

Analyse und experimentelle Untersuchung eines Handhabungsprozesses in der Pflanzenzucht im Hinblick auf die Anwendbarkeit eines automatisierten Greifsystems

Analysis and experimental investigation of a handling process in plant breeding with regard to the applicability of an automated gripping system

*Ilja Dick
Stephan Ulrich
Rainer Bruns*

*Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik (MTL)
Fakultät für Maschinenbau
Helmut-Schmidt-Universität
Universität der Bundeswehr, Hamburg*

Der Einsatz von industriellen Robotern, insbesondere der von kollaborativen Robotern, spielt in der Landwirtschaft noch eine sehr geringe Rolle. Dabei können die sogenannten Cobots einen starken Beitrag zur Effizienzsteigerung leisten. Besonders vielversprechend hat sich hierfür der Prozess des Umtopfens von Jungpflanzen herausgestellt. In diesem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, wie solch eine Automatisierung aussehen kann. Im Vordergrund der Betrachtung steht eine experimentelle Untersuchung des verwendeten Soft-Gripping-Greifers auf die Eignung für eine pflanzenschonende Handhabung. Zusätzlich wird eine Einschätzung abgegeben, ob ein wirtschaftlicher Einsatz eines solchen Systems in einem betrachteten Unternehmen möglich ist.

[Schlüsselwörter: Automatisierung, Pflanzenzucht, Handhabung, soft-gripping, Robotik]

The use of industrial robots, especially that of collaborative robots, still plays a very minor role in agriculture. The so-called cobots can make a strong contribution to increasing efficiency. The process of repotting young plants has proven to be particularly promising. Here an approach is presented of what such an automation can look like. The focus here is on an experimental examination of the soft-gripping gripper used for its suitability for handling that is gentle on plants. In addition, an assessment is made as to whether such a system can be used economically in a company under consideration.

[Keywords: automation, plant breeding, handling, soft-gripping, robotics]

1

Die Digitalisierung und die Automatisierung gewinnen auch in der Landwirtschaft immer mehr an Bedeutung. In kaum einem anderen Bereich sind die Fachgebiete der Produktion so stark mit den Themen Chemie, Physik und Biologie sowie den Belangen von Umwelt, Sozialem und Politik verbunden. Das liegt zum einen an den umfassenden gesetzlichen Regelungen und Vorgaben, die für die Landwirtschaft gelten. Zum anderen trägt die Landwirtschaft Mitverantwortung dafür, dass die Weltbevölkerung gut ernährt wird [CTR18]. Im Rahmen von „Farming 4.0“ rückt die Landwirtschaft zunehmend stärker in das öffentliche Interesse. Es handelt sich bei der Automatisierung nicht nur um eine Optimierung von Arbeitsabläufen, viel mehr erzeugt sie einen Effekt, der die Versorgung der Weltbevölkerung wesentlich verbessern könnte.

So zeigt die aktuelle Debatte um die Ausbringungsmenge von Düngemittel auf den Feldern, dass der derzeitige Ansatz nicht mehr zeitgemäß zu sein scheint. Unter dem Stichwort „Precision Crop Farming“ wird diesem Umstand Rechnung getragen, indem der Einsatz von Dünger, Wasser und Pestiziden bedarfsgerecht, anhand von Messdaten und Wettervorhersagen, gebietsweise für landwirtschaftlich genutzte Felder ermittelt wird [BOL19].

Eine vom „Deutschen Bauernverband e.V.“ beauftragte und vom Digitalverband „Bitkom e.V.“ durchgeführte Studie im Jahr 2020, kommt zu dem Ergebnis, dass bereits 8 von 10 Landwirten auf digitale Technologien setzen [PAU20]. Weitere Erkenntnisse der Studie sind, dass 45% der Landwirte GPS-gesteuerte Landmaschinen nutzen, jedoch nur 12% Robotertechnik im Einsatz haben. Damit ist zu erkennen, dass sich auf dem Gebiet der „Precision

Crop Farming“ bereits einiges tut, während die Roboter-technik sich hauptsächlich in Form von Melkrobotern wiederfindet.

Sowohl die Automobilindustrie, als auch immer mehr die Logistikbranche haben gezeigt, wie durch den Einsatz von Robotern die Effizienz in Prozessen gesteigert werden kann. Im Bereich der Landwirtschaft eröffnen sich neue Potenziale für den Einsatz von Robotern. Einfache und monotone Arbeiten, wie sie im Bereich der Pflanzenzucht vorzufinden sind, können mit deren Hilfe automatisiert werden. Damit können zum einen Kosten reduziert und zum anderen menschliche Arbeitsleistung für anspruchsvollere Tätigkeiten freigegeben werden. Da für die betrachteten Prozesse bereits Automatisierungslösungen auf dem Markt existieren, wird hier das Augenmerk auf kleine und mittlere Unternehmen gelegt. Für diese Unternehmen lohnen sich, aufgrund der geringen Stückzahlen, die am Markt angebotenen Maschinen aus finanzieller Sicht kaum.

2 PROZESSE IN DER PFLANZENZUCHT

In ihren Grundzügen sind die Prozesse bei der betrachteten Art der Pflanzenzucht annähernd die gleichen. In ihren jeweiligen Ausprägungen können sie sich jedoch in Einzelfällen unterscheiden. Unterschiedliche Pflanzenarten benötigen teilweise angepasste Vorgänge, um ein starkes Wachstum zu erzielen. Die konkrete Ausgestaltung der Arbeitsschritte muss dem entsprechend individuell angepasst werden. Grundsätzlich kann man die Phase der Pflanzenzucht in fünf Teilprozesse gliedern. Diese beginnen mit der Stecklingsproduktion, gehen über in die Anzuchtphase, danach werden die Jungpflanzen umgetopft, anschließend folgt die Wachstumsphase und schlussendlich die Vorbereitung für den Transport.

Obwohl der Begriff der Pflanzenzucht in diesem Kontext Verwendung findet, handelt es sich hierbei nicht um die eigentliche Zucht, bei der bestimmte Eigenschaften einer Pflanze beeinflusst werden sollen. Vielmehr wird hier von der vegetativen Vermehrung der Pflanzen gesprochen. Hierbei bleibt das Erbgut der Pflanze unverändert. Die vergleichsweise höheren Kosten und eine geringere Kapazität dieser Methode werden durch den kürzeren Züchtungsprozess und eine höhere Uniformität der neuen Pflanzen überwogen [HF17].

