

Viskositäts- und Oberflächenspannungsverhalten von reinen und technischen
Saccharoselösungen

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Torsten Schmidt
aus Wismar

Vom Fachbereich 15 - Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie -
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
- Dr.-Ing -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuß:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dietrich Knorr

Berichter: Prof. Dr. Bernhard Senge

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Werner Mauch

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 08. Mai 2000

Berlin 2000

D 83

Inhalt

1. EINLEITUNG	1
2. AUFGABENSTELLUNG.....	4
3. LITERATUR.....	5
3.1 RHEOLOGISCHE GRUNDLAGEN.....	5
3.1.1 Mikrorheologische Betrachtung	5
3.1.2 Makrorheologische Betrachtung	7
3.2 EINFLUß DER SCHERGESCHWINDIGKEIT AUF DAS PROZESSING.....	16
3.3 TRANSPORTGLEICHUNGEN	17
3.4 SACCHAROSELÖSUNG - ZWISCHENPRODUKT IM ZUCKERFABRIKATIONSPROZESS	18
3.5 FLIEßVERHALTEN VON SACCHAROSELÖSUNGEN	21
3.6 OBERFLÄCHENSPANNUNG VON SACCHAROSELÖSUNGEN	29
4. MATERIAL UND METHODIK.....	33
4.1 MATERIAL.....	33
4.1.1 Reine Saccharoselösung	33
4.1.2 Technische Saccharoselösung - Dicksaft.....	33
4.1.3 Technische Saccharoselösung - Melasse	34
4.1.4 Zuckerhauszwischenprodukte - Einzugsgüter, Abläufe.....	35
4.2 METHODEN	36
4.2.1 Rheometersystem MC 120 mit adaptierter DRUCKMESSZELLE (DMZ KL).....	36
4.2.2 Rheometersystem UDS 200.....	39
4.2.3 Zylinder-Meßsysteme	42
4.2.4 Berechnungsgleichungen.....	44
4.2.5 Tropfenkonturanalysesystem DSA 10	45
5. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE ZUM FLUIDDYNAMISCHEN VERHALTEN	54
5.1 ABLEITUNG EINES MODELLANSATZES ZUR BESCHREIBUNG DES VISKOSITÄTS-VERHALTENS VON REINER UND TECHNISCHER SACCHAROSELÖSUNG	54
5.2 REINE SACCHAROSELÖSUNG – UNTERSUCHUNGEN ZUR DYNAMISCHEN VISKOSITÄT	56
5.3 DICKSAFT – UNTERSUCHUNGEN ZUR DYNAMISCHEN VISKOSITÄT	60
5.3.1 Temperatur- und Trockensubstanzgehaltsabhängigkeit der dynamischen Viskosität von Rübindicksäften.....	60
5.3.2 Standortabhängigkeit der dynamischen Viskosität	65
5.3.3 Dynamische Viskosität von Dicksaft aus Zuckerrohr	69
5.4 MELASSE – UNTERSUCHUNGEN ZUR DYNAMISCHEN VISKOSITÄT	71
5.4.1 Temperatur- und Trockensubstanzgehaltsabhängigkeit der dynamischen Viskosität von Rübenmelasse	71
5.4.2 Standortabhängigkeit der dynamischen Viskosität von Rübenmelasse.....	73
5.4.3 Dynamische Viskosität von Rohrmelasse.....	76

5.5 ZUCKERHAUSPRODUKTE – UNTERSUCHUNGEN ZUR DYNAMISCHEN VISKOSITÄT	78
5.6 NICHT-NEWTONSCHES VERHALTEN.....	81
5.6.1 Reine Saccharoselösung	81
5.6.2 Dicksaft aus Rübe	84
5.6.3 Melasse aus Rübe	86
5.7 FLIEßAKTIVIERUNGSENERGIE.....	90
5.8 KAPITELZUSAMMENFASSUNG.....	90
6. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE ZUM OBERFLÄCHENSPANNUNGSVERHALTEN	92
6.1 ZEITABHÄNGIGES VERHALTEN DER OBERFLÄCHENSPANNUNG.....	92
6.2 KONZENTRATIONS- UND TEMPERATURABHÄNGIGES VERHALTEN DER OBERFLÄCHENSPANNUNG	97
6.2.1 Reine Saccharoselösungen	98
6.2.2 Technische Saccharoselösung Dicksaft.....	100
6.2.3 Technische Saccharoselösung Melasse	103
6.3 REINHEITSABHÄNGIGES VERHALTEN DER OBERFLÄCHENSPANNUNG	103
6.4 KAPITELZUSAMMENFASSUNG.....	107
7. BERECHNUNG HEIZFLÄCHENBENETZUNG UND WÄRMEÜBERGANG	108
8. BERECHNUNG TRANSPORTOPTIMIERUNG	117
8.1 DICKSAFT.....	121
8.2 MELASSE.....	122
9. HINWEISE / VORSCHLÄGE FÜR WEITERFÜHRENDE UNTERSUCHUNGEN.....	124
10. ZUSAMMENFASSUNG.....	125
11. QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS.....	127
12. DARSTELLUNGSVERZEICHNIS	130
13. ANHANG.....	134

Symbolverzeichnis

A	-	Frequenzfaktor, der mit der Bewegungsfrequenz der Moleküle zusammenhängt	Pas
A	-	„Schub“-Faktor	m ³
A	-	Konstante	
a	-	Kapillarkonstante	
B	-	Konstante	
B	-	Benetzung nach Kogan	
B _{krit}	-	kritische Benetzung	
B _F	-	dimensionsloser Formparameter des hängenden Tropfens	
b	-	Benetzung nach Wiedemann	l/(m·h)
Cl	-	Korrektur-Faktor für die Schubspannung, mit dem der Endflächeneinfluß des Innenzylinders berücksichtigt wird	
c	-	spezifische Wärmekapazität	kJ/(kg·K)
d	-	Durchmesser	m
E _a	-	Aktivierungsenergie	J/mol
E ₁	-	Aktivierungsenergie der Selbstdiffusion	J/mol
E ₂	-	Aktivierungsenergie in Wirkungsrichtung eines angelegten Kraftfeldes	J/mol
F _t	-	Tangentialkraft	N
g	-	Erdbeschleunigung	m/s ²
K	-	Konstante	
K	-	Konsistenzfaktor (Kap. 3.1.2.3)	kg/(m·s ²⁻ⁿ)
K _E	-	Elektroenergie Preis	DM/(kW·h)
K _D	-	Kosten Dampf	DM/t
K _R	-	Kosten Rohr	DM/m
k	-	Konstante (0,962) (Kap. 3.5)	
k	-	Hauptkrümmung (Kap. 4.2.5.2)	
k	-	Wärmedurchgangskoeffizient (Kap. 7)	W/(m ² ·K)
k	-	Rohrrauhigkeit (Kap. 8)	mm
L	-	Höhe bzw. Länge des Innenzylinders – Rotors	m
Le	-	Lewis-Zahl	
l _{HR}	-	Länge Heizrohr	m
l _{Rohr}	-	Länge Rohrleitung	m
M	-	Geschwindigkeitsgefälle-Faktor; hängt von den Radienverhältnis von Rotor und Meßbecher ab	s ⁻¹ /rad·s ⁻¹

M_d	-	gemessenes Drehmoment	N·m
\dot{m}	-	Massenstrom	kg/h
m	-	Exponent	
Nu	-	Nusselt-Zahl	
n	-	Fließexponent	
n	-	Rotor-Drehzahl	min ⁻¹
n_{HR}	-	Anzahl Heizrohre	
P	-	Leistungsaufnahme	W
Pr	-	Prandtl-Zahl	
p_{Abschr}	-	Abschreibungssatz	%
\dot{Q}_{Anw}	-	Wärmestrom Anwärmung	W
R	-	allgemeine Gaskonstante	J/(mol·K)
R_a	-	Radius des Außenzylinders vom Meßbecher	m
Re	-	Reynold-Zahl	
R_i	-	Radius des Innenzylinders vom Rotor	m
R^2	-	Bestimmtheitsmaß	
R	-	Radius	m
r	-	Radius	m
r	-	Korrelationskoeffizient	
S	-	Grenzfläche	m ²
Sc	-	Schmidt-Zahl	
s	-	Bogenlänge entlang des Tropfenprofils (Abbildung 13)	
s	-	Heizwandstärke (Kap. 7)	m
T	-	absolute Temperatur	K
T_g	-	Einfrier- bzw. Glas(übergangs)temperatur	K
T_{Nutz}	-	Nutzungsdauer	h/a
\dot{V}	-	Volumenstrom	m ³ /h
v	-	Geschwindigkeit	m/s
v_v	-	Dampfgeschwindigkeit	m/s
W	-	Arbeit	J
w	-	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
w_{TS}	-	Trockensubstanzgehalt	g /100 g
X_{ges}	-	Gesamtkosten	DM/(m·a)
X_k	-	Festkosten (Anlagenkosten)	DM/(m·a)
X_n	-	Elektroenergiekosten	DM/(m·a)
X_w	-	Anwärmungskosten	DM/(m·a)
x	-	Konstante (Gl. 3.5.3)	

x	-	Molenbruch	(Gl. 3.5.4)
α_1	-	Wärmeübergangskoeffizient Heizmedium an Heizwand	W/(m ² ·K)
α_2	-	Wärmeübergangskoeffizient Heizwand an Lösung	W/(m ² ·K)
Δh_v	-	spezifische Verdampfungsenthalpie	J/kg
Δh	-	Höhendifferenz	m
δ	-	Radienverhältnis	
Φ	-	Winkel zwischen der Tangente im Punkt P (x,z) und der x- Achse (Abbildung 13)	
j	-	Verdrehwinkel	rad
Γ_{FL}	-	Mindestflüssigkeitsbelastung	kg/(m·s)
$\Gamma_{FL(\text{tatsächlich})}$	-	tatsächliche Flüssigkeitsbelastung	kg/(m·s)
\dot{g}_i	-	Geschwindigkeitsgefälle am Rotorradius R_i	1/s
η	-	dynamische Viskosität	mPa·s
ϑ	-	Temperatur	°C
λ	-	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
λ	-	Rohrreibungskoeffizient	
μ	-	Wirkungsgrad	%
π_σ	-	kapillarer Krümmungsdruck	Pa
ρ	-	Dichte	kg/m ³
σ	-	Oberflächenspannung	mN/m
σ_{SL}	-	Filmdicke des Lösungsfilms	m
τ	-	Schubspannung	Pa
τ_a	-	Schubspannung am Radius R_a	Pa
τ_i	-	Schubspannung an der Radialkoordinate r bzw. am Radius R_i	Pa
ν	-	kinematische Viskosität	m ² /s
Ω	-	Winkelgeschwindigkeit	rad/s

Indizes und Abkürzungen:

Abl	-	Ablauf
a	-	außen
D	-	Dampf
EG	-	Einzugsgut
eff	-	effektiv
Fl	-	Fluid
HR	-	Heizrohr
i	-	innen
K	-	Kondensat
Mel	-	Melasse
NP	-	Nachprodukt
opti	-	optimal
RZ	-	Rohzucker
S	-	Saft
Sacch	-	Saccharose
SL	-	Saccharoselösung
TS	-	Trockensubstanz
WV	-	Wasserverdampfung
WZ	-	Weißzucker

1. Einleitung

Ein sicherer Betrieb der in Prozeßabläufen der Zuckerindustrie eingesetzten Anlagentechnik basiert auf Kenntnis der im Microengineeringbereich ablaufenden Vorgänge des Impuls-, Energie- und Stofftransportes.

Diese sind unmittelbar von den eingehenden fluiddynamischen und thermophysikalischen Kennwerten abhängig.

Bei der Zuckerfabrikation häufig angewendete Prozesse der thermischen und mechanischen Verfahrenstechnik wie: Wärmeaustausch, Extraktion (Diffusion), Sedimentation, Filtration, Zyklonierung, Zentrifugierung, Adsorption, sowie Transportvorgänge werden grundlegend vom rheologischen Verhalten des Mediums bestimmt.

Die Rheologie als Lehre und Wissenschaft befaßt sich mit den physikalischen Eigenschaften der Stoffe, die auf dem Deformationsverhalten und Fließen beruhen. Diese Eigenschaften sind sowohl für die Bewertung der Qualität der Stoffe (hier der Rohstoffe und der Endprodukte) als auch für das Verarbeitungsverhalten der Stoffe von großer Bedeutung.

Nur wenige Flüssigkeiten von technischer oder praktischer Bedeutung verhalten sich in der Lebensmittelindustrie annähernd wie idealviskose Flüssigkeiten. Die meisten Flüssigkeiten zeigen ein rheologisches Verhalten, mit dem sie als nicht-Newtonsche strukturviskose Flüssigkeiten bzw. als strukturviskoses plastisches Medium eingestuft werden müssen.

Zur Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften und damit des Deformationsverhaltens eines Körpers bei anisotroper Beanspruchung werden u.a. folgende Grundeigenschaften unterschieden: Elastizität (Festigkeit), Plastizität und Viskosität.

Für Saccharoselösungen ist die Viskosität der wichtigste Kennwert zur Beschreibung des fluiddynamischen Verhaltens.

Ursächlich für das auftretende rheologische Verhalten sind die Eigenschaften der Moleküle und deren vielfältige Wechselwirkungen in der molekularen Struktur.

Saccharoselösungen zeigen damit bei unterschiedlichen Temperaturen, Trockensubstanzgehalten und Reinheiten veränderte Viskositätseigenschaften.

Im Zuckerfabrikationsprozess sind Saccharoselösungen mit sehr unterschiedlichen Temperaturen und Zusammensetzungen anzutreffen, wie z.B. Raffinadeeinzugsgut mit einer Reinheit von nahezu 100 % und Melasse mit einer Reinheit von unter 60 %.

Besonders die Wärmeübertragungsprozesse im Zuckerfabrikationsprozeß sind für die effektive Energieanwendung und -verteilung von zentraler Bedeutung.

Insbesondere Wärmeübertragungsprozesse mit modernen Fallfilmverdampfapparaten besitzen zunehmende Bedeutung im Technologieablauf.

Die Dimensionierung der notwendigen Wärmeübertrager und Verdampfanlagen erfolgt dabei über Modellrechnungen zum Wärmeübergang, die die Kenntnis der Viskositätsdaten voraussetzen.

Bisher verwendete Viskositätsdaten basieren auf Meßwerten von reinen Saccharoselösungen im Temperaturbereich von 0 bis 80 °C und von technischen Saccharoselösungen im Temperaturbereich von 40 bis 80 °C.

Die Viskositätsdaten für Erwärmungs- und Verdampfungsprozesse im technologisch interessierenden Temperaturbereich von 85 bis 130 °C waren bisher nur durch Extrapolation der Meßwerte verfügbar. Messungen der fluiddynamischen Kennwerte mit offenen Meßkammern scheiterten in diesem Temperaturbereich an den hohen Verfälschungen infolge der auftretenden Verdunstungseffekte.

Der Einsatz moderner Meßtechnik ermöglicht jetzt Messungen von Saccharoselösungen unter originären Temperatur- und Druckbedingungen. Die Messungen lieferten neue Erkenntnisse zum Viskositätsverhalten technischer wie auch reiner Saccharoselösungen im Temperaturbereich von 30 bis 130 °C.

Durch Untersuchungen zum nicht-Newtonschen Fließverhalten wird das Verhalten der Saccharoselösungen unter veränderter Scherbeanspruchung bestimmt, um Aufschluß über molekulare Strukturierungsvorgängen zu gewinnen, die von Bedeutung bei der Optimierung von Strömungsprozessen sind und möglicherweise auch auf die Kristallkeimbildung Einfluß haben.

Neben dem fluiddynamischen Verhalten der Saccharoselösungen ist zum Modellieren einer Reihe verfahrenstechnischer Prozesse bei der Zuckerherstellung und in Zucker verarbeitenden Technologien auch die Kenntnis des Oberflächenspannungsverhaltens notwendig, zum

Beispiel bei Siede- und Verdampfungsvorgängen, der Kristallisation und dem Lösen von Kristallen und dem Benetzungs- und Reinigungsverhalten.

Die Oberflächenspannung stellt damit eine wichtige Ergänzung zu den fluiddynamischen Kennwerten der Saccharoselösung dar.

In Filmverdampfungsapparaten wird die Benetzung der Heizflächen durch die Oberflächenspannungseigenschaften der Lösung bestimmt.

Die optimale Benetzung der Heizfläche führt zu einer minimalen Filmdicke. Der Wärmeübergangswert α_2 und damit der Wärmedurchgangskoeffizient k werden erhöht.

Es resultiert daraus eine höhere Wasserverdampfungsleistung, die eine Senkung der notwendigen Heizfläche und damit der Investitionskosten erlaubt. Außerdem wird auch eine Reduzierung der Aufenthaltszeit des Saftes erreicht, was von technologischem Vorteil ist.

Bisher sind Oberflächenspannungen nur von reinen Saccharoselösungen bekannt, die unter Zuhilfenahme der bekannten Oberflächenspannungen des Wassers berechnet wurden.

Oberflächenspannungen von technischen Saccharoselösungen, wie Dicksaft und Zuckerhausprodukten sind in der Literatur nicht verfügbar.

Die ICUMSA empfahl daher aufgrund der verfahrenstechnischen Bedeutung 1998 auf der 22. Tagung in Berlin die Bestimmung der Oberflächenspannungen von Saccharoselösungen, Melassen und Einzugsgütern.

2. Aufgabenstellung

Saccharoselösungen liegen im Zuckerfabrikationsprozess in einem weiten Temperatur-, Konzentrations- und Reinheitsbereich vor.

In der Verdampfstation werden Saccharoselösungen mit Trockensubstanzgehalten von etwa 15 bis 17 g/ 100 g auf 68 g bis 75 g/ 100 g bei Temperaturen von 130 bis 85 °C eingedampft.

Im technologischen Abschnitt Zuckerhaus sinkt die Reinheit der Saccharoselösungen von Raffinadeeinzugsgut mit fast 100 % bis zum Abprodukt Melasse auf etwa 60 % Saccharose im Trockensubstanzgehalt.

Ziel dieser Arbeit ist es, die fluiddynamischen Kennwerte der reinen und technischen Saccharoselösungen unter originären Prozeßbedingungen bei Temperaturen bis zu 130 °C zu bestimmen.

Ebenso ist der Einfluß der einwirkenden Scherbeanspruchung auf das Viskositätsverhalten und damit das nicht-Newtonsche Verhalten der reinen und technischen Saccharoselösungen zu bestimmen.

Außerdem ist die Oberflächenspannung von reinen und technischen Saccharoselösungen im weiten Temperatur-, Konzentrations- und Reinheitsbereich zu ermitteln. Für diese Untersuchungen sind Temperatur und Konzentration sowie Reinheit die definierten Parameter der Saccharoselösungen.

Die Standortabhängigkeit der fluiddynamischen Kennwerte und der Oberflächenspannung, die aus der unterschiedlichen Zusammensetzung des Nichtsaccharoseanteils der technischen Saccharoselösung resultiert, ist zu untersuchen.

Aus den gemessenen Stoffkennwerten sollen Gleichungen zur Bestimmung der dynamischen Viskosität und der Oberflächenspannung abgeleitet werden.

Zur Optimierung des Transports von Lagerdicksaft und Melasse sind unter Verwendung der ermittelten Stoffkennwerte Berechnungen durchzuführen. Ebenso ist der Einfluß auf das Benetzungsverhalten an Heizflächen von Fallfilmverdampfapparaten zu bestimmen.

3. Literatur

3.1 Rheologische Grundlagen

Die Rheologie beschreibt als Teilgebiet der Physik das nicht-ideale Verhalten eines Körpers bei mechanischer Beanspruchung durch äußere anisotrope (nicht in alle Richtungen gleich wirkende) Kräfte. Es erfolgt eine reversible (elastische) oder irreversible (viskose) Deformation des Körpers. Das Deformationsverhalten ist dabei abhängig von der Intensität der einwirkenden Kraft und bei strukturierten Systemen evtl. von der Einwirkzeit.

Kenntnisse des rheologischen Verhaltens dienen als Grundlage zur Planung und Konstruktion von Maschinen und Anlagen, zur Optimierung von technologischen Prozessen und zur Erschließung der Struktur und Bindungsverhältnisse von Stoffen oder Molekülen.

3.1.1 Mikrorheologische Betrachtung

Die Ursache des Auftretens von Fließanomalien basiert auf dem Vorhandensein und der dynamischen Ausbildung von Strukturen in strukturviskosen Medien.

Die Mikrorheologie betrachtet die Körper in ihrem molekularen bzw. dispersen Aufbau unter Berücksichtigung der Art, Form, Größe, Konzentration und Wechselwirkungen der Komponenten sowie der statistischen bzw. dynamischen Mikrostruktur während des Deformationsvorganges. Die mikrorheologischen Deformationsprozesse werden auf der Basis atomphysikalischer, physiko-chemischer Gesetzmäßigkeiten beschrieben bzw. interpretiert. Dadurch wird der Mechanismus des Einflusses einzelner Faktoren auf die rheologischen Phänomene und Möglichkeiten der aktiven Beeinflussung der rheologischen Eigenschaften sichtbar.

Die Stoffeigenschaft Viskosität ist ein Transportphänomen flüssiger und gasförmiger Körper. Die physikalische Theorie des Viskositätsverhaltens basiert auf der kinetischen Theorie der Moleküle. Die darauf aufbauenden Theorien konnten bei einigen mono- oder diatomaren Fluiden experimentell bestätigt werden. Für komplexe polyatomare Moleküle treffen diese Theorien nur begrenzt zu. Sie veranschaulichen jedoch wesentliche physikalische Zusammenhänge des Phänomens.

Flüssigkeiten nehmen eine Zwischenstellung zwischen Gasen und Festkörpern ein. Die Moleküle in Flüssigkeiten sind wie die der Gase in der Lage, ihren Platz zu ändern. Dabei unterliegen die Moleküle der intermolekularen Anziehungskraft der Nachbarmoleküle, der

Wechselwirkungspotentialenergie mit den Nachbarmolekülen und der Wärmebewegung. In Flüssigkeiten liegen die Moleküle durch Abnahme ihrer Wärmebewegung in kondensierter Form vor, so daß der Abstand zwischen den Molekülen durch die wirkenden Anziehungskräfte nur in bestimmten Grenzen ohne Änderung des Aggregatzustandes veränderlich ist.

Mit der Umgruppierung der Moleküle in Flüssigkeiten wird für das einzelne Molekül die momentan günstigste energetische Position eingenommen. Die Umordnung ist nur möglich, wenn es Hohlräume oder Löcher in der Molekülpackung gibt. Röntgenografisch konnten außerdem in Flüssigkeiten die Existenz einer quasikristallinen Nahordnung der Moleküle in sehr kleinen Bereichen nachgewiesen werden. Dieser Ordnungszustand existiert an einem Ort nur sehr kurzzeitig. Er zerfällt und bildet sich neu an anderen Stellen. Die Erhöhung der Temperatur führt sowohl zur Vergrößerung der Anzahl der Löcher als auch zur Verringerung der quasikristallinen Ordnungszustände. Dadurch verringert sich die Dichte der Flüssigkeit und erhöht sich die Beweglichkeit der Moleküle. Nach der Theorie von FRENKEL und EYRING müssen die Moleküle eine Potentialbarriere überwinden, wenn sie von einem gegebenen Platz in eine Leerstelle überwechseln. Dazu ist eine Aktivierungsenergie notwendig, die mit der Frenkel-Eyring-Gleichung berechnet werden kann:

$$h = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3.1.1)$$

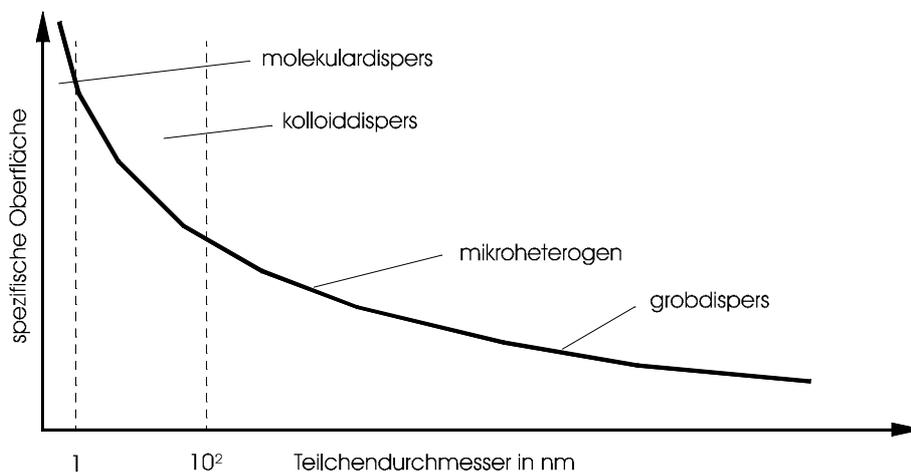
Dasjenige dem Loch benachbarte Molekül, welches die erforderliche kinetische Energie zur Überwindung der Potentialbarriere besitzt, springt in die Leerstelle und gibt damit den eigenen Platz frei. Ohne Einwirkung äußerer Scherkräfte zeigt der Platzwechsel der Moleküle (und damit der Stofftransport) keine Vorzugsrichtung. Die Anzahl der möglichen Sprünge je Zeiteinheit ist um so größer, je mehr Löcher vorhanden sind und je geringer die Höhe der Potentialbarriere ist. Sie charakterisiert die Möglichkeit der molekularen Wärmebewegung in Flüssigkeiten und wird als Selbstdiffusion bezeichnet. Mit der Erhöhung der Temperatur wächst die Geschwindigkeit der Selbstdiffusion. Die minimale Energie, die erforderlich ist, damit Moleküle der Flüssigkeit den Platz von einer zeitlich begrenzten Gleichgewichtsposition mit dem einer anderen austauschen können, ist die Aktivierungsenergie E_1 der Selbstdiffusion. Sie hängt von der Dichte der Molekülpackung, den Molekülabmessungen und den zwischenmolekularen Kräften ab.

Liegt ein äußeres Kraftfeld an, z.B. eine Scherspannung, so ist die Wahrscheinlichkeit für Sprünge der Moleküle in Wirkungsrichtung des Feldes größer, da die dazu erforderliche

Aktivierungsenergie E_2 geringer ist als die in entgegengesetzter Richtung. Dadurch erfolgt eine richtungsabhängige erzwungene Diffusion, die das viskose Fließen der Flüssigkeit bedingt.

Aus der Größe der Moleküle bzw. Partikel lassen sich z.B. folgende Systeme klassifizieren: reine Flüssigkeiten (Wasser), Lösungen (Saccharoselösung), kolloide Suspensionen (Saccharoselösung mit Kristallkeimen), grobdisperse Systeme (Saccharoselösung mit Kristallen).

Diagramm 1 **Abhängigkeit der spezifischen Oberfläche des Systems vom Teilchendurchmesser**



3.1.2 Makrorheologische Betrachtung

Die Makrorheologie betrachtet die Körper als kontinuierliches Medium (Kontinuumsmechanik) ohne Berücksichtigung des inneren Aufbaus (Mikrostruktur). Sie untersucht die äußeren Erscheinungen (phänomenologische Betrachtung) der Körper bei der Deformation und beschreibt die Phänomene mit rheologischen Zustandsgleichungen und mechanischen Modellen. Sie benutzt die Methoden der Mechanik fluider und fester Körper. Die Rheometrie umfaßt Meßmethoden und Geräte zur experimentellen Bestimmung der phänomenologischen Stoffwerte, die den physikalischen Zustand im Mikrobereich integral widerspiegeln.

Die Makrorheologie nutzt für die Darstellung der drei rheologischen Grundeigenschaften Viskosität, Elastizität und Plastizität die einfachen Modellkörper von NEWTON, HOOKE und SAINT VENANT.

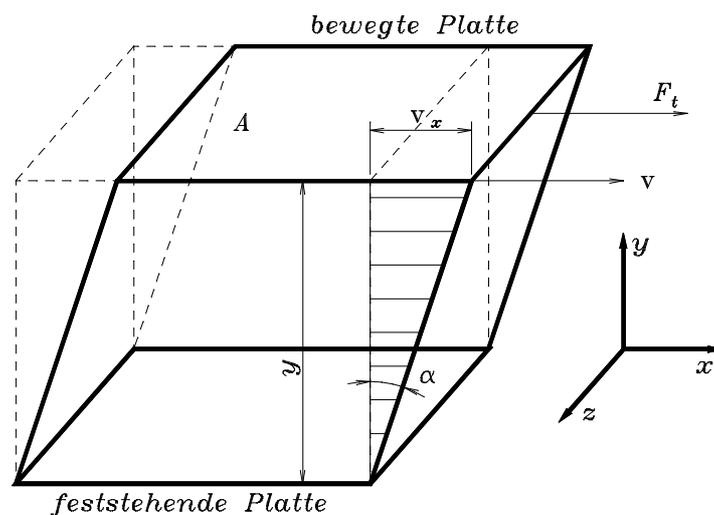
3.1.2.1 Dynamische Viskosität

Alle Fluide zeigen einen bestimmten Widerstand gegen Formänderungen. Dies ist Ergebnis der vielfältigen Wechselwirkungen in der molekularen Struktur des Mediums und stellt eine Art innere Reibung dar.

Bei einer konstanten Verschiebegeschwindigkeit v (Abbildung 1) erzeugt die Tangentialkraft F_t auf der Fläche A eine Scherspannung τ_{xy} , wodurch eine Scherströmung (COUETTE-Strömung) mit dem Geschwindigkeitsgradienten erzeugt wird:

$$\dot{\mathbf{g}} = \frac{d\mathbf{g}}{dt} = \frac{du_x}{dy} = \frac{dv}{dy} \quad (3.1.2)$$

Abbildung 1 Einfache Scherverformung eines viskosen Körpers¹



Die Tangentialkraft ist proportional zum Geschwindigkeitsgradienten $\frac{dv}{dy}$ und zur Fläche A .

$$F_t = \mathbf{h} \cdot A \cdot \frac{dv}{dy} \quad (3.1.3)$$

¹ Tscheuschner, H.-D.: Lebensmitteltechnik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1986, S. 147

Die durch diese Gleichung definierte Stoffkonstante h wird dynamische Viskosität genannt (Pas).

Die Viskosität kann u.a. von den folgenden 6 Parametern abhängig sein.²

$$h = f(S, T, p, \dot{g}, t, E) \quad (3.1.4)$$

„T“ Dieser Parameter definiert die Temperatur der Substanz. Die Viskosität ist stark von Temperaturänderungen abhängig.

„ \dot{g} “ Der Parameter „Geschwindigkeitsgefälle“ beeinflusst die Viskosität von vielen Flüssigkeiten entscheidend. Eine Erhöhung des Geschwindigkeitsgefälles kann sowohl eine Viskositätszunahme oder –abnahme bewirken.

„t“ Der Parameter „Zeit“ beschreibt das Phänomen, daß die Viskosität einiger scherend beeinflusster Substanzen – meist Dispersionen – stark von der vorausgegangenen Behandlungsdauer abhängt.

„p“ Der Parameter „Druck“ führt im allgemeinen nur bei hohen Drücken zu deutlich erkennbaren, druckabhängigen Viskositätsänderungen. Er ist daher in der Praxis normaler Viskosimetrie bei Atmosphärendruck oder bei den meist niedrigen, auf die Probe wirksamen Drücken von geringer Bedeutung. Flüssigkeiten sind unter hohem Druck kompressibel. Durch Druck wird der intermolekulare Widerstand einer Flüssigkeit erhöht. Druckerhöhungen führen damit prinzipiell zu Viskositätserhöhungen.

„S“ Dieser Parameter bezeichnet die physikalisch-chemische Beschaffenheit der zu messenden Substanz, z.B. ob die Flüssigkeit Wasser, Öl oder eine Polymerschmelze ist.

„E“ Der Parameter „elektrisches Feld“ ist bedeutungsvoll für eine Gruppe von speziellen Suspensionen, die durch das Phänomen charakterisiert werden, daß deren Fließverhalten stark durch die Größe eines auf sie einwirkenden elektrischen Feldes beeinflusst wird.

² Schramm G.: Einführung in Rheologie und Rheometrie. Gebrüder HAAKE GmbH 1995, S. 15

3.1.2.2 Newtonsches Fließverhalten

Das NEWTONSche Fließverhalten ist das klassische Fließverhalten aus der Physik und stellt den einfachsten Fall zum Beschreiben des mechanischen Fließens dar. Hier wird von idealviskosen Fluiden ausgegangen, bei denen die Viskosität ein konstanter Stoffkennwert ist.

Höhe und zeitlicher Verlauf der Schubspannung bzw. der Schergeschwindigkeit haben in diesem Fall keinen Einfluß auf den Stoffkennwert Viskosität.

Alle Flüssigkeiten, für die dieses zutrifft, werden „Newtonsche“ Flüssigkeiten genannt.

Der Newtonsche Schubspannungsansatz lautet:

$$\mathbf{t} = \mathbf{h} \cdot \frac{d\mathbf{v}}{dy} = \mathbf{h} \cdot \dot{\mathbf{g}} \quad (3.1.5)$$

3.1.2.3 Nicht-Newtonisches Fließverhalten

Alle anderen Flüssigkeiten, die kein „ideales“ Fließverhalten aufweisen, werden „nicht-Newtonische“ Flüssigkeiten genannt. Besonders bei hochmolekularen Flüssigkeiten, Lösungen und dispersen Systemen treten Abweichungen von der newtonschen Fließkurve infolge Strukturierung in der Mikroebene auf. Mögliche Ursachen für das Auftreten von nicht-Newtonischen Verhalten bzw. der Strukturviskosität in diesen Fluiden zeigt Abbildung 2.

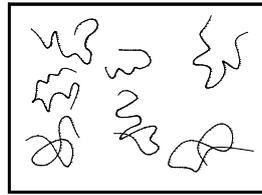
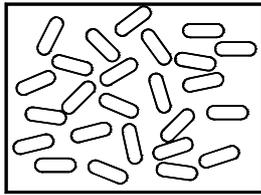
Die Viskosität als konstanter Stoffkennwert der inneren Reibung eines Fluids, der nur von Druck und Temperatur beeinflusst wird, gilt nicht mehr.

Die nicht-NEWTONSche Stoffgröße wird eine abhängige Größe von der Schergeschwindigkeit $\dot{\mathbf{g}}$ und besteht aus einer Komponente, die die innere Reibung, und einer Komponente, die die Strukturänderung widerspiegelt. Die Komponente der Strukturänderung ist dabei eine Funktion der anliegenden Scherspannung. Das für die Definition der newtonschen Viskosität benutzte Verhältnis von Scherspannung τ und Geschwindigkeitsgradienten $\dot{\mathbf{g}}$ liefert bei nicht-Newtonischen Flüssigkeiten eine Viskositätsfunktion, die als effektive Viskosität bezeichnet wird.

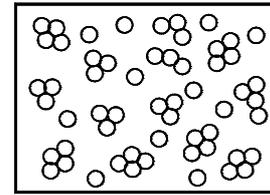
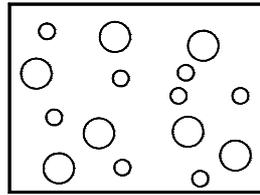
$$\mathbf{h}_{\text{eff}}(\dot{\mathbf{g}}) = \frac{\mathbf{t}}{\dot{\mathbf{g}}} = K \cdot \dot{\mathbf{g}}^{n-1} \quad (3.1.6)$$

Abbildung 2 Ursachen für strukturviskoses Verhalten von Dispersionen³

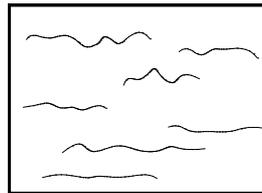
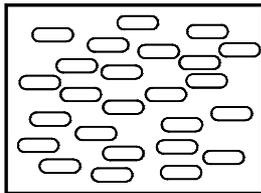
1. Flüssigkeit in Ruhezustand



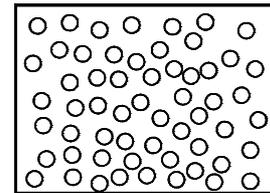
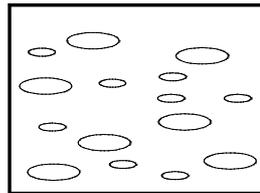
1. Dispersion in Ruhezustand



2. Flüssigkeit unter Scherbeanspruchung



2. Dispersion unter Scherbeanspruchung



Orientierung

Streckung

Deformation der Aggregate

Disaggregation

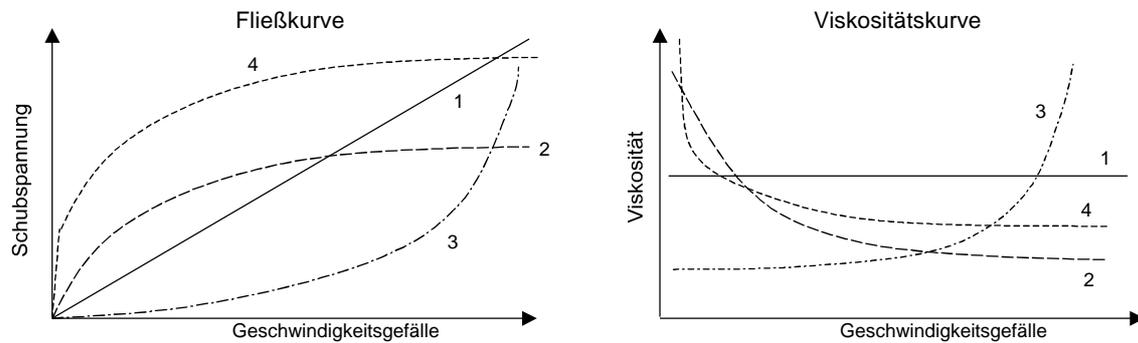
Sie ist eine summarische Charakteristik der inneren Reibung und des scherspannungsabhängigen Gleichgewichtszustandes der Strukturzerstörungs- und Bildungsprozesse.

Die Verwendung der Prozeßviskosität gestattet eine genauere Beschreibung der Viskosität besonders bei hohen Schergeschwindigkeiten.

$$h_{\text{proz}}(\dot{\mathbf{g}}) = \frac{dt}{d\dot{\mathbf{g}}} = n \cdot K \cdot \dot{\mathbf{g}}^{n-1} \quad (3.1.7)$$

Fließ- und Viskositätskurve von häufig vorkommenden nicht-Newtonschen Flüssigkeiten zeigt Abbildung 3 im Vergleich zur Newtonschen Flüssigkeit.

³ Schramm G.: Einführung in Rheologie und Rheometrie. Gebrüder HAAKE GmbH 1995, S. 19

Abbildung 3 Fließ- und Viskositätskurven

- | | |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1 Newtonsche Flüssigkeit | 2 Strukturviskose Flüssigkeit |
| 3 Dilatante Flüssigkeit | 4 Strukturviskose Flüssigkeit mit Fließgrenze (plastisches Fluid) |

Mathematisch läßt sich die Charakteristik des nicht-Newtonschen-Fließens mit einer Reihe von Modellansätzen beschreiben. Eine Auswahl dieser ca. 20 Ansätze für strukturviskose nicht-Newtonsche Flüssigkeiten sind als Beispiel in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 Deformationsansätze für strukturviskose nicht-Newtonsche Flüssigkeiten⁴

Bezeichnung	Zustandsgleichung	Schergeschwindigkeit	Viskositätsfunktion	Stoffparameter
NEWTON	$\boldsymbol{t} = \boldsymbol{h} \cdot \frac{d\boldsymbol{v}}{dy} = \boldsymbol{h} \cdot \dot{\boldsymbol{g}}$	$\dot{\boldsymbol{g}} = \frac{\boldsymbol{t}}{\boldsymbol{h}}$	$\boldsymbol{h} = \frac{\boldsymbol{t}}{\dot{\boldsymbol{g}}}$	\boldsymbol{h} in Pas
OSTWALD-DE WAELE	$\boldsymbol{t} = K \cdot \dot{\boldsymbol{g}}^n$	$\dot{\boldsymbol{g}} = \left(\frac{\boldsymbol{t}}{K} \right)^{1/n}$	$\boldsymbol{h}_{eff} = K \cdot \dot{\boldsymbol{g}}^{n-1}$	K in N·s ⁿ /m ² ; n < 1
STEINER STEIGER-ORY	$\boldsymbol{t} = \frac{1}{C + A\boldsymbol{t}^2} \cdot \dot{\boldsymbol{g}}$	$\dot{\boldsymbol{g}} = \boldsymbol{t} \cdot (C + A\boldsymbol{t}^2)$	$\boldsymbol{h}_{eff} = \frac{1}{C + A\boldsymbol{t}^2}$	C = 1/η ₀ in m/(N·s) A in m ² /N
FERRY	$\boldsymbol{t} = \frac{\boldsymbol{h}_0}{1 + C\boldsymbol{t}} \cdot \dot{\boldsymbol{g}}$	$\dot{\boldsymbol{g}} = \frac{\boldsymbol{t}(1 + C)}{\boldsymbol{h}_0}$	$\boldsymbol{h}_{eff} = \frac{\boldsymbol{h}_0}{1 + C\boldsymbol{t}}$	η ₀ in N·s/m ² C in m ² /N
DE HAVEN	$\boldsymbol{t} = \frac{\boldsymbol{h}_0}{1 + C\boldsymbol{t}^n} \cdot \dot{\boldsymbol{g}}$	$\dot{\boldsymbol{g}} = \frac{\boldsymbol{t}(1 + C\boldsymbol{t}^n)}{\boldsymbol{h}_0}$	$\boldsymbol{h}_{eff} = \frac{\boldsymbol{h}_0}{1 + C\boldsymbol{t}^n}$	η ₀ in N·s/m ² C in m ²ⁿ /N ⁿ
ELLIS (I)	$\boldsymbol{t} = (\boldsymbol{h}_0 + K \cdot \dot{\boldsymbol{g}}^{n-1}) \cdot \dot{\boldsymbol{g}}$	$\dot{\boldsymbol{g}} = \frac{\boldsymbol{t}}{\boldsymbol{h}_0 + K\dot{\boldsymbol{g}}^{n-1}}$	$\boldsymbol{h}_{eff} = \boldsymbol{h}_0 + K\dot{\boldsymbol{g}}^{n-1}$	η ₀ in N·s/m ² K in N·s ⁿ /m ²
SISKO	$\boldsymbol{t} = \boldsymbol{h}_\infty \dot{\boldsymbol{g}} + b\dot{\boldsymbol{g}}^n$	$\dot{\boldsymbol{g}} = \frac{\boldsymbol{t}}{\boldsymbol{h}_\infty + b\dot{\boldsymbol{g}}^{n-1}}$	$\boldsymbol{h}_{eff} = \boldsymbol{h}_\infty + b\dot{\boldsymbol{g}}^{n-1}$	η _∞ in N·s/m ² b in N·s ⁿ /m ²
WILLAMS	$\boldsymbol{t} = \frac{A\dot{\boldsymbol{g}}}{B + \dot{\boldsymbol{g}}} + \boldsymbol{h}_\infty \dot{\boldsymbol{g}}$	$\dot{\boldsymbol{g}} = \frac{\boldsymbol{t}}{A/(B + \dot{\boldsymbol{g}}) + \boldsymbol{h}_\infty}$	$\boldsymbol{h}_{eff} = \frac{A}{B + \dot{\boldsymbol{g}}}$	A in N/m ² B in s ⁻¹

3.1.2.4 Temperaturabhängigkeit der dynamischen Viskosität

Allgemein kann man davon ausgehen, daß jede Änderung der Temperatur einer Substanz auch eine Änderung ihrer viskosen Eigenschaften bedingt. Eine allgemeingültige Aussage

⁴ *Tscheuschner, H.-D.:* Lebensmitteltechnik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1986, S. 159

über das Viskositäts-Temperaturverhalten eines Stoffes kann aber nicht gegeben werden. Für jede spezielle Anwendung muß auf ein mehr oder weniger geeignetes approximatives Verfahren zurückgegriffen werden. Es existieren daher eine ganze Reihe von mathematischen Ansätzen. Die Genauigkeit dieser Ansätze ist dabei auch vom gewählten Temperaturintervall abhängig.

Nach der Frenkel-Eyring-Gleichung (siehe Gleichung (3.1.1)) nimmt die Viskosität bei steigender Temperatur bis zu einem Grenzwert ab.

Für höherviskose Stoffe kann nach der Vogel-Gleichung eine sehr gute Beschreibung des Temperatur-Viskositäts-Verhalten erfolgen:

$$\ln h = A + \frac{B}{T - C} \quad (3.1.8)$$

Durch mindestens drei Messungen bei verschiedenen Temperaturen sind aus den erhaltenen Viskositätswerten η_1 , η_2 und η_3 bei den Temperaturen T_1 , T_2 und T_3 die Parameter wie folgt zu berechnen:

$$C = \frac{(\ln h_1 - \ln h_3) \cdot (T_1 - T_2) T_3 - (\ln h_1 - \ln h_2) \cdot (T_1 - T_3) T_2}{(\ln h_1 - \ln h_2) \cdot (T_1 - T_3) - (\ln h_1 - \ln h_3) \cdot (T_1 - T_2)} \quad (3.1.8.1)$$

$$A = \frac{(T_1 + C) \ln h_1 - (T_2 + C) \ln h_2}{(T_1 - T_2)} \quad (3.1.8.2)$$

$$B = (T_2 + C) \cdot (\ln h_2 - A) \quad (3.1.8.3)$$

Bei diesem Verfahren sollte allerdings eine Extrapolation über den durch die Temperaturen T_1 , T_2 und T_3 definierten Meßbereich vermieden werden.

Weitere ausgewählte mathematische Berechnungsansätze enthält die Tabelle 2.

Tabelle 2 Temperaturabhängigkeit der Viskosität

DE GUZMAN	$\ln h = A + B \cdot \frac{1}{T}$
COMBS und NATIONS	$\ln h = A + B \cdot \frac{T_g}{T}$
FOX und FLORY	$\ln h = A + B \cdot T^{-6}$
LITOVITZ	$\ln h = A + B \cdot T^{-3}$
CORNELISSEN u.a.	$\ln h = A + B \cdot T^{-C}$
WALTHER	$\ln(h + A) = B \cdot T^{-C}$
UMSTÄTTER	$\arcsin \ln \frac{h}{h_0} = A - B \cdot \ln T$
LE CHARTELIER	$\ln h = A \cdot e^{\frac{C}{T}}$
BRADBURY u.a.	$\ln h = A + B \cdot e^{\frac{C}{T}}$
GROSS und ZIMMERMANN	$\ln h = A + B \cdot \frac{\left[1 - e^{-\frac{C}{T}}\right]^{\frac{1}{3}}}{1 - \left[1 - e^{-\frac{C}{T}}\right]^{\frac{1}{3}}}$
WATERTON	$\ln h = A + B \cdot \frac{e^{-\frac{C}{T}}}{T}$
JENCKEL	$\ln h - \frac{C}{T} = A + B \cdot \frac{e^{-\frac{C}{T}}}{T}$
VOGEL	$\ln h = A + B \cdot \frac{1}{T - T_g}$

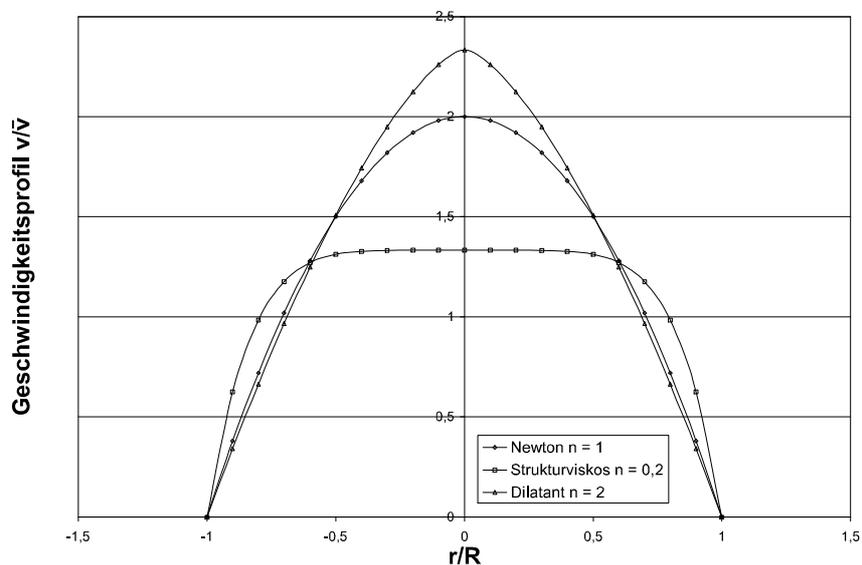
3.2 Einfluß der Schergeschwindigkeit auf das Prozessing

Newtonsche und nicht-Newtonsche Flüssigkeiten zeigen ein unterschiedliches Geschwindigkeitsprofil^{5,6} beim Fließen durch Rohre konstanten Durchmessers. Das Geschwindigkeitsprofil kann durch die folgende Formel berechnet werden und ist dabei vom Fließexponenten n abhängig.

$$v/\bar{v} = \frac{3n+1}{n+1} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\left(1+\frac{1}{n}\right)} \right] \quad (3.2.1)$$

Für $n = 1$ erhält man das Geschwindigkeitsprofil für Newtonsche Flüssigkeiten. Bei einem Fließexponenten $n < 1$ (strukturviskose Flüssigkeiten) bildet sich ein flaches Geschwindigkeitsprofil heraus ($n \rightarrow 0$, $v/\bar{v} \rightarrow 1$) und bei $n > 1$ (dilatante Flüssigkeit) erhält man ein steiles Profil, das für $n \rightarrow \infty$ die Form eines Rotationskegels bekommt.

Diagramm 2 **Geschwindigkeitsprofile von Newtonscher, strukturviskoser und dilatanter Flüssigkeit**



⁵ Ulbrecht, J.; Mitschka, P.: Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten. Leipzig 1967, S. 8-33

⁶ Skelland, A. H. P.: Non-Newtonian flow and heat-transfer. New York 1967, S. 119-122, 215-217

Auch der Druckabfall in Rohren wird vom Fließexponenten n beeinflusst. Strukturviskose Flüssigkeiten haben beim Transport mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten einen niedrigeren Leitungswiderstand als vergleichbare Newtonsche Flüssigkeiten. Bei dilatanten Flüssigkeiten wird der Druckverlust größer. Dies bedeutet auch, daß sich der Leistungsbedarf beim Pumpen dieser Fluide entsprechend ändert.

3.3 Transportgleichungen

Zur Bilanzierung von Strömungsprozessen ist es notwendig, die auftretenden Transportprozesse umfassend zu charakterisieren. In allen Fällen ist die Kenntnis der Viskosität von entscheidender Bedeutung, wie die folgenden zu unterscheidenden Ebenen zeigen:

0. Ebene der thermischen Zustandsgröße Dichte ρ

1. Ebene des Impulstransportes, des Wärmetransportes und des Stofftransportes

charakterisiert werden diese Stoffparameter durch die Viskosität η , die Wärmeleitfähigkeit λ und den Diffusionskoeffizient D

2. Ebene bei zeitlichen Veränderung von Geschwindigkeit, Temperatur und Konzentration

$$\text{NAVIER-STOKES} \quad \frac{\partial w}{\partial t} = \dots \mathbf{u} \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad \text{mit } \mathbf{u} = \frac{\mathbf{h}}{\mathbf{r}} \text{ in m}^2/\text{s} \quad (3.3.1)$$

$$\text{FOURIER} \quad \frac{dT}{dt} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{mit } a = \frac{\mathbf{l}}{\mathbf{r} \cdot c_p} \text{ in m}^2/\text{s} \quad (3.3.2)$$

$$\text{FICK I} \quad \frac{dc}{dt} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \quad \text{mit } D = (T, c) \text{ in m}^2/\text{s} \quad (3.3.3)$$

3. Ebene der molekularen Ausgleichskoeffizienten

$$\text{Prandtl-Zahl (Pr)} \quad \text{Pr} = \frac{\mathbf{u}}{a} \quad \frac{\text{Impulstransport}}{\text{Wärmetransport}} \quad (3.3.4)$$

$$\text{Schmidt-Zahl (Sc)} \quad \text{Sc} = \frac{\mathbf{u}}{D} \quad \frac{\text{Impulstransport}}{\text{Stofftransport}} \quad (3.3.5)$$

$$\text{Lewis-Zahl (Le)} \quad Le = \frac{a}{D} \quad \frac{\text{Wärmetransport}}{\text{Stofftransport}} \quad (3.3.6)$$

Ebenso ist die Reynolds-Zahl Re zur Beschreibung von Strömungsverhältnissen von großer Bedeutung. Sie kann als Verhältnis der Trägheitskraft zur Reibungskraft angesehen werden. Für die Frage, ob eine Strömung stabil laminar bleibt oder ob sich eine turbulente Strömung einstellen kann, ist der Zahlenwert der Reynolds-Zahl das entscheidende Kriterium.

$$\text{Reynolds-Zahl} \quad Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad (3.3.7)$$

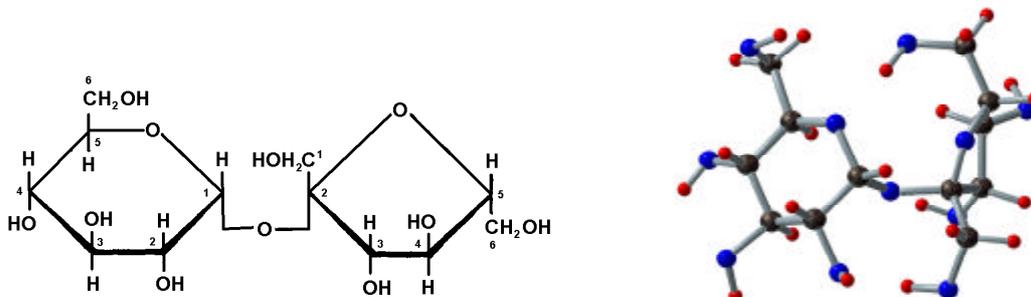
3.4 Saccharoselösung - Zwischenprodukt im Zuckerfabrikationsprozess

Saccharoselösungen bestehen aus in Wasser gelöster Saccharose. Saccharose ist eine Disaccharid, in dem Glukose als heterozyklischer Sechsring (Pyran) und Fruktose als Fünfring (Furan) in Laktolform (inneres Halbzetal) vorliegen. Beide Ringe sind über ihre glykosidische Hydroxylgruppe ätherartig verknüpft (C-Atom 1 der Glukose und C-Atom 2 der Fruktose) (siehe Abbildung 4).

Enthält die Lösung keine bzw. zu vernachlässigende weitere Nichtsaccharosestoffe spricht man von reiner Saccharoselösung.

Der Trockensubstanzgehalt dieser Lösung besteht zu 100 % aus Saccharose.

Abbildung 4 **α -D-Glukopyranosido-(1,2)- β -D-fruktofuranosid**



Das in der Praxis aus biologischem Material hergestellte Produkt, die technische Saccharoselösung, enthält dem gegenüber eine ganze Reihe von Nichtsaccharosestoffen. Der Verunreinigungsgrad wird durch die Reinheit (q) charakterisiert und nach Gleichung (3.4.1) berechnet.

$$q = \frac{m_{Sacch.}}{m_{TS}} \cdot 100 \% \quad (3.4.1)$$

Ausgehend von einem thermostabilen Dünnsaft, der in der Verdampfstation nur geringen Farb- und pH-Wertänderungen unterliegt, enthält die Melasse die Nichtzuckerstoffe aus den Rüben, die nach Extraktion und Saftreinigung im Dünnsaft und damit auch im Dicksaft verbleiben.

Dünnsaft, Dicksaft und Melasse unterscheiden sich damit in der Zusammensetzung hauptsächlich durch ein unterschiedliches Verhältnis von Nichtsaccharosestoffen zu Saccharose und Wasser.

Die Zusammensetzung des Nichtsaccharosestoffanteils dieser technischen Saccharoselösungen ist also nahezu identisch.

Im Einzelfall sind die Inhaltsstoffe abhängig:

- von der Anbauregion (Boden, Klima) der Rübe,
- von den Witterungsverhältnissen während der Vegetationsdauer (Temperatur, Sonnenscheindauer, Regenmenge, Regenverteilung),
- von den anbautechnischen Maßnahmen (Feldbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz),
- von den genetischen Eigenschaften des verwendeten Saatgutes,
- von der Rodetechnik, den Lagerungsbedingungen und der Lagerungsdauer der Rübe vor der Verarbeitung.

Außerdem haben auch die Technologie der Zuckergewinnung und die während der Verarbeitung eingesetzten technischen Hilfsstoffe Einfluß.

Dünnsäfte besitzen einen Trockensubstanzgehalt von etwa 15 bis 18 g/ 100 g und eine Reinheit von etwa 90 %. Dicksäfte sind bei etwa gleicher Reinheit auf Trockensubstanzgehalte von etwa 68 bis 75 g/ 100 g konzentriert.

In Handelsmelasse werden durchschnittlich die in Abbildung 5 angegebenen Inhaltsstoffe analysiert⁷.

Abbildung 5 **Zusammensetzung von Handelsmelasse**

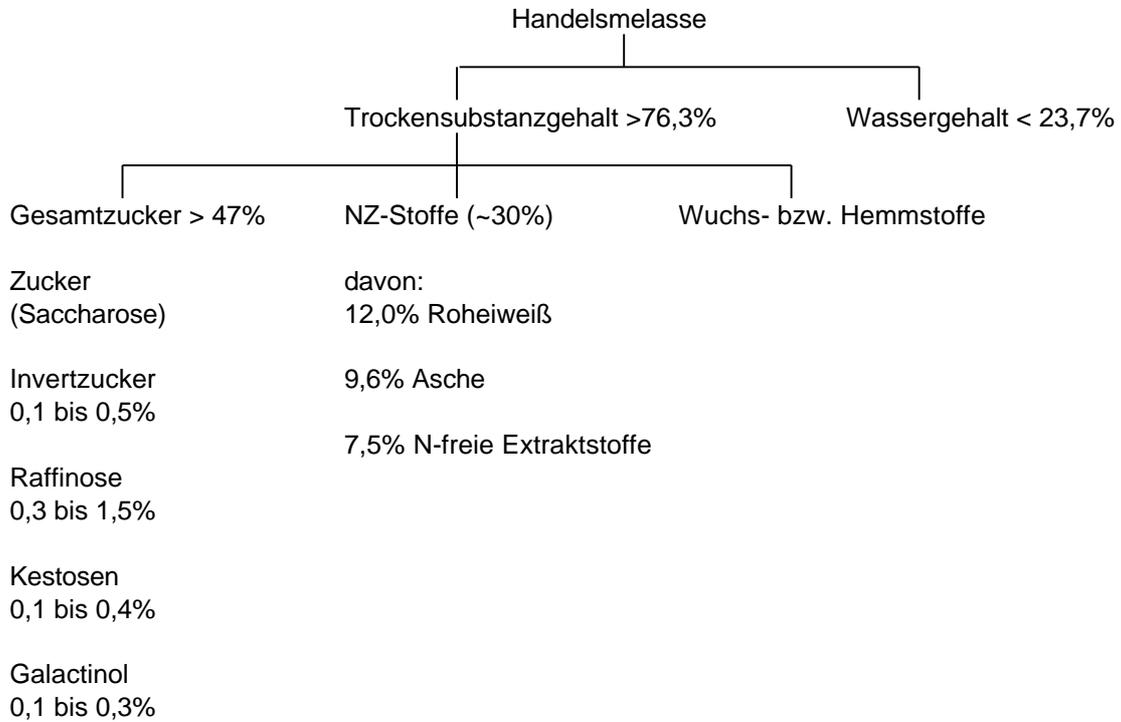


Tabelle 3 gibt die Verbindungen des Nichtzuckerstoffanteils an, der in drei große Stoffklassen gegliedert ist: anorganische, stickstoffhaltige organische und stickstofffreie organische Nichtzuckerstoffe.

⁷ *Schiweck, H.:* Zusammensetzung von Zuckerrübenmelassen. Zuckerindustrie 119 (1994) 272-282

Tabelle 3 Zusammensetzung von Nichtzuckerstoffen der Melasse, bezogen auf Nichtzucker

Anorganische NZ (~33%)	N-haltige NZ-Stoffe (~40%)	N-freie organische NZ-Stoffe (~20%)
<i>Kationen</i>	Pyrolidoncarbonsäure	Citronensäure
		Äpfelsäure
K ⁺ , Na ⁺ , Ca ⁺ , Mg ²⁺ , Fe ³⁺ , Cu ²⁺	Glutaminsäure	Fumarsäure
und Spuren von Schermetallen	Asparaginsäure	Bernsteinsäure
	γ-Aminobuttersäure	Oxalessigsäure
<i>Anionen</i>		
	Tyrosin	Oxalsäure
Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , PO ₄ ³⁻	Serin	Weinsäure
NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻	Alanin	Glykolsäure
	Isoleucin	Milchsäure
	Leucin	
	Valin	Ameisensäure
	Asparagin	Essigsäure
	Glycin	Propionsäure
		Buttersäure
	Betain	
	Peptide	Saccharinsäure
	Nucleotide	
	Farbstoffe, Vorprodukte	Galacturonsäure

3.5 Fließverhalten von Saccharoselösungen

Erste viskosimetrische Untersuchungen an Zuckerlösungen wurden an unreinen Zuckerlösungen durchgeführt. 1874 versetzte BURKHARD⁸ reine Saccharoselösung mit einer Reihe von Nichtzuckerstoffen, die schon zu dieser Zeit als Bestandteile der Melasse erkannt waren, und verfolgte die Zeit, die eine bestimmte Menge einer solchen Zucker-Nichtzucker-Lösung benötigte, um eine Kapillare zu passieren.

⁸ Burkhard, G.: Z. Ver. Rübenzuckerindustrie **24** (1874) 199.

Alle weiteren Viskositätsmessungen an Saccharoselösungen wurden bis 1963 mit Kapillar- bzw. Kugelfallviskosimetern durchgeführt.⁹ Bei Verwendung dieser Meßtechnik ist es nicht möglich, Messungen mit einer Versuchsanordnung über einen größeren Temperatur- bzw. Konzentrationsbereich vorzunehmen. SCHNEIDER, SCHLIEPHAKE und KLIMMEK⁹ führten daher bereits 1963 Messungen an reinen Saccharoselösungen mit einem Rotationsviskosimeter durch.

Die durch das NATIONAL BUREAU OF STANDARDS erarbeiteten fluiddynamischen Stoffkennwerte von reinen Saccharoselösungen wurden von der ICUMSA¹⁰ offiziell angenommen und liegen als Tabellenwerte im Temperaturbereich von 0 bis 80 °C und im Trockensubstanzbereich von 0 bis 82 g / 100 g vor.¹¹

Für technische Saccharoselösungen liegen die Viskositätswerte im Temperaturbereich von 30 bis 90 °C mit $DT = 10$ K für Reinheiten von 90 %, 80 %, 70 % und 60 % und Trockensubstanzgehalte von 50 g/ 100 g bis 84 g/ 100 g vor, wobei die Werte bei 30 °C und 90 °C keine Meßwerte darstellen, sondern extrapoliert wurden.¹¹

Die Bestimmung der Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Trockensubstanzgehalt bei reinen und technischen Saccharoselösungen war Gegenstand vieler Arbeiten. Neben graphischen Darstellungen wurden auch rechnerische Lösungen angeboten.

Eine allgemeine Formel von GUZMAN¹² und ANDRADE¹³ beschreibt die Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur bei Flüssigkeiten. In der Zuckerindustrie ist diese Beziehung als modifizierte Form von FRENKELS¹⁴ Gleichung bekannt^{15,16}:

⁹ Schneider, F.; Schliephake, D.; Klimmek, A.: Über die Viskosität von reinen Saccharoselösungen. Zucker 16 (1963) 465-473

¹⁰ International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis

¹¹ Bubnik, Z.; Kadlec, P.; Urban, D.; Bruhns, M.: Sugar Technologists Manual. Verlag Dr. Albert Bartens, Berlin 1995

¹² Guzman, J. de: Relation between fluidity and heat of fusion. Anales soc. espan. fis. quim. 11 (1913) 353-362, ref. in Chem. Abstr. 9 (1915) 740-741

¹³ Andrade, E. N. da C.: The viscosity of liquids. Nature 125 (1930) 309-310, 580-584

$$\log \mathbf{h} = A + \frac{B}{T} \quad (3.5.1)$$

Mit der Formel nach SOUDERS¹⁷ erhält man die gleichen Ergebnisse:

$$\log \left(\frac{\mathbf{h}}{\mathbf{r}} \right) = A + \frac{B}{T} \quad (3.5.2)$$

Beide Formeln sind nicht ganz exakt. Während die errechneten Werte eine Gerade im Koordinatensystem $\log \mathbf{h}$ und $1/T$ ergeben, liegen die experimentell erhaltenen Werte auf einer schwach gekrümmten Linie. Die Formeln können aber trotzdem in der Praxis für reine und technische Saccharoselösungen angewendet werden.

Aus diesen Formeln mit nur zwei Konstanten leitete WATERMAN¹⁸ folgende Gleichung ab:

$$\log \left(\frac{\mathbf{h}}{\mathbf{r}} \right) = \frac{A}{T^x} + B \quad (3.5.3)$$

Auch für technische Saccharoselösungen trifft diese Formel zu, wenn man die drei Konstanten aus drei verschiedenen Untersuchungen errechnet.

