

1. Prolog

Die globalen Rohstoffvorräte sind begrenzt und Rohstoffe, die wir heute verbrauchen, stehen künftigen Generationen nicht mehr zur Verfügung. Deshalb setzt eine nachhaltige Entwicklung einen effizienten Umgang mit natürlichen Ressourcen voraus (BUNDESREGIERUNG 2008). Allgemein beschreibt Effizienz das Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen (DIN EN ISO 9000 2005). In der Pflanzenproduktion bestimmen Ertrag und Intensität des Ressourceneinsatzes maßgeblich die Effizienz.

Die Erträge der wichtigsten in Europa angebaute Ackerkulturen sind seit etwa 1960 kontinuierlich um 1 bis 2 % p. a. gestiegen (EWERT et al. 2005). Bei Zuckerrüben haben züchterischer und anbautechnischer Fortschritt den Ertrag in den vergangenen 25 Jahren um 1,27 % oder $0,1 \text{ t ha}^{-1}$ p. a. erhöht (MERKES et al. 1996, FUCHS et al. 2008a). Die Ertragsentwicklung in Deutschland wurde von MÄRLÄNDER (1991) für den Zeitraum 1969-1988 erstmals systematisch dargestellt und wird darauf aufbauend regelmäßig veröffentlicht (IFZ 2008).

Der Ertragsanstieg bei Zuckerrüben ist vor allem auf eine Steigerung des Rübenenertrags (Abb. 1) und einen Rückgang der Nichtzuckerstoffe Kalium (K), Natrium (Na) und insbesondere Amino-N (AmN) zurückzuführen (Abb. 2). Der Zuckergehalt blieb im Betrachtungszeitraum nahezu konstant (Abb. 1).

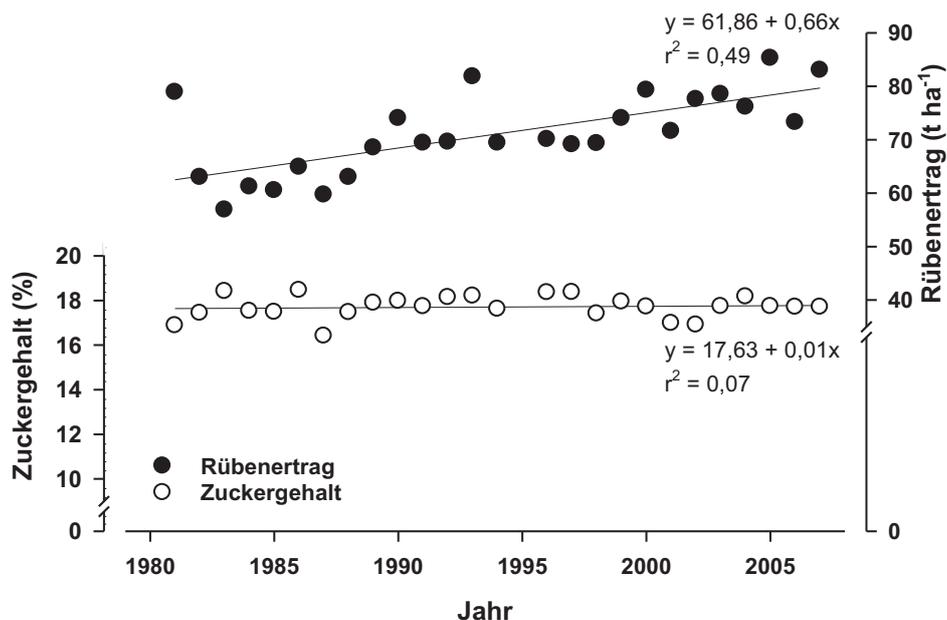


Abb. 1: Entwicklung von Zuckergehalt und Rübenenertrag 1981-2007; Mittel über die in der Wertprüfung des Bundessortenamts neu zugelassenen Zuckerrübensorten

Quelle: verändert nach MÄRLÄNDER et al. (2003)

