

Diplomarbeit

Chokri Arraki

Hicham Rachid

**Aufbau, Simulation, Regelung und Visualisierung
einer Kugel auf Rad**

*Fakultät Technik und Informatik
Department Informations- und
Elektrotechnik*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Information and
Electrical Engineering*

Chokri Arraki

Hicham Rachid

Aufbau, Simulation, Regelung und Visualisierung
einer Kugel auf einem Rad

Diplomarbeit eingereicht im Rahmen der Diplomprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
Studienrichtung Automatisierungstechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. -Ing. Reetmeyer
Zweitgutachter : Prof. Dr. rer. nat. Hasemann

Abgegeben am 02. Juli 2009

Chokri Arraki und Hicham Rachid

Thema der Diplomarbeit

Aufbau, Simulation, Regelung und Visualisierung einer Kugel auf einem Rad

Stichworte

Regelung, Bussystem, Simulation, WinErs, TCP/IP
Automatisierung

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt die Entwicklung einer Kugel auf einem Rad, die umfasste somit das mechanische Design des Labormodells, die mathematische Modellbildung, die Erstellung eines Simulationsmodells, die Parameteridentifikation, die nichtlineare Regelung und die Visualisierung mit dem Automatisierungssoftware WinErs.

Chokri Arraki and Hicham Rachid

Titel of the paper

Construction, Simulation, Regulation and Visualisation of a ball on Wheel

Keywords

Regulation, Bus System, Simulation, WinErs, TCP/IP, Automation

Abstract

The present work describes the development of a ball on a wheel, which thus included the mechanical design of the laboratory model, the mathematical modelling, the creation of a simulation model, the parameter identification, nonlinear control, and its visualization with the Automation software WinErs.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
2. Visualisierung, Simulation und Regelung „Kugel auf Rad“ mit WinErs	9
2.1 Was ist WinErs	9
2.1.1 Blockstruktur	9
2.1.2 GRAFCET.....	10
2.1.3 Prozessbilder	11
2.1.4 Messwerterfassungen	11
2.1.5 Verbindung zwischen WinErs und Modell	11
2.1.6 Regeln mit WinErs	11
3. Aufbau der Anlage	12
3.1 Übersicht der gesamten Anlage.....	12
3.2 Servomotor	13
3.2.1 Einleitung	13
3.2.2 Aufbau des Synchron Servomotors AM247M.....	13
3.2.3 Anschlussstechnik	14
3.2.4 Auswahlkriterien.....	15
3.2.5 Rückführeinheit.....	16
3.2.6 Maßbild	17
3.2.7 Technische Daten des Servomotors	17
3.2.8 Radial-/Axialkräfte An der Motorwelle.....	20
3.2.9 Anschlussbild	21
3.3 Gehäuse-Lagereinheiten	22
3.3.1 Konstruktion der gehäuse-Lageeinheiten	22
3.3.2 Ausgleich von Fluchungsfehlern.....	23
3.3.3 Abdichtung.....	23
3.3.4 Befestigung auf der Welle	23
3.4 Die Item-Aluminiumprofile	24
3.4.1 Profile.....	24
3.4.2 Verbindungselemente	24
3.4.3 Abdeckprofilen	26
3.5 Konstruktion des Rades	27
3.5.1 Die Plexiglasscheiben	27
3.5.2 Die Achse	27
3.5.3 Die Wellenhalter.....	28

3.5.4	Sechskantschrauben.....	28
3.6	Zahnriemenantrieb	29
3.6.1	Synchronriemen.....	29
3.6.2	Synchronscheiben.....	30
3.6.3	Arten von Riemengetriebe.....	31
3.6.4	Warum Zahnriemenantrieb.....	31
3.6.5	Auswahl der Synchronscheiben und der Synchronriemen.....	31
3.7	Distanzsensor	34
3.7.1	Einleitung	34
3.7.2	Eigenschaften	35
3.7.3	Einstellungen	35
3.7.4	Ausgangssignale	36
3.7.5	Alarmausgang.....	37
3.7.6	Vergleichsausgang.....	37
3.7.7	Analogausgang.....	37
3.7.8	Anschlussmethode.....	37
3.8	Servoverstärker AX2000	38
3.8.1	Anleitung.....	38
3.9	Inbetriebnahmesoftware „DRIVE.EXE“	49
3.10	Buskoppler BK 9000	49
3.10.1	Buskoppler Eigenschaften.....	49
3.10.2	Die Schnittstellen	51
3.11	Feldbussystem.....	52
3.11.1	Grundlagen	52
3.11.2	Reaktionszeit BK9000	53
3.11.3	ModbusTCP	54
3.11.4	Verdrahtung	55
3.11.5	Ethernet-Anschluss	56
3.11.6	Parametrierung und Inbetriebnahme	57
3.12	Busklemmen	61
3.12.1	4- Kanal-Digital Eingangsklemme 24 V DC KL1114	61
3.12.2	4-Kannal-Digital Ausgangsklemme 24 V DC KL2114	62
3.12.3	2-Kanal-Analog Eingangsklemme -10..+10 V KL3002	63
3.12.4	2-Kanal-Analog-Einpeiseklemmen 0 / 4 ... 20mA KL 3052	64
3.12.5	2-Kanal-Analog-Ausgangsklemmen -10V..+10V KL 4032	65
3.12.6	K-Bus Endklemme KL 9010	66
4.	Modellbildung	67

4.1	Herleitung der Systemgleichungen.....	67
4.1.1	Zustandsfunktionen des Rades.....	68
4.1.2	Zustandsfunktionen der Kugel.....	69
4.1.3	Zustandsdarstellung des Gesamtsystems.....	69
4.1.4	Linearisierte Zustandsdarstellung.....	70
4.1.5	Berechnung des Ablöswinkels der Kugel vom Rad ⁹	75
4.2	Projekt anlegen	77
4.2.1	Projekt definieren	77
4.2.2	Signale definieren	78
4.2.3	Zuordnung der Signale.....	78
4.2.4	Installation und Anschluss des Feldbussystems mit WRPServ.....	80
4.2.5	Blockstruktur realisieren	84
5.	Simulation und Regelung des Systems Kugel auf Rad	92
5.1	Verfahren zum Zustandsreglerentwurf	92
5.1.1	Zustandsregelung	92
5.1.2	Berechnung der Pole der charakteristische Gleichung.....	92
5.1.3	Steuerbarkeit.....	93
5.1.4	Transformationsmatrix	93
5.1.5	Stabilität	95
5.1.6	Polvorgabe.....	96
5.1.7	Bestimmung der Rückführvektor	97
5.1.8	Geschlossene Regelkreis erstellen	97
5.1.9	Sprungantwort.....	98
5.1.10	Antwort des Regelkreises auf einen Störung.....	99
5.2	Verfahren zum PD-Reglerentwurf	100
5.2.1	Übertragungsfunktion.....	100
5.2.2	PD-Regler	102
5.2.3	Berechnung der Parameter	102
5.2.4	Erstellung des PD-Reglers mit WinErs	104
5.2.5	Sprungantwort.....	106
5.2.6	Antwort des Regelkreises auf einen Störung.....	107
5.3	Regelung der Anlage	108
5.3.1	Optimierung der Signalwerte.....	109
5.3.2	PD Regler	111
5.3.5	Sprungantwort mit Zustandsregler bei einer Störung	114
6.	Prozessvisualisierung.....	116
6.1	Einleitung	116

6.1.1	Bildeinstellungen.....	116
6.1.2	Farbpalette.....	116
6.1.3	Prozessbildskript.....	117
6.1.4	Hintergrundbild.....	117
6.1.5	Bildelemente	117
6.1.6	Prozessbild editieren.....	118
6.2	Start-Prozessbild.....	119
6.2.1	Statisches Text erstellen	119
6.2.2	Verknüpfungsschaltfläche	119
6.2.3	Allgemeine Einstellungen der Prozessbildseite	121
6.2.4	Kompilieren der Prozessbildseite	122
6.3	Übersicht-Prozessbild	122
6.3.1	Dynamische Bitmap	123
6.3.2	Bedienelemente	124
6.4	Prozessbild für die Geregelte Anlage.....	126
6.4.1	Auswahl-Menü	126
6.4.2	Online Numerik Fenster	127
6.4.3	Online Grafik Fenster	127
6.4.4	Blockstruktur-Ansicht	128
6.4.5	Grafcet-Ansicht	129
6.4.6	Funktionsgeber-Ansicht.....	133
6.4.7	Prozess-Neustarten	136
6.4.8	Messungsstatus-Anzeigen	137
6.5	Visualisierung der Simulation.....	146
6.5.1	Kugel Visualisierung.....	146
6.5.2	Visualisierung des Rads.....	146
6.5.3	Button zum Starten der Störungen	148
6.5.4	Button für Rezeptur auslösen.....	149
6.5.5	Parametereingabefelder	150
6.5.6	Einstellung der Steuerspannung	150
7.	Zusammenfassung.....	153
8.	Abbildungsverzeichnis	155
9.	Tabellenverzeichnis	159
10.	Symbolverzeichnis	160
11.	Literaturverzeichnis	162
12.	Anhang.....	163
	Selbstständigkeitserklärung.....	174

1. Einleitung

Die Interessen seitens des Ingenieurbüros Dr. -Ing. Schoop GmbH waren auf die Erstellung eines illustrativen Experiments zur Demonstration der Leistungsfähigkeit ihrer Automatisierungssoftware „WinErs“ auf Fachmessen fokussiert.

Die Diplomarbeit „Kugel auf Rad“ umfasst das mechanische Design des Labormodells, die mathematische Modellbildung, die Erstellung eines Simulationsmodells, die Parameteridentifikation, die nichtlineare Regelung und die Visualisierung.

Die Regelungsaufgabe für dieses System besteht darin, die Position der Kugel mittels Ultraschallsensor zu messen und auf Scheiben, die durch einen Motor angetrieben werden, zu balancieren. Dabei soll die Kugel ständig auf dem Rad stabil bleiben ohne hinzufallen, auch dann nicht, wenn die Kugel aus ihrer Ruhelage gerät, wie z.B. durch einen Handstoß.

Realisierungsaufgabe

Es ist ein mechanischer Aufbau vorzunehmen, der die Funktionstüchtigkeit der Regelung demonstriert.

Jede Probe vom Sensor gibt ein Signal (4-20mA), durch Busklemme KL 3052, dann ergibt die wirkliche Entfernung zur Kugel. Die Reglungblockstruktur (WinErs) analysiert den wirklichen Entfernungswert und reagiert auf die Kugelbewegungen, das wird sich mit einer Zykluszeit von 10 Millisekunden wiederholt. Dieses Signal wird dem Steuergerät übersandt und gibt die Motorrotationsrate an. Das Rad wird durch einen Zahnriemen zur Motorachse verbunden (Seite 12, Übersicht zur gesamten Anlage).

Aufbau

Es liegt ein relativ großer Aufbau vor mit einem effektiven Raddurchmesser von etwa einem halben Meter aus zwei Plexiglasscheiben (Durchmesser ca. 500mm, Stärke 4mm, lichter Abstand der Platten ca. 80mm) und Item –Aluminiumprofile (siehe Seite24). Auf eine Welle (12mm) sind die zwei kreisrunden Plexiglasscheiben (siehe Seite27) koaxial montiert. Als Kugeln können Gummibälle wegen der Reibung verwendet werden.

Antrieb

Für den Antrieb einer „Kugel auf einem Rad“ werden in der Literatur fast ausschließlich Linearführungen mit Gleichstrom-Motoren oder Servomotoren verwendet.

- **Servomotor**

Als Antrieb wird ein Synchron Servomotor der AM2000-Serie mit Servoverstärker verwendet (siehe Seite 13).

Über den Analogen Ausgang kann am Verstärker des Motors eine Spannung angelegt werden. Dieser generiert über einen internen Stromregler einen Motorstrom, der proportional zur angelegten Spannung ist. Da der Motorstrom proportional zum Drehmoment des Motors ist, ist das Moment also auch proportional zur Ausgangsspannung, welche durch die Busklemme KL 4032 von Fa. Beckhoff fließt.

Um Gleichstrommotoren für Positionierungsaufgaben zu verwenden, ist ein geschlossener Regelkreis mit Sensoren und zusätzlicher Elektronik nötig. Derartig erweiterte Motoren werden Servomotoren genannt. Sie bestehen in der Regel aus einem kleinen Gleichstrommotor, einem Rückführungsmechanismus (normalerweise ein Potentiometer oder Inkrementalgeber) und einem Regelschaltkreis, der den Motorstrom anhand von Soll- und Ist-Position reguliert. Da sich Servomotoren meist nur innerhalb eines begrenzten Winkels steuern lassen, ist deren Einsatzbereich auf kleinere Stell- und Positionieraufgaben begrenzt.

- **Gleichstrommotor**

Als klassischer Regelantrieb existieren Gleichstrommotoren in unterschiedlichsten Größen und Leistungsklassen. Allen gemeinsam ist ein Rotor, dessen Wicklungen vom Magnetfeld des Stators durchdrungen und über Kohlebürsten mit Gleichstrom gespeist werden.

Ein mechanischer Kommutator (Stromwender) sorgt dabei für die zur Rotation notwendige Umkehr der Stromrichtung. Bei konstanter Last ist die Drehzahl proportional zur Motorspannung, dabei kann die Drehrichtung durch Stromumkehr geändert werden. Bei leistungsfähigeren Systemen wird häufig eine Stromregelung zur Kontrolle des Drehmomentes genutzt. Vorteil ist eine gute Dynamik und ein ruhiger Lauf, jedoch ist eine genaue Positionsbestimmung ohne eine Rückführung mit Sensoren unmöglich.

Sensorik

Für die Bestimmung der Position der Kugel wird ein Ultraschallsensor verwendet (Seite 34), der die Distanz vom Sensor zur Kugel misst. Aus dieser Distanz wird die Winkelposition der Kugel berechnet.

Mathematische Aufgabe

Die nichtlineare Differentialgleichung für die Radbewegung wird für sehr kleine Radwinkel linearisiert und zusammen mit der Antriebsgleichung in Matrixschreibweise im Zustandsraum dargestellt (Zustandsregelung).

Als Zustandsgrößen werden Winkel, Winkelgeschwindigkeit der Kugel, und Winkelgeschwindigkeit des Rads gewählt. Ähnliche Zustandsdarstellungen wurden im Übrigen in der Regel auch von den anderen untersuchten Arbeiten verwendet.

Die eigentliche Regelung erfolgt mit WinErs, einem PC und Feldbussystem der Firma Beckhoff über TCP/IP Modbus (*Transport Control Protocol / Internet Protocol*).

Regelung

Unter der Regelung eines Systems versteht man einen Vorgang, bei dem eine Größe (Ist- oder Regelgröße) fortlaufend erfasst und mit einer anderen Größe (Soll- oder Führungsgröße) verglichen wird, wobei deren Differenzsignal (Stellgröße) den zu regelnden Prozess im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst. Im Gegensatz zur Steuerung (open loop) findet der gesamte Wirkungsablauf in einem geschlossenen Kreis (closed loop) statt; die Ausgangsgrößen wirken also auf die Eingangsgrößen zurück.

Mehrgrößensystem

Liegen bei einer Regelung mehrere stark miteinander verkoppelte Regel- und Stellgrößen vor, die nicht mehr getrennt voneinander behandelt werden können, spricht man von einem Mehrgrößensystem. Ein gutes Beispiel dafür ist die „Kugel auf einem Rad“, bei der Winkelgeschwindigkeit des Rades, Position und Winkelgeschwindigkeit der Kugel zusammenhängen und nicht unabhängig voneinander auf vorgegebene Sollwerte gebracht werden können. Ein solches System mit mehreren Regelgrößen und einer Stellgröße wird in der englischsprachigen Literatur auch als SIMO-System (Single Input, multiple Output) bezeichnet.

Um für die Regelstrecke bei Mehrgrößensystem eine möglichst kompakte Beschreibung zu erhalten, werden die meist elektrischen Ein- und Ausgangsgrößen zu den Vektoren $u(t)$ und $y(t)$ zusammengefasst. Zusätzlich werden für die Regelung derartig verkoppelter Systeme oft auch nicht messbare interne Zustandsgrößen benötigt, welche mit dem Vektor $x(t)$ beschrieben werden.

Der prinzipielle Aufbau der Regelung eines dynamischen Mehrgrößensystems ist am Beispiel „Kugel auf dem Rad“ in Abb.1 dargestellt.

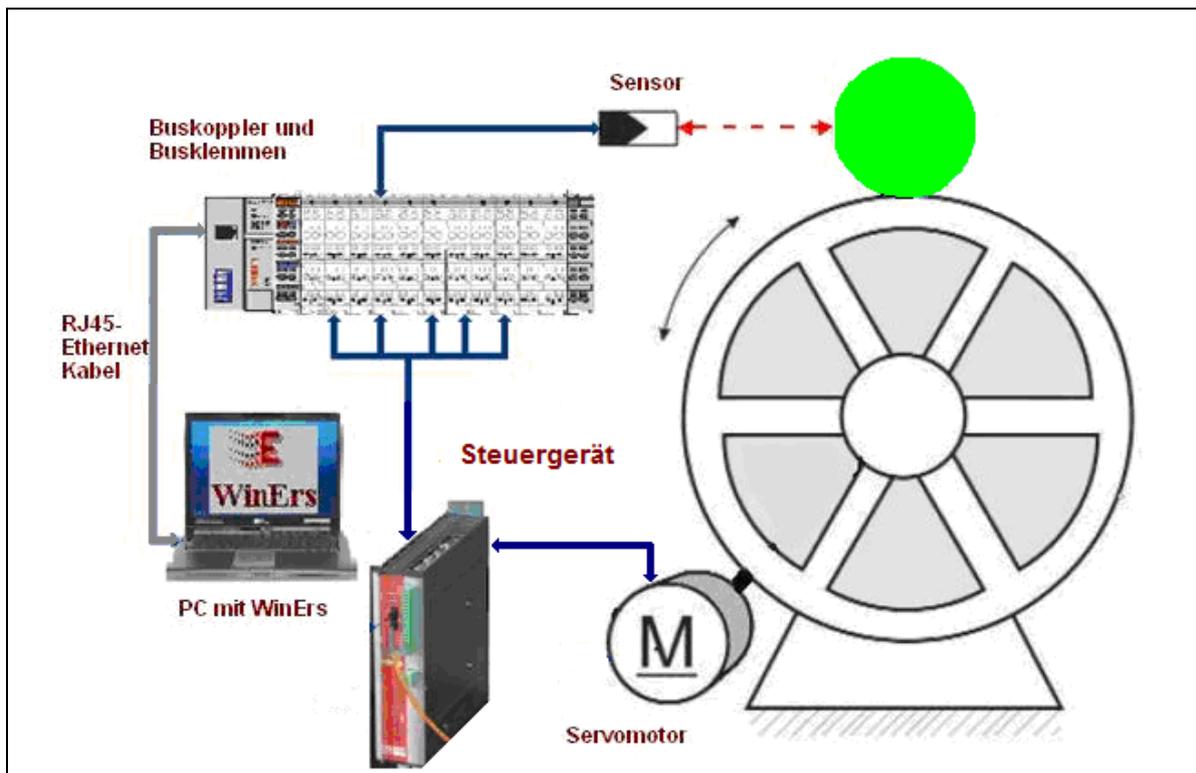


Abb. 1 Aufbau des System Kugel auf Rad

2. Visualisierung, Simulation und Regelung „Kugel auf Rad“ mit WinErs

2.1 Was ist WinErs ¹

- WinErs ist eine modular aufgebaute Software für die Prozessautomatisierung, die einsetzbar ist als Visualisierungssystem, als Überwachungssystem, als Messwerterfassungssystem, als Steuerungs- und Regelungssystem, als Simulationssystem und als komplettes Prozessleitsystem auf PC-Basis.
- WinErs umfasst folgende Module:
- Grundmodul (Trenddarstellung, PC-Treiber, Anweisungs-Script)
- Messwerterfassung und –speicherung
- Steuern, Regeln, Berechnen (Blockstrukturen und Funktionspläne, GRAFCET, Fuzzy-Control, Arithmetik-Block, Programmgeber, DGL-Block)
- Prozessvisualisierung (Prozessbilder)
- Alarme und Meldungen
- Rezepturen (Rest)
- Protokolle

2.1.1 Blockstruktur

Um einen Blockstruktur in WinErs zu realisieren, stehen für die analoge Blöcke, binäre Blöcke, spezielle Blöcke, Ablaufsteuerungsblöcke und weitere diverse Blöcke zur Verfügung. Analoge und binäre Blöcke besitzen aus der Regelungstechnik bzw. Digitaltechnik bekanntes Übertragungsverhalten, spezielle Blöcke (z.B. DGL...) können vom Benutzer in einem vorgegebenen Rahmen selbst definiert werden und Ablaufsteuerungsblöcke (nach DIN 40719, IEC848 modifiziert) dienen der Realisierung einer Schritt- bzw. Programmsteuerung.

Das Erstellen von Blockstrukturen erfolgt in fünf Schritten:

1. Erstellen der Struktur mit dem Blockstruktureditor.
2. Einrichtung einzelner Blöcke, sofern nötig, über deren Einstellungsdialog im Blockstruktureditor z. B. Ein- / Ausgangszahl, Ablaufverhalten und Ähnliches. Das Ändern der Einstellungen erfordert ein erneutes Übersetzen der Blockstruktur und kann nicht online geschehen, da zum Bearbeiten von Blockstrukturseiten diese deaktiviert werden müssen.

- 3.Übersetzen (Kompilierung) der Blockstruktur. Dies kann im Editor oder im Blockstruktur-Aktivierungsdialog erfolgen. Bei Übersetzungsfehlern weiter mit Schritt
- 4.Einstellung der Blockparameter aus dem Editor im Parametermodus, dem Blockparameterfenster oder der Blockstrukturansicht. Die Blockparameter können jederzeit online geändert werden.
- 5.Aktivieren der Blockstruktur über den Aktivierungsdialog. Nur aktivierte Blockstrukturen werden im Steuerungs- und Regelungszyklus ausgeführt.

2.1.2 GRAFCET

GRAFCET (Akronym für frz. Graphe Fonctionnel de Commande Etape Transition) ist eine Beschreibungssprache für das Festlegen eines Systemverhaltens. In diesem Sinne ist GRAFCET keine Programmiersprache, sondern eine rein deskriptive Sprache, aber die Grafcet-Implementierung von WinErs erlaubt die direkte Überführung eines Grafkets in ein Steuerungssystem bzw. einen ausführbaren Funktionsplan (in der Regel eine Ablaufsteuerung). Das Hauptanwendungsgebiet ist daher auch das Erstellen und Ausführen von Funktionsplänen für Ablaufsteuerungen. Gegenüber Funktionsplänen nach DIN EN 61131-3 (IEC 61131-3) bzw. SFCs (Sequential Flow Charts) ist Grafcet eindeutiger und umfassender definiert und vermeidet daher missverständliche Interpretationen.

GRAFCET ist definiert durch die Norm DIN EN 60848 (bzw. IEC 60848). Die vorliegende Grafcet-Implementierung von WinErs erweitert die Norm DIN EN 60848 durch praxisorientierte zusätzliche Elemente und flexible Elementeigenschaften.

Ein GRAFCET besteht aus Schritten, Transitionen (Übergangsbedingungen) und Aktionen. Ein Verbund aus solchen Elementen, verbunden durch Wirkverbindungen, wird als Grafcet-Plan bezeichnet.

WinErs organisiert Grafkets seitenweise. Dabei kann eine Grafcet-Seite genau einen Grafcet-Plan enthalten. Es können aber auch mehrere Grafcet-Pläne auf einer Seite untergebracht werden oder es kann sich ein Grafcet-Plan über mehrere Seiten erstrecken.

Das Erstellen von Grafcet-Plänen erfolgt in vier Schritten:

1. Erstellen des Grafcet-Plans auf einer Grafcet-Seite mit dem Grafcet-Editor.
2. Einrichtung bzw. Konfiguration der einzelnen Elemente, sofern nötig, über deren Einstellungsdialog. Das Ändern der Einstellungen erfordert ein erneutes Übersetzen der Grafcet-Seite.
3. Übersetzen (Kompilierung) der Grafcet-Seite. Dies kann im Editor oder im Grafcet-Aktivierungsdialog erfolgen. Bei Übersetzungsfehlern weiter mit Schritt 1.
4. Aktivieren der Grafcet-Seite über den Aktivierungsdialog. Nur aktivierte Grafcet-Seiten werden im Steuerungs- und Regelungszyklus ausgeführt.

2.1.3 Prozessbilder

Prozessbilder setzen sich aus Prozessbildelement zusammen und dienen dazu, einen Prozess über eine selbst erstellte grafische Oberfläche zu visualisieren und zu bedienen. Dabei kann das Prozessbild als Unterfenster von WinErs oder als Desktop-Fenster angezeigt werden. Die letztere Variante erlaubt es, die grafische Oberfläche von Windows ganz hinter die Visualisierung zurücktreten zu lassen. Prozessbilder werden mit dem Prozesseditor erstellt. Alle Bildelemente können frei positioniert und in der Größe verändert werden. Über den Einstellungsdialog werden die Bildeinstellungen sowie Hintergrundbild und Farbpalette für das Prozessbild eingerichtet. Über die Prozessbildansicht findet die eigentliche Visualisierung und Prozesssteuerung über Benutzereingaben statt.

2.1.4 Messwerterfassungen

Mit Hilfe der Messwerterfassungen können Messwerte gespeichert werden (WinErs bezeichnet Messwerterfassungen oder Messwertspeicherungen kurz als Messungen; vom Prozess eingelesene Messwerte werden als Online-Messwerte bezeichnet).

2.1.5 Verbindung zwischen WinErs und Modell

Die analogen und binären Signale sollen vom Feldbussystem der Firma. Beckhoff über TCP/IP (Transport Control Protocol / Internet Protocol) Modbus eingelesen und ausgegeben werden. Da der WRPServ (WRPServ ist die zu WinErs gehörende Prozess-Task, die alle Steuerungs- und Regelungsaufgaben übernimmt.) die Schnittstelle zum Buskoppler bildet, müssen Sie die entsprechenden Adressen einstellen.

2.1.6 Regeln mit WinErs

Um die Anlage zu Regeln und / oder Steuern (oder Testen) muss als erstes ein **WinErs-Projekt** angelegt werden (siehe Seite 77).

3. Aufbau der Anlage

3.1 Übersicht der gesamten Anlage

Die Anlage wurde durch Aluminiumprofile, Plexiglasscheiben, Distanzsensor, Buskoppler, Busklemmen, Gehäuse-Lagereinheiten, Synchronriemen, Servomotor, AM247M und Servoverstärker der Serie AX2000 konzipiert und aufgebaut.

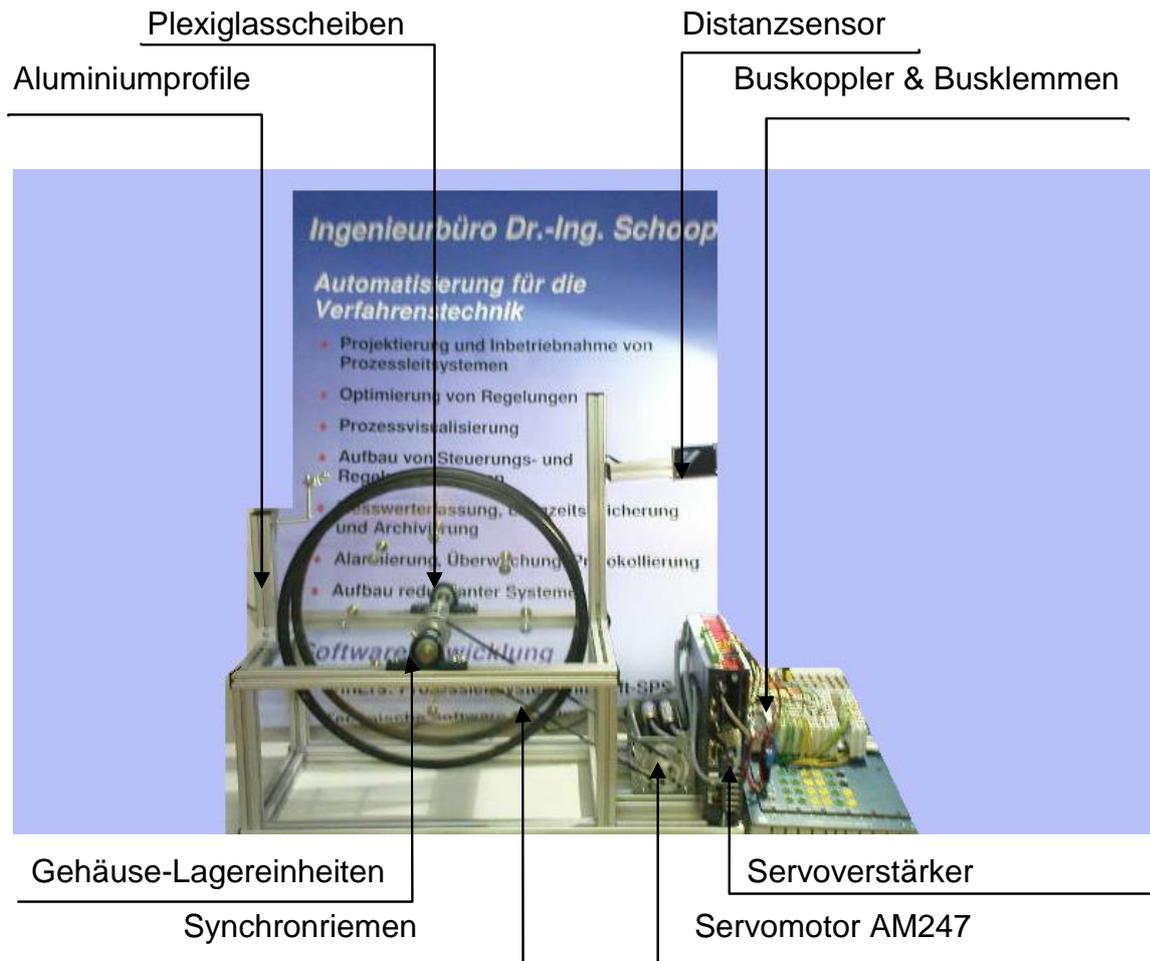


Abb. 2 Übersicht der gesamten Anlage

3.2 Servomotor ²

3.2.1 Einleitung

Der Begriff Servomotor kommt von seinem früheren Einsatzgebiet als Hilfsantrieb (servus lat. Sklave) und beschreibt kein physikalisches Wirkungsprinzip wie es etwa Motorbezeichnungen wie DC-Motor oder Asynchronmotor machen. Im Allgemeinen sind mit Servomotor jedoch bürstenlose Gleichstrommotoren oder vektorgeregelte Asynchron-/Synchronmotoren gemeint



Abb. 3 Servomotor AM274M

3.2.2 Aufbau des Synchron Servomotors AM247M

AM247M ist ein bürstenloser Synchron Servomotor der AM2000-Serie, und überzeugt durch höchstes Qualitätsniveau, ist hochdynamisch, hat niedrige Rotorträgheitsmomente, besitzt ausgezeichnete Rundlaufeigenschaften und besticht durch seine hohe Überlastfähigkeit. In Verbindung mit dem digitalen Servoverstärker AX2006 der Baureihe AX2000/AX2500 eignet sich der Synchron Servomotor hervorragend für Positionier aufgaben mit besonders hohen Ansprüchen an Dynamik und Standfestigkeit. Die Rotoren des Servomotors AM247M sind mit Neodym-Permanentmagneten bestückt. Das Magnetmaterial trägt wesentlich dazu bei, dass dieser Motor hochdynamisch gefahren werden kann.

Im Stator ist eine dreiphasige Wicklung untergebracht, die durch den Servoverstärker AX2006 versorgt wird. Der Motor besitzt keine Bürsten, die Kommutierung wird elektronisch im Servoverstärker vorgenommen.

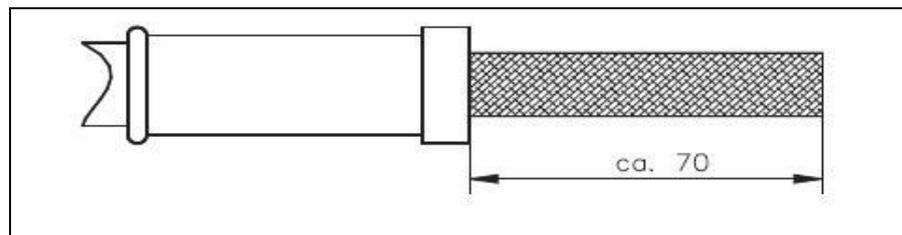
Die Wicklungstemperatur wird über Temperatursensoren in den Statorwicklungen überwacht und über einen potenzialfreien Kontakt (Öffner) gemeldet.

3.2.3 Anschluss technik

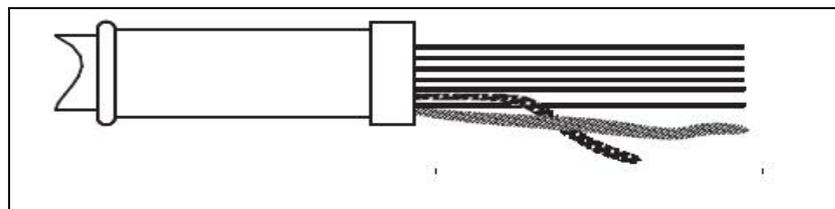
Der Anschluss des Motors an den AX2006 geschieht mittels eines Power Combicon Steckers (X9).

für dieses Modell braucht man kurze Leitungen (30cm). Dafür sollten die Motorleitung und die Resolverleitung (6m lang) umgebaut werden.

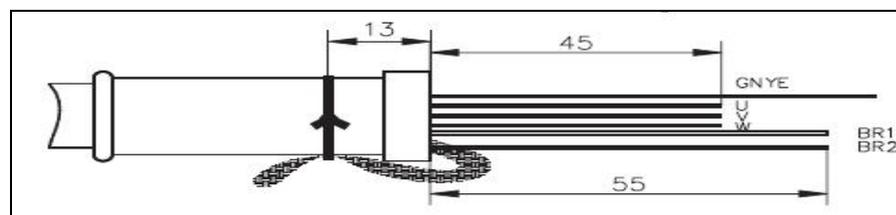
- Man soll zuerst die Gummitülle über das Kabel schieben. Danach soll man die äußere Ummantelung auf einer Länge von 70mm entfernen, ohne den Schirm zu verletzen.



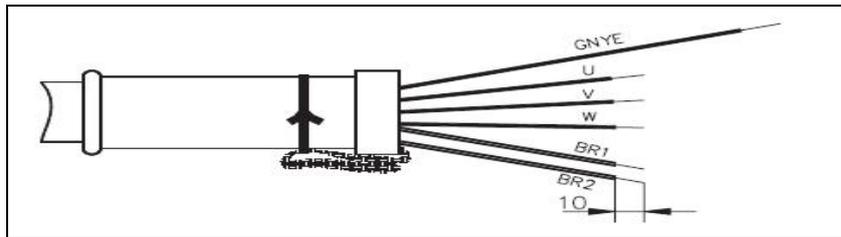
- Die Schirmgeflechte sollen dann von den Adern getrennt werden.



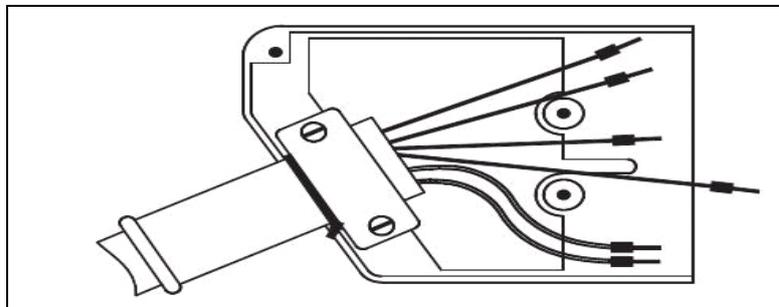
- Danach sollen die Schirmgeflechte zu einem Strang verdreht werden und mit dem Draht an der Tülle verbunden werden. Die Bremsadern sollen dann auf 55mm und die Leitungsadern auf 45mm gekürzt werden.



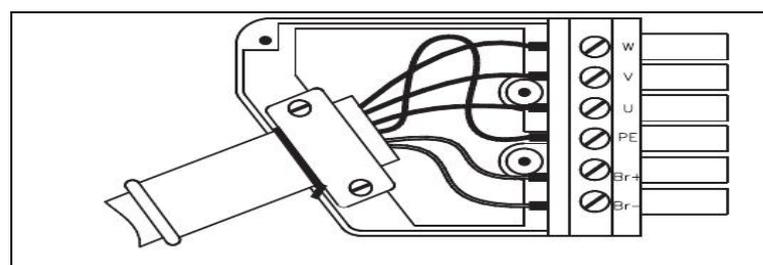
- Dann soll das überstehende Stück des Schirmstrangs wieder nach vorn gelegt werden, und die Aderenden ca. 10mm weit isoliert werden.



- Danach soll das Schirmblech in das Unterteil des Steckergehäuses gelegt und das Kabel in die Zugenlastung gesteckt werden, so dass der umgeschlagene Schirmstrang auf dem Schirmblech aufliegt und der Bindedraht nicht mit untergeklemmt wird. Dann sollen die Schrauben fest angezogen, ohne das Kabel zu zerquetschen.



Als letztes soll der Stecker in das Gehäuse gelegt werden. Man soll darauf achten, dass die Zunge des Schirmbleches in der PE-klemme sitzt.



3.2.4 Auswahlkriterien

Als Servomotor werden elektrische Antriebe verschiedener Bauart bezeichnet, die mit einem Servoregler (oder auch Servoverstärker genannt) in einem geschlossenen Regelkreis betrieben werden. Der Betrieb kann dabei Momenten geregelt, geschwindigkeitsgeregelt oder positionsgeregelt sein. Kombinationen sind durch die Schachtelung der Regelkreise möglich. Dies ermöglicht eine Anpassung an verschiedenste Anwendungen.

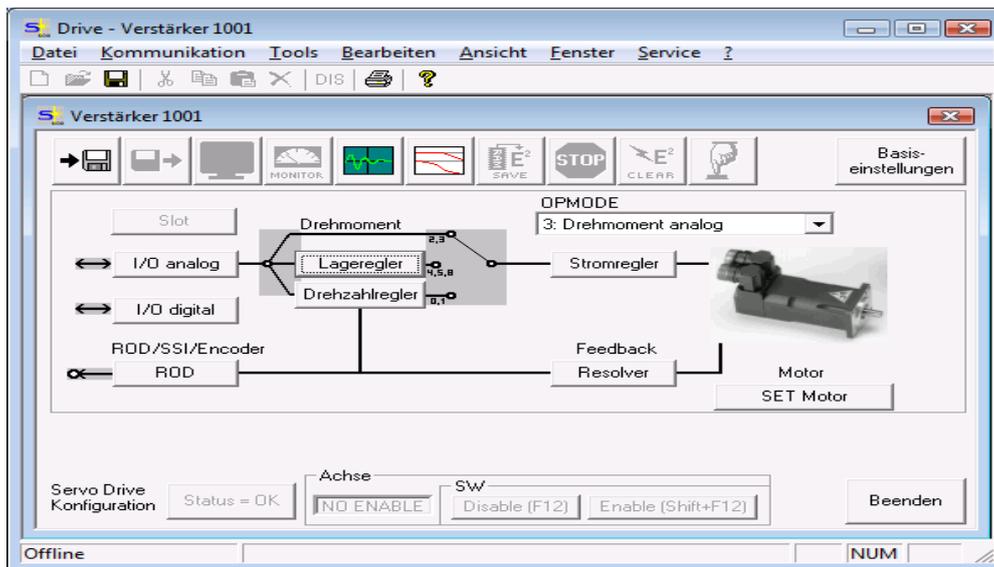


Abb. 4 Auswahlkriterien

3.2.5 Rückführeinheit

Der Motor AM247M hat als Rückführeinheit standardmäßig einen Resolver eingebaut, kann aber auch mit Single- oder Multiturn-Absolutwertgebern bestückt werden. Der Servoverstärker AX2006 wertet die Feedbacksignale aus und speist der Motor mit Sinusströmen.

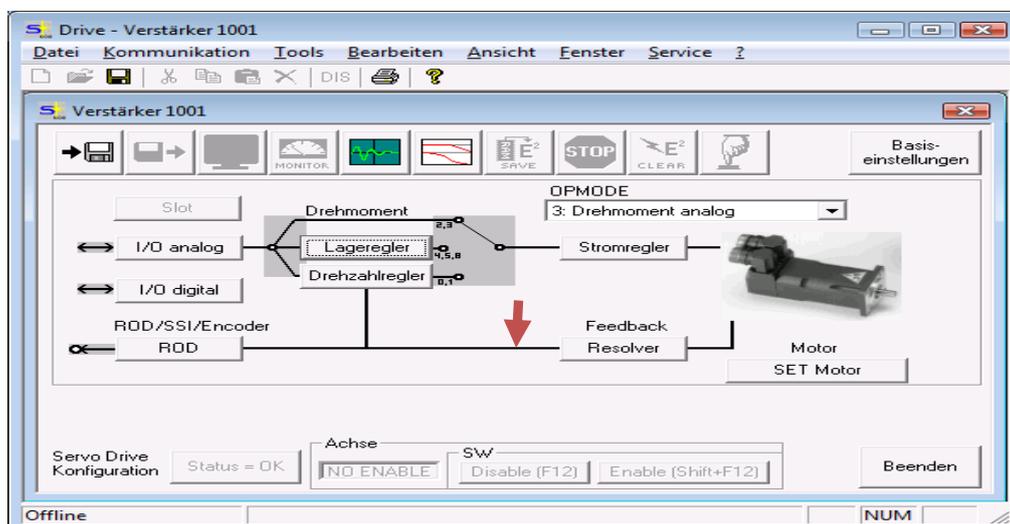


Abb. 5 Rückführung des Resolvers

3.2.6 Maßbild

Der Motor AM247M ist metallschwarz lackiert. Er hat ein Wellenende ohne Passfedernut mit einem Durchmesser von 14mm. Seine gesamte Länge beträgt 199mm und seine Breite beträgt 74mm.

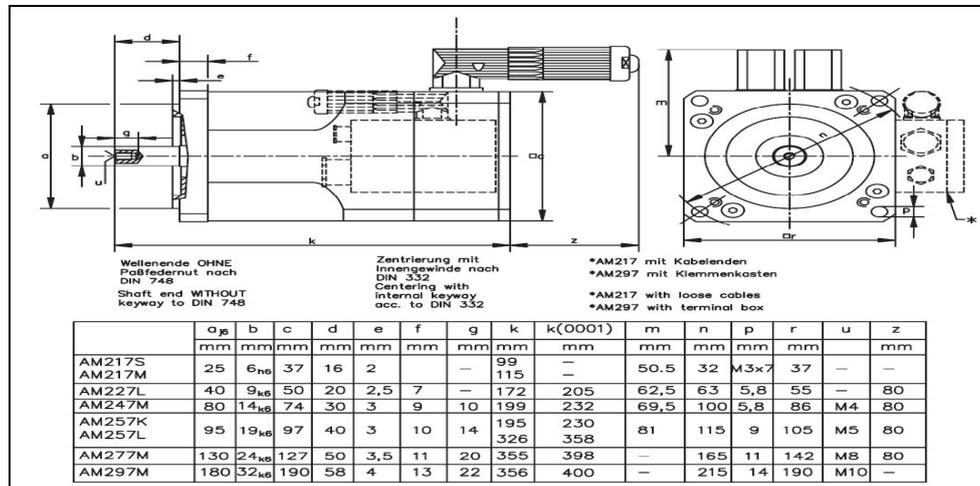


Abb. 6 Maßbild

3.2.7 Technische Daten des Servomotors

- **Stillstands Drehmoment Mo [Nm]**

Das Stillstands Drehmoment kann bei Drehzahl $n=0 \text{ min}^{-1}$ und Nennumgebungsbedingungen unbegrenzt lange abgegeben werden.

- **Nenn Drehmoment Mn [Nm]**

Das Nenn Drehmoment wird abgegeben, wenn der Motor bei Nenndrehzahl Nennstrom aufnimmt. Das Nenn Drehmoment kann im Dauerbetrieb (S1) bei Nenndrehzahl unbegrenzt lange abgegeben werden.

- **Stillstandsstrom I_{0rms} [A]**

Der Stillstandsstrom ist der Sinus-Effektiv-Stromwert, den der Motor bei Stillstand aufnimmt, um das Stillstandsmoment abgeben zu können.

- **Nennstrom I_{nrms} [A]**

Der Nennstrom ist der Sinus-Effektiv-Stromwert, den der Motor bei Nenndrehzahl aufnimmt, um das Nennmoment abgeben zu können.

- **Spitzenstrom (Impulsstrom) I_{0max} [A]**

Der Spitzenstrom (Sinus-Effektivwert) sollte den 4-fachen Nennstrom nicht übersteigen. Den tatsächlichen Wert bestimmt der Spitzenstrom des verwendeten

Servoverstärkers.

- **Drehmomentkonstante K_{Trms} [Nm/A]**

Die Drehmomentkonstante gibt an, wie viel Drehmoment in Nm der Motor mit 1A Sinus-Effektivstrom erzeugt. Es gilt $M=I \times K_T$

- **Spannungskonstante k_{Erms} [V/1000min-1]**

Die Spannungskonstante gibt die auf 1000U/min bezogene induzierte Motor EMK als Sinus-Effektivwert zwischen zwei Klemmen an.

- **Rotorträgheitsmoment J [kgcm²]**

Die Konstante J ist ein Maß für das Beschleunigungsvermögen des Motors. Mit I_0 ergibt sich z.B. die Beschleunigungszeit t_b von 0 bis 3000 min zu:

$$t_b = \frac{3000 \cdot 2\pi}{M_0 \cdot 60s} \cdot \frac{m^2}{10^4 cm^2} \cdot J = \frac{3000 \cdot 2\pi}{2.5 \cdot 60s} \cdot \frac{m^2}{10^4 cm^2} \cdot 1.4 = 17.592ms$$

Gl. 1

Mit M_0 in Nm und J in $kgcm^2$

- **Thermische Zeitkonstante t [min]**

Die Konstante t_{th} gibt die Erwärmungszeit des kalten Motors bei Belastung mit I_0 bis zum Erreichen von 0,63 x 105 Kelvin Übertemperatur an.

Bei Belastung mit Spitzenstrom erfolgt die Erwärmung in wesentlich kürzerer Zeit.

- **Lüftverzögerungszeit t_{BRH} [ms] / Einfallverzögerungszeit t_{BRL} [ms] der Bremse**

Die Konstanten geben die Reaktionszeiten der Haltebremse bei Betrieb mit Nennspannung am Servoverstärker an.

Daten	Sym	Einheit	AM217S	AM217M	AM227L	AM247M	AM257K	AM257L	AM277M	AM297M	Data	
Stillstands Drehmoment	M_0	Nm	0,1	0,2	0,8	2,5	2,6	9,5	22	40	Standstill torque	
Stillstandsstrom	I_{0rms}	A	0,6	0,93	0,83	1,78	1,9	6,1	13,7	23,4	Standstill current	
Nenn Drehzahl	n_n	min^{-1}	6000	6000	4500	3000	3000	3000	3000	3000	Rated speed	
Drehmomentkonstante	K_{Trms}	Nm/A	0,17	0,22	0,96	1,41	1,36	1,55	1,6	1,71	Torque constant	
Spannungskonstante	$K_{E rms}$	mV/min	10	13	58	85	82	94	97	103,5	Voltage constant	
Netz-Nennspannung	U_n	V	230		400	400-480					Mains voltage	
Nenn Drehmoment bei n_n	M_n	Nm	0,09	0,18	0,72	2,15	2,3	8	17	26	Rated torque at n_n	
Nennstrom	I_n	A	0,59	0,89	0,83	1,64	1,76	5,6	11,3	17	Rated current	
Nennleistung	P_n	kW	0,06	0,11	0,34	0,68	0,72	2,51	5,34	8,17	Rated power	
Spitzenstrom	I_{0max}	A	2,8	4,3	3,8	8,0	8,6	27,5	63	94	Peak current	
Motorpolzahl	p_{Mot}	-	6								Motor pole no.	
Resolverpolzahl	p_{Res}	-	2								Resolver pole no.	
Wicklungswiderstand Phase-Phase	R_{20}	Ω	38,2	22	47,7	14,8	9,5	1,61	0,94	0,3	Winding resistance Phase-Phase	
Wicklungsinduktivität Phase-Phase	L	mH	6,5	4,7	43	32	40	10	9	2,9	Winding inductance Phase-Phase	
Isolierstoffklasse	-	-	F, DIN 57530								Insulation class	
Schaltpunkt Thermokontakt	-	$^{\circ}C$	145 \pm 5								Switch. point therm. contact	
Bauform	-	-	IM B5(V1,V3), DIN 42950								Basic style	
Rotorträgheitsmoment	J	kgcm ²	0,06	0,12	0,13	1,4	2,1	6,5	13,1	139,4	Rotor moment of inertia	
Statisches Reibmoment	M_R	Nm	0,01	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	Static friction torque	
zul. Radialbelastung am Wellenende bei n_n	F_R	N	60	60	115	270	580	580	640	780	Radial load permitted at shaft end with n_n	
zul. Axialbelastung am Wellenende bei n_n	F_A	N	20	20	40	90	180	180	200	360	Axial load permitted at shaft end with n_n	
Toleranzklasse Flansch	-	-	R, DIN 42955								Tolerance class flange	
Schwinggüte	-	-	N, DIN ISO 2373								Vibration class	
Therm. Zeitkonstante	t_{TH}	min	5	7	22	15	60	70	75	60	Thermal time constant	
Gewicht Standard	G	kg	0,7	0,8	1,5	3,3	4,5	8,7	17	40	Weight standard	
EMV-RES Anschluss	-	-	Kabel		12 polig, rund						EMV-RES connector	
RES-Leitung, geschirmt	-	mm ²	4 x 2 x 0,25								RES cable, shielded	
Leistungsanschluss	-	-	Kabel		4 + 4-polig, abgewinkelt					KK*	Power connection	
Motorleitung, geschirmt	-	mm ²	4 x 1				4 x 1,5		4 x 2,5	4 x 4		Motor cable, shielded
Haltemoment	M_{BR}	Nm	—		1,2	2,5	5		12	20	Holding torque	
Anschlussspannung	U_{BR}	V=	—		24 +15/-0%						Operating voltage	
elektrische Leistung	P_{BR}	W	—		8	12	16		18	22	electrical power	
Trägheitsmoment	J_{BR}	kgcm ²	—		0,07	0,38	1,06		3,6	9,5	Moment of inertia	
Lüftverzögerungszeit	t_{BRH}	ms	—		15-20	10-15	10-30		30-60	20-60	Release delay time	
Einfallverzögerungszeit	t_{BRL}	ms	—		5-10	10-15	5-15		10-20	10-35	Application delay time	
Gewicht der Bremse	G_{BR}	kg	—		0,3	0,4	0,75		1,5	3,3	Weight of the brake	
Motorleitung mit Bremse, geschirmt	-	mm ²	—		4x1 + 2x0,75		4x1,5 + 2x0,75		4x2,5 + 2x1	4x1**	Motor cable with brake, shielded	

Abb. 7 Technische Daten des Servomotors

3.2.8 Radial-/Axialkräfte An der Motorwelle

Die zulässige Radialkraft, die auf der Motorwelle wirkt, beträgt 270N nach der unten stehenden in Abb.8 angegebenen Kennlinie. Da die Zahnriemenscheibe in der Mitte der Motorwelle montiert werden soll, beträgt die reale Radialkraft $F_R + 10\%$ also

$$F_{R_{real}} = 270Nm + (270 \cdot 10\%)Nm = 297Nm \quad \text{Gl. 2}$$

Für die Lebensdauer der Lager sind 20.000 Betriebsstunden zugrunde gelegt. Dafür darf die Axialkraft F_A die Radialkraft F_R nicht überschreiten. Also für diesen Motor soll $F_A \leq 99Nm$ mit

$$F_A = \frac{F_R}{3} \quad \text{Gl. 3}$$

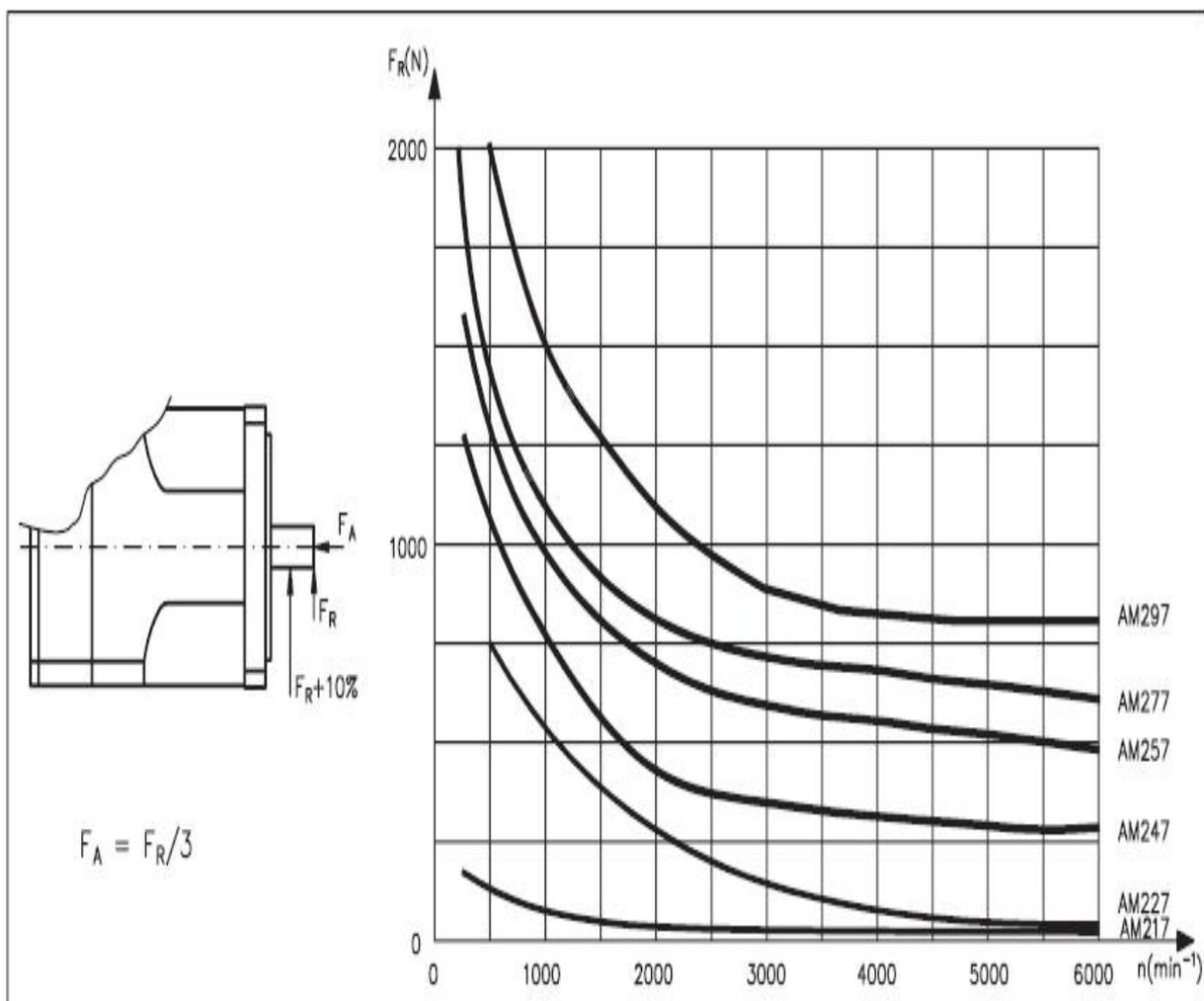


Abb. 8 Radial-/Axial Kräfte

3.2.9 Anschlussbild

Der Motor AM247M ist mit abgewinkeltem Stecker für die Leitungsversorgung und dem Resolversignal ausgerüstet.

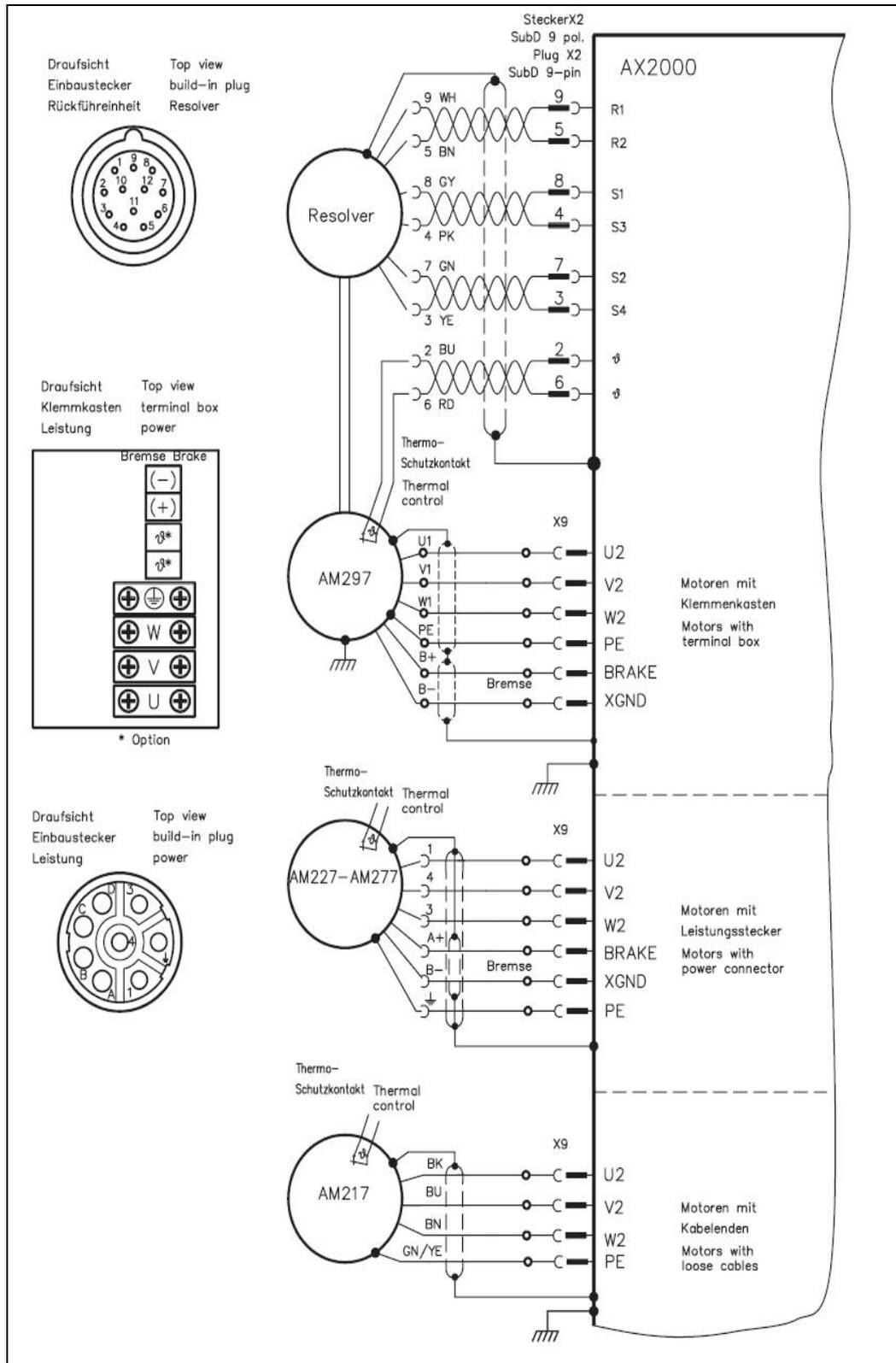


Abb. 9 Anschlussbild

3.3 Gehäuse-Lagereinheiten ³

Die in diesem Modell benötigte Gehäuse-Lageeinheiten, sind vom Typ UCP201

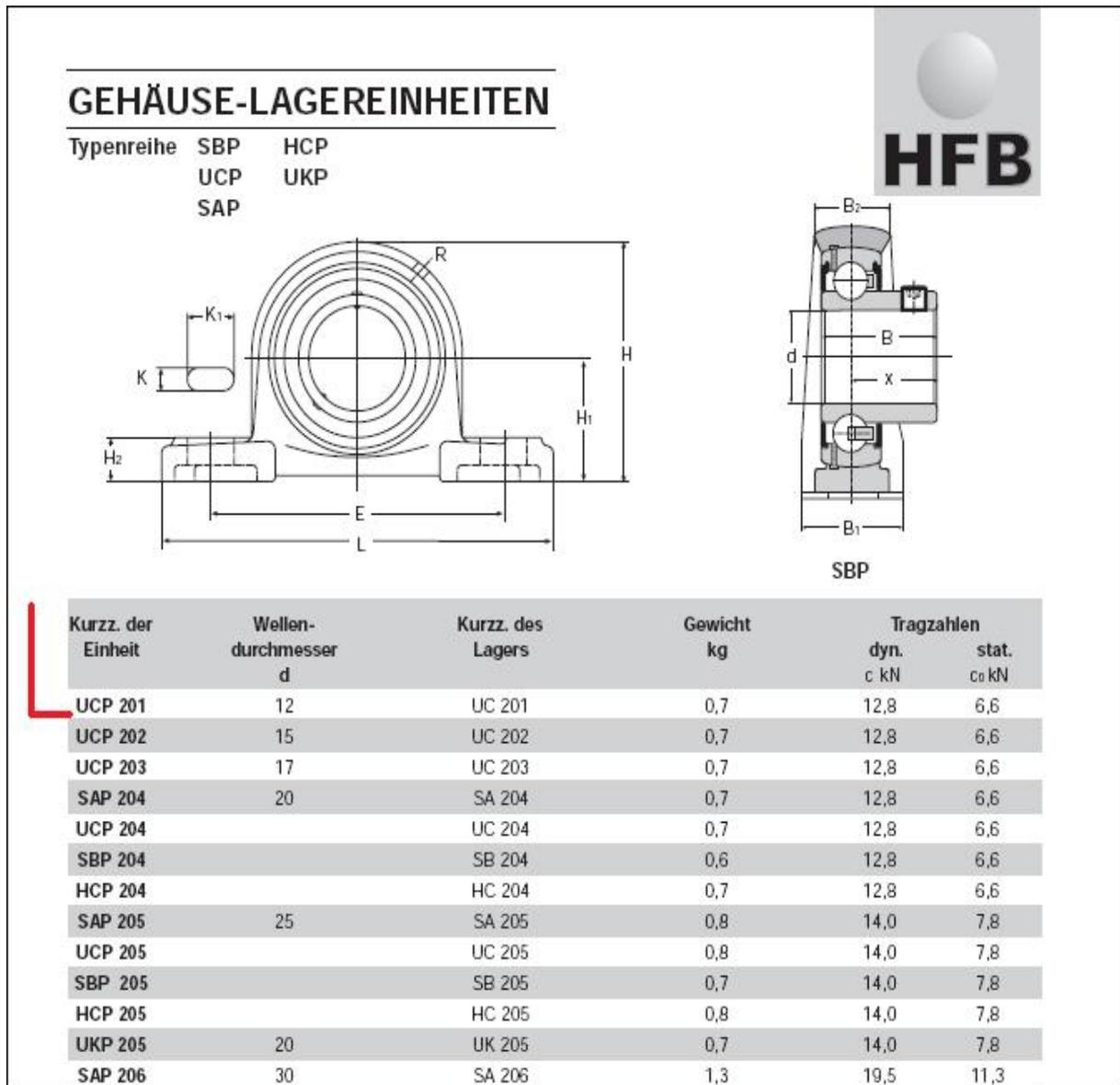


Abb. 10 Gehäuse-Lageeinheiten UCP201

3.3.1 Konstruktion der gehäuse-Lageeinheiten

Diese Gehäuse-Lageeinheiten wurden für all die Fälle entwickelt, in denen es auf eine möglichst einfache Montage und auf wartungsfreien Betrieb ankommt. Sie bestehen aus einem doppelt abgedichteten Rillenkugellager und einem Gehäuse.



