



## Prolog

### 1 Effizienzsteigerung

Laut der Prognosen der Vereinten Nationen wird die Weltbevölkerung bis 2050 von heute 7 Mrd. auf 9,7 Mrd. Menschen ansteigen (UN, 2015). Folglich steht die Landwirtschaft vor einer enormen Herausforderung, da sie den steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln für eine wachsende Bevölkerung decken muss. Zunehmender Wohlstand in Entwicklungs- und Schwellenländern führt zudem zu einem starken Anstieg der Nachfrage nach Veredelungsprodukten wie z. B. Fleisch, so dass der Bedarf nach pflanzlichen Rohstoffen als Futtermittel zusätzlich steigt. Nach Tilman et al. (2011) wird der Bedarf nach pflanzlichen Nahrungs- und Futtermitteln von 2005 bis 2050 global um 100-110 % ansteigen.

Neben der steigenden Nachfrage nach Nahrungs- und Futtermitteln nimmt auch der Energiebedarf weltweit zu. Wie aus dem World Energy Outlook 2014 (WEO) der Internationalen Energie Agentur (IEA) hervorgeht, steigt der weltweite Energiebedarf bis 2040 um 37 % an (IEA, 2014). Um die Treibhausgasemissionen zu senken und unabhängiger von der Nutzung fossiler Energieträger zu werden, hat die Europäische Union im Jahr 2009 die Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen erlassen (Anonym, 2009). Infolgedessen hat die Produktion von nachwachsenden Rohstoffen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in den letzten Jahren erheblich zugenommen (FNR, 2015), so dass es zu einer starken Konkurrenz um Ackerflächen für die Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln sowie nachwachsenden Rohstoffen gekommen ist.

Die Steigerung des Angebotes an landwirtschaftlichen Rohstoffen ist demnach die wichtigste Voraussetzung, um zukünftig eine ausreichende Versorgung der wachsenden Weltbevölkerung sicherstellen zu können (OECD-FAO, 2015). Da die landwirtschaftlich nutzbare Fläche weltweit begrenzt ist (Mifflin, 2000; Meyer et al. 2011; Royal Society, 2009), kann die Erntemenge nur gesteigert werden, indem die Produktivität der Fläche erhöht wird. Das wichtigste Ziel für die Landwirtschaft ist es daher, die Menge von qualitativ hochwertigen Nahrungsmitteln auf der vorhandenen Fläche zu steigern, dabei die natürlichen Ressourcen zu schonen und effizient zu nutzen sowie die sozialen Belange und den Tierschutz im Sinne einer nachhaltigen Produktion zu berücksichtigen. Dieses Ziel wird vom Wissenschaftlichen Beirat für Agrarpolitik als „nachhaltige Produktivitätssteigerung“ bezeichnet (Bauhaus et al., 2012). Nach Meyer et al. (2013) gibt es drei grundlegen-



de Ansätze, mit denen die Erträge im Rahmen einer nachhaltigen Produktivitätssteigerung erhöht werden können. Dazu zählen die züchterische Erhöhung des Ertragspotenzials der Kulturarten, die Reduzierung von Ertragslücken durch die Verbesserung des Anbaumanagements und die Reduzierung der Nachernteverluste.

Zuckerrüben haben vielfältige Nutzungsmöglichkeiten als Lebensmittel, Futtermittel und Bioenergierohstoff (WVZ, 2015), so dass ihr Anbau dazu beitragen kann, den weltweit steigenden Bedarf an landwirtschaftlichen Produkten zu decken. Im Jahr 2017 wird die Zuckermarktordnung auslaufen (EU Kommission, 2013). Es wird erwartet, dass dies zu volatilen Preisen und enormen Mengenschwankungen führen wird. Daher muss die Wettbewerbsfähigkeit des Zuckerrübenanbaus auf nationaler und regionaler Ebene gegenüber den Konkurrenzfrüchten wie Raps, Mais und Getreide und auf internationaler Ebene gegenüber Zuckerrohr erhöht werden. Mit dieser Problematik sehen sich in Zukunft nicht nur die Zuckerrübenanbauenden Betriebe, sondern auch die Zuckerrübenzüchter und die Zuckerindustrie in Europa konfrontiert. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, ist eine Effizienzsteigerung in der Zuckerrübenproduktion durch eine nachhaltige Produktivitätssteigerung unbedingt notwendig.

