

**Fachbereiche
Elektrotechnik und Informatik
sowie
Mechatronik und Maschinenbau**



FACHHOCHSCHULE BOCHUM
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

**Abschlussarbeit zum
Master of Engineering in Mechatronics**

**Entwurf von Regelalgorithmen für eine
elektrohydraulische Lenkung**

Philipp Kaiser

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig angefertigt habe und nur die im Anhang aufgeführten Hilfsmittel benutzt wurden.

Bochum, den 24.02.2006

Betreuung

Prof. Dr.-Ing. Michael Pohl (FH Bochum)

Prof. Dr.-Ing. Thomas Nied-Menninger (FH Bochum)

Danksagung

Mein Dank gilt allen Professoren, Mitarbeitern und Studenten, die mich bei der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt haben:

- Prof. Dr.-Ing. Michael Pohl und Prof. Dr.-Ing. Thomas Nied-Menninger für die Betreuung dieser Arbeit und die fachliche Begleitung auf den Gebieten der Regelungstechnik und der Hydraulik
- Dipl.-Ing. Ilona Moritz für die gute Zusammenarbeit im Labor für Steuerungs- und Regelungstechnik
- Dipl.-Ing. Harry Preuß und Dipl.-Ing. Marcel Vollbrecht für die tatkräftige Unterstützung im Labor für Antriebstechnik
- Dipl.-Ing. Josef Otte für die Hilfe bei elektrotechnischen Fragestellungen
- Der Projektgruppe „Frequenzgangmessung“ mit Timo Stell, Oliver Abendroth und Martin Wohlleb für die gute Zusammenarbeit bei den Messungen am Fahrzeug
- Der Projektgruppe „dSPACE“ mit Sascha Severin, Julian Zimmer und Stefan Mulorz für die Inbetriebnahme der MicroAutoBox

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	7
1.1 Projekt „X-by-Wire-Fahrzeug“	7
1.2 Aufgabenstellung	8
1.3 Steer-by-Wire	9
1.3.1 Zahnstangenhydrolenkung.....	10
1.3.2 Modifikation der Lenkung	13
1.4 Entwicklungsstrategie	15
1.5 Hard- und Software	15
2. Frequenzgangmessung.....	17
2.1 Grundlagen	17
2.2 Hauptprogramm „Frequenzgangmessung“	19
2.2.1 Unterprogramm „Signalerzeugung“	24
2.2.2 Unterprogramm „Analyse“	29
2.2.3 Unterprogramm „Maximum“	31
2.3 Verifizierung der Messung	33
2.4 Systemidentifikation	34
3. Untersuchungen am Prüfstand.....	38
3.1 Vorgehensweise.....	38
3.2 Pumpenkennlinien	39
3.2.1 Aufbau des Prüfstands.....	39
3.2.2 Hauptprogramm „Pumpenkennlinienmessung“	41
3.2.3 Unterprogramm „Signalerzeugung“	45
3.2.4 Aufnahme der Kennlinien.....	47
3.3 Ventilkennlinien.....	50
3.3.1 Erweiterung des Prüfstands	50
3.3.2 Hauptprogramm „Ventilkennlinienmessung“	52
3.3.3 Aufnahme der Kennlinien.....	53
3.4 Interpretation der Ergebnisse	58
3.5 Frequenzgang des Ventils.....	60
3.6 Entwurf einer Druckregelung am Prüfstand	61
3.6.1 MicroAutoBox.....	61
3.6.2 Reglerentwurf und Stabilität im Frequenzgang	62

3.6.3	Praktische Umsetzung der Regelung.....	66
4.	Untersuchungen am Fahrzeug.....	68
4.1	Vorgehensweise.....	68
4.1.1	Messumgebung.....	68
4.2	Ventilkennlinie.....	69
4.3	Frequenzgang.....	71
4.4	Erweiterung und Test der Druckregelung.....	73
5.	Zusammenfassung & Ausblick	76
A.	Anhang	77
A.1	Quellenangaben	77
A.2	Datenblätter & Dokumente	78
A.2.1	Bosch Regelventil	78
A.2.2	dSPACE MicroAutoBox.....	78
A.2.3	Intra-Automation Druckaufnehmer	78
A.2.4	National Instruments Messkarte PCI-6229.....	78
A.2.5	Unterlagen Frequenzgang	78
A.2.6	Zukünftige verbrauchsarme Servolenkungen.....	78
A.3	Messwerte.....	78
A.3.1	Pumpenkennlinie.....	79
A.3.2	Ventilkennlinie auf dem Prüfstand.....	80
A.3.3	Ventilkennlinie im Fahrzeug	81
A.3.4	Frequenzgänge Negativer Ast.....	82

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Das Versuchsfahrzeug	8
Abbildung 1-2: Funktionsprinzip einer Zahnstangenhydrolenkung	10
Abbildung 1-3: Pumpe mit Stromregelventil und Kennlinie	11
Abbildung 1-4: Modifikation der Zahnstangenhydrolenkung	13
Abbildung 1-5: Software LabVIEW 7.1 und Messkarte PCI-6229	15
Abbildung 2-1: Anregungs- und Antwortsignal eines linearen Systems	17
Abbildung 2-2: Phasenverschiebung und Amplitudenverhältnis	18
Abbildung 2-3: Beispiel für ein Bode-Diagramm	18
Abbildung 2-4: Frontpanel der Frequenzgangmessung	20
Abbildung 2-5: Blockdiagramm der Frequenzgangmessung	21
Abbildung 2-6: ausgewertete Schwingungen	23
Abbildung 2-7: Frontpanel der Signalerzeugung	25
Abbildung 2-8: Blockdiagramm der Signalerzeugung	26
Abbildung 2-9: Zeitintervall von $dt = 0,05$ s	28
Abbildung 2-10: Frontpanel der Signalanalyse	29
Abbildung 2-11: Blockdiagramm der Signalanalyse	30
Abbildung 2-12: Frontpanel der Signalauswertung	31
Abbildung 2-13: Blockdiagramm der Signalauswertung	32
Abbildung 2-14: RC-Tiefpass	33
Abbildung 2-15: Bode-Diagramm des Tiefpasses (Messung und Berechnung)	34
Abbildung 2-16: Bode-Diagramm des Tiefpasses (Messung und Annäherung)	36
Abbildung 3-1: Lenkhilfepumpe	38
Abbildung 3-2: Pumpe auf dem Prüfstand	39
Abbildung 3-3: Drehzahl über Ansteuerspannung	41
Abbildung 3-4: Frontpanel der Pumpenkennlinienmessung	42
Abbildung 3-5: Blockdiagramm der Pumpenkennlinienmessung	43
Abbildung 3-6: Frontpanel der Signalerzeugung	45
Abbildung 3-7: Blockdiagramm der Signalerzeugung	46
Abbildung 3-8: Pumpenkennlinien bei 50°C	48
Abbildung 3-9: Pumpenkennlinien bei 80°C	49
Abbildung 3-10: Pumpe und Ventil auf dem Prüfstand	50
Abbildung 3-11: Frontpanel der Ventilkennlinienmessung	52

Abbildung 3-12: Blockdiagramm der Ventilkennlinienmessung	53
Abbildung 3-13: Ventilkennlinien bei 25 °C.....	55
Abbildung 3-14: Ventilkennlinien bei 50 °C.....	56
Abbildung 3-15: Ventilkennlinien bei 80 °C.....	57
Abbildung 3-16: Prüfstand-Ventilkennlinie mit Frequenzgang-Messbereichen.....	59
Abbildung 3-17: Frequenzgang des Ventils auf dem Prüfstand.....	60
Abbildung 3-18: MicroAutoBox	61
Abbildung 3-19: Frequenzgang im negativen Ast der Kennlinie mit Näherung.....	62
Abbildung 3-20: Blockschaltbild des Regelkreises in Matlab Simulink	63
Abbildung 3-21: Frequenzgang des offenen Regelkreises	65
Abbildung 3-22: Blockschaltbild der Regelstruktur für die MicroAutoBox	66
Abbildung 3-23: Verhalten des Regelkreises bei diversen Sollwertsprüngen.....	67
Abbildung 4-1: Messumgebung im Versuchsfahrzeug	68
Abbildung 4-2: Fahrzeug-Ventilkennlinie mit Frequenzgang-Messbereichen.....	70
Abbildung 4-3: Frequenzgang des Ventils im Fahrzeug	71
Abbildung 4-4: Vergleich der Frequenzgänge im negativen Kennlinien-Ast	72
Abbildung 4-5: Erweiterung der Druckregelung um das Handmoment.....	73
Abbildung 4-6: Druckregelung mit Handmoment als Sollwertvorgabe.....	74
Abbildung 4-7: Schwingungen von ungefähr 12 Hertz.....	75

1. Einleitung

1.1 Projekt „X-by-Wire-Fahrzeug“

Die technische Entwicklung in der Automobilbranche schreitet rasant voran. Die Verbesserung von Sicherheit, Komfort und vor allem der enorme Innovationsdruck lassen den Anteil der Automobilelektronik stetig wachsen. Der Einsatz moderner Steuerungstechnik und Datenverarbeitung bringt immer neue Funktionalitäten. Gleichzeitig befindet sich die herkömmliche Technik auf dem Prüfstand und wird teilweise durch neuartige mechatronische Systeme ersetzt. Häufig spricht man in diesem Zusammenhang von Drive-by-Wire. Der Name bringt bereits das wesentliche Merkmal dieser Technologie zum Ausdruck: Der Fahrerwunsch wird nicht mehr mechanisch an die Aktuatoren übertragen, sondern über elektrische Signalleitungen. Vorbild für diese Technologie ist das aus der Luftfahrt bekannte Fly-by-Wire. Angesichts der langen Signalstrecken in den heutigen Flugzeugen wird schnell deutlich, aus welcher Motivation heraus die mechanischen Kopplungen durch elektrische Leitungen ersetzt wurden. Allerdings müssen die Systeme aus Sicherheitsgründen teilweise in heißer Fünffachredundanz¹ ausgeführt werden, was immense Kosten verursacht. Der Ausfall der elektrischen Versorgung darf in keinem Fall zu einem gefährlichen Betriebszustand führen. Deshalb sind Kosten- und Sicherheitsaspekte die größten Hürden auf dem Weg zur Serienreife von X-by-Wire-Systemen. Im Automobilbereich unterscheidet man diese nach den Fahrzeugfunktionen:

- Brake-by-Wire (Bremsen)
- Accelerate-by-Wire (Beschleunigen)
- Shift-by-Wire (Schalten)
- Steer-by-Wire (Lenken)

Zur Erforschung dieser Bereiche verfügt das Automotivelabor der Fachhochschule Bochum über ein Versuchsfahrzeug, an dem Entwicklungsprojekte, Diplom- und Masterarbeiten durchgeführt werden. Der Volkswagen Kleinbus der Baureihe T4 wurde in der Vergangenheit peu à peu mit mechatronischen Komponenten ausgerüstet. Genauere Informationen zu diesen Umbaumaßnahmen sind den entsprechenden Dokumentationen zu entnehmen. Das Thema dieser Masterarbeit ist

¹ Fünf parallel arbeitende Systeme mit gleicher Funktion zur gegenseitigen Fehlerabsicherung

das Lenksystem auf der Grundlage des in der Vergangenheit umgebauten Hydraulikkreislaufs. Die Veränderungen werden später detailliert erläutert.



Abbildung 1-1: Das Versuchsfahrzeug

1.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabe besteht darin, das bereits modifizierte Lenksystem unter anderem mittels Frequenzgangmessungen ausführlich zu untersuchen. Mit den Ergebnissen soll eine elektrohydraulische Lenkunterstützung realisiert werden, die in ihrer Funktionsweise der mechanisch-hydraulischen Lenkunterstützung entspricht. Die benötigten Regelalgorithmen sollen auf einer dSPACE MicroAutoBox implementiert werden. Das genaue Thema lautet:

„Entwurf von Regelalgorithmen für eine elektrohydraulische Servolenkung unter Zuhilfenahme von Frequenzgangmessungen sowie Implementation in einem Embedded Automotivecontroller“

1.3 Steer-by-Wire

Die Hauptaufgabe der Servolenkung eines Kraftfahrzeugs besteht darin, dem Fahrer in jeder Fahrsituation einen komfortablen Kraftaufwand beim Lenken zu garantieren. Es müssen also ausreichend schnell hinreichend hohe Unterstützungskräfte erzeugt werden, um das vom Fahrer am Lenkrad aufgebrauchte Handmoment zu verstärken und somit das Lenken zu erleichtern. Herkömmliche Servolenkungen, wie die weit verbreitete Zahnstangenhydrolenkung (siehe nächstes Kapitel), bekommen dabei mittlerweile Konkurrenz von zahlreichen mechatronischen Systemen, die Einfluss auf das Handmoment oder auch direkt auf den Radlenkwinkel nehmen. Insbesondere der hohe Kraftstoffverbrauchsanteil heutiger hydraulischer Servolenkungen führte in den letzten Jahren zur Entwicklung elektrischer (**electric power-steering**) und elektrohydraulischer (**electrohydraulic power-steering**) Servolenkungen. Hier wird die Lenkunterstützung durch eine von einem Elektromotor angetriebene Pumpe oder direkt durch einen Elektromotor und ein Getriebe an der Lenksäule, am Lenkgetrieberitzel oder an der Zahnstange erzeugt. Beide Systeme reduzieren hierdurch den Kraftstoffverbrauchsanteil im Vergleich zu einer hydraulischen Servolenkung, weil die Pumpe nur dann arbeitet, wenn Servounterstützung nötig ist. Darüber hinaus bietet eine EPS neue Möglichkeiten zur Beeinflussung des Lenkmoments. Allerdings belasten beide Systeme das elektrische Bordnetz, ihr Einsatzbereich ist daher auf niedrige Fahrzeuggewichte begrenzt. [1] Eine weitere wichtige Anforderung an zukünftige Lenksysteme ist die vollständige Steer-by-Wire-Funktionalität. Diese ermöglicht den Eingriff eines Steuergeräts in das Lenkverhalten unabhängig vom Handmoment des Fahrers. Dadurch wird die Servokraft regelbar. Eine mechanisch durchgängige Lenksäule als manuelle Rückfallebene garantiert die Sicherheit und die Nutzung der Lenkarbeit des Fahrers. Die Anforderungen an zukünftige Lenksysteme lauten zusammengefasst:

- Ermöglichen von voller Steer-by-Wire- Funktionalität unter Beibehaltung oder Optimierung des gewohnten Lenkgefühls
- Signifikante Reduktion des Kraftstoffverbrauchsanteils im Vergleich zu heutigen hydraulischen Servolenkungen
- Hinreichendes Leistungsvermögen für alle Fahrzeugklassen

Das Konzept des Automotivelabors der Fachhochschule Bochum basiert auf der Zahnstangenhydrolenkung, die um ein elektrohydraulisches Servoventil erweitert wurde. Zunächst wird jedoch die konventionelle Zahnstangenhydrolenkung erläutert.

1.3.1 Zahnstangenhydraulenkung

Die heute in Personenkraftwagen meistverbreitete hydraulische Servolenkung ist die Zahnstangenhydraulenkung (siehe Abbildung). Auch das Versuchsfahrzeug war ursprünglich mit dieser Art Servolenkung ausgestattet. Darunter versteht man eine mechanische Lenkung mit hydraulischer Lenkkraftunterstützung.

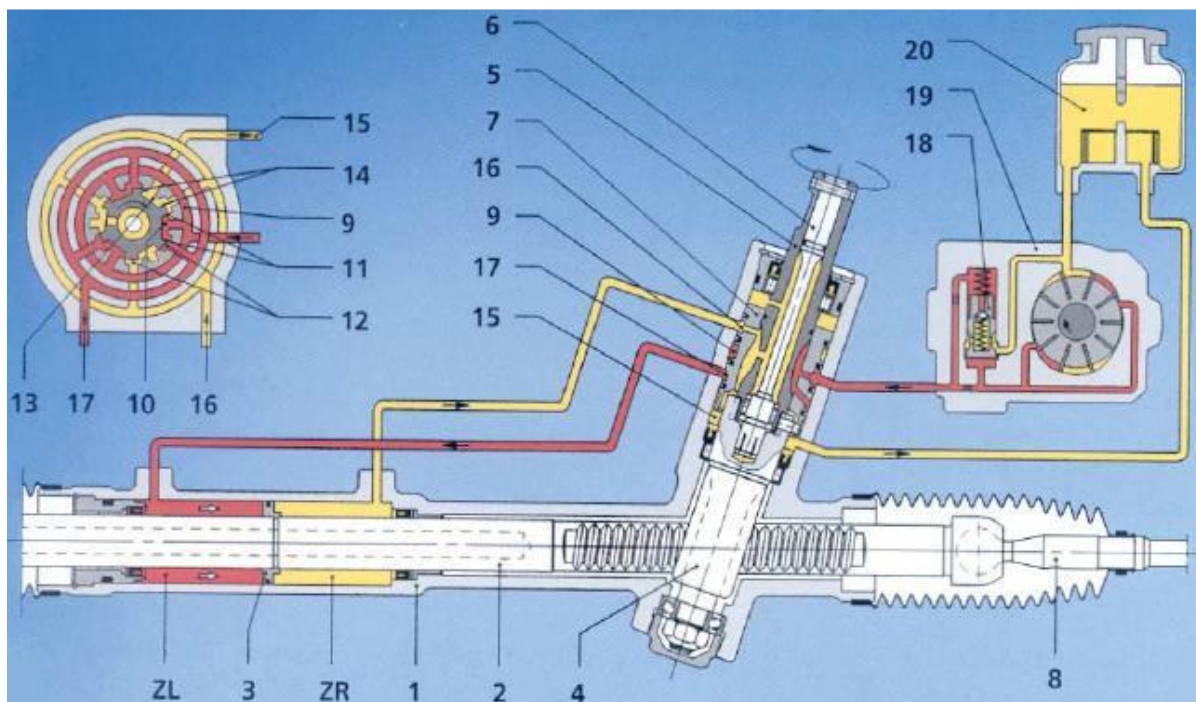


Abbildung 1-2: Funktionsprinzip einer Zahnstangenhydraulenkung

Während des Lenkvorgangs bringt der Fahrer am Lenkrad ein Drehmoment, das so genannte Handmoment, auf. Er bewegt damit nicht nur die Zahnstange und somit die Räder, sondern verursacht auch die Verdrehung des Drehschiebers (5) in einer Ventileinheit, welche sich im Ventilgehäuse am Ritzel befindet. Die Verdrehung erfolgt relativ zu einer Steuerbuchse (7) und gegen den Torsionswiderstand eines Drehstabs (6). Die Lenkhilfepumpe (19) fördert permanent Hydrauliköl (z.B. Pentosin CHF 11S) in das Ventil hinein. In Nullstellung ist die Druckseite mit dem Tank (20) verbunden. Bei Torsion erfolgt die Öffnung von Einlassschlitzen, so dass Drucköl in den linken (ZL) oder rechten (ZR) Arbeitszylinder des Lenkgetriebes gelangt. Durch die Druckdifferenz wird über einen Kolben (3) eine resultierende Kraft auf die Zahnstange (2) erzeugt. Diese Kraft unterstützt den Fahrer bei der Lenkbewegung. Der Drehstab ist entscheidend für die Lenkpräzision und das Lenkgefühl. Die

Lenkkräfteunterstützung ist auf die jeweilige Fahrsituation angepasst. Bei kleinen Lenkausschlägen ist sie kleiner und bei großen Lenkausschlägen größer. Somit wirkt die Lenkung bei kleineren Korrekturen der Fahrtrichtung auf der Autobahn mechanisch direkter, weil wegen der kleinen Kräfte kaum Lenkunterstützung erfolgt. Dagegen ist die hydraulische Unterstützung beim Parkieren größer und dem Fahrer wird die meiste Lenkarbeit abgenommen.

Ein großer Nachteil der Zahnstangenhydraulenkung hängt mit dem Antrieb der Pumpe zusammen. In den meisten Fällen wird eine Flügelzellenpumpe eingesetzt, die über einen Riemen vom Verbrennungsmotor angetrieben wird. Der geförderte Volumenstrom bestimmt die Zahnstangengeschwindigkeit, abhängig von der Kolbengeometrie des Lenkgetriebes, und damit die Empfindlichkeit der Lenkung. Deshalb basiert die Auslegung der Pumpe auf dem Volumenstrom bei Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors. Aus energetischen Gründen und um ein sich mit der Motordrehzahl änderndes Lenkgefühl zu vermeiden, wird für Drehzahlen über der Leerlaufdrehzahl das nicht benötigte Öl über ein ungeregeltes Stromregelventil (18) in der Pumpe umgewälzt. Der in das Lenkgetriebe geförderte Volumenstrom bleibt folglich ab der Leerlaufdrehzahl etwa konstant.

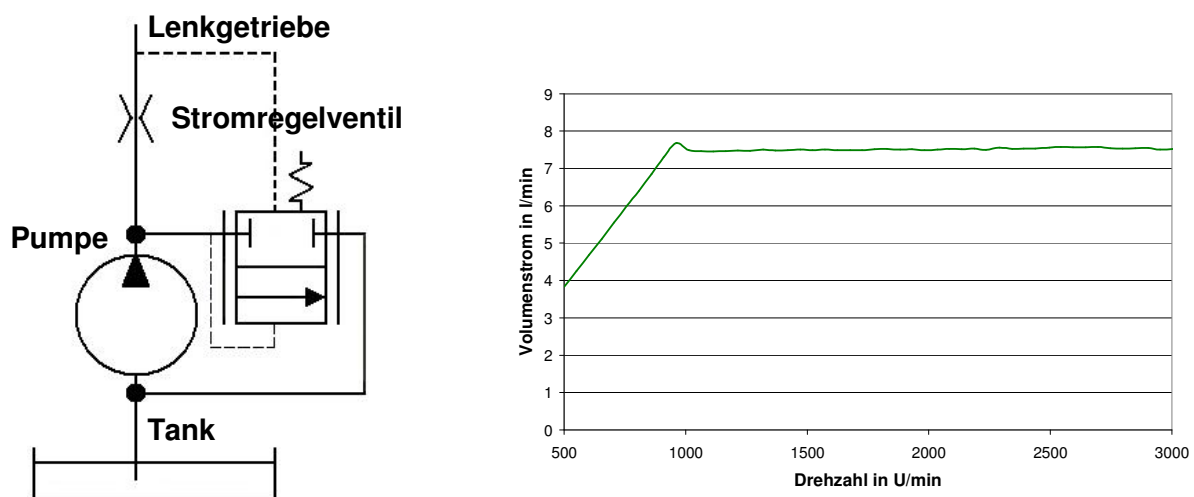


Abbildung 1-3: Pumpe mit Stromregelventil und Kennlinie

Bei Geradeausfahrt mit hoher Geschwindigkeit ergibt sich eine unnötig große Leistungsaufnahme. Obwohl wenig Kraftunterstützung benötigt wird, fördert die Pumpe abhängig von der Drehzahl des Verbrennungsmotors. Die hierbei von der

Pumpe aufgenommene Leistung ist somit reine Verlustleistung und ergibt sich aus dem mit der Pumpendrehzahl ansteigenden Volumenstrom der Pumpe, dem Druckabfall im Lenksystem und dem Wirkungsgrad der Pumpe.

$$P_{Verlust} = \frac{1}{\eta_P} \cdot Q_P \cdot \Delta p \quad (1)$$

$P_{Verlust}$	Verlustleistung
η_P	Wirkungsgrad der Pumpe
Q_P	Volumenstrom der Pumpe
Δp	Druckabfall im Lenksystem

Die dargestellte Pumpenkennlinie wird später gemessen. Die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchsanteils durch neue Lenkkonzepte ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

1.3.2 Modifikation der Lenkung

Beim Umbau der Lenkung des Versuchsfahrzeugs stand die Gewährleistung vollständiger Steer-by-Wire-Funktionalität im Vordergrund (siehe abgeschlossene Projekt- und Diplomarbeiten). Deshalb wurde das mechanisch-hydraulische Drehschieberventil durch ein elektrohydraulisches Servoventil ersetzt. In beiden Fällen handelt es sich um 4/3-Wegeventile mit offener Mitte (Open-Center). Der entscheidende Vorteil des Servoventils liegt in der elektronischen Ansteuerung. Diese ermöglicht den Eingriff in das Lenkverhalten mit einem Steuergerät und damit auch den Einsatz von Regelungsalgorithmen.

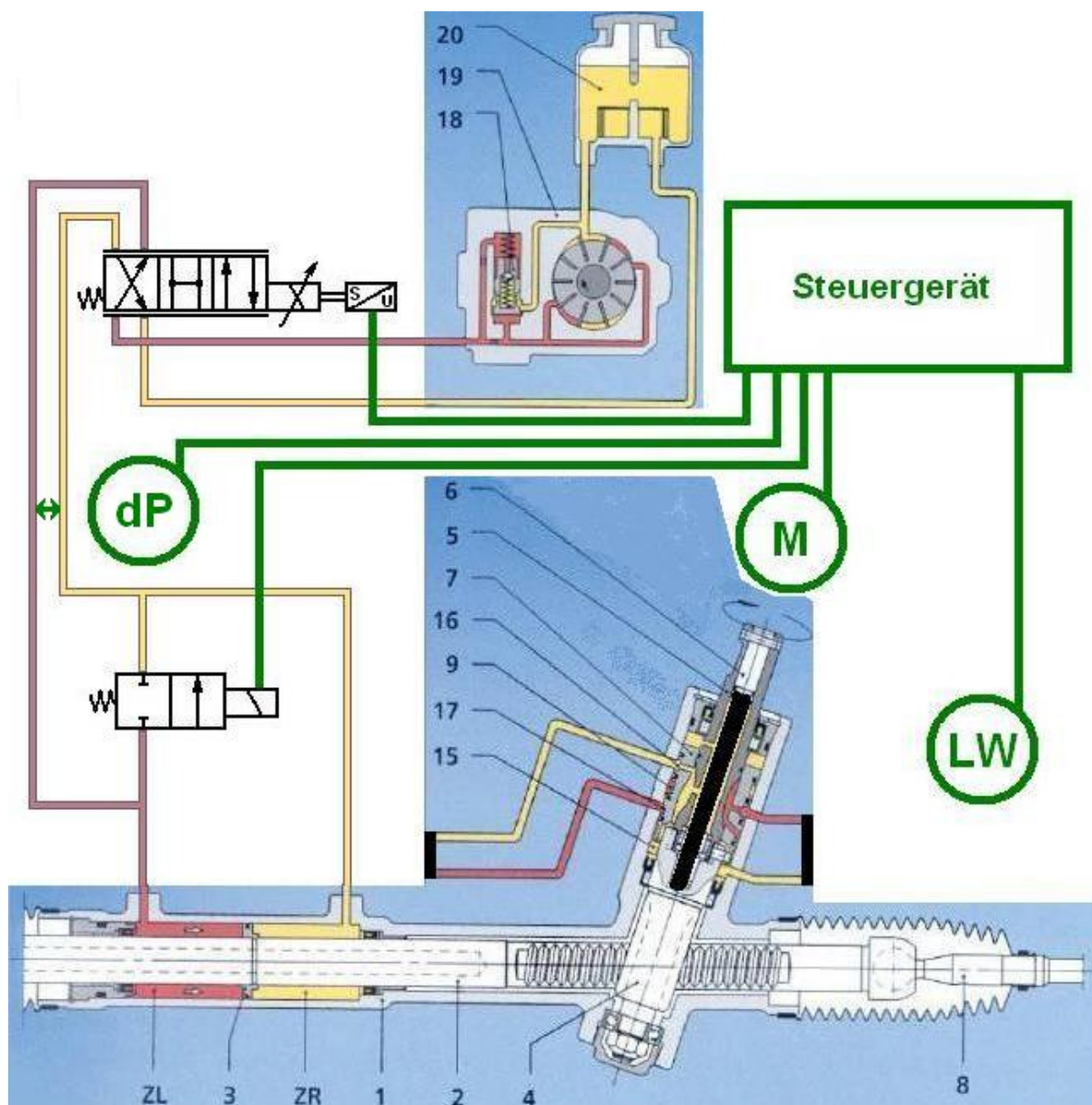


Abbildung 1-4: Modifikation der Zahnstangenhydraulenkung

Der Ventilschieber des Servoventils wird von einem Proportionalmagneten bewegt. Eine spezielle Regelkarte regelt die Position des Schiebers in Abhängigkeit von der angelegten Steuerspannung (-10 Volt bis +10 Volt). Das neue Ventil ist das Ergebnis einer Diplomarbeit. [2] Es basiert auf einem Bosch Regelventil NG 6. Dabei handelt es sich eigentlich um ein 4/4-Wegeventil mit geschlossener Mitte und einer Fail-Safe-Stellung, in der alle Anschlüsse abgesperrt sind. Bei der Neukonstruktion der hydraulischen Hauptstufe wurde aus Gründen der Baugröße auf diese Schaltstellung verzichtet. Fällt die Versorgungsenergie aus, drückt eine Feder den Steuerschieber in einen Endanschlag. Dabei wird der Volumenstrom auf eine der beiden Zylinderseiten geleitet und verursacht einen Vollausschlag der Räder. Aus diesem Grund wurde ein elektromagnetisch betätigtes 2/2-Wegeventil zwischen die beiden Arbeitsanschlüsse montiert. Es ist stromlos geöffnet und bildet bei Ausfall der Versorgungsenergie einen Bypass. Durch die dann bestehende Verbindung gleicht sich der Druck in beiden Zylinderkammern aus und der Fahrer kann mechanisch lenken.

