

## Technische Dokumentation

### Simulation eines hydraulischen Zylinderantriebes

als Bestandteil der Positionsreglersoftware

*Electronics  
Hydraulics meets  
meets Hydraulics  
Electronics*

## INHALT

1	Allgemeine Informationen.....	4
1.1	Verwendete Symbole .....	4
1.2	Impressum .....	4
2	Einleitung .....	5
3	Das Simulationsmodell.....	6
3.1	Druckversorgung .....	6
3.1.1	Konstantpumpe, Festdrehzahl, DBV (CDBV) .....	6
3.1.2	Konstantpumpe, Festdrehzahl, DBV, Speicher (CADBV).....	6
3.1.3	Ideale druckgeregelte Pumpe (IDPMP) .....	7
3.1.4	Drehzahlvariable Konstantpumpe mit Proportional – DBV (NPRDBV) .....	7
3.1.5	Konstantpumpe, Festdrehzahl, DBV, Speicherladeschaltung (ACHC).....	7
3.2	Öl.....	8
3.3	Proportionalventil.....	8
3.4	Zylinder .....	8
3.5	Last .....	8
3.6	Typisches Gesamtmodell .....	9
4	Parametrierung .....	10
4.1	Parameterübersicht .....	10
4.2	Parameter der Druckversorgung .....	11
4.2.1	SIM (Aktivierung der internen Simulation) .....	11
4.2.2	VTYPE (Art der Druckversorgung) .....	11
4.2.3	QPUMP (Nennfördermenge der Pumpe).....	11
4.2.4	QVP (druckabhängige Leckage).....	11
4.2.5	EFP (E - Modul des Öls druckabhängig) .....	12
4.2.6	PDBV (Nennöffnungsdruck des DBV) .....	12
4.2.7	DPDBV (Kennliniensteigung des DBV) .....	12
4.2.8	VACC (Gasvolumen des Speichers) .....	12
4.2.9	PREP (Vorspanndruck des Speichers).....	13
4.2.10	NPOL (Polytrophenexponent).....	13
4.2.11	TNRAMP (Zeit für Drehzahländerung) .....	13
4.2.12	TDBV (Ansprechzeit des DBV).....	13
4.2.13	QNDBV (Menge für Mindestdruckangabe DBV).....	14
4.2.14	PMIN (Mindestdruck DBV).....	14
4.2.15	DBHYST (Kennlinienhysterese) .....	14
4.2.16	PSTOP / PSTART (Schaltpunkte Speicherladeschaltung) .....	14
4.2.17	QLEAK (druckabhängige Systemleckage).....	15
4.3	Parameter des Wegeventils .....	15
4.3.1	Q_PA / Q_PB / Q_AT / Q_BT (Nennvolumenströme) .....	15
4.3.2	VOVL (Überdeckung) .....	15
4.3.3	VHYST (Ventilhysterese).....	15
4.3.4	TSTP (Sprungantwortzeit) .....	16
4.3.5	EIGENFV (Eigenfrequenz des Ventils).....	16
4.4	Parameter des Zylinders .....	16
4.4.1	CYLDIAP (Kolbendurchmesser) .....	16
4.4.2	CYLDIARA (Stangendurchmesser A).....	16
4.4.3	CYLDIARB (Stangendurchmesser B).....	16
4.4.4	CYLSTRK (Zylinderhub).....	17
4.4.5	MOVMA (Bewegte Masse) .....	17
4.4.6	DVIS (Koeffizient viskose Dämpfung).....	17
4.4.7	VTOTA / VTOTB (Totvolumen Seite A/B).....	17
4.5	Parameter der Lastkraft.....	18

4.5.1	CCF (Kraftkurven).....	18
4.5.2	FHAFT (richtungsabhängige Reibkraft).....	18
4.5.3	FLCONST (Konstante Lastkraft gegen A).....	19
4.5.4	FNORM (Normierungsgröße Maximalkraft) .....	19
4.5.5	CCFLE / CCFLR (Kraftkurven).....	19
5	Simulation verwenden .....	21
5.1	Anbindung der Simulation an den internen Regler .....	21
5.2	Verwendung einer externen Signalschnittstelle .....	21
5.3	Aktivierung der Simulation und Beobachtung der Werte .....	21
6	Beispiele .....	22
6.1	Simulation des Systems nach Werkseinstellungen.....	22
6.2	Regler in Betrieb nehmen .....	24
6.3	Beispiele für Parameteränderungen und deren Auswirkungen.....	27
6.3.1	Energieverbrauch verschiedener Druckversorgungen .....	27
6.3.2	Lastkräfte .....	28
6.3.3	Leitungsvolumina .....	29
6.3.4	Asymmetrisches Ventil.....	30
7	Notizen .....	31

## 1 Allgemeine Informationen

Diese Anleitung beschreibt die Verwendung der modulinternen Simulation. Sie ist als Ergänzung zu der jeweiligen Produktdokumentation zu verstehen. Es gelten die dort gegebenen Hinweise zur sicheren Verwendung der Geräte.

### 1.1 Verwendete Symbole



Allgemeiner Hinweis



Sicherheitsrelevanter Hinweis

### 1.2 Impressum

**W.E.St.** Elektronik GmbH

Gewerbering 31  
41372 Niederkrüchten

Tel.: +49 (0)2163 577355-0  
Fax.: +49 (0)2163 577355 -11

Homepage: [www.w-e-st.de](http://www.w-e-st.de)  
EMAIL: [contact@w-e-st.de](mailto:contact@w-e-st.de)

Datum: 04.03.2025

Die hier beschriebenen Daten und Eigenschaften dienen nur der Produktbeschreibung. Der Anwender ist angehalten, diese Daten zu beurteilen und auf die Eignung für den Einsatzfall zu prüfen. Eine allgemeine Eignung kann aus diesem Dokument nicht abgeleitet werden. Die technischen Angaben und Abmessungen sind unverbindlich. Es können daraus keinerlei Ansprüche abgeleitet werden.

Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt.

## 2 Einleitung

Die dynamische Simulation hydraulischer Systeme ist ein etabliertes Werkzeug für den Konstrukteur. Es gibt am Markt eine Vielzahl von Lösungen für eine reine Offline – Simulation.

Die dort im Modell verwendeten Regler sind generischer Art. Im besten Fall wird eine Ankopplung an reale Regler in Form einer HIL (Hardware in the Loop) – Simulation ermöglicht. Der dazu erforderliche Aufwand ist immens und für die meisten kleineren bis mittleren Projekte nicht wirtschaftlich.

Vorteile einer vollumfänglichen Simulation sind aber:

- Frühzeitiges Erkennen von Auslegungsproblemen
- Vermeidung von Funktionsrisiken
- Möglichkeit zur Auswahl kostengünstigerer Komponenten
- Einfachste Berechnung des Systemwirkungsgrades für einen festgelegten Bewegungszyklus, damit Vergleichsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Lösungen
- Realistischer Test der Automatisierung ohne angeschlossene Maschine, Verkürzung der Inbetriebnahmephase
- Gewinnung eines vertieften Verständnisses für die physikalischen Wechselwirkungen im System
- Trainingsmöglichkeiten

Dem steht ein relativ hoher Aufwand zur Modellerstellung und Parametrierung entgegen sowie die Lizenzkosten der verwendeten Software.

Die hier beschriebene Lösung umgeht dies, indem sie die Möglichkeit zu einer echten physikalischen Simulation auf der realen Reglerhardware bietet. Dies ist möglich durch Beschränkungen der Komplexität der Modellierung und durch vordefinierte (Teil-) Systeme.

## 3 Das Simulationsmodell

Ein einfaches System zur elektrohydraulischen Positionierung einer oder mehrerer Achsen besteht aus den in den nächsten Abschnitten betrachteten Elementen.

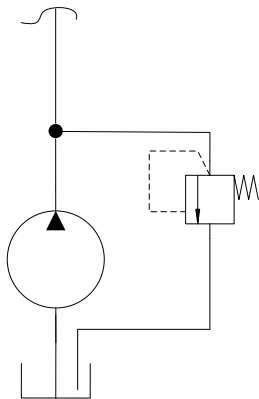
Eine Druckversorgung kann mehrere Achsen versorgen. Die gemeinsame Druckleitung wird durch entsprechende Signalverknüpfungen zwischen den Teilmodellen abgebildet.

### 3.1 Druckversorgung

Es gibt verschiedene Varianten, die man über einen Parameter auswählen kann:

#### 3.1.1 Konstantpumpe, Festdrehzahl, DBV (CDBV)

zu den Verbrauchern



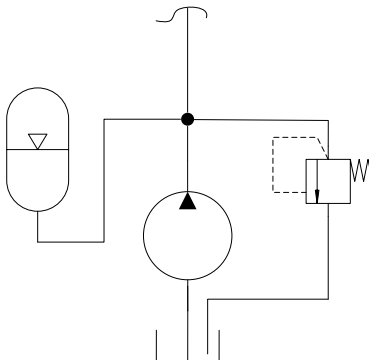
Diese Variante der Druckversorgung besteht aus einer Konstantpumpe, die von einem Motor mit fester Drehzahl angetrieben wird.

Die Kombination wird beschrieben mittels der Nennfördermenge der Pumpe sowie druckabhängiger Leckage.

Das DBV ist anhand seines stationären Verhaltens modelliert und wird durch Öffnungsdruck und Kennliniensteigung charakterisiert.

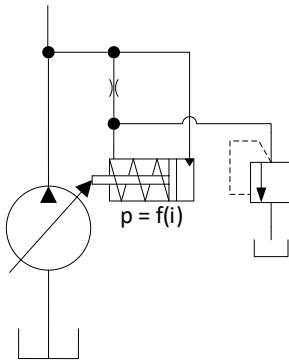
#### 3.1.2 Konstantpumpe, Festdrehzahl, DBV, Speicher (CADBV)

zu den Verbrauchern



Zusätzlich ist bei dieser Variante ein Hydrospeicher enthalten, dessen Gasvolumen und Vorspanndruck das Verhalten bestimmen.

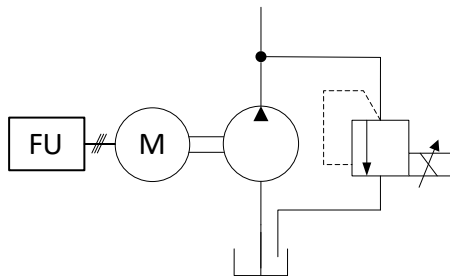
### 3.1.3 Ideale druckgeregelter Pumpe (IDPMP)



Diese Variante kann in der Realität zum Beispiel durch eine Verstellpumpe mit hydraulisch – mechanischer Druckregelung und einem Speicher zur Deckung von Spitzen repräsentiert werden. Das Modell besitzt keine Dynamik. Es gewährleistet einen stets konstanten Versorgungsdruck ohne Lastabhängigkeit.

