

Institut für Landtechnik
Justus-Liebig-Universität Gießen

DIREKTOR PROF.DR. H. SEUFERT

*„Bestandesorientierte automatische Nachführung
landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen in
Reihenkulturen mit Hilfe der digitalen
Bildverarbeitung“*

*„Stand Oriented Automatic Guidance for
Agricultural Vehicles in Row Crops Using Digital
Image Processing“*

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades im Fachbereich
Agrarwissenschaften der Justus-Liebig-Universität Gießen

eingereicht von Dipl.-Ing. agr. Rainer Keicher aus Neckarsulm

Gießen, im Februar 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	6
2	Automatische Lenksysteme in der Literatur	8
3	Material und Methoden	17
4	Entwicklung der Hardware des automatischen Lenksystems	19
4.1	Versuchsträger und Claas Autopilot	19
4.2	Hydraulik	21
4.3	Elektrik	25
4.4	Sensorik	30
4.5	Reglerhardware	35
5	Entwicklung der Software des automatischen Lenksystems	37
5.1	Softwareentwicklung Lenkwinkelregler	37
5.1.1	Theoretische Betrachtung	39
5.1.2	Systemanalyse	47
5.1.2.1	Versuchsvorbereitung	47
5.1.2.2	Versuchsdurchführung	49
5.1.2.3	Auswertung	51
5.1.3	Synthese des Lenkwinkelreglers	58
5.2	Softwareentwicklung Positionsregler	60
5.2.1	Grundlagen digitaler Bildverarbeitung	60
5.2.2	Reflexionseigenschaften	64
5.2.3	Farbdifferenzbildung und Binärbilderstellung	67
5.2.4	Reihenerkennung	70
5.2.4.1	Ausgangs-Software und Weiterentwicklung	70
5.2.4.2	Sichtfeldgeometrie	83
5.2.4.3	Initialisierung	89
5.2.4.4	Positionsregelung	92
5.2.4.5	Positionsinterpolation und Signalkorrektur	99
6	Feldversuche	104
6.1	Versuchsdurchführung	104
6.2	Versuchsanalyse	105
6.3	Ergebnisse	106
6.3.1	Analyse der Bitmaps	106

6.3.2	Analyse der Protokolldateien	108
6.3.3	Analyse der Binärbilderstellung und Leitlinienberechnung	110
7	Diskussion und Handlungsvorschläge	120
8	Zusammenfassung	123

Abbildungsverzeichnis

4.1	Fendt Xylon Versuchsträger	19
4.2	Claas Autopilot im Standardtraktor	20
4.3	Hydraulik Claas Jaguar mit Autopilot	21
4.4	Lenkungshydraulik Fendt Xylon	22
4.5	Lenkungshydraulik Fendt Xylon mit Autopilot	23
4.6	Hydraulikkomponenten des Autopiloten im Versuchsträger	24
4.7	Danfoss PVG 32 EM im Versuchsträger	24
4.8	Lenkungshydraulik Fendt Xylon mit Danfoss PVG 32 EM	25
4.9	Elektrische Beschaltung Steuerungsmodul Claas Autopilot	26
4.10	Komponenten des Autopiloten im Versuchsträger	27
4.11	Prinzip der Impulsbreitenmodulation	28
4.12	Kennlinie des Danfoss PVG 32 EM	29
4.13	Schaltplan des analogen Reglers	31
4.14	Pulnix TMC 50 RGB	32
4.15	Blockschaltbild des IC-PCI-Motherboards	33
4.16	Blockschaltbild des AM-CLR-Acquisition Moduls	34
4.17	Bildverarbeitungs- und Reglerrechner im Versuchsträger	35
4.18	Der Radwinkelgeber des Claas Autopiloten	36
5.1	Regelkreis	37
5.2	Beispiel für Ein- und Ausgangsverhalten	38
5.3	Einfache Sinusfunktion zur Systemidentifikation	39
5.4	Verwendete Sinusfunktion zur Systemidentifikation	40
5.5	Funktionsverlauf des Ölvolumenstroms	41
5.6	Lenkungsgeometrie des Versuchsträgers	41
5.7	Funktionsverlauf des in den Gleichlaufzylinder geförderten Ölvo- lumens	46
5.8	Funktionsverlauf des theoretischen Lenkwinkels	46
5.9	Funktionsverlauf der Radwinkelgeberspannung	47
5.10	Theoretisches Ein- und Ausgangsverhalten des idealen Systems	48
5.11	Versuchsträger mit Frontpacker	49
5.12	Psion Data-Logger zur Versuchsaufzeichnung	50
5.13	Gemittelte Messdateien Sinus rechts-links	51
5.14	Gemittelte Messdateien Sinus links-rechts	52
5.15	Gemittelte Messdateien Sprung rechts	52
5.16	Gemittelte Messdateien Sprung links	53
5.17	Verhalten einer I-T _t Regelstrecke	54

5.18	Verhalten einer I-T ₁ -T _t Regelstrecke	55
5.19	Elementarglieder der untersuchten Regelstrecke	55
5.20	Sprungantwort, Bode-Diagramm, Nyquist-Ortskurve und Wurzelortskurve des approximierten Modellsystems; „LISA-lineare Systemanalyse“	57
5.21	Wurzelortskurve der Gesamtübertragungsfunktion $G_S(s) \cdot G_R(s)$; „LISA-Lineare Systemanalyse“	59
5.22	Aufbau eines Bildverarbeitungssystems (nach Georg 1992)	60
5.23	Das Spektrum elektromagnetischer Strahlung (Hawkins 1997)	61
5.24	CCD-Chip	62
5.25	Erzeugung des analogen Signals	63
5.26	Look-Up-Table	64
5.27	Histogramme von Boden und Pflanzen	65
5.28	RGB-Histogramme von Getreidepflanzen	65
5.29	RGB-Histogramme eines nassen Bodens	66
5.30	RGB-Histogramme eines trockenen Bodens	66
5.31	RGB-Histogramme von Ernterückständen	67
5.32	Transmissions-, Absorptions- und Reflexionsverhalten grüner Blätter (Reusch)	68
5.33	Reflexionsvermögen trockener und feuchter Braunerde (Reusch)	68
5.34	Reflexionsvermögen grüner Blätter unterschiedlichen Chlorophyllgehalts (Reusch)	69
5.35	Reflexionseigenschaften und Grün-Rot Differenz	70
5.36	Binärbilderstellung	71
5.37	Ausschnitt aus einem Binärbild eines Reihenbestandes	72
5.38	Heading und Offset Error	72
5.39	Programmablaufplan des ersten Reihenverfolgungsalgorithmus	73
5.40	Programmablaufplan zur Validierung berechneter Reihen	75
5.41	Programmablaufplan Bildverarbeitungsrechner (Sender)	78
5.42	Programmablaufplan Regelungsrechner (Empfänger)	79
5.43	Ermittlung des Soll-Lenkswinkels	82
5.44	Verzerrung in x-Richtung (rot) und in y-Richtung (grün)	84
5.45	Kamerasichtfeld (links) und reale Abmessungen (rechts)	85
5.46	Verzerrung eines Bildpunktes	85
5.47	Punkte- und Streckenbezeichnungen	86
5.48	Herleitung der Formeln zur Berechnung der wahren Längen	87
5.49	Speicherung der Halbbilder im Interlaced-Modus	92
5.50	90 Grad Drehung des Bildkoordinatensystems	94
5.51	Regressionspunktermittlung	95
5.52	Berechnung von Heading (oben) und Offset (unten)	97
5.53	Interpolation der Traktorposition	100
5.54	Kennlinie des Danfoss PVG 32 EM Proportionalventils	102
5.55	Berechnung der Steuerspannung U_2 zur Totbandkompensation	102
6.1	Vorversuch mit neuem Algorithmus zur Reihenerkennung	104
6.2	Maishacke zur visuellen Funktionskontrolle des Lenkautomaten	106
6.3	Ursachen für fehlerhafte Leitlinienberechnung	107

6.4	Auswirkung der Pflanzenhöhe auf das Binärbild	108
6.5	Durchschnittliche Offset-Werte des ersten Versuchsabschnitts . .	109
6.6	Durchschnittliche Heading- und Soll-Lenkwinkel	109
6.7	Soll-Lenkwinkelverlauf Versuchsfahrt 116	110
6.8	Störschwingungen durch den Spannungswandler	111
6.9	Korrekt ermittelte Leitlinienpaare, erster Versuchstag	111
6.10	Korrekt ermittelte Leitlinienpaare, zweiter Versuchstag	112
6.11	Korrekt ermittelte Leitlinienpaare, dritter Versuchstag	112
6.12	Bedeckungsgrad der Pflanzen, erster Versuchstag	113
6.13	Korrekte Leitlinien und Bedeckungsgrad, erster Versuchstag . . .	114
6.14	Bedeckungsgrad der Pflanzen, zweiter Versuchstag	114
6.15	Korrekte Leitlinien und Bedeckungsgrad, zweiter Versuchstag . .	115
6.16	Bedeckungsgrad der Pflanzen, dritter Versuchstag	115
6.17	Korrekte Leitlinien und Bedeckungsgrad, dritter Versuchstag . .	116
6.18	Versuch j, Blende 16, zu dunkles Bild	117
6.19	Versuch k, Blende 5.6, helleres Bild	117
6.20	alle Binärbilder des Versuches k, invertiert	118

Kapitel 1

Einleitung und Aufgabenstellung

Das Projekt “Automatisierung der Lenkung zur Führung von Arbeitsgeräten in Reihenkulturen mit Hilfe der Bildverarbeitung” hat zum Ziel, einen Beitrag zur kostengünstigen und effizienten mechanischen Unkrautregulierung in landwirtschaftlichen Kulturen beizusteuern. Dabei soll ohne mentale oder physische Überlastung des Fahrers, mit Auswirkungen auf die Arbeitsqualität als Konsequenz, eine relativ hohe Fahrgeschwindigkeit bei minimierten Abständen zwischen Pflanzen und Werkzeugen ermöglicht werden.

Für die Realisierung dieses Zieles soll eine funktionssichere bildanalytische Steuerung einen wichtigen Beitrag leisten. Zur Zielsetzung gehören die Auswahl und die Modifikation der Hardware, die Auswahl eines adäquaten Eingangssignals sowie die Entwicklung einer anwendungsfähigen Software zum Erkennen des Verlaufs der Pflanzenbestände auf Basis der Bildverarbeitung. Aus dem Verlauf der Pflanzenreihe soll mit mathematischen Operationen eine Leitlinie für die Führung des Werkzeugs generiert werden. Diese Leitlinie erlaubt eine vorausschauende Regelung, die optimierte Arbeitsgeschwindigkeiten mit stabiler Regelcharakteristik und hoher Regelgüte gewährleistet. Das System soll die bisher noch nicht realisierte automatisierte Führung eines Werkzeugträgers mit angebautem Hackgerät ermöglichen.

Aus dem Bild der Pflanzenreihen sollen mit Hilfe eines zu erstellenden Reihenverfolgungsalgorithmus mehrere Leitlinien errechnet und unter Berücksichtigung des “Wissens” über den üblichen Reihenverlauf gewichtet werden. Unkräuter zwischen den Reihen sowie Fehlstellen sollen toleriert und auch eine Anwendung in nicht geschlossenen Reihenbeständen (Rüben, Kartoffeln etc.) ermöglicht werden. Aus der Resultierenden der errechneten und gewichteten Leitlinien soll ein seitlicher Versatz sowie ein Spurfehlwinkel errechnet, aus diesen wiederum die Eingangsgröße für den Regler generiert werden. Dieses Verfahren soll eine vorausschauende Regelung erlauben, die optimierte Arbeitsgeschwindigkeiten mit stabiler Regelcharakteristik und hoher Regelgüte gewährleistet.

Die Regelkreisdynamik, Regelungsalgorithmen und elektrohydraulische Stellanrichtungen, die an bestehende Traktoren angebaut werden können, sollen weiterhin untersucht werden. Dabei soll mittels eines geeigneten Hydraulikventils und eines noch zu erstellenden Reglers in den bereits vorhandenen hydraulischen Lenkkreis eingegriffen werden.

Ein Trägerfahrzeug soll für Feldversuchszwecke mit der automatisierten Lenkung ausgestattet und im praktischen Einsatz unter definierten Bedingungen betrieben werden. Die für die Erfassung der kritischen Werte nötige Messausrüstung muss installiert und die Methoden der Messwerterfassung müssen erarbeitet werden. Die Auswertung der erfassten Daten und die Umsetzung der Erkenntnisse in eine Optimierung des Systems sind geplant.

Kapitel 2

Automatische Lenksysteme in der Literatur

Wissenschaftliche Arbeiten über den Einsatz der digitalen Bildverarbeitung zur berührungslosen Erfassung von Leitlinien gibt es seit Ende der siebziger Jahre in ständig steigender Zahl. Die internationale Aktualität der Fragestellung ist nach wie vor unbestritten. Diverse andere Lösungsansätze zum Thema automatisierte Steuerung von Arbeitsgeräten, deren Ursprünge nach Jahns [Jahns, 1970] zurück bis Anfang der 60er Jahre reichen, wurden ebenfalls untersucht. Prinzipiell lassen sich zwei Strategien unterscheiden, und zwar erstens die Verfolgung einer durch die vorherige Bearbeitung generierten Leitlinie wie eine Pflugfurche oder einen Pflanzenbestand, und zweitens die Verfolgung einer Leitlinie, die durch ihren Abstand zu bestimmten Fixpunkten im Feld oder einem anderen Koordinatensystem definiert ist. Im ersten Fall spricht man auch von reellen Leitlinien oder einer relativen Positionsbestimmung (relativ zum Pflanzenbestand oder zur vorhandenen Pflugfurche), im zweiten Fall von virtuellen Leitlinien oder einer absoluten Positionsbestimmung (Position in einem ortsfesten Koordinatensystem).

Bestandesorientierte Nachführungssysteme mit mechanischer Sensorik, die hauptsächlich bei Hackfruchterntemaschinen eingeführt sind, erfordern in ihrer Anwendung eine belastbare Pflanzenreihe. Zum Beispiel sind automatische Feinsteuerungen der Hersteller Grimme, Deutschland, sowie Amac und Rumpstadt, Holland, als Zusatzausrüstung für Geräte zur Pflege oder Ernte von Kartoffelbeständen erhältlich [Wulf, 1997]. Diese sind mit Schleiftastern oder Tasträdern ausgestattet und führen das im Dreipunkt angehängte, seitlich verschiebbare Arbeitsgerät am Kartoffeldamm entlang. Auf diese Weise werden z.B. grüne Knollen durch seitliches Abfräsen des Dammes bei Pflegearbeiten mit der Dammfräse vermieden.

Seit 1978 ist mit dem Claas Autopiloten ein automatisches Nachführungssystem für landwirtschaftliche Erntefahrzeuge auf dem Markt erhältlich. Das ursprünglich für Häcksler und Mähdrescher konzipierte automatische Lenksystem steht in einer modifizierten Ausführung auch zur Nachrüstung in Standardtraktoren zur Verfügung. Auch hier besteht die Sensorik aus mechanischen Tastern, die bei Abweichungen von der Sollinie vom Pflanzenbestand ausgelenkt werden

und eine Lenkkorrektur auslösen. Der Autopilot, der als Zusatzausrüstung bei 90% der ausgelieferten Claas Feldhäcksler und bei 15% der Mähdrescher mit verkauft wird, ist europaweit wohl die bedeutendste automatische Lenkeinrichtung für landwirtschaftliche Arbeitsgeräte. Zusammen mit den Systemen, die in Lizenz in Maschinen anderer Hersteller, wie z. B. Zuckerrübenroder eingebaut werden, verkauft Claas ca. 2500 Autopiloten jährlich [Diekhans, 1999].

Mit dem Laserpiloten stellte wiederum die Firma Claas 1999 auf der Agritechnica ein automatisches Lenksystem für Mähdrescher vor. Dieses ermittelt mittels Laserabtastung die Position der Bestandeskante und lenkt den Mähdrescher so, dass die volle Schnittbreite des Schneidwerkes genutzt wird. Dadurch wird auch bei sehr breiten Schneidwerken eine optimale Ausnutzung der Maschine erreicht, ohne dass Bestandesreste auf dem Feld zurückbleiben [CIT, 1999].

Entwicklungsarbeiten an bestandesbezogenen Leitlinienverfolgungsmethoden auf der Basis elektroakustischer Sensoren wurden unter anderem an der Universität in Halle unternommen. Hier wurde der Prototyp einer automatischen Schwadabtastung zur Nachführung einer Presse entwickelt [Hofmann, 1993]. Die Eignung des Signals von Ultraschallsensoren für die Lageregelung von Spritzgestängen und Bodenbearbeitungsgeräten wurde in wissenschaftlichen Untersuchungen nachgewiesen [Knechtges, 1991] [Kollar, 1985] und hat bereits zu einer Einführung dieser Technik an verschiedenen Geräten geführt. Die Anwendung dieser Sensortechnik beispielsweise für die Führung eines Hackgerätes wäre jedoch auf große Höhenunterschiede zwischen Pflanzenreihe und Fahrgasse sowie viel Blattmasse, also Pflanzen im fortgeschrittenen Wachstumsstadium, angewiesen. Trotz dieser Einschränkung wird das System mittlerweile als "Pilot System DR" von den Firmen John Deere, Danfoss und Reichhardt Steuerungstechnik als Zusatzausrüstung für die 6er-Serie des Traktorenherstellers angeboten [Danfoss und Reichhardt, 1999]. Leider ist es mit dieser Technik weder möglich, zwischen Kulturpflanzen und Beikraut zu unterscheiden, noch ist eine vorausschauende flächige Betrachtung des Bestandes möglich, was eine Leitlinienerkennung auf verunkrauteten Flächen sowie eine stabile Regelung der Lenkung bei höheren Geschwindigkeiten erschwert.

Auch wenn keine reelle Leitlinie wie ein zu bearbeitender Bestand vorliegt, kann ein automatisches Lenksystem von Vorteil sein. So z.B. beim Pflanzenschutz im Voraufbau, der Grunddüngung im Herbst oder bei der Stilllegungs- oder Brachflächenpflege. Systeme zur absoluten Positionsbestimmung auf dem Feld, wie Lasertriangulation, Funk oder GNSS¹, können hierzu genutzt werden. Dabei wird eine virtuelle Leitlinie berechnet, ein zu verfolgender Pfad im verwendeten Koordinatensystem, und dieser digital im Bordrechner gespeichert, um ihm bei den anschließenden Überfahrten mittels permanenter Positionsbestimmung und -angleichung des Traktors folgen zu können.

Mit dem Arnex Navigator der Firma Arnex Navigation AB, Göteborg, Schweden, wird bereits seit längerem ein laserbasiertes System zur Bestimmung der Absolutposition auf dem Feld als Komplettlösung angeboten. Die Software erlaubt eine 3-D Navigation im zuvor durch Feldvermessung und Positionierung der Reflektoren erstellten Koordinatensystem, die Berechnung von realen

¹Global Navigation Satellite System

Oberflächen (Hüllkurven von Hügeln) und ist mit 5 cm Genauigkeit schon sehr präzise [Holmqvist, 1993] [Holmqvist, 1995]. Da die Genauigkeit des Systems aber von der Anzahl der aufgestellten Reflektoren und deren exakter Positionsbestimmung abhängt, ist ein solches System für größere landwirtschaftliche Flächen zu inflexibel.

Ebenso kann ein GNSS zur Verfolgung von virtuellen Leitlinien eingesetzt werden. Die zwei in Betrieb befindlichen Systeme, das amerikanische NAVSTAR GPS², bekannt nur als GPS, und das russische GLONASS³ können genutzt werden. Im Aufbau befindet sich noch das europäische ENSS⁴ [Lechner und Baumann, 2000]. GPS erlaubt Genauigkeiten im Bereich von mehreren Metern bis zu wenigen Zentimetern. Ein ortsfester Empfänger kann den durch die (momentan abgeschaltete) militärische Verschlüsselung des Signals induzierten Messfehler durch beliebig oft wiederholbare Messungen kompensieren. Ein GPS-Empfänger auf sich fortbewegenden Fahrzeugen hingegen liegt, durch diese vom Satellitennetzbetreiber gewollten Messfehler, im Genauigkeitsbereich von 200-300m. In Verbindung mit einer mobilen Referenzstation, die ortsfest genau eingemessen wird, kann jedoch der Verschlüsselungsfehler berechnet und ein Korrekturfaktor bereitgestellt werden. Dieser oder eines von verschiedenen Sendeanstalten angebotene, üblicherweise auf Langwellensendern ausgestrahlte Korrektursignal ermöglicht auch einem Empfänger auf einem mobilen Fahrzeug, durch Verrechnung der ermittelten eigenen Position mit dem übermittelten Fehler (DGPS⁵) eine Genauigkeit in der Größenordnung von Dezimetern. Das durch Verknüpfung eines DGPS mit einem Kreiselkompass zur Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors entstandene RTKDGPS⁶ erlaubt auch auf mobilen Aggregaten Genauigkeiten um 3 cm, wofür allerdings auch nach Abschaltung der militärischen Verschlüsselung noch eine Referenzstation oder die Nutzung eines Korrektursignals erforderlich ist.

Die Firma Modulaire Inc., Turenki, Finnland, bietet ein autonomes Leichtfahrzeug zur Bodenbearbeitung an [Nieminen et al., 1996] [Alakukku et al., 1997]. Zum Einsatz kommt ein System mit RTKDGPS als Sensor, das ein automatisches Pflügen inklusive Wendemanövern am Feldende erlaubt.

In Wageningen am Institut für Land- und Umwelttechnik (IMAG-DLO) wurde ein Versuchstraktor mit einem seitlich verschiebbaren Werkzeugträger in der Dreipunktaufhängung und einem Lenkungssystem, ebenfalls mit RTKDGPS Sensor, aufgebaut [van Zuydam, 1999]. Das System sollte vom Traktorfahrer erzeugte Abweichungen des Werkzeugs vom Sollpfad durch Verschieben des Werkzeugs relativ zum Traktor kompensieren.

Am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim wird ein selbstfahrender Feldhäcksler der Firma Claas, ausgerüstet mit einem automatischen Lenksystem mit RTKDGPS als Sensor, auf seine Einsatzfähigkeit hin untersucht [Stoll und Kutzbach, 1999]. Auf unterschiedlichen Fahrbahnen und mit

²NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System

³GLOBAL NAVigation Satellite System

⁴European Navigation Satellite System

⁵Differential Global Positioning System

⁶Real Time Kinematic Differential Global Positioning System

variabler Fahrgeschwindigkeit werden die Systemeigenschaften, die Genauigkeit sowie der Einfluss der Veränderung der Position des Empfängers am Fahrzeug betrachtet.

Die angeführten Beispiele für nicht bestandesorientierte Nachführungssysteme halten einen vorgegebenen, im Bordrechner gespeicherten Pfad ein. Sie sind in der Lage, permanente Soll-Ist-Abgleiche der Position durchzuführen, und verwenden zusätzlich die Information der vom Gerät zurückgelegten Strecken, um Navigationslücken zu überbrücken. Trotzdem besteht eine Unzulänglichkeit in der nicht bestandesbezogenen Vorgehensweise, da Bestände schräg wachsen, Anbaugeräte relativ zum Traktor beweglich sind, Bodenverwerfungen auftreten oder variierende Bodenverhältnisse bei aufeinander folgenden Überfahrten aufgrund von Schlupf systematische Fehler verursachen können. Bei Hackarbeiten oder anderen bestandespflegerischen Maßnahmen im frühen Vegetationsstadium der Ackerkulturen ist aus diesen Gründen eine Abtastung der realen Leitlinie vorzuziehen. Da noch kein mechanisch belastbarer Bestand vorliegt, muss dies berührungslos erfolgen. Neben den schon genannten Ultraschall- oder Lasersystemen eignet sich optische Sensorik prinzipiell für eine derartige Aufgabenstellung.

Bereits kommerziell angebotene, mittels Photodioden gesteuerte Unkrautbekämpfungssysteme, wie das amerikanische Detectspray, können keine Leitlinien erkennen. Sie sind lediglich in der Lage, grüne Pflanzen von Ackerboden zu unterscheiden, um so Einsparungen bei der Herbizidapplikation auf Brachflächen oder eventuell beim Bandspritzen zu ermöglichen [Hollstein und Biller, 1998]. So werden zum Beispiel in Braunschweig Untersuchungen mit einem in Australien entwickelten System zur Detektion von grünen Pflanzen auf Brachland durchgeführt [von Barga et al., 1992] [Biller, 1993] [Biller, 1995].

Für eine bestandesorientierte, vorausschauende automatisierte Traktorsteuerung mit berührungsloser Sensorik scheint, erst recht bei höheren Fahrgeschwindigkeiten, die digitale Bildverarbeitung erforderlich und prädestiniert. Seit Anfang der achtziger Jahre rückte aus diesem Grund bildanalytische Sensorik für vielfältige Applikationen ins Interesse landwirtschaftlicher Forschung.

Unterstützt durch Wirtschaftsförderungsmittel präsentierte das Ingenieurbüro Manfred Bareiss in Welzheim auf der Agritechnica 1993 den Prototyp einer auf die Bildanalyse gestützten Feinsteuerung einer Unkrauthacke für den Heckanbau [Bareiss, 1993]. Die Bildverarbeitung errechnete die Pflanzenmittelpunkte und daraus die Position der Pflanzenreihe senkrecht unter der Kamera, der Hackrahmen wurde nach dieser Berechnung über einen Hydraulikzylinder seitlich verschoben. Das Projekt basiert jedoch auf der Erfassung einer momentanen Regelabweichung, eine vorausschauende Erfassung der Leitlinie relativ zur Fahrtrichtung des Arbeitsgeräts findet nicht statt. Entsprechend der momentanen Regelabweichung wird das Stellglied angesteuert. Komplikationen ergeben sich zwangsläufig bei Fehlstellen im Bestand oder sprunghafter Änderung der Leitlinie. Die Stabilität und die Regelgüte eines solchen Regelkreises werden durch erhöhte Fahrgeschwindigkeit und Fehlstellen der Pflanzen sowie durch den Unkrautbesatz limitiert.

Angelehnt an das menschliche Auge, muss der Sensor eine gewisse Strecke vorausschauen, und das Sichtfeld muss flächige Ausdehnung besitzen, um die

Richtung der Reihenverläufe ermitteln zu können. Auch muss eine eindeutige Trennung zwischen Boden und Pflanzen möglich sein, eine Identifizierung einzelner Pflanzen ist hingegen für den Anwendungszweck Reihenerkennung nicht erforderlich.

Zur Realisierung einer solchen Sensorik ist, aufgrund ihres günstigen Anschaffungspreises und ihrer kompakten Bauweise, eine CCD⁷-Kamera besonders geeignet. Jedoch sind die Unzulänglichkeiten einer herkömmlichen Schwarzweißkamera als Sensor im Zusammenhang mit der Trennung Boden/Pflanzen bekannt. Dem Thema Reflexionseigenschaften von Pflanzen und Boden widmen sich zahlreiche Untersuchungen [Leamer et al., 1978] [Guyer et al., 1986] [Franz et al., 1991] [Inoué, 1991] [von Bargaen et al., 1992] [Biller, 1993] [Brown et al., 1994] [Woebbecke et al., 1995] [Sudduth und Hummel, 1996] [Shearer et al., 1996] [Wartenberg und Heisig, 1997] [Reusch, 1997]. Eine Unterteilung in Teilspektren, d.h. Farbbereiche, erhöht den Informationsgehalt und damit die Möglichkeiten der Merkmalsextraktion beträchtlich. Untersucht wurde z.B. die Eignung der Differenz der Reflexionen im roten und im nahen infraroten Bereich der Strahlung zur Identifikation der Pflanze [von Bargaen et al., 1992] [Biller, 1993] [Biller, 1995] [Hollstein und Biller, 1998]. Von Bargaen selbst errechnete zur Trennung von Boden und Pflanzen sogenannte NDIs⁸ als Quotienten der Farbkanäle Rot, Blau und Infrarot [von Bargaen et al., 1992]. Beste Möglichkeiten zur Trennung von Boden und Pflanzen bietet auch der NDVI⁹ [Reusch, 1997].

Die Verwendung von Farbkameras und die Unterteilung in mehrere Farbkanäle ermöglicht die Erstellung von Mehrkanalbildern und die Bildung von Differenzen oder Quotienten der einzelnen Kanäle, wodurch eine eindeutige Trennung von Pflanzen und Boden gewährleistet werden kann. Auf diese Zusammenhänge wird in Kapitel 5.2.3 auf Seite 67 näher eingegangen.

Trotz der genannten Erkenntnisse über die optischen Eigenschaften von Pflanzen und Böden kamen bis heute in Forschungsarbeiten mit dem Thema Lenkungsautomatisierung überwiegend Schwarzweiß-CCD-Kameras mit entferntem Infrarot-Blocking-Filter zum Einsatz [Reid und Searcy, 1988] [Brandon et al., 1989] [Brandon und Searcy, 1992] [Marchant, 1991] [Marchant, 1994] [Marchant und Brivot, 1995] [Marchant und Brivot, 1996]. Diese wurden zusätzlich mit einem Bandpassfilter um 850 nm ausgerüstet, da hier die Reflexionsdifferenz zwischen Boden und Pflanzen am größten ist. Im Infrarotbereich können jedoch auf dem Feld liegende Ernterückstände wie beispielsweise Stroh als Pflanzen erkannt werden [Franz et al., 1991] [Tarbell und Reid, 1991]. Dieser Effekt und Probleme mit direkter Sonneneinstrahlung [Marchant und Brivot, 1996] lassen den Infrarotbereich als alleinigen Spektralbereich für die Signalquelle nur bedingt als geeignet erscheinen. Da auch die Kosten der Farbbildverarbeitungskomponenten im Laufe der Jahre deutlich gefallen sind, erscheint heute eine RGB-fähige Hardware für diese Aufgabenstellung geboten.

⁷Charge Couple Device

⁸Normalized Difference Indices

⁹Normalized Difference Vegetation Index

Ist die Trennung der zu bearbeiteten Kulturpflanzen vom Hintergrund (Boden, organische Reste) erfolgt, wird ein Binärbild (Zweipegelbild) erstellt. Auch die Weiterverarbeitung dieses Binärbildes wird mit verschiedenen Strategien realisiert. Die Extraktion einer Leitlinie kann einzelpflanzenbezogen durch Identifikation von Pflanzen und Berechnung deren Mittelpunktes erfolgen, wie in den Projekten Bareiss [Bareiss, 1993] oder Marchant [Marchant, 1994], oder reihenbezogen ohne Berücksichtigung einzelner Pflanzen. Der Lösungsansatz von Marchant [Marchant und Brivot, 1995], der ein Transputersystem mit speziell entwickelten ASICs¹⁰ einsetzt und auf eine im Infrarotbereich verstärkte Schwarzweißkamera zurückgreift, trennt zunächst Boden und Pflanzen mittels Grauwertdifferenzen und Texturanalyse, um im Anschluss daran eine Transformation in den Hough-Raum [Hough, 1962] durchzuführen. Hier werden dann die Linien im Bild, die z.B. Blattgrenzen repräsentieren, als Punkte mit erhöhten Grauwerten dargestellt. Aus den gewonnenen Informationen kann nach der Rücktransformation auf gerade Linien wie zum Beispiel Blattadern und somit auf die Blattorientierung und den Pflanzenmittelpunkt geschlossen werden. Aus den detektierten Einzelpflanzen wird der Verlauf der Pflanzenreihe errechnet. Dieser Algorithmus zur Kantenextraktion ist zwar sehr effektiv und unempfindlich gegen unscharfe Ränder oder Unterbrechungen, er ist jedoch, insbesondere in Verbindung mit der Einzelpflanzenbestimmung, so rechenaufwendig, dass trotz der eingesetzten modernen Rechnerarchitektur eine Echtzeitanwendung nicht möglich ist. Außerdem ist die verwendete Hardware für eine praxisrelevante Lösung zur Zeit noch zu kostenintensiv.

Ein Forscherteam am CEMAGREF¹¹ in Frankreich arbeitet an einem System zur Führung eines Mähdreschers entlang der Bestandesgrenze mit Hilfe eines bildanalytischen Sensors [Debain et al., 2000]. Ausgehend vom Projekt "Entwicklung eines autarken Rasenmähers" [Derras et al., 1994], der ebenfalls mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung entlang der Bearbeitungskante geführt werden sollte, wurden die gewonnenen Erkenntnisse auf andere Anwendungsbereiche übertragen. Basierend wiederum auf einem Schwarzweißbild, werden Grauwertmaxima im Histogramm (heller Bestand/dunkler Boden) sowie die Grauwertverteilung im Bild (Textur) analysiert. Auch wenn das Gesamtprojekt einen fahrerlosen Mähdrescher zum Ziel hat und somit weit mehr Aspekte umfasst als die Sensorik, ist doch speziell die Bestandesgrenzenerfassung beim Mähdrusch im Getreidefeld beispielsweise mit dem Claas Laserpilot deutlich einfacher, kostengünstiger und zuverlässiger gelöst [CIT, 1999].

Im Forschungszentrum Bygholm, Dänemark, wird ebenfalls an einem bildanalytischen Sensor zur Erkennung von Pflanzenreihen im Feld gearbeitet. Dieser soll in ein Automatisierungssystem zur Feinsteuerung eines Hackrahmens in der Dreipunktaufhängung integriert werden [Søgaard und Olsen, 2000]. Basierend auf einer Farbbildkamera wird ein Binärbild erstellt, dieses mit Dilatations- und Erosionsmatrizen gefiltert, bis nur noch eine Reihe einzelner Pixel pro Kulturpflanzenreihe im Binärbild vorhanden ist. Dieses wird in den Hough-Raum transformiert, wodurch die Reihen im Bild extrahiert und die Position des Fahr-

¹⁰ Application Specific Integrated Circuit

¹¹ Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

zeugs relativ zur Reihe errechnet werden können.

Åstrand und Baerveldt am Centre for Computer Systems Architecture, Halmstad Universität, Schweden, arbeiten ebenfalls an einem bildanalytischen Sensor zur Reihenerkennung. Hier wird zur Erstellung des Binärbildes wiederum auf eine Schwarzweiß-Kamera mit Bandpassfilter im nahen Infrarotbereich zurückgegriffen. Das mittels Schwellwertbildung erzeugte Binärbild wird ebenfalls in den Hough-Raum transformiert um die Pflanzenreihen identifizieren zu können. Anschließend wird auch hier die Reihenposition relativ zum Fahrzeug sowie die Richtung der Reihe relativ zur Fahrtrichtung errechnet [Åstrand und Baerveldt, 1999].

Ein an der Universität von Southern Queensland, Australien, entwickeltes automatisches Lenksystem mit bildanalytischer Sensorik, das ebenfalls auf einer CCD-Kamera mit entferntem Infrarot-Blocking Filter aufbaut, soll inzwischen am Markt platziert sein. Gefördert von Case und dem Cotton Research Development Council wurde die Soft- und Hardware für ein Nachführungssystem in Reihenkulturen entwickelt. Der Reihenverfolgungsalgorithmus basiert hier auf der Flächenschwerpunktsberechnung kleiner, auf einen Abschnitt einer Pflanzenreihe beschränkter Fenster. Diese werden nur einmal pro Bild berechnet. Die Testfahrten wurden mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s durchgeführt, als Genauigkeit wird ± 2 cm angegeben [Billingsley, 1997].

In den USA befasst sich die Arbeitsgruppe um Prof. Gerrish vom Agricultural Engineering Department der Michigan State University mit der Entwicklung eines automatischen Lenksystems für einen Rasenmäher. Ähnlich wie im französischen Projekt der CEMAGREF soll die Bearbeitungskante erkannt und das Fahrzeug daran entlang geführt werden [Gerrish et al., 1986] [Fehr und Gerrish, 1989] [Fehr und Gerrish, 1995]. Im Zuge der Forschungsarbeiten wurde das Projekt auf die Steuerung eines Traktors in einem Getreidebestand entlang der Reihen erweitert und die Sensorik von Schwarzweiß- auf Farbbildverarbeitung umgestellt [Gerrish et al., 1997]. Der zugrundeliegende Reihenerkennungsalgorithmus wird in zwei Varianten genutzt. Einmal wird vorab eine Histogrammanalyse der drei Farbkanäle durchgeführt und der Kanal mit dem deutlichsten Unterschied zwischen Boden und Pflanzen zur weiteren Verarbeitung herangezogen. In der zweiten Variante wird jeweils ein gewisser Prozentsatz aller drei Farbkanäle zur Berechnung der Durchschnittsgrauwerte herangezogen und die weitere Verarbeitung erfolgt in diesem neu errechneten Kanal. Obwohl eine dynamische Schwellwertanpassung über die Helligkeit im verwendeten Kanal stattfindet, bleibt jedoch in beiden Fällen die fehlende Flexibilität der Sensorik bei wechselnden Bodenverhältnissen oder sich änderndem Chlorophyllgehalt der Pflanzen. Die folgende Bearbeitung des Binärbildes geschieht in beiden Varianten analog, ein Teilbild wird zur Berechnung der Leitlinie verwendet. Diese beginnt im unteren Bildrand und endet im Vanishing Point, errechnet werden Versatz und Richtungsabweichung (Offset und Heading). Das System wurde auf einen Case 7110 Traktor aufgebaut, Versuchsfahrten mit 4,8 km/h und 12,9 km/h in einem Getreidefeld ergaben Standardabweichungen von der Sollinie von 6 cm und 12 cm.

Eine Forschergruppe um Prof. Searcy vom Agricultural Engineering Department der A+M Universität in Texas entwickelten einen bildanalytischen

Sensor zur Erkennung von Pflanzenreihen im Getreidefeld. Sie verwendeten ein Schwarzweiß-System mit Bandpassfilter um 850 nm, um die Reflexionsdifferenz von Boden und Pflanzen im nahen Infrarotbereich zu nutzen [Reid et al., 1985] [Reid und Searcy, 1988]. Dieses Verfahren wurde, zusammen mit einem neuen Reihenverfolgungsalgorithmus, in ein automatisches Lenksystem für einen Traktor integriert [Brandon et al., 1989] [Brandon und Searcy, 1992]. Die Leitlinienberechnung im Binärbild erfolgt mittels Hough-Transformation.

An der Universität Tokio, Department of Biological and Environmental Engineering, arbeiten Prof. Torii und Mitarbeiter an einem mittels Bildverarbeitung gesteuerten Traktor. Versuche zur Erstellung des Binärbildes wurden mittels Farbbildverarbeitung im RGB-Raum und im HSI-Raum durchgeführt, wobei hier der HSI-Raum als geeignet betrachtet wurde. Die Leitlinienberechnung erfolgte mittels Hough-Transformation oder Regressionsanalyse, laut Ergebnisbericht ergaben die Versuchsfahrten eine Genauigkeit von ± 2 cm bei einer Fahrgeschwindigkeit von 0,9 km/h [Torii, 2000].

Die bisher genannten Veröffentlichungen bezogen sich auf Systeme, die entweder mit virtuellen oder mit reellen Leitlinien arbeiten. Da aber beide Verfahren Unzulänglichkeiten aufweisen, befassen sich verschiedene Forschungsprojekte mit der Kombination von Sensoren und der Verarbeitung der anfallenden Daten.

Im Department of Agricultural Engineering der Hokkaido Universität in Sapporo, Japan, wurde der Prototyp eines autonomen Traktors realisiert. Dieser greift für die Lenkung auf drei gekoppelte Systeme zurück. Auf dem Fahrzeug befindet sich ein GMDS¹², eine Art Kompass, am Feldrand befinden sich zwei Bildverarbeitungssysteme. Letztere, mit einem rotierenden Spiegel ausgestattet, berechnen den Winkel vom Fahrzeug bezüglich der Feldränder und übermitteln diesen an den Bordrechner. Durch Triangulation kann die Position auf dem Feld bestimmt werden, durch den GMDS der Vektor der Geschwindigkeit [Noguchi et al., 1997].

In einem gemeinsamen Projekt der Hokkaido Universität in Sapporo, Japan, der Universität von Illinois, und dem Department of Food, Agricultural and Biological Engineering in Columbus, USA, wurde versucht, bisher erarbeitete Methoden und Erfahrungen zu bündeln und ein autonomes Fahrzeug zu realisieren [Noguchi et al., 1998]. Dieses soll, automatisch gesteuert mittels DGPS, GMDS und Bildverarbeitung, selbständig über ein Getreidefeld fahren und Informationen über den Bestand sammeln. Zur groben Orientierung auf dem Feld dient das DGPS, der GMD-Sensor ermittelt den Geschwindigkeitsvektor und das Bildverarbeitungssystem soll zwischen Unkräutern und Getreidepflanzen unterscheiden, Informationen zur automatischen Lenkung liefern und zusätzlich noch den Bestand hinsichtlich Höhe und Bedeckungsgrad beurteilen. Versuchsergebnisse bezüglich der Steuerungsgenauigkeit wurden bis dato noch nicht veröffentlicht.

Aus der Auswertung der Literatur zum Thema Verfolgung reeller Leitlinien mittels digitaler Bildverarbeitung ergibt sich, dass gegenwärtig die sichere vorausschauende Erfassung des Reihenverlaufs, die unerlässlich für die Nach-

¹²Geo-Magnetic Direction Sensor

führung eines mobilen Aggregates entlang der Reihe ist, noch nicht endgültig gelöst ist. Schon bei der Bewertung der verwendeten Spektren des Lichts als Basis für die Erstellung eines Binärbildes werden weltweit stark differierende Ansätze verfolgt. Die notwendige Schnelligkeit der Reihenberechnung erfordert eine Beschränkung der Auswertung auf einen Farbkanal, die sichere Trennung von Pflanzen und Boden jedoch ist ohne Farbinformation nicht für alle in der Praxis vorkommenden Situationen gewährleistet. Der Reihenverfolgungsalgorithmus soll schnell, aber präzise sein. Digitale Filterungen oder Transformationen in andere Merkmalsräume bringen Verbesserungen des Informationsgehaltes mit sich, verhindern aber eine Echtzeitanwendung oder verteuern sie zumindest nicht unerheblich. Trotz der Vielzahl der Veröffentlichungen wurde noch kein Bilddatenverarbeitungs- bzw. Regelalgorithmus etabliert, auf den für eine maschinentechnische Umsetzung ohne weiteres zurückgegriffen werden kann. Ausgangspunkt für eine bildanalytisch basierte automatisierte Steuerung für Landmaschinen muss aber in jedem Fall ein Binärbild mit exakt vom Hintergrund Boden getrennten Pflanzen sein. Nur auf einem solchen binären Raster von Bildpunkten kann ein Leitlinienberechnungsalgorithmus aufbauen. Aus diesem Grund kommt der Erfassung der Leitlinie mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung, speziell der Wahl des geeigneten Eingangssignals, besondere Bedeutung zu.

Kapitel 3

Material und Methoden

Zu Beginn des Forschungsvorhabens „Lenkungsautomatisierung“ standen ein Fendt Xylon 524, ein Claas Autopilot für Standardtraktoren sowie ein ITI-Schwarzweißbildverarbeitungssystem zur Verfügung. Die Beschreibung dieser Komponenten, ihre Verknüpfung mit dem Versuchsträger zum Traktor mit automatischem Lenksystem sowie ihre teilweise Ersetzung durch besser geeignete erfolgt in den folgenden Kapiteln. Da weder ein komplettes automatisches Lenksystem mit bildanalytischer Sensorik noch Methoden zur Beurteilung der Arbeitsqualität eines solchen zur Verfügung standen, war es erforderlich, sowohl das Lenksystem als auch die zugehörigen Analysemethoden neu zu entwickeln. Dies hatte zur Folge, dass in der Periode der Vorversuche umfassende Umbauten und Verbesserungen in das Lenksystem einfließen.

Eine definierte Schnittstelle zwischen dem Claas Autopiloten, der für Traktoren mit herkömmlichem Hydrauliksystem entwickelt wurde, und dem mit Load-Sensing-System ausgestatteten Versuchsträger war nicht verfügbar. Infolgedessen mussten, wie in Kapitel 4.2 ab Seite 21 beschrieben, der Autopilot an das LS-System angepasst und Kontrollmethoden für die Funktionsbeurteilung entwickelt werden.

Ebenso musste eine Schnittstelle für die elektrische Verbindung von Claas Autopilot und bildanalytischer Sensorik realisiert werden, da die von Claas verwendeten mechanischen Taster in ihrer Funktion vom Rechner simuliert werden sollten. Diese Vorgehensweise, die durch sie entstandenen Probleme sowie deren Lösung wird in Kapitel 4.3 ab Seite 25 erläutert.

Ausgehend von einem Standard-Schwarzweißbildverarbeitungssystem musste die Sensorik aufgrund der für Pflanzen charakteristischen Reflexionseigenschaften der verwendeten Ackerkulturen den speziellen Anforderungen angepasst werden. Hierfür waren über die Literaturrecherche hinaus noch umfassende Versuche unter Laborbedingungen notwendig. Diese und deren Ergebnisse, die zur verwendeten Farbbildverarbeitungshardware und der Methode der Farbkanaldifferenzierung führten, werden in Kapitel 4.4 ab Seite 30 ausführlich beschrieben.

Der analoge Regler des Claas Autopiloten, seine Integration ins System, seine Mängel, die Verbesserungen und letztendlich seine Ersetzung durch einen digitalen Regler werden in Kapitel 4.5 ab Seite 35 beschrieben.

Das komplexe Thema der Entwicklung eines digitalen Reglers wird ab Kapitel 5.1, Seite 37 ausführlich behandelt. Um ein stabiles Gesamtsystem zu erhalten, muss die Lenkwinkelregelung auf das Fahrzeug abgestimmt sein. Aus diesem Grund wurde zuerst eine Systemanalyse durchgeführt, um die Eigenschaften der Lenkhydraulik des Versuchsträgers zu ermitteln. Danach wurde ein Regler synthetisiert, der die ermittelten Instabilitäten kompensiert und zusammen mit der vorhandenen Regelstrecke einen stabilen Regelkreis ergibt.

Die Software zur Farbdifferenzbildung, Binärbilderstellung und Reihenerkennung sowie die Algorithmen zur Erfassung und Interpretation der Berechnungsergebnisse wurden entwickelt und durchliefen im Laufe des Projektes zahlreiche Verbesserungen und Erweiterungen. Obwohl die Arbeitsqualität des Gesamtsystems schon im ersten Feldversuch zufriedenstellende Ergebnisse lieferte, machten die von den programmierten Kontrollalgorithmen mitgeschriebenen Berechnungsergebnisse eine umfassende Überarbeitung der Routinen erforderlich. Das ursprüngliche Programm sowie die zahlreichen Umstrukturierungen und Erweiterungen werden ab Kapitel 5.2, Seite 60 erläutert.

Kapitel 4

Entwicklung der Hardware des automatischen Lenksystems

4.1 Versuchsträger und Claas Autopilot

Als Versuchsträger für das Lenksystem diente ein Fendt Xylon 524. Dieser von der Firma Fendt zur Verfügung gestellte Systemtraktor wurde am Institut für Landtechnik der Justus-Liebig-Universität Gießen mit den Komponenten des automatischen Lenksystems ausgerüstet. Das Bild 4.1 zeigt den Versuchsträger.



Abbildung 4.1: Fendt Xylon Versuchsträger

Zu Beginn der Arbeiten wurde bei der Regelungstechnik auf vorhandenes Know-How etablierter Anbieter zurückgegriffen. Mit dem Claas Autopiloten wird ein komplettes System zur Nachrüstung einer automatischen Lenkungsein-

richtung für landwirtschaftliche Arbeitsgeräte auf dem Markt angeboten. Wie in Bild 4.2 dargestellt, besteht das System aus folgenden Komponenten: Die Standard-Lenkeinrichtung des Traktors, bestehend aus Hydraulikpumpe (1), Servostat (4) und Lenkzylinder (5), wird durch ein 7/2-Wegeventil (2) schaltbar getrennt. Der Autopilot, bestehend aus Elektronikbox (6), Fußschalter (7), Bedienteil (8) und Lenkdrehmelder (9), schaltet beim aktivieren die normale Lenkung ab. Das Regelventil (3) übernimmt die Versorgung des Lenkzylinders (5) mit Öldruck, gesteuert vom Autopiloten. Dieser steuert das System unter Berücksichtigung der Signale des Radwinkelgebers (11) und der Taster am Arbeitsgerät, die über die Schnittstelle (12) angeschlossen werden.