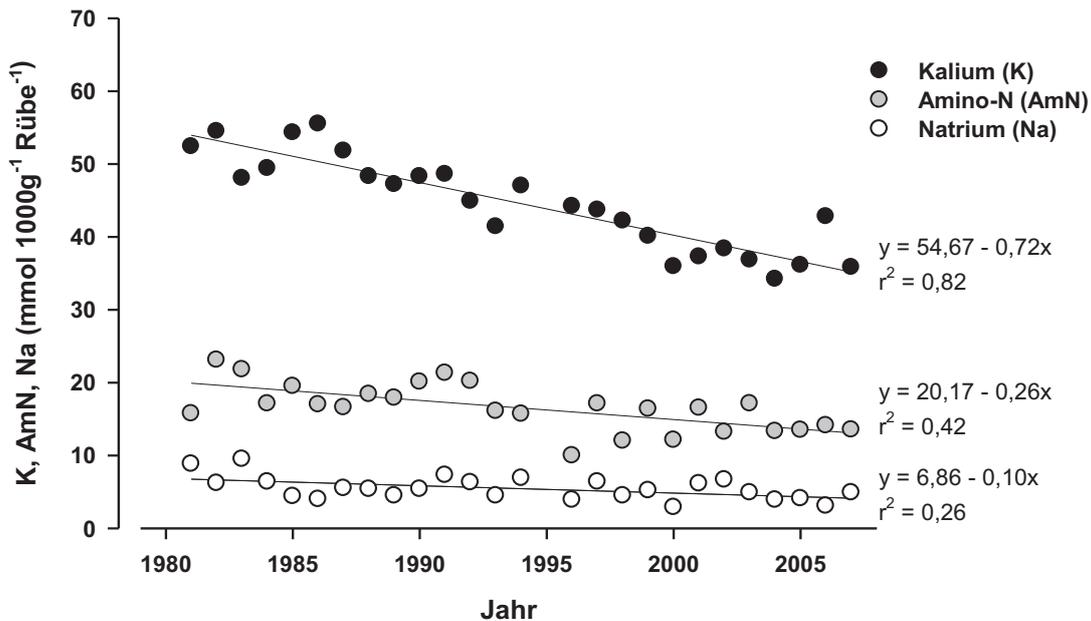


Abb. 2: Entwicklung der Nichtzuckerstoffe Kalium, Natrium und Amino-N 1981-2007; Mittel über die in der Wertprüfung des Bundessortenamts neu zugelassenen Zuckerrübensorten

Quelle: verändert nach IfZ (2008)

Als Kennzahl zur Charakterisierung von Ertrag und Qualität bei der Produktion von Zuckerrüben wird in Deutschland der Bereinigte Zuckerertrag (BZE) herangezogen (MÄRLÄNDER et al. 2003). In die Formel zur Berechnung des BZE fließen Rübenertrag (RE; t ha⁻¹), Zuckergehalt (ω'_{ZG} ; %), Standardfabrikverlust (SFV; %) und Standardmelasseverlust (SMV; %) ein. Dabei berücksichtigt der SMV die Gehalte der melassebildenden Inhaltsstoffe (mmol 100 g⁻¹ Rübenfrischmasse) K, Na und AmN und definiert den Anteil an Zucker, der in der Fabrik nicht gewonnen werden kann, sondern in der Melasse verbleibt. Der SMV (1) findet seit 1996 in Deutschland Anwendung und wird mit folgender Formel berechnet (BUCHHOLZ et al. 1995):

$$SMV = 0,12 * (\omega'_{K} + \omega'_{Na}) + 0,24 * \omega'_{\alpha-Am-N} + 0,48 \quad (1)$$

Für die Berechnung des BZE ergibt sich damit folgende Formel (MÄRLÄNDER et al. 2003) (2):

$$BZE = \frac{RE * (ZG - SMV - SFV)}{100} \quad (2)$$

Als SFV wird konstant ein Wert von 0,6 abgezogen. Er charakterisiert allgemeine Zuckerverluste und die Zuckermenge, die technisch bedingt nicht aus dem Rohstoff extrahiert werden kann. Bis 1995 wurde statt des SMV der Melassezucker nach REINEFELD et al. (1974) zur Berechnung der Zuckerverluste verwendet.