Das Ertragspotenzial eines Genotyps ist der höchstmögliche Ertrag, den dieser unter optimalen Wachstumsbedingungen, also ohne eine begrenzte Wasser- oder Nährstoffversorgung sowie ohne eine Limitierung durch Schädlinge, Krankheiten, Unkräuter oder andere Stressfaktoren in der Umwelt realisieren kann, an die sie adaptiert ist (Evans und Fischer, 1999). In Hohertragsregionen wie in Europa ist das Anbaumanagement bereits weitestgehend optimiert, dass Verbesserungen zu keiner deutlichen Ertragssteigerung mehr führen werden (Licker et al. 2010). Folglich ist die Ertragslücke, die die Differenz zwischen dem durchschnittlichen Ertrag der landwirtschaftlichen Betriebe und dem Ertragspotenzial beschreibt, in diesen Ländern relativ gering (Lobell et al., 2009). Auch beim Zuckerrübenanbau in Deutschland ist das Anbaumanagement bereits sehr gut aufgestellt (Reinecke et al., 2013; Wießner et al., 2010; Hoffmann und Stockfisch, 2010), so dass der Ertrag bereits nahe dem theoretisch möglichen Potenzial liegt (Hoffmann, 2006) und die Ertragslücke gering ist. Eine Verbesserung des Anbaumanagements bei Zuckerrüben würde somit hauptsächlich zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Anbaus führen, aber zu keinem deutlichen Anstieg des Ertrages (Loel, 2014). Nach Loel (2014) hat die Züchtung mit einem Anteil von etwa 50 % eine große Bedeutung für die Verbesserung von Ertrag und Qualität von Zuckerrüben. Die andere Hälfte ist auf Veränderungen im Anbaumanagement und Klima zurückzuführen. Folglich wird bei Zuckerrü-



ben erwartet, dass ein Ertragsanstieg hauptsächlich durch die züchterische Steigerung des Ertragspotenzials erzielt werden kann (Loel, 2014). Diesbezüglich soll im ersten Teil der vorliegenden Arbeit das Ertragspotenzial von Zuckerrüben analysiert werden.

Für die Umsetzung einer nachhaltigen Produktivitätssteigerung gilt es aber nicht nur, den höchst möglichen Ertrag auf dem Feld zu erzielen, sondern diesen auch ohne Verluste zu ernten und mit nahezu gleichbleibender Qualität bis zum Verkauf bzw. bis zur Weiterverarbeitung zu erhalten (Meyer et al., 2013). Ein großer Teil der Zuckerrüben muss nach der Ernte bis zur Verarbeitung in der Fabrik gelagert werden. Dabei kommt es zu Zuckerverlusten und zu einer Anreicherung von Stoffen, die die Effizienz des Verarbeitungsprozesses in der Fabrik mindern (Burba, 1976; Kenter und Hoffmann, 2009). Durch den Anbau von Zuckerrübensorten mit guter Lagerfähigkeit könnten die Lagerungsverluste von Zuckerrüben reduziert und damit die Effizienz der Zuckerrübenproduktion nachhaltig gesteigert werden. Daher sollen im zweiten Teil der Arbeit Möglichkeiten zur Verbesserung der Lagerfähigkeit von Zuckerrübenotypen untersucht werden.

## **2 Ertragspotenzial von Zuckerrüben**

### **2.1 Hintergrund zum Ertragspotenzial**

Bei einigen landwirtschaftlichen Kulturarten führte die züchterische Veränderung von den ursprünglichen Sommerformen hin zu Winterformen zu einem erheblichen Anstieg im Ertrag. Dieser Ertragsvorteil der Winter- gegenüber den Sommerkulturen ist vor allem bei Winterweizen, Ackerbohnen sowie Raps bekannt (Herzog und Geisler, 1991; Butruille et al, 1999; Gan et al., 2000). Die Hauptursachen für die höheren Erträge der Winterformen gegenüber den Sommerformen sind eine bessere Ausnutzung der photosynthetisch aktiven Strahlung sowie des Bodenwassers und der milden Temperaturen im Frühjahr. Auch bei Zuckerrüben wurde bereits mehrfach darüber nachgedacht, durch die Züchtung von Winterrüben eine weitere Ertragssteigerung zu erreichen (Achard, 1809; Schneider, 1935). Durch die Aussaat im Herbst und die Ernte im Herbst des folgenden Jahres kommt es zu einer Erhöhung der Lichtinterzeption des Bestandes, so dass ein theoretischer Gesamt-trockenmassezuwachs von ca. 26 % im Vergleich zu im Frühjahr gesäten Zuckerrüben erwartet wird (Hoffmann und Kluge-Severin, 2010). Da bisher aber noch keine winterharten und schossfesten Zuckerrüben verfügbar sind, ist der Winterrübenanbau unter mitteleuropäischen Wachstumsbedingungen im Feld nicht möglich (Milford und Limb, 2008).