Die Realisierung von Regelalgorithmen setzt nicht nur die elektronische Ansteuerung des Ventils voraus, sondern auch genaue Kenntnisse über den Zustand des Systems. Deshalb sind in zahlreichen Projekt- und Diplomarbeiten Sensoren angebracht und teilweise selbst entwickelt worden. Am Lenkrad werden das vom Fahrer aufgebrachte Handmoment und der Lenkradwinkel gemessen. Druckaufnehmer in den Arbeitsleitungen des Ventils geben Aufschluss über die Druckdifferenz zwischen beiden Zylinderkammern der Lenkhilfe. Parallel zu dieser Masterarbeit wird die Erfassung des tatsächlichen Lenkwinkels der Räder realisiert. Eine weitere Besonderheit der modifizierten Lenkung resultiert aus dem ursprünglichen Ansatz der Neugestaltung. Das Servoventil sollte die gleiche Charakteristik aufweisen wie das Drehschieberventil und dieses 1:1 ersetzen. Anstelle der direkten Betätigung durch das Handmoment sollte dieses gemessen und als Steuerspannung auf das Ventil gegeben werden. Bei ersten rudimentären Regelungsversuchen ergab sich ein schwach gedämpftes System. Als Ursache wurde die Schwingungsfähigkeit des Drehstabs vermutet. Deshalb wurde dieser entfernt. Bei der modifizierten Lenkung besteht also eine steife Verbindung zwischen dem Lenkrad und dem Ritzel, welches in die Zahnstange greift.

1.4 Entwicklungsstrategie

Das Ziel dieser Masterarbeit ist die Realisierung einer elektrohydraulischen Lenkunterstützung mit den hier beschriebenen Komponenten. Ausgehend vom Handmoment des Fahrers (also der vorhandenen Drehmomentmessung) und der jeweiligen Fahrsituation müssen die Unterstützungskräfte geregelt werden. Folgende Arbeitsschritte sind vorgesehen:

- Programmierung einer Frequenzgangmessung mit LabVIEW, um das Verhalten des Servoventils im Frequenzbereich untersuchen zu können
- Messung der Kennlinien der Lenkhilfepumpe auf dem Prüfstand
- Aufnahme der statischen Kennlinien des Servoventils auf dem Prüfstand
- Messung von Frequenzgängen in verschiedenen Bereichen der Kennlinie des Servoventils
- Entwurf einer Druckregelung auf dem Prüfstand, implementiert in einer dSPACE MicroAutoBox
- Testen der Druckregelung im Fahrzeug (erweitert um die Messung des Handmoments als Sollwertvorgabe)

1.5 Hard- und Software

Zur Durchführung von Frequenzgangmessungen und zum Aufnehmen von Kennlinien steht ein System der Firma National Instruments zur Verfügung. Die Erfassung der Messdaten erfolgt mit einer Messkarte vom Typ PCI-6229. Die Konfiguration der Karte und die eigentlichen Messabläufe werden mit der Software LabVIEW 7.1 programmiert.

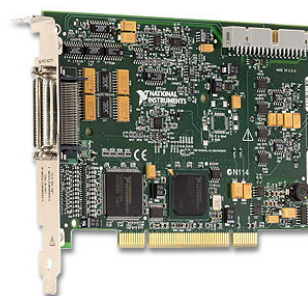


Abbildung 1-5: Software LabVIEW 7.1 und Messkarte PCI-6229

Einige ausgewählte Spezifikationen der Messkarte:

- Analog-Eingänge: 32 (single ended) bzw. 16 (differential)
- Maximale Abtastrate: 250 kS/s
- Analog-Ausgänge: 4
- Maximale Updaterate: 833 kS/s
- Auflösung (ADC und DAC): 16 Bit
- Eingangs- und Ausgangsspannungsbereich: ± 10 V
- Digitale Kanäle: 48

LabVIEW (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench) ist eine graphische Programmiersprache, die aus der Mess- und Automatisierungstechnik stammt. Der entscheidende Vorteil gegenüber textorientierten Programmiersprachen liegt in der blockorientierten Arbeitsweise, die das Erstellen von Quellcode überflüssig macht. LabVIEW-Programme nennt man VIs (**V**irtuelle **I**nstrumente). Diese bestehen aus zwei Ebenen: Auf der Bedienebene (Frontpanel) platziert der Anwender alle Bedienelemente (Textfelder, Füllstandsanzeigen, Digitalanzeigen, Drehschalter, Taster, Graphen etc.), die zur Steuerung des Programms benötigt werden. Diese Elemente werden auf der Programmierenebene (Blockdiagramm) mit weiteren Funktionsblöcken zum eigentlichen Programm verbunden. Dabei repräsentieren die Verbindungen unterschiedliche Datentypen (Floatingpoint, Integer, Boolesche Variablen, Strings, Arrays, Cluster, dynamische Datentypen etc.) und unterscheiden sich entsprechend in Linienstärke, Muster und Färbung. In sehr umfangreichen Bibliotheken finden sich Blöcke für die verschiedensten Funktionen (Timing, Kontrollstrukturen, Mathematik, Schnittstellen, Datenerfassung, Anwenderdialoge etc.). Jedes VI kann als Unterprogramm (Sub-VI) eingesetzt werden, indem man Elemente des Frontpanels als Ein- und/oder Ausgänge definiert.

Das folgende Kapitel beschäftigt sich ausführlich mit der Theorie, der Programmierung und der Auswertung einer Frequenzgangmessung.

2. Frequenzgangmessung

2.1 Grundlagen

Das Verhalten eines kontinuierlichen linearen Systems wird im Zeitbereich mit Hilfe der gewöhnlichen Differentialgleichung beschrieben. [3] Durch die Anwendung der Laplace-Transformation auf diese Gleichung und Umformungen erhält man die Übertragungsfunktion des Systems. Für den Spezialfall $s = j\omega$ geht die Übertragungsfunktion $G(s)$ in den Frequenzgang $G(j\omega)$ über. Dieser kann unmittelbar physikalisch interpretiert und auch gemessen werden. Jedes lineare kontinuierliche System, das mit sinusförmigen Signalen angeregt wird, führt nach dem Einschwingen ebenfalls sinusförmige Schwingungen der gleichen Frequenz aus. Dabei stellen sich jedoch eine andere Amplitude und eine Phasenverschiebung zum Anregungssignal ein.

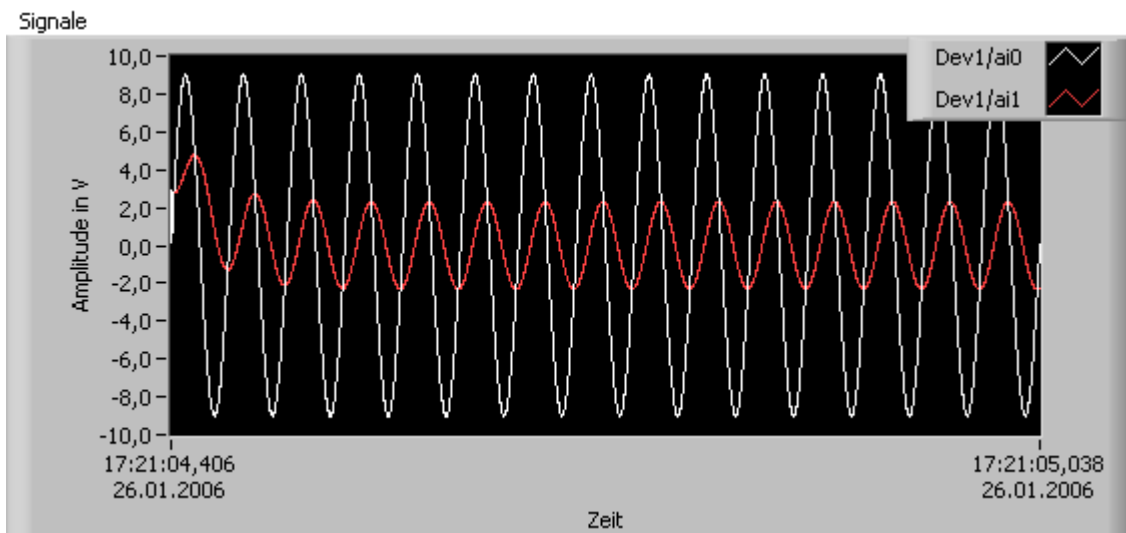


Abbildung 2-1: Anregungs- und Antwortsignal eines linearen Systems

Trägt man das Verhältnis von Ausgangsamplitude zu Eingangsamplitude sowie die Phasenverschiebung über der Frequenz auf, so erhält man die Frequenzkennlinien-Darstellung. Wählt man hierbei für das Amplitudenverhältnis und die Frequenz logarithmische Achsen und trägt die Phasenverschiebung linear auf, so nennt man die Darstellung Bode-Diagramm.

In den meisten technisch relevanten Fällen handelt es sich jedoch um nichtlineare Systeme, deren Verhalten sehr schwierig zu beschreiben ist. Durch Linearisierung um den Arbeitspunkt oder in linearen Bereichen der Kennlinie können aber trotzdem

die bekannten Verfahren angewendet werden. Der Frequenzgang eines offenen Regelkreises liefert Informationen über das Verhalten des geschlossenen Regelkreises (Phasenreserve, Durchtrittsfrequenz etc.) und kann für einen graphischen Reglerentwurf verwendet werden.

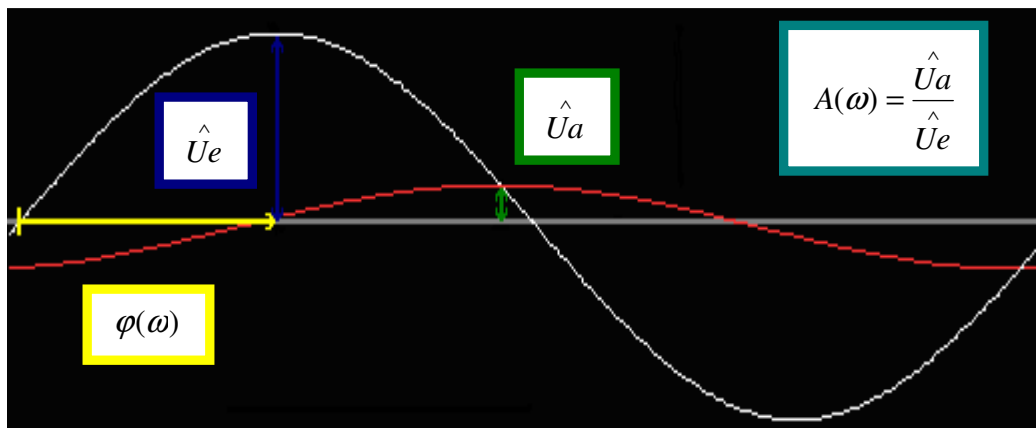


Abbildung 2-2: Phasenverschiebung und Amplitudenverhältnis

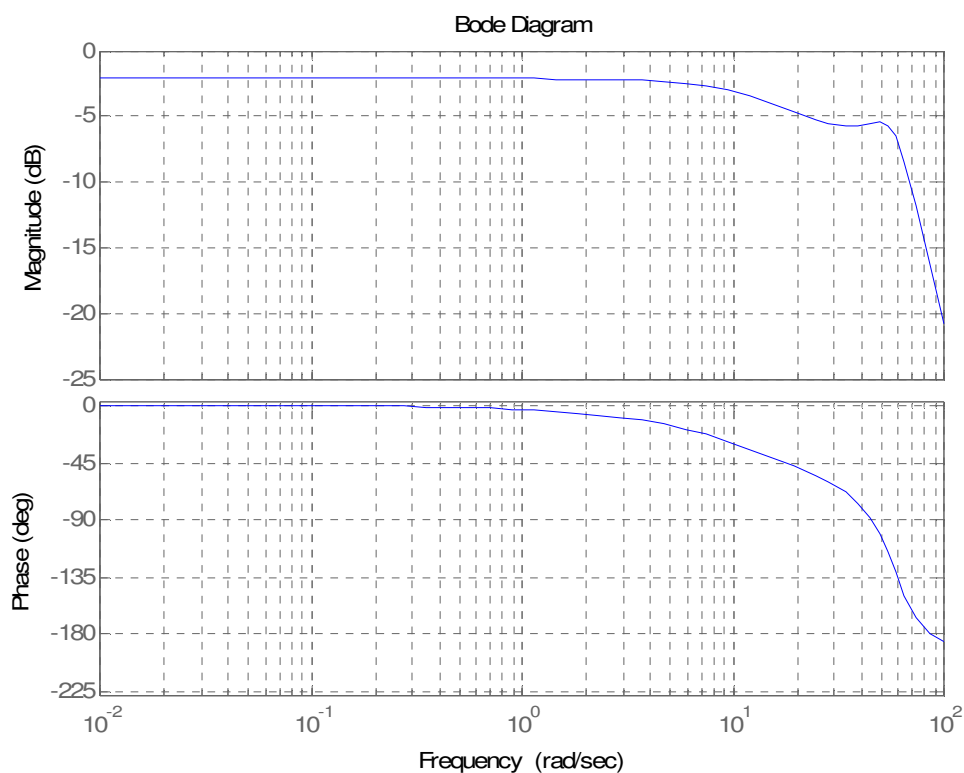


Abbildung 2-3: Beispiel für ein Bode-Diagramm

2.2 Hauptprogramm „Frequenzgangmessung“



VI „FG_Main.vi“

Die Ermittlung des Systemverhaltens soll mit sinusförmigen Testsignalen unterschiedlicher Frequenz erfolgen. Dazu muss jeweils das Anregungssignal zeitlich dem Antwortsignal zugeordnet, das Amplitudenverhältnis gebildet sowie die Phasenverschiebung bestimmt werden. Das Hauptprogramm führt mit Hilfe von Unterprogrammen diesen Messablauf aus, speichert die Daten in einer Textdatei und stellt den Amplituden- und Phasengang in einem Bode-Diagramm dar. Der Anwender gibt im Frontpanel folgende Parameter für die Messung vor:

Startfrequenz (F_I) & Endfrequenz (F_h)

bilden den Frequenzbereich in Hertz, in dem die Messung stattfinden soll.

Schritte (N)

gibt die Anzahl der Messfrequenzen vor. Der angegebene Frequenzbereich wird linear aufgeteilt.

Amplitude & Offset

der Sinusspannung in Volt.

Anzahl 1, Anzahl 2 & Umschaltfrequenz

Der Anwender gibt die Anzahl der vollen Sinusschwingungen vor, mit denen das System angeregt wird. Dabei können zwei Werte eingestellt werden: Anzahl 1 vor der Umschaltfrequenz und Anzahl 2 nach der Umschaltfrequenz.

Das Frontpanel beinhaltet noch weitere Elemente:

- Stopp-Button (vorzeitige Beendigung der Messung)
- Anzeige der aktuellen Frequenz
- Darstellung der letzten Sinussequenz
- Bode-Diagramm mit dem bisher gemessenen Amplituden- und Phasengang (In der Abbildung als Beispiel ein RC-Tiefpass)

Auf die Bedienungselemente des Frontpanels wird im Blockdiagramm des VIs zugegriffen.

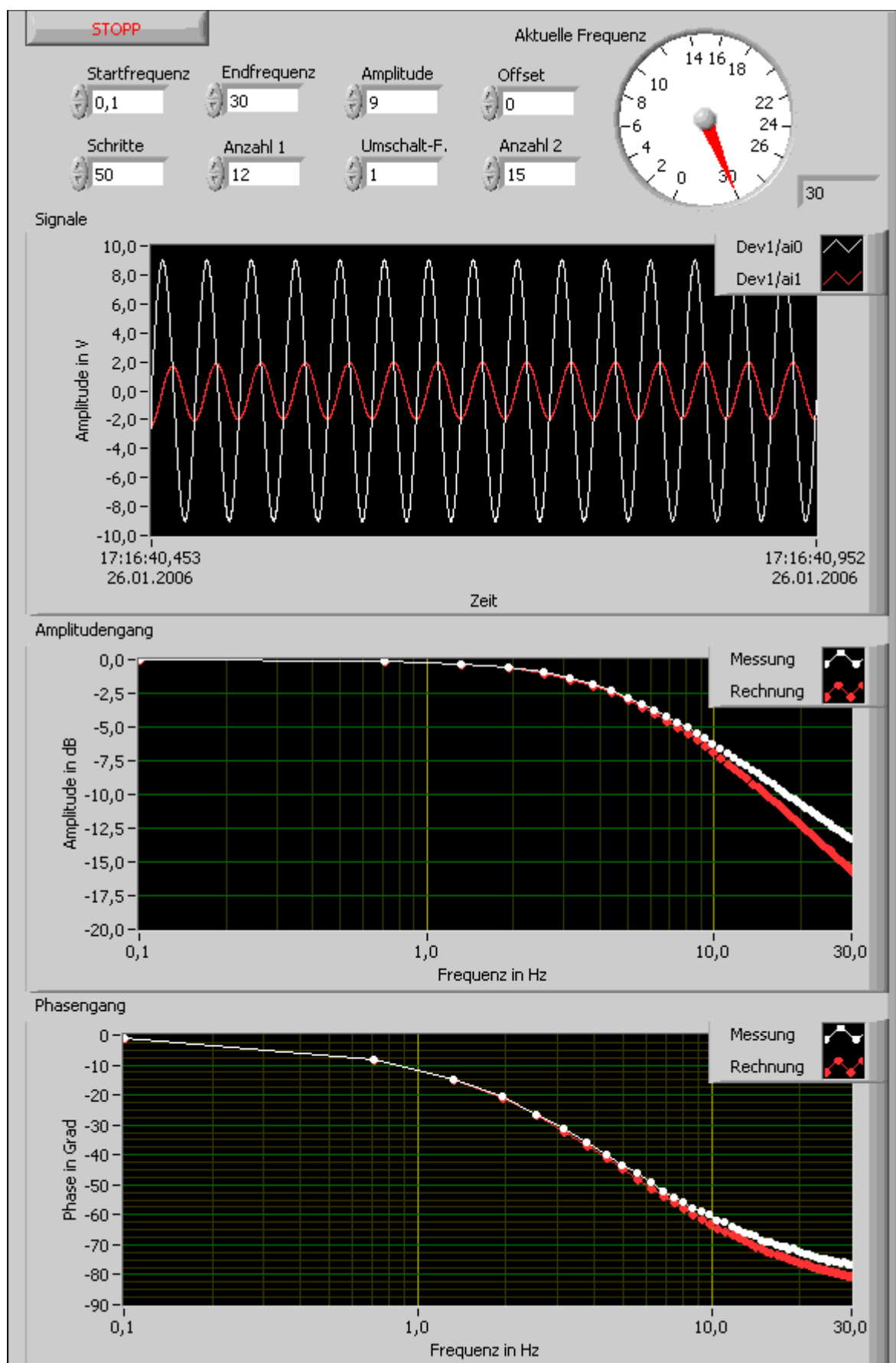


Abbildung 2-4: Frontpanel der Frequenzgangmessung

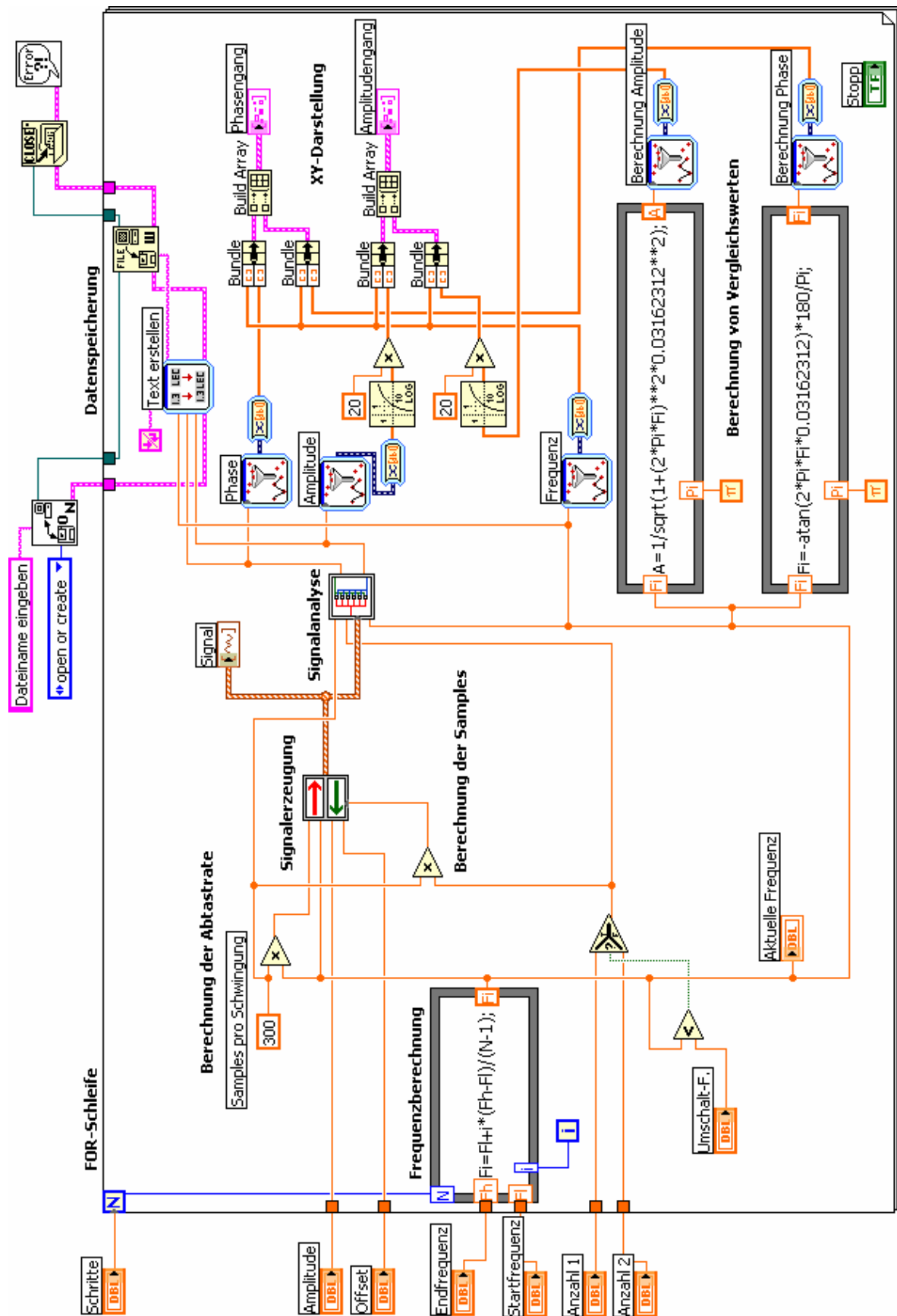


Abbildung 2-5: Blockdiagramm der Frequenzgangmessung

Die einzelnen Funktionsabschnitte sind im Blockdiagramm fett gedruckt und werden im Folgenden erläutert:

FOR-Schleife

Das Hauptprogramm besteht aus einer großen FOR-Schleife. In jedem Durchlauf wird eine Sinusfrequenz abgearbeitet. Die FOR-Schleife wird beendet, sobald N Schritte erreicht sind.

Frequenzberechnung

Die aktuelle Messfrequenz (F_i) wird mit Hilfe des Schleifenzählers i berechnet:

$$F_i = F_l + \frac{i}{N-1} \cdot (F_h - F_l) \quad (2)$$

Signalerzeugung

Die berechnete Frequenz wird gemeinsam mit weiteren Parametern an das Unterprogramm „Signalerzeugung“ übergeben. Die Spannungsamplitude und einen Offset hat der Anwender bereits eingestellt, die Abtastrate und die Anzahl der Samples werden vorher berechnet (siehe unten). Das Unterprogramm erzeugt eine Sinussequenz mit der gewünschten Anzahl an vollen Schwingungen als Anregungssignal und liest synchron dazu das Antwortsignal ein. Um die zeitliche Zuordnung beider Signale sicherzustellen, wird auch das Anregungssignal auf einen analogen Eingang der Messkarte zurückgeführt und mit abgetastet. Nach Beendigung des Zyklus gibt das Sub-VI die Messung als Signalverlauf zur Weiterverarbeitung an das Hauptprogramm zurück. Der Datentyp Signalverlauf besteht aus den Abtastwerten und dem zugehörigen Zeitstempel.

Berechnung der Abtastrate

Jede volle Schwingung soll mit einer definierten Anzahl von Abtastwerten (hier: 300 Samples) aufgelöst werden. Die Abtastrate ergibt sich aus der Multiplikation mit der aktuellen Frequenz des Anregungssignals. Dadurch ist gewährleistet, dass die Signale in jedem Fall ausreichend genau abgetastet werden und keine unnötig großen Datenmengen entstehen.

Berechnung der Samples

Die Zahl der Abtastwerte wird so gewählt, dass genau die gewünschte Anzahl an vollen Schwingungen eingelesen wird. Da jede Schwingung eine definierte Anzahl an Samples dauert, muss diese mit der gewünschten Schwingungsanzahl multipliziert werden.

Signalanalyse

Das Unterprogramm „Signalanalyse“ wertet sechs der gemessenen vollen Schwingungen aus. Dabei wird jeweils die Amplitudenverhältnis gebildet (ohne Spannungsoffset) und die Phasenverschiebung bestimmt. Die Auswertung liefert nur dann richtige Ergebnisse, wenn das System eingeschwungen ist. Die letzte gemessene Schwingung wird nicht ausgewertet. Deshalb müssen mindestens sieben Sinusschwingungen zuzüglich Einschwingphase ausgeführt werden.

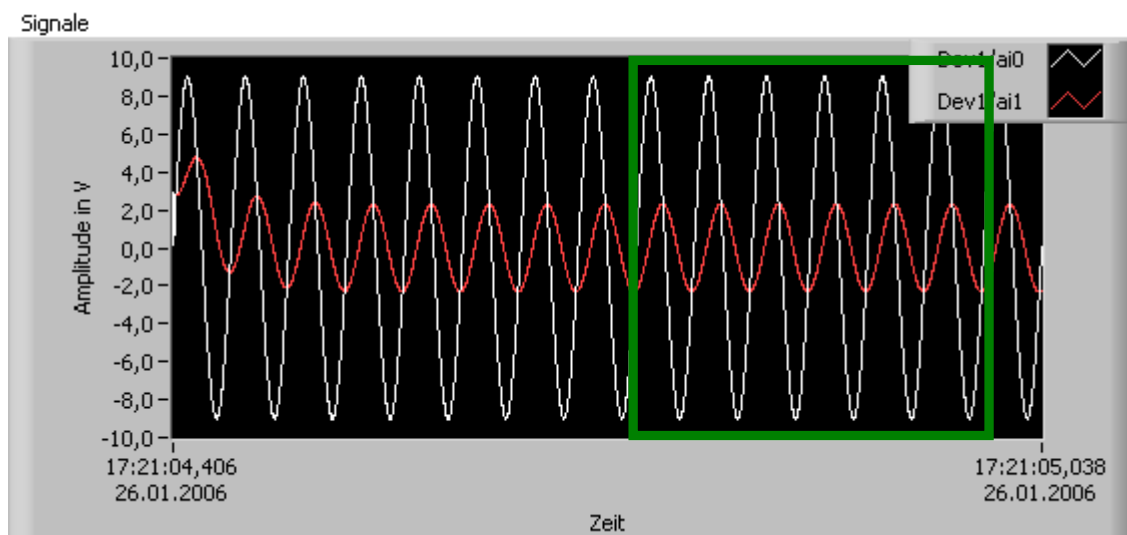


Abbildung 2-6: ausgewertete Schwingungen

Jede Schwingung fällt in einen Bereich von Abtastwerten, der durch die Messfrequenz und die Abtastrate genau festgelegt ist. Dadurch können die auszuwertenden Schwingungen exakt identifiziert werden. Um Messfehler zu minimieren, werden die sechs Amplitudenverhältnisse und Phasenverschiebungen gemittelt an das Hauptprogramm zurückgegeben.

