

# Die Sojabohne (*Glycine max* (L.) Merr.): Nutzung, Genetik, Biotechnologie

F. J. Zeller

## Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.): utilization, genetics, biotechnology

### 1. Einführung

Die Sojabohne ist mit einer Produktion von fast 155 Mio. t die weltweit wirtschaftlich wichtigste Ölpflanze (FAO, 1998). Es folgen in ihrer Bedeutung als ölliefernde Pflanzen die Ölpalme, der Raps, die Sonnenblume, die Erdnuß und die Baumwolle (Tab. 1). Wichtigste sojabohnen-produzierende Länder sind die USA mit etwa 75.36 Mio. t, gefolgt von Brasilien mit 31.42 Mio. t, Argentinien mit 15.78 Mio. t und China mit 13.9 Mio. t. Größter Sojabohnenproduzent in der Europäischen Union (EU) ist Italien mit 1.2 Mio. t, gefolgt von Frankreich mit 282.000 t. Österreich produziert zur Zeit ca. 46.000 t, die Schweiz etwas mehr als 6.000 t, Deutschland nur etwa 1.000 t im Jahr (FAO, 1998).

Die USA sind nicht nur weltweit größter Produzent, sondern mit über 26 Mio. t auch wichtigstes Sojabohnen-Ex-

Tabelle 1: Wichtige Pflanzenöle (Weltproduktion in Mio. t nach FAO, 1998)

Table 1: Important plant oils (world production in MT after FAO, 1998)

Pflanzenart/Öl	1998
Sojaöl	22.2
Palmöl	18.3
Rapsöl	11.9
Sonnenblumenöl	9.1
Erdnußöl	5.2
Baumwollsamensöl	4.2
Kokosöl	3.2
Olivenöl	2.5
Palmkernöl	2.4

portland. Die EU-Länder importieren zur Zeit ca. 15 Mio. t Sojabohnen jährlich, davon ca. 10 Mio. t aus den USA (FAO, 1998). Allein die deutschen Ölmühlen verarbeiten

### Summary

Soybean (*Glycine max*) is the most important oil crop worldwide. Because of its high content of oil and protein there are many uses in the food and non-food sector. The cultivated soybean originates from the wild species *Glycine soja*. Numerous other wild *Glycine* species form a huge reservoir of genetic resources that are slowly being utilized by breeding. Mutagenic and genetic engineering studies of the soybean genome have resulted in drastic alterations of fatty and amino acid composition. The introduction of a bacterial gene for tolerance to the herbicide glyphosate into the soybean genome has led to transgenic lines which are commercially grown on a large scale.

**Key words:** taxonomy, *Glycine* genomes, genetic resources, genetic engineering.

### Zusammenfassung

Die Sojabohne (*Glycine max*) ist die weltweit wichtigste Ölpflanze. Aufgrund ihrer hohen Gehalte an Öl und Protein wird sie im Food- und Non-Food-Bereich vielseitig genutzt. Die kultivierte Sojabohne stammt von der wilden Art *Glycine soja* ab. Zahlreiche andere wilde *Glycine*-Arten bilden ein großes Reservoir genetischer Ressourcen, die erst langsam in der Züchtung Eingang finden. Mutagene und gentechnische Eingriffe in das Soja-Genom haben zu drastischen Veränderungen in der Fettsäuren- und Aminosäuren-Zusammensetzung geführt. Durch den Einbau eines bakteriellen Gens für Toleranz gegenüber dem Herbizid Glyphosate in das Sojagenom sind transgene Linien geschaffen worden, die bereits in großem Umfang kommerziell angebaut werden.

**Schlagworte:** Systematik, *Glycine*-Genome, genetische Ressourcen, Genmanipulationen.

im Jahr mehr als 2.2 Mio. t Sojabohnen aus den USA. Zu den Importen in die EU kommen noch etwa 6 Mio. t Sojaschrot, das überwiegend aus Südamerika eingeführt wird. Die Importquote für Deutschland liegt hier bei etwa 3 Mio. t. Brasilien ist mit ca. 8.34 Mio. t zweitwichtigster Exporteur von Sojaschrot.

Im folgenden werden die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten der Sojabohne, ihre Abstammung, Systematik und Genetik beschrieben. Darüber hinaus wird auf die genetische Variabilität und die vorhandenen genetischen Ressourcen in Wildarten als Voraussetzungen für züchterische Verbesserungen eingegangen. Schließlich werden genetische Veränderungen und gentechnische Eingriffe in die DNA erörtert, die in transgenen Pflanzen völlig neue Fettsäuren- und Aminosäurenmuster sowie Toleranz gegenüber dem Herbizid Glyphosate geschaffen haben.

## 2. Produkte der Sojabohne

Aufgrund ihrer hohen Gehalte an Öl und Protein (Tab. 2) wird die Sojabohne vielseitig genutzt. Als Fermentationsprodukte aus ganzen Bohnen werden Sojasauce (Shoyu, Ketjap), Sojapaste, Natto, Miso und Tempeh hergestellt (HYMOWITZ and NEWELL, 1981). Sojamilch ist die Grundlage von Tofu, eine Art Sojakäse, der, ursprünglich aus China stammend, sich auch bei uns zunehmender Beliebtheit erfreut. Vollfettes Sojamehl wird aus ganzen Sojabohnen gemahlen und für die Herstellung von Backwaren, Milchinstantgetränken, Konfekt, Suppen, Saucen, Fleisch- und Fischprodukten (RIAZ, 1999) verwendet. Das durch Kaltpressung oder durch Extraktion gewonnene Sojaöl

Tabelle 2: Die Inhaltsstoffe des Sojabohnensamens  
Table 2: The components of soybean seed

Komponenten	Anteile im Samen
Protein	ca. 40 %
Öl	ca. 18 %
gesättigte Fettsäuren	< 0.4 % Myristinsäure C <sub>14:0</sub> < 0.5 % Arachidonsäure C <sub>20:0</sub> 2-7 % Stearinsäure C <sub>18:0</sub> 4-11 % Palmitinsäure C <sub>16:0</sub>
ungesättigte Fettsäuren	4-12 % $\alpha$ - Linolensäure C <sub>18:3</sub> 23-32% Ölsäure C <sub>18:1</sub> 48-52 % Linolsäure C <sub>18:2</sub>
Lecithin	ca. 2%
Kohlenhydrate	34 %
Asche	4.9 %

dient zur Herstellung von Margarine, Brat- und Fritierfetten. Da Sojaöl geruchs- und geschmacksneutral ist, kann es als Kontaktstoff beim Braten, als Trennstoff beim Backen, als Gleitstoff bei Salaten und als Bindemittel bei Mayonaisen eingesetzt werden. Aus Sojaöl wird auch der Emulgator Lecithin gewonnen. Lecithin ist Grundstoff für Süßigkeiten wie Schokolade, Kakao- und Milchkisgetränke, Eiscreme, Backwaren und Vitaminpräparate.