2.1 PROZESSAUFNAHME

Die Ausgestaltung der fünf oben genannten Teilprozesse kann je nach Betriebsgröße und Automatisierungsgrad unterschiedlich ausfallen. Hier werden die Vorgänge beispielhaft an einem Unternehmen dargestellt, bei dem die Untersuchung stattgefunden hat. Eine Übersicht der Arbeitsschritte ist in Abbildung 1 gegeben.

Der Prozess beginnt mit der Stecklingsproduktion oder alternativ mit dem Zukauf von bereits bewurzelten Stecklingen. Für die Stecklingsproduktion werden 5 – 8 cm

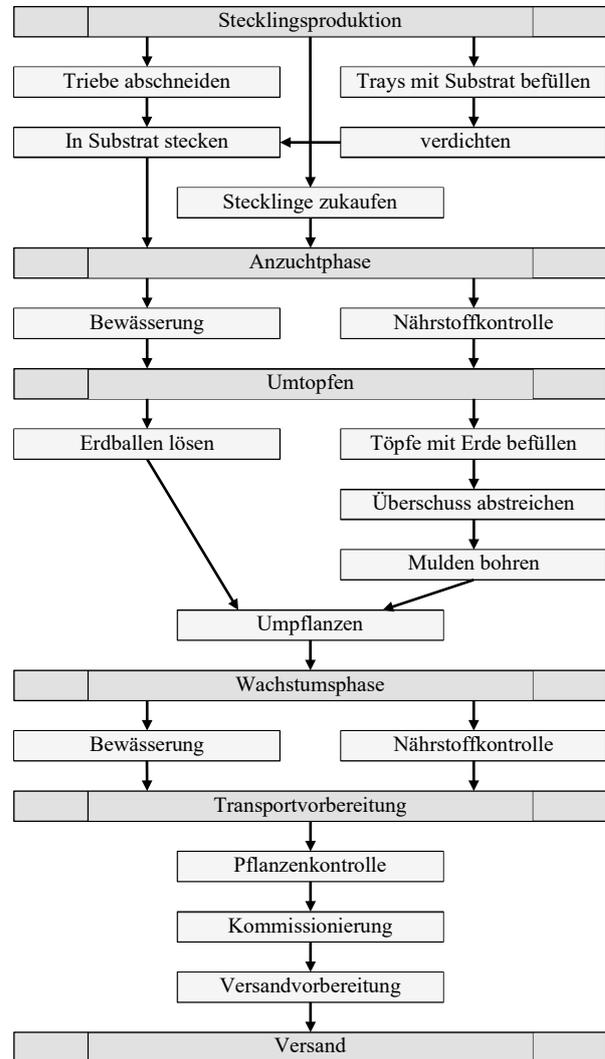


Abbildung 1. Arbeitsschritte in der Pflanzenzucht.

lange Triebe von einer Mutterpflanze abgeschnitten. Diese werden per Hand in ein Substrat, bestehend aus Erde und abgestimmten Zusätzen und Nährstoffen, eingesetzt. Als Aufnahmemedium für das Substrat, dient eine Palette mit ausgestanzten Zellen. Die Anzahl und Größe der Zellen in dem jeweiligen Anzuchttray, werden entsprechend der zu verarbeitenden Pflanze gewählt. Eine typische Größenordnung wurde mit 96 Zellen (8x12) und 144 Zellen (10x14) festgestellt. Die Befüllung der Trays mit dem Substrat erfolgt bereits automatisiert. Dazu werden die Trays auf einem Bandförderer unter die Befüllungsmaschine gefahren und dort befüllt und verdichtet. Anschließend transportiert der Bandförderer die befüllten Trays zu der Steckstation, an der Arbeiter die Stecklinge am unteren Ende greifen und in das Substrat einstecken.

Die bestückten Anzuchttrays werden für die Anzuchtphase auf Transportböden gestapelt und in ein Gewächshaus abtransportiert. Hier sollen die Pflanzen neue Wurzeln ausbilden. Dafür werden die Umgebungsbedingungen so weit wie möglich optimal ausgestaltet. Eine regelmäßige Nährstoffüberprüfung und eine automatisierte Bewässerungsanlage sorgen für ein kräftiges Wurzelwachstum.

Nach Ausbildung einer starken Wurzelstruktur wird ein weiterer Wachstumsimpuls, durch das Umtopfen der Pflanze in einen größeren Behälter, angeregt. Bevor die Pflanzen aus den Trays entnommen werden können, müssen diese erst vorbereitet werden. In der Regel hat sich eine so starke Bewurzelung ausgebildet, dass die Pflanzen nicht beschädigungsfrei aus den Trays herausgezogen werden können. Dazu werden die Anzuchttrays von Mitarbeitern auf eine Stanzmaschine gelegt. Diese drückt die Erdballen der Pflanzen von unten aus den Trays heraus, sodass diese nur noch locker in den Zellen liegen. Die Befüllung der Jungpflanzentöpfe mit Erde, in die die herangewachsenen Stecklinge umgetopft werden sollen, erfolgt automatisiert. Dazu werden die Töpfe auf einem Bandförderer unter eine Topfmaschine gefahren. Diese Befüllt die Töpfe mit Erde und streicht den Überschuss ab. Mit einem integrierten Bohrer werden Mulden für die Erdballen der Stecklinge gebohrt. Sowohl die Anzuchttrays, als auch die vorbereiteten Jungpflanzentöpfe werden zu der Umtopfstation gebracht, an der Saisonarbeitskräften den Umtopfvorgang vornehmen. Dabei werden die Pflanzen lediglich aus dem Anzuchttray entnommen und in die vorbereitete Mulde gesetzt. Im Anschluss werden die umgetopften Pflanzen von einer Maschine gewässert und mit Blähton bestreut. Eine weitere Maschine nimmt die bestückten Töpfe auf und hebt diese auf Trays.

Die fertigen Jungpflanzentrays werden für die Wachstumsphase händisch auf Wagen verladen und entweder auf ein Feld oder in ein Gewächshaus transportiert. Nach der Wachstumsphase kontrollieren Mitarbeiter die Pflanzen und verpacken sie auftragsbezogen in Kisten und Kartons. Die für den Versand vorbereiteten Ladungsträger werden im Anschluss an einen Transportdienstleister übergeben.