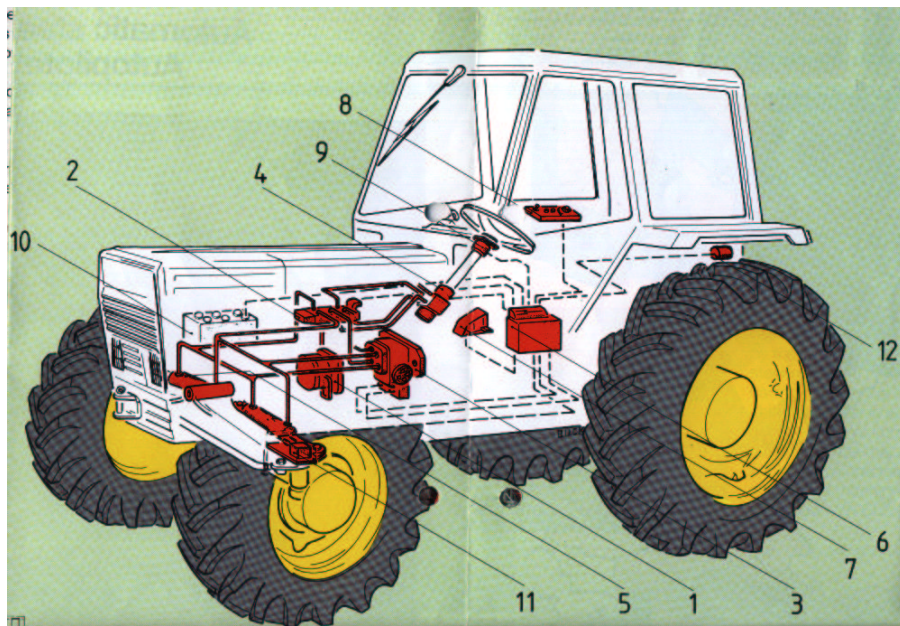


Abbildung 4.2: Claas Autopilot im Standardtraktor

Die Taster des Autopiloten bestehen beim Feldhäcksler Claas Jaguar aus zwei Metallstäben. Bewegt sich das Fahrzeug exakt auf der vorgesehenen Linie, befinden sich diese beiden Hebel der links und rechts angebrachten Taster nicht ausgelenkt in ihrer Ruhelage. Eine Abweichung von der Leitlinie schlägt sich sofort in einer Auslenkung einer der beiden Hebel nieder, da die Maishalme diese mechanisch bewegen. Im Drehpunkt eines solchen Hebels befindet sich ein Potentiometer. Mit diesem wird die Abweichung in einen analogen Spannungswert umgewandelt. Der Regler überprüft permanent die von den beiden Tastern ankommenden Spannungswerte und vergleicht sie mit einem dritten. Dieser stammt von dem an der Lenkungsgeometrie angebrachten Radwinkelgeber. Der elektrische Aufbau der beiden Taster und des Radwinkelgebers sind identisch. Bei einer Fahrt auf der Solllinie und keinem Lenkeinschlag liefern alle drei Potentiometer den gleichen Spannungswert. Wenn eine Abweichung von der einzuhaltenden, durch die Pflanzenreihe vorgegebenen Fahrlinie eintritt, führt dies zu einer Auslenkung eines der beiden Taster. Der Regler ermittelt nun eine Spannungs Differenz zwischen Taster und Radwinkelgeber und ist sofort durch

Ansprechen des im Hydraulikkreislauf der Lenkung befindlichen Regelventils darum bemüht, durch Nachführen der Räder und der daraus resultierenden Spannungsänderung am Radwinkelgeber, diese Differenz wieder auszugleichen. Der Lenkeinschlag hat zur Folge, dass das Fahrzeug wieder zurück auf die 0-Linie, d.h. im Beispiel die Mitte der Maisreihe, fährt. Der Taster schwenkt zurück in Nullstellung und eine erneute Spannungsdifferenz zwischen nicht ausgelenktem Taster und ausgelenktem Radwinkelgeber führt zum Zurückstellen der Räder.

Zur Realisierung der automatischen Traktorsteuerung sollte die digitale Bildverarbeitung den taktilen Sensor des Claas Autopiloten ersetzen. Der von der Firma Fendt zur Verfügung gestellte Versuchsträger Xylon 524 wurde aus diesem Grunde am Institut für Landtechnik der Justus-Liebig-Universität in Gießen mit den Komponenten des Autopiloten ausgerüstet.

4.2 Hydraulik

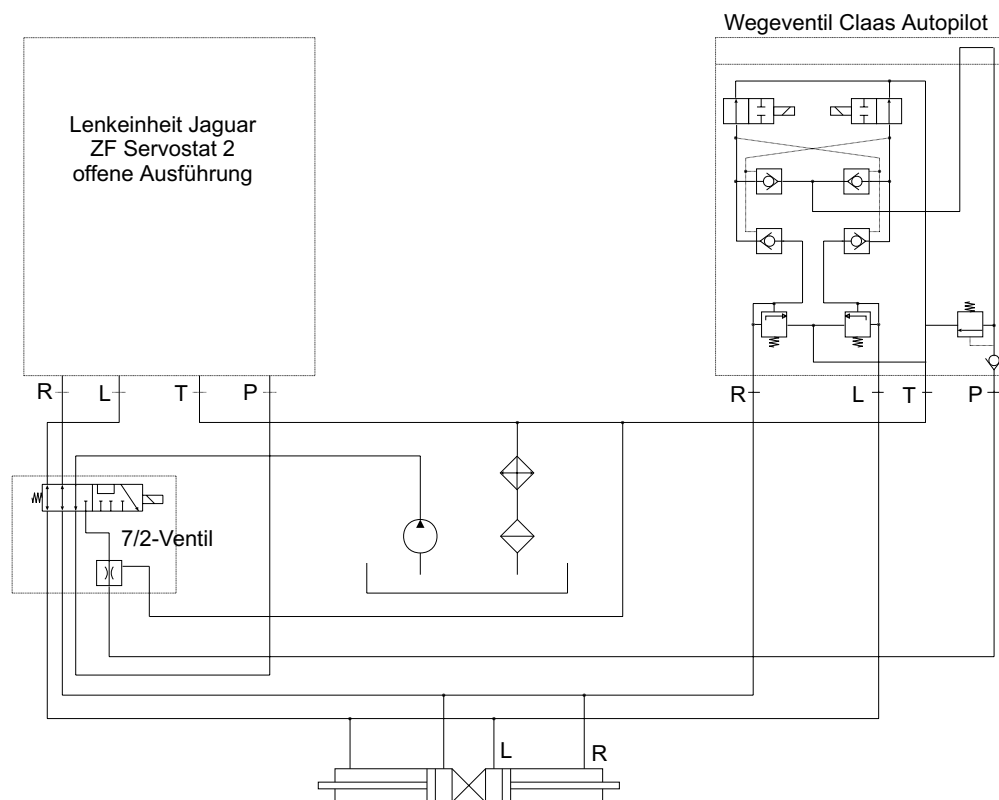


Abbildung 4.3: Hydraulik Claas Jaguar mit Autopilot

In Anlehnung an den Hydraulikplan des Claas Jaguar Feldhäckslers, dargestellt in Bild 4.3, für den der Autopilot ursprünglich konzipiert wurde, konnten die von der Firma Claas dankenswerter Weise überlassenen Hydraulikventile eingebaut werden. Wie aus dem Schaltplan zu ersehen ist, handelt es sich beim Claas Jaguar um ein offenes (open Center) Hydrauliksystem. Dies bedeutet,

dass im Ruhezustand, also ohne Verbraucher, die Pumpe ein konstantes Ölvolumen fördert, und dieses immer im Kreislauf umgepumpt wird. Aus diesem Grund werden solche Systeme auch als Konstantvolumensysteme bezeichnet. Da dies jedoch Energie erfordert und zudem das Öl erwärmt, sind modernere landwirtschaftliche Traktoren mit Load-Sensing-Systemen ausgestattet.

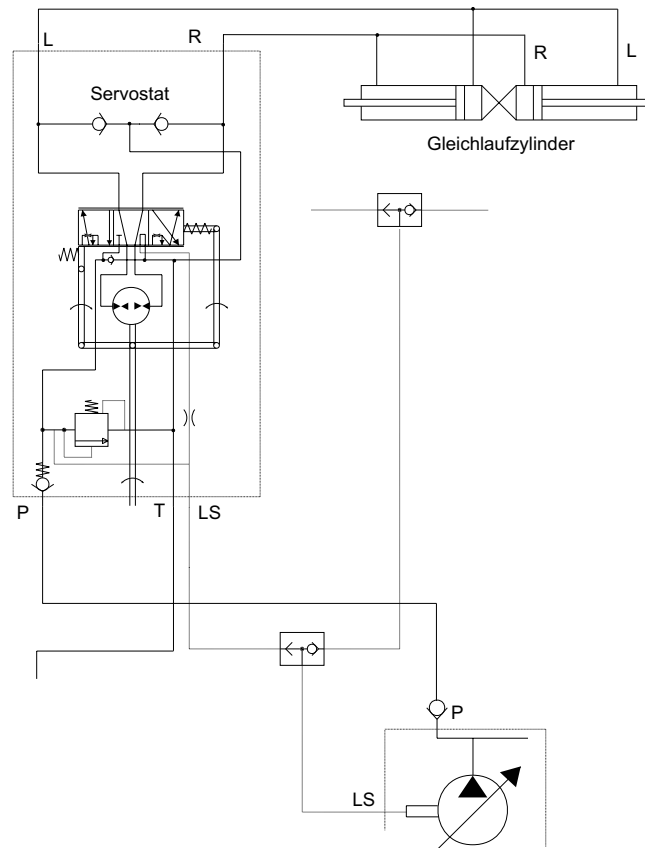


Abbildung 4.4: Lenkungshydraulik Fendt Xylon

Der Fendt Xylon verfügt, wie aus Bild 4.4 hervorgeht, über ein solches Load-Sensing-Hydrauliksystem. Hier wird zur Druckbeschaffung eine Regelpumpe verwendet, d. h. im Ruhezustand ohne Verbraucher steht die Pumpe auf Nullförderung und hält nur einen Stand-By-Druck von 23 bar, um Leistungsanforderungen von Verbrauchern zu übermitteln.

Jeder Verbraucher benötigt einen LS¹-Anschluss, der im Ruhezustand mit T (Tank) kurzgeschlossen, also drucklos ist. Betätigt man ein Hydraulikventil, so wird dessen LS-Anschluss mit P (Pumpe) verbunden, der 23 bar Stand-By-Druck am LS-Anschluss der Pumpe lässt diese ausschwenken und der Systemdruck wird aufgebaut. Das Wegeventil des Claas Autopiloten ist jedoch für ein Konstantvolumensystem ausgelegt und verfügt nicht über die benötigten Steueranschlüsse des LS-Systems. Aus diesem Grund musste, wie im Hydraulikplan in Bild 4.5 zu sehen ist, ein zusätzliches 3/2-Wegeventil² eingebaut werden, um

¹LS = Kurzform für Load Sensing

²3/2-Wegeventil: Hydraulikventil mit 3 Anschlüssen und 2 Schaltzuständen

durch eine Simulation des LS-Anschlusses die Hydraulikleistung anzufordern. Das Zusatzventil, das die LS-Leitung im Ruhezustand mit T verbindet, wird bei Bedarf elektrisch umgeschaltet, worauf die Steuerleitung mit P verbunden wird.

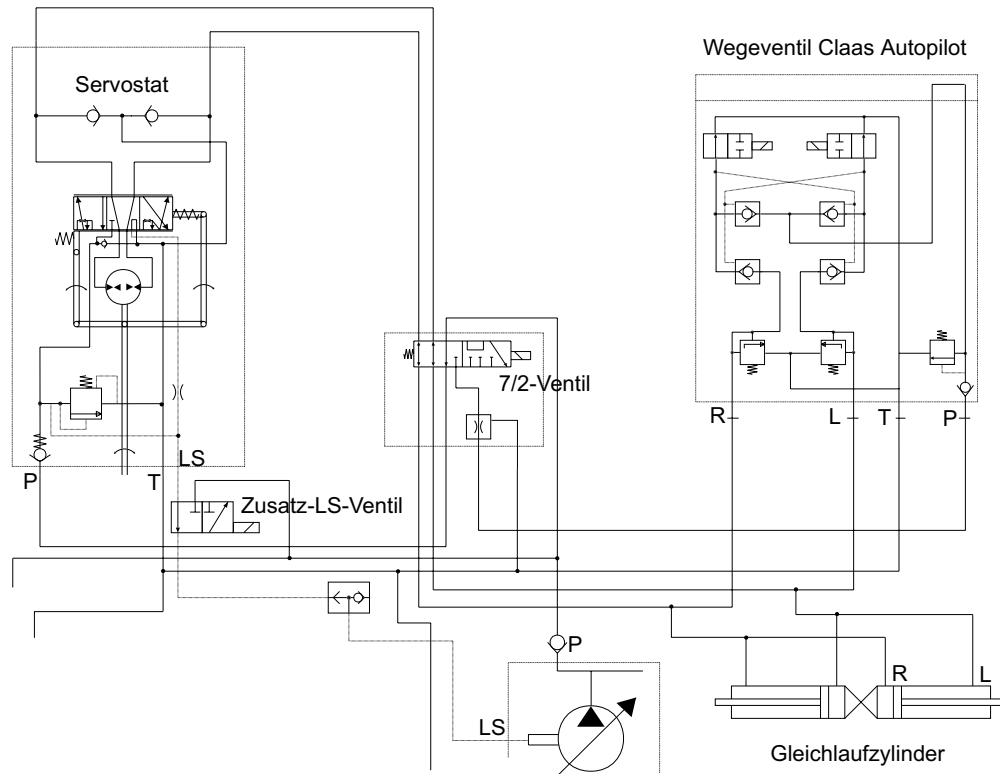


Abbildung 4.5: Lenkungshydraulik Fendt Xylon mit Autopilot

Das Claas Regelventil stellt ein zentrales Element des Autopiloten dar. Zusammen mit dem 7/2-Wegeventil und dem LS-Zusatzventil wurde es hinter der Kabine in die Traktorhydraulikanlage integriert. Die im Bild 4.6 erkennbaren zwei Magnete steuern im Prinzip zwei eigene Ventile für Links- und Rechtseinschlag. Die langen Leitungen, die beim Einbau des Autopiloten konstruktionsbedingt benötigt wurden, verlängerten sich nochmals durch den Einbau des LS-Ventils. Mit aus diesem Grund kam es zu erheblichen Totzeiten in der Systemreaktion auf Korrektursignale. Die mit Hydraulikfachleuten der Firma Fendt erörterten Möglichkeiten beschränkten sich auf das mittels Magnetventil obligatorische Ausschwenken der Pumpe auf Vollast beim Einschalten des Autopiloten. Allerdings wäre hierdurch, abgesehen von der dauernden Maximalbeanspruchung von Pumpe und Öl, eine adäquate Systemidentifikation wegen fehlender Ansprechverzögerung der Pumpe nicht möglich.

Aus den genannten Gründen wurde schließlich das in Bild 4.7 gezeigte Danfoss PVG 32 Proportionalventil angeschafft. Es verfügt über den erforderlichen LS-Anschluss und macht damit das Zusatzventil überflüssig. Somit entfiel die zeitliche Verzögerung durch das Ansprechen des Ventils. Der Hydraulikschaltplan in Bild 4.8 zeigt das modifizierte System. Enthalten bleibt das 7/2-Ventil

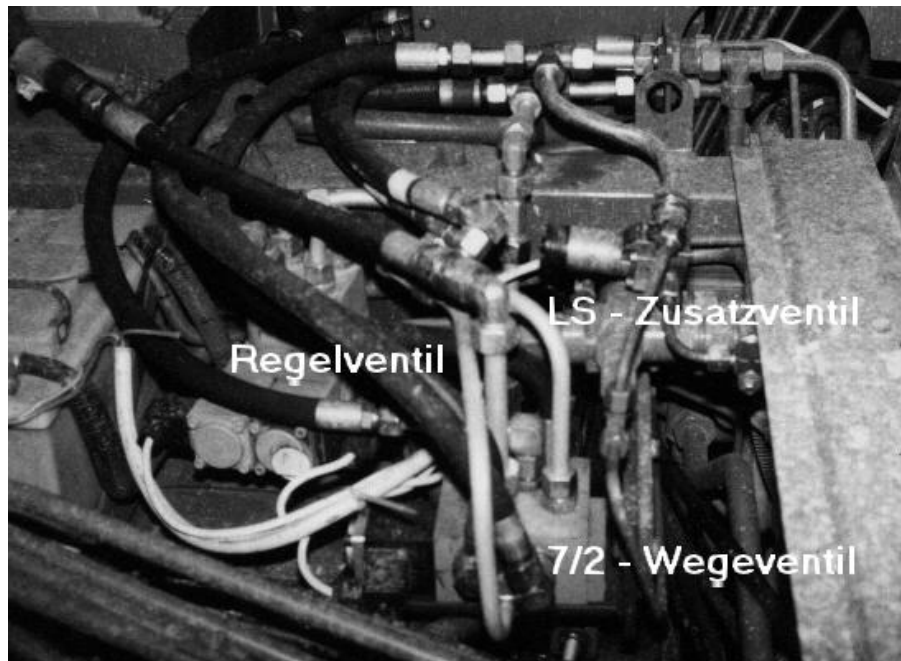


Abbildung 4.6: Hydraulikkomponenten des Autopiloten im Versuchsträger

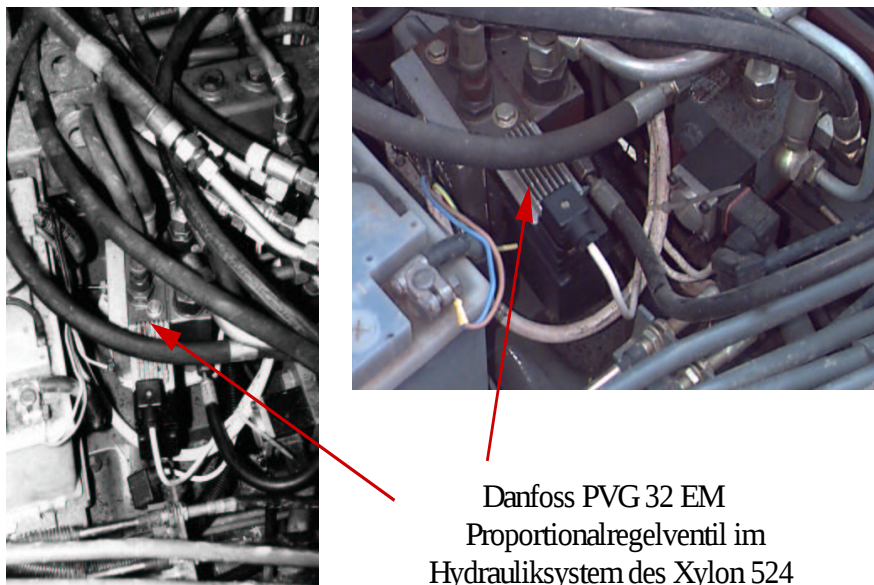


Abbildung 4.7: Danfoss PVG 32 EM im Versuchsträger

zur Trennung von Lenkservostat und Gleichlaufzylinder bei automatischem Betrieb. Das Regelventil von Claas wurde durch das Load-Sensing kompatible Proportionalventil Danfoss PVG 32 EM ersetzt. Das zusätzlich eingebaute LS-Ventil konnte entfallen.

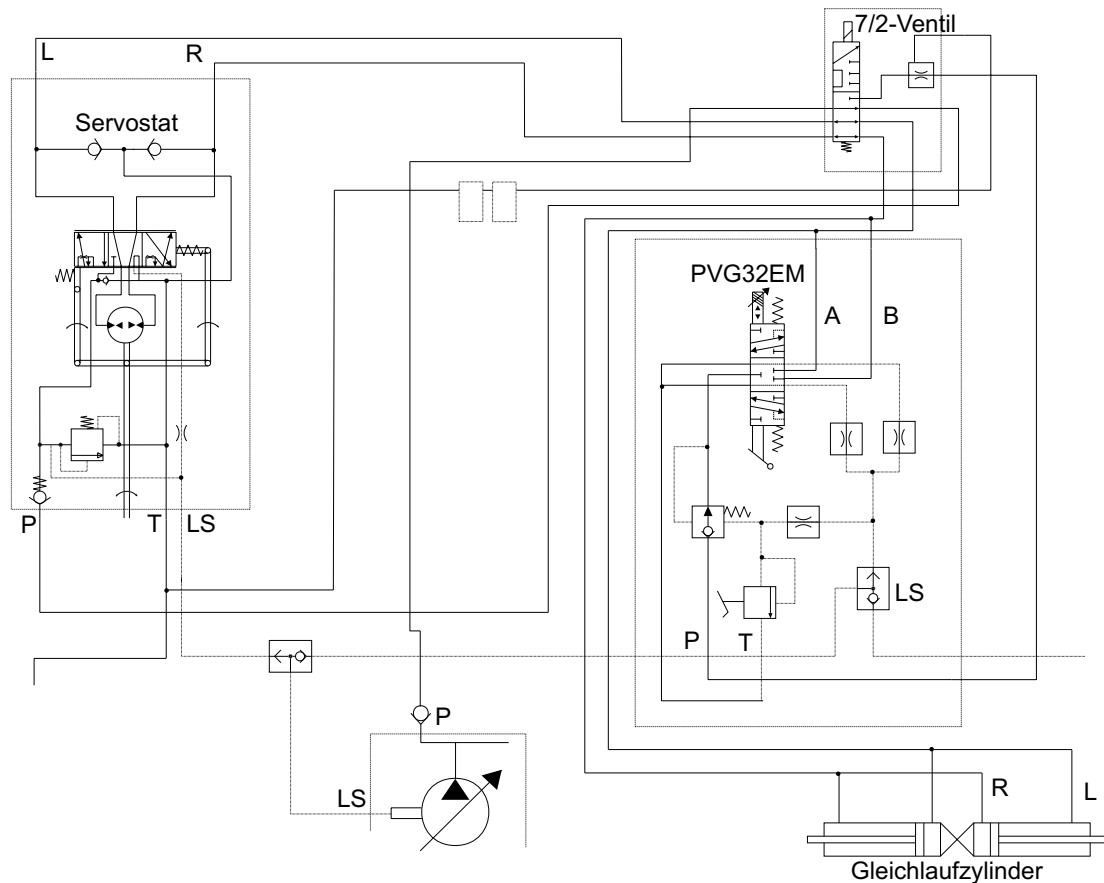


Abbildung 4.8: Lenkungshydraulik Fendt Xylon mit Danfoss PVG 32 EM

Im Bild 4.8 ist somit als Ergebnis der Modifikationen der Hydraulikschaltplan des automatischen Lenksystems dargestellt.

4.3 Elektrik

Aufgrund der unterschiedlichen Hydrauliksysteme und der besonderen Anforderungen des Forschungsvorhabens wurden einige Anpassungen zwingend notwendig. Die elektrische Installation des Claas Autopiloten im Fendt Xylon ist in Bild 4.9 aufgezeigt, die Modifikationen sind fett herausgestellt. Neben dem Mittenversteller für Fahrten am Hang und dem Radwinkelgeber, der in Kapitel 4.4 auf Seite 30 noch ausführlich erläutert wird, ist der Fußschalter als Eingangsgröße zu erkennen. Dieser ist im Claas Jaguar neben dem Drehmelder am Lenkrad sowie den Türkontaktschaltern Teil der Sicherheitsausrüstung des Autopiloten. Die Anschlüsse der zwei Magneten des Regelventils, des 7/2-Wegeventils und

die nachträglich angefügten Transistoren zur Ansteuerung des LS-Ventils sind die Ausgangsgrößen des Moduls. Das LS-Ventil wurde in Kapitel 4.2 bereits erläutert, das 7/2-Ventil ist erforderlich zur Abschaltung des Lenkservostaten während der Fahrt mit dem Autopiloten. Die Anschlüsse der Magnetventile (Klemme 3 und 12) dienen zur elektrischen Ansteuerung des Regelventils des Autopiloten.

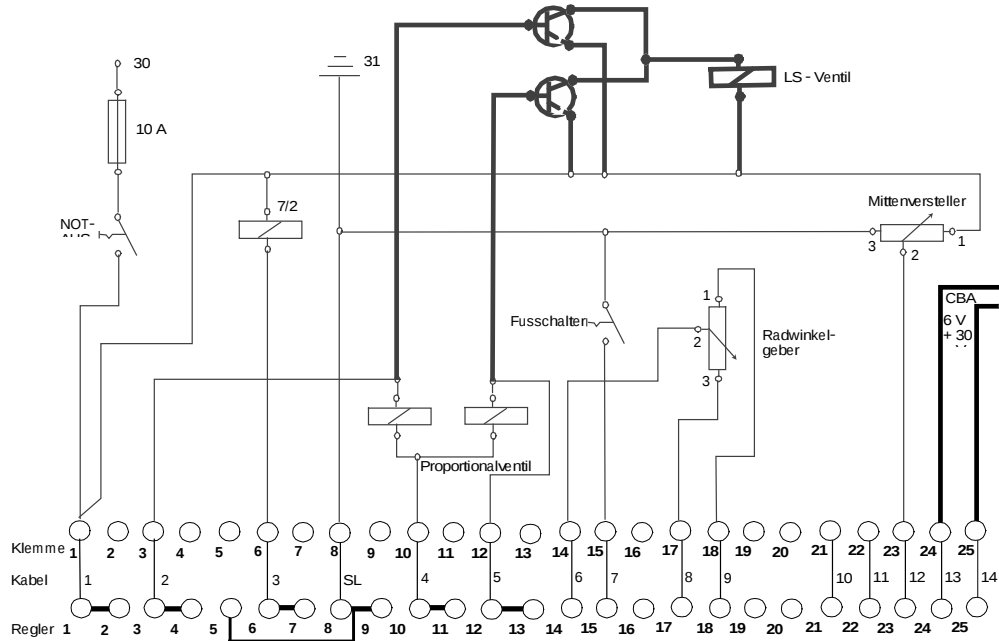


Abbildung 4.9: Elektrische Beschaltung Steuerungsmodul Claas Autopilot

Aufgrund nicht verfügbarer Unterlagen zum elektrischen Aufbau des Reglers führten erste Probeläufe des Systems zur ebenso unbeabsichtigten wie vorzeitigen Zerstörung einiger thermisch überbeanspruchter Bauteile. Eine Überarbeitung der Verdrahtung sowie ein neues Steuerungsmodul schafften Abhilfe. Fehlende Teile wie Fußschalter, Drehmelder oder Türkontaktschalter wurden elektrisch simuliert oder entfielen wenn möglich komplett. Die Ansteuerung des Zusatz-LS-Wegeventils über zwei Transistoren wurde nachträglich aufgelötet. Die Taster des Autopiloten wurden durch den Bildverarbeitungsrechner und das Grabau GR 412 D/A-Interface ersetzt. Wie in Bild 4.10 dargestellt, waren die Komponenten des Autopiloten in der Kabine des Versuchsträgers untergebracht.

Das Grabau Interface, im Bild oben links, dient der Simulation der taktischen Sensoren. Der Autopilot als analoger Regler (im Bild oben Mitte) benötigt einen solchen Spannungswert als Eingangsgröße, der Bildverarbeitungsrechner allerdings gibt digitale Werte aus. Die Umformung, also D/A Wandlung, erfolgte im Grabau Interface. Da die uns vorliegende Information lediglich das Eingangssignal des Reglers mit halber Bordspannung $\pm 0,3$ Volt Korrekturspannung spezifizierten, waren hier Vorversuche erforderlich.

Während in der Originalkonfiguration sowohl Regler als auch Radwinkelge-



Abbildung 4.10: Komponenten des Autopiloten im Versuchsträger

ber und taktile Sensoren direkt am Bordnetz hängen und die wirksamen Potentiale mittels Spannungsteilern immer in relativen Verhältnissen zueinander stehen, ist dies bei Einsatz eines digitalen Zwischengliedes anders. So bewirkte das Anlassen der Maschine einen Spannungsanstieg von ca. 12 Volt im Stillstand auf bis zu 14 Volt im laufenden Zustand. Da nun der Regler immer noch 50 % der Bordspannung, also 7 Volt, als relativen Nullpunkt wertet, der Bildverarbeitungsrechner aber einen Absolutwert von 6 Volt für den Ruhezustand liefert, resultiert durch diese Spannungsdifferenz schon ein maximaler Lenkwinkel bei Nullabweichung.

Nach abgeschlossener Installation der hydraulischen und elektrischen Komponenten wurde eine Simulation zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit des Systems durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde über das Grabau Interface mit dem PC eine Korrekturspannung vorgegeben. Ziel war, die Räder 10° nach links, dann 10° nach rechts und wieder zurück in die Ausgangslage zu stellen. Aus genannten Gründen führten zahlreiche Wiederholungen des Tests und deren nicht reproduzierbare, stark differierende Ergebnisse zum Abbruch der Versuche. Weiterhin traten mitunter große Totzeiten im Ansprechverhalten des Hydrauliksystems auf, welche zum Teil auf sehr lange Leitungen, zum Teil vermutlich auch auf Lufteinschlüsse im LS-System zurückzuführen waren. Die fehlende Kenntnis vom Durchflussverhalten des Regelventils sowie der Kennlinie des Reglers machten es zudem unmöglich, auf die geforderten 10° Radwinkel zu kommen. Der nicht vorhandene LS-Anschluss am Regelventil sowie mangelnde Möglichkeiten zum Eingriff in die Regelung mittels digitaler Technik machten Veränderungen notwendig. Da auch eine Modifikation der Übertragungsfunktion des

Reglers mittels eines Rechners zur Anpassung, Stabilisierung oder Erweiterung bei dem vorgegebenen analogen, fest verlöteten Regler nicht vorgesehen ist, mussten neue, alternative Konzepte erarbeitet werden.

Passend zum Hydrauliksystem des Trägerfahrzeugs wurde deshalb das PVG 32 EM Proportionalventil in die Lenkungshydraulik integriert. Wie in Bild 4.7 zu sehen ist, verfügt dieses Ventil jedoch, im Gegensatz zum Claas Regelventil, dargestellt in Bild 4.6, nur über einen Elektromagneten zur Ansteuerung. Das von Claas im Jaguar verwendete Ventil mit zwei Magneten wird vom Regler auf zwei getrennten Kanälen angesteuert. Dies geschieht mit 12 V Steuerungsspannung, die Begrenzung der Durchflussmenge sowie -geschwindigkeit wird mit Hilfe der Impulsbreitenmodulation (siehe Bild 4.11) realisiert. Darunter versteht man das Ansteuern des Magneten mit einer Rechteckspannung. Die Amplitude entspricht der vollen Versorgungsspannung, die Frequenz (Chopperfrequenz) ist fest vorgegeben. Durch die variable Breite der einzelnen Impulse werden der die Spule durchfließende Strom und damit die Schieberstellung gesteuert. Eine Anpassung der Lenkgeschwindigkeit erfolgt somit über den Stromdurchfluss. Es werden beim Claas Ventil zwei Verstärker für Lenkkorrekturen nach rechts und nach links benötigt.

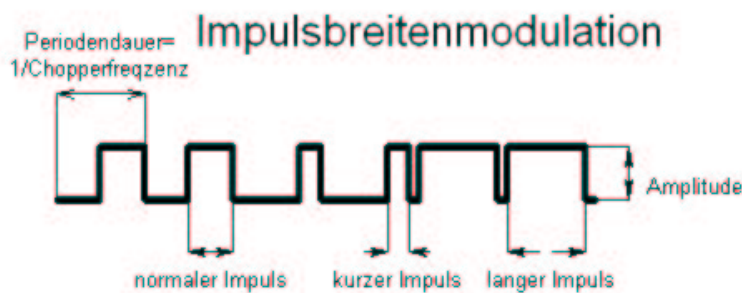


Abbildung 4.11: Prinzip der Impulsbreitenmodulation

Das Auflösungsvermögen dieser Logik, d.h. die Anzahl der zur Verfügung stehenden Impulsbreiten, entscheidet über die Feinheit, mit der man den Öldurchfluss elektrisch regeln kann. Als Extrema können das einfache Wegeventil und das PVG 32 EH genannt werden. Ein Wegeventil zeichnet sich aus durch lediglich zwei "Impulsbreiten", nämlich 0% der Periodendauer, also ganz geschlossener Ventilschieber, und 100%, also ganz geöffnet, aus. Mit dem EH-Magneten kann beim Danfoss Ventil eine Abstufung erzielt werden, die annähernd den analogen Charakter des Proportionalventils wiedergibt. Technische Informationen zur Abstufung der Impulsbreiten und die Zuordnung zur Spannungsdifferenz Radwinkel / Sensor beim Claas Autopiloten waren nicht verfügbar.

Das verwendete Danfoss PVG 32 EM Proportionalventil verfügt über einen integrierten Verstärker, der sich ebenfalls der Methode der Impulsbreitenmodulation bedient. Allerdings erfolgt die Ansteuerung ratiometrisch, d.h. eine variable Spannung im Bereich von 25% bis 75% der Versorgungsspannung wird angelegt, um ein Auslenken des Magneten in die eine oder andere Richtung zu

induzieren. 50% UV³ bedeutet Mittelstellung, also geschlossener Schieber. Der Begriff proportional in der Bezeichnung des eingebauten Ventils bezieht sich auf eine Spannungs-Volumenstromproportionalität. Der im Ventil eingebaute elektromagnetisch betätigte Schieber bewegt sich dabei proportional zur angelegten Spannung. Der durch den Schieber fließende Ölvolumenstrom ist wiederum proportional zum Schieberweg, wodurch sich die Proportionalität zwischen Spannung und Volumenstrom ergibt. Bild 5.54 zeigt die Kennlinie des Ventils.

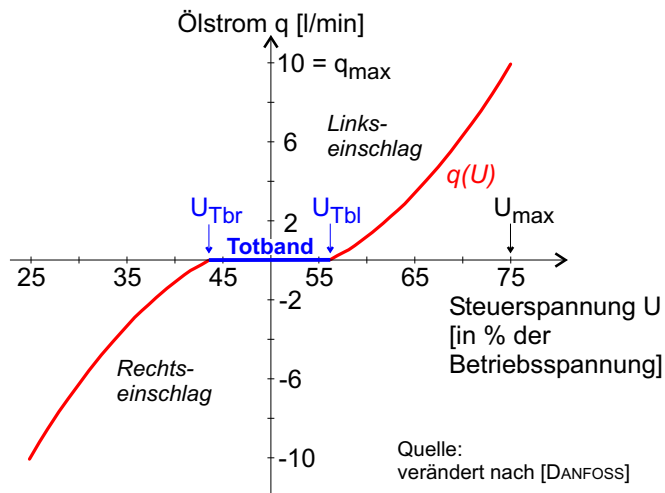


Abbildung 4.12: Kennlinie des Danfoss PVG 32 EM

Allerdings erfordert auch das PVG 32 eine Versorgungsspannung, die konstant und mit minimaler Restwelligkeit anliegen sollte. Aus diesem Grund wurde der als Versorgungsquelle genutzten Batterie, bedingt durch die bereits erwähnte starke Ungleichmäßigkeit ihrer Ausgangsspannung durch die Regelung der Lichtmaschine, zunächst ein Spannungsregler nachgeschaltet. Nachdem sich auch diese Maßnahme als unzureichend erwiesen hatte, da der Spannungsregler aus den 14,4 Volt der Lichtmaschine keine 12V zuverlässig stabilisieren konnte, kam hierfür ein 220V Transformator mit stabilisierten 12 Volt Ausgangsspannung zum Einsatz. Damit war gewährleistet, dass die Spannung am Proportionalventil zu jedem Zeitpunkt bei jedem Betriebszustand denselben Wert, und somit denselben virtuellen Nullpunkt für die Ansteuerung, hat. Wird nun der Steuereingang des Proportionalventils mit 25 % der UV, sprich 3V, beaufschlagt, so lenkt das Hydrauliksystem mit maximaler Geschwindigkeit nach rechts, bei 75 % der UV, was 9V entspricht, ebenfalls mit maximaler Geschwindigkeit nach links. Die Lenkgeschwindigkeit ist über eine Volumenstrombegrenzung durch den im Ventil eingebauten Schieber, der für einen maximalen Durchsatz von 10 l/min ausgelegt ist, beschränkt. Da der Regler des Autopiloten nicht in der Lage ist, dieses Hydraulikventil anzusteuern, musste das Ausgangssignal konvertiert werden. Somit ergab sich auch ein Ansatzpunkt zum Eingriff in die Regelung durch den PC. Allerdings bereitete es einige Probleme, ein impulsbreitenmoduliertes Signal online mittels A/D-Wandlung zu interpretieren. Außerdem brachte die

³UV = Versorgungsspannung

Montage des Radwinkelgebers an der Vorderachse ein 8 m langes Kabel bis zur Auswertelogik mit sich. Die geringen Spannungsdifferenzen im Bereich von 0,04 V pro Grad Lenkwinkel führten zur Entscheidung, das Signal zu spreizen. Beide Punkte zusammen bewirkten die Entwicklung des eigenen analogen Reglers.

Der Regler sollte die erforderliche Logik enthalten, nutzbare Ausgangssignale liefern und für eine stabile Regelung sorgen. Aufgrund des Bestrebens, möglichst nahe am Ausgangssystem zu bleiben, wurde die in Bild 4.13 gezeigte Schaltung realisiert. Die Funktionsweise dieses Reglers beruht prinzipiell auf der des Reglers der Firma Claas. Er ist in zwei Teile untergliedert. In der linken Hälfte befindet sich der Radwinkelgeberverstärker, die rechte Hälfte besteht aus vier als Komparatoren geschalteten Operationsverstärkern. Das Ausgangssignal der Bildverarbeitung wird mit dem Lenkwinkelgebersignal verglichen. Ausgangsgrößen sind, analog zum Claas Regler, zwei Differenzkanäle. Diese liefern Korrekturspannungen im Bereich von 0...10 Volt, welche in den Rechner eingelesen, zwecks Stabilisierung modifiziert und umgesetzt in ein Signal passend zum Proportionalventil wieder ausgegeben werden.

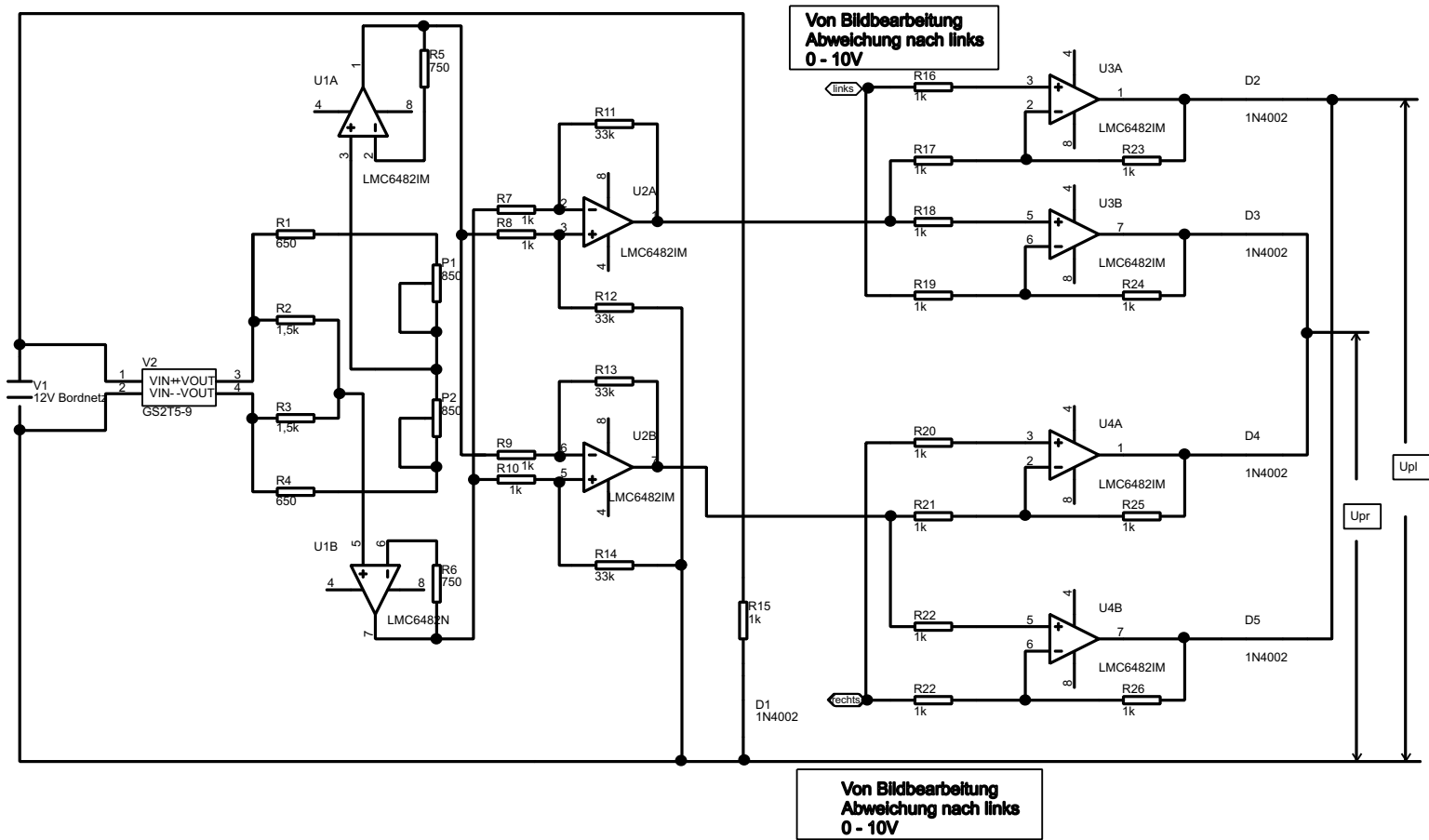
Allerdings gab es auch bei diesem Regler Schwierigkeiten, wie z.B. Bauteiltoleranzen statischer und vor allem dynamischer Art, die zu Temperaturdrift und damit zu Schwankungen in der Signalerfassung bzw. Signalausgabe führten. Außerdem ist es überflüssig, zunächst ein analoges Signal zu erzeugen, dieses digital umzusetzen und zu korrigieren, um es dann wieder rückzuwandeln und auszugeben.

Die Konsequenz dieser Erkenntnisse war der Entschluss, die Entwicklung in Richtung eines digitalen, programmierten Softwarereglers fortzuführen. Dieser Schritt brachte zwei weitere bedeutende Vorteile mit sich. Zum einen erlaubt ein solcher Softwareregler Erweiterungen z.B. zu einer Kennfeldregelung ohne vollständige Neukonzeption der programmierten Logik, zum anderen sind zu ermittelnde Parameter wie z.B. ein P- oder I-Anteil während der Projektierungsphase einfacher zu variieren. Bild 4.17 auf Seite 35 zeigt die beiden in der Traktorkabine installierten Rechner, der Regelungsrechner ersetzte das Modul des Claas Autopiloten. Über die serielle Schnittstelle wurden die Korrektursignale des Bildverarbeitungsrechners eingelesen. Das Abfragen der analogen Werte des Radwinkelgebers sowie die Ausgabe der Regelspannung erfolgte über eine A/D-D/A Wandlerkarte. Die Entwicklung des digitalen Reglers sowie die entwickelten Programme werden in Kapitel 5.1 auf Seite 37 ausführlich beschrieben.

4.4 Sensorik

Die eingesetzte Sensorik besteht aus dem Radwinkelgeber, der als Bestandteil des Radwinkelreglers im nächsten Kapitel beschrieben wird, und dem Bildverarbeitungssystem. Der Kamera als eigentlichem Sensor des Systems kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie die Eigenschaften des Gesamtsystems bestimmt. Die Entwicklung der Software des Bildverarbeitungssystems und damit auch die der eingesetzten Hardware wird in Kapitel 5.2.2 auf Seite 64 noch ausführlicher erläutert. Da mit dem zuerst eingesetzten Schwarzweiß-System keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt wurden, kam zunächst eine Schwarzweiß-, dann ei-

Abbildung 4.13: Schaltplan des analogen Reglers



ne Farbkamera mit analoger Grün-Rot-Kanaldifferenzierung zum Einsatz. Da es hiermit jedoch auch nicht möglich war, die Differenzbildung zu variieren, wurde die im folgenden beschriebene Farbbildverarbeitungshardware angeschafft.

Bei der eingesetzten Kamera handelt es sich um eine CCD⁴-Kamera der Firma Pulnix, genauer um das Modell TMC 50 RGB. Bei dieser Ein-Chip True-Color-RGB⁵-Kamera wird das Bild mittels Filterung in die drei Farbspektren rot, grün und blau zerlegt, die dann über den R-, G- und B-Ausgang an die Bildverarbeitungskarte geliefert werden. Bild 4.14 zeigt die Kamera in eingebautem Zustand.



Abbildung 4.14: Pulnix TMC 50 RGB

Technische Daten der Pulnix TMC 50 RGB:

- Sensor: Interline Transfer CCD Pixel: 500 (H) x 582 (V)
- Chipabmessungen: 8,8 mm x 6,6 mm
- Signal: CCIR Standard, PAL Color System
- Austastung: 625 Lines, 50 Fields/sec, 2:1 Interlaced
- Horizontalfrequenz: 15,625 kHz
- Vertikalfrequenz: 50 Hz
- Synchronisation: Extern / Intern
- Auflösung: 320 Horizontal 420 Vertikal

⁴CCD = Charge Couple Device

⁵RGB = Rot-Grün-Blau- Farbraum

- Ausgang: Composite Color Video (RGB, PAL, B/W)

Als Bildverarbeitungsrechner wurde ein AMD K6/2 300 MHz mit Windows NT 4.0 SP3 Betriebssystem eingesetzt. Die Farbbildverarbeitungshardware bestand aus einer IC-PCI Karte und einem AMC Color Acquisition Modul der Firma ITI. Das gewählte Motherboard verfügt über 2 MB tripple-ported VRAM-Bildspeicher. Dies ermöglicht den Zugriff auf den Bildspeicher von drei Stellen gleichzeitig: Zum einen von der Kamera bzw. von dem Acquisition Modul, welches die Bilddaten anliefert, zum zweiten vom Videoausgang, über den die Daten an den Bildschirm weitergegeben werden, und zum dritten von der Bildverarbeitungssoftware, bzw. dem PCI-Bus. Folglich kann die Bildverarbeitung parallel zum Einlesevorgang ablaufen. Physikalisch steckt das Motherboard in einem PCI-Slot, um die Datentransferrate zum Host zu optimieren, da diese Größe bei PC-basierten Bildverarbeitungssystemen den begrenzenden Faktor für die Leistungsfähigkeit darstellt. Bild 4.15 zeigt das Blockschaltbild des Motherboards.

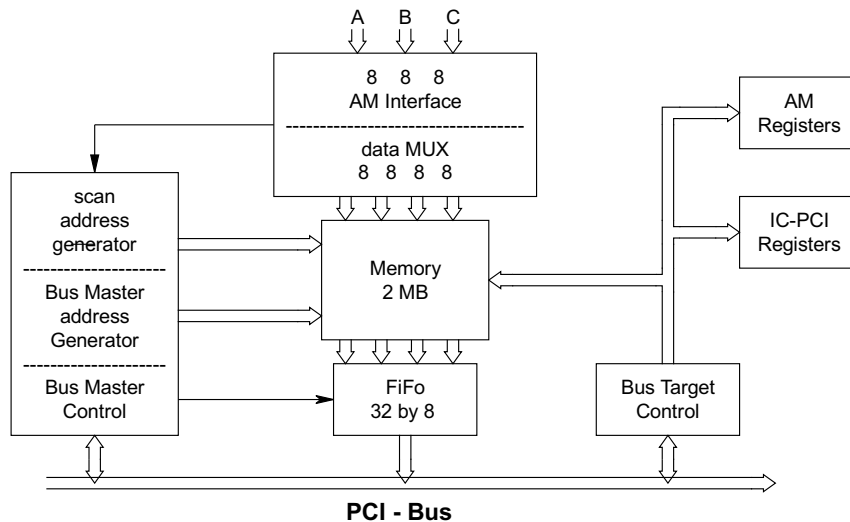


Abbildung 4.15: Blockschaltbild des IC-PCI-Motherboards

Aufgrund des modularen Konzepts der Bildverarbeitungskomponenten von ITI gibt es für das Einlesen des Videosignals mehrere Acquisition Module, für vorliegende Arbeit wurde ein AM-CLR Color Modul angeschafft. Es akzeptiert als Eingangsgrößen RGB, NTSC, PAL, oder monochrome Videosignale. Wie in Bild 4.16 zu sehen ist, wird das eingehende Signal aufgespaltet in drei einzelne Signale. Im Falle der Pulnix RGB-Kamera werden schon drei Signale ans Acquisition Modul geliefert. Diese drei Signale entsprechen einzelnen Grauwertbildern, jedes repräsentiert einen der drei Farbkanäle, der vierte Kanal könnte ein Overlay für Beschriftungen sein, ein Infrarotkanal oder ähnliches.

Das AMC-Modul verfügt über einen Color-Space-Converter (CSC), der das eingehende Signal von RGB in andere Farbräume transformieren kann. Nach der Digitalisierung kann das Bild nach Y:U:V, R-Y:Y:B-Y oder H:S:I übersetzt werden. Die für die linearen Transformationen nötigen Umwandlungsmatrizen sind

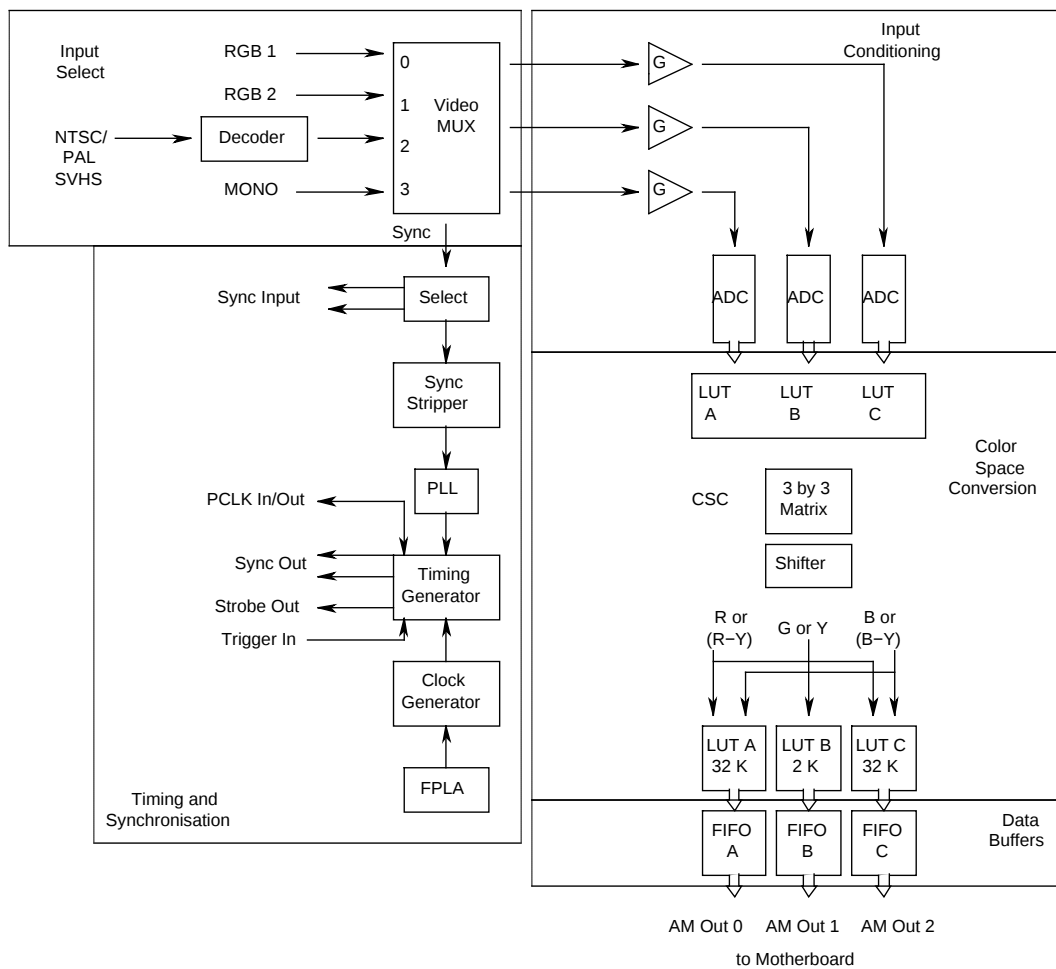


Abbildung 4.16: Blockschaltbild des AM-CLR-Acquisition Moduls

programmierbar. Für die nicht lineare Konvertierung in den HSI-Raum sind zusätzlich noch drei 32 K x 8 Bit Ausgangs-Look-Up-Tables vorhanden. Alle Farbraumkonvertierungen werden ohne Zeitverlust online erledigt. Für Veränderungen am auf dem Motherboard eingehenden Signal stehen auf diesem noch drei 256 x 8 Bit Eingangs-Look-Up-Tables zur Verfügung. Mit ihnen können beispielsweise online Binarisierungen durchgeführt werden.

