EVALUIERUNG DER TECHNISCHEN UND WIRTSCHAFTLICHEN UMSETZBARKEIT EINES NEUARTIGEN VERFAHRENSKONZEPTS ZUR HERSTELLUNG VON PROTEINPRODUKTEN AUS SOJABOHNEN.

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Markus Seiler
aus Gütersloh

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.-Ing. U. Stahl
1. Berichter:	Prof. Dr. Dr. e.h. F. Meuser
2. Berichter:	Prof. Dr.-Ing. D. Knorr

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 07.09.2006

Berlin 2006
D 83

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen Menschen bedanken, ohne die diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dr. e.h. Friedrich Meuser für die wissenschaftliche Betreuung und Förderung dieser Arbeit sowie für die persönliche Unterstützung auch über die Grenzen des Instituts für Getreidetechnologie hinweg.

Herrn Prof. Ulf Stahl danke ich für die Übernahme des Vorsitzes und Herrn Prof. Dietrich Knorr für die Bereitschaft als Gutachter im Promotionsausschuss mitzuwirken.

Ich danke der Firma GEA Westfalia Separator AG, Oelde, der Firma Jäckering, Hamm und dem Institut für Getreidetechnologie der TU Berlin sowie der Bundesanstalt für Getreide-, Kartoffel- und Fettforschung, Detmold für ihre analytische, materielle und technische Unterstützung.

Herrn Dr.-Ing. Willi Witt, Leiter der BU Stärketechnik und Industrielle Biotechnologie der GEA Westfalia Separator Industrie GmbH, Oelde, spreche ich meinen besonderen Dank aus. Der praktische Teil der Arbeit wurde bei Westfalia Separator durchgeführt. Darüber hinaus möchte ich mich bei den Herren Detlef Ullmann und Kim Träger für deren ermutigende Unterstützung danken.

Bei den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der Westfalia Separator AG, insbesondere der BU Stärketechnik und des ZVT, möchte ich mich für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken. Insbesondere danke ich den Herren Dr. Mannweiler, Rassenhövel, Umlauf, Seemann und Frau Boszulak für die hilfreiche Unterstützung bei der praktischen Durchführung der Versuche und den analytischen Untersuchungen.

Ein herzlicher Dank gilt meinen Eltern, die mir auch für diesen Lebensabschnitt die notwendige Unterstützung und Beistand geboten haben.

Ganz besonders herzlich möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, insbesondere bei meiner Frau Bettina und meinen beiden Kindern, für die mir entgegengebrachte Rücksicht und Geduld sowie für die Schaffung notwendiger Freiräume während der Anfertigung dieser Arbeit.

Markus Seiler Gütersloh, im Juli 2006

Für Bettina:

Waren anfangs neue Ufer noch fern, so ist das vollendete Werk die Brücke zu neuen Wegen und auch Beginn eines neuen Lebensabschnitts, welches ohne Deine stete Unterstützung und Motivation nicht möglich geworden wäre.

1 Einleitung und Problemstellung 10

2 Bedeutung und Eigenschaften von Sojabohnen und Sojaproteinen 14

2.1 Weltproduktion an Sojabohnen 14

2.2 Handel mit Sojabohnen 14

2.3 Landwirtschaftliche Eigenschaften 17

2.3.1 Bedeutung des Feuchtigkeitsgehalts 17

2.4 Morphologische Zusammensetzung der Sojabohne 18

2.5 Chemische Zusammensetzung der Sojabohne 19

2.5.1 Proteine der Sojabohne 19

2.5.2 Enzyme der Sojabohne 21

2.5.3 Antinutritive Substanzen der Sojabohne 21

2.5.4 Lipide der Sojabohne 22

2.5.5 Kohlenhydrate der Sojabohne 23

2.5.6 Mineralstoffe der Sojabohne 24

2.6 Funktionelle Eigenschaften und Nährwert von Sojaproteinprodukten 24

3 Darstellung der Prozesstechnik zur Sojabohnenverarbeitung 28

3.2 Direkte Verarbeitung der ganzen Sojabohne zu Lebensmitteln 32

3.3 Indirekte Verarbeitung der Sojabohne zu Lebensmitteln 33

3.3.1 Ölraffination 33

3.3.2 Weiterverarbeitung von Sojaschrot 35

3.3.2.1 Sojaschrote als Futtermittel 36

3.3.2.2 Sojabohnenmehl als Lebensmittel 36

3.3.2.3 Sojaprotein-Konzentrate 37

3.3.2.4 Sojaprotein-Isolate 37

3.3.2.5 Texturierte Sojaproteine 37

4 Detaillierte Darstellung des Betriebs von Ölmühlen und der Herstellung von Sojaproteinprodukten 38

4.1 Betrieb von Ölmühlen 38

4.1.1 Ölgewinnung mit Schneckenpressen 38

4.1.2 Ölgewinnung durch Lösungsmittel-Extraktion 39

4.1.2.1 Annahme und Lagerung von Sojabohnen 40

4.1.2.2 Präparation der Sojabohnen zur Extraktion ... 40
4.1.2.3 Lösungsmittel Extraktion ... 46
4.1.2.4 Verarbeitungsschritte nach der Lösungsmittel-Extraktion ... 53
4.2 Sojaproteinprodukte ... 57
4.2.1 Herstellung von Sojaproteinprodukten ... 58
4.2.1.1 Herstellung von SPC ... 59
4.2.1.1.1 Wässrig-alkoholische Extraktion löslicher Substanzen ... 61
4.2.1.1.2 Extraktion löslicher Substanzen bei saurem pH-Wert ... 64
4.2.1.2 Herstellung von SPI ... 66
4.2.1.2.1 Wässrige Extraktion und Fällung ... 67
4.2.1.3 Grundlagen für den Einsatz von Dekantern bei der Herstellung von Sojaproteinprodukten ... 72
4.3 Kombination der Proteinproduktherstellung mit der Abtrennung von Rohöl ... 75
5 Wirtschaftlichkeit des neuen Verfahrens im Vergleich zum konventionellen Verfahren ... 86
5.1 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ... 87
5.2 Vergleichende Betrachtung der Investitionskosten ... 90
5.3 Vergleichende Betrachtung der Produktionskosten ... 92
6 Zusammenfassung ... 99

Verzeichnis der definierten Symbole, Einheiten, Abkürzungen und Begriffe

Symbolverzeichnis

α	Konuswinkel Dekanter	°
c	Konzentration	g/ l
℃	Grad Celsius = T [K] - 273,16 [K] T: thermodynamische Temperatur	-
Δ	Differenz	-
d	Durchmesser	mm
l	Liter	$[10^{-3}m^3]$
L	Länge	mm
n	Trommeldrehzahl Dekanter	min^{-1}
ω	Winkelgeschwindigkeit	1/s
g	Erdbeschleunigung	9,81 m/s^2
Ölanteil	Massenanteil Öl	g/g
π	die Zahl Pi	3,1416
p	Druck [10^5 Pa]	bar
P	mechanische Leistung	W
ρ	Dichte	kg/m^3
R	Partikelradius	mm
T	Temperatur	℃
t	Zeit	s

Abkürzungen und Begriffe

AACS	American Association of Cereal Chemists
Abb.	Abbildung
AOCS	American Oil Chemists' Society
ASA	American Soybean Association
BFD	Block Flow Diagrams; hier: Prozessblockschaltbild
Break even	Punkt, an dem Erlös und Kosten einer Produktion gleich sind (Gewinnschwelle)
CBOT	Chicago Board of Trade
DIN	Deutsches Institut für Normung
D_n	Differenzdrehzahl zwischen Trommel und Transportschnecke eines Dekanters
Emulsionsphase	Emulsion aus Öl- und wässriger Phase
Extrakt	lösliche und extrahierbare Bestandteile als flüssige Phase
Extraktionsrückstand	konzentrierte Feststofffraktion nach Konusaustrag des Dekanters
GMO	genetically modified organism; hier: genetisch veränderter Organismus
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations

FDA	Food and Drug Administration
FDS	Flash-Desolvertiersystem
HCl	Salzsäure
HD	Hochdruckhomogenisator
IPA	Isopropanol (2-Propanol)
IP	Isoelektrischer Punkt von Proteinprodukten
Kap.	Kapitel
N	Stickstoff
NaOH	Natronlauge
NFPA	National Fire Protection Association
NPU	Net protein utilisation
NSI	Nitogen Solubility Index
Ölphase	freie Ölphase
Overhead	wirtschaftliche Überschreitung; bspw., Mehraufwand, Mehrkosten, Gemeinkosten, administrative Arbeitskräfte etc.
P&ID	Process and Instrumentation Diagrams; Prozess- und Instrumentationsbilder
PDCAAS	Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score
PDI	Protein Dispersibility Index
PER	Protein efficiency ratio
PFD	Process Flow Diagrams; hier: Prozessfließbild
pH	pH-Wert
Scale up	Maßstabsvergrößerung von Herstellverfahren
SEM	Sojaextraktionsmehl
SPC	Soy protein concentrate; hier: Sojaproteinkonzentrat
SPI	Soy protein isolate; hier: Sojaproteinisolat
Sojamehl	gemahlene Sojabohnenkörner mit abgetrennten Schalenanteil, d < 400 µm
Tab.	Tabelle
TM	Trockenmasse
TM	Trockenmasse g/100g
TVP	Textured vegetable protein; hier: texturiertes Sojaprotein
UHT	Ultra-high temperature processing
USD	US Dollar
USDA	United States Department of Agriculture
VDTTK	Vordesolventieren, Desolventieren, Toasten, Trocknen und Kühlen
wässrige Phase	Phase mit löslichen Bestandteile (Protein, Zucker, Asche)
WF	White flakes
WHO	World Health Organization
WS	Westfalia Separator
Zentrat	geklärter, flüssiger Dekanterablauf

1 Einleitung und Problemstellung

Die einjährige Sojabohne, Glycine max L., gehört zu der Familie der Leguminosen (Schmetterlingsblüter) und stammt aus Ostasien, wahrscheinlich aus Nord-, beziehungsweise Zentral-China [1-5]. Es wird davon ausgegangen, dass erste Anpflanzungen der Sojabohne in Korea und Japan vor etwa 2000 Jahren erfolgten. Zwar hat China die längste Tradition im Anbau von Sojabohnen, jedoch nimmt es heute erst nach den USA, Brasilien und Argentinien weltweit den vierten Platz in der Weltproduktion ein (Abb. 1) [6]. Sojabohnen werden traditionell zur Produktion von Lebensmitteln, wie beispielsweise Tofu und Sojamilch, eingesetzt. Deshalb hat die Sojabohne eine wichtige Bedeutung in der asiatischen Ernährung. Heutzutage wird die Sojabohne über diese Anwendung hinaus weit mehr als Futtermittel und als Rohstoff für die industrielle Gewinnung von Öl sowie die Herstellung von Proteinprodukten und den dabei anfallenden Nebenprodukten eingesetzt.

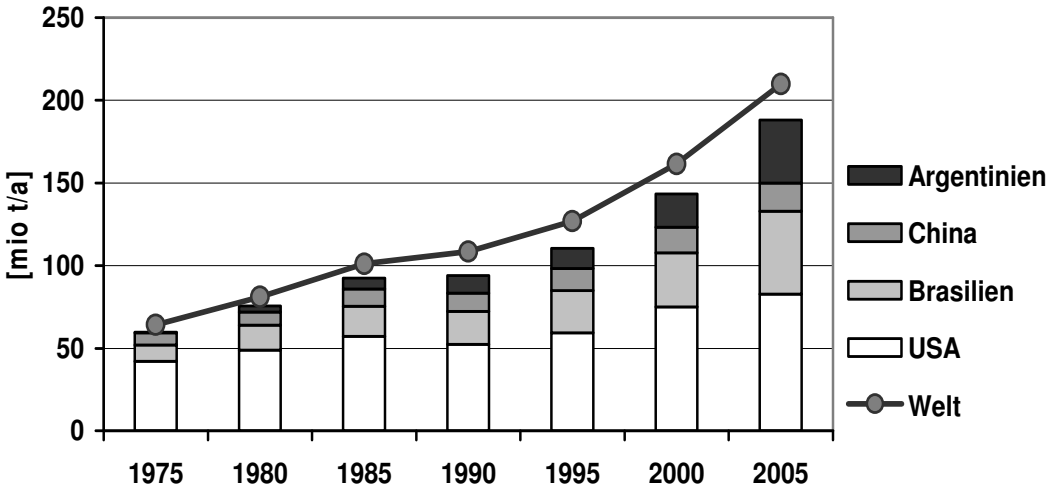


Abbildung 1: Weltproduktion an Sojabohnen (1975-2005).
Quelle: FAOSTAT data, 2006; [6]

Trotz des mit etwa 20% relativ niedrigen Ölgehalts, stellt die Sojabohne heute die bedeutendste Rohstoffquelle für Speiseöl dar. Derzeit wird der Bedarf an Speiseöl zu etwa 50 % aus Sojabohnen sichergestellt [1,6,7].

Bei der Verarbeitung von Sojabohnen in einer Ölmühle fallen pro Tonne extrahierten Rohöls etwa 4,5 Tonnen an Sojamehl an, das einen durchschnittlichen Proteingehalt von 54% hat. Dabei übersteigt der kommerzielle Wert aus dem extrahierten Sojamehl die aus dem Öl, wobei jedoch mit dem Öl die Wertschöpfung des Verfahrens erzielt wird. Damit ist das Sojamehl das eigentliche Hauptprodukt bei der Ölextraktion. Daraus ergibt sich für die Sojabohne eine Sonderstellung innerhalb der

Ölsaaten, die von besonderer Bedeutung für die menschliche und tierische Ernährung ist.

Es ist berechnet worden, dass mit der ausschließlichen Verwertung von Sojabohnen für die menschliche Ernährung etwa ein Drittel des dafür erforderlichen Proteinbedarfs gedeckt werden könnte [8]. Damit ist die Sojabohne eine der größten Rohstoffquellen für Nahrungsproteine, die bisher jedoch auf direktem Wege nur unzureichend genutzt wird, obwohl mit Blick auf die Welternährungssituation und die Sicherung der Ernährung daran an sich ein großes Interesse bestehen sollte. So werden beispielsweise die bei der Entölung anfallenden Sojaschrote weit überwiegend zur tierischen Ernährung für die Produktion von Fleisch und Eiern eingesetzt, obgleich daraus hochwertige Proteinprodukte für die menschliche hergestellt werden können. Diesbezüglich ist der Vergleich des Energieeinsatzes zur Herstellung eines Kilogramms an Protein zwischen pflanzlichen und tierischen Proteinen interessant, der sehr deutlich zu Gunsten pflanzlicher Proteine ausfällt (Abb. 2) [9,10]. Augenblicklich ist die Herstellung solcher Proteinprodukte aus Sojabohnen jedoch nicht größer als 750 Tausend Tonnen pro Jahr.

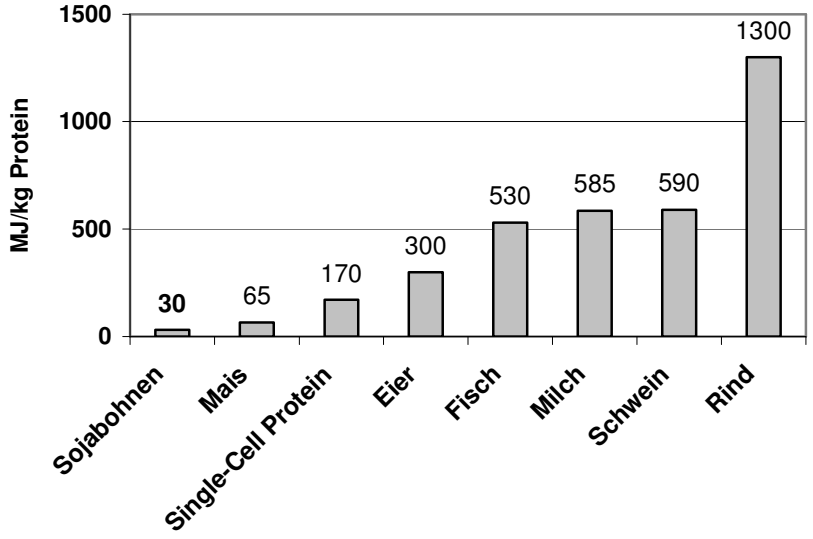


Abbildung 2: Darstellung des spezifischen Energieeinsatzes zur Produktion eines Kilogramms an Protein in verschiedenen Organismen.

Quelle: Gassmann, B., 1983; [9] u. Brown, L.R., 2005; [10]

Die Herstellung der Sojaproteinprodukte erfolgt derzeit nach der mit dem Lösungsmittel n-Hexan (C_6H_{14}) durchgeführten Öl-Extraktion aus dem anfallenden Sojaschrot [11-14]. Der Vorteil der Anwendung dieses Lösungsmittels liegt in seiner mit niedrigen Kosten verbundenen unbeschränkten Verfügbarkeit, seiner mit nur geringen Verlusten verbundenen Rezirkulierbarkeit im Prozess und der Effizienz der

Entölung. Der Einsatz des Hexans ist jedoch auf Grund des Explosionsrisikos beim Betrieb der Ölmühle, seiner toxikologischen Wirkung und den umweltgefährdenden Emissionen umstritten [15-17]. Außerdem kann auf dem Stand der Technik ein Restgehalt an Hexan im Sojaschrot nicht vermieden werden. Deshalb hat es Versuche gegeben, andere Lösungsmittel zur Ölextraktion einzusetzen [15,18-23], die bezogen auf den industriellen Einsatz bislang alle erfolglos geblieben sind. Das hat sich daraus ergeben, dass sich die Ölextraktion primär nach den Bedürfnissen der Ölmühlen richtet, große Quantitäten an Sojabohnen zur Ölextraktion zu verwenden. Eine Tageskapazität von 1.000 Tonnen Sojabohnen stellt bereits die untere Grenze für die Wirtschaftlichkeit einer Ölmühle dar. Bereits diese Kapazität einer Ölmühle überschreitet die übliche Kapazität einer typischen Sojaproteinanlage um den Faktor 10.

Auf Grund der Divergenz der Kapazitäten, ist die Prozesstechnik der Ölmühle auf die Ölextraktion ausgerichtet und optimiert, ohne dabei die für die Proteinproduktherstellung erforderlichen thermischen Prozessbedingungen zu berücksichtigen. Es werden in einigen Ölmühlen, die gleichzeitig Proteinanlagen betreiben, zwar Bemühungen unternommen die thermischen Prozessbedingungen aufeinander abzustimmen, daraus resultieren jedoch meist nur Kompromisslösungen. Da bei der Herstellung von Proteinprodukten der Erhaltung der Löslichkeit der Proteine eine Schlüsselbedeutung zukommt, muss beispielsweise die Extraktionstemperatur auf die Verhinderung der Denaturierung der Proteine abgestellt werden [1,4,24]. Das kann eine Verminderung der Verarbeitungsleistung zur Ölextraktion zur Folge haben. Darüber hinaus kann die Desolventierung der Schrote nicht mit den üblicherweise eingesetzten Toastern durchgeführt werden, sondern es sind dafür aufwendige Flash Desolventiser Systeme (FDS) erforderlich, wodurch allerdings die Proteine thermisch deutlich weniger belastet werden als mit den Toastern.

Eine hohe Löslichkeit ist für die Extraktion der Proteine aus den Sojaschroten eine Grundbedingung, um eine hohe Ausbeute an Proteinprodukten mit den gewünschten funktionellen Eigenschaften gewährleisten zu können [25,26]. Daraus ist zu erkennen, dass es für den Betrieb einer Ölmühle, in der die Ölextraktion und die Proteinproduktherstellung betrieben werden, insbesondere für die Proteinproduktherstellung einen auf den Rohstoffeinsatz bezogenen Zielkonflikt gibt. Deshalb sollte es für die Proteinproduktherstellung einen eigenständigen Weg geben, welcher der Relation zwischen dem Protein- und dem Ölgehalt in der Sojabohne Rechnung trägt und aus dem sich ergeben sollte, dass die Wertschöpfung aus den Sojaproteinprodukten größer als die aus dem Öl sein sollte. Aus dieser Forderung wurde die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit abgeleitet, in der es darum ging, ein im Pilotmaßstab entwickeltes neuartiges Verfahren zur Sojaproteinproduktherstellung in ein prozesstechnisches Konzept umzusetzen und für dieses eine erste Abschätzung für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens durchzuführen.

In dem neuartigen Pilotverfahren ist die Herstellung von mit der Entölung des Rohstoffs über die Verwendung eines wässrig-alkoholischen Lösungsmittels direkt kombiniert [28-32]. Der Ansatz für diese Kombination ergab sich aus der im FRIOLEX Verfahren gemachten Beobachtung, dass Teile des Öls im Sinne der

Ölgewinnung mittels des genannten Lösungsmittels aus zerkleinerten ölhaltigen Rohstoffen durch Zentrifugalabscheidung in einem Schritt als klare Ölphase abgetrennt werden kann [33-36]. Der dabei erreichbare Entölungsgrad reicht jedoch nicht aus, um aus dem Entölungsrückstand Proteinprodukte gewinnen zu können, wofür ein Restölgehalt von < 2% erforderlich ist. Deshalb musste ein neuer verfahrenstechnischer Weg gefunden werden, um diese Bedingung einstellen zu können. Da es dabei um die Proteinproduktherstellung und nicht um die Ölgewinnung ging, war es nicht erforderlich, einen klaren Ölablauf in einem Schritt zu erhalten, so dass das Verfahren im Hinblick auf die Zentrifugalabscheidung auf eine in mehreren Schritten wiederholte Feststoffabscheidung bei gleichzeitiger Trennung des Lösungsmittels zusammen mit dem Öl abgestellt werden konnte. Die wiederholende Abtrennung des Feststoffs wurde gleichzeitig mit einer Nasszerkleinerung durch Hochdruckhomogenisation (HD) verbunden, um den für die Entölung erforderlichen möglichst vollständigen Zellaufschluss zu erreichen. Dabei war es überraschend, dass die Hochdruckhomogenisation so geführt werden konnte, dass es trotz des reichlich vorhandenen Lezithins zu keiner Emulsionsbildung zwischen Öl und Protein kam. Die Anwendung und Optimierung dieser Verfahrenstechnik im Pilotmaßstab führte schließlich zu dem notwendigen Entölungsgrad für die nachfolgende Proteinextraktion aus dem feuchten Entölungsrückstand. Diese erfolgte für die Sojaprotein-Konzentrate (SPC) mit dem gleichen Lösungsmittel.

Dieser Erkenntnisstand wurde für die Ausarbeitung des Verfahrenskonzepts verwendet, dessen wesentlicher Vorteil in der Ausrichtung der Sojabohnenverarbeitung auf die Proteinproduktherstellung zu sehen ist [37-39]. Daraus ergibt es sich, dass die Anlagenkapazität ohne Rücksicht auf die Ölgewinnung ausgelegt werden kann. Die Ausarbeitung des Verfahrenskonzepts erforderte eine umfassende Betrachtung der bestehenden Prozesstechnik sowohl zur Ölgewinnung als auch zur Proteinproduktherstellung aus Sojabohnen. Das diente der notwendigen Abgrenzung der Schnittstellen zwischen beiden Teilprozessen. Diesbezüglich musste die Abgrenzung unter dem Gesichtspunkt der höheren Wertschöpfung aus den Proteinprodukten gegenüber dem Öl erfolgen. Außerdem war eine Betrachtung über die Bedeutung und den Stellenwert der Sojabohnen in der weltweiten Ernährung erforderlich, um auf diesen Hintergrund die Relevanz des Verfahrens für die Sojabohnenverarbeitung einordnen zu können.

2 Bedeutung und Eigenschaften von Sojabohnen und Sojaproteinen

Auf Grund der großen Bedeutung, die das neuartige Verfahrenskonzept für die Herstellung von Sojaproteinprodukten und dabei insbesondere für die zukünftige Verwertung der Sojabohnen zur Sicherung der Proteinversorgung in der Ernährung haben kann, soll hier zunächst auf die Produktion, den Handel und die verschiedenen Aspekte der landwirtschaftlichen und bio-chemischen und morphologischen Eigenschaften der Sojabohne sowie der ernährungsphysiologischen und funktionellen Eigenschaften ihrer Inhaltsstoffe eingegangen werden.

2.1 Weltproduktion an Sojabohnen

Die Weltproduktion an Sojabohnen ist in den letzten 25 Jahren mehr als verdreifacht worden. Die derzeitige Produktionsmenge übersteigt 200 Millionen Tonnen (Abb. 3). Vier Länder dominieren die Produktion von Sojabohnen. Es sind die USA (42%), Brasilien (24%), Argentinien (17%) und China (9%) [6]. Dieses starke Wachstum hat sich durch die erhebliche Ausweitung des Anbaus in den USA, in Brasilien und Argentinien ergeben. Darüber hinaus haben die Steigerung des Hektarertrags und Maßnahmen in der Pflanzenzüchtung sowie der Einsatz fortschrittlicher Technik in der Agrarwirtschaft dazu beigetragen (Tab. 1).

Tabelle 1: Anstieg in der Produktion und im Ertrag an Sojabohnen (1975 – 2005)

Land	Produktion [Mio. t]				Ertrag [t/ha]	
	1975	1985	1995	2005	1975	2005
USA	42,1	57,1	59,2	82,8	1,94	2,87
Brasilien	9,9	18,3	25,7	50,2	1,69	2,19
Argentinien	0,5	6,5	12,1	38,3	1,36	2,73
China	7,3	10,5	15,4	16,9	1,04	1,77
Welt	**64,3**	**101,2**	**127,0**	**209,9**	**1,66**	**2,29**

Quelle: FAOSTAT data, 2006; [6]

2.2 Handel mit Sojabohnen

Die Sojabohnen sind ein Welthandelsprodukt; sie werden als Massenprodukt an Börsen gehandelt. Spot und Future Preise sind wie bei fast allen Agrarprodukten keine reinen Marktpreise. Bestimmte Marktregularien haben dazu beigetragen, dass der Preis für Sojabohnen auf dem Weltmarkt bemerkenswert stabil geblieben ist

(Abb. 4) [40,41], wenn es nicht bedingt durch Ernteausfälle zu starken Preisschwankungen kam.

Mehr als 25 % der Weltproduktion werden als unbehandeltes oder verarbeitetes Rohmaterial international gehandelt (Tab. 2) [42]. Die USA und Brasilien sind die führenden Exporteure, mit einem ungefähren Anteil von 80% am gesamten Handel. Den größten Anteil an diesem Handel bestreiten einige wenige Grossunternehmen. Hauptsächlich werden Sojabohnen in die Europäische Union und China eingeführt. Beträchtliche Mengen an Sojabohnen werden in den wesentlichen Anbauländern direkt zu Sojaschrot und/oder Sojaöl für den Export verarbeitet. Daraus können sich aus dem lokalen Bedarf für beide Produkte Ungleichgewichte in der internationalen Vermarktung ergeben.

Sojabohnen werden in Qualitätsklassen eingeteilt und entsprechend dieser Klassierung preislich eingestuft [43]. Darüber hinaus werden die Sojabohnen auch hinsichtlich ihres Schüttgewichts, des Anteils geschädigter Sojabohnen und deren Farbe (Anteil an grünen, braunen oder schwarzen Bohnen) bonitiert. Zusätzlich kann der Käufer andere Qualitätskriterien festlegen, welche Bedeutung für die endgültige Verwendung haben mögen. Außerdem ist der Feuchtegehalt von besonderer Bedeutung, der immer angegeben werden muss und dies unabhängig von der Klassierung.

Tabelle 2: Export von Sojabohnen und Sojaprodukten der wesentlichen exportierenden Länder im Jahr 2000 (Angaben in Millionen Tonnen)

Land	Sojabohnen	Sojaschrot	Sojaöl
USA	27,0	6,3	0,6
Brasilien	12,7	10,3	1,1
Argentinien	4,1	14,4	3,0
Welt	**49,7**	**39,7**	**7,9**

Quelle: FAOSTAT data 2006; [6], World Bank, 2002; [42]

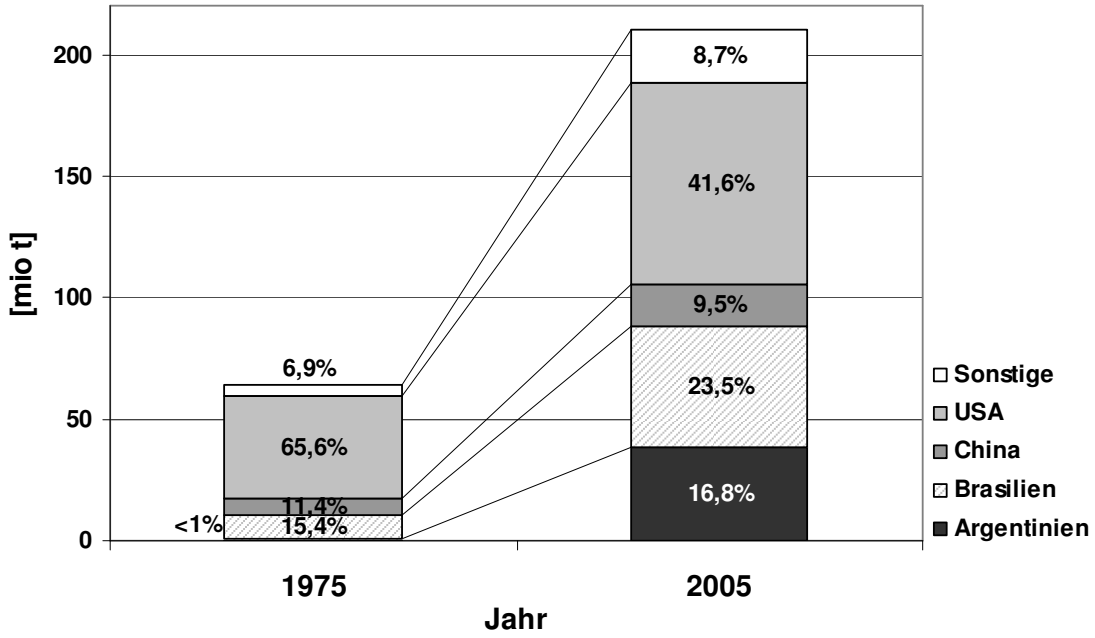


Abbildung 3: Anteil der wichtigsten Produktionsländer an der Weltproduktion von Sojabohnen in 1975 und 2005.

Quelle: FAOSTAT data; 2006 [6]

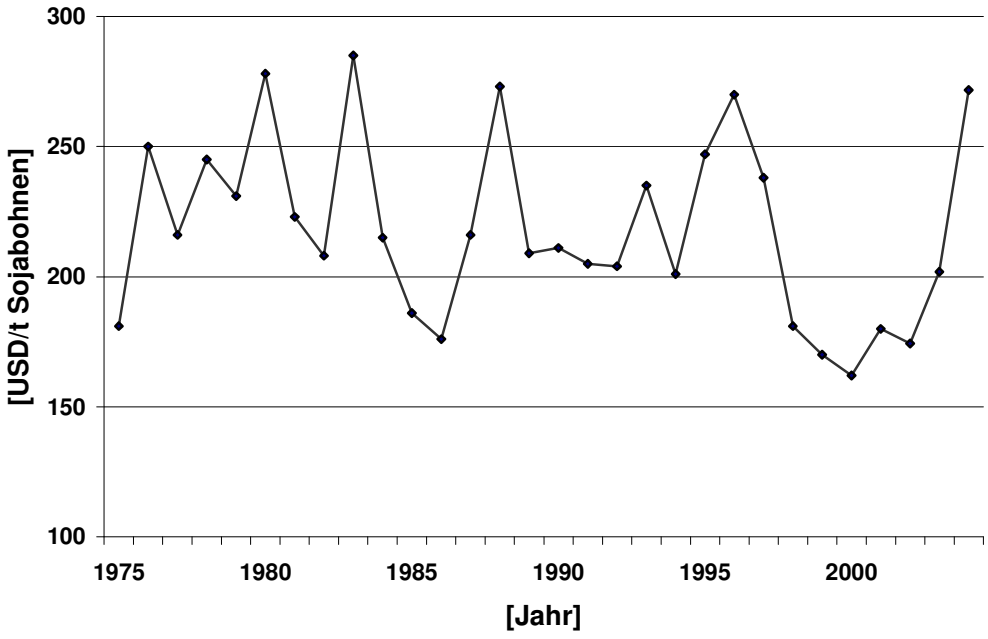


Abbildung 4: Darstellung der Preisentwicklung für Sojabohnen für den Zeitraum von 1975 bis 2004.

Quelle: CBOT, Chicago Board of Trade; 2005 [41]

2.3 Landwirtschaftliche Eigenschaften

Sojabohnen wachsen auf nahezu allen Böden, mit der Ausnahme von Sandböden mit geringer Wasserhaltung. Der für das Wachstum der Pflanze ideale pH-Wert liegt im Bereich von 6,0 bis 6,5. Die Sojapflanze gedeiht am besten in gemäßigten Klimazonen. Sie ist eine so genannte Kurztag-Pflanze, die zu blühen beginnt, wenn die Tageslängen unter 14 Stunden sinken [44-47]. Die Züchtung von Sorten mit unterschiedlichen Reifeperioden erlaubt eine an den Breitengrad angepasste Produktion. Neuere Zuchtsorten können auch in subtropischen und tropischen Zonen angebaut werden. Deshalb konnte der Sojaanbau wesentlich ausgedehnt werden.

Vorteilhaft ist für den Anbau von Sojabohnen, dass 50% des für die Proteinbildung erforderlichen Stickstoffs durch Knöllchenbakterien zur Verfügung gestellt werden. Nachteilig ist es allerdings, dass die Pflanze bis zur Ausreifung relativ viel Wasser benötigt. Deshalb kann eine Bewässerung unabdingbar sein.

Die Aussaat erfolgt im späten Frühling bis Anfang Sommer. Bereits Anfang bis Mitte August ist die volle Reife der Sojabohnen erreicht. Zu diesem Zeitpunkt werden die Blätter gelb und fallen schließlich ab. Gleichzeitig reduziert sich der Feuchtegehalt der Sojabohnenkotyledonen. Die Ernte sollte möglichst bei einem Restfeuchtegehalt der Bohnen von 13% erfolgen. Oberhalb dieses Wertes müssen die geernteten Bohnen getrocknet werden, um sie lagerstabil zu machen. Im Falle eines zu niedrigen Restfeuchtegehalts bei der Ernte besteht die Gefahr, dass die Sojabohnen durch die mechanische Beanspruchung der Erntemaschine in ihre Kotyledonen zerteilt oder diese gar zersplittert werden.

2.3.1 Bedeutung des Feuchtigkeitsgehalts

Der Feuchtigkeitsgehalt der Sojabohne muss während der Lagerung auf 12 – 13 % gehalten werden [48]. Liegt der Feuchtigkeitsgehalt höher wird die Sojabohne von Schimmel befallen. Das kann zur Selbsterhitzung führen, die mit einem beschleunigten Verderb des Lagerguts einhergeht. Unterhalb eines Feuchtigkeitsgehalts von 12% werden die Sojabohnen brüchig. Das führt zum beschleunigten Ranzigwerden während der Lagerung. Deshalb ist es erforderlich, den Feuchtigkeitsgehalt während der Lagerung zu kontrollieren und entsprechend genau einzustellen, um die Verarbeit- und Verwertbarkeit der Sojabohnen sicherzustellen.

2.4 Morphologische Zusammensetzung der Sojabohne

Die Form der Sojabohnen variiert von nahezu kugelförmigen bis zu gestreckten, flachen Bohnen. Die industriell zur Ölgewinnung eingesetzten Bohnen sind von kugelförmiger Gestalt, während die gestreckten Varietäten als Gemüse genutzt werden. Die Farbe der Bohnen kann gelb, grün, braun oder schwarz sein. Nur gelbe Bohnen werden industriell zur Ölextraktion eingesetzt. Andersfarbige Bohnen gelten für industrielle Anwendungen als Verunreinigung. Die übliche Maßzahl zur Beurteilung der Bohnengröße ist die Anzahl von Bohnen bezogen auf eine bestimmtes Volumen oder Gewicht. Die industriell verarbeiteten Sojabohnen wiegen durchschnittlich 18-20 Gramm pro 100 Sojabohnen, während jene der gestreckten Form ein wesentlich höheres Gewicht haben.

Die Bohne besteht aus der Samenschale (Schale), den beiden Keimblättern, den Kotyledonen und dem Keimling, der 2 % vom Bohnengewicht ausmacht [49]. Die Keimblätter haben einen Anteil von 90 Prozent am Gesamtgewicht der Bohne. In den palisadenartig geformten Zellen der Kotyledonen ist praktisch das gesamte Öl und Protein enthalten. Elektronenmikroskopische Aufnahmen dieser Zellen konnten zeigen, dass so genannte „Protein- und Lipid Bodies“ vorhanden sind. Die Protein Bodies sind durchschnittlich 10 µm groß, während die wesentlich kleineren Lipid Bodies etwa 0,2 - 0,5 µm messen. Die Abbildung 5 zeigt einen schematischen Querschnitt durch eine Bohne [50-53].

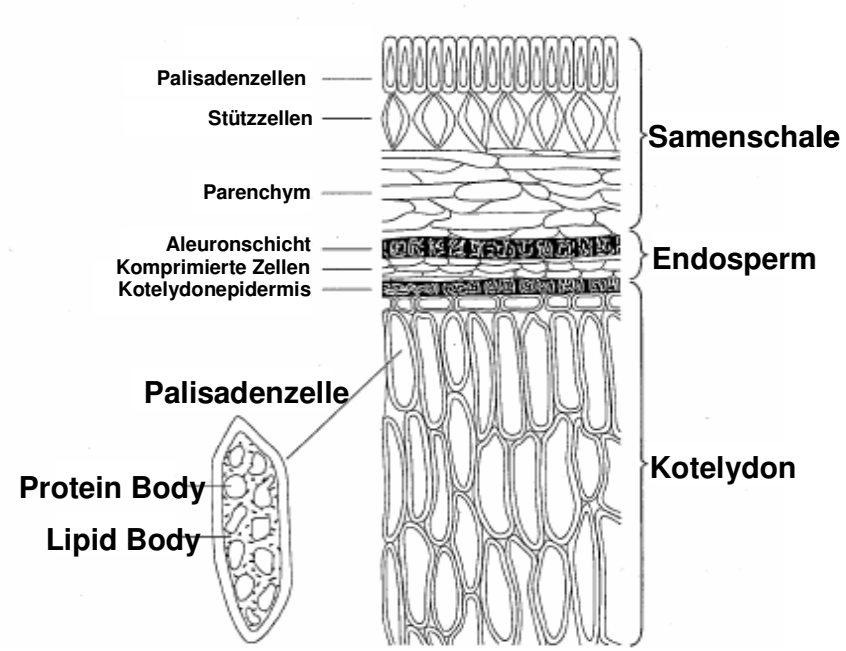


Abbildung 5: Schematischer Querschnitt durch eine Sojabohne.

Quelle: Smith und Circle; 1972 [50]

Die Kotelydonen sind von der Samenschale umhüllt, welche einen Anteil von 8 Prozent am Gesamtgewicht hat. Die Samenschale hält die Kotyledonen zusammen und stellt eine wirksame Schutzschicht dar. Die Samenschale kann durch den Einsatz von Walzen- oder Scheibenmühlen und nachfolgende Aspiration von den Kotelydonen abgetrennt werden.

2.5 Chemische Zusammensetzung der Sojabohne

Die chemische Zusammensetzung der Sojabohne unterliegt, ebenso wie die morphologische, einer natürlichen Schwankungsbreite, welche sich aus der Varietät und den Wachstumsbedingungen ergibt. Durch züchterische Maßnahmen ist es gelungen, den Proteinanteil auf 40-45 % und den Lipidanteil auf 18-20 % in der Trockensubstanz der Sojabohnen zu erhöhen [54-56]. Dabei hat sich gezeigt, dass mit der Erhöhung des Proteinanteils um 1%, eine Erniedrigung des Ölanteils um 0,5% einhergeht. Wahrscheinlich ist dieser Zusammenhang zwischen Protein und Öl, der Grund für das geringe Interesse an Varietäten mit hohem Proteinanteil.

Tabelle 3: Morphologische und chemische Zusammensetzung der Sojabohne

Bestandteil	**Anteil (%)**	**Protein**	**Fett**	**Kohlenhydrate**	**Asche**
		(% TS)			
Kotelydonen	90	43	23	29	5,0
Samenschale	8	9	1	86	4,3
Keimling	2	41	11	43	4,4
Gesamt	**100**	**40**	**21**	**34**	**4,9**

Quelle: Schuster (1985); [55]

2.5.1 Proteine der Sojabohne

Die Proteine der Sojabohnen, bestehen aus nieder- und hochmolekularen Proteinfraktionen. Darunter gibt es eine dominierende Proteinfraktion, das Glycinin, das zusammen mit dem Conglycinin die Reserveproteine der Sojabohne ausmacht. Die Sojaproteine können nach ihrer Löslichkeit in verschiedenen Medien charakterisiert werden. Die Löslichkeit der Sojaproteine in Wasser hängt stark vom pH-Wert ab (Abb. 6) [51,57]. Bei einer thermisch unbehandelten Sojabohne können etwa 80% der enthaltenen Proteine unter neutralen oder alkalischen Bedingungen wässrig in Lösung gebracht werden. Das Löslichkeitsminimum liegt bei einem pH-Wert von 4,2 bis 4,6. Dieser Bereich des pH-Werts wird als der isoelektrische Bereich der Sojaproteine bezeichnet.

Auf diesem Löslichkeitsverhalten der Sojaproteine basieren alle Verfahren zur Proteinproduktgewinnung aus Sojabohnen oder deren weiterverarbeiteten Produkten, wobei allerdings die hohe Löslichkeit der nativen Sojaproteine von mindestens 80% nicht erreicht wird, da diese durch die notwendige Anwendung thermischer Verfahrensschritte bei der Sojabohnenverarbeitung teilweise verloren geht. Das Löslichkeitsverhalten der Sojaproteine ist vor allen Dingen für die selektive Abreicherung unerwünschter stickstoffhaltiger Substanzen in den Proteinprodukten von großer Bedeutung.

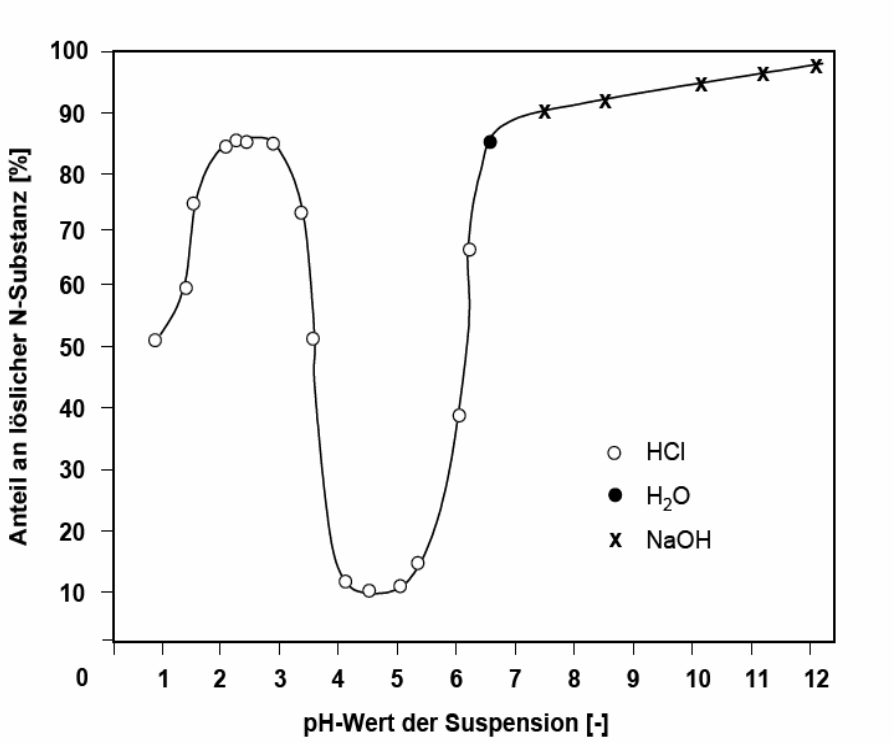


Abbildung 6: Einfluss des pH-Werts auf die Löslichkeit von Sojaproteinen aus entfettetem Sojamehl.

Quelle: Wolf, W.J. und Cowan, J.C; 1975; [51]

Zur Erläuterung dieses Zusammenhangs sei hier auf die Arbeiten von Wolf [56] verwiesen, der eine Charakterisierung der Sojaproteine nach ihren Sedimentationskonstanten eingeführt hat. Danach gibt es vier Hauptfraktionen, welche als 2 S, 7 S, 11 S und 15 S bezeichnet werden [58,59]. Der Buchstabe S steht für Svedberg Einheiten [60], welche die charakteristische Sedimentationskonstante in Wasser bei 20 °C angibt. Die so erhaltenen Werte sind keine exakten Angaben, jedoch zeigen sie eine gute Indikation auf. So hat beispielsweise das 11 S Globulin die Sedimentationskonstante von 12,3.

