

Institut für Landtechnik  
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

**Erfassung der Wurzelarchitektur von Zuckerrüben und Mangold  
mittels UWB-RADAR**

Inaugural-Dissertation  
zur  
Erlangung des Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)  
der  
Landwirtschaftlichen Fakultät  
der  
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität  
zu Bonn

vorgelegt im November 2012 von  
Dipl.-Ing. agr. Christian Peveling-Oberhag  
aus  
Datteln

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers  
1. Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Jan-Welm Biermann  
Tag der mündlichen Prüfung: 05.04.2013

© 2013 im Selbstverlag

Bezugsquelle: Institut für Landtechnik  
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität  
Nussallee 5  
53115 Bonn

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Texten und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne Zustimmung des Autors urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen

*Wer bewirkt, daß dort, wo bisher ein Halm wuchs, nunmehr zwei Halme wachsen, der hat mehr für sein Volk getan als ein Feldherr, der eine Schlacht gewann.*

*(Friedrich der Große)*

*Meinen Eltern*



## Kurzfassung

Die Züchtung von Nutzpflanzen ist ein wichtiger Prozess für die Entwicklung leistungsfähiger neuer Pflanzensorten. Die schnelle Bonitur einer Vielzahl von Nutzpflanzen im Rahmen einer pflanzenzüchterischen Fragestellung (Rapid Phenotyping) erfordert deshalb hochauflösende und nicht-destruktive Sensorsysteme. Für Wurzelfrüchte, deren ertragsrelevanter Teil sich unter der Erdoberfläche entwickelt, stehen bisher allerdings nur solche Sensorsysteme zur Verfügung, die immobil und mit hohen Kosten behaftet sind. Ziel der vorliegenden Arbeit war es deshalb ein neues Sensorsystem auf Basis von Ultrabreitband-RADAR zu entwickeln, welches Wurzelfrüchte im Boden erfassen und Unterschiede in der Wurzelarchitektur voneinander diskriminieren sollte. Dabei sollte das System einfach zu transportieren, intuitiv zu bedienen und erheblich günstiger sein als bestehende Systeme (Computertomographie und Magnetresonanztomographie).

Hierzu wurde ein Sensorsystem aufgebaut, welches diese Aufgaben an einzelnen Pflanztopfen erfüllen sollte. Als Modellpflanzen wurden Zuckerrübe und Mangold ausgewählt, da hier erhebliche Unterschiede in der Entwicklung des Wurzelsystems zu erwarten waren.

Die Prüfung aller wesentlichen Komponenten und Datenverarbeitungsschritte zeigte gute Ergebnisse und lieferte eindeutige Informationen zur Konfiguration des Sensorsystems hinsichtlich Antrieb, Antennenpolarisation, Antennenabstand und Datenverarbeitung. Während bei der Untersuchung von Testkörpern eindeutige Ergebnisse erzielt wurden, die die Leistungsfähigkeit des Sensorsystems unter Beweis stellten, war die Applikation auf reales Pflanzenmaterial weniger erfolgreich. Das System lieferte zwar Informationen über den betreffenden Wurzelkörper, es zeigte sich jedoch, dass diese für die gleiche Pflanze weder konsistent waren, noch dass Unterschiede hinsichtlich der Größe und der Morphologie des Wurzelkörpers erfasst werden konnten. Eine Diskriminierung der Wurzelarchitektur anhand der Sensordaten war deshalb nicht möglich.

Für eine zukünftige Applikation des Sensorsystems sind deshalb Modifikationen notwendig, die vor allem die Konfiguration des RADAR-Systems, die Ausgestaltung der Antennen und die Datenauswertung betreffen.

## **Abstract**

Plant breeding is highly important for development of efficient crops. Rapid assessment of plant-parameters within the breeding process (Rapid Phenotyping) is crucial. Therefore non-destructive sensors are needed for recognition of plant parameters. However, in case of root-crops the assessment of the buried part of the plants is difficult and only a few sensor-systems are able to analyze the root structure in a non-destructive way. In most cases these sensor-systems are immobile and highly expensive. Therefore the aim of this thesis was to develop a novel sensor-system based on ultra-wideband RADAR, which on the one hand would be able to analyze the root-structure with high resolution in a non destructive way and on the other hand would be more valuable and mobile compared to the existing systems (CT and MRI).

Based on these ideas a sensor-system was developed, which was meant to be able to match the requirements. The sensor system has been tested experimentally using single plant pots under greenhouse-conditions. For testing the system with real plants sugar beet and leaf beet have been selected as models, because they have significantly different root architecture.

Within the experiments all components of the sensor system and all steps of data processing showed good results. Experiments with test bodies delivered clear information about optimization of the system's drives, antenna positioning and polarization and gave recommendations on data processing. However, in case of real plant material the results were not as good as expected. Sensor data was generated for single plants, but it was neither consistent for the same plant nor information was gathered about size and morphological parameters on the root system. Therefore separation of different root architecture based on the sensor data was not possible.

Further applications of the sensor-system would require major modifications of the whole system including configuration of the RADAR, antenna design and improvement of the data processing software.

## I. Inhaltsverzeichnis

<b>I.</b>	<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>II.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>III.</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XII</b>
<b>IV.</b>	<b>Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen.....</b>	<b>XIII</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens.....</b>	<b>4</b>
2.1	Analyse von Wurzelfrüchten.....	4
2.2	Eigenschaften von Wurzelfrüchten und Zuckerrüben .....	4
2.3	Destruktive Analyseverfahren.....	6
2.3.1	Manuelle Verfahren.....	6
2.3.2	Elektromechanische Verfahren .....	7
2.3.3	Volumenstromverfahren.....	7
2.3.4	Einzelrübenzählung .....	7
2.3.5	Einzelrübenmessung .....	8
2.4	Nicht-destruktive Analyseverfahren .....	8
2.4.1	Optische Analyseverfahren .....	8
2.4.2	Magnetresonanztomographie .....	9
2.4.3	Computertomographie .....	13
2.4.4	Emissionstomographie.....	15
2.4.5	Mikrowellenreflexion (RADAR).....	15
2.5	Anwendung von RADAR in der Pflanzenanalyse .....	16
2.5.1	Funktionsweise von RADAR .....	16
2.5.2	Physikalische Eigenschaften elektromagnetischer Wellen .....	17
2.5.3	Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Materie .....	19

2.5.4	Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung in geologischen Medien.....	21
2.5.5	Anwendungen von GPR .....	23
2.5.5.1	Archäologie und Forensik.....	24
2.5.5.2	Materialanalyse .....	25
2.5.5.3	Landminensuche.....	26
2.5.5.4	Land- und Forstwirtschaft, Pflanzenanalyse .....	28
<b>3</b>	<b>Problemstellung .....</b>	<b>33</b>
3.1	Aufgabenstellung und Forschungshypothesen.....	33
3.2	Konzept des Messsystems.....	35
<b>4</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>37</b>
4.1	Aufbau des Sensorsystems.....	37
4.1.1	Komponenten und Funktionsprinzip des RADAR-Systems .....	37
4.1.2	Spezifikationen des verwendeten RADAR-Systems.....	43
4.1.3	Scannersystem .....	46
4.1.4	Systemsoftware .....	47
4.1.5	Rohdatenverarbeitung .....	48
4.2	Pflanzgefäße.....	52
4.3	Pflanzsubstrat, Bewässerung und Nährstoffzuteilung.....	52
4.4	Pflanzenmaterial .....	53
4.5	Bestimmung des Substrat-Wassergehalts.....	53
4.6	Referenzkörper .....	54
4.7	Datenbereinigung und Datenauswertung .....	55
4.7.1	Time-Gating.....	55
4.7.2	Hintergrundabzug .....	56
4.7.3	Hilbert Transformation .....	58
4.7.4	Hierarchie der Datenverarbeitung und Auswertung.....	60



4.8	Interpretation der erzeugten RADAR-Bilder.....	61
4.9	Methoden zur Überprüfung des Sensorsystems.....	64
4.9.1	Überprüfung der Antriebselemente .....	64
4.9.2	Festlegung von Antennenabständen und Polarisation .....	65
4.9.3	Prüfung der Hintergrundabzugsmethoden .....	65
4.9.4	Prüfung der weiteren Datenbereinigungsmethoden .....	66
4.10	Versuche zur Eingrenzung des Zeitbereichs .....	66
4.11	Messung von Pflanzenmaterial unter Gewächshausbedingungen.....	67
4.12	Versuche zur Erhöhung des dielektrischen Kontrastes.....	68
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>69</b>
5.1	Überprüfung der Antriebselemente.....	69
5.1.1	Rotationsantrieb.....	69
5.1.2	Linearantrieb.....	70
5.1.3	Bewertung der Leistungsfähigkeit des Antriebssystems.....	72
5.2	Optimierung von Antennenabstand und Polarisation .....	73
5.3	Datenverarbeitung- und Datenbereinigung.....	79
5.3.1	Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke.....	79
5.3.2	Hintergrundabzugsmechanismen.....	82
5.3.2.1	Statischer Hintergrundabzug .....	85
5.3.2.2	Dynamischer Hintergrundabzug .....	91
5.3.2.3	Bewertung der Leistungsfähigkeit der Hintergrundabzüge .....	95
5.3.3	Eingrenzung des Zeitbereichs.....	96
5.3.4	Anwendung der Hilbert-Transformation.....	99
5.3.5	Anwendung der Datenverarbeitungs- und Datenbereinigungsmechanismen auf Zuckerrübenpflanzen .....	101
5.3.6	Zusammenfassende Bewertung der Leistungsfähigkeit der gewählten Methoden.....	107

5.4	Untersuchung des Pflanzenmaterials unter Gewächshausbedingungen .....	108
5.4.1	Qualitative Analyse der Zuckerrüben-Reflexionsdaten.....	108
5.4.2	Qualitative Analyse der Mangold-Reflexionsdaten .....	115
5.4.3	Vergleich von Zuckerrüben- und Mangold-Reflexionsdaten .....	122
5.4.4	Qualitative Pflanzenanalyse nach Erhöhung des dielektrischen Kontrastes.....	125
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>132</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>136</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>138</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>146</b>
9.1	Richtcharakteristik der verwendeten Hornantennen .....	146
9.2	Abmessungen der verwendeten Antennen.....	150
9.3	Eigenschaften des verwendeten Düngemittels.....	151

## II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kombinierte MRI-PET Aufnahme einer Zuckerrübe. (a) Foto der untersuchten Rübe (b) MRI-Aufnahme (c) Kombinierte MRI-PET Aufnahme nach Applikation eines Radiotracers. Sh: Blattansätze, pi: Mark, hy: Hypokotyl, ro: Feinwurzeln. Nach JAHNKE et al. (2009), verändert .....	12
Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines einfachen RADAR-Systems nach TOOMAY & HANNEN (2004), verändert.....	16
Abbildung 3: Spektrum elektromagnetischer Wellen nach KUCHLING (2007) .....	18
Abbildung 4: GPR-Aufnahme (Radargramm) eines Armierungsstahls als Referenzmessung. Die Intensität der Reflexionsdaten wird in Form eines Farbgradienten als Funktion der Tiefe (y) in Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung (West nach Ost ( $W \rightarrow E$ ), x) dargestellt. Nach SCHULTZ (2008).....	25
Abbildung 5: Zeitverlauf, Autokorrelationsfunktion und Frequenzspektrum einer idealen MLBS nach SACHS & PEYERL (1999) .....	40
Abbildung 6: Interleaved-sampling für $m = 1$ und $n = 3$ . Die Abtastwerte sind entsprechend ihrer natürlichen Reihenfolge nummeriert nach SACHS & PEYERL (1999).....	41
Abbildung 7: Schematischer Aufbau des UWB-RADARs nach SACHS et al. (2005), verändert .....	42
Abbildung 8: Theoretisches Auflösungsvermögen des RADAR-Systems ( $\delta_r$ ) in Abhängigkeit von der Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon_r$ ) des betreffenden Materials. Alle Werte wurden gemäß Gleichung 4-11 berechnet .....	45
Abbildung 9: Scannersystem als Foto (links) und Funktionsskizze (rechts) mit allen wesentlichen Komponenten. $T_x$ : Transmitter-Antenne, $R_x$ : Receiver-Antenne, $La$ : Linearantrieb (mit angedeutetem Laufweg), $Pg$ : Pflanzgefäß, $Ra$ : Rotationsantrieb.....	46

Abbildung 10: Schematischer Aufbau des Datenarrays nach der Rohdatenverarbeitung nach MATHWORKS (2009), verändert.....	51
Abbildung 11: RADAR-Volumen nach SACHS (1998). x: Scannerposition Rotationsantrieb; y: Scannerposition Linearantrieb.....	51
Abbildung 12: Flussdiagramm zu Ablauf und Hierarchie der Datenverarbeitung und –bereinigung.....	60
Abbildung 13: Aufbereitung der Reflexionsdaten am Beispiel einer in das Substrat eingebrachten Metallplatte. A: Rohdaten, B: Daten nach Time-Gating, C: Daten nach Time-Gating und Hintergrundabzug, D: Daten nach Time-Gating, Hintergrundabzug und Bildung des quadratischen Absolut-Wertes der Hilbert-Transformation.....	61
Abbildung 14: B-Scan einer $120 \times 80 \times 10$ mm Metallplatte in Quarzsand. Die Position einiger markanter Reflexionsphänomene ist in der Funktionsskizze (links) und dem Radargramm (rechts) besonders gekennzeichnet: $G_V$ : Vordere Gefäßwand, $G_R$ : Rückseitige Gefäßwand, MP: Metallplatte.....	62
Abbildung 15: Drehwinkel des Rotationsantriebs in Abhängigkeit von der Nummer der Messung für drei unterschiedliche Schrittweiten ( $n = 30$ ).....	69
Abbildung 16: $H(r)$ von $T_A$ und $T_B$ bei horizontaler (HH) und vertikaler Antennenpolarisation (VV) in Abhängigkeit vom Antennenabstand zur Oberfläche des Versuchsgefäßes ( $n = 10$ ).....	74
Abbildung 17: $H(r)$ in Abhängigkeit von der Laufzeit der elektromagnetischen Wellen. Dargestellt werden die Daten von $T_A$ und $T_B$ bei horizontaler Polarisation (HH) für unterschiedliche Antennenabstände. Die Daten wurden über die vertikale Scannerposition gemittelt ( $n = 10$ ).....	75

Abbildung 18: $H(r)$ in Abhängigkeit von der Laufzeit der elektromagnetischen Wellen. Dargestellt werden die Daten von $T_A$ und $T_B$ bei vertikaler Polarisation (VV) für unterschiedliche Antennenabstände. Die Daten wurden über die vertikale Scannerposition gemittelt ( $n = 10$ ) .....	76
Abbildung 19: Reflexionscharakteristik von $T_A$ und $T_B$ in Abhängigkeit von vertikaler Scannerposition und Laufzeit bei verschiedenen Antennenabständen und horizontaler Polarisation ( $n = 10$ ) .....	77
Abbildung 20: Reflexionscharakteristik von $T_A$ und $T_B$ Abhängigkeit von vertikaler Scannerposition und Laufzeit bei verschiedenen Antennenabständen und vertikaler Polarisation ( $n = 10$ ) .....	78
Abbildung 21: Wirkung von Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke auf die Reflexionsdaten von $T_A$ . A: Rohdaten, B: Daten nach Abzug einer Referenzmessung, C: Daten nach Begrenzung der Scanstrecke und Time-Gating, D: Mittlerer Korrelationskoeffizient von gesendetem und reflektiertem Signal ( $r$ ) über der Laufzeit. Die gestrichelten Linien deuten die Schnittebenen im Zeit- und Wegbereich an ( $n = 10$ ).....	79
Abbildung 22: Wirkung von Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke auf die Reflexionsdaten von $T_B$ . A: Rohdaten, B: Daten nach Abzug einer Referenzmessung, C: Daten nach Begrenzung der Scanstrecke und Time-Gating, D: Mittlerer Korrelationskoeffizient von gesendetem und reflektiertem Signal ( $r$ ) über der Laufzeit. Die gestrichelten Linien deuten die Schnittebenen im Zeit- und Wegbereich an ( $n = 10$ ).....	81
Abbildung 23: Wirkung von Referenzabzug (REF) auf die Rohdaten (RAW) von $T_A$ und $T_B$ ( $n = 10$ ) .....	83
Abbildung 24: Wirkung des statischen Hintergrundabzugs in zweiter Dimension auf die Reflexionsdaten von $T_A$ in Abhängigkeit von der jeweiligen Mittelwertmethode. Ref: Abzug einer Referenzmessung (als Vergleich), Ami: Arithmetisches Mittel, Med: Median, Mod: Modus ( $n = 10$ ) .....	85

Abbildung 25: Wirkung des statischen Hintergrundabzugs in zweiter Dimension auf die Reflexionsdaten von $T_B$ in Abhängigkeit von der jeweiligen Mittelwertmethode: Ref: Abzug einer Referenzmessung (als Vergleich), Ami: Arithmetisches Mittel, Med: Median, Mod: Modus ( $n = 10$ ) .....	86
Abbildung 26: Wirkung des statischen Hintergrundabzugs in dritter Dimension auf die Reflexionsdaten von $T_A$ in Abhängigkeit von der jeweiligen Mittelwertmethode. Ref: Abzug einer Referenzmessung (als Vergleich), Ami: Arithmetisches Mittel, Med: Median, Mod: Modus. Die Farbskala ist mit dem angegebenen Wert zu multiplizieren.....	89
Abbildung 27: Wirkung des statischen Hintergrundabzugs in dritter Dimension auf die Reflexionsdaten von $T_B$ in Abhängigkeit von der jeweiligen Mittelwertmethode: Ref: Abzug einer Referenzmessung (als Vergleich), Ami: Arithmetisches Mittel, Med: Median, Mod: Modus. Die Farbskala ist mit dem angegebenen Wert zu multiplizieren .....	90
Abbildung 28: $r_{max}$ , $\bar{r}$ und $\left  \frac{r_{max}}{\bar{r}} \right $ von $T_A$ und $T_B$ bei dynamischem Hintergrundabzug in Abhängigkeit von der gewählten Fenstergröße ( $w$ ) .....	92
Abbildung 29: Wirkung unterschiedlicher Hintergrundabzugsmechanismen auf die Reflexionsdaten von $T_A$ (oben) und $T_B$ (unten). Ref: Abzug einer Referenzmessung, Stat: Statischer Hintergrundabzug, Dyn: Dynamischer Hintergrundabzug mit $w = 30$ . Die Farbskala ist mit dem angegebenen Wert zu multiplizieren .....	93
Abbildung 30: Reflexionsdaten einer Metallplatte, die jeweils an der Vorder- (MPV) und Rückseite (MPH) sowie im Zentrum des Pflanzgefäßes in das Substrat eingebracht wurde. SUB: Messung des Substrats ohne Metallplatte ( $n = 5$ ).....	97
Abbildung 31: Wirkung der Hilbert-Transformation (Hilbert) auf die Reflexionsdaten (Reflex) von $T_A$ , $T_B$ und einer Metallplatte (MP) in mittiger Position im Versuchsgefäß (vgl. Kapitel 5.3.3).....	99

---

Abbildung 32: Mittelwert der Reflexionsdaten aus Abbildung 31. Reflex: Reflexionsdaten, Hilbert: Quadratischer Absolut-Wert der Hilbert- Transformierten Reflexionsdaten ( $ H(r) ^2$ ). Die Mittelung erfolgte über die Laufzeit .....	100
Abbildung 33: Arithmetisches Mittel aller Einzelaufnahmen (B-Scans) von Zuckerrübe Z 2/5 und einer Referenzmessung (Ref). Aufnahmedatum: 22.06.2012, $d_{max}$ : 64,5 mm ( $n = 19$ ) .....	102
Abbildung 34: Arithmetisches Mittel der Reflexionsdaten von Z 2/5 und Z 1/7 zu unterschiedlichen Aufnahmetermen. Von den Reflexionsdaten wurde jeweils eine Referenzmessung abgezogen. Die Maßangaben beziehen sich auf den jeweils ermittelten maximalen Durchmesser ( $d_{max}$ ) der Zuckerrüben ( $n = 19$ ) .....	104
Abbildung 35: Arithmetisches Mittel der Reflexionsdaten von Z 2/5 und Z 1/7 zu unterschiedlichen Aufnahmetermen. Von den Reflexionsdaten wurde jeweils das arithmetische Mittel in zweiter Dimension nach Begrenzung der Scanstrecke und Time-Gating abgezogen. Die Maßangaben beziehen sich auf den jeweils ermittelten maximalen Durchmesser ( $d_{max}$ ) der Zuckerrüben ( $n = 19$ ) .....	105
Abbildung 36: Hilbert-Transformation der Daten aus Abbildung 34 .....	106
Abbildung 37: Hilbert-Transformation der Daten aus Abbildung 35 .....	106
Abbildung 38: B-Scans ausgewählter Zuckerrüben an den Aufnahmepositionen 40°, 160° und 300°. Aufnahmedatum: 02.05.2012 .....	110
Abbildung 39: B-Scans ausgewählter Zuckerrüben an den Winkelpositionen 40°, 160°, 300°. Aufnahmedatum: 06.06.2012 .....	112
Abbildung 40: B-Scans ausgewählter Zuckerrüben an den Winkelpositionen 40°, 160°, 300°. Aufnahmedatum: 27.08.2012 .....	114
Abbildung 41: B-Scans der ausgewählten Mangold-Pflanzen für drei unterschiedliche Aufnahmewinkel. Aufnahmedatum: 06.07.2012 ....	117
Abbildung 42: B-Scans der ausgewählten Mangold-Pflanzen für drei unterschiedliche Aufnahmewinkel. Aufnahmedatum: 24.07.2012 ....	119

Abbildung 43: B-Scans der ausgewählten Mangold-Pflanzen für drei unterschiedliche Aufnahmewinkel. Aufnahmedatum: 27.08.2012 ....	121
Abbildung 44: Direkter Vergleich der Reflexionsdaten der Zuckerrüben Z 1/10 und Z 2/1 mit den Reflexionsdaten der Mangoldpflanzen M 2/4 und M 2/6 an verschiedenen Aufnahmewinkeln. Aufnahmedatum: 27.08.2012.....	123
Abbildung 45: Zuckerrüben und Mangoldpflanzen nach Ausgrabung und Entfernung des Blattwerks .....	124
Abbildung 46: B-Scans der Zuckerrübe Z 2/5 zwei Tage nach Einstellung der Bewässerung (A), 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung (B) sowie 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung und zusätzlicher Entfernung des Blattwerks (C).....	126
Abbildung 47: B-Scans der Zuckerrübe Z 2/10 zwei Tage nach Einstellung der Bewässerung (A), 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung (B) sowie 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung und zusätzlicher Entfernung des Blattwerks (C).....	127
Abbildung 48: B-Scans der Mangold-Pflanze M 2/4 zwei Tage nach Einstellung der Bewässerung (A), 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung (B) sowie 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung und zusätzlicher Entfernung des Blattwerks (C).....	129
Abbildung 49: B-Scans der Mangold-Pflanze M 2/11 zwei Tage nach Einstellung der Bewässerung (A), 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung (B) sowie 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung und zusätzlicher Entfernung des Blattwerks (C) .....	130
Abbildung 50: Richtcharakteristik der verwendeten Hornantenne (BBHA 9120 A) im Frequenzbereich von 0,8; 1 und 1,5 GHz für das elektrische Feld (E-Ebene) und das magnetische Feld (H-Ebene); nach SCHWARZBECK (2012a), verändert .....	146
Abbildung 51: Richtcharakteristik der verwendeten Hornantenne (BBHA 9120 A) im Frequenzbereich von 2; 2,5 und 3 GHz für das elektrische Feld (E-Ebene) und das magnetische Feld (H-Ebene); nach SCHWARZBECK (2012a), verändert .....	147



Abbildung 52: Richtcharakteristik der verwendeten Hornantenne (BBHA 9120 A) im Frequenzbereich von 4; 5 und 6 GHz für das elektrische Feld (E-Ebene) und das magnetische Feld (H-Ebene); nach SCHWARZBECK (2012a), verändert .....	148
Abbildung 53: Richtcharakteristik der verwendeten Hornantenne (BBHA 9120 A) im Frequenzbereich von 7; 8 und 9 GHz für das elektrische Feld (E-Ebene) und das magnetische Feld (H-Ebene). Nach SCHWARZBECK (2012a) verändert .....	149
Abbildung 54: Abmessungen der verwendeten Hornantennen (alle Bemaßungen in mm) nach SCHWARZBECK (2012b), verändert .....	150

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Biotechnische Eigenschaften von Zuckerrüben nach KROMER et al. (2004), verändert.....	5
Tabelle 2: Leistungsdaten des verwendeten RADAR-Systems .....	43
Tabelle 3: Abmessungen der verwendeten Referenzkörper .....	54
Tabelle 4: Zusammenfassung der experimentell ermittelten Werte der Prüfung des Linearantriebs ( $n = 30$ ); nach PEVELING-OBERHAG & SCHULZE LAMMERS (2012) .....	71
Tabelle 5: Ausgewählte Parameter der Reflexionsdaten von $T_A$ und $T_B$ vor- und Nach Durchführung des Hintergrundabzugs: $r_{max}$ : Maximaler Reflexionskoeffizient, $\bar{r}$ : mittlerer Reflexionskoeffizient, $\left  \frac{r_{max}}{\bar{r}} \right $ : Betrag des Verhältnisses von $r_{max}$ zu $\bar{r}$ .....	84
Tabelle 6: Vergleich von maximalem Reflexionskoeffizient ( $r_{max}$ ), mittlerem Reflexionskoeffizient ( $\bar{r}$ ), und Betrag des Verhältnisses von $r_{max}$ zu $\bar{r}$ ( $\left  \frac{r_{max}}{\bar{r}} \right $ ) bei unterschiedlichen statischen Hintergrundabzugsmethoden.....	87
Tabelle 7: Vergleich von maximalem Reflexionskoeffizient ( $r_{max}$ ), mittlerem Reflexionskoeffizient ( $\bar{r}$ ), und Betrag des Verhältnisses von $r_{max}$ zu $\bar{r}$ ( $\left  \frac{r_{max}}{\bar{r}} \right $ ) bei unterschiedlichen statischen Hintergrundabzugsmethoden nach Anwendung von Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke.....	88
Tabelle 8: Maximale Reflexionskoeffizienten im Zielbereich von $T_A$ und $T_B$ ( $r_{max}$ ) nach Anwendung verschiedener Hintergrundabzugsmechanismen sowie deren Verhältnis zueinander ( $\frac{r_{max}(T_A)}{r_{max}(T_B)}$ ). Für alle Methoden wurde das arithmetische Mittel zur Bildung des Mittelwertes verwendet.....	94
Tabelle 9: Entwicklung von $d_{max}$ der ausgewählten Zuckerrüben an drei unterschiedlichen Untersuchungsterminen .....	108
Tabelle 10: Entwicklung von $d_{max}$ von 4 ausgewählten Mangoldpflanzen über 3 unterschiedliche Aufnahmetermine .....	115
Tabelle 11: Spezifische Merkmale der untersuchten Pflanzen.....	125

## IV. Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

Abkürzung/ Symbol	Physikalische Einheit	Bedeutung
% vol.		Volumetrischer Boden- bzw. Substratwassergehalt
*		Faltungsoperator
$\frac{r_{\max}(T_A)}{r_{\max}(T_B)}$		Verhältnis des maximalen Reflexionskoeffizienten von Testkörper A zu maximalem Reflexionskoeffizienten von Testkörper B
$\frac{r_{\max}}{\bar{r}}$		Verhältnis von maximalem zu mittlerem Reflexionskoeffizienten
$\bar{r}$		mittlerer Reflexionskoeffizient
$\bar{x}$		Arithmetisches Mittel
$\bar{y}$	mm	Mittleres Auflösungsvermögen des Linearantriebs
∀		Alle
μm	=10 <sup>-6</sup> m	Mikrometer
μ <sub>r</sub>		Magnetische Permeabilität/ Permeabilitätszahl
<sup>11</sup> C		Radioisotop des Kohlenstoffs
3σ		dreifache Standardabweichung
A <sub>b</sub>		Absorption
ADC		Analog-Digital-Wandler (Analog Digital Converter)
B	Hz	Nutzbare Bandbreite
c	m · s <sup>-1</sup>	Geschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle
c <sub>0</sub>	≅ 3 · 10 <sup>8</sup> m · s <sup>-1</sup>	Geschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle im Vakuum (Lichtgeschwindigkeit)

## Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

---

CT		Computertomographie
dBm		Dezibel/
		Leistungspegel (Bezugsgröße: 1 mW)
DC		Gleichstrom (Direct Current)
DIN		Deutsches Institut für Normung
$d_{\max}$	mm	Maximaler Durchmesser eines Rübenkörpers/
		Maximaler Durchmesser der Sprossbasis von Mangold
DN 250		Norm für den Außendurchmesser eines KG-Rohrs (250 mm)
$D_p$		Matrix nach Anpassung des Startpunktes
$D_{\text{roh}}$		Rohdatenmatrix
E	$V \cdot m^{-1}$	Elektrische Feldstärke
EMI		Elektromagnetische Induktion
EN		Europäische Norm
f	Hz	Frequenz
$f_c$	Hz	Taktfrequenz
FFT		Schnelle Fourier Transformation
		(Fast Fourier Transformation)
FHT		Schnelle Hadamard Transformation (Fast Hadamard Transformation)
$f_l$	Hz	Untere Frequenzgrenze
$f_u$	Hz	Obere Frequenzgrenze
GHz	$= 10^9$ Hz	Gigahertz
GPR		Ground Penetrating RADAR
$G_R$		Rückseitige Gefäßwand
GUI		Graphical User Interface
$G_V$		Vordere Gefäßwand

## Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

---

h		Vektor bei Durchführung der Hilbert-Transformation
H(r)		Hilbert-Transformiertes, komplexes Signal von $r$
h(t)		Signal des Messobjektes
HH		Horizontale Polarisierung
HU		Hounsfield-Einheit (Hounsfield Unit)
Hz	$s^{-1}$	Herz
i	$\sqrt{-1}$	Imaginäre Einheit
I	$W \cdot m^{-2}$	Energiestromdichte
ifft		Inverse schnelle Fourier Transformation (Inverse Fast Fourier Transformation)
IIRB		International Institute for Beet Research
k(t)		Virtueller Filter
KG-Rohr		Kanalgrundrohr (nach DIN EN 877)
kV	$= 10^3 V$	Kilovolt
kW	$= 10^3 W$	Kilowatt
m		Zeilenzahl einer Matrix/ Anzahl
M		Mangold
m(n)		Ideale MLBS
m(t)		Ideale Maximalfolge
MHz	$= 10^6 Hz$	Megahertz
MLBS		Maximum Length Binary Sequence
M-Sequenz		
MP		Metallplatte
$m_R$		Zeilennummer des Referenzsamples

## Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

---

MRT		Magnetresonanztomographie/
MRI		Magnetic Resonance Imaging
mW	= $10^{-3}$ W	Milliwatt
$M_{xy}$		Magnetischer Summenvektor
n		Spaltenzahl einer Matrix/ Anzahl/ Stichprobenumfang
N		Blocklänge
nm	= $10^{-9}$ m	Nanometer
ns	= $10^{-9}$ s	Nanosekunde
o		Matrizenzahl eines Arrays
Ø	mm	Durchmesser
P	mW/ dBm	Elektrische Leistung
PET		Positronen Emissions Tomographie
$P_{mR}$		Startpunkt der RADAR-Messung in der Datenmatrix
PVC		Polyvinylchlorid
$p_{xy}$		Punkt einer Matrix an Position (x y)
r		Reflexionskoeffizient
$R^2$		Regressionskoeffizient
RADAR		Radio Detection and Ranging
RAM		RADAR absorbierende Materialien
$R_e$		Reflexion
$r_i$		Imaginärteil
$r_{max}$		maximaler Reflexionskoeffizient
$r_r$		Realteil
$R_x$		Empfänger-Antenne
s(t)		Stationäre Maximalfolge

## Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

---

SPAD		Soil and Plant Analysis Department
t	s	Zeit
T	s	Taktdauer einer Maximalfolge
T&H		Track and Hold
T <sub>A</sub>		Testkörper A
T <sub>B</sub>		Testkörper B
t <sub>c</sub>	s	Taktrate
TDR		Time Domain Reflectometry
T <sub>r</sub>		Transmission
T <sub>x</sub>		Transmitter-Antenne
u		Vektor bei Durchführung der Hilbert-Transformation
UWB		Ultra-Breitband
v	<i>steps · s<sup>-1</sup></i>	Geschwindigkeit des Linearantriebs
VV		Vertikale Polarisierung
w		Fensterbreite bei dynamischem Hintergrundabzug
x(n)		Messsignal
y(n)		Anregungssignal
y(t)		Messsignal
y <sub>max</sub>	mm	Aufgezeichnete Endkoordinate
y <sub>min</sub>	mm	Aufgezeichnete Startkoordinate
Z		Zuckerrübe
δ <sub>cr</sub>	m	Querauflösung (cross range resolution)
δ <sub>r</sub>	m	Räumliches Auflösungsvermögen (in Längsrichtung)
ε <sub>0</sub>	= 1	Dielektrizitätskonstante im Vakuum

## Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

---

$\epsilon_r$		Elektrische Permeabilität
		Dielektrizitätszahl
$\lambda$	m	Wellenlänge
$\sigma$		Standardabweichung
$\Phi$	°	Öffnungswinkel der Antenne
$\varphi_1$	°	Einfallswinkel
$\varphi_2$	°	Austrittswinkel
$\psi_{mm}(\tau)$		Autokorrelation von $m(t)$
$\psi_{xy}(n)$		Zyklische Kreuzkorrelierte von $y(n)$ und $x(n)$
$\psi_{ym}(\tau)$		Kreuzkorrelierte zwischen $y(t)$ und $m(t)$



# 1 Einleitung

Die Züchtung von Nutzpflanzen hat sowohl in der Vergangenheit als auch in der Gegenwart wesentlich zur Verbesserung und Steigerung der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion und damit zur Sicherung der Versorgung mit Nahrungs-, Futter- und Energiepflanzen beigetragen. Ein tragendes Element der Pflanzenzüchtung ist dabei der Selektionsprozess, bei dem Pflanzen anhand spezifischer Merkmale für die weitere Zucht und den Anbau ausgewählt werden.

Das grundlegende Ziel der Pflanzenzüchtung ist die Beeinflussung des Erbganges von (Nutz-) Pflanzen, so dass deren Eigenschaften verbessert werden. Primär geht es dabei um die Steigerung des Ertrags von Pflanzen und die Verbesserung der Qualität des Ernteproduktes. Für diese Ziele sind während des Züchtungsprozesses (vereinfacht dargestellt) fünf Schritte notwendig (SLEPER & POEHLMAN, 2006):

1. Identifizierung der morphologischen, physiologischen und pathologischen Eigenschaften einer Kulturpflanzenart, die zur besseren Anpassung, Gesundheit, Produktivität und Eignung für das Produktionsziel (z.B. Nahrungsmittelproduktion) beitragen.
2. Identifizierung neuer Gene und der nächsten Verwandten, die die geforderten Eigenschaften in unterschiedlichen Stämmen codieren.
3. Kombination der Gene in einer neuen, verbesserten Sorte.
4. Evaluierung der Eigenschaften der neuen Sorte im Vergleich zu bestehenden Sorten unter den lokalen Umweltbedingungen.
5. Vertrieb der neuen Sorte, wenn diese bessere Eigenschaften aufweist als die bestehende.

Dieser Prozess hat, neben weiteren agronomischen Verbesserungen, wesentlich zur Erhöhung der Pflanzenerträge seit den 1920er Jahren beigetragen. So wurden zwischen einzelnen homo- und heterozygoten Maislinien Ertragsunterschiede von mehr als 100% festgestellt, was auf einen hohen Beitrag der Pflanzenzüchtung schließen lässt (BROWN & CALIGARI, 2008). TOUSSAINT (1978) schätzt den Beitrag der Pflanzenzüchtung am Mehrertrag von Nutzpflanzen seit 1820 auf 30%, wohingegen Pflanzenschutzverfahren nur rund 20% ausmachen. Nur der Einfluss von Mineraldüngern (50%) ist stärker einzuschätzen. Versuche von alten Weizensorten aus dem Jahre 1908 mit Sorten aus dem Jahre 1980 brachten, bei gleicher Bewirtschaftung, Ertragsunterschiede von 50% hervor.

Vergleiche von Gerstensorten aus den 1940er Jahren mit Sorten aus den 1980er Jahren brachten Ertragsunterschiede von 30%, was ebenfalls auf einen hohen Einfluss der Pflanzenzüchtung schließen lässt und den hohen Beitrag der Pflanzenzüchtung zur Versorgung der Menschheit mit pflanzlichen Produkten unterstreicht (BROWN & CALIGARI, 2008).

Die zentrale Methode ist dabei die „Selektion“, die auch als Rückgrat der Pflanzenzüchtung bezeichnet wird. Diese Methode wird bereits seit mehreren tausend Jahren angewendet und ist damit seit Beginn der Pflanzenzüchtung Bestandteil des gesamten Züchtungskonzeptes. Die Selektion beschreibt dabei nichts anderes als einen aktiven, vom Menschen gesteuerten, Ausleseprozess, bei dem diejenigen Sorten einer Kulturpflanze für den späteren Anbau ausgewählt werden, die die für das Produktionsziel vorteilhaftesten Eigenschaften aufweisen (MURPHY, 2007).

Für die Selektion von Pflanzen werden stets bestimmte Kriterien, beispielsweise für Ertrag, Qualität, Krankheitstoleranz oder Stresstoleranz festgelegt, anhand derer die Pflanze bewertet wird. Die Einhaltung dieser Kriterien wird dabei entweder anhand der physiologischen Ausprägung der genannten Merkmale bewertet (Phänotypisierung) oder es werden mikrobiologische Verfahren angewandt, bei denen die Merkmale anhand bestimmter Gene oder Gensequenzen identifiziert werden, die in unmittelbarer Nachbarschaft derjenigen Gene liegen, die das gesuchte Merkmal codieren (molekulare Marker). Diese Analyse erfordert jedoch umfangreiche Kenntnisse des betreffenden Pflanzengenoms, z.B. in Form von Markerkarten (JUNG, 2007). Die abschließende oder begleitende Kontrolle des Züchtungserfolges wird jedoch stets an inneren oder äußeren Merkmalen der Nutzpflanze festgemacht, die mit Hilfe valider Methoden überprüft werden müssen. Die Erfassung der Merkmale geschah in der Vergangenheit meist manuell, wird mittlerweile aber von Sensorsystemen unterstützt, die die Merkmalerfassung und damit den Züchtungsprozess wesentlich beschleunigen.

Während solche Sensorsysteme sehr gut auf oberirdische Pflanzenteile, wie z.B. Getreideähren oder Blattwerk, angewendet werden können, ist die Erfassung unterirdischer Pflanzenteile (z.B. Speicherwurzeln) noch immer eine Herausforderung. Da eine Entfernung des Wurzelwerks aus dem Boden Stressreaktionen in der Pflanze auslöst und bis zu deren Absterben führen kann, sind nicht-destruktive Sensorsysteme für die Erfassung bestimmter Charakteristika vorteilhaft, wenn die Pflanze sich ungehindert weiterentwickeln soll.

Für die Architektur der unterirdischen Pflanzenteile bestehen mit der Computertomographie (CT) und Magnetresonanztomographie (MRT) zwar Verfahren, die den Wurzelkörper sehr genau erfassen können, demgegenüber stehen jedoch hohe Kosten und eine stark eingeschränkte Mobilität. Für die Pflanzenzüchtung besteht deshalb ein Bedarf an mobilen und kostengünstigen Sensorsystemen, die die Architektur der unterirdischen Pflanzenteile möglichst genau abbilden können.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Sensorsystem auf Basis von UWB-RADAR entwickelt, welches die Anforderungen der Pflanzenzüchtung (hochauflösende, nicht-destruktive Erfassung des Wurzelraums mit kostengünstigen und mobilen Sensorsystemen) erfüllen soll. Zuckerrüben und Mangoldpflanzen wurden als Modellpflanzen in Topfversuchen kultiviert und mit dem Sensorsystem gemessen, um zu testen, ob das entwickelte Sensorsystem den gestellten Anforderungen gerecht wird. Die Versuche hierzu wurden in den Jahren 2010 bis 2012 im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsnetzwerkes CROP.SENSE.net durchgeführt.

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Analyse von Wurzelfrüchten

Im Hinblick auf den pflanzenzüchterischen Erfolg sind sämtliche Analyseverfahren sinnvoll, die zuverlässige Daten zu den pflanzenzüchterisch definierten Zielen liefern. Diese sind für Wurzelfrüchte:

- Steigerung des Ertrages und der Produktqualität
- Verbesserung der Resistenz gegen Schadorganismen bzw. Verringerung des Pflanzenschutzaufwandes
- Verbesserung der Toleranz gegen abiotische Stressfaktoren zur Reduzierung des pflanzenbaulichen Aufwands sowie zur Sicherung der Erträge unter veränderten Umweltbedingungen
- Verbessertes Nährstoffaneignungsvermögen/ Reduzierung des Düngemiteleinsatzes (ANONYM, 2012)

Bei Zuckerrüben werden diese Ziele, soweit sie das ertragsbildende Organ betreffen, in aller Regel nach der Ernte bzw. nach Entfernung der Pflanze aus dem Boden überprüft. Hierzu stehen sowohl manuelle als auch technische Lösungen zur Verfügung, die im Folgenden näher erläutert werden sollen.

### 2.2 Eigenschaften von Wurzelfrüchten und Zuckerrüben

Wurzelfrüchte werden in der landwirtschaftlichen Systematik den Hackfrüchten zugeordnet, weil Pflegemaßnahmen der Bestände auf einer Hand- oder Maschinenhacke basierten. Bei Wurzelfrüchten werden (im Gegensatz zu Getreide) stets unterirdisch wachsende, vegetative Pflanzenteile genutzt. Eine unmittelbare Beziehung zwischen dem Wachstum der Speicherwurzel und der Assimilationsleistung des Blattapparates besteht bei diesen Nutzpflanzen nicht. Neben weiteren Nutzpflanzen haben die Kartoffel (*Solanum tuberosum* L.) und die Zuckerrübe (*beta vulgaris* L.) die größte Anbaubedeutung in Europa (DIEPENBROCK et al., 1999).

Zuckerrüben gehören zur botanischen Familie der *Chenopodiaceae* und haben ihren Ursprung im mittleren Osten sowie im mediterranen Raum. Die Zuckerrübe ist eine biannuelle Pflanze, die sich während des ersten Jahres vegetativ entwickelt und erst nach Überwinterung im zweiten Jahr zur generativen Entwicklung (Samenproduktion) angeregt wird.

Im landwirtschaftlichen Anbau werden Zuckerrüben jedoch bereits nach dem ersten Jahr geerntet. Für die Ernte ist dabei die Speicherwurzel der Zuckerrübe von Interesse, in der sich, je nach Abschnitt, 7 bis 20% Saccharose befindet, die zu weißem Kristallzucker verarbeitet wird (KROMER et al., 2004). Tabelle 1 zeigt empirisch ermittelte Werte und Wertebereiche der wichtigsten Eigenschaften von Zuckerrüben.

Tabelle 1: Biotechnische Eigenschaften von Zuckerrüben nach KROMER et al. (2004), verändert

Eigenschaft	Maßeinheit	Arithm. Mittel	Wertebereich
Länge	mm	220	100 - 340
Masse	g	800	140 – 3.000
Verteilung der Masse			
Kopf	%	6	5 – 7
Hypokotyl	%	12	6 – 18
Wurzel	%	82	77 - 86
Maximaler Durchmesser	mm	120	40 – 330
Köpfdurchmesser	mm	80	40 - 160
Scheitelhöhe	mm	45	0 – 150
Köpfdicke	mm	30	5 - 100
Dichte der Rübe	kg·dm <sup>-3</sup>	1,07	1 – 1,14
Schüttdichte	kg·m <sup>-3</sup>	635	580 - 690
Schüttwinkel	°	40,5	35 - 46
Oberfläche	cm <sup>2</sup>	350	10 - 700

Diese Parameter eignen sich in vielfältiger Weise, um das Ergebnis der Pflanzenzüchtung im Hinblick auf Masse, Qualität und Form des Rübenkörpers zu überprüfen. Da der ertragsbildende Teil der Frucht unter der Erdoberfläche verborgen ist, sind dessen Merkmale jedoch für manuelle oder maschinelle Analyseverfahren meist nicht direkt zugänglich.

Die folgenden Kapitel geben deshalb einen Überblick über destruktive und nicht destruktive Verfahren, die zur Analyse und Beschreibung von Wurzelfrüchten im Allgemeinen und zur Beschreibung von Zuckerrüben-Speicherwurzeln im Speziellen geeignet sind.

## **2.3 Destruktive Analyseverfahren**

Unter destruktiven Analyseverfahren werden im Folgenden sämtliche Verfahren zusammengefasst, bei denen eine Analyse der (Speicher-)wurzel die gesamte oder teilweise Entfernung aus dem Erdboden erfordert, so dass ein weiteres Pflanzenwachstum ausgeschlossen ist.

### **2.3.1 Manuelle Verfahren**

Unter den manuellen Verfahren kann die Gesamtheit aller Methoden zusammengefasst werden, bei denen die Pflanzen von Hand überprüft werden. Solche Verfahren werden auch als „Bonituren“ bezeichnet. Bei diesen Bonituren werden bestimmte Parameter der Wurzelfrüchte subjektiv oder mit Hilfe einfacher technischer Einrichtungen (Lineal, Waage) erfasst und beurteilt.

Die meisten geometrischen und gravimetrischen Parameter, z.B. von Zuckerrüben, können so mit Hilfe eines Lineals und einer Waage ermittelt werden. Dazu werden die Zuckerrüben, möglichst ohne Beschädigungen, aus dem Boden entfernt, ggf. gewaschen und im Anschluss vermessen und gewogen. Die Waschung der Zuckerrüben wird in Art, Dauer und Durchführung durch einen IIRB-Standard (KROMER et al., 2004) festgelegt. Die Scheitelhöhe der Zuckerrüben sowie deren Verteilung im Feld sind die einzigen Parameter, bei denen eine Entfernung der Zuckerrübe aus dem Bestand nicht notwendig ist. Die Zuckerrüben können auch sektionsweise untersucht werden, indem sie in Segmente mit definierten Durchmessern aufgeteilt werden.

Dieses Verfahren ist jedoch nur für kleine Parzellen oder spezielle Versuchsanforderungen (z.B. Test von Erntemaschinen oder Reinigungsladern) geeignet, da der hohe Handarbeitsaufwand sehr zeitintensiv ist. Eine schnelle Beprobung vieler Einzelpflanzen ist mit dieser Methode nicht möglich. Eine Ertragsmessung auf Feldebene (Größenordnung mehrere Hektar) entfällt ebenfalls.

### **2.3.2 Elektromechanische Verfahren**

Als elektromechanische Verfahren werden solche Analyseverfahren definiert, die bestimmte Merkmale auf der Grundlage von mechanischen Größen (z.B. Kraft) oder elektrischen Größen (z.B. Spannungsänderung), die aus einem mechanischen Einfluss resultieren, ermittelt.

In der landwirtschaftlichen Anwendung sind dies vor allem Ertragsmesssysteme, die Masse oder Volumen der Zuckerrüben unmittelbar nach der Ernte erfassen. Solche Systeme bestimmen die Masse an Zuckerrüben pro Zeiteinheit (Massefluss), die bestimmte Organe der Erntemaschine passieren. Dabei kann die Masse entweder direkt über eine Verwiegung (z.B. an bestimmten Förderelementen) oder über eine Impulsmessung an Übergabestellen bestimmt werden (SCHMITTMANN & SCHULZE LAMMERS, 2003). Ein solches System ist jedoch eher für große landwirtschaftliche Flächen geeignet, da sich, je nach Größe der Erntemaschinen, praktisch keine Informationen über einzelne Zuckerrüben generieren lassen.

### **2.3.3 Volumenstromverfahren**

Analog zum Massestrom kann in Erntemaschinen auch der Volumenstrom von Zuckerrüben bestimmt werden. Dazu wird an geeigneter Stelle ein Profil des Zuckerrübenstroms aufgenommen und daraus, zusammen mit der Fördergeschwindigkeit, der Volumenstrom der Zuckerrüben berechnet. Alternativ kann auch die Änderung des Bunkerfüllstandes der Erntemaschine erfasst werden (SCHMITTMANN & SCHULZE LAMMERS, 2003). Für dieses Verfahren ergeben sich die gleichen Nachteile wie bei elektromechanischen Verfahren (vgl. Kapitel 2.3.2).

### **2.3.4 Einzelrübenzählung**

Bei der Einzelrübenzählung wird die Anzahl an Zuckerrüben pro Fläche bestimmt. Dazu wird an einer Erntemaschine der zurückgelegte Weg gemessen und die Anzahl an Zuckerrüben pro zurückgelegter Wegeinheit durch den mittleren Längs- und Querabstand der einzelnen Rüben zueinander bestimmt. Die Gesamtmasse dieser Fläche wird anhand einer mittleren Einzelrübenmasse berechnet (SCHMITTMANN & HIEN, 2001). Für spezifische Informationen zu einzelnen Pflanzen ist dieses System jedoch ungeeignet.

### **2.3.5 Einzelrübenmessung**

Die Einzelrübenmessung ist eine Weiterentwicklung der Einzelrübenzählung. Neben der Anzahl der Zuckerrüben muss auch die Masse der jeweiligen Einzelrübe bekannt sein. Diese kann anhand des maximalen Durchmessers der Zuckerrübe zuverlässig vorhergesagt werden ( $R^2=0,87$  bis  $0,97$ ) es ist jedoch eine standortspezifische Kalibrierung notwendig. Der Ertrag kann im Anschluss durch Aufsummierung der zuvor bestimmten Einzelmassen bestimmt werden (SCHMITTMANN & HIEN, 2001).

Dieses Verfahren ist prinzipiell geeignet, um die Masse von Einzelpflanzen vorherzusagen. Spezifische Aussagen zur Entwicklung des Rübenkörpers lassen sich aus diesen Daten jedoch nicht ableiten.

## **2.4 Nicht-destruktive Analyseverfahren**

Unter nicht-destruktiven Analyseverfahren sollen im Folgenden sämtliche Verfahren zusammengefasst werden, bei denen die Entfernung der Speicherwurzeln aus dem Boden nicht notwendig ist. Einige dieser Verfahren liefern neben spezifischen Daten (z.B. Masse, Volumen) auch Bilder der unterirdischen Pflanzenorgane und können daher als bildgebende Verfahren bezeichnet werden.

### **2.4.1 Optische Analyseverfahren**

Bei der Evaluierung von Pflanzenbeständen nutzen optische Systeme spezifische Reflexionscharakteristika von Pflanzenmaterial aus. Grünes Pflanzenmaterial weist im Normalzustand einen bestimmten Gehalt des Farbstoffes Chlorophyll auf, der einen Teil der elektromagnetischen Strahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich absorbiert. Im sichtbaren Spektralbereich wird vor allem der grüne Teil des Lichtes reflektiert (AMBERGER, 1996). Aus der Reflexion in den Spektralbereichen 400 bis 700 nm lässt sich vor allem der Chlorophyllgehalt der Blätter eines Pflanzenbestandes bestimmen, wohingegen der Spektralbereich von 700-800 nm (nahes Infrarot) für die Messung der interzellularen Zwischenräume oder der Blattfläche eines Pflanzenbestandes dienen kann (THIESSEN, 2002). Im Pflanzenbestand selbst werden in der Regel spektrale Indizes verwendet, da diese unempfindlicher gegenüber Störeinflüssen (z.B. Globalstrahlung) sind (THIESSEN, 2002).



Reflexionsoptische Verfahren dienen bei der Beurteilung größerer Pflanzenbestände vor allem als Hilfsmittel für die Stickstoffdüngung, da zwischen den Reflexionscharakteristika des Bestandes, verursacht durch die Chlorophyllkonzentration und dem Bedarf an Stickstoffdüngemitteln, ein enger Zusammenhang besteht (REUSCH, 1997, THIESSEN, 2002). Neben der Stickstoffversorgung spielen jedoch auch andere Parameter eine Rolle, die die Reflexionscharakteristika eines Pflanzenbestandes beeinflussen. Untersuchungen von REUSCH (1997) und THIESSEN (2002) zeigten die Eignung eines solchen Systems für die N-Düngung von Getreide auf Basis manueller oder fahrzeuggebundener Systeme auf. Ähnliche Konzepte wurden auch von THOREN (2007) und THIESSEN (2002) verfolgt, wobei an Stelle reflexionsoptischer Messungen das Prinzip der Fluoreszenz genutzt wurde. Dieses Verfahren eröffnete neben der Anwendung in der Düngemittelapplikation auch Möglichkeiten zur Detektion des Krankheitsbefalls von Pflanzen (THIESSEN, 2002).

Während diese Konzepte vor allem auf die Anwendung in größeren Pflanzenbeständen angelegt sind, gibt es auch Entwicklungen auf Einzelpflanzen-, bzw. Einzelblattbasis. Die größte Bedeutung hat hierbei ein tragbares Chlorophyll-Messgerät (Minolta SPAD 502), welches auf Transmissionsmessungen im Wellenlängenbereich von 650 und 940 nm beruht. Das System misst dabei einzelne Blätter, bzw. Blattabschnitte der Pflanze und gibt einen Transmissionskoeffizienten als Messwert aus, der eng mit dem Chlorophyllgehalt der Pflanze korreliert (MARKWELL et al., 1995).

Trotz aller dieser Ansätze sind optische Geräte aber nur unzureichend in der Lage den Einzelpflanzenenertrag oder gar die Struktur unterirdischer Speicherorgane zu bestimmen, da keine ausreichende Korrelation zwischen oberirdischer und unterirdischer Biomasse besteht.

#### **2.4.2 Magnetresonanztomographie**

Die Magnetresonanztomographie (MRT) ist ein Verfahren, das auf der Grundlage der Anregung des magnetischen Kernmoments beruht. Alle Atomkerne mit ungerader Nukleonenzahl weisen ein solches Moment auf. In der Regel wird für die MRT das magnetische Kernmoment von Wasserstoff genutzt, da dieses unter allen Elementen das höchste ist und Wasserstoff ein hohes natürliches Vorkommen, vor allem in lebender Materie, aufweist. Setzt man eine Probe mit solchen Kernen einem äußeren Magnetfeld aus, so richten sich die magnetischen Momente parallel oder antiparallel zum Magnetfeld aus. Da der parallele Zustand energetisch günstiger ist, bildet sich eine messbare Magnetisierung in Richtung des äußeren Magnetfeldes aus.

Durch Anregung mit einem hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeld kann dieser Gleichgewichtszustand aufgehoben werden, wenn die Energie bzw. Frequenz dieses Feldes der magnetischen Energie der untersuchten Protonen entspricht (Resonanz- oder Larmorfrequenz) (REISER & SEMMLER, 2002). Durch geeignete Dauer und Leistung des Impulses kann die Magnetisierung um genau  $90^\circ$  gekippt werden, so dass diese in einer  $xy$ -Ebene liegt. Damit liegt die gesamte Magnetisierung in der  $xy$ -Ebene und dreht sich dort. Diese Drehung des magnetischen Summenvektors ( $M_{xy}$ ) induziert in einer Empfangsspule einen Wechselstrom, dessen Frequenz der Larmorfrequenz gleich ist (MR-Signal). Das angeregte System geht nach einiger Zeit wieder in die Ausgangssituation zurück und wird damit wieder stabil, das MR-Signal nimmt dadurch ab. Diese Abnahme kann durch zwei unabhängige Vorgänge erklärt werden: Abnahme des Signals und Zunahme der ursprünglichen Magnetisierung (T1-Relaxation), Verlust der Magnetisierung durch Dephasierung der Spins (T2-Relaxation). Die eigentliche Bildgebung geschieht nun auf der Grundlage von drei Parametern, da diese sich je nach stofflicher Zusammensetzung (z.B. unterschiedliche Gewebetypen) stark unterscheiden:

- Protonendichte (Anzahl anregbarer Spins pro Volumeneinheit, entspricht dem maximalen MR-Signal)
- T1-Relaxation
- T2-Relaxation

Entsprechend dieser Parameter kann das entstehende Bild mit unterschiedlichen Farbgradienten (ggf. unter Zuhilfenahme weiterer Parameter) gewichtet werden, so dass unterschiedliche Merkmale (z.B. gesundes Gewebe, Tumor, etc.) voneinander abgegrenzt werden können (WEISHAUPT et al., 2009).

MRT wird vor allem in der Medizin zur Diagnose von Krankheiten eingesetzt, da aufgrund der Vielzahl anregbarer Protonen ein sehr spezifischer Nachweis der jeweiligen Erkrankung (z.B. Tumore) möglich ist und die Belastung des Patienten durch Strahlung sehr gering ist (GOYEN, 2006). Im Bereich der Pflanzenwissenschaften ist dieses Verfahren zwar neu, bietet aber ähnliche Vorteile wie in der medizinischen Diagnostik.

VAN AS (2007) zeigte in seiner Studie Möglichkeiten des Einsatzes von MRT an Pflanzengewebe auf. Der Vorteil dabei ist, dass unterschiedliche Parameter, wie etwa Zellgröße, Membranpermeabilität, Wasserdiffusion, Phloem- und Xylem-Fluss auf nicht destruktive Weise erfasst und sehr genau bestimmt werden können. Dadurch kann z.B. die Reaktion der Pflanze auf Wasserstress über lange Zeit untersucht werden, ohne diese zu schädigen, so dass der Verlauf des Stresses über die Zeit (Dynamik) erfasst werden kann.

Neben oberirdischen Pflanzenteilen sind aber auch Pflanzenwurzeln im Fokus von MRT-Untersuchungen. Bereits Mitte der 1980er Jahre konnten Wurzeln von Pelargonien (*pelargonium hortorum*) mit einer Auflösung von 100 µm und einer Schichtdicke von 1,2 mm (BROWN et al., 1986) und Wurzeln von Ackerbohnen (*Vicia faba*) mit einer Auflösung von 600 µm (BOTTOMLEY et al., 1986) erfasst werden. Unterschiedliche Wassergehalte konnten zu dieser Zeit zwar festgestellt, aber noch nicht interpretiert werden (BROWN et al., 1986). Neben Pflanzen können auch die Wassersättigung eines Bodens, die Größe der Poren oder bestimmte Transportprozesse aus MRT-Daten bestimmt werden. Der nicht-destruktive Charakter dieser Methoden erlaubt darüber hinaus Langzeitmessungen (VAN AS & VAN DUSSCHOTEN, 1997).

