

Lehrstuhl für Landtechnik der Technischen Universität München

**Einzelpflanzenorientierte Prozessführung  
im Freilandgemüsebau**

**Hans Peter Römer**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum  
Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der  
Technischen Universität München zur Erlangung des  
akademischen Grades eines

**Doktors der Agrarwissenschaften**

genehmigten Dissertation

Vorsitzender:

Univ. Prof. Dr. W. Schnitzler

Prüfer der Dissertation:

1. Univ. Prof. Dr. J. Meyer

2. Univ. Prof. Dr. H. Auernhammer

Die Dissertation wurde am 20.10.2000 bei der Technischen  
Universität München eingereicht und durch die Fakultät  
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung,  
Landnutzung und Umwelt am 1 .2.2001 angenommen

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		Seite
<b>Abbildungsverzeichnis</b>		6
<b>Tabellenverzeichnis</b>		9
<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>		10
<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b>		12
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	14
1.1	Problemstellung	15
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens</b>	17
2.1	Ortung	17
2.1.1	Satellitenortung	18
2.1.1.1	Differentielles GPS (DGPS)	19
2.1.1.2	Real-Time-Kinematic GPS (RTK-Mode)	20
2.1.1.3	Weitere Satellitennavigationssysteme	20
2.1.1.4	Integrierte Satellitennavigationssysteme	21
2.1.2	Navigation entlang von Leitlinien	21
2.1.2.1	Induktive Leitkabelsysteme	21
2.1.2.2	Laserleitlinien	22
2.1.2.3	Computerbildanalyse zur Reihenführung	23
2.1.2.4	Optische Pflanzenerkennungs- und Unterscheidungssysteme	23
2.1.3	Erdgestützte Triangulation	23
2.1.3.1	Lasertriangulation	23
2.1.4	Vollautomatische zielverfolgende Tachymeter	25
2.2	Expertensysteme	26
2.2.2	Stickstoffsimulationen	29
2.2.3	Expertensysteme für den Pflanzenschutz	30
<b>3</b>	<b>Zielsetzung</b>	31
<b>4</b>	<b>Untersuchung der Messgenauigkeit zweier Ortungssysteme</b>	32
4.1	Material und Methoden	32
4.1.1	Das Versuchsfeld	32
4.1.2	Ermittlung des Messverhaltens von „Capsy“	33
4.1.2.1	Funktionsweise von „Capsy“	33
4.1.2.2	Einrichtung des Versuchsfeldes zur Messung mit „Capsy“	35
4.1.2.3	Vorversuch	38
4.1.2.4	Überprüfung der Messgenauigkeit von „Capsy“ im statischen	

---

	Betrieb	39
4.1.2.5	Überprüfung der Messgenauigkeit von „Capsy“ im dynamischen Betrieb	41
4.1.2.6	Versuchsaufbau zur Überprüfung der dynamischen Genauigkeit von „Capsy“	43
4.1.3	Ermittlung des Messverhaltens des „Geodimeter 4000“	50
4.1.3.1	Funktionsweise des Geodimeter 4000	50
4.1.3.2	Übertragung der Positionsdaten auf einen Rechner	53
4.1.4	Untersuchung der statischen Genauigkeit des „Geodimeter 4000“	56
4.1.5	Untersuchung der dynamischen Genauigkeit des „Geodimeter 4000“	57
4.2	Ergebnisse zur Ortungsgenauigkeit	64
4.2.1	Ergebnisse zur statischen Messgenauigkeit von „Capsy“	64
4.2.1.1	Messwertstabilität	66
4.2.1.2	Wiederholgenauigkeit des Systems	68
4.2.2	Ergebnisse zur dynamischen Genauigkeit von „Capsy“	72
4.2.3	Ergebnisse zur statischen Genauigkeit der Totalstation „Geodimeter 4000“	75
4.2.4	Ergebnisse zur dynamischen Genauigkeit der Totalstation „Geodimeter 4000“	77
4.3	Schlussfolgerungen aus dem Messverhalten der Ortungssysteme	81
4.3.1	Messgenauigkeit des Lasertriangulationssystems „Capsy“	81
4.3.2	Messgenauigkeit der Totalstation „Geodimeter 4000“	83
4.3.3	Fazit	84
<b>5</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>85</b>
5.1	Die Komponenten des Portalversuchsrahmens	85
5.1.1	Ausführende Komponenten	86
5.1.1.1	Der Linearregner	86
5.1.1.2	Querverschiebung	87
5.1.1.3	Antriebe des PVR	89
5.1.2	Datenerfassung und Steuerung	90
5.1.2.1	Klimadatenerfassung	92
5.1.2.2	Positionsdatenerfassung	93
5.2	Ermittlung der Pflanzenposition	93
5.2.1	Einmessen der Einzelpflanzen	94
5.2.2	Einmessen der Pflanzfahrt	94
5.3	Prozessführung	96
5.3.1	Organisation des Quellcodes	97
5.3.1.1	Die Programmbibliothek IDM.Pas	99
5.3.1.2	Die Programmbibliothek Geo.Pas	99

5.3.1.3	Die Programmbibliothek Weather.pas	99
5.3.1.4	Die Programmbibliothek Steuer.pas	99
5.3.1.5	Die Variablenbibliothek Varconst.pas	100
5.3.2	Steuerungsprogramm	100
5.3.2.1	Positionsmessung	100
5.3.2.2	Abschätzung der aktuellen Position	103
5.3.2.3	Regelroutinen der Steuerung	106
5.3.2.4	Bestimmung des Sollwertes	106
5.3.2.5	Steuerung des Spritzbalkens über einer Reihe	109
5.3.2.6	Steuerungsvarianten	112
5.4	Expertensysteme	113
5.4.1	Die Schnittstellendatei „Agenda.lst“	114
5.4.2	Bodenfeuchtemodell	116
5.4.3	Bewässern	122
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	116
6.1	Ermittlung der Pflanzenposition	116
6.2	Prozessführung	119
6.2.1	Steuerungs genauigkeit	119
6.2.2	Ortsreferenzierter Vergleich von Sollweg und gesteuerter Fahrt	120
6.2.3	Messfahrten der Steuerungsvariante 1	121
6.2.4	Messfahrten der Steuerungsvariante 2	123
6.3	Expertensysteme	127
6.3.1	Bewässerung	128
6.3.2	Durchführung einer Bewässerungsmaßnahme	130
<b>7</b>	<b>Diskussion</b>	132
7.1	Ortung	133
7.2	Erfassung der Pflanzenposition	135
7.3	Prozessführung	136
7.3.1	Steuerung	137
7.3.1.1	Einflussfaktoren auf die Steuerungsgenauigkeit	137
7.3.1.2	Bewertung der Abweichungsspannweiten	138
7.4	Expertensystem	138
7.4.0.1	Bewässern	139
7.5	Weiterführende Arbeiten	139
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	141
<b>9</b>	<b>Summary</b>	144
<b>10</b>	<b>Literatur</b>	146



## Abbildungsverzeichnis

	Seite
1: Blockdiagramm eines Informationssystems für eine Prozessführung im Freilandgartenbau	16
2: Bilanzmodell der Bodenfeuchte (WEBER 1997)	28
3: Lageskizze des Versuchsfeldes im Versuchszentrum Dürnast	32
4: Messprinzip des Ortungs und Positioniersystems „CAPSY“	34
5: Targetmontierung	36
6: Lageplan des Versuchsfeldes in der Versuchstation Dürnast (xy Koordinatensystem für „Capsy“)	37
7: Flächen im Versuchsfeld mit unsicherer Messprognose	39
8: Messwertverschiebung bei bewegtem Gerät	42
9: Versuchsstrecke mit angetriebenem Gerätetragrahmen	43
10: Elektrooptische Entfernungsmessung nach dem Phasenlaufzeitverfahren (SCHLEMMER 1996)	51
11: Positionsbestimmung und Datenerfassung mit dem „Geodimeter 4000“	53
12: Position der Messpunkte im Versuchsfeld	56
13: Versuchsaufbau zur Überprüfung der dynamischen Genauigkeit des „Geodimeter 4000“	58
14: Diagonale Hin und Rückfahrt mit zwei Bewegungsgeschwindigkeiten des Zielkörpers	60
15: Positionsmessung entlang einer gespannten Schnur	64
16: Häufigkeitsverteilung der Messwerte am Punkt 92/34	66
17: Häufigkeitsverteilung der Messwerte am Punkt 74/34	67
18: Häufigkeitsverteilung der Messwerte am Punkt 50/34	68
19: Häufigkeitsverteilung zweier Messungen am Punkt 92/34	69
20: Häufigkeitsverteilung zweier Messungen am Punkt 32/34	70
21: Häufigkeitsverteilung zweier Messungen am Punkt 56/34	71
22: Häufigkeitsverteilung zweier Messungen mit „Capsy“ am Punkt 26/34	71
23: Positionsbestimmung von „Capsy“ bei 0,3 km/h	72
24: Positionsbestimmung von „Capsy“ bei 4,25 km/h	73
25: Positionsbestimmung von „Capsy“ bei 8,9 km/h (Kurve geglättet)	74
26: Ausrichtung von „Capsy“ während der Fahrt (v= 8,9 km/h)	74
27: Verteilung der Messwerte an einem Messpunkt (x: 32,2 m y: 42,3 m)	75
28: Mittlere Abweichungen der Messwerte im Fast Trackingmodus von den im Standardmodus gemessenen (Punkte parallel zur x - Richtung)	76
29: Mittlere Abweichungen der Messwerte im Fast Trackingmodus von den im Standardmodus gemessenen (Punkte parallel zur y - Achse)	77

<b>30:</b>	Hin- und Rückfahrt mit 2 Geschwindigkeiten des Zielkörpers (Fahrtrichtung um 50 gon (45°) zur Beobachtungsrichtung gedreht)	77
<b>31:</b>	Mittlerer Zeitverzug und dessen Spannweiten der x - Koordinaten bei bewegtem Prisma	78
<b>32:</b>	Mittlerer Zeitverzug der y - Koordinaten und dessen Spannweiten bei bewegtem Prisma	79
<b>33:</b>	Mittlerer Zeitverzug und dessen Spannweiten der x - und y - Koordinaten bei diagonal bewegtem Prisma	80
<b>34:</b>	Der Portalversuchsrahmen (PVR)	86
<b>35:</b>	Modul zur Querverschiebung am PVR	88
<b>36:</b>	Schaltschema des Wasserflusses am Gießwagenmodul	88
<b>37:</b>	Datenerfassung und Steuerung des Prozessrechners am PVR	91
<b>38:</b>	Messung der Pflanzfahrt	95
<b>39:</b>	Funktionen der Prozessführung	97
<b>40:</b>	Flussdiagramm des Hauptprogrammes	98
<b>41:</b>	Flussdiagramm der Prozedur „Fahrkontrolle“	101
<b>42:</b>	Flussdiagramm der Prozedur „Geodimeterdaten sichern“	102
<b>43:</b>	Flussdiagramm der Prozedur „Position schätzen“	104
<b>44:</b>	Flussdiagramm der Prozedur „x steuern“	106
<b>45:</b>	Flussdiagramm der Prozedur „x Sollwert Check“	108
<b>46:</b>	Flussdiagramm der Prozedur „Reihe fahren“	109
<b>47:</b>	Flussdiagramm der Prozedur „Reihe anfahren“	110
<b>48:</b>	Flussdiagramm der Prozedur „Reihe überfahren“	111
<b>49:</b>	Flussdiagramm der Prozedur „Agendaliste lesen“	115
<b>50:</b>	Flussdiagramm der Einbindung des Bodenfeuchtemodells	118
<b>51:</b>	Flussdiagramm der Prozedur „Bewässern“	123
<b>52:</b>	Einzelpflanzenpositionen und Verlauf der Pflanzspur bei Reihe 47	116
<b>53:</b>	Isometrischer Ausschnitt einer Pflanzenreihe	117
<b>54:</b>	Schwankungsbreite der Pflanzspur um den gleitenden Mittelwert (Glättungsbreite 12 Werte)	117
<b>55:</b>	Schwankungsbreite innerhalb der Einzelpflanzenpositionen um den gleitenden Mittelwert (Glättungsbreite 2 Werte)	118
<b>56:</b>	Verlauf einer gesteuerten Fahrt entlang einer Pflanzspur	119
<b>57:</b>	Ausschnitt einer Messfahrt mit den dazugehörigen Sollwerten der Steuerung (ohne Mittelwertbildung)	120
<b>58:</b>	Häufigkeitsanalyse der Messfahrten vom 29.09.98 über 4 Beeten (Datengrundlage 3792 Werte)	121
<b>59:</b>	Häufigkeitsanalyse der Messfahrten vom 5.11.98 über 2 Beeten (Datengrundlage 3299 Messwerte)	122
<b>60:</b>	Häufigkeitsanalyse der Abweichung einer Messfahrt am 11.9.99 mit geglätteter Sollwertkurve und fester Übergabe der Steuerbefehle ( $v'_x : 0,05 \text{ ms}^{-1}$ , $v'_y : 0,06 \text{ ms}^{-1}$ )	123

<b>61:</b>	Ausschnitt einer Messfahrt mit den dazugehörigen Sollwerten der Steuerung (mit Mittelwertbildg.) $v'_x : 0.049 \text{ ms}^{-1}$ , $v'_y : 0.06 \text{ ms}^{-1}$ , Toleranz: $\pm 0,003 \text{ m}$	124
<b>62:</b>	Häufigkeitsanalyse der Abweichung einer Messfahrt Variante 2 ( $v'_x : 0,07 \text{ ms}^{-1}$ , $v'_y : 0,05 \text{ ms}^{-1}$ Toleranz: $\pm 0,003 \text{ m}$ )	125
<b>63:</b>	Häufigkeitsanalyse der Abweichung einer Messfahrt Variante 2 ( $v'_x : 0,08 \text{ ms}^{-1}$ , $v'_y : 0,049 \text{ ms}^{-1}$ , Toleranz: $\pm 0,006 \text{ m}$ )	126
<b>64:</b>	Häufigkeitsanalyse der Abweichung einer Messfahrt Variante 2 ( $v'_x : 0,07 \text{ ms}^{-1}$ , $v'_y : 0,045 \text{ ms}^{-1}$ , Toleranz: $\pm 0,007 \text{ m}$ )	126
<b>65:</b>	Ausschnitt einer Messfahrt mit den dazugehörigen Sollwerten der Steuerung (mit Mittelwertbildung) $v'_x : 0.049 \text{ ms}^{-1}$ , $v'_y : 0.08 \text{ ms}^{-1}$ , Toleranz: $0,006 \text{ m}$	127
<b>66:</b>	Feuchteverlauf in der obersten Bodenschicht (<10 cm) ohne Bewässerung	128
<b>67:</b>	Feuchteverlauf in der obersten Bodenschicht (<10 cm) und daraus resultierende Bewässerungsgaben	129
<b>68:</b>	Feuchteverlauf in der unteren Bodenschicht (10 - 60 cm) und der Versickerung hieraus in den Unterboden	130
<b>69:</b>	Selbständige Durchführung einer Bewässerung von zwei Kultureinheiten	132



---

**Tabellenverzeichnis**

	Seite
<b>Tabelle 1:</b> Bearbeitungsebenen und deren Genauigkeitsanforderungen	17
<b>Tabelle 2:</b> Synchronisationsfehler einer Totalstation (STEMPFHUBER, 1999)	25
<b>Tabelle 3:</b> Übersicht über Bodenfeuchtesensoren (nach PASCHOLD und WIETHALER, 1999)	27
<b>Tabelle 4:</b> Expertensysteme im Pflanzenschutz (nach TISCHER, 1998)	30
<b>Tabelle 5:</b> Spezifikation des „ <i>Geodimeter 4000</i> “	51
<b>Tabelle 6:</b> Mittelwerte und Standardabweichung der Messreihen mit „ <i>Capsy</i> “	65
<b>Tabelle 7:</b> Spritzdüsen am PVR	90

## Verzeichnis der Formelzeichen

$\vec{a}$	: Beschleunigungsvektor	
$\vec{v}$	: Geschwindigkeitsvektor	
$t_g$	: Gesamtfahrdauer	
$\vec{s}$	: Vektor der Fahrtstrecke	
$\vec{P}$	: Vektor der Prismaposition	
$t_b$	: Beschleunigungszeit	
$\vec{I}_0$	: Berechnungsintervall	[m]
$n$	: Anzahl Programmdurchläufe	
$\vec{v}$	: Fahrtgeschwindigkeitsvektor	[ms <sup>-1</sup> ]
$\vec{t}$	: Vektor der Motorlaufzeiten	[s]
$F10$	: pflanzenverfügbares Wasser Schicht 1	[mm]
$F50$	: pflanzenverfügbares Wasser Schicht 2	[mm]
$N$	: Tagesniederschlag	[mm]
$VS1$	: Wasser das von Schicht 1 in Schicht 2 versickert	[mm]
$DF$	: Wasser, das zwischen den Schichten diffundiert	[mm]
$Ea$	: Evapotranspiration aus Schicht1	[mm]
$OW$	: Oberflächenwasser	[mm]
$TR$	: Transpiration der in Schicht 2 wurzelnden Pflanzen	[mm]
$VS2$	: Wasser das aus Schicht 2 versickert	[mm]
$i$	: aktueller Tag	
$FK10$	: Feldkapazität der Schicht 1	[mm]
$VK$	: Versickerungskoeffizient	[-]
$DK$	: Diffusionskoeffizient	[-]
$Ep$	: potentielle Evapotranspiration	[mm]
$AF$	: Abtrocknungsfaktor	[-]
$HF$	: Haundefaktor	[mm/hPa]
$E$	: Sättigungsdampfdruck	[hPa]
$f$	: relative Luftfeuchte um 14.00 Uhr	[%]
$k_1$	: 6,107	[hPa]
$k_2$	: 17,26939	[-]
$k_3$	: 237,3	[°C]
$T$	: Lufttemperatur um 14.00 Uhr	[°C]
$SW$	: Sättigungsfeuchte der Schicht 1	[mm]
$PK$	: Pflanzenkoeffizient	[-]
$FK50$	: Feldkapazität der Schicht 2	[mm]
$pF10_i$	: potentielles, pflanzenverfügbares Wasser in Schicht 1	[mm]

<i>pF50<sub>i</sub></i> : potentielles, pflanzenverfügbares Wasser in Schicht 2	[mm]
<i>F10</i> : Bodenfeuchte	[mm]
<i>WF</i> : Welkefeuchte	[mm]
<i>FK10</i> : Feldkapazität der Schicht 1	[mm]

**Verzeichnis der Abkürzungen**

C/A Code	Coarse/Acquisition Code, Groberfassungscode der NAVSTAR Satelliten
COM	Bezeichnung der seriellen Schnittstelle am Prozessrechner
EDM	elektrooptische Distanzmessung
FTS	fahrerlose Transportsysteme
GB	Gartenbau
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikova Sistema, russisches Satellitennavigationssystem
GPS:	Navigation Satellite Time and Ranging- Global Positioning System (NAVSTAR-GPS)
IP 55	Schutzart nach DIN 40 050 und IEC Publikation 144 (IP)
ISM	Intelligentes Sensor Modul
IDM	Intelligentes Daten Modul
LW	Landwirtschaft
MS-DOS <sup>®</sup>	Microsoft <sup>®</sup> Disk Operating System, Betriebssystem für IBM <sup>®</sup> kompatible Rechner
P-Code	Precise Code im NAVSTAR-GPS
PVR	Portalversuchsrahmen, Versuchsgerät zur einzelpflanzenorientierten Kulturführung
RS- 232	Recommended Standard 232 für serielle Datenkommunikation der Electronic Industry Association (EIA)
RS- 485	Recommended Standard 485 für serielle Datenkommunikation der Electronic Industry Association (EIA)
RTK - GPS	Real-Time-Kinematic GPS (RTK-Mode)
TNO:	Nederlandse Organisatie voor toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek, deutsch: Niederländische Einrichtung für angewandte Forschung

Zum Gelingen dieser Arbeit haben sehr viele Menschen mit beigetragen und ich möchte mich dafür sehr herzlich bedanken.

An allererster Stelle bedanke ich mich bei dem Initiator dieser Arbeit, Prof. Joachim Meyer, dass er mich mit diesem Projekt betraut hat. Für die Unterstützung, Hilfe und Rat auch über das Fachliche hinaus bin ich dankbar.

Herzlichen Dank auch an Prof. Auernhammer, der einerseits das Koreferat dieser Arbeit übernahm und dessen Arbeitsgruppe andererseits den Lineartisch zur Überprüfung der dynamischen Genauigkeit des *Geodimeter 4000* zur Verfügung stellte.

Besonderer Dank gebührt auch Prof. Schnitzler für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und für das Überlassen des Versuchsfeldes in Dürnast. Herzlichen Dank auch an Herrn Reiter und die Mitarbeiter der Versuchstation.

Ganz herzlich bedanke ich mich bei meinen früheren Kollegen Dr. Andreas Bertram, Dr. Paul Hartmann und Dr. Hansjörg Weber für die fruchtbaren Diskussionen, den fachlichen Rat und die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Mein Dank gilt im besonderen auch allen, die an der Konstruktion und am Bau des PVR beteiligt waren. Genannt sei hier zum einen Herr Dallinger, Herr Bauer und Dr. Stanzel und zum anderen die Werkstatt unter Leitung von Herrn Stadler.

Bei Herrn Keller, dem früheren technischen Zeichner bedanke ich mich für die aufwändigen und detailreichen Zeichnungen des PVR.

Dank auch an die Kollegen Tiemo Schwenke und Thomas Steinmayr, für die vielen konstruktiven Gespräche und Anregungen.

Elke Frohn bin ich zu tiefem Dank für die Unterstützung während meiner Promotionszeit verpflichtet.

Besonders herzlichen Dank sage ich auch meiner Freundin Claudia, die mich während der Niederschrift liebevoll unterstützt hat.

## 1 Einleitung

Eines der vorrangigen Ziele der gartenbaulichen Forschung der letzten zwanzig Jahre ist die Verbesserung der Kulturverfahren im Hinblick auf Ressourcen- und Umweltschonung. Im Freilandgartenbau betrifft dies besonders Bewässerung, Düngung und Pflanzenschutz. Es besteht hierbei jedoch ein Zielkonflikt für den Gärtner, denn er kann die Aufwandsmengen nicht beliebig verringern, da er den Erfolg seines Betriebes durch Ertrag und Qualität seiner Produktion sichern muss.

Bei Gewächshauskulturen lassen sich die Wachstumsfaktoren der Pflanze sehr gut durch eine gute Regelung der Klimaführung steuern. Verluste an Aufwandsmitteln lassen sich zudem in geschlossenen Bewässerungssystemen auffangen. Im Freilandgartenbau wird bisher in technischer Hinsicht mit einem geringeren kulturtechnischen Aufwand gearbeitet. Der Anbauer passt sich in der Regel dem Entwicklungsverlauf der Kultur vor Ort an, der wiederum von den Witterungsbedingungen bestimmt ist. Häufig kommt es dabei zu Arbeitsspitzen, da bei mehreren Kulturen z. B. nach längeren Regenperioden Bearbeitungsmaßnahmen in dem gleichen engen Witterungsfenster durchgeführt werden müssten (WEBER 1997). Daher kann oft eine Vielzahl von Arbeiten nicht zu dem Zeitpunkt ausgeführt werden, der dem Wachstumsstadium und Bedarf der Pflanzen entspricht und den kulturtechnischen Anforderungen Rechnung trägt. Die Ausbringung erfolgt dann entweder auf Vorrat oder in der Nachsorge mit einem höheren Aufwand.

Die Idee einer einzelpflanzenorientierten Kulturführung gründet auf der Überlegung, dass eine örtlich und zeitlich genaue Behandlung der Pflanzen den Behandlungsaufwand verringert. Am Beispiel Düngung bedeutet das, dass der Pflanze nicht ein Vorrat an Nährstoffen zur Verfügung gestellt wird, der unter ungünstigen Bedingungen ausgewaschen wird, sondern dass der Pflanze zu jedem Zeitpunkt nur die Nährstoffe in der aktuell notwendigen Menge zu Verfügung stehen. Es sind bisher jedoch keinerlei Erkenntnisse vorhanden, in welchem Ausmaß Dünger durch ein solches Verfahren eingespart werden kann. Zwar ist bekannt, welchen Nährstoffbedarf die Pflanze während der Kulturzeit hat und welchem Wachstumsstadium er zugeordnet ist, aber gerade im Freiland ist die Dauer der Wachstumsstadien in erheblichem Maß von der aktuellen Witterung abhängig, und damit ist

die Planung von Düngergaben, die dem Wachstumsstadium exakt angepasst sind, während der Kulturperiode nicht möglich. Ein solches Verfahren erfordert eine ständige Beobachtung der Kultur, anhand derer Entscheidungen über notwendige Düngemaßnahmen getroffen werden. Es ist offensichtlich, dass diese Methode einen erheblichen Arbeitsaufwand durch geschultes Personal erfordert. Der dadurch resultierende finanzielle Aufwand ist sowohl im gartenbaulichen Versuchswesen als auch im Erwerbsgartenbau schwer zu rechtfertigen.

Um die geringeren Steuerungsmöglichkeiten im Freilandgartenbau zu nutzen, ist eine automatisierte und rechnergestützte Prozessführung notwendig. Die rechnergestützte Prozessführung, die selbständig Entscheidungen finden kann und in die Tat umsetzt, entlastet die Arbeitskraftkapazität eines Betriebes und ermöglicht deren effizienteren Einsatz im organisatorischen Bereich. Ihre besondere Bedeutung liegt aber darin, dass mit ihr die Kulturführung mit neuen Strategien zur Aufwandsreduzierung bei Bewässerung, Düngung und Pflanzenschutz ermöglicht wird.

### 1.1 Problemstellung

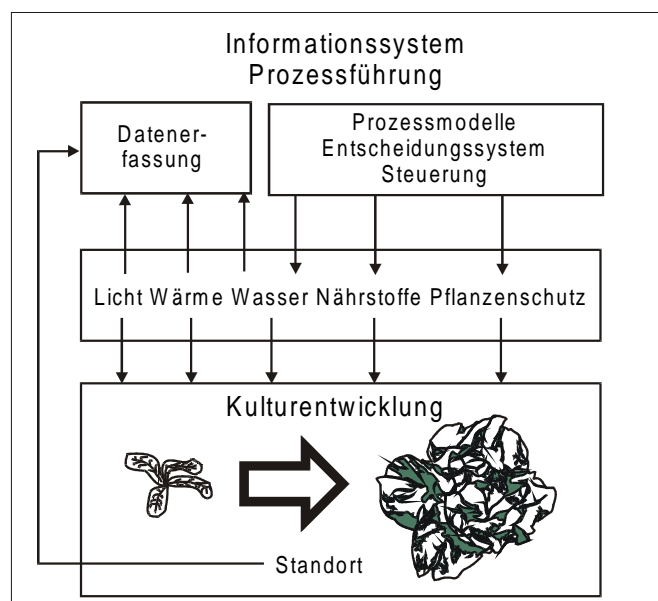
Der Freilandgartenbau ist aufgrund seiner hohen Intensitätsstufe durch große Aufwandsmengen bei Bewässerung Düngung und Pflanzenschutz gekennzeichnet. Im Unterglasgartenbau ist es gelungen, die Aufwandsmengen durch die gezielte Steuerung der Klimafaktoren zu reduzieren und einen einheitlichen Kulturverlauf zu erzielen und damit die Anwendung von Bewässerung, Düngung und Pflanzenschutz bedarfsgerecht zu regeln (SCHRÖDER et al. 1995, ZERCHE und KUCHENBUCH 1995, Schwarz et. al.1996, HEISSNER 1997 )

Im Freiland stehen geringere Steuerungsmöglichkeiten zur Verfügung, da die Klimafaktoren vorgegeben sind und sich in ihrem Einfluss auf die Pflanze überlagern. Um diese wenigen Eingriffsmöglichkeiten des Anbauers optimal zu nutzen, muss vorhandenes Wissen über den Einfluss der Klimafaktoren auf die Pflanze in Expertensysteme eingebracht werden, um damit neue Kulturführungsstrategien zum effizienteren Einsatz von Bewässerung, Düngung und Pflanzenschutz im

Freiland zu entwickeln. Für deren Anwendung ist eine automatisierte Kulturführung rechnergestützter Prozessführung notwendig, welche die Einsatzentscheidung für anstehende Kulturmaßnahmen selbständig treffen kann.

Im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Kulturen hat im Gartenbau die einzelne Pflanze durch ihren hohen Wert für den Betriebserfolg besondere Bedeutung. Daher sollte die Einzelpflanze die Zielgröße bei der Bearbeitung sein. Für die ortsgenaue Durchführung der Bearbeitungsmaßnahmen ist ein Positionierungssystem notwendig, das es ermöglicht, die Arbeitsgeräte zu den Ausführungsorten zu steuern.

Hierzu wird ein Informationssystem benötigt, das die Daten einer Klimastation mit Hilfe eines Expertensystems verknüpft und zu einer Abschätzung der aktuellen Situation hinsichtlich des Nährstoff- und Wasservorrates sowie und des Gesundheitszustandes der Pflanzen verarbeitet (Abbildung 1). Somit lassen sich neue Strategien zur aufwandsreduzierten und damit umwelt- und ressourcenschonenden Kulturführung im Freilandgartenbau durchführen und überprüfen.



**Abb. 1:** Blockdiagramm eines Informationssystems für eine Prozessführung im Freilandgartenbau



## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Ortung und Navigation

Das Wort Navigation stammt von dem lateinischen Wort „navigare“ ab, das bedeutet das Steuern eines Schiffes. Der Seemann der Antike orientierte sich dabei am Küstenverlauf mit Leuchttürmen und an den Sternen. In der Moderne benutzt die Luftfahrt auf dem Land sogenannte Funkfeuer als Orientierungshilfen für die Führung des Flugzeuges. Grundlegender Bestandteil der Navigation ist die Ortung, d. h. die Bestimmung der eigenen Position und der Ausrichtung. Wesentliche Messprinzipien in der Schifffahrt und in der Luftfahrt sind die Streckenmessung und die Winkelmessung. Bei der Ortsbestimmung mit dem Sextant wird auch die Weltzeit benötigt, um mit Hilfe des Sonnenstandes den Längen- und Breitengrad zu ermitteln. In der Luftfahrt wird anhand der Winkel und Entfernungen zu festen Landmarken, den Funkfeuern, die Position des Luftfahrzeugs bestimmt.

In Landwirtschaft (LW) und Gartenbau (GB) gibt es unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit der Ortungssysteme, die vom jeweiligen Verfahrenssys-

**Tabelle 1:** Bearbeitungsebenen und deren Genauigkeitsanforderungen

Bearbeitungsebene	Genauigkeit	Ortungssysteme	Anwendung	
			LW	GB
Teilschlagbezogener Anbau	$\pm 20$ m	GPS, Linearisierter Schlag		
Beetbezogener Anbau	$\pm 0,5$ m	DGPS,		
Reihenführung	$\pm 0,01$ m	Leitliniensysteme (Computerbildanalyse)		
einzelpflanzenorientierte Kulturführung	$\pm 0,01$ m	Lasertrackingsysteme, Totalstationen, RTK-GPS		

verändert nach AUERNHAMMER 1990

tem abhängig sind.

### 2.1.1 Satellitenortung

In der Landwirtschaft hat sich im Pflanzenbau eine neue Art der Bewirtschaftung entwickelt, die unter den Begriffen Precision Farming, Precision Agriculture, oder auch teilschlagbezogener Anbau, zusammengefasst werden. Ziel des Verfahrens ist die an den Standort angepasste Bestandesführung. Der Standort ist hierbei durch heterogene Faktoren wie Klima, Boden und insbesondere seine Nährstoffversorgung gekennzeichnet. Es werden daher ortsreferenzierte Daten erhoben, wie z. B. bei der Ernte der Ertrag. Kennzeichnend ist der Informationskreislauf von Ertrags- Düng- und Bodendaten über mehrere Kulturperioden (AUERNHAMMER 1999). Im Gegensatz zur Antike werden nicht die Gestirne betrachtet sondern die Antennen des Navigationssystems sind auf Satelliten gerichtet und bestimmen den aktuellen Standort des Fahrzeugs. Hierfür werden in der Regel die NAVSTAR-GPS Satelliten genutzt. NAVSTAR-GPS ist die Abkürzung für Navigation Satellite Time and Ranging - Global Positioning System. Der Betreiber und Entwickler dieses Systems ist das amerikanische Verteidigungsministerium und es dient vorrangig militärischen Zwecken. Mit zunehmender Verfügbarkeit wurde dieses System auch von anderen Nutzergruppen erschlossen.

Grundlage des Verfahrens sind Satelliten, die die Erde auf sechs Umlaufbahnen umkreisen. Die Satelliten werden von der Erde aus gesteuert und erhalten von dort auch Information über ihren Standort. An Bord des Satelliten befindet sich eine Atomuhr deren Zeitsignal zusammen mit der aktuellen Position auf die Erde gesendet wird. Der Empfänger auf der Erde bestimmt mit den Daten und seiner eigenen Uhrzeit seine Entfernung zu dem Satelliten. Empfängt er Daten von drei Satelliten, kann er daraus seine Position errechnen. Da bei den Empfängern weniger genaue Quarzuhren verwendet werden, muss noch der so genannte Uhrenfehler mit einem vierten Satelliten ermittelt werden.

Die Satelliten senden ihre Signale auf zwei Trägerfrequenzen mit zwei verschiedenen Codes. Der C/A Code ist allgemein verfügbar, und die Genauigkeit kann von 40 bis 100 m reichen. Bis zum 2. 5. 2000 wurde dieser Code durch Selective Availability (SA) zeitweise künstlich verschlechtert, um potentiellen Gegnern der USA kein präzises Navigationsinstrument zur Verfügung zu stellen. Nach einer

Erklärung des Präsidenten der USA wird SA ab diesem Datum nicht mehr eingesetzt werden. Jedem Nutzer steht damit eine Genauigkeit von 10-20 m oder besser zur Verfügung.

Der P-Code (Precise Code) des NAVSTAR-GPS erlaubt eine höhere Genauigkeit, im Bereich von 3 m bis 15 m, er ist jedoch dem amerikanischen Militär vorbehalten.

Viele Landmaschinenhersteller bieten heute Lösungen zur Anbindung und Einsatz von GPS mit ihren Maschinen an. Sie sind in verschiedene Systemen eingebunden, z. B. bei der Ertrags erfassung bei Getreide sowie auch bei der Regelung der Düngerausbringung.

Von Vorteil ist die globale Einsetzbarkeit des Systems und der geringe finanzielle Aufwand, da GPS in vielen Anwendungen ausserhalb der Landwirtschaft genutzt wird. Zudem sind auf dem Feld keine vorbereitenden Maßnahmen notwendig.

Der Messfehler bei der Satellitenortung setzt sich aus verschiedenen Einzelfehlern zusammen (WILD, 1998):

- Abschattungen durch das Gelände, Bäume oder hohe Gebäude
- Gangschwankungen der Satellitenuhr
- Ephemeridenfehler (Schwankungen der Satellitenlaufbahn)
- mehrdeutige Signale durch Reflexion des Signals an Hindernissen
- Veränderung der Laufzeit durch Störungen in der Ionosphäre
- Veränderung der Laufzeit durch Störungen in der Troposphäre
- Empfängerrauschen

#### 2.1.1.1 Differentielles GPS (DGPS)

Eine Verbesserung der Ortung mit dem C/A Code ist mit der Entwicklung des differentiellen GPS gelungen. Es wird an einem Punkt mit geodätisch oder durch eine Langzeitmessung mit einem herkömmlichen GPS - Empfänger ermittelten

Koordinaten eine Referenzstation aufgestellt, die den aktuellen Fehler der Störungen der Ionosphäre und die Verfälschungen durch den Betreiber bestimmt. Die Korrekturdaten werden per Funk an den Empfänger auf der Maschine übermittelt und so können Genauigkeiten von 3 m bis 10 m erreicht werden. Es stehen zudem von kommerziellen Anbietern Korrektursignale zur Verfügung, die ebenfalls per Satellit auf die GPS Empfänger übertragen werden. Andere Korrektursignale werden per Langwelle oder im RDS-Telegramm der Rundfunksender übertragen (SaPos).

#### 2.1.1.2 Real-Time-Kinematic GPS (RTK-Mode)

Die nächste Genauigkeitsstufe bei GPS ist der Real - Time - Kinematic (RTK) Modus, bei dem zusätzlich noch die Trägerwelle ausgewertet wird. Das Verfahren benötigt eine Initialisierungsphase und Kontakt zu mindestens 5 Satelliten. Ein Hersteller (LeicaGeosystems) gibt eine Genauigkeit im Zentimeterbereich an bei einer Messrate von 10 Hz und einem Zeitnachlauf von 0.03 s für das System „MC1000“, das 1998 auf den Markt kam. ZUYDAM (1999) erzielte mit einem RTK-GPS Empfänger von Trimble mit einem einfachen Fahrzeugaufbau Steuerungsgenauigkeiten von ca. 1,5 cm bei der Fahrt entlang einer geraden Linie zwischen zwei Punkten.

#### 2.1.1.3 Weitere Satellitennavigationssysteme

Zusätzlich zum US-amerikanischen GPS besteht das russische Satellitennetz GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikova Sistema). Aktuell sind 10 Satelliten aktiv. Genauigkeiten werden hier mit 75 -100 m angegeben. Einige GPS-Empfänger nutzen sowohl NAVSTAR-GPS Satelliten als auch GLONASS Satelliten. Eine künstliche Verschlechterung der Genauigkeit für zivile Nutzer wie bei NAVSTAR-GPS ist bei diesem System nicht vorgesehen.

#### 2.1.1.4 Integrierte Satellitennavigationssysteme

Eine Weiterentwicklung der Satellitennavigationssysteme erfolgt mit der Einbindung weiterer Sensoren zur Fortschreibung der Position des Fahrzeugs bei Signalabschattung oder zur Plausibilitätsprüfung des Messergebnisses. SCHWENKE et al. (1999) setzten hierzu Radarsensoren als odometrische Stützsysteme ein. SCHÄNZER und MARTIN (1999) setzen zur Steuerung eines Straßenfahrzeugs eine Kombination von Inertialsensoren und DGPS ein.

#### 2.1.2 Navigation entlang von Leitlinien

Leitlinien sind künstliche oder natürliche lineare Landmarken, an denen sich ein System eindimensional im Bezug rechts oder links von der Leitlinie orten kann. Die Position entlang der Leitlinie wird jedoch in der Regel nicht erfasst. In diesem System werden Aussagen über einen Versatz von der Leitlinie getroffen werden und keine über die absolute Position des Arbeitsgerätes.

##### 2.1.2.1 Induktive Leitkabelsysteme

Induktive Navigationssysteme werden häufig in der Industrie bei fahrerlosen Transportsystemen (FTS) eingesetzt (ULLRICH 1996). Sie sind ein wesentliches Element moderner Prozessleitsysteme in der Produktion und führen automatisch den Transport von Material und Fertigwaren in der Fabrik durch.

Im Boden ist ein wechselstromdurchflossenes Kabel verlegt, und mit induktiven Sensoren wird das Fahrzeug entlang des Kabels gesteuert. In der Landwirtschaft wurden solche Systeme experimentell untersucht, aber aufgrund ihrer Nachteile in der Praxis nicht eingesetzt. Einerseits ist der Aufwand der Verlegearbeiten sehr hoch, da die Kabel unter der Bearbeitungszone verlegt werden müssen, zum anderen ist die Genauigkeit eben wegen der Verlegetiefe und wegen heterogener Bodenbedingungen, die das elektromagnetische Feld beeinflussen, mit 5 cm bis zu

---

15 cm Genauigkeit für die Reihenführung nicht ausreichend. (JAHNS 1976, HOLT und TILLET 1989, TILLET und NYBRANT 1990, KOLLAR 1992).

#### 2.1.2.2 Laserleitlinien

Höhere Genauigkeiten lassen sich mit Laserleitlinien erzielen. Am Feldrand steht ein Lasersender, dessen Strahl mit einem rotierenden Spiegel eine vertikale "Laserebene" aufspannt. Es handelt sich strenggenommen dabei nicht mehr um eine Leitlinie, sondern um eine vertikale Leitebene. Dies gewährleistet den Empfang des Laserstrahls auch wenn der Empfänger seine Höhe verändert. Am steuernden Gerät befindet sich als Empfänger ein "totes Band" (ZUYDAM 1992), bei dem zwei lichtsensitive Flächen durch einen nicht empfindlichen Bereich getrennt sind. Trifft der Laserstrahl auf eine der empfindlichen Flächen, wird das Gerät in diese Richtung gesteuert. Inzwischen gibt es auch positionssensitive Empfänger, die je nach Ort des eintreffenden Laserstrahls auf der Empfangsfläche einen bestimmten Strom abgeben. ZUYDAM (1990, 1991, 1992) setzte ein Gantry ein, ein 12 m breiten Geräteträger, der entlang einer Laserleitlinie geführt wurde. Das System erreicht Genauigkeiten mit Abweichungen von maximal 0,014 m. Das ermöglicht eine abgestimmte Verfahrenskette von der Saat zu Bandspritzung, Banddüngung oder Unkrauthacke.

Bei den Versuchen mit den Laserleitlinien mußte der Laser für jede zweite Fahrspur neu aufgestellt und eingerichtet werden.

### 2.1.2.3 Computerbildanalyse zur Reihenführung

Auf dem Feld können auch vorhandene Leitlinien genutzt werden. In der Landwirtschaft können beim Pflügen die Pflugfurchen, oder beim Mähdrusch der Schwad schon gemähten Erntegutes als Leitlinie für das Fahrzeug verwendet werden. HAGUE et al. 1997 rüsteten ein Fahrzeug mit einer digitalen Kamera und einem Mobilcomputer aus. Mit der Kamera wurden die Pflanzenreihen bestimmt und die Position des Fahrzeugs zu ihnen. Unter ungünstigen Bedingungen wie z. B. hoher Unkrautbestand oder geringe optische Unterschiede zwischen den Kulturpflanzen und dem Boden, ist dieses Verfahren unsicher.

Tian et al. (1997) gelang es mit Hilfe der Computer junge Tomatenpflanzen zu erkennen, und ihren Standort bezogen auf die Kameraposition zu ermitteln. Jedoch lag auch hier die Erkennungsrate etwas über 65%. Die Fehler wurden in der Hauptsache durch überlappende Blätter verursacht.

### 2.1.2.4 Optische Pflanzenerkennungs- und Unterscheidungssysteme

VRINDTS und BAERDEMAEKER (1997) erzielten mit einem Spektralphotometer unter Laborbedingungen gute Ergebnisse bei der Unterscheidung von Kultur, Unkrautpflanze und Boden (Fehlerrate 0 - 6,5%). Sie konnten diese Qualität unter den wechselnden Freilandbedingungen nicht erzielen.

### 2.1.3 Erdgestützte Triangulation

Im Gegensatz zu den Satellitennavigationsverfahren, die das Trilaterationsverfahren nutzen, bei dem die Position durch Streckenmessung ermittelt wird, wird bei der Triangulation die Position aus der Winkelmessung zu bekannten Landmarken ermittelt.

### 2.1.3.1 Lasertriangulation

SHMULEVICH et al. (1989) erzielten mit einem rotierenden Lasersystem Genauigkeiten von etwa 15 cm. Es wurden die Winkel von zwei festpositionierten Laserscannern zu einem retroreflektierenden Ziel gemessen, und daraus die Position des Fahrzeugs ermittelt. Die Genauigkeit des Systems ist vor allem durch die konstante Rotationsgeschwindigkeit des Schrittmotors, die Auflösung des Winkelencoders und die Messfrequenz beschränkt. In weiterführenden Arbeiten positionierte MIZRACH et al. (1994) die Retroreflektoren auf einem engeren Rahmen der Größe 1 m x 0,5 m. Hierbei ergab sich bei der Längenmessung eine Standardabweichung von 0,45 m bei einer Entfernung von 70 m zwischen Rahmen und Laser.

An der TNO in Delft wurde ein Positioniersystem mit rotierendem Laser entwickelt, das als Komplettsystem zur Ermittlung und Absteckung von Punkten in einer Ebene für das Baugewerbe von *Spectra Physics Laserplane* unter dem Namen "CAPSY" auf den Markt gebracht wurde.

Die Messeigenschaften des Gerätes im Innenbereich und auf kleineren Flächen wurden von HELBACH und SCHLEMMER (1994) untersucht. Das Gerät erzielte in diesen Versuchen eine Genauigkeit von 3 mm unter der Voraussetzung, dass die Einrichtung des Gerätes unter optimalen Bedingungen stattfand. Während der Einrichtung bestimmt das System die Position der Landmarken, anhand deren es sich orientiert. Durch ungünstige Standpunkte kann diese Messung jedoch ungenau werden und damit auch die darauf beruhenden Messungen. Es wurden keine Messungen durchgeführt, während sich das Gerät bewegte.



#### 2.1.4 Vollautomatische zielverfolgende Tachymeter

Diese Geräte werden oft auch als Totalstationen bezeichnet. Tachymeter im Allgemeinen sind Theodoliten mit Streckenmessung. Die Streckenmessung erfolgt hierbei in der Regel mit elektrooptischen Distanzmessern (EDM). Diese senden einen amplitudenmodulierten Laserstrahl aus, der an einem Prisma am Messobjekt reflektiert wird. Aus den Phasenverschiebungen wird die Distanz bestimmt. Automatische Tachymeter sind zusätzlich noch mit einem Erfassungssystem für das Prisma und Servomotoren zum Nachführen des Theodoliten ausgestattet. Damit ist das Gerät in der Lage, das bewegte Ziel im Fokus zu halten. STEMPFHUBER (1999) untersuchte das Messverhalten eines Leica - Tachymeters im Vergleich zu einem RTK - GPS - Positionierungssystem. Er bestimmte dabei einen Synchronisationsfehler der Winkel- und Streckenmessung, der bei diesem Gerät abhängig vom Messmodus war.

**Tabelle 2:** Synchronisationsfehler einer Totalstation (STEMPFHUBER,1999)

Messmodus	Kompensator	Ziellinienkorrektur	Synchronisationsfehler
Tracking	ein	ein	0,285 s
	ein	aus	0,284 s
	aus	aus	0,243 s
Fast Tracking	ein	ein	0,115 s
	ein	aus	0,106 s
	aus	aus	0,103 s

Je höher die Bewegungsgeschwindigkeiten des Zieles desto höher ist der Fehler in der Positionsangabe des Gerätes. Zusätzlich beeinflusst auch die Bewegungsrichtung in Bezug auf den Messstrahl die Größe des Fehlers. Durch eine Korrekturrechnung der Daten konnte STEMPFHUBER diesen Fehler ausgleichen.

## 2.2 Expertensysteme

Im Ablauf der Kulturführung sind immer wieder Entscheidungen über den Zeitpunkt und den Ort von Bearbeitungsmaßnahmen zu treffen. Die Prozessführung muss daher über Entscheidungssysteme verfügen, die aus den aktuellen Zustandsgrößen der Kultur Entscheidungsvorschläge für Kulturmaßnahmen ermitteln und sie über Schnittstellen dem Prozessführungsprogramm zur Verfügung stellen. Die Zustandsgrößen können einerseits von Sensoren erfasst werden oder andererseits mit anderen Messgrößen aus Modellen hergeleitet werden. Das ist dann sinnvoll, wenn diese Zustandsgröße nur schlecht oder mit großer Unsicherheit gemessen werden kann.

### 2.2.1 Bodenfeuchtemodell

Die bedarfsgerechte Steuerung der Bewässerung ist eine langjähriges Forschungsobjekt der Fachhochschule Geisenheim. Eine Zielsetzung war hierbei mit Pfälzer Klimadaten den Wasserverbrauch einer Kultur zu errechnen, und danach den Bewässerungszeitpunkt zu bestimmen. Der Grundlage hierfür war die Berechnung der potentiellen Evaporation nach PENMAN (modifiziert nach DOORENBOS und PRUITT, 1977) und eine Anpassung der Evapotranspiration an das jeweilige Wachstumsstadium der Kulturpflanze. Hierfür liegen für ein weites Spektrum an Kulturpflanzen Untersuchungen vor ( PFÜLB et al.1991, PASCHOLD 1999).

Zur Bestimmung der Bodenfeuchte stehen zwar einige Sensortechniken zur Verfügung, sie haben jedoch unter Freilandbedingungen oft folgende Nachteile:

- Hoher Wartungsaufwand
- Geringe mechanische Belastbarkeit
- Einschränkung der Bodenbearbeitung
- Lokal begrenzte Gültigkeit der Messwerte

PASCHOLD und WIETHALER (1999) untersuchten die auf dem Markt verfügbaren Bodenfeuchtesensoren. Für die Steuerung im Freiland ist demnach nur der Flori Sensor von Netafim geeignet ( Tab. 3). Jedoch ist der Ausgabewert ohne exakten Bezug zu einer Bodenfeuchtegröße, wie Saugspannung oder Wassergehalt, sondern ein Wert, der sich zwischen 0 und 100 bewegt.