Der Nachteil der Farbbildverarbeitung liegt darin, dass die Interpretation von Farbinformationen eine Bearbeitung aller drei Kanäle erfordert, was ein immenses Datenvolumen bedeutet. Unter Zuhilfenahme der drei 256 x 8 Bit Eingangs-Look-Up-Tables (im Schaltbild LUT) kann eine Farbdifferenzbildung hier digital erfolgen, was die oben geforderte Variation der Umrechnungsfaktoren ermöglicht. Die Möglichkeiten der Farbdifferenzbildung zur Datenreduktion werden in Kapitel 5.2.3 beschrieben.

4.5 Reglerhardware

Nachdem sich der Regler des Claas Autopiloten sowie der selbst entwickelte analoge Regler als den Anforderungen nicht genügend erwiesen hatten, wurden die notwendigen Komponenten für die Programmierung des digitalen Reglers auf dem Versuchsträger installiert. Der eingesetzte digitale Regler besteht aus einem 486 DX 133 Rechner mit MS-DOS Betriebssystem und einer handelsüblichen Analog-Digital-Wandlerkarte zum Einlesen des Radwinkels und zur Ausgabe der Korrekturspannung. Bild 4.17 zeigt beide Rechner in der Kabine des Versuchsträgers.

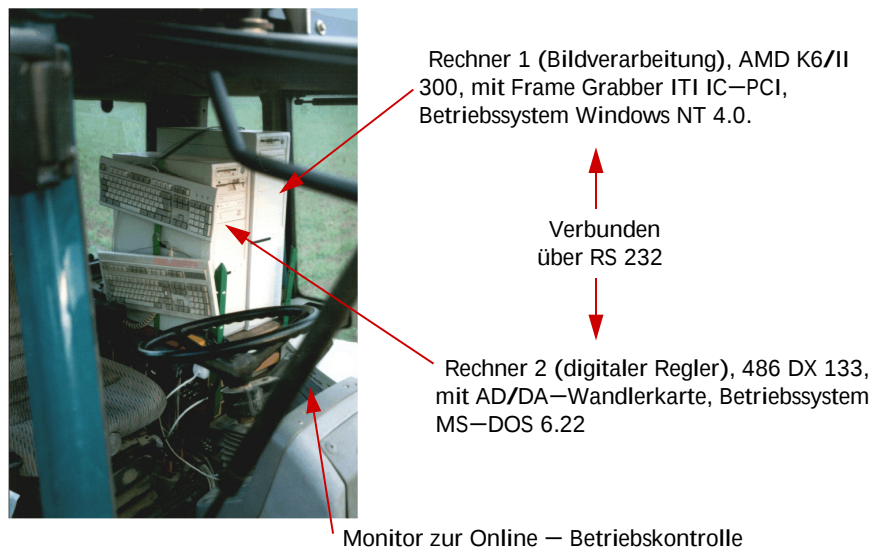


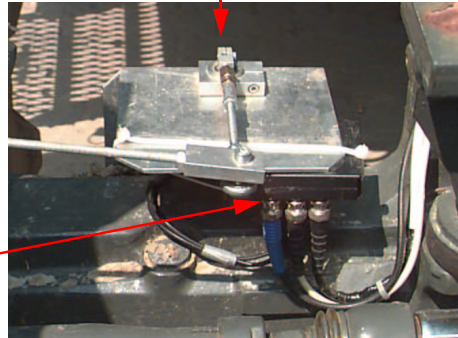
Abbildung 4.17: Bildverarbeitungs- und Reglerrechner im Versuchsträger

Zur Bestimmung des im inneren Regelkreis des Kaskadenreglers benötigten Lenkwinkels wird der in Bild 4.18 gezeigte Lenkwinkelgeber des Claas-Autopiloten eingesetzt. Aufbau und Funktion des Radwinkelgebers wurden in Kapitel 4.1 schon erläutert.



Radwinkelgeber aus dem Claas Autopiloten

Radwinkelgeber, installiert an der Traktorvorderachse



Verstärkerschaltung zum Radwinkelgeber, zur Vermeidung von Meßfehlern aufgrund von Störspannungen wird das Signal gespreizt

Abbildung 4.18: Der Radwinkelgeber des Claas Autopiloten

Der Bildverarbeitungsrechner wurde über die RS 232-Schnittstelle mit dem Reglerrechner vernetzt, um Initialisierungsroutinen, den Datenaustausch und den Benutzerzugriff von einem Rechner aus zu ermöglichen.

Kapitel 5

Entwicklung der Software des automatischen Lenksystems

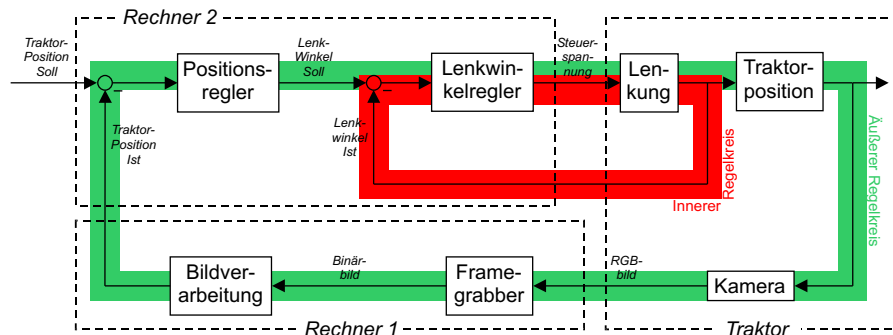


Abbildung 5.1: Regelkreis

Die Software des automatischen Lenksystems lässt sich in zwei Teilbereiche untergliedern. Wie in Bild 5.1 verdeutlicht, besteht das System aus einem inneren und einem äußeren Regelkreis. Den äußeren Regelkreis (im Bild grün) stellt die in Kapitel 5.2 ab Seite 60 beschriebene Positionsregelung dar. Diese ist in ihren Regelparametern abhängig von der zu bearbeitenden Kultur, dem verwendeten Anbaugerät und der gewünschten Arbeitsgeschwindigkeit. Der im folgenden behandelte Lenkwinkelregler (innerer Regelkreis, im Bild rot) ist abhängig von den eingesetzten Bauteilen, somit fahrzeugspezifisch, und muss dem Versuchsträger angepasst sein.

5.1 Softwareentwicklung Lenkwinkelregler

Vor der Festlegung der Regelparameter ist eine Identifikation des vorhandenen Systems, d.h. eine Untersuchung der regelungstechnisch relevanten Eigenschaften des hydraulischen Lenksystems des Versuchsträgers erforderlich. Mit dem zu entwerfenden Regler kann dann eventuellen Instabilitäten begegnet werden. Als Ergebnis einer solchen Systemuntersuchung erhält man die Übertragungsfunktion. Sie stellt eine mathematische Beschreibung des Verhaltens eines Systems

in einem Regelkreis dar. Die Übertragungsfunktion kann auf zwei Wegen ermittelt werden. Entweder auf dem theoretischen, bei dem das Verhalten der einzelnen Systemkomponenten in ein mathematisches Modell gefasst und dieses dann ausgewertet wird, oder auf dem experimentellen Weg. Da ein derart komplexes Hydrauliksystem wie das im verwendeten Versuchsträger aufgrund hochgradiger Nichtlinearität mathematisch nur sehr schwer zu beschreiben ist, und deshalb Vereinfachungen getroffen werden müssten die das Ergebnis in Frage stellen würden, wurde hier der experimentelle Weg gewählt. Bei diesem wird das Hydrauliksystem als Ganzes und nicht als Zusammensetzung einzelner Komponenten und damit auch einzelner Übertragungsverhalten betrachtet. Aus der erfassten Reaktion des Systems auf ein vorher gewähltes Eingangssignal lässt sich auf diese Weise das Übertragungsverhalten ermitteln.

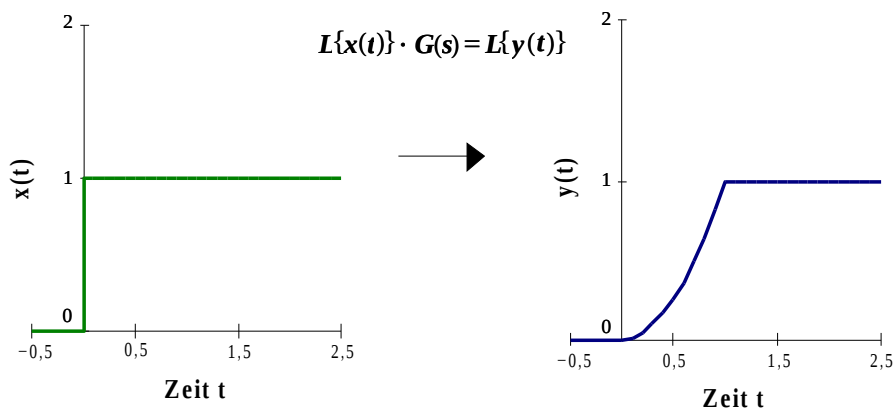


Abbildung 5.2: Beispiel für Ein- und Ausgangsverhalten

In dieser Arbeit wurde zur Bestimmung der Übertragungsfunktion das Programmpaket WinFact96 des Ingenieurbüros Dr. Kahlert verwendet. Die Systemidentifikation und damit die Ermittlung der Übertragungsfunktion erfolgt dabei durch die Vorgabe einer Eingangsfunktion $x(t)$ und Messen der Systemreaktion $y(t)$. Diese beiden Informationen müssen im entsprechenden Dateiformat dem Programm zur Verfügung gestellt werden, welches hieraus die Übertragungsfunktion berechnet. Der Zusammenhang zwischen Ein-, Ausgangssignal und Übertragungsfunktion ist in Bild 5.2 dargestellt.

5.1.1 Theoretische Betrachtung

Um anhand der Systemreaktion die Übertragungsfunktion bestimmen zu können, würde die oben dargestellte Sprungfunktion als Eingangssignal prinzipiell ausreichen. Da es sich bei dem Hydrauliksystem des Versuchsträgers aber um ein Load-Sensing System mit Regelpumpe handelt, war es sinnvoll, den gesamten Regelbereich der Pumpe von Nullförderung bis zu der für die Lenkung notwendigen maximalen Förderleistung (0 bis 10 l/min) und die daraus resultierenden Einflüsse auf die Lenkung zu untersuchen. Dadurch war es erforderlich, eine Funktion zu wählen, die bewirkt, dass die Pumpe die gesamte Verstellkurve des erwähnten Bereiches durchläuft.

Diese Forderung erfüllt eine Sinusfunktion mit entsprechend gewählter Amplitude. Mit ihrem Maximum von 9 Volt Regelspannung am Proportionalventil bewirkt sie die volle Pumpenleistung und den maximalen Ventilschieberweg für die Lenkung nach links, mit dem Minimum von 3 Volt wird ebenfalls die größtmögliche Pumpenleistung angefordert, der Ventilschieber geht dabei aber in die Endstellung für Lenkung nach rechts. Damit ist gewährleistet, dass in der ermittelten Übertragungsfunktion auch Systemreaktionen berücksichtigt sind, die bei einem statischen Sprung als Eingangsfunktion nicht in Erscheinung treten würden, da in diesem Fall die Regelpumpe der Hydraulik nur kurz in den geforderten Bereich gefahren würde und sich nicht ständig neuen Anforderungen anpassen müsste.

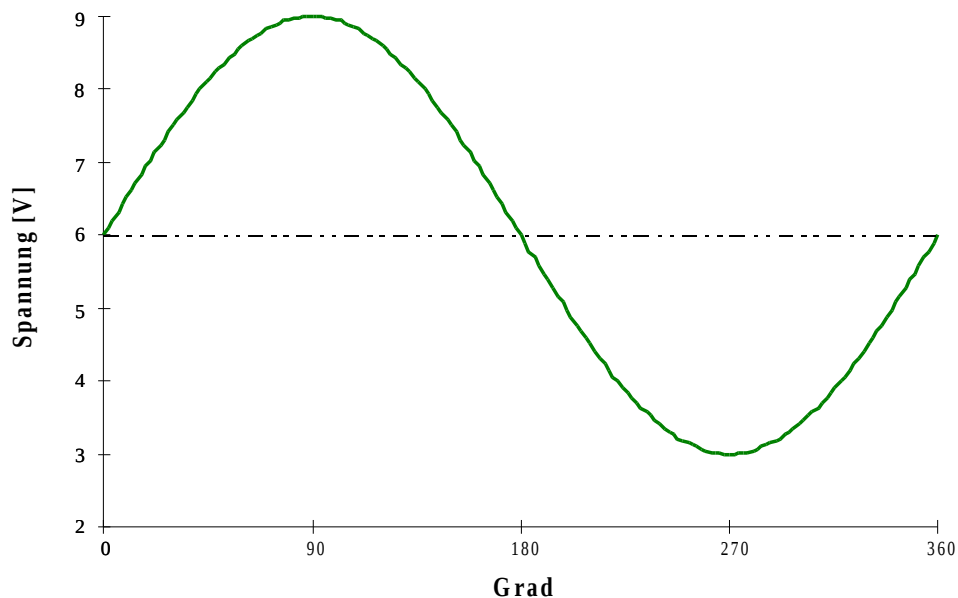


Abbildung 5.3: Einfache Sinusfunktion zur Systemidentifikation

In Bild 5.3 ist eine den Anforderungen angemessene Eingangsfunktion über eine Periode dargestellt, mit der die Untersuchung durchgeführt werden könnte.

Der dargestellte Sinus hat eine Amplitude von 3 Volt bei einem Offset von 6 Volt. Diese entsprechen genau der Hälfte der Versorgungsspannung des Hydraulikventils und somit dem virtuellen Nullpunkt der Regelung. Beim Maximum von 9 Volt ist die maximale Lenkgeschwindigkeit nach links erreicht, beim Minimum von 3 Volt die maximale Lenkgeschwindigkeit nach rechts.

Eine solche Periode über 360 Grad würde allerdings nicht das gewünschte Ergebnis zur Folge haben. Während der ersten Halbwelle, also im Bereich von 6 bis 9 Volt, käme eine Lenkbewegung nach links zustande, während der zweiten Halbwelle eine Lenkbewegung nach rechts zurück zum Ausgangspunkt. Ziel aber war sowohl einen Links- als auch einen Rechtsausschlag zu verwirklichen. Also wurde das Eingangssignal um einen zweiten Sinus mit umgekehrter Amplitudenfolge erweitert. Damit konnte erreicht werden, dass die Hydraulik zuerst nach links lenkt, zurückstellt, dann nach rechts lenkt und wieder zurückstellt. In Bild 5.4 ist die so bei den Untersuchungen verwendete Sinusfunktion bestehend aus zwei Perioden dargestellt. Da zwischen angelegter Spannung und Schieberweg sowie zwischen Schieberweg und Volumenstrom eine Proportionalität besteht, entspricht diese Funktion in ihrer Form auch dem Verlauf der Funktion des Ölvolumenstroms. In Bild 5.5 ist diese dargestellt.

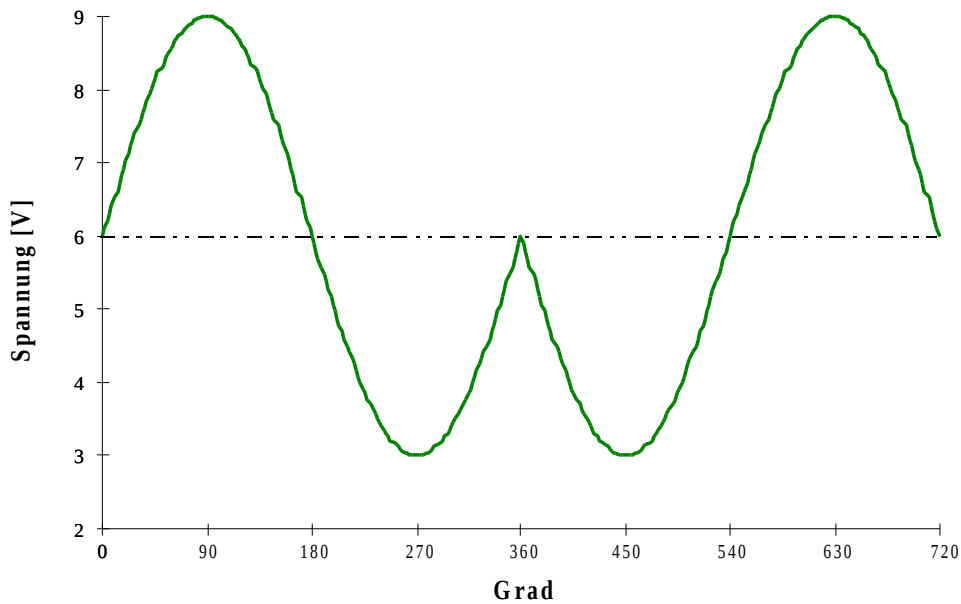


Abbildung 5.4: Verwendete Sinusfunktion zur Systemidentifikation

Aufgrund der Kennlinie des Radwinkelgebers und der vorab gewählten Hebelübersetzung zwischen Radwinkelgeber und Lenkungsgeometrie war ein maximaler Lenkwinkel von 10 Grad nach links sowie nach rechts zulässig. Aus diesem Grund war es erforderlich, die Periodendauer der Sinusfunktion so zu wählen, dass dieser Wert nicht überschritten wird. Zu diesem Zweck wurde vorweg eine genaue Betrachtung der Lenkungsgeometrie und des verwendeten Gleichlaufzy-

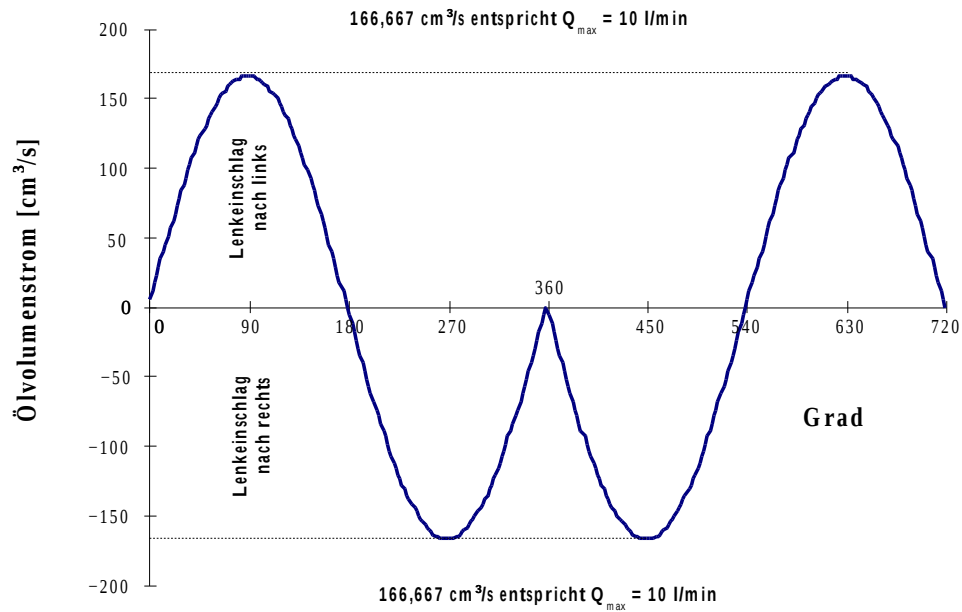


Abbildung 5.5: Funktionsverlauf des Ölvolumenstroms

linders durchgeführt, um zu bestimmen, wieviel Öl für einen Lenkwinkel von 10 Grad in den Gleichlaufzylinder gefördert werden muss. Bild 5.6 stellt diese Betrachtung dar.

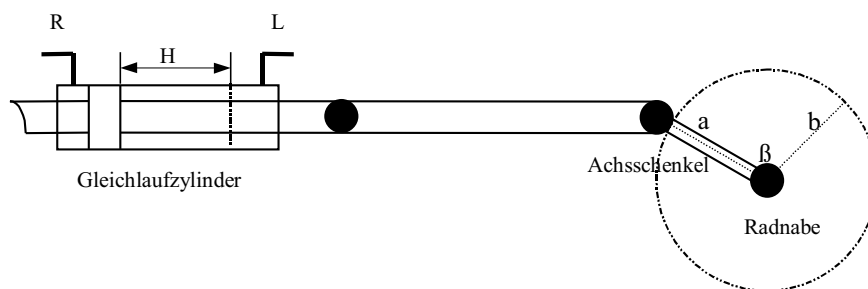


Abbildung 5.6: Lenkungsgeometrie des Versuchsträgers

Bekannt aus den Unterlagen des Traktors war:

Gleichlaufzylinder:

- Durchmesser Kolben $D = 70 \text{ mm}$
- Durchmesser Kolbenstange $d = 40 \text{ mm}$

- max. Hub von Anschlag zu Anschlag $H = 235 \text{ mm}$
- benötigte Ölmenge für max. Hub $Q_{max} = 609 \text{ cm}^3$

Achsschenkel:

- Länge $l = a = b = 177 \text{ mm}$

Daraus erhält man den maximalen Lenkwinkel β von Anschlag zu Anschlag mit:

$$H^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos(\beta)$$

$$\cos(\beta) = -\frac{H^2 - a^2 - b^2}{2ab}$$

$$\cos(\beta) = -\frac{(235\text{mm})^2 - (177\text{mm})^2 - (177\text{mm})^2}{2 \cdot 177\text{mm} \cdot 177\text{mm}}$$

$$\beta = 83,2^\circ$$

Aus der benötigten Ölmenge von 609 cm^3 für $83,2^\circ$ Grad Lenkwinkel ergibt sich damit näherungsweise:

$$609\text{cm}^3 \cong 83,2^\circ$$

$$7,32\text{cm}^3 \cong 1^\circ$$

$$73,2\text{cm}^3 \cong 10^\circ$$

Werden $73,20 \text{ cm}^3$ Hydrauliköl in den Gleichlaufzylinder gefördert, müsste dies theoretisch den geforderten Lenkeinschlag von genau 10° Grad bewirken. Damit ist mit der Menge Öl, die höchstens während einer Halbwelle der Sinusfunktion durch das Lenkungsproportionalventil gefördert werden darf, die letzte notwendige Größe zur Berechnung der maximal zulässigen Periodendauer des Eingangssignals bestimmt. Der in Bild 5.5 dargestellte Verlauf entspricht dem sich einstellenden Verlauf des Ölvolumenstroms bei vorgegebenem Signal nach Bild 5.4 am Steuereingang des Proportionalventils. Das Integral über dieser Funktion entspricht damit der geförderten Ölmenge, die für den Fall eines Einschlags von 10° Grad bestimmt werden konnte. Die maximale Periodendauer war dadurch wie folgt zu berechnen:

Es gelten:

$Q(t)$ Volumenstrom in Abhängigkeit von der Zeit

$V(t)$ Ölmenge in Abhängigkeit von der Zeit

$$Q(t) = Q_{max} \cdot \sin(\omega t)$$

$$V(t) = Q_{max} \cdot \int_0^{\frac{1}{2}T} \sin(\omega t) dt$$

$$V(t) = Q_{max} \cdot \left[-\frac{1}{\omega} \cdot \cos(\omega t) \right]_0^{\frac{1}{2}T}$$

$$V(t) = Q_{max} \cdot \left[-\frac{1}{\omega} \cdot \cos\left(\omega \cdot \frac{1}{2}T\right) + \frac{1}{\omega} \cdot \cos(\omega \cdot 0) \right]$$

mit $\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T}$:

$$V(t) = Q_{max} \cdot \left[-\frac{T}{2\pi} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2}T\right) + \frac{T}{2\pi} \cdot \cos(0) \right]$$

$$V(t) = Q_{max} \cdot \left[-\frac{T}{2\pi} \cdot \cos(\pi) + \frac{T}{2\pi} \cdot \cos(0) \right]$$

$$V(t) = T \cdot \left[-\frac{Q_{max}}{2\pi} \cdot \cos(\pi) + \frac{Q_{max}}{2\pi} \cdot \cos(0) \right]$$

$$\Rightarrow T = \frac{V(t) \cdot 2\pi}{Q_{max} [-\cos(\pi) + \cos(0)]}$$

Werte:

$$V(t) = 73,20 \text{ cm}^3 \text{ für } t = \frac{1}{2} T$$

$$Q_{max} = 166,667 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = 10 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

Eingesetzt:

$$T = \frac{73,20 \text{ cm}^3 \cdot 2\pi}{166,667 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \cdot [-\cos(\pi) + \cos(0)]}$$

$$\Rightarrow T = 1,379 \text{ s}$$

Aus programmiertechnischen Gründen ergab sich bei der Gestaltung des verwendeten Eingangssignal $x(t)$ eine Periodendauer von $T=1,2\text{s}$. Die Folge davon war, dass die angestrebten 10 Grad theoretischer Lenkeinschlag bei der Versuchsdurchführung nicht mehr ganz erreicht werden konnten. Es ergab sich somit ein neuer Lenkwinkel, der sich während einer Halbwelle bei idealem Systemverhalten einstellen würde. Dessen Berechnung erfolgt durch Lösen des bestimmten Integrals mit den Grenzen $t_0=0$ bis $t=T/2=0,6\text{s}$

$$Q(t) = Q_{max} \cdot \sin(\omega t)$$

$$V(t) = Q_{max} \cdot \int_0^t \sin(\omega t) dt$$

$$V(t) = Q_{max} \cdot \left[-\frac{1}{\omega} \cdot \cos(\omega t) \right]_{t_0}^t$$

Werte:

$$Q_{max} = 166,667 \frac{cm^3}{s}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T} = 2\pi \frac{1}{1,2s} = 5,236 \frac{1}{s}$$

$$t_0 = 0s$$

$$t = \frac{T}{2} = 0,6s$$

Eingesetzt:

$$V(t) = Q_{max} \cdot \left[-\frac{1,2s}{2\pi} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{1,2s} \cdot 0,6s\right) + \frac{1,2s}{2\pi} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{1,2s} \cdot 0s\right) \right]$$

$$V(t) = 166,667 \frac{cm^3}{s} \cdot \left[-\frac{1,2s}{2\pi} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{1,2s} \cdot 0,6s\right) + \frac{1,2s}{2\pi} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{1,2s} \cdot 0s\right) \right]$$

$$\Rightarrow V(t) = 63,66 cm^3$$

Die theoretisch geförderte Ölmenge während einer Halbwelle der gewählten Sinusfunktion bei idealem Systemverhalten beträgt also anstelle der angestrebten 73,20 cm³ für 10 Grad Lenkwinkel nur 63,66 cm³. Daraus ergibt sich ein Lenkwinkel von:

$$609 cm^3 \cong 83,2^\circ$$

$$7,32 cm^3 \cong 1^\circ$$

$$\Rightarrow 63,66 cm^3 \cong 8,70^\circ$$

Außer den hier errechneten Maxima der geförderten Ölmenge und des Lenkeinschlags lassen sich auch die kompletten Funktionsverläufe der beiden Größen ermitteln und graphisch darstellen. Die Funktion des Volumenstroms stellt die Ableitung der geförderten Ölmenge dar, umgekehrt ist die geförderte Ölmenge als das Integral über dem Volumenstrom zu sehen. Somit kann durch Integration der bekannten Volumenstromfunktion und bestimmen der Integrationskonstante der Kurvenverlauf von V(t) bestimmt werden. Der daraus resultierende, sich theoretisch einstellende Radwinkel lässt sich dann mit dem Proportionalitätsfaktor von 7,32 cm³/Grad aus der Funktion von V(t) bestimmen. Der Rechenablauf zur Bestimmung der Integrationskonstante ist im folgenden dargestellt.

$$Q(t) = Q_{max} \cdot \sin(\omega t)$$

$$V(t) = Q_{max} \cdot \int \sin(\omega t) dt + c$$

$$V(t) = Q_{max} \cdot \left(-\frac{1}{\omega}\right) \cdot \cos(\omega t) + c$$

Randbedingung: $V_{(t=0)} = 0$, damit:

$$0 = Q_{max} \cdot \left(-\frac{1}{\omega}\right) \cdot \cos(\omega t) + c$$

$$\Rightarrow c = Q_{max} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \cos(\omega t)$$

Werte:

$$Q_{max} = 166,667 \frac{cm^3}{s}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T} = 2\pi \frac{1}{1,2s} = 5,236 \frac{1}{s}$$

Eingesetzt:

$$c = 166,667 \frac{cm^3}{s} \cdot \frac{1,2s}{2\pi} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{1,2s} \cdot 0\right)$$

$$\Rightarrow c = 31,83cm^3$$

Daraus folgt:

$$V(t) = Q_{max} \cdot \left(-\frac{1}{\omega}\right) \cdot \cos(\omega t) + 31,83cm^3$$

Nach der Berechnung der Integrationskonstante lässt sich die Darstellung der beiden genannten Funktionsverläufe, gefördertes Volumen $V(t)$ und theoretischer Radwinkel $\beta(t)$, realisieren. Diese sind in den Bildern 5.7 und 5.8 aufgezeigt.

Zu den durchgeführten Berechnungen ist anzumerken, dass die Ergebnisse für die zweite Periode mit umgekehrter Amplitudenfolge betragsmäßig die gleichen Ergebnisse liefern würde, lediglich das Vorzeichen wäre verändert, wie auch aus den dargestellten Kurven ersichtlich. Deshalb wird darauf verzichtet, dies näher aufzuführen.

Nachdem es möglich war, den Verlauf des erwarteten Lenkwinkels durch Integration einer bereits bekannten bzw. selbst gewählten Eingangsfunktion unter Berücksichtigung ermittelter Faktoren bei idealem Systemverhalten vorherzusagen, ist es auch möglich, den Verlauf der von der Messverstärkerschaltung des Radwinkelgebers übermittelten Spannung darzustellen. Dieser Spannungsverlauf war letztendlich die Größe, die bei den Versuchsdurchläufen aufgezeichnet

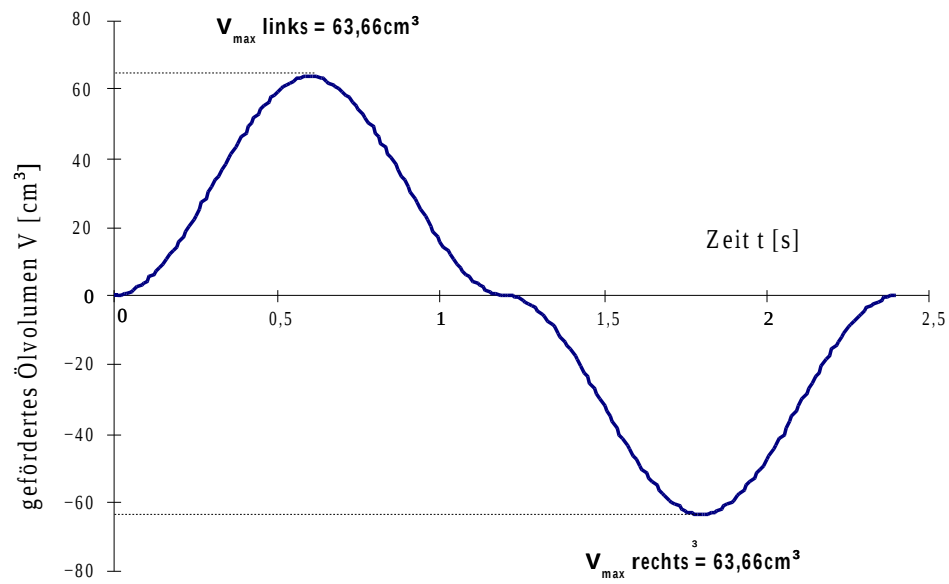


Abbildung 5.7: Funktionsverlauf des in den Gleichlaufzylinder geförderten Ölvolumens

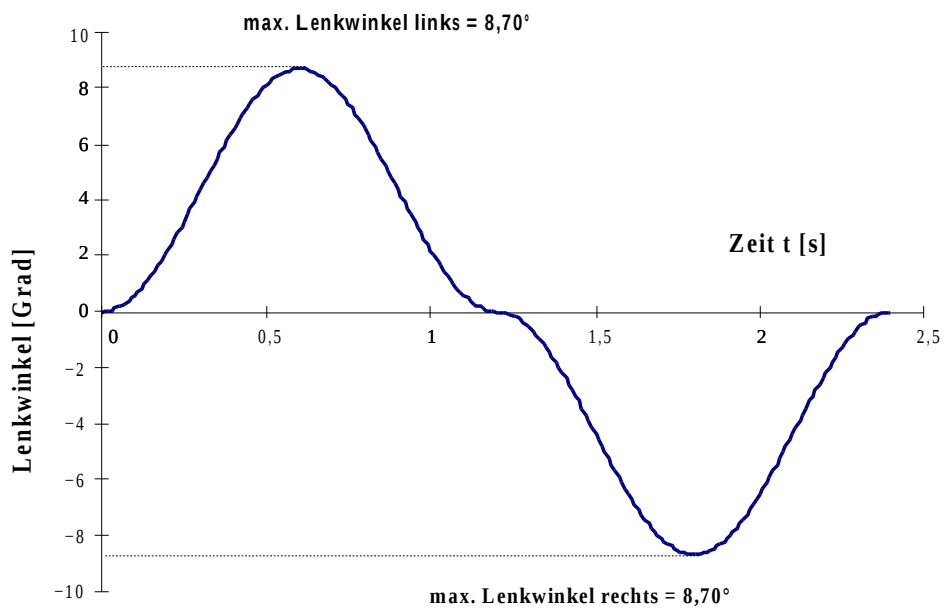


Abbildung 5.8: Funktionsverlauf des theoretischen Lenkwinkels

wurde und aus deren Verlauf Aussagen über bestimmte Systemeigenschaften gemacht werden konnten. Aus diesem Grunde war die rechnerische Bestimmung vor der Durchführung erster Versuche durchaus sinnvoll, um den theoretischen Spannungsverlauf bei einem idealen System als Vergleichsmöglichkeit für später gemessene Kurven vorliegen zu haben. In Bild 5.9 ist der theoretische Radwinkelgeberspannungsverlauf dargestellt, in Bild 5.10 sind sowohl das Eingangssignal $x(t)$, also der gewählte Sinus über zwei Perioden mit umgekehrter Amplitudenfolge, als auch die daraus resultierende Systemreaktion $y(t)$ für ideales Systemverhalten dargestellt. Diese Abbildung beschreibt im Prinzip die Aufgabenstellung bei der Systemidentifikation, nämlich ein Eingangssignal und ein Ausgangssignal, die über die zu ermittelnde Übertragungsfunktion miteinander zusammenhängen.

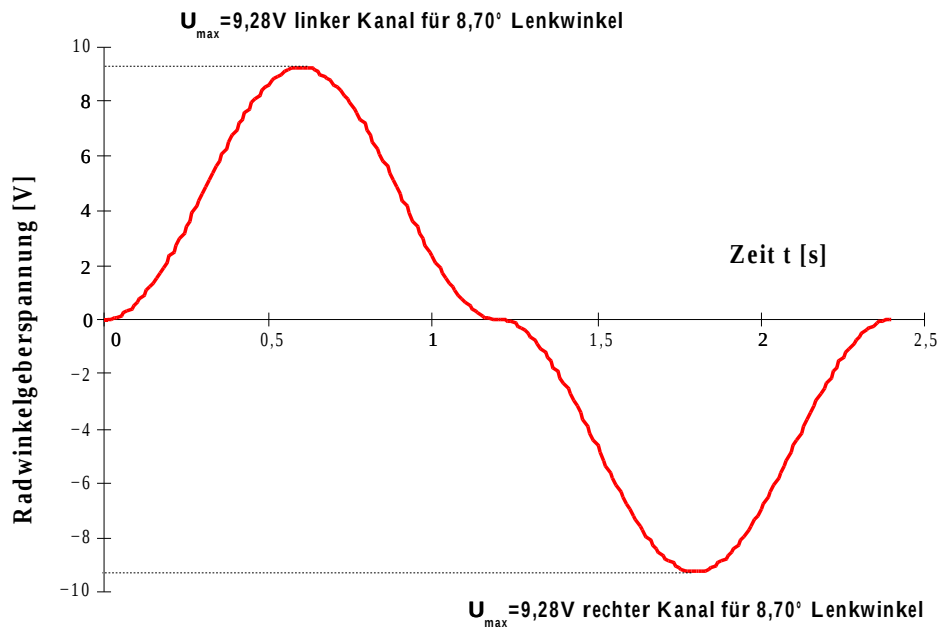


Abbildung 5.9: Funktionsverlauf der Radwinkelgeberspannung

5.1.2 Systemanalyse

5.1.2.1 Versuchsvorbereitung

Bevor überhaupt Testläufe oder ähnliches gestartet werden konnten, mussten die verschiedenen Komponenten der automatischen Lenkung in den Traktor integriert werden. Über den Einbau bzw. die Anordnung der einzelnen Zusatzteile wurde in Kapitel 4 ab Seite 19 unter Zuhilfenahme von Fotos bereits berichtet. Hier soll nun ausführlicher auf die Anbringung und Justierung des Radwinkelgebers inklusive der Messverstärkerschaltung eingegangen werden.

Der Radwinkelgeber stellt in seiner Funktion ein für die Systemidentifikation wesentliches Bauteil dar. Er sollte zu jedem Zeitpunkt verlässliche Informa-

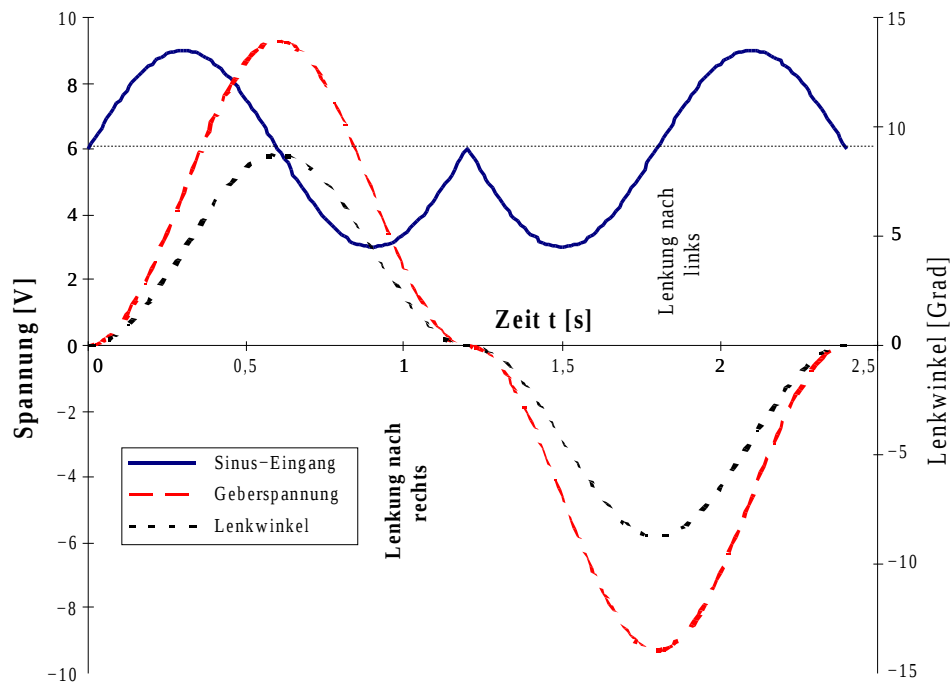


Abbildung 5.10: Theoretisches Ein- und Ausgangsverhalten des idealen Systems

tionen über den aktuellen Lenkwinkel geben. Während der Durchführung der Identifikation repräsentierte der Spannungsverlauf der Radwinkelgeberverstärkerschaltung die Systemreaktion auf das gewählte Eingangssignal. Aus diesem Grunde war eine exakte Justierung des Radwinkelgebers bezüglich sowohl des Nullpunktes als auch des Verstellbereiches von größter Bedeutung. Zur Durchführung dieser Justierung konnte auf im Versuchsträger vorhandene Komponenten zurückgegriffen werden, somit war die einfachste Lösung, um ständig Messwerte beider Ausgangskanäle zu erhalten und dadurch den Nullpunkt exakt einstellen zu können, ein Hilfsprogramm. Dieses liest über das A/D-Interface kontinuierlich beide Kanäle ein und gibt die ermittelten Werte am Bildschirm aus. Zunächst wurde unter Zuhilfenahme des eingebauten Gleichlaufzylinders die Lenkung exakt gerade gestellt. Mit einem handelsüblichen Tiefenmaß war dabei die Mittelstellung des Kolbens zu finden. Die Einstellung des Radwinkelgebers in dieser Nullstellung wurde so vorgenommen, dass an beiden Ausgangskanälen 0 Volt anlagen. Damit war der Nullpunkt justiert. Aus dem errechneten Hub/Lenkwinkelverhältnis (235 mm Hub des Gleichlaufzylinders entsprechen 83,2 Grad Lenkwinkel) lässt sich ableiten, dass 28,25 mm Hub genau den erwünschten 10 Grad Lenkwinkel entsprechen. Diese 28,25 mm wurden am Gleichlaufzylinder durch Lenkraddrehung eingestellt und dann die Länge des Anlenkhebels des Radwinkelgebers so eingestellt, dass der Ausgabewert genau 10 Volt betrug. Eine Kontrolle der Einstellung durch Einschlag in die andere Richtung ergab das selbe Resultat. Damit waren die exakte Umsetzung von 10 Grad Lenkeinschlag in 8 Grad Geberdrehung und somit die erwünschte Ausgangskennlinie der Messverstärkerschaltung mit 1 Volt pro Grad erreicht.

Weiterhin wurde der Versuchsträger vor den Untersuchungen mit einem Reifenpacker im Frontanbau ausgestattet. Mit diesem wurden mittels der Fronthydraulik des Traktors die Vorderräder entlastet, so dass die Systemreaktion ohne Abhängigkeit von der bodenspezifischen Reibung zwischen Reifen und Untergrund ermittelt werden konnte. Bild 5.11 zeigt den Traktor mit dem Frontpacker.



Abbildung 5.11: Versuchsträger mit Frontpacker

Bei der Ermittlung der Übertragungsfunktion mit voll belasteter Lenkachse wären nicht nur Systemreaktionen, sondern auch Einflüsse durch Reibkräfte zwischen Rädern und Untergrund sowie Torsionskräfte der Stollen des Reifenprofils beinhaltet. Da diese Kräfte aber ständig wechselnden Einflussfaktoren wie Fahrgeschwindigkeit, Reifeninnendruck, Gewichtsbelastung der Räder oder auch Beschaffenheit des Untergrundes unterworfen und somit nicht reproduzierbar sind, erschien es sinnvoller, sie auszuschließen. Damit ist gewährleistet, dass die Übertragungsfunktion das exakte Systemverhalten der installierten Hydraulik beschreibt. Durch den Ausschluss dieser externen Faktoren wird bei der Untersuchung die Umsetzung zwischen Rädern und Boden ohne Zeitverzögerung und ohne Proportionalitätsfehler, also 1:1, impliziert. Dies ist in der Praxis allerdings nicht der Fall. Das Lenkungshydrauliksystem des Versuchsträgers wurde mit Hilfe der bisher erläuterten Untersuchungen ausreichend beschrieben, die Umsetzung der eingeleiteten Lenkbewegungen in Fahrzeugbewegungen ist abhängig von der Untergrundbeschaffenheit und wurde hier nicht weiter untersucht.

5.1.2.2 Versuchsdurchführung

Ziel der hier beschriebenen Versuche war, wie bereits erwähnt, aus einem definierten Eingangssignal $x(t)$ und dem daraus resultierenden und dokumentier-

ten Ausgangssignal $y(t)$ die Übertragungsfunktion des Systems zu bestimmen. Hierzu mussten die Verläufe der Eingangs- und Ausgangssignale der einzelnen Versuche mit Hilfe eines in den Versuchsaufbau integrierten Data-Loggers aufgezeichnet werden. Mit drei der zur Verfügung stehenden vier Messkanäle wurden das Eingangssignal und die beiden Ausgänge der Messverstärkerschaltung des Radwinkelgebers für Lenkeinschlag links und für Lenkeinschlag rechts mit einer Abtastrate von $100\frac{1}{s}$ aufgezeichnet. Die jeweiligen Messdateien lassen sich mit Hilfe eines Übertragungs- und Konvertierungsprogramms über die parallele Schnittstelle auf einen PC kopieren und stehen dort zur Auswertung zur Verfügung. Bild 5.12 zeigt den verwendeten Data-Logger.



Abbildung 5.12: Pison Data-Logger zur Versuchsaufzeichnung

Als Eingangsfunktion dient eine Sinusfunktion, deren Amplitude so gestaltet war, dass damit der maximale Ventilschieberweg und der maximale Ölvolumenstrom in beide Richtungen ausgeschöpft wurde. Über den Verlauf des gewählten Signals und den theoretischen Hintergrund hierzu wurde in Kapitel 5.1.1 ab Seite 39 bereits berichtet. Als Ergänzung sei hier noch erwähnt, dass zur Durchführung der Systemidentifikation zwei verschiedene Sinusfunktionen programmiert wurden. Die erste beginnt mit einer steigenden Flanke, lenkt also zuerst nach links, die zweite beginnt mit einer fallenden Flanke, wodurch am Anfang ein Rechtseinschlag erfolgt. Der Grund hierfür war die erforderliche Überprüfung des Symmetrieverhaltens des Hydrauliksystems, um daraus eventuell entstehende systematische Fehler ausschließen zu können. Weiterhin wurden noch zwei Eingangssprünge, ausgehend vom Nullpunkt des Hydraulikventils, 6 Volt, um jeweils 1,25 Volt auf 7,25 Volt bzw. 4,75 Volt programmiert und ebenfalls zur Versuchsdurchführung genutzt. Die ermittelten Daten und Signalverläufe dienten zur Gegenkontrolle der mit Hilfe der Sinusfunktionen errechneten Sprungantworten. Diese Programme wurden bei der Versuchsdurchführung am PC gestar-

tet und die generierten Spannungswerte über das D/A-Interface sowohl an den Data-Logger zur Aufzeichnung als auch an das Lenkungsproportionalventil zur Systemerregung weitergegeben. Der Stichprobenumfang der Messungen betrug hier $n=20$.

An den Verläufen der einzelnen Spannungen von Eingangssignal, Radwinkelgeber links und Radwinkelgeber rechts sowie dem Verlauf des errechneten seitlichen Versatzes und damit der Reaktion des Gesamtsystems Traktor, bei der als Fahrgeschwindigkeit der Zielwert von 25 km/h zugrunde gelegt wurde, waren die zu erwartenden Unzulänglichkeiten im Übertragungsverhalten des Hydrauliksystems zu erkennen. Es war aus diesen Werten aber auch zu erkennen, dass sich das System in beide Richtungen, also nach links und rechts, gleich verhält. Unabhängig vom verwendeten Eingangssignal waren die auftretenden Fehler aufgrund des nicht idealen Systems identisch, womit die Forderung nach Symmetrie erfüllt ist.

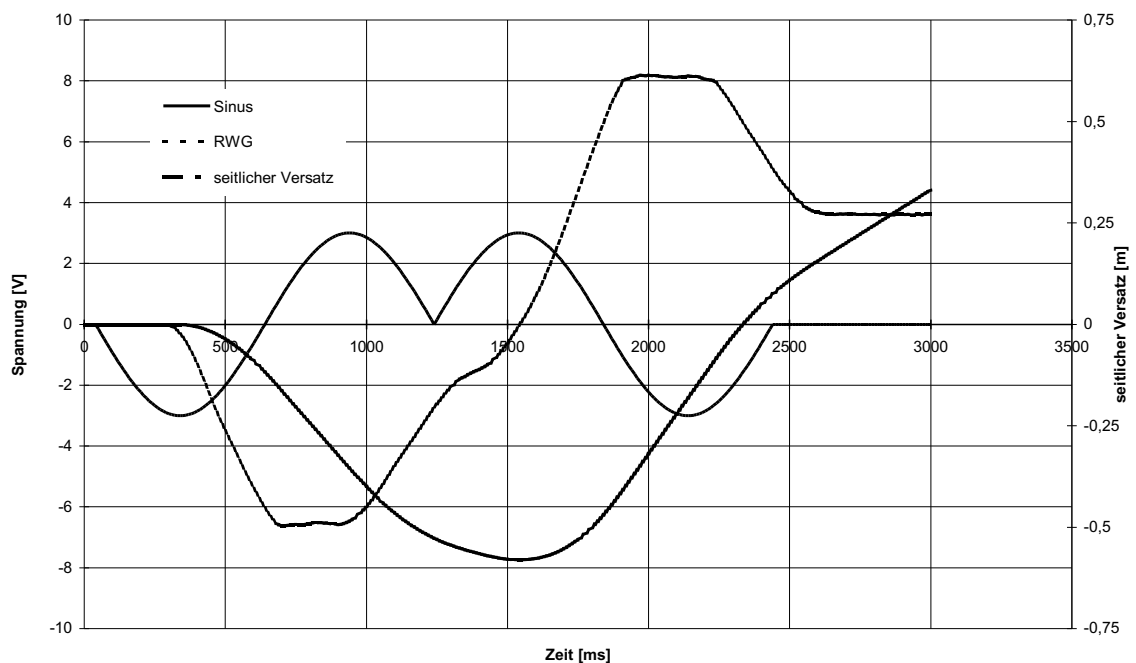


Abbildung 5.13: Gemittelte Messdateien Sinus rechts-links

Exemplarisch sind in den Bildern 5.13 bis 5.16 die gemittelten Signalverläufe der jeweiligen Messreihen aufgezeigt. Diese Daten entstanden durch Bildung der arithmetischen Mittel der einzelnen Stichproben und dienten zur Berechnung der Übertragungsfunktion.