MRT-Aufnahmen von Wurzelsystemen werden allgemein als komplex eingestuft, da z.B. Bodenwasser (vor allem bei großen Pflanztöpfen) oder ferromagnetische Partikel die Bildqualität stark beeinflussen können. Vor allem das Bodenwasser muss vom Wasser in der Pflanze separiert werden, um einen ausreichenden Bildkontrast zu erhalten. Ein bildgebendes Verfahren unterirdischer Pflanzenorgane (Imaging, Magnetic Resonance Imaging (MRI)) erfordert daher spezielle Messeinrichtungen. Trotzdem erreichen aktuelle MRI-Systeme Auflösungen von 10 µm bei Schichtdicken von 200 µm und eignen sich sogar zur Bestimmung physiologischer Informationen (z.B. Größe von Vakuolen, Zuckerkonzentrationen, etc.) (BLÜMLER et al., 2009).

Neben 2D-Aufnahmen von Wurzelsystemen ermöglicht MRI auch die Generierung dreidimensionaler Daten, die jedoch mit einem hohen Rechenaufwand einhergehen (BLÜMLER et al., 2009). Neuere Entwicklungen gehen in Richtung von Sensor-Kombinationen bzw. Fusion, bei denen neben den Strukturen (MRI) auch die Translokation bestimmter Stoffe (z. B. Photosyntheseassimilate) sichtbar gemacht werden können. Hierzu wird die Positronen Emissions Tomographie (PET) genutzt, die diese Flüsse und deren Dynamik mit Hilfe radioaktiver Isotope (z.B.  $^{11}\text{C}$ ) sichtbar machen kann (Abbildung 1) (JAHNKE et al., 2009).

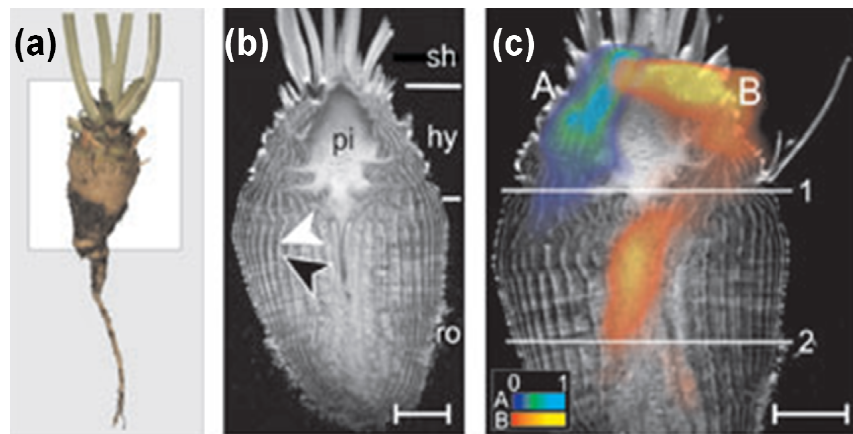


Abbildung 1: Kombinierte MRI-PET Aufnahme einer Zuckerrübe. (a) Foto der untersuchten Rübe (b) MRI-Aufnahme (c) Kombinierte MRI-PET Aufnahme nach Applikation eines Radiotracers. Sh: Blattansätze, pi: Mark, hy: Hypokotyl, ro: Feinwurzeln. Nach JAHNKE et al. (2009), verändert

Die Abmessungen eines MRT sind jedoch derart groß, dass dieses System nicht transportabel und für Feldarbeiten deshalb ungeeignet ist. Neuere Entwicklungen zielen daher auf die Entwicklung portabler Systeme für die Feldanwendung ab (PERLO et al., 2005). Der Nutzen solcher Systeme für Pflanzenanalysen ist jedoch beschränkt, da ein solches System um den zu messenden Pflanzteil herum angebracht werden muss (BLÜMLER et al., 2009) und damit Wurzeluntersuchungen im Boden ausgeschlossen sind.

Trotz der hohen Auflösung und mannigfaltiger Einsatzmöglichkeiten von MRT zur Pflanzenanalyse (JAHNKE et al., 2009) ist der Einsatzbereich beschränkt, da die bestehenden Systeme stationär sind und den maximalen Durchmesser der zu verwendenden Pflanzgefäße beschränken (ein Untersuchungsobjekt mit 15 cm Durchmesser erfordert einen Magneten mit einem Lochdurchmesser von 30 cm). Mobile Lösungen sind zwar vorhanden, eignen sich aber vor allen Dingen für die Untersuchung oberirdischer Pflanzenteile (BLÜMLER et al., 2009). Ein zusätzlicher Nachteil sind die hohen Kosten eines solchen Systems (>1.000.000 €) (VAN DUSSCHOTEN, 2011, persönliche Mitteilung), die die Verwendung in der Praxis auf wenige Spezialfälle beschränken dürften.

### 2.4.3 Computertomographie

Computertomographie (CT) beschreibt ein Verfahren, bei dem mittels Röntgenstrahlen zweidimensionale Schnittbilder eines Untersuchungskörpers angefertigt werden. Dazu rotiert eine Röntgenröhre in 360° um das Untersuchungsobjekt (JACKSON & THOMAS, 2009). Auf der gegenüberliegenden Seite der Strahlungsquelle liegt ein Detektor, der simultan zur Strahlungsquelle rotiert. Bei Mehrschichtgeräten sind Detektorzeilen in Längsrichtung des Untersuchungsobjektes angeordnet, so dass bei einer Rotation mehrere Schnittbilder aufgenommen werden können. Diese Aufnahmen aus einem bestimmten Winkel werden auch Projektion genannt. Moderne CT-Geräte messen etwa 1.000 Projektionen bei einer Umlaufzeit von 0,27 bis 0,35 s. Die Leistungen eines Röntgenstrahlers bewegen sich im Bereich von 60 bis 120 kW bei 80 bis 140 kV Spannung (ALKADHI et al., 2009). Durch zusätzliche Längsverschiebung des Untersuchungstisches kann der gesamte Untersuchungsgegenstand erfasst werden. Die Ergebnisse der Untersuchung sind zweidimensionale Schnittbilder, deren Pixelelementen ein Wert für die Schwächung des Röntgenstrahls zugewiesen wird. Im Anschluss findet eine Rekonstruktion des Bildes statt (JACKSON & THOMAS, 2009).

Die Schwächungswerte, auch CT-Werte genannt, entsprechen dem Durchschnitt (arithmetisches Mittel) aller Voxel (Volumeneinheiten), die auf dem Weg von der Strahlungsquelle zum Detektor liegen (JACKSON & THOMAS, 2009). Diese werden mit den Schwächungswerten von Wasser verglichen und als Hounsfield-Einheiten (HU) dargestellt. Luft weist dabei mit -1.000 den kleinsten möglichen Wert auf während Wasser per Definition einen Wert von 0 hat. In (menschlichem) Gewebe werden Werte bis zu +3.000 (Knochen) erreicht (DÖSSEL, 2000).

Wie auch das Prinzip der MRT wird CT hauptsächlich in der medizinischen Diagnostik eingesetzt. Aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften finden sich aber auch Anwendungen sowohl bei der Analyse von ober- und unterirdischem Pflanzenmaterial als auch in der Bodenanalyse. Erste Berichte über die Anwendung des CT-Prinzips zur Bodenanalyse gibt es aus den 1980er Jahren. PETROVIC et al. (1982) nutzen ein CT-Gerät zur Messung der Rohdichte von Böden. HAINSWORTH & AYLMOORE (1983) wandten CT zur Untersuchung des Bodenwassergehaltes an. CRESTANA et al. (1985) zeigten in weiterführenden Untersuchungen, dass CT ein sinnvolles Instrument zur quantitativen Bestimmung des Bodenwassergehaltes sein kann. Untersuchungen können mit dieser Methode dynamisch und in drei Dimensionen durchgeführt werden, was im Vergleich zu Röntgenabsorptions- oder Neutronenmethoden ein wesentlicher Vorteil ist. Das Auflösungsvermögen von Computertomographen ist dabei derart hoch, dass sogar kleinste Strukturen im Boden wie

die Gänge von Regenwürmern ( $\varnothing$  2-5 mm), sichtbar gemacht werden können (JOSCHKO et al., 1991).

In der Pflanzenanalyse wird CT in vielfältiger Weise eingesetzt. Bei oberirdischen Pflanzenteilen können solche Systeme beispielsweise für die Bestimmung der Jahresringe von Bäumen dienen. Darüber hinaus können auch diejenigen Regionen identifiziert werden, in denen ein hoher Wasserfluss stattfindet. Der dafür genutzte Tomograph ist sogar mobil und kann daher an lebenden Bäumen im Freiland eingesetzt werden und Informationen über deren innere Struktur liefern, ohne einen destruktiven Eingriff vorzunehmen (ONOE et al., 1984). Neuere Entwicklungen hin zu hochauflösenden Verfahren versprechen ein hohes Potenzial bei der Untersuchung von Pflanzenteilen, da es im Vergleich zu anderen Verfahren (z.B. Mikroskopie) nicht destruktiv ist und auch ohne besondere Vorbehandlung der Proben gute Ergebnisse liefert. Bei einer weiteren Verbesserung der Auflösung von CT-Systemen könnte sogar eine Bildgebung im Zellularbereich erreicht werden (STUPPY et al., 2003).

Die Analysen verschiedener Bodenparameter zeigten schon bald nach der Entwicklung von CT das Potenzial für nicht-destruktive Wurzelanalysen auf. Untersuchungen von TOLLNER (1991) zeigten bei Pflanzenwurzeln und anderen organischen Materialien, dass Auflösungen im Bereich von 1 mm möglich sind. Unter kontrollierten Bedingungen waren bei Bohnen wenig später sogar Auflösungen von bis zu 0,15 mm möglich, wenn entsprechend hohe Energien bei der CT verwendet wurden (HEERAMAN et al., 1997). Die Verwendung von CT zur Analyse von Baumwurzeln führte zu Auflösungen im Bereich von 0,5 bis 1 mm, wobei hier jedoch speziell gezogene Bohrkerne und nicht das Wurzelwerk im natürlichen Boden untersucht wurde (PIERRET et al., 1999). Neue Entwicklungen ermöglichen Auflösungen von unter 500 nm und erlauben damit sogar die Aufnahme von Feinwurzeln (TRACY et al., 2010).

Als mögliche Probleme bei der Analyse von Pflanzenwurzeln werden vor allem hohe Wassergehalte und andere organische Bestandteile des Bodens genannt, die die Erfassung der Wurzeln mittels CT erschweren. Neben der Verwendung spezieller Substrate (niedriger Gehalt an organischen Bestandteilen) kann dieser Nachteil teilweise auch durch spezielle Softwarelösungen kompensiert werden (TRACY et al., 2010).

#### 2.4.4 Emissionstomographie

Bei der Emissionstomographie werden Stoffe, die von den Pflanzen aufgenommen werden, mit Markern versehen. Dies sind in der Regel Isotope bestimmter Atome, die eine Strahlung erzeugen, die das Pflanzengewebe (und ggf. das umgebende Medium) durchdringen und im Anschluss detektiert werden können. Im Falle von Kohlenstoff kann dazu  $^{11}\text{C}$  verwendet werden. Dieses Isotop emittiert Positronen mit der skizzierten Eigenschaft, die außerhalb der Pflanze detektiert werden können. Dadurch können die Verlagerung bzw. Transport in der Pflanze sowie der Ort der Einlagerung sichtbar gemacht werden. Das Verfahren wird auch als Positronen Emissions Tomographie (PET) bezeichnet und ist auch auf Wurzelsysteme anwendbar (vgl. JAHNKE et al., 2009).

#### 2.4.5 Mikrowellenreflexion (RADAR)

Das Wort „RADAR“ stammt aus dem Englischen und steht als Abkürzung für *Radio Detection And Ranging* (LUDLOFF, 2008; SKOLNIK, 1990) was so viel bedeutet wie „Erfassung, und Entfernungsmessung mittels (elektromagnetischer) Strahlung“. Diese Abkürzung beschreibt ein Verfahren, welches 1904 unter dem Titel *„Verfahren um entfernte metallische Gegenstände mittels elektrischer Wellen einem Beobachter zu melden“* zum Patent angemeldet wurde (HÜLSMEYER, 1904). Mit Hilfe dieses Verfahrens konnten große metallische Gegenstände (z.B. Züge) erfasst und deren Entfernung zum RADAR-Gerät abgeschätzt werden konnten. *Taylor* und *Young* nutzten dieses Verfahren im Jahr 1922 um die Anwesenheit eines Schiffes auf dem Potomac River nachzuweisen (BRITAIN, 2008). Spätestens seit diesem Experiment war klar, dass das RADAR-Prinzip auch für militärische Zwecke einen hohen Nutzen darstellte.

Ab Mitte der 1930er Jahre wurde dieses Verfahren deshalb für militärische Anwendungen weiterentwickelt. Schon 1938 konnte die US-Navy Schiffe auf eine Entfernung von 40 nautischen Meilen orten (LUDLOFF, 2008). Während des 2. Weltkrieges spielte RADAR eine wichtige Rolle bei der Luft- und Seekriegsführung. So war RADAR ein wesentliches Instrument bei der Erfassung gegnerischer Flugzeuge und wurde ab 1943 bei der Bekämpfung von U-Booten eingesetzt (LACOMME & FREYSZ, 2001).

In der heutigen Zeit wird RADAR neben militärischen Anwendungen auch im Zivilbereich intensiv genutzt. Neben zivilem Luft- und Seeverkehr wird RADAR z.B. bei Wetterbeobachtung, Fernerkundung und in vielen weiteren Bereichen eingesetzt (LACOMME & FREYSZ, 2001). Die Entwicklung leistungsfähiger Computer vergrößerte auch den Nutzen der Daten, die aus einem RADAR-System gewonnen werden können.

RADAR kann in vielfältiger Weise zur Ortung und Parameterabschätzung eingesetzt werden. Anwendungen des RADAR-Prinzips finden sich in nahezu jedem Bereich der Naturwissenschaften und werden auch für Pflanzenanalysen eingesetzt. Da das RADAR-Prinzip für diese Arbeit von zentraler Bedeutung ist werden Funktionsweise, physikalische Grundlagen und Anwendungsgebiete in den folgenden Kapiteln detailliert erläutert.

## 2.5 Anwendung von RADAR in der Pflanzenanalyse

### 2.5.1 Funktionsweise von RADAR

Wie in Kapitel 2.4.5 erwähnt, basiert die Funktion von RADAR auf dem Empfang (und dem Aussenden) elektromagnetischer Wellen. Ein einfaches Radarsystem benötigt hierbei nicht mehr als eine Antenne, einen Sende- und Empfangsumschalter, eine Sendeeinheit (Transmitter), eine Empfangseinheit (Receiver), einen Signalprozessor, einen Computer und ein Display zur Anzeige der Signale (TOOMAY & HANNEN, 2004). Das Zusammenspiel dieser Einzelkomponenten ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

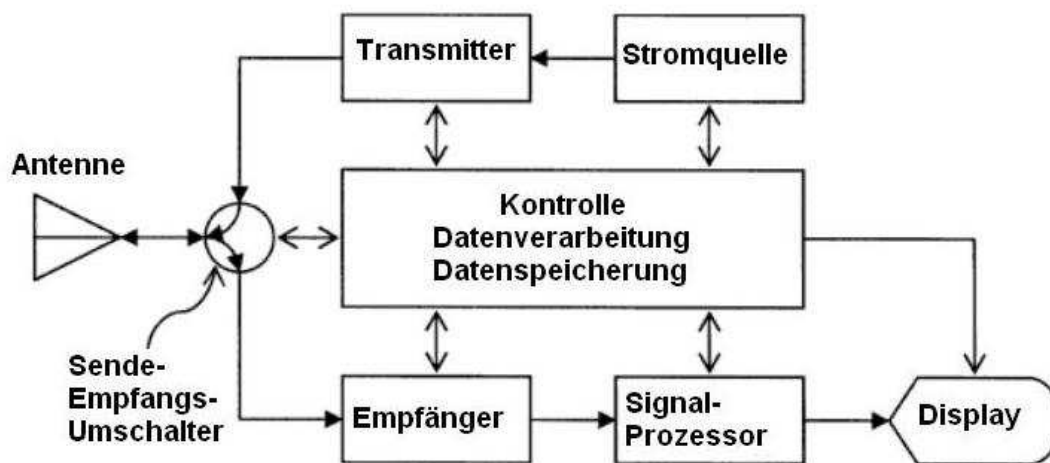


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines einfachen RADAR-Systems nach TOOMAY & HANNEN (2004), verändert

Der Transmitter erzeugt kurze elektromagnetische Impulse, die über die Antenne ausgesendet werden. Diese Strahlung breitet sich im Raum aus und wird von bestimmten Gegenständen reflektiert (SKOLNIK, 1990).



Diese reflektierte Strahlung kann wiederum von der Antenne aufgenommen, und von der Empfangseinheit ausgewertet werden, sobald das System mittels eines entsprechenden Schaltmechanismus von „Senden“ auf „Empfangen“ umgestellt wurde. Die weitere Aufbereitung übernehmen anschließend ein Signalprozessor und die angeschlossene Computereinheit (TOOMAY & HANNEN, 2004).

RADAR-Systeme werden anhand ihrer spezifischen Funktion unterschieden. Zunächst ist hierbei entscheidend, ob ein System von sich aus elektromagnetische Wellen ausstrahlt und empfängt (*aktives RADAR*) oder ob es nur elektromagnetische Strahlung einer anderen Quelle empfängt (*passives RADAR*) (KINGSLEY & QUEGAN, 1992). Weiterhin werden die RADAR-Systeme ihrer spezifischen Bauart bzw. ihrem Anwendungsgebiet nach gegliedert (LUDLOFF, 2008).

## 2.5.2 Physikalische Eigenschaften elektromagnetischer Wellen

Elektromagnetische Wellen unterliegen dem so genannten *Welle-Teilchen-Dualismus*, der ihnen auf der einen Seite die Eigenschaften einer Welle, auf der anderen die Eigenschaften eines Teilchens zuordnet (PEDROTTI et al., 2005). Dieser Dualismus bezeichnet das unterschiedliche Verhalten elektromagnetischer Wellen im Raum: Solange sich die Strahlung frei im Raum ausbreitet, weist sie Wellencharakter auf, beim Auftreffen auf feste Materie jedoch eher Teilchencharakter (DOBRINSKI et al., 2006).

Als Begründer der Theorie elektromagnetischer Wellen gilt *Maxwell*, der mathematisch nachwies, dass es sich bei elektromagnetischen Wellen um Transversalwellen handelt, die sich im Raum mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten (DOBRINSKI et al., 2006). In einem dreidimensionalen Raum (x-, y- und z-Ebene) schwingt das elektrische Feld dabei in der xy- und das magnetische Feld in der xz-Ebene. Elektromagnetische Wellen werden daher auch als gekoppelte Wellen bezeichnet (ALONSO & FINN, 2000). Der experimentelle Beweis dieser Theorie wurde von *Hertz* erbracht (GERTHSEN & MESCHÉDE, 2004). Nach PEDROTTI et al. (2005) kann die Geschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle ( $c$ ) als Produkt aus Wellenlänge ( $\lambda$ ) und Frequenz ( $f$ ) dargestellt werden:

$$c = \lambda \cdot f \quad (2-1)$$

Aus dieser Gleichung lässt sich

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2-2)$$

ableiten, wodurch klar wird, dass  $f$  und  $\lambda$  umgekehrt proportional sind, da  $c$  in einem definierten Medium konstant ist (PEDROTTI et al., 2005). Die Charakterisierung elektromagnetischer Wellen erfolgt meist anhand der Wellenlänge oder der Frequenz. Abbildung 3 zeigt ein Spektrum elektromagnetischer Wellen, geordnet nach deren Wellenlängen. Auf der rechten Seite wird die Verwendung dieser Frequenzen im technischen Bereich beschrieben. Es ist ersichtlich, dass RADAR-Wellen etwa im Wellenlängenbereich von  $10^{-1}$  bis  $10^{-2}$  m bzw. im Frequenzbereich von etwa  $3 \cdot 10^9$  bis  $3 \cdot 10^{10}$  Hz angesiedelt sind.

Wellenlänge	Wellenart	
$10^6$ m = 1 000 km	Telegrafiewellen	
$10^5$ m = 100 km		
$10^4$ m = 10 km		
$10^3$ m = 1 km	Rundfunkwellen	LW
$10^2$ m		MW
10 m		KW
1 m		UKW, VHF
$10^{-1}$ m = 10 cm	Mikrowellen	Fernsehen, UHF
$10^{-2}$ m = 1 cm		Radar
$10^{-3}$ m = 1 mm	Infrarotwellen	
$10^{-4}$ m = 0,1 mm = 100 $\mu$ m		
$10^{-5}$ m = 0,01 mm = 10 $\mu$ m		
$10^{-6}$ m = 1 $\mu$ m	sichtbares Licht	770 nm
$10^{-7}$ m = 100 nm		390 nm
$10^{-8}$ m = 10 nm	Ultraviolett	
$10^{-9}$ m = 1 nm	Röntgenstrahlen	weich
$10^{-10}$ m = 100 pm		
$10^{-11}$ m = 10 pm		
$10^{-12}$ m = 1 pm	$\gamma$ -Strahlen	hart
$10^{-13}$ m		
$10^{-14}$ m	kosmische Strahlen	

Abbildung 3: Spektrum elektromagnetischer Wellen nach KUCHLING (2007)

Nach DEMTRÖDER (2006) transportieren elektromagnetische Wellen Energie mit einer definierten Dichte, die durch

$$I = c \cdot \varepsilon_r \cdot E^2 \quad (2-3)$$

beschrieben werden kann, wobei  $I$  die Energiestromdichte,  $\varepsilon_r$  die Dielektrizitätskonstante des betreffenden Mediums,  $E$  die elektrische Feldstärke und  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen ( $c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) darstellt.

Diese Energie kann in Wechselwirkung mit Materie treten, sobald sie auf die Oberfläche eines Körpers auftrifft (ALONSO & FINN, 2000). Dieser Effekt ist für die Anwendung des RADAR-Prinzips von essentieller Bedeutung und soll daher im folgenden Kapitel näher erläutert werden.

### 2.5.3 Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Materie

Sobald eine elektromagnetische Welle von einem Medium mit der Geschwindigkeit  $c_1$  in ein anderes Medium (mit abweichender Dielektrizitätszahl) übergeht, verändert sich deren Geschwindigkeit auf den Wert  $c_2$  (DORN & BADER, 1986). Da der Wert von  $c_2$  z.B. im Fall von Böden und anderen geologischen Materialien geringer ist, als die Geschwindigkeit in Luft ( $c_0$ ), (DANIELS, 2000) treten an der Grenzfläche zwischen Luft und Medium unterschiedliche Effekte auf, die im Wesentlichen in

- *Transmission* ( $T_r$ ): Die Welle passiert das Medium
- *Absorption* ( $A_b$ ): Die Energie der Welle wird in das Medium aufgenommen und in eine andere Energieform umgewandelt
- *Reflexion* ( $R_e$ ): Die Welle wird an der Grenzfläche des Mediums zurückgeworfen (reflektiert)

eingeteilt werden können (DOBRINSKI et al., 2006). In der Regel treten diese Phänomene selten isoliert auf, so dass der gesamte Interaktionsprozess als Summe aus Absorption, Reflexion und Transmission folgendermaßen beschrieben werden kann:

$$A_b + R_e + T_r = 1 \quad (2-4)$$

$A_b$ ,  $T_r$  und  $R_e$  stellen hierbei dimensionslose Größen dar, die Werte zwischen 0 (= 0%) und 1 (=100%) annehmen können (KONSTANTINOVIC, 2007).

Da für das RADAR-Prinzip nur der Prozess der Reflexion relevant ist, soll im Folgenden nur dieser näher erläutert werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass durch die Effekte der Absorption und Transmission Energieverluste auftreten können.

Für den Fall von ebenen Grenzflächen gilt das *Gesetz der Reflexion*, das besagt, dass der Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle zur Fläche ( $\varphi_1$ ) gleich dem Austrittswinkel ( $\varphi_2$ ) ist (Daniels, 2000). Die reflektierte Welle ist in diesem Fall gerichtet und verläuft gemäß dem Gesetz der Reflexion in eine definierte Richtung.

In der Praxis weisen Oberflächen jedoch in der Mehrzahl aller Fälle eine mehr oder weniger raue Oberfläche auf. Dadurch kommt es zum Effekt der Beugung, sobald eine Welle auf eine scharfe Kante der Oberfläche fällt. Dadurch wird die Welle nicht in eine zentrale Richtung reflektiert, sondern verteilt sich in unterschiedliche Richtungen in den Raum (DANIELS, 2000).

Wenn das Medium, auf das die Welle aufschlägt, ein Hohlkörper ist, so kann es zu einem dritten Reflexionseffekt, der so genannten resonanten Reflektion, kommen. Dabei dringt die Welle in den Körper ein und wird an den Wänden des Körpers immer wieder reflektiert, wobei ein Teil der Energie aus dem Körper zurück in das umgebene Medium reflektiert wird. Dadurch kommt es innerhalb des Körpers zu elektromagnetischen (Eigen-)Schwingungen, die auch als Ringen bezeichnet werden. Dauer und Intensität des Ringens werden dabei durch die Wellenlänge, die Maße des Körpers sowie dessen dielektrische Eigenschaften bzw. den dielektrischen Kontrast zum umgebenden Medium bestimmt (DANIELS, 2000).

Neben der Reflexion stellt auch die Transmission eine Ausbreitung der Welle durch den Raum dar. Beim Übergang der Welle von einem Medium in das Andere tritt dabei der Effekt der Brechung auf, der durch die Gleichung

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2-5)$$

beschrieben werden kann (DORN & BADER, 1986).

Derjenige Teil der elektromagnetischen Wellen, der zum RADAR-System hin reflektiert wird, kann von diesem detektiert werden. Neben der Zeit, die die elektromagnetischen Wellen vom Aussenden bis zum erneuten Eintreffen beim RADAR-System benötigen (Laufzeit), kann auch die Stärke der reflektierten Wellen (ggf. im Verhältnis zu den ausgestrahlten Wellen) detektiert werden. Mit Hilfe der Laufzeit der elektromagnetischen Wellen, vom RADAR-Gerät zum gesuchten Objekt und zurück, kann im Anschluss eine Distanzabschätzung durchgeführt werden.

Dabei wird zum einen der Zeitpunkt erfasst, an dem die elektromagnetischen Wellen vom RADAR-System in die Umgebung abgegeben werden, zum anderen der Zeitpunkt, an dem der reflektierte Teil der Wellen zum RADAR-System zurückläuft. Darüber hinaus wird die Stärke der Wellen bestimmt, woraus Eigenschaften des Objektes (v.a. Größe) abgeleitet werden können (TAIT, 2005).

#### 2.5.4 Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung in geologischen Medien

Ein Sonderfall des RADAR-Prinzips tritt ein, wenn die elektromagnetischen Wellen nicht in Luft, sondern in ein anderes Medium (z.B. Boden) abgegeben werden. Dieser RADAR-Typ wird als Ground Penetrating Radar (GPR), oder allgemeiner als Surface Penetrating RADAR, definiert. Bei diesen Systemen gelten prinzipiell die gleichen physikalischen Gesetze, wie in den vorherigen Kapiteln, es besteht jedoch die Einschränkung, dass die Geschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen keine Konstante darstellt, sondern material- und frequenzabhängig ist. In Abhängigkeit vom verwendeten GPR-System und dem untersuchten Medium ergeben sich damit mehr oder weniger große Unterschiede für die Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit die Berechnung von Distanzen.

Maßgeblich hierfür sind zum einen die Dielektrizitätszahl bzw. Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon_r$ ) eines Stoffes, zum anderen die Permeabilitätszahl ( $\mu_r$ ). Allgemein gilt für den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle in einem Medium ( $c$ ) sowie  $\mu_r$  und  $\epsilon_r$  (GERTHSEN & MESCHÉDE, 2004):

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \quad (2-6)$$

Während für die meisten Stoffe, mit Ausnahme von ferromagnetischen,  $\mu_r \approx 1$  gilt (DORN & BADER, 1986), weist  $\epsilon_r$ , bei natürlich vorkommenden Stoffen, eine gewisse Schwankungsbreite auf. In (trockenen) geologischen Materialien nimmt  $\epsilon_r$  Werte von etwa 4 bis 8 an, während Wasser eine Dielektrizitätskonstante von 80 besitzt (DAVIS & ANNAN, 1989) und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen damit, im Vergleich zu anderen Materialien, deutlich herabgesetzt ist. Es ist jedoch zu beachten, dass  $\epsilon_r$  neben den stofflichen Eigenschaften wesentlich von anderen Faktoren, allen voran der Frequenz bzw. Wellenlänge, beeinflusst wird. So steigt die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen z.B. in Wasser bei Frequenzen über 1 GHz wegen auftretender Relaxationseffekte stark an (DAVIS & ANNAN, 1989), wodurch  $\epsilon_r$  bei Frequenzen über 1 GHz sinkt.

Die Kalkulation von Distanzen in anderen Medien als Luft bedarf daher einer genauen Kenntnis bzw. vorhergehender Messung von  $\varepsilon_r$ , da ansonsten nur eine Abschätzung der Distanzen (z.B. anhand von vorher ermittelten Referenzwerten) möglich ist.

Neben der Abschwächung der Geschwindigkeit muss bei GPR Systemen beachtet werden, dass Reflexionsphänomene im zu untersuchenden Medium auftreten, sobald sich die dielektrischen Eigenschaften des Bodens ändern. Reflexionen der elektromagnetischen Wellen treten dabei immer dann auf, wenn ein Medium mit der Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon_{r1}$  in ein anderes Medium mit der Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon_{r2}$  übergeht. Diese sind dabei umso stärker, je höher die Differenz zwischen den Dielektrizitätskonstanten der betreffenden Medien ist (Gradient, bzw. dielektrischer Gradient). Die Reflexionsintensität wird dabei über den so genannten Reflexionskoeffizienten ( $r$ ) quantifiziert (DAVIS & ANNAN, 1989; PAUL & SPECKMANN, 2004):

$$r = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}} \quad (2-7)$$

So können beispielsweise unterschiedliche Bodenschichten, wie sie in der Natur häufig vorkommen, bereits Reflexionen auslösen. Diese sind umso ausgeprägter, je größer die Differenz der Dielektrizitätskonstanten zweier Schichten zueinander ist.

### 2.5.5 Anwendungen von Boden penetrierenden RADAR-Systemen (GPR)

Aufgrund der hohen möglichen Bandbreite an Frequenzen und den spezifischen Eigenschaften eines GPR-Systems ist dessen Anwendungen in vielen zivilen- und militärischen Bereichen möglich. Der Begriff „Ground Penetrating Radar“ ist dabei aber keineswegs nur auf Boden begrenzt, da auch Anwendungen von GPR in anderen Medien bekannt sind (vgl. ARNONE, 1996; MAIERHOFER et al., 1999; MAIERHOFER, 2000; EISEN et al., 2003).

Nach DANIELS (2004) lässt sich GPR in folgenden konkreten Bereichen von Wissenschaft und Technik finden:

- Archäologie
- Bohrlochanalysen
- Analyse von Brückendecken
- Gebäudezustandsanalyse
- Auffinden von Bodenkontaminationen
- Auffinden von Landminen
- Bewertung der Qualität von Stahlbeton
- Forensik
- Geophysik
- Medizin
- Erforschung von Planeten(oberflächen)
- Inspektion von Gleisen und Gleisbetten
- Satelliten- und flugzeuggebundene Fernerkundung
- Analyse von Straßen (Asphalt)
- Sicherheitstechnik
- Schnee-, Eis- und Gletscheranalysen
- Holzanalysen
- Untersuchung von Tunnelauskleidungen
- Untersuchung von Wandzuständen

Aufgrund dieser Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten von GPR sollen im folgenden Abschnitt einige zentrale Anwendungen näher erläutert werden, um die Leistungsfähigkeit von GPR-Systemen zu verdeutlichen.

### 2.5.5.1 Archäologie und Forensik

Für archäologische Untersuchungen wurde GPR bereits erfolgreich zur Detektion von Inkonsistenzen, Hohlräumen und unter der Erde verborgenen Metallgegenständen in unterschiedlichsten Strukturen (z.B. mittelalterliche Kathedralen, Burgen, Pyramiden) eingesetzt (FIDLER, 2004). Die Detektion selbst dient dabei aber nur als Anhaltspunkt für die Position archäologisch relevanter Strukturen. Untersuchungen in Japan zeigten, dass die Position bestimmter Bauwerke (aufgrund ihrer spezifischen Struktur) aus den Reflexionsdaten eines 300 bzw. 500 MHz GPR-Systems abgeleitet werden können (GOODMAN, 1994). Untersuchungen mit 500 MHz GPR in Arizona (USA) (STERNBERG & MCGILL, 1995) und Biella (Italien) (SAMBUELLI et al., 1999) zeigten ähnliche Ergebnisse, ebenso wie eine Untersuchung mit einem 100 bzw. 350 MHz System in Neufundland (Kanada) (VAUGHAN, 1986).

Zur genauen Identifizierung der archäologischen Strukturen in diesen Untersuchungen waren jedoch immer Ausgrabungen erforderlich. Die Position der archäologisch relevanten Objekte konnte mit den vorgestellten Systemen grob bestimmt werden, da diese als „Anomalien“ in den erzeugten Datenbildern (Radargrammen) sichtbar waren. Dies ermöglichte im Anschluss eine gezielte Ausgrabung. Vor allem die Untersuchungen von VAUGHAN (1986) zeigen jedoch deutlich, dass nicht alle relevanten Strukturen mit Hilfe von GPR erfasst werden können.

Das Anwendungsprinzip in der Forensik ist ähnlich dem der Archäologie. GPR soll in diesem Wissenschaftsfeld beim Auffinden von menschlichen und tierischen Überresten helfen. Modelluntersuchungen mit Schweinekadavern unterschiedlicher Größe und unterschiedlichen Zersetzungsgrades in Tiefen von 0,5 bis 1 m mit einem 500 MHz GPR System zeigten dabei nur zum Teil gute Ergebnisse. Während die Erfassung der Positionen der Kadaver in Sandböden verhältnismäßig unproblematisch war, stieß das System bei tonigen Böden an seine Grenzen. Das Auffinden der Kadaver geschah anhand von Anomalien im Radargramm, die sowohl auf die Kadaver selbst, als auch die Veränderung des Bodens (resultierend aus dem Vergraben) zurückgeführt wurden. Neben einigermaßen erhaltenen Kadavern (nach 13 bis 21 Monaten Verweilzeit im Boden) konnten auch komplett skelettierte Kadaver mit Hilfe des GPR Systems detektiert werden (SCHULTZ et al., 2006). Eine Fallstudie aus dem Jahre 2003 lieferte ähnliche Ergebnisse und zeigte, dass sogar die Position einer skelettierten menschlichen Leiche nach 15 Jahren unter der Betonschicht einer Garage detektiert werden konnte.



Die Identifikation erfolgte dabei ebenfalls durch die Bestimmung einer Anomalie im Radargramm- die Freilegung der Überreste erfolgte im Anschluss (SCHULTZ, 2007). Ein Beispiel für die Bildgebung der RADAR-Daten (Radargramm) ist in Abbildung 4 dargestellt.

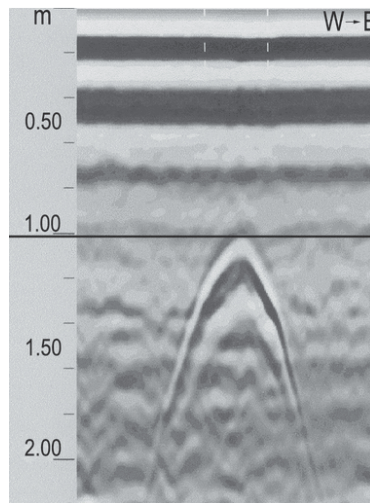


Abbildung 4: GPR-Aufnahme (Radargramm) eines Armierungsstahls als Referenzmessung. Die Intensität der Reflexionsdaten wird in Form eines Farbgradienten als Funktion der Tiefe (y) in Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung (West nach Ost (W→E), x) dargestellt. Nach SCHULTZ (2008)

### 2.5.5.2 Materialanalyse

Aus der wissenschaftlichen Forschung sind zahlreiche Berichte über die Anwendung von GPR zur Materialprüfung- bzw. Materialanalyse vorhanden. Angefangen von Eis und Schnee über Beton und Brückenelemente bis hin zu Feuchtigkeitsanalysen, lassen sich viele Beispiele für die erfolgreiche Anwendung von GPR anführen.

Aus Eisuntersuchungen auf einem Flugfeld in der Antarktis (Pegasus-Runway, Ross Ice-Shelf) konnten bei Verwendung einer Frequenz, die um 500 MHz zentriert wurde, sowohl Eisschichten mit niedriger Dichte, als auch Eisschichten mit feinen Wassereinschlüssen anhand von Anomalien im Radargramm geortet werden. Die Auflösung bei dieser Frequenz wird mit ca. 0,3 m angegeben (ARCONI, 1996). Untersuchungen am Colle Gnifetti Gletscher (Monte Rosa, Schweiz) zeigten, dass mit einem 100 bzw. 250 MHz-System die Eisschichten unterschiedlicher Jahre anhand eines Radargramms identifiziert werden können, da Einlagerungen (z.B. Sedimente) zu Reflexionen im Eis führten (EISEN et al., 2003). Ähnliches gilt für die Messung von Schneetiefen, bei denen das Ausgangsgestein Reflexionen der elektromagnetischen Wellen verursacht und so die Abschätzung der Dicke der darüber liegenden Schneeschicht ermöglicht (MANACORDA et al., 2004).

Auch einzelne Schneesichten wurden bereits erfolgreich mit Hilfe von GPR lokalisiert (HEILIG et al., 2008), ebenso wie verschüttete Menschen nach einem Lawinenabgang (INSTANES et al., 2004).

Bei der Analyse von Betonbauteilen wurden mit Hilfe von GPR bereits Strukturen wie Kabel, Rohre oder Spannungskanäle geortet. Die Besonderheit bei Betonbauteilen besteht darin, dass eine Stahlbewehrung in den Bauteilen enthalten ist, die mitunter starke Reflexionen verursacht. Die Polarisation der Wellen senkrecht zu den Bewehrungsstäben kann diesen Effekt jedoch abschwächen (MAIERHOFER et al., 1999; MAIERHOFER, 2000). Erste Ansätze zu dieser Art von Anwendung waren jedoch bereits 24 Jahre zuvor bekannt. Zu diesem Zeitpunkt wurde eine Methode zur Inspektion von Minen und Tunneln entwickelt, die auf den unterschiedlichen Dielektrizitätseigenschaften von Fels- und Kohleschichten sowie deren Wassergehalt beruhten (COOK, 1975).

Aufbauend auf den Erkenntnissen von COOK (1975) wurde die Feuchtigkeitsanalyse unterschiedlicher Materialien mittels GPR weiterentwickelt. Neben Feuchtigkeitsanalysen von Böden, die in dieser Gliederung dem Bereich der Landwirtschaft zugeordnet werden, sind auch Berichte über die erfolgreiche Messung der Feuchte von Beton (MAIERHOFER et al., 1999) und Teeblättern während des Verarbeitungsprozesses (OKAMURA, 2000) vorhanden. GPR arbeitet dabei, im Gegensatz zu anderen Sensoren, zerstörungsfrei (MAIERHOFER et al., 1999).

### **2.5.5.3 Landminensuche**

Für die Anwendung von GPR im Bereich der Landminensuche sind bereits große Anstrengungen sowohl im zivilen als auch im militärischen Bereich unternommen worden. Landminen sind typischerweise in ca. 10 cm Tiefe vergraben, so dass die Penetrationstiefe für eine Lokalisierung nicht allzu hoch sein muss. Ein zentrales Problem beim Auffinden dieser Objekte mit konventionellen Methoden (mechanisch, magnetisch) besteht darin, dass eine Ortung ausgeschlossen ist, sobald nicht metallische Komponenten (z.B. Keramik) als Minenkörper verwendet werden (MONTROYA & SMITH, 1999). Der Metallanteil in solchen Minen kann lediglich 0,1 g betragen, wohingegen sie in dieser Größe mit bis zu 20 g Sprengstoff beladen sind. Die Dielektrizitätskonstanten dieser Sprengstoffe liegen dabei, in Abhängigkeit von Sprengstoffart und Frequenz, im Bereich von etwa 2,2 bis 3,3 (BRUSCHINI et al., 1998). Die Detektion solcher Minen ist damit schwierig, da die Dielektrizitätskonstante von Böden in einem ähnlichen Bereich liegt und der Kontrast zwischen Mine und Boden gering ist (CARIN et al., 1999; RAPPAPORT et al., 2001; SATO et al., 2004).

Für die Anwendung von Detektoren zur Minensuche werden trotzdem eine Detektionsrate von 99,6% und ein möglichst geringes Auftreten von Fehlalarmen gefordert (YAROVOY et al., 2000).

Da Minen, im Verhältnis zu anderen Objekten, mitunter relativ klein sind ( $\varnothing$  7,5 nach CHIGNELL (1998)), ist die untere Grenze der verwendbaren Frequenz auf etwa 1 GHz beschränkt. Unterhalb dieser Frequenz ist das Auflösungsvermögen zu gering, um die Mine zu erfassen. Die Obergrenze der verwendeten Frequenzen liegt bei etwa 6 GHz, da ab hier Oberflächenrauigkeit und Bodeninhomogenitäten die Mine überlagern (CHEN et al., 2000). Ein zusätzliches Problem stellt die Zusammensetzung der Böden dar, da deren Dielektrizitätskonstante sich in Abhängigkeit von Dichte, Wassergehalt und Zusammensetzung ändert (MONTROYA & SMITH, 1999). Darüber hinaus ist der hohe Zeitbedarf, der bei der Detektion von einzelnen Minen mittels GPR besteht, ein weiteres Problem. CARIN et al. (1999) schlagen deshalb ein „stand-off“ System, basierend auf Ultra-Breitband (UWB)-Technik vor, welches ganze Minenfelder an Stelle einzelner Minen erfasst und so eine wesentlich schnellere Untersuchung großer Areale ermöglicht. Zur Unterscheidung zwischen Störeinflüssen (Clutter) und Zieldaten wird deshalb ein UWB-System im Frequenzbereich von 50 bis 1.200 MHz vorgeschlagen. UWB-Systeme erzeugen sehr kurze zeitliche Pulse, so dass ein hohes Auflösungsvermögen im Zeitbereich (Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Wellen) erreicht wird. Trotzdem stellt die Detektion von Plastik-Minen nach wie vor ein großes Problem dar, da der Kontrast zwischen Mine und Boden sehr gering ist. Die Zugabe von Wasser zum Boden kann jedoch helfen den Kontrast zu verbessern (CARIN et al., 1999). Eine zusätzliche Clutter-Reduktion kann durch die Verwendung spezieller Antennen (MONTROYA & SMITH, 1999) oder die Verwendung von Antennen-Arrays (SATO et al., 2004) erreicht werden, so dass die Landminen einfacher erfasst werden können.

Wie bereits zuvor angedeutet, wurden in jüngerer Vergangenheit vermehrt GPR-Systeme zur Minensuche verwendet, die auf Breitband oder UWB-Technik beruhen (VITEBSKIY et al., 1997; CARIN et al., 1999; SCHEERS et al., 2000; HO et al., 2008). Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass niedrige Frequenzen mit entsprechend hoher Penetrationstiefe genutzt werden können, während die zeitliche Auflösung durch die hohe Bandbreite sehr kurz gehalten wird. Systeme mit einer Bandbreite von 500 MHz bis zu 10.000 MHz sind daher bereits im Einsatz (HO et al., 2008).

#### **2.5.5.4 Land- und Forstwirtschaft, Pflanzenanalyse**

Für Applikationen in der Land- und Forstwirtschaft können grundsätzlich drei Haupteinsatzgebiete von GPR voneinander abgegrenzt werden:

- Bodenanalyse
- Pflanzenanalyse
- Sonstige Anwendungen

##### **Bodenanalyse**

Ziel einer Bodenuntersuchung mit GPR ist in der Regel das Auffinden bestimmter Bodenschichten oder Ausgangsgesteine bzw. die Bestimmung der Mächtigkeit bestimmter Bodenschichten. So wurde GPR erfolgreich für die Bestimmung der Mächtigkeit von Torfschichten in einem Moor eingesetzt, bei dem das Ausgangsgestein, im Vergleich zum Torf, einen starken Reflektor darstellte und dementsprechend gut geortet werden konnte (MEIER et al., 2002). Auch auf landwirtschaftlichen Standorten konnten bestimmte Bodenhorizonte erfolgreich mit Hilfe von GPR identifiziert werden. Bei annähernder Feldkapazität (maximale Wassersättigung des Bodens) konnte auf dem gemessenen Standort die Tiefe der Pflugsohle zuverlässig bestimmt werden. Mit Hilfe einer 500 MHz-Antenne konnten darüber hinaus auch Strukturen im Unterboden identifiziert werden, an denen ein Substratwechsel (schwach bis mittellehmiger Sand über stark lehmigem Sand) zu beobachten war. Eine 500 MHz Antenne löste den Boden dabei besser auf als eine 900 MHz-Antenne. Diese löste die Pflugsohle jedoch deutlich klarer auf. Messungen bei trockenerem Boden führten zu einer besseren Auflösung des Unterbodens, aber zu einer schlechteren Auflösung der Pflugsohle, was auf den fehlenden Einfluss von Stauwasser zurückgeführt wird (PETERSEN et al., 2005). Ähnliche Ergebnisse konnten auch in Böden mit Tongehalten um 11% erreicht werden, wobei auch hier eine 500 MHz-Antenne genutzt wurde (RAPER et al., 1990). FREELAND et al. (1998) nutzen ein GPR-System mit unterschiedlichen Antennen, so dass verschiedene Frequenzen zwischen 300 und 900 MHz zur Bodenkartierung genutzt werden konnten. Es zeigte sich, dass höherfrequente Antennen zwar eine feinere Auflösung ermöglichten, die Penetrationstiefe in den Untergrund war jedoch, im Vergleich zu niederfrequenteren Antennen, wesentlich geringer. An unterschiedlichen Standorten in den USA konnte das GPR-Verfahren erfolgreich zur Bestimmung verschiedener Schichten im Untergrund eingesetzt werden. Es wird jedoch darauf verwiesen, dass die Interpretation der RADAR-Bilder ein gewisses Maß an Erfahrung voraussetzt. Teilweise ist auch die Verifikation der Daten („ground truthing“), mit Hilfe destruktiver Methoden (Bohrlöcher), notwendig.

Derartige Horizonte können in einem Feld aber auch zur Bestimmung der Bodenfeuchte genutzt werden. Entsprechende Untersuchungen nutzen hierbei den Einfluss von Wasser auf die Dielektrizitätskonstante des Bodens (TOPP, 1980) aus. Nach Gleichung 2-6 nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen in einem Medium mit steigender Dielektrizitätskonstante ab. Dadurch wird, im Vergleich zu einer niedrigen Dielektrizitätskonstante, für eine identisch lange Strecke innerhalb eines Mediums mehr Zeit benötigt. Ein bestimmter Horizont eines Bodens, der in konstanter Tiefe liegt, erscheint deshalb, entsprechend der aktuellen Bodenfeuchte, früher oder später auf der Zeitachse eines Radargramms. Diese theoretische Betrachtung wurde von LUNT et al. (2005) empirisch untersucht und unter den betrachteten Bedingungen verifiziert. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass ein entsprechender Horizont (Reflektor) klar erkennbar vorhanden sein muss und ggf. weitere Informationen über diesen Horizont (z.B. durch Bohrlöcher) eingeholt werden müssen. Des Weiteren können starke Niederschlagsereignisse die Anwendung dieses GPR-Verfahrens beeinträchtigen. Soweit eine nicht destruktive Analyse der Bodenzusammensetzung Ziel der Bodenanalyse ist, weisen INMAN et al. (2002) darauf hin, dass Elektromagnetische Induktionsverfahren (EMI) wesentlich kostengünstiger als GPR-Untersuchungen sind und diese nur bei besonderen Fragenstellungen (Schichtung des Unterbodens) Vorteile aufweisen.

Neben einzelnen Bodenschichten und der Bodenfeuchte spielen in der Landwirtschaft auch im Boden vergrabene Dinge eine gewisse Rolle. So kann GPR beispielsweise zur Lokalisierung von Drainagen in Ackerböden genutzt werden, z.B. wenn diese erneuert werden müssen. Entsprechende Untersuchungen zeigten, dass Drainagen mit 5 cm Durchmesser problemlos geortet werden können, wenn die Bodenbedingungen dies zulassen. Das gilt vor allem dann, wenn der dielektrische Kontrast zwischen Boden und Drainage sehr groß ist (z.B. gefrorener Boden mit hoher Wassersättigung, leere Drainage). Bestimmte äußere Bedingungen, etwa eine hohe Wassersättigung des Bodens bei gleichzeitig gefüllter Drainage (kleiner dielektrischer Kontrast) oder die Bildung von (Verdichtungs-)Horizonten (Überlagerung des Signals), können jedoch zu einer Verschlechterung der Detektionsrate führen (ALLRED et al., 2005).

## **Pflanzenanalyse**

Die Analyse von Pflanzenmaterial mit Hilfe von GPR umfasst im Wesentlichen die Detektion, sowie ggf. Masse- und Volumenbestimmungen von Pflanzen- oder Pflanzenteilen, die ganz oder teilweise unter der Bodenoberfläche verborgen sind. Konkret sind dabei meist entweder die Wurzeln oder Speicherorgane (Rüben, Knollen) von (Nutz-)Pflanzen Ziel der Analyse.

Für forstwissenschaftliche Fragestellungen wurde GPR erfolgreich für die Untersuchung des Wurzelsystems von Einzelbäumen (HRUSKA et al., 1999) und für Wurzeluntersuchungen an ganzen Baumbeständen (BUTNOR et al., 2001, BUTNOR et al., 2003) eingesetzt. Bei der Untersuchung von Einzelbäumen wurde mit Hilfe eines 450 MHz GPR-Systems der Wurzelraum von ca. 50 Jahre alten Eichenbäumen untersucht. Es zeigte sich, dass die Wurzeln bis zu einem Durchmesser von 3 bis 4 cm detektiert und kartiert werden konnten. Der Messfehler, berechnet anhand von Bohrkernproben, betrug dabei maximal 1 bis 2 cm im Durchmesser sowie 2 bis 3 cm in der Wurzellänge, wobei der absolute Fehler im Durchmesser auf 1 cm gesenkt werden konnte, sobald eine höhere Frequenz verwendet wurde (HRUSKA et al., 1999).

Weiterführende Studien von BUTNOR et al. (2001, 2003) betrachteten nicht das Wurzelsystem an Einzelbäumen, sondern das Wurzelsystem ganzer Baumbestände. Dabei wurden unterschiedliche Baumbestände in den USA untersucht, die sich in Bodenart bzw. –aufbau, sowie im Alter des Baumbestandes unterschieden. Messungen mit einem GPR-System im Frequenzbereich von 450 sowie 1.500 MHz in Längs- und Querrichtung der Baumreihen führten zu unterschiedlichen Ergebnissen. Während sandige Böden sehr gut mit GPR zu untersuchen waren und eine Größenbestimmung der Wurzeln bis zu 0,5 cm Durchmesser möglich war, war dies in stark lehmigen Böden (mit teilweise Stauwassereinfluss) nicht möglich. Die verwendete Frequenz beeinflusste die Auflösung des Systems dabei wesentlich: Während bei 450 MHz eine höhere Penetrationstiefe erreicht werden konnte, war die Auflösung der Bilder bei 1.500 MHz deutlich besser, die Penetrationstiefe dafür aber eingeschränkt. Eine Detektion der Wurzeln und Interpretation der Ergebnisse war umso einfacher, je besser die Orientierung der Wurzeln (längs- oder quer zur Scanrichtung) bekannt war. Die schlechtere Detektierbarkeit der Wurzeln in lehmigen bzw. tonigen Böden wird auf eine höhere Dämpfung der elektromagnetischen Wellen zurückgeführt. Es wird außerdem darauf hingewiesen, dass akkurate Ergebnisse nur bei konstanter Geschwindigkeit und stetem Bodenkontakt erreicht werden konnten.

Eine weitere wichtige Erkenntnis war die Tatsache, dass eng zusammenliegende Wurzeln in den Radargrammen nicht voneinander unterscheidbar waren, sondern einen einzigen Reflexionspeak verursachten, was die Interpretation der Radargramme weiter verkompliziert, zumal auch andere Objekte im Boden (unerwünschte) Reflexionen verursachen können (BUTNOR et al., 2001).

Weiterführende Untersuchungen aus dem Jahr 2003 mit ähnlichem Versuchsdesign, aber speziellerer Signalauswertung, kamen zu besseren Ergebnissen. Auf dem untersuchten Standort (Agroforstsystem auf sandigem Lehmboden mit guter Drainage) konnten hohe Korrelationen zwischen RADAR-Signal und gemessener Wurzelmasse erreicht werden. Dies galt insbesondere bei einer Nachbehandlung (post-processing) der Daten mit unterschiedlichen Mechanismen (Hintergrund-Abzug, Hilbert-Transformation, etc.). Auf diese Weise konnten Korrelationskoeffizienten zwischen RADAR-Signal und Wurzelmasse von bis zu 0,85 erreicht werden (BUTNOR et al., 2003). Diese Studie beschränkte sich allerdings nur auf einen speziellen Standort, dessen Eigenschaften nach BUTNOR et al. (2001) für Anwendung von GPR sehr günstig sind.

Aus diesen und ähnlichen Ergebnissen wurde ein System auf Basis von UWB-GPR zur Ertragsmessung von Zuckerrüben entwickelt. Zentraler Ansatzpunkt dabei war die Tatsache, dass bestehende Systeme (die meist auf Energiefluss, Kraft- oder Impulsmessverfahren beruhen) der anhaftenden Erde nur unzureichend Rechnung tragen. Um dieses Problem zu umgehen, sollte der von den einzelnen Zuckerrüben reflektierte Teil der elektromagnetischen Wellen mit der Masse der jeweiligen Rübe korreliert werden, so dass eine teilflächenspezifische Ertragskartierung während des Erntevorgangs durchgeführt werden konnte. Das verwendete System mit einer Bandbreite von 9 GHz erfüllte diese Aufgabe nur teilweise. Vor allem bei hohen Bodenfeuchtegehalten und einer hohen Oberflächenrauigkeit war die Detektierbarkeit von Zuckerrüben stark eingeschränkt. Unter günstigen Bedingungen (geringe Bodenfeuchte, geringe Oberflächenrauigkeit) konnten Korrelationskoeffizienten von bis zu 0,81 für die Korrelation von reflektierter Energie zu Einzelrübenmasse ermittelt werden. Unter ungünstigen Bedingungen wurden jedoch unzureichende Koeffizienten von 0,32 erreicht. Das System wird, in der vorhandenen Konfiguration, deshalb nicht als generell einsatzfähig angesehen, sondern als einsatzfähig mit mehr oder weniger starken Einschränkungen (KONSTANTINOVIC, 2007). Darüber hinaus sind umfangreiche Signalverarbeitungsprozesse notwendig, um die Zuckerrüben aus dem Radargramm zu separieren (WÖCKEL et al., 2006).

### **Sonstige RADAR-Anwendungen in der Landwirtschaft**

Neben dem eigentlichen Konzept eines GPR, bestimmte Oberflächen zu penetrieren, finden sich in der Landwirtschaft auch Anwendungen, bei denen dieses Prinzip nicht oder nur teilweise erfüllt ist und die Zuordnung der eingesetzten RADAR-Systeme in die Klasse „GPR“ damit nicht oder nur eingeschränkt möglich ist. Da diese Systeme aber ebenfalls wichtig für die Analyse von Pflanzenparametern sind, soll im Folgenden eine kurze Übersicht gegeben werden.

Ein wesentlicher Einsatzbereich der oben genannten Sensoren ist die Messung von Ertragsparametern. Die Messung von Gras, Heu, gehäckseltem Mais und Hafer mit Pulsradarsystemen erbrachten hohe Korrelationen zwischen deren Masse und der Intensität der reflektierten Strahlung bei Kalibrationsmessungen. Das verwendete 5,8 GHz System konnte dabei durch eine 5-mal so hohe Masse penetrieren, wie ein vergleichbares 26 GHz-System. Als Messwert für die pflanzliche Masse wurde dabei die Intensität des an einer Metallplatte reflektierten Signals herangezogen, welches (durch die Dämpfung des Pflanzenmaterials) umso größer war, je geringer die Masse des Pflanzenmaterials. Messungen im Anschluss an die Kalibrierung zeigten jedoch, dass die Genauigkeit der Sensoren für eine praktische Anwendung nicht ausreicht, zumal die verwendeten Systeme eigentlich für Füllstandmessungen konzipiert waren (WILD et al., 2003). Eine ähnliche Versuchsanordnung wurde von PAUL & SPECKMANN (2004) genutzt, um Höhe und Pflanzendichte in Getreidebeständen zu messen. Es zeigte sich, dass ein 24,1 GHz Füllstandradar dazu in der Lage war und Potenzial für weitere Anwendungen besitzt. Die Bestandesdichte sowie weitere Informationen (z.B. Chlorophyllkonzentration) können jedoch, bei ausreichender Vegetationsdecke, auch im Bereich des sichtbaren Lichtes und des Nahinfrarotbereiches zuverlässig gewonnen werden (REUSCH, 1997).

Weitere Anwendungen von RADAR in der Landwirtschaft betreffen vor allem Geschwindigkeitsmessungen an Maschinen. Diese arbeiten jedoch nach einem anderen Prinzip (Dopplerradar) als die hier vorgestellten Systeme (WILD et al., 2003) und werden deshalb nicht näher erläutert.



## 3 Problemstellung

### 3.1 Aufgabenstellung und Forschungshypothesen

Wie in Kapitel 2 gezeigt wurde, existiert eine Reihe technischer und manueller Lösungen für die Charakterisierung unterirdischer Speicherorgane von Pflanzen, speziell von Zuckerrüben.

Die destruktiven Methoden sind dabei in der Regel einfach zu handhaben und liefern die geforderten Ergebnisse, erzeugen durch das Entfernen der Pflanze aus dem Erdboden zur Charakterisierung der Speicherorgane aber ein zentrales Problem: Ein weiteres Wachstum der Pflanze wird unterbrochen. Speziell bei der Züchtung von Zuckerrüben und Zuckerrübenhybriden besteht damit keine Möglichkeit mehr Saatgut mit Hilfe dieser Pflanze zu produzieren oder das (Speicher-)Wurzelsystem über die gesamte Wachstumsperiode zu beobachten. Darüber hinaus sind die meisten automatisierten Methoden nur für größere Flächen geeignet und liefern praktisch keine Informationen über Einzelpflanzen. Manuelle Methoden sind zwar präziser, erfordern aber einen hohen Zeitaufwand.

Nicht destruktive Systeme liefern demgegenüber Daten, ohne die Pflanze aus dem Boden zu entfernen und so ihre Entwicklung zu beeinflussen. Während optische Methoden keine exakten Daten über die Entwicklung der Speicherwurzeln liefern, sondern nur Korrelationen zu Masse, Volumen oder anderen Parametern herstellen, liefern tomographische Verfahren (MRT, CT) sogar hochauflösende Bilder von einzelnen Pflanzen oder auch einzelnen Pflanzenteilen.