Nach dem Abtrennen des Sojaöls in der Ölmühle fällt ca. 80 % Sojaschrot (Preßkuchen) an. Sojaschrot oder -mehl ist ein wichtiges Handelsprodukt. In den USA werden zur Zeit über 30 Mio. t im Jahr produziert (FAO, 1998). Entfettetes Sojamehl besitzt einen Proteingehalt von etwa 70 % und zeichnet sich durch gute Emulgierereigenschaften aus. Es wird für die Herstellung von Fertiggerichten, Backwaren, Teigwaren (Sojanudeln) ebenso wie von Fleisch- und Wurstwaren, Fleischersatzprodukten (TVP = Textured Vegetable Protein), Ersatzmilchprodukten und Diätgetränken verwendet. Der überwiegende Teil des erzeugten Sojaextraktionsschrots geht jedoch in die Tierfütterung (Milchviehfütterung, Rindermast, Schweinemast, Zuchtsauen- und Ferkelfütterung). Nicht nur für den Bereich der Lebensmittel- und Tierfutterherstellung ist die Sojabohne unentbehrlich geworden, auch die Palette an industriell genutzten Sojaprodukten wird immer umfangreicher. Soja wird für die Herstellung von Lösungsmitteln (Methylsojat), biologisch abbaubaren Waschmitteln, Druckfarben, Lacken, biologisch abbaubaren Polymeren und Kunstfasern, Adhäsiven, umweltverträglichen Schmiermitteln und -ölen, Hydraulikölen, Trockenölen in der Metallverarbeitung, Biodiesel und schadstofffreien Kühlflüssigkeiten verwendet. Auch die Herstellung von Cremes und Kosmetika sowie Pestiziden sind Anwendungsfelder auf Sojabasis. Schließlich wird Sojaöl als Mittel zur Staubbindung auf öffentlichen Verkehrswegen sowie in Getreide- und Ölmühlen eingesetzt.

## 3. Abstammung, Systematik, Cytogenetik

Die Sojapflanze ist ein Schmetterlingsblütler und gehört der Ordnung der Fabales an. Als kurze Buschform wird sie 30 bis 90 cm groß, es gibt aber auch bis zu 2 m hohe rankende und halbrankende Typen. Ihre Blätter sind dreiteilig. In den Blattachsen entstehen in Büscheln angeordnete kleine Blüten, in denen nach erfolgter Selbstbestäubung Hülsen mit 1-3 rundlich, ovalen Samen entstehen (SCHUSTER, 1992). Wie auch andere Schmetterlingsblütler

ist die Sojabohne in der Lage, in Symbiose mit Knöllchenbakterien (*Bradyrhizobium japonicum*) den Luftstickstoff zu fixieren.

Die heute kultivierte Sojabohne, *Glycine max*, stammt von der wilden, einjährigen *G. soja* ab, die in China, Japan, Korea, Rußland und Taiwan beheimatet ist (HYMOWITZ et al., 1998; Tab. 3). Beide Arten sind miteinander kreuzbar. Ihr diploider Chromosomensatz ist mit Ausnahme einer paracentrischen Inversion (AHMAD et al., 1979) und einer reziproken Translokation (PALMER et al., 1987) identisch. Die F<sub>1</sub>-Bastarde sind in der Regel fertil (SINGH und HYMOWITZ, 1988). Taxonomisch unterscheidet man den Subgenus *Soja* mit *G. max* und ihrem Vorfahren *G. soja*

sowie den Subgenus *Glycine* mit zur Zeit etwa 16 wilden, perennierenden *Glycine*-Arten, die fast alle in Australien, einige auf Papua Neuguinea, Indonesien, den Philippinen und Taiwan beheimatet sind (HYMOWITZ et al., 1998; Tab. 3). Die Unterscheidung und Genombezeichnung der verschiedenen *Glycine*-Arten erfolgte hauptsächlich aufgrund ihrer Kreuzbarkeit, des Grades der meiotischen Chromosomenpaarung und der Fertilität der F<sub>1</sub>-Bastarde. Auch morphologische Merkmale wie Hülsen- und Blattgröße wurden zur Kennzeichnung herangezogen (SINGH and HYMOWITZ, 1985). Alle B-Genom-Arten besitzen Adventivwurzeln, während den anderen Wildarten Seitenwurzeln fehlen.

Tabelle 3: Arten der Gattung *Glycine* Willd., Chromosomenzahl, Genombezeichnung und Verbreitung (verändert nach HYMOWITZ et al., 1998 und SINGH et al., 1998a)

Table 3: Species of the genus *Glycine* Willd., chromosome number, genome symbol and distribution (modified after HYMOWITZ et al., 1998 and SINGH et al., 1998a)

Subgenus <i>Soja</i>	Chr.zahl	Genomsymbol	Verbreitung
<i>G. soja</i>	40	GG	China, Japan, Korea, Rußland, Taiwan
<i>G. max</i>	40	GG	kultiviert, weltweit
Subgenus <i>Glycine</i>			
<i>G. albicans</i>	40	II	Australien
<i>G. arenaria</i>	40	HH	Australien
<i>G. argyrea</i>	40	A <sub>2</sub> A <sub>2</sub>	Australien
<i>G. canescens</i>	40	AA	Australien
<i>G. clandestina</i>	40	A <sub>1</sub> A <sub>1</sub>	Australien
<i>G. curvata</i>	40	C <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	Australien
<i>G. cyrtoloba</i>	40	CC	Australien
<i>G. falcata</i>	40	FF	Australien
<i>G. hirticaulis</i>	40	H <sub>1</sub> H <sub>1</sub>	Australien
	80	—	Australien
<i>G. lactovirens</i>	40	I <sub>1</sub> I <sub>1</sub>	Australien
<i>G. latifolia</i>	40	B <sub>1</sub> B <sub>1</sub>	Australien
<i>G. latrobeana</i>	40	A <sub>3</sub> A <sub>3</sub>	Australien
<i>G. microphylla</i>	40	BB	Australien
<i>G. pindanica</i>	40	H <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Australien
<i>G. tabacina</i>	40	B <sub>2</sub> B <sub>2</sub>	Australien
	80	komplex <sup>1</sup>	Australien, West-, Zentral- und Südpazifische Inseln
<i>G. tomentella</i> Hayata	38	EE	Australien
<i>G. tomentella-4</i>	40	D <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	Australien
<i>G. tomentella-5</i>	40	D <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	Australien
<i>G. tomentella-2</i>	40	DD	Australien, Papua Neuguinea
<i>G. tomentella-3</i>	40	D <sub>3</sub> D <sub>3</sub>	Australien
<i>G. tomentella</i>	78	DDEE	Australien, Papua Neuguinea
<i>G. tomentella</i>	80	komplex <sup>2</sup>	Australien, Papua Neuguinea, Indonesien, Philippinen, Taiwan