Eine umfassende Analyse von Einflussfaktoren auf Ertrag und Qualität von Zuckerrüben anhand langjähriger Versuche führten erstmals VON BOGUSLAWSKI und SCHILDBACH (1969) durch. Mit Schwerpunkt auf der Erfassung anbautechnischer Maßnahmen bearbeiteten BAROCKA et al. (1972) die Thematik mittels Regressionsanalyse und multiplen Mittelwertvergleichen. MÄRLÄNDER (1991) nahm eine Einteilung in beeinflussbare und nicht beeinflussbare Faktoren vor und setzte die Methode der Varianzkomponentenschätzung zur Quantifizierung des spezifischen Einflusses der Sorte und deren Interaktion zur Umwelt ein. Diese Methode wurde später auch von WOLF (1995) zur Quantifizierung des Einflusses von Umwelt und Sorte unter Berücksichtigung der neuen Bundesländer angewandt. Zusammengefasst zeigten die Untersuchungen, dass der Ertrag von Zuckerrüben sehr stark durch die Umwelt beeinflusst wird, d. h. durch Standort und Jahr sowie deren Interaktion.

Ertrag und Qualität von Zuckerrüben unterscheiden sich zwischen den Regionen Deutschlands (WVZ 2007). Zwischen landwirtschaftlichen Betrieben auch in direkter räumlicher Nähe können durchaus Differenzen im Zuckerertrag von über 5 t ha^{-1} bestehen (WINDT 2005). Es liegt nahe, dass bestehende Unterschiede zwischen Betrieben vergleichbarer Umwelten (Standort x Jahr) auf das Anbaumanagement der Landwirte zurückzuführen sind. Es umfasst die langfristige Ausrichtung des Bodennutzungssystems (z. B. Fruchtfolge) und alle kurzfristigen direkt beeinflussbaren produktionstechnischen Maßnahmen (z. B. Düngung, Pflanzenschutz). Das Anbaumanagement war trotz seiner zentralen Bedeutung für die Pflanzenproduktion bisher kaum Gegenstand pflanzenbaulicher Forschung. Der Einfluss des Anbaumanagements ist i. d. R. kaum von dem des Standorts zu trennen, eine strikte Trennung der Varianzursache ist nur in Dauerversuchen mit Großparzellen möglich (PRINGAS und MÄRLÄNDER 2004). Eine genaue Kenntnis des Einflusses des Anbaumanagements könnte aber einen Beitrag leisten, die Effizienz im Zuckerrübenanbau zu erhöhen. Mithilfe betriebsbezogener Daten sollte deshalb in dieser Arbeit der Faktor „Anbaumanagement“ quantifiziert werden, der in der wissenschaftlichen Literatur zu Zuckerrüben bisher nicht beschrieben wurde.

Neben dem erreichten Ergebnis wirken die eingesetzten Ressourcen auf die Effizienz. Nach GELDERMANN und KOGEL (2002) sind Umweltaspekte der landwirtschaftlichen Produktion hauptsächlich mit deren Intensität verknüpft. Zweifelsohne war der Zuckerrübenanbau bis Ende der 70er Jahre sehr

arbeitsintensiv, wurden doch etwa 600 Arbeitskraftstunden (Akh) $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ aufgewendet (DIEPENBROCK et al. 1999), woraus sich auch eine hohe Kostenintensität ableiten ließ. Heute ist ein Arbeitszeitbedarf von weniger als 10 Akh $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ erforderlich (KTBL 2006). Die Reduzierung des Arbeitszeitbedarfs ist vor allem auf den Einsatz von monogermem Saatgut, die Entwicklung rübenverträglicher Herbizide und die zunehmende Technisierung der Ernte zurückzuführen (LÜTKE ENTRUP et al. 1995). Aus der Nutzung des technischen Fortschritts resultierte die Substitution von Arbeit durch Kapital. Über den Einsatz von Mechanisierung, Dünge- und Pflanzenschutzmitteln kann die Intensität in der Pflanzenproduktion quantifiziert werden (HERZOG et al. 2006). Der Anbau von Zuckerrüben gilt allgemein als intensiv und wird mit negativen Wirkungen auf die Umwelt verbunden (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2003, SRU 2004). Diese Einschätzung könnte darin begründet sein, dass Zuckerrüben einen sehr hohen Trockenmasseertrag liefern, der theoretisch bei über 30 t ha^{-1} liegt (KENTER et al. 2006), und davon ausgegangen wird, dass dieser nur mit einem hohen Aufwand an Düngung und Pflanzenschutz zu realisieren ist. Deshalb sollte in dieser Arbeit systematisch für Deutschland untersucht werden, ob eine hohe Ertragsleistung von Zuckerrüben eine hohe Intensität im Anbau voraussetzt.

