

# Technologische Aspekte der Ethanolgewinnung\*

Von K. Misselhorn, Berlin

Die Herstellung von Ethanol als Energieträger aus nachwachsenden Rohstoffen wird seit einigen Jahren häufig diskutiert. Der Aufsatz gibt einen Überblick über den heutigen Stand der Technik und hat sein Schwergewicht bei den Verfahrensstufen zur Verarbeitung stärkehaltiger Rohstoffe, die sich in der Vergangenheit durch besonderen Energiebedarf auszeichneten und bei denen moderne Entwicklungen zu Fortschritten in dieser Hinsicht geführt haben. Der spezifische Energiebedarf des Gesamtprozesses läßt sich mit etwa 7 MJ/l absoluter Alkohol angeben, wenn die entstehende Schlempe nicht eingedampft werden muß. Bei der Kombination eines solchen Betriebes mit einer Biogasanlage läßt sich für Getreideschlempen ein Rückgewinn von Heizenergie aus dem Faulgas in der Größe von 3–5 MJ/l absoluter Alkohol errechnen. Beim heutigen Stand der Technik bleibt dann noch ein Bedarf an fossiler Energie von 2–4 MJ/l absoluter Alkohol, das entspricht 10–20% des unteren Heizwertes des hergestellten Ethanols.

**Technological Aspects of Ethanol Production.** Production of ethanol as an energy source from renewable resources has been frequently discussed for a couple of years. This report gives a survey of the current state of technology with emphasis on those process steps which in the past were characterized by extreme energy consumption and where progress has been made in this respect due to new development. The specific energy consumption of the total process may be stated as approx. 7 MJ/l of absolute alcohol, if the resulting cereal slop will not have to be evaporated. When such a plant is combined with a bio-gas plant recovery of heating energy from cereal slop via its sewer gas in the region of 3–5 MJ/l of absolute alcohol may be calculated. At the present stage of technology there remains a demand of fossile energy of 2–4 MJ/l of absolute alcohol, representing 10–20% of the lower calorific value of the ethanol produced.

Seit die Erdölpreise so kräftig gestiegen sind, gilt für die Alkoholherstellung die grundlegende Forderung, den Prozeß mit so wenig Energieaufwand wie irgend möglich durchzuführen. In Abbildung 1 ist als energetischer Wirkungsgrad das Verhältnis des unteren Heizwertes des Produktes zum Aufwand an fossiler Energie bei seiner Herstellung angegeben [1]. Für die Kohleverflüssigung werden heute energetische Wirkungsgrade von etwa 0,3 bis 0,4 angegeben. Für die Kohlevergasung werden Zahlen von 0,6 genannt. Prozesse auf der Basis von fossilen Rohstoffen können aus theoretischen Gründen niemals Wirkungsgrade obiger Definition über 1 erzielen. Bezieht man bei den biologischen Verfahren den Wirkungsgrad lediglich auf den Einsatz an fossiler Energie bei ihrer Gewinnung – und dies stellt heute den Anreiz für die Diskussion um nachwachsende Energieträger dar –, so können diese Verfahren Bilanzwerte von über 1 erreichen. Für Zuckerrohr und auch Manioka, bei denen oberirdische Pflanzenteile verbrannt werden können, läßt sich ein Wirkungsgrad von 8 bis 9 errechnen [1].

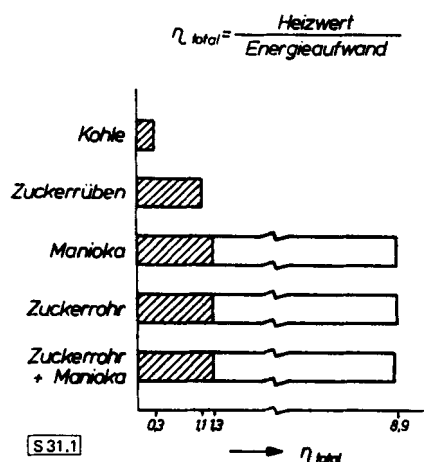


Abbildung 1. Energiebilanzzahlen bei der Herstellung flüssiger Energieträger.

