

**Materialwissenschaftliche Untersuchungen von
Rohstoff, Zwischenprodukten und Finalprodukt
im Rübenzuckerfabrikationsprozess**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Ahmad Haji Nezhad

aus dem Iran

von der Fakultät III - Prozesswissenschaften

der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. sc. techn. F. Thiemig

Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. B. Senge

Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. E. Manzke

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 09.10.08

Berlin 2008

D 83

Danksagung

Herrn Prof. Dr. B. Senge möchte ich für die Überlassung des Themas und in besonderer Weise für die überaus freundliche und hilfreiche Unterstützung sowie für die zahlreichen Ratschläge und fachlichen Diskussionen danken. Modernste Meßmethoden wurden zur Verfügung gestellt.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. E. Manzke für die aktive Unterstützung meiner fachlichen Entwicklung danken.

Herrn Prof. Dr. F. Thiemig sei für Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission gedankt.

Der BMA, insbesondere Herrn Direktor Dr. Mayer danke ich für die finanzielle Unterstützung. Außerdem bedanke ich mich bei der Firma Putsch insbesondere Herrn Direktor Dipl.-Ing. C.C. Radinger für die finanzielle und die organisatorische Unterstützung dieser Arbeit.

Herr Dipl.-Ing. R. Bromm danke ich für die Motivation und die zahlreichen Tipps.

Weiterhin danke ich allen Kollegen und Kolleginnen der Fakultät III – Prozesswissenschaften, insbesondere Herrn Dr. Blochwitz, Herrn Dipl.-Ing. Hildebrandt und Frau Dipl.-Ing. Monika Brückner für die technische Unterstützung und das angenehme erfrischende Arbeitsklima.

An dieser Stelle möchte ich meinen Eltern (Ali und Sultan) besonders danken. Vor allem wegen ihrer stetigen Unterstützung und Hilfe ist es mir gelungen, diese Arbeit fertig zu stellen.

Abstract

The need for fast and online methods for measurement and maintenance of quality of food has led to research for fast measurable, often physical, variables that reliably correlate with the quality. For instance, food rheology plays an important role in the quality control and process automation of food process engineering where material characteristics such as viscosity or thermo-capacity are required. More recently rheological methods have been employed in food process engineering to assess the different activities involved in the transformation of raw materials into food. The aim of this work was to evaluate the change in material characteristics as a result of physical processing in the sugar production.

we evaluated the mechanical characteristics of the beets with the use of Instron (type 4310), a material testing device. Initially, the measurement system RHEOSWING[®] RSD 1-1 was used inline-online for the continuous acquisition of material viscosity within the technical scale. This was done in factories A and B of the sugar industry and aimed to capture the appearance of viscosity increasing polysaccharides in the raw juice and to initiate technological measures for the safety of the operation mode.

The use of modern air mounting rheometers such as UDS 200 and MCR 301 allows the assessment of the viscosity of the original highly concentrated and diluted sample materials within the temperature and dry substance range that is technologically of interest.

The reasons for such measurements were the increased use of molasses and vinasses, and the demand from industry for the missing specific values which are essential for technology improvement. The analysis from the raw materials up to the final products demonstrated the following results. we observed a considerable association between the maximal breaking force, elasticity and work as measures of the physical characteristics and of the processing quality of the beets. we further detected a change in viscosity of altered beets when the raw extracts were examined. The non-Newtonian flow characteristic of the extract correlates positively with the concentration of the high molecular compartments such as pectin and dextran. These were identified as critical effects when a super-positioning method was employed. Material characteristic values for the viscosity of the beet molasses, which are often derived from the measurements in the sixties and nineties of the last century, indicated a concentration capacity of maximum 80% of the dry material content and describe the viscosity characteristic as solely dynamic viscosity dependent on the temperature and dry substance. We determined the dependency of the dry material and of the temperature from the viscosity characteristics. We further examined the rheological deformation system of this relationship. At temperatures below 50 °C and with a dry substance content of >83% there is a non-Newtonian characteristic. We demonstrate that experimentally detected dependencies of viscosity characteristics of molasses from dry material, temperature and flow index.

A hydraulic transport system is introduced as an example for optimization calculation for the design of the process technique.

The rheological characteristic of vinasse has hardly been examined so far. The rheological testing showed a dependency of the flow characteristics (Newton/non-Newton) from the previous process and not from the dry material.

The evaluation of the thermal-physical characteristic values was performed by density, specific heat capacity, heat conductivity coefficient, and boiling point increment.

The listed thermal-physical characteristic values were aimed to be used only as rough estimates for the measurements because of difficulties in their exact measurement.

We collected information about the flow characteristics of the sugar crystals.

Investigations of the measured downslip and slip angle for sugar crystal fractions were also a part of this work. Particle size distribution in the fine crystal sugar from sugar manufacturing processes was identified by sieve analysis. Fluid dynamic behaviour of Carbonatations mud, pure sucrose solution, and technical sucrose solution from beet and cane and crystal suspension were studied and used as literature results.

Abstract

Die Forderungen nach Schnellmethoden und on-line-Verfahren für die Bestimmung und die Einhaltung der Qualität von Lebensmitteln bedingt die Suche nach schnell messbaren in der Regel physikalischen Größen, welche zuverlässig mit der Qualität korrelieren. Zum Beispiel spielt in der Qualitätskontrolle und der Prozess-Automatisierung die Lebensmittel -Rheologie eine Rolle für die Lebensmittelverfahrenstechnik, wo Stoffdaten wie z. B. Viskositäten oder Wärmekapazitäten benötigt werden. Rheologische Methoden zur Aufklärung ablaufender Vorgänge während der Verarbeitung von Rohstoffen zu Lebensmitteln gehören zu den neueren Untersuchungsmethoden der Lebensmitteltechnik.

Die Rüben wurden auf ihre mechanischen Eigenschaften mit einer Materialprüfmaschine Modell 4301 untersucht.

Der erstmalige inline-online-Einsatz des Messsystems RHEOSWING® RSD 1-1 zur kontinuierlichen Erfassung der Rohsaftviskosität im technischen Maßstab wurde in der Zuckerindustrie in den Werken A und B mit dem Ziel durchgeführt, das Auftreten von viskositätserhöhenden Polysacchariden im Rohsaft unmittelbar zu erfassen und technologische Maßnahmen zur Sicherung der Fahrweise einzuleiten. Die Verwendung moderner Rheometer mit Luftlagertechnik UDS 200 und MCR 301 ermöglicht die Viskositätserfassung originären hochkonzentrierten und verdünnten Probenmaterials im technologisch interessierenden Temperatur- und Trockensubstanzbereich. Hintergrund der Messungen waren die verstärkte Anwendung von Melasse und Vinasse und Nachfragen aus der Industrie zu fehlenden aktuellen Kennwerten zur Technologieoptimierung. Ziel der Arbeit war es, die Stoffkennwerte infolge physikalischer Vorgänge in dem Zuckerfabrikationsprozess zu bestimmen. Bei der Untersuchung von den Rohstoffen bis zu den Finalprodukten wurden folgende Ergebnisse erhalten. Es konnte ein deutlicher Zusammenhang insbesondere zwischen der Bruchkraft, Elastizitätsmodul und elastischer Arbeit als charakteristische Kenngrößen für die physikalischen Eigenschaften und die Verarbeitungsqualität der Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit beobachten werden.

Bei der Untersuchung von Rohextrakt wurde eine Viskositätsänderung bei schlechten Rüben ermittelt. Die Viskosität des Extraktes nimmt mit zunehmender Konzentration an hochmolekularen Bestandteilen wie z. B. Pektin und Dextran zu. Als kritische Effekte werden Pektin- und Dextran als ein Superpositionsprinzip ermittelt.

Vorliegende Stoffkennwerte der Viskosität von Rübenmelasse datieren im Regelfall aus den sechziger und neunziger Jahren des vorigen Jahrhunderts und charakterisieren Melasse im Konzentrationsbereich bis 80 % Trockensubstanzgehalt und beschreiben das Viskositätsverhalten ausschließlich mit einer dynamischen Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur und der Trockenmasse. Trockensubstanz- und Temperaturabhängigkeit des Viskositätsverhaltens sowie das zugehörige rheologische Deformationssystem werden bestimmt. Bei einem Trockensubstanzgehalt > 83 % liegt nicht-Newtonsches Verhalten bei Temperaturen unterhalb 50 °C vor. Experimentell ermittelte Abhängigkeiten des Viskositätsverhaltens der Melasse von Trockensubstanz, Temperatur und Fließindex werden dargestellt. Eine Optimierungsrechnung zur Auslegung der Prozesstechnik am Beispiel des hydraulischen Transportsystems wird vorgestellt.

Das rheologische Verhalten von Vinasse als Nebenprodukt der Melassefermentation wurde bis jetzt kaum untersucht. Die rheologischen Untersuchungen ergaben eine Abhängigkeit des Fließverhaltens (Newton/nicht-Newton) vom vorherigen Prozess und nicht von der Trockensubstanz. Die Bestimmung der wärmephysikalischen Kennwerte erfolgte am Beispiel der Dichte, der spezifischen Wärmekapazität, des Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten und der Siedepunkterhöhung. Die aufgeführten wärmephysikalischen Kennwerte sollten aufgrund der Schwierigkeiten bei der Vermessung als orientierende Daten verwendet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen der Ausbildung des Böschung- und Rutschwinkels für Zuckerkrystallfraktionen durchgeführt. Durch Siebanalyse wurde die Partikelgrößenverteilung bei dem feinen Kristallzucker aus verschiedenen Zuckerfabrikationsprozessen ermittelt. Als Literaturergebnisse wurde fluiddynamisches Verhalten von Carbonatationsschlamm, reiner Saccharoselösung, technischer Saccharoselösung aus Rübe und Rohr und Kristallsuspension recherchiert.

Das Fließverhalten von Carbonatationsschlamm ist z. B. von Interesse für den Reinigungszyklus der Beutel- bzw. Kerzenfilter, da nur ein gut fließfähiges System eine ausreichende Regenerierung der Filterflächen gewährleistet. Auch haben Fließeigenschaften von technischen Saccharoselösungen für die Modellierung von Wärmeübertragungsprozessen in der Zuckerindustrie eine entscheidende Bedeutung.

Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung	4
3	Literaturübersicht	5
3.1	Zuckerfabrikationsprozess	5
3.1.1	Rübenlagerung	5
3.1.2	Extraktion (fest-flüssig-Extraktion).....	7
3.1.3	Saftreinigung.....	7
3.1.4	Verdampfstation.....	9
3.1.5	Kristallgewinnung	10
3.1.6	Lagerung und Abpackung	10
3.2	Rheologische Grundlagen	11
3.2.1	Deformationsverhalten von Festkörpern.....	11
3.2.2	Fließverhalten von Flüssigkeiten	12
3.2.3	Strukturviskoses Verhalten.....	13
3.3	Materialwissenschaftliche Kennwerte des Zuckerfabrikationsprozesses	15
3.3.1	Materialwissenschaftliche Charakterisierung von Festkörpern	16
3.3.2	Zwischenprodukte	20
4	Material und Methoden	36
4.1	Material	36
4.1.1	FrISChe und gelagerte Rüben	36
4.1.2	Technische Saccharoselösungen.....	38
4.2	Methoden	39
4.2.1	Parallelplattendeformation mit Materialprüfmaschine Instron 4301.....	39
4.2.2	Viskositätsbestimmung mit online-Messsystem Physica Rheoswing RSD 1-1 ..	40
4.2.3	Kapillarmessungen zur Bestimmung der Viskosität des Extraktes.....	40
4.2.4	Luftlagerrheometer UDS 200	41
4.2.5	Luftlagerrheometer MCR 301 – Melasse/Viskositätsmessung.....	42
5	Physiko-mechanische Eigenschaften von lagernden Zuckerrüben	43
5.1	Chemische, physiologische und meteorologische Veränderungen	43
5.2	Methodenentwicklung	44
5.2.1	Vorbereitung der Proben	45
5.2.2	Erfassung einer Masterkurve	46
5.3	Physiko-mechanische-Untersuchungen von Rüben Zuckerfabrik C	47
5.3.1	Bruchkraft und Verformungsarbeit.....	47

5.3.2	Ermittlung des Elastizitätsmoduls.....	52
5.4	Physiko-mechanische-Untersuchungen von Rüben Zuckerfabrik D (Marokko)	56
5.4.1	Bruchkraft und Verformungsarbeit.....	56
5.4.2	Ermittlung des Elastizitätsmoduls.....	61
5.5	Ergebnisse der Bruchkraft, elastischen und plastischen Arbeit zur Absicherung der Untersuchungen.....	65
5.6	Ergebnisse der Elastizitätsmodule zur Absicherung der Untersuchungen.....	69
5.7	Diskussion.....	71
5.8	Kapitelzusammenfassung.....	71
6	Inline–online Erfassung des fluiddynamischen Verhaltens von Rohsaft.....	73
6.1	Versuchsstandort Werk A.....	73
6.1.1	Einbindung in Werk A.....	73
6.1.2	Strömungstechnische Ergebnisse im Werk A.....	74
6.1.3	Detektion von Veränderungen der Extraktviskosität (Fahrweise).....	75
6.1.4	Schlussfolgerung für die Optimierung des Messsystems.....	76
6.2	Versuchsstandort Werk B.....	77
6.2.1	Ergebnisse in Werk B.....	77
6.2.2	Strömungstechnische Ergebnisse im Werk B.....	80
6.2.3	Detektion schlechten Rübenmaterials/geschädigter Rüben in Werk B	80
6.2.4	Sicherung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	81
6.2.5	Schlussfolgerung für die Optimierung des Messsystems.....	82
6.3	Temperaturkompensation.....	82
6.4	Aufbau der Viskositätsmatrix im Rohsaft.....	83
6.4.1	Einfluss von Temperatur und Trockensubstanz auf die Rohsaftviskosität	83
6.4.2	Einfluss von Pektin, Dextran und Lävan auf die Viskosität von Rohsaft.....	83
6.5	Grundlagen der Viskositätsmatrix des Rohsaftes.....	86
6.5.1	Superpositionsprinzip bei Hydrokolloidzugabe	86
6.6	Weiterentwicklung der Methode in der Kampagne 2005 /64/.....	90
6.6.1	Optimierung der Messeinrichtung.....	90
6.6.2	Dauerbetrieb des Messsystems /64/	91
7	Fluiddynamisches Verhalten von Carbonatationsschlamm, reiner Saccharoselösung, technischer Saccharoselösung aus Rübe und Rohr und Kristallsuspensionen	93
7.1	Fließverhalten von Carbonatationsschlamm /66/.....	93

7.2 Fließverhalten reiner Saccharoselösung /50/.....	96
7.2.1 Dynamische Viskosität reiner Saccharoselösung	96
7.2.2 Nicht-Newtonsches Verhalten reiner Saccharoselösung /50/	97
7.3 Fließverhalten technischer Saccharoselösung /50/.....	99
7.3.1 Einfluss von Temperatur und Trockensubstanzgehalt auf die dynamische Viskosität der technischen Saccharoselösung	99
7.3.2 Einfluss des pH-Wertes auf das Viskositätsverhalten im Dicksaft /49/.....	100
7.3.3 Einfluss des Kalksalzgehaltes auf das Viskositätsverhalten im Dicksaft /49/ ...	101
7.3.4 Vergleich der dynamischen Viskosität von Rohr- und Rübendicksaft /50/	102
7.3.5 Nicht-Newtonsches Verhalten von Dicksäften /49, 50/	103
7.4 Fließeigenschaften von Zuckerkrystalsuspensionen /71/.....	105
8 Rheologische Charakterisierung von Melasse und Vinasse	107
8.1 Fließeigenschaften von Rübenmelasse.....	107
8.1.1 Nicht-Newtonsches Verhalten von Melasse mit $w_{TS} > 83 \%$	107
8.1.2 Newtonsches Verhalten von Melassen mit $w_{TS} \leq 83 \%$	109
8.1.3 Abgrenzung des Ereignisfeldes der Messungen	111
8.1.4 Vergleich der Messergebnisse mit Literaturdaten.....	115
8.1.5 Einfluss der Temperatur auf die Melasseviskosität.....	116
8.1.6 Abhängigkeit des Fließindex n vom Trockensubstanzgehalt.....	118
8.1.7 Transportoptimierung für Melasse	119
8.2 Fließeigenschaften und wärmephysikalische Kennwerte von Rübenvinasse	120
8.2.1 Ermittlung der fluiddynamischen Kennwerte.....	120
8.2.2 Ergebnisse der wärmephysikalischen Vinasseuntersuchungen.....	126
9 Böschungs- und Rutschwinkelbestimmung von Kristallzucker	127
9.1 Kennwerte der Partikelgrößenverteilung eines Zuckerkrystalhaufwerkes.....	127
9.2 Kennwerte der Böschungs- und Rutschwinkel eines Zuckerkrystalhaufwerkes..	128
9.2.1 Böschungswinkel	128
9.2.2 Rutschwinkel.....	130
10 Schlussfolgerung für weitere Untersuchungen	132
11 Zusammenfassung.....	133
12 Literaturverzeichnis	136
13 Anhang.....	143

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 3.1. Blockschema der Zuckergewinnung aus Rüben /1/	5
Abb. 3.2. Scherverformung eines viskosen Körpers /24/	12
Abb. 3.3. Ursachen für strukturviskoses Verhalten von Molekülsystemen und Dispersionen /25/	13
Abb. 3.4. Fließ- und Viskositätskurven	15
Abb. 3.5. α -D-Glukopyranosido-(1,2)- β -D-fruktofuranosid /43/.....	20
Abb. 4.1. Materialprüfmaschine Instron Modell 4301	40
Abb. 4.2. Kapillarviskosimetrie zur Bestimmung der Viskosität des Extraktes.....	40
Abb. 4.3. Luftlagerrheometer MCR 301	42
Abb. 5.1. Meteorologische Daten der Mietenlagerung für Zuckerfabrik C /110/	44
Abb. 5.2. Messschnitt Probengewinnung.....	45
Abb. 5.3. Exemplarisches Beispiel eines Originalmessverlaufes der Kraft-Weg-Messung....	47
Abb. 5.4 Kraft-Weg-Messungen einer frischen Rübe in zwei Ebenen (Zuckerfabrik C).....	48
Abb. 5.5. Kraft-Weg-Messungen Einzelrübe nach 10 Tagen Mietenlagerung	49
Abb. 5.6. Kraft–Weg-Messungen einer Rübe nach 20 Tagen Mietenlagerung.....	50
Abb. 5.7. Kraft-Weg-Messungen einer Rübe nach 30 Tagen Mietenlagerung	51
Abb. 5.8. Kraft-Weg-Kurve einer aufgetauten Rübe.....	52
Abb. 5.9. Exemplarische Darstellung des Außenbereichs einer Rübe nach 20 Tagen Mietenlagerung	53
Abb. 5.10. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer frischen Rübe.....	53
Abb. 5.11. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Rübe nach 10 Tagen Lagerung.....	54
Abb. 5.12. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Rübe nach 20 Tagen Lagerung.....	54
Abb. 5.13. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Rübe nach 30 Tagen Lagerung.....	55
Abb. 5.14. Spannungs-Dehnungs-Diagramme einer aufgetauten Rübe	55
Abb. 5.15. Kraft-Weg-Messungen einer frischen Rübe in zwei Ebenen (Zuckerfabrik D).....	56
Abb. 5.16. Kraft-Weg-Messungen einer Rübe 12 Tage nach der Ernte	57
Abb. 5.17. Kraft–Weg-Messungen einer Rübe 19 Tage nach der Ernte	58
Abb. 5.18. Kraft-Weg-Messungen einer Rübe 26 Tage nach der Ernte	59
Abb. 5.19. Kraft-Weg-Kurve einer aufgetauten Rübe (gefroren bei -6 °C)	60
Abb. 5.20. Kraft-Weg-Kurve einer aufgetauten Rübe (gefroren bei -11 °C)	60
Abb. 5.21. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer frischen Rübe.....	62
Abb. 5.22. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Rübe 12 Tage nach der Ernte.....	62
Abb. 5.23. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Rübe 19 Tage nach der Ernte.....	63

Abb. 5.24. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Rübe 26 Tage nach der Ernte.....	63
Abb. 5.25. Spannungs-Dehnungs-Diagramme einer aufgetauten Rübe (-6 °C).....	64
Abb. 5.26. Spannungs-Dehnungs-Diagramme einer aufgetauten Rübe (-11 °C).....	64
Abb. 5.27. Mittelwert der Bruchkraft aller vermessenen Rüben bei Ebene 1 und 2 in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik C und D).....	66
Abb. 5.28. Bruchkraft aller vermessenen Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit.....	66
Abb. 5.29. Bruchkraft aller vermessenen Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit.....	67
Abb. 5.30. Mittelwerte der Elastizitätsmodule aller gemessenen Rüben in kPa in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik C).....	70
Abb. 5.31. Mittelwerte der Elastizitätsmodule aller gemessenen Rüben in kPa in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik D).....	70
Abb. 6.1. Einbindung der Anlage in Werk A.....	73
Abb. 6.2. Kontinuierliche Erfassung der Extraktviskosität.....	74
Abb. 6.3. Extraktviskositätsänderung im Produktionsprozess.....	75
Abb. 6.4. Einbindung der Anlage in Werk B.....	76
Abb. 6.5. Einfluss von Pülpe und Sand auf die Extraktviskosität.....	77
Abb. 6.6. Rohsaftviskosität innerhalb einer Stunde (12 bis 13 Uhr), $\Delta p = 0,8$ bar Takt 95 s...	79
Abb. 6.7. Rohsaftviskosität innerhalb einer Stunde (10 bis 11 Uhr), 06./07.11.03, $\Delta p = 0,8$ bar, Takt 27 s.....	79
Abb. 6.8. Temperaturinduzierte Viskositätsänderung.....	82
Abb. 6.9. Darstellung der Versuchsergebnisse.....	86
Abb. 6.10. Superpositionsprinzip Dextran und Pektin im Rohextrakt bei 20 °C.....	88
Abb. 6.11. Vereinfachtes Schema der Versuchsanlage Kampagne 2005.....	90
Abb. 6.12. Behälter zur Grobentpülung und Grobentsandung des Rohsaftes.....	91
Abb. 6.13. inline-online-Viskositätsmessung des Rohsaftes vom 15. bis 22.11.04.....	92
Abb. 7.1. Dynamische Viskosität reiner Saccharoselösung in Abhängigkeit von Trockensubstanzgehalt und Temperatur.....	96
Abb. 7.2. Fließkurve reiner Saccharoselösung.....	97
Abb. 7.3. Messkurven der eingesetzten Glucosesirupe /115/.....	98
Abb. 7.4. Dynamische Viskosität von Dicksaft in Abhängigkeit von Trockensubstanzgehalt und Temperatur.....	99
Abb. 7.5. Dynamische Viskosität von Dicksäften mit unterschiedlichem pH-Wert.....	100
Abb. 7.6. Prozentuale Änderung der dynamischen Viskosität von Dicksäften.....	100
Abb. 7.7. Prozentuale Änderung der dynamischen Viskosität von Dicksäften.....	101
Abb. 7.8. Prozentualer Vergleich von Rohr- und Rübendicksaft.....	102

Abb. 7.9. Fließkurve Dicksaft.....	104
Abb. 8.1. Fließkurve von Melasse mit $w_{TS} = 85,45\%$	107
Abb. 8.2. Effektive Viskosität der Melasse mit 85,45 % TS.....	109
Abb. 8.3. Fließkurve von Melasse mit $w_{TS} = 79\%$	110
Abb. 8.4. Dynamische Viskosität einer Melasse mit Newtonschem Verhalten	111
Abb. 8.5. Fließkurven der Melasse im Bereich $84 \leq w_{TS} \leq 85\%$ bei 20 °C.....	112
Abb. 8.6. Fließkurven der Melasse im Bereich $85 \leq w_{TS} \leq 86\%$ bei 20 und 25 °C.....	113
Abb. 8.7. Fließkurven der Melasse im Bereich $84 \leq w_{TS} \leq 85\%$ bei 40 °C.....	113
Abb. 8.8. Fließkurven der Melasse im Bereich $85 \leq w_{TS} \leq 86\%$ bei 40 °C.....	114
Abb. 8.9. Fließkurven der Melasse im Bereich $84 \leq w_{TS} \leq 85\%$ bei 60 °C.....	114
Abb. 8.10. Fließkurven der Melasse im Bereich $85 \leq w_{TS} \leq 86\%$ bei 60 °C.....	115
Abb. 8.11. Effektive Viskosität in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt und Temperatur	117
Abb. 8.12. Effektive Viskosität der Melasse mit 85,45 % TS und 50 s^{-1}	117
Abb. 8.13. Fließkurven Vinasse 2 $w_{TS} = 65,5\%$	120
Abb. 8.14. Fließkurven Vinasse 3 $w_{TS} = 70\%$	122
Abb. 8.15. Fließkurven Vinasse 1 $w_{TS} = 50,1\%$	122
Abb. 8.16. Abhängigkeit der Viskosität der Vinasse von der Temperatur, $w_{TS} = 50,1\%$	124
Abb. 8.17. Effektive Viskosität der Vinasse mit 65,5 % Trockensubstanzgehalt	125
Abb. 8.18. Effektive Viskosität der Vinasse mit 70 % Trockensubstanzgehalt	125
Abb. 9.1. Verteilungssummenfunktion von feinem Kristallzucker verschiedener Hersteller .	128
Abb. 9.2. Böschungswinkelbestimmung mit Messkammer	129
Abb. 9.3. Böschungswinkelbestimmung bei Kristallzucker (fein) verschiedener Zuckerhersteller.....	129
Abb. 9.4. Rutschwinkel Kristallzuckerfraktionen (fein) Oberfläche Edelstahl und Förderbandgummi	130

Tabellenverzeichnis:

Tab. 3.1. Ausgewählte Prozessparameter einer 6stufigen Verdampferanlage.....	10
Tab. 3.2. Rheologische Standardmodelle /26/	14
Tab. 3.3. Physikalische Kennwerte für die Aufbereitung und Lagerung von Zuckerrüben /36/.	17
Tab. 3.4. Klassifikation der Rüben nach dem Schneidwiderstand /29/.....	18
Tab. 3.5. Klassifikation der Rüben nach ihrer Elastizität/Turgorzustand	19
Tab. 3.6. Stoffkennwerte Zuckerkristalle /43/.....	20
Tab. 3.7. Stoffkennwerte Rohsaft /43/	24
Tab. 3.8. Stoffkennwerte Calciumcarbonatationsschlamm /66/.....	25
Tab. 3.9. Stoffkennwerte für Dicksaft /43/.....	27
Tab. 3.10. Parameter der Verdampfungskristallisation bei der Weißzuckerherstellung.....	28
Tab. 3.11. Zusammensetzung von Melasse /11/	30
Tab. 3.12. Zusammensetzung von Vinasse in % /83, 84/	34
Tab. 4.1. Chemische Zusammensetzung von frischen Zuckerrüben (Auswahl).....	37
Tab. 4.2. Laborergebnisse von frischen Rüben (Werk C) n = 10	37
Tab. 4.3. Analysedaten von Rohsaft der Werke A und B /108, 109/	38
Tab. 4.4. Analysedaten der untersuchten Dicksäfte.....	38
Tab. 4.5. Analysedaten der Melasseproben in %.....	39
Tab. 4.6. Analysedaten der Vinasseproben.....	39
Tab. 4.7. Torsionsschwinger RHEOSWING® RSD 1-1	40
Tab. 4.8. Messabschnitte	41
Tab. 4.9. Messabschnitte	42
Tab. 5.1. Berechneter Masseverlust während der Lagerung nach Schmidt /36/	43
Tab. 5.2. Meteorologische Daten der Lagerung des Anbauggebietes der Zuckerfabrik C.....	43
Tab. 5.3. Parameter der Parallelplattendeformationsversuche	46
Tab. 5.4. Physiko-mechanische Eigenschaften von einer frischen Rübe ($\vartheta = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$)....	48
Tab. 5.5. Physiko-mechanische Eigenschaften Einzelrübe 10 Tage Lagerung.....	49
Tab. 5.6. Physiko-mechanische Eigenschaften einer Rübe nach 20 Tagen Lagerung.....	50
Tab. 5.7. Physiko-mechanische Eigenschaften einer Rübe nach 30 Tagen Lagerung.....	51
Tab. 5.8. Physiko-mechanische Eigenschaften einer aufgetauten Rübe	52
Tab. 5.9. Elastizitätsmodule in kPa der Messungen aus Abb.5.10. bis 5.14.	55
Tab. 5.10. Physiko-mechanische Eigenschaften von einer frischen Rübe ($\vartheta = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$)..	56
Tab. 5.11. Physiko-mechanische Eigenschaften einer Rübe 12 Tage nach der Ernte	57

Tab. 5.12. Physiko-mechanische Eigenschaften einer Rübe 19 Tage nach der Ernte	58
Tab. 5.13. Physiko-mechanische Eigenschaften einer Einzelrübe 26 Tage nach der Ernte..	59
Tab. 5.14. Physiko-mechanische Eigenschaften einer aufgetauten Rübe (-11 °C)	61
Tab. 5.15. Physiko-mechanische Eigenschaften einer aufgetauten Rübe (-6 °C)	61
Tab. 5.16. Elastizitätsmodule in kPa der Messungen aus Abb.5.21. bis 5.26.	64
Tab. 5.17. Mittelwerte der Bruchkraft in N aller gemessenen Rüben in Abhängigkeit zur Lagerzeit in Tagen (Zuckerfabrik C)	65
Tab. 5.18. Mittelwerte der Bruchkraft in N aller gemessenen Rüben in Abhängigkeit zur Lagerzeit in Tagen (Zuckerfabrik D)	65
Tab. 5.19. Elastische und plastische Arbeit bei den Probenahmestellen aller vermessenen Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik C und D).....	68
Tab. 5.20. Mittelwerte der Elastizitätsmodule in kPa aller vermessenen Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik C)	69
Tab. 5.21. Mittelwerte der Elastizitätsmodule in kPa aller vermessenen Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik D)	69
Tab. 6.1. Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten längs des Sensors	75
Tab. 6.2. Verdichtete Untersuchungsergebnisse 06./07.11.2003.....	78
Tab. 6.3. Übereinstimmung rheologischer Daten des Rohsaftes mit Druckänderungen der Filterstation.....	81
Tab. 6.4. Reproduzierbarkeit der Messanstellungen.....	81
Tab. 6.5. Mittelwerte der Rohsaftviskositäten	83
Tab. 6.6. Versuchsergebnisse	84
Tab. 6.7. Rohsaftviskosität bei Dextranzugabe.....	84
Tab. 6.8. Rohsaftviskosität bei Lävanzugabe	85
Tab. 6.9. Einfluss von Pektin- und Dextranerhöhung (Superpositionsprinzip) bei 20 °C	87
Tab. 6.10. Einfluss von Pektin und Dextran und Lösung im Wasser bei 20 °C	88
Tab. 7.1. Verdichtetes Messprotokoll, Carbonatationsschlamm 50, 55, 60 % TS	94
Tab. 7.2. Verschiedene Kristallmodifikationen bei dem Schlammsaftkonzentrat.....	95
Tab. 7.3. Fließverhalten reiner Saccharoselösung.....	97
Tab. 7.4. Fließverhalten Dicksaft aus Rüben.....	104
Tab. 8.1. Ermittlung des rheologischen Deformationssystems für Probe Nr. 15	108
Tab. 8.2. Ermittlung des rheologischen Deformationssystems für Probe Nr. 1	110
Tab. 8.3. Vergleich der Literaturdaten nach /43/ mit ermittelten Viskositätsdaten bei 40 °C	116
Tab. 8.4. Ermittlung der Aktivierungsenergie von Melasse $w_{TS} = 85,45\%$ (Nr. 15).....	118
Tab. 8.5. Fließindex in Abhängigkeit von der Versuchsklasse und Trockenmassengehalt..	118

Tab. 8.6. Ermittlung des rheologischen Deformationssystems für Probe Nr. 2	121
Tab. 8.7. Ermittlung des rheologischen Deformationssystems für Proben Nr. 1 und 3.....	123
Tab. 8.8. Ermittlung der trockensubstanzabhängigen Fließaktivierungsenergie	125
Tab. 8.9. Wärmephysikalische Stoffkennwerte von Vinassen bei 20 °C	126
Tab. 9.1. Kristallgrößenverteilung aus verschiedenen Zuckerfabrikationsprozessen	127
Tab. 9.2. Fraktionsgröße	128
Tab. 9.3. Die Rutschwinkel und Böschungswinkel des gesamten Spektrums alle Proben	130

Formelzeichen	Parameter	Einheit
A	Fläche	m ²
A	Schneidwiderstand Tab. 3.4.	m·p/m ²
a	Koeffizienten in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt	-
A ₁	Koeffizient in der FRENKEL-EYRING-Gleichung	Pa·s
B	Exponent in der FRENKEL-EYRING-Gleichung	K
b	Koeffizienten in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt	-
B _k	Baukosten	€/m ²
c	Konzentration	mg/l
c _w	Widerstandsbeiwert	-
c _p	spezifische Wärmekapazität	kJ/kg·K
d	Durchmesser	m
d _i	Inneren Durchmesser	m
d _{opt}	optimierter Rohrlitungsdurchmesser	m
E	Elastizitätsmodul	Pa
E _A	Fließaktivierungsenergie	kJ/kmol
EE	Elektroenergiekosten	€/kWh
F _{IE(420)} , F _{IE(560)}	Farbe	IE
F _K -Wert	Filtrationskoeffizienten der Calciumcarbonatsuspension	s/m ²
f	Biegung	m
F	Impulskraft	N
F _{Br}	Bruchkraft	N
F _t	Kraft	N
\bar{F}	Mittelwert der Bruchkraft	N
h	Höhe	m
j	Zinsen jährliche	%/a
J	Flächenträgheitsmoment	m ⁴
K	Konsistenzfaktor	kg/ms ²⁻ⁿ
k	Wärmeübertragungskoeffizient	W/m ² ·K
K _B	Betriebskosten	€/m·a
K _G	Gesamtkosten	€/m·a
k ₁	Korrektur der Kapillar-Viskosimeter	s
K ₁	Gerätekonstante	m ² /s ²
l	Länge	m
l _B	Entfernung (Ende der Einfassung und der Stütze)	m
M	Molekulargewicht	kg/kmol

m	Masse	kg
n	Fließindex	-
[n]	Drehzahl	1/s
p	Druck	Pa
p _B	Brühdendruck	bar
P _D	Dampfdruck	bar
p _{FD1}	Filterdruck	bar
Δp _F	Filterdifferenzdruck	bar
P/l	spezifische Leistung	W/m
q	Reinheit	%
q	Biegekraft in Gl. 5.3	p
r	Korrelationskoeffizient	-
Re	Reynolds-Zahl	-
R _{Gas}	Allgemeine Gaskonstante	kJ/kmol·K
R _i	Radius des Innenzylinders	m
R ²	Bestimmtheitsmaß	-
s	Standardabweichung	-
t	Zeit	s
T	absolute Temperatur	K
t _{Lag}	Lagerungszeit	d
TN	Nutzungsdauer	h/a
TS	Trockensubstanz	%
v	Geschwindigkeit	m/s
V	Spezifisches Volumen	m ³ /kg
Ṡ	Volumenstrom	m ³ /s
V _F	Filtratanfall je m ² Filterfläche	m ³ /m ²
W _{el}	elastische Arbeit	N·m
W _{pl}	plastische Arbeit	N·m
w _{TS}	Gehalt, Masseanteil	%
w _{TS1}	Trockensubstanzgehalt Originalprobe	%
w _{TS2}	Verdünnungskonzentration nach Dest-Wasserzugabe	%
\bar{x}	Mittelwert	-
$\bar{x}_{\text{Ges.-B}}$	Mittelwert der gesamten Bruchkraft	N
$\bar{x}_{\text{Ges.-E}}$	Mittelwert des gesamten Elastizitätsmoduls	Pa
$\bar{x}_{\text{Ges.-el}}$	Mittelwert der gesamten elastischen Arbeit	N·m
$\bar{x}_{\text{Ges.-pl}}$	Mittelwert der gesamten plastischen Arbeit	N·m

$\bar{X}_{\text{Ges.-R}}$	Mittelwert der gesamten Relation Arbeit (el/pl)	-
\bar{X}_{RFM}	Feuchtigkeitsmittelwerte	%
\bar{X}_{TM}	Temperaturmittelwert	°C
X_k	Festkosten	€/m·a
y	Übersättigungskoeffizient	-
α	Wärmeübertragungskoeffizient	W/m ² ·K
β	spezifischer Widerstand des Filtermittels	1/m
°S	Zuckergehalt	%
Δt_s	Siedepunktserhöhung	K
ΔT	Temperaturdifferenz	K
Δw_s	Saccharoseverlust	kg/t
Δw_{ZLa}	Zuckerverlust	g/dt·d
ρ	Dichte	kg/m ³
ρ_{Sch}	Schüttdichte	kg/m ³
η_{eff}	effektive Viskosität	Pa·s
η_{CA}	Casson Viskosität	Pa·s
η_{Proz}	Prozessviskosität	Pa·s
η_{dyn}	dynamische Viskosität	Pa·s
η_{pl}	plastische Viskosität	Pa·s
η_{kap}	Viskosität der Kapillarviskosimeter	Pa·s
η_{rel}	relative Viskosität	Pa·s
η_{Sup}	Suspensionsviskosität	Pa·s
η_{MI}	Viskosität der Mutterlösung	Pa·s
τ	Schubspannung	Pa
τ_0	Fließgrenze	Pa
ϑ	Temperatur	°C
ϑ_B	Brüdenraumtemperatur	°C
ϑ_D	Heizdampftemperatur	°C
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
λ	Wärmeleitkoeffizient	W/m·K
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit	s ⁻¹
ϕ	Korngrößenbereich	m
φ	Volumenanteil der Kristalle	m ³ /m ³
φ_{max}	maximale Packungsdichte der Kristalle in der Suspension	m ³ /m ³

μ	Pumpenwirkungsgrad	-
ε	Dehnung	m^3/m^3
σ	Oberflächenspannung	mN/m
δ	Wandgleitschichtdicke in Gl. 7.8	μm

Indices und Abkürzungen:

Alk	Alkalität
A	außen
a.R.	auf Rüben (bezogen auf Rüben)
AR	Aufgetaute Rüben
D	Dextran
D1	Dextranzugabe 1 g/l, 2 g/l, 3g/l, 4 g/l, 6 g/l
DüS3	Dünnsaft ³ oder gereinigter Extrakt
el	elastisch
F	Farbe
fR	frische Rüben
G	Gummi
Ges. Härte	Gesamte Härte
Ges. Spe.	Gesamt Spektrum
HK	Hauptkalkung
HPCV	High Protein Containing Vinasse
IE	ICUMSA-Einheit
i	innen
K	Koeffizient
Kap	Kapilar
Kr	Kristall
P & L	Pfeifer & Langen
pl	plastisch
P	Pektin
P1	Pektinzugabe 1 g/l, 2g/l, 3 g/l
k. A.	keine Angabe
LPCV	Low Protein Containing Vinasse
Lösl. Gesamt-N	Gesamte gelöste Stickstoffverbindungen
MA	mittlere Maschenweite
ML	Mutterlösung
Mel	Melasse
MPCV	Middle Protein Containing Vinasse
N	Stickstoffverbindungen
Nord	Nordzucker
n. b.	nicht bestimmt
R	Rübe
rel	relativ
Red.	Reduzierende

RFM	Mittel der relativen Feuchte
S	Stahl
spez	spezifisch
Süd	Südzucker
TG	Minimum der Temperatur in 5 cm über dem Erdboden
TN	Minimum der Temperatur in 2 m über dem Erdboden
TM	Mittel der Temperatur in 2 m über dem Erdboden
Zafes	Zentralabteilung für Forschung und Entwicklung Südzucker AG
1-a	Außenbereich der Ebene 1
1-i	Innenbereich der Ebene 1
2-a	Außenbereich der Ebene 2
2-i	Innenbereich der Ebene 2

1 Einleitung

Vorliegende fluiddynamische Stoffkennwerte aus dem Zuckerfabrikationsprozess datieren im Regelfall aus den sechziger und neunziger Jahren des vorigen Jahrhunderts und beschreiben das Viskositätsverhalten ausschließlich als dynamische Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur und der Trockenmasse. Kennwerte der heute im Technologieablauf üblichen höheren Trockenmassen bzw. materialwissenschaftliche Kennwerte z. B. des Rohsaftes lagen nicht vor. Viskositätsdaten wurden mittels Kapillarviskosimetrie ermittelt, was den Einsatz filtrierter Säfte erforderte, gleichzeitig aber auch eine Verfälschung realen Materialverhaltens durch Entnahme hochmolekularer oder partikulierter Bestandteile darstellt. Zuletzt erfolgte die Ermittlung notwendiger Kennwerte für den Verdampfungsprozess durch Extrapolation, da in konventionellen rheologischen Messungen mit offener Messzelle der Messfehler durch Verdunstungseffekte entscheidend das Ergebnis beeinflusste. Schergeschwindigkeitsabhängige Ergebnisse von nicht-Newtonschen Systemen fehlen vollständig.

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.

Da die eingehenden fluiddynamischen Stoffkennwerte Viskosität, Dichte, Oberflächenspannung mit entscheidend für die Auslegung der gesamten Prozesstechnik sind, kommt ihrer exakten Kenntnis eine besondere Bedeutung zu. In allen Transportprozessen (Impuls, Energie und Stoff) stellt die Viskosität aufgrund ihres Einflusses auf die Grenzschichtprozesse (Mikroengineering) die den Prozess limitierende Größe dar. Die Arbeitsweise der Prozesstechnik wie hydraulischer Transport, Extraktion und Extraktreinigungsverfahren, die komplexe Wärmeübertragungstechnik einer Zuckerfabrik insbesondere bei hochviskosen Produkten, Mischprozesse und Löseprozesse, mechanische Trennverfahren, Kristallisation bis hin zur Produktabfüllung wird dadurch entscheidend beeinflusst. Aus materialwissenschaftlicher/fluidodynamischer Sicht liegen am Beispiel bei der Rübenzuckerherstellung Festkörper als Rohstoff bzw. Finalprodukt vor. Einerseits liegen strukturviskose nicht-Newtonsche Flüssigkeiten wie Rohsaft, Säfte in der Saftreinigung und Aufkonzentrierung vor, die visuell als Flüssigkeiten erkennbar sind. Andererseits sind strukturviskose nicht-Newtonsche Medien mit plastischer Fließcharakteristik, die im Ruhezustand eine Festkörpercharakteristik aufweisen, da eine Fließgrenze vorhanden ist, wie Zuckerkristallsuspensionen und Carbonatationsschlamm, vorliegend. Eine komplexe Beschreibung der auftretenden Fließanomalien im gesamten Zuckerfabrikationsprozess ist aus der Literatur nicht bekannt.

In jedem Prozessabschnitt liegt demnach ein spezifischer Strukturierungszustand und damit eine örtlich und zeitlich bewirkte Prozess- oder effektive Viskosität vor, die sich wiederum

aus der durch Messung ermittelten rheologischen Zustandsgleichung (Deformationssystem) berechnen lässt. Mit Ausnahme von hochkonzentriertem Filterschlamm und Magma liegen Stoffsysteme auf niedrig viskosem Level vor, die indirekt die Prozessführung durch Einstellung niedriger Prozessviskositäten vereinfachen. Deshalb ist das fluiddynamische Verhalten im Zuckerfabrikationsprozess bisher mit Ausnahme der 4. Kammer in Kühlungskristallisatoren nicht als problematisch bewertet worden.

Anhand einiger Beispiele aus der Lebensmitteltechnologie wird gezeigt, wie die prozessbegleitende Erfassung rheologischer und materialwissenschaftlicher Eigenschaften vom Rohstoff bis zum Endprodukt die Grundlage für eine Prozessoptimierung sein kann. Im Zuckerfabrikationsprozess häufig angewendete Prozesse wie Extraktion (Diffusion), besonders der Prozess der Extraktreinigung, Kristallgewinnung durch Zentrifugierung, sowie Transportvorgänge aller Art werden grundlegend von den rheologischen Eigenschaften des Mediums bestimmt. Aus diesem Grund haben rheologische Untersuchungen in der Lebensmitteltechnologie und Erforschung der physikalisch-chemischen Eigenschaften in den letzten Jahren eine starke Entwicklung genommen. Während der Industriezweig zur Charakterisierung der Rohstoffe, der Prozesse und letztlich der Endprodukte und deren stoffliche und strukturelle Wandlung in der Vergangenheit mehr oder weniger nur die empirische und beschreibende Rheometrie bevorzugte, werden heute zunehmend in der Wissenschaft und auch vermehrt in der Praxis, fundamentale Methoden benutzt. Beispielsweise ist die Erfassung und Beschreibung der Rohsaftgewinnung und des Saftreinigungsprozesses in der Zuckerfabrikation ein neues wissenschaftliches Untersuchungsfeld, um ein besseres Verständnis der ablaufenden Reaktionen bei den Prozessschritten zu ermöglichen und die Qualität des eingehenden Rohsaftes zu bewerten. In der Zuckerfabrikation sind die rheologischen Messverfahren mit einmalig detektierender Wirkung in der Lage, Aufgaben der Prozesskontrolle, der Qualitätskontrolle und der Strukturerkennung vor allem im Vorderbetrieb zu lösen.

Neben klassischen rheologischen Untersuchungen beschreiben andere mögliche Untersuchungsansätze auch eine Materialbeschreibung mittels dielektrischer Kennwerte. Für vorliegende intermittierende Strukturbereiche erscheint die Nutzung konventioneller rheologischer Methoden und Kennwerte dagegen z. B. bei der Kristallgewinnung sinnvoller.

Rheologische Untersuchungen dienen der Prozesskontrolle und der Sicherung der Fahrweise der Anlagentechnik im gesamten Bereich der Saftreinigung.

Besitzt ein nativer Rohsaft bzw. ein schlecht gereinigter Rohsaft aufgrund des Vorkommens an hochmolekularen Bestandteilen/Komponenten eine Abweichung vom Newtonschen Fließverhalten, kann der Saftreinigungseffekt schnell durch eine rheologische Messung am Beispiel des Fließindex ermittelt werden.

Moderne entwickelte inline-online-Messverfahren können die Rohsaftqualität erkennen und eine optimierte technologische Arbeitsweise der Saftreinigung (Verfahren über Leitstandanwendung) realisieren.

2 Aufgabenstellung

Die Zuckerrübenverarbeitung beginnt mit der Lieferung und der Aufbereitungstechnologie des Rohstoffes zum Schnitzel. Gerade Rohstoffprobleme werden verursacht durch die Witterungseinflüsse (Frost bzw. zu warme Witterung) und damit Veränderungen der chemischen und physikalischen Eigenschaften der zweijährigen Beta Vulgaris. Durch die Messung der physiko-mechanischen Eigenschaften der Rüben könnten deren Veränderungen im Vorderbetrieb z. B. bei der Lagerung, Transport und Schneidmaschine erkannt werden. Diese Untersuchungen können als Maßstab für Schnitzelqualität betrachtet werden.

In der Literatur findet man nur wenige Angaben über das fluiddynamische Verhalten und materialwissenschaftliche Angaben von Rohstoff, Zwischenprodukten und Final- sowie Nebenprodukten des gesamten Zuckerfabrikationsprozesses. Aus diesem Grunde soll in der vorliegenden Arbeit eine umfassende materialwissenschaftliche Charakterisierung des gesamten Technologieablaufes erfolgen. Die meisten Forschungsarbeiten liegen bis jetzt über das fluiddynamische Verhalten von hochkonzentrierten Lösungen in der Verdampfstation vor.

Ziel dieser Arbeit ist es, vorzugsweise die fluiddynamischen Kennwerte der Zwischenprodukte wie Rohextrakt, im Extraktreinigungsprozess, Zuckerhausprodukte und die Schüttguteigenschaften des Kristallzuckers und dessen Fraktionen zu bestimmen. Dabei sollen die materialwissenschaftlichen rheologischen Untersuchungen zur Erfassung der chemischen und physikalischen Vorgänge in den Prozessschritten verwendet werden.

Hierzu werden Rohstoff, sowie ausgewählte Zwischen- und Byprodukte sowie Kristallzucker aus dem Zuckerfabrikationsprozess nach folgenden Gesichtspunkten untersucht:

1. Bestimmung der physiko-mechanischen Eigenschaften des Rohstoffs in Abhängigkeit von den Inhaltsstoffen, Lagerdauer und Lagerklima zur Optimierung und zur Bewertung des Festkörperverhaltens der Rüben,
2. Ermittlung des rheologischen Verhaltens von nativen Extraktionssäften im Vorderbetrieb,
3. Aufbau der Viskositätsmatrix bei Verarbeitung alterierten Rüben,
4. Zusammenstellung des rheologischen Verhaltens von technischen und reinen Saccharoselösungen in Abhängigkeit von der Temperatur (30 bis 130 °C), Trockensubstanzgehalt, chemischer Zusammensetzung, pH-Wert, Kalksalzgehalt, sowie Unterschiede zwischen Rüben- und Rohrzucker, Deformationssystem Carbonatationsschlamm als Literaturrecherche,
5. Rheologische Charakterisierung von Melasse und Vinasse in Abhängigkeit von Trockensubstanz und chemischer Zusammensetzung,

Ermittlung des Fließverhaltens von kristallinem Zucker und dessen Fraktionen sowie zugehöriger Böschung- und Rutschwinkel.

3 Literaturübersicht

3.1 Zuckerfabrikationsprozess

Die Gewinnung des Zuckers aus dem Zellsaft der Zuckerrüben erfolgt durch eine Kombination verschiedener thermischer und mechanischer Verfahren zur Gewinnung des Reservestoffes Saccharose der Pflanze Zuckerrübe nach ca. 180 - 210 Vegetationstagen. Eine vereinfachte schematische Darstellung erfolgt in Abbildung 3.1. Die Prozessschritte im konventionellen Technologieablauf werden kurz erläutert.

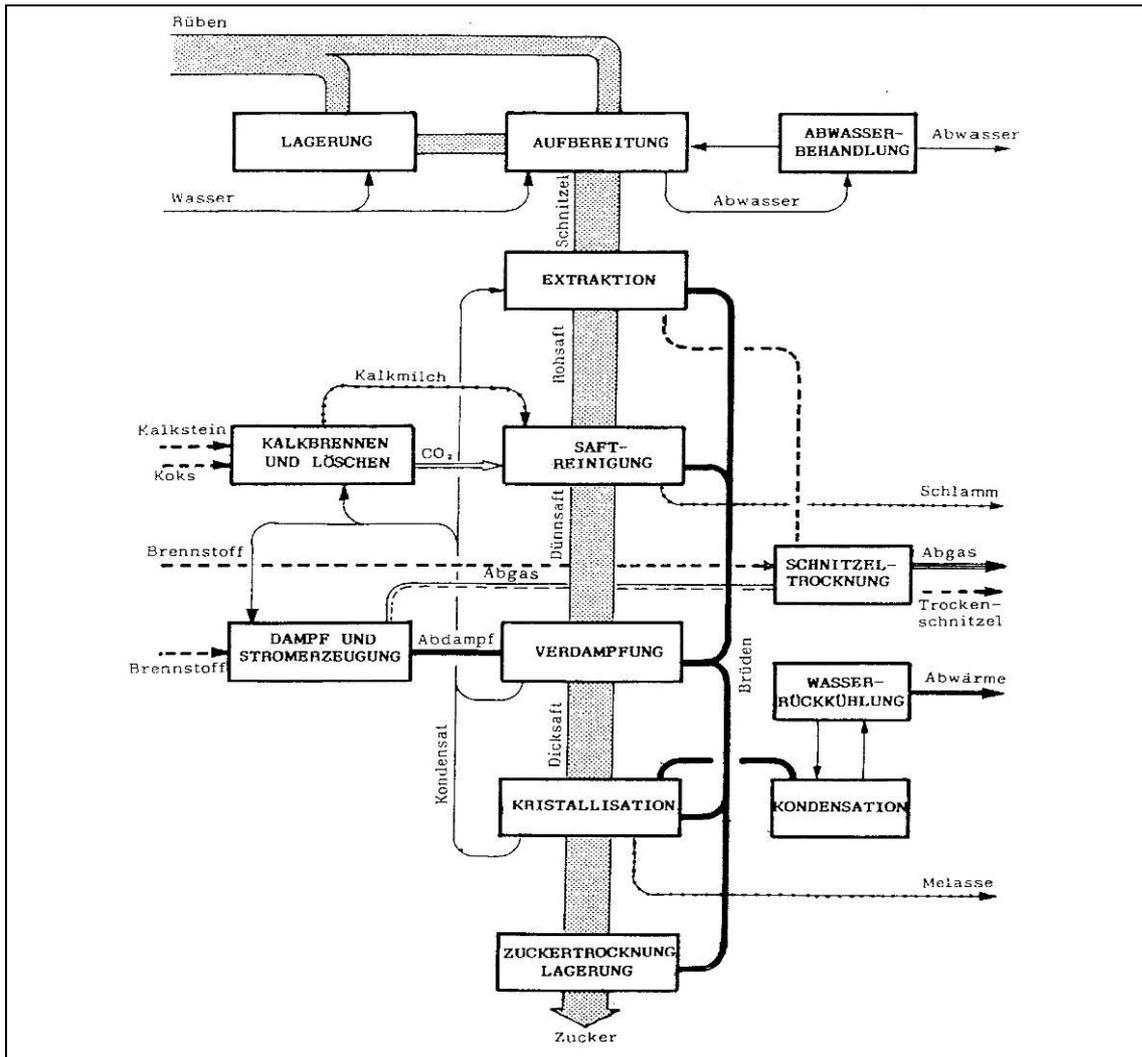


Abb. 3.1. Blockschema der Zuckergewinnung aus Rüben /1/

3.1.1 Rübenlagerung

Da die Zuckerrübenwurzeln auch nach der Ernte biologisch aktiv sind, müssen solche Lagerungsbedingungen realisiert werden, die die technologische Qualität der Zuckerrüben auf ein unumgängliches Maß zur Sicherung der Lebensprozesse der Pflanzen sichern. Die Rüben werden in zwei Lagerungsvarianten gelagert:

1. in kleinen Mieten am Feldrand unbelüftet
2. im Silo der Zuckerfabrik.

Eine Belüftung erfolgt teilweise insbesondere für Rüben mit Langzeitlagerung. Die Rüben sollten optimal bei $0 \leq \vartheta \leq 5$ °C gehalten werden. Die Temperatur der Kühlluft sollte -4 °C nicht unterschreiten. Bei tieferer Temperatur treten irreversible Schäden der Zuckerrüben auf /2/.

Bei der Rübenlagerung treten in den Rüben folgende Veränderungen ein:

1. Der Massenverlust hängt von Lagerart, Rübenqualität und den Witterungsverhältnissen ab und setzt sich aus Saccharoseverlust und Welkverlust zusammen. Umfangreiche Untersuchungen zu diesem Sachverhalt wurden durch /3, 4/ dargestellt.
2. Zuckerverlust durch Veratmung. Erste Stufe ist die Invertierung der Saccharose, dann folgt der enzymatische Abbau. Die Atmungsintensität steigt exponentiell mit der Temperatur. Bei Fehlen von Luftsauerstoff kann alkoholische Gärung eintreten.
3. Reichliche Niederschläge, die Ernte und Abfuhr der Rüben erschweren und zu einem erhöhten Erdanhang führen und eine mögliche Erhöhung des Wassergehaltes der anhaftenden Erde und das Welken bewirken, ergeben für die Zuckerfabriken Verarbeitungsschwierigkeiten durch einen erhöhten Erdanhang./4/
4. Stoff- und Strukturveränderungen bei häufigem Wechsel von Einfrieren und Auftauen durch ungünstige Lagerhaltung erhöhen die Anfälligkeit für den Verderb durch den Stoffwechsel von Pilzen und Bakterien.

Gemeinsames Merkmal der verfaulenden Rüben ist, dass die Zellsaftreinheit abnimmt und der Gehalt an reduzierenden Substanzen steigt. Welche Abbauprodukte genau entstehen, kann nicht generalisiert werden. Dies hängt vom jeweiligen Befall ab. Besonders problematisch ist das Entstehen von Dextran. Es wurden bei den vollkommen durchgefaulten Rüben hohe Gehalte gefunden. Eine Zusammenstellung der witterungsbedingten Beeinträchtigungen für den Zeitraum 1979 bis 2003 zeigt, dass es in 40 % der Kampagnen durch die Witterung zu Erschwernissen und Störungen in unterschiedlicher Größenordnung kam./4/

Bedingungen für eine verlustarme Lagerung sind:

1. saubere Rüben, vor allem weitgehendes Entfernen des Besatzes vor der Einlagerung;
2. optimale Lagerbedingungen: Temperatur 0 bis 5 °C , relative Luftfeuchtigkeit 90 bis 96 %;
3. Zwangsbelüftung der Stapel (wenn diese 3 m Höhe und 15 m Breite überschreiten). Belüftungsintensität bei ungewaschenen Rüben $20 \text{ m}^3/(\text{t}\cdot\text{h})$ und bei gewaschenen mindestens $40 \text{ m}^3/(\text{t}\cdot\text{h})$, Verluste in unbelüfteten Lagern (200 – 600 g Z/t·R·d) sind höher als in belüfteten Lagern (54 – 131 g Z/t·R·d) /1,3/.

Die Belüftung der Rüben bringt ökonomische Effekte einerseits durch Senkung der Zuckerverluste, andererseits erhöht sich der Aufwand durch den Verbrauch an Elektroenergie. Der

Elektroenergieverbrauch ist neben dem für die angestrebte Temperatursenkung zugeführten Luftvolumenstrom von der Ausführung des Belüftungskanals hinsichtlich seiner Querschnittsfläche und den Widerstandsbeiwerten abhängig. Die Widerstandsbeiwerte werden vor allem durch die Verhältnisse beim Ansaugen der Luft, durch die konstruktive Ausführung des Übergangs vom Lüfter zum Belüftungskanal, der Luftaustrittsöffnungen sowie durch die Geometrie des Belüftungskanals bestimmt. /6,7,8/

4. Schutz vor dem Welken: Durch Einsatz von Kalkmilch wird die Oberfläche der Rüben desinfiziert und Mikroorganismenaktivität gehemmt. Weiter bewirkt die Abdeckung eine Reflexion einfallender Wärmestrahlung. /1/

3.1.2 Extraktion (fest-flüssig-Extraktion)

Bei der Gewinnung des Extraktes aus den Zuckerrüben stehen physikalische Vorgänge nach vorhergehender Denaturierung der Zellmembran im Vordergrund. Die löslichen Bestandteile der Rübenschnitzel werden extrahiert. Die extrahierten Schnitzel bleiben zurück und werden nach Abpressung zu Tierfutter verarbeitet. Das Ziel der Extraktion muss es sein, einen Rohsaft zu gewinnen, der möglichst wenig Nichtsaccharosestoffe enthält, eine hohe Konzentration an Saccharose aufweist und wirtschaftlich weiterverarbeitet werden kann. Bedingungen sind: Extraktionstemperatur 70 – 73 °C, bei alterierten Rüben 65 °C, Extraktionsgrad: 99 %, Abzug: 103 – 125 %. /3/

3.1.3 Saftreinigung

Vorkalkung

Das Verfahren der Saftreinigung beginnt mit einer Vorkalkung, in der der Rohsaft durch eine CaO-Zugabe von 0,2 bis 0,3 % a. R. langsam alkalisiert wird, um die Ausflockung der Kolloide und die Fällung der unlöslichen Kalksalze vollständig zu erreichen. Dadurch wird ein schlammartiger vorgekalkter Rohsaft hergestellt, der sich je nach Temperatur und Zeitdauer der Kalkeinwirkung mehr oder weniger schnell absetzt und bei dem die überstehende Lösung klar wird /9/. Dieser Vorgang wurde als Vorkalkung bezeichnet, weil er der eigentlichen Hauptkalkung vorgeschaltet ist. Die Vorkalkung erfolgt bis zum pH 10,8 - 11,2, dem so genannten optimalen Flockungspunkt, dass der Saft nach dem Absetzen klar und durchscheinend wird. Reinefeld und Hoffmann /10/ ermitteln, dass durch die Vorkalkungsbehandlung ca. 90 % des Pektins aus dem Saft entfernt werden.

Hauptkalkung

Die Ziele sind alkalische Zerstörung des Invertzuckers und alkalische Verseifung der Amide. Die Trübe enthält Nichtsaccharosestoffe, ist chemisch unbeständig und wird bei alkalischer Lösung, besonders mit höheren Temperaturen zu organischen Säuren und Farbstoffen abgebaut. Unter Prozessbedingungen sollen die Verbindungen in der Hauptkalkung möglichst vollständig abgebaut werden. Bei unvollständigem Abbau von Invertzucker und Amiden tre-

ten bei weiterer Verarbeitung bei der Verdampfung und Kristallisation pH-Abfall und Farbstoffbildung ein. Die chemischen Reaktionen der Hauptkalkung werden begünstigt durch einen pH-Wert von ca. 12 und einer Temperatur von ca. 80 °C. /3/

1. Carbonatation

Allein die Dehydratation und die Ausflockung der Kolloidstoffe während der Vorkalkung reichen nicht aus, um eine spätere reibungslose Trennung der ausgeflockten Kolloidstoffe mittels statischer Filtration zu gewährleisten. Es muss ein Kolloidträger mit guter Adsorptionsfähigkeit für die negativ geladenen Kolloidstoffe eingebracht werden. Bei der Durchführung der klassischen Saftreinigung wird dieses durch die Erzeugung der CaCO_3 -Kristalle während der 1. Carbonatation realisiert. Die durch Calciumionen positiv geladenen CaCO_3 -Kristalle sind adsorptionsfähig. Darüber hinaus können die CaCO_3 -Kristalle als Filterhilfsmittel betrachtet werden. Optimale pH-Werte sind 11,2 bis 10,8 und 85 °C /11,12/. Die Carbonatation hat folgende Aufgabe /1, 13, 14, 15, 16/:

1. Erzeugung eines gut filtrierbaren Niederschlages mit einem hohen Adsorptionsvermögen für verschiedene Nichtsaccharosestoffe,
2. Erzeugung eines kalksalzarmen gereinigten Rohsaftes mit einem akzeptablen Farbindex von $F_{\text{Düs } 3}$ (1700-1800 IE_{420})
3. Einhaltung der optimalen Alkalität in der 2. Carbonatation für eine problemfreie Eindickung des gereinigten Rohsaftes.

1. Schlammabtrennung

Die Abtrennung der im Verlauf der Saftreinigung gebildeten Niederschläge nach der 1. Carbonatation erfolgt durch Filtration oder durch Sedimentation in Verbindung mit einer kontinuierlichen Filtration. Zur Abtrennung des Feststoffgehaltes der Calciumcarbonatsuspension der 1. Carbonatation durch Filtration werden zur Feststoffanreicherung oftmals vor der endgültigen Abtrennung Eindickfilter oder Dekanteure verwendet.

Als Dekanteurvolumen werden ca. 100 - 110 % des Schlammsaftvolumens benötigt. Von dem insgesamt anfallenden Schlammkonzentrat werden etwa 45 Vol-% zur Vorkalkung zurückgeführt und etwa 55 Vol-% auf Zellen- oder zellenlosen Trommelfiltern (Drehzellentrommelfilter) filtriert. Hierbei werden je nach Schlammgehalt des Schlammkonzentrates für 1000 t Rübenverarbeitung/d 20 - 30 m^2 Filterfläche benötigt. Der Carbonatationsschlamm wird bis auf einen Zuckergehalt von 0,8 - 1,0 % gewaschen. Je nach Kalkzugabe zur Saftreinigung fallen 8 - 10 % Schlamm a. R. mit 50 % Trockensubstanzgehalt an. /11/

Der aktuelle technische Stand sind moderne automatische Filtersysteme nach dem Prinzip der Rahmenfilterpresse.

2. Carbonatation

Bei der 2. Carbonatation führt man in den filtrierten Saft der 1. Carbonatation weiteres Kohlendioxid hinzu, um das noch verfügbare Calciumhydroxid in Carbonat zu überführen. In einer Umsetzung wird außerdem das an organische Säuren oder komplex gebundene Calcium teilweise als Carbonat ausgefällt. Es gelingt nicht, wenn die natürliche Alkalität sehr gering ist, einen genügend kleinen Restkalkgehalt im Dünnsaft zu erhalten. Durch Zugabe von Natriumcarbonat zum Dünnsaft oder durch eine Ionenaustauscherbehandlung des Dünnsaftes kann eine Enthärtung erzielt werden. Die Temperatur bei der 2. Carbonatation sollte 92 - 95 °C betragen, als Endpunkt der 2. Carbonatation wird ein pH-Wert zwischen 8,5 - 9 eingehalten. /3/

2. Schlammabtrennung

Da bei der Schlammsaft2-Filtration die anfallende Schlammmenge nur 2 - 5 % derjenigen bei der Schlammsaft1-Filtration ausmacht, filtriert man den Schlammsaft meist direkt über stoffbespannte Filter. Nur in Ausnahmefällen wird durch Dekanteure in Klarsaft und Schlammkonzentrat vorgetrennt. Der anfallende Schlamm wird in den Filtern nicht abgesüßt, sondern entweder zur Vorkalkung zurückgenommen oder zum Schlammkonzentrat gegeben und mit diesem zusammen über die Filteranlage abfiltriert und abgesüßt.

3.1.4 Verdampfstation

Der Dünnsaft hat eine Trockensubstanz von 14 bis 18 % und eine Reinheit von 90-92 %. Da Saccharose in Wasser sehr gut löslich ist, muss man vor der Kristallisation einen großen Teil des Wassers verdampfen. Es ist sinnvoll, den Trockensubstanzgehalt des Saftes auf 75 % zu erhöhen /2/, bevor man im nachfolgenden Schritt mit der Kristallisation der Saccharose beginnt. Die Verdampfung erfolgt in Verdampfapparaten differenzierter Bauarten in 5 bis 6 Stufen bzw. mit Einsatz von Vorverdampfern. Es ist möglich, den Wärmebedarf durch eine Hintereinanderschaltung mehrerer Verdampfer wesentlich zu verringern. Bei der mehrstufigen Arbeitsweise wird der Brüden der ersten Verdampferstufe zur Beheizung der zweiten Stufe verwendet usw.

Zur Dimensionierung von Wärmeübertragern und Verdampfern nutzt man vorhandene Viskositätsdaten, die im Temperaturbereich von 0 – 80 °C durch Kapillarviskosimetrie gewonnen wurden. Durch Einsatz einer Druckmesszelle in Verbindung mit einem Rheometer werden die Messungen unter Originalprozessbedingungen ermöglicht und korreliert.

Tab. 3.1. Ausgewählte Prozessparameter einer 6stufigen Verdampferanlage

Parameter	nach	Stufe. 1	Stufe. 2	Stufe. 3	Stufe. 4	Stufe. 5	Stufe. 6
ϑ_D in °C	/17/	131	125,5	120	114	105	99,5
ϑ_D in °C	/18/	128,5	123,9	117,1	107,9	103,4	100,3
ϑ_B in °C	/17/	126	120,5	114,5	105,5	100	88
ϑ_B in °C	/18/	123,9	117,1	107,9	103,4	100,3	89,9
P_D in bar	/17/	2,78	2,35	1,99	1,64	1,21	1,00
P_D in bar	/18/	2,58	2,24	1,80	1,33	1,14	1,02
P_B in bar	/17/	2,39	2,02	1,66	1,23	1,01	0,65
P_B in bar	/18/	2,24	1,80	1,33	1,14	1,02	0,69

3.1.5 Kristallgewinnung

Im Zuckerhaus werden die Saccharosekristallisation und die Kristallabtrennung durchgeführt. Das Ziel der Zuckerkristallisation ist die Gewinnung reiner Saccharose durch Vakuum- und Kühlungskristallisation und die Konzentrierung der im Dicksaft vorhandenen Nichtzuckerstoffe in Melassen, deren Reinheiten in Rübenzuckerfabriken unter 60 % liegen sollen. Der Erschöpfungsgrad von Melasse wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst wie z. B. der Muttersirupviskosität. Eine hohe Viskosität behindert das Kristallwachstum und begrenzt das freie Fließen des Magmas und eine ordnungsgemäße Zentrifugenarbeit. Bekannt sind mehrere theoretische und empirische Gleichungen zur Berechnung der Viskosität reiner und unreiner Saccharoselösungen /19/. Eine niedrige Viskosität bewirkt eine Verringerung der Saccharosezerstörung, eine verringerte Farbbildung und eine höhere Kristallisationsgeschwindigkeit. Durch eine Druckabsenkung auf absolut 0,2 bar wird der Siedepunkt auf ca. 70 °C gesenkt. /20/

3.1.6 Lagerung und Abpackung

Saccharosekristalle haben direkt nach dem Zentrifugieren einen Wassergehalt von < 1,0 % /2/. Für ein gutes Lagerungsverhalten von Weißzucker ist es wichtig, dass die Zuckerkristalle vor Silotransport getrocknet, gekühlt und fraktioniert werden. In feuchter Form ist Zucker nicht lagerfähig. Das Trocknen und Kühlen des Weißzuckers kann in einer Anlage oder kombiniert erfolgen. Der größte Teil des Zuckers gelangt in loser oder flüssiger Form mit Silofahrzeugen an die weiterverarbeitende Industrie. Die Lagerfähigkeit des Kristallzuckers ist bei folgenden Randbedingungen gegeben, Wassergehalt: 0,04 bis 0,05 %, Temperatur < 30 °C. /2/

3.2 Rheologische Grundlagen

Die Lebensmittelrheologie befasst sich mit den speziellen physikalischen Eigenschaften der Lebensmittel wie Festigkeit, Viskosität, Elastizität und Plastizität, die auf dem Deformationsverhalten beruhen und in der Regel durch die Abweichung vom idealelastischen/ idealviskosen Verhalten gekennzeichnet sind.

Die Ermittlung dieser Eigenschaften, die sich u. a. aus dem strukturellen Aufbau ableiten, ist sowohl für die Bewertung der Qualität als auch für das Verhalten in Grundoperationen der Lebensmittelverfahrenstechnik von großer Bedeutung, da sich Fließ-, Transport-, Lager- und Verarbeitungsverhalten ableiten lassen.

Arbeitsgebiete der Rheologie sind die Makro-, Mikro- und Texturrheologie.

Die Makrorheologie untersucht die Zusammenhänge $\tau = f(\dot{\gamma}, \gamma)$ des Einwirkens äußerer anisotroper Kräfte. Diese Phänomene, die die Relationen Spannungen, Deformationen und Zeit umfassen, werden durch rheologische Zustandsgleichungen, die charakteristische Stoffwerte enthalten und durch mechanische Analogiemodelle beschrieben.

Die makrorheologischen Gesetze sind zur Berechnung von strömungstechnischen oder Formgebungsprozessen geeignet und deshalb von grundlegender Bedeutung. „Mit Hilfe der Makrorheologie können nicht die Ursachen des Deformationsverhaltens und damit auch nicht die Möglichkeiten zu deren Beeinflussung erkannt werden.“ /21/

Ursache von Strukturierungen sind Bindungsarten chemischer und physikalischer Natur.

3.2.1 Deformationsverhalten von Festkörpern

Die Eigenschaften eines Festkörpers prüft man, indem dieser deformiert wird. Als Grundformen kommen einfache Dehnung und einfache Spannung vor. Ist die Dehnung der Spannung proportional, so gilt das Hookesche Gesetz für ein ideal elastisches Material (Gleichung 3.1).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{F}{A} = E \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad \text{in Pa oder N/m}^2 \quad (3.1)$$

Wegen der erheblichen Größe der Deformation, die bei der Belastung von Festkörpern auftreten kann, sind nach Peleg /22/ Parameterkorrekturen vorzunehmen. Die üblicherweise verwendete Größe der Dehnung

$$\varepsilon = \frac{l_0 - l}{l_0} \quad (3.2)$$

für die wahre Dehnung gilt

$$\varepsilon_w = -\int_{l_0}^l \frac{dl}{l}. \quad (3.3)$$

Die Lösung des Integrals führt zu

$$\varepsilon_w = -\ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = -\ln(1 - \varepsilon). \quad (3.4)$$

„Bei Belastung eines definierten, z.B. zylindrischen Probekörpers, nimmt kraftabhängig auch die Querschnittsfläche des Körpers zu, so dass die reale Spannung vermindert wird. Ausgehend von inkompressiblen Materialien, schlagen Shermann und Olkku /23/ eine Korrektur vor. Bei starker Verformung ist die wahre Deformation heranzuziehen:

$$\sigma(I) = \frac{F(I)}{r^2 \cdot \pi} = \frac{F(I)}{r_0^2 \cdot \pi} \cdot e^{-\varepsilon_w} \quad (3.5)$$

Diese idealen Eigenschaften sind nur selten bei realen Körpern anzutreffen. Nach dem 2. rheologischen Axiom besitzt jedes Material alle Eigenschaften. In Abhängigkeit von der Belastung sind sie unterschiedlich stark ausgeprägt“.

3.2.2 Fließverhalten von Flüssigkeiten

Alle Fluide zeigen einen Widerstand gegen Formänderungen und Ortsveränderungen, der von Wechselwirkungen in der molekularen Struktur des Mediums abhängig ist und als innere Reibung bezeichnet wird. Am Beispiel der Couette-Strömung wird das Messprinzip in Abb. 3.2 dargestellt.

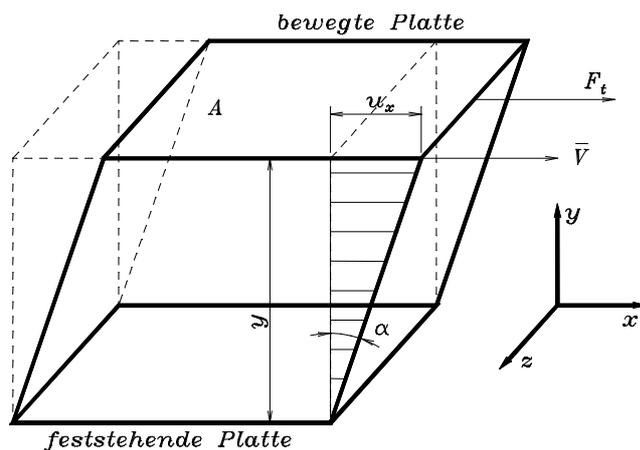


Abb. 3.2. Scherverformung eines viskosen Körpers /24/

Bei einer konstanten Verschiebegeschwindigkeit v erzeugt die einwirkende Kraft auf der Fläche A eine Scherspannung τ_{xy} , wodurch eine Scherströmung mit linearem Geschwindigkeitsgradienten erzeugt wird.

Es gilt:

$$\tau = \frac{F_t}{A} = \eta \cdot \frac{dv}{dh} = \eta \cdot \frac{dv}{dr} \quad \text{in Pa} \quad (3.6)$$

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}^1 \quad \text{in Pa} \quad (3.7)$$

Der Quotient aus Schubspannung und Schergeschwindigkeit ist eine Materialgröße, die als dynamische Viskosität η bezeichnet wird. Das Newtonsche Fließverhalten ist der einfachste Fall zum Beschreiben des Fließverhaltens. Höhe und zeitlicher Verlauf der Schubspannung bzw. der Schergeschwindigkeit haben keinen Einfluss auf den Stoffkennwert Viskosität. Alle

Flüssigkeiten, für die dieses zutrifft, werden „Newtonsche“ Flüssigkeiten genannt. Grundlagen der Durchführung einer rheologischen Messung sind:

1. laminare Strömung
2. Gültigkeit der Haftbedingungen
3. homogenes Einphasensystem
4. Partikelgröße < 20 % Spaltweite.