Diese Vorteile bergen aber auch spezifische Nachteile. So sind die vorgestellten Tomographieverfahren in der Regel mit hohen Kosten behaftet und weisen zum Teil gesundheitliche Risiken durch die Emission von Strahlung (CT, Emissionstomographie) auf. Bis auf wenige Ausnahmen sind diese Systeme ortsfest und nicht oder nur mit erheblichem Aufwand zu transportieren.

Boden-penetrierende RADAR-Systeme (GPR) sind demgegenüber vergleichsweise kostengünstig und problemlos zu transportieren. Die emittierte Strahlung liegt im Mikrowellenbereich und weist im Allgemeinen Leistungen auf, die für die Gesundheit des Menschen unkritisch sind. Im Vergleich zu den vorgestellten Tomographieverfahren müssen jedoch Nachteile im Auflösungsvermögen in Kauf genommen werden.

Aus diesen Fakten ergeben sich für ein Messsystem zur Charakterisierung unterirdischer Pflanzenteile auf Basis von GPR folgende Anforderungen:

- Möglichst hohe Auflösung des Systems, so dass bereits in frühen Stadien des Pflanzenwachstums Daten über die Charakteristika der Speicherwurzeln gewonnen werden können.
- Das System sollte das Wachstum der Pflanze nicht beeinträchtigen, so dass die Entwicklung, bis hin zur Samenreife, ungestört fortgesetzt werden kann.
- Eine Variabilität des Systems hinsichtlich der Größe von Pflanzgefäßen sollte ebenso geben sein, wie die Portabilität damit das System an mehreren Standorten eingesetzt werden kann.
- Störungen des Systems durch externe Einflüsse (z.B. Bodenwasser, Düngemittel) sollten soweit wie möglich reduziert werden.
- Das System muss in der pflanzenzüchterischen Anwendung auch von fachfremden Personen zu bedienen sein. Die Ergebnisse der Messungen müssen verständlich, nachvollziehbar und mit möglichst geringem Aufwand für die Nacharbeitung zur Verfügung stehen.
- Das System soll maximalen Anwenderschutz ohne zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen (Abschirmung) gewährleisten.

Aus diesen Anforderungen können folgende Forschungshypothesen abgeleitet werden:

- Das konzipierte System ermöglicht eine zerstörungsfreie Messung der geometrischen Eigenschaften folgender Speicherwurzeln unter Versuchsbedingungen (Einzelpflanzen in Gefäßen):
  - Zuckerrüben
  - Mangold
- Störeinflüsse können soweit reduziert werden, dass keine signifikante Beeinflussung des Systems innerhalb der definierten Grenzen stattfindet.
- Erfassung und Auswertung der Daten lassen sich soweit automatisieren, dass das Verfahren auch von fachfremden Personen angewendet werden kann.
- Das System ist transportabel, arbeitet mit einem vertretbaren Zeitaufwand und ist damit für eine Hochdurchsatz-Phänotypisierung (Rapid-Phenotyping) im Bereich der Pflanzenzüchtung geeignet.

### 3.2 Konzept des Messsystems

Für die Bestimmung der Oberflächencharakteristika und der Geometrie unterirdischer Speicherorgane von Pflanzen soll ein Versuchsstand auf der Basis von Ultra-Breitband RADAR (UWB-RADAR) entwickelt werden, bei dem die typischen Nachteile, bzw. möglichen Störfaktoren eines RADAR-Systems minimiert werden sollen. Unter Berücksichtigung der im vorherigen Kapitel definierten Anforderungen ergibt sich daraus folgende technische Umsetzung:

#### Anwendung eines Ultrabreitband (UWB) Systems:

Durch die hohe Frequenzbandbreite wird eine relativ hohe Auflösung des Systems (im cm-Bereich) bei einer niedrigen Ausgangsleistung erreicht. Dies soll eine präzise Vermessung der Testobjekte (Zuckerrüben) ebenso gewährleisten, wie den Schutz der Anwender und der zu untersuchenden Pflanzen, da Ausgangsleistungen von maximal 10 mW (entspricht 10 dBm) ausreichend und damit für Anwender und Pflanzenmaterial unkritisch sind.

#### Entwicklung eines portablen Versuchsstandes:

Aufgrund der geringen Abmessung des RADAR-Systems, der Antennen und der erforderlichen Antriebstechnik soll ein Versuchsstand konstruiert werden, der mit Hilfe von zwei Personen und einfachen technischen Hilfsmitteln (Gabelhubwagen) von einem Ort zum anderen transportiert werden kann.

#### Verwendung des passenden Bodens:

Böden und deren physikalische und chemische Eigenschaften haben einen wesentlichen Einfluss auf das Ausbreitungsverhalten elektromagnetischer Wellen. Im Falle von Gefäßversuchen kann die Bodenart, im Rahmen der Anforderungen der Pflanzen, frei gewählt werden. Auf diese Weise kann ein Boden ausgewählt werden, der eine möglichst niedrige Dämpfung und damit einen geringen Störeinfluss aufweist.

#### Eliminierung von Störquellen:

Störquellen können die Qualität einer RADAR-Messung beeinflussen und sind damit ein nicht zu unterschätzender Problemfaktor. Es soll deshalb zunächst geklärt werden, inwieweit diese Einflüsse mit Hilfe geeigneter Softwareverfahren (Referenzabzug, Time-Gating, etc.) minimiert bzw. ausgeschaltet werden können.

### Entwicklung geeigneter Algorithmen zur automatisierten Datenauswertung:

Die Auswertung der vom RADAR-System erzeugten Daten erfordert mehrere unterschiedlich komplexe Schritte, die vor allem für unerfahrene RADAR-Nutzer eine erhebliche Herausforderung darstellen. Im Sinne eines möglichst schnellen und anwenderfreundlichen Gesamtsystems soll die Datenauswertung daher weitgehend automatisiert werden. Hierzu sollen mit Hilfe der Software MATLAB® geeignete Algorithmen entwickelt werden.

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Aufbau des Sensorsystems

#### 4.1.1 Komponenten und Funktionsprinzip des RADAR-Systems

Bei dem im Rahmen dieser Forschungsarbeit verwendeten RADAR-System handelt es sich um ein UWB-RADAR, welches auf dem Prinzip von Maximalfolgen (MLBS) basiert. MLBS steht als Abkürzung für *Maximum Length Binary Sequence*, auch M-Sequenz oder Maximalfolge genannt, und beschreibt ein UWB-Sensorverfahren. Maximalfolgen sind spezielle Pseudo-Rausch-Folgen, die mit Hilfe eines rückgekoppelten n-stufigen, digitalen Schieberegisters erzeugt werden (SACHS et al., 2002, SACHS et al., 2005). Ursprünglich stammt dieses Verfahren aus der Akustik und arbeitet im Hochfrequenzbereich nach einem ähnlichen Prinzip (SACHS & PEYERL, 1999). M-Sequenzen gehören zur Gruppe der Korrelationsverfahren, bei denen zeitlich ausgedehnte Signale verwendet werden, um Impulsantworten (zeitlich kurze Signale) zu erhalten. Die Anforderungen an maximale Amplituden werden dadurch herabgesetzt. Die Darstellung als Impulsantwort erfolgt jedoch nicht durch direkte Anregung, sondern durch nachträgliche Signalverarbeitung (MÜLLER & MÖSER, 2004). Die Taktdauer einer Maximalfolge ( $T$ ) wird durch die Taktrate ( $t_c$ ) und die Stufen des Schieberegisters ( $n$ ) vorgegeben:

$$T = (2^n - 1) \cdot t_c \quad (4-1)$$

Wobei die Inverse von  $t_c$  der Taktfrequenz ( $f_c$ ) des Taktgenerators entspricht:

$$f_c = \frac{1}{t_c} \quad (4-2)$$

Eine MLBS weist im Zeitbereich eine Rechteckfunktion auf, die periodisch zwischen den Werten -1 und 1 schwankt. Ihre Autokorrelationsfunktion ist kammförmig und weist eine maximale Amplitude von  $2^{n-1}$  auf (SACHS et al., 2002). Regt man nun ein Testobjekt mit einer stationären Maximalfolge  $s(t)$  an, so entsteht empfängerseitig als Messsignal  $y(t)$  zunächst das Faltungsprodukt aus  $s(t)$  und Messobjekt  $h(t)$  (MÜLLER & MÖSER, 2004; SACHS & PEYERL, 1999):

$$y(t) = s(t) * h(t) \quad (4-3)$$

Die vom Schieberegister erzeugte, reale Maximalfolge  $s(t)$  lässt sich weiterhin als Faltungsprodukt aus einer idealen Maximalfolge  $m(t)$  und einem virtuellen Filter (Impulsantwort  $k(t)$ ) darstellen:

$$y(t) = m(t) * k(t) * h(t) \quad (4-4)$$

Für die Kreuzkorrelierte  $\psi_{ym}(\tau)$  zwischen  $y(t)$  und  $m(t)$  gilt damit:

$$\Psi_{ym}(\tau) = h(\tau) * k(\tau) * \Psi_{mm}(\tau) \quad (4-5)$$

Wobei  $\Psi_{mm}(\tau)$  die Autokorrelation der Maximalfolge  $m(t)$  darstellt. Diese Autokorrelation ist einer Dirac-Folge<sup>1</sup> sehr ähnlich, so dass für  $\psi_{ym}(\tau)$  vereinfacht gilt:

$$\psi_{ym}(\tau) \approx h(\tau) * k(\tau) \quad (4-6)$$

Voraussetzung dafür ist, dass die Impulsantwort innerhalb der Periode  $T$  des Testsignals hinreichend abgeklungen ist.  $\psi_{ym}(\tau)$  ist damit direkt proportional zur gesuchten Impulsantwort. Für geringe Anforderungen an die Messgenauigkeit ist die Verfälschung durch  $k(\tau)$  akzeptabel. Bei höherer Messgenauigkeit muss  $k(\tau)$  nach vorheriger Kalibrierung aus  $\psi_{ym}(\tau)$  entfaltet werden. Die in Gleichung 4-6 dargestellte Näherung gilt jedoch nur solange wie das Abtasttheorem (Nyquist-Theorem) eingehalten wird. Hierfür gilt, dass die genutzte Bandbreite des Systems kleiner ist als  $\frac{f_c}{2}$  (SACHS & PEYERL 1999; SACHS et al., 2003). Das Messsignal  $y(t)$  lässt sich damit relativ einfach als Kreuzkorrelierte von Messobjekt und Impulsantwort darstellen. Über die Dauer ( $T$ ) der erzeugten MLBS, lassen sich das Anregungssignal  $y(n)$  und Messsignal  $x(n)$  als Zeilenvektoren darstellen:

$$\begin{aligned} x_n &= [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_N]^T \\ y_n &= [y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_N]^T \end{aligned} \quad (4-7)$$

---

<sup>1</sup> Dirac-Folge: Eine Impulsantwort mit, theoretisch, minimaler Dauer und maximaler Amplitude. Die Flanken werden dadurch unendlich steil. In der technischen Realisierung ist nur eine Annäherung an die Dirac-Folge möglich.

Die zyklische Kreuzkorrelation zwischen beiden Signalen  $\psi_{yx}(n)$  lässt sich damit auf einfache Matrixmultiplikation zurückführen:

$$\begin{bmatrix} \psi_{yx1} \\ \psi_{yx2} \\ \psi_{yx3} \\ \vdots \\ \psi_{yxN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_N \\ x_N & x_1 & x_2 & \dots & x_{N-1} \\ x_{N-1} & x_N & x_1 & \dots & x_{N-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_2 & x_3 & x_4 & \dots & x_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

Aus  $x(n)$  wird dazu reihenweise eine Matrix gebildet, bei der die Indizes zyklisch nach rechts verschoben werden. Wenn für  $x(n)$  eine ideale MLBS  $m(n)$  verwendet wird, besteht diese Matrix nur aus den Werten +1 und -1, so dass die Matrixmultiplikation auf einfache Addition und Subtraktion zurückgeführt werden kann (SACHS & PEYERL, 1999). Der eigentliche Vorteil dieser Darstellung liegt darin, dass sie mit der so genannten „schnellen Hadamard-Transformation“ (Fast Hadamard Transformation, FHT) relativ einfach im Zeitbereich korreliert und gefaltet werden kann (MÜLLER & MÖSER, 2004). Da die FHT im Gegensatz zur Fourier-Transformation keine Drehzeigermultiplikatoren verwendet (SACHS & PEYERL, 1999), sondern aufgrund der Struktur von  $x(n)$  mit einfacher Addition und Subtraktion arbeiten kann, ergibt sich ein Zeitgewinn vom Faktor 10 im Vergleich zur Fourier-Transformation. Zwar gibt es für die Fourier-Transformation einen speziellen Algorithmus, die so genannte Fast-Fourier-Transformation (FFT), dieser ist jedoch auf Blocklängen ( $N$ ) von

$$N = 2^m \quad (4-9)$$

angewiesen. Da die Taktdauer der MLBS jedoch nach Gleichung 4-1 immer um genau einen Wert kürzer ist als die Blocklänge der FFT, müssten spezielle, zeitintensive Verfahren zur Umwandlung eingesetzt werden (MÜLLER & MÖSER, 2004).

Zeitverlauf, sowie Autokorrelationsfunktion und Frequenzspektrum einer idealen MLBS sind in Abbildung 5 dargestellt. Für die Anwendung des MLBS-Prinzips ist dabei wichtig, dass nur etwa die Hälfte des vollen Frequenzspektrums ( $DC$  bis  $f_c$ ) für die Nutzung zur Verfügung steht (SACHS & PEYERL, 1999), um das Nyquist Theorem zu erfüllen. Da der untere (abgetastete) Teil dieses Spektrums aber über 70% der Signalenergie beinhaltet, ist diese Einschränkung nicht weiter störend, zumal eine Erhöhung der Abtastrate über  $\frac{f_c}{2}$  hinaus die Unempfindlichkeit des Messsystems gegenüber dem Messrauschen stark herabsetzt (SACHS et al., 2003).

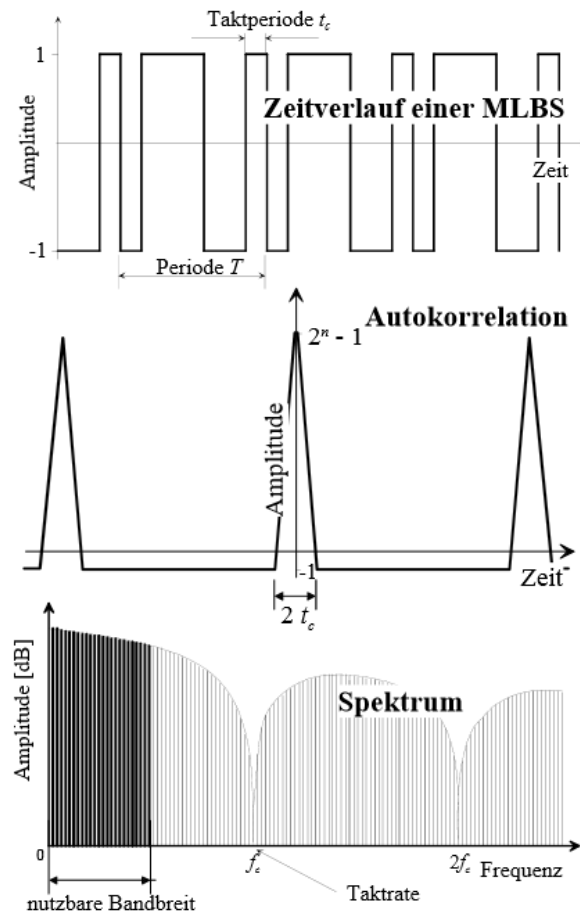


Abbildung 5: Zeitverlauf, Autokorrelationsfunktion und Frequenzspektrum einer idealen MLBS nach SACHS & PEYERL (1999)

Nach der Erzeugung der MLBS und der Aussendung der Wellen auf das Testobjekt, weicht das vom Objekt reflektierte Signal in der Regel vom erzeugten Signal ab, so dass als Messsignal ein verändertes Signal (Impulsantwort) in das Sensorsystem zurückläuft (SACHS et al., 2005). Für Bandbreiten von 40 bis etwa 100 MHz lassen sich MLBS und rücklaufendes Signal noch in Echtzeit erfassen. Für Bandbreiten darüber ist eine Echtzeiterfassung nicht mehr zweckmäßig, da die Analog-Digital-Wandler (ADC) zu langsam arbeiten (SACHS & PEYERL, 1999). Das rücklaufende Signal wird deshalb nach der Erfassung in einer Track and Hold (T&H)-Schaltung erfasst und gehalten bis der anschließende ADC die Signale weiterverarbeiten kann (SACHS et al., 2005). Für die Weiterverarbeitung der Signale bietet sich das so genannte „Interleaved Sampling“ (Unterabtastung) an. Da eine MLBS ein periodisches Signal ist, bietet sich für die Unterabtastung die Verwendung eines  $m$ -stufigen Binärteilers an. Wenn dieser auch das Schieberegister ansteuert, lässt sich der Abtasttakt aus dem Systemtakt ( $f_c$ ) ableiten. Abbildung 6 zeigt diesen Vorgang für  $m = 1$  und  $n = 3$ .



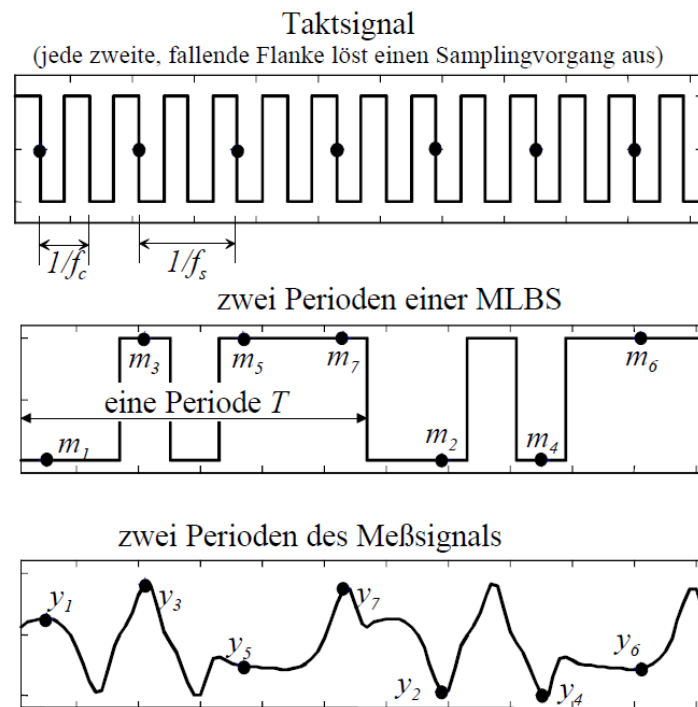


Abbildung 6: Interleaved-sampling für  $m = 1$  und  $n = 3$ . Die Abtastwerte sind entsprechend ihrer natürlichen Reihenfolge nummeriert nach SACHS & PEYERL (1999)

Dabei löst jede zweite Flanke des Taktsignals einen Samplingvorgang aus. Nach  $m$  Perioden der MLBS sind alle Signale eingesammelt und stehen in einer falschen, aber bekannten Reihenfolge zur Verfügung. Diese Unterabtastung hat den Vorteil, dass die Abtastrate dem ADC angepasst werden kann. Eine zusätzliche Störunterdrückung und Reduktion des Datenumfangs kann durch Mittelung der Messdaten (Averaging) erreicht werden (SACHS & PEYERL, 1999).

Das Funktionsprinzip des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten MLBS-Sensors wird in Abbildung 7 schematisch mit allen zuvor beschriebenen Komponenten dargestellt.

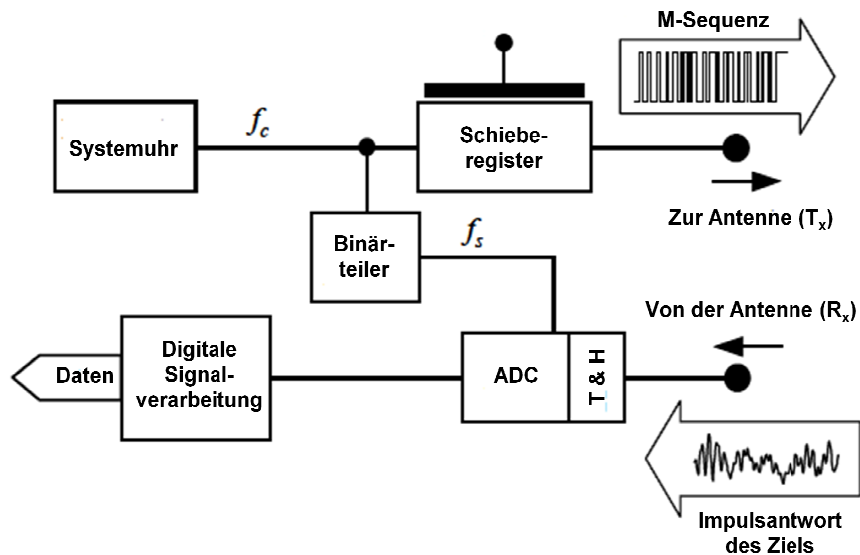


Abbildung 7: Schematischer Aufbau des UWB-RADARs nach SACHS et al. (2005), verändert

Das System besteht aus insgesamt 2 Messköpfen mit jeweils 3 Kanälen. Von diesen dienen 2 als Transmitter zum Aussenden der elektromagnetischen Wellen ( $T_{x1}$ ,  $T_{x2}$ ) und insgesamt 4 als Receiver zum Empfang der reflektierten Wellen ( $R_{x1}$ ,  $R_{x2}$ ,  $R_{x3}$ ,  $R_{x4}$ ), von denen  $T_{x1}$ ,  $R_{x1}$  und  $R_{x2}$  zum ersten und  $T_{x2}$ ,  $R_{x3}$  und  $R_{x4}$  zum zweiten Messkopf zugeordnet werden. Obwohl jeder Messkopf eine eigene Einheit darstellt, können die Receiver Kanäle untereinander verschaltet werden. Durch diese Konfiguration können Antennenarrays betrieben werden, die RADAR-Aufnahmen aus unterschiedlichen Winkeln ermöglichen und so den Messprozess beschleunigen. Soweit nicht anders angegeben, wurden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nur die Kanäle  $T_{x1}$  und  $R_{x3}$  genutzt. Die für das RADAR-System verwendeten Antennen waren Breitband-Horn Antennen (Typ BBHA 9120A, Schwarzbeck Messtechnik, Schönau). Die Richtcharakteristik der Antennen sowie die genauen Abmessungen können dem Anhang entnommen werden.

#### 4.1.2 Spezifikationen des verwendeten RADAR-Systems

Bei dem hier verwendeten UWB-RADAR-System handelt es sich um eine Einzelanfertigung der Firma Imsens (Ilmenau) welches unter Mitwirkung der technischen Universität Ilmenau entwickelt und aufgebaut wurde. Die wichtigsten Leistungsdaten des Systems sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Leistungsdaten des verwendeten RADAR-Systems

Leistungsmerkmal	Gleichung	Physikalische Einheit	Wert/ Wertebereich
Taktfrequenz ( $f_c$ )		GHz	18
Untere Frequenzgrenze ( $f_l$ ) <sup>2</sup>		GHz	0,8
Obere Frequenzgrenze ( $f_u$ )		GHz	9
Nutzbare Bandbreite ( $B$ )	$B = f_u - f_l$	GHz	8,2
Taktrate ( $t_c$ )	$t_c = \frac{1}{f_c}$	ns	0,0556
Anzahl Samples ( $n$ )			511
Erfasster Zeitbereich ( $t_0 \dots t_n$ )	$t_0 = 0 \cdot t_c$ $t_n = n \cdot t_c$	ns	0 : 28,3889
Maximale Ausgangsleistung ( $P$ )		mW	10
		dBm	10
Gesamtzahl der Messkanäle			$2 \times 3$
davon Sendekanäle ( $T_x$ )			$2 \times 1$
davon Empfangskanäle ( $R_x$ )			$2 \times 2$

Neben diesen Werten sind auch noch einige weitere Werte relevant, die aus den Leistungsdaten berechnet werden können.

<sup>2</sup> Die untere Frequenzgrenze wird durch die verwendeten Antennen begrenzt. Theoretisch wären eine Untergrenze im DC-Bereich, und damit eine Frequenzbandbreite nahe 9 GHz erreichbar.

Das räumliche Auflösungsvermögen ( $\delta_r$ ) des verwendeten RADAR-Systems hängt im Wesentlichen von der Auflösung im Zeitbereich bzw. der Taktrate ( $t_c$ ) und der Ausbreitungsgeschwindigkeit im betreffenden Medium ( $c$ ) ab. Allgemein kann dieser Zusammenhang als

$$\delta_r \cong \frac{1}{2} \cdot c \cdot t_c \quad (4-10)$$

definiert werden (SACHS et al., 2002). Nach Gleichung 2-6 kann  $\delta_r$  an Stelle von  $c$  auch in Abhängigkeit von  $\varepsilon_r$  ausgedrückt werden:

$$\delta_r \cong \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \cdot t_c \cong \frac{t_c \cdot c}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (4-11)$$

Neben  $t_c$  und  $\varepsilon_r$  ist die Ausbreitung im Raum auch noch vom Öffnungswinkel der Antenne ( $\theta$ ) abhängig (SACHS et al., 2002), so dass für  $\delta_{cr}$  gilt:

$$\delta_{cr} \cong \frac{t_c \cdot c}{2\sqrt{\varepsilon_r} \cdot \sin \theta} \quad (4-12)$$

Ein großer Vorteil der UWB-Technik liegt in der hohen Auflösung im Zeitbereich aufgrund der hohen Taktfrequenz bzw. Bandbreite (SACHS & PEYERL, 1999). Das reale Auflösungsvermögen des gesamten Systems wird damit bei konstanter Taktfrequenz  $f_c$  und konstantem  $\theta$  maßgeblich von  $\varepsilon_r$  bestimmt. Eine Abschätzung von  $\delta_r$  in Abhängigkeit von  $\varepsilon_r$  ist in Abbildung 8 dargestellt.

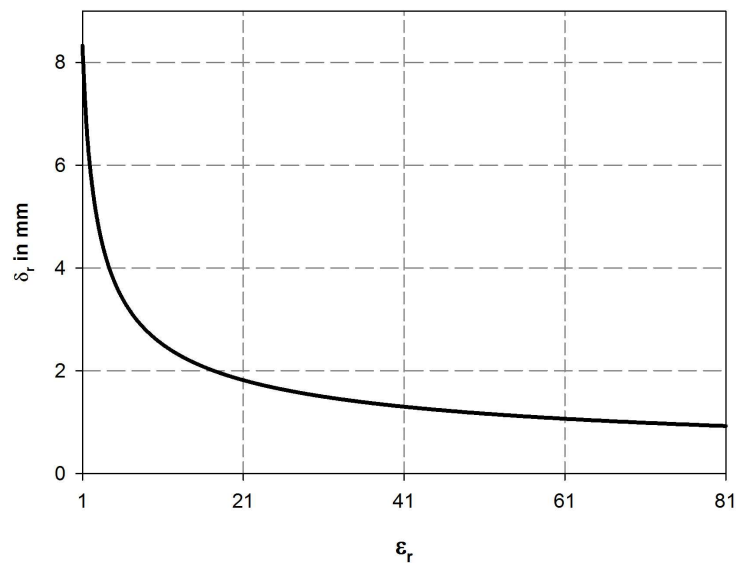


Abbildung 8: Theoretisches Auflösungsvermögen des RADAR-Systems ( $\delta_r$ ) in Abhängigkeit von der Dielektrizitätskonstante ( $\varepsilon_r$ ) des betreffenden Materials. Alle Werte wurden gemäß Gleichung (4-11) berechnet

### 4.1.3 Scannersystem

Zur Positionierung der Antennen im Raum wurden die Hornantennen an einem Linearantrieb (LES-4, ISEL-Automation, Eichenzell) angebracht und die Untersuchungsobjekte auf einem Rotationsantrieb (RDH-M, ISEL-Automation, Eichenzell) positioniert. Der Linearantrieb wurde mit Hilfe von Inbusschrauben auf einem Metallrahmen befestigt, so dass eine grobe Positionierung im Raum möglich war, um das System an unterschiedliche Versuchsszenarien anzupassen. Die Antennen wurden mithilfe eines Adapters an die Schlittenplatte des Antriebs geschraubt, so dass diese innerhalb des Fahrweges (820 mm) vertikal bewegt werden konnten. Der Abstand beider Antennen zueinander beträgt dabei 260 mm, so dass von der Unterkante der Transmitterantenne zur Oberkante der Empfängerantenne ein Abstand von 15 mm bei horizontaler Polarisation realisiert wurde.

Der Rotationsantrieb wurde in horizontaler Ausrichtung auf dem Metallboden des Versuchsstandes fixiert, damit die Pflanzgefäße in horizontaler Richtung um die Antennen gedreht werden können. Hierzu wurde eine Adapterplatte auf die Antriebseinheit aufgeschraubt, die die Fixierung der Unterkante der Pflanzgefäße mit Hilfe von 3 Metallbolzen ermöglichte. Die Unterkante der Untersuchungs- bzw. Pflanzgefäße wurde mit Hilfe einer Klemmeinrichtung mit 3 Rollen fixiert, um die Mantelfläche der Pflanzgefäße an jeder Stelle in möglichst konstantem Abstand zu den Antennen positionieren zu können. Abbildung 9 verdeutlicht den Aufbau des Systems mit allen wichtigen Komponenten.

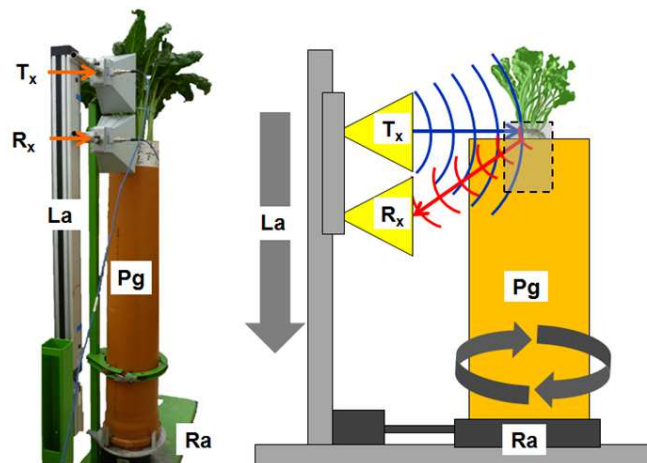


Abbildung 9: Scannersystem als Foto (links) und Funktionsskizze (rechts) mit allen wesentlichen Komponenten.  $T_x$ : Transmitter-Antenne,  $R_x$ : Receiver-Antenne,  $La$ : Linearantrieb (mit angedeutetem Laufweg),  $Pg$ : Pflanzgefäß,  $Ra$ : Rotationsantrieb

Zur Ansteuerung der Antriebe wurde ein computergesteuerter Controller (IMCP-4, ISEL-Automation, Eichenzell) verwendet. Dieser ermöglichte die Verwendung von bis zu 4 unterschiedlichen Antrieben, von denen im Versuchsbetrieb jedoch nur die Endstufen x (Rotationsantrieb) und y (Linearantrieb) verwendet wurden. Die Kommunikation des Controllers mit dem PC wurde durch eine RS 232-Schnittstelle realisiert. Für die Antriebe konnten dadurch theoretisch folgende Minimalauflösungen erreicht werden:

- Rotationsantrieb (x-Achse): 0,0089°
- Linearantrieb (y-Achse): 0,00313 mm

#### 4.1.4 Systemsoftware

Der Betrieb des UWB-RADARs, welcher Steuerung, Kontrolle, Datenakquisition, sowie die Ansteuerung der Antriebe beinhaltete, wurde mit Hilfe der Software „ultraANALYSER 2011“ (Version 1.0, Imsens, Ilmenau) realisiert. Diese Software bietet mannigfaltige Einstellungsmöglichkeiten für das gesamte System, die in folgende Hauptbereiche untergliedert werden können:

- Basiskonfiguration (Referenzsample, Scannerreferenzfahrt, etc.)
- Datenakquisition
- Real-Time Darstellung der RADAR-Daten und Scannerparameter
- Einfache Rohdatenverarbeitung
- Systemkonfiguration

Vor Inbetriebnahme des Systems mussten zunächst einige wichtige Einstellungen vorgenommen und eine Referenzmessung durchgeführt werden. Dies betraf zum einen den Linear- bzw. Rotationsantrieb, bei dem jeweils eine Referenzfahrt durchgeführt werden musste, zum anderen das UWB-RADAR, bei dem ein Null- oder Referenzsample eingemessen wurde.

Die Referenzfahrt der Antriebe diente der Definition des Koordinatenursprungs zur weiteren Bestimmung der Laufwege bzw. Positionen. Hierzu wurden beide Antriebe an ihren jeweiligen Endschalter gefahren und diese Positionen als Nullpunkt definiert. Alle aufgezeichneten Koordinaten orientierten sich an diesem Referenzwert.

Dem UWB-RADAR wurde vor Beginn der Messungen ein so genanntes Nullsample durch eine Referenzmessung zugewiesen.

Da das hier verwendete UWB-RADAR auf dem Prinzip von Pseudozufalls bzw. Pseudorandomfolgen besteht, ist dieser Schritt zwingend notwendig, da eine genaue Zuweisung des Startpunktes des Signals im Zeitbereich nur auf diese Weise möglich ist. Dazu wurden mehrere Messungen im Leerraum durchgeführt und die Zeitbereichsposition mit maximalem Reflexionskoeffizienten als Ausgangsposition festgelegt. Diese Methode bietet eine sehr schnelle Möglichkeit der Inbetriebnahme. Es muss jedoch beachtet werden, dass die elektromagnetischen Wellen die Antennen zum skizzierten Zeitpunkt bereits verlassen haben. Der festgelegte Nullpunkt entspricht daher nicht dem tatsächlichen, physischen Nullpunkt im Raum (HELBIG, 2012, persönliche Mitteilung).

### 4.1.5 Rohdatenverarbeitung

Die vom RADAR-System erzeugten Daten lagen als .uastd-Dateien vor und wurden mit Hilfe des Programms MATLAB (Version R2009a, Mathworks) weiterverarbeitet. Die Dateien bestanden dabei im Wesentlichen aus zwei verschiedenen Variablen: „ChList“, die die Daten aller Kanäle des RADAR-Sensors enthielt und „Scanner“, die die Positionsinformationen des Linear- und Rotationsantriebes enthielten.

Diese Daten wurden vom Sensorsystem zunächst ohne ausreichend definierte Struktur aufgezeichnet und mussten für die anschließende Verwendung weiterverarbeitet und strukturiert werden, um eine weiterführende Analyse zu ermöglichen. Dazu wurde mit Hilfe von MATLAB ein Graphical User Interface (GUI) programmiert, welches Strukturierung, Aufbereitung und Darstellung der Daten übernahm.

Die vom RADAR-System übergebenen Daten lagen zunächst als 2-dimensionale Vektoren bzw. Matrizen vor, die über alle Messungen des Systems fortgeschrieben wurden. Für die Aufbereitungen waren dabei folgende Variablen essentiell:

- Datenmatrix:

Diese Matrix hatte die Dimensionen  $m \cdot n$ , wobei  $m$  der Reihenzahl und  $n$  der Spaltenzahl entsprach.  $m$  war systembedingt auf 511 Reihen begrenzt und repräsentiert den Zeitbereich der Messung (in ns).  $n$  entsprach der gesamten Anzahl der Einzelmessungen (Samples) und wird über die Dauer der Messung kontinuierlich fortgeschrieben, bis diese automatisch oder manuell beendet wird. In jede Zelle der Matrix wird der zum Zeitpunkt  $m$  in Messung  $n$  ermittelte Korrelationskoeffizient ( $r$ ) eingetragen.



- Scannerinformationen:  
Die Scannerinformationen gliedern sich in zwei Variablen, bei der die eine die Position der Rotationsachse als sphärische Koordinate enthielt und die andere die Position der Gleitplatte auf dem Linearantrieb (in m). Beide Variablen sind Zeilenvektoren mit einer Reihe und  $n$  Spalten. Für jedes Sample standen damit zwei Koordinaten zur Verfügung, um die Position der Hornantennen im Raum zu bestimmen.
  
- Sonstige Informationen:  
Weitere wichtige Informationen wurden als separate Variablen mit einer Zeile und  $n$  Spalten ausgegeben und umfassten im Wesentlichen:
  - Taktfrequenz des Systems (in Hz)
  - Position des Nullsamples im Zeitbereich
  - Aussteuerung des ADC

Der erste Schritt zur Strukturierung der Daten war das Auffinden des Startpunktes der Messung, da dieser wegen des spezifischen Funktionsprinzips in allen  $n$  Spalten auf einem zufälligen Punkt  $p_{m_R}$  in Zeile  $m_R$  der Datenmatrix lag. Anhand der Zeilennummer  $m_R$  wurde die Rohdatenmatrix ( $D_{roh}$ ) in eine neue Matrix ( $D_p$ ) überführt:  $m_R$  wurde in die erste Zeile der Matrix  $D_p$  gelegt. Alle auf  $m_R$  folgenden Zeilen wurden bis zur Endzeile ( $m_{511}$ ) an  $m_R$  angeschlossen. Alle vor  $m_R$  liegenden Zeilen wurden ihrer Hierarchie entsprechend an  $m_{511}$  angeschlossen, bis zur Zeile  $m_{(R-1)}$ . So entstand aus

$$D_{roh} \equiv \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m_R,1} & p_{m_R,2} & \cdots & p_{m_R,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{511,1} & p_{511,2} & \cdots & p_{m,n} \end{pmatrix} \quad (4-13)$$

die neue Datenmatrix

$$D_p \equiv \begin{pmatrix} p_{m_R,1} & p_{m_R,2} & \cdots & p_{m_R,n} \\ p_{(m_R+1),1} & p_{(m_R+1),2} & \cdots & p_{(m_R+1),n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{511,1} & p_{511,2} & \cdots & p_{511,n} \\ p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{(m_R-1),1} & p_{(m_R-1),2} & \cdots & p_{(m_R-1),n} \end{pmatrix} \quad (4-14)$$

Da es in den letzten Reihen der Matrix zu unlogischen Werten kam, die durch die Referenzmessungen begründet sind, wurden die letzten 11 Reihen der Matrix im Anschluss gelöscht, da diese keine für den Messvorgang relevanten Informationen lieferten und Rauscherscheinungen so relativ einfach kompensiert werden konnten.  $D_p$  wies damit im Anschluss eine Reihenzahl von  $m = 500$  auf.

Bei den hier durchgeführten Messungen handelt es sich um die Erfassung eines Volumens, so dass neben den Positionsinformationen der beiden Scannerachsen auch die Laufzeit des Signals, sowie der zugehörige Korrelationskoeffizient berücksichtigt werden müssen. Dies erfordert ein spezifisches Datenmanagement, mit dessen Hilfe jederzeit auf bestimmte Messwerte innerhalb dieses Datenvolumens zurückgegriffen werden kann. Mit Hilfe der Software MATLAB wurden die Daten deshalb entsprechend ihrer Scannerkoordinaten geordnet. Dazu wurde die Datenmatrix  $D_p$  zunächst spaltenweise nach den sphärischen Koordinaten der Rotationsachse separiert und für jede neue sphärische Koordinate eine separate Datenmatrix  $D_o$  mit  $m = 500$  Reihen und  $n$  Spalten gebildet.

Da die Spaltenzahl  $n$  bei den auf diese Weise separierten Matrizen nicht immer identisch war, mussten alle Matrizen auf die minimale Spaltenzahl aller auf diese Weise erzeugten Matrizen gekürzt werden. Der Grund für diese Unterschiede ist, dass RADAR- und Scannerantrieb unabhängig voneinander angesteuert werden. Dadurch kann es zu entsprechend längeren oder kürzeren Laufwegen kommen. Da sich diese Unterschiede jedoch im Bereich weniger Zentimeter bewegen, ist diese Tatsache für die weitere Analyse zu vernachlässigen. Nach dieser Neuordnung wurden alle Matrizen in einem so genannten 3D-Array zusammengeführt, der aus  $m$  Zeilen,  $n$  Spalten und  $o$  Matrizen besteht, wobei  $m$  dem Zeitbereich entspricht,  $n$  der vertikalen Position der Hornantennen im Raum und  $o$  der sphärischen Position des zu untersuchenden Pflanzgefäßes. Der Aufbau dieses Arrays wird in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Diese übersichtliche Anordnung der Daten ermöglichte einen schnellen und einfachen Zugriff auf einzelne Zellen, ebenso wie auf größere Bereiche einer oder mehrerer Matrizen.

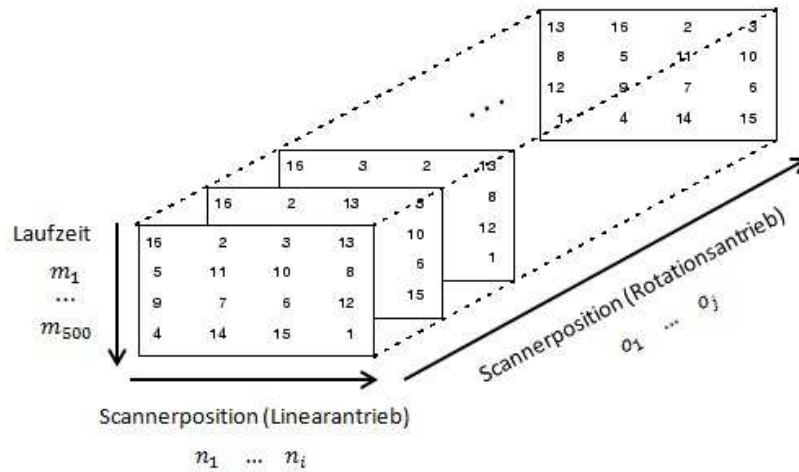


Abbildung 10: Schematischer Aufbau des Datenarrays nach der Rohdatenverarbeitung nach MATHWORKS (2009), verändert

Der Hauptvorteil dieser Anordnung liegt darin, dass die gespeicherten Reflexionsdaten nach der Neuordnung, wie in Abbildung 11 dargestellt, ihrer Lage nach genau der Definition des RADAR-Volumens nach SACHS (1998) entsprechen. Der Zugriff auf die Daten wird dadurch wesentlich vereinfacht.

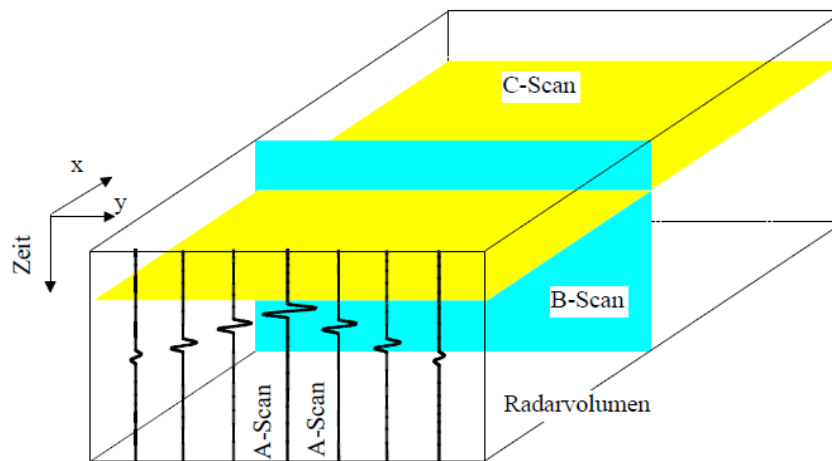


Abbildung 11: RADAR-Volumen nach SACHS (1998). x: Scannerposition Rotationsantrieb; y: Scannerposition Linearantrieb

## 4.2 Pflanzgefäße

Als Pflanzgefäße wurden Kanalgrundrohre (KG Rohre) nach den Normen DIN EN 877 und DIN 19522 verwendet. Diese Rohre bestehen aus Polyvinylchlorid (PVC) und wurden in einem Außendurchmesser von 250 mm bei einer Wandstärke 6,1 mm (DN 250) verwendet. Die Länge der Gefäße variierte je nach Versuchsanstellung zwischen 1.000 mm und 1.500 mm.

PVC ist für die vorgestellten Versuche vorteilhaft, da es, frequenzabhängig, eine Dielektrizitätszahl von 2 bis 6 aufweist (DOBRINSKI et al., 2006; BÖGE et al., 2001). Diese niedrige Dielektrizitätszahl führt zu geringen Reflexionen an der Gefäßoberfläche, so dass der Großteil der elektromagnetischen Wellen in das eingefüllte Substrat eindringen kann. Andere Materialien (z.B. Polyethylen) weisen zwar ähnliche Dielektrizitätskonstanten auf, die genannten PVC Rohre sind jedoch in großen Stückzahlen verfügbar und konnten mit minimalem Aufwand für die hier vorgestellten Versuche angepasst werden.

Die Rohre wurden mit passenden Endmuffen versehen und verklebt, so dass die betreffenden Substrate problemlos eingefüllt werden konnten. Eine Drainage wurde durch Perforation am unteren Rand der Muffe gewährleistet, so dass sich innerhalb des Pflanzgefäßes keine Stauwasserzonen bilden konnten.

## 4.3 Pflanzsubstrat, Bewässerung und Nährstoffzuteilung

Als Substrat wurde für alle Untersuchungen Quarzsand mit einer Körnung von 0,71 bis 1,44 mm verwendet. Dies hat den Hintergrund, dass Quarzsand zum einen ein Substrat, bzw. geologisches Medium, mit einer sehr niedrigen Dielektrizitätszahl (3 bis 5) (DAVIS & ANNAN, 1989) darstellt und damit für GPR Untersuchungen gut geeignet ist. Zum anderen konnten in diesem Substrat Zuckerrüben erfolgreich angezogen werden, wenn ausreichende Wasser- und Nährstoffzufuhr gewährleistet wurde (METZNER, 2012, persönliche Mitteilung).

Die Bewässerung der in dem Substrat angezogenen Pflanzen wurde mit Hilfe einer automatischen Tropfbewässerung realisiert, wobei für jedes Pflanzgefäß zwei Tropfer verwendet wurden.

Die Nährstoffzufuhr erfolgte mit Hilfe einer Dosierpumpe über die Tropfbewässerung. Hierzu wurde das Düngemittel „Hakaphos blau“ (Compo, Münster) in einer Konzentration von 0,01% (erste Woche der Anzucht) bis 0,05% (übrige Zeit) verwendet. Die Zusammensetzung des Düngemittels kann dem Anhang dieser Arbeit entnommen werden.

#### **4.4 Pflanzenmaterial**

Als Versuchspflanzen wurden Zuckerrüben der Sorte „Pauletta“ (KWS, Einbeck) verwendet. Diese wurden 3 cm tief in die Pflanzgefäße ausgesät und mit Bodensubstrat bedeckt. Die Saat erfolgte genau in der Mitte des zylindrischen Pflanzgefäßes, indem diese mit Hilfe einer Lochscheibe vor der Saat markiert wurde.

Zu Vergleichszwecken wurden neben den Zuckerrüben auch Mangoldpflanzen einer Zuchtlinie genutzt, die von der Universität Kiel (Institut für Pflanzenzüchtung, Prof. Dr. Jung) zur Verfügung gestellt wurden. Im Vergleich zu Zuckerrüben weist Mangold ein verzweigtes Wurzelsystem an Stelle einer Speicherwurzel auf. Dadurch sollten Unterschiede in der Reflexionscharakteristik sichtbar gemacht werden.

Alle Pflanzen wurden unter Gewächshausbedingungen angezogen und von Anfang Mai bis Ende September 2012 in einem Abstand von ca. 14 Tagen mit Hilfe des RADAR-Systems untersucht. Insgesamt wurden hierbei 10 Zuckerrüben sowie 8 Mangoldpflanzen untersucht. Aufgrund einer verspäteten Saat konnten letztere jedoch erst ab Ende Juni 2012 untersucht werden.

#### **4.5 Bestimmung des Substrat-Wassergehalts**

Da die Bodenfeuchte einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität von GPR-Messungen ausübt, (DAVIS & ANNAN, 1989) ist die Kenntnis des Bodenwassergehaltes für die spätere Ergebnisinterpretation vorteilhaft. Vor den RADAR-Messungen wurde deshalb der Substrat-Wassergehalt (in % vol.) mit Hilfe eines TDR-Gerätes (Mini Trase, Soilmoisture Corp., Santa Barbara, USA) gemessen. Dieses System arbeitet auf der Basis elektromagnetischer Impulse, die durch eine 15 cm lange Sonde mit zwei Metallstäben in das Dielektrikum (Boden) eingebracht werden. Wenn sich beide Stäbe komplett im Boden befinden kann über die Laufzeit des Impulses zwischen Anfang und Ende der Stäbe die Dielektrizitätskonstante des Bodens bestimmt werden. Nach TOPP (1980) kann der Substrat-Wassergehalt im Anschluss über eine Gleichung bestimmt werden. Dabei wird vom Hersteller eine Messgenauigkeit von  $\pm 2\%$  vol. angegeben.

#### 4.6 Referenzkörper

Da Zuckerrüben, wie alle übrigen Pflanzen auch, einer natürlichen Variabilität unterliegen, ist die Verwendung dieser Pflanzen zur Erstüberprüfung des Sensorsystems nicht sinnvoll. Es wurden deshalb Testkörper mit definierten Abmessungen und geometrischen Eigenschaften verwendet, um bestimmte Parameter des Sensorsystems (Wiederholgenauigkeit, Antennenpolarisation, etc.) zu bestimmen.

Die Testkörper bestanden aus Steckblumenformschaum (Smithers-Oasis, Cuyahoga Falls, USA), einem speziellen Kunstharz, welches in gesättigtem Zustand einen Wassergehalt von ca. 95% vol. aufweist. Dieser war in unterschiedlichen geometrischen Formen verfügbar und konnte mit einem Messer für die spezifischen Versuchsanforderungen nachgebessert werden. Soweit nicht anders angegeben, wurden die betreffenden Referenzkörper bei vollständiger Wassersättigung (95% vol.) verwendet.

Bei den Testkörpern handelte es sich um kegelstumpfförmige, rotationssymmetrische Körper mit hoher geometrischer Ähnlichkeit zur Speicherwurzel von Zuckerrüben, die im weiteren Verlauf als Testkörper A ( $T_A$ ) und Testkörper B ( $T_B$ ) bezeichnet werden. Abmessungen und weitere wichtige Daten der Testkörper können Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3: Abmessungen und Eigenschaften der verwendeten Referenzkörper

Merkmal	Physikalische Einheit	Größe	
		$T_A$	$T_B$
Durchmesser Grundfläche	mm	120	90
Durchmesser Deckfläche	mm	90	50
Länge der Mantellinie	mm	202	175
Höhe	mm	200	170
Mantelfläche	cm <sup>2</sup>	1.332	770
Volumen	cm <sup>3</sup>	6.974	2.688

## 4.7 Datenbereinigung und Datenauswertung

Da die eigentlichen Zieldaten der RADAR-Untersuchungen (Wurzelkörper) in aller Regel mit Störsignalen vermischt waren, leistete eine Bereinigung der Daten vor deren Darstellung und Weiternutzung einen wesentlichen Beitrag dazu, dass diese einfacher interpretiert werden konnten. Dazu wurden im Rahmen der hier vorgestellten Versuche das Time-Gating durchgeführt und unterschiedliche Hintergrundabzüge, sowie die Hilbert-Transformation genutzt, die im Folgenden näher erläutert werden.

### 4.7.1 Time-Gating

Zur Separierung der Zieldaten aus dem Radargramm stand nach der Restrukturierung der Daten ein 3-dimensionales Array mit 500 Zeilen zur Verfügung. Diese repräsentierten den Zeitbereich der RADAR-Messungen, so dass jede Zeile einem spezifischen Zeitbereich (Laufzeit des elektromagnetischen Impulses) der Messung zugeordnet werden kann (vgl. Kapitel 4.1.5).

Nach Tabelle 2 erfasste das Array damit ein Zeitfenster von 0 (Zeile 1) bis  $27,7778 \text{ ns}$  (Zeile 500). Für die hier vorgestellten Messungen konnten Reflexionen der verborgenen Speicherwurzeln oder Referenzobjekte jedoch innerhalb eines bestimmten Zeitfensters erwartet werden. Frühe Zeitpunkte der Messung, sowie sehr späte Zeitpunkte konnten damit aus dem Array entfernt werden, so dass sich die weitere Analyse und Datenverarbeitung ausschließlich auf denjenigen Zeitbereich beschränkte, in dem Reflexionen des Ziels auftraten. Ein solches Vorgehen wird als Time-Gating bezeichnet (WÖCKEL et al., 2006).

Dieser Schritt muss für jede Messung neu durchgeführt werden, da der Zeitpunkt der Reflexionen des Ziels höchst unterschiedlich ausfallen kann. Dies kann zum einen durch das Objekt selbst (Größe, Geometrie), zum anderen durch äußere Faktoren (Substrat-Wassergehalt, Dielektrizitätskonstante des Substrats) bedingt sein. Es ist außerdem zu beachten, dass der Zeitpunkt der Reflexion des Ziels über die Drehung des Pflanzgefäßes veränderlich ist, vor allem aufgrund der Symmetrieeigenschaften des Ziels und dessen Lage zur Längsachse des Pflanzgefäßes. Wenn das Time-Gating also für alle  $o$  Matrizen des Arrays durchgeführt werden soll, muss es ausreichend groß bemessen sein, da ansonsten die Gefahr besteht einen Teil der Informationen „abzuschneiden“.

#### 4.7.2 Hintergrundabzug

Der Hintergrundabzug trägt wesentlich dazu bei, den Einfluss von Störsignalen (Clutter), die aus unerwünschten Reflexionen, Antennenübersprechen und anderen Quellen resultieren, auf das Messergebnis zu minimieren. Der Hintergrundabzug eliminiert dabei vor allem Clutter der zeitlich konstant auftritt. Dies ist z.B. das Antennenübersprechen, bei dem ein Teil der gesendeten elektromagnetischen Wellen direkt in die Empfangsantenne übergeht und dort entsprechende Störsignale auslöst. Neben dem Antennenübersprechen können auf diese Weise auch Echos eliminiert werden, die über einen Großteil des Scans konstant auftreten (z.B. Reflexionen der Pflanzgefäßoberfläche). Grundsätzlich bieten sich für diese Operation 4 unterschiedliche Verfahren an:

1. Abzug des Mittelwertes in 2. Dimension (statisch)
2. Abzug des Mittelwertes in 3. Dimension (statisch)
3. Abzug des abschnittsweise gebildeten Mittelwertes in 2. Dimension (dynamisch)
4. Abzug einer Referenzmessung (Leerraummessung, Referenzmessung)

Bei Verfahren 1 wurde aus der strukturierten Datenmatrix der entsprechende Mittelwert aller vorhandenen Spalten (2. Dimension) gebildet. Das Resultat war ein 500 Zeilen langer Spaltenvektor, der anschließend elementweise von allen  $n$  Spalten der Datenmatrix subtrahiert wurde. Bei einem Datenarray wurde dieses Verfahren für alle  $o$  Matrizen wiederholt.

Verfahren 2 beruhte auf einem ähnlichen Konzept. An Stelle von der Mittelwertbildung einer Matrix wurde für die Bildung des Mittelwertes jedoch das aus der Datenstrukturierung hervorgegangene Array verwendet. Bei diesem wurde der Mittelwert aller  $o$  Einzelmatrizen gebildet (3. Dimension). Das Resultat war eine Matrix mit 500 Zeilen und  $n$  Spalten. Diese wurde elementweise von jeder der  $o$  Einzelmatrizen abgezogen, so dass ein neuer Array mit identischen Dimensionen wie der Rohdatenarray entstand. Voraussetzung für dieses Verfahren ist dabei ein Datenarray für das gilt:

$$o \geq 2 \quad (4-15)$$



Verfahren 3 verfolgte ein ähnliches Konzept wie Verfahren 2, nur das an Stelle des Mittelwertes über alle  $n$  Spalten der Mittelwert nur über einem bestimmten Bereich (Fenster) gebildet wurde. Hierzu wurde vor der Durchführung des Verfahrens eine bestimmte Fenstergröße ( $w$ ) festgelegt. Ausgehend von dieser Fenstergröße wurde in jeder Spalte der betreffenden Matrix der Mittelwert ( $\bar{x}$ ) wie folgt gebildet und von der betreffenden Spalte subtrahiert:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{l} \cdot \sum_{k=1}^l n_l & \forall l < \frac{w}{2} \\ \bar{x} &= \frac{1}{l-k} \cdot \sum_{k=\frac{w}{2}}^l n_l & \forall \frac{w}{2} \leq l \leq m - \frac{w}{2} \\ \bar{x} &= \frac{1}{l-k} \cdot \sum_{k=m-\frac{w}{2}}^l n_l & \forall l > m - \frac{w}{2} \end{aligned} \quad (4-16)$$

Für Datenarrays mit mehr als einer Matrix wurde das Verfahren für jede Datenmatrix einzeln wiederholt. Dieses Verfahren kann jedoch nur dann sinnvoll angewendet werden, wenn

$$m \gg l \quad (4-17)$$

gilt.

Für Verfahren 4 wurde neben der Messung von Pflanzen bzw. Testkörpern auch eine Messung eines leeren Pflanz- bzw. Probegefäßes durchgeführt (Referenzmessung). Dazu wurde das verwendete Substrat mit identischem Wassergehalt in ein Gefäß mit identischer Größe, wie bei der Messung der realen Pflanzen oder Testkörper eingefüllt. Anschließend wurde das leere Gefäß mit identischer Sensorkonfiguration gemessen. Bei der anschließenden Datenverarbeitung wurde die entstehende Leerraum-Datenmatrix von der Rohdatenmatrix des jeweiligen Versuches abgezogen. Hierbei war zu beachten, dass die Datenarrays die gleichen Dimensionen aufwiesen; ggf. war eine geringfügige Kürzung notwendig. Wenn die in Gleichung 4-15 definierte Bedingung erfüllt war, wurde aus allen  $o$  Matrizen des Datenarrays das arithmetische Mittel in dritter Dimension gebildet (vgl. Verfahren 2) und elementweise von jeder einzelnen Matrix subtrahiert.

Für die Mittelwertbildung bei Verfahren 1 und 2 wurden drei unterschiedliche Mittelwerttypen untersucht:

- a) Arithmetisches Mittel
- b) Median
- c) Modus (geometrisches Mittel)

Zusätzlich zu diesen Parametern wurde bei Verfahren 2 geprüft, wie sich eine Begrenzung der vertikalen Aufnahmestrecke auf diese Form des Hintergrundabzugs auswirkt. Der Hintergrund hierbei ist, dass eine vorherige Begrenzung der Aufnahmestrecke die Mittelwertbildung beeinflusst, da nicht mehr die gesamte Aufnahmestrecke für die Mittelwertbildung verwendet wird, sondern nur ein kleinerer Teil. Hierzu wurde die Datenmatrix in ihrer Spaltenzahl auf denjenigen Bereich begrenzt, der für die Methodenbewertung relevant war. Der Hintergrundabzug und die damit verbundene Mittelwertbildung wurden erst im Anschluss daran durchgeführt.

