

Autonome Feldroboter

ARNO RUCKELSHAUSEN

1 Stand der Technik

Die Agrartechnologie hat sich zu einem High-Tech-Bereich mit höchster Relevanz für die globalen Herausforderungen Ernährung und Energie sowie Landschaftspflege entwickelt. So erfordert die Lösung der Ernährungsprobleme eine Steigerung der Produktion bei gleichzeitiger Schonung der Umwelt (low input) und einer Optimierung der Verteilung von Lebensmitteln (QAIM et al. 2008). Die Nutzung der technologischen Fortschritte in der Informatik, Elektronik und der Sensorik ist eine Schlüsselkomponente zur Lösung dieser globalen Herausforderung. In der Agrartechnologie stellen diese Bereiche mittlerweile eine Kernkompetenz dar; der überwiegende Anteil von Innovationen in der Landtechnik basiert auf der Integration intelligenter Systeme in den Agrarprozess.

Nach einer anfänglichen Unterschätzung des Aufwandes für die Bereiche Software und Elektronik zur Entwicklung robuster Systemlösungen werden Automatisierungssysteme zunehmend in die Praxis eingeführt, z.B. automatische Lenksysteme zur Fahrerassistenz oder die sensorgesteuerte Düngung. Wesentliche Hemmnisse für eine zügigere Praxiseinführung sind derzeit die automatisierte Erfassung und Weiterverarbeitung von Daten sowie die Umsetzung der technischen Informationen in Handlungsanweisungen. Aus Sicht der landwirtschaftlichen Betriebe führt die Automatisierungstechnik zu den Optionen teilflächenspezifische Bewirtschaftung und Flottenmanagement. In diesen Bereichen der Landtechnik-Automatisierung, die häufig unter dem Begriff „Precision Farming“ zusammengefasst werden, gibt es bereits kommerziell verfügbare Systeme.

Die nächste Stufe des Automatisierungsgrades ist die Einführung der Feldrobotik (AUERNHAMMER 2001). Betrachtet man hierbei das Flottenmanagement in der Außenwirtschaft, so gibt es mehrere Optionen:

- Kombination von bemannten und unbemannten Fahrzeugen existierender Konzepte (teilautonome Flotten)
- Unbemannte Fahrzeuge existierender Konzepte (autonome Flotten)
- Kombination von bemannten Fahrzeugen existierender Konzepte und unbemannten Fahrzeugen neuer Konzepte (teilautonome Flotten mit Feldrobotern)
- Unbemannte Fahrzeuge neuer Konzepte (autonome Feldroboterschwärme)

Aus Sicht der Automatisierungstechnik ist der Übergang zu autonomen System als kontinuierlicher Prozess zu sehen, da bereits heutige Systeme einen z.T. hohen Automatisierungsgrad – ohne direkte Eingriffe des Menschen – besitzen. Es können Fahrzeuge existieren,

tierender Konzepte für Forschungsarbeiten durch einen vergleichsweise geringen technologischen Aufwand „autonomisiert“ werden (JOHNSON et al. 2009, NIEHAUS et al. 2007). Die sich ändernden Feldbedingungen und die Vielfalt der technischen und nicht technischen Probleme erfordern noch umfangreiche Arbeiten vor einer Praxiseinführung. Autonome Feldroboter sind Gegenstand wissenschaftlicher Forschungen (BLACKMORE et al. 2007, JØRGENSEN et al. 2006). Das von der Universität Wageningen (Niederlande) initiierte internationale „Field Robot Event“ (HENTEN et al. 2007) bietet jährlich einen Eindruck zum Stand der Technik. Überwiegend studentische Teams stellen sich den Aufgaben in den Maisfeldern, auch werden dort Studien autonomer Feldroboter vorgestellt (Abb. 1).



Abb. 1: Studierenden-Teams (links) und autonomer Unkrautroboter Hortibot (rechts) beim Field Robot Event (Fotos: A. ROGGE, A. RUCKELSHAUSEN)

2 Anforderungen an autonome Feldroboter

Vorhandene schwere Maschinen erfordern einen hohen Energieeinsatz und verdichten den Boden, was zu einem weiteren Energieverbrauch zur Auflockerung des Bodens führt. Der Einsatz von kleineren (und leichteren) Feldrobotern und Roboterschwärmen bietet technologische Alternativen; diese könnten rund um die Uhr sowohl auf kleinen als auch großen Flächen eingesetzt werden. Durch die Integration entsprechender Informationssysteme (incl. Sensoren) könnte sich der landwirtschaftliche Prozess den Umgebungs- und Rahmenbedingungen anpassen, z.B. Witterungsverhältnisse, Pflanzeigenschaften oder verfügbare Maschinen, auch bieten sich hierdurch Optionen für eine Automatisierung (und damit eine hohe Flächenleistung) ökologischer Produkte.