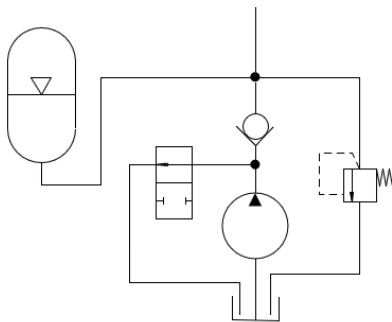
Um eine Steuerbarkeit des Pumpendruck während der Simulation zu

### 3.1.4 Drehzahlvariable Konstantpumpe mit Proportional – DBV (NPRDBV)



Im Gegensatz zu der Schaltung CDBV sind hier sowohl die Pumpendrehzahl wie auch der Einstelldruck des DBV während der Laufzeit variabel. Durch parametrierbare Drehzahlrampen können sowohl relativ langsame Frequenzumrichter oder schnelle Servomotoren nachgestellt werden. Auch das DBV wird hinsichtlich seines stationären und dynamischen Verhaltens als nichtideales Element beschrieben.

### 3.1.5 Konstantpumpe, Festdrehzahl, DBV, Speicherladeschaltung (ACHC)

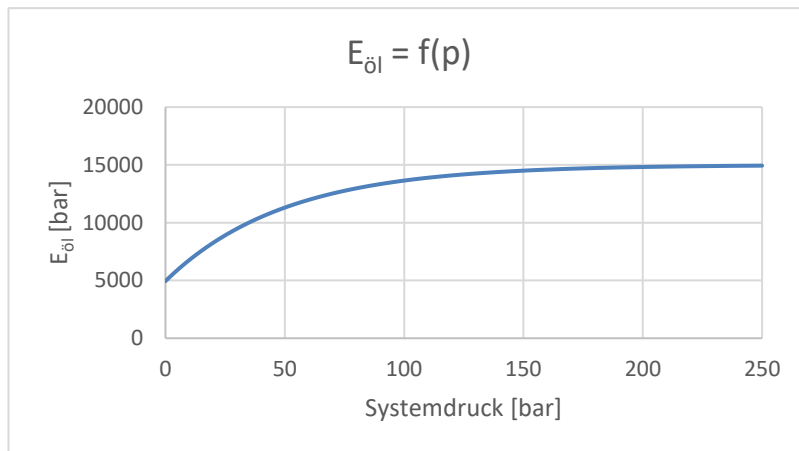


Diese Schaltung ist ähnlich zu der Variante CADBV, verfügt aber über eine Speicherladeschaltung. Diese bewirkt ein intervallartiges Laden des Speichers. Dieses wird über zwei druckabhängige Schaltpunkte gesteuert. Im Falle des Neutralumlaufrs fördert die Pumpe nichts in das druckseitige System, so dass alle Verbräuche aus dem Speicher bedient werden.

Um einen gewissen zeitlichen Druckabfall auch bei geschlossenen Verbraucherventilen nachbilden zu können, ist eine druckproportionale, permanente Leckage einstellbar. Hierdurch können Verluste in der geschlossenen Mittelstellung von Schieberventilen nachgebildet werden.

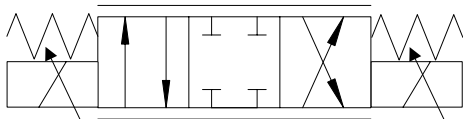
## 3.2 Öl

Das Druckmedium kann entweder idealisiert mit konstantem Ersatzkompressionsmodul (fest 14000 bar) oder mit Druckabhängigkeit beschrieben werden. Dabei ist der folgende Zusammenhang hinterlegt:



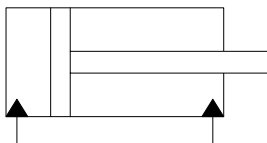
Die Nutzung dieser Kurve ist besonders zu empfehlen, wenn mit abgesenktem Versorgungsdruck gearbeitet wird. Durch testweises Ein- und Ausschalten dieser Modellverfeinerung kann man zudem den Einfluss dieser Eigenschaft auf die Stabilität des Antriebs testen.

## 3.3 Proportionalventil



Es wird das Verhalten eines 4/3 – Wegeventils mit geschlossener Mittelstellung, parametrierbarer Überdeckung und Dynamik abgebildet. Die Nenndurchflüsse der Steuerkanten lassen sich individuell vorgeben. Sämtliche Parameter können aus den typischen Ventildatenblättern entnommen werden.

## 3.4 Zylinder



Das Modell erlaubt es durch entsprechende Parametrierung sowohl Gleichgang- als auch Differentialzylinder oder Plunger zu beschreiben.

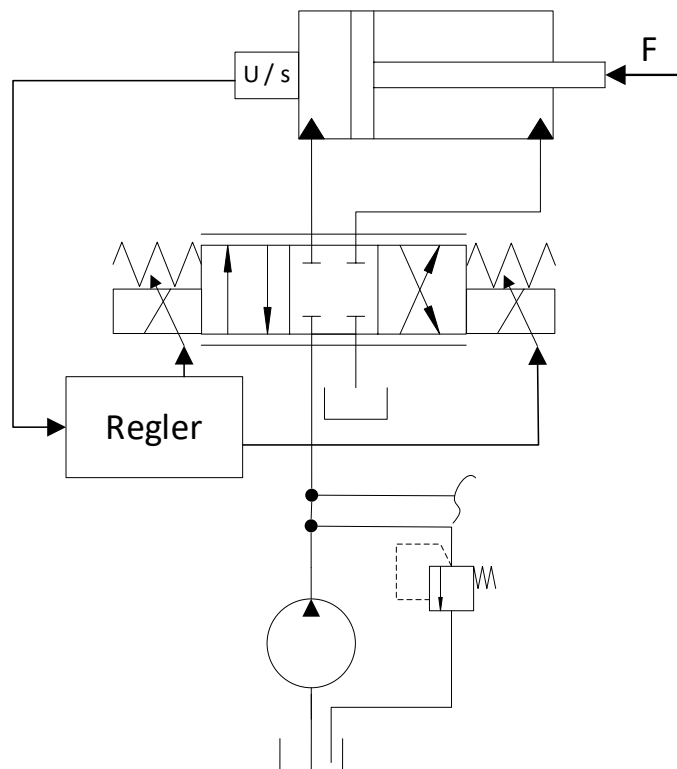
Das enthaltene Ölvolumen und dessen Hubabhängigkeit wird in den Gleichungen des Druckaufbaus berücksichtigt. Haftreibung und viskose Dämpfung ebenfalls.

## 3.5 Last

Es gibt die Möglichkeit, eine konstante Last aufzuprägen oder zwei wegabhängige Kurven für das Aus- und Einfahren vorzugeben.



## 3.6 Typisches Gesamtmodell



In der einfachsten Ausbaustufe kann ein Zylinderantrieb mit Positionsregler simuliert werden. Die angedeutete Verbindungslinie an der Druckleitung symbolisiert die Erweiterungsmöglichkeit auf mehrere Achsen, die von der gleichen Druckversorgung gespeist werden.

## 4 Parametrierung

### 4.1 Parameterübersicht

Sämtliche Parameter der Simulation befinden sich in der Gruppe „Simulation“. Dies ist eine typische Ansicht der Parameterseite im WPC:

SIM	ON	Aktivierung der internen Simulation
<b>Simulation der Druckversorgung</b>		
VTYPE	NPRDBV	Art der Druckversorgung
Q_PUMP	40,0	Nennfördermenge der Pumpe [ l/min ]
QVP	0,01	druckabhängige Leckage [ l/(min*bar) ]
VHYD	5,0	hydraulisches Totvolumen [ l ]
EFP	OFF	E - Modul des Öls druckabhängig
PDBV	100,0	Nennöffnungsdruck des DBV [bar]
DPDBV	0,25	Kennliniensteigung des DBV [ bar/(l/min) ]
TNRAMP	1000	Zeit für Drehzahländerung 0-100% [ms]
TDBV	0,08	Ansprechzeit des DBV [s]
QNDBV	40,0	Menge für Mindestdruckangabe [l/min]
PMIN	15,0	Mindestdruck DBV [bar]
DBHYST	5,0	Kennlinienhysterese [% von PDBV]
<b>Simulation des Wegeventils</b>		
Q_PA	40,0	Nennvolumenstrom P->A [ l/min ]
Q_PB	40,0	Nennvolumenstrom P->B [ l/min ]
Q_AT	40,0	Nennvolumenstrom A->T [ l/min ]
Q_BT	40,0	Nennvolumenstrom B->T [ l/min ]
VOVL	0,0	Überdeckung [%]
VHYST	0,5	Hysterese [%]
TSTP	20	Sprungantwortzeit [ms]
EIGENFV	35	Eigenfrequenz des Ventils [Hz]
<b>Zylinder und Leitungen</b>		
CYLDIAP	90,0	Kolbendurchmesser [mm]
CYLDIARA	0,0	Stangendurchmesser A [mm]
CYLDIARB	40,0	Stangendurchmesser B [mm]
CYLSTRK	0,1	Zylinderhub [m]
MOVMA	25,0	Bewegte Masse [kg]
DVIS	100,0	Koeffizient viskose Dämpfung [Ns/m]
VTOTA	0,2	Totvolumen Seite A [ l ]
VTOTB	0,2	Totvolumen Seite B [ l ]
<b>externe und interne Kräfte</b>		
CCF	OFF	Kraftkurven
FHAFT	50,0	Haftreibung [N]
FLCONST	0,0	Konstante Lastkraft gegen A [N]

## 4.2 Parameter der Druckversorgung

Vorbemerkung: Je nach Auswahl des Parameters VTYPE werden nur die Parameter angezeigt, die für die gewählte Art der Druckversorgung relevant sind. Die Übrigen können ignoriert werden, sie haben keinen Einfluss auf die Berechnung.

### 4.2.1 SIM (Aktivierung der internen Simulation)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
SIM            x	x= OFF   ON   EXT	-	<b>SIMULATION</b>

Über dieses Kommando wird die Simulation aktiviert, falls man die Einstellung „ON“ oder „EXT“ wählt.

Wenn man in diesem Modus keine Hardwareausgänge ansteuern möchte (der Normalfall), sollte man „ON“ einstellen. Bei Auswahl „EXT“ werden die über das Skript definierten Zuweisungen auf die Hardwareausgänge weiterhin durchgeführt. Dieser Modus ist beispielsweise zusammen mit einem entsprechenden Skript geeignet, um das Gerät als reinen Achssimulator zu betreiben.

### 4.2.2 VTYPE (Art der Druckversorgung)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
VTYPE        x	x= CDBV   CADBV   IDPMP   NPRDBV   ACHC	-	<b>SIMULATION</b>

Über dieses Kommando wird die Art der Druckversorgung gewählt. Siehe Abschnitt 3.1.