Abb. 11 Gehäuse-Lagereinheiten

3.3.2 Ausgleich von Fluchungsfehlern

Der äußere Laufring des Lagers ist ballig geschliffen, und die Aufnahmebohrung im Gehäuse ist entsprechend hohlkugelförmig ausgedreht. Diese Kombination ermöglicht eine Selbsteinstellung zwischen Kugellager und Gehäuse. Es können damit Fluchtungsfehler durch die Montage und Wellenbiegungen während des Arbeitsvorganges ausgeglichen werden.

3.3.3 Abdichtung

Die Kugellager sind mit einer öl- und hitzebeständigen Gummidichtung und einem Stahl-Schleuderring zweifach abgedichtet. Der äußere Stahl-Schleuderring ist am Innenring des Lagers befestigt und verhindert so wirkungsvoll das Eindringen von Schmutz. Die mit Stahl verstärkte Gummidichtung ist am Außenring des Lagers befestigt und schleift auf dem Innenring. Die Kombination dieser zwei Dichtungselemente hält Schmutz und Feuchtigkeit von außen fern und hält das Schmierfett im Lager und gewährleistet so einen einwandfreien Lauf.

3.3.4 Befestigung auf der Welle

Die Gehäuselager sollen mit zwei verlängerten Innenringen und zwei Befestigungsschrauben auf der Welle befestigt werden. Die Kugeldruckschrauben sind mit einem Sechskantschlüssel auf der Welle manuell festgeschraubt und gewährleisten so einen stammen Sitz.

3.4 Die Item-Aluminiumprofile ⁴

Die Item-Aluminiumprofile sind besonders einfach zu bearbeiten, schnell zu montieren, flexibel und modular.

Für den Modellbaukasten sind Profile, Verbindungselemente und die zugehörigen Abdeckungen verwendet.

3.4.1 Profile

Alle Profile lassen sich in jeder denkbaren Position untereinander verbinden, und damit lassen sich beliebige Konstruktionen ohne weitere Oberflächenbearbeitung sauber und schnell aufbauen.

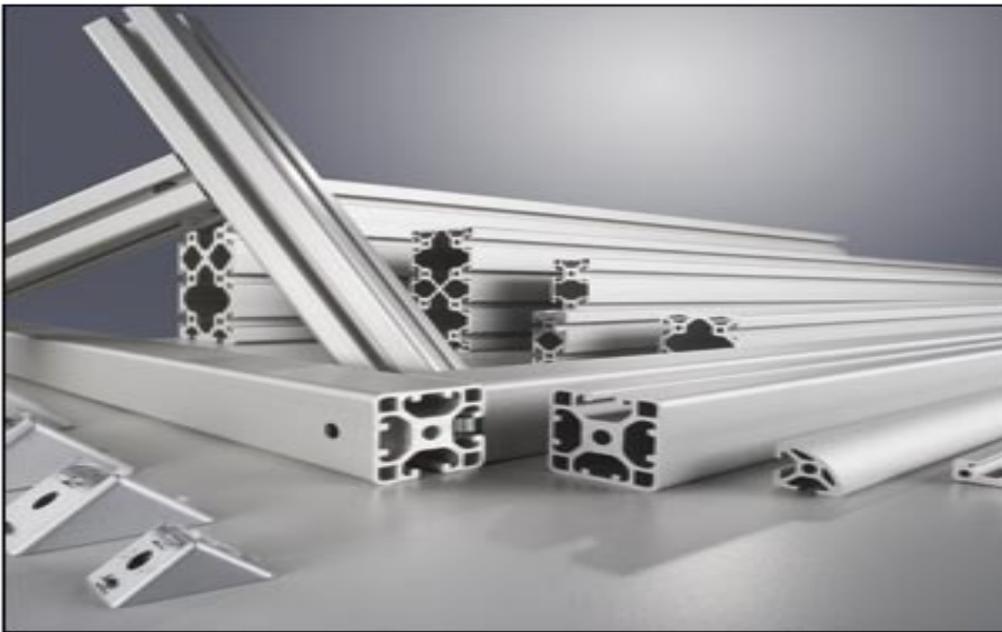


Abb. 12 Aluminiumprofile

3.4.2 Verbindungselemente

Zur Verbindung von Profilen untereinander oder zur Befestigung beliebiger Bauteile an Profilkonstruktionen werden in die Profilnuten speziell gestaltete Befestigungselemente eingesetzt.

- **Nutensteine Zn**

Die Nutensteine Zn können bei Bedarf mit der Schraube an zu befestigenden Bauteile vormontiert und an einer beliebigen Stelle in die Profilnut eingesetzt werden. Durch die Verriegelung in der Nut wird dort ein feststehendes Gewinde erzeugt.



Abb. 13 Nutenstein Zn

- **Nutenstein St mit 2 Gewinden**

Nutenstein St mit 2 Gewinden werden vorzugsweise in Verbindung mit den Winklelementen T2 und Universal- bzw. Automatikverbindern zu Befestigung von Profilen unter 45° eingesetzt, können aber auch bei allen anderen Profilverbindungen genutzt werden.



Abb. 14 Nutenstein St

- **Zylinderschrauben**

Zylinderschrauben stehen in verschiedenen Durchmessern und Längen zur Verfügung.



Abb. 15 Zylinderschrauben

- **Rechtwinkelverbindung**

Sie dient der optimalen Krafteinleitung und stellt die lagerichtige Fixierung der Profile sicher.

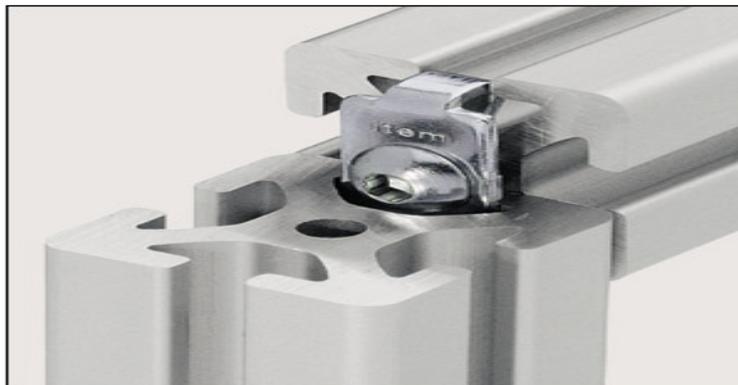


Abb. 16 Rechtwinkelverbindung

3.4.3 Abdeckprofilen

Die Abdeckprofile werden durch Aufdrücken/Aufschlagen in den Kernbohrungen befestigt.



Abb. 17 Abdeckprofilen

3.5 Konstruktion des Rades

3.5.1 Die Plexiglasscheiben

Für die Konstruktion des Rades sind mehrere Bauteile zusammengebaut worden.

Die zwei Plexiglasscheiben sind mit einem Durchmesser von 500mm und einer Bohrung von 12mm zusammengebaut.



Abb. 18 Plexiglasscheiben

3.5.2 Die Achse

Die Achse besteht aus einer Welle mit der Länge von 350mm und einem Durchmesser von 12mm mit der Anpassung h7.

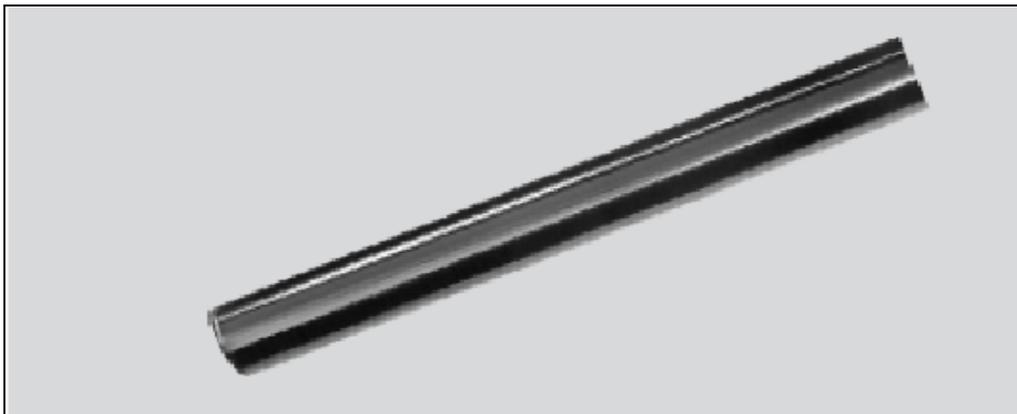


Abb. 19 Vollwelle

An die beiden Seiten der Welle wurden Kugellager montiert. Diese sind durch Nutensteine fest mit den Item-Profilen verschraubt.

3.5.3 Die Wellenhalter

Die Zentralbefestigung der Welle mit den Plexiglasscheiben wurde durch spezielle Wellenhalter (ATHR12) realisiert.

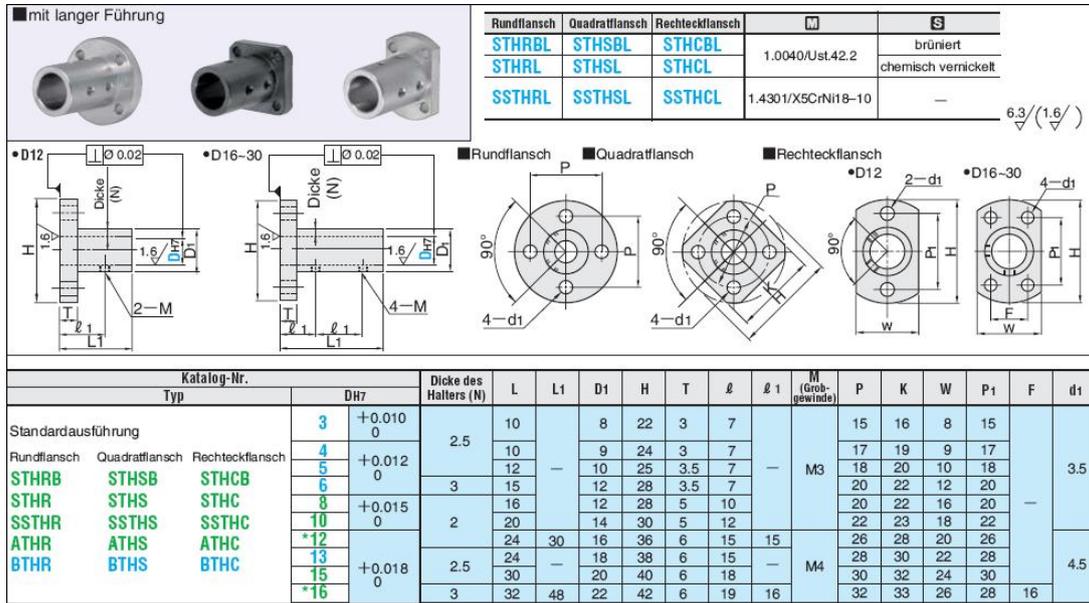


Abb. 20 Wellenhalter

3.5.4 Sechskantschrauben

Um das Drehen der Welle zu verhindern, sind zwei Sechskantschrauben zu benötigen.

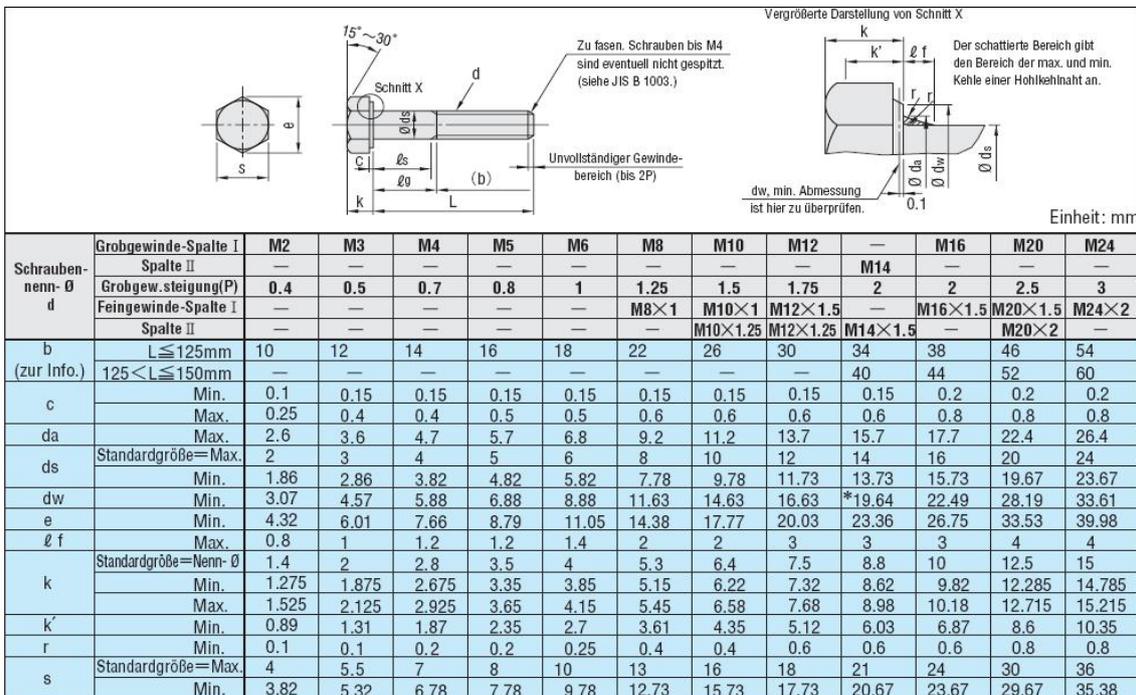


Tabelle 1 Sechskantschrauben

3.6 Zahnriemenantrieb ⁵

Das Zahnriemengetriebe besteht aus zwei Synchronscheiben, die durch einen Synchronriemen verbunden sind.



Abb. 21 Zahnriemenantrieb

3.6.1 Synchronriemen

Der Synchronriemen ist ein Treibriemen mit Zahnung, die formschlüssig in gezahnten Riemenscheiben laufen. Er ist ein flexibles in sich geschlossenes Band zur Kraftübertragung an einem Riemetrieb.

Typ	□	
HTBN	① Zahnriemenrücken	Chloropren-Kautschuk, (MTS8M besteht aus sehr hartem synthetischen Kautschuk)
	② Zahnwerkstoff	
	③ Zugstrang	Glasfaserzugstrang; S u. Alternative Z Twist (MTS8M mit Glasfaserzugstrang)
	④ Grundgewebe	Nylongewebe
HTUN	①②④ Zahnriemenkörper	Polyurethan
	③ Zugstrang	Aramidfaser

📌 Auswahlmethode
 S. 2551

📌 HTUN mit Zwischenraum zwischen d. Zähnen.

📌 Eigenschaften und Hinweise
 S. 1780

Abb. 22 Synchronriemen

Der Synchronriemen besteht aus Kunststoff, der im Zugstrang durch Glascord (früher Stahldraht) und an dessen Rücken durch Polyamidgewebe verstärkt ist.

Zusätzlich ist ein bestimmtes Gewebe - ebenfalls aus Polyamid - in den Zähnen verarbeitet.

Auf der Innenseite des Riemens sind, ähnlich einer Kette, Zähne aus Gummi (Neopren) oder Kunststoff (Polyurethan) ausgeformt, die in ein spezielles Zahnrad eingreifen.

3.6.2 Synchronscheiben

Die Synchronscheiben sind zwei Scheiben, die auf der Welle des Motors und auf der Welle des Rades montiert sind. Die beiden Scheiben sind mit dem Synchronriemen verbunden und bilden eine offenes Riemengetriebe.

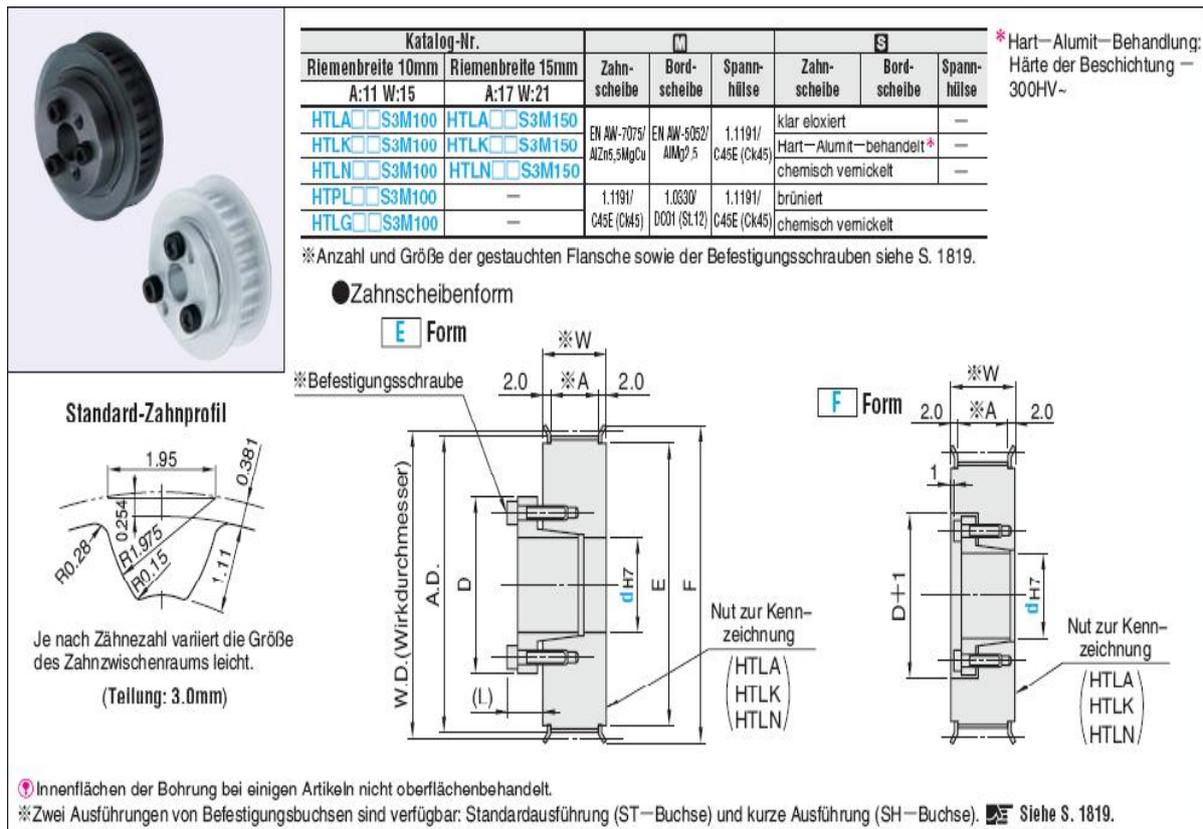


Abb. 23 Synchronscheiben

Die Synchronscheiben bestehen aus Spannhülse und Befestigungsschrauben. Diese Spannhülsen ermöglichen die Befestigung der Synchronscheiben auf der Welle ohne die Welle zu bearbeiten.

Durch das Antreiben des Servomotors über Zahnriemen, treten hohe Radialkräfte auf. Zu hohe Radialbelastung verkürzt die Lebensdauer des Motors erheblich. Deswegen soll auf der Welle des Motors keine Bearbeitung, wie z.B. Passfedernut angebracht werden. Darum sind die Synchronscheiben durch Spannhülsen auf der Welle des Motors und auf der Welle des Rades zu befestigen.

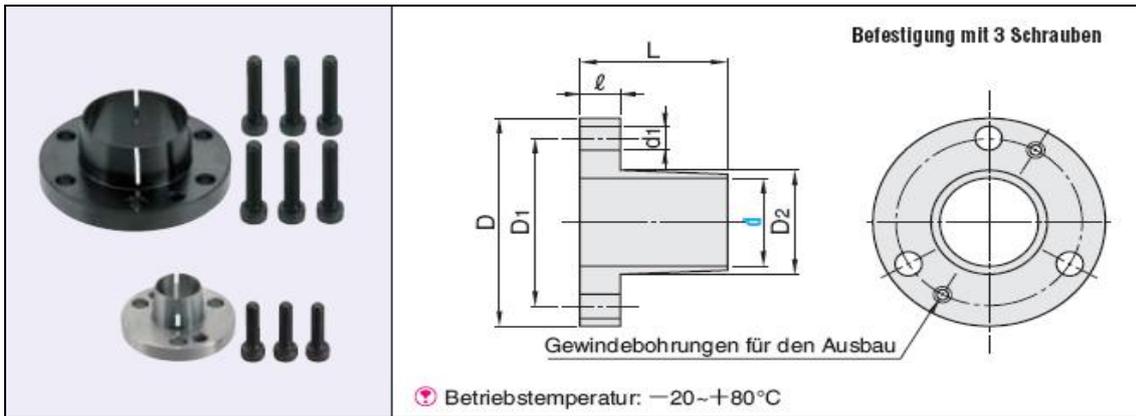


Abb. 24 Spannhülse

3.6.3 Arten von Riemengetriebe

Man unterscheidet beim Zahnriemengetriebe zwischen drei unterschiedliche Arten:

- Gekreuzte Riemengetriebe
- Halbgekreuzte Riemengetriebe
- Offene Riemengetriebe

Das Riemengetriebe, das man für dieses Modell braucht ist eine offenes Riemengetriebe. Dieses Getriebe ist die einfachste Bauart ohne Spannvorrichtung. Bei ihm läuft der Riemen über zwei Riemenscheiben, deren Achsen parallel und deren Drehrichtung gleich sind. Es können sehr große Riemengeschwindigkeiten gefahren werden.

3.6.4 Warum Zahnriemenantrieb

Da die regelungstechnische Aufgabe eine sehr kleine Umschaltzeit und Beschleunigungszeit benötigt, hat man sich für den Zahnriemenantrieb entschieden. Durch die Formschlüssigkeit der Zahnung sind hohe Kräfte übertragbar.

Die Zahnriemen haben eine hohe Laufruhe. Sie haben auch bei geringer Belastung eine hohe Lebensdauer. Außerdem sind sie sehr leicht und schnell zum montieren.

Ein weiterer Vorteil ist die geringe Geräuschentwicklung bei Zahnriemenantrieben während des Laufs. Sie entwickeln im Vergleich zu den Kettentrieben nur einen Bruchteil des Lärms.

3.6.5 Auswahl der Synchronscheiben und der Synchronriemen

a- Synchronscheiben

- Mindestanzahl der Zähne

Für diese Aufgabe braucht man maximal 500 1/min, um den Ball auf dem Rad zu regeln. Dafür soll die Mindestanzahl der Zähne der kleinen Riemenscheibe 14 sein (die Zähnezahl der kleinen Riemenscheibe soll größer sein als die Mindestanzahl der Zähne aus der unten stehenden Tabelle)

Es wird die kleine Riemenscheibe mit 44 Zähnen gewählt. Die große Riemenscheibe hat 60 Zähne.

Drehzahl d. kleinen Riemenscheibe (1/min)	Riemenausführung, Mindestanzahl der Zähne										
	MXL	XL	L	H	S2M	S3M	S5M	S8M	MTS8M	T5	T10
bis 900	12	10	12	14	14	14	14	22	24	12	14
von 900 bis 1200	12	10	12	16	14	14	16	24	24	12	16
von 900 bis 1200	14	11	14	18	16	16	20	26	24	14	18
von 1800 bis 3600	16	12	16	20	18	18	24	28	24	16	20
von 3600 bis 4800	–	16	20	24	20	20	26	30	24	20	22
von 4800 bis 10000	–	–	–	–	20	20	26	–	–	–	–

Tabelle 2 Mindestanzahl der Zähne der Riemenscheibe

- Die Übersetzung i

Die Übersetzung i ergibt sich aus dem Verhältnis der Drehzahl der Zahnscheiben n_1 und n_2 bzw. den Zähnezahlen z_2 und z_1 oder den Wirkdurchmessern der Zahnscheiben d_2 und d_1 .

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{44}{60} = 0.73 \quad \text{Gl. 4}$$

- Wirkungsdurchmesser der Zahnscheiben

Der Wirkungsdurchmesser der Zahnscheiben wird mit der Zähnezahl und der Teilung t des gewählten Zahnprofils ermittelt.

Der minimale Durchmesser der kleinen Synchroscheibe, die an der Motorwelle liegt, ist

$$d_{\min} \geq \frac{M_0}{F_R} \cdot 2 \quad \text{Gl. 5}$$

Mit M_0 : Stillstands Drehmoment des Servomotors AM247M mit $M_0 = 2.7 \text{ Nm}$ (Aus den technische Daten des Motors AM247M)

F_R : Die zulässige Radialkraft, die auf die Motorwelle wirkt mit $F_R = 297 \text{ N}$

$$d_{\min} \geq \frac{M_0}{F_R} \cdot 2 = d_{\min} \geq \frac{2.7}{297} \cdot 2 = 18.18 \text{ mm} \quad \text{Gl. 6}$$

Also die Durchmesser der kleinen Synchroscheiben d_k , die an der Motorwelle liegt, soll größer-gleich 18.18 mm.

$$\bullet \quad d_k = \frac{z_k \cdot t}{\pi} \text{ mm} = \frac{44 \cdot 3 \text{ mm}}{\pi} = 42 \text{ mm} > 18.18 \text{ mm} \quad \text{Gl. 7}$$

Also diese Größe passt zu der Motorwelle.

Mit t ist die Teilung (3mm) und z_k ist die Anzahl der Zähne der kleinen Riemenscheibe (44 Zähne)

$$\bullet \quad d_g = \frac{z_g \cdot t}{\pi} \text{ mm} = \frac{60 \cdot 3 \text{ mm}}{\pi} = 57.29 \text{ mm} \quad \text{Gl. 8}$$

Mit t ist die Teilung (3mm) und z_g ist die Anzahl der Zähne der großen Riemenscheibe (60 Zähne).

- **Nabenbohrung**

Die Motorwelle hat einen Durchmesser von 14mm. Also die Nabenbohrung der kleinen Synchroscheibe soll auch 14mm sein.

Die Rad-Welle hat einen Durchmesser von 12mm. Also die Nabenbohrung der großen Synchroscheibe soll auch 12mm sein.

- **Bestellartikel**

- **HTLA44S3M100-E-14** : - HTLA: Typ der Zahnscheiben
 - 44: Anzahl der Zähne der kleinen scheibe
 - S3M100: Die Breite der Zahnscheiben (10mm)
 - E: Zahnscheibenform
 - 14: Nabenbohrung in mm
- **HTLA60S3M100-E-12**: (entspricht den Großen Zahnscheiben mit eine Durchmesser von 12mm)

b- Synchronriemen

- **Berechnung des Umschlingungswinkels β**

Der Umschlingungswinkel β an der kleinen Zahnscheibe ist:

$$\beta = 2 \cdot \arccos \left[\frac{t \cdot (z_g - z_k)}{2 \cdot \pi \cdot a} \right] \circ (\text{Grad}) \quad \text{Gl. 9}$$

mit a ist der gemessene Abstand zwischen den beiden Wellen, mit a = 435mm

$$\text{Also } \beta = 2 \cdot \arccos \left[\frac{3\text{mm} \cdot (60 - 40)}{2 \cdot \pi \cdot 435\text{mm}} \right] = 197.763^\circ \quad \text{Gl. 10}$$

- Berechnung der Wirklänge L_w

Die Wirklänge L_w des Zahnriemens ist für einen Antrieb mit zwei Scheiben:

$$\begin{aligned} \beta &= 2 \cdot \arccos \left[\frac{t \cdot (z_g - z_k)}{2 \cdot \pi \cdot a} \right] \circ (\text{Grad}) \\ L_w &= 2 \cdot a \cdot \sin \frac{\beta}{2} + \frac{t}{2} \cdot \left[z_g + z_k + \left(1 - \frac{\beta}{180}\right) \cdot (z_g - z_k) \right] \text{mm} \\ &= 2 \cdot 435 \cdot \sin \frac{197.76}{2} + \frac{3\text{mm}}{2} \cdot \left[60 + 44 + \left(1 - \frac{197.76}{180}\right) \cdot (60 - 44) \right] \text{mm} \\ &= 1023.495\text{mm} \end{aligned} \quad \text{Gl. 11}$$

Man soll den Riemen mit der Länge 1050mm wählen.

- BestellArtikel

Der Bestellartikel der Synchronriemen lautet nach den oben gerechneten Werten:

- HTBN1050S3M-100** : - HTBN: Typ der Zahnriemen
 - 1050: Die Riemenlänge in mm
 - S3M-100: Die Riemen-Nennbreite (10mm)

3.7 Distanzsensor ⁶

3.7.1 Einleitung

Das SA1D-LL4 ist ein leistungsstarkes Distanzmessgerät. Es erlaubt genaue Distanz-Messungen über einen Distanzbereich von 200mm bis 500mm. Durch Auswertung der Reflektion eines Strahles wird die Distanz bestimmt.

Das SA1D-LL4 wird in diesem Versuch eingesetzt für die Messung der Kugelposition auf dem Rad. Er garantiert eine hohe Messgenauigkeit für bewegte Objekte.



Abb. 25 Distanzsensor

3.7.2 Eigenschaften

Der Sensor hat einen analogen Ausgang von 4mA bis 20mA. Das entspricht einem Arbeitsbereich von 200mm bis 500mm. Er hat auch einen Vergleichsausgang und besteht aus NPN/PNP offener Kollektor. Der Vergleichsausgang ist eingeschaltet wenn das Objekt zwischen dem unteren und dem oberen Grenzwert liegt (zwischen 200mm und 500mm).

Der Sensor hat auch ein Alarmausgang. Der ist eingeschaltet, wenn das Objekt außerhalb des Arbeitsbereichs liegt.

Als Betriebsanzeigen, hat der Sensor vier Anzeigen

- Entfernungsanzeige: Diese Anzeige besteht aus einer 10-stufigen LED-Anzeige. Die MON-Anzeige zeigt die Position des Objektes im Arbeitsbereich an. Die NS-FS-Anzeigen zeigen die Voreinstellung des oberen und unteren Grenzwerts.
- Die Ausgangsanzeige OUT: leuchtet, wenn der Vergleichsausgang auf EIN gesetzt ist.
- Die Anzeige POWER leuchtet, wenn die Versorgungsspannung angelegt wird.
- Die Alarmanzeige ALARM leuchtet, wenn zu wenig oder zu viel Licht reflektiert wird.

Die Ansprechzeit des Sensors ist auf FALSE (max.5ms) oder auf SLOW (max.50ms) einzustellen.

3.7.3 Einstellungen

Der obere und untere Grenzwert können unabhängig voneinander eingestellt werden. Wenn sich die Kugel innerhalb des eingestellten Arbeitsbereiches befindet, wird der Vergleichsausgang gesetzt und die Anzeige OUT leuchtet.

- a- Einstellungen des unteren Grenzwerts

Der Monitorschalter soll als erstes auf MON gestellt werden. Dann soll die Kugel in die untere Grenzwertposition platziert (bei -150mm) werden. Die Position in der 10-stufigen LED-Anzeige zeigt auf Stufe Nr. 10. Der Monitorschalter soll dann auf NS gestellt und die linken NS-Knopf bis zu der Stufe Nr. 10 gedreht werden. Dann ist Monitorschalter wieder auf MON zu stellen.

b- Einstellungen des oberen Grenzwerts

Der Monitorschalter ist auf MON zu stellen. Dann soll die Kugel in die obere Grenzwertposition platziert (bei 150mm) werden. Die Position in der 10-stufigen LED-Anzeige zeigt auf Stufe Nr. 1. Der Monitorschalter soll dann auf FS gestellt und der rechten FS-Knopf bis zu der Stufe Nr. 1 gedreht werden. Dann soll der Monitorschalter wieder auf MON gestellt werden.

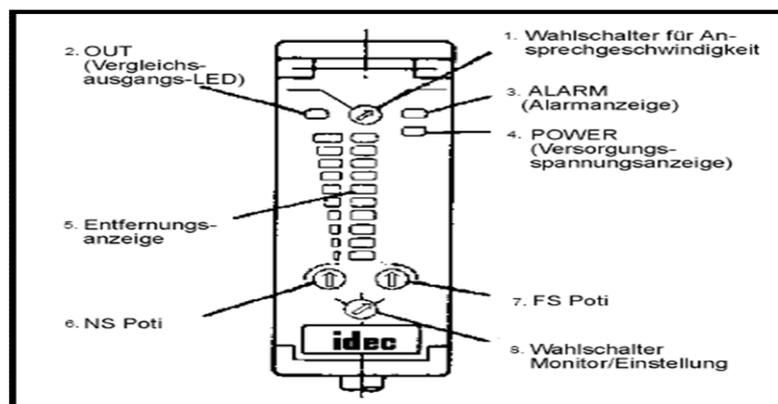


Abb. 26 Funktionenbezeichnung

1. Wahlschalter für Ansprechgeschwindigkeit
FAST : 5ms, SLOW : 50s. Der Sensor soll auf FAST eingestellt werden.
2. OUT : Vergleichsausgangs-LED
3. ALARM : Alarmausgangs-LED
4. POWER : Versorgungsspannungs-LED
5. Entfernungsanzeige : 10-stufige LED-Anzeige
6. NS-Poti : für Naheinstellung (14 Umdrehungen)
7. FS-Poti : für Ferneinstellung (14 Umdrehungen)
8. Wahlschalter Monitor/Einstellung : NS für Unterer Grenzwert, MON für Monitor und FS für Oberer Grenzwert

3.7.4 Ausgangssignale

Der Distanzsensor LA1D-LL4 hat drei Ausgangssignale:

- Alarmausgang

- Vergleichsausgang
- Analogausgang

3.7.5 Alarmausgang

Wenn die Kugel sich außerhalb vom Sensor-Arbeitsbereich befindet, geht die Alarmanzeige an. Zur gleichen Zeit gehen der Vergleichsausgang und die OUT-Anzeige aus. Das Analog-Signal wird gleich 4mA, wenn die Kugel außerhalb des Arbeitsbereiches liegt.

3.7.6 Vergleichsausgang

Wenn sich die Kugel innerhalb des Arbeitsbereiches befindet, leuchtet die Lampe OUT und der Ausgang wird gesetzt.

3.7.7 Analogausgang

Am Ausgang stehen 4 bis 20mA zur Verfügung. Dieser Strombereich entspricht in dieser Aufgabe -150mm bis 150mm. Die Position der Kugel wird auch in der 10-stufigen Entfernungsanzeige sichtbar gemacht.



Abb. 27 Entfernungsanzeige

Die Stufe Nr.5 der Entfernungsanzeige entspricht die Ruhelage der Kugel (bei 0mm)

Die Stufe Nr.10 der Entfernungsanzeige entspricht der unteren Position der Kugel (bei -150mm)

Die Stufe Nr.1 der Entfernungsanzeige entspricht der oberen Position der Kugel (bei 150mm)

3.7.8 Anschlussmethode

Der Kabelanschluss des Sensors besteht aus drei Drähten, braun, schwarz und weiß.

Der braune Draht ist für die Betriebsspannung des Sensors und wird auf +24v angeschlossen.

Der blaue Draht wird auf die Masse gelegt. Und der weiße Draht ist das analoge Ausgangssignal des Sensors und wird an das erste analoge Eingangssignal der Busklemmen KL3052 angeschlossen.

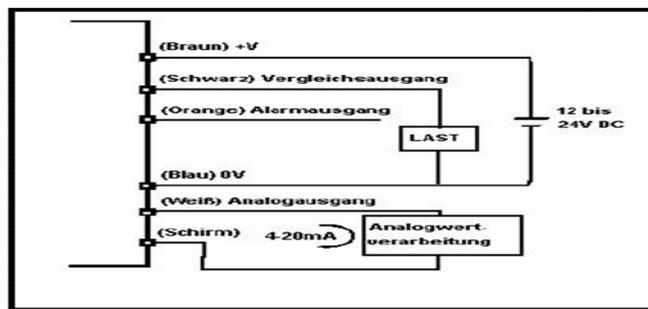


Abb. 28 Anschlusschaltbild

3.8 Servoverstärker AX2000

3.8.1 Anleitung

Die Servoverstärker der Serie AX2000 werden als Komponenten von Antriebssystemen in elektrische Anlagen oder Maschinen eingebaut. Die Servoverstärker treiben die bürstenlosen Synchron Servomotoren sowie die Linear Servomotoren AL2000 Drehmoment-, Drehzahl- und lagegeregelt an. Die Serie AX2000 ist die leistungsfähige Variante mit Servoverstärker, die bis 70/80-A-Nennstrom ausgelegt sind.

Für einen Betrieb direkt am Netz sind Entstörfilter für die Leistungseinspeisung integriert, ebenso Entstörfilter für die 24-V-Hilfsspannungsversorgung. Dadurch entfallen aufwändige Schirmungsmaßnahmen in der Netzzuleitung. Konfektionierte Motor-, Resolver- und Encoderleitungen vereinfachen die Verdrahtung des Systems.



Abb. 29 Servoverstärker AX2000

Die digitalen Servoverstärker weisen eine Vielzahl an Komfortfunktionen auf. Dazu gehören z. B. einstellbare Sollwerttrampen, 2 analoge Monitorausgänge sowie 4 programmierbare digitale Eingänge (zwei sind standardmäßig als Endschaltereingänge definiert) und 2 digitale

Ausgänge. Optional ist der Servoverstärker mit einer personell sicheren Anlaufsperrung ausrüstbar. Sie verhindert, trotz Anliegen der Leistungsspannung, einen Wiederanlauf des Antriebs; der Hauptstromkreis kann somit aktiv bleiben.

Integrierte Sicherheit wird ebenfalls groß geschrieben. Bei den Servoverstärker wird die elektrisch sichere Trennung nach EN 50178 zwischen Netz- bzw. Motoranschluss und der Signalelektronik durch entsprechende Kriechwege und vollständige Potenzialtrennung eingehalten. Weitere integrierte Funktionen betreffen die Sanfteinschaltung, Überspannungserkennung, den Kurzschlusschutz und die Phasenausfallüberwachung.

Steckerbelegungen

Der Servoverstärker AX2000 besteht aus 10 Stecken.

- X0: Netzanschluss
- X1: Anschluss eines Sinus-Cosinus Encoders als Rückführsystem
- X2: Resoleveranschluss
- X3: Anschluss für digitale und analoge Ein- und Ausgänge
- X4: Anschluss für die 24V-Hilfsspannung
- X5: Anschluss für Inkrementalgeber
- X6: RS232-Interface, PC-Anschluss
- X7: Zwischenkreisanschluss
- X8: Anschluss für Externer Bremswiderstand
- X9: Motoranschluss mit Bremse

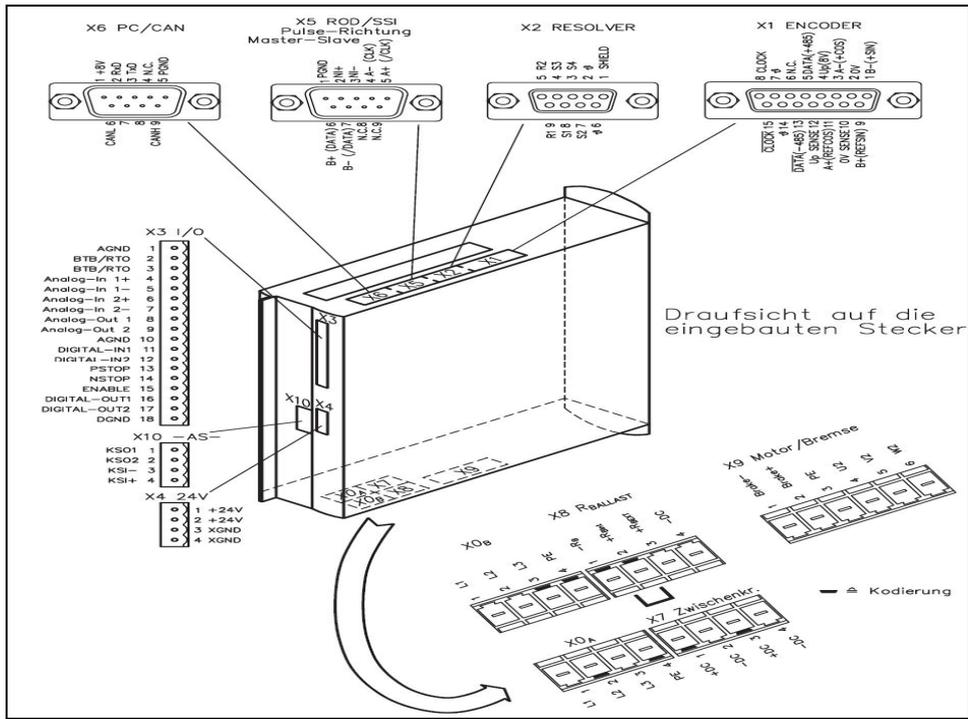


Abb. 30 Steckerbelegungen

Anschlussplan

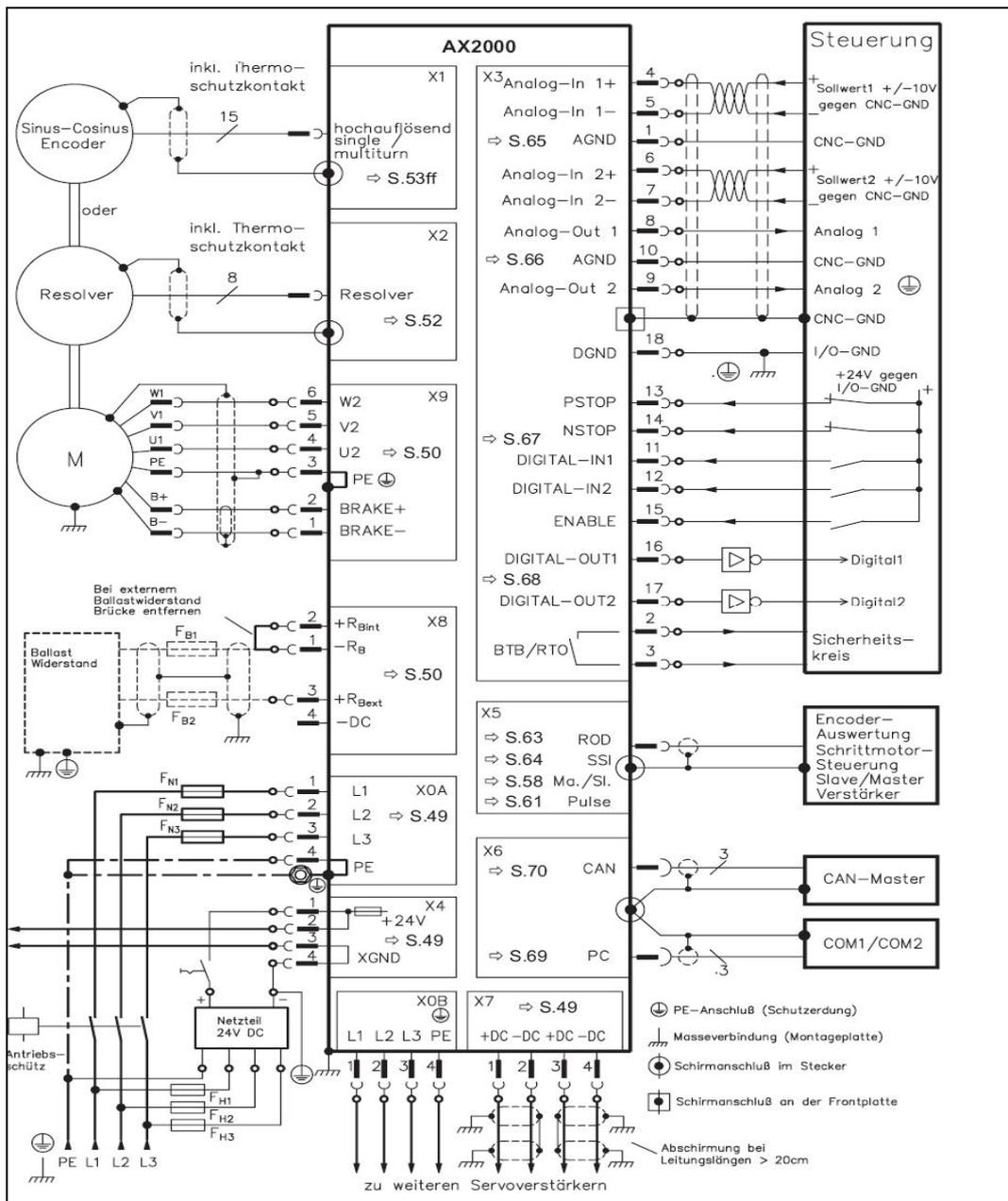


Abb. 31 Anschlussplan Übersicht

Die Anschlüsse die man in dieser Aufgabe benötigen soll

- X0: Netzanschluss
- X2: Resoleveranschluss
- X3: Anschluss für digitale und analoge Ein- und Ausgänge
- X4: Anschluss für die 24V-Hilfsspannung
- X6: RS232-Interface, PC-Anschluss
- X9: Motoranschluss mit Bremse

Netzanschluss X0

Das Netz besteht aus drei Hauptleiter mit der Bezeichnung L1, L2, L3 und ein Schutzleiter PE und ist grün-gelb gekennzeichnet.

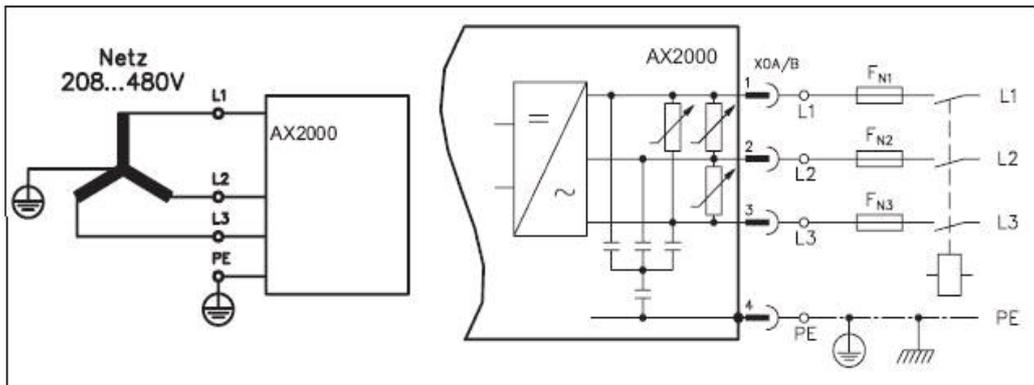


Abb. 32 Anschluss an Versorgungsnetz

Resoleveranschluss X2

Der Resolver wird als Rückführsystem an der Anschluss X2 angeschlossen. Der Thermoschutzkontakt im Motor wird über die Resolverleitung am AX2000 angeschlossen und dort ausgewertet.

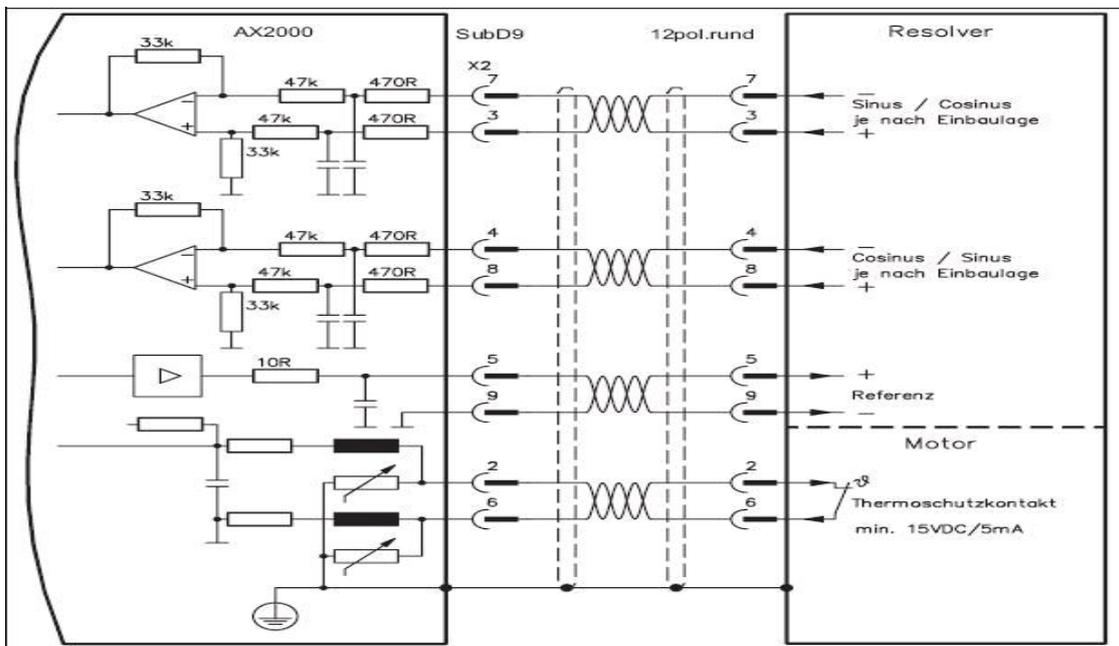


Abb. 33 Resolveranschlussplan

Anschluss für digitale und analoge Ein- und Ausgänge X3

Analoge Eingänge (X3)

Der Servoverstärker besitzt zwei programmierbare Differenzeingänge für analoge Sollwerte.

Drehzahlsollwert

Drehzahlsollwert ist der Eingang Analog-In 1 der Servoverstärker AX2000. Dieses analoge Eingangssignal ist unter das Driver-Programm einzustellen. Die Klemme X3/4 wird an den ersten analog Ausgangssignal der Busklemmen KL4032 angeschlossen und X3/5 wird an der Masse der selben KL angeschlossen. (Weitere Hinweise zu LK4032 finden Sie auf Seite 66).

Drehmomentsollwert

Drehmomentsollwert ist der zweite analoge Eingangssignal (Analog-In2) der Servoverstärker AX2000.

Die Klemme X3/6 wird an den zweiten analog Ausgangssignal der Busklemme KL4032 angeschlossen und X3/7 wird mit CNC-GND der Busklemme verbunden.

Als Potentialbezug muss AGNG (X3/1) immer mit CNC-GND der Steuerung verbunden werden.

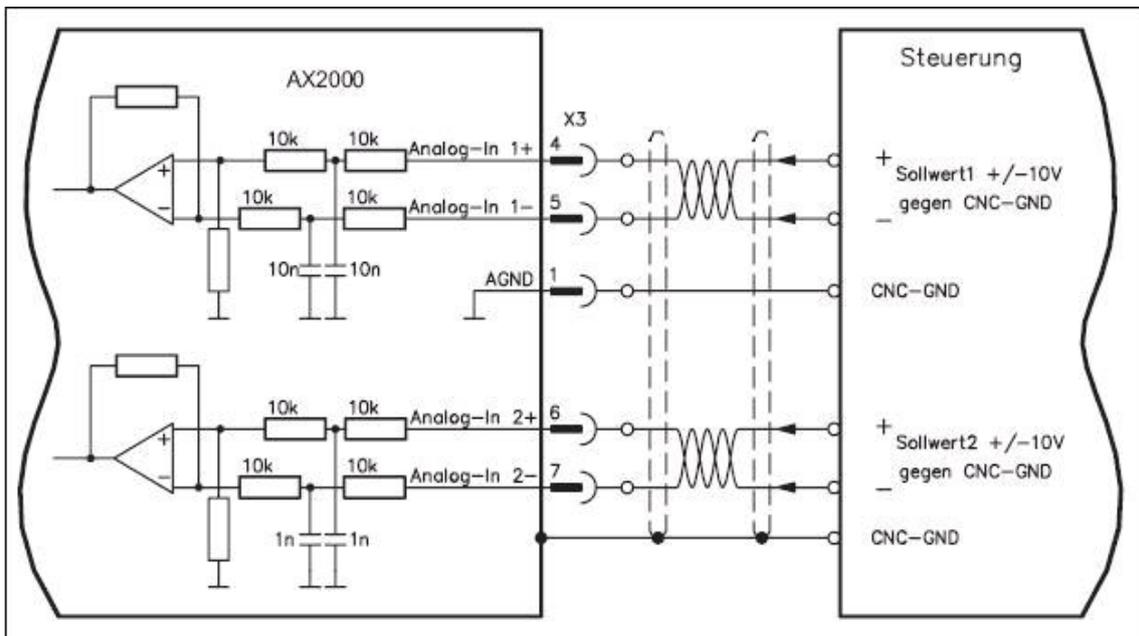


Abb. 34 Anschlussplan der Analogeingänge

Analoge Ausgänge (X3)

Die Klemmen X3/8 (Analog-Out 1) und X3/9 (Analog-Out2) weisen den folgenden analogen Signalen zu:

Analog-Out 1: Tachospannung (Drehzahlwert). Dieser Ausgang liefert $\pm 10V$ bei der eingestellten Enddrehzahl.

Analog-Out 2: Stromwert (Drehmoment). Dieser Ausgang liefert $\pm 10V$ für den eingestellten Spitzenstrom (Sinus-Effektivwert).

Die Klemmen X3/8 (Analog-Out 1) wird mit dem ersten analog Eingangssignal der Busklemme KL3002 verdrahtet.

Die Klemmen X3/9 (Analog-Out 2) wird mit dem zweiten analog Eingangssignal der Busklemme KL3002 verdrahtet. (Weitere Hinweise zu LK3002 sind auf der Seite 64).

Als Potentialbezug müssen die klemmen X3/1 und X3/10 r mit CNC-GND der Steuerung verbunden werden.

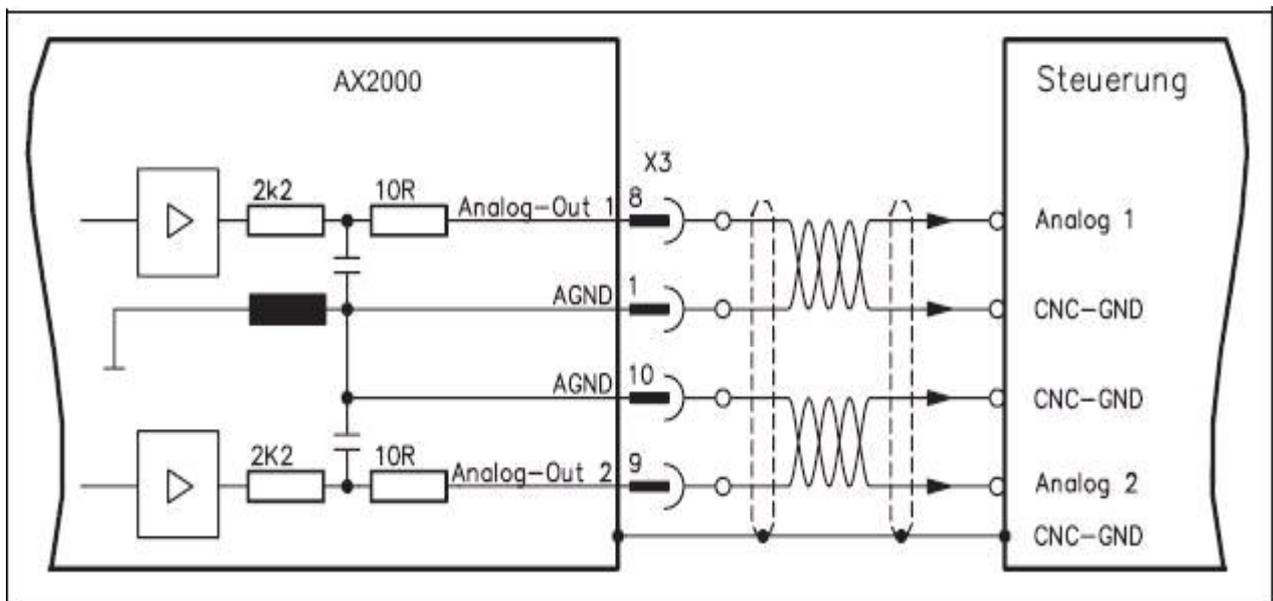


Abb. 35 Anschlussplan der Analogausgänge

Digitale Eingänge (X3)

Der Servoverstärker AX2000 hat 5 digitale Eingänge. Alle digitalen Eingänge sind über Optokoppler potentialfrei gekoppelt.

Eingang Freigabe ENABLE

Man kann die Endstufe des Servoverstärkers mit dem Freigabe- (Enable-) Signal freigeben.

Die Klemme X3/15 des Servoverstärkers AX2000 wird mit dem ersten digital Ausgangssignal der Busklemme KL2134 verdrahtet.

Im gesperrten Zustand (Low Signal) ist der angeschlossene Motor drehmomentfrei.

Endschalter PSTOP/NSTOP

Die Klemmen X3/13 und X3/14 sind standardmäßig für den Anschluss von Endschalter programmiert. Wenn diese Eingänge nicht für den Anschluss von Endschaltern benötigt werden, kann man sie für andere Eingangsfunktionen nutzen.

DIGITAL-IN 1/ DIGITAL-IN 2

Die Verknüpfung der digitalen Eingänge Klemme X3/11 (DIGITAL-IN 1) bzw. Klemme X3/12 (DIGITAL-IN 2) ist mit einer vorprogrammierten Funktion realisierbar.

Die Klemme X3/11 des Servoverstärkers AX2000 wird mit dem zweiten digital Ausgangssignal der Busklemme KL2134 verdrahtet. Und Die Klemme X3/12 wird mit dem dritten Eingangssignal der Busklemme KL2134 verdrahtet. (Weitere Hinweise zu KL2134 sind auf der Seite.63).

Programmierbare digitale Eingänge

Die digitalen Eingänge PSTOP/ NSTOP/ DIGITAL-IN1 und DIGITAL-IN2 sind im Servoverstärker abgespeicherte vorprogrammierte Funktionen einzustellen.

Eine Liste der vorprogrammierten Funktionen findet man auf der Bildschirmseite "I/O digital" der Inbetriebnahmesoftware.

Wenn einem Eingang eine vorprogrammierte Funktion neu zugewiesen wird, muss der Datensatz im EEPROM des Servoverstärkers gespeichert und die 24V Hilfspannungsversorgung des Servoverstärkers aus- und wieder eingeschaltet werden (Reset des Verstärkersoftware).

Als Potentialbezug muss die Klemme X3/18 der DIGITAL-GND (DGND) mit I/O-GND der Steuerung verbunden werden.

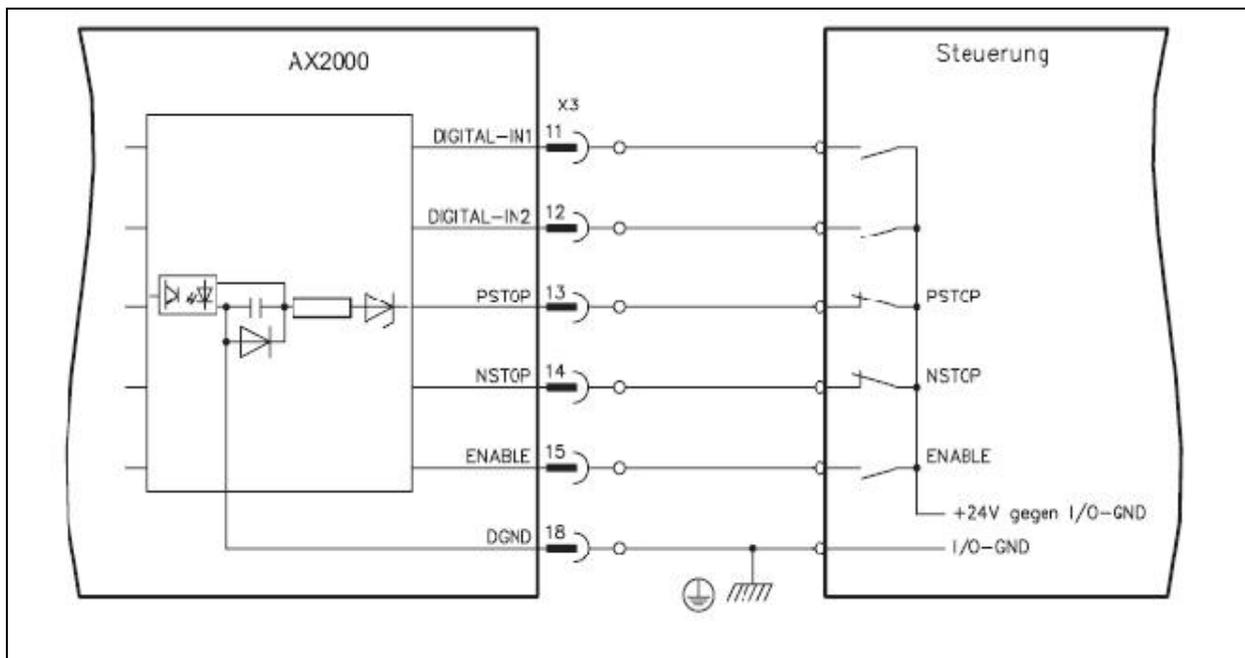


Abb. 36 Anschlussplan der digitalen Eingänge

Digitale Ausgänge (X3)

Der Servoverstärker AX2000 hat zwei digitale Ausgänge DIGITAL-OUT 1/2.

Man kann die digitalen Ausgänge DIGITAL-OUT1 (Klemme X3/16) und DIGITAL-OUT2 (Klemme X3/17) dazu verwenden, Meldungen vom im Servoverstärker abgespeicherten, vorprogrammierten Funktionen auszugeben

Wenn einem Eingang eine vorprogrammierte Funktion neu zugewiesen wird, muss der Datensatz im Eeprom des Servoverstärkers gespeichert und die 24V Hilfspannungsversorgung des Servoverstärkers aus- und wieder eingeschaltet werden (Reset des Verstärkerssoftware).

Die Klemme X3/16 des Servoverstärkers AX2000 wird mit dem ersten digital Eingangssignal der Busklemme KL1114 verdrahtet. (Weitere Hinweise zu LK1114 finden Sie auf der Seite.62).