### 4.7.3 Hilbert Transformation

Die vom RADAR-System ausgegebenen Korrelationskoeffizienten wiesen einen zeitlichen Verlauf auf, der mehr oder weniger stark zwischen positiven und negativen Werten schwankte. Auch bei einer Darstellung in absoluten Werten scheint das Signal für den Betrachter noch sehr verrauscht zu sein. Die Berechnung der Hüllkurve des Signals ändert diese Wahrnehmung: Das Signal erscheint für den Betrachter „weicher“ und ist einfacher interpretierbar.

Zu diesem Zweck wurde je nach Versuchsplan sowohl vor, als auch nach der Anwendung von Time-Gating und Hintergrundabzügen die so genannte Hilbert-Transformation auf die Daten angewendet. Diese Transformation erzeugt aus einem realen, analytischen, Signal ( $r$ ) ein komplexes Signal ( $H(r)$ ):

$$H(r) = r_r + i \cdot r_i \quad (4-18)$$

Dieses besteht aus einem Realteil ( $r_r$ ), der dem analytischen Signal entspricht und einem Imaginärteil ( $r_i$ ), der im Vergleich zu  $r_r$  um  $90^\circ$  phasenverschoben ist. Die Hilbert-Transformation arbeitet dazu in folgenden Schritten:

1. Durchführen der schnellen Fourier-Transformation (fft) für das Eingangssignal. Das Ergebnis ist ein Vektor  $u$
2. Erstellen eines Vektors  $h$ , dessen Elemente  $h(i)$  die Werte
  - 1 für  $i = 1$  und  $i = \frac{n}{2} + 1$
  - 2 für  $i = 2, 3, \dots, \frac{n}{2}$
  - 0 für  $i = \frac{n}{2} + 2, \dots, n$

annimmt, wobei  $n$  der Länge des Vektors  $u$  entspricht.

3. Elementweise Berechnung des Produkts von  $u$  und  $h$ .
4. Durchführen der inversen schnellen Fourier-Transformation (ifft) und Darstellung der ersten  $n$  Werte.

Das resultierende komplexe Signal  $H(r)$  kann mit Hilfe der Betragsfunktion (Magnitude) als realwertiges Signal dargestellt werden:

$$|H(r)| = \sqrt{r_r^2 + r_i^2} \quad (4-19)$$

Dabei entspricht  $r_r$  dem Realteil und  $r_i$  dem Imaginärteil von  $r$  (MATHWORKS, 2009). Dieser Betrag entspricht der Hüllkurve bzw. Einhüllenden des Eingangssignals. Bei der Verwendung von Matrizen arbeiteten die beschriebenen Funktionen spaltenweise (MATHWORKS, 2009).

Bei den verwendeten RADAR-Daten ist außerdem der quadratische Wert der oben genannten Betragsfunktion proportional zur Energie (WÖCKEL et al., 2006, KONSTANTINOVIC, 2007), die von der Empfangsantenne detektiert wird.

#### 4.7.4 Hierarchie der Datenverarbeitung und Auswertung

Die Hierarchie der Datenverarbeitung wird in Abbildung 12 in einem Flussdiagramm dargestellt.

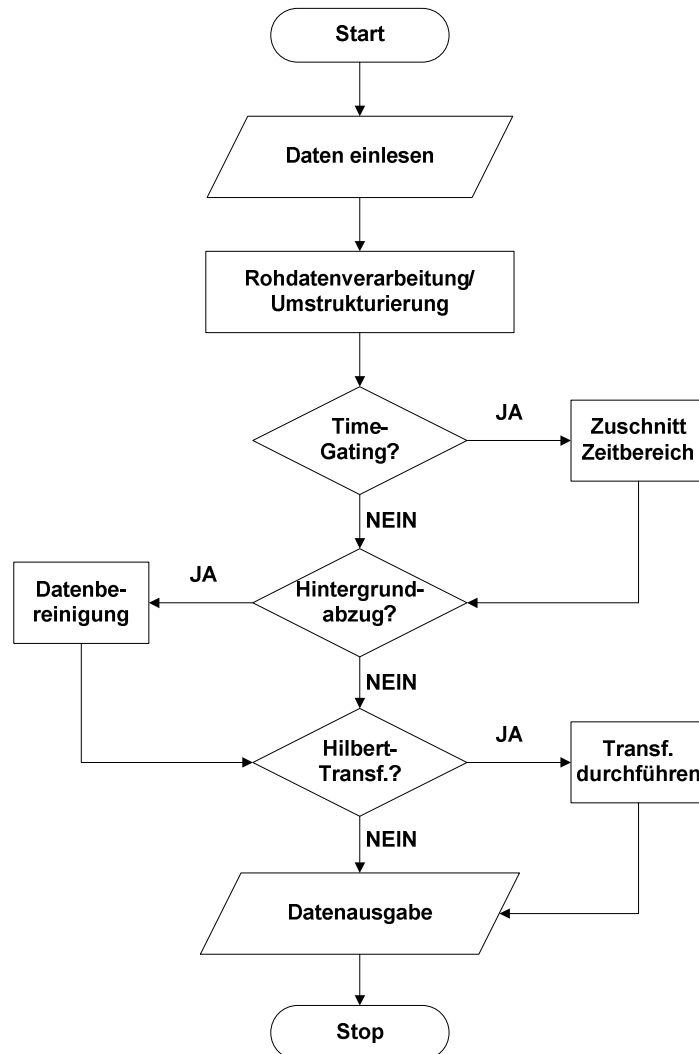


Abbildung 12: Flussdiagramm zu Ablauf und Hierarchie der Datenverarbeitung und -bereinigung

Ein Beispiel für die Aufbereitung der Reflexionsdaten entsprechend der Hierarchie ist in Abbildung 13 dargestellt.

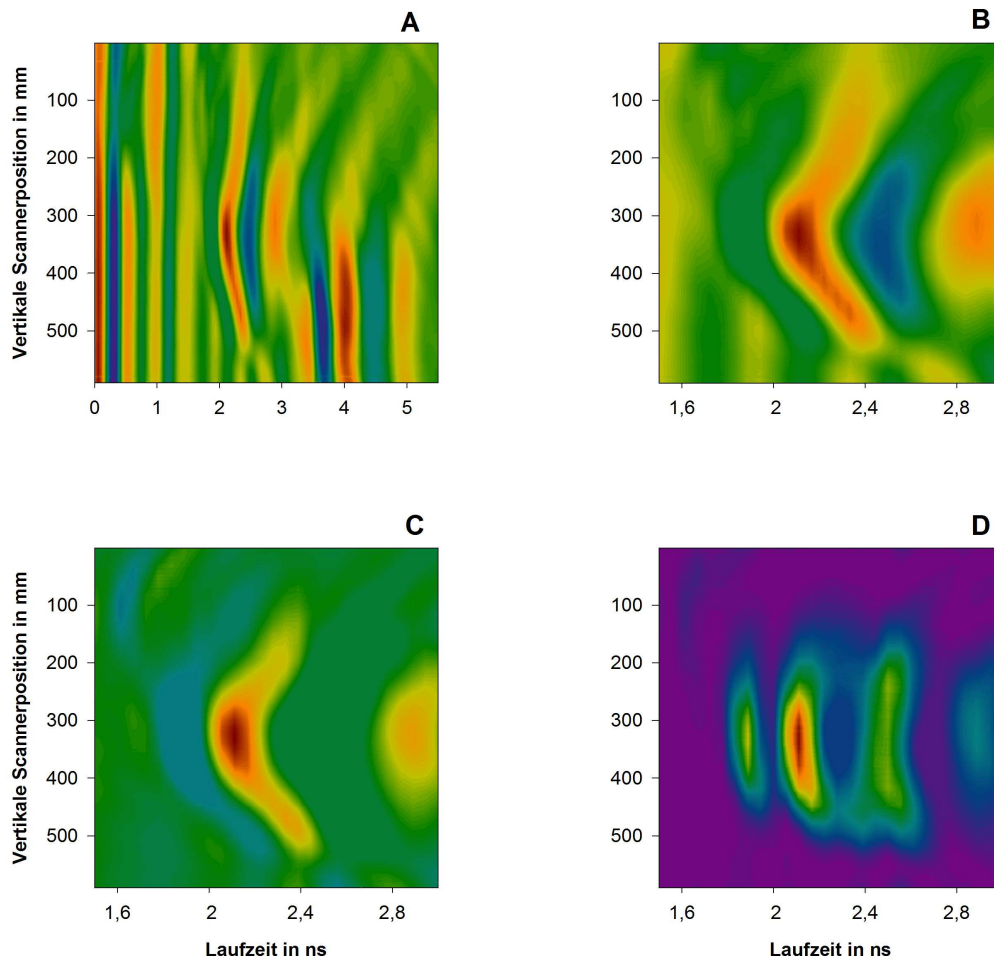


Abbildung 13: Aufbereitung der Reflexionsdaten am Beispiel einer in das Substrat eingebrachten Metallplatte. A: Rohdaten, B: Daten nach Time-Gating, C: Daten nach Time-Gating und Hintergrundabzug, D: Daten nach Time-Gating, Hintergrundabzug und Bildung des quadratischen Absolut-Wertes der Hilbert-Transformation

#### 4.8 Interpretation der erzeugten RADAR-Bilder

Durch die Bewegung der Linearachse des RADAR-Scanners entstanden bei den unterschiedlichen Messungen Bilder, deren Dateninhalt eine spezifische Interpretation erfordert. Abbildung 14 zeigt das Kontur-Diagramm einer Testmessung mit typischen Charakteristika.

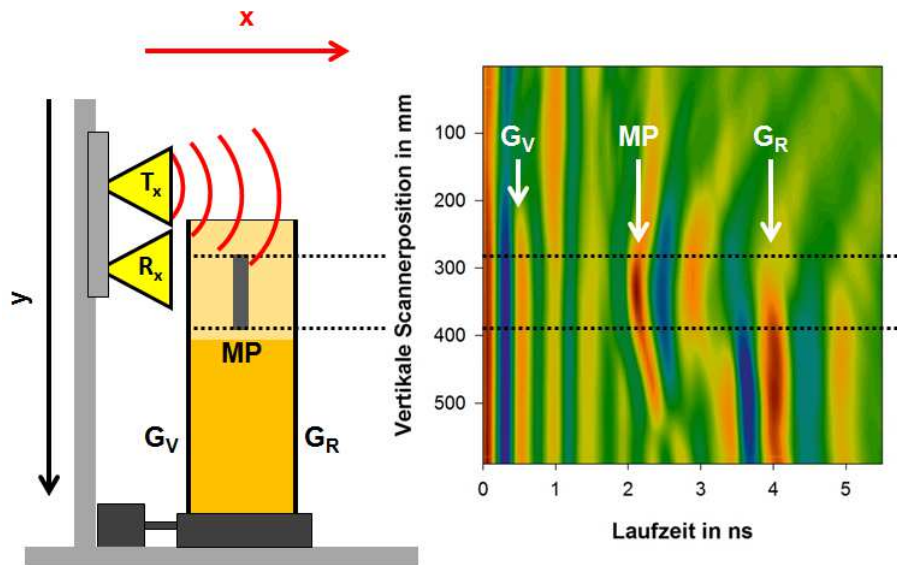


Abbildung 14: B-Scan einer  $120 \times 80 \times 10$  mm Metallplatte in Quarzsand. Die Position einiger markanter Reflexionsphänomene ist in der Funktionsskizze (links) und dem Radargramm (rechts) besonders gekennzeichnet:  $G_V$ : Vordere Gefäßwand,  $G_R$ : Rückseitige Gefäßwand, MP: Metallplatte

Dieses Beispiel repräsentiert einen vollständigen Scan entlang der y-Achse (Vertikale Scannerposition), in Abhängigkeit von der Laufzeit der elektromagnetischen Wellen (x-Achse). Im Vergleich zur ursprünglichen Definition des RADAR-Volumens und der daraus resultierenden Struktur des Daten-Arrays (vgl. Kapitel 4.1.5) wurde das Bild im gezeigten Beispiel um  $90^\circ$  gedreht (transponiert). Diese Transposition macht das Diagramm für den Betrachter leichter verständlich, da die y-Achse so der tatsächlichen Scannerachse im Raum entspricht. Die Höhe des Korrelationskoeffizienten, der vom RADAR-System ausgegeben wird, wird durch einen skalierten Farbcode repräsentiert:

- Rot: positiver Korrelationskoeffizient
- Grün: Korrelationskoeffizient geht gegen 0
- Blau: negativer Korrelationskoeffizient

Eine stark rote Färbung deutet dabei eine starke Reflexion der eingestrahelten Wellen an einer bestimmten Position an, während eine grüne Färbung Bereiche markiert, in denen keine, oder nur sehr geringe Reflexionen stattfinden. Blaue Bereiche deuten ebenfalls auf eine starke Reflexion hin, allerdings hat die reflektierte Welle hier ein anderes Vorzeichen als die ausgestrahlte Welle (positiv statt negativ und umgekehrt). Solche Diagramme werden auch als Radargramme bezeichnet (SACHS, 1998).

Das Ziel der Untersuchung in Abbildung 14 war eine Metallplatte (MP) mit definierten Abmessungen, die in den Reflexionsdaten auch sehr gut identifiziert werden kann. Es fällt auf, dass das beobachtete Reflexionsverhalten scheinbar einen hyperbelartigen Verlauf aufweist. Der Grund für diese hyperbelartige Struktur ist das halbkugelförmige Ausbreitungsverhalten elektromagnetischer Wellen im Untergrund (Substrat). Dadurch wird von der Empfangsantenne auch vor und nach der Lage des eigentlichen Objektes ein Echo aufgezeichnet. Die reale Entfernung des Objektes (in diesem Fall des Rübenkörpers) liegt im Scheitelpunkt der Hyperbel (MEIER et al., 2002).

Neben der Reflektion des eigentlichen Ziels (MP) sind im Radargramm auch andere Reflexionsphänomene identifizierbar. Im gewählten Beispiel sind dies die Vorderseite des Pflanzgefäßes (Abbildung 14: „G<sub>V</sub>“), sowie dessen Rückseite (Abbildung 14: „G<sub>R</sub>“). Im Vergleich zum Zielobjekt erscheinen diese Reflexionsphänomene, aufgrund der Größe des Pflanzgefäßes, nicht als hyperbelartige, sondern als lineare Strukturen. Es fällt weiterhin auf, dass die Rückseite des Pflanzgefäßes, im Vergleich zu dessen Vorderseite, eine scheinbar kürzere Reflexionsbande erzeugt. Der Grund hierfür liegt in der Metallplatte, die den größten Teil der eingestrahnten Wellen reflektiert. Die hintere Gefäßwand liegt damit im „Schatten“, in den kaum noch Wellen vordringen.

Ein Problem der Darstellung als B-Scan ist die Tatsache, dass in diesen Bildern nur 3 der 4 vorliegenden Dimensionen der RADAR-Daten (Laufzeit, Vertikale Scannerposition, Reflexionskoeffizient) berücksichtigt werden können. Eine Berücksichtigung der 4. Dimension (Horizontale Scannerposition bzw. Drehung im Raum) erfordert deshalb entweder eine Serie von Radargrammen (ein Radargramm für jeden Winkelschritt) oder eine dreidimensionale Darstellung im Raum, die jedoch immer mit einem Verlust an Informationen behaftet ist. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit die Daten über alle Aufnahmewinkel hinweg zu mitteln.

## 4.9 Methoden zur Überprüfung des Sensorsystems

### 4.9.1 Überprüfung der Antriebselemente

Die Antriebselemente des Scannersystems (linear und rotatorisch) können mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und damit mit unterschiedlichem Auflösungsvermögen betrieben werden. Während der Rotationsantrieb bei der vorgestellten Versuchsanordnung lediglich für die Anfahrt bestimmter Winkel diente, wurde der Linearantrieb mit einer definierten Geschwindigkeit in vertikaler Richtung bewegt. Während dieser Bewegung zeichnete das RADAR-System alle notwendigen Daten in bestimmten Abständen auf.

Für das Auflösungsvermögen der Antriebe galt es jedoch zwei zentrale Aspekte besonders zu beachten und zu überprüfen. Zum einen lieferte der Controller der gewählten Antriebe keine Koordinaten während der Bewegung sondern nur eine Start- und eine Endkoordinate. Diese „Zwischenkoordinaten“ wurden deshalb von der Kontrollsoftware über die Zeit interpoliert. Da durch die Beschleunigung des Linearantriebs auf eine bestimmte Geschwindigkeit und das Abbremsen gegen Ende der Strecke keine konstante Geschwindigkeit vorherrschte, war die Genauigkeit dieser Interpolation unzureichend. Da Anfangs- und Endkoordinaten der Bewegung für jeden Versuch bekannt waren, wurde anhand von Regressionsrechnungen überprüft, ob dieser (systematische) Fehler korrigierbar ist. Hierzu wurden mit dem Linearantrieb Messungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten von  $2.000 \text{ steps} \cdot \text{s}^{-1}$  bis  $20.000 \text{ steps} \cdot \text{s}^{-1}$  durchgeführt. Als Startkoordinate wurden 10 mm und als Endkoordinate 800 mm festgelegt. Für jede Geschwindigkeitsstufe wurden 30 separate Messungen durchgeführt und zusätzlich das mittlere Auflösungsvermögen berechnet.

Ähnliche Messungen wurden mit dem Rotationsantrieb durchgeführt, um zu überprüfen, wie genau dieser vorgegebene Positionen anfährt, bzw. vorgegebene Winkelschritte einhält. Dazu wurden 3 Messungen mit Winkelschritten von  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  und  $20^\circ$  durchgeführt und 30-fach wiederholt.



#### 4.9.2 Festlegung von Antennenabständen und Polarisation

Zur Ermittlung des idealen Abstandes (maximale Reflexion der ausgesandten Wellen vom Untersuchungsobjekt) beider Antennen zum Pflanzgefäß wurden Versuche mit den Testobjekten  $T_A$  und  $T_B$  durchgeführt. Beide Testobjekte wurden in trockenem Quarzsand in den Pflanzgefäßen vergraben. Ein Teil des Testobjektes ragte dabei aus dem Substrat heraus, um das Verhalten eines (geköpften) Rübenkörpers im Boden zu simulieren. Beide Testkörper wurden im Anschluss mit Antennenabständen von 10 bis 150 mm in 20 mm-Schritten, sowie horizontaler und vertikaler Antennenpolarisation gescannt. Jede Messung wurde dabei 10-fach wiederholt.

Neben den beiden Testobjekten wurde auch eine Leerraummessung durchgeführt, bei der sich im Pflanzgefäß ausschließlich trockener Quarzsand befand. Diese Messung wurde für jede Abstands- und Polarisationsvariante 10-fach wiederholt. Danach wurde aus den Wiederholungen der Testkörper- und Leerraummessungen das arithmetische Mittel gebildet und ein Hintergrundabzug durchgeführt. Hierzu wurde von den Mittelwerten der Testkörpermessungen die jeweilige Leerraummessung abgezogen. Störende Reflexionen (Hintergrundrauschen) konnten auf diese Weise unterdrückt werden.

#### 4.9.3 Prüfung der Hintergrundabzugsmethoden

Für die Unterdrückung störender Reflexionen ist bei der Datenaufbereitung die Durchführung eines Hintergrundabzuges bei den jeweiligen Rohdaten unabdingbar. In Kapitel 4.7.2 wurde hierzu die Methode der Leerraummessung vorgestellt. In der praktischen Anwendung ist diese Methode jedoch mit zwei gravierenden Nachteilen behaftet:

1. Erhöhter Zeitaufwand durch weitere Messungen.
2. Für jede mögliche Umweltbedingung (Pflanzsubstrat, Substrat-Wassergehalt, Sensorkonfiguration, etc.) müssen entsprechende Leerraumsamples vorgehalten werden.

Diese Nachteile würden das Messkonzept des Sensorsystems wesentlich verkomplizieren und den Zeitbedarf für einzelne Messungen stark erhöhen. An Stelle von Leerraummessungen wurden deshalb die übrigen, in Kapitel 4.7.2 genannten Verfahren geprüft, bei denen nur eine Messung des eigentlichen Versuchsgefäßes und keine zusätzliche Messung eines Leergefäßes notwendig sind.

Hierzu wurden die in Kapitel 4.9.2 genannten Daten bei 90 mm Antennenabstand und horizontaler Polarisation verwendet. Auf diese Daten wurden zunächst die Verfahren 1 und 2 jeweils mit arithmetischem Mittel, Median und Modus als Mittelwertmethoden angewendet. Bei Verfahren 3 wurde nur das arithmetische Mittel als Mittelwertmethode auf die Daten angewendet, die Fensterbreite ( $w$ ) wurde jedoch in Zehnerschritten von 10 bis 190 verändert.

Als Referenz für diese Methoden wurde der Hintergrundabzug mit Leerraummessung (Verfahren 4) definiert. Die Datengrundlage bildeten die Messdaten von  $T_A$  und  $T_B$  in trockenem Quarzsand bei horizontaler Antennenpolarisation und einem Antennenabstand von 90 mm zum Pflanzgefäß.

### **4.9.4 Prüfung der weiteren Datenbereinigungsmethoden**

Neben den Hintergrundabzugsmechanismen wurden auch das Time-Gating und die Hilbert-Transformation als mögliche Hilfen bzw. Beiträge zur Datenbereinigung untersucht. Beide Verfahren wurden hierzu auf die in Kapitel 4.9.3 genannten Daten angewendet und im Anschluss mit den Ausgangsdaten verglichen. Bei der Hilbert-Transformation wurde zusätzlich die Anwendung vor und nach Durchführung des Hintergrundabzugs geprüft. Der Vergleich mit den Ausgangsdaten erfolgte qualitativ.

### **4.10 Versuche zur Eingrenzung des Zeitbereichs**

Da im gesamten Spektrum der RADAR-Daten mehrere Reflexionen auftraten, war eine Zuordnung des Rübenkörpers zu einem spezifischen Reflexionsphänomen nicht immer zweifelsfrei möglich. Für eine möglichst schnelle und präzise Erfassung der Reflexionsphänomene wurde Time-Gating genutzt (vgl. Kapitel 4.7.1). Für dieses Verfahren sind jedoch genaue Informationen über die Lage der Pflanzgefäßwände (Vorder- und Rückseite) im Zeitbereich erforderlich.

Zur eindeutigen Identifikation der Grenzen wurde in ein substratgefülltes Pflanzgefäß eine rechteckige Metallplatte mit den Maßen  $120 \times 80 \times 10$  mm in ca. 60 mm Tiefe unter der Substratoberfläche eingebracht. Die Ausrichtung der Metallplatte erfolgte parallel zur Antennenoberfläche an drei unterschiedlichen Positionen:

1. Vorderseite des Pflanzgefäßes
2. Rückseite des Pflanzgefäßes
3. Mitte des Pflanzgefäßes

Durch diese Positionen sollten die Vorderseite des Substratraums (1), die Rückseite des Substratraums (2), sowie die Mitte des Substratraums (3) identifiziert werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung (insbesondere (1) und (2)) sollten Schnittgrenzen für das spätere Time-Gating bei der Untersuchung von Pflanzenmaterial liefern. Durch die Verwendung eines ferromagnetischen Metalls (Stahl) wurde ein hoher dielektrischer Kontrast zwischen Zielobjekt (Metallplatte) und Substrat erzeugt, so dass Reflexionsphänomene sichtbar wurden, die auch in den Rohdaten eindeutig zuzuordnen waren.

Die RADAR-Scans wurden auf einer vertikalen Strecke von den Positionen 1 bis 650 mm bei einer Geschwindigkeit von  $6.000 \text{ steps}\cdot\text{s}^{-1}$  in 5-facher Wiederholung durchgeführt. Eine Veränderung der horizontalen Position (Drehung) erfolgte nicht.

#### 4.11 Messung von Pflanzenmaterial unter Gewächshausbedingungen

Für die Evaluierung der Leistungsfähigkeit des UWB-RADAR Scanners unter Gewächshausbedingungen wurden die in Quarzsand angezogenen Zuckerrüben und Mangold-Pflanzen (vgl. Kapitel 4.4) mit Hilfe des RADARs vermessen. Hierzu wurden die Pflanzgefäße manuell auf den Drehantrieb des Scanners gestellt. Eine zusätzliche Manschette fixierte den Pflanztopf, so dass der Abstand zwischen RADAR-Antennen und Pflanzgefäßoberfläche annähernd konstant gehalten werden konnte.

Der Wassergehalt des Bodensubstrates wurde an vier unterschiedlichen Stellen des Pflanzgefäßes mit Hilfe von TDR erfasst. Sowohl bei den Zuckerrüben als auch bei den Mangold-Pflanzen wurde der maximale Kopfdurchmesser ( $d_{max}$ ) mit Hilfe einer Schieblehre bestimmt und festgehalten. Bei den Mangold-Pflanzen wurde der maximale Durchmesser der Sprossbasis als  $d_{max}$  definiert.

Im Anschluss wurden die Pflanzen mit Hilfe des Sensorsystems gemessen und die Daten mit Hilfe der Software MATLAB und dem in Kapitel 4.1.5 beschriebenen GUI weiterverarbeitet. Soweit nicht anders angegeben, wurden die Pflanzen in horizontaler Richtung in  $20^\circ$ -Schritten vermessen. Die Strecke des Linearantriebes reichte bei den Untersuchungen von 1 bis 500 mm (Messungen am 02.05.2012, 23.05.2012 und 06.06.2012) bis 1 bis 650 mm (alle übrigen Messungen) bei einer Geschwindigkeit von  $6.000 \text{ steps}\cdot\text{s}^{-1}$ . Als Antennenabstand wurde, aufbauend auf den Erfahrungen mit den Probekörpern, 90 mm bei horizontaler Polarisation festgelegt. Überhängendes Blattwerk wurde mit Hilfe von Kunststoffbändern fixiert, um Verletzungen durch Antrieb und Antennen zu vermeiden.

#### **4.12 Versuche zur Erhöhung des dielektrischen Kontrastes**

Da der dielektrische Gradient zwischen Wurzelkörper (Rübe, Mangoldwurzel) und Substrat (Quarzsand) nach ersten Versuchen als relativ gering eingeschätzt wurde, wurden im Anschluss weitere Untersuchungen durchgeführt, mit deren Hilfe dieser Gradient erhöht werden sollte.

Hierzu wurde bei einem Teil der untersuchten Pflanzen unmittelbar vor Abschluss der Messkampagne die Zufuhr von Wasser und Nährstoffen eingestellt. Hierdurch sollte der Boden austrocknen und der dielektrische Gradient zwischen Wurzelkörper und Substrat entsprechend steigen. Dadurch sollten wesentlich stärkere Reflexionen am Wurzelkörper erreicht werden.

Zusätzlich wurde nach Durchführung einer ersten Messung das Blattwerk der Pflanzen grob entfernt, um zu untersuchen, inwieweit dieses einen Einfluss auf die Reflexionscharakteristik der Pflanzen ausübt.

Bei beiden Untersuchungen wurde eine vertikale Position von 1 bis 650 mm bei einer Geschwindigkeit von  $6.000 \text{ steps} \cdot \text{s}^{-1}$  eingestellt. Die Drehung der Pflanzgefäße erfolgte in  $20^\circ$ -Schritten.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Überprüfung der Antriebselemente

#### 5.1.1 Rotationsantrieb

Die Versuche zur Bestimmung der Genauigkeit des Rotationsantriebes führten zu eindeutigen Ergebnissen. Wie in Abbildung 15 dargestellt, wurden die zuvor eingestellten Winkel bei jeder einzelnen Messung, unabhängig von der eingestellten Schrittweite, präzise angefahren. Die dargestellten Punkte repräsentieren zwar das arithmetische Mittel aus jeweils 30 Einzelmessungen, es zeigte sich jedoch, dass die Streuung der Einzelwerte über alle Messungen hinweg sehr gering war, so dass die Standardabweichung ( $\sigma$ ) für jeden gemittelten Wert gegen 0 ging. Dies spricht für ein sehr präzises Verhalten des Drehantriebes, was durch die Regressionskoeffizienten ( $R^2$ ) von 1 für alle drei betrachteten Varianten unterstrichen wird.

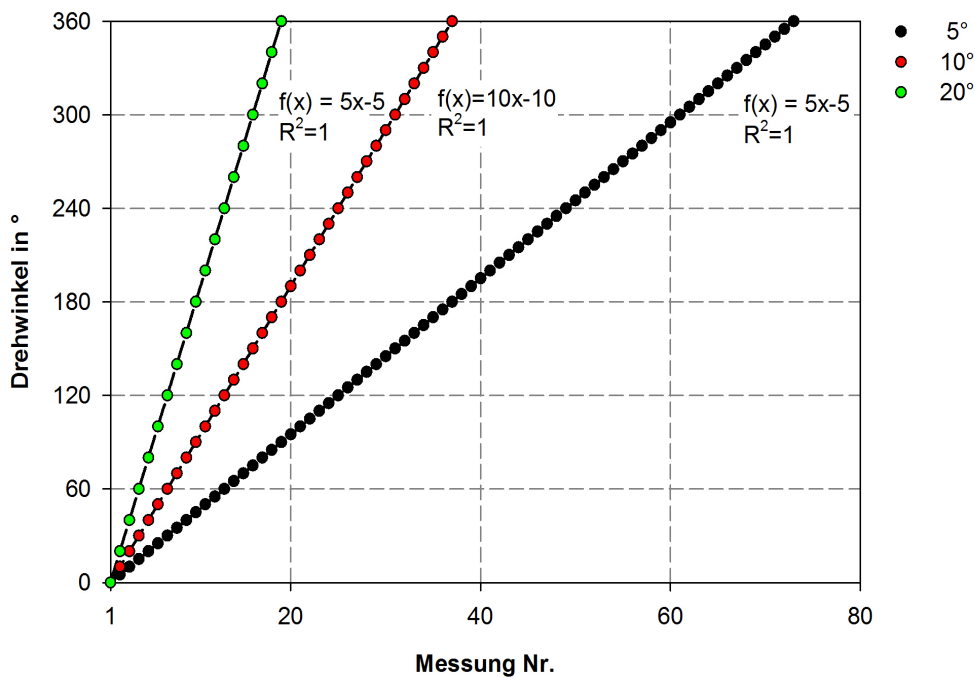


Abbildung 15: Drehwinkel des Rotationsantriebs in Abhängigkeit von der Nummer der Messung für drei unterschiedliche Schrittweiten ( $n = 30$ )

### 5.1.2 Linearantrieb

Im Gegensatz zum Rotationsantrieb werden beim Linearantrieb keine vorher definierten Positionen angefahren, sondern vielmehr ein Bereich zwischen zwei vorgegebenen Koordinaten abgefahren. Während dieser Bewegung werden die Zieldaten mit Hilfe des RADARs erfasst. Die entsprechende Position der Antennen auf dem Linearantrieb wird von der Kontrollsoftware über die Bewegungszeit interpoliert. Dies führte dazu, dass der Linearantrieb nicht mit einer ähnlichen hohen Präzision arbeitete wie der Rotationsantrieb.

Tabelle 4 zeigt experimentell ermittelte Werte aus jeweils 30 Einzelmessungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Antriebs. In allen Fällen wurden Start- und Endkoordinaten identisch bei 10 mm (Startkoordinate) bzw. 800 mm (Endkoordinate) gewählt. Es ist deutlich zu erkennen, dass diese Koordinaten nur ungenau eingehalten wurden. Während die aufgezeichneten Startkoordinaten ( $y_{min}$ ) mit Abweichungen von 0,19 bis 1,88 mm von der festgelegten Startkoordinate (10 mm) noch eine geringe Streuung zeigten, war diese bei den Endkoordinaten erheblich höher. Die aufgezeichneten Endkoordinaten ( $y_{max}$ ) lagen zwischen 18,33 mm bis 188,19 mm über der festgelegten Endkoordinate (800 mm).

Tabelle 4: Zusammenfassung der experimentell ermittelten Werte der Prüfung des Linearantriebs ( $n = 30$ ); nach PEVELING-OBERHAG & SCHULZE LAMMERS (2012), verändert

$v$ steps·s <sup>-1</sup>	$y_{min}$ mm	$y_{max}$ mm	$\bar{y}$ mm	$3\sigma$ mm	$3\sigma$ %	$R^2$
2000	10,19	818,33	0,6	0,16	26,70	0,9999
4000	10,38	833,99	1,19	0,27	22,41	0,9998
6000	10,56	851,57	1,77	0,26	14,64	0,9998
8000	10,75	873,88	2,41	0,65	26,97	0,9999
10000	10,94	894,22	3,01	0,83	27,64	1
12000	11,13	911,44	3,54	0,48	13,65	0,9999
14000	11,31	932,94	4,22	1,14	27,09	0,9999
16000	11,50	955,31	4,82	1,31	27,14	0,9999
18000	11,69	973,08	5,30	0,70	13,29	0,9999
20000	11,88	988,19	6,09	3,19	52,34	0,9998

In beiden Fällen ( $y_{min}$  und  $y_{max}$ ) konnte festgestellt werden, dass diese Abweichungen mit zunehmender Geschwindigkeit ebenfalls zunahmen. Dieser Umstand wird auf die längere Beschleunigungs- bzw. Bremsstrecke des Antriebes zurückgeführt, die von der RADAR-Software bei der Koordinateninterpolation scheinbar nur unzureichend berücksichtigt wurde.

Mit steigender Geschwindigkeit nahm das mittlere Auflösungsvermögen ( $\bar{y}$ ) ebenfalls deutlich ab. Während bei einer Geschwindigkeit von 2000 steps·s<sup>-1</sup> noch ein mittleres Auflösungsvermögen von 0,6 mm erreicht wurde, konnte bei 20.000 steps·s<sup>-1</sup> nur noch ein Auflösungsvermögen von 6,09 mm realisiert werden. Neben dem mittleren Auflösungsvermögen ist auch die dreifache Standardabweichung ( $3\sigma$ ) in Tabelle 4 dargestellt. Während diese bei Geschwindigkeiten bis 12.000 steps·s<sup>-1</sup> im Bereich von unter einem Millimeter lag, lag sie bei Geschwindigkeiten von 14.000 und 16.000 steps·s<sup>-1</sup> in einem Bereich über 1 mm und bei 20.000 steps·s<sup>-1</sup> über 3 mm. Eine Ausnahme stellt lediglich eine Geschwindigkeit von 18.000 steps·s<sup>-1</sup> dar, bei der  $3\sigma$  deutlich unter 1 mm lag.

Bei relativer Betrachtung im Verhältnis zum jeweiligen Mittelwert fiel auf, dass  $3\sigma$  bei 6.000, 12.000 und 18.000  $\text{steps}\cdot\text{s}^{-1}$  eine Abweichung (Streuung) von unter 15% aufwies. Die genaue Einhaltung des mittleren Abstandes von Messpunkt zu Messpunkt ist damit für diese Geschwindigkeiten am höchsten. Alle übrigen Geschwindigkeiten wiesen Abweichungen von über 20% auf, bei der Höchstgeschwindigkeit von 20.000  $\text{steps}\cdot\text{s}^{-1}$  kam es sogar zu Abweichungen von über 50%. Eine lineare Regression zwischen aufgezeichneten und theoretisch zu erwartenden Koordinaten lieferte hohe Regressionskoeffizienten ( $R^2$ ) von über 0,99 für alle Geschwindigkeiten (vgl. Tabelle 4).

### 5.1.3 Bewertung der Leistungsfähigkeit des Antriebssystems

Der Rotationsantrieb stellt für das Gesamtsystem keine nennenswerte Fehlerquelle dar, da die vorgegebenen Koordinaten präzise angefahren und eingehalten wurden. Unter der Voraussetzung, dass alle Software-Einstellungen korrekt ausgeführt werden, können die Koordinaten des Rotationsantriebes damit problemlos übernommen werden.

Die unzureichende Interpolation der Koordinaten des Linearantriebes durch die RADAR-Software stellt dagegen einen ernstzunehmenden systematischen Fehler des Systems dar, der jedoch prinzipiell korrigierbar ist, indem eine Interpolation mit den realen (physischen) Start- und Endkoordinaten durchgeführt wird. Die Eignung dieser Methode wird durch entsprechend hohe Regressionskoeffizienten belegt. Für den Betrieb des Linearantriebes lassen sich damit folgende Aussagen ableiten:

1. Eine Geschwindigkeit von 6.000, 12.000 oder 18.000  $\text{steps}\cdot\text{s}^{-1}$  ist empfehlenswert, da die mittlere Auflösung hier am präzisesten eingehalten wird (kleinstes  $3\sigma$ ).
2. Diese Geschwindigkeiten gehen mit einem mittleren Auflösungsvermögen von 1,77, 2,54 bzw. 5,3 mm einher. Soweit für Sensoranwendungen höhere Auflösungen benötigt werden, müssen Einschränkungen hinsichtlich der Genauigkeit in Kauf genommen werden.
3. Die fehlerhafte Koordinateninterpolation kann durch eine einfache lineare Interpolation der Daten kompensiert werden und muss im Datenverarbeitungsalgorithmus entsprechend berücksichtigt werden.



Bei der festgestellten Präzision des Rotationsantriebes ist die hier gezeigte Leistung des Linearbetriebes insgesamt als unbefriedigend zu bewerten. Durch die Neuinterpolation der Koordinaten nach deren Aufzeichnung konnte der (systematische) Fehler des Antriebssystems zwar kompensiert werden, hierzu ist jedoch ein weiterer Bearbeitungsschritt notwendig, der die Handhabung des Sensorsystems verkompliziert. An dieser Stelle besteht für den Linearantrieb also noch Verbesserungsbedarf.

Eine Möglichkeit hierfür wäre, die Bewegung des Antriebes nicht über die Laufzeit zwischen zwei Koordinaten zu interpolieren, sondern das RADAR-System über den Antrieb zu triggern. Hierzu würde ein bestimmter Abstand von Punkt zu Punkt (z.B. 5 mm) festgelegt und vom System angefahren. Beim Erreichen des vorgegebenen Punktes würde ein Messvorgang des RADAR-Systems ausgelöst, so dass Messungen in einem definierten Raster durchgeführt würden. Der Vorteil hierbei liegt in der Kontinuität des Systems, da für das Triggern kein Anhalten des Antriebs notwendig wäre. Ein Anfahren jedes einzelnen Punktes mit entsprechendem Anhalten des Antriebes wäre weniger sinnvoll, da es zu einem erheblich höheren Zeitbedarf bei den Messungen führen würde.

Der für das hier vorgestellte System eingesetzte Linearantrieb und dessen Controller unterstützten den skizzierten „Trigger-Vorgang“ jedoch nicht, so dass die zuvor skizzierte Möglichkeit für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit nicht vorhanden war. Für weitere Forschungsaktivitäten wäre dies jedoch eine sinnvolle Modifikation.

## **5.2 Optimierung von Antennenabstand und Polarisation**

Durch die Veränderung des Antennenabstandes zur Oberfläche des Versuchsgefäßes ändern sich die Reflexionscharakteristika des Ziels im Zeitbereich. Während bei geringen Distanzen die Reflexionen des Ziels vom Antennenübersprechen überlagert werden können, tritt bei relativ weiten Distanzen ein Verlust an vom Ziel reflektierter Energie ein, da diese sich weiter im Raum verteilt. Für Untersuchungen mit dem vorgestellten RADAR-System musste deshalb die optimale Distanz gefunden werden, um einerseits eine Überlagerung der Daten mit dem Antennenübersprechen zu vermeiden und dabei andererseits keinen allzu hohen Energieverlust zu provozieren. Gleiches gilt für die Polarisation der Antennen, da diese einen wesentlichen Einfluss auf das Reflexionsverhalten haben kann (MAIERHOFER, 2000).

Einen Überblick über den Zusammenhang zwischen Polarisation, Antenennabstand und dem Anteil der vom Ziel reflektierten Wellen gibt Abbildung 16. Hier wird der maximale im Zielbereich festgestellte Wert nach Anwendung der Hilbert-Transformation ( $|H(r)|$ ) in Abhängigkeit vom Antennenabstand dargestellt. Es fällt zunächst auf, dass der größere der beiden Testkörper ( $T_A$ ) über alle Abstände hinweg eine höhere maximal reflektierte Energie sowohl bei horizontaler (HH) als auch bei vertikaler Polarisation (VV) aufweist. Bei  $T_A$  und bei  $T_B$  liegt das Maximum bei vertikaler Polarisation über alle Abstände hinweg deutlich über dem Maximum bei horizontaler Polarisation. Bei horizontaler Polarisation liegt das Maximum der Reflexionen sowohl für  $T_A$  als auch für  $T_B$  im Bereich zwischen 70 und 110 mm Abstand, während es bei vertikaler Polarisation im Bereich von 30 bis 70 mm ( $T_A$ ) und 10 mm ( $T_B$ ) liegt.

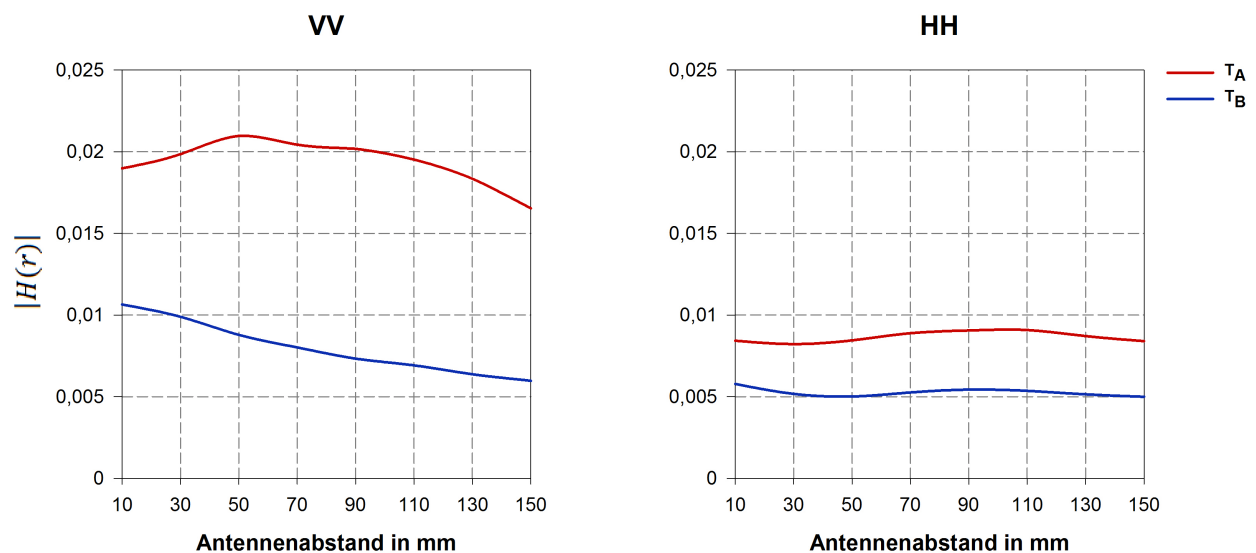


Abbildung 16:  $|H(r)|$  von  $T_A$  und  $T_B$  bei horizontaler (HH) und vertikaler Antennenpolarisation (VV) in Abhängigkeit vom Antennenabstand zur Oberfläche des Versuchsgefäßes ( $n = 10$ )

Diese Erkenntnisse liefern aber nur eine Momentaufnahme zur Bewertung des optimalen Abstandes, sowie der besten Polarisation für weiterführende Aufnahmen, da diese Maximalwerte aus dem betrachteten Zeitfenster extrahiert wurden, in dem das Ziel vermutet wurde. Wesentlich entscheidender als nur der absolute Maximalwert ist der Verlauf von  $H(r)$  über das betrachtete Zeitfenster hinweg.

Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen diesen Verlauf in separaten Diagrammen. Bei horizontaler Polarisation zeigen sich hier sowohl für  $T_A$  als auch für  $T_B$  relativ eindeutige Maxima, die den Testkörpern zugeordnet werden können. Für Antennenabstände zwischen 70 und 110 mm zeigt sich der Trend, dass die Maxima mit zunehmendem Abstand zu höheren Laufzeiten verschoben werden.

Dies liegt an der längeren Strecke, die die eingestrahelten Wellen aufgrund des größeren Abstandes zurücklegen müssen. Die Unterschiede im Wert des Maximums sind dabei sehr gering. Für einen Antennenabstand von 10 mm zur Pflanzgefäßoberfläche zeigten sich mehrere Maxima, die jedoch nicht den jeweiligen Testkörper als Ursache haben. Im Falle von  $T_B$  dominiert eines dieser Maxima sogar die Übrigen. Bei allen weiteren Abständen und für beide Testkörper zeigen sich dagegen eindeutige Maxima, die den Testkörpern zugeordnet werden können.

Im Gegensatz zur horizontalen Polarisation zeigt sich bei vertikaler Polarisation ein anderes Bild. Zwar werden über alle Abstände und beide Testkörper hinweg wesentlich höhere Werte für  $|H(r)|$  erreicht, es zeigt sich aber vor allem bei  $T_A$ , dass neben dem Maximum des Ziels auch andere Maxima auftreten, die einen wesentlich höheren Wert aufweisen als das gesuchte Ziel. Hierbei zeigt sich ein ähnlicher Trend wie bei horizontaler Polarisation der Antennen. Ähnliche Ergebnisse lassen sich auch für  $T_B$  feststellen. Bei vertikaler Polarisation dominieren „Störreflexionen“ die eigentlichen Reflexionen des Ziels. Die Maxima sind schwach ausgeprägt und für einen Abstand von 70 mm am höchsten. Im Gegensatz zu  $T_A$  liegen diese Maxima aber auf ähnlichem Niveau wie bei horizontaler Polarisation.

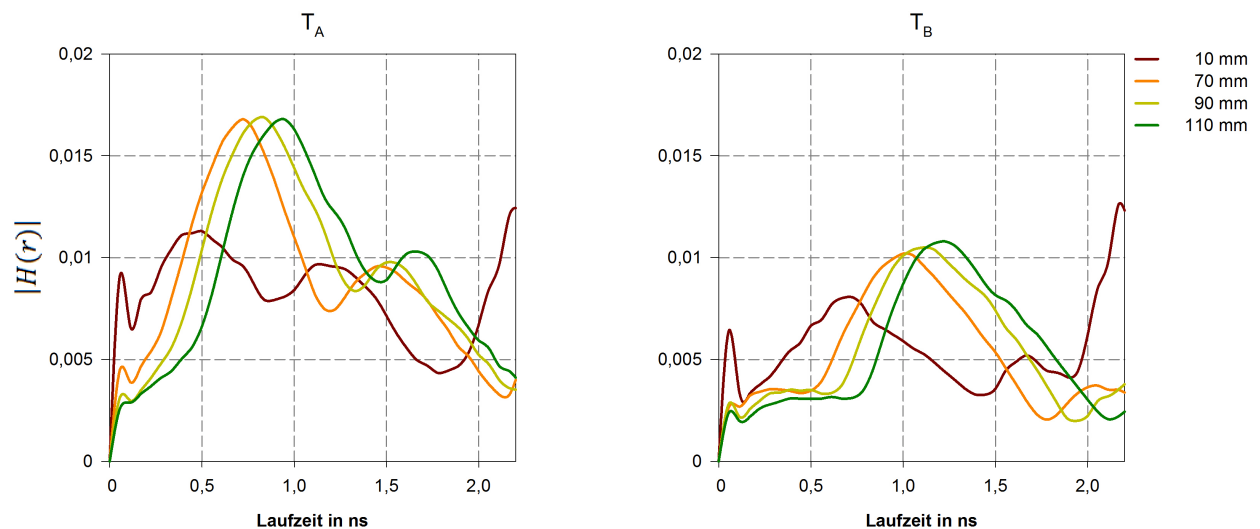


Abbildung 17:  $|H(r)|$  in Abhängigkeit von der Laufzeit der elektromagnetischen Wellen. Dargestellt werden die Daten von  $T_A$  und  $T_B$  bei horizontaler Polarisation (HH) für unterschiedliche Antennenabstände. Die Daten wurden über die vertikale Scannerposition gemittelt ( $n = 10$ )

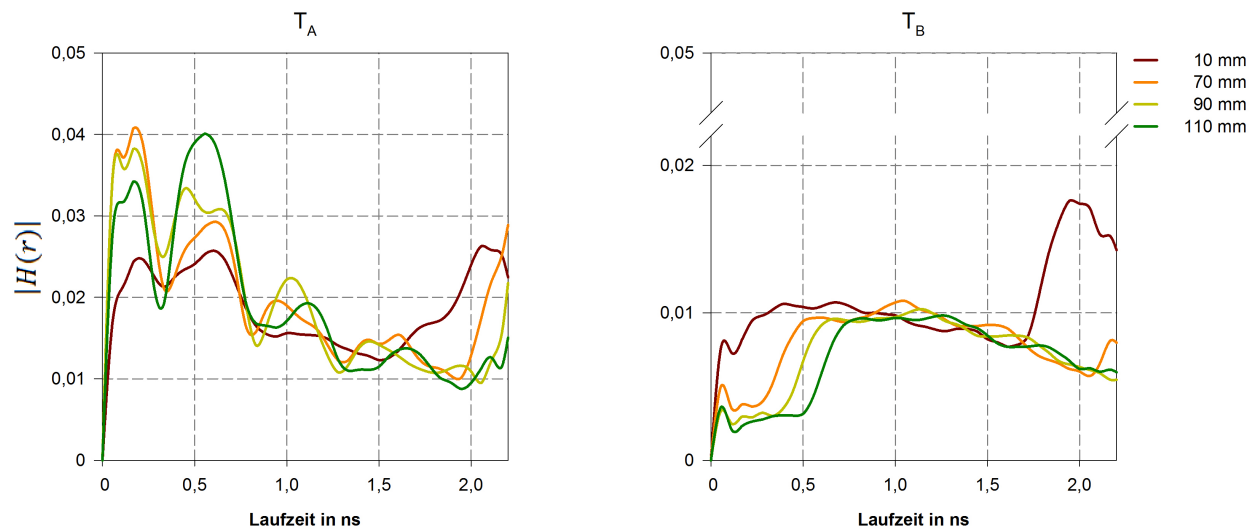


Abbildung 18:  $|H(r)|$  in Abhängigkeit von der Laufzeit der elektromagnetischen Wellen. Dargestellt werden die Daten von  $T_A$  und  $T_B$  bei vertikaler Polarisation (VV) für unterschiedliche Antennenabstände. Die Daten wurden über die vertikale Scannerposition gemittelt ( $n = 10$ )

Das Problem der mehrfachen Maxima tritt vor allem dann auf, wenn neben dem gewählten Zeitbereich auch der Weg des Linearantriebes berücksichtigt wird, über den in Abbildung 17 und Abbildung 18 das arithmetische Mittel gebildet wurde. Abbildung 19 zeigt dagegen die Ergebnisse der Untersuchung mit horizontaler Polarisation als Konturdiagramm ohne eine Mittelwertbildung über den Weg des Linearantriebes und vor Anwendung der Hilbert-Transformation. Es ist deutlich zu erkennen, dass beide Testkörper vom RADAR-System erfasst werden und eine ausgeprägte Reflexionscharakteristik zwischen 0,5 und 1,5 ns Laufzeit bzw. 200 und 500 mm vertikaler Scannerposition ( $T_A$ ) und 0,75 und 1,5 ns Laufzeit bzw. 250 und 450 mm vertikaler Scannerposition ( $T_B$ ) aufweisen. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Antennenabständen (70 bis 100 mm) sind dabei marginal und machen sich nur durch eine mit zunehmendem Abstand spätere Ausprägung im Zeitbereich bemerkbar. Eine Unterscheidung beider Testkörper hinsichtlich der Größe ist bei allen Abständen problemlos möglich.

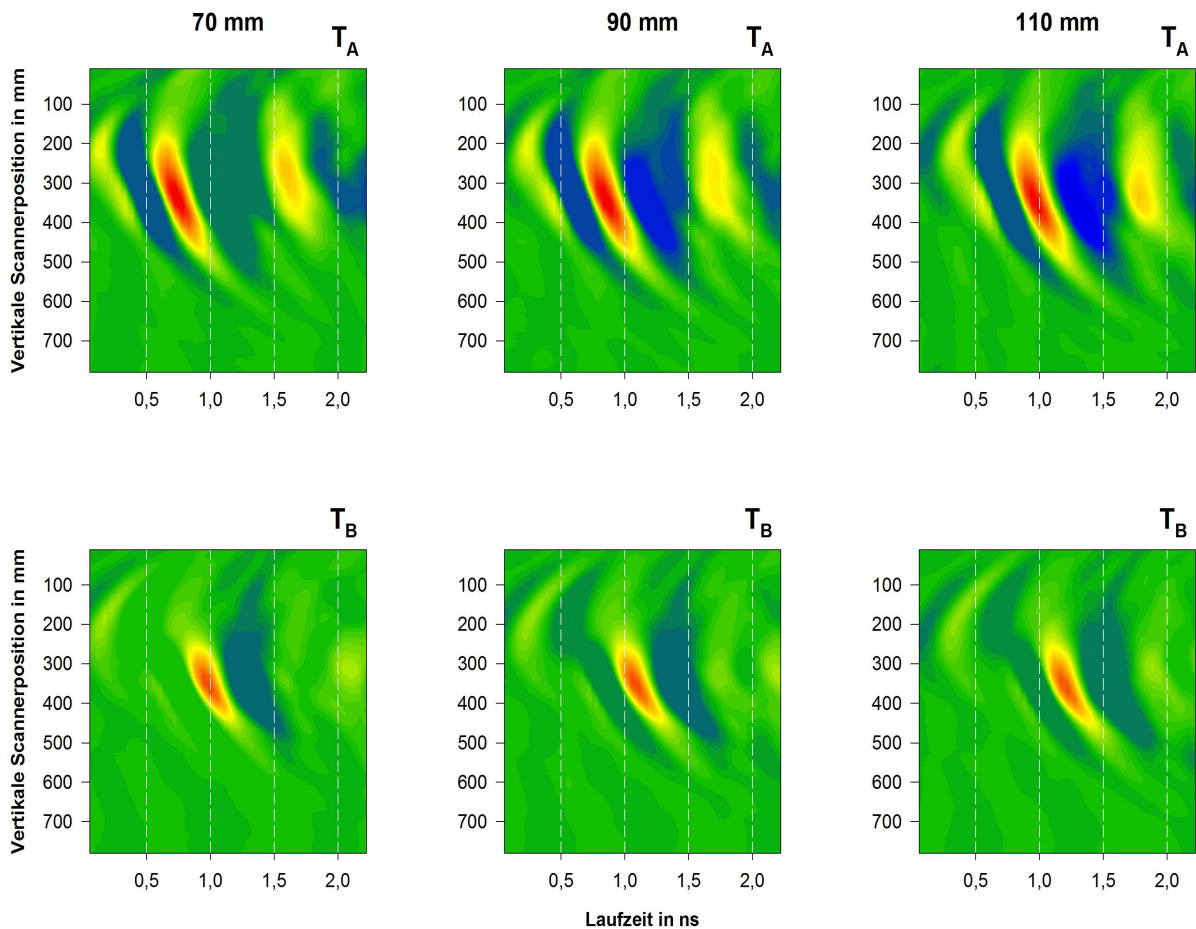


Abbildung 19: Reflexionscharakteristik von  $T_A$  und  $T_B$  in Abhängigkeit von vertikaler Scannerposition und Laufzeit bei verschiedenen Antennenabständen und horizontaler Polarisation ( $n = 10$ )

Im Gegensatz dazu sind die Reflexionscharakteristika bei vertikaler Polarisation deutlich schwerer zu interpretieren. Wie in Abbildung 20 dargestellt wird, sind sowohl bei  $T_A$  als auch bei  $T_B$  zwar ausgeprägte Reflexionscharakteristika vorhanden, diese sind jedoch aufgrund anderer Reflexionserscheinungen wesentlich schlechter zu identifizieren als bei horizontaler Polarisation. So sind vor allem bei  $T_A$  erhebliche Störreflexionen zu erkennen, die sich im Zeitbereich vor, nach und innerhalb derjenigen Zeitzone befinden, in der die Reflexionen von  $T_A$  beobachtet werden können (0,3 bis etwa 0,6 ns). Diese Tatsache macht eine Abschätzung der Testkörperposition über der vertikalen Scannerposition, unabhängig vom Antennenabstand, schwierig. Für  $T_B$  sind diese Störreflexionen zwar weniger stark ausgeprägt, im gewählten Zeitfenster tauchen jedoch zwei Reflexionsmaxima auf, die eine Zuordnung der Reflexionscharakteristika des Testobjektes auf einen bestimmten Zeitbereich erschweren. Bei einem Antennenabstand von 110 mm kommt es zu größeren Störreflexionen, die die Identifikation von  $T_B$  zusätzlich erschweren.

Eine Unterscheidung von  $T_A$  und  $T_B$  ist zwar auch bei vertikaler Polarisation möglich, jedoch deutlich schwieriger als bei horizontaler Polarisation.