Von WEIPERT, TSCHUSCHNER und WINDHAB¹⁹ wird der von SUBCENKO gefundene Ansatz für die Beschreibung der Temperatur- und Konzentrationsabhängigkeit der dynamischen Viskosität von reiner Saccharoselösungen vorgeschlagen:

¹⁴ Frenkel, J.: Über die Wärmebewegung in festen und flüssigen Körpern. Z. Physik 35 (1925/26) 652-669

¹⁵ Honig, P.: The viscosity of sugar house products. Proc. Ann. Conv. Sugar Technol. Assoc. India 23 (1954) 80-91

¹⁶ Silin, P. M.; Silina, S. A.: Viskosität von Melassen. Z. Zuckerind. 4 (1954) 159-160

¹⁷ Souders, M. Jr.: Viscosity-temperature relations. J. Amer. Chem. Soc. 59 (1937) 1252-1254

¹⁸ Cornelissen, J.; Waterman: The Viscosity-temperature relationship of liquids. Chem. Eng. Sci. 4 (1955) 238-246

¹⁹ Weipert, D.; Tscheuschner, H.-D.; Windhab, E.: Rheologie der Lebensmittel. Behr's Verlag, Hamburg 1993

$$\mathbf{h}(T, x) = A \cdot \exp\left(\frac{B \cdot x}{T}\right) \quad (3.5.4)$$

Diese Gleichung wurde anhand experimenteller Untersuchungen als zweiparametrischer Ansatz abgeleitet. Die Stoffwerte A und B sind von der Saccharosekonzentration der Lösung abhängig, ebenso der Molenbruch x .

Im Temperaturbereich von 30 bis 70 °C liefert die Gleichung (3.5.4) von SUBCENKO gute Übereinstimmung mit den von SCHNEIDER, SCHLIEPHAKE und KLIMMEK²⁰ bestimmten Werten.

PIDOUX²¹ schlug eine weitere Gleichung für reine und technische Saccharoselösungen vor, deren Nutzung sich gegenwärtig in der Zuckerindustrie durchgesetzt hat:

$$\log \mathbf{h} = a \cdot \frac{T - T_0}{T^2} + b \quad (3.5.5)$$

Mit dieser Gleichung (3.5.5) können Viskositätswerte von Saccharoselösungen für einen weiten Temperaturbereich bestimmt werden, indem man die Parameter a und b aus zwei bekannten Viskositätswerten unterschiedlicher Temperaturen nach den Gleichungen (3.5.5.1) und (3.5.5.2) bestimmt.²²

$$a = \frac{\log \mathbf{h}_2 - \log \mathbf{h}_1}{\frac{T_2 - T_0}{T_2^2} - \frac{T_1 - T_0}{T_1^2}} \quad (3.5.5.1)$$

$$b = \log \mathbf{h}_1 - a \cdot \frac{T_1 - T_0}{T_1^2} = \log \mathbf{h}_2 - a \cdot \frac{T_2 - T_0}{T_2^2} \quad (3.5.5.2)$$

Auch diese Formel ist mit systematischen Fehlern behaftet. Besonders bei höheren Trockensubstanzgehalten erhält man deutliche Abweichungen von den Meßwerten.

²⁰ Schneider, F.; Schliephake, D.; Klimmek, A.: Über die Viskosität von reinen Saccharoselösungen. Zucker 16 (1963), 465-473

²¹ Pidoux, G.: Formel zur Berechnung der Viskosität im Bereich von 0 bis 100 °C. Zucker 14 (1961) 523-532

²² Bubnik, Z.; Kadlec, P.; Urban, D.; Bruhns, M.: Sugar Technologists Manual. Verlag Dr. Albert Bartens, Berlin 1995; S. 240

Kompliziertere empirische Berechnungsgleichungen wurden von SWINDELLS et al. und SCHEIDER et al. zur Bestimmung der dynamische Viskosität von reiner Saccharoselösung abgeleitet:

SWINDELLS et al.; $0\% \leq w_{TS} \leq 75\%$; $35^\circ\text{C} \leq t \leq 80^\circ\text{C}$; (Viskosität in mPoise)

$$\mathbf{h} = \exp(\exp(a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2)) \quad (3.5.6)$$

$$a_i = b_0 + b_1 \cdot w_{TS} + b_2 \cdot w_{TS}^2 + b_3 \cdot w_{TS}^3 + b_4 \cdot w_{TS}^4 \quad (3.5.6.1)$$

mit

	a_0	a_1	a_2
b_0	1,06060	$-1,16060 \cdot 10^{-2}$	$2,16324 \cdot 10^{-5}$
b_1	$4,48276 \cdot 10^{-3}$	$2,58734 \cdot 10^{-4}$	$-2,0812 \cdot 10^{-6}$
b_2	$3,55426 \cdot 10^{-4}$	$-9,2851 \cdot 10^{-6}$	$9,72267 \cdot 10^{-8}$
b_3	$-5,0866 \cdot 10^{-6}$	$1,48845 \cdot 10^{-7}$	$-1,6791 \cdot 10^{-9}$
b_4	$3,96546 \cdot 10^{-8}$	$-9,1659 \cdot 10^{-10}$	$9,99632 \cdot 10^{-12}$

Beispielrechnung:

dyn. Viskosität von reiner Saccharoselösung mit $w_{TS} = 75 \text{ g}/100 \text{ g}$ und 70°C :

$$a_0 = b_0 + b_1 \cdot w_{TS} + b_2 \cdot w_{TS}^2 + b_3 \cdot w_{TS}^3 + b_4 \cdot w_{TS}^4 = 2,504865$$

$$a_1 = b_0 + b_1 \cdot w_{TS} + b_2 \cdot w_{TS}^2 + b_3 \cdot w_{TS}^3 + b_4 \cdot w_{TS}^4 = -0,010637$$

$$a_2 = b_0 + b_1 \cdot w_{TS} + b_2 \cdot w_{TS}^2 + b_3 \cdot w_{TS}^3 + b_4 \cdot w_{TS}^4 = 2,036209 \cdot 10^{-5}$$

$$\mathbf{h} = \exp(\exp(a_0 + a_1 \cdot \mathbf{J} + a_2 \cdot \mathbf{J}^2)) = 616,46 \cdot \text{mPoise} \hat{=} 61,646 \cdot \text{mPas}$$

SCHEIDER et al.; $75\% \leq w_{TS} \leq 86\%$; $40^\circ\text{C} \leq t \leq 80^\circ\text{C}$; (Viskosität in mPas)

$$\mathbf{h} = \exp(\exp(a_0 + a_1 \cdot w_{TS} + a_2 \cdot w_{TS}^2)) \quad (3.5.7)$$

$$a_i = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3 \quad (3.5.7.1)$$

mit

	a_0	a_1	a_2
b_0	17,3192	-0,396637	$2,66618 \cdot 10^{-3}$
b_1	-0,549808	$1,18161 \cdot 10^{-2}$	$-6,46174 \cdot 10^{-5}$
b_2	$5,52061 \cdot 10^{-3}$	$-1,06095 \cdot 10^{-4}$	$4,76275 \cdot 10^{-7}$
b_3	$-1,51025 \cdot 10^{-5}$	$1,75733 \cdot 10^{-7}$	$1,11668 \cdot 10^{-10}$

Beispielrechnung:

dyn. Viskosität von reiner Saccharoselösung mit $w_{TS} = 75 \text{ g/100 g}$ und 70 °C :

$$a_0 = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3 = 0,70347$$

$$a_1 = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3 = -0,0291$$

$$a_2 = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3 = 5,15012 \cdot 10^{-4}$$

$$h = \exp\left(\exp\left(a_0 + a_1 \cdot w_{TS} + a_2 \cdot w_{TS}^2\right)\right) = 62,102 \cdot \text{mPas}$$

Von GENOTELLE²³ wurde der folgende Berechnungsansatz für technische Saccharoselösungen, für Temperaturen von 40 bis 80 °C aus verschiedenen Literaturwerten abgeleitet:

$$\log h = 22,46 \cdot d - 0,114 + c \cdot \left(1,1 + 43,1 \cdot a \cdot d^{1,25}\right) \quad (3.5.8)$$

$$a = 0,85 + 0,15 \frac{q}{100} \quad (3.5.8.1)$$

$$b = w_{DS} \cdot \left[k + (1-k) \frac{q}{100} \right] \quad (3.5.8.2)$$

$$c = \frac{30-t}{91-t} \quad (3.5.8.3)$$

²³ Genotelle, J.: Ind. Alim. Agric. 95 (1978) 747-755

$$d = \frac{b}{1900 - 18 \cdot b} \quad (3.5.8.4)$$

Der Parameter k ist abhängig vom Nichtsaccharoseanteil und wird gleichgesetzt mit 0,962. Die Berechnung der Viskositätswerte für Temperaturen unter 40 °C und über 80 °C sind dabei aufgrund der Extrapolation weniger genau.

Beispielrechnung:

dynamische Viskosität von technischer Saccharoselösung mit $w_{TS} = 75$ g/100 g, 90 % Reinheit und 70 °C:

$$a = 0,985$$

$$b = 74,715$$

$$c = -0,248$$

$$d = 0,135$$

$$h = 10^{(22,46 \cdot d - 0,114 + c \cdot (1,1 + 43,1 \cdot a \cdot d^{1,25}))} = 59,672 \cdot mPas$$

Meßdaten von Saccharoselösungen oberhalb 84 °C konnten aus der Literatur nicht recherchiert werden.

Im Zuckerfabrikationsprozess aber liegen die Saccharoselösungen mit Temperaturen deutlich über 80 °C vor. Zum Beispiel beim Verdampfungsprozess mit Temperaturen von 96°C (Stufe 6B) bis 130°C (Stufe 1), Tabelle 4.

Dünnsaft mit einem Trockensubstanzgehalt von 17 g/100 g durchströmt zunächst die als Vorverdampfer geschalteten Stufen 5 und 6A und dann die Stufen 1 bis 6B. Die Konzentrierung des Saftes auf einen Trockensubstanzgehalt von 75 g/100 g wird dabei bis zum Dicksaft erreicht.

Tabelle 4 **Temperaturschema einer sechsstufigen Verdampfanlage²⁴**

Stufe	Heizdampf Temperatur	Siedetemperatur
	in °C	in °C
1	136,9	130,4
2	129,3	125,1
3	123,7	117,8
4	116,0	105,1
5	105,5	103,0
6A	102,1	99,4
6B	102,1	94,9

Aufgrund der bisher verwendeten Meßtechnik war es nicht, möglich bei originären Prozeßbedingungen zu messen.

In Meßsystemen mit Normaldruck führten hohe Temperaturen zur Konzentrationserhöhung der Lösung infolge Verdunstung oder Verdampfung. Die exakte Viskositätsbestimmung bei definierter Konzentration wurde damit unmöglich.

Der begrenzte Temperaturbereich der bisherigen empirischen Gleichungen ist ein maßgeblicher Nachteil.

Fluiddynamischen Stoffkennwerte des relevanten Temperaturbereichs konnten nur durch Extrapolation der vorhandenen Meßwerte erhalten werden.

Die erhaltenen Stoffwerte sind daher im Extrapolationsbereich mit entsprechender Unsicherheit behaftet.

Saccharoselösungen wurden bisher auch bei sehr hohen Konzentrationen und niedrigen Temperaturen als Newtonsche Medien angesehen. Umfangreiches Material zu dieser Aussage veröffentlichen SCHNEIDER, SCHLIEPHAKE, KLIMMEK.²⁵

²⁴ Schmidt, T.: Energetische Untersuchungen von Energieanwendungsprozessen bei der Zuckergewinnung im Werk Zeitz unter Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 1995

CHRISTOPH und SENGE²⁶ geben im Gegensatz dazu für Dicksaft Abhängigkeiten der Viskosität von der Schergeschwindigkeit an, die sich aus der Viskositätsbestimmung in zwei unterschiedlichen Schergeschwindigkeitsbereichen ergibt.

3.6 Oberflächenspannung von Saccharoselösungen

Im Zuckerfabrikationsprozeß stellt das Oberflächenspannungsverhalten von Saccharoselösungen eine wichtige Ergänzung der fluiddynamischen Kennwerte dar.

Eine zentrale Bedeutung der Oberflächenspannung ergibt sich bei der Problematik der Mehrphasenströmung und der Benetzung der Heizflächen in Filmverdampfungsapparaten bei Siede- und Verdampfungsprozessen.

Die Benetzung der Heizflächen wird maßgeblich durch die Oberflächenspannungseigenschaften der Lösung bestimmt.

Zur Vermeidung der Entnetzung der Rohroberflächen bei Rieselfilmströmung wird eine Mindestflüssigkeitsbelastung $\Gamma_{Fl} = 0,1 \dots 1 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ empfohlen.²⁷ Die kleineren Werte gelten für dünnflüssige und die größeren Werte für hochviskose Lösungen.

Für genauere Berechnungen sollte die Mindestflüssigkeitsbelastung nach KOGAN bestimmt werden:²⁷

$$\Gamma_{Fl} = 0,6214 \cdot h^{0,1625} \cdot s^{0,625} \cdot r^{0,208} \quad [\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})] \quad (3.6.1)$$

²⁵ Schneider, F.; Schliephake, D.; Klimmek, A.: Über die Viskosität von reinen Saccharoselösungen. Zucker 16 (1963) 465-473

²⁶ Christoph, D.; Senge, B.: Fließeigenschaften von reinen und technischen Saccharoselösungen im Temperaturbereich von 30 bis 130°C; Bericht über die 5. Tagung für Lebensmittelrheologie. Granum-Verlag, Detmold 1997

²⁷ Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden Teil 1 Wärmeübertrager. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1980, S. 162

Ebenso geht die Oberflächenspannung in die Berechnung der kritischen Benetzung ein. Für Filmströmung in Fallfilmverdampfapparaten wurden die folgenden Gleichungen, ebenfalls nach KOGAN verwendet:

$$B_{krit} = \frac{29,2}{\text{Re}_{Fl}^{0,75}} \quad \text{für} \quad \text{Re}_{fl} < \frac{85 \cdot r_{Fl}^2}{h_{Fl}^2} \cdot 10^{-11} \quad (3.6.2.1)$$

$$B_{krit} = \frac{h_{Fl}}{r_{Fl} \cdot \text{Re}_{Fl}^{0,25}} \cdot 10^6 \quad \text{für} \quad \frac{85 \cdot r_{Fl}^2}{h_{Fl}^2} \cdot 10^{-11} < \text{Re}_{Fl} < \frac{282 \cdot r_{Fl}}{h_{Fl}} \cdot 10^{-5} \quad (3.6.2.2)$$

$$B_{krit} = \frac{432 \cdot h_{Fl}^{1,25}}{\text{Re}_{Fl}^{1,25}} \cdot 10^4 \quad \text{für} \quad \text{Re}_{Fl} > \frac{282 \cdot r_{Fl}}{h_{Fl}} \cdot 10^{-5} \quad (3.6.2.3)$$

$$\text{Re}_{Fl} = \frac{4 \cdot \Gamma_{Fl}}{h_{Fl}} \quad (3.6.3)$$

$$B = \frac{v_v \cdot h_{Fl}}{s} \quad (3.6.4)$$

$B < B_{krit}$: Bereich 1; Der Flüssigkeitsanteil im Dampfstrom ist gering (Ringströmung). Es liegt ein relativ kleiner Druckverlust und eine hohe Intensität des Wärmeüberganges vor.

$B > B_{krit}$: Bereich 2; Der Flüssigkeitsanteil in der Dampfströmung ist hoch (Spritzerströmung). Es besteht die Gefahr, daß der Flüssigkeitsfilm gänzlich aufreißt.

Die optimale Benetzung der Heizfläche führt zu einer Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten α_2 und damit des Wärmedurchgangskoeffizienten k .

Daraus resultiert eine höhere Wasserverdampfungsleistung, die eine Senkung der notwendigen Heizfläche und damit der Investitionskosten erlaubt. Die Reduzierung der Aufenthaltszeit des Saftes ist dabei ebenfalls von technologischem Vorteil.

Für die Dampfblasenkeimbildung ist die Oberflächenspannung der Lösung ebenso von Bedeutung²⁸.

Außerdem besitzt die Grenzflächenspannung einen entscheidenden Einfluß auf verfahrenstechnische Prozesse, wie die Kristallisation und Lösung von Kristallen, die Zerstäubung, Sprühtrocknung, Emulgierung und das Benetzungs- und Reinigungsverhalten.

Die ICUMSA empfahl, aufgrund der verfahrenstechnischen Bedeutung 1998 auf der 22. Tagung in Berlin die Bestimmung der Oberflächenspannungen von Saccharoselösungen, Melassen und Einzugsgütern.

Bisher sind Oberflächenspannungen nur von reinen Saccharoselösungen in der Literatur²⁹ dargestellt.

Diese Werte wurden berechnet unter Zuhilfenahme der bekannten Oberflächenspannungen des Wassers und der von HIRSCHMÜLLER³⁰ angegebenen Oberflächenspannungen von Saccharose-Wasser-Lösungen bei einer Temperatur von 21°C und Konzentrationen bis zu 62,7 g/ 100 g.

Für die Abhängigkeit von der Saccharosekonzentration gab SMOLENSKI die folgende empirische Gleichung zur Berechnung der Oberflächenspannung von reinen Saccharoselösungen an³¹:

$$s = s_{H_2O} + 0,089 \cdot c \quad [N/m] \quad (3.6.2)$$

In die Gleichung muß allerdings auch der Tabellenwert für Wasser bei gleicher Temperatur zusätzlich zur Konzentration c eingesetzt werden.

Oberflächenspannungen von technischen Saccharoselösungen, wie Dicksaft und Zuckerhausprodukten sind in der Literatur nicht verfügbar.

²⁸ Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. VDI Verlag 1991; S. Ha 2

²⁹ Baloh, T.: Wärmeatlas für die Zuckerindustrie. Verlag M. & H. Schaper, Hannover 1975

³⁰ Hirschmüller, H.: Principles of Sugar Technology. Hrsg.: P. Honig Bd. 1, Amsterdam 1953, 20

³¹ Werner, E.: Zuckertechniker-Taschenbuch. Verlag Dr. Albert Bartens, 1956, S.62/63

Ansatzweise wurden von SCHOENECK und WANNINGER³² technische Saccharoselösungen untersucht. Sie lösten Zucker 1 und Zucker 2 in Wasser und bestimmten bei 20 bis 50 °C ohne weitere Reinigung der Lösung deren Oberflächenspannung.

³² Schoeneck, H.; Wanninger, W.: Die Oberflächenspannung von wässrigen Saccharoselösungen. Zucker 18 (1965), 477-480

4. Material und Methodik

4.1 Material

4.1.1 Reine Saccharoselösung

Die Herstellung reiner Saccharoselösungen erfolgte gravimetrisch aus Raffinade und doppelt destilliertem Wasser. Die verwendete Raffinade der Zuckerfabrik Baddeckenstedt enthielt 0,00176 % Leitfähigkeitsasche, bestimmt nach der ICUMSA-Methode.

Die Lösevorgänge zum Einstellen des benötigten Trockensubstanzgehalts wurden teilweise durch Temperaturerhöhung der Probe begünstigt. Die Temperierung erfolgte im Wasserbad in einer luftdicht verschlossenen Probenflasche, um Verdunstung auszuschließen. Anschließend wurde die Konzentration am Refraktometer überprüft.

4.1.2 Technische Saccharoselösung - Dicksaft

Untersucht wurden Dicksäfte aus den Rübenzuckerfabriken Zeitz, Baddeckenstedt, Anklam, Offenau und Belkas (Ägypten), sowie Rohrdicksäfte aus Gledhow (Südafrika).

Nachfolgend sind in Tabelle 5 die Analysedaten einiger untersuchter Dicksäfte tabellarisch angegeben:

Tabelle 5 Analysedaten der untersuchten Dicksäfte

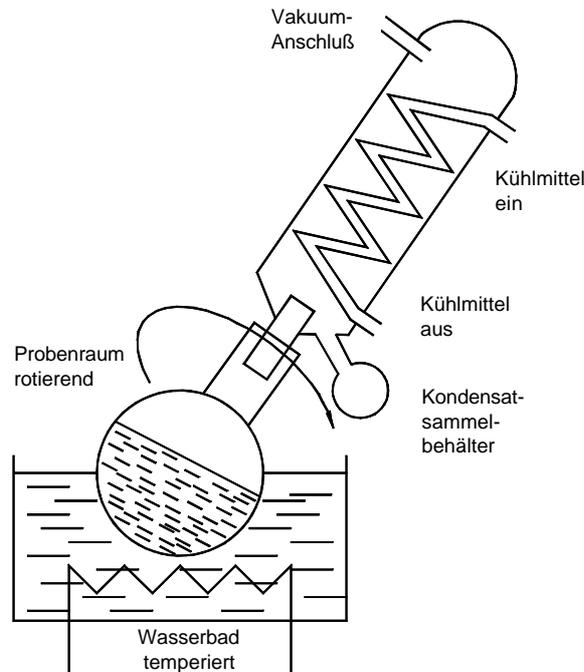
Probe	w _s °S	w _{rs} g/100 g	q %	pH	Glucose enzym. g/100g	Fructose enzym. g/100g	Leitfähig- keitsasche %	ges. Härte als CaO g/100g	F (420) IE	F (560) IE
Dicksaft Belkas (Ägypten)	63,85	71,8	88,93	8,05	0,1262	0,0833	2,73	0,075	7156,67	1257,25
Dicksaft Zeitz (1) Konzentrat (09.06.97)	66,49	71,9	92,48	8,85	0,0302	0,0217	1,435	0,055	3143,95	512,53
Dicksaft Zeitz (2) Tank (09.06.97)	62,62	66,9	93,60	9,11	0,0309	0,0247	1,736	0,05	2593,43	355,15
Dicksaft Zeitz (3) Konzentrat (25.06.98)	64,82	69,0	93,94	9,13	0,0254	0,0155	1,43	0,035	4170,20	747,58
Dicksaft Zeitz (4) Tank (25.06.98)	61,63	66,2	93,10	9,25	0,0332	0,0185	1,35	0,038	3258,28	555,68

Die Verdünnung der Säfte erfolgte mit doppelt destilliertem Wasser und wurde anschließend refraktometrisch überprüft.

Zum Erhöhen der Konzentration stand ein Laborvakuumverdampfapparat zur Verfügung (Apparateskizze siehe Abbildung 6).

Mit dieser Apparatur konnten die Proben thermisch schonend, bei etwa 50 °C, eingengt werden.

Abbildung 6 Skizze Laborvakuumverdampfapparat



Die Reinheit der Dicksäfte wurde für die Untersuchungen nicht verändert. Die Untersuchungsergebnisse repräsentieren damit die standortabhängigen Unterschiede, bedingt durch Anbaugesicht der Rüben und Arbeit der Extraktion, Saftreinigung und Verdampfstation.

4.1.3 Technische Saccharoselösung - Melasse

Die untersuchten Melassen stammen aus den Rübenzuckerfabriken Zeitz, Baddeckenstedt und Belkas (Ägypten), sowie aus sudanesischen und südafrikanischen Rohrzuckerfabriken. Die Analysedaten enthält die Tabelle 6.

Die Einstellung des Trockensubstanzgehalts erfolgte wie beim Dicksaft mit destilliertem Wasser bzw. durch Verdampfung. Zusätzlich wurde bei einigen Proben durch Zugabe von Raffinade die Reinheit definiert eingestellt. Dieses sollte einen Vergleich der Viskositätswerte mit denen der Zuckerhauszwischenprodukte gestatten.

Tabelle 6 **Analysedaten der untersuchten Melassen**

Probe	w _S °S	w _{RS} g/100 g	q %	pH	Glucose enzym. g/100g	Fructose enzym. g/100g	Leitfähig- keitsasche %	ges. Härte als CaO g/100g	F (420) IE	F (560) IE
Melasse Zeitz (12.03.97)	45,20	79,9	56,57	7,70	0,0134	0,0478	10,56	0,321		
Melasse Baddeckenstedt (12.03.97)	48,00	81,4	58,97	8,15	0,0085	0,0366	10,02	0,318		
Melasse Belkas (1) April 97	44,94	74,3	60,48	6,25	0,1981	0,3043	10,07	0,225	156888,88	30222,22
Melasse Belkas (2) April 97	50,20	85,8	58,51	7,93	0,0055	0,0053	12,22	0,345	82843,71	17156,29
Melasse Zeitz (09.06.97)	48,46	85,2	56,88	8,21	0,00645	0,0051	11,31	0,315	79711,75	15299,34
Mel Südafrika Maidstone (24.11.95) untersucht am 30.9.97	38,02	80,2	47,41	5,79	3,986	3,844	9,69	1,83	138800,00	29800,00
Melasse Baddeckenstedt (23.10.97)	51,27	85,4	60,04	8,25	0,0122	0,0518	10,86	0,21	47479,78	9707,53
Melasse Rohr Sudan (1) 1997	40,63	76,8	52,90	5,59	2,981	1,917	8,071	1,73	162833,33	31833,33
Melasse Rohr Sudan (2) 1997	29,20	78,8	37,06	5,39	11,153	7,158	6,03	1,32	188750,40	30500,30
Melasse Südafrika Maidstone 16.2.98	26,42	83,5	31,64	5,14	3,665	5,762	13,39	1,08	272666,66	42000,00

4.1.4 Zuckerhauszwischenprodukte - Einzugsgüter, Abläufe

Ziel der Untersuchungen der Einzugsgüter und Abläufe war es, die Viskositätsdaten der originalen Zuckerhauszwischenprodukte mit den Meßwerten der rückverdünnten Melassen vergleichen zu können.

Die Meßproben wurden größtenteils auf definierte Trockensubstanzgehalte eingestellt, ohne die Reinheit zu verändern. Einige Proben wurden auch im unveränderten Originalzustand untersucht.

Die folgenden Einzugsgüter und Abläufe wurden untersucht (Tabelle 7).

Tabelle 7 **Analysedaten der untersuchten Zuckerhauszwischenprodukte**

Probe	w _S °S	w _{RS} g/100 g	q %	pH	Glucose enzym. g/100g	Fructose enzym. g/100g	Leitfähig- keitsasche %	ges. Härte als CaO g/100g	F (420) IE	F (560) IE
EGNP Zeitz 9.6.97	59,51	75,0	79,35	8,70	0,024	0,0247	4,76	0,14	25068,31	4815,60
EGRZ Zeitz 9.6.97	66,00	73,0	90,41	8,54	0,0274	0,0212	2,11	0,13	7407,76	1434,40
EGWZ2 Zeitz 9.6.97	69,70	73,0	95,48	8,60	0,0273	0,0198	0,86	0,05	2210,27	383,54
RZ GAbI Zeitz 9.6.97	65,38	81,5	80,22	8,60	0,0669	0,0638	4,92	0,13	18855,22	3367,00
WZ2 GAbI Zeitz 9.6.97	70,37	77,6	90,68	8,55	0,0497	0,0407	2,29	0,08	6788,44	1035,99
NP GAbI Zeitz 9.6.97	65,60	80,3	81,80	8,51	0,0538	0,0505	4,59	0,15	20818,14	3807,21
EGNP Baddeckenstedt 24.10.97	64,60	82,8	78,02	8,59	0,0747	0,0106	5,545	0,09	16042,51	2985,82

4.2 Methoden

Für die Untersuchung der rheologischen Eigenschaften, der Viskosität und des Fließverhaltens, der Saccharoselösungen standen folgende Meßgeräte der Firma Physica Meßtechnik GmbH Stuttgart zur Verfügung:

- Rheometersystem MC 120 mit adaptierter DRUCKMESSZELLE (DMZ KL)
- Rheometersystem UDS 200 (Luftlagerreometer).

Die Bestimmung der Oberflächenspannung der Saccharoselösungen erfolgte mit dem

- Tropfenkonturanalysesystem DSA 10 der Firma Krüss GmbH Hamburg.

4.2.1 Rheometersystem MC 120 mit adaptierter DRUCKMESSZELLE (DMZ KL)

Dieses Meßgerät besteht aus dem Rheometersystem Rheolab MC 120 der Firma Physica Meßtechnik GmbH Stuttgart, ausgestattet mit einer von der Paar-Physica Meßtechnik GmbH Radeburg modifiziert gefertigten Druckmeßzelle. Die Druckmeßzelle kann mit einer Füllmenge von 145 ml im Druckbereich von 0 bis 64 bar betrieben werden.

Als Meßsystem dient ein konzentrischer Zylinder in dem ein doppeltgelagerter Meßkörper rotiert. Der Antrieb des Meßkörpers erfolgt mit einem Meßmotor-Drehgebersystem ohne Getriebe. Der Meßabgriff erfolgt über eine Seltenerde-Magnetkupplung, die 50 mNm Drehmoment überträgt.

Das Meßmedium befindet sich in einem Doppelspalt zwischen dem feststehenden Zylindereinsatz und dem zylindrischen Teil der verschraubten Druckplatte, in der sich auch das obere Lager des Meßkörpers befindet. Das untere Lager befindet sich im Boden des Zylinders. Der Aufbau der DMZ KL ist in Abbildung 7 dargestellt.

Bei vorgegebener Schergeschwindigkeit wird das aus dem Fließwiderstand der Meßsubstanz auf den Meßkörper wirkende Bremsmoment (=Drehmoment, Schubspannung) gemessen. Die Temperaturmessung erfolgt direkt im Meßmedium mit einem Pt 100 Meßfühler. Die Druckmeßzelle ist im stationären Betrieb mit konstanter Meßsubstanz und als

Prozeßviskosimeter mit kontinuierlichem Lösungszufluß einsetzbar. Über den Druckanschluß der Meßzelle wird im stationären Betrieb durch Zufuhr von reinem Stickstoff der Umgebungsdruck der Meßlösung auf 4 bar eingestellt, um mit Sicherheit über dem Dampfdruck der Lösung ($130\text{ °C} \hat{=} 2,7\text{ bar}$) zu liegen. In Abhängigkeit vom Viskositätsbereich stehen ein kleiner (DMZ KL) und ein großer Meßkörper (DMZ GR) zur Verfügung:

Meßsystem	DMZ KL	DMZ GR
Viskositätsbereich Pas	0,002 - 10	0,02 - 100

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde auf Grund des zu vermessenden Viskositätsbereiches ausschließlich das Meßsystem DMZ KL verwendet. Die Daten des Meßsystems DMZ KL enthält die Tabelle 8.

Abbildung 7 Aufbau des Meßsystems DMZ KL

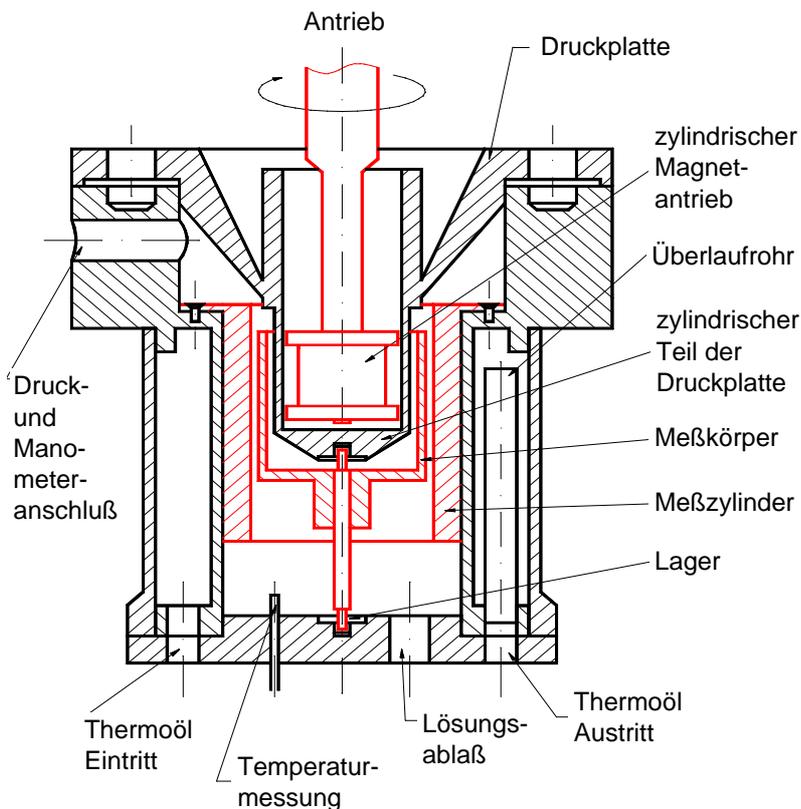


Tabelle 8 **Daten des Meßsystems DMZ KL**

Schergeschwindigkeitsbereich	1/s	0 ... 1000
Schubspannungsbereich	Pa	0 ... 140
Viskositätsbereich	Pas	0,002 ... 10
Füllmenge	ml	145
Schergeschwindigkeitsfaktor	min/s	5,039
Radius Meßzylinder	mm	23,5
Außenradius Meßkörper	mm	23,0
Innenradius Meßkörper	mm	20,0
Meßspalt	mm	2 · 0,5 (Doppelspalt)
Betriebsdruck max.	bar	64
Temperatur max.	°C	150
maximales Drehmoment	mNm	50

Das Meßsystem DRUCKMESSZELLE (DMZ KL) wurde für die Untersuchungen der Saccharoselösungen mit $60 \leq w_{TS} \leq 85$ g/100 g bis zu Temperaturen von 130 °C verwendet. Die Temperierung erfolgte für die meisten Meßungen ausgehend von 30 °C mit $\Delta t = 10$ K aufwärts bis 130 °C. Einige Dicksäfte wurden erst ab 80 °C untersucht.

Aufgrund der hohen Viskositäten von Melassen mit hoher Konzentration konnten diese teilweise erst ab Temperaturen von 40 °C beginnend untersucht werden, da das übertragbare Drehmoment der Magnetkupplung von 50 mNm nicht ausreichte den Meßkörper bei 30 °C in Rotation zu versetzen.

Unterhalb einem Drehmoment von $5 \frac{\%}{\%o}$ treten Meßfehler auf.

Die Messungen mit dem Meßsystem DRUCKMESSZELLE (DMZ KL) erfolgten für reine Saccharoselösungen und Dicksäfte mit linear zunehmenden Schergeschwindigkeiten von 200 bis 500 s^{-1} im Temperaturbereich 30 - 70 °C und mit 500 bis 1000 s^{-1} ab 80 °C.

Für Melassen und Zuckerhauszwischenprodukte mußten aufgrund der höheren Viskosität und des begrenzt übertragbaren Drehmoments die in Tabelle 9 angegebenen Schergeschwindigkeiten verwendet werden.

Tabelle 9 **verwendete Schergeschwindigkeiten für Melasse und Zuckerhauszwischenprodukte**

verwendete Schergeschwindigkeiten in 1/s					
Temperatur	Trockensubstanzgehalt				
	85g/100g	80g/100g	75g/100g	70g/100g	65g/100g
ab 30°C		20 - 30	50 - 100	50 - 100	200 - 500
ab 40°C	10 - 20	50 - 100	100 - 150	100 - 150	
ab 50°C	20 - 50	100 - 150	200 - 300	200 - 300	
ab 60°C	100 - 130	200 - 300	200 - 500	200 - 500	
ab 70°C	150 - 200	200 - 500			
ab 80°C	200 - 400	500 - 1000	500 - 1000	500 - 1000	500 - 1000
ab 90°C	500 - 1000				

In den angegebenen Schergeschwindigkeitsbereichen wurden jeweils 15 Meßwerte zur Viskosität bei linearer Schergeschwindigkeitserhöhung ermittelt.

Die Messungen am Rheometersystem „Druckmeßzelle“ erfolgte mit jeweils zwei Wiederholungsmessungen.

4.2.2 Rheometersystem UDS 200

Mit dem Rheometersystem UDS 200 können die Fließeigenschaften der Meßsubstanzen in einer offenen Meßzelle bestimmt werden.

Zur Meßwellenlagerung wurde ein technisch sehr aufwendiges Luftlager verwendet, mit dem die Lagerreibung auf ein Minimum reduziert wird. Bei diesen kombinierten Radial/Axial-Lagern dient Druckluft zur „Schmierung“ zwischen der Rotorachse und dem Lagergehäuse. Dadurch können noch signifikante Meßwerte mit einem solchen Rheometer erzielt werden, auch wenn niedrigviskose Flüssigkeiten bei gleichzeitiger Wahl von kleinsten Schubspannungsvorgaben rheologisch untersucht werden sollen. Demzufolge sind mit diesem Rheometersystem UDS 200 sehr genaue Messungen möglich.

Die notwendige Druckluft wird durch einen separaten Kompressor bereitgestellt.

Drehmomente bis 150 mNm können vom Meßantrieb übertragen werden. In Abhängigkeit vom Viskositätsbereich stehen die Zylinder-Meßsysteme Z1 DIN bis Z5 DIN zur Verfügung.

Für die Untersuchung der Saccharoselösungen sind die Zylinder-Meßsysteme Z1 DIN und Z2 DIN am besten geeignet. In wenigen Fällen wird das Meßsystem Z3 DIN verwendet.

Die Daten dieser Meßsysteme enthält Tabelle 10 im Abschnitt 4.2.3.

Die Saccharoselösungen mit $60 \leq w_{TS} \leq 85$ g/100 g wurden mit diesem Meßsystem bei den Temperaturen 70, 60, 50, 40, 30, 20, 15, 10 und 5 °C vermessen. Die Temperierung erfolgte von 70 °C ausgehend durch Abkühlen. Nach der Messung bei 50 °C wurden die Meßproben ausgetauscht, um Verfälschungen der nachfolgenden Meßwerte durch Konzentrationserhöhung der Probe, bedingt durch das offene Meßsystem und der damit verbundenen Wasserverdunstung, auszuschließen.

Im Übersättigungsbereich der Saccharoselösungen sind Verfälschungen der Viskositätsmeßergebnisse aufgrund von Kristallkeimen nicht auszuschließen. Die Messungen wurden in diesen Fällen auch bis 5 °C fortgeführt, solange nicht augenscheinlich Kristalle in der Meßlösung festgestellt wurden. Zur Ableitung von empirischen Näherungsgleichungen der Viskosität unter Vernachlässigung des relativ geringen Einflusses der Schergeschwindigkeit erfolgten die Messungen mit linear abnehmender Schergeschwindigkeit von 500 bis 5 s^{-1} . Dabei wurden im Schergeschwindigkeitsbereich jeweils 15 Meßwerte bestimmt. Bei hohen Viskositäten mußte die maximale Schergeschwindigkeit wegen des nicht ausreichenden Drehmoments des Meßantriebs reduziert werden.

Unterhalb der Schergeschwindigkeit von 5 s^{-1} wurden aufgrund des minimalen Drehmoments keine aussagefähigen Meßwerte erhalten.

Neben der Viskositätsbestimmung im niedrigen Temperaturbereich war hauptsächlich die Ermittlung des Deformationssystems Ziel der Untersuchungen mit diesem hochpräzisen Meßsystem, die Bestimmung der Abhängigkeit der Viskosität von der Deformationsgeschwindigkeit.

Diese Untersuchungen zum nicht-NEWTONSchen Verhalten erfolgten ausschließlich mit diesem Meßsystem, da es aufgrund des Luftlagers sehr genaue Meßwerte liefert.

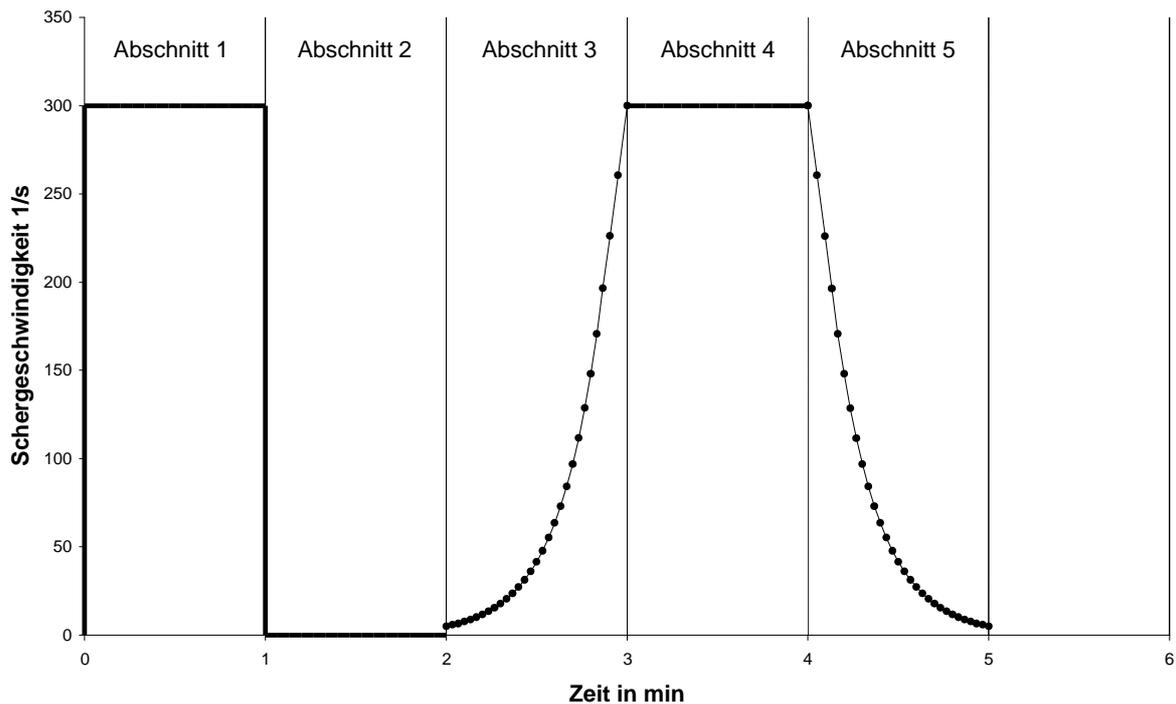
Folgender Meßablauf wurde für diese Untersuchungen an den Saccharoselösungen durchgeführt:

- Abschnitt 1: 1 min Vorscherung mit Schergeschwindigkeit 300 s^{-1}
- Abschnitt 2 1 min Ruhepause (Schergeschwindigkeit 0 s^{-1})

- Abschnitt 3 1 min logarithmische Erhöhung der Schergeschwindigkeit von 5 s^{-1} auf 300 s^{-1} (Hinlaufkurve)
- Abschnitt 4 1 min konstante Schergeschwindigkeit 300 s^{-1}
- Abschnitt 5 1 min logarithmische Verringerung der Schergeschwindigkeit von 300 s^{-1} auf 5 s^{-1} (Rücklaufkurve)

Die jeweils 30 Meßpunkte der Abschnitte 3 und 5 wurden für die Auswertungen zum nicht-NEWTONSchen Verhalten verwendet. Zur Veranschaulichung ist der gesamte Meßablauf in Abbildung 8 dargestellt.

Abbildung 8 Meßablauf zur Bestimmung des nicht-NEWTONSchen Verhaltens am Rheometersystem UDS 200



Alle Untersuchungen am Rheometersystem UDS 200 zur Viskosität erfolgten mit jeweils einer Wiederholungsmessung.

4.2.3 Zylinder-Meßsysteme

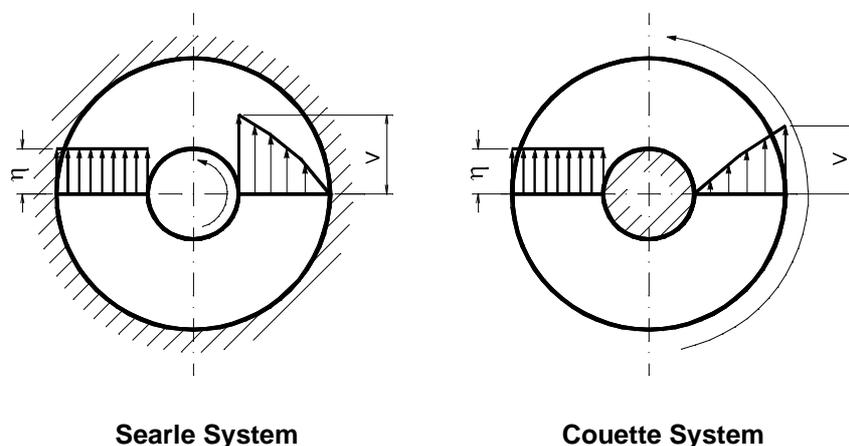
Zum Einsatz kamen bei Messungen mit dem UDS 200 die Zylinder-Meßsysteme Z1 DIN, Z2 DIN und Z3 DIN.

Tabelle 10 enthält die spezifischen Daten dieser verwendeten koaxialen Zylinder-Meßsysteme.

Beim Meßsystem Z1 DIN handelt es sich um ein Doppelspalt-System (nach DIN 54 453, siehe Abbildung 10). Dieses System ist besonders gut für niedrig viskose Medien geeignet und wurde daher für Saccharoselösungen niedriger Konzentration und hoher Temperatur verwendet. Der Drehkörper ist glockenförmig. Die zu untersuchende Flüssigkeit umgibt den Drehkörper auf seiner Innen- und Außenseite. Die ringförmige Endfläche am unteren Rand des Drehkörpers ist sehr schmal und weit vom Boden des Meßbechers entfernt, so daß der Endflächeneinfluß auf das gemessene Drehmoment unbedeutend ist.

Die Meßbedingungen im äußeren Spalt dieser Meßeinrichtung entsprechen dem „Searle“-Prinzip, die im inneren Spalt dem „Couette“-Prinzip.

Abbildung 9 Schematische Darstellung von Geschwindigkeit und Viskosität in den Meßspalten von Searle- und Couette-Meßsystemen



Die Meßsysteme Z2 DIN und Z3 DIN arbeiten nach den Meßbedingungen des Searle-Prinzips und besitzen einen einfachen Meßspalt nach dem DIN-System (DIN 53 019, siehe Abbildung 10). Die Radienverhältnisse vom Innen- zum Außenzylinder, die Drehkörperlänge im Verhältnis zum Drehkörperradius und der Abstand zwischen der Kegelspitze am Drehkörper und dem Boden des Meßbechers sind standardisiert. Die Fehlerbeiträge durch die Nicht-Linearität des Geschwindigkeitsprofils quer zum Spalt und durch die Endflächeneinflüsse,

sowohl für kleine als auch große koaxiale Zylinder-Meßeinrichtungen, sind prozentual konstant und miteinander vergleichbar.

Diese Systeme wurden zur Messung der hochviskosen Medien, wie Dicksaft und Melasse hoher Konzentration und niedriger Temperatur verwendet.

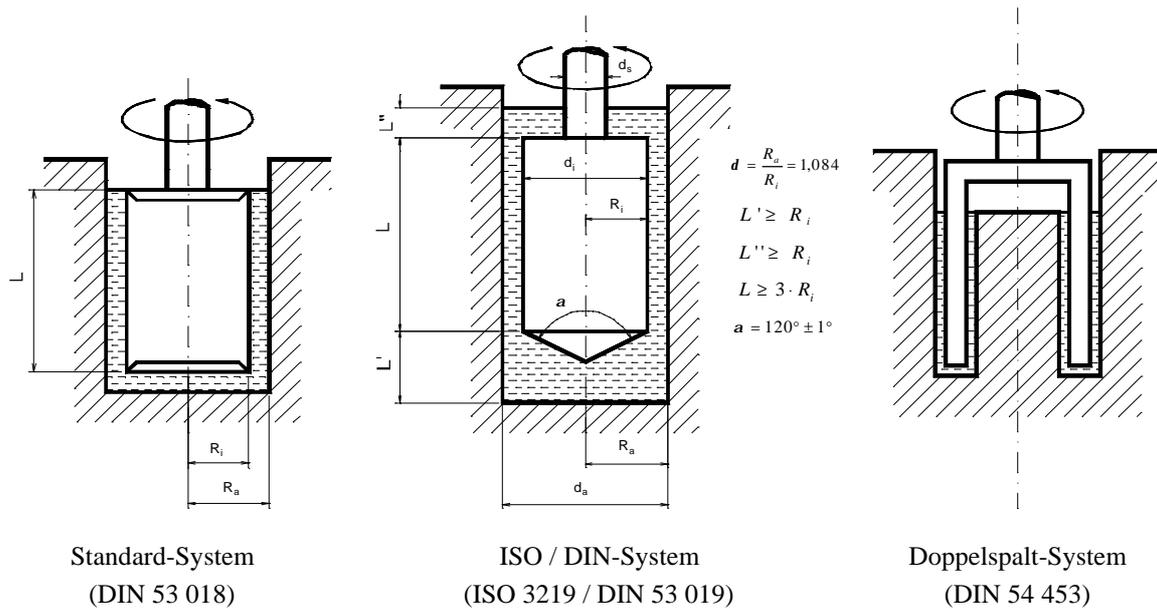
Tabelle 10 **Daten der verwendeten Meßsysteme am UDS 200**

Meßsystem		Z1 DIN	Z2 DIN	Z3 DIN
Schergeschwindigkeitsbereich	s ⁻¹	0 ... 4031	0 ... 1032	0 ... 1032
Schubspannungsbereich	Pa	0 ... 67	0 ... 195	0 ... 1141
Viskositätsbereich	Pas	0,001 ... 1,30	0,02 ... 15	0,118 ... 100
Füllmenge	ml	17	100	17
Schergeschwindigkeitsfaktor	min/s	5,039	1,291	1,291
Radius Meßzylinder	mm	24,0	24,4	13,56
Außenradius Meßkörper	mm	23,5	22,5	12,5
Innenradius Meßkörper	mm	22,75	-	-
Meßspalt	mm	2 · 0,5 (Doppelspalt)	1,9	1,06
maximales Drehmoment	mNm	150	150	150

Voraussetzungen bei der Verwendung dieser Meßsysteme zu rheologischen Messungen sind:

1. laminare, ebene Schichtenströmung
2. Wandhaftung des Fluides / der Probe $w(R) = 0$
3. Reproduzierbarkeit der Messung des verwendeten Scherspalt
4. Homogenität der Probe
5. maximale Partikelgröße ist 1/5 des Scherspalt

Abbildung 10 Koaxiale Zylinder-Meßsysteme



4.2.4 Berechnungsgleichungen

4.2.4.1 Berechnung des Geschwindigkeitsgefälles am Innenzylinder (Rotor)

$$\dot{g}_i = 2\Omega \frac{R_a^2}{R_a^2 - R_i^2} \quad (4.2.1)$$

$$\Omega = \frac{2p \cdot n}{60} \quad (4.2.2)$$

Das Geschwindigkeitsgefälle ist gleich der Rotordrehzahl n multipliziert mit einer Konstanten M , die vom Verhältnis der Radien R_a und R_i abhängt.

Durch Einführen des Radienverhältnisses:

$$d = \frac{R_a}{R_i} \quad (4.2.3)$$

führt dies zu:

$$\dot{g}_i = \left(\frac{1 + d^2}{d^2 - 1} \right) \cdot \Omega = M \cdot \Omega \quad (4.2.4)$$

4.2.4.2 Berechnung der Schubspannung t

Die Schubspannung wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$t_i = \frac{M_d}{2p \cdot L \cdot R_i^2 \cdot Cl} = \left(\frac{1}{2p \cdot L \cdot R_i^2 \cdot Cl} \right) \cdot M_d \quad (4.2.5)$$

$$t_i = A \cdot M_d \quad (4.2.6)$$

Folgendermaßen vereinfacht charakterisiert der „Schub“-Faktor A die Geometrie der Meßeinrichtung. Für eine bestimmte Meßeinrichtung ist der „Schub“-Faktor eine Konstante.

$$t_a = \frac{M_d}{2p \cdot L \cdot R_a^2 \cdot Cl} \quad (4.2.7)$$

$$t_r = \frac{M_d}{2p \cdot L \cdot r^2 \cdot Cl} \quad (4.2.8)$$

Cl ist ein Korrektur-Faktor für die Schubspannung, mit dem der Endflächeneinfluß eines Innenzylinders berücksichtigt wird. Seine Bestimmung bedingt die Kenntnis von τ_i und τ_r , wobei τ_a in den meisten Fällen von geringer Bedeutung ist.

4.2.4.3 Berechnung der Viskosität

Die Viskosität wird wie folgt berechnet:

$$h = \frac{M_d}{\Omega} \cdot \frac{A}{M} \quad [\text{Pas}] \quad (4.2.9)$$

mit $G = A/M$ vereinfacht sich die Gleichung wie folgt:

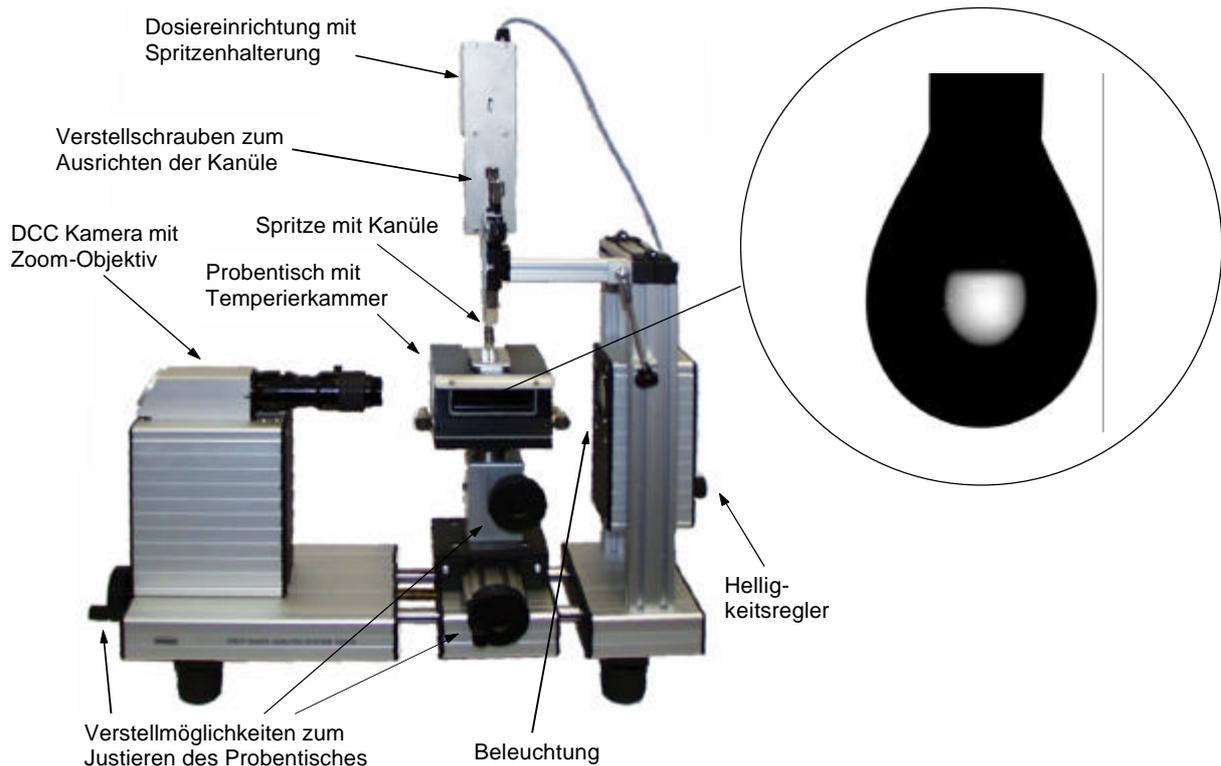
$$h = \frac{M_d}{\Omega} \cdot G \quad [\text{Pas}] \quad (4.2.10)$$

4.2.5 Tropfenkonturanalysesystem DSA 10

Für die Messungen der Grenzflächenspannung wurde das Kontaktwinkelmeßsystem DSA 10 der Firma Krüss GmbH Hamburg (Abbildung 11) genutzt.

Das Gerät ist flexibel zur Bestimmung von Kontaktwinkeln einsetzbar. Zusammen mit zusätzlicher Software kann es zur Bestimmung von Ober- und Grenzflächenspannungen verwendet werden. Meßprinzip ist die Bildanalyse der Tropfenkontur.

Abbildung 11 Aufbau des Kontaktwinkelmeßgerätes DSA 10 (konfiguriert zur Oberflächenspannungsmessung)



Die Bestimmung der Ober- und Grenzflächenspannung von Flüssigkeiten erfolgt aus der Konturanalyse eines an einer Kanüle hängenden Tropfens (Pedant Drop Method). Die den Tropfen umgebende Phase war bei den hier dargestellten Messungen mit Wasserdampf gesättigte Luft.

Die Überprüfung der Genauigkeit dieses Verfahrens durch die Messung der Oberflächenspannung von doppelt destilliertem Wasser lieferte um 0,45 % geringere Werte gegenüber den Angaben von Baloh³³. Dies entspricht etwa 0,3 mN/m.

³³ Baloh, T.: Wärmeatlas für die Zuckerindustrie. Verlag M. & H. Schaper, Hannover 1975

4.2.5.1 Theoretische Grundlagen der Tropfenkonturanalyse zur Ermittlung der Grenzflächenspannung / Oberflächenspannung

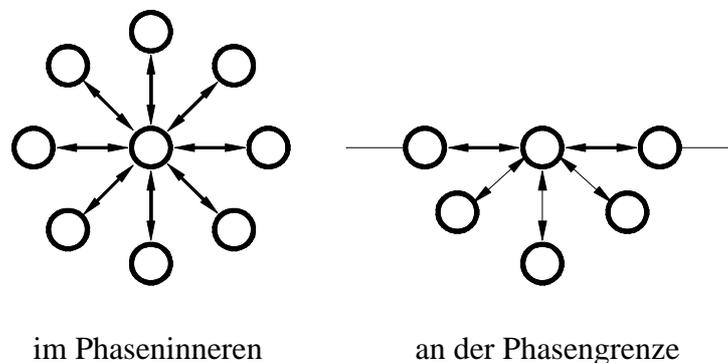
Die Grenzflächenspannung (auch Oberflächenspannung genannt) gibt die Arbeit an, die zur Bildung von 1 m² Grenzfläche benötigt wird.³⁴

$$W_s = \sigma \cdot \Delta S \quad \text{oder} \quad dW_s = \sigma \cdot dS \quad (4.2.11)$$

Die Grenzflächenspannung (*Oberflächenspannung*) beschreibt zahlenwertmäßig die Art und Größe der zwischenmolekularen Wechselwirkungen an der Phasengrenzfläche. Sie wird auch als *spezifische freie Grenzflächenenergie* bezeichnet.³⁵

Die *freie Grenzflächenenergie* resultiert aus den unkompensierten Kräften der Moleküle oder Teilchen an der Phasengrenzfläche. Wechselwirkungen zwischen gleichartigen Molekülen sind hier nur mit Molekülen in der Oberflächenschicht und der Volumenphase möglich. Bei Flüssigkeiten entspricht die *freie Grenzflächenenergie* der Arbeit, die notwendig ist, um ein Molekül aus dem Inneren der Flüssigkeit an die Phasengrenze zu transportieren.

Abbildung 12 Schema der Wechselwirkungskräfte zwischen Molekülen



Die *freie Grenzflächenenergie* kann als eine Kraft verstanden werden, die auf ein Molekül in der Phasengrenze wirkt.

³⁴ Grassmann, P.: Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik. Salle + Sauerländer (Otto Salle Verlag, Frankfurt am Main Berlin München; Verlag Sauerländer, Aarau Frankfurt am Main Salzburg) S. 350

³⁵ Tscheuschner, H.-D.: Lebensmitteltechnik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1986; S. 92

Einen wichtigen Einfluß auf den Anteil der *freien Grenzflächenenergie* hat neben der Temperatur die Oberflächengestalt (Krümmung). Konvexe Oberflächengestalten erhöhen und konkave Formen verringern den Anteil.

Der daraus entstehende Differenzdruck Δp zwischen den Phasen (auch *Kapillarer Krümmungsdruck* (p_s) genannt), der von der Grenzflächenspannung σ und dem Krümmungsradius r abhängig ist, gibt GRASSMANN³⁶ für eine kugelförmige, ganz von Flüssigkeit umschlossene Blase wie folgt an:

$$\Delta p = p_s = \frac{4 \cdot \sigma}{d} = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \quad (4.2.12)$$

Beispielrechnung für Wasser 100 °C und Blasenradius 0,1 mm:

$$\Delta p = \frac{2 \cdot 58,92 \cdot \frac{mN}{m}}{0,0001 \cdot m} = 1178,4 \cdot Pa$$

Dieser Differenzdruck muß zusätzlich durch den erhöhten Dampfdruck im Blasenkeim überwunden werden. Der Dampfdruck ist abhängig von der Überhitzung der Lösung ($\Delta p = f(\Delta T)$).

Bei ansteigender Überhitzung (ΔT) werden zunehmend Vertiefungen mit kleinerem Krümmungsradius r der Grenzfläche zur Flüssigkeit angeregt, so daß sich die Heizfläche allmählich mit aktiven Blasenkeimstellen bedeckt.

In analoger Weise nimmt die Anzahl aktiver Blasenkeimstellen auch mit wachsendem Siededruck zu, da die Oberflächenspannung σ abnimmt und die Steigung der Dampfdruckkurve (dp/dT) größer wird.³⁷

³⁶ Grassmann, P.: Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik. Salle + Sauerländer (Otto Salle Verlag, Frankfurt am Main Berlin München; Verlag Sauerländer, Aarau Frankfurt am Main Salzburg)

³⁷ Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. VDI Verlag 1991; S. Ha 1

4.2.5.2 Auswertungsmethodik der Tropfenkonturanalyse zur Bestimmung der Grenzflächenspannung

Für die Bestimmung der Oberflächenspannung durch die Tropfenkonturanalyse ist ein hängender, im hydromechanischen Gleichgewicht befindlicher Tropfen, die Voraussetzung. Aufgrund des Kräftegleichgewichts zwischen Gravitationskraft und kapillarem Krümmungsdruck nimmt der Tropfen eine charakteristische Form und Größe an.

Aus dieser charakteristischen Form und Größe wird durch die zusätzliche Software zum Kontaktwinkelmeßsystem DSA 10 der Firma Krüss GmbH die Oberflächenspannung bestimmt.³⁸

Der sich aus der Krümmung eines Oberflächenausschnitts der Tropfenkontur ergebende Differenzdruck wird aus den senkrecht aufeinander stehenden Krümmungsradien nach Gleichung (4.2.13) berechnet:

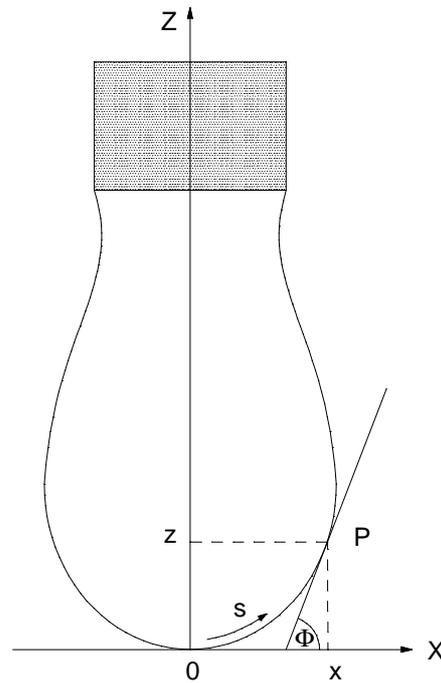
$$\Delta p = \sigma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.2.13)$$

Die Gleichung beschreibt den Unterschied zwischen dem Druck unter und über einem gekrümmten Oberflächenausschnitt eines Tropfens mit den Hauptkrümmungsradien r_1 und r_2 . Die Druckdifferenz Δp ist der Überdruck unter dem gekrümmten Flächenausschnitt.

Für einen in z- Richtung rotationssymmetrischen hängenden Tropfen ist ausgehend von Gleichung (4.2.13) eine analytische geometrische Beschreibung der Hauptkrümmungsradien notwendig. Die Tangente am Schnittpunkt der z- Achse mit dem Scheitelpunkt (Apex) des Tropfens bildet die x- Achse. Das Tropfenprofil ist durch Wertepaare (x,z) in der x,z- Ebene gegeben.

³⁸ Dokumentation Krüss GmbH Hamburg

Abbildung 13 Geometrie des hängenden Tropfens



Im hydromechanischen Gleichgewicht gilt die Beziehung

$$\Delta p_{apex} - \Delta p_p = z \cdot \Delta p \cdot g \quad (4.2.14)$$

Mit den Hauptkrümmungen k (Kehrwert der Hauptkrümmungsradien r) und der Gleichung (4.2.13) erhält man:

$$\Delta p_{apex} = \mathbf{s} \cdot (k_{apex,1} + k_{apex,2}) \quad (4.2.15)$$

$$\Delta p_p = \mathbf{s} \cdot (k_{p,1} + k_{p,2}) \quad (4.2.16)$$

Die Hauptkrümmungen am Scheitelpunkt sind aufgrund der Axialsymmetrie des Tropfens in allen Richtungen gleich (k_{apex}). Aus der Differentialgeometrie kennt man die analytischen Ausdrücke für die Krümmungen der Hauptnormalenschnitte am Punkt P (x, z):

$$k_{p,1} = \frac{d\Phi}{ds} = \left(\frac{d^2 z}{dx^2} \right) \cdot \left(1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right)^{-3/2} \quad (4.2.17)$$

$$k_{p,2} = \frac{\sin \Phi}{x} = \left(\frac{dz}{dx} \right) \cdot \frac{1}{x} \cdot \left(1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (4.2.18)$$

Aus den Gleichungen (4.2.13) bis (4.2.17) ergibt sich:

$$\frac{d\Phi}{ds} = 2 \cdot k_{apex} - \frac{z \cdot \Delta p \cdot g}{s} - \frac{\sin \Phi}{x} \quad (4.2.19)$$

Gleichung (4.2.20) beschreibt das Profil eines hängenden Tropfens im hydromechanischen Gleichgewicht. Zur Lösung der Gleichung wird sie in eine dimensionslose Form überführt. Dazu dienen folgende Definitionen:

$$X = \frac{x}{a}; \quad Z = \frac{z}{a}; \quad S = \frac{s}{a}; \quad B_F = \frac{1}{a \cdot k_{apex}}; \quad \text{mit: } a = \sqrt{\frac{s}{\Delta p \cdot g}} \quad (4.2.20)$$

Mit diesen Definitionen kann Gleichung (4.2.19) nach Substitution folgendermaßen beschrieben werden:

$$\frac{d\Phi}{dS} = \frac{2}{B_F} - Z - \frac{\sin \Phi}{X}; \quad \frac{dX}{dS} = \cos \Phi; \quad \frac{dZ}{dS} = \sin \Phi \quad (4.2.21)$$

Am Scheitelpunkt gelten die Randbedingungen $X = Z = S = \Phi = 0$. Daraus ergibt sich:

$$\frac{\sin \Phi}{X} = \frac{1}{B_F} \quad (4.2.22)$$

B_F ist der einzige Parameter, der die Form des Tropfenprofils bestimmt. Er wird deshalb Formparameter genannt. Weiterhin ergibt sich, daß die Grenzflächenspannung σ bei bekannter Dichtedifferenz $\Delta\rho$ berechnet werden kann, wenn das relative Größenverhältnis a eines gemessenen Tropfens zum entsprechenden theoretischen Tropfenprofil bestimmt wird.