Die Klemme X3/18 der DIGITAL-GND (DGND) muss als Potentialbezug mit I/O-GND der Steuerung verbunden werden.

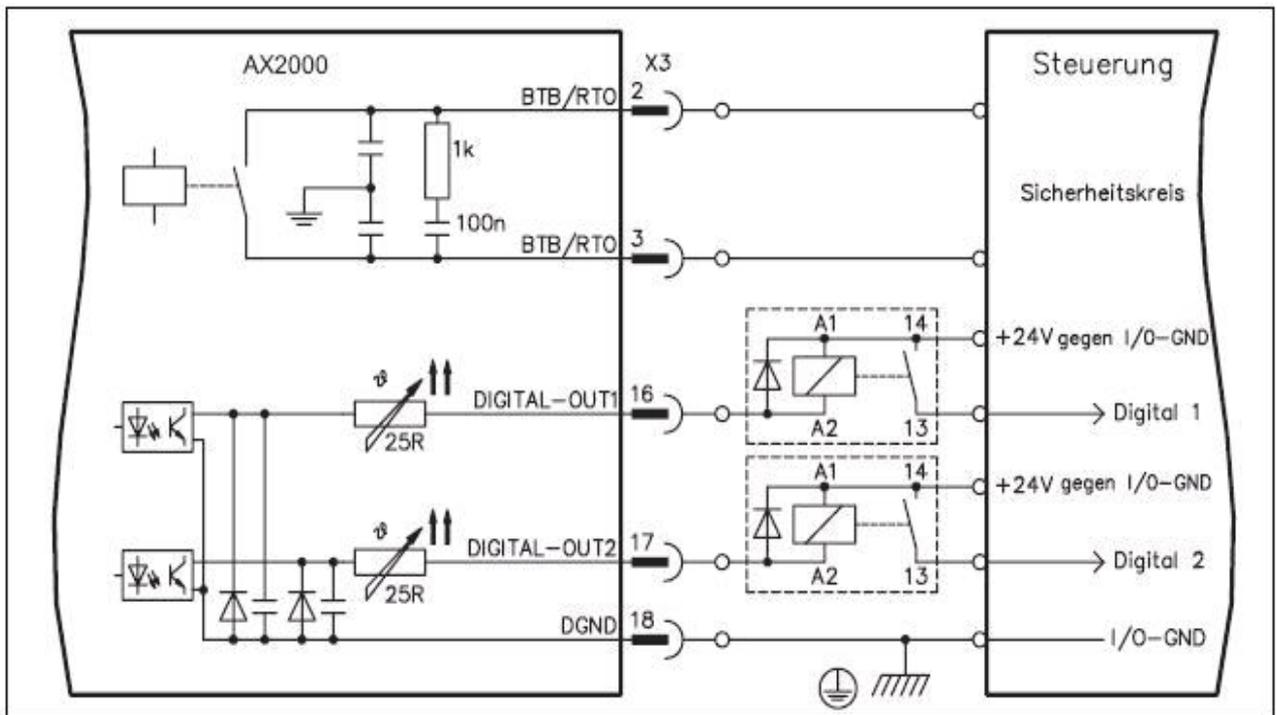


Abb. 37 Anschlussplan der digitalen Ausgänge

Anschluss für die 24V-Hilfsspannung (X4)

Aus einem externen 24V DC-Netzteil, wird die 24V-Hilfsspannung an der Klemme +24V und die Masse an XGND der Anschluss X4 angeschlossen.

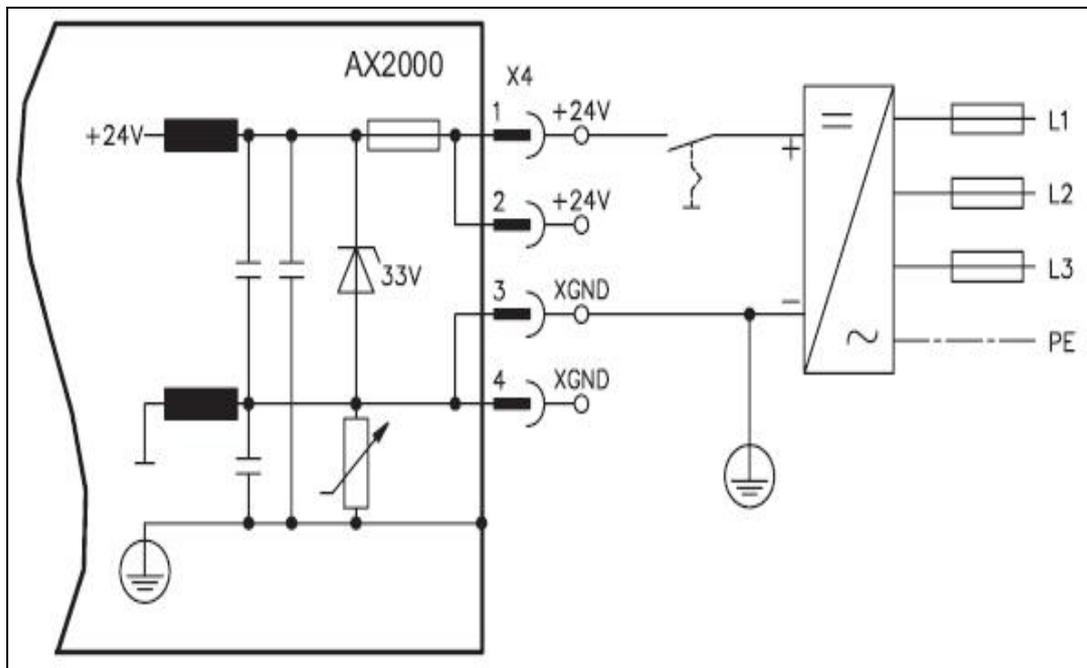


Abb. 38 Anschlussplan der 24V-Hilfsspannung

RS232-Interface, PC-Anschluss (X6)

Der Stecker X6 des AX2000 ist belegt mit den Signalen des RS232 Interface und des CAN Interface.

Die PC-Schnittstelle (X6) des Servoverstärkers wird bei abgeschalteten Versorgungsspannung, über eine Nullmodem-Leitung mit einer serielle Schnittstelle des PC verbunden.

Die Schnittstelle ist über Optokoppler galvanisch getrennt und liegt auf dem gleichen Potential wie das KA-Nopen-Interface.

Die Schnittstelle wird in der Inbetriebnahmesoftware angewählt und eingestellt

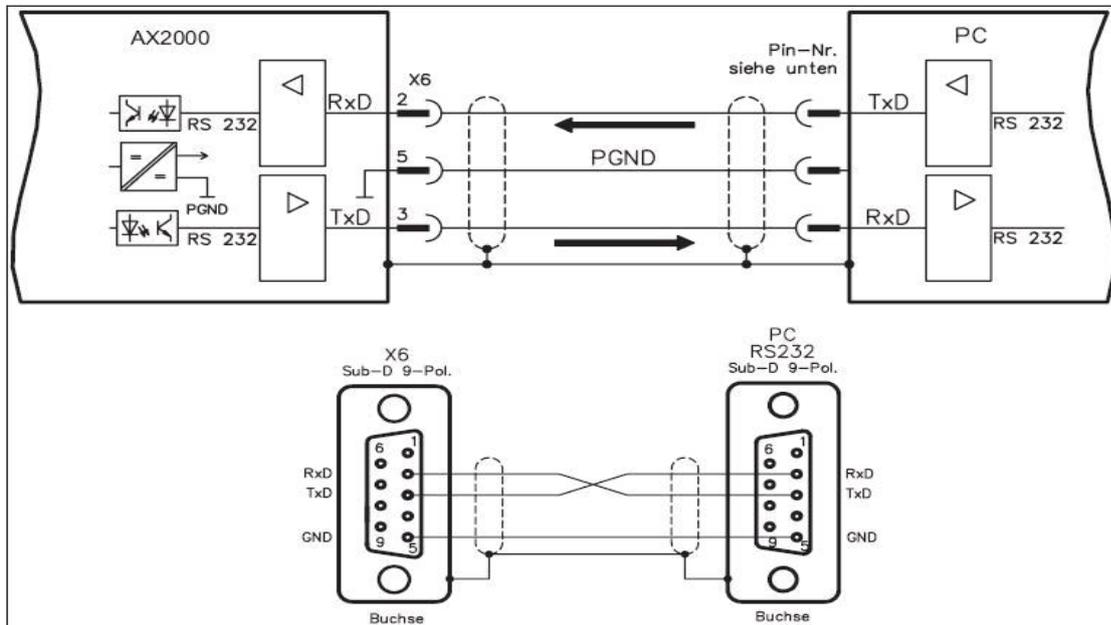


Abb. 39 Übertragungsleitung zwischen PC und AX2000

Die Busleitung sollte mit einem Wellenwiderstand von 120Ω verwendet werden. Die verwendbare Leitungslänge für eine sichere Kommunikation nimmt mit zunehmender Übertragungsrate ab.

Übertragungsrate / kBaud	max. Leitungslänge / m
1000	20
500	70
250	115

Tabelle 3 Übertragungsrate

Motoranschluss mit Bremse (X9)

X9 ist eine Power Combination Stecker und ermittelt die Verbindung des Motors AM247M an den Servoverstärker AX2000.

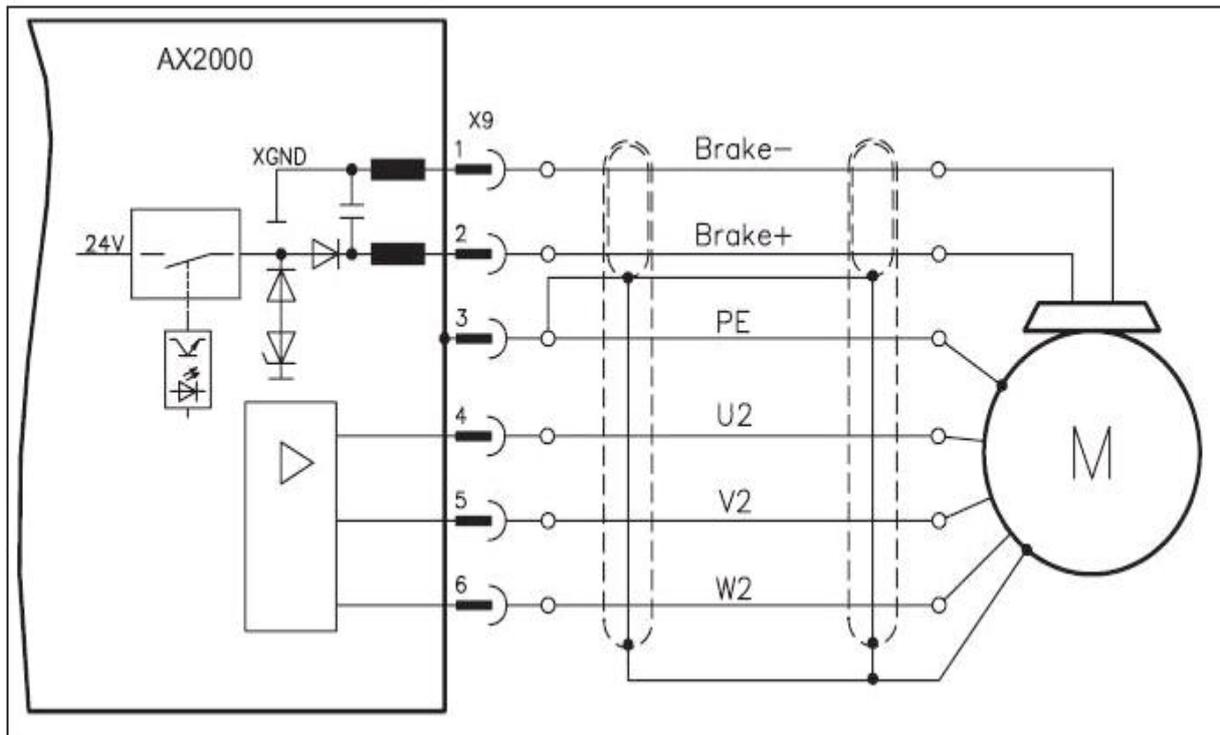


Abb. 40 Anschlussplan des Motors AM247M mit AX2000

3.9 Inbetriebnahmesoftware „DRIVE.EXE“

(siehe Anhang)

3.10 Buskoppler BK 9000 ⁷

3.10.1 Buskoppler Eigenschaften

Das Busklemmen-System ist das universelle Bindeglied zwischen einem Feldbus-System und der Sensor / Aktuator- Ebene. Eine Einheit besteht aus einem Buskoppler als Kopfstation und bis zu 64 elektronischen Reihenklemmen, wovon die letzte eine Endklemme ist. Für jede technische Signalform stehen Klemmen mit jeweils zwei E/A-Kanälen zur Verfügung, die beliebig gemischt werden können. Dabei haben alle Klemmentypen die gleiche Bauform, wodurch der Projektierungsaufwand sehr gering gehalten wird. Bauhöhe und Tiefe sind auf kompakte Klemmenkästen abgestimmt.

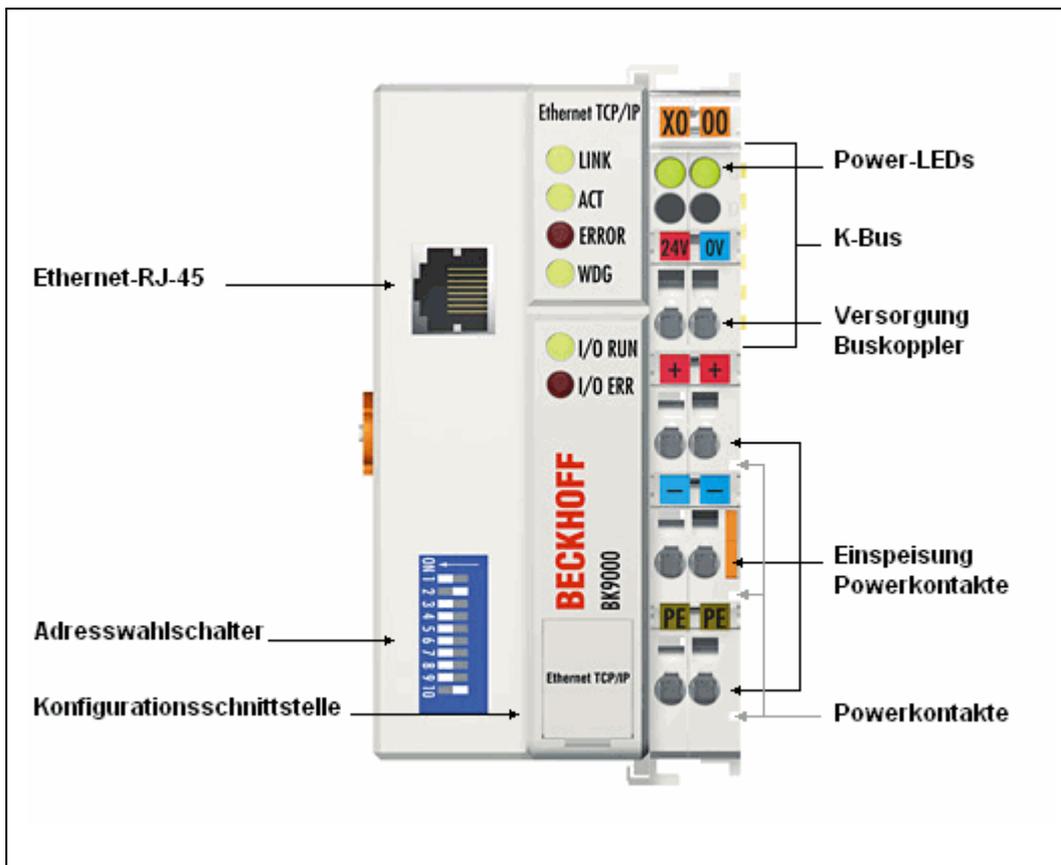


Abb. 41 Beckhoff Buskoppler Bk9000

Die technischen Daten des Buskopplers sind in der Tabelle 4 zusammengefasst.

Technische Daten	BK9000
Anzahl der Busklemmen	64
Digitale Peripheriesignale	256 Ein-/Ausgänge
Analoge Peripheriesignale	128 Ein-/Ausgänge
Protokolle	UDP- ADS, TCP-ADS, Fast-ADS, ModbusTCP
Busanschluss	RJ 45
Spannungsversorgung	24 V DC (-15%/+20%)
Eingangsstrom	70 mA + (ges. K-Bus Strom)/4
Einschaltstrom	ca. 2,5 x Dauerstrom

Tabelle 4 Eigenschaften des Buskopplers BK9000

- **K-Bus**

Der K-Bus ist der Datenweg innerhalb der Klemmleiste. Über sechs Kontakte an den Seitenwänden der Klemmen wird der K-Bus vom Buskoppler durch alle Klemmen geführt. Die Endklemme schließt den K-Bus ab.

- **Potential-Einspeiseklemmen für potentialgetrennte Gruppen**

Über drei Powerkontakte wird die Betriebsspannung an die nachfolgenden Klemmen weitergegeben. Durch den Einsatz von Potential-Einspeiseklemmen, kann die Klemmleiste in beliebige potentialgetrennte Gruppen gliedert werden. Die Potential-Einspeiseklemmen werden bei der Ansteuerung der Klemmen nicht berücksichtigt, sie dürfen an beliebiger Stelle in die Klemmleiste eingereiht werden.

In einer Klemmleiste können bis zu 64 Klemmen eingesetzt werden. Dabei werden Potential-Einspeise klemmen mitgezählt, die Endklemme nicht.

- **Buskoppler für verschiedene Feldbus-Systeme**

Verschiedene Buskoppler lassen sich einsetzen, um die elektronische Klemmleiste schnell und einfach an unterschiedliche Feldbus-Systeme anzukoppeln. Auch eine nachträgliche Umrüstung auf ein anderes Feldbus-System ist möglich. Der Buskoppler übernimmt alle Kontroll- und Steuerungsaufgaben, die für den Betrieb der angeschlossenen Busklemmen notwendig sind. Die Bedienung und Konfiguration der Busklemmen wird ausschließlich über den Buskoppler durchgeführt. Die eingestellten Parameter werden jedoch spannungsausfallsicher in den jeweiligen Busklemmen gespeichert. Feldbus, K-Bus und E/A-Ebene sind galvanisch getrennt.

Wenn der Datenaustausch über den Feldbus zeitweise gestört ist oder ausfällt, bleiben Registerinhalte (wie z. B. Zählerstände) erhalten, digitale Ausgänge werden gelöscht und analoge Ausgänge nehmen einen Wert an, der bei der Inbetriebnahme für jeden Ausgang konfigurierbar ist. Die Default-Einstellung der analogen Ausgänge ist 0 V bzw. 0 mA. Digitale Ausgänge fallen in einen inaktiven Zustand zurück. Die Timeout-Zeiten der Buskoppler entsprechen den für das Feldbus-System üblichen Zeiten. Bei der Umstellung auf ein anderes Bussystem muss man im Falle großer Zykluszeiten des Bussystems die Änderung der Timeout-Zeiten beachten.

3.10.2 Die Schnittstellen

Ein Buskoppler besitzt sechs unterschiedliche Anschlussmöglichkeiten. Diese Schnittstellen sind als Steckverbindungen und Federkraftklemmen ausgelegt.

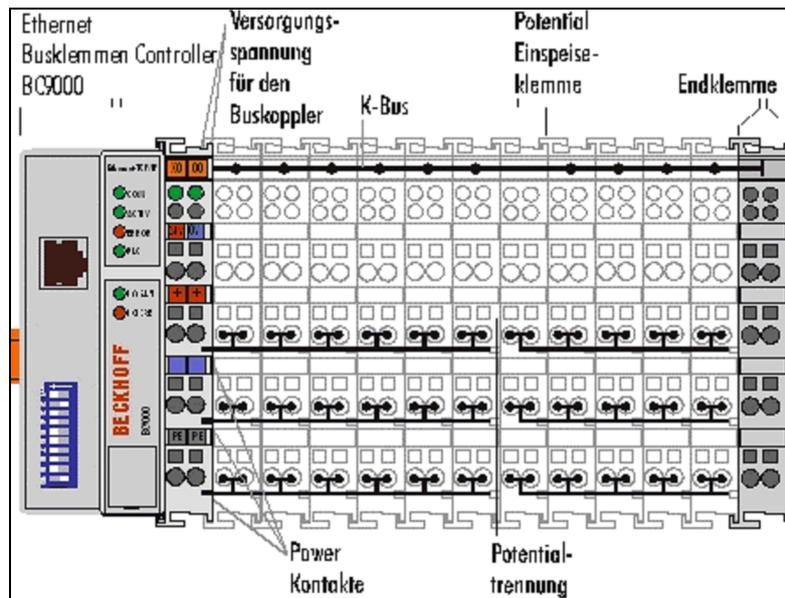


Abb. 42 Buskoppler und Busklemmen

3.11 Feldbussystem

3.11.1 Grundlagen

- **Internet-Protokoll (IP)**

Die Grundlage der Datenkommunikation ist das Internet-Protokoll (IP). IP transportiert Datenpakete von einem Teilnehmer zu einem anderen, der sich im gleichen oder in einem anderen Netz befinden kann. IP kümmert sich dabei um das Adress-Management (Finden und Zuordnen des MAC-IDs), die Segmentierung und die Pfadsuche (Routing). Wie das Ethernet-Protokoll gewährleistet auch IP keinen gesicherten Transport der Daten; Datenpakete können verloren gehen oder in ihrer Reihenfolge vertauscht werden. Für einen standardisierten, gesicherten Informationsaustausch zwischen beliebig vielen verschiedenen Netzwerken wurde TCP/IP entwickelt. Dabei ist TCP/IP weitgehend unabhängig von der verwendeten Hard- und Software. Oftmals als ein Begriff verwendet, handelt es sich hierbei um mehrere aufeinander aufgesetzte Protokolle: z.B. IP, TCP, UDP, ARP und ICMP.

- **Transmission Control Protocol (TCP)**

Das auf IP aufsetzende Transmission Control Protocol (TCP) ist ein verbindungsorientiertes Transport-Protokoll. Es umfasst Fehlererkennungs- und Behandlungsmechanismen. Verlorene Telegramme werden wiederholt.

- **BootP**

Das BootP-Protokoll ermöglicht das Einstellen und Ändern der TCP/IP-Adresse indem der Netzwerk-Teilnehmer mit der MAC-ID angesprochen wird.

- **Auf TCP/IP und UDP/IP aufsetzende Protokolle**

Auf TCP/IP bzw. UDP können folgende Protokolle aufsetzen:

- ADS
- ModbusTCP

Beide Protokolle sind parallel auf dem Buskoppler implementiert, so dass für die Aktivierung der Protokolle keine Konfiguration nötig ist.

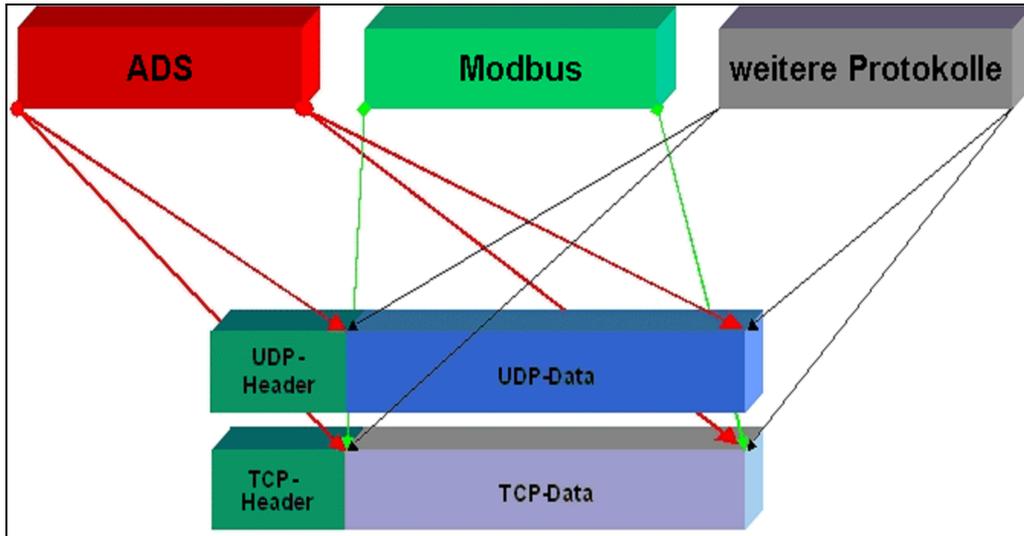


Abb. 43 ADS und TCP Modbus

ADS setzt wahlweise auf TCP oder UDP auf, während ModbusTCP stets auf TCP/IP basiert.

3.11.2 Reaktionszeit BK9000

ADS	Zeit [ms]
TCP	23 bis 50 ms
UDP	2 bis 3 ms

Tabelle 5 Reaktionszeit des ADS-Kommunikation

Modbus	Zeit [ms]
TCP	12 bis 15 ms (Default)
UDP	1 bis 3 ms

Tabelle 6 Reaktionszeit des Modbus

- **ADS-Kommunikation**

Das ADS-Protokoll (ADS: Automation Device Specification) ist eine Transportschicht innerhalb des Beckhoff TwinCAT Systems. Es ist für den Datenaustausch der verschiedenen Software-Module entwickelt worden, zum Beispiel für die Kommunikation zwischen der NC und der PLC. Mit diesem Protokoll hat man die Freiheit von jedem Punkt im TwinCAT mit anderen Tools zu kommunizieren. Wird eine Kommunikation zu anderen PC oder Geräten benötigt setzt das ADS-Protokoll auf TCP/IP auf. Somit ist es in einem vernetzten System möglich, an alle Daten von einem beliebigen Punkt zu kommen.

Das ADS-Protokoll wird auf das TCP/IP- oder UDP/IP-Protokoll aufgesetzt. Es ermöglicht dem Benutzer innerhalb des Beckhoff-Systems über nahezu beliebige Verbindungswege mit allen angeschlossenen Geräten zu kommunizieren und diese zu parametrieren. Außerhalb des Beckhoff-Systems stehen verschiedene Wege offen, um mit anderen Software-Tools Daten auszutauschen.

- **Verbindungen innerhalb eines Busklemmenblocks**

Die elektrischen Verbindungen zwischen Buskoppler und Busklemmen werden durch das Zusammenstecken der Komponenten automatisch realisiert:

- Die sechs Federkontakte des K-Bus übernehmen die Übertragung der Daten und die Versorgung der Busklemmenelektronik.
- Die Powerkontakte übertragen die Versorgung für die Feldelektronik und stellen so innerhalb des Busklemmenblocks eine Versorgungsschiene dar. Die Versorgung der Powerkontakte erfolgt über Klemmen auf dem Buskoppler.

3.11.3 ModbusTCP

- **ModbusTCP-Protokoll**

Das Ethernet-Protokoll wird über die MAC-ID adressiert. Der Anwender braucht sich meist um diese Adresse nicht zu kümmern. Die IP-Nummer ist 4 Byte groß und muss vom Anwender auf dem Buskoppler und in der Anwendung parametrieren werden. Die TCP-Port ist bei ModbusTCP auf 502 festgelegt. Die UNIT ist bei ModbusTCP frei wählbar und braucht vom Anwender nicht konfiguriert werden.

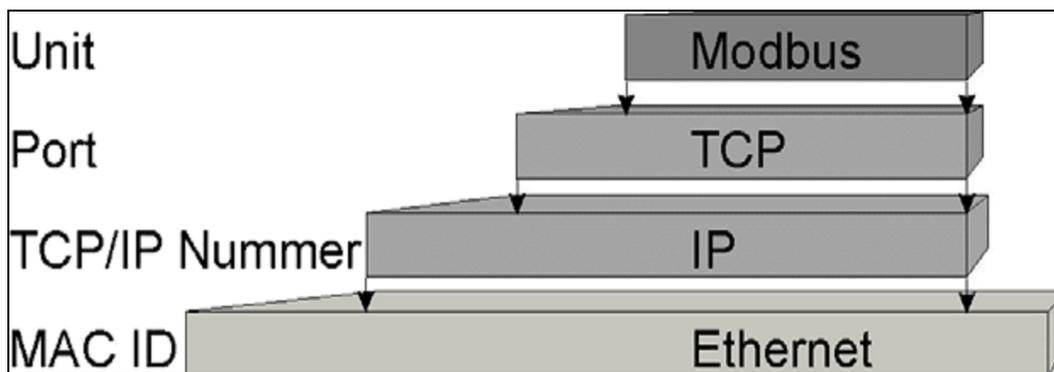


Abb. 44 ModbusTCP-Protokoll

3.11.4 Verdrahtung

- **Spannungsversorgung Buskoppler**

Die Buskoppler benötigen zum Betrieb eine 24 V Gleichspannung. Der Anschluss findet über die oberen Federkraftklemmen mit der Bezeichnung 24 V und 0 V statt. Die Versorgungsspannung versorgt die Buskopplerelektronik und über den K-Bus die Busklemmen. Die Spannungsversorgung der Buskopplerelektronik und die des K-Busses sind galvanisch von der Spannung der Feldebene getrennt.

- **Einspeisung Powerkontakte**

Die unteren sechs Anschlüsse mit Federkraftklemmen können zur Einspeisung der Peripherieversorgung benutzt werden. Die Federkraftklemmen sind paarweise mit einem Powerkontakt verbunden. Die Einspeisung zu den Powerkontakten besitzt keine Verbindung zur Spannungsversorgung der Buskoppler. Die Auslegung der Einspeisung lässt Spannungen bis zu 24 V zu. Die paarweise Anordnung und die elektrische Verbindung zwischen den Speiseklemmkontakten ermöglicht das Durchschleifen der Anschlussdrähte zu unterschiedlichen Klemmpunkten.

Die Strombelastung über den Powerkontakten darf 10 A nicht dauerhaft überschreiten. Die Strombelastbarkeit zwischen zwei Federkraftklemmen ist mit der Belastbarkeit der Verbindungsdrähte identisch.

- **Powerkontakte**

An der rechten Seitenfläche des Buskopplers befinden sich drei Federkontakte der Powerkontaktverbindungen.

Die Federkontakte sind in Schlitzen verborgen um den Berührungsschutz sicherzustellen. Durch das Anreihen einer Busklemme werden die Messerkontakte auf der linken Seite der Busklemme mit den Federkontakten verbunden.

Die Nut/Federführung an der Ober- und Unterseite der Buskoppler und Busklemmen garantiert sichere Führung der Powerkontakte.

- **Konfigurations-Schnittstelle**

Auf der unteren Seite der Frontfläche sind die Standardbuskoppler mit einer RS232-Schnittstelle ausgerüstet. Der Miniaturstecker kann mit einem Verbindungskabel und der Konfigurationssoftware KS2000 mit einem PC verbunden werden. Die Schnittstelle erlaubt das Konfigurieren der Busklemmen, wie zum Beispiel das Einstellen des Verstärkungsfaktors der analogen Kanäle. Über die Schnittstelle kann auch die Zuordnungen der Busklemmen- Daten zum Prozessabbild im Buskoppler verändert werden. Die Funktionalität der Konfigurationsschnittstelle ist auch über den Feldbus mit der Stringkommunikation zu erreichen.

- **Potentialtrennung**

Die Buskoppler arbeiten mit drei unabhängigen Potentialgruppen. Die Versorgungsspannung speist galvanisch getrennt die K-Bus-Elektronik im Buskoppler und den K-Bus selbst. Aus der Versorgungsspannung wird weiter die Betriebsspannung für den Betrieb des Feldbusses erzeugt.

Anmerkung: Alle Busklemmen haben eine galvanische Trennung zum K-Bus. Der K-Bus ist dadurch vollständig galvanisch gekapselt.

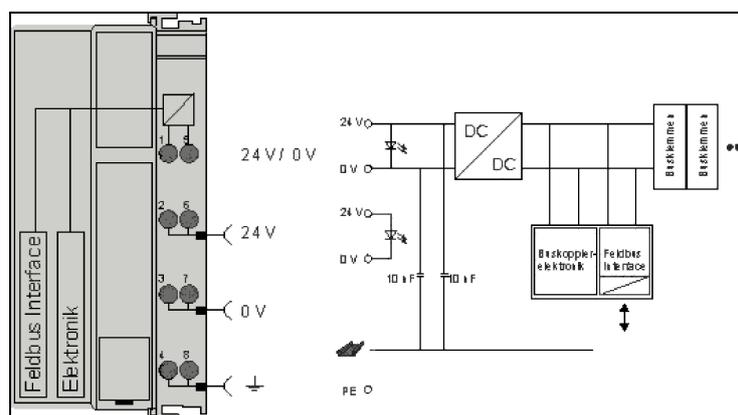


Abb. 45 Buskoppler aufbau

3.11.5 Ethernet-Anschluss

Der Anschluss an den Ethernet-Bus erfolgt über einen RJ45-Stecker (Westernstecker).

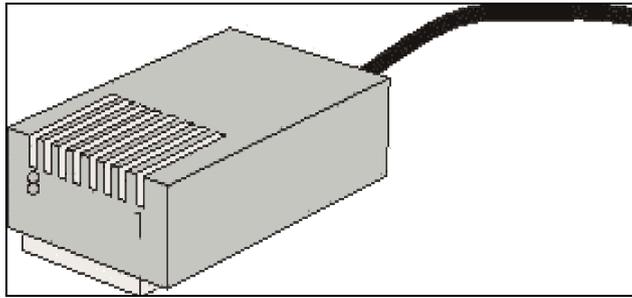


Abb. 46 RJ45-Stecker

- **Direkte Verbindung zwischen PC mit Ethernet-Karte und BK9000**

Um den PC direkt mit dem Busklemmen Controller zu verbinden, muss ein Ethernetkabel mit gekreuzten Aderpaaren (Cross-Over-Kabel) verwendet werden.

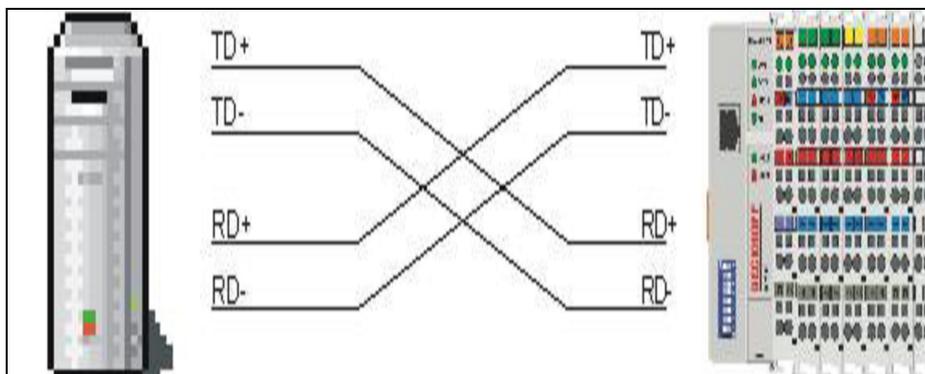


Abb. 47 Verbindung zwischen PC mit Ethernet-Karte und BK9000

3.11.6 Parametrierung und Inbetriebnahme

- **Anlaufverhalten des Buskopplers**

Nach dem Einschalten prüft der Buskoppler seinen Zustand, konfiguriert den K-Bus und erstellt anhand der gesteckten Busklemmen eine Aufbaukarte. Wenn der Buskoppler eine dezentrale Steuerung besitzt (BCxxxx) wird nach einer erfolgreichen Aufbaukarte die lokale SPS gestartet.

Beim Hochlauf des Buskopplers leuchten und blinken die E/A-LEDs. Im fehlerfreien Zustand sollte nach ca. 2-3 sec keine E/A-LED mehr blinken. Im Fehlerfall hängt es von der Fehlerart ab, welche LED blinkt (siehe Diagnose-LEDs).

- **Wiederherstellen der Hersteller-Einstellungen**

➤ Der Buskoppler soll ausgeschaltet und nur die Endklemme (KL9010) gesteckt werden.

- Alle DIP-Schalter sollen auf ON gestellt und der Buskoppler wieder eingeschaltet.
 - Nach erfolgreichem Einstellen der Default-Parameter leuchtet die LED *Error* und die LEDs *I/O RUN* und *I/O ERR* blinken abwechselnd.
 - Danach kann der Buskoppler ausgeschaltet werden, die Busklemmen anschließen und wie gewohnt fortfahren
- **Einstellung der Ethernet-Parameter**
 - Der Buskoppler soll ausgeschaltet und nur die Endklemme (KL9010) gesteckt werden.
 - Alle DIP-Schalter sollen auf OFF gestellt und der Buskoppler wieder eingeschalten.
 - Die LEDs *I/O RUN* und *I/O ERR* leuchten konstant.
 - Nun anhand der folgenden Tabelle kann die gewünschte Einstellung vorgenommen.

DIP-Schalter	Parameter	Auswahl	Einstellung
1	Baud-Rate	10 MBaud	OFF (0)
		100 MBaud	ON (1)
2	Auto-Baud-Rate	Disable	OFF (0)
		Enable	ON (1)
3	Übertragungsart	Vollduplex	ON (1)
		Halbduplex	OFF (0)

Tabelle 7 Einstellung des DIP-Schalters

- Zur Übernahme der Werte soll den DIP-Schalter 10 auf ON geschaltet werden.
- Der Buskoppler zeigt nun durch blinken der LEDs *I/O RUN* und *I/O ERR*, das er die Parameter übernommen hat.
- Danach kann der Buskoppler ausschaltet werden, die Busklemmen anschließen und wie gewohnt fortfahren.

- **IP-Adresse**

Die Einstellung der IP-Adresse kann mit vier unterschiedlichen Verfahren durchgeführt werden, davon ist die **BootP-Server Einstellung** im Folgenden beschrieben werden.

- **Einstellung der IP-Adresse über den Beckhoff BootP-Server**

Es soll für die Adresseinstellung mit dem Beckhoff BootP-Server den DIP-Schalter 9 auf ON (1) und den DIP-Schalter 10 auf OFF (0) gestellt werden. Die DIP-Schalter 1-8 haben dann keine Adress-Funktion mehr. Ist dies nicht der Fall so meldet der Buskoppler Fehler-Code 6-4. Während der Adressvergabe blinkt die LED TCP/IP ERROR.

- **Subnetz-Maske**

Die Subnetz-Maske unterliegt der Kontrolle des Netzwerkverwalters und legt die Struktur der Subnetze fest. Kleine Netze ohne Router benötigen keine Subnetz-Maske. Das gleiche gilt, wenn es keine registrierten IP- Nummern verwendet werden. kann man die Subnetz-Maske dazu verwenden, anstelle des Gebrauchs vieler Netznummern das Netz mit dieser Maske zu unterteilen.

Die Subnetz-Maske ist eine 32-Bit Ziffer:

- Einsen in der Maske kennzeichnen den Subnetz-Nummernteil eines Adressraums.
- Nullen kennzeichnen den Teil des Adressraums, der für die Host-IDs zur Verfügung steht.

Beschreibung	Binäre Darstellung	Dezimale Darstellung
IP-Adresse	10101100.00010000.00010001.11001000	172.16.17.200
Subnetz-Maske	11111111.11111111.00010100.00000000	255.255.20.0
Netz-ID	10101100.00010000.00010000.00000000	172.16.16.0
Host-ID	00000000.00000000.00000001.11001000	0.0.1.200

Tabelle 8 Eingabe der IP-Adresse

Standard Subnetz-Maske

Adressklasse	Standard Subnetz-Maske (dezimal)	Standard Subnetz-Maske (hex)
A	255.0.0.0	FF.00.00.00
B	255.255.0.0	FF.FF.00.00
C	255.255.255.0	FF.FF.FF.00

Tabelle 9 Eingabe der Subnetz-Maske

- **Kommunikation zwischen den PC und den Buskoppler**

Um die Kommunikation mit dem PC zu ermöglichen, muss an einer freien Netzwerkkarte eine IP-Adresse eingestellt werden, die die Form 172.16.17.xxx (xxx = 0, 2...255) hat. Als Subnetzmaske wird 255.255.0.0 eingestellt. Dazu wird in der Systemsteuerung den Menüpunkt „Netzwerkverbindungen“ aufgerufen und wird dort die zu konfigurierende Netzwerkkarte ausgewählt. Durch Klicken mit der rechten Maustaste öffnet sich das Kontextmenü. Es soll den Punkt Eigenschaften gewählt und der Punkt Internetprotokoll (TCP/IP) markiert werden, dann auf den Button *Eigenschaften* klicken.

Es muss beachtet werden, dass die Treibereinstellungen anpassen müssen, wenn mittels BootP-Server die IP-Adresse des Buskopplers geändert worden (s. u.).

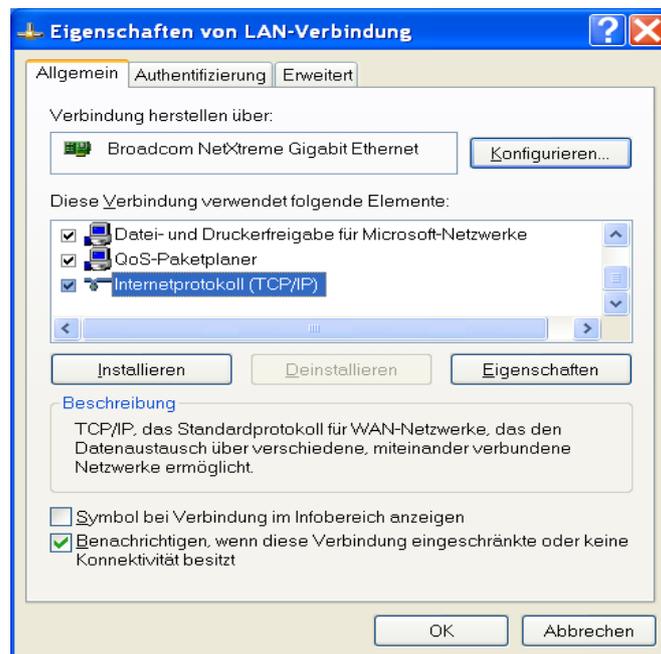


Abb. 48 Einstellung der Netzwerkverbindung

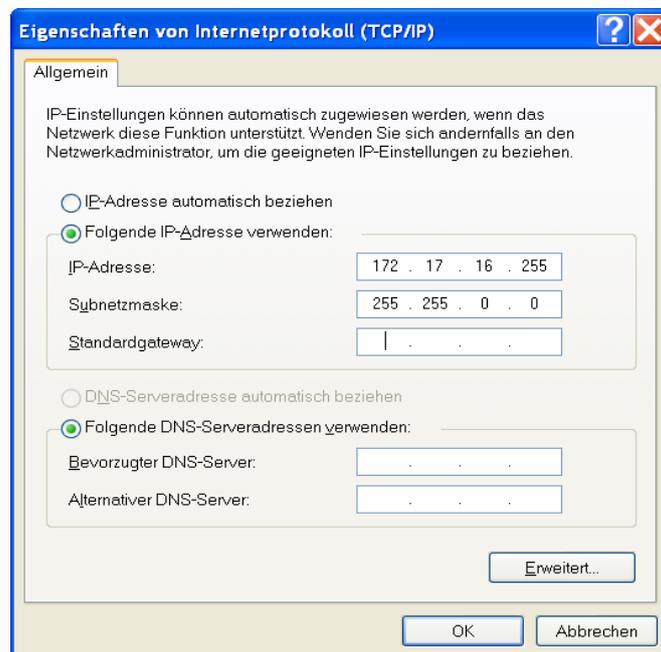


Abb. 49 Einstellung der IP-Adresse

3.12 Busklemmen ⁷

3.12.1 4- Kanal-Digital Eingangsklemme 24 V DC KL1114

Die digitalen Eingangsklemmen KL1104 und KL1114 erfassen die binären Steuersignale aus der Prozessebene und transportieren sie galvanisch getrennt zum übergeordneten Automatisierungsgerät. Die Varianten KL1104 und KL1114 besitzen unterschiedlich schnelle Eingangsfilter. Die Busklemmen enthalten je vier Kanäle, die ihren Signalzustand durch Leuchtdioden anzeigen. Die Busklemmen enthalten je vier Kanäle, die ihren Signalzustand durch Leuchtdioden anzeigen.

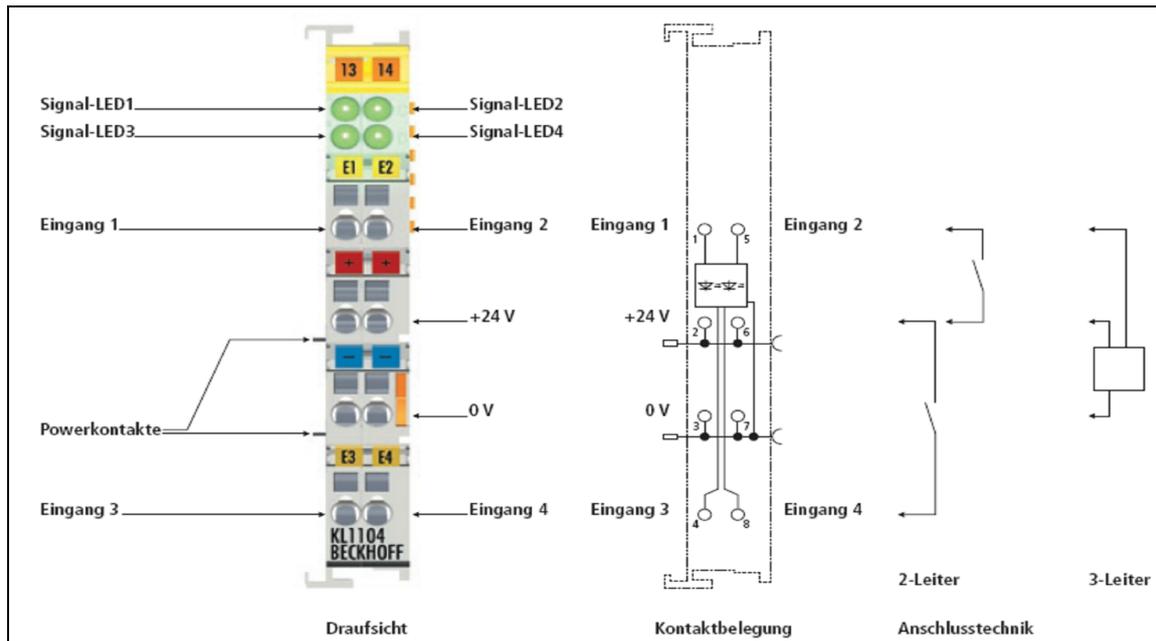


Abb. 50 Digital Eingangsklemme

Die Eigenschaften der Eingangsklemmen KL1114 sind in der Tabelle 10 zusammengefasst.

Technische Daten	KL1114
Anzahl der Eingänge	4
spannung	24 V DC (-15 % /+ 20%)
Signalspannung „0“	-3 V ... 5 V
Signalspannung „1“	15 V ... 30 V
Eingangsfilter	0,2 ms
Eingangsstrom	5 mA typ.
Stromaufnahme vom K-Bus	5 mA typ.
Potenzialtrennung	500 Veff (K-Bus/Feldspannung)

Tabelle 10 Eigenschaften der Digital Eingangsklemme KL1114

3.12.2 4-Kanal-Digital Ausgangsklemme 24 V DC KL2114

Die digitalen Ausgangsklemmen KL2114 schalten die binären Steuersignale des Automatisierungsgerätes galvanisch getrennt zur Prozessebene an die Aktoren weiter. Die Variante KL2114 verarbeitet Lastströme mit überlast- und kurzschluss sicheren Ausgängen. Die Busklemmen enthalten je vier Kanäle, deren Signalzustand durch Leuchtdioden angezeigt wird.

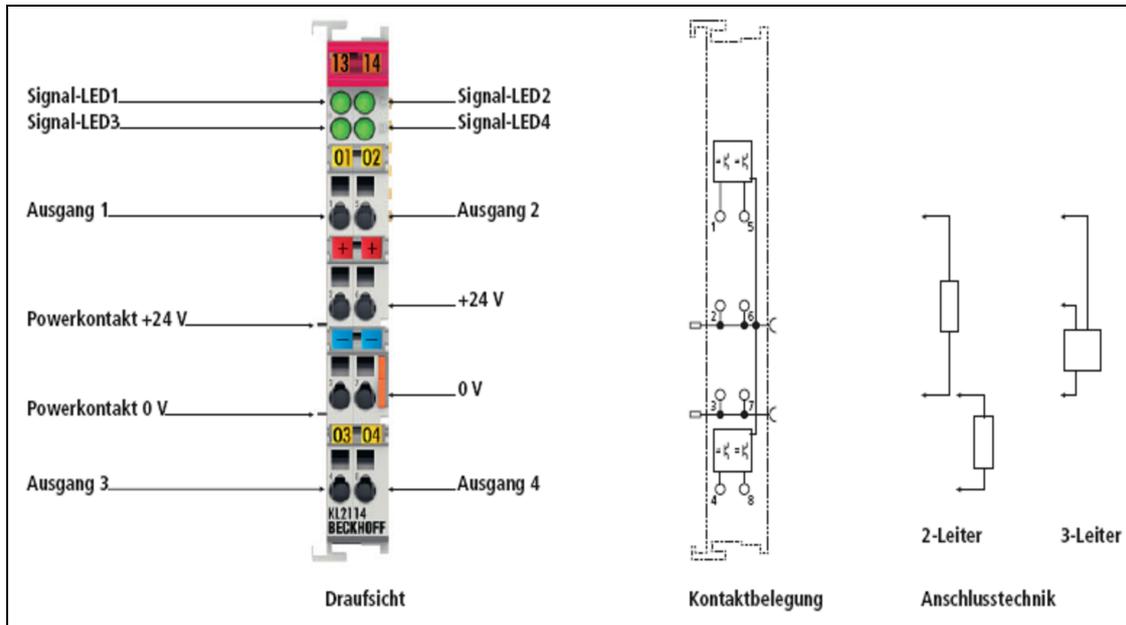


Abb. 51 Digital Ausgangsklemme

Die Eigenschaften der Ausgangsklemmen KL2114 sind in der Tabelle 11 zusammengefasst.

Technische Daten	KL2114
Anzahl Ausgänge	4
Nennlastspannung	24 V DC (-15 %/+20 %)
Lastart	ohmsch, induktiv, Lampenlast
Ausgangsstrom max.	0,5 A (kurzschlussfest) je Kanal
Verpolungsschutz	Nein
Potenzialtrennung	500 Veff (K-Bus/ Feldspannung)
Stromaufnahme Powerkontakte	30 mA typ.
Stromaufnahme K-Bus	9 mA typ.

Tabelle 11 Eigenschaften der Digital Ausgangsklemme KL2114

3.12.3 2-Kanal-Analog Eingangsklemme -10..+10 V KL3002

Die analogen Eingangsklemmen KL3001 und KL3002 verarbeiten Signale im Bereich von -10 bis +10 V. Die Spannung wird mit einer Auflösung von 12 Bit digitalisiert und galvanisch getrennt zum übergeordneten Automatisierungsgerät transportiert. Die Eingangskanäle der Busklemmen sind Differenzeingänge und besitzen ein gemeinsames, internes Massepotenzial. Die KL3001 ist die einkanalige Variante und zeichnet sich durch ihre feine Granularität und Potenzialfreiheit aus. Die Variante KL3002 vereint zwei Kanäle in einem Gehäuse. Die Leuchtdioden zeigen den Datenaustausch mit dem Buskoppler an.

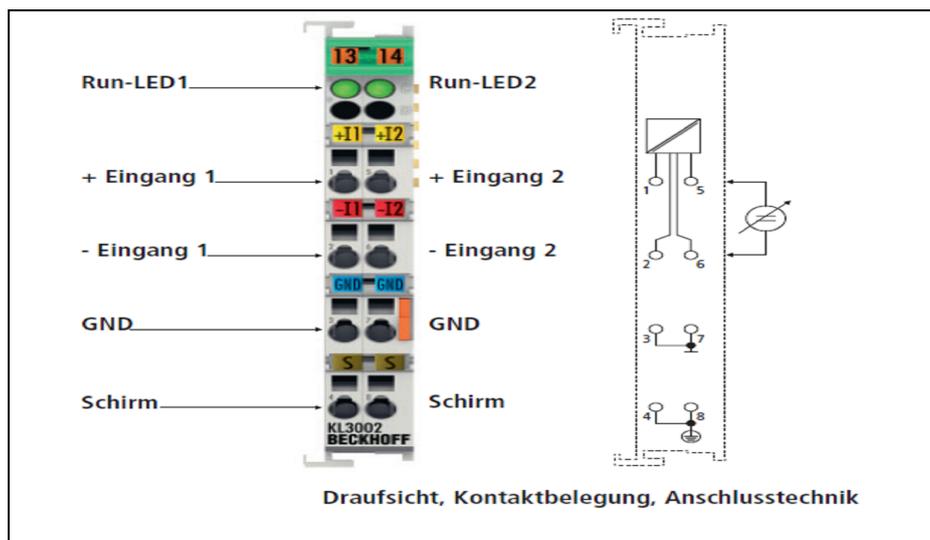


Abb. 52 Analog Eingangsklemme

Die Eigenschaften der Eingangsklemmen KL3002 sind in der Tabelle 12 zusammengefasst.

Technische Daten	KL3002
Anzahl Eingänge	2
Spannungsversorgung	über den K-Bus
Signalspannung	-10...10 V
Innenwiderstand	> 200 K Ω
Auflösung	12 Bit
Wandlungszeit	~ 2 ms
Messfehler	< $\pm 0,3$ % (bezogen auf den Messbereichsendwert)
Potenzialtrennung	500 V _{eff} (K-Bus/ Signalspannung)
Stromaufnahme K-Bus	65 mA typ.

Tabelle 12 Eigenschaften der analog Eingangsklemme KL3002

3.12.4 2-Kanal-Analog-Einpeiseklemmen 0 / 4 ... 20mA KL 3052

Die analogen Eingangsklemmen KL3052 haben die Aufgabe, im Feld befindliche Messumformer zu versorgen und analoge Messsignale galvanisch getrennt zum Automatisierungsgerät zu übertragen. Die Versorgungsspannung für die Sensoren wird über die Powerkontakte an die Klemmen geführt. Die Powerkontakte können wahlweise über die Standardversorgung oder eine Einspeiseklemme (KL9xxx), mit galvanischer Trennung für die Betriebsspannung, versorgt werden. Die Eingangselektronik ist unabhängig von der Versorgungsspannung der Powerkontakte. Die 0-V-Schiene ist das Bezugspotenzial für die Eingänge.

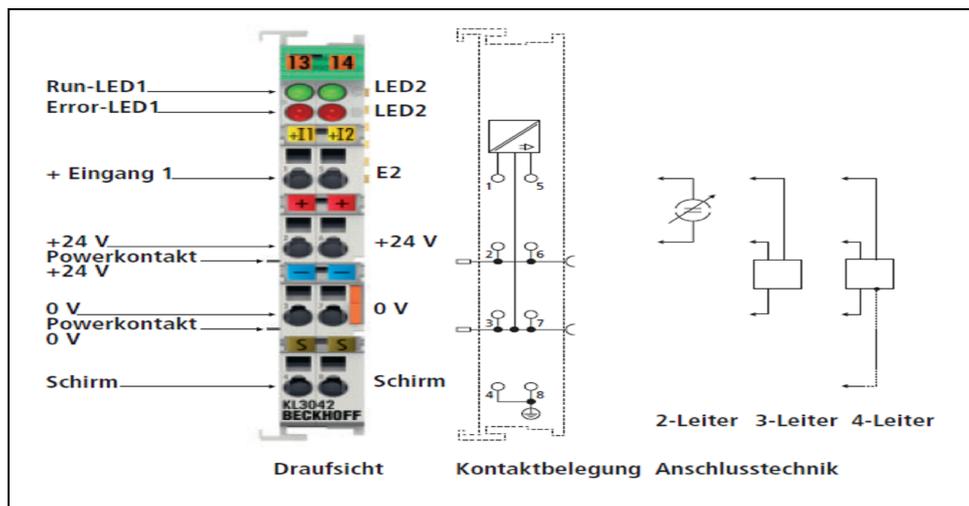


Abb. 53 Analog-Einpeiseklemmen

Die Eigenschaften der Eingangsklemmen KL3052 sind in der Tabelle 13 zusammengefasst.

Technische Daten	KL3052
Anzahl Eingänge	2
Signalstrom	4.....20mA
Spannungsversorgung	24 V DC über die Powerkontakte
Innenwiderstand	80 Diodenspannung 0,7 V
Auflösung	12 Bit
Wandlungszeit	2ms
Überspannungsfestigkeit	35V max.
Stromaufnahme K-Bus	65 mA typ.

Tabelle 13 Eigenschaften der analog Einspeiseklemme KL3052

3.12.5 2-Kanal-Analog-Ausgangsklemmen -10V..+10V KL 4032

Die analogen Ausgangsklemmen KL4032 erzeugen Signale im Bereich von -10 bis +10 V. Die Spannung wird mit einer Auflösung von 12 Bit galvanisch getrennt zur Prozessebene transportiert.

Die Ausgangskanäle einer Busklemme besitzen ein gemeinsames Masse-potenzial. Die Variante KL4032 vereint zwei Kanäle in einem Gehäuse. Den Datenaustausch mit dem Buskoppler zeigen Run-LEDs an.

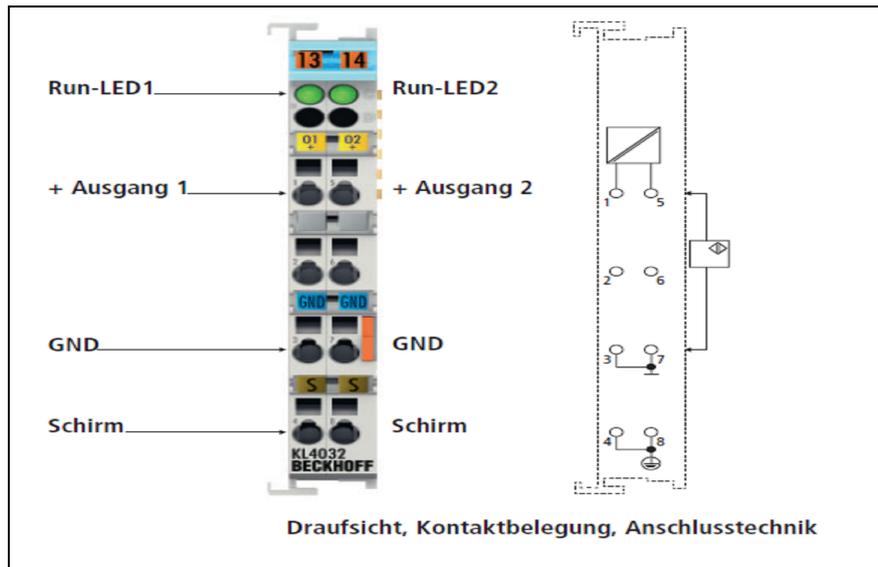


Abb. 54 Analog-Ausgangsklemmen

Die Eigenschaften der Ausgangsklemmen KL4032 sind in der Tabelle 14 zusammengefasst.

Technische Daten	KL4032
Anzahl Eingänge	2
Spannungsversorgung	über den K-Bus
Signalspannung	-10V...10 V
Bürde	> 5 k
Messfehler	< ±0,1 % (bezogen auf den Messbereichs endwert)
Wandlungszeit	~ 4 ms
Auflösung	12Bit
Potenzialtrennung	500 Veff (K -Bus/Signalspannung)
Stromaufnahme K-Bus	75 mA typ.

Tabelle 14 Eigenschaften der analog Ausgangsklemme KL4032

3.12.6 K-Bus Endklemme KL 9010

Die K-Bus Endklemme KL9010 ist für den Datenaustausch zwischen Buskoppler und den Busklemmen notwendig. Jeder Klemmenblock muss auf der rechten Seite mit einer Endklemme abgeschlossen werden. Die Busendklemme KL9010 ist ohne jede weitere Funktion oder Anschlussmöglichkeit.

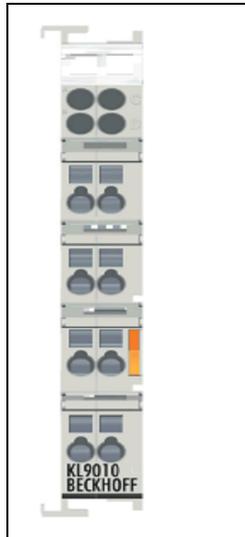


Abb. 55 Endklemme

Die technischen Daten der Klemme KL9010 sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Technische Daten	KL9010
Stromaufnahme aus dem K-Bus	-
Potenzialtrennung	500 V _{eff} (K-Bus/Feldspannung)
Bitbreite im Prozessabbild	-
Konfiguration	keine Adress- oder Konfigurationseinstellung erforderlich
Gewicht	ca. 50 g
zulässiger Umgebungstemperaturbereich	-0°C ... +55°C (im Betrieb) -25°C ... +70°C (bei Lagerung)
zulässige relative Luftfeuchtigkeit	5% ... 95%, keine Betauung
EMV-Festigkeit / Aussendung	gemäß EN 61000-6-2 / EN 61000-6-4
Vibrations- / Schockfestigkeit	gemäß EN 60068-2-6 / EN 60068-2-27, EN 60068-2-29
Schutzart	IP20
Einbaulage	beliebig
Zulassung	CE

Tabelle 15 Eigenschaften der Endklemme KL9010

4. Modellbildung

Nachdem die Komponenten des zu regelnden Systems und deren physikalischen Eigenschaften bekannt sind, kann nun ein entsprechendes mathematisches Modell der „Kugel auf Rad“ erstellt werden. Diese Modellierung ist Basis für den Reglerentwurf und die Simulation des Systems.

4.1 Herleitung der Systemgleichungen

Das zu modellierende mechanische System besteht wie in Bild 56 gezeigt ist, aus einer Kugel der Masse m_{Kugel} und einem drehbar gelagerten Rad der Radius R_{Rad} . Die Auslenkung der Kugel von der vertikalen Y-Achse wird mit dem Winkel φ und die Winkelgeschwindigkeit ω bezeichnet. Die Winkelgeschwindigkeit des Rads wird mit Ω bezeichnet. Als externe Stellgröße wirkt die Spannung U auf den Motor, der das Rad antreibt.

Um die Bewegungsgleichungen zu erhalten, wird das System „Kugel auf Rad“ in zwei dynamischen Komponenten „Kugel“ und „Rad“ zerlegt

Die Winkelgeschwindigkeit der Kugel wird als Zeitableitung des Winkels φ $\omega = \frac{d \varphi}{dt}$, und

die Winkelbeschleunigung wird als Zeitableitung $\dot{\omega} = \frac{d^2 \varphi}{d^2 t} = \frac{d \omega}{d t}$ der Winkelgeschwindigkeit ω angegeben.