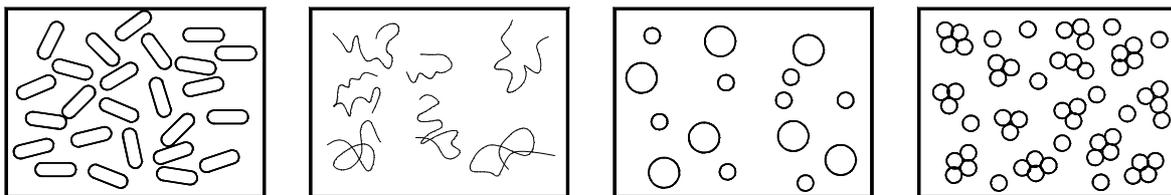
3.2.3 Strukturviskoses Verhalten

Flüssigkeiten, die Fließanomalien aufweisen, werden „nicht-Newtonsche“ Flüssigkeiten genannt. Bei nicht-Newtonschen Flüssigkeiten besteht ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Schergeschwindigkeit und Spannung und weiter eine zeitliche Abhängigkeit.

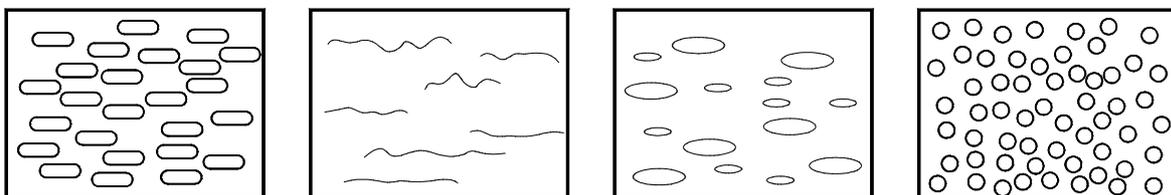
Bei hochmolekularen Flüssigkeiten, Lösungen und dispersen Systemen als reale Lebensmittelsysteme sind Abweichungen vom Newtonschen Verhalten infolge der verstärkten Wechselwirkungen von Molekülen und Teilchen die Regel.

Mögliche Ursachen für das Auftreten von Strukturviskosität auf Molekül- und Partikelbasis enthält Abbildung 3.3.

1. Flüssigkeit in Ruhezustand



2. Flüssigkeit unter Scherbeanspruchung



Orientierung

Streckung

Deformation

Desaggregation

Abb. 3.3. Ursachen für strukturviskoses Verhalten von Molekülsystemen und Dispersionen /25/

Fließverhalten und Fließanomalien kann man mit Hilfe rheologischer Zustandsgleichungen beschreiben. $\tau = f(\dot{\gamma}, t)$ (3.8)

Die für den Lebensmitteltechnologen wichtigsten Gleichungen sind nachfolgend in Tab. 3.2 als $\tau = f(\dot{\gamma})$ aufgeführt.

Tab. 3.2. Rheologische Standardmodelle /26/

Modell	Zustandsgleichung	Dynamische, effektive und Prozessviskosität	Anzahl der Modellparameter
	$\tau = f(\dot{\gamma})$ in Pa	$\eta_{\text{eff}} = f(\dot{\gamma})$ in Pas	
Newton	$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}^1$	dynamische Viskosität η	1 linear-viskose
OSTWAL D/De WAELE	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$ (3.9)	$\eta_{\text{eff}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$ (3.14)	2 nichtlinear-viskose
OSTWAL D/De WAELE	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$ (3.10)	$\eta_{\text{Proz}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = n \cdot K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$ (3.15)	2 nichtlinear-viskose
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{BH}} \cdot \dot{\gamma}$ (3.11)	$\eta_{\text{eff}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \eta_{\text{BH}}$ (3.16)	2 linear-plastisch
Casson	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta_{\text{CA}} \cdot \dot{\gamma}}$ (3.12)	$\eta_{\text{eff}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \eta_{\text{CA}} + 2\sqrt{\tau_{0\text{CA}} \cdot \eta_{\text{CA}} / \dot{\gamma}}$ (3.17)	2 nichtlinear-plastisch
Herschel Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$ (3.13)	$\eta_{\text{eff}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$ (3.18)	3 nichtlinear-plastisch

Für die Gruppe der strukturviskosen nicht-Newtonschen Flüssigkeiten wird in den meisten Fällen der Potenzansatz von OSTWALD/De WAELE genutzt. Z. B. für Rohextrakt, Melasse > 83 % w_{TS}, und reine Saccharoselösung mit > 80 % w_{TS}.

Carbonatationsschlamm und Kristallsuspension weisen eine Fließgrenze in bestimmten w_{TS} und ϑ Bereichen auf und können z.B. mit Gl. 3.13. beschrieben werden. Die in den Gleichungen (rheologischen Zustandsgleichungen) aufgeführten Parameter widerspiegeln den strukturellen Aufbau, das Fließverhalten bei Belastung sowie als Differenz die strukturell bewirkten Veränderungen in einem durchgeführten technologischen Prozessabschnitt. Die Modelle unterscheiden sich nach der Anzahl der Parameter und dem funktionellen Zusammenhang $\tau = f(\dot{\gamma})$ und werden durch Regression der Fließkurven gewonnen. Je nach Anzahl der Parameter wird eine mehr oder minder gute Anpassung erzielt. Die Ergebnisse von unterschiedlichen Modellrechnungen sind untereinander nur bedingt vergleichbar, zum Beispiel unterscheiden sich die regressierten Fließgrenzen τ_0 nach der applizierten rheologischen Zustandsgleichung.

Als Kriterien für die Modellierung des Fließverhaltens sind zu nennen:

1. einfache Handhabbarkeit des Modells
2. Entscheidend für die Auswahl des Modells ist die mathematische Korrelation zwischen Messdaten und Modellgleichung am Beispiel des Korrelationskoeffizienten und der Standardabweichung.
3. (möglichst) geringe Anzahl von Parametern

Für den Spezialfall $\tau_0 \rightarrow 0$ geht der Herschel-Bulkley -Ansatz in die Gleichung von OSTWALD/De WAELE über. Für den weiteren Spezialfall $n = 1$ folgt der Newtonsche

Schubspannungsansatz. Damit liegt in Tab. 3.2 ein logischer modularer Aufbau vor. Mit einem Modellansatz können Newtonsche bzw. nicht-Newtonsche strukturviskose Flüssigkeiten und plastische Medien verglichen werden.

Der Parameter K kennzeichnet den Konsistenzfaktor und steht synonym für die Viskosität (innere Reibung) und lässt sehr gut Rückschlüsse auf die Konzentration von Inhaltsstoffen zu. Der Fließindex n ermöglicht folgende wichtige Differenzierungen des Strukturverhaltens:

1. für $n = 1$ liegt immer ein strukturloses und damit Newtonsches Fließverhalten vor
2. für $n < 1$ liegt prinzipiell Strukturviskosität und damit Scherverdünnung vor
3. für $n > 1$ liegt ein so genanntes dilatantes Fließverhalten mit Scherverdickung vor.

Der Zusammenhang von Schubspannung und Schergeschwindigkeit wird als Fließkurve (Rheogramm) bezeichnet. Fließkurven und Viskositätsverlauf von ideal viskosem Verhalten, Strukturviskosität, plastischem Fließverhalten sowie Dilatanz sind in Abb. 3.4. enthalten.

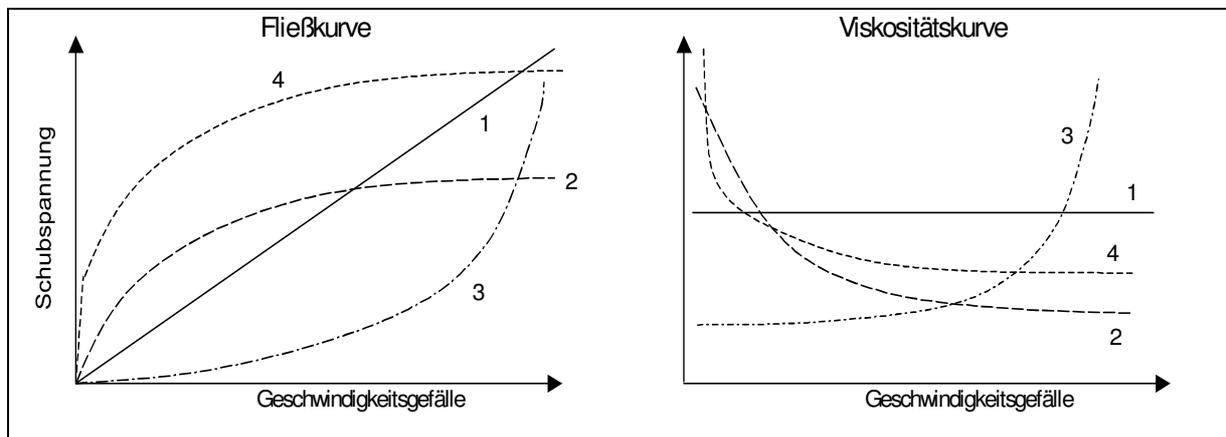


Abb. 3.4. Fließ- und Viskositätskurven

- 1 Newtonsche Flüssigkeit
- 2 Strukturviskose Flüssigkeit
- 3 Dilatante Flüssigkeit
- 4 Strukturviskosität mit Fließgrenze (plastisches Medium)

Je nach sich darstellendem Kurvenverlauf im τ - $\dot{\gamma}$ -Diagramm kann im einfachen Fall in die in Tab.3.2. aufgeführten Deformationssysteme unterschieden werden. Je nach Modellansatz existiert daher eine Gleichung zur Berechnung der effektiven Viskosität, die das Fließ- oder Verarbeitungsverhalten beschreibt.

3.3 Materialwissenschaftliche Kennwerte des Zuckerfabrikationsprozesses

Immer umfassender und erfolgreicher werden rheologische Untersuchungsverfahren zur Ermittlung der rheologischen Eigenschaften der Zwischenprodukte sowie der Verfahren der Anlagenoptimierung und zur optimierten Prozessführung und Qualitätskontrolle genutzt.

Der Einfluss mechanischer Beschädigungen der Zuckerrüben auf ablaufende Veränderungen der Inhaltstoffe wurde eingehend in der Literatur beschrieben. Vukov und Patkai /27/ führten die Beschädigungen auf die mechanischen Einwirkungen bei Ernte, Umschlag, Reinigung, Transport und Lagerung der Rüben zurück. Eine Folge der Beschädigungen ist der Massenverlust durch Abbrechen von Rübenteilen sowie das Austreten von Zellsaft. Drath, Strauß und Schiweck /28/ untersuchten den Einfluss einiger Faktoren auf die Bruchfestigkeit der Rüben, darunter Sortenunterschiede. „Zur Bestimmung der Bruchfestigkeit der aus den Rüben geschnittenen Probekörper wurde unter anderem eine Zugprüfmaschine eingesetzt. Dabei wurden die Rüben in 2 Bereiche eingestuft. Liegt die Bruchlast der Rüben unter 600 N, sind schwer zu verarbeitende brüchige Schnitzel, mit Werten > 700 N sehr gute Schnitzelverarbeitung zu erwarten. Bezüglich Elastizitätsmodul wurden Rüben nach Vukov zwischen 686-1372 als steif, 412-686 als elastisch, 176-412 als weich und < 176 N/cm² als sehr weich bezeichnet.“ /28, 29/

Die Untersuchungen zeigen nicht, von welchem Teil der Rüben und zu welchem Zeitpunkt die Probe genommen wurde. Probenvorbereitung, Größe und Länge (Geometriedaten) sind nicht bekannt. Änderungen während der Kampagne wurden nicht untersucht.

Nach der Extraktion liegen ausschließlich fließfähige Zwischenprodukte vor. Vasatko et al. /30/ berichteten über den Einfluss von Pektin und Albumin auf die Viskosität unreiner oder technischer Saccharoselösungen. Drago und Delavier /31/ haben bestätigt, dass die Viskosität unreiner Saccharoselösungen von der Menge und Art der Nichtzuckerstoffe beeinflusst wird. Grabka berichtet über das rheologische Verhalten des Zuckerkalkcarbonatkomplexes in /32/ und bestätigt, dass die Komplexsuspension zu den nicht-Newtonschen Flüssigkeiten gehört. Rheologische Parameter werden nicht angegeben.

3.3.1 Materialwissenschaftliche Charakterisierung von Festkörpern

3.3.1.1 Zuckerrüben (Wurzeln)

Zuckerrüben zählen zu den landwirtschaftlichen Massenschüttgütern und können als viskoelastische Körper bezeichnet werden. Zuckerrüben werden nach der Ernte als Festkörper in Schüttungen in Mieten oder Silos gelagert. Es handelt sich bei erntefrischen Rüben um ein **viskoelastisches** Material mit einem Turgor von ca. 2 MPa /33/.

Während des Kampagnezeitraums von ca. 90 d ändert sich das Materialverhalten infolge von Lebensprozessen mit Verbrauch von Inhaltstoffen in einen mehr **viskoelastischen** Zustand. Mechanische Analogiemodelle zur Beschreibung der physiko-mechanischen Eigenschaften von Zuckerrüben sind in der Literatur nicht bekannt.

Die Zuckerrübenwurzeln bestehen aus strukturellen elementaren Einheiten (Zellen). In der jungen Zelle erfüllt das Protoplasma die ganze Zelle, während in der voll entwickelten Zelle

nur eine dünne Schicht von Protoplasma an der Zellwand liegt. Die Zellwand umhüllt das Protoplasma und gibt der Zelle die nötige Festigkeit. /34/

Gewöhnlich werden zwei Arten von Geweben unterschieden, das Bildungsgewebe (Meristeme) und Dauergewebe (Somatisches). Bildungsgewebe sind solche, in denen die Bildung neuer Zellen vor sich geht und die Differentiation noch unvollständig ist. Das Dauergewebe ist reif und wenigstens zeitweilig zu einer weiteren Teilung unfähig. /35/

Die Zellwand besteht aus mehreren Schichten. Hierzu gehören die Zellulosefibrillen, die Hemizellulose, das Pektin und das Zellwandprotein. Die benachbarten Zellwände sind durch die Mittellamelle verbunden, die aus nativem Pektin besteht.

Die Mittellamelle ist von entscheidender Bedeutung. Je stärker die Vernetzung der Matrix in der Mittellamelle ist, umso fester ist das Zellgewebe. Der kombinierte Effekt des hydrostatischen Druckes des Zellinhaltes mit der elastischen Zellwand bestimmt das viskoelastische Verhalten der Zellen des Gewebes.

Der Wurzelkörper besteht aus verschiedenen Gewebearten, parenchymatisches Speicherewebe (für Zuckerspeicherung verantwortlich), und Leitbündeln mit Bedeutung für die Diffusion. /35/ Insbesondere spielt für den Wasserhaushalt sowohl die Zahl der im Zellsaft gelösten Teilchen insgesamt als auch die Anwesenheit bestimmter Ionen und ihr Verhältnis zueinander, wie z. B. das Verhältnis von K^+ zu Ca^{++} eine Rolle. Nachfolgend sind in Tabelle 3.3. die mechanischen und thermodynamischen Kennwerte der Zuckerrüben aufgeführt, die für ihre Aufbereitung und Lagerung von Bedeutung sind.

Ausführliche Erläuterungen zu den Kennwerten können den entsprechenden Standardwerken /36/ entnommen werden.

Tab. 3.3. Physikalische Kennwerte für die Aufbereitung und Lagerung von Zuckerrüben /36/.

Nach	Messeinheit	Richtwert
Masse Einzelrübe	kg	0,2-1,2
äquivalenter Durchmesser	m	0,07-0,11
Dichte Feststoff	kg/m ³	1100
Schüttdichte	kg/m ³	650
Porosität	m ³ /m ³	0,4
spez. Wärmekapazität	kJ/kg.K	3,5
Wärmeübertragungskoeffizient bei der Belüftung	W/m ² .K	3
Wärmeübertragungskoeffizient beim Schwimmen	W/m ² .K	66
Bruchkraft	N	< 600 weich, >700 sehr gut /28/

3.3.1.2 Einfluss der Rübeneigenschaften auf die Schneidarbeit

Zweck der Schneidarbeit ist die Herstellung von Schnitzeln, die für die gegebene Extraktionsanlage die am besten geeignete geometrische Dimension haben und einen mög-

lichst geringen hydrodynamischen Widerstand gegenüber der Extraktionsflüssigkeit aufweisen. Makroskopisch betrachtet ist das Gewebe der Zuckerrüben annähernd isotrop und annähernd homogen /29/.

Der Schneidwiderstand ist die spezifische Arbeit, die notwendig ist, um die Oberflächeneinheit des Rüben Gewebes mit der gegebenen Schneidkante durchzuschneiden. /29/ Nach Vukov /29/ werden aus dem Rübenkörper zylinderförmige Probestücke gebohrt und mit einem eingespannten Draht durchgeschnitten. Der Draht wird in einen Rahmen gespannt, der am Ende eines Fallpendels von gegebenem Moment befestigt ist. Wird das Pendel aus einer bestimmten Höhe fallen gelassen, so wird die zum Schneiden nötige Arbeit geleistet, deren Größe dem Energieunterschied zwischen dem leeren und dem aktiven Pendelausschlag entspricht und aus den Ausschlagwinkeln berechnet wird.

Hinsichtlich des Schneidwiderstandes ist der Rübenkörper makroskopisch als isotrop zu betrachten. In Tab. 3.4. gibt Vukov eine Klassifikation nach dem Schneidwiderstand.

Tab. 3.4. Klassifikation der Rüben nach dem Schneidwiderstand /29/

Zustand der Rüben	Schneidwiderstand
	cm·kp/cm ²
weich	0,8
normal	0,8-1,4
verkorkt	1,4-1,8
holzig	1,9-3,0
stark verholzt	3,0

Die elastischen und plastischen Eigenschaften des Rübenkörpers beeinflussen einerseits die Sprödigkeit der Rüben vor dem Schneiden und andererseits das Volumengewicht, die Kompressibilität und den hydrodynamischen Widerstand der Schnitzel bei der Extraktion. /29/ Wenn man aus Rüben geschnittene Probekörper einer Druck- oder Biegeprobe unterzieht, kommen teils bleibende, teils reversible Deformationen zustande. Die reversible (elastische) Deformation ist gut reproduzierbar und kann als eine charakteristische Stoffkonstante zur Beurteilung des Rübenmaterials herangezogen werden. Nach Vukov ist der Zuckerrübenkörper makroskopisch als statistisch annähernd isotrop und fast homogen zu betrachten. Demgegenüber hängt die bleibende (plastische) Deformation zum Teil mit dem Auspressen des Saftes zusammen und ist nicht reproduzierbar. /29/.

„Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls erfolgt durch eine Biegeprobe. Aus der Rübe werden 6 cm dicke Stücke geschnitten und aus diesen mit Hilfe eines Bohrers von 8 mm Durchmesser 60 mm lange Zylinder hergestellt. Die Zylinder werden in das Gerät eingefasst, mit 200 lb Gewicht belastet und nach 1 min wird der Zeigerstand bei belasteten Probekörpern abgelesen. Dann nimmt man die Belastung sofort ab und notiert den Zeigerstand nach

genau 1 min aus der Differenz, dem Betrag der elastischen Dehnung, der Elastizitätsmodul ermittelt.“ /37/ In Tab. 3.5 ist nach Vukov /29/ eine Klassifikation der Rüben nach ihrem Elastizitätsparameter gegeben.

Tab. 3.5. Klassifikation der Rüben nach ihrer Elastizität/Turgorzustand

Elastizitätsmodul nach /2, 29/ in N/cm ²	
sehr weich	< 177
Weich	177 – 412
Elastisch	412 – 686
steif/spröde	686 – 1373

3.3.1.3 Zuckerkristalle

Zuckerkristalle sind charakterisiert durch eindeutige Kristallstruktur und werden aus rheologischer Sicht als harte Lebensmittel klassifiziert. Weißzucker ist eine Zufallsschüttung. Bei breiter Partikelgrößenverteilung haben die kleineren Partikel die Möglichkeit, die Lücken zwischen den großen Partikeln zu besetzen. Dadurch vermindert sich die Porosität – der Hohlraumanteil am Volumen der Schüttung – die die effektive Wärmeleitfähigkeit beeinflusst. Deswegen benötigt man Informationen über das Fließverhalten der Zuckerkristalle, um Silo, Apparate und Geräte zur Handhabung dieses Schüttgutes funktionsgerecht und zuverlässig auszulegen. Durch die Einbeziehung des Fließverhaltens kann z. B. ein Silo so ausgelegt werden, dass das Schüttgut selbstständig aus dem Silo ausfließt, wie es von der verfahrenstechnischen Aufgabenstellung und von der geplanten Betriebsweise her gefordert ist. Die hydrophilen Materialeigenschaften von Weißzucker, unter bestimmten Umständen mehr oder weniger Wasser aufzunehmen, sind problematisch bei der Lagerung. Das Wasser wird aus der umgebenden Luft aufgenommen, die nie absolut trocken ist. Je nach Temperatur und relativer Feuchte der Luft stellt sich im Zucker nach entsprechender Kontaktzeit eine Gleichgewichtsfeuchte ein. Dieser Zusammenhang wird in so genannten Sorptionsisothermen dargestellt. In der Literatur sind des Öfteren einzelne Sorptionsisothermen, in der Regel für eine Temperatur von 20 °C, wiedergegeben. Dabei fehlen meistens Angaben über Korngrößenverteilung und Reinheit bzw. weitere Qualitätsgrößen wie z. B. Asche oder Invertzuckergehalt. Diese Größen haben aber einen entscheidenden Einfluss auf die Gleichgewichtsfeuchte eines Weißzuckers. Ausführlichere, systematische Untersuchungen sind von Werner, Bym, Wilson, Theobald /38, 39, 40, 41, 42/ gemacht worden. Damit die Fließfähigkeit des Weißzuckers gewährleistet und die gebundene Feuchte umgewandelt und entfernt wird, muss die Luft zwischen den Kristallen im Silo bestimmten Zuständen entsprechen und gegebenenfalls konditioniert werden. Dem Zucker sollen während der Konditionierung ca. 0,04 % Feuchtigkeit entzogen werden.

Tab. 3.6. Stoffkennwerte Zuckerkristalle /43/

	Messeinheiten	Richtwerte
Wärmeübertragungskoeffizient	W/m ² ·K	0,582 bei 0 °C
Schmelztemperatur	°C	186 ± 4
Bruchkraft	N	22,065
spezifische Volumen	m ³ /kg	6,304·10 ⁻⁴
Schüttdichte	kg/m ³	1586,2 bei 20 °C
spezifische Wärmekapazität	J/kg·K	1243,9 bei 25 °C
Korngrößenbereich	mm	0,20 – 0,75
Invertzucker, max	%	0,04
Asche als Leitfähigkeit	%	0,0108
Farbe in Lösung	IE ₄₂₀	22,5

Untersuchungen zum Fließverhalten von Zuckerkristallen können in der Literatur nicht gefunden werden. Auch existieren keine Angaben zu Rutsch- und Böschungswinkel in Abhängigkeit vom Partikelspektrum.

3.3.2 Zwischenprodukte

3.3.2.1 Reine Saccharoselösung

Saccharoselösungen bestehen aus in Wasser gelöster Saccharose. Saccharose ist ein Disaccharid, in dem Glukose als heterozyklischer Sechring (Pyran) und Fruktose als Fünfring (Furan) in Laktolform (inneres Halbazetal) vorliegen.

Beide Ringe sind über ihre glykosidische Hydroxylgruppe ätherartig verknüpft (C-Atom 1 der Glukose und C-Atom 2 der Fruktose) siehe Abb.3.5.

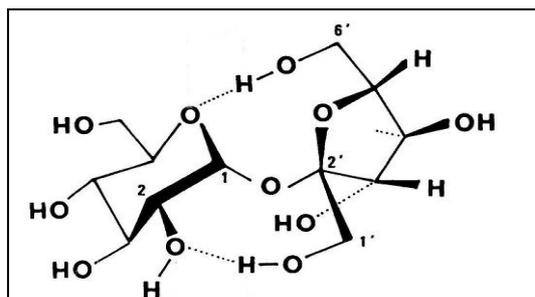


Abb. 3.5. α -D-Glukopyranosido-(1,2)- β -D-fruktufuranosid /43/

Enthält die Lösung keine bzw. zu vernachlässigende weitere Nichtsaccharosestoffe spricht man von reiner Saccharoselösung. In der älteren Literatur wurden reine Saccharoselösungen von Schneider et al., Eszterle /44, 45, 46/ und unreine Saccharoselösungen von *Drago und Delavier* /31/ als Newtonsche-Flüssigkeiten bezeichnet.

Zum Saftreinigungs- und Verdampfungsprozess dominieren Wärmeübertragungs-Prozesse, in die als limitierende Grenzwerte die Viskosität eingeht. Allgemein kann man davon ausgehen, dass jede Änderung der Temperatur einer Substanz auch eine Änderung ihrer viskosen

Eigenschaften bedingt. Es existiert daher eine ganze Reihe von mathematischen Ansätzen. Die Genauigkeit dieser Ansätze ist dabei auch vom gewählten Temperaturintervall abhängig. Zur Anwendung an die Arrhenius-Gleichung wird für den Fall des physikalischen Zusammenstoßes ohne eintretende chemische Reaktion die Frenkel-Eyring Gleichung abgeleitet.

$$k(T) = k_{\infty} \cdot \exp\left(\frac{E}{R \cdot T}\right) \quad (3.19)$$

$$(3.20) \quad \eta(T) = A \cdot \exp\left(\frac{E_A}{R \cdot T}\right) \quad (3.20)$$

Pidoux /47/ schlug eine weitere Gleichung für reine und technische Saccharoselösungen vor, deren Nutzung sich gegenwärtig in der Zuckerindustrie durchgesetzt hat:

$$\log \eta = a \cdot \frac{T - T_0}{T^2} + b \quad (3.21)$$

Die Parameter a und b werden aus zwei bekannten Viskositätswerten bei unterschiedlichen Temperaturen nach den Gleichungen (3.22.1) und (3.22.2) bestimmt /43/.

$$a = \frac{\log \eta_2 - \log \eta_1}{\frac{T_2 - T_0}{T_2^2} - \frac{T_1 - T_0}{T_1^2}} \quad (3.21.1)$$

$$b = \log \eta_1 - a \cdot \frac{T_1 - T_0}{T_1^2} = \log \eta_2 - a \cdot \frac{T_2 - T_0}{T_2^2} \quad (3.21.2)$$

Weitere ausgewählte mathematische Berechnungsansätze aus der Literatur enthält die Tabelle 12.1 im Anhang.

Schmidt zeigt, dass für reine Saccharoselösungen im ausgewählten Temperaturbereich von 60 bis 75 °C und einem Konzentrationsbereich von 60 bis 75 % mit einer hohen statistischen Absicherung nach dem OSTWALD/De WAELE -Ansatz ein strukturviskoses Verhalten nachgewiesen wird. /48/

Zur rechnerischen Bestimmung der dynamischen Viskosität von reinen Saccharoselösungen wird die von Schmidt, Christoph, Senge, et al., /49, 50/ abgeleitete Gleichung ($0,999 \leq R^2 \leq 0,9999$) empfohlen. $60 \% \leq w_{TS} \leq 75 \%$ und $30 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 130 \text{ °C}$.

Diese Untersuchungen wurden auf der Grundlage von Messungen im relevanten ϑ - und w_{TS} -Bereich mit Originalsäften und einer DMZ durchgeführt.

$$\ln \eta = -a \cdot \frac{\vartheta}{(\vartheta + 273)^{2,135}} + b \quad (3.22)$$

$$a = 21,9804 \cdot w_{TS}^2 - 2270,7746 \cdot w_{TS} + 68847,1902 \quad (3.22.1)$$

$$b = 0,009281 \cdot w_{TS}^2 - 0,93371 \cdot w_{TS} + 27,94497 \quad (3.22.2)$$

Technische Saccharoselösungen

Das im Technologieablauf hergestellte Zwischenprodukt enthält eine Reihe von Nichtsaccharosestoffen. Der Verunreinigungsgrad wird durch die Reinheit q charakterisiert

$$q = \frac{m_s}{m_{TS}} \cdot 100 \% \quad (3.23)$$

Dünnsaft, Dicksaft und Melasse unterscheiden sich damit in der Zusammensetzung hauptsächlich durch ein unterschiedliches Verhältnis von Nichtsaccharosestoffen zu Saccharose und Wasser. /50/

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

Im Einzelfall sind die Inhaltsstoffe abhängig:

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

Außerdem besitzt auch die Technologie der Zuckergewinnung in der jeweiligen Zuckerfabrik und die während der Verarbeitung eingesetzten technischen Hilfsstoffe Einfluss.

Analog findet Senge die Aussage, dass für jede Fabrik in Abhängigkeit der genannten Einflussgröße eine „eigene Viskositätsmatrix“ vorliegt, die sich in ein Ereignisfeld einordnet./49/

3.3.2.2 Rohextrakt

Mit Hilfe von heißem Wasser wird den Schnitzeln in Extraktionstürmen der Zucker entzogen. In 70 °C heißem Wasser löst sich der Zucker aus den Rübenzellen. Es entsteht der so genannte Rohsaft.

Da in der Literatur keine aktuellen Messdaten der genannten Systeme vorliegen, erfolgte zunächst bei den Untersuchungen unter Produktionsbedingungen die Annahme eines Newtonschen Fließverhaltens der Rohsäfte.

Durch den Einsatz von Messkapillaren mit vorheriger Filtration kann ein eventuell vorliegendes nicht-Newtonsches Fließverhalten nicht detektiert werden /51/. Messbedingt wird die dynamische Viskosität ausgewiesen und korreliert. Diese können aber als Orientierungswerte Verwendung finden.

Die Rohsaftviskosität hängt eindeutig als Matrixgröße von der technologischen Qualität der verarbeiteten Rüben ab. Die im Zellsaft von Zuckerrübenschnitzeln vorhandenen organischen Nichtsaccharosestoffe sind zum großen Teil hochmolekulare Verbindungen wie Ei-

weißstoffe, Nucleoproteide, Pektine, Hemizellulosen, Cellulosen, Aminosäuren und Lignin. Bei der Verarbeitung von alteriertem bzw. frostgeschädigtem Rübenmaterial kommen auch Polysaccharide wie Dextran und Lävan vor (Barfoed und Moddgaard, 1987; Stoppok und Buchholz 1994 und van der Poel et al., 2000 /2, 52, 53/. Diese entstehen durch mikrobiologische Tätigkeiten insbesondere nach Gefrieren und Wiederauftauen der Rüben. Die hochmolekularen Bestandteile beeinflussen stark das rheologische Verhalten des Rohsaftes (Ajdari Rad, 2002; Ajdari Rad und Senge, 2002 und Ajdari Rad und Senge, 2003) /9, 54, 55/ und sind verantwortlich für die Verarbeitungs- und Filtrationsprobleme nach der 1. und 2. Carbonatation (Verhaart und Visser, 1962; Schneider, 1971; Shore et al., 1983; Buczys, 1994; Stoppk und Buchholz, 1994; Buchholz und Bruhns, 1994; Bruijn, 2000, Ajdari Rad 2002 und Kraus 2003) /9, 53, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62/. Untersuchungen zum Einfluss der hochmolekularen Bestandteile auf die Filtrierbarkeit des Schlammsaftes 1 mit einer standardisierten Saftreinigung /9/ kommen zum Schluss, dass die Zunahme der Dextrankonzentration im Rohsaft zu einer Verschlechterung der Filtrierbarkeit des Schlammsaftes¹ führt und bei Überschreitung eines kritischen Grenzwertes durch Dextranaseeinsatz reguliert werden muss. Außerdem erhöht sich der Filtrationskoeffizient (F_K -Wert) des Schlammsaftes¹ infolge der sphärischen Barrieren durch die Dextranmoleküle /9/. Der Einfluss der Dextrankonzentration ist als Negativfaktor bis in die Kristallbildung feststellbar. Die negativen Einflüsse von Dextran während des (isothermen) Kristallisationsprozesses aus reinen Saccharoselösungen wurden bei verschiedenen Temperaturen auf die Wachstumsrate der Saccharosekristalle und die Qualität des resultierenden Zuckers untersucht. /63/

Die inline-online-Viskosimetrie des Rohsaftes ist eine Möglichkeit, die Verarbeitung von alteriertem sowie frostgeschädigtem Rübenmaterial mit höheren Anteilen an Hydrokolloiden wie Dextran, Lävan und Pektin zu kontrollieren. Die Verarbeitung alterierter Rüben ist mit einem Anstieg von Lävan- und Dextrangehalten im Rohsaft verbunden. Der hierbei zum Einsatz kommende online-Torsionsschwinger (RHEOSWING[®] RSD 1-1) bietet sich als online-Messverfahren zur Überwachung an, denn es ermöglicht Aussagen über Veränderungen in der Viskosität des Rohsaftes als Folge einer Änderung der Konzentration von hochmolekularen Inhaltsstoffen des Rohsaftes und anderer Strukturänderungen innerhalb der unterschiedlichen Prozessschritte des Zuckerfabrikationsprozesses.

Moderne rheologische Untersuchungsmethoden zur kontinuierlichen Erfassung der Rohsaftviskosität zeigen, dass sich die Rohsaftviskosität als eine mögliche Führungsgröße zur Regelung der Kalkmilchmenge für die Hauptkalkung (bzw. die Einstellung der Hauptkalkungsalkalität) nutzen lassen kann. Die Bestimmung der Rohsaftviskosität ermöglicht es, um den nachteiligen Effekt eines schlecht filtrierbaren Schlammsaftes 1 frühzeitig zu erkennen, hierauf durch Änderung der Hauptkalkungsalkalität zu reagieren./64/

Tab. 3.7. Stoffkennwerte Rohsaft /43/

	Einheiten	Richtwerte
°S	%	15 – 16
w_{TS}	%	16 – 18
pH		6,0 – 6,2
Reinheit	%	87-91
Dichte	kg/m ³ bei 40 °C	1051 - 1060,3
Wärmeübertragungskoeffizient	W/m ² ·K	560/700 /65/
spezifische Wärmekapazität	kJ/kg·K	3,79 - 3,75

3.3.2.3 Feststoffabtrennung Carbonatationsschlamm

Die Abtrennung des gebildeten Feststoffes erfolgt durch Filtration. Ältere Technologien arbeiten mit Beutelfiltern und einer weiteren Eindickung des anfallenden Schlammsaftkonzentrats zu Carbonatationsschlamm mittels Trommelsaugfiltern. Neuere Technologien arbeiten mit Kerzenfiltern und nachgeschalteten selbstreinigenden Hochdruckfilterpressen. Je nach Apparateausstattung fällt nach den Trommelsaugfiltern ein Carbonatationsschlamm mit ca. 50 - 60 % Trockensubstanzgehalt an; bei Einsatz z. B. einer Hochdruckfilterpresse ein Schlamm mit 65 - 80 % Trockensubstanzgehalt. Während Carbonatationsschlamm mit ca. 50 - 60 % Trockensubstanz ein fließfähiges System darstellt und klassisch mittels Dickstoffpumpen gefördert wird, gelangt der aus modernen Filterapparaten anfallende Carbonatationsschlamm als Feststoff per Förderband zum so genannten Carbokalkbunker und dient in der Landwirtschaft als Kalkdüngemittel.

Der Ermittlung des Fließverhaltens dieses Carbonatationsschlammes der jährlich, örtlich und technologisch bedingt keine determinierte Zusammensetzung aufweist, sollen die nachfolgenden Ausführungen dienen. In der zuckertechnologischen und rheologischen Fachliteratur finden sich keinerlei Hinweise zum Stoffsystem selbst. „Das Fließverhalten von Carbonatationsschlamm ist auch von Interesse für den Reinigungszyklus der Beutel- bzw. Kerzenfilter“ /66/, da nur ein gut fließfähiges System eine ausreichende Regenerierung der Filterflächen gewährleistet. Aus den genannten Gründen wurde Carbonatationsschlamm der Zuckerfabriken D und F untersucht.

Es wurde festgestellt, dass es sich beim vorliegenden Carbonatationsschlamm um ein klassisches nicht-Newtonsches Medium mit plastischen Eigenschaften handelt. Eine Zeitabhängigkeit des Fließverhaltens (thixotropes Verhalten) konnte nicht gefunden werden. /66/ Bei der Zuckergewinnung ist mit einem Carbonatationsschlammfall von 5 - 8 kg/dt Rübe zu rechnen.

Tab. 3.8. Stoffkennwerte Calciumcarbonatationsschlamm /66/

Probe	Richtwert		
	w_{TS}	η_{pl}	τ_0
Einheiten	%	Pa·s	Pa
1	50	0,29	19,86
2	55	1,452	23,572
3	60	0,034	90,11

3.3.2.4 Fließverhalten von Calciumcarbonatationsschlamm

Bei den betrachteten Filterschlämmen handelt sich um ein konzentriertes fließfähiges System mit ca. 55 - 60 % Feststoffanteilen. Die Feststoffeigenschaften bestimmen das rheologische Verhalten damit maßgeblich.

In den Strömungen solcher konzentrierter disperser Stoffsysteme stellt sich ein Gleichgewicht zwischen den so genannten strukturierenden Kräften (das sind Wechselwirkungskräfte zwischen den dispersen Anteilen durch van der Waalssche Kräfte und elektrostatischen Wechselwirkungen zwischen Dispersionsmittel und disperser Phase) sowie den hydrodynamischen Kräften (Schwerkraft, Reibungskraft, Trägheitskraft, Druckkraft) ein, die durch die kontinuierliche Phase und die ablaufende Strömung eingebracht werden. Charakteristisch für das Fließen solcher strukturierter Systeme ist die Existenz der Fließgrenze τ_0 . Ein Fließvorgang tritt nur ein, wenn die Fließschubspannung größer als die Fließgrenze τ_0 ist. In diesem Moment erfolgt eine Zerstörung der Ruhestruktur.

Modellansatz nach Casson

Kalzium- und Magnesiumschlämme können aus rheologischer Sicht gut mit dem Modellansatz nach Casson beschrieben werden /67/. Dieses Gesetz wurde von Casson aufgrund theoretischer Überlegungen abgeleitet und 1959 erstmals publiziert. "Casson ging von der Betrachtung der abstoßend und abziehend wirkenden Kräfte zwischen den Teilchen in nicht wässrigen Medien aus," /68/. Mit dem Reibungsgesetz nach Casson ist man in der Lage, eine große Anzahl von Suspensionen, selbst flüssige Schokolade, zu beschreiben. Die Modellgleichungen sind in Tab. 3.2 enthalten.

3.3.2.5 Rheologisches Verhalten von Dicksaft

Dicksäfte sind bei 90 % Reinheit auf Trockensubstanzgehalte von etwa 68 bis 75 g/ 100 g konzentriert. Für die technische Saccharoselösung ist die Viskosität neben der Dichte und dem Oberflächenspannungsverhalten ein Kennwert zur Beschreibung des fluiddynamischen Verhaltens.

Bisher wurden technische Saccharoselösungen auch bei sehr hohen Konzentrationen und niedrigen Temperaturen wie Dicksaft als Newtonsches Medium angesehen. Umfangreiches

Material zu dieser Aussage veröffentlichten Schneider, Schliephake und Klimmek /69/. Diese Messungen wurden mit einem Rotationsviskosimeter durchgeführt.

Weiterführende Untersuchungen mit dem Ziel einer Strukturaufklärung wurden mit einem hochpräzisen Luftlagerreometer vorgenommen.

Eine Korrelation der Messdaten in ausgewählten Temperatur- und Konzentrationsbereichen auch nach dem OSTWALD/De WAELE -Ansatz liefert höchste Sicherheit und deutet auf strukturviskoses Verhalten hin. Zur rechnerischen Bestimmung der dynamischen Viskosität von Rübendicksaft gelten die von Schmidt, Christoph, Senge /49/ auf der Basis der gemittelten Regressionen abgeleiteten Gleichungen ($0,999 \leq R^2 \leq 0,9999$).

($65 \% \leq w_{TS} \leq 75 \%$; $30 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 130 \text{ °C}$; Messsystem: Bestimmung mit Druckmesszelle)

$$\ln \eta = -a \cdot \frac{\vartheta}{(\vartheta + 273)^{2,21}} + b \quad (3.24)$$

$$a = 14,395 \cdot w_{TS}^2 - 937,714 \cdot w_{TS} + 21688,1 \quad (3.24.1)$$

$$b = 0,005318 \cdot w_{TS}^2 - 0,419434 \cdot w_{TS} + 11,17167 \quad (3.24.2)$$

Um temperaturseitig den Regressionsbereich zu erweitern, wurde unter Verwendung der berechneten Mittelwerte aus den Messwerten der Messsysteme Druckmesszelle und UDS 200 die Gleichung (3.26) für den gesamten untersuchten Temperaturbereich von 5 bis 130 °C regressiert ($0,999 \leq R^2 \leq 0,9999$):

($60 \% \leq w_{TS} \leq 75 \%$; $5 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 130 \text{ °C}$; Messsystem: Druckmesszelle und UDS 200)

$$\ln \eta = -a \cdot \frac{\vartheta}{(\vartheta + 273)^{2,24}} + b \quad (3.25)$$

$$a = 31,8302 \cdot w_{TS}^2 - 3034,8965 \cdot w_{TS} + 89712,8726 \quad (3.25.1)$$

$$b = 0,008244 \cdot w_{TS}^2 - 0,8026 \cdot w_{TS} + 23,8943 \quad (3.25.2)$$

Für untersuchten Dicksaft aus Zuckerrohr wurden die folgenden temperaturabhängigen Regressionsgleichungen bestimmt:

$w_{TS} = 65 \%$, ($60 \leq \vartheta \leq 130 \text{ °C}$; Messsystem: DMZ)

$$\ln \eta = -4285,4609 \cdot \frac{\vartheta}{(\vartheta + 273)^{1,95}} + 6,132 \quad (3.26)$$

$w_{TS} = 68,6 \%$ ($30 \leq \vartheta \leq 130 \text{ °C}$; Messsystem: DMZ)

$$\ln \eta = -14375,3697 \cdot \frac{\vartheta}{(\vartheta + 273)^{2,12}} + 7,424 \quad (3.27)$$

Das Viskositätsverhalten der Dicksäfte variiert z. B. bei gleichem Trockensubstanzgehalt in Abhängigkeit vom Standort. Die Viskositäten der untersuchten Rübendicksäfte liegen bei Temperaturen von 5 bis 100 °C grundsätzlich unter denen von reinen Saccharoselösungen. Die Differenz dieser Stoffkennwerte ist temperatur- und konzentrationsabhängig. Mit steigender Temperatur nimmt die Differenz ab. Über 100 °C, deutlich bei 130 °C, kann die Viskosität des Dicksaftes größer als die der reinen Saccharoselösung sein. Senge gibt bei wei-

terführenden Untersuchungen mit Luftlagerrheometern dazu für Dicksaft Abhängigkeiten der Viskosität von der Schergeschwindigkeit an, die sich aus der Viskositätsbestimmung bei zwei unterschiedlichen Schergeschwindigkeitsbereichen ergibt. /70/

Tab. 3.9. Stoffkennwerte für Dicksaft /43/

	Einheiten	Richtwerte
w_{TS}	%	72 – 75
Reinheit	%	92 – 94
Dichte	kg/m ³	1380,0 bei 20 °C
spezifische Wärmekapazität	kJ/kg·K	2,38
Farbindex	IE ₄₂₀	3500

3.3.2.6 Fließverhalten von Zuckerkrystalsuspension (Magma) und Prozesskontrolle

Suspensionen bestehen aus einer kontinuierlichen Phase, dem Suspensionsfluid und festen Partikeln, die die disperse Phase bilden. Bei der Modellierung des Fließverhaltens werden Suspensionen meistens als makroskopisches Kontinuum betrachtet. Im makroskopischen Maßstab ist das Fließen einer Suspension immer inhomogen und unstetig /71/. In der Zuckerindustrie besonders häufig untersucht wurde das rheologische Verhalten von Nachproduktmagmen, weil unter den dort vorliegenden Bedingungen das Fließverhalten eine wesentliche Randbedingung der Kristallisation ist (Silina, Terentjew, Gromkovskij, Frusov, Szekrenyesi) /72, 73, 74, 75/. Ein strukturviskoses Fließverhalten wurde von Terentjew und Gromkovskij /73, 74/ gefunden. Das nicht-Newtonsche Fließverhalten der Füllmassen ist eindeutig auf den Einfluss der dispergierten festen Phase zurückzuführen.

Die reineren Krystalsuspensionen der ersten Kristallisationsstufen sind nur von Wagnerowski untersucht worden. Er stellte empirische Gleichungen für die relative Füllmasseviskosität auf. Einflussgrößen sind Trockensubstanz und Kristallgehalt der Füllmasse. Es gibt einen Zusammenhang zwischen Viskosität und Übersättigung. Es ist gut zu erkennen, dass die Viskosität mit steigender Übersättigung und mit sinkender Reinheit zunimmt. „Die Zunahme der Viskosität mit sinkender Reinheit (hochmolekularer Bestandteile) ist darauf zurückzuführen, dass bei sinkender Reinheit der Trockensubstanzgehalt in der Lösung bei gleicher Übersättigung höher ist.“ /76/

Zur Beschreibung von Suspensionen als Stoffsystem wird die relative Viskosität verwendet, die als Stoffwert von den Eigenschaften der suspendierten Partikel abhängig ist /69/:

$$\eta_{\text{Susp}} = \eta_{\text{Ml}} \cdot \eta_{\text{rel}} \quad (3.28)$$

Für verdünnte Suspensionen gilt die von Einstein theoretisch abgeleitete Gleichung:

$$\eta_{\text{rel}} = 1 + 2,5\phi \quad (3.29)$$

Beim maximalen Volumenanteil an Partikeln geht eine Suspension in eine feste Schüttung über.

$$\eta_{\text{rel}} = \left(1 + \frac{1,4\phi}{1 - \phi/\phi_{\text{max}}} \right)^2 \quad (3.30)$$

Das Modell von Einstein berücksichtigt die Erhöhung der molekularen Viskosität der Flüssigkeit durch einzelne suspendierte feste Kugeln. Dieses Modell beschreibt die Viskositätserhöhung richtig, solange die Abstände zwischen den Kugeln groß im Vergleich zu ihrem Durchmesser sind, weil dann keine weiteren Wechselwirkungen zwischen den Kugeln auftreten.

Tab. 3.10. Parameter der Verdampfungskristallisation bei der Weißzuckerherstellung

		Kristallsuspension /20/		
	Einheiten	A	B	C
q	%	94-95	94	77-78
w _{TS}	%	90-91	91-92	93-95
Übersättigungszahl		1,05-1,20	1,25-1,30	1,30-1,40
Viskosität übersättigter Saccharoselösung bei 20 °C /77/				
w _{TS} in %	Viskosität	Einheit		
75	2328,0	mPas		
80	20,7·10 ³			
92,2	7·10 ⁶			
95,10	14·10 ⁹			

Der Kristallisationsprozess stellt einen der sensibelsten Produktionsabschnitte in der Zuckergewinnung dar. Um den Kristallisationsprozess hinsichtlich Energieeinsparung zu optimieren und um Unabhängigkeit von subjektiven Bewertungskriterien zu erreichen, wurden eine Reihe unterschiedlicher Messsysteme zur Kontrolle und Steuerung der Kristallisation entwickelt und eingesetzt.

„Einige Rheometer, die auch für den industriellen Einsatz geeignet sind, wie z. B. das im Berliner Zuckerinstitut getestete ViscoScop® der deutschen Firma Marimex, weisen zwar prinzipiell die komplexen Viskositäten aus, können das integrierte Antwortsignal auf die anregenden Schwingungen systembedingt allerdings nicht in einen elastischen und einen viskosen Anteil auflösen. Das über Magnetspule-Anker einen Außenschaft definiert anregende ViscoScop® ist mit einer internen Temperaturmessung ausgerüstet. Die Dichtekompensation berücksichtigt, dass der schwingende, im Resonanzzustand arbeitende Messkörper die ihn anhaftende Fluidschicht als Grenzschicht beschleunigen muss. Die Vorgabe einer intern verrechneten, konstanten Massedichte im Beispiel der am Saatpunkt ist ausreichend. Dass die Leistungsfähigkeit des Messsystems sehr gut ist, belegt der in Echtzeit in den verschiedenen Phasen der diskontinuierlichen Verdampfungskristallisation von Weißzucker im industriellen Maßstab gemessene, unten diskutierte Verlauf der komplexen nach Viskositäten. /78/

Zur Regelung des gesamten diskontinuierlichen Kristallisationsprozesses von Saccharose aus technischen Lösungen mit Hilfe von Viskositätssignalen unter industriellen Bedingungen und in Echtzeit müssen deren Korrelationen mit technologisch maßgebenden Größen der unterschiedlichen Phasen des Chargenprozesses bekannt sein. Im gesamten Prozessverlauf von der konzentrierten technischen Saccharoselösung zur Kristallsuspension (Magma) ändern sich Viskositätskoeffizienten um fast 4 Zehnerpotenzen. Damit sind hohe Anforderungen an die Signalauflösung gestellt. Zudem durchlaufen die Prozesse schwer zu regelnde kritische Prozessphasen: z. B. die Kristallauflösung bei zu niedriger Übersättigung, die Sekundärkristallbildung bei zu hoher Übersättigung.

Die sehr gute Übereinstimmung der über die Viskositäten online ermittelten Gesamttrockenmassenanteile ist mit dem Gesamtverlauf der Verdampfungskristallisation als auch für das Zeitintervall des Eindickens bis zum Saatpunkt mit der Kornbildungsphase erkennbar. Bemerkenswert ist vor allem, dass die sehr unterschiedlichen Viskositätseinflüsse der Trockenmasse einerseits über das Kristallsaat und andererseits über den Muttersirup in weiten Konzentrationsbereichen richtig erfasst werden“ /78/. Technische Anwendungen sind nicht bekannt.

Es könnte eine sichere Messung im Einphasenbetrieb (Kristallkeimbildung) mit kleinen Grenzkorndurchmessern durchgeführt werden, aber bei Mehrphasenbetrieb könnte eine Blockade des Messsystems durch Kontakt auftreten.

3.3.2.7 Melasse

Die Melasse ist inzwischen für Anwendungen über die Hefe- und Ethanolproduktion hinaus ein Rohstoff von immer größer werdender Bedeutung. Ihre dunkle Farbe verdankt die Melasse einer Reaktion zwischen Zuckern und Aminosäuren infolge Maillard-Reaktion.

Nicht der gesamte Zucker der Rübe kann unmittelbar in kristalliner Form gewonnen werden, da ein Teil des Zuckers stofflich gebunden ist und nicht auskristallisieren kann.

Die Melasse enthält etwa zur Hälfte Saccharose, die durch Kristallisation nicht mehr gewinnbar ist, aber einer anderen Anwendung vorteilhaft zugeführt werden kann.

Der Melasseanfall liegt zwischen 4,5 und 5,5 kg/dt Rüben. /11/

Melasse ist definiert als wässrige Lösung aus Saccharose und Nichtsaccharose einer bestimmten Zusammensetzung und Trockensubstanzgehalt, die mit Saccharose bei Schleudertemperatur gesättigt ist. /75/ Melasse wird als Kohlenstoffquelle für Fermentationszwecke eingesetzt. Wegen des Zucker- und Rohproteingehalts ist Melasse auch als Futtermittel für die Rindermast, für Milchkühe, Pferde, Schweine und Geflügel geeignet. /76/

Die Viskosität von Melasse ist ein wichtiger Qualitätsfaktor, da sie unter Ausnutzung der Klebrigkeit der gelösten Zucker als Bindemittel für Futtermischungen dient und gleichzeitig als Gleitmittel in der Pelletpresse wirkt. /11/

Die Zusammensetzung der Melasse hängt von der Herkunft und der Technologieführung ab /8/. Die enthaltenen Nichtsaccharosestoffe bestimmen die Qualität und den Wert der Melasse. Die verschiedenen Nichtsaccharosekomponenten wirken sich unterschiedlich auf das Viskositätsverhalten aus.

Die Melassezusammensetzung ist differenziert, weil Zuckerrüben ein biologischer Rohstoff sind und die Verarbeitung darauf ausgerichtet wird, einen möglichst großen Teil der enthaltenen Saccharose in reiner Form zu gewinnen. Bis auf etwa 30 % der im Rohsaft enthaltenen Nichtsaccharosestoffe, die durch die Saftreinigung ausgeschieden werden, gehen alle löslichen Nichtsaccharosestoffe in die Melasse über. /11/

In der nachfolgenden Tab.3.11. ist die chemische Zusammensetzung einer üblichen Melasse enthalten.

Tab. 3.11. Zusammensetzung von Melasse /11/

Trockensubstanzgehalt	78 - 86 %
Saccharosegehalt	47 - 54 °S
Reinheit	58 – 64 %
Nichtsaccharosegehalt	28 – 34 %
Raffinosegehalt	0,6 – 1,6 %
Gehalt an reduzierenden Substanzen	0,1 – 2,5 %
Gesamtstickstoffgehalt	1,5 – 2,1 %
Aschegehalt	8 – 11,1 %
Kaliumgehalt	3,6 – 5 %
Natriumgehalt	0,3 – 1,6 %
Kalziumgehalt	0,2 – 1,0 %
Sulfitgehalt	0,005- 0,011 %
Farbindex	5200-25000
pH-Wert	6,8 – 8,6

Kalium ist das in Rübenmelasse am stärksten vertretene Kation, gefolgt von Natrium, Calcium und Magnesium. Mit zunehmendem Calciumgehalt steigt die Viskosität der Melasse.

Der Nachweis von Methoxyl-Gruppen deutet auf die Anwesenheit von löslichen ligninähnlichen Polymeren hin. Dem Vorkommen an Methoxyl-Gruppen von 0,3 bis 0,4 % entspricht ein Gehalt an löslichem Lignin von 2 bis 3 %. Dies könnte zur höheren Viskosität von Melasse beitragen.

Rübenmelasse enthält nur sehr wenige Substanzen, die als Wachse oder Fette beschrieben werden können, wohl aber einen bedeutenden Anteil an Polysacchariden und Hemicellulosen (Arabane), die die Viskosität erhöhen.

Die Lagertemperatur der Melasse sollte 40 °C nicht überschreiten. Wenn Rübenmelasse zu warm eingelagert wird, unterliegt sie ebenfalls chemischen Reaktionen, die CO₂-Bildung und Wärmeentwicklung hervorrufen./2/

Die Melasse wird bisher als Newtonsches Medium angesehen. Umfangreiches Material zu dieser Aussage veröffentlichten Schneider, Schliephake und Klimmek /69/.

Das Viskositätsverhalten begrenzt die Wasserentfernung während der Verdampfungskristallisation. Zu hohe Viskositäten limitieren die Kristallisationsrate und begrenzen damit die Verarbeitbarkeit des Magmas./71/

Ein freies (Ab-)Fließen und ordnungsgemäßes Zentrifugieren ist bei zu hohen Viskositäten unmöglich. Das hat zur Konsequenz, dass ein Nachproduktmagma mit einem weniger viskosen Muttersirup einen höheren Trockenmassegehalt aufweisen kann und damit eine höhere Ausbeute an Zucker ermöglicht und eine stärker erschöpfte Melasse resultiert.

Die Viskosität von Melasse wird in /43/ durchweg als dynamische Viskosität in Tabellenform angegeben.

Zugrunde liegt die 1965 von Breitung entwickelte Gleichung für die Berechnung der Temperatur- und Konzentrationsabhängigkeit von Standard-Melasse bei 40 °C:

$$\eta_1 = \eta \cdot [1 - 0,25 \cdot (1 - 0,01 \cdot q) \cdot (4,734 - 0,0379 \cdot \vartheta) \cdot w_{TS}] \text{ in Pas} \quad (3.31)$$

Diese Gleichung wurde anhand experimenteller Untersuchungen als vierparametrischer Ansatz abgeleitet. Die Viskosität hängt von der Basisviskosität η der reinen Saccharoselösung, der Trockensubstanz w_{TS} , der Temperatur T und der Reinheit der Melasse q ab.

Wie aus den Angaben von Hirschmüller und Zablinsky /79/ sowie Breitung /80/ und aus vorliegenden Untersuchungen hervorgeht, kann die Viskosität einzelner Melassechargen stark von der einer Durchschnittsmelasse abweichen. Bei hohem Alkalisalzgehalt ist die Viskosität geringer, bei erhöhtem Polysaccharidgehalt (Dextran, Lävan, Stärke, Pektinbruchstücke usw.) und Erdalkalisalzgehalt höher.

Voruntersuchungen von Senge /49/ zeigen, dass Betriebsmelassen im Trockensubstanzbereich von 76 bis < 83 % bei allen Untersuchungstemperaturen Newtonsches Verhalten aufweisen. Oberhalb von 83 % liegt das Viskositätsverhalten einer nicht-Newtonschen, strukturviskosen Flüssigkeit vor. Ab einer Trockensubstanz von 83 %, deutlich aber bei 84 %, werden bei Extrapolation des Ansatzes nach /79/ erheblich höhere Viskositätsdaten, als messtechnisch ermittelt, berechnet. Damit ist die Gleichung von Breitung /80/ zur Berechnung der dynamischen Viskosität bei der Beschreibung von Energie-, Impuls- und Stofftransportvorgängen im Bereich von mehr als 83 % Trockensubstanz nicht mehr Stand der Technik.

Die dynamische Viskosität der Melasse hat einen großen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit der Nachproduktmagmen. /71/ Völlig anders verhalten sich Melassen, die bei Technologieführung über Elektroporation hergestellt wurden. /81/

Bisher wurde noch nicht eindeutig festgestellt und publiziert, unter welchen komplexen Bedingungen sich Melasse als eine Newtonsche oder nicht-Newtonsche Flüssigkeit darstellt. /50/. Die Kenntnis der Fließeigenschaften von Melasse besitzt für die Modellierung von ver-

fahrenstechnischen Prozessen in der Zuckerindustrie zunehmend Bedeutung. Zur Dimensionierung der Prozessausrüstungen für die Lagerung mit ca. 86 % Trockenmasse und dem hydraulischen Transport nach Verdünnung und Erwärmung der Melasse benötigt man aktuelle fluiddynamische Kennwerte zur sicheren Auslegung von Pumpen, Wärmeübertragern und Rohrleitungssystemen. Einfluss von Phosphat auf die rheologischen Eigenschaften von Melasse bei verschiedenen Temperaturen. Mit einem Brookfield-Rheometer wurden rheologische Eigenschaften von Melasse untersucht bei 40, 45, 50, 55, und 60 °C unter Zusatz von Kaliumhydrogenphosphat. Die Viskosität der Melasse stieg mit steigender Phosphatkonzentration und nahm mit steigender Temperatur ab. Bei niedriger Temperatur weist die Melasse nicht-Newtonsches Verhalten auf. Die Aktivierungsenergie nahm mit steigender Phosphatkonzentration ab, was auch eine Verringerung des Strömungswiderstandes bedeutet. /82/ Generell gilt, dass das Fließverhalten von Melasse von der Trockensubstanz, Temperatur, der Relation Nicht-Saccharosestoffe/Wasser, Prozessbedingungen, Viskosität des Magmas, Größe und Form des Magmas abhängt. /71/

3.3.2.8 Vinasse

Vinasse, aus dem lateinischen „vinaceus“ bedeutete ursprünglich Weinhefe. Es ist genau wie Melasse, ein honigartiger dunkelbrauner Sirup, der als Folgeerzeugnis nach dem Fermentieren von Melasse entsteht. /83, 84/

Vinasse ist ein Abfallprodukt der Zuckerherstellung. Vinassen sind auf 50-70 % Trockensubstanz eingedickte Melassefermentationsrückstände, die sich nach ihrem Ausgangsmaterial vorwiegend Zuckerrüben- oder Zuckerrohrmelasse und dem jeweiligen Gärungsverfahren unterscheiden. Vinasse entsteht zum Beispiel bei der fermentativen Herstellung von Alkohol /85/, der Gewinnung von Back- und Presshefen /86/ sowie organischen Säuren /87, 88/, Glutamat, Lysin /89/, Antibiotika /90/ u. a. Produkten. /84/

Neben einer großen Zahl von Nicht-Melasse-Emulsionen aus industrieller (Lignin-Sulfate, Hemi-Zellulose Rohsaft) und landwirtschaftlicher Nahrungsmittelproduktion (Laktose, Molke und Soja-Nebenprodukten, Weizenliquören, hydrolysierten Permeaten und Kartoffel-Nebenprodukten der Stärkeproduktion) sind Zuckerrüben- und Zuckerrohr-Vinassen aus Melassefermentationsprozessen zu wichtigen Nebenprodukten bei der Verwendung in Futter und Düngemitteln geworden. /91, 92/ Nach dem bundesdeutschen Futtermittelrecht /93/ sind Vinassen seit 1976 zur Verarbeitung im Wiederkäuerfutter zugelassen und werden dort als „Melasserest für Rinder, Schafe und Ziegen“ bezeichnet /84/. Die angestrebte Verwertung der Vinasse als Futtermittel ist bei einer Verdaulichkeit der organischen Substanz in Höhe von 73,5 % grundsätzlich sinnvoll, insbesondere als günstige N-Quelle. Eine begrenzte Schmachthaftigkeit, hohe Kaliumgehalte sowie sehr hohe Sulfatgehalte limitieren den Einsatz von Vinasse (max. 3% Vinasse in der Gesamtration), nicht zuletzt angesichts möglicher nachteiliger Effekte auf die Gesundheit und Leistung der Tiere. /94/ Von der geschätzten

Gesamtproduktion in der Europäischen Union (1,2 Millionen Tonnen) werden 50 bis 60 % in der Futtermittelindustrie genutzt. /95/

Als ein weiterer Abnehmer bietet sich die Landwirtschaft direkt an. Die Melasseschlempe als ein natürliches Recyclingprodukt dem Boden wieder zuzuführen, um ihn „vor Entkräftung zu schützen“. Vor 30 Jahren nahm das Düngen mit eingedickter Schlempe, der Vinasse, konkrete Formen an. Entscheidender Wirkungsträger der Vinasse sind die rd. 3,5 % Stickstoff. Sie sind der Bestandteil von Aminosäuren und dem Betanin und stehen der Pflanze direkt oder nach Mineralisation im Boden als eine ständig fließende N-Quelle zur Verfügung. Durch den Restzucker in der Vinasse vermehren sich die rotteführenden Bakterien und Pilze außerordentlich rasch und wandeln dabei den Vinasse-N in Körpereiwweiß um. Zuckerrüben-Vinasse kann auch Ammonium-Phosphat oder andere N und P₂O₅ Produkte zugesetzt werden, wie auch Magnesium für komplette Flüssig-Dünger-Produkte (Patente sind erhältlich). Durch seinen Borgehalt kann Vinasse auch als schützender Wirkstoff bei Pflanzen gegen bestimmte Krankheiten (z. B. Herzfäule in Zuckerrüben) betrachtet werden. Die Hälfte der gesamteuropäischen Produktion (ca. 550000 t) wird als Dünger genutzt. /83/

Unentwickelte oder teilweise entwickelte Applikationen von Vinasse schließen den Gebrauch als Bindemittel für industrielle Abfallprodukte (Stahlindustrie) ein, ein Katalysator für Polyreaktion (wegen des Betains in Rüben-Vinasse), Fiberglas und Mineral oder feine Abfalladditiva zu flüssigem und festem Heizmaterial, konkretem Plastifikator, Biogasproduktion, Fischfutter, Futterhefe (Torulahefe), Ammonifikation, Verbrennung von Pottasche und Rückgewinnung von Energie /91, 95, 96/ und zur Verbesserung der Kompostproduktion. /97/

Bei der Beurteilung der Vinasse-Qualität sind vor allem der Trockensubstanzgehalt, der Gesamtstickstoffgehalt sowie der Gehalt an Rohprotein und verdaulichem Protein von Bedeutung. Weiterhin sind der Kalium-, Natrium-, Rohasche- und Betaingehalt der jeweiligen Vinasse qualitätsbestimmend. /98/

Die Zusammensetzung variiert je nach Herkunft der Melasse (Zuckerrohr, Zuckerrübe) und Fermentationsprozess. Angesichts der Vielfalt der auf dem Markt befindlichen Vinassen wird anhand des Ausgangsmaterials eine Differenzierung vorgenommen.

Aber auch weniger häufig vorkommende Produkte wie Citrusmelasse können zur Vinasseproduktion verwendet werden. Daher erfolgte die Einordnung/Charakterisierung von Vinassen in Anlehnung an das Ausgangsprodukt.

Darüber hinaus bestehen aber auch Unterschiede in der Herstellungstechnik. Während für die Zuckerrohr- und Citrusvinassen in der Literatur lediglich die Herstellung mittels fermentativer Entzuckerung beschrieben ist, ist die Produktion der Zuckerrübenvinasse auch auf dem Wege der physikalischen Entzuckerung möglich, siehe Tab. 3.12./84/

Tab. 3.12. Zusammensetzung von Vinasse in % /83, 84/

Nach	/83/		/84/	
	Rüben	Rohr	Rüben	Rohr
Trockensubstanz	55-70	40-55	62,1-76,5	57,1
Invertzucker	0,5-3	2-5	k. A.	k. A.
Aschegehalt	HPCV:4-8 MPCV:18-22	12-18	30	22,3-32,6
Proteingehalt	HPCV:35-50 MPCV:16-34	8-15	k.A.	8,7-10,2
Kalium als K ₂ O	HPCV:1,5-4 MPCV:6-9	4-6	10,6	8-11,6
pH-Wert	5-6,5	3,5-4	k. A.	k. A.

LEWICKI (1978) nimmt eine Unterteilung der Vinassen anhand ihres Rohproteingehalts in drei Gruppen vor und benennt sie als HPCV (High Protein Containing Vinasse), MPCV (Middle Protein Containing Vinasse) und LPCV (Low Protein Containing Vinasse). Diese Einteilung ist ebenfalls in der Tabelle 3.12. dargestellt.

Davon entfällt ein großer Anteil des Gesamtrohprotein bei nicht entkalkierten Zuckerrübenvinassen auf Betain (9 - 41 %) und Glutamin (15 - 26 %), welches wiederum zum wesentlichen Teil aus L-Pyrrolidincarbonsäure und L-Glutamin (22,9 - 24,9 %) besteht. Ammoniak ist nur zu 0,4 - 0,9 % enthalten /99/. Troccon und Demarquilly (1989) /100/ ermittelten bei der Untersuchung einer nicht entkalkierten physikalisch entzuckerten Zuckerrüben-Vinasse 58,6 % Betain und 3,9 % Ammoniak.

Der Prozess des Entkalkierens hat durch einen Austausch von Kalium gegen Ammoniumsulfat eine Anreicherung von NH₄⁺ bzw. Ammoniak in der teil- und vollentkalkierten Zuckerrübenvinasse zur Folge. Dementsprechend findet sich in den entkalkierten Vinassen ein deutlich höherer Anteil der Ammoniakfraktion am Rohproteingehalt mit 14,7 % bis 52,1 % als in den nicht entkalkierten Vinassen sowie ein verminderter Betainanteil (17,8 - 38,1 %) /89, 101/. Zuckerrübenvinasse hat im nichtentkalkierten Zustand einen Aschegehalt von bis zu 30 %. Dabei nimmt Kalium den mengenmäßig größten Anteil mit bis zu 10,6 % in der Trockensubstanz ein /99, 102/. Es kann allerdings durch eine Fällung des Kaliums zur Reduzierung auf bis zu 0,3 % in der Trockensubstanz kommen /89/ (alkalisierte Vinassen). Das Verfahren der chemisch-physikalischen Entzuckerung von Zuckerrüben durch Flüssigkeitschromatographie geht mit einer Teilentsalzung einher. Die Alkaliionen werden dabei größtenteils durch Calciumionen ausgetauscht und die entstehende Vinasse weist somit einen geringen Anteil von Kalium 0,8 % mit einem dementsprechend hohen Anteil von 7,4 % Calcium auf /99/. Bezüglich des Sulfatgehalts von Vinassen wurden lediglich von /103/ Angaben für die Zuckerrohrvinassen in Höhe von durchschnittlich 26,0 g/kg und von /84/ mit 1,8 g/kg für eine teilalkalisierte Zuckerrübenvinasse gemacht.

Man kann die Zusammensetzung der Vinasse mit Melasse vergleichen. Die hier untersuchte nicht entkalkierte Zuckerrübenvinasse aus der Backhefeherstellung hatte nur noch einen

geringen Restzuckergehalt (Melasse: 73 %, Vinasse: 29,1 %). Der Proteingehalt war dagegen in der Vinasse nahezu dreimal höher als in der Melasse (Melasse: 14,8 %, Vinasse 31,5 %). Als mengenmäßig vorherrschende Aminosäuren erwiesen sich sowohl in der Vinasse, als auch in der Melasse Glutamin bei Vinasse 8,17 %, Melasse 3,6 % und Asparaginsäure Vinasse 1,5 %, Melasse 0,83 %. Zudem war die Vinasse sehr Kaliumionenreich 7,1 % /104/. Stoffkennwerte von Vinasse wurden bis jetzt kaum untersucht, obwohl man diese 25 Jahre als eine Zeit des großen Fortschritts, sowohl wissenschaftlich als auch praktisch, in der Anwendung von Vinasse betrachten darf. Die Viskosität der Vinasse hängt von der Konzentration, dem Rohmaterial und dem Verdunstungsprozess ab.

Hintergrund der Messungen sind die verstärkte Anwendung von Melasse und Vinasse und Nachfragen aus der Industrie zu fehlenden aktuellen Kennwerten zur Technologieoptimierung. Um verfahrenstechnische Prozesse in der Zuckerindustrie modellieren zu können, ist es von großer Bedeutung, die Fließeigenschaften der Vinasse zu bestimmen. Die Kenntnis aktueller fluiddynamischer Kennwerte dient der Dimensionierung der Prozessausrüstungen für die Lagerung mit ca. 65 % TS und dem hydraulischen Transport nach Eindickung der Vinasse und ermöglicht die gesicherte Auslegung von Pumpen, Wärmeübertragern und Rohrleitungssystemen.

4 Material und Methoden

4.1 Material

4.1.1 Frische und gelagerte Rüben

Die im Lagerungsversuch verwendeten Zuckerrüben stammen aus der Ernte 2005 und 2008, Der erste Teil der Rüben stammt aus dem Anbaugebiet Zuckerfabrik C, sie wurden am 06.04.05 mit einer Ablageentfernung von 7,9 cm ausgesät und am 20.05.05 auf einen Endabstand von 0,154 m vereinzelt. Die Rüben wurden am Tag der Aussaat mit Ammoniumnitrat-Harnstofflösung auf einen Sollwert von 120 kg N/ha inklusive mineralischem Bodenstickstoff gedüngt. Alle Pflanzenschutzmaßnahmen wurden ortsüblich durchgeführt. Am 12.10.05 wurden die Rüben mit einem einreihigen Parzellenrübenroder geerntet. Die Rüben wurden zur Probennahme von Hand sortiert. Beschädigte, beinige oder schlecht geköpfte Rüben wurden verworfen. Die Rüben wurden zum Teil maximal bis 30 Tage in einer Miete auf dem Feld gelagert. Die Miete hatte eine Höhe von 2,20 m, eine Breite von 3 m und eine Länge von 5 m. Es bestand keine Belüftung und Abdeckung. Zur Erfassung der Bruchkraft von gefrorenen Rüben wurden in den Monaten Dezember bis Januar die Rüben in einem kleinen selbstgebauten Lager gelagert. Aufgrund von starkem Frost im Untersuchungszeitraum wurden die Rüben eingefroren. Für die Untersuchungen wurden die Rüben bei Raumtemperatur 6 Stunden vor der Untersuchung aufgetaut.

Der zweite Teil der Rüben stammt aus der Ernte des Anbaugebietes Sidi Bennour (Marokko) vom Jahr 2008. Die Zuckerrüben waren so verpackt, dass Beschädigungen durch Quetschen weder während des Transportes zum Flughafen Casablanca noch von Frankfurt Airport möglich waren. Die Rüben wurden am 06.10.07 mit einer Ablageentfernung von 8,2 cm ausgesät. Die wurden am Tag der Aussaat mit Ammoniumnitrat-Harnstofflösung auf einen Sollwert von 80 kg N/ha inklusive mineralischem Bodenstickstoff gedüngt. Alle Pflanzenschutzmaßnahmen wurden ortsüblich durchgeführt. Am 09.04.08. wurden die Rüben mit einem einreihigen Parzellenrübenroder geerntet. Die Rüben wurden zur Probennahme von Hand sortiert. Beschädigte, beinige oder schlecht geköpfte Rüben wurden verworfen. Die Rüben wurden zum Teil maximal bis 27 Tage in einem Kühlhaus des Lebensmitteldiscounters Kaufland bei konstanten 8 °C gelagert. Zur Erfassung der Bruchkraft von gefrorenen Rüben wurden die Rüben bei zwei unterschiedlichen Minustemperaturen in einem Kühlhaus teilweise bis -6 ± 1 °C und teilweise bis -11 ± 1 °C gelagert. Nach 3 Tagen bei Frost-Temperatur wurden die Rüben wieder für 2 Tage bei 8 °C gelagert. Die Rüben wurden vor der Untersuchung aufgetaut.

4.1.1.1 Chemische Analytik

Frische Rüben wurden im Labor zerkleinert und gefrostet. Der aus den Rüben hergestellte Rübenbrei wurde homogenisiert und der Mark- und Zuckergehalt bestimmt. Nach Zusatz von Wasser und Aluminiumsulfatlösung (3g/l) mazeriert für 2 min. Nach der Filtration wurde die Lösung polarisiert durch Polarimeter PROPOL(PM_30.0). Danach wurde der Zuckergehalt bestimmt.

Der Markgehalt wurde aus dem Rübenbrei nach viermaliger Extraktion der löslichen Bestandteile mit heißem Wasser und Ethanol durch Trocknen bei 105 °C bestimmt /105, 106/. Die chemische Zusammensetzung ist anhand eigener Analytik und zu Vergleichszwecken in Tab. 4.1 erfasst.

Tab. 4.1. Chemische Zusammensetzung von frischen Zuckerrüben (Auswahl)

Quelle	/2/	/4/	/107/	Fabrik C	Fabrik D
	%	%	%	%	%
H ₂ O	73-76,5	76,5	77,15	76,83	76,10
Trockensubstanz	23,5-27	20-23,5	22,85	23,17	23,90
Saccharose	14-20	16,5	17,41	17,21	17,80
			mmol/100g	mmol/100g	mmol/100g
Kalium	0,2	0,21	4,23	3,8	K. A.
Natrium	0,02 – 0,04	0,03	0,65	0,33	k. A.
α-Amino-N	1,0 – 1,20	0,03	1,39	0,82	k. A.
red. Zucker	k.A.	< 0,1	0,64	k. A.	k. A.
Betain	0,20 – 0,30	k. A.	1,68	k. A.	k. A.
Lösl. Gesamt-N	k.A.	k. A.	5,46	k. A.	k. A.
Cellulose	1,10 – 1,50	1,2	k. A.	k. A.	k. A.

In Tab.4.2 wurden die Ergebnisse der chemischen Zusammensetzung von Rüben erfasst.