<sup>1</sup> allopolyploid (A- und B-Genom) und Segment-Allopolyploide (B-Genom)

<sup>2</sup> allopolyploid (A- und D-Genom oder andere unbekannte Kombinationen)

*Glycine*-Arten mit ähnlichem oder gleichem Genom lassen sich gewöhnlich miteinander kreuzen. Die  $F_1$ -Bastarde zeigen normale Chromosomenpaarung in der Meiose und sind fertil. Dies gilt besonders für die Arten, die das A-, B- und G-Genom besitzen. Kreuzungen zwischen Arten verschiedener Genome sind dagegen meist steril, wenn es überhaupt zu einem Samenansatz kommt (HYMOWITZ et al., 1998). 13 Wildarten sind diploid und besitzen eine Chromosomenzahl von  $2n = 40$ . Von *G. hirticaulis* und *G. tabacina* sind sowohl diploide als auch tetraploide Herkünfte bekannt, von *G. tomentella* gibt es eine aneudiploide, vier diploide, eine aneutetraploide und eine tetraploide Herkunft (Tab. 3). Seevögel haben wahrscheinlich tetraploide Herkünfte von *G. tabacina* und *G. tomentella* von Australien auf die verschiedenen west-, zentral- und südpazifischen Inseln verbreitet.

Bei der kultivierten Sojabohne ( $n = 20$ ) wurden bisher 21 bis 23 Kopplungsgruppen gefunden (SHOEMAKER et al., 1996). Mehr als 500 morphologische, biochemische und molekulare Marker konnten diesen Kopplungsgruppen bisher zugeordnet werden. Die Mitose-Chromosomen von *G. max* sind mit einer Länge zwischen 1.43–2.84  $\mu\text{m}$  erheblich kleiner als die der meisten anderen wichtigen Kulturpflanzen (SEN und VIDYABHUSAN, 1960). Sie können anhand ihrer Struktur im Pachytänstadium der Meiose identifiziert werden (SINGH and HYMOWITZ, 1988). Der haploide Chromosomensatz enthält pro Zellkern einen 2C-DNA-Gehalt zwischen 2.37 und 2.49 pg (CHUNG et al., 1998). Die Erstellung eines Satzes aller 20 primär-trisomen Linien ( $2n = 41$ ) wurde nach mehr als 10 Jahren kürzlich erfolgreich abgeschlossen. Da die Trisomen aus Nachkommenschaften verschiedener männlich-steriler Genotypen stammen, werden sie zur Zeit in die kommerzielle Sorte ‚Clark 63‘ eingekreuzt (T. HYMOWITZ, 1999, briefliche Mitteilung). Vier Kopplungsgruppen konnten bisher entsprechenden Chromosomen (Nr. 3, 5, 13 und 20) zugeordnet werden. Mit Hilfe des Trisomensatzes sollen die restlichen Kopplungsgruppen ebenfalls lokalisiert werden.

Die meisten Gattungen der Fabales besitzen einen Chromosomensatz von  $2n = 22$ . LACKEY (1980) vermutet daher, daß auch die Gattung *Glycine* von einem 22-chromosomigen Vorfahren abstammt. Nach Verlust eines Chromosomenpaares und anschließender Polyploidisierung dürfte sich dann die Sojabohne entwickelt haben (PALMER und KILEN, 1987). Es wird angenommen, daß im Laufe der Zeit das Sojagenom diploidisiert wurde, das heißt, ein genetischer Mechanismus dazu geführt hat, daß die Chromosomen in der Meiose als Bivalente paaren und die Gene disom

vererbt werden. Das Auftreten zahlreicher dupliziert vorliegender Gene im Genom (PALMER und KILEN, 1987) und der Nachweis homöologer Chromosomen (LOHNES et al., 1997) unterstützen die Annahme einer Genomverdopplung und anschließender Diploidisierung in der Evolution der Sojabohne.

#### 4. Genetische Variation und genetische Ressourcen

Unter Verwendung molekularer Marker und Verwandtschaftskoeffizienten konnten KISHA et al. (1998) zeigen, daß die genetische Variation der kultivierten Sojabohne sehr gering ist. GIZLICE et al. (1994) fanden in Nachkommenschaftstests, daß 80 % des Genmaterials der zwischen 1947 und 1988 zugelassenen, kommerziellen Sojabohnensorten in den USA auf nur 13 Ausgangslinien zurückgeführt werden können. Die Möglichkeiten einer Erweiterung der genetischen Variation im *Glycine max*-Pool sind sehr beschränkt. Innerhalb des primären Genpools der Sojabohne bietet sich jedoch die wilde Form *G. soja* an, die mit *G. max* verhältnismäßig leicht kreuzbar ist. Bislang waren allerdings Kreuzungen mit dieser Wildform eher spärlich (ERTL und FEHR, 1985). Kürzlich berichteten PANTALONE et al. (1997) über Gehalte an  $\alpha$ -Linolensäure in *Glycine soja*-Herkünften, die doppelt so hoch waren wie der Gehalt im Öl der Kulturform *G. max*. Die Entdeckung eines Gens (*Scg-1*) für die Unterdrückung des Speicherproteins  $\beta$ -Conglycinin in *G. soja* (TERAISHI et al., 1999) erlaubt in Zukunft möglicherweise weitere Veränderungen des Proteingehalts. Wahrscheinlich besitzt *G. soja* auch Gene/Allele für eine günstigere Aminosäurezusammensetzung (KWANYUEN et al., 1997).