Vor diesem Hintergrund erscheint das Öko-Effizienzkonzept, das Anfang der 1990er Jahre vom World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) initiiert wurde und als „one of the primary way in which business can contribute to the concept of sustainable development“ (HUR et al. 2004) angesehen wird, geeignet eine nachhaltige Entwicklung im Zuckerrübenanbau zu beschreiben. Nach Definition des WBCSD (1996 und 2000) ist Öko-Effizienz (engl. eco-efficiency) "... reached by the delivery of competitively priced goods and services that satisfy human needs and bring quality of life, while progressively reducing ecological impacts and resource intensity throughout the life cycle, to a level at least in line with the earth's estimated carrying capacity.“ Dabei steht der Begriff Öko-Effizienz als Abkürzung für ökonomische und gleichzeitig ökologische Effizienz (LUPTÁCIK und WEISS 2005). Das Öko-Effizienzkonzept führt den wirtschaftlichen Fortschritt, der eine effizientere Verwendung von Ressourcen und damit wirtschaftlichen Wohlstand ermöglicht, mit dem ökologischen Fortschritt zusammen, durch den eine Reduzierung, z. B. umweltschädlicher Emissionen und damit eine Verminderung der Umweltbelastung, erreicht wird (VERFAILLIE und BIDWELL 2000). Ziel ist die zunehmende Erzeugung

nützlicher Güter bei abnehmendem Verbrauch von Ressourcen (WBCSD 2000). Dabei zielte das WBCSD-Konzept nicht darauf ab, einen einzigen verbindlichen Ansatz zur Messung von Öko-Effizienz zu entwickeln. Vielmehr sollte ein Rahmenkonzept geschaffen werden, das einfach zu interpretieren ist und damit von einer großen Zahl von Anwendern genutzt werden kann. Das Öko-Effizienzkonzept wird international vielfach eingesetzt, insbesondere in der Industrie (SALING et al. 2002, DE SIMONE und POPOFF 1997).

Obwohl das Postulat der Nachhaltigkeit verfolgt wird, beschränkt sich die Auswahl von Indikatoren zur Messung der Öko-Effizienz auf ökonomische und ökologische Größen (VERFAILLIE und BIDWELL 2000), soziale Aspekte werden zumeist nicht berücksichtigt. Das WBCSD empfiehlt Unternehmen, sieben Handlungskriterien der Öko-Effizienz bei der betrieblichen Umsetzung des Konzeptes zu berücksichtigen (WBCSD 2000):

1. *Reduzierung der Materialintensität von Gütern und Dienstleistungen*
2. *Reduzierung der Energieintensität von Gütern und Dienstleistungen*
3. *Reduzierung der Verteilung giftiger Stoffe*
4. *Erhöhung der Wiederverwertbarkeit der eingesetzten Materialien*
5. *Maximierung der nachhaltigen/zukunftsfähigen Nutzung erneuerbarer Ressourcen*
6. *Verlängerung der Produktlebensdauer*
7. *Erhöhung der Serviceintensität von Gütern und Dienstleistungen*

Da das Produkt Zuckerrübe nicht direkt vergleichbar mit herkömmlichen Industriegütern oder Dienstleistungen ist, sondern der landwirtschaftlichen Urproduktion entstammt, wurden für den Zuckerrübenanbau nur die Handlungskriterien 1.-4. als relevant angesehen.