Umgekehrt kann die Verfügbarkeit leistungsfähiger neuer Technologien auch Anforderungen an den landwirtschaftlichen Prozess stellen. Dies ist in der Vergangenheit beispielsweise bei der – aus pflanzenbaulicher Sicht nicht optimalen – Einführung von Reihenkulturen geschehen.

Da die technische Entwicklung von Automatisierungssystemen – und damit von Feldrobotern – maßgeblich von dem Prozess, d.h. der Applikation, der verfügbaren Technologie und den nicht technischen Rahmenbedingungen abhängt, wird auf diese Aspekte im Folgenden eingegangen.

2.1 Applikationsspezifische Rahmenbedingungen

Für autonome Feld- und Service-Roboter gibt es zahlreiche Anwendungen mit erheblichem zukünftigen Marktpotenzial (SICILIANO und KHATIB 2008). Die Landwirtschaft kann dabei eine wichtige Rolle spielen: Trotz der Komplexität auf dem Feld wird aufgrund der günstigeren Sicherheitsaspekte – beispielsweise im Vergleich zum Straßenverkehr – ein früherer Marktzugang erwartet. Es ist daher damit zu rechnen, dass in den nächsten Jahren auf den landwirtschaftlichen Flächen die innovativsten Technologien für autonome Systeme erprobt werden.

Die Anwendungen autonomer Feldroboter im Umfeld der Landwirtschaft (outdoor) können sich zunächst auf die bisherigen Konzepte beziehen. Dies betrifft klassische landwirtschaftliche Bearbeitungsschritte (z.B. Saat), den Gartenbau (z.B. Ernte), die Landschaftspflege (z.B. Rasenmähen) oder die Kommunaltechnik (z.B. Unkrautregulierung). Darüber hinaus können sich neue Applikationen ergeben, wie die Pflanzenbonitur, Bodenbeprobungen, Markierungsarbeiten oder Werbeflächen.

Sowohl für die bisherigen Prozesse als auch für neue Optionen durch Feldroboter kann eine detaillierte Analyse der Prozesse und der technologischen Möglichkeiten zu Änderungen der Prozessabläufe führen. Beispiele sind veränderte Anbaustrukturen, die Verknüpfung landwirtschaftlicher Prozesse oder die Einzelpflanzenbehandlung.

Über die pflanzenbaulichen und technischen Prozesse hinaus stellt die Einführung autonomer Feldroboter Anforderungen bzgl. der betrieblichen Praxis und Logistik. Durch die zunehmende Automatisierung und Einführung teilautonomer Systeme wird dies wahrscheinlich ein kontinuierlicher Prozess sein. Die Akzeptanz der Landwirte und die Bereitschaft zum Einsatz neuer Techniken sind nach Einschätzung des Autors in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Es ist damit zu rechnen, dass in Zukunft betriebsspezifische Bewertungen unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit (DOLUSCHITZ et al. 2009) über die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes bemannter oder unbemannter Systeme entscheiden; erste Modelle für Wirtschaftlichkeitsberechnungen autonomer Feldroboter sind bereits vorgestellt worden (JØRGENSEN et al. 2006).

Zur Einführung neuer Technologien spielt auch deren Akzeptanz beim Anwender und in der Gesellschaft eine wichtige Rolle. Neben der Benutzerfreundlichkeit der Mensch-Maschine-Schnittstelle werden auch Produktdesign-Varianten für autonome Systeme unter Akzeptanz-Aspekten entwickelt. Abbildung 2 zeigt die technische Realisierung ei-



Abb. 2: Modul einer sensorgesteuerten Querhacke zur Unkrautregulierung innerhalb der Reihe (links); Designvorschlag zur Umsetzung als autonomer Unkrautroboter (Fotos: A. RUCKELSHAUSEN/M. MARDER)

nes (nicht autonomen) sensorgesteuerten Moduls zur mechanischen Unkrautregulierung innerhalb der Reihe (RUCKELSHAUSEN et al. 1999) und einen Designvorschlag zur Umsetzung als autonomes System (MARDER 2007).