5.1.2.3 Auswertung

Die Auswertung erfolgte mit Hilfe des Programmpaketes WinFact 96 unter Verwendung der aufgezeichneten Messdateien. Das Programm "IDA-Identifikation linearer Systeme" ermittelte anhand der Verläufe von Ein- und Ausgangs-

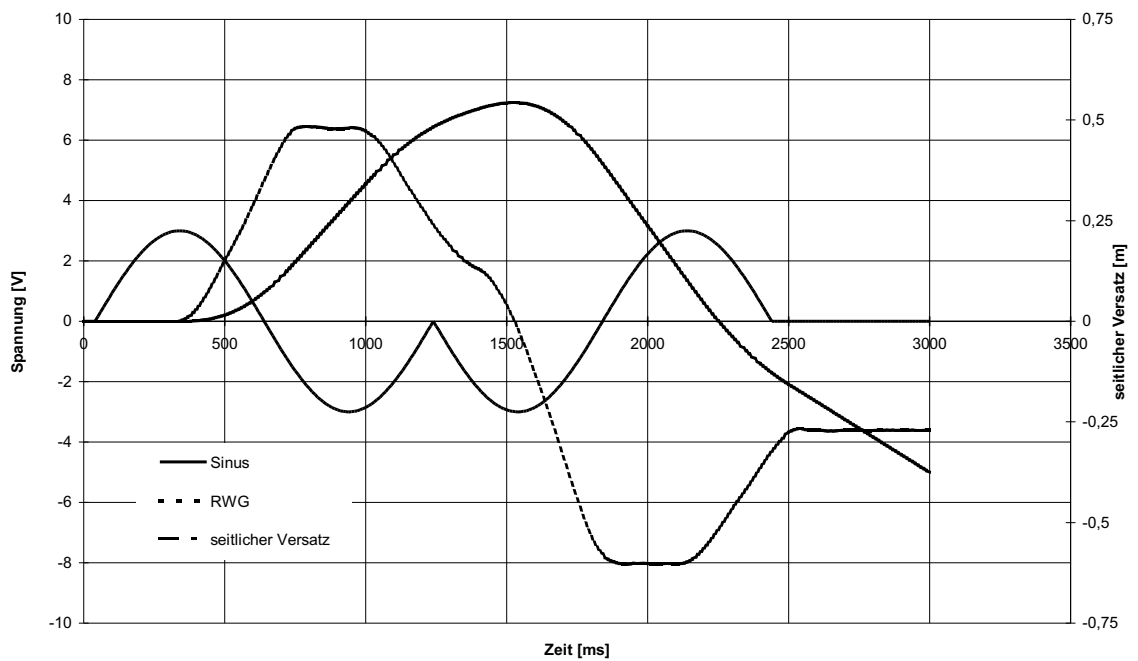


Abbildung 5.14: Gemittelte Messdateien Sinus links-rechts

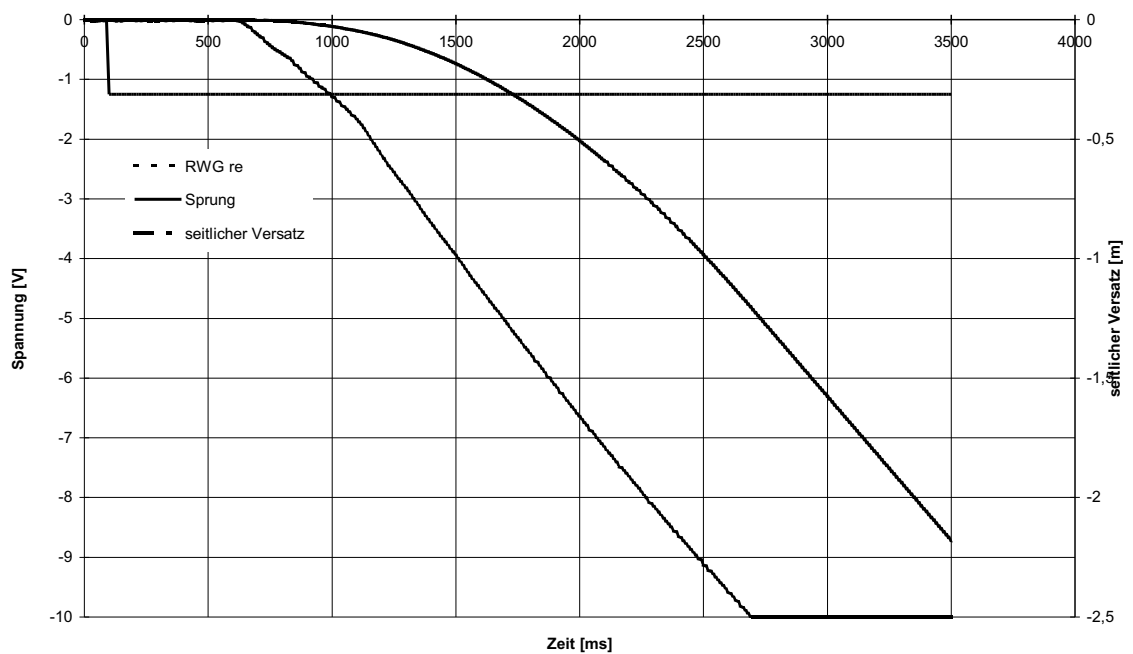


Abbildung 5.15: Gemittelte Messdateien Sprung rechts

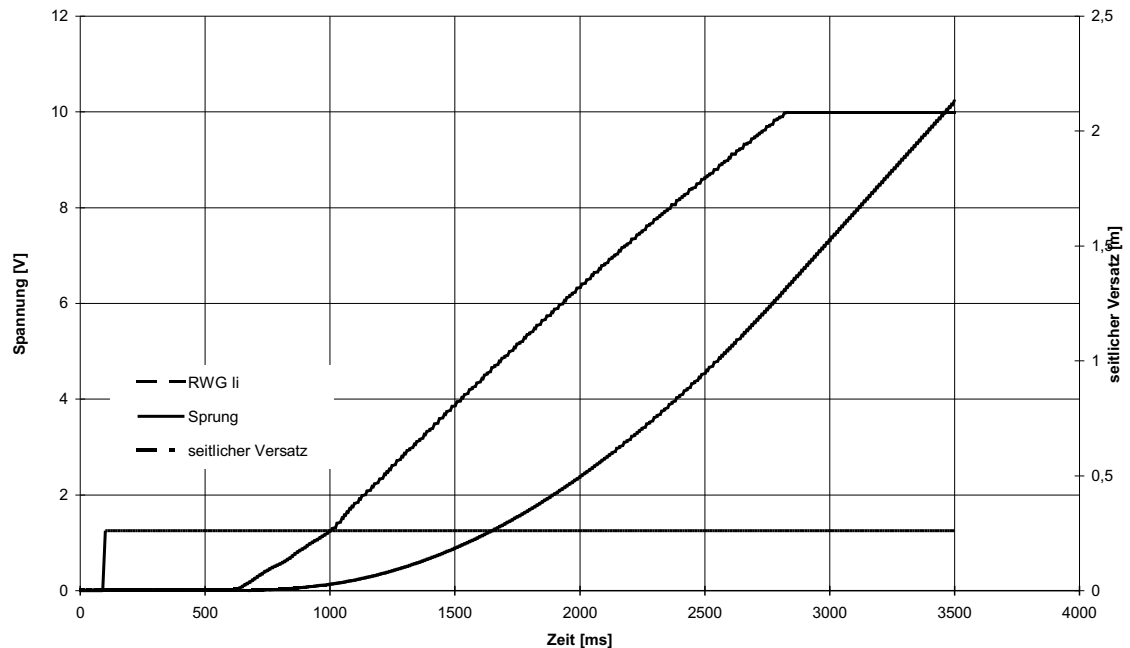


Abbildung 5.16: Gemittelte Messdateien Sprung links

signal die Übertragungsfunktion. Bei dieser Ermittlung werden die Laplace-Transformierten von $y(t)$ und $x(t)$ ins Verhältnis gesetzt, so dass gilt:

$$L\{x(t)\} \cdot G(s) = L\{y(t)\}$$

$$\Rightarrow X(s) \cdot G(s) = Y(s)$$

mit:

$L\{x(t)\}, X(s)$ = Laplacetransformierte des Eingangssignals

$L\{y(t)\}, Y(s)$ = Laplacetransformierte des Ausgangssignals

$G(s)$ = Übertragungsfunktion

Vor der Interpretation der Ergebnisse dieser von der verwendeten Software durchgeführten Berechnung sind einige Aussagen zum erwarteten Resultat zu treffen. Bei dem hier untersuchten Lenksystem handelt es sich um eine Regelstrecke mit integrierendem, kurz I-Verhalten. Charakteristisch für solche Regelstrecken ist das fehlende Ausgleichsverhalten, d.h. es wird nach erfolgter Ansteuerung selbständig kein neuer Beharrungswert erreicht. Durch Signallaufzeiten, Ansprechzeiten des Magnetventils und vor allem aufgrund der speziellen Eigenschaften des vorliegenden Load-Sensing-Hydrauliksystems, z.B. Nachlaufzeit der Hydraulikpumpe, ist außerdem eine Totzeit zu erwarten. Deshalb erscheint ein Systemverhalten der Art $I-T_t$ als wahrscheinlich. Ein solches System hätte

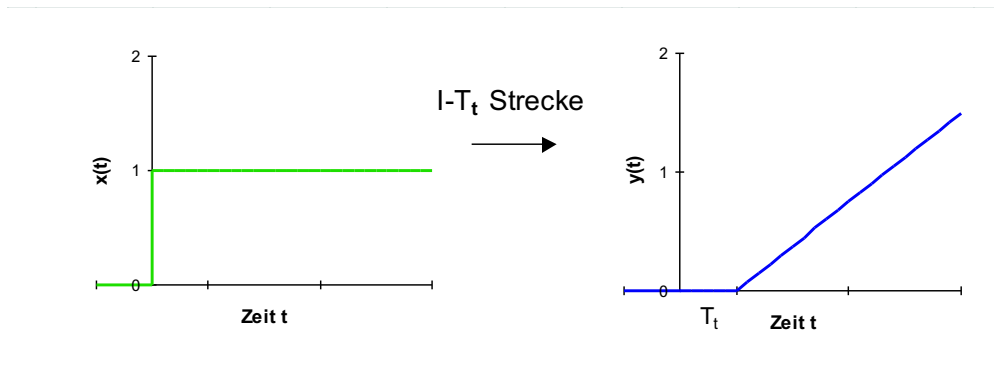


Abbildung 5.17: Verhalten einer I- T_t Regelstrecke

eine den Darstellungen in Bild 5.17 qualitativ entsprechende Sprungantwort zur Folge gehabt.

In diesem, dem für das vorliegende System einfachsten Fall, hätte sich eine Übertragungsfunktion ergeben, die folgende allgemeine Form aufweist (die Parameter K_I und T_t zu berechnen wäre Aufgabe des Programms gewesen):

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_I}{s} \cdot e^{-sT_t}$$

Vergleicht man die Darstellung dieser Sprungantwort mit den Sprungantworten der durchgeführten Messungen, so lässt sich feststellen, dass diese Systembeschreibung eines I- T_t -Verhaltens den tatsächlichen Verhältnissen nicht genügt. Den Ergebnissen der Messungen entsprechend lässt sich vorab vermuten, dass eine für dieses System korrekte Übertragungsfunktion eine Ausgleichszeit beinhaltet. Zu vermuten ist dies aufgrund des leichten Knicks im Verlauf des Ausgangssignals bei Aufgabe des Eingangssprungs für den Fall der Lenkbewegung nach links wie nach rechts. Mit einem Ausgleichsverhalten ist diese Systemreaktion zwar nicht exakt zu approximieren, es entspricht aber eher der Realität als das I- T_t -Verhalten. In diesem Falle würde es sich um ein I- T_1 - T_t -System handeln. Ausgleichzeiten höherer Ordnung konnten ausgeschlossen werden, da das Systemverhalten keinen Einschwingvorgang aufweist. Die Reaktion, die ein System mit einem I- T_1 - T_t -Verhalten auf einen Sprung am Eingang erzeugt ist im Bild 5.18 dargestellt und entspricht annähernd der gemessenen Sprungantwort.

Die Übertragungsfunktion für eine solche Regelstrecke würde allgemein lauten (mit $b_2 = T_1$):

$$G_s(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_I}{s \cdot (b_1 + b_2 s)} \cdot e^{-sT_t}$$

$$G_s(s) = \frac{K_I}{b_1 s + b_2 s^2} \cdot e^{-sT_t}$$

Die einzelnen Parameter dieser allgemeinen Übertragungsfunktion waren durch die Anwendung der Software zu ermitteln. Graphisch dargestellt ergibt

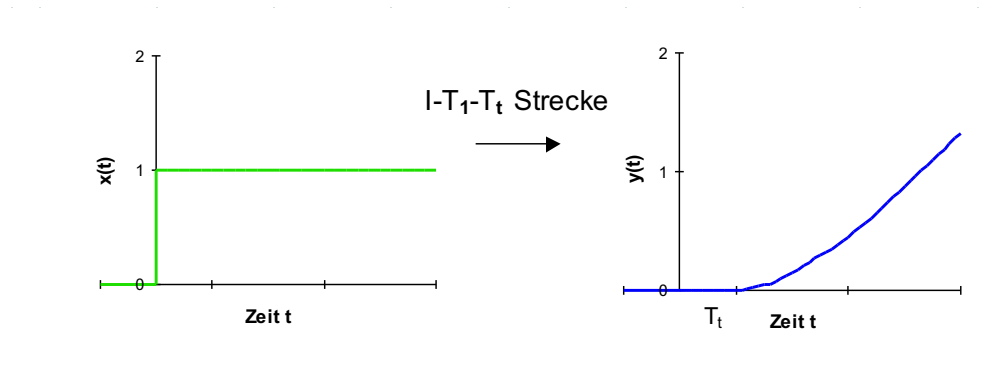


Abbildung 5.18: Verhalten einer I-T₁-T_t Regelstrecke

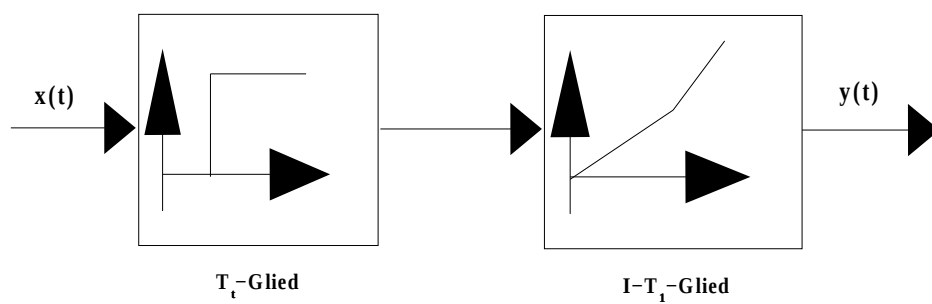


Abbildung 5.19: Elementarglieder der untersuchten Regelstrecke

sich für die untersuchte Regelstrecke die in Bild 5.19 aufgezeigte Zusammensetzung einzelner Elementarglieder.

Die Signalverläufe, welche sich aus den gemittelten Messdateien ergaben, dienten letztendlich dem Programm zur Berechnung. Aus dem Verhältnis der Laplace-Transformierten dieser Ein- und Ausgangssignale ergaben sich für die gesuchten Koeffizienten der zu ermittelnden Übertragungsfunktion folgende Werte:

$$K_I = 0,715 \frac{1}{s}$$

$$b_1 = -0,14$$

$$b_2 = T_1 = 1,835$$

$$T_t = 0,215$$

Damit:

$$G_s(s) = \frac{0,715 \frac{1}{s}}{-0,14s + 1,835s^2} \cdot e^{-0,215s}$$

Die Bestimmung der Übertragungsfunktion ergab somit das vorher vermutete I-T₁-T_t-Verhalten. Bei der Ermittlung wurden dabei alle vier durchgeführten Versuchsreihen mit den jeweils unterschiedlichen Eingangssignalen berücksichtigt. Die graphische Darstellung der Eigenschaften der ermittelten Übertragungsfunktion, die mit dem Programm "LISA-Analyse linearer Systeme" erzeugt wurde, ist in Bild 5.20 dargestellt. Es zeigt die Sprungantwort, das Bode-Diagramm, das Nyquist-Diagramm (Ortskurve) und die Wurzelortskurve eines Systems mit den ermittelten Eigenschaften. Aus der abgebildeten Sprungantwort lässt sich die Qualität der Approximation der ermittelten Übertragungsfunktion erkennen. Der Verlauf der berechneten Sprungantwort sollte den Verlauf der experimentell ermittelten Sprungantwort möglichst exakt wiedergeben. Das Bode-Diagramm stellt den Amplituden- und den Phasengang des untersuchten Systems dar. Aus dem Amplitudengang ist das Verhältnis der Signalamplituden zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen bei gleicher Frequenz ersichtlich. Der Phasengang zeigt die Phasenverschiebung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal. Beim Nyquist-Diagramm (Ortskurve) wird der Frequenzgang $F(j\omega)$ als Kurve in der komplexen Ebene in Abhängigkeit des Parameters ω dargestellt. Interpretationen dieser beiden Darstellungen, die dem Ergebnis der durchgeführten Untersuchung dienlich wären, sind nicht ohne größeren Aufwand möglich.

Aus der letzten Darstellung, der Wurzelortskurve, lässt sich jedoch normalerweise direkt eine Aussage über die Stabilität des untersuchten Systems ableiten. Da bisher aber nur eine Regelstrecke und kein geschlossener Regelkreis vorliegt, ist die Aussage, die aufgrund dieser Abbildung getroffen werden kann, nicht

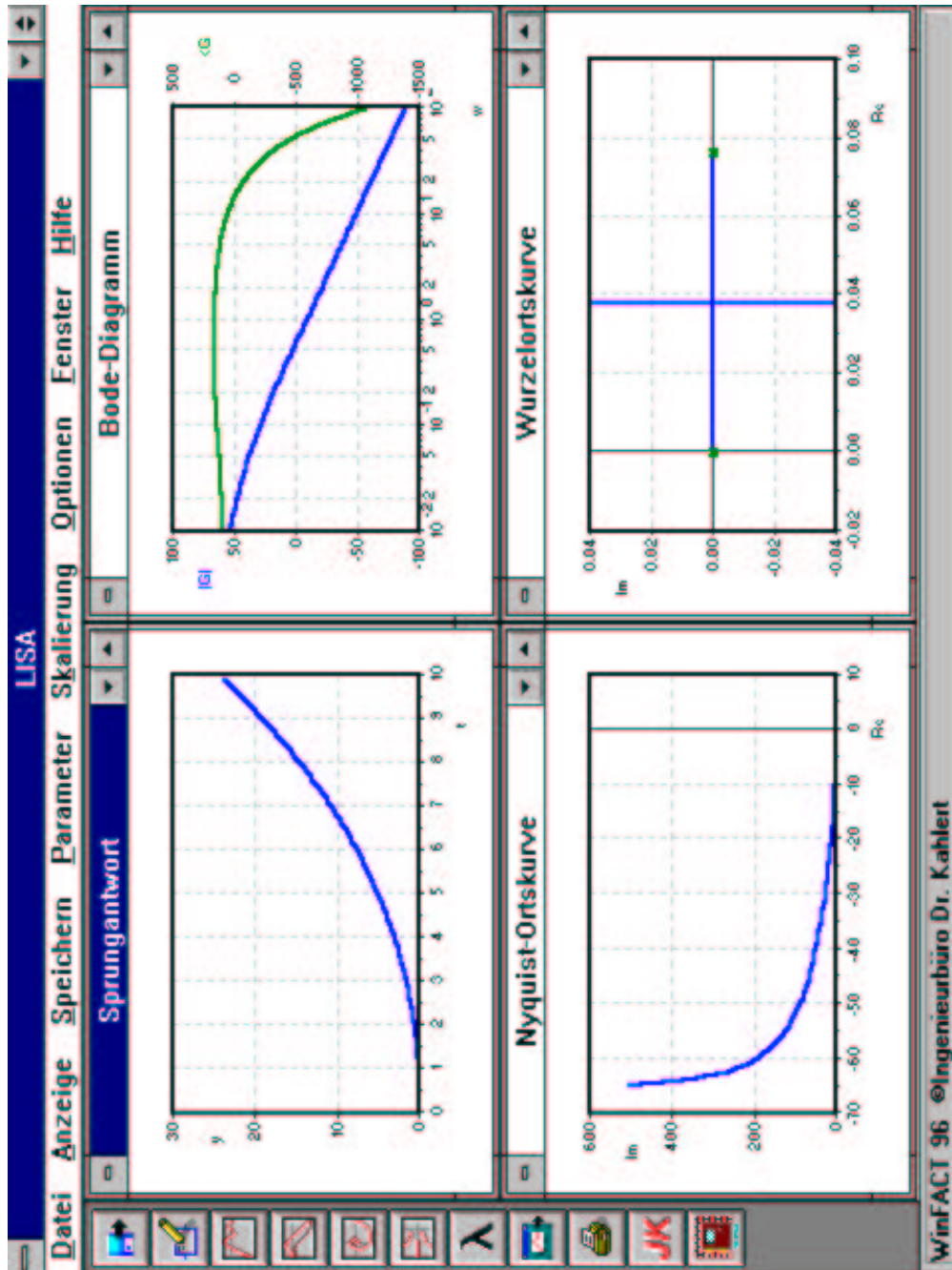


Abbildung 5.20: Sprungantwort, Bode-Diagramm, Nyquist-Ortskurve und Wurzelortskurve des approximierten Modellsystems; „LISA-lineare Systemanalyse“

maßgebend. Die verwendete Software nimmt, um den Mangel des unvollständigen Regelkreises zu beseitigen, zur Berechnung selbständig einen P-Regler als Ergänzung der Regelstrecke und führt mit diesem die erforderlichen Berechnungen zur Erstellung der Wurzelortskurve durch. Da dieser Regler in seinen Eigenschaften dem noch zu synthetisierenden kaum entspricht, ist die Aussagekraft dieses Ergebnisses eher marginal. An dieser Stelle sei aber erwähnt, dass ein System dann als stabil bezeichnet werden kann, wenn sich die Polstellen des Graphen im negativen reellen Bereich, also links der Imaginärachse befinden. Mit dem vom Programm eingesetzten P-Regler ist, wie aus der Abbildung 5.20 ersichtlich, diese Forderung nicht erfüllt.

WinFact96 bietet mit dem Programm "BORIS-Blockorientierte Simulation" die Möglichkeit, den Ablauf bei der Bestimmung der Übertragungsfunktion umzukehren und mit dem bekannten Eingangssignal und der ermittelten Übertragungsfunktion das vorher zur Berechnung verwendete Ausgangssignal zu reproduzieren. Hierzu muss ein Blockschaltbild mit einem Eingangsblock, einem Übertragungsblock und einem Ausgangsblock erstellt werden. Der Eingangsblock gibt das zur Systemidentifikation verwendete Eingangssignal wieder, dient also als Signalgenerator. Der Übertragungsblock beinhaltet die ermittelte Systemübertragungsfunktion, der Ausgangsblock gibt im Oszillographmodus das Ausgangssignal wieder, beeinflusst es selbst aber nicht. Er übernimmt lediglich die Funktion eines Mess- und Anzeigegeäts. Wenn bei der Bestimmung von $G(s)$ keine gravierenden Vereinfachungen gemacht worden sind, muss das Ergebnis der Simulation mit der im Versuch ermittelten AusgangsgröÙe übereinstimmen. Zur Simulation wurden die beiden Sprungfunktionen der Versuchsreihe zur Systemidentifikation gewählt. Die Signalverläufe aus der Simulation stellten eine gute Annäherung an die gemessenen dar, womit die ermittelte Übertragungsfunktion als gute Wiedergabe des tatsächlichen Verhaltens der Regelstrecke interpretiert werden konnte.

5.1.3 Synthese des Lenkwinkelreglers

Das Programm "RESY-Entwurf linearer Regelkreise" der WinFact96 Software ermöglicht es, bei einer bekannten Übertragungsfunktion der identifizierten Regelstrecke die zugehörigen Regelparameter für ein stabil geregeltes System zu ermitteln. Aus der Zeitdarstellung dieses Programms wird ersichtlich, wie der geschlossene Regelkreis mit den gewählten Regelparametern auf eine sprungförmige RegelgröÙenänderung von 0 auf 1 reagiert. Aus dem Zeitverlauf lassen sich vom Programm Ausregelzeit, Überswingweite, bleibende Regeldifferenz sowie maximaler StellgröÙenbedarf ermitteln. Aus der Frequenzdarstellung stehen bei Bedarf noch weitere Kennwerte sowohl für den offenen als auch für den geschlossenen Regelkreis wie beispielsweise Durchtrittsfrequenz, Phasenreserve, Amplitudenrand, Bandbreite oder auch Resonanzüberhöhung zur Verfügung.

Von dem verwendeten Programm wurde für die untersuchte Regelstrecke als passende Reglerübertragungsfunktion folgender Ausdruck ermittelt:

$$G_R(s) = K_P \cdot \frac{s(a_1 + a_2s)}{1 + s(b_1 + b_2s)}$$

$$G_R(s) = K_P \cdot \frac{a_1 s + a_2 s^2}{1 + b_1 s + b_2 s^2}$$

Werte:

$$K_P = 4$$

$$a_1 = 1$$

$$a_2 = 0,14$$

$$b_1 = 0,3$$

$$b_2 = 0,02$$

Damit:

$$G_R(s) = 4 \cdot \frac{s + 0,14s^2}{1 + 0,3s + 0,02s^2}$$

Eine abschließende Stabilitätsuntersuchung nach dem WOK-Verfahren ist schließlich noch in Bild 5.21 aufgeführt. Vergleicht man die dort dargestellte Wurzelortskurve des geschlossenen Regelkreises mit der in Bild 5.20 dargestellten des offenen Kreises, so ist die Wirkung der ermittelten Reglerübertragungsfunktion ersichtlich. Im Gegensatz zur ersten Darstellung befindet nun keine Polstelle mehr im positiven reellen Bereich.

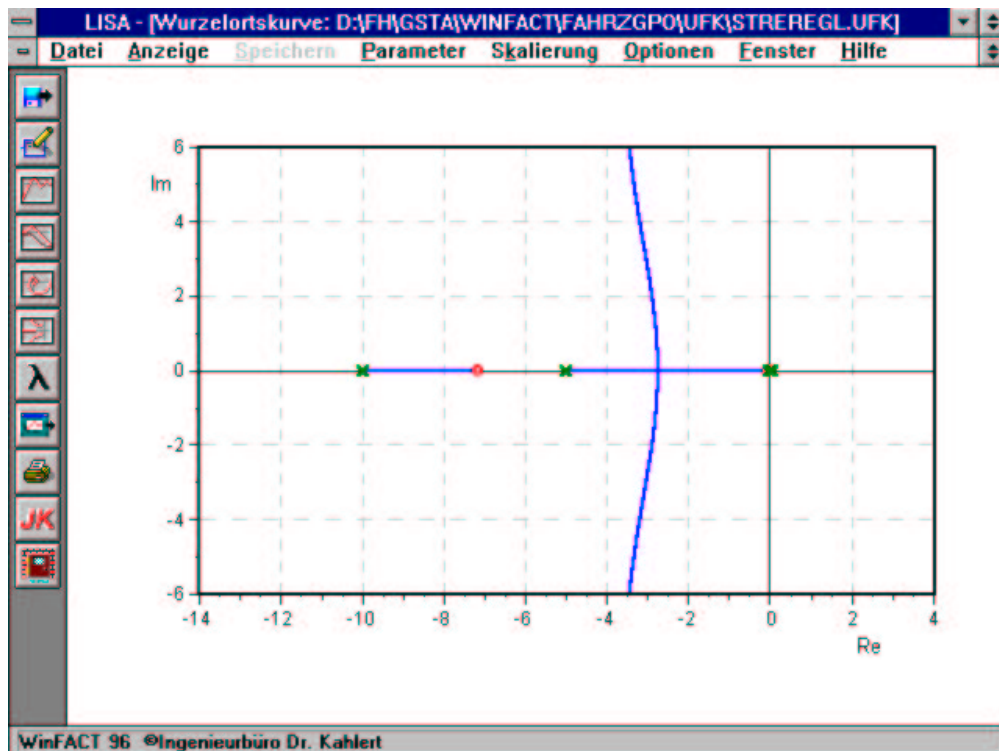


Abbildung 5.21: Wurzelortskurve der Gesamtübertragungsfunktion $G_S(s) \cdot G_R(s)$; „LISA-Lineare Systemanalyse“

5.2 Softwareentwicklung Positionsregler

5.2.1 Grundlagen digitaler Bildverarbeitung

Unter dem Begriff digitale Bildverarbeitung versteht man die Erfassung und Auswertung von Bildern mit Hilfe eines speziellen Systems. Dieses kann, wie in vorliegender Arbeit, aus einem Rechner, einer Bildverarbeitungskarte (framegrabber) und einer Kamera bestehen. Der prinzipielle Aufbau eines solchen Systems ist in Bild 5.22 vereinfacht dargestellt. Das Bild wird von der Kamera eingelesen und in Form eines analogen Signals an den auf der Bildverarbeitungskarte lokalisierten A/D-Wandler übergeben. Dieser wandelt die anliegende Spannung in diskrete Grauwerte für die einzelnen Bildpunkte (Pixel) um. So wird das Bild in ein Raster von Zeilen und Spalten aufgeteilt und jedem entstandenen Bildpunkt ein Wert zugewiesen. Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Bildpunkte ist, wie die Anzahl der Helligkeits- oder Graustufen auch, variabel und von der verwendeten Bildverarbeitungshardware abhängig.

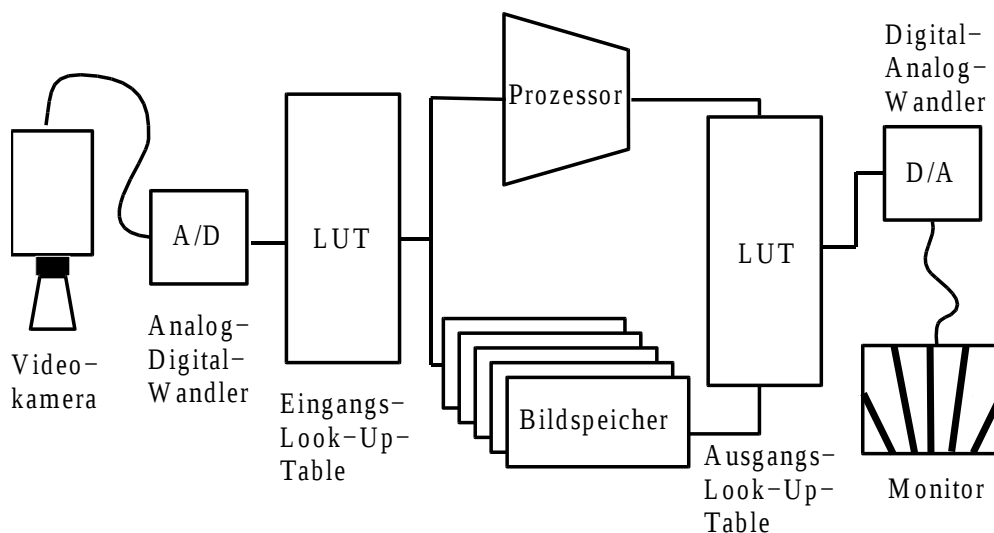


Abbildung 5.22: Aufbau eines Bildverarbeitungssystems (nach Georg 1992)

Die Bildverarbeitung basiert auf der Erfassung eines Bildes bzw. einer Situation mit einer Kamera als erstem Schritt. Die Kamera hat die Aufgabe, ein von einer gegebenen Umgebung durch Reflexion der elektromagnetischen Strahlung in einem bestimmten Spektralbereich erzeugtes Bild aufzuzeichnen. Dieser ist im Normalfall, wenn man der menschlichen Wahrnehmung ähnliche Bilder erzeugen will, der sichtbare Bereich. Er kann sich aber auch über das ganze im Bild 5.23 gezeigte Spektrum erstrecken.

Zur Bildaufnahme verwendet man heutzutage im allgemeinen CCD-Kameras, da diese klein, robust und preiswert sind. Die zentrale Einheit einer

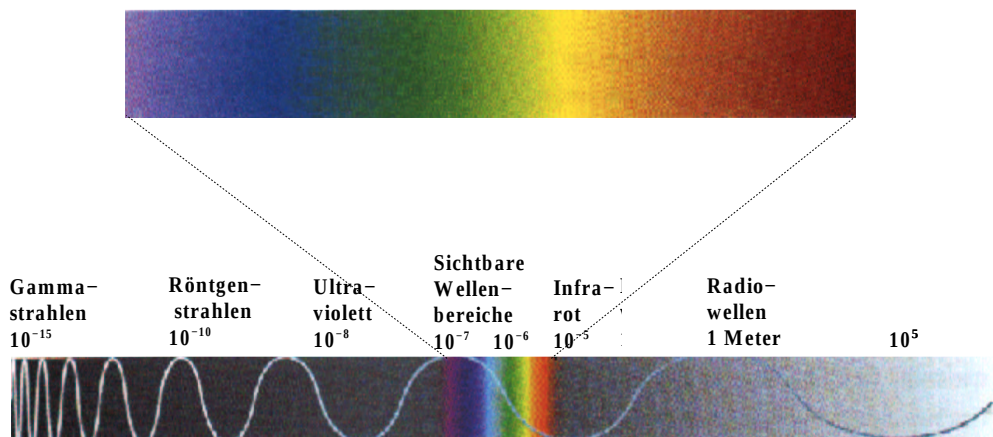


Abbildung 5.23: Das Spektrum elektromagnetischer Strahlung (Hawkings 1997)

solchen Kamera stellt der Bildwandlerchip dar. Bei Schwarzweiß-Kameras wird ein solcher Chip benötigt, er weist Empfindlichkeit über die gesamte Bandbreite des sichtbaren Lichts (ca. 400-700 nm) auf. Auch im nahen Infrarotbereich (ca. 700-2500 nm) sind solche CCD-Chips noch empfindlich. Dieser wird aber normalerweise durch ein Filter (IR-Blocking) ausgegrenzt. Wie in Kapitel 5.2.2 ab Seite 64 noch näher beschrieben wird, bringt die Verwendung von Schwarzweiß-Kameras in vorliegender Arbeit ähnlichen Anwendungsfällen Probleme mit sich. Vegetation lässt sich über den gesamten Empfindlichkeitsbereich eines CCD-Chips nicht ohne weiteres vom Hintergrund Boden trennen. Deshalb ist eine Farbbildverarbeitung und damit die Aufteilung des Lichts in die drei Teilspektren Rot, Grün und Blau notwendig. Eine RGB-Kamera benötigt für jede Farbe einen Bildwandlerchip.

Eine kostengünstigere Lösung für eine Farbkamera stellt die Einchip-RGB-Kamera dar, bei der ein Farbfilter die Sensorelemente in drei Gruppen aufteilt. Bei der in diesem Projekt verwendeten Kamera handelt es sich um eine 1-Chip RGB Kamera der Firma Pulnix mit der Bezeichnung TMC 50 RGB. Dieser CCD Chip besteht aus MOS¹-Kondensatoren, die in einem rechteckigen Feld angeordnet sind. Eintreffendes Licht (Photonen) erzeugt Ladungsverschiebungen in den Kondensatoren des Interline-Transfer-Chips, diese werden auf ein vertikales Shift-Register übertragen. Die vertikalen Shift-Register liegen seitlich neben den Kondensatoren und werden zum Auslesezeitpunkt mit einer Spannung beaufschlagt, worauf ein Ladungsübergang stattfindet. Die vertikalen Shift-Register münden in ein horizontales Shift-Register am oberen Ende des Kondensatoren-

¹MOS = Metall Oxid Silicon

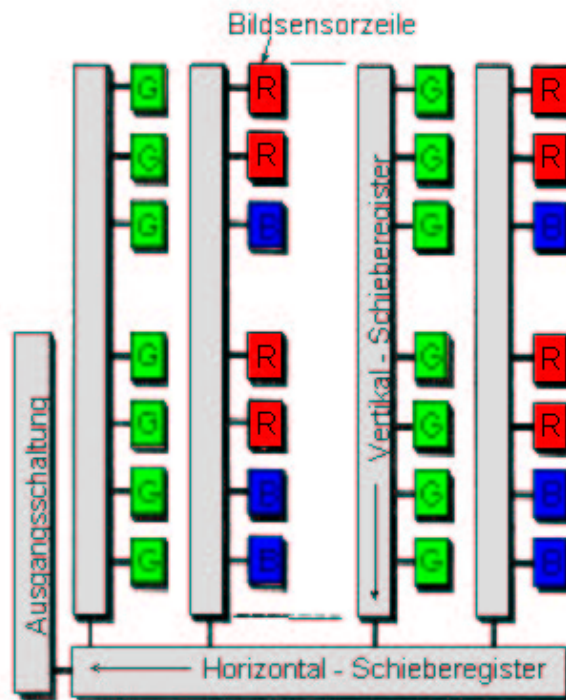


Abbildung 5.24: CCD-Chip

feldes. Nach dem Auslesen der Bildinformation in die vertikalen Register erfolgt eine pixelweise Übertragung der Inhalte dieser Register nach oben ins horizontale Register, und von dort zeilenweise in den Ausgangsverstärker. Bild 5.24 zeigt den Aufbau des CCD-Chips.

Der zweite Schritt besteht, mit Ausnahme von Systemen mit digitaler Kamera, in der Erzeugung eines analogen Signals. Der Ausgangsverstärker einer CCD-Flächenkamera erzeugt ein Standard-Videosignal oder bei Farbkameras optional ein RGB-Signal. In Abhängigkeit von der Anzahl eingetroffener Photonen auf dem Sensor eines Bildpunktes wird als Ausgang eine Spannung erzeugt. Wie in Bild 5.25 verdeutlicht, ergibt die Aneinanderreihung der Spannungen für die einzelnen Bildpunkte ein analoges Signal, welches, verknüpft mit den zusätzlichen Informationen wie horizontaler und vertikaler Synchronisation, ein Videosignal ergibt. Dieses analoge Signal wird als Eingangsgröße für ein Bildverarbeitungssystem verwendet und, im dritten Schritt, durch A/D-Wandlung wiederum in einzelne diskrete Bildpunkte zerlegt. Hierzu wird die anliegende Spannung zu einer Zeit t_0 gemessen und entsprechend ihrer Höhe wird dem Bildpunkt 1 ein Grauwert zugewiesen. Nach einer gewissen, von der Abtastfrequenz abhängigen Zeit $t_0 + \Delta t$ wird wieder gemessen und dem nächsten Bildpunkt 2 ein Grauwert zugeordnet. So wird verfahren, bis nach $t_0 + x \cdot \Delta t = 1/(z \cdot y)$ Sekunden der horizontale Synchronisationspuls das Ende einer Bildzeile anzeigt (x =horizontale Auflösung, y =vertikale Auflösung, z =Anzahl der Bilder pro Sekunde, in Europa 25). Sind alle Bildzeilen digitalisiert, so zeigt der vertikale Synchronisationspuls das Ende des Bildes an und ein neues Bild wird begonnen. So entsteht ein zwei-

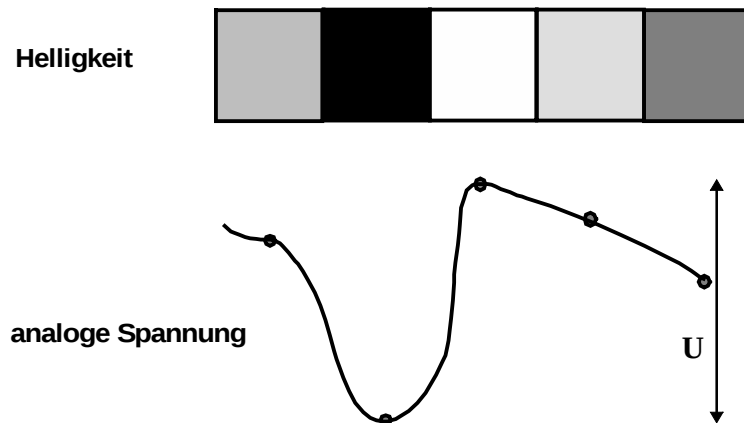


Abbildung 5.25: Erzeugung des analogen Signals

dimensionales Raster aus den Grauwerten der einzelnen Bildpunkte im Speicher der Bildverarbeitungskarte oder, optional, im Speicher des Host-Rechners. Die Anzahl der Bildpunkte auf der Bildverarbeitungskarte hängt somit von der Abtastfrequenz des A/D-Wandlers ab. Stimmt die Auflösung der Kamera mit der durch die Abtastfrequenz der Karte erzeugten Auflösung des Bildes überein, so spricht man von pixelsynchronen Systemen.

Steht nun das digitale Bild im Systemspeicher oder im Bildspeicher auf der Karte zur Verfügung, so können mittels eines Prozessors Algorithmen zur Extraktion von Informationen, wie z.B. im Falle dieser Arbeit zur Trennung des Bodens von Pflanzen und zur Bestimmung des Reihenverlaufs, angewendet werden. Liegen nur zwei Objektklassen zur Trennung vor, nämlich Vorder- und Hintergrund, so bietet sich die Erstellung eines Binärbildes² an. Im Fall eines Getreidebestandes wäre es beispielsweise wünschenswert, im Speicher ein Array von Bildpunkten zu erhalten, deren Grauwerte entweder 1 für grüne Pflanzen oder 0 für den Hintergrund betragen. Bei ausreichendem Kontrast könnte man beispielsweise davon ausgehen, dass alle hellen Stellen in einem Bild Pflanzen repräsentieren und alle dunklen Stellen den Hintergrund, also den Boden.

Da in einem System mit 8 Bit Auflösung in der Helligkeit 256 Grauwerte möglich sind, würde man allen Bildpunkten mit einem Grauwert größer 120 den Wert 1 zuordnen, allen anderen den Wert 0. Dies ermöglichen sogenannte LUT³. Eine LUT verwendet, wie in Bild 5.26 verdeutlicht, den Grauwert eines Bildpunktes als Adresse und ersetzt ihn durch den Inhalt der Tabelle an eben dieser. Sollen beispielsweise alle Bildpunkte, die heller als Grauwert 120 sind, als Objekt definiert werden und der Rest als Hintergrund, so werden alle Zellen der Tabelle von 0 bis 120 mit 0 gefüllt und der Rest mit 1. Während des Einlesevorgangs werden die Grauwerte durch die Tabellenwerte ersetzt, und als Resultat steht im Speicher ein Binärbild. Ein Binärbild weist eindeutige Grenzen zwischen Objekt und Hintergrund auf, es ist somit Ausgangspunkt für weitere Berechnungen wie Mittelpunktbestimmung oder ähnliches. Da die Grenzen in den Ausgangsbildern

²Binärbild = Zwei-Pegel-Bild

³LUT = Look-Up-Tables

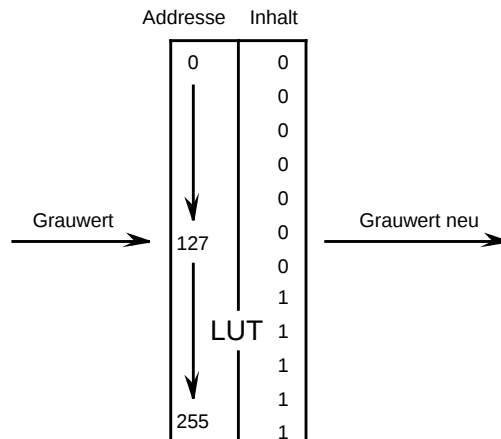


Abbildung 5.26: Look-Up-Table

nicht so eindeutig sind, kommt der Erstellung eines Binärbildes größte Bedeutung zu. Eine einfache Binarisierung über einen fixen Schwellwert wird unter variierenden Lichtverhältnissen sehr schnell zu unsinnigen Ergebnissen führen. Deshalb ist die Auswahl eines adäquaten, kontrastreichen Eingangssignals ein wichtiger Teil der Problematik der Leitlinienerkennung.

5.2.2 Reflexionseigenschaften

Zum Thema Reihenerkennung wurden umfassende Versuche durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war, eine adäquate Methode zur Trennung der Pflanzen vom Bildhintergrund zu finden. Mit Hilfe einer Serie von Schwarzweiß-Aufnahmen wurde festgestellt, dass, abhängig vom verwendeten Bild, bei der Binarisierung über einen Schwellwert teilweise der Boden dunkel und die Pflanzen hell, teilweise aber auch der Boden hell und die Pflanzen dunkel erschienen. Daraus folgt, dass trotz des in der Literatur oft als statisch beschriebenen Reflexionsvermögens mit dem Abtrocknen nasser Böden eine deutliche Erhöhung des Reflexionsgrades einher geht. Dies führt dazu, dass eine eindeutige Unterscheidung zwischen Boden und Pflanzen im Schwarzweißbild nicht möglich ist. Zur Abklärung dieses Umstandes sind die in Bild 5.27 gezeigten Histogramme von Getreidepflanzen, trockenem und anschließend angefeuchtetem Boden erstellt worden. Hierbei handelt es sich um Aufnahmen unter identischen Lichtverhältnissen. Wie ersichtlich ist, ändert sich das Reflexionsverhalten von Boden mit dem Feuchtigkeitsgehalt. Es ist jedoch für die online-Erstellung eines Binärbildes unerlässlich, die Kulturpflanzen schon im Rohbild aufgrund der Grauwertverteilung vom Hintergrund zu trennen. Im Schwarzweißbild kann eine Unterscheidung zwischen nassen und trockenen Böden vorgenommen werden, die Pflanzen liegen in ihrem Reflexionsvermögen jedoch dazwischen und lassen sich somit nicht für alle Zustände des Bodens eindeutig differenzieren.

Wie in den Bildern 5.28 bis 5.31 dargestellt, zeigen aus dem RGB-Bild erstellte Histogramme für die drei Farbkanäle rot, grün und blau ähnliche Tendenzen. Zur Erläuterung: Das Histogramm eines Farbkanals ist die Häufigkeitsverteilung

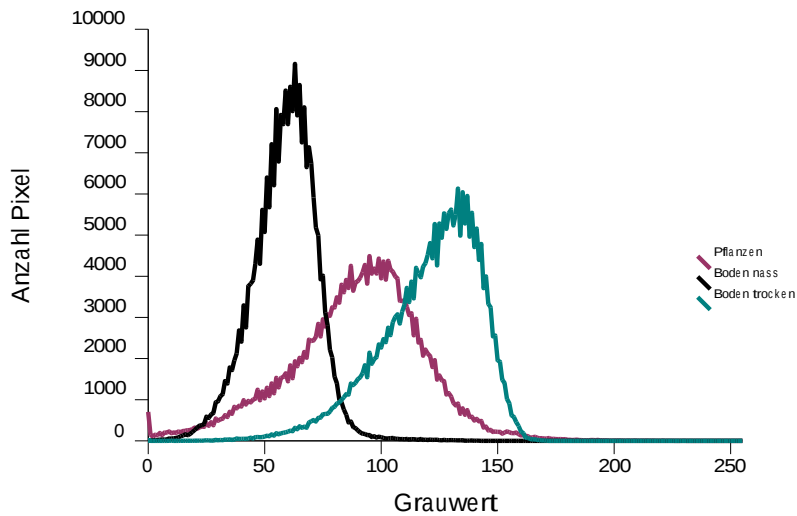


Abbildung 5.27: Histogramme von Boden und Pflanzen

der einzelnen Grauwerte in den Farbkanälen. Verfügt ein Motiv über ein hohes Reflexionsvermögen, so werden die Grauwerte bei gegebener Beleuchtung häufiger Werte in Richtung 255 (weiß) annehmen, während bei einem dunklen Motiv die Grauwerte gegen 0 (schwarz) tendieren werden.

Keiner der drei Farbkanäle genügt den Anforderungen, Boden in jedem Zustand zuverlässig von den grünen Pflanzen trennen zu können. Bezieht man die Ernterückstände in die Betrachtung mit ein, führt dies zu zusätzlichen Problemen, da sie im roten Kanal ein ähnliches Grauwert histogramm aufweisen wie die Getreidepflanzen, im grünen Kanal jedoch wie nasser Boden.