Gleichung (4.2.21) wird zusammen mit den Randbedingungen aus Gleichung (4.2.22) als die Fundamentalgleichung eines hängenden Tropfens bezeichnet.

Durch Variation des Formparameters B_F können nach einem numerischen Integrationsverfahren theoretische Tropfenprofile berechnet werden. Wenn das theoretische Tropfenprofil gerade dem gemessenen Tropfenprofil entspricht, kann die Grenzflächenspannung berechnet werden. Das Problem der Bestimmung der Grenzflächenspannung besteht also darin, das richtige theoretische Tropfenprofil des gemessenen Tropfens exakt und schnell zu erfassen.

4.2.5.3 Meßdurchführung und Probenmaterial

Zur Messung wird die Probe in eine Spritze mit Kanüle gegeben. Die Spritze wird in die automatische Dosiereinrichtung gespannt, mit der sich der Kolben der Spritze fein dosiert bewegen läßt. Die Kanüle wird in der Temperierkammer direkt vor dem Objektiv der DCC Kamera positioniert.

Zur Vermeidung von Verdunstung oder Adsorption an der Tropfenoberfläche wird auch in die Temperierkammer etwas Probenmaterial gegeben, damit sich um den zu analysierenden Tropfen unter atmosphärischem Druck ein mit Wasserdampf gesättigter Raum ausbilden.

Die Temperatur in der Temperierkammer wird mit einem Pt 100 erfaßt und durch ein separates Digitaldisplay angezeigt.

Die Meßwertaufnahme erfolgt automatisch durch softwareseitige Auswertung des digitalisierten Tropfenbildes. Voraussetzung für die Auswertung ist die Eingabe des Kanüledurchmessers, der Gravitationskonstanten und der jeweiligen Dichtedifferenz zwischen Lösung und umgebender Phase.

Für die Untersuchungen wurden die Dichten der Saccharoselösungen der Literatur³⁹ entnommen. Die Gravitationskonstante wurde mit $9,8066 \text{ m/s}^2$ angegeben. Fehler dieser Werte gehen einfach proportional in die ermittelten Oberflächenspannungen ein.

Die Messung der Oberflächenspannung wurde an neu gebildeten Tropfen über einen Zeitraum von 5 min durchgeführt. Die Leistung der verwendeten Computertechnik gestattete dabei etwa alle 3 Sekunden einen Meßwertabgriff.

Im Temperaturbereich von 20 bis 90 °C wurden reine Saccharoselösungen, hergestellt aus Raffinade, sowie Dicksäfte und Melassen der Fabriken Zeitz und Baddeckenstedt untersucht. Durch Rückverdünnung mit doppelt destilliertem Wasser wurden die Dicksäfte mit einem Trockensubstanzgehalt von etwa 72 g/100 g und einer Reinheit von etwa 93 % auf Trockensubstanzgehalte von 10, 20, 30, 40, 50, 60 und 70 eingestellt. Die Konzentration von 75 g/100 g wurde durch Verdampfen der Lösung in einem Laborverdampfapparat hergestellt.

³⁹ Bubnik, Z.; Kadlec, P.; Urban, D.; Bruhns, M.: Sugar Technologists Manual. Verlag Dr. Albert Bartens 1995

Die Melassen mit einem Trockensubstanzgehalt von über 80 g/100 g und einer Reinheit von etwa 60 % wurden durch Rückverdünnung und Zugabe von Raffinade auf Trockensubstanzgehalte von 60, 70 und 80 g/100 g mit Reinheiten von 60, 70 und 80 % eingestellt. Die Oberflächenspannungsmessungen wurden jeweils zur Kontrolle einmal wiederholt.

5. Untersuchungsergebnisse zum fluiddynamischen Verhalten

5.1 Ableitung eines Modellansatzes zur Beschreibung des Viskositätsverhaltens von reiner und technischer Saccharoselösung

Die Meßwerte bei definierten Temperaturen, Trockensubstanzgehalten und Reinheiten wurden mit Hilfe der rheologischen Modelle von NEWTON und OSTWALD regressiert. Zur Ableitung empirischer Näherungsgleichungen der Viskosität in Abhängigkeit von Konzentration (Trockensubstanzgehalt) und Temperatur wurden die Lösungen vereinfachend als Newtonsche Medien betrachtet. Dies erscheint aus folgenden Gründen möglich:

- Die Viskositätsverringerng aufgrund der Scherung ist im allgemeinen relativ gering und nähert sich mit höheren Schergeschwindigkeiten dem Newtonschen Fließverhalten an.
- Im Fabrikationsprozeß unterliegen die Lösungen einer ständigen Scherung. Weitere Viskositätsverringerngen aufgrund erhöhter Scherung bedeuten damit hier immer Veränderungen zu Gunsten des Prozesses und der eingesetzten Prozeßtechnik.

Zur konzentrations- und temperaturabhängigen Beschreibung der dynamischen Viskosität reiner und technischer Saccharoselösungen (Reinheit: 90 ... 94%) eignet sich ein mit hoher statistischer Sicherheit ($0,995 \leq R^2 \leq 0,999$) einfach zu handhabender Potenzansatz:

$$h(\mathbf{J}, w_{TS}) = \frac{K(w_{TS})}{\mathbf{J}^m} \quad (5.1.1)$$

Allerdings konnten damit nicht für alle untersuchten Saccharoselösungen befriedigende Korrelationen erhalten werden. Eine Verbesserung der Korrelation wurde unter Verwendung der Pidoux-Formel (3.5.5) erreicht, aber auch ihre Grenzen zeigten sich besonders deutlich bei der Regression von Meßwerten hohen Trockensubstanzgehaltes, insbesondere von Melassemeßwerten. Daher wurde aus der Pidoux-Formel (3.5.5) die Gleichung (5.1.2) zur Regression abgeleitet und vorzugsweise für die Regressionen der Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur verwendet.

$$\ln h = a \cdot \frac{\mathbf{J}}{(\mathbf{J} + 273)^m} + b \quad (5.1.2)$$

In Gleichung (5.1.2) wird im Unterschied zur Pidoux-Formel (3.5.5) die Temperatur in °C eingesetzt, und der Exponent ist nicht mehr quadratisch festgelegt. Außerdem ist der dekadische Logarithmus durch den Logarithmus Naturalis ersetzt.

Für die untersuchten Saccharoselösungen werden die Parameter a , b und m aus den gemessenen Viskositätsmittelwerten in Abhängigkeit von der Temperatur durch nicht-lineare Regression mit Gleichung (5.1.2) bestimmt. Bestimmtheitsmaße von $0,999 \leq R^2 \leq 0,9999$ werden dabei für die untersuchten Saccharoselösungen erhalten.

Die Abhängigkeit der dynamischen Viskosität von Trockensubstanzgehalt und Reinheit konnte zusätzlich in die empirischen Näherungsgleichungen eingearbeitet werden. Dafür wurde die nicht-lineare Regression für die unterschiedlichen Trockensubstanzgehalte mit einem für alle untersuchten Trockensubstanzgehalte am besten geeigneten Exponent m durchgeführt. Anschließend wurde die Abhängigkeiten der erhaltenen Parameter a und b vom Trockensubstanzgehalt mittels polynomischer Regression wie folgt beschrieben:

$$a = a_1 \cdot w_{TS}^2 + a_2 \cdot w_{TS} + a_3 \quad (5.1.3)$$

$$b = b_1 \cdot w_{TS}^2 + b_2 \cdot w_{TS} + b_3 \quad (5.1.4)$$

Für die zusätzliche Variable der Reinheit im Abschnitt der Zuckerhausprodukte wurde der folgende Ansatz zur Beschreibung der Abhängigkeiten der Parameter a und b verwendet:

$$a = a_1 \cdot w_{TS} + a_2 \cdot q + a_3 \quad (5.1.5)$$

$$b = b_1 \cdot w_{TS}^{m_b} + b_2 \cdot q + b_3 \quad (5.1.6)$$

In Anlehnung an die Berechnung von Pidoux zur Bestimmung der Parameter a und b aus der gemessenen Viskosität einer Probe bei zwei unterschiedlichen Temperaturen, ergeben sich die folgenden Gleichungen zur Berechnung der Parameter a und b in Gleichung (5.1.2):

$$a = -(\mathbf{J}_1 + 273)^m \cdot (-\ln(\mathbf{h}_1) + \ln(\mathbf{h}_2)) \cdot \frac{(\mathbf{J}_2 + 273)^m}{\mathbf{J}_1 \cdot (\mathbf{J}_2 + 273)^m - (\mathbf{J}_1 + 273)^m \cdot \mathbf{J}_2} \quad (5.1.7)$$

$$b = \frac{\ln(\mathbf{h}_2) \cdot \mathbf{J}_1 \cdot (\mathbf{J}_2 + 273)^m - (\mathbf{J}_1 + 273)^m \cdot \mathbf{J}_2 \cdot \ln(\mathbf{h}_1)}{\mathbf{J}_1 \cdot (\mathbf{J}_2 + 273)^m - (\mathbf{J}_1 + 273)^m \cdot \mathbf{J}_2} \quad (5.1.8)$$

Entsprechend der nachfolgenden Abschnitte wird dabei die Verwendung eines Exponenten für Dicksaft von $m = 2,24$ und für Melasse von $m = 2,268$ empfohlen.

5.2 Reine Saccharoselösung – Untersuchungen zur dynamischen Viskosität

Durch den Einsatz der Druckmeßzelle erfolgten die Untersuchungen bis 130 °C ohne Konzentrationveränderung der Lösungen. Erstmals sind damit Meßwerte über 80 °C verfügbar.

Aufgrund der Meßbereiche der Meßsysteme waren die Untersuchungen hinsichtlich des Trockensubstanzgehaltsbereiches eingeschränkt. Viskositäten reiner Saccharoselösungen mit Trockensubstanzgehalten unter 60 g/100 g konnten nicht mehr mit ausreichender Meßsicherheit bestimmt werden. Hierfür war das minimal notwendige Drehmoment im Meßantrieb verantwortlich. Im hohen Temperaturbereich wurde dieses besonders deutlich. Ebenso wurden die Grenzen des Meßbereichs bei hohem Trockensubstanzgehalt und niedriger Temperatur aufgrund des maximal aufzunehmenden Drehmoment erreicht. Letzteres verursachte zunächst eine erhebliche Einschränkung des Schergeschwindigkeitsbereichs bei den Untersuchungen. Im Drehmomentbereich von 2 bis 150 mNm konnten die Messungen durchgeführt werden.

Die Veränderung der reinen Saccharoselösung während der Messungen kann als minimal eingeschätzt werden. Erst bei Temperaturen über 120 °C wurden leichte Farbveränderungen und pH-Wert Absenkungen beobachtet, was auf Saccharoseabbau durch Hydrolyse hindeutet. Die Reaktionsgeschwindigkeit der Hydrolyse nimmt in diesen Temperaturbereich von über 120 °C deutlich zu.⁴⁰

Refraktometrische Überprüfungen des Trockensubstanzgehaltes vor und nach der Messung ergaben maximal Differenzen von +0,2 % w_{TS}. Damit kann ein Ansteigen des Trockensubstanzgehaltes infolge Verdunstung in der Druckmeßzelle ausgeschlossen werden.

Die mit dem Rheometersystem „Druckmeßzelle“ erhaltenen Meßwerte der dynamischen Viskosität von reinen Saccharoselösungen wurden zunächst temperaturabhängig mit Gleichung (5.1.2) und einem Exponenten m von 2,135 regressiert.

Für die Parameter a und b wurden dabei die in Tabelle 11 dargestellten Werte in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt berechnet.

⁴⁰ *Autorenkollektiv*: Die Zuckerherstellung. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1984; S. 84

**Tabelle 11 Regressionsparameter in Abhängigkeit vom
Trockensubstanzgehalt**

Trockensubstanzgehalt in g/100g	Parameter		Bestimmtheitsmaß R ²
	a	b	
60	-11720,3707	5,3259	0,99989
65	-14142,9332	6,4895	0,99968
70	-17567,7537	8,0383	0,99995
75	-22188,3532	10,13	1,00000

Durch polynomische Beschreibung der Abhängigkeit der Parameter *a* und *b* vom Trockensubstanzgehalt wurde zur rechnerischen Bestimmung der dynamischen Viskosität von reinen Saccharoselösungen die folgende Gleichung (5.2.1) abgeleitet.

Das Bestimmtheitsmaß beträgt $R^2 = 0,9999$. Der Gültigkeitsbereich ist wie folgt festgelegt:
 $60 \% \leq w_{TS} \leq 75 \%$ und $30 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 130 \text{ °C}$.

$$\ln h = -a \cdot \frac{J}{(J + 273)^{2,135}} + b \quad (5.2.1)$$

$$a = 21,9804 \cdot w_{TS}^2 - 2270,7746 \cdot w_{TS} + 68847,1902 \quad (5.2.1.1)$$

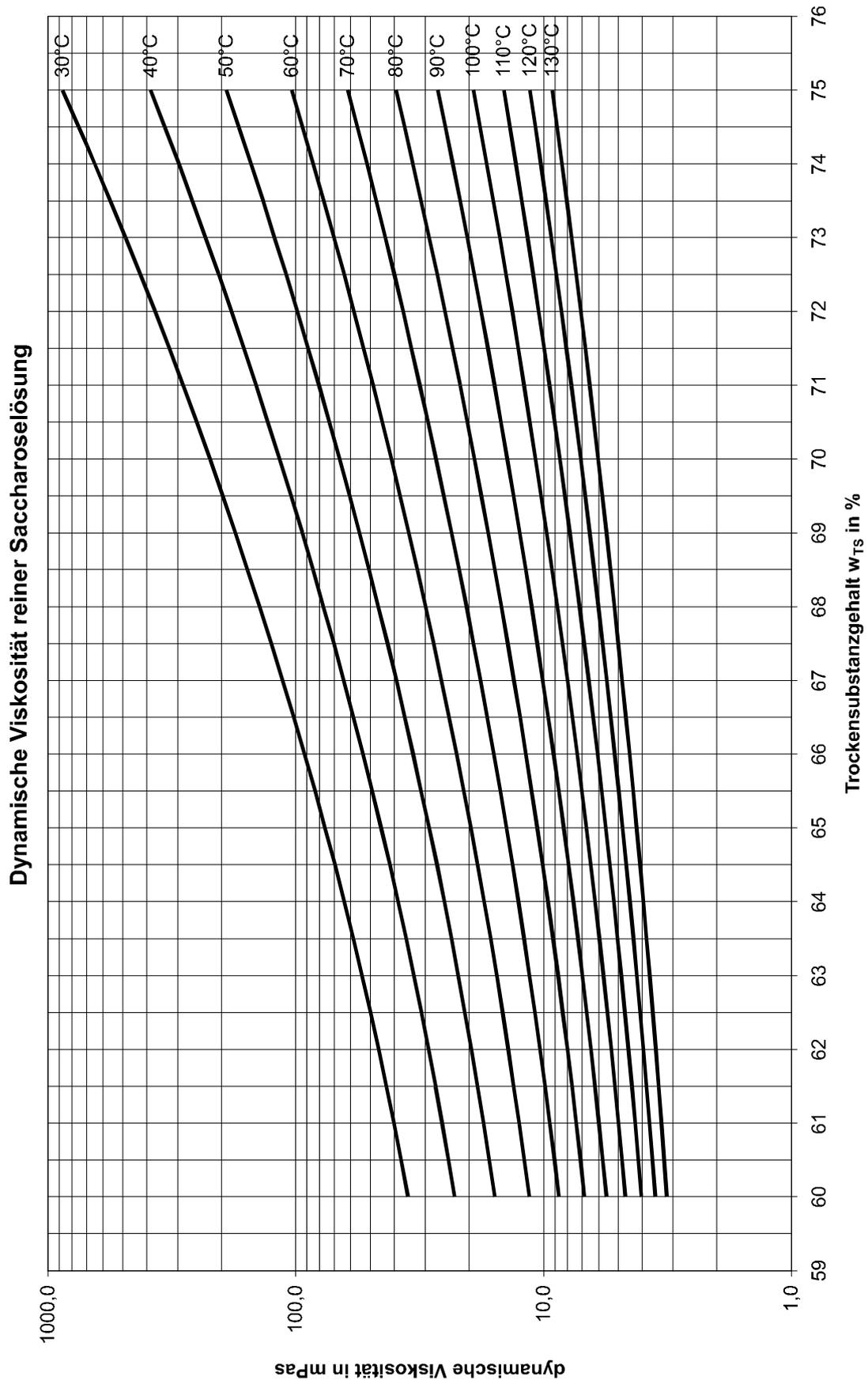
$$b = 0,009281 \cdot w_{TS}^2 - 0,93371 \cdot w_{TS} + 27,94497 \quad (5.2.1.2)$$

Das Nomogramm zur Gleichung (5.2.1) ist in Diagramm 3 dargestellt. Die berechneten Werte der dynamischen Viskosität von reiner Saccharoselösung im Temperaturbereich von 30 bis 130 °C enthält der Anhang.

Aufgrund der größeren Meßungenaugigkeit der Meßtechnik bei geringen Trockensubstanzgehalten, verursacht durch die schlechtere Auflösung infolge des minimal aufgenommenen Drehmoments im Meßantrieb, wurden für den Trockensubstanzgehalt von 60 g/100 g etwas höhere Viskositätswerte als in der Literatur⁴¹ angegeben erhalten.

⁴¹ *Bubnik, Z.; Kadlec, P.; Urban, D.; Bruhns, M.: Sugar Technologists Manual. Verlag Dr. Albert Bartens, Berlin 1995*

Diagramm 3 Dynamische Viskosität reiner Saccharoselösung

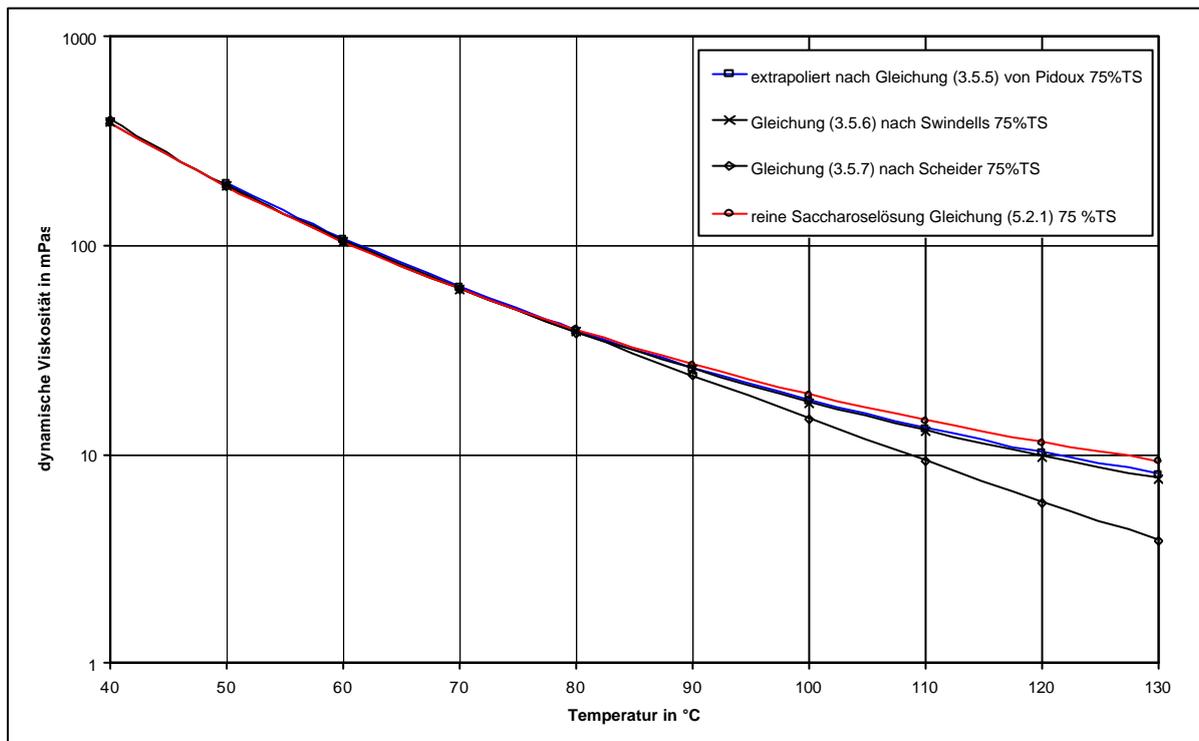


Der Vergleich der Meßwerte der Druckmeßzelle mit den extrapolierten Daten der bisher verfügbaren Gleichungen zeigt deutlich die auftretenden Differenzen.

Stimmen die Viskositätswerte im Temperaturbereich von 30 bis 80 °C noch sehr gut überein, nehmen die Differenzen mit steigenden Temperaturen zu.

In Diagramm 4 sind die gemessenen und extrapolierten Viskositätsdaten für reine Saccharoselösung mit einem Trockensubstanzgehalt von 75 g/100 g vergleichend dargestellt.

Diagramm 4 Vergleich der Meßwerte der dynamischen Viskosität mit den extrapolierten Werten von empirischen Gleichungen für reine Saccharoselösung



Die Gleichung (3.5.7) nach SCHEIDER et al., deren Gültigkeitsbereich erst bei diesem Trockensubstanzgehalt von 75 g/100 g beginnt, liefert im Gültigkeitsbereich (40 bis 80 °C) mit den in der Druckmeßzelle gemessenen Werten sehr gut übereinstimmende Viskositätsdaten. Bei Extrapolation aber ergeben sich mit ihr bei 130 °C die größten Differenzen, es werden nur 42 % des in der Druckmeßzelle gemessenen Viskositätswertes berechnet.

Wesentlich besser übereinstimmende Viskositätsdaten erhält man mit der Gleichung (3.5.6) von SWINDELLS et al.. Bei 130 °C werden immerhin 84 % des in der Druckmeßzelle erhaltenen Viskositätswertes berechnet.

Unter Verwendung der Extrapolationsmethode nach Gleichung (3.5.5) von PIDOUX wird die beste Übereinstimmung zu den Meßwerten erhalten. Aber auch hier erreicht der berechnete Viskositätswert bei 130 °C nur 87 % des Meßwertes.

5.3 Dicksaft – Untersuchungen zur dynamischen Viskosität

Untersucht wurden Rübensäfte der Fabriken Zeitz, Baddeckenstedt, Anklam, Offenau und Belkas (Ägypten), sowie Rohrdicksaft aus Gledhow (Südafrika).

Die untersuchten Dicksäfte sollten das Spektrum des Viskositätsverhaltens berücksichtigen, das sich aus den unterschiedlichen Technologien der Zuckerfabriken, den Rübenqualitäten und Lagerungsbedingungen ergibt.

Der Dicksaft der Zuckerfabrik Zeitz war ein gelagerter Dicksaft, aus der Dicksaftaufarbeitungskampagne 1996. Mit dem Dicksaft der Zuckerfabrik Anklam konnte ein Dicksaft untersucht werden, der zuvor nach dem Dänischen Saftreinigungsverfahren gereinigt wurde. Der ägyptische Dicksaft wies eine vergleichsweise geringe Reinheit von 88,9 % auf. Außerdem wurde Rohrdicksaft untersucht, der verfahrensbedingt höhere Invertzuckergehalte aufweist.

5.3.1 Temperatur- und Trockensubstanzgehaltsabhängigkeit der dynamischen Viskosität von Rübensäften

Zur rechnerischen Bestimmung der dynamischen Viskosität von Rübensäften wurden die folgenden Regressionsgleichungen aus den Meßwerten aller untersuchten Rübensäfte abgeleitet.

Bei Zugrundelegung der gemittelten Meßwerten des Meßsystems DMZ KL wurde die Gleichung (5.3.1) mit einem Bestimmtheitsmaß von 1,000 regressiert:

(65 % ≤ w_{TS} ≤ 75 %; 30 °C ≤ ϑ ≤ 130 °C; Meßsystem: DMZ KL)

$$\ln h = -a \cdot \frac{J}{(J + 273)^{2,21}} + b \quad (5.3.1)$$

$$a = 14,395 \cdot w_{TS}^2 - 937,714 \cdot w_{TS} + 21688,1 \quad (5.3.1.1)$$

$$b = 0,005318 \cdot w_{TS}^2 - 0,419434 \cdot w_{TS} + 11,17167 \quad (5.3.1.2)$$

Um temperaturseitig den Regressionsbereich zu erweitern, wurde unter Verwendung der berechneten Mittelwerte aus den Meßwerten der Meßsysteme „Druckmeßzelle“ und UDS 200 die Gleichung (5.3.2) für den gesamten untersuchten Temperaturbereich von 5 bis 130 °C mit einem Bestimmtheitsmaß von ebenfalls 1,000 regressiert:

(60 % ≤ w_{TS} ≤ 75 %; 5 °C ≤ ϑ ≤ 130 °C; Meßsystem: DMZ KL und UDS 200)

$$\ln h = -a \cdot \frac{J}{(J + 273)^{2,24}} + b \quad (5.3.2)$$

$$a = 31,8302 \cdot w_{TS}^2 - 3034,8965 \cdot w_{TS} + 89712,8726 \quad (5.3.2.1)$$

$$b = 0,008244 \cdot w_{TS}^2 - 0,8026 \cdot w_{TS} + 23,8943 \quad (5.3.2.2)$$

Werden Viskositätsdaten bei Prozeßtemperaturen > 80 °C benötigt, sollte auf die Werte der Gleichung (5.3.1) zurückgegriffen werden. Sie liefert im Temperaturbereich über 80 °C etwas genauere Werte, da sie nur unter Verwendung der Meßwerte des Meßsystems „Druckmeßzelle“ ermittelt wurde.

Gleichung (5.3.2) berechnet im gleichen Temperaturbereich um bis zu 3 % niedrigere Viskositätswerte. Dieser Nachteil ist aber als sehr gering einzuschätzen, da aufgrund der standortabhängigen Viskositätsunterschiede einzelne Viskositätswerte der Dicksäfte zwischen 94 % und 112 % des berechneten Wertes betragen können.

Vorteil der Gleichung (5.3.2) ist der große Gültigkeitsbereich von 5 bis 130 °C.

Diagramm 5 zeigt das Nomogramm zur Gleichung (5.3.2). Die entsprechenden berechneten Werte der dynamischen Viskosität sind im Anhang enthalten.

Wie bei reiner Saccharoselösung werden auch beim Dicksaft deutliche Differenzen zwischen den Meßwerten der Druckmeßzelle und den extrapolierten Werten der bisher verfügbaren Gleichungen im Temperaturbereich über 80 °C erhalten.

Im Gültigkeitsbereich der Gleichung (3.5.8) von GENOTELLE, von 40 bis 80 °C, wird eine gute Übereinstimmung mit den Meßwerten erhalten (siehe Diagramm 7). Darüber hinaus wird z. B. bei einer Temperatur von 130 °C für einen Dicksaft mit 75 g/100 g Trockensubstanzgehalt durch Extrapolation mit dieser Gleichung (3.5.8) nur noch 72,5 % des Meßwertes erhalten. Eine etwas bessere Übereinstimmung mit den Meßwerten wird durch die Verwendung der Extrapolationsmethode nach PIDOUX (Gleichung (3.5.5)) mit 84,5 % des Meßwertes erreicht (siehe Diagramm 6)

Diagramm 6 Vergleich der Gleichung (5.3.2) mit den extrapolierten Werten von empirischen Gleichungen für Dicksaft

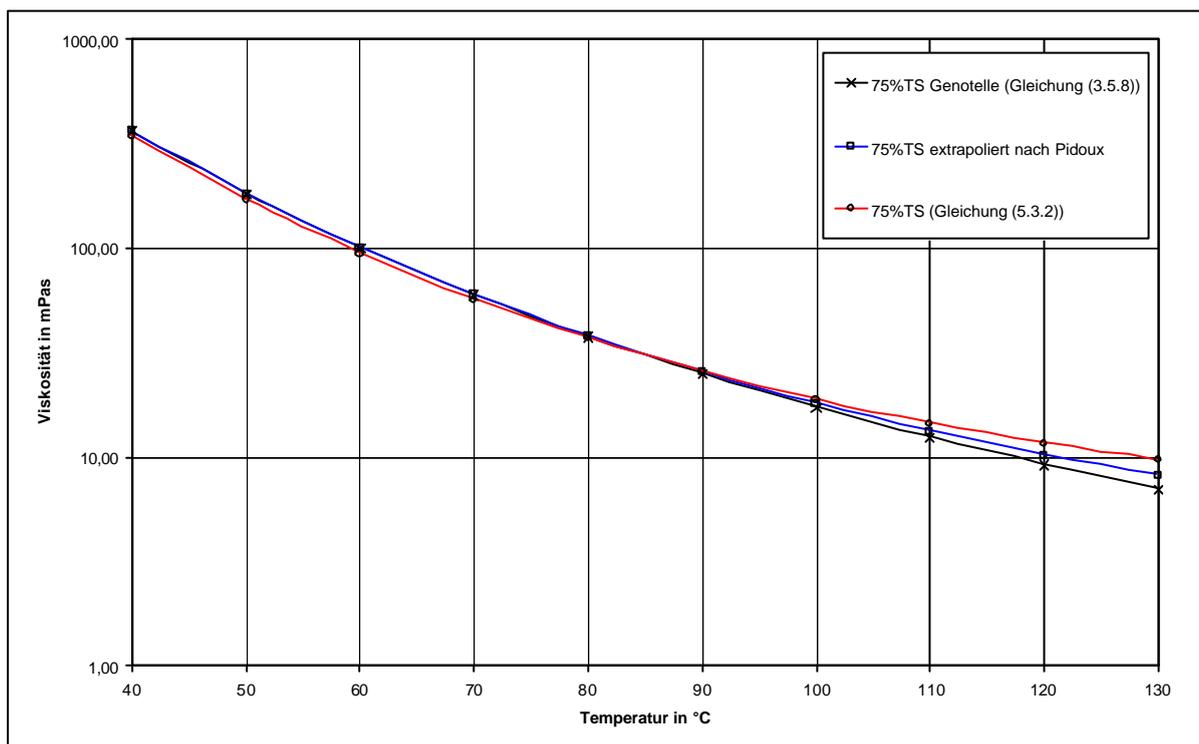
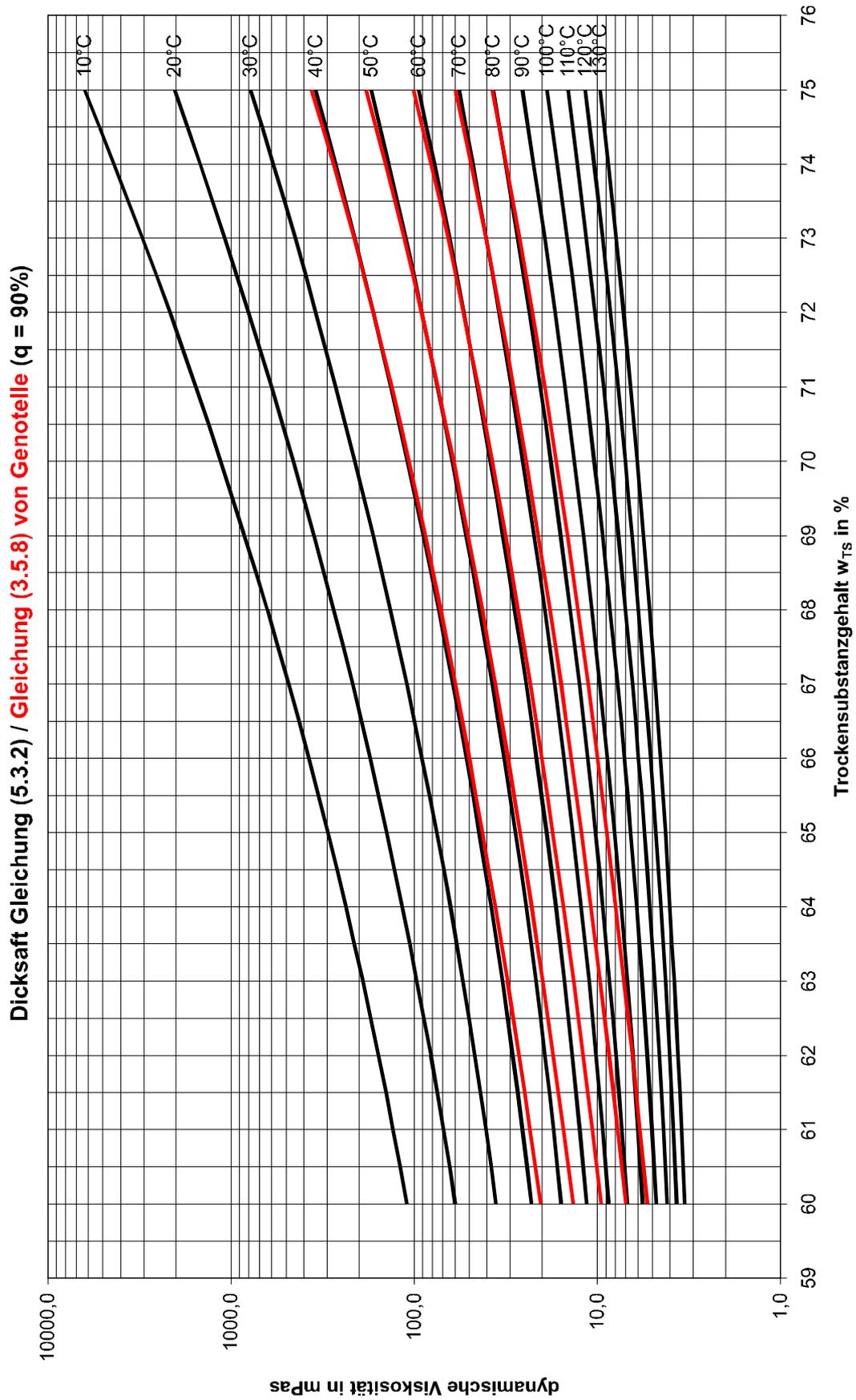


Diagramm 7 Vergleich der Gleichung (5.3.2) mit Gleichung (3.5.8) von GENOTELLE



5.3.2 Standortabhängigkeit der dynamischen Viskosität

Die Temperatur- und Trockensubstanzgehaltsabhängigkeiten der untersuchten Rübensäfte der Fabriken Zeitz, Baddeckenstedt, Anklam, Offenau und Belkas (Ägypten) wurden einzeln standortabhängig ausgewertet.

Mit den bereits erläuterten Regressionsansatz (Gleichung (5.1.2)) wurden für die verschiedenen Standorte die in Tabelle 12 angegebenen Regressionsparameter ermittelt.

Bezogen auf die Viskositätswerte der reinen Saccharoselösung aus Gleichung (5.2.1) zeigen die untersuchten Dicksäfte ein unterschiedliches Verhalten.

Bei einem Trockensubstanzgehalt von 60 g/100 g (Diagramm 8) weist der Dicksaft Baddeckenstedt die geringsten Viskositätswerte auf. Das Viskositätsverhalten ist nahezu identisch dem der reinen Saccharoselösung. Dicksaft aus Zeitz hingegen erreicht bei diesem Trockensubstanzgehalt die höchsten Viskositätswerte. Sind die Viskositätswerte bei 30 °C noch auf dem Niveau der reinen Saccharoselösung, nehmen sie gleichmäßig über den gesamten Temperaturbereich zu. Bei 130 °C werden 120 % der Viskosität von reiner Saccharoselösung erhalten. Insgesamt ist bei dem Trockensubstanzgehalt von 60 g/100 g die Viskosität der Dicksäfte gleich bzw. höher als bei der reinen Saccharoselösung.

Bei 65 g/100 g Trockensubstanzgehalt (Diagramm 9) werden die niedrigsten Werte für die Dicksäfte der Fabriken Zeitz und Belkas (Ägypten) bei 30 °C mit etwa 90 % erhalten. Die Viskosität dieser Dicksäfte steigt im weiteren Temperaturbereich auf 108 %, bezogen auf die Viskosität von reiner Saccharoselösung. Die höchsten Viskositätsdaten werden bei diesem Trockensubstanzgehalt mit 110 bis 118 % für Dicksaft der Fabrik Anklam ermittelt.

Bei weiterer Trockensubstanzgehaltserhöhung setzt sich die Viskositätsverringerung der Dicksäfte gegenüber der Viskosität der reinen Saccharoselösung im unteren Temperaturbereich fort. So werden bei 30 °C bei den Dicksäften Viskositätswerte zwischen 80 und 100 % der Viskosität von reiner Saccharoselösung erreicht.

Im hohen Temperaturbereich ist ein gegensätzliches Verhalten zu beobachten. Die Viskosität der Dicksäfte nimmt gegenüber der Viskosität der reinen Saccharoselösung zu.

Tabelle 12 Standortabhängige Regressionsparameter der untersuchten Dicksäfte

Parameter	Standort				
	Zeitz	Baddeckenstedt	Anklam	Offenau	Belkas (Ägypten)
a ₁	-41,698	-32,68374	-62,6577	-31,8525108	-34,8508
a ₂	4718,764	3456,4141	7263,2918	3034,89618	3763,332
a ₃	-145499,55	-107838,766	-236505,1297	-89712,8726	-117467,3719
b ₁	0,0149	0,009689	0,011228	0,00829458	0,011104
b ₂	-1,67637	-1,003365	-1,23966	-0,80472459	-1,20646
b ₃	52,14842	30,83793	39,9109	23,8935142	37,8399
m	2,16	2,2	2,25	2,24	2,2
Bestimmtheitsmaß	0,99982	0,99995	0,99998	0,99986	0,99994
Gültigkeitsbereich	60 ≤ w _{TS} ≤ 75 %; 30 ≤ J ≤ 130 °C	60 ≤ w _{TS} ≤ 75 %; 5 ≤ J ≤ 130 °C	65 ≤ w _{TS} ≤ 75 %; 5 ≤ J ≤ 130 °C	60 ≤ w _{TS} ≤ 75 %; 40 ≤ J ≤ 120 °C	65 ≤ w _{TS} ≤ 75 %; 30 ≤ J ≤ 130 °C
Meßsystem	DMZ	DMZ; UDS 200	DMZ; UDS 200	DMZ	DMZ

Bei 70 g/100 g Trockensubstanzgehalt (Diagramm 10) werden z.B. bei 130 °C Werte zwischen 100 und 109 % erhalten und bei 75 g/100 g Trockensubstanzgehalt erhöht sich der Maximalwert bei 130 °C auf 115 %.

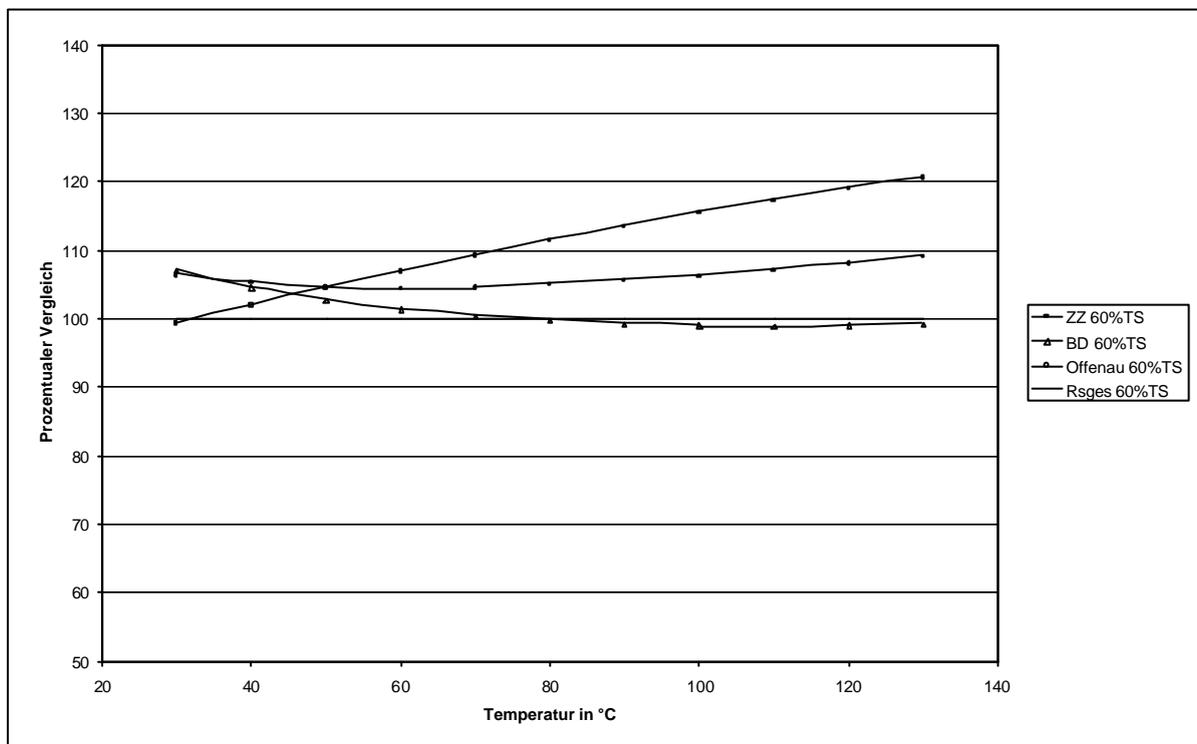
Die auftretenden Unterschiede im Viskositätsverhalten der Dicksäfte müssen mit den unterschiedlichen Zusammensetzungen erklärt werden, die sich bedingt durch den Rübenanbauort (Boden, Klima, anbautechnische Maßnahmen), den genetischen Eigenschaften des Saatgutes, der Rodetechnik, den Lagerbedingungen, der Lagerdauer und der technologischen Arbeitsweise in Extraktion, Saftreinigung und Verdampfstation ergeben.

Eine genaue Analyse der untersuchten Dicksäfte betreffs unterschiedlicher Ionengehalte konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Daher sei hier auf die Arbeiten

von CHRISTOPH / SENGE ⁴² verwiesen, die Abhängigkeiten der Viskosität von pH-Wert und Ca-Ionengehalt feststellten.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß die Viskositätsdaten der untersuchten Rübensäfte bei Temperaturen von 5 bis 100 °C in der Mehrzahl unter denen der reinen Saccharoselösungen liegen. Bei Temperaturen über 100 °C, deutlicher bei 130 °C, liegt die Viskosität der meisten untersuchten Dicksäfte über der Viskosität von reinen Saccharoselösungen. Dieses Verhalten ist Konzentrationsabhängigkeit und wird bei höheren Konzentrationen deutlicher.

Diagramm 8 Vergleich der standortabhängigen Viskositätsunterschiede für Dicksaft $w_{TS} = 60\%$



⁴² Christoph, D.; Senge, B.: Fließeigenschaften von reinen und technischen Saccharoselösungen im Temperaturbereich von 30 bis 130°C; Bericht über die 5. Tagung für Lebensmittelrheologie. Granum-Verlag, Detmold 1997

Diagramm 9 Vergleich der standortabhängigen Viskositätsunterschiede für
Dicksaft $w_{TS} = 65\%$

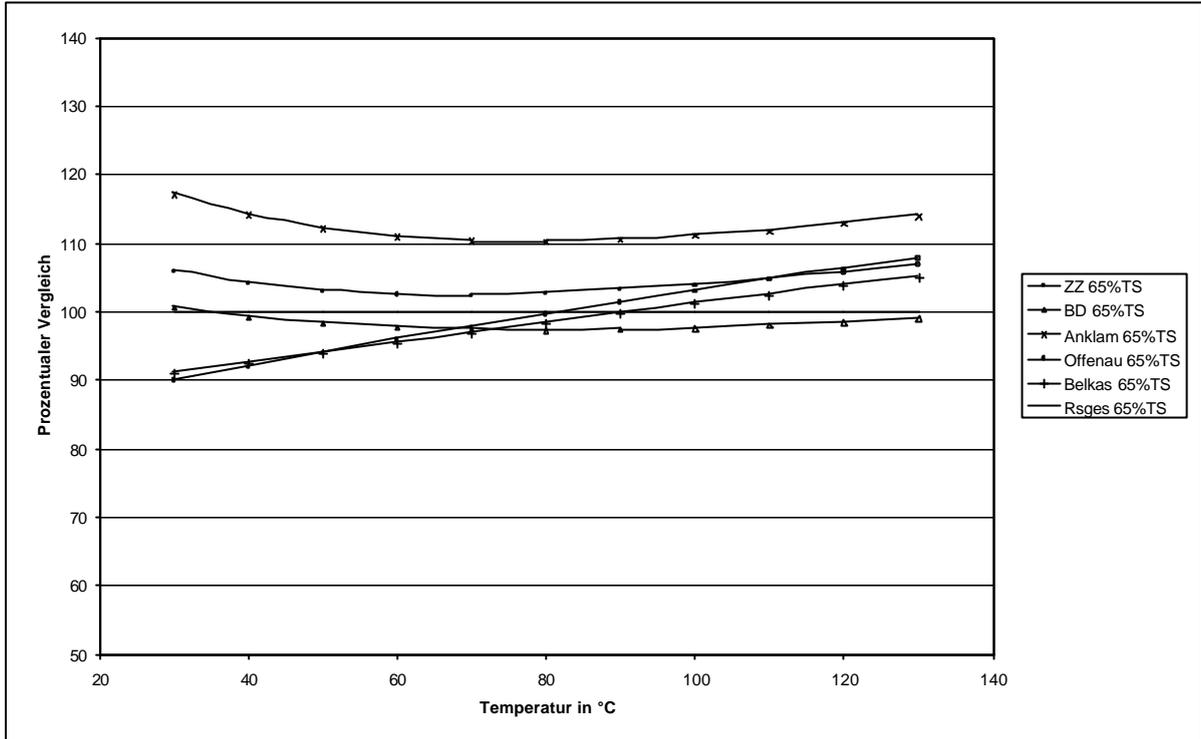


Diagramm 10 Vergleich der standortabhängigen Viskositätsunterschiede für
Dicksaft $w_{TS} = 70\%$

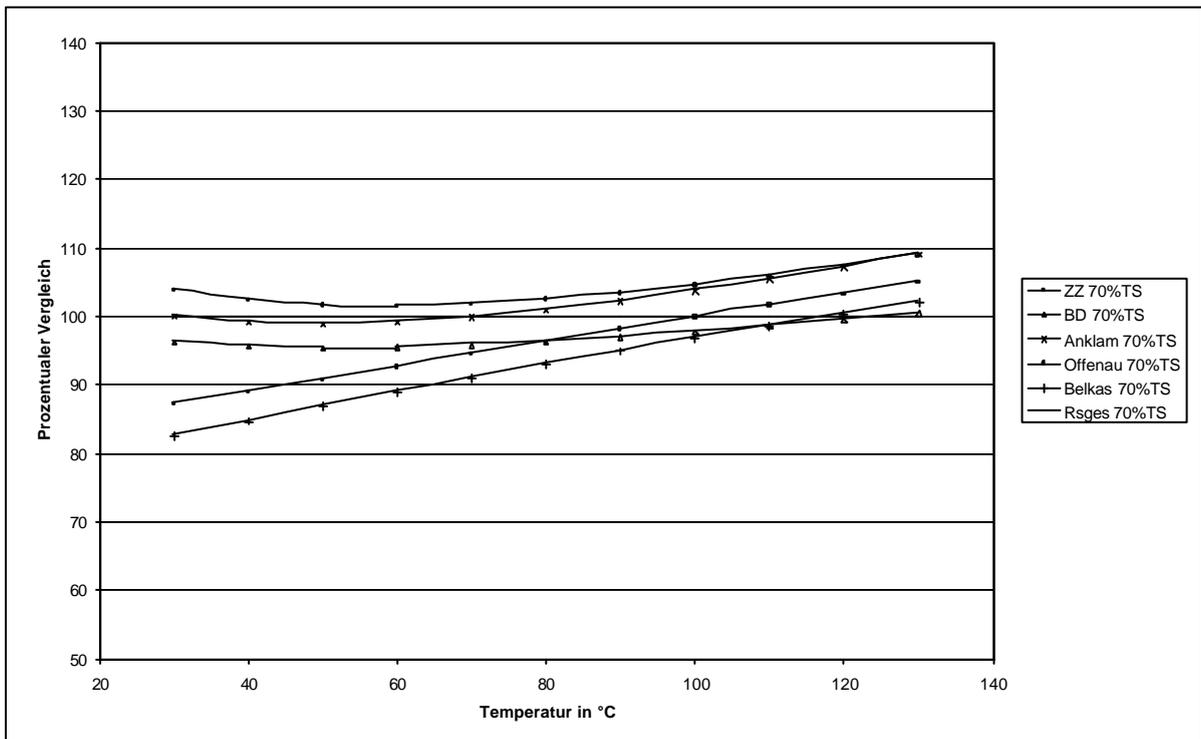
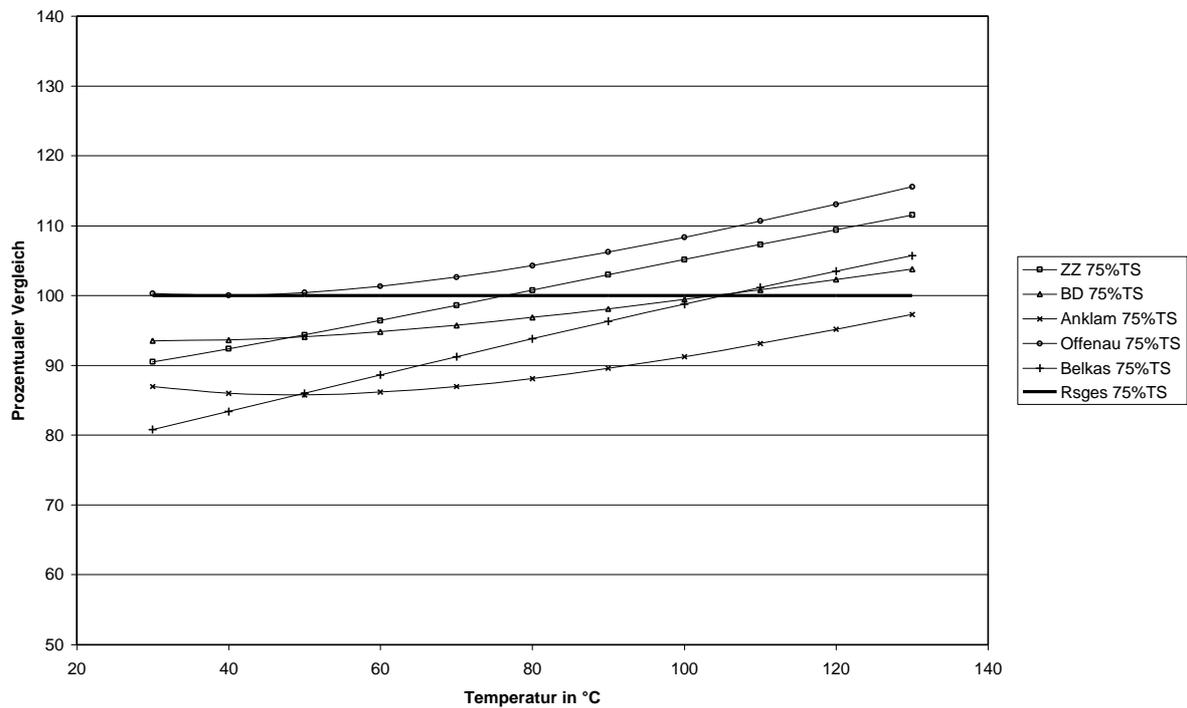


Diagramm 11 Vergleich der standortabhängigen Viskositätsunterschiede für Dicksaft $w_{TS} = 75\%$



5.3.3 Dynamische Viskosität von Dicksaft aus Zuckerrohr

Für die untersuchten Dicksaft aus Zuckerrohr der Fabrik Gledhow (Südafrika) wurden die folgenden temperaturabhängigen Regressionsgleichungen bestimmt:

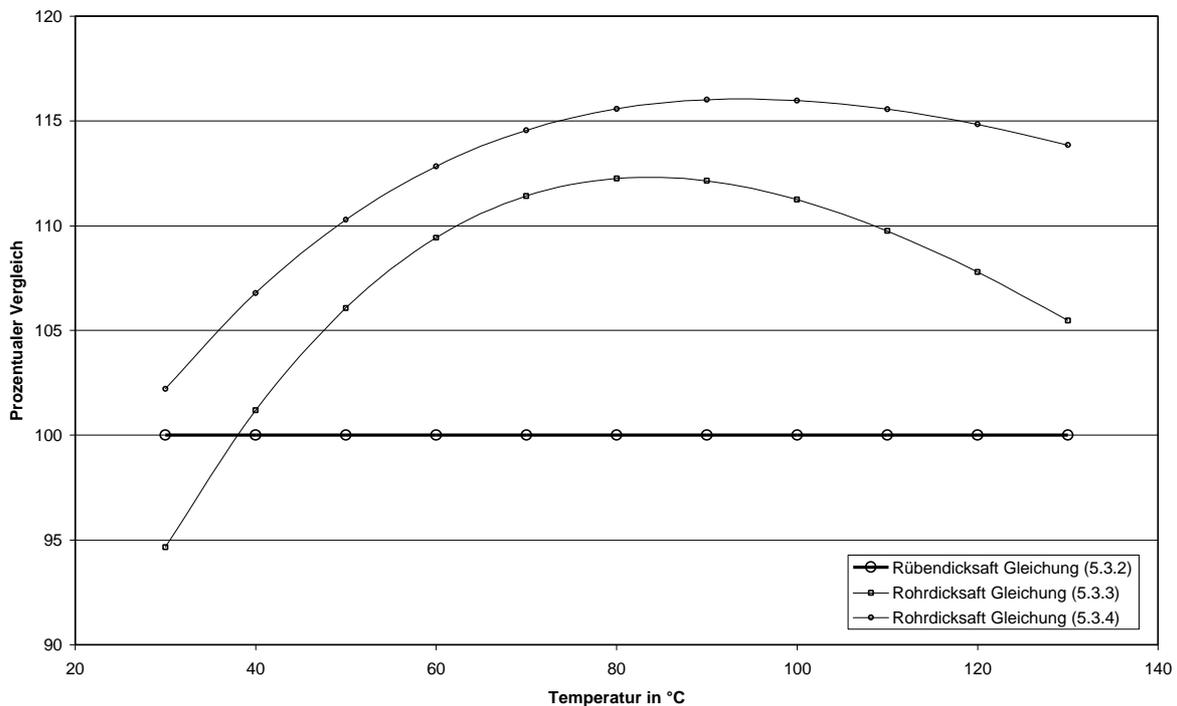
$w_{TS} = 65 \text{ g/100 g}$ ($60 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 130 \text{ °C}$; Meßsystem: DMZ)

$$\ln h = -4285,4609 \cdot \frac{J}{(J + 273)^{1,95}} + 6,132 \quad (5.3.3)$$

$w_{TS} = 68,6 \text{ g/100 g}$ ($30 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 130 \text{ °C}$; Meßsystem: DMZ)

$$\ln h = -14375,3697 \cdot \frac{J}{(J + 273)^{2,12}} + 7,424 \quad (5.3.4)$$

Diagramm 12 Vergleich der dynamischen Viskosität von Dicksaft aus Zuckerrohr und Zuckerrübe



Die Rohrdicksäfte besitzen bei gleicher Konzentration und Temperatur eine höhere Viskosität als die vergleichbaren Rübensäfte. Zu erklären ist dieses Verhalten durch die unterschiedliche Zusammensetzung von Rüben- und Rohrdicksäften. Der rohstoff- und verfahrensbedingt höhere Invertzuckergehalt der Rohrdicksäfte ist vermutlich Ursache für das höhere Viskositätsniveau.

Die Maximalwerte der untersuchten Konzentrationen erreichen etwa 116 % der mit Gleichung (5.3.2) für Rübensäfte ermittelten Werte (siehe Diagramm 12). Auffällig dabei ist außerdem, daß die größten prozentualen Viskositätsdifferenzen im Temperaturbereich zwischen 80 und 100 °C erhalten werden. Die prozentuale Viskositätsverringering bei Temperaturen über 100 °C kann als Hinweis auf einsetzende Abbaureaktionen gesehen werden.

5.4 Melasse – Untersuchungen zur dynamischen Viskosität

5.4.1 Temperatur- und Trockensubstanzgehaltsabhängigkeit der dynamischen Viskosität von Rübenmelasse

Zur Berechnung der dynamischen Viskosität von Rübenmelasse wurden die nachfolgend angegebenen empirischen Gleichungen aus den Mittelwerten aller untersuchten Standorte mit einem Bestimmtheitsmaß von 1,000 regressiert.

Die Regressierung der Gleichung (5.4.1) erfolgte nur mit Meßwerten der „Druckmeßzelle“. Mit ihr werden aufgrund des eingeschränkteren Temperaturbereichs bei Temperaturen über 80 °C etwas genauere Werte erhalten.

Gleichung (5.4.2) wurde aus den Mittelwerten beider verwendeter Meßsysteme berechnet, so daß ihr Vorteil im größeren Gültigkeitsbereich zu sehen ist.

(70 % ≤ w_{TS} ≤ 85 %; 30 °C ≤ J ≤ 130 °C; Meßsystem: Druckmeßzelle)

$$\ln h = a \cdot \frac{J}{(J + 273)^{2,1}} + b \quad (5.4.1)$$

$$a = -24,9484 \cdot w_{TS}^2 + 3008,86 \cdot w_{TS} - 101475,2 \quad (5.4.1.1)$$

$$b = 0,0134 \cdot w_{TS}^2 - 1,5761 \cdot w_{TS} + 52,172 \quad (5.4.1.2)$$

(70 % ≤ w_{TS} ≤ 85 %; 5 °C ≤ J ≤ 130 °C; Meßsystem: Druckmeßzelle und UDS 200)

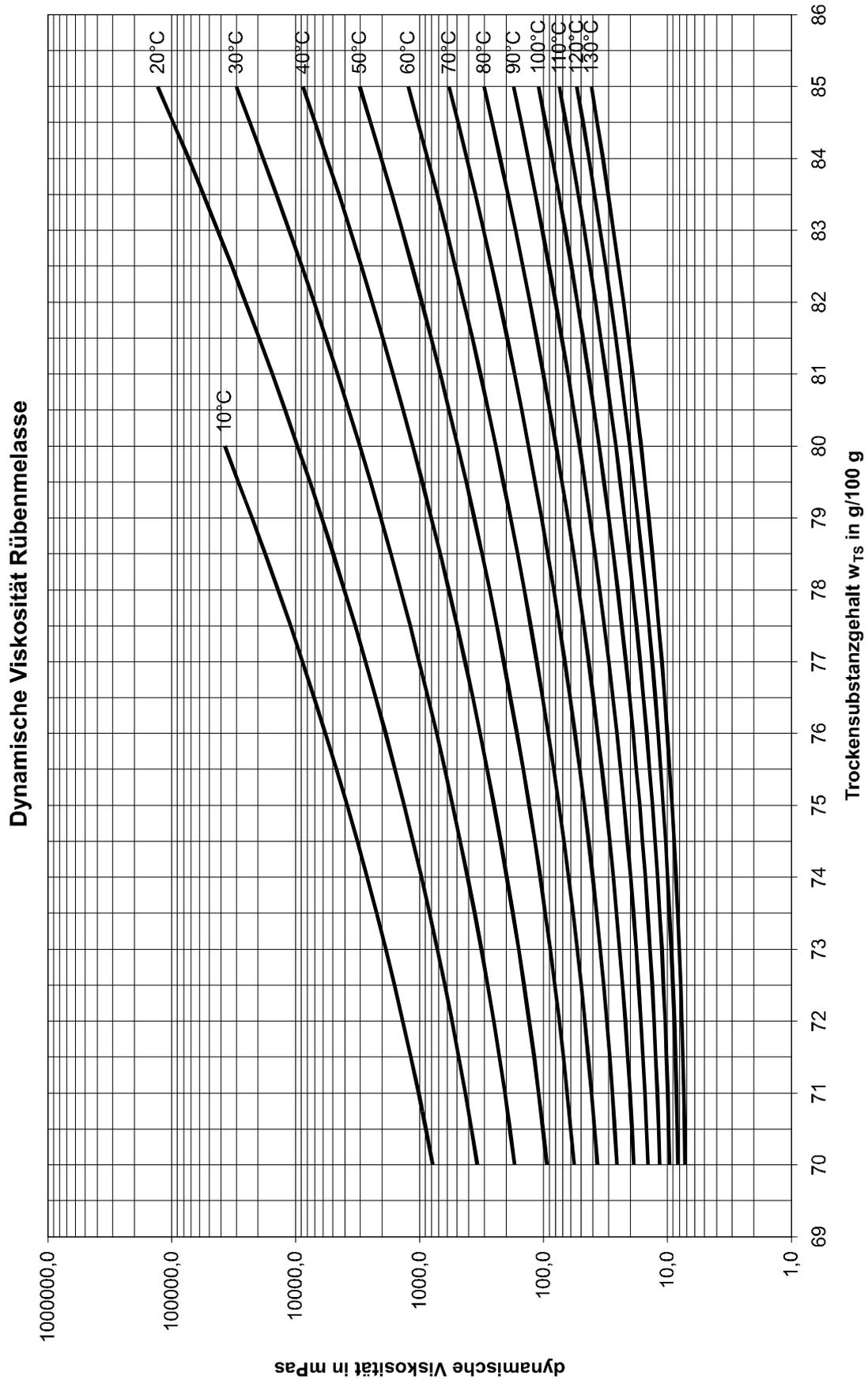
$$\ln h = a \cdot \frac{J}{(J + 273)^{2,268}} + b \quad (5.4.2)$$

$$a = -51,4719 \cdot w_{TS}^2 + 5425,1367 \cdot w_{TS} - 162808,1888 \quad (5.4.2.1)$$

$$b = 0,01507 \cdot w_{TS}^2 - 1,810354 \cdot w_{TS} + 60,51091 \quad (5.4.2.2)$$

Im Anhang sind die berechneten Werte der dynamischen Viskosität für Melasse aus Rübe nach Gleichung (5.4.2) angegeben.

Diagramm 13 Dynamische Viskosität von Melasse aus Zuckerrübe



5.4.2 Standortabhängigkeit der dynamischen Viskosität von Rübenmelasse

Für die untersuchten Standorte Zeitz, Baddeckenstedt und Belkas (Ägypten) wurden die in Tabelle 13 dargestellten Regressionsparameter ermittelt.

Tabelle 13 Standortabhängige Regressionsparameter der untersuchten Melassen

Parameter	Standort		
	Rübenmelasse Zeitz	Rübenmelasse Baddeckenstedt	Rübenmelasse Belkas (Ägypten)
a ₁	-43,6909	-24,1156	0
a ₂	5499,8532	2611,7608	-4620,5273
a ₃	-190721,78	-82216,4327	306205,791
b ₁	0,015681	0,008798	0
b ₂	-1,920361	-0,884922	0,85802
b ₃	65,106265	26,40338	-57,3674
m	2,168	2,15	2,298
Bestimmtheitsmaß	0,999	0,999	0,999
Gültigkeitsbereich	70 ≤ w _{TS} ≤ 85 %; 30 ≤ J ≤ 130 °C	70 ≤ w _{TS} ≤ 85 %; 30 ≤ J ≤ 130 °C	80 ≤ w _{TS} ≤ 85 %; 30 ≤ J ≤ 130 °C
Meßsystem	DMZ	DMZ	DMZ

Standortabhängig zeigen Melassen größere Differenzen im Viskositätsverhalten als Dicksäfte.

Bezogen auf die berechneten Viskositätswerte der Gleichung (5.4.1) können einzelne Viskositätswerte standortabhängig bei Konzentrationen von 70 und 75 g/100 g um ±20 % variieren. Bei Konzentrationen über 75 g/100 g vergrößert sich der Streubereich und kann im extrem Fall z. B. bei 30 °C -30 % bzw. bei 130 °C +30 % betragen.

Für Gleichung (5.4.2) kann eine standortbedingte Streuung der Viskositätswerte von durchschnittlich $\pm 20\%$ angegeben werden. Bei den Grenztemperaturen sind aber auch hier Streuungen bis zu $+30\%$ und -40% möglich (Diagramm 14 bis Diagramm 17).