In Abbildung 2 ist dargestellt, weshalb wir Stärke als einen besonders zu beachtenden Rohstoff für die Alkoholherstellung ansehen. Im Jahre 1977 war die Weltstärkeerzeugung mehr als 10mal so groß wie die Weltzuckerproduktion. Bis zum heutigen Tage wird Ethanol ganz überwiegend aus zuckerhaltigen Rohstoffen hergestellt. Ein extremes Beispiel ist Brasilien, wo mehr als 99% der dort erzeugten, gewaltigen Alkoholmenge aus zuckerhaltigen Rohstoffen kommt. Eine erste Anlage zur Produktion von Stärkealkohol in größerem Maßstab ist seit kurzem in Betrieb [2]. Ein Forschungszentrum zur Konversion von Stärke befindet sich dort im Aufbau [3].

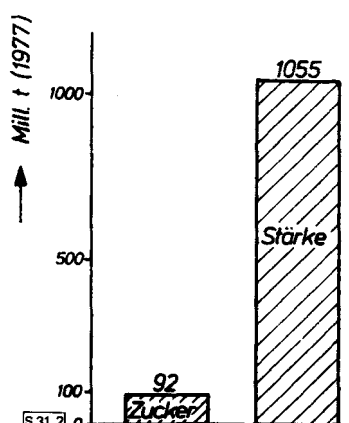


Abbildung 2. Weltproduktion an Zucker und Stärke im Jahre 1977.

Schon seit langem wird dagegen in Deutschland Alkohol in großen Mengen auch aus stärkehaltigen Rohstoffen hergestellt.

In Tabelle 1 sind in der zweiten Spalte die Erträge je ha aufgeführt, wie sie im statistischen Jahrbuch der Bundesrepublik Deutschland zu finden sind. Diesen sind in der dritten

\* Nach einem Vortrag bei der Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Alkohol-Seminar, 8. Januar 1982.

Tabelle 1.  
Hektarerträge landwirtschaftlicher Rohstoffe heute und bei gezielter Züchtung (Alkoholausbeute 90% der Theorie; r. A. = reiner Alkohol).

	Stärke- bzw. Zuckergehalt (%)	Stat. Jahrbuch (t/ha)	Mög- licher Ertrag (t/ha)	Heutiger Alkohol- ertrag (m³ r. A./ha)	Möglicher Alkohol- ertrag (m³ r. A./ha)
Weizen	60	3,6 – 6,7	7 – 12	1,2 – 2,7	2,7 – 4,6
Roggen	58	3,1 – 4,0	–	1,2 – 1,5	–
Gerste	58	3,6 – 5,6	–	1,3 – 2,1	–
Mais	60	4,0 – 6,6	7 – 14	1,6 – 2,7	2,7 – 5,4
Kartoffeln	14	20,0 – 33,0	60 – 80	1,8 – 3,0	3,9 – 5,1
Zuckerrüben	15	34,0 – 51,0	70 – 120	3,1 – 4,7	4,3 – 7,3
Futterrüben	11	52,0 – 117,0	–	3,5 – 7,8	–
Topinambur	15	–	60 – 70	–	5,6 – 6,5
Holz	–	5	7 – 10	–	–

Spalte Angaben über mögliche Hektarerträge gegenübergestellt, die landwirtschaftliche Experten für erzielbar halten [4, 5, 6]. Aus diesen Angaben errechnen sich die Alkoholmengen der 4. Spalte. Man sieht, daß Rüben mit besonders großen Hektarerträgen aufzuwarten haben, während Getreidesorten in dieser Hinsicht nicht so günstig abschneiden. Man muß aber berücksichtigen, daß der Anbau von Hackfrüchten mit größerem Arbeitsaufwand verbunden ist, als der Anbau von Getreide oder Mais. Getreidearten haben weiterhin den Vorteil, einen Brennstoff in Form des Getreidestrohs mitzubringen, so daß es sich lohnen wird, die Technologie der Strohverbrennung, beispielsweise nach Brikettierung, intensiv voranzutreiben.

In der letzten Spalte der Tabelle 1 ist schließlich der Alkoholерtrag angegeben, der sich aus den für möglich gehaltenen Hektarerträgen ergeben würde. Man sieht, daß die Getreidearten ein sehr großes Entwicklungspotential beinhalten und den heutigen Ertrag bei entsprechender Entwicklung verdoppeln können. Von den schon seit langem in industrieller Hinsicht optimierten Rüben ist offensichtlich ein nicht ganz so hohes Entwicklungspotential zu erwarten.

In der folgenden Tabelle 2 sind die Zahlen für den Energieaufwand bei der Alkoholherstellung zusammengetragen. Der seit langem übliche periodische Aufschluß erfordert sowohl bei zucker- als auch stärkehaltigen Rohstoffen mit 4 bis 8 MJ/l Alkohol einen hohen Energieeinsatz.