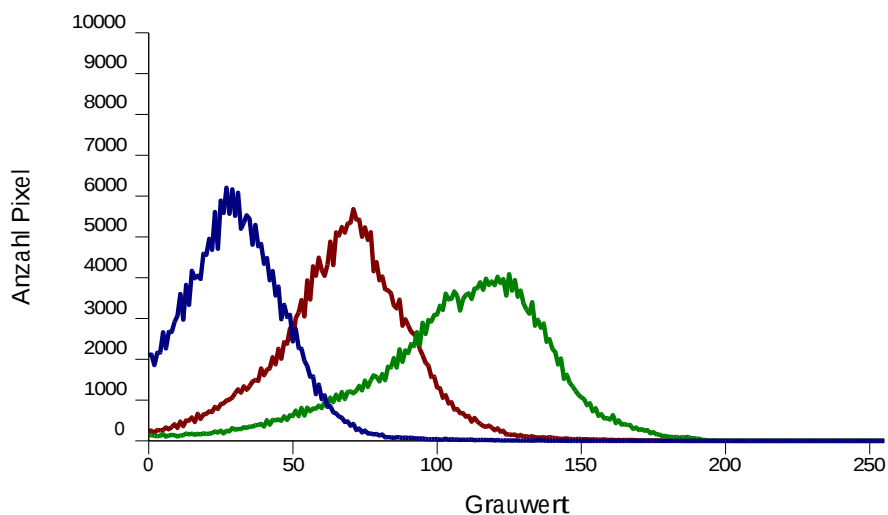


Abbildung 5.28: RGB-Histogramme von Getreidepflanzen

In Bild 5.32 ist das typische Transmissions-, Absorptions- und Reflexions-

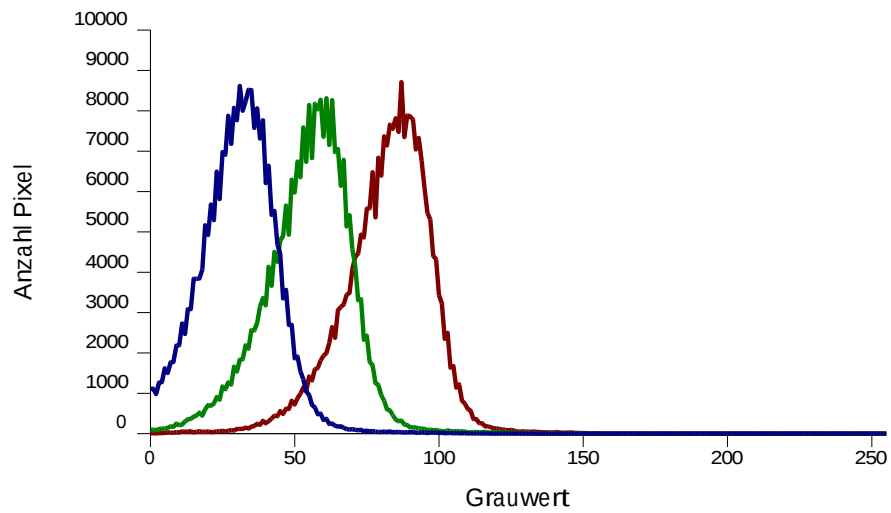


Abbildung 5.29: RGB-Histogramme eines nassen Bodens

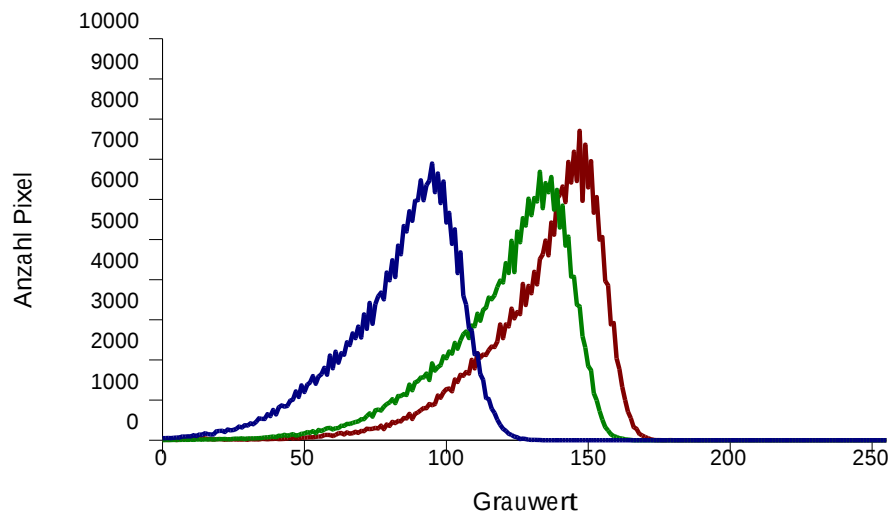


Abbildung 5.30: RGB-Histogramme eines trockenen Bodens

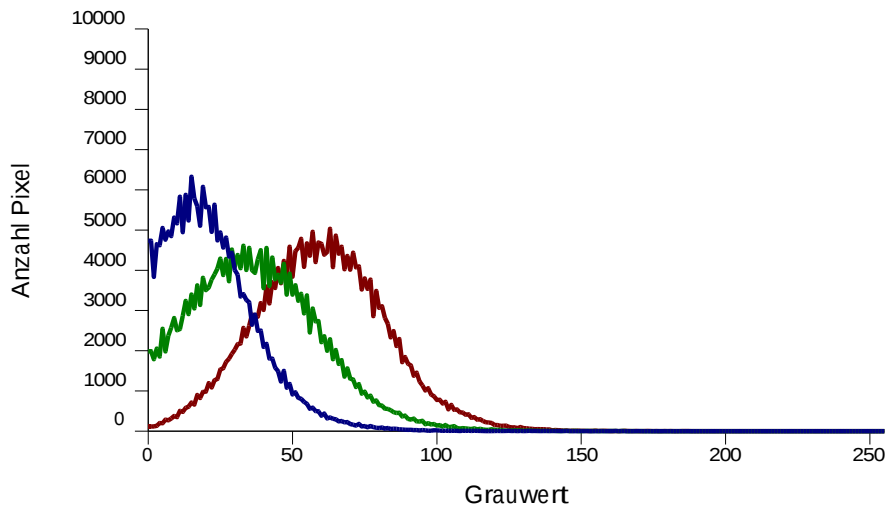


Abbildung 5.31: RGB-Histogramme von Ernterückständen

verhalten eines grünen, chlorophyllhaltigen Blattes aufgezeigt. Bild 5.33 zeigt nochmals die typischen Reflexionsspektren von trockener und feuchter Braunerde in Abhängigkeit von der Wellenlänge, Bild 5.34 die Reflexionsspektren grüner Blätter. Es fällt auf, dass, im Gegensatz zu grünen Blättern, der Boden ein stetig ansteigendes Reflexionsvermögen mit zunehmender Wellenlänge aufweist. Chlorophyllhaltige Pflanzenteile hingegen zeichnen sich aus durch einen relativ zum optischen Verhalten des Bodens erhöhten Reflexionsgrad im grünen Bereich (um 550 nm), eine ausgeprägte Absorption der Strahlung im roten Bereich (um 650 nm) sowie den in Bild 5.34 deutlich zu sehenden typisch sprunghaften Anstieg des Reflexionsvermögens um 700 nm (Red Edge).

Wie gezeigt wurde, ist die Betrachtung eines einzelnen Reflexionsgrades, egal ob über den gesamten sichtbaren Bereich oder nur über ein Teilspektrum, für eine zuverlässige Trennung von Boden und Pflanzen nicht geeignet. Während der Boden keine Ansatzpunkte für eine Unterscheidung bietet, weist das Chlorophyll die erwähnten charakteristischen Merkmale auf: ein Absorptionsminimum im grünen Bereich, ein Maximum im roten Bereich und annähernd keine Absorption mehr im Infrarotbereich.

5.2.3 Farbdifferenzbildung und Binärbilderstellung

Die im Literaturteil schon angesprochenen, meist aus der Fernerkundung stammenden Quotienten und Indizes, die üblicherweise aus Mehrkanalbildern erstellt werden können, basieren auf diesen Erkenntnissen. Nach [Reusch, 1997] werden unter anderen folgende Indizes verwendet:

IR/R	Infrarot zu Rot Verhältnis
IR/G	Infrarot zu Grün Verhältnis
G/R	Grün zu Rot Verhältnis

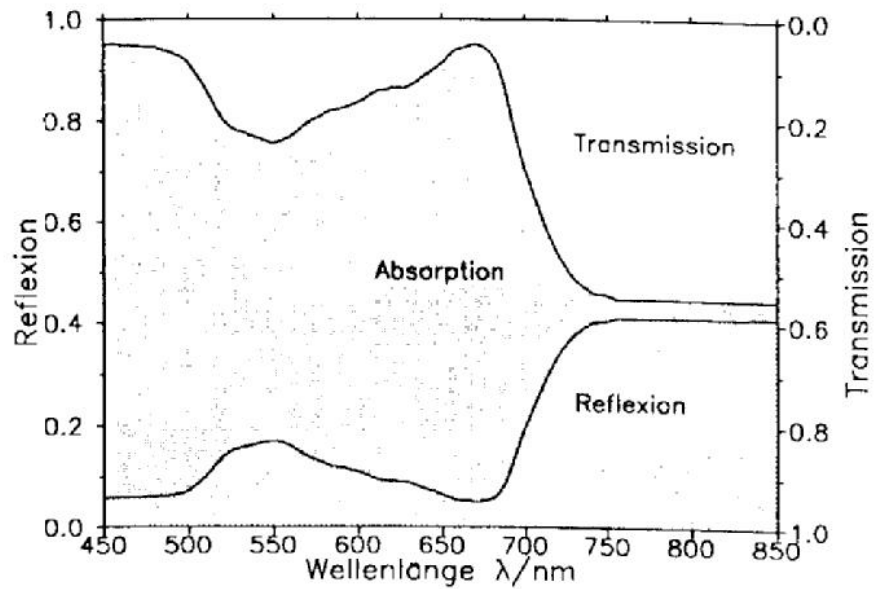


Abbildung 5.32: Transmissions-, Absorptions- und Reflexionsverhalten grüner Blätter (Reusch)

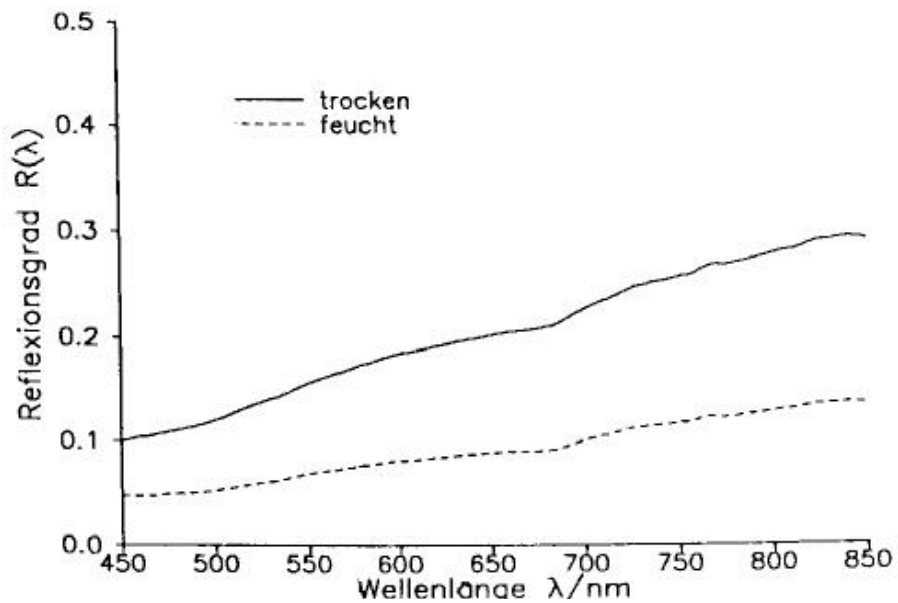


Abbildung 5.33: Reflexionsvermögen trockener und feuchter Braunerde (Reusch)

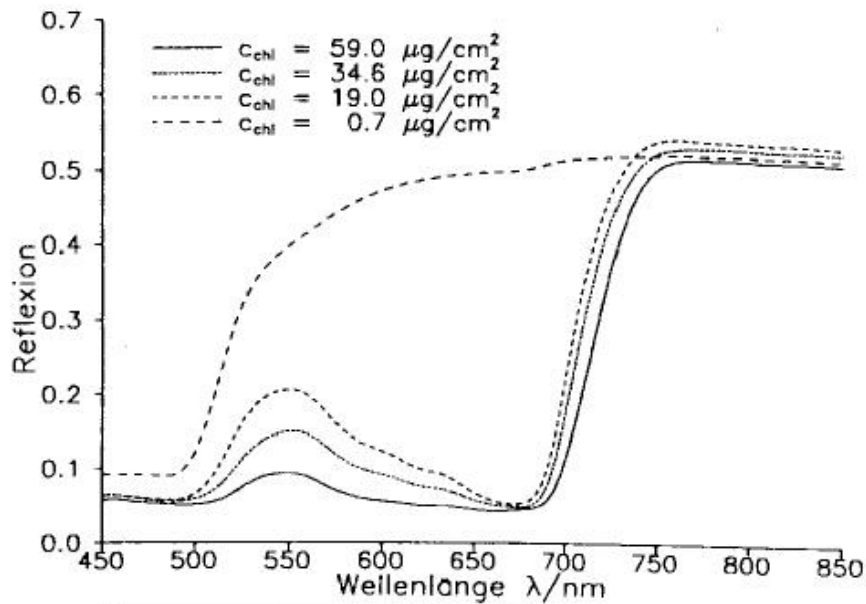


Abbildung 5.34: Reflexionsvermögen grüner Blätter unterschiedlichen Chlorophyllgehalts (Reusch)

NDVI Normalized Difference Vegetation Index

Diese und noch weitere, komplexere Indizes zur Biomassebestimmung oder ähnlichen Aufgabenstellungen weisen zwar eine hervorragende Trennungsschärfe (Pflanzen von Boden) auf, aber in vorliegender Arbeit war aufgrund der Anforderungen an die Rechengeschwindigkeit eine Verwendung solcher Algorithmen nicht darstellbar. Wie in den Histogrammen in den Bildern 5.27 bis 5.31 sowie in den Bildern 5.32 bis 5.34 zu sehen ist, ist bei den Getreidepflanzen das Reflexionsvermögen im grünen Kanal immer ausgeprägter als im roten, während bei den Böden und bei den Ernterückständen immer, unabhängig vom Feuchtigkeitsgehalt, die Grauwerte im Histogramm des roten Kanals höher sind als die im grünen Kanal. Da mit der gegebenen Hardware eine Quotientenbildung ausscheidet und auch die Betrachtung des Infrarotbereiches nicht möglich ist, andererseits aber die Betrachtung einzelner Teilspektren auch keine Trennung erlaubt, bleibt nur die Differenzbildung des roten und des grünen Kanals. Dieser auch von [Petry, 1989] beschriebene Ansatz lässt nur in den Fällen, in denen der Bildpunkt eine lebende, chlorophyllhaltige Pflanze repräsentiert, ein positives Ergebnis erwarten. Bei allen Bodenarten und -zuständen sowie bei Ernterückständen im Bild eines Getreidefeldes ist das Resultat negativ. Zur Bildung der Differenzen von Farbkanälen braucht bei der verwendeten Hardware nur die CSC⁴-Matrix mit den entsprechenden Faktoren geladen zu werden, was dazu führt, dass die Grauwerte im roten Kanal von denen im grünen subtrahiert werden. Das Ergebnis ist positiv für lebende Pflanzen und negativ bzw. Null, da negative Grauwerte nicht definiert sind, für den Bildhintergrund. Dies

⁴CSC = Color Space Conversation

ermöglicht die für alle weiterführenden Methoden der Bildverarbeitung bzw. Bildanalyse nötige Trennung von Vordergrund und Hintergrund.

Bei Verwendung der Eingangs-LUT des Motherboards können nun alle positiven Werte größer Null durch eine eins ersetzt werden, der Rest bleibt Null. Durch diese Binarisierung erhält man ein zwei-Pegel-Bild, in dem die Bildpunkte die zum Pflanzenbestand gehören durch eine 1 repräsentiert werden, der Hintergrund durch eine 0.

Bild 5.35 zeigt nochmals die verwendeten Teilspektren und die dazugehörigen charakteristischen Reflexionseigenschaften von grünen Pflanzen und Boden.

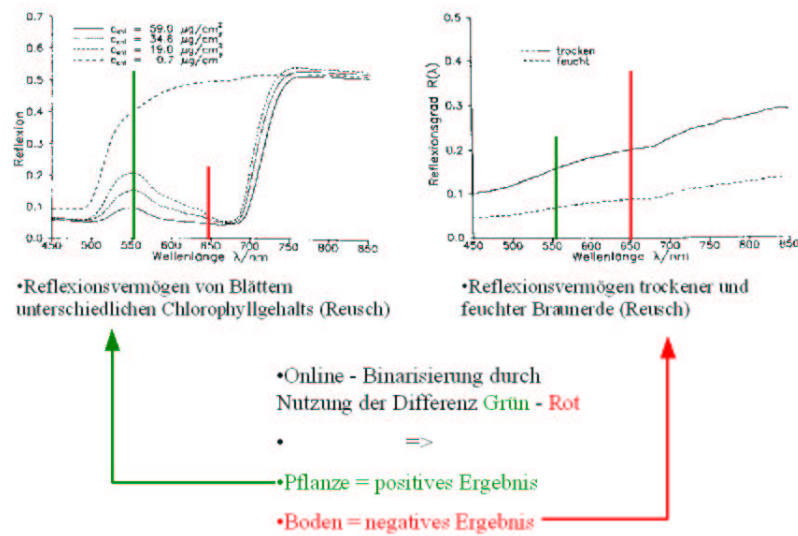


Abbildung 5.35: Reflexionseigenschaften und Grün-Rot Differenz

Bild 5.36 verdeutlicht die Vorgänge während des Einlesens der Bilder in die Bildverarbeitungskarte: Grün-Rot Differenzbildung mittels Color-Space-Conversion-Table und Binarisierung mittels Look-Up-Table. Durch diese Operationen wird aus dem ursprünglich 1,3 MB großen Farbbild (768x572 Pixel x 8 Bit Farbtiefe x 3 Kanäle) ein 220 KB (768x572 Pixel/2, nur Halbbild) großes Binärbild, das anschließend in den Systemspeicher des Hostrechners transferiert und nochmals um den Faktor 8 auf 27 KB komprimiert wird. Auf diesem Binärbild basiert der im nächsten Kapitel erläuterte Leitlinienverfolgungsalgorithmus.

5.2.4 Reihenerkennung

5.2.4.1 Ausgangs-Software und Weiterentwicklung

Der Einsatz eines Bildverarbeitungssystems als Sensor erfordert eine Verarbeitungsgeschwindigkeit <40 ms, um in Videoechtzeit arbeiten zu können. Da eine Implementierung von Operationen zur Bildverbesserung, Segmentierung oder gar Objekterkennung zur Pflanzenidentifikation als Softwarelösungen zu rechenintensiv sind und als Hardwarelösung das Budget des Forschungsvorhabens überschritten hätten, wurde auf High Level Bildverarbeitungsroutinen verzich-

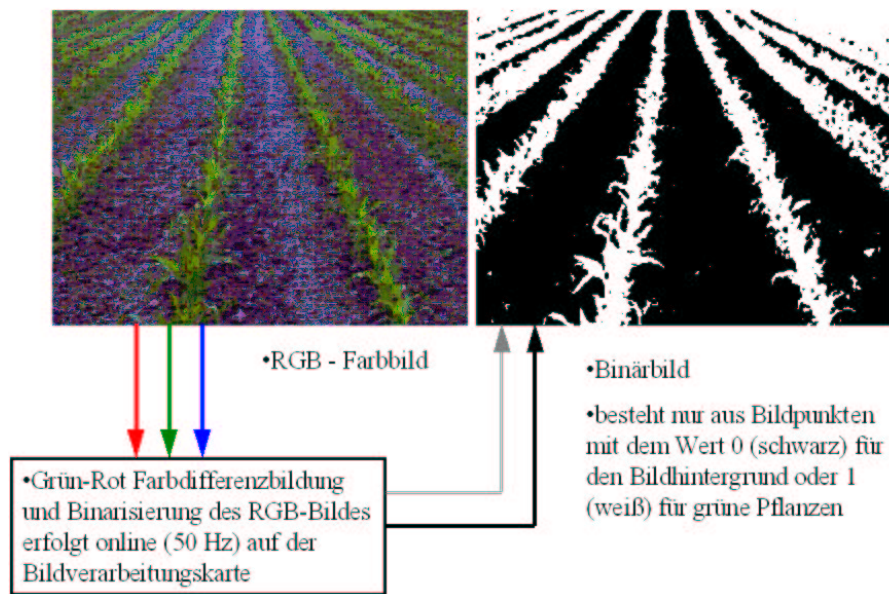


Abbildung 5.36: Binärbilderstellung

tet. Das Programm zur Reihenerkennung nimmt nur eine Farbdifferenzbildung mit anschließender Binarisierung vor, um dann mittels Regressionsanalyse im Binärbild den Reihenverlauf zu berechnen.

Die Farbdifferenzbildung wurde in Kapitel 5.2.3 schon erläutert. Die Binarisierung wird mittels Look-Up-Table realisiert. Als Resultat erhält man ein zweidimensionales Raster von Bildpunkten, in dem Pflanzen mit einer 1 und Hintergrund mit einer 0 dargestellt sind. Da ein solches, mit preiswerter Technik in Echtzeit darstellbares Binärbild prinzipiell als fehlerbehaftet betrachtet werden muss, bietet sich ein statistisches Verfahren zur Leitlinienberechnung an. Das verwendete Verfahren zur Berechnung der Reihenmittellinien wird im folgenden vorgestellt. Der hierfür ursprünglich verwendete Reihenberechnungsalgorithmus wird in Bild 5.37 verdeutlicht. Auf der Basis dieses Programmkerns wurde das Leitlinienverfolgungsprogramm aufgebaut.

Beginnend vom Reihenmittelpunkt (im Bild E) wird ein Array von Bildpunkten jeweils links und rechts aufsummiert, gemittelt und dann die Differenz aus beiden gebildet. Diese wird auf Plausibilität überprüft, gegebenenfalls korrigiert und dient anschließend zur Berechnung des neuen Mittelpunktes E für den nächsten Durchlauf. Die jeweiligen Mittelpunkte werden mit den zugehörigen y-Werten gespeichert und dienen der Regression zur Leitlinienberechnung. Als Ergebnis erhält man, wie in Bild 5.38 dargestellt, eine Linie im Bild, deren unteres Ende um den Offset aus der Bildmitte versetzt ist und deren Richtung um den Heading von der Fahrzeuglängsachse abweicht. Aus diesen beiden Werten sowie den optischen Gegebenheiten, auf die in Kapitel 5.2.4.2 auf Seite 83 näher eingegangen wird, generiert das Bildverarbeitungsprogramm einen Korrekturwert, der an das Reglermodul weitergeleitet wird. Bild 5.39 zeigt den Programmablaufplan des Ursprungsprogramms.

Die Bildverarbeitungskarte tastet das Kamerasignal kontinuierlich ab, je-

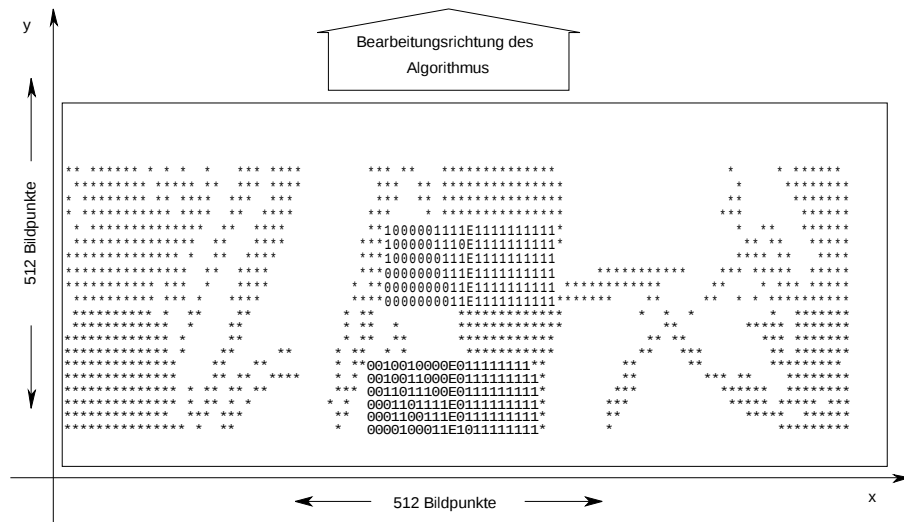


Abbildung 5.37: Ausschnitt aus einem Binärbild eines Reihenbestandes

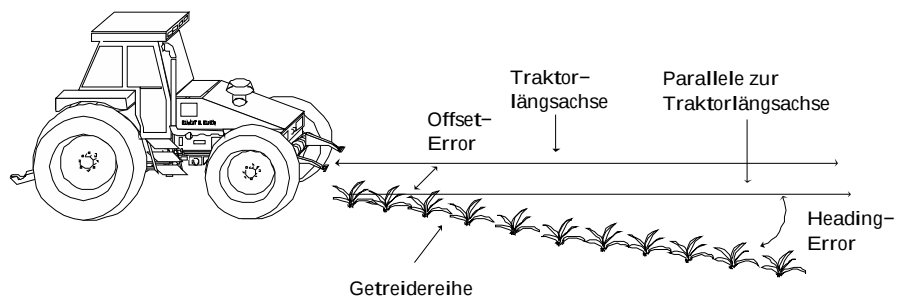


Abbildung 5.38: Heading und Offset Error

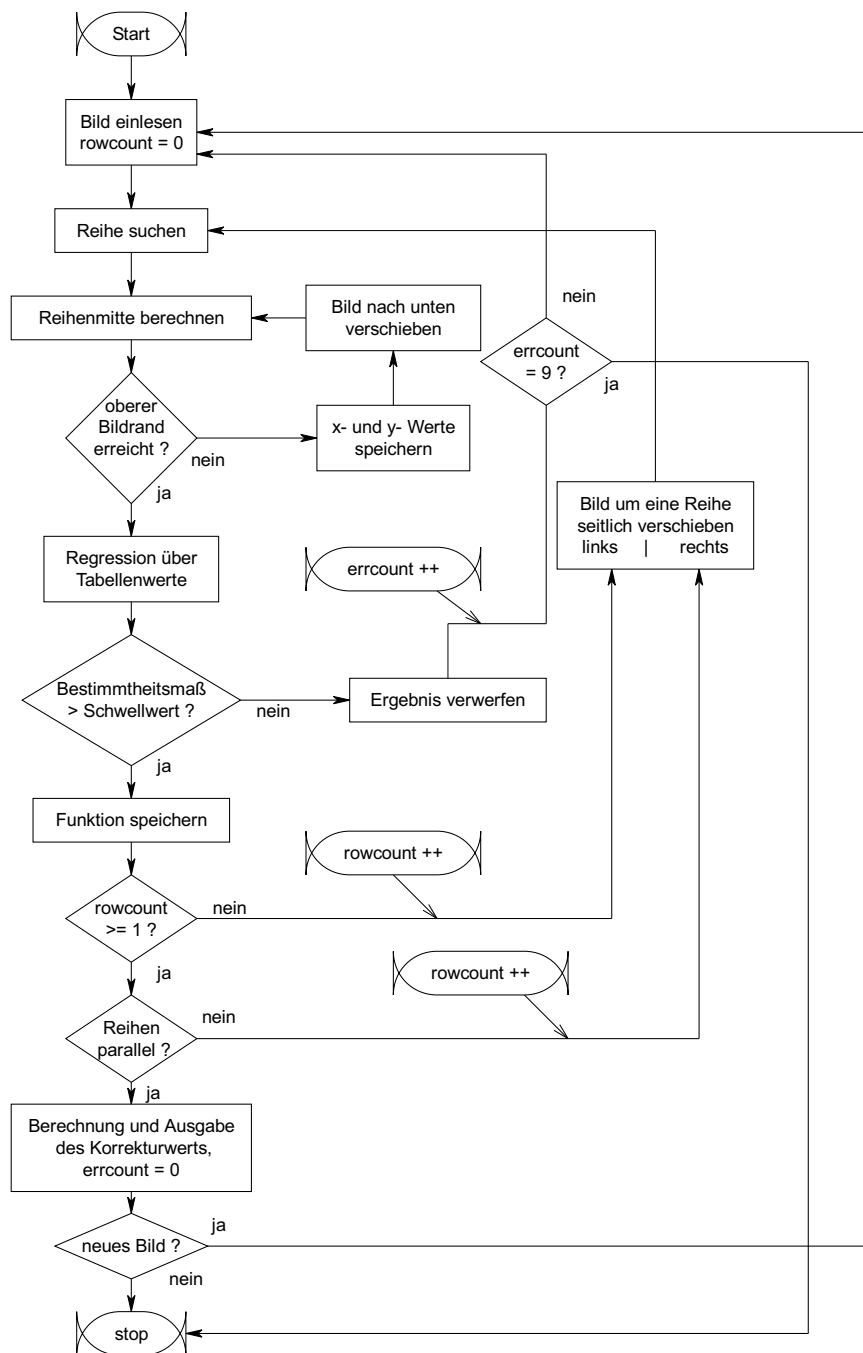


Abbildung 5.39: Programmablaufplan des ersten Reihenverfolgungsalgorithmus

weils auf Anforderung wird ein neuer Korrekturwert generiert. Dazu wird zunächst das auf der Bildverarbeitungskarte vorliegende Binärbild in den Hauptspeicher transferiert. Dieser Vorgang ist im PAP mit "Einlesen" bezeichnet. Dort werden, im Bild aufsteigend, die Reihenmitten gesucht und die Ergebnisse mit zugehöriger Position in y-Richtung in einer Tabelle abgelegt. Ist der obere Bildrand erreicht, erfolgt eine lineare Regression über die Wertepaare in der Tabelle. Mit der Kontrolle des Bestimmtheitsmaßes erfolgt eine erste Überprüfung des Ergebnisses. Für $r^2 < 0,75$ kann von einem ungenügenden Binärbild ausgegangen werden, der Bildeinzug wird wiederholt und ein Zähler (errcount) inkrementiert. Bei 10 ungültigen Bildern in Folge springt das Programm zur Fehlerauswertroutine. Andernfalls wird die Geradenfunktion gespeichert und eine zweite Reihe zur Leitlinienberechnung herangezogen. Dazu wird das Bild eine Reihe nach links verschoben, ein Reihenzähler (rowcount) inkrementiert und die Geradenberechnung erfolgt wie oben beschrieben. Liegen zwei Geraden vor, so wird deren Parallelität überprüft. Ist das Ergebnis akzeptabel, so werden Offset und Heading kalkuliert und die Mittelwerte der beiden Ergebnisse gebildet. Mit den beiden Werten als Adresse wird in einer Umrechnungstabelle ein Korrekturwert ausgelesen und als Ausgangsgröße an den Regler übergeben.

Erschwerend wirkt sich bei diesem Verfahren aus, dass der Algorithmus zur Leitlinienverfolgung nicht in der Lage ist, zwischen Kulturpflanzen und Unkräutern zu unterscheiden. Folglich führen größere Unkrautplatten, die asymmetrisch auf einer Seite der zu berechnenden Reihe stehen, weil sie als Pflanzen erkannt werden zu einer Abweichung des errechneten vom tatsächlichen Reihenverlauf. Fehlstellen im Bestand können diesen Effekt noch verstärken. Um dem zu begegnen, erfolgte mit einer weiteren Überprüfung der Plausibilität des Ergebnisses der Mittelpunktsberechnung eine Programmerweiterung. In Bild 5.40 sind die zusätzlichen Kontrollstrukturen erläutert. Ist die Parallelität der beiden Reihen gegeben, so werden die errechneten Ergebnisse mit einem Faktor (im Beispiel 0,5) gewichtet und das Additionsergebnis als Ausgabewert bereitgestellt. Im anderen Falle wird eine dritte Reihe zur Beurteilung herangezogen. Die Gewichtung erfolgt dann ebenfalls auf die in Bild 5.40 gezeigte Weise. Liegt eine Parallelität zwischen zwei der drei Reihen vor, so werden die beiden Ergebnisse mit dem selben Faktor (hier wiederum 0,5) gewichtet. Liegt keine Parallelität vor, so werden alle drei Ergebnisse mit einem zweiten Faktor (hier 0,1667) gewichtet und mit dem Ergebnis des letzten Programmdurchlaufs verrechnet. Dieses liegt im Ergebnisspeicher vor und wird zu diesem Zweck mit einem weiteren Faktor (hier 0,5) multipliziert.

Das bisher beschriebene Programm konnte noch in einer einzigen Datei untergebracht werden. Diese ist, unter dem Namen xylonwf.c, zusammen mit einer Auswahl anderer im Zuge dieser Arbeit erstellter Quellcodes im Anhang ab Seite 131 gelistet. Die Ablaufstruktur soll kurz erläutert werden. Der Programmstart bewirkt definitionsgemäß den Aufruf der **main()**-Funktion⁵ und die Deklaration und Initialisierung einiger benötigter Variablen. Die nachfolgende Funktion **init_hw()** lädt Library-Routinen, auf die die Bildverarbeitungskarte zurückgreift, und legt eine LUT in der Weise an, dass Eingangs-Grauwerte kleiner als

⁵Bei den hervorgehobenen Textstellen handelt es sich um C-Funktionsaufrufe

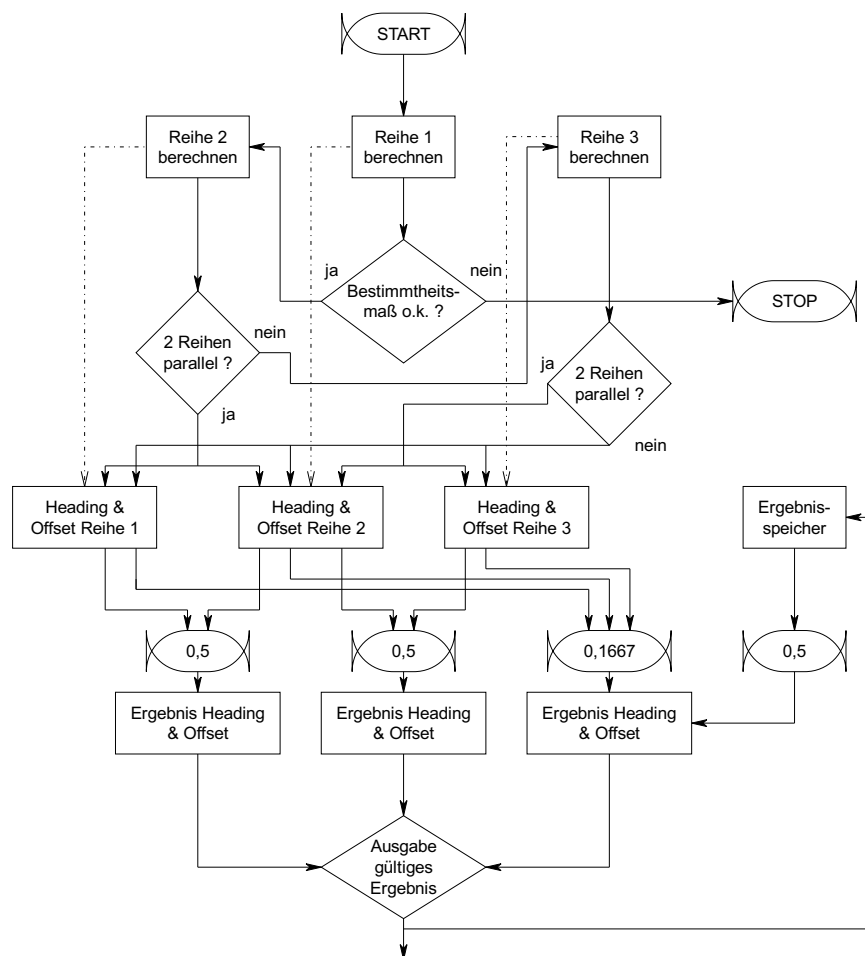


Abbildung 5.40: Programmablaufplan zur Validierung berechneter Reihen

der Schwellwert **THRESH**⁶ auf eins gesetzt werden, die übrigen auf null. Wieder zurück in **main()** folgen einige Zeilen weiterer Initialisierungen, die Zwischenspeicher für die Bilddaten reservieren und die Verbindung zum Grabau-Interface herstellen. **xyloninitcontrol()** und die von ihr wiederum aufgerufene **PIDT1_init()** sind das Ergebnis einer Autocode-Generierung aus einer Reglerentwicklungs-Software und sorgen für einen definierten Ausgangszustand des digitalen PID⁷-Reglers. Nach den Startvorbereitungen tritt das Programm in die Hauptschleife ein, die solange wiederholt wird, wie der Anwender keine Taste drückt.

Die zunächst abzuarbeitende **image_proc()** bildet quasi das Herz des Programms. Über **grab()** und **get_rectangle()** wird das binarisierte Kamerabild im Arbeitsspeicher verfügbar und kann durch den anschließenden Reihenverfolgungsalgorithmus wie oben beschrieben analysiert werden. Im vorliegenden Fall war das Programm auf einen Reihenabstand von 80 Bildpunkten ausgelegt (entsprechend ca. 20 cm bei Getreide mit doppeltem Reihenabstand). Außerdem wird unterstellt, dass die abgebildete Pflanzenreihe, die als Leitlinie fungieren soll, ungefähr durch die untere Bildrandmitte verläuft. In einem ersten Teil des Algorithmus muss ein Einstieg in die Reihe gefunden werden, die verfolgt werden soll. Ausgehend von der Bildmitte werden jeweils nach links und rechts über fünf Zeilen in der Höhe und $80/2 = 40$ Punkte in der Breite die weißen (Pflanzen darstellenden) Bildpunkte gezählt. Ergibt der rechte Block deutlich mehr weiße Bildpunkte, muss die Reihe tendenziell weiter rechts liegen, so dass der Einstiegspunkt etwas nach rechts korrigiert wird. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis der linke und der rechte Zähler ungefähr gleichviel Weißanteil aufweisen. Sollte dies auch nach 25 Versuchen nicht der Fall sein, wird das Bild verworfen und ein neues angefordert.

Die Reihenverfolgung im Anschluss an eine erfolgreiche Einstiegspunktberechnung verfährt nach einem ähnlichen Schema: Das Bild wird in Schritten von fünf Zeilen durchlaufen und nach links und rechts auf weiße Bildpunkte untersucht. Taucht eine Differenz zwischen rechts- und linksliegender Anzahl weißer Bildpunkte auf, wird zwar ebenfalls der Einsetzpunkt entsprechend versetzt, allerdings werden dieselben fünf Zeilen daraufhin nicht noch ein zweites Mal durchlaufen, sondern die Korrektur wirkt sich erst auf die Analyse der darüberliegenden fünf Zeilen aus. Für die lineare Regression werden in jedem Schritt die Zeilennummer als x-Wert sowie die (eventuell korrigierte) Einstiegs-Spaltennummer als y-Wert gespeichert. Am oberen Bildrand angelangt, erfolgt abschließend die Berechnung der Parameter der Regressionsgeraden bezüglich aller xy-Wertepaare, bevor das Kommando wieder an die Hauptschleife der **main()**-Funktion zurückgegeben wird. Die Summe der Differenzen, um die die Durchgangspunkte der Regressionsgeraden durch den oberen und den doppelt gewichteten unteren Bildrand vom Mittelpunkt abweichen, dividiert durch den Faktor 2,56, ergibt ein Maß für die Abweichung des Traktors von seiner Soll-Linie. Dieses Abweichungsmaß wird an die PID-Reglerfunktion **xyloncontrol()** übergeben, die ihrerseits zur Berechnung der Reglerantwort die Funktion

⁶In Grossbuchstaben geschrieben sind die Variablen, die im C-Quellcode verwendet werden

⁷Regler mit Proportional, Integral und Differentialanteil

PIDT1_fct() heranzieht. Um das Grabau-Interface so ansteuern zu können, dass es eine geeignete Steuerspannung für das Lenkventil einstellt, muss die Reglerantwort entsprechend skaliert werden. Ist der Wert an das Interface ausgegeben und der Eintrag der Positionsabweichung in eine Protokolldatei abgeschlossen, beginnt ein neuer Schleifendurchlauf. Durch einen Tastendruck kann die Schleife abgebrochen und das Programm beendet werden.

Für die Weiterentwicklung der Software mussten mehrere, nachfolgend kurz erwähnte Aspekte berücksichtigt werden: Um eine universellere Einsetzbarkeit des Reihenverfolgungsalgorithmus zu erreichen, wurde die Einführung einer Reihe von zusätzlichen Variablen notwendig, vor allem um verschiedenen Gegebenheiten geometrischer Art gerecht werden zu können, wie z. B. Reihenabstände, Reihenbreiten, Bildausschnittsgrößen bei unterschiedlichen Kameraeinstellungen etc. Eine Modifikation des Algorithmus sollte für verbesserte Ergebnisse auch unter schwierigeren Beleuchtungsverhältnissen sorgen, wenn sich die Pflanzenreihe nur sehr unscharf vom Bodenhintergrund abgrenzt. Dazu wird nun nicht mehr die Differenz der Summen weißer Bildpunkte als Kriterium herangezogen, sondern der Verlauf der Dichte weißer Bildpunkte im Bild, hierauf wird im Kapitel 5.2.4.4 auf Seite 92 noch näher eingegangen. Damit nicht für jede Parameteränderung der Quelltext geändert und neu kompiliert werden muss, wird eine Konfigurationsdatei direkt nach dem Programmstart eingelesen. In dieser Datei sind alle wesentlichen Parameter in üblichen Einheiten enthalten; Reihenabstände müssen z. B. nicht erst in Bildpunkte umgerechnet werden. Bei der Konfigurationsdatei handelt es sich um eine einfache Textdatei, in die beliebige Kommentare eingefügt werden können und die mit jedem Texteditor bearbeitet werden kann.

Im Verlauf der Programmentwicklung hat sich herausgestellt, dass die angestrebten Verbesserungen nicht über die Software allein zu erreichen sind. Probleme ergeben sich insbesondere bei der Entkoppelung von Bildverarbeitung und Regelung sowie bei einer schnellen Datenerfassung und -ausgabe unter dem Betriebssystem WindowsNT. Daher kam ein zweiter Rechner zur Anwendung. Der erste Computer führt die Bildverarbeitung durch, der zweite die Erfassung von Lenkwinkeldaten, Regelungsberechnungen und die Datenausgabe, d. h. die Ansteuerung des Lenkventils. Die Kommunikation zwischen den Rechnern erfolgt über die serielle Schnittstelle, so dass die Implementierung eines Übertragungsprotokolls nötig wird. Nicht zuletzt führt der Einbau einer Bildverarbeitungskarte mit Funktionen für Bus-Mastering und für mathematische Farbkanalumrechnungen in Echtzeit einerseits zu deutlichen Geschwindigkeitsvorteilen, andererseits aber auch zu erweiterten Initialisierungsabläufen.

Für den bildverarbeitenden Computer mit dem Betriebssystem WindowsNT, über den der Benutzer das Programm beeinflusst und der die jeweils aktuellsten Positionsdaten an den zweiten Rechner sendet, werden im Folgenden die Begriffe Hauptrechner, NT-Rechner, Bildverarbeitungsrechner und Sender synonym verwendet. Der zweite Rechner wird entsprechend als Nebenrechner, Zweitrechner, Regelungsrechner oder Empfänger bezeichnet. Auf der Grundlage der bisher erläuterten Forderungen und Gegebenheiten wurde das Versuchssystem vollständig überarbeitet. Das Ergebnis aus regelungstechnischer Sicht zeigt Abbildung 5.1, während die Umsetzung auf der Ebene der Software in den Ab-

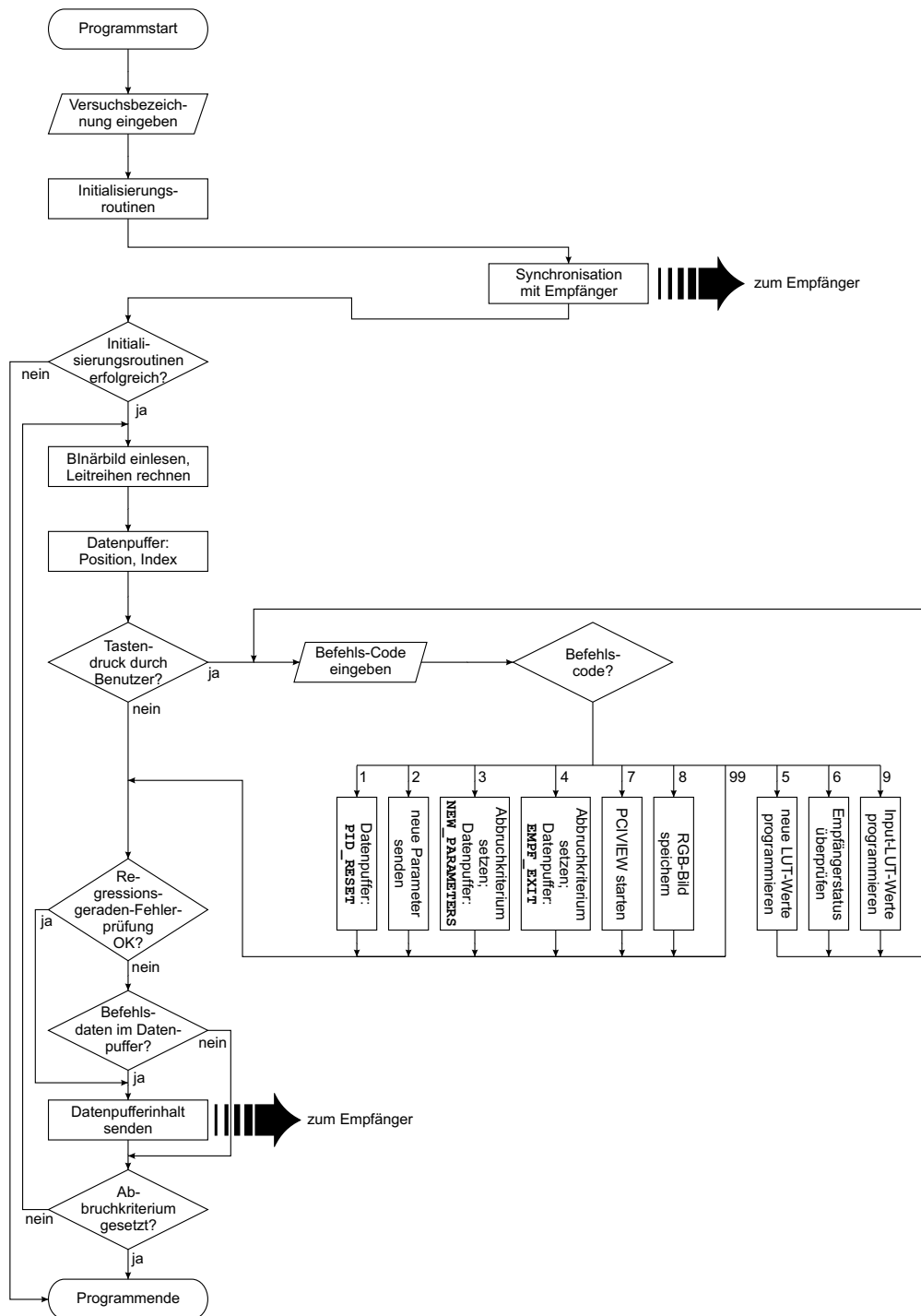


Abbildung 5.41: Programmablaufplan Bildverarbeitungsrechner (Sender)

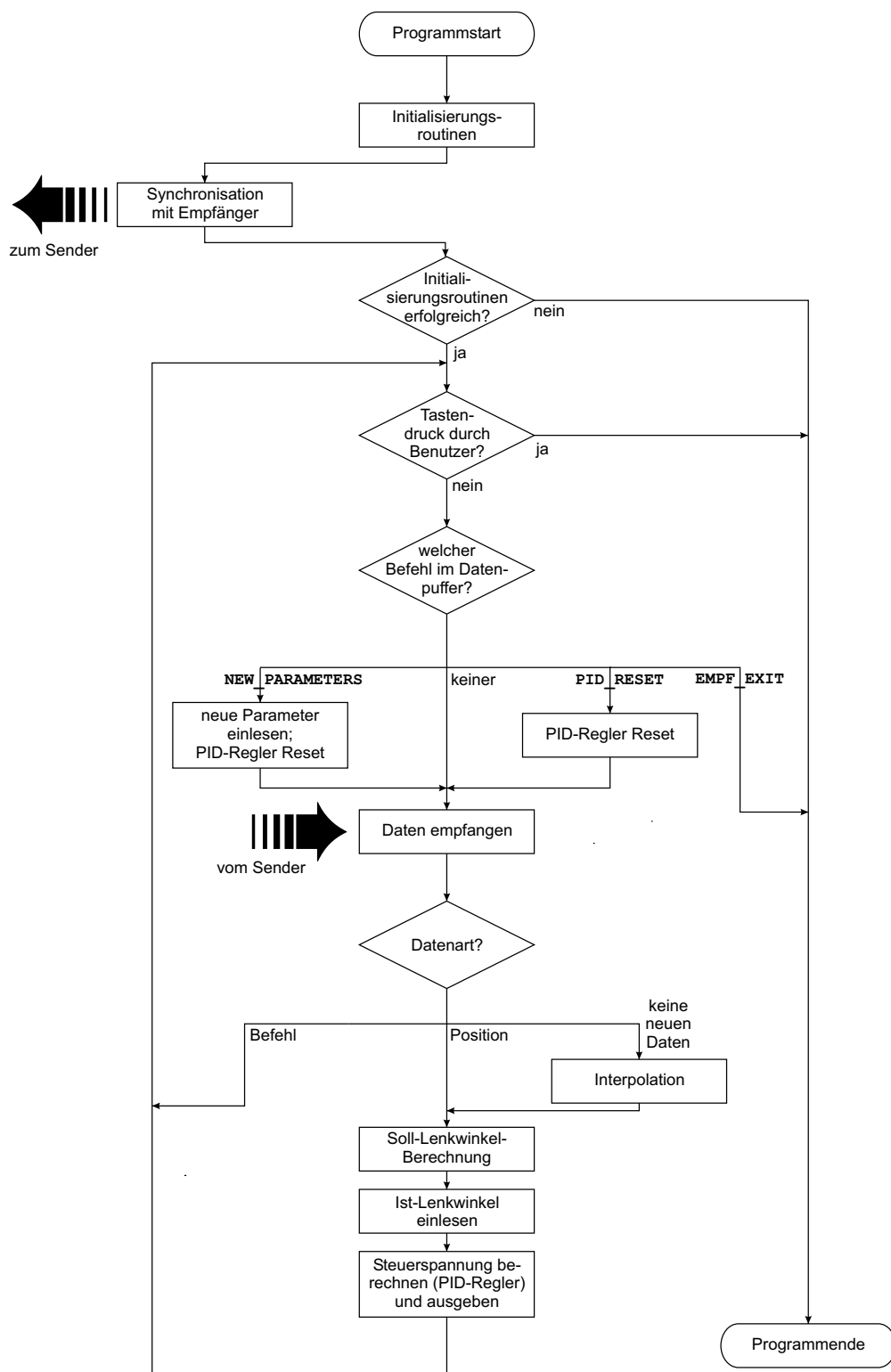


Abbildung 5.42: Programmablaufplan Regelungsrechner (Empfänger)

bildungen 5.41 und 5.42 vereinfacht dargestellt ist. Sowohl das sender- als auch das empfängerseitige Programm müssen durch den Anwender gestartet werden. Die Reihenfolge spielt dabei keine Rolle, denn nach der Initialisierungsphase erfolgt eine automatische Synchronisation. Danach treten die Programme jeweils in eine Schleife ein, die erst durch die Betätigung einer Taste unterbrochen wird. Beim Empfänger führt diese Unterbrechung zum Programmende, während beim Sender zehn Optionen zur Auswahl stehen:

1. Regler-Reset: Durch längere Sende-Unterbrechungen können die Werte des sogenannten integrierenden Anteils der Regelungsfunktion im Empfänger extrem anwachsen. Damit die Regelung weiter ordnungsgemäß arbeiten kann, müssen diese Werte auf null zurückgesetzt werden.
2. Parameter senden: Sollte der Empfänger zwischendurch abgeschaltet gewesen sein, wird er mit dieser Option neu synchronisiert und die aktuellen Versuchsparameter werden übermittelt.
3. Sender beenden, Empfänger Bereitschaft: Hiermit wird der laufende Versuch beendet und der Empfänger in einen Wartestatus versetzt. Beim nächsten Sender-Start kann die Synchronisierung direkt eingeleitet werden.
4. Sender und Empfänger beenden: Beide Programme werden beendet.
5. Neue LUT-Initialisierung: Für spezielle Versuchszwecke können die Lookup-tables für die Binarisierung der Grün-Rot-Differenz auf einen anderen Schwellwert gesetzt werden.
6. Empfänger-Status: Überprüft die Empfangsbereitschaft des Zweitrechners.
7. PciView starten: Ruft das Windows-Programm PciView.exe auf, mit dem die binarisierten Kamerabilder online auf dem Bildschirm angezeigt werden können.
8. Save RGB: Für Versuchs- und Dokumentationszwecke werden alle drei Stufen eines Kamerabildes gespeichert, d. h. dasselbe Bild einmal als RGB- (Farb-) Bild, als Grün-Rot Farbdifferenzbild und als Binärbild.
9. Input-LUT-Initialisierung: Für eine eventuell notwendige Anpassung der Farbdifferenz mittels einer unterschiedlichen Gewichtung der Farbkanäle können diese über eine entsprechende Initialisierung der Eingangs-Lookup-tables verstärkt oder abgeschwächt werden.
10. Abbruch: Die Options-Routine wird beendet und das Programm normal fortgesetzt.