Die Winkelbeschleunigung des Rades wird als Zeitableitung $\dot{\Omega} = \frac{d \Omega}{dt}$ der Winkelgeschwindigkeit Ω angegeben.

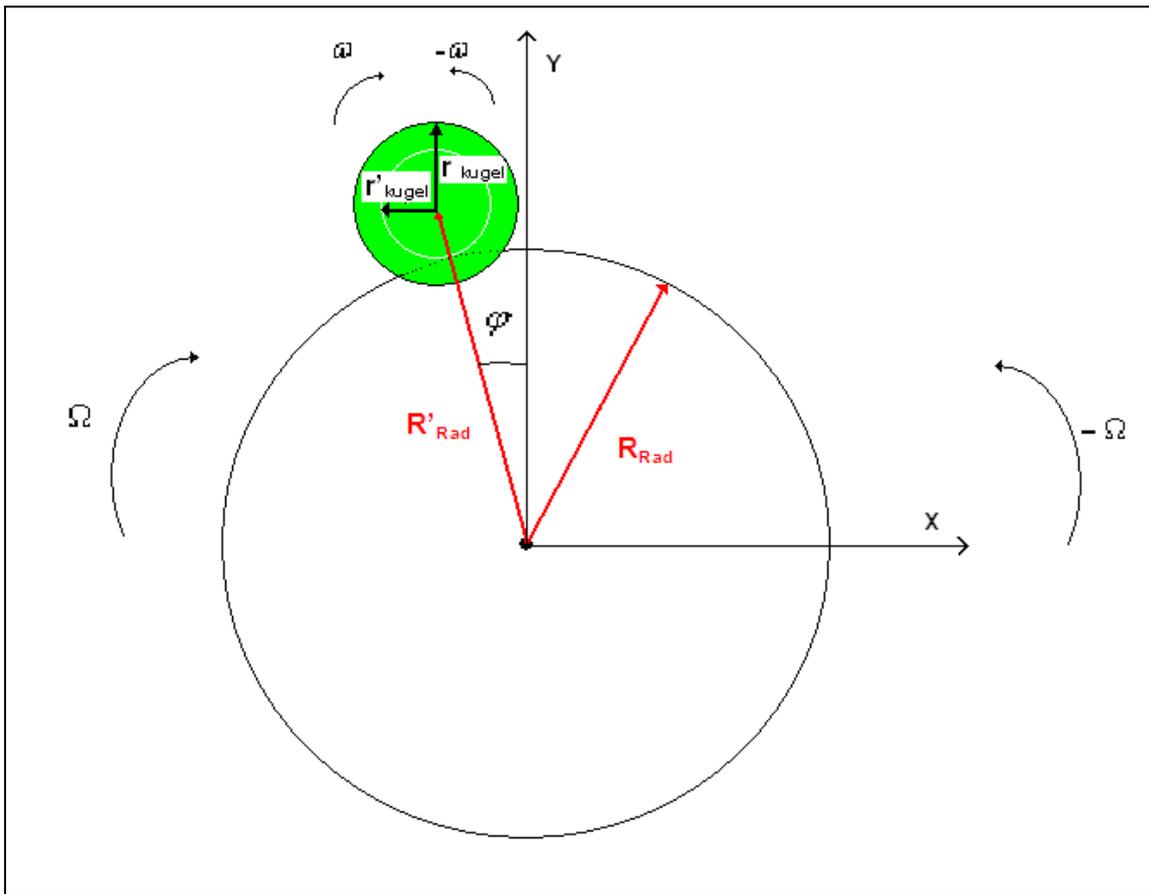


Abb. 56 Kugel auf Rad Model

$$\dot{\Omega}(t) = \frac{m_{Kugel} \cdot g \cdot R_{Rad} \cdot \sin \varphi(t) + (J_{Kugel} + m_{Kugel} \cdot r'_{Kugel}{}^2) \cdot U(t)}{J_{Kugel} \cdot J_{Rad} + m_{kugel} \cdot (R_{Rad}{}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad})} \quad \text{Gl. 12}^8$$

$$\ddot{\varphi}(t) = \frac{m_{Kugel} \cdot g \cdot R_{Rad} \cdot \sin \varphi(t) \cdot (R_{Rad}{}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad}) + J_{Kugel} \cdot R_{Rad} \cdot U(t)}{R'_{Rad} \cdot (J_{Kugel} \cdot J_{Rad} + m_{kugel} \cdot (R_{Rad}{}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad}))} \quad \text{Gl. 13}$$

4.1.1 Zustandsfunktionen des Rades

Wie schon im vorherigen Abschnitt, werden die folgenden Definitionen festgelegt

$$x_1(t) = \Omega \quad \text{Gl. 14}$$

$$\dot{x}_1(t) = \dot{\Omega} \quad \text{Gl. 15}$$

Somit kann die Gleichung (Gl.12) auch beschrieben werden als

$$\dot{x}_1(t) = \frac{m_{Kugel} \cdot g \cdot R_{Rad} \cdot \sin x_2(t) + (J_{Kugel} + m_{Kugel} \cdot r'_{Kugel}{}^2) \cdot U(t)}{J_{Kugel} \cdot J_{Rad} + m_{kugel} \cdot (R_{Rad}{}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad})} \quad \text{Gl. 16}$$

4.1.2 Zustandsfunktionen der Kugel

Als erstes müssen die einzelnen Zustandsfunktionen aufgestellt werden. Hierbei müssen zuerst folgende Definitionen für die Kugel aufgestellt werden.

$$x_2(t) = \varphi \quad \text{Gl. 17}$$

$$x_3(t) = \dot{x}_2(t) \quad \text{Gl. 18}$$

$$\dot{x}_3(t) = \ddot{\varphi} \quad \text{Gl. 19}$$

Somit kann die Gleichung (Gl.13) auch beschrieben werden als

$$\dot{x}_3(t) = \frac{m_{Kugel} \cdot g \cdot R_{Rad} \cdot \sin x_2(t) \cdot (R_{Rad}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad}) + J_{Kugel} \cdot R_{Rad} \cdot U(t)}{R'_{Rad} \cdot (J_{Kugel} \cdot J_{Rad} + m_{kugel} \cdot (R_{Rad}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad}))} \quad \text{Gl. 20}$$

Die Gleichung (Gl.13) ist durch die Gleichung (Gl.20) auf eine Funktion 1.Ordnung reduziert worden, was für die Zustandsbeschreibung notwendig ist.

4.1.3 Zustandsdarstellung des Gesamtsystems

Für die allgemeine Beschreibung eines Systems im Zustandsraum erhält man zwei Gleichungen, die Zustandsdifferentialgleichung:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t) \quad \text{Gl. 21}$$

und die Ausgangsgleichung:

$$y(t) = c^T x(t) + du(t) \quad \text{Gl. 22}$$

Die nichtlinearen Zustandsgleichungen lauten

$$\dot{x}_1(t) = \frac{m_{Kugel} \cdot g \cdot R_{Rad} \cdot \sin x_2(t) + (J_{Kugel} + m_{Kugel} \cdot r'_{Kugel}{}^2) \cdot U(t)}{J_{Kugel} \cdot J_{Rad} + m_{kugel} \cdot (R_{Rad}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad})} \quad \text{Gl. 23}$$

$$\dot{x}_2(t) = x_3(t) \quad \text{Gl. 24}$$

$$\dot{x}_3(t) = \frac{m_{Kugel} \cdot g \cdot R_{Rad} \cdot \sin x_2(t) \cdot (R_{Rad}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad}) + J_{Kugel} \cdot R_{Rad} \cdot U(t)}{R'_{Rad} \cdot (J_{Kugel} \cdot J_{Rad} + m_{kugel} \cdot (R_{Rad}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad}))} \quad \text{Gl. 25}$$

Da nur die Parameter $\Omega(t)$ und $\varphi(t)$ als Messsignale vorliegen gilt für die Ausgangsmatrix

$$y_1(t) = x_1(t) \quad \text{Gl. 26}$$

$$y_2(t) = x_2(t) \quad \text{Gl. 27}$$

Die Differentialgleichungen lassen sich übersichtlicher mit der Systemmatrix A

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{m \cdot g \cdot R_{Rad} \cdot \sin \varphi}{T} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{m \cdot g \cdot \sin \varphi \cdot (R_{Rad}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}^2 \cdot J_{Rad})}{T \cdot R'_{Rad}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 28}$$

dem Eingangsvektor b :

$$b = \begin{bmatrix} \frac{J_{Kugel} + m_{Kugel} \cdot r'_{Kugel}^2}{T} \\ 0 \\ \frac{R_{Rad} \cdot J_{Kugel}}{R'_{Rad} \cdot T} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 29}$$

und dem Ausgangsvektor c^T :

$$c^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 30}$$

$$d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 31}$$

beschreiben

$$\text{Wobei } T = (J_{Kugel} \cdot J_{Rad} + m_{Kugel} \cdot (R_{Rad}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}^2 \cdot J_{Rad})) \quad \text{Gl. 32}$$

Der Vektor d in (Gl.31) verbindet den Eingang u direkt und trägheitslos mit dem Ausgang y . Da dies in physikalischen Systemen nicht vorkommt, wird d oft gleich null gesetzt.

Anhand dieser mathematischen Modellierung können nun weitere regelungstechnisch bedeutende Eigenschaften des Systems analysiert werden.

4.1.4 Linearisierte Zustandsdarstellung

Wegen der Sinusfunktion, ist die Zustandsgleichung eine nichtlineare Gleichung. Wenn das System um einen Arbeitspunkt, der bekannt ist, betrieben wird und um herum Arbeitspunkt herum kleine Auslegung erfolgt, kann man das System um diesen Betriebspunkt linearisieren.

Der Arbeitspunkt soll hier bei $\varphi(t) \approx 0^\circ$ d.h. $\Delta S \approx 0$ cm liegen, dies bedeutet, dass die Kugel eine stabile Lage erreicht hat.

Durch diesen Arbeitspunkt, kann ein Rückschluss auf den Arbeitspunkt des Eingangssignals gezogen werden, da $\Delta S \approx 0$ mm muss auch $u(t) \approx 0$ V sein.

Somit gilt für den Arbeitspunkt

$$\Delta S \approx 0 \text{ mm} \quad \text{Gl. 33}$$

$$u(t) \approx 0 \text{ V} \quad \text{Gl. 34}$$

Nimmt man eine kleine Änderung um den Arbeitspunkt an, so kann mittels der Reihenentwicklung nach Taylor die Beziehung aufgestellt werden

$$x(t) = x_B(t) + \Delta x(t) \quad \text{Gl. 35}$$

$$u(t) = u_B(t) + \Delta u(t) \quad \text{Gl. 36}$$

Daraus folgt

$$\dot{x}(t) = f(x_B(t) + \Delta x(t), u_B(t) + \Delta u(t)) \quad \text{Gl. 37}$$

$$y(t) = f(x_B(t) + \Delta x(t), u_B(t) + \Delta u(t)) \quad \text{Gl. 38}$$

Somit gilt für die linearisierte Zustandsdarstellung im Arbeitspunkt

$$\dot{x}(t) = A \Delta x(t) + b \Delta u(t) \quad \text{Gl. 39}$$

$$\Delta y(t) = c^T \Delta x(t) + d \Delta u(t) \quad \text{Gl. 40}$$

Für den Arbeitspunkt ergibt sich die Zustandsform, wobei

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \end{bmatrix}_B \quad \text{Gl. 41}$$

$$b = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u} \end{bmatrix}_B \quad \text{Gl. 42}$$

$$c^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} & \frac{\partial f}{\partial x_2} & \frac{\partial f}{\partial x_3} \end{bmatrix}_B \quad \text{Gl. 43}$$

$$d = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial u} \\ \frac{\partial f}{\partial u} \end{bmatrix}_B \quad \text{Gl. 44}$$

Wegen $x_B = 0$

$$f_1 = \dot{x}_1 = \frac{m_{Kugel} \cdot g \cdot R_{Rad} \cdot \sin x_2 + (J_{Kugel} + m_{Kugel} \cdot r'_{Kugel}{}^2) \cdot U}{J_{Kugel} \cdot J_{Rad} + m_{Kugel} \cdot (R_{Rad}{}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad})} = 0 \quad \text{Gl. 45}$$

$$f_2 = \dot{x}_2 = x_3 = 0 \quad \text{Gl. 46}$$

$$f_3 = \dot{x}_3 = \frac{m_{Kugel} \cdot g \cdot R_{Rad} \cdot \sin x_2 \cdot (R_{Rad}{}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad}) + J_{Kugel} \cdot R_{Rad} \cdot U}{R'_{Rad} \cdot (J_{Kugel} \cdot J_{Rad} + m_{Kugel} \cdot (R_{Rad}{}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad}))} = 0 \quad \text{Gl. 47}$$

werden die Differenzierungen durchgeführt.

$$\begin{array}{lll} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} = 0 & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} = \frac{m \cdot g \cdot \cos x_2 \cdot R_{Rad}}{T} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} = 0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} = 0 & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = 0 & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} = 1 \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} = \frac{m \cdot g \cdot \cos x_2 \cdot (R_{Rad}{}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad})}{T \cdot R'_{Rad}} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} = 0 & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} = 0 \end{array}$$

Aus diesen Faktoren kann die linearisierte Zustandsform für den Arbeitspunkt aufgestellt werden ($\varphi \approx 0$) unter Berücksichtigung, dass bei $\varphi \leq \pm 10^\circ$ gilt:

$$\sin \varphi(t) \approx \hat{\varphi} = \varphi(t) \quad \text{Gl. 48}$$

$$\cos \varphi(t) = 1 \quad \text{Gl. 49}$$

Nun werden alle Größen zusammengefasst und es ergibt sich die linearisierte Zustandsraumdarstellung

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{m \cdot g \cdot R_{Rad}}{T} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{m \cdot g \cdot (R_{Rad}{}^2 \cdot J_{Kugel} + r'_{Kugel}{}^2 \cdot J_{Rad})}{T \cdot R'_{Rad}} & 0 & 0 \end{bmatrix}_B \quad \text{Gl. 50}$$

Für den Eingangsvektor b werden folgende Differenzierungen durchgeführt:

$$\frac{\partial f_1}{\partial u} = \frac{J_{Kugel} + m_{Kugel} \cdot r_{Kugel}'^2}{T} \quad \text{Gl. 51}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial u} = 0 \quad \text{Gl. 52}$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial u} = \frac{R_{Rad} \cdot J_{Kugel}}{R'_{Rad} \cdot T} \quad \text{Gl. 53}$$

$$b = \begin{bmatrix} \frac{J_{Kugel} + m_{Kugel} \cdot r_{Kugel}'^2}{T} \\ 0 \\ \frac{R_{Rad} \cdot J_{Kugel}}{R'_{Rad} \cdot T} \end{bmatrix}_B \quad \text{Gl. 54}$$

Aus Überlegungen, dass zwei Ausgangsgrößen existieren, die Winkelgeschwindigkeit des Rads $x_1 = \Omega$ und der Winkel der Kugel $x_2 = \varphi$ werden für den Ausgangsvektor c folgende Differenzierungen durchgeführt:

$$\begin{array}{ccc} \frac{\partial f_{y1}}{\partial x_1} = 1 & \frac{\partial f_{y1}}{\partial x_1} = 0 & \frac{\partial f_{y1}}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial f_{y2}}{\partial x_2} = 0 & \frac{\partial f_{y2}}{\partial x_2} = 1 & \frac{\partial f_{y2}}{\partial x_2} = 1 \end{array} \quad \text{Gl. 55}$$

$$c^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_B \quad \text{Gl. 56}$$

Es werden alle ermittelten Größen des Systems aufgelistet und in die Zustandsgleichung eingesetzt

$$J_{Kugel} = \frac{2}{5} \cdot m_{Kugel} \cdot r_{Kugel}'^2 \quad \text{Gl. 57}$$

$$J_{Rad} = m_{scheibe} \cdot R_{Rad}'^2 + \frac{1}{2} \cdot m_{S\ tan\ ge} \cdot R_{S\ tan\ ge}'^2 \quad \text{Gl. 58}$$

Parameter	Wert	Einheit
m_{Kugel}	0,2	Kg
m_{scheibe}	0,927	Kg
m_{Stange}	0,38	Kg
R_{stange}	0,06	m
r_{Kugel}	0,048	m
r'_{Kugel}	0,018	m
R_{Rad}	0,25	m
R'_{Rad}	0,27	m
J_{Kugel}	0,0002	Kg.m ²
J_{Rad}	0,06	Kg.m ²
g	9,81	m/s ²

Tabelle 16 Parameter des gesamt Systems

Das System „Kugel auf Rad“ wird mit den Werten im Zustandsraum folgendermaßen beschrieben:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 5.335 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 12.622 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 14.4 \\ 0 \\ 10.071 \end{bmatrix} \cdot u(t) \quad \text{Gl. 59}$$

Ausgangsmatrix

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 60}$$

4.1.5 Berechnung des Ablöswinkels der Kugel vom Rad ⁹

Der Zustand 1 ist der Anfangszustand, und beim Zustand 2 hebt die Kugel gerade vom Rad ab. (Abb.57)

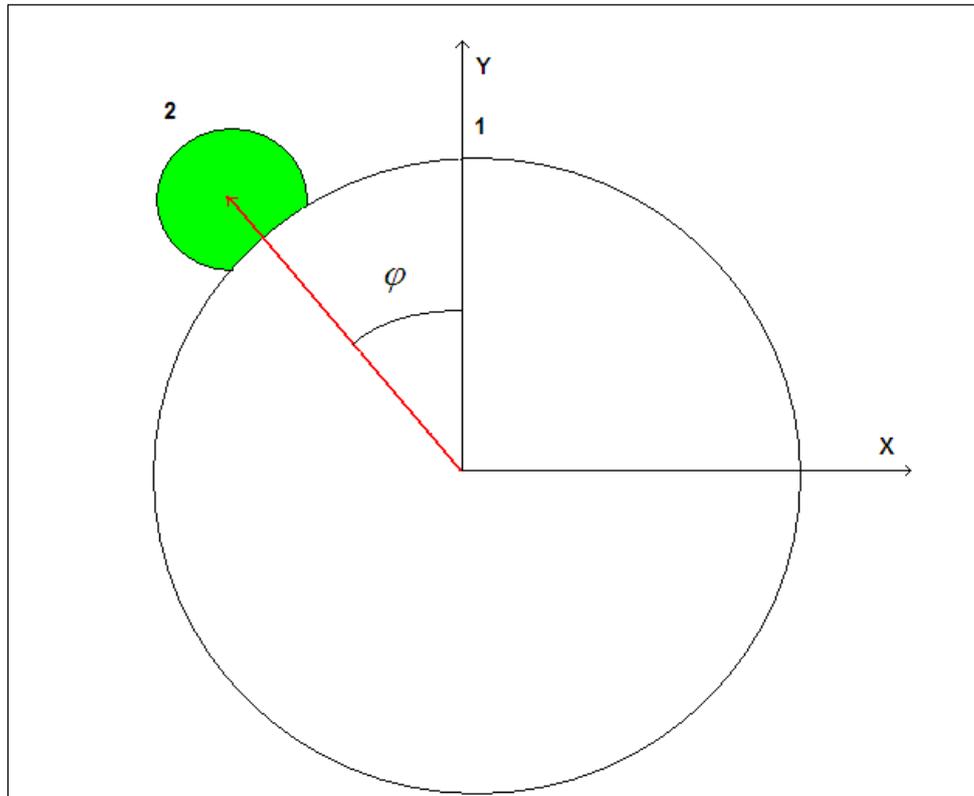


Abb. 57 Ablöswinkel der Kugel vom Rad

Die Geschwindigkeit der Kugel in diesem Augenblick wird mit v bezeichnet

Die potenzielle Energie in dieser Position wird auf Null gesetzt.

Wegen der Energieerhaltung ist

$$\Delta E_{pot} + \Delta E_{kin} = 0 \quad \text{Gl. 61}$$

$$\text{und daher } E_{Pot,2} - E_{Pot,1} + E_{Kin,1} - E_{Kin,2} = 0 \quad \text{Gl. 62}$$

$$\text{Wegen } E_{Pot,2} = E_{Kin,1} = 0 \quad \text{Gl. 63}$$

$$\text{Also } E_{Kin,2} - E_{Pot,1} = 0 \quad \text{Gl. 64}$$

$$\text{Wobei } E_{kin,2} = \frac{1}{2} \cdot m_{Kugel} \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot J_{Kugel} \cdot \omega^2 \quad \text{Gl. 65}$$

$$E_{Pot,1} = m_{Kugel} \cdot g \cdot ((r_{Kugel} + R_{Rad}) - (r_{Kugel} + R_{Rad}) \cdot \cos(\varphi)) = 0 \quad \text{Gl. 66}$$

$$E_{Pot,1} = m_{Kugel} \cdot g \cdot ((r_{Kugel} + R_{Rad}) (1 - \cos(\varphi))) = 0 \quad \text{Gl. 67}$$

Daraus erhält man

$$\frac{1}{2} \cdot m_{Kugel} \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot J_{Kugel} \cdot \omega^2 - m \cdot g \cdot ((R_{Kugel} + R_{Rad}) (1 - \cos(\varphi))) = 0 \quad \text{Gl. 68}$$

Da die Kugel rollt und nicht gleitet, könnte ω^2 durch $\frac{v^2}{r^2}$ ersetzt werden:

$$\frac{1}{2} \cdot m_{Kugel} \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot J_{Kugel} \cdot \frac{v^2}{r^2} - m \cdot g \cdot ((r_{Kugel} + R_{Rad}) (1 - \cos(\varphi))) = 0 \quad \text{Gl. 69}$$

Das Trägheitsmoment einer Kugel, „ J_{Kugel} “ die um ihrem Durchmesser rotiert, ist:

$$J_{Kugel} = \frac{2}{5} \cdot m_{Kugel} \cdot r^2 \quad \text{Gl. 70}$$

Setzt man die Gleichung (Gl. 70) in der Gleichung (Gl.69) erhält man:

$$\frac{1}{2} \cdot m_{Kugel} \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} \cdot m_{Kugel} \cdot r_{Kugel}^2 \cdot \frac{v^2}{r_{Kugel}^2} - m_{Kugel} \cdot g \cdot ((r_{Kugel} + R_{Rad}) (1 - \cos(\varphi))) = 0 \quad \text{Gl. 71}$$

$$\frac{1}{2} \cdot m_{Kugel} \cdot v^2 + \frac{1}{5} \cdot m_{Kugel} \cdot v^2 - m_{Kugel} \cdot g \cdot ((r_{Kugel} + R_{Rad}) (1 - \cos(\varphi))) = 0 \quad \text{Gl. 72}$$

Das ergibt

$$v^2 = \frac{10}{7} \cdot g \cdot ((R_{Rad} + r_{Kugel}) \cdot (1 - \cos(\varphi))) \quad \text{Gl. 73}$$

Mit der Bezeichnung

$$\sum F_r = m \cdot a_r \quad \text{Gl. 74}$$

gilt für die Kugel im Augenblick des Ablösens vom Rad

$$m_{Kugel} \cdot g \cdot \cos \varphi = m_{Kugel} \cdot \frac{v^2}{R_{Rad} + r_{Kugel}} \quad \text{Gl. 75}$$

Damit erhält man

$$\cos \varphi = \frac{v^2}{g \cdot (R_{Rad} + r_{Kugel})} = \frac{1}{g \cdot (R_{Rad} + r_{Kugel})} \left(\frac{10}{7} \cdot g \cdot ((R_{Rad} + r_{Kugel}) \cdot (1 - \cos(\varphi))) \right) \quad \text{Gl. 76}$$

$$\cos \varphi = \frac{10}{7} \cdot (1 - \cos \varphi) \quad \text{Gl. 77}$$

Der Winkel bei dem die Kugel runterfällt, ist also

$$\varphi = \arccos\left(\frac{10}{17}\right) \quad \text{Gl.78}$$

$$\varphi \approx 54^\circ \quad \text{Gl. 79}$$

Der gerechnete Winkel $\varphi \approx 54^\circ$ wird im Kapitel „Visualisierung“ benötigt.

4.2 Projekt anlegen ¹⁰

4.2.1 Projekt definieren

Dafür wird ein Projektname benötigt, am besten ein Name, der dieses Projekt beschreibt, hier wird die Name „Kugel auf Rad“ genommen, Über *Datei – Neues Projekt* werden Dialoge aufgemacht. Als erstes wird nach dem Projektnamen mit der Angabe des Pfades gefragt, Weiter wird die Anzahl der Signale abgefragt. Es wird unterschieden zwischen analogen und binären Signalen. Binäre Signale haben nur zwei Zustände: Low / High, während analoge Signale einen Wertebereich umfassen. Es wird jeweils nach der Anzahl der Eingänge, Ausgänge und der Merker gefragt. Eingangssignale sind Signale, die das WinErs vom Prozess einliest, Ausgangssignale sind Signale, die WinErs an den Prozess ausgibt, während Merker interne Signale sind, die für Zwischenergebnisse, berechnete Werte, Sollwerte oder für Simulationen benötigt werden.

Die Zykluszeit gibt an, in welchem Zeittakt die Signale zyklisch bearbeitet werden (Einlesen, Berechnen, Steuern und Regeln, Speichern und Ausgeben). Für unsere Aufgabe soll eine Zykluszeit von 10 ms ausreichen.

Nach der erfolgreichen Projekterstellung und dem Start von WinErs erscheint die Bedienoberfläche mit dem zuletzt bearbeiteten Projekt. Gleichzeitig mit WinErs wird das Programm „WRPServ“ gestartet.

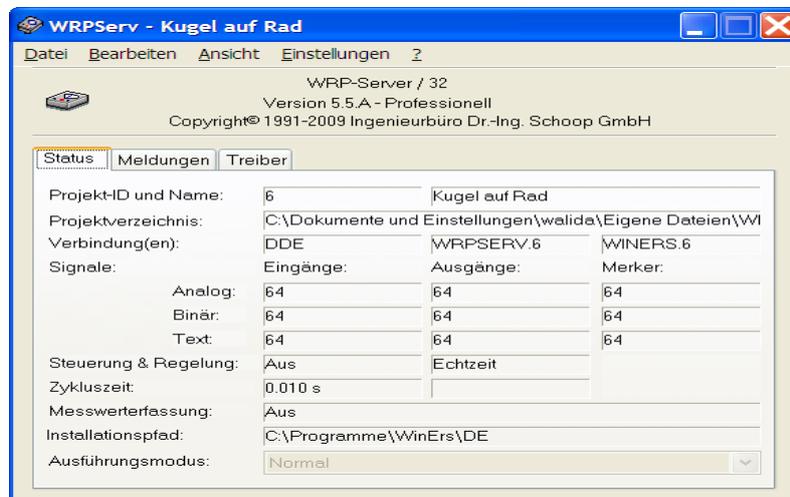


Abb. 58 WinErs-Server (WRPServ)

„WRPServ“ ist der Server von WinErs. Er läuft im Hintergrund und bildet die Schnittstelle von WinErs zu den TCPIP-Geräten.

Der WinErs-Server „WRPServ“ führt u. a. folgende Aufgaben durch:

- Einlesen der Signale vom Buskoppler
- Durchführen der Steuerungen, Regelungen und Simulationen, die mit Hilfe der Blockstrukturseiten bzw. des Anweisungs-Skriptes erstellt wurden. Nachdem

Blockstrukturseiten erstellt wurden, werden sie über „Blockstrukturen aktivieren“ an den WRPServ übertragen und von ihm ausgeführt.

- Ausgeben der durch die Blockstrukturen und durch das Anweisungs-Script berechneten Ausgangssignale an die TCPIP-Geräte.
- Falls die Messwerterfassung eingeschaltet ist, speichert der WRPServ alle in der Messwerterfassung eingestellten Signalwerte.

Da der WRPServ die Schnittstelle zum Buskoppler bildet, muss auch hier die Schnittstelle direkt eingestellt werden. Dafür wählt man im Menü vom WRPServ: *Einstellungen – Prozesstreiber* einrichten.

Nun müssen in WinErs die Signale definiert werden.

4.2.2 Signale definieren

Die Definition der Signale geschieht im Dialog durch *Bearbeiten – Signale definieren*. es soll die analoge Eingangssignale, analoge Ausgangssignale, Binäre Eingangssignale und Binäre Ausgangssignale definiert werden.

Dieser Versuch besteht aus:

- analoge Eingangssignal „Sensor Signal“ (4 bis 20mA) und „Motordrehzahl“ (-10 bis 10V)
- 1 analoge Ausgangssignal (X3_4 von -10 bis 10 V) „Motorsteuersignal“
- 1 Binäre Eingangssignal.(0-24V).
- Binäre Ausgangssignal.(0-24V).
- Der Anzahl der Merker sind beliebig zu auswählen.

4.2.3 Zuordnung der Signale

Analoge Eingangssignale			
Bez. Anlage	Signal	Signalname WinErs	Zustand
Sensorwert	Signal des Sensors	Ist_Position	4 bis 20mA
X3_8	Motor Drehzahl	E_Drehzahl	-10 bis 10V
X3_9	Motor Drehmoment	E_Drehmoment	-10 bis 10V

Tabelle 17 Zuordnung der analoge Eingangssignale

Analoge Ausgangssignale			
Bez. Anlage	Signal	Signalname WinErs	Zustand
X3_4	Drehzahl Steuerspannung	A_Drehzahl	-10 bis 10V
X3_6	Drehmoment Steuerspannung	A_Drehmoment	-10 bis 10V

Tabelle 18 Zuordnung der analoge Ausgangssignale

Binäre Eingangssignale			
Bez. Anlage	Signal Name	Signalname WinErs	Zustand
X3_16	Fehler Meldung des Steuergerät AX2000	Error	High – Low

Tabelle 19 Zuordnung der binär Eingangssignale

Binäre Ausgangssignale			
Bez. Anlage	Signal	Signalname WinErs	Zustand
X3_15	Motor ein/ aus	StartMotor	High – Low
X3_11	Quittieren	Reset	High – Low

Tabelle 20 Zuordnung der binär Ausgangssignale

Die Signale werden entsprechend der unten dargestellten Dialogen (Abb.59, Abb. 60) eingegeben.



Abb. 59 Analogsignale definieren



Abb. 60 Binärsignale definieren

4.2.4 Installation und Anschluss des Feldbussystems mit WRPServ

Die analogen und binären Signale sollen vom Feldbussystem der Firma Beckhoff über TCP/IP (Transport Control Protocol / Internet Protocol) Modbus eingelesen und ausgegeben werden. Da der WRPServ (WRPServ ist die zu WinErs gehörende Prozess-Task, die alle Steuerungs- und Regelungsaufgaben übernimmt.) die Schnittstelle zum Buskoppler bildet, muss die entsprechenden Adressen eingestellt werden. Dafür wählt man im Menü vom WRPServ: *Einstellungen – Prozesstreiber* einrichten. Es erscheint die unten stehende Abbildung

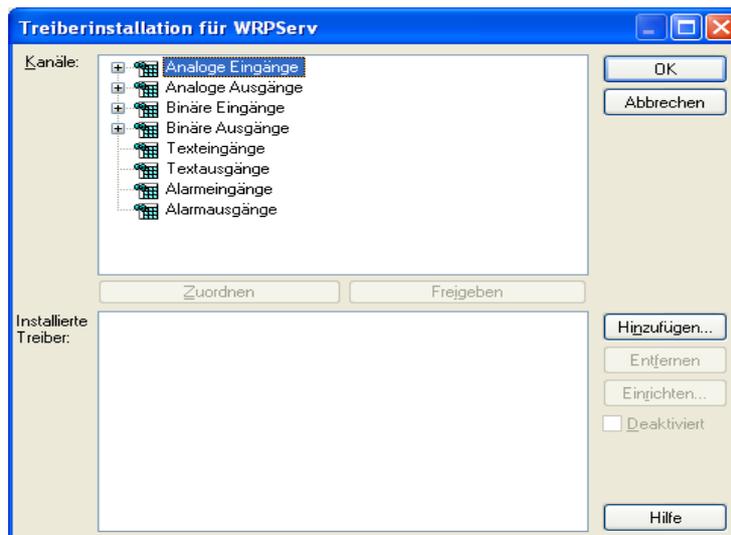


Abb. 61 Treiberinstallation für WRPServ

Über Drücken von Hinzufügen kann der gewünschte Treiber ausgewählt werden.

Es müssen noch die Signale dem Treiber zugeordnet werden, durch Klicken auf die analogen Signale, werden sie markiert. Es soll ebenfalls den TCPIP-Treiber (Klicken auf den Treiber) markiert. Wenn es auf Zuordnen gedrückt, werden die analogen Eingangssignale dem TCP/IP-Treiber zugeordnet.

Entsprechend können die analogen Ausgangssignale, die binären Eingangssignale und binären Ausgangssignale dem Treiber zugeordnet werden.

Durch Markieren des Treibers und Klicken von Einrichten, erscheint der unten dargestellte Dialog zum Einrichten des TCP/IP-Treibers gehen folgendermaßen vor:

- Drücken auf den Button Neuer Host
- Die Einstellung entsprechend der unter angegebene Abbildung werden vorgenommen, als IP-Adresse wird die am Buskoppler der Fa. Beckhoff eingestellten Adresse (Standard Adresse) ausgewählt.

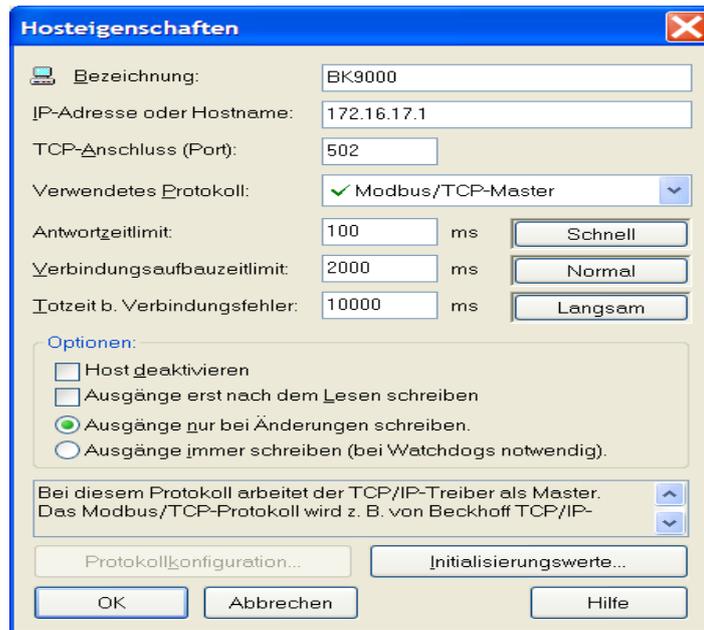


Abb. 62 Hosteigenschaften

- Nach Klicken auf Initialisierungswerte erscheint ein Dialog, es muss die folgende Zeile eingetragen werden:

```

$ Watchdog für Beckhoff BK9000 rücksetzen
AA4385      = 0xBECF          $ Watchdog reset 1
AA4385      = 0xAFFE          $ Watchdog reset 2
AA4384      = 2000            $ Timeout 2000 ms
AA4386      = 1               $ Timeoutmodus
  
```

Durch Drücken von Kanalzuordnung können die Signale dem Treiber zugeordnet werden. Für Analoge Eingänge in der Buttonleiste erscheint die folgende Abbildung:

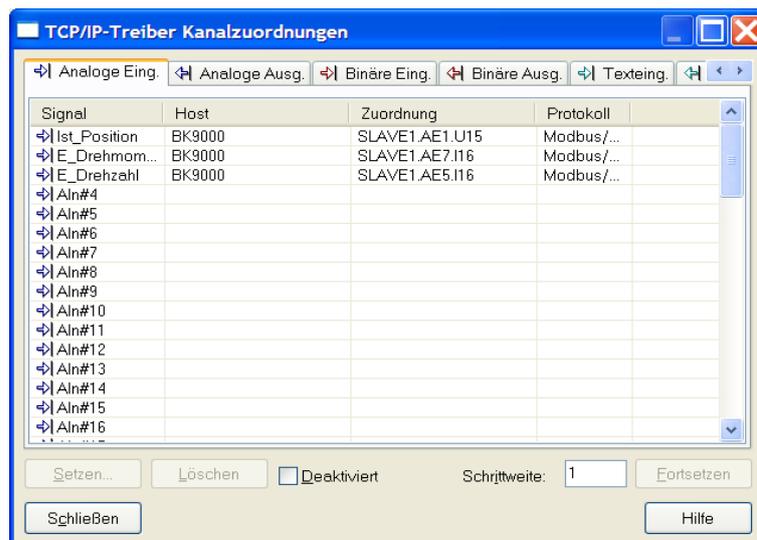


Abb. 63 Kanalzuordnung

Das erste analoge Eingangssignal „Ist_Position“ muss markiert werden und anschließend auf Setzen drücken und es wird wie die folgende Abbildung zeigt eingestellt.



Abb. 64 Kanalzuordnung für erste analog Eingang

Die Zuordnungssyntax für Zuordnungstexte des Modbus/TCP-Protokolls hat die folgende allgemeine Form:

[SLAVE_x.] TYP n [.FORMAT], mit

x: Slaveadresse, 1 ... 247.

TYP: AE: Analogeingang,
AA: Analogausgang,
AM: Analogmerker,
DE: Digitaleingang,
DA: Digitalausgang.

n: Registeradresse, 0... 65534.

FORMAT	Bedeutung
U16	Vorzeichenloses Wort (16 Bit), Standardformat, wenn Angabe ausgelassen wird.
I16	Vorzeichenbehaftetes Wort (16 Bit).
U15	Vorzeichenloses Teilwort (15 Bit, rechtsbündig).
I15	Vorzeichenbehaftetes Teilwort (15 Bit, rechtsbündig).

Tabelle 21 Zuordnungssyntax für Zuordnungstexte des Modbus/TCP-Protokolls

Die anderen Eingangssignale können folgendermaßen eingestellt werden (Tabelle 22).

Signalname	Host	Protokoll	Zuordnung
Ist_Position	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.AE1.U15
E_Drehmoment	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.AE7.I16
E_Drehzahl	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.AE5.I16

Tabelle 22 Zuordnungssyntax der analoge Eingangssignale

Durch Drücken des  Analoge Ausgänge in der Buttonleiste, können die analogen Ausgangssignale folgendermaßen eingestellt werden (Tabelle 23).

Signalname	Horst	Protokoll	Zuordnung
A_Drehzahl	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.AE2057.I16
A_Drehmoment	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.AE2059.I16

Tabelle 23 Zuordnungssyntax der analoge Ausgangssignale

Durch Drücken des  binäre Eingänge in der Buttonleiste, können die binären Eingangssignale folgendermaßen eingestellt werden (Tabelle 24).

Signalname	Horst	Protokoll	Zuordnung
Error	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DE0
DIn#2	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DE1
DIn#3	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DE2
DIn#4	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DE3
DIn#5	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DE4
DIn#6	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DE5
DIn#7	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DE6
DIn#8	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DE7

Tabelle 24 Zuordnungssyntax der binäre Eingangssignale

Durch Drücken des  binäre Ausgänge in der Buttonleiste, können die binären Ausgangssignale folgendermaßen eingestellt werden (Tabelle 25).

Signalname	Horst	Protokoll	Zuordnung
StartMotor	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DA0
Reset	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DA1
DOut#2	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DA2
DOut#3	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DA3
DOut#4	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DA4
DOut#5	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DA5
DOut#6	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DA6
DOut#7	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DA7
DOut#8	BK9000	Modbus/TCP-Master	SLAVE1.DA8

Tabelle 25 Zuordnungssyntax der binäre Ausgangssignale

Es soll die Kanalzuordnung geschlossen werden, durch Drücken von Schließen verlässt man die Treibereinstellung.

Nach der Zuordnung der Signale ist es nun möglich, sich die aktuellen Werte der Signale anzusehen. Dafür muss die Steuerung und Regelung gestartet sein. (weitere Details folgen auf Seite 141).

Abhängig von der Anzahl der Ein- und Ausgänge sind folgende Zuordnungen vorzunehmen (Tabelle 26).

Analoge Eingänge	Analoge Ausgänge	Binäre Eingänge	Binäre Ausgänge
SLAVE1.AE1.xxx	SLAVE1.AA2065.xxx	SLAVE1.DE0	SLAVE1.DA0
SLAVE1.AE3.xxx	SLAVE1.AA2067.xxx	SLAVE1.DE1	SLAVE1.DA1
SLAVE1.AE5.xxx	SLAVE1.AA2069xxx	SLAVE1.DE2	SLAVE1.DA2
SLAVE1.AE7.xxx	SLAVE1.AA2071xxx	SLAVE1.DE3	SLAVE1.DA3
SLAVE1.AE9.xxx	SLAVE1.AA2073xxx	SLAVE1.DE4	SLAVE1.DA4
SLAVE1.AE11.xxx	SLAVE1.AA2075xxx	SLAVE1.DE5	SLAVE1.DA5
SLAVE1.AE13.xxx	SLAVE1.AA2077xxx	SLAVE1.DE6	SLAVE1.DA6
SLAVE1.AE15.xxx	SLAVE1.AA2079xxx	SLAVE1.DE7	SLAVE1.DA7

Tabelle 26 Allgemeine Zuordnung des Modbus/TCP-Protokolls

4.2.5 Blockstruktur realisieren

Das WinErs bietet mehrere Methoden um die Differentialgleichungen zu realisieren:

❖ Erste Methode

• Differentialgleichung erstellen (als Block)

Bevor eine Differentialgleichung auf einer Blockstrukturseite verwendet wird, muss ein Differentialgleichungssystem definiert werden.

Das bisher abgeleitete mathematische Modell „Kapitel 4.1.3“ kann mit WinErs realisiert werden, indem man hier ein Differentialgleichungssystem definiert. Folgender Schritt ist dafür nötig: *bearbeiten – Spezielle Blöcke – DGL-System*. Es öffnet sich der unten dargestellte Dialog, indem man die Einstellung vornehmen kann. Nachdem der Name „DGL_Simulation“, die Eingänge, Ausgänge, Zustände, Parameter und die DGL eingetragen wurden, muss die Syntax des Dialogs überprüft werden, d.h. es wird z.B. überprüft, ob die Zustände, die richtige Anzahl von Ein- und Ausgängen besitzen. Diese Überprüfung geschieht durch Drücken des Buttons

und dann übernommen werden, durch Drücken des Buttons .

Der Dialog kann nun geschlossen werden, wenn man auf drückt.

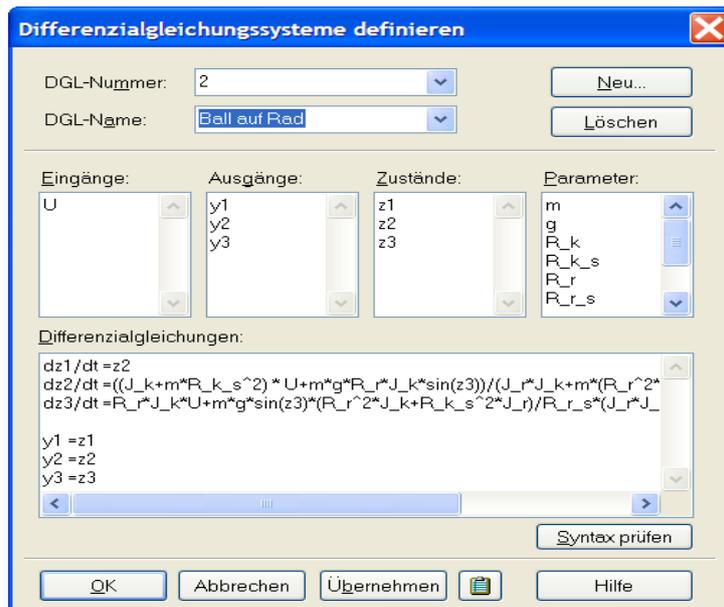


Abb. 65 Differentialgleichung definieren

Die Namen der definierten Signale können in der DGL sind unabhängig von den Signalen, die im Projekt definiert wurden.

- **Blockstrukturen editieren**

Mit der hier zu erstellenden Blockstrukturseite kann man die Simulation der abgeleiteten Formel realisieren.

Über die Menüzeile *Bearbeiten – Blockstrukturen bearbeiten* wird der Blockstruktureditor aufgerufen.

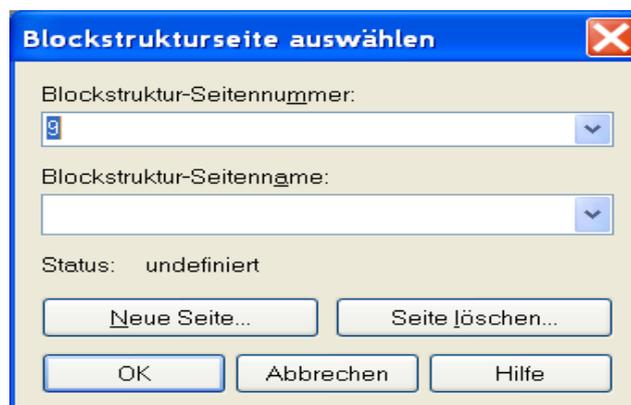


Abb. 66 Blockstrukturseiten-Auswahl

Über den Button  kann man den Namen (DGL_Simulation) für eine neue Blockstrukturseite eingeben und dann mit  bestätigen.

Daraufhin öffnet sich das Fenster mit einer leeren Blockstrukturseite, auf der die Blockstruktur grafisch eingegeben wird. Mit Hilfe der Werkzeugbox (Abb. 67) können die passenden Grafikelemente ausgewählt werden und mit der Maus auf der Seite platziert werden.

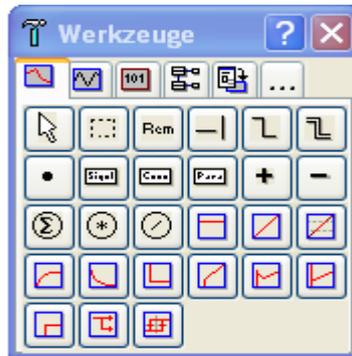


Abb. 67 Werkzeuge

Die Werkzeug-Box ist thematisch unterteilt. Durch Drücken auf einen der Buttons in der oberen Reihe der Werkzeug-Box vergrößert sich die Box um die entsprechenden grafischen Elemente.

Der DGL-Block  ermöglicht die Verwendung von Differentialgleichungssystemen in Blockstrukturen.

Die zu realisierende Blockstrukturseite sieht damit folgendermaßen aus (Abb. 68)

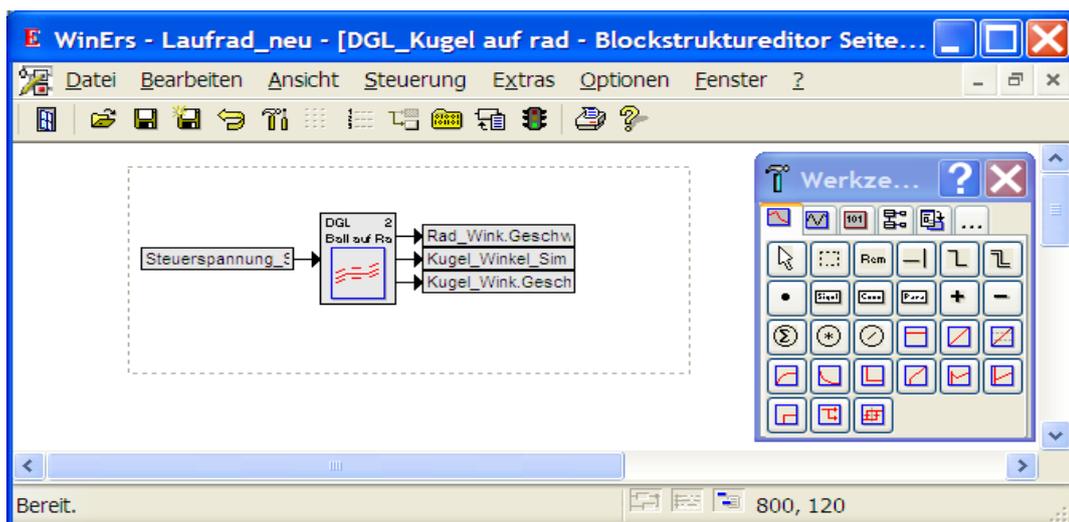


Abb. 68 Blockstrukturseite DGL_Simulation

Nach dem Kompilieren d. h. Übersetzen der Blockstrukturseite im aktiven Fenster, ist es sinnvoll, die Parameter und Anfangszustände einzustellen. Dies geschieht durch Drücken des Buttons  in der Buttonleiste. Dazu wird in dem Feld Parameter oder Anfangszustände (aus den vorherigen Abschnitten) die entsprechende Größe markiert, der Wert in dem Textfeld rechts eingeben und Setzen klicken oder die Eingabetaste betätigen. (Abb.69)

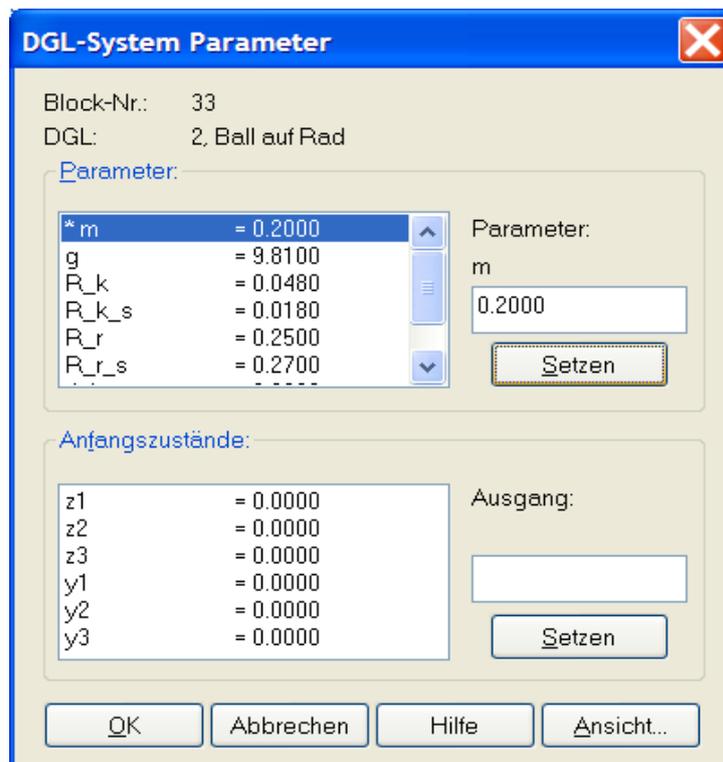


Abb. 69 Eingabe der Parameter der DGL

Mit dem Klicken auf die Schaltfläche  erscheint ein Fenster mit der Definition der Differentialgleichung.

- **Blockstrukturen aktivieren**

Über Steuerung – Blockstrukturen (de)aktivieren können nun die Blockstruktur aktiviert werden, d.h. die Blockstruktur wird an den Server (WRPServ) übertragen und ausgeführt.

Durch Drücken  auf die Blockstrukturseite „DGL_Simulation“ und dann auf  in das rechte Fenster wird die Seite nach Rechts geschoben. Durch Drücken von OK wird die Seite übertragen und sofort ausgeführt.

Um die Funktionsweise der Differentialgleichung zu überprüfen, ist es sinnvoll, sie in der Blockstrukturansicht zu testen.

- ❖ **Zweite Methode**
 - **Die Gleichung als Blockstruktur erstellen**

Als zweite Methode werden die Gleichungen (Gl.12) und (Gl.13) nach dem Öffnen einer neuen Blockstrukturseite mit Hilfe der Multiplikationsblöcke, Summationsblöcke, Divisionsblöcke, Quadratfunktionen, Sinusfunktionen und I-Blöcke (Integratoren) realisiert werden.

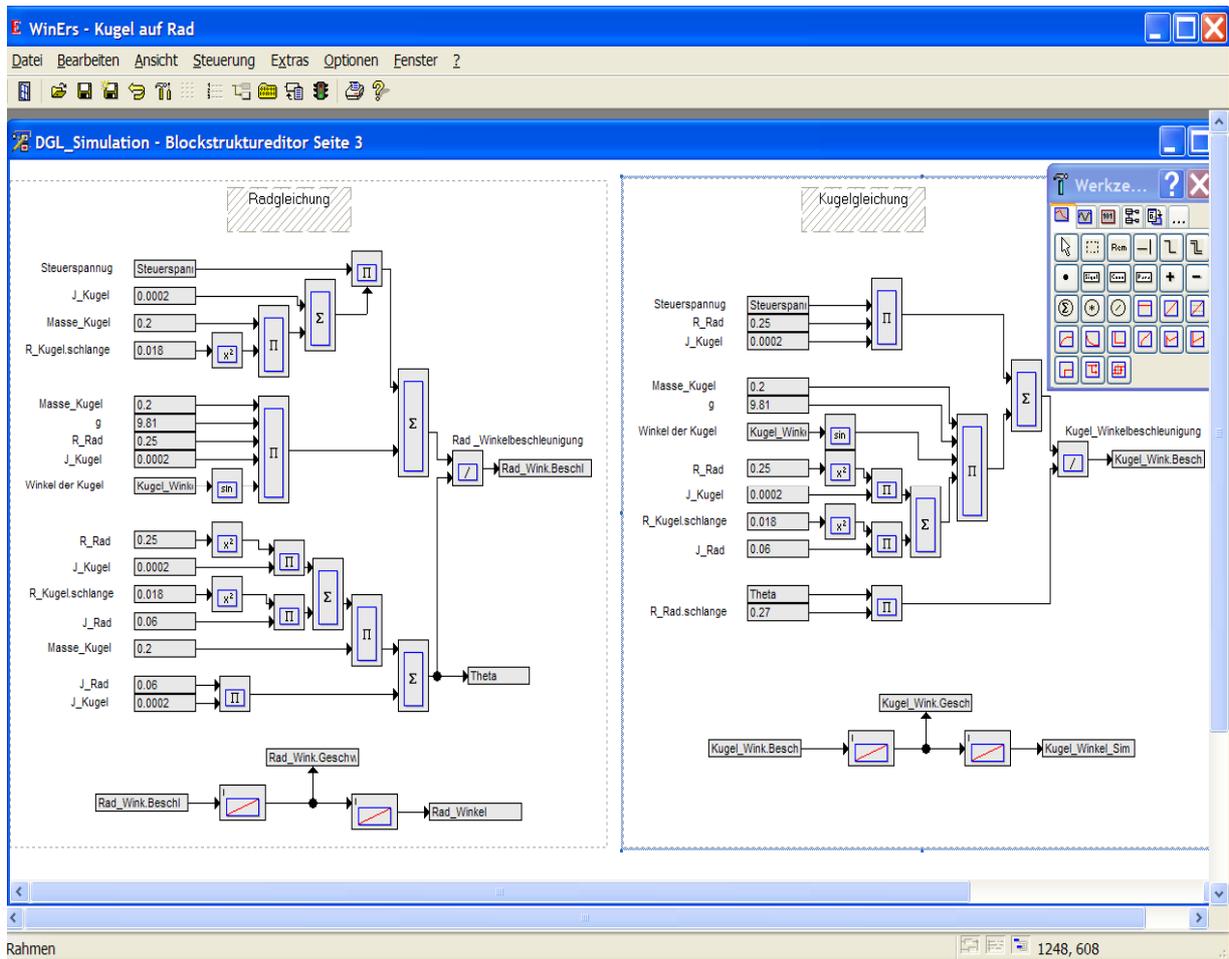


Abb. 70 Differentialgleichungen mit Blockstruktur

- **Steuerung und Regelung starten**

Damit die Signalwerte vom Prozess zyklisch gelesen werden, muss nun über Steuerung – Steuerung und Regelung starten der Einlesezyklus gestartet werden. Wenn die Steuerung und Regelung läuft, wird das linke Icon in der Statuszeile von WinErs farbig „“.

- **Messwerterfassung durchführen**

Mit WinErs gibt es die Möglichkeit, die eingelesenen Werte auch zu speichern und sie später zu betrachten und auszuwerten. Es gibt vier Arten der Messwertspeicherung: Standardmessung, zyklische Messung, Ereignismessung und Langzeitmessung. In diesem Beispiel werden das Einstellen, Durchführen und Darstellen der Standardmessung erläutert.

- **Messwerterfassung (Speicherung) einstellen**

Als erstes muss die Messwerterfassung eingestellt werden, d.h. es wird u.a. festgelegt, welche Signale in welcher Zeit gespeichert werden sollen. Hier sollen alle analogen, binären Eingangssignale, Ausgangssignale und Merkern in der vorgegebenen Zykluszeit von 10ms gespeichert werden.

Über *Steuerung – Messwerterfassung* erscheint ein Dialog, in dem folgende Einstellungen vorgenommen werden müssen:

1. Auswahl bei Messungsart: „Standardmessung“
2. Welche Signale gespeichert werden sollen, wird in dem Fenster „Signale“ gewählt. Nach dem Aufklicken von „Analoge Signale“, „Binäre Signale“ können die Signale markiert werden und durch Drücken von „Einfügen“ in das rechte Fenster „Messwerterfassung“ gebracht werden. Dann wird alle analogen und binären Signale für die Messwerterfassung ausgewählt.
3. Über „Speicherzyklus“ wird angegeben, in welcher Zeit die ausgewählten Signale gespeichert werden sollen. Man wählt hier „1“ als „Zyklen“ bzw. „10ms“ als „Zeit“, d.h. alle ausgewählten Signale werden in der Zykluszeit von 10ms gespeichert

- **Messwerterfassung starten**

Über *Steuerung – Messung starten* wird die Messwertspeicherung gestartet. Die Steuerung und Regelung muss ebenfalls laufen, damit die Werte zyklisch eingelesen werden. Es ist noch möglich, einen Kommentar für diese Messung einzugeben. Der Kommentar ersetzt dann die Beschreibung „Standardmessung, 1 * 0,010 s“.

Durch Drücken von OK wird die Speicherung gestartet. Wenn die Messwerterfassung läuft, wird das rechte Icon in der Statuszeile von WinErs ebenfalls farbig „“.

Während der laufenden Messwerterfassung können die Messwerte grafisch in einem Zeitdiagramm über *Ansicht – Messungen*, grafisch betrachtet werden.

- **Signalwerte setzen**

Um die Steuerung zu testen, können die Werte der analogen Signale über *Steuerung – Signale* verändert und die binären Signale gesetzt bzw. Zurückgesetzt werden.

Wird das Eingangssignal „Steuerspannung_Sim“ auf 1V so wird in der (Abb.71) die entsprechende Sprungantwort erhalten.

- **Messwerterfassung stoppen**

Über *Steuerung – Messung stoppen* wird die Messwertspeicherung gestoppt. Wenn die Messwertspeicherung gestoppt wurde, wird das rechte Icon in der Statuszeile von WinErs wieder grau „“.

- **Darstellung der gespeicherten Messwerte**

Anstatt die Signalwerte numerisch anzuzeigen, die Signalverläufe lassen sich als Trenddarstellung grafisch darstellen. Über *Ansicht – Messung, grafisch* können die gespeicherten Messwerte betrachten und auswerten werden.

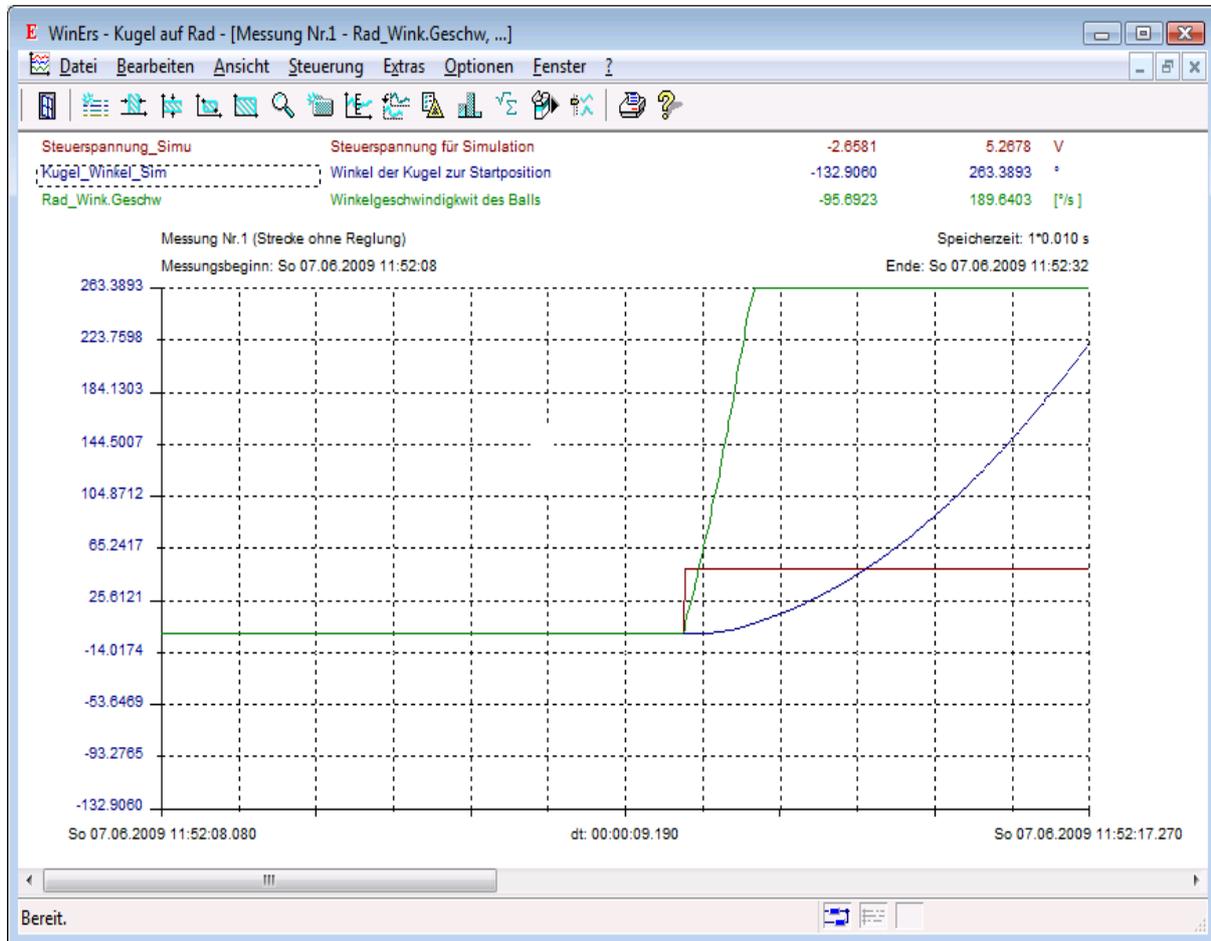


Abb. 71 grafische Trenddarstellung des Winkels und Steuerspannung

Betrachtet man die Sprungantwort des unregulierten Systems, erkennt man die Instabilität.