Außer *G. soja* kommen sämtliche wilde *Glycine*-Arten, die dem tertiären Genpool angehören (Tab. 3), als potentielle Genressourcen in Frage. Diese Arten besitzen Gene für Resistenzen und Toleranzen gegenüber biotischen und abiotischen Streßfaktoren (HYMOWITZ et al., 1998), die der kultivierten Sojabohne weitgehend verloren gegangen sind. In verschiedenen Wildarten wurden Gene für Resistenz gegen Brown spot, der durch *Septoria glycinis* verursacht wird, gegen *Phytophthora* root rot (*Phytophthora sojae*) und Mehltau (*Peronospora manshurica*) gefunden. Auch salz- und herbizid-tolerante Wildformen wurden beschrieben (PALMER et al., 1995). Interspezifische Kreuzungen zwischen *G. max* und den wilden *Glycine*-Arten des tertiären Genpools sind in den vergangenen Jahren mehrfach versucht worden (HYMOWITZ

et al., 1998). Alle scheiterten jedoch an der extrem niedrigen Kreuzbarkeit und dem frühzeitigen Hülsenabwurf. Der Arbeitsgruppe um R. J. SINGH und T. HYMOWITZ an der Universität von Illinois in Urbana, USA, gelang Anfang der 90er Jahre mit der aneutetraploiden ( $2n = 78$ ) *Glycine tomentella* der Durchbruch. Diese wilde Sojabohnenart besitzt Resistenz gegenüber dem Sojabohnenzystenälchen (soybean cyst nematode), dem Sojabohnenrost (soybean rust; SCHOEN et al., 1992), und dem Bean Pod Mottle Virus (SINGH et al., 1998b). Der Braunrost, der durch den Pilz *Phakopsora pachyrhizi* verursacht wird, ist insbesondere in Asien, Mittel- und Südamerika sowie in Australien weit verbreitet (MCGEE, 1992). Das Zystenälchen ist einer der gefährlichsten Schädlinge im gesamten Sojabohnenanbau (NOEL, 1992), während das Bean Pod Mottle Virus, das hauptsächlich vom Bohnenblattkäfer *Cerotoma trifurcata* übertragen wird, vor allem in den USA verbreitet ist (MCGEE, 1992). Mit Hilfe von Gibberellin, Naphthalin und Kinetin sowie unter Verwendung von Embryokulturen erhielt die Arbeitsgruppe in Illinois nach Kreuzung einer kultivierten Sojabohnensorte ( $2n = 40$ ; Genom: GG) mit einer Herkunftspflanze der wilden Sojabohnenart *G. tomentella* ( $2n = 78$ ; Genom: DDEE) erstmals Samenansatz in der  $F_1$ . Die 59-chromosomigen, triploiden Bastardpflanzen wurden colchiziniert und einige 118-chromosomige Körner geerntet. Nach Rückkreuzungen mit einer Kultursorte wurden in den  $BC_3$ -,  $BC_4$ - und  $BC_5$ -Generationen Pflanzen isoliert, die in den somatischen Zellen 40 bis 47 Chromosomen besaßen (SINGH et al., 1990, 1993, 1998b). In diesen Nachkommenschaften konnten insgesamt 286 Pflanzen selektiert werden, die 41-chromosomig waren. Bei ihnen handelt es sich um monosome Fremdchromosomen-Additionslinien, das heißt, im *G. max*-Genom waren einzelne Chromosomen von *G. tomentella* zusätzlich vorhanden. Die Additionslinien, die wie die primär-trisomen Linien in die kommerzielle Sorte ‚Clark 63‘ rückgekreuzt werden, sind durch die Merkmale veränderter Blühzeitpunkt, Wuchshöhe, Behaarung, Samenfertilität, Anzahl der Samen pro Hülse und pro Pflanze, Hülsen- und Samenfarbe sowie Samenertrag charakterisiert (SINGH et al., 1998b). Nach Selbstung der monosomen Additionslinien konnten auch einige 42-chromosomige, disome Additionslinien selektiert werden. Diese waren aber schwachwüchsig und starben nicht selten vorzeitig ab. Einige selektierte Pflanzen, die einen diploiden Chromosomensatz aufwiesen, sind gegenüber dem Zystenälchen (*Heterodera glycine*) resistent. Offensichtlich liegen hier Fremdchromosomen-Translokationen vor, die aufgrund homöologer Chromosomenpaarung und anschließendem Genaustausch entstanden sind. In

weiteren Kreuzungen sollen andere nützliche Gene aus *G. tomentella* dauerhaft in die Kulturform der Sojabohne übertragen werden.

## 5. Mutagene und gentechnische Eingriffe zur Veränderung der Inhaltsstoffe und Toleranz gegenüber Glyphosate

### 5.1 Fettsäurezusammensetzung

Natürliche Öle und Fette sind Ester des Glycerins mit verschiedenen langkettigen Fettsäuren. Die Fettsäuren unterscheiden sich in ihrer Kettenlänge und im Grad ihrer Ungesättigkeit (Anzahl von C=C-Doppelbindungen im Molekül). Für die menschliche Ernährung werden Pflanzenöle empfohlen, die reich an mehrfach-ungesättigten Fettsäuren sind. Wie aus Tab. 2 zu ersehen ist, besitzt die Sojabohne in ihren Samen einen Ölgehalt von ca. 18 %, an dessen Zusammensetzung Myristinsäure, Arachidonsäure, Stearinsäure, Palmitinsäure, Ölsäure, Linolsäure und  $\alpha$ -Linolensäure beteiligt sind. Myristin-, Palmitin- und Stearinsäure gehören zu den gesättigten Fettsäuren, Ölsäure ist eine einfach-ungesättigte Fettsäure, während Linolsäure und  $\alpha$ -Linolensäure zu den mehrfach-ungesättigten Fettsäuren gezählt werden. Linolsäure, auch als ( $\omega$ )-6-Fettsäure bezeichnet, und  $\alpha$ -Linolensäure, eine ( $\omega$ )-3-Fettsäure, sind essentiell, das heißt, sie müssen mit der Nahrung zugeführt werden (KOLETZKO, 1997; WOLFRAM, 1997). Nach Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung sollen mit der Nahrung täglich etwa 10 g Linolsäure und 1 g  $\alpha$ -Linolensäure aufgenommen werden. Eine wichtige Funktion dieser beiden Fettsäuren ist unter anderem die Bildung von Eicosanoiden. Hierbei handelt es sich um Substanzen wie Prostaglandine und andere, die für die Steuerung des Gefäßtonus, der Uterus- und Darmkontraktion, Blutgerinnung und der Chemotaxis verantwortlich sind (STEHLE, 1998). Aus Linolsäure und  $\alpha$ -Linolensäure werden durch Einbau weiterer Doppelbindungen und durch Kettenverlängerungen im Stoffwechsel die langkettigen, mehrfach-ungesättigten Arachidon- und Docosahexaensäure gebildet. Diese beiden Fettsäuren sind zumindest für Säuglinge konditionell essentielle Nährstoffe (KOLETZKO, 1997). Durch Desaturierung und Kettenverlängerung der  $\alpha$ -Linolensäure entsteht im Stoffwechsel darüber hinaus die Eicosapentaensäure, die bei der Hemmung entzündlicher immunologischer Erkrankungen eine wesentliche Rolle spielt (ADAM, 1997).