**Tabelle 3:** Übersicht über Bodenfeuchtesensoren (nach PASCHOLD und WIETHALER, 1999)

Verhaltens- aufwand		Eignung	Einschränkung
Floratronik 11 U	keiner	Gewächshausregelung	kleine Gefäße
DLO, IMAG, Wageningen	keiner	Forschung	kleine Gefäße
Flori-Sensor	keiner	Regelung im Freiland und unter Glas	kleine Gefäße
Watermark	anfeuchten	Freiland	salzempfindlich
WFF-A	keiner	Freiland und unter Glas	kleine Gefäße, salzempfindlich
TDR-Sensor	keiner	Forschung	kleine Gefäße
Tensiometer	hoch	Freiland und unter Glas	Messwertausfall bei Trockenheit

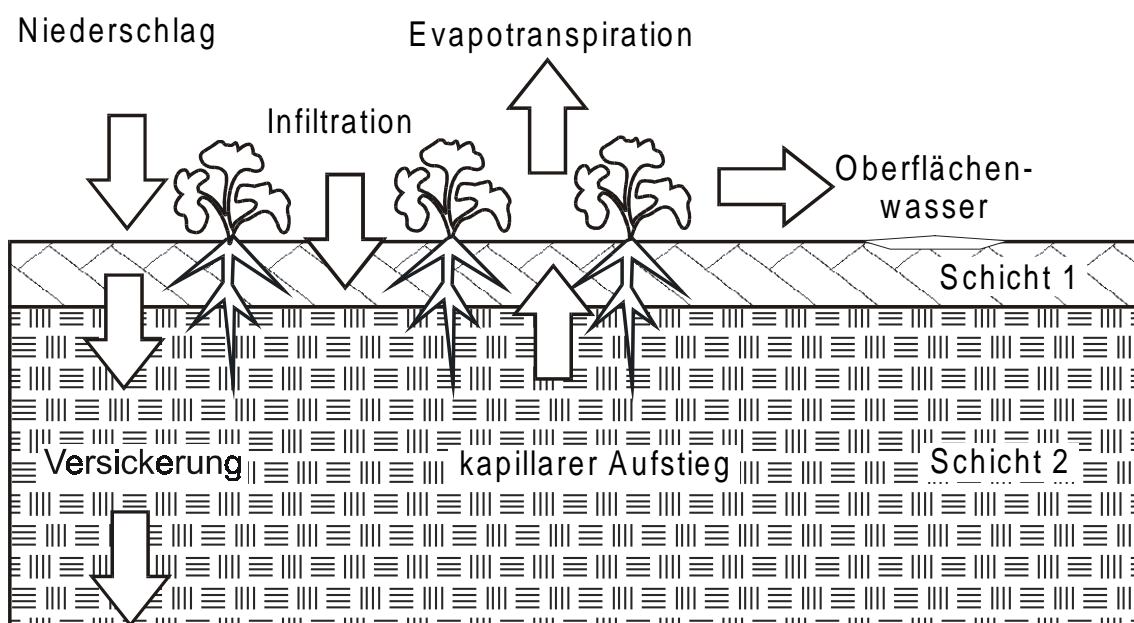
DURLESSER und SPERL (1999) kamen aufgrund ihrer Messungen der Bodenleitfähigkeit als Maß für die Bodenfeuchte zu der Vermutung, dass punktuelle Messungen der Bodenfeuchte keine repräsentative Aussage über die Bodenfeuchte der Gesamtfläche ermöglichen.

Zur Steuerung der Bewässerung benutzen PFÜLB et al. (1991) eine Bilanzierung von aktueller Evapotranspiration zu Niederschlag und Zusatzberechnung. Zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration wird die potentielle Evapotranspiration nach PENMAN (modifiziert nach DOORENBOS und PRUITT, 1977) mit einem Korrekturfaktor, dem Geisenheimer Steuerungsfaktor, multipliziert. Der Faktor ist

abhängig von der Kulturpflanze und ihrem Wuchsstadium und wurde empirisch in Lysimeterversuchen ermittelt. Für den Bewässerungsbedarf einer Kultur im Freiland wird das Halten einer Bodenfeuchte von 60 - 80 % der Feldkapazität des Bodens empfohlen. Dies vermeide eine Versickerung des Bodenwassers von oberen in tiefere Bodenschichten, in denen es den Pflanzen nicht mehr zu Verfügung steht und die Auswaschung von Nährstoffen (PFÜLB et al. 1991, PASCHOLD 2000) .

Einige Bodenfeuchtemodelle (DYER und BAIER 1979, WITNEY 1988, BABEIR et al. 1986) zur Berechnung von Feldarbeitstagen betrachten die Verteilung des Bodenwassers nach Bodentiefe und den Transport dieser Feuchtigkeit innerhalb der Schichten. Auf der Habenseite der Bilanz steht der Niederschlag und die Bodenfeuchte des Vortages, Evapotranspiration, Oberflächenabfluss und das versickerte Wasser werden abgezogen. Je nach Modell werden unterschiedliche Formeln zu Berechnung der Evaporation und weitere Transportvorgänge des Wassers im Boden mit einbezogen.

Diese Bilanz verwendeten auch AUGTER (1989) und WEBER (1997) zur Bestimmung der Feldarbeitstage. Die Berechnung der Evapotranspiration erfolgt bei WEBER nach HAUDE (1958)



**Abb. 2:** Bilanzmodell der Bodenfeuchte (WEBER 1997)

### 2.2.2 Stickstoffsimulationen

Im Gartenbau werden einige Expertensysteme angeboten, die dem Gärtner aus einer Nährstoffbilanz eine Düngeempfehlung für die gesamte Kulturzeit liefern. (SCHARPF 1996). Die Aufteilung auf mehrere Düngegaben zu verschiedenen Terminen bleibt in der Regel dem Gärtner überlassen (ALT UND RIMMEK 1996, FINK 1996, HIMKEN 1996).

Die Nährstoffversorgung während der Kultur hängt aber von der Stickstoffdynamik im Boden ab, so dass der Stickstoffvorrat, der zu Kulturbeginn vorhanden war und mit Bodenproben ermittelt wurde, inzwischen fixiert, oder der in organischer Masse vorhandene Stickstoff durch Mineralisation freigesetzt worden sein kann. Aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes ist eine Beobachtung der Stickstoffdynamik durch kulturbegleitende Beprobung des Bodens nicht möglich. Die Arbeitskosten überstiegen unter den herrschenden Bedingungen die Einsparungen an Düngemittelkosten um ein vielfaches. Einen Hinweis über die aktuelle Nährstoffversorgung der Kultur können aber Simulationsmodelle zur Stickstoffdynamik liefern. Wegen der Vielfalt der Einflussfaktoren auf die Stickstoffdynamik ist die Aussagekraft dieser Modelle nicht allgemeingültig, sondern es müssen die gültigen Parameter des jeweiligen Feldes ermittelt werden (ENGEL 1992).

Eine Übersicht der in der Hauptsache für landwirtschaftliche Kulturen vorhandenen Simulationsmodelle zur Stickstoffdynamik veröffentlichten ENGEL et al (1993). Sie setzen sich in der Regel aus mehreren Modulen zusammen, die einzelne Stoff- und Energieströme beschreiben. Hierzu gehören die Wasserbilanzierung im Boden, der Wärmehaushalt des Bodens, ein Wachstumsmodell der Kulturpflanze und die Simulation der Stickstoffdynamik.

### 2.2.3 Expertensysteme für den Pflanzenschutz

Die vorhandenen Expertensysteme im Pflanzenschutz lassen sich in die Kategorien Entscheidungssysteme und Prognosesysteme einteilen (TISCHER.1998).

Der wichtigste Unterschied der beiden Kategorien, ist die bei den Entscheidungssystemen notwendige Befallsbonitur durch den Anwender. Sie kann von einem rechnergestützten Prozessführungssystem nicht geleistet werden. Hierzu müssten weitere Sensoren zur Erkennung und Unterscheidung des Befalls eingesetzt werden oder es muss ein Anwenderdialog eingeführt werden. Die Prognosemodelle sind dagegen ohne größeren Aufwand in die Prozessführung zu integrieren, wobei auch bei deren Nutzung ein gelegentlicher Anwenderdialog sinnvoll wäre.

**Tabelle 4:** Expertensysteme im Pflanzenschutz (nach TISCHER, 1998)

	Entscheidungssysteme	Prognosesysteme
Methode	Expertenwissen wird in Regeln gefasst, die eine Entscheidung ermöglichen	Entwicklung eines Schaderregers wird berechnet
Aktuelle Wetterdaten	teilweise erforderlich	unbedingt erforderlich
Befallserhebung	unbedingt erforderlich	nicht oder nur selten erforderlich
Ergebnis	Behandlungsnotwendigkeit, optimaler Termin, Wahl des Mittels und der Aufwandmenge	Prognostizierter Befallsverlauf
Treffsicherheit	sehr hoch	mittel bis hoch
Stärken	Unterstützung bei der Mittelwahl	Berechnung unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen möglich
Beispiele	Weizenmodell Bayern, pro_plant ProPhy, Ryncho-Opt	Simcerc, Simery, Simphyt, Welte-Model, Simlep, BBA-Delia, BBA- Psila, Euro-Bugoff, Bonn-Laue, Simsit

### 3 Zielsetzung

Es wurden einige Verfahren zur Ortung und Navigation entwickelt mit Genauigkeiten im Zentimeterbereich. Dies ermöglicht die Steuerung von Arbeitsgeräten im Freiland. Ebenso steht eine breite Wissensbasis zur Verfügung um termingenau zu düngen, Bewässern oder Pflanzenschutzmaßnahmen durchzuführen. Ziel der Arbeit ist daher die Zusammenführung dieser Methoden zur Entwicklung einer einzelpflanzenorientierten Prozessführung für den Freilandgemüsebau, bei dem die Kulturmaßnahmen streng bedarfsorientiert, standortgebunden und weitgehend automatisiert durchgeführt werden können.

Die Automatisierung ist notwendig, damit die Maßnahmen weitgehend unabhängig vom Gesamtbetriebsablauf durchgeführt werden können. Dadurch können die Betriebsmittel bedarfsgerechter eingesetzt werden, da sie mit höherer örtlicher und zeitlicher Genauigkeit ausgebracht werden.

Hierzu ist die Entwicklung eines neuen Bearbeitungsgerätes und eines dazugehörigen Prozessführungsprogramms notwendig, die den Einsatz einer rechnergestützten Prozessführung im Freilandgartenbau ermöglichen. Daraus ergaben sich folgende Teilziele:

- Auswahl, Überprüfung eines Ortungssystems
- Entwicklung, Auswahl der Komponenten und Bau eines Bearbeitungsgerätes
- Entwicklung einer Prozessteuerung mit Schnittstellen für folgende Teilsysteme
  - Anbindung eines Ortungssystems
  - Anbindung der Klimadatenerfassung
  - Anbindung eines Expertensystems
- Überprüfung des Systems auf seine Steuerungsgenauigkeit

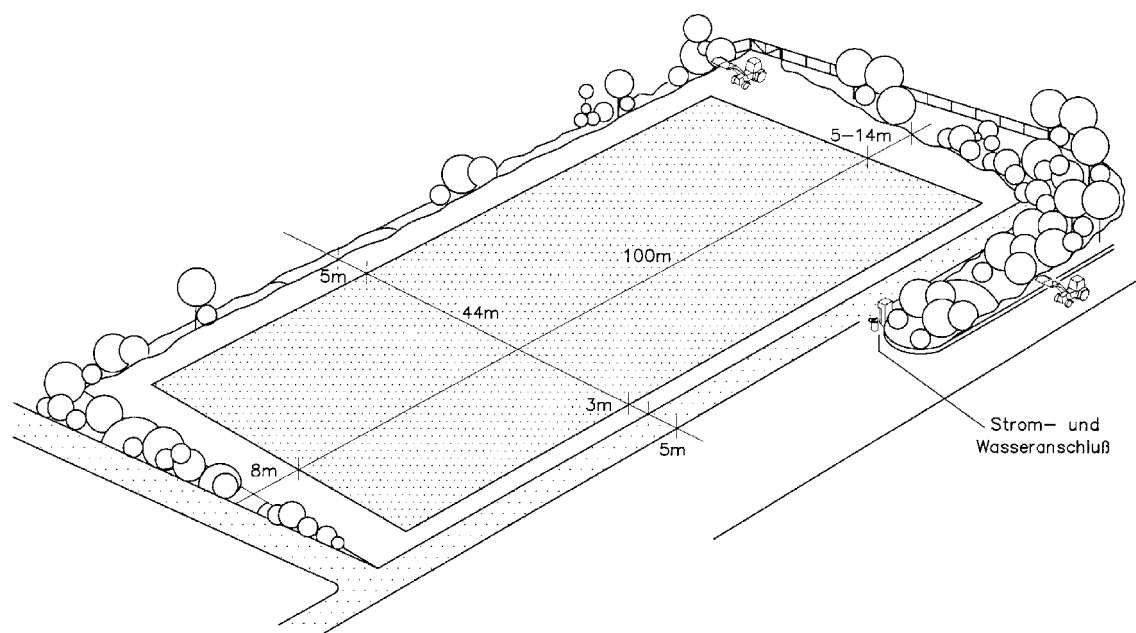
## 4 Untersuchung der Messgenauigkeit zweier Ortungssysteme

Im Vorfeld der Arbeiten zur einzelpflanzenorientierten Prozessführung wurden zwei Ortungssysteme untersucht, ob sie sich grundsätzlich zur Steuerung des Portalversuchsrahmens eignen. Sie unterschieden sich in ihrer Messmethode, „Capsy“ ist ein Lasertriangulationssystem und das „Geodimeter 4000“ ein zielverfolgendes Tachymeter. Beide wurden am Versuchsstandort getestet. Hierbei sollten die für die Steuerung notwendigen Parameter wie z. B. Nachlaufzeiten ermittelt werden.

### 4.1 Material und Methoden

#### 4.1.1 Das Versuchsfeld

Das Versuchsfeld befindet sich auf dem Gelände der Versuchsstation Dürnast des Lehrstuhls für Gemüsebau der Technischen Universität München Weihenstephan. Es ist auf einer Terrasse unterhalb der Gewächshäuser angelegt. Das Feld hat eine Breite von 44 m und eine Länge von 100 m. Es ist rundherum von Wegen umgeben, während der Vegetationsperioden 1997 und 1998 wurde es in der Länge



**Abb. 3:** Lageskizze des Versuchsfeldes im Versuchszentrum Dürnast



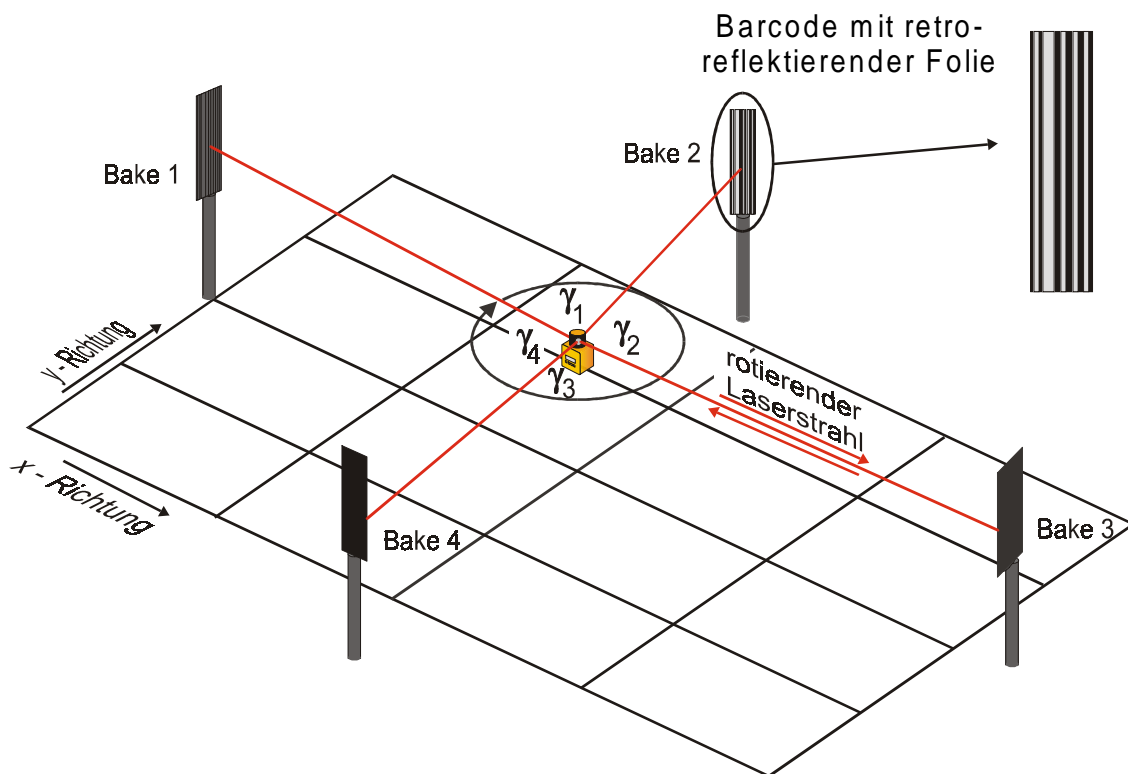
noch einmal von einem Weg geteilt. Die Terrassen wurden mit dem Neubau des Versuchszentrums neu angelegt, aber nicht sofort mit der Inbetriebnahme 1992 in Kultur genommen. Aufgrund der Neuanlage des Geländes sind Bewegungen des Untergrundes möglich. Jedoch sollten Grundbezugspunkte eines Feldkoordinatensystems, die für Vermessungszwecke eingerichtet wurden, sich in ihrer absoluten Position nicht ändern. Daher wurden zu deren Markierung 4 m lange Eisenrohre im Boden eingelassen und eingesandet. Auf diesen Rohren wurde ein massiver Aluminiumkopf mit einer Zentrierungsbohrung aufgebracht. Das Zentrum dieser Bohrung ist die exakte Lage des Referenzpunktes. Die Positionierung dieser Punkte im Versuchsfeld hätte zwar die Einrichtung des Messfeldes erleichtert, aber andererseits Bodenbearbeitungsmaßnahmen erschwert und hätte die Gefahr einer Verschiebung oder Beschädigung des Referenzpunktes in sich geborgen. Diese beiden Punkte begründen ein festes eigenständiges Koordinatensystem auf dem Gelände. (Abbildung 6)

#### 4.1.2 Ermittlung des Messverhaltens von „Capsy“

##### 4.1.2.1 Funktionsweise von „Capsy“

Das Arbeitsprinzip ist die Positionsbestimmung in der Ebene durch Triangulation. Das Gerät bestimmt hierbei die Winkel zu mindestens drei bekannten Landmarken und bestimmt daraus nach dem aus der Geodäsie bekannten „Rückwärtsschnittverfahren“ seine eigene Position. In der Zentraleinheit befindet sich als Sender eine Laserdiode und als Empfänger eine Siliziumzelle. Der Laserstrahl wird mittels eines rotierenden Prismas in der Horizontalen abgelenkt, und überstreicht mit einer Frequenz von 5 Hz eine Ebene.

Die Landmarken sind sogenannte Zieltafeln oder „Targets“. Das sind mattschwarz lackierte Alutafeln mit einer Länge von 150 cm und 16 cm Breite. Auf einer Seite sind Streifen retroreflektierender Folie in zwei unterschiedlichen Breiten aufgeklebt. Die Anordnung der Streifen codiert zwanzig verschiedene Barcodes, so dass innerhalb eines Messbereiches zwanzig Landmarken anhand dieser Codes von „CAPSY“ identifiziert werden.



**Abb. 4 :** Messprinzip des Ortungs und Positioniersystems "CAPSY"

Trifft der Laserstrahl auf eine solche Zieltafel, die nach Herstellerangaben maximal 50 m entfernt sein darf, wird das Laserlicht in Richtung des Senders zurückgeworfen. Das Prisma der Zentraleinheit lenkt das reflektierte Licht auf eine Photodiode, deren Impuls registriert und mit den Messwerten eines Winkelencoders und eines Zählers verknüpft wird, und als Ergebnis einen Winkel zu einer festen Grundrichtung liefert. Der Zähler dient hierbei zu einer Erhöhung der Auflösung des Winkelencoders von 1000 Schritten auf 37.000 Schritte.

Die Positionen der einzelnen Landmarken können direkt im Gerät abgespeichert werden. In der Regel werden sie jedoch in einem Aufnahmeverfahren, dem „Setup“, von dem Gerät selbst ermittelt und einem Messfeld zugeordnet. Dabei wird das Messgerät zuerst über dem ersten Einrichtungspunkt positioniert und ein "Nulltarget" mit einer speziellen Codierung auf dem zweiten. Daraufhin wird ein Messlauf durchgeführt und das Gerät bestimmt die Winkel zwischen allen Targets. Die Positionen von Gerät und Nulltarget werden getauscht und der Messlauf wiederholt. Danach sind die Positionen aller Targets errechenbar. Die Prozedur ist auch mit mehreren Punkten durchführbar. Dabei wird jede Kombination der Positionen von Messgerät und "Nulltarget" einmal durchgemessen. Es erhöht sich

die Genauigkeit der Bestimmung der Targetpositionen und damit die Qualität der sich darauf gründenden späteren Positionsmessungen. Die exakte Positionierung der Einrichtungspunkte hat daher direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Bestimmung der Targetpositionen.

Das Gerät ist mit einer seriellen Schnittstelle ausgerüstet, die den Datenaustausch und die Ansteuerung von und zu einem PC ermöglicht.

#### 4.1.2.2 Einrichtung des Versuchsfeldes zur Messung mit „Capsy“

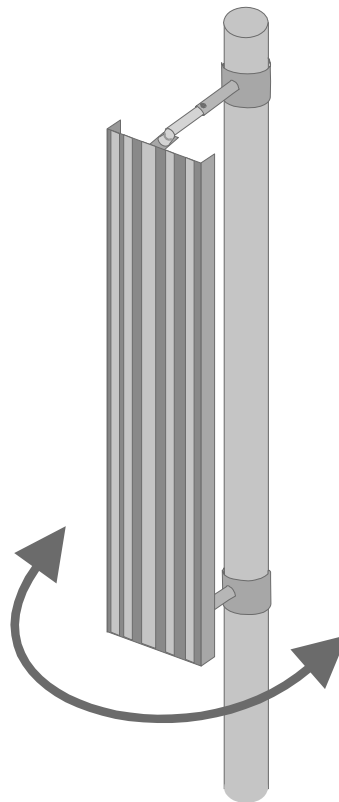
Um auf dem ganzen Versuchsfeld möglichst exakte Positionsdaten zu erhalten, waren 16 Landmarken notwendig. Auf dem Plan in Abbildung 6 sind nur 14 Targets zu erkennen, jedoch sind an zwei Punkten zwei Targets mit um  $90^\circ$  gedrehter Ausrichtung installiert. Die vom Hersteller Spectra Physics lieferbaren Targets für den Einsatz unter Freilandbedingungen bestanden aus Aluminiumtafeln, auf deren Rückseite ein höhenverstellbarer Aluminiumstab in einer Schiene angebracht war. Der Aluminiumstab hatte im Fuß eine Messingspitze und wurde mit Hilfe einer eingebauten Horizontierungslibelle und einer Teleskopstütze lotrecht mit der Spitze in der Markierung aufgestellt.

Die auf der Tafel aufgeklebte Folie reflektiert laut Herstellerangaben bis zu  $45^\circ$  seitlich auftreffende Lichtstrahlen in ausreichender Intensität. Für jede Messung müssen die Targets wieder neu und exakt lotrecht über der Bodenmarkierung aufgestellt werden.

Es wurden eigene auf dem Versuchsgelände fest installierte Targets gebaut (Abbildung 5), um eine kontinuierlich verfügbare Messumgebung zu schaffen, und sich die Messungen damit auf die gleiche Umgebung und Targetkonstellation beziehen.

Basis ist ebenfalls eine mattschwarz lackierte und auf beiden Seiten längs abgekantete 1,5 mm starke Aluplatte. Sie hat eine Länge von 1,5 m und eine Breite von 17 cm. Sie ist entlang ihrer Längsachse drehbar an einem verzinkten 1 3/4"

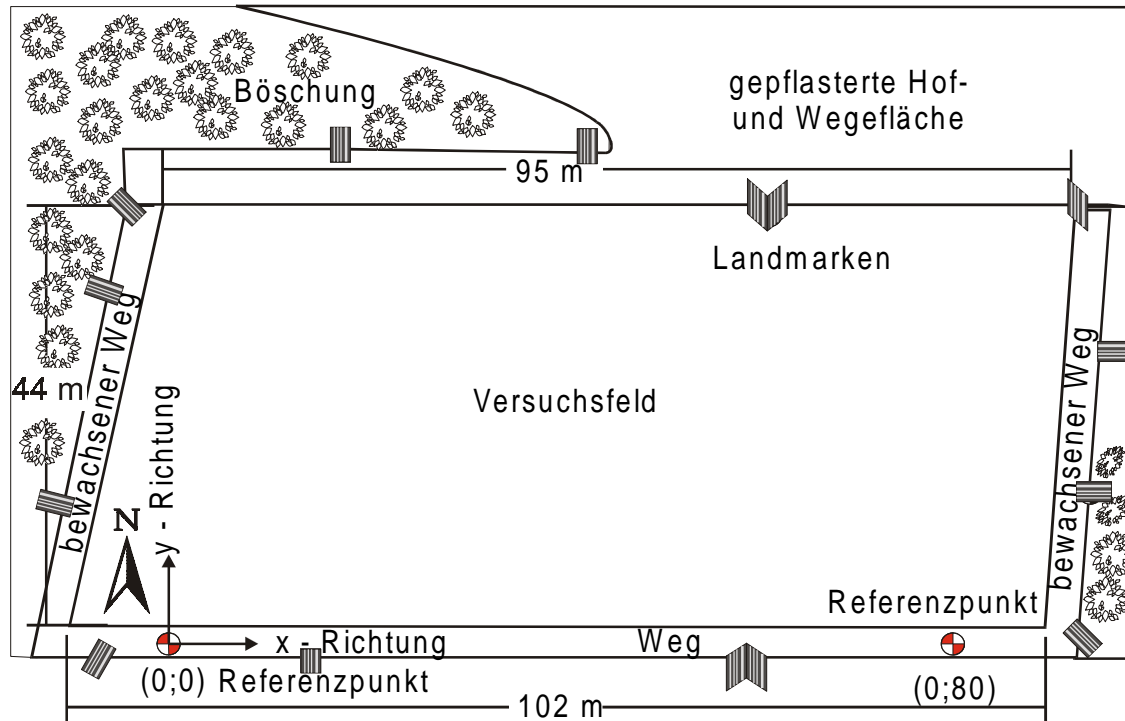
Eisenrohr befestigt, das 1 m tief mit einem Betonfundament im Erdreich eingelassen ist. Die drehbare Befestigung ermöglicht es, den Reflexionsbereich den Bedürfnissen entsprechend auf die Versuchsfläche auszurichten. Als Reflexionsfolie wurde ein Material der Firma 3M mit der Handelsbezeichnung „Scotchlite Photoelectric Diamond Grade 3000X“ benutzt. Diese Folie ist witterungsfest und zeichnet sich durch ein weitwinkliges Rückstrahlungsverhalten aus .



**Abb. 5:** Targetmontierung

Die mitgelieferte Einrichtungssoftware „Capsy Advisor“ erlaubt es Targetkonstellationen darauf zu überprüfen, ob und in welcher Qualität mit Capsy auf der vorgesehenen Fläche gemessen werden kann. Die Auswahl der Targetpositionen auf dem Feld wurden damit ermittelt. Die Verteilung der Targets ist in Abbildung 6 mit schwarz-weißen Markierungspunkten gekennzeichnet.

Die Versuchsfläche bei der Versuchstation Dürnast des Lehrstuhls für Gemüsebau wurde, wie in Abbildung 6 dargestellt, vorbereitet.



**Abb. 6:** Lageplan des Versuchsfeldes in der Versuchstation Dürnast (xy Koordinatensystem für „Capsy“)

Das Ortungssystem ist in der Lage, die Positionen der Targets zu ermitteln, wenn es von mindestens zwei bekannten Punkten aus eingerichtet wurde. Dazu wurde ein eigenes Koordinatensystem mit einem „Nullpunkt“ und einem zweiten Bezugspunkt geschaffen, dessen Lage die x-Richtung für „Capsy“ festlegt, und über dessen Entfernung zum „Nullpunkt“ die Bestimmung beliebiger Positionen im Feld erlaubt mit Hilfe einer Winkelmessung mit einem Theodoliten. In der Abbildung 6 liegen diese Punkte als Referenzpunkte bezeichnet auf dem südlichen bewachsenen Weg.

„Capsy“ benötigt zu seiner Einrichtung, dem so genannten „Setup“, mindestens zwei bekannte Einrichtungspunkte. Aufgrund der Größe des Versuchsfeldes werden vier Einrichtungspunkte benötigt, wobei jedes Target von mindestens zwei Einrichtungspunkten aus erfassbar sein muß. Targets, die in einem so genannten schleifenden Winkel zu den Einrichtungspunkten stehen, sind nur mit größerer Ungenauigkeit zu bestimmen (HELBACH UND SCHLEMMER, 1994). Damit ist

besonders in den Randbereichen zu rechnen, in denen sich die Referenzpunkte befinden.

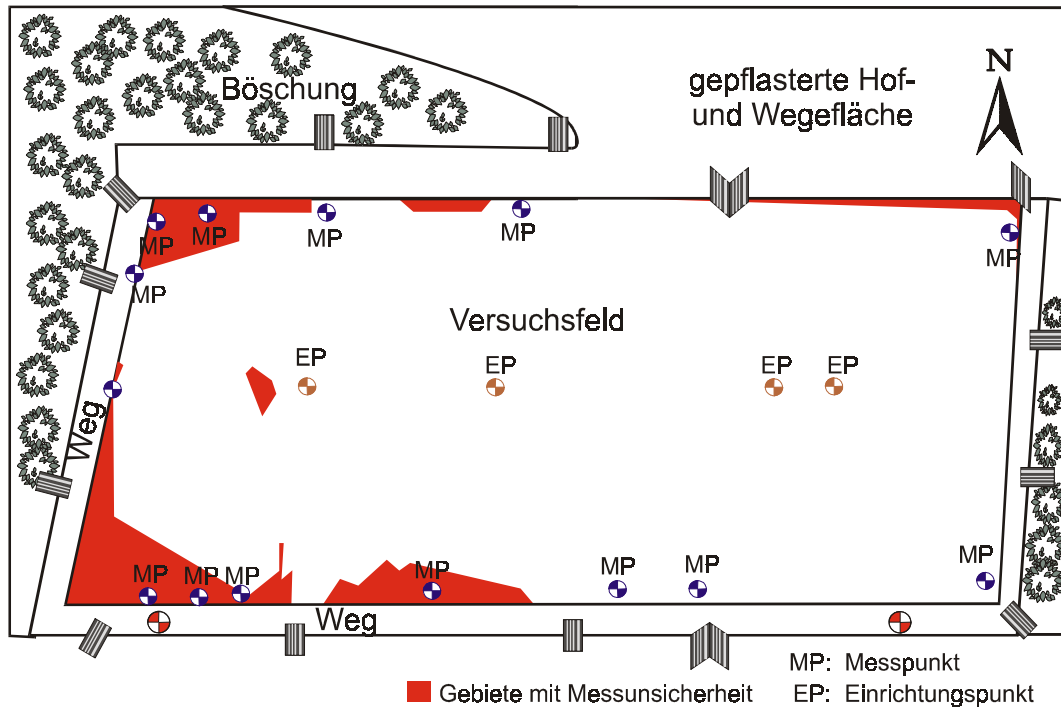
Längs eines Beetes in der Mitte des Feldes wurden daher vier handelsübliche Bodenmarkierungen im Feld installiert und mit Hilfe eines Theodoliten von den Referenzpunkten aus eingemessen. Die Entfernung der Referenzpunkte wurde mit einem Bandmaß durch Mehrfachmessung bestimmt. Zusätzlich wurde sie mit dem laseroptischen Distanzmessgerät "Disto" von Leica gemessen.

Nachdem die Position der Einrichtungspunkte, wie in Abbildung 7 mit EP markiert, aus den Messungen mit dem Theodolit berechnet war, wurden diese Daten im Gerät gespeichert und das Setup durchgeführt. Durch die Größe des Versuchsfeldes stieß das Gerät teilweise an die Grenzen seiner Reichweite. In der westlichen Hälfte des Feldes waren einige Targets im Grenzbereich der Erkennbarkeit durch das Gerät, da das Setup nur mit gutgeladenen Akkus und somit hoher Laserleistung gelang.

#### 4.1.2.3 Vorversuch

Eine Überprüfung der Targetkonstellation auf dem Rechner mit der Einrichtungssoftware „*Capsy Advisor*“ machte deutlich, dass in den Randbereichen des Versuchsfeldes, im besonderen in der westlichen Hälfte des Feldes, die Targets entweder nicht erfassbar waren, oder in ungünstigen Winkeln zum Messgerät standen (Abbildung 7). Das Programm wies bestimmte Bereiche des Messfeldes (in der Abbildung 7 dunkel gefärbt) als nicht auswertbar aus. Deswegen wurden Messungen in diesen Bereichen unternommen, und bei erfolgreicher Messung im Gerät abgespeichert. In der Abbildung 7 sind diese Punkte mit den Buchstaben MP gekennzeichnet. Es zeigte sich, dass auch in den vom Programm als nicht messbar ausgewiesenen Bereichen die Position erfolgreich bestimmt werden konnte. Im südwestlichen Teil des Feldes konnte der Eckbereich nicht mehr gemessen werden. In der Folge wurde dieser Teil des Feldes begrünt, so dass eine Positionierung dort

nicht mehr notwendig war.



**Abb. 7:** Flächen im Versuchsfeld mit unsicherer Messprognose

#### 4.1.2.4 Überprüfung der Messgenauigkeit von „Capsy“ im statischen Betrieb

Als Kriterien für die Überprüfung des Messsystem wurde

- die Übereinstimmung mit einem Referenzsystem, einem Theodoliten
- die Stabilität der Messwerte und
- die Wiederholbarkeit des Messergebnisses

untersucht.

Es ist zusätzlich damit zu rechnen, dass die Messgenauigkeit in bestimmten Bereichen unterschiedlich ist, weil unter Umständen die Targets in ungünstiger Lage oder Winkel zum Gerät stehen.

Als Referenzsystem zur Überprüfung der Messgenauigkeit wurde der Universaltheodolit FT1A der Firma eo-Fennel eingesetzt. Er ist für eine mm - Schätzung bis

---

150 m geeignet. Als Grundorientierungspunkte dienten die Referenzpunkte aus der Abbildung 6.

Zur Überprüfung der Wiederholbarkeit wurden feste Messpunkte eingerichtet. In einer Fahrspur des Feldes wurden vier Holzpflocke im Abstand von jeweils 30 m bis auf einen Überstand von 5 cm eingeschlagen. Auf der Oberseite der Pflöcke wurden jeweils eine Holzschraube eingedreht, deren Kreuzschlitzkerbe mit dem Theodoliten von beiden Referenzpunkten aus eingemessen wurde. Diese Schrauben wurden mit einer Maurerschnur verbunden, wobei darauf geachtet wurde, dass die gedachte Linie der gespannten Schnur sich bis zum Zentrum der Schrauben fortsetzte. Die Schnur wurde mit einem Maßband unterlegt, um die Position der Zwischenschritte von 6 m zu finden.

Bei den Messungen über dem Holzpflock wurde das Messgerät mit einem Aluminium - Dreibeinstativ und einem Dreifuß mit optischem Lot direkt über der Schraube des Pflocks bei exakter Horizontierung eingerichtet. Für die Messungen an den Zwischenschritten wurde das Gerät über dem Schnittpunkt der Schnur und der 6 m Markierung des Maßbandes oder einem Vielfachen davon eingerichtet, bis der nächste Holzpflock erreicht war. Somit wurde gewährleistet, dass jede Messung einem Punkt im Referenzsystem zugeordnet werden konnte.

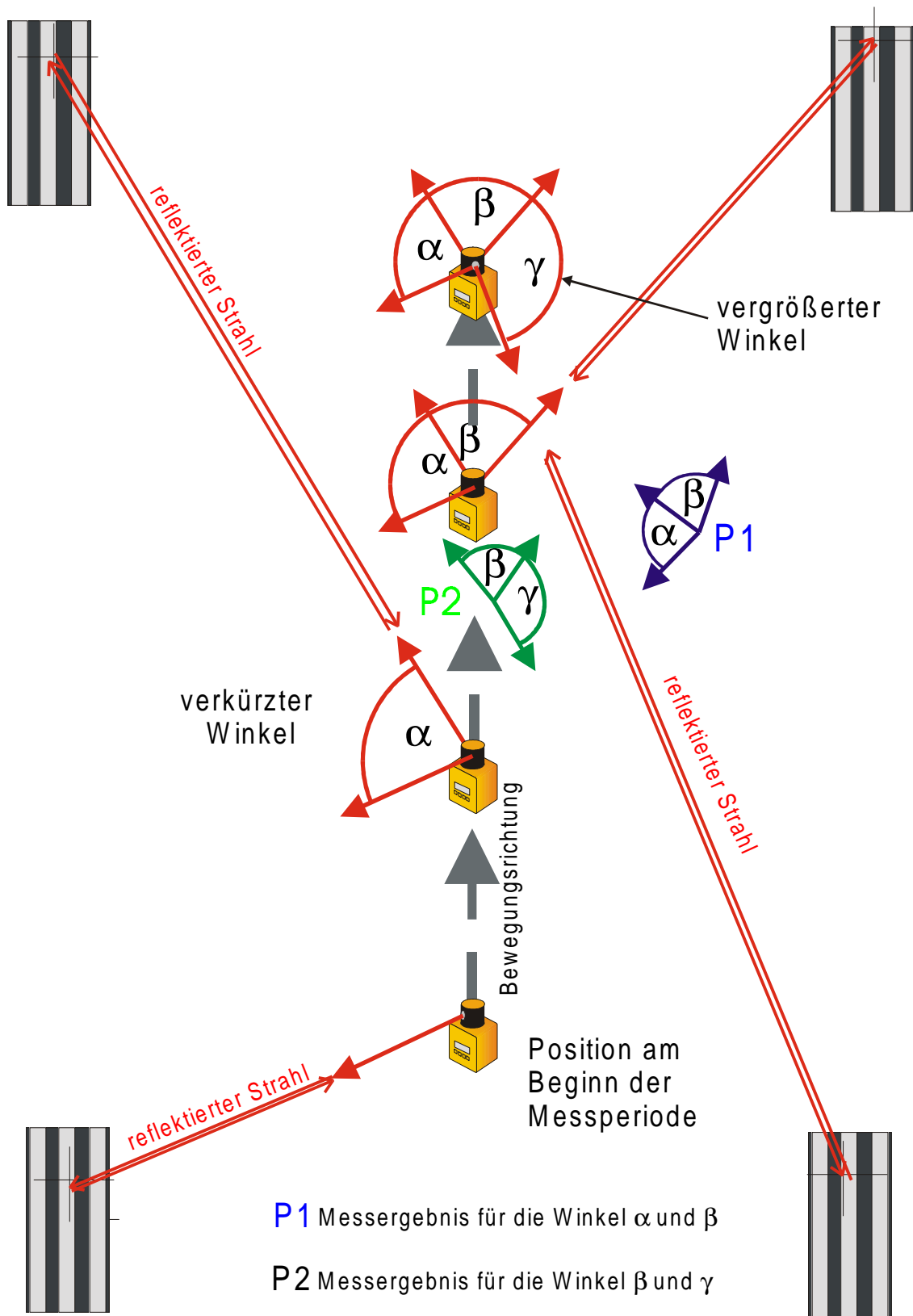
Das Gerät war mit der seriellen Schnittstelle eines tragbaren Computers verbunden. Zu jeder Messung wurden hundert Messwerte am Einzelpunkt erfasst. Nach diesen hundert Messwerten beendete der Computer die Messung, in dem er einen Reset am Messgerät auslöste, das heißt, „Casy“ orientierte sich wieder neu in seiner Umgebung. Jeder Punkt wurde jeweils mit einer Messfrequenz von 1, 2, und 3 Hz erfasst. Die Mehrfachmessung dient zur Überprüfung der Stabilität der Messwerte.



#### 4.1.2.5 Überprüfung der Messgenauigkeit von „Capsy“ im dynamischen Betrieb

Das System „Capsy“ ist für den stationären Betrieb in der Bauvermessung entwickelt worden. Bewegt sich das System während einer Umdrehung des Laserstrahls, im Weiteren dynamischer Betrieb genannt, dann wird jedes einzelne Target von einer anderen Position aus detektiert. Die Winkel zwischen den einzelnen Targets werden daher entweder verkürzt oder vergrößert abhängig von der Drehrichtung des Lasers und der Bewegungsrichtung des Systems. Die errechnete Position weicht dann von der Position zum Ausgabezeitpunkt ab. Sie driftet in Drehrichtung des Lasers ab. Die Größe des Drifts ist abhängig von der Geschwindigkeit des Messgeräts und, wie aus Abbildung grafisch ermittelt, von der Auswahl der Targets. Die scheinbare Position P1 ergibt sich aus der Berechnung der Winkel  $\alpha$  und  $\beta$ , also den Targets 1 - 3, die scheinbare Position P2 ergibt sich aus den Winkeln  $\beta$  und  $\gamma$ , somit den Targets 2 - 4. Darüber hinaus sind noch weitere Kombinationen der Targets möglich.

Verändert sich zusätzlich die Ausrichtung des Gerätes, wird dadurch die Winkelmessung noch stärker verfälscht. Diese Abweichungen sind zufällig, und rechnerisch nicht auszugleichen. Eine weitere Fehlermöglichkeit stellt der Antrieb des rotierenden Prismas dar. Die hohe Genauigkeit des Gerätes wird durch die Messung der Umlaufzeit erreicht, indem zwischen den Winkelencoderstufen interpoliert wird. Durch die Beschleunigungsvorgänge kann aber der Gleichlauf des Motors nicht aufrechterhalten werden und die Interpolation liefert somit weniger genaue Werte als im statischen Betrieb.



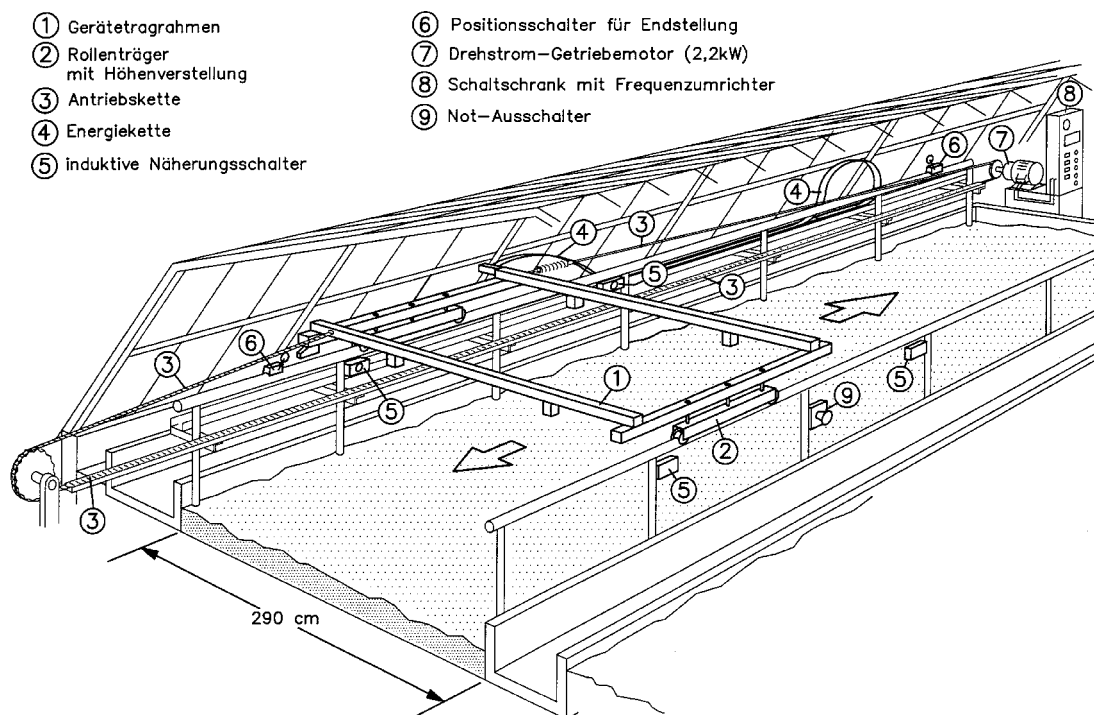
**Abb. 8:** Messwertverschiebung bei bewegtem Gerät

#### 4.1.2.6 Versuchsaufbau zur Überprüfung der dynamischen Genauigkeit von „Capsy“

Der Versuch wurde in einem Gewächshaus des Lehrstuhls für Obstbau der TU-München auf der am Institut für Landtechnik entwickelten Versuchsstrecke mit angetriebenem Gerätetragrahmen durchgeführt

Der Gerätetragrahmen fährt auf zwei Rohrschienen und ist auf einer Seite mit einem frequenzgesteuerten Elektromotor über eine Kette angetrieben. Der Motor erlaubt es, Geschwindigkeiten bis zu 8,9 km/h des Tragrahmens zu fahren. Die Strecke besteht aus einer Beschleunigungsstrecke, der Messstrecke und der Bremsstrecke. Die Anlage kann vor- und rückwärts betrieben werden. In Abb. 9 sind die einzelnen Bestandteile der Versuchsstrecke kurz skizziert.

Für den Versuch wurden vier Targets im Gewächshaus montiert. Das Messgerät wurde am Gerätetragrahmen auf einer Holzplatte an der Seite über der Wegefläche des Gewächshauses befestigt. Zur Bestimmung der Bahn wurde die Strecke mit mehrfachen Unterbrechungen, während derer die Messung fortgesetzt wurde, abgefahren. In den Abbildungen 23, 24 und 25 wurden diese Daten zu einer Kurve



**Abb. 9:** Versuchsstrecke mit angetriebenem Gerätetragrahmen

---

angenähert zusammengefasst und eingezeichnet. Sie dient als Vergleichsmaßstab für die Messkurven.

Die Versuche wurden mit 9 verschiedenen Geschwindigkeiten von 0,3 - 8,9 km/h gefahren.

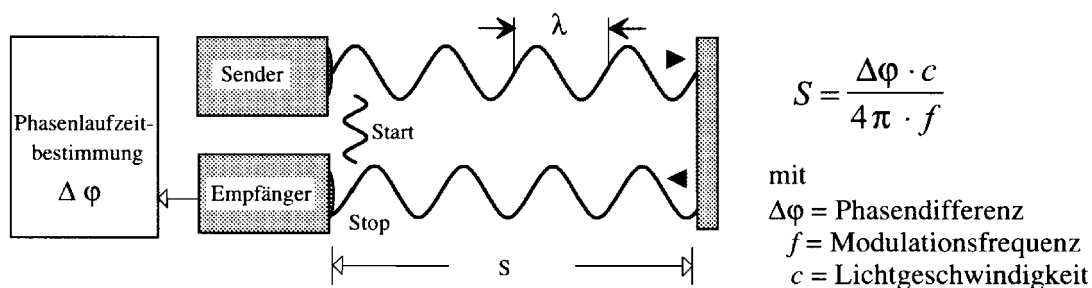
#### 4.1.3 Ermittlung des Messverhaltens des „Geodimeter 4000“

Das „Geodimeter 4000“ ist ein zielverfolgendes Tachymeter, eine Totalstation. Die Totalstation ist dabei lotrecht mit einem Stativ über einer bekannten Position aufgestellt. Sie ermittelt die Position eines Zielkörpers durch Bestimmung des Horizontal- und des Vertikalwinkels sowie der Entfernung zu diesem Zielkörper. Sie ist in der Lage sich selbst nachzuführen, falls sich der Zielkörper aus dem Zentrum des Blickwinkels bewegt.

##### 4.1.3.1 Funktionsweise des Geodimeter 4000

Die Winkelmessung des Geodimeter 4000 entspricht der eines elektronischen Theodoliten. Der Winkel wird an einem internen Winkelencoder abgenommen. Das interne Winkelsystem wird bei der Vorbereitung der Messung auf das Winkelsystem des Koordinatensystems auf dem Versuchsfeldes angeglichen. Die x - Achse zeigt anders als bei dem Koordinatensystem von „Capsy“ nach Norden, die y - Achse hingegen zeigt nach Osten (geodätisches yx- Koordinatensystem).