### 4.2.3 QPUMP (Nennfördermenge der Pumpe)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
QPUMP       x	x= 0,0.. 10000,0	l/min	<b>SIMULATION</b>

Über dieses Kommando wird die Nennfördermenge der Pumpe angegeben. Beim System NPRDBV entspricht dies der Fördermenge bei Maximaldrehzahl. Bei Auswahl des Systems IDPMP ist dieser Parameter nicht verfügbar, da die Menge nicht begrenzt wird.

### 4.2.4 QVP (druckabhängige Leckage)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
QVP            x	x= 0,0.. 1000,0	ml / (min.*bar)	<b>SIMULATION</b>

Der begrenzte volumetrische Wirkungsgrad der Pumpe wird durch diese Angabe definiert. Der Parameter ist auch sichtbar bei der Auswahl VTYPE = IDPMP. In diesem Fall dient er lediglich der Leistungsberechnung.

## 4.2.5 EFP (E - Modul des Öls druckabhängig)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
EFP x	x= OFF ON	-	SIMULATION

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben kann man mit dieser Einstellung bestimmen, ob eine Abhängigkeit der Ölkompresibilität vom Druck berücksichtigt wird. Dies ist der Fall, wenn der Parameter auf „ON“ geschaltet wird. Diese Einstellung bezieht sich auf das gesamte Modell, d.h. auch das Öl in den Zylinderkammern wird entsprechend berechnet.

## 4.2.6 PDBV (Nennöffnungsdruck des DBV)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
PDBV x	x= 0.. 2000	bar	SIMULATION

Diese Eingabe bestimmt den Systemdruck:

Bei den Druckversorgungen CDBV und CADBV gibt sie den tatsächlichen Öffnungsdruck des fest eingestellten DBV an.

Im System IDPMP legt man hier den konstanten Systemdruck fest.

Ist die Option NPRDBV gewählt, gibt dieser Parameter den maximalen Öffnungsdruck des DBV an, der bei 100% Ansteuerung erreicht wird. Er ist dort ebenso die Bezugsgröße für die Ventilhysterese.

## 4.2.7 DPDBV (Kennliniensteigung des DBV)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
DPDBV x	x= 0,01.. 200,0	bar/(l/min)	SIMULATION

Ein typisches DBV hat eine näherungsweise lineare Abhängigkeit des Druckes vom Volumenstrom. Mit diesem Parameter gibt man die Steigung dieser Funktion an. Der Parameter ist nicht verfügbar für das System IDPMP.

## 4.2.8 VACC (Gasvolumen des Speichers)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
VACC x	x= 0,0.. 2000,0	l	SIMULATION

Für den Speicher, der im System CADBV verwendet wird, lässt sich hier das Gasvolumen im vorgespannten, nicht mit Öldruck beaufschlagten Zustand angeben. Je höher das Volumen, desto mehr Öl kann aufgenommen werden.

## 4.2.9 PREP (Vorspanndruck des Speichers)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
PREP x	x= 0,0.. 2000,0	bar (ü)	SIMULATION

Für den Speicher, der im System CADBV verwendet wird, lässt sich hier der Vorspanndruck des Gasvolumens im vorgespannten, nicht mit Öldruck beaufschlagten Zustand angeben. Unterhalb dieses Druckes nimmt der Speicher kein Öl auf und gibt keines ab. Zu beachten ist, dass der Wert tatsächlich wie die anderen Drücke als Überdruck angegeben wird, d.h. der Atmosphärendruck wird bei der internen Weiterverrechnung noch addiert.

## 4.2.10 NPOL (Polytropenexponent)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
NPOL x	x= 1,0.. 2,0	-	SIMULATION

Exponent für die polytrope Zustandsänderung des Gases im Speicher.

Der Voreinstellwert von 140, d.h. 1,4 entspricht der isentropen Zustandsänderung eines zweiatomigen Gases (z.B. N<sub>2</sub>). Der Ansatz dieser Zustandsänderung führt zu einer konservativen Betrachtung. Setzt man den Exponenten auf „100“ = 1,0 entspräche das einer isothermen Zustandsänderung, bei der mehr Volumenänderung für denselben Druckanstieg bzw. -abfall nötig ist. Diesen Grenzfall erreicht man näherungsweise bei sehr langsamen Vorgängen.

## 4.2.11 TNRAMP (Zeit für Drehzahländerung)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
TNRAMP x	x= 0.. 100000	ms	SIMULATION

Der Pumpenantrieb des Systems NPRDBV hat eine begrenzte Dynamik. Übliche Umrichter enthalten eine Rampenfunktion für den Drehzahlsollwert, über die man diese in gewissen Grenzen definieren kann. Darüber hinaus gibt es natürlich eine physikalische Grenze, da ein Beschleunigungsmoment erforderlich ist. Man sollte hier also entweder die eingestellte Rampenzeit eingeben, oder, wenn diese relativ gering ist, die tatsächlich realisierbare Beschleunigungszeit für eine Drehzahländerung von 0-100%.

## 4.2.12 TDBV (Ansprechzeit des DBV)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
TDBV x	x= 1.. 100000	ms	SIMULATION

Das Führungsverhalten des Proportional - DBVs im System NPRDBV wird durch ein PT1 – Element approximiert. An dieser Stelle wird dessen Zeitkonstante vorgegeben.

## 4.2.13 QNDBV (Menge für Mindestdruckangabe DBV)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
QNDBV      x	x= 1.. 100000	l/min	<b>SIMULATION</b>

Das Proportional - DBVs im System NPRDBV hat auch im nicht angesteuerten Zustand einen mengenabhängigen Druckabfall. Die zugehörige Durchflusskennlinie wird durch einen Punkt (Menge / Druck) definiert.

## 4.2.14 PMIN (Mindestdruck DBV)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
PMIN        x	x= 0,0.. 2000,0	bar	<b>SIMULATION</b>

Druckangabe für die Durchflusskennlinie, s.o..

## 4.2.15 DBHYST (Kennlinienhysterese)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
DBHYST    x	x= 0,01.. 1000,0	%	<b>SIMULATION</b>

Der sich einstellende Druck am proportional - DBV ist eine Funktion von Ansteuerung und Volumenstrom. Wenn man nur den Zusammenhang  $p=f(i)$  (mit  $i$  = Magnetstrom) betrachtet, also die Menge konstant lässt, ergibt sich eine Kennlinie, die diesen Zusammenhang zeigt. Die Ansteuerungs-Druck Kennlinie verfügt meistens über eine nennenswerte Hysterese, die im Datenblatt bezogen auf den Maximaldruck angegeben wird. Dieser Wert ist hier einzugeben.

## 4.2.16 PSTOP / PSTART (Schaltpunkte Speicherladeschaltung)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
PSTOP      x	x= 0,0.. 2000,0	bar	<b>SIMULATION</b>
PSTART    x			

Diese Parameter sind nur für das Versorgungssystem ACHC (mit Speicherladeschaltung) relevant.

Der Druck PSTOP entspricht dem oberen Schaltpunkt der Ladeschaltung. Wird er überschritten, so wird das Laden des Speichers beendet und der Neutralumlauf der Pumpe aktiviert und/oder deren Antrieb abgeschaltet. Das Rückschlagventil zu Speicher und System schließt. Sobald der Druck unter PSTART gefallen ist, wird ein erneutes Laden des Speichers ausgelöst. Es handelt sich also um eine 2- Punktregler mit hier vorgegebener Hysterese. Für eine ordnungsgemäße Funktion ist immer  $PSTOP > PSTART$  einzustellen.

## 4.2.17 QLEAK (druckabhängige Systemleckage)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
QLEAK x	x= 0,0.. 1000,0	ml/(min.*bar)	SIMULATION

Bei der Verwendung einer Speicherladeschaltung ist es sehr wichtig, die Leckagemengen zu berücksichtigen, die während der Zeiten ohne Pumpenförderung auftreten. In der Regel sind dies Verluste, die in der abgesperrten Mittelstellung von Schieberventilen auftreten können.

Im Gegensatz zu der Pumpenleckage, die mit dem Parameter „QVP“ angegeben wird, ist diese Menge auch vorhanden, wenn die Pumpe nicht in das System fördert.

## 4.3 Parameter des Wegeventils

### 4.3.1 Q\_PA / Q\_PB / Q\_AT / Q\_BT (Nennvolumenströme)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
Q_.. x	x= 0,0.. 10000,0	l/min	SIMULATION

Für jede der vier Steuerkanten des Wegeventils wird an dieser Stelle der Durchfluss bei Vollöffnung und einer definierten Druckdifferenz von 35 bar (pro Kante) angegeben. Meistens werden Ventile mit kurzgeschlossenen Verbraucheranschlüssen gemessen, so dass das bei identischem Druckabfall an der Zu- und Ablaufkante einem Gesamtdruck von 70 bar entspricht.

Sollte sich die Datenblattangabe auf einen anderen Differenzdruck beziehen, muss umgerechnet werden:

$$Q_E = Q_D \cdot \sqrt{\frac{35 \text{ bar}}{\Delta p_D}}$$

wobei  $Q_E$  die einzugebende Menge,  $Q_D$  die Mengenangabe des Datenblatts und  $\Delta p_D$  die Druckdifferenz an einer Steuerkante der Datenblattangabe sind.

### 4.3.2 VOVL (Überdeckung)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
VOVL x	x= 0,0.. 100,0	%	SIMULATION

Dieser Parameter gibt die (positive) Überdeckung des Wegeventils an. Diese ist zu beiden Seiten symmetrisch.

### 4.3.3 VHYST (Ventilhysterese)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
VHYST x	x= 0,0.. 100,0	%	SIMULATION

Dieser Parameter gibt die Hysterese des Wegeventils an.

## 4.3.4 TSTP (Sprungantwortzeit)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
TSTP x	x= 0.. 1000	ms	SIMULATION

Die Sprungantwortzeit des Ventils (Datenblattangabe) ist hier einzutragen. Manchmal muss diese aus einem Diagramm abgelesen werden.

## 4.3.5 EIGENFV (Eigenfrequenz des Ventils)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
EIGENFV x	x= 1.. 1000	Hz	SIMULATION

Hier wird die Eigenfrequenz des Ventils angegeben, die im Datenblatt entweder direkt aufgeführt ist oder einem Bodediagramm entnommen werden kann. Dort ist die Frequenz zu bestimmen, bei der die Phasenverschiebung  $-90^\circ$  beträgt.

Bei direktgesteuerten Ventilen wird auch dies meistens nicht angegeben, nur die Sprungantwortzeit. Man sollte die Eigenfrequenz dann gemäß der Faustformel  $f_0$  [Hz]  $\approx 740 / T_{\text{Sprung}}$  [ms] eingeben.

