

1.5 Überblick über die Zuckergewinnung

1.5.1 Zucker aus Zuckerrüben

1.5.1.1 Verbreitung der Zuckerrüben

Die Hauptanbaugebiete der Zuckerrübe liegen in den gemäßigten Klimazonen der nördlichen Halbkugel mit dem Schwerpunkt in Europa. Zu den Ländern mit den größten Ernteflächen zählten 1998/99 (BARTENS und MOSOLFF (2001) die Ukraine (947 000 ha), Russland (810 000 ha) sowie Deutschland, Frankreich, Polen und die USA (380 000 bis 500 000 ha). In Südamerika gibt es vergleichsweise geringen Rübenanbau in Chile und Uruguay. In den letzten 35 Jahren hat sich der Zuckerrübenanbau in Ländern des Vorderen und Mittleren Orients ausgebreitet. So haben besonders die Türkei, Syrien und der Iran eine Zuckerindustrie aufgebaut. In mehreren nordafrikanischen Ländern (Marokko, Tunesien, Algerien, Ägypten) werden ebenfalls Zuckerrüben angebaut. Die **Verarbeitungskapazitäten** von Zuckerfabriken sind sehr unterschiedlich: In West- und Mitteleuropa und den USA liegen sie meistens zwischen 10.000 und 15.000 t/d (Tonnen Rüben pro 24 Stunden), einige erreichen auch 20.000 t/d mit Zuckerausbeuten von über 14 % (bezogen auf die Rübenmasse). In den anderen Anbaugebieten liegt die Verarbeitung um 5.000 t/d oder darunter mit deutlich geringeren Zuckerausbeuten.

1.5.1.2 Eigenschaften der Zuckerrüben

Die Zuckerrübe ist eine zweijährige Pflanze, die nach dem ersten Vegetationsjahr ein Maximum an Saccharose im Wurzelkörper gespeichert hat und als Rohstoff für die Zuckergewinnung dient. Im zweiten Vegetationsjahr werden die Samenanlagen ausgebildet. Schon früh hat man zwischen ertragreichen, zuckerreichen und **Rübensorten** mit mittlerem Ertrag und Saccharosegehalt unterschieden, wobei Ertrag und Saccharosegehalt meistens negativ miteinander korrelieren. Die **Erträge** an Zuckerrüben sind bedingt durch Rübensorte, Wachstumsdauer, Boden, Düngung, Witterung, Bestandsdichte und Ernteverfahren. Sie erreichen als Durchschnitt der Europäischen Union etwa 55 t/ha; der Zuckerertrag liegt meistens über 8 t/ha. Damit ist die Zuckerrübe hinsichtlich der Ertragsleistung, aber auch der Assimilationsleistung den anderen in Mitteleuropa angebauten Feldpflanzen überlegen.

Die qualitative und quantitative **Zusammensetzung** der Zuckerrüben ist abhängig von Rübensorte und Wachstumsbedingungen. Aber selbst unter gleichen Bedingungen gewachsene Rüben zeigen verschiedene Größen und unterschiedliche Eigenschaften. Schließlich ist auch die Verteilung der Inhaltsstoffe in der Rübe ungleichmäßig (Tab. 1.13). Zuckerrüben bestehen zu 73,0 bis 76,5 % aus Wasser und zu 23,5 bis 27,0 % aus Trockensubstanz. Die unlösliche Trockensubstanz (4,5 bis 5,0 %) bezeichnet man als Mark. Es sind die unter den Bedingungen der wässrigen Extraktion der Zuckergewinnung unlöslichen Bestandteile des

1.5 Überblick über die Zuckergewinnung

Wurzelkörpers (Pectin, Cellulose, Pentosanen, Lignin). Die lösliche Trockensubstanz enthält Saccharose (14 bis 20 %, bezogen auf die Rübenmasse) und etwa 2,5 % Nichtsaccharosestoffe, von denen andere Saccharide (Raffinose, Invertzucker), Stickstoffverbindungen, anorganische und organische Salze die wichtigsten sind. Weitere Komponenten wie Saponin, Farbstoffe und fettähnliche Substanzen sind mengenmäßig zu vernachlässigen (BOHN 1998). Es ist die qualitative und quantitative Zusammensetzung der **Nichtsaccharosefraktion**, die das chemische Verhalten des Extraktes während des Zuckergewinnungsprozesses bestimmt. Invertzucker fördert die Farbbildung und führt zum Entstehen von sauren Abbauprodukten. Schädliche Stickstoffverbindungen (Aminosäuren, Betain, Amide) werden im Prozess nicht ausgeschieden, sind an der Farbbildung beteiligt und erhöhen den Melasseanfall. Kalium und Natrium steigern die Löslichkeit der Saccharose und vermindern damit den Anteil an kristallisierbarer Saccharose. Der Begriff des technologischen oder **technischen Wertes** der Zuckerrübe berücksichtigt den Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf die Ausbeute an Saccharose, aber auch das mechanische Verhalten, wie Bruchfestigkeit und Schneidbarkeit, sowie die Form des Wurzelkörpers, von der die Optimierung der maschinellen Ernte beeinflusst wird.