Die Entfernungsmessung erfolgt elektrooptisch nach dem Phasenvergleichsverfahren. Die Lichtquelle in dem Instrument, eine Gallium-Arsenid-Diode, wirft einen Infrarotlichtstrahl amplitudenmoduliert auf einen Zielkörper. An diesem befindet sich ein Prisma, das den Strahl zum Sender reflektiert.



**Abb. 10:** Elektrooptische Entfernungsmessung nach dem Phasenlaufzeitverfahren (SCHLEMMER 1996)

Das Instrument vergleicht die Phasenverschiebung der Amplitude des ausgesandten Strahls zum Empfangenen. Durch die Modulation der Amplitude ergibt sich ein Muster, das die Entfernung zum Prisma bestimmt. Dieser Zusammenhang erklärt sich durch die Laufzeit des Lichtes und ist deswegen abhängig von der Dichte der Luft. Zur Korrektur braucht das Instrument daher die Werte der aktuellen Temperatur und des Luftdruckes. Durch die Bildung des arithmetischen Mittelwerts mehrerer Messwerte wird die Genauigkeit erhöht. Je größer die Anzahl der Messwerte ist, mit der der Mittelwert gebildet wird desto genauer ist das Messergebnis. Das „Geodimeter 4000“ bietet daher verschieden genaue Messmodi an.

Im Fast Trackingmodus gibt der Hersteller eine Genauigkeit von  $\pm 15$  mm an, im Standardmodus  $\pm 6$  mm und im Mittelwertverfahren sogar  $\pm 4$  mm. Letzteres beansprucht jedoch eine Messdauer von mindestens 4 Minuten.

**Tabelle 5:** Spezifikation des „Geodimeter 4000“

Messmodus	Entfernungsmessung	Winkelmessung	Positioniergenauigkeit	Messzeit
Fast Tracking	$\pm 10$ mm	0,5 gon	$\pm 15$ mm	0,4 s
Standard	$\pm 1$ mm	0,5 gon	$\pm 6$ mm	8-10 s
$\bar{D}$	$\pm 1$ mm	0,5 gon	$\pm 4$ mm	> 4 min
Reichweite	300 m	Kürzeste messbare Entfernung		3 m

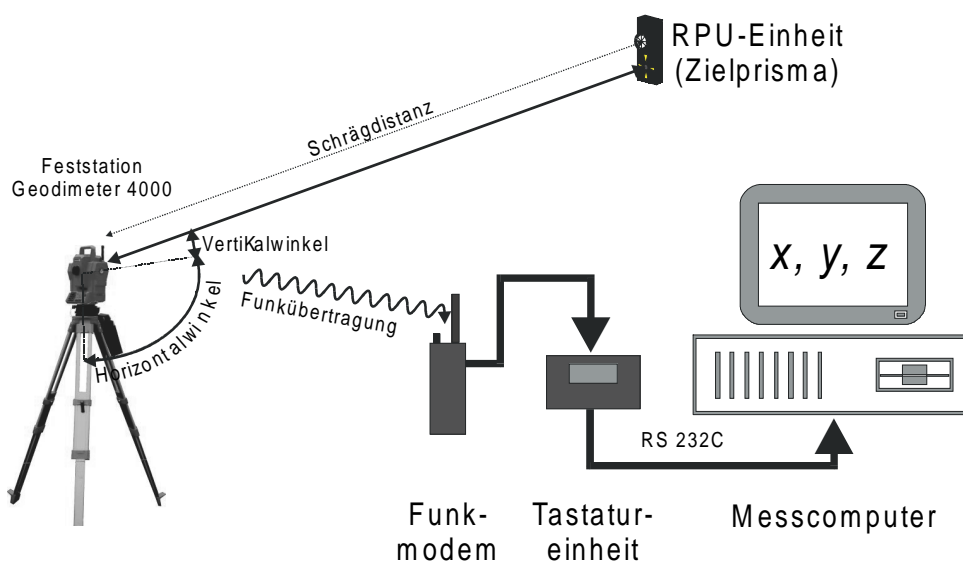
Der Einsatz der Totalstation erfordert eine Reihe von sorgfältigen Vorbereitungen. Zuerst wird die Station mit einem optischen Lot exakt über einem festen und im Koordinatensystem des Versuchsfeldes bekannten Punkt mit einem Stativ aufgebaut. Die Genauigkeit des Einrichtens liegt hier bei etwa einem Millimeter. Die Horizontierung, bei dem die Stehachse des Gerätes lotrecht mittels einer Dosenlibelle und des verstellbaren Dreifußes justiert wird, ist notwendig, um Höhenwinkelfehler zu vermeiden. Das Instrument besitzt Neigungssensoren, um zusätzlich einen Feinabgleich zu der vom Anwender durchgeführten Horizontierung des Geräts vorzunehmen. Dann wird das Horizontalwinkelsystem der Station der Richtung des Koordinatensystems auf dem Feld angepasst, indem ein markanter Punkt der Umgebung angezielt wird zu dem die Winkelzuordnung bekannt ist. Im Falle des Versuchsfeldes in Dürnast war es der Freisinger Dom. Das Kreuz der südlichen Turmspitze wurde anvisiert, und der dazugehörige Winkel in das Gerät eingegeben.

Das „*Geodimeter 4000*“ ist in der Lage, im Fast Tracking Modus den Zielkörper (vgl. Abbildung 11) zu suchen und sich darauf auszurichten. Die Antriebe der Steh- und der Kippachse sind hierzu mit Servomotoren ausgerüstet. Das Instrument sucht damit die Umgebung oder nur bestimmte Sektoren, die vom Benutzer vorher angegeben wurden, nach dem Ziel ab. Zum Erkennen des Ziels gibt es zwei Möglichkeiten. Einerseits ist das Ziel „aktiv“, das heißt, es besitzt eine Infrarotdiode, mit der es vom Instrument erkannt wird. Das Maximum dieser Infrarotquelle ist der Orientierungspunkt für die Ausrichtung des „*Geodimeter 4000*“. Andererseits besteht aber auch die Möglichkeit des „Prismentrackings“, bei der sich das Gerät anhand der Intensität des zurückgesandten Signals des Prismas orientiert. Der Erfassungsbereich für die Zielverfolgung des Gerätes ist in diesem Fall jedoch sehr eng und bei der Datenübertragung signalisiert das Gerät, dass die Werte nicht korrekt ermittelt werden.

## 4.1.3.2 Übertragung der Positionsdaten auf einen Rechner

Das „*Geodimeter 4000*“ bietet durch ein Funkmodem die Möglichkeit, die Positionsdaten der fest aufgebauten Station mit einer Übertragungsrate von 9600 Baud an eine mobile Tastatureinheit zu übertragen. Die Tastatureinheit ist ebenso wie die Feststation mit einer seriellen RS 232C Schnittstelle ausgerüstet, mit der die Positionsdaten an einen Computer im ASCII Format übertragen werden können. Nur in dieser Betriebsart ist auch die automatische Zielverfolgung aktiviert. Welche Daten übertragen werden, kann vom Nutzer selbst bestimmt werden, indem er sogenannte „Tables“ auf der Tastatureinheit oder der Feststation konfiguriert. Die Konfiguration gilt genauso wie die Stationskoordinaten (die Position der Feststation auf dem Feld) nur für das Gerät - Tastatureinheit oder Station - auf dem sie eingegeben wurden. Und die Messdaten werden entsprechend dieser Konfiguration berechnet und ausgegeben.

Im Remote-Betrieb mit der Tastatureinheit ermittelt die Feststation die Grunddaten Winkel und Schrägdistanz zum Zielkörper. Die Berechnung der Ausgabedaten, wie z. B. die Position erfolgt in der Tastatureinheit. Jedem möglichen Ausgabewert ist eine Zahl als Bezeichner(“Label”) zugeordnet, der in der Konfiguration angegeben wird. Dann wird eine Abfolge von Bezeichnern und Werten, jeweils getrennt durch



**Abb. 11:** Positionsbestimmung und Datenerfassung mit dem „*Geodimeter 4000*“

eine Zeilenweitschaltung und einen Rücklauf, auf den Rechner übertragen. Die Reihenfolge der Bezeichner im Table bestimmt die Ausgabereihenfolge auf der Schnittstelle. Das Datentelegramm beginnt mit einem Infocode, der signalisiert, ob die Messung fehlerfrei ist, und wird mit dem Zeichen ">" abgeschlossen.

Das Datentelegramm sieht folgendermaßen aus:

```
[Info]
[Label]
[Wert]
[Label]
[Wert]
:
[Label]
[Wert]
>
```

Zur Datenerfassung auf dem Rechner wurde ein Pascal-Programm entwickelt, das die Daten von der seriellen Schnittstelle abfragt und getrennt durch ein Semikolon in eine Zeile und die Systemzeit des PC an den Anfang der Zeile schreibt. Für die Überprüfung der statischen und der dynamischen Genauigkeit wurden die x, y, z Koordinaten sowie der Horizontalwinkel und die Schrägdistanz erfasst.

Die gespeicherten Daten liegen dann in folgendem Format vor:

```

:
Rechnerzeit  Info  x      y      z      Horiz.winkel  Schrägdistanz
17:55:10:21;0; 37;26.52; 38;-0.73; 39;0.919; 7;398.2420; 11;26.54;
17:55:10:65;0; 37;26.53; 38;-0.73; 39;0.919; 7;398.2420; 11;26.54;
:

```

Die erste Information des Datentelegramms [Info] zeigt an ob der Messwert aktuell und korrekt ermittelt wurde. Sie lautet dann „0“ im andern Fall eine andere Zahl. Die „3“ wird als [Info] übermittelt, wenn die Totalstation die Entfernungsmessung intern kalibriert. Es werden dann zwar Messwerte übermittelt, jedoch auf Grundlage der letzten Entfernungsmessung vor der Kalibrierung. Der Zielverfolgungsmodus erlaubt es der Station, sich stets mit Hilfe der Servomotoren auf das Ziel auszurichten, solange es ein Signal der Infrarotleuchtdiode des Zielkörpers

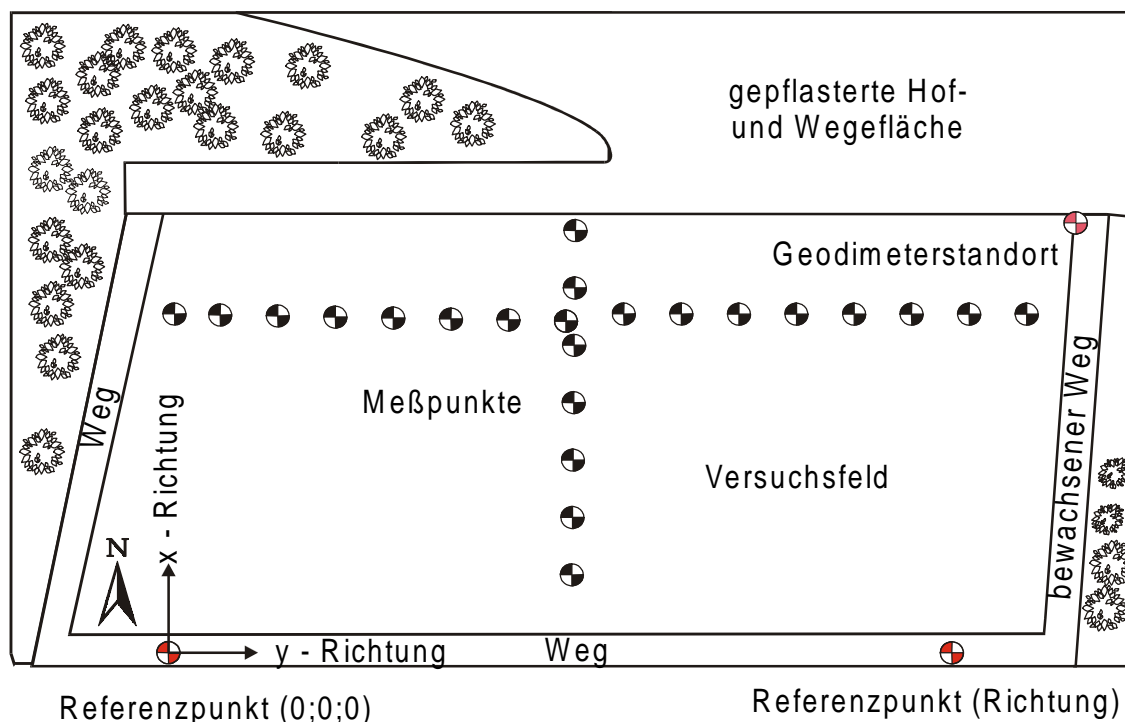


erhält. Die Zielverfolgung ist jedoch nur beim Remote - Betrieb mit der Tastatureinheit möglich.

Die Reichweite des „Geodimeter 4000“ beträgt mit dem vorhandenen Ziel etwa 300 m. Andere Zielkörper mit mehreren Prismen erlauben Messungen bis 3 km. Die Messgrenze ist durch die maximale Wellenlänge des Modulationsbereiches eingeschränkt. Für größere Reichweiten ist das elektrooptische Entfernungsmessverfahren (EDM) nicht geeignet. Der Standort der Totalstation bei allen folgenden Untersuchungen war immer der Festpunkt an der nordöstlichen Ecke des Versuchsfeldes. Die Koordinaten im lokalen Koordinatensystem lauten:  $x = 43,076$  m,  $y = 94,660$  m.

#### 4.1.4 Untersuchung der statischen Genauigkeit des „Geodimeter 4000“

Auf dem Versuchsfeld wurden mehrere Messpunkte mit Hilfe von Holzpflocken fest markiert. Die Holzpflocke wurde entlang einer gespannten Schnur eingeschlagen. An der Spitze der Holzpflocke wurden Kreuzschlitzschrauben eingedreht. Die Holzpflocke wurden einerseits in einer Reihe entlang der x-Achse und andererseits



**Abb. 12:** Position der Messpunkte im Versuchsfeld

---

in einer Reihe entlang der y-Achse fixiert. Die y-Achse war zusätzlich noch in zwei Hälften unterteilt, da auch das Feld hier noch einmal in zwei Hälften aufgeteilt war. Dadurch kommt der Versatz der Messpunkte im östlichen und westlichen Bereich des Versuchsfeldes in der Abb. 12 zustande.

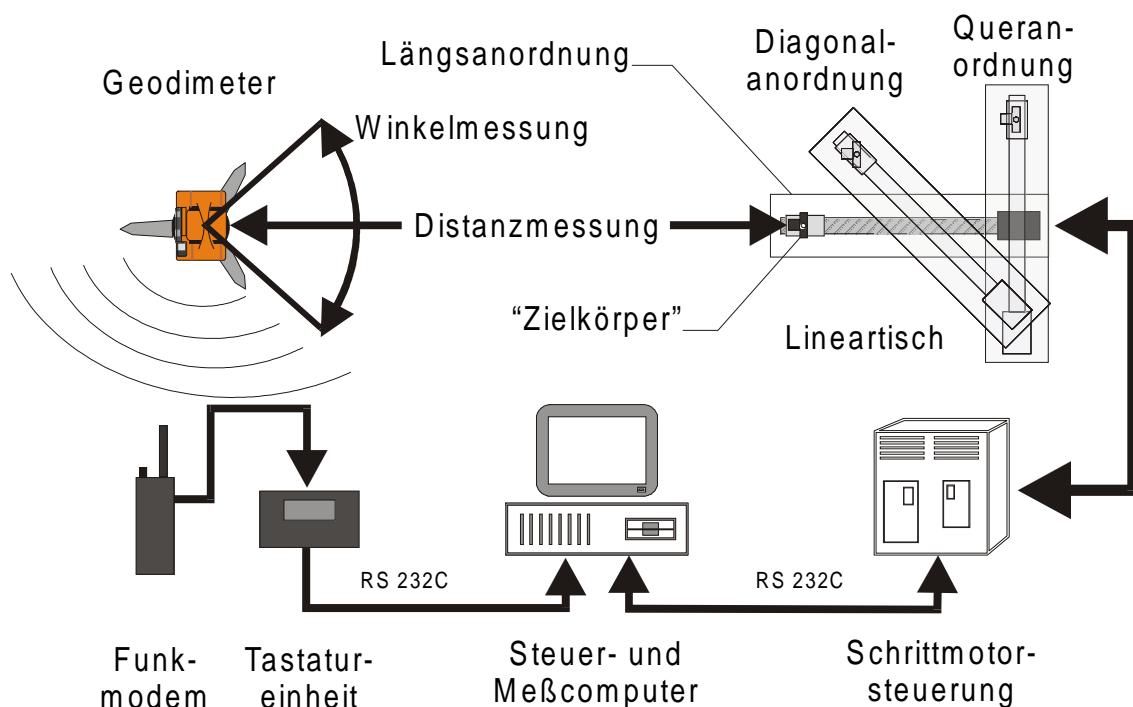
Der Zielkörper wurde auf eine Messingstange geschraubt, an deren unterem Ende eine Spitze angebracht war. Diese Spitze wurde in der Kreuzschlitzschraube zentriert. Mit Hilfe der Dosenlibelle im Zielkörper wurde er lotrecht über der Markierung aufgestellt.

Eine mögliche Ursache für Abweichungen des Messwertes während des Einsatzes des Geodimeter 4000 als Ortungssystem liegt darin, dass das Instrument beim erneuten Aufstellen nicht wieder exakt über der eingemessenen Stationskoordinate steht. Die Messungen wurden deswegen dreimal wiederholt und pro Messung ca. 90 Werte aufgenommen. Für jede Wiederholung wurde der Einrichtvorgang und die Zentrierung auf dem Stationsstandort erneut durchgeführt. Das Instrument wurde durch einen Dreifuß mit optischem Lot zentriert und die Stehachse lotrecht justiert. Daraufhin wurde die nördliche Turmkreuzspitze des Freisinger Doms angezielt und der Referenzwinkel eingegeben. Damit war das Gerät in dem Koordinatensystem des Versuchsfeldes orientiert und messbereit.

## 4.1.5 Untersuchung der dynamischen Genauigkeit des „Geodimeter 4000“

Das „Geodimeter 4000“ ist ein System des Vermessungswesens. Die vom Hersteller angegebene Genauigkeit bezieht sich daher nur auf die Messung bei ruhendem Prisma und einer Messdauer von mindestens 4 s. Bewegt sich jedoch das Prisma während der Messungen, liefert das System aus folgenden Gründen weniger genaue Messwerte ab als im statischen Betrieb. Zum einen benötigt die Datenübertragung per Funk auf den Rechner eine bestimmte Zeitspanne, zum anderen dauert auch der Messvorgang eine bestimmte Messperiode. Im Trackingmodus ist dieser Zeitbedarf zwar verkürzt, dennoch erstreckt er sich über einige Zehntelsekunden. Der Messwert, der den Rechner erreicht, beschreibt die Position des Prismas, die es bei der Messwertaufnahme hat, die sich aber inzwischen geändert haben kann.

Für die Untersuchung des Messverhaltens des „Geodimeter 4000“ unter dynamischen Bedingungen ist eine möglichst exakte Zuordnung der Position des Prisma sowie der dazugehörigen Zeit notwendig. Hierzu wurde ein Lineartisch verwendet. Der Lineartisch besteht aus einem Schlitten, der auf einer Schiene geführt wird. Der Schlitten wird mit einer schrittmotorgetriebenen Spindel auf der Schiene



**Abb. 13:** Versuchsaufbau zur Überprüfung der dynamischen Genauigkeit des „Geodimeter 4000“

bewegt. Die Steuerung des Schrittmotors und seine Stromversorgung sind in einem externen Gehäuse untergebracht. Die Fahrbefehle werden über eine serielle Schnittstelle von einem Rechner auf die Steuerung übertragen

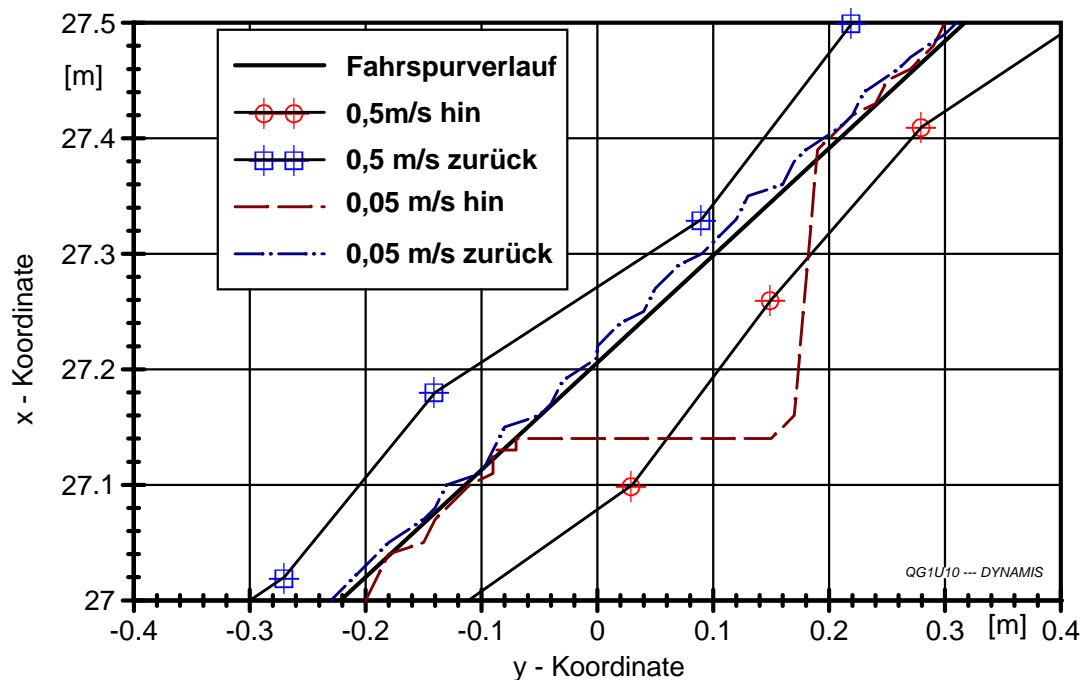
Um die zeitliche Zuordnung der Fahrbefehle zu den Messwerten des „*Geodimeter 4000*“ zu gewährleisten, wurde insgesamt nur ein Rechner benutzt, um einerseits die Messdaten des „*Geodimeter 4000*“ zu empfangen, und andererseits die Fahrbefehle an die Schrittmotorsteuerung zu übergeben. Der zeitliche Verzug durch die Datenübertragung kann hierbei nur rechnerisch ermittelt werden. Für die Darstellung der Ergebnisse ist er im gesamten Zeitverzug nicht herausgerechnet sondern enthalten.

Die Positionsbestimmung durch das „*Geodimeter 4000*“ erfolgt mit Hilfe zweier Messungen. Dies ist zum einen die Entfernungsmessung und zum anderen die Winkelmessung. Es wurde ein Versuchsaufbau gewählt, bei dem die Messkomponenten getrennt voneinander und kombiniert untersucht werden konnten. Zur Überprüfung der Entfernungsmessung wurde die Fahrbahnachse entlang einer gedachten Gerade vom „*Geodimeter 4000*“ zum Lineartisch eingerichtet. Die Winkelmessung wurde untersucht, indem die Fahrbahnachse quer zu dieser Linie eingerichtet wurde. Das zeitliche Verhalten von Entfernungsmessung und Winkelmessung zueinander wurde mit einer Ausrichtung der Fahrbahnachse untersucht, die  $50 \text{ gon}$  ( $45^\circ$ ) horizontal zu der Verbindungsgerade des Mittelpunktes des Lineartisches und des „*Geodimeter 4000*“ geneigt war (vgl. Abbildung 13).

Die Versuchsfahrten wurden mit zehn unterschiedlichen Geschwindigkeiten von 0,05 bis 0,5 m/s durchgeführt. Jede Fahrt bestand aus einer Hin- und einer Rückfahrt und wurde dreimal wiederholt. Der Versuchsablauf wurde von einem Rechnerprogramm gesteuert, das auf Tastendruck den Fahrbefehl an die Schrittmotorsteuerung übergibt und einen Zeitstempel in die Positionsdatendatei ablegt. Mit der Ausgabe des Fahrbefehls wird die Erfassung der Positionsdaten aufgenommen. Treffen an der seriellen Schnittstelle Daten ein, versieht das Programm sie mit einem Zeitstempel und legt sie in der Positionsdatendatei ab. Zu Beginn einer jeden Messfahrt und an deren Ende wurde das „*Geodimeter 4000*“ in den Standardmodus (vgl. Tabelle 5) umgestellt und drei Messwerte aufgenommen.

In Abbildung 14 ist beispielhaft jeweils eine Hin- und Rückfahrt bei der höchsten und bei der niedrigsten Geschwindigkeit dargestellt. Die Abweichung ist bei jeder Geschwindigkeit unterschiedlich und zeigt rechts zur Fahrtrichtung. Auffällig ist die Messabweichung der Fahrt mit  $0,05 \text{ ms}^{-1}$  beginnend bei  $y = -0,08 \text{ m}$ . In regelmäßigen Abständen legt das Ortungssystem eine Kalibrierungsphase des Entfernungsmesssystems ein. Das Übertragungstelegramm der Messdaten an den Computer ist dann mit einer Infokennzahl markiert. Während dieser Zeit findet jedoch eine Winkelmessung noch statt, wie an der Abbildung 14 zu sehen ist.

Zur Steuerung des Portalversuchsrahmens muß die Prozesssteuerung eine Information über den aktuellen Standort der Geräte haben. Da das „Geodimeter 4000“ eine bestimmte Zeit braucht, um die Position des Prisma zu ermitteln und an den Rechner weiterzugeben, ist es notwendig, mit Hilfe einer Schätzfunktion, die



**Abb. 14:** Diagonale Hin und Rückfahrt mit zwei Bewegungsgeschwindigkeiten des Zielkörpers

wahrscheinlichen Koordinaten  $x$  und  $y$  abzuschätzen und nach diesen Werten den Portalversuchsrahmen zu steuern. Die für diese Schätzung notwendigen Totzeiten wurden in diesen Versuchen ermittelt.

Mit Hilfe der Startzeit kann die Funktion der x- und y-Koordinaten nach der Zeit ermittelt werden. Diese Funktion setzt sich in der ersten Phase aus der Beschleunigungszeit zusammen und verhält sich dann entsprechend dem Weg-Zeit-Gesetz. Die Beschleunigungszeit ist abhängig von der zu erreichenden Geschwindigkeit. Die Beschleunigung wurde mit Hilfe der Messdaten ermittelt nach der folgenden Formel. Hierbei wurde angenommen, dass die Beschleunigungen beim Start und beim Bremsen zwar entgegengesetzt gerichtet aber gleich groß sind.

Für die Annahme gleicher Anfahr- und Bremsbeschleunigung gilt:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}^2}{\vec{v} t_g - \vec{s}} \quad (1)$$

- $\vec{a}$  : Beschleunigungsvektor
- $\vec{v}$  : Geschwindigkeitsvektor
- $t_g$  : Gesamtfahrdauer
- $\vec{s}$  : Vektor der Fahrtstrecke

Bis zum Ende der Beschleunigungsphase errechnet sich die Position zum Zeitpunkt  $t$  nach der folgenden Formel:

für  $t < t_b$

$$\vec{P} = \vec{P}_0 + \frac{\vec{a} t^2}{2} \quad (2)$$

für die Phase gleichmäßiger Geschwindigkeit  $t_b < t < t_g - t_b$  :

$$\vec{P} = \vec{P}_0 + \frac{\vec{a} t_b^2}{2} + \vec{v} (t - t_b) \quad (3)$$

für die Abbremsphase  $t > t_g - t_b$  :

$$\vec{P} = \vec{P}_0 + \frac{\vec{a} t_b^2}{2} - \vec{v} (t_g - 2 t_b) + \vec{v} (t - t_g + t_b) - \frac{\vec{a} (t - t_g - t_b)^2}{2} \quad (4)$$

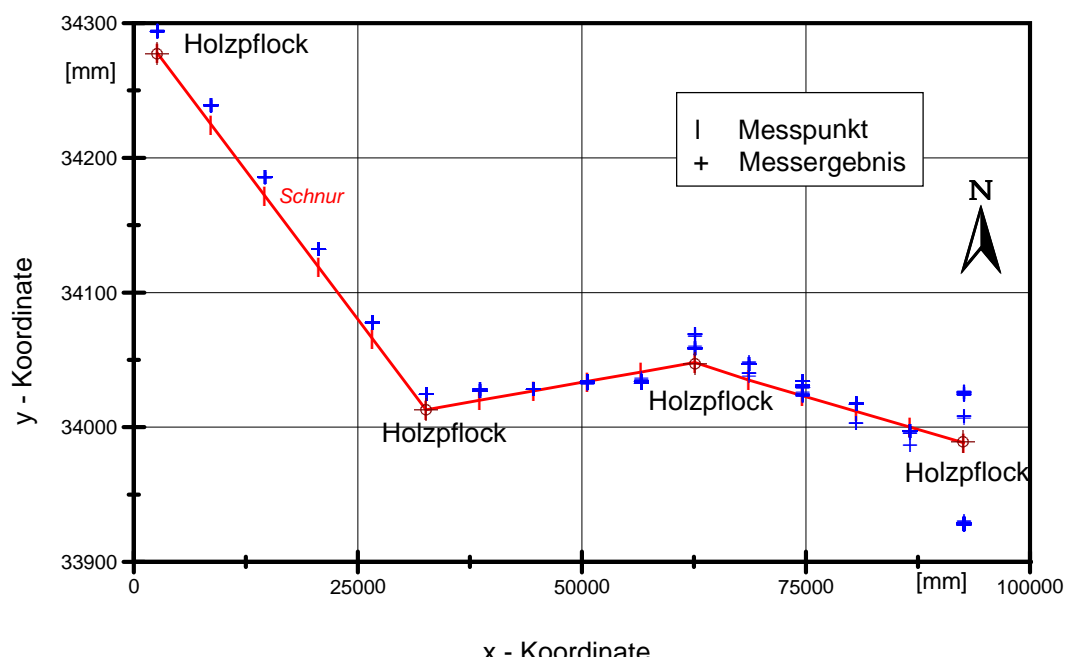
- $\vec{P}$  : Vektor der Prismaposition  
 $\vec{P}_0$  : Vektor der Ausgangsposition  
 $t_b$  : Beschleunigungszeit

## 4.2 Ergebnisse zur Ortungsgenauigkeit

### 4.2.1 Ergebnisse zur statischen Messgenauigkeit von „Capsy“

In der Abbildung 15 sind die von „Capsy“ und die vom Theodoliten gemessenen Positionen in einer Übersicht über die ganze Feldlänge dargestellt. Die Messpunkte werden im weiteren mit ihren Positionskordinaten in Meter bezeichnet.

Die y - Achse ist hier sehr detailliert aufgezeichnet, während x - Achse nur eine geringe Auflösung hat, da die Schnur entlang der x - Achse gespannt war und sich die x - Koordinaten nur wenig änderten. Wie sich in den folgenden Darstellungen zeigen wird, ist die Abweichung der Messwerte in y - Richtung in der Regel weitaus größer. Die Darstellung zeigt aber sehr deutlich, dass innerhalb des Feldes große Unterschiede in der Messqualität auftreten.



**Abb. 15:** Positionsmessung entlang einer gespannten Schnur

Obwohl in Abbildung 15 der westliche Teil des Feldes größere Flächen mit schlechter Messbarkeit ausweist, schwanken die Messwerte besonders im östlichen Teil des Feldes. Von  $x = 2000$  mm bis  $x = 32000$  m zeigt sich eine gleichbleibende



Abweichung von der mit dem Theodoliten ermittelten Position. Im zweiten Abschnitt kreuzen die Messwerte die gespannte Schnur und beginnen in der y - Richtung zu schwanken wobei erst an der  $y = 62000$  mm Koordinate die 1 cm Grenze der Schwankungsbreite überschritten ist.

**Tabelle 6:** Mittelwerte und Standardabweichung der Messreihen mit „Capsy“

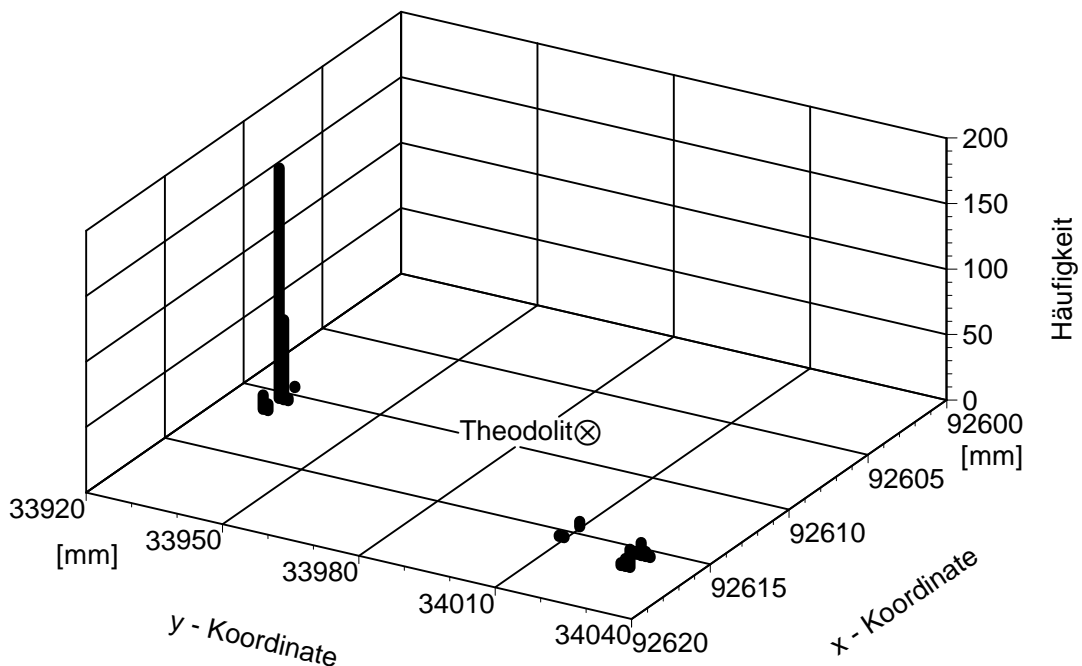
$\bar{x}$ [m]	$\bar{y}$ [m]	$s_x$ [mm]	$s_y$ [mm]
92,611	33,953	2	40
86,598	33,999	0	1
80,382	33,836	2268	1830
74,601	34,034	1	3
68,604	34,049	1	1
62,607	34,061	0	3
56,611	34,034	4	1
50,590	34,035	1	0
45,556	34,164	16888	1322
50,699	33,668	908	3621
44,593	34,030	0	0
38,596	34,029	0	0
32,599	34,027	0	0
26,605	34,080	0	0
20,603	34,134	0	1
14,604	34,188	0	0
8,608	34,241	0	0
2,613	34,296	1	0
2,615	34,296	1	0

Die großen Werte der Standardabweichung aus Tabelle 6 in einzelnen Bereichen des Versuchsfeldes (Punkte 80/34; 44/34; 50,34) rühren von Fehlmessungen her. Der falsch gemessene Punkt, befindet sich hierbei scheinbar außerhalb des Versuchsfeldes. Das führt zu einer weiten Verschiebung des Mittelwertes. Zurückzuführen sind diese Messfehler auf die Konstellation „Gefährlicher Kreis“, bei dem sich Messpunkt und Landmarken auf einer gemeinsamen Kreislinie befinden. Unter diesen Bedingungen sind die Rechenergebnisse der „Rückschnittmethode“, nach der „Capsy“ seine Position berechnet, nicht mehr gültig.

#### 4.2.1.1 Messwertstabilität

In Abbildung 16 ist die Häufigkeit des Auftretens einzelner Messwerte am Messpunkt 92/34 dargestellt. „Capsy“ gibt die Messwerte mit einer Auflösung von 1 mm aus. Die Verteilung der Messwerte ist diskret. Die Abweichung in x - Richtung liegt unterhalb der geforderten Grenze von 10 mm, in y - Richtung beträgt die Streubreite jedoch 100 mm.

Die Messwerte lassen sich deutlich in zwei Gruppen aufteilen, bei der die südliche

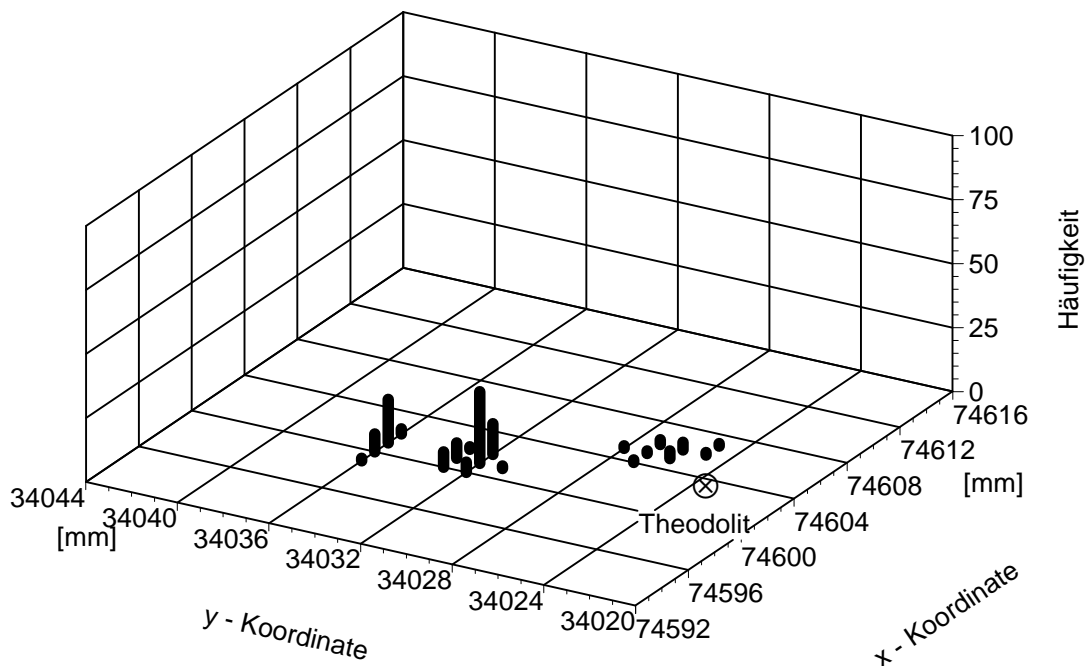


**Abb. 16:** Häufigkeitsverteilung der Messwerte am Punkt 92/34

Gruppe jedoch deutlich seltener auftritt. Die Messwerte, die sich einer Gruppe zuordnen lassen, treten jedoch zeitlich getrennt von einander auf. Für die Darstellung wurden drei Messzyklen zusammengefasst, so dass hier 300 Messwerte die Häufigkeitsverteilung der zwei Gruppen bilden. Der Messpunkt befindet sich am äußersten östlichen Rand des Versuchsfeldes, an dem die Lage zu den Targets besonders ungünstig ist.

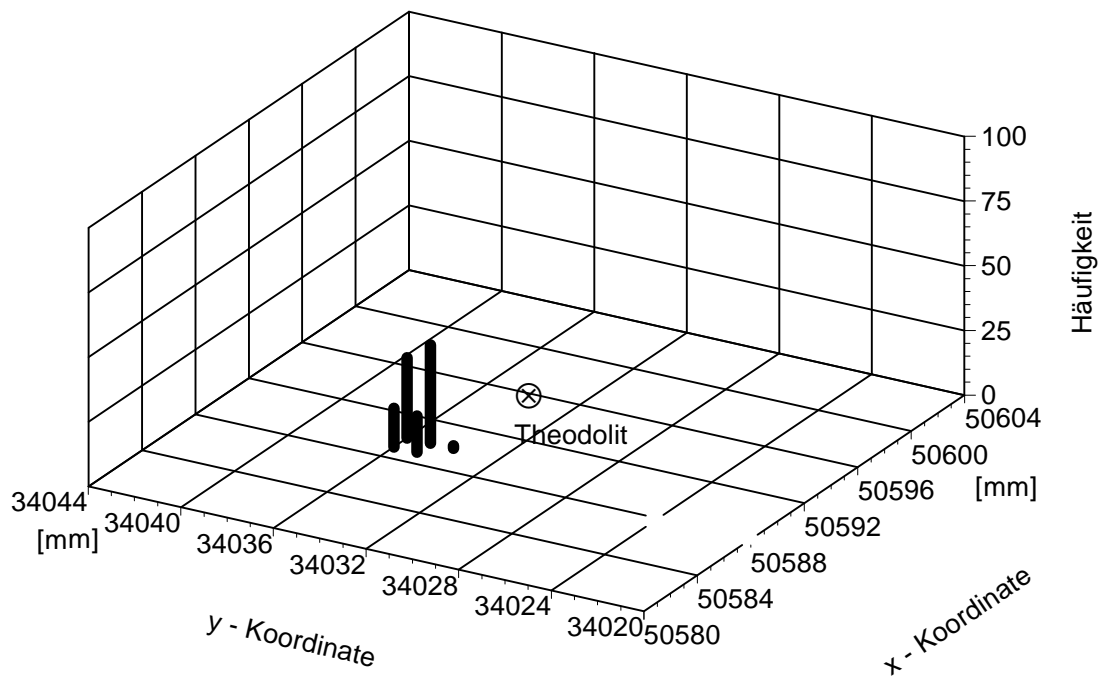
Bei dem Punkt 74/34 tritt die große Messschwankung nicht auf, doch lassen sich die Messwerte in drei Gruppen einteilen und sie sind stärker über die Gruppen verteilt als bei Punkt 92/34 und überschreiten zudem die Grenze von 1 cm.

Die Berechnung eines Mittelwertes führt hier nicht zu einer exakteren Positionsbestimmung, da die Messwerte wegen einer anderen Auswahl der Targets, die für die Berechnung der Position herangezogen werden, Gruppen bilden. Die Positionsbestimmung mit dem Theodolit liegt außerhalb des Bereiches, in dem die Messwerte von „Capsy“ liegen.



**Abb. 17:** Häufigkeitsverteilung der Messwerte am Punkt 74/34

Je weiter westlich die Messpunkte liegen, desto geringer ist die Streubreite der Messwerte des Ortungssystems. Bei der Häufigkeitsanalyse der Messwerte am Punkt 50/34 in Abbildung 18 liegen die Messungen dicht beieinander.

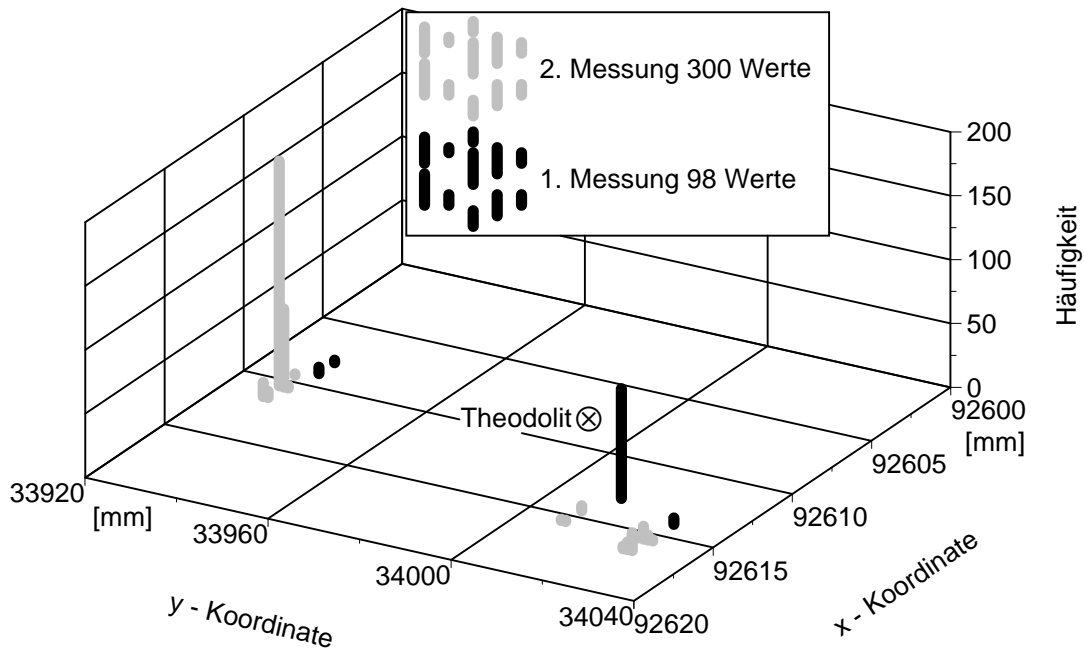


**Abb. 18:** Häufigkeitsverteilung der Messwerte am Punkt 50/34

#### 4.2.1.2 Wiederholgenauigkeit des Systems

Normalerweise wurden die Messungen hintereinander durchgeführt, ohne die Position des Gerätes an dem Messpunkt zu verändern. An den Messpunkten, die durch die Holzpflockmarkierung gekennzeichnet waren, wurde jedoch an einem anderen Tag nochmals gemessen, wobei das Messgerät komplett neu in Position über dem Messpunkt eingerichtet wurde. Für diese Punkte liegt eine direkte Messung mit dem Theodoliten vor, und es ist sichergestellt, dass der Messpunkt ausreichend genau wiedergefunden wurde.

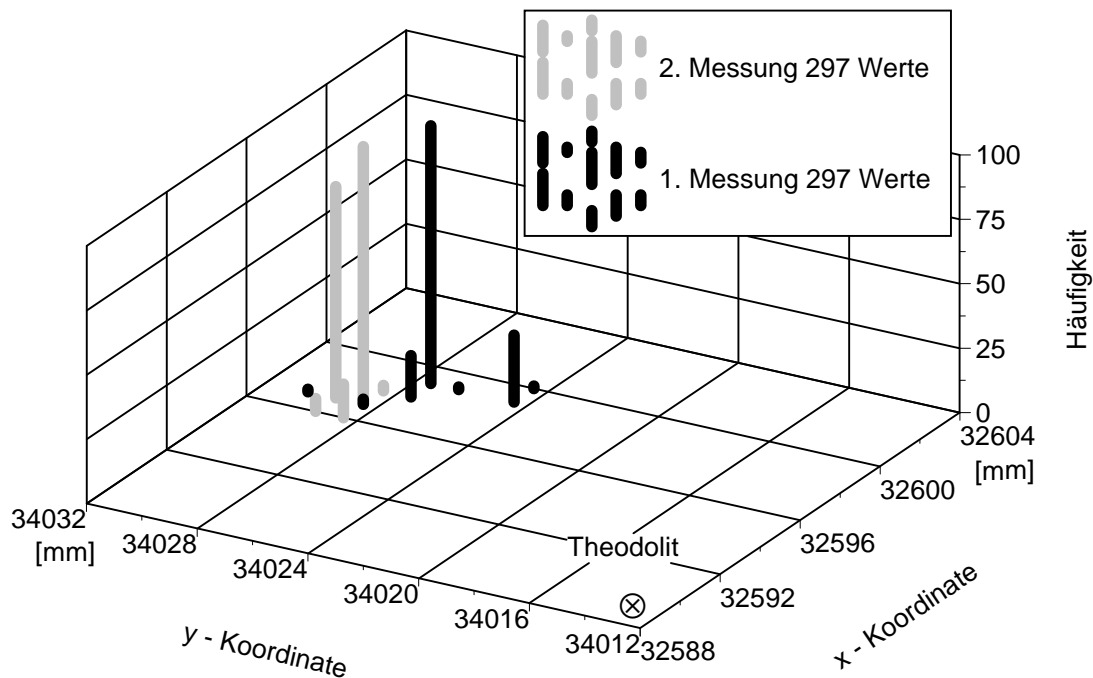
Am Punkt 92/34 ist die Markierung durch den Holzpflöck und die Schraube erfolgt und hier zeigt sich auch bei der ersten Messung die gleiche Verteilung der Messwerte wie bei der zweiten Messung, die schon vorher in der Abbildung 16 dargestellt wurden, die Messwerte sind lediglich in der x-Achse um ca. 3 mm verschoben.



**Abb. 19:** Häufigkeitsverteilung zweier Messungen am Punkt 92/34

Am Punkt 32/34 herrschen wesentlich bessere Messbedingungen und die Darstellung der Messgenauigkeiten zeigt eine sehr deutliche Übereinstimmung der Messwerte der ersten und der zweiten Messung, denn ein Großteil der Messwerte liegt innerhalb von  $0,25 \text{ cm}^2$ . Die Bestimmung der Messpunktposition mit dem Theodoliten unterscheidet sich jedoch sehr deutlich von den Messdaten.