Die 2 S Fraktion besteht aus niedermolekularen Polypeptiden in einem Bereich von etwa 8.000 bis 20.000 Dalton. Diese Fraktion enthält die Trypsin-Inhibitoren der Sojabohnen. Die 7 S Fraktion ist stark heterogen. Die Hauptkomponente dieser Fraktion ist das β-Conglycin, ein Zucker enthaltenes Globulin mit einem Molekuargewicht von etwa 150.000. Daneben enthält diese Fraktion Enzyme (β-Amylase und Lipoxygenase) und Hemaglutinine. Die 11 S Fraktion besteht aus Glycinin, das den größten Anteil an den Sojaproteinen hat. Die 7 S und 11 S Fraktionen haben einen Anteil von etwa 70% am Gesamtprotein der Sojabohne. Glycinin hat ein Molekulargewicht von 320.000 – 350.000 und besteht aus 12 Untereinheiten, welche durch Wasserstoff- und Disulfid-Brücken miteinander verbunden sind. Daraus resultiert die Fähigkeit der Sojaproteine, assozieren- bzw. dissozieren zu können. Darauf beruhen ihre funktionellen Eigenschaften, darunter ihre Texturisierbarkeit. Das 15 S Protein ist wahrscheinlich eine andere Form des Glycinins. Conglycinin und Glycinin sind als Protein Bodies in den Zellen der Kotyledonen abgelagert. Die Fraktionierung der Sojaproteine nach ihren Sedimentationskonstanten lässt das verfahrenstechnische Problem der Herstellung von Proteinprodukten hoher ernährungsphysiologischer und sensorischer Qualität erkennen, das insbesondere in der Abreicherung unerwünschter Stoffe besteht.

2.5.2 Enzyme der Sojabohne

Unter den in Sojabohnen vorkommenden Enzymen sind die Lipase und die Lipoxygenase sowohl für die Ölgewinnung als auch die Proteinproduktherstellung von besonderer Bedeutung. Es entstehen durch ihre Wirkung bei der Sojabohnenverarbeitung freie Fettsäuren und Fettsäureperoxid, die maßgeblich für den ranzigen und bohnenartigen Geschmack in den Endprodukten verantwortlich sind. Im Prozessablauf muss deshalb dafür gesorgt werden, dass über thermische Verfahrensschritte die Aktivität dieser Enzyme inhibiert wird, um Qualitätseinbußen bei den Endprodukten zu vermeiden.

Hinzuweisen ist außerdem auf das Enzym Urease, das zwar keinerlei technologische Bedeutung hat, dafür aber über seine Aktivitätsmessung als wichtiger Indikator für eine thermische Behandlung der Sojabohnen dient. Aus dem Messwert kann direkt auf eine Proteindenaturierung geschlossen werden, so dass damit die Bohnen im Hinblick auf ihre Verarbeitbarkeit zu Proteinprodukten selektiert werden können.

2.5.3 Antinutritive Substanzen der Sojabohne

Die Beseitigung der antinutritiven Substanzen der Sojabohne stellt für die Herstellung von Proteinprodukten ein besonderes Problem dar, da ihre Beseitigung durch thermische Prozessschritte wegen der damit einhergehenden Proteindenaturierung nur beschränkt möglich ist. Zu diesen antinutriven Substanzen zählen insbesondere die Trypsin-Inhibitoren, die Lectine (Hemaglutinine) und die Phytate. Während die Aktivität der Trypsin-Inhibitoren und Lectine unter den Prozessbedingungen weitgehend vermindert werden kann, gibt es für die Beseitigung der Phytate bisher

keine praktikable Lösung. Das muss bei der Entwicklung von Lebensmitteln berücksichtigt werden, bei denen Sojaproteinprodukte in höherer Konzentration vorgesehen sind.

Eine Erklärung für den schädlichen Effekt der Trypsin-Inhibitoren wurde in der Beobachtung gefunden, dass die Hemmung des Trypsins im Verdauungsapparat Proteinverdaulichkeit und –nutzen vermindert [61-64]. Da jedoch gezeigt werden konnte, dass Wachstum auch dann herabgesetzt war, wenn bereits vorverdaute Proteine zusammen mit einer Dosis Trypsin-Inhibitor verfüttert wurden, kann die Hemmung des Trypsins nicht der einzige physiologische Effekt des Trypsin-Inhibitors sein. Es wurde ferner festgestellt, dass erhöhte Ausschüttung der Pankreas in den Verdauungsapparat, zu internen Verlusten an Protein führt [65]. Da die durch den Pankreas ausgeschütteten Proteine reich an schwefelhaltigen Aminosäuren sind, kann dieser interne Verlust, besonders bei einer Ernährung die arm an Methionin und Cystein ist, von Bedeutung sein.

2.5.4 Lipide der Sojabohne

Das Rohöl aus der Sojabohne besteht typischer Weise aus 96% Triglyceriden, 2% Phospholipiden, 1,6% Saponinen, 0,5% freien Fettsäuren und geringen Anteilen an unverseifbaren Substanzen sowie karotinoiden Pigmenten [66].

Die Phospholipide sind oberflächenaktive Substanzen, welche an der Oberfläche der Lipid Bodies lokalisiert sind. Sie gelangen bei der Ölextraktion mit Hexan in das Sojaöl, in dem sie zwei- bis dreimal höher konzentriert vorkommen als in anderen Ölen aus Leguminosen. Die hohe Konzentration erklärt sich daraus, dass die Lipid Bodies der Sojabohne viel kleiner sind, als die anderer Leguminosen. Die Lipid Bodies der Sojabohnen besitzen deshalb die bei weitem größere mit Phospholipiden beladbare Oberfläche.

Die Phospholipide, die unter dem Sammelbegriff Lezithin zusammengefasst werden, wirken als starke Emulgatoren. Deshalb müssen sie aus dem Rohöl abgetrennt werden. Das geschieht durch ein als Entschleimung bezeichnetes Verfahren, auch „degumming“ genannt, bei dem die Phospholipide hydratisiert werden. Dadurch verlieren sie ihren lipophilen Charakter und können als öl-unlösliche Substanz zentrifugal abgetrennt werden [67].

Im Gegensatz zur Verwendung des unpolaren Hexans zur Lösungs-Extraktion von Öl, bei dem das Lezithin ebenfalls im Hexan gelöst wird, führt die Verwendung polarer Lösungsmittel zu einer Verdrängungs-Extraktion des Öls und zum weitgehenden Übergang des Lezithins in das Lösungsmittel [68-70], sofern es nicht zuvor wegen der starken Emulgierwirkung des Lezithins zur Emulsionsbildung zwischen Protein, Öl und polarem Lösungsmittel kommt. Dieser gravierende Unterschied in der Verteilung der Inhaltsstoffe der Sojabohne auf die verschiedenen Lösungsmittel ist von erheblichem Einfluss auf die konzeptionelle Neugestaltung der Proteinproduktgewinnung und wirkt sich auch auf die Raffination des im Prozessablauf anfallenden Rohöls aus.

Im herkömmlichen Prozess schließt die Raffination des Öls eine Desodorierung ein, bei der gleichzeitig unverseifbare Komponenten teilweise entfernt werden, die vornehmlich aus Tocopherolen und Sterolen bestehen. Freie Fettsäuren und Pigmente werden aus dem Öl ebenfalls während der Raffination entfernt. Dadurch wird der Anteil an Nicht-Triglyceriden im raffinierten Öl auf unter 1% reduziert. Die Fettsäurezusammensetzung des Sojaöls ist in Tabelle 4 aufgeführt [66,71].

Tabelle 4: Fettsäurezusammensetzung von Sojaöl

Fettsäure		Gewichtsprozent
Laurinsäure	12:0	4,5
Myristinsäure	14:0	4,5
Palmitinsäure	16:0	11,6
Stearinsäure	18:0	2,5
Ölsäure	18:1	21,1
Linolsäure	18:2	52,4
Linolensäure	18:3	7,1

Quelle: Pryde, E.H. (1980), [66]

2.5.5 Kohlenhydrate der Sojabohne

Sojabohnen enthalten etwa 40% Kohlenhydrate. Diese können in zwei Gruppen eingeteilt werden, die löslichen Zucker ca. 17% und die unlöslichen Fasern ca. 21%. Dabei setzen sich die löslichen Zucker überwiegend aus Sucrose (6%), Stachiose (5%) und Raffinose (4%) zusammen [71]. Während die löslichen Zucker fast ausschließlich nur in den Kotyledonen vorkommen, verteilen sich die unlöslichen Fasern etwa je zur Hälfte auf die Samenschalen und die Kotyledonen. Die unlöslichen Fasern bestehen aus verschiedenen Polysacchariden unter denen Zellulose, Hemizellulosen und Pektine vorkommen. Die Samenschalen enthalten den größten Anteil an der insgesamt vorhandenen Zellulose. Die unlöslichen Hemizellulosen und Pektine kommen hauptsächlich als Zellwandbestandteile in den Kotyledonen vor. Sie zeichnen sich durch ein starkes Wasseraufnahmevermögen aus.

Die Herstellung von Sojaproteinprodukten erfordert die Entfernung der Kohlenhydrate in Abhängigkeit von der Art des herzustellenden Produkts in unterschiedlichem Ausmaß. Die Erfüllung dieser Forderung ergibt sich aus der Festlegung des Mindestproteingehalts der Produkte, der für Sojaprotein-Konzentrate (SPC) 65 % und für Sojaprotein-Isolate (SPI) 90 % in der Trockensubstanz betragen muss. Die Einstellung des Proteingehalts kann bei SPC durch Extraktion der Kohlenhydrate und bei den SPI durch Extraktion der Proteine aus entölten Sojaprodukten (Flocken, Schroten) erfolgen. Eine weitgehende Entfernung der löslichen Kohlenhydrate ist dabei von essentieller Bedeutung für den Einsatz der Proteinprodukte in Lebensmitteln, da sonst bei deren Verzehr Flatulenz entsteht.

2.5.6 Mineralstoffe der Sojabohne

Die Mineralstoffe der Sojabohne werden über den Aschegehalt ermittelt, der etwa fünf Prozent von der Trockensubstanz der Sojabohne ausmacht. Die Mineralstoffe sind praktisch ausschließlich in der ölfreien Substanz der Sojabohne lokalisiert, so dass unter Berücksichtigung des Aschegehalts der Schalen etwa 95% der Mineralstoffe in den Kotyledonen vorkommen [71]. Sie liegen dort überwiegend organisch gebunden als Phytate vor. Das wirkt sich in so fern negativ aus, als dass bei der Verarbeitung der Sojabohnen die Phytate zu großen Teilen in den Sojamehlen und Sojaproteinprodukten verbleiben. Dadurch ist die biologische Verfügbarkeit der Mineralstoffe aus diesen Produkten stark eingeschränkt und ihr Einsatz in Lebensmitteln wirkt sich zusätzlich negativ auf die Verfügbarkeit von Mineralstoffen aus der Nahrung aus [61-64].

2.6 Funktionelle Eigenschaften und Nährwert von Sojaproteinprodukten

Sojaproteinprodukte werden in der modernen westlichen Ernährung überwiegend wegen ihrer funktionellen Eigenschaften und nicht wegen ihres Nährwerts zur Herstellung von Lebensmitteln eingesetzt [72]. Das ist der wesentliche Grund dafür, dass bislang die Sojaproteinprodukte nicht die ihnen aus ernährungsphysiologischen Gründen zukommende Bedeutung in dieser Weltregion erlangt haben, obgleich die Produktion an Sojabohnen dort die in den asiatischen Ländern bei weitem übersteigt [6].

Die funktionellen Eigenschaften der Sojaproteinprodukte beruhen auf der Fähigkeit ihrer Proteine mit Wasser Emulsionen, Gele und Schäume bilden zu können. Außerdem können sie zu fleischähnlichen Strukturen texturiert werden [73-77]. Darin liegt ein außergewöhnliches Entwicklungspotenzial für eine proteinreiche Ernährung auf der Basis pflanzlicher Proteine mit fleischähnlichen sensorischen Eigenschaften begründet. Das kann für die Ernährungssicherung von erheblicher Bedeutung sein, wenn diesbezüglich nicht nur die Kosten für die Fleischerzeugung sondern auch die damit verbundenen Umweltprobleme betrachtet werden.

Das Vorhandensein von einerseits lipophilen und andererseits hydrophilen Gruppen in der polymeren Kette des Proteins erleichtert sowohl die Assoziation von Wasser als auch Fett, so dass mit dem Protein stabile Öl-Wasser Emulsionen gebildet werden können, wobei das Protein wie ein Emulgator wirkt. Die Emulsion ist eine Protein-Dispersion in Öl. Da das polymere Protein über die bereits erwähnten lipophilen und hydrophilen Gruppen hinaus negativ und positiv geladene Seitenketten enthält, ist zusätzlich die Möglichkeit gegeben, mit einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten ionische Bindungen einzugehen.

Sojaproteinprodukte werden üblicherweise in wasserhaltige Lebensmittel eingebracht, weil ihre funktionellen Eigenschaften nur im hydratisierten Zustand ausgenutzt werden können. Die funktionellen Eigenschaften von Sojaproteinprodukten finden bei der Lebensmittelherstellung eine breite Anwendung (Tab. 5) [73]. Diese Eigenschaften der Proteinprodukte sind weitgehend auf die

native Struktur der Proteine zurückzuführen, die während der Proteinproduktherstellung einer gewissen Veränderung unterliegen. Diese Veränderungen können sowohl die primäre als auch die sekundäre und tertiäre Struktur des Proteins betreffen. Diese Strukturen können bei Proteinproduktherstellung durch Variation der Pozessbedingungen gezielt verändert werden. Deshalb gibt es eine Vielzahl von Sojaproteinprodukten mit jeweils unterschiedlichen funktionellen Eigenschaften, die für die Herstellung von so genannten „fabricated foods“ ein wesentliches Strukturelement darstellen.

Tabelle 5: Funktionelle Eigenschaften von Sojaproteinprodukten und deren Einsatz in Lebensmitteln

Funktionelle Eigenschaft	*Darstellung*	*Einsatz im Lebensmittel*	*Sojaprotein-produkt*
Löslichkeit	Proteinlösung, pH abhängig	Getränke	M,K,I,H
Wasserabsorption und –bindung	Wasserstoffbrücken	Fleisch, Saucen, Brot, Kuchen	M,K
Viskosität	Eindickung, Wasserbindung	Suppen, gravies	M,K,I
Gelbildung	Bildung einer Proteinmatrix	Fleisch, Quark, Käse	K,I
Kohäsion/Adhäsion	Protein als Adhäsiv	Fleisch, Wurstwaren, Pasta, Backwaren	M,K,I
Elastizität	Disulfidbrücken in Gelen	Fleisch, Backwaren	I
Emulsion	Bildung u. Stabilisierung v. Fettemulsionen	Wurstwaren, Suppen, Kuchen	M,K,I
Fettabsorption	Bindung v. freiem Fett	Fleisch- u. Wurstwaren, Schmalzgebäck	M,K,I
Aromabindung	Adsorption, Einkapselung	Fleischersatz, Backwaren	K,I,H
Schaumbildung	Schichtbildung mit Gasrückhaltung	Toppings, Kuchen	I,H
Farbkontrolle	Bleichung (Lipoxygenase)	Brot	M

Abkürzung: Sojamehl (M), Sojaprotein-Konzentrat (K), Sojaprotein-Isolat (I), Sojaprotein-Hydrolsat (H)

Quelle: Kinsella (1979); [73]

Der Nährwert der Sojaproteinprodukte spielt bei ihrer Anwendung zur Lebensmittelherstellung zwar keine wesentliche Rolle, es soll hier jedoch trotzdem darauf eingegangen werden, weil es auch in der westlichen Ernährung bereits Produkte gibt, wie Sojamilchprodukte, in denen Sojainhaltsstoffe die Hauptkomponente sind. Diese Produkte können auch grundständig aus

Sojaproteinprodukten hergestellt werden. Gerade darin besteht die Möglichkeit, den Stellenwert der Sojaproteinprodukte in der Ernährung zu vergrößern.

Der Vergleich der in Sojaproteinprodukten enthaltenen essentiellen Aminosäuren zum Eiprotein als Referenzprotein zeigt, dass der Anteil an schwefelhaltigen Aminosäuren (Methionin und Cystein) deren Wertigkeit limitieren. Die Wertigkeit beträgt im Vergleich zum Vollei nur 70%. Wird jedoch die Wertigkeit des Sojaproteins gegenüber anderen pflanzlichen Proteinen, wie Cerealien betrachtet wird, so zeigt sich, dass diese wegen des relativ hohen Gehalts an Lysin groß ist. Das geht aus der in der Tabelle 6 zusammengestellten Aminosäurezusammensetzung von Sojabohnen und Weizen hervor [71,78,79].

Tabelle 6: Zusammensetzung der Aminosäuren von Sojabohnen und Weizen

Aminosäure	**Sojabohne**		**Weizen**	
	A	**B**	**A**	**B**
I- Essentielle Aminosäure				
Isoleucin	4.54	**114**	3.26	**82**
Leucin	7.78	**110**	6.67	**94**
Lysin	6.38	**118**	2.86	**53**
Methionin	1.26		1.50	
Cystin	1.33		2.54	
Meth.+Cyst.	2.59	**74**	4.05	**116**
Phenylalanin	4.94		4.51	
Tyrosin	3.14		2.99	
Ph.ala+Tyr.	8.08	**133**	7.50	**124**
Threonin	3.86	**96**	2.93	**73**
Tryptophan	1.28	**133**	1.09	**113**
Valin	4.80	**97**	4.42	**89**
II- Nicht essentielle Aminosäuren				
Arginin	7.23		4.61	
Histidin	2.53		2.29	
Alanin	4.26		3.62	
Asparaginsäure	11.70		4.93	
Glutaminsäure	18.70		29.86	
Glycin	4.18		3.92	
Prolin	5.49		9.94	
Serin	5.12		4.59	

Legende:
A: g/16 g Stickstoff
B: Percentage of Provisional Amino Acid Scoring Pattern

Quelle: Souci, S.W., Fachmann, W. u. Kraut, H. (1986); [71]

Die ernährungsphysiologische Wertigkeit eines Proteins ergibt sich jedoch nicht allein aus seiner Aminosäurezusammensetzung, sondern darüber hinaus insbesondere aus der biologischen Verfügbarkeit der einzelnen Aminosäuren im Verdauungsgeschehen. Dafür sind Messmethoden entwickelt worden, mit denen die biologische Wertigkeit (BV – biological value), das Protein Effizienz Verhältnis (PER – protein efficiency ratio) und die Netto Protein Nutzung (NPU - net protein utilisation) auf der Grundlage von Human- und Tierversuchen bestimmt werden [80].

Die aktuellste Methode zur Beurteilung der Wertigkeit von Proteinen für die menschliche Ernährung basiert auf der Ermittlung des „Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score“ (PDCAAS). Der mittels PDCAAS festgestellte Bedarf an essentiellen Aminosäuren ist für drei unterschiedliche Altersgruppen sowie der PDCAAS für Sojamehl, SPC und SPI ist in der Tabelle 7 dargestellt [81]. Daraus ist ersichtlich, dass selbst für die Altersgruppe der 2 bis 5jährigen, welche den höchsten Bedarf an essentiellen Aminosäuren haben, der entsprechende Bedarf durch alle aufgeführte Sojaprodukte abgedeckt wird.

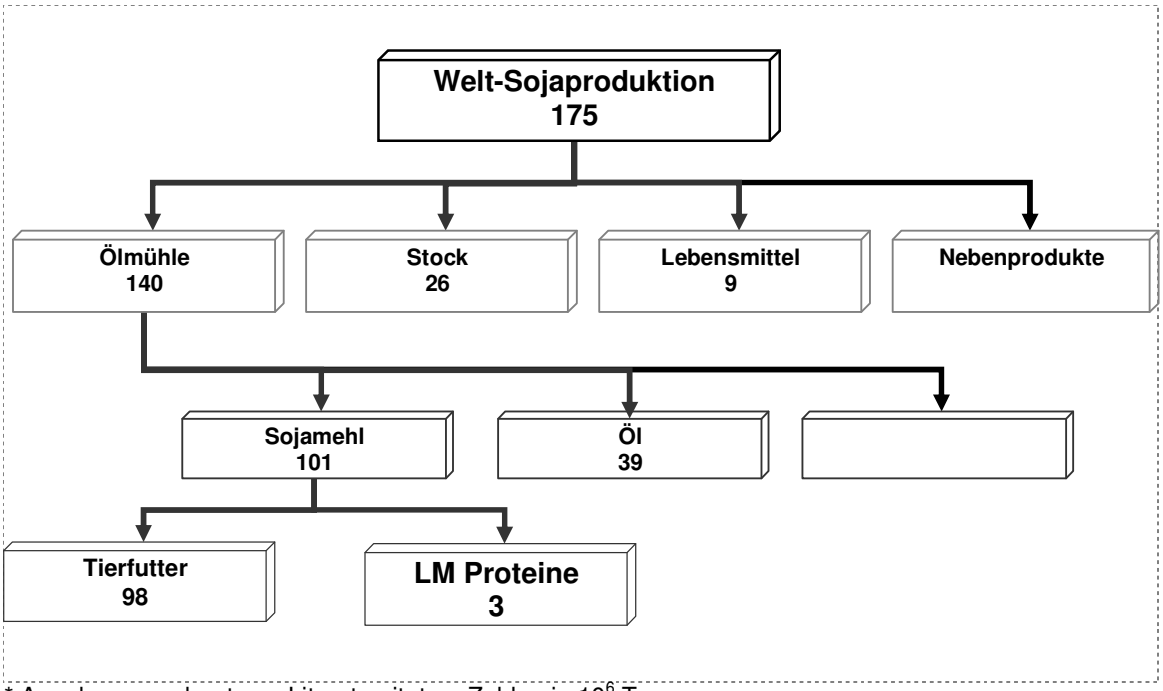
Tabelle 7: Darstellung des Bedarfs an essentiellen Aminosäuren und deren Verteilung auf die verschiedenen Sojaproteinprodukte (Angaben in mg/g und Tag an Protein)

Essenzielle Aminosäure	*FAO/WHO*			*Entfetttes Sojamehl*	*Sojaprotein*	
	2-5	*10-12*	*Erwachsen*		*Konzentrat*	*Isolat*
Histidin	19	19	16	26	25	28
Isoleuzin	28	28	13	46	48	49
Leuzin	66	44	19	78	79	82
Lysin	58	44	16	64	64	64
Methionin+ Cystein	25	22	17	26	28	26
Phenylalanin+ Tyrosin	63	22	19	88	89	92
Threonin	34	28	9	39	45	38
Tryptophan	11	9	5	14	16	14
Valin	35	25	13	46	50	50

Quelle: FAO/WHO Expert Consultation (1991); [81]

3 Darstellung der Prozesstechnik zur Sojabohnenverarbeitung

Da das neue Verfahrenskonzept nur dann realisiert werden kann, wenn es gegenüber dem konventionellen Verfahren zur Sojabohnenverarbeitung konkurrenzfähig sein kann, ist es erforderlich, die Bewertungskriterien für einen solchen Vergleich herauszuarbeiten. Dafür muss der bekannte Stand der Technik zur Sojabohnenverarbeitung mit Blick auf die Sojaproteinproduktherstellung ausführlich dargestellt werden. Auf diese Weise soll eine Abgrenzung zwischen den Verarbeitungswegen zur Sojaproteinproduktherstellung nach dem neunen gegenüber dem konventionellen Verfahren und der anfallenden Produkte ermöglicht werden.



* Angaben errechnet aus Literaturzitaten; Zahlen in 10^6 Tonnen

Abbildung 7: Verarbeitung der Weltproduktion von Sojabohnen in Haupt- und Nebenprodukte.

3.1 Verarbeitungswege für Sojabohnen

Die Sojabohne nimmt unter den landwirtschaftlichen Rohstoffen in so fern eine Sonderstellung ein, als sie praktisch nur in verarbeiteter Form für die menschliche und tierische Ernährung eingesetzt werden kann. Zur Erläuterung dieser Besonderheit sei darauf hingewiesen, dass Cerealien, darunter insbesondere Mais und Weizen, keiner Verarbeitung bedürfen, um als Tierfutter verwertet werden zu können. Das ergibt sich daraus, dass die Cerealien im Vergleich zur Sojabohne weit

weniger mit antinutritiven Substanzen belastet sind. Diese antinutritiven Substanzen sind es, welche die Verarbeitung der Sojabohne unabdingbar machen [62-65,82].

Die Sojabohne konnte ihre Sonderstellung als verarbeitetes Produkt in die menschliche und tierische Ernährung zu gelangen nur dadurch einnehmen, weil sich aus ihrer Verarbeitung sowohl eine Wertschöpfung auf der Seite der menschlichen als auch auf der Seite der tierischen Ernährung ergab. Diese Wertschöpfung entsteht daraus, dass das Protein von großer Bedeutung für die Tierernährung und das Öl von großer Bedeutung für die menschliche Ernährung ist. Die Notwendigkeit der Verarbeitung der Sojabohnen hat zusammen mit dem außerordentlich großen Bedarf an Protein für die Tierernährung und an Öl für die menschliche Ernährung dazu geführt, dass die Verarbeitung in sehr großen Ölmühlen erfolgt, deren Tageskapazität von 1.000 bis 15.000 t reicht [7,83]. Demgegenüber ist die Tageskapazität der Fabriken, die entölte Sojaschrote oder –flocken für die Proteinproduktherstellung verwenden, mit 20 bis 300 t vergleichsweise klein.

In der Abbildung 7 ist der Verarbeitungsweg der Sojabohne in die wichtigsten Produkte aufgezeigt. Nur etwa 3% des bei der Verarbeitung anfallenden Sojamehls gelangen in die menschliche Ernährung, wobei etwas mehr als die Hälfte für die Sojaproteinproduktherstellung eingesetzt werden. Wichtig ist es dabei, dass die Sojaproteinproduktherstellung in eigenständigen Produktionsanlagen aus dem quantitativ und wirtschaftlich wichtigsten Endprodukt der Sojabohnenverarbeitung erfolgt. Das entfettete Sojamehl ist deshalb auch ein eigenständiger Rohstoff, der allerdings eine besondere Desolventierung für seinen Einsatz zur Sojaproteinproduktherstellung erfordert.

In diesem Zusammenhang ist ein Vergleich zur Herstellung von Kleberprotein (Gluten) aus Weizen interessant. Die jährliche Produktionsmenge an Gluten entspricht in etwa der Menge an hergestellten Sojaproteinprodukten. Der Gluten fällt jedoch, anders als bei der Sojaproteinproduktherstellung aus White Flakes (WF), als Koppelungsprodukt zur Stärke, dem Hauptprodukt aus dem Rohstoff Weizenmehl, bei der Stärkeherstellung an. Diese Trenntechnik entspricht dem Verfahrensschritt der Ölextraktion, bei dem das Öl als Koppelungsprodukt zum entfetteten Sojaschrot anfällt. Damit hängt die Menge an Gluten immer von der Menge an verarbeitetem Weizenmehl ab, während die Sojaproteinproduktherstellung nicht an ein Koppelungsprodukt gebunden ist. Ihre Wertschöpfung ergibt sich deshalb allein aus der Verarbeitung des Rohstoffs, den flashdesolventierten WF. Daraus ergibt sich ein erheblicher Vorteil für die Sojaproteinproduktherstellung gegenüber der Glutenherstellung, da sie in keiner ökonomischen Abhängigkeit zu einem Koppelungsprodukt steht.

Die Abbildung 8 lässt erkennen, dass es prinzipiell zwei Wege gibt, um aus Sojabohnen Lebensmittel herzustellen [84]. Der eine Weg, der überwiegend in den asiatischen angewendet wird, führt von den Sojabohnen direkt zu den Endprodukten (vollfette Sojamahlprodukte, Sojamilchprodukte, Tofu) und der andere erfordert deren bereits beschriebene vorausgehende Entölung und Weiterverarbeitung (entfettetes Sojamehl, SPC, SPI).

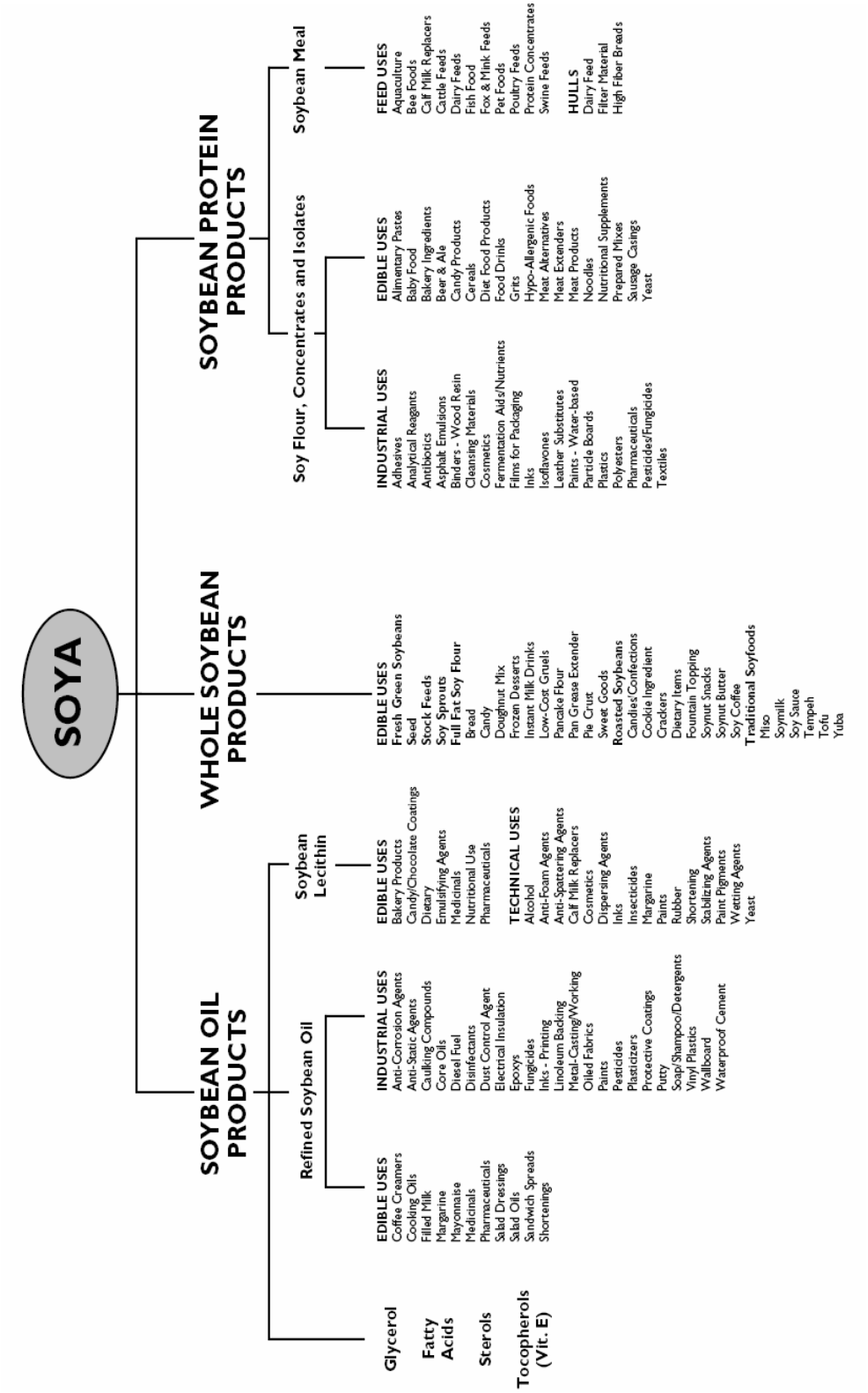


Abbildung 8: Darstellung der Verarbeitungswege für Sojabohnen zu unterschiedlichen Produkten.

Quelle: Soya & Oilseed Bluebook 2004, [84]

Die Abbildung 9 zeigt die unterschiedlichen Verarbeitungsschritte zur Herstellung von Produkten für die Lebensmittelindustrie auf. Daraus ist ersichtlich, dass im Wesentlichen drei Wege der Weiterverarbeitung der geschälten Sojabohnen umgesetzt werden [85]. Der eine Weg, der überwiegend eine mechanische Pressung und anschließende Konditionierung des so entölten Presskuchens darstellt, führt von den Sojabohnen zu einem Sojamehl mit einem geringen Restfettgehalt. Der zweite Verarbeitungsweg ist gerichtet auf die Herstellung von vollfetten Sojamehlen, die sich unterscheiden durch deren Enzymaktivität. Der dritte Weg schließlich eröffnet die Möglichkeit der Herstellung multipler Produkte nach erfolgter Lösungsmittelextraktion des Öls mit Hexan.

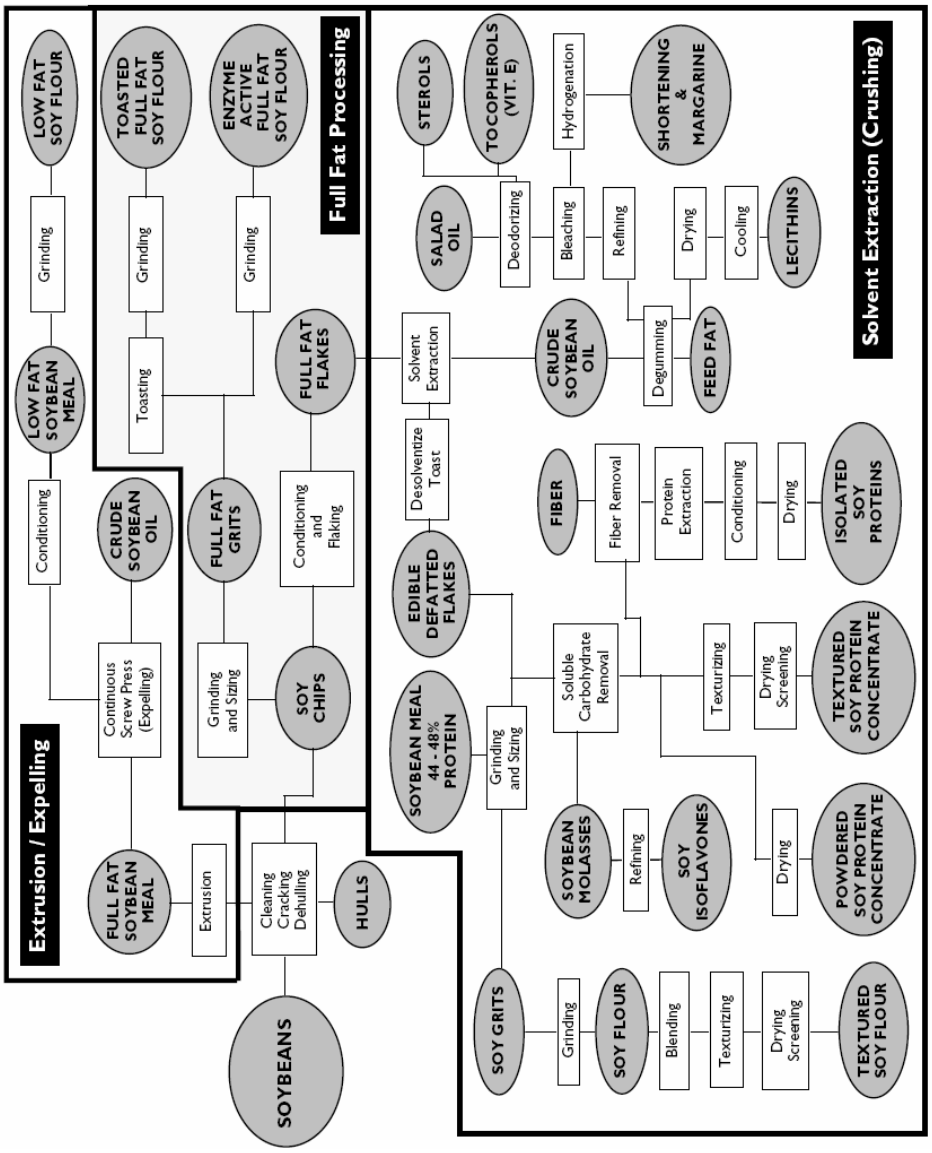


Abbildung 9: Darstellung der Verarbeitungswege für Sojabohnen zu unterschiedlichen Produkten für die Lebensmittelindustrie.

Quelle: Soya & Oilseed Bluebook 2004, [85]

3.2 Direkte Verarbeitung der ganzen Sojabohne zu Lebensmitteln

Die Sojabohnen werden vor ihrer direkten Verarbeitung zu Lebensmitteln auf einen Restfeuchtegehalt von 9 – 10% konditioniert [48,86]. Die Konditionierung dient vor allem der Vorbereitung der Trennung der Schalen von den Kotelydonen. Die konditionierten Bohnen werden zuerst trocken geschält und anschließend werden die Schalen von den Kotelydonen durch Aspiration getrennt. Die Kotelydonen werden zu vollfetten Sojaprodukten wie Mehlen und Grießen vermahlen sowie zu Flocken verarbeitet. Diese Produkte besitzen ihre nativen Eigenschaften, darunter insbesondere ihre Enzymaktivität.

Die enzymaktiven Sojamehle werden bei der Backwarenherstellung aus Weizenmehl zur Bleichung des Karotinfarbstoffs eingesetzt. Sie eignen sich außerdem auch als Bindungsmittel, Emulgator, Oxidationsschutz und Kristallisationsverzögerer [87].

Da die oxidative Enzymaktivität zur Herstellung bestimmter Lebensmittel, wie insbesondere den Sojamilchprodukten, durch die Bildung von Oxidationsprodukten zu unerwünschten sensorischen Eigenschaften führt, werden entweder die Sojabohnen oder vollfette Verarbeitungserzeugnisse thermischen Verarbeitungsschritten unterzogen (Toasten) [88]. Danach werden die Bohnen oder die vollfetten Sojamahlprodukte zu Lebensmitteln weiterverarbeitet (inaktivierte Mehle, Sojamilch, Sojadrinks, Tofu).

Die thermische Behandlung hat neben der erwünschten Inaktivierung der Enzyme eine unerwünschte graduelle Denaturierung der Proteine zur Folge, die sich negativ auf die Ausbeute und Qualitätsmerkmale der Endprodukte auswirken kann. Durch moderne Prozesstechniken, die sich durch eine genaue Kontrolle der Prozessschritte und –parameter auszeichnen, ist es inzwischen gelungen, die Proteindenaturierung einzugrenzen und im Sinne der Erzeugung einer gleichmäßigen Produktqualität zu stabilisieren. Das wiederum hat dazu geführt, dass das Marktpotenzial für viele dieser Produkte, von denen einige bisher in der westlichen Ernährung wenig bekannt waren, wie beispielsweise Sojapaste (Miso), Sojasauce (Sho-yu) oder fermentierter Sojaquark (Su-Fu), deutlich gewachsen ist. Es gibt inzwischen auch im Westen moderne Techniken zur Herstellung dieser traditionellen Sojaprodukte, darunter auf Tofu basierende Eiscreme und Joghurt.

3.3 Indirekte Verarbeitung der Sojabohne zu Lebensmitteln

Wie bereits erwähnt dient die Verarbeitung von Sojabohnen in Ölmühlen im Wesentlichen der Gewinnung von Sojaöl und Herstellung von Sojamehl. Die Entölung erfolgt entweder durch Auspressen oder Lösungsmittelextraktion (Hexan) der Sojabohnen. Die Extraktion mit Hexan überwiegt die durch Auspressen wegen der gegebenen höheren Verarbeitungskapazität und der vergleichsweise niedrigeren Verfahrenskosten bei weitem.

Die Art der Ölextraktion ist für die nachfolgende Herstellung von Lebensmitteln und Zusatzstoffen sowie Stoffen entscheidend, die nicht für die Lebensmittelherstellung bestimmt sind. Das gilt sowohl für die aus dem entfetteten Sojamehl als auch dem extrahierten Öl herzustellenden Produkte. Die in Abhängigkeit von der Art der Ölextraktion für die Produktherstellung anwendbare Prozesstechnik ist entscheidend für die Produktpalette und die Eigenschaften der Produkte. Das ergibt sich aus dem Grad der Verteilung der Inhaltsstoffe der Sojabohne auf den Entölungsrückstand und die Ölfraktion in Abhängigkeit vom eingesetzten Extraktionsverfahren und den verwendeten Verfahrensparametern.

Für die Sojaproteinproduktherstellung ist beispielsweise eine Entölung des Sojaschrots auf weniger als 1% Restölgehalt erforderlich, welcher durch Auspressen bei weitem nicht erreicht werden kann [24]. Deshalb werden Sojaproteinprodukte ausschließlich aus Hexan extrahierten Sojaschroten hergestellt. Die Hexanentölung hat außerdem zur Folge, dass alle Hexan löslichen Inhaltsstoffe der Sojabohne, darunter das Lezithin und die Tocopherole, in die Ölfraktion übergehen. Diese können bei der nachfolgenden Ölraffination als zusätzliche Produkte gewonnen werden. Sie sind als Nebenprodukte der Ölraffination aufzufassen.

3.3.1 Ölraffination

Das bei der Lösungsmittelextraktion und der Auspressung anfallende Sojarohöl wird zum Sojaöl durch aufeinander folgende Verfahrensschritte raffiniert. Wobei durch Abreichern der Inhaltsstoffe des Sojarohöls dessen Zusammensetzung erheblich verändert wird. Es werden vornehmlich freie Fettsäuren und Phosphatide abgetrennt und der Gehalt an Pflanzensterolen, Tocopherolen und Spurenelementen erheblich verringert.

Der erste Schritt der Raffination des Sojarohöls besteht in der Abtrennung der Phospholipide, der auch als "Entschleimung" bezeichnet wird [67,89,90]. Die Entschleimung ist notwendig, um das Rohöl transport- und lagerfähig zu machen. Das ist deshalb notwendig weil die Phospholipide mit den Schleimstoffen aus den Sojabohnen klebrige und zähflüssige Öl-Wasser Emulsionen bilden. Dadurch können Ölverluste in den nachfolgenden Phasen der Raffination verringert und der Zufärbung des raffinierten Öls während der späteren Hochtemperaturdesodorierung entgegengewirkt werden.

Zur Entschleimung wird das Rohöl mit Wasser (2-5%) und Säure gemischt (normalerweise phosphorige Säure). Dadurch reichern sich die Phosphatide an der Grenzschicht zwischen Öl und Wasser an und können anschließend durch Zentrifugalabscheidung abgetrennt werden [7,91,92]. Die Phosphatide werden unter Vakuum getrocknet und danach gebleicht. Das resultierende Produkt besteht ungefähr aus 50% Phospholipiden und 50% Öl und hat eine honigähnliche Viskosität.

Die Phospholipidfraktion wird durch eine Serie von Lösemittelextraktionen und Fällungsreaktionen vom Öl befreit, um ölfreie Phospholipide als Feststoffe zu erhalten, die als Sojalezithine bezeichnet werden. Die Hauptqualitätsparameter für kommerzielle Lezithine sind: Phospholipidgehalt (bestimmt als Prozent azetonunlöslicher Substanzen), freie Säure, nicht lipid Verunreinigungen (gemessen als hexanunlösliche Substanzen), Viskosität und Farbe. Lezithine werden hauptsächlich wegen ihrer Aktivität an der Grenzschicht zwischen der apolaren Fett- und hydrophilen Proteinphase als Emulgatoren genutzt.

Die Entschleimung des Rohöls erfolgt wegen der schnellen Bildung von Öl-Wasser Emulsionen üblicherweise direkt in der Extraktionsanlage, selbst wenn die nachfolgenden Raffinationsschritte andernorts durchgeführt werden. Wenn die Weiterverarbeitung der dabei anfallenden Schleimstoffe ökonomisch sinnlos ist, weil die Verarbeitungsmenge in der Extraktionsanlage zu klein oder die Nachfrage am Markt zu gering ist, werden die abgeschiedenen Phospholipide dem entfetteten Sojamehl beigegeben. Das führt zur Steigerung der anfallenden Mehlmenge und einer Erhöhung ihres Energiewerts. Beides ist für den Einsatz des entfetteten Mehls als Futtermittel von Bedeutung.

Bezogen auf das neuartige Verfahrenskonzept erfolgt die Entschleimung des anfallenden Rohöls weitestgehend bereits bei der Verdrängung des Öls. Die Schleimstoffe reichern sich sowohl in der Flüssigkeits- als auch Feststoffphase des Verfahrensablaufs an. Die Gewinnung der Schleimstoffe aus diesen Phasen ist zwar prinzipiell möglich, sie wird aber auf Grund der Größe der Anlagen ökonomisch nicht sinnvoll sein. Die Schleimstoffe werden deshalb besser mit der an Ballaststoffen angereicherten Feststoffphase aus dem Prozess ausgetragen. Sie können aber auch mit dem Abwasser entsorgt werden. Die weitere Aufarbeitung des Rohöls wird der üblichen Vorgehensweise entsprechen.

Es gibt zwei Wege der Raffination des entschleimten Sojaöls. Sie unterscheiden sich nach der Art der Entfernung der freien Fettsäuren, die entweder durch "saure" oder "alkalische" Verseifung erfolgt [93]. Üblicherweise wird das Sojaöl alkalisch verseift. Dabei erfolgt eine hydrolytische Spaltung des Öls in Glycerin und höherer Fettsäuren, die dabei als Alkalisalze, den „Seifen“ ausfallen. Die alkalische Verseifung entfernt außerdem auch Überreste der Phospholipide, die während der Entschleimung nicht vollständig abgetrennt werden konnten. Zusätzlich geht damit durch teilweise Pigmentzerstörung oder durch Adsorption an die schwere Phase auch ein gewisser Bleichungseffekt einher. Die resultierende wässrige Seifenlösung, der Soap stock, wird vom neutralisierten Öl durch Zentrifugierung abgetrennt. Das Rohöl enthält gewöhnlich noch 0,3 bis 0,8% freie Fettsäuren.