## 4.4 Parameter des Zylinders

### 4.4.1 CYLDIAP (Kolbendurchmesser)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
CYLDIAP x	x= 0,1.. 1000,0	mm	SIMULATION

### 4.4.2 CYLDIARA (Stangendurchmesser A)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
CYLDIARA x	x= 0,0.. 1000,0	mm	SIMULATION

Sollte es auf der Seite „A“ eine Stange geben, ist deren Durchmesser hier anzugeben, ansonsten 0 mm.

### 4.4.3 CYLDIARB (Stangendurchmesser B)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
CYLDIARB x	x= 0,0.. 1000,0	mm	SIMULATION

Sollte es auf der Seite „B“ eine Stange geben, ist deren Durchmesser hier anzugeben, ansonsten 0 mm.

Zur Simulation eines Plungerzylinders kann der Stangendurchmesser gleich dem Kolbendurchmesser gesetzt werden.



## 4.4.4 CYLSTRK (Zylinderhub)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
CYLSTRK x	x= 1.. 10000	mm	SIMULATION

## 4.4.5 MOVMA (Bewegte Masse)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
MOVMA x	x= 1.. 100000	kg	SIMULATION

Die bewegte Masse enthält den Kolben, die Kolbenstange und die anzutreibenden Teile. Sollte es dort eine mechanische Übersetzung geben (z.B. durch Hebel), ist eine auf den Kolben reduzierte Masse zu bestimmen und hier anzugeben. Diese Angabe dient nicht der Bestimmung einer Gewichtskraft, s.u.

## 4.4.6 DVIS (Koeffizient viskose Dämpfung)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
DVIS x	x= 10.. 10000	Ns/m	SIMULATION

Dieser Koeffizient gibt den geschwindigkeitsproportionalen Anteil der Reibkräfte an. Dieser bewirkt eine Dämpfung des Zylinders.

## 4.4.7 VTOTA / VTOTB (Totvolumen Seite A/B)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
VTOTA/B x	x= 0,2.. 100,0	l	SIMULATION

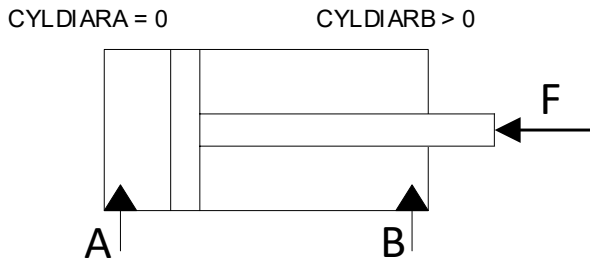
Totvolumen des Öls auf Seite A / B des Zylinders und der angeschlossenen Leitung bis zum Ventil. Sollten Schläuche verwendet werden, ist deren Elastizität durch einen Aufschlagsfaktor (z.B. 2,5 für das Ölvolumen innerhalb des Schlauchs) zu berücksichtigen.

## 4.5 Parameter der Lastkraft

Grundsätzlich ist hiermit jede auf den Zylinder wirkende Kraft gemeint, mit Ausnahme der viskosen Dämpfung (s.o.). Es zählt also auch die Gewichtskraft dazu. Wenn also eine Last nicht rein horizontal bewegt wird, ist dies hier entsprechend zu berücksichtigen.

Vorzeichenkonvention:

Eine Kraft entgegen „A“ wird als positiv angesehen. Wenn dieser Zylinder also ausfährt (x steigt, Öl fließt in seinen Anschluss A) wird Arbeit gegen die Kraft F verrichtet:



Im Falle einer negativen Kraft würde die Kolbenstange in diesem Beispiel auf Zug beansprucht werden.

### 4.5.1 CCF (Kraftkurven)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
CCF	x	x= OFF ON	SIMULATION

Wählt man hier „ON“, so wird die Lastkraft hubabhängig durch Kurvenzüge, getrennt für das Aus- und Einfahren, definiert. „OFF“ bedeutet, dass lediglich eine konstante Lastkraft (+ richtungsabhängige Reibung) vorgebar ist.

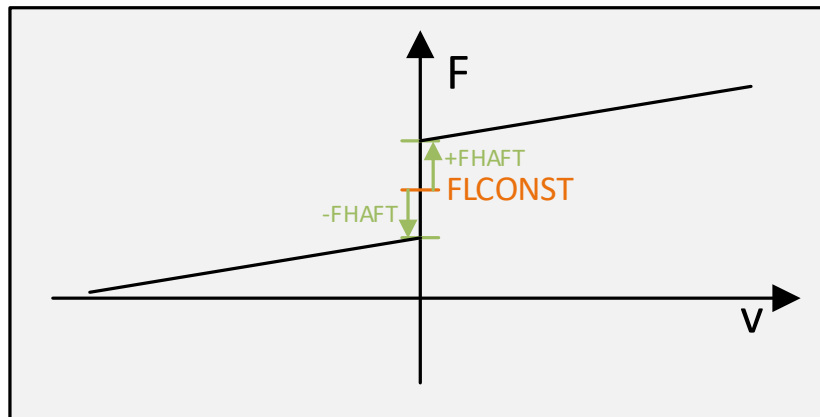
### 4.5.2 FHAFT (richtungsabhängige Reibkraft)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
FHAFT	x	x= 10.. 10000000	SIMULATION CCF = OFF

## 4.5.3 FLCONST (Konstante Lastkraft gegen A)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
FLCONST x	x= -10000000.. 10000000	N	SIMULATION CCF = OFF

Zur Wirkung der Kräfte FHAFT und FLCONST:



Bei positiver Geschwindigkeit wird FHAFT zu FLCONST hinzuaddiert, bei negativer Geschwindigkeit abgezogen. Die weitere Steigung der Gegenkraft resultiert aus der viskosen Dämpfung.

## 4.5.4 FNORM (Normierungsgröße Maximalkraft)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
FNORM x	x= -10000000.. 10000000	N	SIMULATION CCF = ON

Mit dieser Angabe wird definiert, auf welchen Wert sich die Prozentangaben der Kraftkurven beziehen.

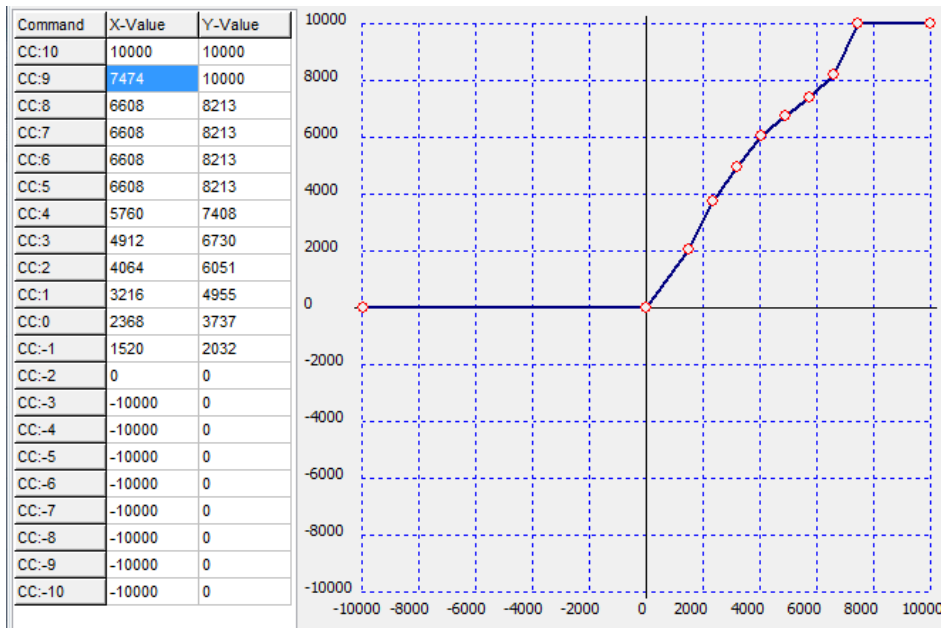
## 4.5.5 CCFLE / CCFLR (Kraftkurven)

Kommando	Parameter	Einheit	Gruppe
CCFLE/CCFLR :I X Y	i= -10... 10 x= -10000... 10000 y= -10000... 10000	- 0,01 % 0,01 %	SIMULATION CCF = ON

An dieser Stelle können Kraftverläufe als Kurvenzüge eingegeben werden. Die X – Achse entspricht dabei dem normierten Hub, die Y – Achse einer normierten Kraft.

Die Kurve befindet sich immer im ersten oder zweiten Quadranten. Negative Hübe kommen nicht vor, daher sind die zugehörigen Y – Koordinaten auf „0“ gesetzt.

Der Ausgang wird mit Hilfe der linearen Interpolation berechnet:  $y=(x-x1)*(y1-y0)/(x1-x0)+y1$ .



Ein Eingabewert von „10000“ entspricht 100% Hub auf der X – Achse bzw. der vollen Lastkraft FNORM.

Es werden zwei Kurven definiert, eine gilt für das Ausfahren des Zylinders (CCFLE), die andere (CCFLR) für das Einfahren. Hierbei gilt zu beachten, dass die Kraft beim Ausfahren immer größer sein sollte als diejenige beim Einfahren. Andernfalls würde man eine negative Reibung und damit ein physikalisch unmögliches wie auch instabiles Verhalten hinterlegen. Um eine solche Situation auszuschließen, werden die Punkte der Kurve CCFLR nach Änderungen an dieser Kurve oder an der CCFLE – Kurve automatisch angepasst, falls sie oberhalb der Kräfte beim Ausfahren beim gleichen Hub liegen.

## 5 Simulation verwenden

### 5.1 Anbindung der Simulation an den internen Regler

Istwert (Position): Dieser Wert wird nach dem Aktivieren der Simulation vom Regler durch den simulierten Wert ersetzt, unabhängig davon, was durch das Skript in XN zugewiesen wird.

Ausgangswert des Reglers / Stellgröße:

Dieser Wert wird durch das Skript zugewiesen. Die Zeile „SIMU“ enthält im Standardskript bereits eine direkte Zuweisung der Prozessgröße „U“, was man meistens ohne Änderung beibehalten kann.

### 5.2 Verwendung einer externen Signalschnittstelle

Das Skript bietet die Möglichkeit, auch andere Signale als Ein- oder Ausgänge zu nutzen und so das Gerät beispielsweise als universellen Achssimulator zu verwenden.