Eine Reduzierung der Materialintensität kann beim Anbau von Zuckerrüben als Rohstoff für die Zuckerproduktion durch eine Verminderung des Einsatzes an Dünge- und Pflanzenschutzmitteln erfolgen. Im Hinblick auf die eingesetzten Landmaschinen weist die Bodenbearbeitung, die i. d. R. mit dem Einsatz eines Ackerschleppers verbunden ist, die höchste Materialintensität auf (WEGENER 2001). Hier verringern weniger Überfahrten und eine geringere Arbeitstiefe die Materialintensität. Beim Prozess Ernte ergeben sich durch einen verminderten Erdanteil Einsparungen beim Transport und dem Reinigungsaufwand in der Fabrik (MUHLACK 1989).

Die Herstellung von mineralischem N-Dünger, die auf dem Haber-Bosch-Verfahren basiert, ist sehr energieintensiv (LEWANDOWSKI et al. 1995). Organischer N-Dünger geht zumeist auf ebenfalls energieaufwändige Tierhaltungsverfahren zurück. Eine Reduzierung des N-Düngeraufwands vermindert die Energieintensität des Zuckerrübenanbaus. Ein qualitativ und quantitativ veränderter Maschineneinsatz bei der Bodenbearbeitung, die neben der N-Düngung den größten Anteil am Energieaufwand hat (HÜLSBERGEN et al. 2001), reduziert den Bedarf an fossilen Energieträgern, während eingesetztes Saatgut und Pflanzenschutzmittel eher weniger zum Energieaufwand beitragen (WEGENER 2001).

Als relevant für die Reduzierung der Verteilung giftiger Stoffe wurden die Prozesse N-Düngung und Pflanzenschutz identifiziert. Giftige Stoffe dürfen in der Pflanzenproduktion grundsätzlich nicht eingesetzt werden. Jedoch sollte der Einsatz übermäßiger N-Gaben aus ökologischen Gründen vermieden werden, da die Möglichkeit der Freisetzung von N_2O in die Atmosphäre (BOUWMAN 1996), der Nitratwaschung in das Grundwasser und der Eutrophierung von Oberflächengewässern besteht (LÆGREID et al. 1999). Pflanzenschutzmittel, im Zuckerrübenanbau zur Bekämpfung von Unkräutern, Krankheiten und Schädlingen eingesetzt, müssen durch das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit zugelassen werden. Sie werden im Rahmen des Zulassungsverfahrens toxikologisch bewertet und u. a. erst zugelassen, wenn ihre Prüfung ergibt (...), dass keine schädlichen Auswirkungen auf die Gesundheit von Mensch und Tier und auf das Grundwasser bestehen (PFLSCHG 1998). Um jedoch die Risiken für Nichtzielorganismen und die Schutzgüter Boden, Wasser und Luft zu minimieren, ist eine Reduzierung der Applikation von Pflanzenschutzmitteln im Zuckerrübenanbau anzustreben.

Der Erhöhung der Wiederverwertbarkeit der eingesetzten Materialien kann bei der Zuckerrübenernte Rechnung getragen werden. Der Boden ist ein landwirtschaftlicher Produktionsfaktor und gleichzeitig eine endliche, nicht vermehrbare natürliche Ressource. Bei der Ernte kommt es durch den Rüben anhaftende Erde zum Bodenabtrag und damit zum Verlust an Ackerkrume. In Süd- und Südostdeutschland wurden bei der Zuckerrübenernte 2004 durchschnittlich $5,34 \text{ t Erde ha}^{-1}$ abgefahren (KRAUS 2005). Eine Reduzierung des Erdanhangs schont die Ressource Boden und trägt zur langfristigen Sicherung der Bodenfruchtbarkeit bei.

Das Ziel einer kontinuierlichen Erhöhung der Öko-Effizienz im Zuckerrübenanbau lässt sich erreichen durch:

1. Erhöhung der Flächenproduktivität,
d. h. ein höherer Zuckerertrag pro ha bei konstantem Ressourceneinsatz,
2. Reduzierung der Umweltwirkungen,
d. h. ein gleichbleibender Zuckerertrag bei geringerem Ressourceneinsatz.