Geht man dagegen zu kontinuierlichen Verfahren über, so reduziert sich der Energieeinsatz für den Aufschluß auf 0,8 bis 3 MJ/l Alkohol. Wie die nächsten zwei Zeilen zeigen, lassen

Tabelle 2.  
Energieaufwand in MJ/l reiner Alkohol zur Erzeugung von absolutem Alkohol.

	Rüben	Rohr	Stärke- haltige Rohstoffe
Aufschluß, periodisch	4 – 5	–	7 – 8
Aufschluß, kontinuierlich	–	–	2
Rohrmühle	–	1,1 – 1,5	–
Extraktion	0,8 – 1	2 – 3	–
Gärung, periodisch	0,06	0,06	0,06
Gärung, kontinuierlich	0,1	0,1	0,1
Destillation, konventionell	10 – 13	10 – 13	10 – 13
Destillation, mit energetischer Kopplung	5 – 7	5 – 7	5 – 7
Prozeß, konventionell	16	13	19
Prozeß, optimiert	7	7	8

sich durch den Übergang von der periodischen zur kontinuierlichen Gärung Energieersparnisse nicht erzielen.

Anders sieht es dagegen bei der Destillation aus. Hier werden neuerdings bevorzugt Mehrdruckanlagen bzw. auch solche eingesetzt, die mit einem Brüdenkompressor ausgestattet sind. Dadurch läßt sich der Energieaufwand von 10 – 13 auf etwa 5 – 7 MJ/l Alkohol reduzieren. In der Summe ergibt sich für zucker- wie stärkehaltige Rohstoffe ein ähnlicher Energiebedarf um etwa 7 MJ/l Alkohol.

Eines der ersten kontinuierlichen, und gleichzeitig energie-sparenden Aufschlußverfahren arbeitet nach dem Prinzip des sogenannten Seagrams-Verfahren, mit Einspritzung von direktem Dampf und Zuschaltung eines Einspritzkondensators als Wärmerückgewinnungsschritt (Abb. 3).

Solche Schaltungen sind mehrfach in die Praxis umgesetzt worden und verursachen Energieverbräuche von etwa 2 bis 2,5 MJ/l reiner Alkohol [7]. Wird der Einspritzkondensator mehrstufig ausgeführt, läßt sich die dort entstehende Temperaturdifferenz verkleinern. Man kommt zu einem Energiebe-

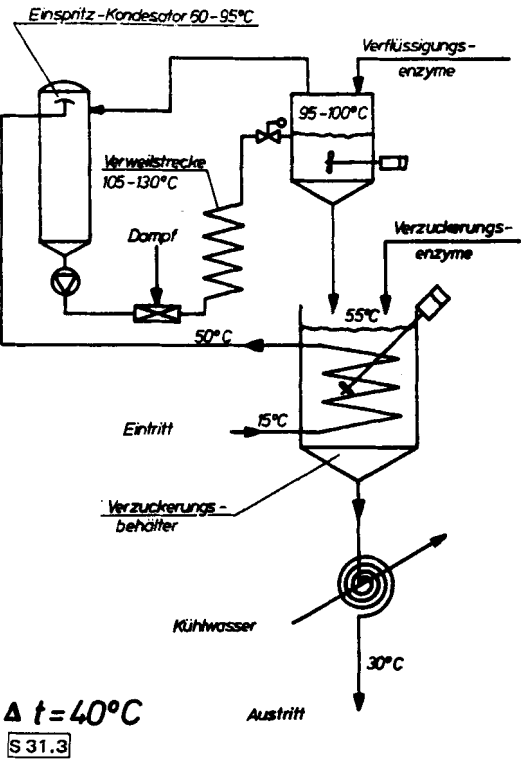
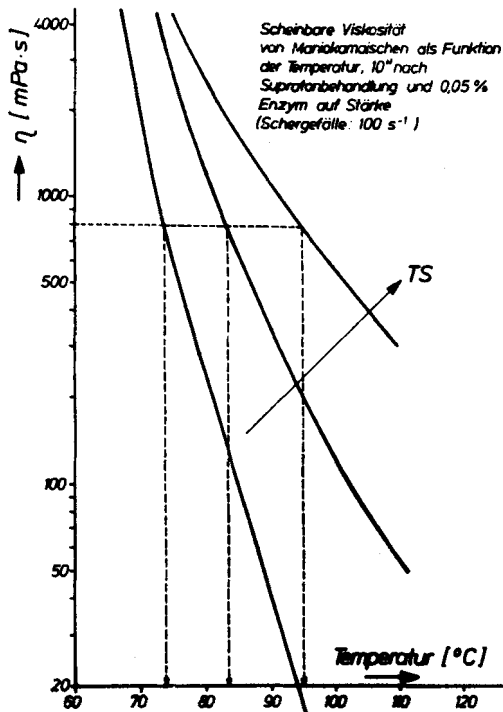