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Standorte vergleichend dargestellt:

Diagramm 14 Vergleich der standortabhängigen Viskositätsunterschiede für Melasse $w_{TS} = 70\text{ g}/100\text{ g}$

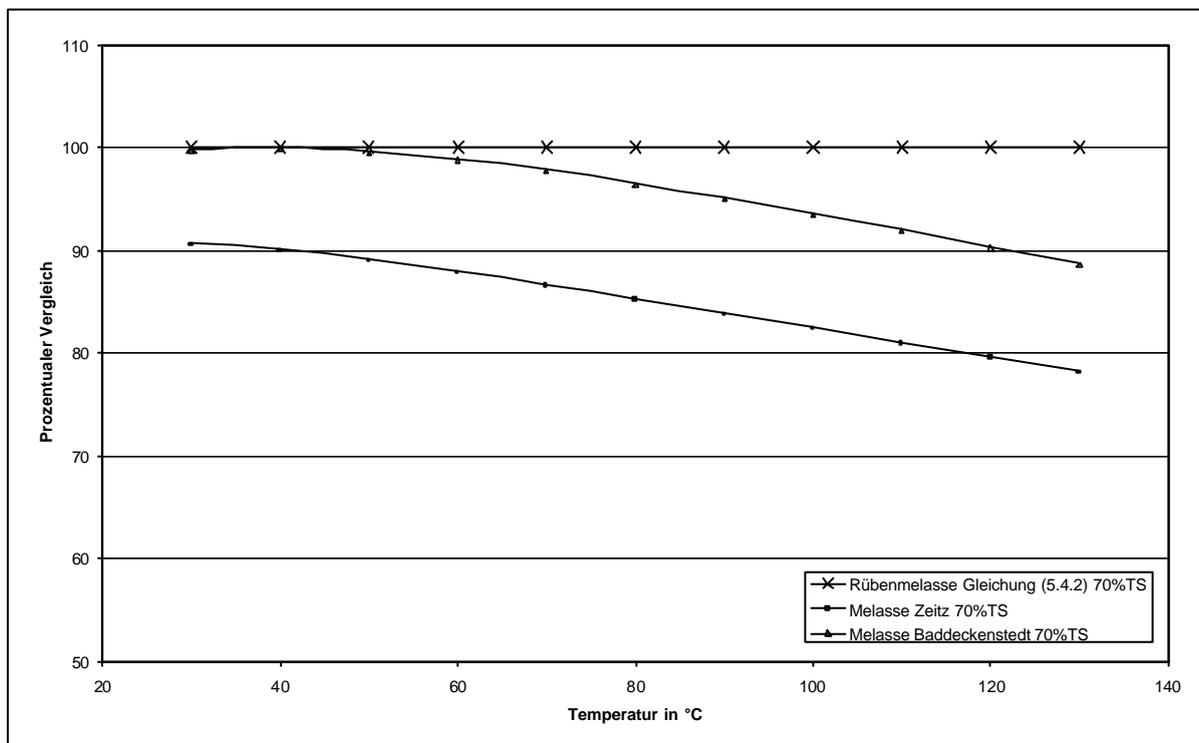


Diagramm 15 Vergleich der standortabhängigen Viskositätsunterschiede für
Melasse $w_{TS} = 75 \text{ g/100 g}$

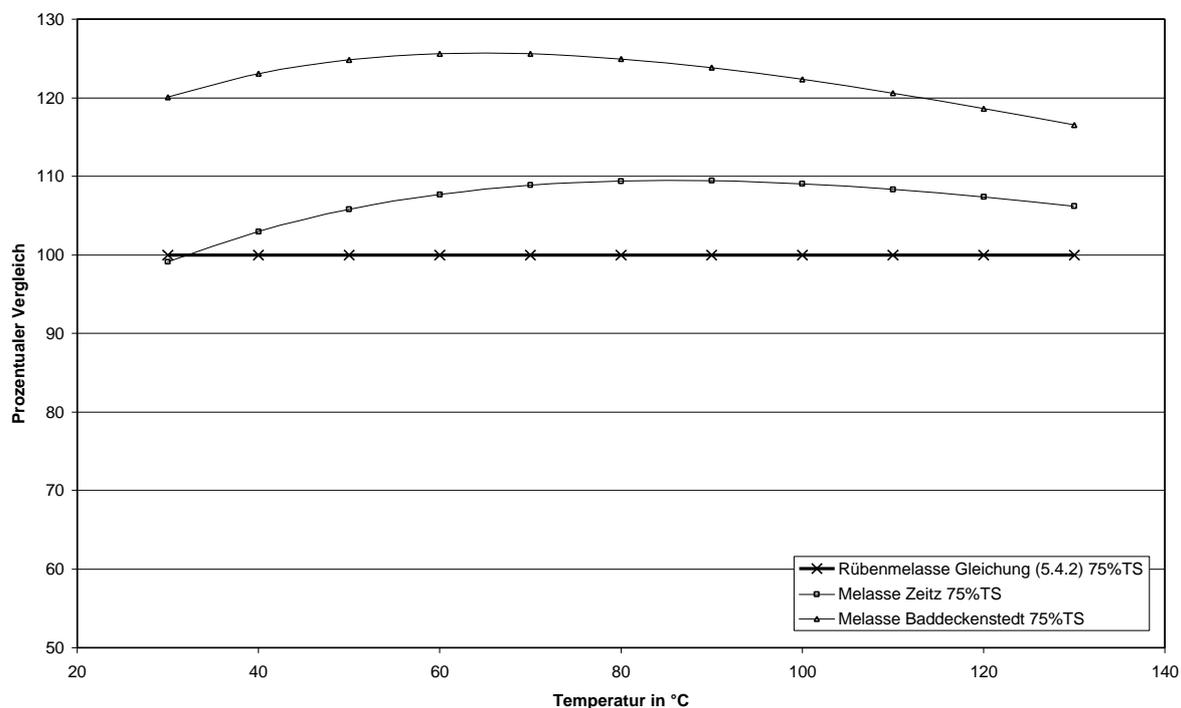


Diagramm 16 Vergleich der standortabhängigen Viskositätsunterschiede für
Melasse $w_{TS} = 80 \text{ g/100 g}$

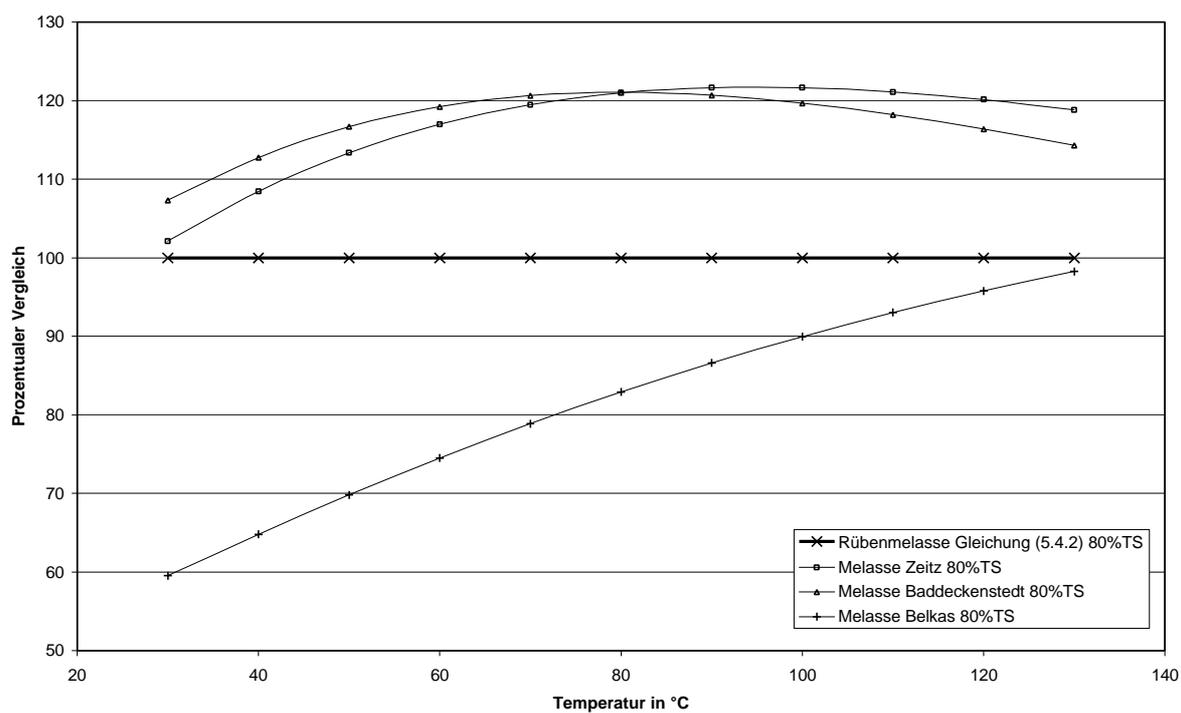
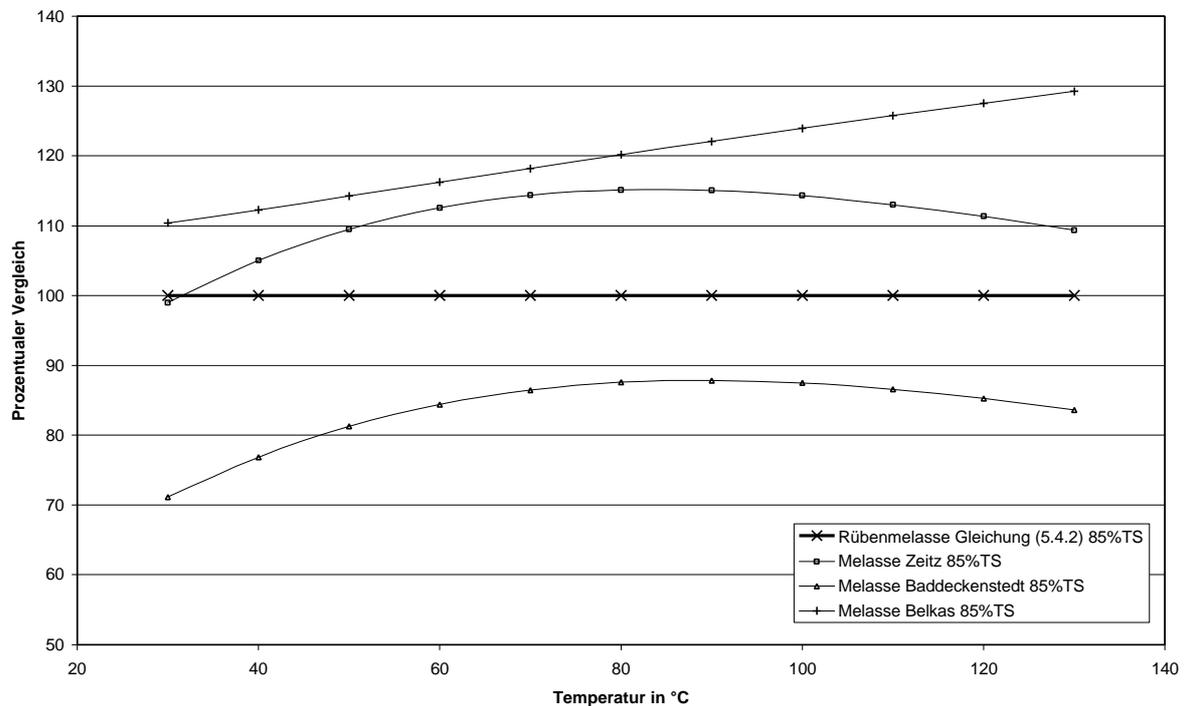


Diagramm 17 Vergleich der standortabhängigen Viskositätsunterschiede für Melasse $w_{TS} = 85 \text{ g/100 g}$



5.4.3 Dynamische Viskosität von Rohrmelasse

Für die untersuchten Rohrmelassen aus Südafrika und dem Sudan wurden folgende Regressionsgleichungen ermittelt:

Rohrmelasse Südafrika $w_{TS} = 80 \text{ g/100 g}$, 30 bis 130 °C, $R^2 = 1,000$

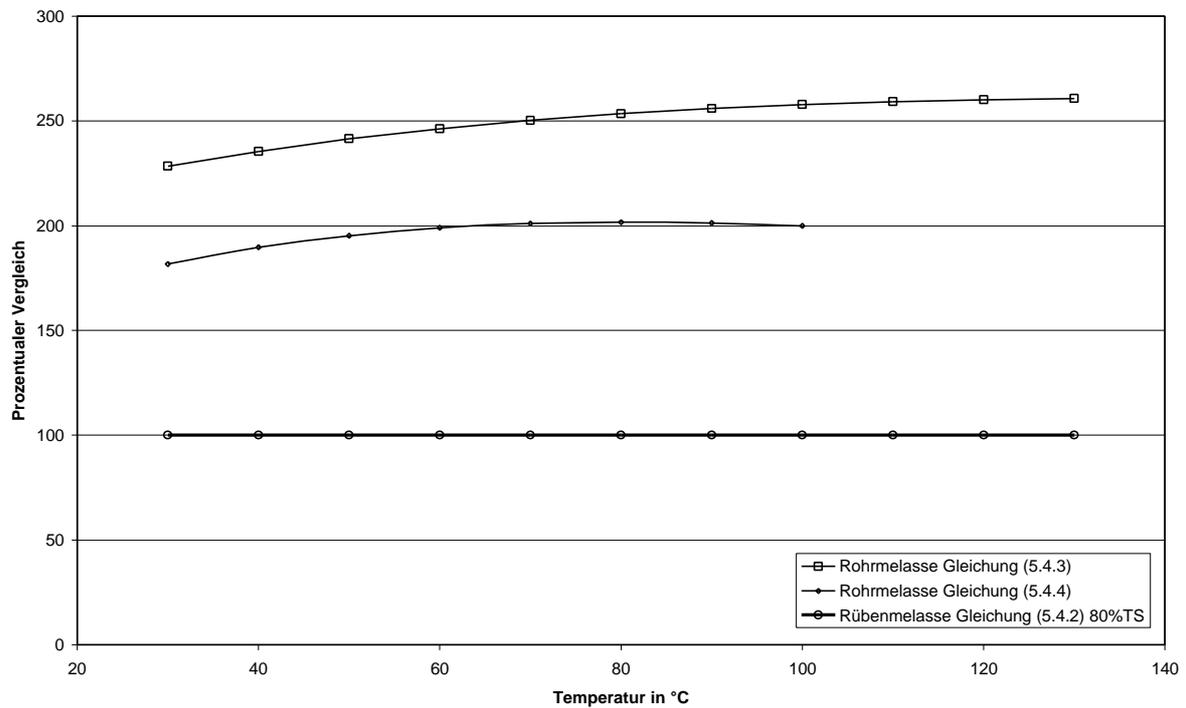
$$\ln h = -50727,73 \cdot \frac{J}{(J+273)^{2,25}} + 12,8154 \quad (5.4.3)$$

Rohrmelasse Sudan $w_{TS} = 80 \text{ g/100 g}$, 30 bis 100 °C, $R^2 = 1,000$

$$\ln h = -31304,5 \cdot \frac{J}{(J+273)^{2,17}} + 12,4868 \quad (5.4.4)$$

Im Vergleich zur Rübenmelasse zeigen die untersuchten Rohrmelassen eine um 100 und 150 % höhere Viskosität (Diagramm 18).

Diagramm 18 Vergleich der dynamischen Viskosität von Rohr- und Rübenmelasse



Dieses Verhalten muß mit der unterschiedlichen molekularen Zusammensetzung der Produkte erklärt werden.

Rohrmelassen besitzen einen wesentlich höheren Anteil an Invertzuckern als Rübenmelassen. Bei der sudanesischen Rohrmelasse kam es aufgrund des Invertzuckeranteils bei 100 °C zur Maillard-Reaktion, in dessen Verlauf es in der Druckmeßzelle zum Druckensteig kam und die Messung abgebrochen werden mußte.

5.5 Zuckerhausprodukte – Untersuchungen zur dynamischen Viskosität

Zur Bestimmung der Viskosität der Zuckerhausprodukte wurde die folgende Gleichung mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,999$ aus den Meßergebnissen der eingestellten Melasseproben regressiert:

Gültigkeitsbereich von $30\text{ °C} \leq J \leq 110\text{ °C}$, $70\text{ g/100 g} \leq w_{TS} \leq 80\text{ g/100 g}$ und $60\% \leq q \leq 80\%$

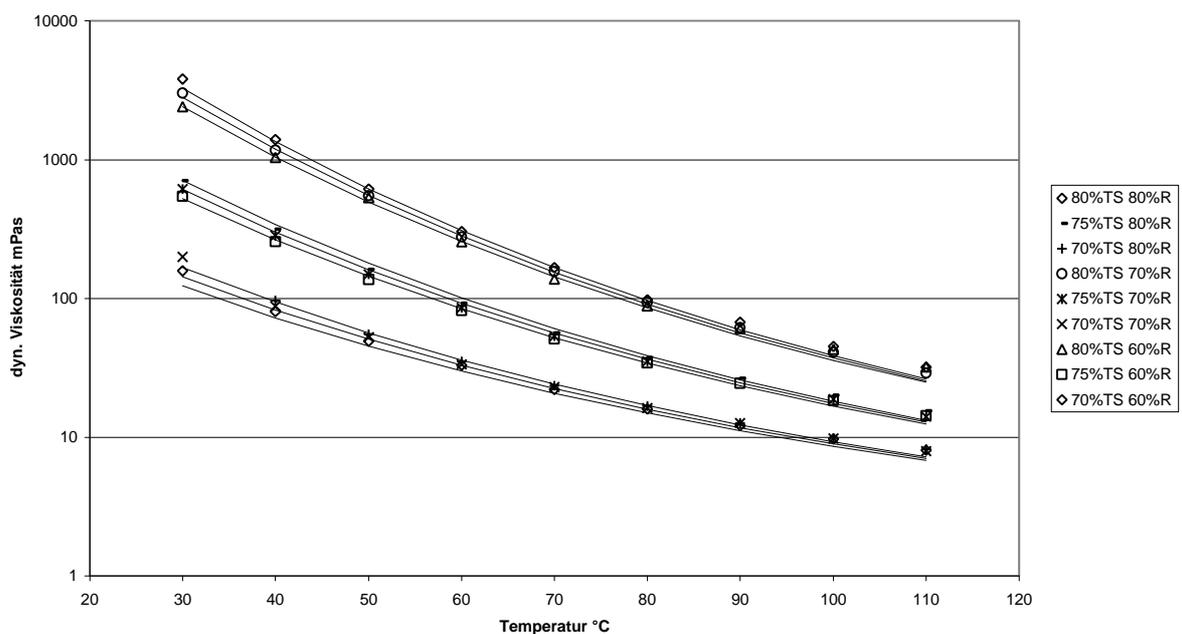
$$\ln h = a \cdot \frac{J}{(J+273)^{1,799}} + b \quad (5.5.1)$$

$$a = -115,995 \cdot w_{TS} - 8,5143 \cdot q + 6631,79 \quad (5.5.1.1)$$

$$b = 0,0195224 \cdot w_{TS}^{1,6} + 0,02391 \cdot q - 12,043 \quad (5.5.1.2)$$

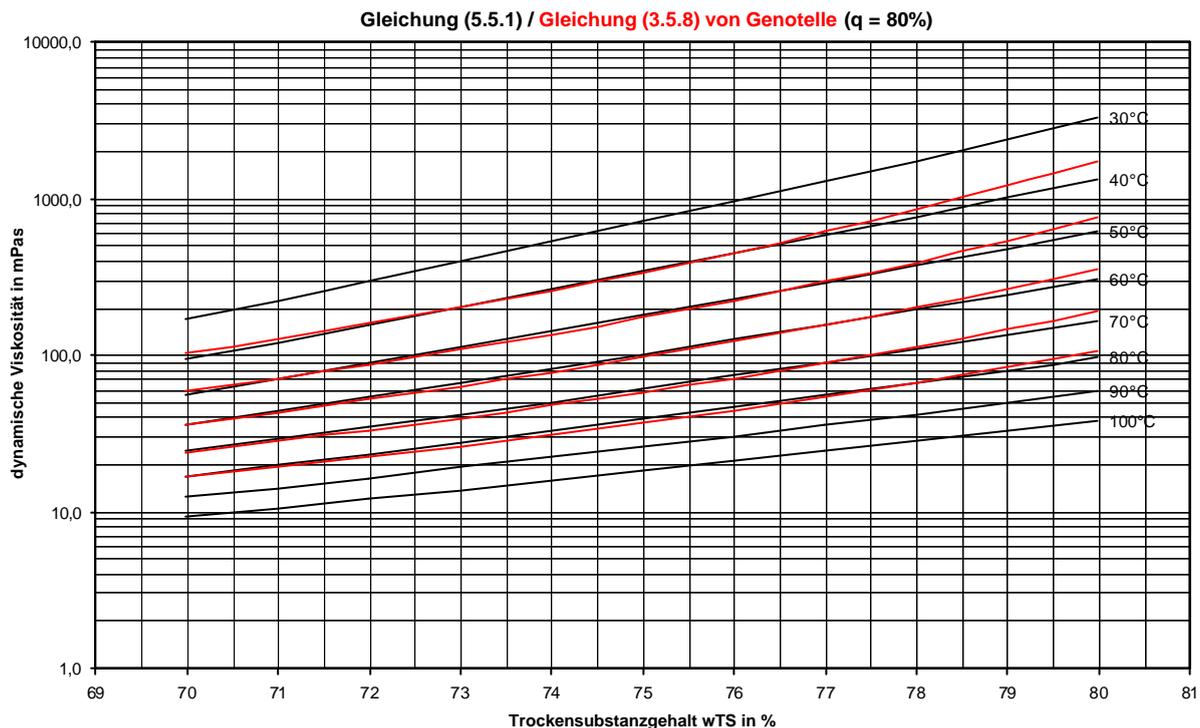
Die dynamische Viskosität wird in mPas erhalten.

Diagramm 19 **Dynamische Viskosität von Zuckerhausprodukten**



Im Vergleich mit dem bisherigen Berechnungsansatz, Gleichung (3.5.8) von GENOTELLE, der bis Temperaturen von 80 °C gültig ist, ergibt sich im gemeinsamen Gültigkeitsbereich eine gute Übereinstimmung (siehe Diagramm 20 exemplarisch für eine Reinheit von 80 %).

Diagramm 20 Vergleich Gleichung (5.5.1) mit Gleichung (3.5.8) von GENOTELLE

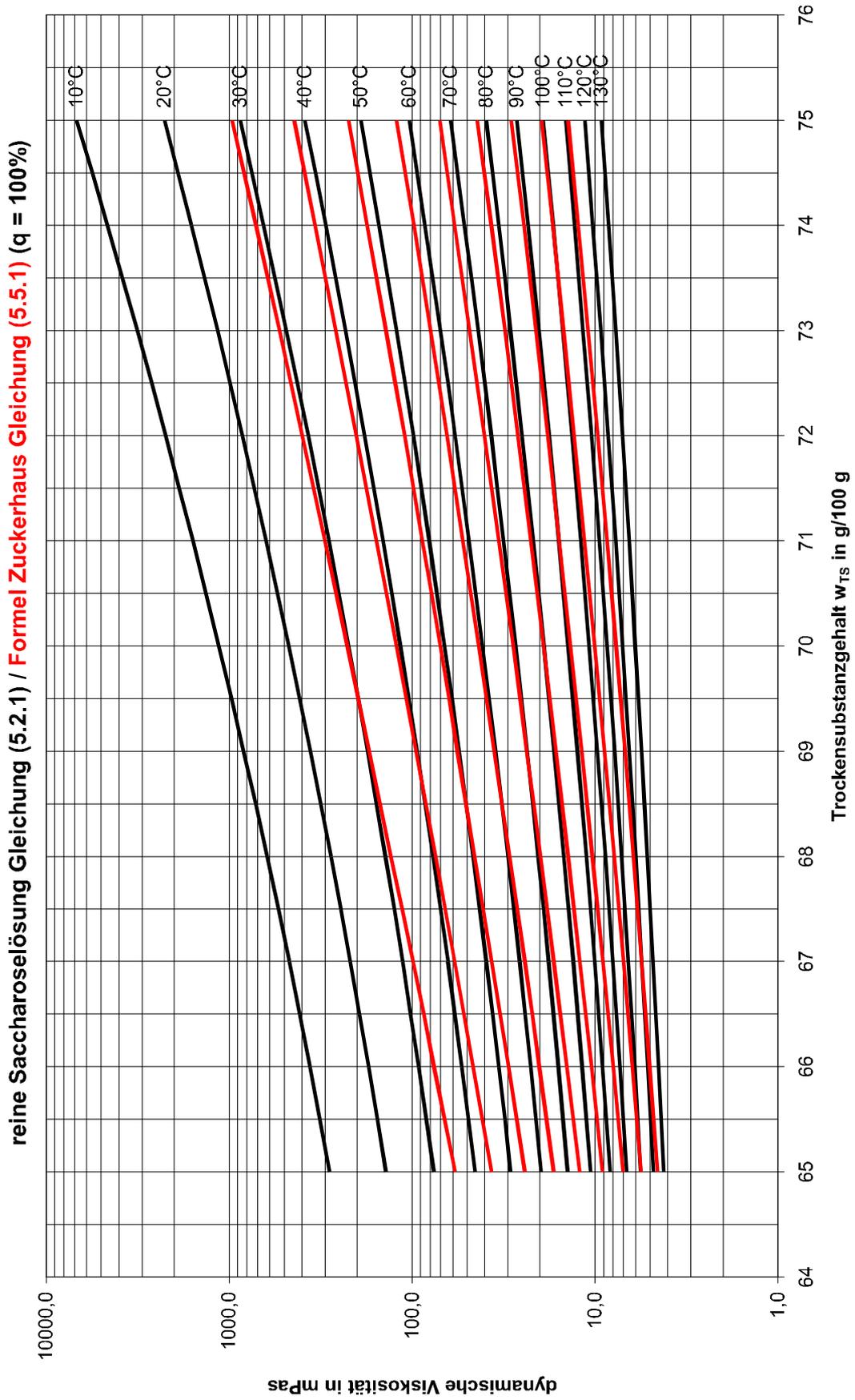


Auch die Vergleiche mit Rohzucker- und Nachprodukteinzugsgut, sowie mit Abläufen der Fabriken Zeitz und Baddeckenstedt zeigen die probate Korrelation mit den berechneten Viskositätswerten.

Mit etwas geringerer Genauigkeit kann mit dieser Gleichung auch die dynamische Viskosität für Saccharoselösungen bis 100 % Reinheit bestimmt werden. Die Extrapolation der dynamischen Viskosität zu niedrigeren Trockensubstanzgehalten als 70 g/100 g ist dagegen nicht empfehlenswert, da hierbei wesentlich größere Fehler auftreten (siehe Diagramm 21).

Im Anhang sind die mit Gleichung (5.5.1) berechneten Viskositätswerte für 80 und 70 % Reinheit angegeben.

Diagramm 21 Vergleich Gleichung (5.2.1) und Gleichung (5.5.1)



5.6 Nicht-Newtonisches Verhalten

Die mit dem Rheometersystem UDS 200 ermittelten Meßwerte zur Bestimmung des nicht-Newtonischen Fließverhaltens wurden nach dem Newton-Ansatz und einer Reihe von Modellansätzen zum nicht-NEWTONSchen Fließen (Ostwald-de Waele, Steiner Steiger-Ory, siehe Abschnitt 3.1.2.3, Tabelle 1) ausgewertet und verglichen.

Die Fließkurven der untersuchten Saccharoselösungen zeigten leichte Abweichungen vom idealviskosen Verhalten. Am besten ließen sich diese experimentell ermittelten Fließkurven mit dem OSTWALD-DE WAELESchen Fließmodell beschreiben. Es ist gekennzeichnet durch das Abnehmen der Viskosität bei zunehmender Scherbeanspruchung.

Die Stoffgröße besteht aus den Komponenten der inneren Reibung und der Komponente, die den schergeschwindigkeitsabhängigen Gleichgewichtszustand der Strukturzerstörungs- und -bildungsprozesse widerspiegelt.

Die Abweichungen vom idealviskosen Verhalten sind besonders deutlich im Schergeschwindigkeitsbereich 0 bis 50 s^{-1} zu beobachten.

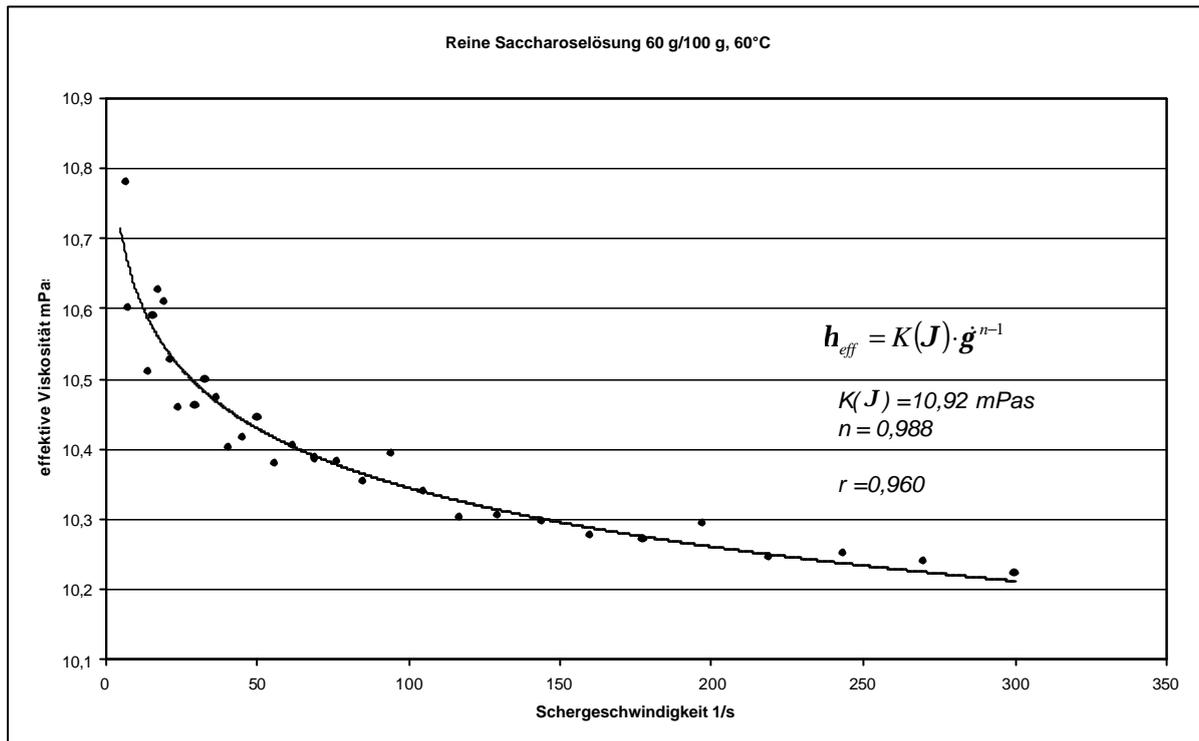
Im allgemeinen sind die Abweichungen vom Newtonschen Schubspannungsansatz als gering einzuschätzen.

Dennoch muß davon ausgegangen werden, daß durch die Scherbeanspruchung Strukturen in der Saccharoselösung zerstört werden.

Im Analogieschluß wurden Oberflächenspannungsveränderungen bei reiner Saccharoselösung beobachtet, die als Folge von Molekülorientierung und Clusterbildung während der Oberflächenalterung zu verstehen sind.

5.6.1 Reine Saccharoselösung

Exemplarisch ist im Diagramm 22 die Fließkurve für reine Saccharoselösung mit 60 g/100 g Trockensubstanzgehalt und $60 \text{ }^\circ\text{C}$ dargestellt. Ausgewertet nach dem Modellansatz von OSTWALD-DE WAELE ergibt sich der durchgezogene Kurvenverlauf mit den angegebenen Parametern.

Diagramm 22 Fließkurve reiner Saccharoselösung


Die Parameter nach dem Modellansatz von OSTWALD-DE WAELE für den gesamten untersuchten Trockensubstanzgehalts- und Temperaturbereich enthalten Tabelle 14 und Tabelle 15.

Tabelle 14 Fließverhalten reiner Saccharoselösung

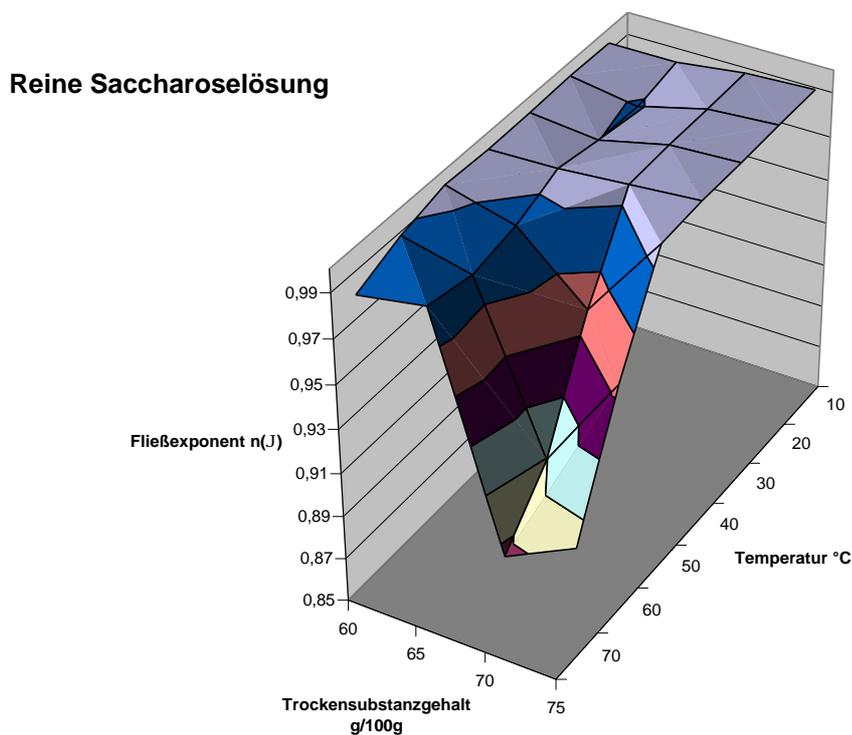
Fließverhalten reiner Saccharoselösung						
K(ϑ) in mPa·s	wTS = 60 g/100 g			wTS = 65 g/100 g		
	J in °C	K(J)	n(J)	r	K(J)	n(J)
70	8,92	0,980	0,9428	14,61	0,986	0,9896
60	10,92	0,988	0,9600	20,98	0,981	0,9514
50	15,25	0,994	0,9119	31,74	0,985	0,9784
40	22,57	0,993	0,9286	47,30	0,994	0,9274
30	35,33	0,993	0,9672	83,94	0,990	0,9760
20	60,44	0,994	0,9716	157,53	0,989	0,9797
15	82,57	0,994	0,9687	221,55	0,994	0,9771
10	114,14	0,994	0,9479	325,00	0,994	0,9666
5	161,99	0,995	0,9437	494,52	0,996	0,9709

Tabelle 15 **Fließverhalten reiner Saccharoselösung**

Fließverhalten reiner Saccharoselösung						
$K(\dot{\gamma})$ in mPas	$w_{TS} = 70 \text{ g}/100 \text{ g}$			$w_{TS} = 75 \text{ g}/100 \text{ g}$		
J in °C	$K(J)$	$n(J)$	r	$K(J)$	$n(J)$	r
70	61,01	0,885	0,8416	119,50	0,901	0,8089
60	76,82	0,909	0,8855	162,74	0,954	0,8404
50	94,31	0,958	0,9440	246,96	0,997	0,9532
40	136,23	0,996	0,9287	492,71	0,999	0,9545
30	262,17	0,997	0,9157	1146,69	0,999	0,9583
20	571,59	0,997	0,9828	3115,28	0,999	0,8927
15	882,69	0,997	0,9617			
10	1441,20	0,998	0,9650			
5	2397,88	0,998	0,8677			

Zur Verdeutlichung der Abhängigkeit des nicht-Newtonschen Fließverhaltens von Konzentration und Temperatur ist der Fließexponent $n(J)$ im Diagramm 23 entsprechend dargestellt.

Diagramm 23 **Fließexponent in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur**



Bei reiner Saccharoselösung werden im Temperaturbereich von 5 bis 40 °C für alle untersuchten Konzentrationen Fließexponenten $n(J)$ von über 0,99 erhalten.

Ab 50 °C setzen deutliche Strukturveränderungen ein, die durch ein plötzliches Abnehmen des Fließexponenten $n(\mathbf{J})$ gekennzeichnet sind. Die einwirkenden Scherkräfte zerstören Strukturausbildungen der reinen Saccharoselösung in diesem Temperaturbereich. Bei einem Trockensubstanzgehalt von 70 g/100 g ist ein Maximum der Strukturveränderung zu erkennen. Hier wird bei 70 °C ein Fließexponenten $n(\mathbf{J})$ von 0,885 erhalten. Dem gegenüber werden bei einem Trockensubstanzgehalt von 60 g/100 g nur geringe Veränderungen beobachtet. Es ist denkbar, daß die Ausbildung der Struktur durch die höhere innere Energie begünstigt wird, weil aufgrund der höheren Eigenbewegung, die Moleküle statistisch häufiger zusammentreffen und damit die Wahrscheinlichkeit steigt, daß die wechselwirkenden Molekülteile aufeinandertreffen. Durch die höhere innere Energie und der damit verbundenen Eigenbewegung der Moleküle lockern sich vermutlich auch die Bindungskräfte, die die Moleküle in der Struktur fixieren.

5.6.2 Dicksaft aus Rübe

Auch beim Dicksaft werden Abweichungen vom idealviskosen Fließverhalten beobachtet. Diagramm 24 zeigt das Viskositätsverhalten von Dicksaft mit 60 g/100 g Trockensubstanzgehalt und 40 °C, sowie die entsprechenden Auswertungsparameter nach dem Fließmodell von OSTWALD-DE WAELE.

Im untersuchten Temperatur- und Konzentrationsbereich werden beim Dicksaft Fließexponenten $n(\mathbf{J})$ zwischen 0,990 und 0,998 erhalten. Im Vergleich zur reinen Saccharoselösung weist Dicksaft damit geringere Strukturänderungen aufgrund der Scherbeanspruchung auf (siehe Tabelle 16 und Tabelle 17). Dafür verantwortlich gemacht werden müssen die Nichtsaccharosestoffe, die wahrscheinlich die Saccharosemoleküle an der Strukturausbildung hindern.

Die nur sehr geringen Unterschiede zwischen den Fließexponenten $n(\mathbf{J})$ im untersuchten Temperatur- und Konzentrationsbereich weisen dennoch einen leichten Entwicklungstrend auf.

Im unteren Temperaturbereich steigt der Fließexponent $n(\mathbf{J})$ bei Konzentrationserhöhung. Im oberen Temperaturbereich wird im Gegensatz dazu eine Verringerung des Fließexponent $n(\mathbf{J})$ bei Konzentrationserhöhung beobachtet (siehe Diagramm 25). Für die Technologie ist diese Problematik ohne jegliche Bedeutung.

Diagramm 24 Fließkurve Dicksaft

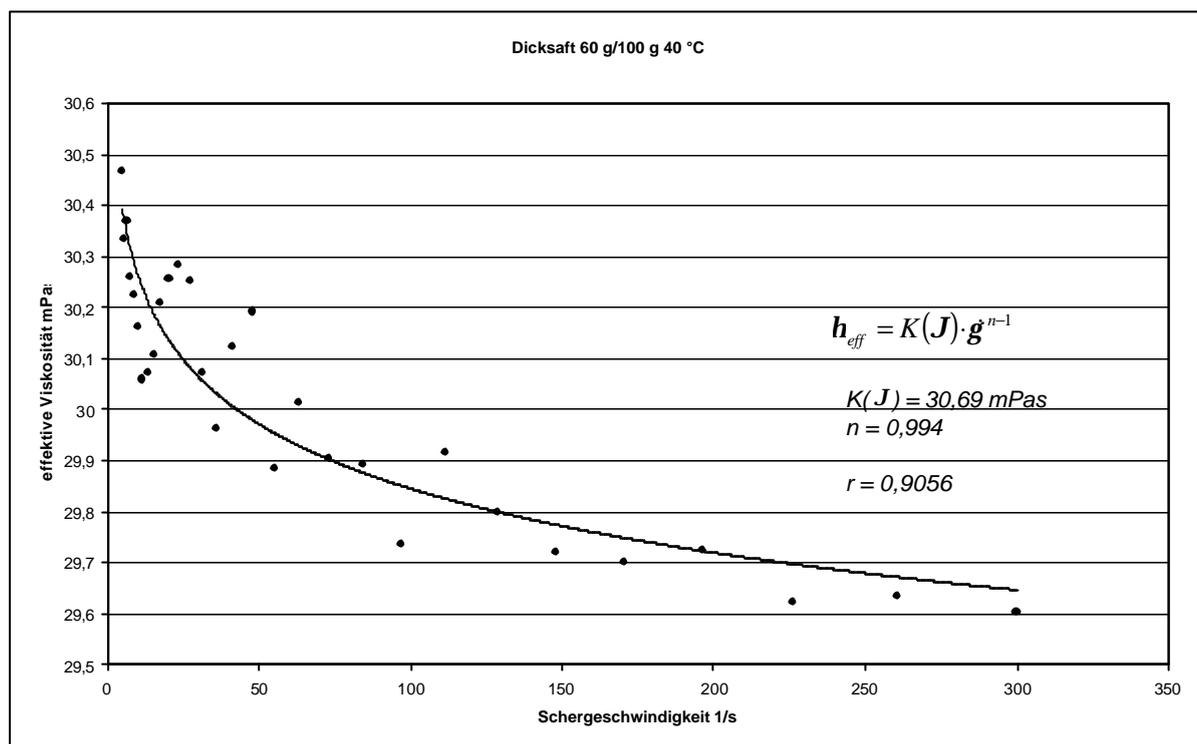


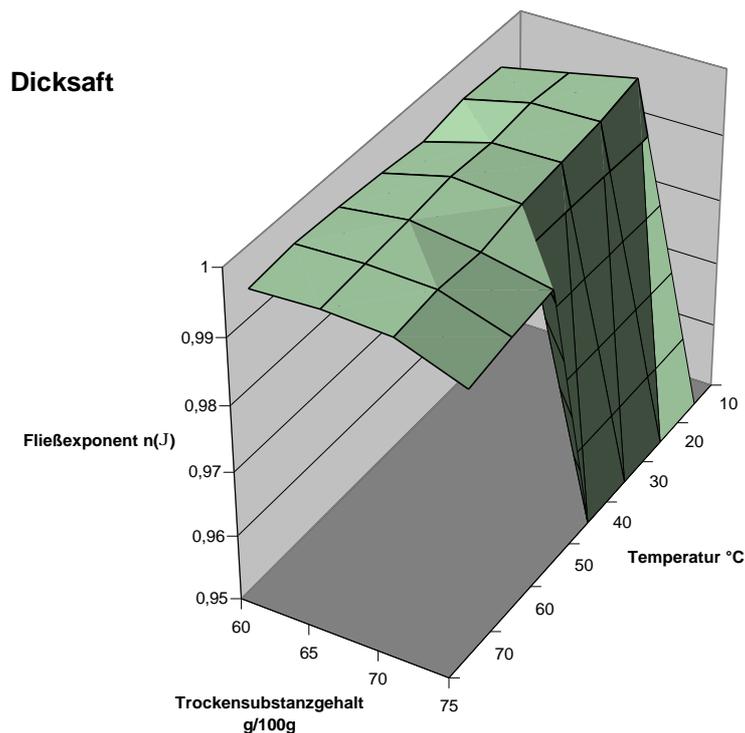
Tabelle 16 Fließverhalten Dicksaft aus Rübe

Fließverhalten von Dicksaft aus Rübe						
K(ϑ) in mPas	WTS = 60%			WTS = 65%		
	J in °C	K(ϑ)	n(ϑ)	r	K(ϑ)	n(ϑ)
70	8,05	0,994	0,8811	13,89	0,995	0,9786
60	11,06	0,995	0,9072	20,59	0,995	0,9369
50	18,59	0,994	0,9056	33,08	0,996	0,9353
40	30,69	0,994	0,9203	59,82	0,997	0,9200
30	52,23	0,993	0,9104	119,04	0,996	0,8912
20	93,98	0,994	0,9114	247,34	0,997	0,9460
15	131,05	0,994	0,8775	373,18	0,997	0,8837
10	186,31	0,994	0,8951	573,32	0,996	0,9778
5	271,04	0,995	0,9069	916,40	0,996	0,9781

Tabelle 17 Fließverhalten Dicksaft aus Rübe

Fließverhalten von Dicksaft aus Rübe						
K(ϑ) in mPas	WTS = 70%			WTS = 75%		
	ϑ in °C	K(ϑ)	n(ϑ)	r	K(ϑ)	n(ϑ)
70	28,74	0,994	0,9640	71,86	0,990	0,9717
60	43,84	0,995	0,9736	121,47	0,991	0,9390
50	73,32	0,994	0,9681	227,00	0,992	0,9086
40	132,52	0,996	0,9190	-	-	-
30	277,07	0,996	0,9568	-	-	-
20	519,03	0,997	0,9554	-	-	-
15	802,95	0,998	0,9502	-	-	-
10	1261,29	0,998	0,9448	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-

Diagramm 25 Fließexponent in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur



5.6.3 Melasse aus Rübe

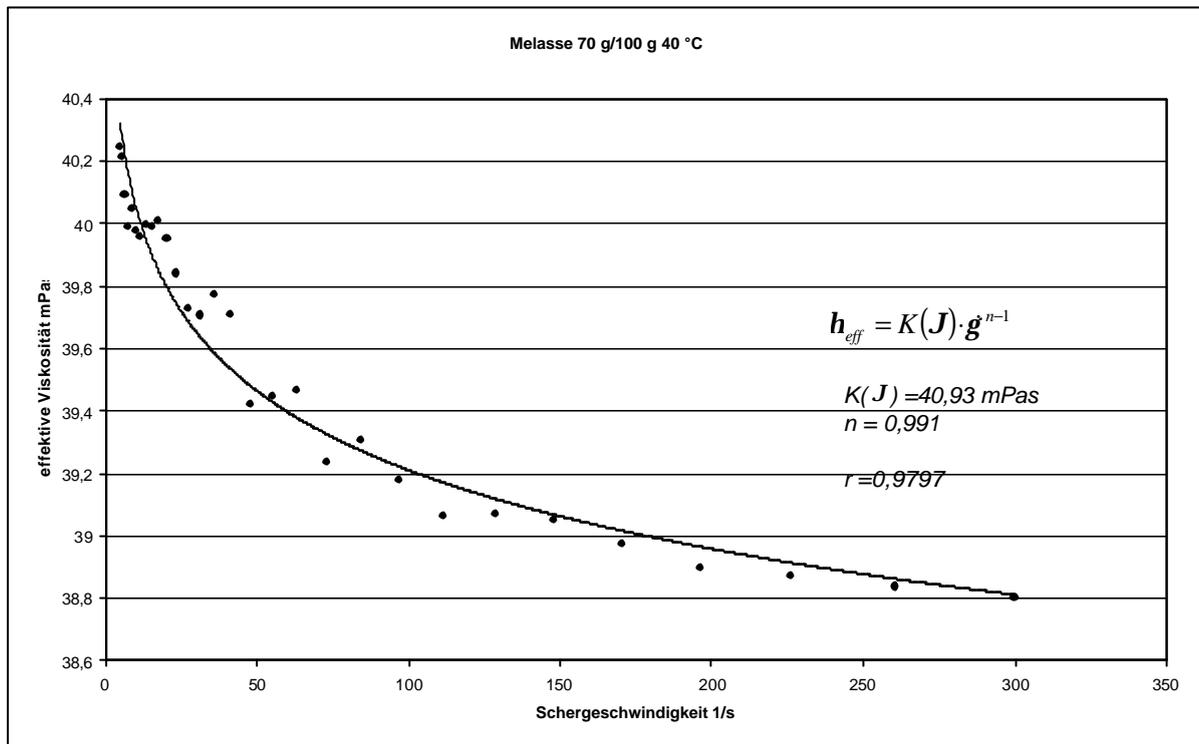
In Diagramm 26 ist am Beispiel von Melasse mit einem Trockensubstanzgehalt von 70 g/100 g und 40 °C das Fließverhalten dargestellt. Der durchgezogene Kurvenverlauf zeigt auch hier die Auswertung nach OSTWALD-DE WAELE mit den angegebenen Parametern.

Die Auswertungsparameter des gesamten untersuchten Konzentrations- und Temperaturbereichs von Melasse mit einer Reinheit von etwa 60 % sind in Tabelle 18 angegeben.

Im Gegensatz zum Dicksaft werden bei der Melasse auffälligere Strukturänderungen aufgrund der Scherbeanspruchung festgestellt. Bei einem Trockensubstanzgehalt von 85 g/100 g und 20 °C fällt $n(J)$ auf 0,956. Die Abhängigkeit des Fließexponenten $n(J)$ von Trockensubstanzgehalt und Temperatur zeigt Diagramm 27.

Es ist festzustellen, daß bei Rübenmelasse mit zunehmender Konzentration der Fließexponent $n(J)$ abnimmt, im niedrigen Temperaturbereich relativ gleichmäßig über den gesamten Konzentrationsbereich, im oberen Temperaturbereich hingegen wird erst beim Trockensubstanzgehalt von 85 g/100 g ein deutliches Absinken des Fließexponenten $n(J)$ beobachtet.

Diagramm 26 Fließkurve Melasse



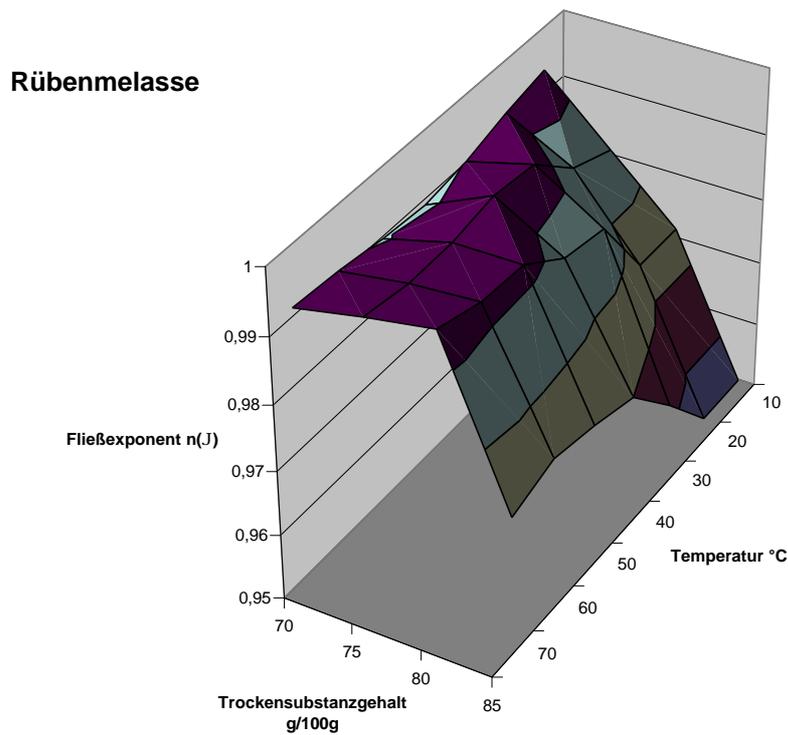
Bedingt durch den geringen Wasseranteil und den hohen Nichtsaccharoseanteil in Melasse kann das Verhalten verursacht werden. Es wird davon ausgegangen, daß in den Bereichen der verstärkten Strukturzerstörung bedingt durch die Scherbeanspruchung, sich bei der Melasse diese Strukturen erst durch eine gewisse Übersättigung bildeten, es aber aufgrund des hohen Nichtsaccharoseanteils nicht zur Kristallbildung kommt.

Tabelle 18 Fließverhalten Melasse aus Rübe

Fließverhalten von Melasse aus Rübe						
$K(\vartheta)$ in mPa·s	Wts = 70%			Wts = 75%		
q in °C	$K(q)$	$n(q)$	r	$K(q)$	$n(q)$	r
70	27,52	0,991	0,9780	59,70	0,993	0,9904
60	40,93	0,991	0,9797	94,52	0,992	0,9858
50	66,07	0,990	0,9901	165,39	0,993	0,9716
40	112,97	0,989	0,9824	317,42	0,994	0,9734
30	210,55	0,990	0,9610	690,53	0,993	0,9875
20	439,90	0,992	0,9807	1471,58	0,987	0,9915
15	671,36	0,992	0,9934	2405,07	0,982	0,9946
10	1071,02	0,993	0,9915	3997,59	0,984	0,9983
5	1782,00	0,994	0,9954	Grenzen des Meßbereichs erreicht		

Tabelle 19 Fließverhalten Melasse aus Rübe

Fließverhalten von Melasse aus Rübe						
$K(\dot{\gamma})$ in mPas	$w_{TS} = 80\%$			$w_{TS} = 85\%$		
q in °C	$K(q)$	$n(q)$	r	$K(q)$	$n(q)$	r
70	198,05	0,995	0,9569	1484,22	0,971	0,9589
60	350,80	0,993	0,9923	2555,12	0,973	0,9686
50	706,04	0,992	0,9959	5997,29	0,972	0,9765
40	1558,92	0,988	0,9908	16811,64	0,971	0,9834
30	3911,95	0,986	0,9961	49801,84	0,965	0,9807
20	11975,34	0,975	0,9823	214240,31	0,956	0,9890
15	22741,03	0,980	0,9879			
10	Grenzen des Meßbereichs erreicht, keine weiteren Messungen möglich			Grenzen des Meßbereichs erreicht, keine weiteren Messungen möglich		
5	Grenzen des Meßbereichs erreicht, keine weiteren Messungen möglich			Grenzen des Meßbereichs erreicht, keine weiteren Messungen möglich		

Diagramm 27 Fließexponent in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur


Das reinheitsabhängige Fließverhalten im Bereich von 70 und 80 % Reinheit zeigt ein ähnliches Verhalten wie Dicksaft. Auch diese geringen scherabhängigen Strukturzerstörungen sind in der Technologie vernachlässigbar.

Tabelle 20 Reinheitsabhängiges Fließverhalten technischer Saccharoselösung

Fließverhalten Melasse aus Rübe, $w_{TS} = 80\%$						
$K(\vartheta)$ in mPas ϑ in °C	q = 70%			q = 80%		
	$K(\vartheta)$	$n(\vartheta)$	r	$K(\vartheta)$	$n(\vartheta)$	r
70	177,41	0,986	0,9786	176,86	0,992	0,9502
60	310,56	0,991	0,9746	354,17	0,992	0,9597
50	687,14	0,992	0,9946	744,97	0,994	0,9795
40	1639,81	0,992	0,9968	1781,11	0,995	0,9931
30	4366,70	0,994	0,9726	3789,60	0,990	0,9909
20	9000,04	0,990	0,9984	12207,87	0,993	0,9956

Tabelle 21 Reinheitsabhängiges Fließverhalten technischer Saccharoselösung

Fließverhalten Melasse aus Rübe, $w_{TS} = 75\%$						
$K(\vartheta)$ in mPas ϑ in °C	q = 70%			q = 80%		
	$K(\vartheta)$	$n(\vartheta)$	r	$K(\vartheta)$	$n(\vartheta)$	r
70	54,31	0,996	0,9777	59,71	0,993	0,9835
60	88,88	0,995	0,9887	96,95	0,993	0,9698
50	157,96	0,995	0,9688	173,55	0,993	0,9492
40	303,39	0,995	0,9668	336,76	0,994	0,9650
30	654,52	0,995	0,9903	725,15	0,995	0,9861
20	1623,46	0,994	0,9950	1803,66	0,996	0,9849
15	2704,03	0,995	0,9918	3037,21	0,996	0,9585
10	4669,21	0,995	0,9794	5315,05	0,996	0,9114

Tabelle 22 Reinheitsabhängiges Fließverhalten technischer Saccharoselösung

Fließverhalten Melasse aus Rübe, $w_{TS} = 70\%$						
$K(\vartheta)$ in mPas ϑ in °C	q = 70%			q = 80%		
	$K(\vartheta)$	$n(\vartheta)$	r	$K(\vartheta)$	$n(\vartheta)$	r
70	25,29	0,991	0,9899	26,80	0,989	0,9638
60	44,84	0,992	0,9798	41,33	0,990	0,9649
50	85,25	0,993	0,9844	69,05	0,990	0,9799
40	148,83	0,993	0,9328	121,59	0,991	0,9453
30	285,50	0,995	0,9299	235,37	0,994	0,9259
20	621,69	0,994	0,9826	504,52	0,995	0,9468
15	970,48	0,994	0,9822	778,57	0,995	0,9780
10				1245,27	0,996	0,9604

5.7 Fließaktivierungsenergie

In diesem Abschnitt werden die Fließaktivierungsenergien angegeben, die zum Überwinden der Potentialbarriere beim Platzwechsel der Moleküle notwendig sind. Unter Verwendung der Gleichung (3.1.1) aus dem Abschnitt 3.1.1 erfolgten die Berechnungen.

Die Fließaktivierungsenergie nimmt mit steigender Konzentration der Saccharoselösung zu. Beim Ansteigen der Reinheit wird eine geringfügige, degressive Erhöhung der Fließaktivierungsenergie beobachtet. So sind die Aktivierungsenergien zwischen Saccharoselösungen mit 90 % und 100 % Reinheit nahezu identisch (siehe Tabelle 23).

Tabelle 23 Fließaktivierungsenergie von Saccharoselösungen

Fließaktivierungsenergie E_a in J/mol						
Reinheit	Trockensubstanzgehalt					
	60 g/100 g	65 g/100 g	70 g/100 g	75 g/100 g	80 g/100 g	85 g/100 g
100%	685	790	929	1091		
90%	685	797	933	1084		
80%			851	1009	1150	
70%			826	987	1130	
60%			801	965	1110	1434

5.8 Kapitelzusammenfassung

Im Abschnitt zum fluiddynamischen Verhalten von Saccharoselösungen wurde ein Modellansatz weiterentwickelt zur Beschreibung der Temperatur-, Trockensubstanzgehalts- und Reinheitsabhängigkeit der dynamischen Viskosität mit mathematisch-statistischen Methoden.

Aus den erstmals erhaltenen Meßwerten der dynamischen Viskosität von Saccharoselösungen bis zu Temperaturen von 130 °C konnten unter Verwendung des entwickelten Modellansatzes empirische Zahlenwertgleichungen zur Berechnung der dynamischen Viskosität in Abhängigkeit von Temperatur, Konzentration und Reinheit ermittelt werden.

Der Vergleich der Meßwerte im Temperaturbereich von 80 bis 130 °C mit den extrapolierten Werten bisher aus der Literatur verfügbarer Berechnungsgleichungen zeigt deutlich Abweichungen zu den Meßwerten unter originären Technologiebedingungen. Alle extrapolierten Viskositätswerte liegen unterhalb der gemessenen Werte.

Die Abhängigkeit der dynamischen Viskosität bedingt durch den Standort der Dicksäfte und Melassen aus Rübe wurde ebenso ermittelt, wie die Unterschiede zur Saccharoselösung aus Rohr.

Die Viskositätswerte von Melassen weisen dabei standortbedingt im Vergleich zu Dicksäften eine größere Streubreite auf und die Viskositätswerte von technischen Saccharoselösungen aus Rohr liegen deutlich über denen aus Rübe.

Die Untersuchungen zum nicht-Newtonschen Fließverhalten ergaben für alle Saccharoselösungen Fließkurven die vom idealviskosen Fließverhalten abwichen. Insgesamt sind diese beobachteten Abweichungen sehr gering und produktspezifisch verschieden und ausschließlich bei Melasse und reiner Saccharoselösung von Bedeutung.

Die geringsten Abweichungen vom idealviskosen Fließverhalten wurden beim Dicksaft beobachtet. Zu den deutlichsten Abweichungen und damit zu den stärksten scherungsbedingten Strukturänderungen kam es bei reinen Saccharoselösungen mit Temperaturen über 50 °C und Trockensubstanzgehalten von etwa 70 g/100 g, sowie bei Melasse mit Trockensubstanzgehalten über 80 g/100 g und niedrigen Temperaturen.

Aus den bestimmten Viskositätsdaten konnten die notwendigen Fließaktivierungsenergien, die zum Überwinden der Potentialbarriere beim Platzwechsel der Moleküle notwendig sind, für die untersuchten Trockensubstanzgehalte berechnet werden.

6. Untersuchungsergebnisse zum Oberflächenspannungsverhalten

Nachstehend werden die Untersuchungsergebnisse der Oberflächenspannungsmessung zeit-, temperatur-, konzentrations- und reinheitsabhängig dargestellt und aus den Meßdaten Näherungsgleichungen für die entsprechenden Zusammenhänge abgeleitet.

6.1 Zeitabhängiges Verhalten der Oberflächenspannung

Durch die Messungen wurde zunächst für alle Temperatur-, Konzentrations- und Reinheitsabstufungen der funktionelle Zusammenhang des Oberflächenspannungsverhaltens in Abhängigkeit von der Zeit erhalten.

Erstmals wurde durch die Anwendung dieses Meßverfahrens ein zeitabhängiges Verhalten des Stoffkennwertes ermittelt. Das Oberflächenspannungsverhalten korreliert mit den rheologischen Untersuchungen, die die Änderung der molekularen Wechselwirkungen infolge mechanischer Belastung zeigen.

Durch Alterung der Oberfläche nimmt in jedem Fall die Oberflächenspannung ab und die Meßkurven weisen charakteristische Verläufe auf (Diagramm 28).

Reine Saccharoselösungen zeigen zeitabhängig lineare Verringerungen der Oberflächenspannung, technische Saccharoselösungen (Dicksaft, Melasse) dagegen deutlich degressiv abnehmende Oberflächenspannungen.

Die Höhe der Oberflächenspannungsreduzierung unterscheidet sich dabei ebenfalls deutlich. Bei reinen Saccharoselösungen verringert sich die Oberflächenspannung während der Oberflächenalterung über 5 Minuten um durchschnittlich 6,9 %. Bei technischen Saccharoselösungen wie Dicksaft und Melasse sinkt die Oberflächenspannung durchschnittlich um 17,6 %.

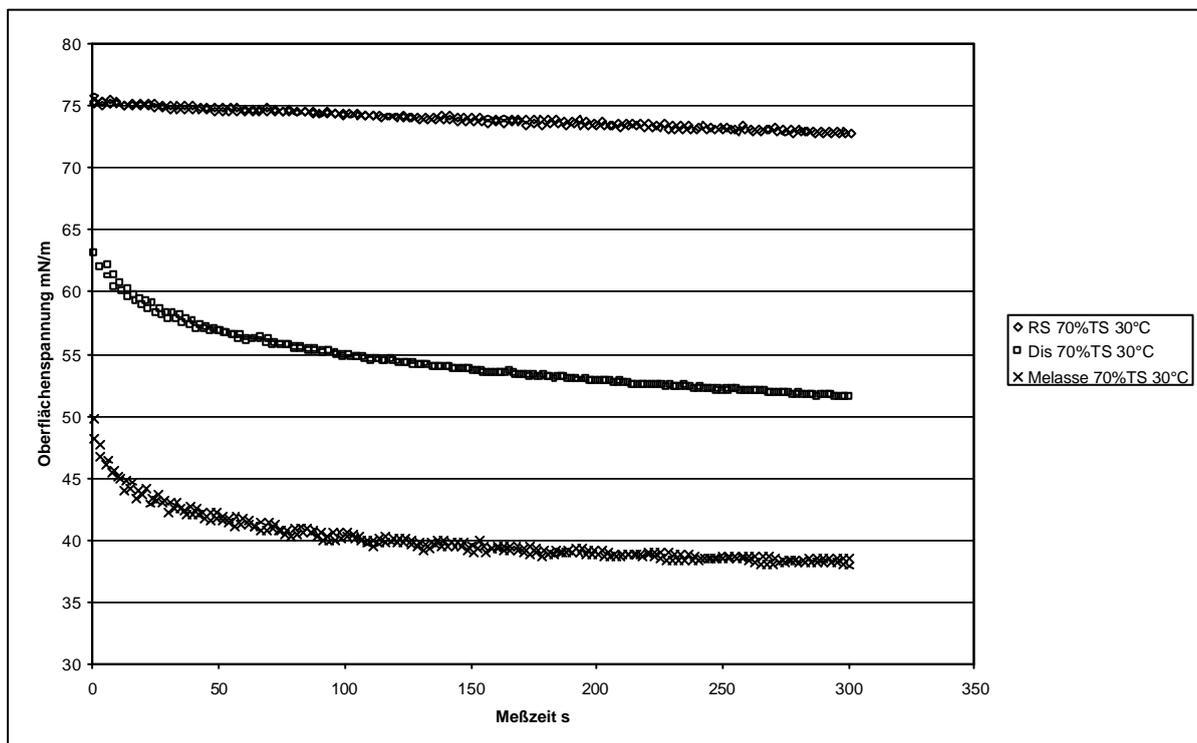
Dieses Verhalten läßt auf unterschiedliche Mechanismen schließen.

Die deutliche Verminderung der Oberflächenspannung der technischen Saccharoselösungen (Dicksaft, Melasse) ist durch die Anwesenheit von oberflächenaktiven Substanzen (Tensiden) zu erklären. Durch Diffusion reichern diese sich in der Oberfläche an und setzen dabei die Oberflächenspannung solange herab, bis eine maximale Konzentration dieser Substanzen in der Oberfläche erreicht ist.