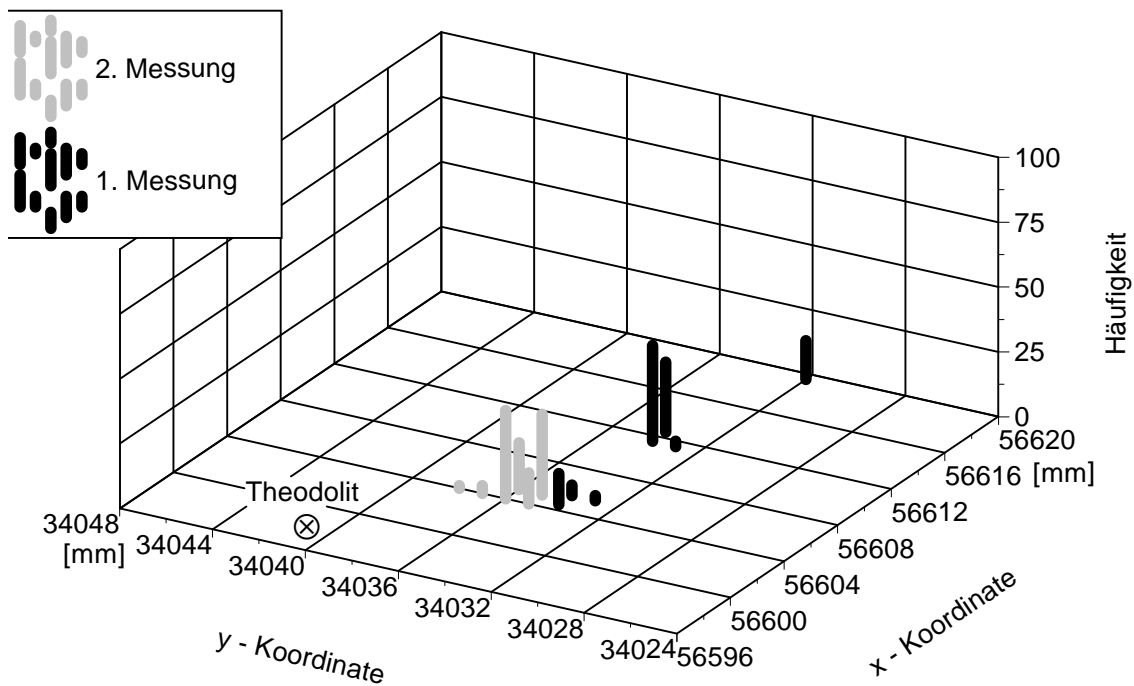
Das Ortungssystem zeigt also eine heterogene Verteilung der Genauigkeit auf dem Versuchsfeld.



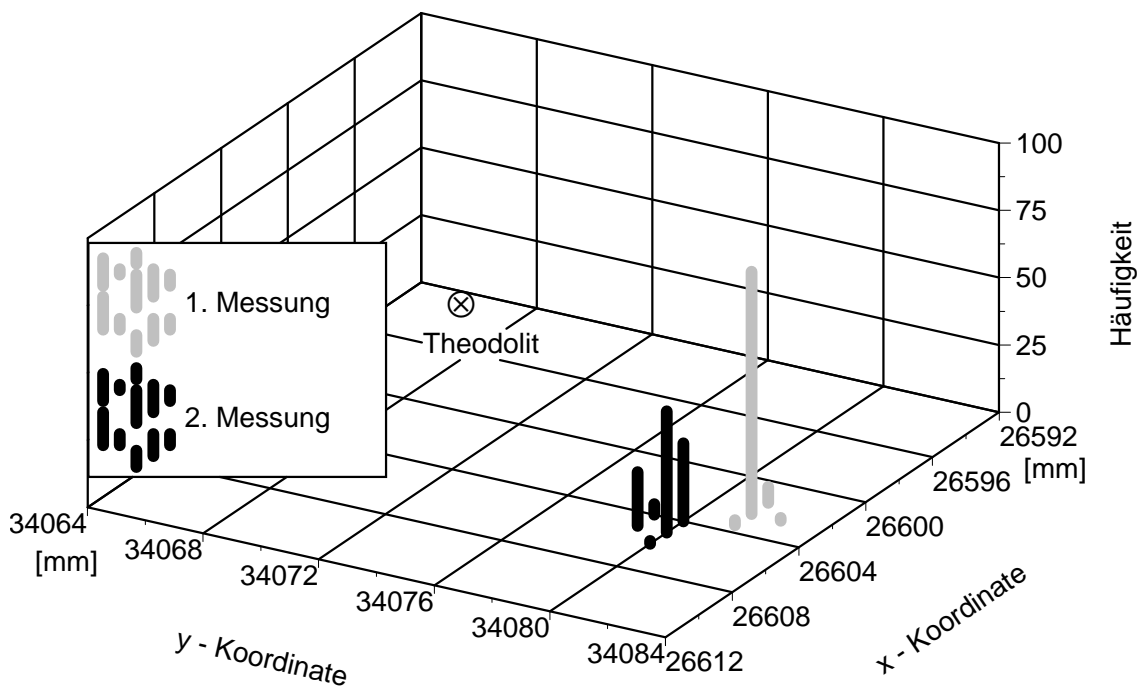
**Abb. 20:** Häufigkeitsverteilung zweier Messungen am Punkt 32/34

Der Punkt 56/34 (Abbildung 21) wurde über der Schnur und mit dem Maßband gemessen. Die Messwerte der zweiten Messung streuen sehr stark. An diesem Tag herrschte stärkerer Wind als bei der ersten Messung, der die Targethalterungen sehr stark zum Schwingen bringen kann. Bei der Messung am Punkt 26/34 herrschten gleichmäßigere Bedingungen, so dass die Schwankungen beider Messungen in einem engen Bereich liegen.

Deutlich ist auch hier die Abweichung der Messwerte von dem Theodolitenmesswert, doch zeigt sich, dass das Ortungssystem sich in seinem Koordinatensystem stabil verhält, sofern die Positionen der Targets möglichst genau ermittelt wurden. In diesem Abschnitt weichen alle Messungen in ähnlicher Weise vom Referenzsystem ab (siehe Abbildung 15).



**Abb. 21:** Häufigkeitsverteilung zweier Messungen am Punkt 56/34

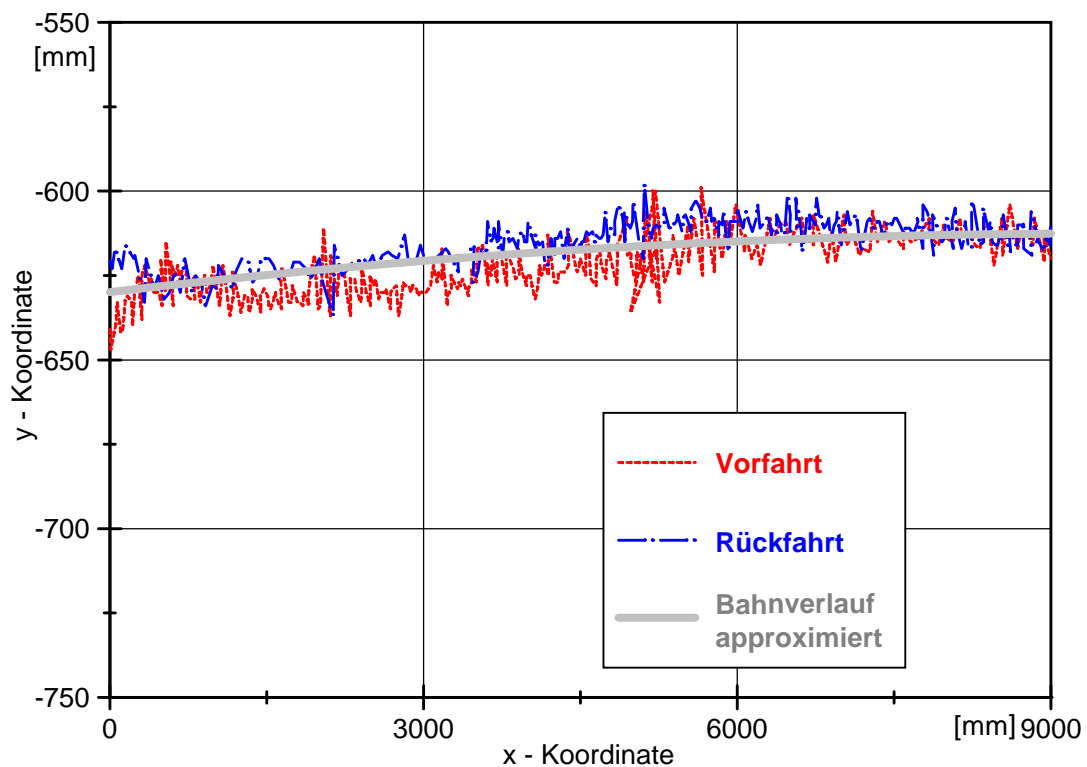


**Abb. 22:** Häufigkeitsverteilung zweier Messungen mit „Capsy“ am Punkt 26/34

#### 4.2.2 Ergebnisse zur dynamischen Genauigkeit von „Capsy“

Die Abbildung 23 zeigt die langsamste Versuchsfahrt bei 0,3 km/h. Die Geschwindigkeit ist doppelt so hoch als die beim Portalversuchsrahmen mögliche.

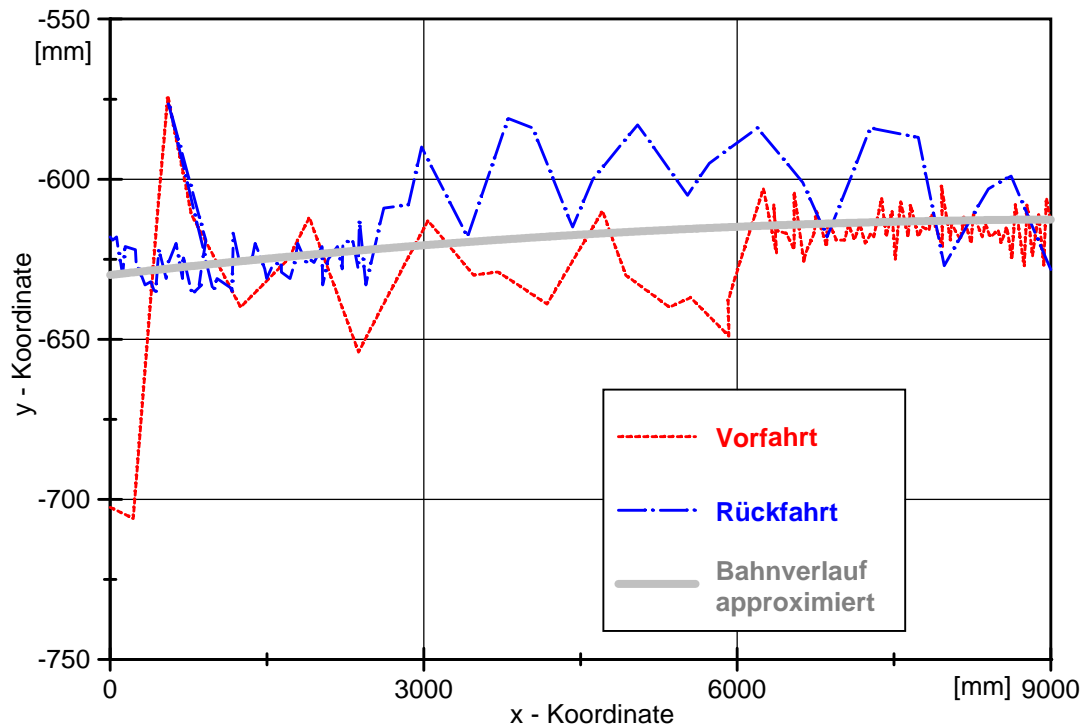
Der Bereich bis 2000 mm kann als Beschleunigungsstrecke für die Vorfahrt bzw. als Bremsstrecke für die Rückfahrt betrachtet werden, das gleiche gilt für die Zone ab 5000 mm. Die Messwerte schwanken hier stärker in der y - Koordinate als bei dem statischen Versuch, in der Regel in einem Bereich von 20 mm. Die x - Koordinate läßt dazu keine Aussage zu, da dies die Bewegungsrichtung ist. Es ist zu erkennen, dass in der relevanten Zone zwischen 2000 und 5000 mm eine leichte Verschiebung der Kurven zu erkennen ist.



**Abb. 23:** Positionsbestimmung von „Capsy“ bei 0,3 km/h



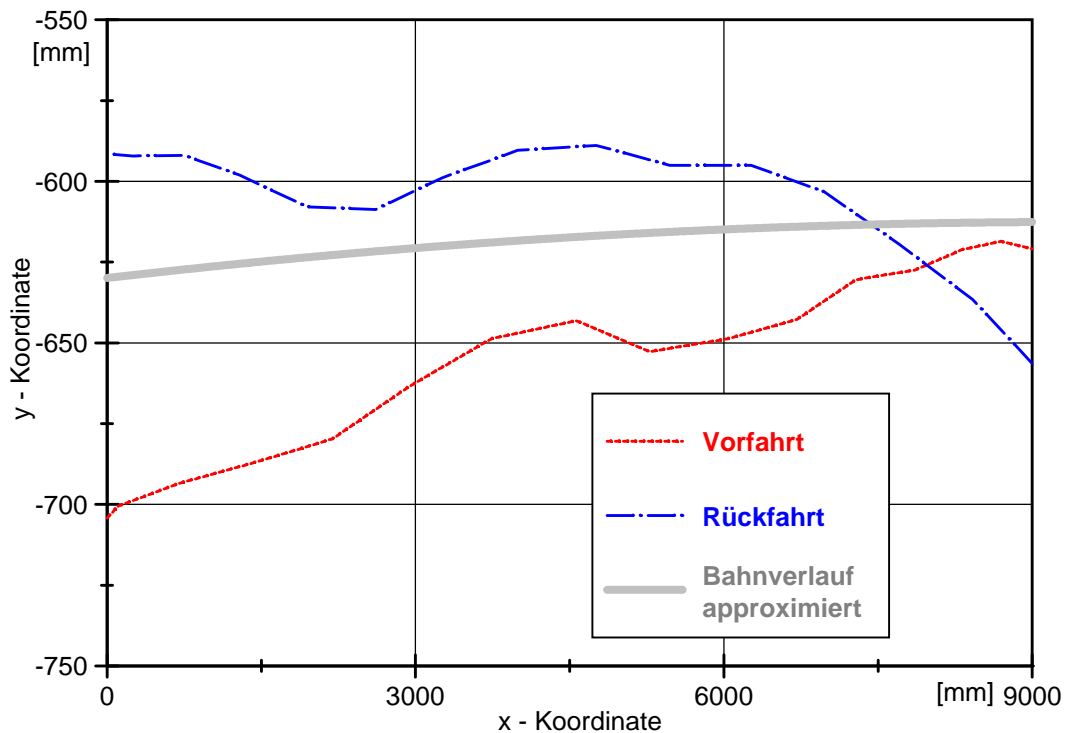
In der Abbildung 24 einer Messung bei 4,25 km ist dieser „Versatz“ sehr viel deutlicher zu erkennen, da die Schwankungen in diesem Beispiel breiter ausfallen. Sie bewegen sich in der Messzone bei ca. 40 mm. Die großen Schwankungen zu Beginn der Messfahrt rühren von der Mechanik des Tragrahmens her. Der Rahmen



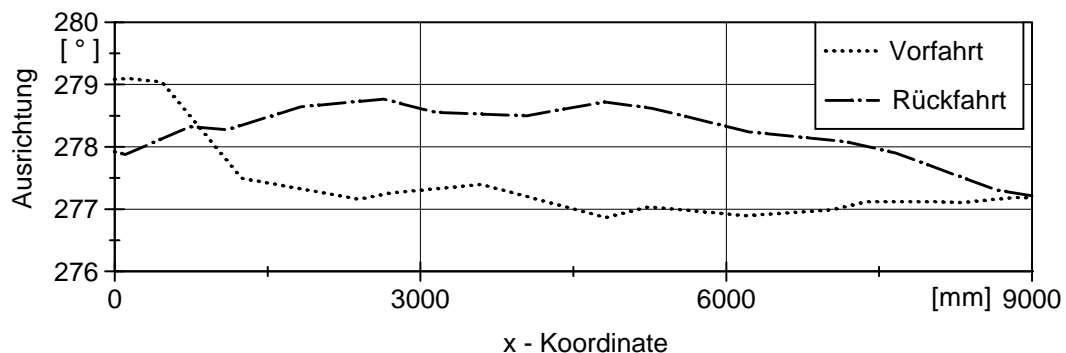
**Abb. 24:** Positionsbestimmung von „Capsy“ bei 4,25 km/h

wird nur einseitig angetrieben, daher verdreht er sich beim Beschleunigen. Ist die Geschwindigkeit erreicht, sind die tangential wirkenden Kräfte im Rahmen der Rollreibungskraft des Wagens und damit gleichbleibend gering. Der Effekt tritt sowohl bei der Vor- wie bei der Rückfahrt auf und ist jeweils in das Beet hinein gerichtet. Die Ausrichtung des Gerätes ist im Ausgabeformat der Messdaten mit enthalten und in Abbildung 26 gegenüber der x - Achse aufgetragen. Sie hat den gleichen Fehler wie die Positionsdaten, da sie mit Hilfe der Targetpositionen errechnet wird. Die Verdrehung des Messgerätes in der Anfahrphase ist deutlich zu erkennen.

Bei einer Geschwindigkeit von 8,9 km/h (Abbildung 25) werden die Effekte noch deutlicher. Besonders deutlich ist der Versatz in y - Richtung zu sehen, der bei dieser Geschwindigkeit bei etwa 50 mm liegt. Das Verdrehen des Gerätes scheint in der Vorfahrt den Versatz noch zu verstärken, während es bei der Rückfahrt den Effekt dämpft.



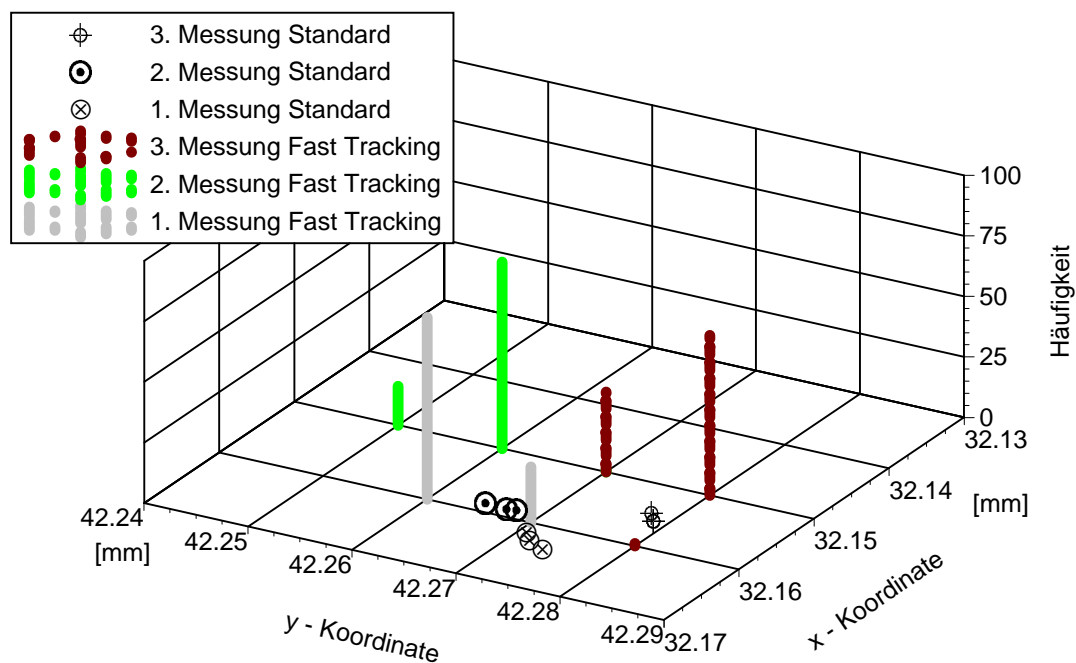
**Abb. 25:** Positionsbestimmung von „Capsy“ bei 8,9 km/h (Kurve geglättet)



**Abb. 26:** Ausrichtung von „Capsy“ während der Fahrt ( $v= 8,9$  km/h)

## 4.2.3 Ergebnisse zur statischen Genauigkeit der Totalstation „Geodimeter 4000“

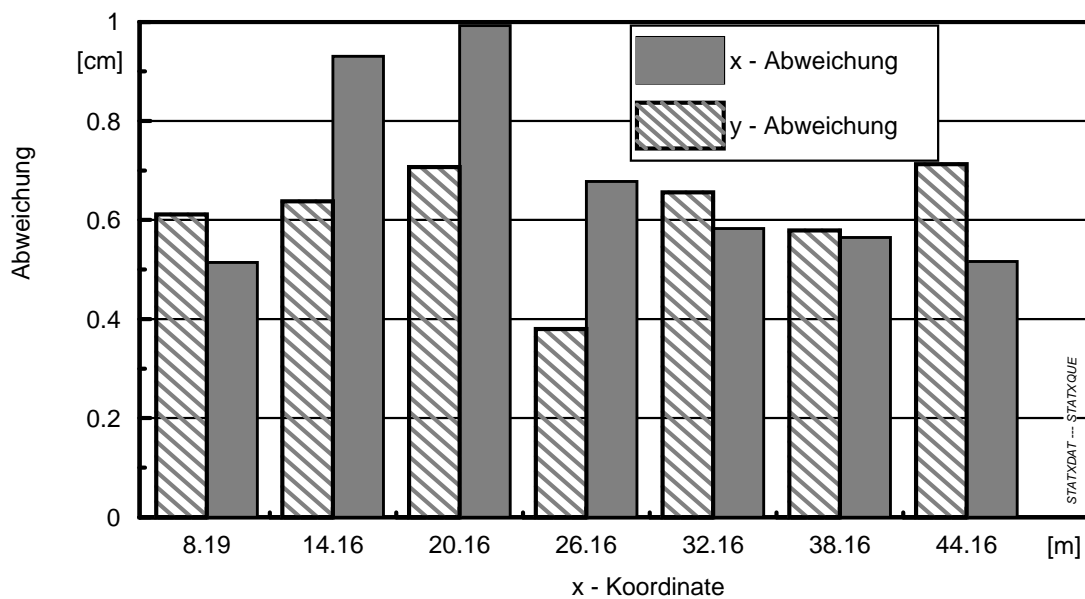
Da die Auflösung des „Geodimeter 4000“ im Trackingmodus nur 1 cm beträgt, streuen die Messwerte um die Einzelmesswerte aus dem Standardmodus. Die Verteilung der Messwerte ist exemplarisch in Abbildung 27 dargestellt. Die Messwerte streuen nur in eine Richtung, da das „Geodimeter 4000“ nicht rundet, sondern einfach den Rest des Wertes nach der zweiten Dezimalstelle abschneidet.



**Abb. 27:** Verteilung der Messwerte an einem Messpunkt  
(x: 32,2 m y: 42,3 m)

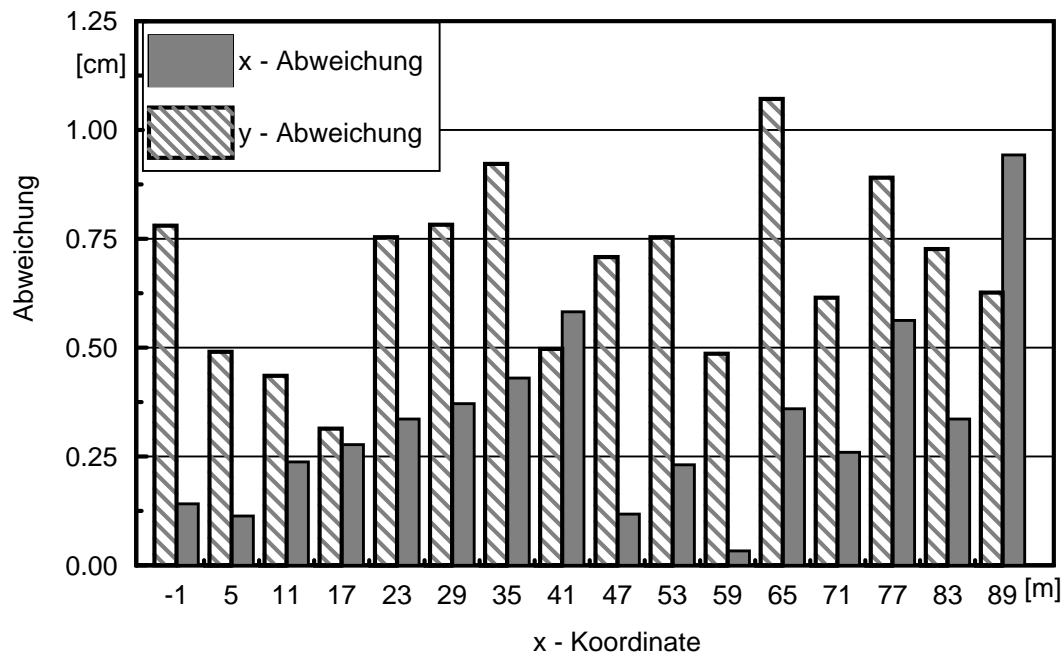
Bei diesem Messdurchlauf treten auch bei der Standardmessung schon Abweichungen von etwa 1 cm auf. Das deutet daraufhin, dass der Einrichtungsvorgang und die Aufstellung der Feststation so ungenau war, dass es zu dieser Abweichung bei der 3. Messung kam. Jedoch liegen bei allen drei Messungen die Messwerte der zugehörigen Tracking - Messung immer in einem Abstand von unter 2 cm.

In Abbildung 28 sind die Abweichungen der Messwerte im Fast Trackingmodus von den Messwerten im Standardmodus an den Punkten parallel zur x - Achse dargestellt. Es zeigt sich eine gleichbleibende Abweichung von ca. 0,5 cm der x - und der y - Koordinaten und dies auch nur in eine Richtung. Das resultiert aus dem oben angesprochenen Verfahren die Messwerte nur bis zur zweiten Dezimalstelle ohne Rundung auszugeben. Die Mittelwerte liegen jedoch alle innerhalb eines Bereichs von +1 cm.



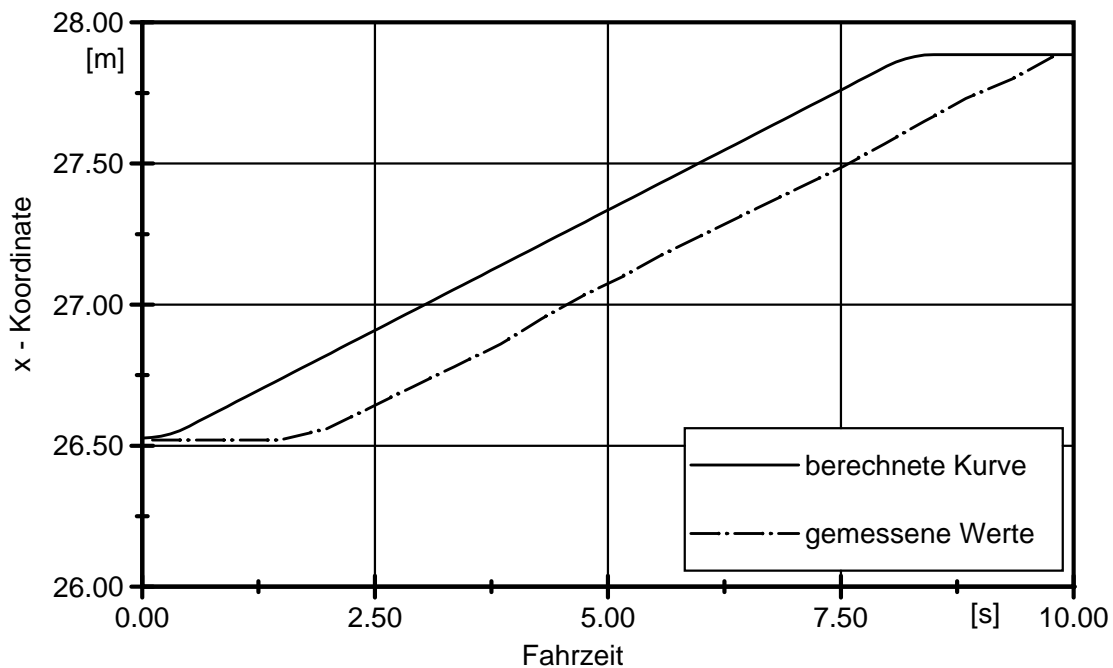
**Abb. 28:** Mittlere Abweichungen der Messwerte im Fast Trackingmodus von den im Standardmodus gemessenen (Punkte parallel zur x - Richtung)

In Abbildung 29 sind die mittleren Abweichungen der Messwerte an den Punkten parallel zur y - Achse dargestellt. Auch hier weichen die Werte nur in einer Richtung von den Messwerten der Standardmessung ab. An der y - Koordinate 65 m wird die 1 cm Marke jedoch überschritten. Die y - Werte zeigen hier deutlich größere Abweichungen als x - Werte, bei denen die Abweichungen in der Regel unter 0,6 cm bleiben.



**Abb. 29:** Mittlere Abweichungen der Messwerte im Fast Trackingmodus von den im Standardmodus gemessenen (Punkte parallel zur y - Achse)

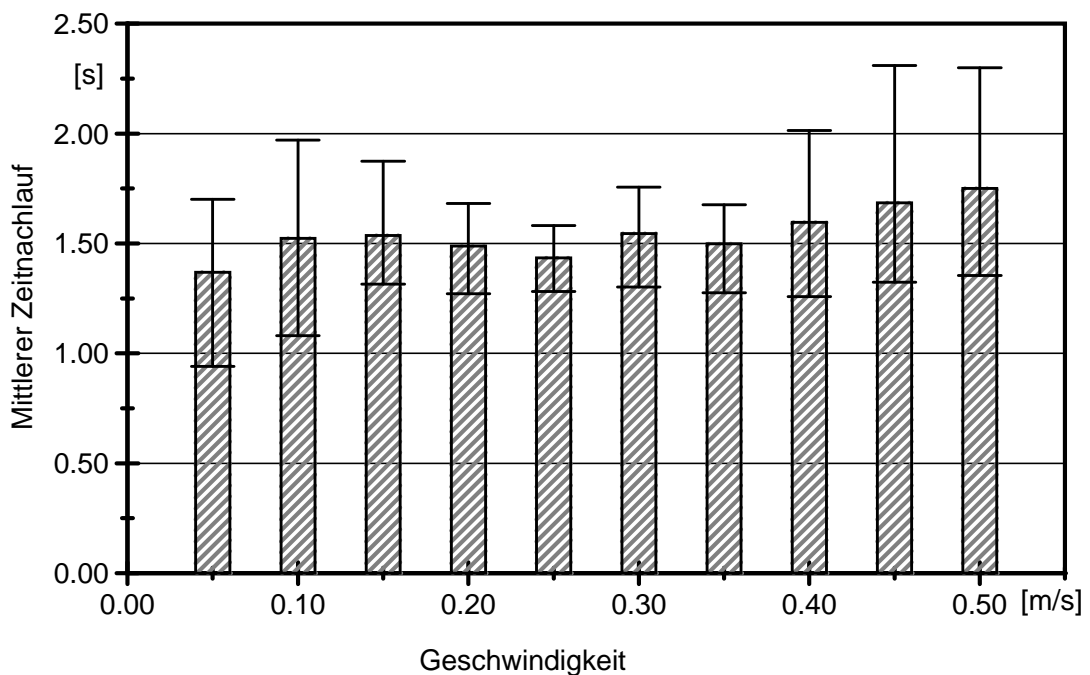
#### 4.2.4 Ergebnisse zur dynamischen Genauigkeit der Totalstation „Geodimeter 4000“



**Abb. 30:** Hin- und Rückfahrt mit 2 Geschwindigkeiten des Zielkörpers (Fahrtrichtung um 50 gon ( $45^\circ$ ) zur Beobachtungsrichtung gedreht)

In Abbildung 30 ist beispielhaft der errechnete Verlauf der  $x$  - Positionen sowie der tatsächlich gemessene bei einer Diagonalfahrt und einer Fahrgeschwindigkeit von  $0,25 \text{ ms}^{-1}$  dargestellt. Die Messkurve läuft der gerechneten Kurve deutlich um etwa  $1,5 \text{ s}$  nach. Der Nachlauf ist über die gesamte Fahrtdauer weitgehend gleichbleibend und erst nach Ende der Fahrt bei  $8,7 \text{ s}$  gleichen sich die  $x$  - Koordinaten an.

In Abbildung 31 sind die Verzugszeiten der  $x$  - Koordinaten bei 10 verschiedenen Geschwindigkeiten in einem Balkendiagramm dargestellt. Auf jedem Balken ist zusätzlich noch die Spannweite der höchsten und der niedrigsten Messverzugszeit dargestellt. Die Balkenhöhen sind Mittelwerte aus dem Versuch, bei dem das Prisma entlang der  $x$  - Achse bewegt wurde.

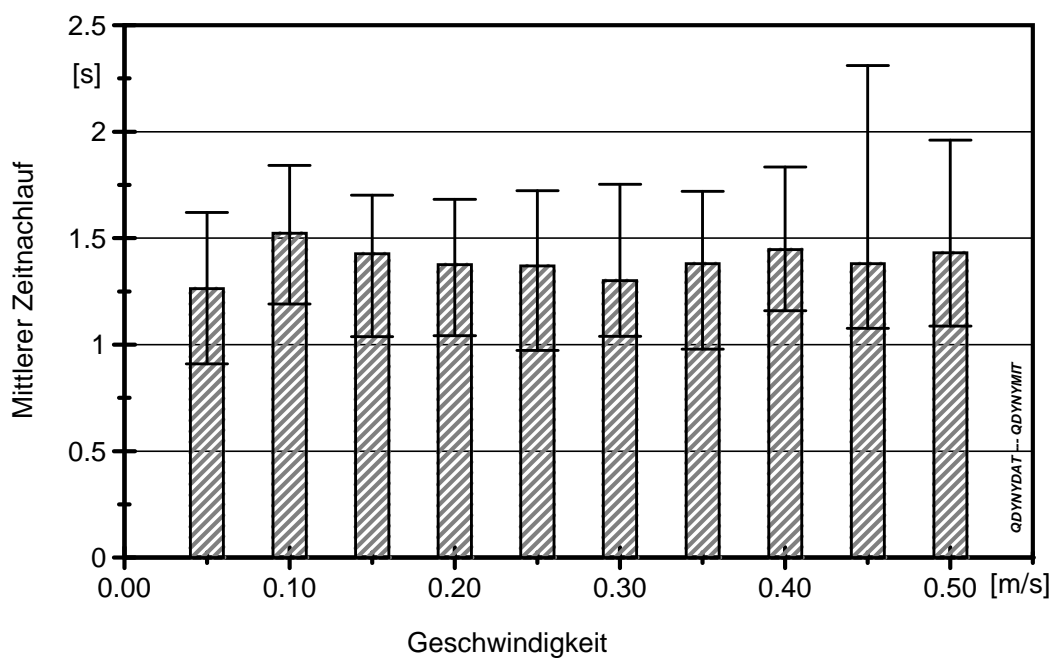


**Abb. 31:** Mittlerer Zeitverzug und dessen Spannweiten der  $x$  - Koordinaten bei bewegtem Prisma

Die Mittelwerte streuen um etwa  $1,5 \text{ s}$  und ein signifikanter Unterschied zwischen den Geschwindigkeitsstufen ist nicht zu erkennen. Allein die Maxima reichen bei den höheren Geschwindigkeiten deutlich in den 2 Sekunden Bereich. Auffällig sind die hohen Spannweiten bei den niederen und bei den hohen Geschwindigkeiten. Die hohen Maxima bei den Geschwindigkeiten  $0,4 - 0,5 \text{ ms}^{-1}$  tragen im stärkeren

Ausmaß zu dem Mittelwert bei als bei den anderen Geschwindigkeitsstufen, da hier die Anzahl der Messwerte wegen der verkürzten Fahrzeit geringer ist.

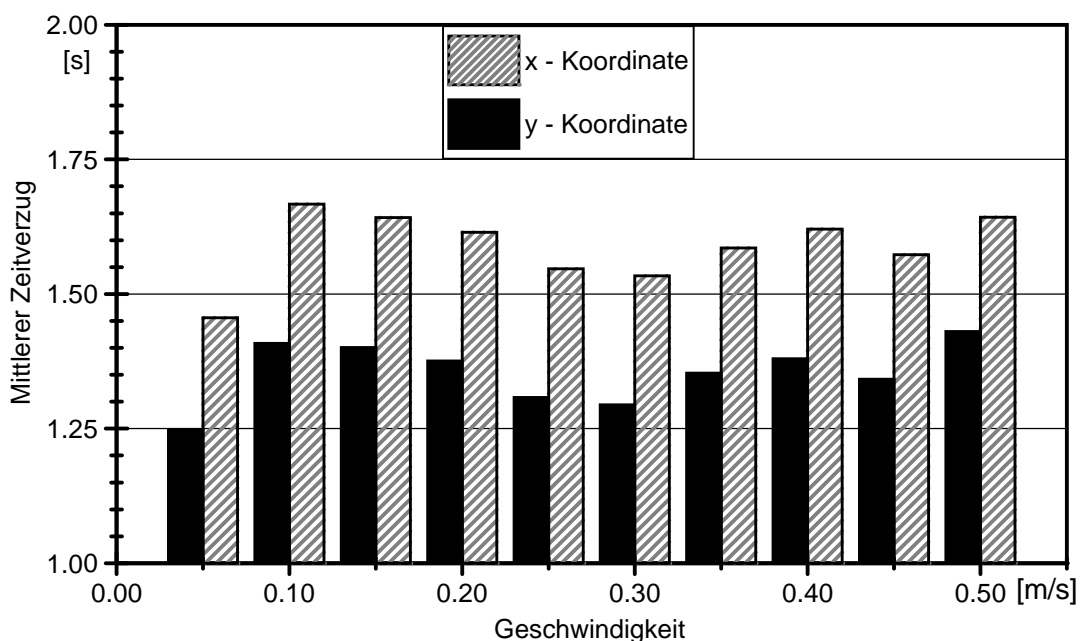
Die Verzugszeiten der  $y$  - Koordinaten in Abbildung 32 sind Mittelwerte des Versuchs, bei dem das Prisma entlang der  $y$  - Achse bewegt wurde. Sie wurden daher zum größten Teil mit Hilfe der Winkelmessung ermittelt, denn die Entfernung zum Prisma blieb während der Fahrt weitgehend gleich, aber der gemessene Horizontalwinkel änderte sich.



**Abb. 32:** Mittlerer Zeitverzug der  $y$  - Koordinaten und dessen Spannweiten bei bewegtem Prisma

Die Mittelwerte liegen alle, außer dem Wert für  $0,1 \text{ ms}^{-1}$ , unter  $1,5 \text{ s}$  Zeitverzug. Die Abweichung der Mittelwerte bewegt sich im Bereich von  $0,25 \text{ s}$ . Die Spannweiten der Messwerte befinden sich in einem größeren Bereich von  $0,75 \text{ s}$ . Die Mittelwerte des Zeitverzuges liegen aber immer niedriger als der Wert der entsprechenden  $x$  - Koordinate.

Dies zeigt sich ganz deutlich in der Abbildung 33, der die Werte der Diagonalfahrt zugrunde liegen. In diesem Fall ändern sich sowohl x - wie auch y - Koordinate. Bei diesem Versuch beträgt der mittlere Zeitverzug der x - Koordinate 1,6 s und ist um 0,2 s höher als der Mittelwert von 1,4 der y - Koordinate. Das bedeutet, dass die Entfernungsmessung und die Winkelmessung nicht zeitsynchron sind, sondern hintereinander von dem System durchgeführt werden. Die Entfernungsmessung erfolgt nach dem Phasenvergleichsverfahren (vgl. Seite 44) , bei der eine bestimmte Anzahl von Messungen gemittelt werden muß, damit die angestrebte Genauigkeit erzielt werden kann. Mit steigender Genauigkeit nimmt auch die Zeitdauer der Messung zu. Für den Fast Tracking Mode beträgt er 0,4 s für das Mittelwertsverfahren jedoch 4 Minuten. Die Winkel können hingegen sehr schnell abgegriffen werden und so kommt es, dass ein Wert "aktueller" ist als der andere.



**Abb. 33:** Mittlerer Zeitverzug und dessen Spannweiten der x - und y - Koordinaten bei diagonal bewegtem Prisma



### 4.3 Schlussfolgerungen aus dem Messverhalten der Ortungssysteme

Es war Ziel der Voruntersuchung eine Auswahl zwischen den Ortungssystemen zu treffen, und genauere Kenntnisse über ihr Messverhalten, die für die Steuerung bedeutsam sind, zu erhalten.

#### 4.3.1 Messgenauigkeit des Lasertriangulationssystems „Capsy“

Das Triangulationssystem arbeitet an einem festen Standpunkt sehr zuverlässig und hochgenau. Jedoch verlangt die Einrichtung des Gerätes besondere Sorgfalt, da sie die Genauigkeit der davon abhängenden Messungen maßgeblich beeinflusst. Im Einrichtungsvorgang wird die Position der Targets errechnet. Je genauer diese Messung ist, desto „stimmiger“ wird die Positionsbestimmung beim späteren Messvorgang. Die Positionsbestimmung erfolgt nach der Methode „Rückwärtschnitt“, nach der aus drei Landmarkenpositionen und den zugehörigen Winkeln die x - und y - Koordinate berechnet werden. Laut Hersteller verwendet das Gerät unterschiedliche Targets für die Berechnung der beiden Koordinaten, wenn sie für die eine oder die andere Koordinate in einem günstigeren Winkel stehen. Bei ungenauen Targetpositionen kann es zu einem sprunghaften Wechsel der Position kommen, wenn andere Targets zur Positionsbestimmung verwendet werden. Die Einzelmessungen treten dann in Gruppen verteilt, besonders im Randbereich des Feldes, auf dem Versuchsfeld auf. Diese Ergebnisse stimmen weitgehend mit der Veröffentlichung von HELBACH und SCHLEMMER (1994) überein, wenn dort auch aufgrund der kürzeren Distanzen höhere Genauigkeiten erreicht werden konnten.

Es sollten ebenfalls so viele Targets wie möglich benutzt werden, damit eine Redundanz besteht, falls die Messkonstellation „Gefährlicher Kreis“ auftritt. Dies setzt dem Ortungssystem „Capsy“ Grenzen, da für ein Feld nur 20 Targets zur Verfügung stehen und andererseits die Reichweite 50 m beträgt. Durch die Reichweite und die Anzahl der Targets ist die Feldgröße auf ca. 100 m x 50 m begrenzt. Andererseits sind die Targets im Vorgewendebereich für die Arbeiten mit dem Schlepper und ausladenden Geräten, wie z. B. einer Pflanzmaschine, sehr

hinderlich. Es wurde dadurch ein erhöhter Aufwand an Rangierbewegungen notwendig.

Der für die Referenzmessungen verwendete Theodolit war in seiner Genauigkeit in den Bereichen des Versuchsfeldes, an denen die Winkel am Messpunkt zu den Referenzpunkten sehr spitz zulaufen, also "schleifend" sind, unterlegen. Um eine genauere Messung zu erzielen ist eine Positionsaufnahme von mehreren günstigen Standorten notwendig.

Insgesamt konnten mit diesem System im statischen Betrieb weitaus höhere Genauigkeiten als bei SHMULEVICH et al. (1989) und MIZRACH et al. (1994) erreicht werden.

Bei Messungen des sich bewegenden Gerätes, das in seiner Konzeption für stationären Betrieb entwickelt wurde, zeigen sich die Schwachstellen. In den Versuchen bestätigte sich das abweichende Messverhalten. Aufgrund des langen Messaufnahmezeitraumes von 1/3 s driftet das Messergebnis in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit.

Ein ähnliches Problem sind die Rotation des Gerätes während des Messvorgangs und Störungen des Gleichlaufs des Antriebsmotors, die eine Fehlmessung der einzelnen Winkel bewirkt. Je höher diese Geschwindigkeitsänderungen sind desto größer ist der Versatz.

Der Versuchsaufbau in dem Gewächshaus für die Messungen mit bewegtem Messgerät fand unter kurzen Distanzen zu den Targets statt, so dass die Auswirkungen des Winkelmessfehlers auf die Positionsbestimmung gering blieben. Auf dem Versuchsfeld sind noch stärkere Effekte zu erwarten, da dort die ausgewählte Targetkonstellation sich immer wieder ändert, und der Fehler somit auch von der Position „Capsys“ auf dem Feld abhängt.

Für Messungen unter dynamischen Bedingungen war das Gerät in seiner bestehenden Ausstattung und Software nur sehr bedingt geeignet. Zwar wurde das Gerät auch zur Steuerung von Mauerrobotern eingesetzt, jedoch findet hierbei die

Positionierung des Roboters vor dem Arbeitsvorgang statt (PRITSCHOW 1996). Das Gerät misst zuverlässig, solange es sich in Ruhe befindet. Je höher die Geschwindigkeit des Fahrzeugs, desto größer ist der Messfehler. Ein Zeitnachlauf der Messwerte, der für die Steuerung von Bedeutung ist, konnte mit dem Versuchsstand nicht untersucht werden.

#### 4.3.2 Messgenauigkeit der Totalstation „Geodimeter 4000“

Die Messgenauigkeit im Trackingmodus erlaubt eine Ortung unter statischen Bedingungen des Zielkörpers mit der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit von  $\pm 15$  mm. Das Abschneiden der Messwerte bewirkt eine Verschiebung der Messwerte um 5 mm. Hier bestünde daher noch die Möglichkeit, die Genauigkeit der Steuerung zu verbessern, wenn das besondere Messverhalten im Fast Tracking Modus mit dem Aufschlag von 5 mm berücksichtigt wird. Höhere Genauigkeiten als bei „Capsy“ sind mit dem „Geodimeter 4000“ nur in den zeitaufwändigeren Standardmodus und Präzisionsmodus möglich.

Die Feldgröße ist bei dem „Geodimeter 4000“ weniger eingeschränkt. Die Reichweite des Gerätes beträgt mit der benutzten Ausstattung 300 m. Mit anderen Prismen sind bis zu 1500 m Messbereich möglich.

Für die Steuerung des PVR ist jedoch das Echtzeitverhalten des Ortungssystems wichtig. In den Versuchen zur dynamischen Genauigkeit wurde das bewegte Ziel verfolgt, und dessen Position gemessen. Die Messwerte haben dabei einen Zeitnachlauf von ca. 1,5 s, wenn sie im Rechner eintreffen. Das entspricht bei einer Messrate von 2 Hz drei Messzyklen, die in dieser Zeit durchlaufen werden. Für die Fahrsteuerung des PVR ist es erforderlich, den Zeitnachlauf vorzuhalten, da die in dem Zeitnachlauf zurückgelegte Strecke des PVR bei einer Geschwindigkeit von  $160 \text{ m h}^{-1}$  ca. 6 cm beträgt.

Bei höheren Geschwindigkeiten des Fahrzeugs ist dann auch zu berücksichtigen, dass Winkelmessung und Streckenmessung nicht zeitgleich sind. Der Fehler der dadurch auftritt, ist direkt proportional zur Geschwindigkeit des Zielkörpers und

abhängig von der Bewegungsrichtung in Bezug auf die Sichtachse „*Geodimeter 4000*“ - Zielkörper. Der größtmögliche Fehler besteht bei einem Winkel von 50 gon (= 45°).

#### 4.3.3 Fazit

Die Messgenauigkeiten des Lasertriangulationssystems „*Capsy*“ und des zielverfolgenden Tachymeters sind im statischen Einsatz vergleichbar. Jedoch ist die Genauigkeit von „*Capsy*“ auf dem ganzen Feld heterogen. Es kann aufgrund der wechselnden Auswahl von Targets zu starken Sprüngen des Messwertes kommen.

Auch im dynamischen Messverhalten sind die Abweichungen in ihrer Größe ähnlich. Aufgrund des unterschiedlichen Versuchsaufbaus lassen sich aus den Ergebnissen keine Unterschiede der Messsysteme ableiten. Aus dem Funktionsprinzip von „*Capsy*“ ergibt sich jedoch, dass der Messfehler je nach Auswahl der Targets sehr unterschiedlich sein kann, und daher rechnerisch nur sehr schwer zu korrigieren ist. Da das Gerät vom Hersteller nicht mehr angeboten und unterstützt wurde, war keine Lösung dieses Messproblems zu erwarten.

Der dynamische Messfehler des „*Geodimeter 4000*“ ist dem unterschiedlichen Beobachtungszeitpunkt von Winkelmessung und Streckenmessung zuzuordnen. Dieser Fehler lässt sich rechnerisch einfach korrigieren. Für die Nutzung am PVR ist dies wegen der geringen Geschwindigkeit nicht erforderlich. Zusätzlich bietet das „*Geodimeter 4000*“ noch die Höhenkoordinate des Zielkörpers und ermöglicht so auch die Höhenführung des Arbeitsgerätes. Daher wurde das „*Geodimeter 4000*“ als Ortungssystem für den Portalversuchsrahmen ausgewählt.

## 5 Material und Methoden

Der Produktionsprozess einer gärtnerischen Freilandkultur ist bestimmt durch seine Eingangsgrößen. Im Freiland sind einige dieser Größen, wie Licht, Temperatur und CO<sub>2</sub> - Versorgung nicht steuerbar. Die Bodenfeuchte und die Düngung sind nur bei einem Defizit regelbar.

