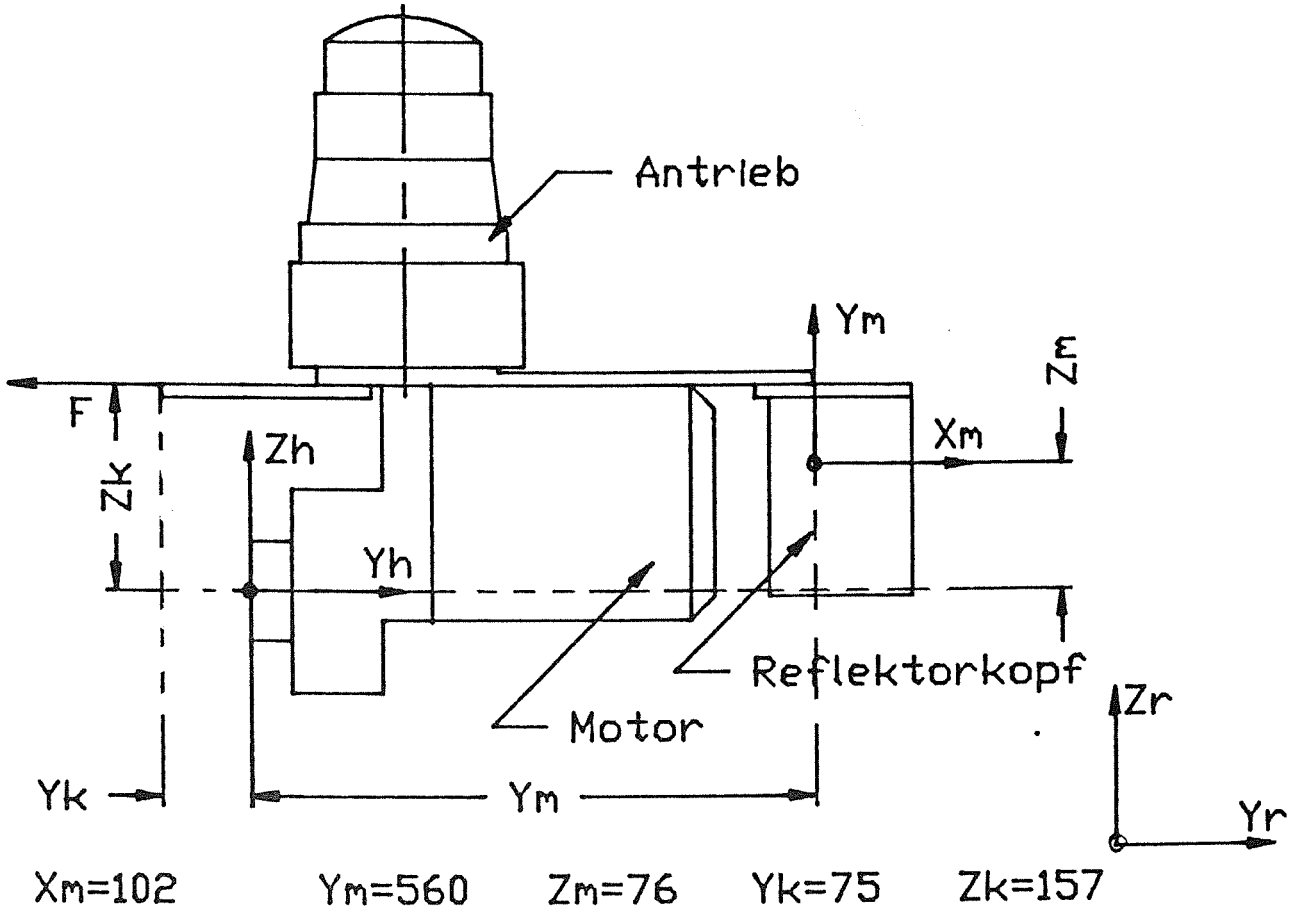
Anlage 3.2.1

Position der Koordinatensysteme während der Belastung in y_R -Richtung

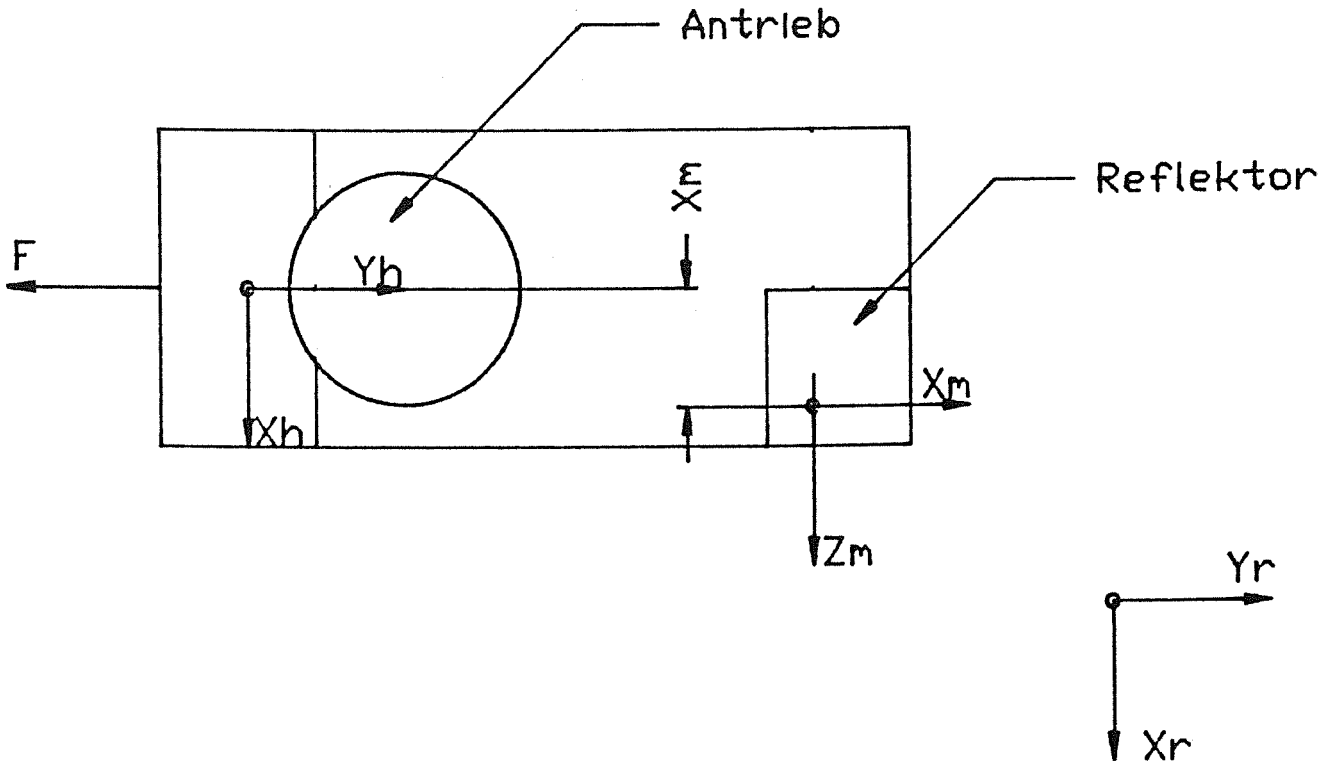