Das Öl wird nach der Neutralisation intensiv mit heißem weichem Wasser gemischt, um Spuren der Seife durch Zentrifugalabscheidung zu entfernen (washing). Der anfallende Feststoff wird im Vakuum getrocknet und dem Soap stock hinzugefügt. Der Soap stock kann zur Produktion von Seife genutzt oder durch Einsatz starker mineralischer Säuren zu Fettsäuren rekonvertiert werden. Diese Mischung aus verschiedenen Fettsäuren, auch bekannt als "acidified soap stock“ kann als Tierfutter oder zur Herstellung von destillierten Fettsäuren verwendet werden. Anschließend wird die Bleichung durchgeführt [94]. Das Rohöl wird gebleicht (bleaching), um die in ihm enthaltenen gelb-orangen Karotinpigmente und das grüne Chlorophyll zu entfernen. Der Umfang der Bleichung hängt von den spezifischen Marktanforderungen ab.

Der letzte Schritt der Raffination besteht in der Desodorierung des Rohöls [95]. Dabei werden unerwünschte Geruchsstoffe durch Wasserdampfdestillation (stripping) unter hohem Vakuum bei Temperaturen im Bereich von 250°C entfernt. Das so raffinierte Öl wird anschließend gekühlt und es wird ihm Zitronensäure zur Vermeidung von oxidativen Umlagerungsreaktionen zugesetzt.

Aus dieser Beschreibung der Ölraffination geht hervor, dass es sich um ein mehrstufiges energieintensives Verfahren handelt, für dessen Durchführung eine spezielle Anlagentechnik erforderlich ist. Diese Anlagen können in großen Ölextraktionsanlagen wirtschaftlicher betrieben werden als in kleinen. Dieser Hinweis ist von besonderer Bedeutung für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der kombinierten Anlage zur Herstellung von Proteinprodukten und zur Gewinnung von Öl aus Sojabohnen.

3.3.2 Weiterverarbeitung von Sojaschrot

Es wurde bereits eingangs darauf hingewiesen, dass der kommerzielle Wert des Sojaschrots den des Sojaöls übersteigt, wobei die Wertschöpfung des Verfahrens weitgehend über das Öl erzielt wird. Daraus folgt, dass ein jedes beliebiges Extraktionsverfahren daran gemessen werden muss, ob mit ihm eine zur Hexanextraktion vergleichbare Wertschöpfung erzielt werden kann. Da sich die Wertschöpfung aus der Differenz zwischen den Erlösen und den Herstellkosten ergibt, wird diese im Wesentlichen von der Effizienz des Extraktionsverfahrens und den Kosten bestimmt, die für das Extraktionsverfahren aufzuwenden sind.

Der große Vorteil der Hexanextraktion besteht in der gegebenen Verfügbarkeit und dem niedrigen Preis des Hexans. Das Hexan wird überdies durch Verdampfung und Kondensation im Kreislauf geführt, so dass nur geringe Verluste entstehen. Es kann außerdem aus dem Extraktionsrückstand, mit dem es keine Bindung eingeht, bei gegenüber anderen Extraktionsmitteln niedriger Temperatur abgedampft werden.

Die Gegenüberstellung dieser Vorteile mit einer wässrig-alkoholischen Extraktion eines vollfetten Sojamahlprodukts lässt sofort erkennen, dass diese gegenüber der Hexanextraktion nicht wirtschaftlich sein kann. Allein schon die Aufarbeitung des Extraktionsrückstands zu einem Trockenprodukt, die bei der Hexanextraktion

lediglich die Austreibung des leicht verdampfbaren Hexans erfordert, würde so hohe Kosten verursachen, dass die Wertschöpfung über das Öl deutlich gemindert, wenn nicht sogar aufgezehrt würde. Daraus folgt, dass ein solches Verfahren nur dann wirtschaftlich sinnvoll durchgeführt werden kann, wenn über die Weiterverarbeitung des Extraktionsrückstands eine zusätzliche Wertschöpfung geschaffen werden kann.

Diesbezüglich ist der Stand der Technik zur Weiterverarbeitung von Sojaschroten zu Sojaproteinprodukten und Folgeprodukten daraus, weit fortgeschritten. Diese Produkte besitzen bereits einen festen Stellenwert in der Ernährung. Nachstehend soll kurz auf den Stand der Technik hingewiesen werden, um daraus auch die Sinnfälligkeit des Versuchs der Wertschöpfung durch Weiterverarbeitung wässrig-alkoholisch entölter Sojamahlprodukte abzuleiten. Dabei ist es von besonderem Interesse, dass bei der wässrig-alkoholischen Extraktion kein dem Sojaschrot aus der Hexanextraktion direkt vergleichbares Produkt hergestellt werden kann. Die Extraktionstechnik mit der erforderlichen anschließenden Trocknung des Rückstands führt auch gegenüber dem Sojaschrot zu keiner Wertschöpfung.

3.3.2.1 Sojaschrote als Futtermittel

Das bei der Ölextraktion anfallende Sojaschrot, es macht zusammen mit den Schalen etwa 80% der Sojabohnenmasse aus, wird wegen seines hohen Proteingehalts (ca. 44%) hauptsächlich als Futtermittel eingesetzt. Sojaschrot, welches aus enthülsten Bohnen produziert wird, enthält > 50% Protein. Damit das Sojaschrot als Tierfutter eingesetzt werden kann, wird es zur Inaktivierung antinutritiver Substanzen thermisch durch Toasten behandelt. Der Wirkungsgrad der Inaktivierung wird anhand der Restaktivität des Enzyms Urease bestimmt.

Zur Beurteilung der Hitzebehandlung oder des Toastens wird die Ureaseaktivität oder die Löslichkeit des Proteins unter spezifizierten Bedingungen bestimmt Stickstoff-Löslichkeits-Index (NSI) oder Protein-Dispergierbarkeits-Index (PDI) [96].

Der optimale Grad des Toastens hängt von den Anforderungen an das Endprodukt ab. So muss Sojaschrot für die Geflügelmast stärker getoasted werden als für die Rindermast. Es gibt eine ganze Reihe von in vitro Methoden mit denen der Nährwert von Sojaschroten in Abhängigkeit von der thermischen Behandlung bestimmt werden kann (Ureaseaktivität, Trypsininhibitor-Aktivität, Farbbindung, Fluoreszenz, Proteinlöslichkeit in Wasser oder Lauge, NSI, PDI und verfügbares Lysin). Die gleichen Methoden werden im Übrigen auch zur Beurteilung von Sojaprodukten eingesetzt, die für die menschliche Ernährung bestimmt sind.

3.3.2.2 Sojabohnenmehl als Lebensmittel

Sojabohnenschrote von geschälten Sojabohnen werden für die menschliche Ernährung zu Mehlen vermahlen. Sie sind als getoastete und nicht getoastete (enzymaktive) Mehle im Handel. Letztere werden überwiegend zum Aufhellen der Krumenfarbe von Backwaren eingesetzt.

Auf dem Markt ist eine Vielzahl von Produkten verfügbar, welche sich hinsichtlich des Lipidgehalts unterscheiden. Dies wird erreicht durch spezifische Beimischung von Sojaöl oder Lezithin zum entfetteten Mehl (Refatting).

3.3.2.3 Sojaprotein-Konzentrate

Sojaproteinkonzentrate (SPC) werden aus entfettetem Sojamehl oder entfetteten Sojaflocken (WF) hergestellt, indem die darin enthaltenen löslichen Kohlenhydrate entweder mit Alkoholen unterschiedlicher Konzentration oder bei saurem pH mit Wasser extrahiert werden. Der Rückstand wird zum SPC getrocknet. Details zur Herstellungstechnik werden weiter unten beschrieben. Der bedeutendste Unterschied zwischen den mit diesen Verfahren hergestellten Verfahren besteht in ihrer Löslichkeit. Die Löslichkeit der unter moderat sauren Bedingungen hergestellten Konzentrate ist vergleichsweise hoch, während der Einsatz von Alkohol zu weitgehend unlöslichem SPC führt.

3.3.2.4 Sojaprotein-Isolate

Sojaprotein-Isolate (SPI) werden wie die SPC aus entfettetem Sojamehl oder entfetteten Sojaflocken hergestellt. Dazu werden die Mehle bzw. Flocken bei alkalischem pH-Wert in Wasser suspendiert, um die Proteine zu lösen. Die Suspension wird zentrifugiert und aus dem Überstand, dem Extrakt, werden die gelösten Proteine am isoelektrischen Punkt durch Ansäuern gefällt. Das Präzipitat wird nach Waschen und Neutralisieren zum SPI getrocknet. Als Nebenprodukt fallen bei der Proteinfällung unlösliche Fasern an, welche wegen der hohen Wasserbindung als diätetische Fasern vermarktet werden.

3.3.2.5 Texturierte Sojaproteine

Texturate (TVP) werden durch Extrusion aus Sojaschroten oder SPC und SPI hergestellt. Sie besitzen eine fleischähnliche Struktur. Sojaschrote können direkt texturiert werden. Diese Möglichkeit entfällt für den bei der wässrig-alkoholischen Extraktion anfallenden Rückstand, weil dieser zur Entfernung des Alkohols zuvor getrocknet werden muss. Das ist aber in sofern kein wesentlicher Nachteil, weil die höchste Wertschöpfung bei der Weiterverarbeitung durch Texturierung aus den Proteinprodukten und nicht aus den Sojaschroten erfolgt.

4 Detaillierte Darstellung des Betriebs von Ölmühlen und der Herstellung von Sojaproteinprodukten

Nach der allgemeinen Darstellung der Prozesstechnik zur Sojabohnenverarbeitung geht es jetzt darum, den Betrieb von Ölmühlen und die Herstellung von Sojaproteinprodukten detailliert darzustellen, um damit eine Grundlage für eine vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für ein neuartiges Verfahrenskonzept zu erarbeiten. Die Darstellung erfolgt unter dem Gesichtspunkt des Vergleichs möglicher Verfahrenschritte und ihrer zwecknotwendigen Abfolge im jeweiligen Verfahren mit Blick auf das zu entwickelnde neue Verfahrenskonzept. Die Auswahl der Verfahrensschritte zur Ölgewinnung und Herstellung von Sojaproteinprodukten nach dem Stand der Technik ist unter der vorgenannten Zielsetzung als absichtsvolles Handeln zu verstehen, das zur Beschränkung des Umfangs der Abhandlung nur in soweit erläutert wird, wie es sich nicht von selbst erklärt.

4.1 Betrieb von Ölmühlen

Zurzeit gibt es zur Ölgewinnung aus Sojabohnen nur zwei verwirklichte Verfahren, wovon nur das eine dem angewandten Stand der Technik entspricht. Das eine Verfahren ist ein Pressverfahren, das andere ein Lösungsmittel-Extraktionsverfahren.

4.1.1 Ölgewinnung mit Schneckenpressen

Die Ölextraktion mit Schneckenpressen wird zwar bei Raps und Nüssen angewendet, praktisch jedoch nicht bei Sojabohnen. Schneckenpressen arbeiten kontinuierlich und haben deshalb die mechanische oder hydraulische Pressung ersetzt. Die Schneckenpressen bestehen aus einem zylindrischen Mantelsieb, dem so genannten Seiher, und einer kernprogressiven Schnecke mit unterschiedlicher Steigung. Die Konfiguration der Schnecke ist so gestaltet, dass das Rohmaterial vom Einlauf zum Auslauf immer stärker komprimiert wird. Der abgepresste Rohstoff verlässt die Schneckenpresse am kleinsten Querschnitt. Das Öl läuft über das Sieb ab.

Wenn eine Ölgewinnung aus Sojabohnen durch Pressen durchgeführt wird, müssen die Sojabohnen vor dem Pressvorgang in der Schneckenpresse vorbehandelt werden. Dazu werden sie gereinigt, teilweise enthülst, flockiert, mit Dampf behandelt und danach getrocknet. Das Flockieren erleichtert die Freisetzung des Öls in der Presse, indem der Abstand vom Partikelinneren zur -oberfläche verringert wird. Die feuchte Erhitzung, welche durch Zugabe von Frischdampf zu den Flocken erfolgt, dient der Denaturierung der Proteine und hilft zu einem gewissen Grad beim Koaleszieren der Öltröpfchen. Die feuchte Erhitzung plastifiziert die eingesetzten Flocken, macht sie weniger spröde und verringert dadurch den Umfang des Zerbröselns der Flocken als Folge der Scherkräfte in der Presse. Umfangreicher Flockenzerfall würde die Ölausbeute verringern sowie ein Rohöl mit einem hohen Anteil an fein suspendierten Partikeln (foots) produzieren.

Der Hauptnachteil des Einsatzes von Schneckenpressen für die Ölgewinnung aus Sojabohnen besteht in der verhältnismäßig niedrigen Ölausbeute. Selbst die leistungsfähigsten Pressen können den Restölgehalt im Preßkuchen nicht unter 3 bis 5% bringen. Im Falle der Sojabohnen stellt jedoch ein Restölgehalt von 5% im Presskuchen einen Ölverlust von etwa 25% bezogen auf den Gesamtölgehalt in der Sojabohne dar. Damit ist auch eine anschließende Lösungsmittel-Extraktion, wie sie bei anderen Ölsaaten durchaus üblich ist, nicht ökonomisch, weil dazu eine zu große Menge an teilentöltem Rohstoff extrahiert werden müsste.

Es wurde bereits erwähnt, dass bezogen auf die Sojabohne der kommerzielle Wert des Sojaschrots den der entsprechenden Quantität an Öl übersteigt. Damit kommt der Wahl eines geeigneten Extraktionsverfahrens sowohl für die Verarbeitung des Sojaschrots als auch seiner Weiterverarbeitung zu Sojaproteinprodukten eine besondere Bedeutung zu, da von ihm ein entscheidender Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Sojaschrots ausgeht. Diesbezüglich hat die Schneckenpressung diverse Nachteile. Wegen des hohen Restölgehalts ist die Lagerfähigkeit des Preßkuchens eingeschränkt und es können aus ihm keine Proteinprodukte hergestellt werden, die den qualitativen Ansprüchen an Sojaproteinprodukte entsprechen. Außerdem führt die Temperaturbelastung des Pressguts zu einer Verringerung des Nährwerts und der Löslichkeit der Proteine in den aus ihm hergestellten Sojaschroten.

Der Vorteil mit Schneckenpressen zu arbeiten besteht jedoch darin, sehr kleine Kapazitäten an Sojabohnen verarbeiten zu können. Demgegenüber besitzen die kleinsten Lösungsmittel-Extraktionsanlagen bereits eine Kapazität von 300 t/d, diese Anlagenkapazität ist aber für die wirtschaftliche Ölgewinnung aus Sojabohnen viel zu klein.

4.1.2 Ölgewinnung durch Lösungsmittel-Extraktion

Die Ölgewinnung durch Lösungsmittel-Extraktion für Sojabohnen besteht aus den Schritten (Abb. 10) [7,12,48,97]:

- Annahme und Lagerung von Sojabohnen
- Präparation des Rohstoffs zur Extraktion
- Lösungsmittel-Extraktion
- Rückgewinnung des Lösungsmittels vom Extrakt (Miscella)
- Desolventieren und Toasten des Sojamehls

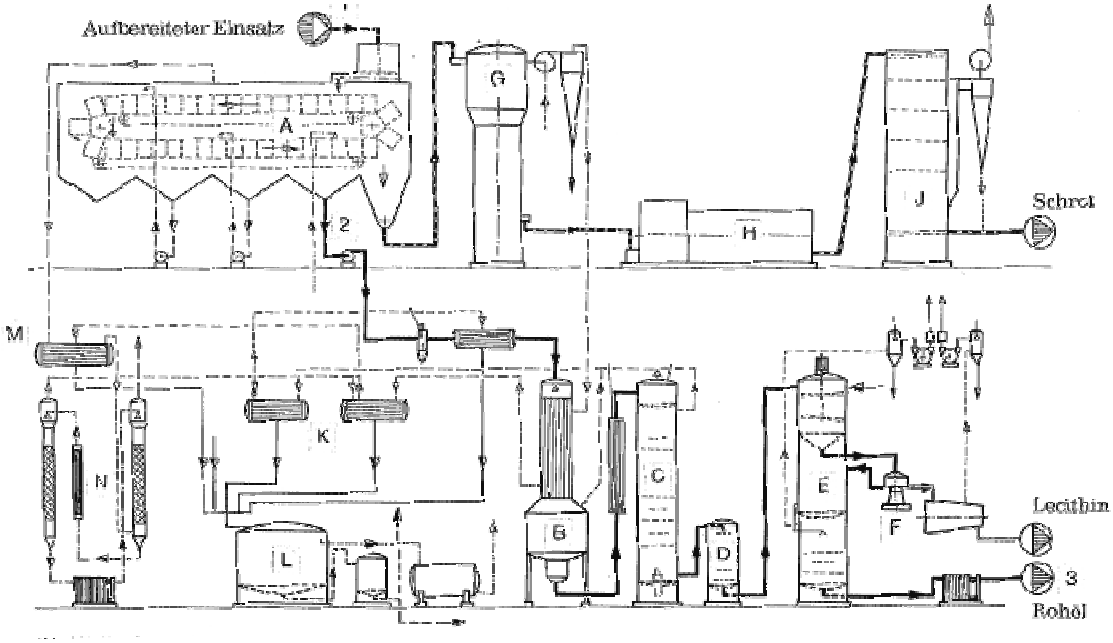


Abbildung 10: Verfahrensschaltbild einer typischen Verarbeitung von Sojabohnen zur Gewinnung von Sojaöl und Sojaschrot.

Quelle: Bockisch (1993), [7]

4.1.2.1 Annahme und Lagerung von Sojabohnen

Sojabohnen werden als Massengut per Lkw, Schiene oder Schiff angeliefert und in Silos eingelagert. Die Größe der Silos hängt von der Frequenz der Annahme und von der Verfügbarkeit anderer Lagerstätten ab. Das Lagervolumen sollte der Verarbeitungsmenge von einigen Wochen entsprechen.

Die Sojabohnen werden entsprechend der bei der Anlieferung festgestellten Qualitätskriterien bezahlt. Von besonderer Bedeutung ist es, den Öl- und Proteingehalt sowie den Anteil an freien Fettsäuren zu bestimmen, da diese Kriterien für die Wirtschaftlichkeit einer Ölmühle von hoher Relevanz sind.

4.1.2.2 Präparation der Sojabohnen zur Extraktion

Die Präparation der Sojabohnen zur Extraktion besteht aus den Verfahrensschritten: Trocknen, Temperieren, Reinigen, Klassieren (wahlweise), Zerkleinern, Schälen (wahlweise), Konditionieren und Flockieren (Abb. 11) [7,48,98,99].

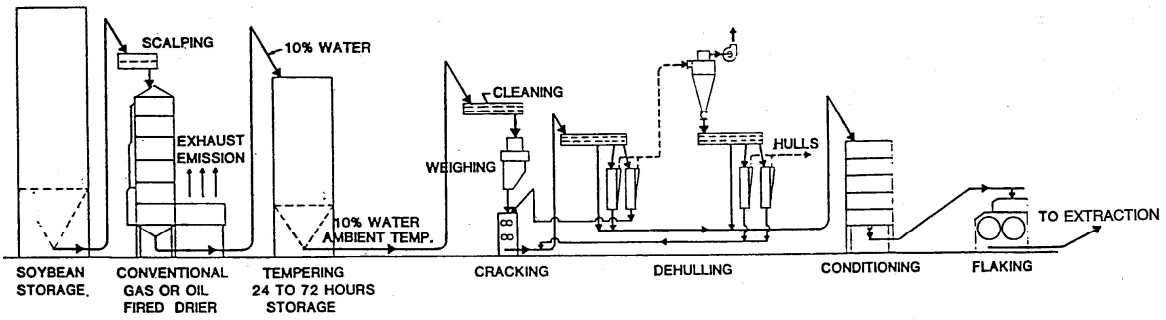


Abbildung 11: Blockdiagramm für eine typische Präparation von Sojabohnen vor der Lösungsmittel-Extraktion.

Quelle: Moore (1983), [99]

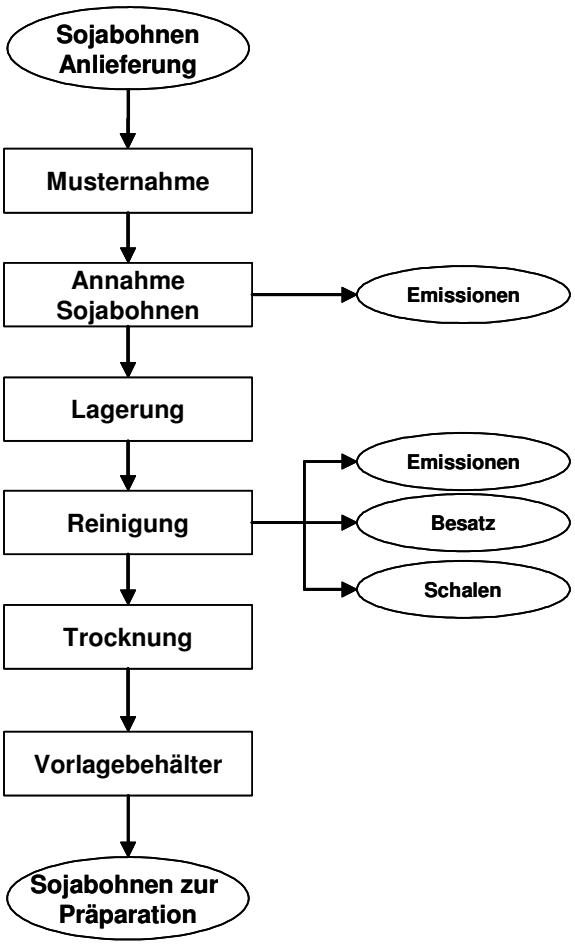


Abbildung 12: Blockdiagramm für eine typische Präparation von Sojabohnen vor der Lösungsmittel-Extraktion.

Quelle: Bühler AG (2004), [98]

- **Trocknen**
  Sollen die Sojabohnen vor der Extraktion geschält werden, so müssen sie auf einen Feuchtigkeitsgehalt unter 10% getrocknet werden, um die Abtrennung der Schalen zu erleichtern. Die Trocknung erfolgt in gas- oder ölbefeuerten Zwangsumlauftrocknern, die in neuerer Zeit mit Abluftrückführung ausgestattet sind. Dadurch konnte der Energiebedarf auf etwa 3,5 kJ/kg verdunstetes Wasser abgesenkt werden. Sofern der natürliche Feuchtigkeitsgehalt der Sojabohnen bereits 10% oder kleiner ist, oder die Schälung nicht notwendig sein sollte, kann auf das Trocknen als vorbereitender Schritt verzichtet werden.

- **Temperieren**
  Nachdem dem die getrockneten Sojabohnen abgekühlt sind, werden sie zur Einstellung der Gleichgewichtsfeuchte für 2 bis 5 Tage in außen aufgestellten Temperierungsbehältern gelagert (tempering). Da alle nachfolgenden Verarbeitungsschritte kontinuierlich ablaufen, ist es notwendig die Menge den Fluss der Sojabohnen von den Behältern zu den folgenden Arbeitsschritten zu durch wägende Dosierung zu regeln. Dies muss mit der geplanten Verarbeitungskapazität der Extraktionsanlage koordiniert werden.

- **Reinigen**
  Die Sojabohnen werden während des Prozesses einer Anzahl von Reinigungsvorgängen unterworfen (Abb. 13) [99]. Eine besonders hohe Bedeutung besitzt dabei die Beseitigung von Eisenteilen durch Magnetabscheidung, um vor allem die Mühlen und Flockierwalzen vor Beschädigungen zu schützen. Steine, Sand, Staub und andere Fremdmaterialien werden durch herkömmliche Reinigungsmaschinen (Aspiratoren) entfernt.

- **Klassieren**
  Eine Klassierung der Sojabohnen die in der Abtrennung bereits gebrochener Bohnen von ganzen Bohnen besteht, erfolgt nur, wenn das aus dem Sojaschrot herzustellende Sojamehl für den menschlichen Bedarf geeignet sein soll. Die Abtrennung der Bohnenfragmente wird durch einfache Siebung erreicht.

- **Zerkleinern und Schälen**

  Sojabohnen werden zur Vorbereitung auf das nachfolgende Flockieren zerkleinert. Die auf 10% Feuchtigkeitsgehalt eingestellten Sojabohnen werden zwischen gegenläufigen Walzen zugleich geschält und zerkleinert. Die abgelösten Schalenbestandteile werden durch Aspiration abgetrennt. Der Schalenanteil liegt bei etwa 8 Gewichtsprozent. Idealerweise sollten beim

Zerkleinern etwa 4 bis 6 Fragmente möglichst gleicher Größe aus einer Sojabohne entstehen. Es sollten keine Fragmente kleinerer Partikelgrößen gebildet werden, was durch einen Restfeuchtegehalt unter 10% stark begünstigt wird. Ebenso ist ein zu hoher Restfeuchtegehalt zu vermeiden, weil dadurch Agglomerate entstehen, von denen die Schalenbestanteile nur schwer abzutrennen sind.

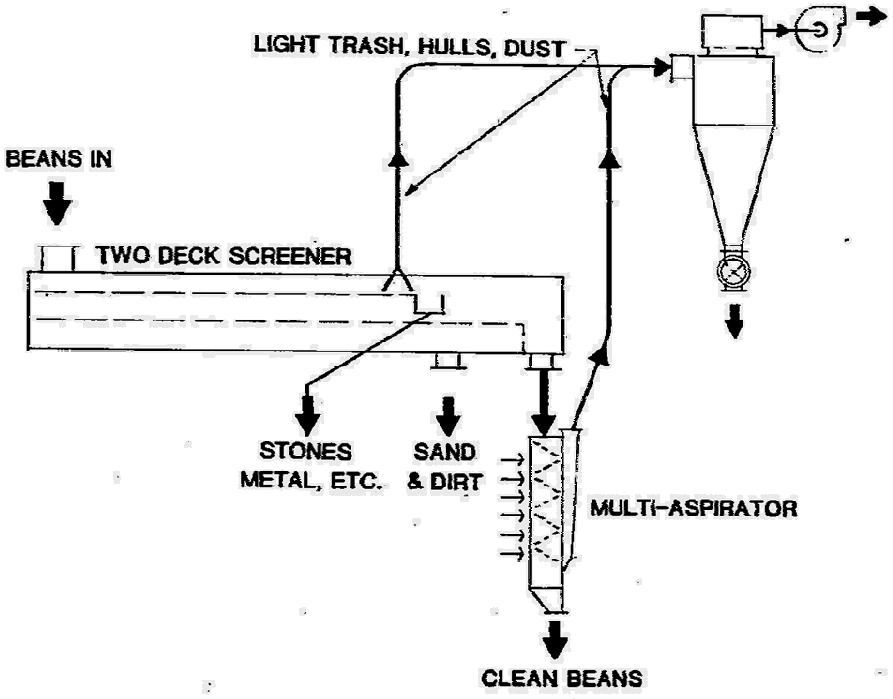


Abbildung 13: Einrichtung zur Reinigung von Sojabohnen, bestehend aus Aspirator und Zyklonabscheider

Quelle: Moore (1983), [99]

In den letzten Jahren ist ein neues Verfahren zur Schälung der Sojabohnen eingeführt worden. Es handelt sich um das so genannte Heißschälen (hot-dehulling system) [98,100]. Dazu werden gereinigte ganze Sojabohnen mit normalem für die Lagerung geeignetem Feuchtegehalt von 13 % einer vorsichtigen Erwärmung auf etwa 60 °C für etwa 20 bis 30 min unterzogen. Dadurch migriert Feuchte vom Inneren der Sojabohne nach außen an die Schale. Nach Ablauf dieser Zeitspanne werden Sojabohnen auf einem Fließbett schnell erwärmt und dabei getrocknet, so dass sich an der Oberfläche der ganzen Sojabohne eine Temperatur von etwa 85 °C einstellt und dabei deren Feuchte auf ≤ 3% absinkt. Danach werden die Sojabohnen wie bereits geschildert weiterverarbeitet.

Der entscheidende Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Reduzierung des Energieverbrauchs gegenüber dem herkömmlichen Verfahren. Die kurze Verweilzeit der Wärmebehandlung beugt einer extensiven Proteindenaturierung vor. Die Reduzierung der Proteinlöslichkeit, ausgedrückt als NSI, entspricht allerdings der des konventionellen Verfahrens. Die Abbildung 14 verdeutlicht die Unterschiede zwischen dem konventionellen Verfahren und dem Heißschälen.

- **Konditionieren**
  Der Sojabohnenbruch wird in einem Konditionierer plastifiziert. Der Konditionierer ist ein dampfbeheizter Reaktor, bei dem Dampf direkt oder indirekt eingeleitet werden kann. Die direkte Dampfeinleitung dient der Erhöhung des Feuchtigkeitsgehalts des zu flockierenden Guts. Dieses wird auf 70 °C erwärmt und auf einen Feuchtigkeitsgehalt von 11% eingestellt. Unter diesen Bedingungen nimmt es eine Plastizität an, mit der es im Flockierer zu Flocken ausgewalzt werden kann.

- **Flockieren**
  Die Kotelydonenbruchstücke werden zwischen gegenläufigen Glattwalzen zu Flocken ausgewalzt. Das Flockieren dient hauptsächlich der Formveränderung Sojabohnenbruchstücke, um während der Extraktion dem Lösungsmittel die Durchdringung der einzelnen Partikel zu erleichtern. Das Flockieren der Kotelydonen verursacht außerdem bis zu einem gewissen Grad einen Aufschluss des Zellgewebes, so dass Teile des Öls einfacher für die nachfolgende Lösungsmittel-Extraktion verfügbar sind. Die Schichtdicke der Sojaflocken liegt üblicherweise im Bereich von 0,25 bis 0,3 mm. Die Schichtdicke wird durch Einstellung des Spalts zwischen den Flockierwalzen. Die Flockierer haben Verschleiß insbesondere im Bereich der Walzenmitte. Setzt sich der Verschleiß fort, so werden die Flocken aus der Mitte dicker als am die am Ende der Walzen. Somit ist es für den Betrieb der Flockierwalzen von Wichtigkeit die Oberfläche nachschleifen zu können, um einen parallelen Abstand über die gesamte Achslänge gewährleisten zu können.

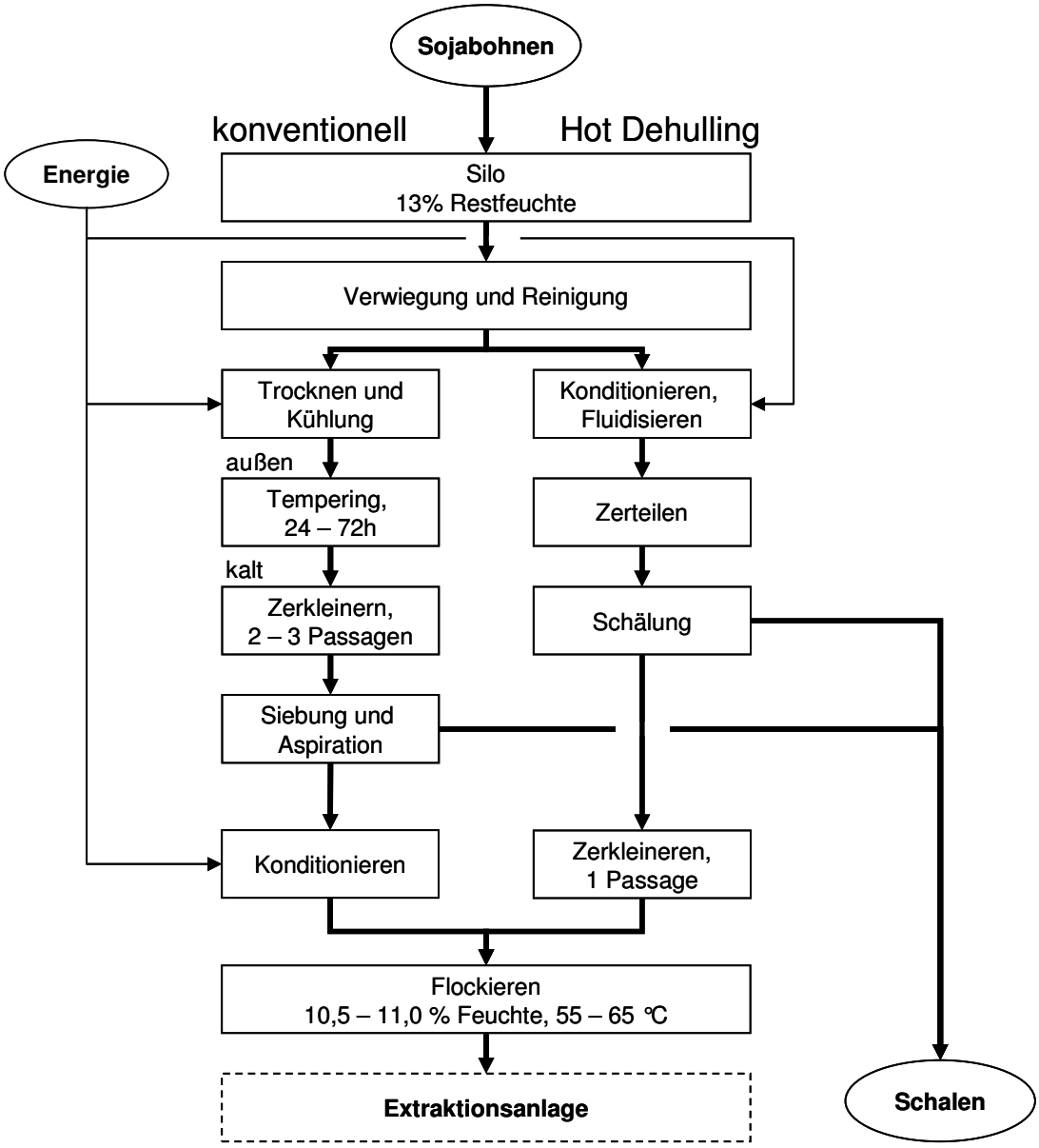


Abbildung 14: Gegenüberstellung der Verfahrensschritte des konventionellen Systems mit dem Hot Dehulling (Popping) System zur Vorbehandlung der Sojabohnen auf die nachfolgende Lösungsmittel-Extraktion.

Quelle: Bühler AG (2004), [98]

4.1.2.3 Lösungsmittel Extraktion

Es sollen hier nur die praktisch relevanten Details genannt werden, insoweit sie nützliche Kriterien für den im Folgenden zu erstellenden Vergleich des herkömmlich eingesetzten Verfahrens mit dem noch zu diskutierenden neuen Verfahrenskonzepts zur Proteingewinnung aufzeigen.

Die Extraktion von Öl aus Ölsaaten mittels apolaren Lösungsmitteln erfolgt im Allgemeinen als Fest-Flüssig-Extraktion, die entweder als Perkolations- oder als Immersionsextraktion durchgeführt wird. Die Perkolationsextraktion wird bei der Sojaölgewinnung eingesetzt. Dabei werden die mechanisch zu Flocken aufbereiteten Sojabohnen durch den Extrakteur geführt und mit Lösungsmittel berieselt. Das Lösungsmittel reichert sich dabei stetig mit Öl an. Der Übergang des Öls vom Feststoff in das Lösungsmittel kann in drei Schritte eingeteilt werden [101]:

a) Diffusion des Lösungsmittels in die Flocken

b) Auflösung der Öltröpfchen im Lösungsmittel

c) Diffusion des ölangereicherten Lösungsmittels aus den Flocken in die umgebende Flüssigkeit.

Dabei hängt die Extraktionsgeschwindigkeit und –effizienz von der Diffusion des Lösungsmittels durch die Flocken ab, wobei sich ein Konzentrationsgradient zwischen Fest- und Flüssigphase einstellt. Die Auflösung der Öltröpfchen im Lösungsmittel hat wegen in ihrer hohen Löslichkeit in diesem praktisch keinen Einfluss auf die Extraktionsgeschwindigkeit. Das Gleichgewicht der Extraktion ist erreicht, wenn die Konzentration des Öls im Lösungsmittel innerhalb der Zellen der Sojaflocken der Konzentration des Öls in der umgebenden Lösung, der freien Miscella, entspricht. Dabei wirkt sich die Temperatur des Lösungsmittels überwiegend nur auf die Extraktionsrate und weniger auf die Gleichgewichtskonzentration aus. Daraus ergibt sich eine Reihe von praktischen Folgen für die Prozesstechnik der Extraktion:

- Für die Prozesstechnik ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Miscella während der Extraktion nicht mit Feststoffen angereichert wird. Allein deshalb scheidet eine Oberflächenvergrößerung durch Vermahlen des Rohstoffs zu einem Mehl für die Perkolationsextraktion aus. Eine Oberflächenvergrößerung kann für dieses Verfahren nur durch eine Absenkung der Flockendicke erreicht werden. Dabei kommt es darauf an, dass bei der Flockierung ein Optimum zwischen der Oberflächenvergrößerung und dem Diffusionswiderstand gefunden wird und gleichzeitig der Zusammenhalt der Flocken nicht zerstört wird. Da die Oberflächenvergrößerung direkt mit der Dicke der Flocken korreliert, besteht ein Zusammenhang zwischen der Flockendicke und der Effizienz der Lösungsmittelextraktion (Abb. 15).

- Da von der Extraktionsrate die Verarbeitungsleistung der Anlage abhängt, besteht ein Interesse daran, diese durch Erhöhen der Lösungsmitteltemperatur zu steigern. Der Betrieb der Extraktion auf einem höheren Temperaturniveau

bedingt eine Erhöhung der Lösungsgeschwindigkeit des Öls im Lösungsmittel und einen Anstieg der Diffusionsgeschwindigkeit des Lösungsmittels aufgrund der bei steigender Temperatur fallenden Viskosität der Miscella. Die Temperaturerhöhung findet ihre Begrenzung in den Sicherheitsanforderungen für den Betrieb der Anlage.

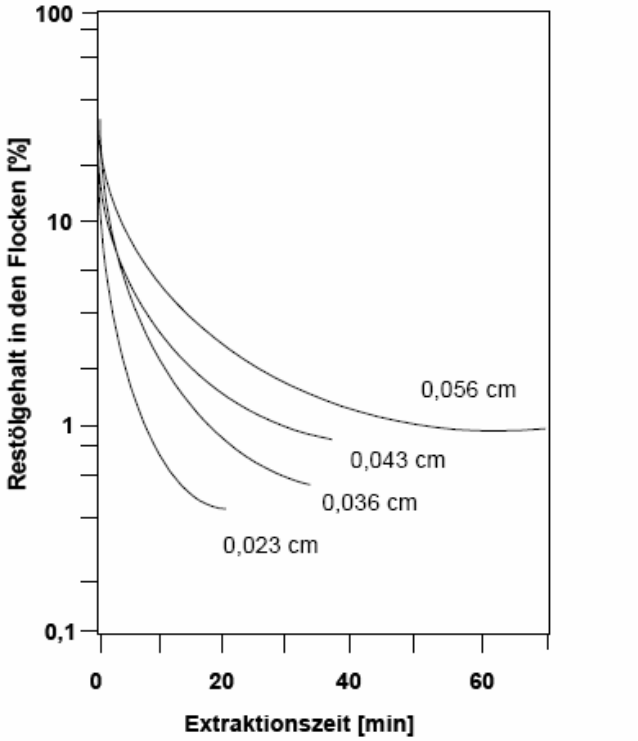


Abbildung 15: Einfluss der Flockendicke auf die Extraktionseffizienz. (Norris 1982)

Quelle: Snyder (1987), [5]

- Da der Konzentrationgradient die treibende Kraft für die Extraktion des Öls aus dem Feststoff ist, kommt es für den Verfahrensablauf der Extraktion darauf an, diesen innerhalb des Extrakteurs auf dem technisch höchst möglichen Niveau zu halten. Diese Anforderung wird verfahrenstechnisch entweder durch eine mehrstufige Extraktion oder eine Gegenstromextraktion erfüllt (Abb. 16) [102]. Dadurch wird gewährleistet, dass durch den hohen Konzentrationsgradienten das Konzentrationsgleichgewicht auf das niedrigste Niveau abgesenkt und damit eine hohe Ölausbeute erreicht wird.

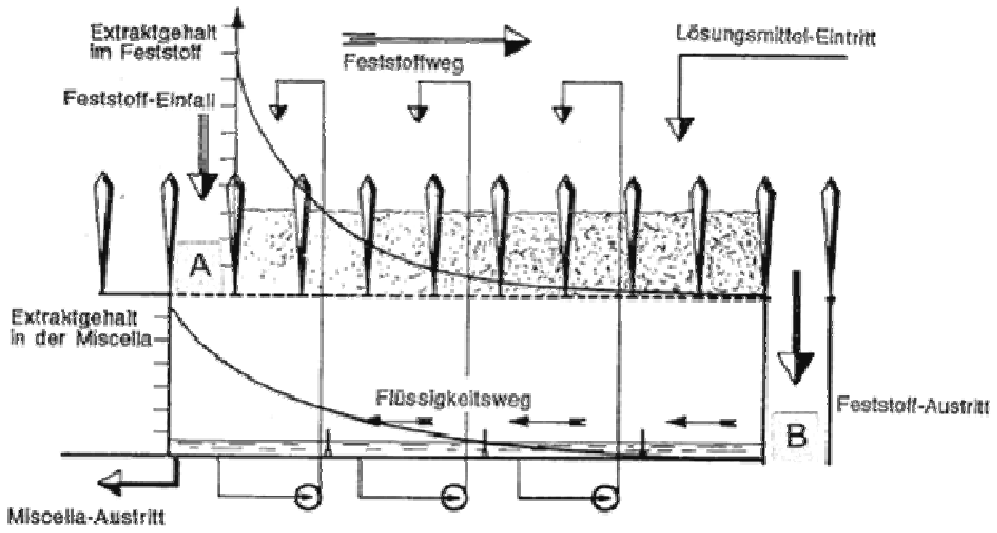


Abbildung 16: Darstellung einer Gegenstromextraktion von Ölsaaten.

Quelle: Kehse (1986), [102]

Bei der Perkolationsextraktion durchtropft das Lösungsmittel das aus Sojaflocken bestehende Feststoffbett. Dabei verteilt sich das Lösungsmittel filmartig auf den Flocken und diffundiert teilweise in diese und läuft teilweise über diese ab, so dass sich dadurch der Konzentrationsgradient für die Extraktion des Öls einstellt. Der Vorteil der Perkolationsextraktion besteht darin, dass das Lückenvolumen des Feststoffbetts nur teilweise und nicht vollständig mit Lösungsmittel ausgefüllt wird. Im Vergleich zum vollständigen Befüllen des Lückenvolumens wird auf diese Weise mit einer relativ kleineren Lösungsmittelmenge eine höhere Strömungsgeschwindigkeit erreicht. Dadurch wird das extrahierte Öl schnell von der Oberfläche abgeführt, so dass der Konzentrationsgradient auf konstant hohem Niveau gehalten werden kann. Daraus resultiert gleichzeitig eine hohe Extraktionsrate.

Dieser Vorteil der Perkolationsextraktion, wie er für Sojaflocken gegeben ist, kann bei anderen Rohstoffen zur Ölgewinnung, die entweder dichter oder von festerer Gewebestruktur sind, nicht ausgenutzt werden. Diese Rohstoffe werden deshalb durch Immersionsextraktion entölt. Bei dieser Extraktion wird der zu entölende Rohstoff vollständig in das Lösungsmittel eingetaucht. Dieses Verfahren erfordert, dass der Rohstoff gerührt wird, um einen Konzentrationsausgleich zwischen dem lokal gesättigten Lösungsmittel und dem Rohstoff einzustellen. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass durch das Rühren nicht zu viel Abrieb erzeugt wird, der später aus der Miscella abzutrennen ist. Der Nachteil der Immersionsextraktion besteht auch darin, dass in der Miscella nur ein Ölgehalt von < 13% erreichbar ist, während er bei der Perkolationsextraktion etwa 30% beträgt. Das bedeutet einen entsprechend höheren Aufwand für die Destillation des Lösungsmittels.

Diese Ausführungen zur Perkolations- und Immersionsextraktion sind für das neue Verfahrenskonzept von sehr großer Bedeutung, weil in diesem vorgesehen ist, das

Öl aus einem für die Proteingewinnung zwecknotwendig herzustellenden Sojamehl durch Verdrängungsextraktion mit einem wässrig-alkoholischen Extraktionsmittel abzutrennen. Dafür kommt nur ein Immersionsverfahren in Frage, für das bezogen auf die Ölgewinnung die Frage nach der Wirtschaftlichkeit seiner Anwendung unter dem Gesichtspunkt des Aufwandes für die Aufarbeitung des Extraktionsmittels zu beantworten sein wird.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung des neuen Verfahrenskonzepts ist vor allen Dingen auch der Restölgehalt im Extraktionsrückstand von großem Interesse, weil er das entscheidende Kriterium für seinen Einsatz zur Proteinproduktherstellung darstellt. Diesbezüglich zeigt die Anwendung der Perkolationsextraktion von Sojaflocken mit Hexan, dass die Ölausbeute und der Restölgehalt direkt mit der Anzahl der Extraktionsstufen und dem Verhältnis Flocken zu Lösungsmittel korreliert. So kann beispielsweise die Anzahl der Extraktionsstufen bei gleichem Extraktionsgrad durch ein verkleinertes Verhältnis von Flocken/Lösungsmittel reduziert werden. Das hat aber eine niedrigere Ölextraktion in der Miscella zur Folge, so dass eine höhere Verdampfungsleistung mit einem entsprechend erhöhten Energieverbrauch für die Rückgewinnung des Lösungsmittels erforderlich ist. Demgegenüber führt eine Erhöhung der Perkolationsstufen bei sonst gleichen Verfahrensparametern dazu, dass der Restölgehalt in den Flocken verringert und damit die Ölausbeute erhöht wird. Der Zusammenhang zwischen den Perkolationsstufen und dem Restölgehalt in den Flocken ist in der Abbildung 17 dargestellt. Es ist zu sehen, dass ab 6 Extraktionsstufen der Restölgehalt < 1% und die Ölausbeute > 99% ist. Die Verfahrensparameter der Ölextraktion erfüllen damit die Bedingung an den Restölgehalt für eine nachfolgende Proteinproduktherstellung aus dem Entölungsrückstand. An dieser Vorgabe muss sich auch das neue Verfahrenskonzept orientieren, um vermarktungsfähige Proteinprodukte herstellen zu können.