Folglich ist auch nicht klar, ob das Ertragspotenzial von Zuckerrüben für einen solch hohen Ertragszuwachs ausreicht, d.h. ob durch den Anbau von Winterrüben diese Ertragssteigerung im Vergleich zu im Frühjahr gesäten Zuckerrüben erzielt werden kann.

Im kommerziellen Zuckerrübenanbau in Mitteleuropa wachsen Zuckerrüben als einjährige Pflanze von Frühjahr bis Herbst für ungefähr 200 Tage. Bei dem Anbau als Winterkultur würden die Pflanzen bereits im Herbst ausgesät und erst im Herbst des folgenden Jahres geerntet. Da die Aussaat der Winterrüben abhängig von der Ernte der Vorfrucht ist, wäre der früheste Aussaattermin der Rüben Mitte August bzw. Anfang September. Die Ernte der Winterrüben im Herbst wäre von der Verarbeitungskampagne der Zuckerfabriken abhängig, die meist im September beginnt. Folglich ergibt sich bei Winterrüben, die für die Zuckerproduktion verwendet werden sollen, eine Vegetationszeit von ungefähr 365-475 Tage. Damit ist die Wachstumszeit von Winterrüben fast doppelt so lang wie bei im Frühjahr gesäten Rüben. Um die Vorteile des Anbaus von Winterrüben nutzen zu können, wird also vorausgesetzt, dass das Wachstum von Zuckerrüben im vegetativen Stadium indeterminiert ist und der Ertrag mit zunehmender Vegetationszeit stetig steigt. Vor dem Hintergrund, die Vegetationsperiode von Zuckerrüben zur Ertragssteigerung zu verlängern, wurde bereits in den 1970er Jahren ein Versuch in England durchgeführt (Wood und Scott, 1975). Hierbei zeigte sich zunächst, dass Winterrüben im Verlauf des Frühjahres deutliche Ertragsvorteile gegenüber im Frühjahr gesäten Zuckerrüben haben. Durch den Übergang in die generative Entwicklungsphase (Schossen) wurde dieser Vorteil allerdings wieder eingebüßt.

Um die Ertragspotenziale und Ertragseffizienz von Kulturpflanzen weiter zu optimieren, ist das Zusammenspiel von Assimilatproduktion (Quelle, source) und Assimilateinlagerung (Senke, sink) von zentraler Bedeutung (Anonym, 2015). Der Prozess der Zuckerakkumulation in Zuckerrüben wird zwar seit Jahren diskutiert (Milford und Watson, 1971; Milford, 1973), dennoch ist die Ertragsbildung sowie die Beziehung zwischen Source und Sink nicht vollständig geklärt. Die Photosyntheserate in den Blättern, die Bildung der Kambiumringe und der Parenchymzellen im Rübenkörper sind essentiell für die Ertragsbildung von Zuckerrüben (Artschwager, 1926; Milford, 1973). Bisher gibt es allerdings keine Informationen zur Ertragsbildung von nicht schossenden Zuckerrüben, die in einer Vegetationsperiode von deutlich mehr als 200 Tagen gewachsen sind.



## **2.2 Ziele der Arbeit – Ertragspotenzial**

Durch den Anbau von Winterrüben wird eine Ertragssteigerung von bis zu 26 % erwartet. Dies ist bedingt durch eine deutlich längere Vegetationsperiode und setzt voraus, dass Zuckerrüben im vegetativen Stadium kontinuierlich weiter wachsen. Bisher stehen allerdings keine schossfesten Zuckerrüben zur Verfügung, um Winterrüben unter Feldbedingungen in Mitteleuropa testen zu können. Somit ist nicht klar, ob Zuckerrüben überhaupt das Ertragspotenzial haben, um diesen theoretischen Ertragsanstieg realisieren zu können.