Anlage 3.2.2

Geometrie der Roboterhand mit
Belastungseinrichtung für Y_r -Richtung

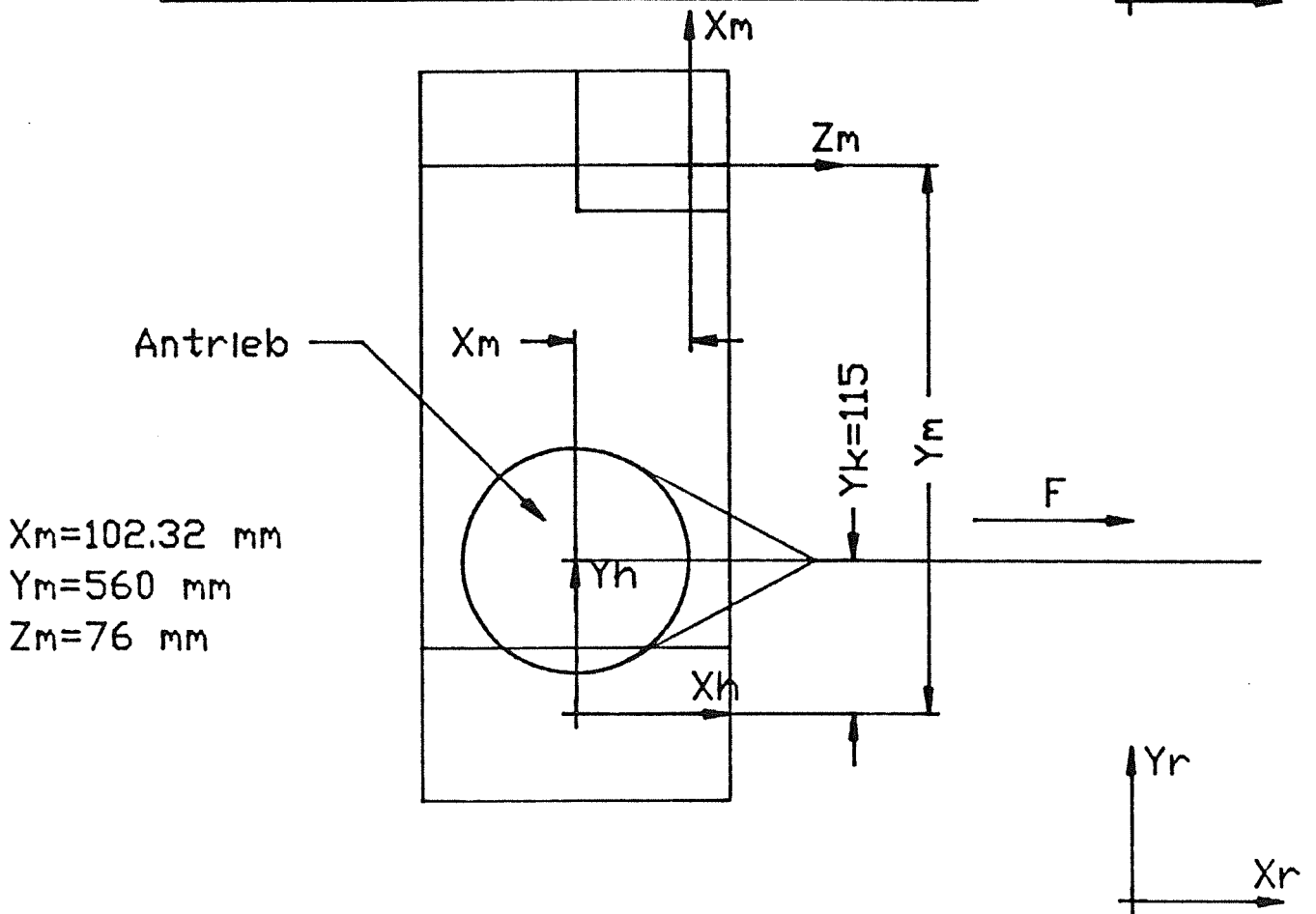
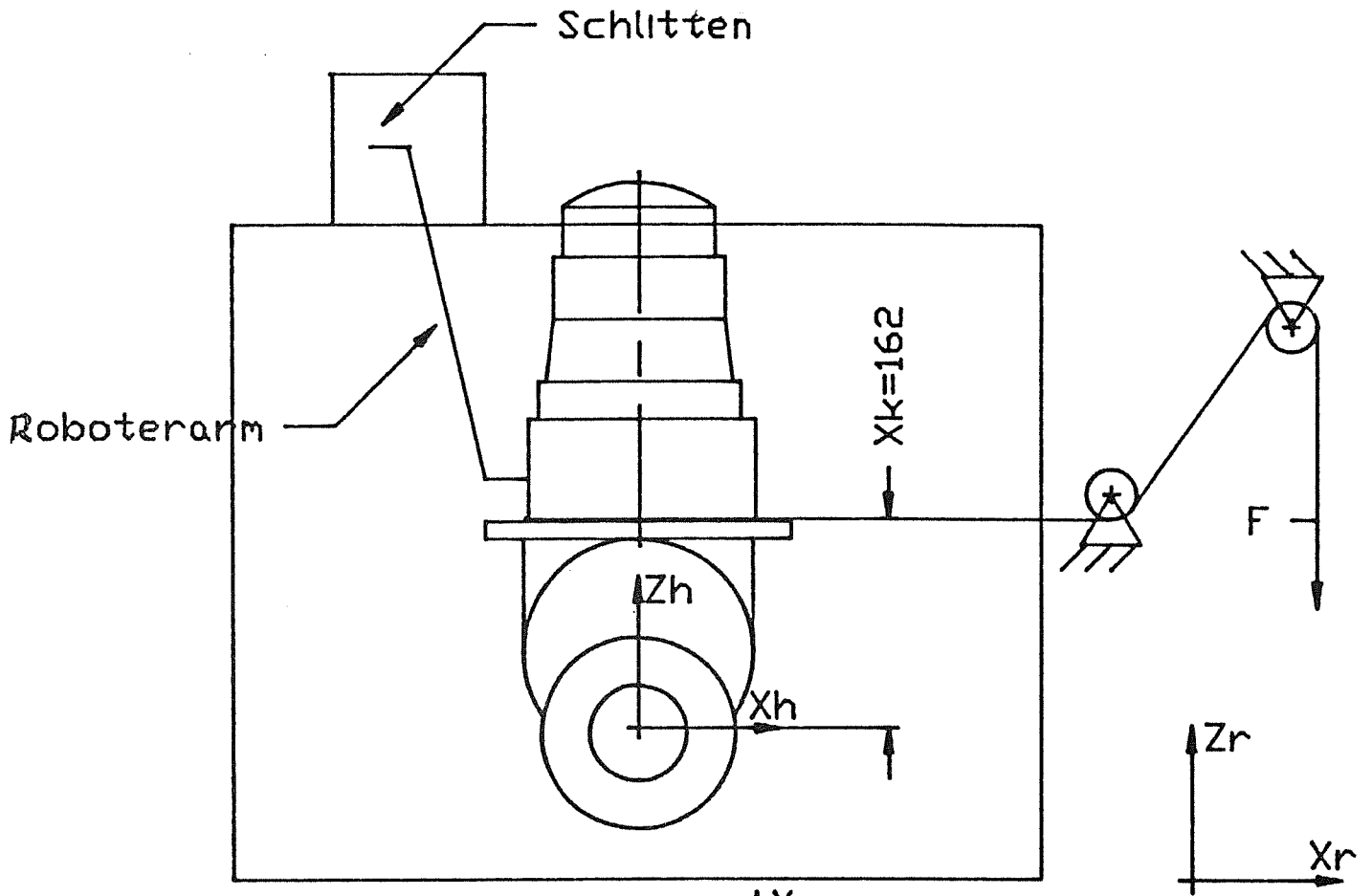