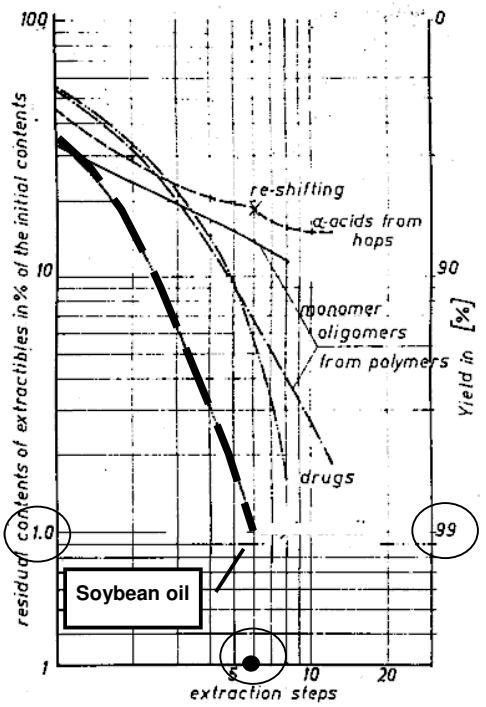


Abbildung 17: Darstellung der gewinnbaren Sojaölausbeute in Abhängigkeit von der Anzahl an Extraktionsstufen.

Quelle: Berk (1992), [103]

Dem großen Vorteil des niedrigen Restölgehalts und der hohen Ölausbeute mittels Hexanextraktion steht die leichte Entflammbarkeit und Explosionsneigung der Mischungen seiner Dämpfe in Luft gegenüber. Deshalb erfordert die Hexanextraktion die Erfüllung besonderer Sicherheitsauflagen. Das hat zur Einführung von speziellen Standards für Gebäude und Installationen in entsprechende Lösungsmittel-Extraktionsanlagen geführt (Abb. 18) [104]. Danach müssen alle elektrischen Installationen explosionsgeschützt ausgeführt sein. Die Abluft der Ventilatoren darf nur über gekühlte Kondensatoren an die Atmosphäre abgegeben werden, um ein mögliches Entweichen der Lösungsmitteldämpfe zu verhindern. Sehr strenge Sicherheitsmaßnahmen müssen getroffen werden, um Funkenschlag innerhalb der Umgebung einer Extraktionsanlage zu verhindern. All dies bedingt hohe Investitions- und Betriebskosten für den Betrieb von Lösungsmittel-Extraktionsanlagen.

Aufgrund dieser Problematik wird ständig nach alternativen Möglichkeiten zur Ölextraktion gesucht. Ein alternatives Lösungsmittel ist Trichloräthylen, das in den frühen vierziger Jahren kommerziell so lange eingesetzt wurde, bis entdeckt wurde, dass er wegen seiner Giftigkeit im Tierfutter nicht mehr eingesetzt werden konnte. Ein weiteres alternatives Verfahren stellt die Entölung mit superkritischem Kohlendioxid dar. Obgleich technisch durchführbar, wird dieses Verfahren zur Extraktion des Sojaöls zurzeit kommerziell nicht eingesetzt, weil die Entölungswirkung des Kohlendioxids nahe dem kritischen Punkt niedrig ist und die Investitionskosten in die Ausrüstung zu hoch sind. Alkohole sind eine Alternative zu

den unpolaren Lösungsmitteln, weil sie ebenso wie diese, allerdings erst bei hoher Temperatur, eine hohe Öllöslichkeit aufweisen. Wasserfreies Ethanol und Isopropanol besitzen bei 100 °C eine hohe Öllöslichkeit. Diese temperaturabhängige Löslichkeit kann dazu genutzt werden, um durch Kühlen der Miscella das Sättigungsgleichgewicht für das Öl zu unterschreiten und dieses als separate Phase durch Zentrifugieren abzuscheiden. Das Lösungsmittel wird nach erneuter Erwärmung dem Extrakteur wieder zugesetzt. Diese Alkohole sind deutlich weniger feuergefährlich als Hexan, trotzdem sind auch hierbei sicherheitsrelevante Vorkehrungen zu treffen.

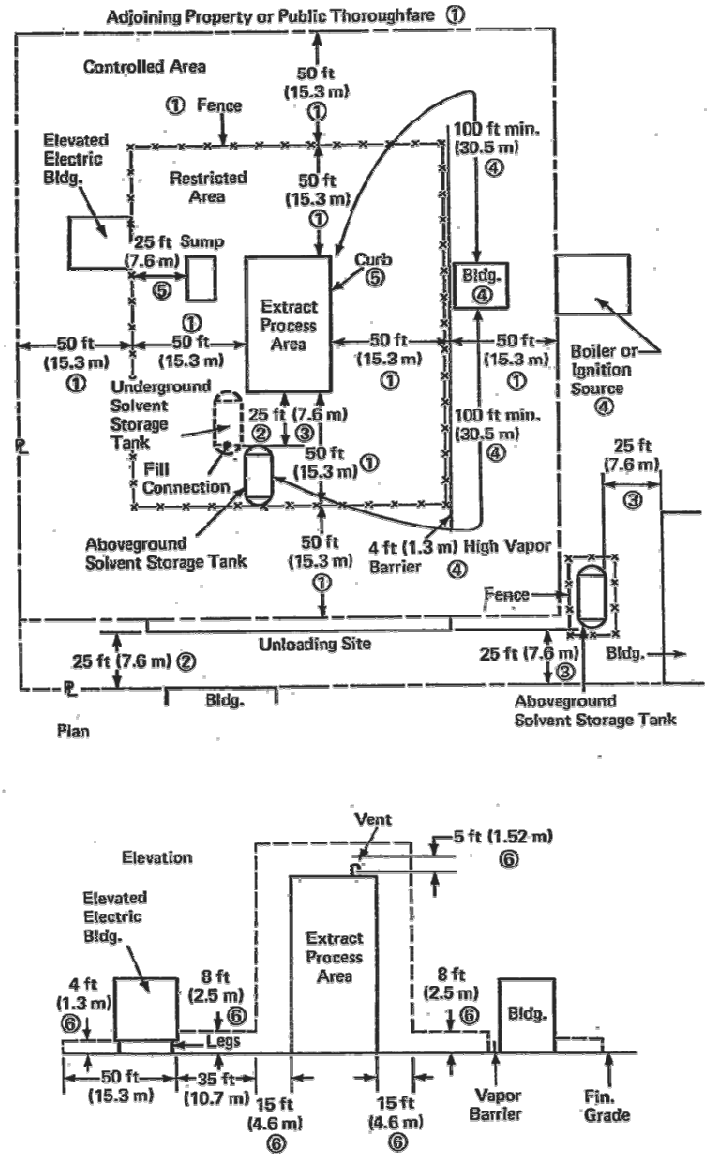


Abbildung 18: Darstellung der Sicherheitsabstände für die Planung von Hexananlagen.

Quelle: NFPA (1993), [104]

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass trotz der teilweise mit beträchtlichem Aufwand betriebenen Forschung zur Entwicklung alternativer Extraktionstechniken die Extraktion von Sojaöl mit n-Hexan praktisch das einzige kommerziell eingesetzte Verfahren zur Ölgewinnung geblieben ist. Alle anderen Verfahren haben sich entweder als technisch oder wirtschaftlich nicht realisierbar erwiesen. Deshalb ist die Proteinproduktgewinnung bisher auch an die Hexanextraktion von Sojaflocken gekoppelt geblieben. Sie erfordert allerdings eine spezielle Aufarbeitung des Extraktionsrückstands mit welcher der Denaturierungsgrad der Proteine gegenüber der herkömmlichen Verfahrensweise reduziert werden kann. In jedem Fall stellt die Ölmühle grundsätzlich nur den Rohstoff für die Proteinproduktherstellung zur Verfügung. Ihre eigene Auslegung erfolgt völlig unabhängig von der Proteinproduktherstellung ausschließlich mit Blick auf die Ölgewinnung. Daraus ergibt es sich, dass alle Verfahrenschritte auf die Ölgewinnung optimiert sind. Das bedeutet, dass beispielsweise die Extrakteure bezüglich der Entölung an ihrem thermischen Optimum gefahren werden. Dabei unterscheiden sich die Extrakteure hinsichtlich ihrer Arbeitsweise, die entweder diskontinuierlich, semikontinuierlich oder kontinuierlich sein kann. Die Extrakteure besitzen sehr flexible Verarbeitungskapazitäten. Die Abbildung 19 zeigt einen Karussellextrakteur, der in Verarbeitungskapazitäten von 20 bis 4.000 t Sojaflocken pro Tag gebaut wird. Aus dieser beispielhaften Angabe der Verarbeitungskapazität ist zu erkennen, dass die Wirtschaftlichkeit des Betriebs eines solchen Extrakteurs auf der Seite großer Verarbeitungskapazitäten liegt. Es entstehen bei Restölgehalten von < 1 % in Abhängigkeit von der Ausführung der Extrakteure Lösungsmittelverluste im Bereich von 0,07 bis 0,3 %.



Abbildung 19: Schematische Darstellung eines Karussell-Extrakteurs.

Quelle: Harburg-Freudenberger (2005), [97]

Der Hinweis auf die Wirtschaftlichkeit solcher Perkolationsextrakteure ist im Zusammenhang mit der zwecknotwendigen Immersionsextraktion nach dem neuen Verfahrenskonzept zu sehen, das eine mehrstufige Abscheidung des zu extrahierenden mehlartigen Feststoffs mit Zentrifugen erforderlich macht. Dabei übernehmen die Zentrifugen die Funktion des Extrakteurs. Daraus entstehen sowohl höhere Investitions- als auch Produktionskosten als bei den Perkolationsextrakteuren, die allerdings aufgrund der Aufgabenstellung der Proteinproduktherstellung auf diese und die Ölabtrennung aufzuteilen sind. Nur daraus kann sich eine Wirtschaftlichkeit für das Gesamtverfahren aus Proteinproduktherstellung und Ölabtrennung gegenüber der Proteinproduktherstellung aus entölten und flash-desolventierten Sojaflocken ergeben.

4.1.2.4 Verarbeitungsschritte nach der Lösungsmittel-Extraktion

Nach der Lösungsmittelextraktion verlassen zwei Stoffströme den Extrakteur. Dies sind der ölreiche, flüssige Extrakt, die Vollmiscella, und der lösungsmittelhaltige Extraktionsrückstand. Aus beiden Stoffströmen muss das Lösungsmittel zurückgewonnen werden. Das geschieht aus der Vollmiscella durch Destillation des Lösungsmittels und aus den entölten Flocken durch Desolventieren (Entbenzinierung).

Die Vollmiscella enthält nach der Extraktion gewöhnlich 30% Öl. Dadurch müssen pro Tonne gewonnenen Rohöls etwa 2,5 Tonnen an Lösungsmittel durch Destillation zurückgewonnen werden. Das wesentliche Merkmal der Destillation des Lösungsmittels aus der Miscella besteht in der Vermeidung einer thermischen Schädigung des Rohöls und einer effizienten Entfernung von Spuren von Lösungsmittelrückständen aus dem Öl. Die Lösungsmittelrückgewinnung schließt deshalb eine Entspannungsverdampfung, eine Vakuumdestillation und ein Strippen mit Dampf ein.

Die extrahierten Flocken haben einen Restgehalt an Lösungsmittel von ungefähr 35% (w/w). Das Austreiben und die Rückgewinnung des Lösungsmittels aus den Sojaflocken ist einer der kritischsten Prozesse in der Ölmühle, weil die ernährungsphysiologische Qualität der Sojaflocken bzw. des daraus hergestellten Sojamehls wesentlich von der Art des Desolventierens abhängt.

Mit dem Desolventieren werden bezogen auf die Verwendung des Extraktionsschrots als Tierfutter zwei Ziele verfolgt. Das eine Ziel besteht in der Entfernung des Lösungsmittelrückstands und das andere in der Deaktivierung antinutritiver Substanzen. Dazu sind Apparate entwickelt worden, in denen das Sojaschrot mit Frischdampf durchströmt werden kann. Der Dampf verdrängt das Lösungsmittel und erhitzt gleichzeitig das Sojaschrot auf eine Temperatur bei der die antinutritiven Substanzen weitgehend inaktiviert werden. Diese thermische Behandlung wird ohne Rücksicht auf die mit der Inaktivierung der antinutritiven Substanzen verbundene thermische Denaturierung der Proteine vorgenommen. Das ist möglich, weil die dabei vorkommende Proteindenaturierung den Futterwert der Sojaschrote praktisch

nicht beeinträchtigt. Diese Vorgehensweise zur Desolventierung ist zwar auch noch möglich, wenn aus den Sojaschroten unlösliche Proteinkonzentrate als Proteinprodukte hergestellt werden sollen, sie ist aber ungeeignet, wenn Sojaproteinisolate Zielprodukte sind, weil diese sich durch hohe Wasserlöslichkeit auszeichnen müssen. Deshalb sind für die Proteinproduktherstellung Apparate entwickelt worden, mit denen eine hoch effiziente Desolventierung von extrahierten Sojaflocken möglich ist, ohne diese einer starken thermischen Belastung auszusetzen. Diese Apparate sind als Flash Desolventiser Systeme (FDS) bekannt geworden.

In der Abbildung 20 ist ein für die Tierfutterherstellung entwickelter Apparat zu sehen, mit dem das entölte Sojaschrot desolventiert und zur Inaktivierung der antinutritiven Substanzen getoastet wird. In diesem Apparat sind die Verfahrensschritte Vordesolventieren, Desolventieren, Toasten, Trocknen und Kühlen (V-D-T-T-K) vereint. Die Anwendung dieser Technik führt im Allgemeinen zu einer erheblichen Einschränkung der Proteinlöslichkeit, wie sie beispielhaft in der Abbildung 21 anhand des NSI dargestellt ist [24,105].

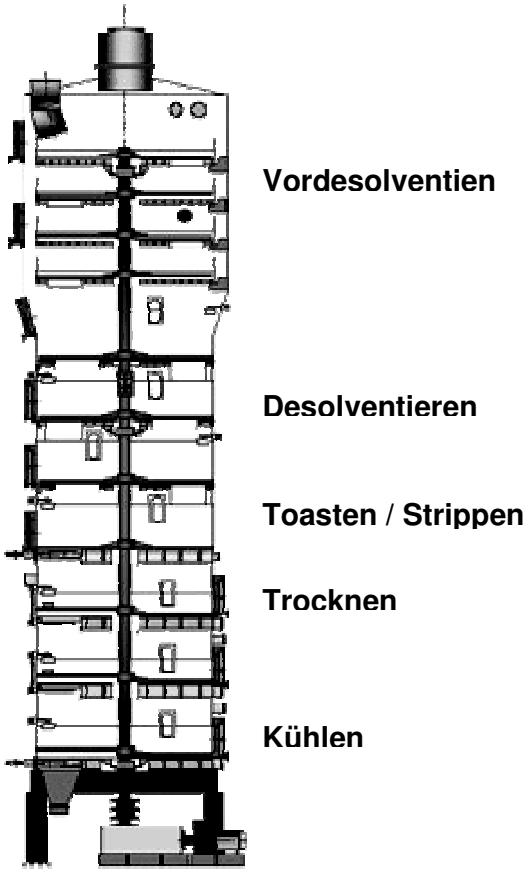


Abbildung 20: Apparat zum Desolventieren und Toasten von entölten Sojaschroten.

Quelle: Harburg-Freudenberger (2005); [97]

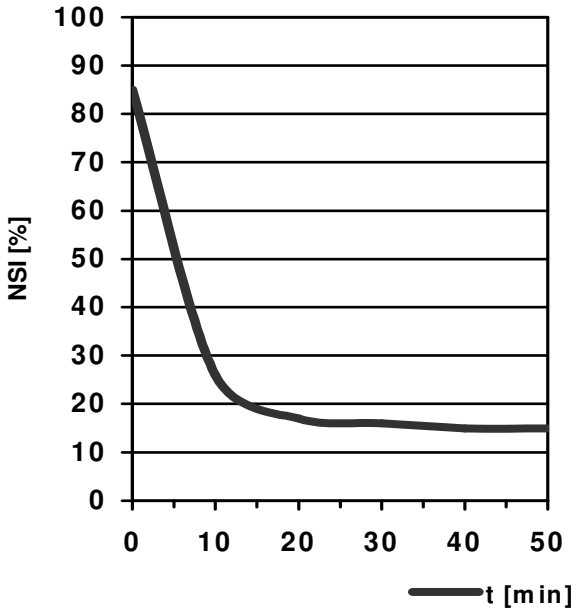


Abbildung 21: Darstellung der Löslichkeit von Sojaproteinen aus Sojaschrot in Abhängigkeit von der Hitzebehandlung.

Quelle: Becker (1971); [24]

Dagegen ermöglicht die Flash-Desolventierung eine variable Einstellung der Proteindenaturierung und Inaktivierung der antinutritiven Substanzen. Das Verfahren beruht auf einer spontanen Verdampfung des Lösungsmittels aus dem Sojaschrot durch Einleiten überhitzten Lösungsmittelgases (135 bis 175 °C). Die Überhitzungswärme wird ausgenutzt, um das gebundene Lösungsmittel zu verdampfen. Dabei erfolgt eine extrem kurze Kontaktzeit des Schrots mit der Wärme, so dass die Proteindenaturierung auf ein Minimum beschränkt bleibt. Durch geeignete Wahl der Verfahrensparameter, wie Druck und Dampfzugabe, kann der NSI auf Werte von > 80% eingestellt werden. Zur Minimierung des Restgehalts an Lösungsmittel in den Flocken können diese zusätzlich unter Vakuum mit überhitztem Wasserdampf behandelt werden. Der Nachteil dieser schonenden Behandlung besteht darin, dass der Verlust an Lösungsmittel etwas größer ausfällt als beim Toasten. Ein hoch entwickeltes FDS ist in der Abbildung 22 zu sehen.

Mit dieser Beschreibung der Prozesstechnik zur Herstellung des Ausgangsstoffs zur Herstellung von Sojaproteinprodukten ist der Vergleichstandard für das neue Verfahrenskonzept hinreichend beschrieben. Darin spielt der Denaturierungsgrad

des Proteins in den Flocken und deren Restölgehalt die entscheidende Rolle für alle zu treffenden Vergleiche im Hinblick auf die Qualitätsmerkmale der Sojaproteinprodukte. Darüber hinaus bildet der realisierte Stand der Technik die Vergleichsgröße für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit des neuen Verfahrenskonzepts, worauf bereits hingewiesen worden ist.

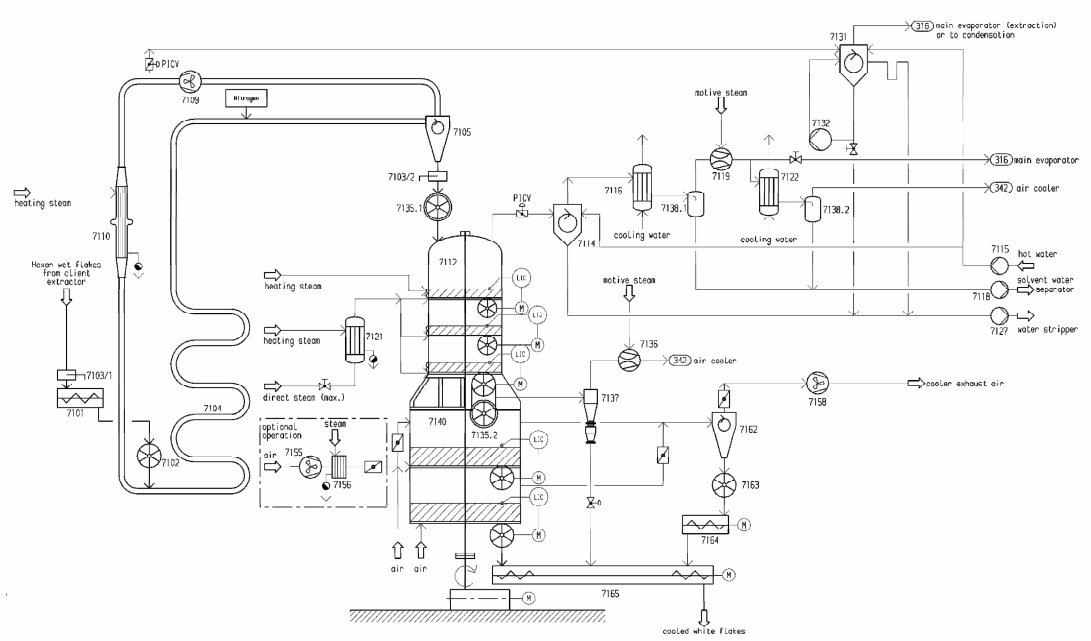


Abbildung 22: Darstellung eines FDS zum Desolventieren von n-Hexan aus Sojaflocken.

Quelle: Harburg-Freudenberger (2005), [97]

4.2 Sojaproteinprodukte

Das wesentliche Ziel des neuen Verfahrenskonzepts besteht darin, über einen kombinierten Verfahrensablauf aus Sojamahlprodukten auf direktem Wege Sojaproteinprodukte herzustellen und Öl abzutrennen. Diese Zielsetzung kann nur erreicht werden, wenn die Endprodukte die gleichen Eigenschaften aufweisen wie die nach dem Stand der Technik hergestellten. Das ist deshalb erforderlich, weil die Anwendung pflanzlicher Proteine in der Lebensmittelindustrie in vielfältiger Weise auf deren ernährungsphysiologischen, sensorischen und funktionellen Eigenschaften beruht.

Werden diese Eigenschaften in den derzeitigen Marktpreisen für pflanzliche Proteinprodukte gespiegelt (Tab. 8) [106], zeigt sich, dass der kommerzielle Wert der Sojaproteinprodukte sowohl in den ernährungsphysiologischen als auch den funktionellen Eigenschaften liegt, demgegenüber aber der kommerzielle Wert des bedeutendsten Konkurrenzproduktes, des Weizenklebers, weitgehend in seinen funktionellen Eigenschaften beruht. Dabei ist es interessant, dass der kommerzielle Wert des Proteins im SPC größer ist als der im SPI. Die Wertschöpfung aus dem SPC ist ebenfalls größer als die aus dem SPI, wenn dazu die in der Tabelle 9 angegebenen Werte für die Ausbeute dieser Produkte aus entfettetem Sojaschrot herangezogen werden.

Tabelle 8: Relativierung der Preise für Proteinprodukte unter Bezugnahme auf den Proteingehalt, den kalorischen Nährwert und die biologische Wertigkeit

Produkt (% Protein in TS)	**Preis pro Tonne**	**Preis pro kg Protein**	**Preis pro kcal Protein**	**Preis pro PDCAAS**
Sojaprotein-Isolat (90%)	2.250 € *	2,63 €	0,63 €	2,63 €
Sojaprotein-Konzentrat (65%)	1.800 € *	3,06 €	0,73 €	3,06 €
Entfettetes Sojamehl (50%)	240 € *	0,54 €	0,13 €	0,54 €
Weizenkleber (80%)	750 € **	1,02 €	0,24 €	4,10 €

* gerundet aus ASA reference guide (2005), [106]
** aktueller Marktpreis (2005), [107]

Die biologische Wertigkeit der Proteine wird über den Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score (PDCAAS) bestimmt. Diese Methode basiert auf der Verdaulichkeit von Proteinen in Lebensmitteln zu Aminosäuren und ist bezogen auf Menschen in der Altersgruppe von 1 bis 5 Jahren, die den höchsten Bedarf an essentiellen Aminosäuren haben. Der maximal erreichbare PDCAAS hat den Wert 1,0. Er besagt, dass das im Lebensmittel enthaltene Protein 100% des Bedarfs an essentiellen Aminosäuren für Kinder im Alter von 1 bis 5 Jahren deckt. Jeglicher Überschuss an Aminosäuren wird durch den Körper ausgeschieden oder in Fett umgesetzt. Damit kann der PDCAAS den Wert 1 nicht überschreiten.

Der PDCAAS für Sojaproteinprodukte erreicht den Wert 1, während er für Weizenkleber nur 0,25 beträgt. Damit ist nicht nur der ernährungsphysiologische Wert von Sojaproteinprodukten gegenüber anderen pflanzlichen Proteinprodukten nicht nur sehr groß, sondern der Einsatz von Sojaproteinprodukten verursacht bei

der Verwendung in Lebensmitteln zur Proteinanreicherung auch deutlich geringere Kosten als der anderer pflanzlicher Proteinprodukte mit niedrigerem PDCAAS, weil beispielsweise der Weizenkleber.

4.2.1 Herstellung von Sojaproteinprodukten

Die Herstellung der Sojaproteinprodukte SPC und SPI erfolgt auf zwei vollständig voneinander getrennten Wegen. Im Falle der SPC wird der größte Anteil der Proteine im Verfahrensablauf in einen unlöslichen Zustand gehalten und im Falle der SPI werden die Proteine im Gegensatz dazu zum größten Teil löslich gemacht. Die Herstellung der Produkte ist über die Verfahrensstufen mit einer Anreicherung der Proteine in den Endprodukten verbunden. Dazu ist die Zusammensetzung der Hauptinhaltsstoffe der Sojabohne und der Anteil der aus ihr hergestellten Produkte nebst ihrer Zusammensetzung in der Abbildung 23 dargestellt.

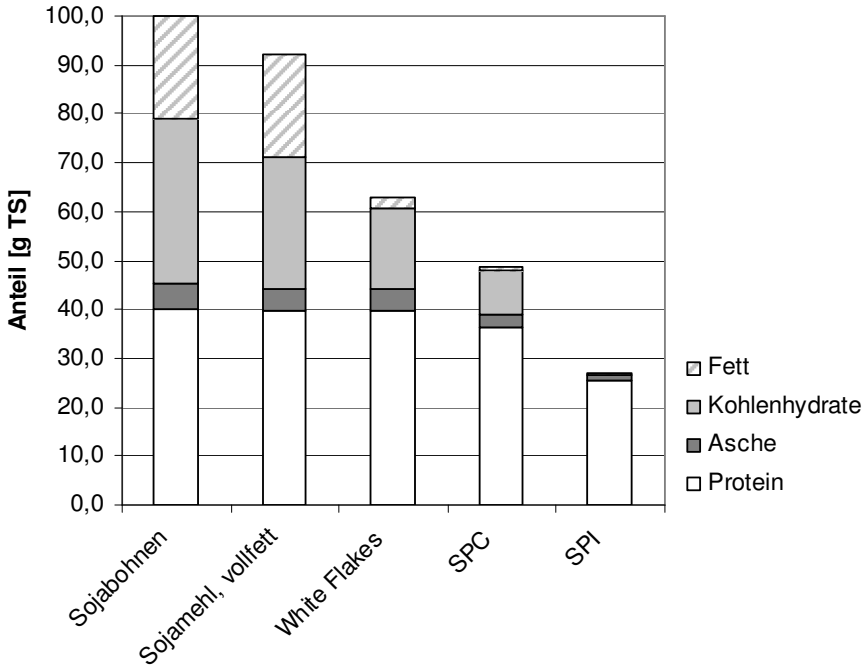


Abbildung 23: Zusammensetzung der Sojabohnen und der aus ihnen hergestellten Produkte.

Quelle: Snyder (1987), [5]

Aus Gründen der Geschlossenheit der Darstellung der zu treffenden Vergleiche zu dem neuen Verfahrenskonzept soll nachfolgend der aktuelle Stand der Technik anhand realer Prozessdaten ausgeführten Anlagen abgehandelt werden. Dazu sei einführend für die Herstellung von SPC und SPI ein Auszug einer realen Massenbilanz für beide Produkte gegeben (Tab. 9) [108]. Aus den Zahlenwerten für das Protein in den Produkten geht hervor, dass der Proteinübergang in die Nebenprodukte respektive in das Abwasser, bei der SPI Herstellung deutlich größer

ist als bei der SPC Herstellung. Daraus resultiert die Notwendigkeit für einen höheren Preis für das SPI gegenüber dem SPC, der außerdem durch die höheren Kosten für die aufwendigere Prozesstechnik verursacht ist. Im Anhang ist eine vereinfachte Massenbilanz der SPI Herstellung angehängt (A1).

Tabelle 9: Auszug aus realen Massenbilanzen für die Herstellung von SPC und SPI aus Sojaflocken

Produkt	Masse [kg]	Trockenmasse [kg]	Protein [kg TS]
Sojaflocken	100	91	49
SPC	65	59	42
SPI	43	41	37

Quelle: Westfalia Separator (2005), [108]

Die SPC und SPI werden neben der Charakterisierung über ihre Inhaltsstoffzusammensetzung nach dem Löslichkeitsverhalten ihrer Proteine in Wasser charakterisiert. Das Löslichkeitsverhalten wird durch zwei standardisierte Methoden bestimmt. Mit der einen wird der ‚Protein Dispersibility Index' (PDI) [109] und mit der anderen der Nitrogen Solubility Index (NSI) [110] bestimmt. Beide Methoden sind sehr ähnlich und unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich der Rührwerksgeschwindigkeit eines bestimmten Mixers, wobei zur Bestimmung des NSI eine niedrigere Rührwerksgeschwindigkeit als beim PDI eingestellt wird. Messgröße ist der mit der Kjeldahl-Methode [111] bestimmte Stickstoff, der vom Gesamtstickstoffgehalt des Produkts in die flüssige Phase übergeführt wird. Generell sind die NSI Werte kleiner als die PDI Werte. In der Literatur [112,113] ist dafür folgender Zusammenhang angegeben PDI = 1,07 * NSI + 1.

4.2.1.1 Herstellung von SPC

Wie bereits unter 3.3.2.3 ausgeführt, erfolgt die Herstellung der SPC auf der Grundlage der unter den Verfahrensbedingungen gegebenen Unlöslichkeit des größten Teils der Sojaproteine, so dass die löslichen Bestandteile extrahiert werden können. Dies sind hauptsächlich die löslichen Kohlenhydrate, aber auch niedermolekulare, stickstoffhaltige Verbindungen und Mineralien. Bei diesem Extraktionsvorgang werden etwa 25% der eingesetzten Trockensubstanz der entfetteten Sojaflocken in die lösliche Phase übergeführt. Durch diese Extraktionstechnik der entölten Flocken, die eine relativ gleichförmige und konstante Inhaltsstoffzusammensetzung aufweisen, ergibt sich eine für die SPC typische Zusammensetzung (Tab. 10) [114]. Dabei muss der Proteingehalt in Trockenmasse mindestens 65% (Nx 6.25) betragen [1,3,4].

Tabelle 10: Allgemeine Charakterisierung eines SPC

Protein (Nx6.25)	[% TS]	min. 65
Feuchte	[%]	max. 9
Kohlenhydrate	[% TS]	max. 20
Asche	[% TS]	max. 7
Fett (saure Hydrolyse)	[% TS]	max. 4
Partikelgröße < 150 µm	[%]	95
Gesamtkeimzahl		max. 10.000
Salmonella in 200 g.		negativ
E. coli in 1 g		negativ

Quelle: ASA (2005), [114]

Industriell werden zwei unterschiedliche Verfahren zur Herstellung von SPC eingesetzt. Es gibt darüber hinaus noch ein drittes Verfahren, das industriell jedoch keine Bedeutung erlangt hat. Mit den nachstehend aufgeführten Verfahren können SPC hergestellt werden, die jedoch jeweils unterschiedliche Eigenschaften besitzen.

a) Wässrig-alkoholische Extraktion löslicher Substanzen [113,115]
b) Extraktion löslicher Substanzen bei saurem pH-Wert [1,5,113]
c) Thermische Denaturierung der Proteine und wässrige Extraktion löslicher Substanzen [5]

Bei allen drei Prozessen wird der größte Teil der Sojaproteine in einen unlöslichen Zustand versetzt, um andere lösliche Bestandteile extrahieren zu können. In Abhängigkeit vom gewählten Verfahrensschritt des Unlöslichmachens unterscheiden sich die SPC hinsichtlich ihres NSI bzw. PDI. Es ist jedoch möglich, die Löslichkeit des Proteins im SPC durch einen zusätzlichen Verarbeitungsschritt zu erhöhen. Das kann beispielsweise bei den durch saure Wäsche gewonnenen Konzentraten durch Neutralisation mit Lauge geschehen. Die durch wässrig-alkoholische Extraktion produzierten SPC haben aufgrund der dabei erfolgenden Denaturierung der Proteine die niedrigsten NSI Werte (10 bis 15%). Die durch den Alkohol verursachten molekularen Veränderungen an den Proteinen sind jedoch im Unterschied zu den durch thermische Denaturierung erzeugten zum größten Teil reversibel. Deshalb können die funktionellen Eigenschaften der durch wässrig-alkoholische Extraktion hergestellten SPC, wie beispielsweise deren Emulsions- oder Wasserbindungs-Vermögen, durch geeignete Verfahrensschritte rekonstituiert werden. Das kann beispielsweise durch Dampfinjektion oder durch Eintrag von Scherkräften geschehen. Die Dispergierbarkeit und Funktionalität der erzeugten Konzentrate können, Einsatz von Jet-Cookern oder durch Eintrag von Scherkräften mittels Homogenisation verbessert werden [5,113,116]. Die durch thermische Denaturierung der Proteine und wässrige Extraktion hergestellten SPC werden sind irreversibel denaturiert und haben im Gegensatz zu den nach den beiden anderen Verfahren hergestellten SPC, die hell gefärbt sind, außerdem eine dunkle Farbe. Wohl aufgrund dieser Färbung konnte sich das dritte Verfahren nicht durchsetzen.

Die Extrakionsverfahren führen in jedem Fall zur weitgehenden Entfernung der unerwünschten Aromakomponenten, so dass die SPC verhältnismäßig mild und geschmacksneutral sind. Außerdem werden durch die Extraktion die in dem Sojaschrot enthaltenen Oligosaccharide, im wesentlichen Raffinose und Stachiose, soweit entfernt, dass sie keine Flatulenz mehr auslösen können. Die SPC besitzen durch die Extraktion löslicher Proteine gegenüber dem Ausgangsprodukt eine etwas andere Aminosäurezusammensetzung (Tab. 11).

Tabelle 11: Aminosäurezusammensetzung der Proteine im Sojamehl und SPC (Gramm Aminosäure pro 16 g Stickstoff)

Aminosäure	Sojamehl	SPC	
		Ethanolische Wäsche	Saure Wäsche
Alanin	4.0	4.86	4.03
Arginin	6.95	7.98	6.46
Asparaginsäure	11.26	12.84	11.28
Cystin	1.45	1.40	1.36
Glutaminsäure	17.18	20.20	18.52
Glycin	3.99	4.60	4.60
Histidin	2.60	2.64	2.59
Isoleucin	4.80	4.80	5.26
Leucin	6.50	7.90	8.13
Lysin	5.70	6.40	6.67
Methionin	1.34	1.40	1.40
Phenylalanin	4.72	5.20	5.61
Prolin	4.72	6.00	5.32
Serin	5.00	5.70	5.97
Threonin	4.27	4.46	3.93
Tryptophan	1.80	1.60	1.35
Tyrosin	3.40	3.70	4.37
Valin	4.60	5.00	5.57

Quelle: Lusas u. Rhee. (1995) ; [113]

4.2.1.1.1 Wässrig-alkoholische Extraktion löslicher Substanzen

Das Verfahren der wässrig-alkoholischen Extraktion beruht auf der Möglichkeit, mittels wässriger Lösungen aus kurzkettigen Alkoholen (Methanol, Ethanol und Isopropanol) die Extraktion von Kohlenhydraten aus Sojamehlen oder –flocken durchführen zu können, weil in solchen Extraktionsmitteln der größte Teil der Proteine nicht löslich ist. Die üblicherweise gewählte Konzentration des wässrig-alkoholischen Extraktionsmittels beträgt etwa 60% Alkohol (w/w).

Auch für die wässrig-alkoholische Extraktion wird ein hoher NSI Wert für die entölten Sojaflocken gefordert, weil damit sichergestellt werden kann, dass die löslichen Kohlenhydrate weitgehend extrahiert werden können. Das ist für getoastete Sojaflocken nicht gegeben, weil in diesen Maillard-Reaktion stattgefunden haben durch welche diese Kohlenhydrate in Form von karamellisierten Produkten fest an

das Protein gebunden bleiben. Dadurch kann der erforderliche Proteingehalt nur schwer erreicht werden und zusätzlich kommt es zu unerwünschten Farbveränderungen im Endprodukt.

Das Verfahren beginnt mit dem Suspendieren der entfetteten Sojaflocken im Lösungsmittel in einem ungefähren Verhältnis von 1:10 bei Temperaturen im Bereich von 50 bis 90°C. Im darauf folgenden Schritt wird die Flüssig-Fest-Extraktion entweder diskontinuierlich oder kontinuierlich durchgeführt. Bei der kontinuierlichen Betriebsweise werden Verarbeitungskapazitäten von bis zu 10 t/h an entfetteten Sojaflocken verarbeitet. Selbst diese Menge ist klein gegenüber dem Durchsatz bei der Ölgewinnung aus den Sojaflocken. Tatsächlich ist die Verarbeitungskapazität der meisten Proteinanlagen kleiner als 10 t/h, üblich sind Anlagengrößen mit einer durchschnittlichen Verarbeitungsleistung von 2,5 t/h entfetteter Sojaflocken. Bei diesen Verarbeitungsleistungen halten sich kontinuierliche und diskontinuierliche Anlagen in etwa die Waage.

Diskontinuierlich arbeitende Anlagen verwenden zur Extraktion ähnliche Ausrüstungen wie sie in den Ölmühlen für die Ölextraktion eingesetzt werden. Wenn entfettete Sojaflocken extrahiert werden, können das horizontale Band- oder Korb-Extrakteure sowie auch Karusell-Extrakteure sein. Immer öfter werden auch Dekantierzentrifugen in solche Anlagen integriert. Die Dekanter beeinflussen das Extraktionsergebnis und den Energiebedarf positiv, weil mit ihnen eine vergleichsweise hohe mechanische Entwässerung des Feststoffs möglich ist. Ein ausgeführtes Verfahrenskonzept bei dem eine dreistufige Gegenstrom-Extraktion mit Dekantern realisiert ist, zeigt die Abbildung 24 [117].

Die Ausführung der Anlagen für eine wässrig-alkoholische Extraktion erfolgt gegenüber Hexananlagen auf einem niedrigeren Gefährdungspotential. Da aber auch bei der wässrig-alkoholischen Extraktion mit einem Lösungsmittel gearbeitet wird, welches bei der eingesetzten Konzentration flüchtig und entflammbar ist, sollten auch diese Anlagen zur SPC Herstellung explosionsgeschützt ausgeführt sein, wenn auch auf einem niedrigerem Sicherheitsstandard.

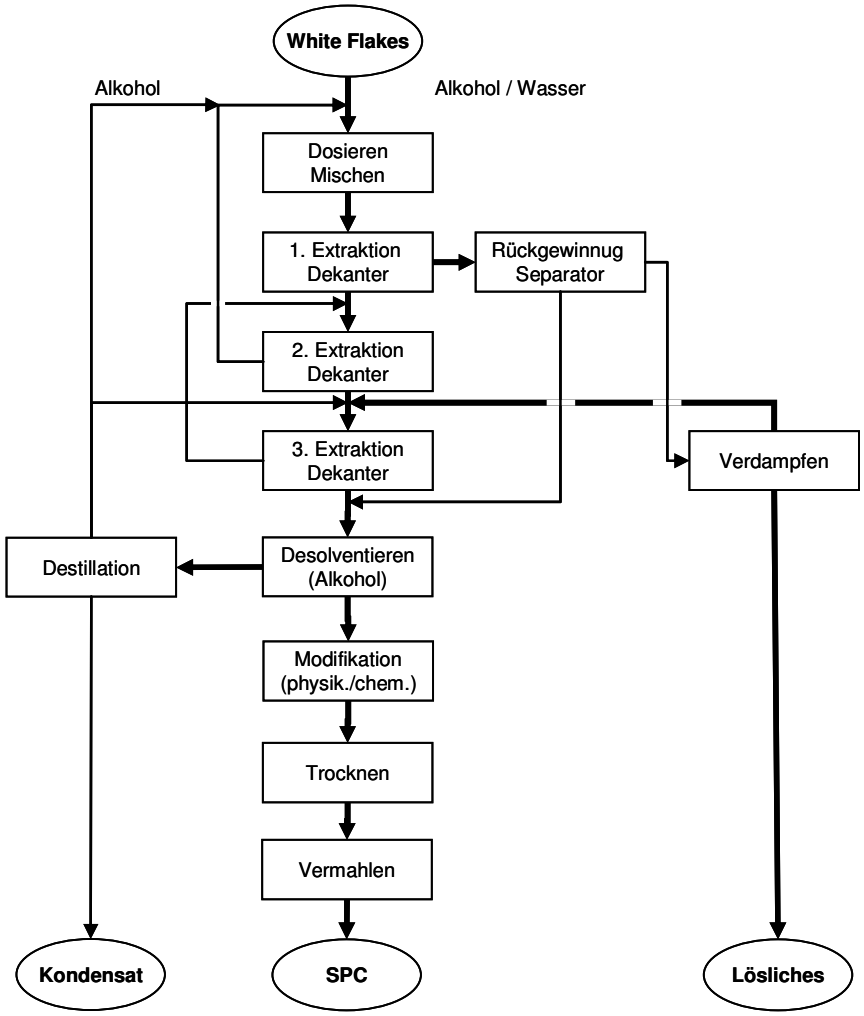


Abbildung 24: Blockdiagramm für die SPC Herstellung durch ethanolisch-wässrige Extraktion unter Verwendung einer dreistufigen Gegenstromextraktion mit Dekantern.

Quelle: Westfalia Separator (2005), [117]

Nach der Extraktion wird der Alkohol aus dem flüssigen Extrakt abdestilliert und nachfolgend rektifiziert. Der rektifizierte Alkohol wird in den Verfahrensablauf rezirkuliert. Der Sumpf aus der Alkoholdestillation wird eingedampft. Das entstehende Verdampferkonzentrat wird als Soja-Melasse bezeichnet und besteht aus den aus den Sojaflocken extrahierten löslichen Bestandteilen. Die Melasse setzt sich aus Kohlenhydraten (60%), Proteinen und andere Stickstoff enthaltenen Substanzen (10%), Mineralien (10%), Fett und Lipoiden (10%) zusammen. Die Melasse wird hauptsächlich als Bindemittel für Tierfutterprodukte verwendet und wirkt darin zusätzlich als kalorischer Bestandteil.

Die extrahierten Sojaflocken sind mit dem Lösungsmittel gesättigt, das aus diesen ausgetrieben werden muss. Dazu werden Desolventierungsapparate für die Entfernung des Alkohols eingesetzt wie sie aus der Ölextraktion bekannt sind. Das

im Feststoff verbleibende Wasser wird durch Heißluftrocknung, gegebenenfalls Sprühtrocknung, abgedampft. Der getrocknete Feststoff ist das SPC, das zu einem Pulver vermahlen wird.

4.2.1.1.2 Extraktion löslicher Substanzen bei saurem pH-Wert

Für die Extraktion bei saurem pH-Wert wird die Eigenschaft der Sojaproteine ausgenutzt, dass ihre Hauptfraktion, der Globuline, bei einem pH Wert im Bereich von 4,2 bis 4,5 eine minimale Löslichkeit aufweist. Zur Extraktion werden die Flocken im Verhältnis 1:10 mit Wasser in einem gerührten Tank mit einem Mischer angemaischt. Die Maische wird mit Säure versetzt, üblicherweise verdünnte Salzsäure (HCl), um den pH-Wert auf den angegebenen Bereich einzustellen. Die Extraktion wird bei ständiger pH-Wert Kontrolle zwei-, oft jedoch dreistufig im Gegenstrom semikontinuierlich in gerührten Tanks durchgeführt. Nach jedem Extraktionstank wird die Suspension einem Dekanter zugeführt (Abb. 25) [5,113,117]. Mit Hilfe der Dekanter werden die Extrakte vom Feststoff getrennt, wobei der Feststoff auf etwa 30 % Feststoffgehalt entwässert wird.