XY-Darstellung

Die Messwerte und die zugrunde liegende Messfrequenz müssen in Kollektoren zwischengespeichert werden, damit sie nicht nach jedem Schleifendurchlauf verloren gehen. Die Darstellung über der Frequenz erfolgt mit Hilfe von XY-Graphen. Die Frequenzachsen sind logarithmisch konfiguriert. Das Amplitudenverhältnis wird vor der Darstellung in Dezibel umgerechnet:

$$A(\omega)_{dB} = 20 \cdot \lg(A(\omega)) \quad [dB] \quad (3)$$

Datenspeicherung

Nach jedem Schleifendurchlauf werden Frequenz, Phasenverschiebung und Amplitudenverhältnis zeilenweise in einer Textdatei abgelegt, deren Dateiname beim Start der Messung angegeben werden muss. Die Werte werden durch Leerzeichen getrennt und jede Zeile wird mit einem Zeilenwechsel abgeschlossen.

Berechnung von Vergleichswerten

Das VI bietet die Möglichkeit, die Messergebnisse mit berechneten Werten zu vergleichen. In diesem Fall werden Amplituden- und Phasengang eines RC-Tiefpasses mit Hilfe der aktuell eingestellten Frequenz berechnet und im Diagramm zusammen mit den Messdaten dargestellt.

2.2.1 Unterprogramm „Signalerzeugung“



Die Erzeugung der analogen Anregungsspannung und das Einlesen derselben sowie des Antwortsignals erfolgen in diesem Unterprogramm. Das Anschlussfeld des VIs zeigt die vom Hauptprogramm übergebenen Parameter, die bereits erläutert wurden. Diese finden sich im Frontpanel wieder. Einzustellende Parameter sind:

Ausgangskanal

Auswahl des Analogausgangs der Messhardware, an dem die Anregungsspannung ausgegeben wird.

Eingangskanäle

In diesem Pull-down-Menü werden die beiden Analogeingänge der Messhardware ausgewählt, an die das Anregungs- und das Antwortsignal angeschlossen sind (in dieser Reihenfolge).

Minimale & maximale Ausgangsspannung (Eingangsspannung)

Spannungsgrenzen der analogen Ein- und Ausgangskanäle der Messhardware.

Das Frontpanel beinhaltet außerdem noch die Darstellung der letzten Sinussequenz.

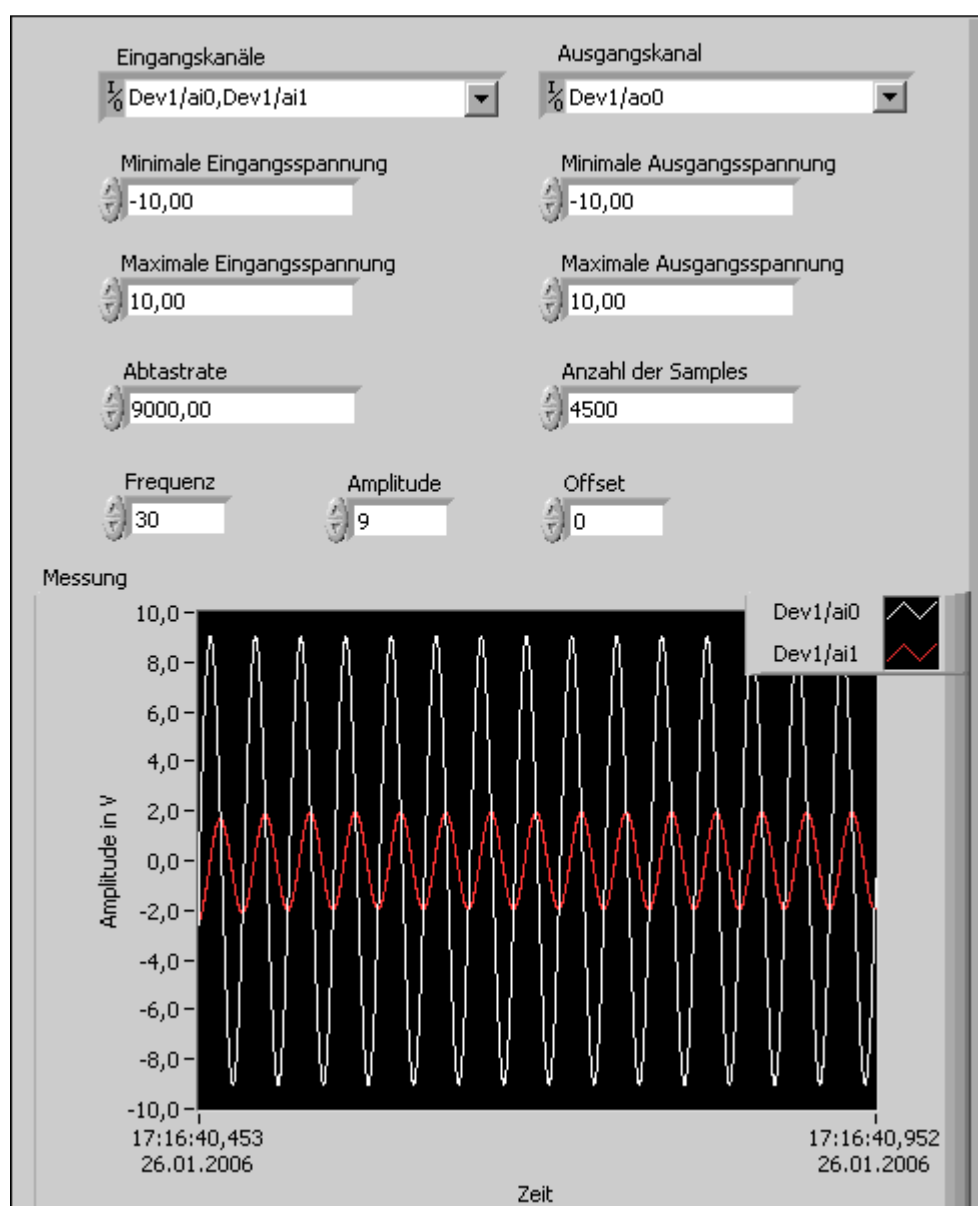


Abbildung 2-7: Frontpanel der Signalerzeugung

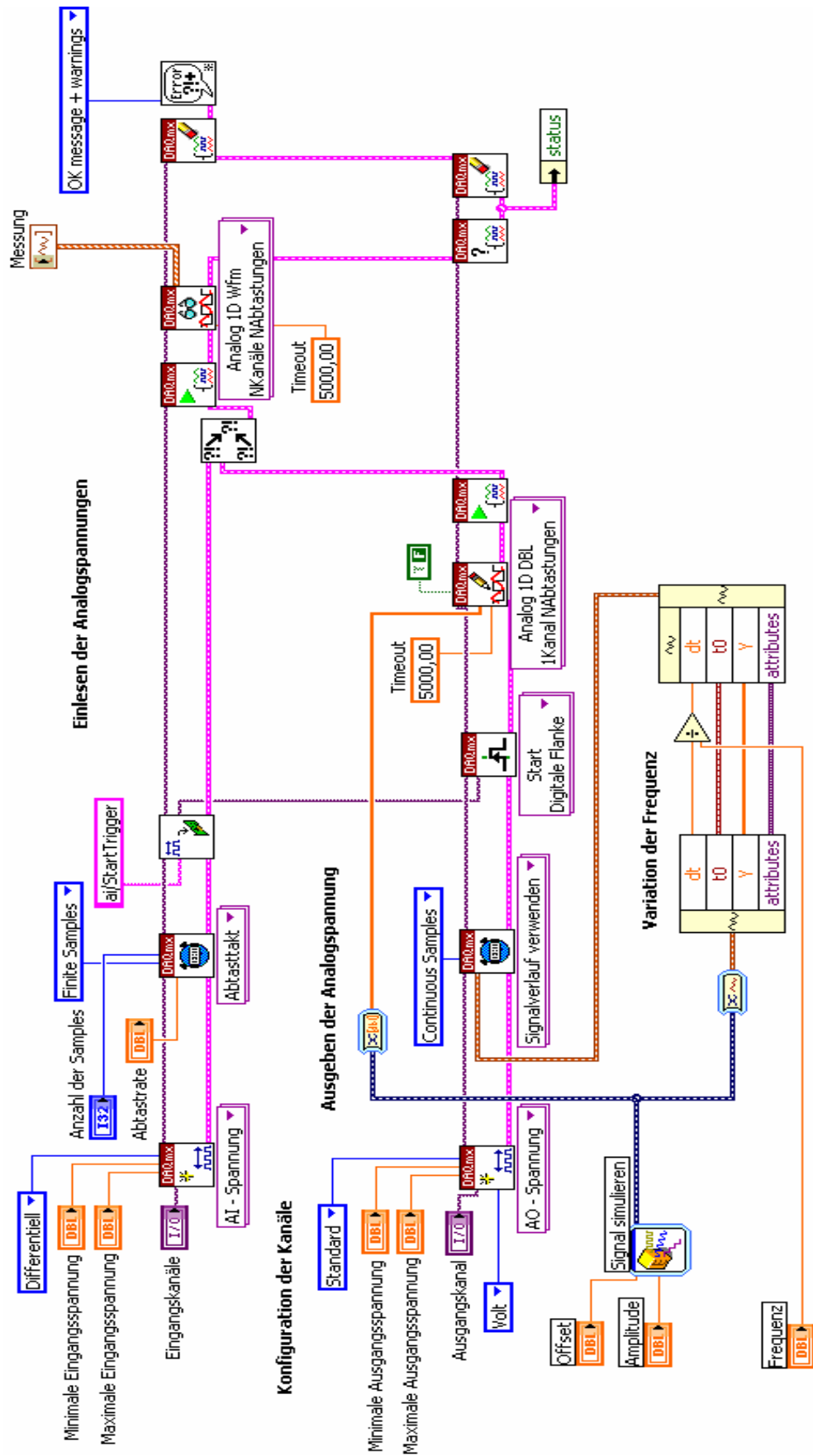


Abbildung 2-8: Blockdiagramm der Signalerzeugung

Das Blockdiagramm gliedert sich in zwei Bereiche. Im oberen Teil des Diagramms erfolgt das Abtasten der analogen Eingangskanäle, während im unteren Teil die gewünschte Sinussequenz ausgegeben wird. Auch in diesem Blockdiagramm sind die einzelnen Funktionsabschnitte fett gedruckt und werden im Folgenden erläutert:

Konfiguration der Kanäle

Der jeweils erste Block der Ein- und Ausgabe initialisiert einen Messtask. Dabei werden über die Elemente des Frontpanels folgende Parameter zugeordnet:

Funktion:	Analog In – Spannung
Eingangskanäle:	Dev1/ai0, Dev1/ai1
Minimale Eingangsspannung:	- 10 V
Maximale Eingangsspannung:	+ 10 V
Betriebsart:	Differentiell (differentielles Messen zwischen zwei Kanälen: ai0 & ai8, ai1 & ai9 etc.)

Funktion:	Analog Out - Spannung
Ausgangskanal:	Dev1/ao0
Minimale Ausgangsspannung:	- 10 V
Maximale Ausgangsspannung:	+ 10 V
Betriebsart:	Standard (Ausgabe zwischen gewähltem Kanal ao0 & Ground)
Einheit:	Volt

Ausgeben der Analogspannung

Der Block „Signal simulieren“ berechnet mit den Parametern „Amplitude“ und „Offset“ die Sinuswerte, die als Signalverlauf kontinuierlich ausgegeben werden. Diese beiden Vorgaben werden im „Timing-Block“ angegeben. Die Ausgabe wird durch eine digitale Flanke gestartet. Diese wird ausgelöst, sobald das Einlesen beginnt.

Variation der Frequenz

Die Verstellung der Frequenz über den Block „Signal simulieren“ funktioniert nicht einwandfrei. Darum erfolgt die Anpassung der Frequenz auf einem anderen Wege. Das simulierte Sinussignal hat eine Frequenz von einem Hertz und eine Updaterate

von 1000 Hertz. Dadurch ergibt sich ein Zeitintervall von einer Millisekunde zwischen den Funktionswerten. Durch Manipulation des Zeitintervalls verändert man die Frequenz des Signals.

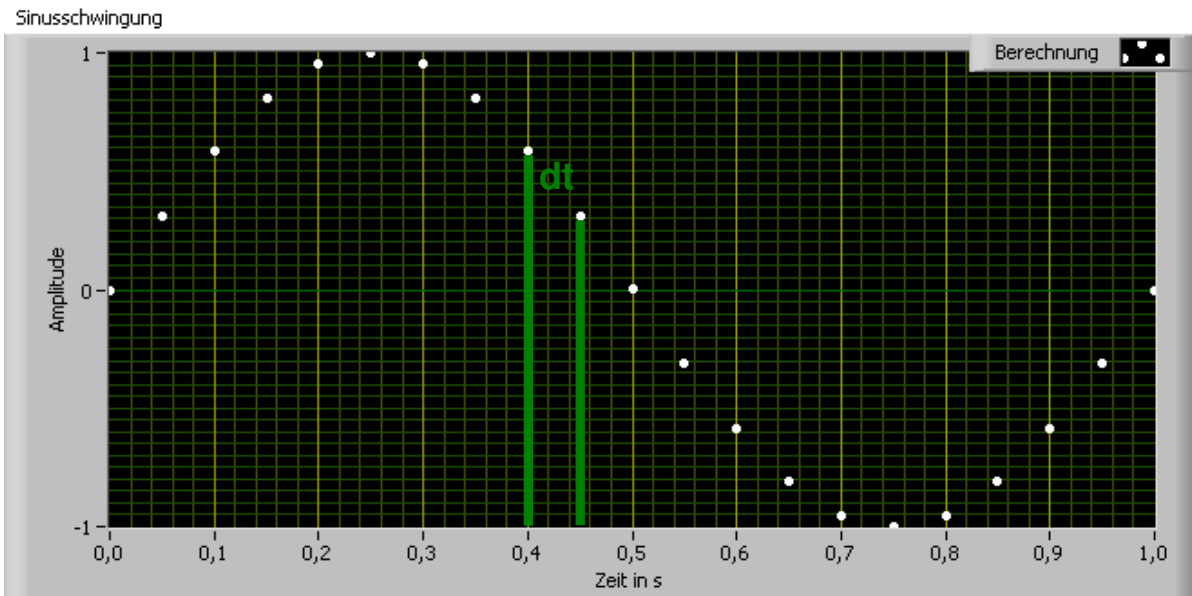


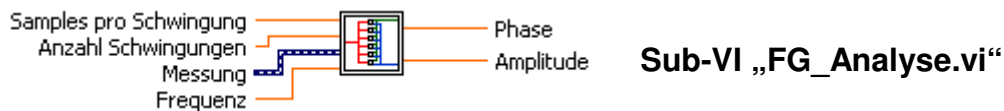
Abbildung 2-9: Zeitintervall von $dt = 0,05$ s

Eine Verdopplung der Zeit bedeutet beispielsweise eine Halbierung der Frequenz. Man muss folglich das Zeitintervall durch die gewünschte Frequenz dividieren, um selbige als Signalfrequenz zu erhalten. Deshalb wird der simulierte Signalverlauf im Blockschaltbild in seine Komponenten zerlegt, entsprechend manipuliert und nach der Zusammenführung für das Timing eingesetzt.

Einlesen der Analogspannungen

Das Einlesen der beiden Analogkanäle ist etwas einfacher. Da eine genau definierte Anzahl an Samples mit einer bereits berechneten Abtastrate einzulesen ist, werden diese Parameter an den „Timing-Block“ übergeben und „Finite Samples“ eingestellt. Anschließend wird die digitale Flanke zum Start der Ausgabe ausgelöst und die Messung gestartet. Das Unterprogramm wird beendet, sobald die geforderten Samples eingelesen wurden.

2.2.2 Unterprogramm „Analyse“



Die gemessene Sinussequenz wird zur Auswertung an dieses Unterprogramm übergeben. Das VI extrahiert sechs Signalabschnitte und gibt diese wiederum an ein Sub-VI weiter, welches jeweils die Phasenverschiebung zwischen Anregungs- und Antwortsignal und deren Amplitudenverhältnis untersucht. Anschließend werden die Ergebnisse gemittelt an das Hauptprogramm zurückgegeben. Das Anschlussfeld dieses VIs zeigt bereits alle benötigten Parameter. Weitere Einstellungen sind nicht erforderlich. Zur Kontrolle werden die sechs Signalabschnitte dargestellt.

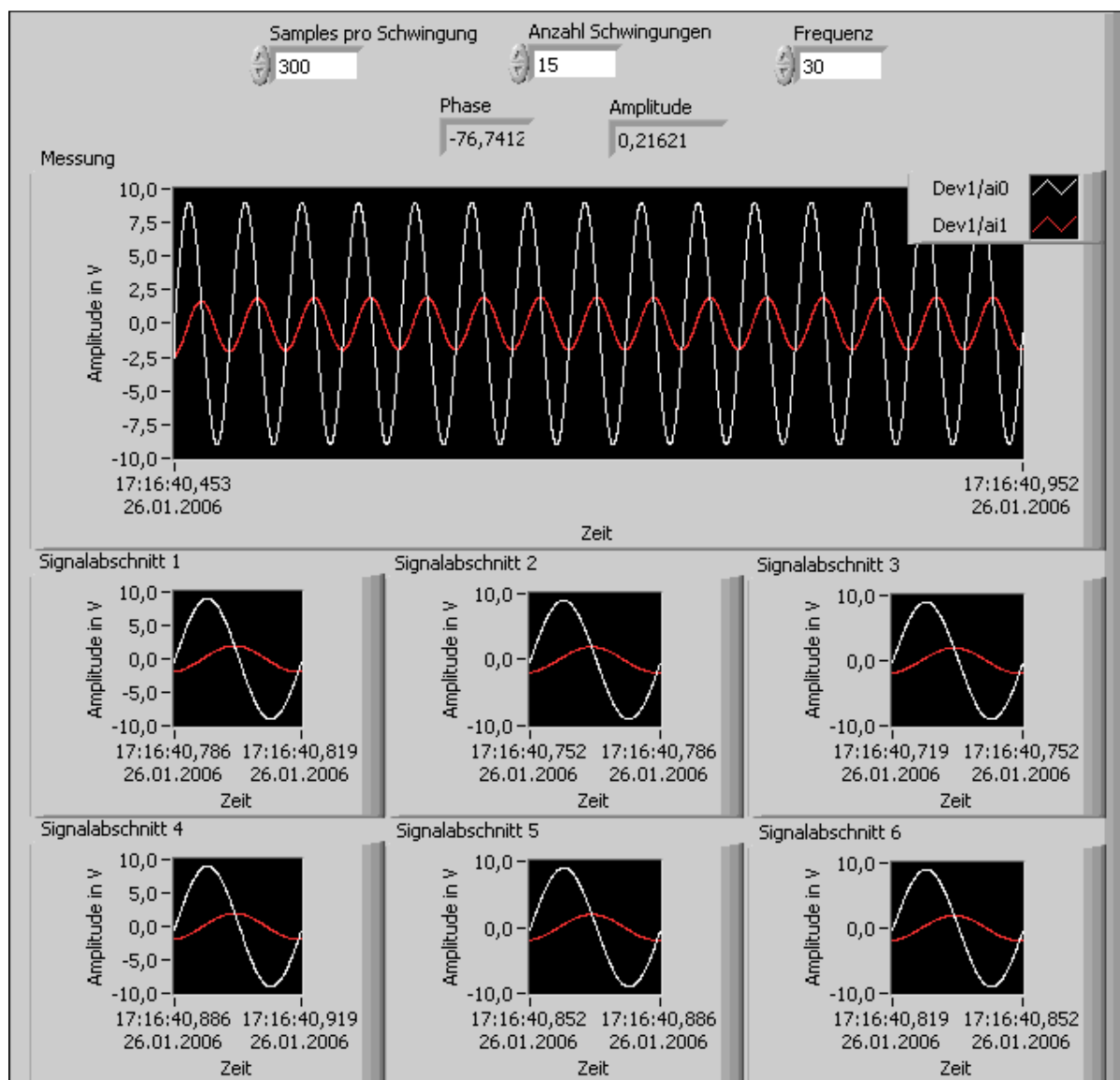


Abbildung 2-10: Frontpanel der Signalanalyse

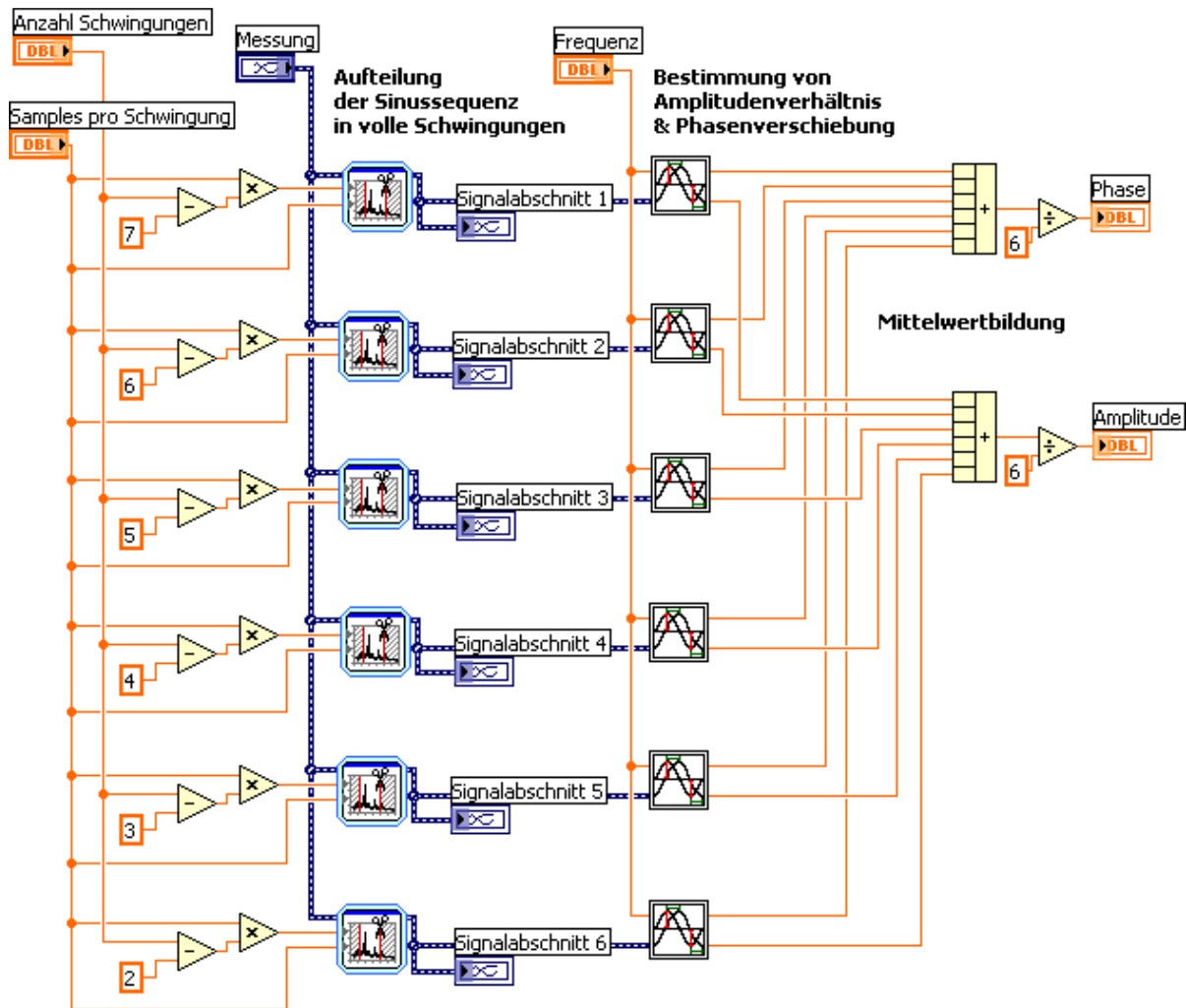


Abbildung 2-11: Blockdiagramm der Signalanalyse

Aus dem Messsignal werden sechs Abschnitte „herausgeschnitten“, die Abschnitte untersucht und anschließend die Ergebnisse gemittelt:

Aufteilung der Sinussequenz in volle Schwingungen

Der Block „Signale extrahieren“ benötigt neben dem Messsignal das erste und das letzte Sample des auszuschneidenden Bereichs. Diese werden mit Hilfe der Schwingungszahl und der Samples pro Schwingung berechnet.

Bestimmung von Amplitudenverhältnis & Phasenverschiebung

Das Sub-VI „Maximum“ ermittelt die Phasenverschiebung zwischen Anregungs- und Antwortsignal und deren Amplitudenverhältnis. Die sechs Ergebnisse werden arithmetisch gemittelt.

2.2.3 Unterprogramm „Maximum“



Sub-VI „FG_Maximum.vi“

Letzter und wichtigster Schritt der Frequenzgangmessung ist die Auswertung einer einzelnen vollen Schwingung. Das Frontpanel des Sub-VIs beinhaltet die Darstellungen von Anregungs- und Antwortsignal, die für die Berechnung von Phasenverschiebung und Amplitudenverhältnis benötigten Daten und die Ergebnisse der Auswertung. Dazu sind die Maximalwerte jeder Schwingung und die zugehörigen Zeitpunkte wichtig. Um einen gegebenenfalls eingestellten Offset wieder herausrechnen zu können, wird auch der arithmetische Mittelwert der Schwingung ermittelt.