Abbildung 3. Kontinuierliches Stärkeaufschlußverfahren nach dem „Jet Cooker“ Prinzip.

darf von etwa 1,5 MJ/l Alkohol. Als Nachteil dieser immer noch mit hohen Temperaturen arbeitenden Einrichtung ist zu nennen, daß Verflüssigungsenzyme, die zu Beginn des Prozesses zugesetzt werden, durch die hohen Temperaturen inaktiviert werden und verloren sind. Weiterhin ist es wegen der auftretenden großen Viskositäten schwierig, mit einer solchen Anlage Maischen mit hohen Trockensubstanzgehalten zu verarbeiten.

Die große Viskositätsspitze beim Erhitzen von Stärkesuspensionen bis in den Verkleisterungsbereich kommt dadurch zustande, daß das große Stärkekorn mit etwa  $10^8$  Stärkemolekülen an seiner Oberfläche aufquillt und sich in der Lösung wie ein riesiges Molekül verhält. Aus der Polymerforschung weiß man, daß bei gleicher Konzentration die Viskosität mit steigender Molekülgröße anwächst. In dem Maße nun, in dem angequollene Stärkemoleküle von der Oberfläche des Stärkekorns abgelöst werden, sinkt die Größe des gequollenen Stärkekorns und fällt die Viskosität bis zu derjenigen, die der gelösten Stärkekonzentration entspricht.

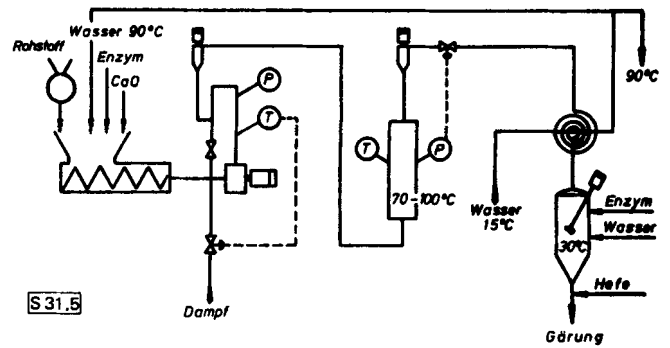
Der unerwünschte Viskositätspeak läßt sich durch Einsatz einer Maschine abschneiden, die auf mechanischem Wege durch Erzeugung hoher Schwingungen und Scherkräfte die Stärkemoleküle vom Stärkekorn abschert, sobald die Oberfläche etwas angequollen ist. Auf diese Weise vermeidet man die Ausbildung einer unbeherrschbaren Viskositätsspitze (Abb. 4).



§ 31.4

Abbildung 4. Scheinbare Viskosität von Maniocamaischen als Funktion der Temperatur.

In Abbildung 5 ist ein Stärkeaufschlußverfahren unter Einsatz einer solchen Maschine dargestellt [8]. Gemahlenes Getreide wird mit vorgewärmtem Wasser angeteigt und der Maschine zugeführt. Durch direkten Dampf stellt man die gewünschte Temperatur zwischen 70 und 100°C ein. Anschließend durchläuft die Maische ein Viskosimeter und eine Verweilzeitstrecke, nach der ein zweites Viskosimeter geschaltet ist, und gibt in einem Wärmeaustauscher die eingebrachte Wärme an das Verdünnungswasser ab. Schließlich erfolgt der Zusatz von Hefe sowie eines Verzuckerungsenzyms, und die verzuckerte Maische kann der Gärung zulaufen.

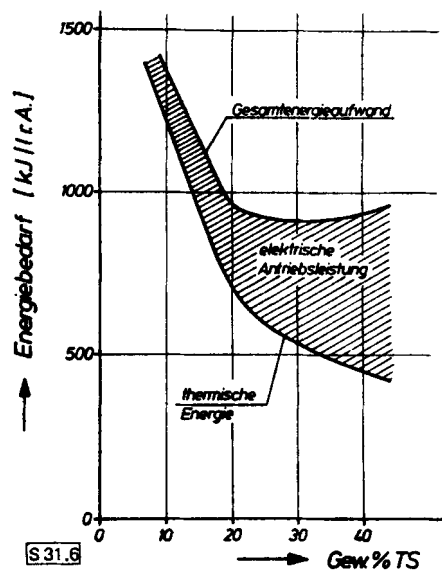


§ 31.5

Abbildung 5. Kontinuierliches, mechanisches Stärkeaufschlußverfahren bei niedriger Temperatur (Supramylanlage).