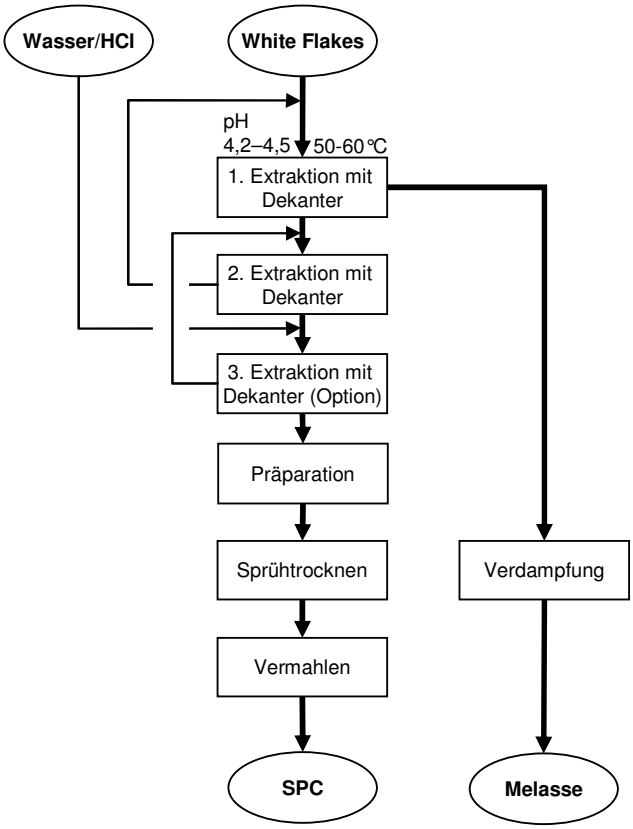


Abbildung 25: Blockdiagramm der SPC Herstellung durch Extraktion löslicher Substanzen bei saurem pH-Wert mittels dreistufiger Gegenstromextraktion mit Dekantern.

Quelle: Westfalia Separator (2005), [117]

Die Extraktion wird im Gegenstrom geführt, so dass der Feststoff auf den erforderlichen Proteingehalt extrahiert wird. Der Oberlauf aus der ersten Dekanterstufe, die Molke, wird eingedampft. Der Unterlauf aus der dritten Dekanterstufe durchläuft eine weitere Präparation, bevor er zum SPC durch Sprühtrocknung getrocknet wird. In der Präparationsstufe werden die funktionellen Eigenschaften der SPC durch physikalische oder chemische Behandlung der Konzentrate eingestellt. Beispielsweise kann durch eine Neutralisation mit Lauge die Löslichkeit der SPC erhöht werden.

Anschließend wird das Konzentrat nach Rückverdünnen auf etwa 15% Feststoffgehalt auf einen Restwassergehalt von etwa 8% sprühgetrocknet. Die Sprühtrocknung ist ohne weiteres möglich, weil es durch das Mischen und Rühren zu einer Zerkleinerung der Flocken kommt. Das SPC wird durch Mahlen auf die gewünschte Partikelgröße eingestellt. Typische Schüttgewichte für SPC-Pulver liegen im Bereich von 0,4 bis 0,45 g/cm³ und für SPC-Granulate im Bereich von 0,54 bis 0,61 g/cm³.

Die Gewinnung der Sojaprotein-Konzentrate durch Extraktion bei saurem pH-Wert hat den Vorteil, dass das Wasser kein brennbares oder explosives Lösungsmittel ist. Der Nachteil des Verfahrens besteht jedoch darin, dass die Abtrennung des Wassers aus dem Feststoff sich schwieriger gestaltet, als die Abtrennung wässrigen Alkohols aus diesem. Das ergibt sich daraus, dass die Flocken in Wasser quellen und dadurch sehr viel Wasser binden. Deshalb ist bei diesem Verfahren der Einsatz von Dekantern zur Entwässerung der Sojaflocken unerlässlich. Das Verfahren zeichnet sich gegenüber der ethanolisch-wässrigen Extraktion insbesondere durch einen geringeren technischen Aufwand bei den thermischen Verfahrensschritten aus (Abb. 26).

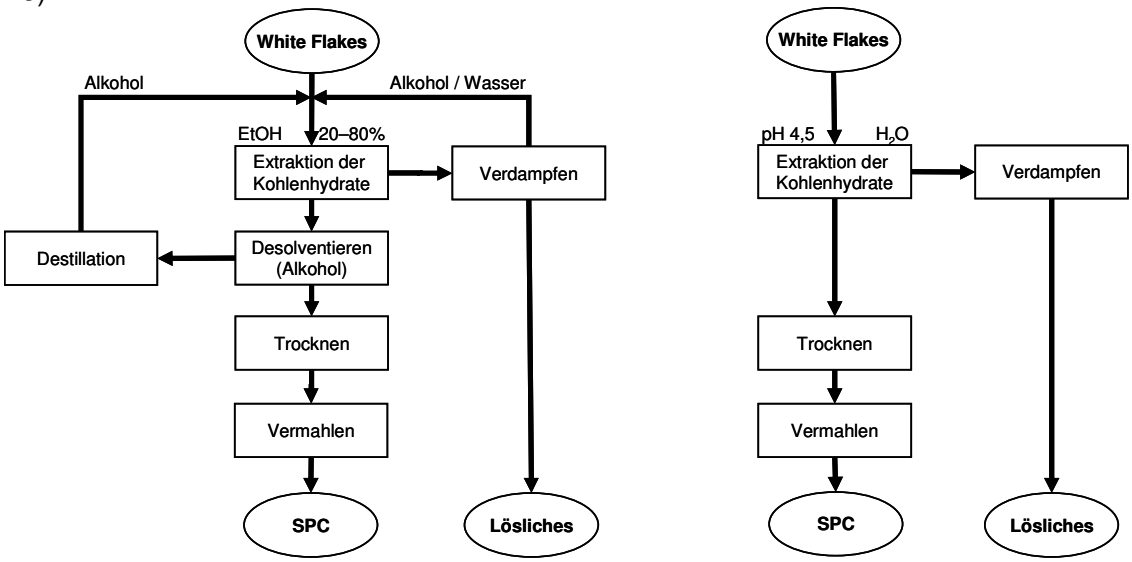


Abbildung 26: Gegenüberstellung der SPC-Herstellung mittels ethanolisch-wässriger Extraktion und Extraktion bei saurem pH-Wert von löslichen Substanzen.

Quelle: Lusas u. Rhee (1995), [113]; Westfalia Separator (2005), [117]

4.2.1.2 Herstellung von SPI

Wie bereits unter 3.3.2.4 ausgeführt, erfolgt die Herstellung der SPI aus entfetteten Sojamehl bzw. –flocken durch Lösen der Proteine in Wasser in alkalischem Milieu und nachfolgender Fällung am isoelektrischen Punkt (IEP). SPI sind die am höchsten konzentrierten Proteinprodukte die kommerziell verfügbar sind. Sie müssen über 90% Protein bezogen auf Trockensubstanz enthalten [1,5,22]. Diese Vorgabe wird bei einer ordnungsgemäßen Betriebsweise der Anlagen zur Proteinherstellung erreicht, so dass die SPI eine relativ gleichförmige Zusammensetzung besitzen (Tab. 12). Es gibt jedoch keine Standarddefinitionen für SPI und die verschiedenen Arten der SPI-Modifikate. Alle diese Produkte werden aufgrund von Spezifikationen gekauft, die sich vor allen Dingen auf ihre funktionellen Eigenschaften beziehen. Die Spezifikationen werden vom Hersteller oder Anwender formuliert. Die SPI eignen sich durch ihre hohe Reinheit besonders zur Veränderung ihrer funktionellen Eigenschaften. Es gibt deshalb SPI mit diversen funktionellen Eigenschaften, die auf ihre Anwendung abgestimmt sind (Tab. 4.1). Es sei außerdem erwähnt, dass SPI als Fleischersatz dienen und zu Fasern versponnen werden können.

Tabelle 12: Allgemeine Charakterisierung eines SPI

Protein (Nx 6,25)	[% TS]	min. 90
Feuchte	[%]	max. 6
Fett (Petrolether)	[% TS]	max. 1
Fett (saure Hydrolyse)	[% TS]	max. 4
Rohfaser	[% TS]	max. 0,5
Asche	[% TS]	max. 4,5
Kohlenhydrate	[% TS]	max. 4
Partikel <150µm	[%]	min. 95
PDCAAS		0,90
Gesamtkeimzahl		max. 10.000
Salmonella		negativ
E. coli		negativ

Quelle: ASA (2005), [114]

Die Einstellung der funktionellen Eigenschaften kann über die Fällungsreaktion in weiten Grenzen eingestellt werden, weil die Neutralisation mit unterschiedlichen Alkalien vorgenommen werden kann. Dadurch entstehen Proteinate mit unterschiedlichen Kationen, beispielsweise Natrium-, Kalium-, Ammonium- oder Calzium-Proteinate. Darunter sind die ersten drei genannten Proteinate in hohem Masse in Wasser löslich, ergeben Lösungen mit sehr hohen Viskositäten und besitzen schaum- und gelbildende Eigenschaften und können als Emulgatoren eingesetzt werden. Dagegen hat Calzium-Proteinat eine niedrige Löslichkeit.

Während anfänglich die SPI für industrielle Zwecke eingesetzt wurden, in den 20er und 30er Jahren des letzten Jahrhunderts vor allem in der Papierindustrie zur Oberflächenhandlung „Coating“ des Papiers, werden seit Anfang der fünfziger Jahre SPI auch für die menschliche Ernährung eingesetzt. Dadurch haben sich besondere Anforderungen an die Herstellung an die SPI ergeben, die sich vor allem auf eine hygienische Produktionsweise und spezifische sensorische und funktionelle Eigenschaften beziehen. Die SPI müssen für ihren Einsatz in Lebensmitteln geruchsfrei und geschmacksneutral sowie von heller Farbe sein. Außerdem müssen die antinutritiven Substanzen bei der Herstellung der SPI weitgehend entfernt werden. Dies kann für die Trypsin-Inhibitoren und Agglutinine prozesstechnisch gewährleistet werden, stellt jedoch für Beseitigung der Phytate ein noch nicht gelöstes Problem dar.

Obgleich das SPI trotz seines Phytatgehalts eine besonders hohe ernährungsphysiologische Qualität besitzt, weil es praktisch ein reines Protein mit einer günstigen Aminosäurezusammensetzung ist, und zusätzlich den Vorteil einer hohen Wasserlöslichkeit besitzt, ist der Markt für SPI trotz einer gegenteiligen Prognose bisher kleiner als für SPC geblieben. Die Hauptgründe für diese Situation sind die verhältnismäßig hohen Produktionskosten, gesetzliche Beschränkungen bezüglich ihrer Verwendung im Lebensmittel und der Nachteil ihrer unzureichenden Texturierbarkeit gegenüber SPC und Sojamehl. Außerdem hat das SPI in Kaseinat ein Konkurrenzprodukt das aufgrund der hohen Milcherzeugung in sehr großen Mengen zur Verfügung steht. Allerdings hat SPI auf der Seite der pflanzlichen Proteinisolate bisher keine Konkurrenz erhalten, auch wenn diesbezüglich viele Anstrengungen unternommen worden sind. Die meisten dieser Produkte haben nicht einmal das Stadium der kommerziellen Produktion erreicht, weil sie entweder ihre sensorischen und/oder funktionellen Eigenschaften nicht den Anforderungen entsprechen konnten, wie sie üblicherweise an SPI gestellt werden.

4.2.1.2.1 Wässrige Extraktion und Fällung

Nachfolgend wird das dem Stand der Technik entsprechende Verfahren zur SPI-Herstellung beschrieben. Die Beschreibung bezieht sich auf ein Verfahren und die zugehörige Anlagentechnik, das von Fa. Westfalia Separator in unterschiedlicher Größe mehrfach realisiert worden ist. In Abhängigkeit von der Größe unterscheiden sich die definitiven Prozessbedingungen sowie die Ausführung der Ausrüstung die je nach Anlagenkonfiguration nach Art und Größe zusammengestellt wird.

Das Blockdiagramm zeigt die prinzipielle Verfahrensweise der Herstellung von SPI aus entfetteten und FDS behandelten Sojaflocken (Abb. 29). Das Rohmaterials muss einen hohen NSI Wert besitzen, da nur so sichergestellt ist, dass das Protein unter den Verfahrensbedingungen so vollständig in Lösung gebracht werden kann, das eine hohe Ausbeute an SPI erreicht wird. Die Extraktionsrate ist beim Einsatz von Sojamehl höher als beim Einsatz von Flocken. Dagegen lassen sich die Flocken nach der Extraktion leichter als das Mehl aus der flüssigen Phase mit Dekantern abtrennen und entwässern. Dem Nachteil der niedrigeren Extraktionsrate, die sich

aus der viel kleineren Oberfläche der Flocken gegenüber dem Mehl ergibt kann durch Verlängerung der Extraktionszeit entgegengewirkt werden.

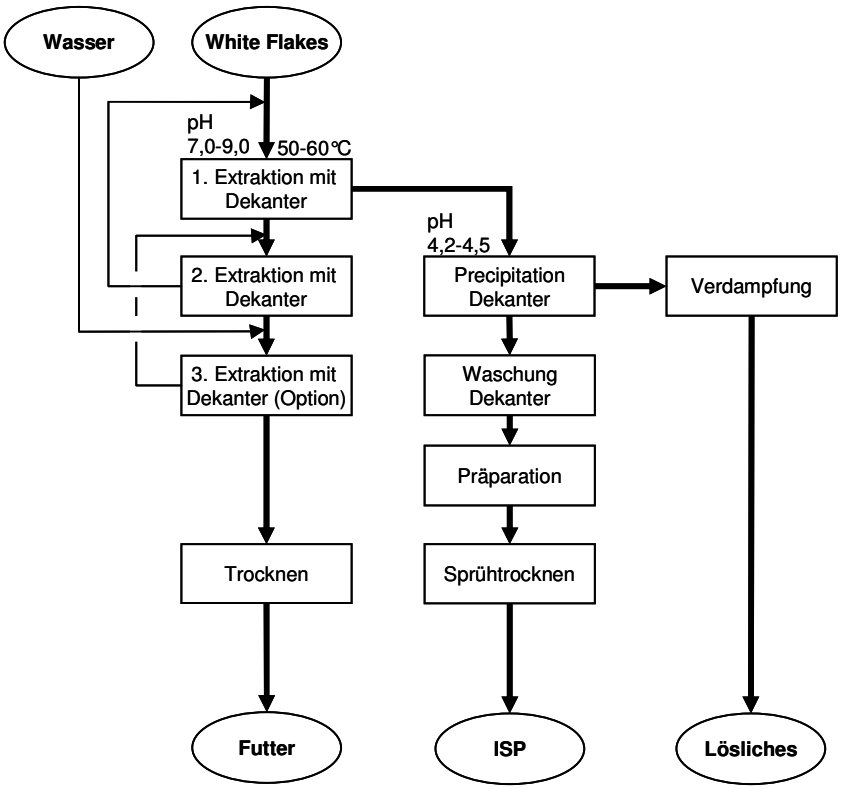


Abbildung 27: Blockdiagramm für die SPI-Herstellung durch alkalische Extraktion unter Verwendung einer mehrstufigen Gegenstromextraktion mit Dekantern.

Quelle: Westfalia Separator (2005), [117]

Die Extraktion wird in einem leicht alkalischen Milieu in einem Bereich des pH-Werts von 7,0 bis 9,0 durchgeführt. Dazu werden die Sojaflocken üblicherweise bei einem Verdünnungsverhältnis von 1:10, in Einzelfällen sogar bis zu 1:20, beim Anfahren mit erwärmtem Wasser (50 bis 60°C) und später mit dem entsprechend warmen Prozesswasser unter intensivem Mischen eingemaischt (Abb. 29). Der pH-Wert wird fortlaufend kontrolliert und jeweils entsprechend dem gewählten Wert justiert, indem Lauge, üblicherweise verdünnte Natronlauge, zudosiert wird. Die Extraktion erfolgt im Gegenstrom in Rührwerksbehältern, die zeitlich kontrolliert befüllt und nach dem Prinzip des first in first out in einer vorgegebenen Verweilzeit durchströmt werden, wobei das Rührwerk eine nicht turbulente Tangentialströmung erzeugt. Der aus dem Rührwerksbehälter ablaufende Massenstrom wird den Dekanterstufen zugeführt, um den jeweiligen Feststoff von der jeweiligen fluiden Phase zu trennen. Der jeweils abgetrennte Feststoff wird erneut suspendiert und erneut mit Prozesswasser intensiv vermischt. Jede Prozessstufe besteht aus einem Extraktionstank und einem Dekanter üblicherweise das Verfahren zweistufig ausgelegt, gelegentlich sogar

dreistufig. Die Prozessparameter, pH-Wert, Extraktionszeit, Temperatur, Verdünnungsverhältnis und der NSI des Rohmaterials, bestimmen die Effizienz der Extraktion. Der Übergang des Proteins und anderer löslicher Substanzen in die Extraktionslösung von als Funktion der Extraktionszeit und des pH-Werts geht aus der Abbildung 28 beispielhaft hervor.

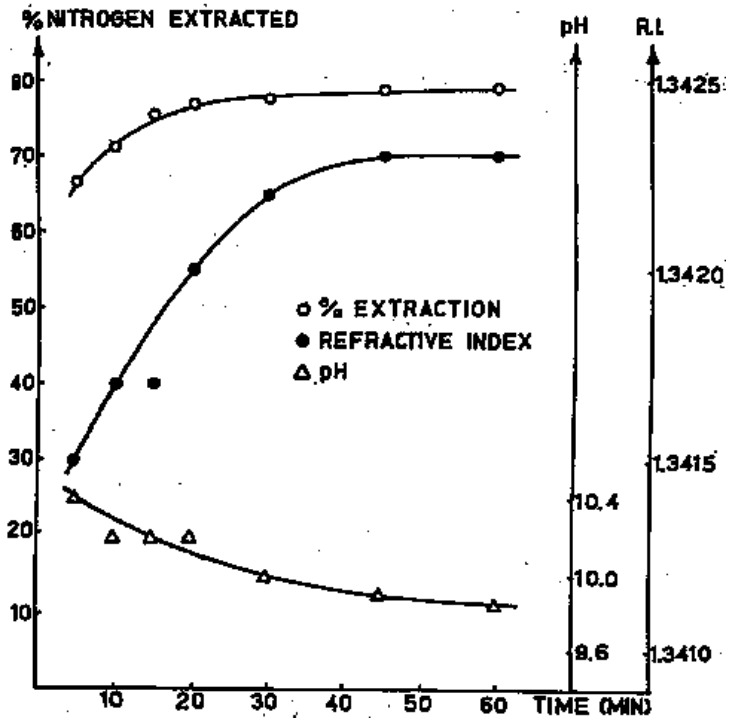


Abbildung 28: Darstellung des Verlaufs der Proteinextraktion aus entfetteten Sojaflocken, mit (0,03M $Ca(OH)_2$, 55°C).

Quelle: Cogan et al.(1967), [118]

Der pH-Wert kann zur Erreichung einer höheren bzw. schnelleren Löslichkeit des Proteins nicht auf pH-Werte > 10 angehoben werden, weil sonst das Risiko der chemischen Modifikation der Proteine zu groß wird und außerdem Maillard-Reaktionen stattfinden würden, die neben einer Bildung dunkler Farbstoff den Nährwert der SPI vermindern würden. Zusätzlich kommt erschwerend hinzu, dass bei einem hohen pH Wert extrahierte Proteine tendenziell mehr Wasser binden und sich damit zentrifugal schlechter separieren lassen. Somit hat sich der oben erwähnte pH Wert allgemein durchgesetzt.

Eine große Bedeutung übt das Feststoff-Flüssigkeits-Verhältnis auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens aus. Zwar wird die Proteinextraktion durch die Wahl eines hohen Feststoff-Flüssigkeits-Verhältnis begünstigt, jedoch wird dadurch gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens durch den höheren Energieaufwand für den Betrieb der Anlage negativ beeinflusst. Letzten Endes sind es deshalb

ökonomische Erwägungen mit denen ein Gleichgewicht zwischen der SPI Ausbeute aus dem Rohstoff und den Kosten für seine Verarbeitung gefunden wird.

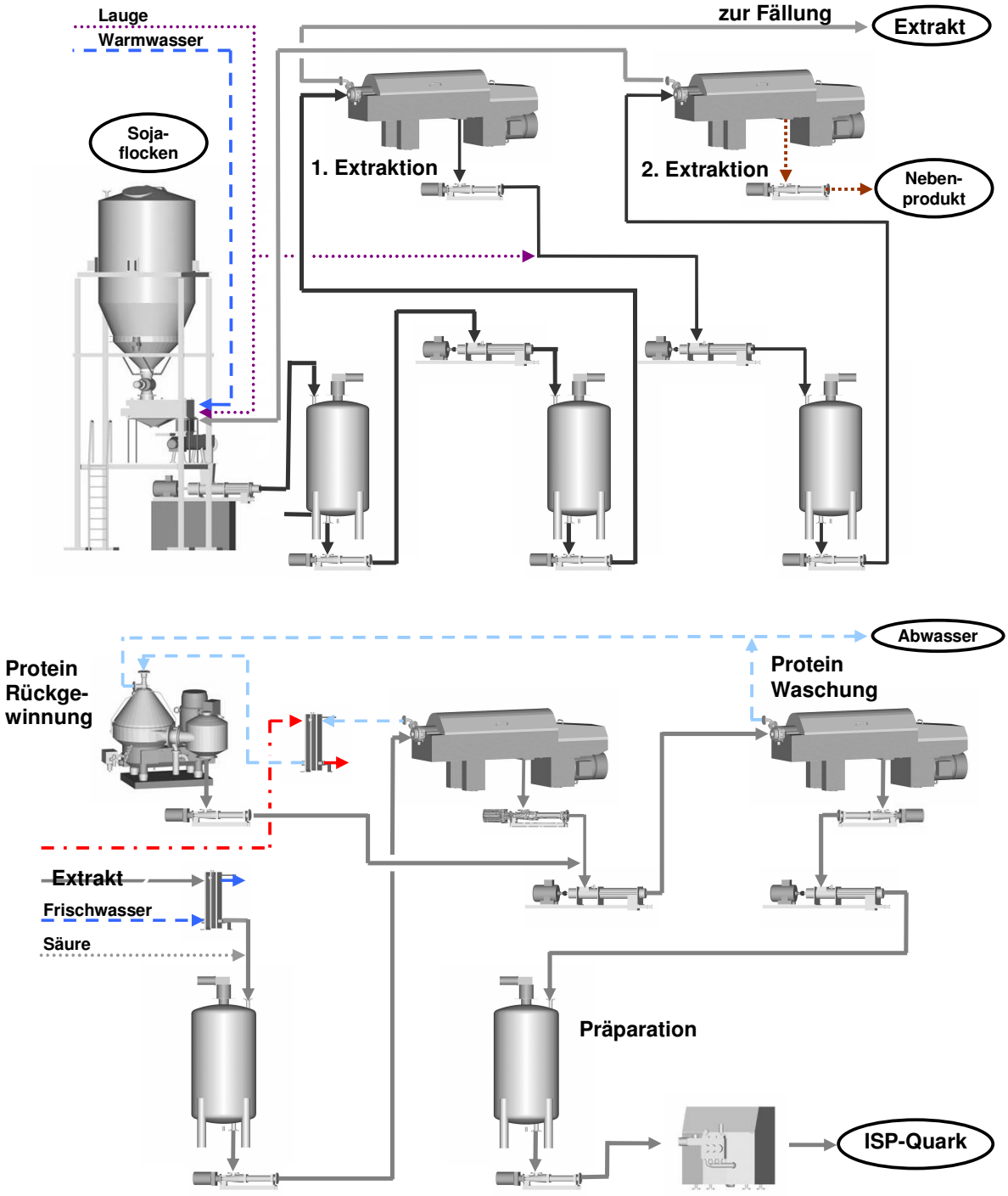


Abbildung 29: Prozessfließbild für die SPI Herstellung durch wässrige Extraktion und Fällung unter Verwendung von Dekantern.

Quelle: Westfalia Separator (2005), [117,A1]

Nach der Extraktion der Sojaproteine werden diese durch Ansäuern des Oberlaufs der ersten Dekanterstufe mit verdünnter Salzsäure auf einen pH-Wert 4,2 bis 4,5 gefällt. Es entsteht eine Suspension in der das gefällte Protein in fein suspendierten Flocken vorliegt. Die Flocken sind sehr fein und scherempfindlich, sie lassen sich aber trotzdem mit Dekantern aus der Suspension abtrennen und entwässern, so dass eine quarkartige Masse entsteht. Während die eingesetzte Säure und die gewählte Temperatur beim Fällen des Proteins keinen signifikanten Einfluss auf die Ausbeute oder Reinheit des SPI haben, kann es durch die starke Schaumbildung beim Dekantieren zu einem Ausbeuteverlust kommen.

Da der Proteingehalt in der Trockenmasse des Sojaquarks den für das SPI geforderten Wert $\geq$ 90% noch nicht besitzt, ist es notwendig den Quark auszuwaschen, um nicht N-haltige Begleitstoffe zu entfernen. Dazu wird der Quark in Sauerwasser resuspendiert und wiederum mit einem Dekanter aus diesem abgetrennt. Der gewaschene Sojaquark wird danach in Wasser resuspendiert und mit Lauge neutralisiert. Die neutralisierte Suspension wird durch UHT Behandlung entkeimt und anschließend zum SPI sprühgetrocknet.

Der Vorteil des sehr hohen Proteingehalts des SPI stellt gleichzeitig in sofern einen Nachteil dar, als er sich durch den Verfahrensablauf negativ auf die Proteinausbeute und die Verteilung des Proteins auf die Masseströme auswirkt. Bei dem Verfahren ergeben sich drei Masseströme das SPI, der Extraktionsrückstand (Faserkonzentrat) und die Molke, die je einen Feststoffanteil an den eingesetzten Feststoffen von 44% (SPI), 22% (Faserkonzentrat) und 34% (Molke) haben. In das SPI gehen, abhängig von der eingesetzten Technologie und Ausrüstung, in einem gut geführten Prozess bis zu 80%, üblicherweise 75% [A1], (vgl. Tab. 9) des ursprünglich in den entfetteten Sojaflocken enthaltenen Proteins über (Abb. 30). Es werden deshalb etwa 3 Tonnen an entfetteten Sojaflocken benötigt um eine Tonne SPI herzustellen. 15% des Proteins befinden sich im Faserkonzentrat und 10% in der Molke.

Das Faserkonzentrat mit einem Feststoffgehalt von etwa 20% wird üblicherweise getrocknet und als Futtermittel vermarktet. Es dient in der Tierfütterung als Proteinquelle es kann aber auch als diätetische Faser zur menschlichen Ernährung eingesetzt werden. Außerdem kann es als funktioneller Zusatzstoff bei der Lebensmittelproduktion eingesetzt werden, weil es eine hohe Wasserbindungskapazität besitzt.

Die Molke ist der kombinierte flüssige, geklärte Oberlauf der Dekanter aus der Fällungs- und Waschstufe; sie hat eine Feststoffkonzentration von nur 1 bis 3%. Die wesentlichen Inhaltsstoffe der Molke sind Zucker und N-haltige Substanzen und Mineralien. Die Verwertung der Molke mit dieser Zusammensetzung und Feststoffkonzentration stellt für die SPI Herstellung eine wirtschaftliche Belastung dar.

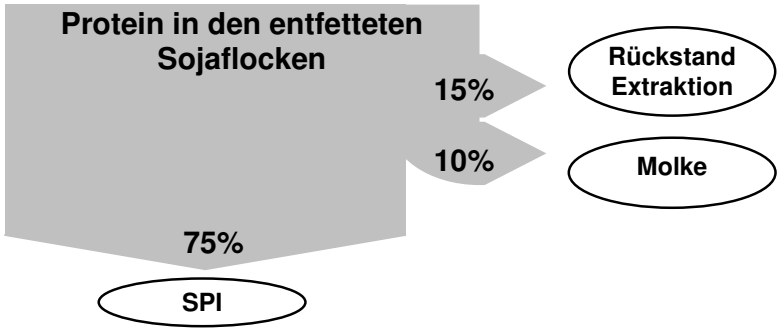


Abbildung 32: Darstellung der durchschnittlichen Proteinverteilung bei der Gewinnung des SPI auf die drei Fraktionen, ausgehend vom eingesetzten Rohmaterial.

4.2.1.3 Grundlagen für den Einsatz von Dekantern bei der Herstellung von Sojaproteinprodukten

Aus der Darstellung des Standes der Technik zur Herstellung sowohl von SPC als auch von SPI geht hervor, dass Dekantierzentrifugen im Verfahrensablauf eine Schlüsselstellung einnehmen. Sie besitzen für diese Anwendung ein Wirkprinzip, dass mehrere zwecknotwendige Verfahrensschritte in einer Maschine vereinigt. Es sind dies die Verfahrensschritte Extraktion durch Verdrängung, Konzentration, Separation und Klärung. Die Konstruktionsparameter der Maschine bestimmen die Wirksamkeit der einzelnen Verfahrensschritte auf das Ergebnis der Anwendung des Wirkprinzips, der horizontalen Förderung einer vertikal durch Zentrifugalkräfte in Phasen getrennten Suspension. Zum Verständnis der Eignung der Maschine für den Einsatz zur Sojaproteinproduktherstellung soll hier insbesondere mit Blick auf das neue Verfahrenskonzept, dass die Entölung vollfetter Sojamahlprodukte durch Verdrängungsextraktion vorsieht, kurz auf die wesentlichen konstruktiven Merkmale eines für diese Anwendung geeigneten Dekantierzentrifuge eingegangen werden.

Dekanter sind horizontal gelagerte Vollmantelzentrifugen, in denen eine Schnecke für den Transport des Feststoffs sorgt (Abb. 31). Die Trommel wird über den Hauptmotor angetrieben und dadurch auf Betriebsdrehzahl gebracht, die für den dargestellten Typ einer Beschleunigung von etwa 3.500 g entspricht. Die Schnecke wird, angepasst an die Prozessstufe, mit Hilfe des Sekundärantriebs entsprechend der gewünschten Differenzdrehzahl eingestellt. Durch Regelung der Differenzdrehzahl wird die Verweilzeit der abgeschleuderten Feststoffpartikel im Separarierraum beeinflusst. Somit kann unter anderem auch dadurch das Entwässerungsverhalten oder aber auch die Klärung der flüssigen Phase eingestellt werden.

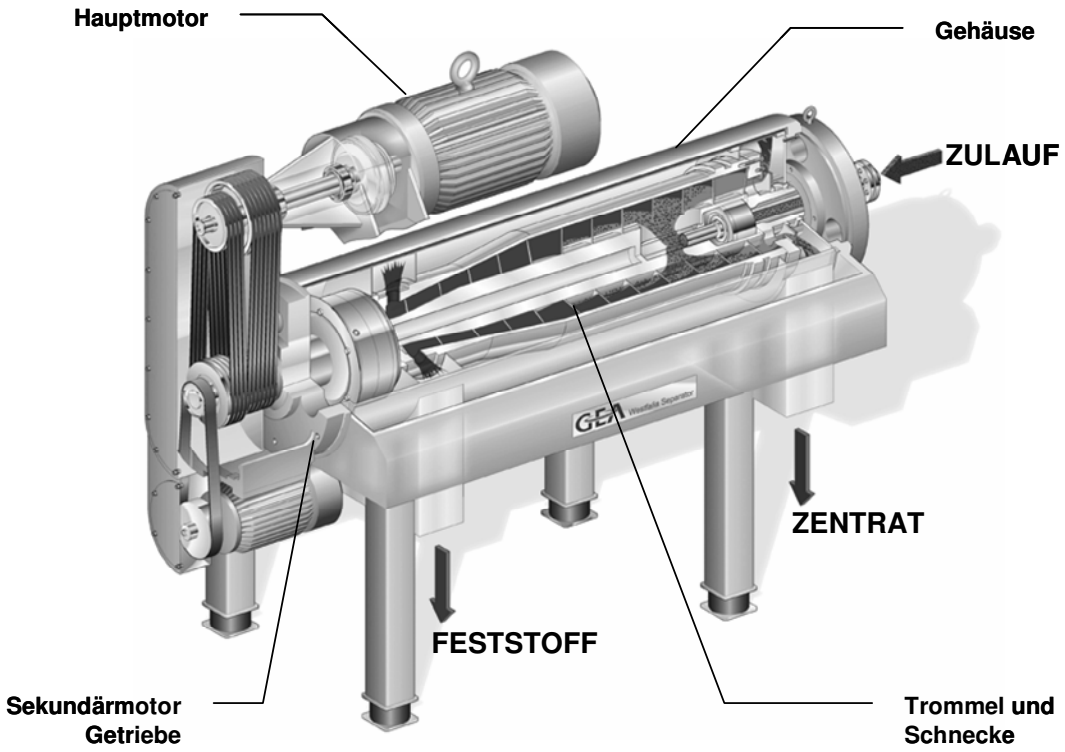


Abbildung 34: Explosionszeichnung eines für die Sojaproteinprodukt-Herstellung eingesetzten Dekanters.

Quelle: Westfalia Separator (2005), [119]

Die Suspension wird kontinuierlich über ein Zulaufrohr in den Verteilerbereich der rotierenden Förderschnecke hineingepumpt. Durch die Zentrifugalkraft der rotierenden Trommel setzen sich die Feststoffpartikel unmittelbar an der Innenwand der Trommel ab. Die Trommel hat einen zylindrischen und einen konischen Teil. Im zylindrischen Teil der Trommel findet hauptsächlich die Klärung der Suspension statt, während die Entwässerung des Feststoffs im konischen Teil erfolgt. Die separierten und entwässerten Feststoffe werden durch die Schnecke zu den Austragsöffnungen des Dekanters gefördert, welche am Ende des Konus lokalisiert sind. Die geklärte flüssige Phase wird am Ende des zylindrischen Teils der Trommel entweder unter Druck mittels einer Zentripetalpumpe oder durch freien Auslauf ausgetragen.

Der Einsatz solcher Dekanter im Verfahren der Sojaproteinprodukt-Herstellung unterliegt darüber hinaus noch anderen Anforderungen. Ihre konstruktive Ausführung muss teil-sanitär ausgeführt sein, so muss eine hohe Entwässerung ermöglichen aufzeigen, um den Anteil des Löslichen im Feststoff deutlich reduzieren zu können und es muss eine hohe Klärung der flüssigen Phase erreicht werden, um hohe Ausbeuten zu erzielen. Da die ausgefällten Proteinflocken sehr scherempfindlich sind, müssen die Zulaufbedingungen so gestalten sein, dass keine großen Schergefälle auftreten.

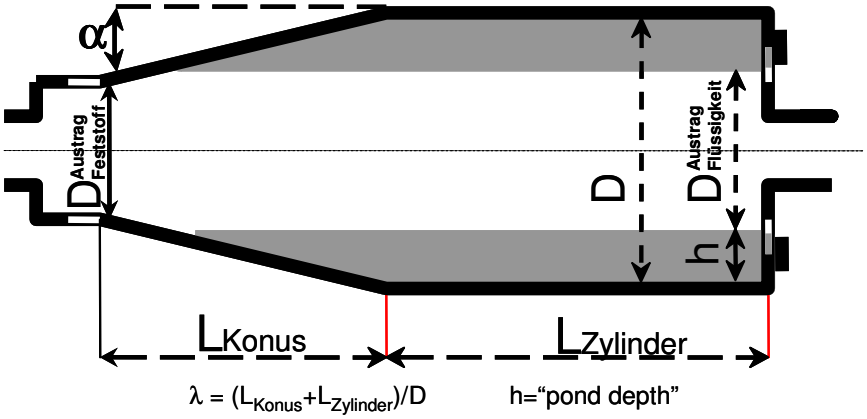


Abbildung 35: Schematische Darstellung der geometrischen Verhältnisse einer Dekantertrommel.

Für die Ausgestaltung des Prozessablaufs der SPC und SPI Herstellung aus durch Verdrängungsextraktion entölten vollfetten Sojamahlprodukten ist es erforderlich die dafür einzusetzenden Dekantierzentrifugen gemäß ihrer Eignung für die einzelnen Verfahrensschritte zu beurteilen. Zur Beurteilung können Ähnlichkeitsbetrachtungen sowie auch empirisch erworbene Prozessdaten herangezogen werden. Eine mögliche Ähnlichkeitsbetrachtung, kann über die Bestimmung der äquivalenten Klärfläche erfolgen. Dazu ist die nachstehende Formel geeignet:

$$VA = A_{Zylinder} \cdot z_{Zylinder} + A_{Konus} \cdot z_{Konus} = \left[D^2 \cdot L_{Zylinder} + \left(\frac{(D_S + D)}{2}\right)^2 \cdot L_{Konus} \right] \cdot \frac{2 \cdot \pi^3 \cdot n^2}{g}$$

(VA=Klärfäche berechnet nach Westfalia Separator Formel; A=Fläche; z=Beschleunigungsziffer; n=Trommeldrehzahl).

Von besonderer Bedeutung ist der Abscheidegrad des Dekanters auf dem sich im Wesentlichen die geometrische Konformation des Rotors und der Schnecke auswirken. Nachstehend sind die wichtigsten Parameter aufgezeigt, die sich auf die Anwendung eines Dekanters auswirken.

1. Geometrische Konformation des Rotors (Abb. 32)

- Trommellänge und –durchmesser; L bzw. D
- Feststoffaustragsdurchmesser; D_{FS}
- Konuswinkel; α
- Schneckensteigung

- Abstand zwischen Schneckenblatt und Trommelinnenwand
- Besondere Einbauten, wie beispielsweise Tauchscheibe

2. Reibbeiwert μ
(zwischen Feststoffhaufen und Schneckenblatt bzw. Trommel Oberfläche)

3. Zulaufbedingungen
- Zulaufmenge; Q_{ZU}
- Feststoffkonzentration
- Partikelgrößenverteilung
- u.a.

4. Betriebsparameter
- Trommeldrehzahl; n
- Differenzdrehzahl; Dn
- Flüssigkeitsaustragsdurchmesser; D_{FL}
- u.a.

Daraus ist zu erkennen, dass für ein optimales Ergebnis in jeder Prozessstufe die Parameter für den Dekanter ermittelt werden müssen, nach denen er gebaut und betrieben werden muss. Dies kann, wie bereits gesagt, einerseits durch bereits existierende Vergleichskennzahlen erfolgen oder es müssen entsprechende Labor- und Pilotversuche durchgeführt werden. Letzteres ist häufig die Methode der Wahl, da jede Anwendung spezifische Anforderungen stellt.

4.3 Kombination der Proteinproduktherstellung mit der Abtrennung von Rohöl

Die vorstehende Diskussion des Stands der Technik lässt klar erkennen, dass die Ölextraktion der eigentlichen Proteingewinnung notwendigerweise vorgelagert ist. Dabei wird die Extraktion des Sojaöls unter ökonomischen Gesichtspunkten als Lösungsmittelextraktion mit Hexan durchgeführt. Der Einsatz dieses Lösungsmittels wird wegen seiner Gesundheitsgefährdung und seines Gefahrenpotentials ganz allgemein als kritisch angesehen. Relativ zu anderen ölhaltigen Früchten ist das Gefahrenpotential bei Sojabohnen deshalb besonders groß, weil aufgrund des niedrigen Ölgehalts der Sojabohnen nur die Lösungsmittelextraktion aus ökonomischen Gesichtspunkten in Betracht kommt und andere Verfahren, Pressverfahren oder Pressverfahren in Kombination mit Lösungsmittelextraktion, die weniger gefährlich sind, praktisch nicht einsetzbar sind.

Der Einsatz von weniger gefährlichen Lösungsmitteln in Form einer Verdrängungsextraktion, beispielsweise mit Wasser, ist bisher erfolglos geblieben, weil das Problem der Emulsionsbildung zwischen Öl und Wasser oder anderen Lösungsmitteln durch die emulgierende Wirkung des Lecithins nicht gelöst werden konnte.

Ein neuer Ansatz zur Entwicklung eines Verfahrens zur Verdrängungsextraktion von Öl aus Sojamahlprodukten wurde im Friolex-Verfahren [33-36] gefunden. Mit diesem Verfahren ist es möglich, ein Gemisch aus einem Sojamahlprodukt und einer wässrig-alkoholischen Lösung in einem Schritt unter der Wirkung von Zentrifugalkräften in zwei Phasen zu trennen, weil es unter bestimmten verfahrensspezifischen Bedingungen zu keiner Emulsionsbildung kommt. Dabei fällt die eine Phase als klare Ölphase an und die andere enthält neben nicht verdrängtem Öl alle anderen Stoffe des Mahlprodukts in Suspension und teilweise in Lösung. Diese Möglichkeit der Phasentrennung wurde als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Verfahrens zur Proteinproduktherstellung genommen, weil es dadurch in der Suspensionsphase zu einer Abreicherung des Ölgehalts kommt, worin die Grundvoraussetzung für die Proteinproduktherstellung besteht (Abb. 33).

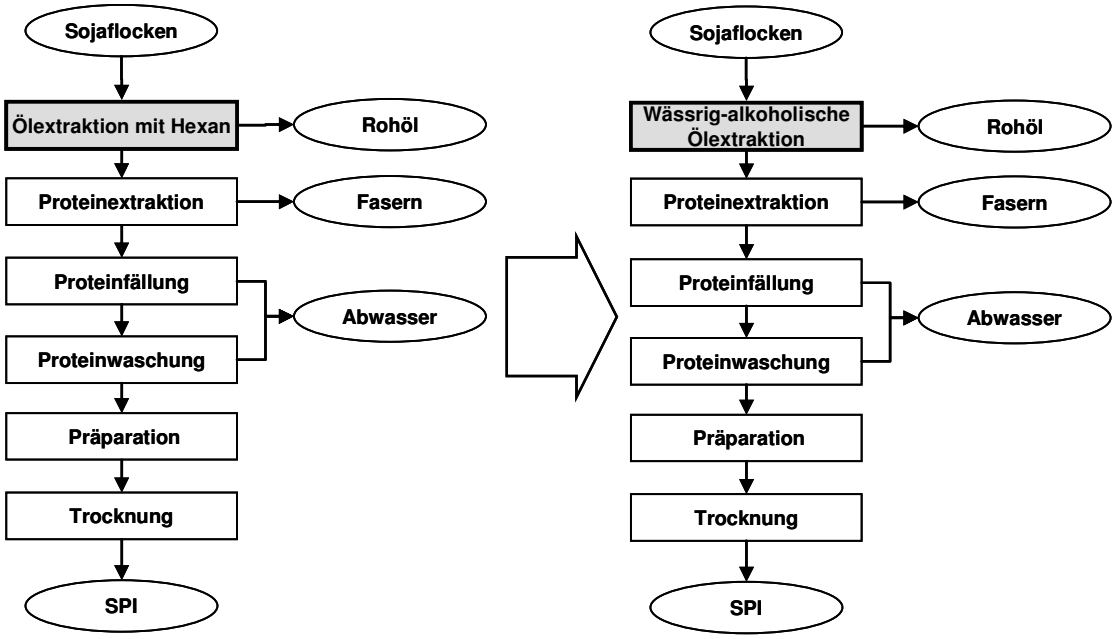


Abbildung 33: Darstellung der wesentlichen Änderung des Verfahrens-konzepts des Neue Verfahrens zur Gewinnung von Sojaproteinprodukten gegenüber dem Stand der Technik.

Zur Verfahrensentwicklung wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, die auf die Feststellung der für die Entölung von vollfetten Sojamahlprodukten geeigneten Prozessparameter gerichtet waren [37-39]. Dabei ging es insbesondere darum, den erforderlichen Entölungsgrad festzustellen. Innerhalb dieser Untersuchungen wurde die Aufbereitung der Sojabohnen, der Vermahlungsgrad des einzusetzenden vollfetten Sojamahlprodukts, die Art des Alkohols und dessen Konzentration, der Temperatur- und pH-Wertbereich der Extraktion und der Aufschlussgrad der Kotelydonen untersucht. Ein besonderes Problem stellte die Bestimmung des Restölgehalts selbst dar. Es ist von großer Bedeutung darauf hinzuweisen, dass das Analysenergebnis von der Art der Trocknung der Zwischen- und Endprodukte abhängt.

Basierend auf den dabei erhaltenen Ergebnissen wurde ein Laborverfahren entwickelt, um zunächst die prinzipielle Durchführbarkeit der Proteinproduktherstellung aus vollfettem Sojamehl beweisen zu können (Abb. 34) [39]. Es konnte gezeigt werden, dass eine kombinierte Ölgewinnung und Proteinproduktherstellung aus vollfettem Sojamehl dann erfolgreich durchgeführt werden kann, wenn ein bestimmter Entölungsgrad erreicht wird. Der zu erreichende Restölgehalt im Entölungsrückstand muss ≤ 2 % in der Trockenmasse sein, um einen Ölgehalt von < 1 % im Proteinprodukt erreichen zu können. Damit kam der Bestimmung des Restölgehalts eine essentielle Bedeutung sowohl zur Ausbeutebestimmung als auch zur Abschätzung der Haltbarkeit der Proteinprodukte zu, ohne die es nicht möglich gewesen wäre das vorgenannte Ergebnis zu sichern.