Im Idealfall geht eine Erhöhung der Flächenproduktivität mit einer Reduzierung der Umweltwirkungen einher.

Um das Öko-Effizienzkonzept für den Zuckerrübenanbau umzusetzen, sollte ein praktikables, transparentes System von Indikatoren entwickelt werden, das ökonomische und ökologische Aspekte des Zuckerrübenanbaus integriert. Diese Indikatoren sollten einfach zu erheben sein. Abgeleitet aus den zuvor erläuterten Handlungskriterien stehen dabei die Prozesse Bodenbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz und Ernte im Mittelpunkt der Betrachtung. Um die Öko-Effizienz eines bestehenden Systems zu messen und zu erhöhen, ist es notwendig, geeignete Indikatoren einzusetzen, die ökonomische und ökologische Faktoren integrieren (HUR et al. 2004). Es sind sowohl Wertindikatoren als auch Umwelteinwirkungsindikatoren notwendig, die entsprechend in Beziehung gesetzt werden müssen (LUPTÁČIK und WEISS 2005). Öko-Effizienz wird in der Regel als Produkt- oder Dienstleistungswert pro Umweltwirkung gemessen. Allgemein anwendbare Indikatoren für den geschaffenen Produkt- oder Dienstleistungswert wie die Menge an erzeugten Gütern bzw. zur Verfügung gestellten Dienstleistungen oder Umsatzerlöse werden auf Indikatoren für den Umwelteinfluss bezogen. In dieser Arbeit wurde, um eine höhere Transparenz und Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen ausgearbeiteten Indikatoren zu schaffen, die Inverse dieser Formel verwendet, d. h. die Umweltwirkungen wurden ins Verhältnis zum geschaffenen Wert gesetzt. Diese Vorgehensweise folgt der Position des WBCSD, dass die wesentliche Information in beiden Varianten enthalten ist (VERFAILLIE und BIDWELL 2000).

Die Herausforderung bei der Entwicklung eines Indikators der Öko-Effizienz liegt in der Verknüpfung von ökologischen und ökonomischen Daten zu Öko-Effizienz-Angaben. Da sowohl der geschaffene Wert als auch die Umweltwirkungen in unterschiedlichen Einheiten gemessen und für ganz unterschiedliche Abgrenzungen

erhoben werden können, sind leistungsfähige, flexible und nachvollziehbare Methoden der Effizienzmessung erforderlich (LUPTÁCIK und WEISS 2005).

Ziel der Arbeit war es, mit einem System geeigneter Indikatoren die aktuelle Öko-Effizienz des Zuckerrübenanbaus abzubilden. Gleichzeitig sollte untersucht werden, ob eine Beziehung zwischen der Intensität des Anbaus und der Ertragsleistung von Zuckerrüben besteht.

Ein System praktikabler Indikatoren, sog. Öko-Effizienzkriterien, wurde generiert, um Öko-Effizienz im Zuckerrübenanbau messbar zu machen. Für die Prozesse Bodenbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz und Ernte konnten aufbauend auf die Handlungskriterien des WBCSD Öko-Effizienzkriterien abgeleitet werden. Unter einem Öko-Effizienzkriterium für den Zuckerrübenanbau ist der Quotient aus prozessspezifischer Umweltwirkung und erzeugtem BZE zu verstehen. Die Intensität bei Bodenbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz und Ernte ist verbunden mit dem Einsatz von Ressourcen und mit Umweltwirkungen auf die Schutzgüter Boden, Wasser und Luft. Ein Set von Indikatoren für die genannten Prozesse, entwickelt in einem Co-Projekt (REINEKE und STOCKFISCH 2008), wurde genutzt, um die Umweltwirkungen des Zuckerrübenanbaus abzuschätzen. Der Energieinput der Bodenbearbeitung, die Höhe der N-Düngung, der Behandlungsindex und der Erdanhang sind Indikatoren für diese Umweltwirkungen. Diese Indikatoren wurden ins Verhältnis zum BZE gesetzt und bilden so Öko-Effizienzkriterien. Für das Anbaujahr 2004 wurden Öko-Effizienzkriterien berechnet. Datengrundlage zu ihrer Berechnung war eine bundesweite Befragung von 109 Zuckerrüben anbauenden Betrieben mit 232 Schlägen.