- **Rezeptur erstellen**

Da später der Ablauf einfach zurückgesetzt werden soll, das bedeutet, dass alle Signale und Zustände auf Anfangszustand gesetzt sind, muss eine Rezeptur anlegen werden. Unter Menü *Bearbeiten - Rezeptur* definieren kann der Dialog zum definieren der Rezeptur geöffnet werden. Es erscheint folgender Dialog:

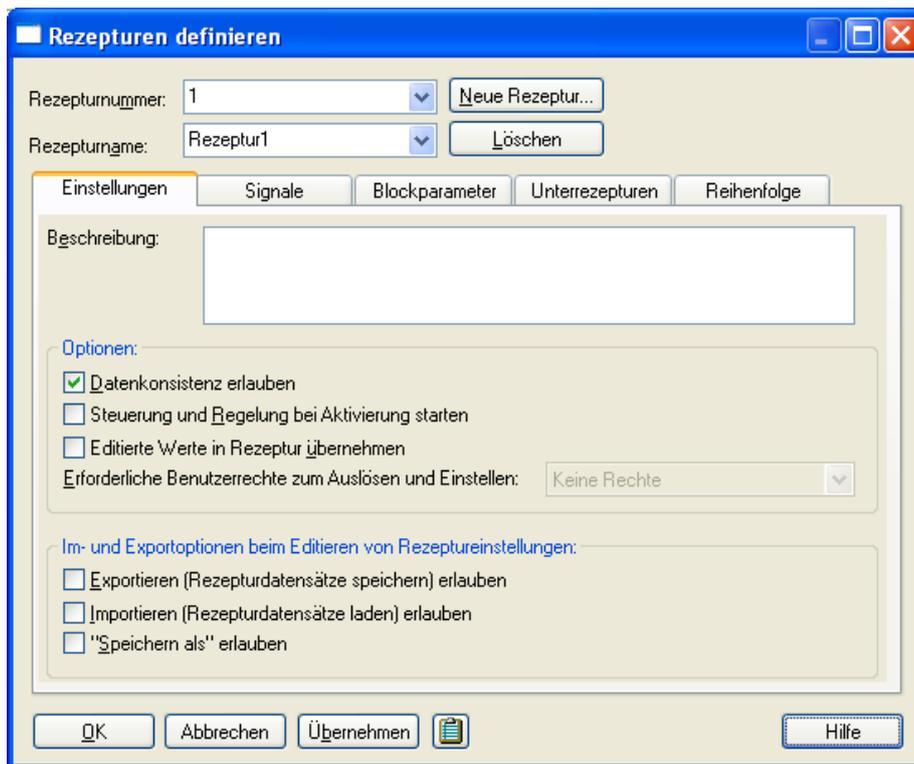


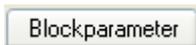
Abb. 72 Rezeptur definieren

Registerkarte Signale:



Um neue *Signale* in die Rezeptur aufzunehmen, wird ein oder mehrere Signale markiert und die Schaltfläche  gewählt. Die Signale werden in die Liste Signale in Rezeptur aufgenommen, sofern diese noch nicht vorhanden sind. Als Zustand wird für neue Signale die Definitionsbereichsuntergrenze eingetragen, als Eingabebereich der Definitionsbereich und als Beschreibung der Signalname.

Registerkarte Blockparameter:



Um einen neuen Parametereintrag einzufügen, wird die Schaltfläche  gewählt. Über den sich öffnenden Dialog kann die Blockstruktur, den Block und dessen Parameter ausgewählt, der eingefügt werden soll. benannte Blöcke werden mit Ihrem Blocknamen und dem Parameterkürzel eingetragen.

5. Simulation und Regelung des Systems Kugel auf Rad

5.1 Verfahren zum Zustandsreglerentwurf

5.1.1 Zustandsregelung

Eine Zustandsregelung ist ein Regelkreis, der die Regelgröße basierend auf der Zustandsraumdarstellung regelt. Dabei wird der Zustand der Regelstrecke durch Messung oder durch einen Beobachter der Regelstrecke zugeführt. Daher wird das Verfahren auch "Regelung durch Zustandsrückführung" genannt.

5.1.2 Berechnung der Pole der charakteristische Gleichung

Für die Bestimmung der Pole eines Systems, verwendet man die charakteristische Gleichung $s_n + a_{n-1} \cdot s_{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$. Gl. 80

Das Polynom $s_n + a_{n-1} \cdot s_{n-1} + \dots + a_1 s + a_0$ heißt charakteristisches Polynom.

Die Pole des geschlossenen Kreises, also die Nullstellen des Nennerpolynoms $N(s)$ der Übertragungsfunktion lassen sich wegen

$$N(s) = \det(s.I - A) = 0 \quad \text{Gl. 81}$$

auch für die Zustandsraumdarstellung berechnen.

Wobei I die Einheitsmatrix ist

$$s.I = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 82}$$

$$s.I - A = \begin{bmatrix} s & -5.335 & 0 \\ 0 & s & -1 \\ 0 & -12.622 & s \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 83}$$

$$\det(s.I - A) = s \cdot \begin{bmatrix} s & -1 \\ -12.622 & s \end{bmatrix} - 0 \cdot \begin{bmatrix} -5.335 & 0 \\ -12.622 & s \end{bmatrix} + 0 \cdot \begin{bmatrix} -5.335 & 0 \\ s & -1 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 84}$$

$$\det(s.I - A) = s^3 - 12.62 \cdot s \quad \text{Gl. 85}$$

Die Pole des Systems sind:

$$\left. \begin{array}{l} s_1 = +0.000 \\ s_2 = +3.552 \\ s_3 = -3.552 \end{array} \right\} \quad \text{Gl. 86}$$

Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass ein Pol der Regelstrecke auf der linken Halbebene der S-Ebene. Ein Pol liegt genau auf dem Ursprung und einer auf dem rechten Halbebene. Da der Pol s_2 auf der rechten Halbebene liegt, ist das System instabil. Der Pol s_1 weist darauf hin, dass ein offener Integrator in der Strecke liegt. Um diese Strecke zu stabilisieren, muss mittels einer Polvorgabe, mindestens Pol s_2 so wie optionalen Pol s_1 verschoben werden (Kapitel 5.1.6).

5.1.3 Steuerbarkeit

Voraussetzung für die Polvorgabe ist die Steuerbarkeit des Systems.

Ein System heißt vollständig steuerbar, wenn es in endlicher Zeit von jedem beliebigen Anfangszustand x_0 durch eine geeignet gewählte Eingangsgröße u in einen beliebig vorgegeben Endzustand x überführt werden kann.

Dazu muss man prüfen, ob die Steuerbarkeitsmatrix S vollen Rang hat d.h. $\text{Rand } S = 3$ sowie $\det S \neq 0$.

Unter dem Rang einer Matrix versteht man dabei die Anzahl von linear unabhängigen Reihen oder Spalten.

$$S = [b \quad A \cdot b \quad A^2 \cdot b] \quad \text{Gl. 87}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 5.335 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 12.622 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 88}$$

$$b = \begin{bmatrix} 14.4 \\ 0 \\ 10.071 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 89}$$

$$S = \begin{bmatrix} 14.4 & 0 & 53.728 \\ 0 & 10.071 & 0 \\ 10.071 & 0 & 127.118 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 90}$$

Es kann gezeigt werden, dass diese Steuerbarkeitsmatrix den $\text{Rand } S = 3$ hat, und $\det S = 12986 \neq 0$ also gleich der Systemordnung n ist. Damit ist das vorliegende Zustandsraummodell des Systems zumindest im linearen Bereich vollständig steuerbar.

5.1.4 Transformationsmatrix

Wenn man vom Zustandsvektor x auf einen neuen Zustandsvektor $x_R = T \cdot x$ übergeht, verändern sich auch die Matrizen der Zustandsraum-Darstellung. Damit das Übertragungsverhalten $G(s)$ des Systems unverändert bleibt, muss die Transformationsmatrix T regulär sein.

Die Matrizen des transformierten Systems

$$\dot{x}_R(t) = A_R \Delta x(t) + b_R \Delta u(t) \quad \text{Gl. 91}$$

$$\Delta y_R(t) = c_R \Delta x(t) + d \Delta u(t) \quad \text{Gl. 92}$$

Die inverse Steuerbarkeitsmatrix lautet:

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} 0.0986 & 0 & -0.041 \\ 0 & 0.099 & 0 \\ -0.0078 & 0 & 0.0112 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 93}$$

Die letzte Zeile der inverse Steuerbarkeitsmatrix S^{-1} lautet:

$$q^T = [-0.0078 \quad 0 \quad 0.0112] \quad \text{Gl. 94}$$

Die Transformationsmatrix und deren Inverse lauten:

$$T_R = \begin{bmatrix} q^T \\ q^T \cdot A \\ q^T \cdot A^2 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 95}$$

$$T_R = \begin{bmatrix} -0.0078 & 0 & 0.0112 \\ 0 & 0.0993 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0993 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 96}$$

$$T_R^{-1} = \begin{bmatrix} -128.04 & 0 & 14.4 \\ 0 & 10.071 & 0 \\ 0 & 0 & 10.071 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 97}$$

Die Systembeschreibung in Reglungsnormalform (RNF) wird folgende beschrieben:

$$A_R = T_R \cdot A \cdot T_R^{-1} \quad \text{Gl. 98}$$

$$A_R = \begin{bmatrix} -0.0078 & 0 & 0.0112 \\ 0 & 0.0993 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0993 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 5.335 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 12.622 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -128.04 & 0 & 14.4 \\ 0 & 10.071 & 0 \\ 0 & 0 & 10.071 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 99}$$

$$A_R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 12.622 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 100}$$

$$b_R = T_R \cdot b \quad \text{Gl. 101}$$

$$b_R = \begin{bmatrix} -0.0078 & 0 & 0.0112 \\ 0 & 0.0993 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0993 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 14.4 \\ 0 \\ 10.071 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 102}$$

$$b_R = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 103}$$

$$c_R = c \cdot T_R^{-1} \quad \text{Gl. 104}$$

$$c_R = \begin{bmatrix} -128.04 & 0 & 14.4 \\ 0 & 10.071 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 105}$$

Somit ergibt sich aus den Gleichungen (Gl. 90) und (Gl. 91) die Zustandsform

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{R1} \\ \dot{x}_{R2} \\ \dot{x}_{R3} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 \end{bmatrix}}_{A_R} \cdot \begin{bmatrix} x_{R1} \\ x_{R2} \\ x_{R3} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_{b_R} \cdot u_R(t) \quad \text{Gl. 106}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{R1} \\ \dot{x}_{R2} \\ \dot{x}_{R3} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 12.622 & 0 \end{bmatrix}}_{A_R} \cdot \begin{bmatrix} x_{R1} \\ x_{R2} \\ x_{R3} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_{b_R} \cdot u_R(t) \quad \text{Gl. 107}$$

$$\begin{bmatrix} y_{R1} \\ y_{R2} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} c_0 & c_1 & c_2 \\ c_3 & c_4 & c_5 \end{bmatrix}}_{c^T} \cdot \begin{bmatrix} x_{R1} \\ x_{R2} \\ x_{R3} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 108}$$

$$\begin{bmatrix} y_{R1} \\ y_{R2} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -128.04 & 0 & 14.4 \\ 0 & 10.071 & 0 \end{bmatrix}}_{c^T} \cdot \begin{bmatrix} x_{R1} \\ x_{R2} \\ x_{R3} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 109}$$

5.1.5 Stabilität

Ein dynamisches System ist stabil, wenn seine transienten Antworten bei beliebigen Anfangsbedingungen für $t \rightarrow \infty$ nach Null abklingen.

Für ein lineares zeitinvariantes System ist das genau dann der Fall, wenn alle Pole des Systems einen negativen Realteil haben.

In der Zustandsdarstellung eines Systems bedeutet dies, dass alle Zustandsgrößen x mit der Zeit zu Null werden. Die Pole des Systems sind dabei identisch mit den Eigenwerten der Systemmatrix A . Diese ergeben sich als Lösungen des Eigenwertproblems $\det(s \cdot I - A) = 0$

Um das instabile System regeln zu können, muss es zuerst stabilisiert werden. Dafür werden an das System die neue, stabile Pole vergeben. Damit es realisiert werden kann, wird an das instabile System ein Vektor so genannter Rückführvektor zurückgekoppelt.

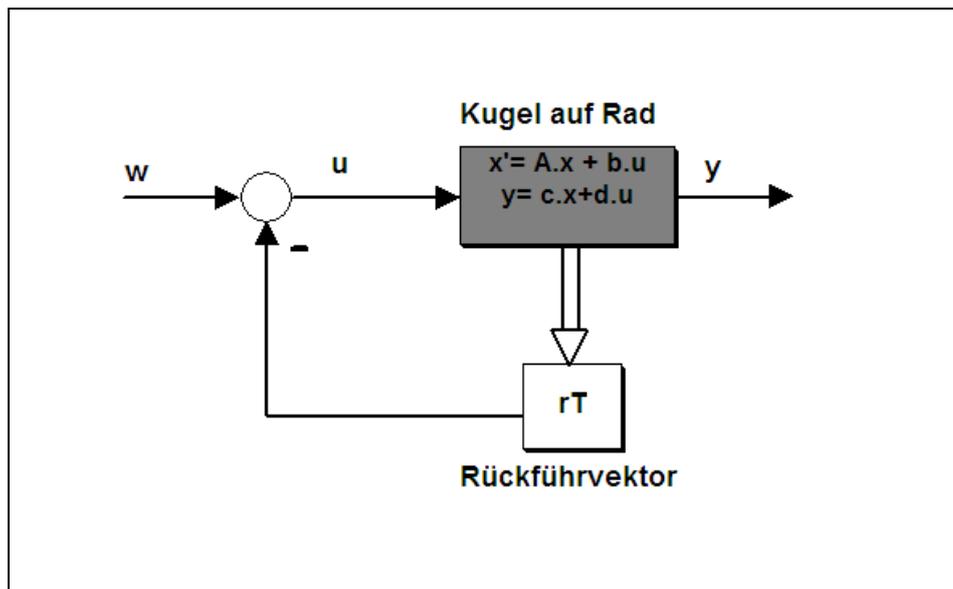


Abb. 73 Zustandsdarstellung mit Rückführvektor

Auf der (Abb. 73) ist schematisch die Methode der Stabilisierung eines instabilen Systems dargestellt. Alle Zustände des Systems werden mittels Zustandsvektor x ausgeführt und mit dem vorher ausgerechneten Rückführvektor multipliziert, anschließend an das System zurückgekoppelt. Das komplette System mit dem Rückführvektor wird nun stabil. Um dies zu realisieren muss der Rückführvektor ausgerechnet werden. Zuerst weiß man nicht, wo die neuen Pole des stabilisierten Systems liegen sollen.

5.1.6 Polvorgabe

Die neuen Pole sollen nicht sehr weit von dem schnellsten Pol des Systems nämlich -3.552 liegen. Es wurden folgende neue Pole des stabilisierten Systems gewählt

$$\left. \begin{array}{l} s_1 = -4.0 \\ s_2 = -4.1 \\ s_2 = -4.2 \end{array} \right\} \text{Gl. 110}$$

Aus den vorgegebenen Polen, wird das charakteristische Polynom

$$s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 \text{ Gl. 111}$$

berechnet.

wobei α_i die erwünschten negativen charakteristischen Koeffizienten die sich aus den neuen Polen ergeben und α_R die negativen charakteristischen Koeffizienten der RNF.

$$(s + 4)(s + 4.1)(s + 4.2) = s^3 + 12.3s^2 + 50.42s + 66.88 \text{ Gl. 112}$$

5.1.7 Bestimmung der Rückführvektor

Aus dem Polynom (Gl. 111) wird der entsprechende Polynomvektor beschrieben

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 113}$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} 66.88 \\ 50.42 \\ 12.3 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 114}$$

$$a_R = \begin{bmatrix} 0 \\ -12.622 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 115}$$

Hieraus folgt die eindeutige Gleichung für den Parametervektor r_R

$$r_R = \alpha - a_R \quad \text{Gl. 116}$$

$$r_R = \begin{bmatrix} 68.88 \\ 63.042 \\ 12.3 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 117}$$

$$r^T = r_R^T \cdot T_R \quad \text{Gl. 118}$$

$$r^T = [68.88 \quad 63.042 \quad 12.3] \cdot \begin{bmatrix} -0.0078 & 0 & 0.0112 \\ 0 & 0.0993 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0993 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 119}$$

Das Rückführvektor ist

$$r^T = [-0.538 \quad 6.259 \quad 1.99] \quad \text{Gl. 120}$$

5.1.8 Geschlossene Regelkreis erstellen

Das zugehörige Blockschaltbild des geschlossenen Regelkreises des Systems ist in der (Abb. 74) dargestellt.

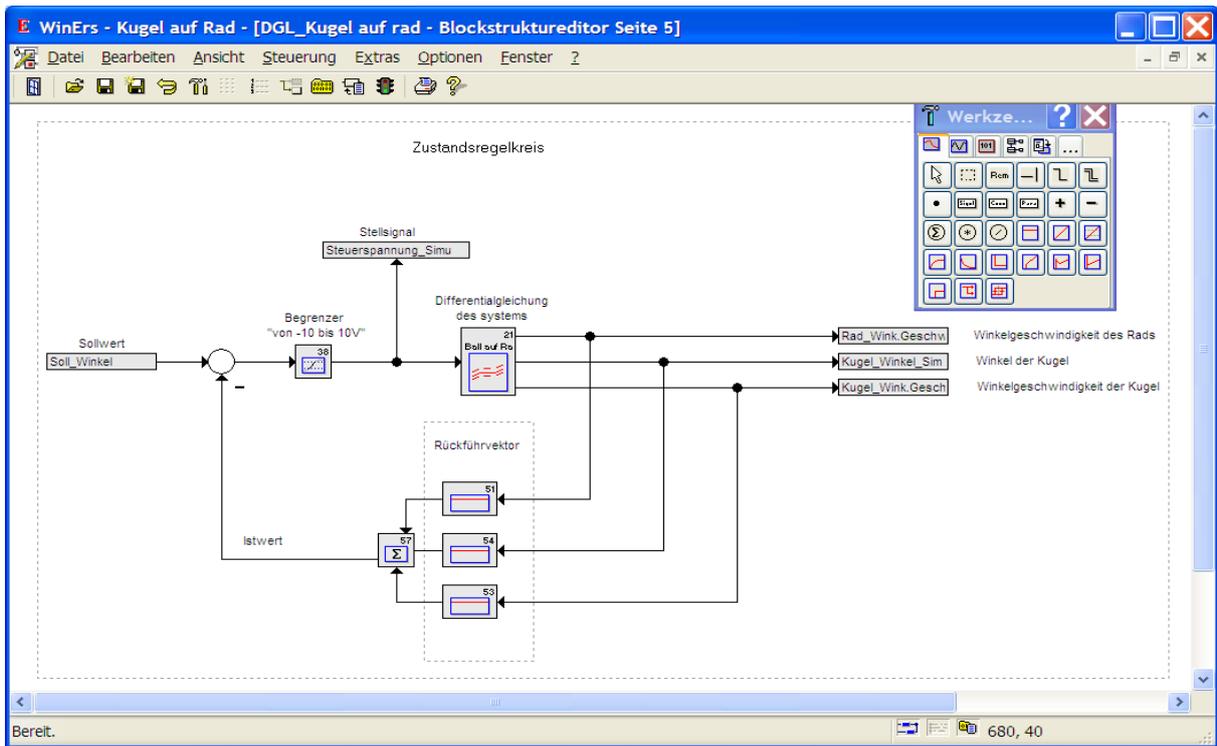


Abb. 74 Geschlossene Regelkreis des Systems

Durch Doppelklicken mit der Maus auf die einzelnen Blöcke erscheint der jeweilige Dialog zum Einstellen der Parameter. Für den Rückführvektor werden für die Verstärkungen der Blöcke 51, 54 und 53 sowie unten aufgeführten Einstellungen vorgenommen.



Abb. 75 Einstellung des Rückführvektors

5.1.9 Sprungantwort

Zunächst wurde eine Sprungantwort der Strecke in Regulationsnormalform aufgenommen. Die entsprechende Simulation ist in der folgenden Abbildung gegeben. Es wurde ein sprungförmige Eingangsgröße aufgeschaltet.

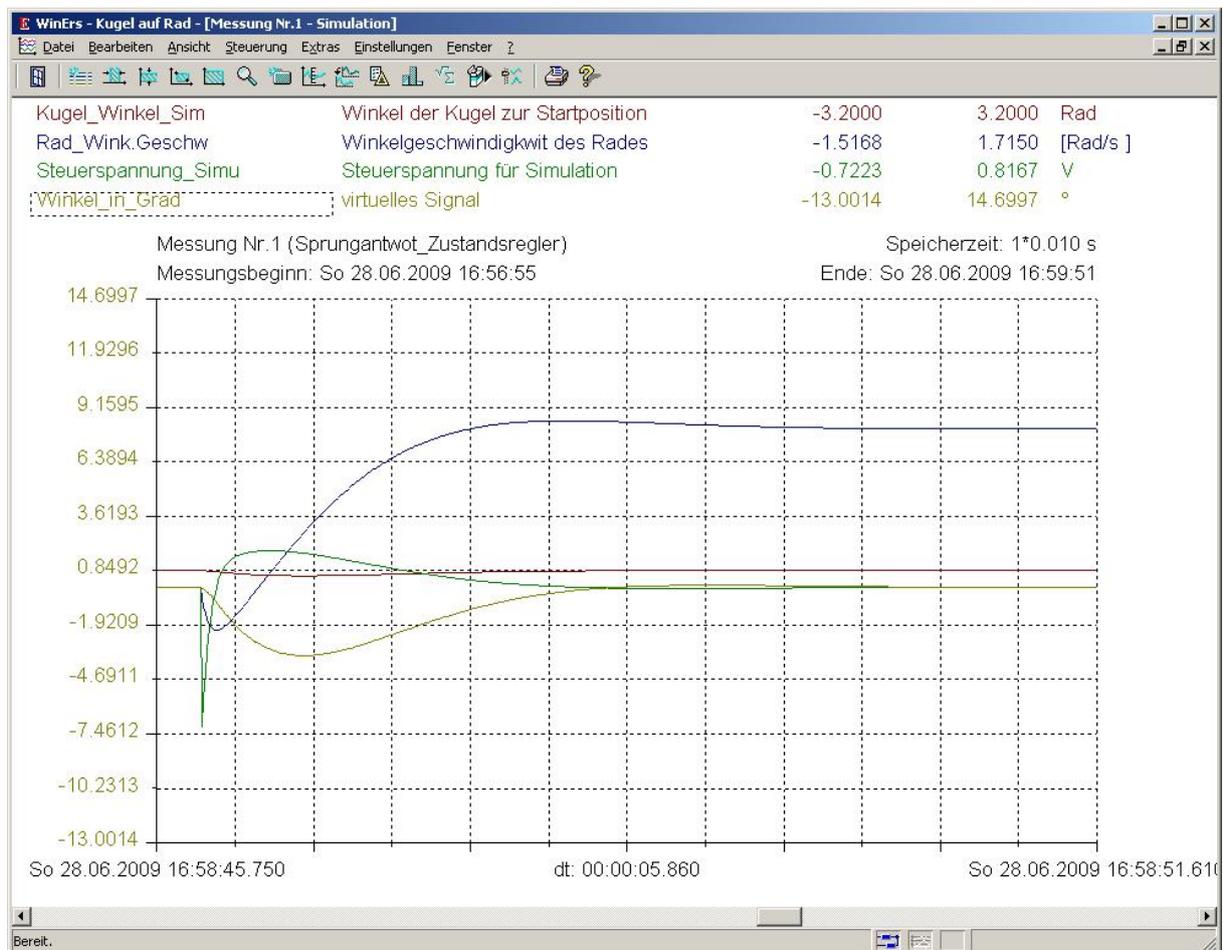


Abb. 76 Antwort des Regelkreises auf einen Führungssprung (Zustandsregler)

5.1.10 Antwort des Regelkreises auf einen Störung

Zunächst wird eine Störung über das Stellsignal mit einem Wert von -2V aufgeschaltet. Entsprechend folgender Abbildung erkennt man, dass die stationäre Genauigkeit erreicht wurde.



Abb. 77 Antwort des Regelkreises auf einen Störung (Zustandsregler)

5.2 Verfahren zum PD-Reglerentwurf

5.2.1 Übertragungsfunktion

Aus der Zustandsraumdarstellung lässt sich die Übertragungsfunktion berechnen, indem man die Gleichung (Gl. 21) in den Laplacebereich transformiert.

$$s \cdot x(s) = A \cdot x(s) + b \cdot u(s) \quad \text{Gl. 121}$$

$$(s \cdot I - A) \cdot x(s) = b \cdot u(s) \quad \text{Gl. 122}$$

$$x(s) = (s \cdot I - A)^{-1} \cdot b \cdot u(s) \quad \text{Gl. 123}$$

Dabei ist I die Einheitsmatrix der Dimension 3. Es sei daran erinnert, dass bei der Matrizenmultiplikation die Reihenfolge der Faktoren wichtig ist. Aus der Laplacetransformierten Ausgangsgleichung

$$y(t) = c^T x(t) + du(t) \quad \text{Gl. 124}$$

folgt dann schließlich:

$$y(s) = c^T \cdot x(s) + d \cdot u(s) = (c^T \cdot (I \cdot s - A)^{-1} \cdot b + d) \cdot u(s) \quad \text{Gl. 125}$$

Damit ergibt sich für die Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = c^T \cdot (I \cdot s - A)^{-1} \cdot b + d \quad \text{Gl. 126}$$

Die inverse Matrix wird ersetzt durch ihre Adjungierte und Determinante:

$$G(s) = \frac{c^T \cdot \text{adj}(s \cdot I - A) \cdot b}{\det(s \cdot I - A)} + d \quad \text{Gl. 127}$$

$$\begin{bmatrix} G_{s(\Omega)} \\ G_{s(\varphi)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_0 & c_1 & c_2 \\ c_3 & c_4 & c_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s & -1 & 0 \\ 0 & s & -1 \\ a_0 & a_1 & s + a_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 128}$$

$$\begin{bmatrix} G_{s(\Omega)} \\ G_{s(\varphi)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_0 & c_1 & c_2 \\ c_3 & c_4 & c_5 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\det(s \cdot I - A)} \cdot \begin{bmatrix} * & * & 1 \\ * & * & s \\ * & * & s^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 129}$$

Daraus erhält man die Übertragungsfunktion der Winkelgeschwindigkeit des Rads

$$G_{s(\Omega)} = \frac{y_{R1}(s)}{u(s)} = [c_0 \quad c_1 \quad c_2] \frac{1}{s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ s \\ s^2 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 130}$$

$$G_{s(\Omega)} = \frac{y_{R1}(s)}{u(s)} = \frac{c_2 \cdot s^2 + c_1 \cdot s + c_0}{s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \quad \text{Gl. 131}$$

$$G_{s(\Omega)} = [-128.04 \quad 0 \quad 14.4] \frac{1}{s^3 + 0 \cdot s^2 - 12.62s + 0} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ s \\ s^2 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 132}$$

$$G_{s(\Omega)} = \frac{14.4s^2 - 128.04}{s^3 - 12.62s} \quad \text{Gl. 133}$$

Und die Übertragungsfunktion des Winkels der Kugel

$$G_{s(\varphi)} = \frac{y_{R2}(s)}{u(s)} = [c_3 \quad c_4 \quad c_5] \frac{1}{s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ s \\ s^2 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 134}$$

$$G_{s(\varphi)} = \frac{y_{R2}(s)}{u(s)} = \frac{c_5 \cdot s^2 + c_4 \cdot s + c_3}{s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \quad \text{Gl. 135}$$

$$G_{s(\varphi)} = [0 \quad 10.071 \quad 0] \frac{1}{s^3 + 0 \cdot s^2 - 12.62s + 0} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ s \\ s^2 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 136}$$

$$G_{s(\varphi)} = \frac{10.071}{s^2 - 12.62}$$

Gl. 137

Jeder Zustandsraum-Darstellung ist also eindeutig eine Übertragungsfunktion zugeordnet.

5.2.2 PD-Regler

Der PD-Regler (proportional-derivative controller) besteht aus der Kombination eines P-Gliedes K_p mit einem D-Glied (D- Anteil reagiert nicht auf die Regelabweichung, sondern nur auf deren Änderungsgeschwindigkeit), er ist ein sehr schneller Regler, denn er fügt im Gegensatz zum PI-Regler keinen zusätzlichen Pol in den offenen Regelkreis ein. Gegenüber dem P-Regler kann der PD-Regler ein T1-Glied kompensieren. Der Nachteil der bleibenden Regelabweichung begrenzt seine Verwendung.

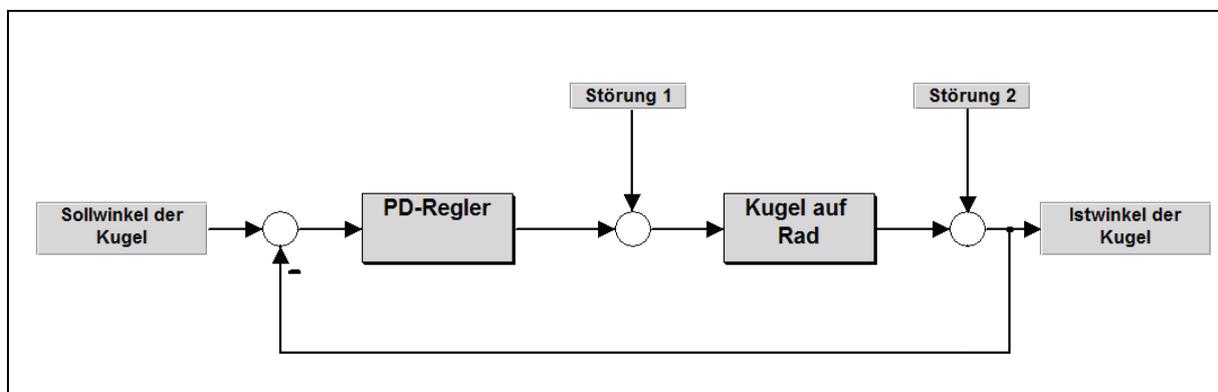


Abb. 78 Blockschaltbild des Geschlossenen Kreises

Der Regler beeinflusst selbsttätig in einem meist technischen Prozess eine oder mehrere physikalische Größen auf ein vorgegebenes Niveau unter Reduzierung von Störeinflüssen. Ihre Behandlung ist Kern der Regelungstechnik.

Dazu vergleichen Regler innerhalb eines Regelkreises laufend das Signal des Sollwertes mit dem gemessenen und zurückgeführten Istwert der Regelgröße und ermitteln aus dem Unterschied der beiden Größen – der Regelabweichung (Regeldifferenz) – eine Stellgröße, welche die Regelstrecke so beeinflusst, dass die Regelabweichung spätestens im eingeschwungenem Zustand zu einem Minimum wird.

5.2.3 Berechnung der Parameter

Die Parameter des PD-Reglers lassen sich mittels Koeffizientenvergleichsmethode berechnen.

Zunächst wird die Übertragungsfunktion der geschlossene Regelkreis ermittelt.

$$G_w = \frac{\varphi}{U} = \frac{G_0}{1+G_0} \quad \text{Gl. 138}$$

Wobei G_0 ist die Übertragungsfunktion der offene Regelkreis

$$G_0 = G_s \cdot G_R \quad \text{Gl. 139}$$

$$G_{s(\varphi)} = \frac{10.071}{s^2 - 12.62} \quad \text{Gl. 140}$$

die Übertragungsfunktion der Strecke

$$G_R = K_p \cdot (1 + T_d \cdot s) \quad \text{Gl. 141}$$

die Übertragungsfunktion des PD-Reglers

$$G_w = \frac{\frac{10.071}{s^2 - 12.62} \cdot K_p \cdot (1 + T_d \cdot s)}{1 + \frac{10.071}{s^2 - 12.62} \cdot K_p \cdot (1 + T_d \cdot s)} \quad \text{Gl. 142}$$

$$G_w = \frac{\frac{10.071}{s^2 - 12.62} \cdot K_p \cdot (1 + T_d \cdot s)}{\frac{s^2 - 12.62 + 10.071}{s^2 - 12.62} \cdot K_p \cdot (1 + T_d \cdot s)} \quad \text{Gl. 143}$$

$$G_w = \frac{10.071 \cdot K_p \cdot (1 + T_d \cdot s)}{s^2 - 12.62 + 10.071 \cdot K_p \cdot (1 + T_d \cdot s)} \quad \text{Gl. 144}$$

$$G_w = \frac{10.071 \cdot K_p \cdot (1 + T_d \cdot s)}{s^2 - 12.62 + 10.071 \cdot K_p \cdot (1 + T_d \cdot s)} \quad \text{Gl. 145}$$

Wobei $T_d = \frac{K_d}{K_p}$ Gl. 146

$$G_w = \frac{10.071 \cdot K_p \cdot (1 + T_d \cdot s)}{s^2 + 10.071 K_d \cdot s + (10.071 \cdot K_p - 12.62)} \quad \text{Gl. 147}$$

$$N_s = s^2 + 10.071K_d \cdot s + (10.071 \cdot K_p - 12.62) \quad \text{Gl. 148}$$

Es wurden folgende neue Pole des stabilisierten Systems gewählt

$s_1 = -4$ und $s_2 = -4.1$ so ergibt die charakteristische Gleichung des Stabiles System

$$N'_s = (s + 4) \cdot (s + 4.1) = s^2 + 8.1s + 16.4 \quad \text{Gl. 149}$$

Zuletzt wird die Koeffizienten der charakteristische Gleichungen N_s und N'_s verglichen.

$$s^2 + 10.071K_d \cdot s + (10.071 \cdot K_p - 12.62) = s^2 + 8.1s + 16.4 \quad \text{Gl. 150}$$

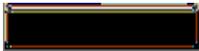
Daraus folgt:

$$K_p = 2.88 \text{ und } K_d = 0.804 \text{ also } T_d = 0.279 \text{ sec}$$

5.2.4 Erstellung des PD-Regelers mit WinErs

Es soll eine Blockstruktur aufgebaut werden, mit der der Regelkreis für die Kugel auf dem Rad simuliert werden kann.

Über *Bearbeiten – Blockstrukturen bearbeiten* wird den Blockstruktur-Editor gewählt.

Es erscheint die Frage nach einer Blockstrukturseite. Über  kann die Namen für eine Blockstrukturseite eingegeben werden, z.B. „Regelung_Simulation“.

Nach Drücken von OK wird ein Fenster mit einer leeren Blockstrukturseite geöffnet, auf der man dem Regelkreis grafisch eingeben kann.

Mit Hilfe der Werkzeug-Box wählt man Grafikelemente aus, die man dann mit der Maus positionieren kann.

Die Werkzeug-Box ist thematisch unterteilt. Durch Drücken auf einen der Button in der oberen Reihe der Werkzeug-Box vergrößert sich die Box um die entsprechenden grafischen

Elemente. Für die Regelkreissimulation wird die Elemente für Reglerblöcke  benötigt.

Der Regelkreis wird entsprechend der unten angegebenen Blockstrukturseite aufgebaut.

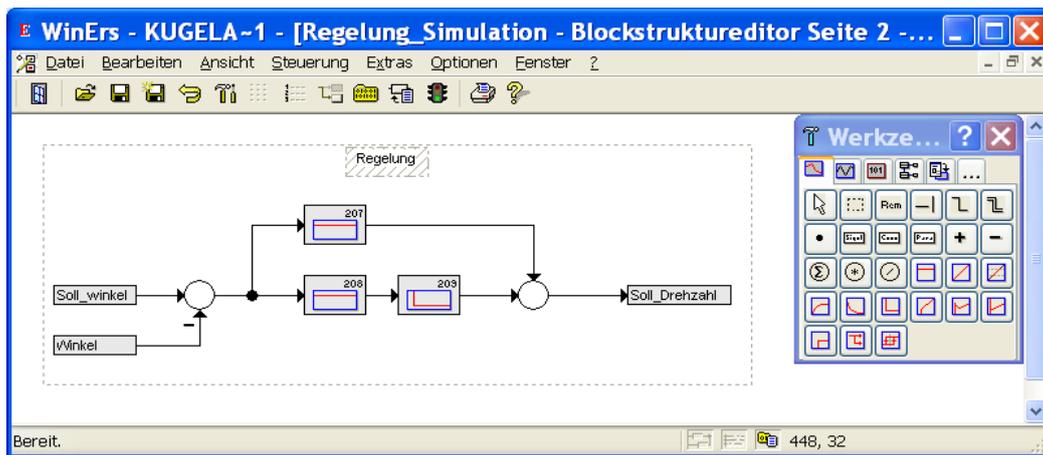


Abb. 79 Regelungsblockstruktur

Nachdem die oben dargestellte Seite erstellt worden, muss die Syntax dieser Seite überprüft werden (das bedeutet, dass es unter anderem überprüft wird, ob die Blöcke die richtige Anzahl von den Ein- und Ausgängen besitzen). Diese Überprüfung erfolgt durch Drücken des Buttons „Blockstrukturseite Kompilieren“  in der Buttonleiste.

Wenn die Seite richtig erstellt worden, meldet „WinErs“ „Die Blockstrukturseite 2 „Regelung_Simulation“ wurde fehlerfrei übersetzt“. Bei einer fehlerhaften Erstellung erscheint ein Fenster, in dem die einzelnen Fehler aufgeführt werden. Durch Doppelklicken auf eine Fehlermeldung wird auf der Blockstrukturseite der fehlerhafte Block bzw. die Linie gekennzeichnet.

Nachdem eine Blockstrukturseite übersetzt worden, ist es sinnvoll, die Parameter der einzelnen Blöcke einzustellen. Dies geschieht durch Drücken des Buttons  in der Buttonleiste oder über das Menü durch *Bearbeiten – Blockparameter* einstellen.

Durch Doppelklicken mit der Maus auf die einzelnen Blöcke erscheint der jeweilige Dialog zum Einstellen der Parameter. Für den PD-Regler werden für die Verstärkungen der Blöcke 207 und 208 sowie unten aufgeführten Einstellungen vorgenommen.



Abb. 80 Einstellung der Parameter

Die Blockstrukturseite kann nun geschlossen werden. Damit sie ausgeführt wird, muss sie aktiviert werden. Dies kann sie im Menü über *Steuerung –Blockstrukturen* (de)aktivieren

werden oder über Drücken der Ampel in der Buttonleiste  des Editors erreicht werden.

Um die Parameterwerte der Blöcke bzw. der Signale zu verändern, wird es durch Doppelklicken mit der linken Maustaste auf den entsprechenden Block. In dem erscheinenden Dialog kann die einzelnen Parameterwerte verstellt werden.

Es besteht auch die Möglichkeit, die Steuerung im Einzelschritt-Verfahren zu testen. Zu diesem Zweck müssen die Steuerung und Regelung gestoppt. Man kann dann über den Button  Einzel- und Mehrschritte berechnen lassen.

Nachdem die Steuerung überprüft wird, soll eine Messwerterfassung (speicherung) durchgeführt werden.

5.2.5 Sprungantwort

Zunächst wurde eine Sprungantwort der Strecke aufgenommen von (0.2° auf 0°). Die entsprechende Simulation ist in der folgenden Abbildung gegeben.

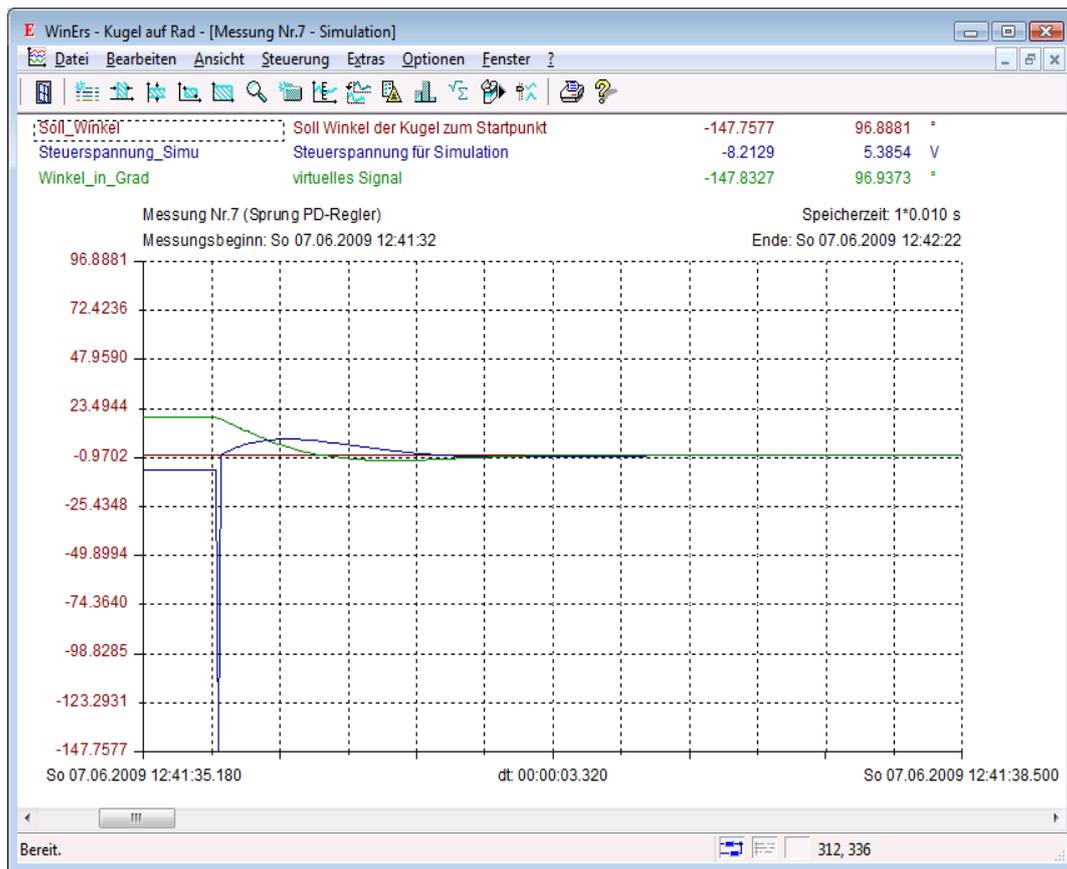


Abb. 81 Antwort des Regelkreises auf einen Führungssprung (PD-Regler)

5.2.6 Antwort des Regelkreises auf einen Störung

Nun es wird eine Störung über das Stellsignal mit einem Wert von -1.5V aufgeschaltet werden.

Die unten angegebene Abbildung zeigt den Verlauf des Stellsignals und der Winkel nach dieser Störung.

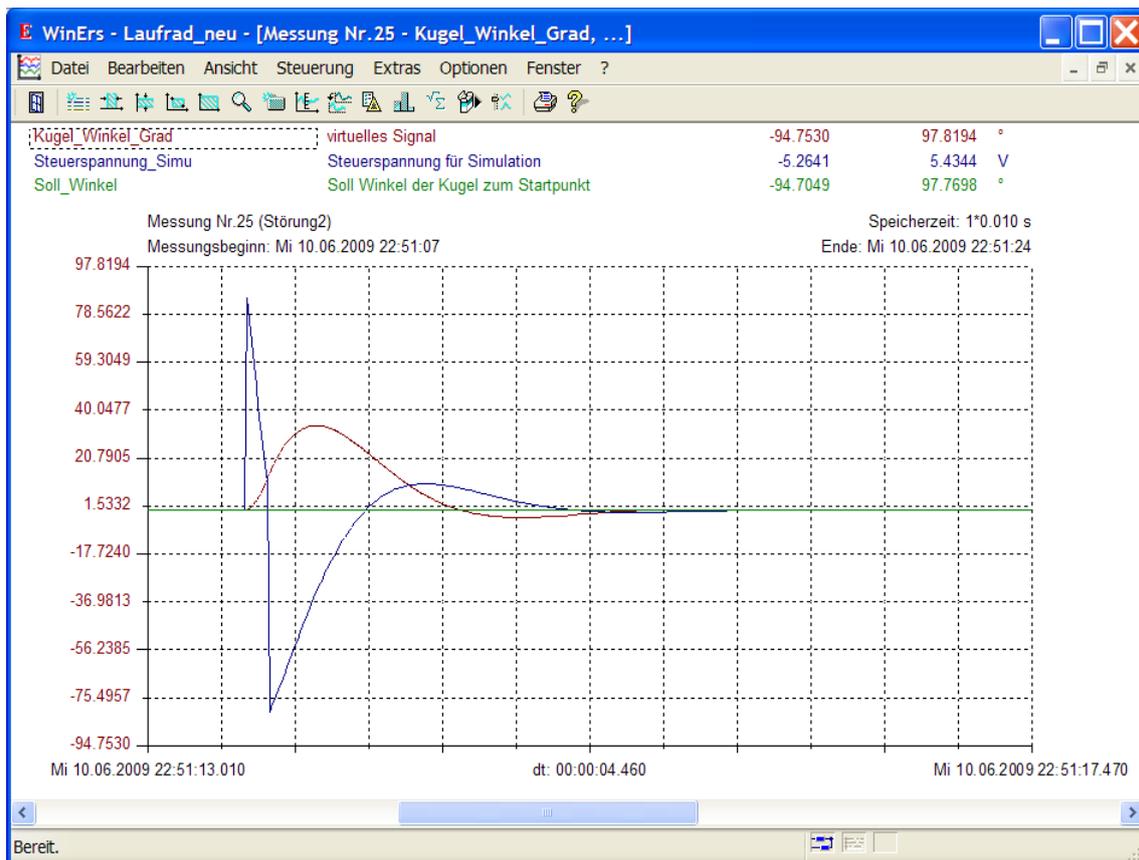


Abb. 82 Verlauf der Regelkreis mit Störung

Anschließend soll ein Prozessbild erstellt werden, mit dem die Kugel auf Rad Regelung überwacht und bedient werden kann.

5.3 Regelung der Anlage

Nach der Untersuchung der Regelstrecke mit Hilfe einer mathematischen Modellbildung, wurden die gerechneten Parameter der PD-Regler und der Zustandsregelung in der Realität verwendet. Dafür ist ein neuer Regelkreis für die Regelung der Anlage zu realisieren. Das analoge Eingangssignal, welches vom Distanzsensor eingelesen wird, entspricht den Istwert. Das analoge Ausgangssignal (A_Drehmoment) wird als Stellsignal betrachtet. Der Regelkreis wird entsprechend der unten angegebenen Blockstrukturseite realisiert.

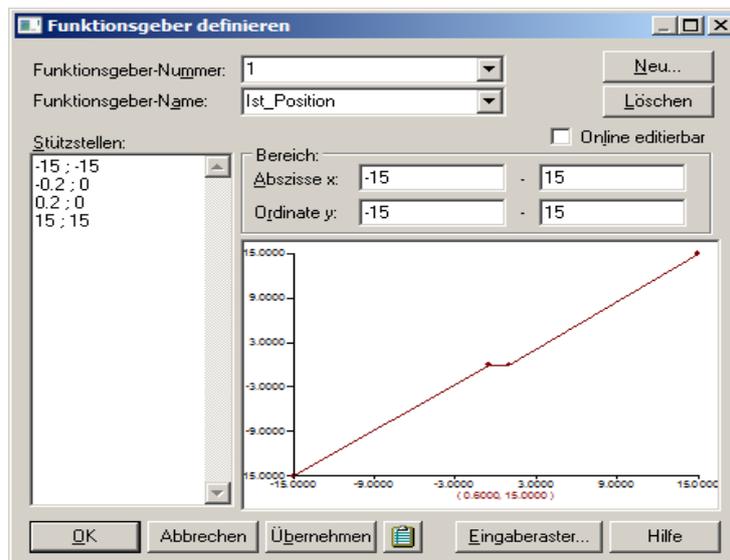


Abb. 84 Funktionsgeber definieren

- **PT1-Filter**

Die Trenddarstellung und die aktuelle numerische Darstellung haben angezeigt, dass die Störungen bei den beiden Eingangssignalen (E_Drehzahl und Ist_Position) auftreten.

Um diese Störungen zu eliminieren, wird ein PT1 Filter mit einer Verstärkung $K=1$ und einer Zeitkonstante $T_1=0,13s$ eingesetzt.

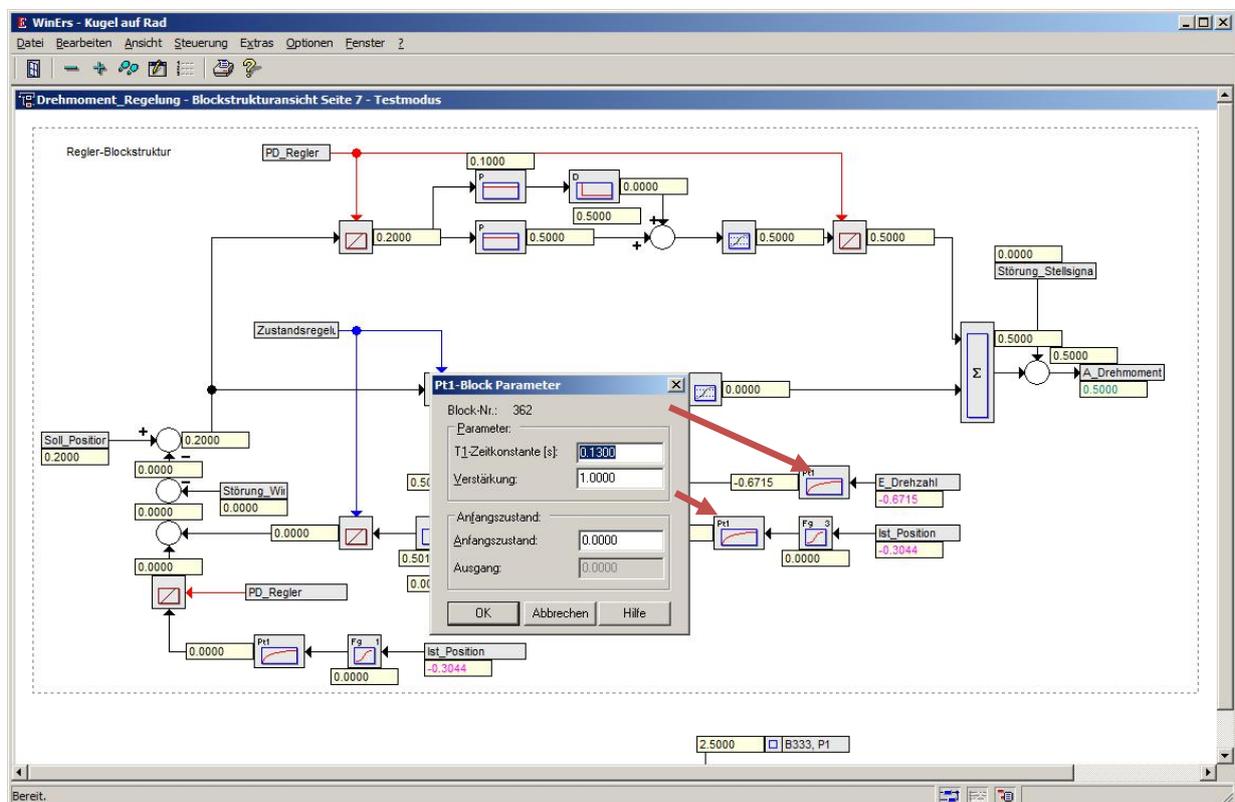


Abb. 85 PT1-Filter

5.3.3 Sprungantwort mit PD-Regler

Zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens der Regelstrecke mit PD-Regler wird eine Sprungantwort aufgenommen. Dazu wird auf dem Stellsignal einen Sprung gegeben.

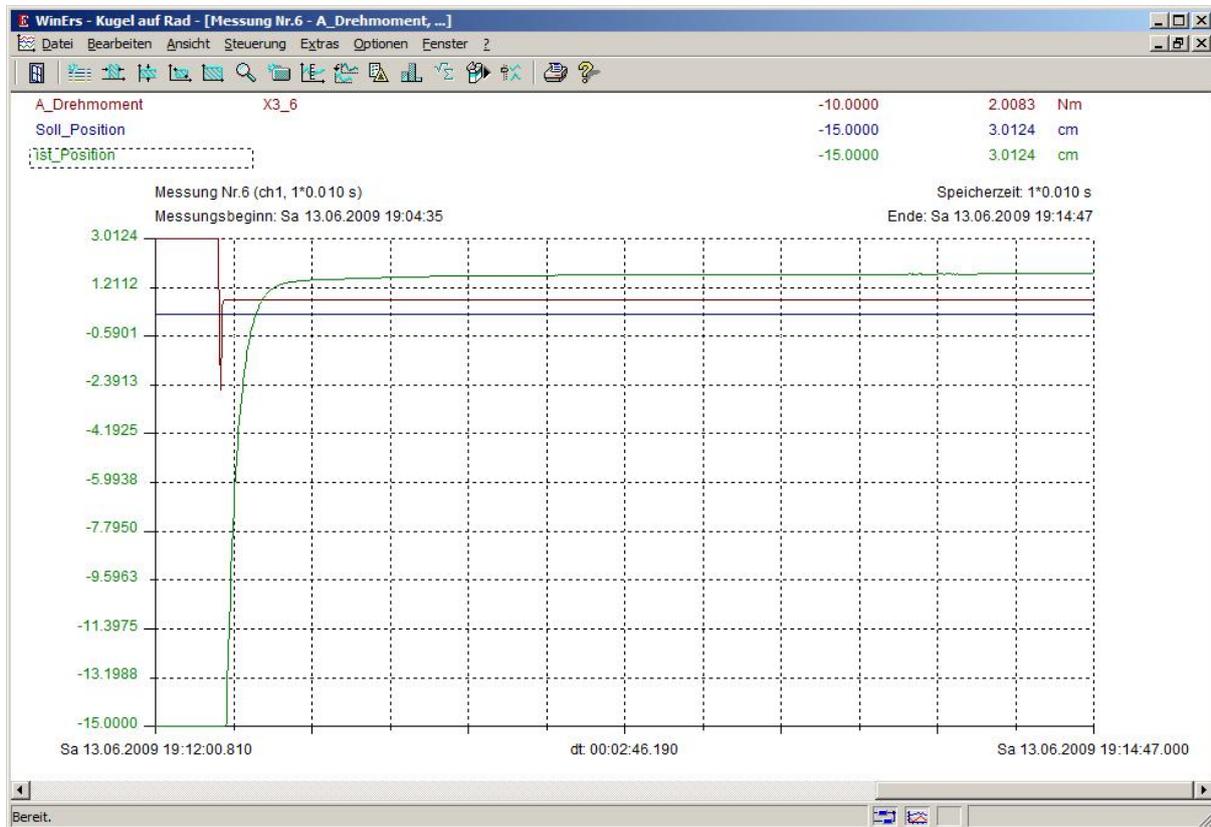


Abb. 87 Sprungantwort mit PD-Regler

Man erkennt durch Abb.87, dass die stationäre Genauigkeit mit einer geringen bleibenden Regelabweichung sehr schnell erreicht ist.

5.3.4 Zustandsregler

Die Zustandsregelung ist ein Regelkreis, der die Regelgröße basierend auf der Zustandsraumdarstellung regelt. Dabei wird der Zustand der Regelstrecke durch Messung der Regelstrecke zugeführt. Daher wird das Verfahren auch „Regelung durch Zustandsrückführung“ genannt.

Die Rückführung, die zusammen mit der Regelstrecke den Regelkreis bildet, geschieht in der Zustandsregelung über eine Messeinrichtung und den eigentlichen Zustandsregler. Letzterer wird auch Rückführmatrix genannt. Deshalb handelt es sich bei einem Zustandsregler immer um einen P-Regler.

Die Signalwerte, die den Rückführvektor bilden, sind:

- **Die Winkelgeschwindigkeit des Rades:**
 $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$, wobei n ist der Eingangsanalogwert für den Drehzahl des Motors, der direkt vom Steuergerät über die Busklemme KL3002 eingelesen wird.

- **Der Kugel-Winkel:**

Dieser Winkel entspricht die Position der Kugel. Die Position wird als zweites analoges Eingangssignal über KL3002 vom Sensor eingelesen.

Die Umrechnung von der Position(in cm) zum Winkel(in grad) wird in der folgenden

Blockstruktur realisiert. $\varphi_{Kugel-Winkel} = \arcsin \frac{E_Position}{R_{rad}}$.

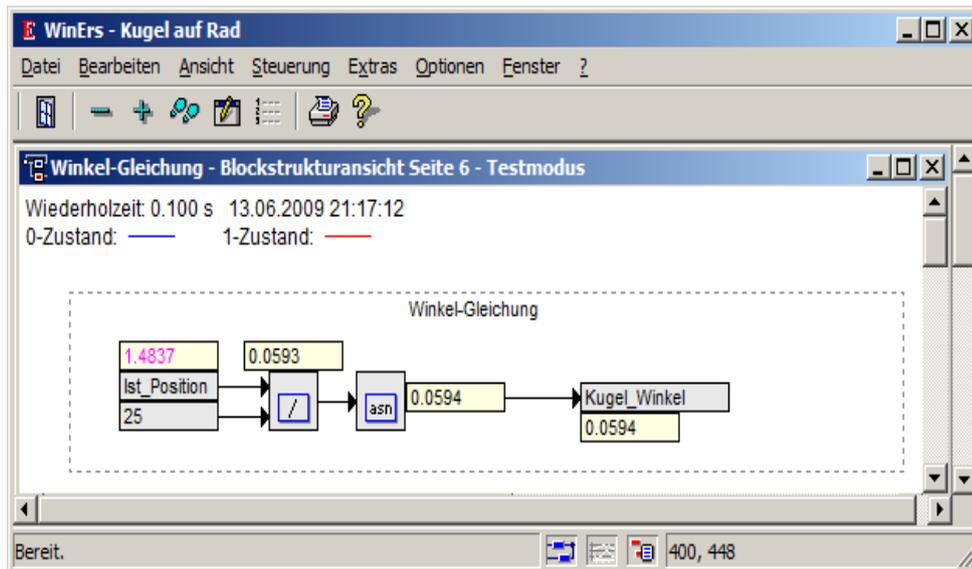


Abb. 88 Winkel-Umrechnung

- **Die Winkelgeschwindigkeit der Kugel:**

Die Winkelgeschwindigkeit der Kugel wird durch differenzieren (Differenzier-Block) des Winkels zum Startpunkt erhalten.

Die folgende Abbildung zeigt die Zustandsrückführung der drei Eingangssignalwerten mit den vorgerechneten Proportional-Gliedern.

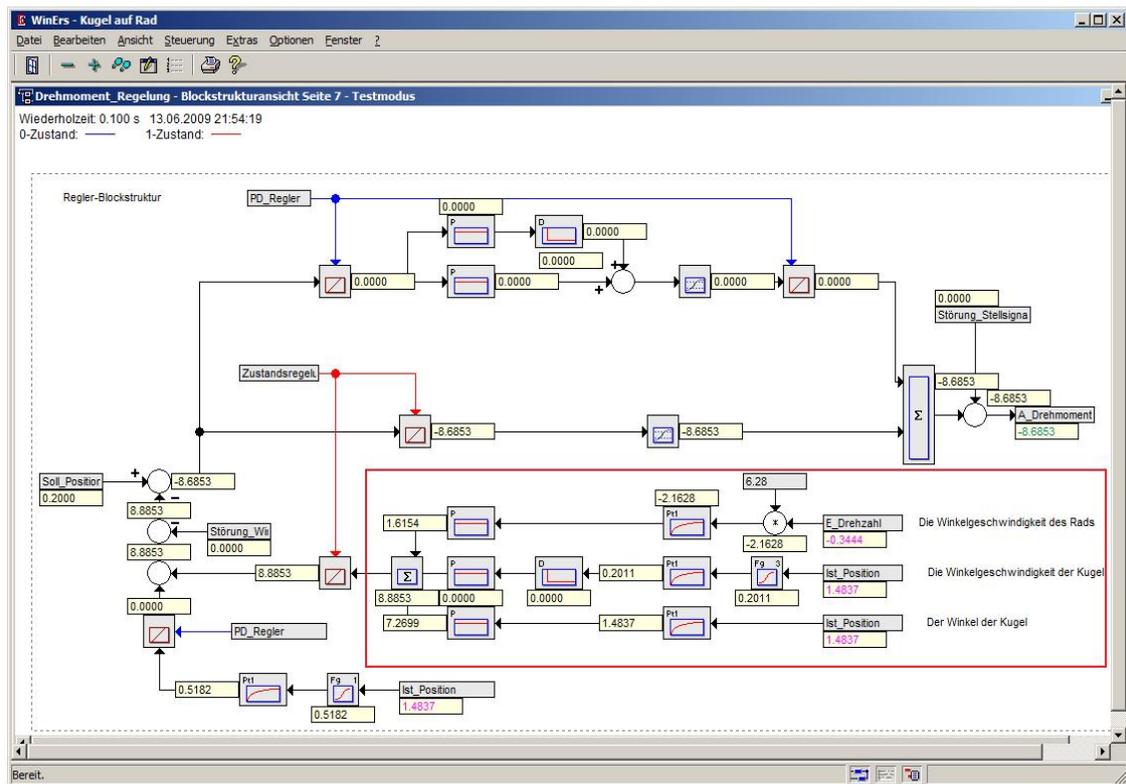


Abb. 89 Rückführvektor

5.3.5 Sprungantwort mit Zustandsregler bei einer Störung

Zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens der Regelstrecke mit Zustandsregler wird eine Sprungantwort aufgenommen. Dazu wird auf dem Stellsignal einen Sprung gegeben.

In der folgenden Abbildung erkennt man, dass die stationäre Genauigkeit mit einer bleibenden Regeldifferenz erreicht ist.