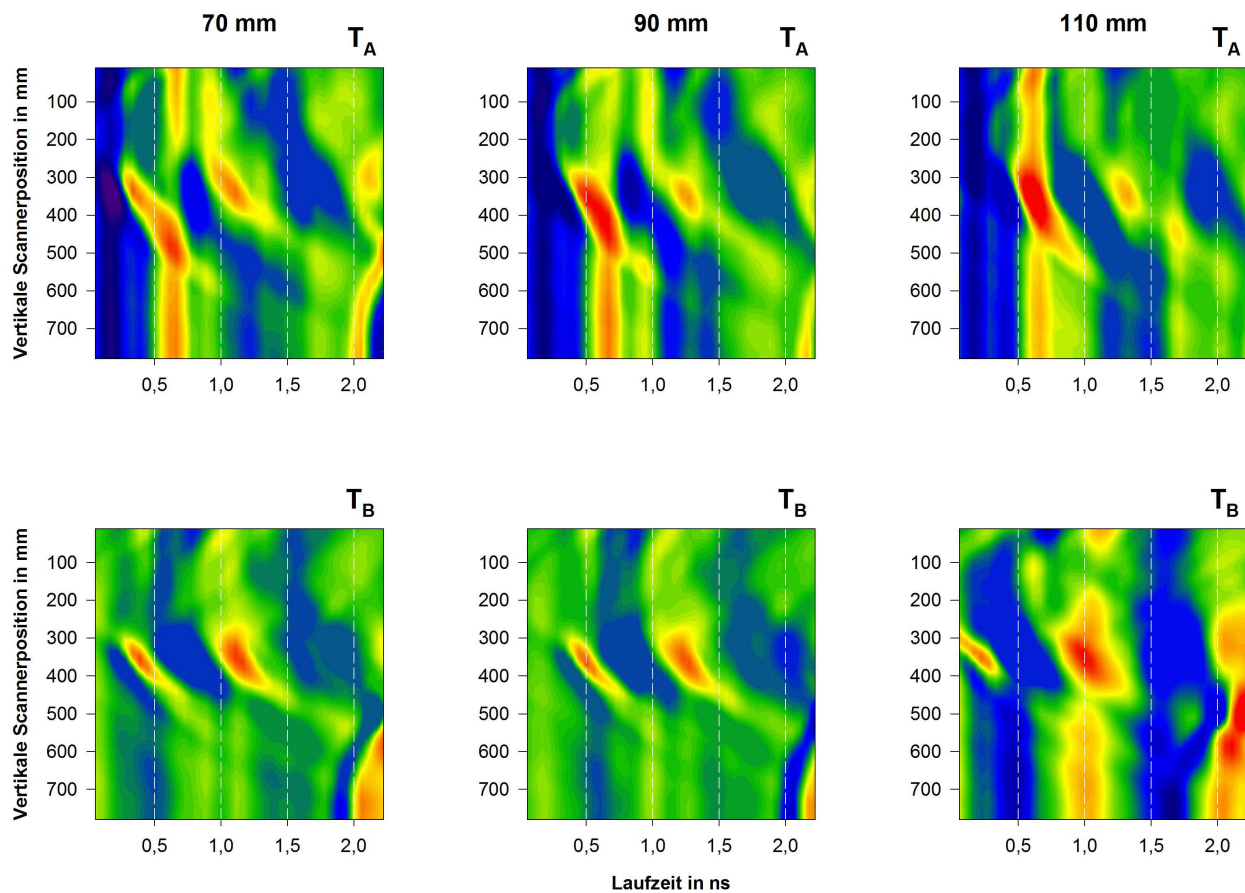


Abbildung 20: Reflexionscharakteristik von  $T_A$  und  $T_B$  Abhängigkeit von vertikaler Scannerposition und Laufzeit bei verschiedenen Antennenabständen und vertikaler Polarisation ( $n = 10$ )

Zusammenfassend können für die Anwendung des RADAR-Sensors damit eine horizontale Polarisation der Antennen und ein Antennenabstand zwischen 70 und 110 mm für die Anwendung empfohlen werden. Bei vertikaler Polarisation werden zwar höhere Reflexionskoeffizienten, vor allem für  $T_A$ , erreicht, die besserer Identifizierbarkeit der Reflexionsmaxima der Testkörper, sowie die nur schwach ausgeprägten Störreflexionen sprechen jedoch eindeutig für die Verwendung der horizontalen Polarisation. Für alle weiteren Versuche wurde der Abstand der Antennen deshalb auf 90 mm von der Oberfläche des Versuchsgefäßes festgelegt und eine horizontale Polarisation der Antennen (HH) verwendet.

### 5.3 Datenverarbeitung- und Datenbereinigung

#### 5.3.1 Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke

Durch Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke (y-Achse, vertikale Scannerposition) kann der Betrachtungsbereich der gewonnenen RADAR-Daten auf den, für die weitere Auswertung relevanten, Bereich beschränkt werden. Störende Reflexionen, die außerhalb des definierten Fensters liegen, fließen nicht in die weitere Datenverarbeitung ein und können die Auswertung deshalb nicht beeinflussen. Abbildung 21 verdeutlicht die Wirkung dieser beiden Mechanismen

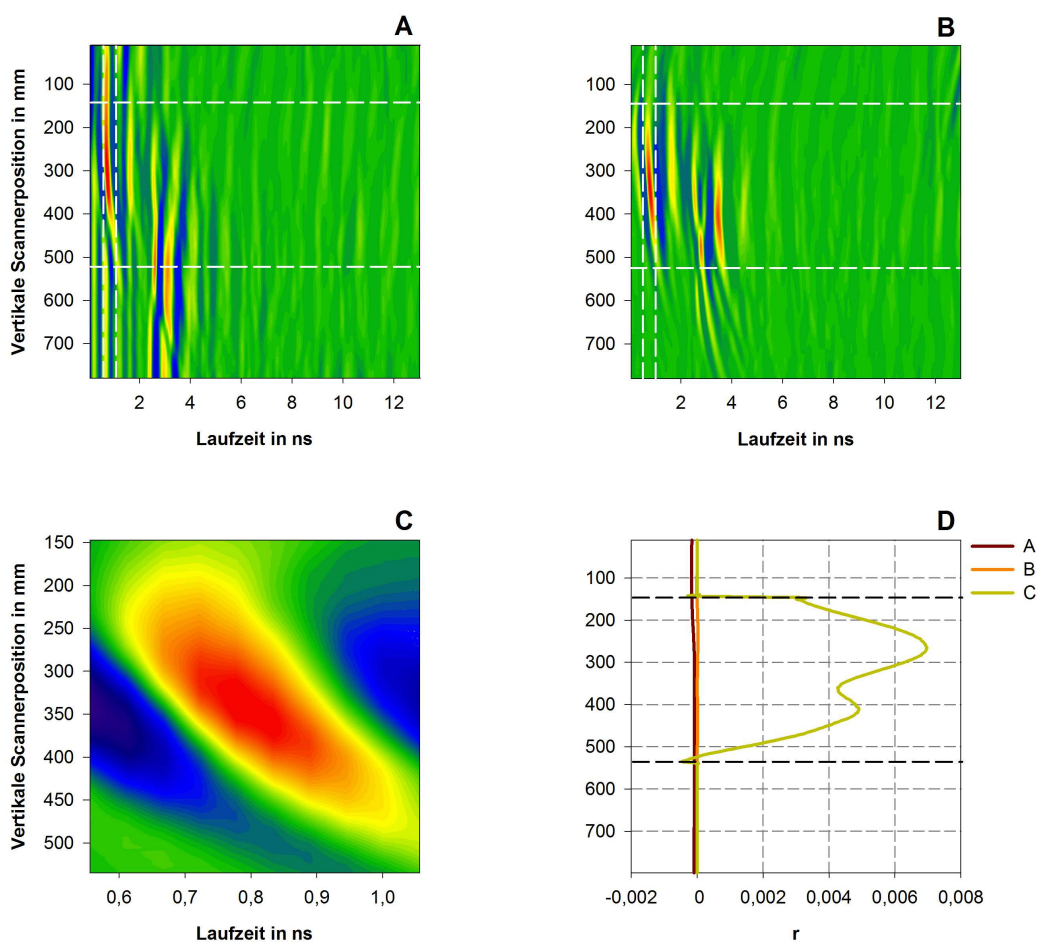


Abbildung 21: Wirkung von Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke auf die Reflexionsdaten von  $T_A$ . A: Rohdaten, B: Daten nach Abzug einer Referenzmessung, C: Daten nach Begrenzung der Scanstrecke und Time-Gating, D: Mittlerer Korrelationskoeffizient von gesendetem und reflektiertem Signal ( $r$ ) über der Laufzeit. Die gestrichelten Linien deuten die Schnittebenen im Zeit- und Wegbereich an ( $n = 10$ )

Teil A und B dieser Abbildung zeigen den Zustand der Daten vor Anwendung von Time-Gating und der Begrenzung der Scanstrecke. Die gestrichelten weißen Linien deuten dabei denjenigen Bereich an, der durch Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke ausgeschnitten wird. Im Verhältnis zu den übrigen Daten ist dieser Bereich bereits sehr klein, wobei die Daten in Abbildung 21 schon von Beginn an auf 13 ns Laufzeit gekürzt wurden, obwohl theoretisch über 27 ns zur Verfügung stehen. Das eigentliche Ziel der Untersuchung (dargestellt in Teil C von Abbildung 21) verbirgt sich also nur in einem kleinen Bereich, der durch geschickte Wahl der Schnittpunkte relativ leicht isoliert werden kann. Diese Isolation hat mehrere Vorteile: Einerseits wird der Datenumfang für die weitere Verarbeitung und Darstellung der Daten wesentlich reduziert, was einen Zeitvorteil mit sich bringt. Andererseits wird der Kontrast zu den umgebenden Daten deutlich besser, so dass beispielsweise bei der Mittelwertbildung über die Laufzeit (Abbildung 21 Teil D) wesentlich höhere Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) erreicht werden. Die Begrenzung der Scanstrecke bringt darüber hinaus Vorteile bei der Durchführung bestimmter Hintergrundabzugsmechanismen (vgl. Kapitel 5.3.2.1).



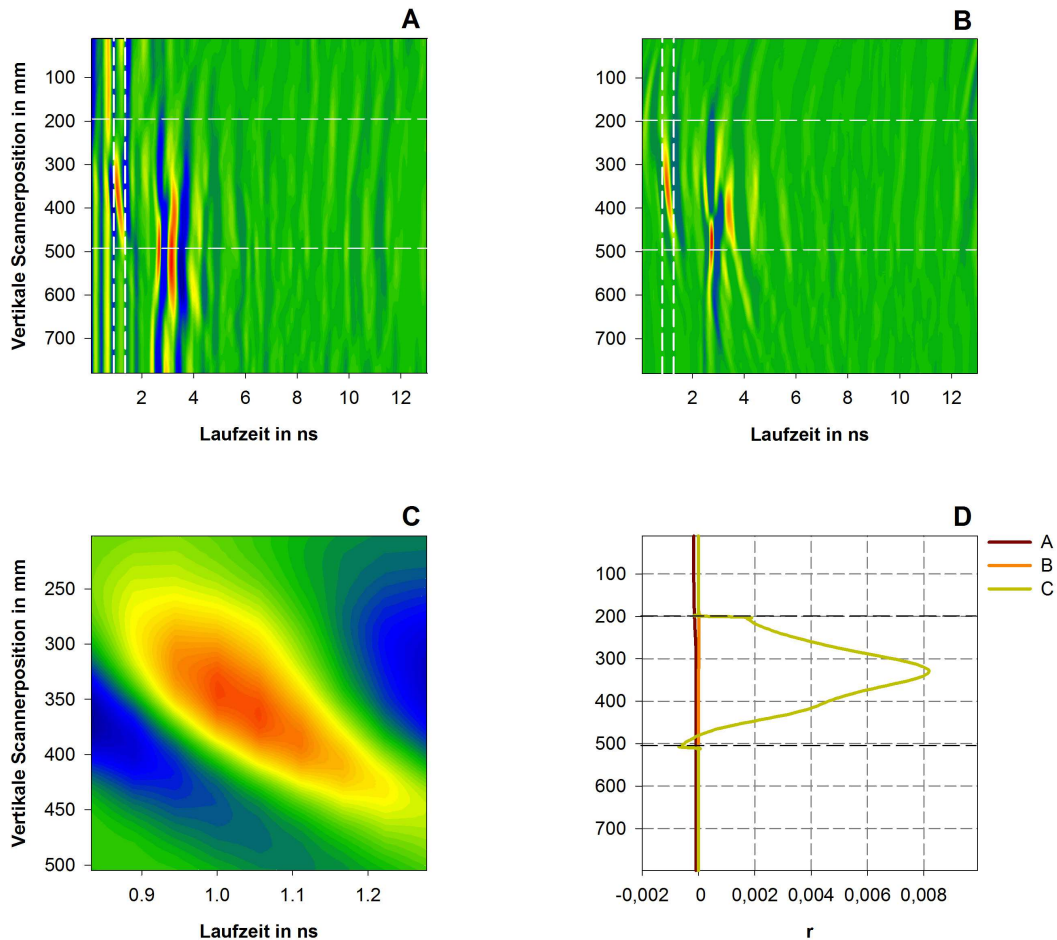


Abbildung 22: Wirkung von Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke auf die Reflexionsdaten von  $T_B$ . A: Rohdaten, B: Daten nach Abzug einer Referenzmessung, C: Daten nach Begrenzung der Scanstrecke und Time-Gating, D: Mittlerer Korrelationskoeffizient von gesendetem und reflektiertem Signal ( $r$ ) über der Laufzeit. Die gestrichelten Linien deuten die Schnittebenen im Zeit- und Wegbereich an ( $n = 10$ )

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Verwendung der Daten von  $T_B$ . Abbildung 22 zeigt hierzu die Daten, die auf identische Weise gewonnen wurden wie für  $T_A$  (vgl. Abbildung 21). Es ist leicht ersichtlich, dass die Wirkung von Time-Gating und der Begrenzung der Scanstrecke (Teil C), im Vergleich zu den Rohdaten (Teil A), ähnlich wie bei  $T_A$  (vgl. Abbildung 21) verläuft. Die durch das Time-Gating und die Achsbegrenzung erreichte „Fokussierung“ auf das relevante Reflexionsphänomen (Testkörper) sorgt auch bei  $T_B$  für eine deutliche Erhöhung von  $r$ , wenn über die Laufzeit gemittelt wird.

Beide Mechanismen haben deshalb eine durchweg positive Wirkung für die weitere Verarbeitung der Daten und deren spätere Interpretation. Wie in Kapitel 5.3.2 noch gezeigt werden wird, hat die Begrenzung der Scanstrecke darüber hinaus einen positiven Einfluss auf bestimmte Hintergrundabzugsmechanismen.

Speziell das Time-Gating wurde wegen seiner positiven Wirkung für den Datenverarbeitungsprozess bereits in früheren Untersuchungen in mannigfaltiger Art und Weise verwendet (vgl. VAN DER MERWE & GUPTA, 2000; RAPPAPORT et al., 2001; TORRIONE & COLLINS, 2006; WÖCKEL et al., 2006). Bei der Anwendung von Time-Gating und der Begrenzung der Scanstrecke ist jedoch darauf zu achten, dass das Schnittfenster groß genug bemessen wird, da die Gefahr besteht, dass ein Teil der Informationen „abgeschnitten“ wird und für die weitere Auswertung verloren geht.

### 5.3.2 Hintergrundabzugsmechanismen

Neben dem Time-Gating und der Begrenzung der Scanstrecke stellt die Entfernung unerwünschter Reflexionen (Hintergrundabzug) eine weitere, wichtige Möglichkeit zur Unterdrückung von Störeinflüssen und damit der Verbesserung der Signalqualität dar. Neben der eigentlichen Reflexion des Ziels (Testkörper, Zuckerrübe, etc.) werden durch die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen auch andere Ziele „getroffen“, die ihrerseits Reflexionen verursachen und in den aufgezeichneten Daten sichtbar sind. Darüber hinaus kann auch die direkte Übertragung der Wellen von der Sende- zur Empfangsantenne (Antennenübersprechen, Crosstalk) eine erhebliche Störquelle darstellen, die das eigentliche Ziel verschleiert. Dieses ist oft erst nach der Entfernung der störenden Reflexionen als Solches zu erkennen (KONSTANTINOVIC, 2007).

Der Effekt des Hintergrundabzugs auf die Signalqualität wird in Abbildung 23 verdeutlicht. Hier sind die Reflexionsdaten von  $T_A$  und  $T_B$  sowohl vor (RAW) als auch nach Abzug von Referenzmessungen (REF, Messung eines Pflanzgefäßes, welches nur das entsprechende Substrat enthielt) dargestellt. Es fällt auf, dass vor Abzug der Referenzmessung weitere Reflexionen neben den eigentlichen Testkörpern vorhanden sind, die die Darstellung der eigentlichen Ziele stören. Nach dem Abzug der jeweiligen Referenzmessung sind die größten Teile dieser Störerscheinungen aber beseitigt und das jeweilige Ziel kann eindeutig identifiziert werden. Die weitere Verarbeitung und vor allem die Interpretation der Reflexionsdaten wird damit wesentlich verbessert.

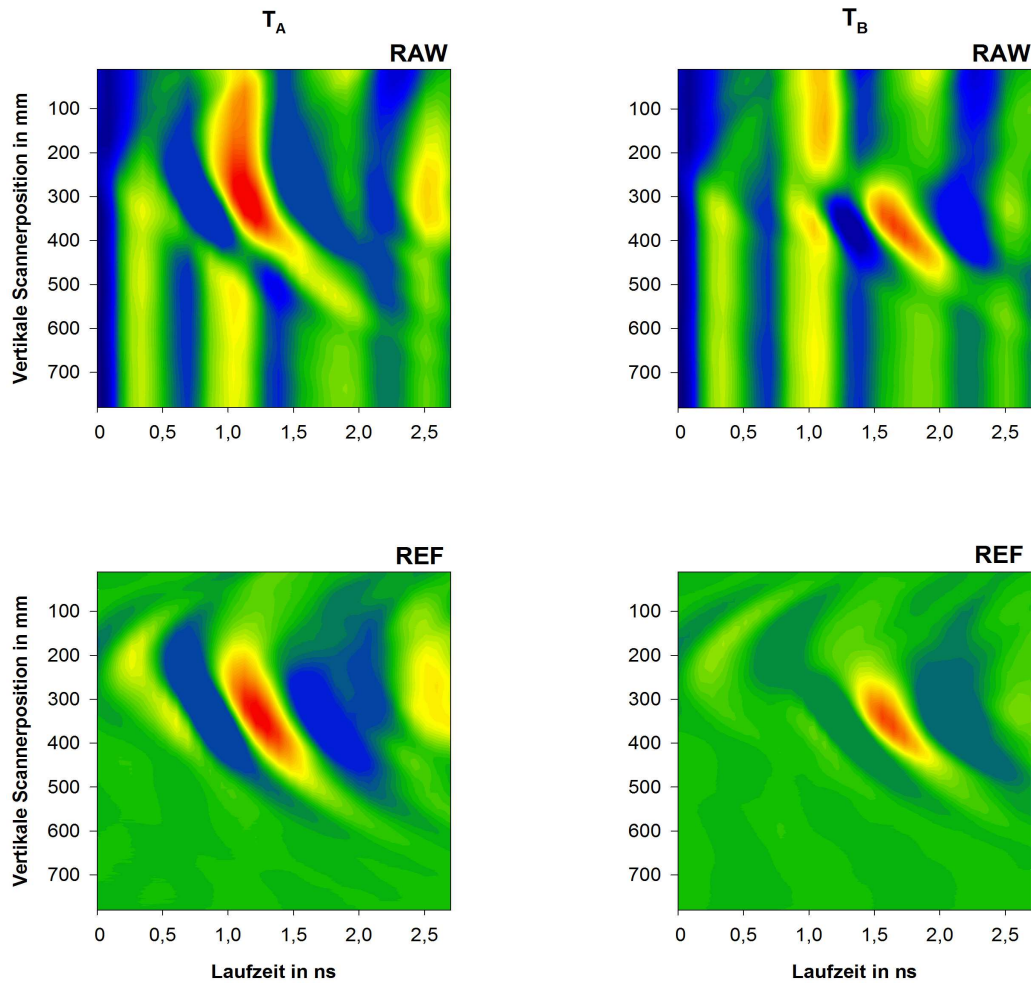


Abbildung 23: Wirkung von Referenzabzug (REF) auf die Rohdaten (RAW) von  $T_A$  und  $T_B$  ( $n = 10$ )

Durch den Abzug der Referenzmessung werden allerdings nicht nur Störreflexionen beseitigt. Auch ein Teil der Daten des jeweiligen Ziels wird von den Rohdaten subtrahiert, so dass die bereinigten Zieldaten im Vergleich zu den Rohdaten kleinere Korrelationskoeffizienten aufweisen. Dieser Effekt wird vor allen Dingen dann deutlich, wenn spezifische Werte vor und nach Durchführung des Hintergrundabzuges miteinander verglichen werden. Wie in Tabelle 5 dargestellt, unterscheiden sich maximaler Reflexionskoeffizient ( $r_{max}$ ) und mittlerer Reflexionskoeffizient ( $\bar{r}$ ) der Rohdaten erheblich von den Daten nach dem Hintergrundabzug.

Tabelle 5: Ausgewählte Parameter der Reflexionsdaten von  $T_A$  und  $T_B$  vor- und nach Durchführung des Hintergrundabzugs:  $r_{max}$ : Maximaler Reflexionskoeffizient,  $\bar{r}$  mittlerer Reflexionskoeffizient,  $\left| \frac{r_{max}}{\bar{r}} \right|$ : Betrag des Verhältnisses von  $r_{max}$  zu  $\bar{r}$

	Rohdaten		Nach Hintergrundabzug	
	$T_A$	$T_B$	$T_A$	$T_B$
$r_{max}$	0,064	0,0436	0,0563	0,0425
$\bar{r}$	-0,0014	-0,0017	0,0003	-0,00002
$\left  \frac{r_{max}}{\bar{r}} \right $	46,87	25,27	167,25	1.781,8

Der maximale Reflexionskoeffizient wird sowohl bei  $T_A$  als auch bei  $T_B$  nach dem Hintergrundabzug geringer: Bei  $T_A$  konnte eine Abnahme um 0,077, bei  $T_B$  eine Abnahme um 0,0011 beobachtet werden. Gleichzeitig nimmt aber auch der mittlere Reflexionskoeffizient in beiden Fällen deutlich ab. Gemessen am Absolut-Wert von  $\bar{r}$  entspricht dies einer Abnahme von 0,0011 bei  $T_A$  und 0,00028 bei  $T_B$ , wenn die Daten vor und nach Durchführung des Hintergrundabzuges miteinander verglichen werden. Dies scheinen zunächst relativ kleine Werte zu sein, wird jedoch das Verhältnis von  $r_{max}$  zu  $\bar{r}$  betrachtet, so fällt auf, dass die Durchführung des Hintergrundabzuges dieses Verhältnis deutlich erhöht: Bei  $T_A$  beträgt die Zunahme 120,38 bei  $T_B$  1.756,53. Der Kontrast zwischen dem Zielobjekt (Bereich mit maximalem Korrelationskoeffizienten) und dem weiteren Zeit- und Wegbereich wird damit durch den Hintergrundabzug erhöht, was den Verlust durch die Subtraktion der Referenzmessung rechtfertigt.

Die Verwendung von Referenzmessungen, die eine der einfachsten und effektivsten Möglichkeiten des Hintergrundabzugs darstellt, ist allerdings aus Gründen der Handhabung und Messgeschwindigkeit des Sensorsystems unvorteilhaft, da für die spezifischen Bedingungen jeweils eine Referenzmessung vorhanden sein muss. Schneller und einfacher handhabbar arbeiten deshalb Mechanismen, bei denen keine Referenzmessung benötigt wird. Die Wirkung dieser Mechanismen wird deshalb im Folgenden näher dargestellt.

### 5.3.2.1 Statischer Hintergrundabzug

#### Abzug des Mittelwertes in zweiter Dimension

Um den zusätzlichen Aufwand für Referenzmessungen zu umgehen, wurden umfangreiche Versuche zur Anwendung von Hintergrundabzugsmechanismen ohne Referenzmessung durchgeführt. Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen die Wirkung des Abzugs des Mittelwertes in zweiter Dimension auf die Reflexionsdaten von  $T_A$  und  $T_B$ . Qualitativ betrachtet fällt hierbei auf, dass sowohl bei  $T_A$  als auch bei  $T_B$  nur der Abzug des arithmetischen Mittels (Ami) und des Medians (Med) Ergebnisse liefert, die mit dem Abzug einer Referenzmessung (Ref) vergleichbar sind. Der Modus (Mod) erzeugt in beiden Fällen starke zusätzliche Störerscheinungen, die eine Identifikation der Reflexionsphänomene der jeweiligen Ziele ( $T_A$  und  $T_B$ ) deutlich erschweren.

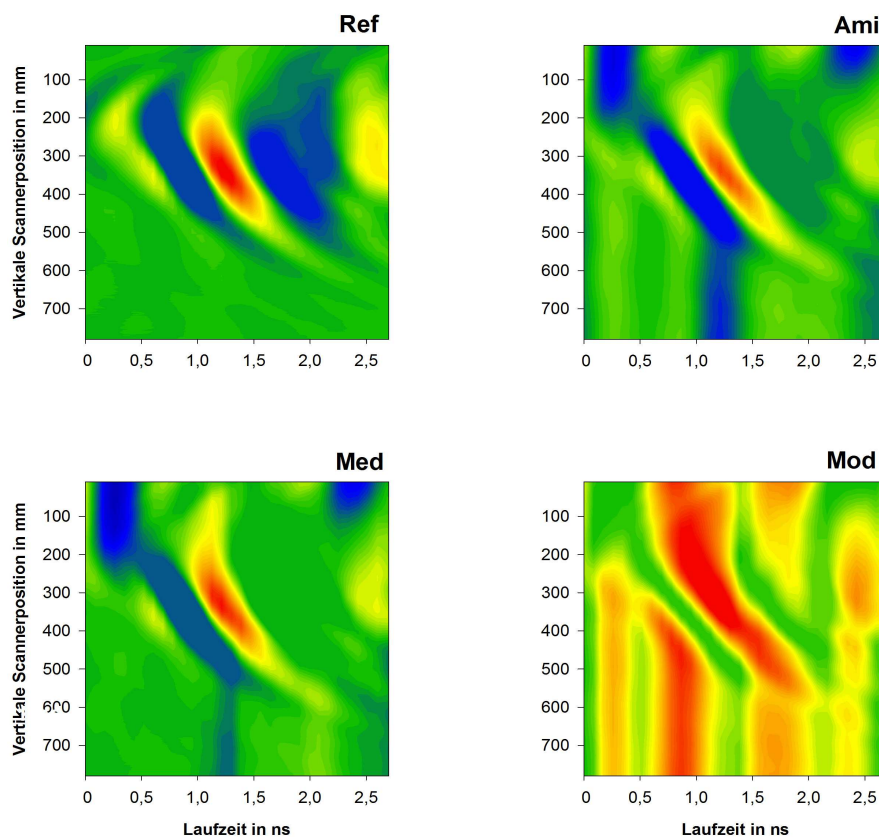


Abbildung 24: Wirkung des statischen Hintergrundabzugs in zweiter Dimension auf die Reflexionsdaten von  $T_A$  in Abhängigkeit von der jeweiligen Mittelwertmethode. Ref: Abzug einer Referenzmessung (als Vergleich), Ami: Arithmetisches Mittel, Med: Median, Mod: Modus ( $n = 10$ )

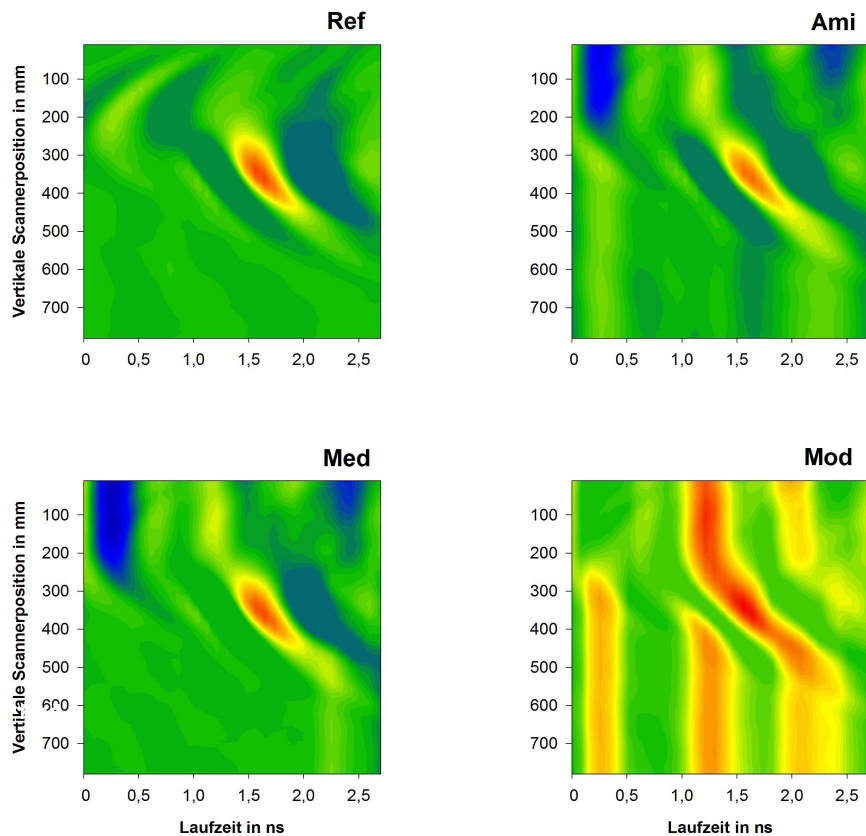


Abbildung 25: Wirkung des statischen Hintergrundabzugs in zweiter Dimension auf die Reflexionsdaten von  $T_B$  in Abhängigkeit von der jeweiligen Mittelwertmethode: Ref: Abzug einer Referenzmessung (als Vergleich), Ami: Arithmetisches Mittel, Med: Median, Mod: Modus ( $n = 10$ )

Deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten sind auch ersichtlich, sobald quantitative Parameter zur Bewertung herangezogen werden. Tabelle 6 zeigt hierzu spezifische Werte.

Tabelle 6: Vergleich von maximalem Reflexionskoeffizient ( $r_{max}$ ), mittlerem Reflexionskoeffizient ( $\bar{r}$ ), und Betrag des Verhältnisses von  $r_{max}$  zu  $\bar{r}$  ( $|\frac{r_{max}}{\bar{r}}|$ ) bei unterschiedlichen statischen Hintergrundabzugsmethoden

	Referenzmessung		Arithm. Mittel		Median		Modus	
	T <sub>A</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>A</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>A</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>A</sub>	T <sub>B</sub>
$r_{max}$	0,0563	0,0425	0,0434	0,0377	0,0504	0,0421	0,0689	0,0514
$\bar{r}$	0,0003	-0,00002	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$-4,2 \cdot 10^{-6}$	$-1,5 \cdot 10^{-4}$	$-1,3 \cdot 10^{-4}$	0,0179	0,0123
$ \frac{r_{max}}{\bar{r}} $	167,25	1.781,8	14.036	12.179	330,21	276,01	3,86	2,87

Bei Anwendung des arithmetischen Mittels zur Berechnung des Hintergrundsignals sind im Vergleich zum Abzug einer Referenzmessung zunächst zwei Unterschiede auffällig: Zum einen ist  $r_{max}$  bei beiden Testkörpern deutlich geringer, zum anderen wird aber auch  $\bar{r}$  erheblich verringert. Im Vergleich zum Abzug einer Referenzmessung mündet dies trotz geringererem  $r_{max}$  in ein deutlich günstigeres  $r_{max}$  zu  $\bar{r}$  Verhältnis. Während beim Abzug der Referenzmessung Werte von 167,25 (T<sub>A</sub>) und 1.781,8 (T<sub>B</sub>) erreicht wurden, wurden bei Anwendung des arithmetischen Mittels Werte von 14.036 (T<sub>A</sub>) bzw. 12.179 (T<sub>B</sub>) erreicht. Unter allen in diesem Szenario getesteten Methoden wies das arithmetische Mittel damit die höchsten Werte auf. Im Vergleich dazu liefern Median und Modus zwar höhere Werte für  $r_{max}$  dies geht aber mit einem höheren  $\bar{r}$  ein, was zu einem niedrigeren  $r_{max}$  zu  $\bar{r}$  Verhältnis führt. Für T<sub>A</sub> wird beim Median zwar noch ein höheres Verhältnis erreicht als bei Abzug einer Referenzmessung, bei T<sub>B</sub> ist dieses jedoch deutlich geringer. Die Anwendung des Modus als Methode für die Mittelwertbildung führt zwar unter allen getesteten Bedingungen zu den höchsten  $r_{max}$ -Werten, die im Vergleich mit den anderen Methoden aber ebenfalls stark erhöhten  $\bar{r}$ -Werte führen zum niedrigsten  $r_{max}$  zu  $\bar{r}$  Verhältnis.

Die Leistungsfähigkeit des arithmetischen Mittels als Hintergrundabzugsmethode konnte durch eine einfache Anpassung des Weg- und Zeitbereichs noch einmal deutlich verbessert werden. Dazu wurde bei einer Datenmatrix der Größe  $m \times n$  nicht, wie in Tabelle 6 gezeigt, der jeweilige Mittelwert über alle Spalten der Datenmatrix gebildet (global), sondern die Matrix zunächst auf denjenigen Bereich begrenzt, in dem das Ziel (T<sub>A</sub> bzw. T<sub>B</sub>) vermutet wurde (Anwendung von Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke (vgl. Kapitel 5.3.1)).

Die Mittelwertbildung erfolgte erst im Anschluss und war damit wesentlich feiner auf den eigentlichen Zielbereich begrenzt. Wie in Tabelle 7 dargestellt, konnte  $\bar{r}$  bei Anwendung des arithmetischen Mittels im Vergleich zu den Daten aus Tabelle 6 weiter gesenkt werden. Trotz abnehmender Maximalwerte führt dies zu einem sehr hohen  $r_{max}$  zu  $\bar{r}$  Verhältnis sowohl bei  $T_A$  als auch bei  $T_B$ . Die übrigen Methoden (Median und Modus) lieferten nach Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke deutlich schlechtere Werte als zuvor. Das arithmetische Mittel zeigt sich auch in dieser Variante den anderen Methoden gegenüber als überlegene Methode, zumal das  $r_{max}$  zu  $\bar{r}$  Verhältnis im Vergleich zu den Daten aus Tabelle 6 noch einmal deutlich gesteigert werden konnte.

Tabelle 7: Vergleich von maximalem Reflexionskoeffizient ( $r_{max}$ ), mittlerem Reflexionskoeffizient ( $\bar{r}$ ) und Betrag des Verhältnisses von  $r_{max}$  zu  $\bar{r}$  ( $\left|\frac{r_{max}}{\bar{r}}\right|$ ) bei unterschiedlichen statischen Hintergrundabzugsmethoden nach Anwendung von Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke

	Referenzmessung		Arithm. Mittel		Median		Modus	
	$T_A$	$T_B$	$T_A$	$T_B$	$T_A$	$T_B$	$T_A$	$T_B$
$r_{max}$	0,0563	0,0425	0,0352	0,0295	0,0409	0,0337	0,0689	0,0514
$\bar{r}$	-0,0012	-0,0011	$4,9 \cdot 10^{-19}$	$1,2 \cdot 10^{-18}$	-0,001	$3,7 \cdot 10^{-4}$	0,0217	0,0142
$\left \frac{r_{max}}{\bar{r}}\right $	45,58	38,38	$7,2 \cdot 10^{16}$	$2,5 \cdot 10^{16}$	40,67	90,2	3,18	3,62

### Abzug des Mittelwertes in dritter Dimension

Sobald bei den Daten des RADAR-Systems eine Drehung des Versuchsgefäßes erfolgt, entsteht ein dreidimensionaler Daten-Array. In diesem Fall kann eine Mittelwertbildung nicht nur über alle Spalten (zweite Dimension), sondern auch über alle einzelnen Matrizen des Arrays (dritte Dimension) erfolgen. Ein Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass ein erheblicher Informationsverlust eintritt, sobald ein Testobjekt aus allen betrachteten Aufnahmewinkeln ähnliche Reflexionscharakteristika aufweist. In diesem Fall wird ein großer Teil der Informationen über das Testobjekt aus den Reflexionsdaten gelöscht und steht im Anschluss nicht mehr zur Verfügung.



Die Effekte der unterschiedlichen Methoden bei Anwendung auf ein dreidimensionales Array der Reflexionsdaten von  $T_A$  und  $T_B$  werden in Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellt.

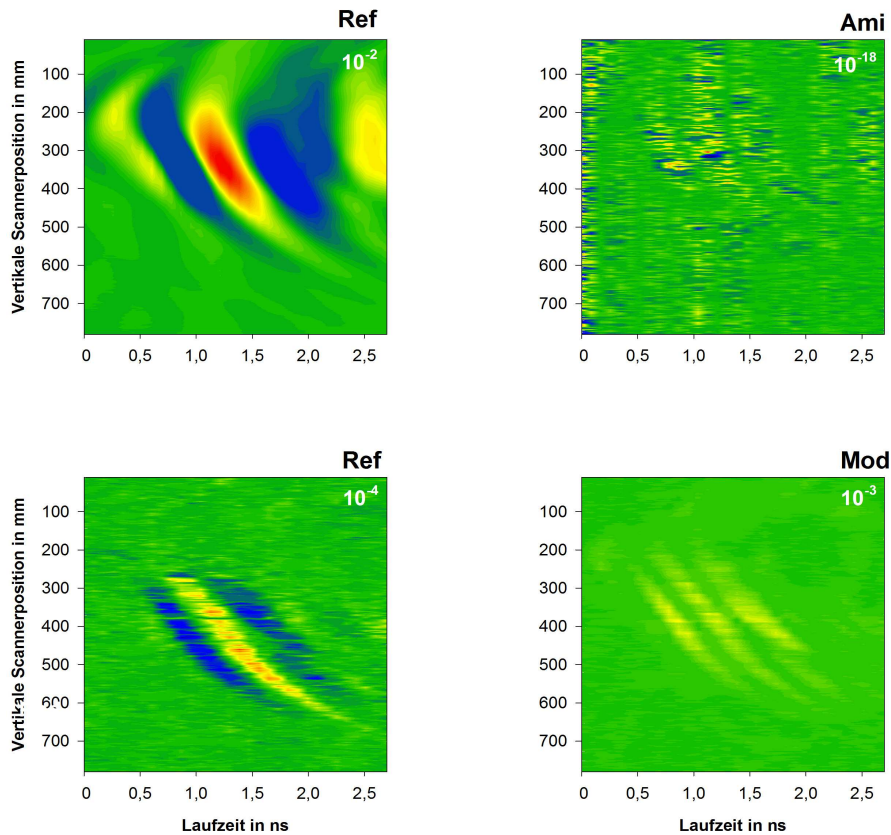


Abbildung 26: Wirkung des statischen Hintergrundabzugs in dritter Dimension auf die Reflexionsdaten von  $T_A$  in Abhängigkeit von der jeweiligen Mittelwertmethode. Ref: Abzug einer Referenzmessung (als Vergleich), Ami: Arithmetisches Mittel, Med: Median, Mod: Modus. Die Farbskala ist mit dem angegebenen Wert zu multiplizieren

Bei diesen Abbildungen wurden die Reflexionsdaten der beiden Testkörper, die aus 10 Einzelmessungen entstanden sind, als Matrizen in einem Array hintereinandergelegt. Der Mittelwertabzug in dritter Dimension erfolgte im Anschluss. Diese Methode bildet zwar nicht zwingend die Realität ab, da die Aufnahme der Daten aus identischen Winkeln erfolgte, sie zeigt aber dennoch deren Wirkung bei RADAR-Aufnahmen, bei denen die Unterschiede in der Reflexionscharakteristik zwischen den einzelnen Aufnahmewinkeln nur marginal sind.

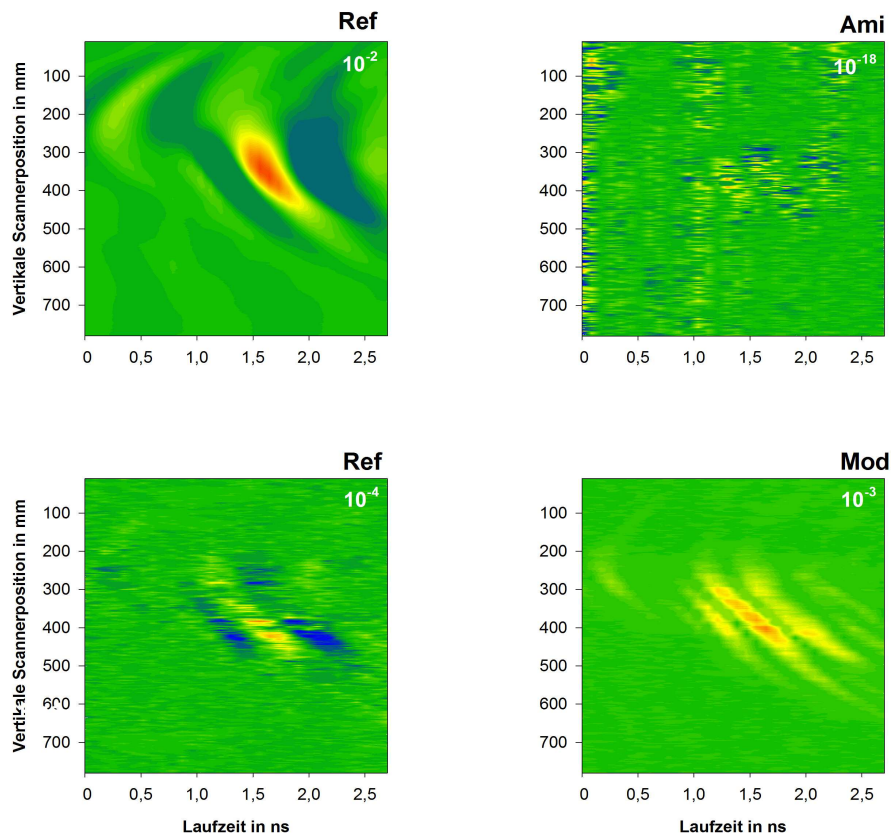


Abbildung 27: Wirkung des statischen Hintergrundabzugs in dritter Dimension auf die Reflexionsdaten von  $T_B$  in Abhängigkeit von der jeweiligen Mittelwertmethode: Ref: Abzug einer Referenzmessung (als Vergleich), Ami: Arithmetisches Mittel, Med: Median, Mod: Modus. Die Farbskala ist mit dem angegebenen Wert zu multiplizieren

Sowohl in Abbildung 26 als auch in Abbildung 27 ist zu erkennen, dass alle drei Mittelwertmethoden (Arithmetisches Mittel, Median und Modus) sehr schlechte Ergebnisse bei der Abbildung der jeweiligen Ziele ( $T_A$  und  $T_B$ ) liefern. Die Testkörper sind zwar bei allen Methoden mehr oder weniger gut zu erkennen. Ein starkes Rauschen und Korrelationskoeffizienten, die im Vergleich mit dem Referenzabzug um bis zu 16 Zehnerpotenzen niedriger liegen, erschweren die Identifikation jedoch sehr stark.

Aus diesem Grund ist ein dreidimensionaler statischer Hintergrundabzug für die weitere Datenbereinigung ungeeignet. Dies gilt vor allem für Zielobjekte die über alle Aufnahmewinkel hinweg ähnliche Reflexionscharakteristika aufweisen. Für Zielobjekte, mit abweichenden Reflexionscharakteristika kann diese Methode jedoch sinnvoll sein, da der Informationsverlust bei solchen Objekten begrenzter sein dürfte als bei den hier betrachteten Objekten.

Da Zuckerrüben aber eine annähernd rotationssymmetrische Form aufweisen, ist zu erwarten, dass eine Anwendung des dreidimensionalen, statischen Hintergrundabzuges bei diesen Objekten zu einem starken Informationsverlust führt, da die Reflexionscharakteristika aus den einzelnen Aufnahmewinkeln ähnlich ausfallen dürften und damit keine ausreichenden Unterschiede bieten. Generell wird diese Methode deshalb als ungeeignet für die Untersuchung von Zuckerrüben in einzelnen Pflanzgefäßen eingestuft.

### 5.3.2.2 Dynamischer Hintergrundabzug

Im Gegensatz zu den statischen Hintergrundabzugsmethoden wird die Mittelwertbildung bei dynamischen Methoden nicht über alle Spalten der Datenmatrizen hinweg durchgeführt, sondern nur in einem bestimmten Bereich um die aktuell betrachtete Spalte herum (Fenster). Die Breite dieses Fensters wird vor Durchführung des Hintergrundabzugs festgelegt. In Abhängigkeit von der Breite dieses Fensters ( $w$ ) lieferte diese Art des Hintergrundabzugs unterschiedliche Ergebnisse, die in Abbildung 28 zusammengefasst werden. Es ist zu erkennen, dass das  $r_{max}$  zu  $\bar{r}$  Verhältnis sowohl für  $T_A$  als auch für  $T_B$  bei einer Fensterbreite von 30 ( $T_B$ ) bzw. 40 Spalten ( $T_A$ ) maximal ist. Das Verhältnis beträgt bei dieser Fensterbreite  $2,535 \cdot 10^6$  für  $T_B$  und  $7,435 \cdot 10^5$  für  $T_A$ . Für alle übrigen, getesteten Fensterbreiten nimmt dieses Verhältnis ab. Mit zunehmender Fensterbreite steigt  $r_{max}$  zwar an, da  $\bar{r}$  aber ebenfalls ansteigt, wird das Verhältnis beider Werte zueinander zunehmend ungünstiger.

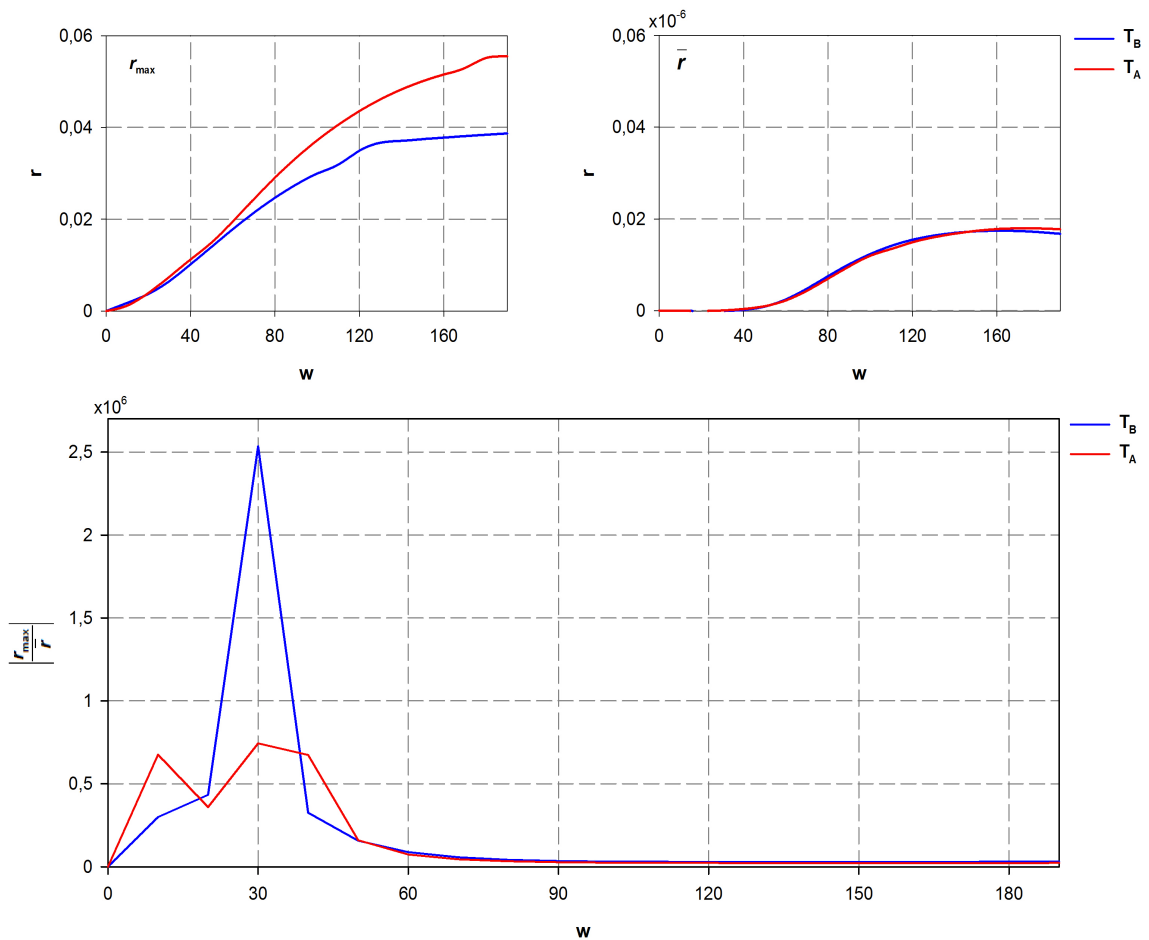


Abbildung 28:  $r_{max}$ ,  $\bar{r}$  und  $\left| \frac{r_{max}}{\bar{r}} \right|$  von  $T_A$  und  $T_B$  bei dynamischem Hintergrundabzug in Abhängigkeit von der gewählten Fenstergröße ( $w$ )

Im Vergleich zu den bisher betrachteten, statischen Methoden liegen die ermittelten Werte für das  $r_{max}$  zu  $\bar{r}$  Verhältnis in einem Bereich, der, bei gleicher Methode zur Mittelwertbildung, noch über dem statischen Hintergrundabzug liegt. Der statische Hintergrundabzug mit dem arithmetischen Mittel als Mittelwertmethode lieferte erst dann ein höheres  $r_{max}$  zu  $\bar{r}$  Verhältnis, wenn zuvor Time-Gating angewendet und die Scanstrecke auf den relevanten Bereich begrenzt wurden. Im Vergleich zu dieser Methode weist der dynamische Hintergrundabzug jedoch einen weiteren Vorteil auf, der mit Hilfe der bisher dargestellten Werte nur unzureichend erfasst wird. Dieser Unterschied betrifft kleine Reflexionen im betrachteten Zeit- und Wegbereich, die, wie in Abbildung 29 dargestellt, in Gestalt kleiner Hyperbeln in den Kontur-Diagrammen auftauchen. Im gewählten Beispiel fällt sofort auf, dass diese kleinen Hyperbeln bei Referenzabzug und statischem Hintergrundabzug nicht oder nur marginal in Erscheinung treten.

Obwohl die Maxima im Fall von  $T_A$  und  $T_B$  im Vergleich zu den anderen Methoden wesentlich geringer ausfallen, kann die „Sichtbarmachung“ dieser kleinen Hyperbeln unter bestimmten Bedingungen ein Vorteil sein (vgl. Abbildung 29).

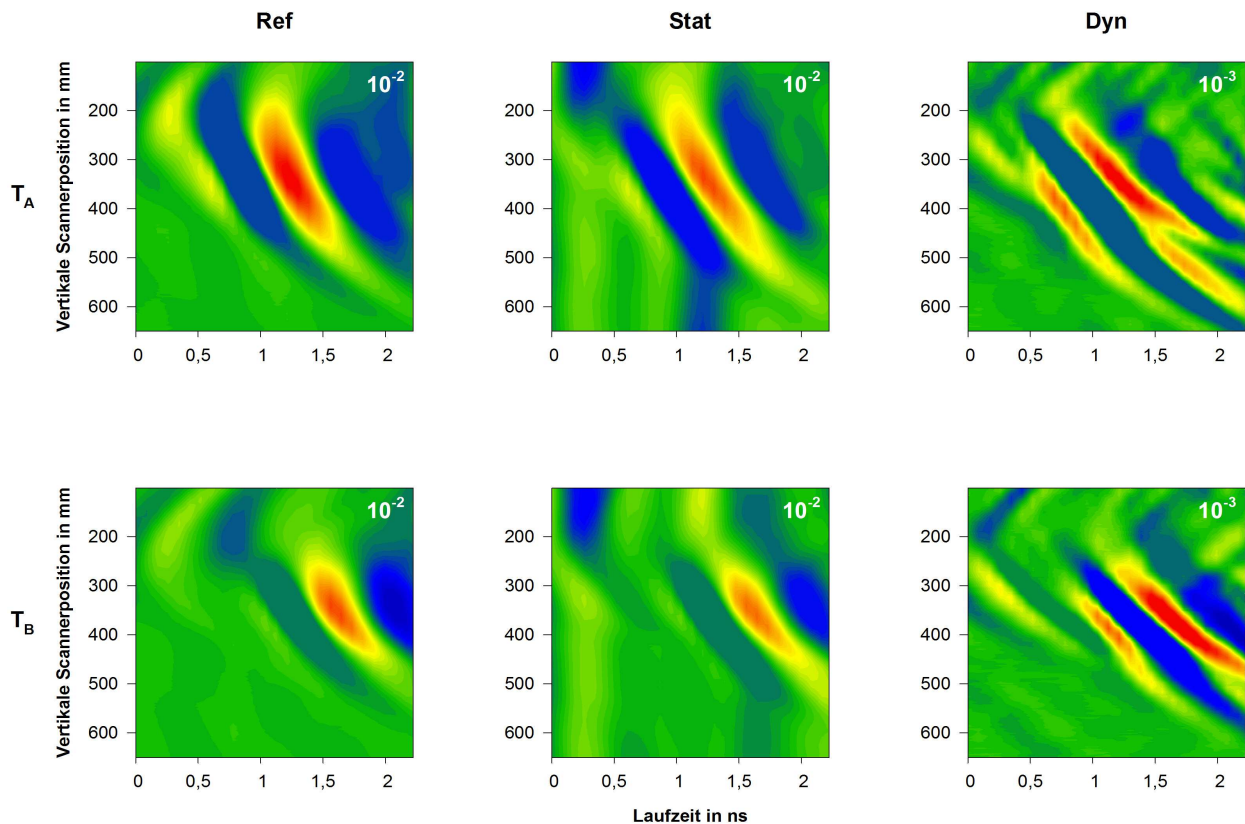


Abbildung 29: Wirkung unterschiedlicher Hintergrundabzugsmechanismen auf die Reflexionsdaten von  $T_A$  (oben) und  $T_B$  (unten). Ref: Abzug einer Referenzmessung, Stat: Statischer Hintergrundabzug, Dyn: Dynamischer Hintergrundabzug mit  $w = 30$ . Die Farbskala ist mit dem angegebenen Wert zu multiplizieren

Beim dynamischen Hintergrundabzug ist jedoch zu beachten, dass diese Methode die ersten und die letzten  $\frac{w}{2}$ -Spalten der Datenmatrix nur unzureichend erfasst, da die volle Fensterbreite hier nicht ausgenutzt werden kann. Bei einer Fensterbreite von 30 kann diese erst ab Spalte 16 voll ausgenutzt werden, da zu diesem Zeitpunkt 30 Spalten (1 bis 5 sowie 31 bis 45) als Nachbarn zur Verfügung stehen. In allen vorherigen Spalten kommt es deshalb zu „Verzerrungen“. Die ersten Spalten der Datenmatrix sind daher unbrauchbar und müssen für eine weitere Analyse verworfen werden. Gleiches gilt für die letzten Spalten der Datenmatrix.

Prinzipiell ist diese Einschränkung nur ein kleineres Problem, da es durch die Wahl einer längeren Scanstrecke kompensiert werden kann. Dies muss jedoch vor Beginn der jeweiligen Messung beachtet und umgesetzt werden, da es nach der Messung nicht mehr korrigierbar ist. Darüber hinaus verlängert sich die Scanzeit aufgrund der längeren Strecke.

Ein weiteres Problem des dynamischen Hintergrundabzugs wird offenbar, wenn die maximalen Reflexionskoeffizienten von  $T_A$  und  $T_B$  im Zielbereich betrachtet werden. Tabelle 8 gibt hierzu einen systematischen Überblick. Es fällt auf, dass die statischen Methoden und der Abzug einer Referenzmessung ein Verhältnis der maximalen Reflexionskoeffizienten  $\left(\frac{r_{max}(T_A)}{r_{max}(T_B)}\right)$  zwischen etwa 1,151 und 1,325 liefern. Das bedeutet, dass  $T_A$  einen wesentlich größeren Anteil an elektromagnetischer Strahlung reflektiert, als  $T_B$ . Da  $T_A$  bei ähnlicher Geometrie eine wesentlich größere Oberfläche aufweist als  $T_B$ , ist dieses Ergebnis nachvollziehbar und entspricht den Erwartungen. Bei Anwendung des dynamischen Hintergrundabzugs verschiebt sich dieses Verhältnis jedoch so stark, dass nun  $T_B$  den höheren maximalen Reflexionskoeffizienten liefert, was zu einem Verhältnis von 0,875 führt.  $T_B$  würde in diesem Fall mehr elektromagnetische Strahlung reflektieren als  $T_A$ , was aber weder der Realität noch der Erwartungshaltung entspricht.

Tabelle 8: Maximale Reflexionskoeffizienten im Zielbereich von  $T_A$  und  $T_B$  ( $r_{max}$ ) nach Anwendung verschiedener Hintergrundabzugsmechanismen sowie deren Verhältnis zueinander  $\left(\frac{r_{max}(T_A)}{r_{max}(T_B)}\right)$ . Für alle Methoden wurde das arithmetische Mittel zur Bildung des Mittelwertes verwendet

Methode	$r_{max}$		$\frac{r_{max}(T_A)}{r_{max}(T_B)}$
	$T_A$	$T_B$	
Referenzmessung	0,0563	0,0425	1,325
Statisch	0,0434	0,0377	1,151
Statisch (nach Time-Gating)	0,0352	0,0295	1,193
Dynamisch ( $w = 30$ )	$6,5293 \cdot 10^{-3}$	$7,4595 \cdot 10^{-3}$	0,875

Die Umkehr dieses Verhältnisses ist also ein Resultat der Fensterbildung bei der Anwendung des dynamischen Hintergrundabzuges. Hierdurch wird der Datenbereich für die Mittelwertbildung offensichtlich derart eingeschränkt, dass der gebildete Mittelwert relativ hoch ausfällt und damit wesentliche Informationen im Zielbereich gelöscht werden. Für die reine Betrachtung der Reflexionen ist dies kein wesentliches Problem. Wie in Abbildung 29 dargestellt, sind sowohl  $T_A$  als auch  $T_B$  bei der Anwendung des dynamischen Hintergrundabzugs (Dyn) eindeutig als Ziele identifizierbar. Im Gegensatz zum Abzug einer Referenzmessung (Ref) oder der Anwendung des statischen Hintergrundabzugs (Stat) sind die Größenunterschiede aber weder in den Kontur-Diagrammen, noch in den Daten eindeutig sichtbar.

### 5.3.2.3 Bewertung der Leistungsfähigkeit der Hintergrundabzüge

Unter den betrachteten statischen Methoden sind nur einige wenige für die Untersuchung von Pflanzenmaterial grundsätzlich geeignet. Das wohl größte Potenzial bietet die Anwendung des arithmetischen Mittels in zweiter Dimension, da hier das höchste  $r_{max}$  zu  $\bar{r}$  Verhältnis unter allen Methoden erzielt wurde. Die Anwendung von Median oder Modus als Mittelwertmethoden führte zu deutlich schlechteren Verhältnissen und ist dem arithmetischen Mittel daher unterlegen. Der Abzug des arithmetischen Mittels liefert immer dann die besten Ergebnisse, wenn Time-Gating und eine Begrenzung der Scanstrecke vor der Applikation des Hintergrundabzugs angewendet wurden.

Im Vergleich mit dem zweidimensionalen Hintergrundabzug lieferte der dreidimensionale Hintergrundabzug wesentliche schlechtere Ergebnisse und ist daher nicht empfehlenswert. Die hier präsentierten Ergebnisse sind jedoch in vielen Dingen auf die sehr spezifische Messkonfiguration zugeschnitten und bilden keine allgemeingültige Aussage. In anderen Messkonfigurationen (z.B. Feldapplikation von GPR) kann die Anwendung der hier unterlegenen Methoden dem arithmetischen Mittel durchaus überlegen sein.