Wird bei diesem Prozeß am Anfang eine temperaturstabile  $\alpha$ -Amylase eingesetzt, so kann diese wegen der mäßigen Temperaturen den gesamten Prozeß mit nur geringfügiger Aktivitätseinbuße durchlaufen. Weiterhin ist es durch den mechanisch unterstützten Aufschluß möglich, Trockensubstanzgehalte von 35 oder gar 45% zu erreichen. Der Energieaufwand ist verständlicherweise um so kleiner, je weniger Wasser erhitzt werden muß. Mit einer solchen Anlage lassen sich Energiebedarfszahlen von 1,5 MJ/l reiner Alkohol erreichen.

Wenn als Verdünnung bei Getreide beispielsweise Dünnphease von einer Schlempe dekantation zur Verfügung steht, kann der Energiebedarf auf 0,5 MJ/l Alkohol sinken (Abb. 6).



§ 31.6

Abbildung 6. Spezifischer Energiebedarf bei einer Leistung von 1000 l reiner Alkohol (r. A.)/h und einer Aufschlußtemperatur von 100°C.

In Abbildung 7 ist die Schlemperückführung dargestellt. Nach der Destillation durchläuft die Schlempe einen Dekanter und wird dort in Dickphase mit 25 bis 35% Trockensubstanzgehalt und Dünnphease getrennt. In der Abbildung ist eine 50%ige Rückführung der Schlempe in Form der Dünnphease vorgesehen. Es ist aber möglich diese Rate bis auf 80% zu steigern. Auf diese Weise fallen nur noch 20% der bisherigen Schlempe in Form einer Dickphase mit 25 – 35% Trockensubstanz an. Entsprechend günstiger liegt der Energiebedarf bei der Endtrocknung.

Es ist auch möglich diese Dickphase an Rinder zu verfüttern. Dadurch würde sich die Zahl zu haltender Großvieheinheiten gegenüber einer direkten Verfütterung der Schlempe im Originalzustand verringern. Wegen der geringeren Wasser-



gen erreicht. Bei der Schlempeeindampfung und Trocknung geht die in der Tabelle dargestellte Größe von 8,1 MJ/l reiner Alkohol noch von einer 50%igen Rückführung der Schlempe aus. Wie schon geschildert, ist es heute möglich, die Rückführung bis zu 80% zu betreiben. Andererseits gibt es aber auch Rohstoffe, wie Rüben und Kartoffeln, die soviel Wasser mitbringen, daß man eine nur geringe Menge oder gar keine Schlempe rückführen kann. Generell läßt sich z. Z. unabhängig vom Rohstoff der Energieverbrauch ohne Schlempeeindampfung in der Größenordnung von 7 MJ/l Alkohol angeben. Im Normalfall wird dieser heute durch fossile Brennstoffe aufgebracht. Mit einer Ausfaltung der Schlempe ließe sich dieser Bedarf noch kräftig reduzieren.

Es sei angenommen, daß die Schlempe einen BSB5-Wert von etwa 50 000 mg O<sub>2</sub>/l hat und die Maische einen Alkoholgehalt von 6 bis 8 Vol.-% auswies. Das in einer Biogasanlage bei der Ausfaltung hieraus entstehende Gas entspricht einer Wärmemenge von etwa 4 bis 6 MJ/l reiner Alkohol. Daraus wiederum ließe sich Dampf mit einer Heizwärme von 3 – 5 MJ/l reiner Alkohol erzeugen, wenn man es nicht vorzieht, einen Gasmotor einzusetzen.

Damit liegt der heutige Verbrauch einer modernen Brennereianlage für gewisse Rohstoffe bereits in einer Größenordnung, die weitgehend mit Biogas gedeckt werden kann, und es erscheint nicht unrealistisch, für die Zukunft auf dieser Basis völlig energieautarke Brennereibetriebe anzustreben.

Eine Kombination mit einer Biogasanlage bietet sich auch an, weil der Anfall des Gases zeitlich übereinstimmt mit dem Anfall des Bedarfs an thermischer und elektrischer Energie. Als weiterer Grund für eine Kombination einer solchen Anlage mit einer Brennerei spricht, daß ein solcher Betrieb bis

heute grundsätzlich Überschußwärme zur Verfügung hat, mit der die Biogasanlage geheizt werden kann. Dadurch steht das anfallende Gas völlig für die Erzeugung hochwertiger Energieformen zur Verfügung.