Die erarbeiteten Ergebnisse zu Ertragsentwicklung, Öko-Effizienz und Intensität im Zuckerrübenanbau werden nachfolgend in drei Artikeln vorgestellt.

Da die Öko-Effizienz des Zuckerrübenanbaus wesentlich vom Ertrag mitbestimmt wird, wurde innerhalb des ersten Artikels die „Entwicklung und Variation der Leistung von Zuckerrüben (*Beta vulgaris* L.) in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von Anbaumanagement und Sorte“ untersucht und in der Zeitschrift Pflanzenbauwissenschaften veröffentlicht (FUCHS et al. 2008a). Die Leistung der Zuckerrübe wird in Deutschland auf unterschiedlichen Ebenen mit unterschiedlichen Schwerpunkten und individueller Zielsetzung erhoben. Die dadurch existierende,

vergleichsweise dichte Datengrundlage wurde genutzt, um folgende Versuchsfragen zu beantworten:

1. Wie hat sich die Leistung von Zuckerrüben in den Regionen Nord, Ost, Süd und West über die vergangenen 25 Jahre und in Nachbarländern entwickelt?
2. Welchen Einfluss hat das Anbaumanagement in Relation zu Sorte, Standort, Region und Jahr auf die Leistung von Zuckerrüben?

Über den Betrachtungszeitraum 1981-2005 stieg der Zuckerertrag in Deutschland im Anbau um 1,27 % p. a. an. Die Entwicklung verlief in den Regionen (Nord, Ost, Süd, West) Deutschlands parallel und die Prognose ergab für alle vier Regionen einen gleichmäßigen Ertragszuwachs von etwa 1 t ha^{-1} in zehn Jahren. Der mittlere Zuckerertrag lag aktuell (2001-2005) bei $9,5 \text{ t ha}^{-1}$ und variierte von 11 t ha^{-1} in der Region Süd bis 8 t ha^{-1} in Ost. Die Bedeutung des Anbaumanagements wurde auf den Ebenen Naturraum (= Subregion mit ähnlichen Umweltbedingungen) und Region abgeschätzt. Die Zuckererträge der leistungsstärksten Betriebe lagen bis zu 7 t ha^{-1} über dem regionalen Mittel. Auf Naturraumebene variierten die Zuckererträge um bis zu 10 t ha^{-1} . Die Analyse des Datenmaterials ergab, dass an allen Standorten ein sehr hoher Ertrag von etwa 14 t ha^{-1} im BZE möglich ist, wobei das Anbaumanagement wesentlich zur betriebsbezogenen Leistung beitrug. An vergleichbaren Standorten ist die Variation im Zuckerertrag letztlich Ausdruck des individuellen Anbaumanagements. Ertrags- und Qualitätsunterschiede tragen somit auch zur Variation der Öko-Effizienz von Zuckerrüben bei. Damit nimmt der Landwirt über den Ertrag Einfluss auf die Öko-Effizienz.

Gegenstand des zweiten Artikels war die „Effizienzentwicklung im Zuckerrübenanbau am Beispiel der N-Düngung“, veröffentlicht in der Zeitschrift Zuckerindustrie (FUCHS und STOCKFISCH 2008). Exemplarisch für die N-Düngung wurden folgende Fragen erörtert:

1. Welche Effizienz wird aktuell im Zuckerrübenanbau in Deutschland erreicht?
2. Bestehen Unterschiede in der Effizienz zwischen Regionen Deutschlands?

Für den Zuckerrübenanbau im Ganzen wurde diskutiert:

3. Welche Effizienzsteigerungen, abgeleitet aus der Entwicklung der vergangenen 25 Jahre, sind möglich bzw. künftig zu erwarten?