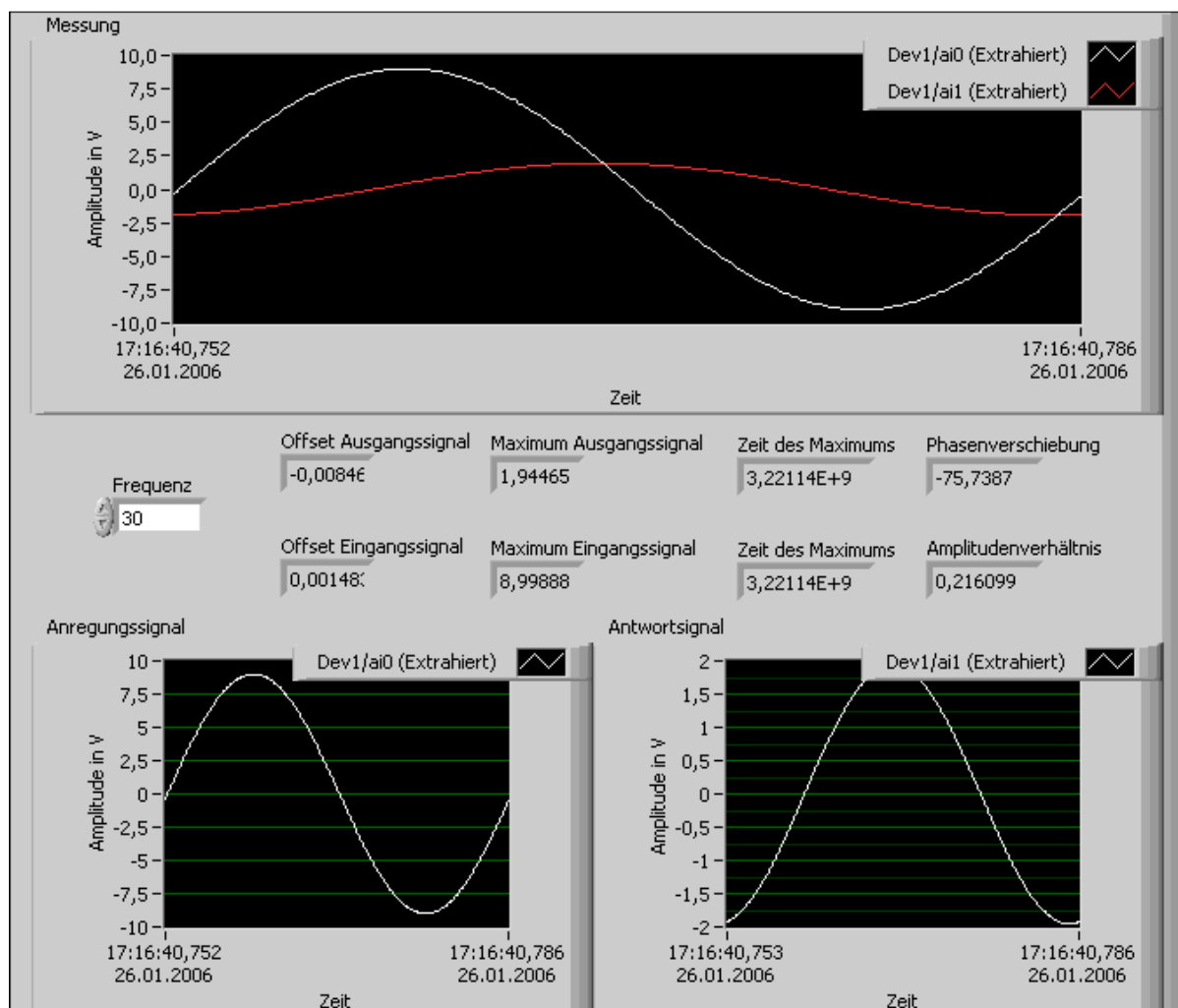


Abbildung 2-12: Frontpanel der Signalauswertung

Im Blockdiagramm findet die Auswertung statt:

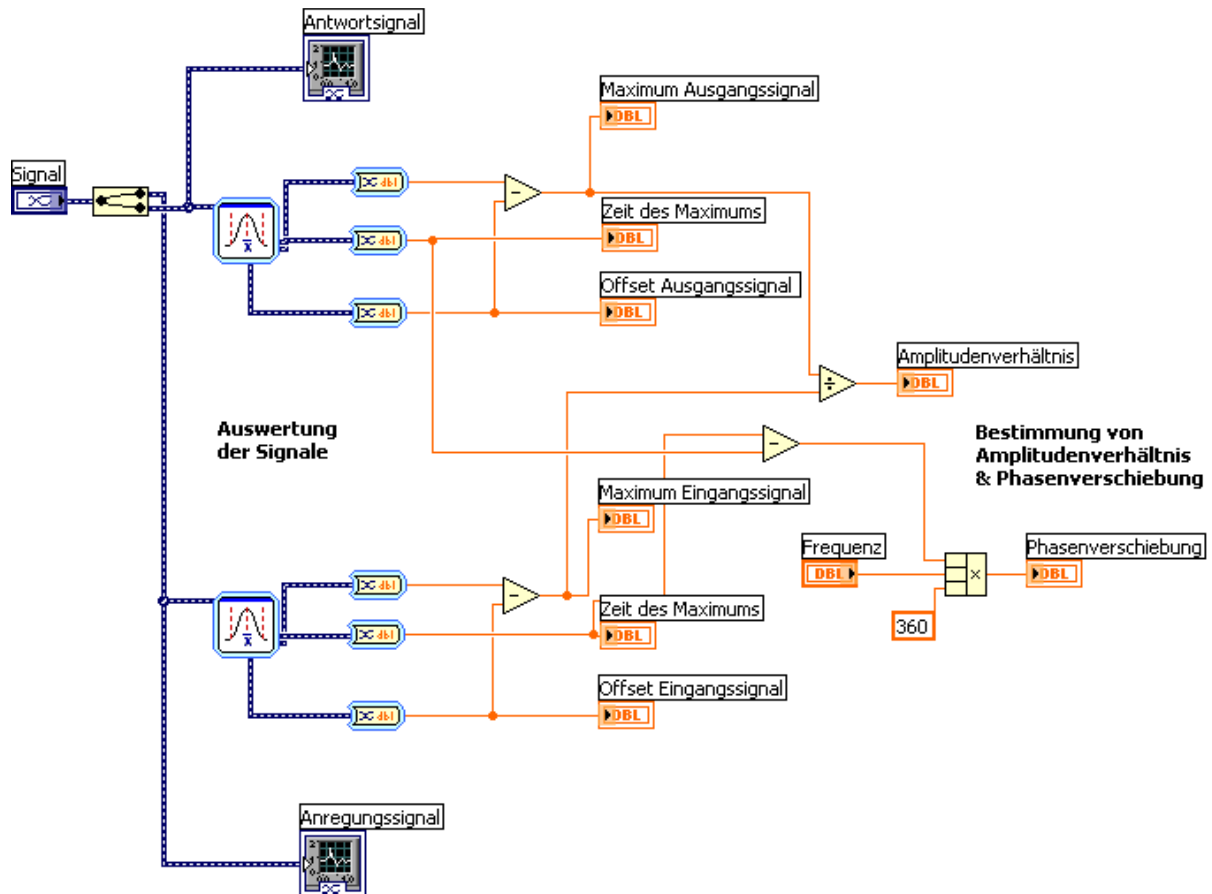


Abbildung 2-13: Blockdiagramm der Signalauswertung

Auswertung der Signale

Nach Trennung der Messsignale werden Anregungs- und Antwortsignal in Statistikblöcken auf deren maximale Amplitude, den Zeitpunkt des Maximums und ihren Offset untersucht. Die Offsets werden von den Maximalwerten subtrahiert.

Bestimmung von Amplitudenverhältnis und Phasenverschiebung

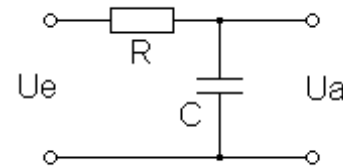
Zur Bestimmung des Amplitudenverhältnisses wird der mittelwertfreie Anteil der Antwortspannung durch den mittelwertfreien Anteil der Anregungsspannung dividiert. Die Zeitdifferenz zwischen den beiden Extremwerten ist ein Maß für die Phasenverschiebung. Da die Frequenz der Kehrwert der Schwingungsdauer ist, stellt das Produkt aus der Zeitdifferenz und der Frequenz den Anteil an einer vollen Schwingung von 360° dar:

$$\varphi(f) = \Delta t \cdot f \cdot 360^\circ = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ \quad (4)$$

2.3 Verifizierung der Messung

Die Richtigkeit des programmierten Messablaufes soll anhand eines bekannten Beispiels überprüft werden. Dazu wird der Frequenzgang eines Verzögerungsgliedes 1. Ordnung (PT₁-Glieder) bestimmt. Für den RC-Tiefpass ergibt sich in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz und der elektrischen Zeitkonstanten rechnerisch folgender Amplitudengang:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}} \quad (5)$$



Für die Phase gilt:

$$\varphi(\omega) = -\arctan(\omega \cdot \tau) \quad (6)$$

Abbildung 2-14: RC-Tiefpass

Um die Theorie mit der Messung vergleichen zu können, werden die notwendigen Parameter der verwendeten Bauteile bestimmt:

$R = 1,002M\Omega$ Ohmscher Widerstand

$C = 31,56nF$ Kapazität des Kondensators

Die Grenzfrequenz des Tiefpasses liegt daher etwa bei:

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \underline{\underline{5,03Hz}} \quad (7)$$

Die Zeitkonstante beträgt:

$$\tau = R \cdot C = \underline{\underline{0,0316sec}} \quad (8)$$

Widerstand und Kondensator werden nun entsprechend der Abbildung verschaltet und an die Messkarte angeschlossen. Parallel zu der Messung erfolgt eine Berechnung des theoretischen Amplitudenverhältnisses und der zugehörigen Phasenverschiebung mit der eingestellten Sinusfrequenz. Messung und Berechnung sind in dem folgenden Diagramm dargestellt:

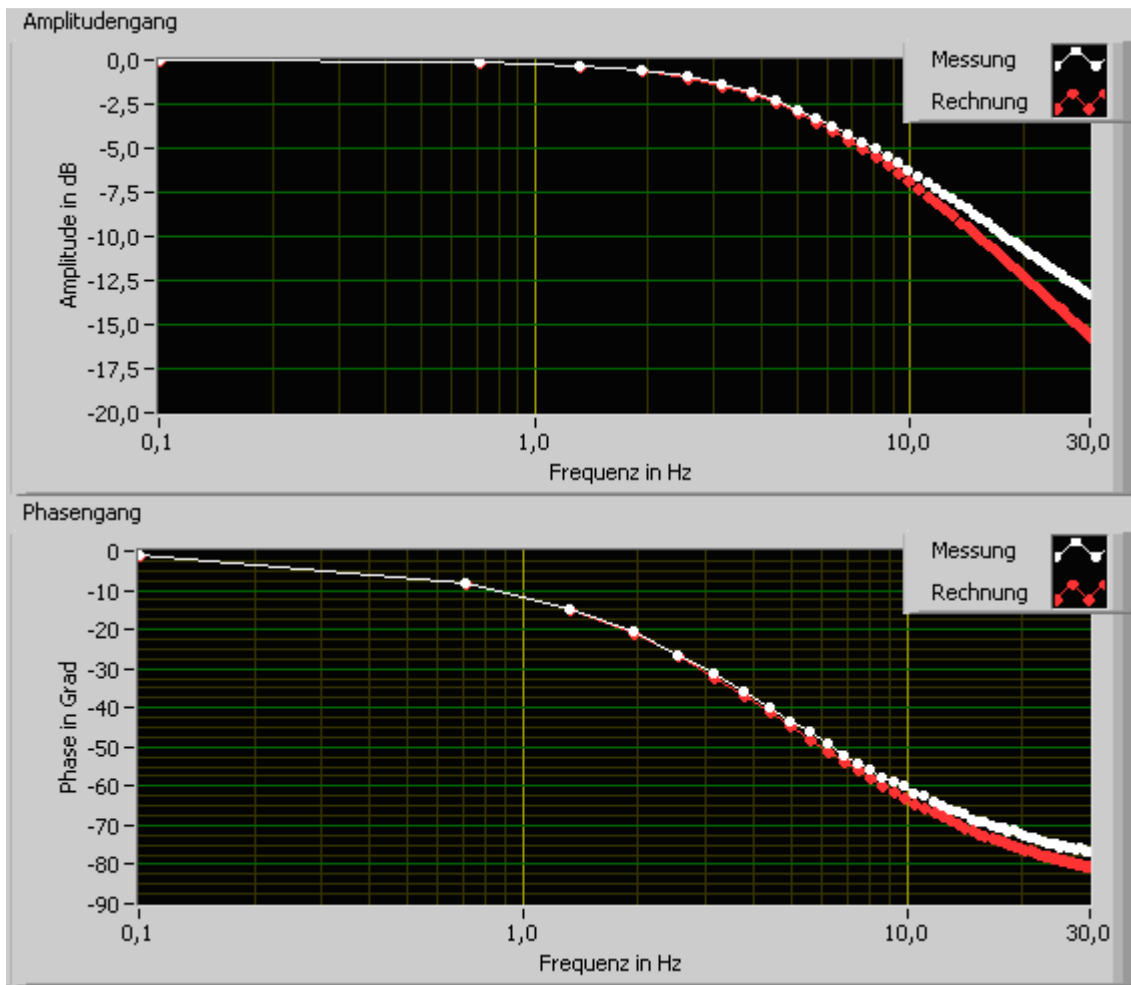


Abbildung 2-15: Bode-Diagramm des Tiefpasses (Messung und Berechnung)

Die Kurven stimmen in etwa überein. Das Messverfahren funktioniert und kann für weitere Messungen eingesetzt werden.

2.4 Systemidentifikation

Für den Entwurf von Regelalgorithmen ist es sehr hilfreich, wenn die Regelstrecke als Übertragungsfunktion $G(s)$ vorliegt. Diese kann aus dem gemessenen Frequenzgang $G(j\omega)$ gewonnen werden. Die automatische Umwandlung erfolgt z.B. mit der Matlab-Funktion `invfreqs()`. Um den Frequenzgang anzunähern, erwartet die Funktion neben den Messdaten auch den Grad des Zähler- und Nennerpolynoms als Parameter. Physikalisch gesehen ist jedes System aus Übertragungsgliedern (P-Glied, I-Glied, D-Glied, PT_1 -Glied etc.) zusammengesetzt. Dabei werden die Frequenzgänge dieser Übertragungsglieder im Bode-Diagramm graphisch addiert

und ihre Übertragungsfunktionen multipliziert. Am Beispiel des RC-Tiefpasses soll die Umwandlung der gemessenen Frequenzgangdaten in die Übertragungsfunktion gezeigt werden. Das folgende Matlab-Skript „Systemidentifikation.m“ liest die Messdaten ein und nähert das System mit der passenden Übertragungsfunktion an:

```
% Initialisierung von Zeilenvektoren für die Messdaten
% Frequenz
Frequenz = [inf];
% Phase
Phase = [inf];
% Amplitude
Amplitude = [inf];
% Positionsindex auf '1' setzen
n = 1;
% Messdaten-Datei öffnen
fid = fopen('D:\Verifizierung_Tiefpass.txt');
% 1. Zeile als String einlesen
line = fgetl(fid);
% Kommata durch Punkte ersetzen
line = strrep(line, ',', '.');
% Verarbeitung der Messdaten-Datei bis alle Zeilen eingelesen sind
while line ~= -1
    % Umwandlung des Strings 'line' in einen Zeilenvektor 'daten'
    % Konvertierung in Floatingpoint-Format
    daten = sscanf(line, '%f', [1, inf]);
    % Umspeichern der Elemente aus 'daten' in die Zeilenvektoren
    % Frequenz, Phase und Amplitude jeweils an Stelle 'n'
    Frequenz(n) = daten(1);
    Phase(n) = daten(2);
    Amplitude(n) = daten(3);
    % Positionsindex inkrementieren
    n = n+1;
    % Einlesen der nächsten Zeile
    line = fgetl(fid);
    % Kommata durch Punkte ersetzen
    line = strrep(line, ',', '.');
end
% Messdaten-Datei schließen
fclose(fid);
% Darstellung der Messung
figure(1), subplot(211), loglog(Frequenz, Amplitude), grid on, hold on
```

```

subplot(212),semilogx(Frequenz,Phase), grid on;
% Umwandlung in ein LTI-Modell
% Umrechnung der Phase von Grad in Radiant
Phase_rad = Phase*pi/180;
% Messwerte in komplexe Zahlen umwandeln
Realteil = Amplitude.*cos(Phase_rad);
Imaginaerteil = Amplitude.*sin(Phase_rad);
c = complex(Realteil,Imaginaerteil);
% System erzeugen
system_gemessen = frd(c,Frequenz*2*pi);
% System annähern (Zählergrad '0', Nennergrad '1')
[zaehler,nenner] = invfreqs(c,Frequenz*2*pi,0,1);
% Übertragungsfunktion bilden
system_angenaehert = tf(zaehler,nenner)
% Beide Systeme in einem Diagramm darstellen
omega={2*pi*0.1,2*pi*30};
figure(2), bode(system_gemessen,system_angenaehert,omega),
grid on, hold on, legend('Messung','Annäherung');
    
```

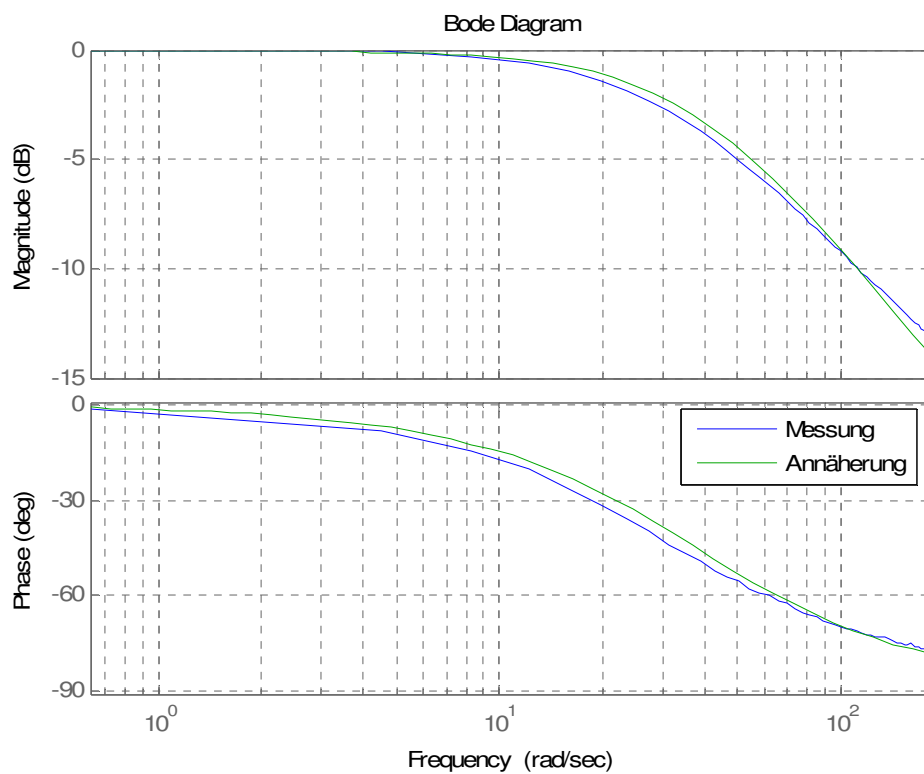


Abbildung 2-16: Bode-Diagramm des Tiefpasses (Messung und Annäherung)

Nach Ausführung des Skripts liefert Matlab folgende Übertragungsfunktion für das angenäherte System:

$$H(s) = \frac{37,64}{s + 37,83} = \frac{1}{0,0266 \cdot s + 1,005} \quad (9)$$

Die theoretisch ermittelte Übertragungsfunktion lautet:

$$G(s) = \frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{\tau \cdot s + 1} = \frac{1}{0,0316 \cdot s + 1} \quad (10)$$

Der Vergleich ergibt einen geringen Unterschied der Zeitkonstanten (0,0266 Sekunden zu 0,0316 Sekunden). Dieses einfache Beispiel zeigt, dass der programmierte Messablauf zu verwendbaren Frequenzgangmessungen führt, aus denen mit Hilfe von Matlab die Übertragungsfunktion ermittelt werden kann.

3. Untersuchungen am Prüfstand

3.1 Vorgehensweise

Die beiden Hauptkomponenten der Lenkung werden auf einem Prüfstand untersucht. Zunächst erfolgt die Aufnahme der Pumpenkennlinien, anschließend die Untersuchung der Ventileigenschaften im Zusammenspiel mit der Originalpumpe. Durch dieses Vorgehen bleiben die Einflüsse der anderen Fahrzeugkomponenten außen vor. Deren Verhalten wird deutlich, wenn die Pumpe und das Ventil wieder im PKW montiert und das Gesamtsystem untersucht wird. Auf dem Prüfstand werden folgende Messungen durchgeführt:

- Volumenstrom der Pumpe in Abhängigkeit von der Motordrehzahl, dem Lastdruck und der Temperatur
- Druck in den abgesperrten Arbeitsleitungen des Ventils in Abhängigkeit von der Ansteuerspannung, der Motordrehzahl und der Temperatur
- Frequenzgang zwischen Ansteuerspannung und Druck in den abgesperrten Arbeitsleitungen des Ventils in Abhängigkeit von der Motordrehzahl und der Temperatur

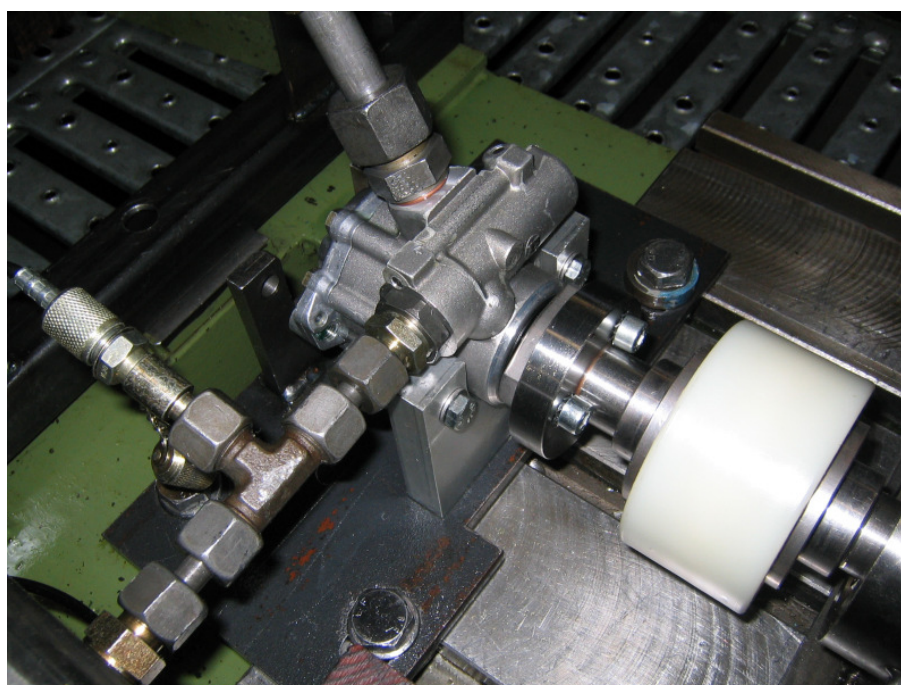


Abbildung 3-1: Lenkhilfepumpe

3.2 Pumpenkennlinien

Die Pumpenkennlinien sind für den Reglerentwurf wichtig, da der für die Dynamik entscheidende Volumenstrom stark drehzahlabhängig ist. Die Pumpe dreht durch den zwischengeschalteten Riementrieb etwas schneller als der Verbrennungsmotor (Übersetzungsverhältnis ca. 1:1,1). Außerdem hängt der Volumenstrom vom Lastdruck und der Temperatur des Hydraulikmediums ab.

Die Pumpenkennlinien können bei einer späteren Modellbildung des Lenksystems behilflich sein, beispielsweise zum Abgleich der Modelldaten mit der Realität oder als Kennfeld im Modell.

3.2.1 Aufbau des Prüfstands

Der Prüfstand des Hydrauliklabors der Fachhochschule Bochum dient in erster Linie dazu, Lenkhilfepumpen im Auftrag der Automobilindustrie zu vermessen. Eine Asynchronmaschine treibt die Pumpe an und übernimmt die Funktion der Verbrennungsmaschine im Fahrzeug. Das Drehmoment wird über eine Zahnriemenverbindung (Übersetzungsverhältnis 1:2), eine Drehmomentmesswelle und eine Zahnkupplung an die Pumpe übertragen:

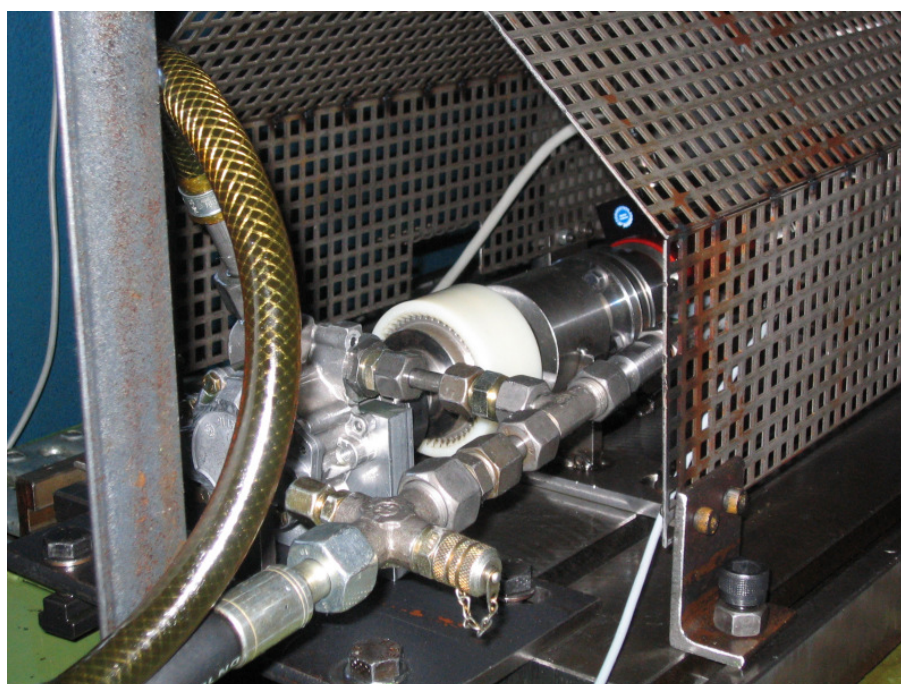


Abbildung 3-2: Pumpe auf dem Prüfstand

Die Drehmomentmesswelle wird benötigt, da sie neben dem Drehmoment auch die Drehzahl der Pumpe liefert. Pro Umdrehung werden 60 Spannungsimpulse abgegeben. Zählt man eine bestimmte Zeit (Torzeit), z.B. eine Minute, die positiven Flanken, erhält man die Drehzahl:

$$n = \frac{60}{60s} = \frac{1 U}{\text{min}} = 1 \text{ Hz} \quad (11)$$

Folglich zeigt die Digitalanzeige des eingesetzten Frequenzzählers die Pumpendrehzahl direkt in U/min. Um diese auch in LabVIEW verarbeiten zu können, wird die Frequenz in eine analoge Spannung gewandelt und mit der Messkarte abgetastet. Die Wandlung geschieht mit einem Digi Table Frequenzmessumformer fm.103. Das Gerät wird über Drehschalter so eingestellt, dass eine Frequenz von 5000 Hz (also 5000 U/min) einer analogen Spannung von 10 V entspricht.

Das gleiche Prinzip wird auf der hydraulischen Seite des Prüfstandes angewendet. Das Volumenstrommessgerät Kracht VC02 liefert ebenfalls eine Pulsfolge. Aus deren Frequenz kann durch folgende Umrechnung der Volumenstrom ermittelt werden:

$$Q = f \cdot 0,00735 \frac{l}{60} \quad (12)$$

Der gültige Messbereich ist mit 0,16 l/min bis 16 l/min angegeben. Daraus ergibt sich eine maximale Frequenz von ca. 2177 Hz. Deshalb wird die Frequenzzählerkarte so eingestellt, dass eine Frequenz von 2000 Hz (also 14,7 l/min) einer analogen Spannung von 10 V entspricht. Die Volumenstrommessung erfolgt auf der Druckseite zwischen dem Druckbegrenzungsventil, mit dem der Arbeitsdruck eingestellt wird, und dem Tank. Alle anderen Komponenten des Leitungssystems auf der Druckseite finden in der Messung keine Verwendung und sind so geschaltet, dass das Öl nur diesen einen Weg nehmen kann. Zur Kontrolle und zum Einstellen des Arbeitsdrucks sind in der Arbeitsleitung ein Manometer und ein Druckaufnehmer (100 bar) untergebracht. Der Sauganschluss der Pumpe ist direkt mit dem Tank verbunden. Im Tank befindet sich ein Thermometer zur Überprüfung der Öltemperatur.

3.2.2 Hauptprogramm „Pumpenkennlinienmessung“



VI „PK_Main.vi“

Das VI ermittelt den Verlauf des geförderten Volumenstroms der Pumpe über der Drehzahl. Dazu muss die Drehzahl der Pumpe für eine gewisse Zeit gehalten und der sich einstellende Volumenstrom gemessen werden. Der Anwender gibt den Drehzahlbereich und die Anzahl der Schritte vor, in die dieser linear geteilt wird. Das Hauptprogramm führt mit Hilfe von Unterprogrammen diesen Messablauf aus, speichert die Daten in einer Textdatei und stellt die Pumpenkennlinie in einem Diagramm dar. Der Anwender gibt im Frontpanel folgende Parameter für die Messung vor:

Startdrehzahl & Enddrehzahl

bilden den Drehzahlbereich in U/min, in dem die Messung stattfinden soll. Die Motordrehzahl der Asynchronmaschine kann wahlweise mittels eines Drehpotentiometers von Hand oder aber über eine externe Spannung verstellt werden. Dabei besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Ansteuerspannung und der Motordrehzahl:

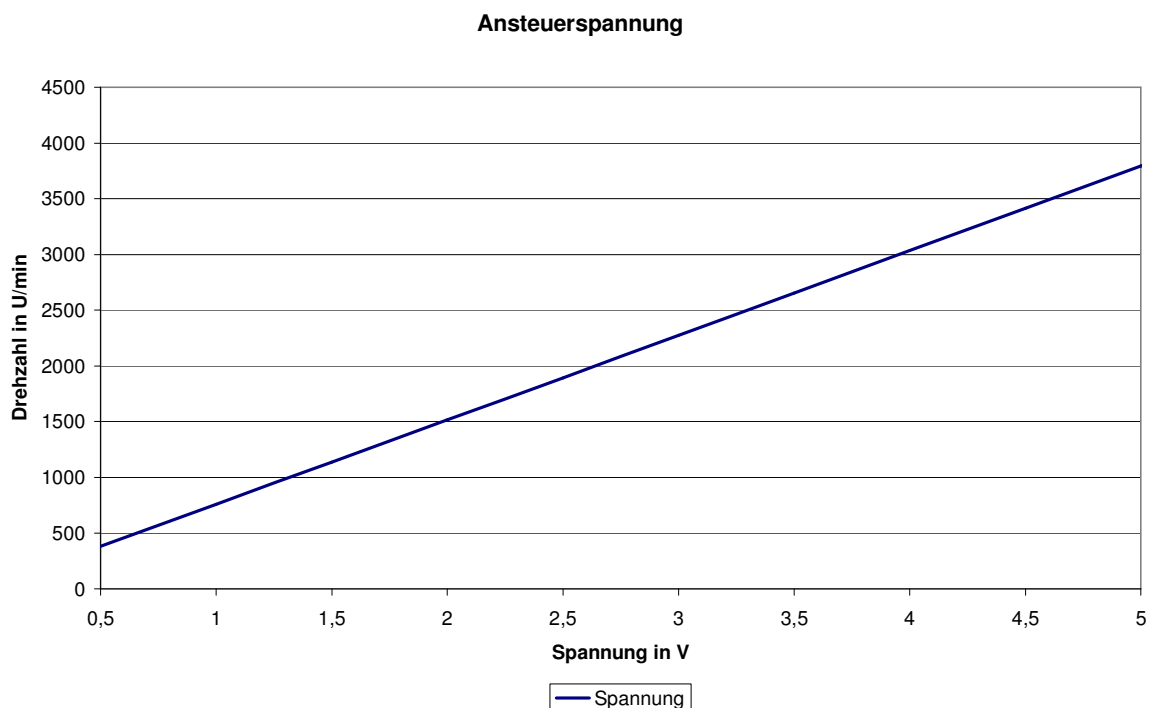


Abbildung 3-3: Drehzahl über Ansteuerspannung

Schritte (N)

gibt die Anzahl der Messdrehzahlen vor. Der angegebene Drehzahlbereich wird linear aufgeteilt.