Tab. 4.2. Laborergebnisse von frischen Rüben (Werk C) n = 10

	°S	Markgehalt	Masse
Probe Nr.	%	%	g
1	16,38	4,05	834
2	16,97	3,95	760
3	17,09	4,78	698
4	17,12	4,58	748
5	16,92	4,64	882
6	17,44	4,46	726
7	17,3	4,96	896
8	17,25	5,08	808
9	17,64	5,12	678
10	17,87	5,25	755

4.1.2 Technische Saccharoselösungen

4.1.2.1 Rohsaft

Die technischen Saccharoselösungen sind für die durchgeführten Untersuchungen des Rohsaftes aus den Produktionsabläufen der Zuckerfabriken A und B entnommen. In der folgenden Tabelle 4.3. sind die durchschnittlichen Analysedaten (Kampagne) von Rohsaft (Werke A und B) aufgeführt.

Tab. 4.3. Analysedaten von Rohsaft der Werke A und B /108, 109/

Probe	Werk	°S	w _{TS}	q	pH
		(%)	(%)	(%)	
Rohsaft	A	15,45	16,66	92,7	5,93
Rohsaft	B	16,1	17,9	89,94	6,1

4.1.2.2 Technische Saccharoselösung Dicksaft

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

Die Analysedaten einiger untersuchter Dicksäfte sind tabellarisch angegeben in Tab 4.4.

Tab. 4.4. Analysedaten der untersuchten Dicksäfte

Probe	°S	w _{TS}	q	pH	Leitfähigkeit Asche	Ges.Härte auf CaO	F _{IE} (420)	F _{IE} (560)
	%	%	%		g/100g	g/100g		
1	63,85	71,8	88,93	8,05	2,73	0,075	7158,67	1257,25
2	66,49	71,9	92,48	8,85	1,435	0,055	3143,95	512,53
3	62,62	66,9	93,60	9,11	1,736	0,05	2593,43	355,15
4	61,63	66,2	93,10	9,25	1,35	0,038	3258,28	555,68
5	64,82	69,0	93,94	9,13	1,43	0,035	4170,20	747,58

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

Zur Erhöhung der Konzentration stand ein Laborvakuumverdampfapparat zur Verfügung.

In dieser Apparatur konnten die Proben thermisch schonend bei etwa 50 °C verdampft werden.

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

4.1.2.3 Melasse aus Melasselager

Die untersuchten Melassen stammen von der Nordzucker AG, Werk C. Die Proben Werk C wurden chronologisch über den Kampagnezeitraum vor dem Einpumpen in den Lagertank

entnommen. Der Trockensubstanzgehalt wurde durch Verdünnung mit dest. Wasser unterhalb der Lagerkonzentration auf 79 bis 82,0 % TS eingestellt.

Die Analysedaten sind in Tabelle 4.5 enthalten. Die Originaltrockensubstanz ist mit w_{TS1} , die Verdünnungskonzentration mit w_{TS2} bezeichnet.

Tab. 4.5. Analysedaten der Melasseproben in %

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
w_{TS1}	86,7	84,9	84,1	84,4	83,4	84,2	83,6	85	85,2	85,9	84,7	85,8	85,6	83,9	85,5	86,2
q	64,2	62,7	62,5	61,6	61,6	61,1	62,2	61,1	61,4	62,5	61	61,8	62,2	61,7	62,8	62,8
°Z	55,7	53,1	52,6	51,9	51,4	51,4	52	51,9	52,3	53,7	51,5	53,1	53,2	51,8	53,7	54,2
w_{TS2}	82	80,1	81,7	79,3	78,9	79	81	80,4	80,7	81,9	80,0	81,2	81,1	81,6	80,9	81,4

4.1.2.4 Vinasse aus Vinasselager

Die untersuchten Vinassen stammen aus der ungarischen und niederländischen Alkoholproduktion sowie der belgischen Zitronensäureproduktion. Zucker wurden bei allen Proben nicht festgestellt.

Die Analysedaten sind in Tabelle 4.6. enthalten.

Tab. 4.6. Analysedaten der Vinasseproben

Probe	w_{TS}	pH	Protein	Kalium	Calcium	Natrium	Sulfat	N
	%		%	%	%	%	%	%
Ungarn	51,0	6,0	k. A.	14,3	0,89	2,57	k. A.	4,06
Niederlande	65,0	6,5	19,0	9,0	k. A.	1,5	8,5	4,6
Belgien	70,0	6,1	26,3	1,41	0,018	1,3	k. A.	4,1

4.2 Methoden

4.2.1 Parallelplattendeformation mit Materialprüfmaschine Instron 4301

Die Bestimmung der Bruchkraft, Arbeit und des Elastizitätsmoduls wurden mit der Materialprüfmaschine Instron Modell 4301 durchgeführt. Verwendet wurde eine Kraftmessdose mit einer maximalen Kraft von 5 kN und der maximale Deformationsweg betrug 12 mm. Die Rüben wurden mit Hilfe eines Probestempels bei einer Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min und $d/h = 1,5$ der Bruchfestigkeitsprüfung unterzogen.

In folgender Abbildung 4.1 ist die Materialprüfmaschine Instron Modell 4301 dargestellt.



Abb. 4.1. Materialprüfmaschine Instron Modell 4301

4.2.2 Viskositätsbestimmung mit online-Messsystem Physica Rheoswing RSD 1-1

In Tab. 4.7 sind die Daten des Torsionsschwingers RHEOSWING[®] RSD 1-1 zusammengefasst.

Tab. 4.7. Torsionsschwinger RHEOSWING[®] RSD 1-1

Parameter	Technische Daten
Vorgabebereich Mediumdichte	0,40 bis 3,999 g/cm ³
Druckbereich	0 bis 150 bar
Maximale Temperatur	bis 110 °C
Messbereich der dynamischen Viskosität	0,3 bis 100 mPas

4.2.3 Kapillarmessungen zur Bestimmung der Viskosität des Extraktes

Die Bestimmung der Viskosität des Rohsaftes wurde mittels Kapillarviskosimetrie (Cannon-Fenske-Routineviskosimeter, Typ-Nr. 51303 und Ubbelohde-Viskosimeter, Typ-Nr. 50103) durchgeführt (Abb.4.2).

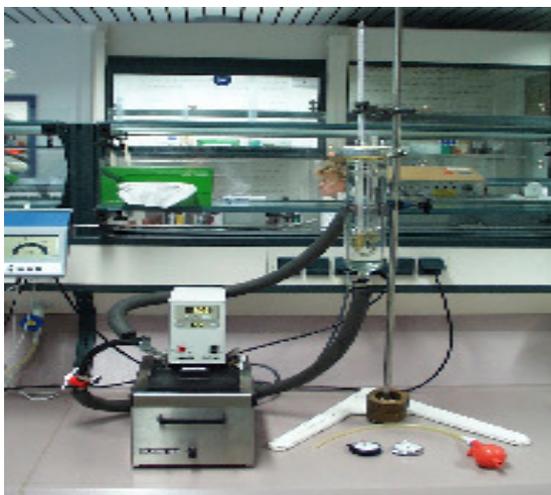


Abb. 4.2. Kapillarviskosimetrie zur Bestimmung der Viskosität des Extraktes

Bei den Untersuchungen wurde ein Rohsaft nach der Filtration (über Rundfilter Fa. Schleicher & Schuell 589¹, Schwarzband, aschefrei) auf die notwendigen Temperaturwerte temperiert. Es wurde jeweils die Durchlaufzeit für ein bestimmtes Volumen gemessen (Dreifachbestimmung). Die kinematische Viskosität und die dynamische Viskosität wurden mit Hilfe der Gleichungen 4.1 und 4.2 ermittelt.

$$v = K_1 \cdot (t - k_1) \quad \text{in m}^2/\text{s} \quad (4.1)$$

$$\eta = v \cdot \rho \quad \text{in Pas} \quad (4.2)$$

4.2.4 Luftlagerreometer UDS 200

Mit dem Rheometersystem UDS 200 können die Fließeigenschaften der Messsubstanzen in einer offenen Messzelle bestimmt werden. Der Einfluss von Reibungskräften durch Luftlager im Messantrieb ist damit minimiert und es werden demzufolge sehr genaue Messungen möglich. Für die Untersuchung der Saccharoselösungen sind Zylindermesssysteme Z1 DIN und Z2 DIN am besten geeignet. Für Melasseuntersuchungen wird das Messsystem Z3 DIN verwendet.

Die Saccharoselösungen wurden bei den Temperaturen 70, 60, 50, 40, 30, 20, 15, 10 und 5 °C untersucht. 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.

Zur Ableitung der empirischen Näherungsgleichung der Viskosität unter Vernachlässigung des relativ geringen Einflusses der Schergeschwindigkeit erfolgten die Messungen mit linear abnehmender Schergeschwindigkeit von 500 bis 5 s⁻¹.

Bei hohen Viskositäten musste die maximale Schergeschwindigkeit aufgrund nicht ausreichenden Drehmoments des Messantriebs reduziert werden.

Neben der Viskositätsbestimmung im niedrigen Temperaturbereich war hauptsächlich die Bestimmung des nicht-NEWTONschen-Verhaltens der Saccharoselösungen Ziel der Untersuchungen mit diesem Hochleistungsreometer.

Der Messabschnitte sind in der Tabelle 4.8. für diese Untersuchungen an den Saccharoselösungen dargestellt.

Tab. 4.8. Messabschnitte

Nr.	Phasen	Schergeschwindigkeit in s ⁻¹
1	Vorscherung	500
2	Ruhephase	0
3	Hinlaufkurve	Von 5 auf 500
4	konstante Schergeschwindigkeit	500
5	Rücklaufkurve	Von 500 auf 5

Der 5. Messabschnitt wurde für die Auswertungen zum nicht-Newtonschen Verhalten durch Regressionsrechnung verwendet.

4.2.5 Luftlagerrheometer MCR 301 – Melasse/Viskositätsmessung

Eingesetzt wurden das hightech Luftlagerrheometer MCR 301 für Produktentwicklung und Forschung (Anton Paar, Germany). Die Melasse wurde bei den Temperaturen 60 – 20 °C mit $\Delta T = 10$ K untersucht. Nach jeder Messung wurden die Messproben ausgetauscht, um Verfälschungen der nachfolgenden Messwerte durch Konzentrationserhöhung der Probe, bedingt durch das offene Messsystem und der damit verbundenen Wasserverdunstung, auszuschließen. Folgende Messvorgabe wurde mit Aufnahme von 5 Messabschnitten in der Tabelle 4.9. dargestellt.

Tab. 4.9. Messabschnitte

Nr.	Phasen	Schergeschwindigkeit in s^{-1}
1	Vorscherung	50
2	Ruhephase	0
3	Hinlaufkurve	1 ... 50
4	Konstante Schergeschwindigkeit	50
5	Rücklaufkurve	50 ... 1

Die Auswertung erfolgte mit der Software des Herstellers vergleichsweise nach dem Newtonschen Schubspannungsansatz und dem Potenzansatz von OSTWALD und De WAELE.

In Abb.4.3. ist das Luftlagerrheometer MCR 301 dargestellt.



Abb. 4.3. Luftlagerrheometer MCR 301

5 Physiko-mechanische Eigenschaften von lagernden Zuckerrüben

Die Veränderung der physiko-mechanischen Eigenschaften lagernder Zuckerrüben soll in diesem Kapitel durch materialwissenschaftliche Untersuchungen objektiver physikalischer Kennwerte bestimmt werden. Die Rüben einer Miete aus der Zuckerfabrik C (Deutschland), die unmittelbar nach Ernte und Feldrandlagerung angeliefert wurden, sowie die Rüben aus Marokko (Fabrik D) werden in Abhängigkeit von der Lagerzeit und der Lagertemperatur an repräsentativen Messstellen (Ebene 1 und Ebene 2) durch Kraft-Weg-Messungen untersucht.

5.1 Chemische, physiologische und meteorologische Veränderungen

Zuckerrüben verlieren normalerweise während der Lagerung an Masse infolge von Wasserverlust und Saccharoseverlust. Die größte Veränderung in der chemischen Zusammensetzung der Zuckerrüben ist die Abnahme des Saccharosegehalts. Die Abhängigkeit des täglichen Saccharoseverlustes von der durchschnittlichen Stapeltemperatur ergibt sich nach Schmidt und Manzke /6/ als technischer Mittelwert nach Gleichung 5.1:

$$\Delta w_{ZLa} = 0,004 + 0,0028 \cdot \vartheta_R \quad \text{in kg/dt-d} \quad (5.1)$$

Gültigkeitsbereich: $3 \text{ °C} \leq \vartheta_R \leq 12 \text{ °C}$, $s = \pm 0,006 \text{ kg}/(\text{dt-d})$

Informatorisch ist in Tabelle 5.1. eine kalkulatorische Abschätzung des Masseverlusts anhand der Lagerzeit angeführt.

Tab. 5.1. Berechneter Masseverlust während der Lagerung nach Schmidt /36/

Lagerzeit	Massenverlust in kg/dt
10 d	0,57
20 d	1,14
30 d	1,71
90 d	5,13

Bei der Lagerung in Mieten strömt die Außenluft ständig, also auch bei höherer Temperatur und geringerer relativer Feuchte durch die Schüttung, so dass die Rüben mehr Wasser abgeben als bei der Lagerung im Großstapel /36/. Chemische und physiologische Veränderungen basieren u. a. auf den Einfluss der einwirkenden meteorologischen Bedingungen.

Bei den Untersuchungen der Rüben aus der Zuckerfabrik C lagen die Temperaturen in einem Standardbereich, abgesehen von einer kurzen Periode am Ende der Lagerung, bei knapp über 12 °C , siehe Tabelle 5.2.

Tab. 5.2. Meteorologische Daten der Lagerung des Anbaugebietes der Zuckerfabrik C /110/

Lagerdauer in Tagen	\bar{S}_{TM} in °C	\bar{S}_{RFM} in %
10	$12,46 \pm 1,80$	$89,4 \pm 4,71$
20	$10,94 \pm 2,53$	$85,95 \pm 6,14$
30	$11,69 \pm 2,44$	$85,2 \pm 6,37$

In Abb. 5.1. ist der Temperaturverlauf und die relative Feuchte während der Lagerzeit dargestellt.

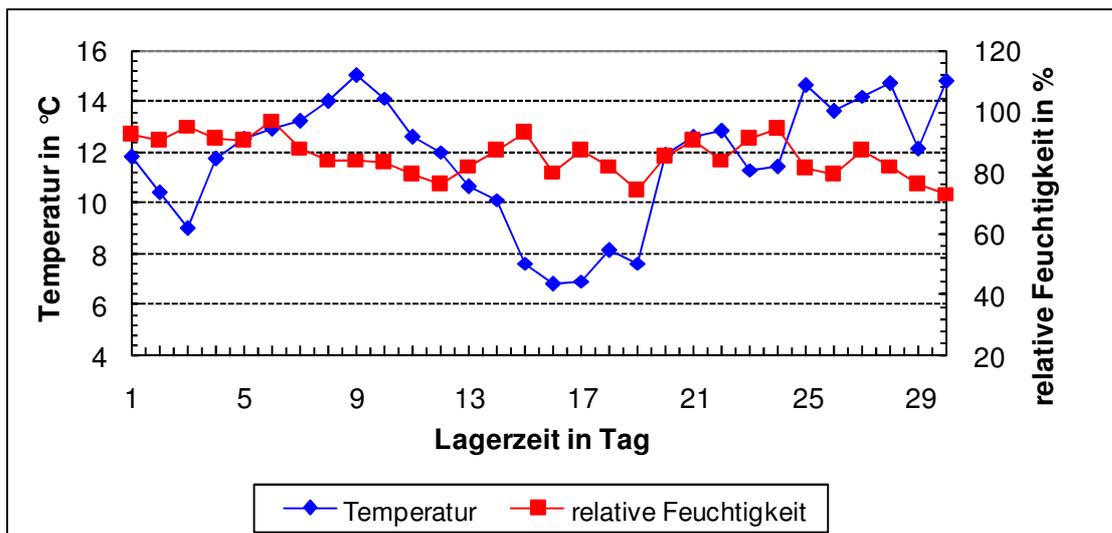


Abb. 5.1. Meteorologische Daten der Mietenlagerung für Zuckerfabrik C /110/

Bei den Untersuchungen für Rüben der Zuckerfabrik D (Marokko) lag die Temperatur in einem Standardbereich bei einem konstanten Wert von 8 °C.

Der Wasserverlust bedeutet Turgor-Verlust und bewirkt einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Zuckerrüben.

Die Verteilung der Inhaltsstoffe ist in den morphologischen Segmenten der Rübe unterschiedlich. Von der Wurzel zur oberen Sprossachse verringert sich der Zuckergehalt.

Während der Zuckerspeicherung ersetzt Zucker zunehmend die in der Vakuole befindlichen Osmotika wie Kalium- und Natriumionen. Die Vakuole enthält fast ausschließlich gelöste Saccharose. Die verbleibenden 5 % des Zellinnenraums füllt das Cytoplasma aus. Durch die hohe Saccharosekonzentration von etwa 0,5 mol/l in der Vakuole gegenüber der Saccharosekonzentration in der Zellwand von 0,06 mol/l werden der hohe osmotische Druck und dadurch eine hohe Bruchkraft verursacht. Zudem sind die parenchymatischen Zellen in diesem oberen Teil weniger entwickelt. Des Weiteren sind die Zellwände dicker im Vergleich zu den oberen Teilen mit den jüngeren Zellen. Diese Änderungen verursachen die Unterschiede in den physikomechanischen Eigenschaften der Rüben. /33/

5.2 Methodenentwicklung

In der Literatur veröffentlichte Ergebnisse über die mechanischen Eigenschaften der Zuckerrüben datieren aus den sechziger und siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts /29, 111/. Der Elastizitätsmodul wurde mit einer einfachen, von Vukov konstruierten Apparatur gemessen. Die gleichzeitige Bestimmung des Elastizitätsmoduls mehrerer Probekörper zur Ermittlung des statistischen Durchschnittes erfolgt mit Hilfe der Biegeprobe. Es wird der Deformationsunterschied zwischen dem be- und entlasteten Zustand der länglichen, zylinderförmigen

Probekörper gemessen, die an einem Ende parallel eingefasst sind, am anderen Ende frei emporragen. Der Elastizitätsmodul berechnet sich nach /37/ mit Hilfe von Gleichung 5.3:

$$E = \frac{l_B^3}{f \cdot J} \cdot \frac{q}{3} \text{ in p/m}^2 \quad (5.3)$$

Vukov ermittelte, dass der Rübenkörper hinsichtlich seiner elastischen Eigenschaften makroskopisch, wie auch statistisch als annähernd isotrop und homogen zu betrachten ist.

Eine konventionelle Materialprüfmaschine mit Kraft-Weg-Führung wurde nicht verwendet, mehrere Proben wurden gleichzeitig untersucht. Wie eingespannt wurde, ist nicht bekannt.

Eigene Untersuchungen der physiko-mechanischen Eigenschaften der Zuckerrüben sollen in folgender Reihenfolge behandelt werden:

- Methodenentwicklung
- Kraft-Weg-Messungen (Bruchkraft sowie Verformungsarbeit)
- Elastizitätsmodul
- Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften des Rübengewebes von speziellen Parametern

5.2.1 Vorbereitung der Proben

Vor den Untersuchungen wurden die Rüben manuell vorgereinigt und schonend gewaschen.

Am 14.10.2005 wurden die frischen Rüben zur Mark- und zur Zuckerbestimmung analysiert.

Für die Versuchsdurchführung wurden zwei Schnittebenen im Rübenkörper gewählt, in Abb. 5.2. sind die Messschnitte und andere geometrische Angaben der Rübenproben dargestellt.

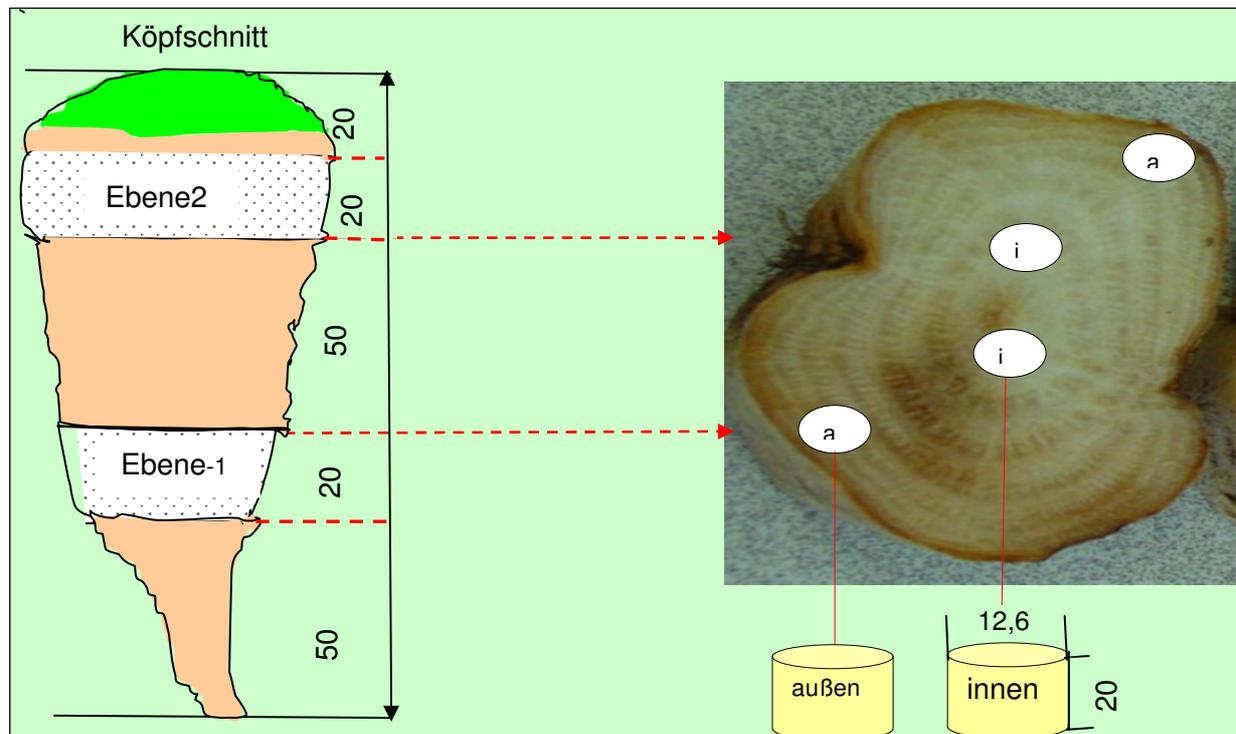


Abb. 5.2. Messschnitt Probengewinnung

Aus diesen Ebenen wurden Proben aus dem inneren Bereich innerhalb des ersten Ringes ($d = 0,03 \text{ m}$) und aus dem äußeren Bereich entnommen. Wegen der unterschiedlichen Größe der Schnittfläche konnten in der Ebene 1 nur jeweils eine innere und äußere Probe und in der Ebene 2 jeweils zwei Proben (innen und außen, jetzt $d = 0,08 \text{ m}$) entnommen werden. In der Tab. 5.3. sind Parameter der Parallelplattendeformationsversuche dargestellt.

Tab. 5.3. Parameter der Parallelplattendeformationsversuche

Parameter	(Zuckerfabrik C - 2005)	(Zuckerfabrik D- 2008)
Durchmesser der zylindrischen Probe	12,66 mm	12,66 mm
Höhe der zylindrischen Probe	* $20 \pm 2 \text{ mm}$	$13 \pm 1 \text{ mm}$
Fahrgeschwindigkeit	100 mm/min	100 mm/min
Kraftmessdose	5 kN	5 kN
Messpunkteabgriff	10 Punkte/s	20 Punkte/s
Wegbegrenzung	12 mm	12 mm
Prüftemperatur	ca. 20 °C	ca. 20 °C

*Das Höhen-/ Durchmesser Verhältnis wurde nicht an das übliche Kriterium $h/d = 1$ bis $1,08$ angepasst. Eine Ausbauchung der Proben konnte nicht festgestellt werden.

5.2.2 Erfassung einer Masterkurve

Physiologisch-chemische Veränderungen des Rüben Gewebes wurden am Beispiel physikalisch-mechanischer Kennwerte bei der Lagerung der Rüben untersucht. Mit der Materialprüfmaschine Instron 4301 wurde unter Anwendung der Parallelplattendeformation mit einem Prüfstempel das Rüben Gewebe deformiert/komprimiert. Die Ermittlung der Materialeigenschaften erfolgte durch die Aufnahme von Kraft-Weg- Kurven und deren Umwandlung in Spannungs-Deformations-Diagramme. Bei Überschreiten der Bruchgrenze reißen die Zellwände im Rübenmaterial, wobei die Flächen aufeinander gleiten. Bei weiterer Deformation trat schrittweise die totale Zerstörung des Prüfkörpers durch Zerfließen ein. Die aufgenommenen Daten wurden bearbeitet, um eine graphische Darstellung für Deformation und Bruchkraft zu ermöglichen und damit eine einheitliche Diagrammgeometrie darzustellen.

In Abb. 5.3. ist ein Originalmessverlauf der 1-Ebene (Außenbereich) von einer Rübe nach 20 Tagen Lagerung exemplarisch bei 12 mm Fahrweg dargestellt.

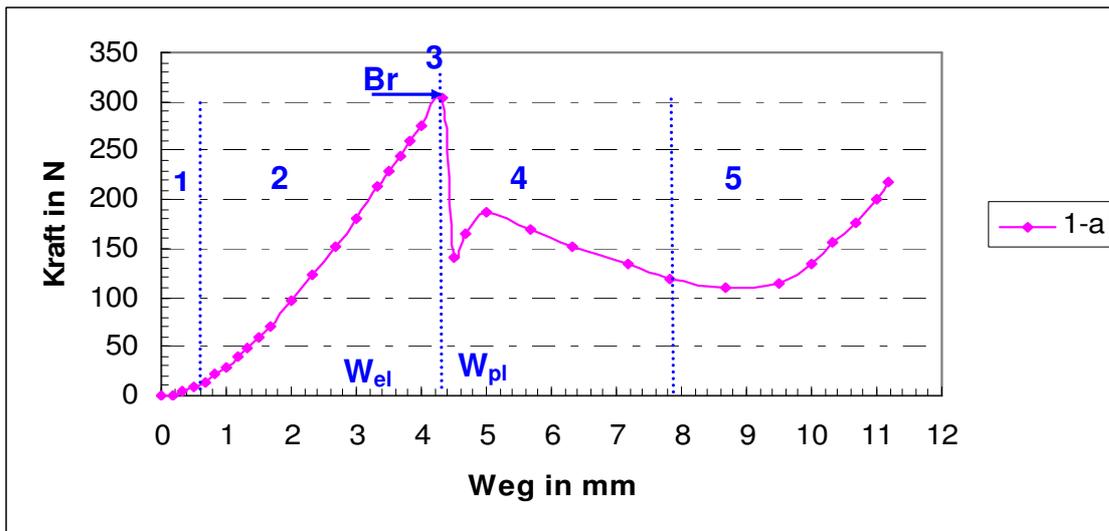


Abb. 5.3. Exemplarisches Beispiel eines Originalmessverlaufes der Kraft-Weg-Messung
Eindeutig können im Diagramm folgende Deformationsbereiche der Rübenprobe festgestellt werden:

1. Adaptionenphase
2. Linearer Bereich mit konstantem Anstieg der Kraft-Weg-Kurve (ideal elastischer Bereich)
3. Bruchpunkt
4. Übergangsbereich mit anschließender plastischer Deformation
5. Zerfließen

5.3 Physiko-mechanische-Untersuchungen von Rüben Zuckerfabrik C

Am Beispiel einzelner Rüben, die aus Anbaugebieten in Deutschland und Marokko stammen, sind die Bereiche exemplarisch in der Abb. 5.4. bis 5.9. in den folgenden Kapiteln dargestellt.

5.3.1 Bruchkraft und Verformungsarbeit

5.3.1.1 Bruchkraft und Verformungsarbeit bei frischen Rüben

Die Abbildung 5.4. enthält einen exemplarischen Überblick über die Kraft-Weg-Kurven der Einzelmessstellen einer frisch geernteten Rübe zur Erläuterung der angewandten Methode.

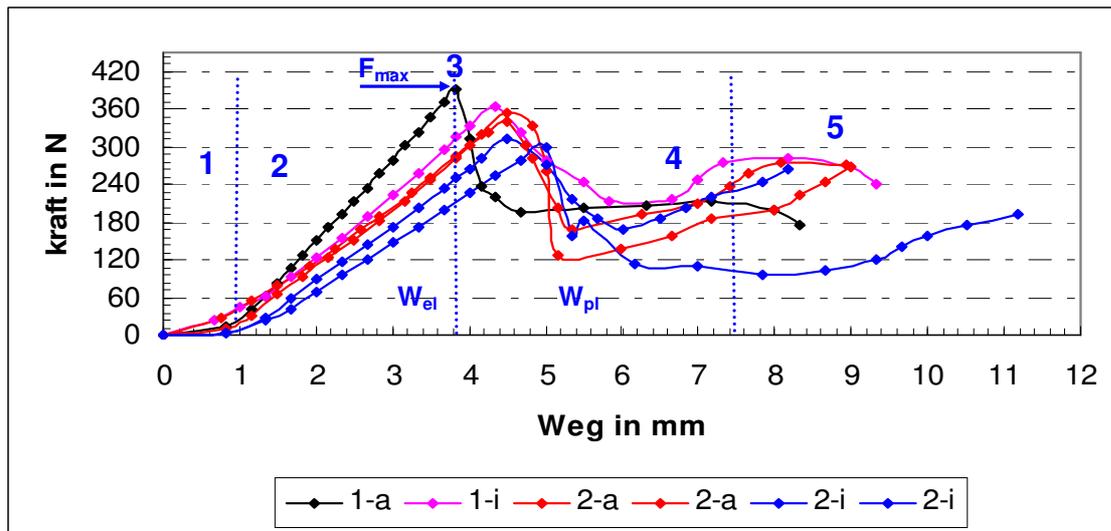


Abb. 5.4 Kraft-Weg-Messungen einer frischen Rübe in zwei Ebenen (Zuckerfabrik C)

Bei allen Versuchsdurchführungen ist im Bereich 2 ein linearer Kurvenverlauf zu verzeichnen. Der plötzliche Abfall der Messkurve ist auf das Zerreißen des Zellgewebes bei Erreichen der Bruchspannung im Punkt 3 zurückzuführen. Wegen des frischen Zustands der Rübe bildet sich ein enger Zerfließbereich in Abb. 5.4. heraus.

In Tab. 5.4. sind die ermittelte Bruchkraft sowie der Anteil der elastischen und plastischen Arbeit bereichsabhängig von einer frischen Rübe exemplarisch dargestellt.

Tab. 5.4. Physiko-mechanische Eigenschaften von einer frischen Rübe ($\vartheta = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$)

Proben	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$
F_{Br} in N	391	363	377 ± 20	352	339	312	299	325 ± 24	343 ± 33
W_{el} in Nm	0,639	0,665	$0,652 \pm 0,018$	0,636	0,670	0,539	0,596	$0,610 \pm 0,056$	$0,624 \pm 0,049$
W_{pl} in Nm	0,892	0,420	$0,656 \pm 0,236$	0,405	0,381	0,352	0,539	$0,419 \pm 0,083$	$0,498 \pm 0,203$
$W_{\text{el}}/W_{\text{pl}}$	0,71	1,58	$1,15 \pm 0,434$	1,57	1,75	1,53	1,10	$1,48 \pm 0,275$	$1,37 \pm 0,389$

Die Arbeit berechnet sich nach den Gleichungen 5.4 bis 5.6 für die relevanten Bereiche 2-3 und 3-4 in Abb.5.4. als Fläche unter der Kurve.

$$W = \int F ds \quad (5.4)$$

$$W_{\text{EL}} = 0,5 F_{\text{max}} (s_3 - s_2) \quad \text{in N}\cdot\text{m} \quad \text{und} \quad (5.5)$$

$$W_{\text{PL}} = \bar{F} (s_4 - s_3) \quad \text{in N}\cdot\text{m} \quad (5.6)$$

Aus Tabelle 5.4. ist erkennbar, dass die elastische Arbeit größer ist als der plastische Anteil.

Der Quotient zwischen elastischer und plastischer Arbeit ist durchschnittlich $> 1,3$.

Der überwiegende elastische Anteil im Vergleich zum plastischen Anteil ist generell bei allen Messkurven zu sehen.

Aus der Tabelle 5.4. ist auch zu ersehen, dass in Ebene 1 eine höhere Bruchkraft sowie elastische Arbeit ermittelt wird als in Ebene 2. Das liegt daran, dass Ebene 1 im Vergleich zu den Zellen von Ebene 2 mehr altes und entwickeltes Parenchymgewebe enthält.

5.3.1.2 Kraft-Weg-Messung nach 10 Tagen Mietenlagerung

Abbildung 5.5. enthält einen exemplarischen Überblick über die Kraft-Weg-Kurven der Einzelmessstellen einer Rübe nach 10 Tagen Lagerung zur Erläuterung der angewandten Methode.

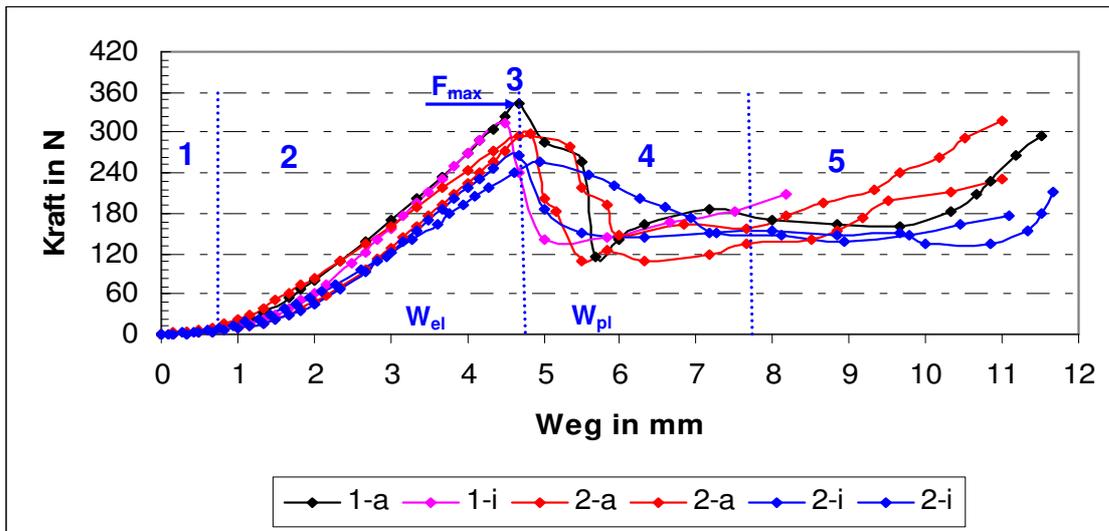


Abb. 5.5. Kraft-Weg-Messungen Einzelrübe nach 10 Tagen Mietenlagerung

In Tabelle 5.5. ist die ermittelte Bruchkraft sowie der Anteil der elastischen und plastischen Arbeit der Messstellen von einer Rübe nach 10 Tagen Lagerung dargestellt.

Tab. 5.5. Physiko-mechanische Eigenschaften Einzelrübe 10 Tagen Lagerung

Proben	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$
F_{Br} in N	343	314	328 ± 21	299	295	266	257	279 ± 18	296 ± 28
W_{el} in Nm	0,599	0,504	$0,552 \pm 0,07$	0,507	0,565	0,441	0,502	$0,504 \pm 0,044$	$0,520 \pm 0,05$
W_{pl} in Nm	0,509	0,504	$0,507 \pm 0$	0,593	0,492	0,783	0,49	$0,59 \pm 0,138$	$0,562 \pm 0,10$
$W_{\text{el}}/W_{\text{pl}}$	1,17	1,00	$1,08 \pm 0,12$	0,85	1,14	0,56	1,02	$0,89 \pm 0,252$	$0,96 \pm 0,20$

Aus der Tabelle 5.5. ist eine Verringerung der elastischen und eine Steigerung der plastischen Arbeit im Vergleich zur frischen Rübe erkennbar. Der Quotient $W_{\text{el}}/W_{\text{pl}}$ liegt durchschnittlich nahe 1,0. Dies ist mit dem Wasserverlust der Rüben nach einer 10tägigen Lagerung zu erklären, bei der die viskoelastischen Eigenschaften der Rübenzellen erhöht werden.

5.3.1.3 Kraft-Weg-Messung nach 20 Tagen Mietenlagerung

Abbildung 5.6. gibt einen exemplarischen Überblick über die Kraft-Weg-Kurve aller Messstellen einer Einzelrübe nach 20 Tagen Lagerung.

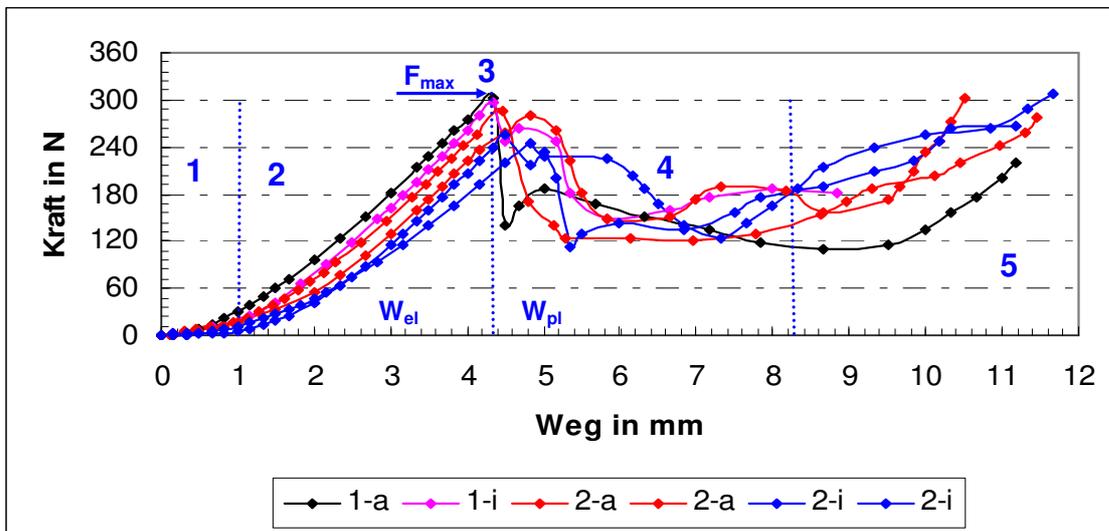


Abb. 5.6. Kraft–Weg-Messungen einer Rübe nach 20 Tagen Mietenlagerung

In Tab. 5.6. ist die ermittelte Bruchkraft sowie der Anteil der elastischen und plastischen Arbeit der Messstellen nach 20 Tagen Lagerung dargestellt.

Tab. 5.6. Physiko-mechanische Eigenschaften einer Rübe nach 20 Tagen Lagerung

Proben	1-a	1-i	$\bar{X}_{Ebene-1}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{Ebene-2}$	$\bar{X}_{Ges.-B}$
F_{Br} in N	308	298	303 ± 7	286	280	256	244	266 ± 20	$278,43 \pm 24,56$
W_{el} in Nm	0,555	0,477	$0,516 \pm 0,055$	0,478	0,516	0,376	0,423	$0,448 \pm 0,061$	$0,471 \pm 0,064$
W_{pl} in Nm	0,742	0,592	$0,667 \pm 0,106$	0,548	0,488	0,554	0,425	$0,504 \pm 0,060$	$0,558 \pm 0,107$
W_{el}/W_{pl}	0,75	0,80	$0,77 \pm 0,041$	0,87	1,06	0,68	0,99	$0,90 \pm 0,167$	$0,85 \pm 0,146$

Generell zeigt Tabelle 5.6. eine weitere Verringerung des Anteils der elastischen Arbeit.

5.3.1.4 Kraft-Weg-Messung nach 30 Tagen Mietenlagerung

Abbildung 5.7. gibt einen exemplarischen Überblick über die Kraft-Weg-Kurve bei den Proben aus den Messebenen und Bereichen der Rübe nach 30 Tagen Lagerung.

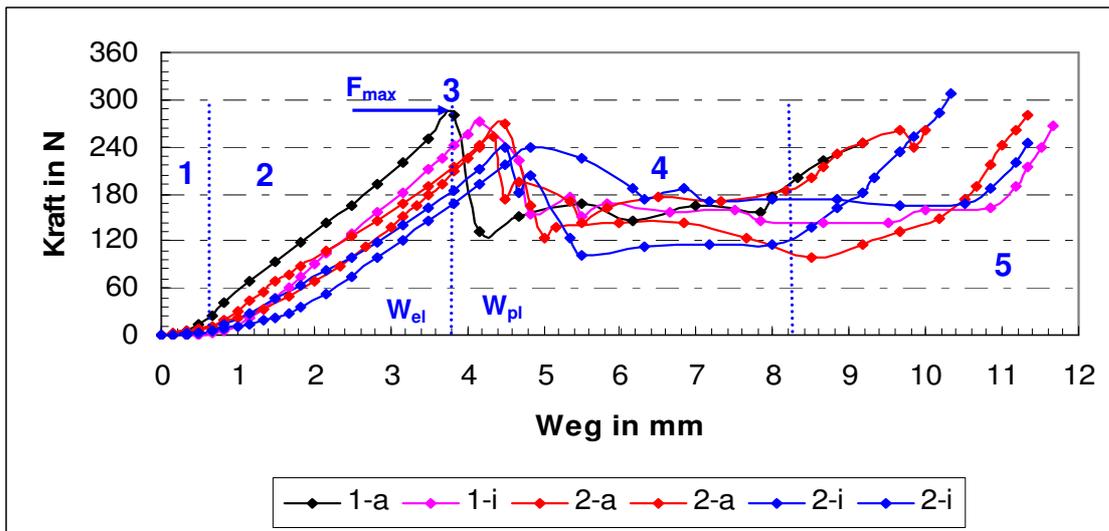


Abb. 5.7. Kraft-Weg-Messungen einer Rübe nach 30 Tagen Mietenlagerung

Aus der Abbildung ist eine Reduzierung der Bruchkraft zu erkennen. Im Bereich 4 (plastisches Fließverhalten) wurde ein flacher Verlauf der Messkurve und deshalb eine Steigerung des plastischen Arbeitsanteils und eine weitere Erhöhung im Bereich 5 (Zerfließbereich) aufgrund des Welkens und der Atmungsverluste der Rüben nach 30 Tagen Lagerung beobachtet.

In Tab. 5.7. ist die ermittelte Bruchkraft sowie der Anteil der elastischen und plastischen Arbeit in den Messstellen nach 30 Tagen Lagerung dargestellt.

Tab. 5.7. Physiko-mechanische Eigenschaften einer Rübe nach 30 Tagen Lagerung

Proben	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$
F_{Br} in N	281	272	277 ± 6	268	252	240	238	250 ± 14	$258,65 \pm 17$
W_{el} in Nm	0,482	0,434	$0,458 \pm 0,034$	0,517	0,411	0,425	0,422	$0,444 \pm 0,049$	$0,449 \pm 0,041$
W_{pl} in Nm	0,730	0,920	$0,825 \pm 0,134$	0,551	0,710	0,552	0,837	$0,663 \pm 0,138$	$0,717 \pm 0,148$
$W_{\text{el}}/W_{\text{pl}}$	0,66	0,47	$0,57 \pm 0,134$	0,93	0,57	0,76	0,50	$0,69 \pm 0,194$	$0,65 \pm 0,17$

Aus Tabelle 5.7. kann ermittelt werden:

1. Weitere Verringerung der elastischen Arbeit im Vergleich zu frischen Rüben
2. Verringerung des Quotienten $W_{\text{el}}/W_{\text{pl}}$ auf 0,65

5.3.1.5 Mechanische Eigenschaften aufgetauter Rüben

Die Lagerung erfolgt in einem selbstgebauten Silo ohne Abdeckung. Die Rüben wurden durch kalte Luft (-16 °C für 48 Stunden) stark gefroren. Danach wurden sie bei Raumtemperatur aufgetaut.

Abbildung 5.8. gibt einen exemplarischen Überblick über die Kraft-Weg-Kurve aller Messstellen einer aufgetauten Rübe.

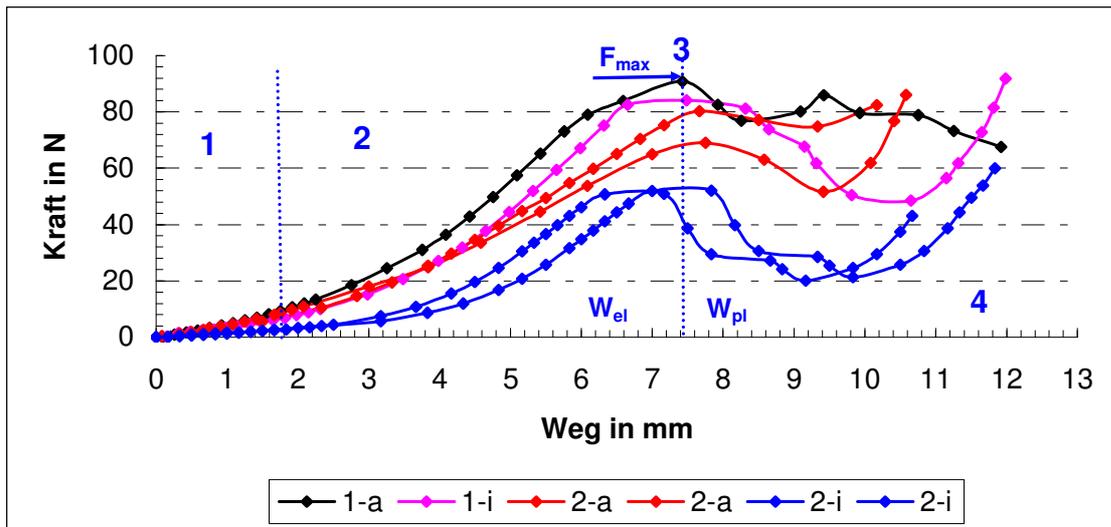


Abb. 5.8. Kraft-Weg-Kurve einer aufgetauten Rübe

Der Vergleich zwischen den Kraft-Weg-Kurven der aufgetauten und der frischen Rüben zeigt eine erhebliche Reduzierung der maximalen Bruchkraft bei den aufgetauten Rüben. Die Mittelwerte sinken um fast 80 %.

In der Tab. 5.8. ist die ermittelte Bruchkraft sowie der Anteil der elastischen und plastischen Arbeit der Messstellen einer aufgetauten Rübe dargestellt.

Tab. 5.8. Physiko-mechanische Eigenschaften einer aufgetauten Rübe

Proben	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$
F_{Br} in N	90	84	87 ± 4	80	68	50	52	63 ± 14	71 ± 16
W_{el} in Nm	0,126	0,131	$0,129 \pm 0,004$	0,127	0,105	0,081	0,050	$0,091 \pm 0,033$	$0,103 \pm 0,03$
W_{pl} in Nm	0,468	0,365	$0,417 \pm 0,073$	0,282	0,282	0,150	0,193	$0,227 \pm 0,066$	$0,290 \pm 0,11$
$W_{\text{el}}/W_{\text{pl}}$	0,26	0,35	$0,30 \pm 0,064$	0,45	0,37	0,54	0,25	$0,40 \pm 0,123$	$0,37 \pm 0,11$

Es wurde eine erhebliche Senkung des elastischen Anteils sowie des Quotienten zwischen beiden Anteilen festgestellt. Durch die Frosteinwirkung wird die Gewebestruktur erheblich zerstört.

5.3.2 Ermittlung des Elastizitätsmoduls

Die Zuckerrüben zeigen im σ, ε -Diagramm einen elastischen Bereich, der durch eine Gerade gekennzeichnet ist. In Abbildung 5.9 wird am Beispiel einer modifizierten Messkurve der elastische Bereich definiert.

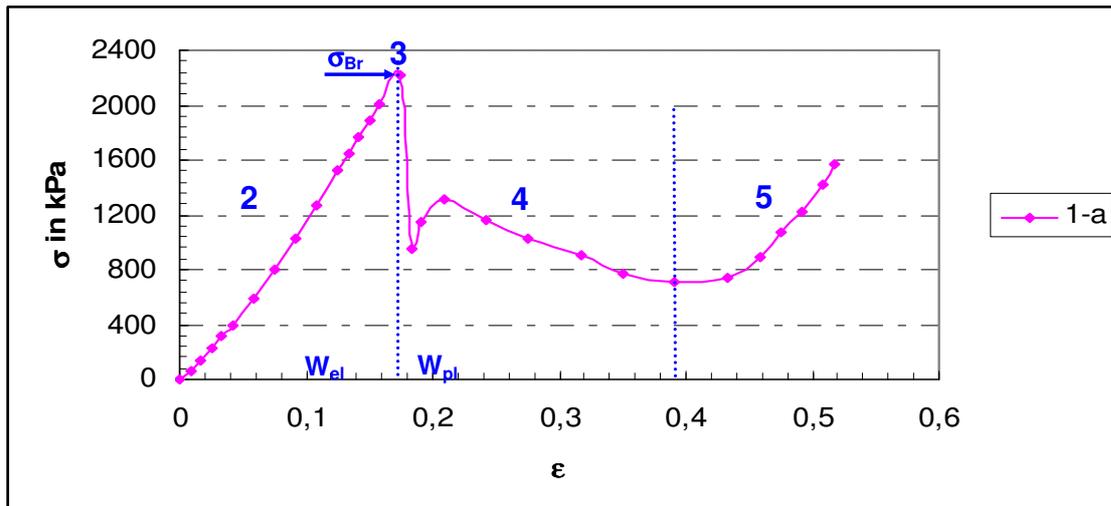


Abb. 5.9. Exemplarische Darstellung des Außenbereichs einer Rübe nach 20 Tagen Mietenlagerung

Das elastische Verhalten wird bis zu der kritischen Bruchspannung berechnet. Danach liegen irreversible plastische Verformungen des Prüfkörpers im Material und zum Schluss das Zerfließen vor. Mit Hilfe der in der Festigkeitslehre benutzten Gleichung 3.1 kann der Elastizitätsmodul ermittelt werden. Da die Deformationen nicht zu groß waren, wurde der Elastizitätsmodul nach Gleichung (3.1) berechnet und auf die Nutzung der Hencky-Deformationsgleichungen verzichtet. Die Abhängigkeit der Elastizitätsmodule von der Probenahmestelle und Lagerungszeiten wird in den Abbildungen 5.10. bis 5.14. gezeigt. In diesen Abbildungen sind ab Abschnitt 2 der Originalmesskurve aus den Abbildungen 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, und 5.8. enthalten.

5.3.2.1 Exemplarisch Erfassung des Elastizitätsmoduls eine Rübe bei verschiedenen Lagerzeiten

In der Abbildung 5.10. ist Abschnitt 2, der Originalmesskurve aus Abb.5.4. enthalten.

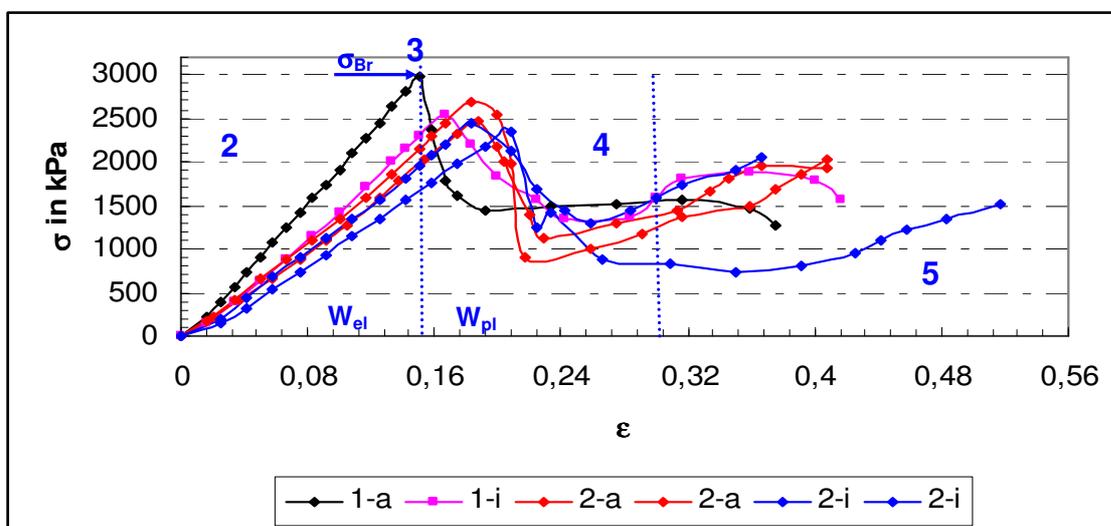


Abb. 5.10. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer frischen Rübe

Der elastische Bereich wird eindeutig am Beispiel der rechnerisch ermittelten Funktion $\sigma(\epsilon)$ nachgewiesen.

In Abbildung 5.11. ist der Abschnitt 2 der Originalmesskurve aus Abb.5.5. enthalten.

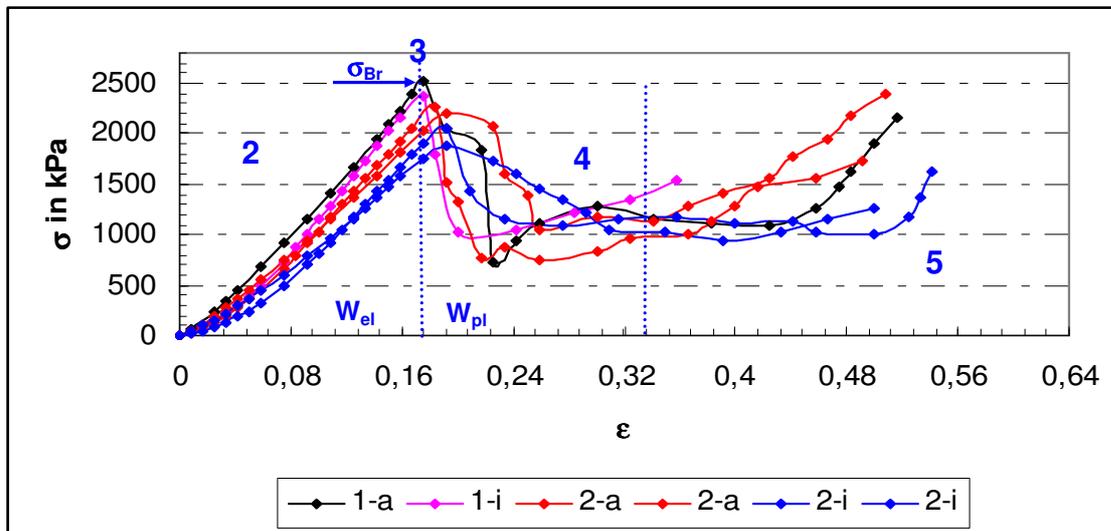


Abb. 5.11. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Rübe nach 10 Tagen Lagerung

Im Gegensatz zu den frischen Rüben ist der Abstand der ersten Kurve (1-Ebene-außen) zu den weiteren Kurven gering. Mit zunehmender Bruchspannung steigt die Abweichung der Kurven voneinander.

In der Abbildung 5.12. ist der Abschnitt 2 der Originalmesskurve aus Abb.5.6. enthalten.

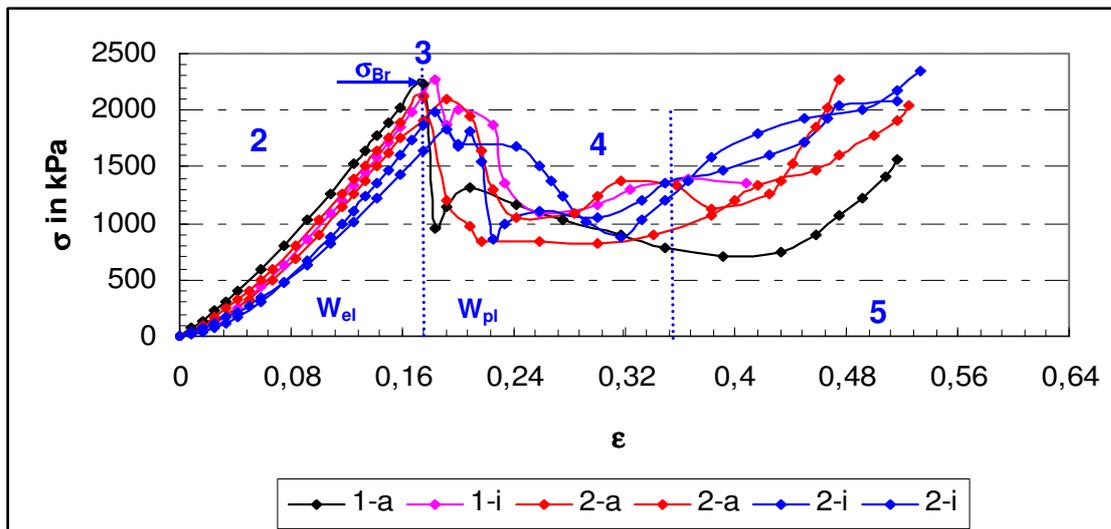


Abb. 5.12. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Rübe nach 20 Tagen Lagerung

In der Abbildung 5.13. ist der Abschnitt 2 der Originalmesskurve aus Abb.5.7. enthalten.

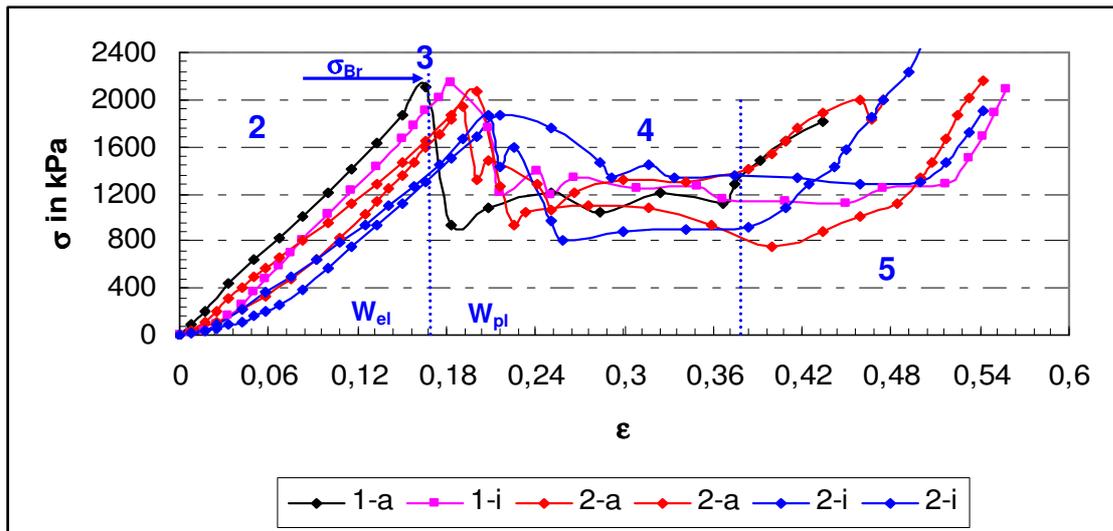


Abb. 5.13. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Rübe nach 30 Tagen Lagerung

In der Abbildung 5.14. ist Abschnitt 2 der Originalmesskurve aus Abb.5. 8. enthalten.

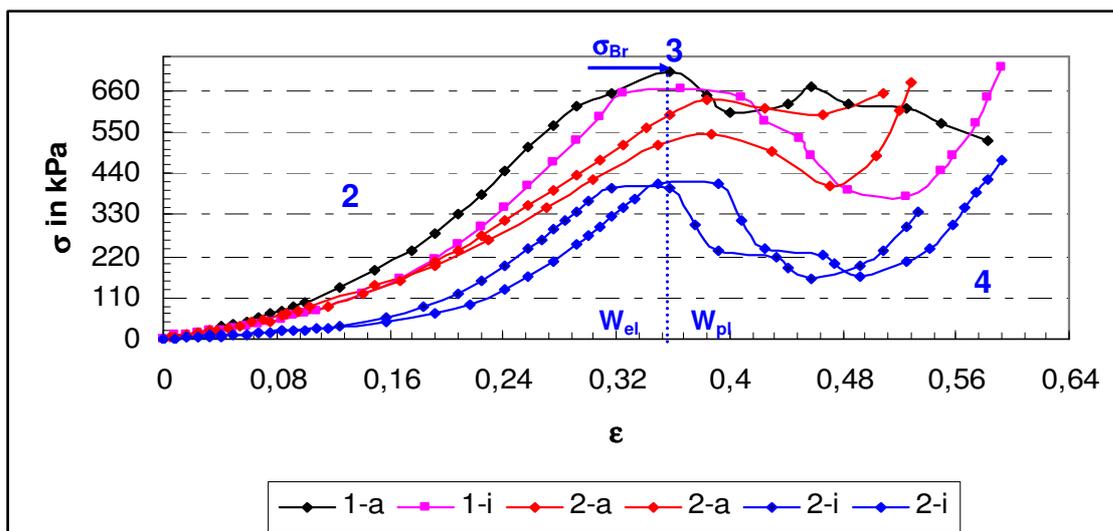


Abb. 5.14. Spannungs-Dehnungs-Diagramme einer aufgetauten Rübe

Tabelle 5.9. enthält die Einzelwerte der Elastizitätsmodule bei verschiedenen Lagerzeiten der Rüben. Grundlage der Auswertung sind die obigen Abbildungen.

Tab. 5.9. Elastizitätsmodule in kPa der Messungen aus Abb.5.10. bis 5.14.

Pro.	1-a*	1-i*	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-E}}$
fR	19897	15173	17535 ± 3340	14712	13175	13335	11283	13126 ± 1409	14596 ± 2678
10 d	14449	13602	14026 ± 599	12352	11254	10760	9868	11059 ± 1036	12048 ± 1598
20 d	12716	12381	12549 ± 237	12117	10908	10843	9547	10854 ± 1050	11419 ± 1095
30 d	12652	11733	12193 ± 650	10370	10090	9007	8617	9521 ± 842	10412 ± 1418
AR	1979	1807	1893 ± 122	1662	1406	1050	1121	1310 ± 281	1504 ± 343

Die Daten aus Tabelle 5.9. zeigen, dass der Elastizitätsmodul der Zckerrbenprobe von der

Entnahmestelle und von der Lagerzeit abhängig ist. Es wurde eine erhebliche Senkung des Elastizitätsmoduls bei aufgetauten Rüben festgestellt.

5.4 Physiko-mechanische-Untersuchungen von Rüben Zuckerfabrik D (Marokko)

5.4.1 Bruchkraft und Verformungsarbeit

5.4.1.1 Bruchkraft und Verformungsarbeit bei frischen Rüben

Abbildung 5.15. enthält einen exemplarischen Überblick über die Kraft-Weg-Kurven der Einzelmessstellen einer frisch geernteten Rübe zur Erläuterung der angewandten Methode.

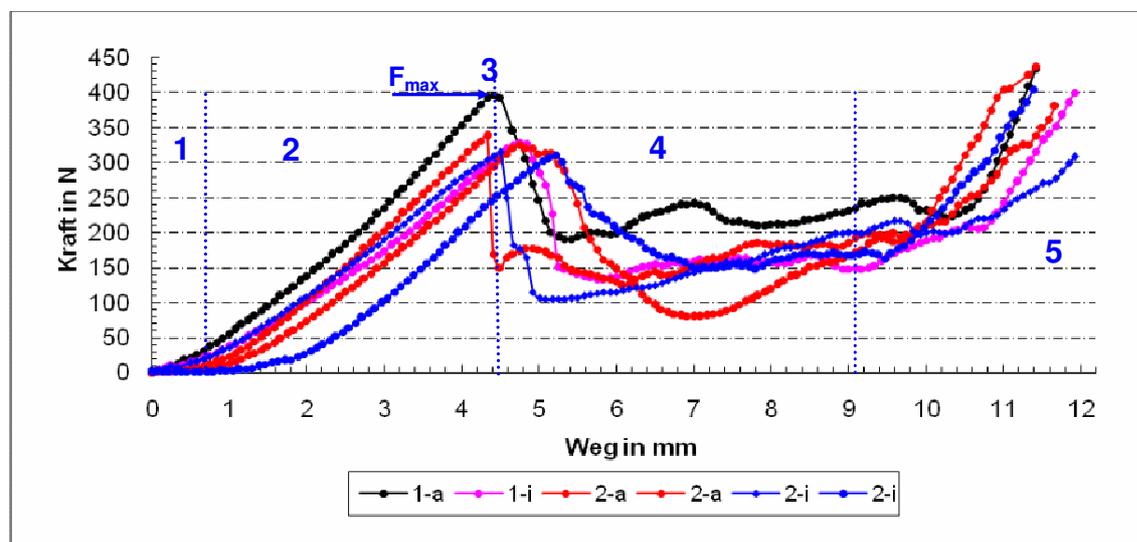


Abb. 5.15. Kraft-Weg-Messungen einer frischen Rübe in zwei Ebenen (Zuckerfabrik D)

Bei allen Versuchsdurchführungen ist im Bereich 2 ein linearer Kurvenverlauf zu verzeichnen. Eine Homogenität des Rübenmaterials ist **nicht** erkennbar. Der plötzliche Abfall der Messkurve ist auf das Zerreißen des Zellgewebes bei Erreichen der Bruchspannung im Punkt 3 zurückzuführen. Bei allen Versuchsdurchführungen ist im Bereich 5 ein Anstieg des Kurvenverlaufs zu verzeichnen.

In Tab. 5.10. ist die ermittelte Bruchkraft sowie der Anteil der elastischen und plastischen Arbeit bereichsabhängig von einer frischen Rübe exemplarisch dargestellt.

Tab. 5.10. Physiko-mechanische Eigenschaften von einer frischen Rübe ($\vartheta = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$)

Proben	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$
F_{Br} in N	404	328	366 ± 53	326	340	314	310	322 ± 14	337 ± 34
W_{el} in Nm	0,753	0,661	$0,707 \pm 0,09$	0,577	0,578	0,593	0,546	$0,574 \pm 0,02$	$0,618 \pm 0,08$
W_{pl} in Nm	0,361	0,426	$0,394 \pm 0,05$	0,445	0,241	0,442	0,478	$0,402 \pm 0,10$	$0,398 \pm 0,09$
$W_{\text{el}}/W_{\text{pl}}$	2,08	1,55	$1,81 \pm 0,37$	1,29	2,39	1,34	1,14	$1,54 \pm 0,57$	$1,63 \pm 0,49$

Die Arbeit wurde gemäß Kapitel 5.3.1.1. ermittelt.

Aus der Tabelle 5.10. ist auch zu ersehen, dass in Ebene 1 eine höhere Bruchkraft sowie elastische Arbeit ermittelt wird als in Ebene 2. Das liegt daran, dass Ebene 1 im Vergleich zu den Zellen von Ebene 2 mehr altes und entwickeltes Parenchymgewebe enthält.

5.4.1.2 Kraft-Weg-Messung 12 Tage nach der Ernte

Abbildung 5.16. gibt einen exemplarischen Überblick über die Kraft-Weg-Kurve aller Messstellen 12 Tage nach der Ernte.

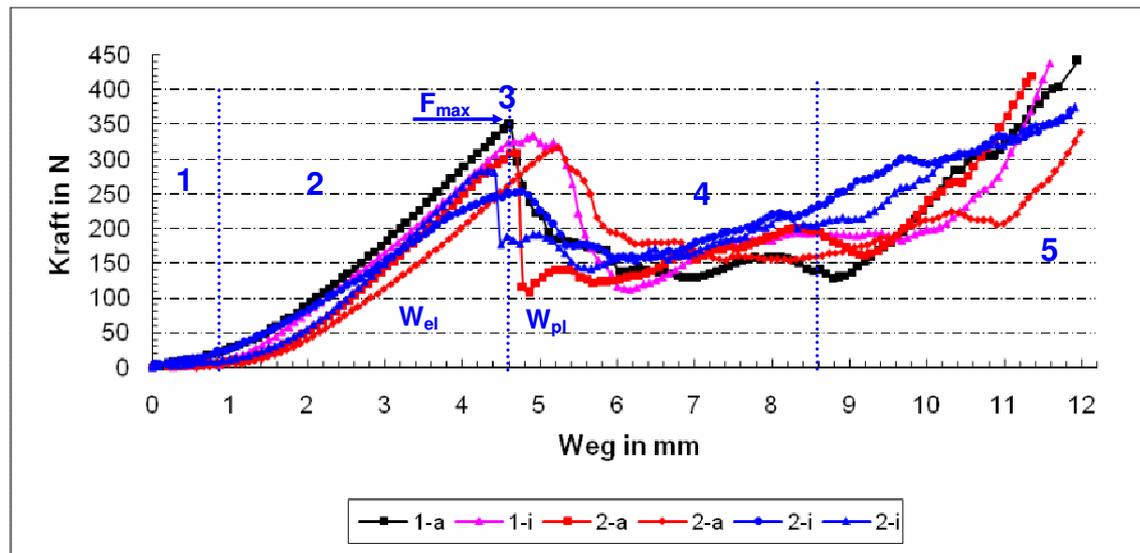


Abb. 5.16. Kraft-Weg-Messungen einer Rübe 12 Tage nach der Ernte

Es kann festgestellt werden, dass alle Proben im Vergleich zu frischen Rüben eine geringere Bruchkraft aufweisen. Der stetige Anstieg ist bei den Messverläufen wieder auf den Bereich 2 reduziert. In Abb.5.16. ist eine leichte Homogenität bei der Bruchkraft in allen Ebenen und Bereichen zu erkennen. Es kann festgestellt werden, dass alle Proben im Vergleich zu Rüben aus Fabrik C eine höhere Bruchkraft aufweisen.

In Tabelle 5.11. ist die ermittelte Bruchkraft sowie der Anteil der elastischen und plastischen Arbeit der Messstellen von einer Rübe 12 Tage nach der Ernte dargestellt.

Tab. 5.11. Physiko-mechanische Eigenschaften einer Rübe 12 Tage nach der Ernte

Proben	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$
F_{Br} in N	348	334	341 ± 10	307	317	273	253	288 ± 30	305 ± 33
W_{el} in Nm	0,626	0,634	$0,630 \pm 0,08$	0,485	0,576	0,457	0,555	$0,518 \pm 0,05$	$0,555 \pm 0,07$
W_{pl} in Nm	0,567	0,485	$0,526 \pm 0,05$	0,431	0,577	0,512	0,405	$0,481 \pm 0,08$	$0,496 \pm 0,063$
$W_{\text{el}}/W_{\text{pl}}$	1,10	1,30	$1,60 \pm 0,07$	1,12	1,0	0,90	1,37	$1,1 \pm 0,37$	$1,12 \pm 0,18$

Aus der Tabelle 5.11. ist eine Verringerung der elastischen und eine Steigerung der plastischen Arbeit im Vergleich zur frischen Rübe erkennbar. Der Quotient $W_{\text{el}}/W_{\text{pl}}$ liegt durch-

schnittlich bei $> 1,0$. Dies ist mit dem Wasserverlust der Rüben nach einer 12tägigen Lagerung zu erklären, bei der die **viskoelastischen** Eigenschaften erhöht werden.

Aus der Tabelle 5.11. ist eine Steigerung der elastischen und eine Verringerung der plastischen Arbeit im Vergleich zur Rübe aus Deutschland erkennbar.

5.4.1.3 Kraft-Weg-Messung 19 Tage nach der Ernte

Abbildung 5.17. gibt einen exemplarischen Überblick über die Kraft-Weg-Kurve aller Messstellen einer Rübe 19 Tage nach der Ernte.

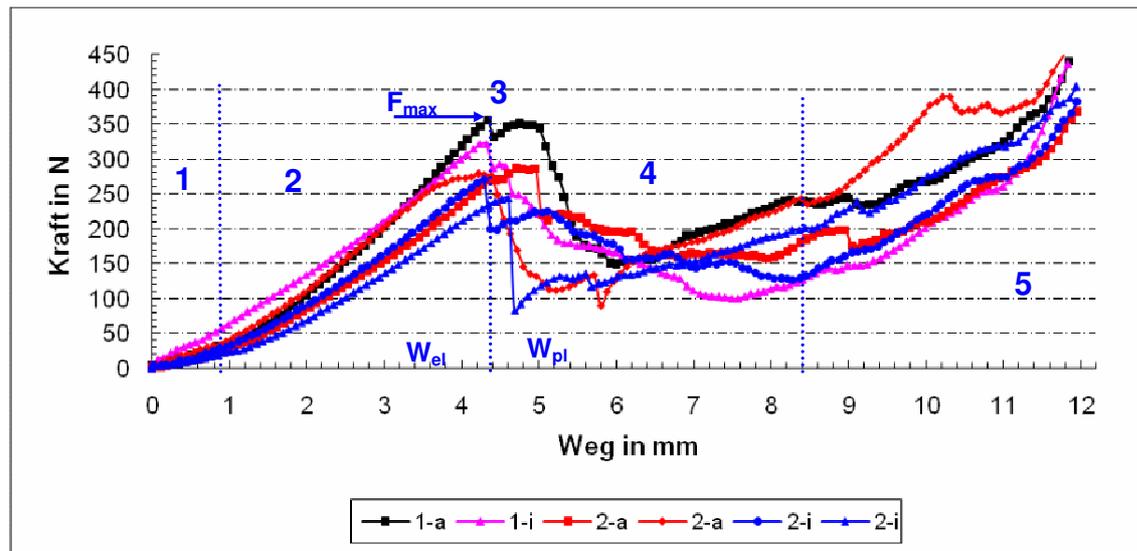


Abb. 5.17. Kraft–Weg-Messungen einer Rübe 19 Tage nach der Ernte

Aus der oberen Abbildung ist eine Reduzierung des linearen Anstiegs bei allen Kurven mit Ausnahme (1-a) im Bereich 2 zu sehen. Im Bereich 4 (plastisches Fließverhalten) wurde ein flacher Verlauf der Messkurve und deshalb eine Steigerung des plastischen Arbeitsanteils und eine weitere Erhöhung im Bereich 5 (Zerfließbereich) aufgrund des Welkens und der Atmungsverluste der Rüben 19 Tage nach der Ernte beobachtet.

In Tab. 5.12. ist die ermittelte Bruchkraft sowie der Anteil der elastischen und plastischen Arbeit der Messstellen 19 Tage nach der Ernte dargestellt.

Tab. 5.12. Physiko-mechanische Eigenschaften einer Rübe 19 Tage nach der Ernte

Proben	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$
F_{Br} in N	355	321	338 ± 24	285	278	270	241	269 ± 19	292 ± 40
W_{el} in Nm	0,606	0,633	$0,620 \pm 0,02$	0,560	0,549	0,480	0,444	$0,508 \pm 0,055$	$0,545 \pm 0,072$
W_{pl} in Nm	0,524	0,701	$0,612 \pm 0,12$	0,442	0,561	0,329	0,602	$0,483 \pm 0,13$	$0,526 \pm 0,12$
W_{el}/W_{pl}	1,15	0,90	$1,02 \pm 0,17$	1,26	0,98	1,45	0,73	$1,11 \pm 0,30$	$1,03 \pm 0,23$

Generell zeigt Tabelle 5.12. eine weitere Verringerung des Anteils der elastischen Deformationsarbeit im Vergleich zum plastischen Anteil. Der Quotient W_{el}/W_{pl} liegt hier durchschnittlich bei 1,03.

Aus der Tabelle 5.12. ist eine Steigerung der Bruchkraft und der elastischen Arbeit und eine Verringerung der plastischen Arbeit im Vergleich zur Rübe aus Deutschland erkennbar.