Die gesetzlichen und technischen Rahmenbedingungen zur Sicherheitstechnik bei autonomen Systemen basieren auf den verfügbaren Technologien und unterliegen daher kontinuierlichen Anpassungen. Zertifizierte Techniken (z.B. Laserscanner) können für bestimmte Applikationen autonomer Systeme bereits für eine gesetzliche Zulassung ausreichen (LANGE 2010). Weiterführende gesetzliche und versicherungstechnische Regelungen werden im Zuge der Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit autonomer (Feld-)Roboter zu treffen sein.

2.2 Technologien

Neben der Navigation und der agrartechnischen Applikation sind bei der Technologieentwicklung eines autonomen Feldroboters die Aspekte Sicherheitstechnik, Service und Mensch-Maschine-Schnittstelle zu berücksichtigen. Die Hardware umfasst die Bereiche Fahrzeug, Sensorik, Aktorik, Energieversorgung und Systemtechnik. Geht man von einer funktionierenden applikationsspezifischen Hardware aus, so besteht der überwiegende Aufwand in der Entwicklung robuster Algorithmen unter Verwendung verschiedener Informationsquellen. Dies sind insbesondere Sensordaten, GPS sowie a priori-Informationen über roboterinterne und -externe Datenquellen (z.B. via WLAN). Diese Informationen werden zur Erfassung der Pflanzen-, Umgebungs- und Maschinendaten, zur Navigation sowie zur Sicherheitstechnik fusioniert. Die Komplexität der sich ändernden Feldsituationen des Feldroboters sowie der Umsetzung der Daten in Handlungsanweisungen, stellen erhebliche Anforderungen bzgl. der Kenntnisse und Analyse der landwirtschaftlichen Applikation und deren Umsetzung in robuste Software-Algorithmen. Eine in-

terdisziplinäre Zusammenarbeit bei der Feldroboterentwicklung erscheint daher sinnvoll.

Aufgrund der erheblichen technischen Komplexität werden zunehmend 3-D-Simulatoren für dynamische Simulationen eingesetzt (GAZEBO 2010, MICROSOFT 2010). Dabei können neben den physikalischen Robotereigenschaften auch die Charakteristiken der Sensoren integriert werden (oder werden von dem Sensorhersteller zur Verfügung gestellt). Damit kann die Roboternavigation realitätsnah simuliert und das Programm im Idealfall direkt auf den realen Roboter übertragen werden. Abbildung

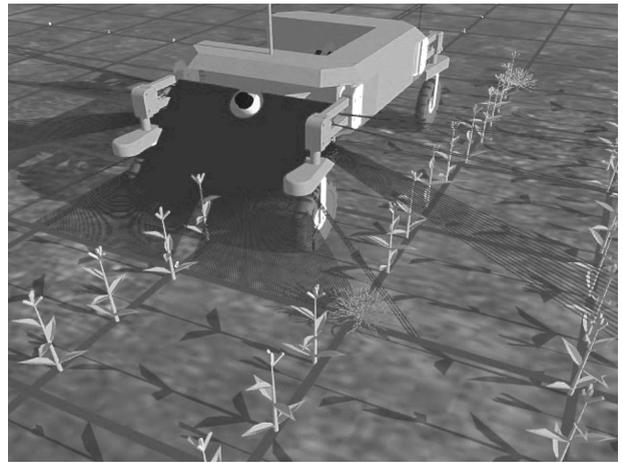


Abb. 3: 3-D-Simulation des autonomen Feldroboters BoniRob mit einem Laserscanner
(Foto: U. Weiss/Bosch, Stuttgart)

3 zeigt eine Simulation der Robert Bosch GmbH mit dem Feldroboter BoniRob und einem Laserscanner (WEISS und BIBER 2009). Die Weiterentwicklung und Applikation der Simulationen werden maßgeblich zur Entwicklung robuster Feldroboter beitragen.

Darüber hinaus ergeben sich applikationsspezifisch weitere Schlüsseltechnologien; dies betrifft sowohl fahrende als auch fliegende Feldroboter (UAV – Unmanned Aerial Vehicles, z.B. Quadrocopter). Insbesondere das Gewicht und der Energieverbrauch sind meist kritische Parameter zur Entwicklung eines Produktes. Die Feldrobotik kann in diesem Bereich wahrscheinlich von Entwicklungen aus dem Fahrzeugbereich (automotive) profitieren.