Der Portalversuchsrahmen ist das Versuchsgerät für die rechnergestützte einzel-pflanzenorientierte Prozessführung. Er gliedert sich in folgende Komponenten auf:

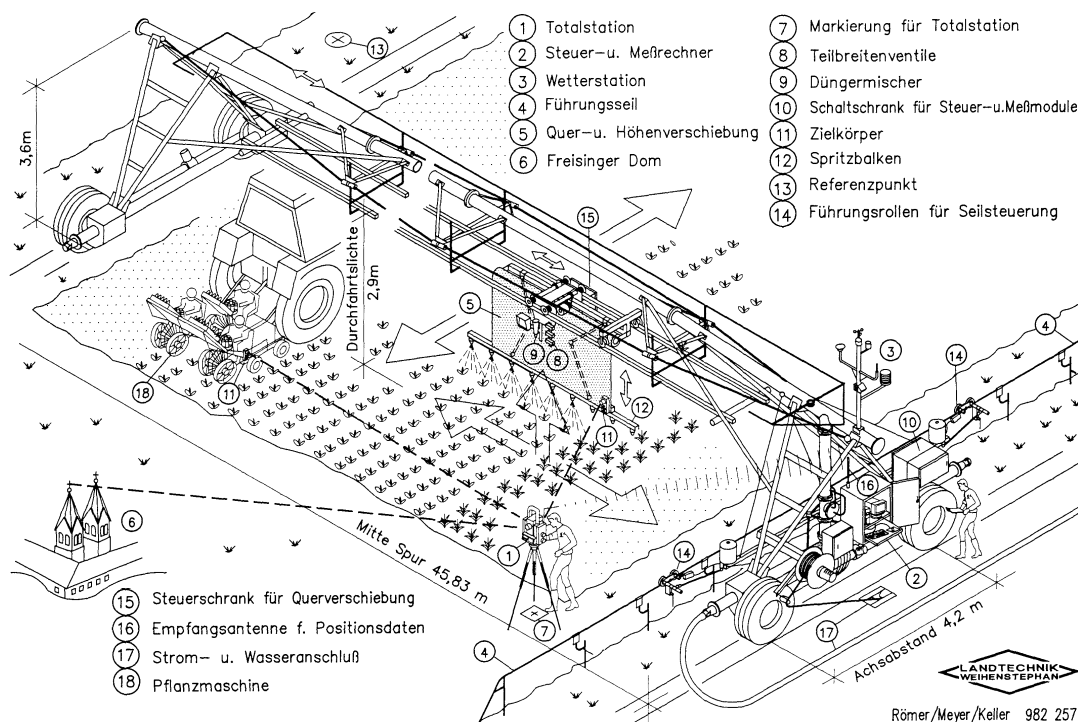
- Ausführungskomponenten
  - Düngung
  - Bewässerung
  - Pflanzenschutz
- Datenerfassung
  - Positionierung
  - Klimadatenerfassung
- Prozessführungskomponenten
  - Steuerungsprogramm
  - Entscheidungsmodul mit Schnittstelle zu:
    - Bodenfeuchtemodell
    - Düngemodell (noch nicht realisiert)
    - Pflanzenschutzprognose(noch nicht realisiert)

### 5.1 Die Komponenten des Portalversuchsrahmens

Der Portalversuchrahmen bezeichnet ein Gesamtsystem mit Klimadatenerfassung, Ortungssystem „*Geodimeter 4000*“, dem ausführenden Gerät, das aus Linearregner und Querverschiebung mit Spritzbalken zur Durchführung der Behandlungsmaßnahmen besteht, und einem Prozessrechner, der einerseits die Schnittstelle zum Bediener darstellt und andererseits die Datenerfassung übernimmt sowie Einsatzentscheidungen erarbeitet.

### 5.1.1 Ausführende Komponenten

Die ausführenden Funktionen des Versuchsgertes sind Bewässerung Düngung und Pflanzenschutz. In der Praxis des Freilandgartenbaues werden zur Bewässerung einerseits mobile, seltener stationäre Beregnungsmaschinen mit Kreisregnern oder Düsenwagen mit sehr geringen Vorfahrtgeschwindigkeiten eingesetzt, andererseits werden zur Blattdüngung und zum Pflanzenschutz Feldspritzen mit Arbeitsgeschwindigkeiten ab ca. 4 km/h und höher genutzt. Der Grund hierfür sind die sehr unterschiedlichen Ausbringmengen, beim Pflanzenschutz von 100 - 1500 l/ha und bei der Bewässerung von 40 - 100 m<sup>3</sup>/ha.



**Abb. 34:** Der Portalversuchsrahmen (PVR)

#### 5.1.1.1 Der Linearregner

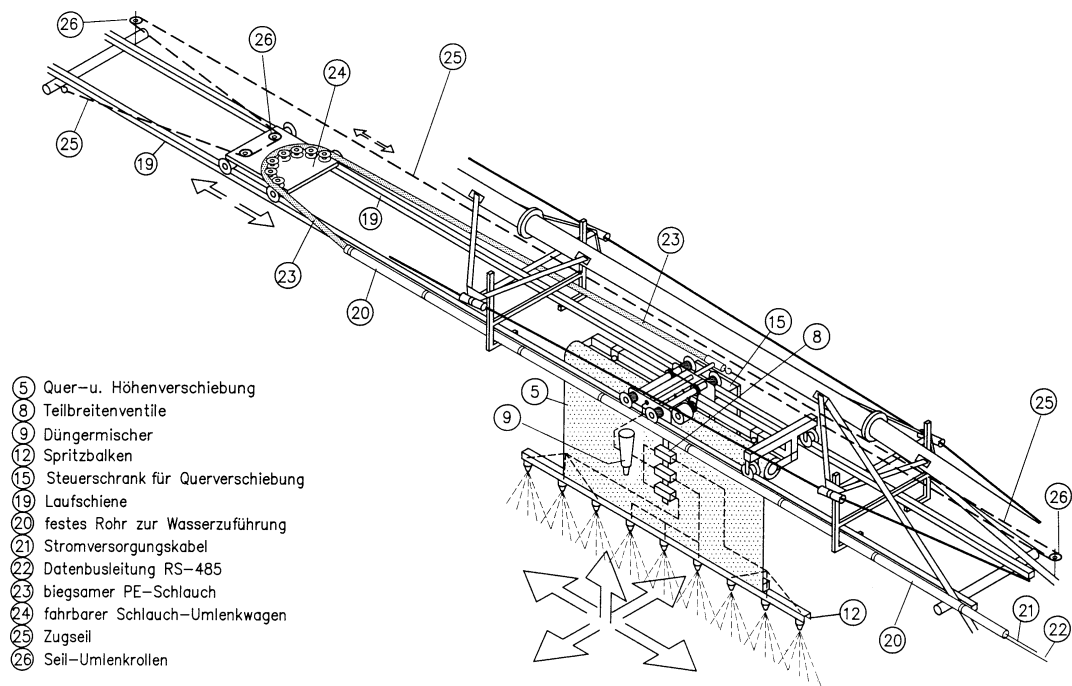
Die Grundkomponente ist ein 46 m breiter Span eines Bauer Linearregners, der das Versuchsfeld in Nord - Südrichtung überspannt. Die Durchgangshöhe beträgt 3,8 m, so dass ein Geräteträger darunter hindurch fahren kann. Die Fahrtürme im Norden und im Süden werden einzeln von 380 V Elektromotoren mit jeweils

0,7 kW angetrieben. Am nördlichen Feldrand ist ein Drahtseil gespannt, mit dessen Hilfe der Linearregner in seiner Spur geführt wird. Die Fahrgeschwindigkeit des PVR in Längsrichtung (y - Achse) ist der Aufgabe Beregnen angepasst und beträgt ca. 0,046 m/s. Das Fahrzeug wird in der Spur gehalten, indem die Antriebe der Fahrtürme einzeln an oder abgeschaltet werden, und so wird die Fahrtrichtung des Versuchsgeräts verändert. Dieser Vorgang läuft rein mechanisch ohne Eingriff des Prozessrechners ab.

An dem nördlichen Fahrturm sind drei Schaltschränke montiert, in denen die elektronischen Komponenten untergebracht sind. Dazu gehört Prozessrechner, der mit Hilfe eines Schnittstellenkonverters einen RS 485 Bus betreibt und damit mit den Mess- und Steuermodulen als Master kommuniziert. Die Messmodule besitzen eine Eigenintelligenz in Form von Programmen, die die Sensorenmesswerte in Klimawerte umrechnen und als ASCII Telegramm an den Prozessrechner nach dessen Anfrage übergeben. Die Steuermodule schalten über eigene Relais die einzelnen Antriebe und die Magnetventile der gesamten Wasserversorgung des Portalversuchsrahmens an. Sie bieten zusätzlich eine „Watchdog - Funktion“, die bei Kommunikationsabbruch mit dem Prozessrechner alle Relais abschaltet.

#### 5.1.1.2 Querverschiebung

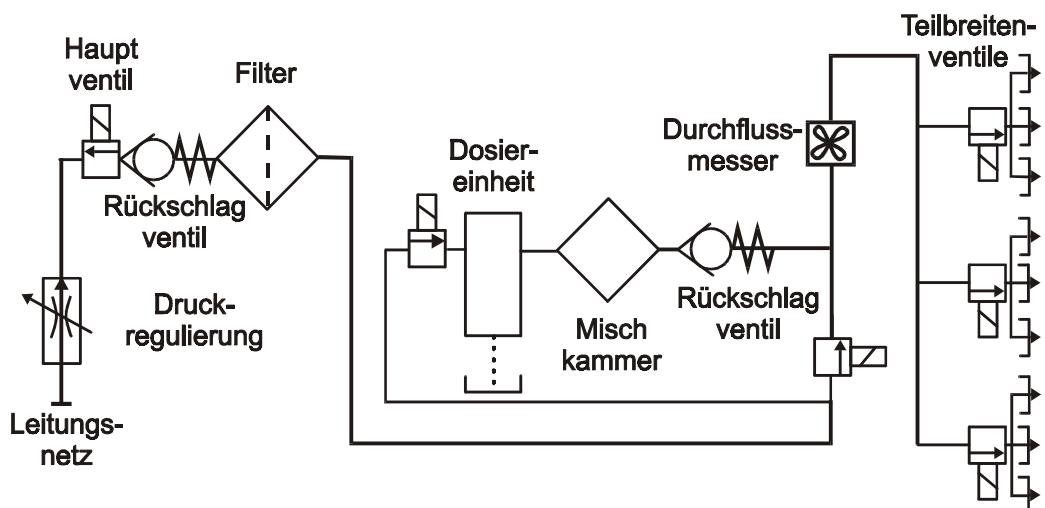
Zur Positionierung der Arbeitsgeräte in Querrichtung (x-Achse) ist in den Regner eine Querverschiebung eingebaut. Sie besteht aus einem Gießwagenmodul mit zwei Laufschiene, die unter der Quertraverse des Linearregners aufgehängt sind, und einem Fahrwagen, der mit einem 24 V Motor über die Laufrollen angetrieben wird. An dem Fahrwagen ist ein Spritzbalken montiert, der in der Höhe elektrisch verstellbar ist. Der Spritzbalken ist in drei Teilbreiten von jeweils 1,5 m Breite unterteilt. Die Teilbreiten werden mit Magnetventilen elektrisch geschaltet. Die Wasserversorgung erfolgt mit einem PE-Schlauch, in dem auch das Datenkabel des RS 485 Busses und das Stromkabel mit 240 V verlegt sind.



Römer/Meyer/Keller 982 270

**Abb. 35:** Modul zur Querverschiebung am PVR

Auf der südlichen Seite der Querverschiebung befindet sich ein Düngedosiergerät Dosatron DI 16, mit dessen Hilfe Pflanzenschutzmittel und Düngemittel dem Wasserstrom zugemischt werden können.



**Abb. 36:** Schaltschema des Wasserflusses am Gießwagenmodul



Der PVR arbeitet ähnlich dem aus der Computerdruckertechnik bekannten Plotter. Der Linearegner bewegt sich längs der y - Achse des Koordinatensystems des „Geodimeter 4000“, die Querverschiebung entlang der x - Achse, und mit der Höhenführung bewegt sich der Spritzbalken in z - Richtung. Auf diese Weise kann der Portalversuchsrahmen jeden Ort auf dem Versuchsfeld ansteuern und bearbeiten.

#### 5.1.1.3 Antriebe des PVR

Die Bewegung in y-Richtung erfolgt durch die Antriebe des Linearregners. An den Fahrtürmen der Nord- und Südseite befindet sich jeweils ein 0,7 kW Elektromotor. Die Antriebsenergie wird mit zwei Getrieben mit einer Gesamtübersetzung von 1:50 auf beide Räder übertragen. Das erste Getriebe befindet sich in der Mitte des horizontalen Fahrturmrohres und treibt die beiden Wellen an, die in die Getriebe am Ausfallende münden. Die Räder sind direkt an diese Getriebe montiert.

Die Querverschiebung in x - Richtung wird von einem 24 V Motor angetrieben. Die Kraft wird mit Keilriemen auf die beiden Wellen der Laufrollen des Gießwagenmoduls übertragen. Die Querverschiebung ist ein eigenständiges Modul, an dem ein höhenverstellbarer Spritzrahmen mit 3 Teilbreiten installiert ist.

Der Spritzbalken ist an einer nach unten aufgehängten Markise montiert. Zwei Federarme drücken den Spritzbalken in Richtung Boden und das Markisentuch wirkt den Federarmen entgegen und hält ihn auf Höhe. Ein Rollenmotor zieht das Tuch ein oder gibt es frei und verändert somit die Höhe (z - Koordinate) des Spritzbalkens.

Die Teilbreiten können von dem Rechner getrennt voneinander angesteuert werden. Eine Teilbreite überdeckt ein Beet mit 1,5 m Breite. Für Düngung und Pflanzenschutz können die entsprechenden Mittel mit Hilfe einer Dosieranlage zugemischt werden. Die Anpassung der Wirkstoffmengen, die aus gebracht werden, kann einerseits mit Hilfe des Drucks, zum zweiten durch die Wahl der

Düsen, oder zum dritten durch die Konzentration der Stammlösung eingestellt werden.

Da die Fahrgeschwindigkeit des Portalversuchsrahmens mit 160 m/h sehr gering ist erfordern Aufwandmengen von 1000 l/ha einen Durchfluss an der einzelnen Düse von 0,13 l/min.

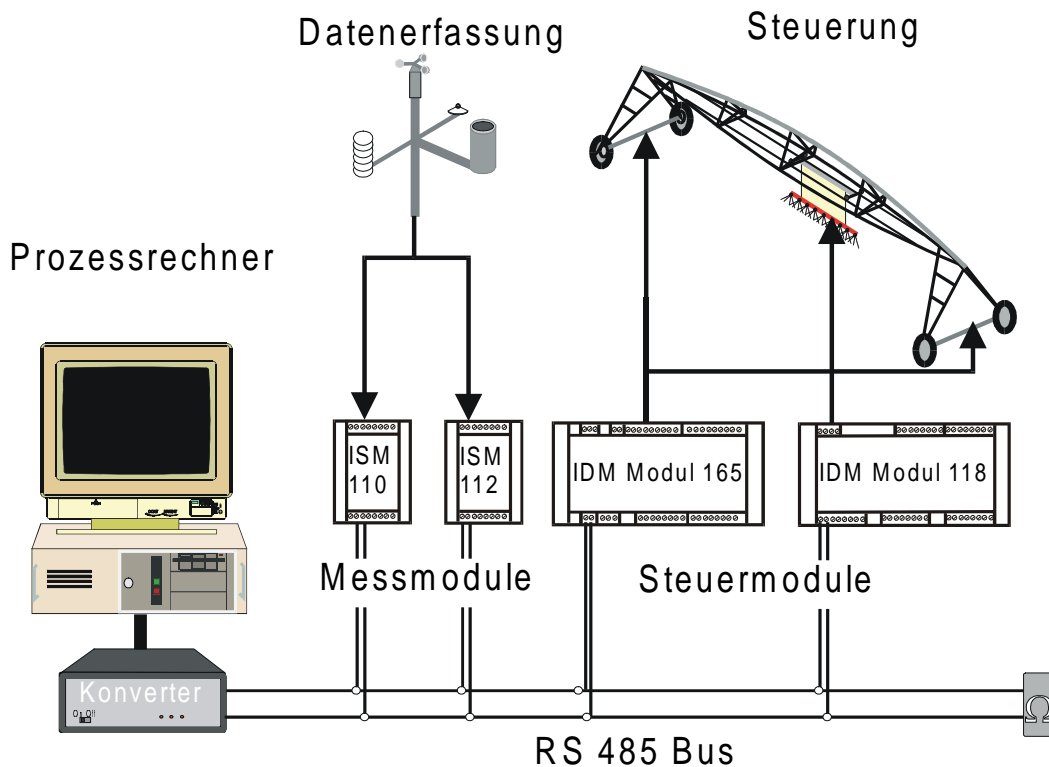
**Tabelle 7:** Spritzdüsen am PVR

Druck	Typ		
	652.187	652.247	652.407
[bar]	$\dot{V}$ [l/min]		
0,5			0,5
1	0,06	0,12	0,71
2	0,08	0,16	1
3	0,1	0,2	1,23
5	0,13	0,26	1,58
7	0,15	0,3	1,87
10	0,18	0,36	2,24

### 5.1.2 Datenerfassung und Steuerung

Die Datenerfassung und die Steuerung erfolgen mit einem Prozessrechner Pentium 60 in einem Industriegehäuse im 19" Format und der Schutzklasse IP 55 unter dem Betriebssystem „MSDOS 6.22" und einem unter Turbo Pascal 7.0 erstellten Steuerprogramm. Die Kommunikation mit dem Ortungssystem wird über die serielle Schnittstelle COM 1 zu der Tastatureinheit des „*Geodimeter 4000*“ hergestellt. An der Ostseite des nördlichen Fahrturmes befindet sich eine Festantenne, die dem Funkmodem zum Datenaustausch mit der Totalstation dient.

An COM2 ist der Konverter zum Betrieb des RS 485 Busses, auf dem der Datenverkehr zu den Mess- und Steuermodulen der Firma Meilhaus abläuft, angeschlossen. Die Module ISM110 und 112 (ISM: Intelligentes Sensor Modul) dienen zur Klimadatenerfassung. Die Module IDM 165 und IDM 118 (IDM Intelligentes Datenmodul) sind mit Steuerrelais ausgestattet und steuern den



**Abb. 37:** Datenerfassung und Steuerung des Prozessrechners am PVR

Linearregner und die Querverschiebung. Der Datentransfer wird mit einer Baudrate von 19200 Bits/s im Master - Slave System durchgeführt, das heißt, der Prozessrechner schickt ein Abfragetelegramm und das angesprochene Modul antwortet. Zum Ansteuern der Relais überträgt der Rechner eine Zahl zwischen 0 und 255, ein Byte. Jedes Bit dieses Bytes steht für ein Relais, das dementsprechend geschaltet ist. Das Modul antwortet mit einem „acknowledge“ Telegramm, falls die Übertragung fehlerfrei war und das Byte gesetzt wurde.

Die Stromversorgung des Rechners und der Module ist unabhängig von der Stromversorgung der Antriebe des Linearregners.

### 5.1.2.1 Klimadatenerfassung

An der Spitze des nördlichen Fahrturmes in 4 m Höhe befindet sich der Mast mit den Klimasensoren. Die Klimasensoren werden mit ISM 110 und 112 Modulen der Firma Meilhaus ausgewertet. Die Module besitzen einen internen Speicher, das FlashRom, in die Umrechnungsprogramme zur vorherigen Verarbeitung der Sensormesswerte zu Klimadaten geladen werden können die dann als ASCII-Daten an den Rechner übermittelt werden.

Zur Erfassung der Einstrahlung wird ein Pyranometer CM 11 von Kipp & Zoonen eingesetzt. In dem Sensormodul werden die Messwerte kontinuierlich aufsummiert und jede Stunde von dem Prozessrechner abgefragt. Danach setzt der Prozessrechner den Integrationskanal auf 0 zurück. Aus der in dieser Zeit ermittelten Summe wird der Mittelwert der Einstrahlung berechnet.

Die Windgeschwindigkeit wird mit einem Schalenanemometer der Firma Thies gemessen. Die Umdrehungen werden von einem optoelektronischen Abnehmer erfasst, so dass die Anlaufgeschwindigkeit des Windmessers sehr gering ist und geringe Windgeschwindigkeiten ab 0,3 m/s gemessen werden können. Die eigentliche Messgröße ist hierbei der Windweg, der jeweils zur Stunde in eine mittlere Windgeschwindigkeit umgerechnet und abgespeichert wird.

Temperatur und Luftfeuchte werden mit einem kombinierten Sensor, dem Hygro - Thermo - Geber von Thies erfasst. Die Temperatur wird mit einem Pt 100 über eine 4 - Leiter Widerstandsmessung bestimmt. Die Luftfeuchte wird mit einem kapazitiven Sensor und einer Versorgungsspannung von 24 V gemessen. Das Ausgangssignal ist eine Spannung von 0 - 1 V, wobei ein 1 V einer relativen Luftfeuchte von 100% entspricht. Die Sensoren sind in einem Kunststofflamellengehäuse ohne Zwangsbelüftung untergebracht.

Der Niederschlagsgeber hat eine 200 cm<sup>2</sup> große Auffangfläche, und die Menge wird mit einer Kippwaage und einem Reedkontakt erfasst. Die Wände des Niederschlagsmessers sind beheizbar, so dass auch die Winterfeuchte erfasst werden kann.

### 5.1.2.2 Positionsdatenerfassung

Die Kommunikation des Prozessrechners mit dem „*Geodimeter 4000*“ erfolgt auf COM 1 mit der Tastatureinheit. Vor Beginn der Messungen wird die Feststation auf „Remote“ Betrieb geschaltet. Dabei fragt die Feststation einen Horizontalwinkelbereich ab, innerhalb dessen sie das Zielprisma suchen soll, falls es die Verbindung verloren gegangen ist. Die Station kalibriert sich auf das Infrarotsignal des Zielprismas, und verfolgt dieses automatisch im weiteren Verlauf der Messung. Im Gegensatz zu der Kommunikation auf dem RS 485 Bus ist der Prozessrechner in der Rolle des Slave und die Tastatureinheit ist der Master. Denn sie sendet kontinuierlich Positionsdaten. Der Erhalt muss nicht vom Prozessrechner quittiert werden, damit das „*Geodimeter 4000*“ weiter Daten sendet. Die Kommunikation erfolgt also nur in eine Richtung.

Die Tastatureinheit erhält ihre Daten über das Funkmodem von der Feststation, die sich im „Remote“ Modus befindet. Die Feststation wird allein über die Tastatureinheit bedient. Eingaben über die Tastatur an der Feststation sind nicht möglich, sie kann dort nur abgeschaltet werden. Zur Ortung des Portalversuchsrahmens befindet sich das Zielprisma direkt am Spritzbalken.

## 5.2 Ermittlung der Pflanzenposition

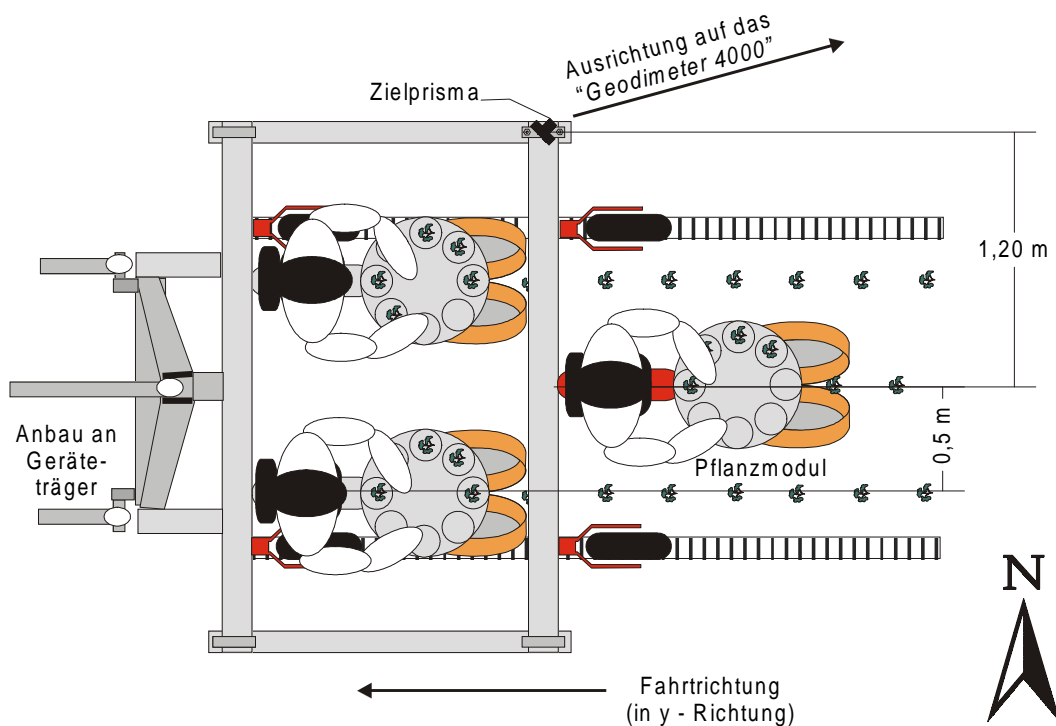
Das Steuerungssystem braucht zur Führung des Spritzbalkens eine Datengrundlage für die Pflanzenposition. Hierzu ist die Ermittlung der Position der Einzelpflanze notwendig, um eine einzelpflanzenorientierte Kulturführung zu ermöglichen. Im Moment stehen zur Erfassung der Pflanzenposition keine maschinellen Hilfsmittel zur Verfügung, daher wurden die Daten von Hand erfasst. Da dieses Verfahren jedoch nur zeitaufwändig zu handhaben ist, wurde auch der Verlauf der Pflanzfahrten erfasst um eine rationelle Methode der Datenerhebung für die Steuerung zu entwickeln.

### 5.2.1 Einmessen der Einzelpflanzen

Die Position der Einzelpflanzen wurde von 2 Personen mit dem „Geodimeter 4000“ im Trackingmodus (Auflösung: 1cm) eingemessen. Eine Person hielt den Zielkörper 1 cm über dem Zentrum der Pflanze. Als Zentrum wurde bei stehenden Pflanzen der Stängel und der Vegetationspunkt betrachtet, bei liegenden der Austrittsort des Stängels aus dem Boden. Die zweite Person bediente das Terminal der Fernbedienung des „Geodimeter 4000“ und löste die Übermittlung der Daten an den Prozessrechner aus (Registriermodus). Es entspricht daher jeder Einzelwert in der Datei einer Pflanzenposition.

### 5.2.2 Einmessen der Pflanzfahrt

Für die Pflanzung wurde eine Längen - Pflanzmaschine mit 3 Modulen verwendet. Die Pflanzmaschine war an einen Fendt Geräteträger (365GT) im Heckanbau montiert, und wurde allein vom Schlepperfahrer auf dem Versuchsfeld gesteuert. Auf der in Fahrtrichtung hinteren rechten Ecke der Pflanzmaschine war das



**Abb. 38:** Messung der Pflanzfahrt

Zielprisma angebracht. Die Pflanzung wurde immer von Ost nach West durchgeführt, damit das Ziel nicht vom Schlepper oder Gerätebauteilen verdeckt wurde und eine ständige Sichtverbindung zwischen Prisma und Zielkörper gewährleistet war. Die Messdaten des „*Geodimeter 4000*“ wurden kontinuierlich (Slave-Modus) an den Prozessrechner übergeben und dort abgespeichert.

War ein Beet gepflanzt, wurde das Gerät ausgehoben, und der Schlepper fuhr wieder zum östlichen Ende des Feldes. Das „*Geodimeter 4000*“ wurde in dieser Zeit manuell auf die Startposition geführt, da die Sicht auf das Zielprisma durch das Gerät abgedeckt war. Sobald der Schlepper am Feldanfang ausgerichtet war und das „*Geodimeter 4000*“ das Zielprisma wieder erfasst hatte, nahm es die automatische Zielverfolgung wieder auf.

Nach Beendigung der Pflanzung wurden die Daten mit Hilfe eines Turbo - Pascal Programms zu Reihendateien verarbeitet. Das Programm sucht die Messdaten nach Werten der z - Koordinate unterhalb einer Grenze ab, für die angenommen wurde, dass die Pflanzmaschine abgesenkt war. Dies zeigte den Beginn einer neuen Reihe an. Da das „*Geodimeter 4000*“ in regelmäßigen Abständen eine Eigenkalibrierung durchführt, stehen für einen Zeitraum von ca. 4 - 5 s keine Positionsdaten zur Verfügung, dennoch schickt das „*Geodimeter 4000*“ Daten, die mit dem Infolabel “3“ versehen sind. Diese Daten werden ebenfalls von dem Turbo - Pascal - Programm eliminiert. Die Reihen werden dann unter eigenem Namen abgespeichert.

### 5.3 Prozessführung

Die Prozessführung ist der übergeordnete Programmteil, der die Schnittstelle zu den anderen Programmteilen zur Verfügung stellt. Die Teilbereiche des Programms entsprechend der Abbildung 39 sind:

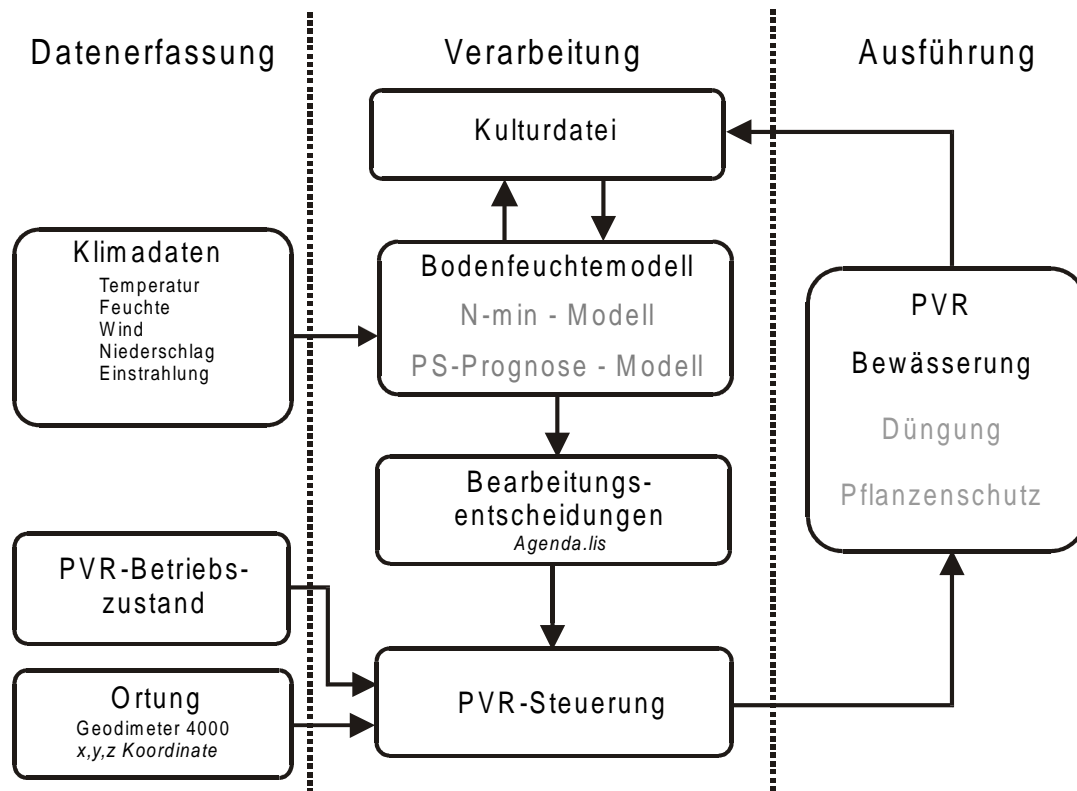
- Datenerfassung
  - Ortung
  - Klimadaten

- 
- Entscheidungsmodelle
    - Bewässerung
    - Düngung (geplant)
    - Pflanzenschutz (geplant)
  - Ausführung
    - Fahrsteuerung
    - Teilbreitenverwaltung

Das Hauptprogramm ist als Endlosschleife konzipiert. Das Programm kann durch Drücken der „Esc“ Taste beendet werden. Vorher werden jedoch alle Steuervorgänge abgebrochen und der Spritzbalken nach oben gefahren.

Während des Durchlaufs der Schleife werden die einzelnen Teilbereiche abgefragt und wenn notwendig bearbeitet. Bestimmte Vorgänge sind unter bestimmten Bedingungen nicht möglich. So kann das Fahrsteuerungsprogramm nicht aktiv werden, wenn das Ortungssystem nicht angeschlossen und aktiv ist. Ebenfalls wird die Bodenfeuchte nicht berechnet, solange die Fahrsteuerung aktiv ist, da es bei intensiven Berechnungsvorgängen zu Verzögerungen der Steuerungsbewegungen kommen kann.





**Abb. 39:** Funktionen der Prozessführung

Die Behandlungsanweisungen werden nicht direkt im Hauptprogramm gesetzt sondern in die Datei „Agenda.lis“ auf die Festplatte geschrieben. Diese Datei ist somit die Schnittstelle zwischen Bewässerungsmodul und der Kulturführung. Dies hat den Vorteil, das bei Unterbrechungen des Programms der notwendige Behandlungsbefehl dennoch erhalten bleibt. Andererseits können auch andere Programme in die Datei Behandlungsbefehle eintragen, die dann von der Kulturführung abgearbeitet werden.

### 5.3.1 Organisation des Quellcodes

Das Hauptprogramm greift auf mehrere „Units“ zu. Dies sind Programmbibliotheken in denen weitere Unterprogramme vereinbart und schon vorkompiliert sind. Die Units enthalten Prozeduren und Funktionen die jeweils einem bestimmten Aufgabenbereich wie z. B. Datenerfassung, Ortung, Prozessführung, und Steuerung zugeordnet sind.

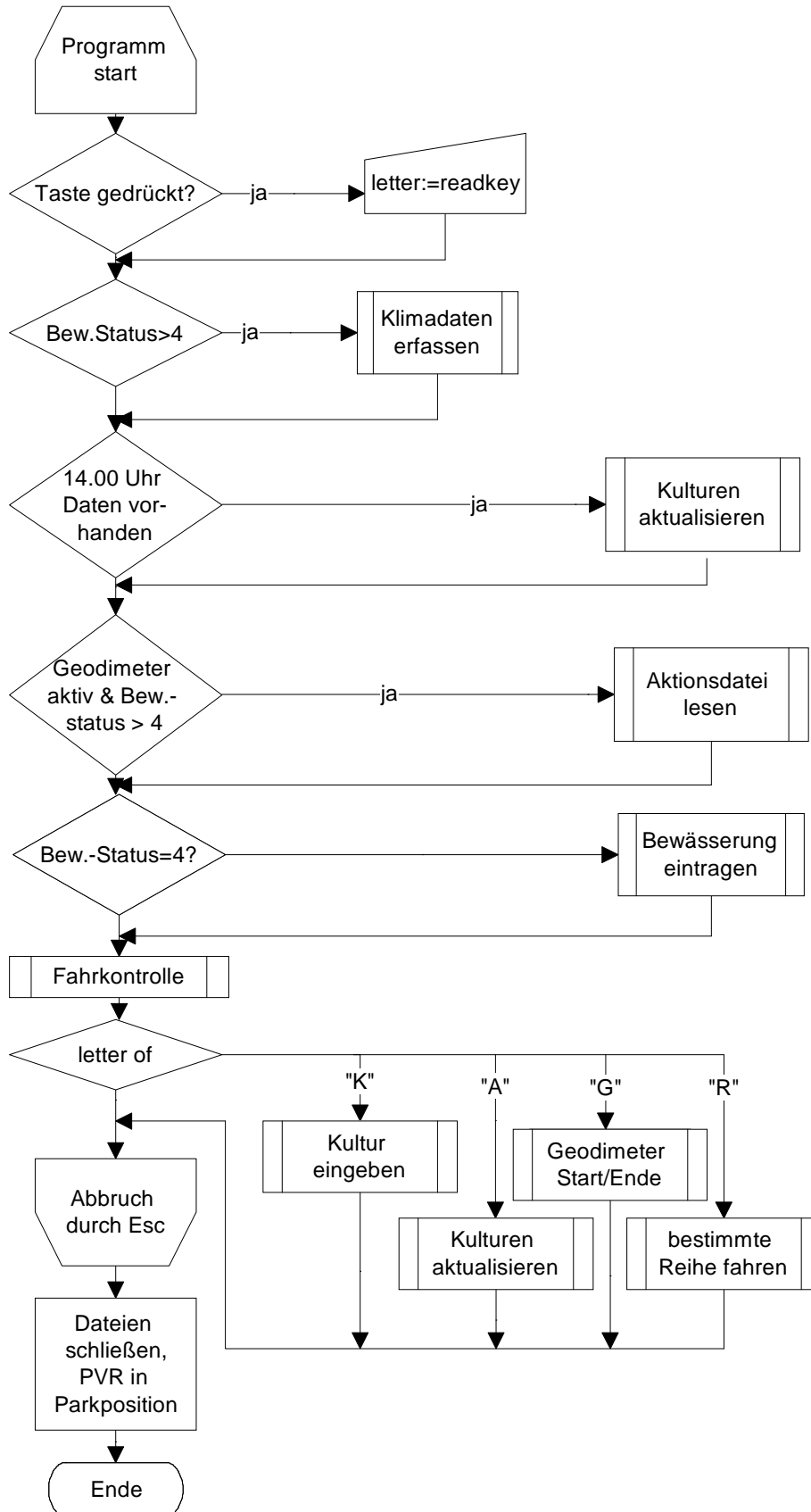


Abb. 40: Flussdiagramm des Hauptprogrammes

### 5.3.1.1 Die Programmbibliothek IDM.Pas

In der Bibliothek Idm.pas sind alle Befehle zur Kommunikation mit den IDM- und ISM-Modulen zur Klimadatenerfassung und zur Ansteuerung des Linearregners und der Querverschiebung zusammengefasst. Hierzu gehören z. B. grundlegende Steuerbefehle wie „fahre\_ost“ oder „fahre\_nord“, die eine entsprechende Fahrbewegung auslösen.

Die Zuordnung der einzelnen Eingänge an den vier Modulen zu den Mess- und Steuergrößen ist im Konstantenteil der Unit definiert. Im Falle einer Änderung von einzelnen Anschlüssen muss nicht die Befehlsprozedur geändert werden, es genügt, die Änderung in die Konstantenvereinbarung einzutragen.

### 5.3.1.2 Die Programmbibliothek Geo.Pas

Die Programmbibliothek Geo.pas enthält die Prozeduren zur Kommunikation mit dem „*Geodimeter 4000*“ und stellt den anderen Unterprogrammen gemessene und geschätzte Positionsdaten zur Verfügung. Die Kommunikation erfolgt hier im Master - Slave - Verfahren. Die Tastatureinheit schickt hierbei kontinuierlich Positionsdaten. Die Prozedur „Geo\_sichern“ überprüft, ob an der Schnittstelle COM 1 Daten vorliegen. Wenn ja, werden die Positionsdaten aufgenommen. Im anderen Fall wird die Prozedur beendet. Sie stellt eine Initialisierungsprozedur zur Verfügung um das „*Geodimeter 4000*“ anzuschließen und die Schnittstelle zu öffnen.

### 5.3.1.3 Die Programmbibliothek Weather.pas

Die Prozeduren dieser Bibliothek dienen zur Verwaltung der Wetterdaten, und die Bibliothek enthält das Modul zur Berechnung der Bodenfeuchte. Die Abfrage der Wetterdaten erfolgt über Prozeduren der Unit IDM.pas. Die von der Wetterstation erhaltenen Daten werden mit diesen Routinen ausgewertet und abgespeichert.

#### 5.3.1.4 Die Programmbibliothek Steuer.pas

Die Programmbibliothek Steuer.pas enthält dem Namen entsprechend die Prozeduren zur Steuerung und Regelung am Portalversuchsrahmen sowie für die Abläufe einer Bewässerungsmaßnahme.

#### 5.3.1.5 Die Variablenbibliothek Varconst.pas

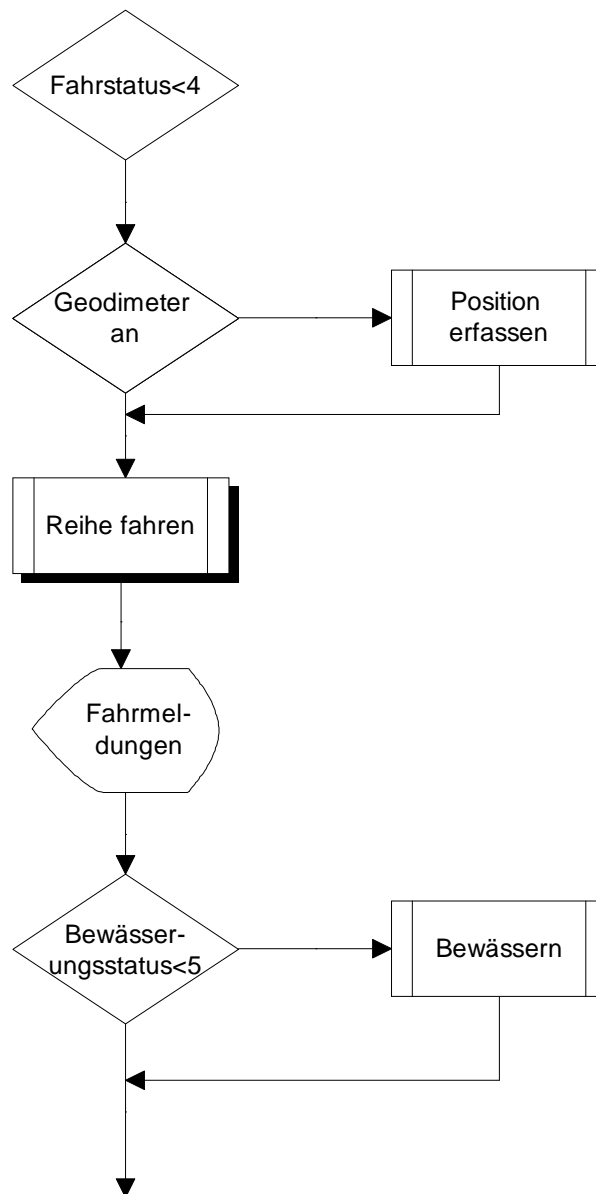
Da in Turbopascal Units nicht gegenseitig aufeinander verweisen können, aber manche Variablen und Konstanten von mehreren Units genutzt werden müssen, wurden sie in einer eigenen Unit vereinbart, auf die alle zugreifen können, aber die selbst auf keine zugreifen muss.

### 5.3.2 Steuerungsprogramm

Das Steuerungsprogramm ist der Ausführungsteil des Prozessführungsprogramms. Im Hauptprogramm ist es als Prozedur „Fahrkontrolle“ deklariert (Abbildung ?). Sie ist der Verteiler in die weiteren Unterprogramme „Reihe fahren“ und „Bewässern“ und veranlasst die Positionserfassung, indem sie die Prozedur „Geodimeter sichern“ aus der Unit „Geo.pas“ startet. Sie ist aktiv, solange die Variable „Fahrstatus“  $< 4$  ist. Die Variable „Fahrstatus“ zeigt an in welchem Teilprozess des Fahrvorgangs sich der PVR gerade befindet, das heißt, für Werte von 0 - 3 ist der PVR aktiv und führt eine Bearbeitungsmaßnahme durch.

#### 5.3.2.1 Positionsmessung

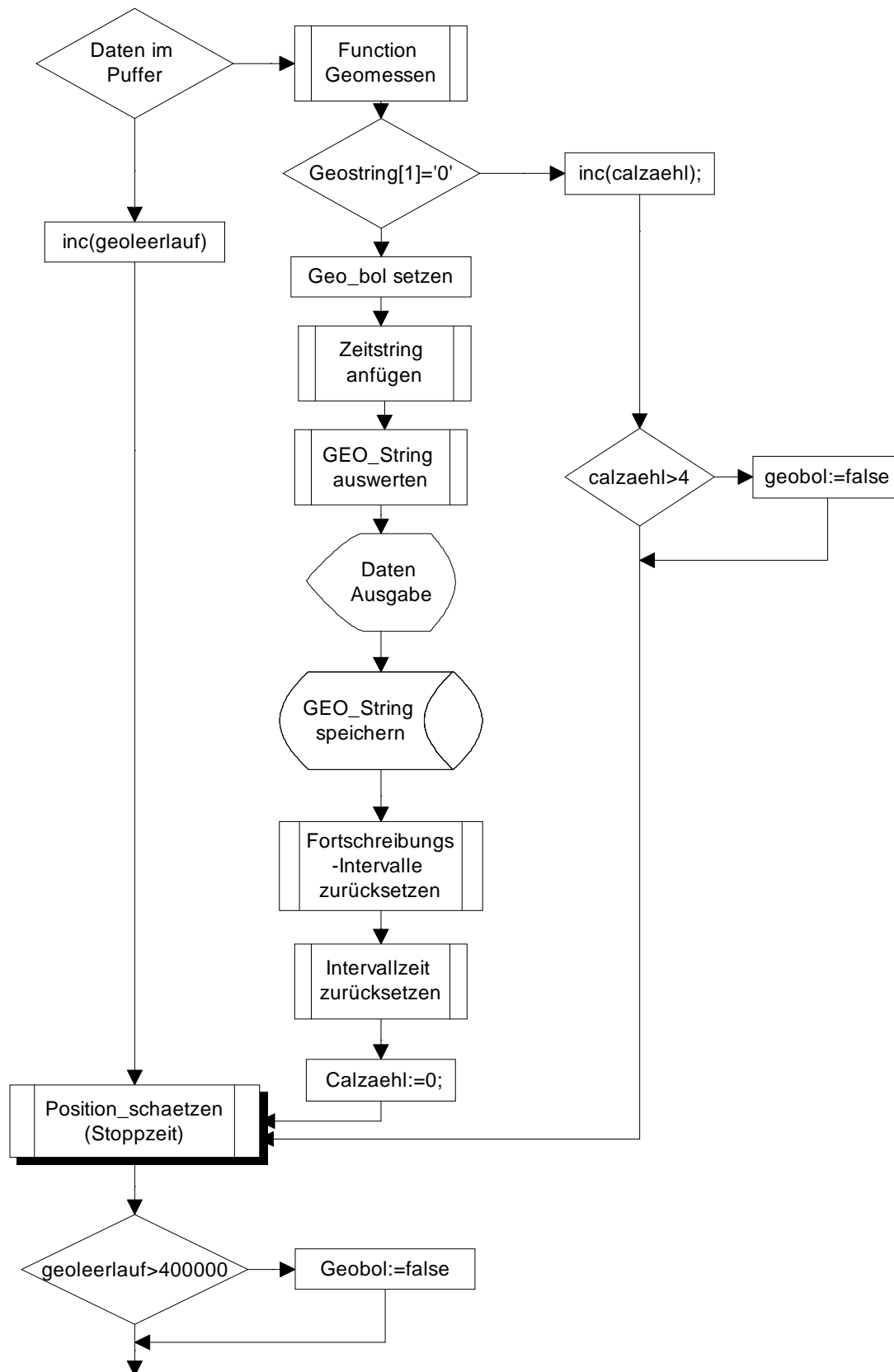
Die Prozedur „Geodimeter sichern“ holt die Messdaten aus dem Puffer der Schnittstelle, sofern dort welche vorliegen. Die Daten werden als ASCII Daten mit der Funktion „Geomessen“ als Zeichenkette eingelesen. Es wird überprüft ob das Infolabel „0“ lautet, und die Messdaten somit verwertbar sind (siehe Seite 46).



**Abb. 41:** Flussdiagramm der Prozedur „Fahrkontrolle“

Falls ja, wird der Schalter „Geo\_bol“ auf wahr gestellt, der Fahraktionen der Prozeduren der unteren Steuerebene, „x\_steuern“ etc., ermöglicht.

Falls das Infolabel nicht „0“ lautet, werden die Daten des „Geodimeter 4000“ nicht berücksichtigt. Es werden von der Prozedur maximal 4 Sätze dieser Messdaten in Reihe akzeptiert, danach wird der Schalter „Geo\_bol“ auf falsch gestellt und somit der PVR inaktiviert.



**Abb. 42:** Flussdiagramm der Prozedur „Geodimeterdaten sichern“

Für die Sicherung der Messdaten wird die Zeile mit einem Zeitstempel versehen und in der Positionsdatendatei abgespeichert. Danach wird die Zeichenkette in Zahlenvariablen ausgewertet, um die geschätzte Position zu berechnen. Die Hierbei gewonnenen Messdaten werden kontinuierlich abgespeichert und zur Auswertung der Steuerungsgenauigkeit benutzt.