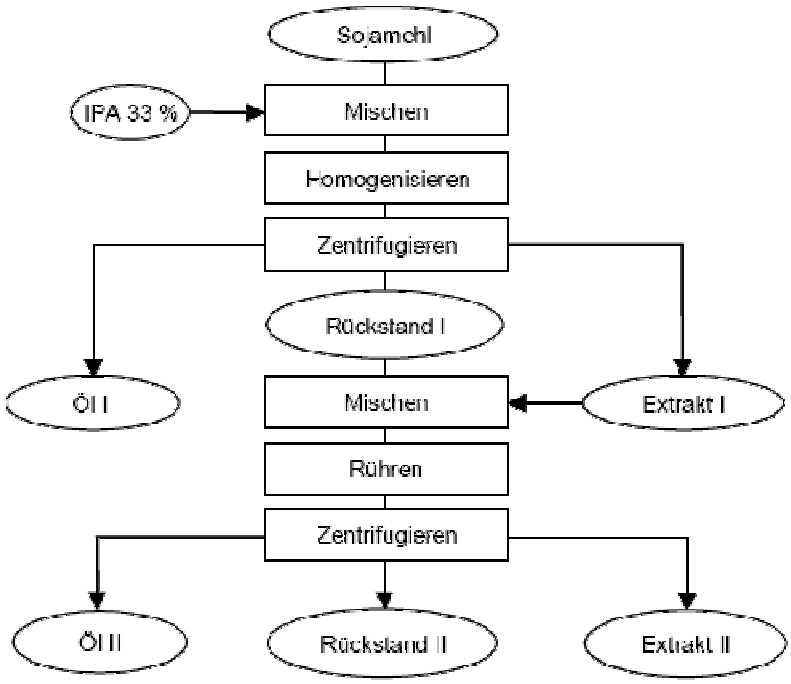


Abbildung 34: Verfahrensfließbild des Verfahrens zur Gewinnung eines Entölungsrückstands für die Proteinproduktherstellung im Labormaßstab.

Quelle: Dazert (2004), [39]

Der nächste Schritt der Entwicklungsarbeit bestand nun darin die Ergebnisse vom Labor- auf den Pilotmaßstab zu übertragen (**Abb. 35**) [37-39,120-122] Diese Entwicklungsarbeit war der Ausgangspunkt für die Durchführung der vorliegenden Dissertation, welche die Evaluierung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit des neuen Verfahrens zur Herstellung von Sojaproteinprodukten zum Gegenstand hatte.

Da der genannte Restölgehalt von ≤ 2 %, der einem Entölungsgrad des Entölungsrückstands von etwa 90 % entspricht, unabdingbare Voraussetzung für die

Herstellung haltbarer Proteinprodukte ist, galt es zu zeigen, dass das mit dem Laborverfahren erzielte Ergebnis auch mit dem Pilotverfahren erreicht werden kann. Diese Versuche wurden unter Einsatz eines Schlaufenmischers (Burdosa, Baureihe MD) zur Suspendierung des Mahlprodukts, eines Homogenisators (Niro Soavi, Typ Panda) zum effizienten Zellaufschluss und eines Dekanters (Westfalia Separator, Typ CA 225) zur Trennung der Maische in den feststoffhaltigen Unterlauf, der den wesentlichen Anteil der Feststoffe aus dem Sojamahlprodukt enthielt, und den Oberlauf, der einen großen Teil des Öls und des wässrigen Alkohols enthielt.

Diese Versuche erfolgten gemäß der in Abbildung 35 dargestellten Verfahrensweise. Dazu wurde das vollfette Sojamehl mit 33%igen 2-Propanol/Wasser Gemisch im Verhältnis 1:3 im Rührbehälter eingemaischt. Daraufhin wurde die Sojamaische bei Umgebungstemperatur (ca. 20 °C) dem Homogenisator zugeführt und darin bei einem Druck von 200 bar aufgeschlossen. Die so aufgeschlossene Maische wurde dann im eingesetzten Dekanter in die beiden Phasen getrennt, wobei die Feststoffphase als Konzentrat anfiel.

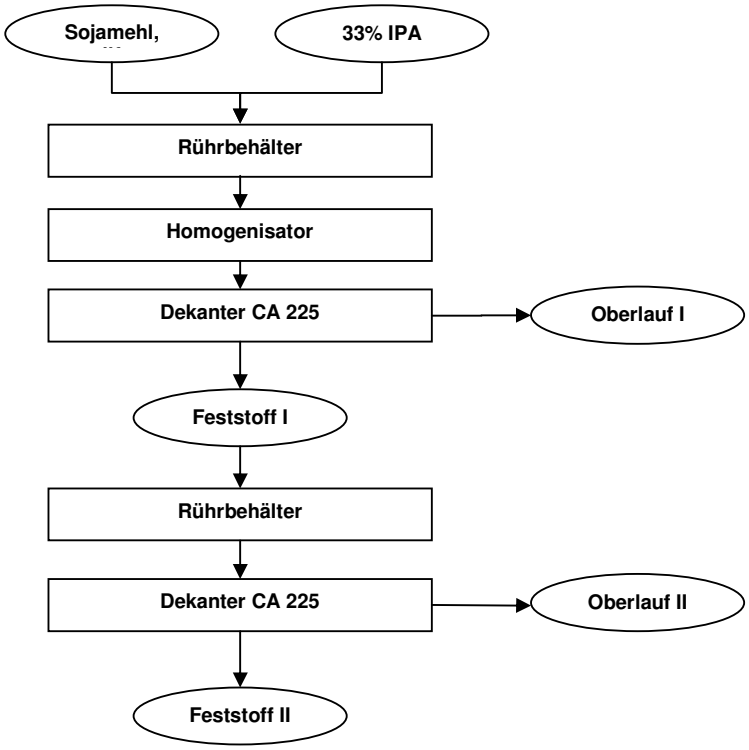


Abbildung 35: Verfahrensfließbild zur Gewinnung eines Entölungsrückstands aus vollfettem Sojamehl im Pilotmaßstab.

Bei dieser Konfiguration des Pilotversuches ergab sich eine Emulsion zwischen der Öl- und der alkoholisch-wässrigen Phase, welche es verhinderte, dass das Öl und das Extraktionsmittel als klar voneinander getrennte Phasen anfielen. Durch Zentrifugieren von Aliquots der Maische über ein Zeitintervall konnte gezeigt werden, dass anfänglich keine Emulsion vorhanden war und deren Bildung einer Zeitfunktion

gehorchte. Das erklärt die Beobachtung, dass eine Phasentrennung nur direkt nach der Anmaischung erzielt werden konnte. Damit stellte sich heraus, dass nicht die zeitnahe Separation nach der Homogenisierung von wesentlicher Bedeutung für die Freisetzung des Öls ist, sondern eine möglichst kurze Verweilzeit während der Anmaischung. Daraus wurde die Schlussfolgerung gezogen, für die weitere Verfahrensentwicklung statt der diskontinuierlichen Aufbereitung der Maische im Behälter, ein kontinuierliches Verfahren zur Präparation der Maische vor der Homogenisierung zu wählen.

Es wurde außerdem beobachtet, dass die Granulation des vollfetten Sojamehls ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf den kontinuierlichen Betrieb der Pilotanlage ausübte. Das hing damit zusammen, dass die groben Teile des Mahlprodukts sich im Zulauf des Homogenisators vor dem Homogenisierventil sammelten und so die Maschine in ihrer Zerkleinerungswirkung limitierten. Deshalb ist die gezielte Einstellung der Granulation auf ein enges Körnungsspektrum bei feiner Granulation von großer Bedeutung für den kontinuierlichen Ablauf des Verfahrens und darüber hinaus den erreichbaren Entölungsgrad.

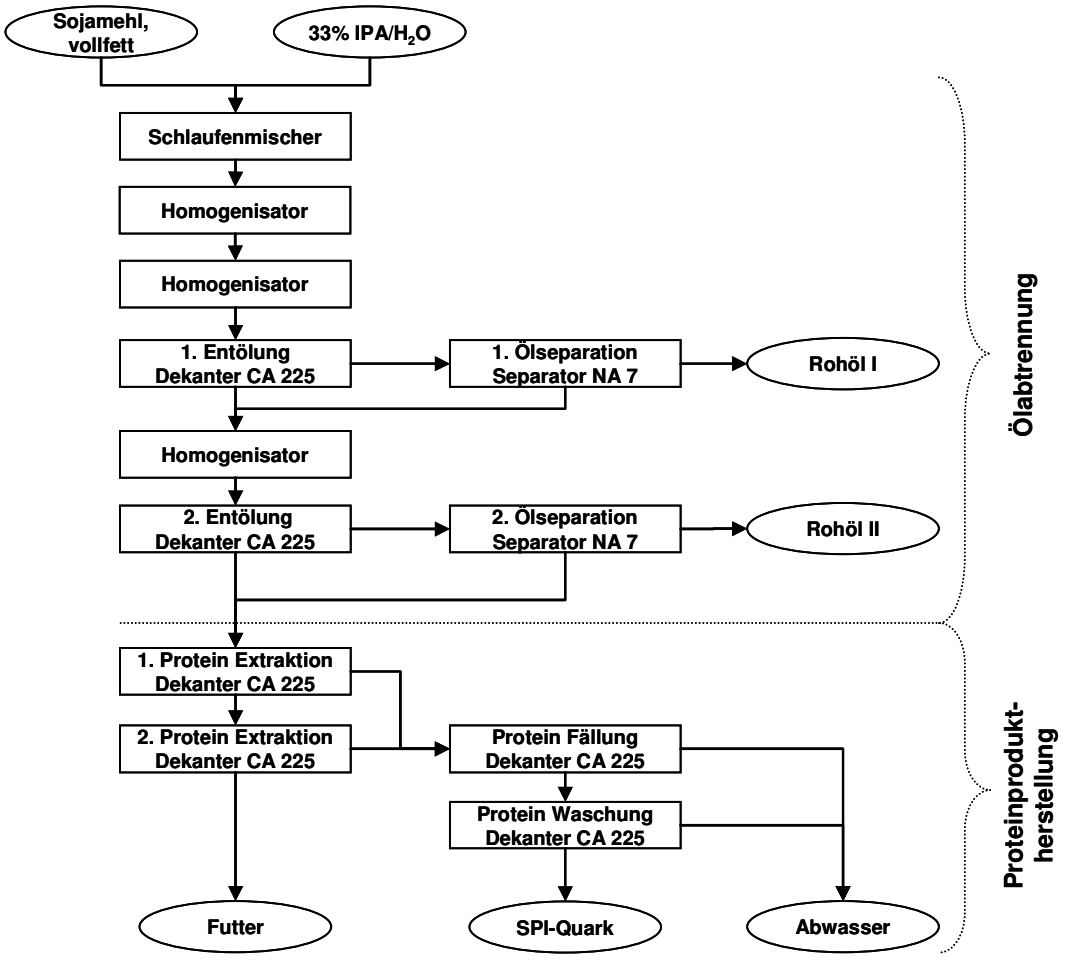


Abbildung 36: Verfahrensfließbild des im pilottechnischen Maßstab betriebenen Verfahrens zur Gewinnung von Sojaprotein-Isolat aus vollfettem Sojamehl.

Die weitere Entwicklung des Verfahrens im pilottechnischen Maßstab erfolgte unter besonderer Berücksichtigung der Einstellung der Granulation der eingesetzten vollfetten Sojamehle, deren kontinuierlicher Anmaischung und ihrem Zellaufschluss in dem wässrig-alkoholischen Lösungsmittel. Die Bedingungen der Entölung wurden dahingehend optimiert, dass das Mehl und das wässrig-alkoholische Lösungsmittel in den Einzugsschacht einer Exzenterschneckenpumpe (Allweiler, SEZ P100.1) dosiert wurden. Die Dosierung des Mehls erfolgte volumetrisch (Brabender, FlexWall) (**Abb. 36, 37**). Die Suspension wurde über die Exzenterschneckenpumpe einem Schlaufenmischer (Burdosa, Baureihe MD) zugeführt, um darin eine vollständige Benetzung der Mehlpartikel zu erreichen. Direkt folgend wurde die so vorbehandelte Suspension einer in Serie geschalteten zweistufigen Homogenisierung (Niro Soavi, Panda) zugeführt und bei jeweils 200 bar aufgeschlossen. Daraufhin wurde die so hergestellte Sojamaische direkt einem Dekanter zugeführt. Der Dekanter (Westfalia Separator, CA 225-01-33) wurde durch Einbau einer Tauchscheibe und Betrieb bei niedrigen Differenzdrehzahlen so konfiguriert, dass eine gute Entwässerung erreicht werden konnte.

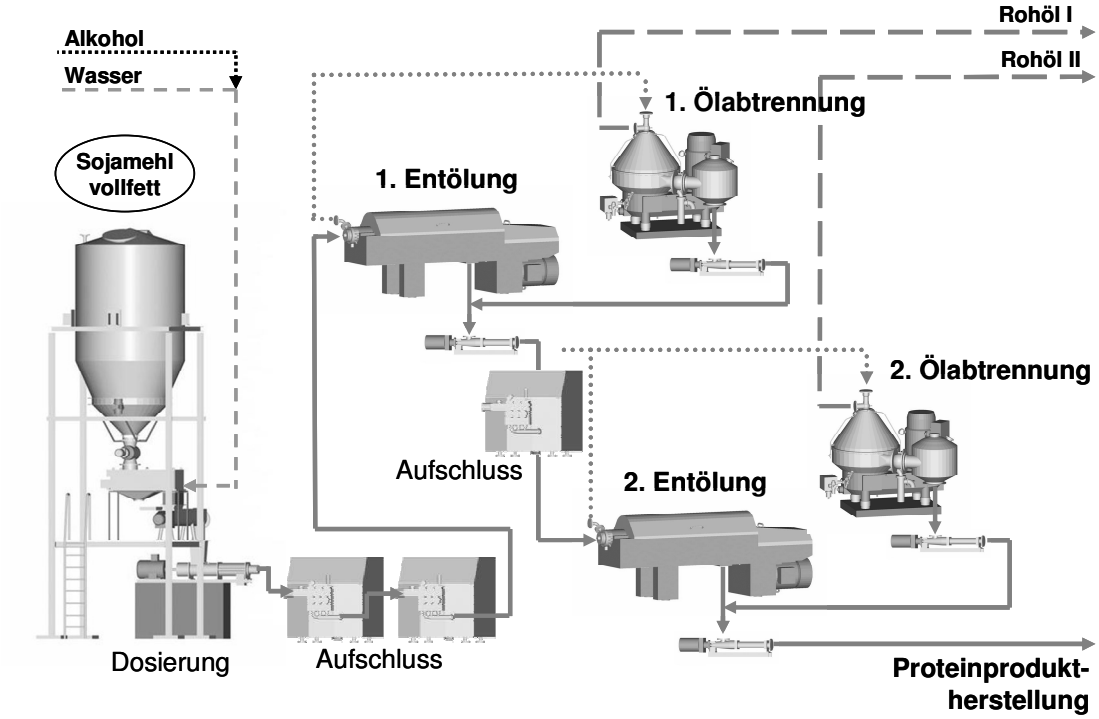


Abbildung 37: Verfahrensfließbild der gewählten Konfiguration zur Ölabtrennung aus vollfettem Sojamehl zur Proteinproduktherstellung.

Damit konnte der Verfahrensschritt der 1. Entölung bis vor die 1. Ölabtrennung kontinuierlich betrieben werden. Der flüssige Oberlauf des Dekanters, welcher sich aus Öl- und wässrig-alkoholischer Phase zusammensetzte, wurde anschließend mit einem Düsenseparator (Westfalia Separator, NA 7-01-576) getrennt. Es fielen dabei drei Phasen an. Die Öl-Phase bildete das Endprodukt Rohöl I. Die Mittelphase und

das Konzentrat wurden daraufhin mit dem aus dem Dekanter angefallenen Feststoff anteilig vermischt.

Das so erhaltene Feststoffgemisch durchlief dann ein zweites Mal die gleichen Prozessstufen, wobei jedoch nur noch einmal homogenisiert wurde. Dabei fiel wiederum Rohöl an (Rohöl II), das mit dem zuerst gewonnenen Rohöl I vereint wurde. Die bei der Separation anfallende Mittelphase und das Konzentrat wurden mit dem aus dem Dekanter ausgetragenen Feststoff aus der 2. Entölung vermischt. Diese Suspension bildete den Ausgangsstoff für die nachfolgende Proteinproduktherstellung.

Durch diese Verfahrensweise war es möglich im ersten Entölungsschritt den Restölgehalt im resultierenden Feststoff auf etwa 4 % (Konzentrat aus 1. Entölung) abzusenken. Nach dem zweiten Entölungsschritt wurde dann der erstrebte Restölgehalt von ≤ 2 % erreicht (Konzentrat aus 2. Entölung). Damit war das Laborverfahren erfolgreich in den Pilotmaßstab übertragen. Die Ergebnisse belegten, dass ein Scale up des Verfahrensablaufs möglich ist, womit die wesentliche Hürde genommen war, um die im Verfahren angefallene Suspension zur Proteinproduktherstellung direkt weiterverwenden zu können. Ohne die Einstellung dieses niedrigen Restölgehalts in der Trockenmasse der Suspension hätte die weitere Verfahrensentwicklung aufgegeben werden müssen.

Mit diesem Ergebnis war die entscheidende Grundlage für die weitere Durchführung der Aufgabenstellung geschaffen, weil das Mengengerüst des Pilotversuchs in die Betrachtung über die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens einbezogen werden konnte. Für diese Betrachtung war es weiterhin notwendig, das Mengengerüst für die Herstellung von Proteinprodukten aufzustellen. Dazu wurden die aus den Standardverfahren bekannten Prozessparameter zur Anwendung gebracht (vgl. Kapitel 4.2.1.2.1).

Die Extraktion der Sojaproteine aus dem Entölungsrückstand erfolgte unter alkalischen Verhältnissen bei einem pH-Wert von 9,0. Die Extraktion der Proteine wurde analog dem Verfahrensfließbild in Abbildung 31 zweistufig durchgeführt. Dabei zeigten sich keine Auffälligkeiten im Vergleich zur bekannten Extraktion der Sojaproteine aus mit Hexan entfetteten Sojaflocken. Der Proteingehalt im Konzentrat nach der zweiten Extraktionsstufe lag unter 30 % bezogen auf Trockensubstanz. Damit war ein Extraktionsgrad erreicht, der dem der Proteinextraktion aus entfetteten Sojaflocken entsprach. Der extrahierte Rückstand ließ sich ebenso wie der Extrakt aus entfetteten und vermahlenen Sojaflocken auf einen Trockenmassegehalt von etwa 18 % entwässern. Dieser Trockenmassegehalt ist etwas kleiner als der in entwässerten Rückständen aus Sojaflocken, der größer als 20 % sein kann.

Die extrahierten Proteine wurden durch Einstellung des pH-Werts auf den isoelektrischen Punkt (pH-Wert 4,5 bis 4,8) ausgefällt. Dazu wurde verdünnte Salzsäure (10%ig) sukzessive in den mit dem Extrakt gefüllten Rührbehälter dosiert. Unmittelbar nach dem Fällen der Proteine wurden diese mit einem Dekanter aus der Molke abgeschieden.

Der Dekanter hat an dieser Stelle eine Aufgabe zu lösen, die aus zwei sich widersprechenden Zielen bestehen. Einerseits soll eine möglichst verlustfreie

Abtrennung der feinst suspendierten Proteinpartikel erfolgen und andererseits soll im Konzentrat ein möglichst hoher Trockensubstanzgehalt erreicht werden, damit insbesondere gelöste Verunreinigungen (primär Kohlenhydrate) in den Oberlauf verdrängt werden. Damit kommt der Dimensionierung bei der Auslegung der erforderlichen Dekantergröße und der Ausführung des Dekanters eine besondere Bedeutung zu. Diese Auslegung kann nicht allein auf Grund der kalkulatorischen Betrachtung der benötigten äquivalenten Klärfläche erfolgen, sondern sie muss auch das g-Volumen berücksichtigen, das dem Produkt aus der g-Zahl und dem Füllvolumen der Trommel entspricht. Außerdem müssen spezifische Ausführungsmerkmale, wie CIP Fähigkeit, teil-sanitäres Design, und empirische Erfahrungen im Umgang mit dem Produkt (Schaumbildung, Flockenbildung etc.) in der Auslegung berücksichtigt werden. Abhängig von den spezifischen Prozessbedingungen und der Anlagenkonfiguration kann es erforderlich sein, einen Klärseparator zur eventuellen Rückgewinnung von feinst suspendierten Proteinflocken aus dem Oberlauf des Dekanters einzusetzen. Diese Ausgestaltung der Prozesstechnik wirkt sich zwar nur wenig auf die Investitions- und Produktionskosten aus, sie dient aber der Risikominderung im Bezug auf Störungen im Prozessablauf, die beispielsweise auf schwankende Rohmaterialeigenschaften zurückzuführen sind.

Der im Pilotmaßstab Maßstab eingesetzte Dekanter (Westfalia Separator, CA 225-01-33) konnte den oben genannten Ansprüchen nur teilweise genügen, weil er dafür, anders als größere Maschinen, nicht ausgelegt ist. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass ein 2-Getriebe Antrieb zur feineren Einstellung der Differenzdrehzahl zwischen Schnecke und Trommel fehlt. Dadurch kann bei größeren Maschinen einerseits das Entwässerungsverhalten und andererseits die Abscheidung durch verringerte Scherkräfte positiv beeinflusst werden, um dadurch die für Proteinprodukte gegebenen Spezifikationen einstellen zu können. Mit dem Dekanter wurde die Molke jedoch soweit geklärt, dass der Oberlauf nur noch mit Spuren nicht abgetrennter Proteinpartikel versetzt war. Damit konnte der angefallene Oberlauf verworfen und dem Abwasser zugeführt werden.

Der angefallene Proteinquark aus der Fällungsstufe wurde anschließend einer weiteren Waschung unterzogen. Dabei wurde ein Verdünnungsverhältnis von 1:4 gewählt, mit dem der Proteinquark mit Wasser in einem Rührbehälter re-suspendiert wurde. Der pH-Wert wurde durch Zugabe von verdünnter Salzsäure auf 4,5 gehalten. Der so ausgewaschene Proteinquark wurde danach mit einer Dekantierzentrifuge entwässert und durch spätere Sprühtrocknung zum SPI aufgearbeitet. Die Auswaschung erwies sich in sofern als problematisch, als dass das Kompaktierungsverhalten des zweimalig gewaschenen Proteinquarks negativ beeinflusst wurde. Das führte dazu, dass sowohl Proteinpartikel in den Oberlauf gelangten als auch die Trockenmasse im Proteinquark absank.

Es zeigte sich im Pilotmaßstab, dass der Proteingehalt in der Trockenmasse des SPI nicht der Forderung von ≥ 90 % entsprach. Es wurden bezogen auf die Trockenmasse Proteingehalte von lediglich 83 bis 86 % im SPI erzielt und die Entwässerung des SPI Quarks erreichte Werte von nur 18 bis 20 %. Das war teilweise darauf zurückzuführen, dass der eingesetzte Dekanter den Proteinquark nicht so stark entwässern konnte, wie dies mit einer größeren Maschine möglich gewesen wäre. Das wurde daraus geschlossen, dass auch beim Einsatz entfetteter

Sojaflocken zur SPI Herstellung der geforderte Proteingehalt nicht immer erreicht wurde. Damit lag eine Diskrepanz zwischen den im pilottechnischen Maßstab erzielten Ergebnissen und den tatsächlich im industriellen Maßstab vorkommenden vor. Es konnte in diesem Stadium der Versuche nicht geklärt werden, in wieweit sich die Leistung der eingesetzten Maschinentechnik oder der Rohstoff auf das Ergebnis ausgewirkt hatten. Darin besteht ein grundsätzliches Problem vieler Pilotversuche, weil mit ihnen prozesstechnische Optimierungen oft nur begrenzt möglich sind. Bezogen auf die vorliegende Problemstellung wurde das jedoch als lediglich bedingt problematisch angesehen, weil die Ergebnisse doch recht nahe an den erstrebten Vorgaben der Produktspezifikation lagen. Diese Einschätzung des Werts dieser Versuchsergebnisse für die Durchführbarkeit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Verfahrens ist auch dadurch gedeckt, dass es durch exzessives Auswaschen eines getrockneten SPI gelang, seinen Proteingehalt von anfänglich 86 % auf 90 % anzuheben.

Damit war auch das Mengengerüst für die SPI Herstellung aus dem Entölungsrückstand erarbeitet und in den Grenzen der durch die Pilotversuche gegebenen Genauigkeit abgesichert. SPI wurde hier als aus dem Sojaquark herstellbares Proteinprodukt gewählt, weil damit das gesamte Anlagenkonzept auch die Herstellung anderer Proteinprodukte einschließt und mit dem SPI überdies die höchste Wertschöpfung erzielt wird.

Nachdem nun das Mengengerüst für die Entölung des Sojamahlprodukts und die Aufarbeitung des Entölungsrückstands zu SPI bekannt waren, konnte die erstrebte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die mit dem neuen Verfahren herstellbaren Proteinprodukte durchgeführt werden. Als Grundlage für diese Betrachtung wurde von einer Verarbeitungsleistung für ein Anlagenkonzept von 3.000 kg/h gereinigten Sojabohnen ausgegangen. Dies entspricht dem Einsatz von 2.500 kg/h White Flakes bei der klassischen Sojaproteinproduktherstellung und gleicht damit der Verarbeitungskapazität einer weltweit typischen Anlagengröße. Die Konfiguration der Pilotversuche wurde dazu verwendet, um das Scale-up auf die geeigneten Maschinen- und Apparategrößen vorzunehmen. Die dafür durchzuführenden kalkulatorischen Vergleichsbetrachtungen wurden zum Teil unter Zugrundelegung empirisch bekannter Daten durchgeführt, um damit eine erste Abschätzung für eine Realisierung einer solchen Anlage vornehmen zu können. Diese Vorgehensweise hat den besonderen Vorteil, dass der eigentlich neue Teil des Anlagenkonzepts, nämlich die Entölung der Sojabohnen in bereits bestehende Anlagen integriert werden könnte, gegebenenfalls in einer Pilotgröße, um dann eine endgültige Aussage über die Realisierbarkeit des Gesamtkonzepts anhand eines kontinuierlich betriebenen Prozesses treffen zu können.

In der Tabelle 13 sind die Mengengerüste für die beiden Prozessstufen zur Veranschaulichung der Pilotversuche als Auszug aus dem im Anhang in den Tabellen (Anhang, A2-A4) enthaltenen Messwerten dargestellt. Obgleich die Pilotversuche in den entscheidenden Prozessschritten kontinuierlich durchgeführt wurden und die dabei vorkommenden Massenströme erfasst wurden, erwies es sich für die Gesamtdarstellung des Prozessablaufs nicht als vorteilhaft, die Prozessbeschreibung auf der Grundlage der tatsächlich ermittelten Massenströme vorzunehmen. Die Prozessbeschreibung erfolgte deshalb aus der Massenbilanz, in welche alle Massenströme eingehen. Dabei diente der Volumen- und Feststoffstrom

durch den bei den Pilotversuchen verwendete Mischer als Führungsgröße. Das Scale up auf die angegebene Verarbeitungsleistung erfolgte dann einerseits durch lineare Hochrechnung unter Verwendung von Erfahrungswerten aus der industriellen Praxis.

Prinzipiell war die Verteilung des Proteins auf die Massenströme und die Ausbeute an Proteinprodukten zu bestimmen, da die Proteinproduktherstellung wesentlicher Bestandteil die Vergleichbarkeit zum Stand der Technik ist. Das so erhaltene Mengengerüst stellt eine gute Annäherung an die in der Praxis vorkommenden Werte dar, obgleich die im pilottechnischen Maßstab eingesetzten Maschinen nicht optimal eingestellt werden konnten, beziehungsweise einige Möglichkeiten zur Verbesserung der Effizienz mangels der Verfügbarkeit entsprechender Maschinen nicht realisiert werden konnten. Des Weiteren konnten einige Verfahrensschritte, wie beispielsweise die Alkoholrückgewinnung, nicht durchgeführt werden. Dafür konnten jedoch Erfahrungswerte aus realisierten SPC Anlagen und dem Stand der Technik der Ethanolherstellung herangezogen werden.

Tabelle 13: Durchschnittlicher Inhaltsstoffgehalt der im kleintechnischen Maßstab angefallenen Fraktionen.

Fraktion	Inhaltsstoffgehalt [%TS]		
	TS	Fett	Protein
Zulauf 1. Entölung	**25,0**	**23,1**	**40,4**
Konzentrat 1. Entölung	**34,0**	**3,3**	**51,0**
Oberlauf 1. Entölung	**20,0**	**52,5**	**15,8**
Mittelphase 1. Ölseparation	**11,8**	**12,7**	**33,7**
Konzentrat 1. Ölseparation	**13,3**	**2,3**	**38,5**
Zulauf 2. Entölung	**23,1**	**4,3**	**47,5**
Konzentrat 2. Entölung	**28,1**	**1,6**	**51,7**
Oberlauf 2. Entölung	**15,4**	**13,6**	**44,0**
Mittelphase 2. Ölseparation	**10,1**	**8,4**	**45,0**
Konzentrat 2. Ölseparation	**16,2**	**2,5**	**53,1**
Konzentrat 2. Protein Extraktion	**15,7**	**2,0**	**19,9**
Zulauf Prezipitation	**4,8**	**4,2**	**57,7**
Oberlauf Prezipitation	**2,0**	**-**	**18,9**
Konzentrat Prezipitation	**20,7**	**6,5**	**79,2**
Oberlauf Protein Waschung	**6,5**	**7,5**	**75,5**
Konzentrat Protein Waschung	**20,2**	**7,8**	**83,0**

Quelle: Westfalia Separator (2004), [A2-A4]

Im gegenwärtigen Stadium des aus wissenschaftlichen Erkenntnissen neu entwickelten Verfahrens zur Sojaproteinproduktherstellung ging es hier im Wesentlichen zunächst darum, Basiswissen für die Übertragung des anhand von Pilotversuchen gewonnenen Kenntnisstandes in die industrielle Praxis zu schaffen, nicht jedoch darum, die Pilotergebnisse direkt für den Bau einer Anlage zu verwenden. Dafür müssen in einer nachfolgenden Stufe Versuche durchgeführt werden, die zu belastbaren Ergebnissen hinsichtlich der notwendigen Entscheidungen für die Investition in eine solche Anlage führen. Dies bedeutet, es müssen Aussagen über die Konkurrenzfähigkeit des Verfahrens und der Produkte getroffen werden können. Dazu müssen gesicherte Kenntnisse über die technische Realisierbarkeit des Verfahrens, über die Produktionskosten und die Produktqualitäten gesammelt werden. Eine solche Datenbasis kann nur über den kontinuierlichen Betrieb einer Anlage erstellt werden. Die prinzipielle Realisierbarkeit einer Anlage ist auf der Grundlage der erworbenen wissenschaftlichen Erkenntnisse als gesichert anzusehen und aus ihnen konnte das hier dargestellte Anlagenkonzept entwickelt werden. Gleichzeitig konnte mit durchgeführten Labor- und Pilotversuchen bewiesen werden, dass die mit dem neuen Verfahren hergestellten Proteinprodukte die gleichen qualitativen Eigenschaften wie konventionell hergestellte besitzen [39]. Damit waren die Voraussetzungen geschaffen, eine erste Abschätzung für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens vornehmen und einen Vergleich zum konventionellen Verfahren anstellen zu können.

5 Wirtschaftlichkeit des neuen Verfahrens im Vergleich zum konventionellen Verfahren

Der wesentliche treibende Faktor für die Durchführung dieser Arbeit bestand in der Aussicht über eine Verdrängungsextraktion des Öls aus vollfetten Sojamahlprodukten den Basisrohstoff für die Herstellung von Proteinprodukten erhalten zu können, der bisher aus konventionell mit Hexan entölten Sojaflocken besteht. Darin wird ein erheblicher umweltschonender und gesundheitlicher Vorteil in der Proteinproduktherstellung gesehen. Dieser Vorteil wird sich aber nur dann realisieren lassen, wenn darüber hinaus sich entweder wirtschaftliche Vorteile bei der Produktherstellung und/oder qualitative Vorteile bei den Produkten ergeben (Abb. 37).

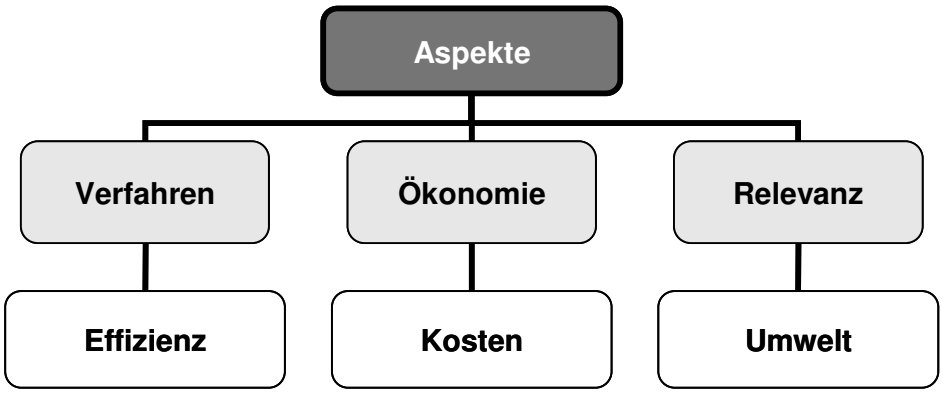


Abbildung 37: Aspekte zur Realisierung eines innovativen Verfahrens.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil besteht darin, dass die Proteinproduktherstellung auf den Hauptinhaltsstoff der Sojabohnen abgestellt werden kann, so dass in einem solchen Verfahren das Öl zum Nebenprodukt wird. Die Konsequenz daraus ist es, dass eine entsprechende Anlage unter dem Aspekt der Proteinproduktherstellung zu konzipieren ist und die darin erforderliche Ölabtrennung lediglich einen Verfahrensschritt darstellt. Daraus erwächst der beträchtliche Vorteil, dass die Rohstoffauswahl auf die Proteinproduktherstellung abgestellt werden kann, was bei der konventionellen Entölung sehr großer Chargen von Sojabohnen praktisch kaum möglich ist. Damit können kleine Rohstoffchargen unter den Aspekten Wirtschaftlichkeit, Verfahrensgängigkeit, Endprodukteigenschaften, Produkthaftung, Nischenanwendung etc. gezielt ausgewählt werden. Beispielhaft sei hier auf die Auswahl und den Einsatz von GMO freien Sojabohnen für die Proteinproduktherstellung hingewiesen, in die alle diese Aspekte einfließen.

Dieser letztere Hinweis ist im Zusammenhang mit der möglichen Umsetzung des Verfahrens zu sehen, welche Idealerweise mit Beteiligung eines innovativen Investor erfolgen sollte, weil dieser eine Risikobewertung zu Gunsten der Chancen vornimmt, die das Verfahren bietet. Genau aus diesem Grunde muss auch die nachstehende vorläufige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt werden, um eine Risikobewertung vornehmen zu können. Eine derartige Vorgehensweise ist nicht nur

sinnvoll für die Umsetzung des hier aufgezeigten Verfahrensvorschlags, sondern kann prinzipiell für die Einführung neuer Verfahrenskonzepte gelten. Insbesondere unter Berücksichtigung der Vermeidung von Konflikten zwischen Verfahrensgebern und Verfahrensnehmern hinsichtlich der in Verträgen festzulegenden Gewährleistungsansprüche gewinnt diese Vorgehensweise ihre besondere Bedeutung.

Nachstehend erfolgt eine vergleichende Betrachtung der für die Wirtschaftlichkeit des neuen Verfahrens gegenüber dem konventionellen relevanten Faktoren untergliedert in Investitions- und Produktionskosten. Die Betrachtung erfolgt bezogen auf eine Standardgröße für eine Anlage zur Herstellung von Sojaproteinprodukten. Neben den genannten Faktoren hängt die Wirtschaftlichkeit auch von der Lokalisierung der Anlage, ihrem Design und ihrer Verarbeitungsleistung ab, weil davon die Kapitalkosten, die Betriebskosten und der Wirkungsgrad der Anlage hinsichtlich Produktausbeute und –qualität beeinflusst werden.

5.1 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Grundlage der vorläufigen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung soll eine Budgetabschätzung für eine Anlagengröße mit einer Verarbeitungsleistung von 3 t/h gereinigter Sojabohnen sein. Der Begrenzung auf eine Budgetabschätzung ergibt sich aus dem derzeitigen Stand der Projektentwicklung, der für eine endgültige Realisierung des Projekts notwendigerweise noch weitere Phasen durchlaufen muss, in denen der Grad der Information immer mehr zunehmen muss. Dies setzt eine Erhöhung der Detaillierung der Kostenabschätzung hinsichtlich des Liefer- und Leistungsumfangs, der seinerseits von einer weiteren Detaillierung und Präzisierung der Beschreibung des Verfahrens abhängt [123,124]. In der Regel existieren folgende Stufen in der Angebotsphase eines Projekts:

1. Stufe der Budgetabschätzung: Sie erfolgt in der Konzeptphase eines Projekts und wird im Zusammenhang einer ersten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Konzeptstudie erstellt. Üblicherweise können diese Abschätzungen mit einer Genauigkeit von etwa ± 25% bezogen auf das später reale Projektvolumen erfolgen.
2. Stufe der Engineering Studie: Sie wird insbesondere bei indifferenten Projektsituationen vorgenommen, um eine klare Definition bezüglich Technologie oder aber auch ökonomischen Gesichtspunkten zu erarbeiten. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn eine spezifische Projektentwicklung durchgeführt werden soll.
3. Stufe des vorläufigen Angebots: Sie bezieht sich auf ein konkretisiertes Auslegungskonzept mit einem abgestimmten Liefer- und Leistungsumfang. Dazu liegen hinreichend genaue Informationen über die Prozessbeschreibung, das Automatisierungskonzept und die ökonomischen Randbedingungen vor. Die Genauigkeit dieser Kostenabschätzung liegt im Bereich von ± 15 bis 20%.
4. Stufe der Projektbewilligungsphase; Sie bezieht sich auf ein Auslegungskonzept, dass sämtliche prozessrelevanten Informationen enthält (Engineering, Mechanisches- und Elektrisches- Design etc.). Die

Projektkostenabschätzung erreicht in dieser Stufe eine Genauigkeit von ± 10%.

5. Stufe des verbindlichen Angebots: Das Projekt beruht nunmehr auf spezifischen Details der kundenseitigen Anforderungen und einem wettbewerbsfähigem Konzept. Das Angebot enthält vollständige Listen über die zu liefernden Ausrüstungen, die Kosten für Engineering- und Service-Leistungen sowie detaillierte Pläne für die Aufstellungen, Spezifikationen über die Betriebsstoffe etc., den Projektabwicklungszeitplan und alle benötigten Dokumentationen. Auf dieser Stufe hat das Angebot bezogen auf die Projektkosten eine Genauigkeit von ± 5%.

Jede dieser Projektkostenabschätzungen beruht auf spezifischen Engineering- und Design-Kriterien. Die Inhalte der verschiedenen Kostenabschätzungen mit deren zunehmenden Grad an Detaillierung sind in Tabelle 14 dargestellt. Daraus ist eindeutig zu erkennen, dass auf dem vorliegenden Kenntnisstand zum Projekt, der dem einer Projektstudie entspricht, nur eine Budgetabschätzung erfolgen kann. Gegebenenfalls wäre es noch möglich ein vorläufiges Angebot abzugeben, dadurch würde jedoch die Genauigkeit der Kostenabschätzung nur etwa um 7 – 8 % erhöht werden können.

Die folgenden Stufen der Projektkostenabschätzung beziehen sich bereits auf teilweise sehr spezifische und detaillierte Angaben zu einem konkreten Projekt, welche wie bereits erwähnt, erst noch erarbeitet werden müssen. Zum Verständnis der hier durchgeführten Untersuchung und der Ermittlung der noch ausstehenden Informationen ist es erforderlich einige in der Tabelle vorkommenden Punkte etwas näher zu erläutern, bzw. zu definieren. Das sind der Lieferumfang, die Fließbilder, die Massen- und Energiebilanz und die Ausrüstungsliste.

1. Der **Lieferumfang** beschreibt das Leistungspaket unter der jeweiligen Kostenabschätzung bzw. dem jeweiligen Angebot. Für eine Budgetabschätzung könnte dies im vorliegenden Fall eine Anlage zur Verarbeitung von 3 t/h an gereinigten Sojabohnen zur Herstellung von SPI sein, ohne jedoch weitere Details zu nennen. Es brauchten keine weiteren Einzelheiten wie beispielsweise die genaue Prozessbeschreibung mit der zugehörigen Ausrüstungsliste genannt zu werden.

   Abweichend davon beruht die hier vorliegende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aufgrund der doch bereits relativ genauen Ausrüstungsliste für das neue Verfahren und die bekannte Ausrüstung für das zum Vergleich herangezogene konventionelle Verfahren auf konkreten Angaben, die etwa der Stufe einer Projektstudie entsprechen. Damit ist die Varianz in der Projektkostenabschätzung auf etwa ± 20 % einzuschätzen.

2. Die **Fließbilder** beschreiben den prinzipiellen Prozessablauf, den Einsatz von Verbrauchsmaterialien und deren Zusammenhänge. In der frühen Projektphase genügen so genannte Prozessblockschaltbilder (BFD), bei denen die Hauptverfahrensschritte in Blöcken dargestellt sind. Im Zuge der weiteren Projektbearbeitung werden zusätzliche Informationen nötig. Diese werden mit den Prozessfließbildern (PFD) geliefert, in denen sämtliche

Hauptausrüstungen, Hauptprodukt- und Nebenprodukt-Ströme, die Hauptregelkreise, Anschlüsse der Verbrauchsmaterialien, hauptsächlich verwandte Materialien und eventuell die Größenordnung der eingesetzten Rohrleitungsverbindungen dargestellt sind.

Im verbindlichen Angebot wird eine weitere Detaillierungsstufe durch die Prozess- und Instrumentations-Diagramme (P&ID) erreicht. Neben dem vorgenannten werden darüber hinaus Informationen bezüglich der eingesetzten Ausrüstungen für den Prozess und die Handhabung des Verbrauchsmaterials, der Rohrleitungen und Rohrleitungsverbindungen, der Instrumente und Regelungen gegeben. Zusätzlich werden alle Ausrüstungsteile mit einem Nummernsystem gekennzeichnet.

3. Die **Massen- und Energiebilanz** enthält alle Informationen, die sich auf die Produkt- und Prozessströme beziehen. Die Massenbilanzen in der frühen Phase der Projektbearbeitung geben nur einen generellen Überblick und dienen der Darstellung der Projektgrenzen.
4. Die **Ausrüstungsliste** enthält alle notwendigen Angaben über die im Projekt enthaltenen Ausrüstungen. Während der Projektentwicklung wird diese Liste konkretisiert und detailliert. Beispielsweise enthält das Budgetangebot nur eine Liste der Hauptausrüstungen, während zum verbindlichen Angebot die Liste aus dem P&ID abgeleitet wird und somit sämtliche Ausrüstungen enthält. Die Informationen bezüglich der Ausrüstung beschränken sich üblicherweise auf eine Identifizierungsnummer, Kapazität, Größe und Gewicht, Lieferant und Modell, elektrische Anschlussleistung, Material und Preis. Aus praktischen Gründen wird die Ausrüstungsliste abhängig von den Projektanforderungen in verschiedene Listen aufgeteilt, darunter die Motorliste, Instrumenten-Liste, Ventil-Liste, Liste der elektrischen Bauteile und andere.

Tabelle 14: Darstellung der verschiedenen Angebotsphasen und der jeweils dabei zu erstellenden Unterlagen.

Dokumentation	Konzeptstudie Budget-abschätzung	Projektentwicklung vorläufiges Angebot	Projektstudie Pre-Engineering	Projekt-bewilligung Angebot	Vergabe verbindliches Angebot
1. *Lieferumfang*	Allgemein	Allgemein/spezifisch	Spezifisch	Spezifisch	Definiert
histor. Daten	Ja	Ja/nein	Nein	Nein	Nein
2. *Zeichnungen*					
Fliessbild	BFD	BFD/PFD	PFD/P&ID	P&ID	P&ID
Anlagenzeichng.	Allgemein	Allgemein +	Allgemein ++	Spezifisch	Detailliert
Ausrüstungsanordng.	Allgemein	Allgemein +	Allgemein ++	Spezifisch	Detailliert
Gebäudezchng.	Umriss	Allgemein +		Spezifisch	Detailliert
3. *Engineering Kalk.*					
Massenbilanz	Allgemein	Allgemein	Spezifisch	Spezifisch	Spezifisch
Energiebilanz	Abschätzung	Abschätzung	Spezifisch	Spezifisch	Spezifisch
Prozessbeschreibung	Allgemein	Allgemein	Allgemein/Spezifisch		
Regelprinzip	Allgemein	Allgemein	Allgemein/Spezifisch	Spezifisch	Definiert
Umwelt	Allgemein	Allgemein	Allgemein	Spezifisch	Definiert
Platzbedarf	Allgemein	Allgemein	Spezifisch	Spezifisch	Definiert
Ausrüstungsliste	X	Allgemein	Spezifisch	Spezifisch	Definiert
4. *Abschätzung*					
Ausrüstung	Erfahrung	Erfahrung	Definiert	Definiert	Definiert
Installation	Faktor	Faktor/Abschätzung	Abschätzung	Abschätzung	Definier
Gebäude	Faktor	Faktor/Abschätzung	Nach Bedarf	Abschätzung	Abschätzung
Utilities	Erfahrung	Faktor/Abschätzung	Nach Bedarf	Definiert	Definiert
5. Genauigkeit	± 25%	± 15-20%		± 10%	± 5%
6. Kosten					

BFD: Block Flow Diagrams; Prozessblockschaltbild
PFD. Process Flow Diagrams; Prozessfließbild
P&ID: Process and Instrumentation Diagrams; Prozess- und Instrumentationsbilder

5.2 Vergleichende Betrachtung der Investitionskosten

Es wurde bereits erwähnt, dass die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens vom Design, dem Standort und der Kapazität der Anlage abhängt, in denen sich die Investitionskosten widerspiegeln. Im Folgenden soll kurz auf die wesentlichen die Investitionskosten beeinflussenden Faktoren eingegangen werden, welche die Errichtung einer Anlage zur Herstellung von Sojaproteinprodukten beeinflussen. Diesbezüglich kann das Prozessdesign in drei Bereiche aufgeteilt werden, welche den Prozess, die Infrastruktur und Designaspekte selbst, wie die Automation, berücksichtigen.