3 Autonome Feldroboter BoniRob

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an autonome Feldroboter an einem Beispiel konkretisiert. Die Zusammenführung der beschriebenen Technologien zu einem autonomen Feldroboter ist äußerst komplex. Zur Reduktion dieser Komplexität wurde die Applikation Bonitur (oder Phänotypisierung) identifiziert. Die Erweiterung der – für die Navigation notwendigen – Sensorsysteme führt zu einem Nutzen bei den Pflanzenzüchtern als Anwender dieser Technologie. Für den Fall einer erfolgreichen Entwicklung bieten sich weitere Perspektiven für weitere Anwendungen durch Integration von Aktoren. Dies geschieht im Rahmen eines vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) und der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernäh-

zung (BLE) geförderten interdisziplinären Forschungsvorhabens. Die Amazonen-Werke, die Robert Bosch GmbH und die Fachhochschule Osnabrück mit den Fakultäten Ingenieurwissenschaften/Informatik und Agrarwissenschaften/Landschaftsarchitektur arbeiten gemeinsam an der Entwicklung des autonomen Feldroboters BoniRob zur Phänotypisierung von Pflanzen (RUCKELSHAUSEN et al. 2009). Am Beispiel Mais soll das Verfahren zunächst entwickelt werden. An dem Projekt wirken weitere kooperative Partner mit, z.B. der DLG-Ausschuss Versuchswesen in der Pflanzenproduktion.

3.1 Applikation: Phänotypisierung von Einzelpflanzen

Zur Charakterisierung von Pflanzen (Bonitur, Phänotypisierung) sind charakteristische morphologische und spektrale Pflanzenmerkmale wesentliche Informationen für die Pflanzenzüchtung. Im Rahmen der Feldversuche werden meist einzelne Daten manuell ermittelt und mithilfe entsprechender Statistikmethoden interpretiert. Die automatische Erfassung der Parameter aller einzelnen Pflanzen wäre ein drastischer Innovationsprung im Feldversuchswesen.

Technologische Herausforderungen sind die Lokalisierung einer einzelnen Maispflanze und das Wiederfinden dieser Einzelpflanze zu einem späteren Zeitpunkt, z. B. während eines anderen Wachstumsstadiums. Hierzu werden verschiedene Sensoren und bildgebende Systeme kombiniert (Sensor- und Datenfusion) und ein RTK-DGPS-System mit hoher Genauigkeit eingesetzt. Die erreichte typische Genauigkeit von ± 2 cm ist kleiner als der mittlere Abstand zweier Maispflanzen. In Feldversuchen sind im Vorfeld des Projektes das Wiederfinden der Einzelpflanze nachgewiesen worden (FENDER et al. 2006) (Abb. 4). Damit kann jede Pflanze elektronisch markiert und bei späteren Versuchsfahrten wiedergefunden werden. Wird diese Technologie mit einem autonomen Roboter kombiniert, so stehen alle Daten der Einzelpflanze für die Auswertungen zur Verfügung.

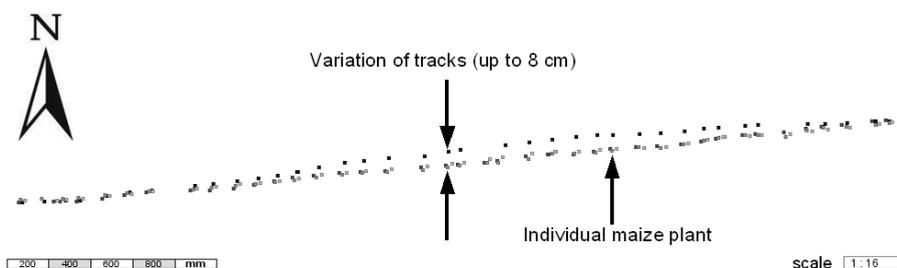


Abb. 4: Positionen einzelner Maispflanzen für 4 unabhängige Messfahrten auf dem Maisfeld (FENDER et al. 2006)

3.2 Konzeption und Realisierung von BoniRob

Die Systemstruktur von BoniRob (Abb. 5) enthält mehrere via Ethernet kommunizierende Kontrollsysteme zur Navigation (GPS und Odometrie), zur Motorsteuerung des Fahrzeugs und zur Phänotypisierung. In der untersten Ebene sind die Sensoren und Aktoren dargestellt. Die Systemtechnik erlaubt eine Echtzeitverarbeitung bei hohen Datenraten: Die Pflanzendaten werden mit Zeit- und Ortsstempeln in Datenbanken zur späteren Offline-Pflanzenphänotypisierung abgelegt, Daten einzelner Sensoren (insbesondere eines 3-D-Laserscanners) und bereits vorhandene Messdaten werden zur Navigation verwendet (WEISS und BIBER 2009); es werden Methoden der probabilistischen Robotik angewendet.