5.4.1.4 Kraft-Weg-Messung 26 Tage nach der Ernte

Abbildung 5.18. gibt einen exemplarischen Überblick über die Kraft-Weg-Kurve bei den Proben aus den Messebenen und Bereichen der Rübe 26 Tage nach der Ernte.

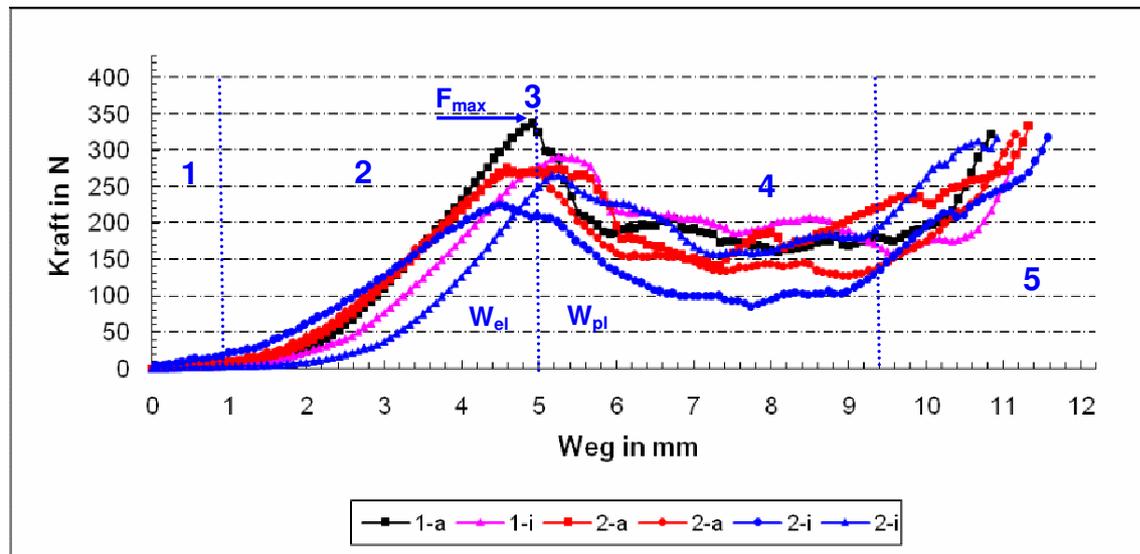


Abb. 5.18. Kraft-Weg-Messungen einer Rübe 26 Tage nach der Ernte

Aus der Abbildung ist eine Reduzierung der Bruchkraft zu erkennen. Im Bereich 4 (plastisches Fließverhalten) wurde ein flacher Verlauf der Messkurve und deshalb eine Steigerung des plastischen Arbeitsanteils und eine weitere Erhöhung im Bereich 5 (Zerfließbereich) aufgrund des Welkens und der Atmungsverluste der Rüben 26 Tage nach der Ernte beobachtet.

In Tab. 5.13. ist die ermittelte Bruchkraft sowie der Anteil der elastischen und plastischen Arbeit in den Messstellen 26 Tage nach der Ernte dargestellt.

Tab. 5.13. Physiko-mechanische Eigenschaften einer Einzlrübe 26 Tage nach der Ernte

Proben	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$
F_{Br} in N	337	291	314 ± 32	274	275	265	225	260 ± 24	$277,83 \pm 36$
W_{el} in Nm	0,516	0,489	$0,503 \pm 0,02$	0,489	0,562	0,354	0,407	$453 \pm 0,09$	$470 \pm 0,07$
W_{pl} in Nm	0,598	0,559	$0,578 \pm 0,027$	0,545	0,440	0,574	0,545	$0,526 \pm 0,059$	$0,543 \pm 0,054$
W_{el}/W_{pl}	0,86	0,87	$0,86 \pm 0,008$	0,89	1,27	0,61	0,74	$0,88 \pm 0,28$	$0,86 \pm 0,20$

Aus Tabelle 5.13. kann eine weitere Verringerung der elastischen Arbeit im Vergleich zu den frischen Rüben sowie eine Verringerung des Quotienten W_{el}/W_{pl} auf 0,86 ermittelt werden.

Weiterhin aus der Tabelle 5.13. ist eine Steigerung der Bruchkraft und der elastischen Arbeit und eine Verringerung der plastischen Arbeit im Vergleich zur Rübe aus Deutschland erkennbar.

5.4.1.5 Mechanische Eigenschaften aufgetauter Rüben

Die Lagerung erfolgte in zwei separaten Kühlräumen. Die Rüben wurden bei zwei unterschiedlichen Temperaturen ($-11 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ und $-6 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ für 72 Stunden) eingefroren. Danach wurden sie bei $8 \text{ }^\circ\text{C}$ in 48 Stunden aufgetaut.

In folgenden Abbildungen 5.19. und 5.20. wird ein exemplarischer Überblick über die Kraft-Weg-Kurve aller Messstellen für eine aufgetaute Rübe sowohl bei ($-6 \text{ }^\circ\text{C}$) als auch bei ($-11 \text{ }^\circ\text{C}$) dargestellt.

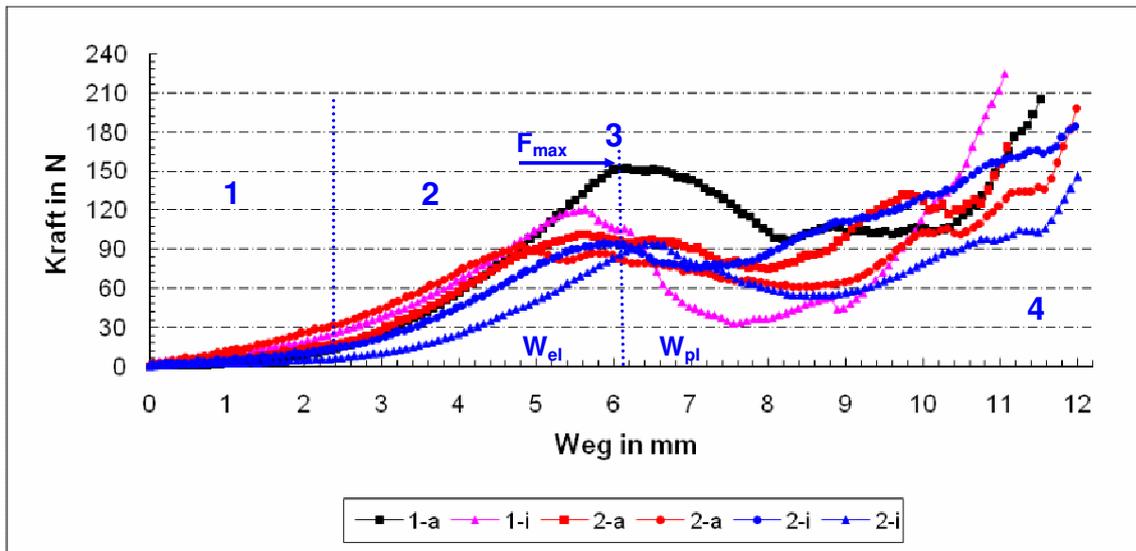


Abb. 5.19. Kraft-Weg-Kurve einer aufgetauten Rübe (gefroren bei $-6 \text{ }^\circ\text{C}$)

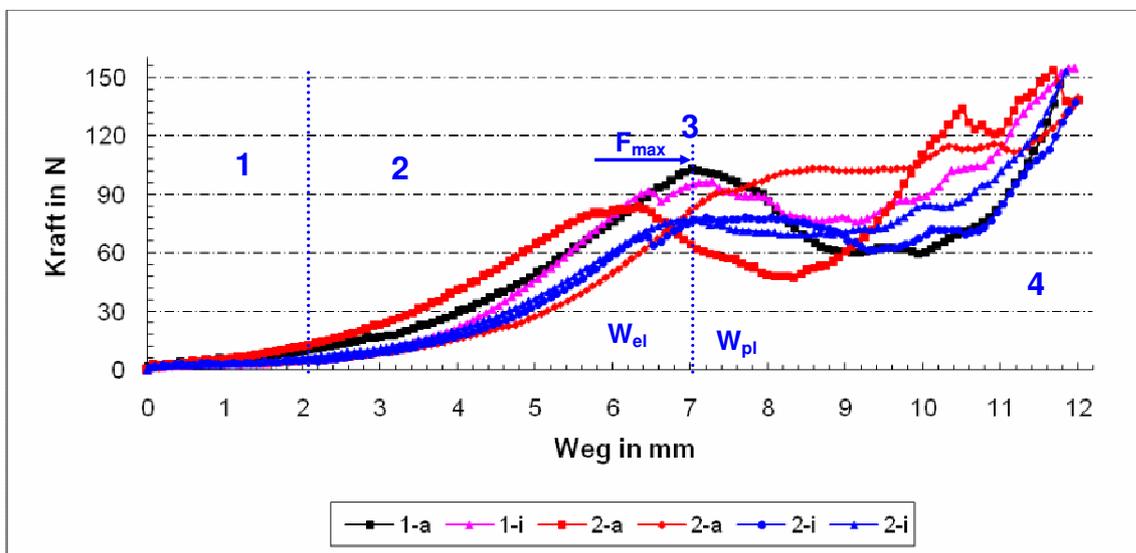


Abb. 5.20. Kraft-Weg-Kurve einer aufgetauten Rübe (gefroren bei $-11 \text{ }^\circ\text{C}$)

Im Gegensatz zu Abb. 5.20. zeichnet sich die Bruchkraft in Abb. 5.19. als markanter Punkt deutlicher ab.

Der Vergleich zwischen den Kraft-Weg-Kurven der aufgetauten und der frischen Rüben zeigt eine erhebliche Reduzierung der Bruchkraft bei den aufgetauten Rüben.

Durch Vergleich der beiden Kurven ist zu erkennen, dass die Strukturverformung der Rüben, die unter -6 °C gelagert wurden, kleiner ist als den Rüben bei -11 °C . Auch eine vollständige Zerstörung der Struktur ist nicht erkennbar.

In den Tabellen 5.14. und 5.15. ist die ermittelte Bruchkraft sowie der Anteil der elastischen und plastischen Arbeit der Messstellen für eine aufgetaute Rübe sowohl bei -6 °C als auch bei -11 °C dargestellt.

Tab. 5.14. Physiko-mechanische Eigenschaften einer aufgetauten Rübe (-6 °C)

Proben	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$
F_{Br} in N	153	120	$136,5 \pm 23$	101	94	93	94	$95,5 \pm 26$	$109,16 \pm 23$
W_{el} in Nm	0,292	0,256	$0,274 \pm 0,03$	0,203	0,183	0,202	0,176	$0,191 \pm 0,001$	$0,218 \pm 0,05$
W_{pl} in Nm	0,571	0,283	$0,427 \pm 0,2$	0,484	0,540	0,370	0,369	$0,440 \pm 0,09$	$0,436 \pm 0,11$
$W_{\text{el}}/W_{\text{pl}}$	0,51	0,90	$0,78 \pm 0,27$	0,41	0,33	0,54	0,47	$0,44 \pm 0,08$	$0,53 \pm 0,19$

Tab. 5.15. Physiko-mechanische Eigenschaften einer aufgetauten Rübe (-11 °C)

Proben	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$
F_{Br} in N	102	96	$99 \pm 4,2$	82	103	68	77	$82,5 \pm 14,8$	$88 \pm 14,4$
W_{el} in Nm	0,240	0,162	$0,201 \pm 0,06$	0,216	0,272	0,122	0,185	$0,198 \pm 0,06$	$0,199 \pm 0,06$
W_{pl} in Nm	0,360	0,440	$0,400 \pm 0,05$	0,504	0,406	0,430	0,431	$0,442 \pm 0,04$	$0,428 \pm 0,05$
$W_{\text{el}}/W_{\text{pl}}$	0,67	0,37	$0,52 \pm 0,21$	0,43	0,67	0,28	0,43	$0,45 \pm 0,16$	$0,47 \pm 0,15$

Generell zeigen die Tabellen 5.14. und 5.15. eine erhebliche Senkung der elastischen Deformationsarbeit im Vergleich zum plastischen Anteil. Durch die Frosteinwirkung wird die Gewebestruktur erheblich zerstört.

Weiterhin aus der Tabelle 5.14. und 5.15. ist eine Steigerung der Bruchkraft und der elastischen Arbeit und eine Verringerung der plastischen Arbeit im Vergleich zur Rübe aus Deutschland erkennbar.

5.4.2 Ermittlung des Elastizitätsmoduls

Das Elastizitätsmodul wurde gemäß Kapitel 5.3.2. ermittelt.

5.4.2.1 Erfassung des Elastizitätsmoduls einer frischen Rübe

In der Abbildung 5.21. ist Abschnitt 2 der Originalmesskurve aus Abb.5.15. enthalten. Der elastische Bereich wird eindeutig am Beispiel der rechnerisch ermittelten Funktion $\sigma(\epsilon)$ nachgewiesen.

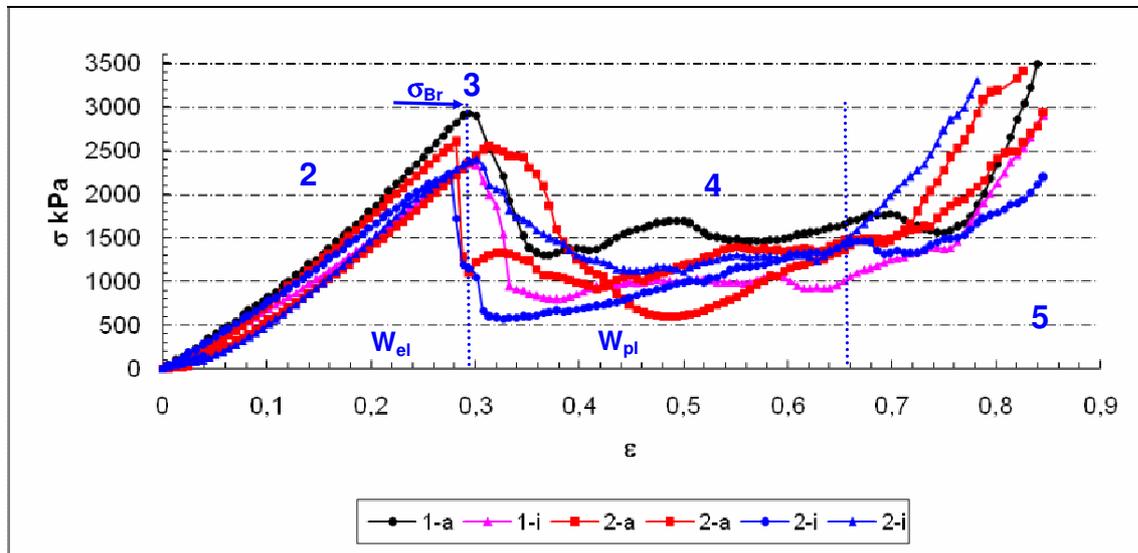


Abb. 5.21. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer frischen Rübe

Ein gerader Anstieg ist in Bereich 2 deutlich zu erkennen.

5.4.2.2 Elastizitätsmodul 12 Tage nach der Ernte

In Abbildung 5.22. ist der Abschnitt 2 der Originalmesskurve aus Abb.5.16. enthalten.

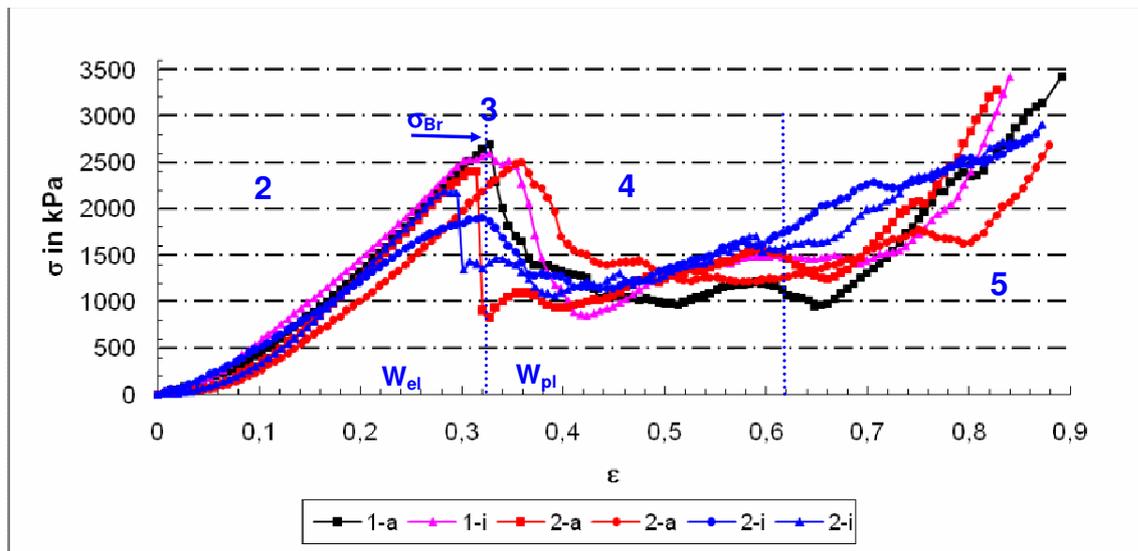


Abb. 5.22. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Rübe 12 Tage nach der Ernte

Im Gegensatz zu den frischen Rüben ist der Abstand der ersten Kurve (1-Ebene-außen) zu den weiteren Kurven gering.

5.4.2.3 Elastizitätsmodul 19 Tage nach der Ernte

In der Abbildung 5.23. ist Abschnitt 2 der Originalmesskurve aus Abb.5.17. enthalten.

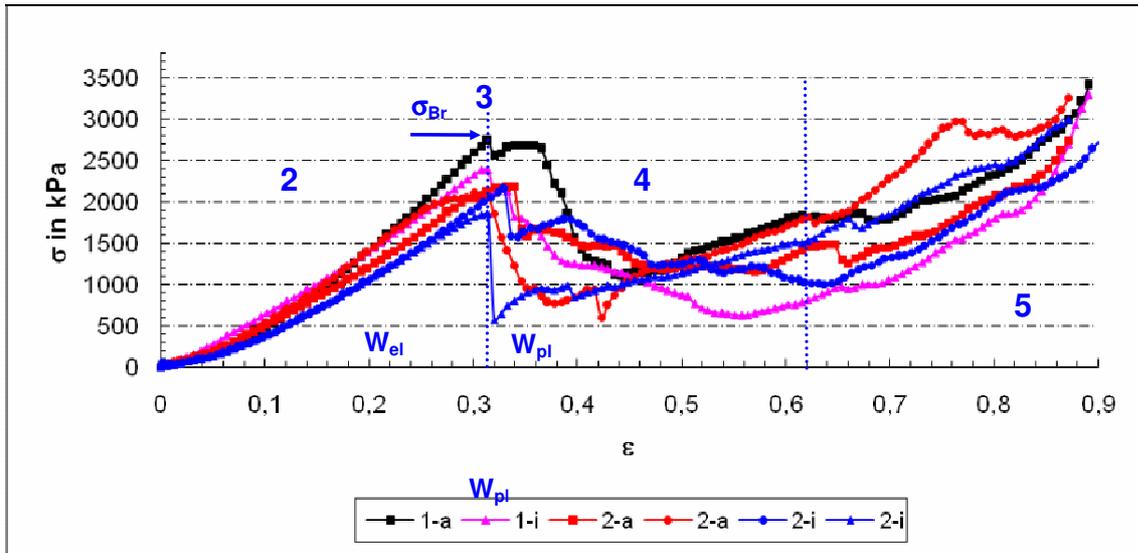


Abb. 5.23. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Rübe 19 Tage nach der Ernte
Aus der Abbildung 5.23. ist eine Reduzierung der Bruchspannung zu erkennen.

5.4.2.4 Elastizitätsmodul 26 Tage nach der Ernte

In der Abbildung 5.24. ist Abschnitt 2 der Originalmesskurve aus Abb.5.18. enthalten.

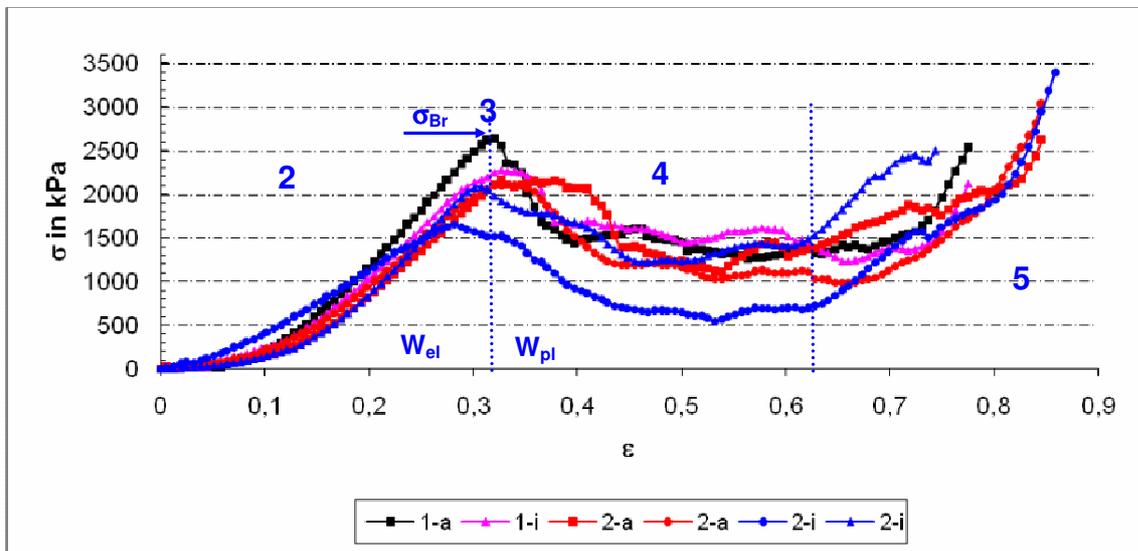


Abb. 5.24. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Rübe 26 Tage nach der Ernte

5.4.2.5 Elastizitätsmodul der aufgetauter Rübe

In den folgenden Abbildungen 5.25. und 5.26. wird ab Abschnitt 2 der Originalmesskurve aus den Abbildungen 5.19. und 5.20. ein exemplarischer Überblick über des Elastizitätsmodul aller Messstellen für eine aufgetaute Rübe sowohl bei -6 °C als auch bei -11 °C gegeben.

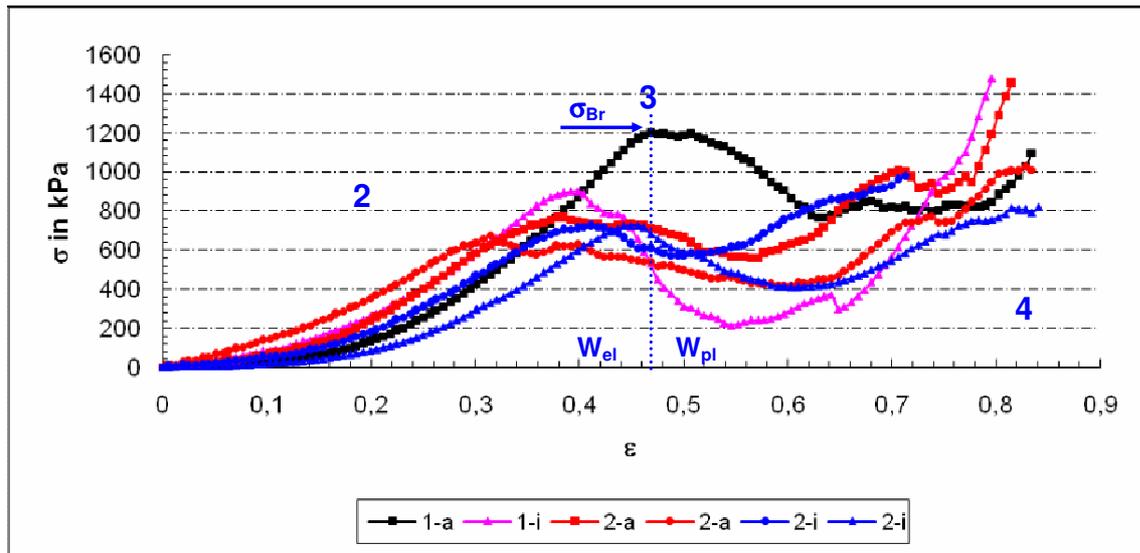


Abb. 5.25. Spannungs-Dehnungs-Diagramme einer aufgetauten Rübe (-6 °C)

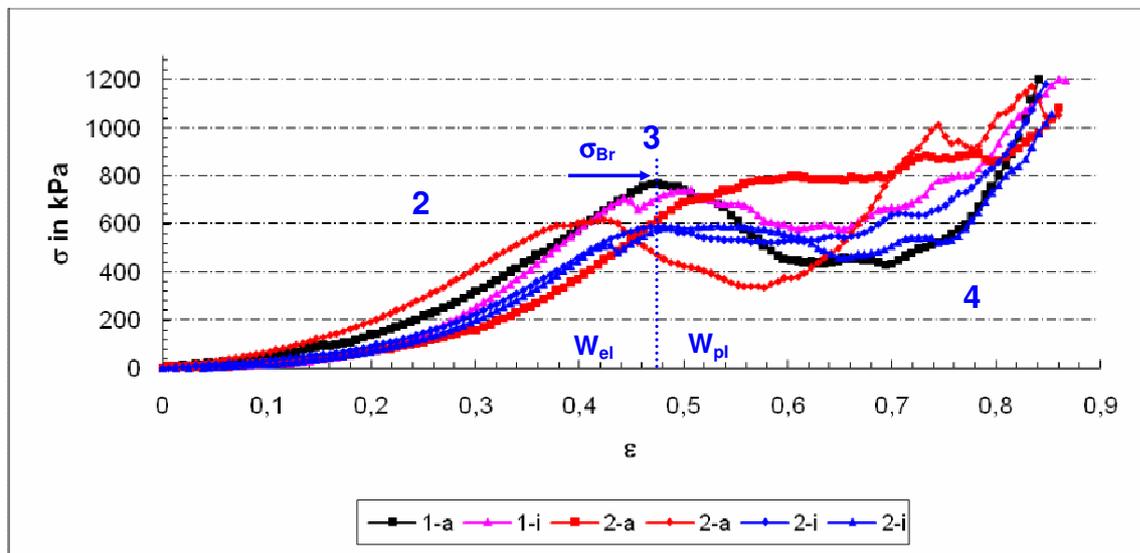


Abb. 5.26. Spannungs-Dehnungs-Diagramme einer aufgetauten Rübe (-11 °C)

Tabelle 5.16. enthält die Einzelwerte der Elastizitätsmodule bei verschiedenen Lagerzeiten der Rüben. Grundlage der Auswertung sind die obigen Abbildungen.

Tab. 5.16. Elastizitätsmodule in kPa der Messungen aus Abb.5.21. bis 5.26.

Pro.	1-a*	1-i*	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-E}}$
fR	9930	7934	8932 ± 1411	8080	9190	8111	7963	8336 ± 572	8534 ± 830
10 d	8489	8140	8315 ± 246	7818	6978	7190	5959	6986 ± 772	7429 ± 916
20 d	8449	7737	8093 ± 503	6786	6993	6517	7296	6898 ± 330	7296 ± 705
27 d	8236	6949	7593 ± 910	5942	6329	5623	6233	6165 ± 493	6640 ± 924
Auf (-6)	2553	2263	2408 ± 205	1981	2140	1754	1614	1872 ± 233	2050 ± 343
Auf (-11)	1635	1589	1612 ± 32	1451	1350	1187	1214	1301 ± 123	1404 ± 187

Es wurde eine erhebliche Senkung des Elastizitätsmoduls bei aufgetauten Rüben festgestellt. Durch die höheren Frostgrade wird die Zellstruktur stärker zerstört.

5.5 Ergebnisse der Bruchkraft, elastischen und plastischen Arbeit zur Absicherung der Untersuchungen

Bisher wurden in den Unterkapiteln 5.3. bis 5.4. nur exemplarische Ergebnisse einer Rübenmessung dargestellt. In der nachfolgenden Tabelle 5.17. und 5.18. sind die Ergebnisse aller Messungen der Zuckerfabriken C und D aufgeführt.

Tab. 5.17. Mittelwerte der Bruchkraft in N aller gemessenen Rüben in Abhängigkeit zur Lagerzeit in Tagen (Zuckerfabrik C)

Pro.	1-a	1-i	$\bar{x}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{x}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{x}_{\text{Ges.-B}}$	n*
fR	389	359	374 ± 21	352	344	317	310	331 ± 18	345 ± 28	30, 5
10 d	323	324	324 ± 1	302	301	266	264	283 ± 21	297 ± 26	12, 2
20 d	308	283	296 ± 18	282	274	238	240	259 ± 20	271 ± 24	12, 2
30 d	277	267	272 ± 7	249	245	246	246	246 ± 2	255 ± 13	12, 2
AR	99	80	90 ± 13	74	77	50	51	63 ± 14	72 ± 18	12, 2

*n: Anzahl der Messstellen, Anzahl der Rüben,

Tab. 5.18. Mittelwerte der Bruchkraft in N aller gemessenen Rüben in Abhängigkeit zur Lagerzeit in Tagen (Zuckerfabrik D)

Pro.	1-a	1-i	$\bar{x}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{x}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{x}_{\text{Ges.-B}}$	n*
fR	379	347	363 ± 23	339	324	305	299	316 ± 19	332 ± 30	36, 6
10 d	360	338	350 ± 16	302	309	281	269	291 ± 18	310 ± 34	36, 6
20 d	332	325	328 ± 5	296	287	250	274	277 ± 20	295 ± 31	36, 6
30 d	316	302	310 ± 9	291	280	242	234	262 ± 27	278 ± 29	36, 6
AR (-11)	110	90,6	100 ± 14	91	95,8	63,6	70,4	80 ± 16	87 ± 17	36, 6
AR (-6)	132	116	124 ± 11	104	102	95	90	98 ± 7	107 ± 16	30, 5

*n: Anzahl der Messstellen, Anzahl der Rüben,

Die Bruchkraft der Proben aus Zuckerfabrik C ist nur bei den frischen Rüben höher als bei den marokkanischen Rüben (Zuckerfabrik D). Bei den Versuchsreihen beider Rübenproben war festzustellen, dass die Bruchkraft mit zunehmender Lagerzeit abnimmt. Jedoch reduzierte sich diese Bruchkraft bei den aus Marokko stammenden Rüben langsamer. An dieser Stelle muß allerdings darauf hingewiesen werden, dass die marokkanischen Rüben in einem Kühllager eines Lebensmittelgeschäftes gelagert wurden. Hingegen waren die deutschen Rüben den normalen klimatischen Bedingungen eines Mietenlagers ausgesetzt. Aufgrund der in Marokko herrschenden klimatischen Bedingungen sind die Rüben trockener und der Wasserabgabeprozess während der Lagerung verläuft über einen längeren Zeitraum. Auch die Rübensorte könnte auch eine nicht unwesentliche Rolle spielen.

Weitere Erkenntnisse aus den beiden oberen Tabellen sind die Auswirkungen der Lagertemperaturen auf die Bruchkräfte. Die bei -6 °C gelagerten Rüben weisen noch eine Reststruktur auf, die im Vergleich zu den frischen Rüben und denen, die bereits seit 30

Tagen gelagert wurden, erheblich schwächer ist. Bei weiterer Senkung der Lagertemperatur auf bis -16 °C wird eine erhebliche Zerstörung der Struktur erkennbar.

Abbildung 5.27. gibt einen Überblick über Mittelwerte der Bruchkraft aller vermessenen Rüben bei Ebene 1 und 2 in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabriken C und D)

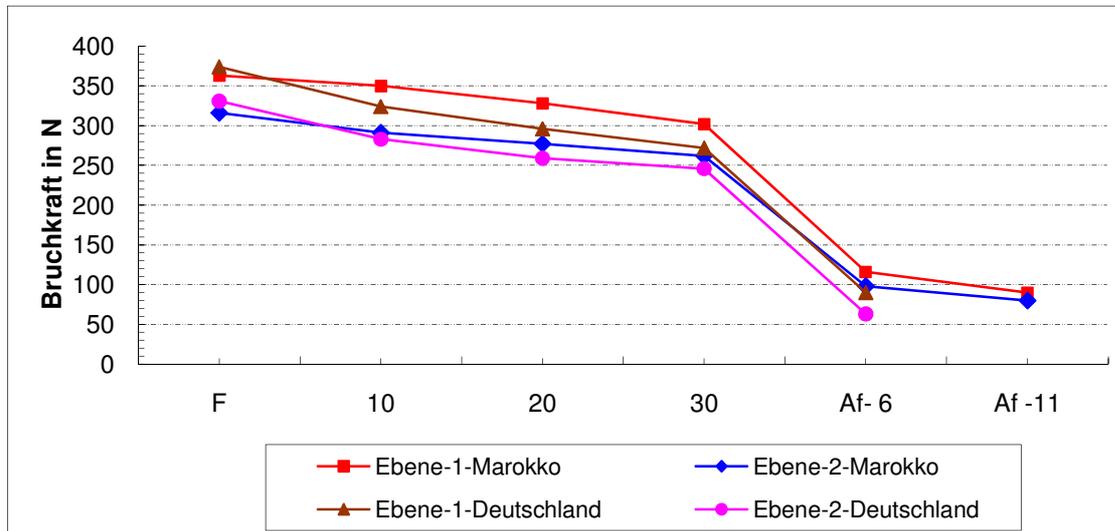


Abb. 5.27. Mittelwert der Bruchkraft aller vermessenen Rüben bei Ebene 1 und 2 in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik C und D)

Verglichen mit den deutschen Rüben besitzen die marokkanischen Rüben eine höhere Bruchkraft. Für alle Rüben ist festzustellen, dass die Bruchkraft bei Ebene 1 höher ist als bei Ebene 2.

Abbildung 5.28. und 5.29. gibt einen Überblick über die Bruchkraft bei allen vermessenen Rüben in Abhängigkeit ihrer Lagerzeiten (Zuckerfabrik C und D).

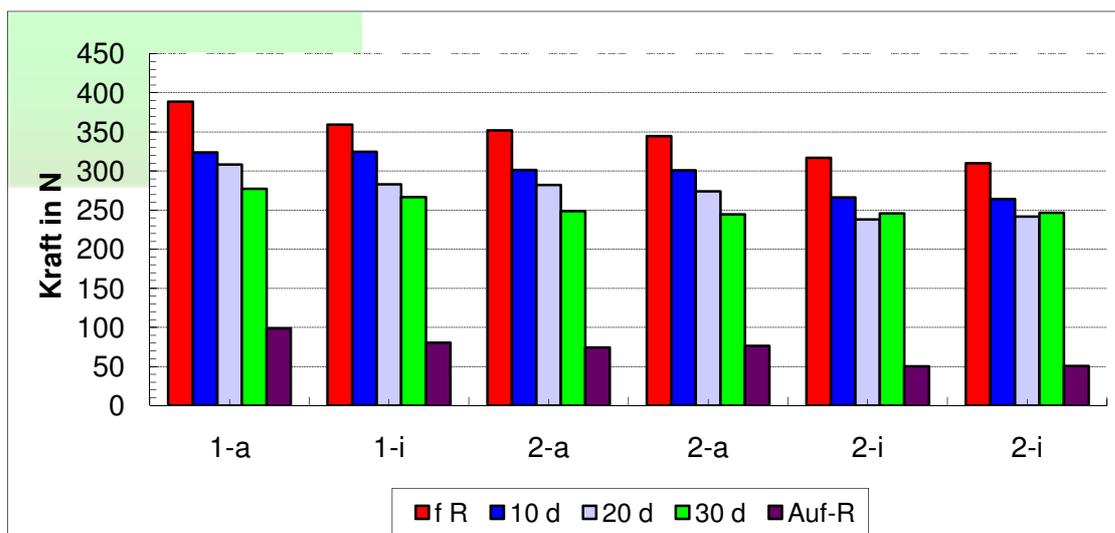


Abb. 5.28. Bruchkraft aller vermessenen Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik C)

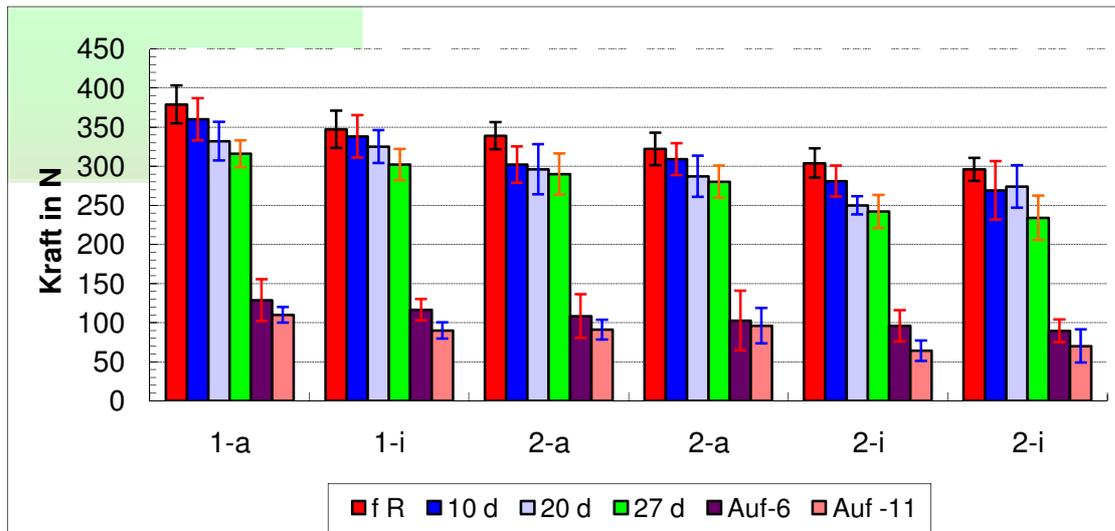


Abb. 5.29. Bruchkraft aller vermessenen Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik D)

Die Abbildungen 5.28., 5.29. repräsentieren den Mittelwert verschiedener Kraft-Weg-Untersuchungen, die in zwei Ebenen und zwei verschiedenen Bereichen bei unterschiedlichen Lagerzeiten ermittelt wurden.

Folgende eindeutige Aussagen können aus den in den oberen Abbildungen und Tabellen zusammengefassten Versuchsergebnissen abgeleitet werden:

- Die Rüben stellen ein inhomogenes Material dar,
- Signifikante Unterschiede zwischen Ebene 1 und 2 liegen vor,
- Signifikante Unterschiede bestehen zwischen Außen- und Innenbereich,
- Signifikante Unterschiede bei unterschiedlich lang gelagerten Rüben werden bezüglich der physiko-mechanischen Eigenschaften gefunden. Der „spröde“ Festkörper einer frischen Rübe geht bei längerer Lagerung in einen **viskoelastischen/gummielastischen** Zustand über.

In Tab. 5.19. ist die ermittelte elastische und plastische Arbeit bei den Probenahmestellen aller vermessenen Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit erfasst.

Tab. 5.19. Elastische und plastische Arbeit bei den Probenahmestellen aller vermessenen Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik C und D).

Elastische Arbeit in N·m								
Zuckerfabrik C				*n	Zuckerfabrik D			*n = 36, 6
	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.}}$		$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.}}$	
fR	0,631 ± 0,01	0,561 ± 0,06	0,584 ± 0,06	30, 5	0,727 ± 0,08	0,601 ± 0,05	0,643 ± 0,09	
10 d	0,542 ± 0,03	0,479 ± 0,04	0,499 ± 0,05	12, 2	0,652 ± 0,04	0,525 ± 0,04	0,568 ± 0,07	
20 d	0,527 ± 0,08	0,412 ± 0,06	0,450 ± 0,08	12, 2	0,605 ± 0,01	0,533 ± 0,04	0,557 ± 0,05	
30 d	0,409 ± 0,03	0,404 ± 0,01	0,405 ± 0,01	12, 2	0,520 ± 0,07	0,441 ± 0,05	0,467 ± 0,06	
Plastische Arbeit in N·m								
Zuckerfabrik C					Zuckerfabrik D			*n = 36, 6
	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.}}$		$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.}}$	
fR	0,470 ± 0,12	0,446 ± 0,03	0,454 ± 0,06	30, 5	0,422 ± 0,07	0,442 ± 0,03	0,435 ± 0,04	
10 d	0,535 ± 0,02	0,528 ± 0,09	0,530 ± 0,07	12, 2	0,500 ± 0,06	0,383 ± 0,07	0,432 ± 0,08	
20 d	0,573 ± 0,11	0,469 ± 0,05	0,503 ± 0,08	12, 2	0,514 ± 0,02	0,442 ± 0,05	0,466 ± 0,06	
30 d	0,620 ± 0,07	0,578 ± 0,15	0,592 ± 0,12	12, 2	0,535 ± 0,08	0,516 ± 0,10	0,522 ± 0,09	
Relation								
Zuckerfabrik C					Zuckerfabrik D			*n = 36, 6
	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.}}$		$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.}}$	
fR	1,387 ± 0,34	1,256 ± 0,09	1,29 ± 0,18	30, 5	1,79 ± 0,42	1,34 ± 0,07	1,50 ± 0,30	
10 d	1,014 ± 0,02	0,926 ± 0,17	0,95 ± 0,14	12, 2	1,30 ± 0,06	1,34 ± 0,18	1,31 ± 0,14	
20 d	0,924 ± 0,04	0,886 ± 0,19	0,89 ± 0,15	12, 2	1,77 ± 0,03	1,21 ± 0,07	1,20 ± 0,06	
30 d	0,668 ± 0,13	0,738 ± 0,21	0,71 ± 0,18	12, 2	0,99 ± 0,16	0,89 ± 0,26	0,92 ± 0,22	

*n: Anzahl der Messstellen, Anzahl der Rüben

Folgende Aussagen können aus Tabelle 5.19. abgeleitet werden:

- Signifikante Unterschiede zu Ebene 1 und 2 bei elastischer Arbeit,
- Signifikante Unterschiede zwischen Außen- und Innenbereich bei elastischer Arbeit,
- Keine deutlichen Unterschiede zwischen Ebenen und Bereichen bei plastischer Arbeit,
- Deutliche Unterschiede bei der Relation W_{el}/W_{pl} in Ebenen und Bereichen.

5.6 Ergebnisse der Elastizitätsmodule zur Absicherung der Untersuchungen

In der Tab. 5.20. und 5.21. sind die Mittelwerte der Elastizitätsmodule in kPa aller vermessenen Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit dargestellt (Zuckerfabrik C und D).

Tab. 5.20. Mittelwerte der Elastizitätsmodule in kPa aller vermessenen Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik C)

Elastizitätsmodule										
	1-a*	1-i*	\bar{x} Ebene-1	2-a	2-a	2-i	2-i	\bar{x} Ebene-2	\bar{x} Ges.	*n
fR	16838	14660	15749 ± 1540	14493	12877	12100	11844	12829 ± 1193	13802 ± 1898	30, 5
10 d	13652	14177	13915 ± 371	11690	12583	11114	10565	11488 ± 862	12297 ± 1429	12, 2
20 d	12570	11976	12273 ± 420	11761	10935	9770	10346	10703 ± 851	11226 ± 1061	12, 2
30 d	12493	11168	11831 ± 937	9513	9721	9105	8910	9312 ± 371	10152 ± 1396	12, 2
AR	2219	1969	2094 ± 177	1742	1496	1179	1214	1408 ± 264	1636 ± 416	12, 2
Nach /112/	Einheit		Elastizitätsmodul				Messung			
Stahl	kPa		210·10 ⁶				Zug			
Kartoffel			3200 - 4300				Axiale Kompression			
Käse			160				Axiale Kompression			
Gelatine			1,6 - 10,3				Axiale Spannung			

*n: Anzahl der Messstellen, Anzahl der Rüben

Tab. 5.21. Mittelwerte der Elastizitätsmodule in kPa aller vermessenen Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik D)

Elastizitätsmodule										
	1-a*	1-i*	\bar{x} Ebene-1	2-a	2-a	2-i	2-i	\bar{x} Ebene-2	\bar{x} Ges.	*n
fR	9259	8759	9010 ± 353	8350	8203	8108	7558	8005 ± 346	8363 ± 489	36, 6
10 d	8777	8277	8527 ± 353	7884	7700	7247	6767	7399 ± 500	7775 ± 716	36, 6
20 d	7970	7656	7814 ± 222	7126	6948	6629	6722	6856 ± 224	7175 ± 486	36, 6
30 d	7314	7305	7309 ± 6	6904	6813	6078	6014	6474 ± 468	6752 ± 563	36, 6
AR(-6 °C)	2036	1892	1964 ± 101	1782	1915	1589	1462	1687 ± 200	1779 ± 216	36, 6
AR(-11 °C)	1976	1691	1834 ± 201	1547	1449	1353	1569	1480 ± 100	1598 ± 220	30, 5

*n: Anzahl der Messstellen, Anzahl der Rüben

Die vergleichsweise höheren Elastizitätsmodule deutscher Rüben sind auf die Geometrie der entnommenen Proben zurückzuführen. Die Verkürzung der Rübenprobenlängen von 20 mm auf 13 mm bewirkt bei gleichem Rübenmaterial eine Reduzierung der Elastizitätsmodule.

In Abb. 5.30. und 5.31. sind Mittelwerte der Elastizitätsmodule in kPa aller vermessenen Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit dargestellt.

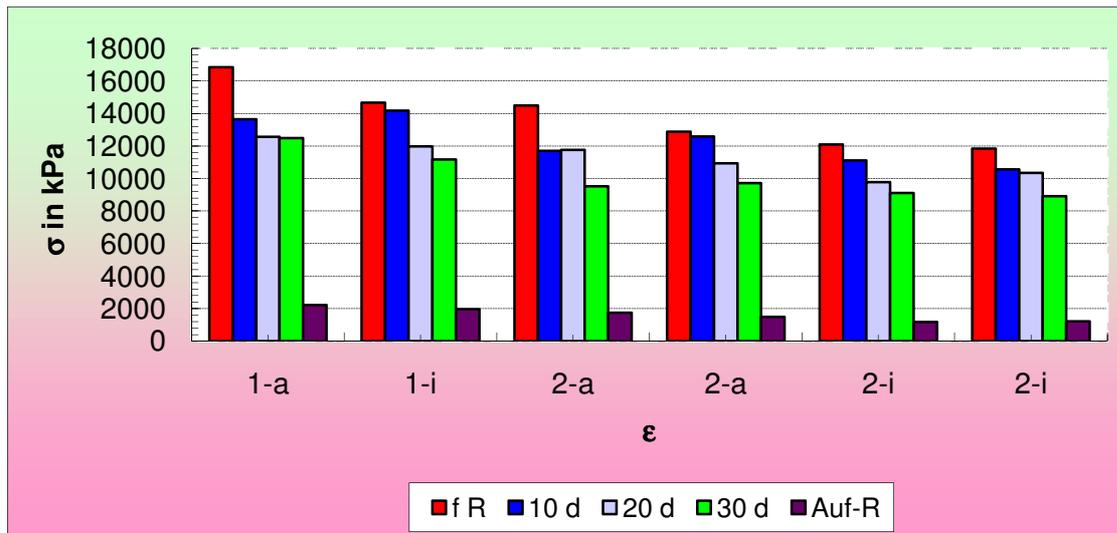


Abb. 5.30. Mittelwerte der Elastizitätsmodule aller gemessenen Rüben in kPa in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik C)

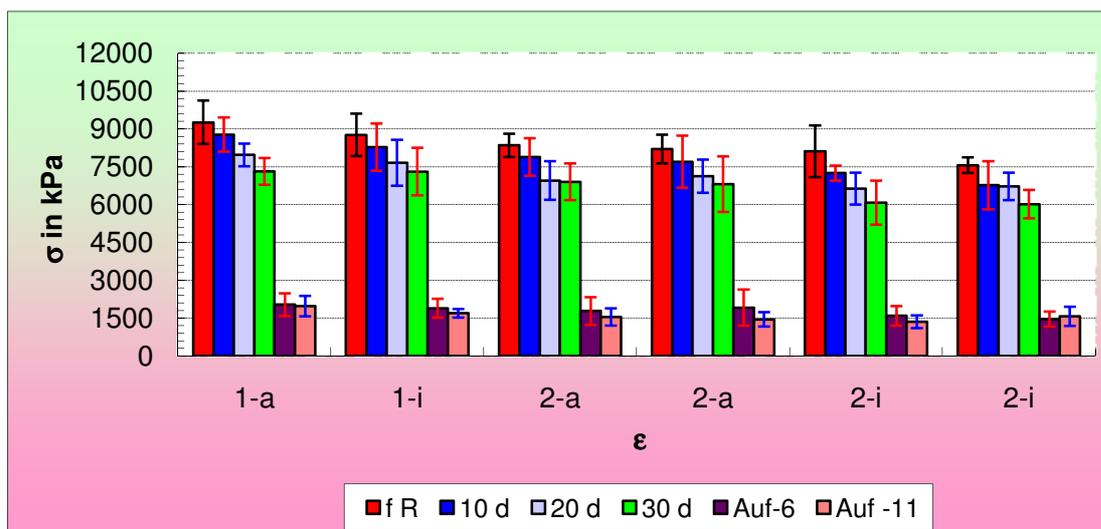


Abb. 5.31. Mittelwerte der Elastizitätsmodule aller gemessenen Rüben in kPa in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik D)

Die Daten aus den oberen Tabellen und Abbildungen zeigen:

- Die Rüben stellen ein inhomogenes Material dar,
- Der Elastizitätsmodul der Zuckerrübenprobe ist von der Entnahmestelle, klimatischen Bedingungen und von der Lagerzeit abhängig,
- Der Elastizitätsmodul bei Ebene 1 liegt sichtlich höher als bei Ebene 2,
- Eine Erhöhung des Elastizitätsmoduls ist von innen nach außen erkennbar,
- Eine erhebliche Reduzierung des Elastizitätsmoduls ist bei aufgetauten Rüben erkennbar.

5.7 Diskussion

Die mögliche Ursache für eine Erhöhung des Elastizitätsmoduls, der Bruchkraft und der elastischen Arbeit von innen nach außen liegt darin, dass die Speicherwurzel, charakterisiert durch eine Anzahl sekundärer Kambiumringe, von einem vaskulären System umgeben ist, bestehend aus Xylem und Phloem. Im Laufe der Entwicklung vergrößerte sich bei Zuckerrüben der Abstand zwischen allen Ringen, insbesondere zwischen dem ersten und dem zentralen Ring. Das heißt die Proben der Innenbereiche besitzen mehr Parenchymzellen bzw. Meristemzellen (Bildungsgewebe) im Vergleich zu den Proben der Außenbereiche. Dagegen besitzen diese Proben mehr Xylem und Phloem, die für Festigkeit bekannt sind.

Eine andere mögliche Ursache für die höheren physiko-mechanischen Eigenschaften bei Ebene 1 liegt darin, dass die Verteilung der Inhaltsstoffe in den morphologischen Segmenten der Rübe unterschiedlich ist. Von der Wurzel zur oberen Sprossachse verringert sich der Zuckergehalt.

Die Vakuole enthält fast ausschließlich gelöste Saccharose. Die verbleibenden 5 % des Zellinnenraums füllt das Cytoplasma aus. Durch die hohe Saccharosekonzentration von etwa 0,5 mol/l in der Vakuole gegenüber der Saccharosekonzentration in der Zellwand von 0,06 mol/l werden der hohe osmotische Druck und dadurch eine hohe Bruchkraft verursacht. Zudem sind die parenchymatischen Zellen in diesem oberen Teil weniger entwickelt. Des Weiteren sind die Zellwände dicker im Vergleich zu den oberen Teilen mit den jüngeren Zellen. Diese Änderungen verursachen die Unterschiede in den physikomechanischen Eigenschaften der Rüben. /33/

5.8 Kapitelzusammenfassung

Die Rüben aus der Anbaugebietes Sidi Bennour (Marokko) und Nordstemmen wurden auf ihre physico-mechanischen Eigenschaften untersucht. Dabei konnte ein deutlicher Zusammenhang insbesondere zwischen der Bruchkraft, Elastizitätsmodul und elastischer/plastischer Arbeit als charakteristische Kenngrößen für die physikalischen Eigenschaften und die Verarbeitungsqualität beobachtet werden.

Es konnten Unterschiede im Kraft-Weg-Verlauf zwischen den Rüben verschiedener Lagerzeit ermittelt werden. Wie aus Tabelle 5.17., 5.18. und Abb. 5.28. 5.29. zu ersehen ist, liegt die höchste Bruchkraft bei frischen Rüben, gefolgt von den 10, 20, 30 Tage gelagerten Rüben und den aufgetauten Rüben vor. Es wird angenommen, dass der Zellturgor während der Lagerung den entscheidenden Einfluss auf die Bruchkraft bzw. -spannung ausübt. Im Falle der aufgetauten Proben ist der Texturabbau auf mechanische Beschädigungen der Zelle durch die Gefrierlagerung und dem nachfolgenden Auftauen zurückzuführen.

Der Vergleich zwischen dem Elastizitätsmodul der frischen Rüben zu Rüben nach 10, 20, und 30 Tagen Lagerung sowie zu aufgetauten Rüben weist eine stetige Reduzierung des Elastizitätsmoduls auf. Der Elastizitätsmodul des Rübenmaterials ist stark vom

Turgorzustand der Rüben abhängig und sinkt erheblich beim Welken ab. Drastisch ist der Abbau nach Frosteinwirkung.

Hier wurden die Ergebnisse des Elastizitätsmoduls mit Vukov /27, 116/ verglichen. Er ermittelte, dass der Rübenkörper hinsichtlich seiner elastischen Eigenschaften makroskopisch, wie auch statistisch als annähernd isotrop und homogen zu betrachten ist. Die eigenen Untersuchungen der Rübenkörper ergeben im Gegensatz zu Vukov signifikante anisotrope Materialeigenschaften. Am Beispiel des ermittelten Elastizitätsmoduls ergibt sich eine große Diskrepanz zu den von Vukov 1975 gefundenen Ergebnissen. Die hier mittels moderner Materialprüfmaschine und Parallelplattendeformation ermittelten Ergebnisse weichen von den Werten, die Vukov mit der imitierenden Biegemethode und gleichzeitigem Vermessen von 20 Prüfwert zur E-Modulbestimmung fand, ab. Hinweise zum Frischezustand der Rüben werden durch ihn nicht gegeben. Schließlich sei bemerkt, dass bei stark alterierten Rüben, die eine geringere Elastizität aufweisen, das Schneiden der Schnitzel je nach Ausmaß des Erweichens des Rübengewebes stets schwieriger wird. Fast stündlich müssen die Schnitzelmesser gewechselt werden.

Der Elastizitätsmodul ist neben der Bruchkraft und der elastischen Arbeit eine wichtige und verallgemeinerbare/objektiv vergleichbare Kenngröße für die Rüben als Festkörper bzw. des Frischezustandes. Die viskoelastischen Eigenschaften des Rübenmaterials beeinflussen einerseits die Sprödigkeit der Rüben beim Schneiden, und andererseits, die Kompressibilität und den hydrodynamischen Widerstand der Schnitzel bei der Extraktion /29/. Messungen zur Arbeitsaufnahme an Schneidmaschinen über die Kampagne wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

6 Inline–online Erfassung des fluiddynamischen Verhaltens von Rohsaft

Der erstmalige inline-online-Einsatz zur kontinuierlichen Erfassung der Rohsaftviskosität im technischen Maßstab wurde in der Zuckerindustrie in den Werken A und B mit dem Ziel durchgeführt, das Auftreten von viskositätserhöhenden Polysacchariden im Rohsaft unmittelbar zu erfassen und technologische Maßnahmen zur Sicherung der Fahrweise einzuleiten (Dextranaseeinsatz, veränderte Technologieführung im Extraktreinigungsprozess). Durch die Untersuchungen der Versuchsanlage sollten folgende Aufgaben realisiert werden:

1. Abscheiden von Pülpeteilchen und Sand in einem Zentrifugalabscheider und dessen periodische Reinigung (geometrische Bedingungen).
2. Verhinderung der Belagbildung auf dem Sensor durch eine geeignete Bypassströmung mit hohen Strömungskräften.
3. Sicherung des Messprinzips und Erhalt von verfahrenstechnischen/strömungstechnischen Kennwerten.
4. Verwertung der Messdaten im Leitstand.

6.1 Versuchsstandort Werk A

6.1.1 Einbindung in Werk A

Die Untersuchungen erfolgten unmittelbar nach dem Einbau der Messsystems RHEOSWING® RSD 1-1 in ein vorgefertigtes Geometriesystem zur Einhausung des Messkopfes in ein Hüllrohr DN 25 und die Einbindung in das Rohrleitungssystem DN 25 der Versuchsanlage. Zur als notwendig erachteten Entpülpung/Entsandung wurde bei der ersten Ausführung ein kleintechnisches Hydroklassierersystem (Wolftechnik Filtersystem) in die Leitungsführung eingebunden. (siehe Abb.6.1.)

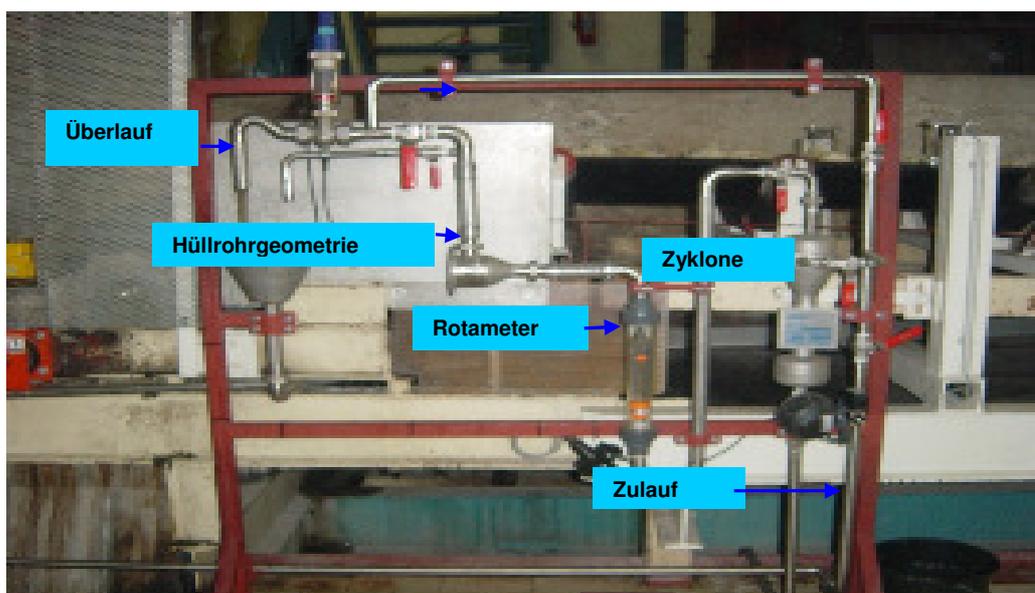


Abb. 6.1. Einbindung der Anlage in Werk A

Nach 14tägiger Betriebsdauer kann von einem möglichen Einsatz des Messsystems und der peripheren Datenerfassung gesprochen werden. Ein Beispiel für einen Betrieb des Messsystems bis 400 min ist in Abbildung 6.2. dargestellt.

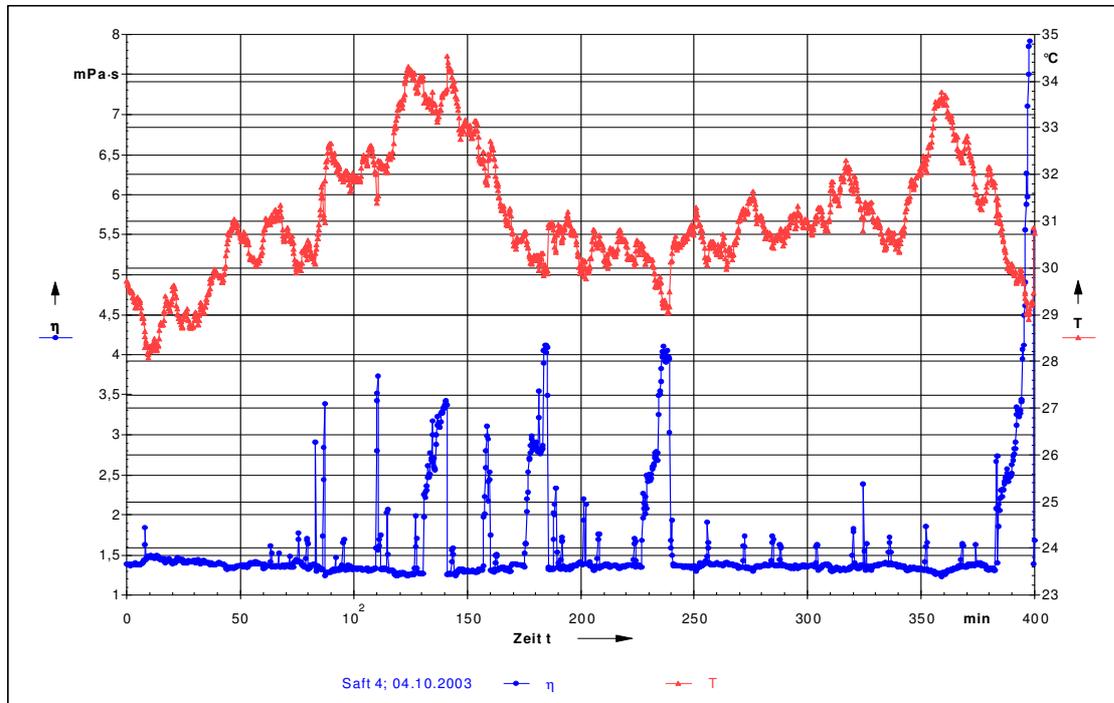


Abb. 6.2. Kontinuierliche Erfassung der Extraktviskosität

Im eingerichteten Datenerfassungstakt von 4 Wertepaaren pro Minute wird die dynamische Viskosität und Temperatur des betrieblichen Geschehens erfasst und aufgezeichnet. Das Wegdriften des Messwertes auf unreales 8 mPa·s ist auf permanenten Pülpekontakt des Sensors zurückzuführen. Die anderen kleinen Störungen werden durch Pülpe verursacht und durch Selbstreinigung beseitigt.

6.1.2 Strömungstechnische Ergebnisse im Werk A

Die Untersuchung zeigt, dass vor allem Ablagerungen von Feststoffteilchen auf dem Sensor einen Drift der Kennlinie und damit Messwertverfälschungen verursachen. Aus diesem Grunde wurde in einem Versuch der Volumenstrom von 1,5 auf 2,5 m³/h erhöht, um über höhere Strömungsgeschwindigkeiten und damit höhere Strömungskräfte eine Selbstreinigung zu bewirken. In der Tabelle 6.1. sind die Strömungsgeschwindigkeiten längs des Sensors bei den verschiedenen Volumenströmen dargestellt. Viertelstündlich wurde der Reinigungszyklus betätigt.

Tab. 6.1. Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten längs des Sensors

\dot{V}	\dot{V}	A^*	v_{Ein}	v_{Aus}
m^3/h	M^3/s	m^2	m/s	m/s
1,5	0,00042	0,00041	1,01	0,083
2,0	0,00055	0,00041	1,34	0,109
2,5	0,00069	0,00041	1,68	0,137

$$A^* = A_{\text{DN25}} - A_{\text{Sensor}} = 0,00049 - 0,000079 = 0,00041 \text{ m}^2$$

Verblockte Pülpepartikel können nicht durch den zu geringen Geschwindigkeitsvektor oder die zu geringe Impulskraft aus dem Kreisringquerschnitt von der Oberfläche abgespült werden. Aus der Wärmeübertragungstechnik sind Geschwindigkeiten $> 2 \text{ m/s}$ notwendig, um ein schnelles Ansetzen/Ablagern von Eiweiß und anderen Saftinhaltsstoffen zu reduzieren.

Wie eine Analyse der bisherigen Untersuchungen zeigt, ist der eingetretene Reinigungseffekt am Sensor auf das Wirken der Impulskraft nach **auf/zu** des Bodenablassventiles zurückzuführen.

6.1.3 Detektion von Veränderungen der Extraktviskosität (Fahrweise)

In bisher jedem Fall konnte in Korrelation mit den betrieblichen Gegebenheiten eine „schlechtere“ Rübenqualität oder eine Verschlechterung der Fahrweise des Extraktionsturms ad hoc rheologisch detektiert und angezeigt werden.

In der folgenden Abbildung 6.3 konnte die Fahrweise des Extraktionsturms infolge defekter Siebe, bzw. unzureichender Arbeit des Sandabscheiders exemplarisch nachgewiesen werden:

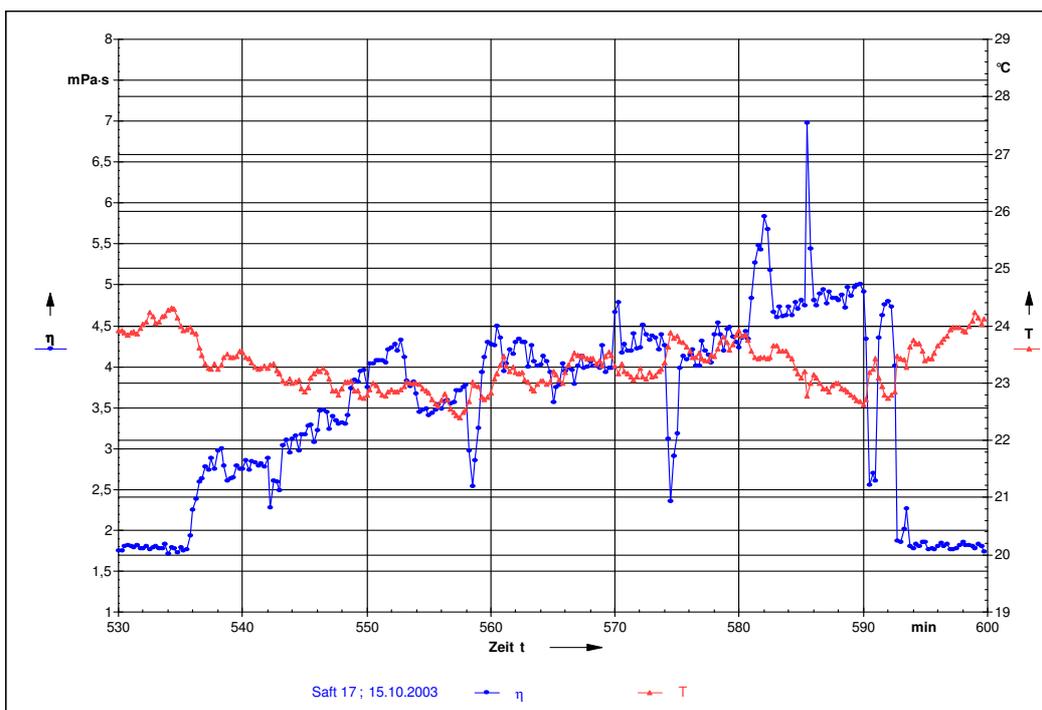


Abb. 6.3. Extraktviskositätsänderung im Produktionsprozess

Das eigentliche Applikationsproblem ist die permanente Sauberhaltung des Sensors über die Standzeit eines Tages.

6.1.4 Schlussfolgerung für die Optimierung des Messsystems

Die Untersuchungsergebnisse im Werk A zeigen, dass vor allem die Ablagerungen von Feststoffteilchen auf dem Sensor einen Drift der Kennlinie und damit Messwertverfälschungen verursachen. Diese wurden bei der Installation im Werk B berücksichtigt und folgende Veränderungen vorgenommen:

1. Einstellung höherer Strömungsgeschwindigkeit (von ca. 2,5 m/s) bzw. höherer Impulskräfte längs des Sensors durch eine Hüllrohrenbindung des Sensorstabes.
2. Nutzung des Rohsaftes als Selbstreinigungsmedium für den Sensor durch Einbau eines Regelventils (mit auf/zu-Charakteristik) und Verzicht auf Zyklonabscheidung.
3. Veränderte Zeitsteuerung mit höherer Anzahl von Reinigungsimpulsen.

Abbildung 6.4. zeigt den Aufbau der Versuchsanlage zur Erfassung der dynamischen Rohsaftviskosität im Werk B in der Kampagne 2003.

Bei der Installation im Werk B wurden die genannten Veränderungen vorgenommen. Der Zentrifugalkraftabscheider wurde umfahren. Die Einbindung ist in Abb. 6.4. dargestellt.

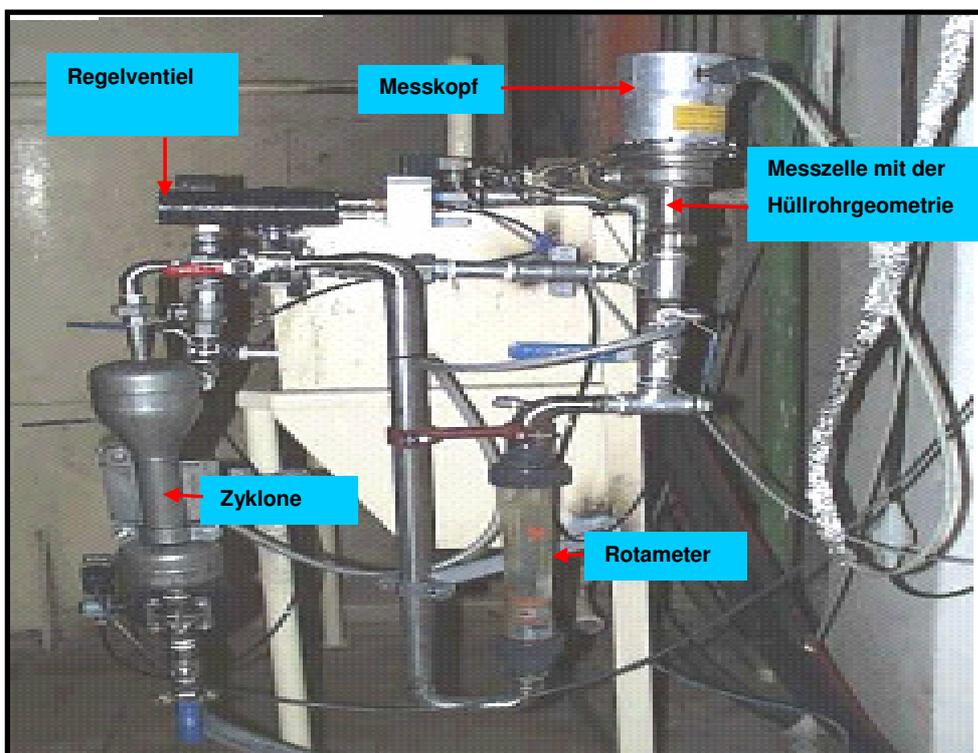


Abb. 6.4. Einbindung der Anlage in Werk B

6.2 Versuchsstandort Werk B

6.2.1 Ergebnisse in Werk B

In folgender Abbildung wurde der Einfluss von Pülpe und Sand auf Viskositätserhöhung des Rohsaftes dargestellt. Wie aus der Abbildung 6.5. zu erkennen ist, konnte ein stabiles Messsignal nur kurzzeitig erfasst werden.

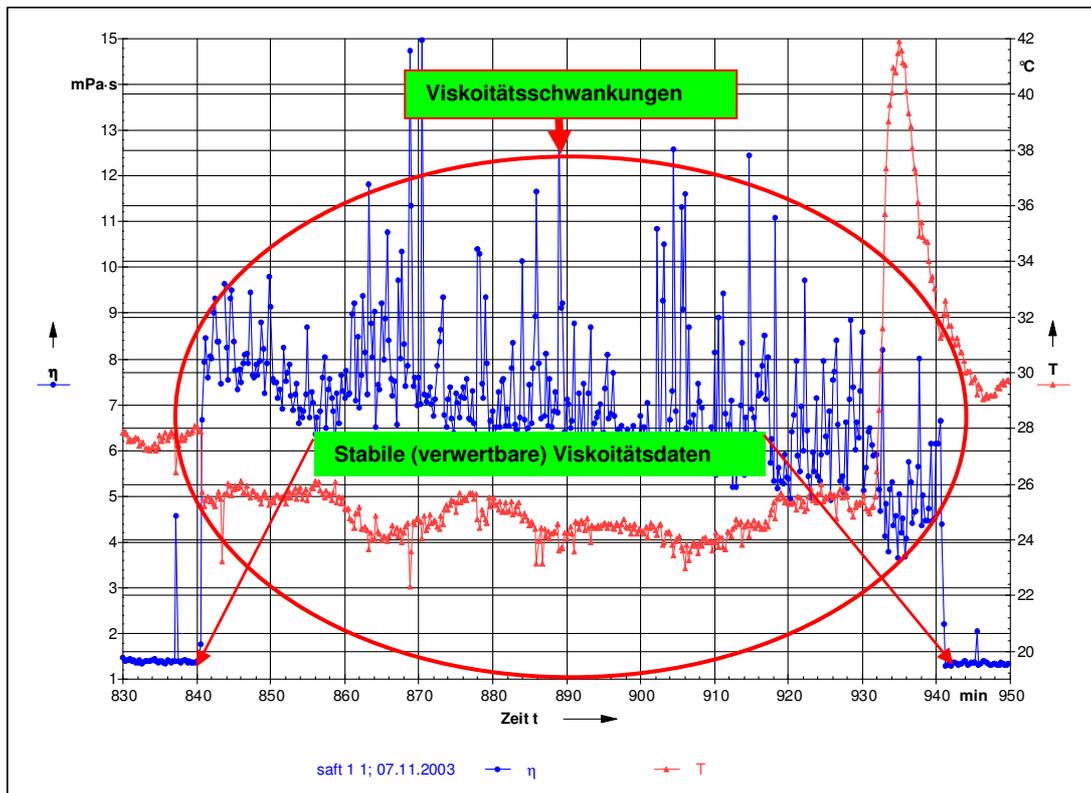


Abb. 6.5. Einfluss von Pülpe und Sand auf die Extraktviskosität

Aufgrund der möglichen Verbesserungen zum Betrieb der Messvorrichtung fanden weitere Versuchsanstellungen zur Optimierung der Einsatzfähigkeit zu einem sicher funktionierenden Messsystem als „Frühwarnsystem“ im Rahmen der Saftreinigungsprozesse statt.

Die nachfolgenden Aussagen beziehen sich auf die gewonnenen Versuchsergebnisse am 06./07.11.2003, können aber als repräsentativ für die Einsatzcharakteristik gewertet werden.

Eine weitere Verbesserung der Fahrweise der Messtechnik stellen die nachfolgend beschriebenen Optimierungsschritte dar. Zur Bewertung der Fahrweise/Funktionssicherheit des RHEOSWING® RSD 1-1 wurden die Untersuchungen im Stundentakt erfasst und bewertet.

In der nachfolgenden Tabelle 6.2. sind die Versuchsvorgaben und die Messergebnisse als Funktion der angelegten Strömungsgeschwindigkeit zur Versuchsanlage aufgeführt:

Tab. 6.2. Verdichtete Untersuchungsergebnisse

Nr.	\dot{V}^{**}	v^{**}	Taktzeit	***Echtzeit/Anzahl Störungen	verwertbare Messpunkte	Bewertung
	M ³ /h	m/s	S		-	%
1	7,3	2,89	95	12 – 13 / 5	23/217	90,4
2	8,0	3,09	95	13 – 14 / 3	13/227	94,4
3	6,4	2,46	95	14 – 15 / 5	41/199	82,9
4	5,3	2,04	95	15 – 16 / 6	73/167	69,6
5	5,3	2,04	27	16 – 17 / 7	18/222	92,5
6	7,2	2,77	27	17 – 18 / 2	7/233	97,1
7	7,2	2,77	27	06–07/2 (07.11.)	3/237	98,8
8	7,2	2,77	27	07 – 08 / 2	2/238	99,1
9	7,2	2,77	27	08 – 09 / 4	5/235	98,0
10	7,2	2,77	27	09 – 10 / 5	7/233	97,1
11	7,2	2,77	27	10 – 11 / 2	3/327	98,8
12	7,2	2,77	27	11 – 12 / 2	3/327	98,8

Hinweise zur Tabelle:

\dot{V}^{**} gemessen mit der Eimermethode: Volumen pro Zeit bei eingestelltem Druck

v^{**} mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung für das Hüllrohr DN 32 um den Sensor berechnet. Sensordurchmesser 10 mm.