Mit einem Teil dieser Optionen kann also vom Hauptrechner aus der Empfangscomputer gesteuert werden, so dass man bei der Bedienung nicht immer

zwischen beiden Rechnern hin und her wechseln muss. Mit jedem Schleifendurchlauf wird ein binarisiertes Bild von der Bildverarbeitungskarte ins PC-RAM eingelesen. Dort kann der Reihenverfolgungsalgorithmus darauf zugreifen. Da die Pflanzen-Leitreihe im Binärbild normalerweise einen sehr unregelmäßigen Umriss aufweist, muss sie auf eine mathematisch definierte Linie reduziert werden. Der Algorithmus bedient sich hierbei des Verfahrens der linearen Regression. Dazu wird das Bild in gleichmäßige horizontale Abschnitte aufgeteilt. In jedem Abschnitt wird der Mittelpunkt der Leitreihe berechnet und als Regressionspunkt gespeichert. Die Gerade, deren Verlauf die Position aller Regressionspunkte am besten repräsentiert, ist die Regressionsgerade. Aus ihrer Lage im Bild kann man auf die Stellung des Traktors relativ zur Leitreihe schließen. Diese wird mittels der zwei schließlich Heading und Offset beschrieben. Jeweils nach einer Anzahl von BMPSPEICHERRATE verarbeiteten Bildern wird eine Protokoll-Speicherung durchgeführt. Dabei wird jedes Bild um eine Infozeile nach folgendem Aufbau-schema ergänzt:

↓#**033** T : 055.46 Wk : -01.2 Off : 0047 #00660 ff : 000000

Bedeutung im einzelnen:

↓#	Nummer der unterhalb dieser Infozeile befindlichen Bitmap innerhalb der Datei
T:	Zeitpunkt, zu dem das Bild aufgenommen wurde, in Sekunden nach dem Programmstart
Wk:	Heading-Winkel in Grad; positiv bei Fahrtrichtungstendenz nach links
Off:	Offset in Millimeter; positiv, wenn der Traktor sich zu weit links befindet
#	fortlaufende Nummer (Index) der verarbeiteten Bilder
ff:	Fehlercode (von links nach rechts; 1 bedeutet, dass der entsprechende Fehler auftrat):

1. nicht belegt
2. die Parallelitätsbedingung für die Regressionsgeraden ist nicht erfüllt
3. mindestens eine Regressionsgerade weist ein schlechtes r^2 auf
4. Dichteverlauf nur schwer ermittelbar
5. Einsetzpunkt für die Reihenverfolgung nur schwer ermittelbar
6. der Algorithmus hat über den rechten oder linken Bildrand hinaus gelesen

Zusätzlich zu dieser Infozeile werden die berechneten Regressionsgeraden sowie ein kleines schwarzes Dreieck jeweils am unteren und oberen Bildrand eingezeichnet. Verläuft die Regressionsgerade der Hauptleitreihe durch diese Dreiecke, befindet sich der Traktor in Optimalposition. Die jeweils neuesten Positionsdaten bzw. gegebenenfalls der letzte Anwenderbefehl werden an den zweiten Rechner übertragen. Dieser fragt in einer Dauerschleife ständig an der Schnittstelle ab, ob neue Daten angekommen sind. Wenn ja, wird entweder bei einem vorliegenden Befehl dieser ausgeführt oder anhand der neuen Position ein Soll-Lenkwinkel berechnet. Wenn nicht, wird in einem Zwischenschritt die alte Position interpoliert.

Die Vorgehensweise, nach der der bei einer bestimmten Traktorposition erforderliche Lenkwinkel bestimmt wird, ist in Abbildung 5.43 verdeutlicht: Der Traktor wird, einem Anhänger mit Achsschenkelenkung vergleichbar, an einer imaginären Deichsel (Strecke B) gezogen. Dabei wird das vordere Ende der Deichsel exakt der Leitlinie entlang geführt. Der Winkel zwischen der Traktorlängsachse und der Deichsel ergibt den einzuschlagenden Lenkwinkel. B und damit das Lenkwinkel-Regelungsverhalten ist über die Variable Vorlaufzeit beeinflussbar, ihre Berechnung ist in Abschnitt 5.2.4.5 auf Seite 99 beschrieben. Zum Abschluss jedes Schleifendurchlaufs fragen weitere Software-Routinen den derzeitigen Lenkeinschlag ab und geben eine Korrekturspannung an das elektrohydraulische Lenkventil aus, um den geforderten Lenkwinkel einzustellen.

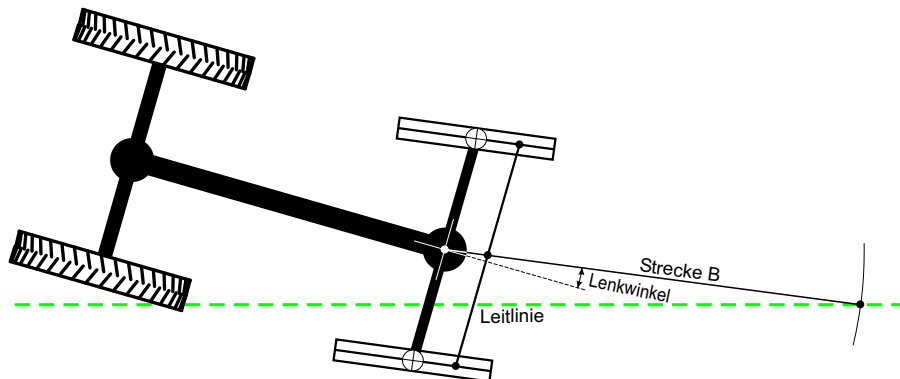


Abbildung 5.43: Ermittlung des Soll-Lenkwinkels

Verschiedene Eigenschaften verschiedener PC-Betriebssysteme machten die Aufrüstung des Lenkungsautomatisierungssystems um einen zweiten PC erforderlich. Um möglichst alle Funktionen der IC-PCI-Bildverarbeitungskarte nutzen zu können, ist ein 32-Bit Betriebssystem Voraussetzung. Da Stabilität und Zuverlässigkeit für ein Lenksystem im Vordergrund stehen, kommt WindowsNT zum Einsatz. Zunächst scheint es naheliegend, dessen Multithread-Fähigkeiten zu nutzen. Threads sind Objekte innerhalb von Prozessen, die Programmanweisungen ausführen. Sie lassen gleichzeitige Aktionen innerhalb eines Prozesses zu und ermöglichen einem Prozess, verschiedene Teile des Programms auf unterschiedlichen Prozessoren gleichzeitig auszuführen. Dies scheint eine ideale Möglichkeit zu sein, die geforderte Entkopplung von Bildverarbeitung und Regelung zu verwirklichen. Allerdings werden auf Einprozessorsystemen zwei

Threads nicht parallel abgearbeitet, sondern es wird zwischen beiden hin und her geschaltet. Leider gibt es keine definierte Schaltfrequenz, WindowsNT verteilt die sogenannten Zeitscheiben autark, diese sind i. d. R. ca. 30-100 ms lang. Damit wäre eine Regelfrequenz im Bereich über 25 Hz nicht mehr zuverlässig zu realisieren. In diesem Frequenzbereich kommen erschwerend Komplikationen mit dem schnellen AD/DA-Datenaustausch hinzu. Allein für eine vom Computer ausgelöste Lenkwinkelgeber-Spannungsmessung verstreichen ca. 12-20 ms, für eine Danfoss-Steuerspannungsausgabe noch einmal soviel. Eine versuchsweise installierte neue AD/DA-IO-Karte erlaubte unter WindowsNT aufgrund der Threadproblematik auch keine schnellere Messung. Um preisgünstig und kurzfristig zu einer Lösung zu kommen, wurde der Hauptrechner über ein schnelles seriell-Übertragungsprotokoll mit einem DOS-Rechner verbunden. Übermittelt wird jeweils die aktuellste, vom Bildverarbeitungsprogramm berechnete Traktorposition. Die Lenkwinkelerfassung und Steuerspannungsausgabe gehen vom DOS-Rechner aus, so dass der Bildverarbeitungsrechner nicht mehr in die Regelung involviert ist. Unter DOS können AD/DA-Ein- und -Ausgangsoperationen sehr schnell durchgeführt werden, weil man über Hardware-Adressen direkt auf die Schreib- und Leseregister der AD/DA-Karte zugreifen kann.

Da die Rechnerleistung in dieser Anwendung nicht der begrenzende Faktor ist, wäre das System auf einem Industrierechner mit Echtzeitbetriebssystem durchaus darstellbar, was auch im Hinblick auf die Robustheit der verwendeten Komponenten sinnvoll wäre. In vorliegender Arbeit musste aber aus Kostengründen mit der vorhandenen Bildverarbeitungshardware und den zugehörigen Treibern gearbeitet werden, weshalb eine Portierung auf ein Echtzeitsystem nicht möglich war.

5.2.4.2 Sichtfeldgeometrie

Da für den Reihenverfolgungsalgorithmus und schon vorher während der Programminitialisierung eine ganze Reihe von Variablen gebraucht werden, ist vor deren Beschreibung eine Erläuterung der geometrischen Gegebenheiten angebracht.

Wie aus Abbildung 5.44 hervorgeht, treten durch die schräg nach unten weisende Montagerichtung der Kamera auf dem Traktor verschiedene Verzerrungen in x- und y-Richtung auf. Eine durch ein Kamerapixel abgebildete Strecke aus dem Bereich des oberen Bildrands ist in Realität länger als eine abgebildete Strecke aus dem unteren Bildrand. Das erklärt die Tatsache, dass in der Realität parallel verlaufende Strecken auf einem Monitor nach oben hin zusammenlaufend erscheinen.

Abbildung 5.45 zeigt zum Vergleich denselben Bildausschnitt, einmal am Monitor und einmal so entzerrt, dass die Seitenverhältnisse der Realität entsprechen, ähnlich einem Blick aus der Vogelperspektive. Damit aus dem Verlauf der Regressionsgeraden im Bild auf die Richtung des Traktors im Verhältnis zur Leitreihe in der Realität Rückschlüsse gezogen werden können, müssen die Verzerrungen aus dem Bild herausgerechnet werden. Abbildung 5.46 stellt (vergrößert, noch einmal viergeteilt und zur Verdeutlichung in der Verzerrung etwas verstärkt) die gelbe Fläche aus Abbildung 5.44 dar.

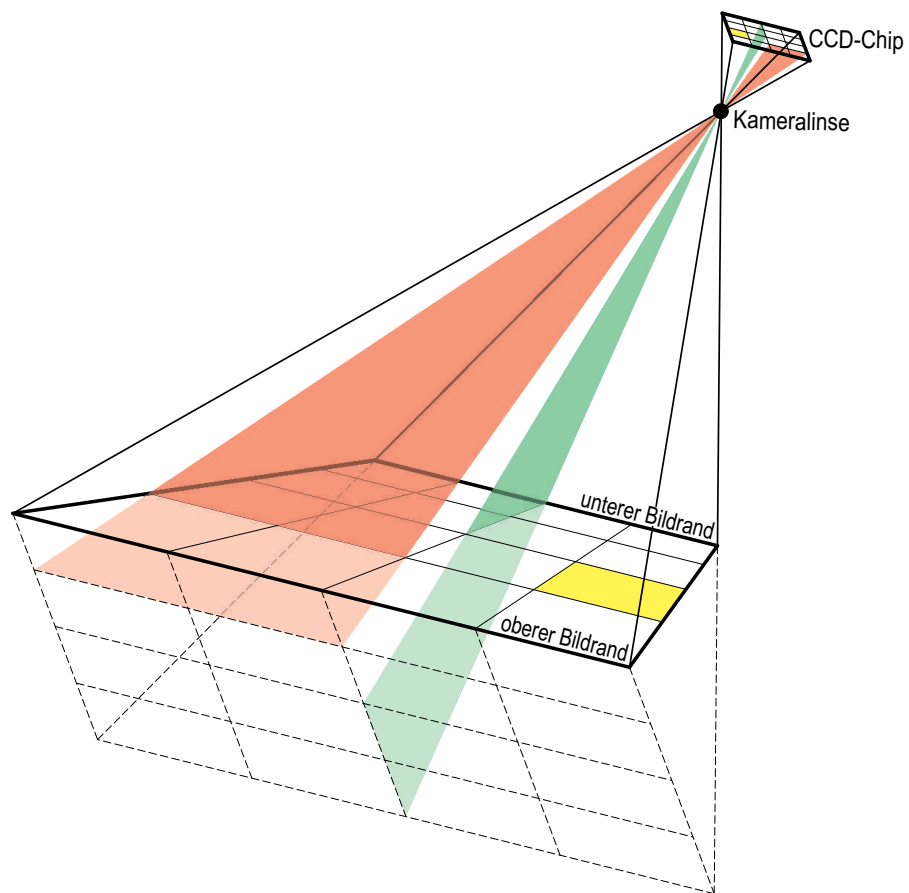


Abbildung 5.44: Verzerrung in x-Richtung (rot) und in y-Richtung (grün)

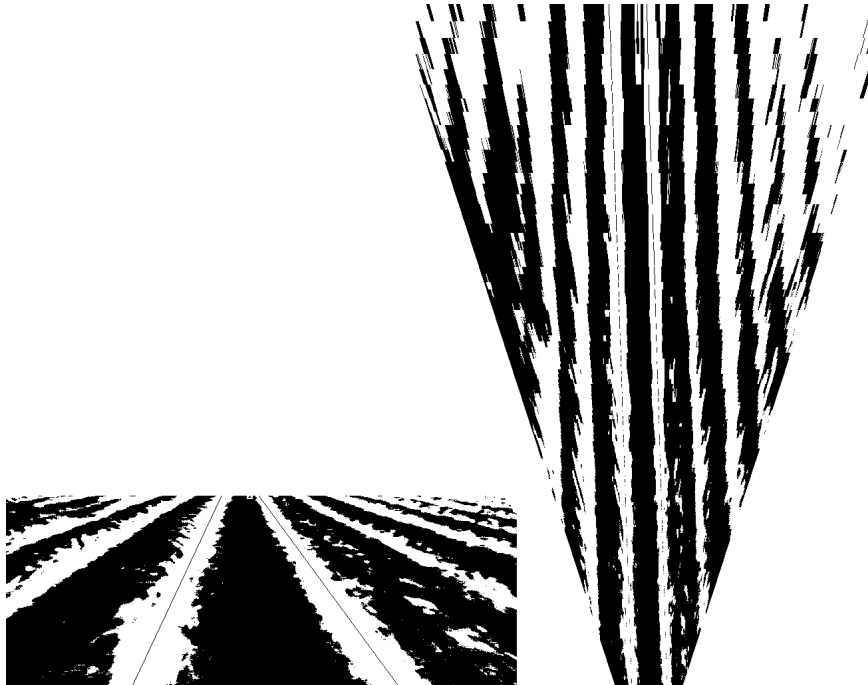


Abbildung 5.45: Kamerasichtfeld (links) und reale Abmessungen (rechts)

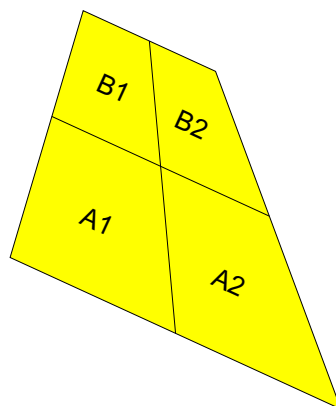


Abbildung 5.46: Verzerrung eines Bildpunktes

[illegible]

Auf dieses reduzierte Modell mit acht Bildzeilen ($Y_{Res}=8$) beziehen sich die nachstehenden Erläuterungen. Zwischen der Kamera-Sichtfeldbreite und -länge besteht ein linearer Zusammenhang. Dieser ist im unteren Drittel der Abbildung 5.48 mit der Geraden $B(D) = m \cdot D + OO_OS$ dargestellt. Zu beachten ist die Richtungsumkehr, die aus der Bildzeilen-Anordnung und -bezeichnung im PC-Speicher folgt: Die positiven Abszissenwerte werden nach links abgetragen und D_i (im Quelltext `D_I`) bezeichnet nicht die Sichtfeldlänge ab dem unteren Bildrand (`ZO_ZS`), sondern die Strecke ab dem oberen Bildrand, die zurückgelegt wird, wenn man auf dem Bildschirm von der (obersten) Zeile 0 nach unten in die Zeile i springt. Für die Berechnung von D benötigt man zunächst den vertikalen Öffnungswinkel der Kamera γ (`W - 1` im Quelltext):

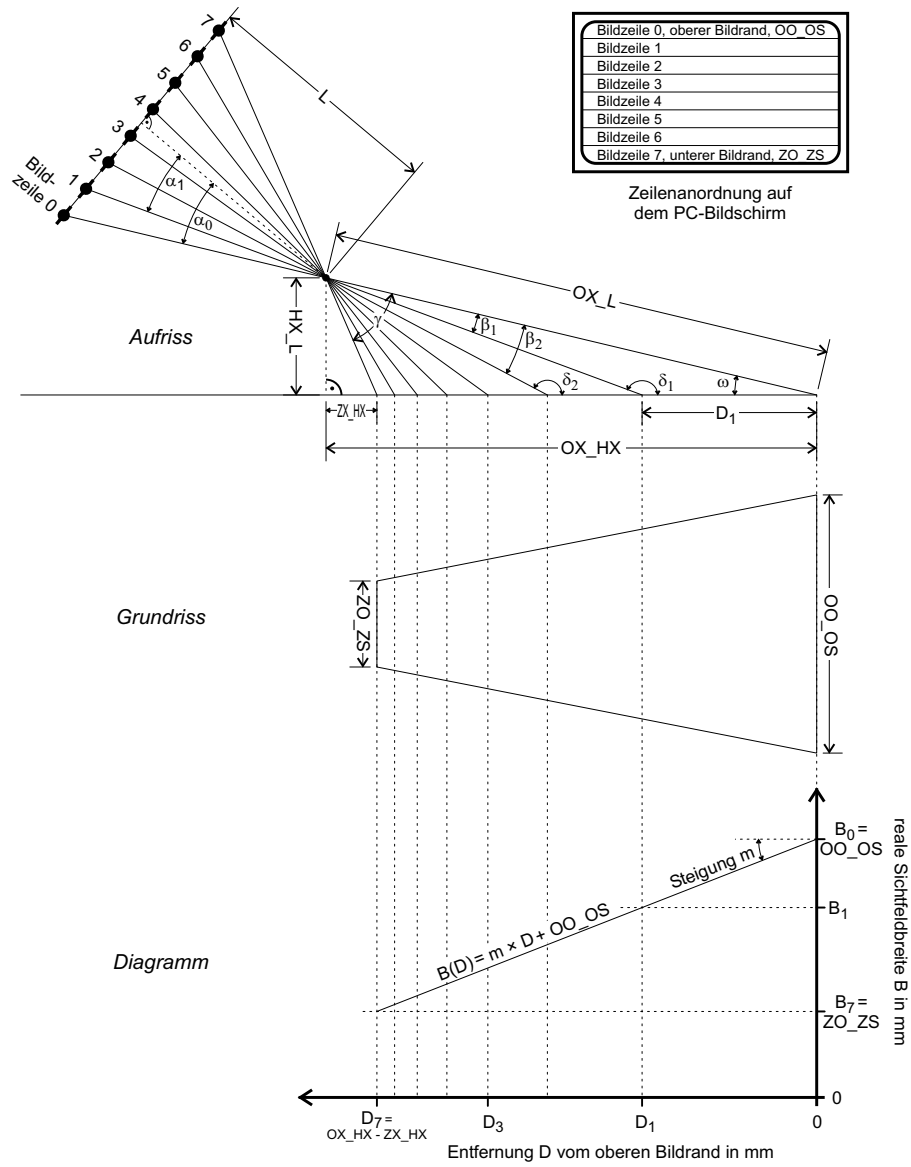


Abbildung 5.48: Herleitung der Formeln zur Berechnung der wahren Längen

$$\gamma = \arctan\left(\frac{OX_HX}{HX_L}\right) - \arctan\left(\frac{ZX_HX}{HX_L}\right)$$

Für jede Bildzeile Z_i gibt es einen Winkel α_i :

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{Z_i - \frac{Y_{Res}-1}{2}}{L}\right)$$

L wird beschrieben durch die Beziehung:

$$L = \frac{\frac{Y_{Res}-1}{2}}{\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)}$$

Nach einer Addition von $\frac{\gamma}{2}$ zu α_i erhält man für β_i , bzw. im Quelltext W_3_I, folgende Gleichung:

$$\beta_i = \frac{\gamma}{2} + \arctan\left(\frac{2 \cdot Z_i}{Y_{Res} - 1} - 1\right) \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)$$

Die Anwendung des Sinussatzes führt zu folgendem Zusammenhang:

$$\frac{D_i}{\sin \beta_i} = \frac{OX_L}{\sin \delta_i}$$

Dabei gilt für $\sin \delta_i = \sin(180 - (\omega + \beta)) = \sin(\omega + \beta)$ und für $\omega = \arctan\left(\frac{HX_L}{OX_HX}\right)$. Im Quelltext steht W_2 für den Winkel ω . Die Werte auf der Abszisse in Abbildung 5.48 errechnen sich demnach nach der Formel:

$$D_i = \frac{OX_L \cdot \sin \beta_i}{\sin(\beta_i + \omega)}$$

Aufgrund der genannten Abszissen-Richtungsumkehrung wird die Geradensteigung m nach folgendem Schema angegeben:

$$m = \frac{\Delta y}{-\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_1 - x_2}$$

Konkret führt dies zu:

$$m = \frac{ZO_ZS - OO_OS}{OX_HX - ZX_HX}$$

Mit diesen Herleitungen steht alles zur Verfügung, um anhand der einleitend erwähnten Geradengleichung zu jeder Bildzeile Z_i die Sichtfeldbreite B_i zu berechnen, die sie abbildet. B_i geteilt durch die Anzahl der Pixelzwischenräume innerhalb einer Zeile ($X_{Res} - 1$) ergibt die zurückgelegte Strecke im Sichtfeld, wenn man von einem Pixel zum danebenliegenden übergeht. Diese Strecke entspricht der durch ein Pixel dieser Zeile abgebildeten Breite und wird in MM_PRO_PXL[I] gespeichert.

5.2.4.3 Initialisierung

Der größte Teil der Einstiegsphase wird über die Funktion **Programmstart()** veranlasst, die in der **main()**-Funktion an erster Stelle steht. Sie stellt neben der Abfrage der Versuchsbezeichnung hauptsächlich einen Container für eine Reihe anderer Initialisierungsfunktionen dar. Zunächst ist dies **init_parameters()**. Es kann gewählt werden, ob die für das Regelungsprogramm erforderlichen Parameter aus der in der Datei `david_glob_def.h` definierten oder einer vom Benutzer angegebenen Konfigurationsdatei eingelesen werden sollen. Kann die Datei geöffnet werden, werden mit 44 Aufrufen von **read_param()** die Parameter eingelesen. Damit keine Verwechslungen auftreten, wird jeder Parameter durch eine eindeutige Zeichenfolge in der Konfigurationsdatei eingeleitet. Ein fehlender oder fehlerhaft gelesener Parameter führt zum Programmabbruch, damit im späteren Lenkautomatikbetrieb keine unvorhersehbaren Reaktionen auftreten. Manche Größen werden programmintern in einer anderen als der eingelesenen Einheit benötigt, so dass **init_parameters()** mit einigen Umrechnungen abschließt.

Die Befehlsstruktur von **init_itex_icpci()** und **LoadCnf_GetPointers()** ist überwiegend der Dokumentation der Bildverarbeitungskarte entnommen. Für die Bildverarbeitungskarte und deren Acquisition-Modul, das die Verbindung zur Kamera herstellt, ist eine eigene Konfigurationsdatei erforderlich. Diese kann mit dem mitgelieferten Itex-Configurator-Tool erstellt werden und beinhaltet Angaben zur Kamera, deren Auflösung, Video-Eingangs- und -ausgangsformat, Farbabgleichseinstellungen, sowie die Matrix zur Farbraumkonvertierung, bzw. im vorliegenden Fall zur Grün-Rot-Differenzbildung. Innerhalb von **LoadCnf_GetPointers()** wird die Datei geladen, die Hardware entsprechend konfiguriert und in sogenannten Zeigervariablen die Adressen der Bildverarbeitungskarte und des Acquisition-Moduls gespeichert. Über die Zeiger ist es möglich, auf der Hardware bestimmte Aktionen auszulösen, beispielsweise einen Bus-Master-Transfer oder das Setzen neuer Werte in der Matrix oder in den Look-up-tables. Eine falsche Installation, eine fehlerhafte Kamera-Konfigurationsdatei oder andere auftretende Initialisierungsfehler führen ebenso zum Programmabbruch wie eine in den beiden Konfigurationsdateien widersprüchlich angegebene Kameraauflösung. Im nächsten Schritt wird durch **init_mm_pro_pxl()** die Tabelle `MM_PRO_PXL[i]` berechnet. Die Grundlage für die Berechnung bilden einige der inzwischen eingelesenen Programmparameter. Gebraucht wird diese Tabelle später vom Reihenverfolgungsalgorithmus, der zu jeder Bildzeile *i* die Breite in Millimeter ablesen kann, die durch einen Bildpunkt dieser Zeile dargestellt wird.

Nach der Vorbereitung einer Protokolldatei `[VBez8]bvAlgoDat.txt` für Kenn- und Koordinatenwerte, die vom Bildverarbeitungsalgorithmus errechnet werden, geht die Kontrolle an die **Programmstart()**-Funktion zurück und von dort weiter an **Set_AMC_LUT()**. Das Acquisition-Modul besitzt für jeden seiner drei Farbkanäle sowohl eine Eingangs- als auch eine Ausgangs-LUT. Die Eingangs-LUT wird standardmäßig 1 : 1 initialisiert, bei der Ausgangs-LUT hängen die Werte von eventuell durchzuführenden Farbraumkonvertierungen

⁸VBez = Versuchsbezeichnung, die bei Beginn eines Versuchs eingegeben werden muss

ab. Für die vorliegende Anwendung müssen die LUTs umprogrammiert werden, damit die von der Matrix weitergegebenen Grün-Rot-Differenzwerte binarisiert werden. Aus programmiertechnischer Sicht ist zu beachten, dass die Matrix-Ausgangswerte der Kanäle A und C aus Genauigkeitsgründen, die für bestimmte Farbraumkonvertierungen notwendig sind, Werte zwischen 0 und 32767 annehmen können. Damit liegen sie um den Faktor 128 höher als die Werte des B-Kanals, dessen Bandbreite nur 8 Bit umfasst. Als letzte Funktion in **Programmstart()** muss **SendParameter()** abgearbeitet werden. Damit diese mit dem Zweitreechner die Verbindung aufnehmen kann, wird in **InitComm()** die serielle Schnittstelle aktiviert. Da WindowsNT mit Hardwarezugriffen sehr viel restriktiver umgeht als DOS, ist hier der Programmieraufwand entsprechend größer. Zunächst müssen drei Strukturen angelegt werden mit einer Reihe von Schnittstellenparametern. Nicht ganz so wesentlich ist die Timeout-Struktur. Über Timeout-Variablen kann darauf Einfluss genommen werden, wie lange höchstens gewartet wird, wenn zum Zeitpunkt eines Lesebefehls noch keine Daten eingegangen sind oder nach welcher Zeit ein Sendebefehl abgebrochen wird, wenn der Empfänger die Leitung nicht freigibt. Das Stichwort overlapped, das sich hinter READ_OS⁹ und WRITE_OS verbirgt, hat mit der Möglichkeit unter WindowsNT zu tun, im Nachhinein zu überprüfen, ob Daten letztlich doch noch gesendet oder gelesen werden konnten, falls zum Zeitpunkt des entsprechenden Befehls die Übertragung durch die Gegenseite blockiert war. Die dritte Struktur schließlich fasst die zentralen Parameter zusammen. Es sind dies die Baudrate, Angaben über Paritäts- und Stoppbits sowie das sogenannte Handshaking¹⁰.

Nachdem die Schnittstelle zur Kommunikation vorbereitet ist, werden alle Parameter, die der Reglercomputer für seine Berechnungen braucht, zur Übertragung in zwei lokalen Array-Variablen einheitlich abgelegt. Durch diese anfängliche Übertragung benötigt man keine weitere, auf dem zweiten Rechner gespeicherte Konfigurationsdatei. **SendParameter()** tritt nun in eine Schleife ein, in der kontinuierlich überprüft wird, ob sich der Empfänger meldet, und zwar exakt mit dem in der Variablen CODE[] gespeicherten Passwort. Wird dieses Passwort erkannt, wird es umgehend zurückgesendet, damit der Empfänger in den Parameterempfangsstatus umschaltet. Während der Übertragung wird jedes Byte mitgezählt, sowohl vom Empfänger als auch vom Sender. Zuletzt werden die Summen ausgetauscht und gegenseitig verglichen. Bei Differenzen bricht das Programm mit einer entsprechenden Meldung ab. Abschließend ermittelt **SendParameter()** über **EmfaengerStatus()**, ob der Empfänger in den Positionsempfangsmodus gewechselt hat. Erkennbar ist dies an einem kontinuierlichen Wechsel zwischen low- und high-Zustand des empfängerseitigen RTS-/CTS-Anschlusses, der mit dem RLSD-/CD-Anschluss der Senderschnittstelle verbunden ist. Einige Befehlszeilen zum Anlegen und Öffnen der Protokolldatei [VBez]main1Dat.txt schließen die Funktion **Programmstart()** schließlich ab.

Nachdem alle Komponenten startbereit sind, wird über **acquire()** die Bild-

⁹OS = Overlapped Structure

¹⁰Signalisierung der Sende- bzw. Empfangsbereitschaft

verarbeitungskarte in Betrieb gesetzt. Dies ist der Zeitpunkt null, von dem aus die in den Bitmapkopfzeilen angezeigten Sekunden gezählt werden. Einige Einstellungen für die spätere Bildausgabe am Monitor werden noch getätigt und per **bmp_open()** eine Datei [VBez] bmp.bmp geöffnet, die Kontroll-Bitmaps speichert. Bevor **main()** in die Hauptschleife überführt, ruft sie das Hilfsprogramm PciView.exe auf, mit dem auf dem Monitor die laufenden Binärbilder angezeigt werden können.

Die Initialisierungsprozesse im Nebencomputer gestalten sich deutlich einfacher. Der erste Vorgang in **main()** ist ein **EmpfangParameter()**-Aufruf, der weitergeleitet wird an **InitEmpfangParameter()**. Dort werden per **InitDosCom()** einige Register gesetzt, um die dem Sender entsprechende Übertragungsrate etc. einzustellen. In einer Programmschleife wird solange abwechselnd das Erkennungscodewort gesendet und eine eventuelle Antwort abgeprüft, bis entweder der Sender den Code erwidert oder der Benutzer das Programm abbricht. Da während der Initialisierungsphase die Zeit nicht der begrenzende Faktor ist und es sich bei den Parametern teilweise um Fließkommazahlen handelt, wird für deren Übertragung die Schnittstelle in **EmpfangParameter()** vorübergehend in einem anderen Modus angesprochen. Lässt der Vergleich der Anzahl gesendeter Bytes mit der Anzahl empfangener Bytes auf eine ordnungsgemäße Übertragung schließen, werden am Monitor des Zweitcomputers alle empfangenen Werte angezeigt. Wieder zurück in **main()**, wird auch empfängerseitig eine Protokolldatei für die Aufzeichnung wichtiger Zwischen- und Endergebnisse des Regelungsprogramms geöffnet.

Die wichtigste Aufgabe der Hauptschleife im Sender ist die Bildverarbeitung, die die im Folgenden besprochenen Phasen umfasst: Bilddatentransfer, Reihenverfolgungsalgorithmus, Positionsberechnung und gegebenenfalls Bildspeicherung auf einem Datenträger. Der Zähler Index wird zu Beginn jedes Schleifendurchlaufs um eins erhöht. Er ist global abrufbar, erscheint in allen Protokolldateien, einschließlich der des Empfängers, da der Zählerstand mit den Positionswerten übermittelt wird. So können die Daten der Protokolldateien im Nachhinein einander wieder zugeordnet werden. Über **BMPSPEICHERRATE** kann in der Konfigurationsdatei xyl.txt festgelegt werden, jedes wievielte Bild samt zugehöriger Daten auf die Festplatte rückgeschrieben wird.

Die erste Phase der Bildverarbeitung wird mit **bm_transf()** eingeleitet. Seit dem Aufruf von **acquire()** steht die Bildverarbeitungskarte über das Acquisition-Modul mit der Kamera in Verbindung und schreibt die laufenden Bilddaten in einen lokalen Zwischenspeicher. Während der Initialisierungsphase wurde dieser Speicher in zwei Blöcke aufgeteilt, die sogenannten Frames. Die CCD-Kamera erzeugt, der Fernsehnorm entsprechend, 50 Halbbilder pro Sekunde. Jeder der beiden Frames kann ein Halbbild aufnehmen, so dass je nach per **icp_bm_ilace()** eingestelltem Modus ein Voll- oder zwei Halbbilder abgegriffen werden können. Da bei der gegebenen Kameraauflösung von 768·572 Bildpunkten jedes Halbbild aus 286 Zeilen besteht und dies für den Reihenverfolgungsalgorithmus ausreicht, wird die Bildverarbeitung im Halbbildmodus betrieben. Damit immer die neuesten Bildinformationen ins Computer-RAM verschoben werden, laufen mehrere Schritte ab: **icp_wait_start_vb()** wartet auf das nächste Austastsignal (Vertical Blank), das dem Aufbau eines neuen

Halbbilds vorangeht. Über das Register FLDSTAT wird ermittelt, ob vor diesem letzten Austastsignal das erste oder zweite Halbbild (even oder odd field) übertragen wurde.

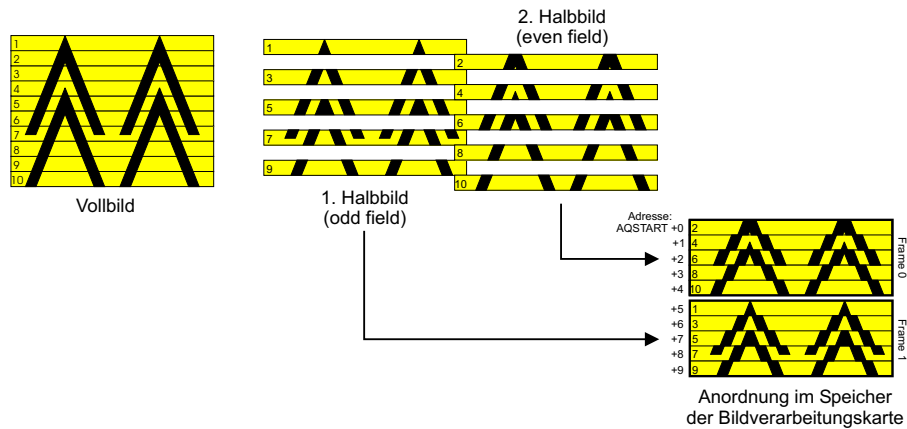


Abbildung 5.49: Speicherung der Halbbilder im Interlaced-Modus

Da in **acquire()** das Register FLDSEL auf zwei gesetzt wurde, gilt die in Abbildung 5.49 dargestellte Zuordnung zwischen Halbbild und Frame, über die sich die Startadresse des jeweils aktuellen Bildes ableiten lässt. Bevor die Bildverarbeitungskarte das Kommando über das PC-Bus-System (Bus-Master) anfordern kann, müssen drei Angaben gemacht werden:

- die Adresse von buf, dem im PC-RAM angelegten Array für die Bildspeicherung,
- die schon erwähnte Lese-Startadresse des aktuellen Bildes,
- die Menge der zu übertragenden Daten in Bytes.

Mit der Datenmengenerklärung wird zugleich veranlasst, dass das buf-Array für andere Zugriffe gesperrt wird, damit nicht Lese- und Schreiboperationen zeitgleich ablaufen.

5.2.4.4 Positionsregelung

Sobald von **icp_wait_bm_done()** der Abschluss des Bus-Master-Transfers gemeldet wurde, startet **main()** mit **extended_image_proc()** die nächste Phase. Diese Funktion koordiniert die Aufrufe von **image_proc()**, dem Reihenverfolgungsalgorithmus im eigentlichen Sinne. Koordination bedeutet hier zunächst die Übergabe von Parametern, die zum einen die jeweilige Reihe kennzeichnen, wenn in einem Bild mehrere Regressionsgeraden zu berechnen sind und zum andern einen Speicherort angeben, an dem die einzelnen Ergebnisse abgelegt werden sollen. Am Anfang von **image_proc()** steht die Bestimmung der beiden Variablen TAST_BER und STD_KORR. TAST_BER steht für die Breite des Bereichs, den der Algorithmus zur Verfolgung der Reihe links und rechts von ihr abtastet. Bei einem zu großen Tastbereich erhöht sich das Risiko, dass

der Algorithmus auf die Nachbarreihe überspringt, während bei einem zu kleinen Bereich eventuell das Ergebnis dadurch verfälscht wird, dass nicht mehr die ganze Reihe erfasst wird. `TAST_BER` ist abhängig von der Reihenbreite, die mit dem vom Anwender über die Konfigurationsdatei festgelegten Tastbereichsfaktor multipliziert wird. Programmintern wird `TAST_BER` auf die Hälfte des Reihenabstands begrenzt, um die erwähnten Übergriffe zu vermeiden. `STD_KORR` ist ein Korrekturwert, der standardmäßig in den Algorithmus mit einfließt, um perspektivische Verzerrungen auszugleichen. Eine sehr wichtige Voraussetzung für gute Regressionsergebnisse ist die Wahl eines optimalen Einsetzpunktes für den Verfolgungsalgorithmus. Die Schwierigkeit besteht darin, dass mit der Einsetzpunktsuche einerseits ein Bereich abgedeckt werden muss, der so breit ist, dass er die Leitreihe mit einer gewissen Sicherheit beinhaltet. Andererseits darf er nicht so breit sein, dass unter ungünstigen Umständen zwei Reihen auf einmal erfasst werden. Daher erstreckt sich das Verfahren zur Einsetzpunktermittlung über zwei Phasen. Als erster Anhaltswert für den Ausgangspunkt wird die Bildspalte `j` herangezogen, die bei korrekter Traktorposition den Mittelpunkt der Leitreihe abbilden würde. Dies geschieht mit folgender Formel:

$$j = \frac{X_RES}{2} + \frac{Rh_SM + Kam_SM + akt_Rh \cdot Rh_Rh}{mm_pro_pxl}$$

`X_RES` ist die Bildauflösung in x-Richtung, `RH_SM` und `KAM_SM` steht für den per Konfigurationsdatei anzugebenden Abstand zwischen der Hauptleitreihe und der Schlepperlängsachse (Schleppermitte), wenn sich diese in Sollposition befindet. `KAM_SM` ist zu deklarieren, wenn ein Versatz zwischen der Kamera und der Längsachse vorliegt. Von `extended_image_proc()` wurde der Parameter `AKT_RH` übergeben, dessen Wert für die Hauptleitreihe 0 beträgt, für die Reihe links davon -1 bzw. rechts davon +1. Ausgehend von dieser Spalte `j` werden durch drei Zähler drei Felder der Höhe `dZ` zeilenweise auf weiße (Pflanzen darstellende) Bildpunkte abgesucht: je ein Feld einen halben Reihenabstand nach links und rechts sowie ein Feld derselben Breite mittig über `j`. Je nachdem, welcher Zähler den höchsten Stand pro Zeile erreicht, wird der Ausgangspunkt um eine viertel Reihenbreite nach links oder nach rechts korrigiert oder beibehalten. Sollte einer der seitlichen Zähler schon in den Bereich der nächsten Reihe hineinlaufen, z. B. weil der Traktor schräg steht, so dürfte er im Normalfall deshalb nicht das Pflanzenbildpunkt-Maximum ermitteln, weil er dann auch den gesamten Reihenzwischenraum beinhaltet.

Mit dieser Art der Ausgangspunkt-Grobeinstufung kann also ein sehr breites Ausgangsfeld abgetastet werden, ohne dass Schwierigkeiten auftreten, wenn sich dieses Ausgangsfeld teilweise in eine benachbarte Reihe hineinerstreckt. Das gilt zumindest solange, wie nebeneinander liegende Reihen nicht durch Unkrautplatten verbunden sind. Die Groborientierung läuft in einer Schleife, die beendet wird, wenn der mittlere Zähler das Maximum erreicht hat und damit keine Grobkorrektur mehr erfolgen muss. Der durchschnittliche Spaltenindex der Ausgangspunkte der einzelnen Zeilen bildet die Grundlage für die genauere Einsetzpunktsuche. Da die Ermittlung der einzelnen Regressionspunkte bis auf minimale Unterschiede nach demselben Schema abläuft wie die Festlegung des

exakten Einsetzpunktes, wird auf eine ausführliche Beschreibung der Letzteren verzichtet.

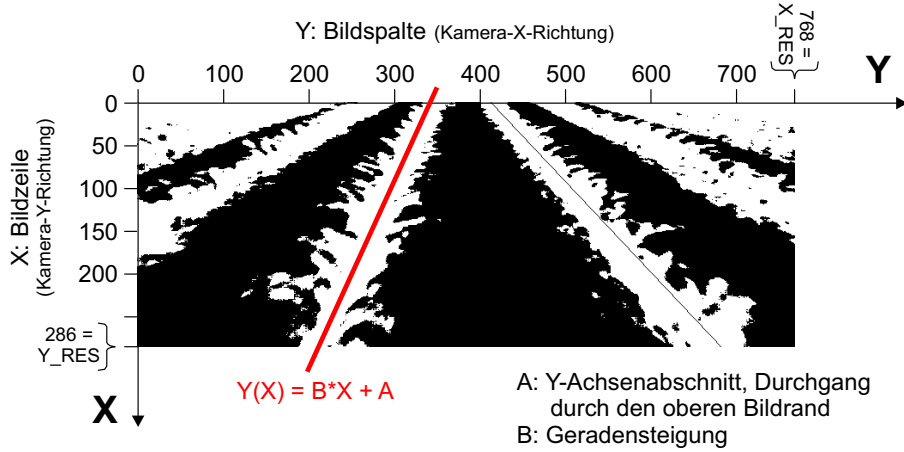


Abbildung 5.50: 90 Grad Drehung des Bildkoordinatensystems

Wenn die Traktorlängsachse parallel zur Leitreihe verläuft und sich die Kamera gleichzeitig exakt über dieser Reihe befindet, steht die entsprechende Regressionsgerade senkrecht im Bild. Um in dieser Situation nicht mit einer Geradensteigung von $m = \infty$ umgehen zu müssen, wird das Koordinatensystem, wie in Bild 5.50 verdeutlicht, um 90 Grad gedreht. Die Ermittlung eines Regressionspunktes geschieht anhand des Verlaufs der Dichte weißer Bildpunkte innerhalb des Abtastbereichs eines Bildabschnitts. In Abbildung 5.51 ist ein solcher Abtastbereich (blaues Rechteck) vergrößert dargestellt. Dessen Größe hängt in der Breite vom schon erwähnten Tastbereichsfaktor, in der Höhe von dZ ab. Seine horizontale Lage wird im untersten Abschnitt durch den Einsetzpunkt bestimmt, in allen weiteren jeweils durch den vorhergehenden Regressionspunkt, korrigiert um den Verzerrungs-Korrekturwert STD_KORR .

Die Anzahl weißer Bildpunkte je Dichtefeld (hellgelb bzw. orange) ist nach unten in einem Diagramm abgetragen. Sie wird mit der Variablen $DICHTE$ gezählt und mit REF_DICHTE_L (Referenzdichte von links) verglichen. Wenn $DICHTE$ größer ist als REF_DICHTE_L , wird diese und REF_DICHTE_R (Referenzdichte nach rechts) auf den Wert von $DICHTE$ erhöht und in $RANDPOS_L$ der Bildspaltenindex gespeichert, in dem dieses bisherige Dichtemaximum auftrat. Nähert sich der Algorithmus dem rechten Rand der Leitreihe, beginnt die Zahl schwarzer Bildpunkte zuzunehmen. D. h. $DICHTE$ nimmt Werte an, die kleiner als REF_DICHTE_R sind. Tritt dieser Fall ein, wird REF_DICHTE_R gleich null gesetzt und mit $RANDPOS_R$ der Bildspaltenindex festgehalten, an dem der Bereich der maximalen Dichte zu Ende geht. Der Mittelpunkt zwischen den beiden Dichtemaximum-Rändern ergibt den x-Wert des neuen Regressionspunktes, wobei dieser so begrenzt wird, dass der Sprung vom Ausgangs-x-Wert höchstens $CORR_MAX$ Bildpunkte beträgt.