Um weiterhin eine Ansteuerung der Ausgänge zu gewährleisten, ist der Parameter SIM auf EXT zu stellen und die gewünschten Signalverknüpfungen im Skript vorzunehmen:

Eingangssignal Skript aus Sim	Bedeutung	Wertebereich
X	Momentane Position [mm]	0... Hub
PPSIM	Pumpendruck [bar]	
PASIM	Druck Zylinderanschluss A [bar]	
PBSIM	Druck Zylinderanschluss B [bar]	

Folgende Ausgänge des Skripts in Richtung der Simulation stehen zur Verfügung:

Ausgangssignal Skript zur Sim	Bedeutung	Wertebereich
SIMU	Ansteuerung des simulierten Wegeventils	+/- 100,0 %
SIMDB	Ansteuerung eines simulierten prop. DBV	0,0... 100,0%
SIMN	Ansteuerung eines simulierten Frequenzumrichters	0,0... 100,0%

Zu beachten:

Die Ausgänge des Skriptes in die Simulation werden dort auf die hier angegebenen Wertebereiche begrenzt. Weitergehende Restriktionen hinsichtlich der Ansteuerbereichs, wie etwa eine Mindestdrehzahl, sind im Skript vorzunehmen.

### 5.3 Aktivierung der Simulation und Beobachtung der Werte

Durch Setzen des Parameters SIM auf ON wird die Simulation aktiv und die Hardwareausgänge werden abgeschaltet. Es empfiehlt sich, die Fernbedienungsfunktion des WPC zu verwenden, um den Regler oder den Handbetrieb zu aktivieren und Sollwerte vorzugeben.

Die Beobachtung der simulierten Werte geschieht entweder im Monitorfenster des WPC oder besser im Oszilloskopfenster, da dort die Signalverläufe abgebildet werden.

## 6 Beispiele

Die folgenden Beispiele sind auch als Schnelleinstieg in die Thematik geeignet.

Aufgrund der großen Anzahl an Parametern ist die Nutzung des Moduls nur mit WPC ab Version 4.0 möglich.

### 6.1 Simulation des Systems nach Werkseinstellungen

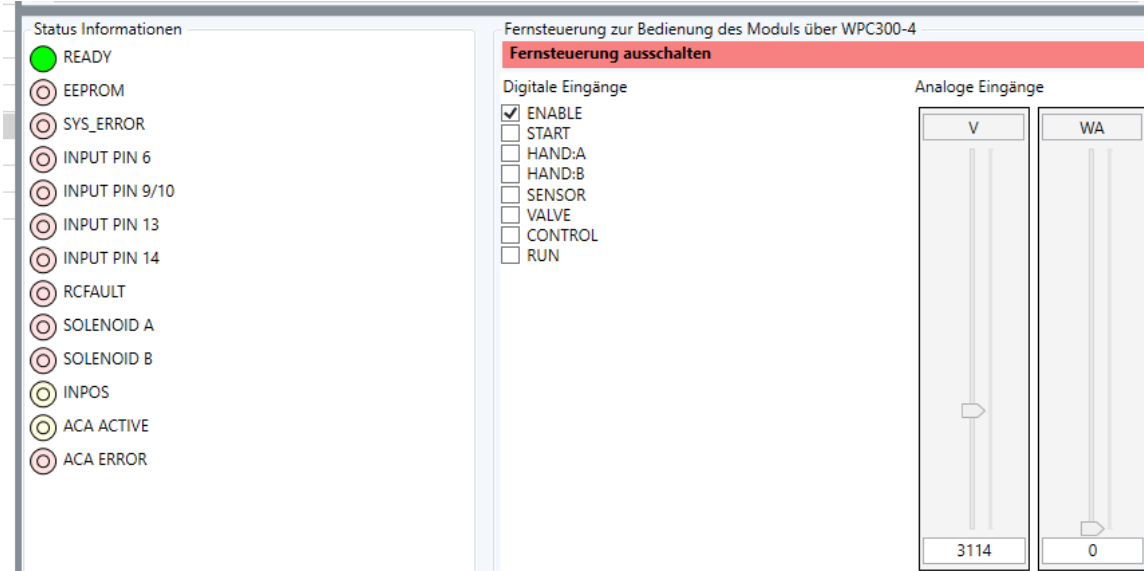
Startpunkt ist ein Gerät mit werksgemäßer Parametrierung, ggf. setzen Sie es mit „DEFAULT“ darauf zurück.

Wählen Sie die Gruppe „Simulation“:



Setzen Sie dort den obersten Parameter SIM auf ON.

Aktivieren Sie im Monitorfenster der WPC die Fernsteuerung und setzen Sie den ENABLE – Eingang:

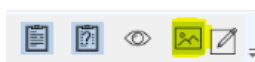


Die grüne READY – LED auf der linken Seite signalisiert, dass der Regler betriebsbereit ist. Stellen Sie den Schieberegler V etwas hoch wie in diesem Beispiel und aktivieren Sie die Checkbox HAND:A. Beobachten Sie die Prozesswertanzeigen des Istwertes X und der Drücke P\_A und P\_B. X steigt, bis der Zylinder bei 100 mm seinen Endanschlag erreicht hat. Während der Bewegung ist der Druck P\_A niedriger als P\_B, dies aufgrund der Flächenverhältnisse des Differentialzylinders und der nicht vorhandenen Lastkraft. Sobald der Zylinder den Endanschlag erreicht hat, steigt der Druck P\_A bis auf den Pumpendruck P\_P an und der Druck P\_B fällt auf „0“, da nun kein Durchfluss durch das Ventil mehr vorhanden ist.

Zum Umkehren der Bewegung nehmen Sie das Signal an HAND:A weg und setzen Sie stattdessen HAND:B. Der Zylinder fährt wieder ein.

Zeichnen Sie jetzt die Signalverläufe mit dem Oszilloskop des WPC auf.

Hierzu aktivieren Sie zuerst das zugehörige Fenster:



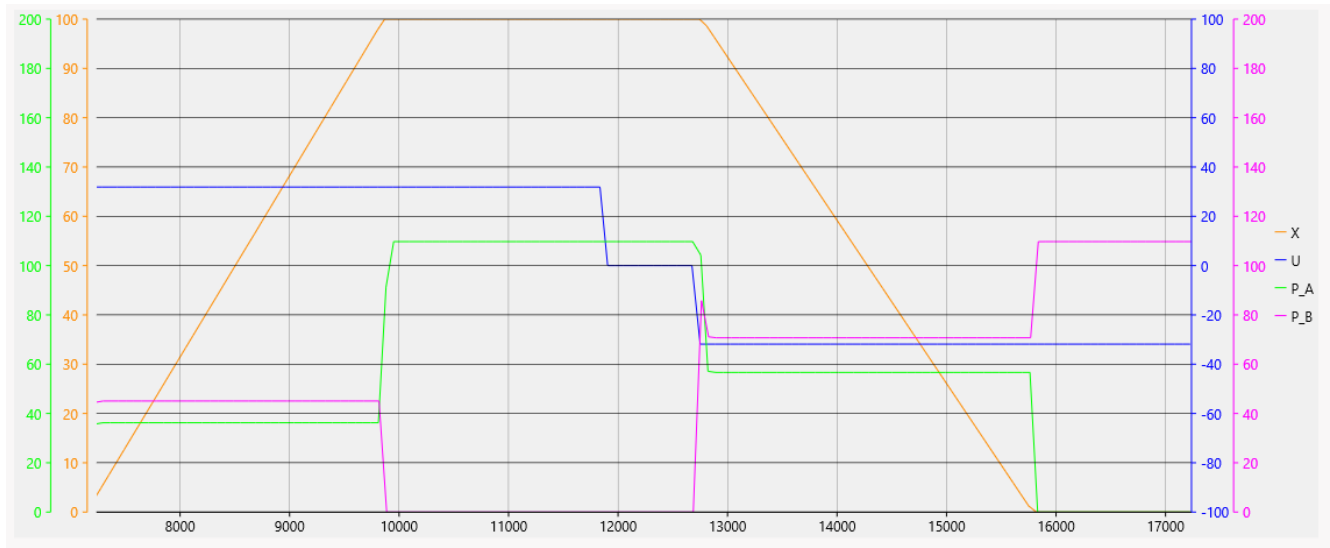
Wählen Sie am besten diese Einstellungen und Wertebereiche:

Kanal Einstellungen

Ch 1 X mm     Ch 2 U %     Ch 3 p A bar     Ch 4 p B bar

Min 0    Max 100    Min -100    Max 100    Min 0    Max 200    Min 0    Max 200

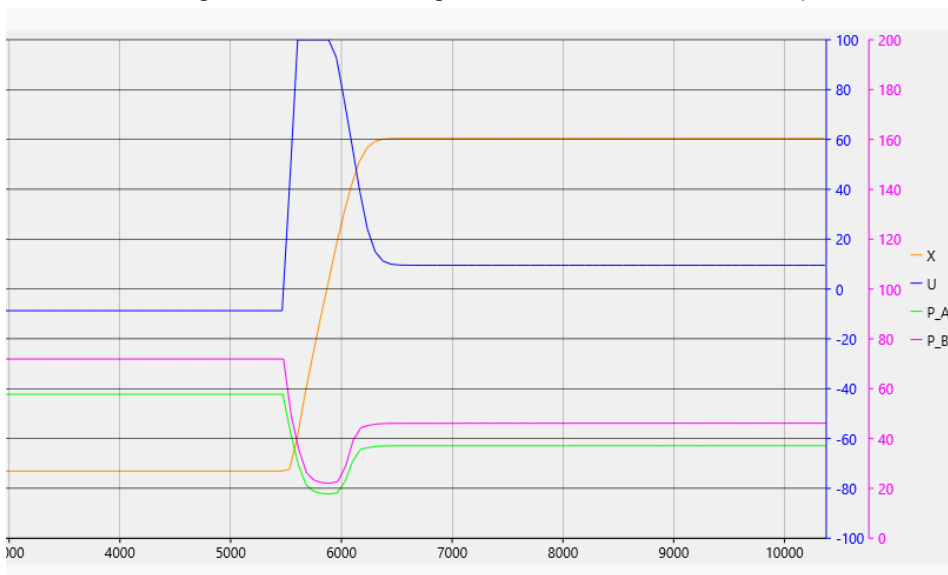
Anschließend kann die Aufzeichnung gestartet und der Handbetrieb wiederholt werden:



Der Signalpeak bei P\_B zu Beginn des Einfahrens entsteht durch die Beschleunigungskräfte.

Geben Sie die Maximalgeschwindigkeit (= volle Ansteuerung) frei, Schieber V ganz nach oben stellen.