## Literaturnachweis

- [1] Houben, H.: „Motortreibstoff (Ethanol) aus Ein- und Zweijahrespflanzen wie Zuckerrüben, Manioka, Zuckerrohr“. Zuckerindustrie **105** (1980), 37 – 44.
- [2] Bernstein, K.: Gebr. Becker, D-4720 Beckum, persönliche Mitteilung.
- [3] Kooperationsprojekt Biotechnologie, BMFT/INT (Brasilien).
- [4] Dambroth, M.: „Pflanzenzüchterische und pflanzenbauliche Fragen der Ethanol-Erzeugung aus Kartoffeln“, Wintertagung 1981 der DLG in Würzburg, 12. – 13. 11. 1981.
- [5] EG-Kommissariat Energie, Bericht „Ethanol as a Fuel“, 1981.
- [6] Holo, J., und L. Koch: „Blattprotein: Möglichkeiten und Technologie“, Vortrag anläßlich der Tagung „Biotechnologie in Österreich“, 28. – 30. 5. 1980, Graz.
- [7] Misselhorn, K.: „Ethanol aus Stärke in energiewirtschaftlicher Sicht“, Vortrag anläßlich der Tagung „Biotechnologie in Österreich“, 28. – 30. 5. 1980, Graz.
- [8] Misselhorn, K.: „Supramyl – ein Verfahrensschritt für die Herstellung von Energie-Alkohol“, Vortrag anläßlich der Hannover-Messe 1980, Informationstag Agrotechnik.
- [9] Stegemann, J.: „Energiesparende Ethanol-Destillier-Anlagen“, Vortrag anläßlich der Hannover-Messe 1980, Informationstag Agrotechnik.

**Anschrift des Verfassers:** Prof. Dr. K. Misselhorn, Institut für Gärungsgewerbe und Biotechnologie, Abteilung für Brennerei- und Apparatechnik der VLSF, Seestraße 13, D-1000 Berlin 65.

(Eingegangen: 13. April 1982)

# Studies of Starch Size and Distribution in 33 Barley Varieties with a Celloscope

By M. J. Mäkelä, T. Korpela  
and S. Laakso, Turku (Finland)

Detailed starch particle distribution curves for 33 Finnish barley varieties were determined by a Celloscope technique. All of the curves showed two maxima with respect to both the number and mass. Reproducibility of the counting method was controlled by making duplicate samples to test critical points in the sample treatment. Amounts of the small granules in the barley varieties were rather similar, but average volumes of the large particles varied by even more than 100%. This showed that the essential differences between the varieties appeared in the region termed here as the medium size granules. Based on the knowledge of the accurate size distribution curves from 33 different barley varieties an easy and simple procedure was developed to evaluate granule size distributions of starch in barley samples well enough for practical purposes.

**Untersuchung von Stärkekorngröße und Korngrößenverteilung mit einem Celloscope.** Durch eine Celloscope-Technik wurden detaillierte Teilchen-Verteilungskurven für 33 finnische Gerstesorten ermittelt. Alle Kurven zeigten bezüglich Anzahl und Masse zwei Maxima. Die Reproduzierbarkeit der Auszählmethode wurde durch doppelte Proben zur Prüfung der für die Probenbehandlung kritischen Punkte kontrolliert. Die Anzahl der kleinen Körner in den Gerstesorten war ziemlich ähnlich, dagegen schwankten die durchschnittlichen Volumina der großen Körner um mehr als 100%. Dies zeigte, daß die wesentlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Sorten in dem Bereich der mittleren Korngrößen auftreten. Auf der Grundlage der Kenntnis der genauen Größenverteilungskurven von 33 verschiedenen Gerstesorten wurde ein leichtes und einfaches Verfahren zur Bestimmung der Korngrößenverteilung der Stärke in Gersteproben entwickelt, das praktischen Zwecken durchaus genügt.

## 1 Introduction

Size distribution and appearance of individual starch granules vary depending on their origin. On the other hand, deviations from a typical spherical granule might occur at higher size ranges [1].

Granules with irregular appearance present a special problem when their size distribution in terms of volume or mass is to be determined. This problem is especially pertinent to the widely used microscopic techniques because these are based on direct measurement of particles' cross-sectional area and include corrections for spherical particles. Consequently, any errors