Für eine Quantifizierung der Testobjekte anhand der reflektierten Strahlung ist der dynamische Hintergrundabzug eher ungeeignet, da zu viele Informationen gelöscht werden. Statischer Hintergrundabzug in zweiter Dimension und der Abzug von Referenzmessungen lieferten hier deutlich bessere und nachvollziehbarere Ergebnisse. Während die Anwendung von Median und Modus als Mittelwertbildungsmethoden unbefriedigende Ergebnisse lieferten, zeigte die Anwendung des arithmetischen Mittels durchweg die besten Werte.

Der statische Hintergrundabzug in zweiter Dimension lieferte unter allen Methoden die höchsten  $r_{max}$  zu  $r$  Verhältnisse; vor allem bei vorherigem Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke, so dass diese Methode für das hier vorgestellte Testszenario am besten geeignet zu sein scheint.

Für kleine Reflexionen im Zielbereich und die reine Identifikation des reflektierenden Ziels ist jedoch auch der dynamische Hintergrundabzug geeignet. Dieser liefert mehr Details in Form kleiner Hyperbeln im Reflexionsbereich und macht eine Identifikation des Ziels ebenfalls möglich. Es ist jedoch zu beachten, dass es zu Verzerrungen in den Anfangs- und Endspalten der Datenmatrix, sowie einem erheblichen Informationsverlust im Bereich des eigentlichen Ziels kommt. Eine realistische Abbildung der Größe des Ziels anhand der Daten oder des Reflexionsbildes ist deshalb nicht immer gegeben, so dass der dynamische Hintergrundabzug für quantitative Aussagen ungeeignet ist. Für die Anwendung dieser Methode scheint eine Fenstergröße ( $w$ ) von 30 Spalten optimal zu sein.

### 5.3.3 Eingrenzung des Zeitbereichs

Während die Messungen mit den Testkörpern  $T_A$  und  $T_B$  in trockenem Quarzsand durchgeführt wurden, waren die Zuckerrüben- und Mangoldpflanzen von Quarzsand mit einem Substrat-Wassergehalt zwischen 5,3% vol. und 6,7% vol. umgeben. Die Reflexionscharakteristik der unterirdischen Pflanzenteile unterschied sich damit wesentlich von der Reflexionscharakteristik der Testobjekte und vor allem das Auffinden des substratgefüllten Teils des Pflanzgefäßes erwies sich oft als schwierig. Dies liegt vor allem daran, dass die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen im Raum vom RADAR-System als Funktion über die Zeit und nicht über die Entfernung ausgegeben wird. Für eine korrekte Identifikation der Reflexionen eines Ziels ist die Kenntnisse der ungefähren Lage im Zeitbereich deshalb eine große Hilfe, zumal diese Lage auch für die Grenzen des Zeitbereichs beim Time-Gating (vgl. Kapitel 5.3.1) wichtig ist.

Die Ergebnisse der Methode zur Bestimmung dieses Zeitbereichs bzw. Zeitfensters werden in Abbildung 30 gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Metallplatte, unabhängig von ihrer Position im Pflanzgefäß, starke Reflexionen auslöst, was auf den starken dielektrischen Gradienten zum umgebenden Substrat und ihre Abmessungen zurückzuführen ist. Liegt die Platte vorne an der Innenwand des Pflanzgefäßes an (MPV), so entsteht ein relativ starkes hyperbelartiges Reflexionsphänomen im Zeitbereich um 0,5 ns zwischen 250 und 400 mm vertikaler Scannerposition. Wird die Metallplatte an der Rückseite des Pflanzgefäßes in das Substrat eingebracht (MPR), ändert sich die Reflexionscharakteristik.



Im Vergleich zum reinen Substrat ohne Metallplatte (SUB) bildet sich ein Reflexionspeak bei etwa 3,5 ns und zwischen 300 und 500 mm vertikaler Scannerposition aus.

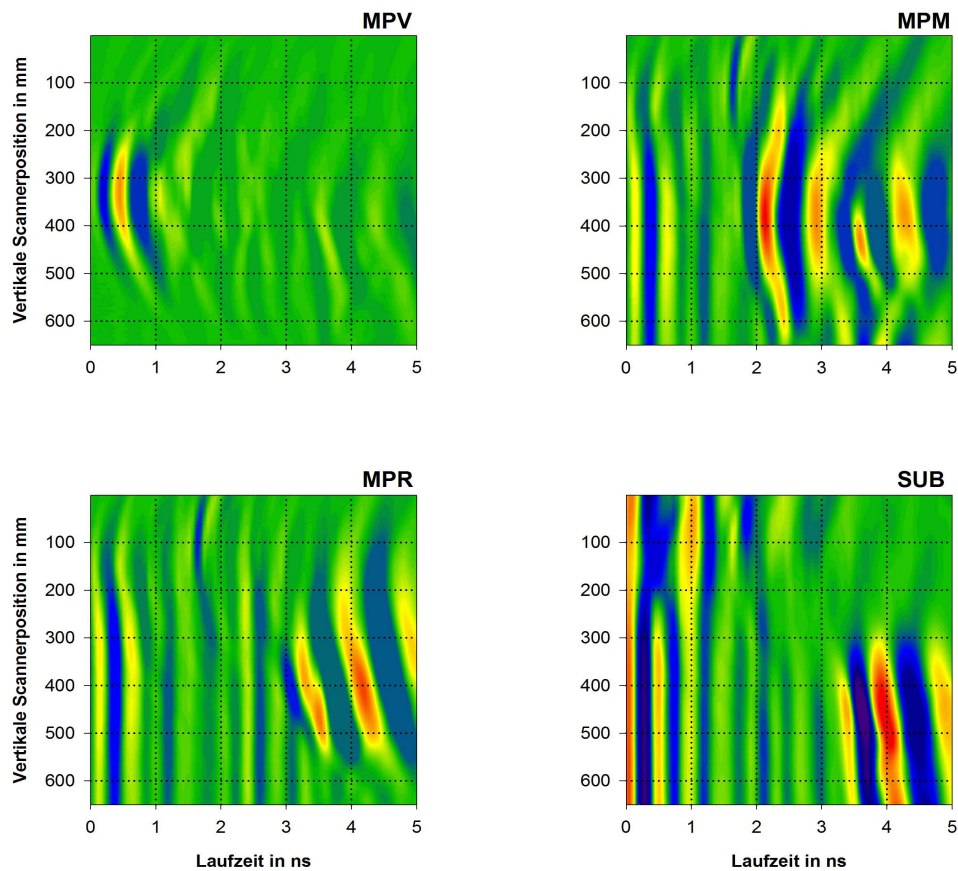


Abbildung 30: Reflexionsdaten einer Metallplatte, die jeweils an der Vorder- (MPV) und Rückseite (MPH) sowie im Zentrum des Pflanzgefäßes in das Substrat eingebracht wurde. SUB: Messung des Substrats ohne Metallplatte ( $n = 5$ )

Beide Varianten (MPV und MPR) zeigen damit denjenigen Zeitbereich auf, der dem substratgefüllten Teil des Pflanzgefäßes entspricht. Bei dem gemessenen Substrat-Wassergehalt von etwa 6,4% vol. liegt dieser zwischen 0,5 und 3,5 ns und damit in einem Zeitfenster von ca. 3 ns. Zur Verifizierung dieser Aussage kann dasjenige Reflexionsphänomen herangezogen werden, welches entsteht, wenn die Metallplatte in mittlerer Position (MPM) in das Pflanzgefäß eingebracht wird. Wie in Abbildung 30 dargestellt, entsteht bei dieser Variante ein markantes Reflexionsphänomen bei etwa 2,1 ns zwischen 300 und 450 mm vertikaler Scannerposition.

Gemäß dem zuvor definierten Zeitfenster wäre eine Reflexion der Metallplatte bei mittlerer Position nach der Hälfte des definierten Zeitfensters, also nach 1,5 ns an einer Position um 2 ns im Zeitbereich zu erwarten. Diese Annahme stimmt mit der Messung der Variante MPM bis auf 0,1 ns überein. Diese kleine Differenz kann auf Ungenauigkeiten bei der Positionierung der Metallplatte im Pflanzgefäß zurückgeführt werden.

Die hier skizzierten Phänomene können auch bei einer Messung des reinen Substrats beobachtet werden. Wie in Abbildung 30 dargestellt wird, entstehen auch bei der Messung des reinen Substrats (SUB) diverse Reflexionsphänomene. Neben dem Antennenübersprechen (Crosstalk), das relativ konstant um 0 ns auftritt ist im Bereich um 0,5 ns ab 300 mm vertikaler Scannerposition ein markanter Reflexionspeak zu beobachten, der sich bis zum Abschluss des Scanvorgangs bei 650 mm fortsetzt. Hierbei handelt es sich um die Vorderseite des Pflanzgefäßes, die erste Reflexionen auslöst, sobald sie von den elektromagnetischen Wellen getroffen wird. Die Tatsache, dass dieses Phänomen erst ab 300 mm auftaucht, unterstützt zusammen mit der Messung der Variante MPV diese Annahme, da etwa ab dieser Position die gesamte Fläche der Sendeantenne ( $T_x$ ) vor dem substratgefüllten Teil des Pflanzgefäßes liegt. Weitere markante Reflexionen finden sich ab etwa 3,5 ns ebenfalls ab 300 mm, was die Vermutung nahelegt, dass es sich hierbei um die Rückseite des Pflanzgefäßes handelt. Auf der Grundlage der Variante MPR wird diese in einem ähnlichen Zeitbereich vermutet.

Zusammenfassend kann auf der Grundlage dieser Ergebnisse der Zeitbereich, in dem mit hoher Wahrscheinlichkeit Reflexionen der unterirdischen Pflanzenteile zu erwarten sind, eingeschränkt werden. Aus einem Zeitfenster von ursprünglich 27,78 ns (0 ns ... 27,78 ns) kann so ein Bereich von 3 ns (0,5 ns ... 3,5 ns) isoliert werden, der für die weitere Analyse relevant ist. Gemessen am ursprünglichen Zeitfenster kann der Datenumfang damit um bis zu 89,2% reduziert werden. Darüber hinaus werden unerwünschte Reflexionen, die z.B. durch Antennenübersprechen oder durch andere im Messraum befindliche Gegenstände ausgelöst werden, effektiv entfernt, wenn sie außerhalb dieses Zeitfensters liegen. Die Eingrenzung des Zeitbereichs leistet damit einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion des Datenumfangs und damit zur Beschleunigung der Datenverarbeitung.

Es ist jedoch zu beachten, dass die hier gezeigten Ergebnisse nur für einen Substrat-Wassergehalt um 6,4% vol., PVC-Versuchsgefäße mit einem Außendurchmesser von 250 mm und einen Antennenabstand von 90 mm zur Gefäßoberfläche (bei horizontaler Polarisation) gelten. Wenn sich der Substrat-Wassergehalt und damit die dielektrischen Eigenschaften des Bodens wesentlich ändern, ist unter Umständen eine Anpassung des hier definierten Zeitfensters notwendig.

Bei geringerem Substrat-Wassergehalt kann es entsprechend kleiner ausfallen, bei höherem Substrat-Wassergehalt ist eine Vergrößerung notwendig. Gleiches gilt für eine Veränderung der Versuchsanordnung: Sobald Gefäße mit anderem Durchmesser oder aus anderem Material verwendet werden, muss das Zeitfenster ebenso angepasst werden, wie bei einer Modifikation des Antennenabstandes und der Polarisation. Gleiches gilt auch bei der Verwendung eines anderen Substrates.

### 5.3.4 Anwendung der Hilbert-Transformation

Wie bereits in Kapitel 4.7.3 erläutert, weist die Anwendung der Hilbert-Transformation auf die RADAR-Daten unterschiedliche Vorteile auf. Um diese zu illustrieren, sind in Abbildung 31 Reflexionsdaten und Hilbert-transformierte Reflexionsdaten von drei unterschiedlichen Testszenarien als Kontur-Diagramme dargestellt.

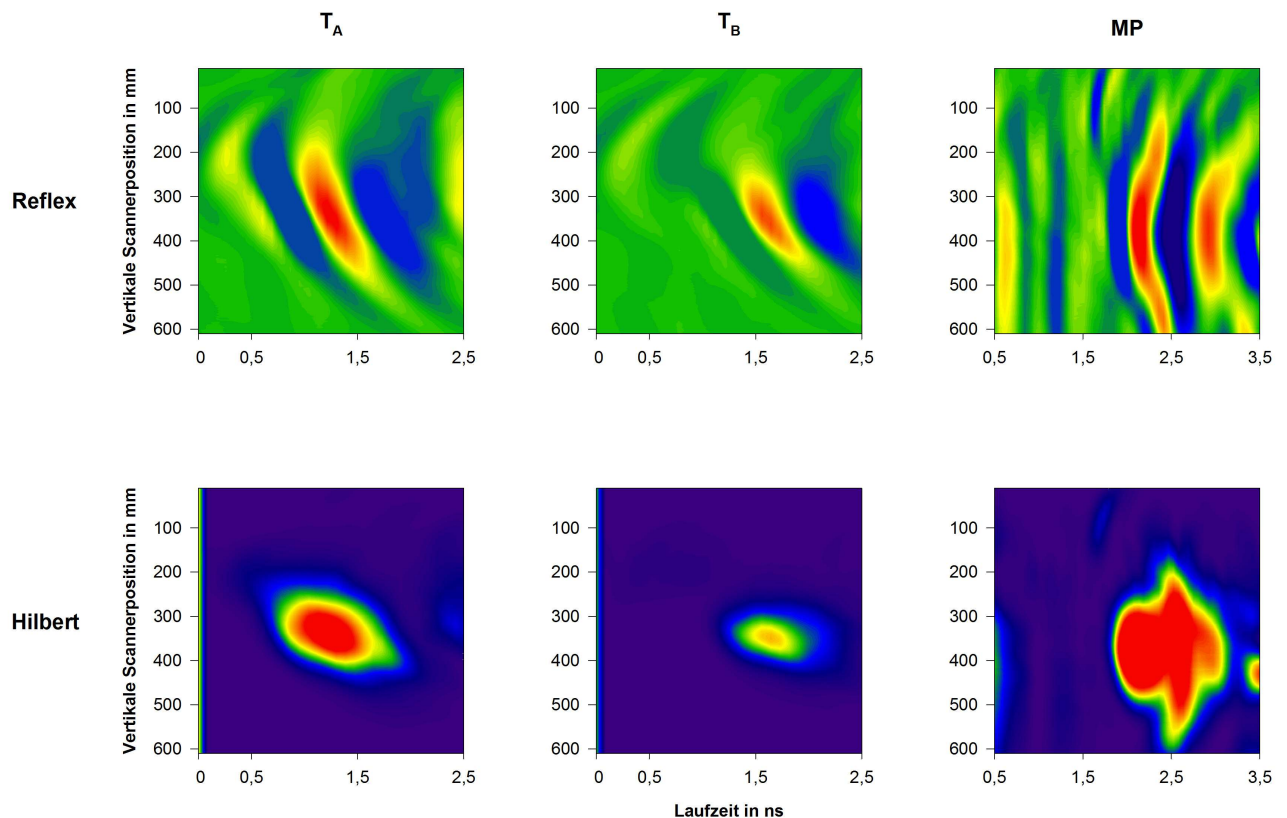


Abbildung 31: Wirkung der Hilbert-Transformation (Hilbert) auf die Reflexionsdaten (Reflex) von T<sub>A</sub>, T<sub>B</sub> und einer Metallplatte (MP) in mittlerer Position im Versuchsgefäß (vgl. Kapitel 5.3.3)

Schon in den Reflexionsdaten lassen sich markante Unterschiede zwischen den verschiedenen Testszenarien ( $T_A$ ,  $T_B$  und MP) feststellen. Nach Bildung des quadratischen Absolut-Wertes der Hilbert-transformierten Daten ( $|H(r)|^2$ ) im unteren Bereich werden die Unterschiede allerdings noch deutlicher. Bei gleicher Farbskalierung bildet die Metallplatte das markanteste Reflexionspeak, während  $T_A$  und  $T_B$  zwar ebenfalls eindeutig im Reflexionsspektrum zu identifizieren sind, jedoch deutlich schwächere Reflexionspeaks auslösen.

Wenn das arithmetische Mittel der gewählten Testszenarien über die Zeit gebildet wird, wird noch deutlicher, dass die Hilbert-Transformation zu einer einfacheren Interpretation des Reflexionsspektrums beitragen kann. Dieser Umstand ist in Abbildung 32 dargestellt.

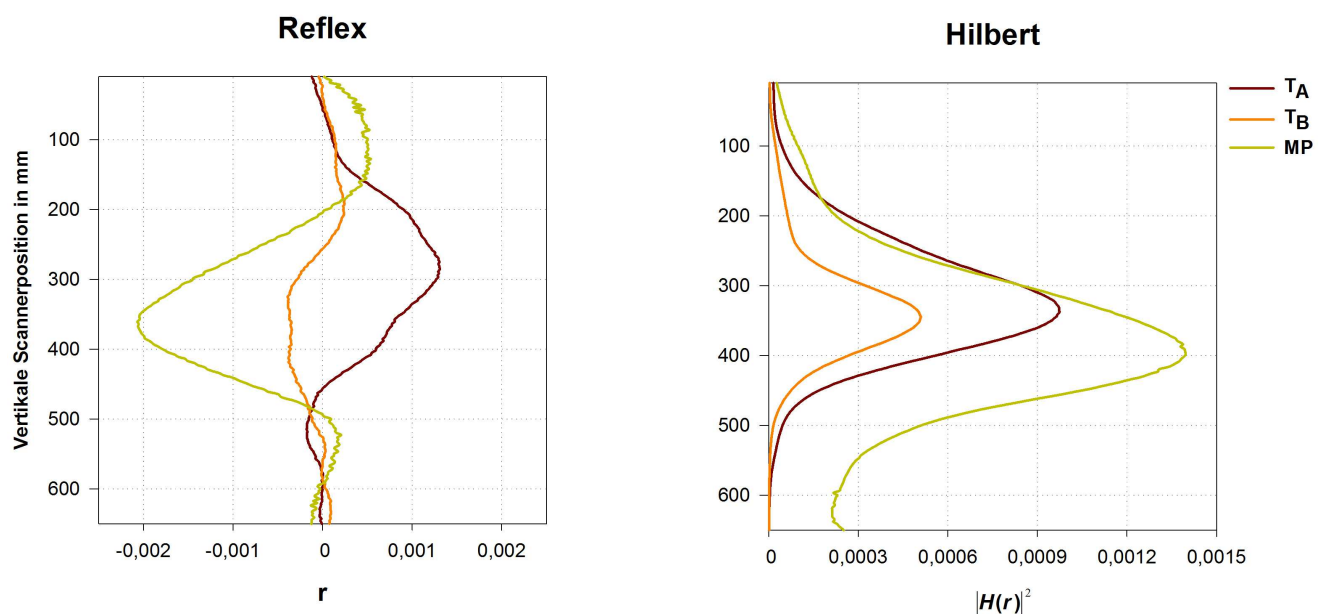


Abbildung 32: Mittelwert der Reflexionsdaten aus Abbildung 31. Reflex: Reflexionsdaten, Hilbert: Quadratischer Absolut-Wert der Hilbert-Transformierten Reflexionsdaten ( $|H(r)|^2$ ). Die Mittelung erfolgte über die Laufzeit

Es ist deutlich zu sehen, dass bei Betrachtung der reinen Reflexionsdaten (Reflex) keine eindeutigen Unterschiede feststellbar sind, da sowohl positive als auch negative Peaks in den Daten vorhanden sind. Nach der Hilbert-Transformation sind die Peaks ausschließlich positiv und eindeutig identifizierbar. Darüber hinaus sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten quantifizierbar und deren Reihenfolge entspricht den Erwartungen.

Die Hilbert-Transformation ist deshalb ein sehr gutes Instrument, um Reflexionsphänomene aus dem Reflexionsspektrum noch besser zu isolieren. Sie kann deshalb auch für die Untersuchung des Wurzelmaterials eine sinnvolle Hilfe darstellen, zumal die Vorzüge dieser Transformation auch in anderen Studien an Zuckerrüben (KONSTANTINOVIC, 2007) und an Baumwurzeln (BUTNOR et al., 2003) nachgewiesen wurden.

### **5.3.5 Anwendung der Datenverarbeitungs- und Datenbereinigungsmechanismen auf Zuckerrübenpflanzen**

Unter den bisher betrachteten Bedingungen wurden die unterschiedlichen Verfahren ausschließlich auf Daten angewendet, die mit Hilfe von Testobjekten generiert wurden. Natürliches Pflanzenmaterial unterscheidet sich jedoch in vielerlei Hinsicht von diesen idealisierten Testkörpern derart, dass eine Überprüfung der vorgestellten Methoden an Pflanzenmaterial notwendig ist. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Anwendung dieser Methoden deshalb anhand einiger ausgewählter Radargramme an Zuckerrüben dargestellt werden. Um die Datenmenge auf ein vertretbares Maß zu reduzieren, wurden im Folgenden nur die Reflexionsdaten der Zuckerrüben Z 1/7 und Z 2/5 von den Untersuchungsterminen 23.05.2012, 22.06.2012 und 24.07.2012 verwendet.

Grundsätzlich finden sich diverse Reflexionscharakteristika, die bereits bei der Eingrenzung des Zeitbereichs auffielen (vgl. Kapitel 5.3.3), auch bei der Untersuchung von Zuckerrüben wieder. Abbildung 33 zeigt hierzu das arithmetische Mittel aller aufgenommenen Winkel von Zuckerrübe Z 2/5 und einer entsprechenden Referenzmessung.

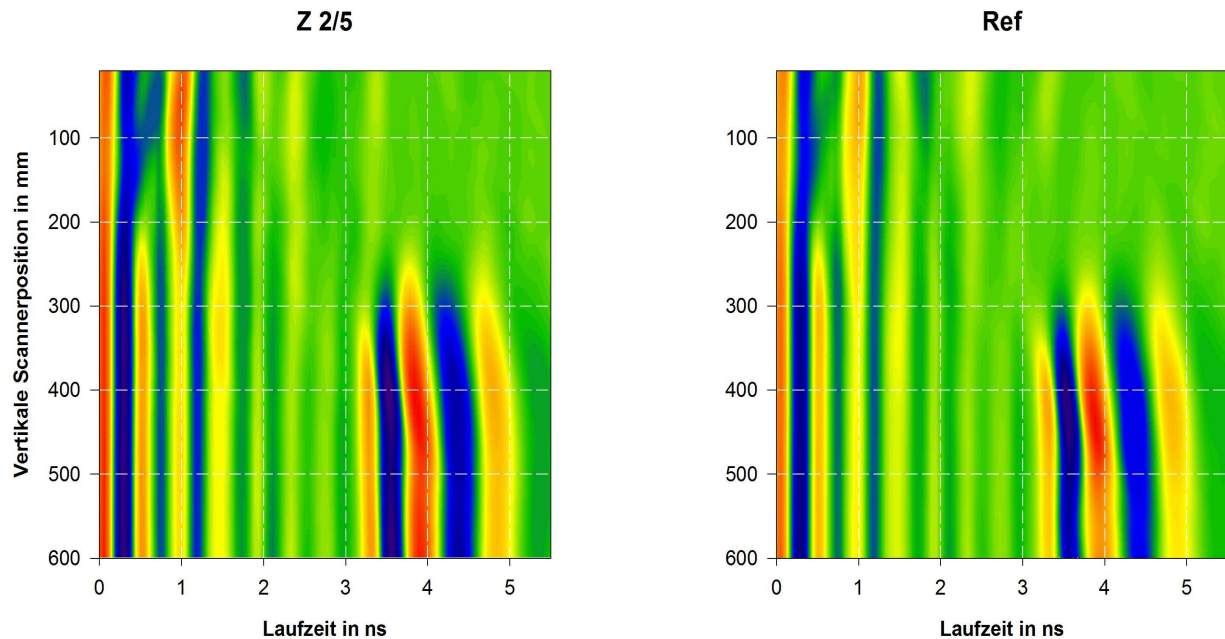


Abbildung 33: Arithmetisches Mittel aller Einzelaufnahmen (B-Scans) von Zuckerrübe Z 2/5 und einer Referenzmessung (Ref). Aufnahmedatum: 22.06.2012,  $d_{max}$ : 64,5 mm ( $n = 19$ )

Hierbei handelt es sich um Rohdaten, die nicht weiter verarbeitet wurden. Trotzdem sind bereits einige Charakteristika in beiden Kontur-Diagrammen erkennbar. So zeigt sich um 0 ns eine durchgängige Reflexionsbande, die auf das Antennenübersprechen (Crosstalk) zurückgeführt werden kann. Bei 0,5 ns findet sich im Bereich von etwa 250 bis 600 mm ebenfalls eine durchgängige Reflexionsbande, die auf Reflexionen an der Vorderseite des Pflanzgefäßes hindeutet. Im gleichen Streckenbereich finden sich ähnliche Reflexionen um 3,3 ns, die die Rückseite des Pflanzgefäßes repräsentieren. Diese Charakteristika zeigen sich in ähnlicher Ausprägung und Stärke in beiden Fällen. Größere Abweichungen von der Referenzmessung zur Zuckerrübe finden sich im Bereich um 1 ns von 20 bis 200 mm (Reflexionen an Blattwerk, Rübenkopf und Substratoberfläche) und um 1,5 ns im Bereich von 200 bis 400 mm (Reflexionen am Rübenkörper). Speziell die Reflexionen am Rübenkörper sind allerdings, im Verhältnis zu den übrigen Reflexionen, nur sehr schwach ausgeprägt.

Betrachtet man den Zeitbereich, in dem sich die Reflexionen der Zuckerrübe finden, so ergeben sich deutliche Parallelen zur Messung der Metallplatte in Kapitel 5.3.3. Der Zeitbereich, in dem das gesuchte Objekt (Metallplatte) vermutet wurde, wurde in diesen Versuchen auf den Bereich von 0,5 bis 3,5 ns festgelegt. In den Daten aus Abbildung 33 stimmt dieser Bereich mit den Messungen an der Metallplatte weitgehend überein. Die Vorderseite des Pflanzgefäßes ist hier bei 0,5 ns zu finden, die Rückseite bei etwa 3,2 ns.

Eine Anwendung des definierten Zeitfensters ist also problemlos möglich, die obere Grenze (Rückseite des Pflanzgefäßes) sollte allerdings auf 3,2 ns vorverlegt werden. Bei idealer Zentrierung des Rübenkörpers im Pflanzgefäß wären Reflexionen von diesem im Bereich um 2 ns zu vermuten. Tatsächlich treten allerdings schon bei 1,5 ns Reflexionen auf, was auf die größere Breite des Rübenkörpers im Vergleich zur Metallplatte zurückzuführen ist. Da die Reflexionen des Rübenkörpers allerdings relativ schwach ausgeprägt sind, scheint eine Bereinigung der Daten mittels Hintergrundabzug sowie eine Eingrenzung des Zeitfensters sinnvoll.

Die Wirkung des Hintergrundabzugs wird in Abbildung 34 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Reflexionen der Zuckerrüben Z 2/5 und Z 1/7 an drei unterschiedlichen Aufnahmetermen mit Hilfe dieses Mechanismus sichtbar gemacht werden konnten. Beide Zuckerrüben verursachen Reflexionen, die mit zunehmender Wachstumsdauer (späteres Aufnahmedatum) tendenziell zunehmen. Die Reflexionen liegen in beiden Fällen im Bereich von etwa 250 bis 450 mm Scanstrecke und im Zeitbereich um 1,5 ns (Z 2/5) bzw. 1,8 ns (Z 1/7). In beiden Fällen wurde die Scanstrecke im Diagramm auf 165 bis 460 mm und im Zeitbereich auf 0,7 bis 3 ns begrenzt, um Störreflexionen außerhalb dieses Fensters zu unterdrücken.

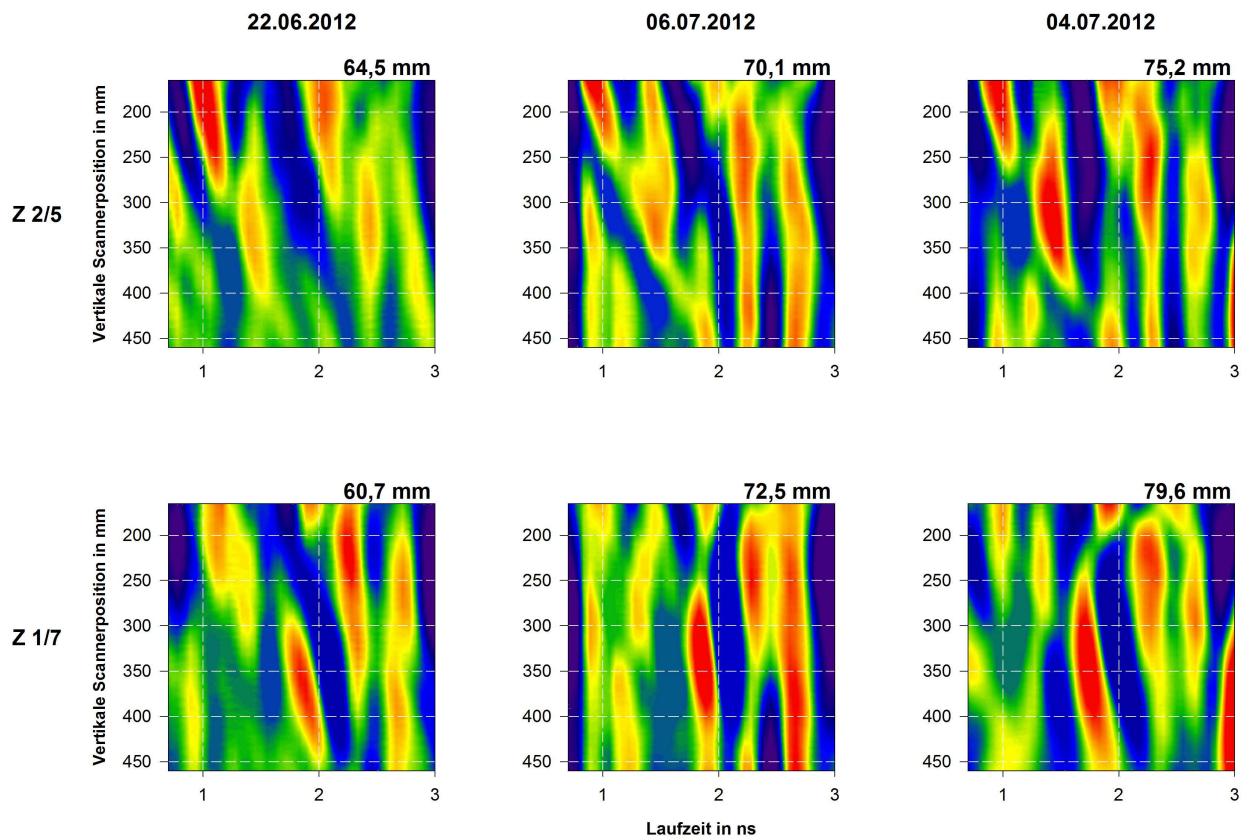


Abbildung 34: Arithmetisches Mittel der Reflexionsdaten von Z 2/5 und Z 1/7 zu unterschiedlichen Aufnahmeterminen. Von den Reflexionsdaten wurde jeweils eine Referenzmessung abgezogen. Die Maßangaben beziehen sich auf den jeweils ermittelten maximalen Durchmesser ( $d_{max}$ ) der Zuckerrüben ( $n = 19$ )

Die Wirkung des in Kapitel 5.3.2.1 beschriebenen, statischen Hintergrundabzugs in zweiter Dimension ist in Abbildung 35 dargestellt. Es ist sowohl im Falle von Z 2/5 als auch im Falle von Z 1/7 zu erkennen, dass die Reflexionen der Rübenkörper an jedem Aufnahmedatum zuverlässig isoliert werden konnten. Die Reflexionen lagen dabei in einem ähnlichen Zeitbereich, wie beim Abzug einer Referenzmessung. Die Scanstrecke, in der sich die Reflexionen befanden, ist jedoch etwas begrenzter und bewegte sich in einem Bereich von etwa 300 bis 400 mm, teilweise auch bis 450 mm. Eine Zunahme der Reflexionskoeffizienten mit dem Aufnahmedatum, wie sie aufgrund der zunehmenden Größe der Rübenkörper zu erwarten wäre, war allerdings nicht immer gegeben, was wahrscheinlich der Bildung des Mittelwerts geschuldet ist. Dadurch, dass dieser individuell für jede Aufnahme gebildet wurde, wurde kein konstanter Wert von den Rohdaten abgezogen, wie es beim Abzug der Referenzmessung der Fall war.



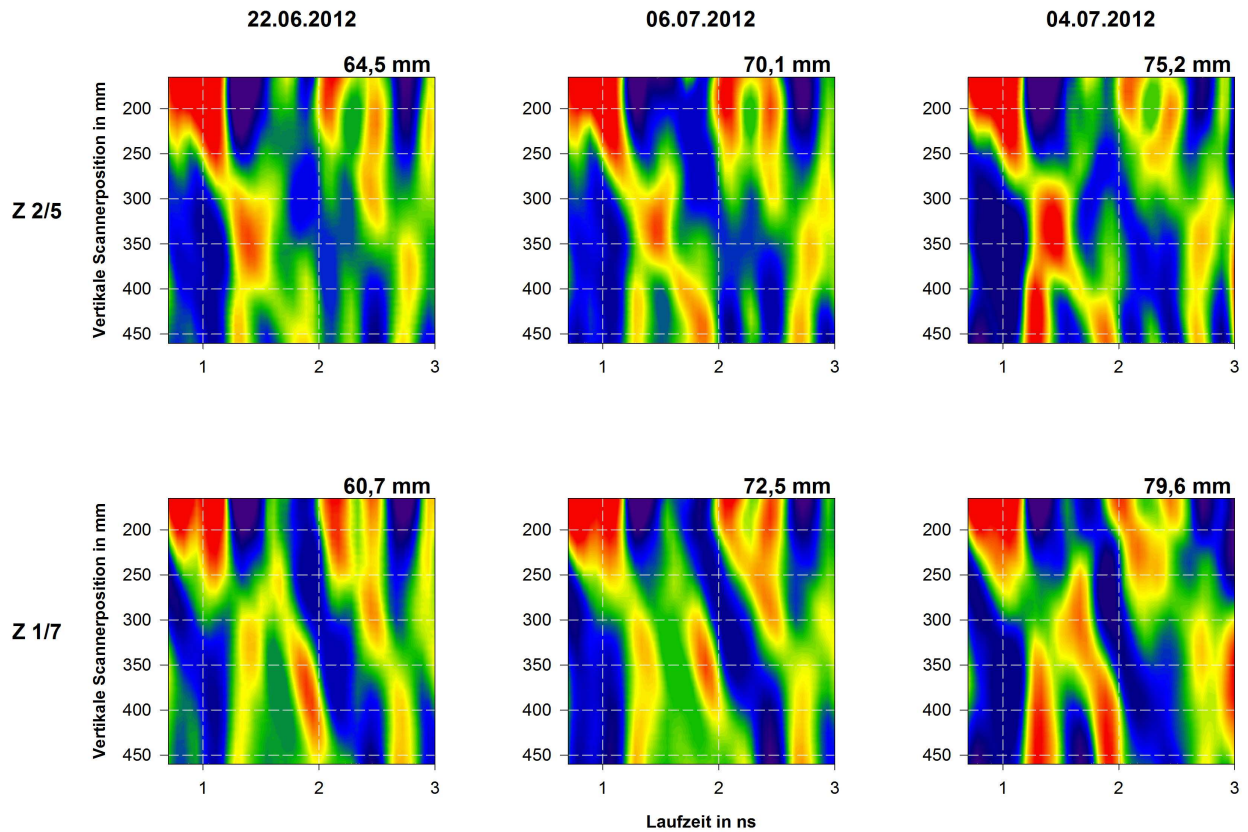


Abbildung 35: Arithmetisches Mittel der Reflexionsdaten von Z 2/5 und Z 1/7 zu unterschiedlichen Aufnahmetermi- nen. Von den Reflexionsdaten wurde jeweils das arithmetische Mittel in zweiter Dimension nach Begrenzung der Scanstrecke und Time-Gating abgezogen. Die Maßangaben beziehen sich auf den jeweils ermittelten maximalen Durchmesser ( $d_{max}$ ) der Zuckerrüben ( $n = 19$ )

Zur Isolierung der Reflexionen der Rübenkörper aus den Daten ist der Abzug des arithmetischen Mittels in zweiter Dimension dennoch geeignet, zumal der Messaufwand für diese Methode deutlich geringer ist. Es muss jedoch auch beachtet werden, dass etwaige quantitative Auswertungen nach der Anwendung dieser Methode verfälscht werden können.

Die Wirkung der Hilbert-Transformation auf die Reflexionsdaten nach dem Hintergrundabzug ist in Abbildung 36 (Referenzabzug) und Abbildung 37 (Abzug des arithmetischen Mittels in zweiter Dimension) dargestellt. Es ist in beiden Fällen zu erkennen, dass durch die Hilbert-Transformation tendenziell eher Störreflexionen als die Reflexionen der Rübenkörper hervorgehoben werden. Die Tatsache, dass Diese stärker ausfielen, als die Reflexionscharakteristika der Rübenkörper ist nicht überraschend, heißt aber im Umkehrschluss, dass die Hilbert-Transformation für eine qualitative Analyse der Reflexionscharakteristika der Rübenkörper ungeeignet ist.

Vor allem beim Referenzabzug (Abbildung 36) zeigen sich bei Z 1/7 zwar auch positive Beispiele für die Anwendung der Hilbert-Transformation, dies lässt sich jedoch nicht generalisieren, so dass deren Anwendung im Einzelfall geprüft werden muss.

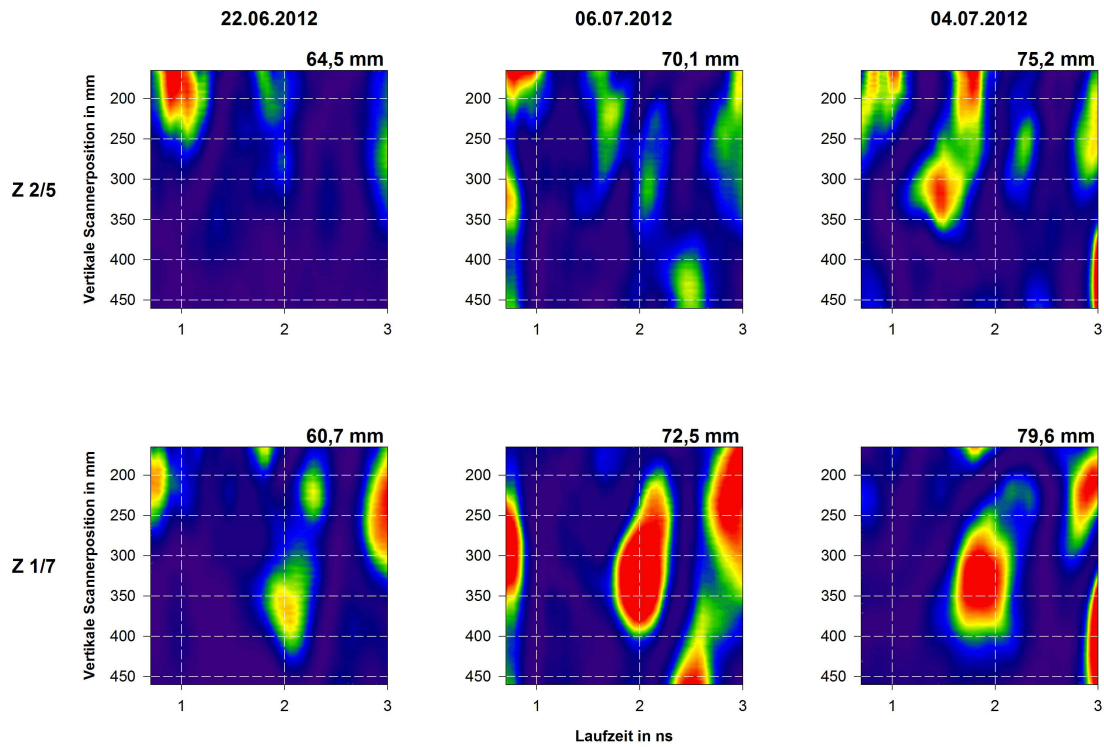


Abbildung 36: Hilbert-Transformation der Daten aus Abbildung 34

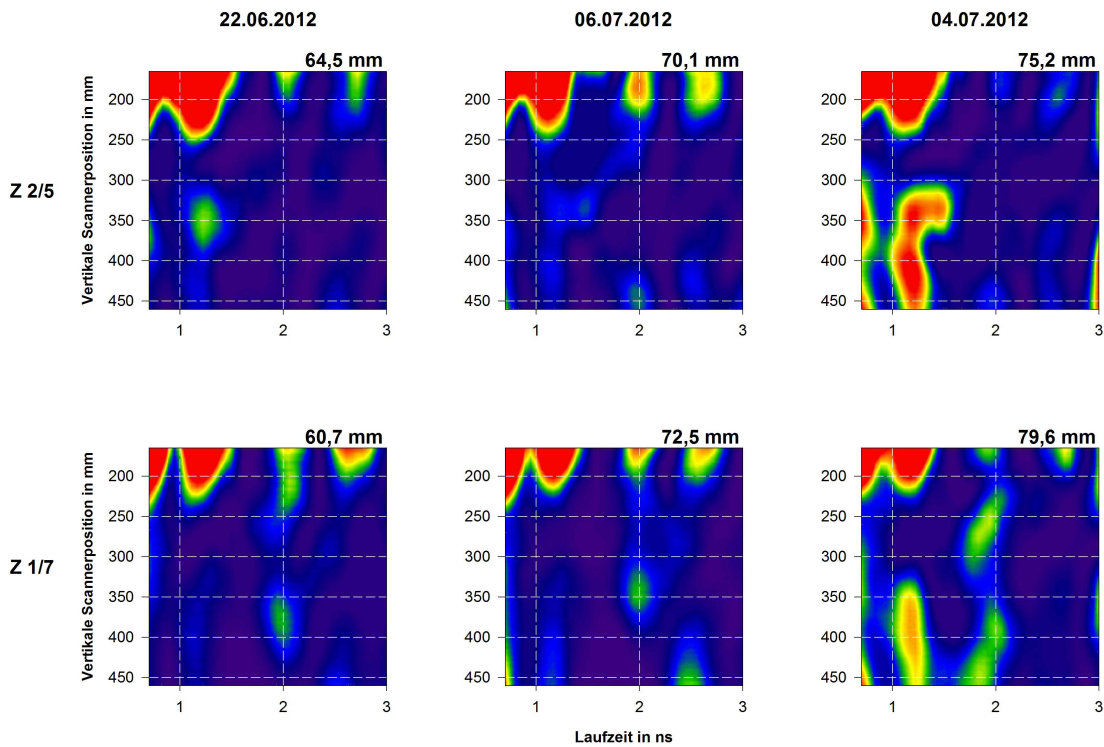


Abbildung 37: Hilbert-Transformation der Daten aus Abbildung 35

### **5.3.6 Zusammenfassende Bewertung der Leistungsfähigkeit der gewählten Methoden**

Die Anwendung des Hintergrundabzugs, sowie die Begrenzung der Scanstrecke und auch das Time-Gating haben einen positiven Einfluss auf die Isolierung der Reflexionen der Rübenkörper. Für den Hintergrundabzug sind dabei sowohl der Referenzabzug als auch der Abzug des arithmetischen Mittels in zweiter Dimension geeignet. Bei letzterer Methode ist jedoch zu beachten, dass es zu einer Verfälschung der Reflexionskoeffizienten bei einer quantitativen Auswertung der Daten kommen könnte. Die Hilbert-Transformation der Daten zeigte für eine Identifizierung der Reflexionen nur unzureichende Ergebnisse, da eher Störreflexionen an Stelle der Reflexionen der Rübenkörper hervorgehoben wurden.

Die positive Wirkung des Hintergrundabzugs auf die Reflexionsdaten wurde, speziell bei der Untersuchung von Pflanzenmaterial, bereits in früheren Untersuchungen von KONSTANTINOVIC (2007) und BUTNOR et al. (2001 & 2003) bestätigt, so dass bei den hier präsentierten Ergebnissen eine hohe Übereinstimmung vorliegt. In allen drei genannten Untersuchungen, wurde jedoch auch die Hilbert-Transformation zur Datenverarbeitung erfolgreich angewendet, was im Gegensatz zu den hier gezeigten Ergebnissen steht.

In diesen, wie auch in anderen Untersuchungen, wurde das verwendete GPR-System jedoch stets im Feld oder unter feldähnlichen Bedingungen eingesetzt und nicht auf Basis von einzelnen Pflanzgefäßen, so dass das Bodenmaterial in Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Wellen weniger begrenzt war. Das Problem starker Reflexionen an der Rückseite des Pflanzgefäßes entfiel damit. Bei der Untersuchung von Baumwurzeln durch BUTNOR et al. (2001 & 2003) gab es außerdem keine Probleme mit den Reflexionen an oberirdischem Pflanzenmaterial (Blattwerk), da die Antennen direkt auf den Boden aufgesetzt wurden. KONSTANTINOVIC (2007) zeigte in seinen Untersuchungen, dass die oberirdische Biomasse, in Form von Blättern oder Blattstielen, für die Identifikation des Rübenkörpers im Boden ein Problem darstellt, da es zur Überlagerung der jeweiligen Signale kam. Erst nach der Entfernung des Blattwerks war eine zuverlässige Detektion der Rübenkörper, in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften, überhaupt möglich.

## 5.4 Untersuchung des Pflanzenmaterials unter Gewächshausbedingungen

### 5.4.1 Qualitative Analyse der Zuckerrüben-Reflexionsdaten

Die qualitative Analyse der Reflexionsdaten der untersuchten Zuckerrüben hatte zum Ziel festzustellen, ob bei den Reflexionsdaten der Zuckerrübenpflanzen Reflexionsmuster zu erkennen sind, die eine Identifikation des Rübenkörpers innerhalb des Datenarrays erlauben.

Aufgrund der hohen Datenmengen können jedoch nicht alle Ergebnisse der Zuckerrübenanalyse im Detail dargestellt werden. Die Darstellung wird sich deshalb im Folgenden auf vier ausgewählte Zuckerrüben beschränken, von denen jeweils drei unterschiedliche Aufnahmewinkel (40°, 160°, 300°) dargestellt werden. Die gewählten Zuckerrüben repräsentieren dabei den gesamten Größenbereich vom größten gemessenen Kopfdurchmesser (Z 1/5) über zwei Zwischengrößen (Z 1/10, Z 2/1) bis zum kleinsten gemessenen Kopfdurchmesser (Z 1/4). Alle Zuckerrüben werden zu drei unterschiedlichen Messterminen dargestellt, die den Anfang der regulären Messungen (02.05.2012), deren Ende (27.08.2012) und einen Zwischentermin (06.06.2012) markieren. Eine Übersicht über die Entwicklung der einzelnen Zuckerrüben findet sich in Tabelle 9.

Tabelle 9: Entwicklung von  $d_{max}$  der ausgewählten Zuckerrüben an drei unterschiedlichen Untersuchungsterminen

Zuckerrübe Nr.	$d_{max}$ [mm]		
	02.05.2012	06.06.2012	27.08.2012
Z 1/4	13,7	15,6	28,7
Z 1/5	40,9	60,8	91,7
Z 1/10	34,7	50,3	87
Z 2/1	26,5	36,9	76,8

Die Reflexionsdaten der Rübenkörper vom ersten Untersuchungstermin (02.05.2012) werden für alle betrachteten Zuckerrüben in Abbildung 38 dargestellt. Bei diesem Untersuchungstermin wiesen alle betrachteten Zuckerrüben den jeweils kleinsten maximalen Durchmesser ( $d_{max}$ ) aller Untersuchungstermine auf.

Beim ersten Untersuchungstermin fällt auf, dass im Bereich um 1 ns und einer Scanstrecke bis 200 mm relativ starke Reflexionsphänomene bei allen Zuckerrüben und allen betrachteten Winkeln vorhanden sind. Das Muster dieser Reflexionsphänomene ändert sich zwar geringfügig, wenn andere Aufnahmewinkel oder Zuckerrüben betrachtet werden, die Position bleibt jedoch relativ konstant. Das legt den Schluss nahe, dass es sich hierbei um Reflexionen handelt, die vom Rübenkopf (oberirdischer Teil der Zuckerrübe), dem Blattwerk der Zuckerrübe, sowie der Oberfläche des Substrates resultieren. Im weiteren Bereich ist eine markante Reflexionsbande um 0,5 ns zwischen etwa 250 und 480 mm vorhanden, die ebenfalls in allen dargestellten B-Scans auftritt. Hierbei handelt es sich um Reflexionen an der Oberfläche des Pflanzgefäßes.

Reflexionen des unterirdischen Teils der Zuckerrüben (Speicherwurzeln) wären nach den Ergebnissen aus Kapitel 5.3.3 im Bereich um 2 ns zu erwarten. Da die Dicke der Speicherwurzel die Dicke der in jenen Versuchen eingesetzten Metallplatte jedoch übersteigt, ist mit diesen Reflexionen bereits in früheren Zeitbereichen, also zwischen 0,8 und maximal 2 ns ab einer vertikalen Scannerposition von 250 bis 300 mm zu rechnen. Solche Reflexionen sind bei dem gezeigten Untersuchungstermin allerdings nur partiell und nicht für alle Rüben sichtbar. Bei der kleinsten der untersuchten Rüben (Z 1/4) zeigt sich nur in der 40°-Aufnahme eine kleinere Reflexion zwischen 300 und 450 mm bei etwa 1,8 bis 1,9 ns, die dem unterirdischen Teil des Rübenkörpers zugeordnet werden könnte. In den Folgeaufnahmen findet sich diese Reflexion jedoch nicht. Z 1/5, die Zuckerrübe mit dem höchsten  $d_{max}$ , zeigt eine solche Reflexion bei etwa 1,5 ns zwischen 300 bis maximal 500 mm bei den Aufnahmewinkeln 40° und 300°. Die dabei sichtbaren Korrelationskoeffizienten weisen im Vergleich zu Z 1/4 ähnliche Werte bei etwas anderer Ausprägung auf. Die beiden übrigen Zuckerrüben weisen mit 34,7 mm (Z 1/10) bzw. 26,5 mm (Z 2/1) maximale Kopfdurchmesser auf, die zwischen den Werten von Z1/4 und Z 1/5 liegen. Trotz geringerem  $d_{max}$  als Z 1/5 zeigen auch diese Zuckerrüben in einem Teil der Aufnahmen Reflexionsphänomene, die dem Wurzelkörper zugeordnet werden können. Bei Z 1/10 ist dies bei der Aufnahme aus 300° deutlich und bei 40° etwas schwächer zu erkennen. Die kleinere der beiden Rüben (Z 2/10) zeigt dagegen nur bei 300° ein markantes Reflexionsphänomen in diesem Bereich. In beiden Fällen liegen die Reflexionen im Zeitbereich um 1,5 ns.

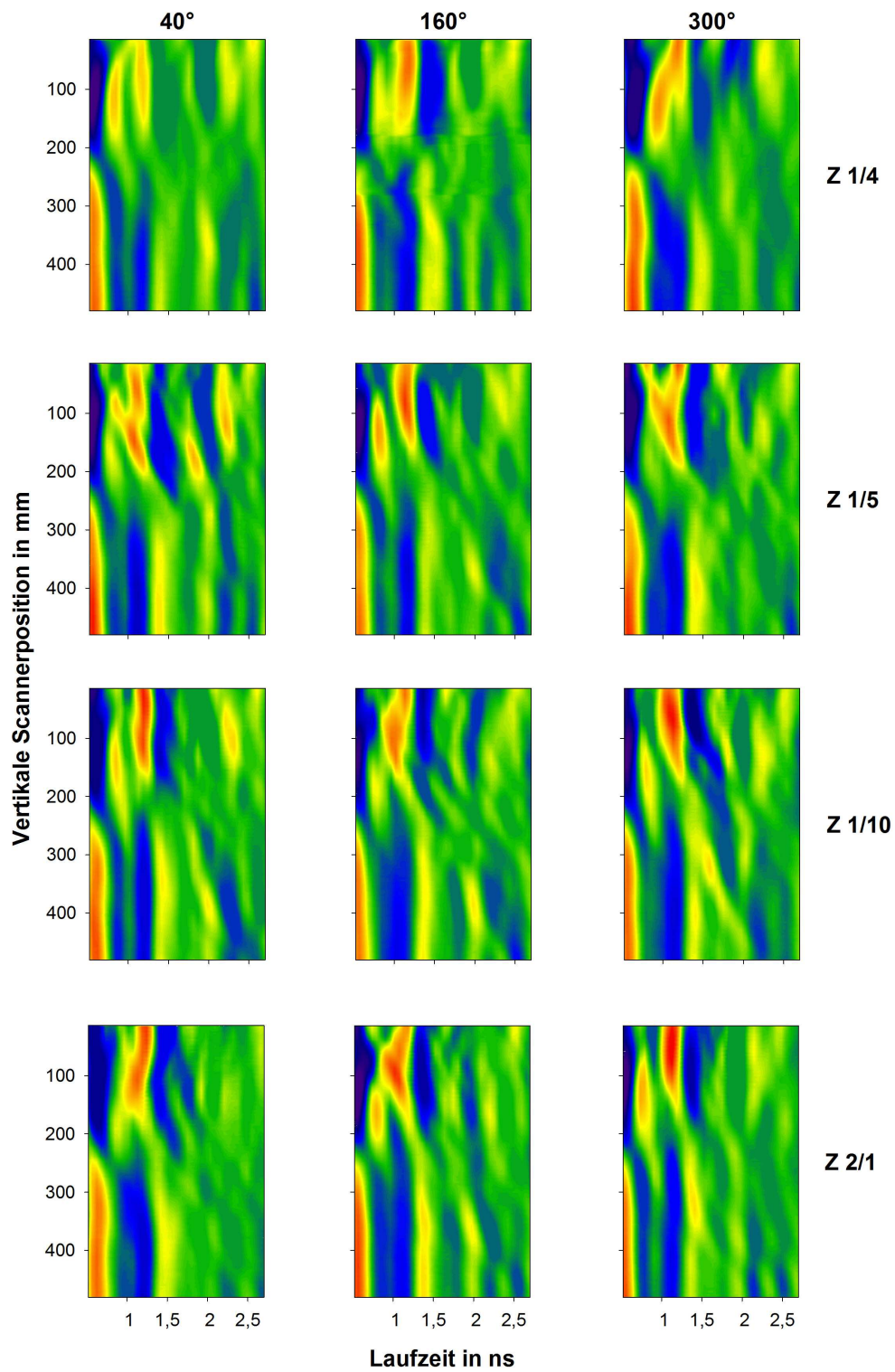


Abbildung 38: B-Scans ausgewählter Zuckerrüben an den Aufnahmepositionen 40°, 160° und 300°. Aufnahmedatum: 02.05.2012

Bei den Zuckerrüben Z 1/5, Z 1/10 und Z 2/1 ist nach etwa einem Monat Entwicklungszeit eine Zunahme von  $d_{max}$  um 15,6 bis 19,9 mm erkennbar. Einzig bei Zuckerrübe Z 1/4 beträgt die Zunahme lediglich 1,9 mm, was zwar für ein Problem beim Wachstum dieser Rübe spricht, diese aber für einen Vergleich mit den übrigen dennoch interessant macht. Die Reflexionscharakteristika der Zuckerrüben am 06.06.2012 sind in Abbildung 39 dargestellt.

Wie bereits bei den Reflexionsdaten vom 02.05.2012 sind auch hier Unterschiede sowohl zwischen den einzelnen Zuckerrüben als auch zwischen den einzelnen Aufnahmewinkeln vorhanden. Gemeinsam ist allen Aufnahmen, dass auch hier ein markantes Reflexionsphänomen bei 1 ns bis etwa 200 mm zu erkennen ist, welches auf die Reflexionen am Rübenkopf, dem Blattwerk und der Substratoberfläche zurückgeführt werden kann.

Die größte Rübe in diesem Vergleich (Z 1/5) zeigte bei allen Aufnahmewinkeln markante Reflexionen im Bereich um 1,5 bis 2 ns von ca. 250 bis 480 mm, die auf den unterirdischen Teil der Zuckerrübe zurückzuführen sind. Die Stärke und das Muster dieser Reflexionen ändern sich jedoch in Lage und Ausprägung in Abhängigkeit vom Aufnahmewinkel. Bei den Zuckerrüben Z 2/1 und Z 1/10 sind ebenfalls Reflexionscharakteristika zu erkennen, die auf den unterirdischen Teil des Rübenkörpers hindeuten. Bei Z 2/1 liegen diese zwischen 1,8 und 2 ns um 350 bis 480 mm und treten bei den Aufnahmen aus 160° und 300° auf. Bei Z 1/10 sind in allen drei Aufnahmen solche Charakteristika zwischen 350 und ca. 450 mm bei etwa 1,5 bis 2 ns erkennbar. Die kleinste Rübe in diesem Vergleich (Z 1/4) zeigte bei Aufnahmewinkeln von 160° und 300° kleinere Reflexionen im Bereich um 300 bis 350 mm. Da diese aber mit ca. 1,3 ns recht früh im Zeitbereich liegen, erscheint es fraglich, ob es sich dabei tatsächlich um Reflexionen des Rübenkörpers handelt, da diese aufgrund der geringeren Abmessungen von Z 1/4, später im Zeitbereich zu erwarten wären.