Aktivieren Sie den Positionsregler, indem Sie die Sollwertschieber „WA“ etwas hochziehen und anschließend das START – Signal setzen. Der Regler fährt die Achse auf die Zielposition:

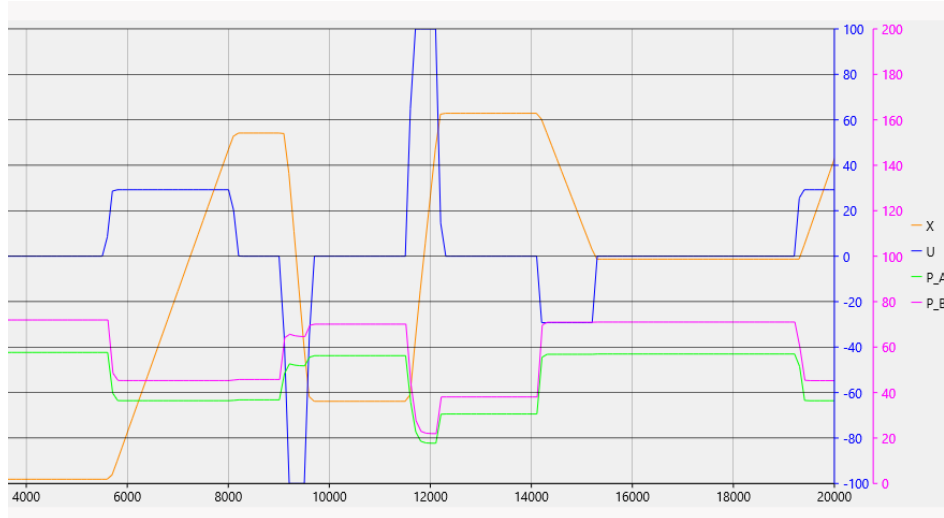


Wie man erkennen kann, beträgt die Ansteuerung des Ventils (U) nach der Bewegung ca. 10% und die Achse bewegt sich nicht mehr. Dies ist auf die Überdeckung zurückzuführen, die über den Parameter VOVL auf 10% eingestellt ist. Im Monitorfenster können Sie den Regelfehler E ablesen, der ca. 0,9 mm beträgt. Dies ist noch kein gutes Resultat. Durch eine passende Einstellung der Überdeckungskompensation und der Bremswege sind hier deutliche Verbesserungen möglich.

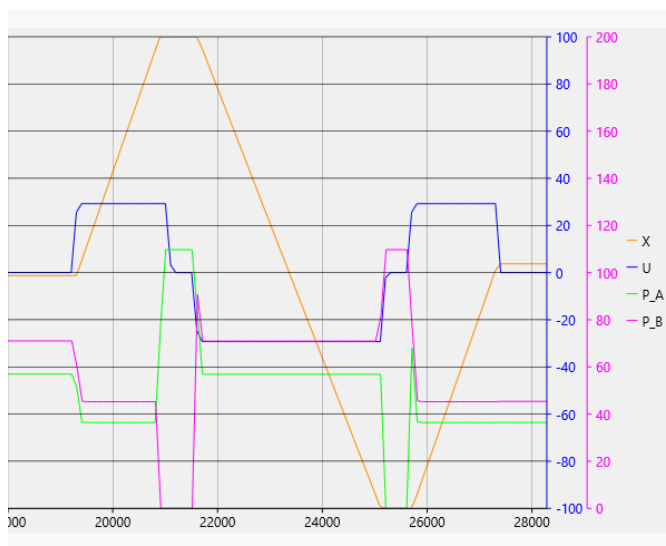
## 6.2 Regler in Betrieb nehmen

Hierzu verwenden Sie den Assistenten, siehe auch Kapitel 3.3. der Gerätedokumentation.

Während der Laufzeit des Assistenten können Sie die hierfür relevanten Signale beobachten. Dies sind insbesondere X und U, in den folgenden Diagrammen werden zusätzlich die Zylinderdrücke dargestellt:

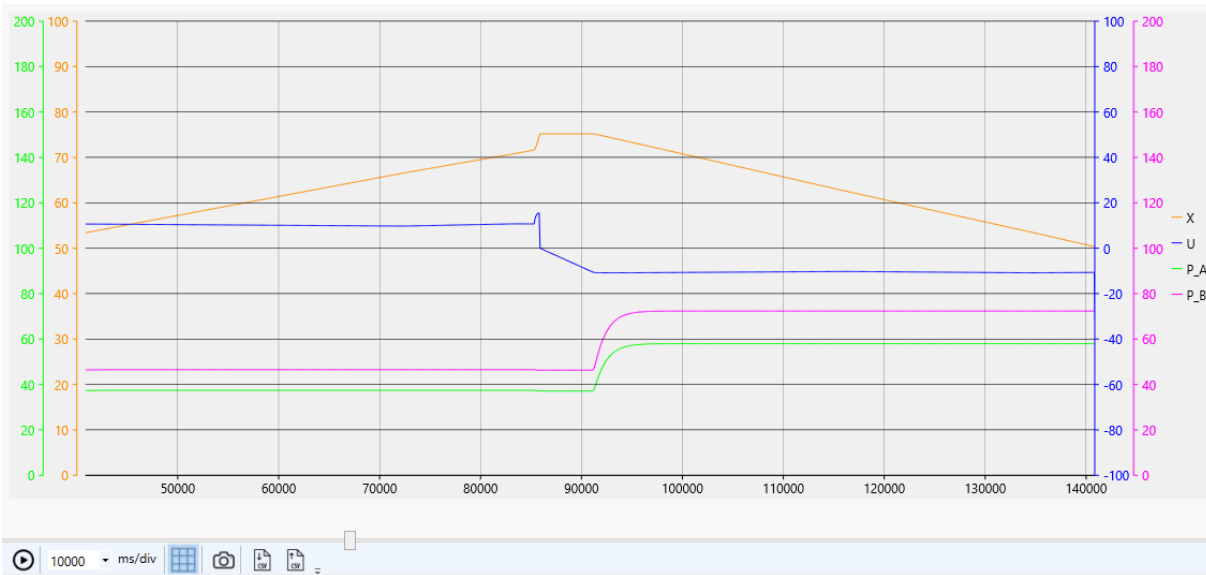


Zu Beginn erfolgt ein Test der Polarität und der Maximalgeschwindigkeiten.

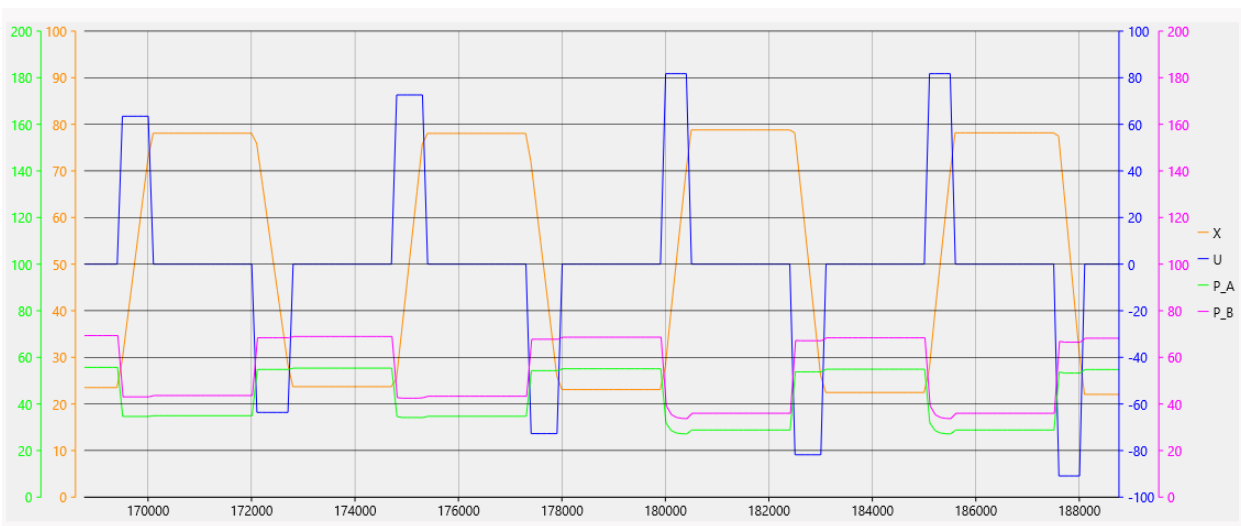


Anschließend wird die Sensorskalierung durch Fahren an die Endlagen durchgeführt. Dies geschieht mit reduzierter Ansteuerung.

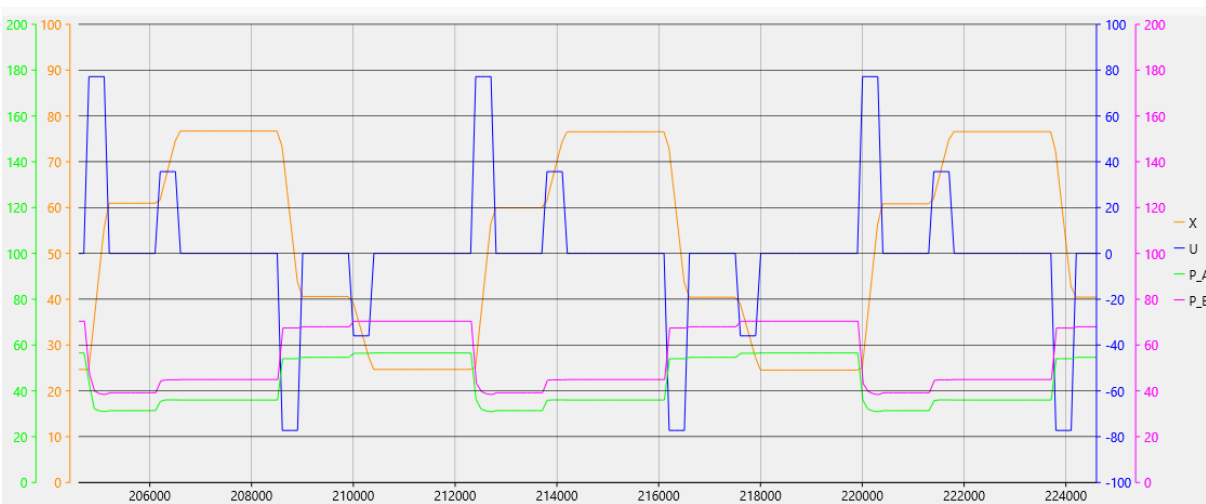




Dieses Diagramm zeigt die Messung der Überdeckungen. Beachten Sie die längere Zeitskala. Durch sehr langsame (geregelte) Bewegungen in beiden Richtungen wird die dafür erforderliche Ventilansteuerung bestimmt.



Zur Ermittlung der Maximalgeschwindigkeiten erfolgen Bewegungen mit stufenweise ansteigender Geschwindigkeit.