In der reinen Saccharoselösung sind diese oberflächenaktiven Substanzen nicht vorhanden. Für die beobachteten Oberflächenspannungsänderungen kommen deshalb nur Strukturänderungen der wäßrigen Saccharoselösung selbst in Betracht. Dies bestätigen rheologische Untersuchungen am gleichen Stoffsystem. Hier wurde nicht-NEWTONsches Verhalten vor allem im Schergeschwindigkeitsbereich $0 \dots 50 \text{ s}^{-1}$ gefunden.⁴³

Die Ausbildung einer Nahordnung in Form von Clusterbildung bzw. Molekülausrichtung kann die Ursache für das beobachtete Verhalten sein. Die Auswirkungen dieser Strukturveränderungen auf die Oberflächenspannung sind zunächst wesentlich geringer als die Auswirkungen der oberflächenaktiven Substanzen in den technischen Saccharoselösungen. Vergleichsweise wurden Messungen der Oberflächenspannung von bidestilliertem Wasser durchgeführt. Hier konnte keine Zeitabhängigkeit der Meßwerte festgestellt werden.

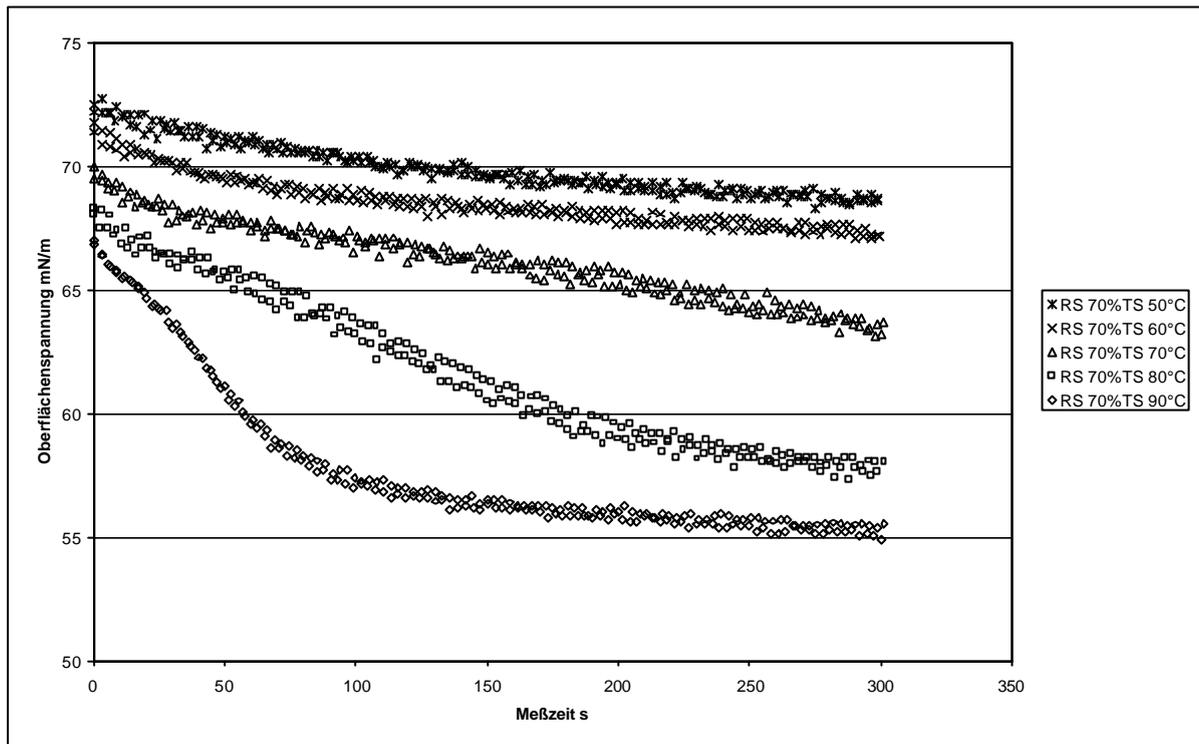
Diagramm 28 **Zeitabhängiges Verhalten der Oberflächenspannung**



⁴³ Schmidt, T.; Christoph, D.; Senge, B.: Non-Newtonian-Behaviour of Pure Sucrose Solution. ICUMSA Tagung Berlin 1998, Poster

Bei höheren Konzentrationen und Temperaturen laufen die Orientierungs- und Strukturierungsvorgänge mit größerer Geschwindigkeit ab (Diagramm 29).

Diagramm 29 Temperaturabhängige Ausbildung einer Nahordnung in reiner Saccharoselösung



Innerhalb der Versuchseinstellung wird unmittelbar nach dem Meßbeginn ein verstärktes Absinken der Oberflächenspannung detektiert. Die Meßkurven der Temperaturen 80 °C und 90 °C erreichen in kürzerer Zeit, aufgrund der höheren inneren Energie, einen Gleichgewichtszustand mit konstanter Oberflächenspannung. Dabei treten in diesem Bereich vergleichbar hohe Oberflächenspannungsabsenkungen auf, wie sie für die technischen Saccharoselösungen ermittelt wurden.

Diagramm 30 zeigt für reine Saccharoselösung ein Maximum der Oberflächenspannungsabnahme bei einem Trockensubstanzgehalt zwischen 50 und 60 g/100 g. Ansatzweise ist dies auch im Diagramm 31 für Dicksaft zu erkennen.

Das heißt, die Auswirkungen der Orientierungs- und Strukturierungsvorgänge auf die Oberflächenspannung erreichen in diesem Konzentrationsbereich ein Maximum.

Steigt die Konzentration der Saccharosemoleküle, tritt eine verstärkte Affinität der Saccharosemoleküle zu den Wassermolekülen ein, indem sie zur Ausbildung der Hydrathülle beitragen. Dabei werden immer mehr zwischenmolekulare Wechselwirkungskräfte im gleichen Zeitabschnitt kompensiert. Die Oberflächenspannung nimmt schneller ab.

Steigt die Konzentration weiter, stehen immer weniger Wassermoleküle für die Orientierungs- und Strukturierungsvorgänge zur Verfügung. Die Saccharosemoleküle behindern sich gegenseitig bei der Ausbildung der Hydrathülle, da sie um die verbleibenden Wassermoleküle konkurrieren.

Die Oberflächenspannung verringert sich nun weniger stark.

Diagramm 30 **Prozentuale Verringerung der Oberflächenspannung reiner Saccharoselösung innerhalb der Meßzeit von 5 Minuten**

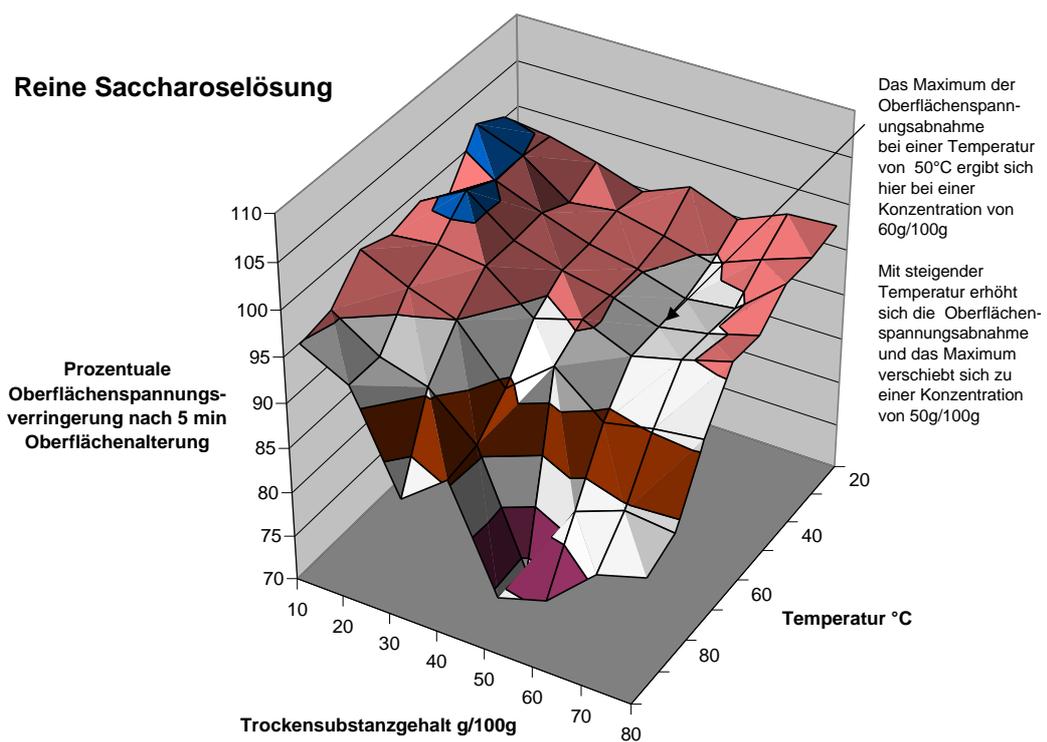
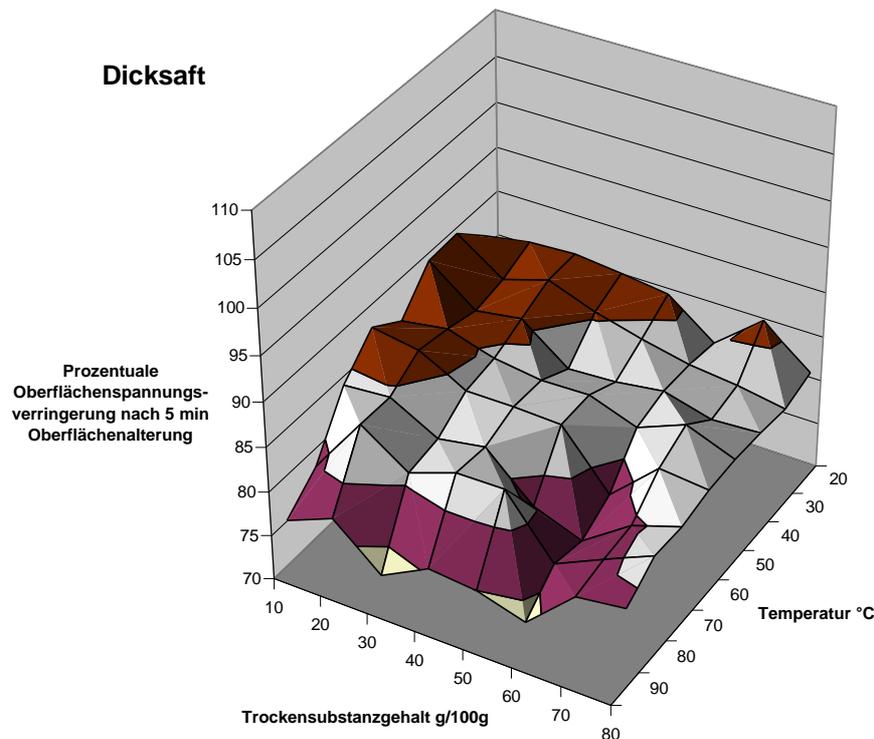


Diagramm 31 **Prozentuale Verringerung der Oberflächenspannung von Dicksaft innerhalb der Meßzeit**



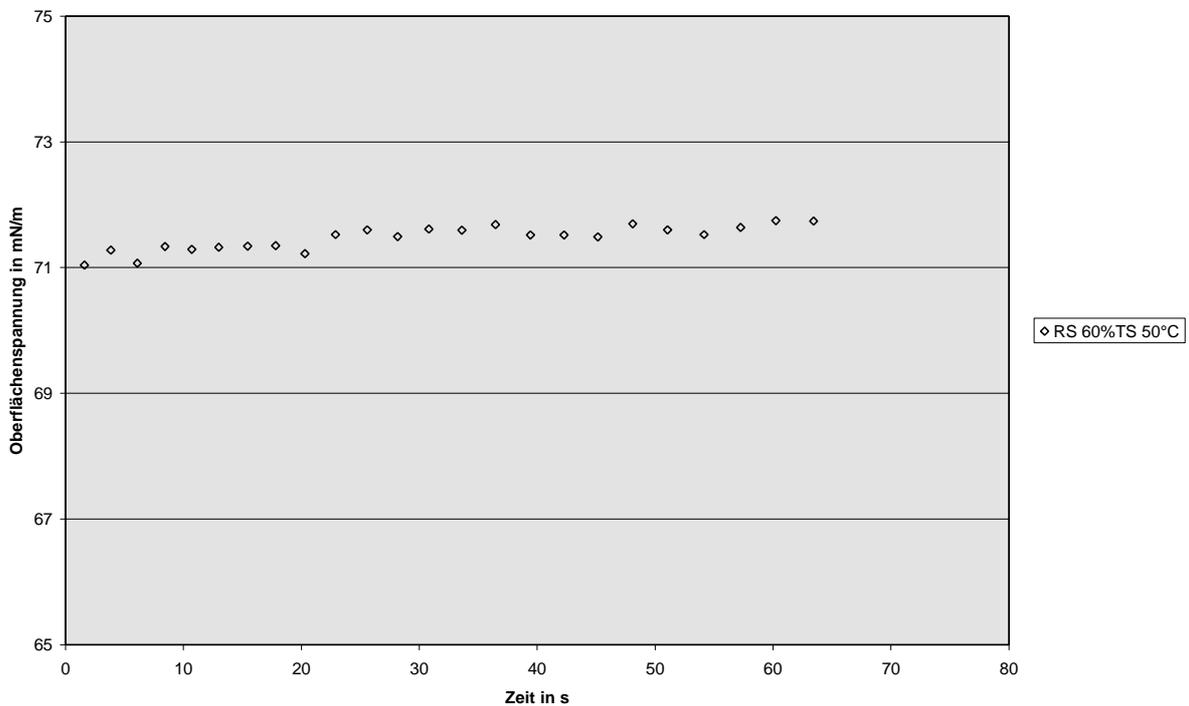
Um Oberflächenspannungswerte für neu ausgebildete Oberflächen zu erhalten und Alterungserscheinungen auszuschließen, wurde die Meßmethodik zur Bestimmung der Oberflächenspannung modifiziert.

Dabei wurde der untersuchte Probentropfen während der Messung kontinuierlich vergrößert. Ein Gleichgewichtszustand stellte sich zwischen Oberflächenalterung und –neubildung ein. Zeitliche Konstanz der Oberflächenspannung war die Folge (Diagramm 32).

Aufgrund der relativ langen Zeit zur Einstellung des Gleichgewichts zwischen Oberflächenneubildung und Oberflächenalterung sind diese Ergebnisse nicht relevant für die Prozeßbedingungen in der Zuckertechnologie.

Eine mathematische Methode erschien daher sinnvoller zur Bestimmung der Oberflächenspannung für neu ausgebildete Oberflächen (siehe nachfolgender Abschnitt).

**Diagramm 32 Oberflächenspannung bei kontinuierlicher
Oberflächenvergrößerung des Tropfens**



6.2 Konzentrations- und temperaturabhängiges Verhalten der Oberflächenspannung

Neu ausgebildete Oberflächen dürften für sich in Bewegung befindliche Lösungen im Zuckerfabrikationsprozeß der Normalfall sein.

Die Oberflächenspannungen dieser neu gebildeten Oberflächen wurden mathematisch aus den ersten 50 Sekunden der zeitabhängigen Meßkurven durch Regression und Extrapolation zum Zeitpunkt „null“ berechnet und für die Bestimmung der Abhängigkeit der Oberflächenspannung von Konzentration und Temperatur verwendet.

Als günstigste Variante zur empirischen Beschreibung der Konzentrations- und Temperaturabhängigkeit wurde nach dem Test verschiedener Regressionsmodelle der folgende Ansatz ermittelt:

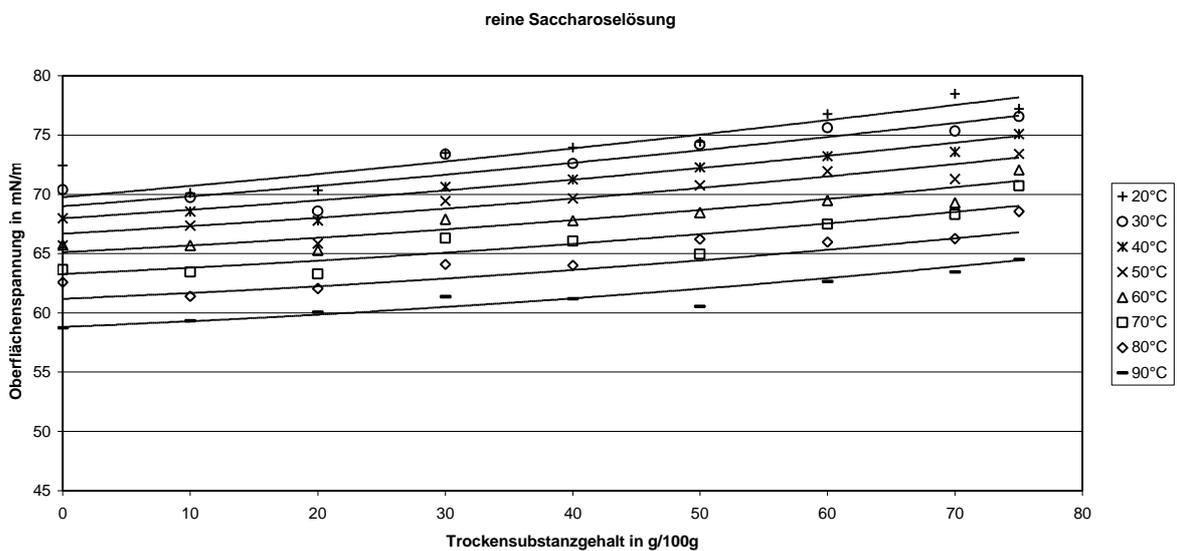
$$\mathbf{s}(w_{TS}, \mathbf{J}) = A(\mathbf{J}) \cdot w_{TS}^2 + B(\mathbf{J}) \cdot w_{TS} + C(\mathbf{J}) \quad (6.2.1)$$

Beide Parameter werden durch Polynome der 1. und 2. Ordnung bestimmt und gehen vom mathematischen Ansatz her gleichwertig in die Korrelation ein.

6.2.1 Reine Saccharoselösungen

Die eigenen Meßwerte zeigen bei reinen Saccharoselösungen das aus der Literatur⁴⁴ bekannte Verhalten, die Zunahme der Oberflächenspannung mit steigender Saccharosekonzentration, sowie sinkende Oberflächenspannungen bei Temperaturerhöhung (siehe Diagramm 33).

Diagramm 33 Oberflächenspannung reiner Saccharoselösung



Durch Regression der Oberflächenspannungsmesswerte erhält man für reine Saccharoselösungen eine Zahlenwertgleichung zur Bestimmung der Oberflächenspannung in Abhängigkeit von Temperatur und Trockensubstanzgehalt mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,981:

$$s(w_{TS}, J) = A \cdot w_{TS}^2 + B \cdot w_{TS} + C \quad (6.2.2)$$

$$A = 2,09 \cdot 10^{-6} \cdot J + 2,35 \cdot 10^{-4} \quad (6.2.2.1)$$

⁴⁴ Baloh: Wärmetlas für die Zuckerindustrie 1975

$$B = 8,98 \cdot 10^{-6} \cdot J^2 - 1,6808 \cdot 10^{-3} \cdot J + 0,121713 \quad (6.2.2.2)$$

$$C = -1,34278 \cdot 10^{-3} \cdot J^2 - 8,6525 \cdot 10^{-3} \cdot J + 70,4731 \quad (6.2.2.3)$$

Mit der Temperatur ϑ in °C und dem Trockensubstanzgehalt w_{TS} in g/100 g wird die Oberflächenspannung σ in mN/m erhalten. Der Meßbereich ist festgelegt auf $20 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 90 \text{ °C}$ und $0 \text{ g/100 g} \leq w_{TS} \leq 75 \text{ g/100 g}$. Ein sicherer Definitionsbereich ist bei der Meßtemperatur von 20 °C bis $w_{TS} = 72 \text{ g/100 g}$ gegeben.

Im Anhang sind die Oberflächenspannungswerte für reine Saccharoselösung berechnet aus Gleichung (6.2.2) angegeben.

Im Vergleich zu den von BALOH⁴⁵ angegebenen Werten liegen die eigenen Meßwerte der Oberflächenspannung durchschnittlich um 4 % niedriger. Die Abweichung variiert in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur. Die Literaturwerte wurden berechnet unter Zuhilfenahme der bekannten Oberflächenspannungen des Wassers und den von HIRSCHMÜLLER⁴⁶ angegebenen Oberflächenspannungen für Saccharose-Wasser-Lösungen bei einer Temperatur von 21 °C und Konzentrationen bis zu 62,7 g/100 g.

Beträgt die Abweichung bei einer Konzentration von 10 g/100 g durchschnittlich 3 % vergrößert sich die Differenz mit steigender Konzentration auf 5,3 % bei 70 g/100 g.

Temperaturabhängig ergeben sich bei 90 °C mit durchschnittlich 6 % die größten Abweichungen, während zwischen 30 und 60 °C die geringsten Abweichungen mit 3 % ermittelt werden.

Ursachen dafür müssen im Einsatz modernster Meßmittel und in der damaligen Berechnungsmethode gesehen werden.

Außerdem sei auch auf die Probenherstellung hingewiesen. Durch die Probenherstellung aus Raffinade (eine Reinigung der Lösung mit Knochenkohle erfolgte nicht) sind Spuren von Nichtsaccharosestoffen nicht auszuschließen, die zu Oberflächenspannungsverringeringen führen können.

⁴⁵ Baloh: Wärmetlas für die Zuckerindustrie 1975

⁴⁶ Hirschmüller, H.: Principles of Sugar Technology. Hrsg.: P. Honig Bd. 1, Amsterdam 1953, 20

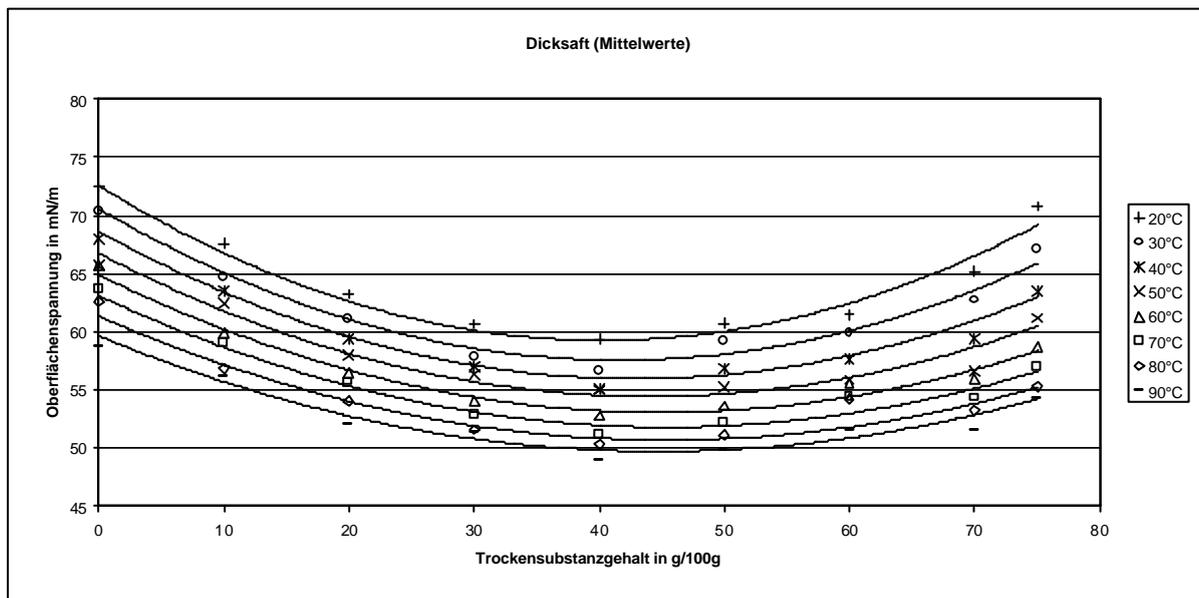
Auch ergeben sich aus Gleichung (6.2.2), aufgrund des verwendeten Regressionsmodells, für Saccharosegehalte unter 10 g/100 g geringere Werte als die bestimmten Meßwerte. Die berechneten Oberflächenspannungen liegen für die Gehalte von 0 g/100 g bis zu maximal 3 % unter den tatsächlich gemessenen Werten für doppelt destilliertes Wasser.

6.2.2 Technische Saccharoselösung Dicksaft

Das konzentrationsabhängige Verhalten der Oberflächenspannung der technischen Saccharoselösung Dicksaft unterscheidet sich deutlich vom Verhalten reiner Saccharoselösung.

Bei Konzentrationen unter 40 g/100 g verringert sich die Oberflächenspannung des Dicksaftes mit steigender Konzentration. Ab Konzentrationen über 40 g/100 g steigt die Oberflächenspannung mit zunehmender Konzentration. Ein deutliches Minimum der Oberflächenspannung stellt sich bei einer Konzentration von 40 g/100 g ein (Diagramm 34).

Diagramm 34 Oberflächenspannung technischer Saccharoselösung Dicksaft



Verantwortlich für dieses Verhalten müssen die Nichtsaccharosestoffe der technischen Saccharoselösungen gemacht werden. Unter diesen befinden sich Saponine, die oberflächenaktive Eigenschaften besitzen.

Diese Substanzen können nur zusammen mit den Wassermolekülen ihre die Oberflächenspannung herabsetzenden Eigenschaften optimal entfalten. Mit der

Trockensubstanzgehaltserhöhung der Lösung kommt es auch zur Konzentrierung der Saponine, die im niedrigen Trockensubstanzgehaltsbereich immer noch ausreichend viele Wassermoleküle für die Entfaltung ihrer Eigenschaften vorfinden. Es kommt aufgrund des Wasserüberschusses zur Oberflächenspannungsabsenkung.

Da die Saccharosemoleküle ihrerseits sich ebenfalls mit den Wassermolekülen in Wechselwirkung befinden und sie zur Bildung der Hydrathülle benötigen, stehen mit steigender Saccharosekonzentration immer weniger freie Wassermoleküle zur Verfügung. Es kommt zur Konkurrenz um die Wassermoleküle. In dessen Verlauf werden mit steigendem Trockensubstanzgehalt die oberflächenaktiven Substanzen verdrängt und die Oberflächenspannung steigt an. Die Regression der Meßwerte ergab folgende Zahlenwertgleichung für die Oberflächenspannung von Dicksaft:

$$\mathbf{s}(w_{TS}, \mathbf{J}) = A \cdot w_{TS}^2 + B \cdot w_{TS} + C \quad (6.2.3)$$

$$A = 4,0372 \cdot 10^{-7} \cdot \mathbf{J}^2 - 9,1 \cdot 10^{-5} \cdot \mathbf{J} + 9,87 \cdot 10^{-3} \quad (6.2.3.1)$$

$$B = -8,2877 \cdot 10^{-6} \cdot \mathbf{J}^2 + 4,0234 \cdot 10^{-3} \cdot \mathbf{J} - 0,7386 \quad (6.2.3.2)$$

$$C = 2,38 \cdot 10^{-4} \cdot \mathbf{J}^2 - 0,2108 \cdot \mathbf{J} + 76,69 \quad (6.2.3.3)$$

Der Korrelationskoeffizient der Gleichung beträgt 0,989. Gültig ist die Gleichung im Bereich $20 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 90 \text{ °C}$ und $0 \text{ g/100 g} \leq w_{TS} \leq 75 \text{ g/100 g}$. Die Oberflächenspannung σ in mN/m wird durch Einsetzen der Temperatur ϑ in °C und des Trockensubstanzgehaltes w_{TS} in g/100 g erhalten. Die mit Gleichung (6.2.3) berechneten Werte enthält die Tabelle 39 im Anhang.

Die Überprüfung des Oberflächenspannungsverhaltens von Originalproben aus der Verdampfstation Baddeckenstedt, also Proben, die nicht durch Rückverdünnung verändert wurden, bestätigen den typischen Kurvenverlauf (Diagramm 35). Gravierende Veränderungen der Oberflächenspannung aufgrund der Rückverdünnung können damit ausgeschlossen werden.

Wie schon das konzentrationsabhängige Verhalten von reiner Saccharoselösung und Dicksaft, zeigt auch das temperaturabhängige Verhalten dieser Lösungen deutliche Unterschiede.

Bei reiner Saccharoselösung nimmt die Oberflächenspannung mit steigender Temperatur stärker ab, während beim Dicksaft eine Oberflächenspannungsdgression mit zunehmender Temperatur bestimmt wird (Diagramm 36). Wasser zeigt dagegen eine lineare Funktion.

Diagramm 35 Oberflächenspannung der Originalsäfte aus der Verdampfstation Baddeckenstedt

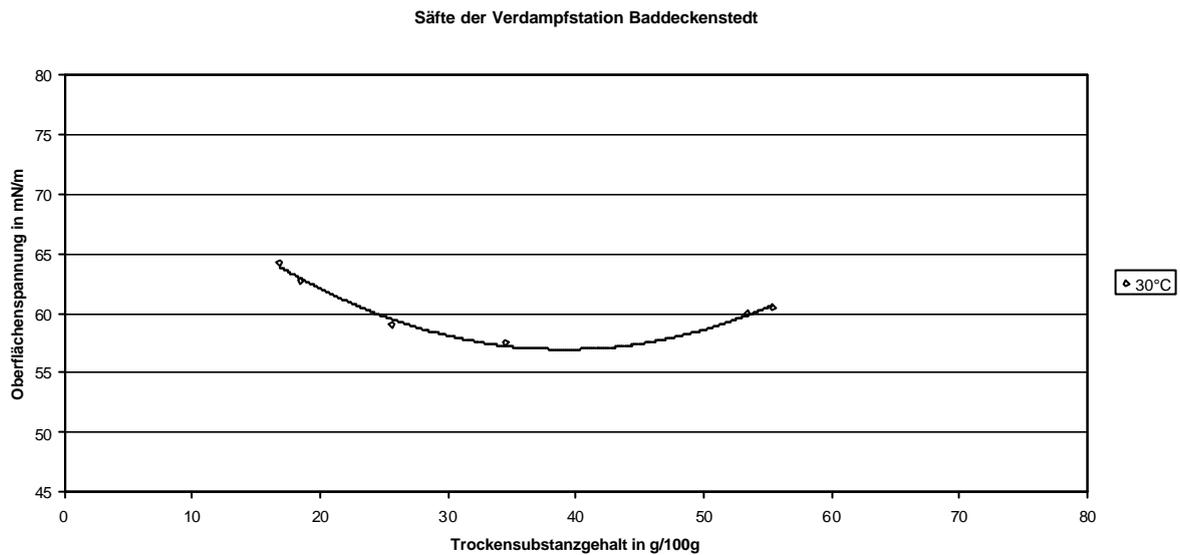
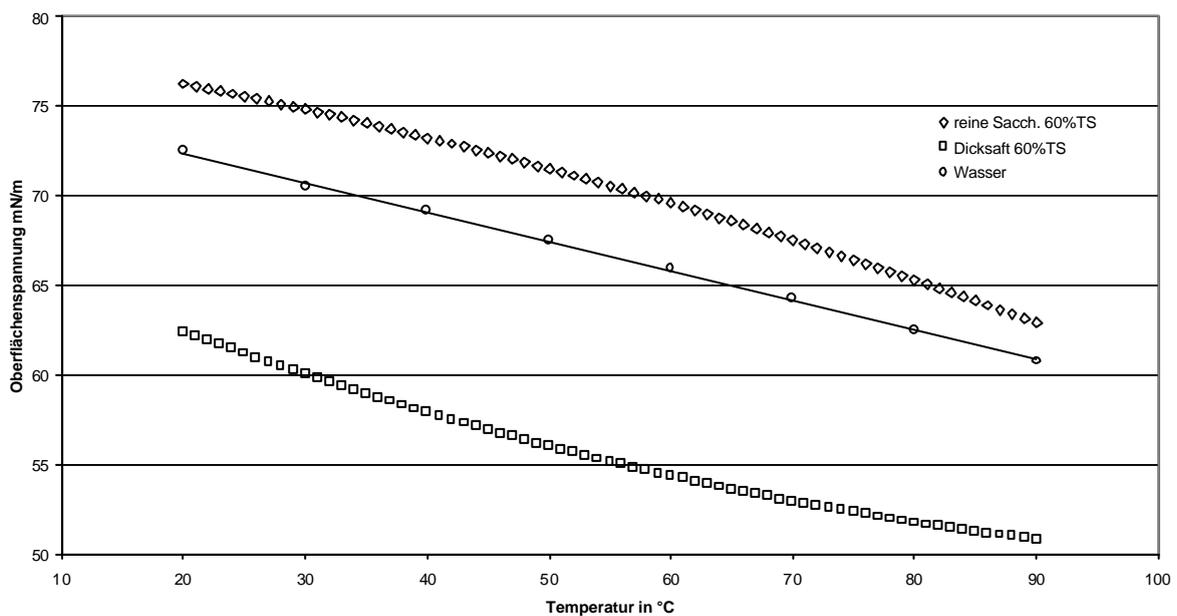


Diagramm 36 Temperaturabhängige Oberflächenspannung von reiner Saccharoselösung und Dicksaft, sowie Wasser

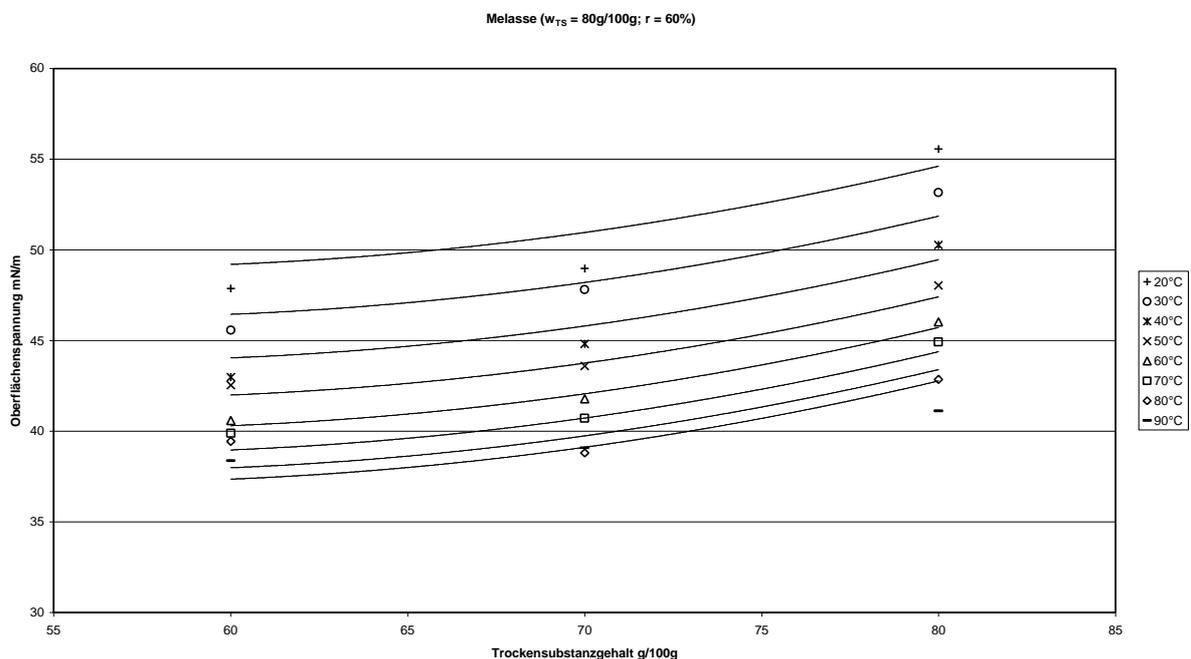


6.2.3 Technische Saccharoselösung Melasse

Das konzentrations- und temperaturabhängige Verhalten der Melasse ist mit dem des Dicksaftes vergleichbar. Für den untersuchten Konzentrationsbereich wurde für Melasse aber kein Minimum der Oberflächenspannung gefunden, sie nimmt mit steigender Konzentration zu (Diagramm 37). Absolut verglichen ist die Oberflächenspannung von Melasse geringer als die von Dicksaft mit gleicher Konzentration, was den molekularen Aufbau (die chemische Zusammensetzung) bestätigt.

Eine empirische Näherungsgleichung zur Berechnung der Oberflächenspannung von Melasse ist im folgenden Abschnitt angegeben. In diese Gleichung ist neben Temperatur und Trockensubstanzgehalt auch die Reinheit als Einflußgröße eingearbeitet.

Diagramm 37 Oberflächenspannung technischer Saccharoselösung Melasse



6.3 Reinheitsabhängiges Verhalten der Oberflächenspannung

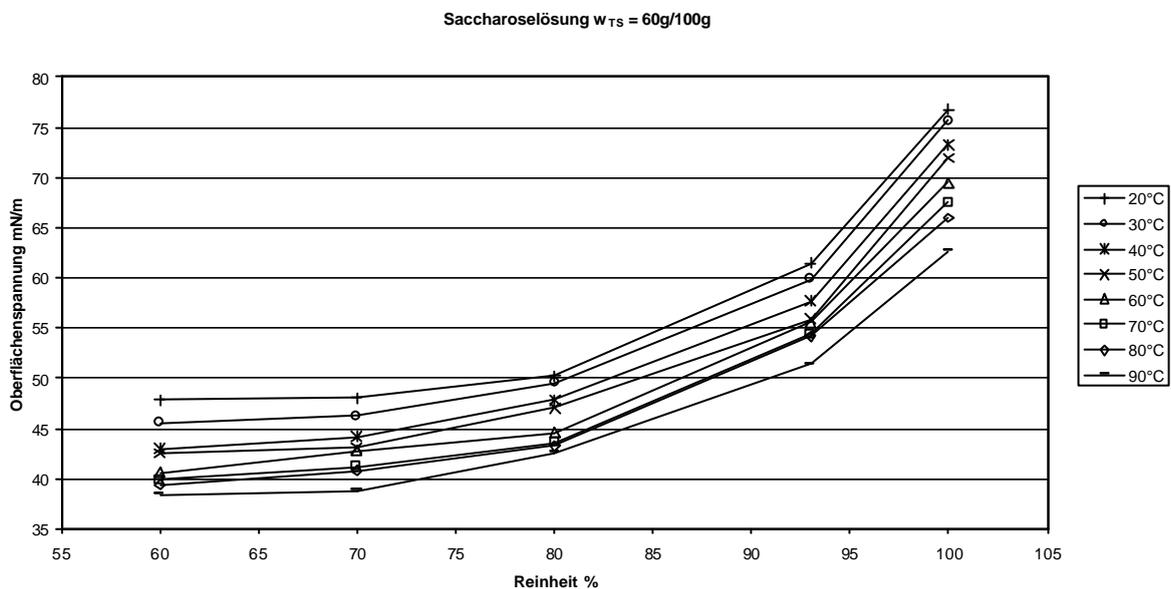
Das reinheitsabhängige Verhalten wurde durch die Auswertung der Meßwerte der reinen Saccharoselösungen, der Dicksäfte und der Melassen mit verschiedenen Reinheitsabstufungen

bestimmt. Auch bei diesen Untersuchungen wurde von neu gebildeten Oberflächen, die noch keiner Alterung unterlagen, ausgegangen.

Die erhaltenen Untersuchungsergebnisse müssen als Unikate betrachtet werden.

Mit sinkenden Reinheiten nimmt die Oberflächenspannung degressiv ab (Diagramm 38), so daß zwischen den Reinheiten 70 % und 60 % kaum Unterschiede in der Oberflächenspannung deutlich werden.

Diagramm 38 Oberflächenspannung von Saccharoselösungen unterschiedlicher Reinheit und Temperatur



Durch Regression der Meßwerte aller untersuchten Saccharoselösungen wird die folgende Gleichung mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,992 erhalten:

$$s(w_{TS}, J, q) = \left(\begin{array}{l} (0,013895 \cdot w_{TS}^2 - 1,67165 \cdot w_{TS} + 29,769) + \\ (0,00144 \cdot J^2 - 0,3241 \cdot J + 29,0254) + \\ \exp\left(28349,78 \cdot \left(\frac{q}{q+200}\right)^{10} + 3,8245\right) \end{array} \right) \quad (6.2.4)$$

Der Gültigkeitsbereich reicht von $20\text{ °C} \leq \vartheta \leq 90\text{ °C}$, $60\text{ g}/100\text{ g} \leq w_{TS} \leq 80\text{ g}/100\text{ g}$ und $60\% \leq q \leq 100\%$. Zu beachten ist dabei, daß im Trockensubstanzbereich von

$75 \text{ g}/100 \text{ g} \leq w_{TS} \leq 80 \text{ g}/100 \text{ g}$ der Reinheitsbereich auf $60 \% \leq q \leq 80 \%$ eingeschränkt ist. Die Oberflächenspannung wird in mN/m erhalten.

Diagramm 39 bis Diagramm 41 zeigen die Meßwerte zusammen mit den entsprechenden Regressionskurven. Die Kurvenzüge für die Reinheiten von 60, 70, 80 % sind bei $w_{TS} = 60 \text{ g}/100 \text{ g}$ von theoretischem Interesse.

Diagramm 39 **Reinheitsabhängigkeit der Oberflächenspannung mit**
 $w_{TS} = 60 \text{ g}/100 \text{ g}$

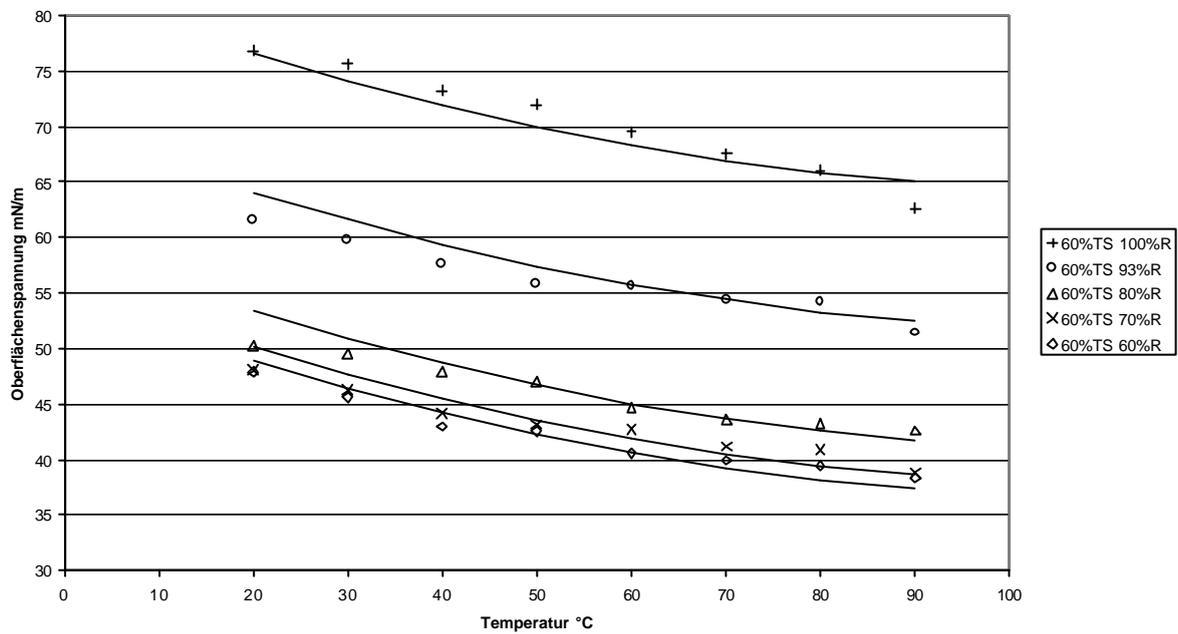


Diagramm 40 Reinheitsabhängigkeit der Oberflächenspannung mit $w_{TS} = 70 \text{ g/100 g}$

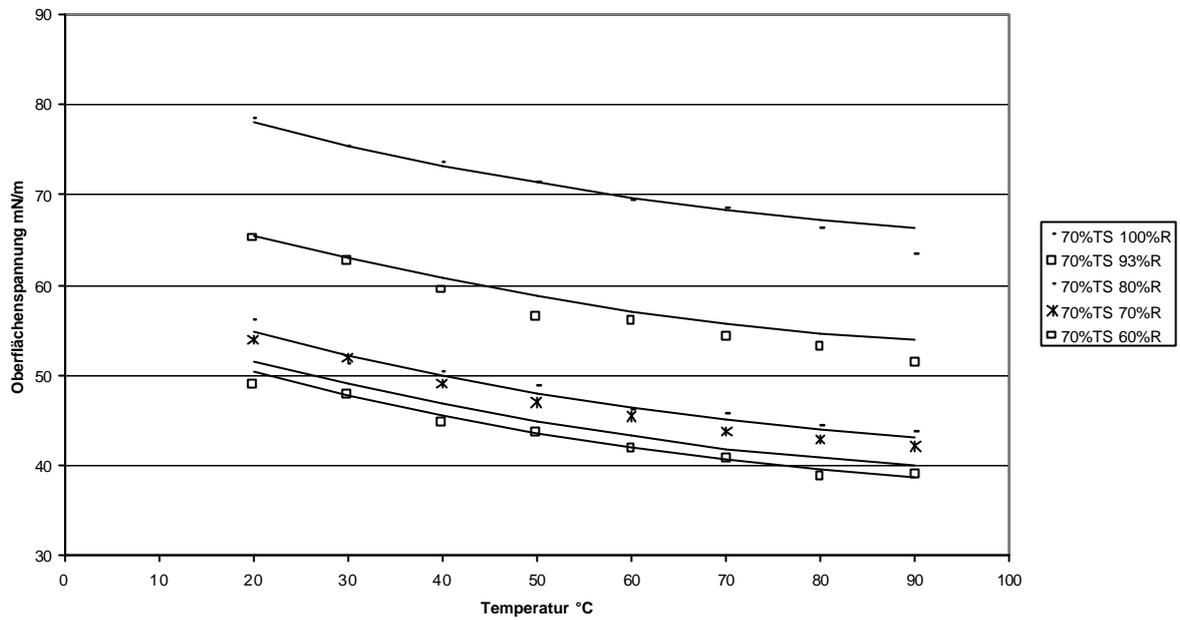
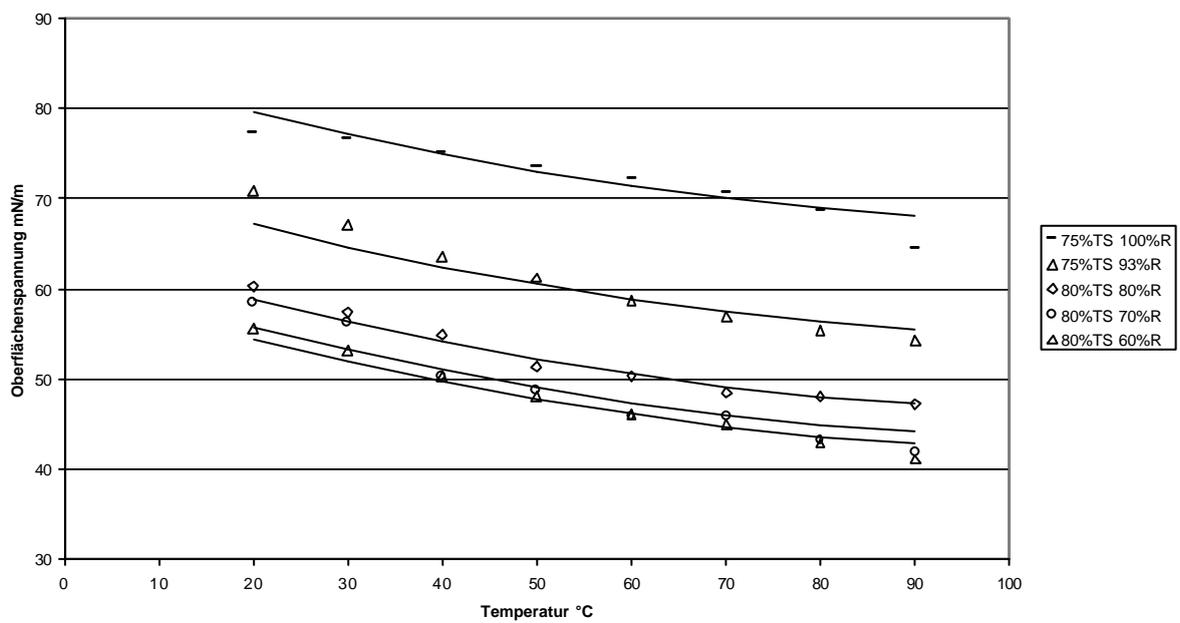


Diagramm 41 Reinheitsabhängigkeit der Oberflächenspannung mit $w_{TS} = 75 \text{ g/100 g}$ und $w_{TS} = 80 \text{ g/100 g}$



Im Anhang sind die nach Gleichung (6.2.4) berechneten Meßwerte für die Reinheiten 80, 70 und 60 % aufgeführt.

6.4 Kapitelzusammenfassung

Der Einsatz modernster computergestützter Meßtechnik zur Oberflächenspannungsbestimmung lieferte Meßergebnisse für reine und technische Saccharoselösungen in einem Umfang, wie sie bisher nicht verfügbar waren.

In einem weiten Temperatur- und Konzentrationsbereich wurden die Oberflächenspannungen für reine und technische Saccharoselösungen bestimmt. Es konnte ein dynamisches Verhalten der Oberflächenspannung als Stoffkennwert in Abhängigkeit vom Stoffsystem, der Konzentration, Temperatur und Alterung ermittelt werden.

Die technische Saccharoselösung Dicksaft zeigt in Abhängigkeit von der Konzentration ein ausgeprägtes Minimum bei mittleren Konzentrationen.

Erstmals wird bei Saccharoselösungen ein reinheitsabhängiges Verhalten der Oberflächenspannung über einen weiten Bereich nachgewiesen.

Für die untersuchten Abhängigkeiten von Temperatur, Konzentration und Reinheit wurden empirische Gleichungsansätze formuliert.

Aus den Untersuchungen abgeleitet, ist anzunehmen, daß die Oberflächenspannungsdaten von Rohrzuckerlösungen ein anderes Verhalten als Rübenzuckerlösungen zeigen. Derzeit gilt $\eta_{\text{Rübe}} < \eta_{\text{Rohr}}$ und $\sigma_{\text{Rohr}} < \sigma_{\text{Rübe}}$.

Wie auch bei der Viskosität kann auch für die Oberflächenspannung ein standortabhängiges Verhalten nachgewiesen werden. Die untersuchten Standorte Baddeckenstedt und Zeitz unterscheiden sich in ihren Oberflächenspannungen um durchschnittlich 1,8 % beim Dicksaft und 3,4 % bei der Melasse.

7. Berechnung Heizflächenbenetzung und Wärmeübergang

Unter Verwendung der ermittelten Oberflächenspannungen, sowie der dynamischen Viskositäten von reinen und technischen Saccharoselösungen sollen in diesem Abschnitt Beispielrechnungen zur Mindestflüssigkeitsbelastung, zur kritischen Benetzung, sowie zur theoretischen Vorausberechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten für Fallfilmverdampfapparate durchgeführt und mit Praxiswerten verglichen werden.

Für die Berechnungen wurden die Daten der Prozessanalyse der Verdampfanlage in der Zuckerfabrik Baddeckenstedt der Nordzucker AG für die Fallstromverdampfapparate Stufe 3 und Stufe 5 aus den Kampagnen 1996 und 1997 herangezogen. Bei Stufe 3 handelt es sich um einen Sektional-Fallstrom-Verdampfapparat der Braunschweigischen Maschinenbauanstalt AG (BMA) mit 4 Kammern. Stufe 5 ist ein Fallstromverdampfapparat herkömmlicher Bauart.

Die Bestimmung der Mindestflüssigkeitsbelastung und der kritischen Benetzung erfolgte nach KOGAN mit den im Abschnitt 3.6 angegebenen Gleichungen (3.6.1) bis (3.6.4).

Die tatsächliche Flüssigkeitsbelastung wurde nach Gleichung (7.1) bestimmt:

$$\Gamma_{Fl(tatsächlich)} = \frac{\dot{V} \cdot r}{p \cdot d_i \cdot n_{HR}} \quad (7.1)$$

Vergleichend wurde die Benetzung nach Firma Wiedemann⁴⁷ berechnet:

$$b = \frac{m_{Saft,aus} \cdot l_{HR}}{A \cdot r \cdot 100} \quad (7.2)$$

Die Heizrohrlänge l_{HR} wird hier in cm eingesetzt. Von der Firma Wiedemann werden für Fallstromverdampfer Werte für die Benetzung b zwischen 8 und 10 l/h cm angegeben.

Die notwendigen Stoffwerte für Wasserdampf, Kondensat und Saccharoselösung wurden mit den nachfolgenden empirische Gleichungen berechnet. Die Gleichungen (7.3) bis (7.7) sind aus den Tabellenwerten für Wasser⁴⁸ abgeleitet:

⁴⁷ Menzel, B., Wiedemann KG Sarstedt: Fallfilmverdampfer in der Zuckerindustrie; Internationales Engieseseminar für die Zuckerindustrie, 21.-27.04.1997; Bratislava 1997

⁴⁸ Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. VDI Verlag 1991; S. Db 7

Dampf- bzw. Brühdichte J_D im Bereich von $0,04 \text{ bar} \leq p_D \leq 3,6 \text{ bar}$ in $^\circ\text{C}$ ($r = 1,000$; Stdabw. der Residuen = 0,0062)

$$J_D = 178,6444 \cdot p_D^{0,153} - 79,5788 - \frac{0,0268}{p_D} + 0,6004 \cdot p_D \quad (7.3)$$

Dampf- bzw. Brühdichte r_D im Bereich von $0,04 \text{ bar} \leq p_D \leq 3,6 \text{ bar}$ in kg/m^3 ($r = 1,000$; Stdabw. der Residuen = 0,0045)

$$r_D = 11,9274 - 11,9152 \cdot \exp(-0,0494 \cdot p_D) \quad (7.4)$$

spezifische Verdampfungsenthalpie Δh_v von Wasser im Bereich von $30 \text{ }^\circ\text{C} \leq \vartheta_D \leq 140 \text{ }^\circ\text{C}$ in kJ/kg

$$\Delta h_v = 2543,23 - 0,14402 \cdot (J_D + 59,96)^{1,4963} \quad (7.5)$$

Wärmeleitfähigkeit I_K von Wasser (Kondensat) im Bereich von $30 \text{ }^\circ\text{C} \leq \vartheta_K \leq 140 \text{ }^\circ\text{C}$ in W/mK

$$I_K = \exp\left(117619,2514 \cdot \frac{J_K}{(J_K + 273)^3} - 0,6142\right) \quad (7.6)$$

dynamische Viskosität h_K von Wasser (Kondensat) im Bereich von $30 \text{ }^\circ\text{C} \leq \vartheta_K \leq 140 \text{ }^\circ\text{C}$ in mPas

$$h_K = \left(-0,0736 + \frac{2,2904}{1 + 2,2904 \cdot 0,0236 \cdot J_K}\right) \quad (7.7)$$

Dichte r von Saccharoselösung und Kondensat in kg/m³

$$r = 997,6 - 4,883 \cdot 10^{-2} \cdot J - 3,84 \cdot 10^{-3} \cdot J^2 + \frac{J \cdot w_{TS}}{0,246 \cdot J - 0,268} \quad (7.8)$$

spezifische Wärmekapazität c von Saccharoselösung und Kondensat in kJ/kgK

$$c = 4,1868 - (2,5121 - 0,0075 \cdot J + 0,0046 \cdot (100 - q)) \cdot \frac{w_{TS}}{100} \quad (7.9)$$

Die theoretische Vorausberechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten (k-Wert) von Fallstromverdampfapparaten beruht auf dem Ansatz der Berechnung aus den thermischen Teilwiderständen (Gleichung (7.10)).

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{s}{l} + \frac{1}{a_2}} \quad (7.10)$$

Die Berechnung der Wärmeübergangszahl (Heizmedium an Heizwand) a_1 wurde nach der durch Billet⁴⁹ veröffentlichten Gleichung (7.11) bestimmt. Sie liefert eine Wärmeübergangszahl für ruhenden kondensierenden Dampf. Da es sich in der Praxis um strömenden Dampf handelt, sind unter Verwendung dieser Gleichung etwas geringere k- Werte zu erwarten. Ausgleichend hierzu wirkt sich jedoch die Tatsache aus, daß Dämpfe in der Praxis lufthaltig sind und sich damit eine Verringerung des praktischen k- Wertes gegenüber dem Theoretischen ergibt.

$$a_1 = 0,943 \cdot \left(\frac{\Delta h_v \cdot r_K^2 \cdot l_{SL}^3 \cdot g}{h_K \cdot (J_D - J_K) \cdot l_{HR}} \right)^{0,25} \quad (7.11)$$

$$J_K = \frac{3 \cdot J_D + J_{SL}}{4} \quad (7.12)$$

⁴⁹ Billet: Verdampfung und ihre technische Anwendung. Verlag Chemie Weinheim Deerfield Beach, Florida Basel 1981

Die Berechnung der Wärmeübergangszahl (Heizwand an Lösung) a_2 wurde anhand der „Verfahrenstechnischen Berechnungsmethoden“⁵⁰ bestimmt.

$$a_2 = \frac{Nu \cdot l_{SL}}{s_{SL}} \quad (7.13)$$

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^{0,344} \quad (7.14)$$

C, m Konstanten abhängig von Reynoldt-Zahl (Strömungsform), siehe Tabelle 24.

Tabelle 24 Konstanten zur Berechnung der Nusselt-Zahl in Abhängigkeit von der Reynoldt-Zahl

Re	C	m
<400	0,0614	0,533
400<Re<800	0,0012	1,2
>800	0,0066	0,933

$$Re = \frac{\dot{m}_{SL}}{p \cdot d_{i,HR} \cdot h_{SL} \cdot n_{HR}} \quad (7.15)$$

$$Pr = \frac{h_{SL} \cdot c_{SL}}{l_{SL}} \quad (7.16)$$

$$s_{SL} = 0302 \cdot \left(\frac{3 \cdot n_{SL}^2}{g} \right)^{0,33} \cdot Re^{0,533} \quad (7.17)$$

⁵⁰ *Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden*, Teil 1 Wärmeübertrager. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1980

Der Vergleich der Benetzungszahlen von KOGAN und WIEDEMANN mit den experimentell ermittelten Werten zeigt für die untersuchten Verdampfapparate eine ausreichende Benetzung der Heizflächen.

Die Berechnung der Benetzung nach Wiedemann, bei der die Benetzungszahlen in der Praxis zwischen 8 und 10 l/h cm liegen sollen, lagen für Stufe 3 im oberen Bereich dieser Vorgabe.

Bei Stufe 5 wurde mit einem Wert von 14 l/h cm bei der Rezirkulation von 194,5 m³ Saft eine sehr hohe Benetzung festgestellt.

Nach der Berechnungsmethode von Kogan entspricht die Flüssigkeitsbelastung einem dimensionslosen Zahlenwert von etwa 0,35 bei Stufe 3 und von 0,54 bei Stufe 5.

Die Berechnung der Mindestflüssigkeitsbelastung liefert hier aber nur Wert von 0,15 für die Stufe 3 und von 0,23 für die Stufe 5.

Die Mindestflüssigkeitsbelastung zur Vermeidung der Entnetzung der Heizflächen liegt damit bei etwa 50 % der tatsächlichen Flüssigkeitsbelastung. Die Reduzierung der Rezirkulationsmenge würde den Verbrauch von Elektroenergie reduzieren und den Wärmedurchgangskoeffizienten geringfügig erhöhen.

Die Bestimmung der kritischen Benetzungszahl ermittelt für beide Verdampfapparate den Bereich 1, bei dem der Flüssigkeitsanteil im Dampfstrom gering ist und ein relativ kleiner Druckverlust und eine hohe Intensität des Wärmeüberganges vorliegen.

Dieses zeigt sich auch deutlich beim neu behohrten Verdampfapparat der Stufe 5 im erreichten Wärmedurchgangskoeffizienten von 1076 W/(m²·K), der sogar geringfügig über dem theoretisch berechneten Wert von 988 W/(m²·K) liegt.

Beim Verdampfapparat der Stufe 3 wurde nur für Kammer 1 eine sehr gute Übereinstimmung des erreichten (1750 W/(m²·K)) und des theoretischen (1778 W/(m²·K)) Wärmedurchgangskoeffizienten ermittelt.

Die Kammern 2, 3 und 4 erreichten hingegen in der Praxis die theoretisch vorausgerechneten Werte nicht. Führt man die geringeren Wärmedurchgangskoeffizienten auf Beläge zurück erhält man für Kammer 2 eine Belagdicke von 0,325 mm, für Kammer 3 von 0,485 mm und für Kammer 4 von 0,575 mm.

Durchschnittlich wird für den gesamten Apparat eine Belagdicke von 0,233 mm berechnet.

Die unterschiedlichen Werte der Mindestflüssigkeitsbelastung, die sich aus der Verwendung der Oberflächenspannung von reiner bzw. von technischer Saccharoselösung ergeben sind in der nachfolgenden Tabelle gegenübergestellt.

Tabelle 25 Mindestflüssigkeitsbelastung bei reiner und technischer Saccharoselösung

	Stufe 5	Stufe 3		Kammer 1	Kammer 2	Kammer 3	Kammer 4
		10.-12.10.96	29.-30.11.96				
techn. Saccharoselösung							
σ : N/m	0,053	0,049	0,049	0,048	0,048	0,049	0,049
Γ_{Fl} kg/(m's)	0,231	0,152	0,151	0,134	0,140	0,146	0,153
reine Saccharoselösung							
σ : N/m	0,064	0,057	0,057	0,056	0,056	0,057	0,057
Γ_{Fl} kg/(m's)	0,259	0,168	0,165	0,147	0,154	0,160	0,167

Es wird deutlich, daß aufgrund der geringeren Oberflächenspannung technischer Saccharoselösung die Mindestflüssigkeitsbelastung abnimmt. Beim Dicksaft ist damit eine geringere Saftmenge ausreichend, um eine vollständige Benetzung der Heizfläche zu gewährleisten.

Die folgenden Tabellen enthalten die einzelnen Berechnungswerte zur Benetzung und dem Wärmedurchgangskoeffizienten.