Tab. 1.13 Zusammensetzung einer ungeköpften Zuckerrübe ohne Blätter (Autorenkollektiv 1984)

Rübenteil	Masse		Reinheit ³⁾ %	Saccharose		Invertzucker		Kalium		Natrium		schädlicher Stickstoff	
	g	A ^{4)/R}		%	A/S	10 ⁻² %	A/I	10 ⁻² %	A/K	10 ⁻³ %	A/Na	10 ⁻³ %	A/N
Epikotyl ¹⁾ , außen	53	7	66	7,0	4	70	48	37	14	58	29	47	12
Epikotyl ¹⁾ , innen	39	5	82	12,0	4	10	5	20	5	15	5	74	13
Hypokotyl ²⁾	84	12	88	14,3	12	6	7	15	9	11	9	42	16
Wurzelkörper	505	69	89	15,4	74	5	35	18	64	11	52	23	54
Rübenschwanz	50	7	84	13,5	6	9	5	24	8	10	5	21	5

1) Epikotyl – Rübenkopf, 2) Hypokotyl – Rübenhals; 3) Reinheit ist der Saccharosegehalt der Trockensubstanz, 4) A der prozentuale Anteil (beispielsweise sind 74 % der gesamten Saccharose der Zuckerrübe im Wurzelkörper lokalisiert, der 69 % der Gesamtmasse der Zuckerrübe ausmacht; die Reinheit ist mit 89 % im Wurzelkörper am höchsten)

1.5.1.3 Ernte, Lagerung, Reinigung, Zerkleinerung

Normalerweise beginnt die **Ernte** in Mitteleuropa Ende September und sollte vor der nasen und kalten Witterung abgeschlossen sein. Es wird maschinell geerntet. Der Transport der Rüben zur Zuckerfabrik erfolgt mit traktorgezogenen Anhängern und Eisenbahnwagons, meistens jedoch mit Lastwagen.

Während der **Lagerung** wird durch Atmung der Zuckerrüben sowie durch den Stoffwechsel von Mikroorganismen (Schimmelpilzen, Hefen und Bakterien) Saccharose abgebaut. Der Saccharoseverlust und die entstehenden mikrobiellen Stoffwechselprodukte vermindern die technische Qualität der Zuckerrüben deutlich. Zur Minimierung der Lagerverluste ist u. a. das Lagern von frischen, unverletzten und saubereren Rüben unumgänglich. Die Stapelhöhe erreicht 10 Meter und das Lager kann über 100 000 Tonnen fassen. Bei längerer Lagerung muss mit dem Abbau von etwa 200 g Saccharose pro Tonne Rüben und Tag gerechnet werden.

Mit Wasserkanonen, Spritzköpfen zur Erzeugung eines konzentrierten und steuerbaren Druckwasserstrahls, werden die Rüben aus dem Lager oder aus den Fahrzeugen gespült bzw. aus den Fahrzeugen gekippt und meistens in Schwemmkanälen, die mit Blatt- und Steinefängern ausgestattet sind, durch das fließende Wasser transportiert. Höhenunterschiede müssen mit Pumpen oder Transportbändern überwunden werden. Das einen großen Teil der Erde enthaltende Schwemmwasser fließt über Siebe oder Roste ab, kurz bevor die Rüben die **Waschmaschine** erreichen. In dieser, meistens ein Trog mit Steinefanganteilen und rotierenden Knüppeln und Transportarmen, wird – bedingt durch das Aneinanderreiben der Rüben und durch Wasserzusatz – auch Erde aus den Wurzelrinnen des Wurzelkörpers entfernt. Besser geschieht dies in der Düsenstrahl-Waschanlage. Für den Transport von Rüben und Erde sowie für das Waschen der Rüben werden große Mengen an Wasser benötigt, das jedoch in geschlossenen Kreisläufen geführt wird, aus denen etwa 30 % (bezogen auf die Rübenmasse) kontinuierlich zur Reinigung meistens in Anaerobanlagen mit der Erzeugung von Biogas geleitet werden. Danach wird das Wasser wiederverwendet oder gemäß der Genehmigung durch die Aufsichtsbehörde entsorgt.

Die **Zerkleinerung** der Rüben erfolgt heute in hängenden Schneidmaschinen oder Trommelschneidmaschinen, in die auswechselbare Messerkästen und Messer eingesetzt sind, nach dem Hobelprinzip zu Streifen. Die (frischen) Schnitzel, seltener Scheiben, gelangen auf Fördereinrichtungen über eine Waage in die Extraktionsanlage.