### 5.3.2.2 Abschätzung der aktuellen Position

Da der Zeitverzug der Messwerte in etwa der Zeitspanne von 3 Messzyklen entspricht, wurde der Eingang der Messwerte an der Schnittstelle als Taktgeber für Berechnungsintervalle einer Schätzposition genutzt. Zwischen zwei Messungen werden die Motorlaufzeiten der Antriebe erfasst und während jeden Durchlaufs des Hauptprogramms werden damit die Fahrtstrecken berechnet und die Position damit erneut geschätzt.

$$\vec{I}_0 = \sum_n^1 (\vec{v} \vec{t}_n) \quad (5)$$

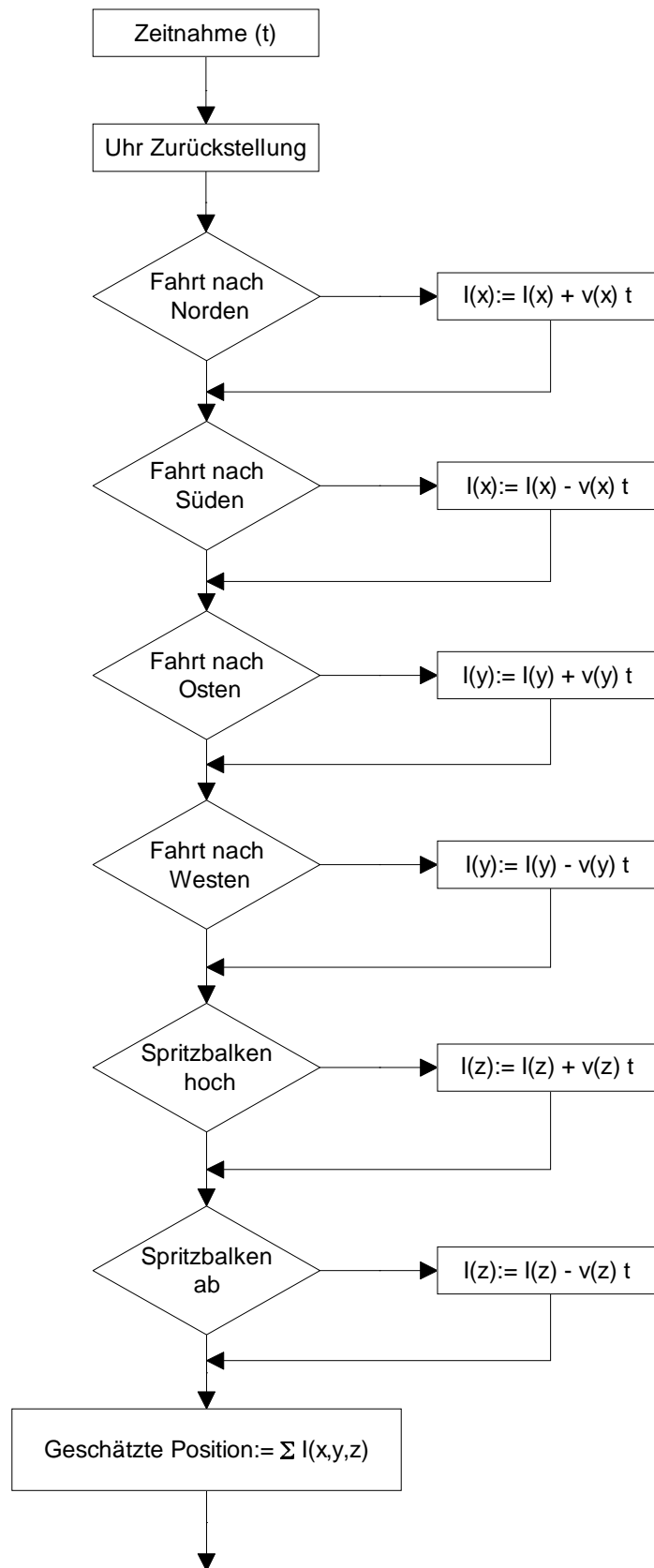
Darin ist:

$\vec{I}_0$	: Berechnungsintervall	[m]
$n$	: Anzahl Programmdurchläufe	[-]
$\vec{v}$	: Fahrtgeschwindigkeitsvektor	[m/s]
$\vec{t}$	: Vektor der Motorlaufzeiten	[s]

Die geschätzte Position  $\vec{P}'$  ergibt sich dann aus der Summe der letzten drei Intervalle und dem aktuellen Intervall.

$$\vec{P}' = \vec{I}_0 + \sum_3^1 I_n \quad (6)$$





**Abb. 43:** Flussdiagramm der Prozedur „Position schätzen“

Die Zeitdifferenz zwischen Entfernungsmessung und Winkelmessung des „*Geodimeter 4000*“ wurde bei der Berechnung nicht berücksichtigt, da die Zeitdifferenz von 0,2 s zwischen Winkelmessung und EDM nur einen Fehler von etwa 4 mm verursacht. Hierzu müssen auch der Horizontalwinkel und die Bewegungsrichtung des Zielkörpers berücksichtigt werden, damit der Einfluss der jeweiligen Messkomponente auf x - und y - Koordinate zugeordnet werden können.

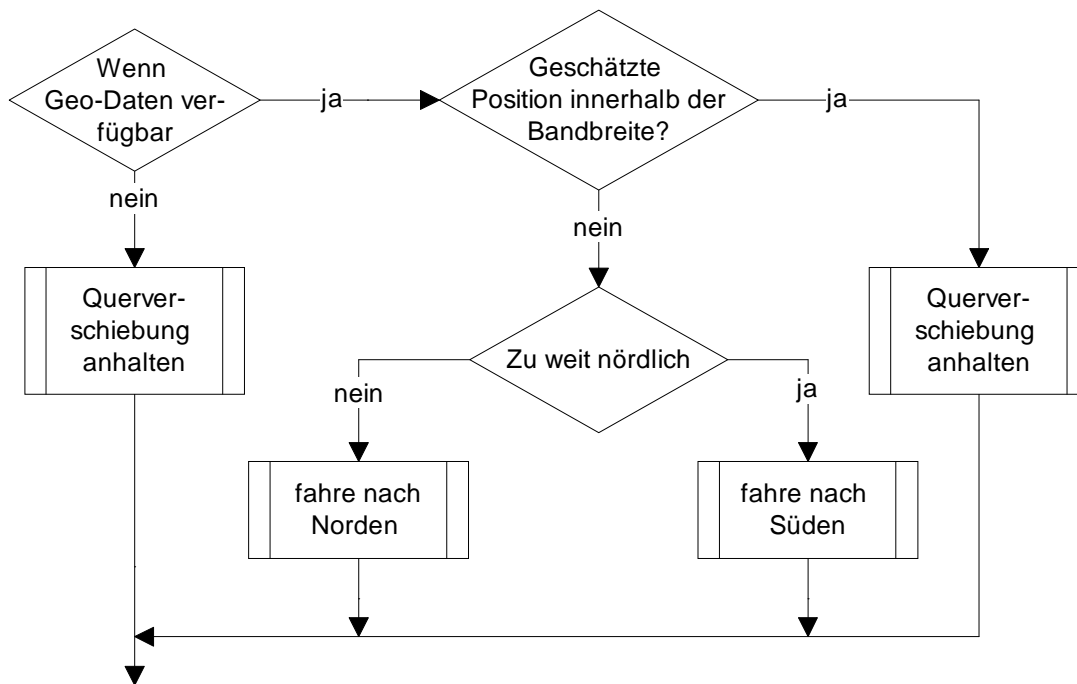
Der Rechenablauf ist in dem Flussdiagramm in Abbildung 43 dargestellt. Die Prozedur „Position Schätzen“ wird innerhalb Prozedur „Geodimeterdaten sichern“ ausgeführt.

Werden Positionsdaten vom „*Geodimeter 4000*“ übermittelt, werden die Berechnungsintervalle ähnlich wie in einem Ringspeicher aktualisiert, das heißt der Wert von  $I_3$  wird in  $I_4$  geschrieben,  $I_2$  in  $I_3$ ,  $I_1$  in  $I_2$  und  $I_0$  in  $I_1$ .  $I_0$  wird auf 0 gesetzt. Mit diesen Intervallwerten wird dann die aktuelle Position geschätzt. Falls keine Ortungsdaten im Schnittstellenpuffer vorliegen, wird nur  $I_0$  aktualisiert und dann die Position abgeschätzt. Um den Ausfall des „*Geodimeter 4000*“ zu erkennen, wurde die Variable „Geoleerlauf“ zur Absicherung eingeführt. Sie zählt die Durchläufe, bei denen keine Positionsdaten eingegangen sind, und schaltet die boolesche Variable „Geobol“ auf „false“, wenn eine kritische Grenze überschritten ist. Die Variable „Geobol“ wird bei allen Fahrsteuerbefehlen überprüft, und bei „false“ werden alle Maßnahmen angehalten.

Diese Vorgehen hat den Vorteil, dass die Position nicht nur mit der Messfrequenz des „*Geodimeters*“ aktualisiert wird, sondern mit jedem neuen Durchlauf des Hauptprogramms. Dieser Laufzeit kommt damit zusätzlich eine besondere Bedeutung bei der Steuerungsgenauigkeit zu.

## 5.3.2.3 Regelroutinen der Steuerung

Ein grundlegender Bereich der Steuerung sind Prozeduren, die jeweils eine Koordinate im Raum kontrollieren. Hier wird die aktuelle Position in der Prozedur „x steuern“ mit einem Sollwert verglichen und wenn nötig der entsprechende Fahrbefehl ausgelöst. Der Regelungsvorgang entspricht einem Dreipunktregler. Die Schaltgrenzen legen die obere und untere Grenze für Regelungsvorgänge fest. Die Prozeduren „Querverschiebung anhalten“, „Fahre nach Norden“ und „Fahre nach Süden“ sind die Fahrbefehle der unteren Ebene. Sie sind in der Unit IDM.Pas definiert.



**Abb. 44:** Flussdiagramm der Prozedur „x steuern“

Die aktuelle Position, mit der der Sollwert verglichen wird, ist hierbei ein Schätzwert, da die Positionswerte des „*Geodimeter 4000*“ mit einem Zeitverzug von 1,4 und 1,6 s den Prozessrechner erreichen (siehe Seite 93). Die Steuerung der beiden anderen Raumrichtungen y und z erfolgt in der gleichen Art und Weise.

### 5.3.2.4 Bestimmung des Sollwertes

Die Pflanzenreihen verlaufen nicht exakt parallel zur y-Achse, sondern beschreiben eine Kurve, weil die Pflanzen im herkömmlichen Verfahren mit der vom Schlepperfahrer gesteuerten Pflanzmaschine gepflanzt wurden. Somit muss während der Fahrt die Position der Querverschiebung abhängig von der Position in Längsrichtung (y) ständig an den Verlauf der Pflanzenreihe angepasst werden. Dies wird mit der Prozedur „x Sollwert Check“ erreicht. Sie überprüft die Position des PVR in Längsrichtung (y), und wählt das der aktuellen y - Position am nächsten liegende Wertetripel aus den Pflanzspurdaten aus. Aus diesem Wertetripel wird dann die Sollposition berechnet.

Es wurden zwei unterschiedliche Verfahren zur Berechnung der Sollposition verwendet. In der Variante 1 wurde nur eine Umrechnung der Pflanzspurdaten auf die Reihenmitte und den Versatz des Zielprismas auf dem Spritzbalken vorgenommen:

$$x_s = x_R - d_p + d_{ZP} \quad (7)$$

Darin ist:

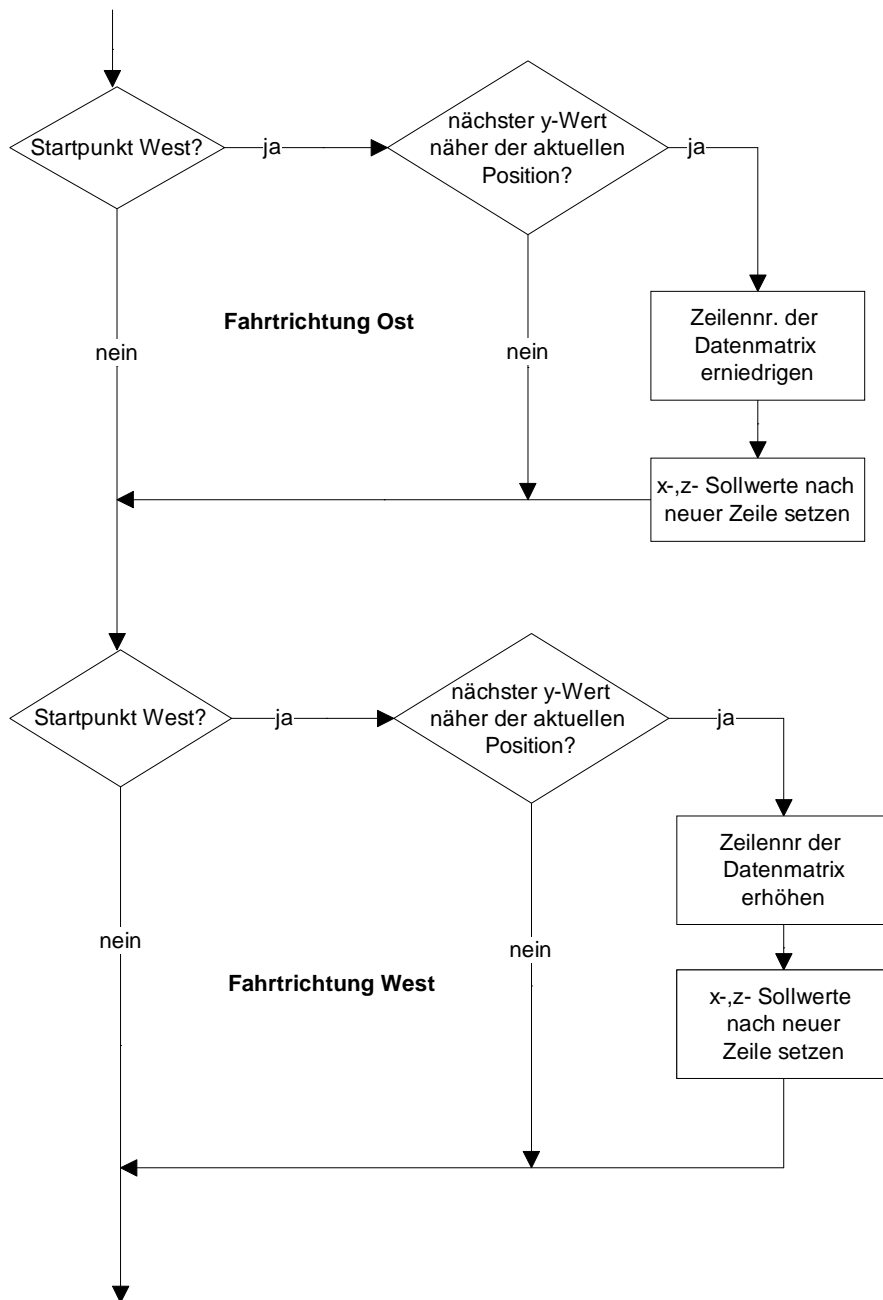
$x_s$ :	Sollwert für die x - Koordinate	[m]
$x_R$ :	x - Koordinate aus den Pflanzspurdaten	[m]
$d_p$ :	Versatz des Zielprismas an der Pflanzmaschine	[m]
$d_{ZP}$ :	Versatz des Zielprismas am Spritzbalken	[m]

In der Variante 2 wurde zusätzlich mit den beiden am nächsten liegenden Wertetripeln ein gleitender Mittelwert berechnet:

$$x_s = \frac{1}{3} \sum_{n+1}^{i=n-1} x_{Ri} - d_p + d_{ZP} \quad (8)$$

Darin ist:

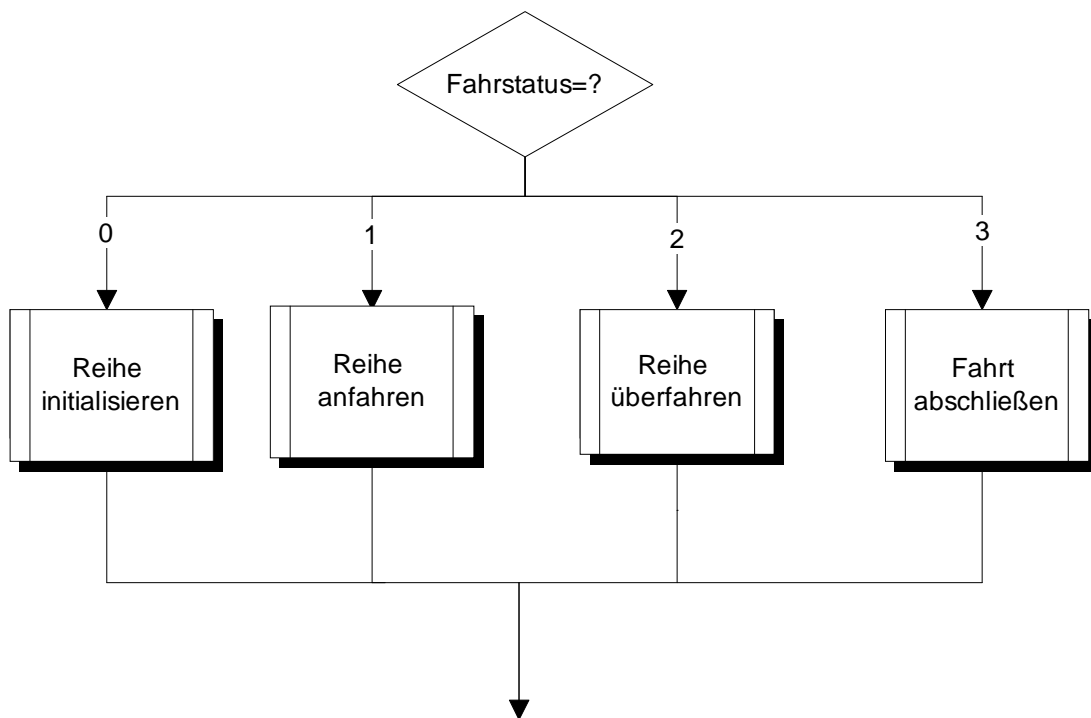
n:	Stelle der aktuellen y - Position im Datensatz	[-]
----	--	-----



**Abb. 45:** Flussdiagramm der Prozedur „x Sollwert Check“

## 5.3.2.5 Steuerung des Spritzbalkens über einer Reihe

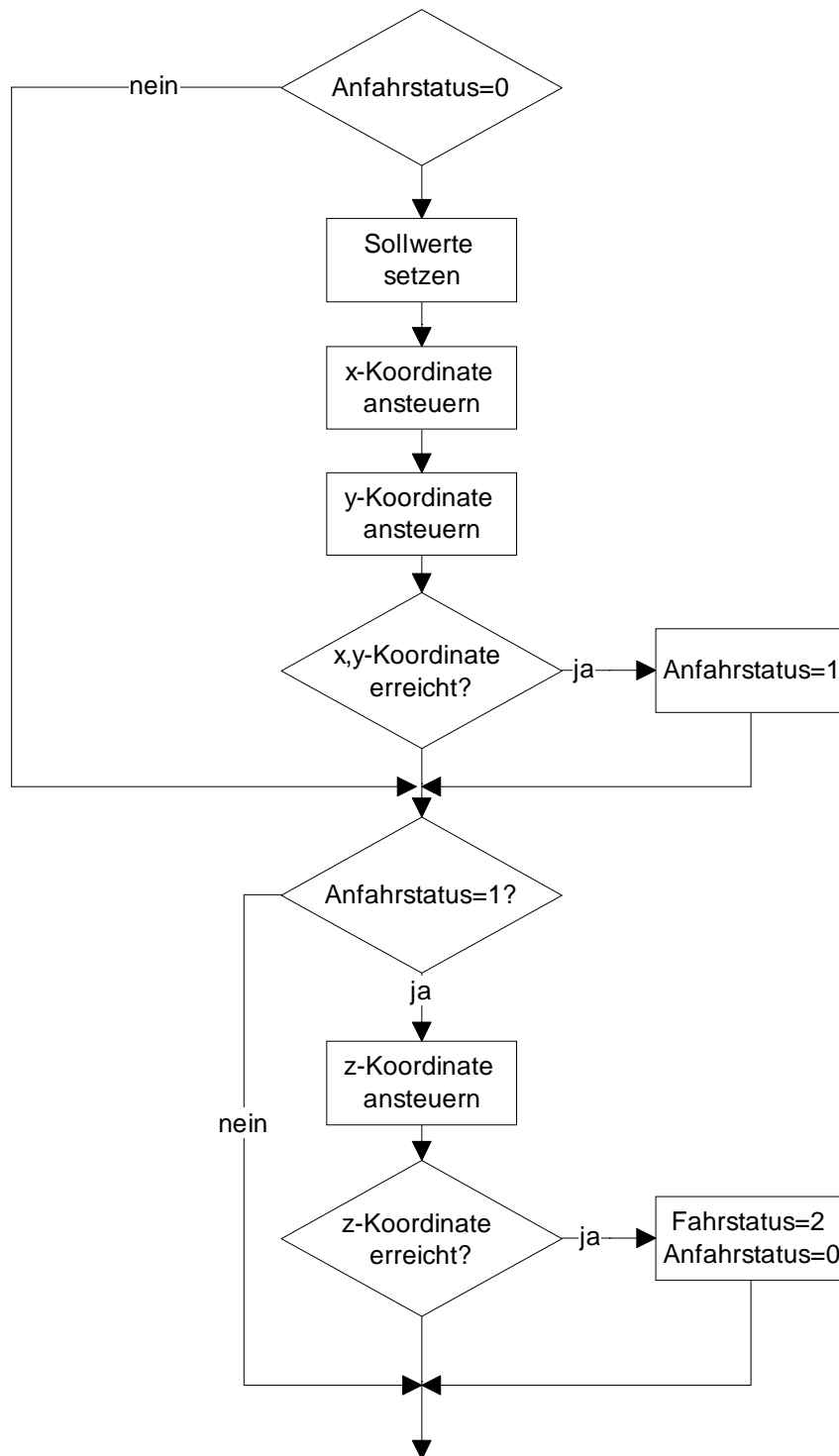
Der Vorgang, eine bestimmte Reihe zu fahren, wurde in einzelne Teilvorgänge zerlegt. Der Wert der Variable Fahrstatus zeigt an, in welchem Teilvorgang sich das Programm befindet. Steht die Variable „Fahrstatus“ auf 0, findet die Initialisierung statt, bei 1 fährt der PVR den Startpunkt der Reihe an, bei 2 „Reihe überfahren“ findet die eigentliche Bearbeitung statt und der Spritzbalken wird über der Reihe geführt, bei 3 wird der Bearbeitungsvorgang abgeschlossen. Ein Fahrstatus  $\geq 4$  zeigt an, dass die Fahrfunktion nicht aktiv ist. Wenn eine oder mehrere erforderliche Bedingungen erfüllt sind, ist der jeweilige Teilvorgang abgeschlossen und die Variable Fahrstatus wird um den Wert 1 erhöht.



**Abb. 46:** Flussdiagramm der Prozedur „Reihe fahren“

Die Prozedur „Reihe initialisieren“ überprüft zuerst die Plausibilität der Reihenummer. Dann werden die Daten der Pflanzspur von der Festplatte in ein Array mit 3 Spalten und maximal 900 Zeilen geladen. Es werden Start und Endpunkt der Reihe festgelegt, indem der aktuelle Standpunkt des Portalversuchsrahmens mit der ersten und der letzten Zeile des Reihenarrays verglichen werden. Der Startpunkt wird die Zeile, die der aktuellen Position am nächsten ist.

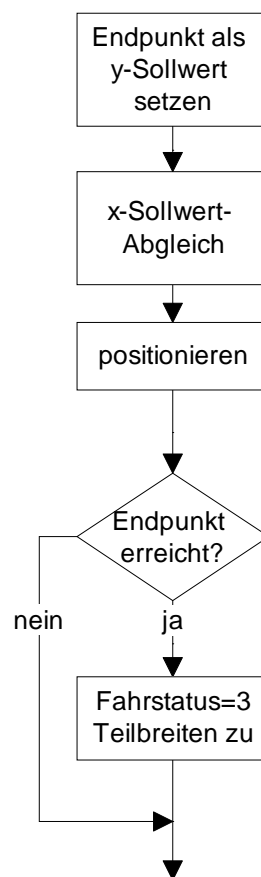
Die Prozedur „Reihe anfahren“ (Abbildung ?) ist nochmals in zwei Teilvorgänge untergliedert, die durch die Variable „Anfahrstatus“ angezeigt werden. Im ersten Teilvorgang steuert der PVR den Startpunkt in Quer- (x) und in Längsrichtung



**Abb. 47:** Flussdiagramm der Prozedur „Reihe anfahren“

(y) an. Hierzu werden die x - und y - Koordinaten als Sollwerte gesetzt und mit den Prozeduren „x steuern“ und „y steuern“ angefahren. Sind sie erreicht, wird die Variable „Anfahrstatus“ auf 1 gesetzt und der zweite Teil der Prozedur aktiviert, der die Höhe (z) des Spritzbalkens einstellt. Nach dem Erreichen der Höhe ist die Prozedur beendet und es werden die Variablen „Anfahrstatus“ auf 0 und „Fahrstatus“ auf 2 gesetzt und damit die Prozedur „Reihe überfahren“ aktiviert.

Die Führung des Spritzbalkens über der Reihe (Prozedur „Reihe überfahren“, Abbildung ?) wird gestartet, indem der Sollwert der y-Koordinate auf den Endpunkt der Reihe gesetzt wird. Die Prozedur „x-Sollwert\_Check“ prüft ständig, welche Position der PVR gerade hat und welche Zeile des Datenarrays der aktuellen Position in Längsrichtung (y) am nächsten ist. Die Prozedur „positionieren“ besteht aus der Abfolge der 3 Prozeduren der unteren Steuerungsebene („x steuern“, „y steuern“ und „z steuern“).



**Abb. 48:** Flussdiagramm der Prozedur „Reihe überfahren“



Ist der Endpunkt in Längsrichtung (y) erreicht, wird die Variable Fahrstatus auf den Wert 3 erhöht und eventuell aktivierte Teilbreiten des Spritzbalkens geschlossen.

Die Fahrt wird in der Prozedur „Fahrt abschließen“ mit den Haltebefehlen für den Linearregner und die Querverschiebung sowie dem Hochfahren des Spritzbalkens abgeschlossen. Sobald er eine Höhe von 2 m erreicht hat, wird der Fahrstatus auf 4 gesetzt und die Fahrt ist beendet.

#### 5.3.2.6 Steuerungsvarianten

Eine besondere Rolle bei der Steuerung hat die Laufzeit eines Hauptprogramm-durchlaufes. Zwar sind die Fahrgeschwindigkeiten in den drei Raumrichtungen sehr gering, zwischen zwei Messwerten des „*Geodimeter 4000*“ beträgt die zurückgelegte Distanz dennoch ca. 2 cm. Deswegen werden die Positionsschätzungen in jedem Durchlauf aktualisiert. Die Zeitdauer dieser Durchläufe ist nicht konstant, sondern abhängig von den Vorgängen und Berechnungen die innerhalb eines Schleifendurchgangs ablaufen.

Zeitrelevante Vorgänge des Hauptprogrammes sind:

- Abspeichern der Messdaten
- Datenverkehr zum „*Geodimeter 4000*“ (Baudrate 9600)
- Datenverkehr auf dem RS 485 Bus (Baudrate 19200)

Die Geschwindigkeit der Datenübertragung zwischen „*Geodimeter 4000*“ und Prozessrechner ist zwar mit 9600 Baud niedriger als auf dem RS 485 Bus, die Kommunikation findet jedoch nur in eine Richtung statt. Dadurch entfallen die Zeitdauern für die Anfrage und das Warten auf eine Antwort. Die Kommunikation mit den Steuermodulen erfordert jedoch immer eine Anfrage oder Befehl des Prozessrechners und eine Antwort des Moduls und hat deswegen einen bestimmten

Zeitbedarf, der von der Telegrammlänge und der Antwortgeschwindigkeit des Moduls abhängig ist.

In der ersten Steuerungsvariante werden die Befehlstelegramme an die Steuermodule IDM 165 und IDM 118 variabel übertragen. Dies bedeutet, die Telegramme werden sofort übermittelt, sobald die Steuerung eine Regelabweichung über der Schaltgrenze festgestellt hat und sofern der Befehl nicht schon vorher ausgelöst wurde. Während eines Umlaufs werden damit eventuell mehrere oder gar kein Telegramm übertragen. Diese Variante wurde mit Schaltgrenzen in x - Richtung von  $\pm 1$  cm gefahren. Für die Schätzung der y - Position wurde mit einer Vorfahrtgeschwindigkeit  $v_y'$  von  $4,9 \text{ cm s}^{-1}$  in y gerechnet.

In der Variante 2 werden die Fahrbefehle zuerst nur in das Übertragungsbyte des betreffenden Moduls geschrieben. Die Übermittlung der Bytes und Abfrage der digitalen Eingänge der Module erfolgt jeweils am Ende des Hauptprogrammes. In dieser Variante wurde mit mehreren Stufen in der Hysterese und der rechnerischen Vorfahrtgeschwindigkeit  $v_y'$  gerechnet. Zusätzlich wurden hier die Sollwerte in x Richtung als gleitende Mittelwerte aus drei Werten berechnet (Kap. 5.3.2.4). Diese Variante diente zur Untersuchung des Einflusses der rechnerischen Vorfahrtgeschwindigkeit und der Schaltgrenzen des Dreipunktreglers.

#### 5.4 Expertensysteme

Einige wichtige Informationen für die Prozessführung sind nur schwer oder überhaupt nicht mit üblicher Sensorik erfassbar, wie z. B. das Nährstoffangebot im Boden oder das Wachstumsstadium der Pflanze. Expertensysteme können durch in Regeln gefasstes Wissen oder durch Einsatz von Modellrechnungen Entscheidungsvorschläge für Bearbeitungsmaßnahmen anbieten. Im Kapitel 2.2 sind für die Bereiche Pflanzenschutz, Pflanzenwachstum, Bodenfeuchte, und Stickstoffdynamik eine große Anzahl von Expertensystemen vorgestellt. Für die Vorhandene Prozessführung wurde beispielhaft ein Bodenfeuchtemodell eingesetzt. Um die Expertensysteme in einem Versuch vergleichend einzusetzen, muss die

Prozessführung eine Schnittstelle besitzen, auf die eine größere Anzahl von Expertensystemen zugreifen kann.

#### 5.4.1 Die Schnittstellendatei „Agenda.lst“

Die Datei „Agenda.lst“ ist die Liste der von der Prozessführung auszuführenden Bearbeitungsmaßnahmen. Die Datei ermöglicht somit einen Zugriff von außerhalb der Prozessführung auf die durchzuführenden Arbeiten. Und sie ist ebenfalls das Gedächtnis der Prozessführung, falls es zu einem Programmabbruch kommt. Im folgenden sind beispielhaft zwei Anweisungen zur Bewässerung in der Datei dargestellt:

bewaessern; KNR:1;RA: 1; RE: 4;;

bewaessern; KNR:2;RA: 5; RE: 8;;

:

An erster Stelle steht die Art der Bearbeitungsmaßnahme, dann folgt die Angabe der Kulturnummer und die Nummer der Beete, mit denen die Reihe beginnt und endet. Es wird ein Softwareschalter („Bagenda“) gesetzt, der im Hauptprogramm die Abfrage der Datei Agenda.lst auslöst, falls keine andere Bearbeitungsmaßnahme durchgeführt wird (Abbildung 49). Beim Neustart des Hauptprogramms ist der Softwareschalter Bagenda gesetzt, sodass die Datei Agenda.lst gelesen wird. Die Prozedur sucht nach der Datei und liest bei Vorhandensein die erste Zeile. Falls das erste Wort „bewaessern“ lautet, wird die Bewässerungszustandsvariable „Bew\_Status auf 0 gesetzt und dies bedeutet, dass eine Bewässerungsablauf mit den Vorgaben der Zeile aus Agenda.lst gestartet wird.

Bisher sind nur Anweisungen zur Bewässerung definiert. Für die Bearbeitungsmaßnahmen Düngung oder Pflanzenschutz müssen noch die zugehörigen Arbeitsabläufe, Befehle und notwendige Parameter festgelegt werden.

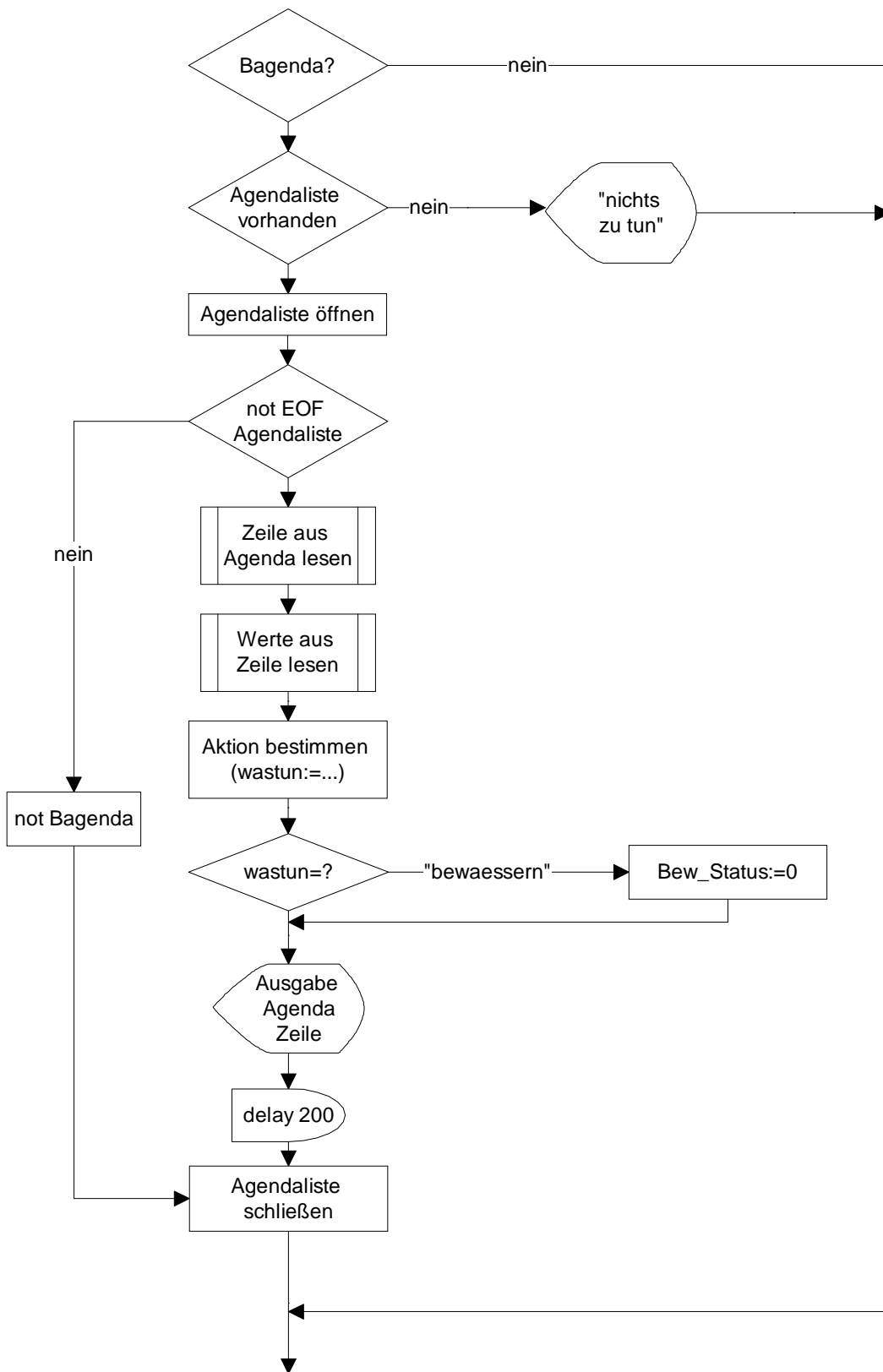
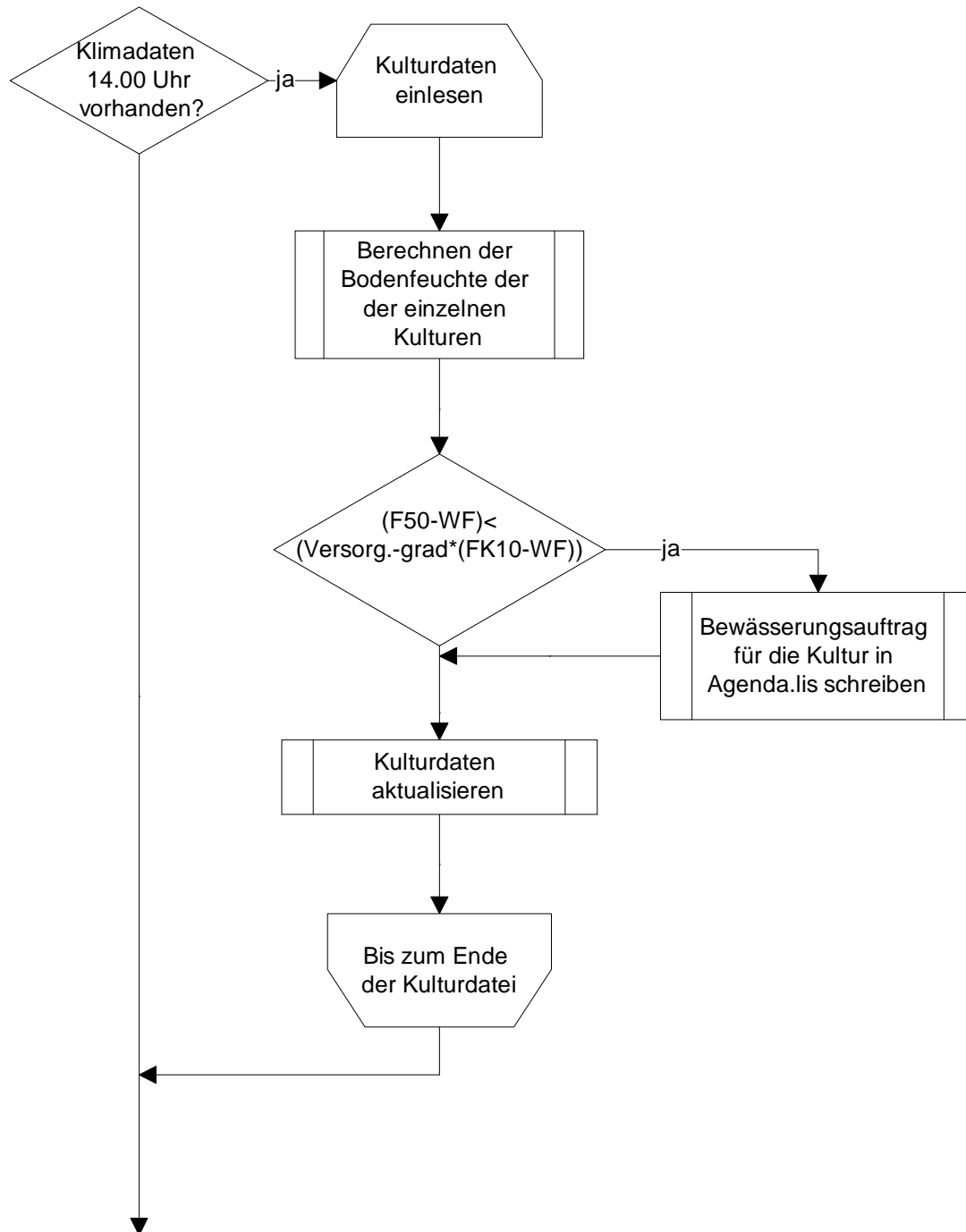


Abb. 49: Flussdiagramm der Prozedur „Agendaliste lesen“

## 5.4.2 Bodenfeuchtemodell

Die Berechnung der Bodenfeuchte wird innerhalb der Prozedur „Klimadaten erfassen“ aktiviert, falls neue Klimawerte von 14.00 Uhr vorliegen. Diese Werte werden zur Berechnung der Bodenfeuchte benötigt.



**Abb. 50:** Flussdiagramm der Einbindung des Bodenfeuchte-modells

Die aktuelle Bodenfeuchte wird aus einer Wasserbilanz von zwei Bodenschichten berechnet. Das Modell wurde von WEBER (1997) zur Berechnung der Feldarbeitstage verwendet. Zur Nutzung in der Prozessführung wurde die Berechnung der Hauptkomponenten des Feuchtetransports in Turbo-Pascal unter Verwendung der mit der Wetterstation erfassten Klimadaten geschrieben. Die Bodenfeuchten werden für die Schichten 0-10 cm (Schicht 1) und 10- 60 cm (Schicht 2) errechnet.

Die Gesamtbilanz der beiden Schichten errechnet sich dann aus:

$$F10_i = F10_{i-1} + N + VS1 + DF_i - Ea_i - OW_i + OW_{i-1} \quad (9)$$

$$F50_i = F50_{i-1} + VS1_i - DF_i - TR_i - VS2_i \quad (10)$$

Darin ist:

F10	: pflanzenverfügbares Wasser Schicht 1	[mm]
F50	: pflanzenverfügbares Wasser Schicht 2	[mm]
N	: Tagesniederschlag	[mm]
VS1	: Wasser das von Schicht 1 in Schicht 2 versickert	[mm]
DF	: Wasser, das zwischen den Schichten diffundiert	[mm]
Ea	: Evapotranspiration aus Schicht1	[mm]
OW	: Oberflächenwasser	[mm]
TR	: Transpiration der in Schicht 2 wurzelnden Pflanzen	[mm]
VS2	: Wasser das aus Schicht 2 versickert	[mm]
i	: aktueller Tag	[-]

Die Berechnung der einzelnen Komponenten erfolgt nach folgenden Formeln:

### ***Versickerung aus Schicht 1 in Schicht 2***

$$VS1_i = (F10_{i-1} - FK10) \cdot VK \quad (11)$$

Gültigkeitsbereich:  $F10_{i-1} \geq FK10$ , sonst gilt  $VS1_i = 0$

Darin ist:

FK10 : Feldkapazität der Schicht 1 [mm]

VK : Versickerungskoeffizient [-]

(Nach DYER und BAIER 1979)

### ***Diffusion zwischen den Schichten***

$$DF_i = \left( \frac{F50_{i-1}}{FK50} - \frac{F10_{i-1}}{FK10} \right) \cdot DK \cdot FK10 \quad (12)$$

Darin ist:

DK : Diffusionskoeffizient [-]

(Nach DYER und BAIER 1979)

### ***Evapotranspiration***

$$Ea_i = \frac{Ep_i \cdot AF \cdot F10_i}{FK10} - TR_i \quad (13)$$

Darin ist:

Ep : potentielle Evapotranspiration [mm]

AF : Abtrocknungsfaktor [-]

(Nach DYER und BAIER 1979)

Die potentielle Evapotranspiration berechnet sich aus:

$$Ep = HF_i \cdot E_i \cdot \left( 1 - \frac{f_i}{100} \right) \quad (14)$$

Darin ist:

HF	: Haundefaktor (nach DIN 19685,1977 in Achtnich, 1980)	[mm/hPa]
E	: Sättigungsdampfdruck	[hPa]
f	: relative Luftfeuchte um 14.00 Uhr	[%]

Der Sättigungsdampfdruck berechnet sich aus:

$$E_i = k_1 \cdot e^{\frac{k_2 \cdot T_i}{(T_i + k_3)}} \quad (15)$$

Gültigkeitsbereich  $0 \leq T \leq 100$  [°C]

Darin ist:

$k_1$	: 6,107	[hPa]
$k_2$	: 17,26939	[-]
$k_3$	: 237,3	[°C]
T	: Lufttemperatur um 14.00 Uhr	[°C]

(Nach JANSSEN und SCHOEDDER 1980)

### ***Oberflächenwasser***

$$OW_i = N_i - (SW10 - F10_i) \quad (16)$$

Gültigkeitsbereich:  $(SW10 - F10_i) < N_i$ , sonst gilt  $OW_i = 0$

Darin ist:

SW10	: Sättigungsfeuchte der Schicht 1	[mm]
------	-----------------------------------	------

(Nach AUGTER 1990a)

### ***Transpiration der in Schicht 2 wurzelnden Pflanzen***

$$TR_i = \frac{PK \cdot AF \cdot Ep_i \cdot F50}{FK50} \quad (17)$$

Gültigkeitsbereich:  $T > 5$  °C, sonst gilt:  $TR_i = 0$

Darin ist:



---

PK	: Pflanzenkoeffizient	[-]
FK50	: Feldkapazität der Schicht 2	[mm]

(Nach DYER und BAIER 1979 und AUGTER 1990a)

### ***Versickerung aus Schicht 2***

$$VS2_i = (F50_{i-1} - FK50) \cdot VK \quad (18)$$

Da die aktuellen Bodenfeuchten zur Berechnung der Komponenten Evapotranspiration, Oberflächenwasser und der Transpiration benötigt werden, werden diese Größen in einem erstem Rechenschritt durch Hilfsgrößen, den potentiellen Bodenfeuchten pF10 und pF50 ersetzt. In dem folgenden Rechenschritt werden die Komponenten mit den daraus resultierenden Bodenfeuchten erneut berechnet. Für die Hilfsgrößen gilt:

$$pF10_i = F10_{i-1} + N_i - VS1_i + DF_i \quad (19)$$

$$pF50_i = F50_{i-1} + VS1_i - DF_i \quad (20)$$

Darin ist:

pF10 <sub>i</sub>	: potentielles, pflanzenverfügbares Wasser in Schicht 1	[mm]
pF50 <sub>i</sub>	: potentielles, pflanzenverfügbares Wasser in Schicht 2	[mm]

Die Klimadaten werden stündlich von dem Prozessrechner an den ISM - Modulen abgefragt. Für die Berechnungen der Bodenfeuchten der einzelnen Kulturen werden nur die Werte von 14.00 Uhr Ortszeit benötigt. Deswegen setzt das Programm einen Software - Schalter sobald um 14.00 Uhr Klimadaten eintreffen. Die eigentliche Berechnung der Bodenfeuchten findet dann statt sobald keine zeitkritischen Operationen des Prozessrechners wie Steuerungsaufgaben mehr

erfolgen. Die ausführende Prozedur „Kulturen aktualisieren“ ist in dem folgenden Fließschema dargestellt.

Sinkt der Bodenfeuchtegehalt unter den Versorgungsgrad VG von 70% wird ein Bewässerungsauftrag in die Datei Agenda.lst geschrieben. Der Versorgungsgrad ist definiert als:

$$VG = \frac{F10 - WF}{FK10 - WF} \cdot 100 \quad (21)$$

Darin ist:

F10	: Bodenfeuchte	[mm]
WF	: Welkefeuchte	[mm]
FK10	: Feldkapazität der Schicht 1	[%]

#### 5.4.3 Bewässern

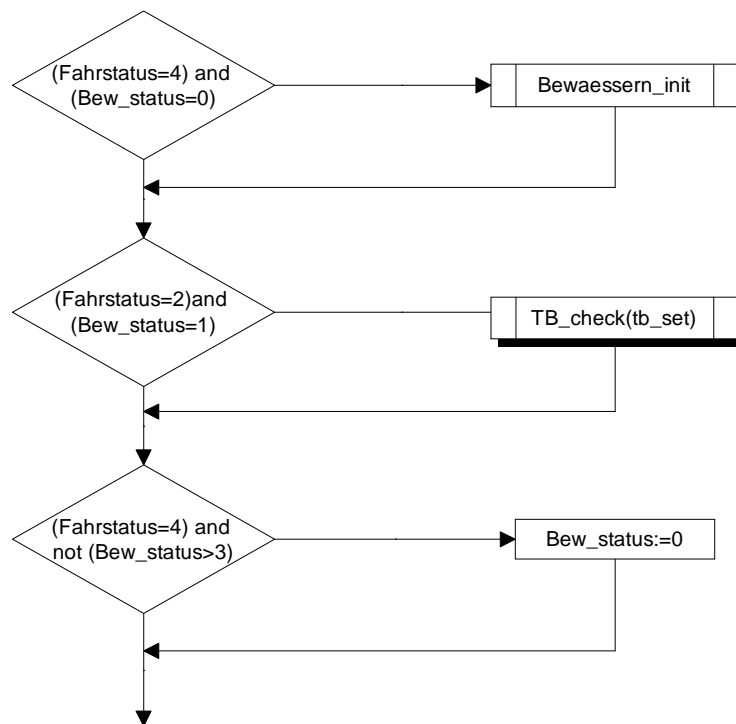
Der Arbeitsablauf einer Bewässerung lässt sich wie das Fahren über eine Reihe in einzelne Teilaufgaben untergliedern:

- Fahren über der Reihe
- Steuerung der Teilbreitenventile
- Aktualisierung der Kulturdaten
- Streichen des Bewässerungsauftrages aus der Datei Agenda.lst

Zum Fahren über der Reihe wird die entsprechende Routine der Fahrsteuerung genutzt. Es können aufgrund der Spritzbalkenbreite drei Reihen gleichzeitig beregnet werden. Das System fährt dabei entlang der Reihe, die sich unter der mittleren Teilbreite befindet. Die Prozedur „Bewässern“ wird indirekt durch die Prozedur „Agendaliste lesen“ aktiviert.