Tabelle 26 Berechnungsergebnisse zur optimalen Benetzung und zum Wärmedurchgang (für Dicksaft ohne Belag)

		Stufe 5 Meßwerte	Stufe 5 redu. Zirkulation	Stufe 3 29.-30.11.	Stufe 3 Kammer 1	Stufe 3 Kammer 2	Stufe 3 Kammer 3	Stufe 3 Kammer 4
$W_{TS\text{ ein}}$	g /100 g	67,32	67,32	41,90	42,35	48,42	52,64	56,38
$W_{TS\text{ aus}}$	g /100 g	74,38	74,38	58,60	47,96	52,02	55,62	58,98
q	%	92,97	92,97	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00
Siedetemperatur Saft	°C	89,60	89,60	111,18	110,40	110,97	111,54	112,02
d_i	m	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
n_{HR}		1253	1253	5165	1291	1291	1291	1291
$m_{\text{Zirkulationssaft}}$	m ³ /h	194,5	130,0	572,6	142,4	145,4	142,4	142,4
l_{HR}	m	7,94	7,94	7,94	7,94	7,94	7,94	7,94
Wanddicke Rohr	m	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
λ_{HR}	W/(m·K)	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50
Belagdicke auf Heizfläche	mm	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
λ_{Belag}	W/(m ² ·K)	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
p_D	bar	0,84	0,84	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
$p_{\text{Brüden}}$	bar	0,54	0,54	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37
ϑ_D	°C	94,9	94,9	117,0	117,0	117,0	117,0	117,0
$\rho_{\text{Brüden}}$	kg/m ³	0,326	0,326	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793
$m_{S\text{ ein}}$	kg/h	106078,0	106078,0	165211,1	161196,8	168576,8	168202,9	170709,1
V_{Saft}	m ³ /h	85,6	85,6	147,9	144,0	147,4	144,9	145,2
λ_S	W/(m·K)	0,610	0,610	0,610	0,610	0,610	0,610	0,610
λ_K	W/(m ² ·K)	0,677	0,677	0,682	0,682	0,682	0,682	0,682
η_K	Pa·s	0,000305	0,000305	0,000243	0,000243	0,000243	0,000242	0,000242
$\rho_{\text{Saft ein}}$	kg/m ³	1239,4	1239,4	1116,7	1119,3	1143,7	1160,5	1175,4
$\rho_{\text{Zirkulationssaft ein}}$	kg/m ³	1255,9	1249,5	1168,3	1119,0	1143,5	1160,3	1175,2
$\rho_{\text{Heizfläche mittel}}$	kg/m ³	1262,2	1259,0	1176,8	1130,7	1151,0	1166,5	1180,6
ρ_{aus}	kg/m ³	1268,5	1268,5	1185,3	1142,3	1158,5	1172,7	1186,1
η_S	Pa·s	0,01924	0,01739	0,00213	0,00114	0,00146	0,00182	0,00226
σ_S	N/m	0,0532	0,0528	0,0488	0,0481	0,0483	0,0486	0,0490
Γ_{FI}	kg/(m·s)	0,231	0,226	0,151	0,134	0,140	0,146	0,153
Re_{fl}		47,9	51,9	283,0	467,7	382,4	321,8	270,3
B_{krit}		5,822	5,186	0,444	0,290	0,338	0,384	0,474
m_{wv}	kg/h	10068,7	10068,7	47082,3	18855,6	11666,2	9011,9	7525,3
$V_{\text{Brüden}}$	m ³ /s	8,58	8,58	16,49	6,60	4,09	3,16	2,64
$A_{\text{Brüden aus}}$	m ²	0,910	0,929	3,894	0,978	0,976	0,975	0,973
$v_{\text{Brüden}}$	m/s	9,436	9,237	4,235	6,752	4,189	3,239	2,709
B		3,412	3,041	0,185	0,160	0,127	0,121	0,125
b (nach Wiedemann)	l/(h·cm)	14,47	9,46	9,66	9,48	10,28	10,27	10,38
Γ_{FI} (tatsächlich)		0,539	0,358	0,358	0,341	0,356	0,354	0,358
Δh_v	J/kg	2270901,1	2270901,1	2210748,5	2210748,5	2210748,5	2210748,5	2210748,5
prozentuale Rezirkulation	%	230,3	153,1	404,9	98,9	98,6	98,2	98,0
$m_{\text{Saft+Rezirk}}$	kg/h	244264,3	162435,1	668986,6	159347,0	166260,4	165220,0	167343,8
$W_{TS\text{ Zirkulation ein}}$	%	71,31	69,77	54,47	42,28	48,37	52,59	56,33
$W_{TS\text{ Heizfläche mittel}}$	%	72,85	72,07	56,54	45,12	50,19	54,10	57,65
v_S	m ² /s	1,524E-05	1,381E-05	1,808E-06	1,010E-06	1,272E-06	1,556E-06	1,913E-06
c_S	J/(kg·K)	2851,5	2880,4	3247,5	3455,2	3352,0	3281,5	3219,1
ϑ_K	°C	93,55	93,55	115,51	115,32	115,46	115,60	115,72
ρ_K	kg/m ³	959,4	959,4	940,7	940,9	940,8	940,6	940,5
a_1	W/(m ² ·K)	6301	6301	6450	6247	6392	6556	6712
Re		28,0	20,6	168,2	298,6	243,0	194,8	158,6
C		0,0614	0,0614	0,0614	0,0614	0,0614	0,0614	0,0614
m		0,5330	0,5330	0,5330	0,5330	0,5330	0,5330	0,5330
Nu		1,705	1,403	2,174	2,434	2,351	2,233	2,144
S_{Film}	m	0,000799	0,000635	0,000509	0,000470	0,000491	0,000498	0,000512
a_2	W/(m ² ·K)	1302	1347	2607	3157	2923	2735	2556
k	W/(m ² ·K)	988	1013	1602	1778	1711	1656	1598

Tabelle 27 Berechnungsergebnisse zur optimalen Benetzung und zum Wärmedurchgang (für Dicksaft mit Belag)

		Stufe 5 Meßwerte	Stufe 5 redu. Zirkulation	Stufe 3 29.-30.11.	Stufe 3 Kammer 1	Stufe 3 Kammer 2	Stufe 3 Kammer 3	Stufe 3 Kammer 4
$W_{TS \text{ ein}}$	g/100 g	67,32	67,32	41,90	42,35	48,42	52,64	56,38
$W_{TS \text{ aus}}$	g/100 g	74,38	74,38	58,60	47,96	52,02	55,62	58,98
q	%	92,97	92,97	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00
Siedetemperatur Saft	°C	89,60	89,60	111,18	110,40	110,97	111,54	112,02
d_i	m	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
n_{HR}		1253	1253	5165	1291	1291	1291	1291
$m_{Zirkulationssaft}$	m ³ /h	194,5	130,0	572,6	142,4	145,4	142,4	142,4
l_{HR}	m	7,94	7,94	7,94	7,94	7,94	7,94	7,94
Wanddicke Rohr	m	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
λ_{HR}	W/(m·K)	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50
Belagdicke auf Heizfläche	mm	0,000	0,000	0,233	0,011	0,325	0,485	0,575
λ_{Belag}	W/(m·K)	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
p_D	bar	0,84	0,84	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
$p_{Brüden}$	bar	0,54	0,54	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37
ϑ_D	°C	94,9	94,9	117,0	117,0	117,0	117,0	117,0
$\rho_{Brüden}$	kg/m ³	0,326	0,326	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793
$m_{S \text{ ein}}$	kg/h	106078,0	106078,0	165211,1	161196,8	168576,8	168202,9	170709,1
V_{Saft}	m ³ /h	85,6	85,6	147,9	144,0	147,4	144,9	145,2
λ_S	W/(m·K)	0,610	0,610	0,610	0,610	0,610	0,610	0,610
λ_K	W/(m ² ·K)	0,677	0,677	0,682	0,682	0,682	0,682	0,682
η_K	Pa·s	0,000305	0,000305	0,000243	0,000243	0,000243	0,000242	0,000242
$\rho_{Saft \text{ ein}}$	kg/m ³	1239,4	1239,4	1116,7	1119,3	1143,7	1160,5	1175,4
$\rho_{Zirkulationssaft \text{ ein}}$	kg/m ³	1255,9	1249,5	1168,3	1119,0	1143,5	1160,3	1175,2
$\rho_{Heizfläche \text{ mittel}}$	kg/m ³	1262,2	1259,0	1176,8	1130,7	1151,0	1166,5	1180,6
ρ_{aus}	kg/m ³	1268,5	1268,5	1185,3	1142,3	1158,5	1172,7	1186,1
η_S	Pa·s	0,01924	0,01739	0,00213	0,00114	0,00146	0,00182	0,00226
σ_S	N/m	0,0532	0,0528	0,0488	0,0481	0,0483	0,0486	0,0490
Γ_{Fl}	kg/(m·s)	0,231	0,226	0,151	0,134	0,140	0,146	0,153
Re_{fl}		47,9	51,9	283,0	467,7	382,4	321,8	270,3
B_{krit}		5,822	5,186	0,444	0,290	0,338	0,384	0,474
m_{wv}	kg/h	10068,7	10068,7	47082,3	18855,6	11666,2	9011,9	7525,3
$V_{Brüden}$	m ³ /s	8,58	8,58	16,49	6,60	4,09	3,16	2,64
$A_{Brüden \text{ aus}}$	m ²	0,910	0,929	3,778	0,977	0,935	0,915	0,902
$v_{Brüden}$	m/s	9,436	9,237	4,365	6,762	4,370	3,452	2,922
B		3,412	3,041	0,190	0,161	0,133	0,129	0,135
b (nach Wiedemann)	l/(h·cm)	14,47	9,46	9,66	9,48	10,28	10,27	10,38
Γ_{Fl} (tatsächlich)		0,539	0,358	0,358	0,341	0,356	0,354	0,358
Δh_v	J/kg	2270901,1	2270901,1	2210748,5	2210748,5	2210748,5	2210748,5	2210748,5
prozentuale Rezirkulation	%	230,3	153,1	404,9	98,9	98,6	98,2	98,0
$m_{Saft+Rezirk}$	kg/h	244264,3	162435,1	668986,6	159347,0	166260,4	165220,0	167343,8
$W_{TS \text{ Zirkulation ein}}$	%	71,31	69,77	54,47	42,28	48,37	52,59	56,33
$W_{TS \text{ Heizfläche mittel}}$	%	72,85	72,07	56,54	45,12	50,19	54,10	57,65
v_S	m ² /s	1,524E-05	1,381E-05	1,808E-06	1,010E-06	1,272E-06	1,556E-06	1,913E-06
c_S	J/(kg·K)	2851,5	2880,4	3247,5	3455,2	3352,0	3281,5	3219,1
ϑ_K	°C	93,55	93,55	115,51	115,32	115,46	115,60	115,72
ρ_K	kg/m ³	959,4	959,4	940,7	940,9	940,8	940,6	940,5
a_1	W/(m ² ·K)	6301	6301	6450	6247	6392	6556	6712
Re		28,0	20,6	168,2	298,6	243,0	194,8	158,6
C		0,0614	0,0614	0,0614	0,0614	0,0614	0,0614	0,0614
m		0,5330	0,5330	0,5330	0,5330	0,5330	0,5330	0,5330
Nu		1,705	1,403	2,174	2,434	2,351	2,233	2,144
S_{Film}	m	0,000799	0,000635	0,000509	0,000470	0,000491	0,000498	0,000512
a_2	W/(m ² ·K)	1302	1347	2607	3157	2923	2735	2556
k	W/(m ² ·K)	988	1013	1234	1750	1184	1008	921

Tabelle 28 Berechnungsergebnisse zur optimalen Benetzung und zum Wärmedurchgang (für reine Saccharoselösung ohne Belag)

		Stufe 5 Meßwerte	Stufe 5 redu. Zirkulation	Stufe 3 29.-30.11.	Stufe 3 Kammer 1	Stufe 3 Kammer 2	Stufe 3 Kammer 3	Stufe 3 Kammer 4
$W_{TS \text{ ein}}$	g/100 g	67,32	67,32	41,90	42,35	48,42	52,64	56,38
$W_{TS \text{ aus}}$	g/100 g	74,38	74,38	58,60	47,96	52,02	55,62	58,98
q	%	92,97	92,97	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00
Siedetemperatur Saft	°C	89,60	89,60	111,18	110,40	110,97	111,54	112,02
d_i	m	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
n_{HR}		1253	1253	5165	1291	1291	1291	1291
$m_{\text{Zirkulationssaft}}$	m ³ /h	194,5	130,0	572,6	142,4	145,4	142,4	142,4
l_{HR}	m	7,94	7,94	7,94	7,94	7,94	7,94	7,94
Wanddicke Rohr	m	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
λ_{HR}	W/(m·K)	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50
Belagdicke auf Heizfläche	mm	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
λ_{Belag}	W/(m·K)	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
p_D	bar	0,84	0,84	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
$p_{\text{Brüden}}$	bar	0,54	0,54	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37
ϑ_D	°C	94,9	94,9	117,0	117,0	117,0	117,0	117,0
$\rho_{\text{Brüden}}$	kg/m ³	0,326	0,326	0,793	0,793	0,793	0,793	0,793
$m_{\text{S ein}}$	kg/h	106078,0	106078,0	165211,1	161196,8	168576,8	168202,9	170709,1
V_{Saft}	m ³ /h	85,6	85,6	147,9	144,0	147,4	144,9	145,2
λ_S	W/(m·K)	0,610	0,610	0,610	0,610	0,610	0,610	0,610
λ_K	W/(m ² ·K)	0,677	0,677	0,682	0,682	0,682	0,682	0,682
η_K	Pa·s	0,000305	0,000305	0,000243	0,000243	0,000243	0,000242	0,000242
$\rho_{\text{Saft ein}}$	kg/m ³	1239,4	1239,4	1116,7	1119,3	1143,7	1160,5	1175,4
$\rho_{\text{Zirkulationssaft ein}}$	kg/m ³	1255,9	1249,5	1168,3	1119,0	1143,5	1160,3	1175,2
$\rho_{\text{Heizfläche mittel}}$	kg/m ³	1262,2	1259,0	1176,8	1130,7	1151,0	1166,5	1180,6
ρ_{aus}	kg/m ³	1268,5	1268,5	1185,3	1142,3	1158,5	1172,7	1186,1
η_S	Pa·s	0,01924	0,01739	0,00213	0,00114	0,00146	0,00182	0,00226
σ_S	N/m	0,0641	0,0640	0,0568	0,0559	0,0563	0,0565	0,0567
Γ_{FI}	kg/(m·s)	0,259	0,254	0,165	0,147	0,154	0,160	0,167
Re_{fl}		53,9	58,5	311,1	514,0	421,0	353,7	296,1
B_{krit}		5,655	5,033	0,434	0,271	0,314	0,361	0,463
m_{wv}	kg/h	10068,7	10068,7	47082,3	18855,6	11666,2	9011,9	7525,3
$V_{\text{Brüden}}$	m ³ /s	8,58	8,58	16,49	6,60	4,09	3,16	2,64
$A_{\text{Brüden aus}}$	m ²	0,910	0,929	3,894	0,978	0,976	0,975	0,973
$v_{\text{Brüden}}$	m/s	9,436	9,237	4,235	6,752	4,189	3,239	2,709
B		2,830	2,511	0,159	0,138	0,109	0,104	0,108
b (nach Wiedemann)	l/(h·cm)	14,47	9,46	9,66	9,48	10,28	10,27	10,38
Γ_{FI} (tatsächlich)		0,539	0,358	0,358	0,341	0,356	0,354	0,358
Δh_v	J/kg	2270901,1	2270901,1	2210748,5	2210748,5	2210748,5	2210748,5	2210748,5
prozentuale Rezirkulation	%	230,3	153,1	404,9	98,9	98,6	98,2	98,0
$m_{\text{Saft+Rezirk}}$	kg/h	244264,3	162435,1	668986,6	159347,0	166260,4	165220,0	167343,8
$W_{TS \text{ Zirkulation ein}}$	%	71,31	69,77	54,47	42,28	48,37	52,59	56,33
$W_{TS \text{ Heizfläche mittel}}$	%	72,85	72,07	56,54	45,12	50,19	54,10	57,65
v_S	m ² /s	1,524E-05	1,381E-05	1,808E-06	1,010E-06	1,272E-06	1,556E-06	1,913E-06
c_S	J/(kg·K)	2851,5	2880,4	3247,5	3455,2	3352,0	3281,5	3219,1
ϑ_K	°C	93,55	93,55	115,51	115,32	115,46	115,60	115,72
ρ_K	kg/m ³	959,4	959,4	940,7	940,9	940,8	940,6	940,5
a_1	W/(m ² ·K)	6301	6301	6450	6247	6392	6556	6712
Re		28,0	20,6	168,2	298,6	243,0	194,8	158,6
C		0,0614	0,0614	0,0614	0,0614	0,0614	0,0614	0,0614
m		0,5330	0,5330	0,5330	0,5330	0,5330	0,5330	0,5330
Nu		1,705	1,403	2,174	2,434	2,351	2,233	2,144
s_{Film}	m	0,000799	0,000635	0,000509	0,000470	0,000491	0,000498	0,000512
a_2	W/(m ² ·K)	1302	1347	2607	3157	2923	2735	2556
k	W/(m ² ·K)	988	1013	1602	1778	1711	1656	1598

8. Berechnung Transportoptimierung

In diesem Abschnitt wird eine Transportoptimierung für gelagerten Dicksaft, der während der Aufarbeitungskampagne in die Fabrik zu transportieren ist, und für Melasse durchgeführt.

Neben der Rohrleitungsdimensionierung ist eine entscheidende Frage: Welche Temperatur der Säfte führt zur Kostenminimierung beim Transportprozeß?

Folgende Bedingungen wurden definiert:

Energiekosten zur Anwärmung (K_D): 50 DM/t Dampf

Elektroenergiekosten bei Eigenerzeugung (K_E): 0,09 DM/kWh

Wirkungsgrad der Pumpe: 75 %

Anlagenkosten: siehe Tabelle 29 zuzüglich 6 % für die Montagekosten

Abschreibungssatz (p_{Abschr}): 10 % pro Jahr

Nutzungsdauer (T_{Nutz}): 2000 h/a

Ausgangstemperatur Saft (ϑ_1): 5 °C

Volumenstrom (\dot{V}) Dicksaft⁵¹ 34,75 m³/h (68 g/100 g, 90 % Reinheit)

Volumenstrom (\dot{V}) Melasse⁵² 9,3 m³/h (80 g/100 g, 60 % Reinheit)

Δh wird vernachlässigt

⁵¹ Schmidt, T.: Energetische Untersuchungen von Energieanwendungsprozessen bei der Zuckergewinnung im Werk Zeitz unter Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 1995

⁵² Schmidt, T.; Christoph, D.: Analyse der verfahrenstechnischen Kennwerte der Verdampfstation und Gesamtwärmeenergiebilanz der Zuckerfabrik Baddeckenstedt 1997

Tabelle 29 Rohrleitungspreise der Zfb. Clauen der Nordzucker AG

DN 50	9,06 DM/m
DN 65	13,48 DM/m
DN 80	18,45 DM/m
DN 100	24,25 DM/m
DN 125	35,10 DM/m
DN 150	46,75 DM/m

Folgender Berechnungsalgorithmus wurde zur iterativen Optimierung von Rohrleitungsdurchmesser und Safttemperatur verwendet:

Stoffkennwerte der Saccharoselösungen

Die Stoffkennwerte der Viskosität h wurden mit den abgeleiteten Näherungsgleichungen dieser Arbeit ermittelt. Die Bestimmung der Dichte r und der spezifischen Wärmekapazität c erfolgte mit den bereits im Abschnitt 7 angegebenen Gleichungen.

Reibungsdruckverlust Dp/l

$$\Delta p / l = \frac{l}{d} \cdot \frac{r}{2} \cdot w^2 \quad (8.1)$$

Reibungskoeffizienten l ^{53,54}

Die Bestimmung des Reibungskoeffizienten erfolgte in Abhängigkeit von den Strömungsverhältnissen (Re-Zahl) und dem Rohrrauigkeitskriterium (Re·k/d) mit den in Tabelle 43 im Anhang angegebenen Gleichungen.

Re-Zahl

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot r}{h} \quad (8.2)$$

⁵³ Bockhardt, Güntzschel, Poetschukat: Grundlagen der Verfahrenstechnik für Ingenieure. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1981

⁵⁴ Senge, B.: 2. Lehrbrief Technische Strömungsmechanik. Zentralstelle für das Hochschulfernstudium Dresden 1992

Strömungsgeschwindigkeit w

$$w = \frac{4 \cdot V}{\rho \cdot d^2} \quad (8.3)$$

Leistungsaufnahme der Pumpe P

$$P = \frac{V \cdot \Delta p / l}{m} \quad (8.4)$$

Elektroenergiekosten X_n

$$X_n = P \cdot K_E \cdot T_{Nutz} \quad (8.5)$$

Festkosten (Anlagenkosten) X_k

$$X_k = \frac{P_{Abschr}}{100} \cdot K_R \quad (8.6)$$

Anwärmkosten X_w

$$X_w = \left(\frac{Q_{Anw}}{\Delta h_v} \cdot K_D \right) \cdot \frac{T_{Nutz}}{l_{Rohr}} \quad (8.7)$$

Wärmestrom Anwärmung Q_{Anw}

$$Q_{Anw} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c \cdot (J_2 - J_1) \quad (8.8)$$

Gesamtkosten X_{ges}

$$X_{ges} = X_n + X_k + X_w \quad (8.9)$$

Entsprechend dem Berechnungsalgorithmus folgt eine Beispielrechnung für den Dicksafttransport durch eine 50 m lange Rohrleitung. Die Anwärmtemperatur und der Rohrlungsdurchmesser werden durch Iteration zum Minimum der Gesamtkosten abgeglichen. Im Berechnungsbeispiel ist dies bereits geschehen. Es wurde ein Rohrlungsdurchmesser von 0,1 m und eine Anwärmtemperatur (ϑ_2) von 41 °C ermittelt.

Für einen Dicksaft mit 68 g/100 g und einer Reinheit von 90 % werden die folgenden Stoffkennwerte berechnet:

dynamische Viskosität (nach Gleichung (5.3.2)):	0,0697 Pas
Dichte (nach Gleichung (7.8)):	1273,1 kg/m ³
spezifische Wärmekapazität (nach Gleichung (7.9)):	2,656 kJ/(kg·K)

Zusammen mit den folgenden zusätzlichen Parametern:

Rohrrauhigkeit k :	0,08 mm
Rohrleitungsdurchmesser d :	0,1 m
Volumenstrom des Dicksaftes \dot{V} :	34,75 m ³ /h

werden berechnet:

Rohrleitungsquerschnittsfläche A :	0,00785 m ²
Strömungsgeschwindigkeit w (nach Gleichung (8.3)):	1,229 m/s
kinematische Viskosität ν :	$5,474347 \cdot 10^{-5}$ m ² /s
Reynold-Zahl Re (nach Gleichung (8.2)):	2245
Rohrrauhigkeitskriterium $Re \cdot k/d$:	1,796

Nach Auswahl der zutreffenden Berechnungsgleichung für den Reibungskoeffizienten λ aus Tabelle 43 im Anhang folgt:

Reibungskoeffizient λ :	0,0285
Reibungsdruckverlust $\Delta p/l$ (nach Gleichung (8.1)):	274,1 Pa/m
Leistungsaufnahme der Pumpe P : (nach Gleichung (8.4) mit $\mu = 0,75$)	3,528 W/m
Elektroenergiekosten X_n (nach Gleichung (8.5)):	0,635 DM/(m·a)
Festkosten X_k (nach Gleichung (8.6)):	2,571 DM/(m·a)
Anwärmkosten X_w : (nach Gleichung (8.7) und (8.8) mit $\Delta h_v = 2200$ kJ/kg)	1,068 DM/(m·a)
Gesamtkosten X_{ges} (nach Gleichung (8.9)):	4,274 DM/(m·a)

8.1 Dicksaft

Die Berechnungen zum Transportverhalten des Dicksaftes zeigen:

- Die optimale Transporttemperatur wird von den variablen Größen: Volumenstrom, Rohrleitungsdurchmesser und Rohrleitungslänge beeinflusst.
- Bei optimaler Transporttemperatur bildet sich in der Rohrleitung eine laminare Strömung bei minimaler Viskosität des Fluids. Der Reibungsdruckverlust ist minimiert. Die weitere Verringerung der Viskosität durch Temperaturerhöhung hat eine Veränderung der Strömungsverhältnisse in den Übergangsbereich zur turbulenten Strömung zur Folge. Es kommt zum Ansteigen der Reibungsdruckverluste.
- Da der Kostenanteil der Anwärmung sich im Verhältnis zu den Elektroenergiekosten bei größeren Rohrleitungslängen verringert, wird ab einer bestimmten Rohrleitungslänge eine konstante optimale Transporttemperatur erhalten.
- Die Ausgangstemperaturen haben keinen Einfluß auf die Lage der optimalen Transporttemperatur. Steigt die Ausgangstemperatur bis auf die optimale Transporttemperatur führt dies zur Senkung der Gesamttransportkosten.
- Steigt die Ausgangstemperatur des Saftes über die berechnete optimale Transporttemperatur hat dies höhere Transportkosten zur Folge. Für diese Verhältnisse ist der Rohrleitungsdurchmesser nicht ausreichend dimensioniert. Die Neudimensionierung der Rohrleitung ist notwendig.

Für eine Dicksaftmenge von $34,75 \text{ m}^3/\text{h}$ ⁵⁵ sind in der nachfolgenden Tabelle die berechnete optimale Transporttemperaturen für verschiedene Rohrleitungslängen angegeben. Ausgangstemperatur des Dicksaftes ist $5 \text{ }^\circ\text{C}$

⁵⁵ Schmidt, T.: Energetische Untersuchungen von Energieanwendungsprozessen bei der Zuckergewinnung im Werk Zeitz unter Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 1995

Tabelle 30 **Optimale Transporttemperaturen für 34,75 m³/h Dicksaft in Abhängigkeit von der Rohrleitungslänge**

l_{Rohr} in m	$d_{\text{opti Rohr}}$ in m	ϑ_{opti} in °C	X_n in DM/(m·a)	X_w in DM/(m·a)	X_k in DM/(m·a)	X_{ges} in DM/(m·a)
10	0,125	14	1,67	1,29	3,72	6,68
20	0,100	31	1,15	1,90	2,57	5,63
30	0,100	36	0,85	1,52	2,57	4,94
40	0,100	40	0,67	1,30	2,57	4,54
50	0,100	41	0,64	1,07	2,57	4,27
60	0,100	41	0,64	0,89	2,57	4,10
70	0,100	41	0,64	0,76	2,57	3,97
80	0,100	41	0,64	0,67	2,57	3,87
90	0,100	41	0,64	0,59	2,57	3,80
100	0,100	41	0,64	0,53	2,57	3,74
150	0,100	41	0,64	0,36	2,57	3,56

Für verschiedene Saftvolumen wurden die in Tabelle 31 angegebenen Rohrleitungsdurchmesser und Temperaturen für den wirtschaftlichen Transport ermittelt.

Tabelle 31 **Optimale Transporttemperaturen für verschiedene Volumenströme**

Dicksaft	Saftvolumen											
	30 m ³ /h		32 m ³ /h		34 m ³ /h		36 m ³ /h		38 m ³ /h		40 m ³ /h	
	$d_{\text{opti Rohr}}$ DN	t_{opti} °C										
l_{Rohr} in m												
10	125	12	125	13	125	14	125	14	125	15	125	15
20	100	29	100	30	100	31	100	31	100	32	100	32
30	100	34	100	35	100	36	100	36	100	37	100	38
40	100	38	100	38	100	39	100	40	100	39	100	39
50	100	41	100	41	100	42	100	40	100	39	100	39
60	100	43	100	43	100	42	100	40	100	39	100	39
70	100	44	100	43	100	42	100	40	100	39	100	39
80	100	44	100	43	100	42	100	40	100	39	100	39
90	100	44	100	43	100	42	100	40	100	39	100	39
100	100	44	100	43	100	42	100	40	100	39	100	39
150	100	44	100	43	100	42	100	40	100	39	100	39

8.2 Melasse

Auch für die Melasse wird eine optimale Transporttemperatur für eine laminare Strömung bei minimaler Viskosität berechnet. Durch die insgesamt höhere Viskosität werden größere optimale Transporttemperaturen erhalten.

Für eine Melassemenge von $9,3 \text{ m}^3/\text{h}$ ⁵⁶ (nach Analyse Werk Baddeckenstedt 1997) wurden die in Tabelle 32 angegebenen Werte berechnet.

Tabelle 32 **Optimale Transporttemperaturen für $9,3 \text{ m}^3/\text{h}$ Melasse in**
Abhängigkeit von der Rohrleitungslänge

l_{Rohr} in m	$d_{\text{opti Rohr}}$ in m	ϑ_{opti} in °C	X_n in DM/(m·a)	X_w in DM/(m·a)	X_k in DM/(m·a)	X_{ges} in DM/(m·a)
10	0,080	55	0,54	1,82	1,96	4,32
20	0,065	73	0,41	1,28	1,43	3,12
30	0,050	96	0,43	1,19	0,96	2,58
40	0,050	99	0,38	0,93	0,96	2,27
50	0,050	99	0,38	0,74	0,96	2,09
60	0,050	99	0,38	0,62	0,96	1,97

Die Anwärmtemperatur von fast 100°C ist als problematisch einzuschätzen. In diesem Temperaturbereich können bereits Abbaureaktionen ablaufen und im schlimmsten Fall auch die Maillard-Reaktion, wie eigene Untersuchungen von Melassen in der Druckmeßzelle zeigten.

Durch die Abbaureaktionen wird die Qualität der Melasse herabgesetzt und das Einsetzen der Maillard-Reaktion hat eine starke Druckentwicklung zur Folge, die die Arbeitssicherheit gefährdet.

Daher sind aus technologischer und arbeitssicherheitstechnischer Sicht diese Anwärmtemperaturen nicht zu realisieren.

Für den Transport von Melasse wird ein möglichst kurzer Transportweg empfohlen.

Ist der Transportweg kurz fallen die Kosten für die Anwärmung stärker ins Gewicht und die optimale Transporttemperatur liegt niedriger.

Für längere Transportwege sind aufgrund der hohen Viskosität von Melasse größer dimensionierte Rohrleitungen unumgänglich.

⁵⁶ Schmidt, T.; Christoph, D.: Analyse der verfahrenstechnischen Kennwerte der Verdampfstation und Gesamtwärmeenergiebilanz der Zuckerfabrik Baddeckenstedt 1997

9. Hinweise / Vorschläge für weiterführende Untersuchungen

Weitere Untersuchungen zur Bestimmung der dynamischen Viskosität werden für reine Saccharoselösungen unterhalb der Konzentration von 60 g / 100 g und für Dicksäfte unterhalb von 65 g / 100 g bis zu Temperaturen von 130 °C vorgeschlagen. Die Untersuchung dieses Temperatur- und Konzentrationsbereiches ist wünschenswert, um Meßwerte der Viskosität von Saccharoselösungen für die ersten Stufen der Verdampfstation zu erhalten. Aus wissenschaftlichem Interesse kommt auch die Untersuchung von Melasse in diesem Bereich in Frage. Untersuchungen in diesem Konzentrationsbereich wurden nicht durchgeführt, da das besondere Interesse dieser Arbeit auf die höher konzentrierten Saccharoselösungen der hinteren Stufen der Verdampfstation und der Verdampfungs- und Kühlungskristallisation gerichtet war.

Ebenfalls sollte die Bestimmung des Einflusses der Zusammensetzung der Nichtsaccharosestoffe in technischen Saccharoselösungen auf die dynamische Viskosität und das Fließverhalten durchgeführt werden.

Die Untersuchungen zum Fließverhalten sollten mit geeigneten Meßeinrichtungen auf Temperaturen von über 70 °C ausgeweitet werden. Die mit konventionellen rheologischen Messungen ermittelten Abweichungen vom Newtonschen Fließverhalten sollten durch Oszillationsmessungen ergänzt werden. Eigene Oszillationsmessungen führten zu Meßwerten, die gerade an der Auflösungsgrenze der Messungen lagen. Auf deren Darstellung wurde deshalb verzichtet.

Für die Rohrzuckerindustrie werden entsprechende Untersuchungen an technischen Saccharoselösungen aus Rohr zur dynamischen Viskosität, dem Fließverhalten und der Oberflächenspannung im gleichen Konzentrations- und Temperaturbereich vorgeschlagen. Hier sind aufgrund anderer Zusammensetzung der technischen Saccharoselösungen aus Rohr abweichende Eigenschaften zu erwarten, wie Untersuchungsergebnisse einzelner Rohrsäfte und -melassen in dieser Arbeit belegen.

Als Konsequenz aus den Berechnungen zur Benetzung von Verdampferheizflächen werden experimentelle Bestimmungen der optimalen Benetzung im Vergleich zur berechneten Mindestflüssigkeitsbelastung und kritischen Flüssigkeitsbelastung der Heizflächen empfohlen.

10. Zusammenfassung

Moderne Meßtechniken ermöglichten die Neuauflage der Bestimmung der dynamischen Viskosität bei originären Prozeßtemperaturen und die berührungslose Bestimmung der Oberflächenspannung von reinen und technischen Saccharoselösungen.

Erstmals wurden Meßwerte der Viskosität von reiner Saccharoselösung, Dicksaft und Melasse, sowie für Zuckerhausprodukte mit Konzentrationen über 60 g/100 g bis Temperaturen von 130 °C bestimmt.

Aus den Meßwerten konnten empirische Näherungsgleichungen mit hoher statistischer Absicherung abgeleitet werden, die die Berechnung der dynamischen Viskosität in Abhängigkeit von Temperatur, Konzentration und Reinheit mit relativ geringem rechnerischen Aufwand ermöglichen.

Verglichen wurde das Viskositätsverhalten von technischen Saccharoselösungen aus Rohr und Rübe exemplarisch am Beispiel von Dicksäften und Melassen aus Rohr und Rübe.

Neue Erkenntnisse wurden auch zum nicht-Newtonschen Fließverhalten von reinen und technischen Saccharoselösungen gewonnen.

Die Abweichungen vom idealviskosen Fließansatz sind insgesamt gering und unterstützen aufgrund der Strukturviskosität das Processing.

Innerhalb der Strukturviskosität wird ein anderes strukturviskoses Verhalten aufgrund der molekularen Zusammensetzung zwischen reiner Saccharoselösung, Dicksaft und Melasse festgestellt.

Bei Dickssäften sind demnach die geringsten vom Newtonschen Medium abweichenden Fließeigenschaften zu beobachten. Durch die Nichtsaccharosestoffe werden die Saccharosemoleküle vermutlich an einer Strukturausbildung gehindert.

Reine Saccharoselösungen und Melassen zeigen demgegenüber in bestimmten Konzentration- und Temperaturbereichen deutliche Strukturviskosität. Als Ursache dafür werden Strukturierungen der Saccharosemoleküle angenommen.

Der Einsatz modernster computergestützter Meßtechnik zur Oberflächenspannungsbestimmung lieferte Meßergebnisse für reine und technische Saccharoselösungen in einem Umfang, wie sie bisher nicht verfügbar waren.

Erstmals konnte ein dynamisches Verhalten der Oberflächenspannung als Stoffkennwert in Abhängigkeit vom Stoffsystem, von Konzentration, Temperatur und Alterung bestimmt werden. Die Oberflächenspannungen von reiner und technischer Saccharoselösung wurden für einen weiten Temperatur- und Konzentrationsbereich ermittelt.

Technische Saccharoselösung zeigten dabei in Abhängigkeit von der Konzentration ein ausgeprägtes Minimum der Oberflächenspannung bei mittleren Konzentrationen.

Am Beispiel der Saccharoselösung konnte erstmals ein reinheitsabhängiges Verhalten bestimmt werden.

Für die untersuchten Saccharoselösungen konnten Gleichungsansätze in Abhängigkeit von der Temperatur, der Konzentration und der Reinheit formuliert werden.

Auch bei der Oberflächenspannung wurde, wie bei der Viskosität, ein standortabhängiges Verhalten nachgewiesen.

Mit den ermittelten neuen Stoffkennwerten der dynamischen Viskosität wurden Berechnungen zur Benetzung von Verdampferheizflächen durchgeführt.

Theoretisch mögliche Wärmedurchgangskoeffizienten konnten anhand der gewonnenen Stoffkennwerte berechnet und mit Untersuchungsergebnissen der Praxis verglichen werden.

Ebenso konnten Transportoptimierungen für gelagerten Dicksaft und Melasse durchgeführt werden.

11. Quellen- und Literaturverzeichnis

Tscheuschner, H.-D.: Lebensmitteltechnik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1986

Schramm G.: Einführung in Rheologie und Rheometrie. Gebrüder HAAKE GmbH 1995

Ulbrecht, J.; Mitschka, P.: Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten. Leipzig 1967, S. 8-33

Skelland, A. H. P.: Non-Newtonian flow and heat-transfer. New York 1967, S. 119-122, 215-217

Schiweck, H.: Zusammensetzung von Zuckerrübenmelassen. Zuckerindustrie 119 (1994) 272-282

Burkhard, G.: Z. Ver. Rübenzuckerindustrie 24 (1874) 199.

Schneider, F.; Schliephake, D.; Klimmek, A.: Über die Viskosität von reinen Saccharoselösungen. Zucker 16 (1963) 465-473

Bubnik, Z.; Kadlec, P.; Urban, D.; Bruhns, M.: Sugar Technologists Manual. Verlag Dr. Albert Bartens, Berlin 1995

Guzman, J. de: Relation between fluidity and heat of fusion. Anales soc. espan. fis. quim. 11 (1913) 353-362, ref. in Chem. Abstr. 9 (1915) 740-741

Andrade, E. N. da C.: The viscosity of liquids. Nature 125 (1930) 309-310, 580-584

Frenkel, J.: Über die Wärmebewegung in festen und flüssigen Körpern. Z. Physik 35 (1925/26) 652-669

Honig, P.: The viscosity of sugar house products. Proc. Ann. Conv. Sugar Technol. Assoc. India 23 (1954) 80-91

Silin, P. M.; Silina, S. A.: Viskosität von Melassen. Z. Zuckerind. 4 (1954) 159-160

Souders, M. Jr.: Viscosity-temperature relations. J. Amer. Chem. Soc. 59 (1937) 1252-1254

Cornelissen, J.; Waterman: The Viscosity-temperature relationship of liquids. Chem. Eng. Sci. 4 (1955) 238-246

Weipert, D.; Tscheuschner, H.-D.; Windhab, E.: Rheologie der Lebensmittel. Behr's Verlag, Hamburg 1993

Pidoux, G.: Formel zur Berechnung der Viskosität im Bereich von 0 bis 100 °C. Zucker 14 (1961) 523-532

Genotelle, J.: Ind. Alim. Agric. 95 (1978) 747-755

Schmidt, T.: Energetische Untersuchungen von Energieanwendungsprozessen bei der Zuckergewinnung im Werk Zeitz unter Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 1995

Christoph, D.; Senge, B.: Fließeigenschaften von reinen und technischen Saccharoselösungen im Temperaturbereich von 30 bis 130°C; Bericht über die 5. Tagung für Lebensmittelrheologie. Granum-Verlag, Detmold 1997

Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden Teil 1 Wärmeübertrager. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1980

Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. VDI Verlag 1991

Baloh, T.: Wärmeatlas für die Zuckerindustrie. Verlag M. & H. Schaper, Hannover 1975

Hirschmüller, H.: Principles of Sugar Technology. Hrsg.: P. Honig Bd. 1, Amsterdam 1953

Werner, E.: Zuckertechniker-Taschenbuch. Verlag Dr. Albert Bartens, 1956, S.62/63

Schoeneck, H.; Wanninger, W.: Die Oberflächenspannung von wäßrigen Saccharoselösungen. Zucker 18 (1965), 477-480

Grassmann, P.: Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik. Salle + Sauerländer (Otto Salle Verlag, Frankfurt am Main Berlin München; Verlag Sauerländer, Aarau Frankfurt am Main Salzburg)

Dokumentation Krüss GmbH Hamburg

Autorenkollektiv: Die Zuckerherstellung. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1984; S. 84

Schmidt, T.; Christoph, D.; Senge, B.: Non-Newtonian-Behaviour of Pure Sucrose Solution. ICUMSA Tagung Berlin 1998, Poster

Menzel, B., Wiedemann KG Sarstedt: Fallfilmverdampfer in der Zuckerindustrie; Internationales Energieseminar für die Zuckerindustrie, 21.-27.04.1997; Bratislava 1997

Billet: Verdampfung und ihre technische Anwendung. Verlag Chemie Weinheim Deerfield Beach, Florida Basel 1981

Bockhardt, Güntzschel, Poetschukat: Grundlagen der Verfahrenstechnik für Ingenieure. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1981

Senge, B.: 2. Lehrbrief Technische Strömungsmechanik. Zentralstelle für das Hochschulfernstudium Dresden 1992

Schmidt, T.; Christoph, D.: Analyse der verfahrenstechnischen Kennwerte der Verdampfstation und Gesamtwärmeenergiebilanz der Zuckerfabrik Baddeckenstedt 1997

Rotenberg, Y.; Boruvka, L.; Neumann, A.W.: Determination of Surface Tension and Contact Angles from the Shapes of Axisymmetric Fluid Interfaces. *J. Colloid Interface Sci.* 93 (1983) 169

Boyce, J.F.; Schürch, S.; Rotenberg, Y.; Neumann, A.W.: The Measurement of Surface and Interfacial Tension by the Axisymmetric Drop Technique. *Colloid Surfaces* 9 (1984) 307

Girault, H.H.J.; Schiffrin, D.J.; Smith, B.D.V.: The Measurement of Interfacial Tension of Pendant Drops Using a Video Image Profile Digitizer. *J. Colloid Interface Sci.* 101, No. 1 (1984) 257

Anastasiadis, S.H.; Chen, J.-K.; Koberstein, J.T.; Siegel, A.F.; Sohn, J.E.; Emerson, J.A.: The determination of interfacial Tension by video image procession of pendant fluid drops. *J. Colloid Interface Sci.* 119, No. 1 (1987) 55

Hansen, F.K.; Rædsrud, G.: Surface Tension by Pendant Drop. *J. Colloid Interface Sci.* 141, No. 1 (1991) 1

Miller, R.; Sedev, R.; Schano, K.-H.; Ng, C.; Neumann, A.W.: Relaxation of adsorption layers at solution/air interfaces using axisymmetric drop-shape analysis. *Colloids and Surfaces* 69 (1993) 209

Gehm, L.: Rheologie – Praxisorientierte Grundlagen und Glosar. Curt R. Vincentz Verlag, Hannover 1998

Bohl W.: Technische Strömungslehre. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1984

12. Darstellungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis:

ABBILDUNG 1	EINFACHE SCHERVERFORMUNG EINES VISKOSEN KÖRPERS	8
ABBILDUNG 2	URSACHEN FÜR STRUKTURVISKOSES VERHALTEN VON DISPERSIONEN.....	11
ABBILDUNG 3	FLIEß- UND VISKOSITÄTSKURVEN	12
ABBILDUNG 4	α -D-GLUKOPYRANOSIDO-(1,2)- β -D-FRUKTOFURANOSID	18
ABBILDUNG 5	ZUSAMMENSETZUNG VON HANDELSMELASSE.....	20
ABBILDUNG 6	SKIZZE LABORVAKUUMVERDAMPFAPPARAT.....	34
ABBILDUNG 7	AUFBAU DES MEßSYSTEMS DMZ KL.....	37
ABBILDUNG 8	MEßABLAUF ZUR BESTIMMUNG DES NICHT-NEWTONSCHEN VERHALTENS AM RHEOMETERSYSTEM UDS 200.....	41
ABBILDUNG 9	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VON GESCHWINDIGKEIT UND VISKOSITÄT IN DEN MEßSPALTEN VON SEARLE- UND COUETTE-MEßSYSTEMEN.....	42
ABBILDUNG 10	KOAXIALE ZYLINDER-MEßSYSTEME	44
ABBILDUNG 11	AUFBAU DES KONTAKTWINKELMEßGERÄTES DSA 10 (KONFIGURIERT ZUR OBERFLÄCHENSPANNUNGSMESSUNG).....	46
ABBILDUNG 12	SCHEMA DER WECHSELWIRKUNGSKRÄFTE ZWISCHEN MOLEKÜLEN.....	47
ABBILDUNG 13	GEOMETRIE DES HÄNGENDEN TROPFENS	50

Tabellenverzeichnis:

TABELLE 1	DEFORMATIONSANSÄTZE FÜR STRUKTURVISKOSE NICHT-NEWTONSCHE FLÜSSIGKEITEN.....	13
TABELLE 2	TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER VISKOSITÄT	15
TABELLE 3	ZUSAMMENSETZUNG VON NICHTZUCKERSTOFFEN DER MELASSE, BEZOGEN AUF NICHTZUCKER	21
TABELLE 4	TEMPERATURSCHEMA EINER SECHSSTUFIGEN VERDAMPFANLAGE.....	28
TABELLE 5	ANALYSEDATEN DER UNTERSUCHTEN DICKSÄFTE	33
TABELLE 6	ANALYSEDATEN DER UNTERSUCHTEN MELASSEN.....	35
TABELLE 7	ANALYSEDATEN DER UNTERSUCHTEN ZUCKERHAUSZWISCHENPRODUKTE	35
TABELLE 8	DATEN DES MEßSYSTEMS DMZ KL	38
TABELLE 9	VERWENDETE SCHERGESCHWINDIGKEITEN FÜR MELASSE UND ZUCKERHAUSZWISCHENPRODUKTE	39
TABELLE 10	DATEN DER VERWENDETEN MEßSYSTEME AM UDS 200	43
TABELLE 11	REGRESSIONSPARAMETER IN ABHÄNGIGKEIT VOM TROCKENSUBSTANZGEHALT	57
TABELLE 12	STANDORTABHÄNGIGE REGRESSIONSPARAMETER DER UNTERSUCHTEN DICKSÄFTE	66
TABELLE 13	STANDORTABHÄNGIGE REGRESSIONSPARAMETER DER UNTERSUCHTEN MELASSEN.....	73
TABELLE 14	FLIEßVERHALTEN REINER SACCHAROSELÖSUNG	82
TABELLE 15	FLIEßVERHALTEN REINER SACCHAROSELÖSUNG	83
TABELLE 16	FLIEßVERHALTEN DICKSAFT AUS RÜBE.....	85
TABELLE 17	FLIEßVERHALTEN DICKSAFT AUS RÜBE.....	85

TABELLE 18	FLIEßVERHALTEN MELASSE AUS RÜBE.....	87
TABELLE 19	FLIEßVERHALTEN MELASSE AUS RÜBE.....	88
TABELLE 20	REINHEITSABHÄNGIGES FLIEßVERHALTEN TECHNISCHER SACCHAROSELÖSUNG	89
TABELLE 21	REINHEITSABHÄNGIGES FLIEßVERHALTEN TECHNISCHER SACCHAROSELÖSUNG	89
TABELLE 22	REINHEITSABHÄNGIGES FLIEßVERHALTEN TECHNISCHER SACCHAROSELÖSUNG	89
TABELLE 23	FLIEßAKTIVIERUNGSENERGIE VON SACCHAROSELÖSUNGEN	90
TABELLE 24	KONSTANTEN ZUR BERECHNUNG DER NUSSELT-ZAHL IN ABHÄNGIGKEIT VON DER REYNOLDT-ZAHL	111
TABELLE 25	MINDESTFLÜSSIGKEITSBELASTUNG BEI REINER UND TECHNISCHER SACCHAROSELÖSUNG	113
TABELLE 26	BERECHNUNGSERGEBNISSE ZUR OPTIMALEN BENETZUNG UND ZUM WÄRMEDURCHGANG (FÜR DICKSAFT OHNE BELAG)	114
TABELLE 27	BERECHNUNGSERGEBNISSE ZUR OPTIMALEN BENETZUNG UND ZUM WÄRMEDURCHGANG (FÜR DICKSAFT MIT BELAG)	115
TABELLE 28	BERECHNUNGSERGEBNISSE ZUR OPTIMALEN BENETZUNG UND ZUM WÄRMEDURCHGANG (FÜR REINE SACCHAROSELÖSUNG OHNE BELAG)	116
TABELLE 29	ROHRLEITUNGSPREISE DER ZFB. CLAUEN DER NORDZUCKER AG	118
TABELLE 30	OPTIMALE TRANSPORTTEMPERATUREN FÜR 34,75 M ³ /H DICKSAFT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ROHRLEITUNGSLÄNGE.....	122
TABELLE 31	OPTIMALE TRANSPORTTEMPERATUREN FÜR VERSCHIEDENE VOLUMENSTRÖME.....	122
TABELLE 32	OPTIMALE TRANSPORTTEMPERATUREN FÜR 9,3 M ³ /H MELASSE IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ROHRLEITUNGSLÄNGE.....	123
TABELLE 33	DYNAMISCHE VISKOSITÄT VON REINER SACCHAROSELÖSUNG BIS TEMPERATUREN VON 130 °C	134
TABELLE 34	DYNAMISCHE VISKOSITÄT VON DICKSAFT	135
TABELLE 35	DYNAMISCHE VISKOSITÄT MELASSE AUS RÜBE.....	137
TABELLE 36	DYNAMISCHE VISKOSITÄT TECHNISCHE SACCHAROSELÖSUNG MIT 80% REINHEIT	139
TABELLE 37	DYNAMISCHE VISKOSITÄT TECHNISCHE SACCHAOSSELÖSUNG MIT 70% REINHEIT	140
TABELLE 38	OBERFLÄCHENSPIGUNG VON REINER SACCHAROSELÖSUNG NACH GLEICHUNG (6.2.2)	141
TABELLE 39	OBERFLÄCHENSPIGUNG VON DICKSAFT NACH GLEICHUNG (6.2.3).....	142
TABELLE 40	OBERFLÄCHENSPIGUNG TECHNISCHE SACCHAROSELÖSUNG Q = 80%	143
TABELLE 41	OBERFLÄCHENSPIGUNG TECHNISCHE SACCHAROSELÖSUNG Q = 70%	144
TABELLE 42	OBERFLÄCHENSPIGUNG TECHNISCHE SACCHAROSELÖSUNG Q = 60%	145
TABELLE 43	BESTIMMUNG DES REIBUNGSKOEFFIZIENTEN λ	146

Diagrammverzeichnis:

DIAGRAMM 1	ABHÄNGIGKEIT DER SPEZIFISCHEN OBERFLÄCHE DES SYSTEMS VOM TEILCHENDURCHMESSER . 7	
DIAGRAMM 2	GESCHWINDIGKEITSPROFILE VON NEWTONSCHER, STRUKTURVISKOSER UND DILATANter FLÜSSIGKEIT	16
DIAGRAMM 3	DYNAMISCHE VISKOSITÄT REINER SACCHAROSELÖSUNG	58

DIAGRAMM 4	VERGLEICH DER MEßWERTE DER DYNAMISCHEN VISKOSITÄT MIT DEN EXTRAPOLIERTEN WERTEN VON EMPIRISCHEN GLEICHUNGEN FÜR REINE SACCHAROSELÖSUNG.....	59
DIAGRAMM 5	DYNAMISCHE VISKOSITÄT VON DICKSAFT AUS RÜBE	62
DIAGRAMM 6	VERGLEICH DER GLEICHUNG (5.3.2) MIT DEN EXTRAPOLIERTEN WERTEN VON EMPIRISCHEN GLEICHUNGEN FÜR DICKSAFT	63
DIAGRAMM 7	VERGLEICH DER GLEICHUNG (5.3.2) MIT GLEICHUNG (3.5.8) VON GENOTELLE.....	64
DIAGRAMM 8	VERGLEICH DER STANDORTABHÄNGIGEN VISKOSITÄTSUNTERSCHIEDE FÜR DICKSAFT $w_{TS} = 60 \%$	67
DIAGRAMM 9	VERGLEICH DER STANDORTABHÄNGIGEN VISKOSITÄTSUNTERSCHIEDE FÜR DICKSAFT $w_{TS} = 65 \%$	68
DIAGRAMM 10	VERGLEICH DER STANDORTABHÄNGIGEN VISKOSITÄTSUNTERSCHIEDE FÜR DICKSAFT $w_{TS} = 70 \%$	68
DIAGRAMM 11	VERGLEICH DER STANDORTABHÄNGIGEN VISKOSITÄTSUNTERSCHIEDE FÜR DICKSAFT $w_{TS} = 75 \%$	69
DIAGRAMM 12	VERGLEICH DER DYNAMISCHEN VISKOSITÄT VON DICKSAFT AUS ZUCKERROHR UND ZUCKERRÜBE.....	70
DIAGRAMM 13	DYNAMISCHE VISKOSITÄT VON MELASSE AUS ZUCKERRÜBE	72
DIAGRAMM 14	VERGLEICH DER STANDORTABHÄNGIGEN VISKOSITÄTSUNTERSCHIEDE FÜR MELASSE $w_{TS} = 70 \text{ G}/100 \text{ G}$	74
DIAGRAMM 15	VERGLEICH DER STANDORTABHÄNGIGEN VISKOSITÄTSUNTERSCHIEDE FÜR MELASSE $w_{TS} = 75 \text{ G}/100 \text{ G}$	75
DIAGRAMM 16	VERGLEICH DER STANDORTABHÄNGIGEN VISKOSITÄTSUNTERSCHIEDE FÜR MELASSE $w_{TS} = 80 \text{ G}/100 \text{ G}$	75
DIAGRAMM 17	VERGLEICH DER STANDORTABHÄNGIGEN VISKOSITÄTSUNTERSCHIEDE FÜR MELASSE $w_{TS} = 85 \text{ G}/100 \text{ G}$	76
DIAGRAMM 18	VERGLEICH DER DYNAMISCHEN VISKOSITÄT VON ROHR- UND RÜBEN- MELASSE.....	77
DIAGRAMM 19	DYNAMISCHE VISKOSITÄT VON ZUCKERHAUSPRODUKTEN	78
DIAGRAMM 20	VERGLEICH GLEICHUNG (5.5.1) MIT GLEICHUNG (3.5.8) VON GENOTELLE.....	79
DIAGRAMM 21	VERGLEICH GLEICHUNG (5.2.1) UND GLEICHUNG (5.5.1)	80
DIAGRAMM 22	FLIEBKURVE REINER SACCHAROSELÖSUNG	82
DIAGRAMM 23	FLIEBEXONENT IN ABHÄNGIGKEIT VON KONZENTRATION UND TEMPERATUR	83
DIAGRAMM 24	FLIEBKURVE DICKSAFT.....	85
DIAGRAMM 25	FLIEBEXONENT IN ABHÄNGIGKEIT VON KONZENTRATION UND TEMPERATUR	86
DIAGRAMM 26	FLIEBKURVE MELASSE.....	87
DIAGRAMM 27	FLIEBEXONENT IN ABHÄNGIGKEIT VON KONZENTRATION UND TEMPERATUR	88
DIAGRAMM 28	ZEITABHÄNGIGES VERHALTEN DER OBERFLÄCHENSpannung	93
DIAGRAMM 29	TEMPERATURABHÄNGIGE AUSBILDUNG EINER NAHORDNUNG IN REINER SACCHAROSELÖSUNG	94
DIAGRAMM 30	PROZENTUALE VERRINGERUNG DER OBERFLÄCHENSpannung REINER SACCHAROSELÖSUNG INNERHALB DER MEßZEIT VON 5 MINUTEN	95

DIAGRAMM 31	PROZENTUALE VERRINGERUNG DER OBERFLÄCHENSPIANNUNG VON DICKSAFT INNERHALB DER MEßZEIT.....	96
DIAGRAMM 32	OBERFLÄCHENSPIANNUNG BEI KONTINUIERLICHER OBERFLÄCHENVERGRÖßERUNG DES TROPFENS	97
DIAGRAMM 33	OBERFLÄCHENSPIANNUNG REINER SACCHAROSELÖSUNG	98
DIAGRAMM 34	OBERFLÄCHENSPIANNUNG TECHNISCHER SACCHAROSELÖSUNG DICKSAFT.....	100
DIAGRAMM 35	OBERFLÄCHENSPIANNUNG DER ORIGINALSÄFTE AUS DER VERDAMPFSTATION BADDECKENSTEDT	102
DIAGRAMM 36	TEMPERATURABHÄNGIGE OBERFLÄCHENSPIANNUNG VON REINER SACCHAROSELÖSUNG UND DICKSAFT, SOWIE WASSER.....	102
DIAGRAMM 37	OBERFLÄCHENSPIANNUNG TECHNISCHER SACCHAROSELÖSUNG MELASSE.....	103
DIAGRAMM 38	OBERFLÄCHENSPIANNUNG VON SACCHAROSELÖSUNGEN UNTERSCHIEDLICHER REINHEIT UND TEMPERATUR.....	104
DIAGRAMM 39	REINHEITSABHÄNGIGKEIT DER OBERFLÄCHENSPIANNUNG MIT $w_{TS} = 60 \text{ G}/100 \text{ G}$	105
DIAGRAMM 40	REINHEITSABHÄNGIGKEIT DER OBERFLÄCHENSPIANNUNG MIT $w_{TS} = 70 \text{ G}/100 \text{ G}$	106
DIAGRAMM 41	REINHEITSABHÄNGIGKEIT DER OBERFLÄCHENSPIANNUNG MIT $w_{TS} = 75 \text{ G}/100 \text{ G}$ UND $w_{TS} = 80 \text{ G}/100 \text{ G}$	106

13. Anhang

Tabelle 33 Dynamische Viskosität von reiner Saccharoselösung bis Temperaturen von 130 °C

Dynamische Viskosität reiner Saccharoselösung in mPas																
Temp. °C	Trockensubstanzgehalt in %															
	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
30	35,21	40,13	46,27	53,99	63,76	76,20	92,16	112,79	139,70	175,11	222,12	285,13	370,41	486,96	647,86	872,27
31	33,62	38,25	44,03	51,29	60,44	72,08	86,96	106,16	131,13	163,88	207,24	265,16	343,28	449,67	595,98	799,25
32	32,13	36,50	41,94	48,76	57,35	68,23	82,13	100,01	123,19	153,52	193,55	246,85	318,50	415,72	548,94	733,30
33	30,72	34,84	39,97	46,39	54,45	64,65	77,63	94,29	115,85	143,96	180,95	230,05	295,83	384,79	506,24	673,66
34	29,39	33,29	38,13	44,17	51,74	61,30	73,44	88,99	109,04	135,13	169,34	214,62	275,09	356,57	467,42	619,65
35	28,14	31,82	36,39	42,08	49,20	58,17	69,54	84,05	102,73	126,95	158,64	200,44	256,08	330,80	432,09	570,69
36	26,96	30,44	34,76	40,12	46,83	55,24	65,89	79,46	96,87	119,38	148,75	187,38	238,63	307,24	399,91	526,24
37	25,84	29,14	33,22	38,29	44,60	52,51	62,49	75,18	91,42	112,37	139,62	175,35	222,61	285,66	370,54	485,84
38	24,79	27,92	31,78	36,56	42,50	49,94	59,31	71,19	86,35	105,86	131,17	164,26	207,88	265,90	343,73	449,08
39	23,79	26,76	30,41	34,93	40,54	47,54	56,34	67,46	81,64	99,82	123,35	154,01	194,32	247,76	319,21	415,59
40	22,85	25,67	29,13	33,40	38,69	45,28	53,55	63,98	77,24	94,21	116,09	144,55	181,83	231,10	296,77	385,04
41	21,96	24,63	27,91	31,95	36,95	43,17	50,94	60,73	73,14	88,99	109,37	135,79	170,31	215,79	276,20	357,14
42	21,12	23,66	26,77	30,59	35,32	41,18	48,50	57,69	69,32	84,13	103,12	127,68	159,68	201,70	257,34	331,63
43	20,32	22,73	25,68	29,31	33,78	39,31	46,20	54,85	65,75	79,60	97,32	120,17	149,85	188,72	240,02	308,29
44	19,56	21,85	24,66	28,10	32,32	37,55	44,05	52,18	62,41	75,38	91,92	113,20	140,76	176,75	224,09	286,89
45	18,84	21,02	23,69	26,95	30,95	35,90	42,03	49,68	59,29	71,43	86,90	106,73	132,35	165,69	209,44	267,27
46	18,16	20,24	22,77	25,87	29,66	34,34	40,12	47,33	56,36	67,75	82,22	100,72	124,55	155,48	195,94	249,26
47	17,51	19,49	21,90	24,84	28,44	32,87	38,33	45,13	53,62	64,31	77,85	95,13	117,32	146,04	183,49	232,70
48	16,89	18,78	21,08	23,88	27,29	31,48	36,65	43,06	51,06	61,09	73,78	89,92	110,60	137,30	172,00	217,46
49	16,31	18,11	20,30	22,96	26,20	30,17	35,06	41,11	48,65	58,08	69,98	85,07	104,37	129,20	161,38	203,42
50	15,75	17,47	19,56	22,09	25,17	28,94	33,56	39,28	46,38	55,26	66,42	80,55	98,56	121,68	151,57	190,48
51	15,22	16,86	18,85	21,26	24,19	27,77	32,15	37,56	44,26	52,61	63,09	76,33	93,16	114,71	142,48	178,53
52	14,71	16,29	18,19	20,48	23,27	26,66	30,82	35,93	42,26	50,13	59,98	72,39	88,13	108,23	134,06	167,50
53	14,23	15,74	17,55	19,74	22,39	25,62	29,56	34,40	40,38	47,79	57,06	68,71	83,44	102,20	126,25	157,30
54	13,77	15,21	16,95	19,03	21,56	24,63	28,37	32,95	38,60	45,60	54,33	65,26	79,07	96,60	119,01	147,85
55	13,34	14,71	16,37	18,36	20,77	23,69	27,24	31,59	36,93	43,54	51,76	62,04	74,98	91,37	112,27	139,10
56	12,92	14,24	15,82	17,73	20,02	22,80	26,18	30,30	35,36	41,60	49,35	59,02	71,16	86,50	106,01	130,99
57	12,52	13,79	15,30	17,12	19,31	21,96	25,17	29,08	33,88	39,78	47,09	56,19	67,59	81,96	100,19	123,46
58	12,14	13,35	14,80	16,54	18,64	21,16	24,21	27,93	32,47	38,06	44,96	53,53	64,24	77,71	94,76	116,47
59	11,78	12,94	14,33	16,00	17,99	20,40	23,31	26,84	31,15	36,44	42,95	51,03	61,11	73,75	89,70	109,96
60	11,43	12,55	13,88	15,47	17,38	19,68	22,45	25,81	29,90	34,91	41,07	48,69	58,17	70,04	84,98	103,91
61	11,10	12,17	13,45	14,97	16,80	18,99	21,63	24,83	28,71	33,46	39,29	46,48	55,42	66,57	80,58	96,27
62	10,78	11,81	13,04	14,50	16,24	18,34	20,86	23,90	27,59	32,10	37,61	44,41	52,83	63,32	76,48	93,02
63	10,48	11,47	12,64	14,04	15,72	17,72	20,12	23,02	26,53	30,81	36,03	42,46	50,40	60,27	72,61	88,12
64	10,18	11,14	12,27	13,61	15,21	17,13	19,42	22,18	25,53	29,59	34,54	40,62	48,12	57,41	69,01	83,54
65	9,91	10,82	11,91	13,20	14,73	16,56	18,76	21,39	24,57	28,43	33,13	38,88	45,97	54,73	65,63	79,27
66	9,64	10,52	11,56	12,80	14,27	16,03	18,12	20,64	23,67	27,34	31,80	37,25	43,94	52,21	62,47	75,27
67	9,38	10,23	11,24	12,42	13,84	15,51	17,52	19,92	22,81	26,30	30,54	35,70	42,04	49,84	59,50	71,53
68	9,14	9,95	10,92	12,06	13,42	15,03	16,94	19,24	21,99	25,32	29,34	34,24	40,24	47,61	56,71	68,03
69	8,90	9,69	10,62	11,72	13,02	14,56	16,40	18,59	21,22	24,39	28,21	32,87	38,54	45,51	54,10	64,74
70	8,67	9,43	10,33	11,39	12,64	14,12	15,88	17,97	20,48	23,50	27,14	31,56	36,94	43,53	51,64	61,66
71	8,46	9,19	10,05	11,07	12,27	13,69	15,38	17,38	19,78	22,66	26,13	30,33	35,43	41,67	49,32	58,77
72	8,25	8,96	9,79	10,77	11,92	13,29	14,90	16,82	19,12	21,86	25,17	29,16	34,00	39,91	47,15	56,06
73	8,05	8,73	9,53	10,48	11,59	12,90	14,45	16,29	18,48	21,11	24,25	28,05	32,65	38,25	45,10	53,51
74	7,85	8,51	9,29	10,20	11,27	12,53	14,01	15,78	17,88	20,38	23,39	27,00	31,37	36,68	43,16	51,11
75	7,67	8,31	9,05	9,93	10,96	12,17	13,60	15,29	17,30	19,70	22,56	26,01	30,16	35,20	41,34	48,85
76	7,49	8,11	8,83	9,67	10,67	11,83	13,20	14,83	16,75	19,04	21,78	25,06	29,02	33,80	39,62	46,72
77	7,32	7,91	8,61	9,43	10,38	11,51	12,83	14,38	16,23	18,42	21,03	24,17	27,93	32,48	37,99	44,72
78	7,15	7,73	8,40	9,19	10,11	11,19	12,46	13,96	15,73	17,83	20,33	23,31	26,90	31,22	36,46	42,82
79	6,99	7,55	8,20	8,96	9,85	10,89	12,12	13,55	15,25	17,26	19,65	22,50	25,92	30,04	35,01	41,04
80	6,84	7,38	8,01	8,75	9,60	10,61	11,78	13,16	14,79	16,72	19,01	21,73	24,99	28,91	33,63	39,35
81	6,69	7,22	7,83	8,54	9,37	10,33	11,46	12,79	14,36	16,21	18,40	21,00	24,11	27,84	32,33	37,76
82	6,55	7,06	7,65	8,34	9,14	10,07	11,16	12,44	13,94	15,71	17,81	20,30	23,27	26,83	31,10	36,26
83	6,41	6,90	7,48	8,14	8,91	9,81	10,87	12,10	13,54	15,24	17,25	19,64	22,48	25,87	29,93	34,83
84	6,28	6,76	7,31	7,96	8,70	9,57	10,59	11,77	13,16	14,79	16,72	19,00	21,72	24,95	28,83	33,49
85	6,15	6,62	7,15	7,78	8,50	9,34	10,32	11,46	12,79	14,36	16,21	18,40	20,99	24,08	27,78	32,21
86	6,03	6,48	7,00	7,60	8,30	9,11	10,06	11,16	12,44	13,95	15,73	17,82	20,31	23,26	26,78	31,00
87	5,91	6,35	6,85	7,44	8,11	8,90	9,81	10,87	12,11	13,56	15,27	17,27	19,65	22,47	25,83	29,85
88	5,79	6,22	6,71	7,28	7,93	8,69	9,57	10,59	11,79	13,18	14,82	16,75	19,03	21,72	24,93	28,76
89	5,68	6,10	6,57	7,12	7,76	8,49	9,34	10,33	11,48	12,82	14,40	16,25	18,43	21,01	24,08	27,73
90	5,58	5,98	6,44	6,97	7,59	8,30	9,12	10,07	11,18	12,48	13,99	15,77	17,86	20,33	23,26	26,75
91	5,47	5,86	6,31	6,83	7,42	8,11	8,91	9,83	10,90	12,15	13,60	15,31	17,32	19,69	22,49	25,82
92	5,37	5,75	6,19	6,69	7,27	7,93	8,70	9,59	10,63	11,83	13,23	14,87	16,80	19,07	21,75	24,93
93	5,28	5,64	6,07	6,56	7,12	7,76	8,51	9,37	10,37	11,52	12,88	14,45	16,30	18,48	21,05	24,00
94	5,18	5,54	5,95	6,43	6,97	7,60	8,32	9,15	10,11	11,23	12,53	14,05	15,83	17,92	20,38	23,28
95	5,09	5,44	5,84	6,30	6,83	7,44	8,13	8,94	9,87	10,95	12,21	13,67	15,38	17,38	19,74	22,52
96	5,00	5,34	5,73	6,18	6,69	7,28	7,96	8,74	9,64	10,68	11,89	13,30	14,94	16,87	19,13	21,79
97	4,92	5,25	5,63	6,06	6,56	7,13	7,79	8,55	9,42	10,42	11,59	12,95	14,53	16,38	18,55	21,10
98	4,84	5,16	5,53	5,95	6,44	6,99	7,63	8,36	9,20	10,18	11,30	12,61	14,13	15,91	17,99	20,44
99	4,76	5,07	5,43	5,84	6,31	6,85	7,47	8,18	8,99	9,94	11,02	12,29	13,75	15,		