Die Variation der N-Düngungseffizienz auf den Schlägen war sehr groß ($3,5 - 38 \text{ kg N t}^{-1}$ BZE). Für die N-Düngung konnte aufgezeigt werden, dass sich die Effizienz durch die Reduktion des Aufwands deutlich schneller steigern ließ als durch

Ertragssteigerungen, die zwar stetig, aber insgesamt verhalten realisiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass im Zuckerrübenanbau gute Ausgangsbedingungen für Effizienzsteigerungen bei der N-Düngung bestehen, da eine Reduzierung des Aufwands nicht zwangsläufig einen verminderten Ertrag bedeutet und weiterhin mit Ertragssteigerungen unabhängig von der Höhe der N-Düngung zu rechnen ist.

Der dritte Artikel trägt den Titel „Eco-efficiency of sugar beet cultivation“ und wurde bei der Zeitschrift *Agriculture, Ecosystems and Environment* eingereicht (FUCHS et al. 2008b). Das Öko-Effizienzkonzept wurde für den Zuckerrübenanbau adaptiert, um dort Wege zu einer nachhaltigen Entwicklung aufzuzeigen und abzubilden. Ziel war es zunächst,

1. die Beziehung zwischen der Intensität des Zuckerrübenanbaus und der Ertragsleistung zu analysieren und darauf aufbauend
2. mit einem System von Indikatoren die gegenwärtige Öko-Effizienz im deutschen Zuckerrübenanbau zu beschreiben.

Die Indikatoren Energieinput der Bodenbearbeitung, N-Düngung, Behandlungsindex und Erdanhang bilden, ins Verhältnis zum BZE gesetzt, aggregiert die Öko-Effizienz im Zuckerrübenanbau in Deutschland ab. Auf Schlagebene variierten die genannten Indikatoren wie auch der BZE ($6-15 \text{ t ha}^{-1}$) sehr stark. Die Öko-Effizienz zeigte folglich ebenfalls eine hohe Variation. Zwischen Erdanhang und BZE bestand eine schwach positive Korrelation. Energieinput der Bodenbearbeitung, N-Düngung und Behandlungsindex korrelierten nicht mit dem BZE. So konnte gezeigt werden, dass der BZE von Zuckerrüben weitgehend unabhängig von der Intensität des Anbaus ist.

Empfehlungen für die Umsetzung des Öko-Effizienzkonzepts schließen die Arbeit ab, die eines von vier Teilprojekten des Verbundprojekts "Umweltwirkungen im Zuckerrübenanbau" war.

Das Verbundprojekt wurde am Institut für Zuckerrübenforschung (IfZ), Göttingen, von Dr. Nicol Stockfisch koordiniert. Neben den Kennzahlen zur Öko-Effizienz wurden spezifische Agrar-Umweltindikatoren für den Zuckerrübenanbau mit dem Schwerpunkt Pflanzenschutz und Energieeinsatz von Heinrich Reineke (IfZ, Betreuung: Prof. Märländer) ausgearbeitet, um Umweltwirkungen/-risiken dezidiert abzubilden (REINEKE und STOCKFISCH 2008). Mit dem Modell REPRO analysierte Peter Deumelandt (Universität Halle-Wittenberg, Betreuung: Prof. Christen) die Bedeutung der Zuckerrübe in Fruchtfolgen und deren Auswirkungen auf die Stoff-

und Energieflüsse im landwirtschaftlichen Betrieb (DEUMELANDT und CHRISTEN 2008). Aufbauend auf eine Vollkostenrechnung wurden von Jörn Uwe Starcke (Universität Göttingen, Betreuung: Prof. Bahrs) Kennzahlen zur Rentabilität des Zuckerrübenanbaus berechnet und Einflussgrößen auf das Betriebszweigergebnis identifiziert (STARCKE und BAHRS 2008). Im Verbundprojekt wurden die komplexen Umweltwirkungen des Zuckerrübenanbaus effektiv (gemeinsame Datengrundlage) aus unterschiedlichen Perspektiven (ökonomisch und ökologisch) und auf verschiedenen Ebenen (Schlag, Betrieb) erfasst.