2.2 AUTOMATISIERUNGSPOTENZIALE

Bei der Betrachtung der Prozesse im Hinblick auf deren Optimierung muss man zwischen globalen und lokalen Optima unterscheiden. Die lokale Optimierung einzelner Prozess führt nicht zwangsläufig zu einem globalen bestmöglichen Ergebnis. Hier gilt es jedoch die Kosten und den Aufwand im Auge zu behalten, da bereits Investitionen in Teilautomatisierungen getätigt worden sind. Diese gilt es nicht zu verwerfen, sondern zu erhalten und in evolutionären Schritten eine Effizienzsteigerung zu erreichen. Aus Sicht des Unternehmens liegt hier das Augenmerk vor allem auf den Bereichen der innerbetrieblichen Transporte, dem Umtopfen von Jungpflanzen und dem Vorbereiten der Pflanzen für den Transport.

Die Stecklingsproduktion ist zweifelsohne ein sehr aufwendiger Prozess. Hier werden sehr viele Arbeitsstunden des Personals gebunden. Unter anderem werden deswegen zum Teil bereits verwurzelte Jungpflanzen eingekauft. Ab einer bestimmten Stückzahl kann eine vollautomatisierte Lösung, wie sie z.B.: von der ISO Group Agri Systems BV [ISO21] angeboten wird, sinnvoll sein. Der Cutting Planter kann bis zu 4.000 Stecklinge pro Stunde produzieren. Hier muss jedoch mit einem hohen Investitionsaufwand gerechnet werden, der die Mittel kleiner Unternehmen übersteigen kann. Ein weiterer Punkt ist, dass die Stecklingsproduktion nicht ganzjährig stattfindet und die Maschine so über mehrere Monate ungenutzt stehen würde.

Der zweite personalaufwendige Produktionsschritt ist das Umtopfen der Jungpflanzen. Während mit dem gesamten Prozess der Pflanzenzucht sieben Mitarbeiter beschäftigt sind, bindet alleine diese Tätigkeit drei der sieben Mitarbeiter, die als Saisonarbeitskräfte eingestellt werden. Damit ist knapp die Hälfte des am Gesamtprozess beteiligten Personals mit dem Umtopfen der Jungpflanzen beschäftigt. Eine automatisierte Lösung wird z.B.: von TTA BV mit dem PackPlanter [TTA21] angeboten. Damit können bis zu 50.000 Stecklinge pro Stunde umgetopft werden. Die Maschine muss jedoch für variierende Pflanzen neu eingerichtet werden, sodass sie sich eher für große Stückzahlen pro Pflanzenart eignet. Im konkreten Fall wird eine flexiblere Lösung mit geringerem Investitionsbedarf benötigt.

Bei der Pflanzenkontrolle überprüfen die Mitarbeiter insbesondere das Wachstum der Pflanzen. Des Weiteren werden die Pflanzen auf Krankheiten gesichtet. Hier bietet es sich an Verfahren der Bildverarbeitung, speziell die des Deep-Learning anzuwenden. Ein mit einem Kamerasystem ausgestatteter Palettierroboter, könnte mit einem angelegten Neuronal Netz, gleichzeitig eine Sichtprüfung durchführen.

3 AUTOMATISIERTE UMTOPFUNG VON JUNGPFANZEN

Für weitere Betrachtungen wurde der Prozess der Jungpflanzenumtopfung ausgewählt. Hier werden nun zwei Dinge untersucht. Den Anfang macht eine experimentelle Untersuchung des Soft-Gripper-Baukastens [SGW21] auf seine Eignung zum Greifen der Jungpflanzen. Im Anschluss folgt eine Weiterentwicklung des Greifers zu einem Parallelgreifer, mit dem eine wirtschaftliche Automatisierung durch das gleichzeitige Greifen mehrere Jungpflanzen realisiert werden soll. Hierfür wird ein Testsystem aufgebaut und weitere Versuche durchgeführt.

3.1 SOFT-GRIPPER-VERSUCHE

Bei den oben genannten Automatisierungsbeispielen werden für diese Aufgabe Pinzettengreifer aus Metall verwendet. Diese greifen die Pflanze am unteren Ende des Stängels, nahe am Erdballen. Hierbei entsteht nur eine kleine Kontaktfläche, über die die Greifkraft auf die Pflanze übertragen werden muss. Aufgrund seiner Bauart verspricht der Softgripper einen schonendere Greifvorgang. Denn durch die größere Kontaktfläche und das nachgiebigere Material kann eine bessere Druckverteilung erreicht werden.

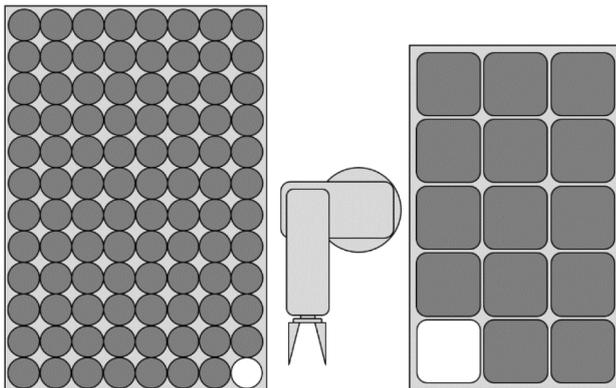


Abbildung 2. Versuchsanordnung für das automatisierte Greifen von Jungpflanzen.

3.1.1 SYSTEMAUFBAU

Für die Untersuchung der Softgripper wurde eine Testumgebung aufgebaut, mit der ein vollständiger Umtopfvorgang durchgeführt werden kann. Das Umtopfen wird mit einem UR3 von Universal Robots durchgeführt [UR21]. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, sind zwei Trays links und rechts vom Roboter positioniert. Auf der linken Seite ist das Anzuchttray mit 96 Jungpflanzen. Auf der rechten Seite steht das 15er Jungpflanzentray. Die Druckluftkontrolle für den pneumatischen Greifer erfolgt mittels einer Control Box für den SoftGripper. Diese wird an den UR-Roboter angeschlossen und kann über das Bedienerschnittstelle des Roboters angesteuert werden.