Die Automation sei hier deshalb erwähnt, weil sie über die dabei erforderliche Regelung und Instrumentierung sowohl einen signifikanten Einfluss auf die Investitionskosten als auch die Betriebskosten der Anlage ausübt. Allein der Grad der Automation kann eine Varianz der Investitionskosten von bis zu 25% zur Folge haben [124]. Deshalb kann die Investitionskostenabschätzung bei nicht erfolgter Klärung des Automationsgrads zu signifikanten Abweichungen in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung führen. In der Tabelle 15 ist eine allgemeine Übersicht

über die Investitionskosten und deren Varianz gegeben, um damit einen Hinweis auf die Aussagekraft von Kostenabschätzungen auf der Stufe der Budgetabschätzung zu geben.

Tabelle 15: Kostenabschätzungen der diversen Positionen des Projekts bezogen auf die die Hauptausrüstungskosten

Investitionskosten	Durchschnitt [%]	Varianz [%]
Hauptausrüstungen	30	27,5 – 35
Instrumente	5,0	3,0 – 7,0
Fracht	1,0	0,5 – 1,5
Gesamtausrüstungen	37,5	32,0 – 45,0
Gebäude und Lager	12,5	10,0 – 25,0
Verbrauchsmaterialien	3,5	2,0 – 7,5
Bauarbeiten	4,5	3,5 – 7,5
Aufstellung u. Installation	6,5	4,0 – 8,0
Verrohrung u. Isolierung	6,0	3,0 – 7,0
Elektrik u. Verkabelung	7,5	5,0 – 9,0
Grundstück	2,0	0 – 5,0
Wartung	1,5	1,0 – 3,0
Engineering u. Beschaffung	10,0	8,0 – 12,0
Ausgaben (Training, Bewilligung etc.)	1,0	0,5 – 1,5
Eventualitäten u. Preissteigerung	7,5	5,0 – 10,0

Quelle: Fiala (1995), [124]

Die Investitionskosten sind für Ölmühlen, die neu errichtet werden, einigermaßen sicher bekannt. Diese liegen für Verarbeitungsleistungen im Bereich von 1.000 bis 3.000 Tonnen pro Tag bei durchschnittlich 23.000 € pro Tonne verarbeitete Ölsaat und Tag [124,125]. Die Varianz im Kapitaleinsatz verschiedener Anlagengrößen liegt im Bereich von 19.000 bis 27.500 € pro Tonne Tagesverarbeitung. Unterhalb der vorgenannten Verarbeitungsleistung muss mit einem höheren Kapitaleinsatz kalkuliert werden. Die Unterschiede liegen vornehmlich an den Bedingungen vor Ort, der Gebäudekonfiguration, dem Grad der Automatisierung der Anlage, den Lagerkapazitäten, der Art der logistischen Abwicklung von Rohmaterialeinsatz und Produktspedition, der Verfügbarkeit von Verbrauchsmaterialien und der Ausführung einer eventuellen Abwasserbehandlung.

Die Kosten für SPI Anlagen sind ebenfalls bekannt. Sie belaufen sich auf 30.000 bis 35.000 € pro Tonne verarbeitete Sojaflocken. Für die Berechnung der Investitionskosten wurde davon ausgegangen, dass jeweils eine Anlage mit der genannten Tageskapazität nach dem neuen Verfahren und eine Anlage nach dem konventionellen Verfahren errichtet würden. Dazu wurden die Kosten für die Ausrüstungen, Instrumente und Elektrik ohne Verkabelung und Verrohrung konkret ermittelt (Anhang: Tabelle A5,A6 – Investitionskosten). Danach beliefen sich diese Kosten für das neue Anlagenkonzept auf etwa 13 Mio. € und für das konventionelle auf etwa 14 Mio. €. Unter Bezugnahme auf Tabelle 15 repräsentieren diese Kosten im Durchschnitt etwa 50 % der Gesamtinvestitionskosten, so dass die

Gesamtinvestitionskosten bis zu 26 bzw. 28 Mio. € für die beiden Verfahren betragen würden. Einmal abgesehen davon, dass die konventionelle Anlage nach dieser Abschätzung eine tendenziell größere Investitionssumme erforderte, würde eine solche Anlage wohl kaum gebaut werden, weil die Versorgung von Proteinanlagen mit entölten Sojaflocken in jedem Fall unproblematischer und billiger ist. Überraschend ist es, dass die Investitionskosten in das neue Anlagenkonzept nicht größer sind, als es die für ein konventionelles mit gleicher Kapazität wäre.

5.3 Vergleichende Betrachtung der Produktionskosten

Die Betrachtung der Produktionskosten erfordert eine genaue Kenntnis über ihre Zusammensetzung und ihr relatives Gefüge. Auch diese Kosten hängen ebenso wie die Investitionskosten stark von lokalen Gegebenheiten ab. So hängen beispielsweise die Personalkosten, die einen gewichtigen Anteil an den Produktionskosten haben, besonders stark von lokalen Gegebenheiten ab. Die Produktionskosten setzen sich im Wesentlichen aus vier Kriterien zusammen, den

- Rohmaterialkosten, welche von der Qualität des eingesetzten Rohmaterials bezüglich Ausbeute und Qualität der Endprodukte abhängen,
- direkten Kosten, die direkt mit der Herstellung der Produkte zusammenhängen und im Wesentlichen die Personal- und Energiekosten ausmachen,
- fixen Kosten, die periodisch auftreten und nicht notwendigerweise einen Bezug zum Produktionsvolumen besitzen, wie Kapitalkosten, Abschreibung, Steuern und Versicherungen etc.,
- Overheads und kommerziellen Aufwendungen, die indirekte Kosten sind, die mit der Verwaltung und Administration des Betriebs der Anlage verbunden sind.

Die Rohmaterialkosten haben dominanten Einfluss auf die Produktionskosten. Der durchschnittliche Preis der am Chicago Board of Trade „CBOT“ gehandelten Sojabohnen schwankt im Bereich von 180 bis etwa 260 USD, d.h. etwa 140 bis 200 €. Für den Beobachtungszeitraum der letzten 30 Jahre lag der durchschnittliche Preis für Sojabohnen bei 210 USD. Der Preis der Sojabohnen in Euro konvertiert hängt vom jeweils gültigen Wechselkurs ab, der derzeit erheblichen Schwankungen ausgesetzt ist. Dieser Preis wurde auch zur Betrachtung der Rohmaterialkosten pro Jahr herangezogen. Eine übliche Anlage zur Gewinnung von Sojaproteinprodukten verarbeitet 2,5 t/h an entfetteten Sojaflocken, wozu etwa 3,6 t/h an ungeschälten und ungereinigten Sojabohnen eingesetzt werden müssen. Damit muss bei der Betrachtung der Gesamtproduktionskosten mit Rohmaterialkosten von etwa 4,5 Millionen Euro kalkuliert werden.

Dem stehen mögliche Erlöse aus den resultierenden Produkten gegenüber. Im Falle einer Anlage zur kombinierten Ölgewinnung und Proteinproduktherstellung aus vollfetten Sojaflocken wären dies die anfallenden Proteinprodukte, die Schalen der Sojabohnen, das Rohöl und das faserhaltige Neben-Produkt. Der durchschnittlich

erzielbare Preis für die Proteinprodukte liegt bei 2.050 Euro, für das Rohöl bei 400 Euro, die Schalen bei 50 Euro und das Neben-Produkt bei 120 Euro pro Tonne.

Dabei müssen die extrahierbaren Quantitäten der anfallenden Produkte bestimmt werden. An dieser Stelle kann nur von einer groben Näherung der Ausbeuten ausgegangen werden, da die entsprechenden Ausbeuten von dem eingesetzten Rohmaterial und der Prozesstechnik abhängen. Zur Simulation der Betrachtung der Kostendeckung Betrachtung soll von einer durchschnittlichen Ausbeute an a) Sojaproteinprodukt von etwa 28 %, b) Rohöl von 20 %, c) pelletierten Schalen von 10 % und d) faserhaltigem Neben-Produkt von 18 % bezogen auf eingesetzte ungeschälte Sojabohne ausgegangen werden. Der restliche Anteil von 24 % wird in gelöster Form dem Abwasser zugeführt und repräsentiert somit den Verlust der Anlage.

Weiterhin müssen Prämissen hinsichtlich der Verfügbarkeit einer Anlage und deren Auslastung über den Betrachtungszeitraum getroffen werden. Prinzipiell gilt, dass Sojabohnen das ganze Jahr über verfügbar sind und somit ein ganzjähriger Betrieb möglich ist. Somit wird die Summe an möglichen Produktionstagen mit 330 Tagen angenommen. Zur Herstellung der Proteinprodukte aus Sojabohnen bedarf es einer regelmäßigen vorbeugenden Reinigung der Anlage, um einwandfreie Produkte herstellen zu können. Daher muss regelmäßig CIP gereinigt werden, welches somit einen Einfluss auf die maximal mögliche effektive Produktionszeit hat. In diesem Fall ist davon auszugehen, mindestens zweimal wöchentlich zu reinigen, was in 22 Stunden effektiver Produktionszeit pro Tag resultiert. Damit ergibt sich theoretisch eine Gesamtproduktionszeit von 330 x 22 = 7.260 Stunden pro Jahr. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass sich nicht vom ersten Produktionsjahr an eine 100 prozentige Auslastung realisieren lässt. Realistisch wäre der Ansatz im ersten Jahr einen Auslastungsgrad von 97 % anzunehmen, gleichbedeutend mit etwa 320 Tagen Produktion. Die Verfügbarkeit der Anlage steigt dann von Jahr zu Jahr an, bis im fünften Produktionsjahr das Personal und die Technologie soweit aufeinander abgestimmt sind, dass eine tatsächliche Ausnutzung von 100 % möglich ist.

Die oben geschilderten Prämissen gelten nun für beide Szenarien. Sie beziehen sich auf eine neu zu errichtende Anlage zur Herstellung von Sojaproteinprodukten nach dem konventionellen Verfahren und einer Anlage, die nach dem neuen Konzept zur kombinierten Rohölgewinnung und Proteinproduktherstellung arbeitet. Hinsichtlich der vergleichenden Betrachtung beider Verfahren wird unter Berücksichtigung der vorab genannten Kriterien, unter denen die Rohstoffauswahl eine dominante Rolle spielt, bewusst darauf verzichtet, zusätzlich auch einen Vergleich zu einer Sojaproteinanlage anzustellen, welche entfettete Sojaflocken als Rohstoff einsetzt.

Die beiden zu betrachtenden Verfahren unterscheiden sich nur unwesentlich was den Rohstoffmaterialeinsatz und die daraus resultierenden Produkte anbetrifft. Allerdings kann die Auswahl des Rohstoffs kostenrelevant sein. Dieser Gesichtspunkt soll hier aber nicht betrachtet werden, da für den Verfahrensablauf von gleichen Kosten auszugehen ist. Kostenrelevante Unterschiede ergeben sich für beide Verfahren jedoch im Hinblick auf die Investitions-, die Personal- und die Produktionskosten.

Auf die Produktionskosten wirken sich vor allen Dingen die bei beiden Verfahren unterschiedlichen Einsätze an Verbrauchsmaterialien, Dampf, Erdgas, Strom etc. aus (Anhang: Tabelle A7 – Verbrauchsmaterialien). Aus den Angaben in der Tabelle A7 wurden die Verbrauchsmaterialien berechnet, die für die Verarbeitung von einer Tonne gereinigter Sojabohnen für beide Verfahren notwendig sind. Die Bezugsgröße „eine Tonne gereinigte Sojabohnen“ wird für die vergleichende Betrachtung als Normierungsgröße verwendet.

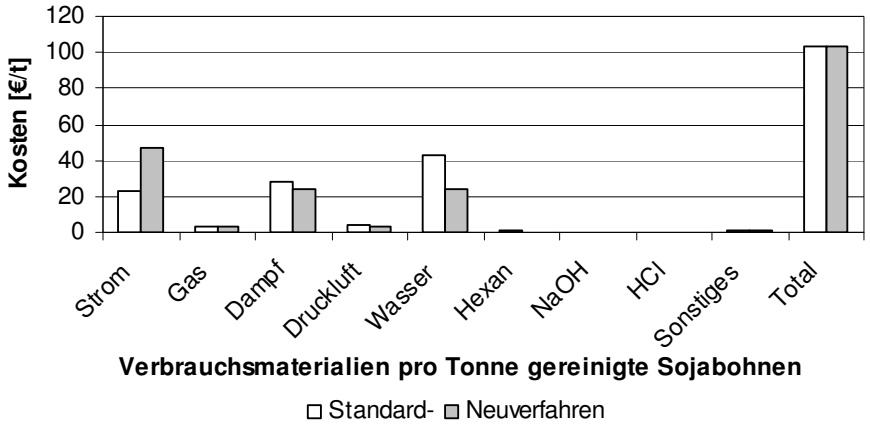


Abbildung 39: Vergleichende Betrachtung der Kosten für die wichtigsten Verbrauchsmaterialien für das Standard- und das neue Verfahren.

Zur Bestimmung der relativen Kosten bezogen auf die in der Abbildung 39 aufgeführten Positionen, wurde von in Europa durchschnittlichen Preisen ausgegangen. Es ist an dieser Stelle zu bemerken, dass der Standort solcher Anlage wesentlich für eine differenzierte Betrachtung dieser Einzelpositionen ist. So könnten beispielsweise jede der beiden Anlagentypen in Russland oder im Mittleren Osten wegen der dort viel niedrigeren lokalen Strom, Gas- und Heizöl-Preise wesentlich kostengünstiger betrieben werden, als In Mitteleuropa. Eine wesentliche Kostenreduktion in Bezug auf die Verbrauchsmaterialien ist an solchen Standorten gegenüber dem mitteleuropäischen als realistisch anzusehen, wenn dazu der stark fluktuierende Preis für Rohöl herangezogen wird.

Die Personalkosten hängen ebenfalls stark von lokalen Bedingungen ab. Für diese gilt ähnliches, wie für die Kosten für die Verbrauchsmaterialien. Die Betrachtung der Personalkosten für die beiden zu vergleichenden Verfahren erfolgte nach westeuropäischen Lohnkosten.

Zur Abschätzung der Personalkosten wurde der Personalbedarf ermittelt. Dazu wurden sämtliche Anlagenteile hinsichtlich des spezifischen Personalbedarfs unter der Prämisse einer ganztägigen Betriebsweise ermittelt. Die Grundlage dafür bildeten die in der Tabelle A8 gemachten Einzelangaben über die Anlagenteile, deren Betrieb, über Erfahrungswerte abgeschätzt wurde. Die ganztägige

Betriebsweise erfordert den Betrieb der Anlage in 3 Schichten, mit einer Schicht als Reserve pro Anlagenteil. Aus dieser Abschätzung ergab sich der in den Tabellen 16 und 17 aufgeführte Personalbedarf für die beiden zu vergleichenden Verfahren.

Tabelle 16: Abschätzung des Personalbedarfs einer konventionellen Anlage zur Rohölgewinnung und Proteinproduktherstellung aus Sojabohnen.

Personal	Mühle	Hexan-Anlage	Protein-Linie	Sprüh-trockner	Futter-trockner	Abwasser	Sonstiges	TOTAL
ungelernte Arbeitskraft	2		3	1	1		2	**9**
angelernte Arbeitskraft	4	3	5	2	2	2	3	**21**
ausgebildete Arbeitskraft	2	6	5	2	2	2	3	**22**
Mechaniker	1	1	1		1			**4**
Elektriker	1	1	1		1			**4**
Sekretariat							3	**3**
Kaufleute							4	**4**
Administration							6	**6**
Management							2	**2**
Gesamt	10	11	15	5	7	4	23	**75**

Tabelle 17: Abschätzung des Personalbedarfs einer Anlage zur Rohölgewinnung und Proteinproduktherstellung aus Sojabohnen nach dem neuen Verfahren.

Personal	Mühle		Protein-Linie	Sprüh-trockner	Futter-trockner	Abwasser	Sonstiges	TOTAL
ungelernte Arbeitskraft	1		4	1	1		2	**9**
angelernte Arbeitskraft	3		6	2	2	2	3	**18**
ausgebildete Arbeitskraft	1		6	2	2	2	3	**16**
Mechaniker	1		1		1			**3**
Elektriker	1		1		1			**3**
Sekretariat							3	**3**
Kaufleute							4	**4**
Administration							6	**6**
Management							2	**2**
Gesamt	7		18	5	7	4	23	**64**

Zur Simulation der zu erwartenden Produktionskosten über eine Projektlaufzeit von 15 Jahren, wurden die in den Tabellen A5 bis A10 dargestellten Berechnungen durchgeführt. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist in den Tabellen 18 und 19 zusammengefasst. Grundlage für diese Berechnungen bildeten reale Budgetangebote vergleichbarer Anlagen, die durch konkrete Anfragen bei entsprechenden Lieferanten der spezifischen Anlagenteile eingeholt wurden, die hier aus Gründen der Wettbewerbsneutralität nicht genannt werden sollen.

Mit dieser zusammenfassenden Betrachtung der anfallenden Kosten waren die Voraussetzungen dafür geschaffen, die Produktionskosten und fixen Kosten in Abhängigkeit von der Produktionsauslastung darzustellen. Aus den Abbildungen 40 und 41 ist zu erkennen, dass selbst bei voller Auslastung der Produktionskapazität

der Fixkostenanteil an den Gesamtkosten für den Betrieb beider Anlagen immer noch etwa 50 % beträgt. Rechnerisch war er bei dem neuen Verfahren mit 49 % geringfügig kleiner als bei dem konventionellen Verfahren mit 53 %. Darin liegt ein besonderes Problem kleiner Anlagen, weil bei so komplexen Verfahren, wie sie hier für die Sojaproteinproduktherstellung vorliegen, hohe Investitionskosten erforderlich sind. Das zeigt noch einmal deutlich auf, wie groß das Risiko sein kann, wenn ein solches Anlagenkonzept realisiert werden soll. Deshalb wird eine Investitionsentscheidung wesentlich davon abhängen, ob es Endproduktkriterien gibt, die eine hohe Aussicht auf Erfolg am Markt bieten.

Zur Abschätzung einer möglichen Wirtschaftlichkeit beider Verfahren ist in den Abbildungen 40 und 41 eine weitere Gerade dargestellt, welche die zu erwartenden Erlöse durch den Verkauf der Produkte repräsentiert. Grundlage für die Berechnung dieser Geraden bildete ein fiktiver Verkaufspreis für SPI und die anfallenden Nebenprodukte, wie sie derzeit am Markt erzielt werden.

Tab. 18: Zusammenstellung der jährlich anfallenden Kosten für den Projektzeitraum von 15 Jahren für das konventionelle Verfahren (in TEUR)

Jahr	Overhead*	Administration Marketing	Verbrauchs-materialien	Personal	Rohmaterial	TOTAL [T€]
1	1.885	0	0	928	0	**2.813**
2	2.520	286	155	2.047	1.848	**6.851**
3	2.522	289	317	2.482	3.772	**9.376**
4	2.523	292	323	2.527	3.849	**9.509**
5	2.525	295	330	2.553	3.926	**9.622**
6	2.526	292	333	2.578	3.966	**9.695**
7	2.528	295	336	2.604	4.005	**9.768**
8	2.529	297	340	2.630	4.045	**9.842**
9	2.531	300	343	2.656	4.086	**9.917**
10	2.533	303	347	2.683	4.127	**9.992**
11	1.699	306	350	2.710	4.168	**9.233**
12	651	310	354	2.737	4.210	**8.260**
13	652	313	357	2.764	4.252	**8.338**
14	654	316	361	2.792	4.294	**8.416**
15	656	319	364	2.820	4.337	**8.496**

* enhält Kosten für Abschreibung, Wartung, Schulung, Transport, Sonstiges

Tab. 19: Zusammenstellung der jährlich anfallenden Kosten für den Projektzeitraum von 15 Jahren für das neue Verfahren (in TEUR)

Jahr	Overhead*	Administration Marketing	Verbrauchs-materialien	Personal	Rohmaterial	TOTAL [T€]
1	1.745	0	0	877	0	**2.622**
2	2.324	285	150	1.988	1.751	**6.493**
3	2.326	288	307	2.422	3.574	**8.911**
4	2.327	290	313	2.466	3.647	**9.038**
5	2.329	293	319	2.491	3.720	**9.147**
6	2.330	290	322	2.516	3.758	**9.216**
7	2.332	293	326	2.541	3.795	**9.287**
8	2.333	296	329	2.566	3.833	**9.358**
9	2.335	299	332	2.592	3.871	**9.430**
10	2.337	302	335	2.618	3.910	**9.502**
11	1.543	305	339	2.644	3.949	**8.780**
12	595	308	342	2.671	3.989	**7.904**
13	596	311	346	2.697	4.029	**7.979**
14	598	314	349	2.724	4.069	**8.055**
15	600	318	353	2.751	4.110	**8.131**

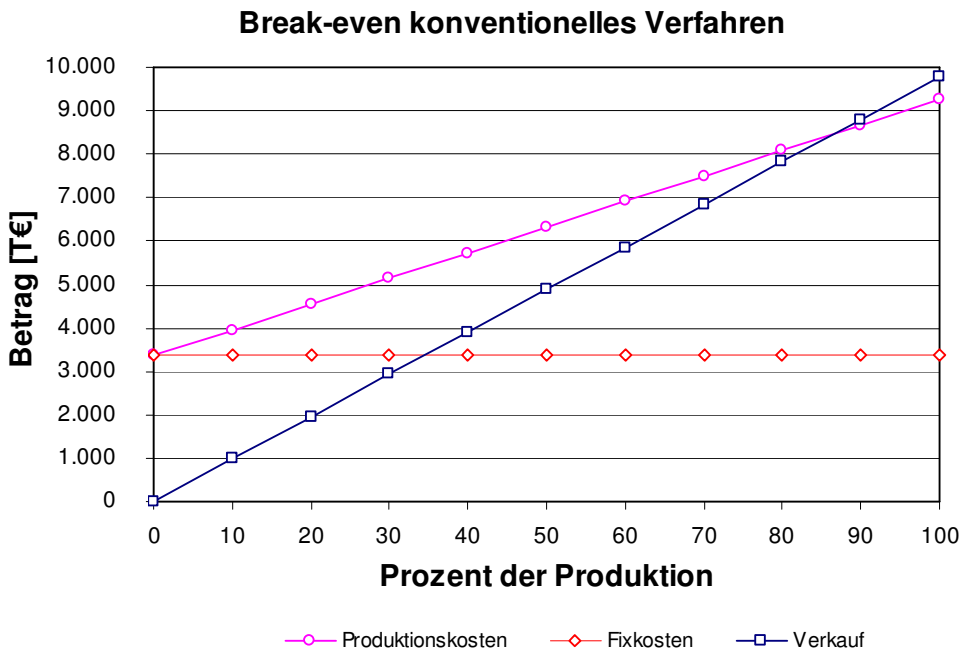


Abbildung 40: Darstellung des Break-even in Abhängigkeit der Produktionsauslastung einer Anlage zur Gewinnung von Öl und Proteinen nach dem Standardverfahren.

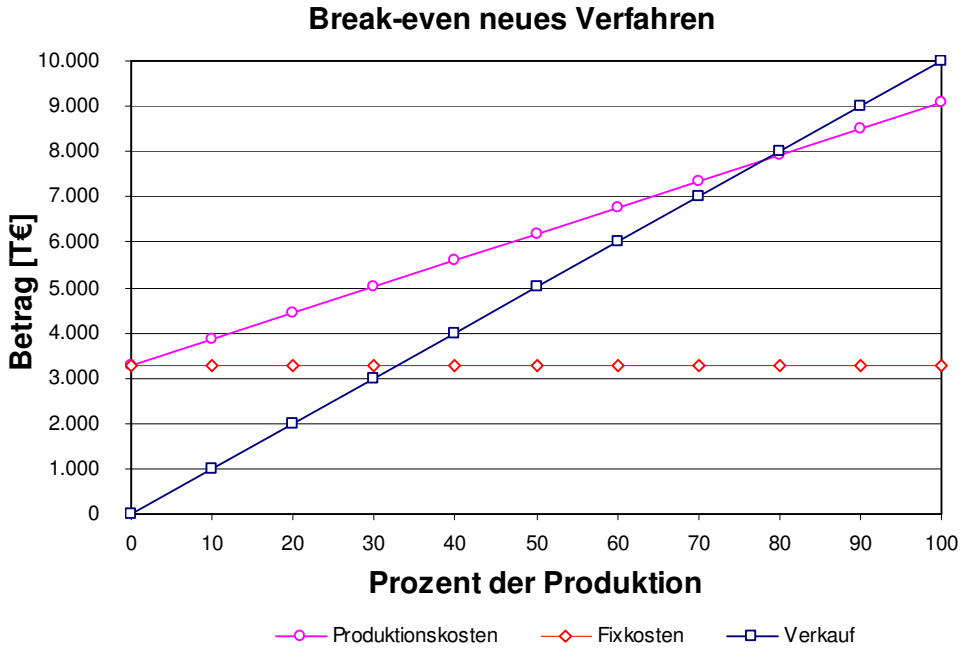


Abbildung 41: Darstellung des Break-Even in Abhängigkeit der Produktionsauslastung einer Anlage zur kombinierten Gewinnung von Öl und Proteinen nach dem Neuen Verfahren.

Aus dem Vergleich des Schnittpunkts beider Geraden ist zu erkennen, dass Kostendeckung (Break even) unter Berücksichtigung von kalkulatorischen Kosten (Afa, Zinsen etc.) beim neuen Verfahren bei 80 % Produktionsauslastung gegenüber 85 % beim konventionellen Verfahren erreicht werden könnte. Damit ist das neue Verfahren nach dieser Betrachtung tendenziell wirtschaftlicher einzuschätzen als das konventionelle. Wird diesbezüglich allerdings die Genauigkeit der ersten Stufe einer Kostenabschätzung bedacht, so relativiert sich diese Aussage. Zusätzlich sollte hier bedacht werden, dass die tatsächlich erzielbaren Endproduktausbeuten und deren funktionelle Eigenschaften eine stark ertragsrelevante Bedeutung haben. Allerdings kann es als sicher eingeschätzt werden, dass die eingangs gestellte Aufgabe, ein Verfahren zu entwickeln, bei dem die Wertschöpfung aus den Sojaproteinprodukten größer als die aus dem Öl sein sollte, erreichbar ist.

Grundsätzlich kann allerdings festgestellt werden, dass eine so kleine konventionelle Anlage, bestehend aus Hexan-Entölung und Proteinproduktherstellung, wohl kaum gebaut würde. Demgegenüber hat eine nach dem neuen Verfahrenskonzept konzipierte Anlage auf Grund dieser Kostenabschätzung durchaus eine Chance zur Realisierung, wenn dazu geeignete Randbedingungen, wie Rohstoffauswahl, Endprodukteigenschaften etc., vorliegen. Das Anlagenkonzept bietet außerdem ein hohes Potential für die Ausweitung der Produktionskapazität, womit gleichzeitig das Verhältnis von Fixkosten zu Gesamtkosten kleiner würde, wenn sich der zu beobachtende Trend zu einem verstärkten Einsatz von pflanzlichen Proteinen in der Ernährung fortsetzen wird. Dies zumal auch deshalb, weil Sojaproteinen besondere funktionelle Eigenschaften verliehen werden können, die sie für die Herstellung von Lebensmitteln mit fleischähnlicher Textur prädestinieren.

6 Zusammenfassung

Die Gewinnung von Proteinprodukten aus Sojabohnen hat wegen des hohen Proteingehalts der Sojabohnen, der ernährungsphysiologischen Wertigkeit der Sojaproteine und den funktionellen Eigenschaften der Sojaproteinprodukte zu einem hohen technologischen und ökonomischen Interesse an ihrem Einsatz sowohl für die Herstellung von Lebensmitteln als auch technischen Produkten geführt. In der Sojabohne ist Protein Hauptinhaltsstoff. Die Proteinproduktherstellung ist allerdings an eine weit reichende Entölung der Sojabohnen gebunden, weil nur so haltbare Sojaproteinprodukte hergestellt werden können. Bei der Verarbeitung von Sojabohnen fallen pro Tonne extrahierten Rohöls etwa 4,5 Tonnen an Sojamehl an, das einen durchschnittlichen Proteingehalt von 54 % hat. Dabei übersteigt der kommerzielle Wert des extrahierten Sojamehls den des Öls, wobei jedoch mit dem Öl die Wertschöpfung des Verfahrens erzielt wird.

In der Umkehrung dieser Relation bestand eine wesentliche Aufgabenstellung eines vorausgegangenen Forschungsprojekts, in welchem ein Verfahren zur Herstellung von Sojaproteinprodukten aus vollfetten Sojamahlprodukten unter Einsatz einer mehrstufigen Verdrängungsextraktion des Öls mit einem wässrig-alkoholischen Lösungsmittel entwickelt worden ist. Aus den dabei erzielten Ergebnissen wurde die Aufgabenstellung dieser Arbeit abgeleitet, die darin bestand, das bis zum Pilotmaßstab entwickelte Verfahren zur Sojaproteinproduktherstellung und Rohölgewinnung in ein prozesstechnisches Konzept umzusetzen und eine erste Abschätzung für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens durchzuführen.

Die Herstellung von Sojaproteinprodukten erfolgt derzeit nach der mit dem Lösungsmittel Hexan durchgeführten Öl-Extraktion aus dem anfallenden Sojaschrot. Der Vorteil der Anwendung dieses Lösungsmittels liegt in der mit niedrigen Kosten verbundenen unbeschränkten Verfügbarkeit, seiner mit nur geringen Verlusten verbundenen Rezirkulierbarkeit im Prozess, der Effizienz der Entölung und der eingeführten sowie energetisch günstigen Entbenzinierung des Entölungsrückstands, dem entfetteten Sojaschrot.. Der Einsatz von Hexan ist jedoch auf Grund des Explosionsrisikos beim Betrieb der Ölmühle, seiner toxikologischen Wirkung und den umweltgefährdenden Emissionen umstritten. Außerdem kann nach dem Stand der Technik ein Restgehalt an Hexan im extrahierten Sojaschrot nicht vermieden werden.

Ein wesentlicher Vorteil des neuen Verfahrenkonzepts wurde in der Ausrichtung der Sojabohnen auf die Proteinproduktherstellung gesehen. Daraus ergibt es sich, dass die Anlagenkapazität ohne Rücksicht auf die Ölgewinnung ausgelegt werden kann. Die Ausarbeitung des Verfahrenskonzepts erforderte eine umfassende Betrachtung des Standes der Technik zur Ölgewinnung und Proteinproduktherstellung. Dazu wurde zunächst auf die Produktion, den Handel und die verschiedenen Aspekte der landwirtschaftlichen und chemischen sowie der ernährungsphysiologischen und funktionellen Eigenschaften der Sojabohne und ihrer Inhaltsstoffe eingegangen.

Da das neue Verfahrenskonzept nur dann realisiert werden kann, wenn es gegenüber dem konventionellen Verfahren zur Sojabohnenverarbeitung zu Sojaproteinprodukten konkurrenzfähig ist, wurden danach Bewertungskriterien für

einen solchen Vergleich herausgearbeitet. Das geschah anhand der Darstellung des Standes der Technik zur Sojabohnenverarbeitung mit Blick auf die Sojaproteinproduktherstellung, darunter den Sojaproteinkonzentraten (SPC) und Sojaproteinisolaten (SPI). Die Bewertungskriterien wurden dazu herangezogen, den Betrieb von Ölmühlen und die Herstellung von Sojaproteinprodukten detailliert unter dem Gesichtspunkt des Vergleichs möglicher Verfahrensschritte und ihrer zwecknotwendigen Abfolge im jeweiligen Verfahren mit Blick auf das neue Verfahrenskonzept darzustellen.

Wesentliche Erkenntnis aus dieser Darstellung ist es, dass für die wässrig-alkoholische Verdrängungsextraktion nur ein Immersionsverfahren in Frage kommt. Bezogen auf die Ölgewinnung war dafür die Frage der Wirtschaftlichkeit seiner Anwendung bezüglich des Aufwandes für die Aufarbeitung des Extraktionsmittels zu beantworten. Außerdem war die Frage nach dem Restölgehalt im Extraktionsrückstand zu klären, weil dieser das entscheidende Kriterium für die Extrahierbarkeit der Proteine mit hoher Ausbeute und die Herstellung haltbarer Proteinprodukte ist.

Da das Ziel des neuen Verfahrenskonzepts darin besteht, über einen kombinierten Verfahrensablauf aus Sojamahlprodukten auf direktem Wege Sojaproteinprodukte (SPC, SPI) herzustellen und Öl abzutrennen, musste auch sichergestellt werden, dass dabei Endprodukte entstehen, die wenigstens die gleichen Eigenschaften aufweisen, wie die nach dem Stand der Technik hergestellten. Diesbezüglich erwies es sich als vorteilhaft, dass die Herstellung der SPC und SPI auf zwei vollständig voneinander getrennten Wegen erfolgen kann. Im Falle der SPC wird der größte Anteil der Proteine im Verfahrensablauf in einem unlöslichen Zustand gehalten, und im Falle der SPI werden die Proteine im Gegensatz dazu zum größten Teil löslich gemacht.

Aus Gründen der Geschlossenheit der Darstellung der zu treffenden Vergleiche zu dem neuen Verfahrenskonzept wurde der Stand der Technik anhand realer Prozessdaten an ausgeführten Anlagen abgehandelt. In dieser Abhandlung wird insbesondere auf die durchschnittliche Proteinverteilung auf die bei der SPC und SPI Herstellung anfallenden Fraktionen eingegangen sowie auf die Schlüsselstellung verwiesen, welche Dekantierzentrifugen im dargestellten Verfahrensablauf einnehmen. Für ein optimales Ergebnis müssen in jeder Prozessstufe die Parameter für den Dekanter ermittelt werden. Dies geschieht entweder durch bereits existierende Vergleichskennzahlen oder über die Durchführung von Pilotversuchen.

Aus der Diskussion des Standes der Technik ergab sich, dass die Ölextraktion der eigentlichen Proteingewinnung bzw. Proteinproduktherstellung notwendigerweise vorgelagert ist. Basierend auf den im Laborverfahren erhaltenen Ergebnissen zur wässrig-alkoholischen Extraktion des Öls wurden Pilotversuche durchgeführt, welche die Evaluierung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit des neuen Verfahrens zur Herstellung von Sojaproteinprodukten zum Gegenstand hatte. Diese Versuche wurden unter Einsatz eines Schlaufenmischers zur Suspendierung des Mahlprodukts, eines Homogenisators zum effizienten Zellaufschluss und eines Dekanters zur Trennung der Maische in den feststoffhaltigen Unterlauf, der den wesentlichen Anteil der Feststoffe aus dem Sojamahlprodukt enthielt, und den

Oberlauf, der einen großen Teil des Öls und des wässrigen Alkohols enthielt, durchgeführt.

Es konnte gezeigt werden, dass eine Phasentrennung nur direkt nach der Anmaischung erzielt werden konnte. Damit stellte sich heraus, dass nicht die zeitnahe Separation nach der Homogenisierung von wesentlicher Bedeutung für die Freisetzung des Öls ist, sondern eine möglichst kurze Verweilzeit während der Anmaischung. Deshalb wurde ein kontinuierliches Verfahren zur Präparation der Maische vor der Homogenisierung gewählt. Dem ersten Entölungsschritt folgte ein zweiter mit dem dann der erstrebte Restölgehalt von ≤ 2 % erreicht wurde. Ohne die Einstellung dieses niedrigen Restölgehalts in der Trockenmasse der Suspension, hätte die weitere Verfahrensentwicklung aufgegeben werden müssen.

Mit diesem Ergebnis war die entscheidende Grundlage für die weitere Durchführung der Aufgabenstellung geschaffen, weil das Mengengerüst des Pilotversuchs in die Betrachtung über die Wirtschaftlichkeit des neuen Verfahrens einbezogen werden konnte. Im Pilotmaßstab zeigte sich allerdings, dass der Proteingehalt in der Trockenmasse des SPI nicht der Forderung von ≥ 90 % entsprach. Das war teilweise darauf zurückzuführen, dass der eingesetzte Dekanter den Proteinquark nicht so stark entwässern konnte, wie das mit einer größeren Maschine möglich gewesen wäre. Darin wurde ein grundsätzliches Problem gesehen, das viele Pilotversuche aufweisen, weil mit ihnen prozesstechnische Optimierungen oft nur begrenzt möglich sind.

Nachdem nun das Mengengerüst für die Entölung des Sojamahlprodukts und die Aufarbeitung des Entölungsrückstands zu SPI bekannt waren, konnte die erstrebte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die mit dem neuen Verfahren herstellbaren Proteinprodukte durchgeführt werden; sie erfolgte für SPI. Im gegenwärtigen Stadium des aus wissenschaftlichen Erkenntnissen neu entwickelten Verfahrens zur Sojaproteinproduktherstellung ging es im Wesentlichen zunächst darum, Basiswissen für die Übertragung des anhand von Pilotversuchen gewonnenen Kenntnisstandes in die industrielle Praxis zu schaffen, nicht jedoch darum die Pilotergebnisse direkt für den Bau einer Anlage zu verwenden.

Es wird als ein wesentlicher Vorteil des neuen Verfahrens angesehen, dass die Proteinproduktherstellung auf den Hauptinhaltsstoff der Sojabohnen, das Protein, abgestellt werden kann, so dass in einem solchen Verfahren das Öl zu einem Nebenprodukt wird. Daraus erwächst der beträchtliche Vorteil, dass die Rohstoffauswahl auf die Proteinproduktherstellung abgestellt werden kann. Das ist bei der konventionellen Entölung sehr großer Chargen von Sojabohnen praktisch nicht möglich. Damit können kleine Rohstoffchargen unter den Aspekten Wirtschaftlichkeit, Verfahrensgängigkeit, Endprodukteigenschaften, Produkthaftung, Nischenanwendung etc. gezielt ausgewählt werden.

Grundlage der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung war eine Budgetabschätzung für eine Anlagengröße von 3 t/h gereinigter Sojabohnen, die einer übliche Anlagengröße für Proteinanlagen entspricht. Die Begrenzung auf eine Budgetabschätzung ergab sich aus dem derzeitigen Stand der Projektentwicklung, der für eine endgültige Realisierung des Projekts notwendigerweise noch weitere Phasen der Detaillierung

durchlaufen muss, um die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung weiter konkretisieren zu können. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde auf eine neu zu errichtende Anlage zur Herstellung von Sojaproteinprodukten nach dem konventionellen Verfahren und eine Anlage, die nach dem neuen Verfahren zur kombinierten Rohölgewinnung und Proteinproduktherstellung arbeitet, durchgeführt.

Die Simulation der zu erwartenden Produktionskosten über eine Projektlaufzeit von 15 Jahren erfolgte auf der Grundlage von realen Budgetangeboten für vergleichbare Anlagen sowie einer Aufstellung der jährlich anfallenden Kosten für Verbrauchsmaterialen, Löhne und Gehälter, Rohmaterialeinsatz, Administration und Marketing sowie sonstige Ausgaben. Damit war es möglich, die Produktions- und fixen Kosten in Abhängigkeit von der Produktionsauslastung darzustellen.

Es zeigte sich, dass bei voller Auslastung der Produktionskapazität der Fixkostenanteil an den Gesamtkosten für den Betrieb beider Anlagen etwa 50 % ausmachte, mit einem tendenziellen kleinen Vorteil für das neue Verfahren gegenüber dem konventionellen. Deshalb wird eine Investitionsentscheidung in das neue Verfahren wesentlich davon abhängen, ob es Endproduktkriterien gibt, die eine hohe Aussicht auf Erfolg der Proteinprodukte am Markt bieten. Unter Berücksichtigung eines fiktiven Verkaufpreises für die in beiden Verfahren anfallenden Endprodukte erreicht das neue Verfahren bei 80 % Produktionsauslastung Kostendeckung, während Kostendeckung für das konventionelle Verfahren bei 85 % Produktionsauslastung eintritt.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass nach dieser Kostenabschätzung das neue Verfahren durchaus eine Chance zur Realisierung hat, wenn dazu geeignete Randbedingungen, wie Rohstoffauswahl, Endprodukteigenschaften etc., vorliegen. Das Anlagenkonzept bietet außerdem ein hohes Potential für die Ausweitung der Produktionskapazität, womit gleichzeitig das Verhältnis von Fixkosten zu Gesamtkosten kleiner würde, wenn sich der zu beobachtende Trend zu einem verstärkten Einsatz von pflanzlichen Proteinen in der Ernährung fortsetzen wird. Dies zumal auch deshalb, weil Sojaproteinen besondere funktionelle Eigenschaften verliehen werden können, die sie für die Herstellung von Lebensmitteln mit fleischähnlicher Textur prädestinieren.

[1] LIU, K.: Soybeans Chemistry, Technology, and Ulilization. Chapman & Hall, New York, USA (1997).

[2] Lange-Ernst, M., Die Sojabohne, Herbig Verlagsbuchhandlung, München, Berlin, (1987).

[3] BELITZ, H.D., GROSCH, W.: Lehrbuch der Lebensmittelchemie. 4., überarb. Aufl.; Springer-Verlag, Berlin (1992).

[4] STEINHART, H.: Charakterisierung der Produkte aus der Sojaverarbeitung. In: Meuser, F., Suckow, P. (Hrsg.): Sojaprodukte Herstellung und Verwendung. Vorträge 1. Hamburger Soja-Tagung, Berlin (1986), 25-46.

[5] SNYDER, H.E.: Soybean Utilization. AVI Book, New York (1987).

[6] FAOSTAT DATA, 2006; letztes Update 24. April 2006; http://faostat.fao.org/.

[7] BOCKISCH, M., Handbuch der Lebensmitteltechnologie, Nahrungsfette und –öle, Ulmer, Stuttgart, (1993).

[8] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO) Commerce Yearbooks FAO, Rome, (2004).

[9] GASSMANN, B.: Preparation and application of vegetable proteins from sunflower seed for human consumption, An approach, Nahrung, 27, (1983), 351.

[10] BROWN, L.R., Moving up the Food Chain efficiently. In Outgrowing the Earth: The Food Security Challenge in an Age of Falling Water Tables and Rising Temperatures (NY: W.W. Norton & Co., 2005). © Earth Policy Institute, (2005).

[11] BOCKISCH, M.: Nahrungsfette und –öle. Ulmer, Stuttgart (1993).

[12] WOERFEL, J.B.: Extraction. In: Erickson, D.R. (Ed.): Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization. AOCS Press, Champaign, Illinois, USA (1995), 65-92.

[13] TÄUFEL, A., TERNES, W., TUNGER, L., ZOBEL, M.: Lebensmittellexikon. 3., neu-bearb. und aktualisierte Aufl.; Behr,s Verlag, Hamburg (1993).

[14] COATS, H.B., KARNOFSKY, G.: Solvent Extraction II. The Soaking Theory of Extraction. JAOCS 2(1950), 51-53.

[15] JOHNSON, L.A., LUSAS, E.W.: Comparison of Alternative Solvents for Oil Extraction. JAOCS 60(1983), 183-193.

[16] LUSAS, E.W., KOSEOGLU, S.S., RHEE, K.C., WATKINS, L.R., HERNANDEZ, E., DOTY, S.C., JOHNSON JR., W.H., RIAZ, M.N.: Progress in IPA Extraction. Oil Mill Gaz. 101(1995), 24-34.

[17] HRON, R.J., ABRAHAM, G., KUK, M.S., FISHER, G.S.: Acidic Ethanol Extraction of Cottonseed. JAOCS 69(1992), 951-953.

[18] MATSUZAKI, N., OSHIMA, T., NISHIOKA, A.: Process for Extracting Oil and Fat. US Patent 4486353, (1984).

[19] LUSAS, E.W., WATKINS, L.R., KOSEOGLU, S.: Isopropyl Alcohol to be Tested as Solvent. INFORM 2(1991), 970-976.

[20] BAKER, E.C., SULLIVAN, D.A.: Development of a Pilot-Plant Process for the Extraction of Soy Flakes with Aqueous Isopropyl Alcohol. JAOCS 60(1983), 1271-1276.

[21] LUSAS, E.W., WATKINS, L.R., KOSEOGLU, S., RHEE, K.C., HERNANDEZ, E., RIAZ, M.N., JOHNSON JR., W.H., DOTY, S.C.: New Isopropanol System Shows Promise. INFORM 5(1994), 1245-1253.

[22] LUSAS, E.W., WATKINS, L.R., KOSEOGLU, S., RHEE, K.C., HERNANDEZ, E., RIAZ, M.N.; JOHNSON JR., W.H., DOTY, S.C.: Final Report: IPA as an Extraction Solvent. INFORM 8(1997), 290-306.

[23] GARCIA SERRATO, A.: Extraktion of Oil from Soybeans. JAOCS 58(1981), 157-159.

[24] BECKER, K.W.: Processing of Oilseed to Meal and Protein Flakes. JAOCS 48(1971), 299-304.