Aus lebensmitteltechnologischer Sicht werden an die Fettsäurezusammensetzung des Sojaöls andere Anforderungen gestellt als aus ernährungsphysiologischer Sicht. Aspekte wie Oxidationsanfälligkeit, Haltbarkeit, thermische Stabilität und Geschmack stehen im Lebensmittelbereich im Vordergrund. Nachteile der ernährungsphysiologisch günstigen  $\alpha$ -Linolensäure in der Lebensmitteltechnologie für ihre Verwendbarkeit als Fritierfett sind ihre leichte Oxidierbarkeit, eingeschränkte Haltbarkeit, sowie ihr unerwünschter Geruch und Geschmack (LIU and WHITE, 1992). Man versucht daher, durch züchterische Maßnahmen den  $\alpha$ -Linolensäuregehalt im Öl zu senken. Nach Behandlung mit mutagenen Chemikalien (EMS) und Strahlen konnten Sojamutanten selektiert werden, deren  $\alpha$ -Linolensäuregehalt auf 2.9 % reduziert war (HAMMOND und FEHR, 1983; BYRUM et al., 1997; RAHMAN und TAKAGI, 1997).

Um eine bessere Oxidationsstabilität zu erreichen und die Haltbarkeit von Sojaöl enthaltenden Lebensmitteln zu verlängern, wird das Öl technologisch teilweise gehärtet. Durch Härten (Anlagerung von Wasserstoff (H) an die Doppelbindungen) wird jedoch die Bildung unerwünschter sogenannter trans-Fettsäuren begünstigt (KINNEY, 1996; ARO et al., 1998). Im Gegensatz zu den mehrfach-ungesättigten Fettsäuren, bei denen die H-Atome auf der gleichen Seite der Doppelbindung liegen (cis-Konfiguration) und dadurch dem Fettsäuremolekül Flexibilität verleihen, befinden sich die H-Atome bei den trans-Fettsäuren auf der gegenüberliegenden Seite der Doppelbindung. Dadurch erhalten diese Säuren eine rigide Struktur. In der 'trans'-Form wirken die mehrfach-ungesättigten Fettsäuren daher ähnlich wie gesättigte Fettsäuren und haben darüber hinaus einen negativen Einfluß auf den Cholesterolspiegel im Blut, indem sie das unerwünschte LDL (low density lipoprotein)-Cholesterol erhöhen, gleichzeitig aber das günstige HDL-Cholesterol senken (SPADY et al., 1993) und damit das Risiko von Herz-Kreislauf-Erkrankungen erhöhen (ARO, 1998; RIAZ, 1999). Wahrscheinlich können trans-Fettsäuren sogar größere Schäden der Herzkranzgefäße hervorrufen als gesättigte Fettsäuren (HU et al., 1997), vor allem dann, wenn sie in größeren Mengen aufgenommen werden (ARO, 1998). Der Einsatz  $\alpha$ -linolensäurearmen Sojaöls als Brat- und Fritierfett ist daher eine Alternative zu teilgehärteten Fetten mit hohem Anteil an trans-Fettsäuren. Öle mit einem Gehalt an  $\alpha$ -Linolensäure, der niedriger als 5 % ist, müssen nicht mehr gehärtet werden.

Für die Herstellung von Margarine sowie Back- und Bratfetten ist ein hoher Anteil gesättigter Fettsäuren, insbeson-

dere der Stearinsäure, im Öl notwendig. Höhere Gehalte an gesättigten Fettsäuren weisen auch eine höhere Schmelztemperatur und eine verbesserte Haltbarkeit auf. Der Gehalt an Stearinsäure beträgt in herkömmlichem Sojaöl nur etwa 4 % (Tab. 2). Daher versucht man, züchterisch den Stearinsäuregehalt zu erhöhen. Erste Erfolge sind bereits erzielt worden. Nach Röntgenstrahlenbehandlung von Sojasamen konnten RAHMAN et al. (1997) Linien selektieren, deren Stearinsäuregehalt höher als 30 % liegt. Die Einführung von cDNA der Sojabohnen- $\Delta^9$ -Stearyl-ACP-Desaturase in Sense oder Antisense-Orientierung führte auch in transgenen Sojabohnen-Linien zu einem Anstieg der Stearinsäure auf etwa 30 % (YADAV, 1996). Ein Sojaöl mit einem Gehalt von 50 % an niedrig-gesättigten Fettsäuren wird in den USA unter dem Namen LoSatSoy (Low Saturate Soybean) bereits vermarktet (ZIND, 1999). Aus diesem Öl werden Mayonnaise und Salatdressings hergestellt.

Die einfach-ungesättigte Ölsäure ist in normalem Sojaöl zu etwa 26 % enthalten (Tab. 2). In Olivenöl liegt der Ölsäuregehalt sogar bei ca. 80 %. Eine Ernährung, die reich an ungesättigten Fettsäuren, insbesondere  $\alpha$ -Linolensäure, ist, und Obst, Gemüse, Leguminosen, Getreide, Fisch, Antioxidantien, Minerale, und B-Vitamine enthält (mediterrane Kost), kann zu einer Verringerung des Gehalts an Gesamtcholesterol und LDL-Cholesterol im Plasma führen (MENSINK and KATAN, 1989; DE LORGERIL et al., 1999). Der Trend zu höheren Gehalten an ungesättigten Fettsäuren im Nahrungsfett, die Vermeidung von trans-Fettsäuren sowie das zunehmende Interesse der Oleochemie an Ölpflanzen mit hohem Ölsäuregehalt haben dazu geführt, daß bei der Sojabohne große Anstrengungen unternommen wurden, den Ölsäuregehalt im Samen zu erhöhen. Nicht durch konventionelle, züchterische Maßnahmen, sondern durch gentechnische Eingriffe wurden erste Erfolge erzielt. In der Sojabohne gibt es mindestens zwei Gene, *Fad 2-1* und *Fad 2-2*, für Fettsäure-synthetisierende  $\omega$ -6 Desaturase-Enzyme (HEPPARD et al., 1996). Das *Fad 2-2*-Gen wird in gentechnisch unveränderten Sojabohnen in allen Geweben, *Fad 2-1* nur im Samen exprimiert. Durch Unterdrückung des *Fad 2-1*-Gens ist es gelungen, aus Suspensionskulturen transgene Pflanzen zu regenerieren, die einen Ölsäuregehalt von ca. 85 % besitzen (KINNEY, 1996; 1998a, b; KINNEY and KNOWLTON, 1998). Die hoch-ölsäurehaltigen Sojalinien, deren  $\alpha$ -Linolensäuregehalt bei 2 % und der Gehalt an Palmitinsäure bei 7 % lag, waren nach mehrjährigen Versuchen an verschiedenen Orten umweltstabil und unterschieden sich weder phänotypisch noch in

ihrer Ertragsleistung von den Ausgangslinien. Auch der Gesamtölgehalt der transgenen hoch-ölsäurehaltigen Linien entsprach etwa dem herkömmlicher Sojabohnensorten (KINNEY and KNOWLTON, 1998).