Alle Maassangaben in Millimeter



Anlage 3.2.3

Geometrie an der Roboterhand für Y_r -Richtung



$X_m=102.32$ mm
 $Y_m=560$ mm
 $Z_m=76$ mm

Anlage 3.2.4

Geometrie der Roboterhand für x_R -Richtung

3.2.2 Durchführung der Messungen und Meßergebnisse

Durchführung

Die Durchführung der Messungen entspricht der beim Portalroboter und ist in Abschnitt 2.1.2 ausführlich beschrieben.

Der Roboterarm wurde in 10 kg Stufen bis max. 90 kg belastet. Verwendet wurde ein Hanfseil. Dehnungs- und Schwingungseffekte, welche die Meßergebnisse beeinflussen könnten, wurden dadurch vermieden, daß man nach Auflage einer Laststufe 30 Sekunden wartete, bis die Messung vorgenommen wurde. Eine Kraftmeßdose kam nicht zum Einsatz. Eine Vorbelastung des Roboterarmes zur Elimination von Lager- oder Schraubenspiel wurde nicht vorgenommen. Beim Belastungsversuch in yR-Richtung wurde die Roboterhand dreimal hintereinander jeweils be- und entlastet.

Meßergebnisse

Die Meßergebnisse sind in Anlage 3.2.5-8 dargestellt. Die Größen $X_L/Y_L/Z_L$ sind die gemessenen Verschiebungen im Laserkoordinatensystem. A/B/C die dazugehörigen Orientierungen (A = Nickwinkel, B = Gierwinkel, C = Rollwinkel). Die Definition der Vorzeichen für die Verschiebungen und Orientierungen ist in Abschnitt 3.1.2 erklärt und in Anlage 3.2.1 zu sehen. Die Messungen sind Relativmessungen.

In Anlage 3.2.9-12 sind die Meßergebnisse als Kurven dargestellt. Aufgetragen sind die relativen Verschiebungen (X_L, Y_L, Z_L) und die relativen Orientierungen (A, B, C) über den Belastungsstufen. Der erste Meßwert wurde als Bezugswert benutzt. Die weiteren Meßwerte wurden als Inkremente dazuaddiert. Man erkennt ein annähernd nichtlineares Verhalten der Verschiebungen und Orientierungen. Die Maximalwerte der Verschiebungen in Zugrichtung betragen für die

y-Richtung	:	0.8 mm
x-Richtung	:	0.38 mm

Positionsabweichungsdaten

Meßdatei : 30210007
 Belastungsversuch : statisch
 Roboter : Noell
 Anzahl der Meßwerte : 9
 Geschwindigkeit (%) : 0
 Last (kg) : 80
 Lastrichtung (WORLD) : negative Y_R -Richtung
 Lastauflage : zunehmend von 0 bis 80 (kg)

Nr.	x mm	y mm	z mm
1	-0.366	0.151	-0.02
2	-0.317	0.137	-0.02
3	-0.266	0.110	-0.01
4	-0.093	0.055	-0.01
5	-0.011	0.042	-0.02
6	0.064	0.002	-0.01
7	0.168	-0.030	-0.01
8	0.327	-0.176	0.04
9	0.454	-0.292	0.06

Nr.	A Grad	B Grad	C Grad
1	-0.027	-0.030	-0.049
2	-0.025	-0.026	-0.050
3	-0.020	-0.018	-0.039
4	-0.012	-0.007	-0.024
5	-0.008	0.000	-0.018
6	-0.001	0.006	0.007
7	0.006	0.014	0.027
8	0.034	0.025	0.068
9	0.055	0.035	0.079

Positionsabweichungsdaten

Meßdatei : 30220007
 Belastungsversuch : statisch
 Roboter : Noell
 Anzahl der Meßwerte : 10
 Geschwindigkeit (%) : 0
 Last (kg) : 90
 Lastrichtung (WORLD) : negative Y_R -Richtung
 Lastauflage : abnehmend von 0 bis 80 (kg)