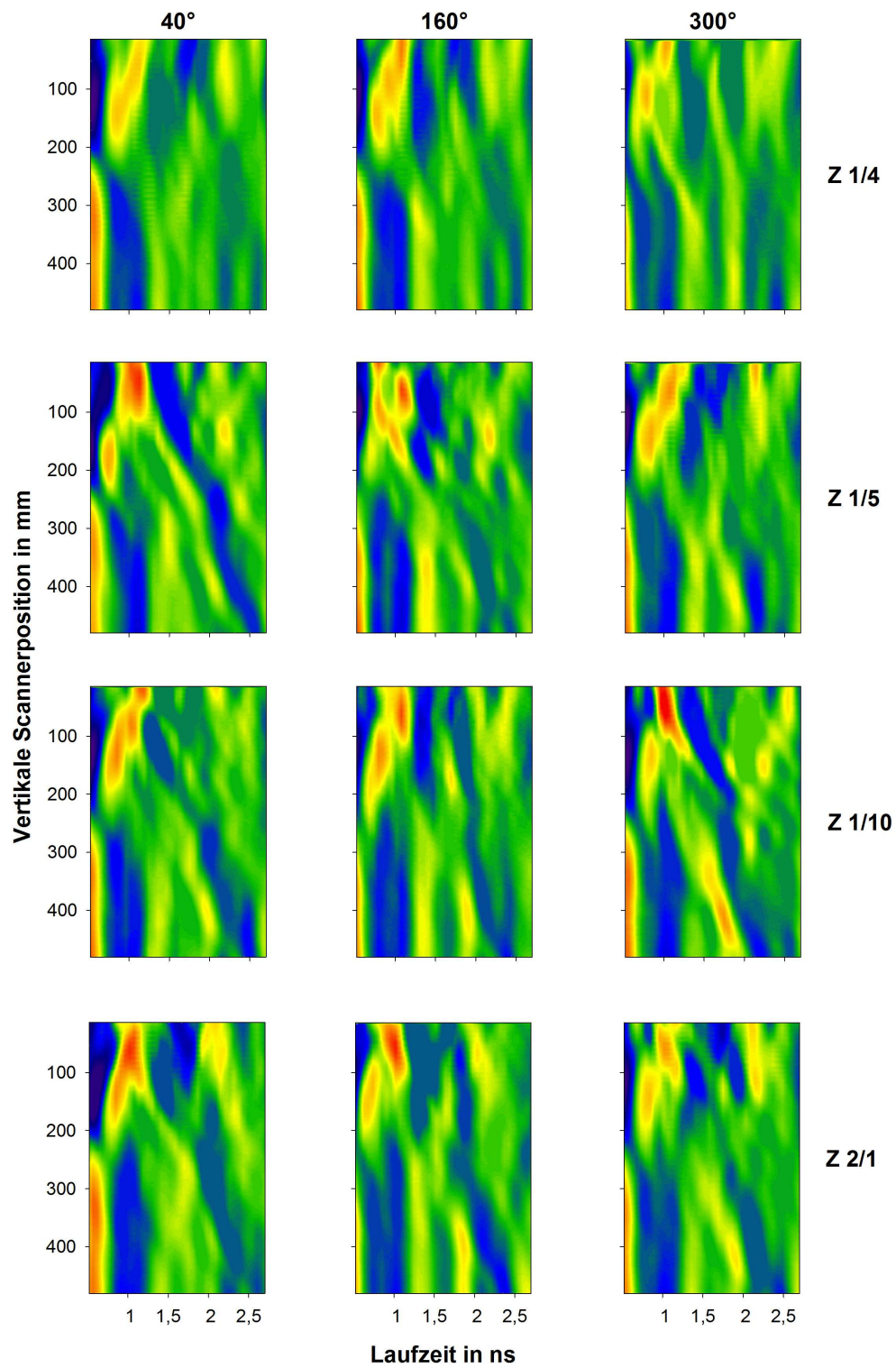


Abbildung 39: B-Scans ausgewählter Zuckerrüben an den Winkelpositionen 40°, 160°, 300°. Aufnahme datum: 06.06.2012



Nach weiteren 52 Tagen Entwicklungszeit und entsprechendem Größenzuwachs zeigten alle Zuckerrüben bei einer Aufnahme am 27.08.2012 erneut Reflexionscharakteristika, die sich im Hinblick auf den oberirdischen Teil der Zuckerrüben, das Blattwerk und die Substratoberfläche zwar ähneln, im Bereich des unterirdischen Rübenkörpers jedoch starke Unterschiede zeigen. Diese sind in Abbildung 40 dargestellt.

Bei den Zuckerrüben Z 1/5, Z 1/10 und Z 2/1 sind in allen Aufnahmen Reflexionenphänomene zwischen 1,3 und 1,5, maximal 2 ns erkennbar, die bei einer vertikalen Scannerposition von etwa 250 bis 500 mm sichtbar sind. In Abhängigkeit von Aufnahmewinkel und Zuckerrübe unterscheiden sich diese zwar in ihrer Ausprägung, die Lage ist aber tendenziell sehr ähnlich. Da Z 1/5 und Z 1/10 mit 91,7 mm bzw. 87 mm ein recht ähnliches  $d_{max}$  aufweisen, ist diese Tatsache sehr gut nachvollziehbar. Z 2/1 weist mit einem  $d_{max}$  von 76,8 mm zwar einen geringeren Wert auf, bei einem Auflösungsvermögen des RADAR-Systems im cm-Bereich ist aber auch dieser Unterschied im Zeitbereich kaum sichtbar, so dass die Reflexionen zu ähnlichen Zeitpunkten auftreten wie bei Z 1/5 und Z 1/10. Der maximale Durchmesser von Z 1/4 war zu diesem Aufnahmezeitpunkt zwar fast doppelt so groß wie am 06.06.2012, dennoch liegt diese Zuckerrübe in ihrer Entwicklung damit sehr weit hinter den übrigen Rüben zurück, was auf ein anormales Wachstum, bzw. morphologische Probleme hindeutet. Dementsprechend sind auch nur bei der Aufnahme aus 40° markante Reflexionen im Zeitbereich um 1,8 ns zwischen 300 und 400 mm erkennbar.

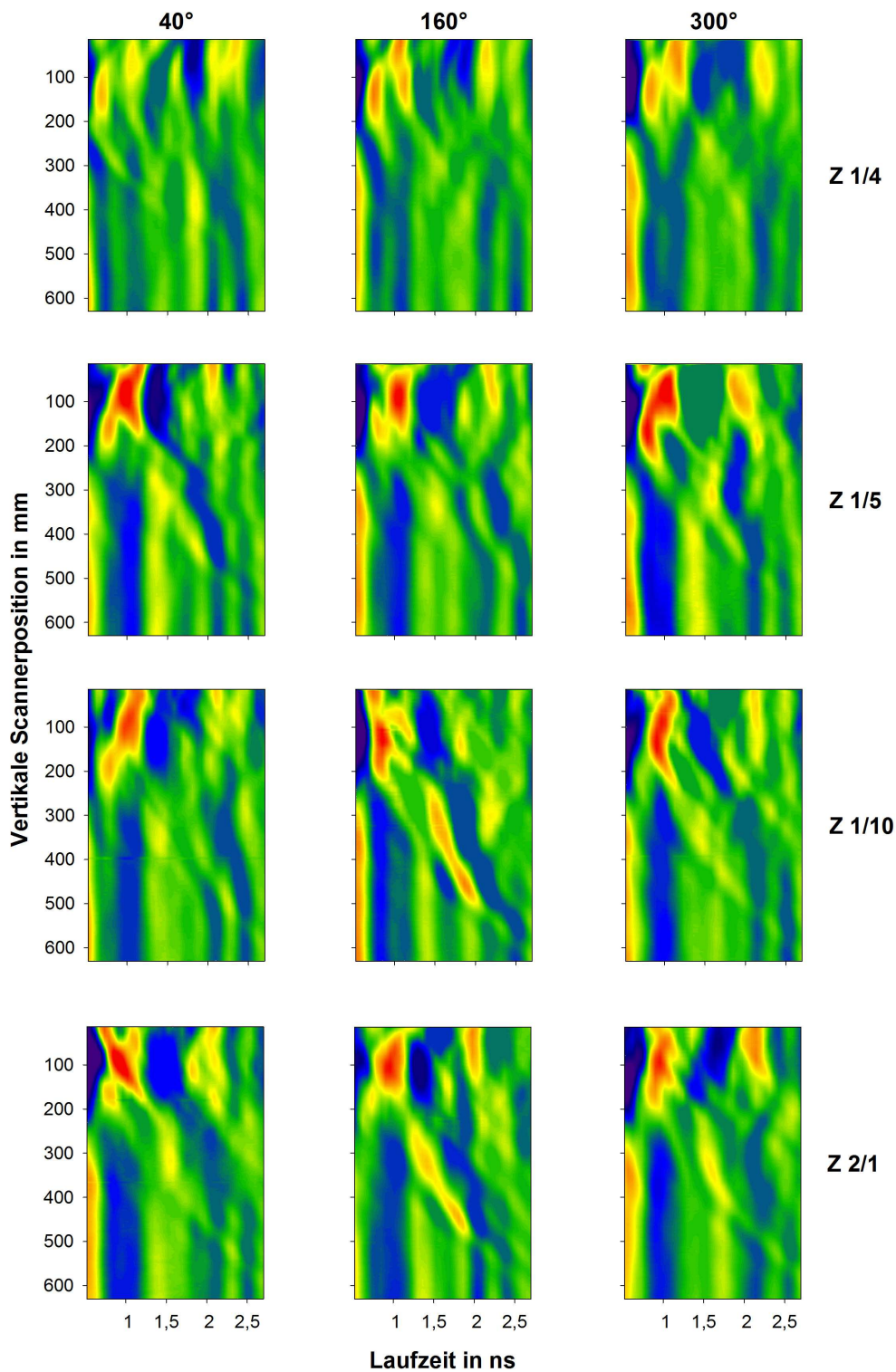


Abbildung 40: B-Scans ausgewählter Zuckerrüben an den Winkelpositionen 40°, 160°, 300°.  
Aufnahmedatum: 27.08.2012

Insgesamt zeigt die Auswahl dieser vier Beispieldpflanzen, dass es bei der Erfassung der Speicherwurzel der Zuckerrüben z. T. erhebliche Probleme gibt. An keinem der gezeigten Aufnahmetermine zeigte sich über die betrachteten Aufnahmewinkel hinweg eine konsistente Reflexionscharakteristik für eine Zuckerrübe. Vielmehr gab es erhebliche Unterschiede bei gleichen Pflanzen. Eindeutige Tendenzen zur Entwicklung der Wurzel lassen sich damit qualitativ nicht ableiten.

Mit zunehmendem  $d_{max}$  konnten zwar vermehrt Reflexionscharakteristika identifiziert werden, die dem Wurzelkörper zuzuordnen sind, eindeutige Aussagen zur Struktur des Rübenkörpers lassen sich aber daraus nicht ableiten, da es sowohl zwischen ähnlich großen Rüben (vgl. Z 1/10 und Z 1/5 in Abbildung 40) als auch zwischen den einzelnen Aufnahmewinkeln zu große Unterschiede gibt.

#### 5.4.2 Qualitative Analyse der Mangold-Reflexionsdaten

Wie bereits bei den Reflexionsdaten der Zuckerrüben war der Datenumfang bei den Mangoldpflanzen ebenfalls derart hoch, dass die Darstellung der Ergebnisse auf einige ausgewählte Pflanzen zu drei unterschiedlichen Untersuchungsterminen beschränkt wird. Als Pflanzen wurden die Mangold Pflanzen M 2/4, M 2/6, M 2/9 und M 2/11 ausgewählt, da diese von ihrer Entwicklung her das Spektrum der untersuchten Pflanzen gut repräsentieren. Die Entwicklung von  $d_{max}$  (bei Mangold an der Sprossbasis gemessen) an den ausgewählten Untersuchungsterminen (06.07.2012, 24.07.2012, 27.08.2012) ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Entwicklung von  $d_{max}$  der 4 ausgewählten Mangoldpflanzen über 3 unterschiedliche Aufnahmetermine

Mangold Nr.	$d_{max}$ [mm]		
	06.07.2012	24.07.2012	27.08.2012
M 2/4	25,3	49,3	89,7
M 2/6	17,1	33,1	43,9
M 2/9	5	22	30,4
M 2/11	14,1	44,3	50,6

Die Reflexionsdaten aller Mangoldpflanzen vom 06.07.2012 werden in Abbildung 41 dargestellt. In dieser Abbildung stellt M 2/4 die Pflanze mit dem höchsten  $d_{max}$  (25,3 mm) und M 2/9 die Pflanze mit dem kleinsten  $d_{max}$  (5 mm) dar. M 2/11 (14,1 mm) und M 2/6 (17,1 mm) stellen Zwischenstufen dar. Wie bereits bei den Reflexionsdaten der Zuckerrüben fallen auch bei allen Mangold-Pflanzen relativ starke Reflexionsphänomene im Bereich bis 200 mm bei etwa 0,5 bis 1 ns Laufzeit auf, die dem Blattwerk bzw. der oberirdischen Biomasse des Mangold, sowie der Substratoberfläche zugeordnet werden können. Trotz unterschiedlicher Ausprägung tritt dieses Reflexionsphänomen in allen Aufnahmen ebenso auf, wie die Reflexionsbande der Pflanzgefäßoberfläche im Bereich von 300 bis 630 mm bei 0,5 ns, die sich nur geringfügig verschiebt.

Reflexionen des Wurzelkörpers der Mangold-Pflanze sind frühestens ab 250 mm und 0,5 ns zu erwarten. Die größte untersuchte Pflanze (M 2/4) zeigte drei sichtbare, aber relativ schwache Reflexionsphänomene im Bereich um 300 bis 400 mm. Die Ausprägung im Zeitbereich lag dabei zwischen ca. 1,3 ns ( $40^\circ$ ) und ca. 2 ns ( $300^\circ$ ), was entweder für eine ungenügende Zentrierung der Pflanze oder stark asymmetrisches Wachstum spricht. Die kleinste Pflanze in diesem Vergleich (M 2/9) zeigte nur bei einem Aufnahmewinkel von  $40^\circ$  Reflexionen im Bereich von 300 bis 400 mm vertikaler Scannerposition bei 1 und 2 ns. Bei einem Aufnahmewinkel von  $160^\circ$  und  $300^\circ$  liegen diese Reflexionen im Bereich von 350 bis 400 mm bei etwa 1,3 ns. Bei dem geringen  $d_{max}$  des Wurzelkörpers ist es allerdings eher unwahrscheinlich, dass diese Reflexionen tatsächlich durch den Wurzelkörper ausgelöst werden. Mit höherer Wahrscheinlichkeit handelt es sich bei diesen Reflexionen um die Substratoberfläche, oder einen Substratbereich mit erhöhtem Wassergehalt. Die beiden Zwischenstufen (M 2/11 und M2/6) zeigen ebenfalls kein konsistentes Reflexionsverhalten. Bei M 2/11 sind nur bei einem Aufnahmewinkel von  $300^\circ$  schwache Reflexionen zwischen 300 und 400 mm und ca. 1,3 bis 1,8 ns wahrnehmbar (was die Theorie betreffend M 2/4 unterstützt), bei M 2/6 sind nur bei  $160^\circ$  und  $300^\circ$  Reflexionen im Bereich um 300 bis 400 mm bei 1,5 bis 2 ns sichtbar.

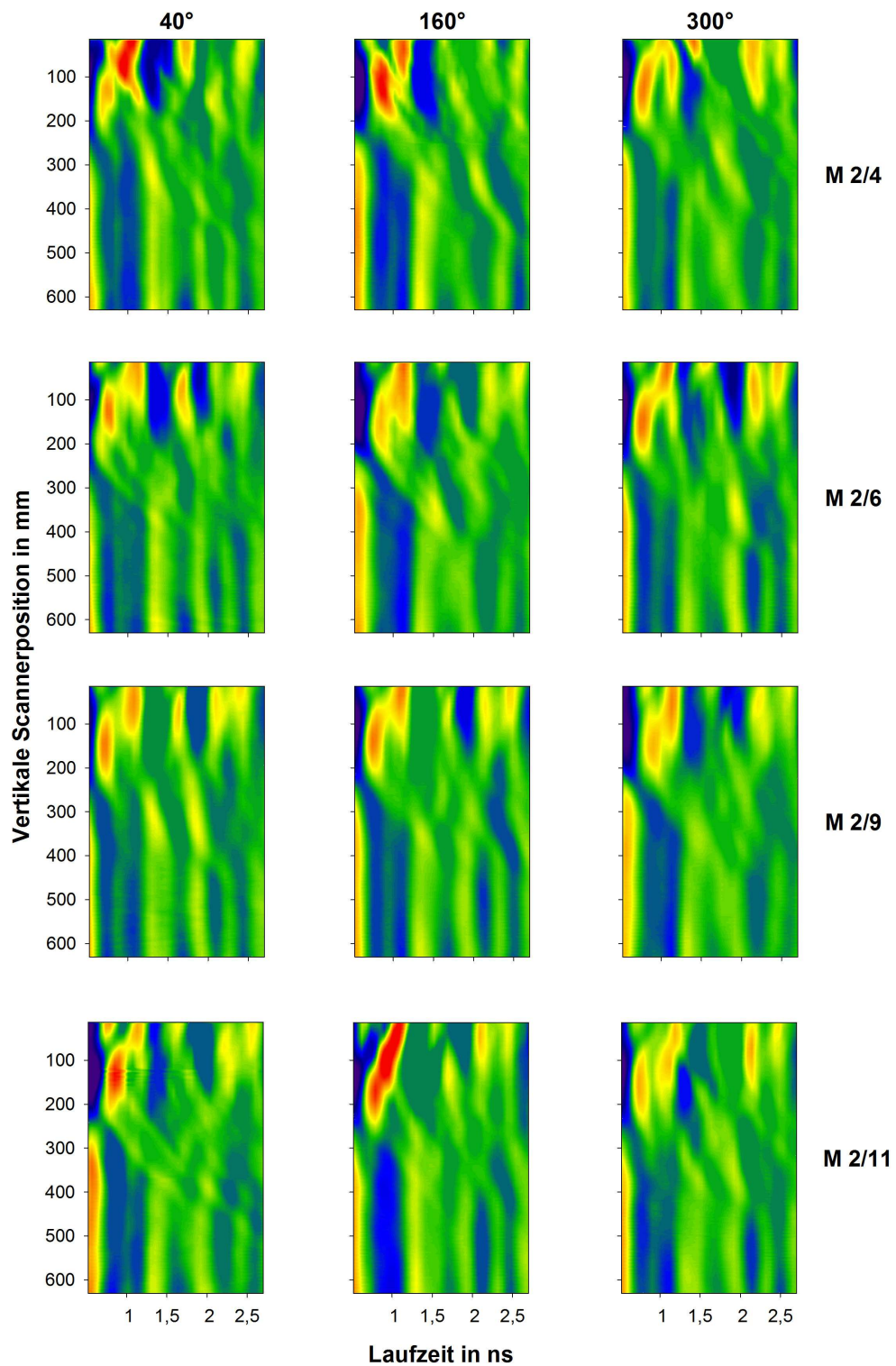


Abbildung 41: B-Scans der ausgewählten Mangold-Pflanzen für drei unterschiedliche Aufnahmewinkel. Aufnahmedatum: 06.07.2012

Nach 18 Tagen weiterer Entwicklungszeit mit entsprechendem Wachstum zeigten sich wesentliche Veränderungen in der Reflexionscharakteristik der einzelnen Mangold-Pflanzen. Wie in Abbildung 42 dargestellt, ergeben sich bei teilweise erheblicher Zunahme von  $d_{max}$  starke Veränderungen in der Reflexionscharakteristik. Nachwievor stellte M 2/4 zu diesem Zeitpunkt die größte Mangold-Pflanze dar und zeigte, neben den bekannten Reflexionen der oberirdischen Biomasse und der Pflanzgefäßwand, markante Reflexionsphänomene im Bereich um 300 bis 400 mm, bzw. 250 bis 350 mm ( $300^\circ$ ) bei 1,5 bis maximal 2 ns. Der „Schwankungsbereich“ wird damit im Vergleich zum 06.07.2012, etwas geringer. Die starke Entwicklung von M 2/11 (Zunahme von  $d_{max}$  von 14,1 auf 44,3 mm) trug offensichtlich zur Ausbildung einer Reflexionsbande im Bereich von ca. 1,3 ns von 350 bis 630 mm bei, die bei allen Aufnahmewinkeln auftritt und eine hohe Konstanz aufweist. Ein ähnliches Phänomen, wenn auch in schwächerer Form, kann auch bei den Pflanzen M 2/6 und M 2/9 beobachtet werden, bei denen diese in ganz ähnlichen Zeitbereichen auftreten. Es ist jedoch insgesamt fraglich, ob diese Reflexionsbanden tatsächlich aus der Präsenz des Wurzelkörpers resultieren, oder ob diese auch andere Gründe, wie z.B. Feuchtegradienten, hat.

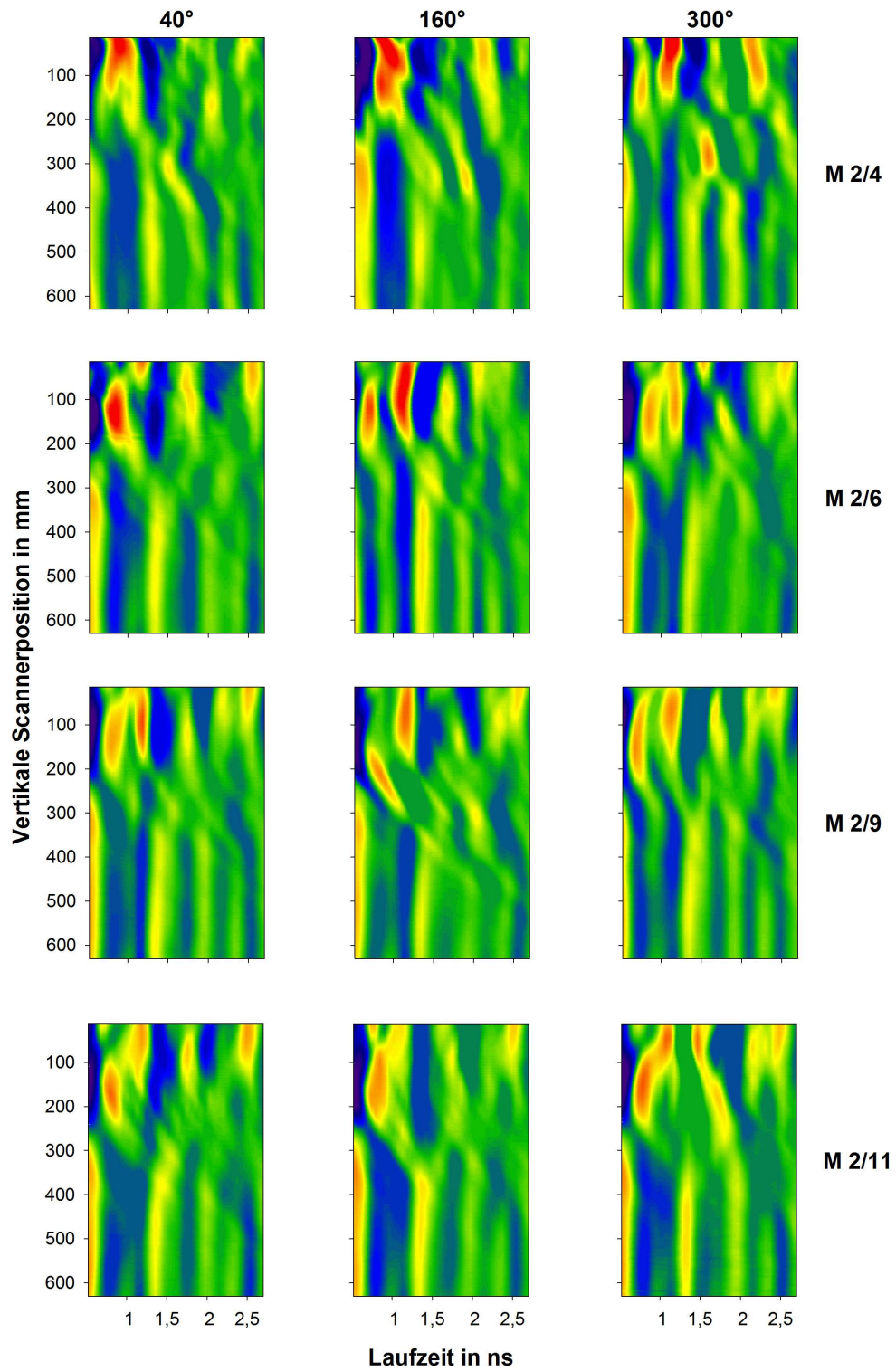


Abbildung 42: B-Scans der ausgewählten Mangold-Pflanzen für drei unterschiedliche Aufnahmewinkel. Aufnahmedatum: 24.07.2012

Nach weiteren 33 Tagen Entwicklungszeit zeigten sich erneut gravierende Veränderungen in der Reflexionscharakteristik. M 2/4 wies mit einem  $d_{max}$  von 89,7 einen sehr großen Durchmesser auf und rief, wie in Abbildung 43 dargestellt, sehr starke Reflexionen im Bereich zwischen 1,5 und 2 ns bei 250 bis 400 mm hervor. Bei M 2/6, welche mit einem  $d_{max}$  von 43,9 mm wesentlich kleiner ist, zeigen sich die genannten Reflexionen in einem ähnlichen Zeitbereich. Sie waren jedoch wesentlich schwächer ausgeprägt und enger umgrenzt (um 300 mm bis 400 mm bei 40° und 160°, 250 bis 400 mm bei 300°). Bei M 2/9 und M 2/11 waren solche Reflexionsphänomene nur partiell erkennbar. M 2/9 (die nun kleinste Pflanze im Vergleich) zeigte nur bei 160° ein markantes Reflexionsphänomen im Bereich um 1,8 ns und 400 mm. M 2/11 wies diese ebenfalls um 400 mm, allerdings etwas stärker und im Bereich um 1,5 bis 1,8 ns bei Aufnahmewinkeln von 40° und 160° auf.

Die markanten Reflexionsbanden (vgl. Abbildung 42), die bei den Aufnahmen vom 24.07.2012 noch auftraten, sind bei den Aufnahmen vom 27.08.2012 nahezu verschwunden und nur bei M 2/11 noch partiell wahrnehmbar.



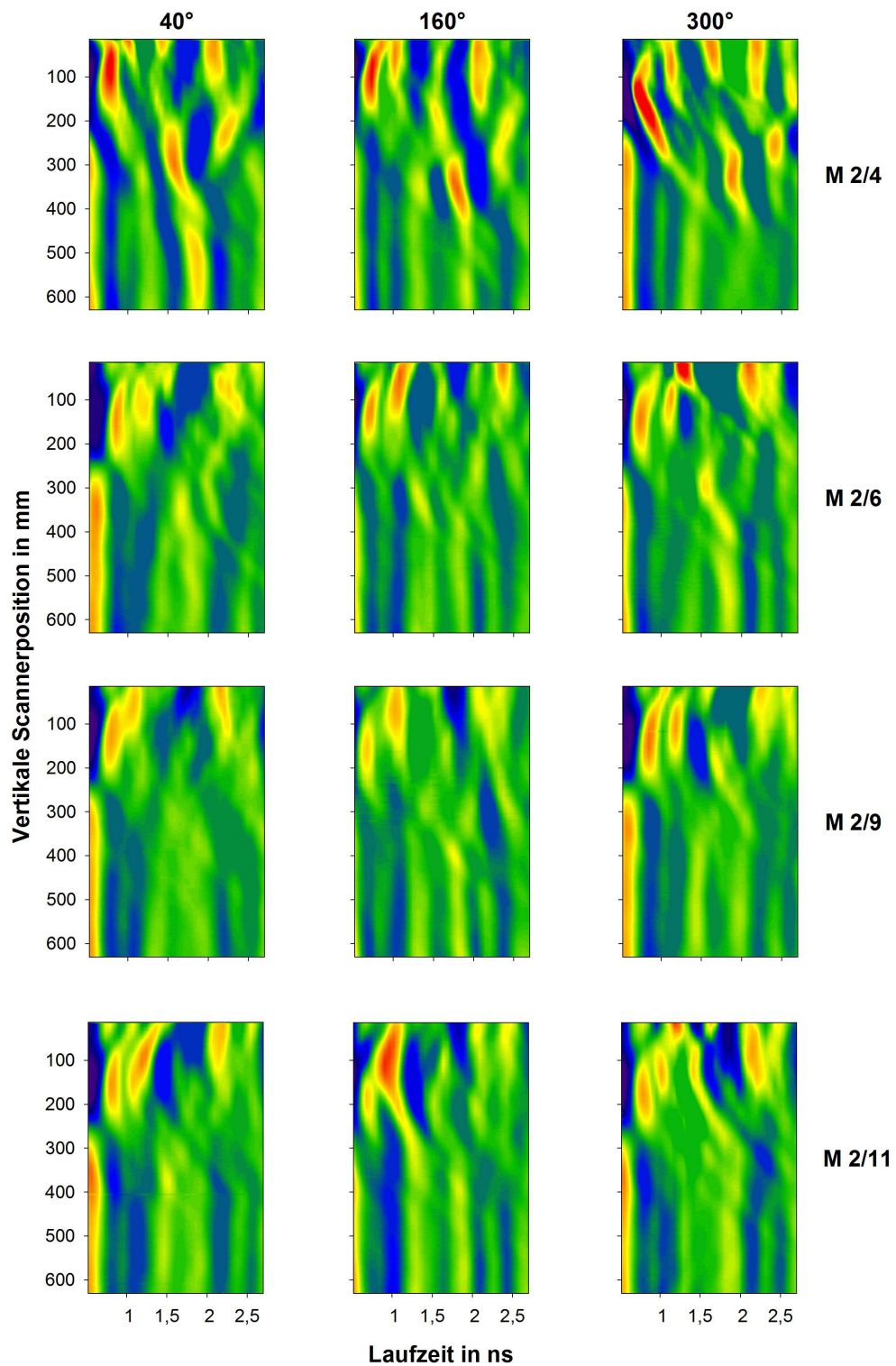


Abbildung 43: B-Scans der ausgewählten Mangold-Pflanzen für drei unterschiedliche Aufnahmewinkel. Aufnahmedatum: 27.08.2012

Wie bereits bei den Zuckerrüben lassen sich damit auch bei den Mangold-Pflanzen keine direkten Aussagen über den Wurzelkörper ableiten, da die Veränderungen innerhalb der einzelnen Aufnahmen stark schwanken. Über die Struktur der Wurzeln lassen sich damit ebenso wenige Rückschlüsse ziehen, wie über Tendenzen in der quantitativen Entwicklung.

Ein zentrales Problem bei den Messungen stellte die Bewertung der unterirdischen Biomasse dar. Da ein Großteil des Wurzelsystems unter der Substratoberfläche verborgen lag, wurde der maximale Durchmesser der Mangoldpflanze an der Sprossbasis (oberirdischer Teil) erfasst. Dieser Messpunkt kann zwar als Indiz für die Entwicklung der oberirdischen Biomasse verwendet werden, es ist allerdings davon auszugehen, dass es keine ausreichende Korrelation zwischen  $d_{max}$  der Mangoldpflanzen und der unterirdischen Biomasse gibt, was eine quantitative Analyse der Reflexionsdaten als nicht sinnvoll erscheinen lässt.

### 5.4.3 Vergleich von Zuckerrüben- und Mangold-Reflexionsdaten

Für eine Anwendbarkeit des RADAR-Systems zur Diskriminierung zwischen verzweigtem Wurzelsystem (Mangold) und einzelner Speicherwurzel (Zuckerrübe) sollten zu jedem beliebigen Messzeitpunkt, unter Berücksichtigung der Grenzen des Systems, klare Unterschiede in den Radargrammen (B-Scans) sichtbar sein. Die zuvor bereits gezeigten Beispiele belegen jedoch, dass dies ohne weitere Maßnahmen nicht möglich ist.

Abbildung 44 zeigt einen direkten Vergleich der Reflexionsdaten von Z 2/1, Z 1/10, sowie M 2/4 und M 2/6. Wie bereits in den Kapiteln 5.4.1 und 5.4.2 erläutert, verursachen alle Pflanzen zwar markante Reflexionen, ein bestimmtes Muster, welches spezifisch auf Mangold oder Zuckerrüben zugeordnet werden könnte, ist allerdings nicht erkennbar. Ein Vergleich der Aufnahme von Z 1/10 bei 300° mit der Aufnahme von M2/6 bei 300° zeigt, dass das Reflexionsspektrum sehr ähnlich ausfällt. Gleiches gilt für die Aufnahmen von Z 2/1 bei 40° bzw. 300° und M 2/4 bei 40° bzw. 160°. Diese Ähnlichkeiten zeigen sehr deutlich, dass die unterschiedliche Entwicklung des jeweiligen (Speicher-)Wurzelwerks mit der gewählten Einstellung des RADAR-Systems nicht ausreichend abgebildet werden kann.

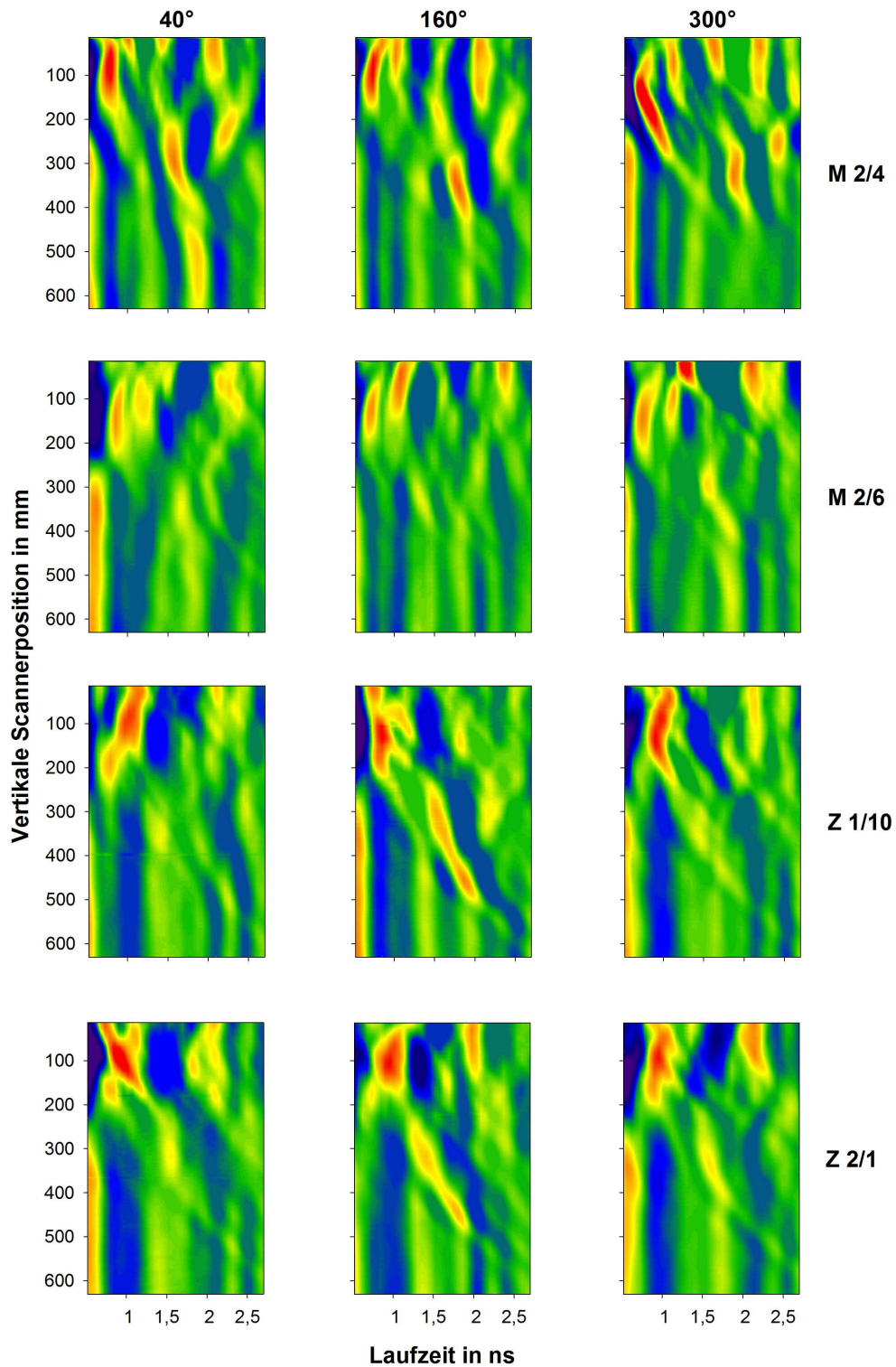


Abbildung 44: Direkter Vergleich der Reflexionsdaten der Zuckerrüben Z 1/10 und Z 2/1 mit den Reflexionsdaten der Mangoldpflanzen M 2/4 und M 2/6 an verschiedenen Aufnahmewinkeln. Aufnahme datum: 27.08.2012

Der Grund hierfür könnte in einer ähnlichen Entwicklung der Speicherwurzeln vermutet werden. Das Freigraben der Wurzeln am 26.10.2012 bzw. 30.10.2012 zeigte jedoch stark unterschiedliche Entwicklungen von Zuckerrüben- und Mangoldpflanzen auf (vgl. Abbildung 45).



Abbildung 45: Zuckerrüben und Mangoldpflanzen nach Ausgrabung und Entfernung des Blattwerks

Es ist zu erkennen, dass die beiden Mangoldpflanzen einen geringeren Durchmesser und ein wesentlich verzweigteres Wurzelsystem aufwiesen als die beiden Zuckerrüben. Die Verzweigung ist bei M 2/6 zwar nicht allzu stark ausgeprägt, so dass eher von einer Pfahlwurzel gesprochen werden kann, dennoch war der Durchmesser dieses Wurzelkörpers deutlich geringer als der von Z 1/10 und Z 2/1. Ähnliches gilt auch für M 2/4, bei der der obere Bereich des Wurzelkörpers zwar einen zusammenhängenden Bereich bildete, nach unten hin aber eine starke Verzweigung auftrat. Darüber hinaus war auch der Durchmesser dieses Wurzelkörpers wesentlich geringer als der der beiden Zuckerrüben. Die morphologischen Unterschiede zwischen Zuckerrüben und Mangold sind damit ausreichend groß und scheiden als Fehlerquelle für die ähnlich ausfallenden Reflexionen aus. Ein Problem bei der Erkennung des verzweigten Speicherwurzelsystems von Mangold könnte die Tatsache sein, dass die einzelnen Wurzeln sehr nahe zusammenliegen. Dadurch können auch mehrere kleine Wurzeln eine einzige Reflexion auslösen (BUTNOR et al., 2001).

Trotz der strukturellen Unterschiede der Wurzeln ist das RADAR-System in der gewählten Parameterkombination nicht in der Lage verzweigende (Mangold) von nicht-verzweigenden (Zuckerrübe) Wurzelsystemen zu unterscheiden, obwohl in dieser Versuchsanordnung Mangold-Pflanzen mit erheblichen Größenunterschieden zu den Rübenkörpern (M 2/6) bzw. stark verzweigtem Wurzelsystem (M 2/4) ausgewählt wurden.

Der hier gezeigte Vergleich beschränkt sich auf vier Beispieldpflanzen und lässt die übrigen Pflanzen zunächst unberücksichtigt. Trotz der damit einhergehenden Einschränkung des Datenumfanges zeigt diese Auswahl doch sehr eindrücklich, dass eine Unterscheidung zwischen Zuckerrüben und Mangold anhand der Reflexionsdaten generell nicht möglich ist.

#### 5.4.4 Qualitative Pflanzenanalyse nach Erhöhung des dielektrischen Kontrastes

Durch die Reduzierung des Substrat-Wassergehaltes sollte ein größerer dielektrischer Gradient zwischen Rüben- bzw. Wurzelkörper erzeugt werden, um diese besser aufzulösen. Nach viertägiger Einstellung der Bewässerung wurden mehrere Pflanzen mit Hilfe des RADAR-Systems gemessen, von denen die Reflexionsdaten von vier ausgewählten Pflanzen im Folgenden näher vorgestellt werden. Die spezifischen Daten dieser Pflanzen können Tabelle 11 entnommen werden.

Tabelle 11: Spezifische Merkmale der untersuchten Pflanzen

	Substrat-Wassergehalt		$d_{max}$	$l$	Masse	
	% vol.				Blattwerk	Wurzelkörper
	26.10.2012	30.10.2012	mm	mm		
Z 2/5	5,7	4,8	104,1	34,7	201,4	758,6
Z 2/10	5,7	5,2	91,9	262,7	362,4	549,8
M 2/4	5,8	3,7	51,9	382,1	1.226	213,6
M 2/11	5,7	4,2	29,7	382,7	569,8	43,7

Aus diesen Daten sind zum einen die morphologischen Unterschiede zwischen einzelnen Pflanzen hinsichtlich der Länge des Wurzelkörpers ( $l$ ) und  $d_{max}$  sichtbar. Zum anderen wird deutlich, dass der Substrat-Wassergehalt zwischen den beiden Untersuchungsterminen um 0,9% vol. (Z 2/5) bis 2,1% vol. (M 2/4) abgenommen hat. Darüber hinaus fällt auf, dass die ausgewählten Mangoldpflanzen eine wesentlich höhere Blatt- als Wurzelmasse aufweisen, was bei beiden Zuckerrübenpflanzen genau umgekehrt war.

Die Reflexionsdaten der beiden Zuckerrüben sind in Abbildung 46 (Z 2/5) und Abbildung 47 (Z 2/10) dargestellt.

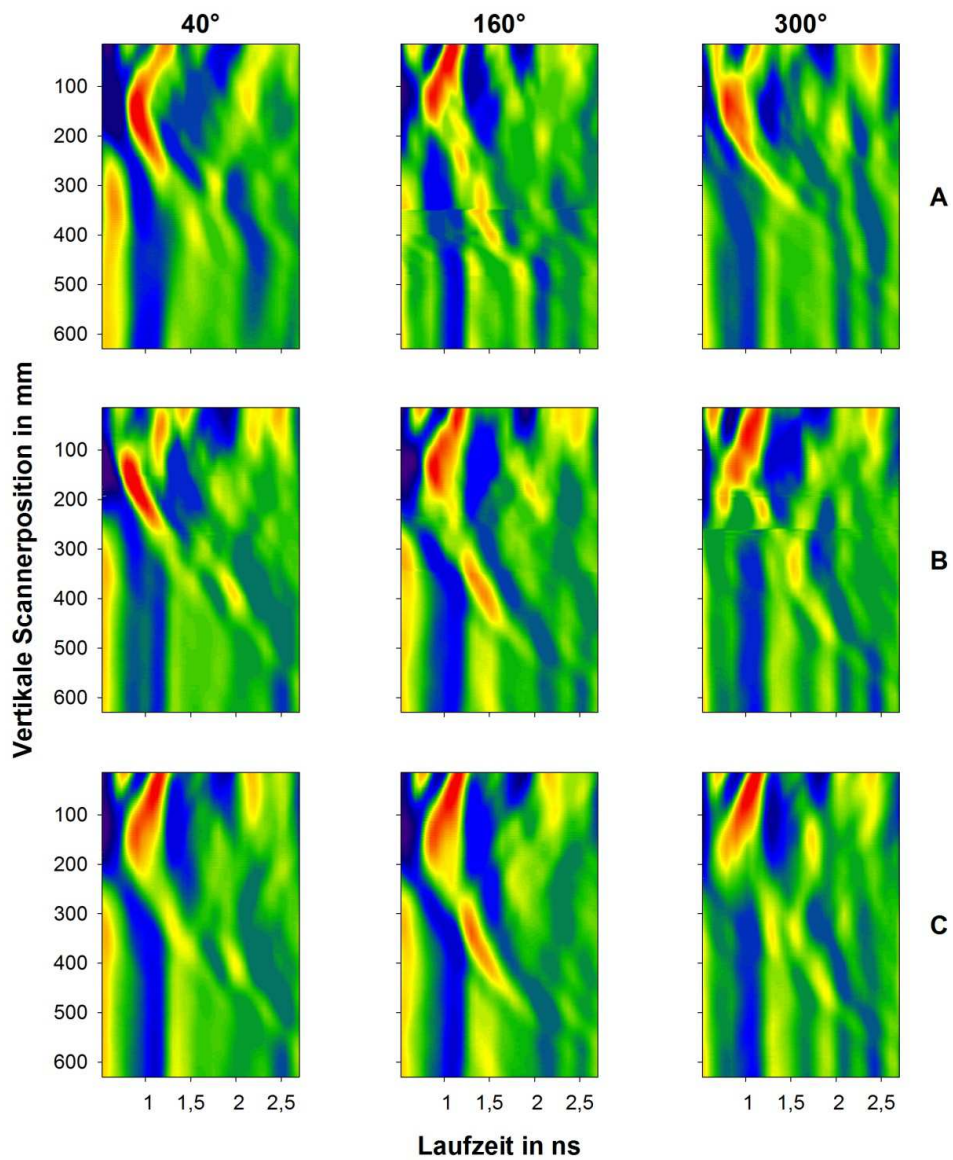


Abbildung 46: B-Scans der Zuckerrübe Z 2/5 zwei Tage nach Einstellung der Bewässerung (A), 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung (B) sowie 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung und zusätzlicher Entfernung des Blattwerks (C)

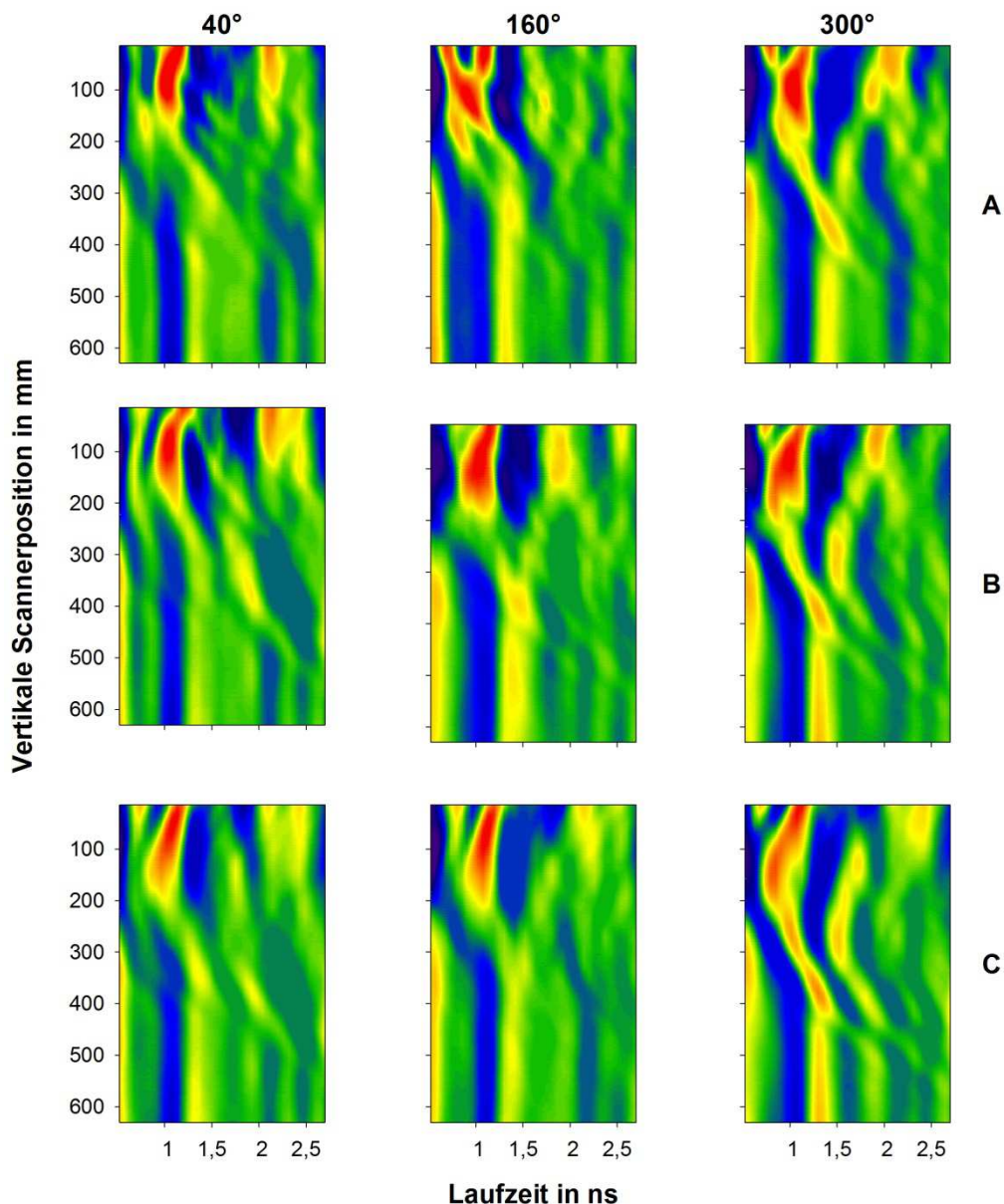


Abbildung 47: B-Scans der Zuckerrübe Z 2/10 zwei Tage nach Einstellung der Bewässerung (A), 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung (B) sowie 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung und zusätzlicher Entfernung des Blattwerks (C)

In beiden Fällen ist deutlich ersichtlich, dass sowohl vor (A) als auch nach zusätzlichem mehrtägigen Wasserentzug (B) noch immer erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Aufnahmen aus unterschiedlichen Winkeln bestehen. Die einzigen Konstanten in diesen Bildern sind die Reflexionen bis 250 mm bei 1 ns (oberirdisches Blattwerk, Rübenkopf und Substratoberfläche) und von ca. 250 bis 630 mm bei 0,5 ns (Oberfläche des Pflanzgefäßes). Die Reflexionen des eigentlichen unterirdischen Teils der Speicherwurzel fielen bei beiden Rüben relativ schwach aus und schwankten stark.

Nach der Einstellung der Bewässerung und der damit einhergehenden Austrocknung des Substrates waren die Reflexionen des Wurzelkörpers zwar tendenziell etwas stärker, schwankten aber immer noch relativ stark in Abhängigkeit vom Aufnahmewinkel. Auch eine grobe Entfernung des Blattwerks (C) konnte diesen Umstand nicht wesentlich verbessern. Trotz jeweils identischer Aufnahmewinkel von Teil B zu Teil C sind praktisch nur Veränderungen der Reflexionscharakteristik im Bereich der oberirdischen Biomasse sichtbar. Die Reflexionscharakteristik der unterirdischen Biomasse wird gar nicht, bis kaum verändert.

Ähnliche Aussagen lassen sich auch für die Untersuchungen der Mangold-Pflanzen ableiten, welche in Abbildung 48 (M 2/4) und Abbildung 49 (M 2/11) dargestellt sind, auch wenn hier einige Unterschiede zu den ausgewählten Zuckerrübenpflanzen sichtbar sind.



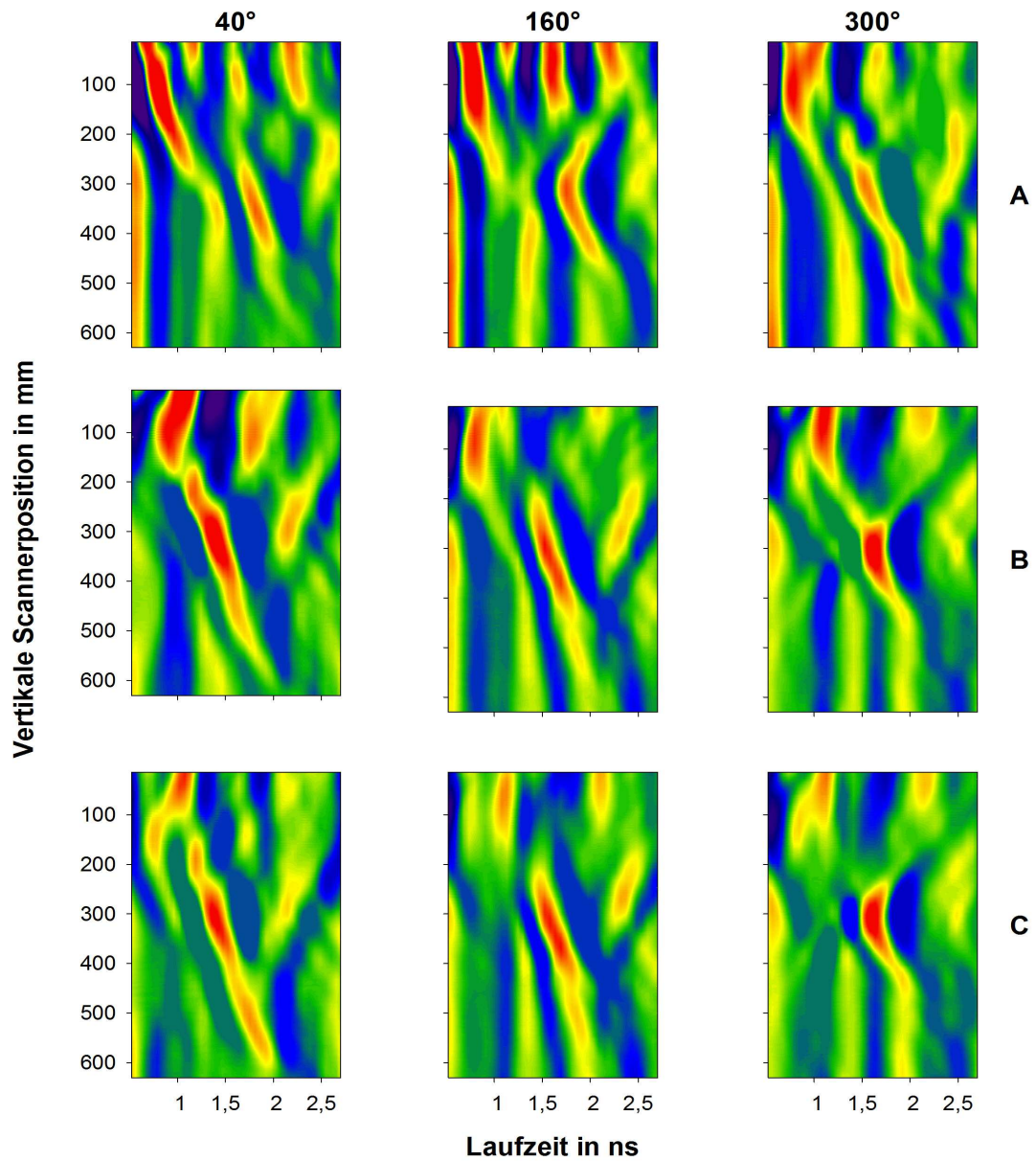


Abbildung 48: B-Scans der Mangold-Pflanze M 2/4 zwei Tage nach Einstellung der Bewässerung (A), 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung (B) sowie 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung und zusätzlicher Entfernung des Blattwerks (C)

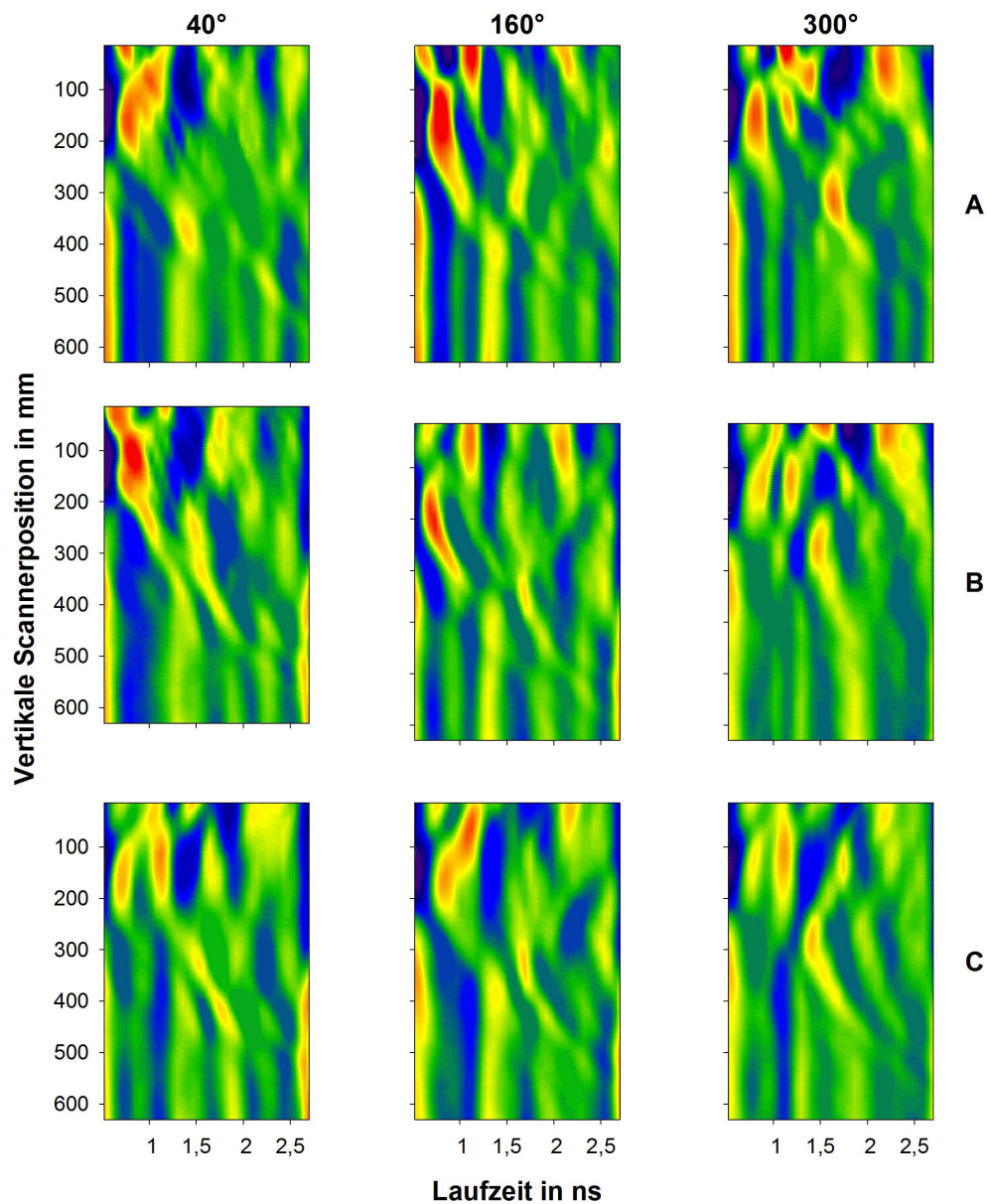


Abbildung 49: B-Scans der Mangold-Pflanze M 2/11 zwei Tage nach Einstellung der Bewässerung (A), 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung (B) sowie 6 Tage nach Einstellung der Bewässerung und zusätzlicher Entfernung des Blattwerks (C)

Speziell die größere der beiden Mangold-Pflanzen zeigt im Bereich zwischen etwa 250 bis 450 mm sehr starke Reflexionen im Zeitbereich zwischen 1,5 und 2 ns. Im Gegensatz zu den untersuchten Zuckerrüben traten diese mit hoher Konstanz über alle Drehwinkel auf und verstärkten sich nach mehrtägigem Wasserentzug (B) erheblich. Dieser Umstand ist wahrscheinlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass M 2/4 nach 6 Tagen „Austrocknung“ die niedrigsten Substrat-Wassergehalte aller untersuchten Pflanzen aufwies. Das Blattwerk zeigte zu diesem Zeitpunkt bereits starke Welkeerscheinungen und führte damit auch weniger Wasser.

Dieser Umstand und die spezielle Ausformung des Wurzelkörpers (vgl. Abbildung 45) scheinen eine starke Reflexion der elektromagnetischen Wellen, im Vergleich zu den übrigen Pflanzen, zu begünstigen. Eine Entfernung des Blattwerks (C) kann die Reflexionen des Wurzelkörpers jedoch nicht verstärken, sondern lediglich diejenigen der oberirdischen Biomasse abschwächen.

Ähnliches gilt für die Pflanze M 2/11, bei der jedoch auch nach Austrocknung und Entfernung des Blattwerks keine Verbesserung der Reflexionscharakteristik im Sinne stärkerer Reflexionen im Wurzelbereich erzielt werden konnte. Dieser Umstand ist vermutlich auf die geringere Größe des Wurzelkörpers zurückzuführen.