Für die Versuchsdurchführung wurden Rahmenbedingungen geschaffen, wie sie in dem untersuchten Unternehmen vorzufinden sind. D.h., dass die Erdballen der Jungpflanzen bereits gelockert sind und eine Mulde in den Jungpflanzentöpfen vorgebohrt worden ist.

3.1.2 GREIFER

Das Kernelement des SoftGrippers sind seine elastischen, aus lebensmittelechtem Silikon gefertigten Greiffinger. Der Aktor wird durch das Aufbringen von Druckluft betrieben. Durch seine speziell entwickelte Geometrie, verteilt sich der Druck im Inneren des Balgs so, dass eine definierte Krümmung des Fingers erfolgt. Die Greiffinger sind so konzipiert, dass sie im Grunde einzeln betrieben

werden können. Mit einer entsprechenden Greiferbasis können jedoch auch mehrere Aktoren gleichzeitig über einen Druckluftkanal gesteuert werden. Durch das Kombinieren der Greiffinger in unterschiedlicher Länge und die Auswahl verschiedener Greiferbasen und zusätzlicher Zwischenelemente, kann ein individueller Greifer in nur wenigen Sekunden zusammengesteckt werden.

Für die Versuche wurden insgesamt 12 Greiferkonfigurationen ausgewählt. Alle Greifer haben die gleichen Fingerelemente. Sie unterscheiden sich jedoch in der Anzahl der Finger und in ihrem Konuswinkel. Es wurden Zwei-Finger-Greifer, Drei-Finger-Greifer und Vier-Finger-Greifer getestet. Der Konuswinkel beschreibt die Ausrichtung der Finger im Ruhezustand, bezogen auf die horizontale Ebene der Greiferbasis. Jede Greiferart wurde mit den jeweiligen Konuswinkeln von 60° , 75° und 90° getestet. Von dem Vier-Finger-Greifer gibt es zwei Ausführungen: einen Vier-Finger-Parallelgreifer und einen Vier-Finger-Zentrischgreifer. In Abbildung 3 sind die vier Greifergrundarten mit einem Konuswinkel von 75° dargestellt.

Durch die Variation des Konuswinkels und der Greiferbasis können geometrische Parameter des Greifers an die Bedingungen der Greifobjekte angepasst werden. Ein kleinerer Konuswinkel hat zur Folge, dass der Öffnungskreis an den Fingerspitzen größer wird. Damit können Objekte mit einem größeren Durchmesser, oder in diesem Fall Pflanzen mit stärkerem Blattwuchs, gegriffen werden. Gleichzeitig verringert sich jedoch die maximal mögliche Objekthöhe. Das ist insofern wichtig, da die zu greifenden Pflanzen nicht an der Oberfläche, sondern so nahe wie möglich am Erdballen gegriffen werden müssen.



Abbildung 3. Vier Greifergrundarten mit einem Konuswinkel von 75° (In Anlehnung an [SG21]).

3.1.3 PROGRAMMABLAUF

Bei den ersten Versuchen steht der einmalige Umtopfvorgang im Vordergrund. Hier soll zunächst nur die grundsätzliche Eignung der SoftGripper für das Handhaben von Pflanzen überprüft werden. Das dafür notwendige Programm wurde direkt am TeachPanel des UR3 programmiert. Für einen Umtopfvorgang werden hierfür 8 Arbeitsschritte am Roboter benötigt. Die einzelnen Wegpunkte wurden händisch ermittelt. Somit ist auch gewährleistet, dass die Greifer unter optimalen Bedingungen arbeiten.

Der Roboterarm fährt aus seiner Grundstellung einige Centimeter über die zu greifende Pflanze. Von dem ersten Wegpunkt aus wird der Greifer senkrecht abgesenkt, bis die Fingerspitzen einige Millimeter oberhalb des Erdballen der Pflanze stehen. An dieser Stelle wird Druckluft auf den Greifer gegeben und 2 Sekunden pausiert, damit die Greiffinger die Pflanze fest umschließen. Die gegriffene Pflanze wird senkrecht aus dem Anzuchttray gehoben, bis der Erdballen der Pflanze über den sich noch im Tray befindlichen Pflanzen schwebt. Nun kann der Roboterarm zu einem Topf im Jungpflanzentray gedreht werden. Dieser Wegpunkt wird ebenfalls in einer Höhe gewählt, in der der Erdballen der gegriffenen Pflanze keine Kollision mit bereits umgetopften Pflanzen verursacht. Nach dem Erreichen des Wegpunktes, wird die Pflanze senkrecht abgesenkt. Durch das Entlasten des Druckluftkanales wird der Griff gelöst und die Pflanze fällt einige Millimeter in die vorbereitete Mulde im Jungpflanzentopf. Der letzte Wegpunkt wird durch das senkrechte Anheben des Greifers erreicht. Von hier aus kann der Roboterarm in seine Grundstellung gefahren werden oder zur nächsten Pflanze im Anzuchttray.

3.1.4 ERGEBNISSE

Die Versuche haben gezeigt, dass nur der Zwei-Finger-Greifer einen zuverlässigen Griff der Pflanze ermöglicht. Bei dem Drei-Finger-Greifer und dem Vier-Finger-Zentrischgreifer tritt jeweils der gleiche Effekt auf, der einen sicheren Griff verhindert. Die Fingerbreite der Greifer beträgt 2 cm. Werden die Finger zentrisch zu einander geführt, entsteht ein Kontakt an den Außenkanten der Finger. Dies führt dazu, dass im geometrischen Zentrum, da wo die Kraftvektoren einen Schnittpunkt bilden, eine Lücke entsteht. Diese Lücke ist so groß, dass der Pflanzenstängel durchrutscht. Der Vier-Finger-Parallelgreifer kann im Grunde wie der Zwei-Finger-Greifer genutzt werden. Hier greift das zweite Fingerpaar im besten Fall ins Leere. Im ungünstigen Fall greift das zweite Fingerpaar in die Blätter der Nachbarpflanze und kann diese gegebenenfalls beschädigen. Um mit diesem Greifer zwei Pflanzen gleichzeitig greifen zu können, müsste der Abstand der Greiffingerpaare auf die jeweilige Traygröße angepasst werden. Da die Abstände bei den Ablagetrays jedoch größer sind, kann das Absetzen der Pflanzen problematisch werden.