1.5.1.4 Extraktion

In der Extraktionsanlage wird im Gegenstrom die in den Parenchymzellen des Wurzelkörpers gespeicherte Saccharose mit Wasser nahezu vollständig extrahiert. Reinheit (der auf den Trockensubstanzgehalt bezogene Saccharosegehalt) und Trockensubstanzgehalt des Extraktes sollen möglichst hoch sein. Für die näherungsweise Beschreibung des Extraktionsprozesses wird das erste Ficksche Gesetz

$$\frac{ds}{dt} = -D \cdot A \cdot \frac{dc}{dx}$$

mit der Definition der Diffusionskonstanten D nach Einstein

$$D = K \cdot \frac{T}{v}$$

1.5 Überblick über die Zuckergewinnung

herangezogen. Es bedeuten ds Saccharosemenge, dt Zeit, A Fläche, dc/dx Konzentrationsgradient, K eine Konstante, T Temperatur, und ν kinematische Viskosität. Aus der Gleichung ist unschwer zu erkennen, dass die Temperatur, die Schnittzeloberfläche, der Konzentrationsgradient und die Verweilzeit die extrahierte Saccharosemenge deutlich beeinflussen.

Die **Temperatur** wirkt sich nicht nur bei der eigentlichen Extraktion auf den Saccharosefluss beschleunigend aus, auch die Denaturierung der pflanzlichen Zelle, besonders der semipermeablen Plasmahäute des Protoplasmas, wird durch Wärmeeinwirkung (einige Minuten bei 70 bis 78 °C) erreicht. Dadurch verlieren die Plasmahäute ihre Semipermeabilität, und die Saccharosemoleküle gelangen in die umgebende Extraktionsflüssigkeit. In der sich anschließenden Extraktion sollten 72 °C nicht überschritten werden. Der Wärmeeinwirkung sind also Grenzen gesetzt, da die Veränderung der Zellwand, insbesondere des Pectins, vermieden werden muss. Die Temperatur wirkt sich auch auf die Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen aus. Während die im Erdreich weitverbreiteten mesophilen Mikroorganismen bei den Extraktionstemperaturen abgetötet werden, erreichen thermophile Bakterien bei Temperaturen zwischen 65 und 70 °C eine hohe Stoffwechselaktivität mit dem Abbau von Saccharose; *Bacillus stearothermophilus* ist ein homofermentativer Milchsäurebildner; *Clostridien* bilden Wasserstoff. Saccharoseverluste erreichen bei größeren Infektionen 0,2 % Saccharose (bezogen auf die Rübenmasse). Lässt sich der bakterielle Stoffwechsel in der Extraktionsanlage nicht allein durch höhere Temperaturen kontrollieren, ist der Einsatz von zugelassenen Desinfektionsmitteln unumgänglich.

Der Vergrößerung der **Schnittzeloberfläche** sind Grenzen gesetzt. Rübenbrei, der eine große Oberfläche hat, scheidet aus mehreren Gründen aus. Feine Schnittzel sind gegenüber mechanischer Beanspruchung empfindlich und brechen leicht. Der **Konzentrationsgradient** lässt sich über die Menge des eingesetzten Extraktionswassers beeinflussen. Steigt jedoch der Abzug (die auf die Rübenmasse bezogene Masse an erhaltenem Extrakt), so erhöht sich auch der Energiebedarf in den folgenden Prozessschritten. Also versucht man, mit dem Abzug unter 110 % zu bleiben. Wird eine zu kleine Menge an Extraktionswasser eingesetzt, ist auch der Abzug niedriger, allerdings erhöhen sich dann wieder die Extraktionsverluste (Anteil der eingeführten Saccharose, der nicht im Extrakt enthalten ist), die üblicherweise zwischen 0,2 und 0,4 % der Rübenmasse betragen. Das Extraktionswasser soll arm an Salzen sein und einen leicht sauren pH-Wert (5,6 bis 5,8) haben. Das bei der mechanischen Entwässerung der extrahierten Schnittzel anfallende Presswasser wird in die Extraktionsanlage zurückgenommen. Kurze **Aufenthaltszeiten** der Schnittzel in den Extraktionsanlagen werden angestrebt, um nachhaltige Veränderungen der unlöslichen Zellsubstanzen zu vermeiden. Jedoch lässt sich die Extraktionszeit von 70 bis 80 min kaum unterschreiten.

Der Extraktionsprozess verläuft kontinuierlich und automatisiert. Die **Anlagen**, die heute am häufigsten eingesetzt werden, sind der senkrecht stehende Extraktionsturm und der geneigte Extraktionstrog. In ihnen werden die Schnittzel durch einfache geeignete Einbauten im Gegenstrom zum Extraktionswasser geführt (Abb. 1.9).