Die Formel für die Geradensteigung B , den y-Achsenabschnitt A und das Bestimmtheitsmaß r^2 können einschlägiger Fachliteratur entnommen werden (statt $\sum_{i=1}^D x_i$ wird vereinfacht $\sum x$ geschrieben):

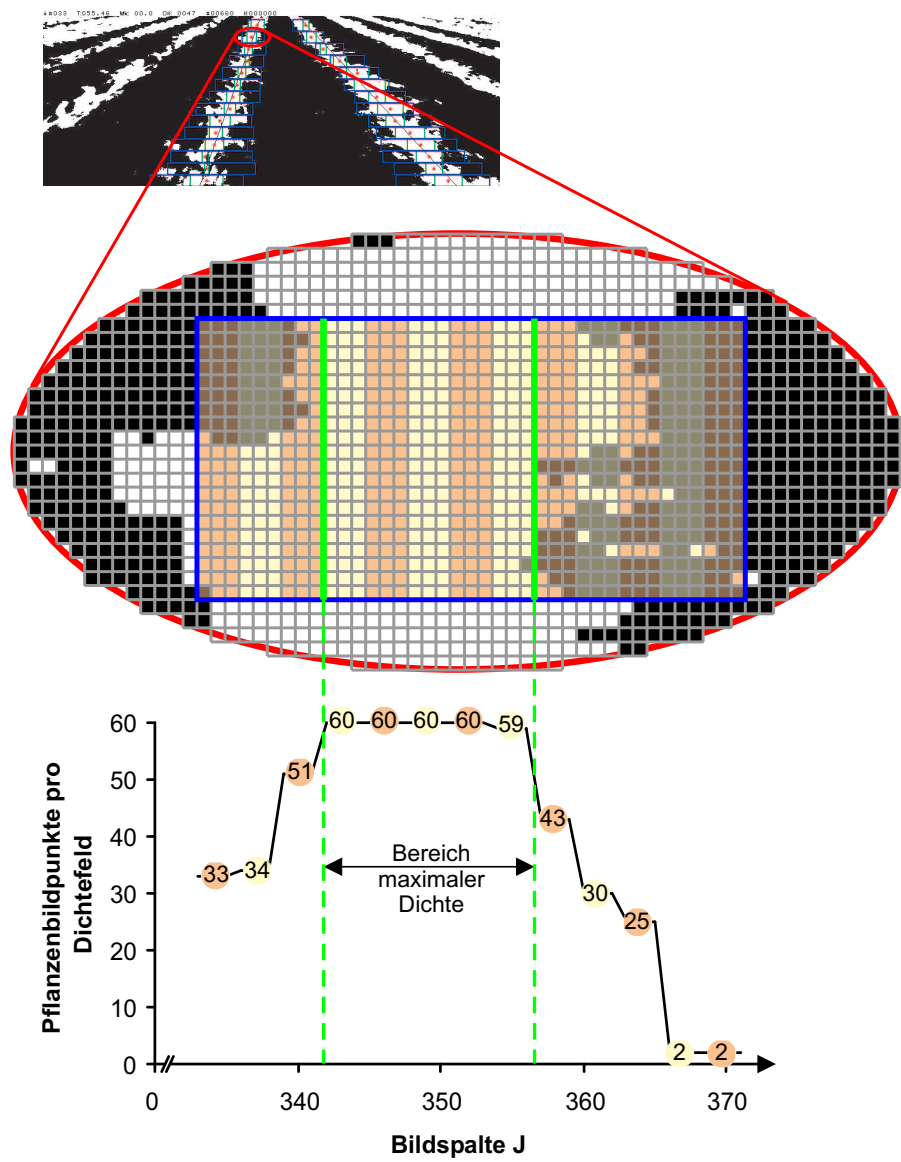


Abbildung 5.51: Regressionspunktermittlung

$$B = \frac{\sum (x \cdot y) - \left(\sum x \cdot \frac{\sum y}{D} \right)}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{D}}$$

$$A = \frac{\sum y}{D} - B \cdot \frac{\sum x}{D}$$

$$r^2 = \frac{\left(\sum (x \cdot y) - \frac{\sum x \cdot \sum y}{D} \right)^2}{\left(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{D} \right) \cdot \left(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{D} \right)}$$

Aus den Formeln geht hervor, dass es nicht nötig ist, alle einzelnen Koordinaten zu speichern, da die laufende Bildung der Summen $\sum x$, $\sum y$, $\sum (x \cdot y)$, $\sum x^2$ und $\sum y^2$ ausreicht.

Aus der Lage der Regressionsgeraden im Bild können der Headingwinkel γ und der Offset gemäß Abbildung 5.52 abgeleitet werden. A und C sind die Spaltenindizes für den Durchgang der Geraden durch den oberen bzw. unteren Bildrand. Aufgrund der Bildverzerrung müssen sie durch Abzug von $X_RES/2$ auf die Kameralängsachse bezogen werden. Die Umrechnung von Pixelgrößen in Millimeter geschieht durch Multiplikation mit $MM_PRO_PXL[i]$. Nach diesen Umformungen kann die Differenz aus A und C zu OX_HX-ZX_HX ins Verhältnis gesetzt und über die Arkustangens-Funktion der Heading errechnet werden:

$$\gamma = \arctan \frac{A - C}{OX_HX - ZX_HX}$$

Der Offsetwert muss auf einen Referenzpunkt bezogen werden. Hierfür wurde der Schnittpunkt aus der Traktorlängsachse und der Unterkante des Kamera-Sichtfelds gewählt. C geht nach demselben Schema wie beim Heading in die Rechnung ein, nur dass es nicht von A subtrahiert, sondern um KAM_SM korrigiert wird und über den Kosinus zur Zwischengröße Off' führt:

$$Off' = \left(\left(C - \frac{X_RES}{2} \right) \cdot mm_pro_pxl[i] - Kam_SM \right) \cdot \cos \gamma$$

Off' ist der senkrechte Abstand des Referenzpunktes von der Leitreihe in Millimeter. Vermindert man Off um RH_SM , erhält man den Offset ($OFFSET_UBR$), den seitlichen Versatz des Traktors auf Höhe des unteren Bildrands.

Im Abstand von $BMP_SPEICHERRATE$ Bildern wird ein Schwarzweiß-Bitmap für Dokumentationszwecke gespeichert. Da dies kein für die Lenkungsautomatisierung an sich unbedingt notwendiger Vorgang ist, wird er hier nur kurz erläutert. Nach einem ähnlichen Schema wie im vorigen Abschnitt, nur umgekehrt, wird aus den global gespeicherten Positionswerten die Geradenformel im Bild

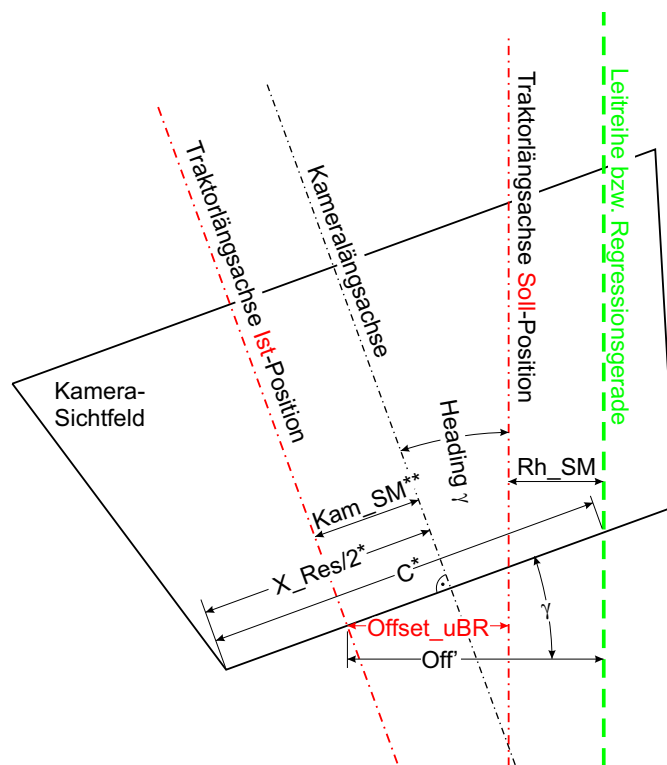
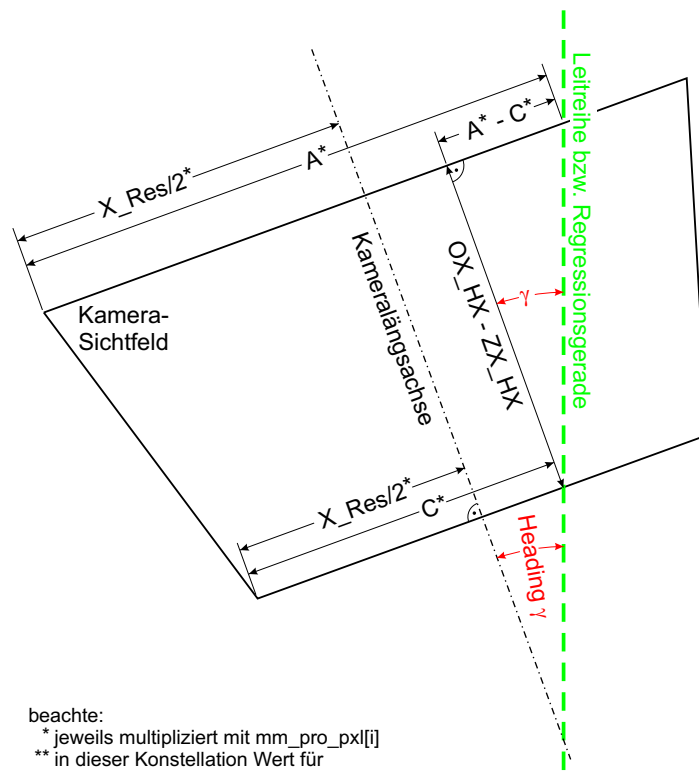


Abbildung 5.52: Berechnung von Heading (oben) und Offset (unten)

berechnet. Damit sowohl flache als auch steile Geraden korrekt, also einen Punkt breit und nicht lückig, gezeichnet werden, ist eine Fallunterscheidung nötig: Bei einem Betrag der Geradensteigung kleiner oder gleich eins wird in jeder Zeile x der Bildpunkt in der Spalte y gleich null (schwarz) gesetzt; ansonsten erfolgt die Zuordnung gegenteilig, und zu jeder Spalte y wird der Bildpunkt in der richtigen Zeile x gesucht. Nach der Eintragung der beiden Dreiecke, die den Verlauf der Regressionsgeraden bei null Heading und null Offset andeuten, wird die Bildinfo-Kopfzeile erstellt. Die Bedeutung der einzelnen Werte wurde schon erläutert. Die jeweils 7·8 Pixel großen Erscheinungsbilder der 20 in dieser Infozeile vorkommenden Zeichen sind im Array `DESIGN[]` gespeichert. Im Array `ZEICHEN[]` wird festgehalten, an welcher Stelle der Infozeile welches Zeichenerscheinungsbild zu stehen hat. Der wesentliche Schritt der Kopfzeilenerstellung besteht darin, die einzutragenden Variablenwerte in ihre Ziffern zu zerlegen und diese Ziffern den richtigen Positionen in der Infozeile zuzuweisen. Das Binärbild liegt so im PC-RAM vor, dass ein Byte einen Bildpunkt repräsentiert. Da bei einem Schwarzweiß-Bitmap aber ein Bit pro Pixel ausreicht, erfolgt vor der Ausgabe in eine Datei eine entsprechende Komprimierung.

Einmal pro Schleifendurchlauf des Hauptcomputers werden Daten an den Zweitrechner gesendet. Dabei handelt es sich um den Index des verarbeiteten Bildes und die zugehörigen Werte für Heading und Offset, die aber durch einen Befehlscode ersetzt werden können, wenn zuvor ein Nutzereingriff stattgefunden hat. Für die Übertragung werden die zu sendenden Daten so umgerechnet und skaliert, dass sie in sechs Bytes untergebracht werden können. Dabei wird aus einem weiter unten erklärten Grund sichergestellt, dass nicht alle sechs Bytes aus exakt derselben Bitfolge bestehen. Bevor ein solches Datenpaket abgeschickt werden kann, muss vom Empfänger die Sendeerlaubnis vorliegen, indem dieser seinen DTR¹¹-Anschluss auf high setzt. Am Zweitcomputer angekommen, werden die Daten zunächst in einem FIFO-Puffer (first-in-first-out-Zwischenspeicher) abgelegt. Der FIFO-Speicher wird vom Empfängerprogramm einmal pro Hauptschleifendurchlauf geleert, wenn die Abtastung des Empfänger-CD¹²-Anschlusses ein low-Signal ergibt. Der Zustand am CD-Pin wird senderseitig vom RTS¹³-Anschluss gesteuert. RTS ist solange auf high-Potential, bis alle sechs Bytes den Sender verlassen haben. Damit wird verhindert, dass der Empfänger ein Datenpaket aus dem FIFO-Puffer abrufen, bevor es vollständig übermittelt wurde. Der FIFO-Speicher umfasst 16 Bytes, die nacheinander ausgelesen werden können, wobei bei jeder Abfrage der Wert des Bytes an erster Stelle in einer Variablen gespeichert werden kann. Anschließend wird die erste Stelle gelöscht und alle weiteren Stellen werden eine Position nach vorne verschoben. Wenn das letzte gesendete Byte die erste Stelle belegt, wird es nicht gelöscht, sondern sein Wert wird bei jedem weiteren FIFO-Abruf ausgegeben. So kann das Programm an sechs aufeinander folgenden exakt gleichen Bytes erkennen, dass sich im FIFO-Speicher keine Daten mehr befinden, denn wie schon erwähnt, besteht ein Datenpaket niemals aus sechs gleichen Bytes.

¹¹DTR: Data Terminal Ready, Pin 4 der seriellen Schnittstelle

¹²CD: Carrier Detect, Pin 1 der seriellen Schnittstelle

¹³RTS: Request To Send, Pin 7 der seriellen Schnittstelle

5.2.4.5 Positionsinterpolation und Signalkorrektur

Bei den folgenden Ausführungen ist viel Wert auf die Beachtung der Vorzeichen zu legen. Lenkwinkel sind bei Rechtseinschlag negativ, Headingwinkel bei Fahrtrichtung nach rechts und Offset bei seitlichem Versatz nach rechts ebenfalls. Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass unterschieden wird zwischen dem Lenkwinkel an der Vorderachse (LW_VA), sowie zwei weiteren (LW_UBR und LW_RGLPKT), die eingestellt werden müssten, wenn sich die Vorderachse auf Höhe des Regelpunktes bzw. des unteren Bildrands befände. Den Offset gibt es ebenfalls als OFFSET_UBR und als OFFSET_RGLPKT. Die jeweiligen Werte lassen sich durch einfache trigonometrische Rechenschritte ineinander überführen. Es ist das Ziel der gesamten Regelung, den Traktor auf Höhe des Regelpunktes, der in der Konfigurationsdatei festzulegen ist, möglichst gut in der Sollposition zu halten. Um dies zu erreichen, wird nach vier Kriterien aus der aktuellen Ist-Position ein Soll-Lenkwinkel abgeleitet.

1. Das Hauptkriterium wurde schon in Abschnitt 5.2.4.1 auf Seite 82 erklärt. Bei einem optimalen, trägheits- und reibungsfreien System könnte die Strecke B so kurz gewählt werden, dass sie dem zurückgelegten Weg zwischen zwei Regelzyklen entspräche. Dann wäre der Traktor bei einer Positionsabweichung schon nach dem nächsten Regelvorgang wieder in der Spur. Da aber das Lenkhydrauliksystem träge reagiert, würde das System über die Soll-Position hinauskorrigieren, weil der Lenkeinschlag nicht schnell genug zurückgestellt würde. Deshalb beinhaltet der Regler eine variable Vorlaufzeit, die, mit der Fahrgeschwindigkeit multipliziert, die Strecke B verlängert. Je größer der Wert für Vorlaufzeit, desto flacher erfolgt die Annäherung an die Leitlinie.
2. Der maximale Betrag des Headingwinkels, mit dem der Traktor auf die Leitlinie zugeführt werden darf, entspricht dem höchstens erlaubten Lenkwinkel LW_VA_MAX.
3. Über die Konfigurationsdatei lässt sich die integrierende Komponente I_TEIL zuschalten, um die der Soll-Lenkwinkel korrigiert wird. Zu I_TEIL wird in jedem Schleifendurchlauf das Produkt LetzterOffset·Integrationsfaktor hinzugezählt. Der I Teil kommt also vor allem dann zur Geltung, wenn der Offset über längere Zeit nicht seinen Sollwert null erreicht, z. B. weil der über die Strecke B ermittelte Lenkwinkel in hügeligem Gelände nicht ausreicht, um den Traktor der Leitlinie anzunähern.
4. Der Soll-Lenkwinkel LW_VA_SOLL wird auf LW_VA_MAX begrenzt.

Wird die Programmschleife im Regelungscomputer schneller als die im Bildverarbeitungscomputer abgearbeitet oder sind Bilder nicht sinnvoll zu verwerten, kann es vorkommen, dass im FIFO-Empfangsspeicher keine neuen Positionswerte vorliegen. In diesem Fall wird gemäß den in Abbildung 5.53 verdeutlichten Zusammenhängen die aktuelle Traktorposition (blau) abgeschätzt, indem die

in den Lenkzylinder strömen. Nicht der Lenkwinkel also ist proportional zur Steuerspannung, sondern die Lenkwinkeländerungsgeschwindigkeit. Diese Tatsache erfordert eine Reglerfunktion, die, ausgehend von der Regeldifferenz Soll-minus Ist-Lenkwinkel, eine Folge von Spannungswerten berechnet, aufgrund derer über das Proportionalventil der geforderte Lenkeinschlag eingestellt wird. Für diese Aufgabe kommt der entwickelte, ab Kapitel 5.1 vorgestellte digitale PID-Lenkwinkelregler zum Einsatz. PID steht für die drei Komponenten, die zur Regler-Ausgangswertberechnung addiert werden:

- **Proportionalanteil:** Der Proportionalanteil bildet quasi die Grundlage des Reglers. Die Regeldifferenz am Reglereingang wird mit einem Proportionalbeiwert multipliziert und an den Ausgang weitergeleitet. Je größer also die Abweichung des Soll- vom Istwert ist, umso stärker wird das Proportionalventil angesteuert.
- **Integralanteil:** Die Charakteristik des Integralanteils ist seine zur Regeldifferenz proportionale Zunahme pro Zeiteinheit. Er sorgt für eine bessere Genauigkeit der Regelung, da bei einer über längere Zeit bestehenden Regeldifferenz die Steuerspannung solange erhöht wird, bis das Proportionalventil anspricht und für eine Korrektur sorgt.
- **Differentialanteil:** Die Größe des Differentialanteils ist proportional zum Maß der Veränderung der Regeldifferenz pro Zeiteinheit. Damit lässt sich die Geschwindigkeit der Regelung erhöhen, denn über den P-Anteil bekommt die Steuerspannung einen zusätzlichen Impuls, durch den Trägheiten und Totzeiten des Lenkhydrauliksystems teilweise ausgeglichen werden können.

Die Aktivierung und Parametrierung dieser Anteile kann über die Konfigurationsdatei vorgenommen werden.

Das Proportionalventil weist einen Totbandbereich auf, der in Abbildung 5.54 blau eingezeichnet ist: Zwischen der Steuerspannung U_{TBR} ¹⁴ und U_{TBL} beträgt der Ölstrom $q(U)$ null Liter pro Minute, d. h. es gibt keine Lenkwinkeländerung. Dies wurde bei der Bestimmung der Systemübertragungsfunktion nicht gesondert berücksichtigt. Deshalb wird mit der Funktion **Danfoss_Totbandkorrektur()** eine Korrektur des PID-Ausgangswertes durchgeführt.

Abbildung 5.55 zeigt die Verhältnisse am Beispiel eines angenommenen, vom Lenkwinkelregler geforderten Ölstroms q_1^* . Ausgehend von einem totbandfreien Zusammenhang zwischen Ölstrom und Steuerspannung, angenähert durch die grüne Kennlinie $q^*(U)$, müsste das Proportionalventil mit U_1 angesteuert werden. Da aufgrund der realen Kennlinie $q(U)$ (rot) mit dieser Spannung U_1 nur der bedeutend kleinere Ölstrom q_1 eingestellt würde, wird U_1 auf U_2 angehoben. Um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, wird anstelle von $q(U)$ ein linearer Verlauf (rot gestrichelt) unterstellt. Auch mit der Steuerspannung U_2 wird deshalb nicht ganz das Niveau des ursprünglich geforderten Ölstroms q_1^* erreicht.

¹⁴ U_{TBR} / U_{TBL} : Totbandspannung bezüglich Lenkbewegungen nach rechts bzw. links

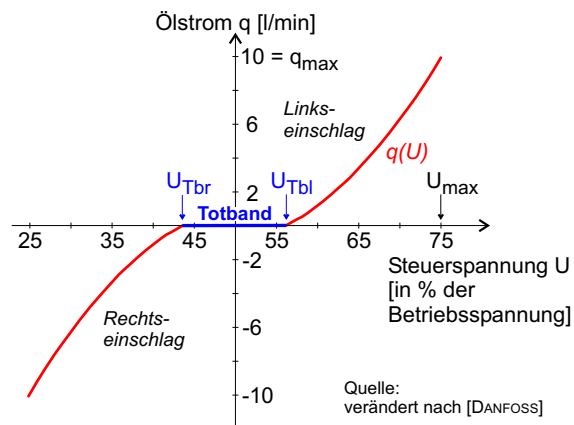


Abbildung 5.54: Kennlinie des Danfoss PVG 32 EM Proportionalventils

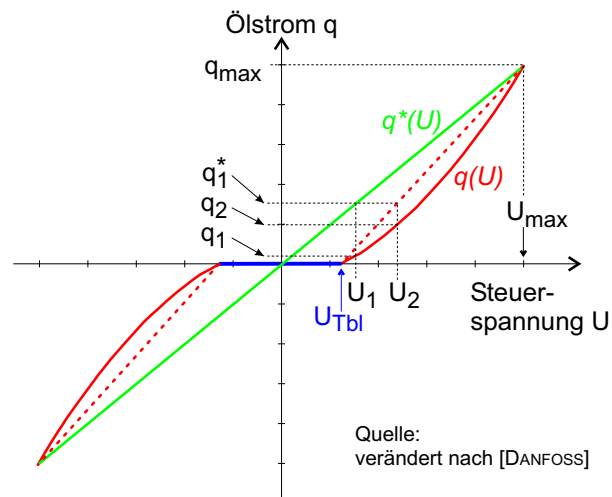


Abbildung 5.55: Berechnung der Steuerspannung U_2 zur Totbandkompensation

Nach vorgenommenen Korrekturen wird der unter Berücksichtigung aller relevanten Randbedingungen berechnete Lenkwinkel an den Lenkwinkelregler übergeben und von diesem eingestellt.

Die Beendigung sowohl des Sender- als auch des Empfängerprogramms wird durch den Austritt aus der Hauptschleife eingeleitet. Im Sender geschieht dies durch die Auswahl einer entsprechenden Option in der Steuerungsroutine, die auf einen Tastendruck hin erscheint. Die Funktion **Programmende()** sorgt für einen definierten Programmausstieg, indem sämtliche Protokolldateien geschlossen sowie reservierter Arbeitsspeicherplatz und Hardwareadressen wieder freigegeben werden. Der Empfänger kann entweder direkt durch die Betätigung einer Taste beendet werden oder indirekt über einen Remote-Befehl, ausgelöst über die Steuerungsroutine des Senders.

Kapitel 6

Feldversuche

6.1 Versuchsdurchführung

Eine Reihe von Ergebnissen aus Vorversuchen lag aus Experimenten, die die Programmcode-Erstellung begleiteten, schon vor. Zur Durchführung dieser Versuche wurde eine Kamera auf einem Stativ installiert, mit einem Blickfeld, dessen Abmessungen der späteren Realsituation ähnlich waren. Innerhalb des Sichtfelds befand sich eine Schiefertafel mit grün markierten Streifen zur Simulation der Pflanzenreihen. Abbildung 6.1 zeigt das Resultat eines solchen Experiments. Aus den Ergebnissen dieser Vorversuche resultierte die Umstellung des Algorithmus auf den Verlauf der Konzentration weißer Bildpunkte zur Regressionspunktbestimmung.

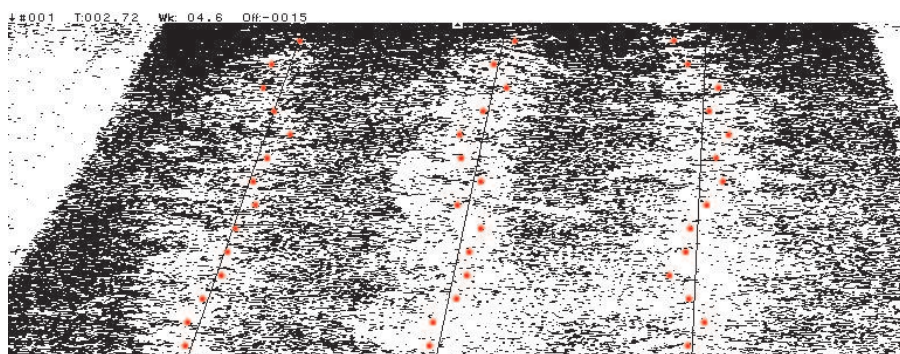


Abbildung 6.1: Vorversuch mit neuem Algorithmus zur Reihenerkennung

Da die Versuche in einem Maisbestand mit 75 cm Reihenabstand stattfinden sollten, wurde das Programm so ausgelegt, dass zwei Regressionsgeraden pro Bild berechnet werden. Eine dritte Reihe war mit der gegebenen Ausstattung des Versuchsträgers am unteren Bildrand nicht mehr zuverlässig zu erfassen. Die Kamera wurde so ausgerichtet, dass einerseits die beiden Leitreihen gut im Bild liegen, andererseits das Blickfeld nicht über den Horizont hinausreicht. Der Regelpunkt, also der Punkt, der durch das Regelsystem möglichst genau in der Sollposition gehalten werden soll, wurde auf einen Meter vor der Vorderachse definiert, entsprechend beispielsweise dem Wirkort einer Frontanbauhacke. Die

Einstellung des PID-Reglers wurde aus der Entwicklungsphase übernommen. Für die Bestimmung der geometrischen Parameter wurde das Kamerasichtfeld, wie es per PciView auf dem Monitor des Hauptrechners angezeigt werden kann, vermessen.

Insgesamt wurden 189 Versuchsfahrten mit dem automatischen Lenksystem durchgeführt. Versuchsfläche war ein 4 ha großer Schlag Silomais mit ca. 250 m Länge in Nord-Süd-Richtung und ca. 160 m Breite in West-Ost-Richtung. Die Bearbeitungsrichtung war Nord-Süd. Die Bodenart des Standorts ist schluffiger Lehm, eine hinsichtlich des Reflexionsverhaltens besonders problematische Art, da sie in der Mitte zwischen stark tonhaltigen und sandigen Böden liegt, also im helligkeitsbasierten Schwarzweißbild deckungsgleich mit grünen Pflanzen ist. Der Unkrautbesatz war normal bis stark, eine chemische Unkrautbekämpfung wurde auf der Versuchsfläche nicht durchgeführt. Leitunkräuter auf diesem Standort sind Taubnessel, Klettenlabkraut und schwarzer Nachtschatten.

Am ersten Versuchstag war das Wetter schön, die Sonne schien an einem annähernd wolkenfreien Himmel. Der Boden war trocken und dementsprechend hell, die Maispflanzen, im Vier- bis Sechsstadium, ca. 15 cm hoch und, für dieses Entwicklungsstadium typisch, eher hellgrün. Der Bedeckungsgrad lag bei ca. 20%. Eine Binarisierung über einen Schwellwert im Schwarzweißbild führte zu keiner eindeutigen Trennung von Pflanzen und Boden. Im Verlauf des Nachmittags nahm die Bewölkung zu, die Sonne war gegen Abend, wie auch an den folgenden Tagen des ersten Versuchsabschnitts, überwiegend verdeckt. Am zweiten Termin war das Wetter schlechter, der Himmel war bedeckt und es regnete zeitweise leicht. Der Boden war nass, der Bestand ca. 60 cm hoch und dunkelgrün. Auch hier war eine eindeutige Trennung im helligkeitsbasierten Schwarzweißbild nicht möglich.

6.2 Versuchsanalyse

Für Analysezwecke werden vom Programm je Versuchsfahrt vier Protokoll-dateien mitgeschrieben. Diese sind anhand einer Bezeichnung, die jeweils zu Beginn eines Versuches eingegeben werden muss, einander zuzuordnen. [Versuchsbezeichnung]_bmp.bmp enthält Binärbitmaps einschließlich eingezeichneter Regressionsgeraden. Über BMPSPEICHERRATE kann beeinflusst werden, in welchem Abstand jeweils ein Bild gespeichert wird. [Versuchsbezeichnung]_bvAlgo.txt stellt für jedes Bitmap wesentliche Eckpunkte bezüglich der Regressionsgeradenberechnung zur Verfügung. [Versuchsbezeichnung]_main1Dat.txt speichert für alle berechneten Bilder den Index, den Aufnahmezeitpunkt relativ zum Programmstart, Heading- und Offset-Werte der einzelnen Geraden und insgesamt sowie einen Fehlercode. [Versuchsbezeichnung]_empf.txt wird vom Zweitrechner erstellt. Ihr können ebenfalls Offset und Heading, der zugehörige Index und eine Relativzeit entnommen werden. Des Weiteren finden sich hier Angaben zur Interpolation, jeweils aktuelle Soll- und Ist-Lenkwinkel und die Danfoss-Steuerspannung. Die ASCII-Textdateien können mit einem Tabellenkalkulationsprogramm importiert und weiterverarbeitet werden. Bilder von besonderem Interesse können aus der Bitmapdatei heraus-

geschnitten werden. Zur visuellen Kontrolle diente die in Abbildung 6.2 gezeigte Maishacke in Verbindung mit der Quantifizierung ausgehackter Maispflanzen.



Abbildung 6.2: Maishacke zur visuellen Funktionskontrolle des Lenkautomaten

6.3 Ergebnisse

Einschränkend muss bei der Interpretation der Versuchsergebnisse die Veränderung verschiedener Programmparameter in der Versuchsphase berücksichtigt werden. Dies hat zur Folge, dass quantitative Aussagen bezüglich der Resultate nur für Teile der erfassten Daten zulässig sind. Da die dokumentierten Fehlermeldungen des Programmes ursachenspezifisch unterscheidbar sind, kann z.B. die Betrachtung der errechneten Offset- und Headingwerte nur tendenziell Aufschluss über die erreichte Genauigkeit der automatischen Lenkeinrichtung geben. Die Betrachtung der einzelnen Fehlermeldungen, fehlerfrei errechnete Leitlinien sowie die Resultate der Binärbilderstellung jedoch erlauben auch eine statistische Betrachtung. Außerdem erfolgte mittels des Hackwerkzeuges im Heck eine generelle Kontrolle der Arbeitsqualität der automatischen Lenkung, so dass die prinzipielle Eignung des Systems für den praktischen Einsatz belegt werden kann. Ausgehackte Maispflanzen traten fast ausschließlich, analog zur manuell gelenkten Kontrollvariante, beim Einsetzen des Werkzeuges oder bei extremen Kurven im Reihenverlauf auf.

6.3.1 Analyse der Bitmaps

Bei der Analyse der Bitmapdateien fielen anfangs häufig Regressionsgeraden auf, die den Verlauf der Leitreihe schlecht wiedergeben. Drei davon sollen an einem Beispiel aus dem Versuch 81 (Versuchsbezeichnung: 01) dargestellt werden.

Aus Abbildung 6.3(a) ist ersichtlich, dass die linke Regressionsgerade den Verlauf der Leitreihe, der an sich deutlich erkennbar ist, sehr schlecht wiedergibt. Ursache war, dass der Algorithmus zur Reiheneinsetzpunkt-Ermittlung unter ungünstigen Bedingungen über den Bildrand hinausrechnete und das Ergebnis deshalb durch nicht definierte Positionswerte verfälscht wird. Außerdem liegt der zweite Regressionspunkt von unten nicht in der Mitte zwischen den beiden Dichtemaximum-Rändern (grün). Dies ist eine Folge der `CORR_MAX`-Variablen, die zu große horizontale Sprünge der Regressionspunkte verhindern soll. Teilbild (b) zeigt die Auswirkung bei `CORR_MAX=200` anstelle von 20 Bildpunkten. Im Algorithmus war `CORR_MAX` ursprünglich über die komplette Bildberechnung hinweg ein konstanter Wert. Dies ist ungünstig; da die Leitreihe im Bild nach oben hin immer schmaler wird, können 200 Punkte im Bereich des unteren Bildrands zwar angemessen sein, am oberen Rand wird damit die Begrenzung jedoch praktisch wirkungslos. Aus diesem Grund musste der Einsetzpunktalgorithmus modifiziert werden. Wenn innerhalb eines Abtastfelds (blau) der rechte Rand des Dichtemaximums der weißen Bildpunkte schon gesetzt wurde (grün), rechts davon aber die maximale Dichte noch einmal auftritt, kann im modifizierten Algorithmus die rechte Randposition erneut festgelegt werden. Ein Vergleich der Teilbilder (b) und (c) verdeutlicht den Unterschied.

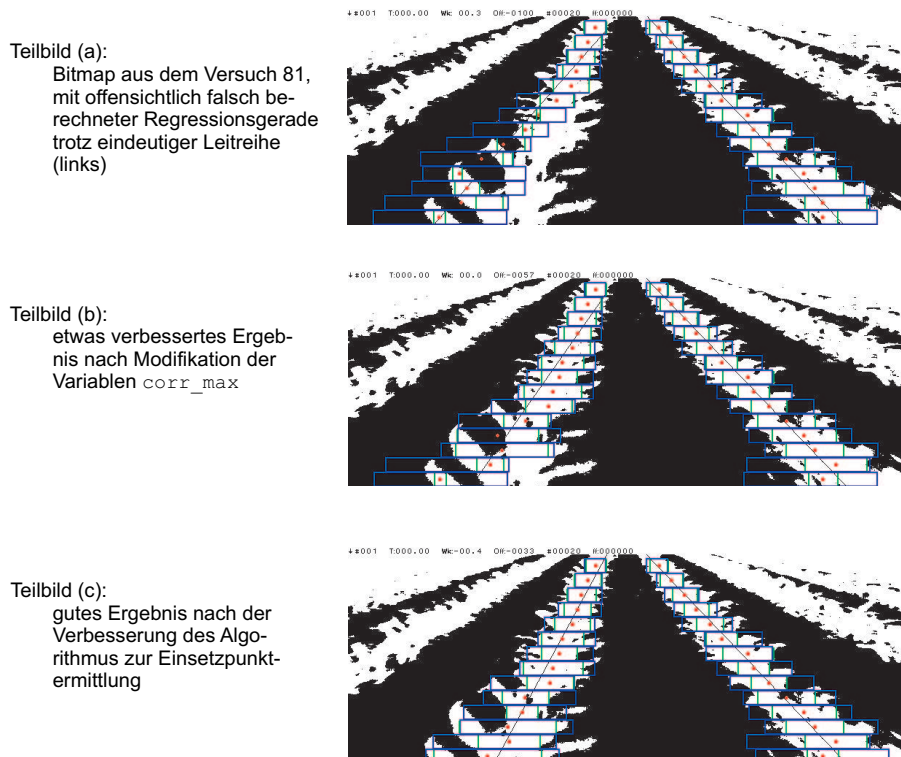


Abbildung 6.3: Ursachen für fehlerhafte Leitlinienberechnung

Generell hat sich das Einmessen des Kamerasichtfensters, welches auf einer befestigten Fläche, also zweidimensional, erfolgte, als Schwachpunkt herausgestellt. Da die Berechnung der perspektivischen Entzerrung darauf basiert, im

Feld aber die dritte Dimension, also die Pflanzenhöhe, die abgebildeten Reihen- und Zwischenraumbreiten nicht unerheblich beeinflusst, müsste diese in die Berechnung der wahren Längen mit einfließen. In Abbildung 6.4 sind am unteren Bildrand die blauen Rechtecke, die die Abtastfelder des Reihenerkennungsalgorithmus darstellen, annähernd doppelt so breit wie die Leitreihen. Am oberen Rand sind sie in etwa gleich breit wie die Reihen. Die Reihenbreite nimmt im Bild offensichtlich langsamer ab, als es theoretisch der Fall sein müsste. Ähnlich verhält es sich mit dem Reihenzwischenraum, der am unteren Bildrand das Dreifache der Reihenbreite beträgt, oben hingegen nur noch gleich groß ist. Erforderlich wäre also eine weitere Programmvariable, die die Pflanzenhöhe beinhaltet, und die Abstimmung der wahren Reihen- und Zwischenraumbreite auf die dritte Dimension, um die Funktionssicherheit des Algorithmus weiter zu erhöhen.

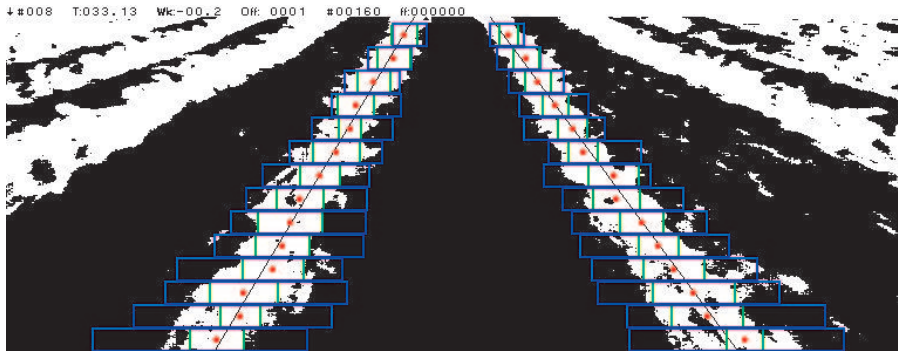


Abbildung 6.4: Auswirkung der Pflanzenhöhe auf das Binärbild

6.3.2 Analyse der Protokolldateien

Dem Versuchsplan lässt sich entnehmen, dass eine der häufigsten Beobachtungen bei den Versuchsfahrten ein seitlicher Versatz des Traktors relativ zur Leitreihe war. D. h. der Versuchsträger folgte zwar dem Verlauf der Leitreihe exakt, aber mit einem kontinuierlichen Abstand von der Sollinie. Im Zuge der Auswertung der [Versuchsbezeichnung]main1Dat.txt-Dateien wurden für jede Versuchsfahrt des ersten Versuchsabschnitts die Durchschnitte aller mitgeschriebenen Offset-Werte (Abbildung 6.5) sowie der Heading- und Soll-Lenkwinkel (Abbildung 6.6) berechnet. Auch wenn eine statistisch abgesicherte quantitative Aussage aufgrund der veränderten Ausgangsbedingungen innerhalb der Versuchsreihe nicht möglich ist, so lässt sich dennoch in Abbildung 6.5 erkennen, dass die Streuung des mittleren Offsets ca. ab Versuch 80 stark zurückgeht. Dies ist auf die Korrektur des Parameters, der die Länge des unteren Bildrands angibt, zurückzuführen. Dieser war am ersten und zum Teil am zweiten Versuchstag mit 1800-2000 mm zu hoch angesetzt, so dass es bei der Berechnung der Positionswerte zu Ungenauigkeiten kam. Ebenfalls auffällig ist die Verteilung der Heading- und Soll-Lenkwindeldurchschnitte. Unabhängig von Versuchstag und Fahrtrichtung wurde vom System ein Heading von ca. 0,5-2 Grad nach rechts detektiert. Entsprechend reagierte der Lenkwinkelregler mit Sollwertvorgaben nach links. Hier-

bei handelt es sich um einen systematischen Fehler, der auf eine nicht exakte Kameramontage zurückzuführen war.

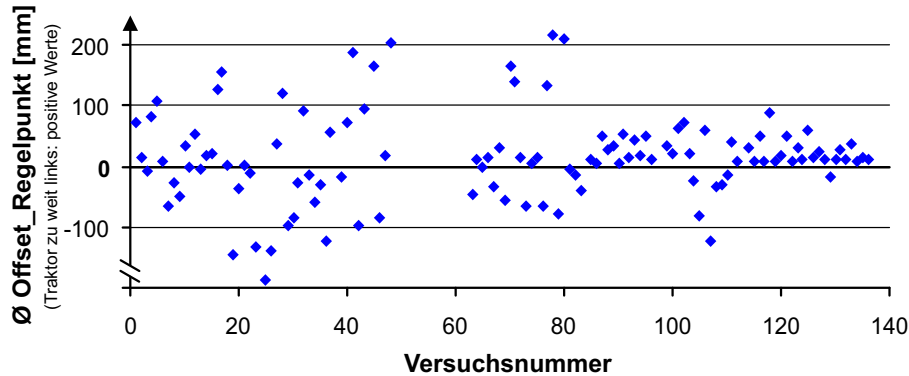


Abbildung 6.5: Durchschnittliche Offset-Werte des ersten Versuchsabschnitts

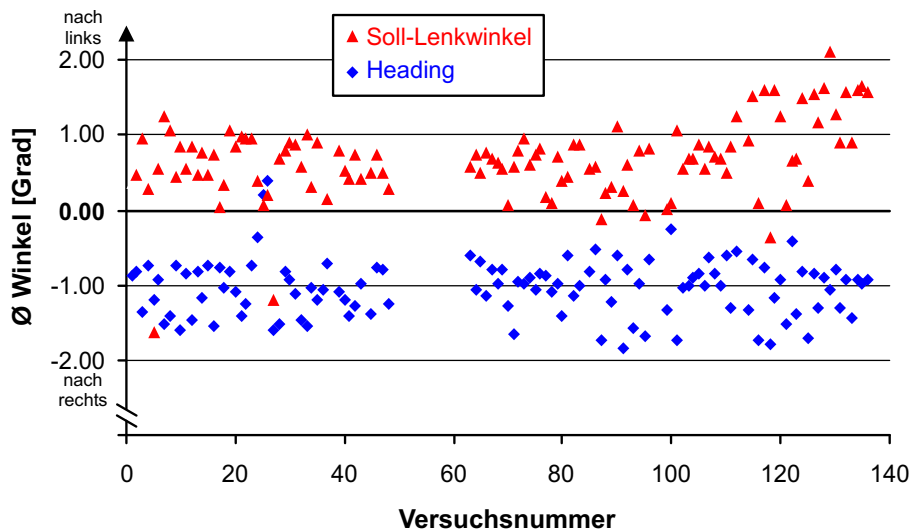


Abbildung 6.6: Durchschnittliche Heading- und Soll-Lenkwinkel

Abbildung 6.7 gibt exemplarisch den Verlauf des Soll-Lenkwinkels während der Versuchsfahrt 116 wieder. Wie ersichtlich ist, werden vom Regler maximal zwei Grad vorgegeben. Bei der Analyse der [Versuchsbezeichnung] empf.txt-Dateien hat sich herausgestellt, dass eine Bewertung der PID-Regler- sowie der Totbandkorrektur-Funktion nicht möglich ist, da alle Ist-Lenkwinkelwerte von einer Schwingung überlagert sind, deren Amplitude ca. einem Grad entspricht. Ursache hierfür ist der 12 V/230 V-Spannungswandler für die Stromversorgung der Computer, der aus Gründen der Mittelknappheit aus dem Institutsfundus übernommen wurde und hier altersbedingte Schwächen zeigte. Mit der Integration des zweiten Rechners in den Versuchsaufbau überstieg dessen Stromaufnahme die maximale Leistung des Wandlers. Die Abbildung 6.8 zeigt einen nachträglich durchgeführten Versuch, in dem mittels eines Hilfsprogramms die Vorgabe

eines Soll-Lenk winkels per Tastatur erfolgte und die vom System eingestellten Ist-Werte mitgeschrieben wurden. Teilbild (b) zeigt die gute Abstimmung des PID-Reglers. Mit einer störschwingungsfreien Spannungsversorgung (Netzstrom) wird ein Soll-Lenk winkel von einem Grad in ca. 0,2 Sekunden eingestellt.

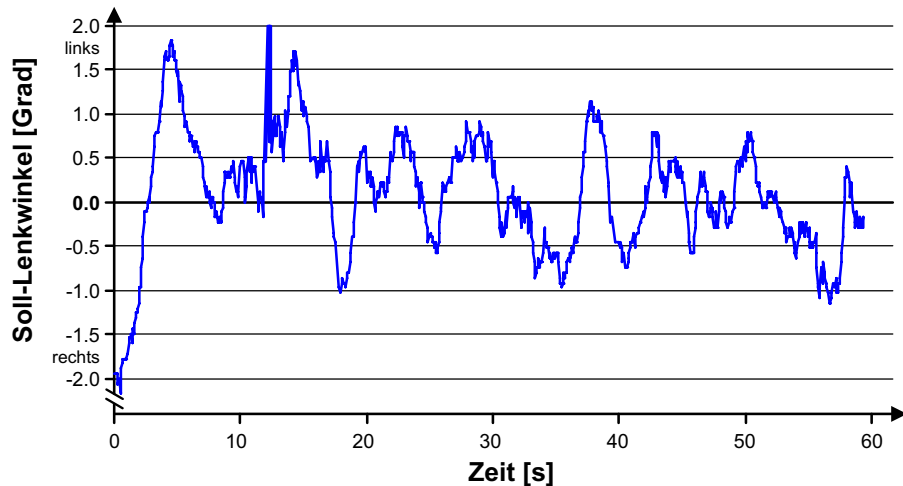


Abbildung 6.7: Soll-Lenk winkelverlauf Versuchsfahrt 116

6.3.3 Analyse der Binärbilderstellung und Leitlinienberechnung

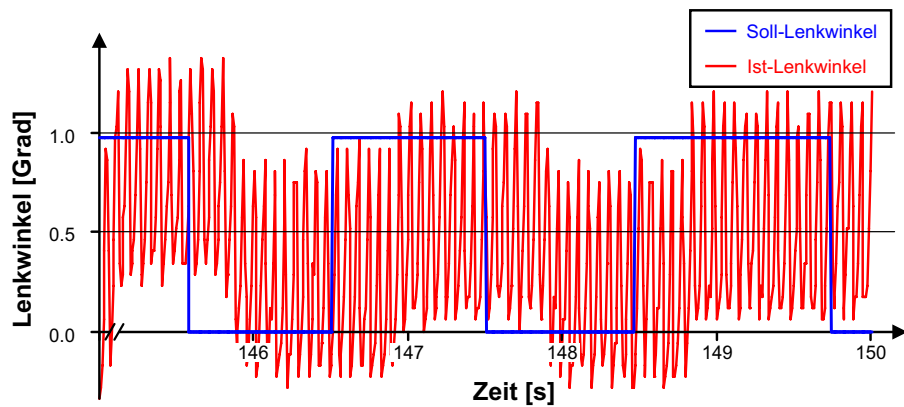
Die ersten 10 Überfahrten wurden mit Blende 16 durchgeführt, danach sorgte zunehmende Bewölkung für weniger Lichteinfall, so dass der Bedeckungsgrad der Maispflanzen im Binärbild auf dem Kontrollmonitor stark zurückging. Obwohl dies zunächst noch keinen Einfluss auf die Arbeitsqualität des Leitlinienerkennungsalgorithmus hatte, wurde die Blende nachreguliert. Es folgten 4 Überfahrten mit Blende 5.6, was aber zu überhöhtem Bedeckungsgrad führte, so dass Fuß mit Blende 8 eine für die nächsten 132 Überfahrten zufriedenstellende Kameraeinstellung gefunden wurde.

Am letzten Versuchstag war die Sonneneinstrahlung so gering, dass die Blendeneinstellung wieder nachjustiert werden musste um einen im Binärbild passenden Bedeckungsgrad zu erhalten. Es folgten 12 Überfahrten mit Blende 5.6, danach noch 31 Überfahrten mit Blende 2.8.

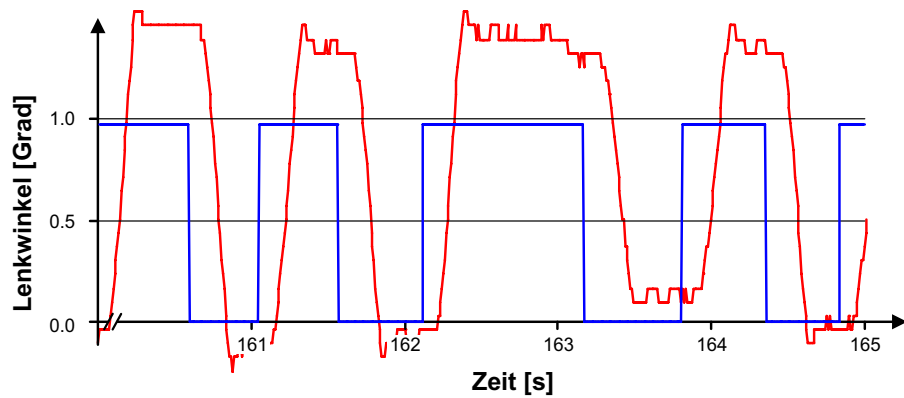
Bild 6.9 zeigt den prozentualen Anteil korrekt errechneter Leitlinien aller am ersten Versuchstag aufgezeichneten Versuchsfahrten. In der Auswertung fehlende Durchfahrten wurden zum Erstellen von RGB-Bildern oder Filmen für Präsentationszwecke genutzt, ein Mitschreiben anderer Daten unterblieb in solchen Fällen.

Da am zweiten Versuchstag eine erste Sichtung der erfassten Daten durchgeführt wurde, gelangen am Nachmittag dieses Tages lediglich 17 weitere Überfahrten. Bild 6.10 zeigt die Auswertung der Leitlinienberechnungen. Die Ergebnisse des dritten Versuchstages sind in Bild 6.11 aufgezeigt.