Das Frontpanel beinhaltet noch weitere Elemente:

- Stopp-Button (vorzeitige Beendigung der Messung)
- Anzeige der aktuellen Drehzahl
- Diagramm mit dem bisher gemessenen Verlauf des Volumenstroms über der Drehzahl

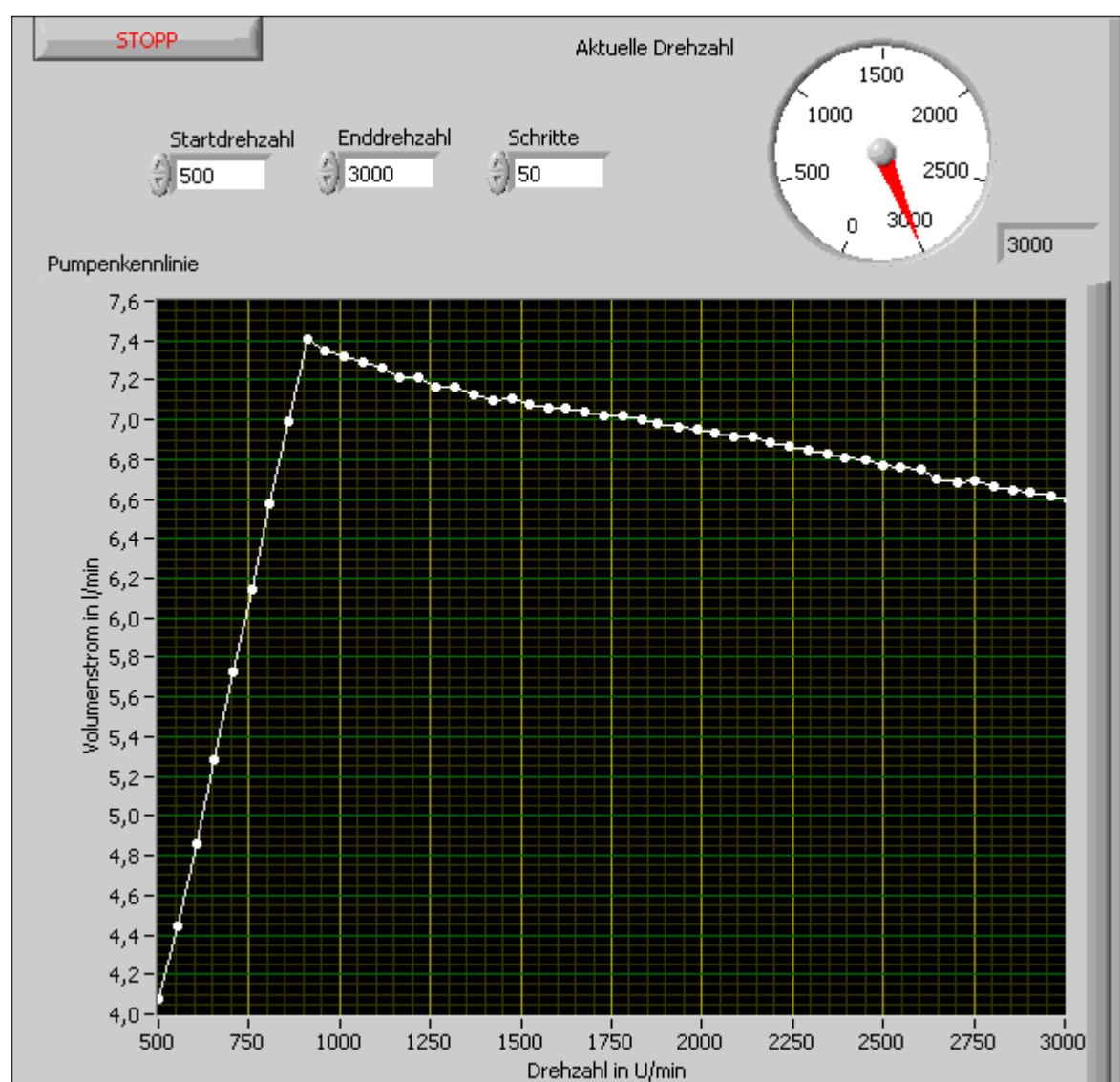


Abbildung 3-4: Frontpanel der Pumpenkennlinienmessung

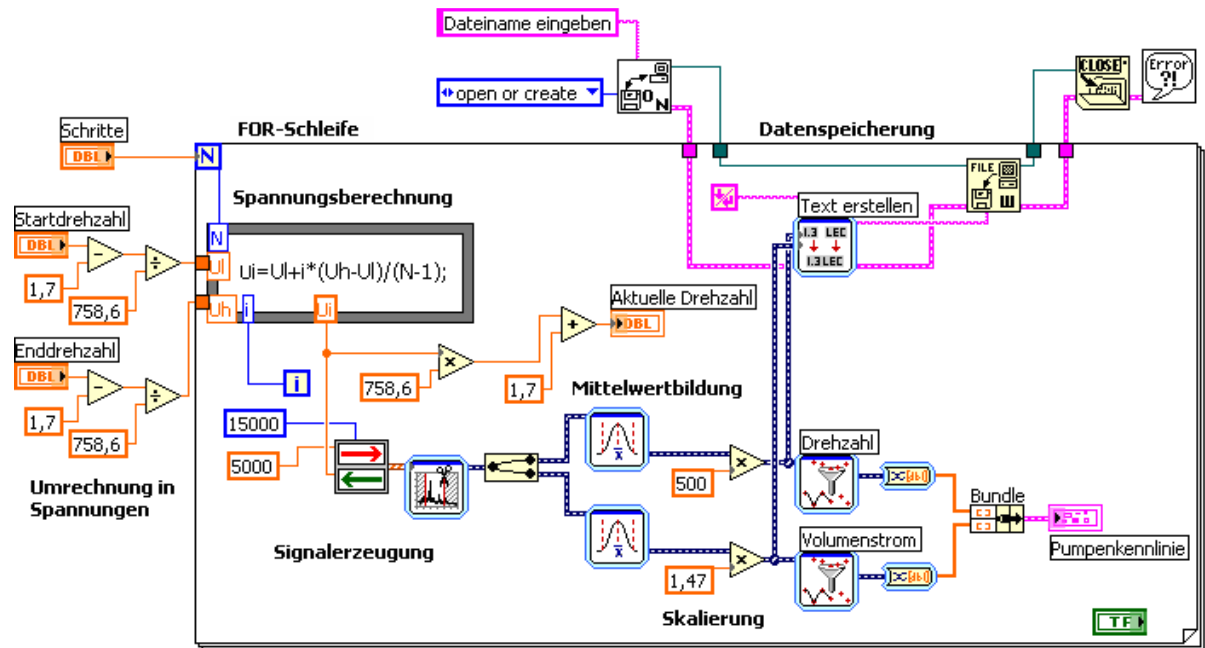


Abbildung 3-5: Blockdiagramm der Pumpenkennlinienmessung

Die einzelnen Funktionsabschnitte sind im Blockdiagramm fett gedruckt und werden im Folgenden erläutert:

FOR-Schleife

Das Hauptprogramm besteht, genau wie bei der Frequenzgangmessung, aus einer großen FOR-Schleife. In jedem Durchlauf wird eine Drehzahl eingestellt, in eine Spannung umgerechnet und abgearbeitet. Die FOR-Schleife wird beendet, sobald N Schritte erreicht sind.

Drehzahlumrechnung & Spannungsberechnung

Da der Anwender im Frontpanel einen Drehzahlbereich einstellt, müssen diese Werte zunächst in einen Spannungsbereich umgerechnet werden. Für die Motordrehzahl gilt folgender Zusammenhang:

$$n = 758,6 \frac{U}{\text{min} \cdot V} \cdot U + 1,7 \frac{U}{\text{min}} \quad (13)$$

Im Blockdiagramm wird die nach der Spannung umgestellte Formel vor Ausführung der Schleife einmal berechnet:

$$U = \frac{n-1,7 \frac{U}{\text{min}}}{758,6 \frac{U}{\text{min}}} V \quad (14)$$

Die aktuelle Spannung (U_i) hängt vom Schleifenzähler i ab:

$$U_i = U_l + \frac{i}{N-1} \cdot (U_h - U_l) \quad (15)$$

Signalerzeugung

Die berechnete Spannung wird gemeinsam mit der Abtastrate und der Anzahl der einzulesenden Samples an das Unterprogramm „Signalerzeugung“ übergeben. In diesem Fall werden 15000 Werte mit einer Abtastrate von 5000 Hertz genommen. Dadurch wird für drei Sekunden eine Spannung am Analogausgang eingestellt und gleichzeitig die Spannungssignale von Drehzahl und Volumenstrom eingelesen. Nach Beendigung des Zyklus gibt das Sub-VI die Messung als Signalverlauf zur Weiterverarbeitung an das Hauptprogramm zurück.

Mittelwertbildung

Um Messfehler zu minimieren, werden die Samples der letzten zwei der drei Sekunden gemittelt. Nach deutlich weniger als einer Sekunde sind die stationären Verhältnisse erreicht.

Skalierung

Die gemessenen Spannungen werden mit Skalierungsfaktoren multipliziert und somit in die Einheiten U/min und l/min umgewandelt. Diese resultieren aus den Einstellungen der Frequenzählerkarten. Ein Volt entspricht einer Drehzahl von 500 U/min und einem Volumenstrom von 1,47 l/min.

Datenspeicherung

Nach jedem Schleifendurchlauf werden Drehzahl und Volumenstrom zeilenweise in einer Textdatei abgelegt, deren Dateiname beim Start der Messung angegeben werden muss. Die Werte werden durch Leerzeichen getrennt und jede Zeile wird mit einem Zeilenwechsel abgeschlossen.

3.2.3 Unterprogramm „Signalerzeugung“



Sub-VI „PK_Signalerzeugung.vi“

Das Unterprogramm „PK_Signalerzeugung.vi“ ist prinzipiell genauso aufgebaut wie die Signalerzeugung für die Frequenzgangmessung. Anstelle einer Sinussequenz wird eine konstante Spannung ausgegeben und die Messsignale für die Drehzahl und den Volumenstrom eingelesen. Auf eine detaillierte Beschreibung wird an dieser Stelle verzichtet.

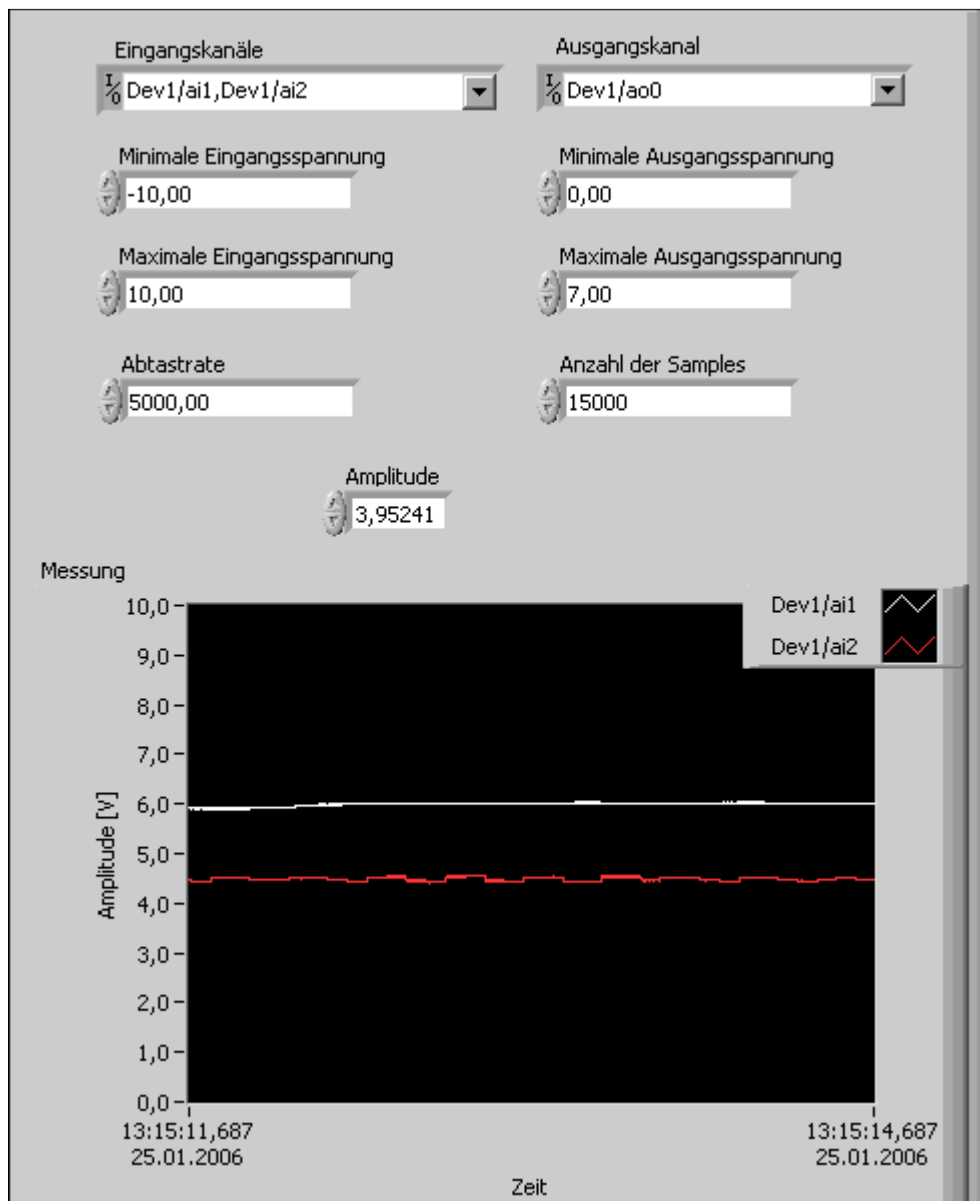


Abbildung 3-6: Frontpanel der Signalerzeugung

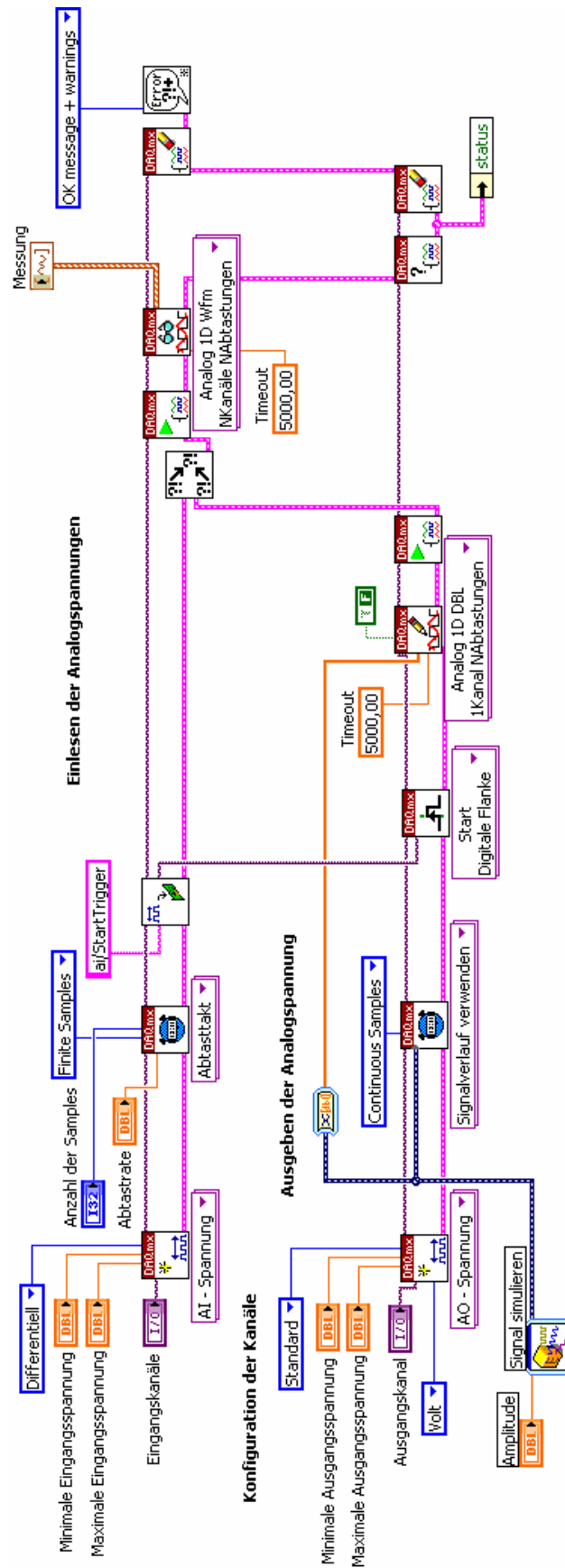


Abbildung 3-7: Blockdiagramm der Signalerzeugung

3.2.4 Aufnahme der Kennlinien

Die Aufnahme der Kennlinien geschieht am PC automatisch bei Start des Programms. Die Drehzahl wird vom Programm kontinuierlich gesteigert und der sich einstellende Volumenstrom gemessen. Dieser Ablauf findet üblicherweise bei zwei verschiedenen Öltemperaturen (50°C und 80°C) und fünf verschiedenen Arbeitsdrücken (5 bar, 10 bar, 20 bar, 50 bar und 80 bar) statt. Vor dem Start der Messung wird bei einer Pumpendrehzahl von 1000 U/min der jeweilige Arbeitsdruck eingestellt. Dieser ist auch etwas vom Volumenstrom abhängig und bleibt während der Messung nicht genau konstant. Gleiches gilt für die Temperatur des Hydrauliköls. Bei hohen Drücken und gleichzeitig hoher Drehzahl erwärmt sich das Öl sehr schnell, umgekehrt kühlt es auch schnell wieder ab. Die Messung ist gültig, wenn die Messtemperatur mit einer Toleranz von $\pm 5^\circ\text{C}$ eingehalten wird. Bei den folgenden Messungen sehen die Toleranzen so aus:

Messung bei 50°C	Temperaturbereich (in °C)			Arbeitsdruckbereich (in bar)		
	min	max	Ø	min	max	Ø
5 bar	51	54	52,5	3,6	5,0	4,3
10 bar	50	51	50,5	8,4	10,1	9,25
20 bar	46	47	46,5	18,3	20,3	19,3
50 bar	47	50	48,5	48,3	50,4	49,35
80 bar	45	49	47,0	78,1	82,6	80,35

Messung bei 80°C	Temperaturbereich (in °C)			Arbeitsdruckbereich (in bar)		
	min	max	Ø	min	max	Ø
5 bar	75	76	75,5	4,1	5	4,55
10 bar	77	79	78	9	10,3	9,65
20 bar	78	80	79	18,8	20,8	19,8
50 bar	78	79	78,5	48,6	51,3	49,95
80 bar	75	78	76,5	78,1	81,2	79,65

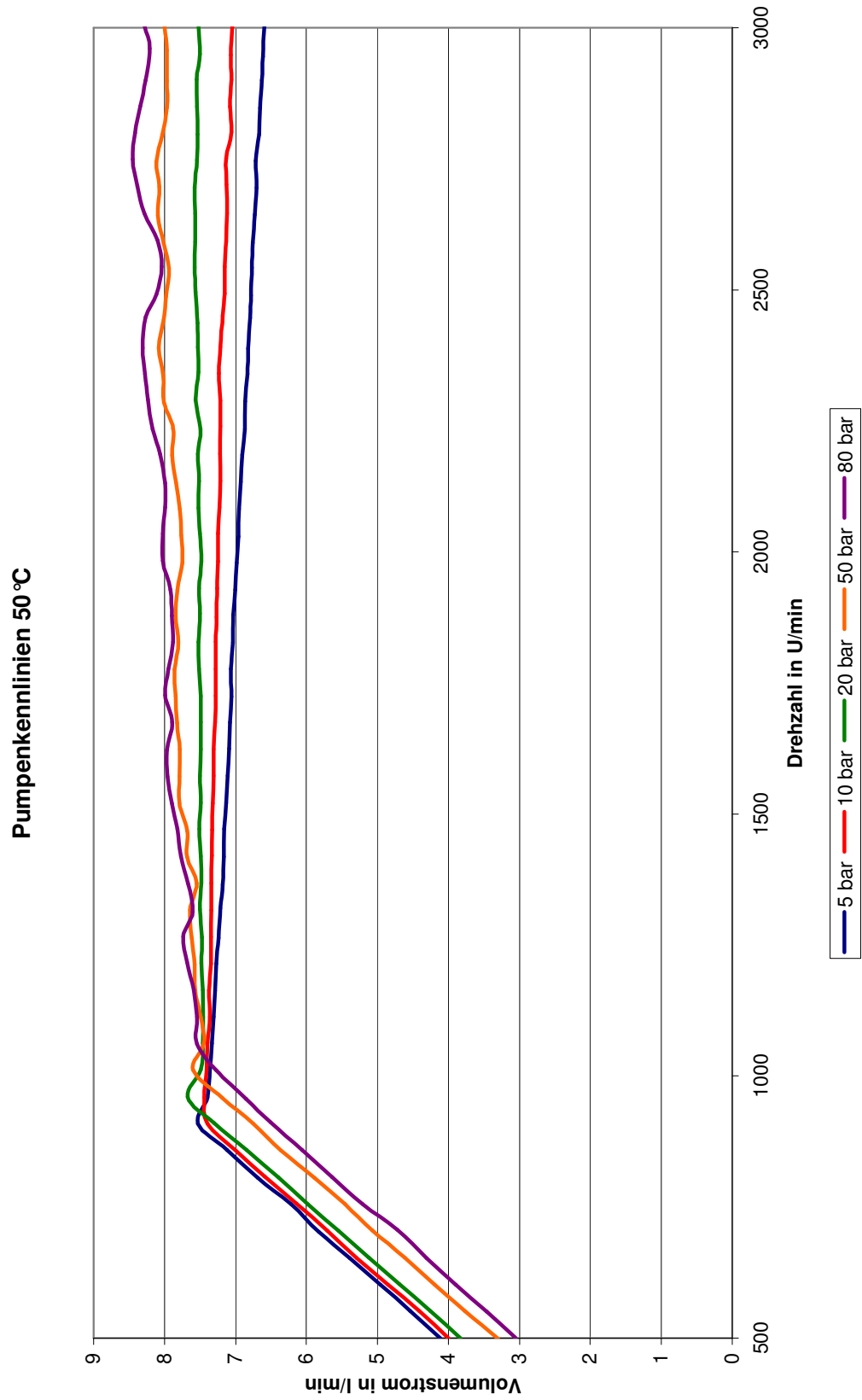


Abbildung 3-8: Pumpenkennlinien bei 50 °C

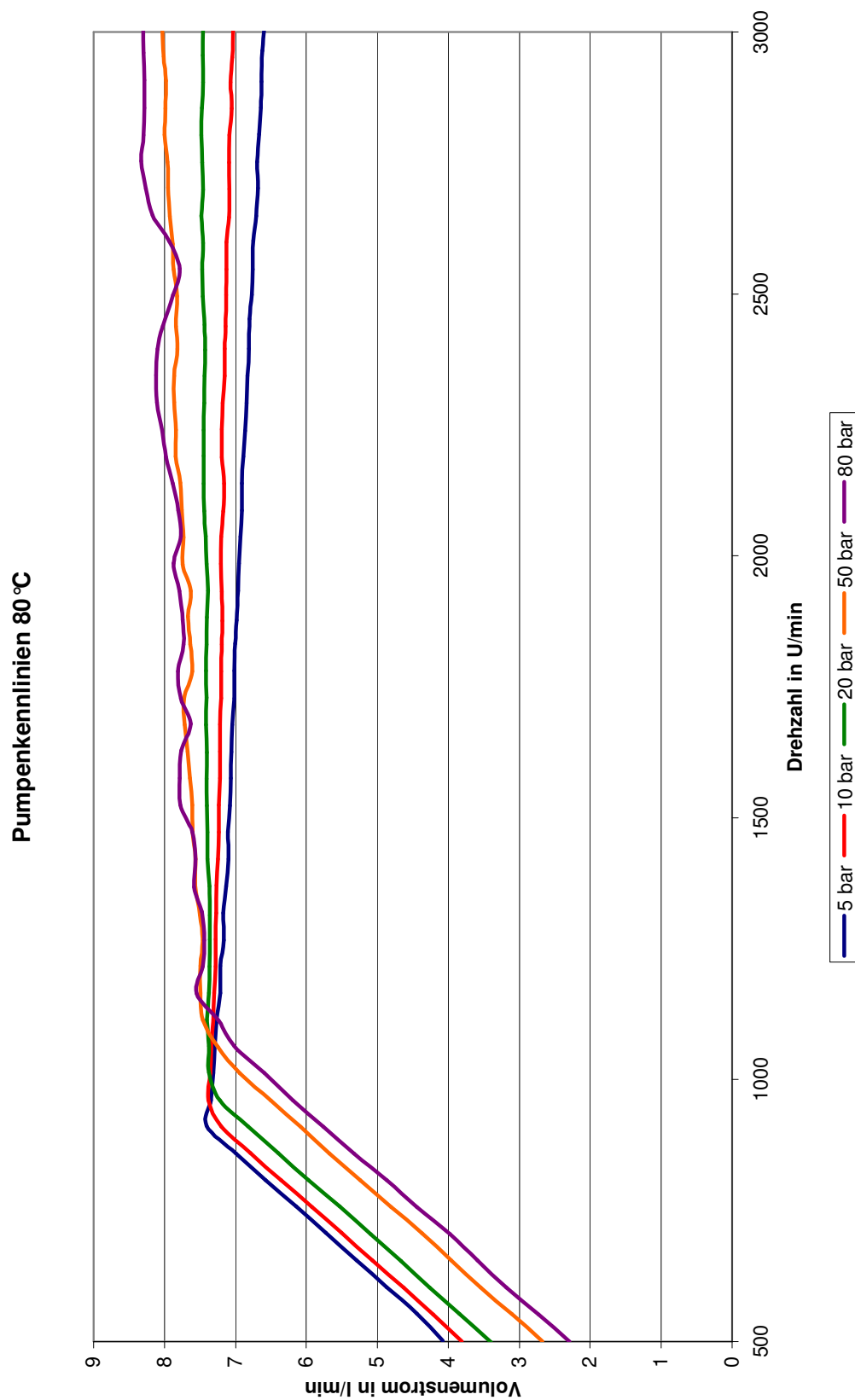


Abbildung 3-9: Pumpenkennlinien bei 80 °C

3.3 Ventilkennlinien

Das Proportionalventil besitzt eine nichtlineare statische Kennlinie. Der ursprüngliche Ansatz der elektrohydraulischen Servolenkung sah vor, das vom Fahrer am Lenkrad aufgebrauchte Drehmoment zu messen und die Messspannung direkt als Ansteuerspannung des Ventils zu verwenden. Folglich musste das Verhalten des Ventils der mechanisch-hydraulischen Servolenkung nachempfunden werden.

Die Messung der Ventilkennlinien, also der Zusammenhang zwischen dem Druck in den abgesperrten Arbeitsleitungen des Ventils und der Ansteuerspannung bei unterschiedlichen Temperaturen und Drehzahlen, erfolgt mit der Originalpumpe. Deshalb wird der bestehende Versuchsaufbau um das Servoventil erweitert.

3.3.1 Erweiterung des Prüfstands

Das Ventil wird neben der Pumpe auf dem Bett des Prüfstands montiert. Die Hochdruckseite der Pumpe wird mit dem Versorgungsanschluss des Ventils verbunden. Der Volumenstrom wird an den Arbeitsanschlüssen direkt gegen Druckaufnehmer (100 bar) beziehungsweise über den Tankanschluss drucklos in den Tank des Prüfstands gefördert.