Der Konuswinkel hat einen weitaus geringeren Einfluss auf die Greifzuverlässigkeit der Greifer, als die Anzahl der Greiffinger. Dieser kann in Abhängigkeit der Pflanzengröße (Durchmesser) angepasst werden. Grundsätzlich sollte er jedoch möglichst groß gewählt werden, um die Kontaktfläche an der Pflanze zu erhöhen. Je kleiner der Konuswinkel gewählt wird, desto größer fällt die Krümmung der einzelnen Finger aus, bis sie sich berühren. Dadurch verdrehen sich die Fingerspitzen, sodass nur noch ein Linienkontakt entsteht. Der Öffnungsdurchmesser des Zwei-Finger-Greifers mit einem Konuswinkel von 90° beträgt 40 mm. Durch das Aufbringen von Vakuum, können die Finger etwas gespreizt und der Öffnungsdurchmesser ein wenig vergrößert werden. Damit erfüllt dieser Greifer die Anforderungen für das betrachtete Szenario am besten.

Mit dem aufgebauten Versuchsstand, kann eine Automatisierung des Umtopfprozesses im Labor realisiert werden. Das Programmieren der Roboterbewegung über das TeachPanel bietet den großen Vorteil, dass nur wenig Know-how benötigt wird und somit auch von einem kleinen landwirtschaftlichen Unternehmen selbständig ausgeführt werden kann. In der Praxis führt es aber zu einem enormen Aufwand, der zu keinen wirtschaftlichen Vorteilen gegenüber dem Einsatz von menschlichem Personal führt. Die Trays müssen stets genau positioniert und alle Anfahrpunkte händisch bestimmt und eingetragen werden. Hinzu kommen die noch zu langen Pickzeiten. Während der Versuche wurde eine mittlere Pickzeit von ca. 20 Sekunden ermittelt. Im Vergleich dazu, benötigt ein Mensch für den gleichen Vorgang im Mittel nur 2,4 Sekunden.

3.2 AUTOMATISIERUNGSANSATZ

Aufbauend auf den Ergebnissen aus den Soft-Gripper-Versuchen soll hier ein praktikabler Automatisierungsansatz vorgestellt werden. Dieser beinhaltet eine Weiterentwicklung des Zwei-Finger-Greifers zu einem verstellbaren Parallelgreifer und den Einsatz von Kameratechnik mit den entsprechenden Bildverarbeitungsverfahren.

3.2.1 SYSTEMAUFBAU

Der Versuchsaufbau für die Automatisierungslösung besteht aus einem Universal Robots UR10, zwei Bandförderern (links und rechts vom Roboter) und zwei 3D-Kameras, die jeweils über den Bandförderern montiert sind (vgl. Abbildung 4). Auf dem linken Förderband werden die Anzuchttrays angeliefert. Auf dem rechten Förderband steht ein Jungpflanzentray mit vorbereiteten Töpfen für die Jungpflanzen bereit. Nach dem Umtopfen wird das Jungpflanzentray abtransportiert und ein neues bereitgestellt. Die Steuerung der Bandförderer ist an die IO-Anschlüsse des UR-Rechners angeschlossen. Ebenfalls mit den IO-Anschlüssen des Roboters ist die Cobot Control Box verbunden. Sie wird für die Steuerung der Druckluft für den Greifer verwendet.

Neben den genannten Komponenten kommt ein Desktop-PC zur Steuerung des Gesamtsystems hinzu. Für die Robotersteuerung wird das Robot Operating System (ROS) genutzt. Dafür wird der offizielle ROS-Treiber von Universal Robots verwendet. Die Bildverarbeitung erfolgt mittels OpenCV. Die beiden 3D-Kameras (Esenso N35 und Roboception rc_visard 65) sind mit dem Desktop-PC verbunden. Die Kameras sind so kalibriert, dass die Kamerakoordinatensysteme in das Roboterkoordinatensystem umgerechnet werden. Damit liefern die Kameras Koordinatenpunkte in Bezug auf die Roboterbasis.

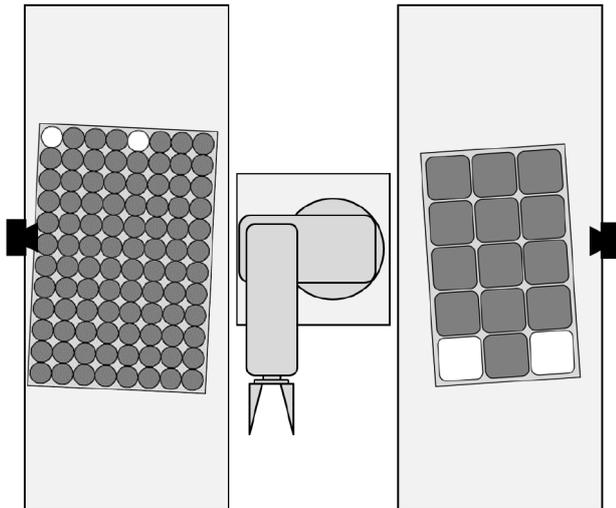


Abbildung 4. Versuchsanordnung für den Automatisierungsansatz.

3.2.2 GREIFER

Um die Pickleistung zu erhöhen, liegt es nahe, einen Greifer zu verwenden, der mehrere Pflanzen gleichzeitig greifen kann. Ähnliche Parallelgreifer kommen in den oben genannten Automatisierungslösungen ebenfalls zum Einsatz. Bei einem starren Greifer ist man mit dem Problem konfrontiert, dass die Abstände zwischen den Pflanzen beim Aufnehmen deutlich kleiner sind als die Abstände beim Ablegen. Hier muss eine Lösung geschaffen werden, mit der diese Abstandsdifferenz überwunden werden kann.

Für die ersten Versuche wurde ein einfacher Greifer mit nur zwei Zwei-Finger-Greifern konstruiert. Bei der Verwendung von nur zwei Greifern kann in engen Grenzen eine beliebige Position mit beiden Greifern angefahren werden. Das ist nützlich um etwaige Höhenunterschiede bei den Jungpflanzen auszugleichen. Bereits mit drei Greifern würde einer dieser Greifer zwangsgeführt werden.