In dieser Arbeit soll daher unter kontrollierten Temperaturbedingungen im Gewächshaus analysiert werden, wie sich der Ertrag und die Qualität von Zuckerrüben im Laufe einer ungewöhnlich langen Wachstumszeit entwickeln. Durch die Analyse der physiologischen Grundlagen der Ertragsbildung sollen Ansatzpunkte identifiziert werden, mit denen das Ertragspotenzial auch in Zukunft züchterisch verbessert werden kann. Außerdem sollen die Ergebnisse einen Hinweis liefern, ob der Winterrübenanbau eine Möglichkeit darstellen könnte, um den Ertrag und damit die Effizienz der Zuckerrübenproduktion nachhaltig zu steigern.

## **3 Lagerfähigkeit von Zuckerrüben**

### **3.1 Hintergrund zur Lagerung**

In Mitteleuropa erfolgt die Zuckerrübenernte meist ab September und muss Mitte oder Ende November aus Gründen des Bodenschutzes und einer termingerechten Aussaat der Folgekultur abgeschlossen sein. Die Verarbeitungskampagne der Zuckerfabriken dauert bisher bis Januar (ca. 100 Tage). Folglich müssen ungefähr die Hälfte (10 Mio. t) der in Deutschland geernteten Zuckerrüben vor der Verarbeitung in der Fabrik gelagert werden. In 2011 wurden die Rüben in Europa durchschnittlich für 60 Tage, in einigen Ländern wie in England jedoch für bis zu 100 Tage gelagert (Legrand et al., 2012). Es wird erwartet, dass in Deutschland die Kampagne nach 2017 auf mindestens 120 Tage ausgedehnt wird, um die Fixkosten der Zuckerfabriken zu reduzieren. Folglich würde nicht nur die Lagerdauer, sondern auch die Menge an gelagerten Rüben deutlich zunehmen. Damit sind die Anbauer und die Fabriken aber auch mit höheren Lagerungsverlusten konfrontiert. Daher ist die Verminderung von Lagerungsverluste unbedingt notwendig, um die Effizienz in der Zuckerrübenproduktion nachhaltig zu steigern.



### 3.2 Ursachen für Lagerungsverluste

Zuckerrüben sind auch nach der Ernte noch lebende Organismen, die ihre Lebensprozesse aufrecht erhalten müssen. Da nach der Ernte keine Photosynthese mehr stattfinden kann, muss die dafür benötigte Energie aus dem Speicherorgan durch Umsetzungsprozesse mobilisiert werden. Dazu muss der in der Vegetationszeit gespeicherte Zucker (Saccharose) zunächst durch rübeneigene Enzyme wie z. B. Invertasen und Saccharose-Synthasen (Klotz und Finger, 2004) zu Glucose und Fructose gespalten werden. Im Anschluss wird dieser in der Glycolyse veratmet und die benötigte Energie wird frei (Burba, 1976). Wenn mehr Zucker enzymatisch hydrolysiert wird als durch die Respiration zu CO<sub>2</sub> oxidiert, reichern sich Glucose und Fructose, deren Summe als Invertzucker bezeichnet wird, in den Zellen der Rüben an (Berghall et al., 1997; Klotz et al., 2006). Umsetzungsprozesse beginnen also direkt nach der Ernte und sind nicht zu verhindern. Sie können allerdings durch produktionstechnische Maßnahmen reduziert werden (Kenter et al., 2006), denn neben diesem Grundumsatz gibt es verschiedene Faktoren, die die Höhe der Lagerungsverluste, d.h. die Zuckerverluste und die Anreicherung von Invertzucker entscheidend beeinflussen.

Da enzymatische Umsetzungsprozesse temperaturabhängig sind (Vukov und Hangyál, 1985), ist die Lagerungstemperatur ein bedeutender Faktor, der die Lagerungsverluste von Zuckerrüben beeinflusst. So haben Burba (1976) sowie Kenter et al. (2006) einen positiven Zusammenhang zwischen der Zuckelumsetzung und der Lagerungstemperatur beschrieben. Da die Lagerungsverluste außerdem mit steigender Lagerungsdauer zunehmen, zeigte sich ein enger positiver Zusammenhang zwischen den Lagerungsverlusten und der Temperatursumme (°Cd) während der Lagerung. Nach Campbell und Klotz (2006) ist die Zuckelumsetzung bei Lagerungstemperaturen zwischen 1,5 und 5 °C am niedrigsten. Im Gegensatz zu anderen Kulturarten wie z. B. Äpfel oder Kartoffeln werden Zuckerrüben allerdings nicht unter kontrollierten Temperaturbedingungen in Hallen, sondern in großen Mieten am Feldrand gelagert. Folglich ist die Lagerungstemperatur abhängig von den Witterungsbedingungen des Standortes und ist somit nicht wesentlich zu beeinflussen.