***Anzahl der Störungen in einer Stunde Messzeit

Ausgezählt werden bei einer Taktzeit von nun eingestellten 95 s mit ca. 1 s und später 27 s Taktdauer und 1 s Totzeit die verwertbar anfallenden Messpunkte im Vergleich zur abgeforderten stündlichen Messpunktzahl von 240 Viskositätsdaten.

Grundlage der Auswertung in Tab. 6.2. sind die nachstehend dargestellten Abbildungen mit stündlicher Auswertung. Es wurde nur exemplarisch Anfang und Ende der Versuchsanstellung im Stundentakt dargestellt.

Nach zweitägiger Untersuchung scheint eine einmalige chemische Reinigung des Sensors mit 50 %iger Natronlauge bei einer Temperatur von ca. 70 °C und 10minütiger Einwirkzeit ausreichend zu sein. In den Abb.6.6. und 6.7. sind die ermittelten Rohsaftviskositäten im Stundentakt exemplarisch dargestellt um die Verbesserungen durch Verkürzung der Schaltimpulszeit nachzuweisen.

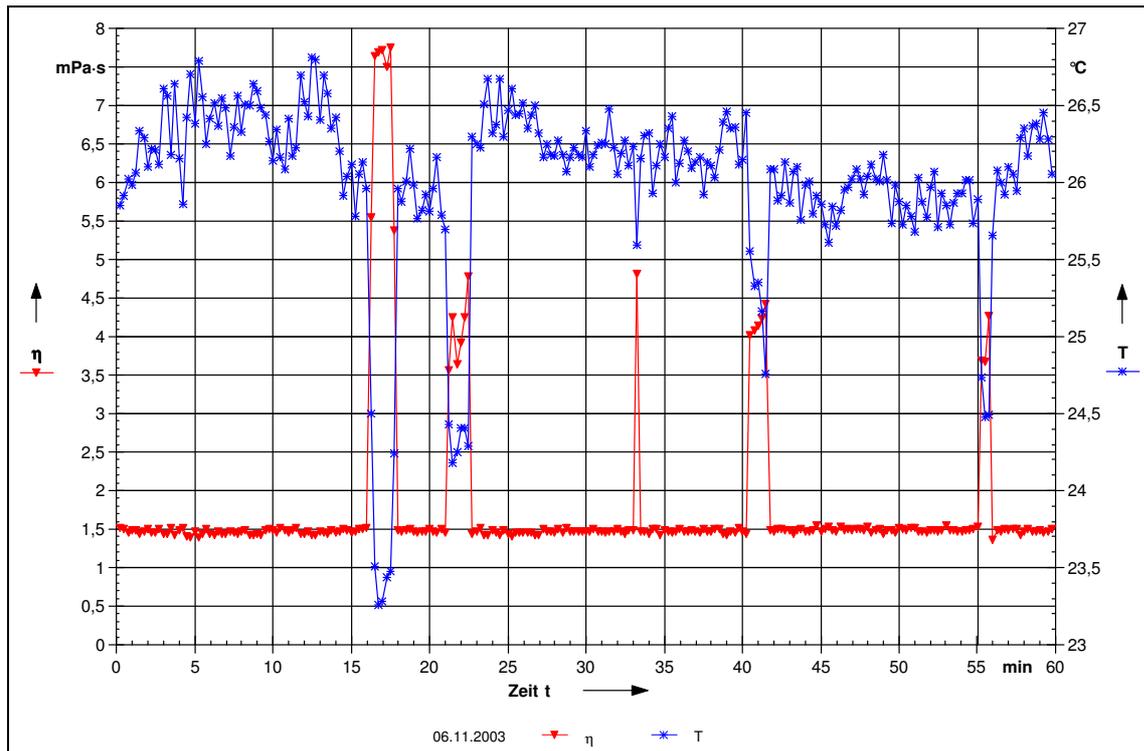


Abb. 6.6. Rohsaftviskosität innerhalb einer Stunde (12 bis 13 Uhr), $\Delta p = 0,8$ bar Takt 95 s
Nach Veränderungen wurde eine stabile Messung der Rohsaftviskosität durchgeführt.

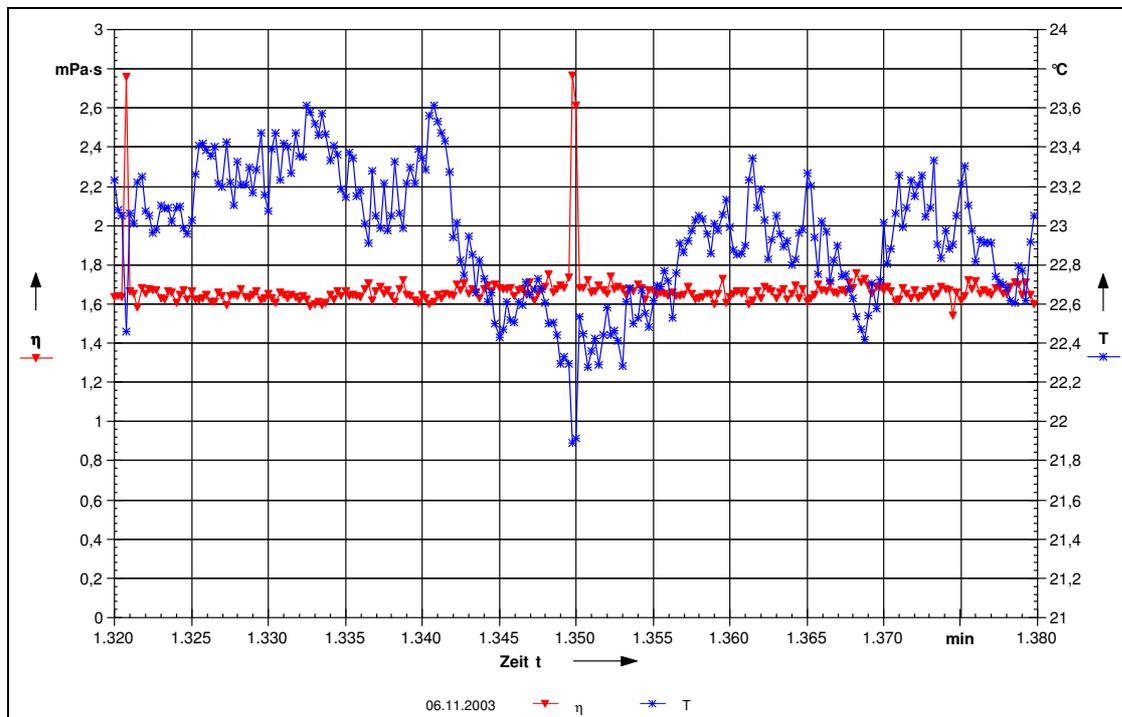


Abb. 6.7. Rohsaftviskosität innerhalb einer Stunde (10 bis 11 Uhr), 06./07.11.03,
 $\Delta p = 0,8$ bar, Takt 27 s

Unter den Bedingungen dieser Einstellungen (Taktzeit 27 s und Vordruck 0,8 bar) konnte am

06./07.11.03 ein ununterbrochener Betrieb (trotz betrieblich bedingten Stillstandes durch Kesselhausprobleme) von 48 Stunden ohne Unterbrechung erzielt werden.

Die Verwertbarkeit der durch das inline-online-System zur Verfügung stehenden Viskositätsdaten konnte auf > 95 % gesteigert werden.

6.2.2 Strömungstechnische Ergebnisse im Werk B

Es wurde festgestellt, dass bei annähernd gleichen äußeren Bedingungen (Fahrweise der Rohsaftgewinnung, gleiche technologische Qualität des Rübenmaterials) die Verfügbarkeit der Messergebnisse und die Standzeit der Anlage in erster Linie von der Wirkung bzw. des Effekts des Freispülverhaltens des Sensors abhängig ist.

Priorität genießt dabei in erster Linie die Wirkung der Impulskräfte auf die Oberfläche des Sensors zu dessen Selbstreinigung.

Die Impulskräfte berechnen sich bei konstantem statischem Druck nach der Gleichung:

$$F = \rho \cdot A_{\text{Ein}} \cdot v^3 \quad \text{in N} \quad (6.1)$$

$$F = 1013 \cdot 0,0008 \cdot (2,89)^3 = 19,56 \text{ N}$$

Die Gleichung für die Bewegungsgröße ($l = \frac{m \cdot v}{t}$) verändert sich entsprechend in

$$\Delta l = \frac{m \cdot v}{\Delta t} \quad (6.2)$$

und liefert mit kleiner werdenden Δt als auf-/zu-Zeit höhere wirkende Impulskräfte zur mechanischen Reinigung des Sensors.

Im Vergleich berechnet sich die Widerstandskraft der Strömung längs des Sensors bzw. bei Aufströmung auf den Sensor bei vorliegender turbulenter Strömung nach der Gleichung:

$$F = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad \text{in N} \quad (6.3)$$

$$F = 0,24 (0,00008 + 0,00282) \cdot \frac{1013}{2} \cdot 2,89^2 = 2,95 \text{ N}$$

Damit ergibt sich eine Relation von Impulskraft zu Widerstandskraft von 6,6:1 bei angenommener Schaltdauer von 1 s zu/auf.

6.2.3 Detektion schlechten Rübenmaterials/geschädigter Rüben in Werk B

Exemplarisch sind in den nachfolgenden Abbildungen die durch die inline-online-Messungen erkannten Veränderungen der Rohsaftviskosität dargestellt. Schädigungen/Beeinträchtigungen der technologischen Qualität der Rüben wurden im Werk B wieder eindeutig erkannt.

Anhand der Viskositätsuntersuchungen von Rohsaft zur Detektion von schlechter Rübenqualität konnten im Bereich der Saftreinigung folgende Veränderungen in Tab. 6.3. gleichzeitig erfasst werden.

Tab. 6.3. Übereinstimmung rheologischer Daten des Rohsaftes mit Druckänderungen der Filterstation

Nr.	Datum	*Zeitraum	p_{FD1}	p_{FD2}	Δp	w_{TS}	Δq	ΔpH
			bar	Bar	bar	%	%	
1	30.10.03	4.30 – 5.30	2,20	2,00	0,20	18,50	1,2	0,3
2	01.11.03	10.20 – 10.50	2,70	2,50	0,20	18,20	0,2	0,1
3	04.11.03	21.30 – 23.00	2,30	2,10	0,20	18,20	2,3	0,1
4	20.11.03	4.00 – 6.30	2,50	2,20	0,30	18,00	2,6	0,2
5	28.11.03	18.00 – 1.00	2,30	1,80	0,50	18,00	2,4	0,1
6	04.12.03	18.00 – 20.10	2,70	2,30	0,40	18,20	1,0	0,2
7	09.12.03	12.30 – 14.00	2,80	2,10	0,70	17,90	---	---

gemessen bei 20 °C

* Dauer der Messstörung

Schädigungen der technologischen Qualität der Rüben, z. B. infolge Hitzenestern im Rübensilo konnten mehrfach durch den Sensor detektiert werden. Nach ca. 60 bis 90 min trat an den Filtern eine Erhöhung der Druckdifferenz auf.

6.2.4 Sicherung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Die Reproduzierbarkeit der Mess- und Versuchsanstellung an Messtagen in der Kampagne ist in Tab. 6.4. enthalten.

Tab. 6.4. Reproduzierbarkeit der Messanstellungen

Nr.	\dot{v} **	v^{***}	Taktzeit	Echtzeit/Anzahl Störungen	Bewertung	Datum
-	m ³ /h	m/s	S	-	%	
1	7,2	2,77	27	15 –19; (28 h)/129	96,40	08.11.03
2	7,4	2,83	27	19.18-19.40; (24,6 h)/100	95,90	09.11.03
3	7,2	2,77	27	20.00 – 13.30; (17,5 h)/71	97,02	10.11.03
4	7,2	2,77	27	15.05-8.35; (17.30 h)/63	98,60	16.11.03
5	7,4	2,83	27	17.00-13.00; (20 h)111	97,20	27.11.03
6	7,8	2,98	18	14.15 – 13.35; (23,3 h)/56	98,70	29.11.03
7	8,0	3,06	18	17.20 – 16.35; (23,3 h)/95	98,20	02.12.03
1,0	8,0	3,06	18	16.30 – 15.50; (23,3 h)/41	98,87	11.12.03

Folgende eindeutige Aussagen können aus den in der Tabelle 6.4 verdichteten Versuchsergebnissen abgeleitet werden:

Bei annähernd gleichen äußeren Bedingungen (Fahrweise der Rohsaftgewinnung, gleicher technologischer Qualität des Rübenmaterials) hängen die Verfügbarkeit der Messergebnisse und die Standzeit der Anlage in erster Linie vom Effekt des Freispülverhaltens des Sensors ab.

6.2.5 Schlussfolgerung für die Optimierung des Messsystems

Ein weiteres erhebliches Problem für die Betriebssicherheit des RSD-Systems stellen die Druckschwankungen in der Rohsaftversorgung dar. Ein kleiner Pufferbehälter mit eigener Pumpe muss für die Stabilität der Rohsaftversorgung sorgen.

Untersuchungen zur Optimierung des Messsystems sollten unter Berücksichtigung der Rohsafteigenschaften, Strömungsbedingungen und Nutzung des Messsignals für das LIMOS-Verfahren geprüft werden.

6.3 Temperaturkompensation

Zunächst muss sicher unterschieden werden, ob eine Temperaturabhängigkeit der Viskosität vorliegt. Es muss daher in 3 generelle Fahrweisen unterschieden werden, von denen folgende von Bedeutung sind:

1. Temperaturkonstanz und vorliegende Viskositätsänderung.
2. Temperaturinduzierte Viskositätsänderung durch betriebliche Einflüsse.
3. Viskositäts- und temperaturänderungsbedingte Daten.

Ein Beispiel für eine typische Temperaturabhängigkeit ist in Abb. 6.8 dargestellt.

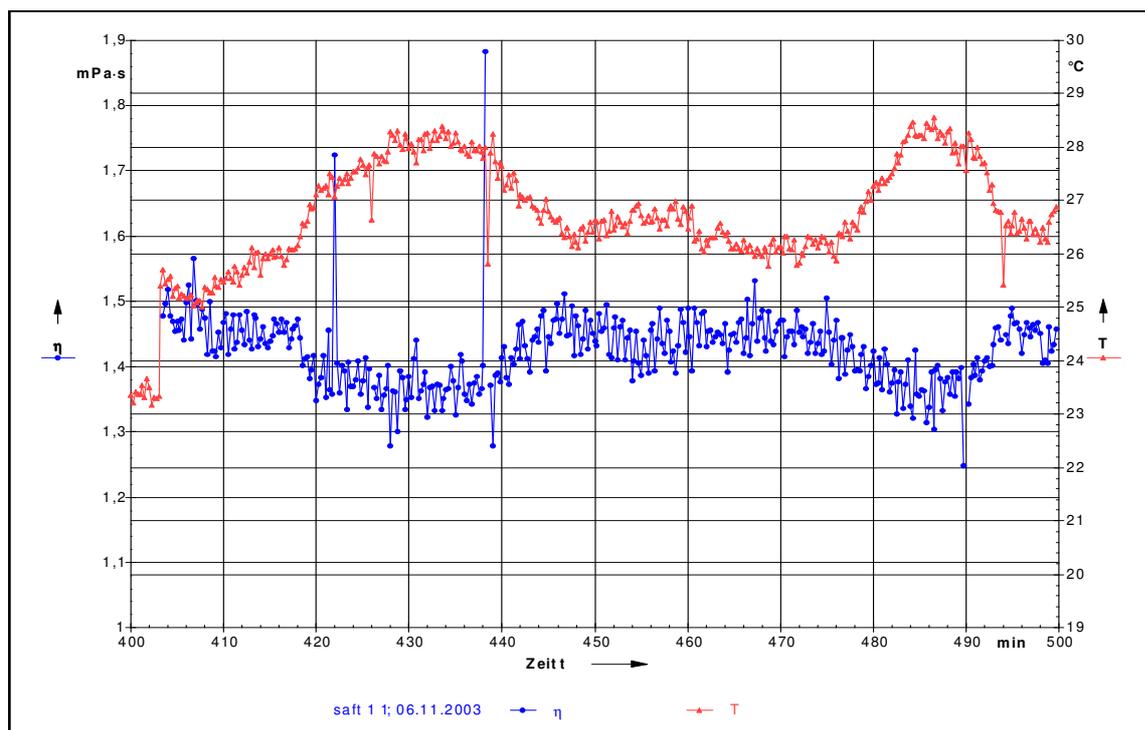


Abb. 6.8. Temperaturinduzierte Viskositätsänderung

Für den Fall eines allmählichen Viskositätsanstieges liegt bei einer temperaturinduzierten Abhängigkeit eine reale Veränderung der Extraktviskosität vor.

Die erste Fragestellung an die Logik der Messwerte ist:

1. Die Kompensation des Temperatureinflusses.
2. In diesem Falle sollten die Originalmessdaten auf das Vorliegen einer so genannten

Sprungfunktion mit der Prüfung wie nachstehend beschrieben:

$$\text{If } \frac{\Delta\eta}{\Delta\vartheta} = \frac{\eta_I - \eta_{I-1}}{\vartheta_I - \vartheta_{I-1}} \leq 10 \text{ \% than date is valid in mPas/15s} \quad (6.4.)$$

abgefragt werden. Bei Einhaltung dieses Algorithmus über einen Zeitraum von 20 Einzelmesswerten liegen reale Änderungen der Viskosität des Rohsaftes vor, wenn im gleichen Zeitraum nicht gleichzeitig die Temperatur sinkt und mit einem ähnlichen Abbruchkriterium befragt wird.

3. Liegen die Änderungen > 10 % bezogen auf den Viskositäts-Zeit-Koeffizienten, liegt eine Messstörung vor. Eine Rückkopplung zum Leitstand zusätzlich zur eigenen Temperaturerfassung liefert eindeutige Aussagen.

6.4 Aufbau der Viskositätsmatrix im Rohsaft

Die nachfolgenden Untersuchungen dienen der Charakterisierung und Bewertung der Einflussparameter auf die Rohsaftviskosität.

6.4.1 Einfluss von Temperatur und Trockensubstanz auf die Rohsaftviskosität

Zur Ermittlung der dynamischen Viskosität wurde ein Rohsaft aus der laufenden Produktion nach der Filtration auf die gewünschte Temperatur temperiert und in der Trockensubstanz eingestellt. Die Vermessung erfolgte mit dem RHEOSWING® RSD 1-1 in einem Temperaturbereich von 20 – 40 °C ($\Delta T = 10 \text{ K}$) und einem Trockensubstanzbereich von 15 – 18 %.

In Tab. 6.5. sind die Mittelwerte der Rohsaftviskositäten bei den Versuchsbedingungen enthalten. (Versuchstag: 17.11.03)

Tab. 6.5. Mittelwerte der Rohsaftviskositäten

w _{TS}	15* %	16 %	17 %	18 %	
ϑ in °C	Dynamische Viskosität in mPas				n**
20	1,4601 ± 0,003	1,5657 ± 0,007	1,6453 ± 0,016	1,7392 ± 0,035	60
30	1,0824 ± 0,010	1,1202 ± 0,009	1,2157 ± 0,003	1,2796 ± 0,009	47
40	0,8342 ± 0,007	0,8463 ± 0,140	0,9035 ± 0,057	0,9878 ± 0,007	48

* auf 17 % bis 15 % durch Zugabe von Wasser

** n Datenerfassungstakt von 4 Wertpaaren pro Minute mal Dauer der Messzeit

Mit steigender Temperatur nimmt die Viskosität des Rohsaftes ab.

Mit steigender Trockensubstanz nimmt die Viskosität des Rohsaftes zu.

Eine Temperaturveränderung von 10 K hat mehr Einfluss auf die Rohsaftviskosität als eine 1 %ige Trockensubstanzänderung.

6.4.2 Einfluss von Pektin, Dextran und Lävän auf die Viskosität von Rohsaft

Im Extrakt vorhandenes Pektin, Dextran und Lävän als hochmolekulare Komponenten besitzen einen großen Einfluss auf das Viskositätsverhalten des Rohsaftes. In der folgenden Untersuchungsreihe wurden Rübenpektin und Dextran (Rübenpektin Typ Beta Molekularge-

wicht 50.000 bis 70.000; Dextran Fa. SIGMA, Molekulargewicht 5.000.000 bis 40.000.000) in drei Dosiermengen von 1 g/l, 2 g/l, 3 g/l zu einem filtrierten Rohsaft zugesetzt, um den Einfluss auf die Viskositätsausbildung zu ermitteln. Für die nachstehend beschriebenen Untersuchungen lagen die Hydrokolloide in gelöster Form im Rohsaft vor.

6.4.2.1 Einfluss von Pektin auf die Rohsaftviskosität

Um die Ermittlung des Einflusses von Pektin auf die Viskosität des Rohsaftes zu bestimmen, wurde Rübenpektin in zwei Dosiermengen (1 g/l, 2 g/l) zu einem filtrierten Rohsaft mit einer Trockensubstanz von 17 % zugesetzt. Für die Versuchsanstellung 3 g/l lag am 17.11.2003 nicht genügend Pektin vor. Die Ausgangswerte für Pektin im nativen Saft wurden nicht bestimmt und standardmäßig mit ca. 0,9 g/l angenommen.

Tab. 6.6. enthält die messtechnisch bestimmte dynamische Viskosität des Rohsaftes

Tab. 6.6. Versuchsergebnisse

	Dosierung 1 g/l		Dosierung 2 g/l		* $\Delta\eta_1$	* $\Delta\eta_2$
ϑ in °C	η_{dyn} in mPas	**n	η_{dyn} in mPas	**n	mPas	
20	2,1295 ± 0,0058	24	2,7587 ± 0,0180	21	0,4842	1,1134
30	1,6560 ± 0,0077	26	2,0786 ± 0,0096	29	0,4403	0,8629
40	1,3161 ± 0,0199	26	1,7042 ± 0,0160	25	0,4126	0,8007

* $\Delta\eta$ Differenz zum normalen Rohsaft mit 17 % Trockensubstanz, Untersuchung mit RSD 1-1

** n Datenerfassungstakt von 4 Wertpaaren pro Minute mal Dauer der Messzeit

Mit steigender Temperatur verringern sich jeweils die Viskositätsdifferenzen.

Aus der Tabelle 6.6. ist bei allen Messtemperaturen ein Anstieg des Viskositätslevels des Rohsaftes mit der Pektinkonzentrationserhöhung zu erkennen.

Die Untersuchungsergebnisse von /9/ werden bestätigt.

6.4.2.2 Einfluss von Dextran auf die Rohsaftviskosität

Um den Einfluss von Dextran auf die Rohsaftviskosität festzustellen, wurden Untersuchungen mit 1, 2 und 3 g/l Dextran zu einem filtrierten Rohsaft mit einer Trockensubstanz von 17 % durchgeführt. Tab. 6.7. enthält die ermittelte dynamische Viskosität des Rohsaftes bei Dextranzugabe.

Tab. 6.7. Rohsaftviskosität bei Dextranzugabe

	Dosierung 1 g/l		Dosierung 2 g/l		Dosierung 3 g/l		* $\Delta\eta_1$	* $\Delta\eta_2$	* $\Delta\eta_3$
ϑ °C	η_{dyn} mPas	**n	η_{dyn} mPas	**n	η_{dyn} mPas	**n	mPas	mPas	mPas
20	1,826 ± 0,009	28	2,041 ± 0,039	49	2,154 ± 0,013	28	0,181	0,395	0,509
30	1,356 ± 0,013	24	1,451 ± 0,005	46	1,571 ± 0,010	32	0,141	0,236	0,355
40	1,056 ± 0,012	43	1,160 ± 0,014	61	1,215 ± 0,007	22	0,153	0,257	0,312

* $\Delta\eta$ Differenz zum normalen Rohsaft mit 17 % Trockensubstanz, Untersuchung mit RSD 1-1

** n Datenerfassungstakt von 4 Wertpaaren pro Minute mal Dauer der Messzeit

Aus der Tabelle 6.7. ist bei allen Messtemperaturen ein Anstieg des Viskositätslevels des Rohsaftes mit der Dextrankonzentrationserhöhung zu erkennen.

Die Pektinzugabe hat mehr Einfluss auf die Erhöhung der Rohsaftviskosität im Vergleich zur Dextranszugabe.

6.4.2.3 Einfluss von Lävanzugabe auf die Rohsaftviskosität

Zur Ermittlung des Einflusses der Lävanzugabe auf die Rohsaftviskosität wurde Rübenlävan in drei Dosiermengen (1, 2 und 3 g/l) zu einem filtrierten Rohsaft mit ebenfalls 17 % Trockensubstanz zugegeben. Tab 6.8. enthält die messtechnisch ermittelte dynamische Viskosität des Rohsaftes im untersuchten Temperatur- und Trockensubstanzbereich.

Tab. 6.8. Rohsaftviskosität bei Lävanzugabe

ϑ °C	Dosierung 1 g/l		Dosierung 2 g/l		Dosierung 3 g/l		$^*\Delta\eta_1$ mPas	$^*\Delta\eta_2$ mPas	$^*\Delta\eta_3$ mPas
	η_{dyn} in mPas	**n	η_{dyn} in mPas	**n	η_{dyn} in mPas	**n			
20	1,791 ± 0,0045	48	1,853 ± 0,0052	28	2,056 ± 0,0137	28	0,145	0,207	0,411
30	1,288 ± 0,0111	42	1,354 ± 0,0220	29	1,462 ± 0,0822	28	0,073	0,138	0,246
40	1,065 ± 0,0083	48	1,142 ± 0,0299	28	1,156 ± 0,0179	22	0,161	0,239	0,252

* $\Delta\eta$ Differenz zum normalen Rohsaft mit 17 % Trockensubstanz, Untersuchung mit RSD 1-1

** n Datenerfassungstakt von 4 Wertpaaren pro Minute mal Dauer der Messzeit

Insgesamt muss konstatiert werden, dass die geringsten Viskositätserhöhungen bei der Lävanzugabe gefunden werden.

Es muss in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von /9, 113/ festgestellt werden, dass die Pektinzugabe den größten Einfluss auf die Erhöhung der Rohsaftviskosität im Vergleich mit Dextran und Lävanzugabe auf Rübenbasis bewirkt.

Obwohl die Molekulargewichte der Hydrokolloide Dextran und Lävanzugabe im Vergleich zum Pektin höher sind, ist die viskositätserhöhende Wirkung von Pektin als Wechselwirkung der am meisten verzweigten Molekülstruktur mit dem daraus resultierenden größten hydraulischen Durchmesser bzw. der ausgeprägtesten Ruhestruktur zu sehen.

Eine Darstellung des gesamten Ereignisfeldes ist in Abb. 6.9 enthalten.

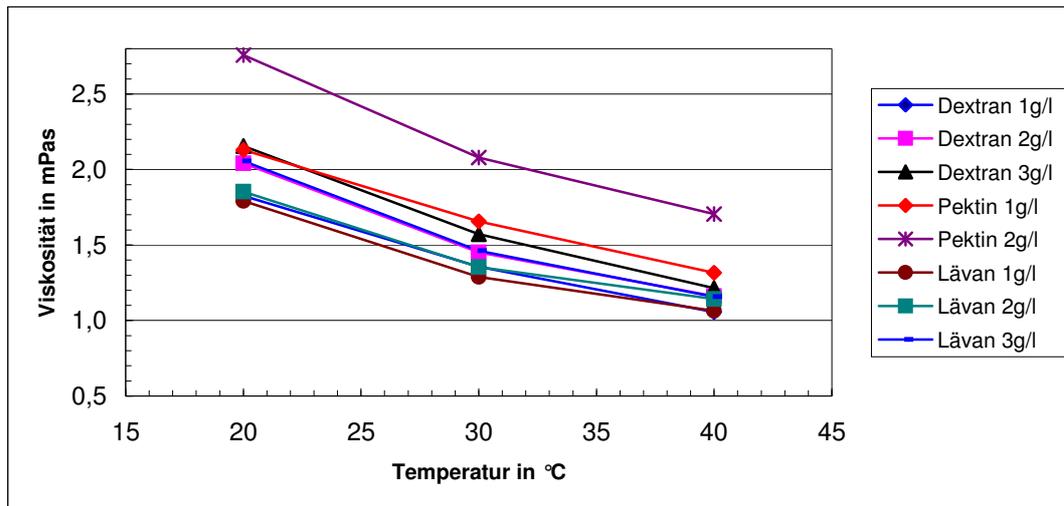


Abb. 6.9. Darstellung der Versuchsergebnisse

Werte > 2,5 mPas liegen in der Versuchsmatrix eindeutig nicht vor, werden aber im unfiltrierten Rohsaft bestimmt.

Ein Vergleich mit den Versuchsergebnissen der RSD-Messungen zeigt bei Ausklammerung von Störungen einen Viskositätsbereich von $1,4 \leq \eta_{\text{Proz}} \leq 4$ mPas.

Im Regelfall werden durch die künstlich einzeln zugesetzten Hydrokolloide diese Viskositätslevel ohne Superpositionsprinzip nicht erreicht.

6.5 Grundlagen der Viskositätsmatrix des Rohsaftes

Nachstehend wird der Versuch unternommen, den Aufbau der Viskositätsmatrix des Rohsaftes grundlagenwissenschaftlich nachzuvollziehen. Der Anteil der Viskositätserhöhung jedes Inhaltsstoffes soll nachfolgend determiniert werden.

Dabei ist die (dynamische) Viskosität die einzige physikalische Größe, die nicht massenanteilig nach der Riechmann Mischungsformel berechnet werden kann. Die Matrix baut sich generell exemplarisch aus unterschiedlichen Konzentrationen bei 20 °C von

1. Wasser 82 % Viskositätslevel 1,00 mPas
2. Saccharose 17 % vollständig gelöst 1,67 mPas $\Delta\eta = 0,67$ mPas
3. Die Zugabe von 1 g/l Pektin zum Rohextrakt 17 % erhöht die Viskosität auf 2,1295 mPas ($\Delta\eta = 0,48$ mPas).

6.5.1 Superpositionsprinzip bei Hydrokolloidzugabe

Da die alleinige Zugabe einer Hydrokolloidkomponente nicht die bei den betrieblichen Messungen festgestellten Rohsaftviskositätslevel ergab, wurden nach der Kampagne zusätzliche Untersuchungen nach dem Superpositionsprinzip durchgeführt, da in den Wechselwirkungen von Pektin und Dextran in Saccharoselösungen ein viskositätserhöhender Effekt vermutet wird.

Da ein nicht originärer Rohsaft vorlag (hier aufgetauter Rohsaft) können die nachfolgend dargestellten Messergebnisse nur als Trends gewertet werden.

Offensichtlich ergeben sich bei der in Tab. 6.9. enthaltenen Modalität der schrittweisen Hydrokolloidzugabe (0,1 % Pektinzugabe + 0,1 % Dextranzugabe) Abweichungen im Vergleich zur Zugabe von nur einer Hydrokolloidkomponente als heuristischer Trend. Zu beachten sind die Konzentrationsmaße 1 g/l Zugabe. Diese entspricht einer Konzentrationserhöhung um 0,1 %.

Bei der Zugabe von ausschließlich Pektin zum Rohsaft in den Stufen 0,1 % ergeben sich im untersuchten Bereich fast lineare Zunahmen der Viskosität. Die Viskositätserhöhung bei einer analogen Dextranzugabe in einer Wasser-Pektin-Matrix fällt erheblich geringer aus.

Dextranzugaben > 0,4 g/l kennzeichnen ein stark problematisches Rübenmaterial /60/.

In Tab. 6.9. sind die verdichteten Messdaten bei einer Temperatur von 20 °C enthalten.

Tab. 6.9. Einfluss von Pektin- und Dextranerhöhung (Superpositionsprinzip) bei 20 °C

Dosiermenge g/l	mPas	$\Delta\eta$ mPas	$\Delta\eta_1$ (Dextran)			$\Delta\eta_2$ (Pektin)		
			1	2	3	1	2	3
Ausgangsextrakt	1,90 ± 0,0049	0						
Pektin (1g/l)	2,23 ± 0,0136	0,337				0,34		
Pektin (1g/l) + Dextran(1 g/l)	2,56 ± 0,0359	0,329	0,33					
Pektin (2 g/l) + Dextran(1 g/l)	2,88 ± 0,2266	0,319					0,32	
Pektin (2 g/l) + Dextran(2 g/l)	3,12 ± 0,0565	0,234		0,23				
Pektin (3 g/l) + Dextran(2 g/l)	3,61 ± 0,0731	0,490						0,49
Pektin (3 g/l) + Dextran(3 g/l)	3,99 ± 0,0805	0,382			0,38			
neue Versuchsanstellung:								
Pektin(3 g/l)	3,48 ± 0,0941							
Pektin (3 g/l) + Dextran(4 g/l)	4,81 ± 0,0959	1,326						
Pektin (3 g/l) + Dextran(6 g/l)	5,78 ± 0,0577	0,971						

Zum Vergleich wurde die Versuchsanstellung anstelle des Einsatzes von aufgetautem Rohsaft mit Wasser wiederholt.

Die Versuchsergebnisse sind in der nachstehenden Tab. 6.10 enthalten.

Tab. 6.10. Einfluss von Pektin und Dextran und Lösung im Wasser bei 20 °C

Dosiermenge g/l	η mPas	$\Delta\eta$ mPas	$\Delta\eta_1$ (Dextran)		$\Delta\eta_2$ (Pektin)	
			1	2	1	2
Wasser	0,8707 ± 0,0091					
Dextran(1 g/l)	0,9932 ± 0,0044	0,1225	0,12			
Pektin(1 g/l)	1,2732 ± 0,2253	0,4025			0,28	
Pektin(1 g/l)+Dextran(1 g/l)	1,3497 ± 0,0109	0,4790	0,07			
Pektin(2 g/l)+Dextran(1 g/l)	1,7723 ± 0,0068	0,9016				0,42
Pektin(2 g/l)+Dextran(2 g/l)	1,9517 ± 0,0194	1,081		0,17		

Eindeutig wird durch diese Messanstellung nachgewiesen, dass für die viskositätssteigernden Interaktionen der Hydrokolloide eine Saccharoselösung vorhanden sein muss. Vor allen Dingen für Dextran resultiert aus der Interaktion Dextran – Saccharoselösung eine Viskositätserhöhung, die sich bei höheren Konzentrationen dieses Hydrokolloids verstärkt.

In Abb. 6.10. sind die Versuchsergebnisse aus Tab. 6.9. zusammengefasst.

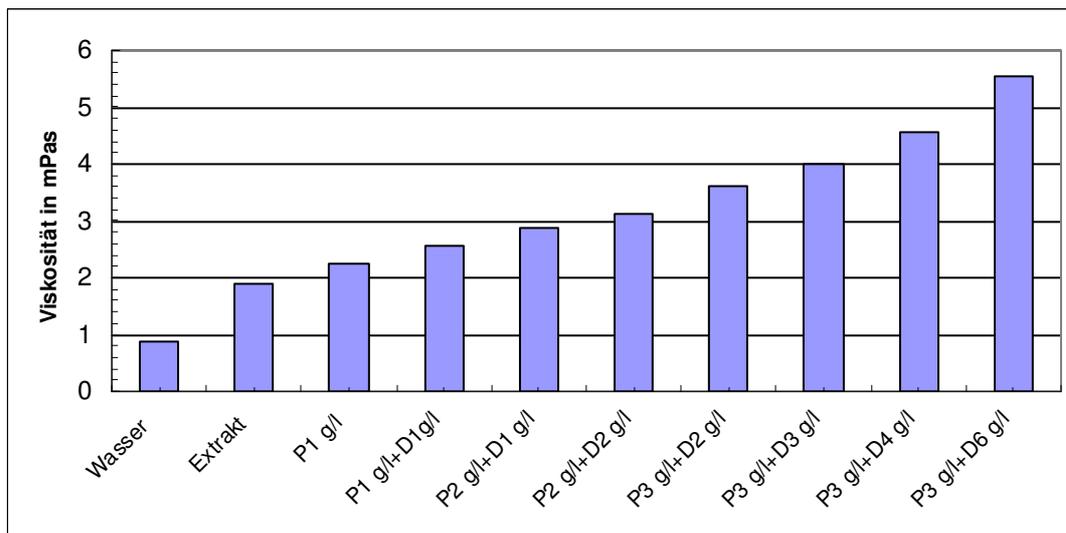


Abb. 6.10. Superpositionsprinzip Dextran und Pektin im Rohextrakt bei 20 °C

Folgende eindeutige Aussagen können aus den in der Tabelle 6.9. verdichteten Versuchsergebnissen abgeleitet werden:

Nur in der ergänzenden/komplexen Wirkung von Pektin/Dextran-Interaktionen in einer Saccharoselösung können die im Rohsaft gemessenen Viskositätslevels entstehen.

Die Zusammenmischung von Dextran und Pektin in den gewählten Konzentrationsstufen zeigt, dass der komplexe Einfluss auf die Steigerung der Viskosität des Rohsaftes primär

durch die Pektinzugabe bedingt ist. Durch die Interaktionen zwischen Saccharoselösung und Dextran werden größere Viskositätszunahmen als bei Einlösen von Dextran in Wasser ermittelt.

Da der Pektinanteil im Rohsaft im Vergleich zur Dextranerhöhung infolge Mikroorganismenaktivität nicht beliebig steigen kann, ist vor allen Dingen der Dextrangehalt in Wechselwirkung mit der gelösten Saccharose ausschlaggebend für das Viskositätsverhalten des Rohsaftes.

Die Methodik der Versuchsdurchführung zeigt, dass es bei einer von Buchholz und Bruhns /60/ definierten kritischen Dextrankonzentration $> 400 \text{ mg/l}$ im Rohextrakt zu den ermittelten Viskositätseffekten kommt.

Da für dieses Stoffsystem von einem nicht-Newtonschen Fließverhalten auszugehen ist, tritt folgender Mechanismus negativ für die Filtrationsleistung auf:

Bei hohen einwirkenden Schergeschwindigkeiten, wie sie z. B. in einer turbulenten Strömung vorliegen, ist die Interaktion des Dextranmoleküls mit der Saccharose auf einem niedrigen Viskositätslevel, da eine Orientierung und Streckung des Moleküls vermutet werden kann (Enthaken der außenstehenden CH_2OH -Gruppe des Saccharosemoleküls und Orientierung in Fließrichtung).

Bei der Filtration oder anderen Stofftrennoperationen liegt aber eine laminare Strömung mit einem niedrigen Schergradienten vor. Unter diesen mechanischen Bedingungen nehmen die strukturbildenden Moleküle (und hier prädestiniert Dextran) den Ruhestrukturzustand ein, d. h. ein nichtorientiertes (ausgerichtetes) und nicht mehr gestrecktes Molekül besitzt einen größeren hydraulischen Radius und damit eine höhere Viskosität, die zur Verringerung der Filterleistung führt. Restrukturierungen zu einer Mikrogelpartikeldispersion verhindern einen Filtrationseffekt ad hoc.

In der Kampagne 2003 wurde eine Rohsaftviskosität von ca. $1,70 \text{ mPas}$ (Rohsafttemperatur von 20 °C) ermittelt.

Eine höhere Rohsaftviskosität bedeutet einen Anstieg der viskositätsbeeinflussenden Komponenten und dient als Warnsignal für die Filtration.

Drei wichtige Aussagen können abgeleitet werden:

1. Bei einem Rohsaft (z. B. $w_{\text{TS}} = 17 \%$; $\vartheta = 20 \text{ °C}$) mit einem Viskositätslevel im Bereich von $1,70 \text{ mPas} > \eta_{\text{Ex}}$ erwartet man keine ungewöhnlichen Hydrokolloidkonzentrationen.
2. Geringere Viskositäten als 1 mPas sind zu vernachlässigen.
3. Liegt eine höhere Rohsaftviskosität vor, so ist mit einer Erhöhung der Konzentration der viskositätsbeeinflussenden Komponenten im Rohsaft zu rechnen. Prozessviskositäten in dieser Größenordnung signalisieren in jedem Fall das Vorliegen „schlechter“ technologischer Eigenschaften des Rohsafts sowie eine problematische Fahrweise der

Extraktgewinnung und verursachen im Regelfall Filtrationsprobleme in der nachfolgenden Saftreinigung.

6.6 Weiterentwicklung der Methode in der Kampagne 2005 /64/

Im Werk B wurden in den Kampagnen 2005/2006 weiterführende Untersuchungen zur Problematik durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse sind als Literaturrecherche nachstehend aufgeführt.

6.6.1 Optimierung der Messeinrichtung

1. Sicherung/Optimierung der Grobentpülpung und Grobentsandung des Rohsaftes zum Messsystem sowie gleichzeitige Reduzierung der Schaumbildung im Abscheidebehälter.
2. Weitere Optimierung der Strömungsbedingungen längs des Sensors zur Erhöhung der Standzeit.
3. Einbindung des Messsignals in das Leitsystem des Werkes.
4. Standzeiterhöhung des Sensors durch Einsatz einer Reinigungsstation als Vorstufe eines automatischen Reinigungssystems mit Warmwasser und Natronlauge.

Abbildung 6.11. zeigt das vereinfachte Schema der Versuchsanlage zur kontinuierlichen Erfassung der Rohsaftviskosität im Werk B in der Kampagne 2005.

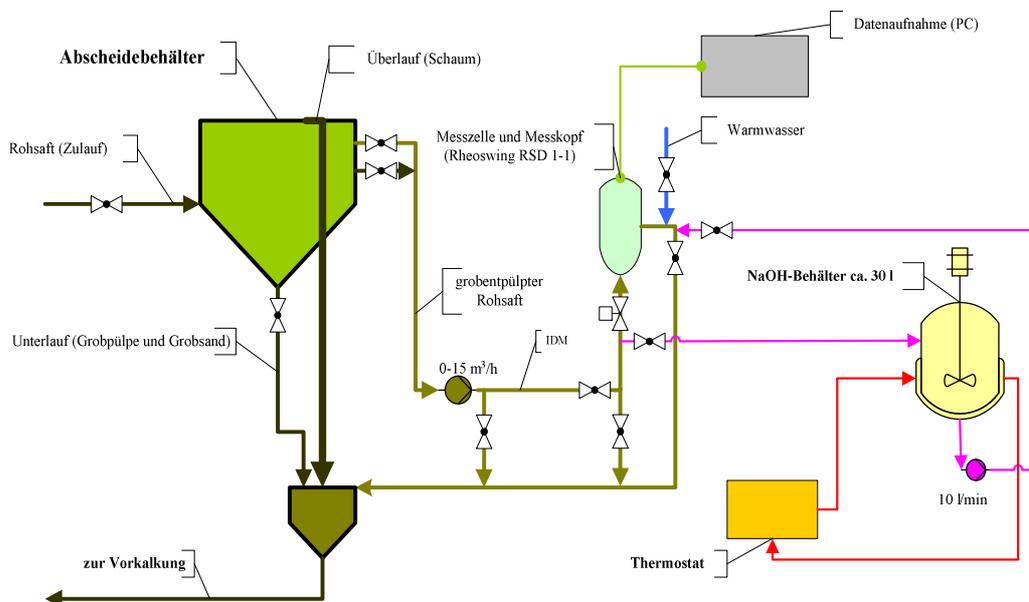


Abb. 6.11. Vereinfachtes Schema der Versuchsanlage Kampagne 2005

Nach der Änderung der Siebposition (Abbildung 6.12.) im Abscheidebehälter für Grobentpülpe und Sand konnte eine optimale Abtrennung aus dem Rohsaft durchgeführt werden.

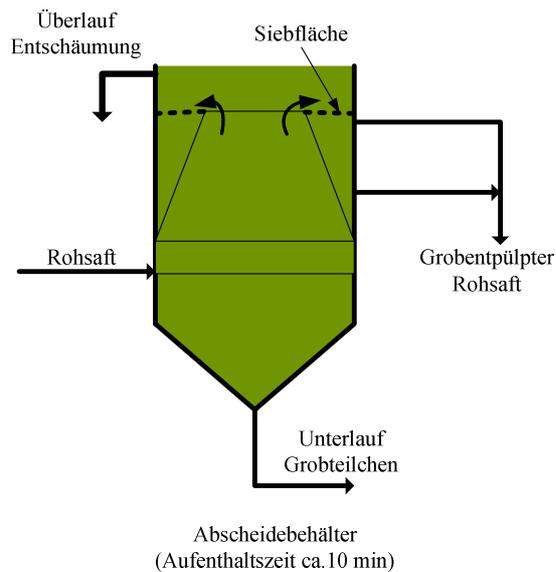


Abb. 6.12. Behälter zur Grobentpülung und Grobentsandung des Rohsaftes

Der Vorrichtung wird ein Volumenstrom zugeführt, der sich aufteilt in:

1. Versorgung des Messsystems RHEOSWING[®] über eine Pumpe, um längs des Sensors eine Strömungsgeschwindigkeit von ca. 1,20 m/s zu erzeugen.
2. Überschüssiger grobentpülpter Rohsaft sowie ein Volumenstrom zum Austrag der Grobteilchen aus dem zylinderkonischen Teil infolge Sedimentation werden in das Betriebsnetz zurückgeführt; ebenso der Überlauf der Entschäumung.

Mit dem gleichen aufbereiteten Rohsaft könnte ein Prozessrefraktometer betrieben werden und die Trockensubstanz des Rohsaftes als wichtiger Prozessparameter den optimalen Betrieb der Extraktion aufzeigen.

Der Abscheidebehälter reduziert den Anteil der Grobteilchen im Rohsaft um ca. 70-80 %. Der grobentpülpte Rohsaft kann problemfrei zur sicheren Erfassung der Rohsaftviskositäten verwendet werden und mit Verzicht auf jegliche mechanische und chemische Reinigung im Kampagneverlauf eingesetzt werden.

6.6.2 Dauerbetrieb des Messsystems /64/

Nach Optimierung der Messeinrichtung wurden Dauerversuche zur online-Erfassung der Viskosität vom 01.11.05 bis zum Ende der Kampagne durchgeführt. Abbildung 6.13. zeigt die ermittelten Viskositätsdaten im Dauerbetrieb über einen Zeitraum von einer Woche.

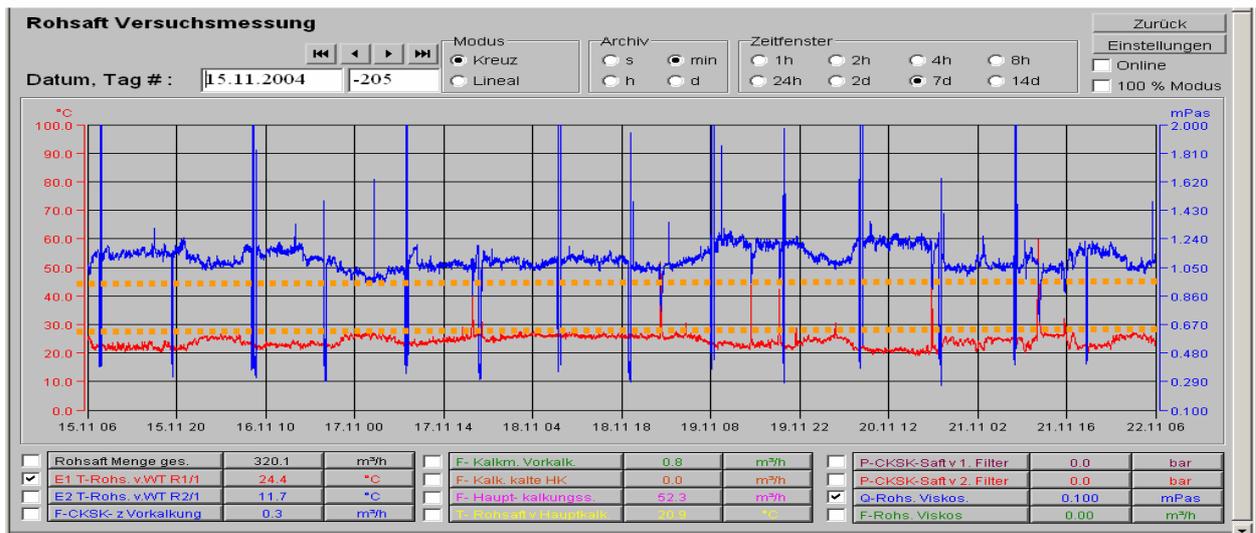


Abb. 6.13. inline-online-Viskositätsmessung des Rohsaftes vom 15. bis 22.11.04

Ausführliche Informationen zur Weiterentwicklung und Serienverläufe der inline-online-Erfassung sind in /64/ angegeben. Das Messsystem war in der Kampagne 2005 ohne eine einzige mechanische Reinigung einsatzfähig.

7 Fluiddynamisches Verhalten von Carbonatationsschlamm, reiner Saccharoselösung, technischer Saccharoselösung aus Rübe und Rohr und Kristallsuspensionen (als Literaturrecherche)

Da die eingehenden fluiddynamischen Stoffkennwerte mit entscheidend für die Auslegung der gesamten Prozesstechnik sind, kommt ihrer exakten Kenntnis eine besondere Bedeutung zu. Das Fließverhalten von Carbonatationsschlamm ist z. B. von Interesse für den Reinigungszyklus der Beutel- bzw. Kerzenfilter, da nur ein gut fließfähiges System eine ausreichende Regenerierung der Filterflächen gewährleistet. Auch haben Fließeigenschaften von technischen Saccharoselösungen für die Modellierung von Wärmeübertragungsprozessen in der Zuckerindustrie eine entscheidende Bedeutung.

7.1 Fließverhalten von Carbonatationsschlamm /66/

Die Messungen wurden in Abhängigkeit von der Konzentration (50, 55 und 60 % Trockensubstanzgehalt) und Temperatur (20 bis 70 °C) durchgeführt.

Die rheologischen Messungen wurden mit Hilfe des Paar-Physica-Rheolab MC 120 im deformationsgesteuerten Modus vorgenommen. Zum Einsatz kam das Zylindermesssystem Z3 DIN.

In der Tabelle 7.1. sind die aus den Originalmessdaten abgeleiteten Messergebnisse, korreliert nach Casson, aufgeführt.

Eine Analyse der Originalmessdaten ergab, dass die Messungen bei 50 und 55 % Trockensubstanzgehalt nicht durch Wandgleiteinflüsse verfälscht werden. Unter Wandgleiteinfluss versteht man das Abrutschen des Messzylinders in der durch Belastungseinfluss entmischten Probe in Wandnähe. Messbedingungen: $\dot{\gamma} = 0,1 - 50 \text{ s}^{-1}$, Z3 DIN, 60 s Vorscheren; 60 s Messung

Tab. 7.1. Verdichtetes Messprotokoll, Carbonatationsschlamm 50, 55, 60 % TS

Carbonatationsschlamm 50 % TS					
ϑ	τ	η_{pl}	r^2	$\pm s$	η_{eff}
°C	Pa	kg/m·s	-----	Pa	kg/m·s
20	15,936	0,046	0,812	2,578	0,607
30	14,297	0,064	0,830	2,816	0,621
40	12,139	0,095	0,863	2,973	0,642
50	10,249	0,185	0,921	3,141	0,779
60	10,058	0,258	0,943	3,294	0,945
70	19,860	0,290	0,962	3,464	1,366
Carbonatationsschlamm 55 % TS					
20	13,91	1,238	0,986	5,309	2,670
30	12,533	1,227	0,988	4,921	2,587
40	11,513	1,353	0,961	8,387	2,670
50	11,113	1,391	0,988	4,113	2,725
60	14,214	1,430	0,992	2,743	2,990
70	23,572	1,452	0,944	6,156	3,692
Carbonatationsschlamm 60 % TS					
20	20,697	3,824	0,996	8,001	6,754
30	12,267	4,179	0,990	11,891	6,45
40*	23,547	1,226	0,992	4,386	2,850
50*	34,949	0,447	0,992	2,412	2,264
60*	48,420	0,210	0,994	1,490	2,080
70*	90,110	0,034	0,897	3,049	2,329

*Eindeutiges Wandgleiten, daher Abfall von η_{eff} aufgrund immer stärker werdender Festkörpercharakteristik

Folgende Aussagen ergeben sich anhand der rheologischen Messungen:

1.- Eine Trockensubstanzerhöhung von 5 % im Bereich von 50 bis 55 % bewirkt eine 2-3 fach höhere effektive Viskosität (bei 70 °C) und damit eine Verschiebung in einen für die Strukturierung exponierten Bereich.

2.- Mit Erhöhung der Temperatur sinkt zunächst die Fließgrenze τ_0 bei allen Messungen, um dann bei 70 °C ein absolutes Maximum anzunehmen. Bei 50 % Trockensubstanzgehalt liegt das Minimum bei 50 - 60 °C, sonst bei 30 °C.

Indifferent verhält sich die gemessene plastische Viskosität. Bei einem Trockensubstanzgehalt von 50 % sinkt die nun auf einem wesentlich höheren Niveau liegende plastische Viskosität mit Erwärmung. Dieser Trend setzt sich auch bei der Vermessung der Probe mit 60 %

Trockensubstanzgehalt fort.

Überraschend ist das in der Tabelle 7.1. dargestellte Verhalten der effektiven Viskosität, insbesondere die Erhöhung bei 70 °C. Bei einem Trockensubstanzgehalt von 50 % findet ein stetiger Anstieg der effektiven Viskosität mit der Temperatur statt. Dieses Anwachsen deutet auf eine Strukturierung in eine festere Form hin. Ein leichter Abfall ist nach dem Casson-Modell zu verzeichnen. Das Minimum der effektiven Viskosität tritt bei den Proben mit 55 % bei ca. 30 °C und 60 % Trockensubstanzgehalt bei ca. 60 °C auf.

Zum bereits nachgewiesenen nicht-Newtonschen Verhalten muss eine weitere Anomalie detektiert werden.

3.- Das in Abhängigkeit von der Temperatur gemessene Verhalten erscheint zunächst als Widerspruch und zwingt zu einer Analyse der möglichen Gründe. Die Ursache für dieses Verhalten ist in den Kristallumwandlungsvorgängen zu finden. Nach Dedek /114/ kann CaCO_3 , hergestellt aus Kalkmilch und Kohlendioxid, in sechs verschiedenen Kristallmodifikationen auftreten. Kristallisation und Rekristallisation finden in Abhängigkeit von der Temperatur, dem Wassergehalt und dem Vorhandensein freier Carbonationen bzw. Chloridionen statt. Folgende sechs Kristallstrukturen, wie in Tabelle 7.2. angegeben, sind möglich.

Tab. 7.2. Verschiedene Kristallmodifikationen bei dem Schlammsaftkonzentrat

Nr.	Kristallstruktur	Zustand
1	amorphe Kristallstruktur	(weich, schmierig)
2	hexahydrates Kristall	$\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 10 bis 30 °C
3	Monohydrates Karbonat	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
4	Vaterit A/B	Amorphe Kristallstruktur im Temperaturbereich 20 bis 150 °C
5	Aragonit	Umwandelbar in/aus Vaterit/Calcit durch Temperatureinwirkung
6	Calcit	Vorliegen $\vartheta > 80$ °C

Calcit und Aragonit weisen in den angeführten Kristallmodifikationen die größte Festigkeit auf und bilden in der Technologie den inkompressiblen Baustein des Filterkuchens zur Abtrennung des Carbonatationsschlammes, ohne den die Filtration bei der Saftreinigung nicht durchführbar wäre. Trotz der Inkompressibilität kann mittels Beutel- bzw. Kerzenfiltern nur eine verkürzte Standardfiltration durchgeführt werden. Der Verlauf der effektiven Viskosität des Filterkuchens mit steigender Untersuchungstemperatur im Bereich > 35 °C ist so physikalisch erklärbar.

4.- Bei 55 und 60 % Trockensubstanzgehalt liegt die effektive Viskosität unabhängig von der Temperatur in etwa gleicher Größenordnung. Eine Abkühlung des Carbonatationsschlammes auf dem Transportweg beeinflusst das Förderverhalten damit kaum.

5.- Aufgrund der gefundenen Fließparameter sollte bei > 60 % Trockensubstanzgehalt von einem Fluidtransport im Rohrleitungssystem Abstand genommen werden. Eigentliches Problem ist das Wideranfahren der vollen Leitung nach einem Stillstand der Pumpe. Technischer

Betrieb ist nur mit Hilfe von auftretenden Wandgleiteneffekten möglich. Wie aus Tab. 7.1. zu entnehmen ist, liegt die effektive Viskosität der Probe mit 60 % Trockensubstanzgehalt bei Wandgleiteneffekten in der Größenordnung der Probe mit 55 % Trockensubstanzgehalt. Ab 63 % Trockensubstanzgehalt liegt Festkörpercharakteristik vor.

6.- Eine zeitliche Abhängigkeit konnte bei der vorgegebenen Schergeschwindigkeit ($0,1 - 50 \text{ s}^{-1}$) und Messzeit von einer Minute nicht ermittelt werden.

7.2 Fließverhalten reiner Saccharoselösung /50/

7.2.1 Dynamische Viskosität reiner Saccharoselösung

Zur rechnerischen Bestimmung der dynamischen Viskosität reiner Saccharoselösungen wurde von Schmidt, Christoph und Senge /49/ Gleichung (3.22) aus den Messwerten der Druckmesszelle abgeleitet. Die Randbedingungen lauten:

$$60 \% \leq w_{\text{TS}} \leq 75 \% ; 30 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \vartheta \leq 130 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Das auf der Basis der Gleichung (3.22) erstellte Nomogramm der dynamischen Viskosität in Abhängigkeit von Trockensubstanzgehalt und Temperatur der reinen Saccharoselösung zeigt Abb. 7.1.

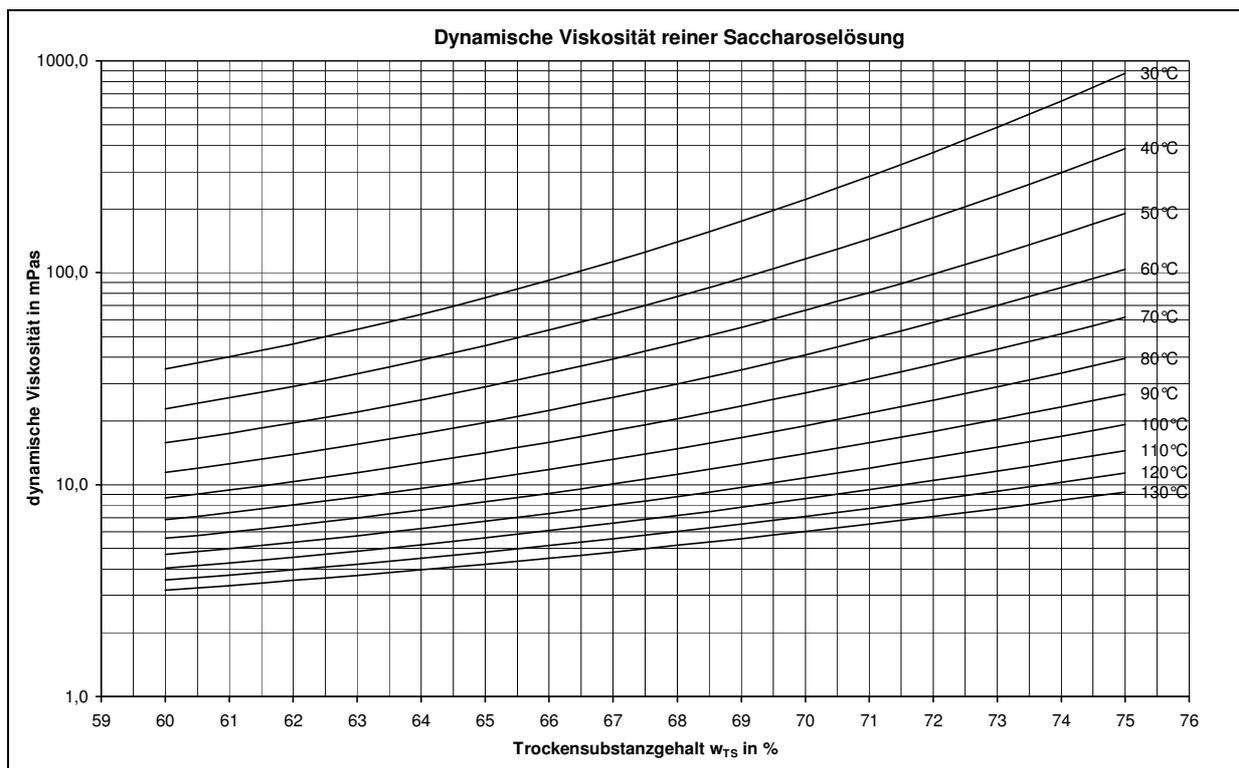


Abb. 7.1. Dynamische Viskosität reiner Saccharoselösung in Abhängigkeit von Trockensubstanzgehalt und Temperatur

7.2.2 Nicht-Newton'sches Verhalten reiner Saccharoselösung /50/

Untersucht wurden mit dem UDS 200 reine Saccharoselösungen mit Trockensubstanzgehalten $60 \% \leq w_{TS} \leq 75 \%$; im Temperaturbereich $5 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 70 \text{ °C}$, mit $5 \leq \dot{\gamma} \leq 500 \text{ s}^{-1}$ lineare Vorgabe.

Exemplarisch ist in der Abbildung 7.2. die Fließkurve für reine Saccharoselösung mit 60 % Trockensubstanzgehalt und 60 °C dargestellt. Ausgewertet nach dem Modellansatz von OSTWALD-DE WAELE ergibt sich ein Kurvenverlauf mit den angegebenen Parametern.

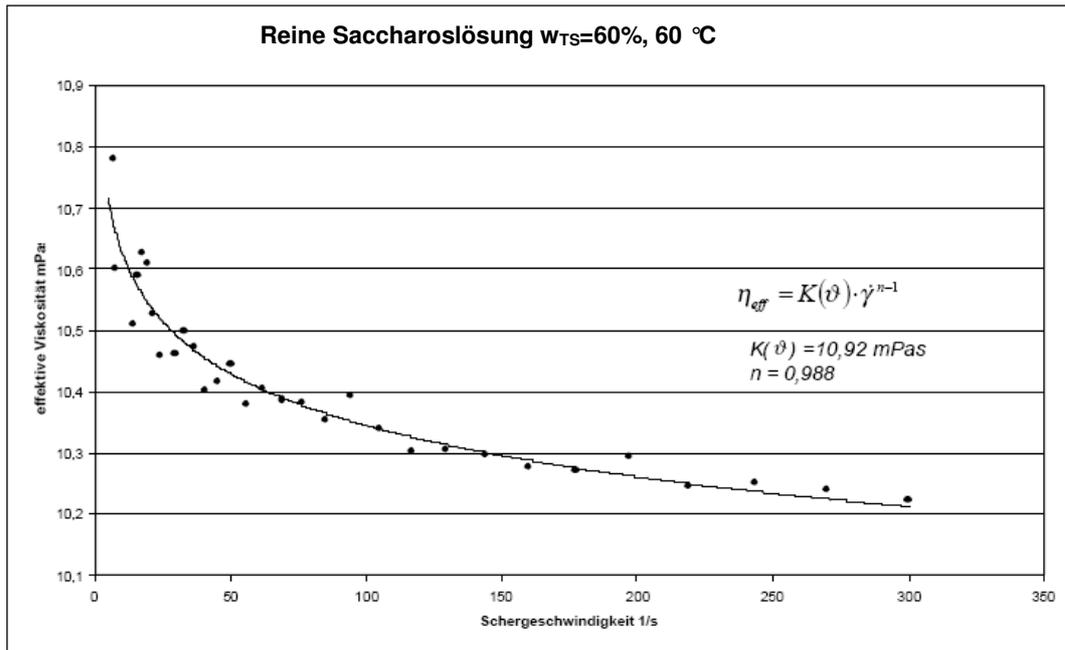


Abb. 7.2. Fließkurve reiner Saccharoselösung

Die Parameter nach dem Modellansatz von OSTWALD-DE WAELE für den gesamten untersuchten Trockensubstanz- und Temperaturbereich sind in Tabelle 7.3. zusammengefasst.

Tab. 7.3. Fließverhalten reiner Saccharoselösung

ϑ	$w_{TS} = 60 \%$			$w_{TS} = 65 \%$			$w_{TS} = 70 \%$			$w_{TS} = 75 \%$		
	$K(\vartheta)$	n	r									
°C	mPa·s			mPa·s			mPa·s			mPa·s		
70	8,92	0,980	0,999	14,61	0,986	0,999	61,0	0,885	0,999	119,50	0,901	0,999
60	10,92	0,988	0,999	20,98	0,981	0,999	76,8	0,909	0,999	162,74	0,954	0,998
50	15,25	0,994	0,999	31,74	0,985	0,999	94,3	0,958	0,999	246,96	0,997	0,998
40	22,57	0,993	0,999	47,30	0,994	0,999	136,2	0,996	0,999	492,71	0,999	0,999
30	35,33	0,993	0,999	83,94	0,990	0,999	262,1	0,997	0,999	1146,6	0,999	1,000
20	60,44	0,994	0,999	157,5	0,990	0,999	571,5	0,997	0,999	3115,2	0,999	1,000
15	82,57	0,994	0,999	221,5	0,994	0,999	882,6	0,997	0,999	-----	-----	-----
10	114,14	0,994	0,999	325,0	0,994	0,999	1441,2	0,998	0,999	-----	-----	-----
5	161,99	0,995	0,999	494,5	0,996	0,999	2397,8	0,998	0,999	-----	-----	-----

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

Ab 50 °C setzen deutliche Strukturveränderungen ein, die durch ein Abnehmen des Fließexponenten n gekennzeichnet sind. Die einwirkenden Scherkräfte zerstören Strukturausbildungen der reinen Saccharoselösung in diesem Temperaturbereich. Bei einem Trockensubstanzgehalt von 70 % ist ein Maximum der Strukturveränderung zu erkennen. Hier wird bei 70 °C ein Fließexponent n von 0,885 erhalten. Demgegenüber werden bei einem Trockensubstanzgehalt von 65 % nur geringe Veränderungen beobachtet. Aufgrund der durch die höhere Temperatur erhöhten inneren Energie scheinen hydrophile Interaktionen mit verstärkten Bemühungen der Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen für dieses Verhalten, das auch für andere Saccharidlösungen gefunden wurde, verantwortlich zu sein. Aktuelle Untersuchungen am Beispiel des noch kleineren Glucosemoleküls belegen die hohe Strukturaffinität von Zuckermolekülen in bestimmten Temperatur- und Konzentrationsbereichen (siehe Abbildung 7.3. als Oszillationsmessung).

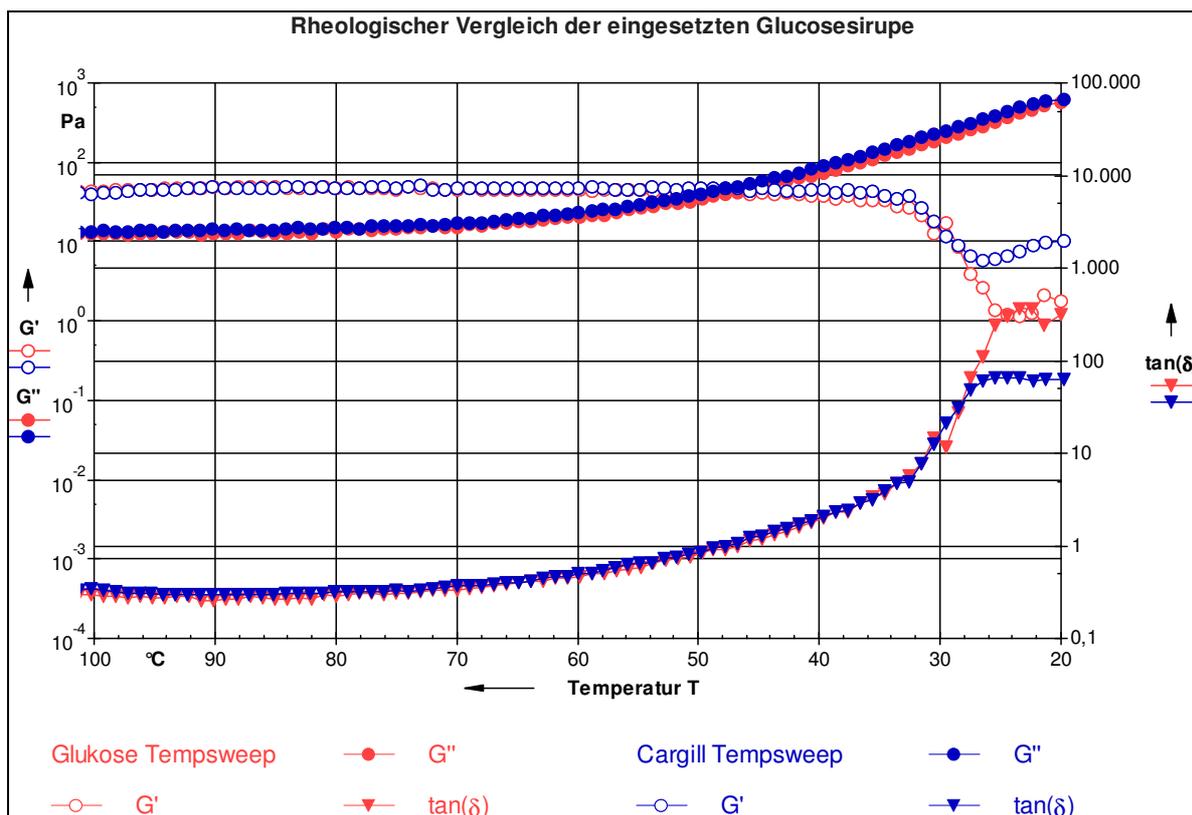


Abb. 7.3. Messkurven der eingesetzten Glucosesirupe /115/

Während der Verlustmodul stetig mit sinkender Temperatur ansteigt, erstaunt das Verhalten des Speichermoduls. Im Temperaturbereich 95 bis 47 °C, mit einem relativen Maximum bei 63 °C, liegt der Speichermodul oberhalb des Verlustmoduls und indiziert trotz der höheren Temperaturen ein dominantes Festkörperverhalten bis ca. 46 °C.

Dieser Effekt wurde bei Saccharoselösungen in hoher Konzentration und bei analogen Temperaturbereichen ebenfalls in ähnlicher Form gefunden/nachgewiesen.

7.3 Fließverhalten technischer Saccharoselösung /50/

7.3.1 Einfluss von Temperatur und Trockensubstanzgehalt auf die dynamische Viskosität der technischen Saccharoselösung

Aus den gewonnenen Messwerten der Untersuchungen von Dicksäften mit unterschiedlicher technologischer Qualität wurden analog wie bei der reinen Saccharoselösung die Gleichungen (3.24, 3.25) für die dynamische Viskosität von Dicksaft in Abhängigkeit von Trockensubstanzgehalt und Temperatur entwickelt.

Die dynamische Viskosität von Dicksaft in Abhängigkeit von Trockensubstanzgehalt und Temperatur zeigt Abb. 7.4.

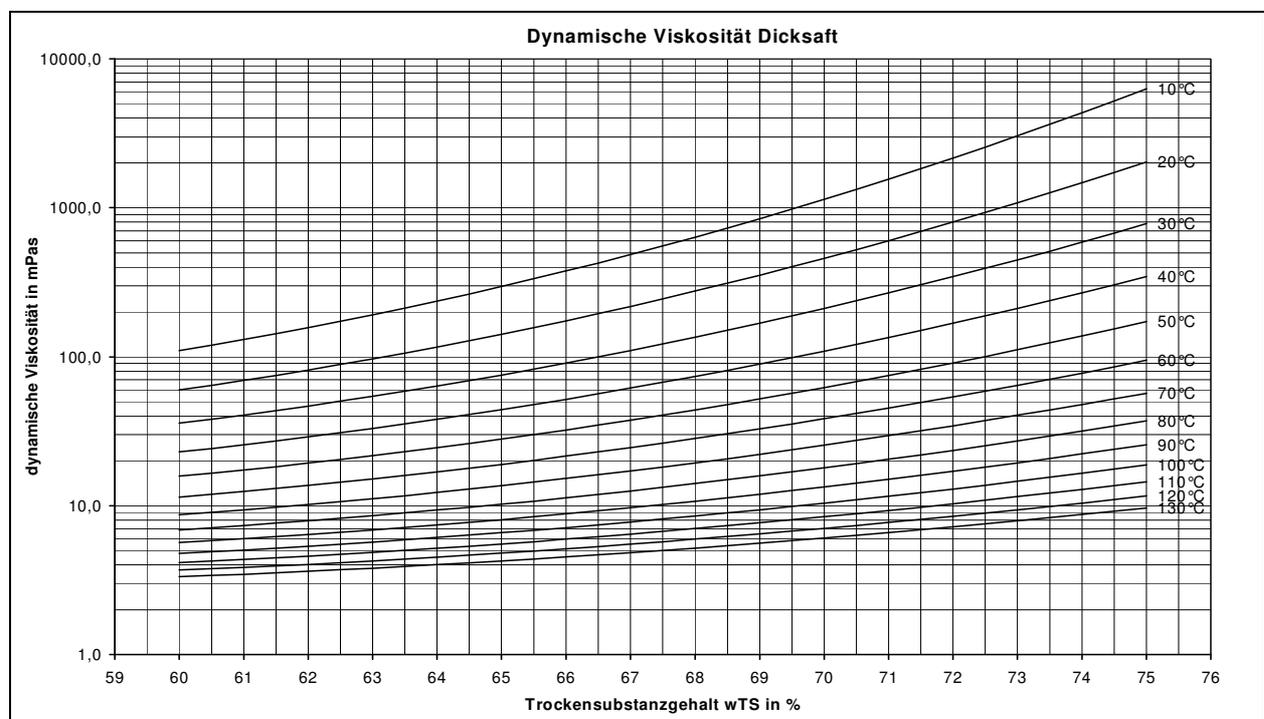


Abb. 7.4. Dynamische Viskosität von Dicksaft in Abhängigkeit von Trockensubstanzgehalt und Temperatur

Abbildung 7.4. zeigt das aus Gleichung (3.25) entwickelte Nomogramm, mit dem die dynamische Viskosität von Dicksaft für den Temperaturbereich von 10 bis 130 °C und einen Trockensubstanzgehalt von 60 bis 75 % TS bestimmt werden kann.

Wie bei reiner Saccharoselösung (Abb.7.1.) werden auch beim Dicksaft deutliche Differenzen zwischen den Messwerten der Druckmesszelle und den extrapolierten Werten der verfügbaren Gleichungen im Temperaturbereich über 80 °C festgestellt.

7.3.2 Einfluss des pH-Wertes auf das Viskositätsverhalten im Dicksaft /49/

Die Dicksäfte wurden bei einem einheitlichen Trockensubstanzgehalt von 65 % im Temperaturbereich von 30 bis 130 °C untersucht. Durch Zugabe von Salzsäure bzw. Natronlauge wurde der Original-pH-Wert (8,5) auf einen pH-Wert von 5,2 bzw. 11,2 eingestellt.

Die dynamische Viskosität von Dicksaft in Abhängigkeit von Temperatur und pH-Wert wird in Abb.7.5. und 7.6. gezeigt.