Nr.	x mm	y mm	z mm
1	0.420	-0.212	0.04
2	0.356	-0.197	0.05
3	0.273	-0.163	0.03
4	0.177	-0.123	0.04
5	0.082	-0.080	0.03
6	-0.037	0.033	-0.01
7	-0.159	0.098	-0.03
8	-0.291	0.164	-0.03
9	-0.408	0.237	-0.05
10	-0.414	0.243	-0.05

Nr.	A Grad	B Grad	C Grad
1	0.039	0.033	0.072
2	0.038	0.028	0.069
3	0.032	0.021	0.058
4	0.025	0.013	0.033
5	0.015	0.006	0.018
6	-0.008	-0.002	-0.011
7	-0.021	-0.012	-0.044
8	-0.032	-0.022	-0.055
9	-0.044	-0.032	-0.070
10	-0.045	-0.033	-0.070

Positionsabweichungsdaten

Meßdatei : 30230007
Belastungsversuch : statisch
Roboter : Noell
Anzahl der Meßwerte : 10
Geschwindigkeit (%) : 0
Last (kg) : 90
Lastrichtung (WORLD) : negative Y_R -Richtung
Lastauflage : abnehmend von 90 bis 0 (kg)

Nr.	x mm	y mm	z mm
1	-0.423	0.190	-0.04
2	-0.374	0.177	-0.03
3	-0.289	0.150	-0.02
4	-0.183	0.128	-0.03
5	-0.088	0.094	-0.04
6	0.008	0.048	-0.02
7	0.234	-0.146	0.03
8	0.311	-0.159	0.03
9	0.398	-0.238	0.05
10	0.405	-0.243	0.06

Nr.	A Grad	B Grad	C Grad
1	-0.036	-0.034	-0.060
2	-0.033	-0.030	-0.062
3	-0.029	-0.023	-0.051
4	-0.025	-0.014	-0.040
5	-0.019	-0.005	-0.029
6	-0.011	0.002	-0.018
7	0.029	0.018	0.040
8	0.032	0.024	0.060
9	0.045	0.031	0.076
10	0.047	0.031	0.085

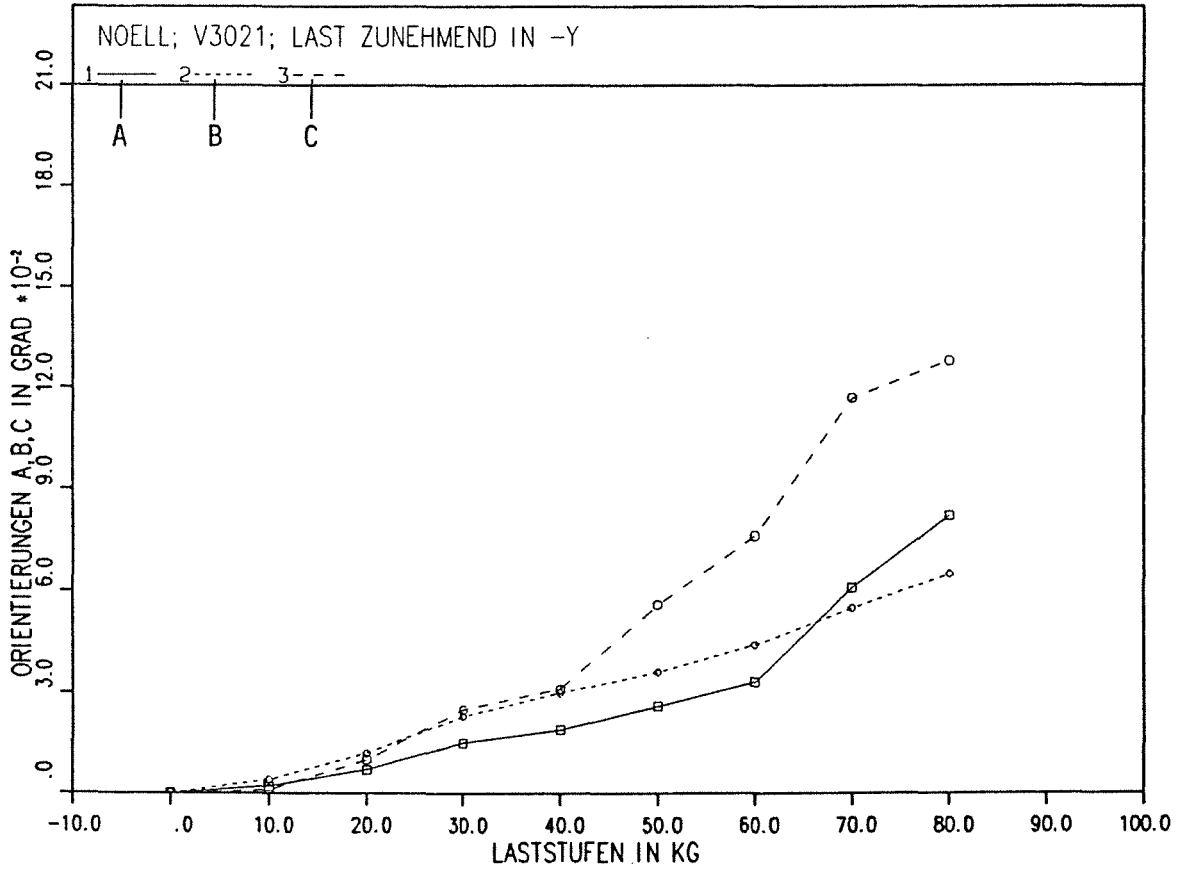
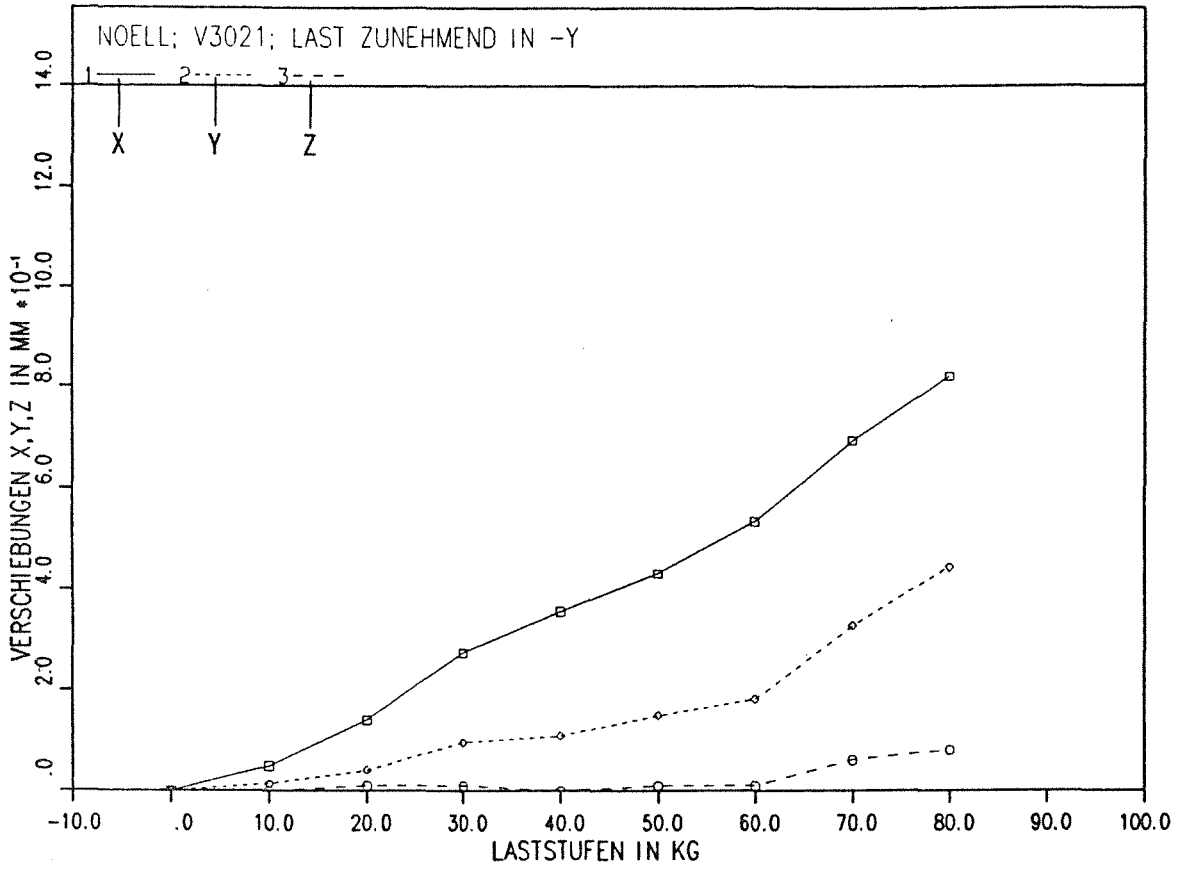
Positionsabweichungsdaten