Da auch die gesättigten Fettsäuren Myristin- und Palmitinsäure den LDL-Cholesterolspiegel im Blut erhöhen (MENSINK et al., 1994), ist man in der Lebensmittelindustrie an Ölsaaten mit möglichst geringen Gehalten dieser beiden Fettsäuren interessiert. Im Öl normaler Sojasamen findet man bis zu 11 % Palmitinsäure (Tab. 2). Niedriger Gehalt dieser Fettsäure wird von mindestens zwei Genloci (*fat<sub>1</sub>*, *fat<sub>2</sub>*), die ihrerseits von modifizierenden Genen beeinflusst werden, kontrolliert (REBETZKE et al., 1998). Nach Kreuzung zweier Linien mit je einem durch EMS (Ethylmethansulfonat) mutierten Locus (BURTON et al., 1998) konnte der Palmitinsäuregehalt in den doppelt-homozygoten Linien auf 4.3 % reduziert werden (WILCOX et al., 1994).

## 5.2 Aminosäurezusammensetzung

Protein und Öl sind die wichtigsten, wirtschaftlich nutzbaren Komponenten des Samens der Sojabohne. Das Protein macht fast 40 % der Inhaltsstoffe aus (Tab. 2). Auf die zahlreichen Produkte, die man nach dem Auspressen des Öls aus dem proteinreichen Sojaschrot herstellen kann, wurde bereits eingegangen. Ernährungsphysiologisch kommt hinzu, daß auch Sojaprotein eine cholesterin-senkende Wirkung hat (LICHTENSTEIN, 1998). Der Hauptanteil des Reserveproteins (etwa 70 %) der Sojabohne wird in Form des Glycinins (11S) und des  $\beta$ -Conglycinins (7S) in den Globulinen der Aleuronkörner gebildet (MEINKE et al., 1981). Glycinin wird von mindestens fünf Genen (*Gy-1* bis *Gy-5*),  $\beta$ -Conglycinin von drei Genen (*Cgy1*, *Cgy2*, *Cgy3*) kontrolliert (NIELSEN, 1996; CHEN und SHOEMAKER, 1998). Schon seit vielen Jahren will man den Gesamtproteingehalt der Sojabohne quantitativ und qualitativ verändern. Versuche, den Proteingehalt konventionell züchterisch zu erhöhen, hatten bislang wenig Erfolg (PAEK et al., 1997). Das Gen *Seg-1* für die Unterdrückung des Speicherproteins  $\beta$ -Conglycinin in der wilden Form *G. soja* (TERAISHI et al., 1999) eröffnet jedoch in Zukunft neue Möglichkeiten, den Proteingehalt in der kultivierten Sojabohne zu verändern.

Wie auch andere Leguminosenarten hat die Sojabohne ein Defizit der schwefelhaltigen, essentiellen Aminosäure Methionin (Tab. 4). Das bedeutet, daß einem Kraftfutter,

das hauptsächlich aus Sojaschrot besteht, die Aminosäure Methionin zugesetzt werden muß. Es ist bekannt, daß die Samen des in Brasilien beheimateten Paranaßbaums (*Bertholletia excelsa*) in ihrer 2S-Albumin-Speicherproteinfraktion ca. 18 % Methionin und 8 % Cystein enthalten (ALTENBACH et al., 1987). Das Gen für hohen Methionin-gehalt der Paranaß konnte isoliert (GANDER et al., 1991) und in das Sojagenom transferiert werden. Untersuchungen mit Proteinextrakten der transgenen Sojabohne mit Seren von Paranaß-Allergikern zeigten jedoch, daß bei den Transformationsexperimenten der genetische Faktor für das Allergen der Paranaß in das Sojagenom übertragen worden war (NORDLEE et al., 1996). Die transgenen Sojabohnen wurden daher nicht kommerzialisiert. Inzwischen arbeitet man an der Übertragung eines Maisgens, das einen hohen Methionin-gehalt in seinem Proteinspeicher besitzt, sowie eines Gens für das 2S-Albumin der Sonnenblume, das 16 % Methionin und 8 % Cystein enthält. In Australien konnte das Gen des Sonnenblumen-2S-Albumins bereits in die Lupine (*Lupinus angustifolius*) übertragen und dort exprimiert werden (MOLVIG et al., 1997). Transgene Lupinen zeigen eine 94 %ige Zunahme des Methionin-gehaltes, der Cysteingehalt nahm jedoch gleichzeitig um 12 % ab.

Das Sojabohnenprotein hat einen Gehalt von 6.4 g Lysin pro 100 g Protein (Tab. 4). Auch Lysin ist eine essentielle

Tabelle 4: Aminosäurezusammensetzung von Sojabohnenschrot (nach PERKINS, 1995)

Table 4: Amino acid composition of soybean seed protein (after PERKINS, 1995)

Aminosäure	g pro 100 g Protein
Alanin	4.0
Arginin	7.0
Asparaginsäure	11.3
Cystein	1.6
Glutaminsäure	17.7
Glycin	4.0
Histidin	2.7
Isoleucin	4.9
Leucin	8.0
Lysin	6.4
Methionin	1.4
Phenylalanin	5.3
Prolin	4.7
Serin	5.0
Threonin	4.2
Tryptophan	1.2
Tyrosin	3.9
Valin	5.3

Aminosäure, die gewöhnlich den Tierfütterationen aus lysinarmem Getreide zugemischt wird. Industriell wird ca. 300.000 t Lysin jährlich hauptsächlich aus verschiedenen Stämmen von *Corynebacterium glutamicum* gewonnen (SAHM et al., 1999). Um den Lysingehalt der Sojabohne noch weiter zu erhöhen, hat man versucht, das *dapA*-Gen von *C. glutamicum*, das die Dihydrodipikolinsäure-Synthese (DHDPS) codiert und an der Synthese von Lysin wesentlich beteiligt ist, in das Sojagenom gentechnisch zu übertragen (FALCO et al., 1995). Transgene Pflanzen konnten selektiert werden, die Lysingehalte bis zu 33 % des Gesamtproteins aufwiesen. Pflanzen mit etwa 12 % Lysin hatten einen normalen Habitus und gute Keimfähigkeit. Die Samen transgener Bohnen mit dem höchsten Lysingehalt waren jedoch geschrumpft und keimten nur schlecht (FALCO et al., 1995).