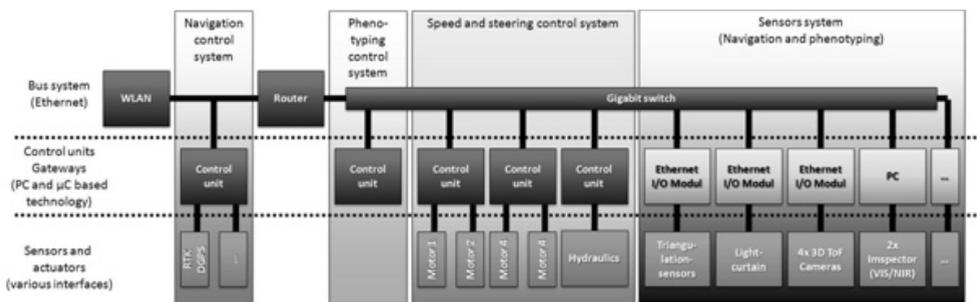


Abb. 5: Systemstruktur BoniRob

Das Fahrzeug ist mit 4 Radnabenmotoren ausgestattet, eine integrierte Hydraulik ermöglicht eine Variation der Messhöhe von 40 bis 80 cm, eine Spurbreitenverstellung sowie eine Drehung auf der Stelle. Durch diese Flexibilität kann die jeweilige optimale Messposition eingestellt werden. In Tabelle 1 sind die vorläufigen technischen Daten von BoniRob zusammengefasst.

Tab. 1: Informationen zum autonomen Feldroboter BoniRob (vorläufig)

Kategorie	Spezifikation
Basisdaten	Fahrzeugdimensionen (L x B x H): 150 x 120 x 50
	Spurbreite: 75–200 cm (variabel)
	Bodenfreiheit: 40–80 cm (variabel)
	Gesamtgewicht: ca. 400 kg
	Maximalgeschwindigkeit: ca. 5 km/h Leistung: ca. 2 kW
Systemtechnik	PC/Microcontroller/Embedded Systems; Ethernet/CAN, Wireless LAN, Middleware-basierte Kommunikationsstruktur, Datenbank
Navigation	2-D-Laserscanner, 3-D-Laserscanner, Beschleunigungssensoren, Gyroskope, Drehgeber, RTK-DGPS; SLAM (simultaneous localization and mapping)
Phänotypisierung Mais	Lichtvorhang, Farbkamera, Spectral Imaging, 3-D-Time-of-Flight-Camera, optoelektronische Abstandssensoren
Sicherheitstechnik	Notaus-Schalter, Ultraschallsensoren, Softwaremonitore (roboterintern, WLAN)
Simulationstechnik	3-D-dynamische-Simulation (Gazebo, Microsoft Robotics Studio)



Abb. 6: Autonome Phänotypisierungsplattform BoniRob
(Foto: M. THIEL)

Die erste Version des Fahrzeugs ist Ende 2009 realisiert worden (Abb. 6), ebenso die Navigation und die Systemtechnik mit der Datenbank. Es sind bereits erste Testfahrten mit BoniRob durchgeführt worden. Für 2010 sind erste Versuchsfahrten zur Messung der Pflanzenparameter sowie eine Optimierung der Software- und der Hardwarekomponenten vorgesehen, das Projekt wird in 2011 abgeschlossen.

4 Fazit und Ausblick

Die Entwicklung autonomer Feldroboter stellt die nächste Stufe der notwendigen Automatisierung in der Landtechnik dar. Zur nachhaltigen Sicherung von Nahrungsmitteln und Energie ist dies von elementarer globaler Bedeutung. Zunächst steht die Entwicklung robuster Prototypen für spezifische Applikationen im Vordergrund von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, wobei die Feldroboter sowohl für existierende als auch neue Konzepte eingesetzt werden können. In Abhängigkeit von den in der Praxis umgesetzten Möglichkeiten können landwirtschaftliche Prozesse optimiert bzw. an die Feldroboter-Technologie angepasst werden. Die technologischen und landwirtschaftlichen Entwicklungen erfordern eine offensive interdisziplinäre Zusammenarbeit und intensive Forschungstätigkeiten mit Praxisbezug. Darüber hinaus ist die Erarbeitung wissensbasierter Mensch-Maschine-Schnittstellen für Handlungsempfehlungen und Bedienkonzepte eine wichtige Aufgabe.