Die schwankende Arbeitsqualität des Algorithmus warf die Frage nach der



Teilbild (a): Störschwingung mit 12/230 Volt Spannungswandler



Teilbild (b): keine Störschwingung mit 230 Volt Netzstrom

Abbildung 6.8: Störschwingungen durch den Spannungswandler

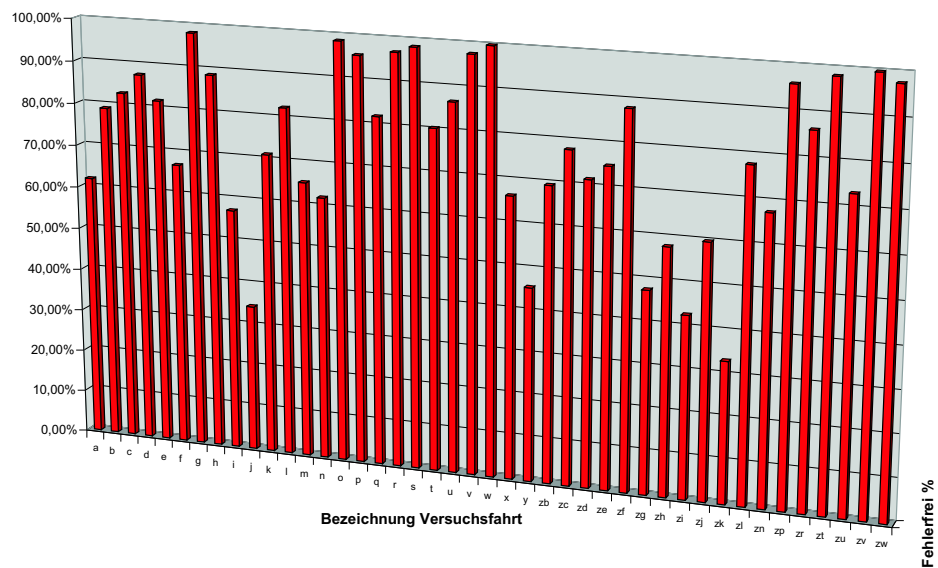


Abbildung 6.9: Korrekt ermittelte Leitlinienpaare, erster Versuchstag

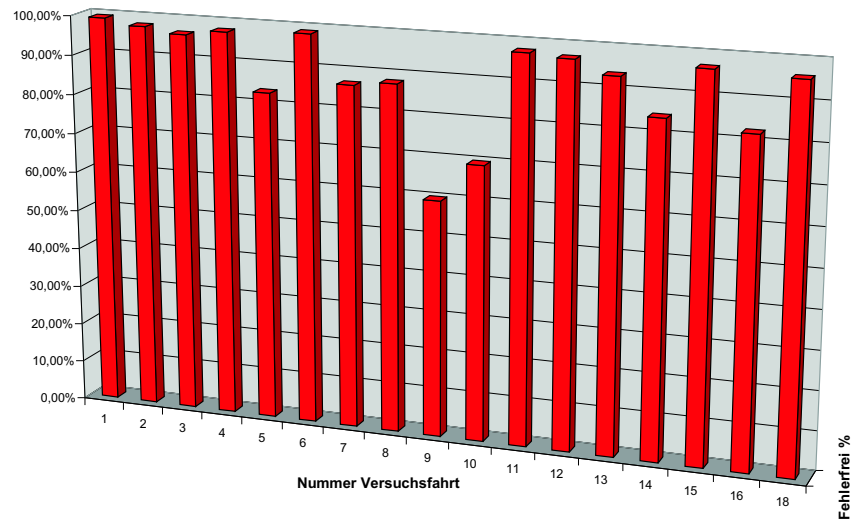


Abbildung 6.10: Korrekt ermittelte Leitlinienpaare, zweiter Versuchstag

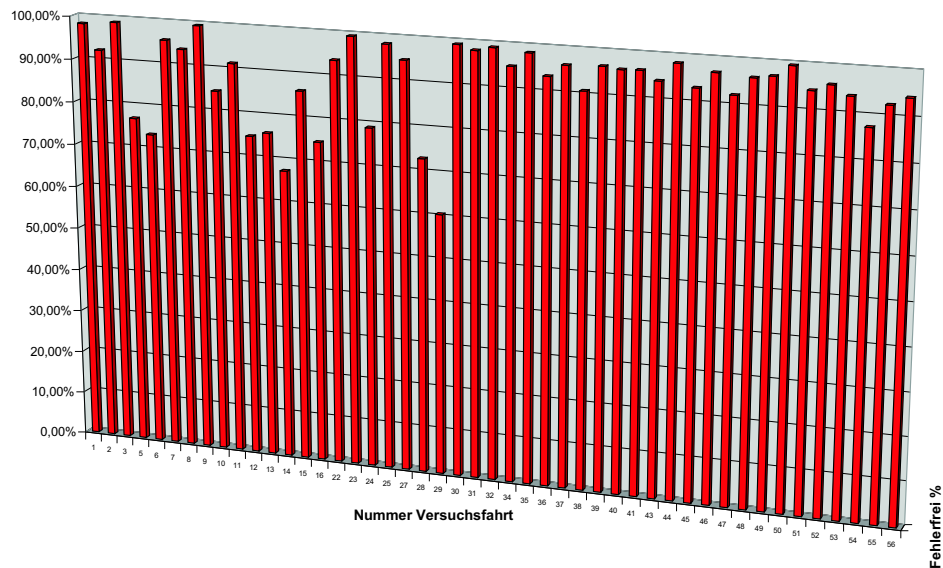


Abbildung 6.11: Korrekt ermittelte Leitlinienpaare, dritter Versuchstag

Ursache, und folglich nach einem Zusammenhang mit der Beleuchtungsintensität auf. Hierzu wurden die mitgeschriebenen Bilder auf ihren Weißanteil hin untersucht, da der mit zunehmender Beleuchtungsintensität ansteigt. In Bild 6.12 ist der prozentuale Bedeckungsgrad der Pflanzenreihen aufgezeigt, der als indirektes Merkmal für stark variierenden Lichteinfall genutzt wurde, Bild 6.13 zeigt den Verlauf der beiden sich ergebenden Kurven aus Bild 6.9 und Bild 6.12 in einem Schaubild, jeweils für den ersten Versuchstag. Die Bilder 6.14 bis 6.17 zeigen analog die Ergebnisse für die Versuchsreihen des zweiten und dritten Versuchstages.

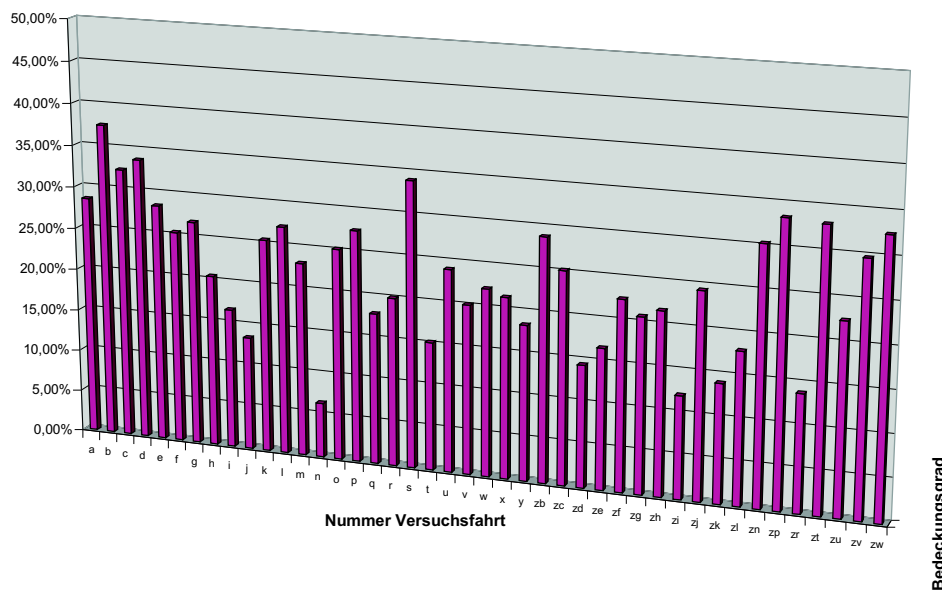


Abbildung 6.12: Bedeckungsgrad der Pflanzen, erster Versuchstag

Die Auswertung des statistischen Zusammenhanges zwischen Berechnungsergebnis und Bedeckungsgrad ergab keinen direkten Zusammenhang. Die Korrelationskoeffizienten betragen 0.5077 für die Reihe des ersten, 0.444 für die Reihe des zweiten und 0.233 für die Reihe des dritten Versuchstages, wobei am ersten Versuchstag aufgrund des unbeständigeren Wetters und der dadurch stark variierenden Ausleuchtung der Bilder die Fehlerquote am höchsten und durch die Übereinstimmung der relativen Minima die Korrelation am höchsten ausfiel.

Die stark variierenden Ergebnisse bei der Leitlinienberechnung jedoch bedürfen einer genaueren Betrachtung. Am ersten Versuchstag schwankte der prozentuale Anteil korrekt berechneter Leitlinien zwischen 60,59 % und 99,49 %. Dass diese Schwankungen sich nicht im Regelverhalten des Gesamtsystems ausdrücken ist auf das robuste Design und die ausreichenden Redundanz des bildanalytischen Sensors zurückzuführen. Trotzdem stellt sich die Frage nach der Ursache, die letztlich nur in unterschiedlicher Beleuchtungsintensität begründet sein kann. Wie schon erläutert, wurde die Blendeneinstellung der Kamera nach einigen Testfahrten auf Blende 8 eingestellt und so belassen. Da alle weiteren Überfahrten zufriedenstellende Ergebnisse bezüglich der Regelgenauigkeit zeig-

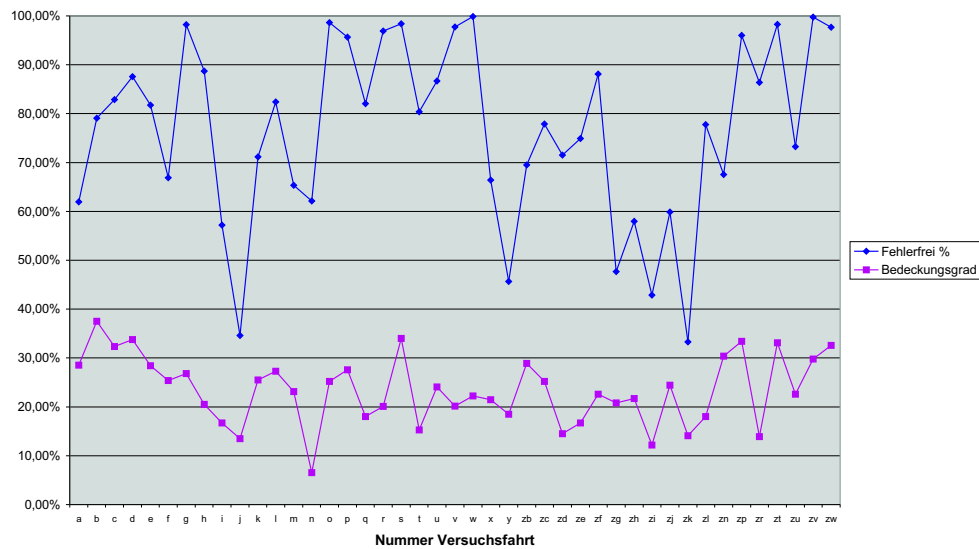


Abbildung 6.13: Korrekte Leitlinien und Bedeckungsgrad, erster Versuchstag

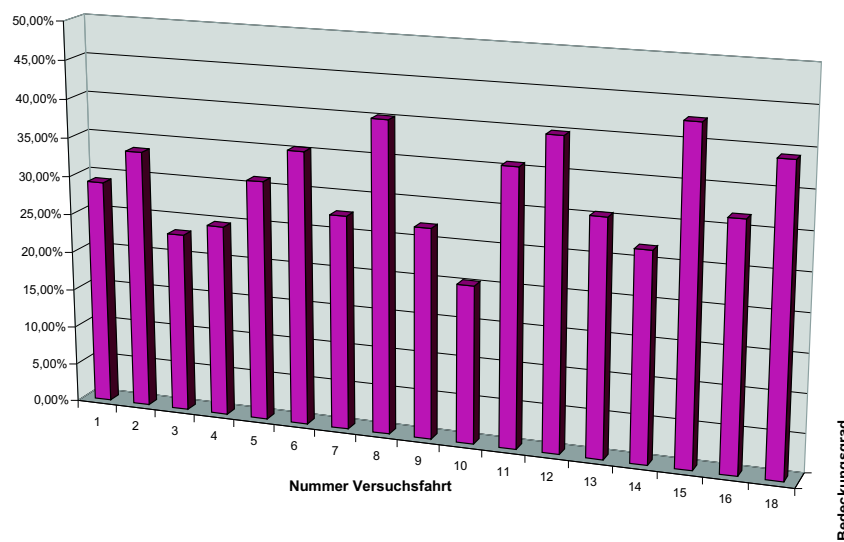


Abbildung 6.14: Bedeckungsgrad der Pflanzen, zweiter Versuchstag

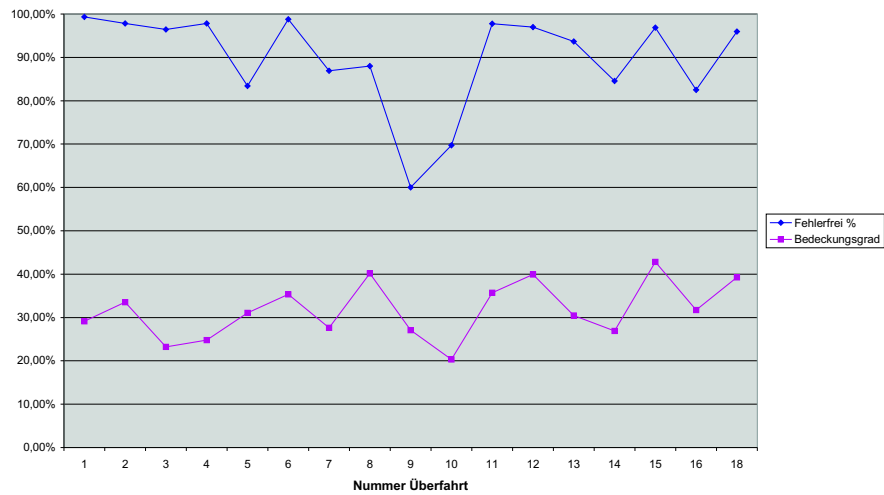


Abbildung 6.15: Korrekte Leitlinien und Bedeckungsgrad, zweiter Versuchstag

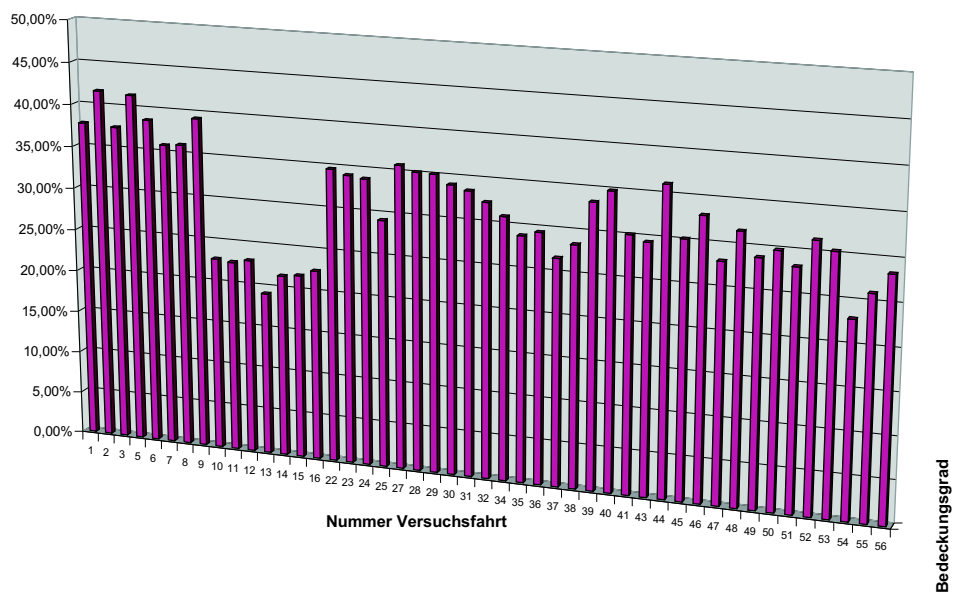


Abbildung 6.16: Bedeckungsgrad der Pflanzen, dritter Versuchstag

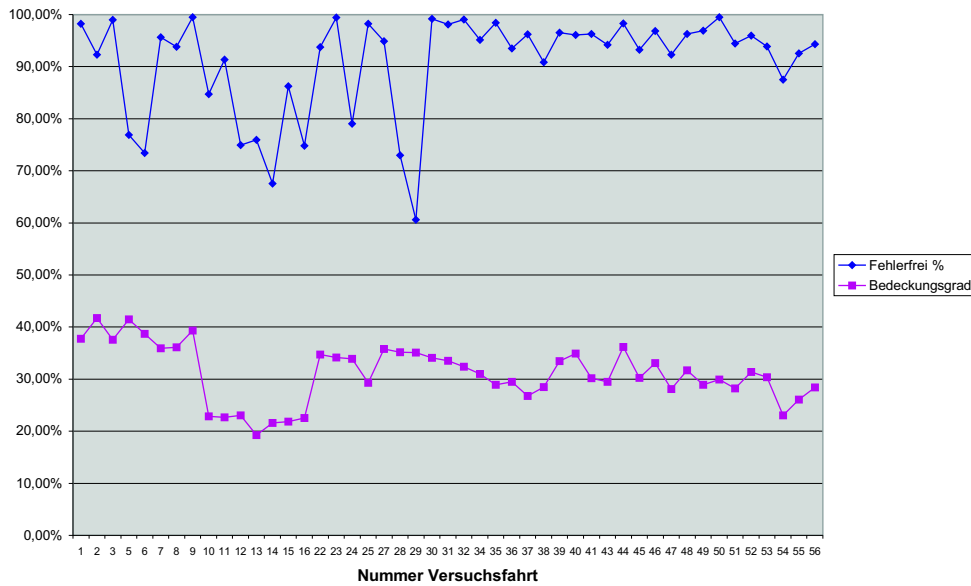


Abbildung 6.17: Korrekte Leitlinien und Bedeckungsgrad, dritter Versuchstag

ten, wurde von einem gleichmäßig gut funktionierenden Sensor ausgegangen. Bei Verwendung der Grün-Rot-Differenz und einmaliger passender Blendeneinstellung wurde der AGC¹-Betrieb der Kamera als ausreichend betrachtet, um mäßig wechselnde Lichtverhältnisse innerhalb eines Versuchstages auszugleichen.

Wie aus den Bildern 6.9, 6.12 und 6.13 zu entnehmen ist, könnte ein Zusammenhang zwischen der Arbeitsqualität des Algorithmus und dem Bedeckungsgrad, also der Ausleuchtung, bestehen. Die permanente Verschlechterung des Ergebnisses zwischen Überfahrt g und j in der Versuchsreihe des ersten Tages sind auf eine zurückgehende Beleuchtungsintensität durch zunehmende Bewölkung zurückzuführen (siehe Bild 6.12). Die dann erfolgte Blendenkorrektur hatte eine sprunghaft ansteigende Erhöhung der korrekt berechneten Leitlinien zur Folge, was die These von einem Zusammenhang stützt. Das schlechte Ergebnis des Algorithmus in Versuch j (35 % korrekte Berechnungen) verbesserte sich nach Korrektur der Blendeneinstellung im darauffolgenden Versuch k auf 71 % korrekte Berechnungen.

Bild 6.18 zeigt das Binärbild des Bestandes im Versuch j vom ersten Versuchstag, mit 15,51 % weißer Bildpunkte sehr dunkel. Eine Betrachtung der Fehlercodes ergibt, dass von 1920 dokumentierten Berechnungen lediglich 664 Durchläufe fehlerfrei blieben, hingegen Fehlerbit 2 (zu wenig oder zu viel weiße Bildpunkte) 1205 mal gesetzt war, was aber kein Verwerfen des Ergebnisses zur Folge hat. Bild 6.19 zeigt das Binärbild des Bestandes im darauffolgenden Versuch k, mit 25,49 % weißer Bildpunkte deutlich heller. Da jedoch auch in diesem Versuch von 1480 Berechnungen 414 mit einem gesetzten Fehlerbit 2 abgeschlossen wurden, lohnt sich eine Betrachtung der Bilder des gesamten Versuchsverlaufs. In Bild 6.20 gezeigt ist der "Film" des Versuchs k, die Binärbilder

¹ Automatic Gain Control, eine Art Belichtungsautomatik

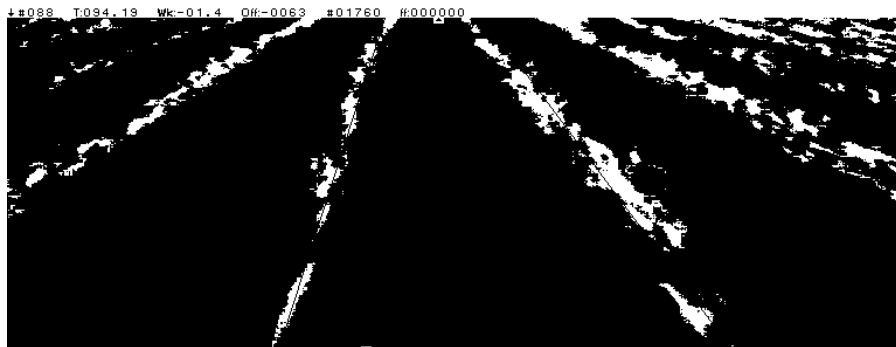


Abbildung 6.18: Versuch j, Blende 16, zu dunkles Bild

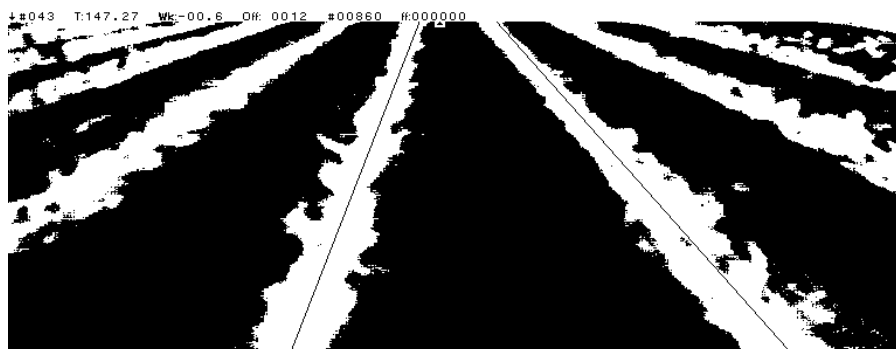


Abbildung 6.19: Versuch k, Blende 5.6, helleres Bild

sind invertiert. Deutlich zu sehen sind starke Schwankungen im Gehalt an weißen (hier schwarzen) Bildpunkten. Dieser Effekt ist nur zu einem geringen Teil auf einen inhomogenen Maisbestand zurückzuführen, grösstenteils basiert er auf sich verändernder Beleuchtungsintensität.

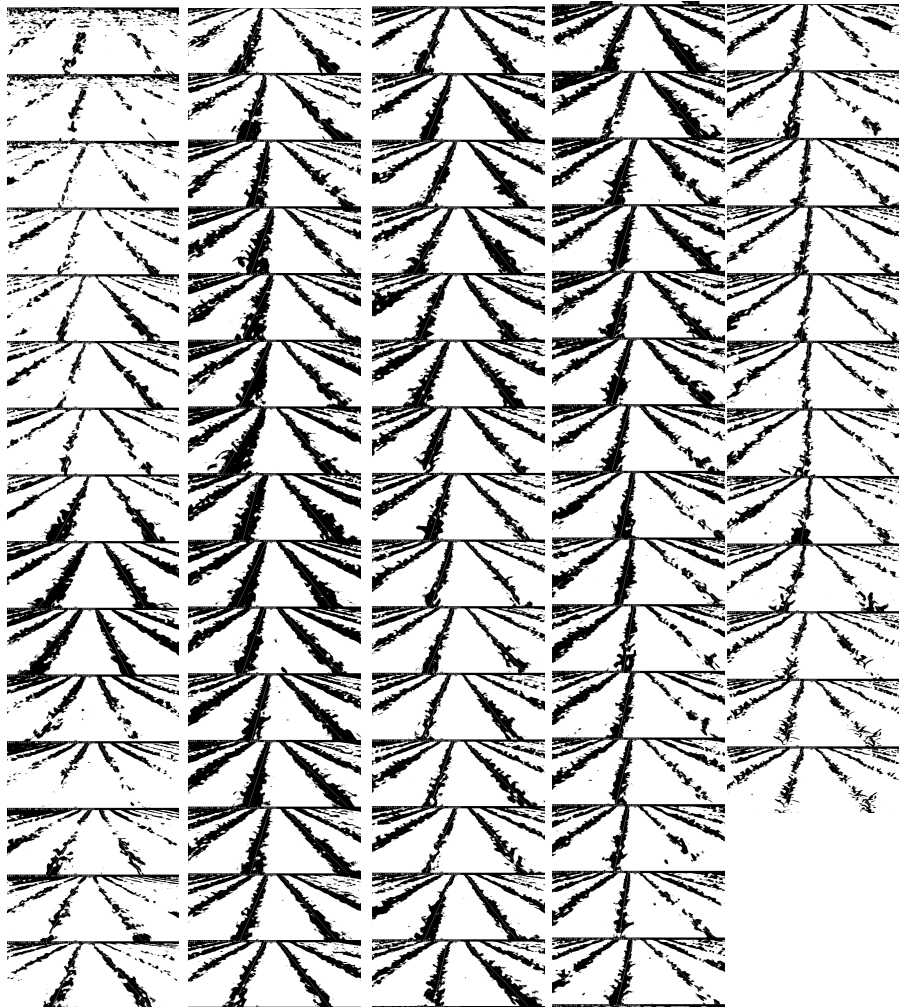


Abbildung 6.20: alle Binärbilder des Versuches k, invertiert

Der mit der hier angewendeten Methodik nicht belegbare statistische Zusammenhang zwischen der betrachteten Beleuchtungsintensität und der zugehörigen Fehlerquote des Algorithmus ist auf zu große Beleuchtungsschwankungen innerhalb eines einzelnen Films einer Überfahrt zurückzuführen. Um hier eine Korrelation nachzuweisen, müsste eine Einzelbildbetrachtung der einzelnen Filme mit zugehöriger Fehlerauswertung der Leitlinienberechnung erfolgen. Um solchen Beleuchtungsschwankungen und als Folge daraus hohen Fehlerquoten bei der Leitlinienberechnung vorzubeugen, wäre eine Kamera mit Blendenautomatik erforderlich.

Die Überfahrten des zweiten Versuchsabschnitts brachten keine verwertbaren Ergebnisse, da der Bestand mit 60 cm zu hoch und auch zu geschlossen stand,

so dass eine durchgängige Leitlinienerkennung nicht gewährleistet war. Häufiges Überspringen von einer Reihe zur nächsten zeigte, dass in diesem Entwicklungsstadium in Mais mit dem vorliegenden Algorithmus die Leitlinie nicht mehr zuverlässig ermittelt werden konnte. Ein anderer Anbringungsort der Kamera wäre notwendig gewesen, um einen ausreichenden Abstand zwischen Objektiv und Pflanzen zu gewährleisten.

Kapitel 7

Diskussion und Handlungsvorschläge

Wie die Versuche zeigen, liegt mit dem automatischen Lenksystem und dem zugehörigen bildanalytischen Sensor ein funktionsfähiges Gesamtkonzept zur automatischen Steuerung der mechanischen Unkrautbekämpfung in Reienkulturen vor. Trotz der im Ergebnisteil dokumentierten bisweilen sehr hohen Fehlerquote bei der Leitlinienberechnung lag der Anteil der geschädigten Pflanzen im Bestand nicht signifikant höher als im Kontrollbestand. Dies liegt zum einen an der hohen Fehlertoleranz des Algorithmus, der bei ungültiger Leitlinienberechnung nach dem Dead-Reckoning-Prinzip weiter regelt (Kursberechnung mittels Geschwindigkeit, Lenkwinkel und dem letzten gültigen Positionswert), zum anderen an der hohen Frequenz der Berechnung.

Obwohl das Regelverhalten des Gesamtsystems keinen Anlass zur Beanstandung gab, spricht die hohe Fehlerquote bei den Leitlinienberechnungen mancher Überfahrten für ein verbesserungswürdiges Prinzip, wobei die Schlüsselrolle bei diesem Problem hier der verwendeten Kamera zukommt.

Eine Kamera mit Automatic Gain Control, wie die verwendete Pulnix TMC 50 RGB ist für eine solche Anwendung unbedingt erforderlich. Darüber hinaus sollte die verwendete Kamera auch über eine Blendenautomatik verfügen, da stark wechselnde Lichtverhältnisse eine Blendenanpassung erfordern. Bis auf die genannte Einschränkung funktionierte der Reihenerkennungsalgorithmus sehr gut, eine Quote von durchschnittlich 76,47 % fehlerfrei erkannten Leitlinien am ersten, 89,80 % am zweiten und 90,83 % am dritten Versuchstag zeugen von einem sehr robusten Sensor, der auch Helligkeitsschwankungen in einem gewissen Rahmen toleriert. Die zunehmende Verbesserung der Ergebnisse zum dritten Versuchstag hin sind mit durch das beständigere Wetter zu erklären, was auch in Bild 6.16 deutlich wird. Obwohl statistisch mit vorliegendem Datenmaterial nicht nachweisbar, besteht ein Zusammenhang zwischen Beleuchtungsintensität und Funktionssicherheit des Algorithmus.

Die durchgeführten Versuche, in deren Verlauf ein 4 ha großes Maisfeld mit einer Maishacke bearbeitet wurde, je zur Hälfte manuell und automatisch gelenkt, wurden beschrieben. Alle automatisch gelenkten Überfahrten brachten zufriedenstellende Ergebnisse hinsichtlich der Regelgenauigkeit, der Anteil aus-

gehackter Maispflanzen lag, wie bei der manuellen Variante, um 1 Prozent. Da die Streifbleche der Maishacke auf einen Abstand von 9 cm eingestellt waren, ist von einer Genauigkeit des Lenkungsautomaten von ± 4 cm bezüglich des im Heck geführten Gerätes auszugehen. Die gefahrenen Arbeitsgeschwindigkeiten betrugen 8,5 km/h bei der manuell gelenkten Variante und bis zu 20 km/h mit dem Lenkautomaten, wobei Geschwindigkeiten über 14 km/h zu starkem Verschütten der Maispflanzen führte.

Die nähere Untersuchung der dokumentierten Ergebnisse des Leitlinienverfolgungsalgorithmus ergaben große Abweichungen beim Anteil korrekt errechneter Leitlinien sowie einige, noch im Verlauf der Versuche korrigierte Programmfehler. Ein Zusammenhang zwischen den Fehlern in der Leitlinienberechnung und dem Anteil weißer Bildpunkte, der von der Beleuchtungsintensität abhängt, konnte mit vorliegendem Datenmaterial statistisch nicht abgesichert werden, scheint aber trotzdem vorzuliegen.

Für weiterführende Arbeiten empfiehlt sich eine Kamera mit AGC und Blendenautomatik, da, wenn auch der Nachweis für einen Zusammenhang der Rechengenauigkeit mit der Beleuchtungsintensität nicht erbracht wurde, die absolute Anzahl der Fehler mit einem gesetzten Bit 2 zu hoch ist, also die Beleuchtungsintensität während der Überfahrten stellenweise als suboptimal einzustufen ist.

Die Integration der verwendeten Einzelkomponenten in einem Einprozessorrechner mit Echtzeitbetriebssystem ist möglich und erforderlich, um ein marktfähiges Lenkungsautomatisierungssystem zu erhalten. Diverse Sicherheitsvorkehrungen, wie sie z. B. beim Claas Autopiloten verwendet werden, sind problemlos zu ergänzen. Die prinzipielle Praxistauglichkeit des Systems wurde in Feldversuchen belegt.

Ein autonomes Fahrzeug, wie es in neueren agrartechnischen Forschungsarbeiten als Ziel formuliert wird, ist jedoch, basierend nur auf digitaler Bildverarbeitung, nicht realisierbar. Wie in der Literaturübersicht aufgezeigt, gibt es Lösungsansätze für beide Strategien der Verfolgung vorgegebener Leitlinien. In aktuellen Projekten sind dies die digitale Bildverarbeitung für die reellen und, insbesondere in Verbindung mit einer mobilen Referenzstation und einem Kreiselkompass zum Erreichen der erforderlichen Genauigkeit, GNSS-Systeme für die virtuellen Leitlinien. Ein menschlicher Fahrer, der ein Arbeitsgerät entlang einer vorhandenen Leitlinie lenkt, arbeitet eigentlich nach beiden Prinzipien, nämlich entlang der reellen solange keine Unregelmäßigkeiten beobachtet werden, um exakt ohne Überlappung oder unbearbeiteter Fläche am Bestand oder der bestehenden Furche zu sein, und entlang einer virtuellen Hilfsleitlinie, wenn z.B. Fehlstellen in einem Pflanzenbestand überbrückt oder Kurven in einer Pflugfurche begradigt werden müssen. Konsequenterweise sollte auch ein automatisches Lenksystem beide Prinzipien beinhalten. Zwar ist es, zumindest aus regelungstechnischer Sicht, einfacher, entlang einer bekannten, meist geradlinig verlaufenden virtuellen Leitlinie zu arbeiten und ebenso ist die realisierbare Genauigkeit im cm-Bereich mit modernen GNSS-Systemen bestechend, jedoch erscheint eine Bearbeitung ohne Referenzierung der reellen Leitlinie unvollkommen, da die absolute Position des Arbeitsgerätes z.B. bei Unkrautregulierungsmaßnahmen eigentlich vollkommen uninteressant ist, von Bedeutung ist lediglich die Posi-

tion relativ zum zu pflegenden Pflanzenbestand. Andererseits bieten digitale Bildverarbeitungssysteme zur Erfassung von Leitlinien die Möglichkeit des Vorausschauens und damit die Voraussetzung für die Nutzung virtueller Hilfsleitlinien. Allerdings sind diese Systeme nicht zu autonomen Systemen ausbaufähig, da Wendemanöver am Feldrand nicht ohne die Information der Absolutposition möglich sind. Zukünftige automatische Lenksysteme für landwirtschaftliche Arbeitsgeräte sollten deshalb beide Sensorfamilien beinhalten, weshalb eine Integration des hier vorgestellten Lenksystems in ein Gesamtkonzept „autonomes Fahrzeug“ erstrebenswert erscheint.

Kapitel 8

Zusammenfassung

Ein automatisches Lenksystem zur bestandesorientierten Nachführung von Arbeitsmaschinen in Reihenkulturen, bestehend aus einem Bildverarbeitungssystem als Sensor, einem fahrzeugspezifischen digitalen Regler und einem Proportionalventil als Aktor wurde auf einem Fendt Xylon 524 Versuchsträger installiert. Die Entwicklung des Systems umfasste mehrere Stufen, vom ursprünglich installierten Claas Autopiloten bis hin zum Endzustand mit Bildverarbeitungssystem, zweischleifigem digitalen Regler auf getrennten Rechnern und einem Load-Sensing kompatiblen Danfoss PVG32 Proportionalventil.

Als Bildverarbeitungshardware kam ein IC-PCI Frame Grabber mit einem AM-CLR RGB-Acquisition Modul der Firma ITI in einem AMD K6/II-300 Hostrechner zum Einsatz. Auf dieser konnte mittels Farbdifferenzbildung und Binarisierung ein geeignetes Eingangssignal mit hoher Informationsdichte für die Leitlinienberechnung erzeugt werden. Der Reihenverfolgungsalgorithmus berechnet mehrere Leitlinien und validiert das Ergebnis nach optischer Entzerrung hinsichtlich Parallelität und Plausibilität. Aus den gültigen Leitlinien generiert er die Korrekturfaktoren Heading und Offset. Der Reihenverfolgungsalgorithmus erwies sich als stabil und tolerant gegenüber Fehlstellen und Unkräutern im Bestand.

Die Eigenschaften des Lenkhydrauliksystems des Versuchsträgers wurde experimentell untersucht und seine Übertragungsfunktion berechnet. Ein passender PID-Regler wurde erstellt und auf dem Regelungsrechner implementiert. Dieser berechnet mittels der Korrekturwerte vom Bildverarbeitungsrechner und dem digitalen PID-Regler den einzustellenden Lenkwinkel. Über eine AD/DA-Wandlerkarte wird die zugehörige Korrekturspannung an das Proportionalventil im Lenkkreis angelegt. Die theoretisch erzielte stabile Regelcharakteristik und die hohe Regelgüte wurden sowohl experimentell als auch im Feldversuch bestätigt.

Die Praxistauglichkeit wurde belegt, die Arbeitsqualität des Lenkungssystems war, bei höherer Fahrgeschwindigkeit, vergleichbar mit der manuell gelenkten Variante.

Die verwendeten Analysewerkzeuge für den Ergebnisteil wurden programmiert, alle relevanten Daten während des Betriebs aufgezeichnet. Die Kriterien für die Bewertung des Gesamtsystems sind qualitativer Art. Der fehlerfreie Ab-

lauf des Programms war gewährleistet, korrekte Zwischenergebnisse lagen vor, Programmabstürze oder andere gravierende Vorkommnisse blieben aus. Die Genauigkeit der automatischen Lenkeinrichtung genügte den Anforderungen einer mechanischen Unkrautregulierung.

Das vorgestellte automatische Lenksystem mit bildanalytischer Sensorik stellt, wie im Literaturteil aufgezeigt, einen Beitrag zum Gesamtkomplex „automatische Lenkungssysteme in der agrartechnischen Forschung“ dar.

Summary

A stand oriented automatic guidance system for row crops was mounted on a Fendt Xylon 524 tractor. This system consisted of an image processing system, a vehicle specific controller and a proportional hydraulic valve. The development began with a Claas Autopilot with machine vision sensor and ended with the two-computer-system with vision-guided position controller, vehicle specific steering angle controller and a Load-Sensing compatible Danfoss PVG32 hydraulic valve.

Image processing hardware was an ITI IC-PCI frame grabber with an AMC colour acquisition module in an AMD K6/II-300 host, a Pulnix TMC 50 RGB CCD-Camera was used as sensor. After transforming and rescaling the image of the camera's view, two guidelines were calculated from a binarised colour differential image, and, after validating their angle deviation, heading and offset errors were generated.

The steering angle controller consisted of an AMD 486 DX 133 host with an AD/DA interface and the developed digital PID-controller. With the heading and offset error calculated by the image processing unit and the actual steering angle provided by the sensor, it supplied the hydraulic valve with the correction voltage, changing the front axle's steering angle.

In several field tests performed, the system has shown to be stable, and, despite the increased working speed, not less accurate than the human operated variant.

Literaturverzeichnis

- [Alakukku et al., 1997] Alakukku, L., Pöyhönen, A., Sampo, M. 1997. Soil compaction control with a light, unmanned tractor in two tillage systems. Paper presented at the 14th Conference „Agroecological and economic aspects of soil tillage“, Pulawy, Polen.
- [Åstrand und Baerveldt, 1999] Åstrand, B., Baerveldt, A.J. 1999. Robust recognition of plant rows. Paper submitted to ICRAM 1999. International conference of recent advances in mechatronics.
- [Bareiss, 1993] Bareiss, M. 1993. Sensorgesteuerte Lenkung für Hackgeräte. Produktinformation Fa. Bareiss, Welzheim.
- [Biller, 1993] Biller, R.H. 1993. Verfahren zur Reduzierung des Betriebsmitteleinsatzes. Forschungsreport der Institute der FAL Braunschweig Völkenrode, Institut für Biosystemtechnik.
- [Biller, 1995] Biller, R.H. 1995. Optoelektronik zur Einsparung von Herbiziden in der Pflanzenproduktion. VDI Landtechnik 1995, 50 (2), pp 68-69.
- [Billingsley, 1997] Billingsley, J. 1997. The successful development of a vision guidance system for agriculture. Computers and electronics in agriculture, Januar 1997, pp 147-163.
- [Brandon und Searcy, 1992] Brandon, J.R., Searcy, S.W. 1992. Vision assisted automatic guidance for agricultural vehicles. SAE technical paper No. 921650. SAE Warrendale.
- [Brandon et al., 1989] Brandon, J.R., Searcy, S.W., Babowicz, R.J. 1989. Distributed control for vision based tractor guidance. Paper presented at the 1989 ASAE international winter meeting. American Society of Agricultural Engineers.

- [Brown et al., 1994] Brown, R.B., Steckler, J.-P.G.A., Anderson, G.W. 1994. Remote sensing for identification of weeds in no-till corn. Transactions of the ASAE, 1994, pp 297-302.
- [CIT, 1999] Claas Industrietechnik, 1999. Claas Laserpilot. Produktpräsentation Agritechnica 1999.
- [Danfoss und Reichhardt, 1999] Danfoss Systempartner und Reichhardt Steuerungstechnik GmbH 1999. Pilotsystem DR. Produktpräsentation Agritechnica 1999.
- [Debain et al., 2000] Debain, C., Chateau, T., Berducat, M., Martinet, P., Bonton, P. 2000. A guidance-assistance system for agricultural vehicles. Computers and electronics in agriculture 25 (2000), pp 29-51.
- [Derras et al., 1994] Derras, M., Debain, C., Berducat, M., Bonton, P., Gallice, J. 1994. Unsupervised region segmentation: a self guidance system for agricultural equipments. Paper presented at the 1994 world congress on agricultural engineering in Milano, CIGR Belgium.
- [Diekhans, 1999] Diekhans, N. 1999. Der Claas Autopilot. Claas Industrietechnik Produktinformation. CIT Entwicklungsabteilung.
- [Fehr und Gerrish, 1989] Fehr, B.W., Gerrish, J.B. 1989. Vision-guided off-road vehicle. Paper presented at the 1989 ASAE international winter meeting. American Society of Agricultural Engineers.
- [Fehr und Gerrish, 1995] Fehr, B.W., Gerrish, J.B. 1995. Vision-guided row-crop follower. Transactions of the ASAE, 1995, pp 613 - 620.
- [Franz et al., 1991] Franz, E, Gebhardt, M.R., Unklesbay, K.,B. 1991. The use of spectral properties of leaves as an aid for identifying weed seedlings in digital images. Transactions of the ASAE, 1991, pp 682-687.
- [Georg, 1993] Georg, H. 1993. Digitale Bildverarbeitung im Agrarbereich unter spezieller Berücksichtigung der Entwicklung eines Systems zur Erkennung von Ackerunkräutern. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Landtechnik, 1993.

- [Gerrish et al., 1986] Gerrish, J.B., Stockman, G.C., Mann, L., Hu, G. 1986. Path-finding by image processing in agricultural field operations. SAE-Paper 861455, SAE-Transactions, Volume 95, Warrendale PA, 1986, pp 5540-5554.
- [Gerrish et al., 1997] Gerrish, J.B., Fehr, B.W., Van Ee, D.P., Welch, D. 1997. Self-steering tractor guided by computer vision. *Applied Engineering in Agriculture* 13 (5) 1997, pp 559-563.
- [Guyer et al., 1986] Guyer, D.E., Miles, G.E., Schreiber, M.M., Mitchell, O.R., Vanderbilt, V. 1986. Computer vision and image processing for plant identification. *Transactions of the ASAE*, 1986, pp 1500-1507.
- [Hofmann, 1993] Hofmann, L. 1993. Schwadabtastung mit Ultraschall. *VDI Landtechnik* 1993, 48(5), pp 266-268.
- [Hollstein und Biller, 1998] Hollstein, A., Biller, R. 1998. Weiterentwicklung eines optoelektronischen Sensorsystems zur gezielten Unkrautkontrolle. *Agrartechnische Forschung* 4 (1998) H.1, pp 11-17.
- [Holmqvist, 1993] Holmqvist, R.; 1993. A laser-optic navigation system for driverless vehicles. *Arnex Navigation Systems AB, Göteborg, Produktinformation*.
- [Holmqvist, 1995] Holmqvist, R.; 1995. Electro - optic sensors and position determination. *Arnex Navigation Systems AB, Göteborg, Produktinformation*.
- [Hough, 1962] Hough, P. V. C. 1962. Methods and means for recognizing complex patterns. *US Patent* 3069654
- [Inoué, 1991] Inoué, Y. 1991. Remote and visualized sensing of physiological depression in crop plants. *Agricultural Research Center, Tsukuba, Ibaraki, JARQ* (Jul 1991), 25(1), pp 1-5.
- [Jahns, 1970] Jahns, G. 1970. Möglichkeiten zum Erzeugen von Kurssignalen für das automatische Lenken von Landfahrzeugen. *Grundlagen der Landtechnik* 1970, 20 (3) pp 65-75.

- [Knechtges, 1991] Knechtges, H. 1991. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Traktor und Gerät. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, TH Aachen. Wissenschaftlicher Fachverlag Dr. Fleck.
- [Kollar, 1985] Kollar, L. 1985. Untersuchungen der Eigenschaften mobiler landwirtschaftlicher Aggregate. Dissertation, Technische Universität Dresden, 1985.
- [Leamer et al., 1978] Leamer, R.W., Noriega, J.R., Wiegand, C.L. 1978. Seasonal changes in reflectance of two wheat cultivars. *Agronomy Journal*, Vol. 70, Jan./Feb. 1978, pp 113-118.
- [Lechner und Baumann, 2000] Lechner, W., Baumann, S. 2000. Global navigation satellite system. *Computers and electronics in agriculture* 25 (2000), pp 67-85.
- [Marchant, 1991] Marchant, J. 1991. Image analysis in biological systems. *Progress in agricultural physics and engineering*. Wallingford (United Kingdom). CAB International.
- [Marchant, 1994] Marchant, J. 1994. Visual sensing for precision crop protection. *Silsoe Research Institut Annual Report 1993-1994*, Wrest Park, Silsoe Bedfordshire MK45 4HS.
- [Marchant und Brivot, 1995] Marchant, J., Brivot, R. 1995. Real time tracking of plant rows using a Hough Transform. *Real Time Imaging* 5 (1), pp 363-371.
- [Marchant und Brivot, 1996] Marchant, J., Brivot, R. 1996. Segmentation of plants and weeds for a precision crop protection robot using infrared images. *Proc. IEEE-Vis. Image Signal Process.* 143 (2), pp 118-124.
- [Nieminen et al., 1996] Nieminen, T., Sampo, M., Mononen, J. 1996. Development of a control system for autonomous agricultural vehicles. *Ag. Eng. Paper* (096A-094).
- [Noguchi et al., 1997] Noguchi, N., Matsuo, Y., Yukumoto, O., Suzuki, M. 1997. Development of a tillage robot using a position sensing system and a geomagnetic direction sensor. *ASAE Paper No.* 973090.

- [Noguchi et al., 1998] Noguchi, N., Reid, J.F., Benson, E.R., Stombaugh, T.S. 1998. Vision intelligence for an agricultural mobile robot using a neural network. 3rd IFAC/CIGR Workshop on AI in Agriculture, Japan.
- [Petry, 1989] Petry, W. Unkrautkontrolle im landwirtschaftlichen Pflanzenbau mit Hilfe der quantitativen Bildanalyse. Dissertation, Universität Bonn 1989.
- [Reid et al., 1985] Reid, J.F., Searcy, S.W., Babowicz, R.J. 1985. Determining a Guidance Directrix in Row Crop images. Paper No. 85-3549, 1985 ASAE Winter Meeting.
- [Reid und Searcy, 1988] Reid, J.F., Searcy, S.W. 1988. An algorithm for separating guidance information from row crop images. Transactions of the ASAE, 1988, pp 1624-1632.
- [Reusch, 1997] Reusch, S. 1997. Entwicklung eines Reflexionsoptischen Sensors zur Erfassung der N-Versorgung landw. Kulturpflanzen. Forschungsbericht Agrartechnik VDI - MEG 303.
- [Shearer et al., 1996] Shearer, S.A., Thomasson, J.A., McNeill, S.G. 1996. Filter selection for NIR sensing of plant and soil materials. Transactions of the ASAE, 1996, pp 1209-1214.
- [Søgaard und Olsen, 2000] Søgaard, H.T., Olsen, H.J. 2000. Crop row detection for cereal grain. In: Stafford, J.V. (Ed.), Precision Agriculture '99. Sheffield Academic Press, pp 181-190.
- [Stoll und Kutzbach, 1999] Stoll, A., Kutzbach, H.D. 1999. Automatic guidance of an agricultural vehicle with GPS. Projektbeschreibung, in: Keicher, R., Seufert, H. 2000. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. Computers and electronics in agriculture 25 (2000), pp 169-194.
- [Sudduth und Hummel, 1996] Sudduth, K A., Hummel, J.W. 1996. Geographic operating range evaluation of a NIR soil sensor. Transactions of the ASAE, 1996, pp 1599-1604.
- [Tarbell und Reid, 1991] Tarbell, K.A., Reid, J.F. 1991. Spatial and spectral characteristics of corn leaves collec-

- ted using computer vision. Transactions of the ASAE, 1991, pp 2256-2263.
- [Torii, 2000] Torii, T. 2000. Research in agricultural autonomous vehicles in Japan. Computers and electronics in agriculture 25 (2000), pp 133-153.
- [von Bargaen et al., 1992] von Bargaen, K., Meyer, G., Mortensen, D., Merritt, S.J., Woebbecke, D.M. 1992. Red - near infrared reflectance sensor system for detecting plants. Optics in agriculture and forestry. SPIE Vol. 1836, 1992, pp 231-238.
- [van Zuydam, 1999] van Zuydam, R. 1999. A drivers steering aid for an agricultural implement, based on an electronic map and Real Time Kinematic DGPS. Computers and electronics in agriculture 24 (1999), pp 153-163.
- [Wartenberg und Heisig, 1997] Wartenberg, G., Heisig, M. 1997. Erkennen von Feldverunkrautungen durch Luftbildtechnik. VDI Landtechnik 1997, 52(1), pp 14-15.
- [Woebbecke et al., 1995] Woebbecke, D.M., Meyer, G.E., van Bargaen, K., Mortensen, D.A. 1995. Color indices for weed identification under various soil, residue and lighting conditions. Transactions of the ASAE, 1993, pp 259-269.
- [Wulf, 1997] Wulf, B. 1997. Automatische Seitensteuerung bei Pflegegeräten und Erntemaschinen. VDI Landtechnik 1997, 52(3), pp 130-131.

Danksagung

Während meiner Doktorandenzeit am Institut für Landtechnik der Justus-Liebig-Universität in Gießen habe ich vielseitige Unterstützung erfahren. Für ihre Hilfe und Motivation möchte ich mich an dieser Stelle bei allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, bedanken.

Besonders danken möchte ich:

Herrn Prof. Dr. H. Seufert für die Überlassung des Themas, die gewährten Arbeitsmöglichkeiten und zur Verfügung gestellten Ressourcen am Institut für Landtechnik, die Betreuung der Arbeit, sowie seine motivierende Unterstützung während meiner gesamten Zeit am Institut,

Herrn Prof. Dr.-Ing H. Knechtges für die Übernahme des Koreferats, die Betreuung der Arbeit, und seine tatkräftige Unterstützung über die gesamte Projektlaufzeit,

der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung des Projekts,

der Firma Agco Fendt, Marktoberdorf, für die Überlassung des Versuchsträgers,

der Firma Claas, Harsewinkel, für die Überlassung der Komponenten des Autopiloten.

Vielen Dank auch an Uli Bauer, der auf alle Fragen eine Antwort weiss, David Brunner für seine hervorragende Diplomarbeit, Prof. Dr. F. Tröster und Wolfgang Keicher für die Unterstützung in Fragen der Regelungstechnik, der Werkstattbesatzung des Instituts für die Umbaumaßnahmen, Herrn Hesse, Frau Haustein, sowie überhaupt allen Institutsmitarbeitern, Doktoranden und Diplomanden für das sehr angenehme Arbeitsklima, meinen Eltern, Gertrud und Ernst, Karl, Thorsten und: Petra