Tabelle 34 Dynamische Viskosität von Dicksaft

Dynamische Viskosität Dicksaft in mPas																
Temp. °C	Trockensubstanzgehalt in %															
	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
5	155,20	186,04	226,48	279,98	351,51	448,16	580,27	763,00	1018,87	1381,69	1902,82	2661,23	3779,75	5451,83	7985,80	11879,33
6	144,58	172,86	209,84	258,64	323,67	411,26	530,57	694,98	924,31	1248,16	1711,32	2382,34	3367,30	4832,49	7041,55	10417,78
7	134,85	160,81	194,67	239,23	298,43	377,92	485,82	633,98	839,85	1129,39	1541,74	2136,49	3005,47	4291,86	6221,59	9155,44
8	125,91	149,77	180,81	221,55	275,52	347,76	445,48	579,19	764,28	1023,57	1391,30	1919,38	2687,43	3819,01	5508,09	8062,84
9	117,69	139,65	168,14	205,44	254,70	320,43	409,06	529,91	696,57	929,14	1257,62	1727,32	2407,39	3404,66	4886,00	7115,19
10	110,13	130,36	156,54	190,72	235,75	295,64	376,14	485,51	635,81	844,74	1138,64	1557,11	2160,35	3040,88	4342,54	6291,56
11	103,16	121,82	145,91	177,28	218,48	273,12	346,33	445,46	581,20	769,17	1032,56	1406,02	1942,04	2720,90	3866,85	5574,29
12	96,74	113,96	136,16	164,97	202,72	252,64	319,31	409,28	532,05	701,43	937,83	1271,67	1748,78	2438,95	3449,68	4948,40
13	90,81	106,73	127,19	153,70	188,33	233,99	294,78	376,55	487,74	640,59	853,11	1152,02	1577,40	2190,05	3063,17	4401,19
14	85,33	100,06	118,95	143,36	175,16	216,98	272,48	346,90	447,75	585,89	777,22	1045,27	1425,17	1969,95	2760,56	3921,85
15	80,26	93,90	111,36	133,86	163,11	201,45	252,19	320,01	411,80	536,62	709,14	949,90	1289,72	1774,98	2476,08	3501,17
16	75,56	88,21	104,37	125,13	152,05	187,25	233,69	295,58	378,88	492,19	647,98	864,55	1169,02	1601,97	2224,79	3131,29
17	71,21	82,95	97,91	117,10	141,91	174,26	216,82	273,36	349,22	452,05	592,94	788,05	1061,27	1448,20	2002,42	2805,49
18	67,18	78,08	91,95	109,70	132,59	162,35	201,41	253,13	322,30	415,76	543,34	719,39	964,95	1311,29	1805,31	2518,01
19	63,43	73,57	86,44	102,87	124,01	151,43	187,31	234,68	297,84	382,89	498,59	657,66	878,70	1189,22	1630,29	2263,88
20	59,94	69,38	81,34	96,57	116,12	141,40	174,40	217,84	275,58	353,08	458,16	602,09	801,35	1080,18	1474,64	2038,85
21	56,70	65,50	76,61	90,74	108,84	132,18	162,56	202,45	255,30	326,02	421,56	551,99	731,89	982,65	1335,98	1839,26
22	53,68	61,88	72,23	85,35	102,12	123,70	151,70	188,37	236,80	301,41	388,41	506,76	669,41	895,28	1212,26	1661,93
23	50,87	58,52	68,16	80,36	95,91	115,88	141,72	175,46	219,91	279,00	358,33	465,87	613,14	816,88	1101,70	1504,11
24	48,24	55,39	64,38	75,73	90,17	108,66	132,54	163,63	204,46	258,58	331,00	428,85	562,38	746,43	1002,75	1363,45
25	45,79	52,48	60,96	71,44	84,86	102,00	124,09	152,76	190,31	239,94	306,14	395,29	516,53	683,03	914,05	1237,86
26	43,50	49,76	57,59	67,45	79,93	95,85	116,29	142,77	177,35	222,91	283,50	364,83	475,06	625,90	834,42	1125,57
27	41,35	47,22	54,54	63,74	75,37	90,15	109,10	133,58	165,45	207,34	262,86	337,15	437,50	574,35	762,83	1025,01
28	39,35	44,85	51,70	60,30	71,13	84,88	102,46	125,11	154,53	193,07	244,01	311,96	403,43	527,76	698,37	934,82
29	37,47	42,63	49,05	57,08	67,19	79,99	96,32	117,30	144,47	179,98	226,78	289,00	372,50	485,60	640,26	853,81
30	35,71	40,55	46,57	54,09	63,53	75,45	90,63	110,08	135,22	167,97	211,01	268,06	344,37	447,39	587,79	780,94
31	34,05	38,61	44,26	51,30	60,12	71,24	85,36	103,42	126,69	156,94	196,56	248,93	318,76	412,73	540,35	715,30
32	32,50	36,78	42,09	48,69	56,94	67,32	80,48	97,26	118,83	146,78	183,31	231,44	295,42	381,24	497,40	656,09
33	31,04	35,07	40,06	46,25	53,98	63,68	75,94	91,55	111,56	137,43	171,13	215,42	274,11	352,59	458,46	602,60
34	29,67	33,47	38,16	43,97	51,21	60,28	71,73	86,26	104,84	128,81	159,94	200,74	254,65	326,50	423,12	554,22
35	28,38	31,96	36,37	41,84	48,63	57,12	67,81	81,35	98,63	120,85	149,65	187,27	236,84	302,71	391,00	510,39
36	27,17	30,54	34,70	39,84	46,21	54,17	64,16	76,79	92,87	113,50	140,16	174,90	220,53	280,98	361,76	470,65
37	26,02	29,21	33,13	37,96	43,95	51,41	60,76	72,55	87,53	106,70	131,41	163,51	205,57	261,13	335,13	434,55
38	24,94	27,95	31,65	36,20	41,83	48,83	57,59	68,61	82,58	100,40	123,33	153,04	191,84	242,95	310,82	401,73
39	23,92	26,77	30,26	34,55	39,85	46,43	54,63	64,94	77,98	94,57	115,86	143,38	179,23	226,30	288,63	371,85
40	22,96	25,65	28,95	33,00	37,99	44,17	51,87	61,52	73,70	89,16	108,96	134,47	167,62	211,03	268,33	344,61
41	22,05	24,60	27,72	31,54	36,24	42,06	49,29	58,33	69,71	84,14	102,56	126,24	156,93	197,00	249,75	319,75
42	21,19	23,61	26,56	30,17	34,60	40,08	46,87	55,35	66,01	79,48	96,63	118,64	147,07	184,11	232,72	297,03
43	20,38	22,67	25,46	28,87	33,06	38,22	44,61	52,57	62,55	75,14	91,13	111,60	137,98	172,24	217,09	276,25
44	19,61	21,78	24,43	27,66	31,61	36,47	42,49	49,97	59,32	71,10	86,02	105,08	129,58	161,31	202,73	257,21
45	18,88	20,94	23,45	26,51	30,24	34,84	40,50	47,53	56,31	67,33	81,28	99,03	121,81	151,23	189,53	239,76
46	18,19	20,15	22,53	25,42	28,96	33,29	38,63	45,25	53,49	63,82	76,86	93,42	114,61	141,92	177,37	223,74
47	17,53	19,39	21,65	24,40	27,75	31,84	36,88	43,11	50,86	60,55	72,75	88,21	107,95	133,32	166,17	209,02
48	16,91	18,68	20,83	23,43	26,60	30,48	35,23	41,11	48,39	57,49	68,92	83,37	101,77	125,36	155,83	195,48
49	16,32	18,00	20,04	22,52	25,52	29,19	33,68	39,22	46,08	54,63	65,34	78,86	96,03	118,00	146,29	183,00
50	15,75	17,36	19,30	21,65	24,50	27,98	32,23	37,45	43,92	51,95	62,00	74,66	90,70	111,17	137,47	171,51
51	15,22	16,75	18,60	20,83	23,54	26,83	30,85	35,79	41,88	49,44	58,88	70,75	85,74	104,84	129,31	160,89
52	14,71	16,17	17,93	20,06	22,63	25,75	29,56	34,22	39,97	47,10	55,97	67,09	81,13	98,95	121,75	151,09
53	14,23	15,62	17,30	19,32	21,76	24,73	28,34	32,75	38,18	44,89	53,24	63,68	76,83	93,49	114,74	142,03
54	13,77	15,10	16,70	18,62	20,95	23,76	27,18	31,36	36,49	42,83	50,68	60,50	72,82	88,40	108,23	133,64
55	13,33	14,60	16,13	17,96	20,17	22,85	26,09	30,05	34,91	40,88	48,29	57,51	69,08	83,67	102,19	125,86
56	12,91	14,13	15,58	17,33	19,44	21,98	25,07	28,82	33,41	39,06	46,04	54,72	65,58	79,26	96,57	118,65
57	12,51	13,67	15,07	16,73	18,74	21,16	24,09	27,65	32,00	37,34	43,93	52,11	62,32	75,14	91,35	111,96
58	12,13	13,24	14,57	16,17	18,08	20,39	23,17	26,55	30,68	35,73	41,95	49,66	59,26	71,30	86,48	105,75
59	11,77	12,83	14,11	15,63	17,45	19,65	22,30	25,51	29,42	34,21	40,09	47,36	56,40	67,71	81,94	99,96
60	11,43	12,44	13,66	15,11	16,86	18,95	21,47	24,53	28,24	32,77	38,34	45,20	53,72	64,35	77,71	94,58

Fortsetzung Tabelle 34 Dynamische Viskosität von Dicksaft

Dynamische Viskosität Dicksaft in mPas																
Temp. °C	Trockensubstanzgehalt in %															
	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
60	11,43	12,44	13,66	15,11	16,86	18,95	21,47	24,53	28,24	32,77	38,34	45,20	53,72	64,35	77,71	94,58
61	11,09	12,07	13,23	14,62	16,29	18,29	20,69	23,60	27,12	31,42	36,68	43,17	51,21	61,21	73,76	89,57
62	10,78	11,71	12,83	14,16	15,75	17,66	19,95	22,71	26,06	30,14	35,13	41,26	48,85	58,27	70,06	84,90
63	10,48	11,37	12,44	13,71	15,24	17,06	19,24	21,88	25,06	28,94	33,66	39,47	46,63	55,52	66,61	80,53
64	10,19	11,05	12,07	13,29	14,75	16,49	18,57	21,08	24,12	27,80	32,28	37,78	44,55	52,93	63,38	76,46
65	9,91	10,73	11,72	12,89	14,28	15,95	17,94	20,33	23,22	26,72	30,98	36,19	42,59	50,51	60,35	72,65
66	9,64	10,44	11,38	12,50	13,84	15,43	17,33	19,62	22,37	25,70	29,74	34,68	40,75	48,23	57,51	69,09
67	9,39	10,15	11,06	12,13	13,41	14,94	16,76	18,94	21,56	24,73	28,58	33,27	39,01	46,09	54,85	65,76
68	9,15	9,88	10,75	11,78	13,01	14,47	16,21	18,29	20,80	23,82	27,48	31,93	37,37	44,07	52,35	62,63
69	8,91	9,62	10,45	11,45	12,62	14,02	15,69	17,68	20,07	22,95	26,43	30,66	35,83	42,17	50,00	59,70
70	8,69	9,37	10,17	11,13	12,25	13,60	15,19	17,10	19,38	22,13	25,45	29,47	34,38	40,39	47,79	56,95
71	8,47	9,13	9,90	10,82	11,90	13,19	14,72	16,54	18,73	21,35	24,51	28,34	33,00	38,70	45,71	54,37
72	8,27	8,90	9,64	10,52	11,57	12,80	14,27	16,02	18,10	20,61	23,62	27,27	31,70	37,11	43,75	51,94
73	8,07	8,68	9,39	10,24	11,24	12,43	13,84	15,51	17,51	19,90	22,78	26,26	30,47	35,61	41,91	49,66
74	7,88	8,46	9,16	9,97	10,94	12,08	13,43	15,03	16,95	19,23	21,98	25,30	29,31	34,20	40,17	47,52
75	7,70	8,26	8,93	9,71	10,64	11,74	13,03	14,57	16,41	18,60	21,22	24,38	28,21	32,86	38,53	45,49
76	7,52	8,07	8,71	9,47	10,36	11,41	12,66	14,14	15,89	17,99	20,50	23,52	27,17	31,59	36,98	43,59
77	7,35	7,88	8,50	9,23	10,09	11,10	12,30	13,72	15,41	17,41	19,82	22,70	26,18	30,39	35,52	41,79
78	7,19	7,70	8,30	9,00	9,83	10,81	11,96	13,32	14,94	16,86	19,16	21,92	25,24	29,26	34,14	40,10
79	7,03	7,52	8,10	8,78	9,58	10,52	11,63	12,94	14,49	16,34	18,54	21,18	24,35	28,18	32,83	38,50
80	6,88	7,36	7,92	8,57	9,34	10,25	11,32	12,58	14,07	15,84	17,95	20,48	23,51	27,16	31,59	36,98
81	6,74	7,20	7,74	8,37	9,11	9,99	11,02	12,23	13,66	15,36	17,39	19,81	22,71	26,20	30,42	35,55
82	6,60	7,04	7,56	8,18	8,89	9,74	10,73	11,90	13,28	14,91	16,85	19,17	21,94	25,28	29,31	34,20
83	6,46	6,89	7,40	7,99	8,68	9,50	10,45	11,58	12,91	14,48	16,34	18,56	21,22	24,41	28,26	32,92
84	6,33	6,75	7,24	7,81	8,48	9,27	10,19	11,27	12,55	14,06	15,85	17,98	20,53	23,58	27,26	31,70
85	6,21	6,61	7,08	7,64	8,29	9,05	9,94	10,98	12,21	13,66	15,39	17,43	19,87	22,79	26,31	30,55
86	6,09	6,48	6,94	7,47	8,10	8,83	9,69	10,70	11,89	13,29	14,94	16,91	19,25	22,05	25,41	29,46
87	5,97	6,35	6,79	7,31	7,92	8,63	9,46	10,43	11,58	12,92	14,52	16,40	18,65	21,33	24,55	28,43
88	5,86	6,23	6,66	7,16	7,75	8,43	9,23	10,17	11,28	12,58	14,11	15,92	18,08	20,66	23,74	27,45
89	5,75	6,11	6,52	7,01	7,58	8,24	9,02	10,03	10,99	12,24	13,72	15,47	17,54	20,01	22,96	26,51
90	5,65	5,99	6,40	6,87	7,42	8,06	8,81	9,69	10,72	11,93	13,35	15,03	17,02	19,39	22,23	25,63
91	5,54	5,88	6,27	6,73	7,26	7,89	8,61	9,46	10,46	11,62	12,99	14,61	16,53	18,81	21,53	24,78
92	5,45	5,77	6,15	6,60	7,12	7,72	8,42	9,24	10,20	11,33	12,65	14,21	16,06	18,25	20,86	23,98
93	5,35	5,67	6,04	6,47	6,97	7,56	8,24	9,03	9,96	11,05	12,32	13,83	15,61	17,71	20,22	23,22
94	5,26	5,57	5,93	6,35	6,83	7,40	8,06	8,83	9,73	10,78	12,01	13,46	15,17	17,20	19,61	22,49
95	5,17	5,47	5,82	6,23	6,70	7,25	7,89	8,64	9,51	10,52	11,71	13,11	14,76	16,72	19,03	21,80
96	5,09	5,38	5,72	6,11	6,57	7,11	7,73	8,45	9,29	10,27	11,42	12,78	14,37	16,25	18,48	21,14
97	5,01	5,29	5,62	6,00	6,45	6,97	7,57	8,27	9,08	10,04	11,15	12,45	13,99	15,80	17,95	20,51
98	4,93	5,20	5,52	5,90	6,33	6,83	7,42	8,10	8,89	9,81	10,88	12,15	13,63	15,38	17,45	19,91
99	4,85	5,12	5,43	5,79	6,21	6,70	7,27	7,93	8,70	9,59	10,63	11,85	13,28	14,97	16,97	19,33
100	4,77	5,04	5,34	5,69	6,10	6,58	7,13	7,77	8,51	9,38	10,39	11,57	12,95	14,58	16,50	18,78
101	4,70	4,96	5,25	5,60	6,00	6,46	6,99	7,61	8,34	9,17	10,15	11,29	12,63	14,21	16,06	18,26
102	4,63	4,88	5,17	5,50	5,89	6,34	6,86	7,47	8,16	8,98	9,93	11,03	12,33	13,85	15,64	17,76
103	4,56	4,81	5,09	5,41	5,79	6,23	6,74	7,32	8,00	8,79	9,71	10,78	12,03	13,50	15,24	17,28
104	4,50	4,73	5,01	5,33	5,69	6,12	6,61	7,18	7,84	8,61	9,50	10,54	11,75	13,18	14,85	16,82
105	4,43	4,66	4,93	5,24	5,60	6,02	6,49	7,05	7,69	8,44	9,30	10,31	11,48	12,86	14,48	16,38
106	4,37	4,60	4,86	5,16	5,51	5,91	6,38	6,92	7,54	8,27	9,11	10,08	11,22	12,56	14,12	15,97
107	4,31	4,53	4,79	5,08	5,42	5,82	6,27	6,80	7,40	8,11	8,92	9,87	10,97	12,27	13,78	15,56
108	4,26	4,47	4,72	5,01	5,34	5,72	6,16	6,68	7,27	7,95	8,74	9,66	10,73	11,99	13,45	15,18
109	4,20	4,41	4,65	4,93	5,26	5,63	6,06	6,56	7,13	7,80	8,57	9,46	10,50	11,72	13,14	14,81
110	4,14	4,35	4,59	4,86	5,18	5,54	5,96	6,45	7,01	7,65	8,40	9,27	10,28	11,46	12,84	14,45
111	4,09	4,29	4,52	4,79	5,10	5,46	5,87	6,34	6,89	7,52	8,24	9,09	10,07	11,21	12,55	14,11
112	4,04	4,24	4,46	4,72	5,03	5,37	5,77	6,24	6,77	7,38	8,09	8,91	9,87	10,98	12,27	13,79
113	3,99	4,18	4,40	4,66	4,95	5,29	5,68	6,13	6,65	7,25	7,94	8,74	9,67	10,75	12,00	13,48
114	3,94	4,13	4,35	4,60	4,88	5,22	5,60	6,04	6,54	7,12	7,80	8,58	9,48	10,53	11,75	13,17
115	3,90	4,08	4,29	4,53	4,82	5,14	5,51	5,94	6,44	7,00	7,66	8,42	9,29	10,31	11,50	12,89
116	3,85	4,03	4,24	4,47	4,75	5,07	5,43	5,85	6,33	6,89	7,53	8,26	9,12	10,11	11,26	12,61
117	3,81	3,98	4,18	4,42	4,69	5,00	5,35	5,76	6,23	6,77	7,40	8,12	8,95	9,91	11,03	12,34
118	3,76	3,93	4,13	4,36	4,63	4,93	5,28	5,68	6,14	6,66	7,27	7,97	8,78	9,72	10,81	12,09
119	3,72	3,89	4,08	4,31	4,57	4,86	5,20	5,59	6,04	6,56	7,15	7,84	8,63	9,54	10,60	11,84
120	3,68	3,84	4,04	4,26	4,51	4,80	5,13	5,51	5,95	6,46	7,04	7,70	8,47	9,37	10,40	11,60
121	3,64	3,80	3,99	4,20	4,45	4,74	5,06	5,44	5,87	6,36	6,92	7,58	8,33	9,20	10,20	11,37
122	3,60	3,76	3,94	4,16	4,40	4,68	5,00	5,36	5,78	6,26	6,82	7,45	8,18	9,03	10,01	11,15
123	3,57	3,72	3,90	4,11	4,35	4,62	4,93	5,29	5,70	6,17	6,71	7,33	8,05	8,87	9,83	10,94
124	3,53	3,68	3,86	4,06	4,29	4,56	4,87	5,22	5,62	6,08	6,61	7,22	7,92	8,72	9,66	10,74
125	3,50	3,64	3,82	4,02	4,24	4,51	4,81	5,15	5,54	5,99	6,51	7,11	7,79	8,58	9,49	10,54
126	3,46	3,61	3,78	3,97	4,20	4,45	4,75	5,08	5,47	5,91	6,42	7,00	7,66	8,43	9,32	10,35
127	3,43	3,57	3,74	3,93	4,15	4,40	4,69	5,02	5,40	5,83	6,33	6,89	7,55	8,30	9,16	10,17
128	3,40	3,54	3,70	3,89	4,10	4,35	4,64	4,96	5,33	5,75	6,24	6,79	7,43	8,17	9,01	9,99
129	3,36	3,50	3,66	3,85	4,06	4,30	4,58	4,90	5,26	5,68	6,15	6,69	7,32	8,04	8,87	9,82
130	3,33	3,47	3,63	3,81	4,02	4,26	4,53	4,84	5,20	5,60	6,07	6,60	7,21	7,91	8,72	9,66

Tabelle 35 Dynamische Viskosität von Rübenmelasse

Dynamische Viskosität Rübenmelasse in mPas																
Temp. °C	Trockensubstanzgehalt in %															
	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
5	1241,74	1656,65	2274,46	3213,48	4672,21	6990,67	10763,78	17055,34	27810,29	46665,94	80583,12	143198,24	261867,01	492303,09	954367,33	1901985,60
6	1128,01	1497,42	2045,04	2873,35	4153,39	6176,52	9449,59	14873,38	24084,31	40122,36	68764,85	121247,91	219942,77	410461,91	790086,11	1556619,16
7	1026,31	1355,74	1841,97	2573,93	3699,29	5468,25	8313,54	12999,64	20960,67	34581,69	58832,26	102942,03	185258,39	342902,75	652787,71	1278147,25
8	935,22	1229,46	1661,90	2309,86	3301,08	4850,84	7329,38	11386,97	18190,28	29878,60	50462,80	87633,98	154481,77	287306,24	542395,96	1052877,66
9	853,51	1116,72	1501,95	2076,55	2951,21	4311,56	6475,04	9995,95	15862,81	25876,79	43392,51	74798,58	132539,72	241419,80	452036,91	870059,72
10	780,10	1015,91	1359,64	1870,04	2643,25	3839,60	5731,84	8793,51	13864,06	22463,56	37404,76	64008,17	112565,15	203438,28	377851,81	721224,49
11	714,05	925,63	1232,81	1696,95	2371,68	3425,77	5084,04	7751,98	12143,76	19545,52	32321,33	54913,51	98585,53	171910,76	316784,80	599678,83
12	654,53	844,65	1119,59	1524,33	2131,77	3062,22	4518,25	6847,66	10659,87	17045,07	27995,20	47228,68	81940,01	145667,66	266316,59	500116,16
13	600,82	771,90	1018,36	1379,67	1919,44	2742,24	4023,14	6061,12	9377,14	14897,61	24304,80	40718,94	70053,51	123763,44	224534,93	418316,02
14	552,29	705,45	927,71	1250,75	1731,22	2460,10	3589,03	5375,57	8265,95	13049,20	21149,37	35191,10	60116,08	105431,58	189833,56	350911,43
15	508,37	647,47	846,41	1135,69	1564,06	2210,88	3207,71	4776,84	7301,37	11454,73	18445,16	30485,77	51716,51	90048,89	160932,88	295208,15
16	468,57	594,26	773,39	1032,83	1415,38	1990,35	2872,12	4252,94	6462,33	10076,34	16122,42	26471,08	44599,19	77107,41	136797,79	249043,86
17	432,46	546,18	707,69	940,72	1282,90	1794,87	2576,25	3793,62	5731,02	8882,24	14122,93	23037,71	38553,70	66191,92	116588,59	210678,01
18	399,65	502,68	648,51	858,13	1164,67	1621,30	2314,92	3390,17	5092,36	7845,64	12397,94	20094,77	33406,33	56962,16	99622,52	178705,60
19	369,80	463,26	595,12	783,95	1058,99	1466,92	2083,71	3035,14	4533,52	6943,93	10906,59	17566,55	29013,32	49138,54	85341,57	151989,19
20	342,61	427,50	546,88	717,24	964,38	1329,39	1878,77	2722,15	4043,59	6157,99	9614,52	15389,81	25255,47	42490,76	73290,97	128605,46
21	317,81	395,01	503,24	657,14	879,55	1206,67	1696,83	2445,73	3613,28	5471,61	8492,79	13511,62	22033,62	36828,66	63096,83	110802,80
22	295,16	365,46	463,70	602,93	803,38	1096,99	1535,03	2201,18	3234,62	4871,01	7516,96	11887,57	19265,14	31994,78	54451,99	94967,78
23	274,46	338,54	427,83	553,95	734,87	998,82	1390,90	1984,45	2900,82	4344,47	6666,35	10480,35	16881,02	27858,47	47103,33	81598,37
24	255,50	313,99	395,25	509,66	673,17	910,80	1262,30	1792,05	2606,03	3881,99	5923,45	9258,48	14823,45	24311,07	40841,69	70282,66
25	238,13	291,57	365,62	469,53	617,53	831,78	1147,39	1620,96	2345,24	3475,04	5273,36	8195,40	13043,95	21261,96	35493,85	60681,83
26	222,19	271,08	338,63	433,13	567,27	760,72	1044,54	1468,57	2114,14	3116,30	4703,40	7268,64	11010,70	18635,41	30916,00	52516,48
27	207,55	252,32	314,02	400,08	521,81	696,73	952,35	1332,63	1908,99	2799,49	4202,77	6459,14	10162,35	16367,99	26988,45	45555,61
28	194,09	235,13	291,55	370,02	480,64	639,02	869,58	1211,15	1726,57	2519,23	3762,23	5750,69	8996,85	14406,47	23911,36	39607,80
29	181,69	219,36	271,02	342,64	443,30	586,91	795,17	1102,45	1564,11	2270,87	3373,86	5129,51	7980,62	12706,05	20701,26	34514,04
30	170,27	204,88	252,22	317,69	409,40	539,79	728,17	1005,01	1419,19	2050,41	3030,88	4583,83	7092,82	11228,95	18188,21	30141,91
31	159,73	191,56	235,00	294,91	378,57	497,12	667,76	917,55	1289,71	1854,38	2727,46	4103,61	6315,72	9943,28	16013,46	26380,93
32	150,00	179,30	219,21	274,09	350,50	458,42	613,21	838,93	1173,84	1679,81	2458,57	3680,23	5634,25	8822,00	14127,58	23138,66
33	141,00	168,01	204,70	255,04	324,92	423,29	563,89	768,14	1069,99	1524,09	2219,88	3306,29	5035,52	7842,21	12488,88	20337,61
34	132,68	157,59	191,36	237,58	301,57	391,35	519,23	704,33	976,78	1384,96	2007,65	2975,46	4508,53	6994,40	11062,10	17912,66
35	124,96	147,97	179,09	221,58	280,23	362,28	478,75	646,71	893,00	1260,46	1818,64	2682,27	4043,85	6231,99	9817,40	15809,00
36	117,81	139,07	167,78	206,88	260,71	335,78	441,99	594,62	817,57	1148,89	1650,03	2421,98	3633,40	5570,80	8729,44	13980,35
37	111,18	130,84	157,35	193,37	242,83	311,60	408,58	547,46	749,58	1048,75	1499,40	2190,54	3270,21	4988,72	7776,66	12387,60
38	105,01	123,22	147,72	180,94	226,43	289,50	378,17	504,71	688,19	958,74	1364,60	1984,40	2948,29	4475,37	6940,72	10997,60
39	99,28	116,15	138,82	169,49	211,38	269,29	350,46	465,90	632,70	877,71	1243,80	1800,51	2662,48	4021,83	6205,93	9782,20
40	93,94	109,60	130,59	158,93	197,54	250,78	325,17	430,63	582,47	804,67	1135,38	1636,20	2408,30	3620,44	5558,88	8717,46
41	88,97	103,51	122,96	149,18	184,81	233,81	302,07	398,53	536,94	738,74	1037,92	1489,17	2181,90	3264,60	4988,09	7782,96
42	84,34	97,84	115,90	140,17	173,09	218,24	280,95	369,28	495,61	679,13	950,19	1357,40	1979,90	2948,62	4483,67	6961,27
43	80,01	92,57	109,34	131,83	162,28	203,92	261,60	342,60	458,05	625,18	871,11	1239,13	1799,41	2667,57	4037,16	6237,46
44	75,98	87,66	103,25	124,12	152,30	190,75	243,87	318,23	423,87	576,28	799,73	1132,81	1637,87	2417,19	3641,22	5598,75
45	72,20	83,09	97,58	116,97	143,08	178,63	227,59	295,94	392,73	531,90	735,20	1037,10	1493,09	2193,76	3289,55	5034,15
46	68,67	78,82	92,32	110,33	134,55	167,45	212,63	275,53	364,32	491,56	676,78	950,83	1363,12	1994,08	2976,68	4534,20
47	65,36	74,83	87,41	104,17	126,66	157,13	198,88	256,82	338,37	454,86	623,84	872,94	1246,28	1815,35	2697,89	4090,74
48	62,27	71,11	82,84	98,44	119,34	147,60	186,21	239,65	314,65	421,42	575,79	802,54	1141,09	1655,13	2448,06	3696,76
49	59,36	67,62	78,57	93,12	112,56	138,78	174,53	223,88	292,93	390,92	532,12	738,80	1046,26	1511,29	2226,63	3346,14
50	56,64	64,36	74,59	88,16	106,26	130,62	163,76	209,38	273,02	363,06	492,39	681,03	960,65	1381,96	2027,50	3033,62
51	54,08	61,30	70,87	83,53	100,40	123,06	153,81	196,02	254,75	337,59	456,19	628,60	883,25	1265,51	1848,95	2754,62
52	51,67	58,44	67,38	79,22	94,96	116,05	144,61	183,71	237,97	314,27	423,17	580,95	813,18	1160,51	1688,62	2505,15
53	49,41	55,75	64,13	75,20	89,89	109,54	136,09	172,36	222,53	292,90	393,01	537,60	749,66	1065,71	1544,44	2281,75
54	47,28	53,22	61,07	71,43	85,16	103,50	128,20	161,87	208,33	273,29	365,44	498,09	692,01	979,99	1414,60	2081,39
55	45,27	50,85	58,21	67,92	80,76	97,87	120,88	152,17	195,23	255,28	340,20	462,06	639,61	902,38	1297,50	1901,42
56	43,38	48,62	55,53	64,63	76,65	92,64	114,09	143,20	183,15	238,72	317,06	429,15	591,93	832,01	1191,75	1739,55
57	41,60	46,52	53,01	61,54	72,80	87,76	107,78	134,88	171,99	223,47	295,84	399,06	548,49	768,14	1096,12	1593,73
58	39,92	44,54	50,64	58,65	69,21	83,21	101,92	127,18	161,68	209,42	276,34	371,52	508,86	710,08	1009,51	1462,20
59	38,33	42,68	48,41	55,94	65,85	78,96	96,45	120,02	152,14	196,45	258,41	346,27	472,66	657,24	930,99	1343,38
60	36,83	40,92	46,32	53,40	62,70	75,00	91,37	113,38	143,30	184,48	241,91	323,10	439,56	609,10	859,69	1235,90

Fortsetzung Tabelle 35 Dynamische Viskosität von Rübenmelasse

Dynamische Viskosität Rübenmelasse in mPas																
Temp. °C	Trockensubstanzgehalt in %															
	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
60	36,83	40,92	46,32	53,40	62,70	75,00	91,37	113,38	143,30	184,48	241,91	323,10	439,56	609,10	859,69	1235,90
61	35,41	39,26	44,34	51,01	59,75	71,29	86,62	107,20	135,10	173,42	226,70	301,82	409,26	565,17	794,87	1138,56
62	34,06	37,70	42,49	48,76	56,99	67,82	82,20	101,45	127,50	163,18	212,67	282,26	381,48	525,04	735,87	1050,27
63	32,79	36,22	40,73	46,64	54,39	64,57	78,06	96,09	120,43	153,69	199,71	264,24	356,00	488,34	682,10	970,08
64	31,58	34,82	39,08	44,65	51,95	61,53	74,20	91,09	113,86	144,90	187,74	247,65	332,58	454,74	633,03	897,18
65	30,44	33,49	37,52	42,78	49,66	58,68	70,58	86,43	107,75	136,74	176,66	232,33	311,05	423,94	588,20	830,80
66	29,36	32,24	36,04	41,01	47,50	56,00	67,20	82,08	102,06	129,16	166,39	218,19	291,23	395,68	547,20	770,29
67	28,33	31,05	34,65	39,34	45,47	53,48	64,03	78,01	96,75	122,12	156,88	205,12	272,96	369,71	509,65	715,06
68	27,35	29,93	33,33	37,77	43,55	51,12	61,05	74,21	91,80	115,56	148,05	193,02	256,11	345,83	475,23	664,59
69	26,42	28,86	32,08	36,28	41,75	48,89	58,26	70,65	87,17	109,46	139,85	181,82	240,55	323,84	443,63	618,42
70	25,54	27,85	30,89	34,87	40,05	46,80	55,64	67,31	82,85	103,76	132,22	171,44	226,16	303,57	414,60	576,13
71	24,70	26,89	29,77	33,54	38,44	44,83	53,18	64,18	78,81	98,45	125,13	161,80	212,85	284,87	387,90	537,36
72	23,90	25,97	28,71	32,28	36,92	42,97	50,86	61,25	75,03	93,49	118,52	152,85	200,52	267,60	363,31	501,76
73	23,14	25,11	27,70	31,09	35,49	41,21	48,68	58,49	71,48	88,86	112,36	144,52	189,09	251,64	340,64	469,04
74	22,42	24,28	26,74	29,96	34,13	39,56	46,63	55,90	68,16	84,53	106,62	136,78	178,48	236,86	319,72	438,94
75	21,73	23,49	25,83	28,89	32,85	38,00	44,69	53,46	65,04	80,47	101,25	129,57	168,62	223,17	300,40	411,22
76	21,07	22,75	24,97	27,87	31,64	36,52	42,87	51,17	62,11	76,67	96,24	122,84	159,46	210,48	282,53	385,66
77	20,44	22,03	24,15	26,91	30,48	35,12	41,14	49,01	59,36	73,11	91,55	116,57	150,93	198,70	266,00	362,07
78	19,84	21,35	23,36	25,99	29,39	33,80	39,52	46,97	56,77	69,76	87,16	110,71	142,99	187,76	250,68	340,28
79	19,27	20,71	22,62	25,12	28,36	32,55	37,98	45,05	54,34	66,62	83,05	105,24	135,59	177,59	236,47	320,12
80	18,72	20,09	21,91	24,29	27,37	31,36	36,53	43,24	52,04	63,67	79,19	100,12	128,68	168,12	223,29	301,46
81	18,20	19,50	21,23	23,50	26,44	30,24	35,15	41,53	49,88	60,90	75,58	95,33	122,23	159,30	211,04	284,18
82	17,70	18,94	20,59	22,75	25,55	29,17	33,85	39,92	47,85	58,29	72,18	90,84	116,20	151,08	199,64	268,14
83	17,22	18,40	19,97	22,04	24,71	28,16	32,62	38,39	45,93	55,83	68,99	86,63	110,56	143,41	189,04	253,25
84	16,77	17,88	19,39	21,36	23,91	27,20	31,45	36,95	44,11	53,52	65,99	82,69	105,29	136,24	179,16	239,42
85	16,33	17,39	18,83	20,71	23,15	26,29	30,34	35,58	42,40	51,34	63,17	78,98	100,34	129,55	169,95	226,55
86	15,91	16,92	18,29	20,09	22,42	25,42	29,29	34,28	40,77	49,28	60,51	75,49	95,71	123,28	161,35	214,57
87	15,51	16,47	17,78	19,50	21,73	24,59	28,29	33,05	39,24	47,33	58,00	72,22	91,36	117,42	153,32	203,41
88	15,12	16,04	17,29	18,94	21,07	23,81	27,34	31,89	37,79	45,49	55,64	69,14	87,28	111,92	145,82	193,01
89	14,75	15,63	16,83	18,40	20,44	23,06	26,43	30,78	36,41	43,76	53,41	66,24	83,44	106,77	138,80	183,29
90	14,40	15,24	16,38	17,88	19,84	22,35	25,58	29,73	35,11	42,11	51,31	63,50	79,83	101,94	132,23	174,22
91	14,06	14,86	15,95	17,39	19,26	21,67	24,76	28,74	33,87	40,56	49,32	60,92	76,44	97,40	126,07	165,74
92	13,73	14,49	15,54	16,92	18,72	21,02	23,98	27,79	32,70	39,08	47,44	58,49	73,24	93,14	120,30	157,80
93	13,42	14,15	15,15	16,47	18,19	20,41	23,24	26,89	31,59	37,69	45,67	56,19	70,23	89,13	114,88	150,37
94	13,11	13,81	14,77	16,04	17,69	19,82	22,54	26,03	30,53	36,36	43,98	54,02	67,38	85,35	109,79	143,40
95	12,82	13,49	14,41	15,63	17,22	19,25	21,87	25,22	29,53	35,11	42,39	51,97	64,70	81,80	105,00	136,87
96	12,55	13,18	14,06	15,24	16,76	18,72	21,22	24,44	28,57	33,92	40,88	50,03	62,17	78,45	100,51	130,74
97	12,28	12,89	13,73	14,86	16,32	18,20	20,61	23,70	27,66	32,78	39,45	48,20	59,78	75,29	96,27	124,98
98	12,02	12,60	13,41	14,49	15,90	17,71	20,03	22,99	26,80	31,71	38,09	46,46	57,52	72,31	92,29	119,57
99	11,77	12,33	13,11	14,15	15,50	17,24	19,47	22,32	25,97	30,68	36,80	44,81	55,38	69,50	88,53	114,48
100	11,53	12,07	12,81	13,81	15,12	16,79	18,94	21,68	25,19	29,71	35,58	43,25	53,36	66,84	84,98	109,69
101	11,30	11,81	12,53	13,49	14,75	16,36	18,43	21,06	24,44	28,78	34,41	41,76	51,44	64,32	81,64	105,18
102	11,08	11,57	12,26	13,19	14,39	15,95	17,94	20,48	23,73	27,90	33,31	40,35	49,63	61,95	78,48	100,92
103	10,87	11,33	12,00	12,89	14,05	15,55	17,47	19,92	23,04	27,06	32,25	39,02	47,90	59,69	75,50	96,91
104	10,66	11,11	11,75	12,61	13,73	15,18	17,02	19,38	22,39	26,26	31,25	37,75	46,27	57,56	72,68	93,12
105	10,46	10,89	11,51	12,33	13,42	14,81	16,60	18,87	21,77	25,50	30,30	36,54	44,72	55,54	70,01	89,55
106	10,27	10,68	11,27	12,07	13,12	14,46	16,19	18,38	21,18	24,77	29,39	35,39	43,25	53,63	67,48	86,17
107	10,09	10,48	11,05	11,82	12,83	14,13	15,79	17,91	20,61	24,07	28,52	34,30	41,85	51,81	65,08	82,97
108	9,91	10,29	10,83	11,58	12,55	13,81	15,42	17,46	20,07	23,41	27,70	33,26	40,51	50,08	62,82	79,94
109	9,74	10,10	10,63	11,34	12,29	13,50	15,06	17,03	19,55	22,77	26,91	32,26	39,25	48,44	60,66	77,08
110	9,57	9,92	10,43	11,12	12,03	13,21	14,71	16,62	19,06	22,17	26,16	31,32	38,04	46,88	58,62	74,37
111	9,41	9,74	10,23	10,90	11,78	12,92	14,38	16,23	18,58	21,58	25,44	30,42	36,89	45,40	56,69	71,80
112	9,26	9,58	10,05	10,69	11,55	12,65	14,06	15,85	18,13	21,03	24,75	29,56	35,80	43,99	54,84	69,36
113	9,11	9,41	9,87	10,49	11,32	12,39	13,75	15,49	17,69	20,50	24,10	28,73	34,76	42,65	53,09	67,05
114	8,96	9,26	9,69	10,30	11,10	12,14	13,46	15,14	17,27	19,99	23,47	27,95	33,77	41,38	51,43	64,85
115	8,82	9,10	9,53	10,11	10,89	11,89	13,17	14,80	16,87	19,50	22,87	27,20	32,82	40,16	49,85	62,76
116	8,69	8,96	9,37	9,93	10,69	11,66	12,90	14,48	16,49	19,04	22,30	26,49	31,91	39,00	48,34	60,78
117	8,56	8,82	9,21	9,76	10,49	11,43	12,64	14,17	16,12	18,59	21,75	25,80	31,05	37,89	46,91	58,89
118	8,43	8,68	9,06	9,59	10,30	11,22	12,39	13,88	15,76	18,16	21,22	25,15	30,22	36,84	45,54	57,10
119	8,31	8,55	8,92	9,43	10,12	11,01	12,15	13,59	15,42	17,75	20,72	24,52	29,43	35,83	44,24	55,39
120	8,19	8,42	8,78	9,28	9,94	10,81	11,91	13,32	15,10	17,35	20,23	23,92	28,68	34,87	42,99	53,76
121	8,08	8,30	8,64	9,13	9,77	10,61	11,69	13,05	14,78	16,98	19,77	23,35	27,96	33,95	41,81	52,21
122	7,97	8,18	8,51	8,98	9,61	10,43	11,47	12,80	14,48	16,61	19,33	22,80	27,27	33,07	40,68	50,73
123	7,86	8,06	8,38	8,84	9,45	10,25	11,26	12,56	14,19	16,26	18,90	22,27	26,61	32,23	39,60	49,32
124	7,76	7,95	8,26	8,71	9,30	10,07	11,06	12,32	13,91	15,93	18,49	21,76	25,97	31,43	38,57	47,98
125	7,66	7,84	8,14	8,57	9,15	9,91	10,87	12,09	13,64	15,61	18,10	21,28	25,37	30,66	37,58	46,70
126	7,56	7,74	8,03	8,45	9,01	9,74	10,68	11,88	13,39	15,30	17,72	20,81	24,79	29,93	36,64	45,47
127	7,47	7,64	7,92	8,33	8,87	9,59	10,50	11,67	13,14	15,00	17,36	20,37	24,23	29,22	35,73	44,30
128	7,38	7,54	7,81	8,21	8,74	9,44	10,33	11,47	12,90	14,71	17,01	19,94	23,70	28,55	34,87	43,18
129	7,29															

Tabelle 36 Dynamische Viskosität technische Saccharoselösung mit q = 80%

Melasse 80% Reinheit dynamische Viskosität in mPas											
Temp. °C	Trockensubstanzgehalt in %										
	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
30	167,48	222,01	295,30	394,12	527,78	709,14	956,01	1293,10	1754,83	2389,25	3263,67
31	157,59	208,22	276,06	367,25	490,20	656,51	882,18	1189,36	1608,80	2183,31	2972,67
32	148,40	195,45	258,29	342,51	455,71	608,36	814,86	1095,07	1476,51	1997,35	2710,74
33	139,85	183,60	241,87	319,71	424,03	564,28	753,41	1009,29	1356,53	1829,23	2474,71
34	131,88	172,60	226,67	298,68	394,90	523,87	697,27	931,16	1247,60	1677,07	2261,76
35	124,46	162,39	212,60	279,27	368,10	486,80	645,93	859,92	1148,60	1539,22	2069,43
36	117,54	152,89	199,55	261,34	343,41	452,76	598,93	794,92	1058,53	1414,18	1895,51
37	111,09	144,06	187,46	244,76	320,65	421,48	555,86	735,53	976,49	1300,65	1738,08
38	105,06	135,84	176,23	229,41	299,64	392,70	516,36	681,23	901,71	1197,46	1595,42
39	99,42	128,17	165,80	215,19	280,25	366,20	480,11	631,53	833,46	1103,57	1466,00
40	94,16	121,03	156,10	202,02	262,33	341,78	446,79	586,00	771,12	1018,06	1348,47
41	89,22	114,36	147,08	189,79	245,75	319,26	416,15	544,24	714,12	940,10	1241,63
42	84,61	108,13	138,68	178,45	230,40	298,47	387,94	505,92	661,95	868,94	1144,40
43	80,28	102,32	130,85	167,90	216,17	279,26	361,96	470,71	614,15	803,95	1055,83
44	76,23	96,88	123,55	158,10	202,99	261,50	338,00	438,34	570,33	744,51	975,06
45	72,42	91,79	116,74	148,97	190,75	245,06	315,89	408,54	530,11	690,11	901,35
46	68,85	87,03	110,38	140,48	179,39	229,84	295,47	381,09	493,16	640,28	834,00
47	65,49	82,56	104,44	132,56	168,82	215,73	276,59	355,79	459,19	594,58	772,40
48	62,33	78,38	98,88	125,18	159,00	202,64	259,12	332,44	427,92	552,63	716,02
49	59,37	74,45	93,68	118,29	149,86	190,49	242,95	310,88	399,13	514,10	664,36
50	56,57	70,76	88,82	111,85	141,34	179,20	227,96	290,95	372,58	478,67	616,98
51	53,94	67,30	84,25	105,84	133,40	168,70	214,06	272,52	348,09	446,07	573,50
52	51,46	64,05	79,98	100,21	125,99	158,94	201,16	255,45	325,47	416,03	533,54
53	49,12	60,98	75,97	94,95	119,08	149,84	189,18	239,64	304,57	388,35	496,80
54	46,92	58,10	72,20	90,02	112,62	141,37	178,05	224,98	285,23	362,81	462,98
55	44,84	55,39	68,66	85,40	106,59	133,47	167,69	211,38	267,34	339,22	431,83
56	42,87	52,84	65,34	81,07	100,94	126,09	158,04	198,75	250,76	317,42	403,11
57	41,01	50,43	62,21	77,01	95,65	119,21	149,06	187,01	235,39	297,26	376,61
58	39,26	48,15	59,27	73,20	90,70	112,78	140,69	176,09	221,12	278,59	352,14
59	37,59	46,01	56,50	69,61	86,06	106,76	132,87	165,92	207,88	261,30	329,52
60	36,02	43,98	53,89	66,25	81,71	101,13	125,58	156,46	195,57	245,27	308,60
61	34,53	42,07	51,43	63,08	77,63	95,86	118,77	147,64	184,13	230,40	289,23
62	33,12	40,26	49,10	60,10	73,79	90,92	112,40	139,41	173,48	216,59	271,29
63	31,78	38,55	46,91	57,29	70,19	86,29	106,44	131,73	163,56	203,75	254,65
64	30,51	36,93	44,84	54,64	66,80	81,95	100,86	124,55	154,31	191,82	239,21
65	29,31	35,39	42,89	52,15	63,62	77,87	95,64	117,85	145,69	180,71	224,88
66	28,17	33,94	41,04	49,79	60,62	74,04	90,74	111,58	137,65	170,37	211,56
67	27,08	32,56	39,29	47,57	57,79	70,44	86,15	105,71	130,13	160,73	199,17
68	26,05	31,26	37,64	45,48	55,13	67,06	81,84	100,21	123,11	151,74	187,64
69	25,07	30,02	36,07	43,49	52,62	63,87	77,79	95,06	116,54	143,35	176,90
70	24,13	28,84	34,59	41,62	50,25	60,87	73,99	90,23	110,40	135,51	166,89
71	23,25	27,73	33,18	39,85	48,01	58,05	70,41	85,70	104,64	128,19	157,56
72	22,40	26,66	31,85	38,17	45,90	55,39	67,05	81,44	99,25	121,34	148,85
73	21,59	25,65	30,58	36,58	43,91	52,87	63,88	77,44	94,19	114,94	140,71
74	20,83	24,70	29,38	35,08	42,02	50,50	60,90	73,69	89,45	108,94	133,11
75	20,09	23,78	28,24	33,65	40,23	48,26	58,09	70,15	84,99	103,32	126,00
76	19,40	22,91	27,16	32,30	38,54	46,15	55,44	66,82	80,81	98,05	119,35
77	18,73	22,08	26,13	31,02	36,94	44,15	52,94	63,69	76,88	93,10	113,12
78	18,10	21,30	25,15	29,80	35,43	42,26	50,58	60,74	73,18	88,46	107,28
79	17,49	20,54	24,22	28,64	33,99	40,47	48,35	57,96	69,70	84,10	101,80
80	16,91	19,83	23,33	27,54	32,63	38,78	46,25	55,33	66,43	80,00	96,67
81	16,35	19,14	22,48	26,50	31,33	37,18	44,25	52,86	63,34	76,15	91,85
82	15,82	18,49	21,68	25,50	30,11	35,66	42,37	50,52	60,43	72,52	87,32
83	15,32	17,87	20,91	24,56	28,94	34,21	40,59	48,31	57,68	69,11	83,07
84	14,83	17,27	20,18	23,66	27,83	32,85	38,90	46,22	55,09	65,89	79,06
85	14,37	16,70	19,48	22,80	26,78	31,55	37,30	44,24	52,65	62,86	75,30
86	13,92	16,16	18,82	21,98	25,77	30,32	35,78	42,37	50,34	60,00	71,75
87	13,50	15,64	18,18	21,21	24,82	29,15	34,34	40,60	48,15	57,30	68,41
88	13,09	15,14	17,57	20,46	23,91	28,03	32,98	38,92	46,09	54,75	65,26
89	12,70	14,66	16,99	19,76	23,05	26,98	31,68	37,33	44,13	52,35	62,29
90	12,32	14,21	16,44	19,08	22,22	25,97	30,45	35,82	42,28	50,07	59,49
91	11,96	13,77	15,91	18,44	21,44	25,01	29,28	34,39	40,53	47,92	56,84
92	11,62	13,35	15,40	17,82	20,69	24,10	28,17	33,04	38,87	45,89	54,34
93	11,29	12,95	14,91	17,23	19,97	23,23	27,11	31,75	37,30	43,96	51,98
94	10,97	12,57	14,45	16,67	19,29	22,41	26,11	30,52	35,80	42,13	49,75
95	10,66	12,20	14,00	16,13	18,64	21,62	25,15	29,36	34,39	40,41	47,63
96	10,37	11,84	13,58	15,61	18,02	20,86	24,24	28,25	33,04	38,77	45,63
97	10,09	11,50	13,17	15,12	17,42	20,15	23,37	27,20	31,76	37,21	43,74
98	9,81	11,18	12,77	14,65	16,86	19,46	22,54	26,20	30,55	35,73	41,94
99	9,55	10,86	12,40	14,20	16,31	18,80	21,75	25,24	29,39	34,33	40,24
100	9,30	10,56	12,04	13,76	15,79	18,18	21,00	24,33	28,29	33,00	38,62
101	9,06	10,27	11,69	13,35	15,29	17,58	20,28	23,47	27,25	31,74	37,09
102	8,83	9,99	11,36	12,95	14,82	17,01	19,59	22,64	26,25	30,54	35,64
103	8,60	9,73	11,04	12,57	14,36	16,46	18,94	21,85	25,30	29,39	34,25
104	8,38	9,47	10,73	12,20	13,92	15,94	18,31	21,10	24,40	28,30	32,94
105	8,18	9,22	10,44	11,85	13,50	15,44	17,71	20,38	23,54	27,27	31,69
106	7,97	8,98	10,15	11,51	13,10	14,96	17,14	19,70	22,71	26,28	30,50
107	7,78	8,75	9,88	11,19	12,72	14,50	16,59	19,04	21,93	25,34	29,37
108	7,59	8,53	9,62	10,88	12,35	14,06	16,07	18,42	21,18	24,44	28,30
109	7,41	8,32	9,37	10,58	11,99	13,64	15,56	17,82	20,47	23,59	27,27
110	7,24	8,11	9,12	10,29	11,65	13,23	15,08	17,25	19,78	22,77	26,30

Tabelle 37 Dynamische Viskosität technische Saccharoselösung mit q = 70%

Melasse 70% Reinheit dynamische Viskosität in mPas											
Temp. °C	Trockensubstanzgehalt in %										
	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
30	143,95	190,82	253,82	338,76	453,64	609,53	821,72	1111,46	1508,33	2053,63	2805,22
31	135,78	179,40	237,85	316,41	422,35	565,64	760,08	1024,74	1386,12	1881,11	2561,21
32	128,16	168,79	223,07	295,80	393,56	525,39	703,73	945,73	1275,14	1724,95	2341,06
33	121,06	158,93	209,37	276,75	367,06	488,46	652,18	873,68	1174,26	1583,45	2142,20
34	114,43	149,76	196,67	259,15	342,63	454,52	604,97	807,90	1082,45	1455,08	1962,37
35	108,23	141,21	184,88	242,86	320,10	423,32	561,70	747,79	998,83	1338,51	1799,58
36	102,45	133,26	173,92	227,77	299,30	394,61	522,00	692,82	922,57	1232,54	1652,05
37	97,03	125,84	163,74	213,79	280,08	368,16	485,54	642,48	852,96	1136,11	1518,21
38	91,97	118,91	154,27	200,83	262,31	343,77	452,03	596,36	789,36	1048,27	1396,65
39	87,23	112,45	145,45	188,79	245,87	321,27	421,20	554,05	731,20	968,17	1286,13
40	82,78	106,40	137,24	177,61	230,63	300,49	392,81	515,20	677,96	895,06	1185,55
41	78,61	100,76	129,58	167,22	216,51	281,28	366,64	479,50	629,17	828,26	1093,93
42	74,70	95,47	122,43	157,55	203,41	263,51	342,51	446,67	584,42	767,17	1010,37
43	71,03	90,52	115,76	148,54	191,25	247,06	320,23	416,44	543,34	711,25	934,09
44	67,57	85,88	109,53	140,15	179,95	231,82	299,64	388,59	505,60	660,01	864,40
45	64,33	81,54	103,70	132,33	169,44	217,69	280,60	362,90	470,89	613,02	800,66
46	61,28	77,46	98,24	125,03	159,66	204,57	262,98	339,19	438,94	569,88	742,30
47	58,40	73,63	93,14	118,22	150,56	192,39	246,66	317,30	409,50	530,24	688,83
48	55,70	70,03	88,35	111,85	142,07	181,07	231,53	297,05	382,36	493,80	639,79
49	53,15	66,65	83,87	105,90	134,16	170,54	217,50	278,32	357,32	460,25	594,77
50	50,74	63,47	79,66	100,32	126,77	160,73	204,47	260,97	334,18	429,34	553,40
51	48,47	60,48	75,71	95,11	119,88	151,60	192,36	244,89	312,80	400,84	515,35
52	46,33	57,66	72,00	90,22	113,43	143,09	181,10	229,98	293,01	374,55	480,34
53	44,31	55,00	68,52	85,64	107,40	135,15	170,63	216,14	274,70	350,26	448,08
54	42,39	52,50	65,24	81,34	101,76	127,74	160,87	203,28	257,72	327,81	418,33
55	40,58	50,14	62,15	77,31	96,48	120,81	151,79	191,33	241,98	307,05	390,88
56	38,87	47,91	59,25	73,52	91,53	114,34	143,31	180,22	227,38	287,82	365,53
57	37,25	45,80	56,51	69,95	86,89	108,28	135,40	169,86	213,81	270,01	342,09
58	35,72	43,81	53,93	66,60	82,53	102,61	128,01	160,22	201,20	253,49	320,41
59	34,27	41,93	51,49	63,45	78,44	97,31	121,11	151,23	189,47	238,16	300,34
60	32,89	40,16	49,20	60,48	74,60	92,33	114,65	142,84	178,55	223,93	281,75
61	31,58	38,47	47,03	57,68	70,99	87,66	108,61	135,01	168,38	210,70	264,50
62	30,34	36,88	44,98	55,05	67,60	83,28	102,95	127,70	158,90	198,39	248,50
63	29,16	35,37	43,04	52,56	64,40	79,17	97,66	120,86	150,06	186,94	233,64
64	28,04	33,93	41,21	50,21	61,39	75,31	92,69	114,46	141,81	176,27	219,82
65	26,98	32,58	39,48	48,00	58,55	71,67	88,02	108,47	134,10	166,33	206,98
66	25,96	31,29	37,83	45,90	55,88	68,25	83,65	102,85	126,89	157,05	195,02
67	25,00	30,07	36,28	43,92	53,36	65,04	79,54	97,59	120,15	148,39	183,88
68	24,09	28,90	34,80	42,05	50,98	62,01	75,67	92,66	113,84	140,31	173,50
69	23,21	27,80	33,41	40,28	48,73	59,15	72,04	88,03	107,92	132,75	163,82
70	22,38	26,75	32,08	38,60	46,60	56,46	68,62	83,68	102,39	125,68	154,78
71	21,59	25,75	30,82	37,01	44,60	53,92	65,40	79,60	97,19	119,07	146,34
72	20,84	24,80	29,62	35,51	42,70	51,52	62,37	75,75	92,32	112,87	138,45
73	20,11	23,90	28,49	34,08	40,90	49,25	59,51	72,14	87,74	107,06	131,07
74	19,43	23,04	27,41	32,72	39,20	47,11	56,81	68,74	83,44	101,62	124,17
75	18,77	22,22	26,38	31,44	37,58	45,09	54,27	65,53	79,40	96,51	117,70
76	18,14	21,43	25,40	30,21	36,06	43,17	51,86	62,51	75,59	91,72	111,64
77	17,55	20,69	24,47	29,05	34,61	41,36	49,59	59,66	72,01	87,21	105,96
78	16,97	19,98	23,59	27,95	33,23	39,64	47,44	56,97	68,64	82,97	100,63
79	16,43	19,30	22,75	26,90	31,93	38,01	45,41	54,44	65,47	78,99	95,62
80	15,90	18,65	21,94	25,90	30,69	36,47	43,49	52,04	62,47	75,24	90,92
81	15,40	18,03	21,17	24,95	29,51	35,01	41,68	49,78	59,65	71,71	86,50
82	14,92	17,44	20,44	24,05	28,39	33,62	39,95	47,63	56,98	68,38	82,34
83	14,46	16,87	19,74	23,19	27,32	32,30	38,32	45,61	54,46	65,25	78,43
84	14,02	16,33	19,08	22,37	26,31	31,05	36,77	43,69	52,08	62,29	74,74
85	13,60	15,81	18,44	21,58	25,34	29,86	35,30	41,87	49,83	59,50	71,27
86	13,20	15,31	17,83	20,83	24,43	28,73	33,91	40,15	47,70	56,86	68,00
87	12,81	14,84	17,25	20,12	23,55	27,66	32,59	38,52	45,69	54,37	64,91
88	12,43	14,38	16,69	19,44	22,72	26,63	31,33	36,98	43,78	52,02	62,00
89	12,08	13,95	16,16	18,79	21,92	25,66	30,13	35,51	41,98	49,79	59,25
90	11,73	13,53	15,65	18,17	21,16	24,73	29,00	34,11	40,26	47,68	56,65
91	11,41	13,13	15,16	17,58	20,44	23,85	27,92	32,79	38,64	45,69	54,19
92	11,09	12,74	14,70	17,01	19,75	23,00	26,89	31,53	37,10	43,80	51,87
93	10,78	12,38	14,25	16,46	19,09	22,20	25,91	30,34	35,64	42,00	49,67
94	10,49	12,02	13,82	15,94	18,45	21,43	24,97	29,20	34,25	40,31	47,59
95	10,21	11,68	13,41	15,45	17,85	20,70	24,09	28,12	32,93	38,69	45,62
96	9,94	11,35	13,02	14,97	17,27	20,00	23,24	27,09	31,68	37,17	43,75
97	9,68	11,04	12,64	14,51	16,72	19,33	22,43	26,10	30,48	35,71	41,98
98	9,43	10,74	12,27	14,07	16,19	18,70	21,66	25,17	29,35	34,33	40,30
99	9,19	10,45	11,92	13,65	15,69	18,09	20,92	24,28	28,27	33,02	38,70
100	8,95	10,17	11,59	13,25	15,20	17,50	20,22	23,43	27,24	31,78	37,19
101	8,73	9,90	11,27	12,87	14,74	16,95	19,54	22,62	26,26	30,59	35,75
102	8,51	9,64	10,96	12,50	14,30	16,41	18,90	21,84	25,33	29,46	34,38
103	8,31	9,39	10,66	12,14	13,87	15,90	18,29	21,10	24,44	28,39	33,08
104	8,11	9,15	10,37	11,80	13,46	15,41	17,70	20,40	23,59	27,36	31,84
105	7,91	8,92	10,10	11,47	13,07	14,94	17,14	19,72	22,78	26,39	30,67
106	7,72	8,70	9,83	11,15	12,69	14,49	16,60	19,08	22,00	25,46	29,55
107	7,54	8,49	9,58	10,85	12,33	14,06	16,09	18,46	21,26	24,57	28,48
108	7,37	8,28	9,33	10,56	11,98	13,65	15,59	17,87	20,56	23,72	27,46
109	7,20	8,08	9,10	10,28	11,65	13,25	15,12	17,31	19,88	22,91	26,49
110	7,04	7,89	8,87	10,01	11,33	12,87	14,67	16,77	19,24	22,14	25,57

Tabelle 38 Oberflächenspannung von reiner Saccharoselösung nach Gleichung (6.2.2)