Meßdatei : 30000081
 Belastungsversuch : statisch
 Roboter : Noell
 Anzahl der Meßwerte : 9
 Geschwindigkeit (%) : 0
 Last (kg) : 90
 Lastrichtung (WORLD) : negative X_R -Richtung
 Lastauflage : abnehmend von 90 bis 10 (kg)

Nr.	x mm	y mm	z mm
1	0.170	0.368	-0.02
2	0.128	0.272	-0.06
3	0.099	0.173	-0.03
4	0.056	0.053	-0.01
5	0.022	-0.041	0.01
6	-0.024	-0.127	0.04
7	-0.085	-0.189	0.04
8	-0.151	-0.232	0.06
9	-0.215	-0.275	0.07

Nr.	A Grad	B Grad	C Grad
1	0.001	-0.001	0.060
2	0.004	-0.001	0.048
3	0.008	0.001	0.049
4	0.012	0.001	0.032
5	0.014	0.002	0.022
6	0.009	0.001	-0.001
7	-0.002	0.001	-0.035
8	-0.016	-0.001	-0.070
9	-0.030	-0.003	-0.104

Anlage 3.2.8 Meßergebnisse in Tabellenform



Anlage 3.2.9

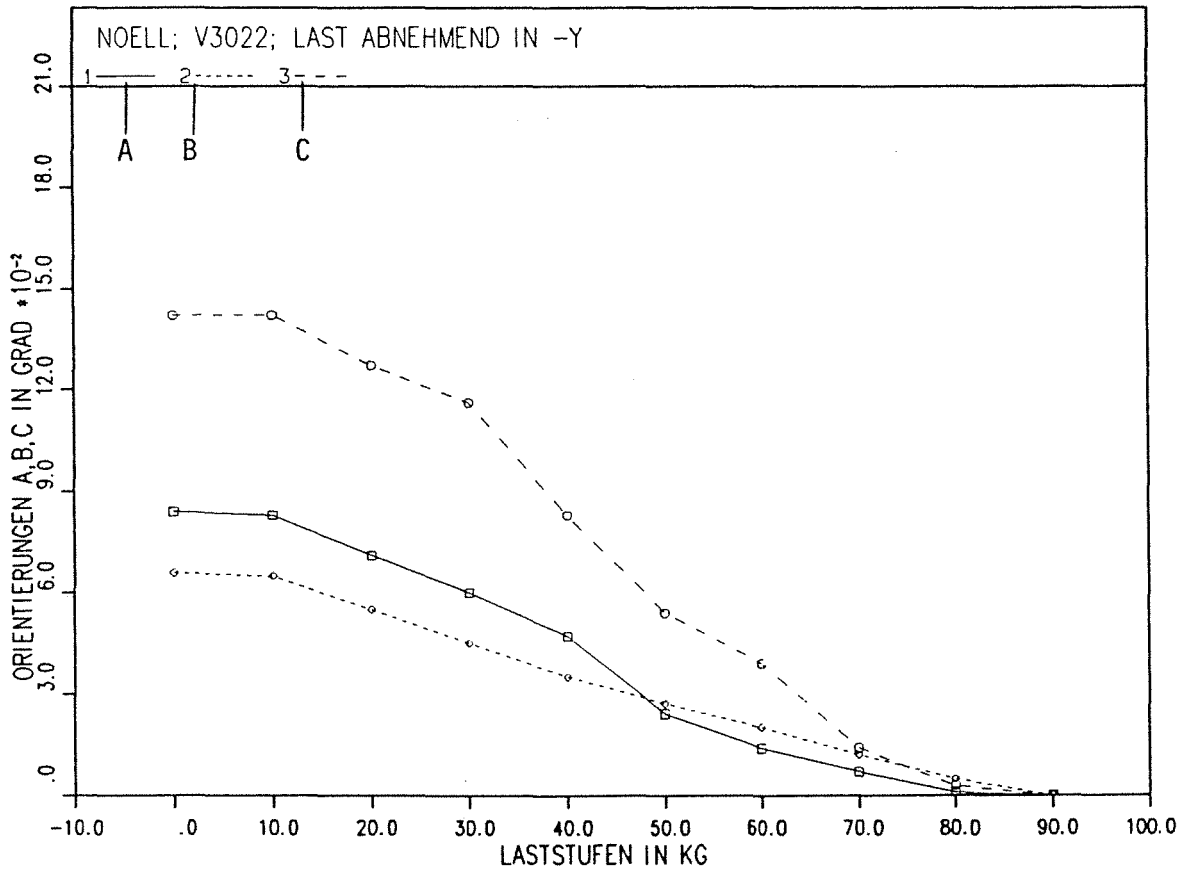
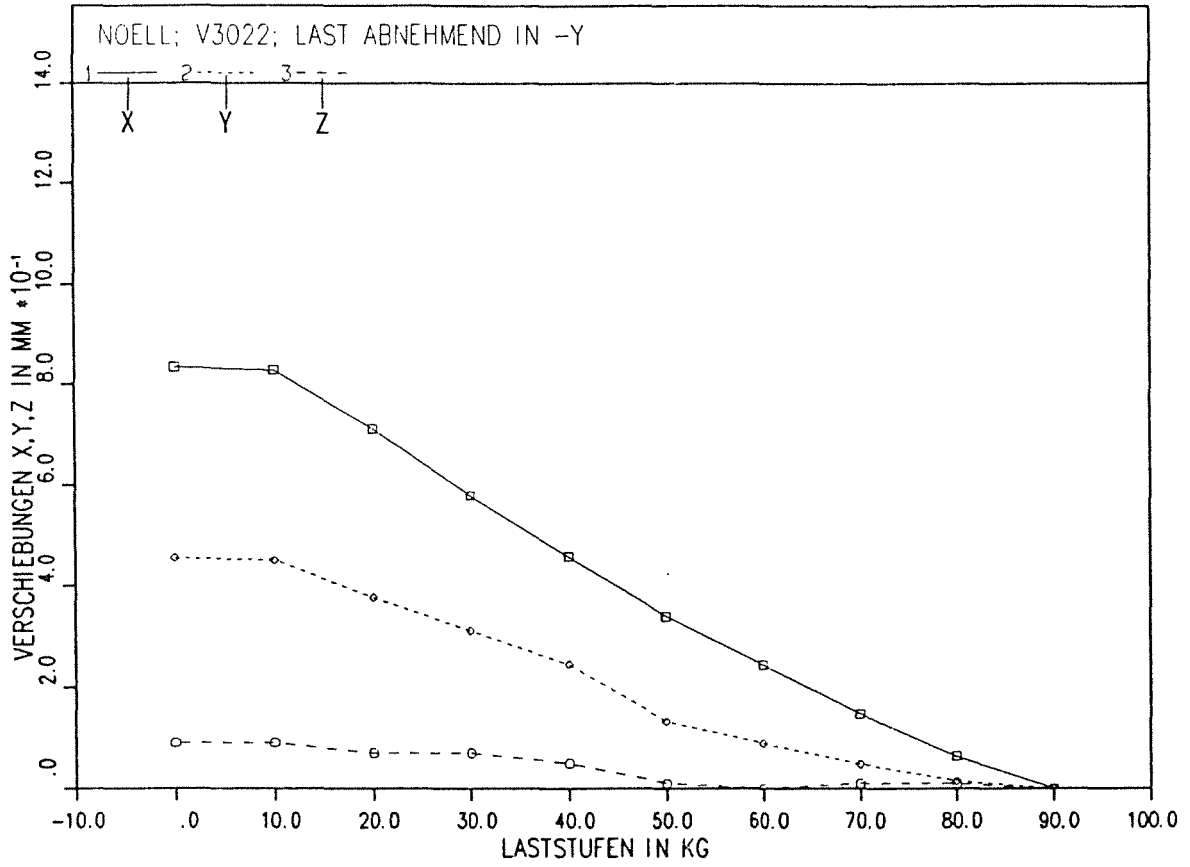
Relative Verschiebung (oben)
Relative Orientierung (unten)

FILE: (C:\US2:\UDD:\SCHY:3021)