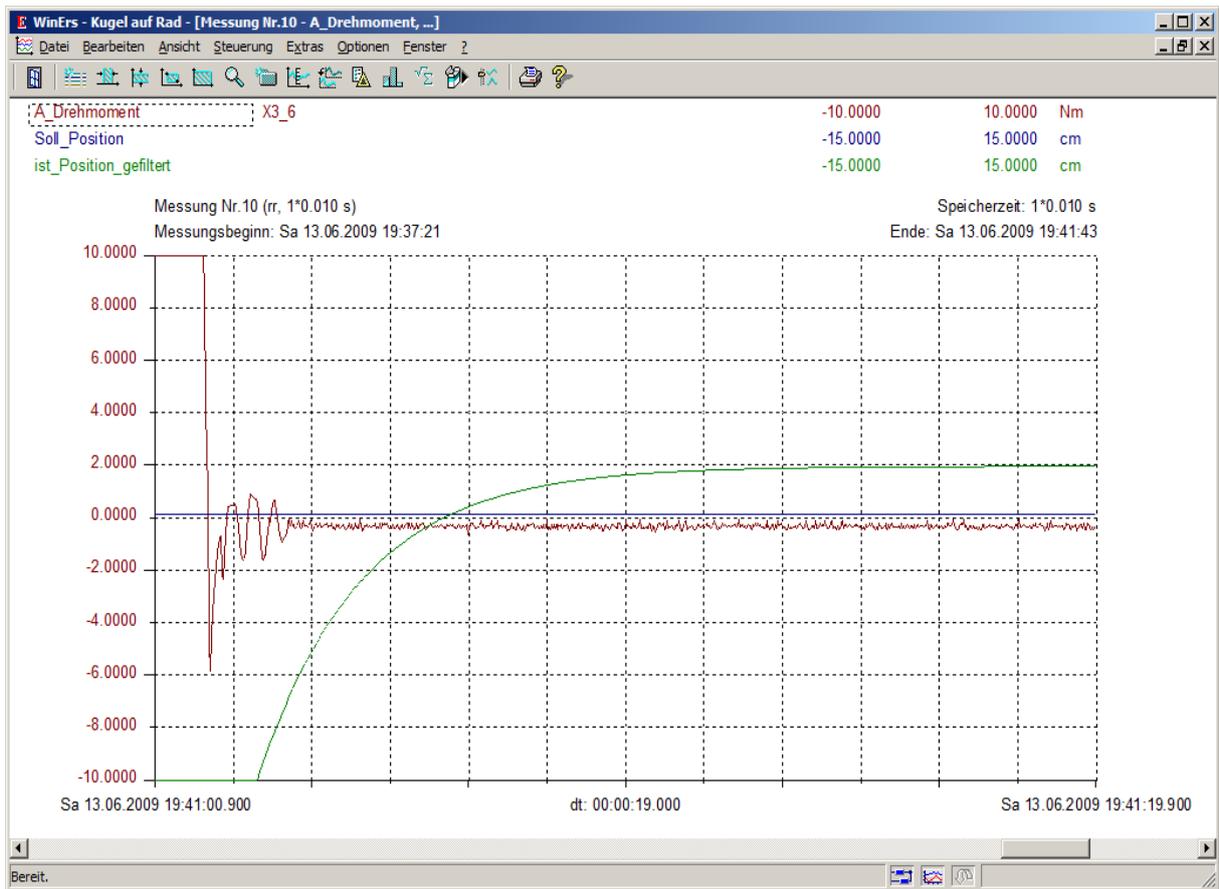


Abb. 90 Sprungantwort mit Zustandsregler

6. Prozessvisualisierung

6.1 Einleitung

Prozessbilder setzen sich aus Prozessbildelementen zusammen und dienen dazu, einen Prozess über eine selbst erstellte grafische Oberfläche zu visualisieren und zu bedienen. Dabei kann das Prozessbild als Unterfenster von WinErs oder als Desktop-Fenster angezeigt werden. Die letztere Variante erlaubt es, die grafische Oberfläche von Windows ganz hinter die Visualisierung zurücktreten zu lassen.

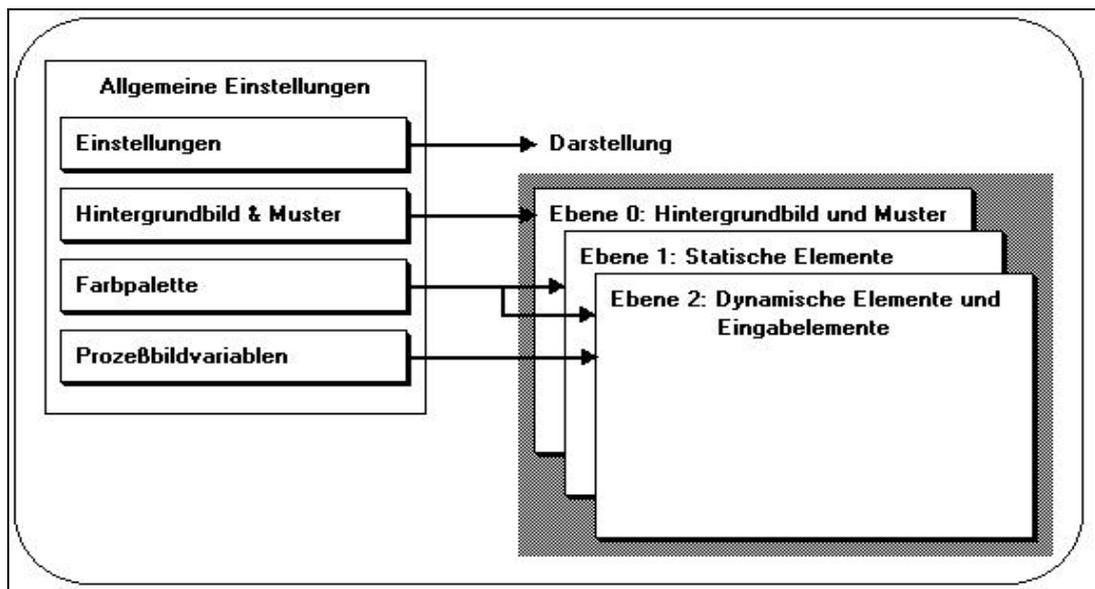


Abb. 91 Aufbau und Darstellungsebene eines Prozessbildes

Ein Prozessbild setzt sich zusammen aus.

6.1.1 Bildeinstellungen

Hierzu gehören einstellbare Bildlaufleisten, Bildgröße, Rahmen und Titel.

6.1.2 Farbpalette

Eine Reihe von Farbeinträgen, denen über Farbnamen eine Farbe zugeordnet wird. Die Farbnamen können innerhalb der Bildelemente für Vordergrund- und Hintergrundfarbe sowie für Farbterme benutzt werden. Auf diese Weise können durch umdefinieren eines Farbeintrages alle Bildelemente gemeinsam geändert werden, die diesen Eintrag verwenden. Man kann zwischen prozessbildspezifischen und globalen Farbpaletten (für alle Prozessbilder) wählen. Über die Option Globale Prozessbildpalette kann man leicht ein einheitliches Farbschema für alle Prozessbilder erreichen.

6.1.3 Prozessbildskript

Über das Prozessbildskript kann man prozessbildeigene Variable (Prozessbildvariablen) definieren. Die Prozessbildvariablen stellen dynamische Größen dar, die durch arithmetische Terme gebildet werden. Auf diese allgemeinen Prozessbildvariablen kann in den speziellen Termen der Prozessbildelemente zurückgegriffen werden. Die Variablen können vom Typ *float*, *bool*, *text* oder *color* sein. Die Verwendung von Prozessbildvariablen dient der Strukturierung, Vereinfachung oder Erweiterung von Prozessbildelementterminen.

6.1.4 Hintergrundbild

Dies ist eine statische Grafik, die als Hintergrund des Prozessbildes verwendet werden kann. z.B. ein Abbild der Anlage oder von Anlagenteilen, die nicht dynamisiert zu werden brauchen. Das Hintergrundbild wird mit einem externen Grafikprogramm erstellt. Standardmäßig ist hierfür die Windows-Anwendung zur Bearbeitung von Bitmaps vorgesehen (*Paintbrush*, bzw. *Paint*). Es können aber auch andere, komfortablere Programme eingerichtet werden.

6.1.5 Bildelemente

Hier stehen statische Elemente (Linie, Rahmen, Text, Grafik etc.) bereit, deren Darstellung fest eingestellt wird und während der Prozessbildansicht (Visualisierung) unverändert bleibt. Dynamische Elemente (Linie, Text, Numerik, Balkengrafik etc.) verfügen über einen oder mehrere Darstellungsparameter, die von Signalen, Projekt- oder Systemgrößen abhängig sein können und hierdurch eine prozessabhängige Visualisierung erlauben. Diese Abhängigkeiten werden in Form von arithmetischen Termen formuliert, bei denen nahezu beliebige Operationen möglich sind und die so eine mögliche Flexibilität erlauben.

Mit Einschränkungen dürfen mehrere dynamische Elemente übereinander liegen, beispielsweise um ein numerisches Ausgabefeld auf einen Bargraphen zu legen. Ausgenommen von dieser Möglichkeit sind fensterbasierte Elemente und einige Eingabeelemente.

Für die Prozesssteuerung stehen Eingabeelemente (numerische Eingabe, Schalter, Schieberegler etc.) zur Verfügung. Alle Eingabeelemente können über Freigabeterme und Tastenzuordnungen verfügen. Über die Freigabeterme kann durch beliebige Operationen der Zugriff auf das Element aktiviert oder deaktiviert werden. Einige Eingabeelemente verfügen, ebenso wie die dynamischen Elemente, zusätzlich über dynamische Darstellungsparameter.

Aktionen und Verzweigungen innerhalb von Prozessbildern werden durch so genannte Verknüpfungen (Links) realisiert. Dabei können über Verknüpfungsoberflächen und Schaltflächen Aktionen und Verzweigungen durch Benutzereingaben ausgelöst werden oder aber automatisiert durch Verknüpfungsmakros ausgeführt werden, z. B. um beim Öffnen eines Prozessbildes oder zeit- oder signalgesteuert Aktionen und Verzweigungen auszulesen.

Prozessbilder werden mit dem Prozessbildeditor erstellt. Alle Bildelemente können frei positioniert und in der Größe verändert werden.

Über den Einstellungsdialog werden die Bildeinstellungen sowie Hintergrundbild und Farbpalette für das Prozessbild eingerichtet. Über die Prozessbildansicht findet die eigentliche Visualisierung und Prozesssteuerung über Benutzereingaben statt.

6.1.6 Prozessbild editieren

Um eine Visualisierung zu erstellen, muss der Prozessbild-Editor über *Bearbeiten – Prozessbilder bearbeiten* aufgerufen werden. Es wird nach einer Prozessbildseite gefragt. Man wählt eine neue Seite und gibt man Prozessbildname ein.

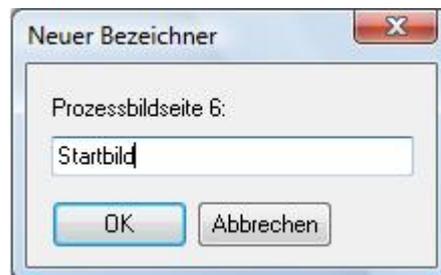


Abb. 92 Prozessbildname

In dem Prozessbildeditor hat man eine Werkzeuge-Box mit verschiedenen statischen und dynamischen Elementen sowie eine Box zum Ausrichten von positionierten Elementen.

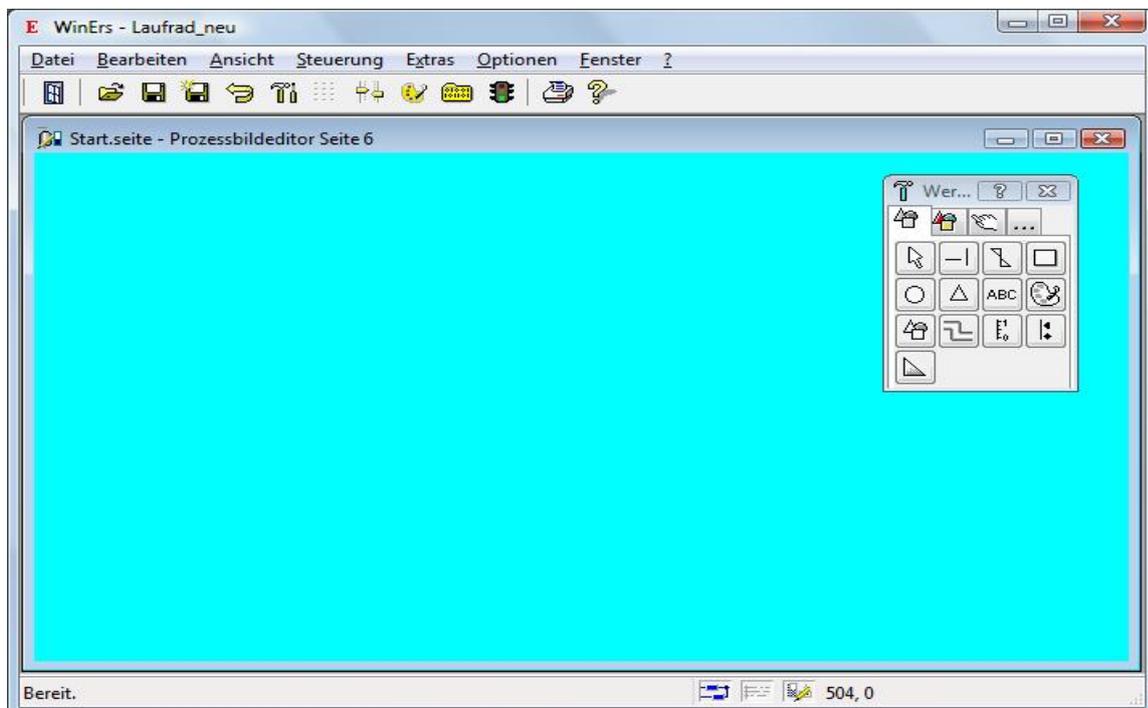


Abb. 93 Prozessbildeditor

Die Aufgabe benötigt vier Prozessbildseiten

- Startseite
- Anlage-Übersicht
- Geregelte Anlage
- Simulierte Anlage

6.2 Start-Prozessbild

6.2.1 Statisches Text erstellen

Die Startseite enthält ein Statische Text und zwei Button, um die Seite zu wechseln oder zu schließen.

In der Werkzeuge-Box ist das Element „Statisches Textfeld“ zu wählen und in dem Fenster zu platzieren.

Durch double Klick auf dieses Element, öffnet sich der folgende Fenster und wird der entsprechende Text eingegeben.

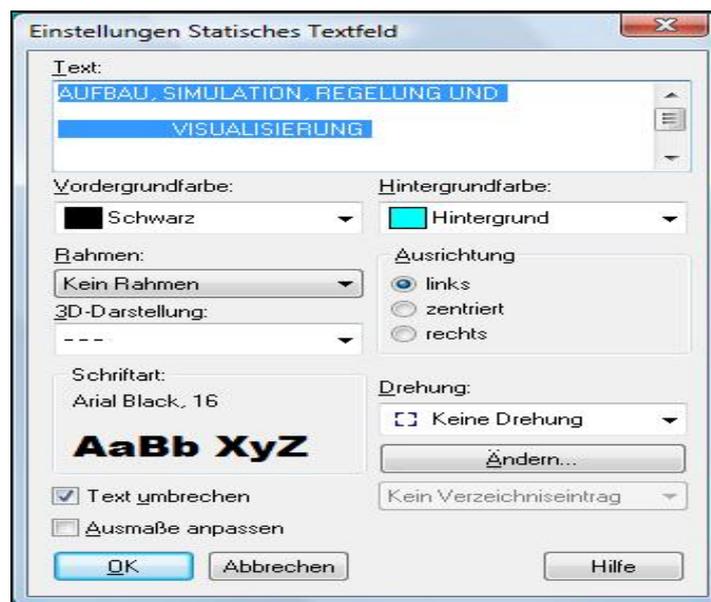


Abb. 94 Statische Textfeld

Wenn man den Dialog mit OK verlässt, wird der Text auf dem Prozessbild erstellt.

6.2.2 Verknüpfungsschaltfläche

Das Schließen und Wechseln der Prozessbildseite (Startseite) wird durch den Button "schließen" bzw. „Weiter“ realisiert. Dies erreicht man in dem Prozessbild-Editor mit dem Element „Verknüpfungsschaltfläche (Link)“  und der entsprechenden Einstellung.



Abb. 95 Startseite-Übersicht

Für den Button "schließen" wird als Verknüpfungsart „Prozessbild schließen“ gewählt. Weiterhin kann bei „Darstellung“ der Text (Schließen) eingegeben werden, der dann auf der Linkfläche (Button) erscheint. Über „Ändern“ werden die Schriftart und die Größe eingestellt.

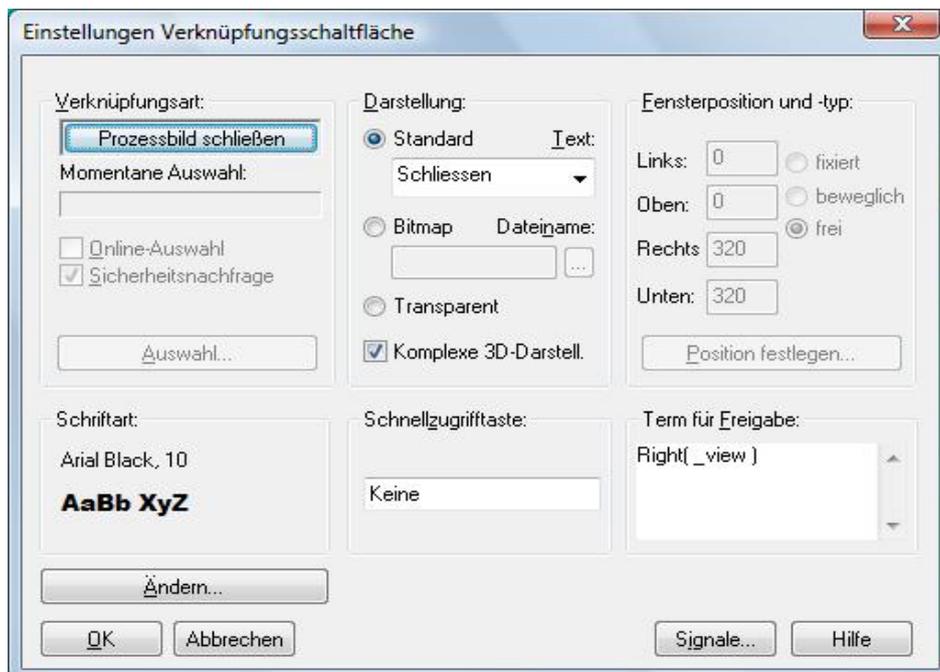


Abb. 96 Prozessbild Schließen

Für den Button "Weiter" wird als Verknüpfungsart „Prozessbildwechsel“ gewählt. Weiterhin kann bei „Darstellung“ der Text (Weiter) eingegeben werden, der dann auf der Linkfläche (Button) erscheint. Über „Ändern“ werden die Schriftart und die Größe eingestellt. Über Auswahl ist auszuwählen welche Prozessbildseite wird gewechselt.

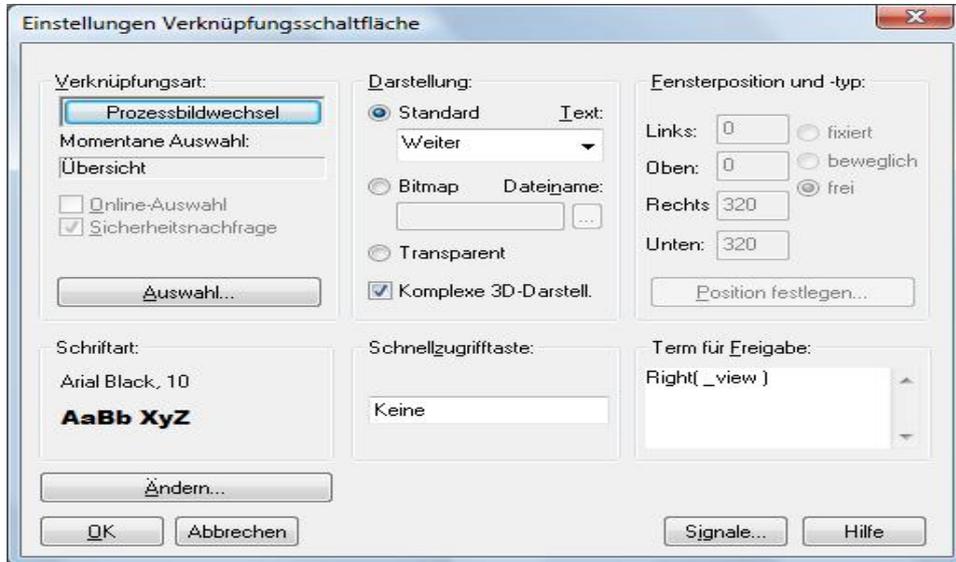


Abb. 97 Prozessbildwechsel

6.2.3 Allgemeine Einstellungen der Prozessbildseite

Durch Drücken des Buttons „Allgemeine Einstellungen für das aktive Fenster“  werden die Größe des Prozessbildes und das Prozessbild als Vollbild eingestellt.

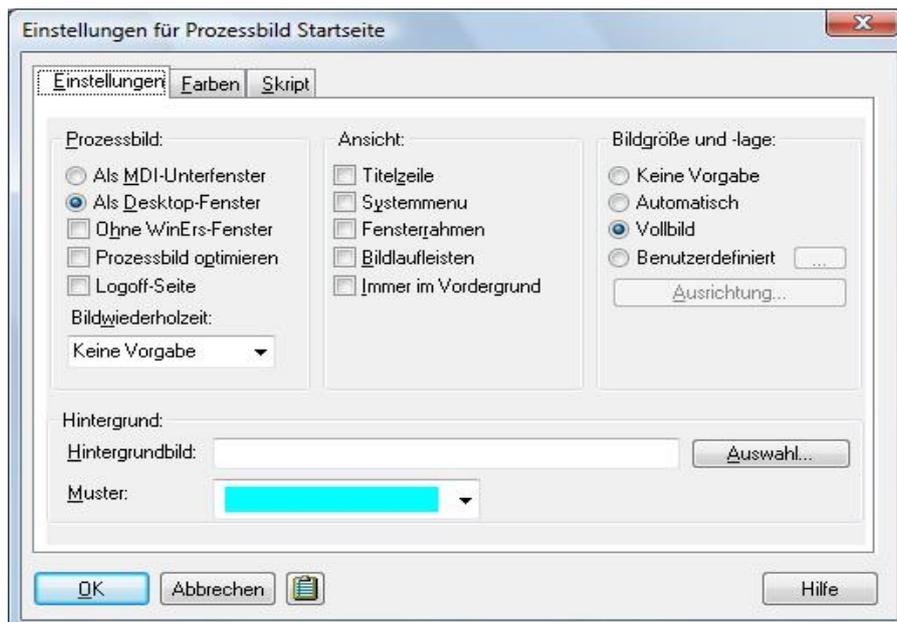


Abb. 98 Prozessbildseite-Einstellungen

Das Prozessbild wird dann als Vollbild ohne Fensterrahmen auf dem Bildschirm erscheinen.

6.2.4 Kompilieren der Prozessbildseite

Nachdem man die oben dargestellte Seite (Abb.98) erstellt hat, müssen die Syntax dieser Seite überprüft werden, d.h. es wird z.B. überprüft, ob die Elemente für das Prozessbild richtig eingestellt sind. Diese Überprüfung geschieht durch Drücken des Buttons „Kompilieren“  in der Buttonleiste

Wenn die Seite richtig erstellt ist, meldet WinErs „Die Prozessbildseite wurde fehlerfrei übersetzt“. Bei einer fehlerhaften Erstellung erscheint ein Fenster, in dem die einzelnen Fehler aufgeführt werden. Durch Doppelklicken auf eine Fehlermeldung wird das fehlerhafte Element gekennzeichnet. Damit die Seite ausgeführt wird, muss sie aktiviert werden.

Dies erreicht man im Menü über Drücken der Ampel in der Buttonleiste  des Editors.



Abb. 99 Aktivierte Startseite

Durch Drücken des Buttons „Weiter“ wird eine neue Prozessbildseite gewechselt

6.3 Übersicht-Prozessbild

Die Übersicht-Prozessbildseite enthält die Übersicht der gesamten Anlage. Sie ist aus zwei Binäre Schalter und vier Verknüpfungsoberflächen realisiert worden.

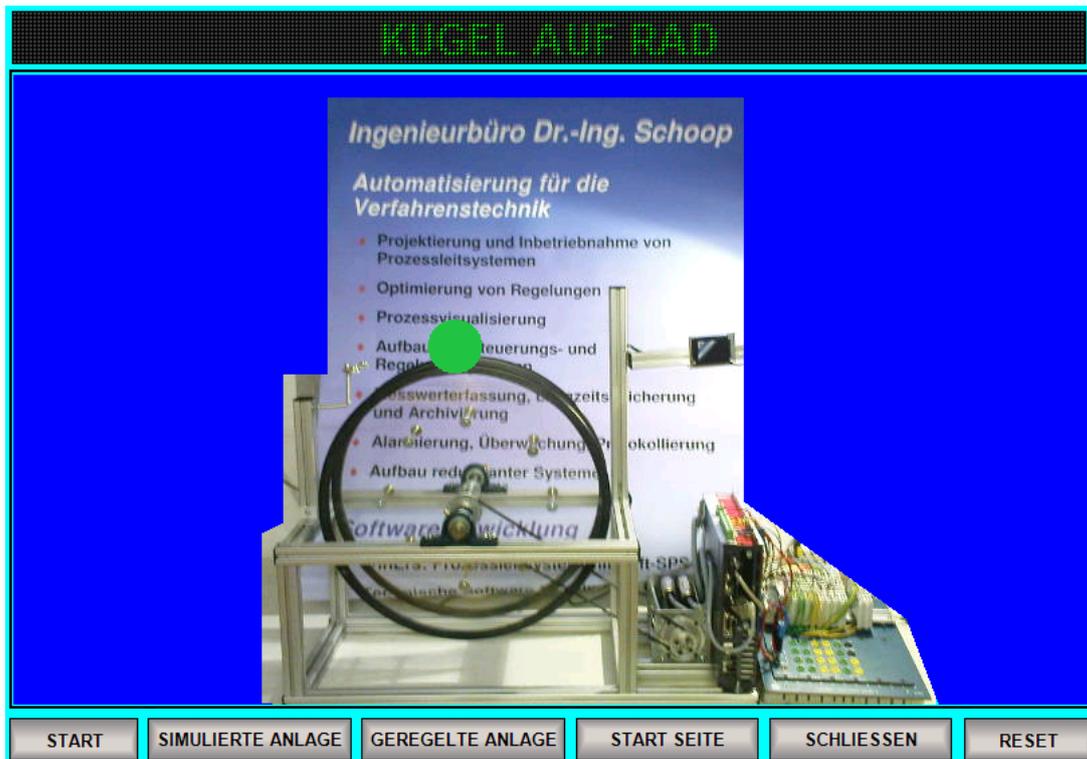


Abb. 100 Übersicht-Prozessbildseite

6.3.1 Dynamische Bitmap

In diese Prozessbildseite soll ein mit MS-Paint bearbeitete Bild der gesamten Anlage verwendet werden. Man wählt die „Dynamische Bitmap“ und positioniert diese auf dem Bildschirm.

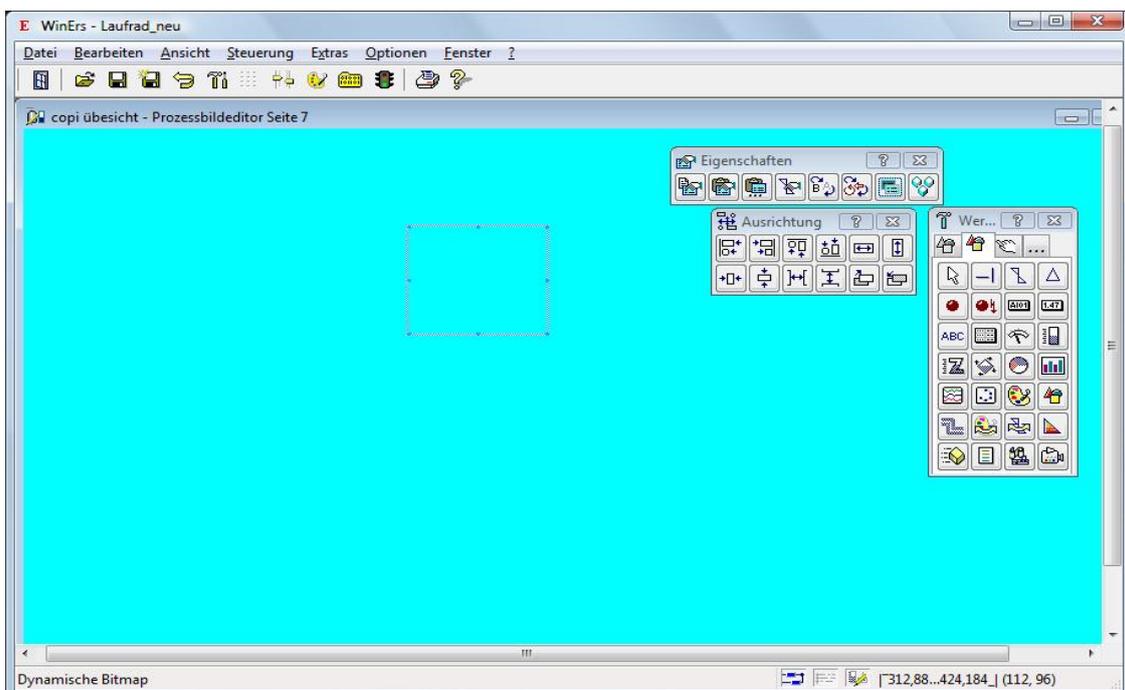


Abb. 101 Dynamische Bitmap erstellen

Durch Doppelklick kommt man in den Einstellungsdialog für die Bitmap. Man sucht die Datei mit der Bitmap und stellt sie im Dialog ein, wie sie gezeichnet werden soll. Wenn man „Transparent zeichnen“ einstellen, werden die Teile der Bitmap, die die Farbe „Transparent“ haben, transparent gezeichnet, d.h. an diesen Stellen erscheint auf dem Prozessbild der eingestellte Hintergrund.

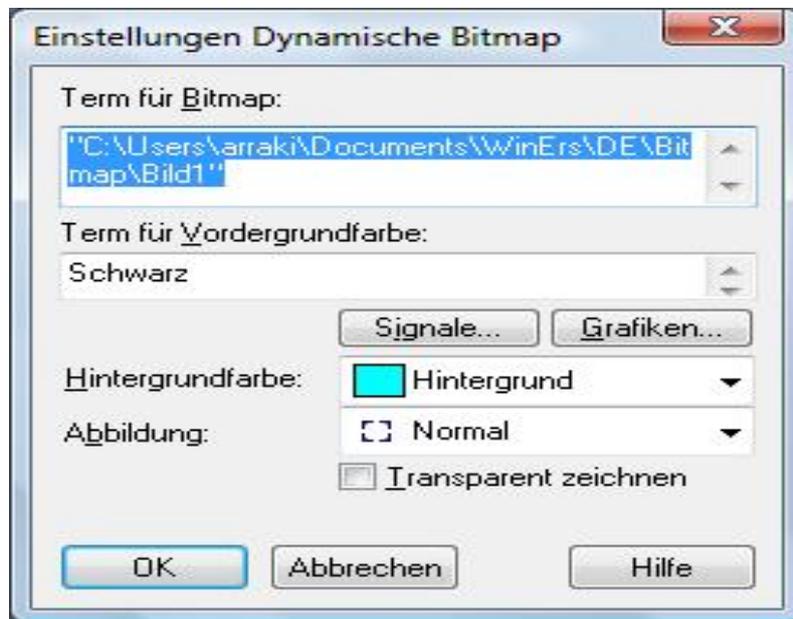


Abb. 102 Einstellungsdialog für die Bitmap

6.3.2 Bedienelemente

Die Übersicht-Prozessbildseite enthält vier Verknüpfungsschaltflächen und zwei binäre Tasten

- Simulierte Anlage
- Geregelter Anlage
- Schließen
- Zurück zum Start
- Start-Schalter
- Reset-Schalter

Diesen Verknüpfungsschaltflächen erreicht man in dem Prozessbild-Editor mit dem Element „Verknüpfungsschaltfläche (Link)“  und wird mit den entsprechenden Einstellungen eingestellt.

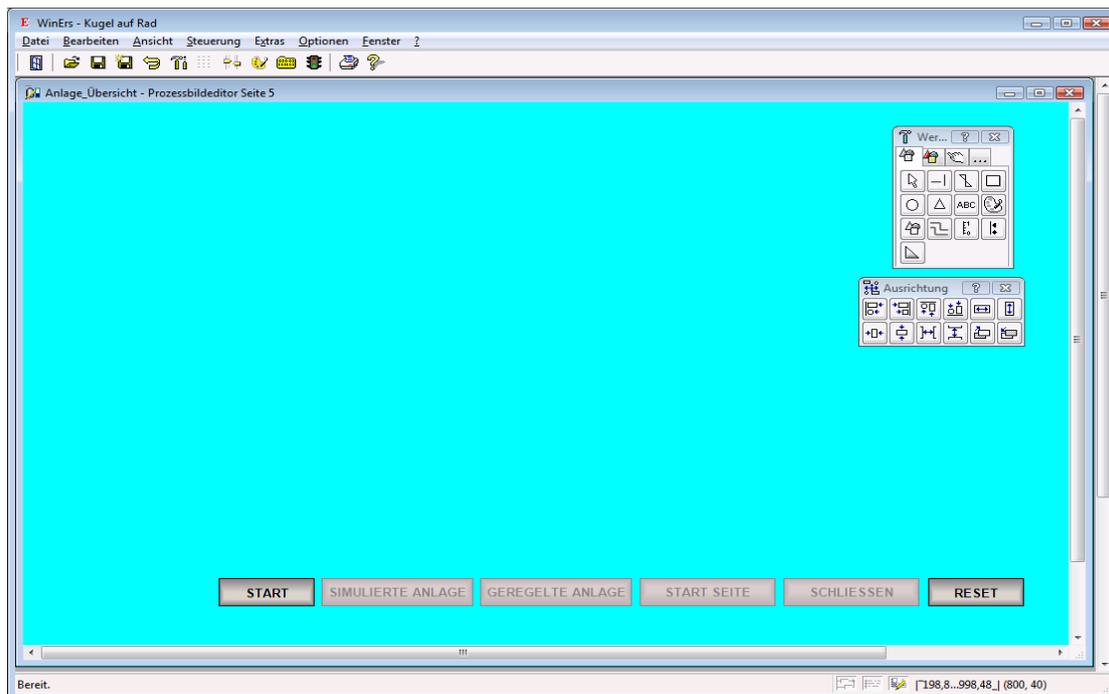


Abb. 103 Bearbeitung der Übersicht-Seite

Mit dem Schalter „Start“ wird die Anlage gestartet, und mit dem Schalter „Reset“ wird die Anlage zurückgesetzt.

Um die Binäre Schalter zu realisieren, wird in der Werkzeuge-Box das Element „Binärschalter“ gewählt und in dem Fenster platziert.

Durch double Klick auf dieses Element, öffnet sich der folgende Fenster und wird der entsprechende Text eingegeben.

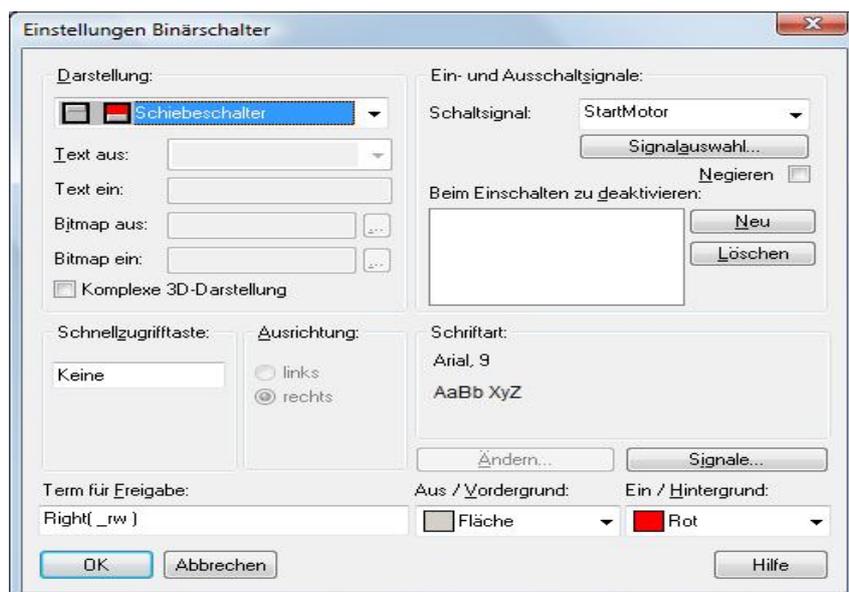


Abb. 104 Start-Reset Schalter Einstellung

6.4 Prozessbild für die Geregelte Anlage

In dieser Prozessbildseite soll die gesamte Anlage visualisiert werden.

Die Seite enthält mehrere Unterfenster, -Buttons sowie -Anzeigern.

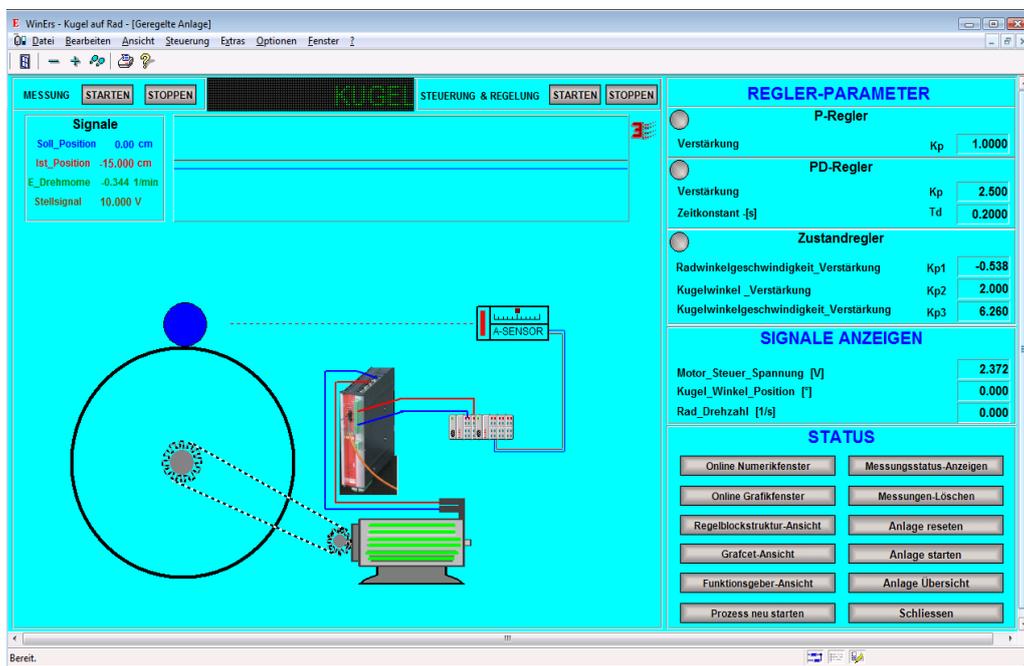


Abb. 105 Geregelte Anlage

6.4.1 Auswahl-Menü

In diese Menü-Fenster sind Unterfenstern mit der „Verknüpfungsschaltfläche (Link)“  realisiert

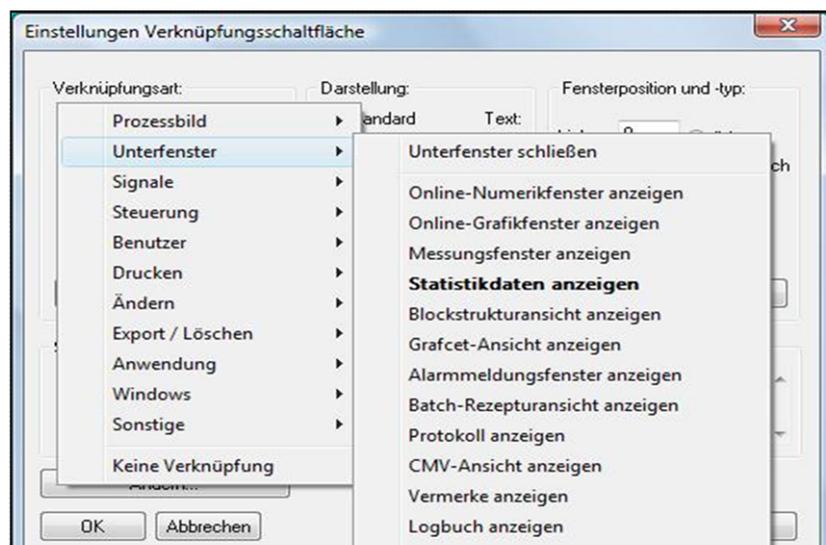


Abb. 106 Verknüpfungsschaltfläche-Einstellungen

6.4.2 Online Numerik Fenster

In diesem Fenster können Gruppen oder Signale ausgewählt werden.

Die Reihenfolge der Signale in der Gruppe, bzw. in der Signalliste bestimmt die Reihenfolge in der die Signale angezeigt werden.

Drückt man auf der Button „Online Numerik Fenster“ werden die Signalwerte numerisch angezeigt.

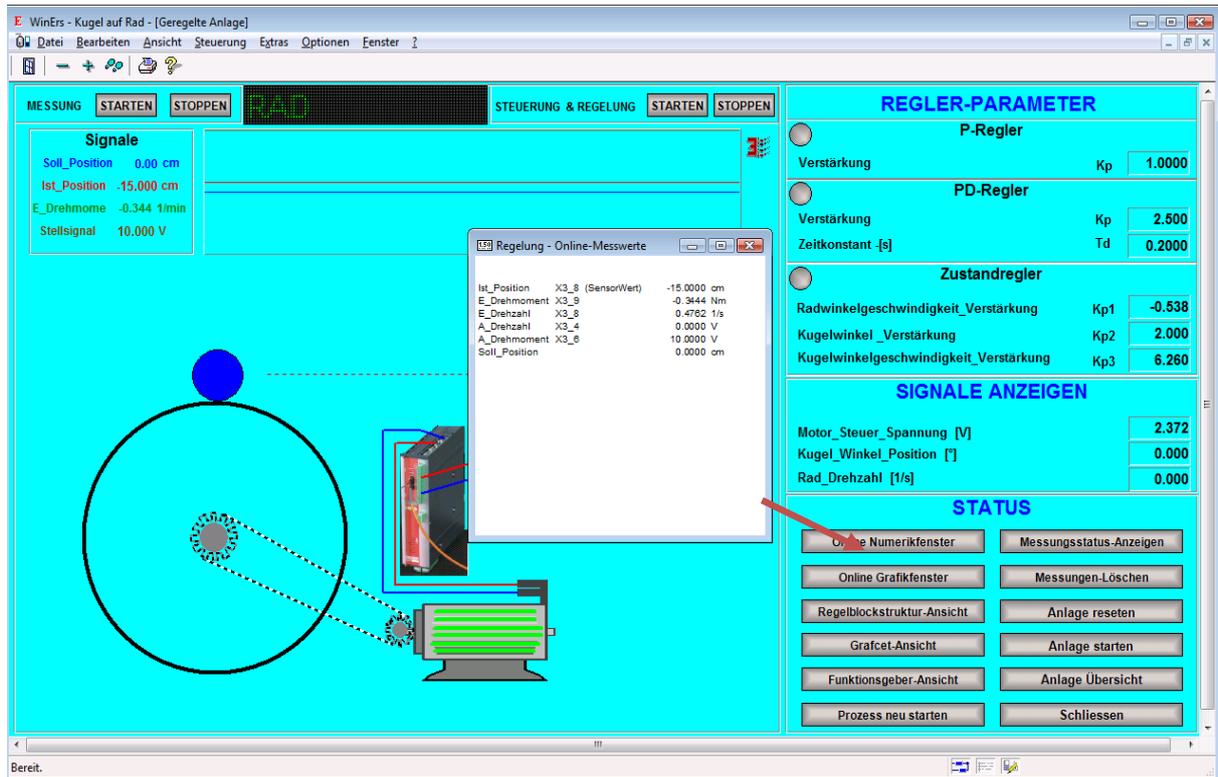


Abb. 107 Online Numerik Fenster

6.4.3 Online Grafik Fenster

Anstatt die Signalwerte numerisch anzuzeigen, können die Signalverläufe als Trenddarstellung grafisch dargestellt werden. Drückt man auf dem Button „Online Grafik Fenster“ werden die ausgewählte Signale grafisch angezeigt.

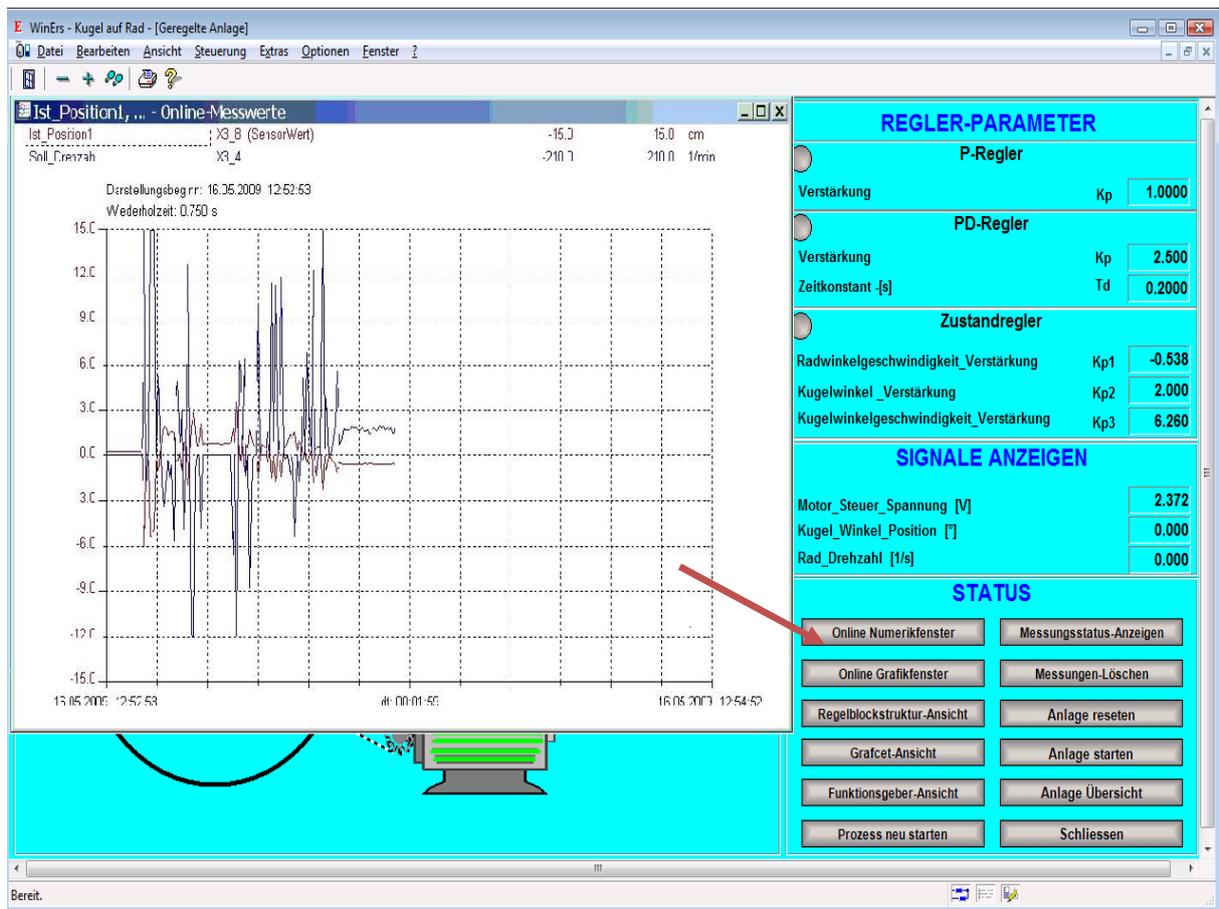


Abb. 108 Online Grafik Fenster

6.4.4 Blockstruktur-Ansicht

Durch einen Klick auf dem Button „Blockstruktur-Ansicht“ wird die dargestellte Blockstrukturseite angezeigt. Die Ansicht eignet sich sowohl zum Testen von der Blockstrukturen, als auch zum parametrieren der Regler- und Steuerungsblöcke.

Im Ansichtsmodus kann die Darstellung der Blockstrukturseite nicht verändert werden. Oben links werden die Taktrate der Aktualisierung der Werte und die aktuelle Zeit dargestellt.

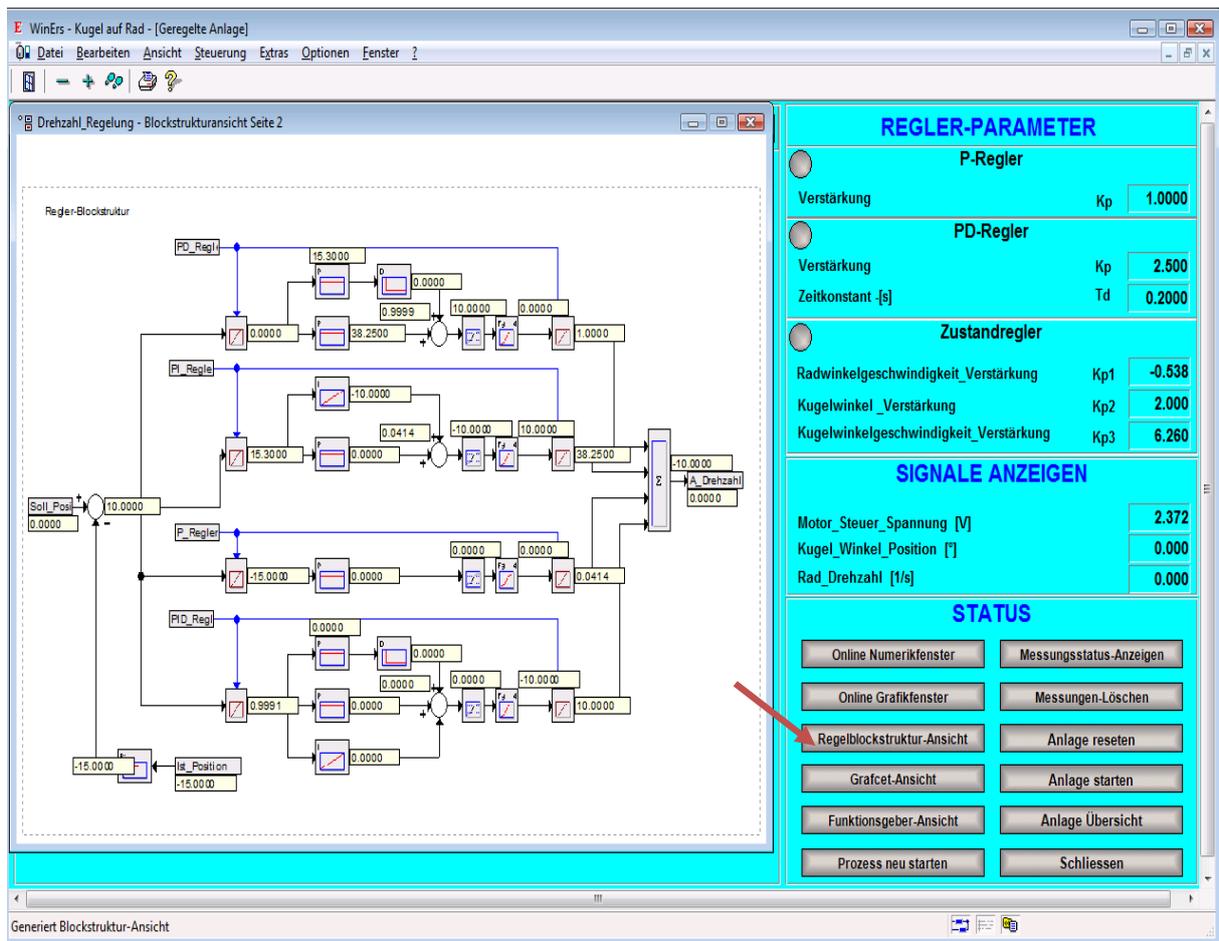


Abb. 109 Blockstruktur-Ansicht

6.4.5 Grafcet-Ansicht

Die Grafcet-Ansicht stellt Grafcet-Seiten mit ihren dynamischen Zuständen dar. Diese ist hilfreich bei der Überwachung von Grafcet-Plänen oder der Fehlersuche.

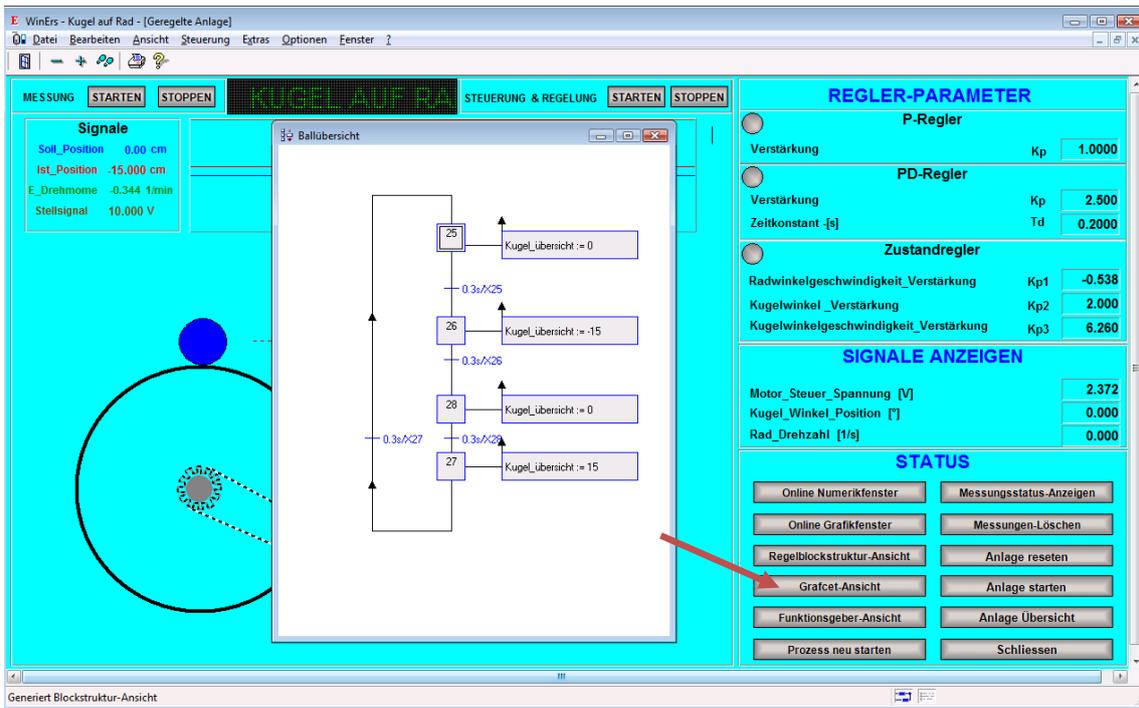


Abb. 110 Grafcet-Ansicht

Die hier zu erstellende Grafcet-Seite soll die Visualisierung der Kugel in der Anlage-Übersichtseite realisiert werden. Die Kugel soll in eine vordefinierte Bereich Links und rechts sich bewegen

Über *Bearbeiten – Grafcetseiten bearbeiten* wird der Grafcteditor aufgerufen. Über den Button *Neue Seite* kann man den Namen für eine neue Grafcetseite eingeben und dann mit *OK* bestätigen.



Abb. 111 Grafcet-Seite erstellen

Nach dem Verlassen des Dialoges über *OK* erscheint ein neues Fenster, in dem die zu bearbeitende Grafcet-Seite dargestellt wird.

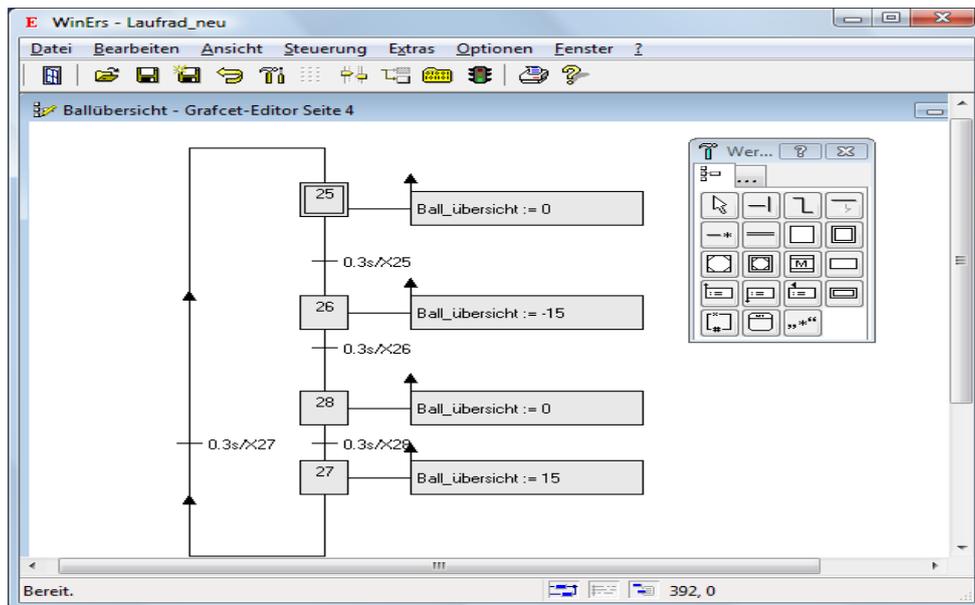


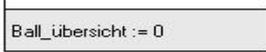
Abb. 112 Grafcet-Seite editieren

Um ein Element in eine Grafcet-Seite einzufügen, wählt man diesen aus der Werkzeugbox aus und klickt mit der Maus auf die gewünschte Position innerhalb der Seite.

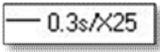
Verbindungslinien, Polygone werden durch Ziehen- und Loslassen mit der Maus erzeugt, nachdem diese zuvor in der Werkzeugbox ausgewählt wurden.

Die Grafcet-Elemente die wir benötigt haben sind:

- **Gespeicherte wirkende Aktion**

Eine gespeicherte wirkende Aktion  bei Aktivierung steuert eine Ausgangsvariable und muss mit einem Schritt verknüpft sein. Sie ordnet der Ausgangsvariable (Ball_Übersicht = 0 cm) einen Wert zu, wenn der Schritt aktiviert wird (steigende Flanke). Andernfalls bleibt die Ausgangsvariable unverändert.

- **Zeit-Transition**

Die Transition  hat einen Freigabeeingang und eine Transitionsbedingung. Wenn der Freigabeeingang aktiv ist und die Transitionsbedingung erfüllt ist, wird die Transition ausgelöst. Das Auslösen führt zum Deaktivieren aller vorangehenden Schritte um zum Aktivieren aller nachfolgenden Schritte.

Die Transition „0,3s/X25“ bedeutet, dass nur weiter geschaltet wird wenn der Schritt 25 0,3 Sekunden gesetzt war.

- **Die Schritte**

Ein Schritt ist Bestandteil der Struktur eines Grafcet-Plans und bestimmt dessen Situation mit. Die aktuelle Situation eines Grafcet-Plans ist bestimmt durch die aktiven Schritte.

- **Compillieren der Grafcet-Seite**

Nachdem man die oben dargestellte Seite erstellt hat, muss man die Syntax dieser Seite überprüfen, d.h. es wird z.B. überprüft, ob die Standard Grafcet-Elemente die richtige Anzahl von Ein- und Ausgängen besitzen. Diese Überprüfung geschieht durch Drücken des Buttons „Grafcet-Seite compillieren“ in der Buttonleiste (gelbe Karteikarte).

Wenn die Seite richtig erstellt wurde, meldet WinErs „Die Grafcet-Seite 1 Ablaufsteuerung Behälter wurde fehlerfrei übersetzt“. Bei einer fehlerhaften Erstellung erscheint ein Fenster, in dem die einzelnen Fehler aufgeführt werden. Durch Doppelklicken auf eine Fehlermeldung wird das fehlerhafte Element gekennzeichnet.

Die Seite kann nun geschlossen werden. Damit sie ausgeführt wird, muss sie aktiviert werden. Dies erreicht man durch Klicken der kleinen Ampel in der Buttonleiste oder über das Menü mit *Steuerung – (De)Aktivieren – Grafcet-Seiten (de)aktivieren*.

- **Grafcet-Seite aktivieren**

Nachdem die Grafcet-Pläne im Editor fertiggestellt und getestet wurden, müssen sie aktiviert werden. Das wird über Menü *Steuerung – (De)Aktivieren – Grafcet-Seiten (de)aktivieren* gemacht. Dazu muss die Grafcet-Seite durch markieren und betätigen des Buttons Einfügen auf die rechte Seite überführt werden.

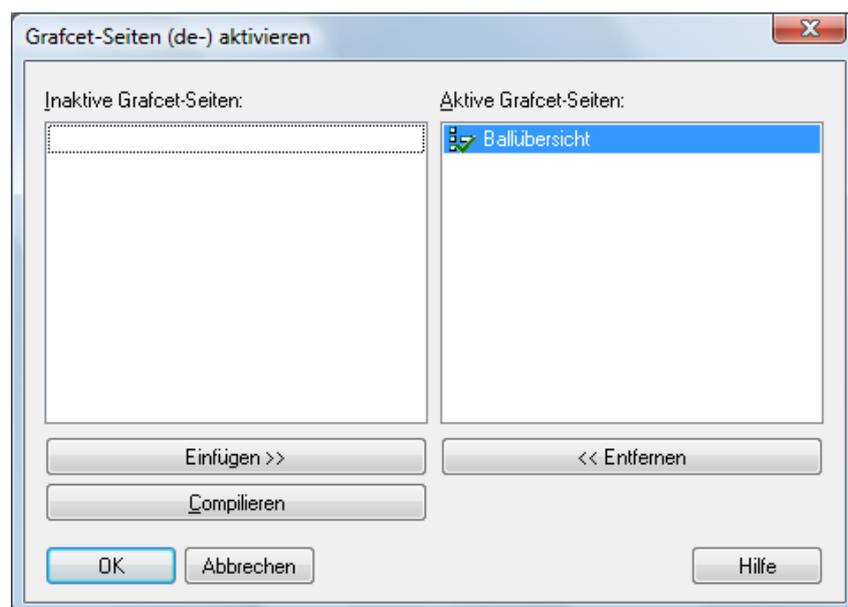


Abb. 113 Grafcet-Seite aktivieren

6.4.6 Funktionsgeber-Ansicht

Der Funktionsgeber-Block ermöglicht die Verwendung von stützstellenbasierten Interpolationen in Blockstrukturen.

Bevor ein Funktionsgeber auf einer Blockstrukturseite verwendet werden kann, muss er unter dem Menüpunkt *Bearbeiten -> Spezielle Blöcke -> Funktionsgeber* definiert worden sein. Ein Funktionsgeber-Block hat jeweils einen analogen Ein- und Ausgang, $u(t)$ und $y(t)$.