Insgesamt zeigte damit auch der Versuch der Kontrasterhöhung durch Austrocknung und Entfernung des Blattwerks insgesamt nur unbefriedigende Ergebnisse. Eine Austrocknung des Substrates zeigt zwar partielle Erfolge (M 2/4), trägt aber weder dazu bei, dass diese auf alle Pflanzen eines Typs übertragbar sind, noch dass Alleinstellungsmerkmale in der Reflexionscharakteristik der Pflanzen entstünden, die eine Diskriminierung zwischen verzweigtem Wurzelsystem und Speicherwurzel erlauben.

## 6 Schlussfolgerungen

Ziel der Entwicklung der bisher vorgestellten Untersuchungen war der Aufbau eines kostengünstigen, weitgehend automatisierten und mobilen Sensorsystems, das auf der Grundlage der Reflexion elektromagnetischer Strahlung in der Lage ist, verzweigte Wurzelsysteme (an Mangoldpflanzen) von Speicherwurzeln (Zuckerrüben) zu diskriminieren und deren Abmessungen zu erfassen. Nach Analyse der vorliegenden Daten und der Vorstellung unterschiedlicher Auswerte- und Darstellungsverfahren muss jedoch festgestellt werden, dass das entwickelte System diese Anforderungen nur teilweise erreicht. Insbesondere die Diskriminierung zwischen Speicherwurzeln und verzweigtem Wurzelsystem funktioniert unter den getesteten Bedingungen nur unzureichend.

Das gesamte System wurde so konzipiert, dass die Kosten für Hardware und Steuerungssoftware deutlich unter 50.000 € lagen. Im Vergleich zu ähnlich arbeitenden, nicht-destruktiven Sensorsystemen stellt dieser Betrag nur einen Bruchteil der Kosten dar. Das System ist darüber hinaus portabel und relativ einfach zu bedienen. Die lineare Antriebskomponente wies zwar einen systematischen Fehler in der Koordinatenaufzeichnung auf, dieser war jedoch über eine neue Koordinateninterpolation korrigierbar und wies hohe Regressionskoeffizienten auf. Der Drehantrieb funktionierte fehlerfrei. Diesen Ergebnissen stehen jedoch Nachteile gegenüber, die die Anwendbarkeit des Systems für Pflanzenuntersuchungen teilweise in Frage stellen.

So wurde in Kapitel 3.1 die Hypothese aufgestellt, dass Störeinflüsse soweit reduziert werden können, dass diese keine signifikante Beeinflussung des Systems darstellen. Für die Versuche mit den, von den Formparametern her rübenähnlichen Testkörpern  $T_A$  und  $T_B$  (vgl. Kapitel 5.3) konnte gezeigt werden, dass mehrere Hintergrundabzugsverfahren, sowie Time-Gating und Begrenzung der Scanstrecke erfolgreich zur Isolierung des gesuchten Signals beitragen. Bei den Hintergrundabzugsmechanismen wurde sogar ein Verfahren vorgestellt, das auch ohne Verwendung von Referenzmessungen sehr gute Ergebnisse lieferte, die von ungeübten Benutzern des Sensorsystems leicht interpretierbar sind. Bei der Anwendung dieser Methoden auf Pflanzenmaterial zeigte sich jedoch, dass zwar grundsätzlich Reflexionen der gesuchten Ziele (Wurzelbiomasse in verzweigter oder unverzweigter Form) generierbar sind, die Qualität dieser Reflexionen hing jedoch in hohem Maße von den spezifischen Eigenschaften des Ziels (Form, Größe, etc.) und dem jeweiligen Aufnahmewinkel ab. Selbst innerhalb einer Aufnahmeserie (mehrere Aufnahmen der gleichen Pflanze an einem Untersuchungstermin aus unterschiedlichen Winkeln) zeigten sich zum Teil gravierende Unterschiede in der Reflexionscharakteristik.

Darüber hinaus traten Stör- bzw. Begleitreflexionen aus anderen Quellen (oberirdische Biomasse, Substratoberfläche, etc.) auf, deren Reflexionsintensität die der Wurzelkörper deutlich überstieg. Vor allem die Reflexionen an der oberirdischen Biomasse waren relativ stark und konnten auch mit Hilfe der Hintergrundabzugsmechanismen nicht vollständig entfernt werden.

Der Grund für diese starken Reflexionen liegt aller Wahrscheinlichkeit nach in dem hohen dielektrischen Gradienten begründet, der zwischen dem umgebenden Medium (Luft) und den übrigen Grenzflächen (Biomasse, Substrat, etc.) besteht. Während  $\epsilon_r$  für Luft einen Wert von  $\sim 1$  annimmt (DAVIS & ANNAN, 1989), liegt  $\epsilon_r$  für die oberirdische Biomasse und das Substrat deutlich höher, da diese wasserführend sind und Wasser im Bereich der Geologie sehr hohe Werte für  $\epsilon_r$  annimmt (DAVIS & ANNAN, 1989). Der Gradient von  $\epsilon_r$  der Wurzeln zum  $\epsilon_r$  des Substrats scheint deutlich geringer zu sein, so dass die Reflexionen entsprechend schwächer ausfallen.

Vorhergehende Studien belegen, dass die Detektion von Biomasse im Boden zwar grundsätzlich ebenso möglich ist, wie deren Quantifizierung anhand der reflektierten Strahlung, in diesen Untersuchungen herrschten jedoch andere Rahmenbedingungen, die die Anwendungen von GPR begünstigten. Untersuchungen von HRUSKA et al. (1999) und BUTNOR et al. (2001, 2003) zeigten, dass die Wurzelsysteme von Bäumen mit Hilfe von GPR-Technik unter bestimmten Bedingungen relativ gut untersucht werden konnten. Im Gegensatz zu den hier durchgeführten Messungen wurden diese jedoch im Feld mit permanentem Bodenkontakt der Antenne durchgeführt. Dadurch wurde zum einen die Schichtgrenze Luft-Boden minimiert, was störende Reflexionen an der Bodenoberfläche vermied, zum anderen stand mit dem natürlichen Boden eine Schicht mit mehreren Metern Mächtigkeit zur Verfügung, in denen sich die elektromagnetische Strahlung ausbreiten konnte. Unter den hier vorgestellten Gewächshausbedingungen war die Mächtigkeit des Substrates durch die Pflanzgefäßoberfläche begrenzt und ein ständiger Kontakt zur Gefäßoberfläche konnte aufgrund der zylindrischen Form nicht hergestellt werden. Die hierdurch entstehenden Grenzschichten (Substrat-Pflanzgefäß-Luft) sorgten offensichtlich für starke Störreflexionen, die den unterirdischen Teil der Biomasse, vor allem bei geringen Abmessungen, zum Teil erheblich überlagerten. Untersuchungen mit einem „off-ground“ UWB-GPR-System an Zuckerrüben (KONSTANTINOVIC, 2007) zeigten zwar, dass die Biomasse von Zuckerrüben anhand der reflektierten Strahlung durchaus quantifiziert werden konnte, doch auch bei diesen Untersuchungen gab es deutliche Einschränkungen. Dies waren in aller Regel die Umweltbedingungen, vor allem Bodenrauhigkeit und Bodenwassergehalt, sowie das Blattwerk der Zuckerrüben, dessen Reflexionen die der Zuckerrübe überlagerten.

Gute Ergebnisse konnten deshalb erst nach Entfernung des Blattwerkes erreicht werden, wenn die Umweltbedingungen günstig waren (niedriger Bodenwassergehalt, geringe Oberflächenrauigkeit, etc.). Darüber hinaus war das Ziel dieser Untersuchung die Quantifizierung der Rübenmasse, für die zum einen auch der oberirdische Teil der Rübe als Reflektor genutzt werden konnte und zum anderen keine direkte Abbildung der Speicherwurzelmorphologie notwendig war. Diese Studien sind mit den hier vorgestellten Ergebnissen deshalb, trotz Analogien in der Pflanzenmorphologie, nicht direkt vergleichbar, zumal auch dort ein mehrere Meter mächtiger Erdhorizont vorlag.

Die Versuche mit einer Metallplatte, welche zum umgebenden Substrat einen starken dielektrischen Gradienten aufwies, zeigen jedoch auch, dass offensichtlich genug elektromagnetische Strahlung in das Substrat eindringt und an der Metallplatte reflektiert wird, um diese zu identifizieren. Dies gilt nicht nur bei Anordnung der Platte an der Vorderseite, sondern auch in der Mitte und an der Rückseite des Gefäßes. Die Mächtigkeit des Substrates (bzw. der Durchmesser des Pflanzgefäßes) allein kann deshalb keine ausreichende Erklärung für die schlechte Detektierbarkeit der Speicherwurzeln liefern. Vielmehr scheinen dagegen tatsächlich die Form der Speicherwurzeln, deren Größe und der geringe dielektrische Gradient zum umgebenden Medium als Ursachen im Vordergrund zu stehen. In jedem Fall konnten weder eine Senkung des Substrat-Wassergehaltes noch eine Entfernung des Blattwerkes die Reflexionen der Wurzelkörper derart hervorheben, dass diese durchgängig in den Radargrammen sichtbar wurden.

Auch wenn die Reflexionsdaten der Zuckerrüben qualitativ nur an einigen ausgewählten Beispielen erläutert und diskutiert wurden, zeigen die gewählten Beispiele jedoch sehr eindrücklich, dass sich aus den Reflexionsdaten von Zuckerrüben- und Mangoldpflanzen keine Muster ableiten lassen, anhand derer die Pflanzen, bzw. das spezifische Wurzelwerk, als solche identifiziert werden können. Neben den qualitativen Aspekten wurde bei den Zuckerrüben auch kein quantitativer Zusammenhang zwischen Reflexionseigenschaften und Wurzelmorphologie (Größe des Wurzelkörpers) gefunden, der die Gültigkeit dieser Aussage für alle übrigen untersuchten Pflanzen noch einmal unterstreicht.

Im Vergleich zu den anderen nicht-destruktiven Methoden, welche zur Abbildung der Wurzelmorphologie von Pflanzen genutzt werden können, muss festgehalten werden, dass das vorgestellte RADAR-System die gestellten Erwartungen nicht erfüllt hat. MRT realisierte in Untersuchung Auflösungen im  $\mu\text{m}$ -Bereich und erzeugte hochauflösende, dreidimensionale Bilder von Wurzelkörpern auch von Zuckerrüben (JAHNKE et al., 2009), ähnlich wie auch CT-Systeme. Das RADAR-System war in der gegebenen Konfiguration zu solchen Auflösungen nicht in der Lage und lieferte Reflexionsdaten, die die Morphologie der untersuchten Wurzeln

nur unzureichend wiedergeben. Die Leistungsfähigkeit von MRT-Systemen und auch CT-Systemen wird damit nicht erreicht. Selbst wenn eine geringere Auflösung des Wurzelkörpers im Hinblick auf die geringeren Kosten des Systems akzeptiert werden könnte, so ist die gezeigte Leistungsfähigkeit trotzdem unzureichend.

Das System kann daher in seiner jetzigen Konfiguration nicht für die Phänotypisierung der Wurzelarchitektur von Pflanzen, insbesondere Zuckerrüben und Mangold, eingesetzt werden. Für eine Applikation dieses Systems, speziell im Hinblick auf pflanzenzüchterische Fragestellungen, wäre eine Modifikation bzw. Weiterentwicklung an mehreren Stellen notwendig. Der weitere Forschungsbedarf hierfür wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

## 7 Ausblick

Da die Anwendung von UWB-RADAR als Sensorsystem für die Analyse der Wurzelarchitektur von Zuckerrüben und Mangold kein hinreichendes Auflösungsvermögen aufwies, sollten für eine weitere Verwendung Verbesserungen an mehreren Stellen des Sensorsystems vorgenommen werden. Diese werden im Folgenden in Verbesserungsmöglichkeiten des Sensorsystems selbst (Hardware) und Verbesserungsmöglichkeiten der Datenauswertung (Software) unterteilt.

### **Verbesserungs- und Modifikationsmöglichkeiten der Hardware**

- An Stelle der verwendeten Horn-Antennen könnten Antennen verwendet werden, die mit einem Dielektrikum gefüllt sind. Diese Füllung hat den Vorteil, dass die Abmessungen der Antenne entsprechend kompakter gestaltet werden können (SCHEERS ET AL., 2000), so dass die elektromagnetischen Wellen sich auf eine kleinere Fläche verteilen und besser fokussiert werden können.
- Zur Verbesserung der Positionierung in vertikaler Richtung sollte das RADAR durch den Linearantrieb getriggert werden, so dass die geforderten Positionen genau erreicht werden. Da das vorhandene System diese Möglichkeit jedoch nicht unterstützt wäre hierfür ein Austausch der Antriebskomponenten bzw. des Controllers erforderlich.
- Zur Vermeidung unerwünschter Reflexionen in der Umgebung des RADARs sollte ein Raum mit möglichst wenig Metallflächen gewählt werden. Alternativ ist auch eine Abdeckung der betreffenden Stellen mit RADAR absorbierenden Materialien (RAM) möglich.
- Durch den Einbau eines Netzwerkanalysators könnte die erzeugte MLBS exakt erfasst und mit der reflektierten Sequenz sehr präzise korreliert werden. Durch die Kenntnis des hinlaufenden Spektrums wäre auch eine Entfaltung der Impulsantwort aus dem reflektierten Spektrum möglich, was das Auflösungsvermögen des Systems noch einmal deutlich verbessern dürfte. Eine entsprechende Funktion ist in der Kontrollsoftware bereits integriert.



## Verbesserungs- und Modifikationsmöglichkeiten der Software

- Sobald die reale MLBS des RADAR-Systems erfasst ist, kann diese mit Hilfe einer Entfaltungsoperation aus dem empfangenen Spektrum entfaltet werden (WÖCKEL et al., 2006), so dass die Impulsantwort des Ziels (eigentliche Reflexion des Wurzelkörpers) wesentlich genauer erfasst werden kann. Eine entsprechende Funktion müsste in die Auswertungssoftware integriert werden.
- Neben der Entfaltungsoperation wäre auch die Integration der Kirchoff-Migration in die Datenauswertung denkbar, da diese die reflektierte Energie auf den Scheitelpunkt der entstehenden Hyperbel zentriert, was die Analyse von Wurzelbiomasse wesentlich verbessert (BUTNOR et al., 2003).
- Für die Darstellung der vierdimensionalen Daten im Raum wären alternative Darstellungsmethoden hilfreich, die zum einen zur Erstellung eines plastischen Modells beitragen und zum anderen der Drehbewegung Rechnung tragen, die in den bisherigen Darstellungsmethoden nur unzureichend berücksichtigt wurde.

Die hier aufgezeigten Möglichkeiten belegen, dass das vorgestellte System noch Entwicklungspotenzial besitzt, welches sich zu großen Teilen erst im Verlauf der Versuchsdurchführung und Datenanalyse offenbarte. Weitere Entwicklungen sollten diese Vorschläge aufnehmen und das RADAR-System in diese Richtung verbessern. Mit gesteigerter Auflösung und einer besseren Erfassung der unterirdischen Biomasse wäre dann auch eine präzise Diskriminierung zwischen verzweigenden Speicherwurzelssystemen, wie bei Mangold, und unverzweigten Systemen, wie bei Zuckerrüben, denkbar.

## 8 Literaturverzeichnis

- ALKADHI, H.; LESCHKA, S.; MARINCEK, B.; FLOHR, T. (2009). Praxisbuch Herz-CT. Grundlagen, Durchführung, Befundung. 1. Aufl., Springer-Verlag, Heidelberg.
- ALLRED, B. J.; DANIELS, J. J.; FAUSEY, N. R.; CHEN, C.; PETERS JR, L.; YOUN, H. (2005). Important considerations for locating buried agricultural drainage pipe using ground penetrating radar. *Applied engineering in agriculture*, 21 (1), S. 71–87.
- ALONSO, M.; FINN, E. J. (2000). Physik. 3., durchges. Aufl., Oldenbourg, München.
- AMBERGER, A. (1996). Pflanzenernährung. Ökologische und physiologische Grundlagen, Dynamik und Stoffwechsel der Nährelemente. 4., völlig Neubearb. Aufl., Ulmer, Stuttgart.
- ANONYM (2012). Züchtungsziele. Bund Deutscher Pflanzenzüchter (BDP), verfügbar unter: [http://www.bdp-online.de/de/Pflanzenzuechtung/Zuechtung\\_und\\_Forschung/Zuechtungsziele/](http://www.bdp-online.de/de/Pflanzenzuechtung/Zuechtung_und_Forschung/Zuechtungsziele/), Zuletzt geprüft am: 05.11.2012.
- ARCONE, S. A. (1996). High resolution of glacial ice stratigraphy: a ground-penetrating radar study of Pegasus Runway, McMurdo Station, Antarctica. *Geophysics*, 61 (6), S. 1653–1663.
- BLÜMLER, P.; WINDT, C. W.; VAN DUSSCHOTEN, D. (2009). Magnetic resonance of plants. *Nova Acta Leopoldina*, 96 (357), S. 17–30.
- BÖGE, W.; FRANKE, P.; BÖGE, A. (2001). Elektrotechnik, Elektronik, Digitaltechnik, Steuerungstechnik. 5., überarb. und erw. Aufl., Vieweg, Braunschweig.
- BOTTOMLEY, P. A.; ROGERS, H. H.; FOSTER, T. H. (1986). NMR imaging shows water distribution and transport in plant root systems in situ. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 83 (1), S. 87–89.
- BRITAIN, J. E. (2008). Electrical Engineering Hall of Fame: Albert H. Taylor. *Proceedings of the IEEE*, 96 (4), S. 745–747.
- BROWN, J.; CALIGARI, P. (2011). *An Introduction to Plant Breeding*. John Wiley & Sons, Hoboken.
- BROWN, J. M.; JOHNSON, G. A.; KRAMER, P. J. (1986). In Vivo Magnetic Resonance Microscopy of Changing Water Content in *Pelargonium hortorum* Roots. *Plant Physiology*, 82 (4), S. 1158–1160.
- BRUSCHINI, C.; GROS, B.; GUERNE, F.; PIECE, P.-Y.; CARMONA, O. (1998). Ground penetrating radar and imaging metal detector for antipersonnel mine detection. *Journal of Applied Geophysics*, 40 (1-3), S. 59–71.
- BUTNOR, J. R.; DOOLITTLE, J. A.; JOHNSEN, K. H.; SAMUELSON, L.; STOKES, T.; KRESS, L. (2003). Utility of Ground-Penetrating Radar as a Root Biomass Survey Tool in Forest Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67 (5), S. 1607–1615.
- BUTNOR, J. R.; DOOLITTLE, J. A.; KRESS, L.; COHEN, S.; JOHNSEN, K. H. (2001). Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree Physiology*, 21 (17), S. 1269–1278.

- CARIN, L.; GENG, N.; MCCLURE, M.; SICHINA, J.; NGUYEN, L. (1999). Ultra-wide-band synthetic-aperture radar for mine-field detection. *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, 41 (1), S. 18–33.
- CHEN, C.-C.; NAG, S.; BURNSIDE, W. D.; HALMAN, J. I.; SHUBERT, K. A.; PETERS, L., JR. (2000). A standoff, focused-beam land mine radar. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 38 (1), S. 507–514.
- CHIGNELL, R. J. (1998). "Minerec" a development platform for anti-personnel mine detection and recognition. *Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines. (Conf. Publ. No. 458)*, S. 64–67.
- COOK, J. C. (1975). Radar transparencies of mine and tunnel rocks. *Geophysics*, 40 (5), S. 865–885.
- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R. S. (1985). Static and Dynamic Three-Dimensional Studies of Water in Soil Using Computed Tomographic Scanning. *Soil science*, 140 (5), S. 326.
- DANIELS, D. J. (2004). Introduction. in: DANIELS, D. J. (Hrsg.): *Ground Penetrating Radar*, 1. Auflage, S. 1–12, Institution of Electrical Engineers, London.
- DANIELS, J. J. (2000). *Ground Penetrating Radar Fundamentals*. Prepared as an appendix to a report to the U.S. EPA, Region V, verfügbar unter: <http://www.geology.ohio-state.edu/~jeff/Library/BASICS.PDF>, Zuletzt geprüft am: 20.11.2012.
- DAVIS, J. L.; ANNNAN, A. P. (1989). Ground-Penetrating RADAR for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37 (5), S. 531–551.
- DEMTRÖDER, W. (2006). *Experimentalphysik 2. Elektrizität und Optik*. 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- DIEPENBROCK, W.; FISCHBECK, G.; HEYLAND, K.-U. (1999). *Spezieller Pflanzenbau*. 3., neubearb. und erg. Aufl, Ulmer, Stuttgart.
- DOBRINSKI, P.; KRAKAU, G.; VOGEL, A. (2006). *Physik für Ingenieure*. 11., durchges. Aufl., Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- DÖSSEL, O. (2000). *Bildgebende Verfahren in der Medizin. Von der Technik zur medizinischen Anwendung*, Springer, Berlin.
- DORN, F.; BADER, F. (1986). *Physik Oberstufe Gesamtband 12/13*. Schroedel, Hannover.
- EISEN, O.; NIXDORF, U. W.; KECK, L.; WAGNER, D. (2003). Alpine ice cores and ground penetrating radar: combined investigations for glaciological and climatic interpretations of a cold Alpine ice body. *Tellus B*, 55 (5), S. 1007–1017.
- FIDLER, J. (2004). Archaeology, Introduction. in: DANIELS, D. J. (Hrsg.): *Ground Penetrating Radar*, 1. Auflage, S. 353–354, Institution of Electrical Engineers, London.
- FREELAND, R. S.; YODER, R. E.; AMMONS, J. T. (1998). Mapping shallow underground features that influence site-specific agricultural production. *Journal of Applied Geophysics*, 40 (1-3), S. 19–27.
- GERTHSEN, C.; MESCHÉDE, D. (2004). *Physik*. 22., völlig neu bearb. Aufl., Springer, Berlin.

- GOODMAN, D. (1994). Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, 59 (2), S. 224–232.
- GOYEN, M. (2006). *Echte Ganzkörper-MRT. Voraussetzungen, Indikationen, Perspektiven*, ABW Wiss.-Verl., Berlin.
- HAINSWORTH, J. M.; AYLMOORE, L. A. (1983). The use of computer assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. *Soil Research*, 21 (4), S. 435–443.
- HEERAMAN, D. A.; HOPMANS, J. W.; CLAUSNITZER, V. (1997). Three dimensional imaging of plant roots in situ with X-ray Computed Tomography. *Plant and Soil*, 189 (2), S. 167–179.
- HEILIG, A.; SCHOBER, M.; SCHNEEBELI, M.; FELLIN, W. (2008). Next level for snow pack monitoring in real-time using Ground-Penetrating Radar (GPR) technology. *International Snow Science Workshop, Whistler*, S. 111–117.
- HO, K. C.; CARIN, L.; GADER, P. D.; WILSON, J. N. (2008). An Investigation of Using the Spectral Characteristics From Ground Penetrating Radar for Landmine/Clutter Discrimination. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 46 (4), S. 1177–1191.
- HRUSKA, J.; CERMAK, J.; SUSTEK, S. (1999). Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiology*, 19 (2), S. 125–130.
- HÜLSMEYER, C. (1904). Verfahren um entfernte metallische Gegenstände mittels elektrischer Wellen einem Beobachter zu melden, Patent Nr.: 165546, Deutschland, 30.04.1904.
- INMAN, D. J.; FREELAND, R. S.; AMMONS, J. T.; YODER, R. E. (2002). Soil Investigations using Electromagnetic Induction and Ground-Penetrating Radar in Southwest Tennessee. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66 (1), S. 206–211.
- INSTANES, A.; LONNE, I.; SANDAKER, K. (2004). Location of avalanche victims with ground-penetrating radar. *Cold Regions Science and Technology*, 38 (1), S. 55–61.
- JACKSON, S. A.; THOMAS, M. (2009). *CT, MRT, Ultraschall auf einen Blick. 1. dt. Aufl.*, Elsevier Urban & Fischer, München.
- JAHNKE, S.; MENZEL, M. I.; VAN DUSSCHOTEN, D.; ROEB, G. W.; BÜHLER, J.; MINWUYELET, S.; BLÜMLER, P.; TEMPERTON, V. M.; HOMBACH, T.; STREUN, M.; BEER, S.; KHODAVERDI, M.; ZIEMONS, K.; COENEN, H. H.; SCHURR, U. (2009). Combined MRI–PET dissects dynamic changes in plant structures and functions. *The Plant Journal*, 59 (4), S. 634–644.
- JOSCHKO, M.; GRAFF, O.; MÜLLER, P. C.; KOTZKE, K.; LINDNER, P.; PRETSCHNER, D. P.; LARINK, O. (1991). A non-destructive method for the morphological assessment of earthworm burrow systems in three dimensions by X-ray computed tomography. *Biology and Fertility of Soils*, 11 (2), S. 88–92.
- JUNG, C. (2008). *Biotechnologische Methoden in der Pflanzenzüchtung. Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 3, S. 83–85.
- KINGSLEY, S.; QUEGAN, S. (1992). *Understanding radar systems*. McGraw-Hill, London.
- KONSTANTINOVIC, M. (2007). *In-Soil Measuring of Sugar Beet Yield Using UWB Radar Sensor System*. Univ. Diss., Universität Bonn

- KROMER, K. H.; BERTRAM, H. H.; BECKMANN, A.; HEIER, L.; HEINTGES, M.; JAKUBOWSKI, H.; STRAETZ, J. (2004). Test Procedures for Measuring the Quality of Sugar Beet - Seed, Drillability, Precision Seeders, Harvesters, Cleaner Loaders. IIRB, Brüssel.
- KUCHLING, H. (2007). Taschenbuch der Physik. 19., aktualisierte Aufl, Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., München.
- LACOMME, P.; FREYSZ, M.-L. (2001). Air and spaceborne radar systems. An introduction, Inst. of Electrical Engineers [u.a.], Stevenage.
- LUDLOFF, A. (2008). Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung. 4., erg. und erw. Aufl., Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- LUNT, I. A.; HUBBARD, S. S.; RUBIN, Y. (2005). Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. *Journal of Hydrology*, 307 (1-4), S. 254–269.
- MAIERHOFER, C. (2000). Radaranwendungen im Bauwesen. *ZfP-Zeitung*, 72, S. 43–50.
- MAIERHOFER, C.; LEIPOLD, S.; WÖSTMANN, J. (1999). Strukturuntersuchungen in Beton mit Impulsradar. *DGZfP-Berichtsband 66-CD*, S. 47–57.
- MANACORDA, G.; MINIATI, M.; SARRI, A.; CONSANI, M.; PENZO, A. (2004). Designing a GPR system for the snow-thickness measurement on mounts everest and karakoram 2. *Ground Penetrating Radar, 2004. GPR 2004. Proceedings of the Tenth International Conference on*, 1, S. 167–170.
- MARKWELL, J.; OSTERMAN, J.; MITCHELL, J. (1995). Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, 46 (3), S. 467–472.
- MATHWORKS (2009). MATLAB 2009a Dokumentation.
- MEIER, E.; STAUBLI, P.; MÜLLER, B. U.; STÜNZI, J.; SCHUBERT, E.; DUBOIS, D. (2002). Georadar – der zerstörungsfreie Blick in den Untergrund: Beispiele aus dem Naturschutzgebiet Zigermoos, Unterägeri/ZG und der Deponie Riet, Winterthur/ZH. *Bull. angew. Geol.*, 7 (1), S. 31–44.
- MONTOYA, T. P.; SMITH, G. S. (1999). Land mine detection using a ground-penetrating radar based on resistively loaded Vee dipoles. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 47 (12), S. 1795–1806.
- MÜLLER, G.; MÖSER, M. (2004). Taschenbuch der technischen Akustik. 3., erw. und überarb. Aufl., Springer, Berlin.
- MURPHY, D. J. (2007). *Plant breeding and biotechnology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- OKAMURA, S. (2000). Microwave Technology for Moisture Measurement. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 1 (2), S. 205–227.
- ONOE, M.; TSAO, J. W.; YAMADA, H.; NAKAMURA, H.; KOGURE, J.; KAWAMURA, H.; YOSHIMATSU, M. (1984). Computed tomography for measuring the annual rings of a live tree. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 221 (1), S. 213–220.
- PAUL, W.; SPECKMANN, H. (2004). Radarsensoren: neue Technologien zur präzisen Bestandesführung. *Landbauforschung Völkenrode*, 54 (2), S. 87–102.

- PEDROTTI, F. L.; PEDROTTI, L. S.; BAUSCH, W.; SCHMIDT, H. (2005). *Optik für Ingenieure*. 3. Auflage, Springer, Berlin.
- PERLO, J.; DEMAS, V.; CASANOVA, F.; MERILES, C. A.; REIMER, J.; PINES, A.; BLÜMICH, B. (2005). High-Resolution NMR Spectroscopy with a Portable Single-Sided Sensor. *Science*, 308 (5726), S. 1279.
- PETERSEN, H.; FLEIGE, H.; RABELL, W.; HORN, R. (2005). Anwendbarkeit geophysikalischer Prospektionsmethoden zur Bestimmung von Bodenverdichtungen und Substratheterogenitäten landwirtschaftlich genutzter Flächen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 168 (1), S. 68–79.
- PETROVIC, A. M.; SIEBERT, J. E.; RIEKE, P. E. (1982). Soil Bulk Density Analysis in Three Dimensions by Computed Tomographic Scanning. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46 (3), S. 445–450.
- PEVELING-OBERHAG, C.; SCHULZE LAMMERS, P. (2012). Non-Destructive Measuring of Root Crop Properties using UWB-RADAR. *Proceedings of International Conference of Agricultural Engineering (CIGR-AgEng, 2012)*, July 8-12, Valencia, Spain.
- PIERRET, A.; CAPOWIEZ, Y.; MORAN, C. J.; KRETZSCHMAR, A. (1999). X-ray computed tomography to quantify tree rooting spatial distributions. *Geoderma*, 90, S. 307–326.
- RAPER, R. L.; ASMUSSEN, L. E.; POWELL, J. B. (1990). Sensing hard pan depth with ground-penetrating radar. *Trans. ASAE*, 33 (1), S. 41–46.
- RAPPAPORT, C.; SILEVITCH, M.; MCKNIGHT, S.; DIMARZIO, C.; MILLER, E.; RAEMER, H. (2001). Multi-Mode Subsurface Sensing and Imaging for Land Mine Detection. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2 (3), S. 215–230.
- REISER, M.; SEMMLER, W. (2002). *Magnetresonanztomographie*. 3., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl., Springer, Berlin.
- REUSCH, S. (1997). Entwicklung eines reflexionsoptischen Sensors zur Erfassung der Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. *Univ. Diss., Universität Kiel*.
- SACHS, J. (1998). GPR: Probleme und Perspektiven. 43rd International Scientific Colloquium Technical University of Ilmenau, September 21-24, 1998.
- SACHS, J.; KMEC, M.; ZETIK, R.; PEYERL, P.; RAUSCHENBACH, P. (2005). Ultra wideband radar assembly kit. *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2005*. Seoul, Korea, S. 372–375.
- SACHS, J.; PEYERL, P. (1999). Ein neues Breitbandmeßverfahren für das Basisband. *IEEE Workshop on Short-Range Radar*, July 1999, TU Ilmenau, 1999.
- SACHS, J.; PEYERL, P.; RAUSCHENBACH, P.; TKAC, F.; KMEC, M.; CRABBE, S. (2003). Integrated Digital UWB-RADAR. in: MOKOLE, E. L. (Hrsg.): *Ultra-wideband, short-pulse electromagnetics 6*, S. 507–514.
- SACHS, J.; PEYERL, P.; ROßBERG, M.; RAUSCHENBACH, P.; FRIEDRICH, J. (2002). Ultra-Wideband Principles for Surface Penetrating Radar. *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 5*, S. 247–257.

- SAMBUELLI, L.; SOCCO, L. V.; BRECCIAROLI, L. (1999). Acquisition and processing of electric, magnetic and GPR data on a Roman site (Victimulae, Salussola, Biella). *Journal of Applied Geophysics*, 41 (2-3), S. 189–204.
- SATO, M.; HAMADA, Y.; FENG, X.; KONG, F.-N.; ZENG, Z.; FANG, G. (2004). GPR using an array antenna for landmine detection. *Near Surface Geophysics*, 2 (1), S. 7–13.
- SCHEERS, B.; PLASMAN, Y.; PIETTE, M.; ACHEROY, M. P. J.; VANDER VORST, A. (2000). Laboratory UWB GPR system for land mine detection. *Proc. SPIE 4084, Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar*, S. 747–752.
- SCHMITTMANN, O.; HIEN, P. (2001). Einzelrübenbezogene Ertragsmessung von Zuckerrüben. *Landtechnik*, 56 (SH 1), S. 195–197.
- SCHMITTMANN, O.; SCHULZE LAMMERS, P. (2003). Systeme zur Ertragsbestimmung bei Zuckerrüben. *Landtechnik*, 58 (3), S. 150 und 195.
- SCHULTZ, J. J. (2007). Using Ground-Penetrating Radar to Locate Clandestine Graves of Homicide Victims: Forming Forensic Archaeology Partnerships With Law Enforcement. *Homicide Studies*, 11 (1), S. 15–29.
- SCHULTZ, J. J. (2008). Sequential Monitoring of Burials Containing Small Pig Cadavers Using Ground Penetrating Radar. *Journal of Forensic Sciences*, 53 (2), S. 279–287.
- SCHULTZ, J. J.; COLLINS, M. E.; FALSETTI, A. B. (2006). Sequential Monitoring of Burials Containing Large Pig Cadavers Using Ground-Penetrating Radar. *Journal of Forensic Sciences*, 51 (3), S. 607–616.
- SCHWARZBECK, (2012a): Richtdiagramm der Doppelsteg-Breitband-Hornantenne BBHA 9120 A, Produktinformation, Schwarzbeck Mess-Elektronik, Schönau. Verfügbar unter: <http://www.schwarzbeck.com/Datenblatt/ri9120a.pdf>, Zuletzt geprüft am: 20.11.2012.
- SCHWARZBECK, (2012b): Abmessungen der Doppelsteg-Breitband-Hornantenne BBHA 9120 A, Produktinformation, Schwarzbeck Mess-Elektronik, Schönau. Verfügbar unter: <http://www.schwarzbeck.com/Datenblatt/d9120a.pdf>, Zuletzt geprüft am: 20.11.2012.
- SKOLNIK, M. I. (1990). *Radar handbook*. 2. Ed., McGraw Hill, New York.
- SLEPER, D. A.; POEHLMAN, J. M. (2006). *Breeding field crops*. 5th edition, Blackwell, Ames, Iowa.
- STERNBERG, B. K.; MCGILL, J. W. (1995). Archaeology studies in southern Arizona using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 33 (1-3), S. 209–225.
- STUPPY, W. H.; MAISANO, J. A.; COLBERT, M. W.; RUDALL, P. J.; ROWE, T. B. (2003). Three-dimensional analysis of plant structure using high-resolution X-ray computed tomography. *Trends in Plant Science*, 8 (1), S. 2–6.
- TAIT, P. (2005). *Introduction to radar target recognition*. Institution of Electrical Engineers, London.
- THIESSEN, E. (2002). *Optische Sensortechnik für den teilflächenspezifischen Einsatz von Agrarchemikalien*. Univ. Diss., Universität Kiel

- THOREN, D. (2007). Laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz zur Bestimmung des N-Gehaltes, der Biomasse und der Pflanzendichte - Technik, Feldmessungen und Einfluss der Lichtbedingungen. Univ. Diss., Technische Universität München
- TOLLNER, E. W. (1991). X-ray computed tomography applications in soil ecology studies. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 34, S. 251–260.
- TOOMAY, J. C.; HANNEN, P. J. (2004). Radar principles for the non-specialist. 3. ed., SciTech Publ., Raleigh, NC.
- TOPP, G. C. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water resources research*, 16 (3), S. 574–582.
- TORRIONE, P.; COLLINS, L. (2006). Ground Response Tracking For Improved Landmine Detection in Ground Penetrating Radar Data. IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2006), 31.7-4.8., Denver, USA, S. 153-156
- TOUSSAINT, E. (1978). Vererbung, Züchtung und Saatgut. in: GÖTZ, A. (Hrsg.): Pflanzenbau, 5., neubearb. und erw. Aufl, S. 200–206, Ulmer, Stuttgart.
- TRACY, S. R.; ROBERTS, J. A.; BLACK, C. R.; MCNEILL, A.; DAVIDSON, R.; MOONEY, S. J. (2010). The X-factor: visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography. *Journal of Experimental Botany*, 61 (2), S. 311–313.
- VAN AS, H.; VAN DUSSCHOTEN, D. (1997). NMR methods for imaging of transport processes in micro-porous systems. *Geoderma*, 80 (3-4), S. 389–403.
- VAN AS, H. (2007). Intact plant MRI for the study of cell water relations, membrane permeability, cell-to-cell and long distance water transport. *Journal of Experimental Botany*, 58 (4), S. 743–756.
- VAN DER MERWE, A.; GUPTA, I. J. (2000). A Novel Signal Processing Technique for Clutter Reduction in GPR Measurements of Small, Shallow Land Mines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38 (6), S. 2627-2637
- VAUGHAN, C. J. (1986). Ground-penetrating radar surveys used in archaeological investigations. *Geophysics*, 51 (3), S. 595–604.
- VITEBSKIY, S.; CARIN, L.; RESSLER, M. A.; LE, F. H. (1997). Ultra-wideband, short-pulse ground-penetrating radar: simulation and measurement. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 35 (3), S. 762–772.
- WEISHAUPT, D.; KOECHLI, V. D.; MARINCEK, B. (2009). Wie funktioniert MRI? Eine Einführung in Physik und Funktionsweise der Magnetresonanzbildgebung. 6. Aufl., Springer-Verlag, Heidelberg.
- WILD, K.; RUHLAND, S.; HAEDICKE, S. (2003). Performance of Pulse Radar Systems for Crop Yield Monitoring. 2003 ASAE Annual International Meeting, 27.-30.07, Las Vegas, Nevada, USA,
- WÖCKEL, S.; KONSTANTINOVIC, M.; SACHS, J.; SCHULZE LAMMERS, P.; KMEC, M. (2006). Application of ultra-wideband M-Sequence-Radar to detect sugar beets in agricultural soils. 19.-22. Juni, Columbus, Ohio, USA.



YAROVY, A. G.; VAN GENDEREN, P.; LIGTHART, L. P. (2000). Ground penetrating impulse radar for land mine detection. Proc. SPIE 4084, Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar, S. 856–860.

## 9 Anhang

### 9.1 Richtcharakteristik der verwendeten Hornantennen

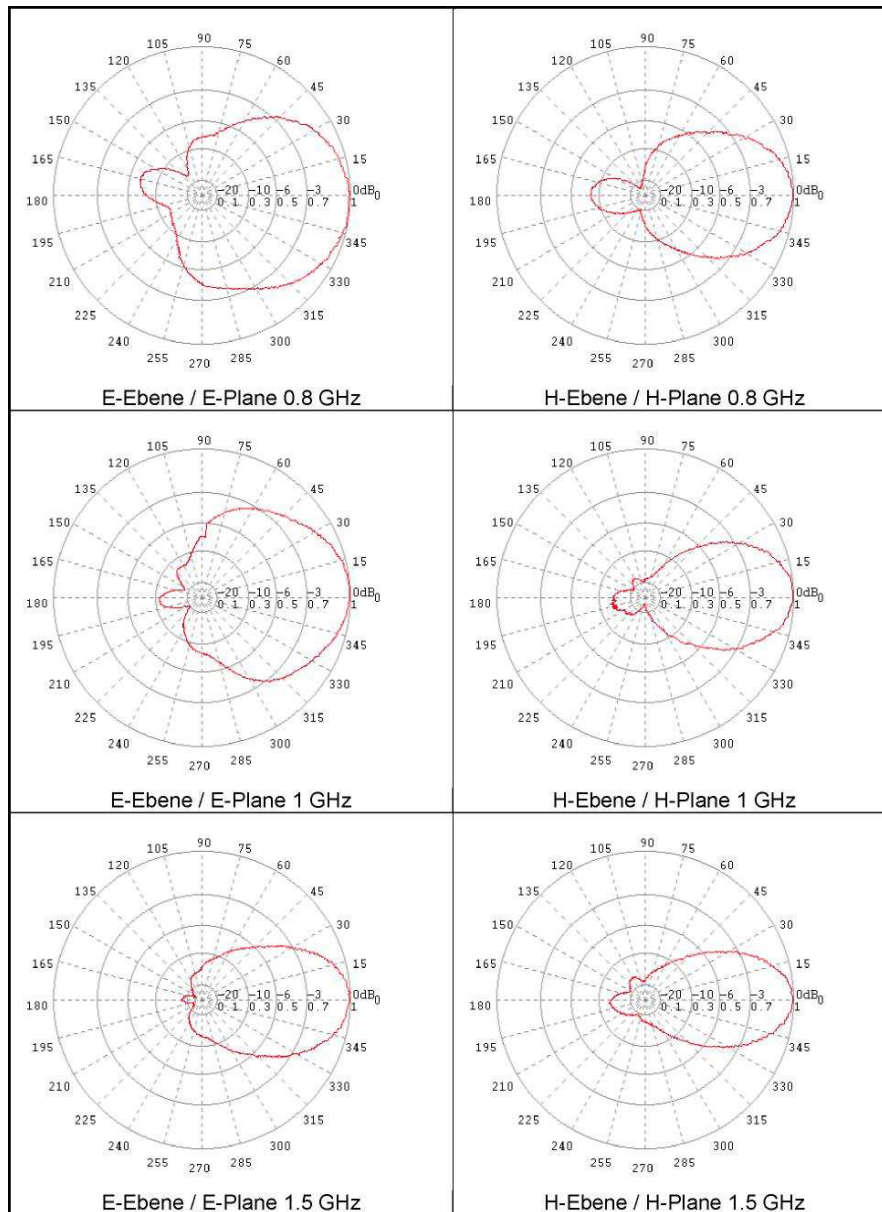


Abbildung 50: Richtcharakteristik der verwendeten Hornantenne (BBHA 9120 A) im Frequenzbereich von 0,8; 1 und 1,5 GHz für das elektrische Feld (E-Ebene) und das magnetische Feld (H-Ebene); nach SCHWARZBECK (2012a), verändert

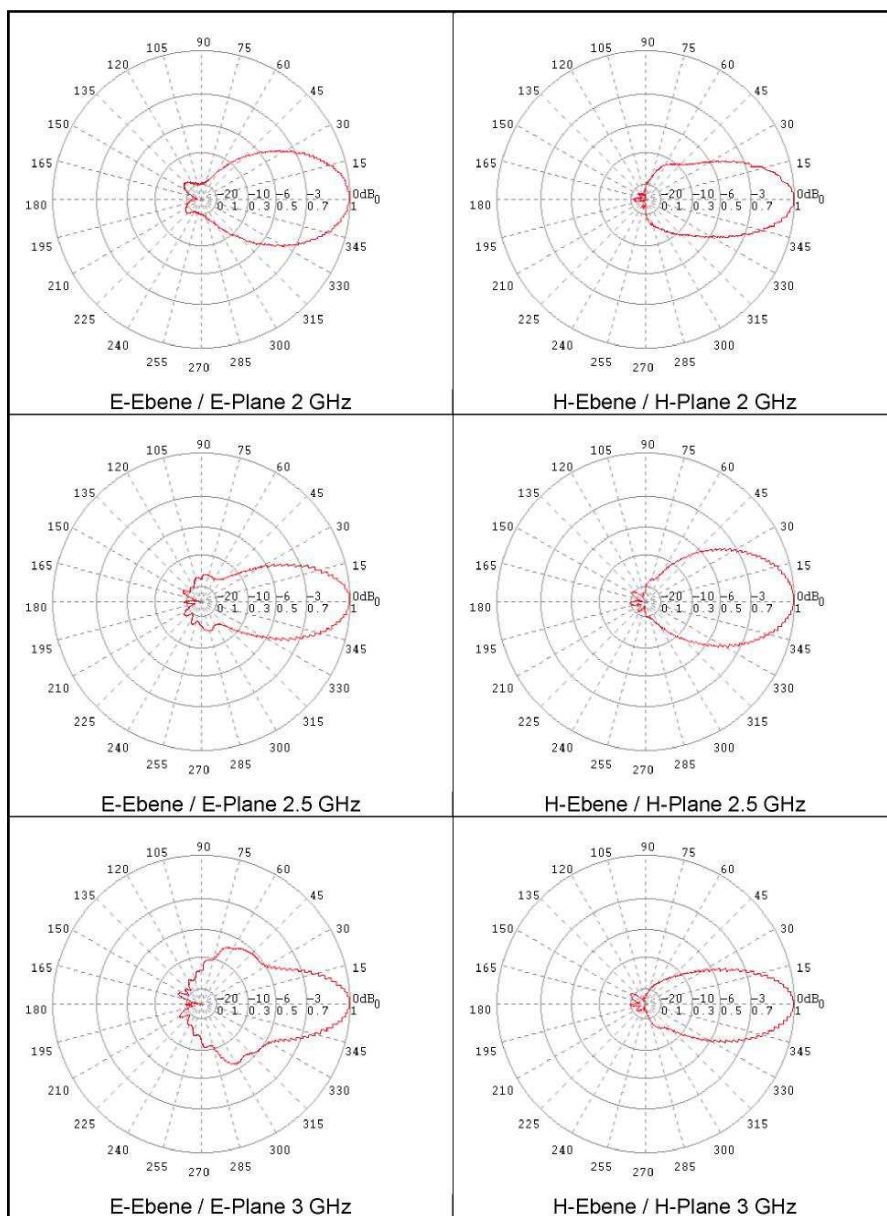


Abbildung 51: Richtcharakteristik der verwendeten Hornantenne (BBHA 9120 A) im Frequenzbereich von 2; 2,5 und 3 GHz für das elektrische Feld (E-Ebene) und das magnetische Feld (H-Ebene); nach SCHWARZBECK (2012a), verändert

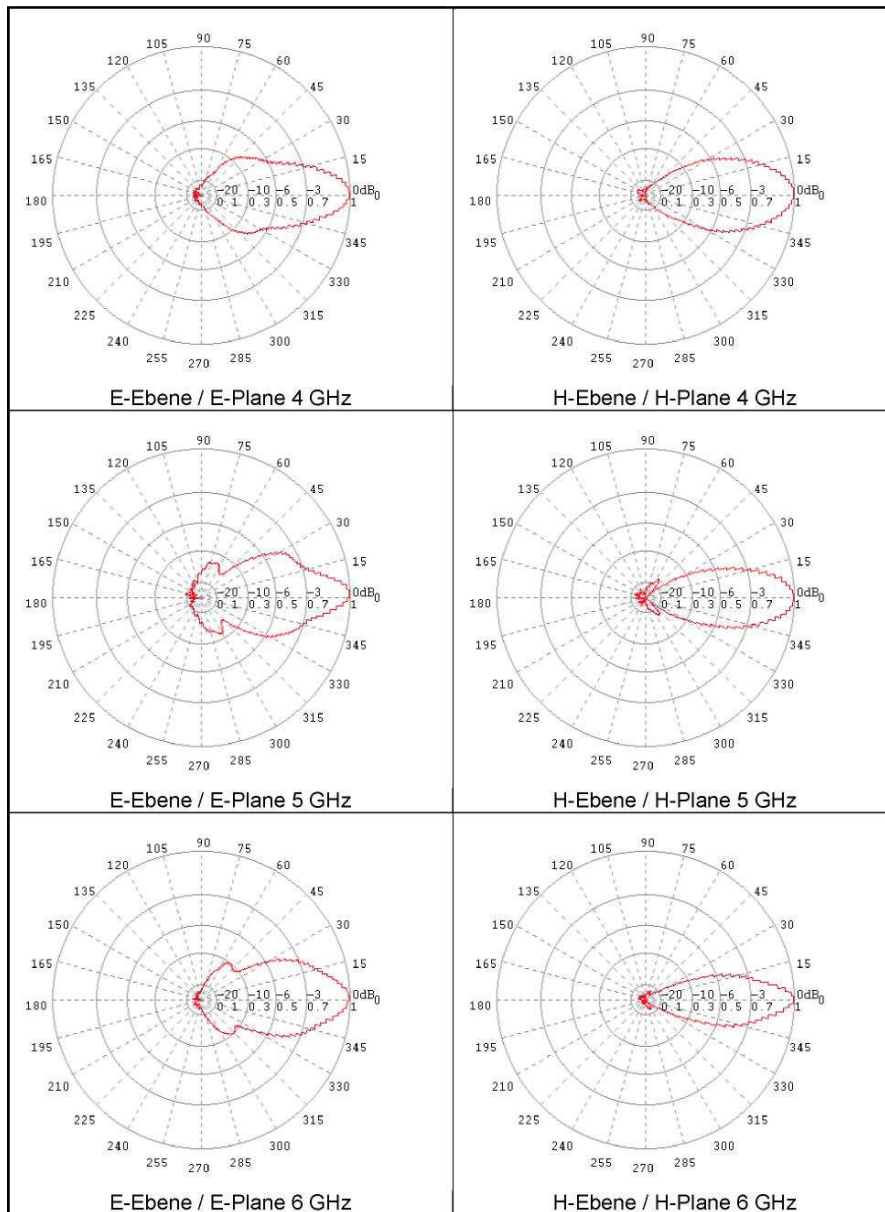


Abbildung 52: Richtcharakteristik der verwendeten Hornantenne (BBHA 9120 A) im Frequenzbereich von 4; 5 und 6 GHz für das elektrische Feld (E-Ebene) und das magnetische Feld (H-Ebene); nach SCHWARZBECK (2012a), verändert

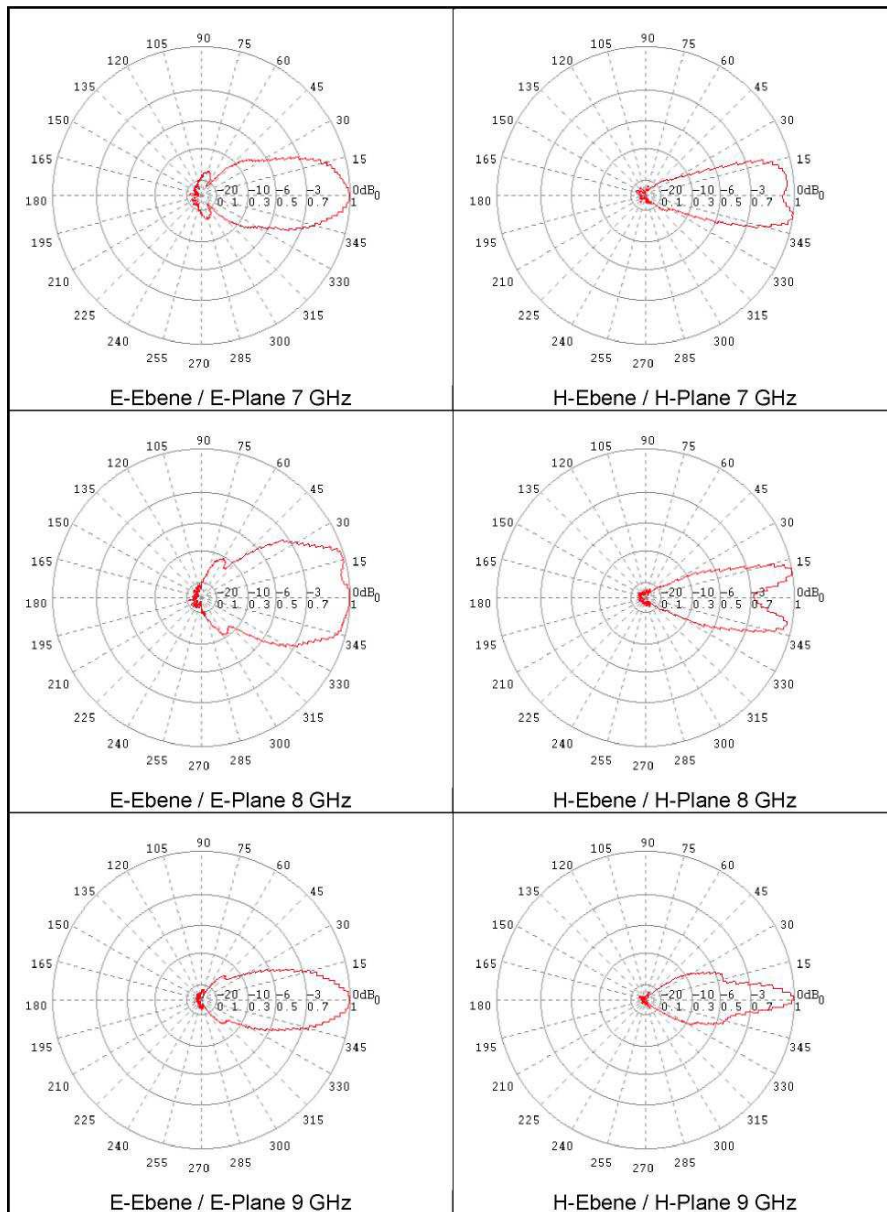


Abbildung 53: Richtcharakteristik der verwendeten Hornantenne (BBHA 9120 A) im Frequenzbereich von 7; 8 und 9 GHz für das elektrische Feld (E-Ebene) und das magnetische Feld (H-Ebene). Nach SCHWARZBECK (2012a) verändert

## 9.2 Abmessungen der verwendeten Antennen

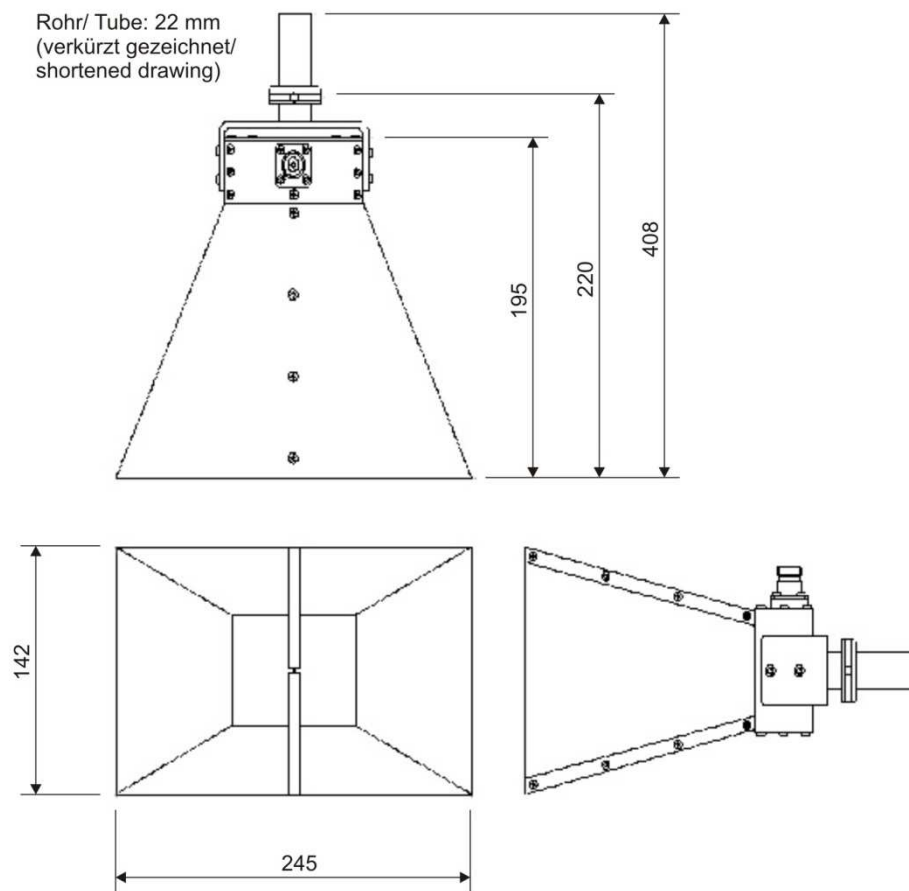


Abbildung 54: Abmessungen der verwendeten Hornantennen (alle Bemaßungen in mm) nach SCHWARZBECK (2012b), verändert

### 9.3 Eigenschaften des verwendeten Düngemittels

Handelsname	Hakaphos® Blau 15+10+15+2
Hersteller	COMPO Expert GmbH, Münster
Schüttgewicht	1.130 kg·m <sup>-3</sup>
pH-Wert	2,8 (10%ige Stammlösung)
Physiologische Wirkung	Sauer

#### Zusammensetzung

Gesamtstickstoff (N)	15%
Nitratstickstoff (NO <sub>3</sub> )	4,5%
Ammoniumstickstoff (NH <sub>4</sub> )	10,5%
Phosphat (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	10%
Kalium (K <sub>2</sub> O)	15%
Magnesium (MgO)	2%
Bor (B)	0,01%
Kupfer (Cu) <sup>#</sup>	0,02%
Eisen (Fe) <sup>#</sup>	0,075%
Mangan (Mn) <sup>#</sup>	0,05%
Molybdän (Mo)	0,001%
Zink (Zn) <sup>#</sup>	0,015%
N-P-K-Verhältnis	1:0,7:1
NO <sub>3</sub> :NH <sub>4</sub> -Verhältnis	30:70

Alle Angaben gemäß dem Produktdatenblatt des Herstellers.

<sup>#</sup>: als Chelat von EDTA zum Schutz gegen Festlegung

## **Danksagung**

Bei der Anfertigung dieser Dissertation und der Durchführung der damit verbundenen Versuche haben viele Menschen mitgewirkt. Diesen Menschen möchte ich mich hiermit sehr herzlich für die stetige Mithilfe danken, insbesondere:

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Schulze Lammers für die Überlassung des Themas und die stetige Unterstützung während meiner Dissertation.

Herrn Prof. Dr. Biermann und Herrn Prof. Dr. Scherer für die Übernahme des Koreferats bzw. des Vorsitzes meiner mündlichen Prüfung.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Landtechnik für die stetige Unterstützung im Rahmen des Forschungsprojektes und allen anderen Institutsaktivitäten.

Herrn Prof. Dr. Yurui Sun von der China Agricultural University (Peking) und seinen Mitarbeitern und Doktoranden für die Unterstützung meiner Arbeit in Bonn und insbesondere für die Mithilfe bei den Messungen in Peking.

Herrn Josef Bauer und Dr. Manfred Trimborn für die Unterstützung bei der Anzucht und Pflege der Versuchspflanzen.

Herrn Dr. Udo Uschkerat für die Unterstützung bei der RADAR-Signalauswertung und die Bereitstellung entsprechender Hardware.

Den Mitgliedern der einzelnen CROP.SENSE.net Forschungsgruppen für Ihre stetige Mithilfe. Insbesondere Herrn Prof. Dr. Goldbach, Herrn Prof. Dr. Jung, Herrn Dr. Kopisch-Obuch und Herrn Dr. Metzner

Meiner Familie meinen Verwandten und Freunden für die stetige Unterstützung und Hilfsbereitschaft.