SCHY

13:48:44

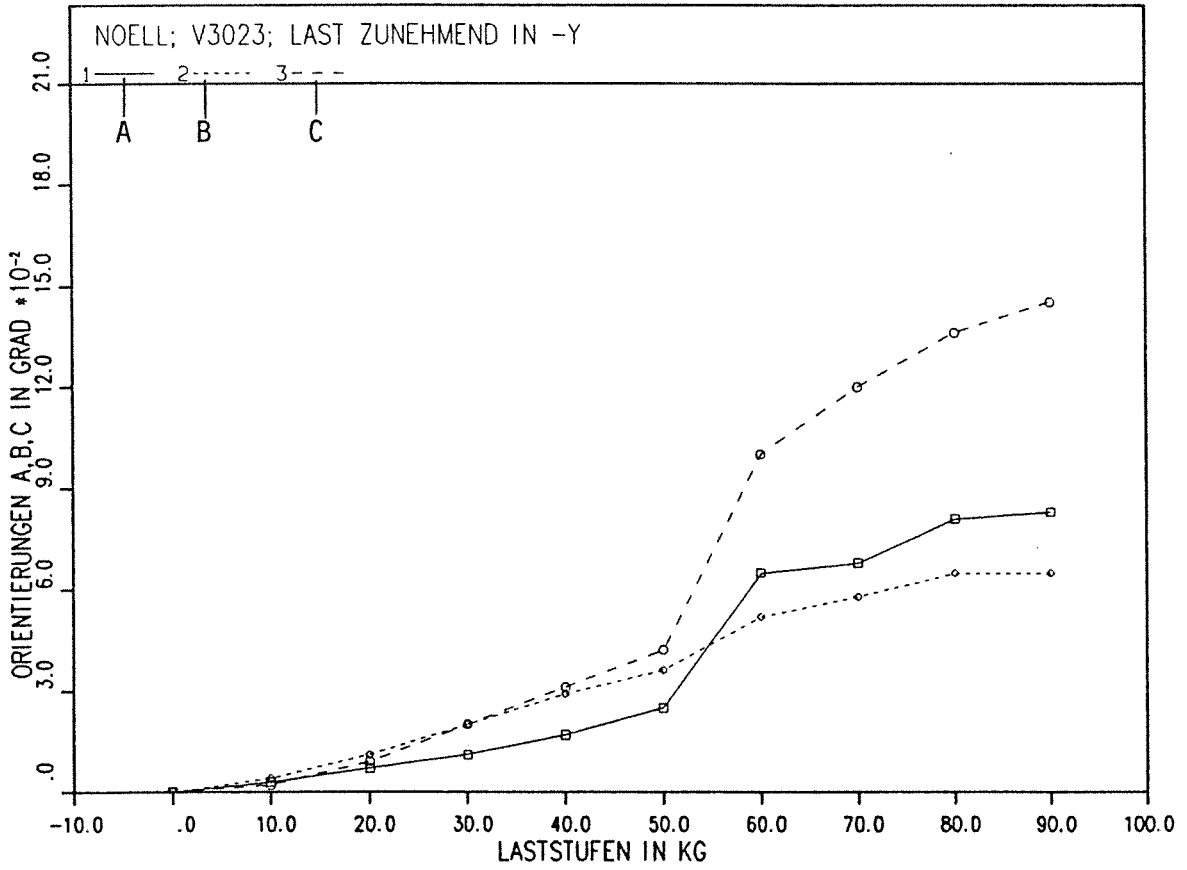
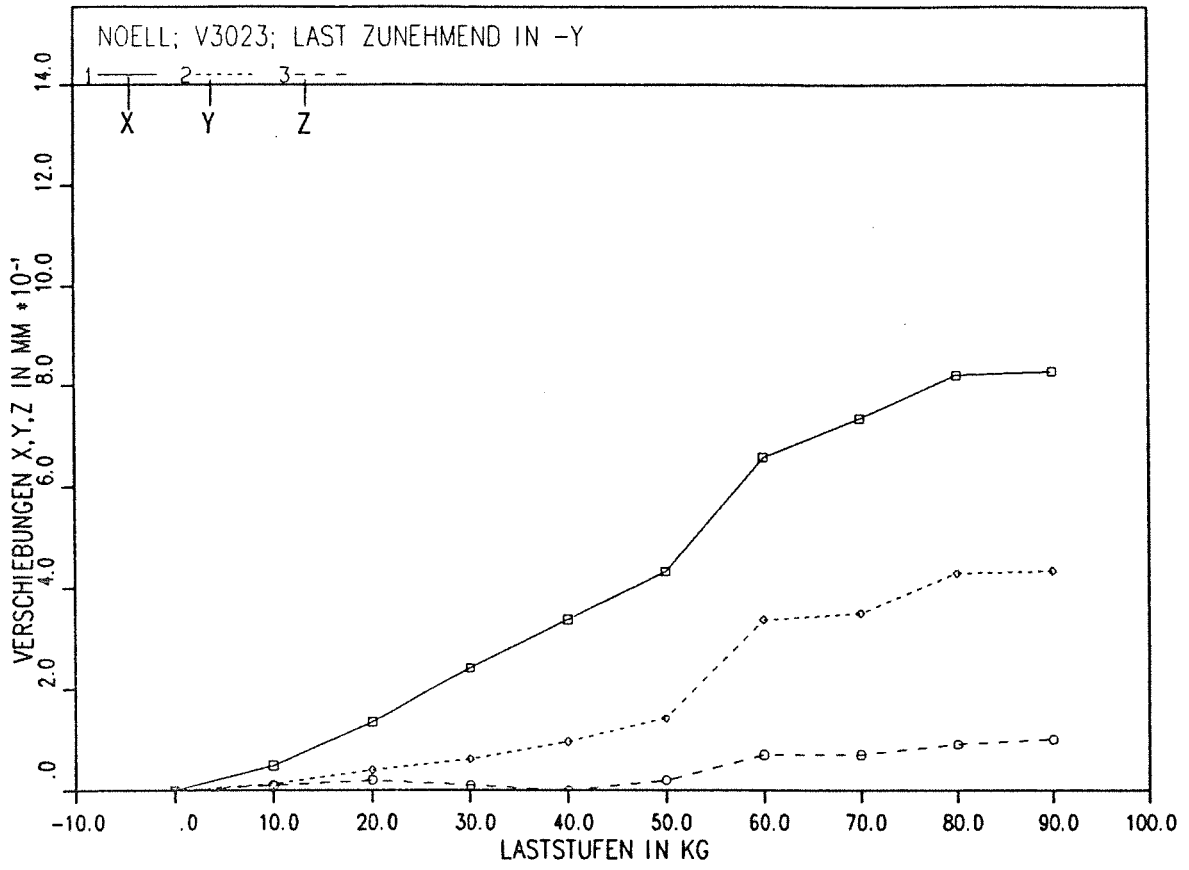
23. 8. 1990



Anlage 3.2.10

Relative Verschiebung (oben)
Relative Orientierung (unten)

23. 8. 1977 11:57 USER= .SCHY FILE #UC240001.SD (022)



Anlage 3.2.11

Relative Verschiebung (oben)

Relative Orientierung (unten)