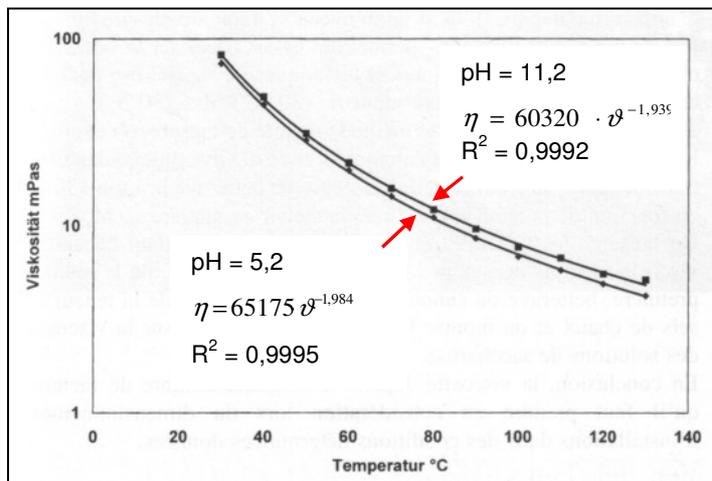


Abb. 7.5. Dynamische Viskosität von Dicksäften mit unterschiedlichem pH-Wert

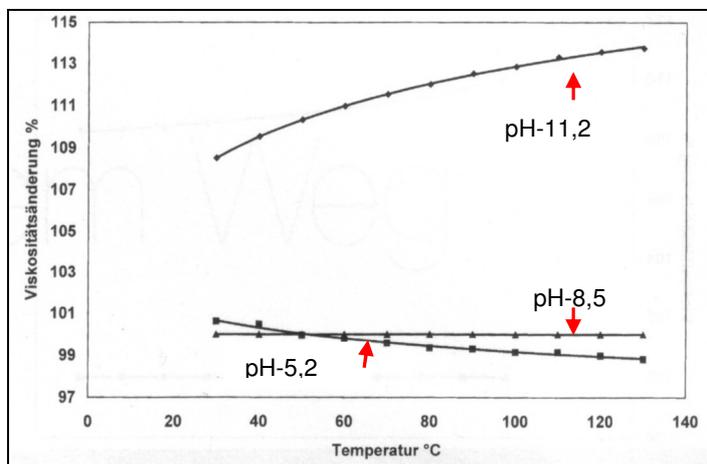


Abb. 7.6. Prozentuale Änderung der dynamischen Viskosität von Dicksäften

Dicksaft mit einem pH-Wert von 11,2 zeigt im untersuchten Temperaturbereich die höchsten Viskositätswerte. Bei einem pH-Wert von 5,2 werden die geringsten Viskositätswerte gemessen. Die Herabsetzung des pH-Wertes von 8,5 auf 5,2 führt zu einer minimalen Verringerung der Viskosität. Eine Erhöhung des pH-Wertes von 8,5 auf 11,2 führt dagegen zu einer beträchtlichen Viskositätsprogression, die z. B. bei 130 °C einen Zuwachs von 14 % erreicht. Deutlich ist erkennbar, dass bei einem pH-Wert von 11,2 eine Viskositätserhöhung in Folge von Strukturierungseffekten durch vorangegangene Saccharosezersetzung eintritt. Die Er-

höhung beträgt bei 30 °C 2,7 % und bei 130 °C 14 %. Die Standardeinstellung (pH = 8) und der Saft mit einem pH-Wert von 5,2 unterscheiden sich dagegen kaum.

Ablaufende chemische Reaktionen der Saccharose sind in hohem Maß vom pH-Wert und von der Temperatur abhängig. Bei der Hydrolyse der Saccharose im alkalischen Milieu treten zwei gegenläufige Prozesse auf, die in ihrer Gesamtheit als Karamellisierung einzuschätzen sind. /116/

Bei der nichtenzymatischen Bräunung entstehen hochmolekulare polymere Karamellfarbstoffe, z. B. aus Monomeren (Glucose/Fructose) entstehen Oligomere (Oligosaccharide), die einen im Vergleich zur Saccharose höheren Strukturierungsgrad aufweisen und damit viskositätserhöhend wirken. Im sauren Bereich (pH 5 bis 7) tritt Inversion auf, wodurch das Saccharosemolekül in Glucose und Fructose aufgespaltet wird.

7.3.3 Einfluss des Kalksalzgehaltes auf das Viskositätsverhalten im Dicksaft /49/

Zur Untersuchung des Viskositätsverhaltens von Dicksaft in Abhängigkeit vom Kalksalzgehalt wurde der natürliche Dicksaft mit CaCl_2 versetzt. Dabei wurde der Gehalt an CaO von 0,06 % auf das Dreifache erhöht und der Dicksaft auf einen Trockensubstanzgehalt von 70 % eingestellt. Abb.7.7. zeigt das Viskositätsverhalten bei einer Erhöhung des CaO-Gehaltes von 0,06 auf 0,18 %.

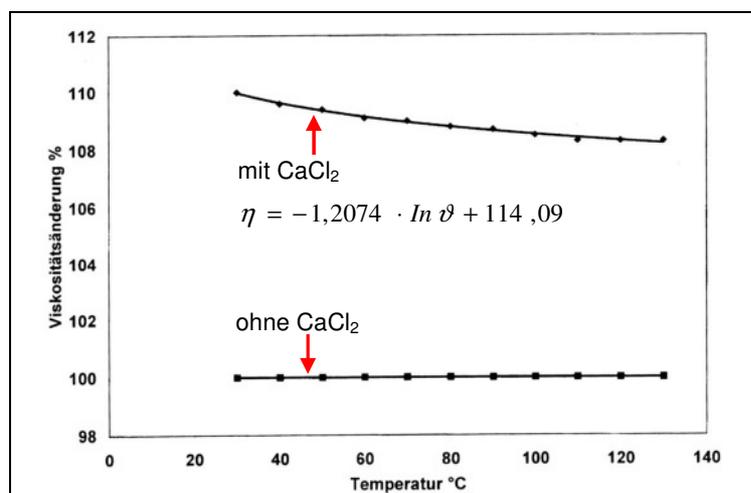


Abb. 7.7. Prozentuale Änderung der dynamischen Viskosität von Dicksäften

Die Viskositätszunahme gegenüber dem Dicksaft aus dem normalen technologischen Prozess beträgt 10 % bei 30 °C und erreicht bei 110 °C bis 130 °C einen konstanten Wert von etwa 8 %. Der Kalksalzgehalt in technischen Saccharoselösungen stellt in jeder Beziehung ein Problem im Zuckerfabrikationsprozess dar. Kalksalzablagerung behindert den Wärmedurchgang infolge von Belagbildung und bedingt anhand der durchgeführten Untersuchungen eine Viskositätssteigerung der Lösung.

Wie die Untersuchungsergebnisse zeigen, hat im Vergleich zum Dicksaft aus dem normalen technologischen Prozess eine Verdopplung oder Verdreifachung des natürlichen Calciumge-

haltes keine proportionale Auswirkung auf das Viskositätsverhalten, eher wird das Viskositätslevel des mit 0,18 % versetzten Saftes auf dem des mit 0,12 % versetzten Saftes gehalten.

Es ist anzunehmen, dass durch Zugabe von Calciumchloridlösung das Calcium-Ion in die bestehende Wasserstoffbrückenbindung /117/ mit einbezogen wird. Damit ergibt sich eine anders gestaltete Strukturierung der Saccharosemoleküle, die sich in einer Viskositätserhöhung äußert. Ebenfalls denkbar ist unter den Milieubedingungen die Bildung von Calciumsaccharaten, die im Molverhältnis 3:1, 2:1 und 1:1 auftreten können und eine Viskositätserhöhung bewirken.

7.3.4 Vergleich der dynamischen Viskosität von Rohr- und Rübendicksaft /50/

Zur rechnerischen Bestimmung der dynamischen Viskosität für die untersuchten Rohrdicksäfte der Fabrik Gledhow wurden von Schmidt, Christoph und Senge /49/ Gleichungen (3.26 und 3.27) aus dem Messsystem DMZ abgeleitet. Die Randbedingungen lauten: für Gleichung 3.26.

$w_{TS} = 65 \%$; ($60 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 130 \text{ °C}$);

und Gleichung 3.27.

$w_{TS} = 68,6 \%$; ($30 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 130 \text{ °C}$)

Die auf der Basis der Gleichungen (3.25, 3.26, 3.27) erstellte Abbildung 7.8. zeigt einen prozentualen Vergleich der dynamischen Viskosität von Rohr- und Rübendicksaft.

In folgender Abbildung 7.8. ist ein prozentualer Vergleich der dynamischen Viskosität von Rohr- und Rübendicksaft dargestellt.

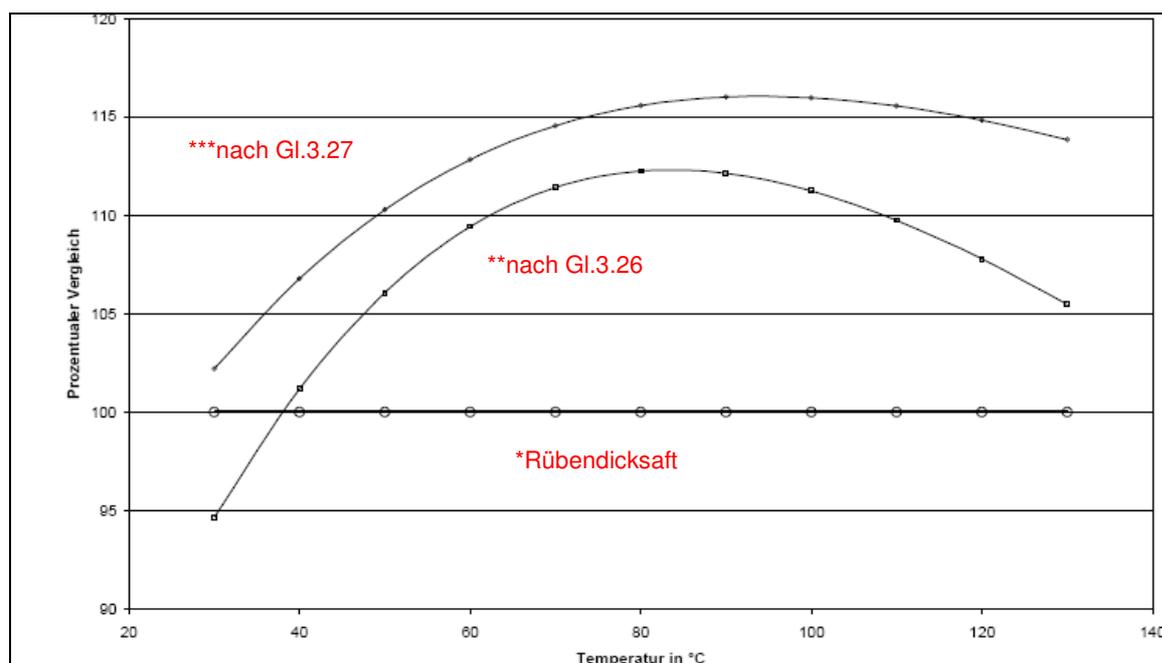


Abb. 7.8. Prozentualer Vergleich von Rohr- und Rübendicksaft

*Gl. 3.25 wurde zur Bestimmung der dynamischen Viskosität von Rübendicksaft für den gesamten untersuchten Temperaturbereich von 5 bis 130 °C verwendet.

**Gl. 3.26 wurde für den untersuchten Dicksaft aus Zuckerrohr verwendet.

$w_{TS} = 65 \%$, ($60 \leq \vartheta \leq 130 \text{ °C}$; Messsystem: DMZ)

***Gl. 3.27 wurde für den untersuchten Dicksaft aus Zuckerrohr verwendet.

$w_{TS} = 68,6 \%$ ($30 \leq \vartheta \leq 130 \text{ °C}$; Messsystem: DMZ)

Die Rohrdicksäfte besitzen bei gleicher Konzentration und Temperatur eine höhere Viskosität als die vergleichbaren Rübendicksäfte. 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 (3.25) für Rübendicksäfte ermittelten Werte (siehe Abb.7.8.). 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.

7.3.5 Nicht-Newtonisches Verhalten von Dicksäften /49, 50/

Auch beim Dicksaft werden Abweichungen vom idealviskosen Fließverhalten beobachtet.

Abbildung 7.9. zeigt das Viskositätsverhalten von Dicksaft mit 60 % Trockensubstanzgehalt bei 40 °C, sowie die entsprechenden Auswertungsparameter nach dem Fließmodell von OSTWALD-DE WAELE. Im untersuchten Temperatur- (10 °C bis 130 °C) und Trockensubstanzbereich (60 % bis 75 %) werden beim Dicksaft Fließexponenten n zwischen 0,990 und 0,998 erhalten. Im Vergleich zur reinen Saccharoselösung weist Dicksaft damit geringere Strukturänderungen aufgrund der Scherbeanspruchung auf. Dafür verantwortlich gemacht werden müssen die Nichtsaccharosestoffe durch stärkere Interaktionen zum Wasser, die wahrscheinlich die Saccharosemoleküle an der Strukturausbildung hindern.

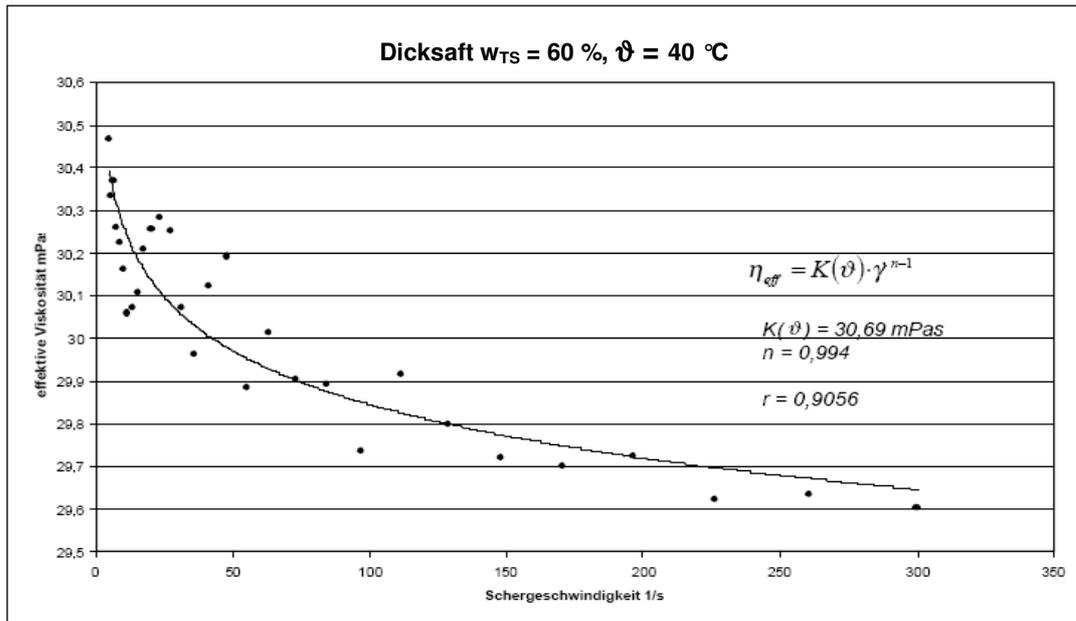


Abb. 7.9. Fließkurve Dicksaft

Tab. 7.4. enthält das Fließverhalten Dicksaft aus Rübe.

Tab. 7.4. Fließverhalten Dicksaft aus Rübren

θ	w _{TS} = 60 %			w _{TS} = 65 %			w _{TS} = 70 %			w _{TS} = 75 %		
	K	n	r	K	n	r	K	N	r	K	n	r
°C	mPa·s			mPa·s			mPa·s			mPa·s		
70	8,05	0,994	0,999	13,89	0,995	0,999	28,74	0,994	0,999	71,86	0,990	1,000
60	11,06	0,995	0,999	20,59	0,995	0,999	43,84	0,995	0,999	121,47	0,991	1,000
50	18,59	0,994	0,999	33,08	0,996	0,999	73,32	0,994	0,999	227,00	0,992	1,000
40	30,69	0,994	0,999	59,82	0,997	0,999	132,52	0,996		-----	-----	-----
30	52,23	0,993	0,999	119,0	0,996	0,999	277,07	0,996		-----	-----	-----
20	93,98	0,994	0,999	247,3	0,997	0,999	519,03	0,997		-----	-----	-----
15	131,05	0,994	0,999	373,1	0,997	0,999	802,95	0,998		-----	-----	-----
10	186,31	0,994	0,999	573,3	0,996	0,999	1261,2	0,998		-----	-----	-----
5	271,04	0,995	0,999	916,4	0,996	0,999	-----	-----		-----	-----	-----

Die nicht-Newtonschen Abweichungen sowie das Viskositätslevel sind bei technischer Saccharoselösung geringer als bei reiner Saccharoselösung bei gleicher Temperatur- und Trockensubstanz, da kleinere Moleküle vorliegen. Eine nicht-Newtonsche Beschreibung sollte nicht vorgenommen werden. Für die Technologieführung ist diese Problematik ohne jegliche Bedeutung.

7.4 Fließeigenschaften von Zuckerkristallsuspensionen /71/

Die Viskosität von Zuckerkristallsuspensionen ist Gegenstand einer Vielzahl von Untersuchungen. Aus der Literatur sind widersprüchliche Angaben zum Fließverhalten von Zuckerkristallsuspensionen bekannt. Ein derartiges Fließverhalten kann nach dem Potenzansatz nach Herschel-Bulkley beschrieben werden./71/ Zusammenfassend ist festzustellen, dass Zuckerkristallsuspensionen keine newtonschen Fluide sind, dass aber verschiedene Autoren unterschiedliche Phänomene (Fließgrenze, Strukturviskosität) finden.

Das makroskopisch wirksame Fließverhalten einer Suspension wird von den Eigenschaften der dispergierten Partikel bestimmt, die die Viskosität der kontinuierlichen Phase verändern. Hier wurden die rheologischen Eigenschaften von Zuckerkristallsuspensionen mit Kristallvolumenanteilen φ von 7 % bis 55 % untersucht. Für die Messungen wurde ein Kapillarrohrviskosimeter eingesetzt, in dem die Abmessungen der Messrohre in einem weiten Bereich variiert wurden: $10 \text{ mm} \leq d_i \leq 20 \text{ mm}$ und $0,05 \text{ m} \leq l \leq 2,8 \text{ m}$. Deutliche Abweichungen vom Fließverhalten Newtonscher Fluide zeigten sich in Abhängigkeit von den Rohrabmessungen und der Partikelgröße.

$$\text{Rohreinlaufänge } \Delta l/d = 3,26 + \frac{1,61}{d_h^2} \quad (7.7)$$

$$\text{Wandgleitschichtdicke } \delta = \varphi \cdot (\varphi_{\max} - \varphi)(898,1 + 22,1 \cdot \varphi) \text{ in } \mu\text{m} \quad (7.8)$$

Zur Beschreibung von Suspensionen als Stoffsystem wird die relative Viskosität in Gleichung 3.29. verwendet. Diese ist als Stoffwert von den Eigenschaften der suspendierten Partikel abhängig:

$$\text{Relative Viskosität } \eta_{\text{rel}} = 1 + 2,5 \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_{\max} - \varphi} \right)^{4/3} \quad (7.9)$$

Zum Ausgleich der gemessenen Werte wurde die folgende Gleichung ermittelt:

$$\eta_{\text{rel}} = 1 + 2,8 \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_{\max} - \varphi} \right)^{4/3} = 1 + 2,5 \cdot \left[\frac{1}{\varphi_{\max} - \varphi} \cdot \varphi \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_{\max} - \varphi} \right)^{1/3} \right] \quad (7.10)$$

$$\eta_{\text{rel}} - 1 = \underset{1}{C_3} \cdot \frac{1}{\varphi_{\max} - \varphi} \cdot \underset{2}{C_4} \cdot \varphi \cdot \underset{3}{C_5} \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_{\max} - \varphi} \right)^{1/3} \quad (7.11)$$

In Gl. 7.11 können drei gleichzeitig wirkende mechanische Terme als Erklärungsmodell für die relative Viskosität konzentrierter Suspensionen nach /71/ identifiziert werden:

1. Bezug der makroskopischen Schergeschwindigkeit $\frac{\Delta v}{\Delta y}$ auf den tatsächlich scherbaren Abstand Δy_w in der Suspension.

2. Erhöhung der Fluidviskosität durch die Anwesenheit von Partikeln entsprechend dem Modell von Einstein.
3. Erhöhung der Energiedissipation in der Suspension durch Änderung der Partikelabstände beim Fließen.

Die Wandgleitschichtdicke nimmt ab, weil mehr kleine Partikel die Packungsdichte unmittelbar an der Wand erhöhen und damit das freie Lösungsvolumen verringern.

Die relative Viskosität nimmt ebenfalls ab, weil die maximale Packungsdichte wächst.

Kritik an der finalen Aussage:

Der konstante Faktor muss bei der Einstein-Gleichung mit 2,5 eingegeben werden, in dem Artikel von Bruhns hatte er ihn mit 2,8 angegeben.

Wenn die relative Viskosität mit dieser Formel berechnet wird, kann kein vergleichbares Ergebnis der Viskosität in den Werten der Viskosität von anderen Autoren ermittelt werden. Die Werte sind für η_{Ma}/η_{ML} zu niedrig. Die erhaltenen Werte für die relative Viskosität von Kristallsuspensionen sind wahrscheinlich abhängig von der Messmethode und der Behandlung der Kristallsuspension während der Messung.

Für die Wandgleitschichtdicke ergibt sich mit $\varphi = 0,1$ und $\varphi_{max} = 0,6$ ein kleiner Wert, der unlogisch ist.

8 Rheologische Charakterisierung von Melasse und Vinasse

8.1 Fließeigenschaften von Rübenmelasse

8.1.1 Nicht-Newtonsches Verhalten von Melasse mit $w_{TS} > 83\%$

Die Ergebnisse materialwissenschaftlicher Untersuchungen an Rübenmelassen werden am Beispiel der fluiddynamischen Kennwerte nachstehend dargestellt. Zunächst erfolgt die Untersuchung des Fließverhaltens in Abhängigkeit von der Trockensubstanz und der Temperatur der Probe mit modernster rheologischer Messtechnik.

Exemplarisch werden am Beispiel der Melasseprobe Nr.15 mit $w_{TS} = 85,45\%$ die Messkurven im Temperaturbereich von 25 bis 60 °C in Abbildung 8.1. dargestellt.

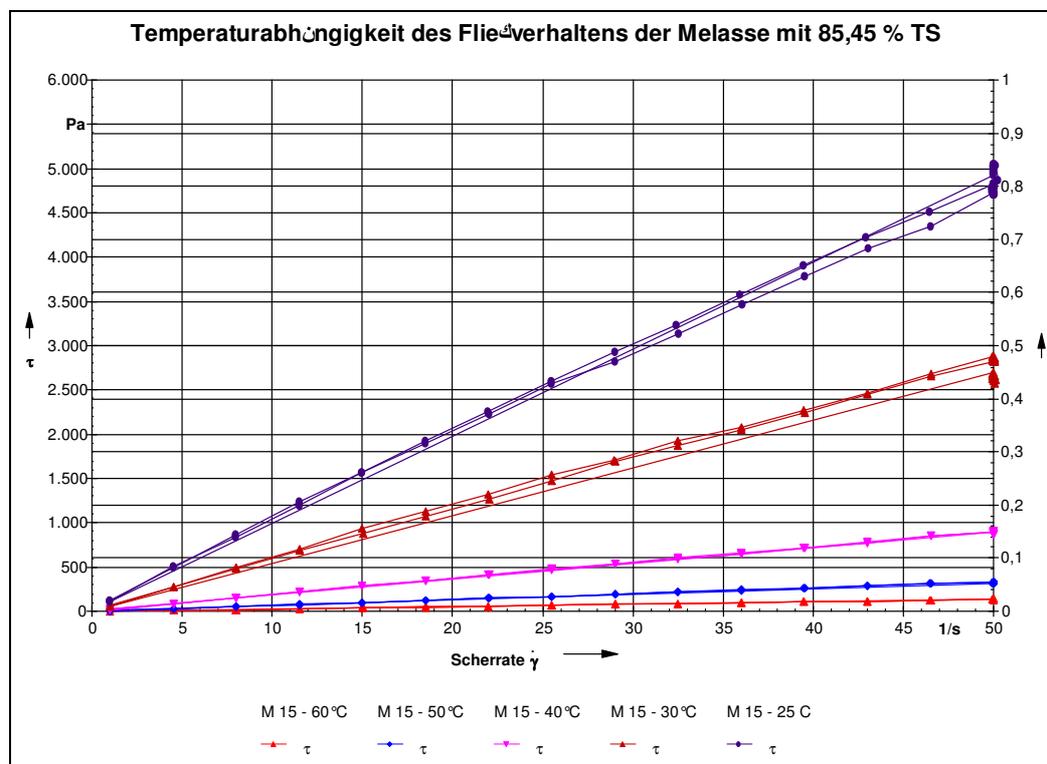


Abb. 8.1. Fließkurve von Melasse mit $w_{TS} = 85,45\%$

Die Abbildung enthält 5 temperaturabhängige Kurven. Jede Kurve besteht aus der Hin- und Rücklaufkurve. Aus Sicherheitsgründen wurden wegen des erhöhten Drehmomentes manche Proben bis 25 °C gekühlt.

Die Parameter der Regression der Fließkurve nach Newton und OSTWALD/De WAELE werden am Beispiel des Bestimmtheitsmaßes r und der Standardabweichung s verglichen. In Tab. 8.1. ist der Vergleich der rheologischen und statistischen Parameter enthalten.

Tab. 8.1. Ermittlung des rheologischen Deformationssystems für Probe Nr. 15

Temperatur	Newton-Regression			OSTWALD/De WAELE-Regression			
	η	r	s	K	n	r	s
°C	Pas	-	Pa	Pas ⁿ	-	-	Pa
25	101,391	0,994	126,845	118,013	0,949	0,999	56,616
30	58,918	0,998	45,845	65,207	0,966	0,999	23,463
40	18,664	0,998	13,213	20,864	0,962	0,999	5,448
50	6,616	0,999	2,008	6,461	1,00	0,999	1,757
60	2,609	0,999	1,331	2,494	1,00	0,999	0,829

Eine Korrelation der Messdaten bei ausgewählten Trockensubstanzen über 83 % und einer Temperatur unter 50 °C liefert generell höchste statistische Sicherheit für den OSTWALD/De WAELE-Ansatz und deutet auf strukturviskoses Verhalten hin.

Mit sinkender Temperatur ist eine Abnahme des Exponenten $n(\vartheta)$ der OSTWALD/De WAELE-Regression zu beobachten. Bei Melassen mit Trockensubstanzen > 83 % wird der Fließindex als Exponent $n(\vartheta)$ bei 60 und 50 °C mit 1,00 ermittelt.

Für die Fließkurven mit den Temperaturen 50 und 60 °C steigt die Schubspannung linear mit der Scherrate $\dot{\gamma}$ an. Das bedeutet, dass innerhalb dieser Konzentration (mehr als 83 %) noch einmal ein temperaturabhängiger Umschlag des Fließ- und Deformationsverhaltens stattfindet.

Dieser Sachverhalt wird bei allen Proben dieser Versuchsklasse festgestellt.

Nachfolgend wird in Abb. 8.2. das Viskositätsverhalten der Probe temperatur- und scherratenabhängig dargestellt. Ursache für das vorliegende Verhalten ist eine in der Lösung aufgrund von Molekülwechselwirkungen vorliegende Strukturierung.

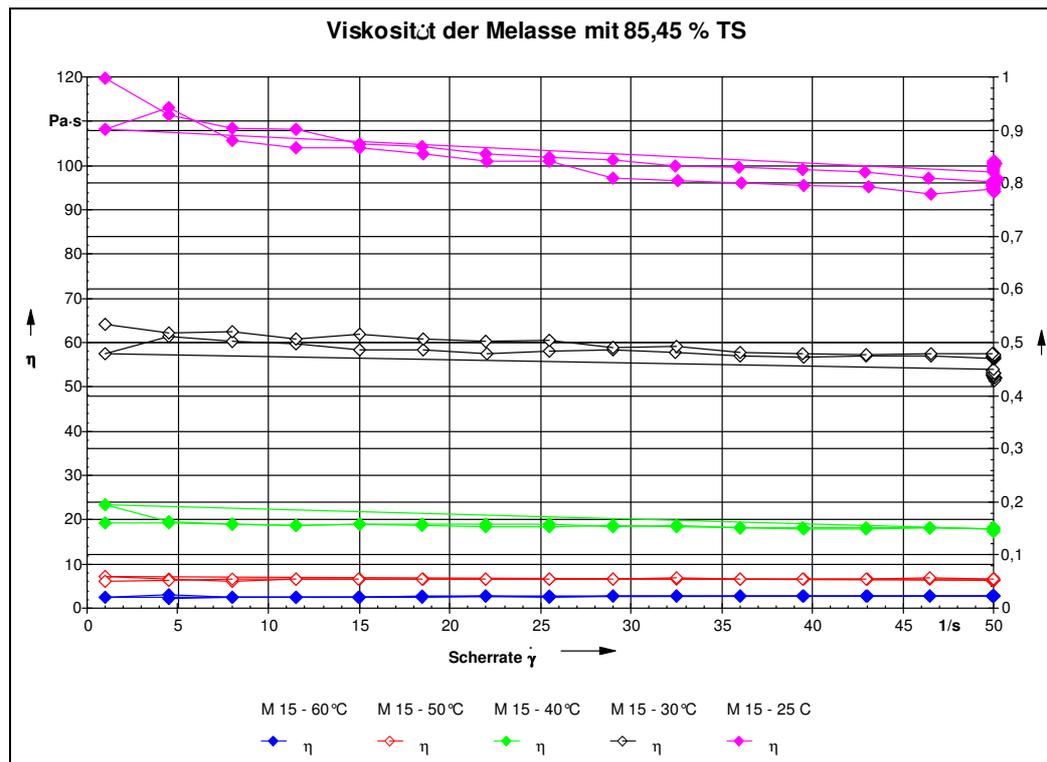


Abb. 8.2. Effektive Viskosität der Melasse mit 85,45 % TS

Aus Sicherheitsgründen wurden wegen des erhöhten Drehmomentes manche Proben bis 25 °C gekühlt.

Eine Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit kann visuell am Verlauf der Messkurven (Nichtlinearität) von 25 °C bis 40 °C erkannt werden.

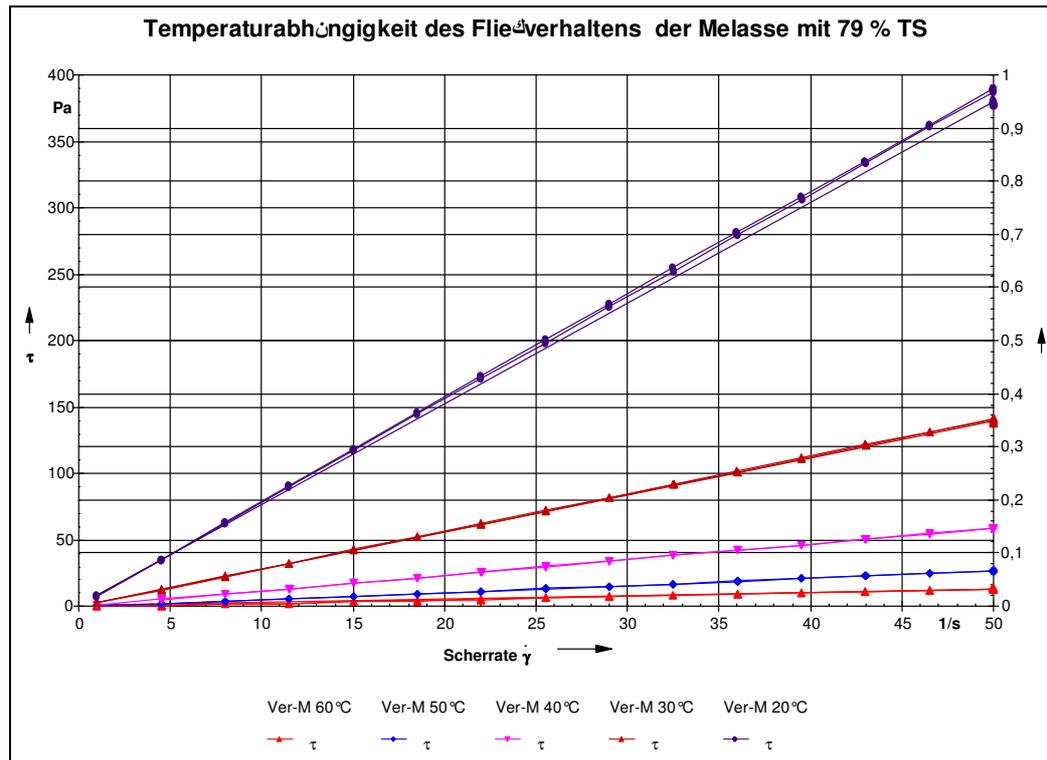
Bei hohen Konzentrationen und niedrigen Temperaturen werden durch die Scherbeanspruchung Ruhestrukturen durch den Mechanismus Orientierung abgebaut. Besonders deutlich wird dieses Verhalten bei einer Trockensubstanz von 85 %.

Anhand der in Tab. 8.1. aufgeführten Parameter können die effektive Viskosität und die Prozessviskosität nach den Gleichungen in Tab. 3.2. scherratenabhängig berechnet werden.

Für technologische Optimierungen ist die Anwendung der Prozessviskosität nach Gl. (3.15) sinnvoll.

8.1.2 Newtonsches Verhalten von Melassen mit $w_{TS} \leq 83$ %

In der nachfolgenden Abbildung 8.3. ist am Beispiel einer Melasse mit 79 % Trockensubstanz das Fließverhalten dargestellt.

Abb. 8.3. Fließkurve von Melasse mit $w_{TS} = 79\%$

Analog Tab. 8.1. erfolgt ein Vergleich der rheologischen Parameter in Tab. 8.2.

Tab. 8.2. Ermittlung des rheologischen Deformationssystems für Probe Nr. 1

Temperatur	Newton-Regression			OSTWALD/DE WAELE-Regression			
	η	r	s	K	n	r	s
°C	Pas	-	Pa	Pas^n	-	-	Pa
25	7,806	0,999	1,144	7,822	0,999	0,999	1,11
30	2,823	0,999	0,246	2,872	0,994	0,999	0,403
40	1,166	0,999	0,243	1,175	1,00	0,999	0,273
50	0,484	0,998	0,846	0,436	1,000	0,998	0,310
60	0,205	0,943	0,921	0,234	1,000	0,997	0,564

Im Vergleich zur Melasse mit 85,45 % Trockensubstanz ergibt sich für die Melasse mit 79 % Trockensubstanz im gesamten Temperaturbereich ein linearer Zusammenhang zwischen Scherrate und gemessener Schubspannung. Lediglich bei 20 °C ist eine leichte Viskositätsabnahme erkennbar.

Aus der Tabelle 8.2. ist erkennbar, dass eine Zunahme des Exponenten $n(\vartheta)$ mit sinkenden Trockensubstanzen mit $n \rightarrow 1$ zu beobachten ist. So ist bei $w_{TS} = 79\%$ der Exponent $n(\vartheta)$ nahezu konstant 1,00.

In Abb. 8.4 ist das Viskositätsverhalten von Melasse mit $w_{TS} = 79\%$ enthalten.

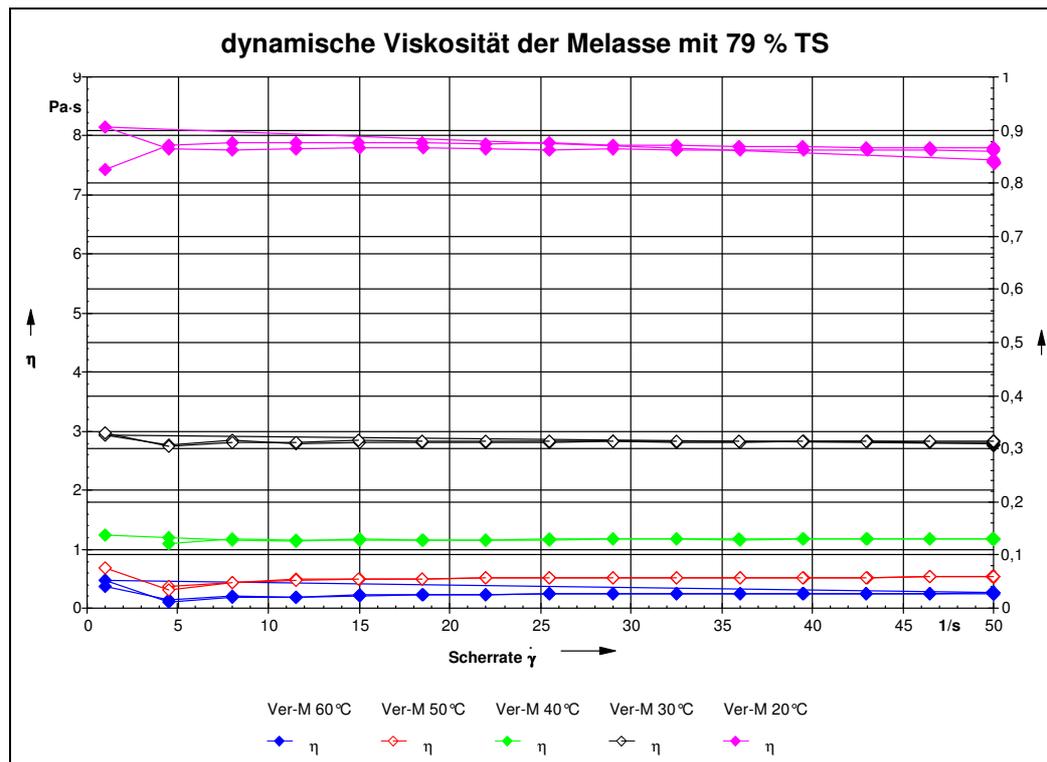


Abb. 8.4. Dynamische Viskosität einer Melasse mit Newtonschem Verhalten

Eine zu verallgemeinernde Ausnahme stellt die Temperatur 60 °C dar. Generell wird als Trend in den Untersuchungen im Trockensubstanzbereich ≤ 83 % eine Abweichung des Fließindexes von 1 in Richtung Struktureffekte ermittelt ($n = 0,943$).

Die gefundene thermisch induzierte Strukturierung wird auch bei der rheologischen Untersuchung reiner und technischer Saccharoselösung ermittelt /49/. Die Ursache könnte infolge der höheren inneren Energie in der größeren freien Weglänge der Moleküle und der Möglichkeit der Bildung größerer temporärer Molekülstrukturen infolge Wassermangel und hoher hydrophiler Eigenschaften der Komponenten liegen.

Hypothetisch könnten auch größere Farbmoleküle in Interaktionen miteinander treten.

Bedingt durch den geringen Wasseranteil und den hohen Nicht-Saccharoseanteil kann dieses Verhalten verursacht werden.

8.1.3 Abgrenzung des Ereignisfeldes der Messungen

Zur Definition des Ereignisfeldes der rheologischen Messungen werden die Originalproben konzentrationsabhängig in den Versuchsklassen $w_{TS} = 84 \dots 85$ % und $w_{TS} = 85 \dots 86$ % in den Abb. 8.5. und 8.6. aufgetragen.

Schergeschwindigkeitsabhängig können am Beispiel der Hilfsordinate am rechten Diagrammrand die beachtlichen Abweichungen zwischen den Proben gleicher Konzentration an einem Produktionsstandort kenntlich gemacht werden.

Nachfolgend ist das temperaturabhängige Fließverhalten für Melasse dargestellt. Es wird zwischen den Trockensubstanzbereichen 84 bis 85 % und 85 bis 86 % unterschieden. Auf die Darstellung des Fließverhaltens der Melasse mit mehr als 86 % wird verzichtet, da hier nur zwei Proben vermessen wurden.

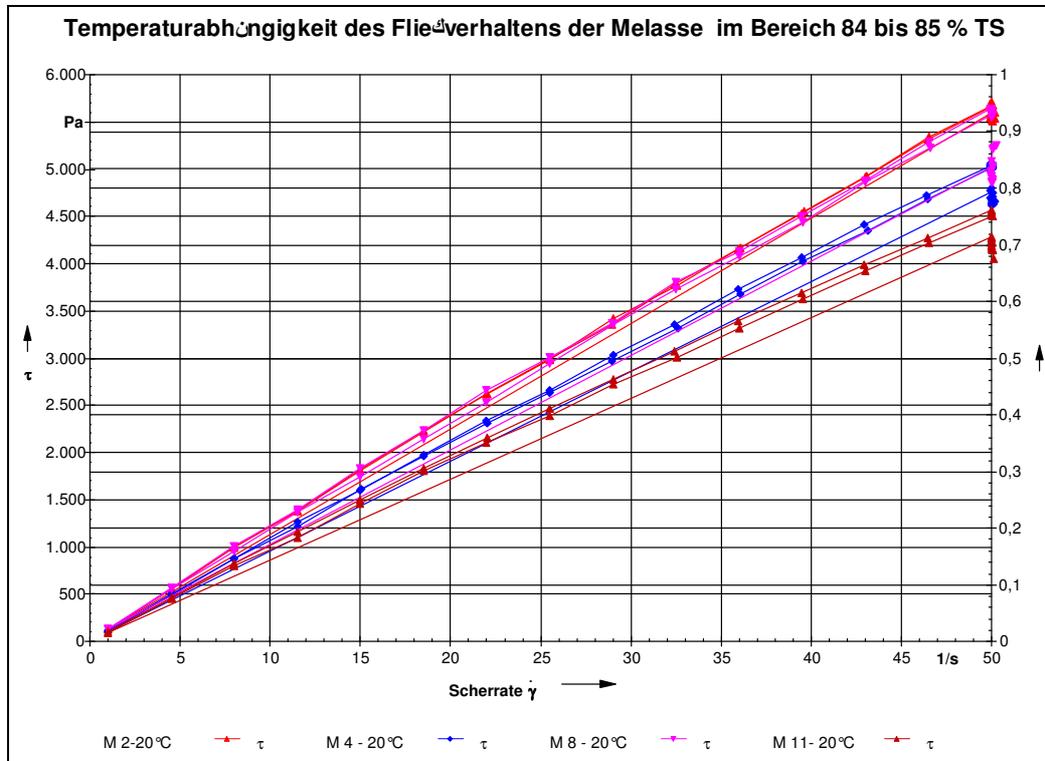


Abb. 8.5. Fließkurven der Melasse im Bereich $84 \leq w_{TS} \leq 85$ % bei 20 °C

Die Abweichung zwischen Hin- und Rücklaufkurven deutet nicht Newtonsches Verhalten von Melasse an.

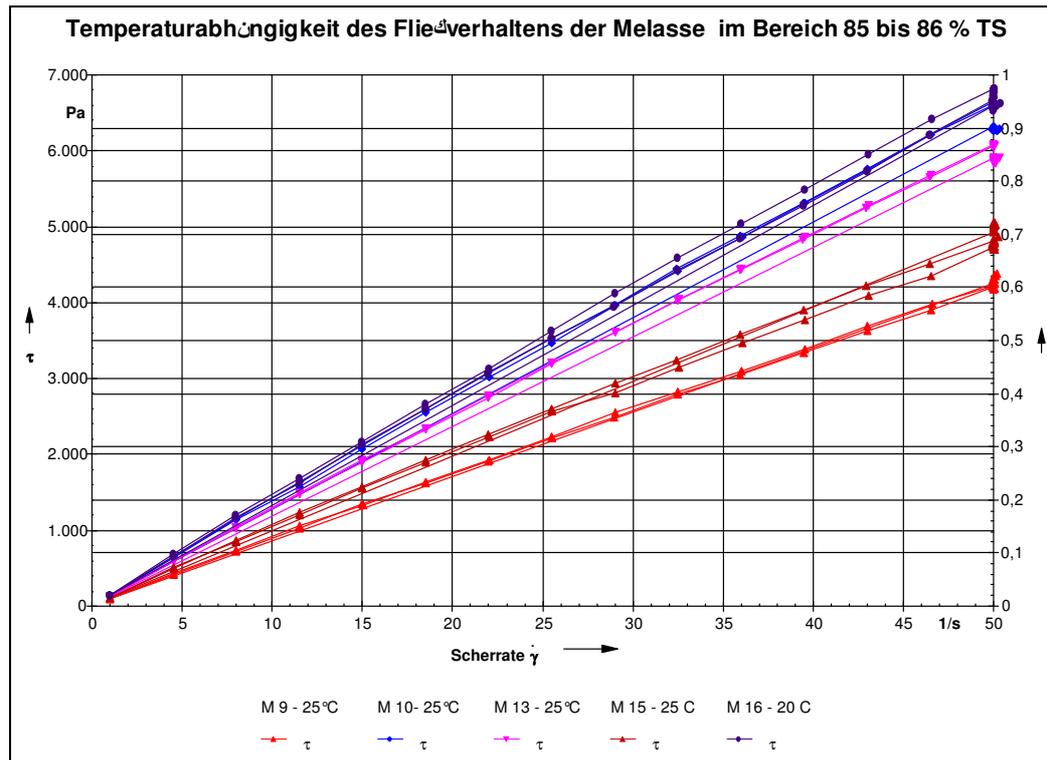


Abb. 8.6. Fließkurven der Melasse im Bereich $85 \leq w_{TS} \leq 86 \%$ bei 20 und 25 °C

Aus Sicherheitsgründen wurden wegen des erhöhten Drehmomentes manche Proben bis 25 °C gekühlt.

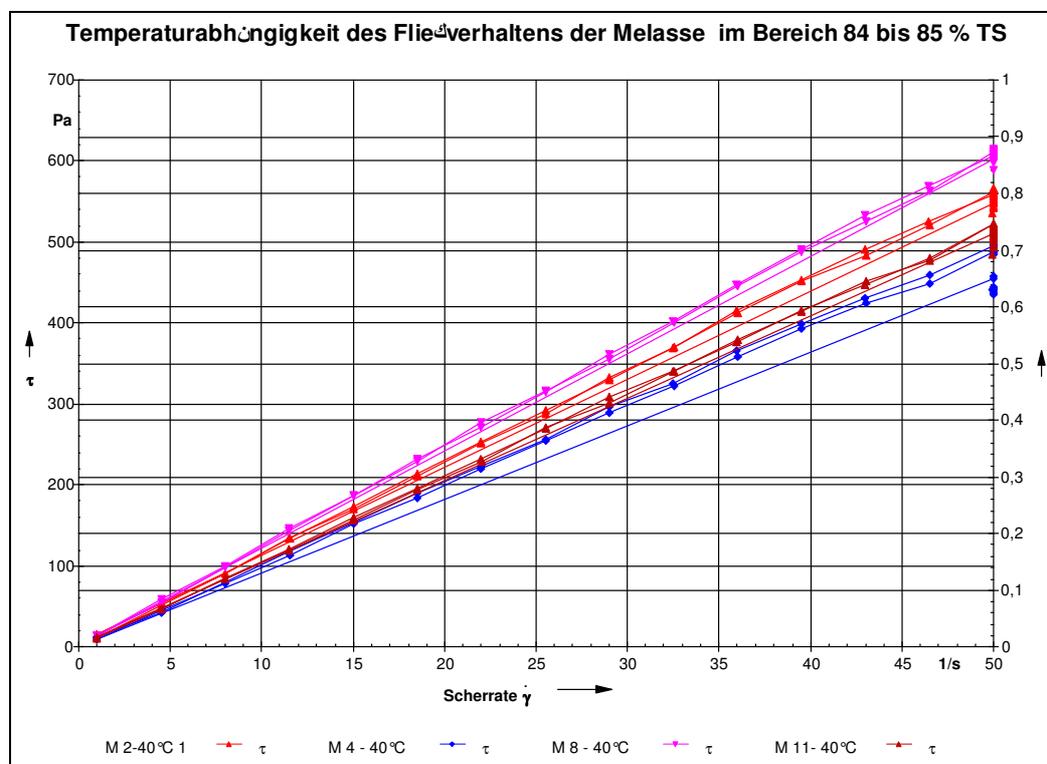


Abb. 8.7. Fließkurven der Melasse im Bereich $84 \leq w_{TS} \leq 85 \%$ bei 40 °C

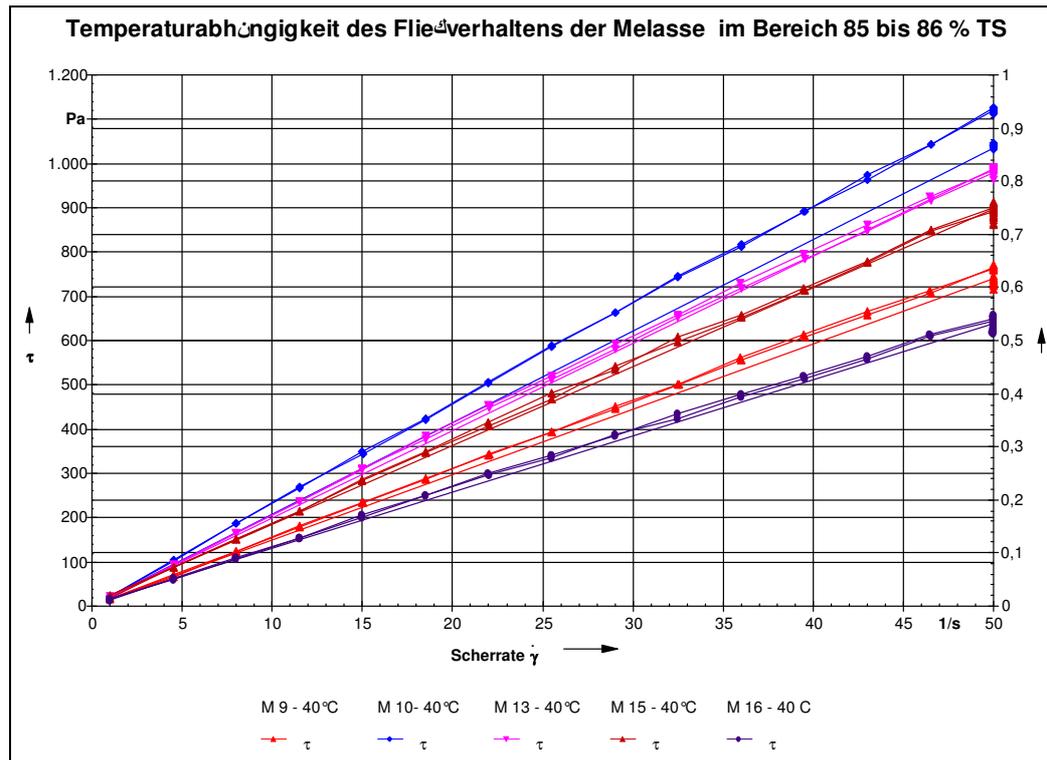


Abb. 8.8. Fließkurven der Melasse im Bereich $85 \leq w_{TS} \leq 86 \%$ bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$

Zu erkennen ist, dass mit zunehmendem Trockenmassegehalt die Differenzen im Schubspannungsverlauf höher sind als bei niedrigeren w_{TS} . Die Abweichungen zwischen den Messwerten betragen bei der Versuchsklasse 84 – 85 % ca. 20 %.

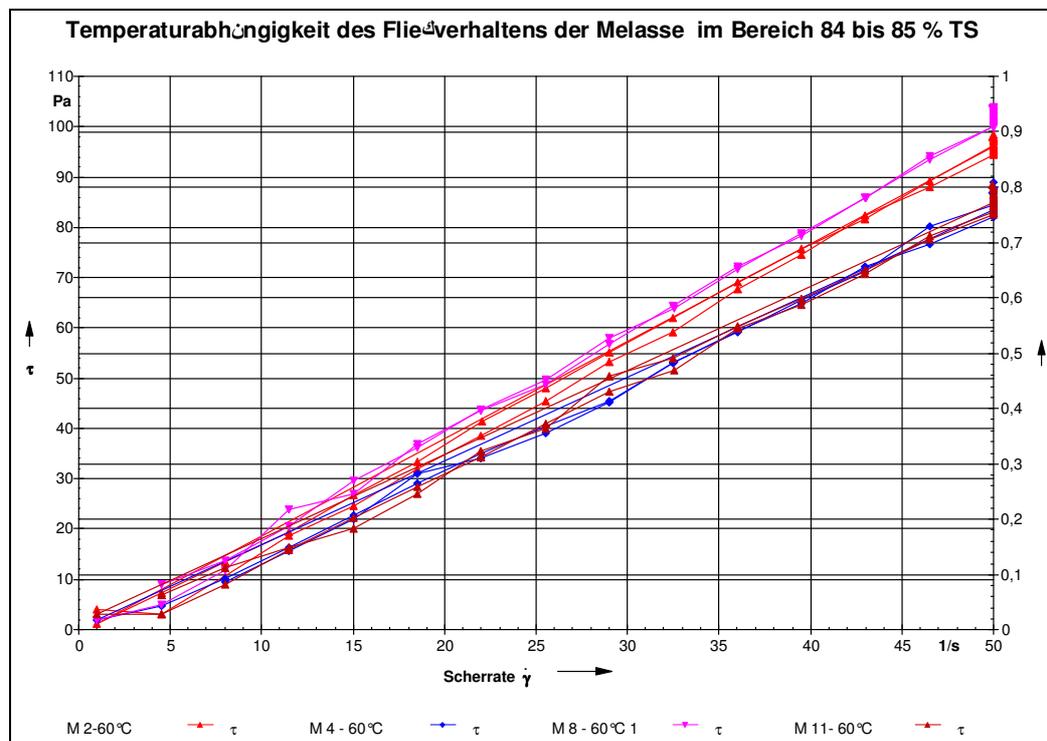


Abb. 8.9. Fließkurven der Melasse im Bereich $84 \leq w_{TS} \leq 85 \%$ bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$

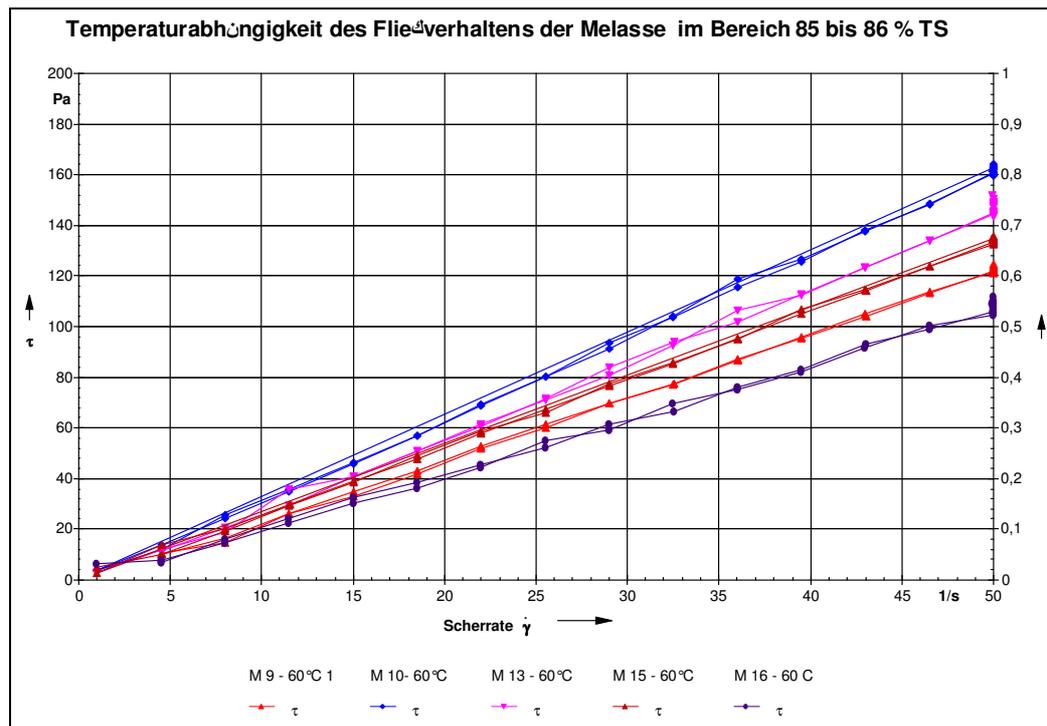


Abb. 8.10. Fließkurven der Melasse im Bereich $85 \leq w_{TS} \leq 86 \%$ bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$

Zu erkennen ist, dass mit zunehmendem Trockenmassegehalt die Differenzen im Schubspannungsverlauf höher sind als bei niedrigeren w_{TS} .

Die Abweichungen zwischen den Messwerten betragen bei der Versuchsklasse 85 – 86 % ca. 35 %.

Anhand dieses Vergleichs aus nur einer Zuckerfabrik können Angaben zur Melasseviskosität nur als Trendangaben bewertet werden. Die absolute Aussagefähigkeit der Messdaten ist analog der Dünnsaftviskosität eingeschränkt bzw. nur relativiert verwertbar.

Der angedachte Vergleich der Melasseproben über den Kampagnezeitraum brachte keine differenzierbaren Aussagen z. B. zur Korrelation von Rohstoffveränderung und Melasseanfall/Veränderung.

8.1.4 Vergleich der Messergebnisse mit Literaturdaten

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die Viskosität der Melasse bis zu einer Trockensubstanz von 86,76 % im Temperaturbereich 20 bis $60 \text{ }^\circ\text{C}$ vermessen. Bis dato waren nur Werte für eine Melasseviskosität bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$ und im Bereich von 79 bis 85 % Trockensubstanz bekannt /43/.

In der nachfolgenden Tab. 8.3. sind die prozentualen Unterschiede zwischen den eigenen Versuchsergebnissen und der Literatur nach /43/ enthalten. Nach /43, 50/ findet keine w_{TS} -abhängige Differenzierung des Viskositätsverhaltens in dynamische und schergeschwindigkeitsabhängige Kennwerte statt. Die in Tab. 8.3 angeführten scheinbaren Viskositäten sind auf 50 s^{-1} normiert.

Tab. 8.3. Vergleich der Literaturdaten nach /43/ mit ermittelten Viskositätsdaten bei 40 °C

w _{TS}	η nach /43/	η bzw. η _{eff}	Δη	Δη in %
	Pas	Pas	Pas	
80,00	1,448	1,259	0,1889	15,00
80,12	1,530	1,373	0,1571	11,44
80,45	1,730	1,407	0,3231	22,97
80,60	1,847	1,478	0,3690	24,97
80,80	2,004	1,497	0,5070	33,87
81,10	2,261	1,889	0,3724	19,72
81,90	3,125	2,536	0,5895	23,25
82,00	3,257	2,551	0,7058	27,67
84,70	11,92	11,247	0,6730	5,98
84,90	13,93	12,198	1,7320	14,20
85,00	15,48	12,934	2,5460	19,69

Die konzentrationsabhängigen Differenzen sind beachtlich und können im technologisch relevanten Bereich Dimensionierungsprobleme bewirken.

Aufgrund der mit high tech Messsystemen durchgeführten Untersuchungen sollten die aktuellen Untersuchungsergebnisse zu Dimensionierungsaufgaben herangezogen werden.

8.1.5 Einfluss der Temperatur auf die Melasseviskosität

Eine zunehmende Erwärmung der Melasse ist mit einer Verminderung der Reibungskräfte im Fluid verbunden. Zur Untersuchung des Viskositätsverhaltens von Melasse in Abhängigkeit von der Temperatur wurde die originäre Melasse der Zuckerfabrik Nordstemmen im Temperaturbereich von 60 bis 20 °C mit $\Delta T = 10$ K untersucht.

Zwischen der scheinbaren Viskosität, der Trockenmasse und der Temperatur konnte folgende Abhängigkeit in Abb. 8.11. ermittelt werden:

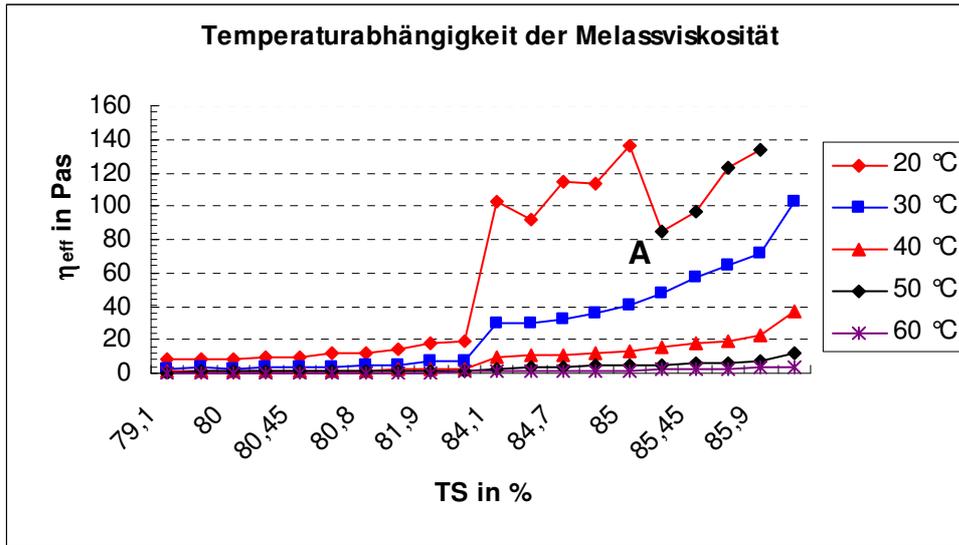


Abb. 8.11. Effektive Viskosität in Abhängigkeit von Trockensubstanzgehalt und Temperatur

Ab Punkt A wurde aus messtechnischen Gründen bei 25 °C gemessen.

Der Einfluss der Temperatur auf die effektive Viskosität wird durch die Frenkel-Eyring-Beziehung approximiert:

$$\eta(T) = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right) = A \cdot \exp\left(\frac{E_A}{R \cdot T}\right) \quad \text{in Pas} \quad (8.1)$$

Bei der Darstellung des Datenmaterials als Funktion $\ln \eta_{\text{eff}}(T) = f(1/T)$ lassen sich mittels Regressionsanalyse temperatur- und schergeschwindigkeitsabhängig die spezifischen Aktivierungsenergien E_A errechnen.

Exemplarisch ist am Beispiel der Melasse mit 85,45 % bei einer Schergeschwindigkeit von 50 s^{-1} die Temperaturabhängigkeit der effektiven Viskosität in Abb. 8.12. dargestellt.

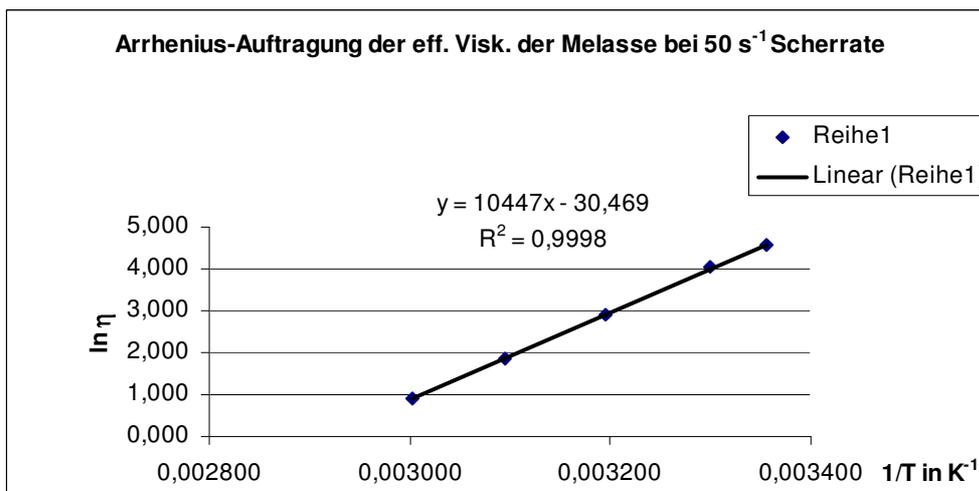


Abb. 8.12. Effektive Viskosität der Melasse mit 85,45 % TS und 50 s^{-1}

Analog wird am Beispiel dieser Melasse für 10 s^{-1} und 1 s^{-1} verfahren. Die Parameter des Arrheniusansatzes sind in Tab. 8.4. enthalten.

Tab. 8.4. Ermittlung der Aktivierungsenergie von Melasse $w_{TS} = 85,45\%$ (Nr. 15)

A	B	E_A	r	Temperaturbereich	$\dot{\gamma}$
10^{-14} Pas	K	kJ/kmol	-	°C	s^{-1}
5,854	10447	87106	0,999	25-60	50
2,841	10686	88843	0,999	25-60	10
1,014	11027	91679	0,999	25-60	1

Bei Anwendung der Parameter der Arrheniusgleichung aus Tab. 8.4. sind Interpolationen im regressierten Temperaturbereich sicher möglich. Mit abnehmender Schergeschwindigkeit steigt die Fließaktivierungsenergie über den Exponent B, wogegen der Koeffizient A der Gleichung 8.1 fällt.

8.1.6 Abhängigkeit des Fließindex n vom Trockensubstanzgehalt

Nachdem der Nachweis erbracht wurde, dass der Trockensubstanzgehalt w_{TS} das Fließ- und Viskositätsverhalten im Wesentlichen bestimmt, soll der Zusammenhang $n(\dot{\gamma}, w_{TS})$ belegt werden. In Tabelle 8.5. ist die Abhängigkeit dargestellt.

Die Darstellung verdeutlicht, dass eine Abhängigkeit zwischen dem Fließindex bzw. dem Fließverhalten und dem Trockensubstanzgehalt der Rübenmelasse vorhanden ist. Es ist möglich, dass bei Rübenmelassen von verschiedenen Werken die jeweilige chemische Zusammensetzung für das Fließ- und Viskositätsverhalten einen wesentlichen Einfluss hat.

Tab. 8.5. Fließindex in Abhängigkeit von der Versuchsklasse und Trockenmassegehalt

Durchschnittswerte Fließindex je Versuchsklasse 10 Proben		
Temperatur °C	$w_{TS} \leq 83\%$ 10 Proben	$w_{TS} \geq 83\%$ 10 Proben
20	0,991	0,966
30	0,992	0,977
40	0,994	0,982
50	0,993	1,00
60	0,989	1,00

Bei Melasse mit $w_{TS} \leq 83\%$ werden im Temperaturbereich von 20 bis 50 °C für alle untersuchten Konzentrationen Fließindices von über 0,99 festgestellt. Ab 50 °C setzen deutliche Strukturveränderungen ein, die durch ein plötzliches Abnehmen des Fließindex gekennzeichnet sind. Die einwirkenden Scherkräfte zerstören Strukturen in diesem Temperaturbereich.

8.1.7 Transportoptimierung für Melasse

In diesem Abschnitt wird eine Transportoptimierung für Melasse durchgeführt.

Eine Rohrleitung ist richtig dimensioniert, wenn die Gesamttransportkosten für einen festgelegten Volumenstrom ein Minimum annehmen. Bei einer qualitativen Betrachtung sind unmittelbar die wirtschaftlich gegensätzlich wirkenden Einflussgrößen bezüglich des Durchmessers zu erkennen.

Für eine Melassemenge von 12 m³/h wurden die in Gl. 3.31. angegebenen Werte berechnet.

Folgende Randbedingungen gehen in die Ermittlung des Kostenminimums ein:

- Eingesetzt werden Edelstahlrohre der Nennweiten 80 und 180 mit etwa gleichen Baukosten $B = 300 \text{ €/m}^2$. Die Baukosten ergeben sich als Quotient der spezifischen Rohrkosten in €/m durch die Nennweite in m. /118/

- $n = 0,966$ (siehe Tab. 8.1, Nr. 15 mit $w_{TS} = 85,45$, bei 40 °C)

$$d_{\text{opt}}^{3n+2} = \frac{EE \cdot T}{\mu \cdot j \cdot B} \cdot \left(\frac{3n+1}{\pi \cdot n} \right)^n \cdot (3n+1) \cdot 2^{3n+2} \cdot K \cdot \dot{V}^{n+1} \quad \text{in m}^{3n+2} \quad (8.2)$$

$$d_{\text{opt}}^{3n+2} = \frac{0,04 \cdot 2000}{0,8 \cdot 0,08 \cdot 300 \cdot 1000} \left(\frac{3 \cdot 0,962 + 1}{3,14 \cdot 0,962} \right)^{0,966} \cdot (3 \cdot 0,966 + 1) \cdot 2^{3 \cdot 0,966 + 2} \cdot 20,864 \cdot \left(\frac{12}{3600} \right)^{1+0,966} \quad \text{in m}^{3n+2}$$

$d_{\text{opt}} = 0,1709 \text{ m}$; gewählt als optimierter Durchmesser DN 200

Für die Druckverlustberechnung gilt:

$$\Delta p = \frac{2 \cdot K \cdot l}{R} \cdot \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \cdot \left(\frac{\dot{V}}{\pi \cdot R^3} \right)^n \quad \text{in Pa/m} \quad (8.3)$$

$$\Delta p = \frac{2 \cdot 20,864 \cdot 1}{0,075} \cdot \left(\frac{3 \cdot 0,962 + 1}{0,962} \right)^{0,966} \cdot \left(\frac{12}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,075^3} \right)^{0,966}$$

$$\Delta p = 5221 \text{ Pa/m}$$

Nach Multiplizieren mit der Rohrlänge, Einrechnung von Höhenunterschieden und der Druckverluste von Einbauten kann die Pumpendimensionierung vorgenommen werden.

8.2 Fließeigenschaften und wärmephysikalische Kennwerte von Rübensvinasse

8.2.1 Ermittlung der fluiddynamischen Kennwerte

Für die Trockensubstanzen 50,1 %, 65,5 % und 70 % sind nachfolgend die Messkurven in fundamentaler Messanstellung dargestellt. Die Tabellen 8.6. und 8.7. enthalten die aus der Fließkurve regressierten Kennwerte zur Ermittlung von effektiver Viskosität in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit. Die rheologischen Untersuchungen ergaben eine Abhängigkeit des Fließverhaltens (Newton/nicht-Newton) vom vorherigen Prozess und nicht von der Trockensubstanz.

8.2.1.1 Nicht-Newtonsches Verhalten von Vinasse 2 mit $w_{TS} = 65,5 \%$

Die Probe entstammt aus der Zitronensäureproduktion. Die Ergebnisse materialwissenschaftlicher Untersuchungen werden am Beispiel der fluiddynamischen Kennwerte nachstehend dargestellt. Zunächst erfolgt die Untersuchung des Fließverhaltens in Abhängigkeit von der Trockensubstanz und Temperatur der Probe.

Die Fließkurven im Temperaturbereich von 20 bis 70 °C sind für Probe Nr. 2 in Abbildung 8.13. enthalten.

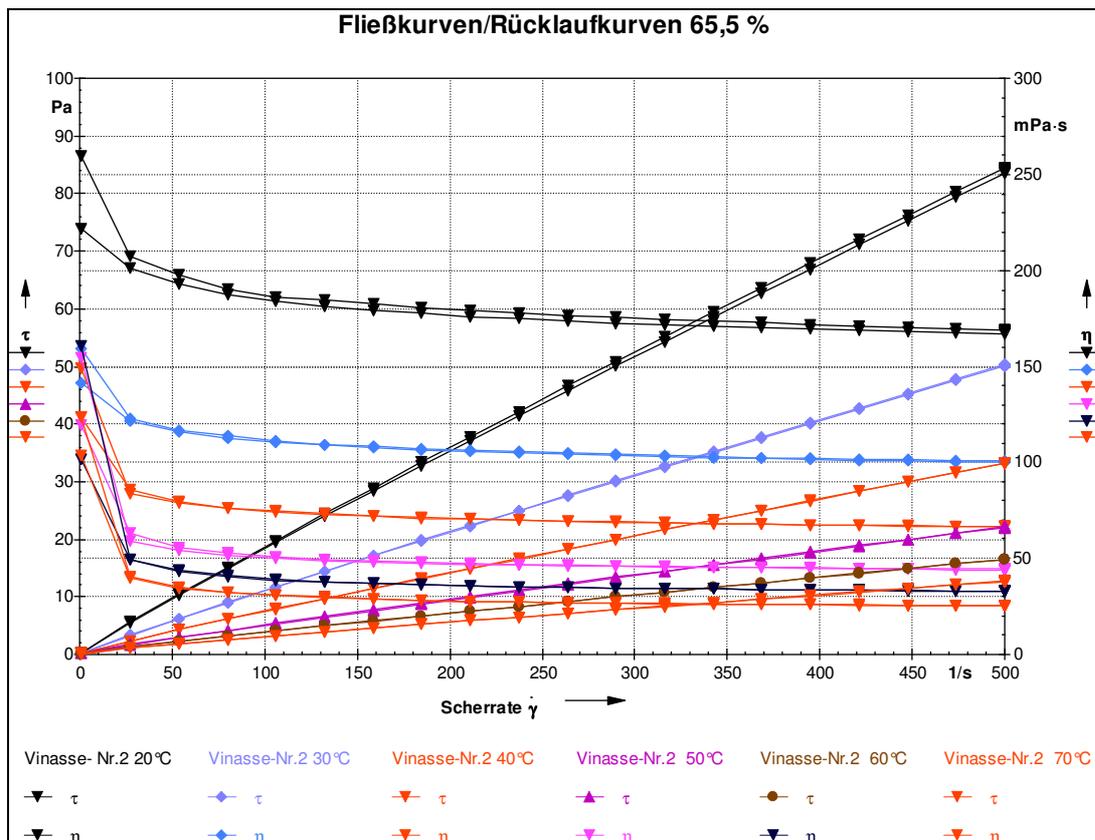


Abb. 8.13. Fließkurven Vinasse 2 $w_{TS} = 65,5 \%$

Die Abbildung 8.13 enthält 6 temperaturabhängige Kurven. Jede Kurve besteht aus der Hin- und Rücklaufkurve. Die Parameter der Fließkurve nach OSTWALD/De WAELE und Newton werden am Beispiel des Korrelationskoeffizienten r und der Standardabweichung s der in

den Gleichungen 3.10., 3.14. und 3.15. enthaltenen Parameter verglichen. In Tab. 8.6. ist der Vergleich der rheologischen und statistischen Parameter enthalten.

Tab. 8.6. Ermittlung des rheologischen Deformationssystems für Probe Nr. 2

Probe	Regression	Ostwald/De Waele				Newton		
	Gleichung	Siehe Gl. 3.10				$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}^1$ in Pa (8.4)		
	Viskosität	Siehe Gl. 3.14				Dynamische Viskosität η		
	Viskosität	Siehe Gl. 3.15						
Nr.	ϑ	K	n	r	s	η	r	s
	°C	Pas ⁿ	-	-	Pa	Pas	-	Pa
2	20	0,244	0,940	0,999	0,366	0,174	0,996	2,375
	30	0,150	0,934	0,999	0,071	0,104	0,996	1,422
	40	0,125	0,894	0,999	0,349	0,070	0,995	1,073
	50	0,097	0,868	0,998	0,349	0,046	0,994	0,735
	60	0,085	0,843	0,998	0,288	0,035	0,992	0,647
	70	0,079	0,811	0,997	0,293	0,026	0,990	0,553

Eine Korrelation der Messdaten der ausgewählten Probe liefert im gesamten Temperaturbereich von 20 – 70 °C eine höhere statistische Sicherheit am Beispiel des Korrelationskoeffizienten r für die Anwendung des OSTWALD/De WAELE-Ansatzes und weist strukturviskoses nicht-Newtonsches Fließverhalten dieser Vinasse nach. Rheodynamisches Verhalten kann nicht ermittelt werden.