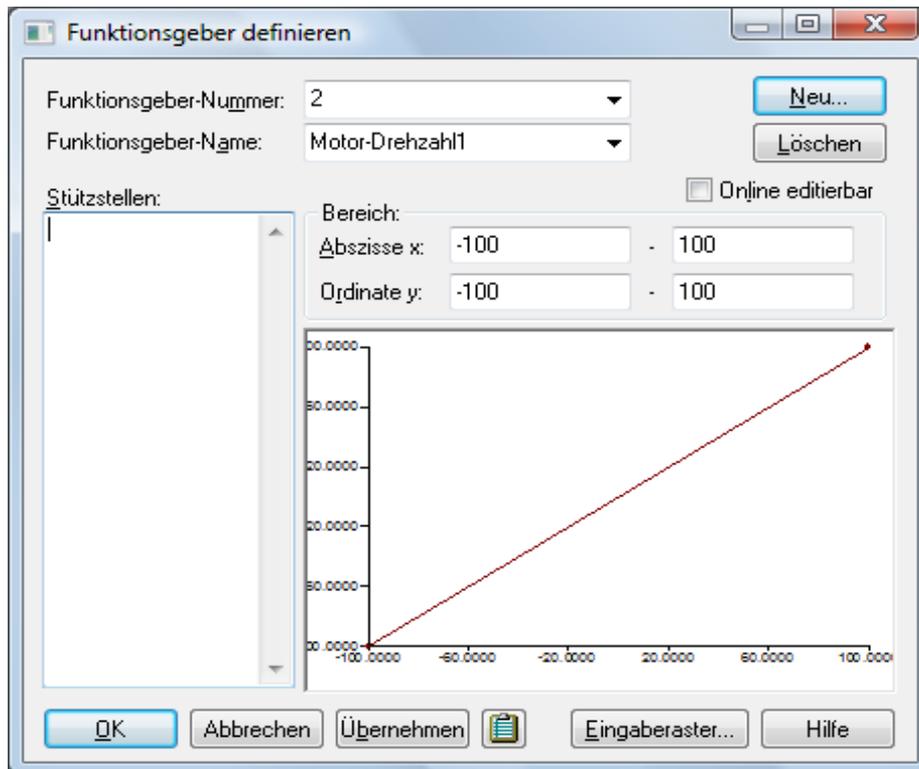


Abb. 114 Funktionsgeber definieren

Wird ein Funktionsgeber-Block auf einer Seite verwendet, muss diesem Block eine Funktionsgeber-Definition zugewiesen werden (es sind ja im Normalfall mehrere verschiedene Funktionsgeber definiert). Dies geschieht während der Erstellung der Seite durch Doppelklicken auf den Block und Auswahl der gewünschten Definition aus der erscheinenden Liste.

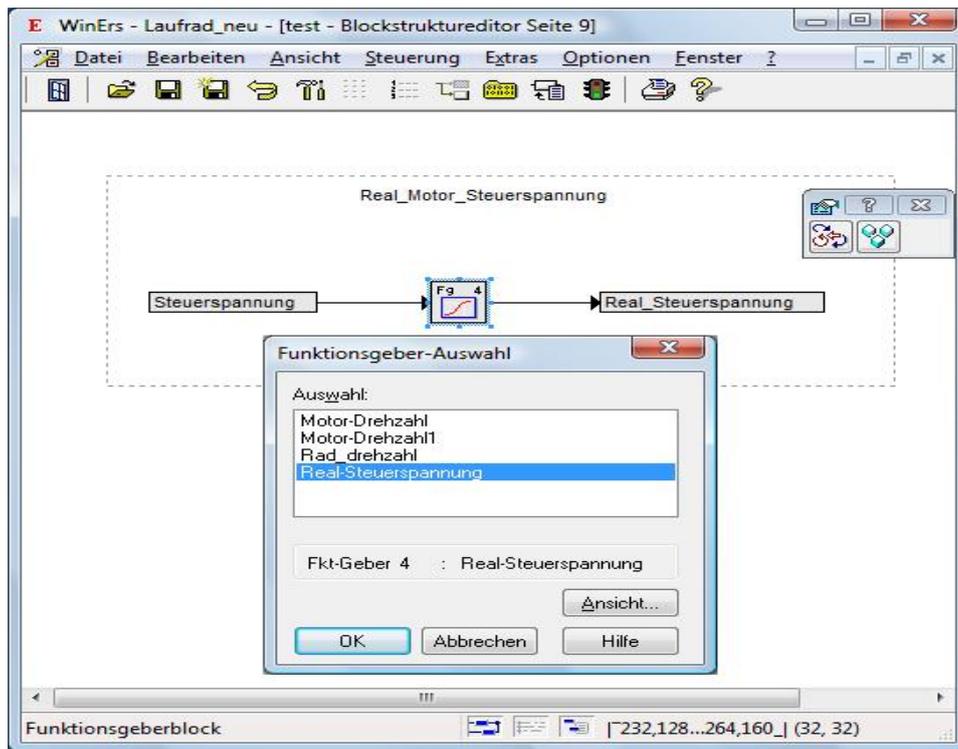


Abb. 115 Funktionsgeberblock-Auswahl

Über eine Verknüpfung kann der Unterfenster des Funktionsgeber-Ansicht geöffnet werden. Die folgenden Einstellungen können für die Verknüpfungsschaltfläche vorgenommen werden:

- Unter „Verknüpfungsart“ wird die Art der Verknüpfung festgelegt. Wählt man aus der Liste die gewünschte Verknüpfung „Funktionsgeber öffnen“.
- Unter „Auswahl“ wählt man den gewünschten Funktionsgeber-Block aus.

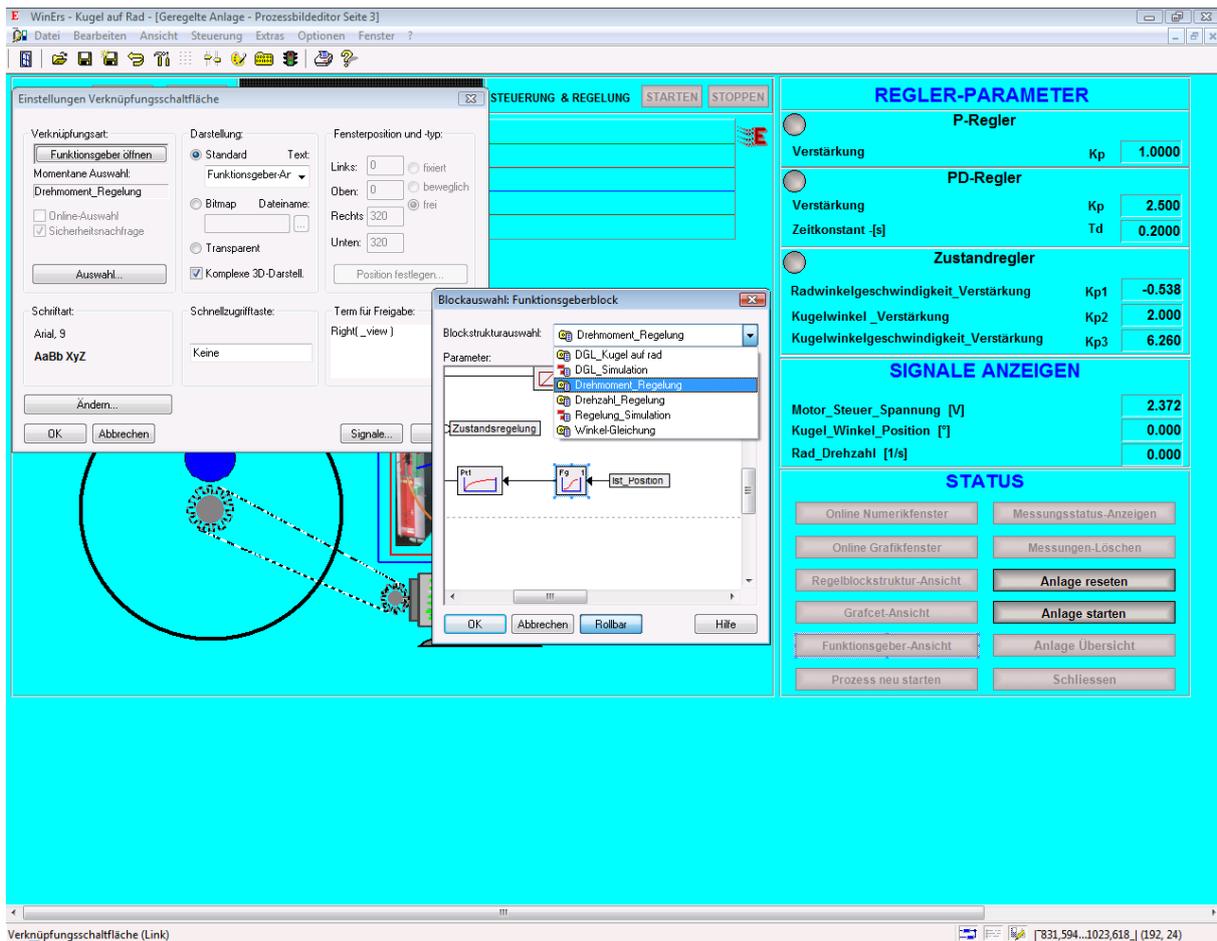


Abb. 116 Verknüpfung einstellen

Wenn man den Button „Funktionsgeber-Ansicht“ drückt, wird dann der Ansicht des Funktionsgebers geöffnet.

Der Funktionsgeber-Block hat keine einstellbaren Parameter. Gleichwohl kann ein Dialogfenster geöffnet werden, in dem der Funktionsgeber und sein aktueller Zustand grafisch und numerisch dargestellt werden.

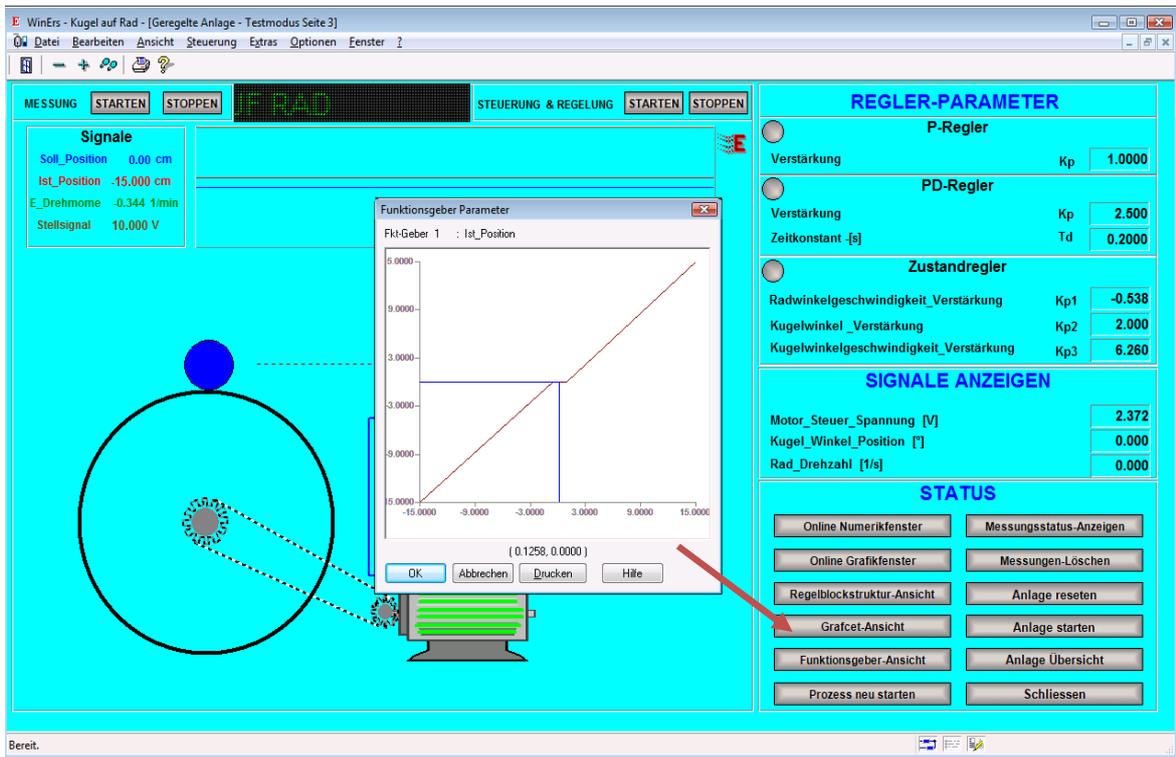


Abb. 117 Funktionsgeber-Ansicht

6.4.7 Prozess-Neustarten

Wenn man merkt, dass das Projekt nicht einwandfrei arbeitet, dann drückt man den Button „Prozess-Neustart“.

Bei einem Neustart wird die Prozess-Task WRPServ neu initialisiert.

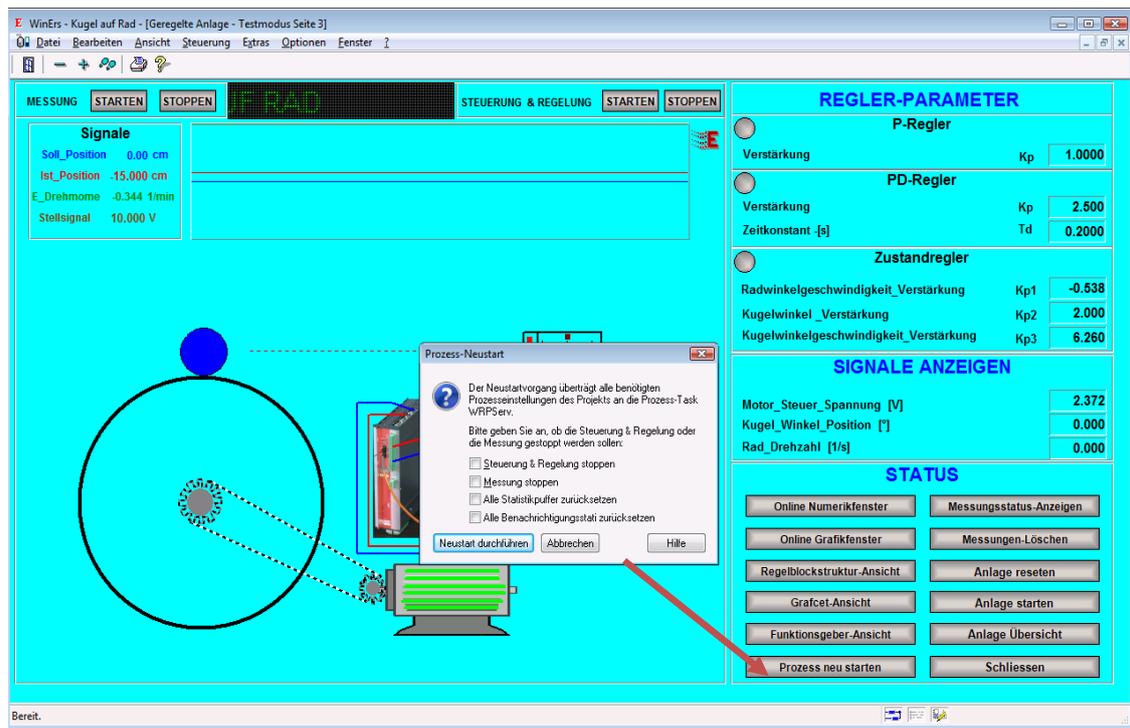


Abb. 118 Prozess-Neustarten

6.4.8 Messungsstatus-Anzeigen

Im Dialogfenster Messungsstatus wird der Zustand der aktuellen Messung angezeigt, sofern eine Messung läuft. Ansonsten wird lediglich die nächste zu vergebende Messungsnummer angezeigt.

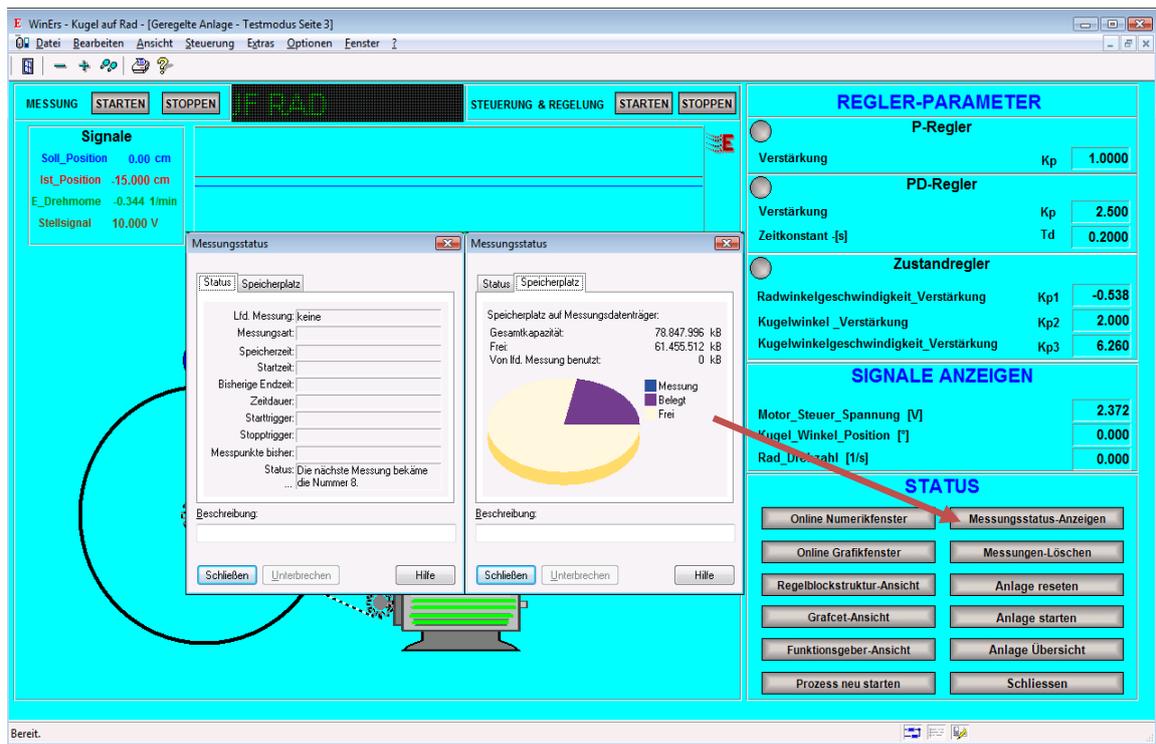


Abb. 119 Messungsstatus-Anzeige

- Registerkarte Status: Status

Im Linken Fenster erscheint die Messungsnummer, der Typ und der Anfangszeitpunkt, der vorläufige Endzeitpunkt, die Speicherzeit, die gespeicherten Messpunkte und der Zustand der laufenden Messung wiedergegeben wird. Läuft eine ereignisgesteuerte Messung, werden die Trigger-Zustände angegeben. Der Messungszustand kann die folgenden Werte annehmen:

- Registerkarte Speicherplatz: Speicherplatz

In dieser Registerkarte wird die Speicherplatzverteilung auf dem Datenträger, der die Messung aufnimmt numerisch und grafisch in Form eines Tortendiagramms angezeigt. Angegeben werden die Gesamtkapazität, der freie Speicherplatz und der, von der laufenden Messung belegte Speicherplatz.

- Messungen löschen

Unter dem Button Messungen löschen können gespeicherte Messungen aus dem Projekt entfernt werden.

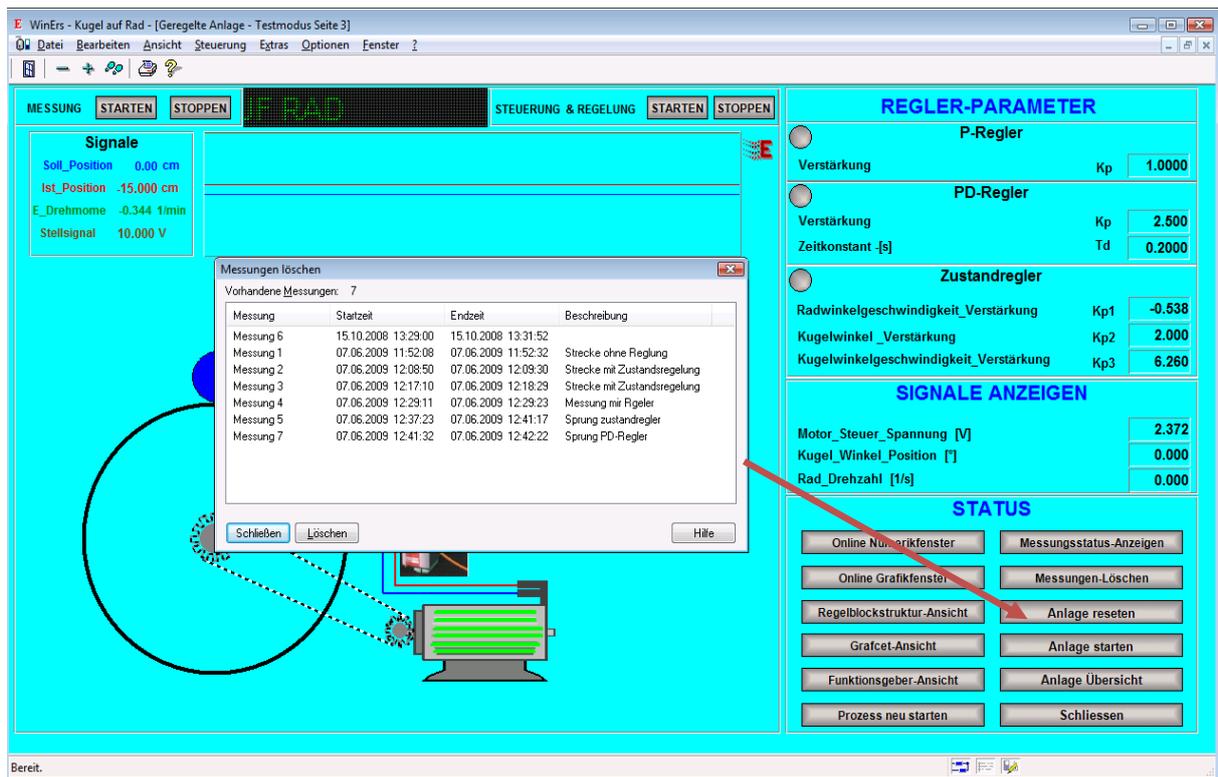


Abb. 120 Messungen löschen

In der Liste Vorhandene Messungen werden alle vorhandenen Messungen des Projektes aufgelistet. Man markiert in der Liste eine oder mehrere zu löschende Messungen und wählt die Schaltfläche Löschen, um den Vorgang auszuführen. momentan laufende Messung kann nicht gelöscht werden.

Über die Schaltfläche Schließen wird die Dialog wieder verlässt.

- **Starten und Stoppen der Messwerterfassung**

Nach dem Start der Messwerterfassung werden alle vorher über den Menüpunkt Messwerterfassung ausgewählten Signale solange auf dem Datenträger gespeichert, bis die Messung gestoppt wird. Über den Dialog zur Anzeige des Messungsstatus kann eine Messung manuell unterbrochen und wieder fortgesetzt werden.

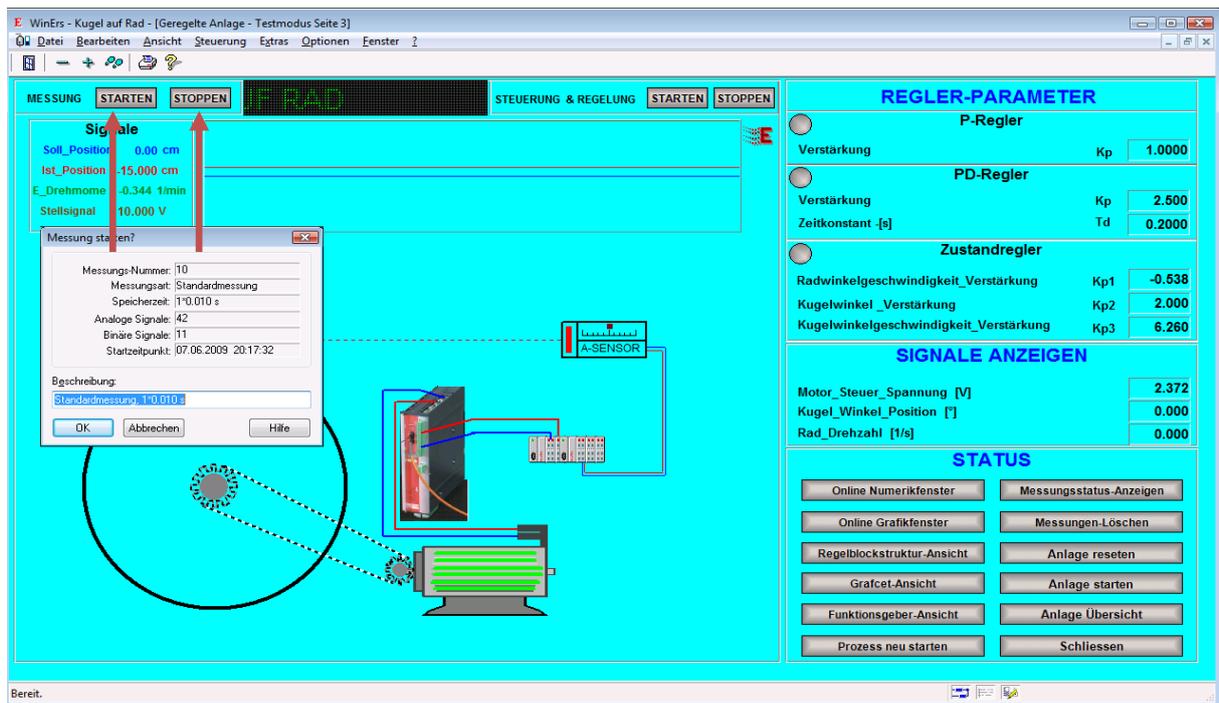


Abb. 121 Starten und Stoppen der Messwerterfassung

Für eine reine Messwerterfassung reicht es aus, dass die Messung gestartet wird. In diesem Fall werden alle Eingangssignale eingelesen und die Messdaten gespeichert. Es muss nicht unbedingt die Steuerung und Regelung laufen.

- **Steuerung & Regelung starten-stoppen**

Das Stoppen der Steuerung und Regelung bewirkt, dass keine Prozesseingänge mehr eingelesen und mehr Prozessausgänge ausgegeben werden. Zudem werden keine Blockstrukturen, kein Anweisungsskript, keine Batch-Rezepturen, keine Protokolle, keine statistischen Berechnungen und keine Alarmer mehr ausgeführt beziehungsweise verarbeitet. Das Starten der Steuerung und Regelung bewirkt, dass alle Prozesseingänge eingelesen und alle Prozessausgänge ausgegeben werden. Zudem werden alle aktivierten Blockstrukturen, das Anweisungsskript, die Batch-Rezepturen, die Protokolle, die statistischen Berechnungen und die Alarmer ausgeführt beziehungsweise verarbeitet.

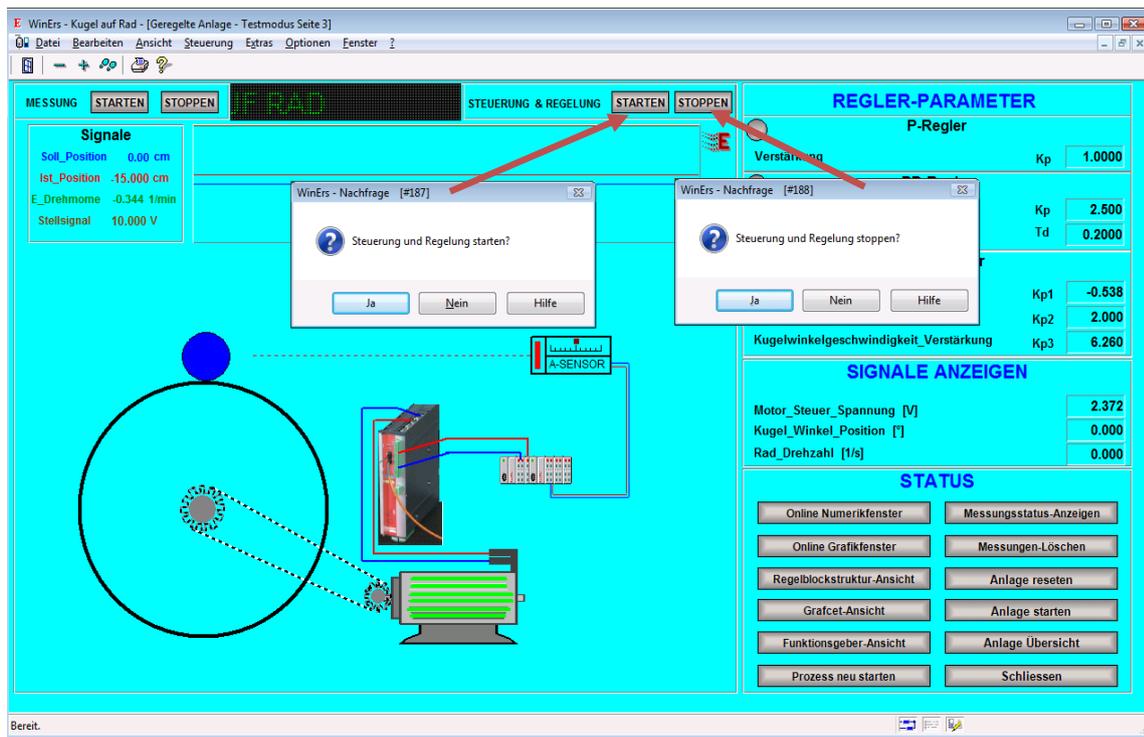


Abb. 122 Steuerung & Regelung starten-stoppen

- **Regler-Auswahl**

In der Prozessvisualisierung liegt die Möglichkeit zwischen vier Regler auszuwählen. Die Auswahlbedingung wird mit Hilfe von Relais-Blöcken und binäre Schaltern realisiert. Es soll als erste zwei binäre Merke (PD-Regler oder Zustandsregler) definiert werden.

- **Binäre Schalter einstellen**

Es soll immer nur ein Regler ausgewählt werden. Gleichzeitig sollen den andern Regler deaktiviert werden.

Aus der Liste „Signalauswahl“ ist der Schaltsignal zu wählen (z.B. PD-Regler).

In die Liste „beim Einschalten zu deaktivieren“ können Signale aufgenommen werden, die beim Einschalten des Schaltsignals zurückgesetzt werden sollen. Über „Neu“ und „Löschen“ werden diese in die Liste aufgenommen oder gelöscht.

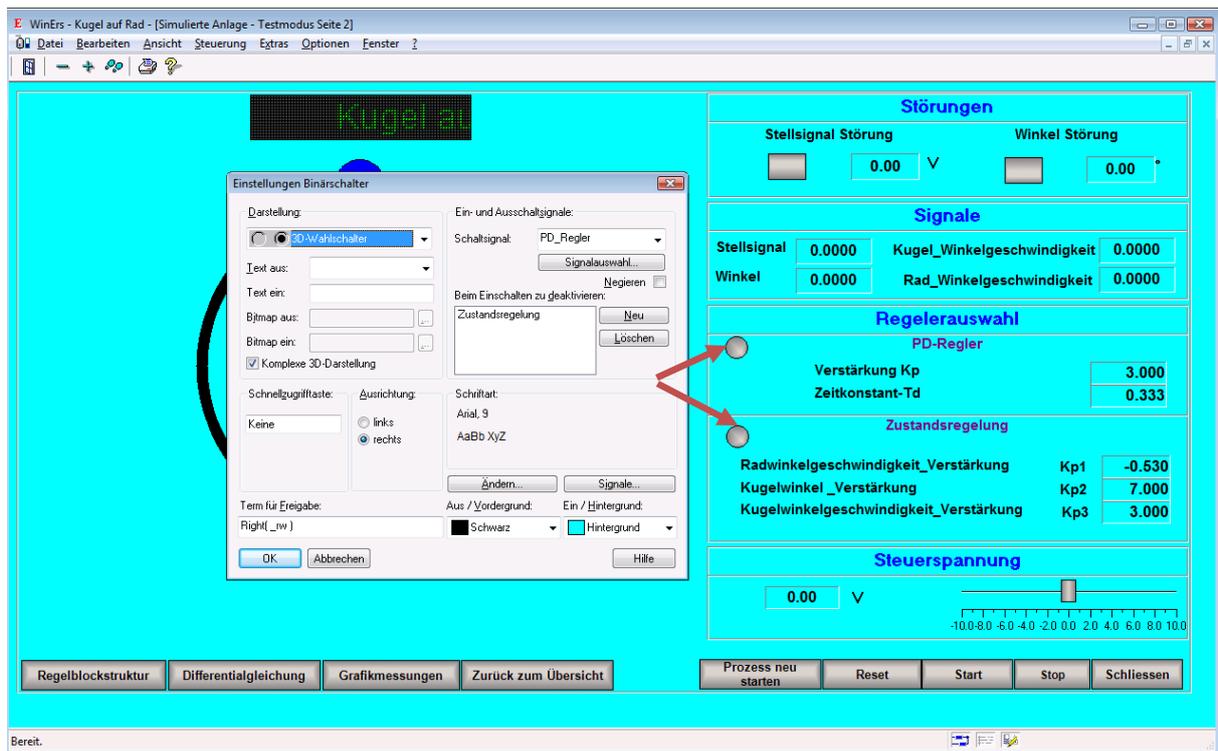


Abb. 123 Einstellungen Binärschalter

Relais-Blöcken

Das Binärrelais hat zwei oder drei binäre Eingänge $E1(t) \dots E3(t)$. Sind nur zwei Eingänge vorhanden, so arbeitet der Block als Schaltrelais, bei drei Binäreingängen arbeitet er als Umschaltrelais. Der Ausgang $A1(t)$ ist binär. Der letzte Eingang oder der mit dem Setzbezeichner S gekennzeichnete Eingang ist der Schalteingang.

Schaltrelais:

$$y(t) = 0 \text{ für } E1(t) = 0 \text{ und } y(t) = u1(t) \text{ für } E1(t) = 1$$

Umschaltrelais:

$$y(t) = u1(t) \text{ für } E1(t) = 1 \text{ und } y(t) = u2(t) \text{ für } E1(t) = 0$$

- **Signaleingabefenster**

Der Signaleingabefenster ist verwendet, um der Ball-Winkel-Position einzulesen.

Es können analoge, binäre oder Textsignale verwendet werden. Das Editieren der Werte findet auf Mausclick in einem Eingabefenster oder Eingabedialog statt.

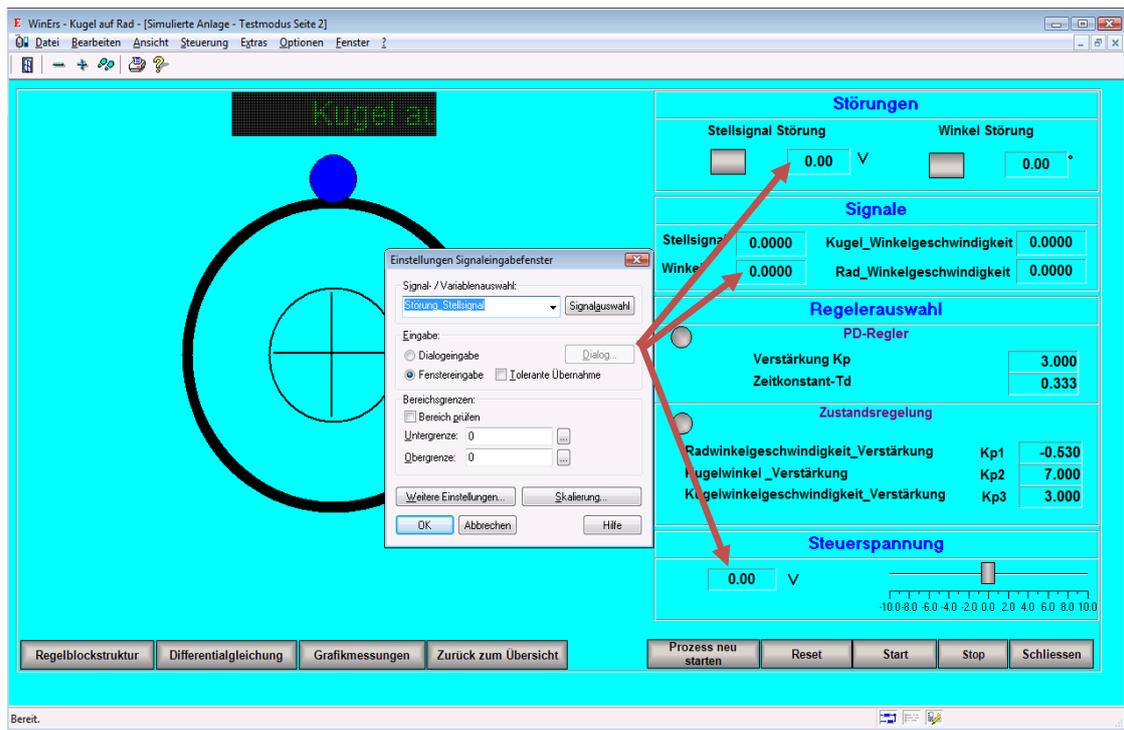


Abb. 124 Signaleingabefenster

- **Dynamische Polygon**

Ein dynamisches Polygon wird als dynamisierter Linienzug, wahlweise mit gefüllter Innenfläche, dargestellt. Dynamisiert wird dabei die Linienfarbe des Polygons.

Wird die Regelung und die Steuerung gestartet, so werden die Eingangssignale als Blau gezeichnet und die Ausgangssignale werden als rot gezeichnet. Dies ist im Feld „Term für Linienfarbe“ einzustellen

Der Term für die Eingangssignale lautet:

- „Regelung und Steuerung? Blau: Weiß“ wenn die Regelung und die Steuerung eingesetzt ist dann soll die Linienfarbe als blau gezeichnet, ansonsten wird als Weiß gezeichnet.

Der Term für die Ausgangssignale lautet:

- „Regelung und Steuerung? rot: Weiß“ wenn die Regelung und die Steuerung eingesetzt ist dann soll die Linienfarbe als rot gezeichnet, ansonsten wird als Weiß gezeichnet.

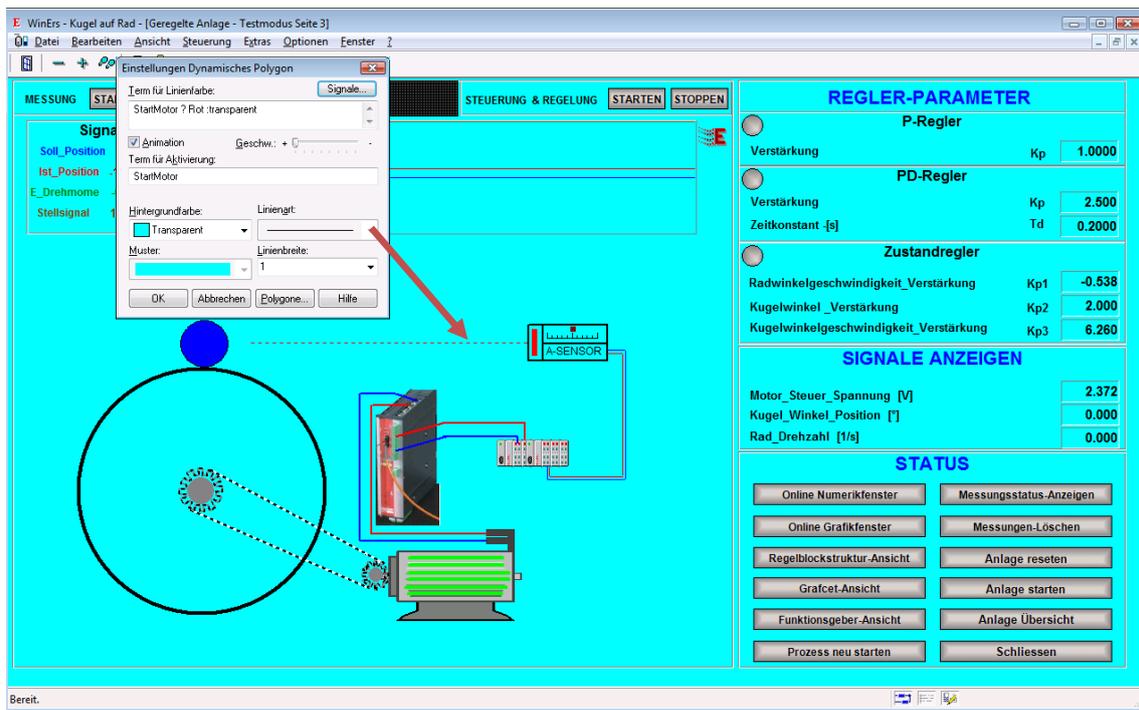


Abb. 125 Dynamische Polynom

- **Laufschrift Einstellungen**

Das Runtext-Control ist ein Prozessbilderweiterungselement (PD-Control) mit dem Laufschriften erzeugt werden können. Es werden mehrere Texte und unterschiedliche Laufschriftmodi unterstützt. Die Darstellung des Runtext-Controls ist an die Darstellung von Großbildschirmen angelehnt und kann dynamische Texte und dynamische Farben verwenden.

Das Runtext-Control verfügt über Standardeinstellungen, wie andere Prozessbildelemente auch und über spezielle Laufschrifteinstellungen. Die Standardeinstellungen sind Schriftart, Hintergrundfarbe, Rahmentyp und Aktivierungsterm. Diese Einstellungen können auch über das Arbeiten mit Elementeigenschaften (Kopieren und Einfügen) bearbeitet werden.

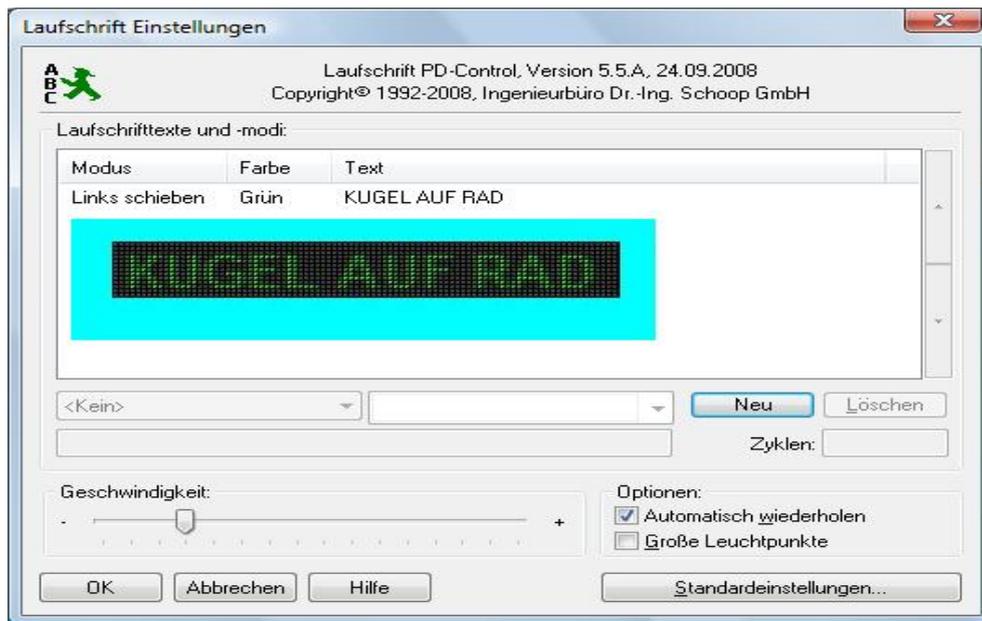


Abb. 126 Laufschrift Einstellungen

- **Signalgrafik**

Das Signalgrafik stellt den zeitlichen Verlauf von Soll-Position, Ist-Position und Ist-Drehzahl dar (y/t-Diagramm), wobei alle Signale in einem Diagramm zusammengefasst sind.

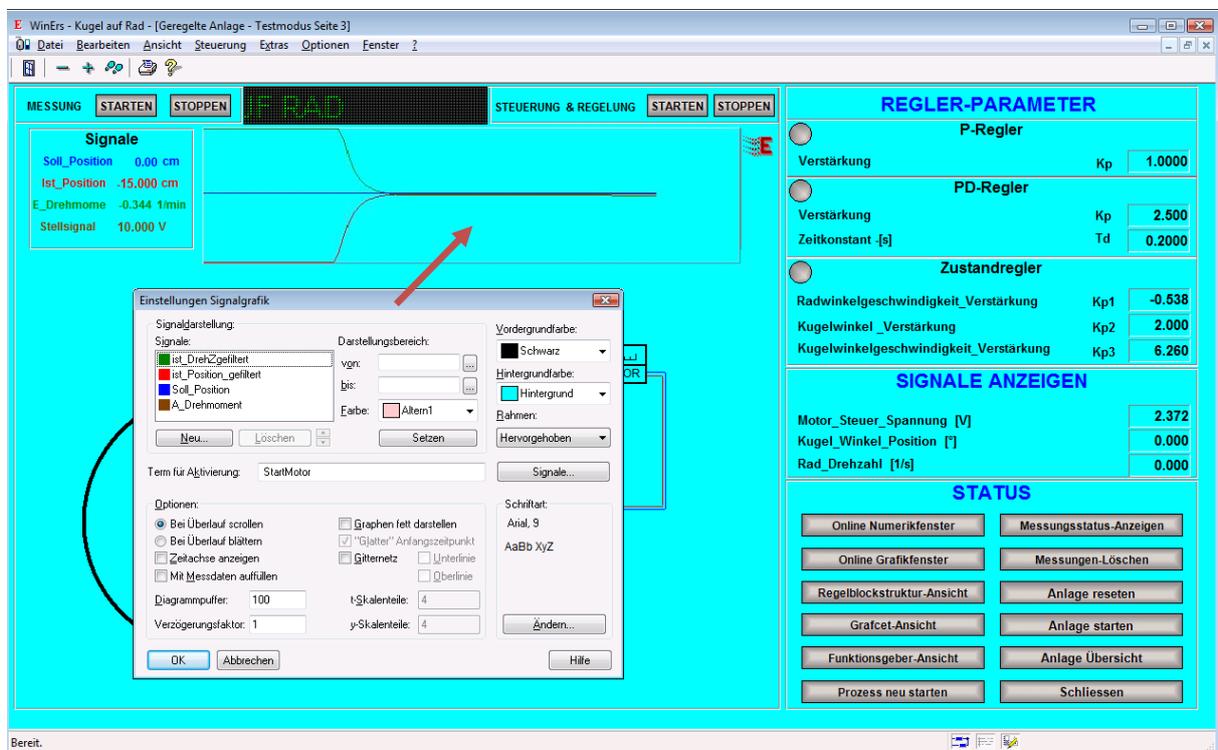


Abb. 127 Signalgrafik

6.5 Visualisierung der Simulation

6.5.1 Kugel Visualisierung

Als erstes soll auf dem Prozessbild die Kugel und das Rad erstellt und positioniert werden. Es wird mit Hilfe der statischen, dynamischen Elemente und Trajektorie entworfen. Es wird in der Werkzeuge-Box das Element Trajektorie  gewählt und in dem Fenster platziert. Beim Doppelklick auf eine Trajektorie öffnet sich deren Einstellungsdialog, dieser Dialogfeld muss damit das unten abgebildete Aussehen haben.

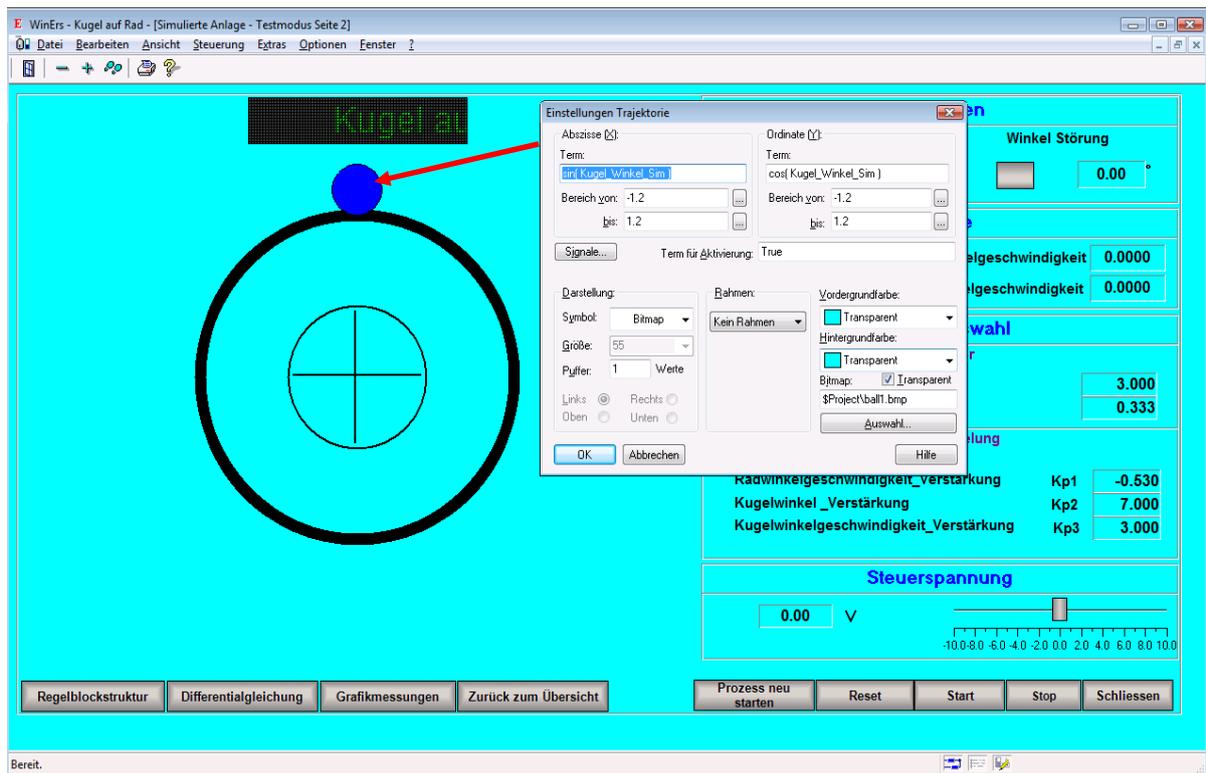


Abb. 128 Einstellung einer Trajektorie

Abzisse (x) und Ordinate (y):

Die Terme bestimmen die aktuellen Werte für die Abszisse (X-Achse) und die Ordinate (Y-Achse). Die hier angegebenen Ausdrücke können Signal- oder zustandsabhängig sein und müssen einen numerischen Wert (Fließkommawert) zurückgeben.

6.5.2 Visualisierung des Rads

Die Umdrehung des Rads wird durch ein dynamisches Rotationspolygon realisiert.

Das dynamische Rotationspolygon ist ein gefüllter oder nicht gefüllter Linienzug, der in der Horizontalen, Vertikalen oder in der Ebene dynamisch gedreht werden kann.

Durch Doppelklicken auf das platzierte Element „dynamisches Rotationspolygon“  kann es aufgeführten Einstellungen vorgenommen werden.

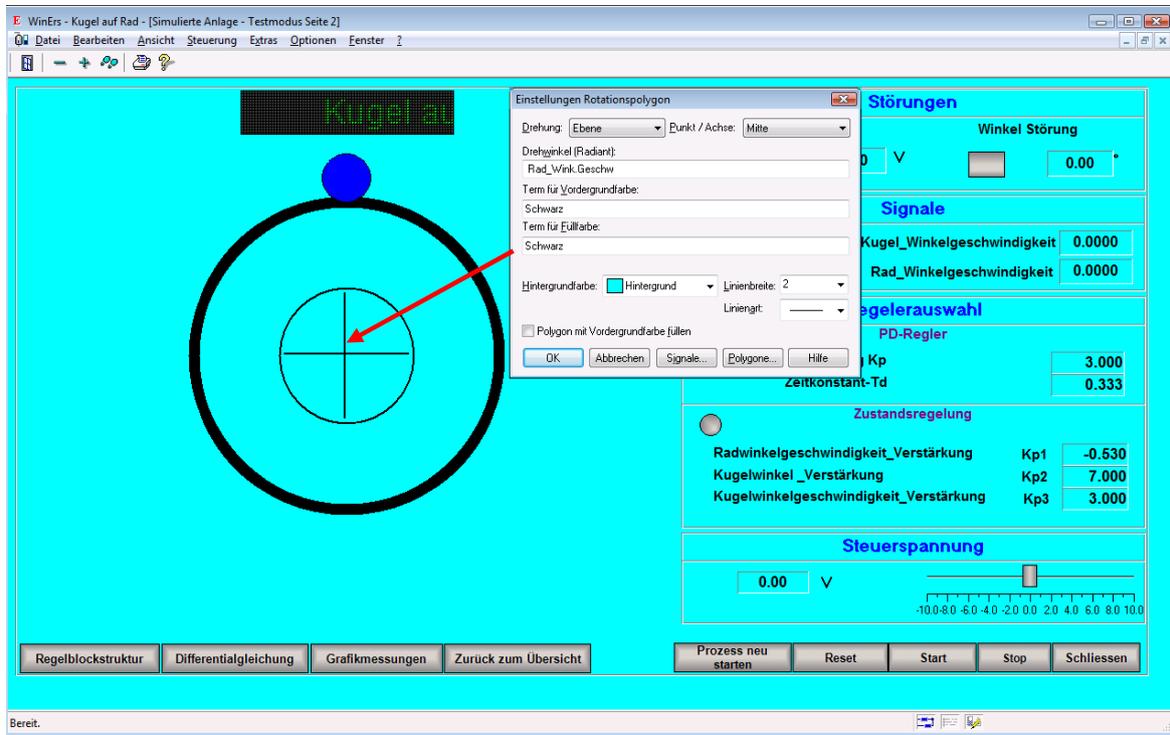


Abb. 129 Einstellung eines Rotationspolynoms

Drehwinkel (Radiant):

Hierunter wird der Drehwinkel in Radiant als veränderlicher dynamischer Term angegeben. Der Term kann Signal- oder Zeitabhängigkeiten enthalten, z.B. $\text{Rad}(\text{pmod}(0, 45) * 8)$ für eine gleichförmige Drehung.

Die Visualisierung des Rads wird durch Ellipse  erstellt.

Beim Doppelklick auf den Ellipsenrand öffnet sich deren Einstellungsdialog (Abb.130)

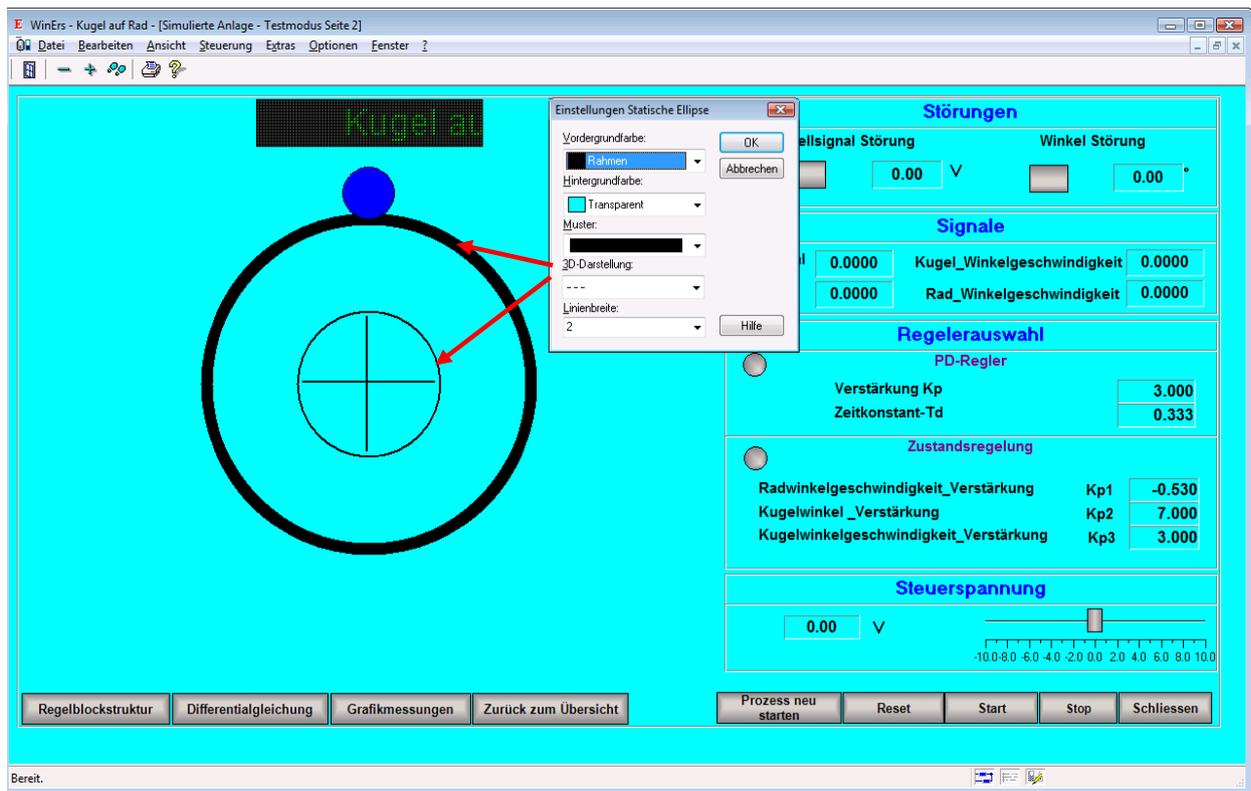


Abb. 130 Einstellung der statische Ellipse

6.5.3 Button zum Starten der Störungen

Das Prozessbild soll nun um Buttons erweitert werden, mit denen Störungen für die Simulation eingegeben werden können.

Aus der Werkzeuge-Box soll die „Verknüpfungsschaltfläche (Link)“  gewählt und platziert. Durch Doppelklicken auf das Element sind die entsprechenden Einstellungen einzugeben. Als Verknüpfungsart wird „Binäres Signal setzen“ gewählt. Über Auswahl kann es festgelegt welches binäre Signal gesetzt werden soll. Hier muss das Signal „Störung“ ausgewählt werden.

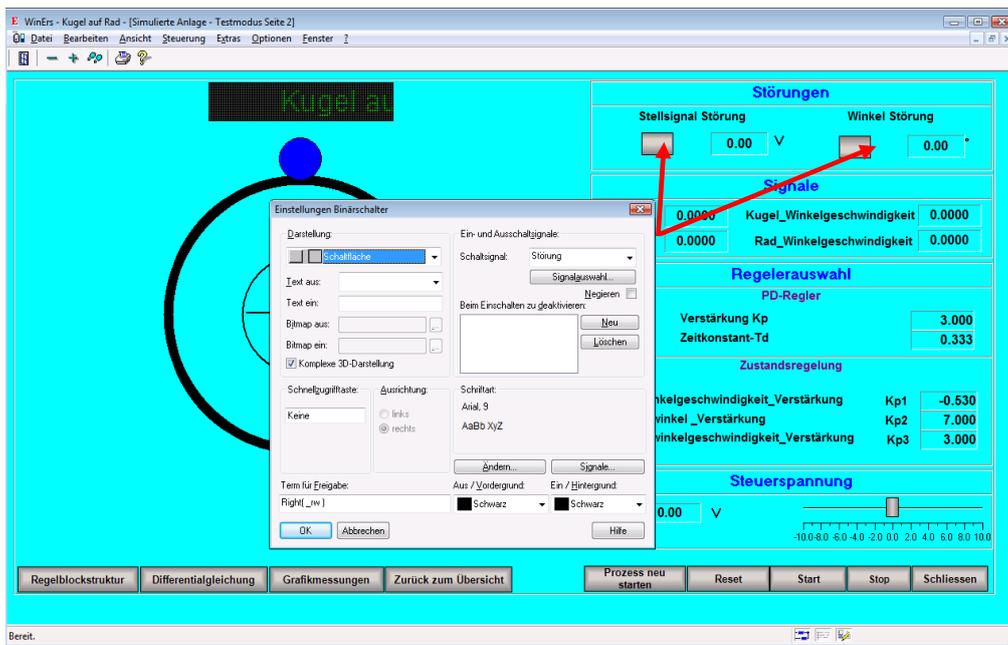


Abb. 131 Einstellungen für den Button zum Setzen der Störung

6.5.4 Button für Rezeptur auslösen

Anstatt die Rezeptur über das Menü auszulösen, gibt es auch die Möglichkeit, die Rezeptur über ein Prozessbild zu aktivieren. Es wird als „Verknüpfungsart“ „Rezeptur auslösen“ eingestellt und über „Auswahl“ die Rezeptur „Rezeptur1“ ausgewählt.

Nach dem Drücken des Buttons „Reset“ wird die Rezeptur aktiviert und damit werden die eingestellten Signal- und Parameterwerte angenommen.

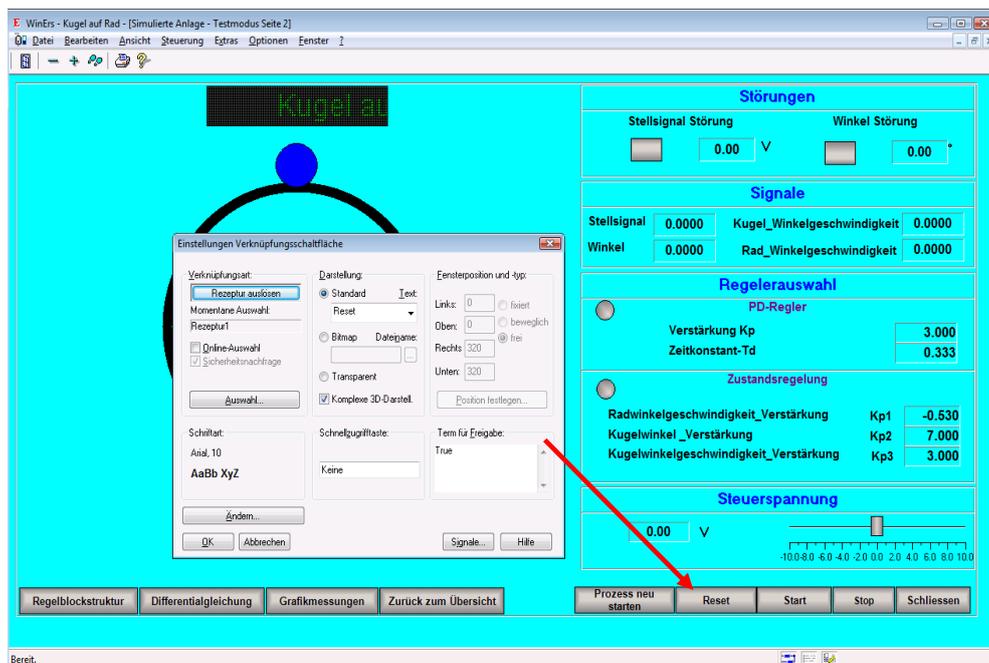


Abb. 132 Rezeptur auslösen über das Prozessbild

6.5.5 Parametereingabefelde

Für die Eingabe des Werts vom Winkelzustand (als Störung), soll das Parametereingabefenster „“, verwendet. Dieses wird aus der Werkzeuge-Box gewählt und positioniert. Durch Doppelklick auf das Element, wird die Parameter unter  ausgewählt.