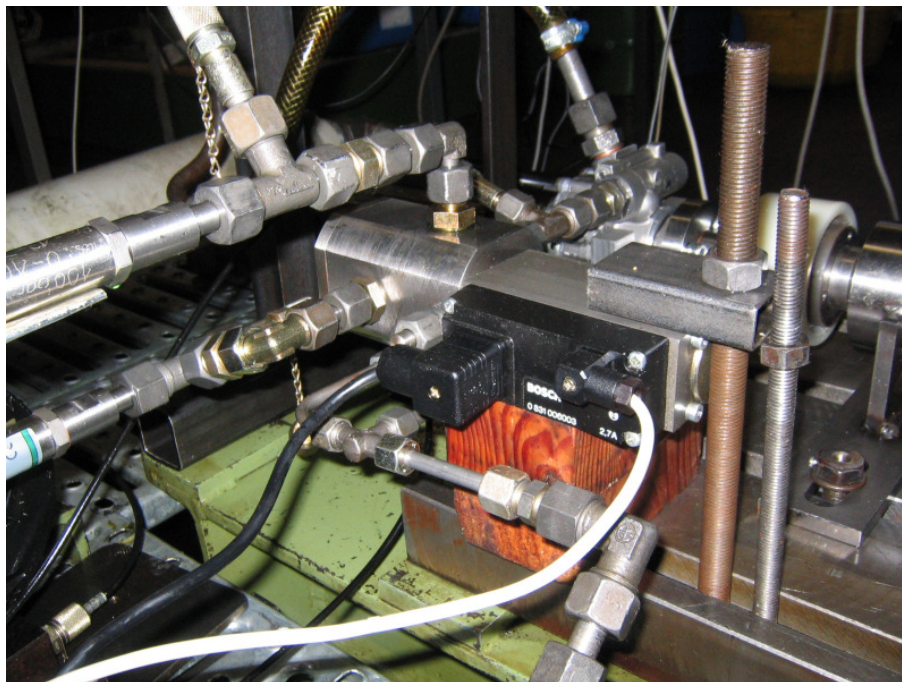


Abbildung 3-10: Pumpe und Ventil auf dem Prüfstand

Für diese Messungen wird die Pumpendrehzahl manuell am Potentiometer eingestellt. Die Drücke in den Arbeitsleitungen werden von den Druckaufnehmern in analoge Spannungen umgewandelt und so verstärkt, dass 100 bar zehn Volt entsprechen. Im drucklosen Zustand liefern sie allerdings Offsetwerte von 1,13 Volt und 0,19 Volt, die in der Software LabVIEW abgezogen werden müssen. Die Volumenstrom- und Drehzahlinformationen spielen bei diesen Versuchen keine Rolle.

3.3.2 Hauptprogramm „Ventilkennlinienmessung“



VI „VK_Main.vi“

Das Programm ist eine Modifikation der Pumpenkennlinienmessung. Die Umrechnung der Drehzahlen in Spannungen fällt weg. Stattdessen wird die Ansteuerspannung direkt eingestellt, an die Signalerzeugung übergeben und gespeichert. Die abgetasteten Druckwerte liefern nach dem Einschwingen und der Mittelwertbildung die Druckdifferenz an den Arbeitsanschlüssen. Vorher werden die angesprochenen Offsetwerte subtrahiert. Die Skalierung der Druckdifferenz erfolgt mit dem Faktor zehn, da zehn Volt einem Druck von 100 bar entsprechen.

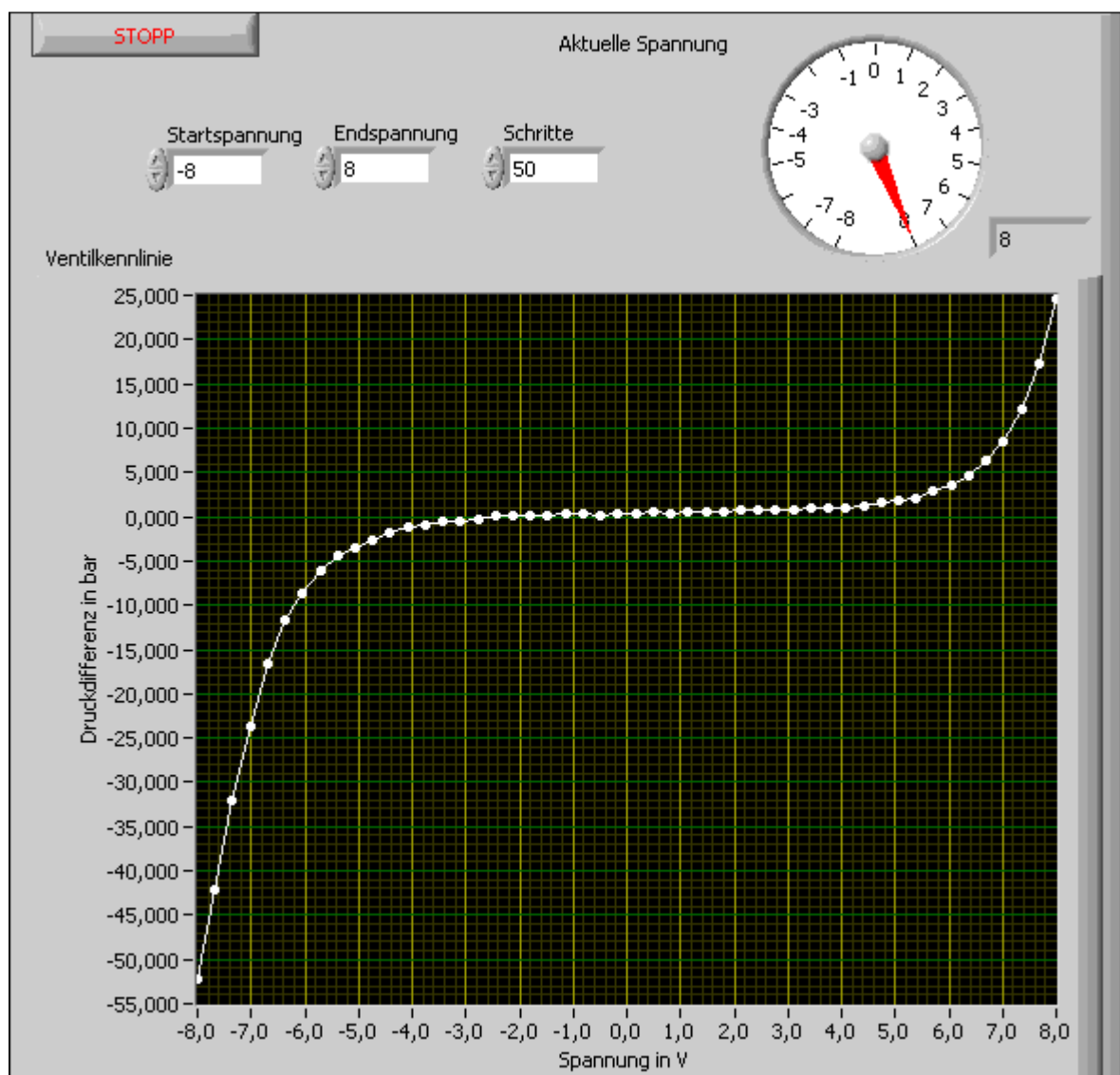


Abbildung 3-11: Frontpanel der Ventilkennlinienmessung

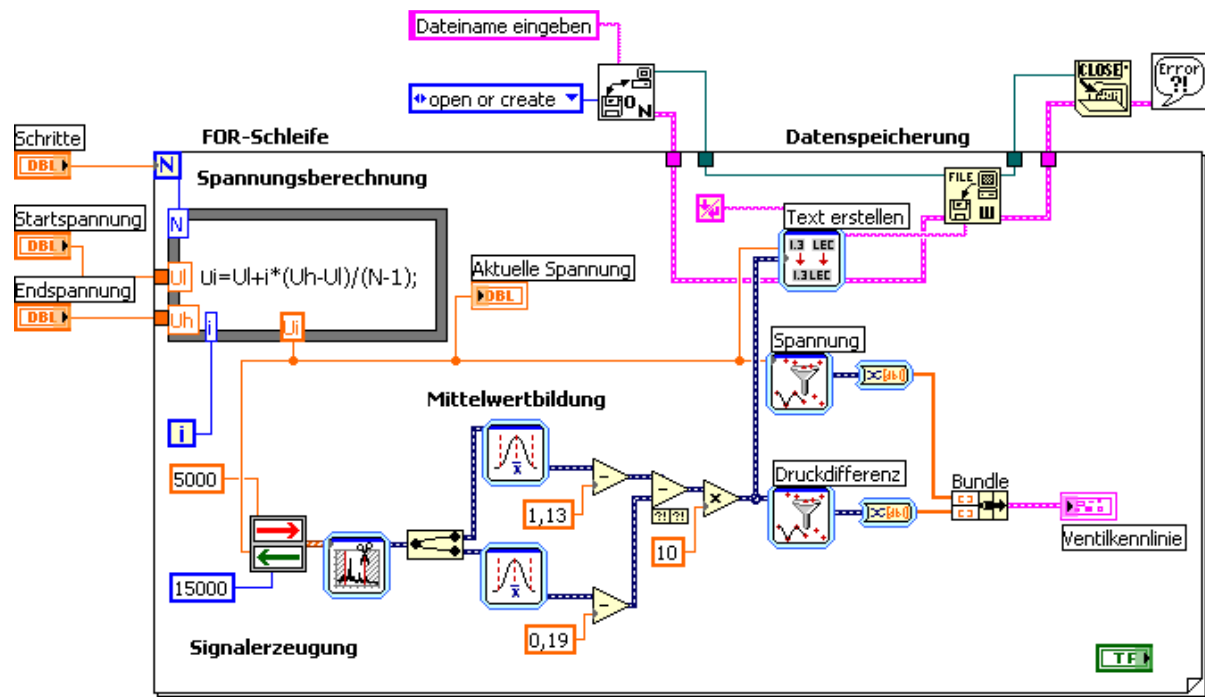


Abbildung 3-12: Blockdiagramm der Ventilkennlinienmessung

3.3.3 Aufnahme der Kennlinien

Auch die Aufnahme der Ventilkennlinien geschieht automatisch beim Start des Programms. In diesem Fall wird die Ansteuerspannung des Ventils in 50 Schritten von -8 Volt auf +8 Volt gesteigert und jeweils die sich nach drei Sekunden einstellende Druckdifferenz zwischen den Arbeitsanschlüssen gemessen. Der Ablauf wird bei drei verschiedenen Öltemperaturen (25 °C, 50 °C und 80 °C wieder mit einer Toleranz von ±5 °C) und fünf verschiedenen Motordrehzahlen (750 U/min, 1000 U/min, 1250 U/min, 1750 U/min und 2250 U/min) durchgeführt.

Messung bei 25 °C	Temperaturbereich (in °C)		
	min	max	Ø
750 U/min	25	25	25
1000 U/min	25	25	25
1250 U/min	26	27	26,5
1750 U/min	26	26	26
2250 U/min	25	26	25,5

Messung bei 50 °C	Temperaturbereich (in °C)		
	min	max	Ø
750 U/min	50	50	50
1000 U/min	51	51	51
1250 U/min	49	50	49,5
1750 U/min	50	50	50
2250 U/min	50	51	50,5

Messung bei 80 °C	Temperaturbereich (in °C)		
	min	max	Ø
750 U/min	76	78	77
1000 U/min	75	77	76
1250 U/min	80	83	81,5
1750 U/min	77	77	77
2250 U/min	75	75	75

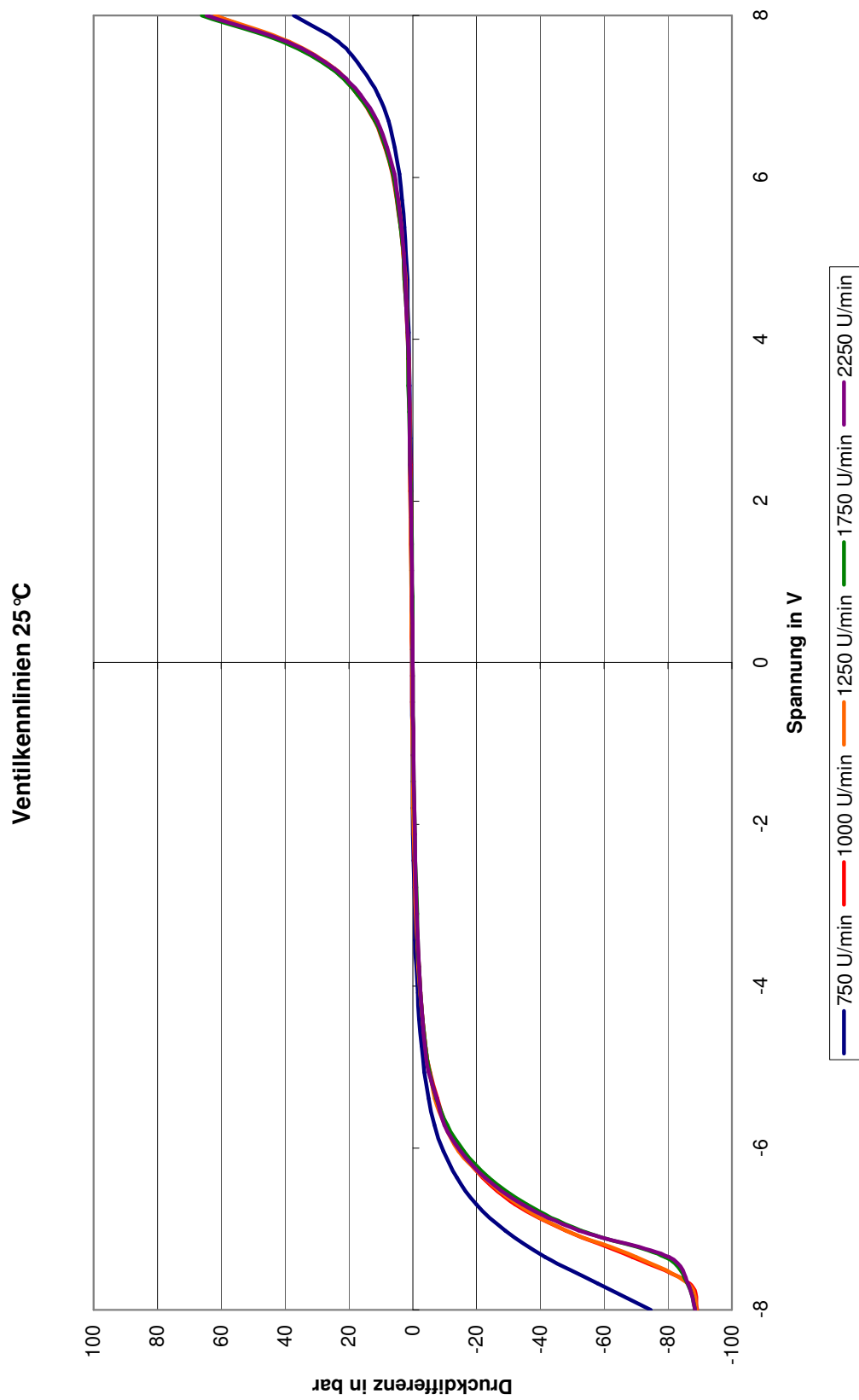


Abbildung 3-13: Ventilkennlinien bei 25 °C

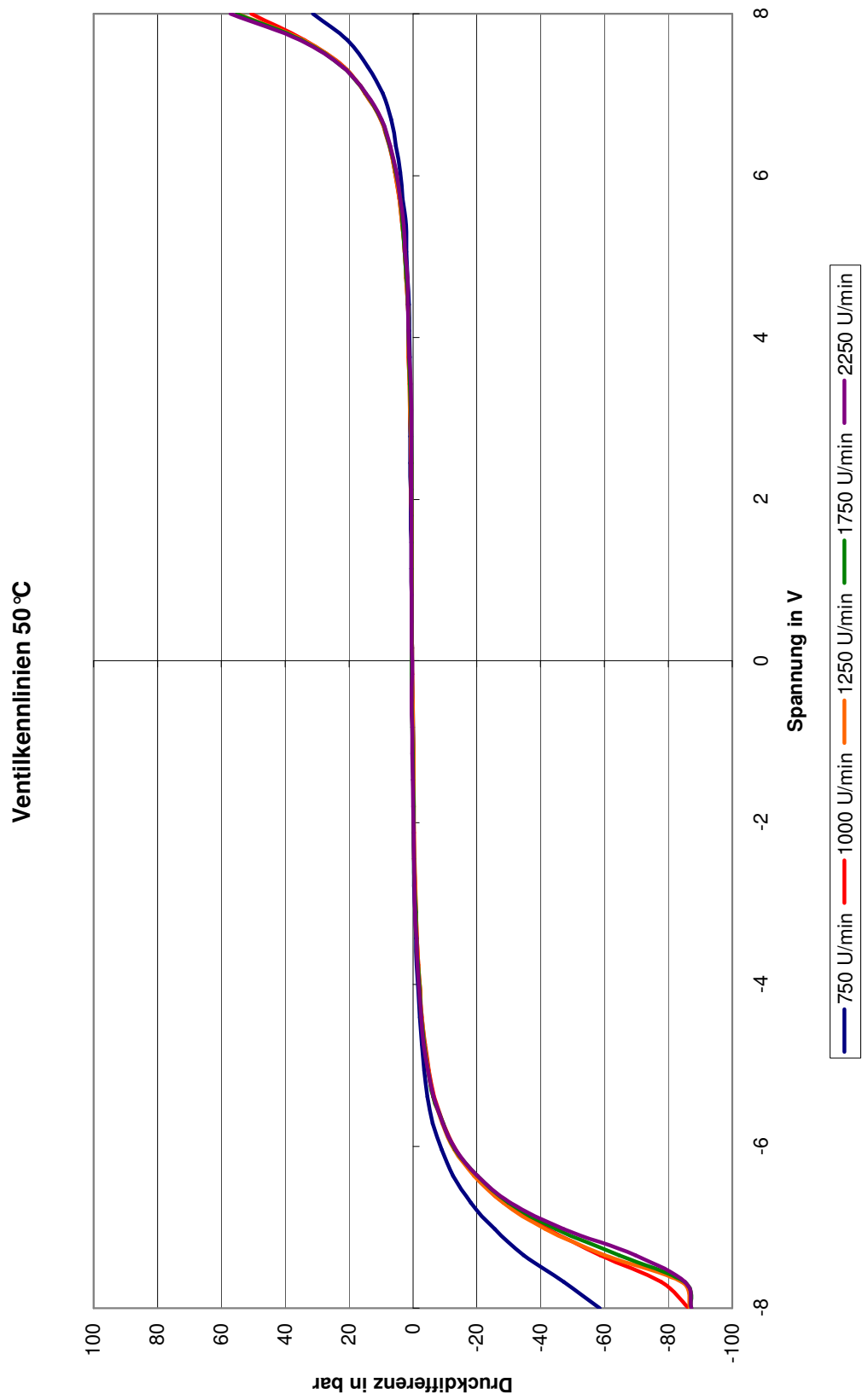


Abbildung 3-14: Ventilkennlinien bei 50 °C

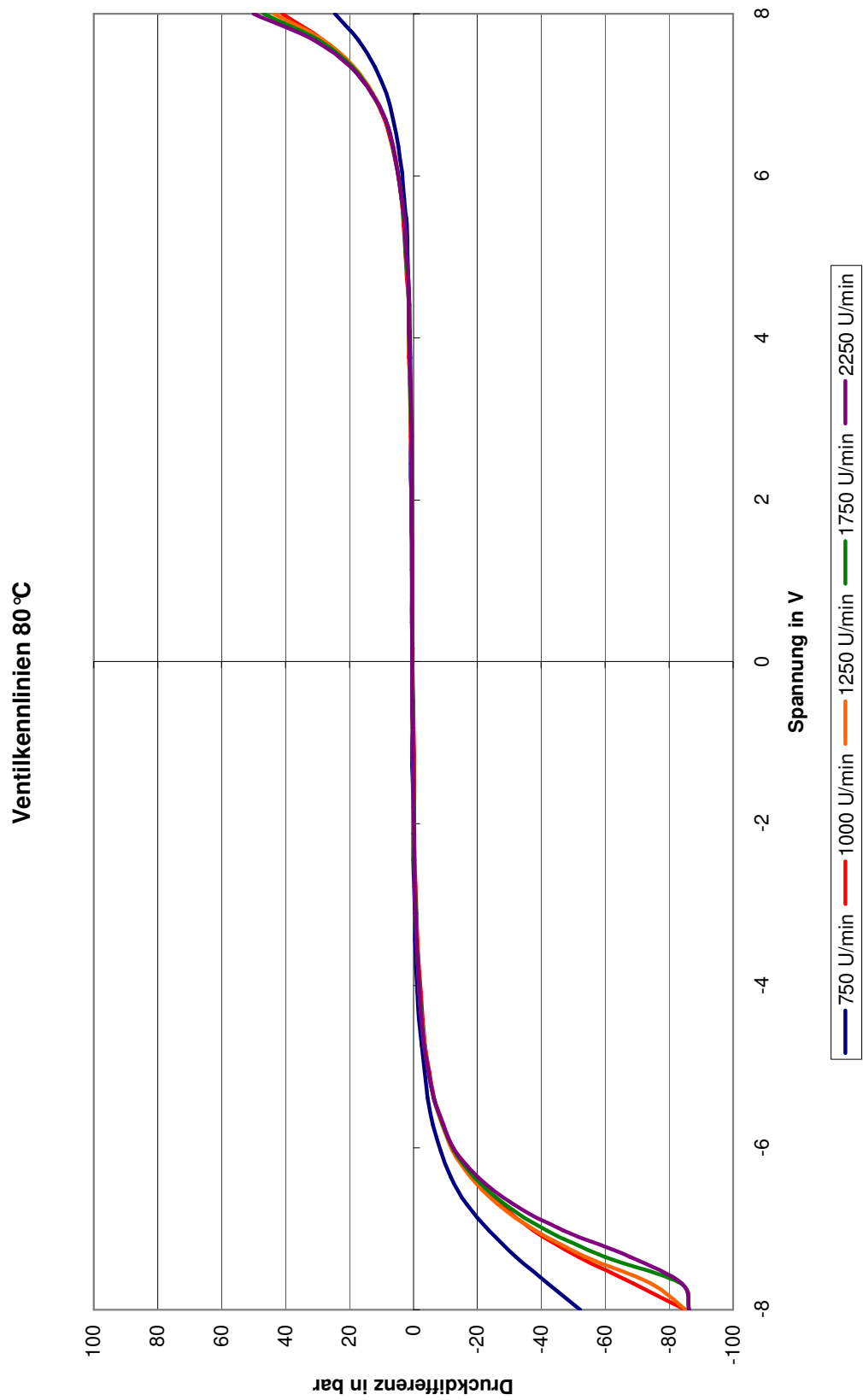


Abbildung 3-15: Ventilkennlinien bei 80°C

3.4 Interpretation der Ergebnisse

Die Pumpen und Ventilkennlinien sind die Grundlage für den Entwurf einer Regelungsstrategie. Folgende Erkenntnisse sind wichtig:

- Der geförderte Volumenstrom wird durch das in der Flügelzellenpumpe eingebaute Stromregelventil ab einer Pumpendrehzahl von etwa 1000 U/min annähernd konstant gehalten und steigt lediglich bei hohen Arbeitsdrücken mit steigender Drehzahl noch deutlich an.
- Der Drehzahlbereich unter 1000 U/min ist für die Regelung uninteressant, da die Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors etwa 1050 U/min beträgt und die Pumpe aufgrund des Übersetzungsverhältnisses von ungefähr 1:1,1 noch etwas schneller dreht (also ca. 1155 U/min).
- Zukünftige Messungen von Ventilkennlinien können bei Leerlaufdrehzahl durchgeführt und die Ergebnisse mit der Kennlinien bei 1250 U/min verglichen werden.
- In allen Kennlinien sind Unterschiede bei verschiedenen Öltemperaturen sichtbar. Da diese aber last- und drehzahlabhängig stark schwanken, empfiehlt sich eine mittlere Bezugstemperatur von 50 °C ±5 °C.
- Die Ventilkennlinien sind nicht punktsymmetrisch zum Ursprung. Der Ventilschieber steht bei null Volt Ansteuerspannung nicht in der Mittelstellung.
- Die Nichtlinearität des Ventils hat stark unterschiedliches Systemverhalten in verschiedenen Abschnitten der Kennlinien zur Folge. Für die Reglerauslegung sollen drei Druckbereiche untersucht werden. In den annähernd linearen Teilstücken zwischen 50 bar und 60 bar Druckdifferenz im positiven und negativen Ast sowie im großen nichtlinearen Mittelbereich zwischen ±20 bar Druckdifferenz wird jeweils eine Frequenzgangmessung durchgeführt. Anhand der Ventilkennlinie bei 50 °C Öl-Temperatur und einer Pumpendrehzahl von 1250 U/min werden die einzustellenden Ansteuerspannungen ermittelt:

Messung bei 50 °C	Druckdifferenz (in bar)		Spannung (in V)			
	min	max	min	max	Offset	Amplitude
Negativer Ast	-60	-50	-7,35	-7,18	-7,265	0,085
Mitte	-20	20	-6,37	7,25	0,44	6,81
Positiver Ast	50	60	7,93	8,04	7,985	0,055

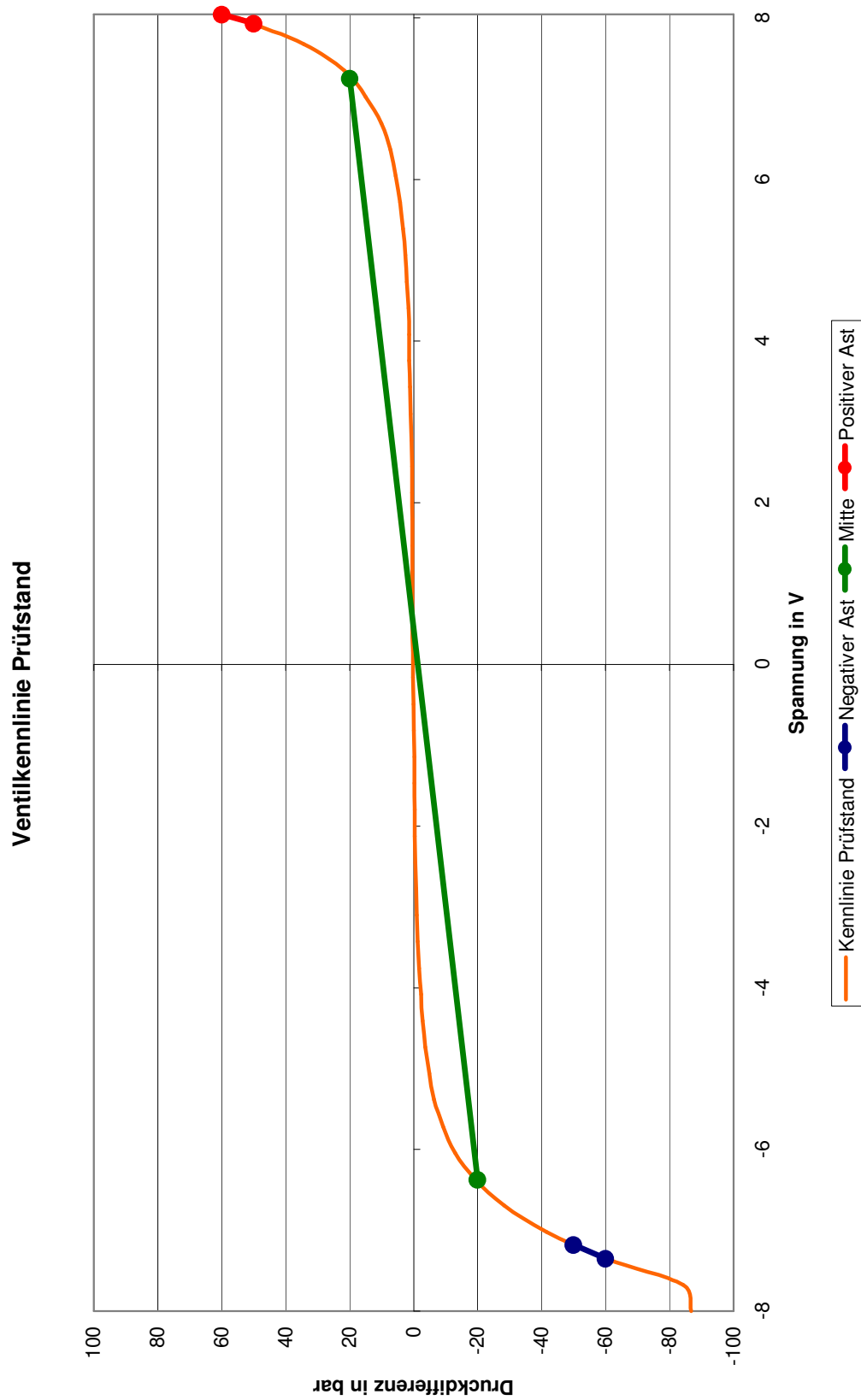


Abbildung 3-16: Prüfstand-Ventilkennlinie mit Frequenzgang-Messbereichen

3.5 Frequenzgang des Ventils

Die Frequenzgangmessung erfolgt mit dem bestehenden Versuchsaufbau. Gemessen wird der Frequenzgang zwischen der Ansteuerspannung des Ventils und der Druckdifferenz, die sich zwischen den beiden abgesperrten Arbeitsleitungen ergibt. Für den Messablauf wird das bereits ausführlich beschriebene LabVIEW-Programm „FG_Main.vi“ um die Berechnung der Druckdifferenz erweitert. Aus den vorigen Messungen resultieren die Randbedingungen für die Frequenzgänge im negativen Ast, Mittelbereich und positiven Ast der Ventilkennlinie: Pumpendrehzahl 1250 U/min und Temperaturbereich von $50\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

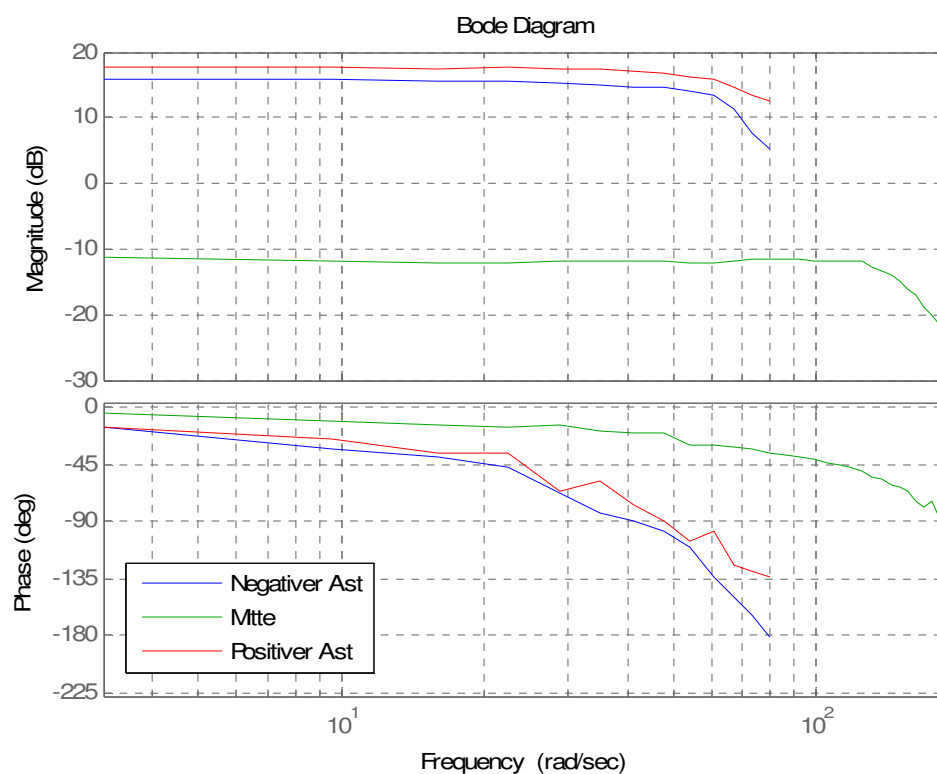


Abbildung 3-17: Frequenzgang des Ventils auf dem Prüfstand

Anmerkung: Die Auswertung der Messdaten funktioniert fehlerfrei, allerdings ist die genaue Einstellung der Drücke nahezu unmöglich, weil die Ventilkennlinie sehr steil ist und kleine Änderungen der Ansteuerspannungen große Druckänderungen zur Folge haben.