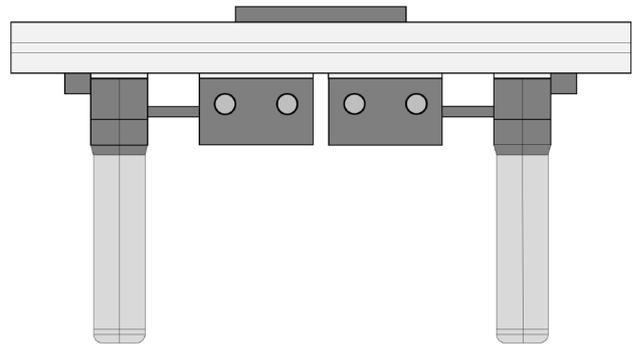


Abbildung 5. Verstellbarer Parallelgreifer.

Der konstruierte Greifer ist in Abbildung 5 dargestellt. Der dunkelgraue Block ganz oben steht für den Flansch, mit dem der Greifer am Roboter befestigt werden kann. Darunter befindet sich eine Alu-Profil-Stange, die alle weiteren Komponenten trägt. In der Mitte befinden sich zwei Pneumatikzylinder. Diese sind jeweils über eine Kolbenstange mit den Zwei-Finger-Greifern verbunden. Ganz außen ist jeweils ein Anschlag befestigt, der den Hub und damit die Verschiebung des Greifers begrenzt.

Die Position der Pneumatikzylinder und der Anschläge kann verstellbar werden. Damit kann der Greifer an die jeweilige Anzuchttray-Jungpflanzentray-Kombination angepasst werden. Zu beachten ist hier jedoch der geringe Hub von nur 20 mm pro Zylinder. Für die Versuche wurde der Greifer so eingestellt, dass der Mittelachsenabstand der Greifer im eingefahrenen Zustand 180 mm beträgt. Im ausgefahrenen Zustand beträgt der Abstand 206 mm. Damit können weder zwei Pflanzen direkt nebeneinander aufgenommen, noch zwei Pflanzen direkt nebeneinander abgelegt werden. Der Pflanzenabstand im Anzuchttray beträgt 45 mm, der im Jungpflanzentray 103 mm. In Abbildung 4 sind die Zellen, die bei einem Greifvorgang angefahren werden weiß markiert. Im eingefahrenen Zustand werden beim Aufnehmen drei Zellen überbrückt. Beim Absetzen im ausgefahrenen Zustand wird eine Zelle überbrückt.

3.2.3 BILDVERARBEITUNG

Erst durch das Vorhandensein einer Bildverarbeitung wird es möglich eine praktikable Automatisierungslösung zu schaffen. In erster Linie ist sie dafür da, um die Trays auf dem Förderband zu lokalisieren. Dadurch wird es möglich die Anfahrpunkt für das Aufnehmen und das Ablegen der Pflanzen automatisch berechnen zu lassen. Es ist zwar theoretisch möglich mit Anschlägen zu arbeiten, um die Trays in eine definierte Position zu bringen, jedoch ist diese Lösung mit einem erhöhten mechanischen Aufwand verbunden. Außerdem bietet die Bildverarbeitung weitere Funktionen, wie die Kontrolle über erfolgreiche oder misslungene Umtopfvorgänge.

Um ein Tray zu detektieren, nimmt die 3D-Kamera eine Punktwolke von der Szene auf. Von dieser Punktwolke wird die Ebene des Bandförderers abgeschnitten. In das verbleibende Bild wird mit Hilfe einer Kantendetektion

ein Rechteck eingepasst. Dafür werden vorab Informationen über die Traygröße (Länge, Breite, Höhe) und die Anzahl der Zellen, sowie deren Verteilung entlang der Längen- und der Breitenkante abgerufen. Für das eingepasste Rechteck wird die Position und die Orientierung bestimmt. Anhand der Information über die Zellenverteilung im Tray werden die Anfahrpunkte für den Roboter berechnet. Zum Schluss werden die Anfahrpunkte an die Robotersteuerung übergeben.

Um die Pflanzen so nah wie möglich am Erdballen greifen zu können, müsste die tatsächliche Höhe des Erdballens einer jeden Pflanze ermittelt werden. Die Höhenunterschiede ergeben sich nach dem Lösen der Erdballen in der Stanzmaschine, da diese nicht alle gleichmäßig wieder zurück in die Zellen fallen. Diese Aufgabe wird jedoch durch die Blätter der Pflanzen erschwert. Die Sichtbehinderung macht eine zuverlässige Höhenbestimmung, zumindest mit diesem Aufbau, unmöglich.

3.2.4 PROGRAMMABLAUF

Mit diesem Aufbau soll getestet werden, ob der automatisierte Umtopfprozess reibungsfrei abläuft. Die größte Herausforderung stellt das parallelisierte Greifen der Pflanzen dar. Da die Höhe der Erdballen nicht exakt bestimmt werden kann, werden die Versuche mit unterschiedlichen Greifhöhen durchgeführt. Ausgehend von der Idealhöhe werden Abweichungen von bis zu 5 mm in beide Richtungen getestet. Damit soll geprüft werden inwieweit der Greifer in Bezug auf Positionsabweichungen fehlerverzeihend ist. Da auch der Abstand zwischen den Pflanzen nicht zwangsläufig immer exakt gleich sein muss, ist es wichtig, dass der Greifer auch diese Ungenauigkeiten ausgleichen kann. Mit einer Fingerbreite von 20 Millimetern und einem flexiblen Anpassungsvermögen an das Greifobjekt, bietet er hierfür gute Voraussetzungen.

Ein grober Überblick über den Ablauf des Programms ist in Abbildung 6 dargestellt. Alle Teilprogramme zur Steuerung der Bandförderer, des Greifers (Control Box), der Kameras und des Roboters werden von einem Hauptprogramm verwaltet. Hier wird auch in Abhängigkeit des verwendeten Greifers und der Trays ein Routenplan für den Roboter erstellt. Um das 15er Jungpflanzentray vollständig zu bestücken, darf bei jedem achten Greifvorgang nur eine Pflanze gegriffen werden. Damit werden für ein 96er Anzuchttray 51 Zyklen benötigt, um alle Pflanzen zu entnehmen. Aufgrund der räumlichen Verteilung, müssen die letzten zwei Pflanzen vom Greifer einzeln aufgenommen werden.