Dabei wird eine erhebliche Abweichung des Fließindex vom strukturlosen Verhalten mit $n = 1$ ermittelt. Der Konsistenzfaktor sinkt logisch mit der Erhöhung der Temperatur. Zu beachten ist das besondere Verhalten des Fließindex mit steigender Temperatur.

Dieser steigt nicht wie anzunehmen mit steigender Temperatur auf Werte $n \rightarrow 1$ an, sondern sinkt stetig ab, was Strukturbildung infolge thermischer Induktion bedeutet.

8.2.1.2 Newtonsches Fließverhalten von Vinasse 1 und 3

In den nachfolgenden Abbildungen 8.14. und 8.15. sind am Beispiel der Vinasse 1 mit 50,1 % und der Vinasse 3 mit 70 % Trockensubstanz die Fließkurven dargestellt.

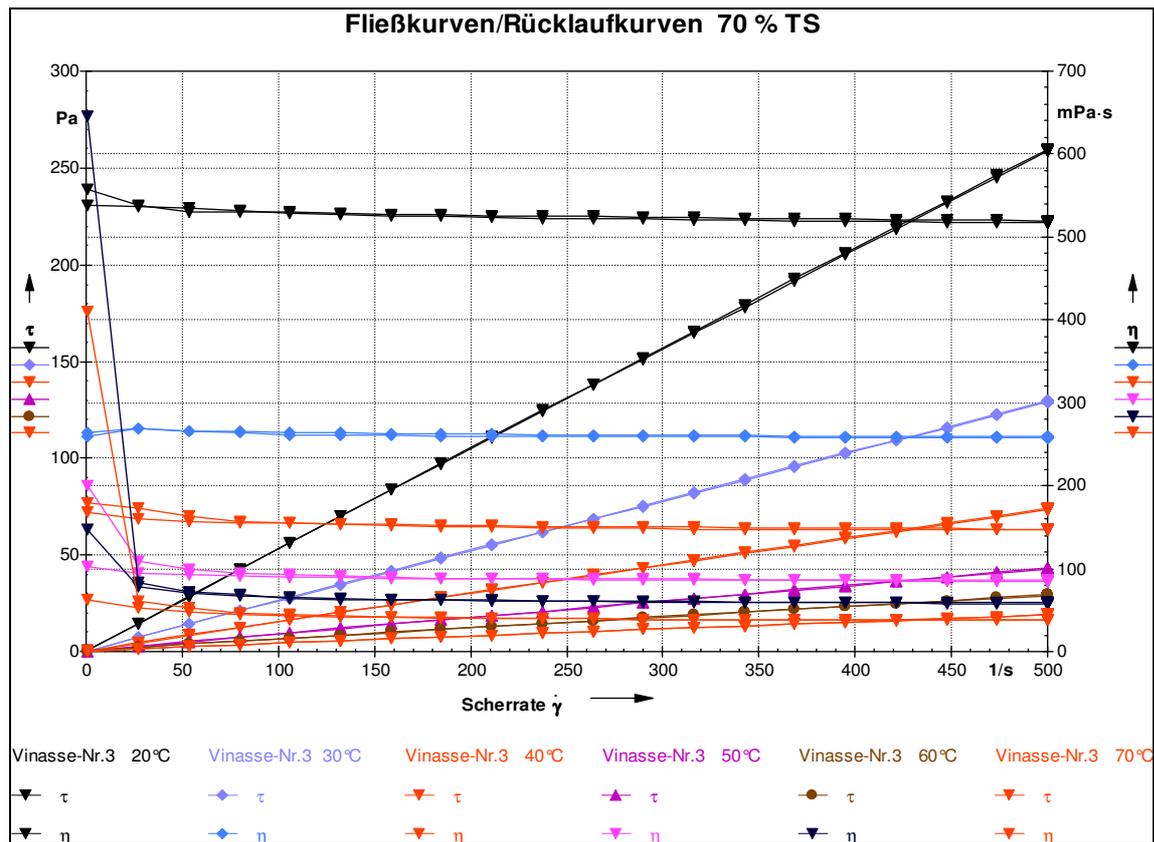


Abb. 8.14. Fließkurven Vinasse 3 $w_{TS} = 70 \%$

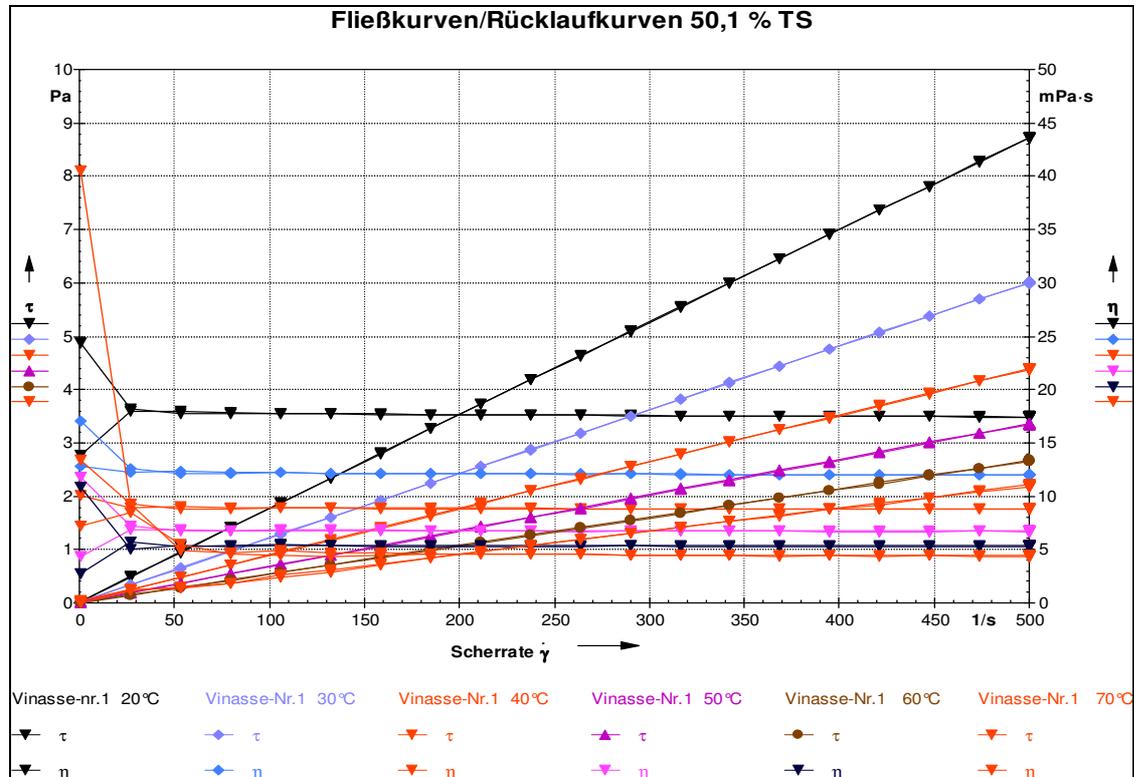


Abb. 8.15. Fließkurven Vinasse 1 $w_{TS} = 50,1 \%$

Analog erfolgt in Tab. 8.7. ein Vergleich der rheologischen Parameter nach den Deformationsansätzen von OSTWALD/De WAELE und Newton.

Tab. 8.7. Ermittlung des rheologischen Deformationssystems für Proben Nr. 1 und 3

Probe	Regression	Ostwald/De Waele (1)				Newton (2)		
		ϑ	K	n	r	s	η	r
	°C	Pas ⁿ	-	-	Pa	Pas	-	Pa
1	20	0,023	0,954	0,999	0,100	0,018	0,999	0,089
	30	0,016	0,951	0,999	0,080	0,012	0,999	0,060
	40	0,012	0,993	0,999	0,070	0,009	0,999	0,046
	50	0,010	0,993	0,998	0,070	0,007	0,999	0,039
	60	0,003	1,000	0,998	0,0551	0,005	0,998	0,056
	(70	0,003	0,755	0,986	0,110	0,004	0,997	0,052)
3	20	0,545	0,992	1,000	0,600	0,524	1,000	1,628
	30	0,269	0,994	1,000	0,340	0,262	1,000	0,687
	40	0,170	0,996	1,000	0,170	0,152	0,999	0,993
	50	0,132	0,998	1,000	0,040	0,089	0,998	0,605
	60	0,103	0,912	0,997	0,650	0,063	0,993	0,101
	(70	0,065	0,861	1,000	0,130	0,041	0,992	0,725)

Im Vergleich zur Vinasse 2 mit 65,5 % Trockensubstanz ergibt sich für die Vinassen mit 50,1 und 70 % Trockensubstanz im gesamten Temperaturbereich ein linearer Zusammenhang zwischen Scherrate und gemessener Schubspannung. Deshalb sollte für diesen Vinasstyp die Beschreibung als strukturlose Newtonflüssigkeit erfolgen, wodurch sich ingenieurtechnische Anwendungen stark vereinfachen lassen. Vinasse 2 hat eine andere technische Herkunft. Eine zu verallgemeinernde Ausnahme stellt die Temperatur 70 °C dar. Generell wird als Trend in den Untersuchungen eine Abweichung des Fließindex von 1 in Richtung Struktureffekte ermittelt ($n = 0,755$ und $0,861$). Die gefundene thermisch induzierte Strukturierung wird auch bei der rheologischen Untersuchung reiner und technischer Saccharoselösung ermittelt /49/.

8.2.1.3 Bestimmung der Viskositätsfunktion $\eta_{\text{dyn}}(\vartheta)$ mittels Torsionsschwinger

Um für Prozessführungen über einen relevanten breiten Temperaturbereich die Stoffkennwerte für Interpolationen im Rahmen von Dimensionierungsrechnungen für Eindampfstationen vorrätig zu haben, wurden in Abhängigkeit von der Trockensubstanz und im technologisch relevanten Temperaturbereich 60 ... 100 °C kontinuierliche orientierende Messungen durchgeführt. Verwendet wurde das Online-Prozessviskosimeter Rheoswing® RSD 1-1. Da ebenfalls mit einer offenen Messzelle gemessen wurde, muss ab einer Temperatur von ca. 60 °C mit Verdunstungseffekten gerechnet werden.

Wie aus der Literatur /119/ bekannt, sinkt mit steigender Temperatur das Viskositätslevel im Regelfall nach einer Exponentialfunktion (Frenkel-Eyring-Gleichung).

In der folgenden Abbildung 8.16. sind die Messdaten der dynamischen Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur für die Vinasse mit Newtonscher Fließcharakteristik dargestellt und als Arrheniusgleichung regressiert.

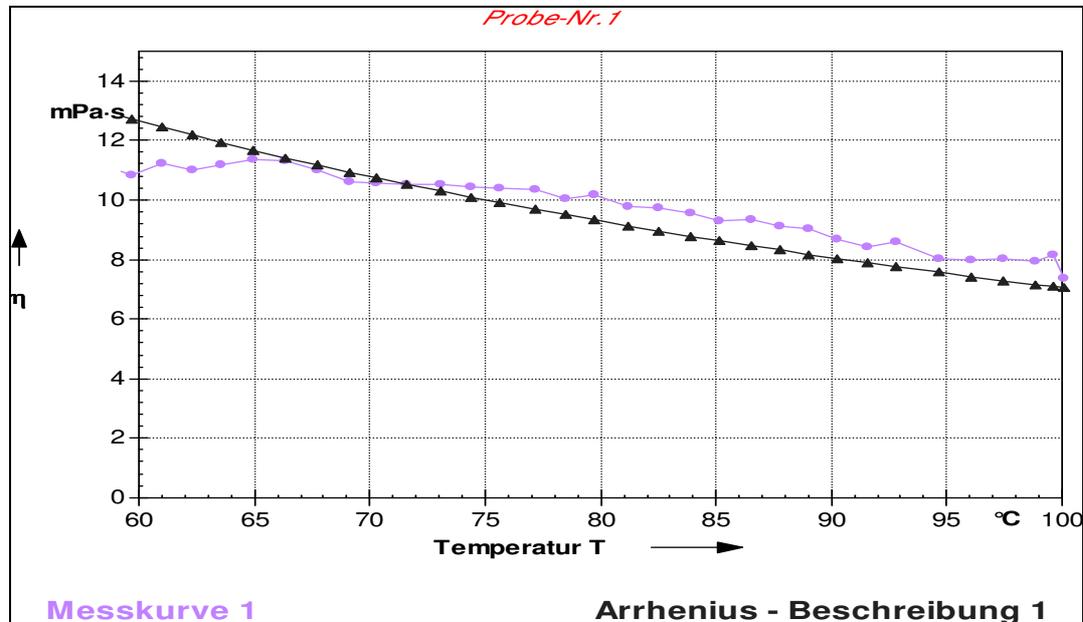


Abb. 8.16. Abhängigkeit der Viskosität der Vinasse von der Temperatur, $w_{TS} = 50,1 \%$

Die Interpolation benötigter Messwerte für die Lösung von Dimensionierungsaufgaben zur Eindampftechnik ist damit verbessert möglich und ergänzt die fundamentalen Messungen bei $\vartheta > 60 \text{ °C}$. Eine Abstimmung zwischen Messkurve und Arrhenius Gleichung ist in Abbildung 8.16. dargestellt.

8.2.1.4 Abhängigkeit der Vinasseviskosität von der Temperatur

Eine zunehmende Erwärmung der Vinasse ist mit einer Verminderung der Reibungskräfte im Fluid verbunden. Zur Untersuchung des Viskositätsverhaltens von Vinasse in Abhängigkeit von der Temperatur wurde die originäre Vinasse im Temperaturbereich von 20 bis 70 °C mit $\Delta T = 10 \text{ K}$ untersucht.

Der Einfluss der Temperatur auf die Viskosität aus den Kapiteln 8.2.1.1. und 8.2.1.2. wird durch die Frenkel-Eyring-Gleichung als modifizierte Arrhenius-Beziehung nach Gl. 8.1 beschrieben:

Die regressierten Parameter A und B des modifizierten Arrheniusansatzes sind für Vinasse mit einer Trockensubstanz von 50,1%, 65,5 % und 70 % in Tab. 8.8 enthalten

Tab. 8.8. Ermittlung der trockensubstanzabhängigen Fließaktivierungsenergie

Vinasse	w _{TS}	A	B	E _A	r	Temperaturbereich
	%	10 ⁻⁷ Pas	K	kJ/kmol	-	°C
1	50,1	5,912	3032,0	25208	0,96	20 - 70
2	65,5	2,245	3992,2	33191	0,97	20 - 70
3	70,0	0,047	5448,4	45297	0,97	20 - 70

Bei der Darstellung des Datenmaterials als Funktion $\ln \eta_{\text{eff}}(T) = f(1/T)$ lassen sich mittels Regressionsanalyse aus Temperatur und Trockensubstanz die spezifischen Aktivierungsenergien E_A errechnen.

Exemplarisch ist am Beispiel der Vinassen mit 65,5 und 70,0 % w_{TS} bei einer Schergeschwindigkeit von 50 s⁻¹ die Temperaturabhängigkeit der effektiven Viskosität in den Abbildungen 8.17. und 8.18. dargestellt.

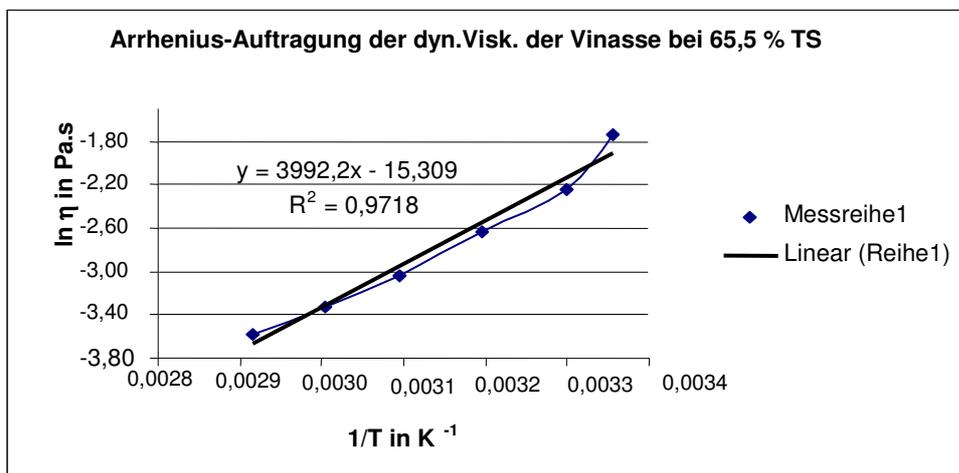


Abb. 8.17. Effektive Viskosität der Vinasse mit 65,5 % Trockensubstanzgehalt

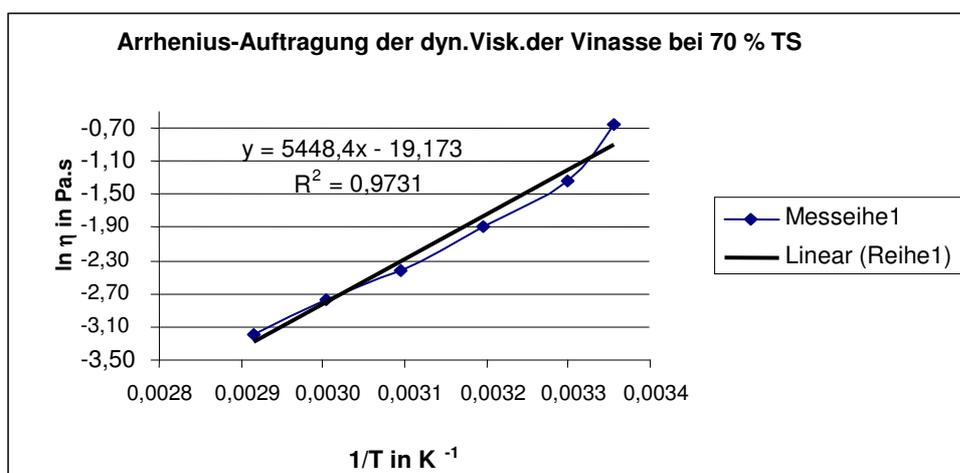


Abb. 8.18. Effektive Viskosität der Vinasse mit 70 % Trockensubstanzgehalt

Bei Anwendung der Parameter der trockensubstanzabhängigen Frenkel-Eyring-Gleichung aus Tab. 8.8 sind Interpolationen im regressierten und technologisch relevanten Temperaturbereich möglich und stellen Sicherheit bei Dimensionierungsrechnungen dar. Mit zunehmender Trockensubstanz steigt der Einfluss der Trockensubstanz auf die Fließaktivierungsenergie über den Exponent B, wogegen der Koeffizient A der Gleichung 8.5. fällt.

8.2.2 Ergebnisse der wärmephysikalischen Vinasseuntersuchungen

In der nachfolgenden Tab. 8.9. sind die Ergebnisse orientierender wärmephysikalischer Untersuchungen dargestellt. Ermittelt wurden die Dichte, die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit bei einer Temperatur von 20 °C. Bekannt ist die im Vergleich zu den fluiddynamischen Kennwerten geringere Temperaturabhängigkeit. Die Siedepunktserhöhung Δt_S wurde druckabhängig bestimmt.

Tab. 8.9. Wärmephysikalische Stoffkennwerte von Vinassen bei 20 °C

Probe	w_{TS}	ρ	c_p	λ	Δt_S bei 1000 mbar	Δt_S bei 500 mbar	Δt_S bei 400 mbar
	%	kg/m ³	kJ/kg·K	W/m·K	K	K	K
1	50,1	1230 ± 10	2,64±0,01	0,63±0,03	n. b.	n. b.	n. b.
2	65,5	1310 ± 10	2,49±0,01	0,62±0,03	3,2 ± 0,1	2,0 ± 0,1	1,4 ± 0,1
3	70	1400 ± 10	2,27±0,01	0,64±0,03	4,7 ± 0,1	3,2 ± 0,1	2,9 ± 0,1

Zusätzlich konnte die Oberflächenspannung von Vinasse 3 bei 60 °C mit $\sigma = 48,5 \pm 0,5$ mN/m bestimmt werden.

Die Dichtemessung mittels Pyknometer ergibt bei allen Proben einen progressiven linearen Zusammenhang mit der Trockensubstanz.

Die spezifische Wärmekapazität sinkt linear mit der Erhöhung der Trockensubstanz.

Relativ unabhängig werden die Messdaten des Wärmeleitkoeffizienten von der Trockensubstanz ermittelt. Ursache kann ein in etwa gleich großer Level des Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten, Wasserfraktion und Trockenmassefraktion angenommen werden.

Bekannt stark w_{TS} - und druckabhängig wird die Siedepunktserhöhung für die Proben 2 und 3 ermittelt. Die Bestimmung der Siedepunktserhöhung wurde im Unterdruckbereich stark durch Schaumbildung beeinträchtigt.

9 Böschungs- und Rutschwinkelbestimmung von Kristallzucker

Die Fließeigenschaften eines Schüttgutes müssen bekannt sein, um die Vorgänge beim Lagern und Ausfließen aus Silos oder Behältern beschreiben zu können.

Das Verhalten eines Schüttgutes lässt sich im Gegensatz zu reinen Flüssigkeiten, nicht allein mit der Angabe der stofflichen Zusammensetzung beschreiben. Eingehende Parameter sind: Größe, Form, Oberfläche, Oberflächenbeschaffenheit, Teilchendichte, Korngrößenverteilung, spezifische Kohäsivität.

An einem Zuckerkristallhaufwerk interessieren Partikelgrößenverteilung, Böschungs- und Rutschwinkel in Abhängigkeit von der Partikelgröße.

9.1 Kennwerte der Partikelgrößenverteilung eines Zuckerkristallhaufwerkes

Die Korngrößenverteilung der Kristalle bestimmt das Aussehen des Zuckers und beeinflusst deutlich sein Verhalten während der industriellen Verarbeitung. Es wird Zucker mit möglichst einheitlichen Kristallen und geringstem Feinkornanteil gefordert. Besonders ein hoher Anteil an Feinkorn kann Unterbrechungen und Störungen verursachen, da die feinen Partikel sich während der Lagerung und des Transports von den Kristallen trennen, zu größeren Blöcken zusammenbacken und verklumpen können. Damit bilden sie die Ursache für Verstopfungen von Leitungen und Dosiereinrichtungen.

Zur Ermittlung einer Teilchengrößenverteilung eignet sich die Durchführung einer Siebanalyse bei kugelförmigen Teilchen. Durch eine Siebanalyse wurde die Korngrößenverteilung bei Kristall-Zucker (fein) aus verschiedenen Zuckerfabriken bestimmt. Die Versuchsergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle 9.1. exemplarisch aufgeführt.

Tab. 9.1. Kristallgrößenverteilung aus verschiedenen Zuckerfabrikationsprozessen

		Pfeifer & Langen	Südzucker	Nordzucker
	Größe	Prozentual	prozentual	prozentual
Fraktion Nr.	mm	%	%	%
1	0,200 - 0,310	12,31	12,2	1
2	0,310 - 0,400	19,44	16,9	10,2
3	0,4 - 0,5	20,31	16,7	23,1
4	0,5 - 0,630	25,87	26,2	31,65
5	0,630 - 0,710	11,8	14,7	16,6
6	> 0,710	10,2	13,3	17,4
gesamt		99,93	100	99,95

Eine weitere Möglichkeit der Partikelgrößenanalyse ist die Laserpartikelmessung und die Darstellung der Häufigkeits- und Summenhäufigkeitsverteilung.

Für Kristallzucker (fein) aus verschiedenen Zuckerfabrikationsprozessen sind die Messdaten mittels Laserpartikelmessung (Beckman & Coulter) in Abb. 9.1. dargestellt.

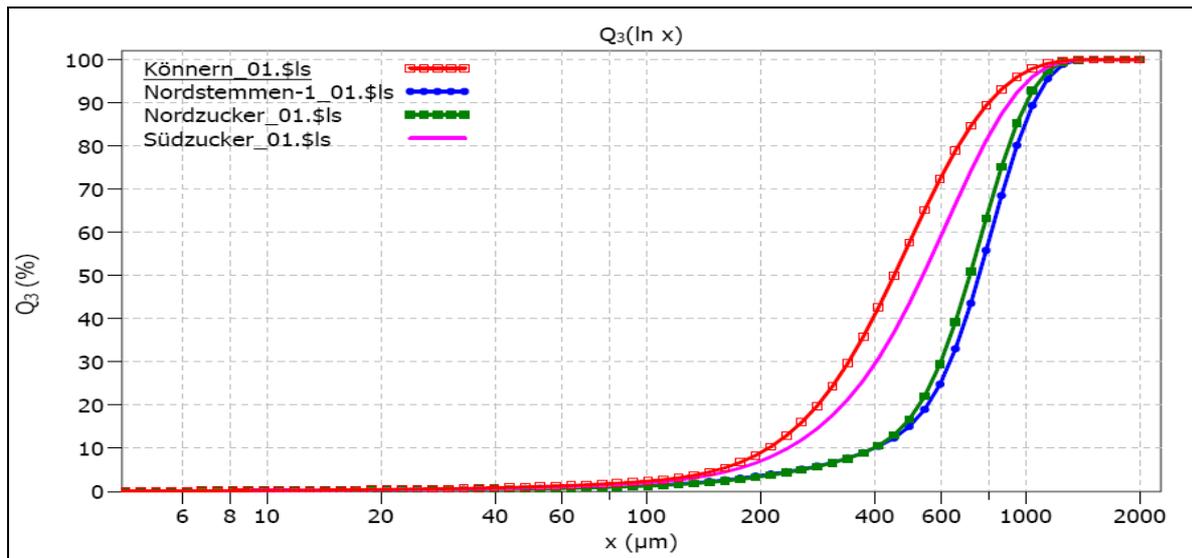


Abb. 9.1. Verteilungssummenfunktion von feinem Kristallzucker verschiedener Hersteller
Folgende Aussagen können aus den in der Tab. 9.1. und Abb. 9.1. dargestellten Versuchsergebnissen abgeleitet werden:

Die Korngrößenverteilung hängt in erster Linie vom Prozessablauf bei der Kristallisation ab. Der Kristallzucker von Nordzucker besitzt eine gröbere Korngröße. Im Gegensatz dazu sind die Körnungen von Südzucker und Pfeifer & Langen vergleichsweise feiner.

9.2 Kennwerte der Böschungs- und Rutschwinkel eines Zuckerkristallhaufwerkes

9.2.1 Böschungswinkel

Der Böschungswinkel kennzeichnet den kleinsten Winkel, bei dem die Feststoffteilchen an einander zu gleiten oder zu rollen beginnen.

Es wurde eine Böschungsbestimmung für verschiedene Kristallkorngrößen von Produkten der Zuckerproduzenten Pfeifer & Langen, Nordzucker und Südzucker durchgeführt. Kommerzieller Zucker wurde durch Siebanalyse in sieben verschiedene Fraktionen (Tab. 9.2.) eingeteilt.

Tab. 9.2. Fraktionsgröße

Fraktion Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Kristallgröße in μm	< 200	200 - 310	310 - 400	400 - 500	500 - 630	630 - 710	> 710

Es wurde für jede Fraktion Kristallzucker die Ausbildung des Böschungswinkels als Dreifachbestimmung mit einem eigens dafür entwickelten Messgerät untersucht, siehe Abb.9.2.

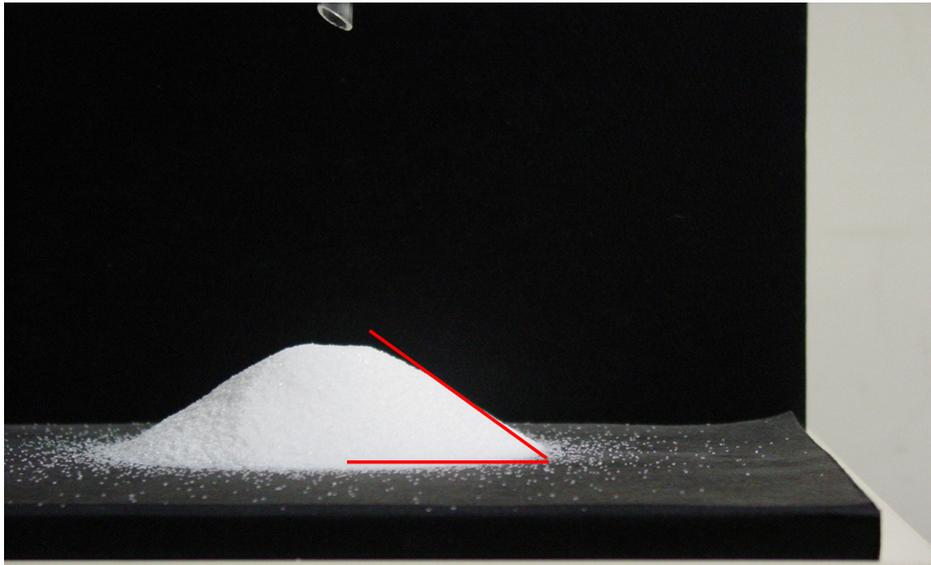


Abb. 9.2. Böschungswinkelbestimmung mit Messkammer

Ein Trichter wird mit einem Abstand von 10 cm über einer Fläche angeordnet. Der Trichter-
auslauf wird verschlossen, anschließend wird die Zuckerprobe (70 g) in den Trichter gefüllt.
Nach Entfernung des Verschlusses rieseln die Zuckerkristalle auf einen erschütterungsfreien
Boden. Es bildet sich ein Kegel (Schüttkegel), der sich durch die verschiedenen Kristallgrö-
ßen unterschiedlich ausbildet.

Die folgende Abb. 9.3. zeigt die Böschungswinkel des Kristallzuckers und verschiedener
Fraktionen des Haufwerkes auf. Die Messung erfolgte bei einer Temperatur von 20 °C und
einer relativen Luftfeuchte von 26 %.

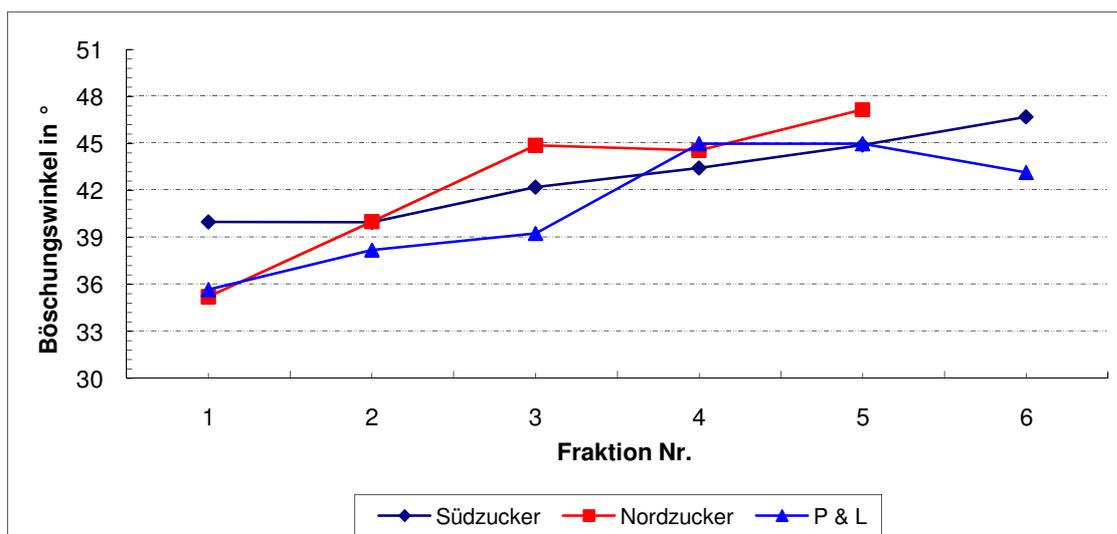


Abb. 9.3. Böschungswinkelbestimmung bei Kristallzucker (fein) verschiedener
Zuckerhersteller

Folgende Aussagen können aus Abb.9.3. abgeleitet werden:

1. Durch die hohen Oberflächenkräfte gerade kleiner Partikel, wird die Ausbildung des Böschungswinkels durch Adhäsionseffekte zur Wandung überlagert.
2. Es besteht eine Fraktions- wie auch eine Produktionsabhängigkeit.
3. Bei allen Produkten verringert sich der Böschungswinkel mit abnehmender Korngröße

9.2.2 Rutschwinkel

Es wurde eine Rutschwinkelbestimmung für verschiedene Kristallkorngrößen der gleichen Hersteller durchgeführt. Es wurde von jeder Fraktion 5 g Kristallzucker auf einer Testoberfläche verteilt. Dann wurde der Tischwinkel über eine Gewindestange langsam erhöht, bis die Zuckerkristalle von der Testoberfläche abglitten (Dreifachbestimmung). In der folgenden Abbildung 9.4. wurden die Rutschwinkel der verschiedenen Fraktionen in Abhängigkeit von der Unterlage (Edelstahl, Förderbandgummi) dargestellt.

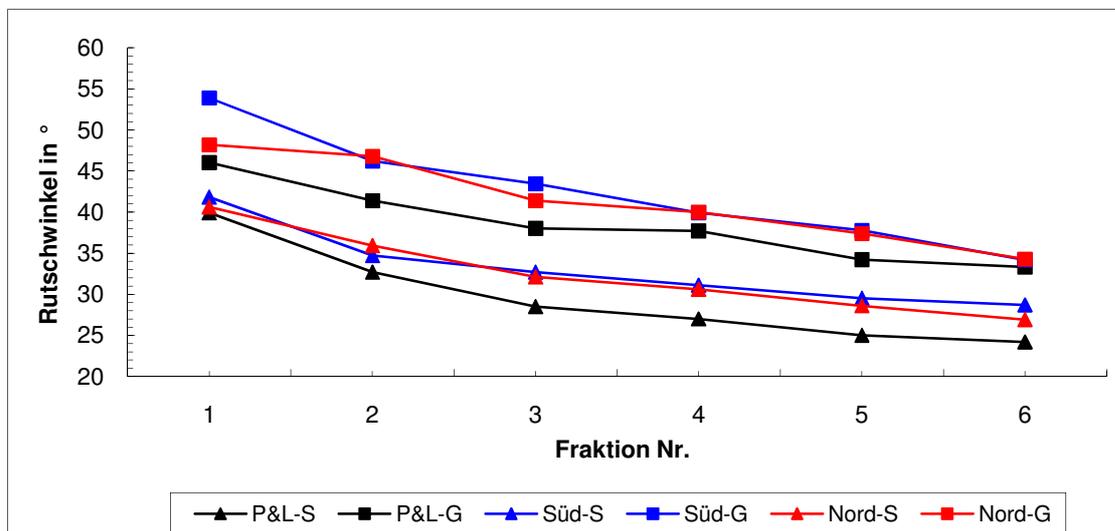


Abb. 9.4. Rutschwinkel Kristallzuckerfraktionen (fein) Oberfläche Edelstahl und Förderbandgummi

Die folgende Tabelle zeigt die Rutschwinkel sowie Böschungswinkel des gesamten Spektrums alle Zuckerprodukte auf.

Tab. 9.3. Die Rutschwinkel und Böschungswinkel des gesamten Spektrums alle Proben

	Rutschwinkel		Böschungswinkel
	Stahl	Gummi	
P&L	29,5	37,5	37,8
Südzucker	32,9	42,2	40,7
Nordzucker	31,9	39,2	42,45

Folgende Aussagen können aus den in Abb. 9.4. dargestellten Versuchsergebnissen abgeleitet werden:

1. Es besteht eine Fraktions- wie auch eine Produktionsabhängigkeit.
2. Bei allen Produkten verringert sich der Rutschwinkel mit zunehmender Korngröße.

3. Je glatter die Fläche ist, desto kleiner ist der Rutschwinkel. Deswegen sind bei allen Versuchen die Rutschwinkel bei Stahloberflächen kleiner als bei Gummioberflächen.
4. Je größer die Partikel sind, desto geringer fallen die Unterschiede der Rutschwinkel aus.
5. Die Unterschiede des gesamten Spektrums der Rutschwinkel der verschiedenen Zuckerhersteller sind bei Stahloberflächen kleiner als die Unterschiede bei Gummi-oberflächen.

Für die Fraktionen 1 und 2 mit Partikeldurchmesser $< 0,2$ bzw. $0,310$ mm kann nicht von einem kohäsionslosen, frei fließendem Schüttgut gesprochen werden.

Bei einem Vergleich Böschungs- (Abb.9.3.) und Rutschwinkel (Abb. 9.4.) konnten nur für grobkörniges Schüttgut vergleichbare Werte ermittelt werden. Das Schüttgut verhält sich mit abnehmender Partikelgröße zunehmend kohäsiv (Beispiel Mehl, Puderzucker).

Die vorliegenden Abweichungen weisen darauf hin, dass die Produkte spezifische Rutschwinkel aufweisen.

10 Schlussfolgerung für weitere Untersuchungen

Die Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass man mit dem rheologischen Messverfahren die ablaufenden Vorgänge bei der Zuckerherstellung erfassen kann. Die ermittelten Erkenntnisse sind für die Vertiefung des Standes der Technik von großer Bedeutung. In diesem Zusammenhang können folgende Schlussfolgerungen für weitere Untersuchungen abgeleitet werden:

Die wichtigsten physikalischen Kennwerte wie Bruchkraft, Elastizitätsmodul, elastische und plastische Arbeit von frischen und verschieden lange gelagerten Zuckerrüben wurden durch die vorliegende Arbeit mit einer neuen Methode ermittelt. Die Kennwerte müssen bezogen auf die Schneidarbeiten, sowie verschiedene Einflussfaktoren wie Sortenabhängigkeit, agrotechnische Faktoren (insbesondere Stickstoffdüngung) weiter untersucht werden.

Besonderes sinnvoll ist, dass die physikalischen Kennwerte zur Optimierung der Diffusion und Schneidmaschinen geprüft werden.

Folgende Untersuchungen zur weiteren Verbesserung der Methode zur inline-online-Erfassung der Rohsaftviskosität werden vorgeschlagen:

- Bei der Verarbeitung von frostgeschädigten oder wärmegeschädigten Rüben könnte das Messsystem RHEOSWING® RSD 1- 1 als „Frühwarnsystem“ als Einbindung in das Prozessleitsystem für das Ansteigen der Rohextraktviskosität, auch zur Gewinnung der Führungsgröße in der Extraktreinigung und zur automatischen Verhältnisdosierung von Kalkmilch und Kohlendioxid in die zu reinigenden Säfte dienen.

- Ebenso könnte die Enzymapplikation von Dextranase vororientierend untersucht und für den Einsatz in der Technologieführung bewertet werden.

In diesem Fall könnte es präventiv gelingen, die Filtrationseigenschaften von dextranhaltigen und lävanhaltigen Säften zu verbessern. Bei dieser Arbeitsweise wird eine nicht notwendige Alkalisierung vermieden und Kalkmilch eingespart.

Weitere Untersuchungen zur Bestimmung der dynamischen Viskosität werden für Melasse unterhalb der Konzentration von 80 % w_{TS} vorgeschlagen. Die Untersuchung dieses Konzentrationsbereiches ist wünschenswert, um Messwerte der Viskosität von Melasse für die weitere Verwendung zu erhalten.

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

Für die Rohrzuckerindustrie werden entsprechende Untersuchungen an Melasse aus Rohr zur dynamischen Viskosität und dem Fließverhalten im gleichen Konzentrations- und Temperaturbereich vorgeschlagen. Hier sind aufgrund anderer Zusammensetzung der technischen Saccharoselösungen aus Rohr abweichende Eigenschaften zu erwarten.

11 Zusammenfassung

Die Rheologie befasst sich mit den physikalischen Eigenschaften der Stoffe, die auf dem Deformations- und Fließverhalten beruhen. Diese Eigenschaften sind sowohl für die Forderungen nach Schnellmethoden und on-line-Verfahren für die Bestimmung und die Einhaltung der Qualität von Lebensmitteln von großer Bedeutung. Zum Beispiel spielt in der Qualitätskontrolle und der Prozess-Automatisierung die Lebensmittel Rheologie eine Rolle für die Lebensmittelverfahrenstechnik, wo Stoffdaten wie z. B. Viskositäten oder Wärmekapazitäten benötigt werden. Rheologische Methoden zur Aufklärung ablaufender Vorgänge während der Verarbeitung von Rohstoffen zu Lebensmitteln gehören zu den neueren Untersuchungsmethoden der Lebensmitteltechnik. Rheologische Messungen detektieren im Rahmen eines physikalischen Messverfahrens den Status quo, sowie ablaufende stoffliche Veränderungen als objektive Messgröße mit einer großen Spreizung des Messbereiches (online - inline). Im Bereich der Zuckerindustrie sind derzeit mehrere Applikationsuntersuchungen zu verschiedenen Themenstellungen in Bearbeitung.

Ziel der Arbeit war es, die Stoffkennwerte infolge physikalischer Vorgänge im Zuckerfabrikationsprozess zu bestimmen.

Die Rüben wurden zunächst auf ihre mechanischen Eigenschaften mit einer Materialprüfmaschine (Instron), Modell 4301 untersucht. Dabei konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen Bruchkraft, Elastizitätsmodul, elastischer und plastischer Arbeit als charakteristische Kenngrößen für die physikalischen Eigenschaften und die Verarbeitungsqualität in Abhängigkeit von der Lagerzeit beobachtet werden. Die Bruchkraft, Elastizitätsmodul und elastische Arbeit sinken deutlich während der Lagerzeit. Aufgrund der Bruchkraft, Elastizitätsmodule und elastischen Arbeit können die zur Verarbeitung gelangenden Rüben zweckmäßiger klassifiziert werden.

In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse des Elastizitätsmoduls mit Vukov /29/ verglichen. Es kann seiner Aussage, dass der Rübenkörper hinsichtlich seiner elastischen Eigenschaften makroskopisch, wie auch statistisch als annähernd isotrop und homogen zu betrachten ist, nicht zugestimmt werden. Hier ist der Rübenkörper hinsichtlich seiner elastischen Eigenschaften inhomogen.

Die Bestimmung der physiko-mechanischen Eigenschaften von Zuckerrüben kann als orientierende grundlagen-wissenschaftliche Untersuchung für die Betriebskontrolle und für Regulierungsmaßnahmen die Schneidmaschine dienen.

In Kapitel 6 war Ziel der Untersuchungen zunächst die grundlagenwissenschaftliche Beschreibung des Viskositätsverhaltens einer im Zuckerfabrikationsprozess vorliegenden Rohsaftmatrix als Wechselwirkungseffekt von Saccarosegehalt, Trockensubstanz, Reinheit, Pektingehalt, Dextrangehalt und Lävangehalt.

Für die technologischen Untersuchungen war eine Optimierung der Technologieführung

notwendig. Dazu stand das Messsystem RHEOSWING® RSD 1-1 als inline-online-Erfassungsgerät in Form eines Torsionsschwingers (Oszillationsmessungen) zur Verfügung. Erste Untersuchungen zur inline-online-Erfassung der Rohsaftviskosität wurden in der Kampagne 2003 in den Werken A und B realisiert. Nach Optimierung der Messeinrichtung wurden Dauerversuche zur online-Erfassung der Viskosität vom Beginn bis zum Ende der Kampagnen 2004 und 2005 durchgeführt.

Die Einbindungsbedingungen wurden orientierend untersucht und das Applikationsverhalten bewertet.

Weiter wurde der Aufbau der Viskositätsmatrix des Rohsaftes unter den Bedingungen verschiedener Fahrweisen untersucht.

Eine höhere Rohsaftviskosität bedeutet einen Anstieg der viskositätsbeeinflussenden Komponenten und dient als Warnsignal für die Filtration.

Drei wichtige Aussagen können abgeleitet werden:

1. Bei einem Rohsaft (z. B. $\vartheta = 23\text{-}30\text{ °C}$) mit einem Viskositätslevel im Bereich von $\eta_{\text{Ex}} < 1,70\text{ mPas}$ erwartet man keine ungewöhnlichen Hydrokolloide.
2. Geringere Viskositäten als 1 mPas sind zu vernachlässigen.
3. Liegt eine höhere Rohsaftviskosität vor, so ist mit einer Erhöhung der Konzentration der viskositätsbeeinflussenden Komponenten im Rohsaft zu rechnen.

Prozessviskositäten in dieser Größenordnung signalisieren in jedem Fall das Vorliegen „schlechter“ technologischer Eigenschaften des Rohsafts sowie eine problematische Fahrweise der Rohsaftgewinnung und verursachen im Regelfall Filtrationsprobleme in der nachfolgenden Saftreinigung.

16 native Rübenzuckermelassen aus dem Werk C wurden analysiert und zusätzlich durch Verdünnung auf eine zweite Trockensubstanz w_{TS} eingestellt. Nach der Verdünnung erfolgte die Einteilung in zwei Gruppen. Zur ersten Versuchsklasse zählt Melasse mit $w_{\text{TS}} > 83\%$. Zur Versuchsklasse zwei Melasse mit $w_{\text{TS}} < 83\%$. In den Abbildungen mit high tech Messsystemen wurde das rheologische Verhalten untersucht. Melassen mit $83\% < w_{\text{TS}} < 86,7\%$ w_{TS} zeigten bei Temperaturen $< 50\text{ °C}$ ein Nicht-Newtonsches (Ostwald/ De Waele) Fließverhalten. Im Gegensatz dazu liegt bei Melasse mit $< 83\%$ Trockensubstanz Newtonsches Fließverhalten im untersuchten Temperaturbereich vor.

Diese Ergebnisse ergänzen bisherige Untersuchungen, in denen festgestellt wurde, dass Rübenzuckermelassen ausschließlich Newtonsches Fließverhalten besitzen.

Die durchschnittlichen Fließindices n von Melasse $< 83\%$ Trockensubstanz tendieren bei allen Temperaturen zu 1, nur bei 60 °C liegen die Werte des Fließindex unerwartet bei 0,989. Wie erwartet, steigen die Fließindexwerte bei Melasse mit nicht-Newtonschem Verhalten bei einer Erwärmung von 20 bis 60 °C an.

Eine Abhängigkeit des nicht-Newtonschen Verhaltens vom Trockensubstanzgehalt und der Temperatur wurde festgestellt. Die Stoffkennwerte können zur optimierten Auslegung der Prozesstechnik genutzt werden.

Da zunehmend aus der Zuckerindustrie Anfragen zu fluiddynamischen und wärmephysikalischen Stoffkennwerten von Vinasse gestellt werden, wurden native Rübenzuckervinassen aus unterschiedlichen Fermentationsprozessen bezüglich ihrer chemischen und physikalischen Kennwerte analysiert.

Die Vinassen entstammten Fermentationstechnologieführungen zur Alkohol- und Zitronensäureherstellung und wiesen unterschiedliche Trockensubstanzen auf.

Die rheologischen Untersuchungen ergaben eine Abhängigkeit des Fließverhaltens (Newton/nicht-Newton) vom vorherigen Prozess und nicht von der Trockensubstanz.

Die bekannte exponentielle Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur und der Trockensubstanz wurde für die vorliegenden Konzentrate bestätigt.

Die Bestimmung der wärmephysikalischen Kennwerte erfolgte am Beispiel der Dichte, der spezifischen Wärmekapazität, des Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten und der Siedepunkterhöhung. Wie die Untersuchungen zeigen, sind die drei erstgenannten Kennwerte linear mit der Trockensubstanz korreliert. Die aufgeführten wärmephysikalischen Kennwerte sollten aufgrund der Schwierigkeiten bei der Vermessung als orientierende Daten verwendet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen der Ausbildung des Böschung- und Rutschwinkels für Zuckerkrystallfraktionen durchgeführt. Durch Siebanalyse wurde die Partikelgrößenverteilung bei dem feinen Kristallzucker aus verschiedenen Zuckerfabrikationsprozessen ermittelt.

Als Literaturergebnisse wurde fluiddynamisches Verhalten von Carbonatationsschlamm, reiner Saccharoselösung, technischer Saccharoselösung aus Rübe und Rohr und Kristallsuspension recherchiert. Das Fließverhalten von Carbonatationsschlamm ist z. B. von Interesse für den Reinigungszyklus der Beutel- bzw. Kerzenfilter, da nur ein gut fließfähiges System eine ausreichende Regenerierung der Filterflächen gewährleistet. Auch haben Fließeigenschaften von technischen Saccharoselösungen für die Modellierung von Wärmeübertragungsprozessen in der Zuckerindustrie eine entscheidende Bedeutung.

12 Literaturverzeichnis

/1/	Baloh, A.: Zuckertechnologie Skript, (1978)
/2/	van der Poel, P.-W.; Schiweck, H.; Schwartz, T.: Zuckertechnologie, Verlag Dr. Albert Bartens, Berlin, (1998)
/3/	Mauch, W.: Zuckertechnologie 1& 2 Skript, (1989)
/4/	Schmidt, P.-V: Über die Zuckerrübenlagerung. Zuckerind 129, 569-575 (2004)
/5/	Wallenstein, H.-D.; Bohn, K.; Kagelmann, G.; Willer, G.: Ergebnisse von Rübenlagerungsversuchen 1957-1961, Zuckererzeugung 6, Beilage 2, (1962)
/6/	Schmidt, P.-V.: Beitrag zur Senkung der Verluste bei der Zuckerrübenlagerung. Dissertation, HU Berlin (1984)
/7/	Senge, B.; Schmidt, P.-V.; Manzke, E.: Gesamtdruckverlust ausgeführter Belüftungsanlagen für Zuckerrüben. Lebensmittelind. 36 72-75, (1989)
/8/	Schmidt, P.-V.; Manzke, E.; Senge, B.: Unterflurbelüftungsanlagen für Zuckerrüben. Lebensmittelind. 35 73-75, (1988)
/9/	Ajdari, M.: Inline-Online Erfassung von Prozessabläufen bei der Extraktreinigung im Zuckerfabrikationsprozess. Dissertation, Technische Universität Berlin., (2002)
/10/	Reinefeld, E.; Schneider, F.; Thielecke, K.; Hoffmann, R.-D.: Untersuchungen über die bei der technischen Reinigung von Zuckersäften auftretende Fällung sowie über den Einfluss der Einzelkomponenten auf die Abtrennbarkeit, Zuckerindustrie. 105, 139 – 146, (1980)
/11/	N.N.: Die Zuckerherstellung, Fachbuchverlag Leipzig, (1980)
/12/	Reinefeld, E.:Über die Kampagne 1977. Zuckerind 103, 292-298, (1978)
/13/	Madsen, R.-F: Extraktreinigung, in: van der Poel, P., W.; Schiweck, H.; Schwartz, T., (Herg.): „Zuckertechnologie Rüben- und Rohrzuckerherstellung“, Verlag Dr. Albert Bartens KG, Berlin, 485-584, (2000)
/14/	Teuschner, F: Extraktreinigung, in: Autorenkollektiv: „Die Zuckerherstellung“, 3. Aufgabe, VEB Fachbuchverlag, Leipzig 207-273, (1984)
/15/	Mc Ginnis, R.-A: Chemistry of the Beet and Processing Materials, in: Mc Ginnis, R. A., (Hrsg.): „Beet-Suger Technology“, 3. Ed. Beet Suger Development Foundation Fort Collins 25-63, (1971)
/16/	Baumgarten, G.: „Die Entwicklung der Braunschweiger Saftreinigung“, Zucker 23, 729-737, (1970)
/17/	Christoph, D.: Verdampfanlagen und Wärmeübertrager, Berliner Zuckerinstitut- (2001)
/18/	Morgenroth, B.: Verdampfanlagen und Wärmeübertrager, Berliner Zuckerinstitut-Sommerkurs (1998)
/19/	Mathlouthi, M.; Kasprzyk, P.: Viscosity of sugar solution, Sugar Technology Reviews

	11, 209-257, (1984)
/20/	Tscheuschner, H.-D.: Grundzüge der Lebensmitteltechnik, Behrs Verlag, (2004)
/21/	Weipert, D.; Tscheuschner, H.-D.; Windhab, E.: Rheologie der Lebensmittel, Behrs Verlag Hamburg, (1993)
/22/	Peleg, M.: Journal of Texture Studies 8, S 283-295, (1977)
/23/	Shermann, P; Olkuu, J.-E: Comperssion Testing of cylindrical Samples with an Instron Universal Testing Machnie. In: Food Texture and Rheology, Academic press London, New York, San Franzisco, (1979)
/24/	Tscheuschner, H.-D.: Lebensmitteltechnik, VEB Fachbuchverlag Leipzig, seite 147. (1986)
/25/	Schramm, G.: Einführung in Rheologie und Rheometrie, Gebrüder HAAKE GmbH, (1995)
/26/	Senge, B.; Blochwitz, R.; Bentlin, S.: Rheologische Stoffkennwerte richtig bestimmen; Deutsche Milchwirtschaft 557, S. 256-260, (2004)
/27/	Vukov, K.; Patkai, G.: Die mechanischen Beschädigungen der Zuckerrüben. Zuckerind 103. 848-850, (1978)
/28/	Drath, L.; Strauß, R.; Schiweck, H.: Untersuchungen über die mechanischen Eigenschaften von Zuckerrüben. Einflussfaktoren auf die Bruchfestigkeit von Rüben. Zuckerind 109, 993-1007, (1984)
/29/	Vukov, K.: Einfluss der Rübeneigenschaften auf die Schneidarbeiten: Zuckerind 25, S.549-552, (1975)
/30/	Vasatko, J.; Studnicky, J.; Smelik, A.: Einfluss der Kolloide und die Änderung der Viskosität im Rübensaft, Listy Cukr. 80, 287-290, (1964)
/31/	Drago, J.; Delavier, H.-J.: Über rheologisches Verhalten und Viskositätsbeeinflussung von Sacchroselösungen ,Zuckerind. 17, 185-193 und 251-261, (1967)
/32/	Grabka, J.: Die Rheologie des Zuckerkalkcarbonatkomplexes Zuckerind. 107, 1024-1027, (1982-b)
/33/	Hoffmann, C.: Zuckerrüben als Rohstoff, Habilitationsschrift, Georg-August-Universität Göttingen, (2006)
/34/	Tullin, V.: Die Morphologie der Zuckerrüben. Zucker 19, 433, (1952)
/35/	Drath, L.: Untersuchungen über die mechanischen Eigenschaften von Zuckerrüben. Zucker 29, 433, (1976)
/36/	Schmidt, P.-V.: Abnahme, Lagerung und Aufbereitung von Zuckerrüben; Verlag Dr. Albert Bartens, Berlin, (1990)
/37/	Vuko, K.: Physik und Chemie der Zuckerrübe als Grundlage der Verarbeitungsverfahren, Akademiai Kiado, Budapest, (1972)
/38/	Werner, E.: Über die Zuckereinlagerung in Silos; Zuckerind, 13. 193-199, (1963)

/39/	N.N.: Die Reinheit des Zuckers, Teil IV: Gleichgewichtsfeuchte-Südzucker-Anwendungstechnik. Hrsg: Südzucker-Verkauf GmbH, Oberursel
/40/	Bym, V.: Zuckerlagerung in Silos/tschech). Dissertation Universität Prag, (1975)
/41/	Wilson, G.; Mason, A.-W; Sargent, D.: The quality of sugar for Silo Storage and the Requierments of a Silo in Order to Maintain product quality. British sugar Plc. Technical Conference, Eastbourne, (1988)
/42/	Theobald, W.: Untersuchungen über die Lagerfähigkeit von Verbrauchszucker unter besonderer Berücksichtigung seines Sorptionsverhaltens. Dissertation, Technische Universität Berlin, (1970)
/43/	Bubnik, Z.; Kadlec, P.; Urban, D.; Bruhns, M.: Sugar Technologists Manual, Verlag Dr. Albert Bartens, Berlin, (1995)
/44/	Schneider, F.: Einiges aus der Kampagne“, Zucker 17, 441-451, (1963/64)
/45/	Schneider, F.: Einiges aus der Kampagne“, Zucker 22, 441-451, (1968/69)
/46/	Eszterle, M.: Viscosity and Mollecular Structure of Pure Sucrose solutions Zuckerind. 115, 263-267, (1990)
/47/	Pidoux, G.: Formel zur Berechnung der Viskosität im Bereich von 0 bis 100 °C, Zucker 14, 523-532, (1961)
/48/	Schmidt, T.; Christoph, D.; Senge, B.: Poster, ICUMSA (1998)
/49/	Christoph, D.; Schmidt, T.; Senge, B.: Fließeigenschaften von reinen und technischen Saccharoselösungen im Temperaturbereich von 30 bis 130 °C, Zuckerind. 123, 876-882, (1998)
/50/	Schmidt, T.: Viskosität- und Oberflächenspannungsverhalten von reinen und technischen Saccharoselösungen, Dissertation, TU Berlin, (2000)
/51/	Ajdari Rad, M.; Senge, B.: Zuckerind, 131. 846-856, (2002)
/52/	Barfoed, S.; Moddgaard, A.: Dextranase löst Dextranporbleme in DDS-Zuckerfabriken, Zuckerind. 112, 391-395, (1987)
/53/	Stoppok, E.; Buchholz, K.: Einsatz von Dextranase und Bestimmung ihrer Aktivität bei der Verarbeitung von alterierten Zuckerrüben, Zuckerind. 119, 476-481, (1994)
/54/	Ajdari Rad, M.; Senge, B.: Inline-online-Ermittlung von Vorgängen bei der Saftreinigung, Zuckerind. 127, 589-599, (2002)
/55/	Ajdari Rad, M.; Senge, B.: Fluidodynamisches Verhalten von Rohsäften und Filtraten der 1. Carbonatation“, Zuckerind. 128, 582-592, (2003)
/56/	Verhaart, M. L.-A.; Visser, N.-H.-M.: Eine genauere Analyse des alkoholischen Niederschlags in Zuckerfabriksäften, Z. Zuckerind. 12, 657-662, (1962)
/57/	Schneider, F.: Einiges aus der Kampagne 1970, Zucker 24, 557-566, (1971)
/58/	Shore, M.; Dutton, J.-U.; Houghton, B.-J.: Evaluation of deteriorated beet, Int. Sugar J. 85, 106-110, 136-139, (1983)
/59/	Buczys, R.: Kalkungscarbonatation-Saftreinigungsverfahren bei frostgeschädigten

	Rüben, Zuckerind. 119, 983-989, (1994):
/60/	Buchholz, K.; Bruhns, M.: Über die Kampagne 1993/94 und neuere technische Entwicklungen, Zuckerind. 119, 351-371, (1994)
/61/	Bruijn, J.-M.: Verarbeitung von frostgeschädigten Rüben bei der CSM und der Einsatz von Dextranase, Zuckerind. 125, 898-902, (2000)
/62/	Kraus, W.: Bericht über die Rübenkampagne, Zweigverein Süd, Zuckerind. 128, 344-354, (2003)
/63/	Abdel-Rahman, E.-S.; Schick, R.; Kurz, T: Influence of dextran on sucrose crystallization, Zuckerind. 132, 453-460, (2007)
/64/	Shahidizenouz, A.; Ajdari Rad, M.; Frenzel, S.; Senge, B.: Optimierung der Saftreinigung durch inline-online-Erfassung der Rohsaftviskosität, Zuckerind 131 846-856, (2006)
/65/	Baloh, A.: Energiewirtschaft in der Zuckerindustrie, Verlag Dr. Albert Bartens, Berlin, (1991)
/66/	Senge, B.; Christoph, D.: Rheologische Untersuchungen zum Transportverhalten von, Carbonatationsschlamm, Zuckerind. 120, 209-217, (1995)
/67/	Reher, E.-D.; Haroske, D.; Köhler, K.: Strömungen Nicht-Newtonscher Flüssigkeit. Chem.Techn.21, H.3, 137-143, (1969)
/68/	Casson, N.: Rheology of Disperse Systems. C.C. Hill, New York, S.84, (1959)
/69/	Bruhns, M.; Schliephake, D.; Schulz, T.: Fließverhalten von Zuckerkristallsuspensionen (Magma), Poster CITS, Münschen, (1995)
/70/	Senge, B.: Untersuchungen über die Fließeigenschaften von technischen Saccharoselösungen im Temperaturbereich von 30 bis 130 °C, internes Arbeitmaterial, FG Lebensmittelrheologie TU Berlin, (1998)
/71/	Bruhns, M.: Fließverhalten von Zuckerkristallsuspensionen und Wärmeübergang bei der Zucker-Verdampfungskristallisation bei kleinen Temperaturgefällen, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, (1996)
/72/	Silina, N.-P.: Viskosität von Füllmassen. Sakhar Prom. 27 Nr.8, 10-14, (1953)
/73/	Trentjew, J.-A.; Popov, V.-A.; Kot, J.-D.; Jasinkaja, F.-V.: über die rheologischen Eigenschaften der Zuckerfüllmassen. Piscevaja Promyslennost 1 38-46 (1965), ref. Z. Zuckerind. 17 Nr.11, (1967)
/74/	Gromkovskij, A.-J.; Fursov, V.-M.: Influence of Crystal Size on Masecuite Viscosity. Izv. V. U. Z. Pisch. Teknol. 4. 157-162, (1977), ref.Zuckerind. 29, (1967)
/75/	Szekrenyesy, T.; Paradi, L.; Hangyal, K.; Liktör, K.: Prinzipielle Fragen der Viskosimetrie von Zucker-Füllmassen insbesondere von Nachproduktfüllmassen“,Zuckerind., 110, 296-302, (1985-a)
/76/	Schick, R.: Vorlesungsunterlagen Grundlagen der Zuckertechnologie, Kapitel Kristal-

	lisation der Saccharose, S. 54, (1998)
/77/	Hoffmann, H.; Mauch, W.: Zucker und Zuckerwaren, 34-35, (1985)
/78/	Tschätzsch, O.: Ausgewählte Untersuchungen zur Saccharosekristallisation im Berliner Zuckerinstitut in den 1995 bis 2005
/79/	Hirschmüller, H.; Zablinsky, H.-Z.: Zuckerind. 5, 18-29, (1955)
/80/	Breitung, H.: Zuckerind.6, 185-193, 254-260, (1956)
/81/	Senge, B.: internes Arbeitmaterial, FG Lebensmittelrheologie TU Berlin, (2006)
/82/	Puri, A.-R.; Kaur, S.: Coop. Sugar 37 (2006) No. 10, 15-20/ Zuckerind. 132, 607, (2007)
/83/	Lewicki, W.: Einführung in die Vinassen (cms) aus der Zuckerrüben- und Zuckerrohr-Melassefermentation zu Bio-Ethanol, Backhefe, Aminosäuren und organischen Säuren: Vinassen (Seite 1-6), http://www.vinasse.de/vinasseartikel.htm (2002)
/84/	Harms, A.-E.: Untersuchungen zum Futterwert von expandierten Trockenschnitzeln sowie von Vinasse beim Rind, Tierärztliche Hochschule Hannover, Dissertation, (2003)
/85/	Wu, Y.-V.; Nielsen, H.-C.; Bagby, M.-O.: Recovery of protein-rich-by-products from sugar beet stillage after alcohol distillation, J. Agric. Food Chem. 37, 1174-1177, (1989)
/86/	Bouy, F.-A.-M.: Hergebruik van Vinasse: Van vaardeloos residu tot grondstof voor veevoer Chemische Magazine (Supplement of Chemische Weekblad) 45, 676-678, (1981)
/87/	Kovats, J.; Niestrawski Z.: Melasse als Rohstoff der biotechnischen Gewinnung von Zitronensäure, Branntweinwirtschaft 113, 371-381, (1973)
/88/	Schulz Ruuch, J : Zitronensäure, Ullmanns Enzyklopädie der Technischen. Chemie 9, 624-636, (1975)
/89/	Lewicki, W.: HPCV: Hochproteinhaltige, teilentkalisierter und veredelter Melassereste als teilweise Eiweiß- und Melassesubstitution im Wiederkäuerfutter, Kraftfutter 61, 480-482, (1978)
/90/	Wendel, K.: Die gärungschemische Verwertung der Melasse, Zuckerind.14, 265-274, (1961)
/91/	Mazzone, J : Food Engineering International. November, p. 50-52, (1981)
/92/	Debruck, J.; Lewicki, W.: Landwirtschaftliche Forschung, Band 38, S. 4.,(1985)
/93/	Weinreich, O.; Knippel, J.; Eberhardt, W.: Futtermittelrechtliche Vorschriften, Verlag Strothe, Frankfurt (Main) (1989)
/94/	Gerdes. B.: Untersuchungen zum Futterwert (Zusammensetzung, Akzeptanz, Verdaulichkeit) von expandierten Trockenschnitzeln sowie von Zuckerrübenvinasse beim Schwein Hannover, Tierärztliche Hochschule, Dissertation, (2003)

/95/	Lewicki, W.: Proceedings of the UNIDO conference, Vienna, Paper no. 22. , (1979)
/96/	Bhandari, H.-C. et al.: Proceedings of 43 rd Annual convention: Sugar Technologists association of India, (1979)
/97/	Vaccari, G. et al: Int.sugar Ind, Band 101, no. 1204b., (1999)
/98/	Lewicki, W.: Vinasse (Melasserest) Technologie, Anwendung und Vermarktung, Kraftfutter 60, 199-200, (1977)
/99/	Weigand, E.; Kirchgessner, M: Zum Futterwert von zwei eingedickten Melasseresten für Wiederkäuer, Landwirsch. Forschung 40, 51-61, (1987a)
/100/	Trocon, J.-L. ; Demarquilly, C.: La vinasse de mélasse de betteraves pour les ruminantes Productions Animales 4, 245-248, (1989)
/101/	Inra, R.: Ruminant Nutrition: Recommended allowances and feed tables, Verlag Libbey Eurotext, R. JARRIGE (Hrsg.), Paris – London – Rom, (1989)
/102/	Manfredini, M.; Cavani, C.: Distillery effluents as animal feeds: The use of condensed (treated) beet molasses slop (CBMS) in lambs, Zoot. Nutr. Anim. 5, 155-164, (1979b)
/103/	Potter, S.-G.; Moya, A.; Henry, P.-R.; Palmer, A.-Z.; Becker, H.-N.; Ammermann C.-B: Sugarcane condensed molasses solubles as a feed for finishing cattle J. Anim. Sci. 60, 839-846, (1985b)
/104/	Stern, M: Ernährungsphysiologische und presstechnische Untersuchungen eines teilentkalisiereten Zuckerrübenmelasserestes aus der fermentativen Backhefeherstellung im Vergleich zu Zuckerrüben- und Zuckerrohrmelasse für den Einsatz in der Fütterung von Wiederkäuern, Gießen; Justus-Liebig-Univ., Fachb. Agrarwissenschaften, Dissertation, (1992)
/105/	Reinefeld, E., Schneider, F.: Analytische Betriebskontrolle der Zuckerindustrie-Teil B: Vorschriften für die Betriebskontrolle; 2.2.1.5. Verlag Dr. Albert Bartens Berlin.
/106/	Werner, E.: Zuckertechniker-Taschenbuch, Verlag Dr. Albert Bartens, Berlin, S. 166, (1966)
/107/	Rother, B.: Die technische Qualität der Zuckerrübe unter dem Einfluss verschiedener Anbaufaktoren, Dissertation, Universität Göttingen, (1998)
/108/	Persönliche Mitteilung über Werk A, (2003)
/109/	Laborbuch Werk B, (2003)
/110/	Hannover, Wetterstation, (2005)
/111/	Vukov, K.: Sortenabhängigkeit einiger physikalischer Eigenschaften der Zuckerrübe.