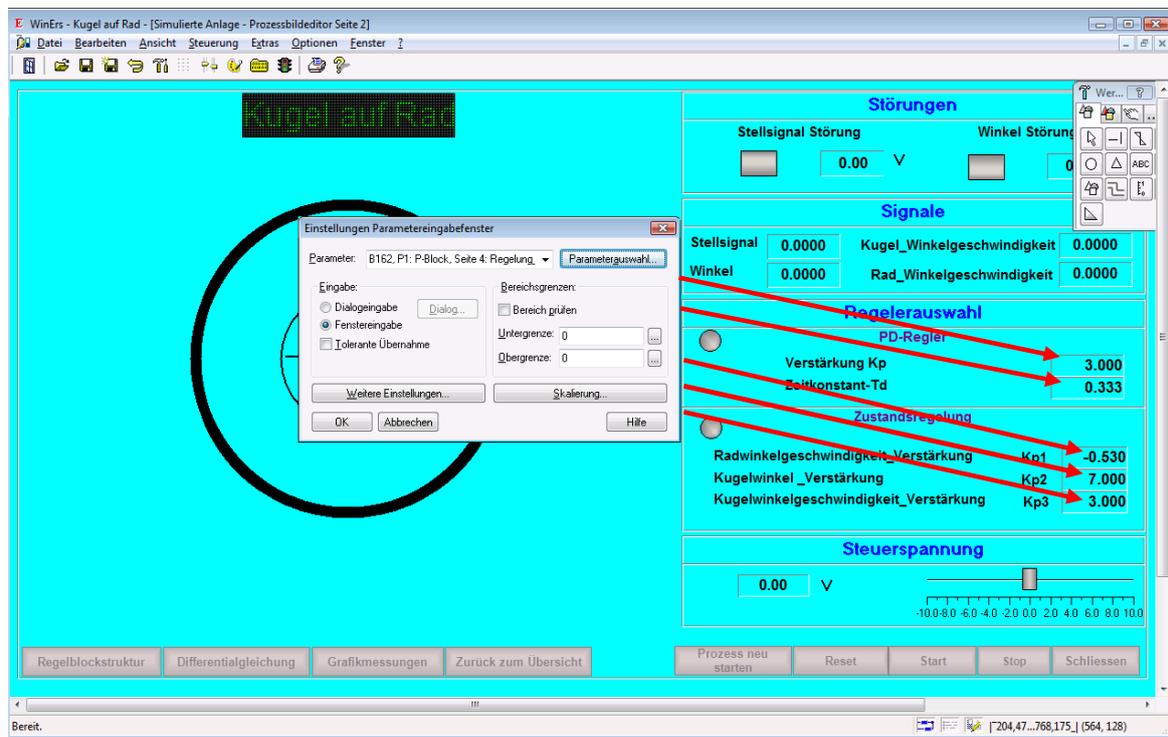


Abb. 133 Parametereingabefeld einstellen

6.5.6 Einstellung der Steuerspannung

Die Verstellung der Steuerspannung wird mit Hilfe des dynamischen Elements „Schieberegler“  realisiert. Das Element ist auszuwählen und zu positionieren.

Durch Markieren des Elements kann man es verschieben und die Größe verändern. Durch Doppelklicken auf das Element werden die entsprechenden Einstellungen eingegeben.

Durch das Einfügen einer Skala  und das Beschriften mit dem „Statischen Text“  kann man das Bild noch verschönern.

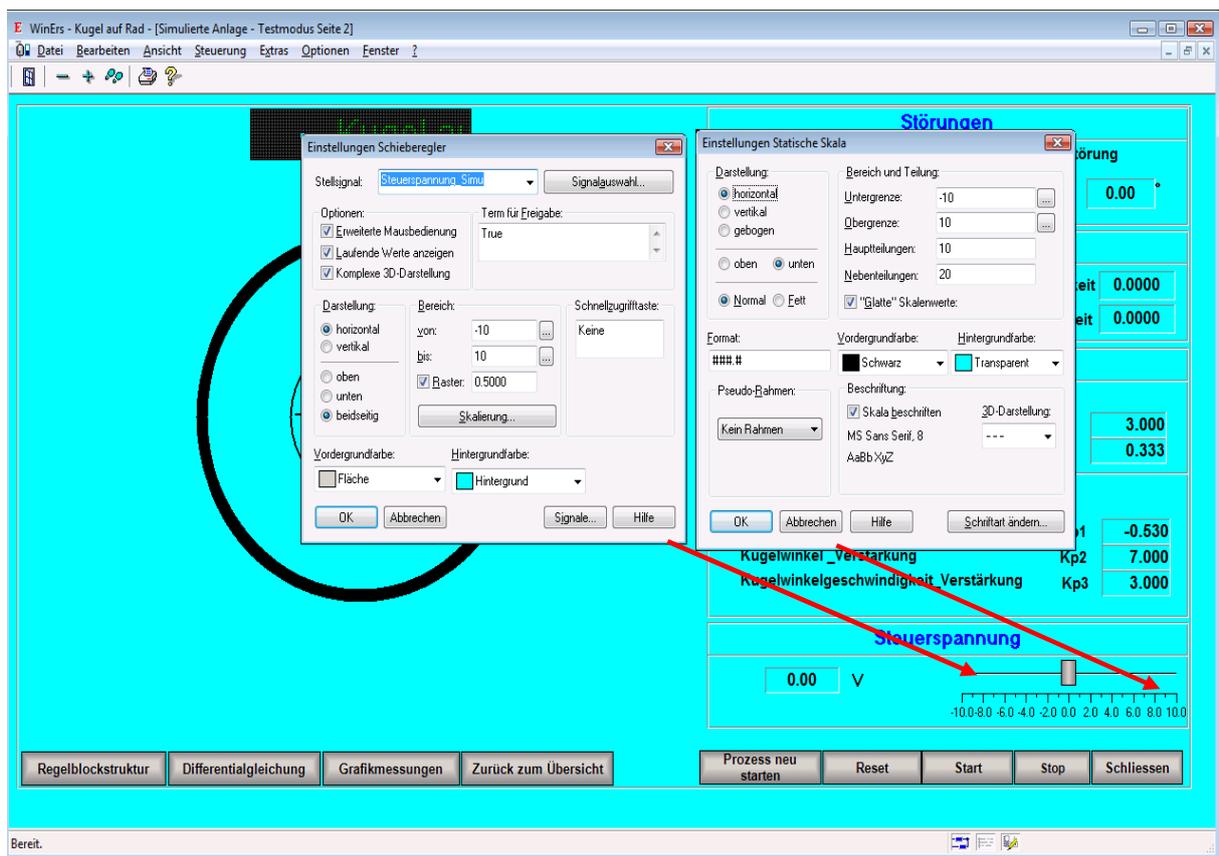


Abb. 134 Einstellung des Schiebereglers und des Statische Skala

Um das Prozessbild zu testen, drückt man auf den Button „Testmodus für Prozessbildansicht“ . Nach den Tests kann man das Fenster schließen. So kehrt man automatisch in den Editier-Modus des Prozessbildes zurück und kann man weiter bearbeiten.

Die Ansicht des Prozessbildes kann über *Ansicht – Prozessbilder* gestartet werden. Somit sieht das Prozessbild für die simulierte Anlage folgendermaßen aus.

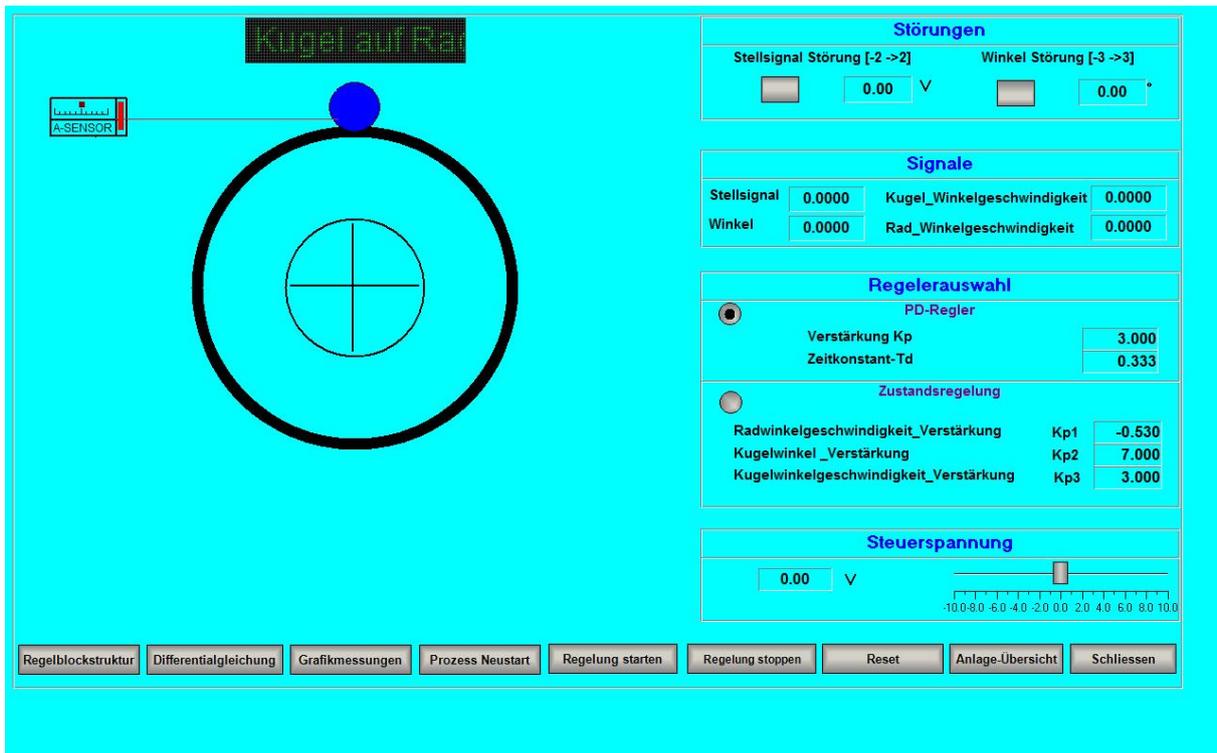


Abb. 135 Übersicht der simulierten Anlage

7. Zusammenfassung

Ziel

Für einen regelungstechnische Versuch, bei dem eine Kugel auf einem rotierenden Rad balanciert werden soll, sollte:

- Ein Prototyp konzipiert und aufgebaut werden
- Ein mathematisches Modell des Systems mit Hilfe der physikalischen Größen erstellen werden.
- Ein Reglentwurf mit unterschiedlichen Regler realisiert werden.
- Eine Simulation des Systems mit Hilfe der mathematische Modellbildung erstellt werden.
- Eine Prozessvisualisierung für das gesamte Projekt realisieren werden.

Methode

Das Modell basiert aus einem Abstandssensor mit einer Zykluszeit von 5ms und einem Meßbereich von 300mm, einem Servomotor AM247 mit einer maximalen Drehzahl von 3000 min^{-1} , einer Umschaltzeit von 5ms, einem Steuergerät der Serie AX2000, einem Rad und einem Buskoppler BK 9000 mit einer Zykluszeit von 10ms.

Die Regelung wird mit einem PD-Regler und einem Zustandsregler realisiert.

Jeder Signalwert des Sensors entspricht die Entfernung zur Kugel und wird in der Reglereinheit ausgewertet. Das Regelprogramm interpretiert eine Änderung der Entfernung des Balls als Bewegung und reagiert, indem das Signal über den Buskoppler zur Motorsteuerung entsprechend neu berechnet wird. Dieses Signal steuert einen Servoverstärker an, welcher die Drehrichtung und Geschwindigkeit des Motors beeinflusst. Das Rad selbst ist über ein Getriebe mit dem Motor verbunden.

Die Radbewegung verursacht ein Wandern der Kugel in die gewünschte Richtung. Während dieser Bewegung verändert sich der Abstand zum Sensor. Diese neue Entfernung wird als Eingangssignal über den Buskoppler BK9000 registriert, zum WinErs-Programm geschickt und der Regelungszyklus wiederholt. Die momentane Zykluszeit beträgt 10ms.

Das Programm zur Regelung wurde mit WinErs implementiert und beinhaltet eine PD-Regelung und eine Zustands-Regelung. Als Echtzeitbetriebssystem kommen PT1-Filter mit eine Zeitkonstante von 0,13ms und Funktionsgeber-Blöcke zur eliminieren der Störungen zum Einsatz. Ein WRP-Server sorgt für die Anbindung der Ein- und Ausgangssignale mit dem Programm WinErs.

Über einer Prozessvisualisierung, kann der Benutzer während der Laufzeit der Gewünschte Regler (über Relais-Blöcke) auswählen und Regelparameter einstellen. Man kann auch

Störungen über das Stellsignal oder Über den Winkel der Kugel eingeben. Ein Wert ungleich 0 resultiert in einer Radbewegung im oder gegen den Uhrzeigersinn, je nach Vorzeichen des Wertes, und die Kugel rotiert auf dem Rad ohne dabei runterzufallen.

Ergebnisse

Mit dem Steuergerät der Serie AX2000 lag die Möglichkeit durch das Driver-Programm die entsprechende Umschaltzeit und die maximale benötigte Drehzahl sowie andere Parameter des Servomotors zu einstellen.

Der Abstandsensor SA1D-LL4 hat eine kleine Zykluszeit (5ms) und ein genügende Messbereich (300mm). Der Sensor hat aber ein Messfehler von $\pm 0,2\text{cm}$. Die Beseitigung der Fehler wurde durch Funktionsgeber-Blöcker ermittelt.

Der PD-Regler ist ein sehr schneller Regler, denn er fügt im Gegensatz zum PI-Regler keinen zusätzlichen Pol in den offenen Regelkreis ein. Gegenüber dem P-Regler kann der PD-Regler ein T1-Glied kompensieren. Der Nachteil der bleibenden Regelabweichung begrenzt seine Verwendung.

Für die Zustandsregelung, umfasst die Arbeit die theoretischen Grundlagen des Reglerentwurfs im Zustandsraum, die Herleitung des mathematischen Algorithmus zur Reglersynthese und die Systemanalyse des Zustandsreglers

Die Vorteile der Zustandsregelung gegenüber anderen Regelungen sind bei mechanischen Systemen mit extremen dynamischen Eigenschaften besonders signifikant. Demgegenüber steht der vergleichsweise hohe mathematische Aufwand zur Synthese der Zustandsregelung. In der Praxis muss daher erwogen werden, ob in jedem Fall der Einsatz einer Zustandsregelung erforderlich und sinnvoll ist. Die Zustandsregelung wird hauptsächlich bei Applikationen anzuwenden sein, bei denen die konventionellen Regelverfahren an ihre Grenzen stoßen. Die Ergebnisse der Diplomarbeit belegen jedoch die Leistungsfähigkeit und praktische Anwendbarkeit des Zustandsregelungskonzepts.

8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Aufbau des System Kugel auf Rad.....	8
Abb. 2 Übersicht der gesamten Anlage	12
Abb. 3 Servomotor AM274M	13
Abb. 4 Auswahlkriterien.....	16
Abb. 5 Rückführung des Resolvers	16
Abb. 6 Maßbild.....	17
Abb. 7 Technische Daten des Servomotors	19
Abb. 8 Radial-/Axial Kräfte.....	20
Abb. 9 Anschlussbild	21
Abb. 10 Gehäuse-Lageeinheiten UCP201	22
Abb. 11 Gehäuse-Lagereinheiten	23
Abb. 12 Aluminiumprofile	24
Abb. 13 Nutenstein Zn.....	25
Abb. 14 Nutenstein St	25
Abb. 15 Zylinderschrauben.....	26
Abb. 16 Rechtwinkelverbindung	26
Abb. 17 Abdeckprofilen	26
Abb. 18 Plexiglasscheiben.....	27
Abb. 19 Vollwelle	27
Abb. 20 Wellenhalter	28
Abb. 21 Zahnriemenantrieb	29
Abb. 22 Synchronriemen	29
Abb. 23 Synchronscheiben.....	30
Abb. 24 Spannhülse	31
Abb. 25 Distanzsensor	35
Abb. 26 Funktionenbezeichnung.....	36
Abb. 27 Entfernungsanzeige	37
Abb. 28 Anschlussschaltbild.....	38
Abb. 29 Servoverstärker AX2000.....	38
Abb. 30 Steckerbelegungen.....	40
Abb. 31 Anschlussplan Übersicht.....	41
Abb. 32 Anschluss an Versorgungsnetz	42
Abb. 33 Resolveranschlussplan.....	42
Abb. 34 Anschlussplan der Analogeingänge	43
Abb. 35 Anschlussplan der Analogausgänge	44

Abb. 36 Anschlussplan der digitalen Eingänge	46
Abb. 37 Anschlussplan der digitalen Ausgänge	47
Abb. 38 Anschlussplan der 24V-Hilfsspannung.....	47
Abb. 39 Übertragungsleitung zwischen PC und AX2000.....	48
Abb. 40 Anschlussplan des Motors AM247M mit AX2000	49
Abb. 41 Beckhoff Buskoppler Bk9000	50
Abb. 42 Buskoppler und Busklemmen	52
Abb. 43 ADS und TCP Modbus.....	53
Abb. 44 ModbusTCP-Protokoll	55
Abb. 45 Buskoppler aufbau	56
Abb. 46 RJ45-Stecker.....	57
Abb. 47 Verbindung zwischen PC mit Ethernet-Karte und BK9000.....	57
Abb. 48 Einstellung der Netzwerkverbindung.....	60
Abb. 49 Einstellung der IP-Adresse	60
Abb. 50 Digital Eingangsklemme	61
Abb. 51 Digital Ausgangsklemme	62
Abb. 52 Analog Eingangsklemme	63
Abb. 53 Analog-Einpeiseklemmen	64
Abb. 54 Analog-Ausgangsklemmen.....	65
Abb. 55 Endklemme	66
Abb. 56 Kugel auf Rad Model	68
Abb. 57 Ablöswinkel der Kugel vom Rad	75
Abb. 58 WinErs-Server (WRPServ).....	77
Abb. 59 Analogsignale definieren	79
Abb. 60 Binärsignale definieren	79
Abb. 61 Treiberinstallation für WRPServ	80
Abb. 62 Hosteigenschaften.....	81
Abb. 63 Kanaluordnung	81
Abb. 64 Kanaluordnung für erste analog Eingang.....	82
Abb. 65 Differentialgleichung definieren	85
Abb. 66 Blockstrukturseiten-Auswahl	85
Abb. 67 Werkzeuge	86
Abb. 68 Blockstrukturseite DGL_Simulation.....	86
Abb. 69 Eingabe der Parameter der DGL.....	87
Abb. 70 Differentialgleichungen mit Blockstruktur.....	88
Abb. 71 grafische Trenddarstellung des Winkels und Steuerspannung	90
Abb. 72 Rezeptur definieren	91

Abb. 73 Zustandsdarstellung mit Rückführvektor	96
Abb. 74 Geschlossene Regelkreis des Systems.....	98
Abb. 75 Einstellung des Rückführvektors	98
Abb. 76 Antwort des Regelkreises auf einen Führungssprung (Zustandsregler).....	99
Abb. 77 Antwort des Regelkreises auf einen Störung (Zustandsregler)	100
Abb. 78 Blockschatbild des Geschlossenen Kreises	102
Abb. 79 Regelungsblockstruktur.....	105
Abb. 80 Einstellung der Parameter	106
Abb. 81 Antwort des Regelkreises auf einen Führungssprung (PD-Regler).....	107
Abb. 82 Verlauf der Regelkreis mit Störung	108
Abb. 83 Regelblockstruktur der Anlage.....	109
Abb. 84 Funktionsgeber definieren.....	110
Abb. 85 PT1-Filter	110
Abb. 86 Begrenzer	111
Abb. 87 Sprungantwort mit PD-Regler.....	112
Abb. 88 Winkel-Umrechnung.....	113
Abb. 89 Rückführvektor	114
Abb. 90 Sprungantwort mit Zustandsregler	115
Abb. 91 Aufbau und Darstellungsebene eines Prozessbildes	116
Abb. 92 Prozessbildname	118
Abb. 93 Prozessbildeditor	118
Abb. 94 Statische Textfeld.....	119
Abb. 95 Startseite-Übersicht.....	120
Abb. 96 Prozessbild Schließen.....	120
Abb. 97 Prozessbildwechsel.....	121
Abb. 98 Prozessbildseite-Einstellungen	121
Abb. 99 Aktivierte Startseite	122
Abb. 100 Übersicht-Prozessbildseite.....	123
Abb. 101 Dynamische Bitmap erstellen	123
Abb. 102 Einstellungsdialog für die Bitmap	124
Abb. 103 Bearbeitung der Übersicht-Seite	125
Abb. 104 Start-Reset Schalter Einstellung	125
Abb. 105 Geregelte Anlage	126
Abb. 106 Verknüpfungsschaltfläche-Einstellungen.....	126
Abb. 107 Online Numerik Fenster	127
Abb. 108 Online Grafik Fenster	128
Abb. 109 Blockstruktur-Ansicht	129

Abb. 110 Grafcet-Ansicht.....	130
Abb. 111 Grafcet-Seite erstellen.....	130
Abb. 112 Grafcet-Seite editieren	131
Abb. 113 Grafcet-Seite aktivieren.....	132
Abb. 114 Funktionsgeber definieren.....	133
Abb. 115 Funktionsgeberblock-Auswahl.....	134
Abb. 116 Verknüpfung einstellen	135
Abb. 117 Funktionsgeber-Ansicht.....	136
Abb. 118 Prozess-Neustarten	137
Abb. 119 Messungsstatus-Anzeige.....	138
Abb. 120 Messungen löschen	139
Abb. 121 Starten und Stoppen der Messwerterfassung	140
Abb. 122 Steuerung & Regelung starten-stoppen	141
Abb. 123 Einstellungen Binärschalter	142
Abb. 124 Signaleingabefenster	143
Abb. 125 Dynamische Polynom	144
Abb. 126 Laufschrift Einstellungen.....	145
Abb. 127 Signalgrafik.....	145
Abb. 128 Einstellung einer Trajektorie.....	146
Abb. 129 Einstellung eines Rotationspolynoms	147
Abb. 130 Einstellung der statische Ellipse	148
Abb. 131 Einstellungen für den Button zum Setzen der Störung	149
Abb. 132 Rezeptur auslösen über das Prozessbild	149
Abb. 133 Parametereingabefeld einstellen	150
Abb. 134 Einstellung des Schieberegler und des Statische Skala	151
Abb. 135 Übersicht der simulierten Anlage.....	152
Abb. 136 Schnittstelleauswahl	163
Abb. 137 Drive-Kommunikation	164
Abb. 138 Startbildschirm	165
Abb. 139 Analoge Werte-Einstellungen	166
Abb. 140 Basiseinstellungen	168
Abb. 141 Motoreinstellungen.....	169
Abb. 142 Drehzahlregler-Einstellungen	171
Abb. 143 Feedback-Einstellungen.....	172
Abb. 144 Stromregler-Einstellungen.....	173

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Sechskantschrauben	28
Tabelle 2 Mindestanzahl der Zähne der Riemenscheibe	32
Tabelle 3 Übertragungsrate	48
Tabelle 4 Eigenschaften des Buskopplers BK9000	50
Tabelle 5 Reaktionszeit des ADS-Kommunkation.....	53
Tabelle 6 Reaktionszeit des Modbus	53
Tabelle 7 Einstellung des DIP-Schalters.....	58
Tabelle 8 Eingabe der IP-Adresse	59
Tabelle 9 Eingabe der Subnetz-Maske.....	59
Tabelle 10 Eigenschaften der Digital Eingangsklemme KL1114.....	61
Tabelle 11 Eigenschaften der Digital Ausgangsklemme KL2114.....	62
Tabelle 12 Eigenschaften der analog Eingangsklemme KL3002	63
Tabelle 13 Eigenschaften der analog Einspeiseklemme KL3052.....	64
Tabelle 14 Eigenschaften der analog Ausgangsklemme KL4032	65
Tabelle 15 Eigenschaften der Endklemme KL9010	66
Tabelle 16 Parameter des gesamt Systems.....	74
Tabelle 17 Zuordnung der analoge Eingangssignale	78
Tabelle 18 Zuordnung der analoge Ausgangssignale	78
Tabelle 19 Zuordnung der binär Eingangssignale	79
Tabelle 20 Zuordnung der binär Ausgangssignale	79
Tabelle 21 Zuordnungssyntax für Zuordnungstexte des Modbus/TCP-Protokolls.....	82
Tabelle 22 Zuordnungssyntax der analoge Eingangssignale	82
Tabelle 23 Zuordnungssyntax der analoge Ausgangssignale	83
Tabelle 24 Zuordnungssyntax der binäre Eingangssignale	83
Tabelle 25 Zuordnungssyntax der binäre Ausgangssignale.....	83
Tabelle 26 Allgemeine Zuordnung des Modbus/TCP-Protokolls	84

10. Symbolverzeichnis

m_{Kugel}	Masse der Kugel	(siehe Gl.12)
m_{Scheibe}	Masse der Scheibe	(siehe Gl.58)
m_{Stange}	Masse der Welle	(siehe Gl.58)
R_{Stange}	Radius der Welle	(siehe Gl.58)
r_{Kugel}	Radius der Kugel	(siehe Abb.58)
r'_{Kugel}	Abstand zwischen Zentrum der Kugel und Rand des Rads	
R_{Rad}	Radius des Rads	(siehe Abb.58)
R'_{Rad}	$R_{\text{Rad}} + r'_{\text{Kugel}}$	(siehe Abb.58)
J_{Kugel}	Trägheitsmoment der Kugel	(siehe Gl.12)
J_{Rad}	Trägheitsmoment des Rads	(siehe Gl.12)
g	Fallbeschleunigung	(siehe Gl.12)
X	X – Koordinate der Massekugel	(siehe Abb.59)
Y	Y – Koordinate der Massekugel	(siehe Abb.59)
φ	Winkel der Kugel zur Startpunkt	(siehe Abb.59)
ω	Winkelgeschwindigkeit der Kugel	(siehe Gl.65)
Ω	Winkelgeschwindigkeit des Rads	(siehe Gl.14)
$\dot{\Omega}$	Winkelbeschleunigung des Rads	(siehe Gl.15)
A	Systemmatrix	(siehe Gl.21)
b	Eingangsmatrix	(siehe Gl.21)
c	Ausgangsmatrix	(siehe Gl.21)
d	Durchgangsmatrix	(siehe Gl.21)
$x(t)$	Zustandsvektor	(siehe Gl.14)
$u(t)$	Eingangsgrößenvektor	(siehe Gl.21)
$y(t)$	Ausgangsgrößenvektor	(siehe Gl.26)
I	Einheitsmatrix	(siehe Gl.81)
S	Steuerbarkeitsmatrix	(siehe Gl.86)
\det	Determinante	(siehe Gl.80)
T_R	Transformationsmatrix	(siehe Gl.94)
A_R	Systemmatrix des transformierten Systems	(siehe Gl.97)
b_R	Eingangsmatrix des transformierten Systems	(siehe Gl.100)
c_R	Ausgangsmatrix des transformierten Systems	(siehe Gl.103)
q^T	Die Letzte Zeile der inverse Steuerbarkeitsmatrix	(siehe Gl.93)
α	Polynomvektor	(siehe Gl.112)
Γ_R	Parametervektor	(siehe Gl.115)

r_R^T	Transponierter Polynomvektor	(siehe Gl.117)
r^T	Rückführvektor	(siehe Gl.117)
$G_{s(\Omega)}$	die Übertragungsfunktion der Winkelgeschwindigkeit	(s Gl.130)
$G_{s(\varphi)}$	Übertragungsfunktion der Winkel	(siehe Gl.133)
v	Die Geschwindigkeit der Kugel	(siehe Gl.65)
ΔE_{pot}	Summe der potontielen Energie	(siehe Gl.61)
ΔE_{kin}	Summe der kinitische Energie	(siehe Gl.61)

11. Literaturverzeichnis

- 1 www.schoop.de
- 2 www.beckhoff.de/Antriebstechnik
- 3 <http://www.hfb-waelzlager.de/Inhalte/pdf/UCPd.pdf>
- 4 www.item.info.de
- 5 www.misumi.de
- 6 <http://www.idec.de>
- 7 www.beckhoff.de
- 8 www.imrt.ethz.ch
- 9 Arbeitsbuch zu Tipler/Mosca Physik für Wissenschaftler und Ingenieure 2.Auflage
- 10 www.winners.de

Von Seite 4 bis 11 Rachid

Von Seite 12 bis 49 Arraki

Von Seite 49 bis 107 Rachid

Von Seite 108 bis 143 Arraki

Von Seite 144 bis 148 Rachid

Von Seite 149 bis 152 Arraki

12. Anhang

Inbetriebnahmesoftware DRIVE.EXE

Die Inbetriebnahmesoftware stellt die Kommunikation zwischen PC und AX2000 und ist dazu bestimmt, die Betriebsparameter der Servoverstärker AX2000 zu ändern und zu speichern. Der angeschlossene Servoverstärker kann mit Hilfe der Software in Betrieb genommen werden – dabei kann der Antrieb mit den Service-Funktionen direkt gesteuert werden.

Erstellen der Verbindung

Man schließt die serielle Übertragungsleitung an die serielle Schnittstelle des PC und an die serielle Schnittstelle X6 des Servoverstärkers an. Danach schaltet man die 24V-Spannungsversorgung des Servoverstärkers ein.

Durch Klicken auf der installierten Software  öffnet sich der unten stehende Fenster.

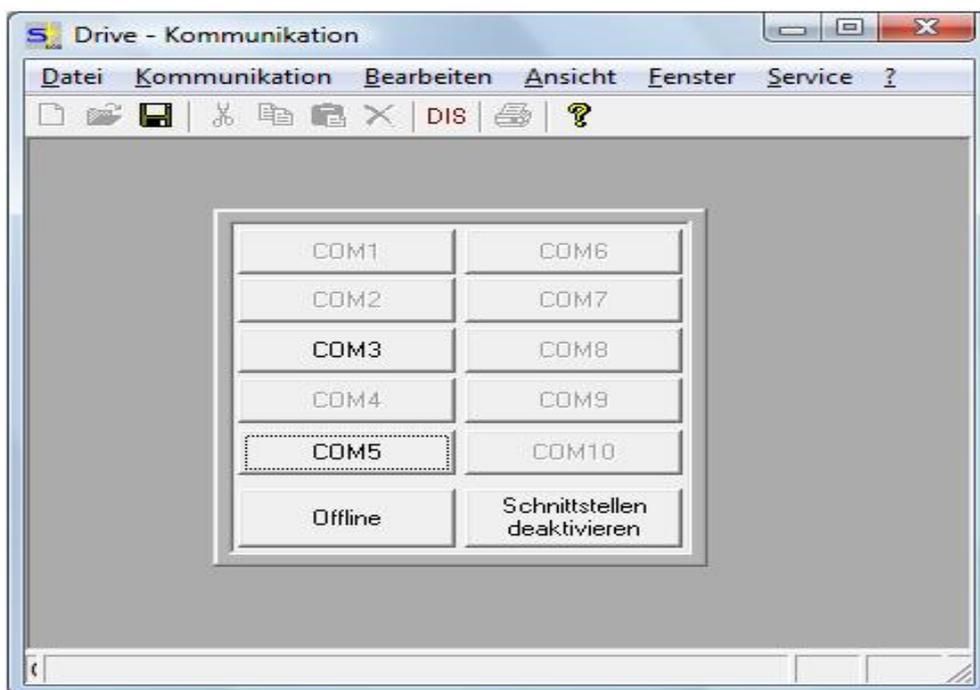


Abb. 136 Schnittstelleauswahl

Man wählt die Schnittstelle, an die der Servoverstärker AX2000 angeschlossen ist (COM 5). Dann versucht der Software ein Verbindung zum Servoverstärker aufzubauen.

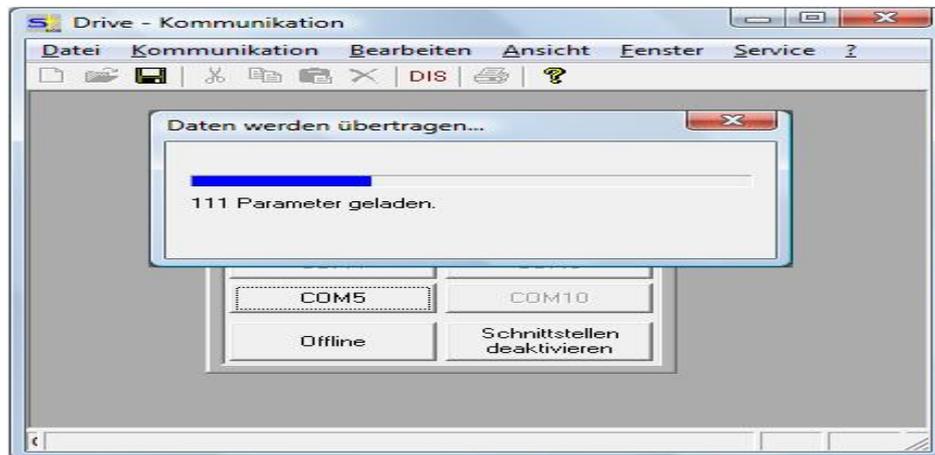


Abb. 137 Drive-Kommunikation

Wenn eine Kommunikation zustande kommt, werden die Parameter aus dem Servoverstärker ausgelesen. Danach öffnet sich der folgende Startbildschirm.

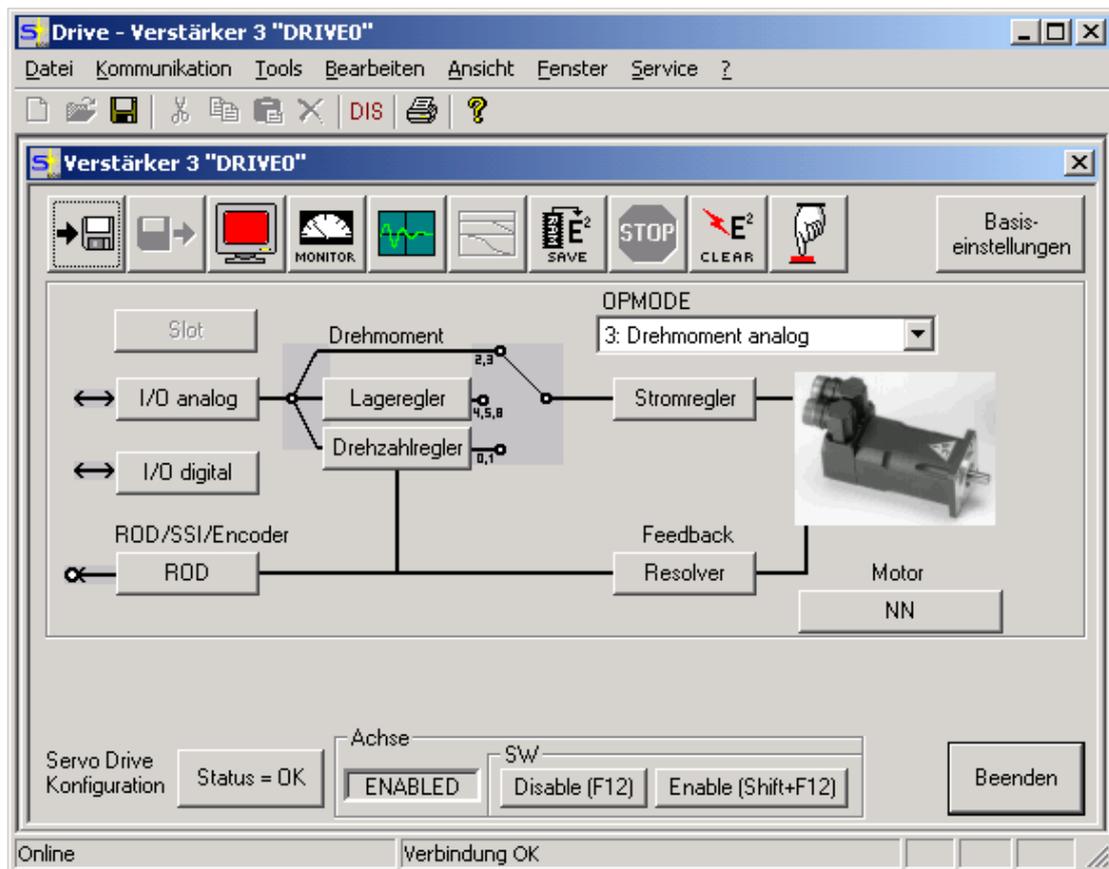


Abb. 138 Startbildschirm

Einstellungen

Analoge Werteeinstellung

Durch die Auswahl der Schaltfläche I/O analog im Startbildschirm, erscheint das folgende Fenster (Abb.3-45).

Unter diese Fenster sind die analogen Werte einzustellen.

Die maximale benötigte Geschwindigkeit des Motors in dieser Aufgabe, ist 210 1/min.

Dieser Wert ist im Feld Skalierung einzustellen.

- Offset: Dient der Kompensation der Offsetspannungen von CNC-Steuerung und der analogen Sollwerteingänge 1 (ANOFF1) bzw. 2 (ANOFF2). Als Offset-Wert wird -30mV eingestellt.
- T- Sollwert: Für Sollwert 1 (Abtaste 8 kHz) kann man hier eine Filterzeitkonstante eingeben (Filter 1. Ordnung)

- Monitor ½: Die Ausgänge ANALOG-OUT1 (ANOUT1) und ANALOG-OUT2 (ANOUT2) liefern je nach Anwahl von der Inbetriebnahme-Software verschiedene analoge Ist- bzw. Sollwerte.

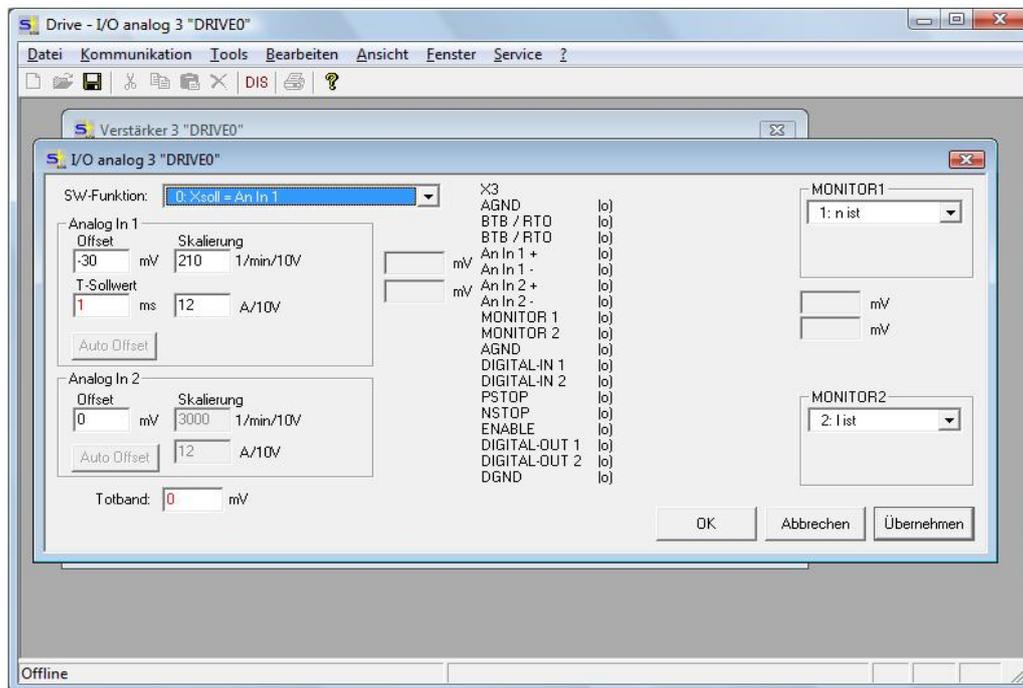


Abb. 139 Analoge Werte-Einstellungen

Basiseinstellungen

Unter der Schaltfläche Basiseinstellungen im Startbildschirm sind die folgenden Parameter einzustellen

- Ballastwiderstand: dieser Wert ist nur zu ändern wenn ein externer Bremswiderstand verwendet wird. Diese Aufgabe benötigt keinen zusätzlichen Bremswiderstand.
- max. Netzspannung: Die maximale Netzspannung beträgt 480V.
- Baudrate CAN Bus: Eingabe der Baudrate (10, 20, 50, 100, 125, 250, 333, 500, 666, 800, 1000 kBaud) des Verstärkers. Die Übertragungsrate wird im Feldbus (CANopen) und bei der Parametrierung der Servoverstärker in Mehrachssystemen benötigt (siehe Produkthandbuch). Mit der Tastatur auf der Servoverstärker-Frontplatte können Sie die Baudrate ebenfalls einstellen. Die Baudrate beträgt 500 KBaud.

- Adresse: Eingabe der Stationsadresse (1...63) des Verstärkers. Diese Nummer wird im Feldbus (CANopen, PROFIBUS DP, SERCOS etc.) und bei der Parametrierung der Servoverstärker in Mehrachssystemen zur eindeutigen Identifikation des Servoverstärkers im System benötigt. Die Adresse wird in der Inbetriebnahme-Software auf jeder Bildschirmseite in der Titelleiste angezeigt, sofern man online arbeitet. Im offline-Betrieb wird nicht die tatsächliche Stationsadresse angezeigt, sondern eine Zahl grösser 1000. Daran kann man den offline-Modus sofort erkennen.
- Mit der Tastatur auf der Servoverstärker-Frontplatte kann man die Stationsadresse ebenfalls einstellen
- Nach Verändern der Baudrate müssen die 24V-Hilfsspannungs-Versorgung der Servoverstärker aus- und wieder eingeschaltet werden.
- Eine Netzphase fehlt: Man kann entscheiden, ob bei Fehlen einer Netzphase die Warnung „n05“ oder der Fehler „F19“ erzeugt wird. „F19“ führt zum Abschalten der Endstufe, „n05“ wird als Meldung behandelt.
- DW:Ist die Definition der Überwachungszeit (Watch-Dog) für die Feldbus/Slot-Kommunikation. Die Überwachung ist nur dann aktiv, wenn der Wert grösser 0 ist und die Endstufe freigegeben ist. Falls die eingestellte Zeit abgelaufen ist, ohne dass der Timer neu getriggert wurde, so wird die Warnung n04 (Ansprechüberwachung) generiert und der Antrieb angehalten. Der Verstärker bleibt weiterhin betriebsbereit und die Endstufe freigegeben. Bevor ein neuer Sollwert akzeptiert wird, muss diese Warnung mit Reset gelöscht werden.

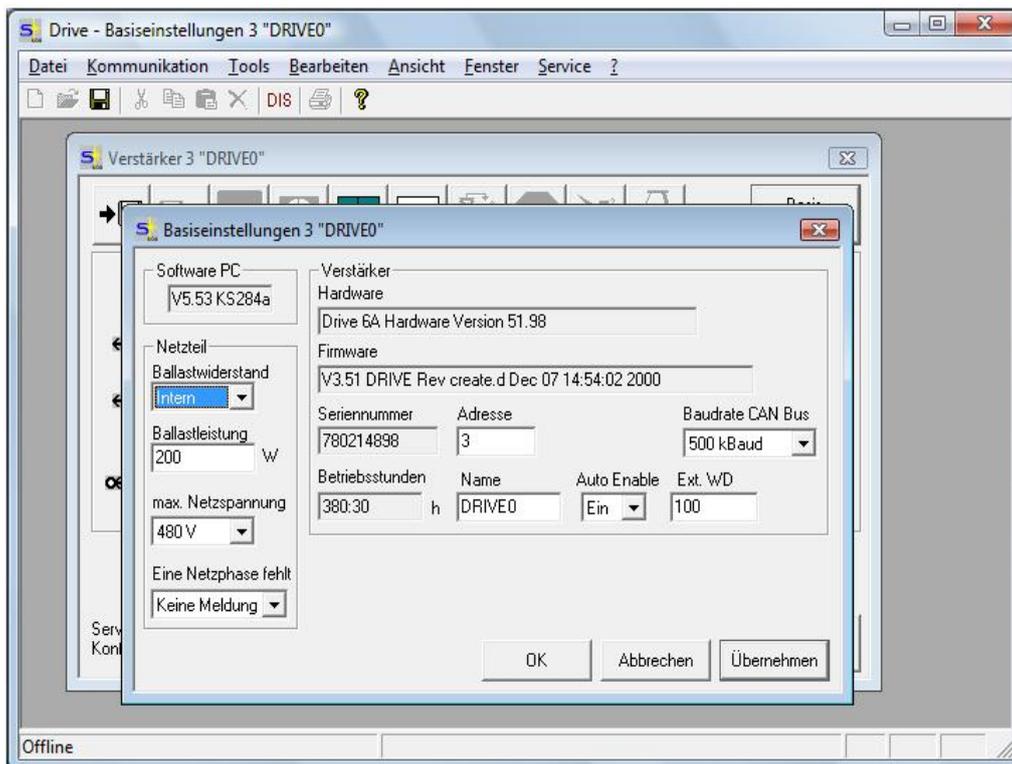


Abb. 140 Basiseinstellungen

Motoreinstellungen

Die Motoreinstellungen sind unter der Schaltfläche Motor im Startbildschirm einzustellen.

- I0: Der Stillstandsstrom ist der Sinus-Effektiv-Stromwert, den der Motor bei Stillstand aufnimmt, um das Stillstandsmoment abgeben zu können (definiert den Maximalwert für die Eingabe von Irms im Stromregler).
- Polzahl: ist die Anzahl der Motorpole pro Umdrehung des Motors (Polzahl =6).Die Stromsollwertvorgabe kann zum Betrieb von 2- bis 250-poligen Motoren eingestellt werden.
- I0max: Der Spitzenstrom (Sinus-Effektivwert) sollte den 4-fachen Nennstrom des Motors nicht übersteigen. Den tatsächlichen Wert bestimmt auch der Spitzenstrom des verwendeten Servoverstärkers (definiert den Maximalwert für die Eingabe von Ipeak im Stromregler).
- L: ist die Statorinduktivität Phase-Phase in mH.
- Grenzdrehzahl (n max): Maximal zulässige Drehzahl des Motors. Begrenzt die Eingabe des Parameters ENDDREHZAHL

- Stromvoreilung: Stromabhängige Phasenvoreilung zur Ausnutzung des Reluktanz-Drehmomentes bei Motoren mit im Läufer eingebetteten Magneten.
- Einsatz/Endwert Phi: Die induktive Phasenverschiebung zwischen Motorstrom und Motorspannung lässt sich bei hohen Drehzahlen kompensieren. Bei gegebenen Spannungsverhältnissen wird hierdurch ein höheres Drehmoment bei Enddrehzahl ermöglicht. Wahlweise lässt sich auch die erreichbare Enddrehzahl bis zu 30% steigern.

Abhängig von der Motordrehzahl wird zwischen Einsatz Phi und der Enddrehzahl die Phasenverschiebung linear bis zum Endwert Phi gesteigert. Die günstigste Einstellung hängt vom Motortyp und der Enddrehzahl ab.

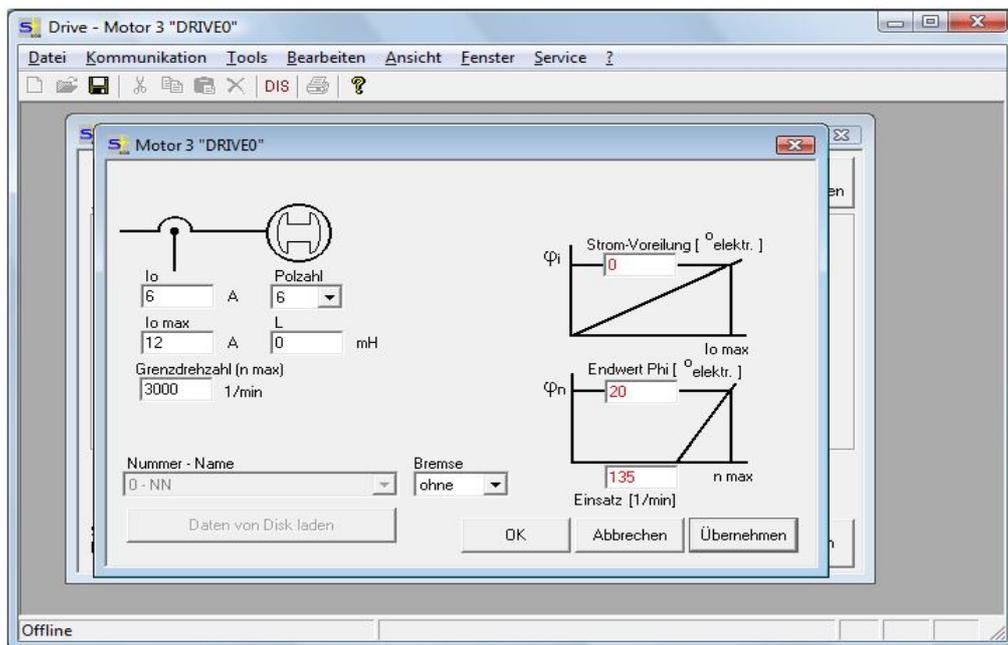


Abb. 141 Motoreinstellungen

Drehzahlregler-Einstellungen

- Enddrehzahl: Begrenzt die Enddrehzahl. Der maximale Wert ist auch von Motor und Encoder abhängig.
- Drehrichtung: Legt die Drehrichtung der Motorwelle bezogen auf die Polarität des Sollwertes fest
- Überdrehzahl: Legt die Obergrenze für die Motordrehzahl fest. Wird diese Grenze überschritten, schaltet der Servoverstärker auf Störung

- SW-Rampe+: Begrenzt die Anstiegsgeschwindigkeit der internen Sollwertverarbeitung beim Beschleunigen in beiden Drehrichtungen auf die Enddrehzahl. Bei sprunghafter oder gestufter Sollwertvorgabe findet eine vorteilhafte Glättung statt. Solange die Rampenzeit kleiner bleibt als die mechanisch begrenzte Anstiegszeit des Systems, wird die Reaktionsgeschwindigkeit des Systems nicht nachteilig beeinflusst. Die eingestellten Rampenzeiten bleiben auch bei Benutzung der Endschalter wirksam.
- SW-Rampe- : Begrenzt die Abfallgeschwindigkeit der internen Sollwertverarbeitung beim Bremsen aus beiden Drehrichtungen auf Drehzahl Null. Bei sprunghafter oder gestufter Sollwertvorgabe findet eine vorteilhafte Glättung statt. Solange die Rampenzeit kleiner bleibt als die mechanisch begrenzte Abfallzeit des Systems, wird die Reaktionsgeschwindigkeit des Systems nicht nachteilig beeinflusst. Meist können SW-Rampe + und SW-Rampe - auf den gleichen Wert eingestellt werden. Die eingestellten Rampenzeiten bleiben auch bei Benutzung der Endschalter wirksam.
- Not-Rampe: Bremsrampe für Notbremsungen. Diese Bremsrampe wird verwendet bei Auftreten der Meldungen n03 (Schleppfehler) und n04 (Ansprechüberwachung) sowie bei Ansprechen eines Hardware-Endschalters oder Software-Endschalters.
- Dis.-Rampe: Beim Sperren der Endstufe (Wegnahme des Hardware- oder Software-Enable) wird der interne Drehzahlsollwert mit dieser Bremsrampe auf 0 gesetzt. Wenn die Drehzahl unter 5U/min abgesunken ist, wird die Endstufe gesperrt. Diese Rampe wirkt sich nur bei Motoren mit konfigurierter Bremse aus.
- Kp: Legt die proportionale Verstärkung fest
- T-Tacho: Die Zeitkonstante des PT1-Filters in der Drehzahlwert-Rückführung (Tachoglättung) kann im Bedarfsfall geändert werden. Dies kann

insbesondere bei sehr kleinen, hochdynamischen Motoren zur Verbesserung von Laufruhe und Sprungverhalten führen.

- T_n : Legt die Integral-Zeitkonstante bzw. Nachstellzeit fest. Kleine Motoren ermöglichen kürzere Nachstellzeiten, große Motoren bzw., große Last-Trägheitsmomente erfordern meist Nachstellzeiten von 20ms und größer. Mit $T_n=0$ ms wird der I-Anteil abgeschaltet.
- PID-T2: Beeinflusst die P-Verstärkung bei mittleren Frequenzen. Oft lässt sich die Dämpfung des Drehzahlregelkreises durch Vergrößerung von PID-T2 bis auf $T_n/3$ verbessern. Die Einstellung erfolgt, falls erforderlich, nach dem Grundabgleich von KP und T_n .

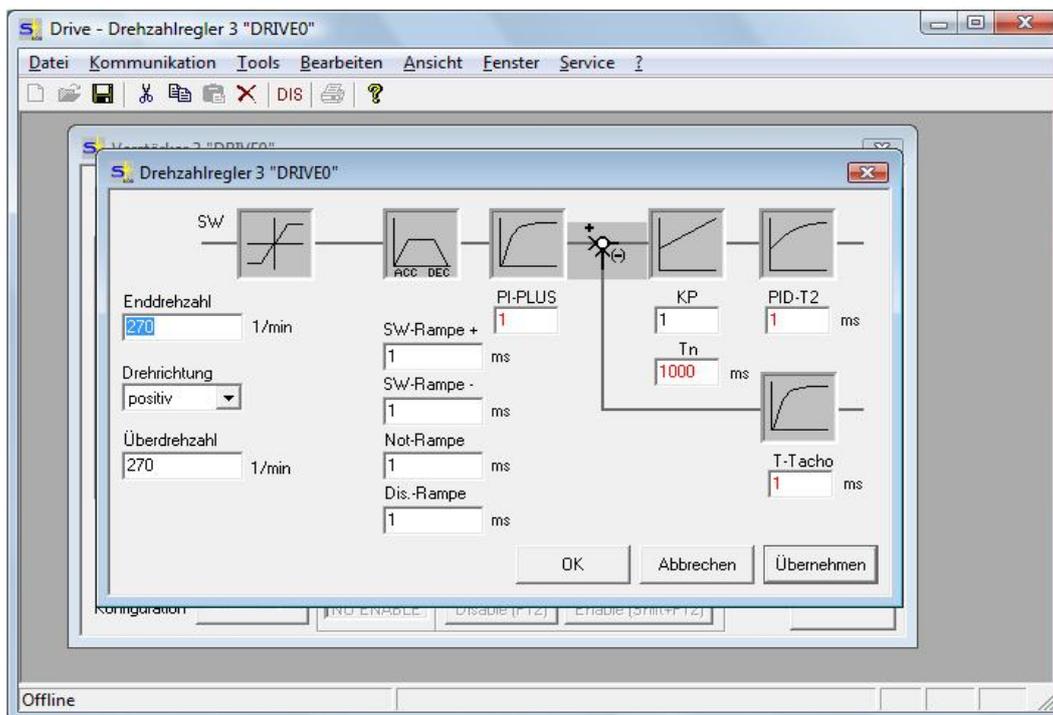


Abb. 142 Drehzahlregler-Einstellungen

Feedback-Einstellungen

- Polzahl: Änderungen an diesem Parameter haben nur Auswirkungen bei Resolver-Rückführung (FBTYPE = 0 oder 3).

Standard-Resolver besitzen 2 Pole. Änderung nur bei disabletem Verstärker

- Bandbreite: Bei hoher Bandbreite reagiert der Antrieb schneller auf Regelabweichungen => kleinerer Schleppfehler beim Beschleunigen. Eine sehr große Bandbreite ist nur sinnvoll bei kleinen Trägheitsmomenten, kleinem KP und sehr großen Beschleunigungswerten. Bei niedriger Bandbreite wird ein Filtereffekt erreicht, Drehzahl und Lageregelung sind glatter (die Encoder-Emulation wird ruhiger)
- Beschl-Vorsteuerung: Bei hoher Bandbreite reagiert der Antrieb schneller auf Regelabweichungen => kleinerer Schleppfehler beim Beschleunigen. Eine sehr große Bandbreite ist nur sinnvoll bei kleinen Trägheitsmomenten, kleinem KP und sehr großen Beschleunigungswerten. Bei niedriger Bandbreite wird ein Filtereffekt erreicht, Drehzahl und Lageregelung sind glatter (die Encoder-Emulation wird ruhiger)

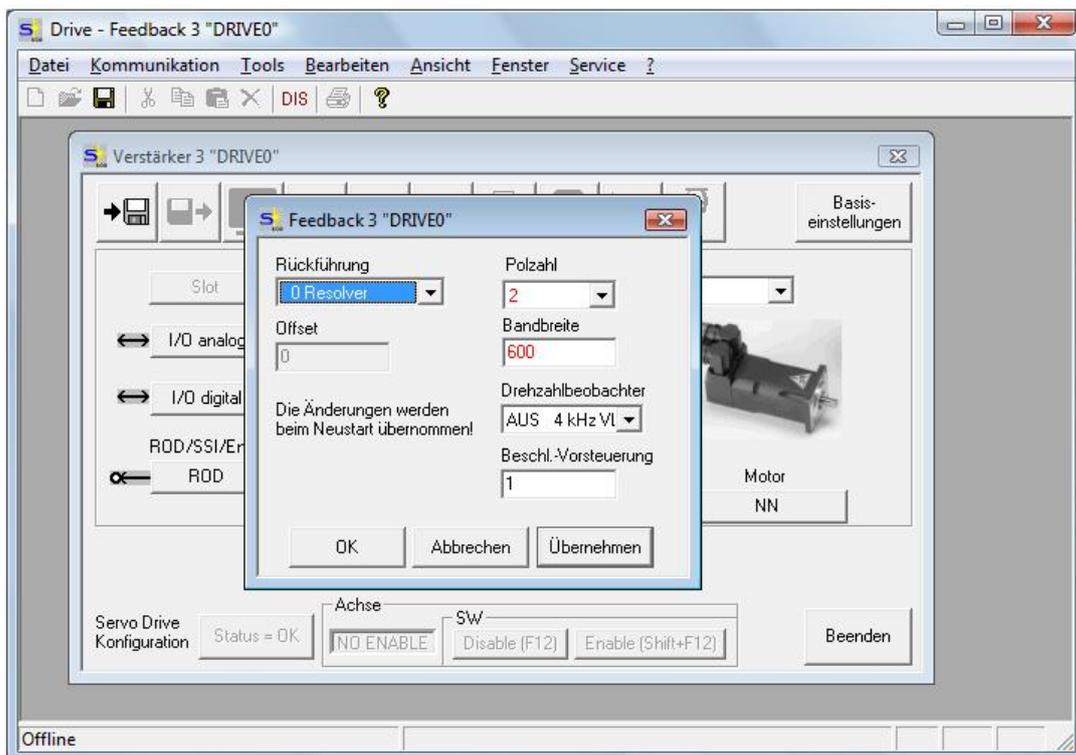


Abb. 143 Feedback-Einstellungen

Stromregler-Einstellungen

- Irms: Stellt den gewünschten Nenn-Ausgangsstrom ein. Der Abgleich erfolgt meist auf den Stillstandsstrom I_0 des angeschlossenen Motors. Begrenzt wird

die Eingabe durch den Verstärkernennstrom bzw. Motorstillstandsstrom I0 (niedrigster Wert).

- Ipeak: Stellt den gewünschten Impulsstrom (Effektivwert) ein. Begrenzt wird die Eingabe durch den Verstärker- bzw. Motorspitzenstrom (niedrigster Wert).
- Ref-Ipeak: Stellt den gewünschten Impulsstrom (Effektivwert) für die Referenzfahrt 7 (Fahren auf Hardwareanschlag mit Nullpunkterkennung) und für die "Wake & Shake" Kommutierung mit externen Gebersystemen ein. Begrenzt wird die Eingabe durch den Verstärker- bzw. Motorspitzenstrom ((niedrigster Wert).
- I²t-Meldung: Eingestellt wird der Prozentwert des Effektivstroms, bei dessen Überschreitung eine Meldung an einem der programmierbaren Ausgänge DIGITAL-OUT1/2 erfolgen soll. Im Display wird eine Warnmeldung wiedergegeben.
- Kp: Legt die proportionale Verstärkung des Stromreglers fest. Normierung: bei KP=1 wird bei der Regelabweichung Isollist=Gerätespitzenstrom die Motornennspannung geliefert.
- Tn: Legt die Nachstellzeit (Integral-Zeitkonstante) des Stromreglers fest.

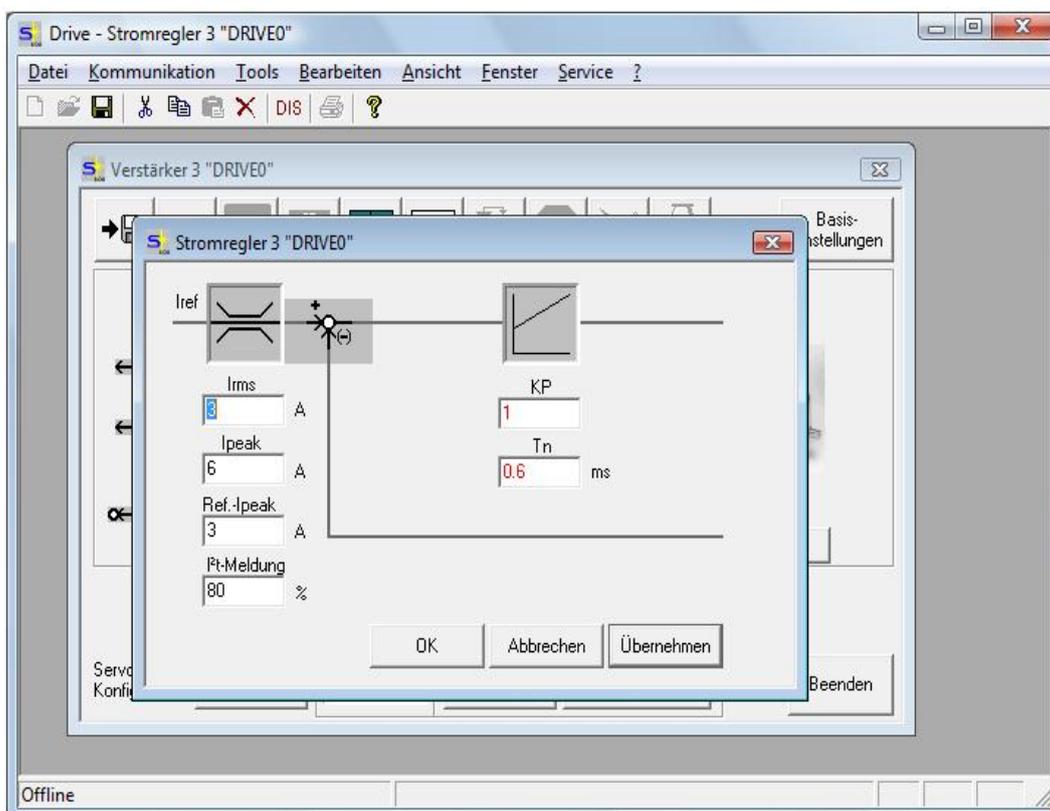


Abb. 144 Stromregler-Einstellungen

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichern wir, dass wir die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §22(4) bzw. §24(4) bzw. §25(4) ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt haben

Hamburg, 02.07.2009

.....
Chokri Arraki

.....
Hicham Rachid