Die Prozedur „Agendaliste lesen“ liest den anstehenden Auftrag aus der Agendaliste und setzt die Variable Bewässerungsstatus auf 0 wenn der Auftrag bewässern lautet. Sie übergibt die Daten zur Kultur an diese Prozedur (Abbildung 51). Diese Prozedur ist um weitere Aktionen wie Düngung und Pflanzenschutz erweiterbar.

Die Prozedur „Bewässern initialisieren“ bestimmt die zu überfahrende Mittelreihe und setzt die Variable Fahrstatus auf 0. Damit beginnt die Ausführung der Bewässerung, in dem der PVR die Reihe anfährt.



**Abb. 51:** Flussdiagramm der Prozedur „Bewässern“

Im „Fahrstatus“ 2 fährt der PVR über der Reihe und die Variable „Bew\_status“ zeigt mit dem Wert 1 an, dass jetzt bewässert wird. Deswegen wird die Prozedur „TB\_Check“ zur Steuerung der Teilbreitenventile aktiviert. Die Variable „Tb\_set“ wird von „Bewässerung initialisieren“ gesetzt und bestimmt, welche Teilbreitenventile geöffnet werden.

Ist eine Reihe beendet, wird der Bewässerungsstatus wieder auf 0 gesetzt, und somit die Routine „Bewässerung initialisieren“ wieder aktiviert, solange bis alle

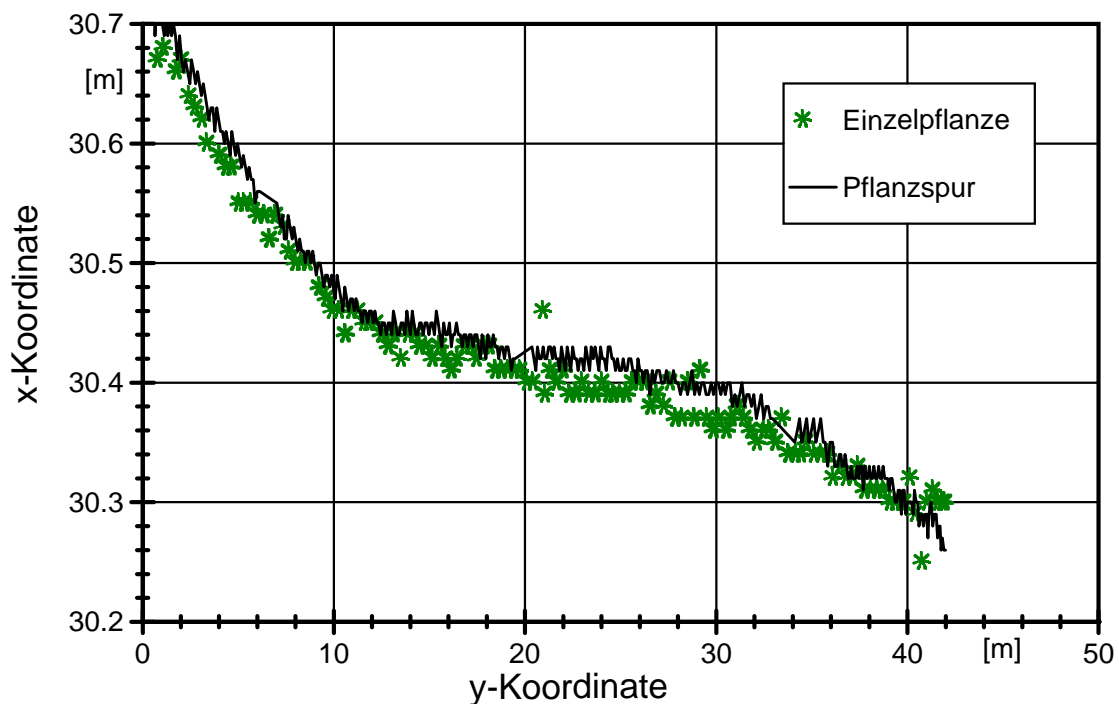
Beete der Kultur bearbeitet sind. Danach setzt die Routine „Bewässern initialisieren“ den Bewässerungsstatus auf 4 und aktiviert damit die Routine „Bewässerung eintragen“ im Hauptprogramm, die in der Kulturdatei die um die Bewässerungsmenge korrigierte Bodenfeuchte einträgt und den Bewässerungsauftrag aus der Datei „Agenda.lst“ streicht.

## 6 Ergebnisse

Grundlage für die Qualität der einer einzelpflanzenorientierten Prozessführung ist die Qualität der Steuerung. In Kapitel 4 wurden zwei Ortungssysteme untersucht und das für die Steuerung wichtige dynamische Messverhalten durch den Zeitnachlauf beschrieben. Diese Versuche bilden somit die Grundlage für die folgenden Ergebnisse zur Positionserfassung der Pflanzen als auch für Steuerungsgenauigkeit des PVR im Bezug auf die in der Zielstellung geforderte Genauigkeit im Zentimeterbereich.

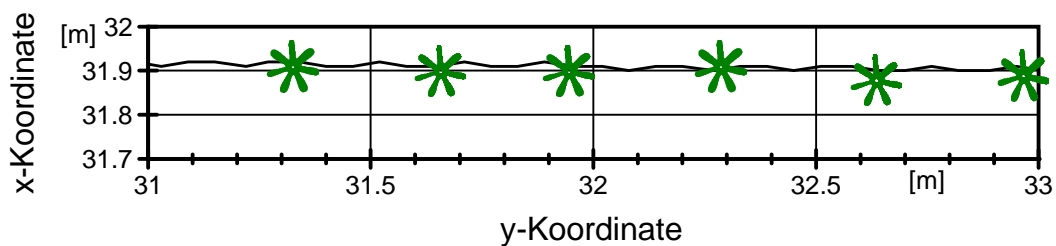
### 6.1 Ermittlung der Pflanzenposition

Aufgrund der Ost - West - Fahrtrichtung wurde vereinfacht angenommen, dass sich die Position der einzelnen Reihen nur durch die durch die Geometrie der Pflanzmaschine definierten Abstände in Querrichtung (x) unterscheiden. In Abbildung 52 ist in einem Beispiel die Pflanzfahrt der Reihe 47 (Feld II) in Reihendaten umgerechnet und den von Hand gemessenen Daten gegenübergestellt.



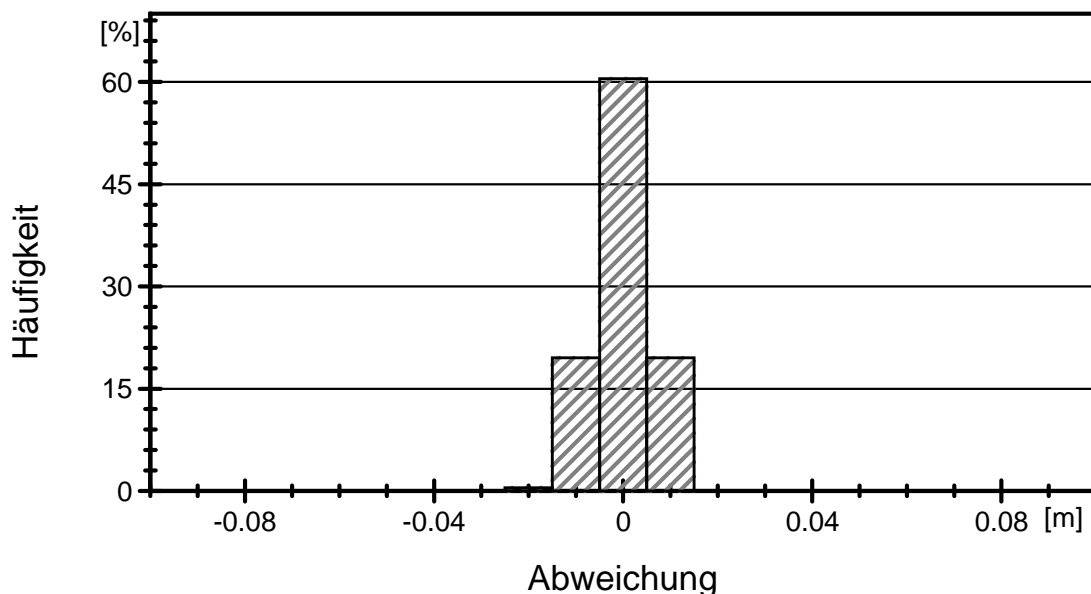
**Abb. 52:** Einzelpflanzenpositionen und Verlauf der Pflanzspur bei Reihe 47

Die Pflanzmaschine hatte eine Geschwindigkeit von ca  $0,1 \text{ ms}^{-1}$  in Fahrtrichtung (y - Achse). Die Messpunkte der Pflanzspur liegen daher im Abstand von etwa  $0,05 \text{ m}$ . Der Pflanzabstand hingegen beträgt  $0,3 \text{ m}$ , so dass etwa 5 Messwerte der Pflanzspur zwischen den Einzelpflanzen liegen. Die größeren Differenzen am Anfang und am Ende der Reihe zu der Pflanzspur rühren daher, dass diese Pflanzen von Hand nach gepflanzt werden mussten, da die Pflanzmaschine am Anfang die Pflanztiefe noch nicht erreicht hatte und am Ende ausgehoben wurde.



**Abb. 53:** Isometrischer Ausschnitt einer Pflanzenreihe

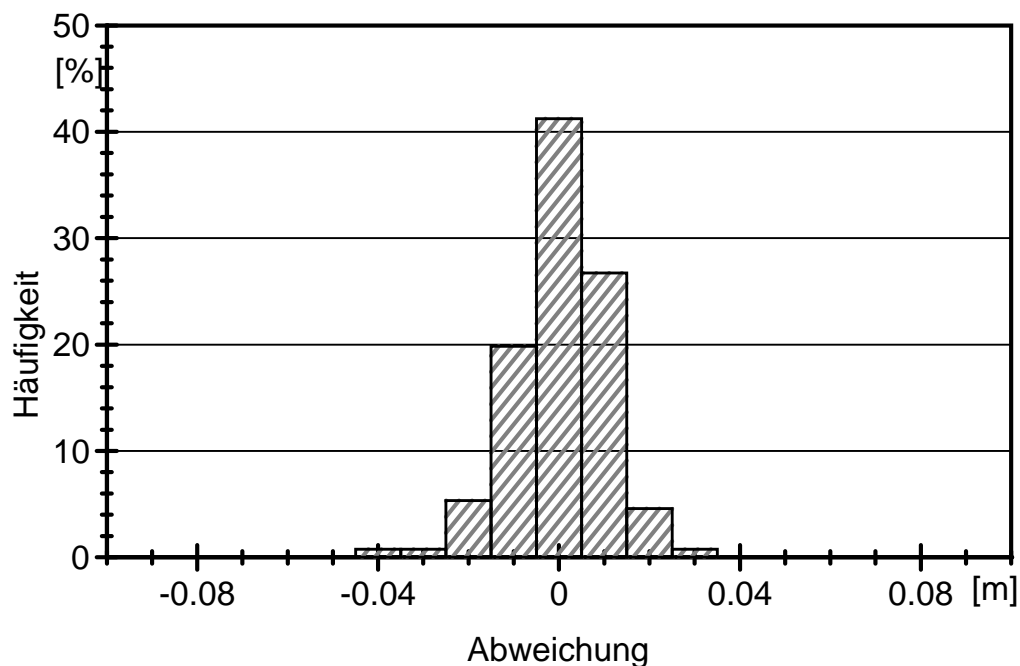
In Abbildung 53 ist die Größe des Symbols für die Einzelpflanze so gewählt, dass sie in etwa einem Durchmesser von  $0,1 \text{ m}$  in der Skalierung der Grafik entsprechen. Die genaue Position ist das Zentrum des Symbols.



**Abb. 54:** Schwankungsbreite der Pflanzspur um den gleitenden Mittelwert (Glättungsbreite 12 Werte)

Die bei der Pflanzung gemessene Pflanzspur zeigt nur sehr geringe Abweichungen im Bereich von 2-3 cm zu den Positionen der Einzelpflanzen. Die Schwankungsbreite der Pflanzspur beträgt 2 cm, wie die Abbildung 54 zeigt. Sie liegt also schon nahe an der Auflösung der Totalstation. ( Standardabweichung: 0,006 m; Spannweite: 0,04 m) .

Die Abweichungen innerhalb der Einzelpflanzenpositionen streuen hingegen stärker. Dies wird auch in der Gesamtübersicht deutlich. Da die Pflanzaggregate nur an der Spitze an der Pflanzmaschine befestigt sind, kann das Aggregat an diesem Punkt um in Querrichtung (x) um 1 - 2 cm pendeln. Die geringere Glättungsbreite in Längsrichtung (y) wurde gewählt, um die gleiche räumliche Länge der Glättungsbreite von etwa 60 cm wie bei der Pflanzspur zu erreichen, da hier die einzelnen Messwerte in Fahrtrichtung 30 cm auseinander liegen, die Messwerte der Pflanzspur jedoch nur ca. 8 cm. Die Standardabweichung beträgt 0.009 m bei einer Spannweite von 0,054 m.

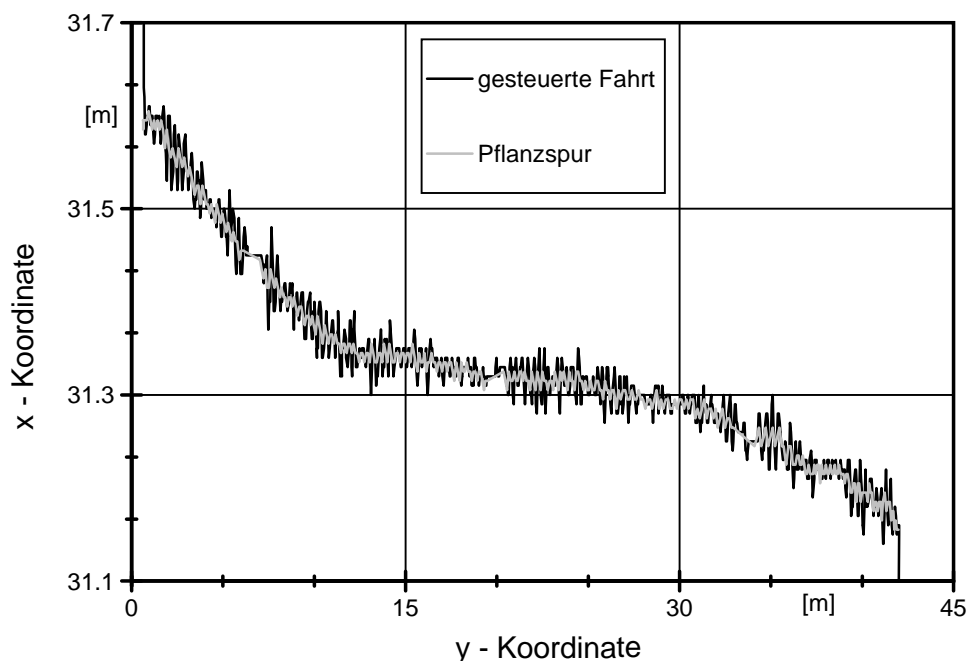


**Abb. 55:** Schwankungsbreite innerhalb der Einzelpflanzenpositionen um den gleitenden Mittelwert (Glättungsbreite 2 Werte)

## 6.2 Prozessführung

### 6.2.1 Steuerungsgenauigkeit

Die nach den Pflanzspurdaten gesteuerte Fahrt schwingt in Querrichtung (x-Achse) um die x-Koordinaten der vorgegebenen Reihe. Die Bewertung der Steuerungsgenauigkeit kann nur im Bezug auf die vorgegebenen Reihendaten erfolgen. Die Daten der Reihe sind jedoch nicht direkt mit den Messdaten der gesteuerten Reihe vergleichbar, denn aufgrund der unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeit sind Mess- und Steuerwerte nicht synchron, sondern bei den Messdaten liegt in etwa die doppelte Menge an Werten vor. Der entscheidende Bezugspunkt ist daher die Position in Fahrtrichtung (y-Koordinate). An Hand ihrer ermittelt das Steuerprogramm die zugehörigen x-Sollwerte zu der aktuellen Position des Spritzbalkens.

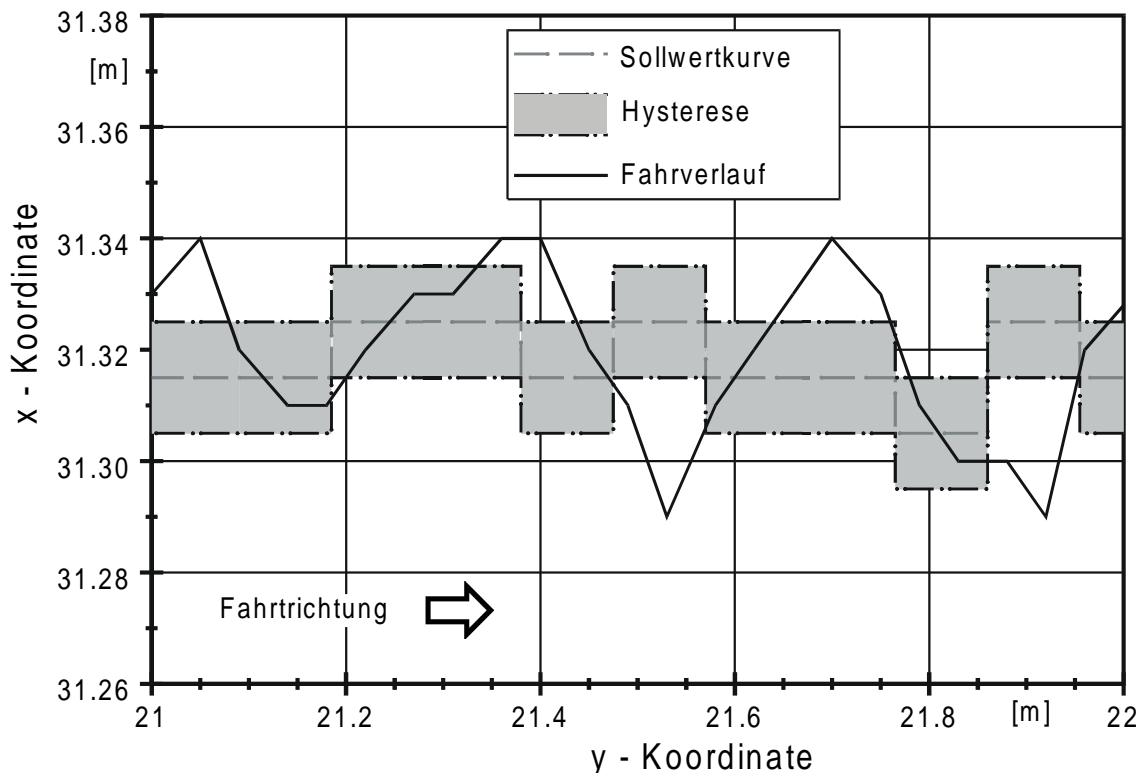


**Abb. 56:** Verlauf einer gesteuerten Fahrt entlang einer Pflanzspur



### 6.2.2 Ortsreferenzierter Vergleich von Sollweg und gesteuerter Fahrt

In der Abbildung 57 sind beispielhaft aus einem Abschnitt die Sollwerte der gesteuerten Fahrt für diesen Abschnitt und der dazugehörige Fahrverlauf dargestellt. Die Sollwerte sind die auf die Beetmitte umgerechneten Pflanzspurdaten. Die gestrichelte Linie zeigt den Gültigkeitsbereich des einzelnen Sollwertes an. Dieser ändert sich sprunghaft zwischen zwei Pflanzspurkoordinaten, daraus entsteht die Treppenstruktur der Sollwertkurve. Jeweils einen 1cm über und unter dem Sollwert verlaufen die obere und untere Schaltgrenze. Die gesteuerte Fahrt neigt hier deutlich zum Überschwingen über die Schaltgrenzen.



**Abb. 57:** Ausschnitt einer Messfahrt mit den dazugehörigen Sollwerten der Steuerung (ohne Mittelwertbildung)

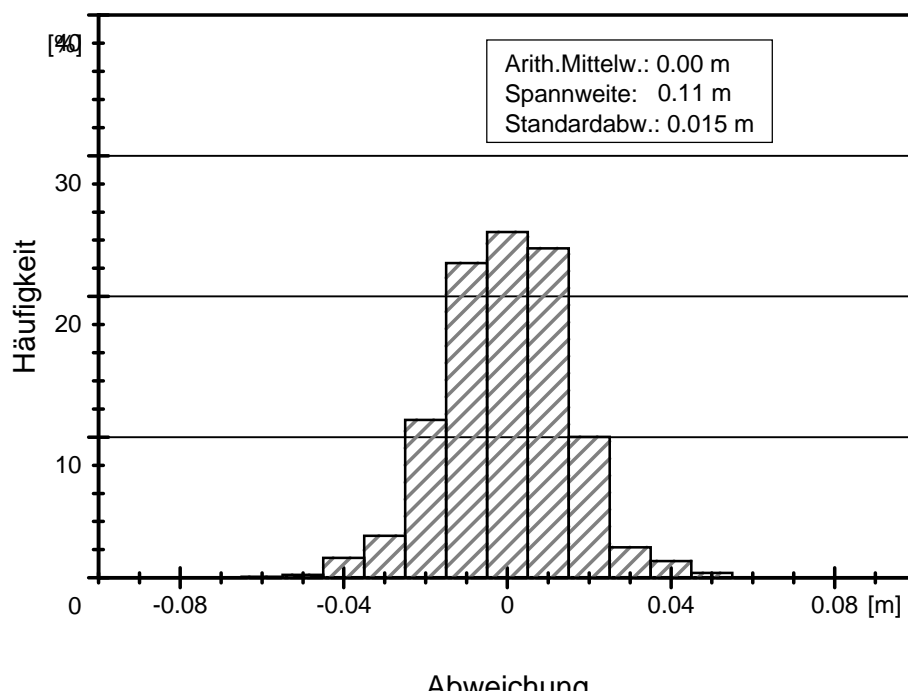
Zur Bewertung der Steuerungsqualität müssen die Messwerte der gesteuerten Fahrt und die Daten der Pflanzspuren bezogen auf ihre Position in Fahrtrichtung (y-Achse) also ortsreferenziert miteinander verglichen werden. Für die Auswertung der Messdaten wurde aufgrund der hohen Anzahl der Messwerte ein Programm in

Turbo-Pascal erstellt, mit dem den Messdaten, die nach der y -Koordinate entsprechenden Punkte der Pflanzspur zugeordnet wurden, und die daraus resultierende Abweichung ermittelt wurde. Es werden daher immer die gemessenen Wertetripel mit denen auf der y - Achse verglichen, die einander am nächsten liegen. Die Zuordnung erfolgt nach dem gleichen Prinzip der aus dem Steuerungsprogramm bekannten Prozedur „x-Sollwert-Check“. Der Vergleichswert ist der gleitende Mittelwert aus drei Sollwerten, um die Schwankungen des Sollwertes auszugleichen.

### 6.2.3 Messfahrten der Steuerungsvariante 1

Die Abweichungen der gesteuerten Fahrt von den Sollwerten wurden in Klassen von -0,1 bis 0,1 m mit einer Klassenbreite von 0,01 m eingeteilt, und die Häufigkeit des Auftretens der Abweichungen ermittelt. Die Ergebnisse einer Messreihe sind in Abbildung 58 dargestellt.

Die Messungen wurden am 22.09.98 durchgeführt. Die Datengrundlage für die Häufigkeitsanalyse sind 3792 Messpunkte aus den Überfahrten von 4 Beeten. Die Beete befanden sich auf Feld II des Versuchsfeldes. Der Portalversuchsrahmen

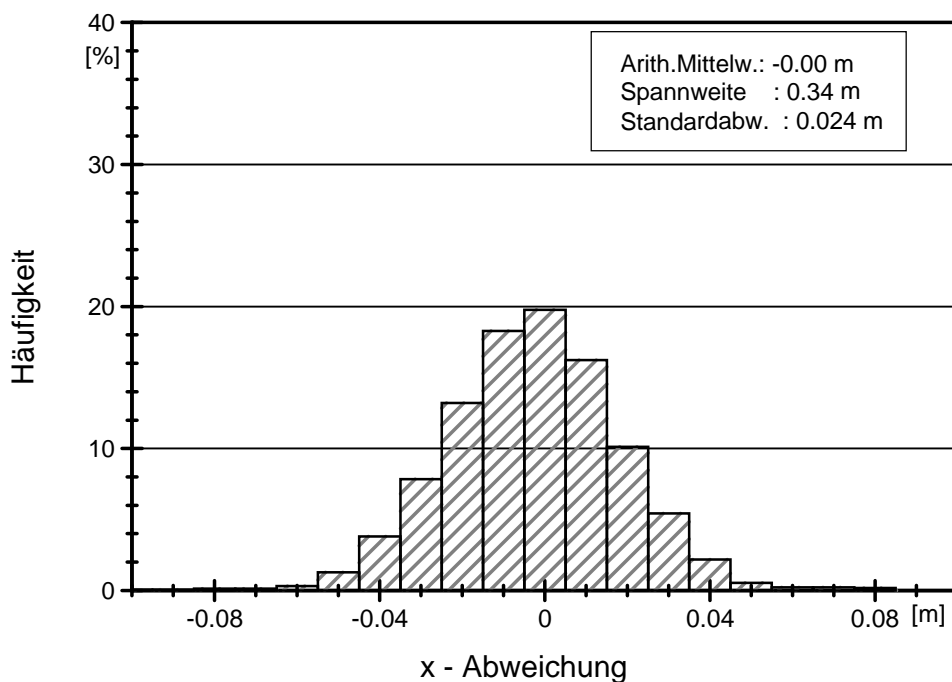


**Abb. 58:** Häufigkeitsanalyse der Messfahrten vom 29.09.98 über 4 Beeten (Datengrundlage 3792 Werte)

bewegte sich in einer Entfernung von 50 m - 100 m vom Geodimeter. Die Spannweite der Abweichungen beträgt 11 cm. Die Mehrzahl der Messwerte liegt jedoch in einem Bereich von 5 cm. Die Standardabweichung beträgt 2 cm. Die Bandbreite (Hysterese) der Regelung war  $\pm 1$  cm. Die rechnerische Vorfahrtgeschwindigkeit in Längsrichtung  $v_y$  war  $0,049 \text{ ms}^{-1}$ , in Querrichtung  $v_x$   $0,05 \text{ ms}^{-1}$ .

Die Messdaten aus Abbildung ? wurden am 5.11.1998 auf Feld I unter gleichen Bedingungen gewonnen. Dieser Teil des Versuchsfeldes liegt näher zu dem Standort des Geodimeters.

Die Messwerte streuen hier etwas weiter als auf Feld II. Besonders auffällig ist hier noch, dass die Spannweite der Abweichungen um 0,23 m höher liegt. Dies scheint durch die besondere Geometrie zwischen Zielprisma und Feststation begründet zu sein. Je spitzer der Blickwinkel des Geodimeters auf das Zielprisma ist, desto enger ist der Erfassungsbereich, da auch die scheinbare Öffnung des Prismas verkleinert ist, und die Infrarotdiode am Zielprisma schlechter zu erfassen ist. Durch die flexible Konstruktion des PVR schwingt der Spritzbalken während der Fahrt. Am

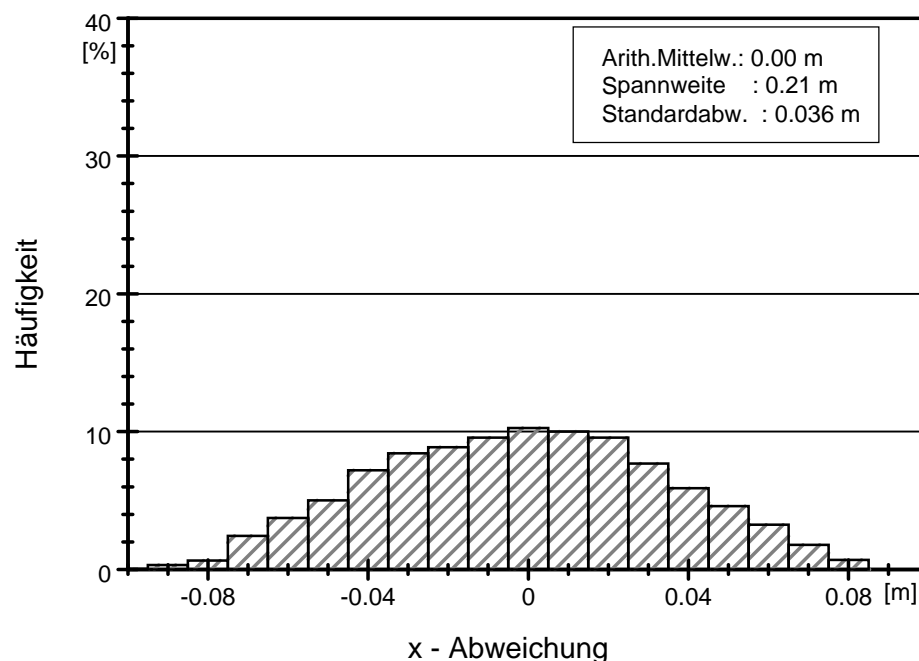


**Abb. 59:** Häufigkeitsanalyse der Messfahrten vom 5.11.98 über 2 Beeten (Datengrundlage 3299 Messwerte)

Ostende des Feldes und besonders in Nähe zum Geodimeterstandort kam es zu einem schlechteren Messverhalten des Systems, da durch die Schwingungen das Ziel zeitweise aus dem Erfassungsbereich der Feststation geriet.

#### 6.2.4 Messfahrten der Steuerungsvariante 2

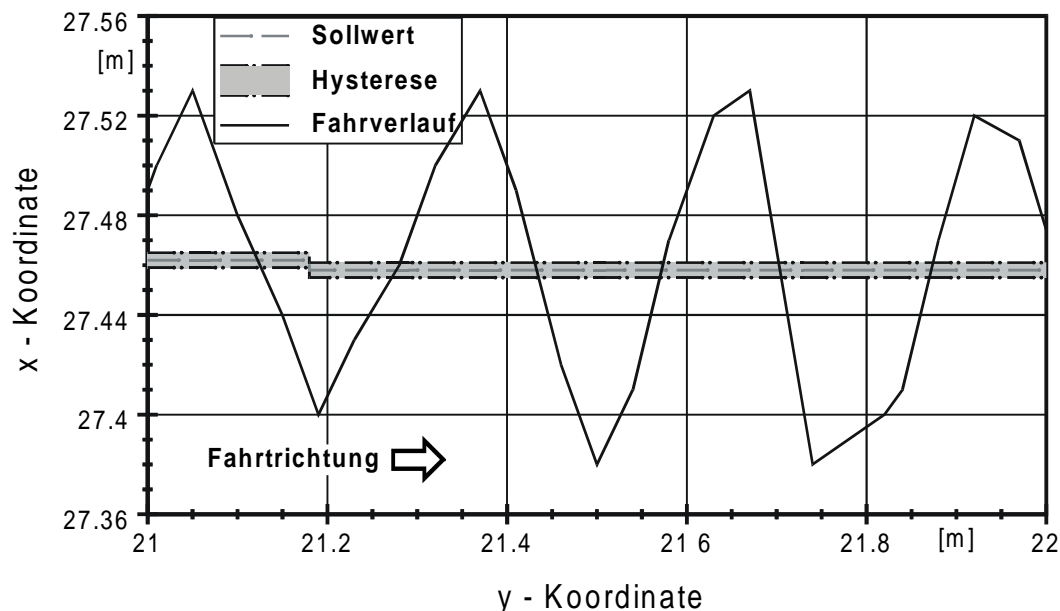
Diese Variante wurde mit einer geringeren Bandbreite (0,003 m) und einer höheren rechnerischen Vorfahrtgeschwindigkeit in y - Richtung  $v'_y$  von  $0,06 \text{ ms}^{-1}$  durchgeführt. Das Steuerprogramm wurde hier so verändert, dass die Steuertelegramme immer fest am Ende eines Programmdurchlaufes übertragen werden. Zusätzlich wurden weitere Informationen des Steuerprogramms wie die geschätzte Position mit abgespeichert. Dies führte zu einer Verlängerung des Hauptprogrammdurchlaufs. Die Sollwerte der Fahrt wurden aus dem gleitenden Mittelwert dreier Pflanzspurdaten ermittelt. Die rechnerische Vorfahrtgeschwindigkeit in Längsrichtung  $v'_x$  betrug  $0,049 \text{ ms}^{-1}$ .



**Abb. 60:** Häufigkeitsanalyse der Abweichung einer Messfahrt am 11.9.99 mit geglätteter Sollwertkurve und fester Übergabe der Steuerbefehle ( $v'_x : 0,05 \text{ ms}^{-1}$ ,  $v'_y : 0,06 \text{ ms}^{-1}$ )

Die Messwerte streuen breiter als in den vorigen Abbildungen, dies zeigt sich in der Standardabweichung von ca. 0,036 m. Dennoch ist hier die Spannweite der Messwerte geringer als in den vorherigen Messfahrten der Variante 1.

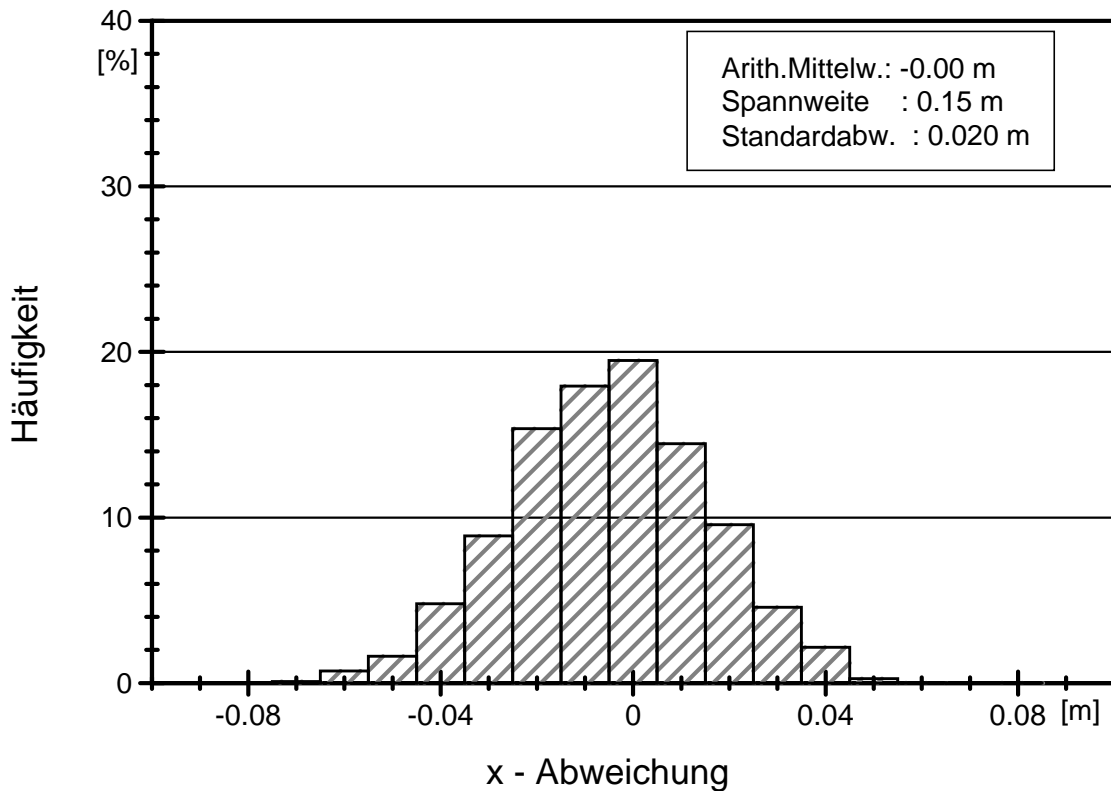
Ein Ausschnitt dieser Messung ist in Abbildung 61 dargestellt. Der Fahrverlauf schwingt weit um die Sollwertlinie mit Abweichungen bis 10 cm um dem Sollwert. Das System bemerkt zu spät die Regelabweichung und erkennt auch nicht rechtzeitig, dass es sich innerhalb des Sollwertbereiches befindet. Dies bedeutet, dass die Schätzung der Position nicht ausreichend aktuell die Position errechnet, und die Anpassung der rechnerischen Vorfahrtgeschwindigkeiten notwendig ist.



**Abb. 61:** Ausschnitt einer Messfahrt mit den dazugehörigen Sollwerten der Steuerung (mit Mittelwertbldg.)  
 $v'_x : 0,049 \text{ ms}^{-1}$ ,  $v'_y : 0,06 \text{ ms}^{-1}$ , Toleranz:  $\pm 0,003 \text{ m}$

In der Versuchsfahrt aus Abbildung 62 wurde die rechnerische Vorfahrtgeschwindigkeit in Querrichtung  $v'_x$  auf  $0,07 \text{ ms}^{-1}$  erhöht, während  $v'_y$  wieder mit  $0,05 \text{ ms}^{-1}$  angegeben wurde.

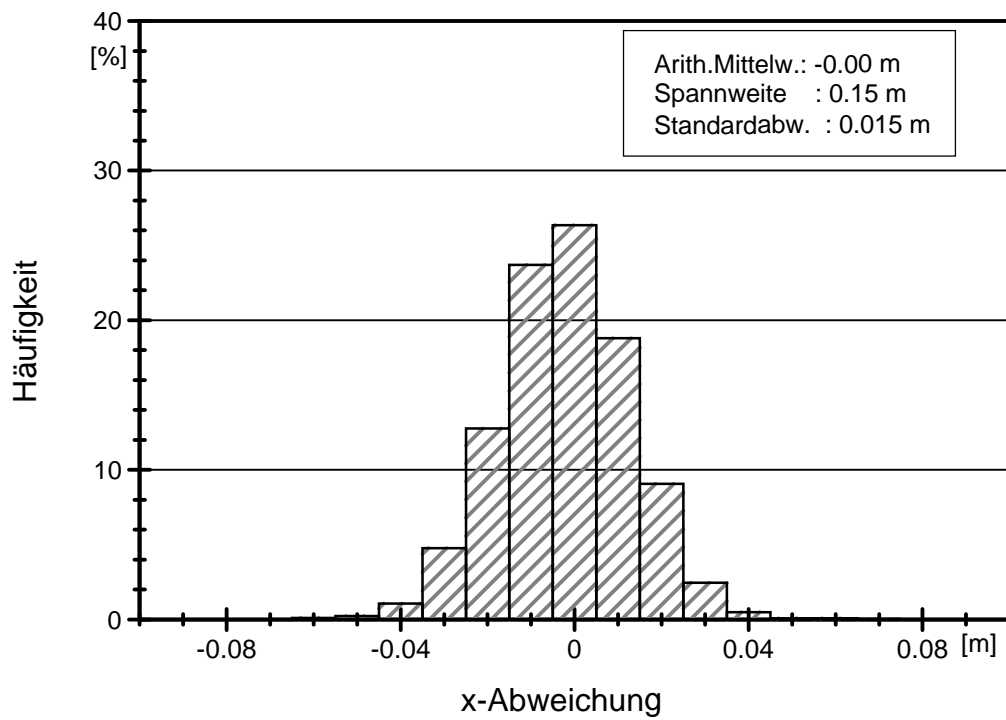
Die Standardabweichung hat sich auf 0,02 m verbessert, ebenso wie die Spannweite mit 0,15 m. Die Qualität der Steuerung hat somit zugenommen.



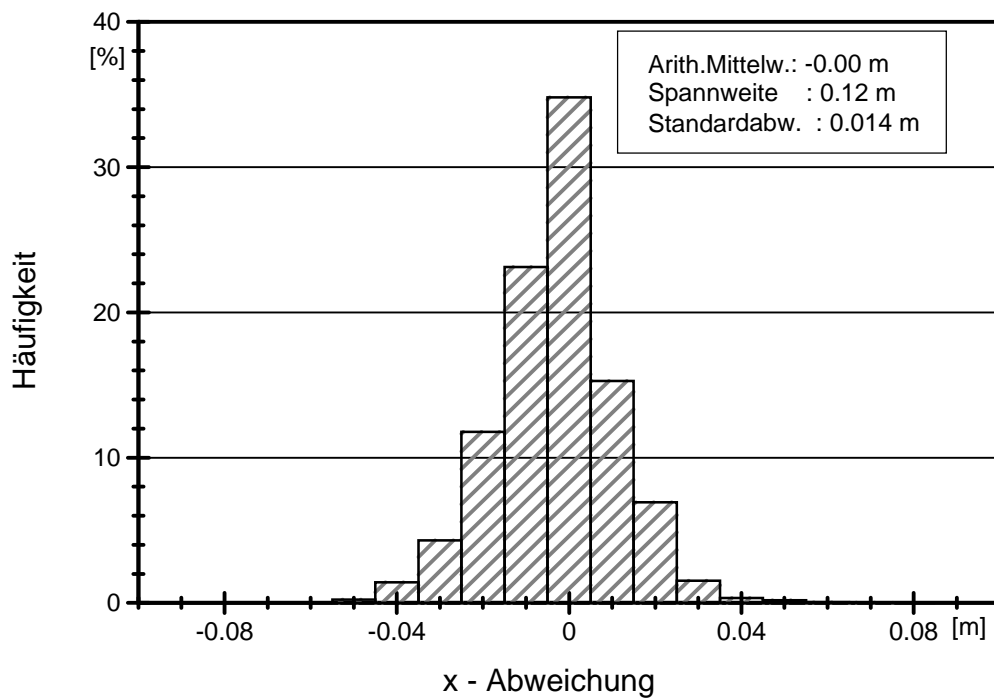
**Abb. 62:** Häufigkeitsanalyse der Abweichung einer Messfahrt Variante 2 ( $v'_x$  :0,07 ms<sup>-1</sup>,  $v'_y$  :0,05 ms<sup>-1</sup> Toleranz: ±0,003 m)

Bei einer Aufweitung der Schaltgrenzen (Toleranz) auf ±0,007 m in Abbildung 64 verbessert sich das Steuerverhalten nochmals. Die Standardabweichung vom Sollwert beträgt nun nur noch 1,5 cm und die Spannweite der auftretenden Abweichung ist bei dieser Messfahrt auf 15,3 cm konstant zur vorigen Stufe geblieben. Der Mittelwert der Abweichungen liegt deutlich bei 0.

Die Erhöhung der rechnerischen Vorfahrtgeschwindigkeit in Querrichtung  $v'_x$  auf 0,080 m/s zeigt noch einmal eine Verbesserung des Steuerungsergebnisses (Abbildung 63). Hier liegt die Standardabweichung bei 0,014 m und die Spannweite verbesserte sich nochmals auf 0.012 m. Hier ist auch deutlich ein hoher Anteil Messwerte mit einer Abweichung von -0,4 - +0,4 cm zu finden.



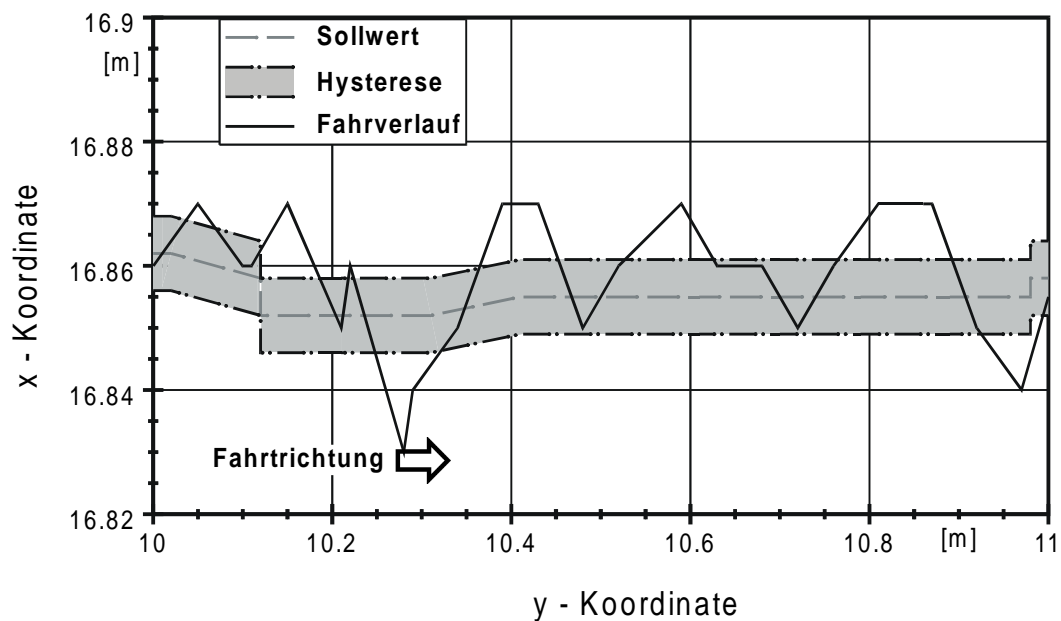
**Abb. 64:** Häufigkeitsanalyse der Abweichung einer Messfahrt Variante 2 ( $v'_x$ :  $0,07 \text{ ms}^{-1}$ ,  $v'_y$ :  $0,045 \text{ ms}^{-1}$ , Toleranz:  $\pm 0,007 \text{ m}$ )



**Abb. 63:** Häufigkeitsanalyse der Abweichung einer Messfahrt Variante 2 ( $v'_x$ :  $0,08 \text{ ms}^{-1}$ ,  $v'_y$ :  $0,049 \text{ ms}^{-1}$ , Toleranz:  $\pm 0,006 \text{ m}$ )

In Abbildung 65 ist ein Ausschnitt aus dieser Messreihe dargestellt. Die Schwingungen über die Schaltgrenzen hinaus sind deutlich reduziert.

Eine weitere Erhöhung der rechnerischen Vorfahrtgeschwindigkeit  $v'_x$  führte zu einer Verschlechterung der Steuerungsqualität.



**Abb. 65:** Ausschnitt einer Messfahrt mit den dazugehörigen Sollwerten der Steuerung (mit Mittelwertbildung)  
 $v'_x : 0,049 \text{ ms}^{-1}$ ,  $v'_y : 0,08 \text{ ms}^{-1}$ , Toleranz: 0,006 m

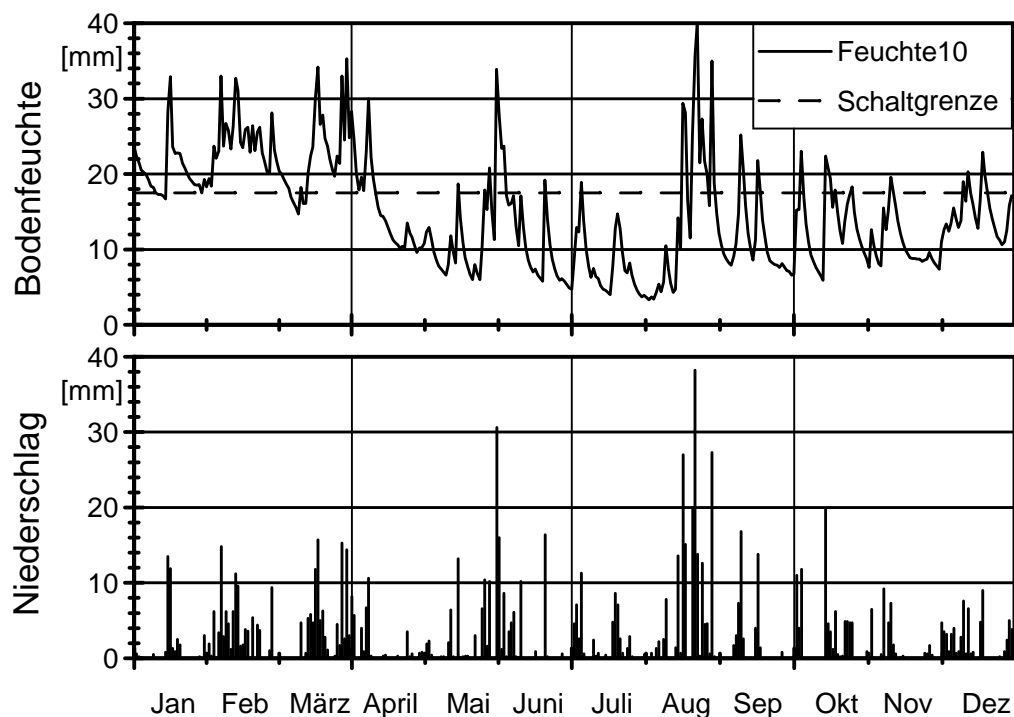
### 6.3 Expertensysteme

Die Funktionsfähigkeit der Prozessführung wurde überprüft, indem mehrere Beete zu einer Kultureinheit zusammengefasst wurden, für die eine eigener Kulturverlauf festgelegt wurde. Anhand eigener gemessener Klimadaten errechnete die Prozessführung die Bodenfeuchtedaten für jede einzelne Kultureinheit. Unterschritt die Bodenfeuchte die Grenze von 70 % der Feldkapazität, wurde ein Auftrag zur Bewässerung in die Auftragslistendatei geschrieben. Sobald dann das Geodimeter 4000 angeschlossen wurde und dem System Positionsdaten zur Verfügung stellte, begann das System selbständig mit der Bewässerungsaktion. Der Portalversuchrahmen behandelt 3 Beete gleichzeitig, jedoch mit je einer Teilbreite von 1,5 m.