Dynamische Messungen: Bremsverhalten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

Reglereinstellung		
A:A	63	Beschleunigungszeit A [ms]
A:B	63	Beschleunigungszeit B [ms]
D:A	13	Bremsweg [mm]
D:B	14	Bremsweg [mm]
D:S	10	Notbremsweg (PIN 7 = OFF) [mm]
PT1	1	Zeitkonstante PT1 -Filter [ms]
Ventilanpassung		
CTRL	SQRT1	Regelcharakteristik
MIN:A	9,13	MIN Einstellung / Überdeckungskompensation A [%]
MIN:B	9,54	MIN Einstellung / Überdeckungskompensation B [%]
MAX:A	100,0	Ausgangsskalierung A [%]
MAX:B	100,0	Ausgangsskalierung B [%]
TRIGGER	0,5	Triggerpunkt der MIN Einstellung [%]
OFFSET	0,0	Ausgangsoffset [%]
POL:U	+	Polarität des Ausgangssignals

Die Reglerparameter nach dem Durchlaufen des Assistenten:

- Die Bremswege D:A und D:B wurden verkleinert, dadurch erhöht sich die Verstärkung des Reglers
- Auch die Beschleunigungszeiten sind verkürzt worden
- Die Überdeckung des Ventils wurde kompensiert: Die eingestellten Werte von 9,13 % und 9,54 % liegen unterhalb des simulierten Wertes von 10%. Der Algorithmus berücksichtigt einen gewissen, jedoch geringen Sicherheitsabstand um auf keinen Fall die wahre Überdeckung zu überkompensieren. Dass dieser Abstand nicht gleich ausfällt liegt an den unsymmetrischen Flächenverhältnissen im Zylinder.

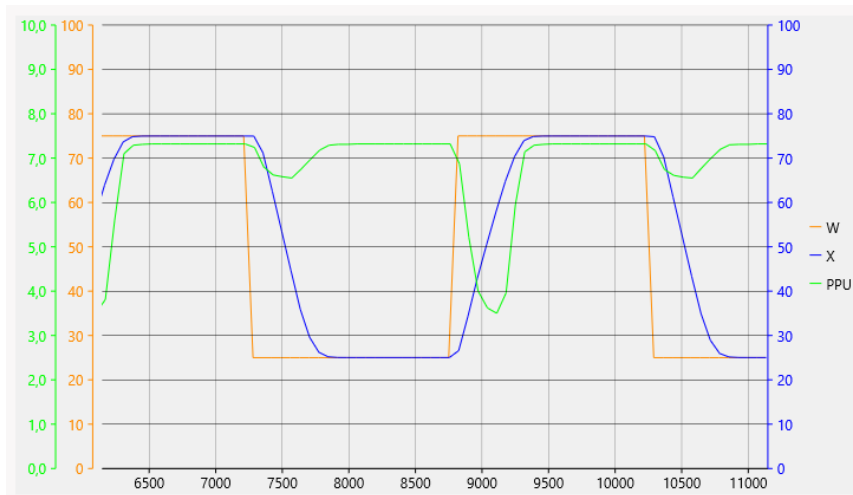
Lässt man nun den Regler wieder arbeiten, indem man das Testsignal aufschaltet und beobachtet man die Regelabweichung, stellt man fest, dass diese nach Abschluss des Positioniervorgangs nur noch 0,03 mm beträgt. Somit konnte sie durch die korrekte Einstellung auf 1/30 des ursprünglichen Wertes reduziert werden.

## 6.3 Beispiele für Parameteränderungen und deren Auswirkungen

Ausgehend von diesem, gut eingestellten System sollen nun die Auswirkungen einiger Variationen untersucht werden. Es handelt sich dabei um typische Änderungen des Verhaltens, die hier rein qualitativ betrachtet werden. Genauere Aussagen zu einem konkreten System setzen voraus, dass dessen Daten bei der Parametrierung verwendet werden.

### 6.3.1 Energieverbrauch verschiedener Druckversorgungen

Die Prozessgröße PPU zeigt die momentane Pumpenleistung unter Vernachlässigung hydraulisch – mechanischer Verluste in der Einheit [kW] an. Wenn man dieses Signal mitaufzeichnet, ergibt sich im System CDBV dieses Bild:



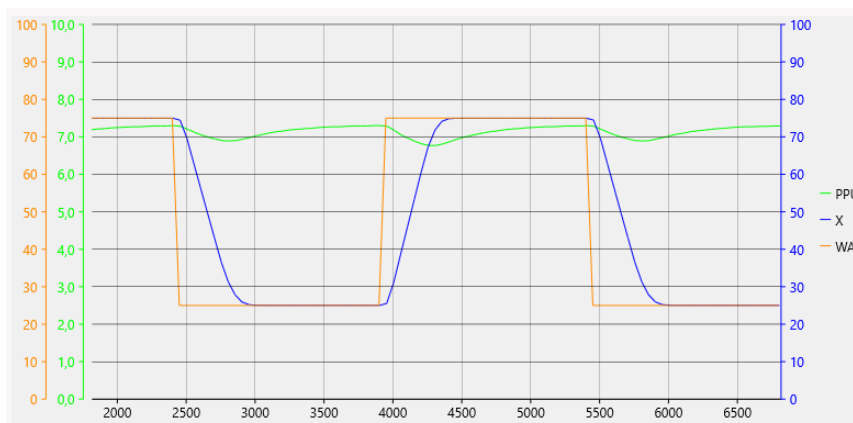
Da eine Konstantpumpe verwendet wird, hängt die Leistungsaufnahme nur vom Leitungsdruck ab.

Wie man erkennt, sinkt die Leistungsaufnahme während der Bewegungsphasen, was auch ein Zusammenbrechen des Versorgungsdruckes zurückzuführen ist. Dies wiederum deutet bei einem konventionell ausgelegten System auf eine Überdimensionierung des Ventils bzw. Unterdimensionierung der Pumpe hin.

Wenn man nach dem Durchlauf des Inbetriebnahmeassistenten das Kommando „ST\_ACA“ im Terminal eingibt, wird die Empfehlung gegeben, die MAX – Parameter kleiner als 100% einzustellen, wodurch sich die maximale Ventilöffnung reduziert und mit höherem Versorgungsdruck während der Bewegungen gearbeitet wird. Dies würde bei diesem Beispiel aber auch zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs führen.

Um verschiedene Systeme vergleichen zu können, gibt es eine Möglichkeit die über einen Bewegungszyklus aufintegrierte Antriebsleistung auszugeben. Dies geschieht über den Terminalbefehl „ECYCLE“. Die Ausgabe erfolgt in [J]. Im vorliegenden Beispiel liefert dieses Kommando den Wert ca. 20300 J. Da über 3s gemittelt wurde, entspricht dies einer mittleren Leistung von ca. 6,76 kW.

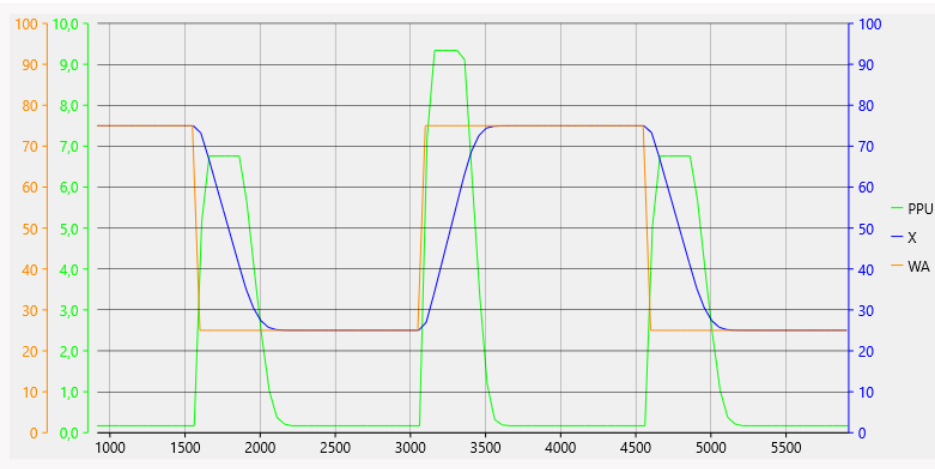
Wechselt man nun das Versorgungssystem und nimmt einen Speicher hinzu (CADBV), so ändert sich der Zeitverlauf der oben dargestellten Größen:



Es ist zu erkennen, dass der Versorgungsdruck nun in den Phasen mit Bewegung nicht mehr so stark einbricht, denn die fehlende Menge wird vom Speicher gedeckt. Ebenso kann man erkennen, dass die Ausfahrbewegung

etwas schneller stattfindet. Leider hat sich durch diese Maßnahme jedoch die Zyklusenergie auf 21,38 kJ vergrößert.

Anders sieht es aus, wenn man den Grenzfall einer idealen, druckgeregelten Pumpe betrachtet (VTYPE = IDPMP):

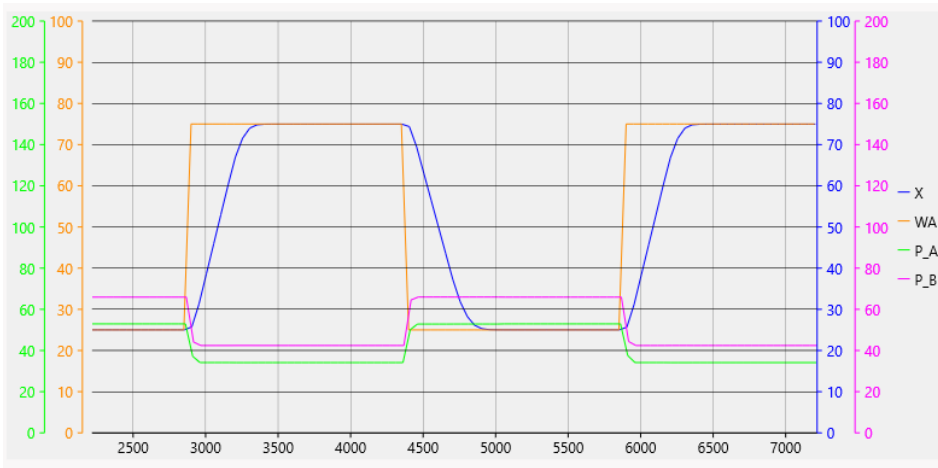


Da der Druck nun konstant bleibt, ist die Bewegung genauso schnell wie bei der Variante mit Speicher. Die Leistungsaufnahme pulsiert nun und erreicht ihre Maxima während der Bewegungen.

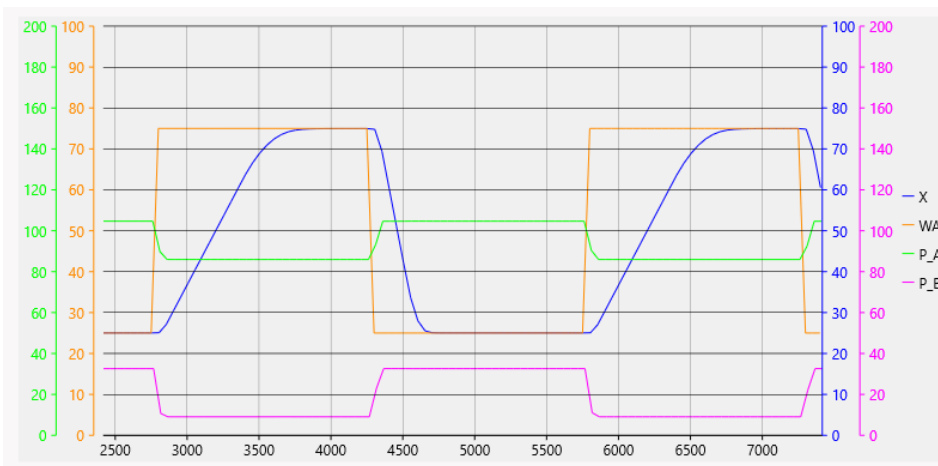
Die Zyklusenergie liegt mit 6,23 kJ jedoch bei unter 30% des vorherigen Wertes!