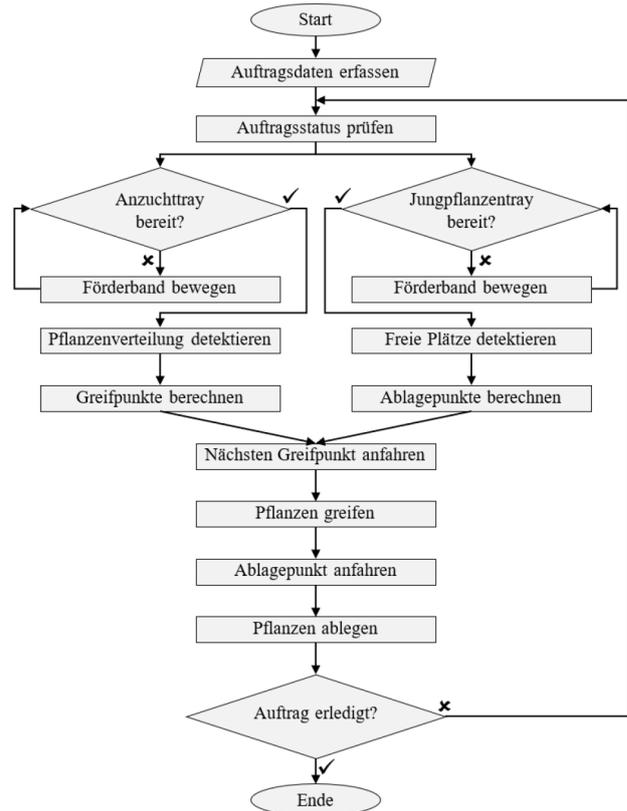


Abbildung 6. Programmablaufplan für die Umtopfversuche.

3.2.5 ERGEBNISSE

Da das System zum aktuellen Zeitpunkt sich noch im Aufbau befindet, können keine belastenden Ergebnisse präsentiert werden. Aus diesem Grund wird hier lediglich eine vorsichtige Einschätzung abgegeben, die aus der Erfahrung aus früheren Projekten herrührt. Die Pickzeit pro Pflanze kann mit dem Parallelgreifer, im Vergleich zu der Pickzeit aus den Soft-Gripper-Versuchen, halbiert werden. Hier besteht noch Optimierungspotenzial im Hinblick auf die Ausführungsgeschwindigkeit des Roboters. Durch eine geschickte Trajektorienplanung und Anpassung der Beschleunigungswerte kann sie gegebenenfalls weiter reduziert werden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass bei zu hohen Beschleunigungswerten die Pflanzen aufgrund von Massenträgheit aus dem Greifer abrutschen können. Auch die Erdballenstruktur darf dabei nicht zu stark belastet werden. Somit sind hier auf Grund der fragilen Struktur der Pflanzen gewisse Grenzen gesetzt. Die Gutmütigkeit der verwendeten SoftGripper, bei Positionierungsabweichungen einen sicheren Griff zu gewährleisten, haben die Greifer bereits in anderen Projekten bewiesen. Ob dies auch auf Pflanzen zutrifft, werden erst die kommenden Versuche zeigen.

Vergleicht man auch hier die Pickzeit mit der von Menschen, so stellt man fest, dass diese um den Faktor 4 höher ist. Um eine in etwa gleiche Leistung erbringen zu können, muss der Parallelgreifer aus acht Greifern bestehen. Dies führt, positiver Ergebnisse aus diesen Versuchen vorausgesetzt, zur Phase 3 des Projekts. Hier muss ein neues mechanisches Konzept für den Greifer gefunden werden. Einer, der auch das Greifen direkt benachbarter Pflanzen ermöglicht. Mit den verwendeten Zwei-Finger-Greifer ist dies prinzipiell möglich. Der Verschiebemechanismus über die Pneumatikzylinder muss jedoch durch einen anderen Ansatz ersetzt werden. Ein weiterer Aspekt bei dieser Greifergröße wird das Eigengewicht sein. Dieses, zusammen mit dem Gewicht der aufgenommenen Pflanze, wird eine starke Restriktion im Hinblick auf die Nutzlast des Roboters sein. Die Dimension des Greifers bleibt trotzdem, wenn auch grenzwertig in Bezug auf Größe und Gewicht, in einem realistischen Bereich.

4 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG

In dem betrachteten Unternehmen müssen pro Saison in etwa 3.000.000 Jungpflanzen umgetopft werden. Diese Aufgabe wird von drei Saisonarbeitskräften ausgeführt. Die Arbeitskräfte arbeiten 10 Stunden am Tag und sechs Tage in der Woche. Die Leistung einer Arbeitskraft beträgt 1.500 Pflanzen pro Stunde. Berücksichtigt man die gesetzlich vorgeschriebenen Pausenzeiten, so benötigen die drei Arbeitskräfte insgesamt gute drei Monate für diese Aufgabe. Etwaige Fehl- oder Krankheitstage, sowie der Anteilige Anspruch auf Urlaub, bleiben hier unberücksichtigt. Bei einem Mindestbruttolohn von 9,50 € pro Stunde und unter Beachtung der Arbeitgeberanteile (24,6%) für die Sozialversicherungen, sowie Arbeitgeberumlagen und dem Beitrag zur Berufsgenossenschaft, entstehen für die drei Arbeitskräfte Gehaltskosten in Höhe von 26.640 € für die drei Monate.

Betrachtet man die Systemleistung des Automatisierungsansatzes unter den gleichen Arbeitszeitbedingungen wie bei den Arbeitskräften, so kommt man zu dem Ergebnis, dass das System über 2,5 Jahre für die 3.000.000 Pflanzen brauchen würde. Selbst bei einem Dauerbetrieb des Systems, würde das Umtopfen immer noch ein knappes Jahr lang dauern. Hierfür wären allerdings weitere Automatisierungsmaßnahme nötig, um eine Bereitstellung der Pflanzen außerhalb der Arbeitszeiten zu gewährleisten. Im Umkehrschluss heißt es, um auf eine vergleichbare Pickleistung zu kommen, werden 11 dieser Systeme benötigt. Die Kosten für Anschaffung, Installation und Inbetriebnahme eines Systems werden überschlägig mit 39.000 € kalkuliert. Hinzu kommen laufende Wartungs- und Betriebskosten. Abgesehen von den zu hohen Anschaffungskosten für 11 Systeme, wäre der Break-Even-Point erst nach etwa 20 Jahre erreicht. Es ist auch nicht davon auszugehen, dass alle Systemkomponenten eine solche Einsatzdauer intakt bleiben.