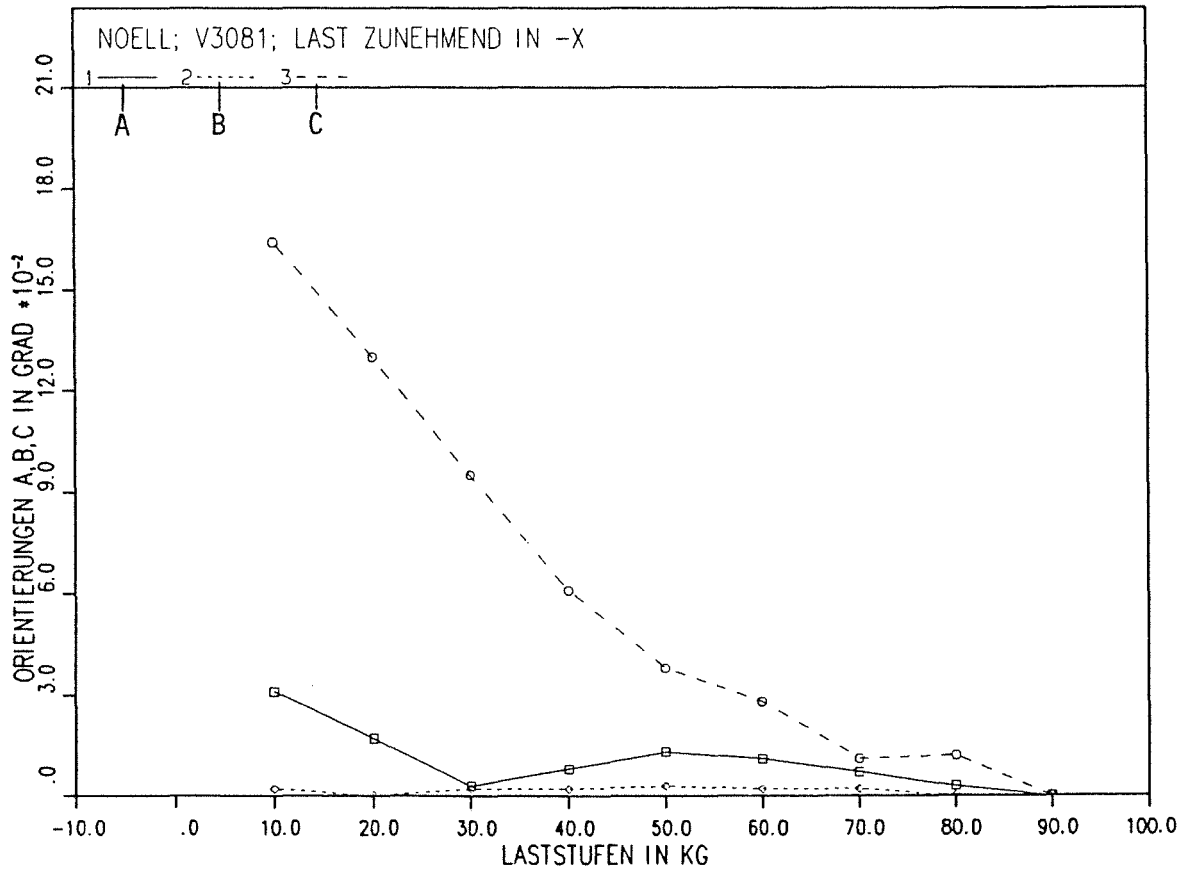
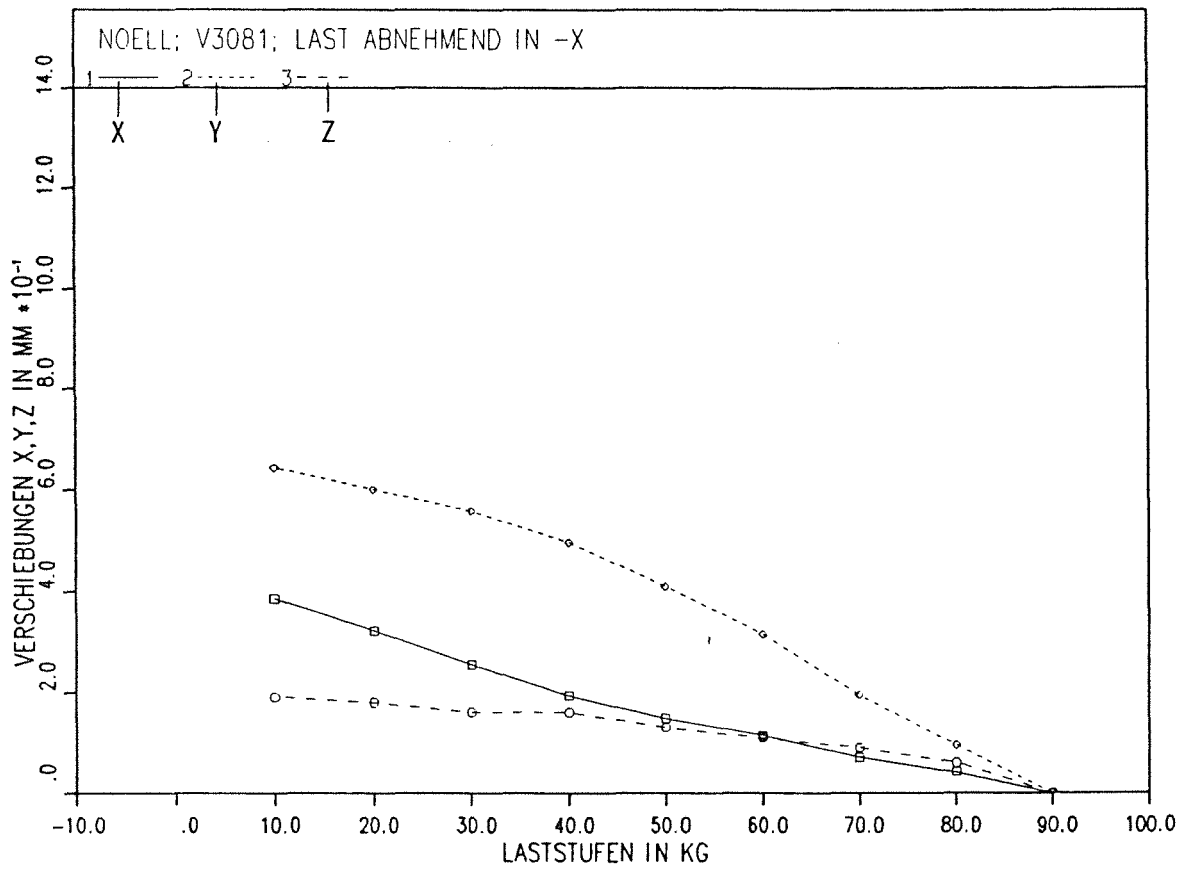
FILE:3023

FILE:3023

FILE:3023

FILE:3023

23. 8. 1990 13:50:12



Anlage 3.2.12

Relative Verschiebung (oben)
Relative Orientierung (unten)

FILE: 3081 (US2:1000):SCHY:30811
13.11.1990 13:30:00
NOELL V3081
A B C
SCHY

Literaturverzeichnis

/1/ R. Lehr; Unveröffentlichter Bericht; März 1989;
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH