

## 1 Einleitung

Beim Anbau von Zuckerrüben kommt es aufgrund der engen Verbindung zwischen Landwirtschaft und Zuckerindustrie zu einer intensiven Verknüpfung pflanzenbaulicher, verarbeitungstechnologischer, ökonomischer sowie ökologischer Produktionsziele. Diese Kombination kann zwangsläufig zu Zielkonflikten führen, so daß die einzelnen Produktionsziele aufeinander abgestimmt werden müssen. Aus pflanzenbaulich bzw. ökonomischer Sicht werden hohe Erträge bzw. hohe Deckungsbeiträge angestrebt. Verarbeitungstechnologisch soll der Rohstoff „Zuckerrübe“ eine hohe Weißzuckerausbeute liefern und unter geringen Betriebskosten verarbeitet werden können. Zusätzlich besteht ein gesellschaftlicher Anspruch nach einer umweltverträglichen Agrarproduktion, in der die natürlichen Ressourcen sinnvoll genutzt werden.

Neben diesen Vorgaben wird die Zuckerwirtschaft in Zukunft durch Veränderungen der ökonomischen Rahmenbedingungen bestimmt werden. So ermöglicht die Zuckermarktordnung in Deutschland zwar ein relativ stabiles Rüben- bzw. Zuckerpreisniveau, aber Fabrikations- (im wesentlichen im Transport- und Energiebereich) und Lohnkosten werden weiter ansteigen (VDZ 1998). Dieser Sachverhalt wird bei der Produktion von Zucker verstärkt zu Rationalisierungsmaßnahmen führen, wie beispielsweise zunehmende Fusionierung der Zuckerfabriken oder Kampagneverlängerungen. Sowohl aus ökonomischer als auch aus pflanzenbaulicher Sicht wird somit zukünftig vor allem die Verbesserung der technischen Qualität der Zuckerrübe von besonderem Interesse aus anbautechnischer Sicht sein.

Die Qualität eines pflanzlichen Produktes wird definiert durch die Summe aller wirtschaftlich bedeutungsvollen Eigenschaften, ausgenommen des Rohertrages. Die technische Qualität der Zuckerrübe im Sinne ihrer fabrikatorischen Verarbeitbarkeit wird durch physikalische Merkmale (Form und Konsistenz) und durch ihre chemische Zusammensetzung (Saccharose und Nichtzuckerstoffe) bestimmt (WINNER 1973). Damit hat die technische Qualität der Zuckerrübe entscheidenden Einfluß auf die Weißzuckerausbeute, dem wichtigsten Kriterium für die Wirtschaftlichkeit einer Zuckerfabrik.

Seit 1996 erfolgt die Bewertung der technischen Qualität von Zuckerrüben in Deutschland nach der Braunschweiger Formel (BUCHHOLZ ET AL. 1995). Dabei wurde durch multiple Regressionen die Beziehung zwischen den qualitätsbestimmenden Inhaltsstoffen Kalium, Natrium und  $\alpha$ -Amino-N und dem Melassezucker bestimmt. Im Gegensatz zu der Formel nach REINEFELD ET AL. (1974) wurde hier der Melassezucker nicht aus Dicksaftanalysen, sondern aus unter standardisierten Bedingungen hergestellten Melassen ermittelt. Als Qualitätskriterium dient seither der sogenannte Standardmelasseverlust.

Zu der Frage, inwieweit sich die technische Qualität der Zuckerrübe in Abhängigkeit einer breiten Variation von Anbaufaktoren verändert, liegen in Deutschland bisher nur wenige pflanzenbauliche Untersuchungen vor (BOGUSLAWSKI und SCHILDBACH 1969, BORNSCHEUER 1975, MÄRLÄNDER 1991, SCHIWECK ET AL. 1994).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, anhand eines umfangreichen und komplexen Datenmaterials den Einfluß der Anbaufaktoren Standort, Sorte, Stickstoffdüngung, Bestan-

desdichte und Erntezeit auf die technische Qualität der Zuckerrübe aufzuzeigen. Die Auswahl der Anbaufaktoren erfolgte dabei nach ihrer sich aus Literaturangaben resultierenden Bedeutung. Aus den Ergebnissen sollen Ansatzpunkte und Maßnahmen abgeleitet werden, um den Rohstoff „Zuckerrübe“ unter den zukünftigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen kostenextensiv und unter weitgehender Schonung der natürlichen Ressourcen produzieren zu können.

Bisher gehen in die Qualitätsbewertung die analytisch leicht bestimmbareren Inhaltsstoffe Saccharose, Kalium, Natrium und  $\alpha$ -Amino-N ein, die eine enge Korrelation zum Melassezuckeranfall bzw. zur Weißzuckerausbeute aufweisen. Um dem wissenschaftlichen Fortschritt und einer Weiterentwicklung der Qualitätsbewertung (Alkalitätskriterien etc.) gerecht zu werden, könnte neben der Routineanalytik jedoch in Zukunft auch die Bestimmung nicht standardmäßig erfaßter Inhaltsstoffe wie beispielsweise reduzierende Zucker, Betain, löslicher Gesamtstickstoff u.a. erforderlich werden (SCHIWECK und BURBA 1993, BURBA 1998).

Neben dem Zuckergehalt und den standardmäßig erfaßten Qualitätsparametern Kalium, Natrium und  $\alpha$ -Amino-N werden deshalb in diesen Untersuchungen auch die nicht standardmäßig erfaßten Nichtzuckerstoffe reduzierende Zucker, anorganische Kationen, anorganische und organische Anionen sowie der Schädliche Stickstoff berücksichtigt.

Dabei sollen folgende Versuchsfragen beantwortet werden:

- ◆ Welchen Einfluß haben Anbaufaktoren auf die standardmäßig erfaßten Qualitätsparameter ?
- ◆ Welchen Einfluß haben Anbaufaktoren auf die nicht standardmäßig erfaßten Qualitätsparameter ?

Wegen der besonderen Bedeutung des  $\alpha$ -Amino-N für die Definition der technischen Qualität wurde desweiteren untersucht:

- ◆ Welchen Einfluß haben Anbaufaktoren auf den Schädlichen Stickstoff ?

Abschließend wird ein Vergleich der Qualitätsbewertung nach REINEFELD ET AL. (1974) und nach BUCHHOLZ ET AL. (1995) aufgestellt und die Wirkung verschiedener Anbaufaktoren auf die Ionendifferenz nach SCHIWECK und BURBA (1993) erläutert.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Anbaufaktoren

Das Rübenmaterial wurde aus Versuchen mit unterschiedlichen pflanzenbaulichen Fragestellungen entnommen. Variiert wurden in diesen Versuchen die Anbaufaktoren Standort, Sorte, Bestandesdichte, Erntezeit und Stickstoffdüngung (Tab. 1), da diese zu den wichtigsten Einflußgrößen der technischen Qualität der Zuckerrübe zählen (OLTMANN ET AL. 1984, AMADUCCI ET AL. 1997). Alle Anbaufaktoren wurden zweijährig (1994 und 1995) geprüft, um auch den Einfluß des Jahres quantifizieren zu können. Dabei standen allerdings nur die Wechselwirkungen mit diesem Faktor im Vordergrund (MÄRLÄNDER 1991, WOLF 1995). Für eine repräsentative Bewertung der Hauptwirkung des Jahres wäre ein längerer Prüfzeitraum notwendig gewesen. Da nach MÄRLÄNDER (1991) keine Wechselwirkungen zwischen den Anbaufaktoren Bestandesdichte bzw. Erntezeit und Standort zu erwarten waren, wurden diese aufgrund des hohen Probenumfangs nur an einem Standort geprüft.

Durch die oben genannten Anbaufaktoren und deren Abstufungen sollte eine extreme Variationsbreite des Rübenmaterials und somit eine starke Streuung der Gehalte an zuckertechologisch relevanten Inhaltsstoffen erreicht werden. Zudem sollten mögliche Interaktionen insbesondere zwischen Jahr, Standort, Sorte und Stickstoffdüngung erfaßt werden.

**Tab. 1:** Untersuchungsmaterial 1994 und 1995

Versuchsserie	Faktor	Standorte	Wdh
Standort	8 Standorte	8	5
Sorte	10 Sorten	2	5
Bestandesdichte	5 Bestandesdichten	1	5
Erntezeit	6 Erntetermine	1	4
Stickstoffdüngung	6 Stickstoffmengen	4	4

Wdh = Wiederholungen

#### 2.1.1 Standort und Sorte

Zur Quantifizierung des Einflusses des Standortes und der Sorte auf die technische Qualität der Zuckerrübe wurde Rübenmaterial aus Überregionalen Sortenleistungsvergleichen (ÜSV) des Instituts für Zuckerrübenforschung (IfZ) Göttingen aufbereitet.

In Zusammenarbeit mit dem Bundessortenamt (BSA) sowie den im Bundesverband Deutscher Pflanzenzüchter, Abteilung Zuckerrüben, zusammengefaßten Zuckerrübenzüchtern ist ein Integriertes Sortenprüfsystem für Zuckerrüben in Deutschland entwickelt worden. Nach Erteilung der Marktfähigkeit durch den Koordinierungsausschuß werden überdurchschnittlich gute Sorten in den Überregionalen Sortenleistungsvergleich (ÜSV) aufgenommen. Die Durchführung und Auswertung des Überregionalen Sortenleistungsvergleiches erfolgt regionalisiert und die Ergebnisse werden jährlich vom Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen zusammengestellt und veröffentlicht (IfZ 1994 und 1995).

Für eine Quantifizierung der Wechselwirkungen zwischen Standort und Sorte wäre eine orthogonale Versuchsanlage notwendig gewesen. Dies war aus arbeitstechnischen Gründen jedoch nicht durchführbar, weshalb die Versuchsserie geteilt wurde.

Zur Bewertung der Wirkung des Standortes auf die technische Qualität der Zuckerrübe wurden zwei Sorten an den Standorten Neufelder Koog (Schleswig-Holstein), Kröpelin (Mecklenburg-Vorpommern), Göttingen (Niedersachsen), Buir (Nordrhein-Westfalen), Hohnstedt (Sachsen-Anhalt), Seligenstadt (Bayern), Gützingen (Bayern) und Hagelstadt (Bayern) beprobt (Tab. 2 a, b und c). Verglichen wurden die Sorten mit den Kennnummern ZR 614 und ZR 619, ein ertragsbetonter bzw. rizomaniatoleranter Sortentyp.

**Tab. 2 a:** Standortspezifische Daten der Versuchsfelder 1994 und 1995

Standort	Abk.	Bodenart		BWZ		pH		N <sub>min</sub> (Frühjahr)	
		1994	1995	1994	1995	1994	1995	1994	1995
Neufelder Koog	NEU	sU	sL	70	70	6,7	6,8	37	19
Kröpelin	KRO	sL	sL	42	50	5,7	6,0	67	33
Göttingen	GOE	L	L	79	77	7,1	7,3	70	79
Buir	BUI	sL	sL	80	85	6,7	6,8	35	60
Hohnstedt	HOE	sL	sL	75	96	- <sup>1)</sup>	7,2	112	91
Seligenstadt	SEL	L	L	81	80	7,3	7,3	- <sup>1)</sup>	105
Gützingen	GUE	uL	uL	82	86	7,2	6,7	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>
Hagelstadt	HAG	sL	L	72	73	7,0	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>
Sudenburg	SUD	IS	IS	36	35	5,8	5,6	42	21
Monsheim	MON	sL	IS	75	70	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	64	120

**Tab. 2 b:** Standortspezifische Daten der Versuchsfelder 1994 und 1995

Standort	Humus	Boden <sup>2)</sup>				Düngung <sup>3)</sup>					
		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		K <sub>2</sub> O		N		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		K <sub>2</sub> O	
		1994	1995	1994	1995	1994	1995	1994	1995	1994	1995
Neufelder Koog	0,0 – 1,5	18	13	10	12	130	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>
Kröpelin	0,0 – 1,5	15	15	18	18	120	92	110	- <sup>1)</sup>	250	240
Göttingen	1,5 – 4,0	36	21	15	7	90	152	92	104	160	180
Buir	0,0 – 1,5	26	21	18	16	155	160	224	180	0	173
Hohnstedt	1,5 – 4,0	15	15	15	9	72	120	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>
Seligenstadt	1,5 – 2,0	3/2 <sup>4)</sup>	5/3 <sup>4)</sup>	14/7 <sup>4)</sup>	20/10 <sup>4)</sup>	137	95	38	20	200	0
Gützingen	- <sup>1)</sup>	20	19	20	22	96	100	142	0	200	180
Hagelstadt	1,5 – 4,0	4/1 <sup>4)</sup>	2/1 <sup>4)</sup>	18/8 <sup>4)</sup>	7/4 <sup>4)</sup>	130	92	115	112	240	276
Sudenburg	0,0 – 1,5	12	10	7	4	- <sup>5)</sup>	- <sup>5)</sup>	60	80	230	240
Monsheim	1,5 – 4,0	21	23	25	24	- <sup>5)</sup>	- <sup>5)</sup>	130	70	200	200

<sup>1)</sup> nicht erhoben

<sup>2)</sup> Angaben in mg/100 g Boden

<sup>3)</sup> Angaben in kg ha<sup>-1</sup>

<sup>4)</sup> Untersuchungen nach EUF

<sup>5)</sup> Stickstoffsteigerungsversuch

**Tab. 2 c:** Standortspezifische Daten der Versuchsfelder 1994 und 1995

Standort	Mittlere Jahrestemperatur (°C) <sup>6)</sup>		Mittlere Niederschlagsmenge (mm) <sup>6)</sup>	
	1994	1995	1994	1995
Neufelder Koog	- <sup>1)</sup>	- <sup>1)</sup>	90,1	70,7
Kröpelin	- <sup>1)</sup>	12,7	- <sup>1)</sup>	46,7
Göttingen	13,6	13,2	60,1	52,6
Buir	14,9	15,6	52,4	46,4
Höhnstedt	14,5	14,7	77,6	64,4
Seligenstadt	14,1	13,7	65,2	65,7
Gützingen	14,1	13,7	61,9	78,3
Hagelstadt	14,5	14,3	63,0	69,0
Sudenburg	13,6	14,1	64,0	45,3
Monsheim	14,7	15,2	55,4	59,9

<sup>1)</sup> nicht erhoben<sup>6)</sup> Zeitraum April bis Oktober

Die Quantifizierung des Einflusses der Sorte wurde anhand der Sorten 1 bis 10 an den Standorten Buir und Höhnstedt geprüft, die durch deutlich unterschiedliche standortspezifische und klimatische Bedingungen gekennzeichnet sind (Tab. 2 a, b, und c). Die Sorten wurden nach der Bewertung ihrer technischen Qualität (Kalium-, Natrium- und  $\alpha$ -Amino-N-Gehalt) in der Beschreibenden Sortenliste (BSA 1994 und 1995) ausgewählt (Tab. 3). Dabei wurde eine möglichst große Heterogenität des Sortiments angestrebt.

**Tab. 3:** Angaben zur Qualität der geprüften Zuckerrübensorten (BSA 1994 und 1995)

Sorte		Gehalte			
Lfd. Nr.	ZR-Nr.	Zucker	Bereinigter Zucker	Kalium + Natrium	Aminostickstoff
1	371	5	6	5	3
2	379	6	7	4	3
3	491	7	7	2	2
4	505	6	7	4	3
5	512	4	5	5	3
6	530	6	6	5	4
7	562	6	7	3	3
8	573	6	7	4	3
9	614	8	8	4	2
10	619	4	5	4	6
11 <sup>1)</sup>	432	4	5	5	3

<sup>1)</sup> Die Sorte 11 wurde in der Versuchsserie Stickstoffdüngung geprüft.

### 2.1.2 Stickstoffdüngung

Der Einfluß der Stickstoffdüngung auf zuckertechnologisch relevante Inhaltsstoffe wurde an den Standorten Suderburg (Niedersachsen), Buir, Höhnstedt und Monsheim (Rheinland-Pfalz) untersucht (Tab. 2). Die Stickstoffdüngung wurde in sechs Stufen von 0 bis 240 kg N ha<sup>-1</sup> variiert. Düngermengen bis maximal 120 kg N ha<sup>-1</sup> wurden in Form von Kalkammonsalpeter (27 % N) zur Saat ausgebracht. Bei den Düngungsstufen 160 bzw. 240 kg N ha<sup>-1</sup> erfolgte eine zweite Düngergabe von 40 bzw. 120 kg N ha<sup>-1</sup> im 4-Blatt-Stadium der Zuckerrüben. In beiden Jahren kam die Sorte ZR 432 zum Anbau, da diese Sorte als ertragsbetonter Sortentyp über eine ausgeglichene technische Qualität verfügt (Tab. 3).

### 2.1.3 Bestandesdichte

Die Wirkung der Bestandesdichte auf die technische Qualität der Zuckerrübe wurde am Standort Göttingen geprüft. Es wurden 5 Bestandesdichtestufen (50000, 65000, 80000, 95000 und 110000 Pflanzen ha<sup>-1</sup>) eingestellt.

Die Aussaat erfolgte in einer Ablageentfernung von etwa 6 cm. Mit der Sorte ZR 371 wurde eine Sorte aus dem Überregionalen Sortenleistungsvergleich ausgewählt, die im Hinblick auf die Qualitätsparameter sehr ausgewogen ist (Tab. 3). Alle Parzellen wurden im 2-Blatt-Stadium der Zuckerrüben auf einen Pflanzenabstand von 18 cm vereinzelt, was bei einem Reihenabstand von 45 cm einer Ausgangsbestandesdichte von 125000 Pflanzen ha<sup>-1</sup> entspricht. Die Abstufung der Bestandesdichte wurde im 4- bis 6-Blatt-Stadium der Zuckerrüben durch manuell erstellte Bestandeslücken realisiert. Dazu wurde der zu simulierende Soll-Feldaufgang (entspricht Soll-Bestandesdichte / Ausgangsbestandesdichte x 100) pro Parzelle ermittelt und die Häufigkeit und Größe der entsprechenden Bestandeslücken nach NEEB (1963) mit Gleichung 1 berechnet. Demzufolge ergab sich mit abnehmender Bestandesdichte, bzw. abnehmendem Feldaufgang, eine immer ungleichmäßigere Pflanzenverteilung, die den Verhältnissen im Praxisanbau entspricht.

$$L_x = p \cdot (1 - p)^{(x-1)} \quad (1)$$

wobei

x = Vielfaches des Pflanzenabstandes (1, 2, ... n)

p = Feldaufgang als Teil von 1

L<sub>x</sub> = relative Häufigkeit des x – fachen Pflanzenabstandes

### 2.1.4 Erntezeit

Der Einfluß der Erntezeit auf die technische Qualität der Zuckerrübe wurde ebenfalls am Standort Göttingen im Rahmen von Untersuchungen zur Beschreibung des Wachstums und der Entwicklung von Zuckerrüben im Vegetationsverlauf im Zeitraum Anfang September bis Mitte November geprüft. In der Versuchsanlage wurde 1994 die Sorte ZR 371 und 1995 die Sorte ZR 562 14tägig beprobt, die hinsichtlich der Bewertung der Qualitätsparameter eine mittlere Stellung einnehmen (Tab. 3).

## 2.2 Analytik

### 2.2.1 Probenvorbereitung

Von den geköpften und gewaschenen Zuckerrüben jeder Versuchsparallele wurde nach der Verwiegung mit Hilfe einer Rübensäge eine homogene Probe gewonnen. Um die Breiproben bis zur Analyse verlustfrei zu lagern, wurden diese in vierfach unterteilten Kunststoffellern („Vierfachsteller“) oder in Breibechern (Volumen 250 ccm, Rehm, Hildesheim, D) bei  $-20\text{ °C}$  tiefgefroren (BURBA ET AL. 1975). Für die Trockensubstanzbestimmung wurden 100 g des Rübenfrischbreis bei  $105\text{ °C}$  bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Für die Analyse der qualitätsbestimmenden Inhaltsstoffe wurden aus den in Kunststoffellern tiefgefroren gelagerten Rübenbreiproben in Anlehnung an die Routineanalytik in Zuckerfabriken (ICUMSA Methode GS6-3; ICUMSA 1994) aluminiumsulfatgeklärte Rübenbreifiltrate hergestellt (Aluminiumsulfatlösung 3 g  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  in 1000 ml  $\text{H}_2\text{O}_{\text{demin}}$ , pH 3,6). Die Filtrate wurden tiefgefroren gelagert, um Invertaseaktivität auszuschließen (BURBA und PUSCZ 1976; BURBA ET AL. 1994).

Chlorid wurde abweichend davon aus wäßrigen Rübenbreifiltraten bestimmt, um mögliche Interaktionen zwischen Aluminiumionen und den Reaktionspartnern auszuschalten. Dazu wurden die Rübenbreiproben maschinell (Universalmaschine UM 5 universal, Stephan, Hameln, D) mit demineralisiertem Wasser, im Verhältnis  $26 \pm 0,05$  g Rübe zu  $177 \pm 0,35$  ml  $\text{H}_2\text{O}_{\text{demin}}$  ( $20\text{ °C}$ ) (ICUMSA 1994), homogenisiert. Die Maschinenlaufzeit betrug 3 Minuten. Die Suspension wurde filtriert (Rundfilter Ederol Nr. 276/11 1/4 gefaltet, Binzer und Munktell, Hatzfeld, D) und die Filtrate bei  $-20\text{ °C}$  tiefgefroren gelagert.

### 2.2.2 Analysen

Neben der Bestimmung von Saccharose, Kalium, Natrium und  $\alpha$ -Amino-N wurden in der vorliegenden Untersuchung als weitere Parameter der technischen Qualität auch reduzierende Zucker, Calcium, Magnesium, Nitrat, Phosphat, Chlorid, Oxalat, Citrat, Malat, Betain und Gesamtstickstoff erfaßt.

#### 2.2.2.1 Saccharose, Kalium, Natrium und $\alpha$ -Amino-N

Mit Hilfe eines automatisierten Rübenbreianalysators (Venema, Groningen, NL) wurde in den aluminiumsulfatgeklärten Rübenbreifiltraten der Saccharosegehalt polarimetrisch, der Gehalt an Kalium und Natrium flammenphotometrisch und der  $\alpha$ -Amino-N-Gehalt fluorometrisch mit der OPT-Methode (OPT = o-Phthaldialdehyd) (BURBA und GEORGI 1975/76) gemessen.

Es wurde eine Kalibrierlösung mit 16 g Saccharose, 7 mmol Kalium, 2 mmol Natrium und 5 mmol  $\alpha$ -Amino-N verwendet. Die Präzision der Analysen wurde durch Variationskoeffizienten von 0,1 % für Saccharose, 1,9 % für Kalium, 2,9 % für Natrium und 1,7 % für  $\alpha$ -Amino-N bestimmt.

Da in die Bewertung der technischen Qualität der Zuckerrübe nach der Braunschweiger-Formel (BUCHHOLZ ET AL. 1995) jedoch der durch die Blauzahl-Methode (STANEK und PAVLAS 1934, KUBADINOW und WIENINGER 1972) bestimmte Gehalt an  $\alpha$ -Amino-N eingeht, wurden, um den systematischen Einfluß des Methodenwechsels zu berücksichtigen, die ermittelten  $\alpha$ -Amino-N-Gehalte mit einer von GLATTKOWSKI und MÄRLÄNDER (1993) ermittelten Regression korrigiert.

### 2.2.2.2 Reduzierende Zucker

Die Messung der reduzierenden Zucker erfolgte in Anlehnung an die Methode von SOMOGYI (1945) und NELSON (1944).

Hierbei wird die Probe mit  $\text{CuSO}_4$  in Anwesenheit von  $\text{NaOH}$  und Kalium-Natrium-Tartrat gekocht, wodurch  $\text{CuSO}_4$  durch die reduzierenden Zucker zu  $\text{Cu}_2\text{O}$  reduziert wird und ausfällt, während das zweiwertige Kupfer durch Tartrat komplexiert wird und in Lösung bleibt. Die Menge des ausgefallenen  $\text{Cu}_2\text{O}$  ist der Anzahl der funktionellen reduzierenden Gruppen stöchiometrisch. Durch Zugabe des Nelson-Reagenz (Tab. 4) wird das einwertige Kupfer zu zweiwertigem oxidiert und es bilden sich aus Ammoniummolybdat Mischoxide des Molybdäns, die die blaue Farbe der Lösung bedingen, deren Intensität dem Gehalt an reduzierenden Zuckern proportional ist.

**Tab. 4:** Reagenzien für die Bestimmung der reduzierenden Zucker nach SOMOGYI (1945) und NELSON (1944)

Reagenzien	Zusammensetzung
Somogyi A	100 g $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ in 900 ml $\text{H}_2\text{O}_{\text{demin}}$ lösen
Somogyi B	35,1 g $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ , 40 g Kalium-Natrium-Tartrat, 100 ml 1 n $\text{NaOH}$ und 120 g Natriumsulfat in 700 ml $\text{H}_2\text{O}_{\text{demin}}$ lösen und auf 900 ml mit $\text{H}_2\text{O}_{\text{demin}}$ auffüllen  Lösung nach 2 Tagen filtrieren und lichtgeschützt aufbewahren
Somogyi-Reagenz	Somogyi A und Somogyi B im Verhältnis 1 : 10 kurz vor Gebrauch mischen
Nelson-Reagenz	42 ml konz. Schwefelsäure in eine Lösung von 50 g $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ in 900 ml $\text{H}_2\text{O}_{\text{demin}}$ vorsichtig einrühren, eine Lösung von 6 g $\text{NaHAsO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ in 50 ml $\text{H}_2\text{O}_{\text{demin}}$ dazugeben  Reagenz 2 Tage bei 37 °C stehenlassen und anschließend lichtgeschützt aufbewahren
Nelson-Lösung	Nelson-Reagenz und $\text{H}_2\text{O}_{\text{demin}}$ im Verhältnis 1 : 1 mischen

Die aluminiumsulfatgeklärten Rübenbreifiltrate wurden auf 20 °C temperiert. Ein Aliquot von 0,2 ml Filtrat wurde mit 0,8 ml  $\text{H}_2\text{O}_{\text{demin}}$  und 1 ml Somogyi-Reagenz gemischt und 20 Minuten im Wasserbad gekocht. Die abgekühlten Proben wurden anschließend mit 2 ml Nelson-Lösung 10 Minuten bei 20 °C und 3000 Umdrehungen pro Minute zentrifugiert (Minifuge GL Nr. 4400, Heraeus-Christ, Osterode, D) und die Extinktion des klaren Überstandes bei 530 nm in 1 cm Kunststoffküvetten gemessen (Ultrospec 2, LKB Biochrom LTD, Cambridge, GB).

Verschieden konzentrierte Glucoselösungen (0,05, 0,1, 0,3 und 0,6 mM) dienen als Standards. Unter den genannten Testbedingungen ergaben 0,45  $\mu\text{mol}$  Glucose eine Absorptionseinheit (1 A 530). Die Präzision der Analyse wurde durch einen Variationskoeffizienten von 3,0 % bestimmt.

### 2.2.2.3 Kationen

Die Kationen Calcium und Magnesium wurden quantitativ mit einem Flammen-Atomabsorptionsspektrometer bestimmt (Unicam 939 AA Spectrometer, Unicam, Cambridge, GB) (NAUMANN und BASSLER 1976).

Bei der Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie wird die Probenlösung pneumatisch in eine Zerstäuberchamber gebracht, in der sie zu einem feinen Aerosol zerstäubt wird. Das Aerosol wird getrocknet, mit den Brenn- und Oxidans-Gasen gemischt und in der heißen Flamme atomisiert. Wird Licht der elementspezifischen Wellenlänge (Calcium 422 nm, Magnesium 285 nm) in die atomisierte Probe eingestrahlt, so erfolgt eine Absorption. Wenn die Bedingungen in der Flamme konstant gehalten werden, folgt die Absorption quantitativen Gesetzen gleicher Art wie bei der Spektralphotometrie von Lösungen, d.h. es ist die Absorption proportional zur Konzentration der zu messenden Atome (Lambert-Beer'sches Gesetz, Gleichung 2).

$$\begin{aligned} A &= \log I_0 / I_t \\ &= E \cdot c \cdot d \end{aligned} \quad (2)$$

wobei

- A = Lichtabsorption
- $I_0$  = Intensität des eingestrahlichten Lichtes
- $I_t$  = Intensität des emittierten Lichtes
- E = molarer Absorptionskoeffizient ( $\text{L mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$ )
- c = molare Konzentration des gelösten Stoffes ( $\text{mol L}^{-1}$ )
- d = Schichtdicke der Lösung (cm) (hier Konstante)

Für die Bestimmung des Calciums wurde eine Lachgas/Acetylen-Flamme (mittlere Flammentemperatur 2750 °C), für die Bestimmung des Magnesiums eine Luft/Acetylen-Flamme (mittlere Flammentemperatur 2300 °C) eingesetzt.

Als Probenlösung wurde 1 ml des aluminiumsulfatgeklärten Rübenbreifiltrates mit 2 ml Cäsium-Lanthan-Puffer (31,7 g CsCl und 33,4 g LaCl<sub>3</sub> in 1000 ml H<sub>2</sub>O<sub>demin</sub>) und 0,25 ml HNO<sub>3</sub> vermischt und auf 5 ml mit H<sub>2</sub>O<sub>demin</sub> aufgefüllt.

Für die Bezugskurve wurden Standardlösungen von 0, 0,01, 0,02, 0,03 und 0,04 mM Calcium bzw. 0, 0,016, 0,032, 0,048 und 0,064 mM Magnesium verwendet. Die Präzision der Analysen wurde bei Calcium durch einen Variationskoeffizienten von 2,2 %, bei Magnesium von 2,0 % bestimmt.

### 2.2.2.4 Anorganische Anionen

Nitrat und Phosphat wurden in den aluminiumsulfatgeklärten, Chlorid in den wäßrigen Rübenbreifiltraten bestimmt.

#### Nitrat

In Anlehnung an MILHAM ET AL. (1970) wurde der Nitratgehalt mittels einer ionenselektiven Elektrode gemessen (Orion Nitrat-Elektrode 93-07 mit Orion Bezugselektrode 90-02 und Orion-Research Mikroprozessor Ionenanalyser 901, Colora Messtechnik GmbH, Lorch, D).

Die Nitrat-Elektrode besteht aus einem Elektrodenkörper und einem Meßkopf. Dieser enthält eine interne Fülllösung in Kontakt mit einer organophilen Membran, gesättigt mit einem Ionenaustauscher. Wenn die Membran mit einer Nitratlösung in Kontakt ist, bildet sich über der Membran ein Potential aus. Dieses Potential ist abhängig von der Konzentration der freien Nitrationen in der Lösung und wird gegen ein konstantes Referenzpotential mit einem Ionenmeter gemessen. Das gemessene Potential entspricht der Nitrationen-Konzentration in der Lösung und wird durch die NERNST-Gleichung beschrieben (Gleichung 3).

$$E = E_0 - S \log (A) \quad (3)$$

wobei

E = gemessenes Elektrodenpotential

E<sub>0</sub> = konstantes Referenzpotential

S = Elektrodensteilheit (ungefähr – 56 mV pro Dekade)

A = Nitrat-Konzentration in der Lösung

Das aluminiumsulfatgeklärte Filtrat wurde im Verhältnis 1 : 2 mit der Pufferlösung verdünnt und daraus wurde die Nitratkonzentration direkt bestimmt (Tab. 5).

Für die Bezugskurve wurden Standardlösungen von 0, 0,016, 0,08, 0,16, 0,32, 0,48 und 1,6 mM Nitrat verwendet. Die Präzision der Analyse wurde durch einen Variationskoeffizienten von 2,0 % bestimmt.

**Tab. 5:** Pufferlösung für die Nitratbestimmung mit Hilfe einer ionenselektiven Elektrode nach MILHAM ET AL. (1970)

Reagenz	Zusammensetzung
Pufferlösung	10 g AgSO <sub>4</sub> , 6 g Amidoschwefelsäure, 26 g Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> und 1,23 g H <sub>3</sub> BO <sub>4</sub> in heißem H <sub>2</sub> O <sub>demin</sub> lösen, abkühlen lassen und auf 1000 ml mit H <sub>2</sub> O <sub>demin</sub> auffüllen die Lösung mit etwa 6,5 ml NaOH auf pH 3 einstellen

#### Phosphat

Die Phosphatbestimmung erfolgte kolorimetrisch nach der Methode von GERICKE und KURMIES (1952).

Bei der Reaktion von Ammoniumvanadat und Ammoniummolybdat mit Ortho-Phosphorsäure in salpetersaurer Lösung entsteht ein gelber Farbkomplex, der durch die Bildung von Ammoniumphosphomolybdat hervorgerufen wird. Die Farbintensität der Lösung ist der Konzentration an Phosphationen proportional.