In Abhängigkeit der ökonomischen, ökologischen und sozialen Rahmenbedingungen ist langfristig ein Nebeneinander von großen Maschinen und kleineren Feldrobotern in teilautonomen und autonomen Flotten zu erwarten.

5 Literatur

- Auernhammer, H. (2001): Precision farming – the environmental challenge, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 30 (1-3), S. 31-43
- Blackmore, B. S.; Griepentrog, H. W.; Fountas, S.; Gemtos, T. (2007): A Specification for an Autonomous Crop Production Mechanization System. *Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal*. Manuscript PM 06 032. Vol. IX
- Doluschitz, R.; Zapf, R.; Schultheiss, U. (2009): Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Betriebe – Vergleichende Beurteilung von Betriebsbewertungssystemen, *KTBL-Schrift 474*, S. 52-70
- Fender, F.; Hanneken, M.; In der Stroth, S.; Kielhorn, A.; Linz, A.; Ruckelshausen, A (2006): Sensor Fusion Meets GPS: Individual Plant Detection. *Proceedings of CIGR EurAgEng/VDI-MEG*
- Gazebo (2010): <http://www.irobotics.org/gazebo08.html>
- Henten, E. J. van; Hofstee, J. W.; Müller, J.; Ruckelshausen, A. (2007): The Field Robot Event – An International Design Contest in Agricultural Engineering. *Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture*, 3-7 June 2007, Skiathos, Greece, Paper nr. 88
- Johnson, D. A.; Naffin, D. J.; Puhalla, J. S.; Sanchez, J.; Wllington, C. K. (2009): Development and implementation of a team of robotic tractors for autonomous peat moss harvesting. *Journal of Field Robotics*. Vol. 26(6-7), pp. 549-571

- Jørgensen, R. N.; Sørensen, C. G.; Pedersen, J. M.; Havn, I.; Jensen, K.; Søgaard, H. T.; Sørensen, L. B. (2006): Hortibot: A system design of a robotic tool carrier for high-tech plant nursing. ATOE 2006 Bonn Automation Technology for Off-Road Equipment – Pre-Conference to the 2006 CIGR World Congress Bonn/Germany, Sept. 3–7, 2006
- Lange, E. (2010): Laser dirigiert fahrerlose Stapel sicher zum Ziel. VDI Nachrichten, Nr. 1/2010
- Marder, M. (2007): Farmer's little helper. Studienarbeit, Hochschule für Bildende Künste, Braunschweig
- Microsoft Robotics Studio (2010): <http://msdn.microsoft.com/en-us/robotics/default.aspx>
- Niehaus, W.; Urra Saco, M.; Wegner, K.-U.; Linz, A.; Ruckelshausen, A.; Thiel, M.; Marquering, J.; Pfisterer, T.; Scheufler, B. (2007): Autonomation of the self propelled mower Profihopper based on intelligent landmarks, Proceedings of the 65th International Conf. Agricultural Engineering 2007, VDI-Verlag, pp.185-190
- Pedersen, S. M.; Fountas, S.; Have, H.; Blackmore, B. S. (2006): Agricultural robots – system analysis and economic feasibility, Precision Agric 7: pp. 295–308
- Qaim, G.; Fischer, E.; Sängler, C. (2008): Herausforderungen für die globale Landwirtschaft vor dem Hintergrund der Welternährungskrise, KTBL-Schrift 474, S. 30–51
- Ruckelshausen, A.; Dzinaj, T.; Gelze, F.; Kleine Hörstkamp, S.; Linz, A.; Marquering, J. (1999): Microcontroller-based multisensor system for online crop/weed detection. Proceedings 1999 Brighton Conference, Vol. 2, pp. 601–606
- Ruckelshausen, A.; Biber, P.; Dorna, M.; Gremmes, H.; Klose, R.; Linz, A.; Rahe, F.; Resch, R.; Thiel, M.; Trautz, D.; Weiss, U. (2009): BoniRob – an autonomous field robot platform for individual plant phenotyping. Proceedings of the 7th European Conference on Precision Agriculture, Wageningen Academic Publishers, pp. 841–847
- Siciliano, B.; Khatib, O. (2008): Springer Handbook of Robotics, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg
- Weiss, U.; Biber, P. (2009): Plant Detection and Mapping for Agricultural Robots using a 3D-lidar Sensor. Proceedings of the 4th European Conference on Mobile Robots, September 2009, pp. 205–210