Im Sojaprotein und im Sojaschrot können nach der Verarbeitung Bruchstücke des gentechnisch veränderten Erbmateri als und der Proteine nachgewiesen werden. Seit dem 15. Mai 1997 ist die ‚Verordnung (EG) No. 258/97 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 1997 über neuartige Lebensmittel und neuartige Lebensmittelzutaten‘ (Novel Food-Verordnung) in allen Mitgliedstaaten der Europäischen Union geltendes Recht.

Zutaten auf Sojaproteinbasis müssen daher gekennzeichnet werden. Mehrjährige Fütterungsversuche mit Ratten, Schweinen, Rindern, Geflügel und schnell-wachsenden Fischen werden in der Regel durchgeführt, bevor Produkte gentechnisch veränderter Pflanzen für den Verzehr durch den Menschen zugelassen werden. Das gilt besonders dann, wenn Produkte der transgenen Pflanze im Vergleich zur unbehandelten Pflanze ‚substantiell nicht gleichwertig‘ sind, das heißt, wenn ein durch ein eingebautes Fremdgen verändertes Protein analytisch nachgewiesen werden kann.

### 5.3 Herbizidtoleranz

Eine der zur Zeit wichtigsten gentechnischen Veränderungen der Sojabohne ist die Einführung eines aus *Agrobacterium* sp. CP4 stammenden Gens, das Toleranz gegenüber dem Herbizid Glyphosate (Handelsname: Roundup) zeigt. Die Wirkung von Glyphosate nach Behandlung der Pflanzen besteht darin, daß es das Enzym 5-Enolpyruvylshikimat-3-Phosphat-Synthase (EPSPS), das für die Synthese der aromatischen Aminosäuren Phenylalanin, Tyrosin und Tryptophan erforderlich ist und bei Bakterien, Pilzen und Pflanzen vorkommt, hemmt. Da die Produktion der aro-

matischen Aminosäuren für die Pflanze lebensnotwendig ist, führt eine Unterbrechung ihrer Synthese zum Zelltod. Das aus *Agrobacterium* in die Sojabohne übertragene Gen wird dominant, monogen vererbt und codiert ein der EPSPS funktions-analoges Enzym, das gegenüber Glyphosate verträglich, also tolerant ist (PADGETTE et al., 1996a). Bei der Behandlung herbizid-toleranter Pflanzen kann Glyphosate während der gesamten Vegetationsperiode gezielter und sparsamer eingesetzt werden. Kosten bis zu 30 % können dadurch eingespart werden.

Der Gehalt an EPSPS in den transgenen Sojabohnen beträgt etwa 0.08 % des Gesamtproteins. PADGETTE et al. (1996b) konnten weder eine Veränderung der Zusammensetzung der rohen Samen noch des in der Fütterung verwendeten Sojaschrots feststellen. In umfangreichen Fütterungsversuchen wurde kein substantieller Unterschied auf Mast- und Milchleistung zwischen herbizid-toleranten und herkömmlichen Bohnen gefunden (HAMMOND et al., 1996). Nach mehr als 10-jährigen Versuchen wurde von der Umweltbehörde, der Nahrungs- und Arzneimittelbehörde, dem Landwirtschaftsministerium sowie dem Novel-Food-Ausschuß in den USA den herbizid-toleranten Sojabohnen die gesundheitliche und ökologische Unbedenklichkeit erteilt. Mit einer Entscheidung vom 3. April 1996 stellte auch die Kommission der Europäischen Union fest, daß kein Grund für die Annahme besteht, herbizid-tolerante Sojabohnen könnten Gesundheits- oder Umweltschäden hervorrufen.

Im Jahre 1999 werden nach Angaben der American Soybean Association in den USA auf einer Fläche von 16 Mio. ha gentechnisch veränderte Sojabohnen ausgesät. Das sind etwa 54 % des gesamten Sojabohnenanbaus in den USA. In Argentinien sind ca. 55 %, in Kanada 23 % des Anbaus herbizid-tolerante Bohnen. In Brasilien wird nach einer Entscheidung der Nationalen Kommission für Biologische Sicherheit (CTNBio) ab Herbst 1999 der Anbau herbizid-toleranter Sojabohnen erlaubt.

### 6. Ausblick

Die Übersicht hat gezeigt, daß die Sojabohne wegen ihrer hohen Gehalte an Öl und Protein sehr vielseitig genutzt werden kann. Die genetischen Untersuchungen zur vervollkommnung der Genarten werden weiter vorangetrieben. Dabei werden klassische wie moderne, molekulargenetische Methoden eingesetzt. Die Erstellung eines kompletten Trisomensatzes ist erfolgreich abgeschlossen worden. Damit wird die Zuordnung aller 20 Kopplungsgrup-

pen zu den entsprechenden Chromosomen möglich. Die genetischen Ressourcen der mit der kultivierten *G. max* kreuzbaren *G. soja* ebenso wie die der 16 dem tertiären Genpool angehörenden wilden *Glycine*-Arten sind erkannt und werden bereits in der Züchtung genutzt. Insbesondere wird zur Zeit das Chromatin von *G. tomentella* in Form von Chromosomenadditionen und -translokationen in das Sojabohnen-Genom integriert.

Dank mutagener Agentien und molekulargenetischer Eingriffe in die DNA ist es gelungen, Linien zu erstellen, die schon weitgehend maßgeschneiderte, neue Fettsäuren- und Aminosäurezusammensetzungen besitzen. Einige Linien sind bereits zugelassen, andere stehen kurz vor der Zulassung. Insbesondere die Nutzung von Genen anderer Pflanzenarten für Enzyme zur Synthese von Fettsäuren und Aminosäuren lassen erwarten, daß man ohne große Einbußen in der Ertragsleistung sowie im Gesamtöl- und Proteingehalt die verschiedenen Inhaltsstoffe der Sojabohne in Zukunft je nach ernährungsphysiologischen, lebensmitteltechnologischen oder oleochemischen Anforderungen ändern kann. Untersuchungen zur Verhinderung gesundheitlicher und ökologischer Schäden durch Produkte transgener Linien oder durch die Pflanzen selbst müssen jedoch auch in Zukunft einen hohen Stellenwert haben.