	Zuckerind.22. 376-379, (1972)
/112/	Mohsenin, N.N.: Physical properties of plant and animal materials, ISBN 0677-21370-0, (1986)
/113/	Ajdari Rad, M.: Persönliche Mitteilung zum Lävan-Gehalt im Rohextrakt Kampagne Werk Warburg, (2003)
/114/	Dedek, J.: Le carbonate de chaux, Librairie Universitaire, Louvain, (1966)
/115/	Senge, B.: Projekt Strukturverhalten von Hartkaramellen, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lebensmittelrheologie, (2007)
/116/	Belitz, H.-D.; Grosch, W.: Lehrbuch der Lebensmittelchemie, 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, (1992)
/117/	Lichtenthaler, F.-W.: Perspektiven in der Nutzung niedermolekularer Kohlenhydrate als Rohstoffe für die chemische Industrie. Zuckerind 116. 701-712, (1991)
/118/	Bentler Rohrhandel GmbH, Falkensee,: Listenpreise Stahlrohr x.1.403, 11,2006
/119/	Frenkel, J.: Über die Wärmebewegung in festen und flüssigen Körpern. Z. Physik 35 (1925/26) 652-669

13 Anhang

13.1. Temperaturabhängigkeit der Viskosität technische Saccharoselösung

De Guzman	$\ln \eta = A + B \cdot \frac{1}{T}$
Combs und Nations	$\ln \eta = A + B \cdot \frac{T_g}{T}$
Fox und Flory	$\ln \eta = A + B \cdot T^{-6}$
Litovitz	$\ln \eta = A + B \cdot T^{-3}$
Cornelissen u.a.	$\ln \eta = A + B \cdot T^{-C}$
Walther	$\ln(\eta + A) = B \cdot T^{-C}$
Umstätter	$\arcsin \ln \frac{\eta}{\eta_0} = A - B \cdot \ln T$
Le Chartelier	$\ln \eta = A \cdot e^{\frac{C}{T}}$
Bradbury u.a.	$\ln \eta = A + B \cdot e^{\frac{C}{T}}$
Gross und Zimmermann	$\ln \eta = A + B \cdot \frac{\left[1 - e^{\frac{C}{T}}\right]^{\frac{1}{3}}}{1 - \left[1 - e^{\frac{C}{T}}\right]^{\frac{1}{3}}}$
Waterton	$\ln \eta = A + B \cdot \frac{e^{\frac{C}{T}}}{T}$
Jenckel	$\ln \eta - \frac{C}{T} = A + B \cdot \frac{e^{\frac{C}{T}}}{T}$
Vogel	$\ln \eta = A + B \cdot \frac{1}{T - T_g}$

A und B sind Konstanten, T ist absolute Temperatur

Tab.13.2. Kraft-Weg Ergebnisse von einer frischen Rübe (Zuckerfabrik D)

1-a		1-i		2-a		2-a		2-i		2-i	
Kraft	Weg										
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,39	7,52	0,09	4,43	0,31	2,56	0,57	0,94	0,00	4,17	0,00	0,94
0,47	10,34	0,17	6,45	0,39	3,23	0,65	1,35	0,09	4,17	0,05	0,94
0,55	13,29	0,25	8,60	0,47	3,76	0,74	1,62	0,17	6,31	0,13	0,94
0,64	16,52	0,34	7,39	0,56	4,70	0,82	2,29	0,25	8,86	0,22	0,94
0,72	20,14	0,42	10,61	0,64	5,64	0,90	3,09	0,34	8,06	0,30	0,94
0,80	24,17	0,50	13,43	0,72	6,85	0,99	4,03	0,50	13,56	0,38	0,94
0,89	28,73	0,59	16,52	0,81	8,19	1,07	4,97	0,59	16,38	0,47	0,94
0,97	33,43	0,67	19,87	0,89	10,07	1,15	5,51	0,67	19,47	0,55	0,94
1,05	38,66	0,75	23,63	0,97	11,95	1,24	5,37	0,75	22,96	0,63	1,08
1,14	44,17	0,84	27,66	1,06	14,64	1,32	7,25	0,84	26,98	0,72	1,35
1,22	50,07	0,92	31,95	1,14	17,72	1,40	9,13	0,92	31,41	0,80	1,62
1,30	56,11	1,00	36,52	1,22	21,21	1,49	11,41	1,00	36,25	0,88	2,02
1,39	62,42	1,09	41,21	1,31	25,24	1,57	13,96	1,09	41,48	0,97	2,42
1,47	68,73	1,17	46,05	1,39	29,67	1,65	17,05	1,17	46,98	1,05	2,96
1,55	75,44	1,25	51,15	1,47	34,64	1,74	20,41	1,25	52,76	1,13	3,76
1,64	82,02	1,34	56,25	1,56	40,00	1,82	24,43	1,34	58,80	1,22	4,84
1,72	88,86	1,42	61,48	1,64	45,91	1,90	28,46	1,42	64,70	1,30	6,45
1,80	95,57	1,50	66,85	1,72	52,35	1,99	33,29	1,50	70,87	1,38	8,60
1,89	102,42	1,59	72,08	1,81	58,93	2,07	38,26	1,59	77,05	1,47	11,01
1,97	109,39	1,67	77,72	1,89	66,18	2,15	43,63	1,67	83,36	1,55	13,70
2,05	116,37	1,75	83,08	1,97	73,56	2,24	49,27	1,75	89,53	1,63	16,38
2,14	123,35	1,84	88,86	2,06	81,08	2,32	55,44	1,84	95,97	1,72	16,92
2,22	130,60	1,92	94,49	2,14	88,86	2,40	61,48	1,92	102,29	1,80	17,99
2,30	137,72	2,00	100,13	2,22	96,91	2,49	67,92	2,00	108,59	1,88	22,29
2,39	145,23	2,09	105,91	2,31	104,69	2,57	74,50	2,09	115,03	1,97	26,18
2,47	152,61	2,17	111,81	2,39	113,15	2,65	81,08	2,17	121,61	2,05	30,61
2,55	160,13	2,25	117,72	2,47	121,08	2,74	87,79	2,25	128,05	2,13	35,31
2,64	167,78	2,34	123,75	2,56	129,39	2,82	94,64	2,34	134,76	2,22	40,27
2,72	175,57	2,42	129,94	2,64	137,44	2,90	101,34	2,42	141,34	2,30	45,78
2,80	183,22	2,50	135,98	2,72	145,77	2,99	108,18	2,50	148,18	2,38	51,55
2,89	191,40	2,59	142,01	2,81	153,82	3,07	114,90	2,59	154,89	2,47	57,45
2,97	199,32	2,67	148,45	2,89	162,14	3,15	121,88	2,67	161,74	2,55	64,03
3,05	207,78	2,75	154,76	2,97	170,46	3,24	128,59	2,75	168,72	2,63	70,47
3,14	216,10	2,84	161,34	3,06	178,79	3,32	135,58	2,84	175,57	2,72	77,59
3,22	224,69	2,92	167,91	3,14	187,11	3,40	142,41	2,92	182,68	2,80	84,57
3,30	233,42	3,00	174,49	3,22	195,57	3,49	149,66	3,00	190,06	2,88	91,82
3,39	242,55	3,09	181,20	3,31	204,02	3,57	156,77	3,09	197,18	2,97	99,20
3,47	251,67	3,17	188,18	3,39	212,61	3,65	164,02	3,17	204,56	3,05	106,85
3,55	261,07	3,25	195,16	3,47	221,20	3,74	171,27	3,25	212,08	3,13	114,63
3,64	270,33	3,34	202,41	3,56	230,06	3,82	178,92	3,34	219,86	3,22	122,56
3,72	279,98	3,42	209,66	3,64	238,38	3,90	186,30	3,42	227,24	3,30	130,60
3,80	289,93	3,50	217,18	3,72	247,38	3,99	194,09	3,50	235,16	3,38	138,92
3,89	299,85	3,59	224,56	3,81	256,24	4,07	202,14	3,59	242,55	3,47	147,24
3,97	309,92	3,67	232,21	3,89	265,10	4,15	210,06	3,67	249,93	3,55	155,70
4,05	319,99	3,75	239,99	3,97	273,81	4,24	218,12	3,75	257,58	3,63	164,16
4,14	330,32	3,84	247,91	4,06	282,80	4,32	226,44	3,84	264,83	3,72	172,88
4,22	340,79	3,92	255,83	4,14	291,54	4,40	234,63	3,92	271,94	3,80	181,87
4,30	350,86	4,00	263,75	4,22	300,25	4,49	243,35	4,00	278,92	3,88	190,73

1-a		1-i		2-a		2-a		2-i		2-i	
Kraft	Weg										
4,39	361,33	4,09	271,94	4,31	308,58	4,57	251,54	4,09	286,04	3,97	199,59
4,47	371,26	4,17	280,26	4,39	317,44	4,65	260,53	4,17	292,47	4,05	208,85
4,55	380,92	4,25	287,91	4,47	325,22	4,74	268,99	4,25	297,98	4,13	218,12
4,64	390,32	4,34	296,09	4,56	332,88	4,82	277,71	4,34	303,75	4,22	226,97
4,72	399,45	4,42	303,35	4,64	340,13	4,90	286,71	4,42	307,90	4,30	235,97
4,80	404,15	4,50	310,45	4,72	172,08	4,99	295,57	4,50	314,48	4,38	245,10
4,89	400,25	4,59	317,97	4,81	151,27	5,07	304,02	4,59	249,12	4,47	253,42
5,05	351,80	4,67	325,10	4,89	166,57	5,15	313,14	4,67	182,55	4,55	259,86
5,22	312,61	4,75	326,17	4,97	171,81	5,24	321,86	4,75	176,64	4,63	266,30
5,30	277,31	4,84	326,71	5,06	176,51	5,32	326,71	4,84	163,62	4,72	274,22
5,39	253,42	4,92	303,75	5,14	179,59	5,40	321,73	4,92	115,16	4,80	282,01
5,47	224,69	5,00	283,22	5,22	179,73	5,49	321,20	5,00	105,77	4,88	289,65
5,55	207,24	5,09	268,05	5,31	178,52	5,57	313,02	5,09	104,30	4,97	296,09
5,64	200,53	5,17	226,44	5,39	174,22	5,65	314,48	5,17	103,90	5,05	302,14
5,72	197,71	5,25	150,87	5,47	169,79	5,74	312,48	5,25	105,11	5,13	307,24
5,80	198,25	5,34	147,11	5,56	166,97	5,82	297,43	5,34	105,24	5,22	310,20
5,89	201,20	5,42	144,16	5,64	155,30	5,90	287,78	5,42	105,64	5,30	300,25
5,97	205,10	5,50	140,13	5,72	147,79	5,99	268,32	5,50	106,85	5,38	272,20
6,05	207,91	5,59	137,44	5,81	146,71	6,07	242,01	5,59	108,99	5,47	267,51
6,14	207,78	5,67	135,16	5,89	145,36	6,15	207,91	5,67	111,68	5,55	263,35
6,22	206,57	5,75	132,76	5,97	143,22	6,24	190,73	5,75	113,15	5,63	236,10
6,30	204,83	5,84	131,95	6,06	139,86	6,32	176,24	5,84	114,23	5,72	226,04
6,39	206,57	5,92	133,55	6,14	136,51	6,40	162,01	5,92	113,95	5,80	222,68
6,47	211,67	6,00	136,10	6,22	135,70	6,49	156,51	6,00	114,63	5,88	217,85
6,55	216,91	6,09	139,46	6,31	132,08	6,57	147,79	6,09	117,05	5,97	207,51
6,64	223,08	6,17	143,89	6,39	126,44	6,65	142,15	6,17	119,32	6,05	201,34
6,72	228,45	6,25	147,79	6,47	129,13	6,74	136,51	6,25	120,80	6,13	195,70
6,80	232,48	6,34	151,40	6,56	135,83	6,82	124,70	6,34	121,48	6,22	192,08
6,89	235,43	6,42	152,75	6,64	140,26	6,90	112,21	6,42	123,49	6,30	187,24
6,97	237,58	6,50	153,28	6,72	143,08	6,99	103,75	6,50	124,70	6,38	177,58
7,05	240,67	6,59	153,03	6,81	147,24	7,07	96,78	6,59	127,52	6,47	171,54
7,14	243,48	6,67	154,76	6,89	141,07	7,15	90,74	6,67	131,27	6,55	167,38
7,22	246,57	6,75	156,77	6,97	139,33	7,24	87,39	6,75	134,49	6,63	164,42
7,30	247,51	6,84	156,24	7,06	143,22	7,32	84,57	6,84	137,19	6,72	163,22
7,39	247,91	6,92	157,04	7,14	147,38	7,40	81,75	6,92	140,13	6,80	161,07
7,47	247,38	7,00	159,19	7,22	150,60	7,49	80,68	7,00	143,22	6,88	157,04
7,55	243,22	7,09	160,13	7,31	154,49	7,57	80,14	7,09	146,30	6,97	150,73
7,64	237,31	7,17	158,79	7,39	158,92	7,65	80,41	7,17	148,45	7,05	149,39
7,72	229,66	7,25	157,98	7,47	162,41	7,74	81,75	7,25	151,94	7,13	148,32
7,80	224,83	7,34	158,52	7,56	164,02	7,82	84,17	7,34	154,36	7,22	148,72
7,89	222,68	7,42	158,92	7,64	166,04	7,90	86,18	7,42	157,04	7,30	148,85
7,97	221,74	7,50	160,13	7,72	170,46	7,99	88,86	7,50	157,31	7,38	151,00
8,05	220,40	7,59	161,47	7,81	174,76	8,07	92,62	7,59	158,38	7,47	152,88
8,14	219,32	7,67	161,61	7,89	180,26	8,15	97,18	7,67	156,91	7,55	154,09
8,22	218,25	7,75	159,46	7,97	184,42	8,24	101,48	7,75	160,67	7,63	151,94
8,30	218,25	7,84	157,44	8,06	186,71	8,32	104,84	7,84	163,48	7,72	150,46
8,39	218,92	7,92	157,18	8,14	188,05	8,40	109,67	7,92	168,32	7,80	146,84
8,47	218,38	8,0	156,64	8,22	186,97	8,49	114,63	8,00	172,75	7,88	152,88
8,55	219,73	8,0	156,3	8,31	185,10	8,57	120,67	8,09	175,97	7,97	157,18
8,64	220,40	8,1	155,8	8,39	183,75	8,65	126,31	8,17	178,25	8,05	160,13
8,72	221,34	8,2	157,5	8,47	184,29	8,74	131,67	8,25	177,98	8,13	162,14

Tab. 13.3. Kraft-Weg Ergebnisse von einer Rübe 12 Tage nach der Ernte (Zuckerfabrik D)

1-a		1-i		2-a		2-a		2-i		2-i	
Kraft	Weg										
0,00	0,00	0,01	-0,53	0,04	-0,13	0,24	-0,53	0,00	0,00	0,00	0,00
0,03	1,75	0,09	-0,40	0,12	-0,13	0,32	-0,40	0,00	0,94	0,02	2,29
0,12	1,88	0,17	-0,26	0,20	0,41	0,41	-0,40	0,08	1,08	0,10	2,29
0,20	3,76	0,26	0,27	0,29	1,08	0,49	-0,13	0,25	2,42	0,18	3,76
0,28	5,51	0,34	0,94	0,37	1,48	0,57	0,00	0,33	3,09	0,27	5,64
0,37	7,25	0,42	1,62	0,45	2,02	0,66	0,94	0,41	3,90	0,35	7,25
0,45	9,00	0,51	2,02	0,54	2,56	0,74	1,62	0,50	4,84	0,43	9,00
0,53	11,01	0,67	4,43	0,62	3,23	0,82	2,29	0,58	5,91	0,52	10,88
0,62	13,16	0,76	5,11	0,70	4,03	0,91	3,23	0,66	6,98	0,60	13,03
0,70	15,71	0,84	5,11	0,79	5,11	0,99	4,70	0,75	7,52	0,68	15,44
0,78	18,53	0,92	7,39	0,87	6,18	1,07	5,24	0,83	6,85	0,77	18,13
0,87	21,62	1,01	10,47	0,95	7,66	1,16	5,11	0,91	9,13	0,85	20,81
0,95	25,11	1,09	14,23	1,04	9,00	1,24	7,25	1,00	10,74	0,93	23,90
1,03	28,60	1,17	17,99	1,12	9,54	1,32	9,67	1,08	12,62	1,02	26,98
1,12	32,35	1,26	22,42	1,20	10,21	1,41	11,82	1,16	14,64	1,10	30,74
1,20	36,11	1,34	27,25	1,29	13,03	1,49	14,64	1,25	17,19	1,18	34,77
1,28	39,60	1,42	32,76	1,37	15,84	1,57	17,45	1,33	19,74	1,27	38,93
1,37	42,15	1,51	38,39	1,45	19,07	1,66	21,08	1,41	22,96	1,35	43,49
1,45	47,66	1,59	44,70	1,54	22,56	1,74	24,84	1,50	26,31	1,43	48,06
1,53	53,43	1,67	51,15	1,62	26,58	1,82	29,13	1,58	30,07	1,52	52,76
1,62	59,20	1,76	57,99	1,70	31,15	1,91	33,83	1,66	34,37	1,60	57,59
1,70	65,37	1,84	64,70	1,79	35,98	1,99	38,93	1,75	38,93	1,68	62,56
1,78	71,55	1,92	71,95	1,87	41,21	2,07	44,17	1,83	43,90	1,77	67,79
1,87	77,86	2,01	78,80	1,95	46,98	2,16	50,07	1,91	49,40	1,85	72,88
1,95	84,43	2,09	86,05	2,04	52,89	2,24	55,84	2,00	55,04	1,93	78,26
2,03	91,28	2,17	93,15	2,12	59,33	2,32	62,02	2,08	61,35	2,02	83,48
2,12	97,98	2,26	100,27	2,20	66,05	2,41	68,19	2,16	67,79	2,10	89,00
2,20	105,11	2,34	107,12	2,29	73,03	2,49	74,64	2,25	74,77	2,18	94,49
2,28	112,21	2,42	114,50	2,37	80,26	2,57	80,94	2,33	82,02	2,27	100,00
2,37	119,59	2,51	121,47	2,45	87,91	2,66	87,39	2,41	89,67	2,35	105,51
2,45	127,11	2,59	128,85	2,54	95,44	2,74	93,55	2,50	97,58	2,43	111,40
2,53	134,63	2,67	135,83	2,62	103,48	2,82	100,13	2,58	105,77	2,52	117,04
2,62	142,41	2,76	143,22	2,70	111,15	2,91	106,45	2,66	113,82	2,60	122,81
2,70	150,06	2,84	150,46	2,79	119,46	2,99	113,15	2,75	122,56	2,68	128,59
2,78	158,12	2,92	157,98	2,87	127,52	3,07	119,59	2,83	131,14	2,77	134,63
2,87	166,17	3,01	165,23	2,95	135,83	3,16	126,31	2,91	140,13	2,85	140,67
2,95	174,49	3,09	173,02	3,04	144,29	3,24	133,02	3,00	148,99	2,93	146,71
3,03	182,68	3,17	180,13	3,12	152,75	3,32	140,13	3,08	158,12	3,02	152,88
3,12	191,27	3,26	188,18	3,20	161,20	3,41	147,11	3,16	167,24	3,10	159,32
3,20	199,73	3,34	195,97	3,29	169,93	3,49	154,36	3,25	176,64	3,18	165,50
3,28	208,45	3,42	203,89	3,37	178,38	3,57	161,47	3,33	185,77	3,27	172,08
3,37	217,31	3,51	211,81	3,45	187,38	3,66	169,26	3,41	195,43	3,35	178,52
3,45	226,30	3,59	220,26	3,54	195,97	3,74	176,51	3,50	204,56	3,43	185,10
3,53	235,16	3,67	228,32	3,62	204,96	3,82	184,29	3,58	214,36	3,52	191,67
3,62	244,29	3,76	236,91	3,70	213,95	3,91	192,21	3,66	223,75	3,60	198,38
3,70	253,28	3,84	245,23	3,79	222,81	3,99	200,13	3,75	231,81	3,68	204,96
3,78	262,41	3,92	254,09	3,87	232,08	4,07	208,18	3,83	240,40	3,77	211,27
3,87	271,54	4,01	262,41	3,95	241,20	4,16	216,64	3,91	250,06	3,85	216,37
3,95	280,80	4,09	271,39	4,04	250,33	4,24	224,83	4,00	259,18	3,93	222,41

1-a		1-i		2-a		2-a		2-i		2-i	
Kraft	Weg										
4,03	289,93	4,17	280,13	4,12	259,99	4,32	233,55	4,08	268,85	4,02	225,10
4,12	299,19	4,26	289,39	4,20	269,39	4,41	241,87	4,16	277,44	4,10	229,93
4,20	308,31	4,34	297,43	4,29	278,64	4,49	250,73	4,25	282,41	4,18	233,55
4,28	317,04	4,42	306,84	4,37	287,11	4,57	259,73	4,33	281,46	4,27	238,65
4,37	325,35	4,51	315,03	4,45	292,75	4,66	268,18	4,41	281,06	4,35	242,28
4,45	334,08	4,59	322,80	4,54	300,12	4,74	277,03	4,50	176,91	4,43	243,89
4,53	341,73	4,67	325,10	4,62	307,77	4,82	285,62	4,58	187,65	4,52	245,10
4,62	348,58	4,76	324,15	4,70	307,77	4,91	293,02	4,66	183,48	4,60	249,12
4,70	296,09	4,84	329,65	4,79	116,52	4,99	300,67	4,75	178,38	4,68	252,08
4,78	262,00	4,92	333,91	4,87	106,57	5,07	307,37	4,83	185,77	4,77	253,69
4,87	237,31	5,01	322,68	4,95	121,74	5,16	312,87	4,91	190,87	4,85	248,72
4,95	222,81	5,09	317,70	5,04	130,20	5,24	317,17	5,00	190,87	4,93	238,12
5,03	216,51	5,17	322,54	5,12	137,19	5,32	300,12	5,08	186,57	5,02	225,77
5,12	192,48	5,26	316,36	5,20	140,67	5,41	286,44	5,16	183,35	5,10	214,89
5,20	184,42	5,34	291,54	5,29	140,53	5,49	281,06	5,25	172,34	5,18	206,44
5,28	184,29	5,42	264,16	5,37	140,67	5,57	268,32	5,33	163,62	5,27	192,08
5,37	181,87	5,51	221,47	5,45	138,25	5,66	249,12	5,41	152,61	5,35	176,51
5,45	179,59	5,59	190,87	5,54	130,46	5,74	215,43	5,50	144,96	5,43	174,76
5,53	175,83	5,67	170,46	5,62	125,91	5,82	203,62	5,58	143,22	5,52	175,30
5,62	172,61	5,76	154,36	5,70	121,61	5,91	195,57	5,66	140,93	5,60	175,16
5,70	171,54	5,84	148,18	5,79	122,01	5,99	192,61	5,75	145,10	5,68	174,63
5,78	169,26	5,92	132,48	5,87	122,01	6,07	188,85	5,83	149,26	5,77	172,21
5,87	166,71	6,01	116,52	5,95	124,83	6,16	182,14	5,91	153,28	5,85	165,90
5,95	151,81	6,09	112,89	6,04	126,71	6,24	178,25	6,00	156,51	5,93	158,52
6,03	138,65	6,17	111,54	6,12	129,79	6,32	177,18	6,08	160,67	6,02	158,52
6,12	138,38	6,26	114,50	6,20	131,14	6,41	178,65	6,16	156,64	6,10	158,38
6,20	140,40	6,34	118,93	6,29	131,95	6,49	179,73	6,25	154,36	6,18	158,12
6,28	140,93	6,42	121,20	6,37	134,76	6,57	179,46	6,33	160,93	6,27	157,04
6,37	140,53	6,51	124,56	6,45	138,38	6,66	179,46	6,41	166,57	6,35	156,51
6,45	138,12	6,59	130,06	6,54	143,35	6,74	181,07	6,50	170,73	6,43	157,04
6,53	135,98	6,67	134,37	6,62	149,12	6,82	179,06	6,58	160,26	6,52	159,32
6,62	136,77	6,76	140,53	6,70	154,63	6,91	172,48	6,66	155,83	6,60	164,02
6,70	135,58	6,84	146,71	6,79	159,59	6,99	168,99	6,75	160,93	6,68	167,78
6,78	131,67	6,92	153,55	6,87	161,61	7,07	165,63	6,83	161,34	6,77	165,63
6,87	129,93	7,01	158,92	6,95	162,81	7,16	162,14	6,91	161,61	6,85	168,32
6,95	130,20	7,09	161,34	7,04	155,57	7,24	156,91	7,00	164,16	6,93	174,36
7,03	129,79	7,17	166,44	7,12	160,40	7,32	155,30	7,08	168,59	7,02	178,79
7,12	131,81	7,26	169,93	7,20	165,77	7,41	154,09	7,16	173,95	7,10	182,68
7,20	135,03	7,34	173,69	7,29	168,85	7,49	158,12	7,25	178,38	7,18	185,90
7,28	138,25	7,42	178,92	7,37	169,12	7,57	159,73	7,33	181,74	7,27	188,72
7,37	141,74	7,51	182,14	7,45	173,69	7,66	158,92	7,41	182,95	7,35	190,73
7,45	145,50	7,59	184,69	7,54	171,14	7,74	158,38	7,50	184,29	7,43	194,89
7,53	149,79	7,67	184,02	7,62	171,67	7,82	157,18	7,58	184,69	7,52	196,91
7,62	153,28	7,76	184,69	7,70	176,10	7,91	156,10	7,66	188,45	7,60	198,92
7,70	155,70	7,84	185,10	7,79	179,46	7,99	154,76	7,75	199,06	7,68	201,47
7,78	156,37	7,92	183,62	7,87	182,41	8,07	154,63	7,83	202,28	7,77	205,36
7,87	155,83	8,01	183,48	7,95	185,50	8,16	154,89	7,91	200,80	7,85	210,73
7,95	158,79	8,09	188,18	8,04	189,66	8,24	154,36	8,00	207,11	7,93	215,16
8,03	159,32	8,17	190,87	8,12	194,76	8,32	155,16	8,08	215,30	8,02	217,98
8,12	158,65	8,26	192,34	8,20	198,38	8,41	156,64	8,16	221,20	8,10	222,28
8,20	157,31	8,34	192,75	8,29	200,40	8,49	158,12	8,25	221,34	8,18	216,64

1-a		1-i		2-a		2-a		2-i		2-i	
Kraft	Weg										
8,28	154,36	8,42	192,34	8,37	199,59	8,57	158,79	8,33	200,13	8,27	214,49
8,37	150,20	8,51	192,34	8,45	197,44	8,66	160,80	8,41	204,96	8,35	216,51
8,45	142,14	8,59	193,95	8,54	195,83	8,74	163,48	8,50	203,75	8,43	222,81
8,53	138,38	8,67	191,67	8,62	195,30	8,82	164,16	8,58	204,42	8,52	226,84
8,62	139,46	8,76	191,00	8,70	188,32	8,91	165,77	8,66	208,59	8,60	231,81
8,70	135,30	8,84	191,00	8,79	180,67	8,99	170,06	8,75	211,40	8,68	234,63
8,78	127,92	8,92	190,60	8,87	177,31	9,07	171,81	8,83	211,94	8,77	240,40
8,87	128,85	9,01	189,39	8,95	172,48	9,16	174,36	8,91	214,89	8,85	248,99
8,95	131,14	9,09	189,12	9,04	165,36	9,24	176,77	9,00	212,48	8,93	252,75
9,03	137,19	9,17	190,46	9,12	161,87	9,32	180,53	9,08	213,42	9,02	259,73
9,12	145,36	9,26	193,02	9,20	161,34	9,41	185,50	9,16	214,49	9,10	269,12
9,20	151,94	9,34	193,69	9,29	163,89	9,49	185,36	9,25	220,13	9,18	270,60
9,28	158,25	9,42	192,75	9,37	168,18	9,57	188,45	9,33	224,83	9,27	272,08
9,37	166,84	9,51	188,85	9,45	173,55	9,66	195,30	9,41	232,34	9,35	276,63
9,45	173,02	9,59	185,63	9,54	181,34	9,74	199,32	9,50	241,87	9,43	280,66
9,53	179,19	9,67	183,48	9,62	189,79	9,82	203,22	9,58	250,87	9,52	287,78
9,62	185,63	9,76	186,97	9,70	199,73	9,91	207,78	9,66	257,71	9,60	294,88
9,70	194,36	9,84	190,73	9,79	209,12	9,99	211,94	9,75	259,73	9,68	298,64
9,78	203,62	9,92	195,16	9,87	219,32	10,07	212,34	9,83	262,14	9,77	301,20
9,87	214,09	10,01	197,71	9,95	228,18	10,16	215,16	9,91	270,06	9,85	298,38
9,95	225,10	10,09	198,25	10,04	238,52	10,24	220,53	10,00	272,34	9,93	294,48
10,03	236,10	10,17	200,93	10,12	248,59	10,32	224,69	10,08	280,40	10,02	292,61
10,12	246,57	10,26	206,44	10,20	253,55	10,41	222,01	10,16	292,47	10,10	293,55
10,20	256,64	10,34	215,03	10,29	263,08	10,49	219,32	10,25	300,52	10,18	297,70
10,28	269,12	10,42	223,22	10,37	267,51	10,57	213,55	10,33	303,22	10,27	301,73
10,37	283,62	10,51	231,40	10,45	264,42	10,66	211,54	10,41	303,75	10,35	303,07
10,45	283,75	10,59	242,81	10,54	275,70	10,74	212,61	10,50	308,05	10,43	305,76
10,53	296,77	10,67	250,20	10,62	289,93	10,82	211,27	10,58	311,53	10,52	305,89
10,62	304,55	10,76	256,24	10,70	303,47	10,91	205,63	10,66	310,87	10,60	310,06
10,70	310,32	10,84	263,21	10,79	313,94	10,99	207,24	10,75	316,51	10,68	314,88
10,78	305,23	10,92	274,09	10,87	324,41	11,07	213,55	10,83	319,86	10,77	321,86
10,87	306,97	11,01	290,73	10,95	346,16	11,16	220,53	10,91	320,39	10,85	328,17
10,95	313,42	11,09	309,11	11,04	361,60	11,24	233,42	11,00	319,31	10,93	333,68
11,03	327,10	11,17	326,71	11,12	377,97	11,32	244,56	11,08	324,68	11,02	332,74
11,12	337,70	11,26	347,64	11,20	392,74	11,41	254,89	11,16	330,86	11,10	330,19
11,20	346,29	11,34	368,17	11,29	408,31	11,49	262,00	11,25	341,86	11,18	326,71
11,28	358,11	11,42	390,59	11,37	419,18	11,57	269,78	11,33	346,03	11,27	331,13
11,37	371,26	11,51	414,35	11,62	463,62	11,66	281,74	11,41	349,38	11,35	336,50
11,45	380,52	11,59	437,84	11,70	482,79	11,74	294,36	11,50	349,78	11,43	339,45
11,53	392,33	11,84	512,72	11,79	498,75	11,82	308,05	11,58	350,19	11,52	347,37
11,62	400,52	11,92	541,72	11,87	519,17	11,91	324,55	11,66	352,60	11,60	351,26
11,70	404,55			11,95	532,60	11,99	338,78	11,75	356,50	11,68	354,62
11,95	440,92							11,83	362,40	11,77	359,85
								11,91	373,94	11,85	367,23

Tab. 13.4. Kraft-Weg Ergebnisse von einer Rübe 19 Tage nach der Ernte (Zuckerfabrik D)

1-a		1-i		2-a		2-a		2-i		2-i	
Kraft	Weg										
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	4,70	0,07	12,22	0,00	1,35	0,00	6,72	0,02	2,69	0,04	4,43
0,09	4,70	0,16	14,90	0,04	1,35	0,05	6,98	0,10	2,69	0,12	4,70
0,17	6,85	0,24	21,21	0,12	1,48	0,13	7,52	0,19	4,03	0,21	4,97
0,25	10,21	0,32	26,18	0,20	3,63	0,22	11,41	0,27	5,78	0,29	6,58
0,34	12,62	0,41	30,34	0,29	5,51	0,30	14,64	0,35	7,12	0,37	9,00
0,42	15,17	0,49	34,10	0,37	7,39	0,38	17,86	0,44	8,73	0,46	11,28
0,50	17,59	0,57	37,32	0,45	9,27	0,47	20,68	0,52	10,61	0,54	13,83
0,59	20,27	0,66	40,81	0,54	11,28	0,55	23,76	0,60	12,35	0,62	16,65
0,75	26,45	0,74	46,45	0,62	13,43	0,63	26,58	0,69	14,23	0,71	19,47
0,84	29,54	0,82	51,95	0,70	16,11	0,72	29,80	0,77	16,38	0,79	22,69
0,92	32,35	0,91	57,45	0,79	19,07	0,80	31,55	0,85	18,80	0,87	26,05
1,00	34,37	0,99	62,96	0,87	22,15	0,88	33,70	0,94	21,35	0,96	29,67
1,09	36,92	1,07	68,73	0,95	25,51	0,97	39,07	1,02	23,63	1,04	33,43
1,17	42,15	1,16	74,64	1,04	29,00	1,05	44,03	1,10	24,84	1,12	37,72
1,25	47,25	1,24	80,26	1,12	32,76	1,13	49,00	1,19	26,58	1,21	41,88
1,34	52,49	1,32	86,18	1,20	36,38	1,22	54,37	1,27	30,61	1,29	46,31
1,42	58,26	1,41	91,95	1,29	39,33	1,30	59,60	1,35	34,37	1,37	50,88
1,50	64,03	1,49	97,71	1,37	42,02	1,38	65,37	1,44	38,26	1,46	55,71
1,59	70,21	1,57	103,48	1,45	47,92	1,47	70,87	1,52	42,29	1,54	60,68
1,67	76,65	1,66	109,39	1,54	53,29	1,55	76,92	1,60	46,45	1,62	65,78
1,75	83,49	1,74	115,31	1,62	58,80	1,63	82,96	1,69	50,74	1,71	70,87
1,84	90,21	1,82	121,08	1,70	64,30	1,72	89,27	1,77	55,31	1,79	76,38
1,92	97,45	1,91	126,97	1,79	69,80	1,80	95,44	1,85	59,87	1,87	81,75
2,00	104,69	1,99	133,02	1,87	75,44	1,88	101,88	1,94	64,84	1,96	87,39
2,09	112,34	2,07	139,06	1,95	80,94	1,97	108,46	2,02	69,80	2,04	92,89
2,17	119,74	2,16	144,97	2,04	86,58	2,05	115,43	2,10	74,90	2,12	98,66
2,25	127,65	2,24	151,14	2,12	92,09	2,13	122,28	2,19	80,14	2,21	104,56
2,34	135,43	2,32	157,31	2,20	97,71	2,22	129,54	2,27	85,50	2,29	110,47
2,42	143,48	2,41	163,62	2,29	103,35	2,30	136,77	2,35	90,88	2,37	116,52
2,50	151,67	2,49	170,06	2,37	108,99	2,38	144,29	2,44	96,38	2,46	122,69
2,59	159,86	2,57	176,51	2,45	114,76	2,47	152,08	2,52	102,02	2,54	128,85
2,67	167,91	2,66	182,68	2,54	120,40	2,55	159,99	2,60	107,51	2,62	135,03
2,75	176,51	2,74	189,53	2,62	126,17	2,63	167,38	2,69	113,15	2,71	141,20
2,84	184,96	2,82	196,24	2,70	131,81	2,72	175,16	2,77	119,06	2,79	147,65
2,92	193,55	2,91	203,08	2,79	137,85	2,80	183,08	2,85	124,83	2,87	154,22
3,00	202,28	2,99	209,79	2,87	143,76	2,88	191,14	2,94	130,60	2,96	160,67
3,09	211,14	3,07	216,91	2,95	149,79	2,97	198,92	3,02	136,51	3,04	167,24
3,17	219,99	3,16	224,02	3,04	155,97	3,05	206,84	3,10	142,55	3,12	174,09
3,25	229,26	3,24	231,14	3,12	162,28	3,13	214,63	3,19	148,59	3,21	180,67
3,34	238,38	3,32	238,65	3,20	168,59	3,22	222,55	3,27	154,63	3,29	187,78
3,42	248,05	3,41	245,90	3,29	175,03	3,30	229,12	3,35	160,80	3,37	194,63
3,50	257,31	3,49	253,42	3,37	181,61	3,38	236,64	3,44	166,97	3,46	201,74
3,59	267,11	3,57	261,07	3,45	188,32	3,47	244,56	3,52	173,15	3,54	208,72
3,67	276,91	3,66	268,99	3,54	195,03	3,55	251,94	3,60	179,59	3,62	216,10
3,75	286,97	3,74	276,51	3,62	202,28	3,63	258,38	3,69	185,90	3,71	222,95
3,84	297,03	3,82	284,29	3,70	209,12	3,72	262,41	3,77	192,08	3,79	230,33
3,92	307,50	3,91	292,21	3,79	216,24	3,80	265,36	3,85	198,79	3,87	237,71
4,00	317,44	3,99	299,59	3,87	224,02	3,88	270,33	3,94	204,96	3,96	244,83

1-a		1-i		2-a		2-a		2-i		2-i	
Kraft	Weg										
4,09	327,90	4,07	306,97	3,95	231,27	3,97	272,61	4,02	211,27	4,04	251,81
4,17	337,97	4,16	314,35	4,04	238,79	4,05	272,48	4,10	217,18	4,12	258,92
4,25	347,23	4,24	321,20	4,12	246,44	4,13	274,49	4,19	223,08	4,21	266,17
4,34	355,15	4,32	321,86	4,20	254,22	4,22	278,38	4,27	228,99	4,29	270,09
4,42	331,93	4,41	286,83	4,29	262,01	4,30	277,58	4,35	233,82	4,37	199,73
4,50	336,36	4,49	293,27	4,37	269,26	4,38	275,02	4,44	238,65	4,46	197,04
4,59	344,41	4,57	289,25	4,45	268,45	4,47	248,32	4,52	241,01	4,54	206,71
4,67	348,31	4,66	250,20	4,54	271,14	4,55	212,88	4,60	241,62	4,62	211,81
4,75	349,52	4,74	248,45	4,62	279,45	4,63	192,48	4,69	82,96	4,71	211,27
4,84	348,58	4,82	241,34	4,70	285,36	4,72	169,53	4,77	92,09	4,79	216,24
4,92	348,84	4,91	231,67	4,79	285,62	4,80	145,50	4,85	103,48	4,87	219,99
5,00	342,67	4,99	221,47	4,87	284,29	4,88	135,30	4,94	111,15	4,96	222,68
5,09	318,65	5,07	204,69	4,95	286,30	4,97	132,48	5,02	117,98	5,04	224,02
5,17	288,59	5,16	191,40	5,04	219,06	5,05	121,61	5,10	123,90	5,12	224,56
5,25	274,22	5,24	183,48	5,12	210,73	5,13	112,61	5,19	128,18	5,21	219,99
5,34	245,63	5,32	179,59	5,20	219,46	5,22	112,09	5,27	131,55	5,29	213,69
5,42	208,85	5,41	178,79	5,29	221,34	5,30	113,55	5,35	129,94	5,37	203,75
5,50	189,93	5,49	176,51	5,37	220,53	5,38	116,92	5,44	127,78	5,46	196,64
5,59	177,85	5,57	175,43	5,45	216,91	5,47	121,08	5,52	131,27	5,54	193,55
5,67	172,21	5,66	175,03	5,54	213,95	5,55	125,91	5,60	134,37	5,62	190,73
5,75	170,06	5,74	173,15	5,62	208,72	5,63	130,46	5,69	117,05	5,71	188,59
5,84	164,29	5,82	171,14	5,70	201,47	5,72	133,28	5,77	120,93	5,79	184,69
5,92	149,79	5,91	167,51	5,79	197,04	5,80	90,21	5,85	124,02	5,87	178,92
6,00	148,05	5,99	165,50	5,87	195,57	5,88	109,79	5,94	126,57	5,96	176,64
6,09	151,54	6,07	162,01	5,95	196,10	5,97	124,17	6,02	131,27	6,04	170,46
6,17	153,28	6,16	156,91	6,04	196,10	6,05	135,58	6,10	133,69	6,12	156,24
6,25	153,69	6,24	154,22	6,12	194,36	6,13	145,36	6,19	133,42	6,21	155,16
6,34	154,76	6,32	149,79	6,20	195,83	6,22	152,61	6,27	135,70	6,29	156,91
6,42	156,77	6,41	144,42	6,29	188,32	6,30	158,92	6,35	139,19	6,37	156,51
6,50	157,58	6,49	141,74	6,37	177,98	6,38	163,62	6,44	142,81	6,46	157,18
6,59	162,95	6,57	137,19	6,45	168,72	6,47	167,24	6,52	143,62	6,54	158,79
6,67	170,87	6,66	133,42	6,54	167,24	6,55	168,72	6,60	146,04	6,62	161,47
6,75	177,58	6,74	131,27	6,62	163,35	6,63	172,48	6,69	148,45	6,71	163,75
6,84	182,28	6,82	128,18	6,70	162,01	6,72	174,49	6,77	147,65	6,79	159,46
6,92	188,59	6,91	117,45	6,79	159,59	6,80	175,97	6,85	148,18	6,87	149,79
7,00	190,73	6,99	111,15	6,87	159,86	6,88	177,71	6,94	151,27	6,96	146,04
7,09	193,69	7,07	107,12	6,95	163,08	6,97	180,67	7,02	153,55	7,04	144,42
7,17	197,71	7,16	104,30	7,04	163,75	7,05	181,87	7,10	156,24	7,12	147,38
7,25	200,26	7,24	103,23	7,12	162,01	7,13	184,42	7,19	160,26	7,21	149,93
7,34	202,95	7,32	102,14	7,20	163,08	7,22	188,59	7,27	163,22	7,29	149,00
7,42	205,77	7,41	100,81	7,29	164,16	7,30	192,34	7,35	167,11	7,37	151,94
7,50	208,18	7,49	99,60	7,37	163,22	7,38	194,09	7,44	169,12	7,46	152,88
7,59	212,88	7,57	100,13	7,45	161,61	7,47	198,38	7,52	170,73	7,54	150,46
7,67	216,77	7,66	102,82	7,54	161,87	7,55	202,14	7,60	174,09	7,62	144,16
7,75	220,93	7,74	105,64	7,62	162,41	7,63	207,65	7,69	178,12	7,71	141,47
7,84	225,10	7,82	107,38	7,70	160,40	7,72	212,88	7,77	182,01	7,79	136,64
7,92	228,59	7,91	110,20	7,79	159,99	7,80	215,83	7,85	184,69	7,87	132,48
8,00	231,67	7,99	113,55	7,87	159,06	7,88	219,46	7,94	187,65	7,96	132,21
8,09	236,37	8,07	116,64	7,95	157,44	7,97	222,28	8,02	189,12	8,04	128,99

1-a		1-i		2-a		2-a		2-i		2-i	
Kraft	Weg										
8,17	240,13	8,16	115,84	8,04	159,19	8,05	225,50	8,10	191,00	8,12	127,78
8,25	242,14	8,24	119,06	8,12	162,95	8,13	230,06	8,19	193,02	8,21	128,18
8,34	238,92	8,32	123,35	8,20	166,97	8,22	234,22	8,27	197,04	8,29	126,31
8,42	237,85	8,41	126,97	8,29	172,61	8,30	239,73	8,35	197,98	8,37	127,52
8,50	236,24	8,49	131,95	8,37	178,38	8,38	243,48	8,44	201,61	8,46	131,00
8,59	234,76	8,57	135,98	8,45	183,62	8,47	234,76	8,52	200,26	8,54	137,19
8,67	235,83	8,66	141,34	8,54	189,26	8,55	238,65	8,60	203,48	8,62	143,48
8,75	239,06	8,74	144,02	8,62	194,89	8,63	242,68	8,69	207,38	8,71	148,72
8,84	242,41	8,82	140,54	8,70	195,43	8,72	244,16	8,77	214,22	8,79	153,03
8,92	243,48	8,91	142,41	8,79	195,70	8,80	248,05	8,85	221,20	8,87	155,03
9,00	243,22	8,99	146,30	8,87	198,38	8,88	252,88	8,94	225,50	8,96	160,13
9,09	234,63	9,07	147,24	8,95	197,85	8,97	261,20	9,02	229,66	9,04	164,96
9,17	233,42	9,16	146,84	9,04	175,57	9,05	269,79	9,10	237,71	9,12	167,78
9,25	234,89	9,24	148,59	9,12	169,93	9,13	276,23	9,19	226,30	9,21	168,18
9,34	235,70	9,32	153,28	9,20	176,91	9,22	284,96	9,27	222,55	9,29	170,87
9,42	238,25	9,41	157,85	9,29	180,53	9,30	294,22	9,35	229,12	9,37	174,22
9,50	244,83	9,49	163,08	9,37	184,83	9,38	300,12	9,44	233,95	9,46	180,53
9,59	252,08	9,57	168,59	9,45	190,46	9,47	308,05	9,52	240,53	9,54	186,04
9,67	258,79	9,66	174,63	9,54	192,61	9,55	315,69	9,60	242,68	9,62	192,08
9,75	263,89	9,74	180,40	9,62	193,28	9,63	324,15	9,69	248,99	9,71	197,85
9,84	264,56	9,82	187,24	9,70	196,64	9,72	332,88	9,77	254,49	9,79	204,96
9,92	266,57	9,91	194,89	9,79	201,87	9,80	343,34	9,85	259,99	9,87	213,02
10,00	268,05	9,99	201,07	9,87	206,04	9,88	354,08	9,94	268,45	9,96	218,52
10,09	269,26	10,07	208,99	9,95	210,06	9,97	365,22	10,02	275,43	10,04	221,74
10,17	271,54	10,16	215,03	10,04	210,20	10,05	377,57	10,10	278,52	10,12	228,99
10,25	277,71	10,24	216,64	10,12	214,89	10,13	382,27	10,19	282,95	10,21	234,36
10,34	284,16	10,32	222,68	10,20	218,65	10,22	389,11	10,27	288,18	10,29	242,95
10,42	288,72	10,41	227,24	10,29	224,96	10,30	388,84	10,35	293,68	10,37	250,73
10,50	294,89	10,49	234,49	10,37	231,54	10,38	373,14	10,44	301,86	10,46	256,64
10,59	301,74	10,57	241,74	10,45	236,64	10,47	367,10	10,52	305,49	10,54	263,75
10,67	304,28	10,66	248,72	10,54	243,48	10,55	371,26	10,60	308,58	10,62	268,59
10,75	307,24	10,74	254,49	10,62	251,81	10,63	369,11	10,69	312,74	10,71	269,79
10,84	312,61	10,82	254,89	10,70	258,52	10,72	375,29	10,77	314,63	10,79	271,54
10,92	318,65	10,91	256,10	10,79	262,41	10,80	376,76	10,85	316,76	10,87	273,95
11,00	324,95	10,99	260,93	10,87	266,84	10,88	368,58	10,94	319,99	10,96	274,36
11,09	334,09	11,07	268,72	10,95	271,54	10,97	366,03	11,02	317,44	11,04	274,76
11,17	344,82	11,16	279,32	11,04	274,63	11,05	369,11	11,10	323,08	11,12	282,01
11,25	353,68	11,24	290,05	11,12	280,26	11,13	371,66	11,19	324,82	11,21	288,44
11,34	359,98	11,32	302,54	11,20	284,01	11,22	375,29	11,27	333,54	11,29	293,15
11,42	366,29	11,41	320,79	11,29	286,97	11,30	380,25	11,35	344,15	11,37	300,80
11,50	372,33	11,49	340,79	11,37	291,81	11,38	382,94	11,44	348,58	11,46	307,50
11,59	386,03	11,57	362,27	11,45	296,77	11,47	393,54	11,52	359,58	11,54	318,25
11,67	397,30	11,66	390,99	11,54	304,56	11,55	407,77	11,60	369,38	11,62	332,33
11,75	414,48	11,74	416,23	11,62	314,48	11,63	425,49	11,69	378,51	11,71	342,67
11,84	439,98	11,82	436,36	11,70	326,96	11,80	454,90	11,77	381,46	11,79	355,15
				11,79	342,80	11,88	472,07	11,85	388,17	11,87	365,76
				11,87	356,63	11,97	491,50	11,94	404,01	11,96	382,67

Tab. 13.5. Kraft-Weg Ergebnisse von Rübe 26 Tage nach der Ernte (Zuckerfabrik D)

1-a		1-i		2-a		2-a		2-i		2-i	
Kraft	Weg										
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	4,17	0,00	0,00
0,08	0,26	0,08	0,13	0,08	0,53	0,08	0,27	0,15	4,97	0,08	0,14
0,17	0,53	0,17	0,27	0,17	1,07	0,17	0,94	0,24	6,58	0,17	0,14
0,25	0,67	0,25	0,54	0,25	1,61	0,25	1,35	0,32	7,79	0,25	0,41
0,33	0,94	0,33	0,67	0,33	2,14	0,33	2,02	0,40	9,00	0,33	0,41
0,42	1,20	0,42	0,94	0,42	2,82	0,42	2,55	0,49	10,21	0,42	0,81
0,50	1,20	0,50	1,07	0,50	3,76	0,50	3,36	0,57	11,68	0,50	1,08
0,58	1,20	0,58	1,34	0,58	4,56	0,58	3,90	0,65	13,16	0,58	1,35
0,67	1,47	0,67	1,61	0,67	5,50	0,67	4,84	0,74	14,64	0,67	1,48
0,75	2,01	0,75	1,74	0,75	6,44	0,75	5,64	0,82	16,25	0,75	1,75
0,83	2,41	0,83	2,01	0,83	7,51	0,83	6,71	0,90	18,13	0,83	1,88
0,92	3,08	0,92	2,68	0,92	8,59	0,92	7,65	0,99	20,00	0,92	2,15
1,00	3,62	1,00	3,22	1,00	9,39	1,00	8,86	1,07	22,15	1,00	2,29
1,08	3,89	1,08	4,03	1,08	9,80	1,08	9,80	1,15	23,90	1,08	2,56
1,17	4,16	1,17	4,70	1,17	11,41	1,17	10,88	1,24	24,84	1,17	2,69
1,25	4,83	1,25	5,64	1,25	13,42	1,25	11,82	1,32	27,66	1,25	2,96
1,33	6,04	1,33	6,58	1,33	15,57	1,33	13,02	1,40	31,01	1,33	3,09
1,42	7,38	1,42	7,78	1,42	17,72	1,42	14,37	1,49	34,50	1,42	3,49
1,50	8,72	1,50	9,13	1,50	20,13	1,50	16,11	1,57	38,13	1,50	3,63
1,58	10,47	1,58	10,74	1,58	22,95	1,58	17,99	1,65	42,02	1,58	4,17
1,67	12,48	1,67	12,48	1,67	26,04	1,67	20,14	1,74	46,18	1,67	4,70
1,75	14,76	1,75	14,50	1,75	29,39	1,75	22,69	1,82	50,47	1,75	5,51
1,83	17,58	1,83	16,78	1,83	33,02	1,83	26,58	1,90	54,90	1,83	6,18
1,92	20,80	1,92	19,33	1,92	37,18	1,92	30,47	1,99	59,47	1,92	7,25
2,00	24,69	2,00	22,01	2,00	41,47	2,00	34,90	2,07	64,30	2,00	8,19
2,08	28,99	2,08	24,83	2,08	46,44	2,08	39,33	2,15	69,40	2,08	9,54
2,17	34,09	2,17	27,92	2,17	51,54	2,17	44,70	2,24	74,50	2,17	10,74
2,25	39,59	2,25	31,14	2,25	57,04	2,25	50,07	2,32	79,74	2,25	12,35
2,33	45,77	2,33	34,36	2,33	63,08	2,33	55,98	2,40	85,10	2,33	14,10
2,42	52,34	2,42	37,58	2,42	69,26	2,42	62,02	2,49	90,61	2,42	16,25
2,50	59,73	2,50	39,73	2,50	75,84	2,50	68,73	2,57	96,38	2,50	18,53
2,58	67,11	2,58	43,89	2,58	82,82	2,58	75,30	2,65	101,88	2,58	21,21
2,67	74,90	2,67	50,07	2,67	89,65	2,67	82,55	2,74	107,78	2,67	23,90
2,75	83,22	2,75	56,11	2,75	97,30	2,75	89,79	2,82	113,95	2,75	26,72
2,83	91,66	2,83	62,41	2,83	104,83	2,83	97,59	2,90	119,87	2,83	29,13
2,92	100,12	2,92	69,26	2,92	112,48	2,92	105,23	2,99	125,91	2,92	31,95
3,00	109,38	3,00	76,36	3,00	120,52	3,00	113,43	3,07	131,95	3,00	36,92
3,08	118,37	3,08	83,61	3,08	128,58	3,08	121,47	3,15	137,98	3,08	42,29
3,17	128,04	3,17	91,27	3,17	136,91	3,17	129,79	3,24	144,29	3,17	47,79
3,25	137,44	3,25	99,19	3,25	145,22	3,25	138,26	3,32	150,73	3,25	53,96
3,33	147,50	3,33	106,98	3,33	153,68	3,33	147,11	3,40	157,18	3,33	60,14
3,42	157,44	3,42	115,29	3,42	162,40	3,42	155,56	3,49	163,75	3,42	67,25
3,50	167,64	3,50	123,62	3,50	170,73	3,50	164,42	3,57	170,46	3,50	74,23
3,58	177,97	3,58	132,34	3,58	179,58	3,58	173,15	3,65	177,04	3,58	82,02
3,67	188,71	3,67	140,93	3,67	188,58	3,67	182,14	3,74	183,48	3,67	90,07
3,75	199,05	3,75	149,65	3,75	197,44	3,75	190,73	3,82	189,26	3,75	98,66
3,83	210,19	3,83	158,91	3,83	205,89	3,83	199,72	3,90	192,61	3,83	107,12
3,92	221,06	3,92	167,77	3,92	214,89	3,92	208,05	3,99	198,38	3,92	116,52
4,00	232,20	4,00	177,17	4,00	223,34	4,00	217,17	4,07	203,62	4,00	125,63

1-a		1-i		2-a		2-a		2-i		2-i	
Kraft	Weg										
4,08	243,07	4,08	186,70	4,08	231,80	4,08	226,03	4,15	208,72	4,08	135,70
4,17	254,21	4,17	196,10	4,17	239,05	4,17	235,43	4,24	213,42	4,17	145,23
4,25	265,49	4,25	205,63	4,25	246,83	4,25	243,89	4,32	217,44	4,25	155,57
4,33	276,36	4,33	215,16	4,33	252,74	4,33	252,61	4,40	221,87	4,33	165,77
4,42	287,10	4,42	224,82	4,42	257,71	4,42	260,93	4,49	225,50	4,42	176,51
4,50	297,70	4,50	234,49	4,50	263,75	4,50	269,52	4,57	221,61	4,50	186,97
4,58	307,49	4,58	243,88	4,58	268,71	4,58	276,50	4,65	218,25	4,58	197,85
4,67	317,03	4,67	252,87	4,67	268,85	4,67	269,25	4,74	214,89	4,67	208,45
4,75	325,22	4,75	261,20	4,75	269,92	4,75	266,17	4,82	212,21	4,75	219,46
4,83	332,19	4,83	267,77	4,83	267,50	4,83	269,79	4,90	208,18	4,83	229,93
4,92	336,72	4,92	273,68	4,92	268,18	4,92	271,40	4,99	208,32	4,92	240,40
5,00	326,15	5,00	278,11	5,00	265,76	5,00	272,07	5,07	207,24	5,00	249,66
5,08	299,71	5,08	281,47	5,08	259,85	5,08	270,33	5,15	205,23	5,08	258,25
5,17	298,23	5,17	288,04	5,17	246,97	5,17	272,88	5,24	200,13	5,17	264,16
5,25	287,22	5,25	290,86	5,25	239,18	5,25	274,35	5,32	194,49	5,25	265,23
5,33	257,84	5,33	288,97	5,33	229,52	5,33	272,74	5,40	184,56	5,33	261,34
5,42	237,44	5,42	288,57	5,42	216,36	5,42	263,48	5,49	174,22	5,42	252,48
5,50	214,48	5,50	287,64	5,50	203,21	5,50	264,29	5,57	169,39	5,50	245,50
5,58	209,52	5,58	283,08	5,58	195,29	5,58	264,02	5,65	163,75	5,58	239,73
5,67	204,42	5,67	277,44	5,67	187,77	5,67	261,74	5,74	155,43	5,67	235,57
5,75	195,29	5,75	262,27	5,75	179,45	5,75	244,56	5,82	144,69	5,75	231,54
5,83	187,77	5,83	233,55	5,83	170,19	5,83	238,25	5,90	138,25	5,83	228,45
5,92	183,74	5,92	216,10	5,92	164,15	5,92	223,89	5,99	133,02	5,92	227,65
6,00	186,29	6,00	217,04	6,00	158,51	6,00	195,56	6,07	128,85	6,00	226,97
6,08	191,13	6,08	215,29	6,08	155,02	6,08	178,52	6,15	125,36	6,08	226,30
6,17	191,93	6,17	213,28	6,17	153,54	6,17	179,05	6,24	121,08	6,17	225,36
6,25	193,41	6,25	213,55	6,25	154,22	6,25	177,85	6,32	116,64	6,25	219,73
6,33	195,29	6,33	216,50	6,33	153,54	6,33	176,50	6,40	112,09	6,33	215,03
6,42	195,56	6,42	215,69	6,42	153,54	6,42	170,19	6,49	107,51	6,42	213,82
6,50	196,76	6,50	211,26	6,50	154,48	6,50	168,72	6,57	105,36	6,50	211,40
6,58	201,73	6,58	209,79	6,58	154,75	6,58	166,03	6,65	103,35	6,58	206,57
6,67	203,34	6,67	211,80	6,67	153,81	6,67	161,20	6,74	101,88	6,67	201,07
6,75	206,03	6,75	208,58	6,75	153,68	6,75	158,38	6,82	100,00	6,75	192,75
6,83	194,48	6,83	205,63	6,83	152,60	6,83	157,17	6,90	98,92	6,83	182,28
6,92	190,86	6,92	206,57	6,92	150,32	6,92	150,87	6,99	99,07	6,92	175,03
7,00	190,59	7,00	206,30	7,00	146,70	7,00	149,66	7,07	99,07	7,00	167,65
7,08	188,31	7,08	205,09	7,08	142,40	7,08	148,58	7,15	99,60	7,08	162,81
7,17	186,43	7,17	202,00	7,17	138,52	7,17	147,51	7,24	100,00	7,17	158,52
7,25	184,95	7,25	198,65	7,25	135,15	7,25	141,74	7,32	98,66	7,25	156,51
7,33	173,54	7,33	195,69	7,33	133,28	7,33	142,41	7,40	95,17	7,33	157,04
7,42	174,89	7,42	192,20	7,42	133,41	7,42	150,60	7,49	93,15	7,42	157,85
7,50	174,89	7,50	186,03	7,50	135,02	7,50	158,25	7,57	92,62	7,50	159,73
7,58	173,68	7,58	186,43	7,58	137,84	7,58	164,56	7,65	89,40	7,58	160,26
7,67	171,40	7,67	188,31	7,67	138,78	7,67	170,60	7,74	84,97	7,67	159,59
7,75	167,37	7,75	190,19	7,75	140,26	7,75	175,56	7,82	87,51	7,75	157,71
7,83	169,52	7,83	191,53	7,83	142,40	7,83	182,27	7,90	91,01	7,83	159,32
7,92	166,56	7,92	193,28	7,92	144,16	7,92	184,96	7,99	94,49	7,92	159,99
8,00	164,01	8,00	197,30	8,00	143,75	8,00	185,36	8,07	97,71	8,00	160,93
8,08	160,66	8,08	201,60	8,08	141,87	8,08	178,92	8,15	100,27	8,08	165,63
8,17	162,80	8,17	202,67	8,17	140,66	8,17	165,23	8,24	102,55	8,17	169,53
8,25	163,61	8,25	202,40	8,25	141,60	8,25	169,66	8,32	104,03	8,25	171,27

1-a		1-i		2-a		2-a		2-i		2-i	
Kraft	Weg										
8,33	164,28	8,33	203,21	8,33	143,88	8,33	172,61	8,40	103,35	8,33	175,57
8,42	166,03	8,42	205,89	8,42	145,49	8,42	174,89	8,49	101,48	8,42	178,12
8,50	167,91	8,50	206,70	8,50	143,48	8,50	177,04	8,57	103,09	8,50	180,53
8,58	172,47	8,58	205,89	8,58	133,28	8,58	182,27	8,65	102,82	8,58	181,74
8,67	174,89	8,67	204,69	8,67	132,88	8,67	185,36	8,74	105,36	8,67	183,62
8,75	175,29	8,75	203,21	8,75	130,32	8,75	189,25	8,82	102,42	8,75	183,75
8,83	180,66	8,83	195,29	8,83	128,18	8,83	195,97	8,90	102,82	8,83	182,41
8,92	169,52	8,92	188,71	8,92	127,92	8,92	198,92	8,99	106,30	8,92	180,13
9,00	168,84	9,00	189,38	9,00	127,50	9,00	204,96	9,07	110,33	9,00	180,80
9,08	171,13	9,08	183,48	9,08	128,18	9,08	208,99	9,15	115,16	9,08	180,80
9,17	175,29	9,17	177,98	9,17	130,46	9,17	213,01	9,24	122,01	9,17	180,53
9,25	179,31	9,25	174,22	9,25	133,01	9,25	215,16	9,32	128,59	9,25	184,83
9,33	179,05	9,33	170,86	9,33	134,49	9,33	218,38	9,40	135,98	9,33	190,33
9,42	179,18	9,42	165,36	9,42	139,85	9,42	222,95	9,49	144,42	9,42	196,24
9,50	176,50	9,50	159,32	9,50	145,62	9,50	227,11	9,57	152,88	9,50	203,62
9,58	175,15	9,58	158,78	9,58	151,93	9,58	231,94	9,65	161,87	9,58	213,42
9,67	180,12	9,67	159,85	9,67	156,90	9,67	237,58	9,74	170,33	9,67	222,81
9,75	184,42	9,75	162,81	9,75	160,93	9,75	234,36	9,82	177,44	9,75	232,48
9,83	187,10	9,83	166,43	9,83	164,28	9,83	231,54	9,90	186,44	9,83	241,20
9,92	191,80	9,92	171,00	9,92	169,25	9,92	234,76	9,99	194,63	9,92	251,81
10,00	195,15	10,00	175,02	10,00	175,42	10,00	227,51	10,07	201,34	10,00	262,55
10,08	197,44	10,08	177,17	10,08	183,34	10,08	224,96	10,15	207,24	10,08	274,49
10,17	201,19	10,17	177,71	10,17	190,19	10,17	233,28	10,24	214,49	10,17	280,66
10,25	209,11	10,25	176,50	10,25	198,64	10,25	241,60	10,32	215,57	10,25	280,66
10,33	217,57	10,33	174,49	10,33	207,50	10,33	248,58	10,40	206,97	10,33	290,20
10,42	231,53	10,42	176,50	10,42	216,36	10,42	249,79	10,49	211,40	10,42	300,40
10,50	250,46	10,50	180,53	10,50	219,45	10,50	254,89	10,57	222,01	10,50	306,04
10,58	270,05	10,58	183,88	10,58	227,64	10,58	258,11	10,65	228,32	10,58	308,45
10,67	288,83	10,67	191,26	10,67	236,09	10,67	259,59	10,74	232,88	10,67	312,21
10,75	305,76	10,75	202,54	10,75	249,65	10,75	261,47	10,82	239,32	10,75	304,28
10,83	321,72	10,83	217,04	10,83	263,34	10,83	266,44	10,90	244,16	10,83	302,54
		10,92	233,28	10,92	280,26	10,92	267,64	10,99	246,17	10,92	317,97
		11,00	251,00	11,00	296,62	11,00	270,73	11,07	249,26		
		11,08	272,74	11,08	308,70	11,08	278,38	11,15	255,97		
				11,17	322,40	11,17	294,89	11,24	261,61		
				11,25	339,57	11,25	310,18	11,32	270,33		
				11,33	359,31	11,33	334,08	11,40	283,89		
				11,42	385,88			11,49	299,72		
								11,57	316,51		
								11,65	337,97		
								11,74	361,33		
								11,82	390,59		
								11,90	418,24		

Tab. 13.6. Elastische und plastische Arbeit aller Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik D)

	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$	*n
fR	0,786	0,653	0,727 ± 0,08	0,659	0,637	0,589	0,534	0,601 ± 0,05	0,643 ± 0,09	36, 6
10 d	0,682	0,622	0,652 ± 0,04	0,541	0,565	0,481	0,515	0,525 ± 0,04	0,568 ± 0,07	36, 6
20 d	0,598	612	0,605 ± 0,01	569	554	472	536	0,533 ± 0,04	0,557 ± 0,05	36, 6
30 d	525	515	0,520 ± 0,007	460	479	368	455	0,441 ± 0,05	0,467 ± 0,06	36, 6
Plastische Arbeit in N-m										
	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$	
fR	0,374	0,468	0,422 ± 0,07	0,454	0,444	0,466	0,404	0,442 ± 0,03	0,435 ± 0,04	36, 6
10 d	0,540	0,461	0,500 ± 0,06	0,386	0,484	0,393	0,327	0,383 ± 0,07	0,432 ± 0,08	36, 6
20 d	0,499	0,529	0,514 ± 0,02	0,483	0,438	0,372	0,477	0,442 ± 0,05	0,466 ± 0,06	36, 6
30 d	478	592	0,535 ± 0,08	598	386	599	479	0,516 ± 0,10	0,522 ± 0,09	36, 6
Relation										
	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$	
fR	2,10	1,49	1,79 ± 0,42	1,45	1,34	1,26	1,32	1,34 ± 0,07	1,50 ± 0,30	36, 6
10 d	1,26	1,34	1,30 ± 0,06	1,40	1,17	1,22	1,57	1,34 ± 0,18	1,31 ± 0,14	36, 6
20 d	1,19	1,15	1,77 ± 0,03	1,18	1,26	1,27	1,12	1,21 ± 0,07	1,20 ± 0,06	36, 6
30 d	1,09	0,87	0,99 ± 0,16	0,76	1,24	0,61	0,95	0,89 ± 0,26	0,92 ± 0,22	36, 6

*n: Anzahl der Messstellen, Anzahl der Rüben

Tab. 13.7. Elastische und plastische Arbeit aller Rüben in Abhängigkeit von der Lagerzeit (Zuckerfabrik C)

Elastische Arbeit in N-m										
	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$	*n
fR	0,637	0,624	0,631 ± 0,009	0,600	0,628	0,508	0,514	0,561 ± 0,060	0,584 ± 0,058	30, 5
10 d	0,56	0,524	0,542 ± 0,025	0,470	0,537	0,452	0,454	0,479 ± 0,040	0,499 ± 0,046	12, 2
20 d	0,584	0,470	0,527 ± 0,081	0,430	0,469	0,328	0,420	0,412 ± 0,060	0,450 ± 0,083	12, 2
30 d	0,431	0,387	0,409 ± 0,031	0,400	0,413	0,404	0,403	0,404 ± 0,007	0,405 ± 0,015	12, 2
Plastische Arbeit in N-m										
	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$	
fR	0,556	0,384	0,470 ± 0,122	0,490	0,452	0,423	0,425	0,446 ± 0,029	0,454 ± 0,060	30, 5
10 d	0,546	0,523	0,535 ± 0,016	0,640	0,532	0,535	0,407	0,528 ± 0,094	0,530 ± 0,07	12, 2
20 d	0,653	0,493	0,573 ± 0,113	0,440	0,427	0,471	0,534	0,469 ± 0,047	0,503 ± 0,082	12, 2
30 d	0,568	0,672	0,620 ± 0,074	0,680	0,712	0,392	0,534	0,578 ± 0,146	0,592 ± 0,119	12, 2
Relation										
	1-a	1-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-1}}$	2-a	2-a	2-i	2-i	$\bar{X}_{\text{Ebene-2}}$	$\bar{X}_{\text{Ges.-B}}$	
fR	1,146	1,628	1,387 ± 0,341	1,23	1,389	1,2	1,209	1,256 ± 0,089	1,29 ± 0,180	30, 5
10 d	1,026	1,002	1,014 ± 0,017	0,74	1,01	0,844	1,11	0,926 ± 0,166	0,95 ± 0,136	12, 2
20 d	0,895	0,953	0,924 ± 0,041	0,98	1,1	0,69	0,78	0,886 ± 0,186	0,89 ± 0,146	12, 2
30 d	0,759	0,576	0,668 ± 0,129	0,59	0,58	1,032	0,754	0,738 ± 0,212	0,71 ± 0,177	12, 2

*n: Anzahl der Messstellen, Anzahl der Rüben

Tab. 13.8. Durchschnittswerte der Rohsaftviskosität mit verschiedenen Trockensubstanzen und Temperaturen

Viskosität [mPa·s]										
15 %			16 %			17 %			18 %	
20 °C	30 °C	40 °C	20 °C	30 °C	40 °C	20 °C	30 °C	20 °C	30 °C	40 °C
1,4535	1,071	0,833	1,569	1,1063	0,8226	1,6196	1,2087	1,7458	1,2872	0,9675
1,4562	1,074	0,83	1,565	1,1047	0,8605	1,6288	1,2125	1,7335	1,2898	0,9801
1,4542	1,076	0,831	1,57	1,1028	0,8388	1,6287	1,2137	1,7282	1,2899	0,9798
1,4524	1,072	0,831	1,573	1,1019	0,8302	1,6417	1,2112	1,7295	1,2898	0,9849
1,4586	1,081	0,834	1,57	1,1017	0,8285	1,6380	1,2106	1,7312	1,2911	0,9806
1,4575	1,094	0,829	1,561	1,1036	0,828	1,6458	1,2119	1,7303	1,2896	0,9822
1,456	1,089	0,828	1,573	1,1015	0,8262	1,6366	1,2139	1,7209	1,2922	0,9831
1,4607	1,086	0,827	1,571	1,107	0,8196	1,6696	1,2066	1,7191	1,2909	0,9837
1,4583	1,09	0,83	1,568	1,1108	0,8247	1,6817	1,2107	1,7159	1,2932	0,9850
1,458	1,087	0,832	1,57	1,1107	0,8242	1,6683	1,2126	1,7129	1,2930	0,9839
1,4569	1,088	0,835	1,575	1,1106	0,8264	1,6335	1,2131	1,7183	1,2932	0,9841
1,4637	1,091	0,836	1,569	1,1096	0,8267	1,6266	1,2120	1,7155	1,2713	0,9844
1,4614	1,08	0,835	1,565	1,1091	0,8279	1,6526	1,2143	1,7121	1,2671	0,9832
1,4636	1,074	0,834	1,573	1,1096	0,826	1,6235	1,2119	1,7129	1,2673	0,9826
1,4597	1,08	0,835	1,567	1,1093	0,8307	1,6572	1,2119	1,7216	1,2704	0,9794
1,4607	1,08	0,836	1,566	1,1142	0,9481	1,6284	1,2146	1,7096	1,2677	0,9753
1,4593	1,073	0,835	1,576	1,113	0,5945	1,6444	1,2170	1,7104	1,2670	0,9818
1,4616	1,077	0,835	1,561	1,1133	0,1456	1,6373	1,2141	1,7165	1,2678	0,9720
1,4634	1,086	0,84	1,567	1,112	0,011	1,6230	1,2117	1,7154	1,2690	0,9659
1,4645	1,089	0,839	1,567	1,1163	1,4811	1,6333	1,2138	1,7156	1,2701	0,9674
1,4627	1,086	0,839	1,575	1,1297	0,8932	1,6233	1,2114	1,7396	1,2693	0,9769
1,463	1,084	0,838	1,567	1,1174	0,8854	1,6226	1,2164	1,7386	1,2675	0,9696
1,4584	1,086	0,838	1,567	1,1167	0,8848	1,6450	1,2159	1,7426	1,2785	0,9732
1,4573	1,087	0,84	1,564	1,1169	0,885	1,6290	1,2170	1,7390	1,2688	0,9845
1,4573	1,085	0,842	1,559	1,1186	0,8912	1,6304	1,2152	1,7409	1,2693	0,9817
1,4561	1,084	0,844	1,563	1,1195	0,8876	1,6349	1,2170	1,7387	1,2710	0,9806
1,457	1,12	0,839	1,582	1,125	0,889	1,6205	1,2170	1,7387	1,2720	0,9825
1,4605	1,085	0,836	1,562	1,1255	0,888	1,6289	1,2182	1,7378	1,2747	0,9826
1,4593	1,088	0,837	1,566	1,1291	0,8845	1,6516	1,2184	1,7394	1,2745	0,9837
1,4565	1,084	0,836	1,566	1,1281	0,8842	1,6444	1,2182	1,7377	1,2745	0,9845
1,4643	1,085	0,834	1,559	1,1315	0,881	1,6411	1,2179	1,7399	1,2710	0,9835
1,4606	1,086	0,835	1,561	1,1335	0,8816	1,6541	1,2184	1,7411	1,2719	0,9888
1,4684	1,078	0,828	1,576	1,1358	0,8803	1,6361	1,2196	1,7410	1,2733	0,9872
1,4626	1,081	0,807	1,563	1,1301	0,8792	1,6386	1,2182	1,7429	1,2716	0,9882
1,4655	1,076	0,806	1,556	1,1254	0,8782	1,6410	1,2150	1,7414	1,2746	0,9868
1,4625	1,08	0,808	1,557	1,1268	0,8852	1,6801	1,2184	1,7416	1,2769	0,9882
1,4602	1,075	0,827	1,562	1,117	0,8821	1,6852	1,2199	1,7427	1,2751	0,9845
1,4632	1,074	0,831	1,565	1,1174	0,8793	1,6509	1,2179	1,7437	1,2741	0,9835
1,4644	1,089	0,834	1,553	1,1155	0,8821	1,6513	1,2177	1,7428	1,2734	0,9888
1,458	1,086	0,836	1,58	1,1122	0,8792	1,6522	1,2182	1,7423	1,3032	0,9872
1,4613	1,112	0,839	1,555	1,1204	0,8772	1,6644	1,2130	1,7426	1,2915	0,9882
1,4602	1,082	0,834	1,565	1,120	0,838	1,6453	1,2158	1,7393	1,2797	0,9878

Tab. 13.9. Durchschnittswerte der Rohsaftviskositäten bei unterschiedlichen Temperaturen und Pektinkonzentrationen

Viskosität					
[mPa·s]					
1 g/l			2 g/l		
20 °C	30 °C	40 °C	20 °C	30 °C	40 °C
2,1241	1,6685	1,332	2,7673	2,0906	1,7021
2,1287	1,661	1,332	2,7702	2,0765	1,7064
2,1249	1,6603	1,331	2,7777	2,0699	1,7086
2,1309	1,661	1,327	2,7686	2,0668	1,7133
2,13	1,6524	1,335	2,7711	2,061	1,7071
2,1295	1,6514	1,356	2,7703	2,0628	1,7128
2,1314	1,6455	1,36	2,7721	2,068	1,7045
2,1342	1,6528	1,356	2,7708	2,0705	1,7102
2,1387	1,6568	1,353	2,7733	2,0679	1,7069
2,1365	1,6633	1,353	2,7756	2,0703	1,7062
2,1361	1,662	1,35	2,7657	2,0826	1,717
2,1366	1,6616	1,351	2,7688	2,0857	1,7206
2,1343	1,6632	1,35	2,7694	2,0854	1,7109
2,131	1,6599	1,347	2,7638	2,0815	1,7076
2,1335	1,6599	1,343	2,7537	2,0889	1,7034
2,131	1,6633	1,343	2,7465	2,0748	1,7024
2,1353	1,6624	1,348	2,7354	2,0768	1,7034
2,1361	1,6613	1,31	2,7354	2,08	1,7045
2,1284	1,6613	1,307	2,7295	2,0809	1,7058
2,1323	1,653	1,311	2,7238	2,0793	1,7018
2,1253	1,6539	1,308	2,7248	2,0896	1,7002
2,124	1,6514	1,306		2,0908	1,7064
2,1203	1,648	1,306		2,0873	1,7072
2,114	1,6439	1,309		2,0789	1,7056
	1,641	1,307		2,0769	1,6307
	1,6389	1,304		2,0905	
				2,0624	
				2,0932	
				2,0898	
2,1296	1,6561	1,316	2,75875	2,0786	1,70422

Tab. 13.10. Durchschnittswerte der Rohsaftviskositäten bei unterschiedlichen Temperaturen und Dextrankonzentrationen

Viskosität								
[mPa·s]								
1g/l			2g/l			3 g/l		
20 °C	30 °C	40 °C	20 °C	30 °C	40 °C	20 °C	30 °C	40 °C
1,8342	1,3191	1,05	2,103	1,4396	1,1413	2,1694	1,5632	1,2028
1,8382	1,3186	1,064	2,1102	1,4349	1,141	2,1704	1,5663	1,2075
1,8389	1,3159	1,066	2,1096	1,4389	1,1444	2,1688	1,5682	1,1991
1,8411	1,3298	1,055	2,101	1,4407	1,1468	2,1775	1,5652	1,2088
1,8413	1,4504	1,048	2,0957	1,4459	1,149	2,1752	1,5668	1,2094
1,8412	1,5449	1,045	2,0456	1,444	1,1488	2,1729	1,5632	1,2147
1,8334	1,3611	1,031	2,0643	1,4476	1,1486	2,1711	1,5652	1,2145
1,838	1,3464	1,062	2,0543	1,4431	1,147	2,1629	1,5652	1,2187
1,8388	1,3819	1,065	2,0788	1,4459	1,1488	2,1495	1,5664	1,2186
1,8374	1,5001	1,053	2,0756	1,4505	1,1496	2,1601	1,5682	1,2194
1,8398	1,5464	1,062	2,0709	1,4531	1,1502	2,1556	1,5724	1,223
1,8408	1,5849	1,06	2,0617	1,4498	1,1492	2,1592	1,5727	1,2203
1,8383	1,4287	1,053	2,0582	1,4507	1,1488	2,1587	1,5736	1,225
1,8356	1,355	1,046	2,0663	1,4504	1,1524	2,1597	1,577	1,2198
1,8379	1,3601	1,051	2,0627	1,4514	1,1518	2,1603	1,5736	1,2203
1,8372	1,4908	1,051	2,0564	1,4497	1,1528	2,1567	1,5741	1,2204
1,8374	1,4984	1,052	2,0426	1,4501	1,1518	2,1519	1,5718	1,2197
1,8328	1,4426	1,041	2,0371	1,4518	1,1511	2,1454	1,5739	1,2146
1,8267	1,3483	1,056	2,029	1,4503	1,1491	2,1476	1,5747	1,2118
1,8288	1,3407	1,032	2,0337	1,4505	1,1544	2,1437	1,5756	1,2309
1,8249	1,3449	1,031	2,0374	1,4511	1,155	2,1447	1,5755	1,2084
1,8274	1,3406	1,027	2,0336	1,453	1,1562	2,1435	1,5742	1,2134
1,825	1,3384	1,032	2,0291	1,4581	1,1564	2,1422	1,5718	
1,8256	1,3413	1,03	2,0284	1,4564	1,152	2,1387	1,5761	
1,8246	1,3399	1,037	2,0161	1,4583	1,1561	2,1403	1,5748	
1,8282	1,3384	1,041	2,02	1,4551	1,1581	2,142	1,5784	
1,8284	1,3382	1,069	2,0102	1,4568	1,1571	2,1339	1,5793	
1,8255	1,3429	1,073	2,0154	1,4569	1,1585		1,5786	
1,8284	1,3443	1,048	2,018	1,4521	1,1608		1,5729	
1,8236	1,3412	1,035	2,0262	1,4569	1,1614		1,5362	
1,8176	1,3425	1,035	1,8772	1,4566	1,1607		1,5404	
1,8208	1,3403	1,055	2,0175	1,4537	1,104		1,5417	
1,8174	1,3386	1,039	2,0206	1,4556	1,1661			
1,8185	1,3488	1,044	2,0221	1,4547	1,1674			
1,8151	1,3394	1,06	2,0127	1,4558	1,1648			
1,816	1,3314	1,053	2,0179	1,4598	1,165			
1,8164	1,3282	1,048	2,0241	1,4582	1,1632			
1,8188	1,3209	1,047	2,0207	1,4602	1,1697			
1,8178	1,3245	1,036	2,015	1,4593	1,1666			
1,818	1,308	1,034	2,0167	1,4574	1,163			
1,8265	1,3567	1,057	2,04103	1,452	1,1609	2,1546	1,5713	1,2155

Tab. 13.11. Optimierungsrechnung, Carbonatationsschlamm 50 % TS

Volumen	Nennweite	spezifischer Druckverlust	Spezifische Leistung	Betriebskosten		Kapitalkosten	Gesamtkosten	
				Eigen	Fremd		Eigen	Fremd
m ³ /h	DIN	Pa/m	W/m	Euro/(m.a)		Euro/(m.a)	Euro/(m.a)	
5,71	80	3250	6,87	0,96	3,41	3,63	4,59	7,04
	100	2100	4,44	0,62	2,2	4,98	5,6	7,18
	125	1350	2,86	0,4	1,42	6,93	7,33	8,35
	150	950	2,01	0,28	1	9,33	9,61	10,33
11,43	80	4350	18,4	2,58	9,13	3,63	6,21	12,76
	100	2600	11	1,54	5,46	4,98	6,52	10,44
	125	1650	6,98	0,98	3,46	6,93	7,91	10,39
	150	1150	4,86	0,68	2,41	9,33	10,01	11,74
17,14	80	5300	33,65	4,71	16,69	3,63	8,34	20,32
	100	3075	19,52	2,73	9,68	4,98	7,71	14,66
	125	1850	11,74	1,64	5,82	6,93	8,57	12,75
	150	1300	8,25	1,16	4,09	9,33	10,49	13,42
22,86	80	6200	52,45	7,34	26,02	3,63	10,97	29,65
	100	3550	30,03	4,2	14,9	4,98	9,18	19,88
	125	2100	17,76	2,49	8,81	6,93	9,42	15,74
	150	1450	12,27	1,72	6,09	9,33	11,05	15,42

Tab. 13.12. Optimierungsrechnung, Carbonatationsschlamm 55 % TS

Volumen	Nennweite	spezifischer Druckverlust	Spezifische Leistung	Betriebskosten		Kapitalkosten	Gesamtkosten	
				Eigen	Fremd		Eigen	Fremd
m ³ /h	DIN	Pa/m	W/m	Euro/(m.a)		Euro/(m.a)	Euro/(m.a)	
5,71	80	5400	11,42	1,60	5,66	3,63	5,23	9,29
	100	3650	7,72	1,08	3,83	4,98	6,06	8,81
	125	2400	5,08	0,71	2,52	6,93	7,64	9,45
	150	1850	3,91	0,55	1,94	9,33	9,88	11,27
11,43	80	7000	29,63	4,15	14,70	3,63	7,78	18,33
	100	4400	18,63	2,61	9,24	4,98	7,59	14,22
	125	2750	11,64	1,63	5,77	6,93	8,56	12,70
	150	2100	8,89	1,25	4,41	9,33	10,58	13,74
17,14	80	8350	53,01	7,42	26,29	3,63	11,05	29,92
	100	5100	32,38	4,53	16,06	4,98	9,51	21,04
	125	3200	20,31	2,84	10,07	6,93	9,77	17,00
	150	2600	16,51	2,31	8,19	9,33	11,64	17,52
22,86	80	9600	81,28	11,38	40,31	3,63	15,01	43,94
	100	5700	48,26	6,76	23,94	4,98	11,74	28,92
	125	3550	30,06	4,21	15,06	6,93	11,14	21,99
	150	2500	21,17	2,96	10,50	9,33	12,29	19,83