3.6 Entwurf einer Druckregelung am Prüfstand

Ziel dieser Arbeit ist die Realisierung einer elektrohydraulischen Lenkunterstützung. Die Komponenten der Lenkung müssen Unterstützungskräfte zur Verfügung stellen, wenn der Fahrer am Lenkrad ein Handmoment aufbringt. Je nach Fahrsituation und Größe des Handmoments sind unterschiedliche Druckdifferenzen zwischen den Arbeitsanschlüssen des Ventils erforderlich. Zunächst soll nun am Prüfstand ein Druckregler entworfen werden, der den Differenzdruck bei abgeschlossenen Arbeitsleitungen auf einen bestimmten Wert einregelt. Diese Situation ist mit dem Parkieren gleichzusetzen. Später soll der Regelalgorithmus am Versuchsfahrzeug eingesetzt werden, wobei dann das gemessene Lenkmoment die Sollwerte vorgibt. Die Regelung läuft auf einem System der Firma dSPACE.

3.6.1 MicroAutoBox

Die MicroAutoBox ist ein Echtzeitsystem für die Entwicklung von neuen Steuerungsfunktionen vor allem im Automobilsektor. Sie ist durch ihre zahlreichen Schnittstellen gerade auch für X-by-Wire-Anwendungen gut geeignet. Alle Funktionen des Versuchsfahrzeugs sollen in Zukunft auf der MicroAutoBox implementiert werden (siehe Dokumentation der Projektgruppe „dSPACE“). Die Programmierung erfolgt in Matlab Simulink. Das Programm wird kompiliert und über die PCMCIA-Schnittstelle auf die MicroAutoBox geladen. Einige ausgewählte technische Daten [4]:



Abbildung 3-18: MicroAutoBox

- IBM PPC 750FX mit 800 MHz
- 8 MB Hauptspeicher
- 4 MB Speicher nur für die Kommunikation zwischen MicroAutoBox und PC/Notebook
- 16 MB nicht flüchtiger Flash-Speicher mit Daten aus Code-Abschnitt und Flight Recorder Uhr-/Kalenderfunktion zum Setzen von Zeitmarken für die Daten des Flight-Recorders

- Anschluss an Notebook/PC für Programme, Experimentkonfiguration, Signalüberwachung und Auslesen des Flight Recorders
- Gegossenes Aluminiumgehäuse
- Vibrationsresistent
- 6 V – 40 V Eingangsspannung
- Schutz gegen Überspannung und Verpolung

3.6.2 Reglerentwurf und Stabilität im Frequenzgang

Der Reglerentwurf und der Stabilitätsnachweis nach dem Nyquist-Kriterium soll am Beispiel des negativen Astes der Kennlinie, also bei Druckdifferenzen zwischen 50 bar und 60 bar, theoretisch erfolgen. Aus diesem Grund wird mit Hilfe des Matlab-Skripts „Systemidentifikation.m“ die Übertragungsfunktion der Strecke ermittelt:

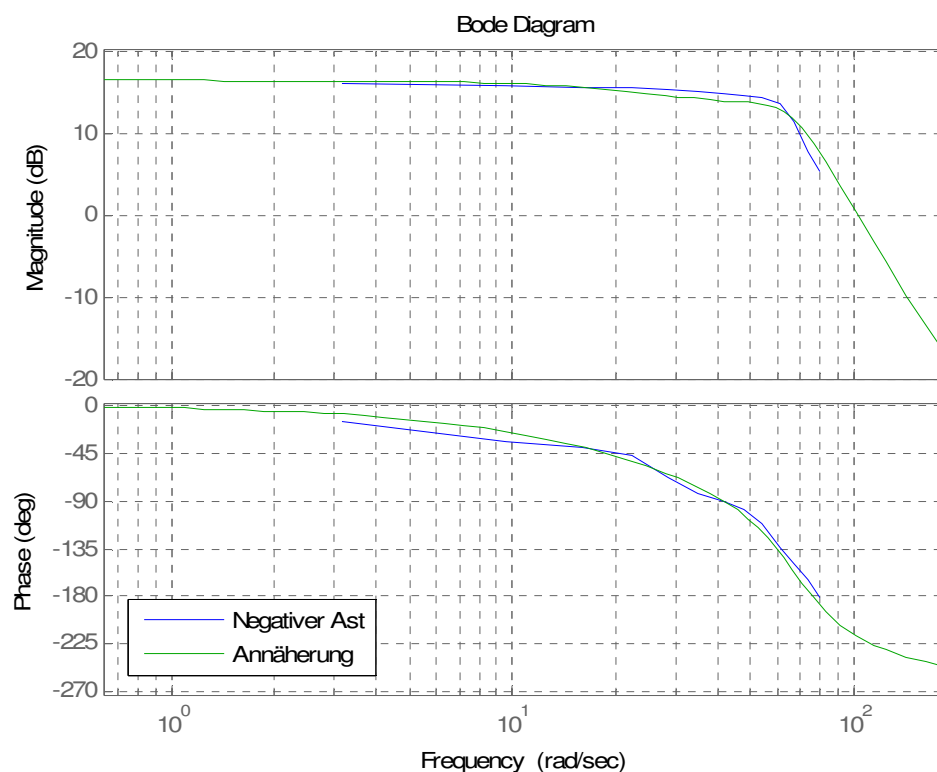


Abbildung 3-19: Frequenzgang im negativen Ast der Kennlinie mit Näherung

Die Annäherung der Messung gelingt mit einem System 0. Ordnung im Zähler und 3. Ordnung im Nenner am besten. Die zugehörige Übertragungsfunktion lautet:

$$H(s) = \frac{825300}{s^3 + 72,64 \cdot s^2 + 5748 \cdot s + 125600} \quad (16)$$

Die Übertragungsfunktion drückt das Verhältnis zwischen Differenzdruck und Ansteuerspannung aus. Da die Auswertung mit den elektrischen Spannungen erfolgt, muss zur Berechnung der tatsächlichen Verstärkung in bar/Volt die Messspannung im Zähler durch einen Druck ersetzt werden (1 V entspricht 10 bar).

Ein Regelkreis ist stabil, wenn der offene Regelkreis (nicht rückgekoppelt) im Frequenzgang bei der Durchtrittskreisfrequenz (Verstärkung 1 bzw. 0 dB) eine Phasenverschiebung kleiner als 180° aufweist. [5] Für die Auslegung eines Reglers im Frequenzbereich gelten folgende Zusammenhänge und Richtwerte:

- Einhaltung einer Phasenreserve (Abstand von -180° Phasenverschiebung bei der Durchtrittskreisfrequenz) von z.B. $\alpha = 60^\circ$
- Dämpfung zwischen 0,4 und 0,7 entspricht einem Überschwingen von 5 % bis 25 % und zeigt im Frequenzgang eine Phasenreserve von 44° bis 60°
- Steigung des Amplitudengangs im Bereich der Durchtrittskreisfrequenz von -20dB/Dekade (integrales Verhalten)
- Die Durchtrittskreisfrequenz bestimmt die Eigenschwingungsfrequenz des späteren Regelkreises. Die Übergangszeit der Regelkreissprungantwort hängt näherungsweise reziprok mit der Durchtrittskreisfrequenz zusammen: Übergangszeit $\sim 1,4/\text{Durchtrittskreisfrequenz}$

Die Regelung der Druckdifferenz soll mit einem einschleifigen Regelkreis realisiert werden. Der Regelkreis sieht prinzipiell folgendermaßen aus:

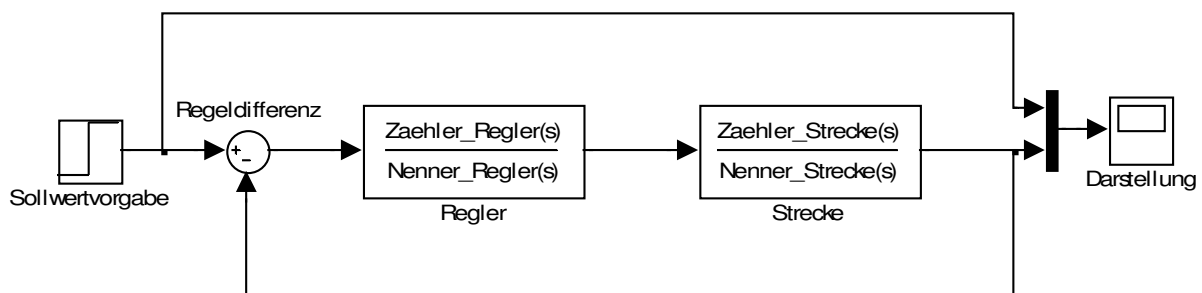


Abbildung 3-20: Blockschaltbild des Regelkreises in Matlab Simulink

Für diese Regelaufgabe wird ein PI-Regler gewählt. Wichtig ist vor allem eine möglichst große Phasenreserve im Bereich der Durchtrittskreisfrequenz, um Stabilität in allen Teilen der nichtlinearen Ventilkennlinie zu erreichen. Besonders kritisch sind dabei die steilen Anstiege der Kennlinie bei hohem Druck. Außerdem soll der Amplitudengang bei der Durchtrittskreisfrequenz eine Steigung von -20dB/Dekade aufweisen. Die Übertragungsfunktion des Reglers lautet:

$$H_R(s) = k_p \cdot \frac{1 + T_N \cdot s}{T_N \cdot s} \quad (17)$$

k_p Verstärkung

T_N Nachstellzeit

Die Bestimmung der Parameter Verstärkung und Nachstellzeit erfolgt empirisch:

$$H_R(s) = k_p \cdot \frac{1 + T_N \cdot s}{T_N \cdot s} = \underline{\underline{0,05 \cdot \frac{1 + 0,1 \cdot s}{0,1 \cdot s}}} \quad (18)$$

Das Matlab-Skript „FG_Regelkreis.m“ multipliziert die Übertragungsfunktionen des PI-Reglers und der Regelstrecke miteinander und stellt den Frequenzgang des offenen Regelkreises dar:

```
% Übertragungsfunktionen von PI-Regler und Regelstrecke
% PI-Regler
kp = 0.05;
TN = 0.1;
Zaehler_PI_Regler = [TN*kp kp];
Nenner_PI_Regler = [TN 0];
PI_Regler = tf(Zaehler_PI_Regler,Nenner_PI_Regler);
% Regelstrecke
Zaehler_Regelstrecke = [825300];
Nenner_Regelstrecke = [1 72.64 5748 125600];
Regelstrecke = tf(Zaehler_Regelstrecke,Nenner_Regelstrecke);
% Offener Regelkreis
Offener_Regelkreis = Regelstrecke*PI_Regler;
% Darstellung
omega={1,100};
```



```
figure(1), bode(Offener_Regelkreis,omega), grid on, hold on,
legend('Offener Regelkreis');
```

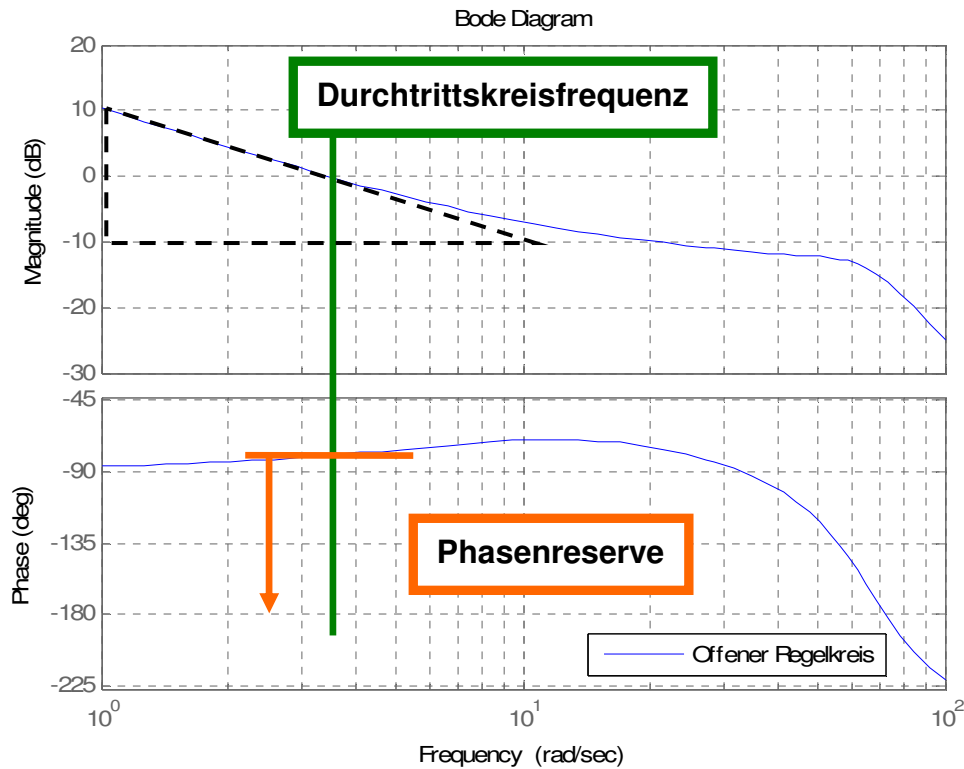


Abbildung 3-21: Frequenzgang des offenen Regelkreises

Aus dem Bode-Diagramm lassen sich eine Durchtrittskreisfrequenz von 3,5 rad/s und eine Phasenreserve von etwa 100° ablesen. Die Übergangszeit beträgt demnach ca. 0,4 s. Der Amplitudengang fällt im Bereich der Durchtrittskreisfrequenz beträgt mit einer Steigung von ungefähr -20dB/Dekade. Die Bedingungen für den Reglerentwurf sind erfüllt, der Regelkreis ist stabil.

3.6.3 Praktische Umsetzung der Regelung

Die praktische Umsetzung des Regelkreises erfordert einige Signalkonditionierungen (Einsatz der MicroAutoBox anstelle der Messkarte PCI-6229) sowie Modifikationen im Blockschaltbild:

- Schaltungstechnische Anpassung der Spannungsbereiche von ± 10 V auf 0 V bis 5 V (analoge Eingänge P1 und P2) und 0 V bis 4,5 V (Analogausgang Ventilspannung UV) durch Änderung von Verstärkungsfaktoren und Spannungsoffsets
- Blöcke für die analogen Eingänge P1 und P2 mit anschließender Umrechnung von Prozent in Volt (5 V entsprechen 100 %), Subtraktion der Offsets und Bildung der Druckdifferenz
- Skalierung der Messwerte durch die Umrechnung von Volt in bar
- Begrenzung der Reglerausgangsspannung, um hohe Drücke um 100 bar zu vermeiden
- Umrechnung der Reglerausgangswerte in Prozentanteile der analogen Ausgangsspannung für die Ventilansteuerung (4,5 V entsprechen 100 %), Addition eines Offsets und anschließende Ausgabe am analogen Ausgang

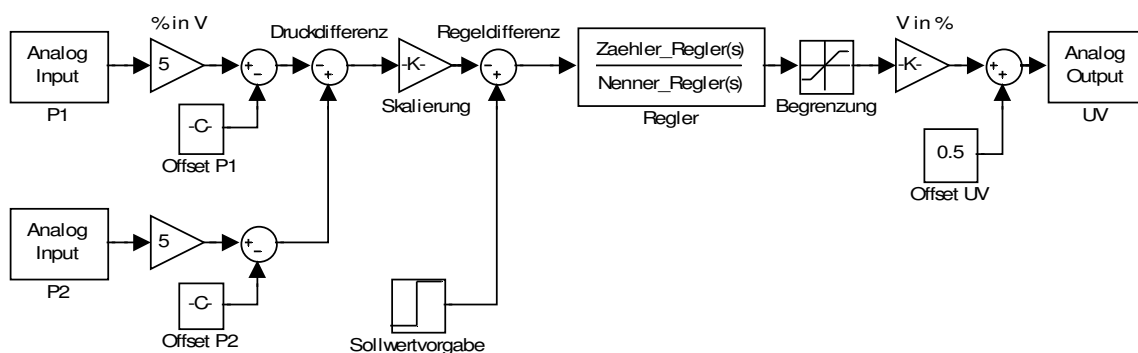


Abbildung 3-22: Blockschaltbild der Regelstruktur für die MicroAutoBox

Die Stabilität des Regelkreises ist in allen Druckbereichen gegeben. Das zeigen folgende Messungen von Sollwertsprüngen bei einer fest eingestellten Pumpendrehzahl von 1250 U/min und einer Öltemperatur von $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$:

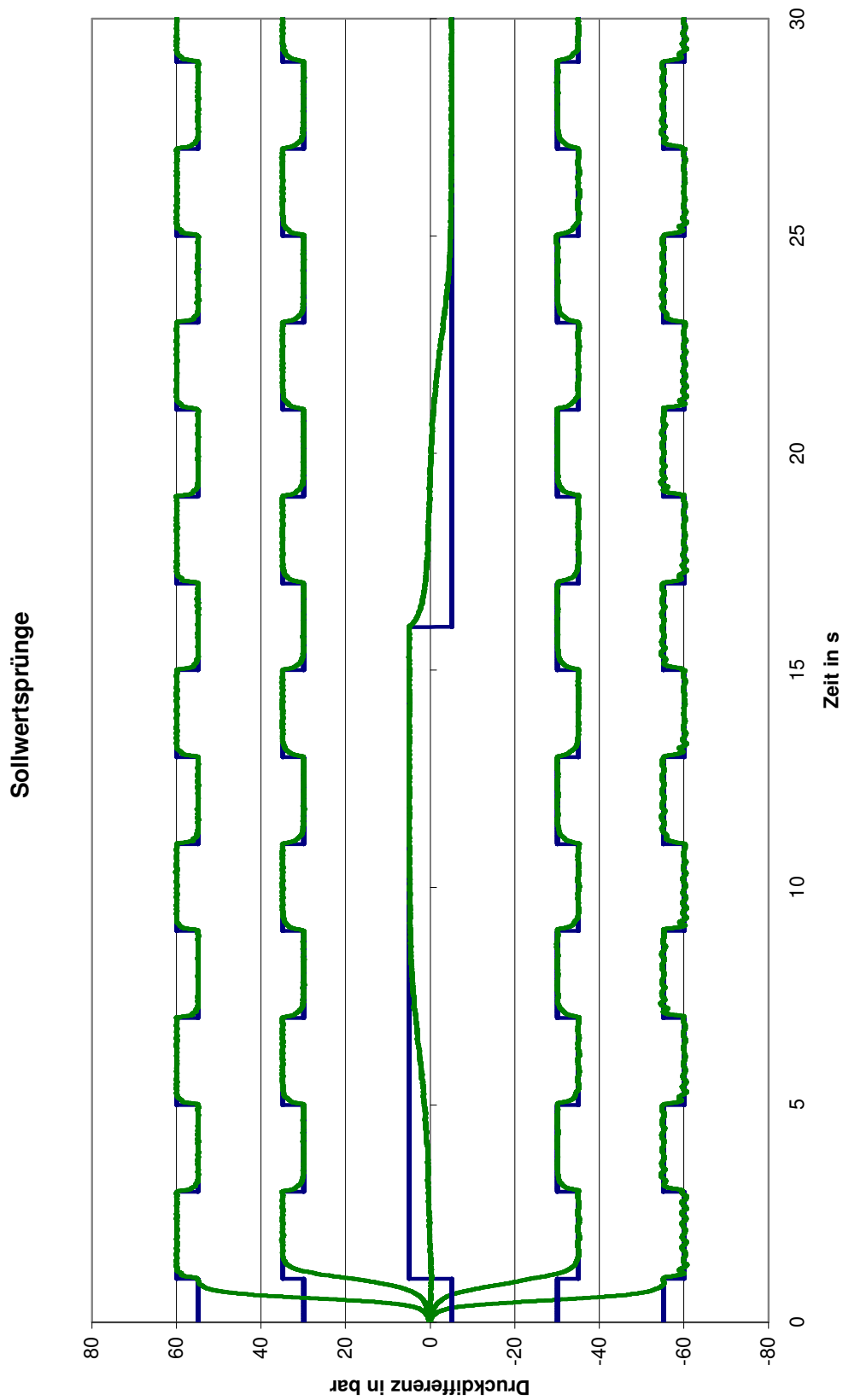


Abbildung 3-23: Verhalten des Regelkreises bei diversen Sollwertsprüngen

4. Untersuchungen am Fahrzeug

4.1 Vorgehensweise

Um die Einflüsse der anderen Lenkungskomponenten herauszustellen, werden Pumpe und Ventil wieder im Fahrzeug installiert und Vergleichsmessungen durchgeführt. Dazu gehören die Aufnahme einer Ventilkennlinie bei Leerlaufdrehzahl und Frequenzgangmessungen in drei Abschnitten dieser neuen Ventilkennlinie, die mit den Frequenzgangmessungen am Prüfstand vergleichbar sind. Anschließend soll die MicroAutoBox im Fahrzeug angeschlossen, die Druckregelung getestet und um das Handmoment als Sollwertvorgabe erweitert werden.

4.1.1 Messumgebung

Im Versuchsfahrzeug führen alle, für X-by-Wire relevanten Leitungen zu einer Messbox (siehe entsprechende Projekt- und Diplomarbeiten). Darin sind unter anderem Signalkonditionierung, Spannungsversorgung und Digitalanzeigen untergebracht.

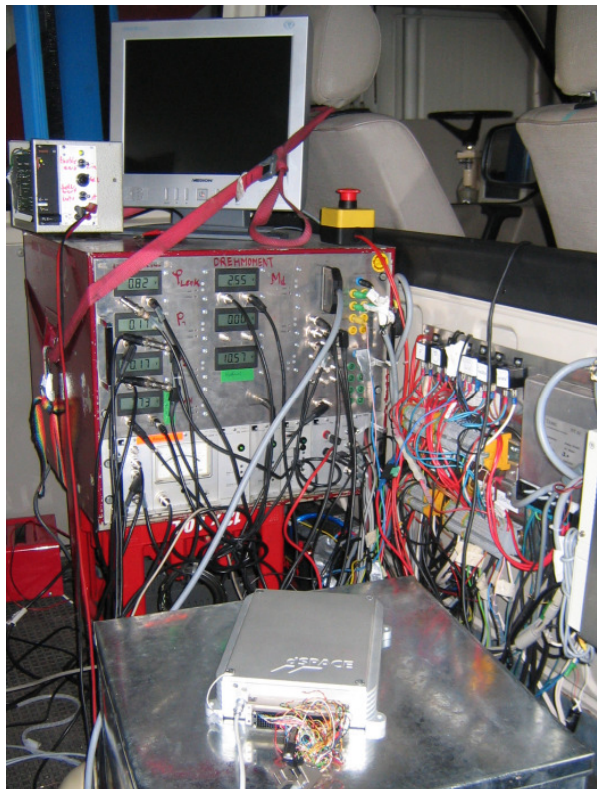


Abbildung 4-1: Messumgebung im Versuchsfahrzeug

Die für diese Arbeit wichtigen Signale können über BNC-Anschlüsse an der Messbox abgenommen und auf die Messkarte gegeben werden. Da bisher alle Funktionen von einem Industrie-PC mit Messkarte unter WinFACT Boris [6] gesteuert wurden, hat die Projektgruppe „dSPACE“ einen Adapterstecker erstellt, mit dem stattdessen die MicroAutoBox angeschlossen werden kann.

4.2 Ventilkennlinie

Die Untersuchungen am Prüfstand haben ergeben, dass der von der Pumpe geförderte Volumenstrom ab einer Drehzahl von ca. 1000 U/min ungefähr als konstant anzunehmen ist. Diese Situation wird im Fahrzeug bei Leerlaufdrehzahl erreicht. Zum Vergleich wird die am Prüfstand gemessene Kennlinie bei 1250 U/min herangezogen. Der zulässige Temperaturbereich beträgt $50\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

Folgende Gegebenheiten unterscheiden die Messungen im Fahrzeug von denen auf dem Prüfstand:

- Die Pumpe wird nun durch den Verbrennungsmotor des Fahrzeugs angetrieben und nicht mehr durch die Asynchronmaschine des Prüfstands.
- Die Arbeitsleitungen sind mit den Zylinderkammern der Lenkhilfe verbunden und nicht direkt am Ventil abgesperrt.
- Die Räder sind mit Stahlprofilen festgesetzt, um möglichst wenig Dynamik im System zuzulassen. Trotzdem bewegen sich die Räder bei hohem Differenzdruck um etwa $\pm 10^\circ$.
- Die Rohrleitungen im Fahrzeug haben geringere Querschnitte. Dadurch befindet sich deutlich weniger Öl im Hydraulikkreislauf (etwa die halbe Menge).
- Die kleinere Ölmenge hat gleichzeitig auch schnellere Änderungen der Temperatur zur Folge.
- Im Fahrzeug kommen andere Druckaufnehmer zum Einsatz als auf dem Prüfstand. Die Messspannung wird mit dem Faktor 30,637 bar/V in einen Druck umgerechnet [7].

In der Ventilkennlinie sind wieder die Bereiche markiert, in denen anschließend Frequenzgangmessungen durchgeführt werden.