[25] MUSCHIOLIK, G.: Proteinprodukte als funktionelle Lebensmittelkomponenten (I). Lebensmitteltechnik 23(1991), 630-636.

[26] MUSCHIOLIK, G.: Proteinprodukte als funktionelle Lebensmittelkomponenten (II). Lebensmitteltechnik 23(1991), 701-707.

[27] MIETH, G., POHL, J., BRÜCKNER J., KROLL, J.: Untersuchungen zur gleichzeitigen Gewinnung von Proteinen und Fetten aus Ölsamen. 1. Mitt. Verfahrensprinzip. Nahrung 19(1975), 955-960.

[28] MIETH, G., POHL, J., BRÜCKNER J., KROLL, J.: Untersuchungen zur gleichzeitigen Gewinnung von Proteinen und Fetten aus Ölsamen. 2. Mitt. Alternativvarianten. Nahrung 29(1985), 449-454.

[29] ROSENTHAL, A., PYLE, D.L., NARANJAN, K., GILMOUR, S., TRINCA, L.: Combined Effect of Operational Variables and Enzyme Activity on Aqueous Enzymatic Extraction of Oil and Protein from Soybean. Enzyme Microbial Techn. 28(2001), 499-509.

[30] ROSENTHAL, A., PYLE, D.L., NIRANJAN, K.: Simultaneous Aqueous Extraction of Oil and Protein from Soybean: Mechanisms for Process Design. Food and Bioprod. Proc. 76(1998), 224-230.

[31] LAWHON, J.T., MANAK, L.J., RHEE, K.C., LUSAS, E.W.: Combining Aqueous Extraction and Membrane Isolation Techniques to Recover Protein and Oil from Soybeans. J. Food Sci. 46(1981), 912-913.

[32] RHEE, K.C., CATER, C.M., MATTIL, K.F.: Simultaneous Recovery of Protein and Oil from Raw Peanuts in an Aqueous System. J. Food Sci. 37(1972), 90-93.

[33] DR. FRISCHE GMBH: Verfahren zur Gewinnung von nicht wasserlöslichen, nativen Produkten aus Stoffgemengen mit Hilfe der Zentrifugalkraft. DP 19529795, (1998).

[34] ANONYM: Friolex Process from Westfalia - A New Process in Oil Recovery. Oils Fats Inter. 14(1998), 32-33.

[35] GEA WESTFALIA SEPARATOR AG: Friolex- Innovatives Verfahren zur Gewinnung hochwertiger pflanzlicher und tierischer Öle und Fette. Firmenschrift GEA Westfalia Separator AG (1997).

[36] GEA WESTFALIA SEPARATOR AG: Revolutionäres Ölgewinnungsverfahren. Fir-menschrift GEA Westfalia Separator AG (1997).

[37] MEUSER, F., FUHRMEISTER, H. U. DAZERT, D.: Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Herstellung von Sojaproteinprodukten aus Sojamahlprodukten. Endbricht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 12096 N, (2001).

[38] MEUSER, F., FUHRMEISTER, H., DAZERT, D. UND NATSCH, A.: Hexanfrei zum Protein - Entwicklung eines neuen Herstellungsverfahrens für Sojaproteinprodukte. Lebensmitteltechnik 12 (2002).

[39] Dazert, D.: Untersuchung der Entölbarkeit von Sojamehl zur Herstellung von Sojaproteinprodukten. Dissertation. TU Berlin (2004).

[40] CENTRAL SOYA COMPANY: Soy Flour Product Line Summary, Central Soya Co., Ft. Wayne, USA, (1988).

[41] CHICAGO BOARD OF TRADE (CBOT): Agricultural Products, Soybeans, Historical Data (2005), http://www.cbot.com/.

[42] WORLD BANK: World Development Indicators 2002, (2002), http://www.worldbank.org/.

[43] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA): Official U.S. grading standards for grain, Washington, DC, (1993), http://www.usda.gov/.

[44] IMGRABEN, H.J.: Anbauanleitung für Sojabohnen. In amtliche Anbauempfehlungen vom Regierungspräsidium Freiburg i. Br. für den Standort Deutschland, (2000).

[45] NOEL, G.R.: History, Distribution and economics. In Riggs, R.D., Wrather, J.A.: Biology and management of the soybean cyst nematode, APS Press, St. Paul, Mn., (1992), 8-10.

[46] OERKE, E.-C., STEINER, U.: Ertragsverluste und Pflanzenschutz. Die Anbausituation für die wirtschaftlich wichtigsten Kulturpflanzen. Schriftenreihe der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft, Band 6, Ulmer Verlag, Stuttgart, 1996).

[47] STOCK, H.G.: Ertragsverluste und Ertragpotential von Sojabohnen auf einem ostdeutschen Standort. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. (39. Jahrestag. der Ges. Pflanzenbauwiss. in Zürich), (1995), 191-198.

[48] WOERFEL, J.B.: HARVEST, STORAGE, HANDLING AND TRADING OF SOYBEANS. IN Erickson, D.R.: Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization, AOCS Press, Champaign, Illinois, (1995), 39-55.

[49] PERKINS, E.G.: Composition of Soybeans and Soybean Products. In Erickson, D.R.: Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization, AOCS Press, Champaign, Illinois, (1995), 9-28.

[50] SMITH, A.K., AND CIRCLE, S.J.: Soybeans: Chemistry and Technology, Vol. 1, Proteins, AVI Publishing Co., Westport, CT, (1972).

[51] WOLF, W.J. AND COWAN, J.C: Soybeans as a Food Source, CRC Press, Boca Raton, Florida, (1975).

[52] WOLF, W.J., BAKER, F.L.: Scanning Electron Microscopy of Soybeans. Cereal Sci. Today 17(1972), 125-130.

[53] WOLF, W.J., BAKER, F.L.: Scanning Electron Microscopy of Soybeans, Soy Flours, Protein Concentrates, and Protein Isolates. Cereal Chem. 52(1975), 387-396.

[54] FRANZKE, C.: Allgemeines Lehrbuch der Lebensmittelchemie. 3. Aufl.; Behr,s Verlag, Hamburg (1996).

[55] SCHUSTER, W.: Sojabohne. In: Hoffmann et al.: Lehrbuch der Züchtung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Band 2, Paul Parey Verlag, Berlin, (1985).

[56] WOLF, W.J.: Soybean Protein. Their Functional, Chemical, and Physical Properties. J. Agr. Food Chem. 18 (1970), 969-976.

[57] ZELLER, F.J.: Die Sojabohne (Glycine max (L.) Merr.): Nutzung, Genetik, Biotechnologie. Die Bodenkultur, Austrian Journal of Agricultural Research, 50, 3, (1999), 191-200.

[58] KINSELLA, J.E.: Functional properties of soy proteins. J. Amer. Oil Chemists' Soc. 56 (1979), 242.

[59] ZAYAS, J.F.: Functionality of Proteins in Food. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (1997).

[60] SVEDBERG T., FÄHRAEUS R. A.: A new Method for the Determination of the Molecular Weight of the Proteins. J Amer Chem Soc 48: 430 – 438, (1926).

[61] NIELSEN, S.S.: Digestibility of Legume Proteins. Food Technol. 45(1991), 112-118.

[62] CHERYAN, M.: Phytic Acid Interactions in Food Systems. CRC Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 13(1980), 297-335.

[63] CARNOVALE, E., LUGARO, E., LOMBARDI-BOCCIA, G.: Phytic Acid in Faba Bean and Pea. Effect on Protein Availability. Cereal Chem. 65(1988), 114-117.

[64] KRIKONAN, A.D., SINGH, M.: Inhibition of Trypsin Activity by Phytate. J. Agric. Food Chem. 30(1982), 799-800.

[65] LIENER, I.E.: Implications of Antinutritional Components in Soybean Food. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 34(1994), 31-67.

[66] PRYDE, E.H.: Composition of soybean oil. In Ericksson, D.R., Pryde, E.H., Brekke, O.L., Mounts, T.L. and Falb, R.A.: Handbook of Soy Oil Processing and Utilization, American Oil Chemists' Society, Champaign, Illinois, (1980).

[67] BREKKE, O.L.: Oil degumming and soybean lecithin. In Ericksson, D.R., Pryde, E.H., Brekke, O.L., Mounts, T.L. and Falb, R.A.: Handbook of Soy Oil Processing and Utilization, American Oil Chemists' Society, Champaign, Illinois, (1980).

[68] LUSAS, E.W., WATKINS, L.R., KOSEOGLU, S.: Isopropyl Alcohol to be Tested as Solvent. INFORM 2(1991), 970-976.

[69] BAKER, E.C., SULLIVAN, D.A.: Development of a Pilot-Plant Process for the Extraction of Soy Flakes with Aqueous Isopropyl Alcohol. JAOCS 60(1983), 1271-1276.

[70] LUSAS, E.W., WATKINS, L.R., KOSEOGLU, S., RHEE, K.C., HERNANDEZ, E., RIAZ, M.N., JOHNSON JR., W.H., DOTY, S.C.: New Isopropanol System Shows Promise. INFORM 5, (1994), 1245-1253.

[71] SOUCI, S.W., FACHMANN, W. UND KRAUT, H.: Die Zusammensetzung der Lebensmittel. Nährwert-Tabellen 1986/87, Wiss. Verlags-Gesellsch.; Stuttgart, (1986).

[72] LASZTITY, R.: Technofunktionelle Eigenschaften von Lebensmittelproteinen. Int. Zeitschrift für Lebensmitteltechnologie und -verfahrenstechnik (ZFL) 40 (1989), 174-179.

[73] KINSELLA, J.E.: Functional Properties of Soy Proteins. JAOCS 56(1979), 242-258.

[74] MUSCHIOLIK, G.: Proteine als mehrfunktionale Zusatzstoffe in diätetischen Lebensmitteln. Ernährungsforschung 36(1991), 147-152.

[75] CHEFTEL, J.C.: Lebensmittelproteine. 1.Aufl.; Behr,s Verlag, Hamburg (1992).

[76] WAGNER, J.R., ANON, M.C.: Influence of Denaturation, Hydrophobicity and Sulf-hydryl Content on Solubility and Water Absorbing Capacity of Soy Protein Isolates. J. Food Sci. 55(1990), 765-770.

[77] GUEGUEN, J.: Struktur und funktionelle Eigenschaften von Proteinen. ZFL 40(1989), 421-430.

[78] SIPOS, E.F.: Herstellung, Beschreibung und Verwendung von Sojakonzentraten und Sojamehlen. American Soybean Association, Hamburg, (1982).

[79] DEL VALLE, F.R.: Nutritional acualities of soya protein as affected by processing. J. Amer. Oil Chemists' Soc. 58(1981), 419.

[80] BIESALSKI, H.K., GRIMM, P.: Taschenatlas der Ernährung, Georg Thieme Verlag Stuttgart, (1999).

[81] FAO/WHO: Protein Quality Evaluation, Report of the Joint FAO/WHO Expert Consultation. Rome: FAO Food and Nutrition Paper No. 51 (1991).

[82] LEE, W.J.: Phytic Acid Content and Phytase Activity of Barley Malt. J. Am. Soc. Brewing Chemists 48(1990), 62-65.

[83] WEBER, K.: Soybean Oil Extraction Plant. In Bartholomai, A.: Food Factories. Verlag Chemie, Weinheim, (1987).

[84] 2004 SOYA & OILSEED BLUEBOOK: Soya Products and Uses. Soyatech Inc., Bar Harbor, ME, (2004), http://www.soyatech.com.

[85] 2004 SOYA & OILSEED BLUEBOOK: Soybean Processing: Extrusion/Expelling, Full Fat and Solvent Extraction. Soyatech Inc., Bar Harbor, ME, (2004), http://www.soyatech.com.

[86] BARGER, W.M.: Handling, Transport, and Preparation of Soybeans. JAOCS 58(1981), 154-156.

[87] BENEDICKT, G.: Verwendung von Sojaerzeugnissen zur Herstellung von Backwaren. In Meuser, F.: Sojaprodukte; Herstellung und Verwendung, Schriftenreihe aus dem Fachgebiet Getreidetechnologie 8, Berlin, (1986).

[88] EX-TECHNIK, EXTRAKTIONSTECHNIK.: Ein neues Verfahren zur Entbenzinierung von Schroten unter Erhaltung de Wasserlöslichkeit des Proteins. Vortrag DGF-Tagung, Münster, (1968).

[89] COWAN, J.C.: Degumming, Refining, Bleaching and Deodorization Theory. J. Am. Oil Chem. Soc. 53(1976), 344-346.

[90] BERNARDINI, E.: Oilseeds, Oils and Fats. Publishing House, Rom, (1985).

[91] GEA WESTFALIA SEPARATOR FOOD TEC GMBH: Processing Lines for the Edible Oil Industry. Firmenschrift GEA Westfalia Separator AG (2006), http://www.westfalia-separator.com.

[92] LURGI AG: Entschleimung von pflanzlichen Ölen und Fetten. Firmenschrift Lurgi AG (2006), http://www.lurgi.com.

[93] ERICKSON, D.R.: Neutralization. In Erickson, D.R.: Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization, AOCS Press, Champaign, Illinois, (1995), 184-202.

[94] ERICKSON, D.R.: Bleaching/Adsorption Treatment. In Erickson, D.R.: Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization, AOCS Press, Champaign, Illinois, (1995), 203-217.

[95] DGF GEMEINSCHAFTSARBEIT: Die Dämpfung von Speisefetten und-ölen zur Desodorierung und Entsäuerung. Fette, Seifen, Anstrichmittel, 83(1981), 89-97, 90(1988), 207-210, 91(1989), 7-14, 91(1989), 253-260, 91(1989), 452-456.

[96] AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY: The Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society, 4th ed., Champaign, USA (1993).

[97] HARBURG-FREUDENBERGER MASCHINBAU GMBH: Extraktion. Firmenschrift der Harburg-Freudenberger Maschinenbau GmbH (2005), http://www.harburg-freudenberger.com/.

[98] BÜHLER AG: Ölmüllerei: Effiziente und wirtschaftliche Ölsaatenaufbereitung. Firmenschrift der Bühler AG (2004), http://www.buhlergroup.com/.

[99] MOORE, N.H.: Oilseed Handling and Preparation prior to Solvent Extraction. J. Am. Oil Chem. Soc., 60(1983).

[100] CROWN IRON WORKS COMPANY: Hot Dehulling. Firmenschrift der Crown Iron Works Company (2005), http://www.crowniron.com/.

[101] SATTLER, K.: Thermische Trennverfahren; Grundlagen, Auslegung, Apparate. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1988).

[102] KEHSE, W.: Fest-Flüssig-Extraktion mit dem Karussell-Extrakteur. Chemiker-Zeitung/Chemische Appartur/Verfahrenstechnik 2000 (1986).

[103] BERK, Z.: Technology of Production of Edible Flours and Protein Products from Soybeans. FAO Agricultural Services Bulletin No. 97, Rom, (1992).

[104] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION: Solvent Extraction Plants. NFPA 36, Quincy, USA (1993).

[105] KINGSBAKER, C.L.: Solvent Extraction Techniques for Soybeans and Other Seeds: Desolventizing and Toasting. JAOCS 47(1970), 458-460.

[106] AMERICAN SOYBEAN ASSOCIATION: Reference Guide, Weekly Update. ASA, St. Louis, USA (2005), http://www.soygrowers.com/.

[107] KRÖNER, G. (KRÖNER-STÄRKE): Persönliche Mitteilung (2005).

[108] GEA WESTFALIA SEPARATOR INDUSTRY GMBH: Persönliche Mitteilung (2005).

[109] AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY: PDI; AOCS Official Method Ba-10-65. The Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society, 4th ed., Champaign, USA (1993).

[110] AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY: NSI; AOCS Official Method Ba-11-65. The Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society, 4th ed., Champaign, USA (1993).

[111] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: EN ISO 3947, Bestimmung des Stickstoffgehalts nach dem Kjeldahl-Verfahren, (1981).

[112] CENTRAL SOYA COMPANY: Soy Flour Product Line Summary. Central Soya Co., Ft. Wayne, USA (1988).

[113] LUSAS, E.W., RHEE, K.C.: Soybean Protein Processing and Utilization. In: Erickson, D.R. (Ed.): Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization. AOCS Press, Champaign, Illinois, USA (1995), 117-160.

[114] AMERICAN SOYBEAN ASSOCIATION: Soy Protein Concentrate Reference Guide. ASA, St. Louis, USA (2005), http://www.soygrowers.com/.

[115] BEERY, K.E.: Preparation of Soy Protein Concentrate Products and their Application in Food Systems. In: Applewhite, T.H. (Ed.): Proceedings of the World Congress on Vegetable Protein Ulilization in Human Foods and Animal Stuffs. AOCS Press, Champaign, Illinois, USA (1989), 62-65.

[116] HOWARD, P.A., CAMPBELL, M.F., ZOLLINGER, D.T.: Water-Soluble Vegetable Protein Aggregates. US Patent 4234620, (1980).

[117] GEA WESTFALIA SEPARATOR INDUSTRY GMBH: Proteine aus nachwachsenden Rohstoffen. Firmenschrift GEA Westfalia Separator AG (2005), http://www.westfalia-separator.com.

[118] COGAN, U., YARON, A., BERK Z. AND S. MIZRAHI: Isolation of Soybean Protein: Effect of Processing Conditions on Yield and Purity. J. Am. Oil Chem. Soc. 44(1967), 321.

[119] GEA WESTFALIA SEPARATOR INDUSTRY GMBH: Hochleistungs-Dekanter CB 50. Das Leistungspaket. Firmenschrift GEA Westfalia Separator AG (2005), http://www.westfalia-separator.com.

[120] WITT, W., SEILER, M. U. MEUSER, F.: Process Design for a combined Extraction of Oil and Protein from Soya. China & International Soy Conference & Exhibition (CISCE), Peking, China (2002).

[121] MEUSER, F., DAZERT, D. U. FUHRMEISTER, H.: Production of Soya Proteins by a New Process. China & International Soy Conference & Exhibition (CISCE), Peking, China (2002).

[122] MEUSER, F. U. DAZERT, D.: Herstellung von Sojaproteinprodukten aus wässrig-alkoholisch entöltem Sojamehl. Endbricht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 13233 N – Anschluss zu AIF-FV Nr. 12096 N, (2003).

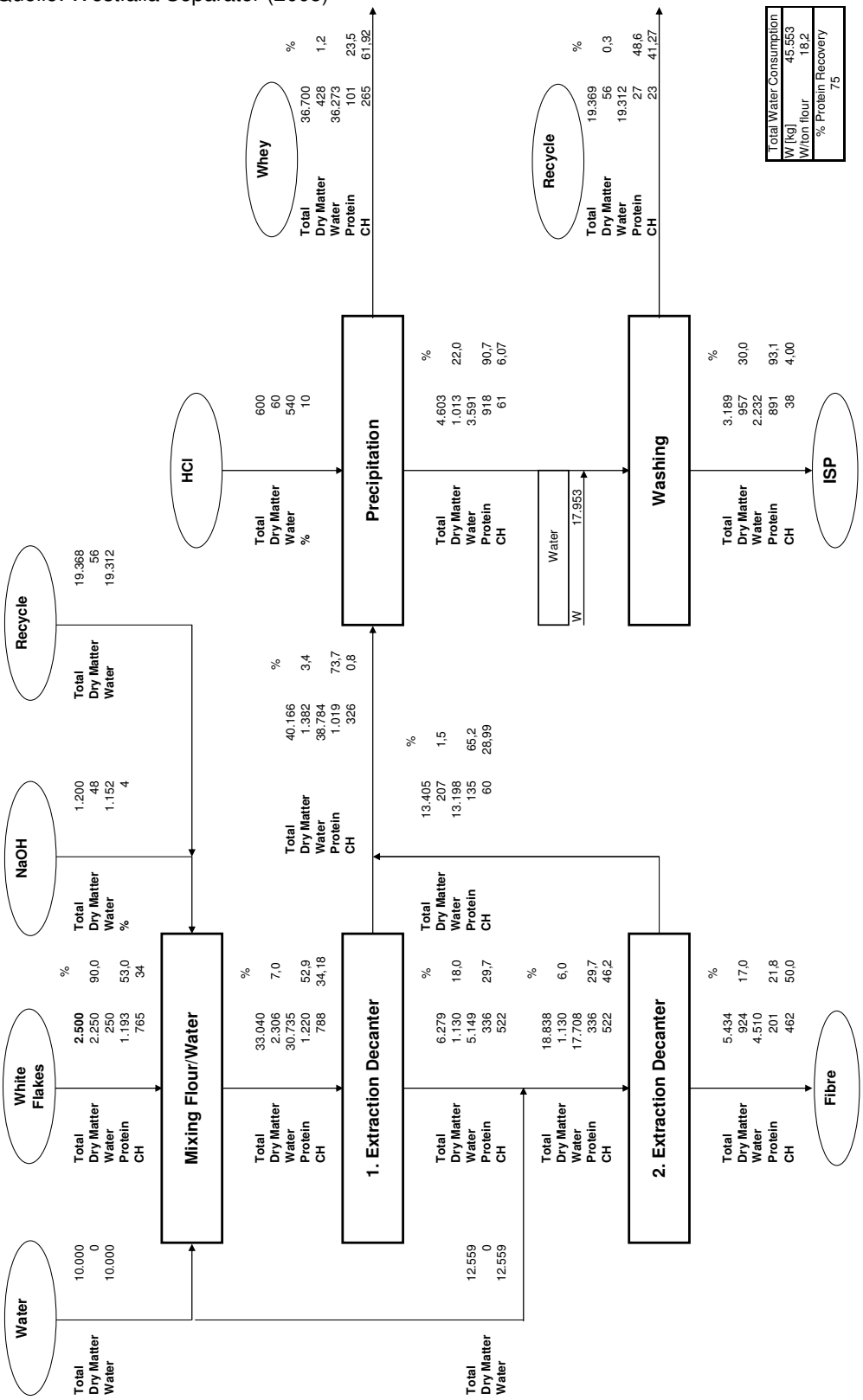
[123] BARTHOLOMAI, A.: Food Factories, Processes, Equipment, Costs. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1987).

[124] FIALA, R.J.: Cost Estimates for Soybean Processing and Soybean Oil Refining. In Erickson, D.R.: Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization. AOCS Press, Champaign, Illinois, USA (1995), 519-535.

[125] WEBER, K.: Soybean Extraction Plant. In Bartholomai,A.: Food Factories, Processes, Equipment, Costs. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1987), 231-235.

A1: Vereinfachte Massenbilanz für den Prozess zur Herstellung von SPI

Quelle: Westfalia Separator (2005)



A2: Pilotversuch II; Versuchsreihe: 10.3-12.3.2003

Probe	TS-%	Öl-% (in Einw.)	Öl-% (inTS)	Protein (in Einw.)%	Protein (in TS)%
Mehl	94,07	20,90	22,22	37,70	40,08
III/1n.Homo	23,89	5,39	22,56	9,52	39,85
Oberlauf III	15,83	7,97	50,35	3,34	21,10
Feststr. III/1	33,59	1,10	3,28	17,99	53,56
Feststr. III/2	34,78	1,13	3,25	18,01	51,78
Roh IV	19,68	0,65	3,30	10,63	54,01
Feststr. IV/2	28,49	0,50	1,76	16,25	57,04
Oberlauf IV/2	4,59	0,74	16,12	1,22	26,58
Roh V	10,99	0,31	2,82	6,17	56,14
Feststr. V/1	27,20	0,80	2,94	15,83	58,20
Oberlauf V/1	1,91	0,38(0,42)	19,90(22,0)	0,40	20,94
Roh VI	10,80	0,21	1,94	6,19	57,32
Feststr. VI/2	26,12	0,40	1,53	17,70	67,76
Oberlauf VI/2	0,71	0,19(0,16-Gerb)	26,76	0,07	9,86
Roh VII	7,18	0,23(0,15-Gerb.)	3,20	3,91	54,46
Feststr. VII/2	16,25	0,16	0,99	5,01	30,83
Oberlauf VII/2	4,86	(0,05%-Gerb.)		3,78	77,78
Roh VIII	4,93	-	-	3,70	75,05
Feststr. VIII/2	22,09	0,43	1,95	19,00	86,01
Oberlauf VIII/2	1,15	-	-	0,28	24,35
Roh IX a	4,29	-	-	3,56	82,98
Feststr. IX/2	19,47	0,32	1,64	17,23	88,50
Oberlauf IX/2	0,60	-	-	0,22	36,67
Ver.I/resuspend.*	87,87	2,69	3,06	47,65	54,22
Ver.III/resusp.*	89,87	2,33	2,59	48,84	54,34
Vers.VIII*(III/1)	87,73	1,40	1,60	51,16	58,32
Vers. VIII*(III/2)	87,48	1,34	1,53	50,97	58,27
Fest.IX/1+IX/2*	87,66	0,46	0,53	74,29	84,75

* getrocknete Produkte (Versuch VIII: Feststr.V -44%; Feststr.VI- 85%) bei der Fa. Jäckering / Hamm

Versuchsaufgabe:
Weiterführende Versuche zur Gewinnung von Sojaprotein. Verbesserung der Ausbeuten durch direktes Vermischen und Homogenisieren der Mehl- Alkohollösung vor der Trennstufe. Mit diesen Versuchen sind für die nachfolgenden Trocknungsstufen verschiedene Proteine, im einzelnen aus dem SPC und dem SPI Prozess herzustellen.

A3: Pilotversuch III; Versuchsreihe: 7.7-9.7.2003

Probe	TS – Ma%	Protein% (a.Einw.)	Protein% (auf TS)	Ölgehalt % (auf Einw.)		Ölgehalt % (auf TS)	
				mit Hydrolyse	ohne Hydrolyse	mit Hydrolyse	ohne Hydrolyse
I/2 n.Homo II	26,31	10,53	40,02	6,17	5,90	23,45	22,43
I/2 Feststoff	33,66	17,80	52,88	1,29	0,67	3,83	1,99
I/2 Öl/Alkohol	22,31	4,04	18,11	11,81	11,55	52,94	51,77
Roh II	-	-	-	-		-	
II/2 Konzentrat	12,82	6,11	47,66	0,89	0,31	6,94	2,42
II/2 Mittelph.	11,20	3,91	34,91	1,98	1,36	15,45	12,14
II/2 ÖL	85,38						
III/2 n.Homo	23,95	12,00	50,10	1,30	0,87	5,43	3,63
III/2 Feststoff	28,35	14,78	52,13	0,66	0,24	2,33	0,85
III/2Öl/Alkoh.	14,63	6,54	44,70	2,18	1,79	14,90	12,24
Roh IV	15,67	6,89	43,97	2,53	2,19	16,15	13,98
IV/1 Konzentr.	13,24	8,66	65,41	0,83	0,30	6,27	2,26
IV/1 Mittelph.	16,88	5,89	34,89	1,51	1,05	8,95	6,22
IV/1 Öl	24,17	2,71	11,21	16,74	-	41,58	-
Roh V	6,97	3,53	50,65	0,17	0,03	2,44	0,43
V/2 Feststt.	16,32	5,27	32,27	0,18	0,02	1,10	0,12
V/2 Oberlauf	4,99	3,11	62,33	0,15	n.n.	3,00	n.n.
Roh VI	5,08	3,11	61,22	0,16	n.n.	3,15	n.n.
VI/2 Feststt.	20,62	16,73	81,15	1,04	0,08	5,04	0,38
VI/2 Oberlauf	2,05	0,38	18,54	n.n.		n.n.	
Roh VII	9,38	7,60	81,02	0,47	n.n.	5,01	n.n.
VII/1 Feststt.	18,31	15,51	84,71	0,92	0,02	5,02	0,11
VII/1Oberlauf	1,23	0,61	49,60	n.n.	-	n.n.	-
Roh VIII	7,05	3,53	50,07	0,18	0,09	2,55	1,28
VIII Feststt.	26,17	15,76	60,22	0,84	0,24	3,21	0,92
VIII Oberlauf	1,80	0,33	18,33	-	-	-	-
Roh IX	7,43	4,42	59,49	0,24	0,11	3,23	1,48
IX Feststt.	25,94	16,20	62,45	0,89	-	3,43	-
IX Oberlauf	0,44	0,11	25,00	n.n.	-	n.n.	-
Entöl.rückstand	95,05	50,80	53,45	2,24	0,81	2,36	0,85

Versuchsaufgabe:

Weiterführende Versuche zur Gewinnung von Sojaprotein. Verbesserung der Ausbeuten durch direktes Vermischen und, im Vergleich zu den vorherigen Versuchen, ein zweistufiges Homogenisieren der Mehl- Alkohollösung vor der Trennstufe.

Mit diesen Versuchen sind für die nachfolgenden Trocknungsstufen verschiedene Proteine, im einzelnen aus dem SPC und dem SPI Prozess und eine entsprechende Massenbilanz herzustellen.

A4: Pilotversuch IV; Versuchsreihe: 11.10.-15.10.2004

Probe	TS-% Gesam	TS-% Lösl.	Prot- -% Gesamt auf Einw.	Prot.-% Lösl. auf Einw.	Prot.-% Gesamt auf TS	Prot-% Lösl-auf TS	Fett-% auf Einw.	Fett-% auf TS
Mehl	92,84	-	35,92		38,69		22,48	24,21
Zulauf I/2.Homo	25,27	-	9,90		39,18		6,11	24,18
Feststoff Dek. I/1	34,00	-	17,32		50,94		2,26	6,65
Feststoff Dek. I/2	36,49	-	18,48		50,64		2,16	5,92
Feststoff Dek.I Durschnitt	35,26	-	18,19		51,59		2,04	5,79
Oberlauf Dek. I/1	15,72	-	3,60		22,90		3,69	23,47
Oberlauf Dek. I/2	31,09		2,76		8,88		10,31	33,16
Oberlauf Dek. 45min.	16,73	6,57	3,43	0,87	20,50	13,24	4,38	26,18
Rohprobe II	17,02	7,24	3,51	0,97	20,62	13,40	6,73	39,54
Mittelphase II/2	9,68	7,60	3,26	1,54	33,68	20,26	1,23	12,71
Konzentrat II/2	10,65	-	4,42		41,50		0,91	8,55
Öl II/2	72,89	-	1,03		1,41		29,83	40,91
Rohpr.III, n.Homo+Mischer	21,44	-	10,35		48,27		1,58	7,37
Oberlauf III/2	12,00	-	4,26		35,50		2,65	22,08
Feststoff III/2	29,06	-	15,58		53,61		0,80	2,75
Rohprobe IV	11,77	-	4,25		36,11		2,19	18,61
Mittelphase IV/2	10,13	9,82	3,81	3,53	37,61	35,94	1,08	10,66
Konzentrat IV/2	12,40	-	5,72		46,13		0,76	6,13
Öl IV	33,26	-	1,85		5,56		7,60	22,85
Roh V v.pH-Versch.	7,26	2,62	3,58	0,81	49,31	30,92	0,26	3,58
Roh V pH=9,5	7,22	4,69	3,48	2,72	48,20	58,00	0,26	3,60
Oberlauf V/2	5,35	5,24	3,14	3,15	58,69	60,11	0,19	3,55
Feststoff V/2	15,78	-	5,08	-	32,19	-	0,39	2,47
Roh VI	6,25	2,38	2,07	1,48	33,12	62,19	0,16	2,56
Oberlauf VI/2	2,64	2,53	1,69	1,63	64,02	64,43	0,07	2,65
Feststoff VI/2 **(Fasern)**	15,71	-	3,13	-	19,92	-	0,31	1,97
Roh VII	4,82	1,86	2,78	0,27	57,68	14,52	0,20	4,15
Oberlauf VII/2 **(Abwasser)**	2,01	1,92	0,38	0,32	18,91	16,67	n.n.	n.n.
Feststoff VII/2	20,72	-	16,40	-	79,15	-	1,36	6,56
Roh VIII	9,73	0,85	7,61	0,14	78,21	16,47	0,75	7,71
Oberlauf VIII/1 **(Abwasser)**	6,49	0,87	4,90	0,14	75,50	16,09	0,49	7,55
Feststoff VIII/1 **(SPI)**	20,24	-	16,33 (16,80)*	-	80,68 (83,00)*	-	1,59	7,86

* Se+ TiO_2 Katalysator

Versuchsaufgabe:

Weiterführende Versuche zur Gewinnung von Sojaprotein. Feststellung der Ausbeuten sowie Massenbilanzen durch möglichst exakte Bestimmung der Durchsätze für alle Versuchsabschnitte. Die Produktströme werden dabei inline vermischt und wie zuvor zweistufig homogenisiert.

A5: Kostenabschätzung für die relevanten Anlagenbereiche nach dem konventionellen Verfahren

Kostenabschätzung der Investitionskosten für das konventionelle Verfahren

lfd.Nr.	Anlagenbereich	Bezeichnung	Kostenabschätzung*
1	Mühle	Annahme, Reinigung, Schälung, Flockierung	2.600.000 €
2	Ölextraktion	Extraktion, Desolventieren, Rückgewinnung, Destillation	2.300.000 €
3	Proteinisolierung	Extraktion, Prezipitation, Pasteurisierung, Präparation	5.000.000 €
4	Sprühtrocknung	Speisesystem, Zerstäuber, Heizsystem, Trocknungsturm	2.700.000 €
5	Trockner Nebenprodukt	Mischsystem, Brecher, Heizsystem, Filtersystem	1.400.000 €
Summe 1-5			**14.000.000 €**
6	Versorgung	Druckluftsystem, Abwasserbehandlung, Gasversorgung, Stromversorgung	1.500.000 €
Summe 1-6			**15.500.000 €**

* inklusive Rohrleitungen, Kabelmaterial, Meß- und Regelgeräte, MKK/PLS Überwachung Aufstellung/Verrohrung/Verkabelung/Inbetriebnahme, Training

A6: Kostenabschätzung für die relevanten Anlagenbereiche nach dem neuen Verfahren

Kostenabschätzung der Investitionskosten für das neue Verfahren

lfd.Nr.	Anlagenbereich	Bezeichnung	Kostenabschätzung*
1	Mühle	Annahme, Reinigung, Schälung, Vermahlung	950.000 €
2	Rohölabtrennung	Extraktion, Desolventieren, Rückgewinnung, Destillation	1.900.000 €
3	Proteinisolierung	Extraktion, Prezipitation, Pasteurisierung, Präparation	5.000.000 €
4	Sprühtrocknung	Speisesystem, Zerstäuber, Heizsystem, Trocknungsturm	2.700.000 €
5	Trockner Nebenprodukt	Mischsystem, Brecher, Heizsystem, Kondensation, Filtersystem	1.650.000 €
6	IPA Rückgewinnung	Verdampfung, Destillation	800.000 €
Summe 1-5			**13.000.000 €**
6	Versorgung	Druckluftsystem, Abwasserbehandlung, Gasversorgung, Stromversorgung	1.500.000 €
Summe 1-6			**14.500.000 €**

* inklusive Rohrleitungen, Kabelmaterial, Meß- und Regelgeräte, MKK/PLS
Engineering, Überwachung Aufstellung/Verrohrung/Verkabelung/Inbetriebnahme, Training

A7: Abschätzung für den Raum- und Flächenbedarf und die Gebäudekosten für das konventionelle und neue Verfahren

Konventionelles Verfahren

		Büro	Mühle	Hexan-Extraktion	Proteinlinie	Sprüh-trockner	Futter-trockner	Verdampfer	Total
Umbauter Raum	Nm^3	1200	4500	6000	6000	5760	4320	750	**27.570**
Flächenbedarf	m^2	400	300	600	600	288	288	150	**2.626**
Kosten / Nm^3 *	100 €	360.000 €	450.000 €	600.000 €	600.000 €	480.000 €	432.000 €	75.000 €	**2.997.000 €**

Neues Verfahren

		Büro	Mühle		Entölung Proteinlinie	Sprüh-trockner	Futter-trockner	Verdampfer	Total
Umbauter Raum	Nm^3	1200	4500	./.	6500	5760	4320	750	**22.570**
Flächenbedarf	m^2	400	300	./.	700	288	288	150	**2.126**
Kosten / Nm^3	100 €	360.000 €	450.000 €	./.	700.000 €	480.000 €	432.000 €	75.000 €	**2.497.000 €**

* Ausgangsbasis Stahlbau mit einfacher Installation und Isolation

A7: Abschätzung für den Bedarf und die Kosten an Verbrauchsmaterialien für das konventionelle und neue Verfahren

Abschätzung des Bedarfs* an Verbrauchsmaterialien nach dem konventionellen Verfahren

	Kosten/Unit	Unit	Mühle	Hexan-Extraktion	Proteinlinie	Sprüh-trockner	Futter-trockner	Verdampfer	Total	
			[Units]	[Units]	[Units]	[Units]	[Units]	[Units]	[Units]	[€]
Strom	**0,138**	kWh	110,0	30,0	252,0	80,0	260,0	30,0	762,0	105,00 €
Strom, Verbrauch	**0,138**	80%	88,0	22,1	145,2	16,1	44,9	6,0	322,3	44,42 €
Gas	**0,200**	Nm^3				17,6			17,6	3,53 €
Dampf	**0,015**	kg	100,0	276,0	234,0	37,8	453,6	756,0	1.857,4	27,86 €
Druckluft	**0,010**	Nm^3	60,0	27,6	3,6	75,6	28,1		194,9	1,95 €
Wasser	**0,002**	l		9.200,0	12.240,0				21.440,0	42,88 €
Hexan	**0,714**	kg		2,0					2,0	1,43 €
NaOH	**0,200**	kg			10,0				10,0	2,00 €
HCl	**0,200**	kg			10,0				10,0	2,00 €
Sonstiges									0,0	
Summe										**126,06 €**

Abschätzung des Bedarfs* an Verbrauchsmaterialien nach dem neuen Verfahren

	Kosten/Unit	Unit	Mühle	Entölung	Proteinlinie	Sprüh-trockner	Futter-trockner	Verdampfer	Total	
			[Units]	[Units]	[Units]	[Units]	[Units]	[Units]	[Units]	[€]
Strom	**0,138**	kWh	70,0	440,5	350,0	20,2	260,0	30,0	1170,66	161,31695
Strom, Verbrauch	**0,138**	0,8	56,0	324,2	201,6	16,1	44,9	24,0	666,9	91,89 €
Gas	**0,200**	Nm^3				17,6			17,6	3,53 €
Dampf	**0,015**	kg	100,0		234,0	37,8	453,6	756,0	1.581,4	23,72 €
Druckluft	**0,010**	Nm^3	60,0	5,0	3,6	75,6	28,1		172,3	1,72 €
Wasser	**0,002**	l			12.240,0				12.240,0	24,48 €
Hexan	**0,714**	kg							0,0	0,00 €
NaOH	**0,200**	kg			10,0				10,0	2,00 €
HCl	**0,200**	kg			10,0				10,0	2,00 €
Sonstiges										
Summe										**149,35 €**

*** Bedarf an Verbrauchsmaterialien pro 1.000 kg/h Sojabohnen**

A8: Abschätzung des Personalbedarfs und der Lohn- und Gehaltskosten für das konventionelle und neue Verfahren

Konventionelles Verfahren
Personalbedarf bezogen auf die einzelnen Gewerke

	€/Monat	Mühle	Hexan-Extraktion	Proteinlinie	Sprüh-trockner	Futter-trockner	Verdampfer	Sonstiges	TOTAL [€]
ungelernter Arbeiter	2.000	2		3	1	1		2	**9**
angelernter Arbeiter	2.500	4	3	5	2	2	2	3	**21**
ausgebildeter Arbeiter	3.000	2	6	5	2	2	2	3	**22**
Mechaniker	4.000	1	1	1		1			**4**
Elektriker	4.000	1	1	1		1			**4**
Sekreteriat	3.500							3	**3**
Kaufleute	4.000							4	**4**
Administration	5.000							6	**6**
Management	7.500							2	**2**
		28.000	33.500	41.500	13.000	21.000	11.000	92.000	240.000

Neues Verfahren
Personalbedarf bezogen auf die einzelnen Gewerke

	€/Monat	Mühle		Proteinlinie	Sprüh-trockner	Futter-trockner	Verdampfer	Sonstiges	TOTAL [€]
ungelernte Arbeitskraft	2.000	1		4	1	1		2	**9**
angelernte Arbeitskraft	2.500	3		6	2	2	2	3	**18**
ausgebildete Arbeitskraft	3.000	1		6	2	2	2	3	**16**
									0
Mechaniker	4.000	1		1		1			**3**
Elektriker	4.000	1		1		1			**3**
Sekreteriat	3.500							3	**3**
Kaufleute	4.000							4	**4**
Administration	5.000							6	**6**
Management	7.500							2	**2**
		20.500		49.000	13.000	21.000	11.000	92.000	206.500

A9: Vergleichende Zusammenstellung der Kosten für einen Projektzeitraum von 15 Jahren für das konventionelle und das neue Verfahren

Jahr	Overhead*	Administration Marketing	Verbrauchs-materialien	Personal	Rohmaterial	TOTAL [T€]
1	1.885	0	0	928	0	**2.813**
2	2.520	283	155	2.047	1.840	**6.845**
3	2.522	286	315	2.482	3.755	**9.360**
4	2.523	289	322	2.527	3.831	**9.492**
5	2.525	292	328	2.553	3.908	**9.606**
6	2.526	295	332	2.578	3.947	**9.678**
7	2.528	298	335	2.604	3.987	**9.751**
8	2.529	301	338	2.630	4.027	**9.825**
9	2.531	304	342	2.656	4.067	**9.899**
10	2.533	307	345	2.683	4.108	**9.975**
11	1.699	310	348	2.710	4.149	**9.216**
12	651	313	352	2.737	4.190	**8.243**
13	652	316	355	2.764	4.232	**8.320**
14	654	319	359	2.792	4.274	**8.398**
15	656	322	363	2.820	4.317	**8.477**

Jahr	Overhead*	Administration Marketing	Verbrauchs-materialien	Personal	Rohmaterial	TOTAL [T€]
1	1.745	0	0	877	0	**2.622**
2	2.324	289	155	1.988	1.801	**6.557**
3	2.326	292	315	2.422	3.676	**9.031**
4	2.327	294	322	2.466	3.751	**9.161**
5	2.329	297	328	2.491	3.827	**9.272**
6	2.330	300	332	2.516	3.865	**9.343**
7	2.332	303	335	2.541	3.904	**9.415**
8	2.333	306	338	2.566	3.943	**9.487**
9	2.335	309	342	2.592	3.982	**9.560**
10	2.337	313	345	2.618	4.022	**9.634**
11	1.543	316	348	2.644	4.062	**8.914**
12	595	319	352	2.671	4.103	**8.039**
13	596	322	355	2.697	4.144	**8.115**
14	598	325	359	2.724	4.185	**8.192**
15	600	329	363	2.751	4.227	**8.269**

* enhält Kosten für Abschreibung, Wartung, Schulung, Transport, Sonstiges

A10: Abschätzung der Produkterlöse für das konventionellen und das neue Verfahren für einen Projektzeitraum von 15 Jahren

Konventionelles Verfahren

Jahr	Produktions-auslastung	SPI	Rohöl	Nebenprodukt	Schalen	Abwasser	Erlöse
	[%]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[T€]
1	0	0	0	0	0	0	**0**
2	49	3.820	2.615	4.226	1.141	3.169	**4.549**
3	98	7.720	5.283	8.539	2.305	6.403	**9.284**
4	99	7.798	5.336	8.625	2.352	6.534	**9.473**
5	100	7.877	5.336	8.625	2.352	6.534	**9.650**
6	100	7.877	5.336	8.625	2.352	6.534	**9.746**
7	100	7.877	5.336	8.625	2.352	6.534	**9.844**
8	100	7.877	5.336	8.625	2.352	6.534	**9.942**
9	100	7.877	5.336	8.625	2.352	6.534	**10.042**
10	100	7.877	5.336	8.625	2.352	6.534	**10.142**
11	100	7.877	5.336	8.625	2.352	6.534	**10.243**
12	100	7.877	5.336	8.625	2.352	6.534	**10.346**
13	100	7.877	5.336	8.625	2.352	6.534	**10.449**
14	100	7.877	5.336	8.625	2.352	6.534	**10.554**
15	100	7.877	5.336	8.625	2.352	6.534	**10.659**

Neues Verfahren

Jahr	Produktions-auslastung	SPI	Rohöl	Nebenprodukt	Schalen	Abwasser	Erlöse
	[%]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[T€]
1	0	0	0	0	0	0	**0**
2	49	3.697	2.561	4.354	1.141	3.169	**4.526**
3	97	7.471	5.175	8.797	2.305	6.403	**9.236**
4	98	7.547	5.227	8.886	2.352	6.534	**9.425**
5	99	7.623	5.227	8.886	2.352	6.534	**9.598**
6	100	7.623	5.227	8.886	2.352	6.534	**9.694**
7	100	7.623	5.227	8.886	2.352	6.534	**9.791**
8	100	7.623	5.227	8.886	2.352	6.534	**9.889**
9	100	7.623	5.227	8.886	2.352	6.534	**9.988**
10	100	7.623	5.227	8.886	2.352	6.534	**10.088**
11	100	7.623	5.227	8.886	2.352	6.534	**10.189**
12	100	7.623	5.227	8.886	2.352	6.534	**10.291**
13	100	7.623	5.227	8.886	2.352	6.534	**10.394**
14	100	7.623	5.227	8.886	2.352	6.534	**10.498**
15	100	7.623	5.227	8.886	2.352	6.534	**10.603**

A11: Abbildung der eingesetzten Maschinen und Apparate zur Durchführung des neuen Verfahrens