## 6.3.2 Lastkräfte

Hier ist eine geänderte Signalauswahl interessant, bei der man die Drücke in den Zylinderkammern hinzunimmt:



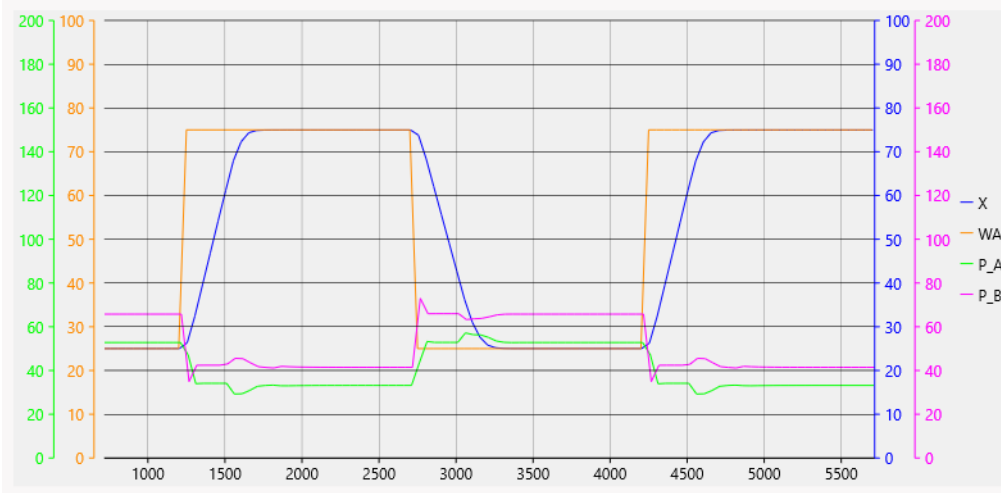
Mit konstanter Lastkraft von 50 kN gegen A:



Die Druckverhältnisse im Zylinder ändern sich aufgrund der Belastung stark, so dass nun der Druck auf Seite A stets höher ist. Da die Kraft immer in dieselbe Richtung wirkt, handelt es sich bei Einfahren um eine antreibende Last. Dennoch ist bei den hier gewählten Verhältnissen der Druck auf Seite B immer  $\geq 9$  bar, so dass dort keine Gefahr der Kavitation besteht. Lasthalteventile sind also nicht erforderlich. Deutlich zu erkennen ist aber nun das asymmetrische Bewegungsprofil, das Ausfahren geht deutlich langsamer vonstatten als das Einfahren. Hier könnte man nun weiter experimentieren und eine Signalbegrenzung in Richtung B über den Parameter MAX:B ausprobieren, oder den Regler auf NC – Modus umstellen, so dass die Bewegung dem Sollprofil folgt.

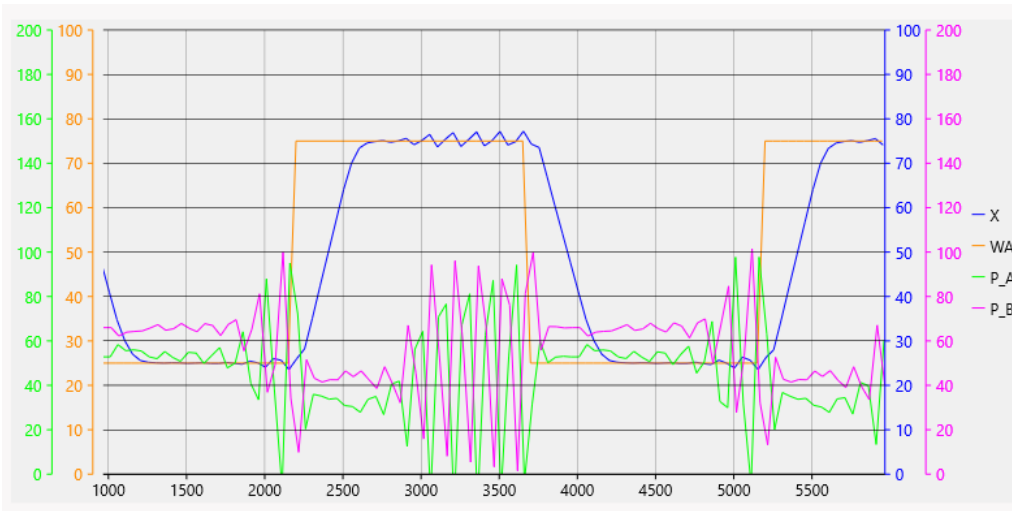
### 6.3.3 Leitungsvolumina

Die Lastkraft wird wieder zurückgesetzt und die bewegte Masse MOVMA auf 5000 kg erhöht:



Jetzt kann man an den Druckverläufen die Beschleunigungskräfte erkennen.

Im nächsten Schritt werden die Totvolumina VTOTA / VTOTB von 0,2 auf jeweils 2 l erhöht. Das Resultat ist ein instabiles Verhalten des Positionsreglers in den Phasen, in denen dieser im Eingriff ist, insbesondere in Richtung A:



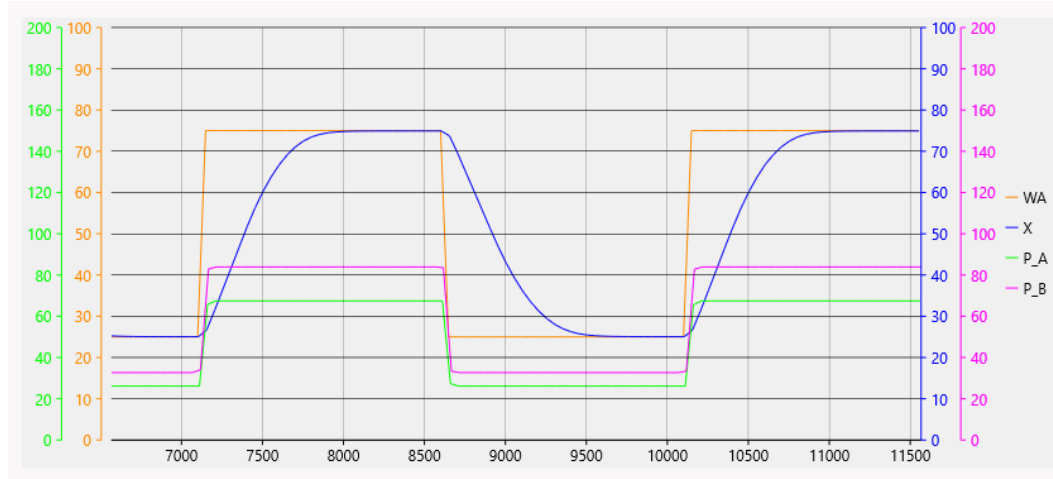
Dies entspricht der theoretischen Vorhersage, da die hydraulische Eigenfrequenz des Antriebs nun abgenommen hat. Durch Verlängerung der Bremswege D:A / D:B kann die Schwingung wieder eliminiert werden. Damit ist aber auch eine Verschlechterung der Regelgenauigkeit verbunden.

## 6.3.4 Asymmetrisches Ventil

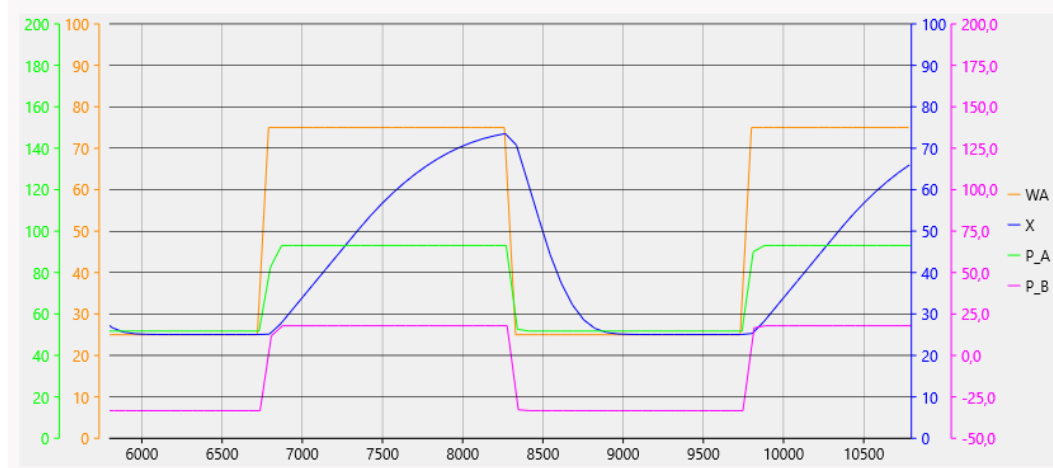
Der simulierte Zylinder ist ein Differentialzylinder mit einem Flächenverhältnis von ca. 1,24 (A zu B). Es soll nun untersucht werden, wie das Verhalten des Antriebs ist, wenn man ein Ventil mit unterschiedlichen Durchflüssen für A und B verwendet, z.B. im Verhältnis 2:1.

Hierzu werden die Simulationen aus Abschnitt 6.3.2 (Lastkräfte) mit diesem Ventilschieber wiederholt.

Zunächst betrachten wir den Fall ohne Lastkraft:



Man erkennt, dass das Druckniveau in beiden Zylinderkammern beim Ausfahren erhöht und beim Einfahren verringert ist. Ein Ventil mit ideal auf den Zylinder angepassten Durchflüssen würde hingegen in beiden Richtungen annähernd dieselben Drücke liefern. Die Geschwindigkeit ist für beide Richtungen verringert.



Addiert man nun die Lastkraft, so sinkt der Druck in Kammer B durch die antreibende Last beim Einfahren bis unter „0“. Im realen System könnte der Druck natürlich keine negativen Werte annehmen, die Simulation verarbeitet dies trotzdem, um in jedem Fall ein numerisch stabiles Verhalten zu wahren. In der Realität würde im Öl gelöste Luft sich nun trennen und Blasen bilden, was man auf jeden Fall vermeiden sollte.

Erst eine Erhöhung des Versorgungsdruckes auf Werte um ca. 250 bar führt in dieser Konstellation nun dazu, dass genug Öl in Kammer B nachströmen kann.

Bei dem gegebenen System ist also die Verwendung eines 2:1 Schiebers keine gute Lösung.

## 7 Notizen