Da Zuckerrüben weltweit in verschiedenen Klimaregionen angebaut werden, wird versucht, die Lagerungstemperaturen durch ein entsprechendes Lagerungsmanagement anzupassen, um die Lagerungsverluste so weit wie möglich zu reduzieren. So werden Zuckerrüben in Regionen, in denen nach der Ernte hohe Temperaturen herrschen wie Italien oder Kalifornien, unverzüglich verarbeitet oder höchstens für wenige Tage gelagert



(Vaccari et al., 1991). In diesen Ländern werden Zuckerrüben sogar traditionell als Winterrüben angebaut (Andreae, 1974; 1980; 1984), denn der Anbau von im Frühjahr gesäten Rüben ist unter anderem auf Grund der starken Hitze im Sommer und der damit einhergehenden schnelleren Alterierung der Rüben bei der Ernte nur begrenzt möglich (Srzednicki, 1978). Zwar sind diese Temperaturen nicht mit den Lagerungstemperaturen in Mitteleuropa zu vergleichen, dennoch treten auch hier zeitweise hohe Temperaturen zur Ernte und auch während der Lagerung auf, die die Lagerungsverluste von Zuckerrüben deutlich erhöhen. Darüber hinaus ist im Hinblick auf die prognostizierte Klimaerwärmung davon auszugehen, dass die Lagerungsverluste, bedingt durch steigende Temperaturen im Herbst, zunehmen werden.

Nicht nur hohe Temperaturen, sondern auch Lagerungstemperaturen unter dem Gefrierpunkt haben einen starken Einfluss auf die Lagerungsverluste von Zuckerrüben. Treten über mehr als 24 Stunden Temperaturen von  $-2$  bis  $-5$  °C auf, gefriert das Rübenewebe irreversibel (Heijbroek und Huijbregts, 1984). Im gefrorenen Zustand kommen fast alle Umsetzungsprozesse zum Erliegen, so dass keine weiteren Lagerungsverluste auftreten und die Rüben für einen langen Zeitraum gelagert werden können. In North Dakota (USA) herrschen während der Lagerung grundsätzlich sehr niedrige Lufttemperaturen (bis zu  $-25$  °C). Dort werden die Rüben zusätzlich durch ein komplexes Ventilationssystem gekühlt, so dass sie während der gesamten Lagerungsperiode im gefrorenen Zustand bleiben ( $-20$  °C) (Backer et al., 1979). Folglich sind die Lagerungsverluste in diesen Regionen eher niedrig. In Nord-West Europa folgen auf Frosteinbrüche im Dezember oder Januar meist längere Perioden mit milden Temperaturen, so dass die Rüben auftauen und die Umsetzungsprozesse wieder einsetzen (Kenter und Hoffmann, 2006). Zusätzlich wird das irreversibel zerstörte Gewebe verstärkt von Mikroorganismen befallen, was ebenfalls zum Zuckerabbau und zu einer extrem starken Anreicherung von unerwünschten Abbauprodukten führt (Oldfield et al., 1980). Außerdem werden die Polysaccharide Dextran und Levan aus dem Zucker durch mikrobielle Umsetzungsprozesse gebildet. Neben den Zuckerverlusten führen diese Polysaccharide zu Problemen bei der Filtration, wodurch es zum Erliegen des Verarbeitungsprozesses in der Fabrik kommen kann (Dutton und Huijbregts, 2006). Um das Erfrieren der Rüben während der Lagerung in Nord-West Europa zu verhindern, wurden in zahlreichen Versuchen diverse Materialien getestet, um die Mieten abzudecken (Huijbregts, 2008; Olsson, 2009). Dabei zeigte sich, dass eine Mietenabdeckung mit Vlies zu den geringsten Lagerungsverlusten führte (Huijbregts, 2008).