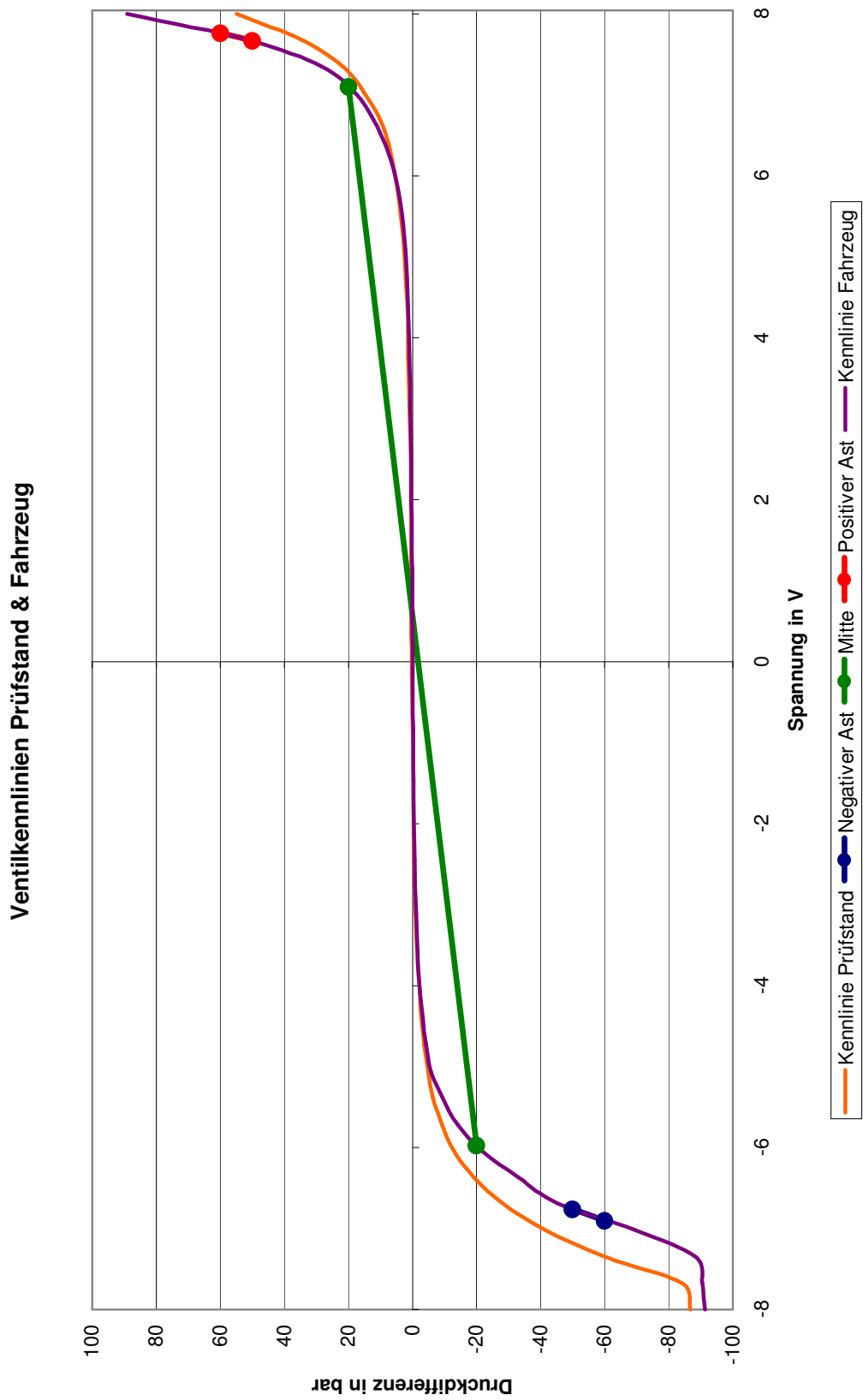


Abbildung 4-2: Fahrzeug-Ventilkennlinie mit Frequenzgang-Messbereichen

4.3 Frequenzgang

Die Frequenzgangmessungen sollen in den gleichen Druckbereichen stattfinden, wie die Messungen am Prüfstand. Aus der gemessenen Kennlinie werden die folgenden Ansteuerspannungen ermittelt:

Messung bei 50 °C	Druckdifferenz (in bar)		Spannung (in V)			
	min	max	min	max	Offset	Amplitude
Negativer Ast	-60	-50	-6,9	-6,76	-6,83	0,07
Mitte	-20	20	-5,97	7,1	0,565	6,535
Positiver Ast	50	60	7,67	7,76	7,715	0,045

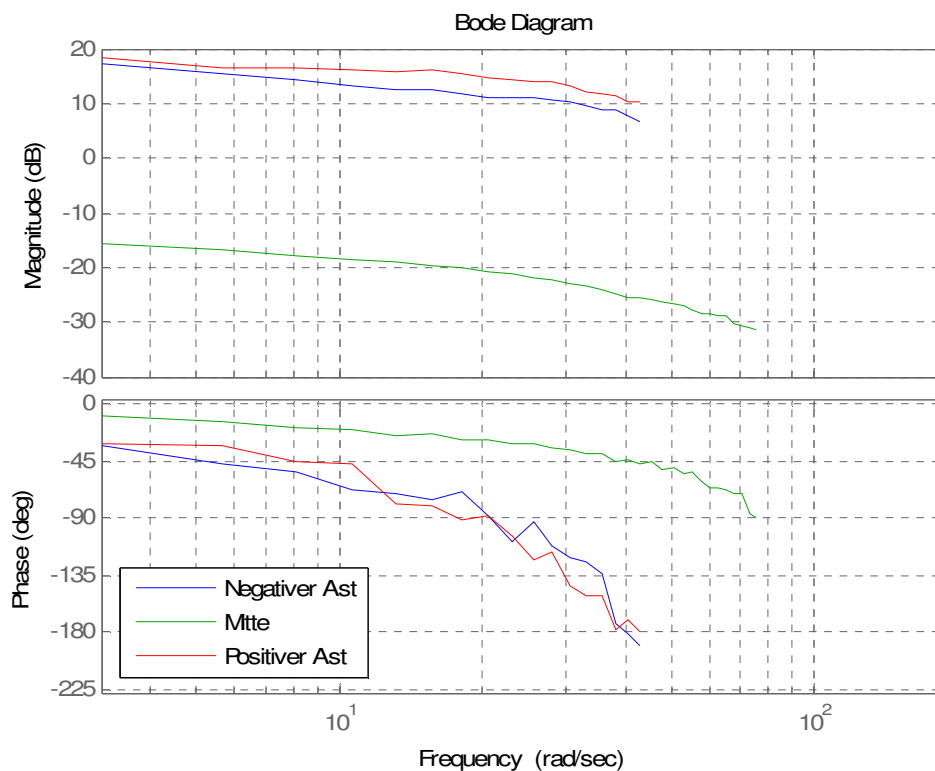


Abbildung 4-3: Frequenzgang des Ventils im Fahrzeug

Anmerkung: Um diese Frequenzgänge mit den Messungen auf dem Prüfstand vergleichen zu können, werden die Amplitudenverhältnisse mit dem Faktor 3,0637 multipliziert (Prüfstand: 1V entspricht 10 bar; Fahrzeug: 1 V entspricht 30,637 bar).

Die Amplituden fallen noch sehr langsam ab, während die Phasenverschiebungen bereits -180° erreicht haben. Dieses Verhalten deutet auf eine Totzeit hin. Zumindest reagiert das System sehr langsam. Das kann an den leichten Bewegungen der Räder und dem damit zu bewegendem Ölvolumen liegen. Die Übertragungsfunktion eines Totzeitgliedes lautet:

$$G(s) = e^{-sT_t} \tag{19}$$

Das folgende Bild mit den Frequenzgängen im negativen Ast der jeweiligen Kennlinie macht den Unterschied zwischen den Verhältnissen im Fahrzeug und auf dem Prüfstand deutlich:

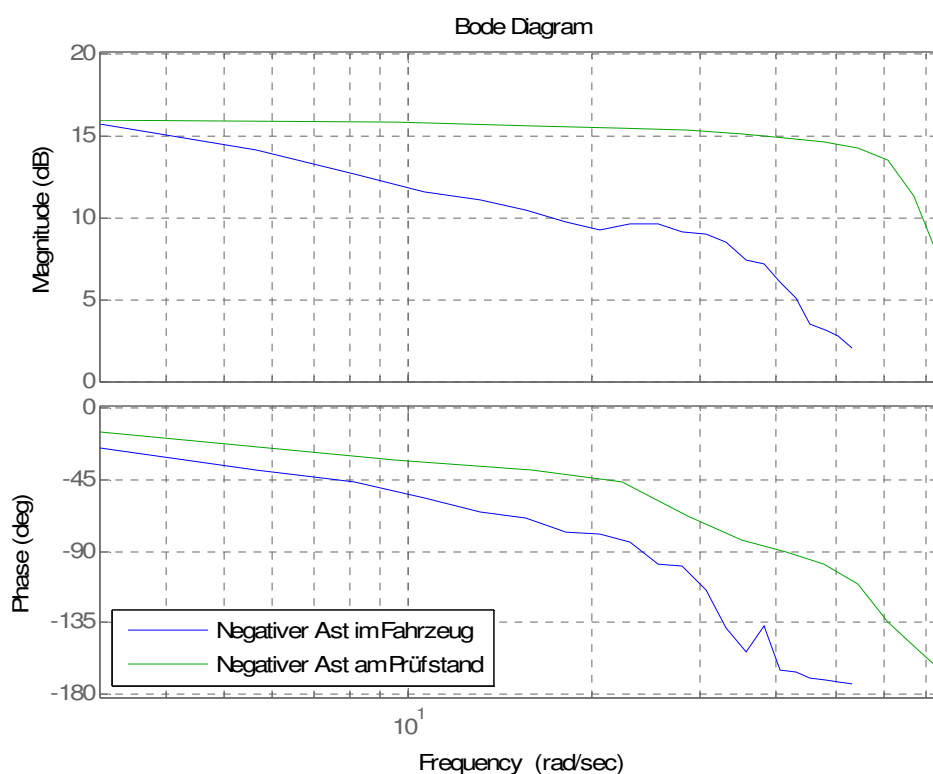


Abbildung 4-4: Vergleich der Frequenzgänge im negativen Kennlinien-Ast

4.4 Erweiterung und Test der Druckregelung

Die Druckregelung wird nun um die Messung des Handmoments erweitert. Diese Messwerte werden mit einem Faktor verstärkt und als Sollwertvorgabe zur Bildung der Regeldifferenz herangezogen.

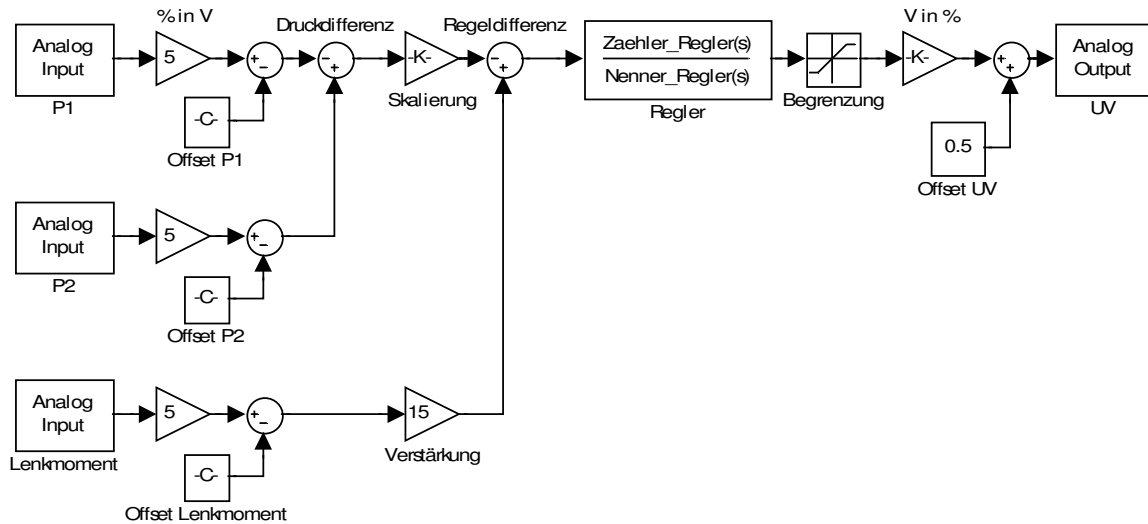


Abbildung 4-5: Erweiterung der Druckregelung um das Handmoment

Zunächst wird der Regelkreis bei geklemmten Rädern getestet. Die elektrohydraulische Unterstützung des Handmoments funktioniert, obwohl sich das Systemverhalten über der Frequenz im Vergleich zum Prüfstand verschlechtert hat. Die Erzeugung eines Lenkmoments verursacht deutliche Unterstützungskräfte. Zeitweise stellt sich ein leichtes Rucken ein. Bei geringen Druckdifferenzen von ± 10 bar wird der langsame Mittelbereich der Ventilkennlinie sichtbar. Der Regler hat Schwierigkeiten dem Sollwert zu folgen. In steileren Bereichen der Kennlinie hingegen wird der Sollwert erreicht und der geforderte Druck eingestellt.

Bei frei beweglichen Rädern, also während des Parkierens, wirkt die geregelte Servolenkung ebenfalls unterstützend. Allerdings fällt eine ungleichmäßige Unterstützung zwischen den beiden Lenkrichtungen auf, die aus der nicht ganz punktsymmetrischen Ventilkennlinie resultiert. Diese muss durch einen Offset ausgeglichen werden. Außerdem ist das Rucken bei schnellen Lenkbewegungen deutlich stärker geworden. Die Schwingungen haben eine Frequenz von etwa 12 Hertz. Eine mögliche Ursache des Problems ist die direkte Rückkopplung der Lenkunterstützung auf das Lenkrad und damit auf die Sollwertvorgabe.

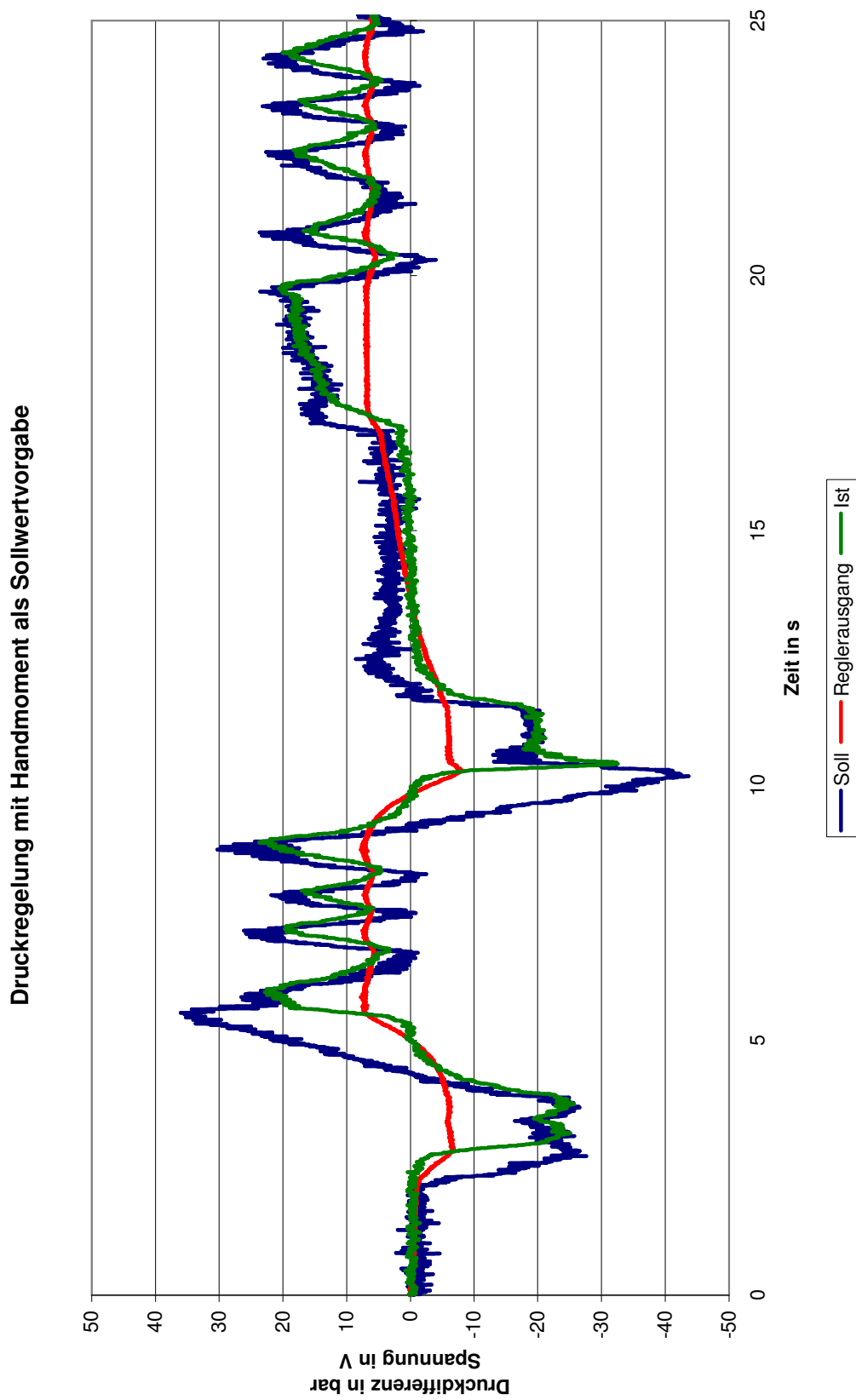


Abbildung 4-6: Druckregelung mit Handmoment als Sollwertvorgabe

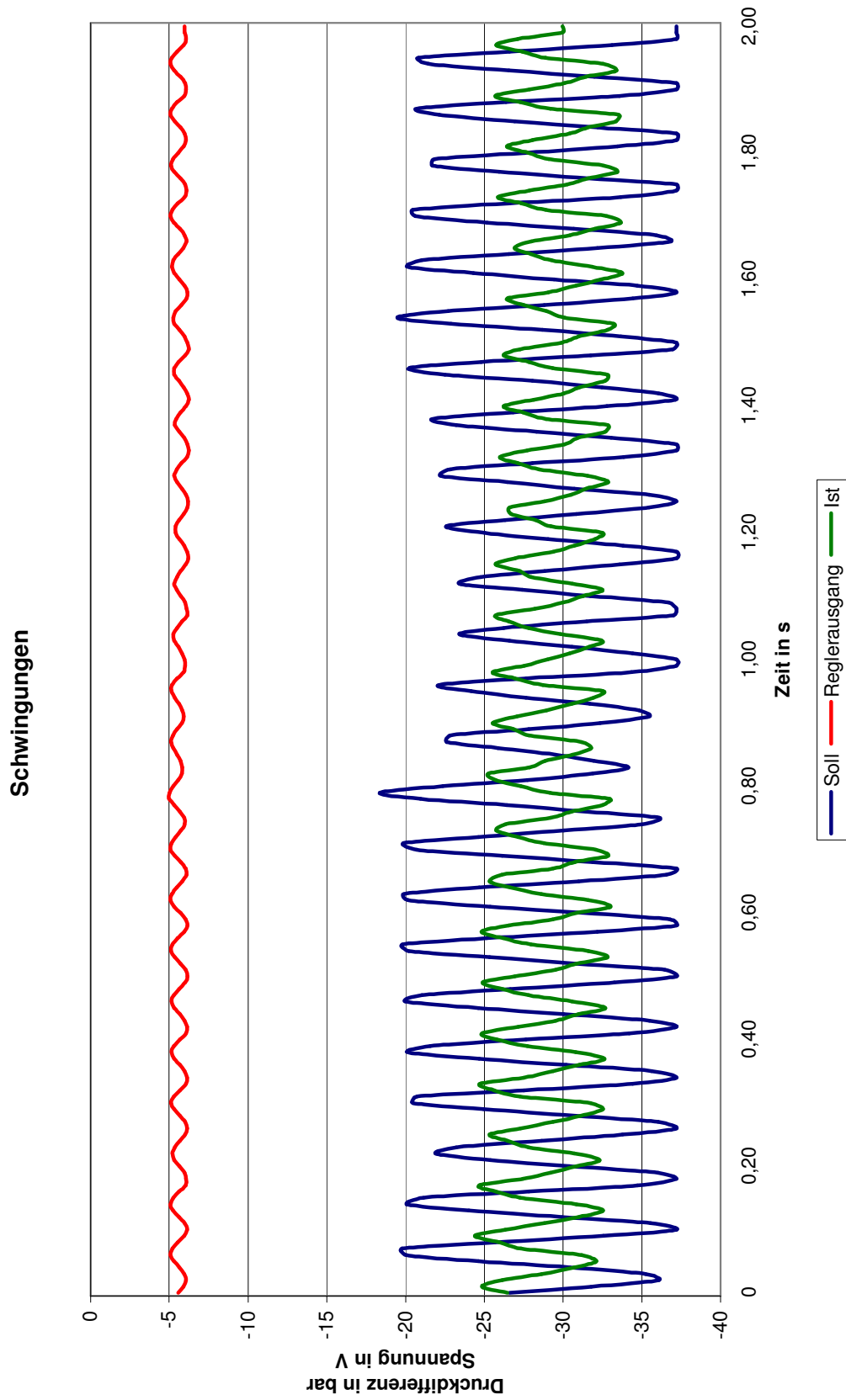


Abbildung 4-7: Schwingungen von ungefähr 12 Hertz

5. Zusammenfassung & Ausblick

Die Aufgabe dieser Masterarbeit ist erfüllt. Die elektrohydraulische Lenkung des Versuchsfahrzeugs funktioniert und bietet vollständige Steer-by-Wire-Funktionalität. Der Regelalgorithmus kommt bei den bisherigen Versuchen mit einem Parametersatz aus, muss aber sicherlich noch ausführlich getestet und optimiert werden. Dazu stehen jetzt zahlreiche Informationen über das Servoventil und die Pumpe sowie die in LabVIEW programmierten Messabläufe zur Verfügung.

Für Fahrversuche blieb leider keine Zeit, so dass sich die Tests auf das Parkieren beschränken, was allerdings der härteste Lastfall für eine Servolenkung ist. Ein großes Problem ist die direkte Rückkopplung der Lenkbewegung auf die Drehmomentmessung. Die entstehenden Schwingungen müssen in jedem Fall eliminiert werden. Gefilterte Analogsignale und eine genauere Einstellung der Signalanpassungen bringen möglicherweise eine Verbesserung. Ob der festgesetzte Drehstab dieses Problem erzeugt, verstärkt oder auch abschwächt lässt sich derzeit nicht definitiv sagen. Die beste Lösung ist wahrscheinlich eine mechanische Entkopplung der Sollwertvorgabe. Auch die Regelung auf den Lenkradwinkel oder den Radwinkel ist eine denkbare Alternative.

Noch einen Schritt weiter gehen Steer-by-Wire-Konzepte, die auch den Antrieb der Servopumpe mit einbeziehen und z.B. mit einer elektrisch angesteuerten Pumpe zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchsanteils beitragen.

Auf dem Gebiet der Lenkungen und im Bereich X-by-Wire im Allgemeinen darf noch viel geforscht und ausprobiert werden – auch am Versuchsfahrzeug des Automotivelabors der Fachhochschule Bochum.

A. Anhang

A.1 Quellenangaben

- [1] Fachartikel „Zukünftige verbrauchsarme Servolenkungen“
von Steffen Müller, BMW
Verlag Vieweg Braunschweig Wiesbaden, ATZ Ausgabe Nr. 2004-04

- [2] Diplomarbeit „Entwicklung eines elektrisch ansteuerbaren Ventils für eine
Open-Center-Lenkung“
von Marc Ludwig
Fachhochschule Bochum

- [3] „Regelungstechnik I“ (12. Auflage)
von Heinz Unbehauen
Verlag Vieweg Braunschweig Wiesbaden, 2002

- [4] <http://www.dspace.de/ww/de/gmb/home/products/hw/micautob.cfm>

- [5] „Regelungstechnik“
von Otto Föllinger
Hüthig Verlag, 1984

- [6] „Simulation technischer Systeme“
von Jörg Kahlert
Verlag Vieweg Braunschweig Wiesbaden, 2004

- [7] Diplomarbeit „Entwurf eines Fahrerinterface für die X-by-Wire Steuerung eines
PKW“
von Mike Reppert
Fachhochschule Bochum, 2003

A.2 Datenblätter & Dokumente

Auf der Begleit-CD zu dieser Masterarbeit befinden sich folgende Datenblätter & Dokumente:

A.2.1 Bosch Regelventil

A.2.2 dSPACE MicroAutoBox

A.2.3 Intra-Automation Druckaufnehmer

A.2.4 National Instruments Messkarte PCI-6229

A.2.5 Unterlagen Frequenzgang

A.2.6 Zukünftige verbrauchsarme Servolenkungen

A.3 Messwerte

Beispielhaft sind hier einige ausgewählte Messwerte aufgeführt. Auf der CD zu dieser Masterarbeit befinden sich alle Messwerte und Graphen.

A.3.1 Pumpenkennlinie

Lastdruck 20 bar – Temperatur 50 °C

Drehzahl in U/min	Volumenstrom in l/min	Drehzahl in U/min	Volumenstrom in l/min
500	3,83	1777	7,52
552	4,25	1828	7,52
603	4,69	1883	7,50
654	5,12	1931	7,52
705	5,55	1982	7,48
757	5,98	2036	7,50
807	6,40	2084	7,52
859	6,84	2135	7,51
910	7,30	2187	7,53
960	7,68	2234	7,50
1012	7,49	2290	7,56
1063	7,46	2343	7,52
1113	7,46	2390	7,53
1164	7,46	2437	7,53
1215	7,48	2496	7,56
1264	7,47	2543	7,57
1319	7,50	2592	7,57
1369	7,48	2645	7,57
1420	7,48	2695	7,58
1472	7,50	2747	7,54
1522	7,49	2797	7,53
1573	7,50	2849	7,54
1624	7,49	2902	7,55
1676	7,49	2950	7,50
1725	7,48	3006	7,52

A.3.2 Ventilkennlinie auf dem Prüfstand

Drehzahl 1250 U/min – Temperatur 50 °C

Spannung in V	Druckdifferenz in bar	Spannung in V	Druckdifferenz in bar
-8,00	-86,66	0,16	0,35
-7,67	-84,24	0,49	0,40
-7,35	-60,10	0,82	0,40
-7,02	-41,43	1,14	0,39
-6,69	-28,36	1,47	0,40
-6,37	-19,13	1,80	0,43
-6,04	-12,86	2,12	0,45
-5,71	-9,26	2,45	0,48
-5,39	-6,37	2,78	0,64
-5,06	-4,86	3,10	0,86
-4,73	-3,69	3,43	1,03
-4,41	-2,73	3,76	1,38
-4,08	-2,24	4,08	1,48
-3,76	-1,75	4,41	1,57
-3,43	-1,31	4,73	2,16
-3,10	-1,02	5,06	2,63
-2,78	-0,79	5,39	3,39
-2,45	-0,47	5,71	4,25
-2,12	-0,35	6,04	5,65
-1,80	-0,30	6,37	7,32
-1,47	-0,24	6,69	10,11
-1,14	-0,20	7,02	14,98
-0,82	-0,08	7,35	21,65
-0,49	0,04	7,67	34,04
-0,16	0,18	8,00	50,60

A.3.3 Ventilkennlinie im Fahrzeug

Drehzahl ca. 1200 U/min – Temperatur 50 °C

Spannung in V	Druckdifferenz in bar	Spannung in V	Druckdifferenz in bar
-8,00	-91,36	0,16	-0,02
-7,67	-90,51	0,49	0,03
-7,35	-88,41	0,82	0,09
-7,02	-69,55	1,14	0,14
-6,69	-45,53	1,47	0,20
-6,37	-33,06	1,80	0,26
-6,04	-21,79	2,12	0,33
-5,71	-14,11	2,45	0,41
-5,39	-9,29	2,78	0,51
-5,06	-5,74	3,10	0,61
-4,73	-4,32	3,43	0,74
-4,41	-3,24	3,76	0,90
-4,08	-2,31	4,08	1,12
-3,76	-1,77	4,41	1,40
-3,43	-1,42	4,73	1,75
-3,10	-1,11	5,06	2,24
-2,78	-0,87	5,39	2,95
-2,45	-0,69	5,71	3,93
-2,12	-0,56	6,04	5,56
-1,80	-0,44	6,37	8,26
-1,47	-0,34	6,69	12,11
-1,14	-0,27	7,02	17,84
-0,82	-0,20	7,35	28,30
-0,49	-0,13	7,67	50,86
-0,16	-0,07	8,00	89,07

A.3.4 Frequenzgänge Negativer Ast

Prüfstand			Fahrzeug		
Frequenz in Hz	Phase in Grad	Amplitude in dB	Frequenz in Hz	Phase in Grad	Amplitude in dB
0,50	-15,80	6,23	0,50	-25,40	1,98
1,52	-33,21	6,17	0,90	-39,60	1,64
2,53	-39,41	5,96	1,29	-46,41	1,40
3,55	-47,02	5,93	1,69	-57,21	1,23
4,57	-68,22	5,81	2,09	-65,81	1,16
5,59	-83,63	5,68	2,48	-69,21	1,09
6,60	-90,43	5,47	2,88	-78,41	0,99
7,62	-98,04	5,36	3,28	-79,61	0,94
8,64	-110,63	5,11	3,67	-84,22	0,98
9,66	-134,23	4,70	4,07	-98,22	0,98
10,67	-150,04	3,66	4,47	-99,62	0,92
11,69	-163,86	2,40	4,86	-115,02	0,92
12,71	-180,65	1,82	5,26	-138,42	0,86