### 6.3.1 Bewässerung

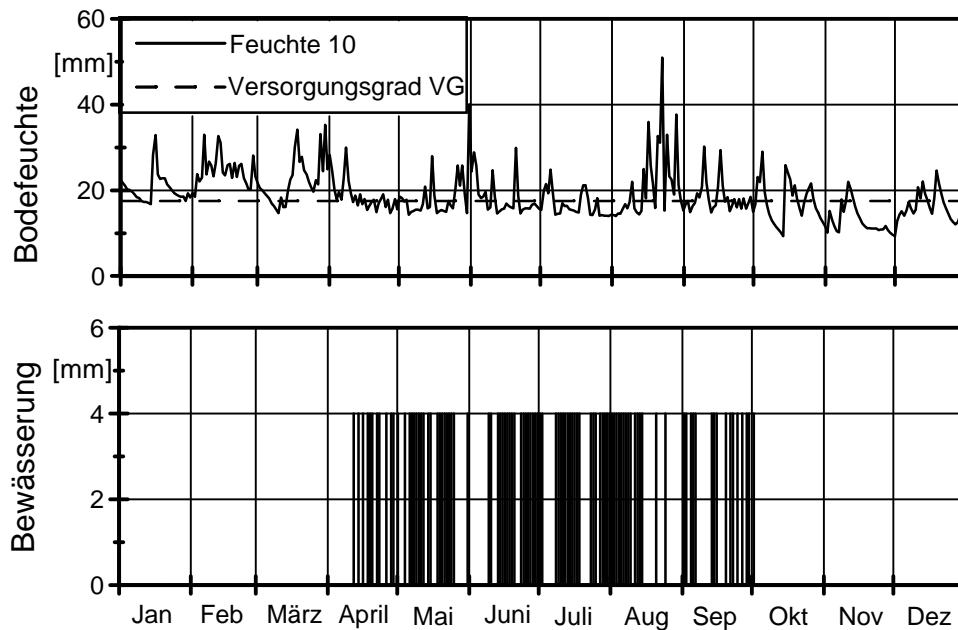
Aufgrund mehrfachen Ausfalls des Niederschlagsensors konnten jedoch während der Messperiode nicht kontinuierlich und durchgängig Niederschlagsmesswerte ermittelt werden und es kam daher zu einer überhöhten Anzahl von Bewässerungsentscheidungen. Deshalb wurde zur Veranschaulichung das Bodenfeuchtemodul auf Klimadaten der Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes angewandt. In Abbildung 66 ist der Feuchteverlauf in der obersten Bodenschicht (< 10 cm) auf mittlerem Boden (WEBER 1997) aufgrund der Klimadaten des Testreferenzjahres 7 dargestellt. Im unteren Diagramm sind die Tagessummen der Niederschläge aufgeführt.



**Abb. 66:** Feuchteverlauf in der obersten Bodenschicht (<10 cm) ohne Bewässerung

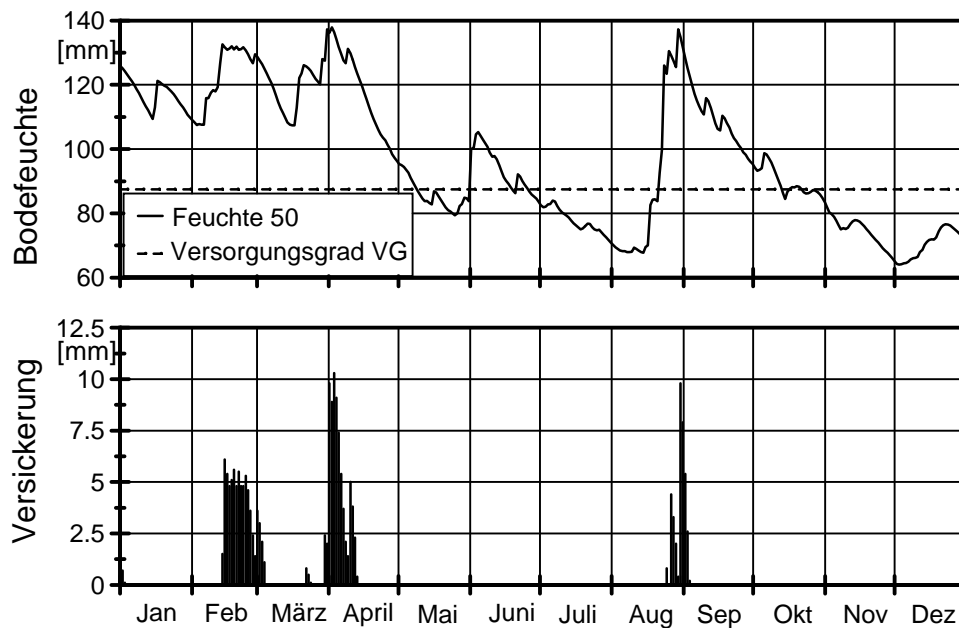
In einer zweiten Simulation wurde bei Unterschreiten des Versorgungsgrades eine Bewässerungsgabe von 4 mm in einem wassersparenden Bewässerungsverfahren durchgeführt. Der Schwellenwert Versorgungsgrad VG der Bewässerung wurde mit 70 % der Feldkapazität auf 17,5 mm festgelegt. Die Bewässerung erfolgte nur für eine angenommene Vegetationsperiode von April - September. Der gesamte errechnete Wasserverbrauch betrug 404 mm. Da nur mit einer Wassergabe / Tag

kalkuliert wurde, bedeutet dies, dass an 101 Tagen bewässert wurde. Der darauf beruhende Bodenfeuchteverlauf ist in Abbildung 67 dargestellt. Im unteren Diagramm sind zusätzlich die Bewässerungsereignisse zu den einzelnen Terminen aufgeführt.



**Abb. 67:** Feuchteverlauf in der obersten Bodenschicht (<10 cm) und daraus resultierende Bewässerungsgaben

Abbildung 68 betrachtet bei dem Modell zusätzlich die zweite Bodenschicht von 10 - 60 cm und die Versickerung von dort in den Unterboden. Es zeigt das mit der gerechneten Wassergabe von 4 mm ein Versorgungsgrad von 70% der Feldkapazität während des Sommers nicht gehalten werden kann, dass es aber dennoch durch hohe Niederschläge in der betreffenden Periode zu einem Wasser- und Stofftransport in den Unterboden kommt.



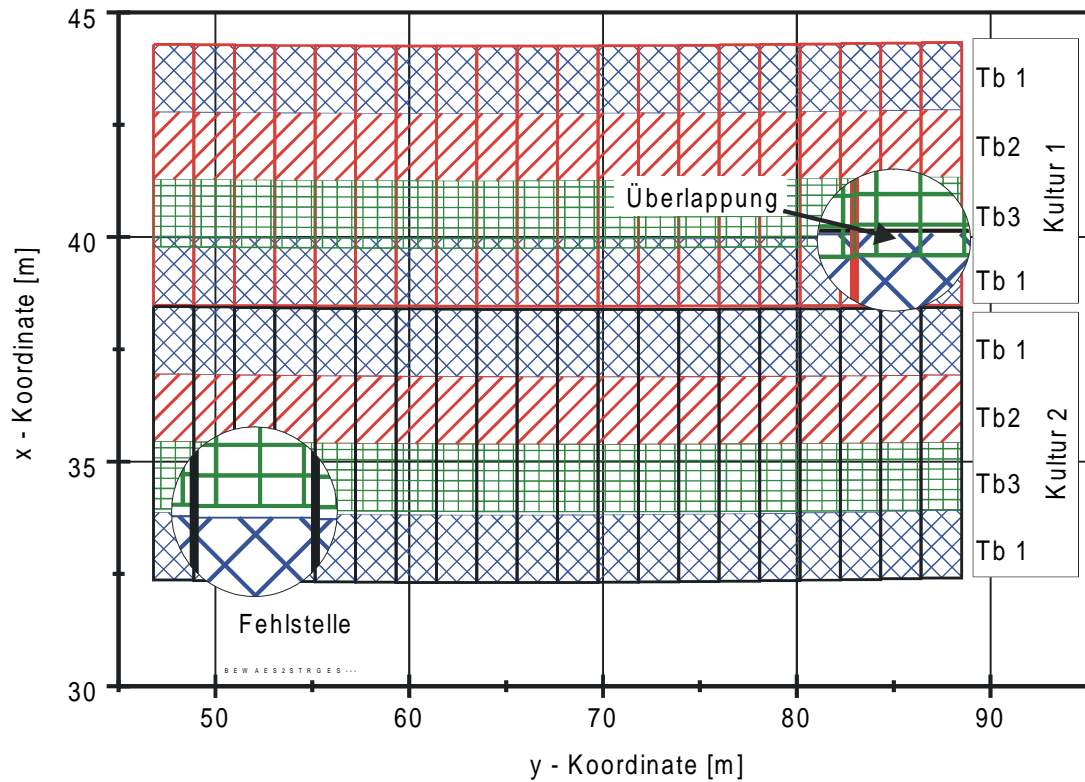
**Abb. 68:** Feuchteverlauf in der unteren Bodenschicht (10 - 60 cm) und der Versickerung hieraus in den Unterboden

### 6.3.2 Durchführung einer Bewässerungsmaßnahme

Die Durchführung zweier Bewässerungsmaßnahmen aufgrund der vor Ort gemessenen Klimadaten ist in der folgenden Abbildung 69 dargestellt. Bereiche, die die Teilbreite 1 (Tb 1) behandelt, sind kreuzdiagonal, die der Teilbreite 2 (Tb 2) sind rechtsdiagonal und die der Teilbreite 3 (Tb 3) sind gitterförmig schraffiert. Die Kulturen bestehen aus jeweils 4 Beeten. Der PVR behandelt jede Kultur einzeln, so kommt es, dass das 4. Beet ebenso wie das 5. Beet, das zur Kultur 2 gehört, mit der Teilbreite 1 behandelt wurden. Die Darstellung zeigt aber auch, dass bei den Anschlussfahrten Überschneidungen, aber auch Fehlstellen auftreten.

Da die Datengrundlage für die Behandlung reale Pflanzfahrten sind, sind die Abstände der Beete nicht exakt 1,5 m, denn die Beete werden einzeln angelegt und der Anschluss der Beete untereinander kann um mehrere Zentimeter variieren. Das

System behandelt hingegen 3 Beete gleichzeitig und kann daher nur nach den Positionsdaten eines Beetes, das unter der Teilbreite 2 liegt, steuern.



**Abb. 69:** Selbständige Durchführung einer Bewässerung von zwei Kultureinheiten

## 7 Diskussion

Die Arbeiten sind in ein Gesamtvorhabens eingebunden, das zur Entwicklung eines prozessrechnergesteuertes Kulturverfahren für den Freilandgartenbau dient, bei dem die Kulturmaßnahmen streng bedarfs- (entzugs-) orientiert, standortgebunden und weitgehend automatisiert durchgeführt werden können. Die Automatisierung ist notwendig, damit die Maßnahmen weitgehend unabhängig vom Gesamtbetriebsablauf erfolgen können. Hiermit sollen in zukünftigen Untersuchungen neue Strategien der Kulturführung mit exakter Terminierung und zielgenauer Ausbringung erarbeitet werden. Dadurch können die Betriebsmittel bedarfsgerechter eingesetzt werden, da sie mit höherer örtlicher und zeitlicher Genauigkeit ausgebracht werden können und so z. B. Auswaschungsverluste bei Düngemitteln reduziert werden.

Inwieweit sich mit Hilfe einer hohen Ortungs- und Steuergenauigkeit Einspareffekte bei den Aufwandsmengen erzielen lassen, ist nicht geklärt, da die Technik für den Freilandgartenbau mit der erforderlichen Genauigkeit nicht vorhanden ist. Daher war die Entwicklung einer rechnergestützten Prozesssteuerung im Freilandgartenbau und deren Anwendung an einem neuentwickelten Bearbeitungsgerät, dem Portalversuchsrahmen (PVR) Ziel der Arbeiten.

Im ersten Abschnitt wird das Messverhalten der beiden untersuchten Ortungssysteme eingeordnet und die sich hieraus ergebenden Schlussfolgerungen für das Steuerungsprogramm des PVR gezogen.

Im zweiten Abschnitt werden die Methoden der Pflanzenerfassung und die Genauigkeiten der Pflanzmaschinenaggregate diskutiert.

Der dritte Abschnitt behandelt die Prozessführung mit der Genauigkeit der Steuerung und den Einfluss der Konstruktion auf das Fahrverhalten und die Steuerung, den Entscheidungsablauf der Prozessführung und die beispielhafte Durchführung einer Bewässerungsmaßnahme.

## 7.1 Ortung

Es hat sich gezeigt, dass bei der Verwendung von Ortungssystemen zur Fahrzeugsteuerung der Beobachtungszeitpunkt und der zeitliche Nachlauf sehr bedeutend sind. Daher müssen primär folgende Anforderungen an ein Ortungssystem für eine einzelpflanzenorientierte Kulturführung gestellt werden:

- möglichst geringe Nachlaufzeit des Messwertes nach der Beobachtung
- kontinuierliche Verfügbarkeit des Systems bei gleicher Messqualität
- Messung mindestens der Ebenenkoordinaten (x,y), besser noch der Raumkoordinaten (x,y,z)
- Genauigkeit möglichst im Bereich  $\pm 1$  cm
- Hohe Messfrequenz

Die Messdaten beim Geodimeter 4000 können nicht direkt als Steuerkriterium übernommen werden, sondern sind um ihren zeitlichen Nachlauf zu korrigieren. Ebenso wie bei dem Leica Tachymeter (Stempfhuber, 1999) tritt auch beim Geodimeter 4000 ein Synchronisationsfehler zwischen Winkelmessung und elektrooptischer Streckenmessung auf. Schon bei einer Geschwindigkeit von 0,180 km/h beläuft sich dieser Fehler unter ungünstigen Bedingungen auf 1cm. Bei der Steuerung des PVR wurde dieser Fehler nicht berücksichtigt, da die Geschwindigkeit noch unter 0,180 km/h liegt.

Die Verfügbarkeit des Systems ist immer gegeben, abgesehen von starkem Nebel. Dies ermöglicht damit auch ein zeitgenaues Arbeiten der Prozessführung.

Einem kontinuierlichen Betrieb des Systems steht jedoch bisher entgegen, dass die Genauigkeit der Entfernungsmessung von der Dichte der Luft abhängt. Daher müssen beim Neustart des Gerätes Temperatur und Luftdruck manuell eingegeben werden. Bei kontinuierlicher Messung müssen diese Korrekturfaktoren in festen Zeitabständen angepasst werden oder die Messung wird im Prozessrechner mit den Daten der Klimastation, nach Einbau eines Barometers, korrigiert. Zusätzlich muss die Feststation vor Witterungseinflüssen durch ein Gehäuse geschützt werden.

Die dreidimensionale Positionserfassung ermöglicht auch die Höhenführung des Spritzbalkens am PVR und somit eine gleichmäßige Verteilung durch die Düsen.

Die Messfrequenz liegt mit 2 Hz relativ niedrig. Dies bedeutet, dass sich der PVR in der Zeit eines Messzyklus um 2,2 cm weiterbewegt. Dies und der zeitliche Nachlauf macht die Abschätzung der aktuellen Position aus den Messdaten notwendig. Darin besteht eine deutliche Schwäche des Systems. Denn je länger der Zeitraum ist, in dem die zusätzliche Fahrstrecke zurückgelegt wird, desto ungenauer ist die Steuerung. Daher sollte das „*Geodimeter 4000*“ als einziges Ortungssystem nur bei langsamen Geschwindigkeiten eingesetzt werden. Dadurch ist jedoch die Schlagkraft eines Arbeitsgerätes begrenzt. Dies hat Rückwirkung auf einen Einsatz des „*Geodimeter 4000*“ mit einem herkömmlichen Traktor. Grundsätzlich ist das System unabhängig vom Arbeitsgerät einsetzbar, solange das Prisma ständig sichtbar für die Feststation daran montiert ist. Jedoch benötigen übliche Verfahren in der Regel Arbeitsgeschwindigkeiten  $> 1$  m/s.

Verglichen mit den Leistungsdaten eines aktuellen RTK-GPS Systems (z. B. „*MC 1000*“ von „*Leica Geosystems*“) mit einer Messfrequenz von 10 Hz und einer Genauigkeit im Zentimeterbereich, hat das „*Geodimeter 4000*“ eine deutlich schwächere Leistung. Dennoch wurden gleiche Steuerungsgenauigkeiten erzielt, wie bei ZUYDAM (1999), der ein handgezogenes Fahrzeug mit einem RTK - GPS Empfänger von *Trimble* entlang einer geraden Linie bei einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s führte. Angesichts der schnellen Entwicklung der GPS Systeme und neuer geplanter Satellitennetze, die Europäische Union plant ein eigenes Satellitensystem mit Namen Gallileo (SCHÄNZER und MARTIN 1999), ist zu erwarten, dass in Zukunft für die Ortung innerhalb von Prozessführungssystemen noch leistungsfähigere Geräte zur Verfügung stehen.

## 7.2 Erfassung der Pflanzenposition

Bisherige Verfahren der Lokalisation von Pflanzen auf dem Feld, waren darauf ausgerichtet, die Position relativ zum Beobachter (Sensor/Kamera)(HAGUE et al. 1997, TIAN et al. 1997) zu erfassen. Die Positionsvermessung eines Pflanzenbestandes mit dem Geodimeter 4000 liefert hingegen absolute Positionsdaten der Einzelpflanzen. Dies bietet folgende Vorteile:

- Identifikation der Einzelpflanze über den Ort
- „blindes“ Wiederfinden und Bearbeiten der Einzelpflanze

Die Vorteile kommen jedoch nur zum Tragen, wenn sichergestellt ist, dass die Position der Pflanze sich während der Kultur z. B. durch Unkrauthacke nicht ändert, und dass das Wachstum der Pflanze berücksichtigt wird, in dem der Standraum der Pflanze entsprechend vergrößert wird. Dadurch ist es möglich, sowohl die Sicherheitszone zu erweitern, die die Pflanze von Herbizidbehandlungen ausspart, oder den Bereich zu erweitern, in dem Düngemaßnahmen durchgeführt werden.

Das Verfahren, die Position von Hand zu erfassen ist sehr zeitaufwändig, daher wurde auch die Fahrt der Pflanzmaschine erfasst. Hierbei wird jedoch nur der Verlauf der Pflanzenreihe ermittelt und nicht die Position der Einzelpflanze. Hierzu muss auch noch der Ablagezeitpunkt ermittelt werden und den durch das Geodimeter 4000 ermittelten Koordinaten zugeordnet werden. Dabei muss wiederum der zeitliche Nachlauf der Messdaten berücksichtigt werden, und die Position der Einzelpflanze durch Interpolation ermittelt werden.

Die Versuche zeigen aber auch, dass die genutzte Gerätetechnik Schwächen für die geforderte Ablagegenauigkeit von 1 cm hat. Durch die Montage der Pflanzaggregate mit der Stirnseite an dem Gerätetragrahmen können seitliche Kräfte mit großer Wirkung am Pflanzaggregat angreifen. Möglicherweise kann dem mit diagonalen Versteifungen zwischen Aggregat und Tragrahmen abgeholfen werden.



Für die Zukunft ist die Integration der Computerbildanalyse sinnvoll. Einerseits können mit Hilfe der Bildinformationen auch Veränderungen der Einzelpflanzenpositionen und Fehlstellen während der Kulturperiode erkannt werden. Andererseits kann erwartet werden, dass eine Vorausinformation über den Standort der Kulturpflanze die Erkennungsrate, die bei ca. 80% liegt (TIAN et al. 1997), verbessern kann.

### 7.3 Prozessführung

Der Aufbau des Prozessführungsprogrammes als eine kontinuierliche Schleife ist notwendig, um ständig die Messstellen und Schnittstellen des Rechners zu überwachen, da hierfür keine eigenen Unterstationen zur Verfügung stehen. Die Operationen müssen alle vom Hauptrechner durchgeführt werden, er wird allein durch eine Vorverarbeitung der Messwerte in den Messmodulen entlastet. In der zweiten Versuchsreihe wurde diese Bürde durch zusätzliches Abspeichern von Rechengrößen und vermehrter Kommunikation auf dem Datenbus erhöht. In der Folge davon verringerte sich die Anzahl der Positionsschätzungen in den Messintervallen des Geodimeters.

Dem kann abgeholfen werden, indem

- die Kommunikationsgeschwindigkeit auf dem Datenbus erhöht wird
- Steuerwerte nur bei Bedarf auf dem Datenbus abgesetzt werden
- ein Rechner mit höherer Rechengeschwindigkeit eingesetzt wird
- die abzuspeichernde Datenmenge so klein als möglich gehalten wird
- die Daten in größeren Gesamtpaketen oder am Ende der Fahrt abgesetzt werden, dadurch werden zeitaufwändige Dateiverwaltungsoperationen vermieden.

### 7.3.1 Steuerung

Die Besonderheit der Steuerung liegt in dem Verfolgen einer während der Pflanzung aufgenommenen unregelmäßigen Fahrtrurve. Das bedeutet, dass sich der Sollwert der Steuerung kontinuierlich ändert. Dies führt zu ständigen Richtungskorrekturen. Da das System versucht, die Position ständig zu überwachen, hängt die Genauigkeit der Steuerung sehr stark von der Qualität der geschätzten Position ab und von der Wiederholrate der Positionsschätzung.

#### 7.3.1.1 Einflussfaktoren auf die Steuerungsgenauigkeit

Die Qualität der Positionsschätzung beeinflusst die Steuerung dahingehend, dass ein Überschätzen der Vorfahrtgeschwindigkeit in x - Richtung zu einer Dämpfung des Schwingens um den Sollwert führt. Wird die Vorfahrtgeschwindigkeit zu hoch, ist die Steuerung nicht mehr in der Lage, dem sich ändernden Sollwert zu folgen.

Eine weitere Folge ist bedingt durch die lange Nachlaufzeit: Nämlich die geschätzte Position hat schon den Grenzwert in der anderen Richtung überschritten, und die Steuerung steuert der vorigen Richtungsänderung wieder entgegen, obwohl sich der Spritzbalken in Wirklichkeit noch innerhalb der Bandbreite befindet, denn die Richtungsänderung meldet das Geodimeter erst 1,5 s später.

Eine höhere Wiederholrate der Positionsschätzung ermöglicht kleinere Zwischenschritte zwischen den Messzyklen des Geodimeters. Dies verringert die Wahrscheinlichkeit, dass die geschätzte Position scheinbar über die gegenüberliegende Steuergrenze überschwingt.

Die Steuerungsgenauigkeit wird auch vom Fahrverhalten des Linearregner und der Querverschiebung beeinflusst. Der Linearregner hält sich in der Spur, indem er die Fahrtrichtung durch getrenntes an und ab Schalten des nördlichen oder südlichen Fahrturns ändert. Dadurch wird die Vorfahrtgeschwindigkeit in Längsrichtung der

Querverschiebung geringer, je nachdem wie nahe sie sich bei dem abgeschalteten Fahrtturm befindet.

#### 7.3.1.2 Bewertung der Abweichungsspannweiten

Die grundsätzliche Forderung in der Zielstellung lag in einer Genauigkeit von  $\pm 1$  cm. Die Steuerung hat Standardabweichungen von 1,2 - 1,4 cm erreicht. Es traten jedoch Spannweiten von etwa 15 cm auf. Im Hinblick auf die Bearbeitungsmaßnahmen Bewässern, Düngen und Pflanzenschutz ist der durch vereinzelt auftretende hohe Abweichungen verursachte Schaden gering. Dennoch muss auch hier die Häufigkeit der hohen Abweichungen reduziert werden, um Aufwandsverluste zu minimieren.

#### 7.4 Expertensystem

Der Entscheidungsablauf wurde anhand einer Simulationsrechnung der Bodenfeuchten in den Schichten 0 - 10 cm und 10 - 50 cm gezeigt. Die in der Simulation gerechnete Bewässerungsgabe von 4 mm reichte zwar aus, um die oberste Bodenschicht ( $< 10$  cm) im Bereich eines Versorgungsgrades von 70% der Feldkapazität zu halten, aber in der darunter liegenden Schicht gelang dies nicht. Daher ist zu klären, in welcher Schicht der Versorgungsgrad angestrebt wird, und ob etwa die gerechnete oberste Bodenschicht vergrößert werden muss, soll sie weiterhin als Entscheidungskriterium dienen. Eine Nutzung der unteren Schicht 2 im vorhandenen Bodenfeuchtemodell ist nicht sinnvoll, da die Rechnung Versickerung nur bei Überschreiten der Feldkapazität vorsieht, und die Diffusion als Transportmechanismus in die Schicht 2 nicht ausreicht.

Dennoch kam es bei größeren Niederschlägen in der Mitte der Vegetationsperiode zu einer Versickerung aus der unteren Bodenschicht in den Untergrund. Hierbei werden mit dem versickerten Wasser auch Nährstoffe in den Untergrund ausgewaschen.

Die Schnittstellendatei Agenda.lst sammelt die Bearbeitungsaufträge, die mit Hilfe des Bodenfeuchtemoduls erzeugt wurden. Sie dient weiteren noch einzubindenden Expertensystemen zur Nährstoffmodellierung oder zur Pflanzenschutzprognose als Eingang in die Prozessführung.

Die Prozessführung reagiert jedoch nicht auf Niederschlagsereignisse, die in der Zeit zwischen Berechnung und Ausführung der Bewässerung stattgefunden haben. Dies führte zu der Situation, dass sich nach einigen Monaten eine Vielzahl von Bewässerungsaufträgen für ein und dieselbe Kultur in der Schnittstellendatei angesammelt hatte. Es ist also eine Prozedur notwendig, die die Schnittstellendatei täglich pflegt, und überzählige Aufträge entfernt

#### 7.4.0.1 Bewässern

Wie die beispielhaft durchgeführte Bewässerung zeigt, kommt es zu Lücken oder Überschneidungen der bearbeiteten Fläche, weil nebeneinanderliegende Beete nicht exakt parallel verlaufen. Für eine exakte Behandlung ist es daher notwendig, die Pflanzung maschinell gesteuert vorzunehmen, damit die Beete exakt aneinander anschließen. Das ist auch im Sinne einer kompletten automatischen Kulturführung. Eine weitere Möglichkeit ist die unabhängige Steuerung der einzelnen Teilbreiten. Die Verringerung der Arbeitsbreite auf eine Teilbreite erhöhte die Bearbeitungszeit des ganzen Feldes von ca. 6 auf 18 Stunden.

#### 7.5 Weiterführende Arbeiten

Mit dem Portalversuchsrahmen steht ein Werkzeug zur Verfügung, um neue Bewässerungs- Dünge, oder Pflanzenschutzstrategien durchzuführen und zu überprüfen, deren grundlegender Ansatz eine zeit- und ortsgenaue Anwendung ist, durch die der Mittelaufwand reduziert werden kann. Unter Berücksichtigung der aktuellen Klimadaten vor Ort, können rechnergestützt Einsatzentscheidungen getroffen und termin- und ortsgenau durchgeführt werden.

Hierzu ist geplant in die Prozessführung Pflanzenwachstums- und Düngemodelle sowie Pflanzenschutzprognosemodelle an die in der Prozessführung vorhandenen Schnittstellen anzubinden. Sie können dann unter den Bedingungen vor Ort überprüft und angepasst werden. Dadurch können einzelnen Wachstumsstadien der Kultur ein bestimmter Wasser- und Nährstoffbedarf oder Krankheitsanfälligkeit zugeordnet werden, und neue Strategien der Kulturführung zur Reduzierung des Mittelaufwandes angewendet und überprüft werden.

Die hohe Genauigkeit des Ortungssystems lässt eine Identifikation der Einzelpflanze über die Position zu. In der Zukunft können ihr somit bei der Ernte mit z. B. Computerbildanalyse pflanzenbauliche Erfolgsparameter zugeordnet werden wie Ertrag und Qualität z. B. die Ausfärbung von Gemüsepaprika. Der Einsatz der Computerbildanalyse ist ebenfalls denkbar, zur Überprüfung der in der Prozessführung eingesetzten Wachstumsmodelle oder zur Feststellung des Kulturfortschritts.

Die Steuerungsgenauigkeit des PVR kann durch eine Aufrüstung mit aktueller Rechnertechnik sowie eine weiteren Verbesserung des Prozessführungsprogramms erhöht werden. Die Geschwindigkeit des Programms kann durch eine Verringerung der abgespeicherten Daten und Reduktion der Kommunikation auf dem Datenbus erhöht werden.

Die mit dem „*Geodimeter 4000*“ ermittelten Pflanzenpositionen können nach Umrechnung in das entsprechende Koordinatensystem auch genutzt werden, um mit anderen schnelleren Ortungssystemen Bodenbearbeitungsmaßnahmen, wie z. B. Unkrauthacke, durchzuführen. Sollten die Maßnahmen langsam durchgeführt werden, kann auch das „*Geodimeter 4000*“ selbst eingesetzt werden.

## 8 Zusammenfassung

Aufgrund des Witterungseinflusses ist der Einsatztermin für Bewässerung, Düngung und Pflanzenschutz für den Anbauer nur schlecht planbar. Viele Maßnahmen müssen daher präventiv durchgeführt werden um den Kulturerfolg nicht zu gefährden. Führt der Anbauer diese Maßnahmen entsprechend dem aktuellen Bedarf der Pflanze durch, ist eine Verringerung der Aufwandsmengen zu erwarten ohne den Ertrag und die Qualität der Ernte zu mindern. Arbeitsspitzen lassen dies jedoch in der Regel nicht zu.

Solche Einsparungen sind jedoch möglich, wenn die Arbeiten aus dem Betriebsarbeitsablauf ausgekoppelt und von einer rechnergestützten Prozessführung selbständig durchgeführt werden. Der Portalversuchsrahmen wurde als Gesamtkonzept für den Einsatz einer rechnergestützten Prozessführung entwickelt. Er beinhaltet einerseits eine Datenerfassungsanlage für Witterungsdaten und ein Ortungssystem zu Lokalisierung eines Arbeitsgerätes und andererseits ein Bearbeitungsgerät, mit dem Bewässerung Düngung und Pflanzenschutz durchgeführt werden können. Das Prozessführungsprogramm, das auf dem Prozessrechner des PVR arbeitet, trifft anhand der Witterungsdaten die Einsatzentscheidungen und führt sie mit Hilfe der Positionsdaten des Ortungsgeräts und dem Bearbeitungsgerät durch.

Inwieweit sich mit Hilfe einer hohen Ortungs- und Steuergenauigkeit Einspareffekte bei den Aufwandsmengen erzielen lassen, ist nicht geklärt, da die Technik hierzu nicht vorhanden ist. Die kleinste mögliche Bearbeitungseinheit ist die Einzelpflanze. Daher wurde die Zielgröße der Arbeitsgenauigkeit im Bezug auf die Einzelpflanze auf  $\pm 1$  cm festgelegt. Im Vorfeld wurden zwei Ortungssysteme mit unterschiedlichen Arbeitsprinzipien untersucht.

Das Lasertriangulationssystem war im statischen Betrieb sehr genau, jedoch war die Messgenauigkeit, über das Feld verteilt, sehr heterogen und es waren nur zweidimensionale Positionsdaten verfügbar. Das zielverfolgende Tachymeter bot zwar eine geringere Auflösung, dafür liefert es alle drei Raumkoordinaten und die Messgenauigkeit blieb im Fast Tracking Modus auf dem Versuchsfeld stabil. Unter

dynamischen Bedingungen zeigte sich ein Zeitnachlauf von 1,4 -1,6 s, wobei der Zeitnachlauf der Streckenmessung um 0,2 s höher als die der Winkelmessung war. Aufgrund der stabilen Messgenauigkeit und der Messung der dreidimensionalen Position wurde es am Versuchsgerät eingesetzt.

Eigens für die Versuche wurde ein Versuchsgerät, der Portalversuchsrahmen PVR, gebaut. Er besteht aus einem Datenerfassungsteil mit Wetterstation und Ortungssystem, einem Prozessführungssystem mit Prozessrechner und einem Ausführungsteil mit dem Span eines Linearregners mit einem in der Höhe und über eine Feldbreite von 45 m beweglichen Spritzbalken mit Dosieranlage und drei Teilbreiten von je 1,5 m Breite.

Für den PVR wurde ein Prozessführungsprogramm mit Schnittstelle zu einem Bodenfeuchtemodell und ein Steuerungsprogrammmodul für die Fahrtriebe in den drei Raumrichtungen entwickelt. Die Steuerung erfolgte mit Hilfe der Positionsdaten des zielverfolgenden Tachymeters. Der Zeitnachlauf der Positionsdaten wurde berücksichtigt, indem aufgrund der Laufzeiten der Fahrtriebe eine aktuelle Position geschätzt wurde. Aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeit des Versuchsgerätes wurde der Synchronitätsfehler zwischen Winkelmessung und Streckenmessung des zielverfolgenden Tachymeters nicht berücksichtigt.

Die Position der Einzelpflanzen wurde einerseits als Reihenverlauf durch Verfolgung der Fahrspur der Pflanzmaschine mit dem Tachymeter ermittelt und andererseits durch manuelles Einmessen des Pflanzenmittelpunktes. Hierbei war die Streuung quer zur Fahrspur bei den von Hand eingemessenen Pflanzen höher als bei der vermessenen Pflanzspur.

Der PVR wurde mit Hilfe der Positionsdaten der Pflanzspur entlang der Pflanzenreihen geführt. Es zeigte sich, dass die Steuerungsgenauigkeit sehr stark von der Qualität der Positionsschätzung abhing. Sie konnte verändert werden, indem der Wert der rechnerischen Vorfahrtgeschwindigkeit verändert wurde, und indem die Anzahl der Wiederholungsrechnungen erhöht wurde. Insgesamt konnten mittlere Abweichungen von  $\pm 1,5$  cm erzielt werden.

---

Ein Bodenfeuchtemodell wurde als Beispiel für die Einbindung eines Expertensystems in das System aufgenommen um für Bewässerungsentscheidungen Eingangsdaten zur Verfügung zu stellen. Als Schnittstelle für den Eingang von Bearbeitungsaufträge wurde eine Datei geschaffen, auf die sowohl die Prozessführung als auch die Expertensysteme Zugriff haben.

Aufgrund aktueller Witterungsdaten wurde im Prozessführungsprogramm ein Defizit der Bodenfeuchte festgestellt und beispielhaft Bewässerungsmaßnahmen ausgeführt. Da die Bewässerung mit drei Teilbreiten auf drei Beeten gleichzeitig durchgeführt wurde, aber sich die Steuerung an dem mittleren Beet orientierte, kam es zu Fehlstellen oder Überlappungen, da die Beete nicht exakt parallel verliefen.

Mit dem Portalversuchsrahmen steht ein Gerät zur Verfügung, mit dem neue Strategien der Kulturführung zur Reduzierung der Aufwandsmengen einer bedarfs- und einzelpflanzenorientierten Prozessführung durchgeführt werden können. Mit diesen Untersuchungen kann das Einsparpotential solcher Strategien ermittelt werden.



## 9 Summary

Due to the influence of the weather the grower can hardly plan the application date for irrigation, fertilization and plant protection. Therefore many treatments have to be executed preventively not to endanger culture success. If the grower executes these applications according to the current requirement of the plant, a decrease of the expenditure quantities is to expect without reducing the yield and the quality of the harvest. However high demands on the working capacity do not permit this usually.

That is however possible, if the work is uncoupled from the routinework, and are independently executed by a computer-aided process control. An experimental frame device (PVR) was developed as a complete concept for the application of a computer-aided process control. It contained on the one hand a data acquisition system for climate and a positioning system for the machines and its implements and on the other hand a spraying boom for irrigation fertilization and plant protection. The process control program, which operates on the process computer of the PVR, makes the application decisions on the basis of current weather data and executes it comparing the position data of the spraying boom and the plant row.

It is not clarified to what extent saving effects on expenditure quantities can be obtained with the help of a high position and control accuracy, because there are no techniques to do that. For the experimental concept the smallest possible processing unit was assumed to be the single plant. Therefore the target of the positioning accuracy in reference to the single plant was determined to be  $\pm 1$  cm.

In the beginning two positioning systems with different working principles were examined. The lasertriangulation system was very exact in static operation, however the measuring accuracy was very heterogeneous in several parts of the field and there were only two-dimensional position data available. The target pursuing tachymeter showed a wider scale in measuring, but it supplies all three-dimensional coordinates and the measuring accuracy remained stable in the fast tracking mode on the experimental field. Under dynamic conditions a time delay of

1,4 -1.6 s was shown. Due to the stable measuring accuracy and the measurement of the three-dimensional position it was used with the test device.

The experimental frame device PVR was built especially for the use of an automatic process control. It consists of a data acquisition section with weather-station and positioning system, a processing system computer and an executive part with the span of a linear moving irrigator with a 4.5 m spraying boom mobile within field width of 45 m, and with three sections of 1.5 m due to the bed width.

For the PVR a process control program has been developed with an interface for several expert systems, i.e. for a soil humidity model, and a control program module for the steering in three dimensions. The steering has been done by using the position data of the target-pursuing tachymeter. The time delay of the position data was considered, as the current position was estimated on base of the run times of the drives. Due to the small driving speed of the PVR the synchronity delay between angular and distance measurement of the target-pursuing tachymeter was not considered.

The PVR was led along the plant rows using the position data which were gained by surveying the track of the transplanting machine. The control accuracy was very strongly influenced by the quality of the position estimation depending on the computational loop rate, and the virtual driving velocities. In total an average deviation of  $\pm 1.5$  cm could be obtained.

According to current weather data in the processing program a deficit of the soil humidity was determined and an irrigation was executed. The PVR can be used as a tool executing and evaluating new strategies in the crop cultivation due to the requirement of the single plant and for the reduction of the expenditure quantities.

## 10 Literatur

- ACHTNICH, W. 1980: Bewässerungslandbau: Agrotechnische Grundlagen der Bewässerungswirtschaft. Ulmer, Stuttgart.
- ALT, D., J. RIMMEK, 1996: OSGAR Pro 2.0 - Das Profiprogramm für die Düngung im Erwerbsgemüsebau, Erwerbsobstbau und im öffentlichen Grün. Der Gartenbauingenieur 2/96 S.46 - 47
- AUERNHAMMER H. 1990: Landtechnische Entwicklungen für eine umwelt- und ertragsorientierte Düngung, Landtechnik 7+8 Landwirtschaftsverlag Münster S. 272 - 278
- AUERNHAMMER H. 1992: Rechnergestützter Pflanzenbau am Beispiel der umweltorientierten Düngung. VDI/MEG Kolloquium Ortung und Navigation Landwirtschaftlicher Fahrzeuge Heft 14 Tagung Weißenstephan 5./6. März 1992
- AUERNHAMMER H. 1999: Precision Farming for the Site-Specific Fertilisation. Zeitschrift für Agrarinformatik 7 (3), S. 58-66
- AUGTER, G. 1983: Ein Agrarmeteorologisches Modell zur Ableitung planungswürdiger Feldarbeitszeiten in der Frühjahrsbestellung. Dissertation, Georg August Universität, Göttingen.
- AUGTER, G. 1990: Ermittlung verfügbarer Feldarbeitstage aus Klimabeobachtungen. KTBL, Darmstadt.
- DOORENBOS J. und W.O. PRUITT, 1977: Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 33. FAO Rom
- DURLESSER H. und C. SPERL, 1999: Satellitengestützte Kartierung des Bodenwassergehaltes mit dem Electromagnetic Soil Mapping System. Tagung Landtechnik 1999 = Conference Agricultural Engineering 1999, VDI-MEG, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, S.175 - 180
- DYER, J.A. und W. BAIER, 1979: Weather based estimation of field workdays in fall. Canadian agricultural engineering, Vol. 21, S. 119 - 122
- ENGEL, T. 1992: Einsatz von Stickstoffs Simulationsmodellen in der Düngeberatung - Funktionsweise, Möglichkeiten und Grenzen - in: Referate der 13. GIL Jahrestagung in Giessen 1992. Hrsg.: R. Ackmann, B. Petersen, H. Geidel Berichte der GIL Bd.3 S. 47 - 52
- ENGEL TH., B. KLÖCKING, E. PRIESACK, TH. SCHAAF 1993: Simulationsmodelle zur Stickstoffdynamik. In Agrarinformatik Bd. 25 Ulmer Verlag Stuttgart

- 
- FINK, M. 1996: N- Expert für Windows™. Der Gartenbauingenieur 2/96 S.47
- HÄBLER, J und H. WACHSMUTH 1979: Formelsammlung für den Vermessungsberuf. Wilhelm Bing Verlag, Korbach
- HAGUE T., MARCHANT, J.A. und TILLET, N. D. 1997: A System for Plant Scale Husbandry. Precision Agriculture '97, Ed.: John Stafford, Vol. II, S. 635 - 642
- HAUDE W. 1958: Über die Verwendung verschiedener Klimafaktoren zur Berechnung der potentiellen Evaporation und Evapotranspiration. Meteorolog. Rundschau 11 S. 96 - 99
- HEISSNER, A. 1997: Die Transpiration von Paprika im Gewächshaus: Messungen und Modellierung. Gartenbauwissenschaft 62 (5), 228. 236
- HELBACH, C. und H. SCHLEMMER 1994: Ein computerunterstütztes Positioniersystem für Vermessungsarbeiten auf der Baustelle, Allgemeine Vermessungsnachrichten 6, S. 219 - 228
- HIMKEN M. 1996: Hydro-Plan + Substrafeed. Der Gartenbauingenieur 2/96 S.48
- JANSSEN, J. und F. SCHOEDDER 1980: Ableitung von Luftzustandsgrößen aus meteorologischen Daten. Grundlagen der Landtechnik 30, S. 81 - 90
- KLUG, E. 1996: ODIN - Optimale Düngung im Nutzgartenbau. Der Gartenbauingenieur 2/96 S.47 - 48
- MIZRACH, A.; I. SHMULEVICH, O. YKUTIELI und Y. EDAN, 1994: Evaluation of a laser method for guidance of field machinery. Computers and Electronics in Agriculture, 10, S. 135 - 149
- PASCHOLD, P.-J. 1999: Geisenheimer Bewässerungsteuerung- Aktuelle Empfehlungen. Gemüse 2, S. 88- 92
- PASCHOLD, P.-J. und A. WIETHALER, 1999: Sensoren zur Steuerung der Bewässerung bei Freilandgemüse. Gemüse 2/1999 S. 93 - 96
- PASCHOLD, P.-J., J. KLEBER und K.H. ZENGERLE, 2000: Einfluss der Bewässerung auf den Ertrag von Brokkoli. Gemüse 2/2000 S. 11 - 14
- PFÜLB, E.; K.H. ZENGERLE und H.D. HARTMANN, 1991: Die Bedarfsgerechte Bewässerungssteuerung im Freilandgemüsebau. Gemüse 7 , S
- PRITSCHOW, G.; M. DALACKER J. KURZ, S. MCCORMAC, J. ZEIHNER 1996: Praxisgerechte Sensorstrategien für die Lokalisierung eines mobilen Mauerroboters auf der Baustelle. Autonome Mobile Systeme 1996 12. Fachgespräch München 14.-15. Oktober 1996 Hrsg: G. Schmidt und F. Freyberger. Springer-Verlag Berlin Heidelberg

- SCHARPF, H. C. 1996: Alte und neue Erkenntnisse in der N-Versorgung von Gemüse. Der Gartenbauingenieur 2/96 S.42 - 44
- SCHRÖDER, F.-G.; D. SCHWARZ ,R. KUCHENBUCH 1995;: Comparisons of biomass production of tomatoes grown in two closed circulating systems. Gartenbauwissenschaften 60 (1995), 6, 294-297
- SCHWARZ, D.; F-G SCHRÖDER; R. KUCHENBUCH 1996: Balance sheet for water, potassium, and nitrogen for tomatoes grown in two closed circulated hydroponic systems. Gartenbauwissenschaft 61 (5 ), 249-255
- SCHLEMMER, H. 1996: Grundlagen der Sensorik: eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure. Wichman, Heidelberg
- SCHWENKE, T. und H. AUERNHAMMER, 1999: Koppelsysteme für die Stützung von DGPS, Landtechnik 54, 2, S. 86-87
- SHMULEVICH, I.; G. ZELTZER, und A. BRUNFELD, 1989: Laser scanning method for guidance of field machinery - Transactions of the ASAE, 32(2), S. 425-430
- STEMPFHUBER, W. 1999: Kinematische Vermessung mit dem zielverfolgenden Tachymeter. In: "Sensorsysteme im Precision Farming" Heft Nr.12 Herausgeber: Prof. Dr. R. Bill, G. Grenzdörffer und F.Schmidt. Universität Rostock
- STORCK, H. und E. BERG, 1991: Produktionsplanung und -führung. In: Gemüseproduktion Hrsg: KRUG, H. 2.Auflage, Verlag Paul Parey Berlin und Hamburg, S. 265 - 275
- TIAN, L.; D. C. SLAUGHTER; R. F. NORRIS 1997: Outdoor Field Machine Vision Identification of Tomato Seedlings for Automated Weed Control. Transactions of the ASAE Vol 40(6), S. 1761 - 1768
- TILLETT, N.D.und T.G. NYBRANT, 1990: Leader cable guidance of an experimental field gantry. J. agric. Eng. Res., 45, S. 253 - 267
- TILLETT, N.D., 1991: Automatic Guidance Sensors for Agricultural Field Machines: A Review. J. agric. Eng Res., 50, S. 167 - 187
- TISCHER, H 1998: Entscheidungs und Prognosemodelle im Pflanzenschutz. Gesunde Pflanzen 8/1998 S. 237-243
- ULLRICH, G. 1996: Navigations- und Steuerungssysteme für die freie Navigation von Radfahrzeugen. Autonome Mobile Systeme 1996 12. Fachgespräch München 14.- 15. Oktober 1996 Hrsg: G. Schmidt und F. Freyberger. Springerverlag Berlin Heidelberg. S. 281-291

- ZERCHE, S. und R. KUCHENBUCH 1995: Stickstoff- und Kaliumbilanzen bei Anbau von Chrysanthemen (Dendranthema-Grandiflorum-Hybriden) im Plant Plane Hydroponik Verfahren; In: Zeitschrift für Pflanzenkunde und Bodenkunde, Weinheim 158, S. 393-398
- ZUYDAM, R.P. van 1990a: Lasergesteuert zaaïen met de gantry. Landbouwmeechanisatie 41, 6, S. 12 -13
- ZUYDAM, R.P. van 1990b: Lasergesteuert schoffelen met de gantry. Landbouwmeechanisatie 41, 8, S. 31
- ZUYDAM, R.P. van 1991: Lasergesteuert rijenbemesten met de gantry. Landbouwmeechanisatie 42, 7, S. 42 - 43
- ZUYDAM, R.P. van 1992a: Volkomen duïsternis vereist. Landbouwmeechanisatie 43,3, S. 84 - 85
- ZUYDAM, R.P. van 1992b: Automatische Steuerung von landwirtschaftlichen Geräten. VDI-MEG Kolloquium Agrartechnik 14, Freising - Weihenstephan,5. - 6. 3. 1992, S.145 - 157
- ZUYDAM, R.P. van, A. Lamaker und D. Goense 1999: Centimetre-Precision Guidance of an Agricultural Vehicle and Implement in the Open Field Tagung Landtechnik 1999 = Conference Agricultural Engineering 1999 VDI-MEG VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, S.205 - 210

#### Verwendete Software:

- BORLAND INTERNATIONAL 1992: Turbo Pascal, Version 7.0 Copyright 1983 1992
- COREL CORPORATION 1997: Corel WordPerfect Suite 8 Academic, Copyright 1997
- COREL CORPORATION 1997: Corel Draw 8 Academic, Copyright 1997
- GESELLSCHAFT FÜR STRUKTURANALYSE GFS 1997: DIAdem 3.01 Aachen
- RISING EDGE DATA SERVICES 1989,: ASYNC11 Asynchronous Serial Communications Package for Turbo Pascal V5.0 Version 1.1 - 05/04/89