Berücksichtigt man an dieser Stelle die dritte Phase der Greiferentwicklung, so kann die Situation dennoch zum positive entwickelt werden. Demnach würde ein System einen Arbeiter, bezogen auf die Pickleistung, eins-zu-eins ersetzen können. Der Break-Even-Point wäre nach etwas mehr als 5 Jahren erreicht. Das ist zwar ein akzeptabler Wert, jedoch kein starkes Argument für das System. Unbefriedigend ist auch die Situation, dass das System neun Monate stillstehen würde, da die Saisondauer für das Umtopfen der Pflanzen nur drei Monate beträgt. Hieraus ergibt sich aber eine Chance einen echten Mehrwert durch den Einsatz von einem cobotbasierten System zu generieren. Durch eine Ausweitung des Einsatzgebiets und damit einer Einsatzdauer über drei Monaten im Jahr, kann der Investitionsaufwand deutlich stärker relativiert werden.

5 SCHLUSSBETRACHTUNG

Die ersten Untersuchungen bei den Soft-Gripper-Versuche, im Hinblick auf die Eignung der Greifer für die Handhabung von Pflanzen, haben vielversprechende Ergebnisse geliefert. Das hat dazu geführt weitere Untersuchungen anzustreben, um eine automatisierte Lösung für den Umtopfprozess in der Pflanzenzucht zu entwickeln. Da die auf dem Markt angebotenen System für kleine und mittlere Landwirtschaftsbetriebe zu teuer in der Anschaffung und zu unflexibel im Einsatz sind, sollte eine flexible Lösung auf Basis von Cobots entwickelt werden. Diese können vergleichsweise mit einem geringen Aufwand in die bestehenden Prozesse integriert werden. Außerdem kann mit einer Auswahl an angepassten Greifern, das System schnell auf verschiedene Pflanzentrays umgerüstet werden.

Bereits aus den ersten Versuchen ist jedoch zu erkennen gewesen, dass die Pickleistung weit hinter der von Menschen liegt. Aus diesem Grund werden Parallelgreifer entwickelt, mit denen die Leistung der Roboter mit der des Menschen gleichziehen soll. Dies kann mit einem Greifer aus acht parallel angeordneten Zwei-Finger-Greifern erreicht werden. Gerade bei der finanziellen Betrachtung muss beachtet werden, dass das System nur drei Monate für diese Aufgabe genutzt werden kann. Gelingt es das System sinnvoll zu erweitern, so kann die Amortisationsdauer drastisch reduziert werden.

Bei der Analyse der Pflanzenzuchtprozesse wurde festgestellt, dass im Bereich der Transportvorbereitung ein weiteres Automatisierungspotenzial besteht. Durch einen Wechsel des Greifers und einer Anpassung der Software, kann der Roboter in den verbleibende neun Monaten in diesem Bereich eingesetzt werden. Hier ist ein mobiles Konzept des Roboters nach dem Vorbild von LUKE2 [IGZ21] denkbar. Damit wäre auch zusätzlich der angestrebten Flexibilität eines solchen Systems Rechnung getragen.

LITERATUR

- [BOL19] Bolinski, Ina: *Virtual Farming*. In: Kasprowicz, Dawid; Rieger, Stefan: *Handbuch Virtualität*. Springer VS, Wiesbaden, 2019 – ISBN 978-3-658-16358-7, S. 303-315
- [CTR18] Bär, Christian; Grädler, Thomas; Mayr, Robert: *Digitalisierung im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Recht*. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2018 – ISBN 978-3-662-55720-4
- [HF17] Hanke, Magda-Viola; Flachowski, Henryk: *Obstzüchtung und wissenschaftliche Grundlagen*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2017 – ISBN 978-3-662-54085-5
- [IGZ21] IGZ Ingenieurgesellschaft für logistische Informationssysteme mbH. *LUKE2*. <https://www.igz.com/sap-warehousing/best-practices/pick-by-robot/> (19.01.2021)
- [ISO21] ISO Group Agri Systems BV. *ISO Cutting Planter 4000*. <https://www.iso-group.nl/en/machines/iso-cutting-planter-4000> (24.06.2021)
- [PAU20] Paulsen, Nina: Schon 8 von 10 Landwirten setzen auf digitale Technologien. 2020 - https://www.bauernverband.de/fileadmin/user_upload/dbv/pressemitteilungen/2020/KW_18/2020-81_Presseinfo_Landwirtschaft_final.pdf (04.03.2021)
- [SCH21] Schulz, Felix: *Analyse und experimentelle Untersuchung eines ausgewählten Prozesses in der Pflanzenzucht im Hinblick auf die Anwendbarkeit eines automatisierten Greifsystems*. Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 2021 (unveröffentlicht)
- [SGW21] SoftGripping by Wegard GmbH. *Cobot SoftGripper*. 2021 - <https://www.softgripping.shop/de/soft-gripper/> (12.03.2021)
- [SG21] SoftGripping by Wegard GmbH. *Data Sheet Collection*. Revision 1.0.1 04.01.2021 - https://soft-gripping.com/assets/downloads/datasheets/SG_Data_Sheets.pdf (12.03.2021)
- [TTA21] TTA BV. *PackPlanter*. <https://www.tta.eu/de/maschinen/pflanzen/packplanter> (08.02.2021)
- [UR21] Universal Robots (Germany) GmbH. *Universal Robots UR3e*. <https://www.universalrobots.com/de/produkte/ur3-roboter/> (12.03.2021)

Ilja Dick, M.Sc., Research Assistant at the Institute of Machine Elements and Technical Logistics at the Helmut-Schmidt-University, Hamburg.

Dr. Stephan Ulrich, Chief Engineer at the Institute of Machine Elements and Technical Logistics at the Helmut-Schmidt-University, Hamburg.

Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns, Professor and head of the Institute of Machine Elements and Technical Logistics at the Helmut-Schmidt-University, Hamburg.

Institute of Machine Elements and Technical Logistics, Helmut-Schmidt-University, Dept. of Mechanical Engineering, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, Germany
E-Mail: ilja.dick@hsu-hh.de, stephan.ulrich@hsu-hh.de
rainer.bruns@hsu-hh.de