Reine Saccharoselösung Oberflächenspannung in mN/m															
Temp. °C	Trockensubstanzgehalt in %														
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
20	70,23	70,71	71,20	71,71	72,23	72,76	73,31	73,87	74,45	75,04	75,64	76,26	76,89	77,54	78,20
21	70,16	70,63	71,12	71,62	72,13	72,66	73,20	73,76	74,33	74,92	75,51	76,13	76,75	77,39	78,05
22	70,09	70,55	71,03	71,53	72,04	72,56	73,09	73,65	74,21	74,79	75,38	75,99	76,61	77,25	77,89
23	70,01	70,47	70,94	71,43	71,94	72,45	72,98	73,53	74,09	74,66	75,25	75,85	76,47	77,10	77,74
24	69,93	70,39	70,85	71,34	71,83	72,35	72,87	73,41	73,96	74,53	75,11	75,71	76,32	76,95	77,59
25	69,85	70,30	70,76	71,24	71,73	72,24	72,76	73,29	73,84	74,40	74,98	75,57	76,18	76,80	77,43
26	69,77	70,21	70,67	71,14	71,62	72,12	72,64	73,17	73,71	74,27	74,84	75,43	76,03	76,64	77,27
27	69,68	70,12	70,57	71,03	71,51	72,01	72,52	73,04	73,58	74,13	74,70	75,28	75,88	76,49	77,12
28	69,59	70,02	70,47	70,93	71,40	71,89	72,40	72,92	73,45	74,00	74,56	75,14	75,73	76,33	76,96
29	69,50	69,93	70,37	70,82	71,29	71,77	72,27	72,79	73,31	73,86	74,42	74,99	75,58	76,18	76,79
30	69,41	69,83	70,26	70,71	71,18	71,65	72,15	72,66	73,18	73,72	74,27	74,84	75,42	76,02	76,63
31	69,31	69,73	70,16	70,60	71,06	71,53	72,02	72,52	73,04	73,58	74,12	74,69	75,27	75,86	76,47
32	69,21	69,62	70,05	70,48	70,94	71,41	71,89	72,39	72,90	73,43	73,98	74,54	75,11	75,70	76,30
33	69,11	69,52	69,93	70,37	70,82	71,28	71,76	72,25	72,76	73,29	73,83	74,38	74,95	75,54	76,14
34	69,01	69,41	69,82	70,25	70,69	71,15	71,62	72,11	72,62	73,14	73,67	74,23	74,79	75,37	75,97
35	68,90	69,30	69,70	70,13	70,57	71,02	71,49	71,97	72,47	72,99	73,52	74,07	74,63	75,21	75,80
36	68,79	69,18	69,58	70,00	70,44	70,89	71,35	71,83	72,33	72,84	73,37	73,91	74,47	75,04	75,63
37	68,68	69,06	69,46	69,88	70,31	70,75	71,21	71,69	72,18	72,69	73,21	73,75	74,30	74,87	75,46
38	68,57	68,94	69,34	69,75	70,17	70,61	71,07	71,54	72,03	72,53	73,05	73,59	74,14	74,70	75,28
39	68,45	68,82	69,21	69,62	70,04	70,47	70,92	71,39	71,88	72,38	72,89	73,42	73,97	74,53	75,11
40	68,33	68,70	69,08	69,48	69,90	70,33	70,78	71,24	71,72	72,22	72,73	73,26	73,80	74,36	74,93
41	68,21	68,57	68,95	69,35	69,76	70,19	70,63	71,09	71,57	72,06	72,57	73,09	73,63	74,19	74,76
42	68,08	68,44	68,82	69,21	69,62	70,04	70,48	70,94	71,41	71,90	72,40	72,92	73,46	74,01	74,58
43	67,96	68,31	68,68	69,07	69,47	69,89	70,33	70,78	71,25	71,73	72,23	72,75	73,28	73,83	74,40
44	67,83	68,18	68,54	68,93	69,33	69,74	70,17	70,62	71,09	71,57	72,06	72,58	73,11	73,65	74,22
45	67,69	68,04	68,40	68,78	69,18	69,59	70,02	70,46	70,92	71,40	71,89	72,40	72,93	73,48	74,04
46	67,56	67,90	68,26	68,63	69,03	69,43	69,86	70,30	70,76	71,23	71,72	72,23	72,75	73,29	73,85
47	67,42	67,76	68,11	68,48	68,87	69,28	69,70	70,14	70,59	71,06	71,55	72,05	72,57	73,11	73,67
48	67,28	67,61	67,97	68,33	68,72	69,12	69,54	69,97	70,42	70,89	71,37	71,87	72,39	72,93	73,48
49	67,14	67,47	67,81	68,18	68,56	68,96	69,37	69,80	70,25	70,71	71,20	71,69	72,21	72,74	73,29
50	66,99	67,32	67,66	68,02	68,40	68,79	69,20	69,63	70,08	70,54	71,02	71,51	72,03	72,56	73,10
51	66,84	67,17	67,51	67,86	68,24	68,63	69,03	69,46	69,90	70,36	70,84	71,33	71,84	72,37	72,91
52	66,69	67,01	67,35	67,70	68,07	68,46	68,86	69,29	69,72	70,18	70,65	71,15	71,65	72,18	72,72
53	66,54	66,86	67,19	67,54	67,91	68,29	68,69	69,11	69,55	70,00	70,47	70,96	71,46	71,99	72,53
54	66,38	66,70	67,03	67,37	67,74	68,12	68,52	68,93	69,37	69,82	70,29	70,77	71,27	71,79	72,33
55	66,23	66,53	66,86	67,20	67,56	67,94	68,34	68,75	69,18	69,63	70,10	70,58	71,08	71,60	72,14
56	66,07	66,37	66,69	67,03	67,39	67,77	68,16	68,57	69,00	69,45	69,91	70,39	70,89	71,41	71,94
57	65,90	66,20	66,52	66,86	67,22	67,59	67,98	68,39	68,81	69,26	69,72	70,20	70,69	71,21	71,74
58	65,74	66,03	66,35	66,69	67,04	67,41	67,80	68,20	68,63	69,07	69,53	70,00	70,50	71,01	71,54
59	65,57	65,86	66,18	66,51	66,86	67,23	67,61	68,01	68,44	68,87	69,33	69,81	70,30	70,81	71,34
60	65,39	65,69	66,00	66,33	66,68	67,04	67,42	67,82	68,24	68,68	69,14	69,61	70,10	70,61	71,14
61	65,22	65,51	65,82	66,15	66,49	66,85	67,23	67,63	68,05	68,48	68,94	69,41	69,90	70,41	70,93
62	65,04	65,33	65,64	65,96	66,30	66,66	67,04	67,44	67,85	68,29	68,74	69,21	69,70	70,20	70,73
63	64,86	65,15	65,45	65,77	66,11	66,47	66,85	67,24	67,66	68,09	68,54	69,01	69,49	70,00	70,52
64	64,68	64,97	65,27	65,59	65,92	66,28	66,65	67,05	67,46	67,89	68,34	68,80	69,29	69,79	70,31
65	64,50	64,78	65,08	65,39	65,73	66,08	66,46	66,85	67,26	67,68	68,13	68,60	69,08	69,58	70,10
66	64,31	64,59	64,89	65,20	65,53	65,89	66,26	66,65	67,05	67,48	67,93	68,39	68,87	69,37	69,89
67	64,12	64,40	64,69	65,00	65,34	65,69	66,05	66,44	66,85	67,27	67,72	68,18	68,66	69,16	69,68
68	63,93	64,20	64,49	64,81	65,13	65,48	65,85	66,24	66,64	67,07	67,51	67,97	68,45	68,95	69,47
69	63,74	64,01	64,30	64,60	64,93	65,28	65,64	66,03	66,43	66,86	67,30	67,76	68,24	68,74	69,25
70	63,54	63,81	64,09	64,40	64,73	65,07	65,44	65,82	66,22	66,64	67,08	67,54	68,02	68,52	69,04
71	63,34	63,60	63,89	64,20	64,52	64,86	65,23	65,61	66,01	66,43	66,87	67,33	67,81	68,30	68,82
72	63,14	63,40	63,68	63,99	64,31	64,65	65,02	65,40	65,80	66,22	66,65	67,11	67,59	68,09	68,60
73	62,93	63,19	63,48	63,78	64,10	64,44	64,80	65,18	65,58	66,00	66,44	66,89	67,37	67,87	68,38
74	62,72	62,98	63,27	63,57	63,89	64,23	64,58	64,96	65,36	65,78	66,22	66,67	67,15	67,64	68,16
75	62,51	62,77	63,05	63,35	63,67	64,01	64,37	64,74	65,14	65,56	66,00	66,45	66,93	67,42	67,94
76	62,30	62,56	62,84	63,13	63,45	63,79	64,15	64,52	64,92	65,34	65,77	66,23	66,70	67,20	67,71
77	62,08	62,34	62,62	62,91	63,23	63,57	63,92	64,30	64,70	65,11	65,55	66,00	66,48	66,97	67,49
78	61,86	62,12	62,40	62,69	63,01	63,34	63,70	64,08	64,47	64,89	65,32	65,78	66,25	66,75	67,26
79	61,64	61,90	62,17	62,47	62,78	63,12	63,47	63,85	64,24	64,66	65,09	65,55	66,02	66,52	67,03
80	61,42	61,67	61,95	62,24	62,56	62,89	63,25	63,62	64,01	64,43	64,86	65,32	65,79	66,29	66,80
81	61,19	61,45	61,72	62,01	62,33	62,66	63,01	63,39	63,78	64,20	64,63	65,09	65,56	66,06	66,57
82	60,97	61,22	61,49	61,78	62,10	62,43	62,78	63,16	63,55	63,96	64,40	64,85	65,33	65,82	66,34
83	60,74	60,99	61,26	61,55	61,86	62,19	62,55	62,92	63,31	63,73	64,16	64,62	65,09	65,59	66,11
84	60,50	60,75	61,02	61,31	61,63	61,96	62,31	62,68	63,08	63,49	63,93	64,38	64,86	65,36	65,87
85	60,26	60,51	60,78	61,08	61,39	61,72	62,07	62,45	62,84	63,25	63,69	64,15	64,62	65,12	65,64
86	60,03	60,28	60,54	60,84	61,15	61,48	61,83	62,20	62,60	63,01	63,45	63,91	64,38	64,88	65,40
87	59,78	60,03	60,30	60,59	60,90	61,24	61,59	61,96	62,36	62,77	63,21	63,66	64,14	64,64	65,16
88	59,54	59,79	60,06	60,35	60,66	60,99	61,34	61,72	62,11	62,53	62,96	63,42	63,90	64,40	64,92
89	59,29	59,54	59,81	60,10	60,41	60,74	61,10	61,47	61,87	62,28	62,72	63,18	63,66	64,16	64,68
90	59,04	59,29	59,56	59,85	60,16	60,49	60,85	61,22	61,62	62,03	62,47	62,93	63,41	63,91	64,44

Tabelle 39 Oberflächenspannung von Dicksaft nach Gleichung (6.2.3)

Dicksaft Oberflächenspannung in mN/m															
Temp. °C	Trockensubstanzgehalt in %														
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
20	69,47	66,78	64,50	62,62	61,17	60,12	59,48	59,25	59,43	60,03	61,03	62,44	64,27	66,50	69,15
21	69,28	66,60	64,33	62,47	61,01	59,96	59,31	59,08	59,25	59,82	60,81	62,20	63,99	66,20	68,81
22	69,10	66,43	64,17	62,31	60,85	59,80	59,15	58,91	59,06	59,62	60,58	61,95	63,72	65,89	68,47
23	68,92	66,26	64,01	62,15	60,70	59,65	59,00	58,73	58,88	59,42	60,36	61,71	63,45	65,59	68,13
24	68,73	66,09	63,85	62,00	60,55	59,49	58,83	58,57	58,70	59,22	60,15	61,47	63,18	65,29	67,80
25	68,55	65,92	63,69	61,84	60,39	59,34	58,67	58,40	58,52	59,03	59,93	61,23	62,92	65,00	67,47
26	68,37	65,75	63,53	61,69	60,24	59,18	58,51	58,23	58,34	58,83	59,72	60,99	62,65	64,71	67,15
27	68,18	65,58	63,37	61,53	60,09	59,03	58,35	58,06	58,16	58,64	59,51	60,76	62,39	64,42	66,82
28	68,00	65,41	63,21	61,38	59,94	58,88	58,20	57,90	57,98	58,45	59,30	60,53	62,14	64,13	66,51
29	67,82	65,25	63,05	61,23	59,79	58,72	58,04	57,73	57,81	58,26	59,09	60,30	61,88	63,85	66,19
30	67,64	65,08	62,89	61,07	59,64	58,57	57,88	57,57	57,63	58,07	58,88	60,07	61,63	63,57	65,88
31	67,46	64,91	62,73	60,92	59,49	58,42	57,73	57,41	57,46	57,88	58,68	59,85	61,39	63,30	65,58
32	67,28	64,74	62,57	60,77	59,34	58,27	57,58	57,25	57,29	57,70	58,48	59,62	61,14	63,02	65,28
33	67,10	64,57	62,41	60,62	59,19	58,12	57,42	57,09	57,12	57,52	58,28	59,41	60,90	62,76	64,98
34	66,92	64,41	62,26	60,47	59,04	57,97	57,27	56,93	56,95	57,34	58,08	59,19	60,66	62,49	64,68
35	66,74	64,24	62,10	60,32	58,89	57,83	57,12	56,77	56,79	57,16	57,89	58,97	60,42	62,23	64,39
36	66,57	64,08	61,94	60,17	58,75	57,68	56,97	56,62	56,62	56,98	57,69	58,76	60,19	61,97	64,11
37	66,39	63,91	61,79	60,02	58,60	57,53	56,82	56,46	56,46	56,80	57,50	58,55	59,96	61,71	63,82
38	66,21	63,75	61,63	59,87	58,45	57,39	56,67	56,31	56,29	56,63	57,31	58,34	59,73	61,46	63,54
39	66,03	63,58	61,48	59,72	58,31	57,24	56,53	56,16	56,13	56,45	57,12	58,14	59,50	61,21	63,27
40	65,86	63,42	61,32	59,57	58,16	57,10	56,38	56,00	55,97	56,28	56,94	57,94	59,28	60,97	63,00
41	65,68	63,25	61,17	59,42	58,02	56,96	56,23	55,85	55,81	56,11	56,75	57,74	59,06	60,72	62,73
42	65,50	63,09	61,01	59,28	57,88	56,81	56,09	55,70	55,65	55,94	56,57	57,54	58,84	60,48	62,46
43	65,33	62,93	60,86	59,13	57,73	56,67	55,95	55,55	55,50	55,78	56,39	57,34	58,63	60,25	62,20
44	65,15	62,76	60,71	58,98	57,59	56,53	55,80	55,41	55,34	55,61	56,22	57,15	58,42	60,02	61,95
45	64,98	62,60	60,55	58,84	57,45	56,39	55,66	55,26	55,19	55,45	56,04	56,96	58,21	59,79	61,69
46	64,80	62,44	60,40	58,69	57,31	56,25	55,52	55,12	55,04	55,29	55,87	56,77	58,00	59,56	61,45
47	64,63	62,28	60,25	58,55	57,17	56,11	55,38	54,97	54,89	55,13	55,70	56,59	57,80	59,34	61,20
48	64,46	62,12	60,10	58,40	57,03	55,97	55,24	54,83	54,74	54,97	55,53	56,40	57,60	59,12	60,96
49	64,28	61,96	59,95	58,26	56,89	55,83	55,10	54,69	54,59	54,82	55,36	56,22	57,40	58,90	60,72
50	64,11	61,80	59,80	58,11	56,75	55,70	54,96	54,55	54,45	54,66	55,19	56,04	57,21	58,69	60,49
51	63,94	61,64	59,65	57,97	56,61	55,56	54,83	54,41	54,30	54,51	55,03	55,87	57,01	58,48	60,26
52	63,77	61,48	59,50	57,83	56,47	55,42	54,69	54,27	54,16	54,36	54,87	55,69	56,83	58,27	60,03
53	63,60	61,32	59,35	57,69	56,33	55,29	54,56	54,13	54,01	54,21	54,71	55,52	56,64	58,07	59,81
54	63,43	61,16	59,20	57,54	56,20	55,16	54,42	53,99	53,87	54,06	54,55	55,35	56,46	57,87	59,59
55	63,26	61,00	59,05	57,40	56,06	55,02	54,29	53,86	53,73	53,91	54,40	55,18	56,28	57,67	59,37
56	63,09	60,84	58,90	57,26	55,92	54,89	54,16	53,72	53,60	53,77	54,24	55,02	56,10	57,48	59,16
57	62,92	60,69	58,75	57,12	55,79	54,76	54,02	53,59	53,46	53,62	54,09	54,86	55,92	57,29	58,95
58	62,75	60,53	58,61	56,98	55,65	54,63	53,89	53,46	53,32	53,48	53,94	54,70	55,75	57,10	58,75
59	62,58	60,37	58,46	56,84	55,52	54,49	53,76	53,33	53,19	53,34	53,79	54,54	55,58	56,92	58,55
60	62,41	60,21	58,31	56,70	55,39	54,36	53,64	53,20	53,06	53,21	53,65	54,39	55,41	56,74	58,35
61	62,24	60,06	58,17	56,57	55,25	54,24	53,51	53,07	52,92	53,07	53,51	54,23	55,25	56,56	58,16
62	62,07	59,90	58,02	56,43	55,12	54,11	53,38	52,94	52,79	52,93	53,36	54,08	55,09	56,39	57,97
63	61,91	59,75	57,88	56,29	54,99	53,98	53,25	52,82	52,67	52,80	53,22	53,93	54,93	56,22	57,79
64	61,74	59,59	57,73	56,15	54,86	53,85	53,13	52,69	52,54	52,67	53,09	53,79	54,78	56,05	57,61
65	61,57	59,44	57,59	56,02	54,73	53,73	53,00	52,57	52,41	52,54	52,95	53,65	54,62	55,88	57,43
66	61,41	59,28	57,44	55,88	54,60	53,60	52,88	52,44	52,29	52,41	52,82	53,51	54,47	55,72	57,25
67	61,24	59,13	57,30	55,74	54,47	53,47	52,76	52,32	52,16	52,29	52,69	53,37	54,33	55,57	57,08
68	61,08	58,98	57,15	55,61	54,34	53,35	52,64	52,20	52,04	52,16	52,56	53,23	54,18	55,41	56,92
69	60,91	58,82	57,01	55,47	54,21	53,23	52,52	52,08	51,92	52,04	52,43	53,10	54,04	55,26	56,76
70	60,75	58,67	56,87	55,34	54,08	53,10	52,40	51,96	51,80	51,92	52,31	52,97	53,90	55,11	56,60
71	60,59	58,52	56,73	55,21	53,96	52,98	52,28	51,84	51,69	51,80	52,18	52,84	53,77	54,97	56,44
72	60,42	58,37	56,59	55,07	53,83	52,86	52,16	51,73	51,57	51,68	52,06	52,71	53,64	54,83	56,29
73	60,26	58,22	56,44	54,94	53,70	52,74	52,04	51,61	51,45	51,56	51,94	52,59	53,51	54,69	56,14
74	60,10	58,07	56,30	54,81	53,58	52,62	51,93	51,50	51,34	51,45	51,82	52,47	53,38	54,56	56,00
75	59,93	57,92	56,16	54,68	53,45	52,50	51,81	51,39	51,23	51,34	51,71	52,35	53,25	54,42	55,86
76	59,77	57,77	56,02	54,54	53,33	52,38	51,69	51,27	51,12	51,22	51,60	52,23	53,13	54,30	55,73
77	59,61	57,62	55,88	54,41	53,21	52,26	51,58	51,16	51,01	51,11	51,48	52,12	53,01	54,17	55,59
78	59,45	57,47	55,74	54,28	53,08	52,15	51,47	51,05	50,90	51,01	51,38	52,01	52,90	54,05	55,46
79	59,29	57,32	55,61	54,15	52,96	52,03	51,36	50,94	50,79	50,90	51,27	51,90	52,78	53,93	55,34
80	59,13	57,17	55,47	54,02	52,84	51,91	51,25	50,84	50,69	50,80	51,16	51,79	52,67	53,82	55,22
81	58,97	57,02	55,33	53,89	52,72	51,80	51,13	50,73	50,58	50,69	51,06	51,68	52,57	53,71	55,10
82	58,81	56,87	55,19	53,77	52,60	51,68	51,03	50,62	50,48	50,59	50,96	51,58	52,46	53,60	54,99
83	58,65	56,73	55,05	53,64	52,48	51,57	50,92	50,52	50,38	50,49	50,86	51,48	52,36	53,49	54,88
84	58,49	56,58	54,92	53,51	52,36	51,46	50,81	50,42	50,28	50,39	50,76	51,38	52,26	53,39	54,77
85	58,34	56,43	54,78	53,38	52,24	51,34	50,70	50,31	50,18	50,30	50,67	51,29	52,16	53,29	54,67
86	58,18	56,29	54,64	53,26	52,12	51,23	50,60	50,21	50,08	50,20	50,57	51,20	52,07	53,20	54,57
87	58,02	56,14	54,51	53,13	52,00	51,12	50,49	50,11	49,99	50,11	50,48	51,11	51,98	53,10	54,48
88	57,86	55,99	54,37	53,00	51,88	51,01	50,39	50,02	49,89	50,02	50,39	51,02	51,89	53,02	54,39
89	57,71	55,85	54,24	52,88	51,77	50,90	50,29	49,92	49,80	49,93	50,31	50,93	51,81	52,93	54,30
90	57,55	55,70	54,11	52,75	51,65	50,79	50,18	49,82	49,71	49,84	50,22	50,85	51,72	52,85	54,22

Tabelle 40 Oberflächenspannung technische Saccharoselösung $q = 80\%$

Melasse 80% Reinheit Oberflächenspannung in mN/m																
Temp. °C	Trockensubstanzgehalt in %															
	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
20	53,38	53,39	53,43	53,49	53,58	53,71	53,85	54,03	54,23	54,47	54,73	55,01	55,33	55,67	56,04	56,44
21	53,11	53,12	53,16	53,23	53,32	53,44	53,59	53,77	53,97	54,20	54,46	54,75	55,06	55,41	55,78	56,18
22	52,85	52,86	52,90	52,96	53,06	53,18	53,33	53,50	53,71	53,94	54,20	54,49	54,80	55,15	55,52	55,92
23	52,59	52,60	52,64	52,71	52,80	52,92	53,07	53,24	53,45	53,68	53,94	54,23	54,54	54,89	55,26	55,66
24	52,34	52,35	52,38	52,45	52,54	52,66	52,81	52,99	53,19	53,42	53,68	53,97	54,29	54,63	55,00	55,40
25	52,08	52,09	52,13	52,20	52,29	52,41	52,56	52,73	52,94	53,17	53,43	53,72	54,03	54,38	54,75	55,15
26	51,83	51,84	51,88	51,94	52,04	52,16	52,31	52,48	52,69	52,92	53,18	53,47	53,78	54,13	54,50	54,90
27	51,58	51,59	51,63	51,70	51,79	51,91	52,06	52,24	52,44	52,67	52,93	53,22	53,53	53,88	54,25	54,65
28	51,34	51,35	51,39	51,45	51,55	51,67	51,81	51,99	52,20	52,43	52,69	52,97	53,29	53,63	54,00	54,40
29	51,10	51,11	51,14	51,21	51,30	51,42	51,57	51,75	51,95	52,19	52,44	52,73	53,05	53,39	53,76	54,16
30	50,86	50,87	50,91	50,97	51,06	51,18	51,33	51,51	51,71	51,95	52,21	52,49	52,81	53,15	53,52	53,92
31	50,62	50,63	50,67	50,73	50,83	50,95	51,10	51,27	51,48	51,71	51,97	52,26	52,57	52,92	53,29	53,68
32	50,39	50,40	50,44	50,50	50,59	50,72	50,86	51,04	51,24	51,48	51,74	52,02	52,34	52,68	53,05	53,45
33	50,16	50,17	50,21	50,27	50,36	50,48	50,63	50,81	51,01	51,25	51,51	51,79	52,11	52,45	52,82	53,22
34	49,93	49,94	49,98	50,04	50,14	50,26	50,41	50,58	50,79	51,02	51,28	51,57	51,88	52,22	52,59	52,99
35	49,71	49,72	49,75	49,82	49,91	50,03	50,18	50,36	50,56	50,79	51,05	51,34	51,66	52,00	52,37	52,77
36	49,48	49,49	49,53	49,60	49,69	49,81	49,96	50,14	50,34	50,57	50,83	51,12	51,43	51,78	52,15	52,55
37	49,27	49,27	49,31	49,38	49,47	49,59	49,74	49,92	50,12	50,35	50,61	50,90	51,22	51,56	51,93	52,33
38	49,05	49,06	49,10	49,16	49,25	49,38	49,52	49,70	49,90	50,14	50,40	50,68	51,00	51,34	51,71	52,11
39	48,84	48,85	48,88	48,95	49,04	49,16	49,31	49,49	49,69	49,92	50,18	50,47	50,79	51,13	51,50	51,90
40	48,63	48,64	48,67	48,74	48,83	48,95	49,10	49,28	49,48	49,71	49,97	50,26	50,58	50,92	51,29	51,69
41	48,42	48,43	48,47	48,53	48,62	48,74	48,89	49,07	49,27	49,51	49,77	50,05	50,37	50,71	51,08	51,48
42	48,21	48,22	48,26	48,33	48,42	48,54	48,69	48,86	49,07	49,30	49,56	49,85	50,16	50,51	50,88	51,28
43	48,01	48,02	48,06	48,12	48,22	48,34	48,49	48,66	48,87	49,10	49,36	49,65	49,96	50,30	50,68	51,07
44	47,81	47,82	47,86	47,93	48,02	48,14	48,29	48,46	48,67	48,90	49,16	49,45	49,76	50,11	50,48	50,88
45	47,62	47,63	47,66	47,73	47,82	47,94	48,09	48,27	48,47	48,70	48,96	49,25	49,57	49,91	50,28	50,68
46	47,42	47,43	47,47	47,54	47,63	47,75	47,90	48,08	48,28	48,51	48,77	49,06	49,37	49,72	50,09	50,49
47	47,23	47,24	47,28	47,35	47,44	47,56	47,71	47,88	48,09	48,32	48,58	48,87	49,18	49,53	49,90	50,30
48	47,05	47,06	47,09	47,16	47,25	47,37	47,52	47,70	47,90	48,13	48,39	48,68	49,00	49,34	49,71	50,11
49	46,86	46,87	46,91	46,97	47,07	47,19	47,34	47,51	47,72	47,95	48,21	48,50	48,81	49,16	49,53	49,92
50	46,68	46,69	46,73	46,79	46,89	47,01	47,16	47,33	47,54	47,77	48,03	48,32	48,63	48,97	49,34	49,74
51	46,50	46,51	46,55	46,61	46,71	46,83	46,98	47,15	47,36	47,59	47,85	48,14	48,45	48,79	49,17	49,56
52	46,33	46,34	46,37	46,44	46,53	46,65	46,80	46,98	47,18	47,41	47,67	47,96	48,28	48,62	48,99	49,39
53	46,15	46,16	46,20	46,27	46,36	46,48	46,63	46,80	47,01	47,24	47,50	47,79	48,10	48,45	48,82	49,22
54	45,98	45,99	46,03	46,10	46,19	46,31	46,46	46,63	46,84	47,07	47,33	47,62	47,93	48,28	48,65	49,05
55	45,82	45,83	45,86	45,93	46,02	46,14	46,29	46,47	46,67	46,90	47,16	47,45	47,77	48,11	48,48	48,88
56	45,65	45,66	45,70	45,76	45,86	45,98	46,13	46,30	46,51	46,74	47,00	47,29	47,60	47,94	48,32	48,71
57	45,49	45,50	45,54	45,60	45,70	45,82	45,97	46,14	46,35	46,58	46,84	47,13	47,44	47,78	48,15	48,55
58	45,33	45,34	45,38	45,44	45,54	45,66	45,81	45,98	46,19	46,42	46,68	46,97	47,28	47,62	48,00	48,39
59	45,18	45,19	45,22	45,29	45,38	45,50	45,65	45,83	46,03	46,26	46,52	46,81	47,13	47,47	47,84	48,24
60	45,02	45,03	45,07	45,14	45,23	45,35	45,50	45,67	45,88	46,11	46,37	46,66	46,97	47,32	47,69	48,09
61	44,87	44,88	44,92	44,99	45,08	45,20	45,35	45,52	45,73	45,96	46,22	46,51	46,82	47,17	47,54	47,94
62	44,73	44,74	44,77	44,84	44,93	45,05	45,20	45,38	45,58	45,81	46,07	46,36	46,68	47,02	47,39	47,79
63	44,58	44,59	44,63	44,69	44,79	44,91	45,06	45,23	45,44	45,67	45,93	46,22	46,53	46,88	47,25	47,65
64	44,44	44,45	44,49	44,55	44,65	44,77	44,92	45,09	45,30	45,53	45,79	46,08	46,39	46,73	47,11	47,50
65	44,30	44,31	44,35	44,42	44,51	44,63	44,78	44,95	45,16	45,39	45,65	45,94	46,25	46,60	46,97	47,37
66	44,17	44,18	44,21	44,28	44,37	44,49	44,64	44,82	45,02	45,25	45,51	45,80	46,12	46,46	46,83	47,23
67	44,04	44,04	44,08	44,15	44,24	44,36	44,51	44,69	44,89	45,12	45,38	45,67	45,98	46,33	46,70	47,10
68	43,91	43,92	43,95	44,02	44,11	44,23	44,38	44,56	44,76	44,99	45,25	45,54	45,86	46,20	46,57	46,97
69	43,78	43,79	43,83	43,89	43,98	44,10	44,25	44,43	44,63	44,87	45,13	45,41	45,73	46,07	46,44	46,84
70	43,65	43,66	43,70	43,77	43,86	43,98	44,13	44,31	44,51	44,74	45,00	45,29	45,60	45,95	46,32	46,72
71	43,53	43,54	43,58	43,65	43,74	43,86	44,01	44,18	44,39	44,62	44,88	45,17	45,48	45,83	46,20	46,60
72	43,42	43,43	43,46	43,53	43,62	43,74	43,89	44,07	44,27	44,50	44,76	45,05	45,37	45,71	46,08	46,48
73	43,30	43,31	43,35	43,41	43,51	43,63	43,77	43,95	44,16	44,39	44,65	44,93	45,25	45,59	45,96	46,36
74	43,19	43,20	43,23	43,30	43,39	43,51	43,66	43,84	44,04	44,27	44,53	44,82	45,14	45,48	45,85	46,25
75	43,08	43,09	43,13	43,19	43,28	43,40	43,55	43,73	43,93	44,17	44,43	44,71	45,03	45,37	45,74	46,14
76	42,97	42,98	43,02	43,08	43,18	43,30	43,45	43,62	43,83	44,06	44,32	44,61	44,92	45,26	45,64	46,03
77	42,87	42,88	42,91	42,98	43,07	43,19	43,34	43,52	43,72	43,95	44,21	44,50	44,82	45,16	45,53	45,93
78	42,77	42,78	42,81	42,88	42,97	43,09	43,24	43,42	43,62	43,85	44,11	44,40	44,72	45,06	45,43	45,83
79	42,67	42,68	42,72	42,78	42,87	42,99	43,14	43,32	43,52	43,76	44,02	44,30	44,62	44,96	45,33	45,73
80	42,57	42,58	42,62	42,69	42,78	42,90	43,05	43,22	43,43	43,66	43,92	44,21	44,52	44,87	45,24	45,64
81	42,48	42,49	42,53	42,59	42,69	42,81	42,96	43,13	43,34	43,57	43,83	44,12	44,43	44,77	45,15	45,54
82	42,39	42,40	42,44	42,50	42,60	42,72	42,87	43,04	43,25	43,48	43,74	44,03	44,34	44,68	45,06	45,45
83	42,31	42,32	42,35	42,42	42,51	42,63	42,78	42,96	43,16	43,39	43,65	43,94	44,26	44,60	44,97	45,37
84	42,22	42,23	42,27	42,33	42,43	42,55	42,70	42,87	43,08	43,31	43,57	43,86	44,17	44,51	44,89	45,28
85	42,14	42,15	42,19	42,25	42,35	42,47	42,62	42,79	43,00	43,23	43,49	43,78	44,09	44,43	44,81	45,20
86	42,06	42,07	42,11	42,18	42,27	42,39	42,54	42,71	42,92	43,15	43,41	43,70	44,01	44,36	44,73	45,13
87	41,99	42,00	42,04	42,10	42,19	42,31	42,46	42,64	42,84	43,08	43,34	43,62	43,94	44,28	44,65	45,05
88	41,92	41,93	41,96	42,03	42,12	42,24	42,39	42,57	42,77	43,00	43,26	43,55	43,87	44,21	44,58	44,98
89	41,85	41,86	41,89	41,96	42,05	42,17	42,32	42,50	42,70	42,93	43,19	43,48	43,80	44,14	44,51	44,91
90																

Tabelle 41 Oberflächenspannung technische Saccharoselösung q = 70%

Melasse 70% Reinheit Oberflächenspannung in mN/m																
Temp. °C	Trockensubstanzgehalt in %															
	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
20	50,24	50,25	50,29	50,35	50,44	50,56	50,71	50,89	51,09	51,33	51,59	51,87	52,19	52,53	52,90	53,30
21	49,97	49,98	50,02	50,09	50,18	50,30	50,45	50,62	50,83	51,06	51,32	51,61	51,92	52,27	52,64	53,04
22	49,71	49,72	49,76	49,82	49,92	50,04	50,19	50,36	50,57	50,80	51,06	51,35	51,66	52,00	52,37	52,77
23	49,45	49,46	49,50	49,56	49,66	49,78	49,93	50,10	50,31	50,54	50,80	51,09	51,40	51,74	52,12	52,51
24	49,20	49,20	49,24	49,31	49,40	49,52	49,67	49,85	50,05	50,28	50,54	50,83	51,15	51,49	51,86	52,26
25	48,94	48,95	48,99	49,05	49,15	49,27	49,42	49,59	49,80	50,03	50,29	50,58	50,89	51,23	51,61	52,00
26	48,69	48,70	48,74	48,80	48,90	49,02	49,17	49,34	49,55	49,78	50,04	50,33	50,64	50,98	51,35	51,75
27	48,44	48,45	48,49	48,56	48,65	48,77	48,92	49,09	49,30	49,53	49,79	50,08	50,39	50,74	51,11	51,51
28	48,20	48,21	48,25	48,31	48,40	48,52	48,67	48,85	49,05	49,29	49,55	49,83	50,15	50,49	50,86	51,26
29	47,96	47,97	48,00	48,07	48,16	48,28	48,43	48,61	48,81	49,04	49,30	49,59	49,91	50,25	50,62	51,02
30	47,72	47,73	47,76	47,83	47,92	48,04	48,19	48,37	48,57	48,80	49,06	49,35	49,67	50,01	50,38	50,78
31	47,48	47,49	47,53	47,59	47,69	47,81	47,96	48,13	48,34	48,57	48,83	49,12	49,43	49,77	50,14	50,54
32	47,25	47,26	47,29	47,36	47,45	47,57	47,72	47,90	48,10	48,33	48,59	48,88	49,20	49,54	49,91	50,31
33	47,02	47,03	47,06	47,13	47,22	47,34	47,49	47,67	47,87	48,10	48,36	48,65	48,97	49,31	49,68	50,08
34	46,79	46,80	46,84	46,90	46,99	47,12	47,26	47,44	47,64	47,88	48,14	48,42	48,74	49,08	49,45	49,85
35	46,56	46,57	46,61	46,68	46,77	46,89	47,04	47,22	47,42	47,65	47,91	48,20	48,51	48,86	49,23	49,63
36	46,34	46,35	46,39	46,46	46,55	46,67	46,82	46,99	47,20	47,43	47,69	47,98	48,29	48,64	49,01	49,41
37	46,12	46,13	46,17	46,24	46,33	46,45	46,60	46,77	46,98	47,21	47,47	47,76	48,07	48,42	48,79	49,19
38	45,91	45,92	45,95	46,02	46,11	46,23	46,38	46,56	46,76	46,99	47,25	47,54	47,86	48,20	48,57	48,97
39	45,69	45,70	45,74	45,81	45,90	46,02	46,17	46,35	46,55	46,78	47,04	47,33	47,64	47,99	48,36	48,76
40	45,48	45,49	45,53	45,60	45,69	45,81	45,96	46,14	46,34	46,57	46,83	47,12	47,43	47,78	48,15	48,55
41	45,28	45,29	45,32	45,39	45,48	45,60	45,75	45,93	46,13	46,36	46,62	46,91	47,23	47,57	47,94	48,34
42	45,07	45,08	45,12	45,18	45,28	45,40	45,55	45,72	45,93	46,16	46,42	46,71	47,02	47,37	47,74	48,13
43	44,87	44,88	44,92	44,98	45,08	45,20	45,35	45,52	45,73	45,96	46,22	46,50	46,82	47,16	47,53	47,93
44	44,67	44,68	44,72	44,78	44,88	45,00	45,15	45,32	45,53	45,76	46,02	46,31	46,62	46,96	47,34	47,73
45	44,48	44,49	44,52	44,59	44,68	44,80	44,95	45,13	45,33	45,56	45,82	46,11	46,43	46,77	47,14	47,54
46	44,28	44,29	44,33	44,39	44,49	44,61	44,76	44,93	45,14	45,37	45,63	45,92	46,23	46,58	46,95	47,35
47	44,09	44,10	44,14	44,20	44,30	44,42	44,57	44,74	44,95	45,18	45,44	45,73	46,04	46,39	46,76	47,16
48	43,91	43,91	43,95	44,02	44,11	44,23	44,38	44,56	44,76	44,99	45,25	45,54	45,86	46,20	46,57	46,97
49	43,72	43,73	43,77	43,83	43,93	44,05	44,20	44,37	44,58	44,81	45,07	45,36	45,67	46,01	46,38	46,78
50	43,54	43,55	43,59	43,65	43,74	43,87	44,01	44,19	44,39	44,63	44,89	45,17	45,49	45,83	46,20	46,60
51	43,36	43,37	43,41	43,47	43,57	43,69	43,84	44,01	44,22	44,45	44,71	45,00	45,31	45,65	46,02	46,42
52	43,18	43,19	43,23	43,30	43,39	43,51	43,66	43,84	44,04	44,27	44,53	44,82	45,13	45,48	45,85	46,25
53	43,01	43,02	43,06	43,12	43,22	43,34	43,49	43,66	43,87	44,10	44,36	44,65	44,96	45,30	45,68	46,07
54	42,84	42,85	42,89	42,95	43,05	43,17	43,32	43,49	43,70	43,93	44,19	44,48	44,79	45,13	45,51	45,90
55	42,67	42,68	42,72	42,79	42,88	43,00	43,15	43,33	43,53	43,76	44,02	44,31	44,62	44,97	45,34	45,74
56	42,51	42,52	42,56	42,62	42,72	42,84	42,99	43,16	43,37	43,60	43,86	44,14	44,46	44,80	45,17	45,57
57	42,35	42,36	42,40	42,46	42,55	42,68	42,82	43,00	43,20	43,44	43,70	43,98	44,30	44,64	45,01	45,41
58	42,19	42,20	42,24	42,30	42,40	42,52	42,67	42,84	43,05	43,28	43,54	43,83	44,14	44,48	44,85	45,25
59	42,03	42,04	42,08	42,15	42,24	42,36	42,51	42,69	42,89	43,12	43,38	43,67	43,98	44,33	44,70	45,10
60	41,88	41,89	41,93	41,99	42,09	42,21	42,36	42,53	42,74	42,97	43,23	43,52	43,83	44,18	44,55	44,94
61	41,73	41,74	41,78	41,84	41,94	42,06	42,21	42,38	42,59	42,82	43,08	43,37	43,68	44,03	44,40	44,79
62	41,59	41,59	41,63	41,70	41,79	41,91	42,06	42,24	42,44	42,67	42,93	43,22	43,54	43,88	44,25	44,65
63	41,44	41,45	41,49	41,55	41,65	41,77	41,92	42,09	42,30	42,53	42,79	43,08	43,39	43,73	44,11	44,50
64	41,30	41,31	41,35	41,41	41,51	41,63	41,77	41,95	42,16	42,39	42,65	42,93	43,25	43,59	43,96	44,36
65	41,16	41,17	41,21	41,27	41,37	41,49	41,64	41,81	42,02	42,25	42,51	42,80	43,11	43,45	43,83	44,22
66	41,03	41,04	41,07	41,14	41,23	41,35	41,50	41,68	41,88	42,11	42,37	42,66	42,98	43,32	43,69	44,09
67	40,89	40,90	40,94	41,01	41,10	41,22	41,37	41,54	41,75	41,98	42,24	42,53	42,84	43,19	43,56	43,96
68	40,76	40,77	40,81	40,88	40,97	41,09	41,24	41,42	41,62	41,85	42,11	42,40	42,71	43,06	43,43	43,83
69	40,64	40,65	40,68	40,75	40,84	40,96	41,11	41,29	41,49	41,72	41,98	42,27	42,59	42,93	43,30	43,70
70	40,51	40,52	40,56	40,63	40,72	40,84	40,99	41,16	41,37	41,60	41,86	42,15	42,46	42,81	43,18	43,58
71	40,39	40,40	40,44	40,50	40,60	40,72	40,87	41,04	41,25	41,48	41,74	42,03	42,34	42,69	43,06	43,45
72	40,27	40,28	40,32	40,39	40,48	40,60	40,75	40,93	41,13	41,36	41,62	41,91	42,22	42,57	42,94	43,34
73	40,16	40,17	40,21	40,27	40,36	40,48	40,63	40,81	41,01	41,25	41,51	41,79	42,11	42,45	42,82	43,22
74	40,05	40,06	40,09	40,16	40,25	40,37	40,52	40,70	40,90	41,13	41,39	41,68	42,00	42,34	42,71	43,11
75	39,94	39,95	39,98	40,05	40,14	40,26	40,41	40,59	40,79	41,02	41,28	41,57	41,89	42,23	42,60	43,00
76	39,83	39,84	39,88	39,94	40,04	40,16	40,30	40,48	40,69	40,92	41,18	41,46	41,78	42,12	42,49	42,89
77	39,73	39,74	39,77	39,84	39,93	40,05	40,20	40,38	40,58	40,81	41,07	41,36	41,68	42,02	42,39	42,79
78	39,63	39,63	39,67	39,74	39,83	39,95	40,10	40,28	40,48	40,71	40,97	41,26	41,58	41,92	42,29	42,69
79	39,53	39,54	39,57	39,64	39,73	39,85	40,00	40,18	40,38	40,61	40,87	41,16	41,48	41,82	42,19	42,59
80	39,43	39,44	39,48	39,54	39,64	39,76	39,91	40,08	40,29	40,52	40,78	41,07	41,38	41,73	42,10	42,49
81	39,34	39,35	39,39	39,45	39,55	39,67	39,81	39,99	40,20	40,43	40,69	40,97	41,29	41,63	42,00	42,40
82	39,25	39,26	39,30	39,36	39,46	39,58	39,73	39,90	40,11	40,34	40,60	40,89	41,20	41,54	41,91	42,31
83	39,16	39,17	39,21	39,28	39,37	39,49	39,64	39,82	40,02	40,25	40,51	40,80	41,11	41,46	41,83	42,23
84	39,08	39,09	39,13	39,19	39,29	39,41	39,56	39,73	39,94	40,17	40,43	40,71	41,03	41,37	41,74	42,14
85	39,00	39,01	39,05	39,11	39,20	39,33	39,47	39,65	39,85	40,09	40,35	40,63	40,95	41,29	41,66	42,06
86	38,92	38,93	38,97	39,03	39,13	39,25	39,40	39,57	39,78	40,01	40,27	40,56	40,87	41,21	41,59	41,98
87	38,85	38,86	38,89	38,96	39,05	39,17	39,32	39,50	39,70	39,93	40,19	40,48	40,80	41,14	41,51	41,91
88	38,77	38,78	38,82	38,89	38,98	39,10	39,25	39,43	39,63	39,86	40,12	40,41	40,72	41,07	41,44	41,84
89	38,71	38,72	38,75	38,82	38,91	39,03	39,18	39,36	39,56	39,79	40,05	40,34	40,66	41,00	41,37</	

Tabelle 42 Oberflächenspannung technische Saccharoselösung $q = 60\%$

Melasse 60% Reinheit Oberflächenspannung in mN/m																
Temp. °C	Trockensubstanzgehalt in %															
	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
20	48,98	48,99	49,03	49,09	49,19	49,31	49,46	49,63	49,84	50,07	50,33	50,62	50,93	51,27	51,64	52,04
21	48,72	48,73	48,76	48,83	48,92	49,04	49,19	49,37	49,57	49,80	50,06	50,35	50,67	51,01	51,38	51,78
22	48,45	48,46	48,50	48,57	48,66	48,78	48,93	49,10	49,31	49,54	49,80	50,09	50,40	50,75	51,12	51,52
23	48,19	48,20	48,24	48,31	48,40	48,52	48,67	48,85	49,05	49,28	49,54	49,83	50,14	50,49	50,86	51,26
24	47,94	47,95	47,99	48,05	48,14	48,26	48,41	48,59	48,79	49,03	49,28	49,57	49,89	50,23	50,60	51,00
25	47,68	47,69	47,73	47,80	47,89	48,01	48,16	48,34	48,54	48,77	49,03	49,32	49,63	49,98	50,35	50,75
26	47,43	47,44	47,48	47,55	47,64	47,76	47,91	48,08	48,29	48,52	48,78	49,07	49,38	49,73	50,10	50,50
27	47,19	47,20	47,23	47,30	47,39	47,51	47,66	47,84	48,04	48,27	48,53	48,82	49,14	49,48	49,85	50,25
28	46,94	46,95	46,99	47,05	47,15	47,27	47,42	47,59	47,80	48,03	48,29	48,58	48,89	49,23	49,61	50,00
29	46,70	46,71	46,75	46,81	46,90	47,03	47,17	47,35	47,55	47,79	48,05	48,33	48,65	48,99	49,36	49,76
30	46,46	46,47	46,51	46,57	46,67	46,79	46,93	47,11	47,32	47,55	47,81	48,09	48,41	48,75	49,12	49,52
31	46,22	46,23	46,27	46,34	46,43	46,55	46,70	46,87	47,08	47,31	47,57	47,86	48,17	48,52	48,89	49,29
32	45,99	46,00	46,04	46,10	46,20	46,32	46,47	46,64	46,85	47,08	47,34	47,62	47,94	48,28	48,65	49,05
33	45,76	45,77	45,81	45,87	45,97	46,09	46,23	46,41	46,62	46,85	47,11	47,39	47,71	48,05	48,42	48,82
34	45,53	45,54	45,58	45,64	45,74	45,86	46,01	46,18	46,39	46,62	46,88	47,17	47,48	47,83	48,20	48,59
35	45,31	45,32	45,35	45,42	45,51	45,63	45,78	45,96	46,16	46,39	46,65	46,94	47,26	47,60	47,97	48,37
36	45,09	45,10	45,13	45,20	45,29	45,41	45,56	45,74	45,94	46,17	46,43	46,72	47,04	47,38	47,75	48,15
37	44,87	44,88	44,91	44,98	45,07	45,19	45,34	45,52	45,72	45,95	46,21	46,50	46,82	47,16	47,53	47,93
38	44,65	44,66	44,70	44,76	44,86	44,98	45,13	45,30	45,51	45,74	46,00	46,29	46,60	46,94	47,31	47,71
39	44,44	44,45	44,48	44,55	44,64	44,76	44,91	45,09	45,29	45,52	45,78	46,07	46,39	46,73	47,10	47,50
40	44,23	44,24	44,27	44,34	44,43	44,55	44,70	44,88	45,08	45,31	45,57	45,86	46,18	46,52	46,89	47,29
41	44,02	44,03	44,07	44,13	44,22	44,35	44,49	44,67	44,87	45,11	45,37	45,65	45,97	46,31	46,68	47,08
42	43,81	43,82	43,86	43,93	44,02	44,14	44,29	44,47	44,67	44,90	45,16	45,45	45,76	46,11	46,48	46,88
43	43,61	43,62	43,66	43,73	43,82	43,94	44,09	44,26	44,47	44,70	44,96	45,25	45,56	45,91	46,28	46,68
44	43,41	43,42	43,46	43,53	43,62	43,74	43,89	44,07	44,27	44,50	44,76	45,05	45,36	45,71	46,08	46,48
45	43,22	43,23	43,27	43,33	43,42	43,54	43,69	43,87	44,07	44,31	44,57	44,85	45,17	45,51	45,88	46,28
46	43,03	43,04	43,07	43,14	43,23	43,35	43,50	43,68	43,88	44,11	44,37	44,66	44,98	45,32	45,69	46,09
47	42,84	42,84	42,88	42,95	43,04	43,16	43,31	43,49	43,69	43,92	44,18	44,47	44,79	45,13	45,50	45,90
48	42,65	42,66	42,69	42,76	42,85	42,97	43,12	43,30	43,50	43,74	43,99	44,28	44,60	44,94	45,31	45,71
49	42,46	42,47	42,51	42,58	42,67	42,79	42,94	43,11	43,32	43,55	43,81	44,10	44,41	44,76	45,13	45,53
50	42,28	42,29	42,33	42,39	42,49	42,61	42,76	42,93	43,14	43,37	43,63	43,92	44,23	44,57	44,95	45,34
51	42,10	42,11	42,15	42,22	42,31	42,43	42,58	42,75	42,96	43,19	43,45	43,74	44,05	44,40	44,77	45,17
52	41,93	41,94	41,97	42,04	42,13	42,25	42,40	42,58	42,78	43,01	43,27	43,56	43,88	44,22	44,59	44,99
53	41,75	41,76	41,80	41,87	41,96	42,08	42,23	42,41	42,61	42,84	43,10	43,39	43,70	44,05	44,42	44,82
54	41,58	41,59	41,63	41,70	41,79	41,91	42,06	42,24	42,44	42,67	42,93	43,22	43,53	43,88	44,25	44,65
55	41,42	41,43	41,46	41,53	41,62	41,74	41,89	42,07	42,27	42,50	42,76	43,05	43,37	43,71	44,08	44,48
56	41,25	41,26	41,30	41,37	41,46	41,58	41,73	41,90	42,11	42,34	42,60	42,89	43,20	43,55	43,92	44,32
57	41,09	41,10	41,14	41,20	41,30	41,42	41,57	41,74	41,95	42,18	42,44	42,73	43,04	43,38	43,76	44,15
58	40,93	40,94	40,98	41,05	41,14	41,26	41,41	41,58	41,79	42,02	42,28	42,57	42,88	43,23	43,60	44,00
59	40,78	40,79	40,82	40,89	40,98	41,10	41,25	41,43	41,63	41,86	42,12	42,41	42,73	43,07	43,44	43,84
60	40,62	40,63	40,67	40,74	40,83	40,95	41,10	41,28	41,48	41,71	41,97	42,26	42,57	42,92	43,29	43,69
61	40,48	40,48	40,52	40,59	40,68	40,80	40,95	41,13	41,33	41,56	41,82	42,11	42,42	42,77	43,14	43,54
62	40,33	40,34	40,38	40,44	40,53	40,65	40,80	40,98	41,18	41,42	41,68	41,96	42,28	42,62	42,99	43,39
63	40,18	40,19	40,23	40,30	40,39	40,51	40,66	40,84	41,04	41,27	41,53	41,82	42,13	42,48	42,85	43,25
64	40,04	40,05	40,09	40,16	40,25	40,37	40,52	40,69	40,90	41,13	41,39	41,68	41,99	42,34	42,71	43,11
65	39,90	39,91	39,95	40,02	40,11	40,23	40,38	40,56	40,76	40,99	41,25	41,54	41,85	42,20	42,57	42,97
66	39,77	39,78	39,82	39,88	39,97	40,10	40,24	40,42	40,62	40,86	41,12	41,40	41,72	42,06	42,43	42,83
67	39,64	39,65	39,68	39,75	39,84	39,96	40,11	40,29	40,49	40,72	40,98	41,27	41,59	41,93	42,30	42,70
68	39,51	39,52	39,55	39,62	39,71	39,83	39,98	40,16	40,36	40,59	40,85	41,14	41,46	41,80	42,17	42,57
69	39,38	39,39	39,43	39,49	39,59	39,71	39,85	40,03	40,24	40,47	40,73	41,01	41,33	41,67	42,04	42,44
70	39,26	39,27	39,30	39,37	39,46	39,58	39,73	39,91	40,11	40,34	40,60	40,89	41,21	41,55	41,92	42,32
71	39,13	39,14	39,18	39,25	39,34	39,46	39,61	39,79	39,99	40,22	40,48	40,77	41,08	41,43	41,80	42,20
72	39,02	39,03	39,06	39,13	39,22	39,34	39,49	39,67	39,87	40,10	40,36	40,65	40,97	41,31	41,68	42,08
73	38,90	38,91	38,95	39,01	39,11	39,23	39,38	39,55	39,76	39,99	40,25	40,54	40,85	41,19	41,57	41,96
74	38,79	38,80	38,84	38,90	38,99	39,12	39,26	39,44	39,64	39,88	40,14	40,42	40,74	41,08	41,45	41,85
75	38,68	38,69	38,73	38,79	38,88	39,01	39,15	39,33	39,53	39,77	40,03	40,31	40,63	40,97	41,34	41,74
76	38,57	38,58	38,62	38,69	38,78	38,90	39,05	39,22	39,43	39,66	39,92	40,21	40,52	40,87	41,24	41,64
77	38,47	38,48	38,52	38,58	38,67	38,80	38,94	39,12	39,32	39,56	39,82	40,10	40,42	40,76	41,13	41,53
78	38,37	38,38	38,42	38,48	38,57	38,69	38,84	39,02	39,22	39,46	39,72	40,00	40,32	40,66	41,03	41,43
79	38,27	38,28	38,32	38,38	38,48	38,60	38,74	38,92	39,13	39,36	39,62	39,90	40,22	40,56	40,93	41,33
80	38,17	38,18	38,22	38,29	38,38	38,50	38,65	38,83	39,03	39,26	39,52	39,81	40,12	40,47	40,84	41,24
81	38,08	38,09	38,13	38,19	38,29	38,41	38,56	38,73	38,94	39,17	39,43	39,72	40,03	40,38	40,75	41,15
82	37,99	38,00	38,04	38,11	38,20	38,32	38,47	38,64	38,85	39,08	39,34	39,63	39,94	40,29	40,66	41,06
83	37,91	37,92	37,95	38,02	38,11	38,23	38,38	38,56	38,76	38,99	39,25	39,54	39,86	40,20	40,57	40,97
84	37,82	37,83	37,87	37,94	38,03	38,15	38,30	38,47	38,68	38,91	39,17	39,46	39,77	40,12	40,49	40,89
85	37,74	37,75	37,79	37,85	37,95	38,07	38,22	38,39	38,60	38,83	39,09	39,38	39,69	40,04	40,41	40,81
86	37,66	37,67	37,71	37,78	37,87	37,99	38,14	38,32	38,52	38,75	39,01	39,30	39,61	39,96	40,33	40,73
87	37,59	37,60	37,64	37,70	37,79	37,92	38,06	38,24	38,44	38,68	38,94	39,22	39,54	39,88	40,25	40,65
88	37,52	37,53	37,56	37,63	37,72	37,84	37,99	38,17	38,37	38,60	38,86	39,15	39,47	39,81	40,18	40,58
89	37,45	37,46	37,50	37,56	37,65	37,77	37,92	38,10	38,30	38,54	38,80	39,08	39,40	39,74	40,11	40,51

Tabelle 43 Bestimmung des Reibungskoeffizienten λ ^{57,58}

		10^5	10^6	10^7	10^8	Bemerkungen
λ	1) $= \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}}}$	$2 \cdot 10^6$			$\text{Re} \frac{k}{d} < 65$	glattes Rohr
	2) $= 0,0054 + \frac{0,396}{\text{Re}^{0,3}}$					
	3) $= 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}}$					
	4) $= (1,8 \cdot \lg \text{Re} - 1,5)^{-2}$					
$= \frac{64}{\text{Re}}$	2) $= 0,109 \left(\frac{d}{k} \right)^{0,25}$				$70 < \text{Re} \frac{k}{d} < 200$	Über- gangs- bereich
	2) $= \left(2 \lg \frac{d}{k} + \frac{120n}{n \cdot k} + 1,018 \right)^{-2}$				$200 < \text{Re} \frac{k}{d} < 1000$	bereich
	3) $= \left(2 \lg \frac{d}{k} + 1,138 \right)^{-2}$				$\text{Re} \frac{k}{d} > 1300$	rauhes Rohr
	4) $= 0,0055 + 0,15 \left(\frac{k}{d} \right)^{0,333}$					

2320

Re →

- 1) nach BLASIUS 2) nach BOCKHARDT / SCHULZ / POETSCHUKAT
 3) nach NIKURADSE 4) nach MOODY

⁵⁷ Bockhardt, Güntzschel, Poetschukat, Grundlagen der Verfahrenstechnik für Ingenieure, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1981

⁵⁸ Senge, 2. Lehrbrief Technische Strömungsmechanik, Zentralstelle für das Hochschulfernstudium Dresden 1992

Viskositäts- und Oberflächenspannungsverhalten von reinen und technischen Saccharoselösungen

- Thesen -

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Torsten Schmidt
aus Wismar

Vom Fachbereich 15 - Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie -
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

- Dr.-Ing -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuß:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dietrich Knorr

Berichter: Prof. Dr. Bernhard Senge

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Werner Mauch

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 08. Mai 2000

Berlin 2000

D 83

- These 1 Zur Sicherung der Prozeßabläufe im Zuckerfabrikationsprozeß ist die Kenntnis der im Microengineeringbereich ablaufenden Vorgänge des Impuls-, Energie- und Stofftransports notwendig.
- These 2 Fließeigenschaften von technischen Saccharoselösungen haben für die Modellierung von Wärmeübertragungsprozessen in der Zuckerindustrie eine entscheidende Bedeutung. So benötigt man zur Dimensionierung von Verdampfapparaten als wichtigste Stoffgröße das Viskositätsverhalten unter Prozeßbedingungen.
- These 3 In einer modernen sechsstufigen Verdampfanlage durchströmt Dünnsaft mit einem Trockensubstanzgehalt von etwa 17 g/100 g zunächst die als Vorverdampfer geschalteten Stufen 5 und 6A mit etwa 100 °C und anschließend die Stufen 1 bis 6B bei Temperaturen von 130 bis 95 °C. Die Saccharoselösung wird dabei auf einen Trockensubstanzgehalt von 75 g/100 g eingengt.
- These 4 Die schergeschwindigkeitsgesteuerte Untersuchung von reiner und technischer Saccharoselösung unter originären Prozeßbedingungen wurde durch die Verwendung eines neuen Meßsystems "Druckmeßzelle" seit 1995 ermöglicht.
- These 5 Beim Meßsystem "Druckmeßzelle" handelt es sich um ein Doppelspaltzylindermeßsystem, das in einer druckdicht verschlossenen Meßzelle durch eine SELTENERDE-Magnetkupplung mit 50 mNm übertragbarem Drehmoment angetrieben wird. Adaptiert im Rheometersystem MC 120 können Viskositätsdaten im Bereich von 0,002 bis 10 Pas bei Temperaturen bis zu 150 °C und einem Druck bis zu 64 bar bestimmt werden.
- These 6 Für Untersuchungen zur Ermittlung des Deformationssystems und zur Durchführung von Oszillationsversuchen wurde das Meßsystem UDS 200 verwendet. Aufgrund des luftgelagerten Meßantriebes können bei niedrigviskosen Flüssigkeiten bei gleichzeitiger Wahl niedrigster Schergeschwindigkeiten noch signifikante Meßwerte erzielt werden.
- These 7 Zur Bestimmung der dynamischen Viskosität wurden innerhalb einer Minute 15 Meßpunkte bei linearer Erhöhung der Schergeschwindigkeit von 200 auf 500 s⁻¹ bei Temperaturen unter 80 °C und mit Schergeschwindigkeiten von 500 bis 1000 s⁻¹ bei Temperaturen über 80 °C aufgenommen. Die Untersuchung zum nicht-NEWTONSchen Fließverhalten der Saccharoselösung erfolgte nach einminütigen Vorscherens mit einer Schergeschwindigkeit von 300 s⁻¹ und einminütiger Ruhepause bei logarithmischer Erhöhung der Schergeschwindigkeit von 5 auf 300 s⁻¹ und anschließender logarithmischer Verringerung auf 5 s⁻¹ nach einer einminütigen Haltephase der Schergeschwindigkeit bei 300 s⁻¹. Während der logarithmischen Erhöhung bzw. Verringerung erfolgte die Aufnahme von jeweils 30 Meßpunkten.
- These 8 Die Auswertung der gemessenen Fließkurven erfolgte nach dem Schubspannungsansatz von NEWTON und OSTWALD-DE WAELE. Aus der in der Zuckerindustrie anerkannten PIDOUX-Gleichung wird eine zugeschnittene Zahlenwertgleichung abgeleitet, die die Temperaturabhängigkeit der mit dem NEWTONSchen Schubspannungsansatz ausgewerteten Daten mit einem Korrelationskoeffizienten von 1,000 widerspiegelt. Im Gegensatz zur PIDOUX-Gleichung ist in dieser neuen Gleichung der dekadische Logarithmus durch den Logarithmus naturalis ersetzt, die

Temperatur wird in °C eingesetzt und der Exponent ist nicht mehr quadratisch festgelegt. Durch polynomische Regression wird zusätzlich die Abhängigkeit der dynamischen Viskosität vom Trockensubstanzgehalt und der Reinheit wiedergegeben.

- These 9 Die gemessenen Viskositätsdaten reiner Saccharoselösungen liegen höher als die mit den bisherigen Berechnungsgleichungen extrapolierten Werte im Bereich von 80 bis 130 °C.
- These 10 Auch die gemessenen Viskositätswerte von Dicksaft liegen höher als die in den Temperaturbereich über 80 °C extrapolierten Werte der bisherigen Berechnungsgleichungen.
- These 11 Das Viskositätsverhalten von Dicksaft variiert bei gleichem Trockensubstanzgehalt in Abhängigkeit vom Rübenanbauort, der Betriebsweise der Saftgewinnung und Saftreinigung und den dadurch vorhandenen Werten für Reinheit, pH-Wert und Kalksalzgehalt.
- These 12 Im Durchschnitt liegt die Viskosität von Dicksaft bezogen auf das Viskositätsverhalten reiner Saccharoselösung im Temperaturbereich von 5 bis 100 °C unter und im Bereich von 100 bis 130 °C über der Viskosität reiner Saccharoselösung. Im Einzelfall kann die Viskosität von Dicksaft bei Temperaturen unter 80 °C um bis zu 20 % geringer sein und bei 130 °C um bis zu 20 % größer.
- These 13 Dicksäfte aus Rohr besitzen im Temperaturbereich zwischen 80 und 100 °C eine um etwa 10 bis 15 % höhere Viskosität als Dicksäfte aus Rübe mit gleichem Trockensubstanzgehalt. Bei höheren Temperaturen kommt es bei stärkerer pH-Wertverringerng zum verstärkten Viskositätsabfall. Die Ursache dafür wird im höheren Invertzuckergehalt der Dicksäfte aus Rohr gesehen.
- These 14 Aus den Meßwerten aller untersuchten Melassen aus Rübe wurde eine empirische Näherungsgleichung für den Temperaturbereich von 5 bis 130 °C und dem Trockensubstanzgehaltsbereich von 70 bis 85 g/100 g berechnet. Standortbedingt zeigen Melassen bei gleichem Trockensubstanzgehalt größere Viskositätsunterschiede als Dicksäfte. Bezogen auf den regressierten Mittelwert sind hier bei Temperaturvorgabe Abweichungen von bis zu +30 und -40 % möglich.
- These 15 Melassen aus Rohr zeigen eine um 100 bis 150 % höhere dynamische Viskosität gegenüber Melassen aus Rübe. Der wesentlich höhere Gehalt an Invertzuckern ist als Ursache dafür zu betrachten.
- These 16 Aus den Viskositätsdaten von rückverdünnter Melasse aus Rübe wurde eine Regressionsgleichung für einen Temperaturbereich von 30 bis 110 °C, einem Trockensubstanzgehaltsbereich von 70 bis 80 g/100 g und einem Reinheitsbereich von 60 bis 80 % bestimmt. Vergleiche mit Rohzucker- und Nachprodukt-einzugsgut und Abläufen der Fabriken Zeitz und Baddeckenstedt zeigen gute Übereinstimmungen mit den berechneten Regressionswerten.
- These 17 Bei allen Saccharoselösungen konnten geringe Abweichungen vom idealviskosen Fließverhalten (NEWTONschen Fließverhalten) festgestellt werden. In der Praxis sind diese Abweichungen vom idealviskosen Deformationsverhalten nicht prozeßerschwerend und können damit vernachlässigt werden.

- These 18 Reine Saccharoselösung zeigt unterhalb von 40 °C kaum Abweichungen vom NEWTONSchen Fließverhalten. Darüber zeigen sich Abweichungen vom NEWTONSchen Fließverhalten, die am deutlichsten bei einem Trockensubstanz-gehalt von 70 g/100 g zu beobachten sind.
- These 19 Dicksaft zeigt die geringsten Abweichungen vom NEWTONSchen Fließverhalten. Fließexponenten unterhalb 0,99 wurden nicht ermittelt.
- These 20 Bei Melasse nehmen die Abweichungen vom NEWTONSchen Fließverhalten mit steigendem Trockensubstanzgehalt zu. Im Temperaturbereich unterhalb von 40 °C geschieht dies gleichmäßig über den gesamten Trockensubstanzgehaltsbereich, bei Temperaturen darüber erst bei einem Trockensubstanzgehalt von 85 g/100 g.
- These 21 Die Aktivierungsenergie, die zum Überwinden der Potentialbarriere beim Platzwechsel der Moleküle notwendig ist, nimmt mit steigender Konzentration der Saccharoselösung zu. Der Reinheitsanstieg hat eine geringfügig, degressive Erhöhung der Fließaktivierung zur Folge. Die Fließaktivierungsenergie kann als zusätzlicher Parameter zur Beschreibung des Fließverhaltens genutzt werden.
- These 22 Das bekannte konzentrationsabhängige Oberflächenspannungsverhalten reiner Saccharoselösung wird durch die Untersuchungen bestätigt. Mit steigendem Trockensubstanzgehalt nimmt die Oberflächenspannung zu.
- These 23 Erstmals konnte ein zeitabhängiges Verhalten der Oberflächenspannung von Saccharoselösungen bestimmt werden. Bei reinen und technischen Saccharose-lösungen verringert sich die Oberflächenspannung bei Alterung.
- These 24 Die Verringerung der Oberflächenspannung bei Alterung erfolgt bei reiner Saccharoselösung aufgrund der Ausbildung einer Nahordnung in Form von Molekülausrichtungen und ist wesentlich geringer als bei technischen Saccharose-lösungen, deren Oberflächenspannungen aufgrund der Anreicherung von oberflächenaktiven Substanzen in der Oberfläche potentiell abnehmen.
- These 25 Zur Beschreibung des konzentrationsabhängigen Oberflächenspannungsverhaltens von reiner Saccharoselösung, Dicksaft und Melasse konnten polynomische Regressionsgleichungen 2. Ordnung bestimmt werden.
- These 26 Temperaturabhängig wird bei reiner Saccharoselösung eine progressive Abnahme der Oberflächenspannung bei Temperaturerhöhung beobachtet, während Dicksaft eine degressive Oberflächenspannungsverringering zeigt.
- These 27 Dicksaft zeigt konzentrationsabhängig ein Minimum der Oberflächenspannung bei mittleren Konzentrationen. Auch unveränderte Originalproben aus der Verdampfstation Baddeckenstedt bestätigen dieses Verhalten.
- These 28 Erstmals konnte ein reinheitsabhängiges Verhalten der Oberflächenspannung gemessen und dokumentiert werden. Aus den Oberflächenspannungswerten von rückverdünnten Melassen konnte eine Regressionsgleichung der Oberflächen-spannung für Saccharoselösung abgeleitet werden. Gültig ist diese Gleichung im Temperaturbereich von 20 bis 90 °C, im Trockensubstanzbereich von 60 bis 80 g/100 g und mit Einschränkungen im Reinheitsbereich von 60 bis 100 %.

- These 29 Oszillationsmessungen zur Viskosität wurden durchgeführt. Da die erhaltenen Ergebnisse sich an der Grenze der Auflösbarkeit bewegten, wurde auf die Darstellung verzichtet.
- These 30 Mit den ermittelten Stoffkennwerten für reine und technische Saccharose-lösungen wurden die Mindestflüssigkeitsbelastungen für Fallfilmverdampf-apparate berechnet und mit tatsächlichen Benetzungswerten aus der Praxis verglichen. Aufgrund der niedrigeren Oberflächenspannung von Dicksaft gegenüber reiner Saccharoselösung reicht eine geringere Dicksaftmenge zur Benetzung der Heizfläche aus.
- These 31 Um die minimalen Transportkosten für gelagerten Dicksaft und Melasse zu ermitteln, wurden Transportoptimierungen durchgeführt. Neben dem optimalen Rohrleitungsdurchmesser wurde die optimale Temperatur des zu fördernden Saftes mit einem interativen Berechnungsverfahren bestimmt.
- These 32 Für Dicksäfte werden bei Rohrleitungslängen über 30 m in Abhängigkeit vom Volumenstrom minimale Transportkosten mit einem Rohrdurchmesser von DN 100 und Safttemperaturen von 38 bis 44 °C erhalten. Bei kürzeren Rohrleitungslängen erhöht sich der Kostenanteil für die Anwärmung gegenüber den Elektroenergiekosten, so daß hier optimale Transporttemperaturen z. B. für eine Rohrleitungslänge von 10 m mit 12 bis 15 °C bei gleichzeitig größeren Rohrleitungsdurchmesser von DN 125 ermittelt wurden.
- These 33 Bei Melassen werden aufgrund höherer Viskosität optimale Transporttemperaturen von fast 100 °C bestimmt. Diese sind in der Praxis aus technologischer und arbeitstechnischer Sicht nicht zu realisieren, da in diesem Temperaturbereich bereits Abbaureaktionen wie z. B. die Maillard-Reaktion ablaufen können. Die Qualität der Melasse wird herabgesetzt und die starke Druckentwicklung gefährdet die Arbeitssicherheit. Für den Melassetransport ist daher ein möglichst kurzer Transportweg zu realisieren.