## Literatur

- ADAM, O. (1997):  $\omega$ -3-Fettsäuren – Wundermittel bei entzündlichen immunologischen Erkrankungen? Ernährungs-Umschau 44, 46–50.
- AHMAD, Q. N., E. J. BRITTEN and D. E. BYTH (1979): Inversion heterozygosity in the hybrid soybean x *Glycine soja*. J. Heredity 70, 358–364.
- ALTENBACH, S. B., K. W. PEARSON, F. W. LEUNG and S. M. SUN (1987): Cloning and sequence analysis of a cDNA encoding Brazil nut protein exceptionally rich in methionine. Plant Mol. Biol. 8, 239–250.
- ARO, A. (1998): Epidemiological studies of trans fatty acids and coronary heart disease. In: SEBEDIO, J. L. and W. W. CHRISTIE (Eds.): Trans fatty acids in human nutrition. The Oily Press, Dundee, Scotland, 235–260.
- ARO, A., J. VAN AMELSVOORT, W. BECKER, M.-A. VAN ERP-BAART, A. KAFATOS, T. LETH and G. VAN POPPEL (1998): Trans fatty acids in dietary fats and oils from 14 European countries: the TRANSFAIR study. J. Food Comp. Anal. 11, 137–149.
- BURTON, J. W., J. R. WILCOX, R. F. WILSON, W. P. NOVITZKY and G. J. REBETZKE (1998): Registration of low palmitic acid soybean germplasm lines N94–2575 and CI1943. Crop Sci. 38, 1407.
- BYRUM, J. R., A. J. KINNEY, K. L. STECCA, D. J. GRACE and B. W. DIERS (1997): Alteration of the omega-3 fatty acid desaturase gene is associated with reduced linolenic acid in the A5 soybean genotype. Theor. Appl. Genet. 94, 536–559.
- CHEN, Z. and R. C. SHOEMAKER (1998): Four genes affecting seed traits in soybean map to linkage group F. J. Heredity 89, 211–215.
- CHUNG, J., J. H. LEE, K. ARUMUGANATHAN, G. L. GRAEF and J. E. SPEC (1998): Relationships between nuclear DNA content and seed and leaf size in soybean. Theor. Appl. Genet., 96, 1064–1068.
- ERTL, D. S. and W. R. FEHR (1985): Agronomic performance of soybean genotypes from *Glycine max* x *Glycine soja* crosses. Crop Sci. 25, 589–592.
- FALCO, S. C., T. GUIDA, M. LOCKE, J. MAIVAS, C. SANDERS, R. T. WARD and P. WEBBER (1995): Transgenic canola and soybean seeds with increased lysine. Bio/Technology 13, 577–582.
- FAO (1998): FAOSTAT, Internet, <http://apps.fao.org/>
- GANDER, E. S., K. O. HOMSTROEM, G. R. DE PAIVA, L. A. B. DE CASTRO, M. CANEIRO and M. F. GROSSI DE SA (1991): Isolation, characterization and expression of a gene coding for a 2S albumin gene from *Bertholetia excelsa* (Brazil nut). Plant Mol. Biol. 16, 437–448.
- GIZLICE, Z., T. E. CARTER, JR. and J. W. BURTON (1994): Genetic base for North American public soybean cultivars released between 1947 and 1988. Crop Sci. 34, 1143–1151.
- HAMMOND, B. G., J. L. VICINI, G. F. HARTNELL, M. W. NAYLOR, C. D. KNIGHT, E. H. ROBINSON, R. L. FUCHS and S. R. PADGETTE (1996): The feeding value of soybeans fed to rats, chickens, catfish and dairy cattle is not altered by genetic incorporation of glyphosate tolerance. J. Nutr. 126, 717–727.
- HAMMOND, E. G. and W. R. FEHR (1983): Registration of A5 germplasm line of soybean. Crop Sci. 23, 192.
- HEPPARD, E. P., A. J. KINNEY, K. L. STECCA and G.-H. MIAO (1996): Developmental and growth temperature regulation of two different microsomal omega-6 desaturase genes in soybean. Plant Physiology 110, 311–319.
- HU, F. B., M. J. STAMPFER, J. E. MANSON, E. RIMM, G. A. COLDITZ, B. A. ROSNER, C. H. HENNEKENS and W. C. WILLETT (1997): Dietary fat intake and the risk of coronary heart disease in women. N. Engl. J. Med. 337, 1491–1499.

- HYMOWITZ, T. and C. A. NEWELL (1981): Taxonomy of the genus *Glycine*, domestication and uses of soybeans. *Econ. Botany* 35, 272–288.
- HYMOWITZ, T. R., R. J. SINGH and K. P. KOLLIPARA (1998): The genomes of the *Glycine*. *Plant Breeding Reviews* 16, 289–317.
- KINNEY, A. J. (1996): Development of genetically engineered soybean oils for good applications. *J. Food Lipids* 3, 273–292.
- KINNEY, A. J. (1998a): Plants as industrial chemical factories – new oil from genetically engineered soybeans. *Fett/Lipid* 100, 173–176.
- KINNEY, A. J. (1998b): Production of specialised oils for industry. In: HARWOOD, J. L. (Ed.): *Plant lipid biosynthesis. Fundamentals and agricultural applications*, Cambridge University Press, 273–285.
- KINNEY, A. J. and S. KNOWLTON (1998): Designer oils. The high oleic acid soybean. In: ROLLER, S. and S. HARLANDER (Eds.): *Genetic modification in the food industry*. Blackie, London, 193–213.
- KISHA, T. J., B. W. DIERS, J. M. HOYT and C. H. SNELLER (1998): Genetic diversity among soybean introductions and North American germplasm. *Crop Sci.* 38, 1669–1680.
- KOLETZKO, B. (1997): Bedeutung langkettiger  $\omega$ -3- und  $\omega$ -6-Fettsäuren für Wachstum und Entwicklung im Säuglingsalter. *Ernährungs-Umschau* 44, 41–45.
- KWANYUEN, P., V. R. PANTALONE, J. W. BURTON and R. F. WILSON (1997): A new approach to genetic alteration of soybean protein composition and quality. *J. Amer. Oil Chem. Soc.* 74, 983–987.
- LACKEY, J. A. (1980): Chromosome numbers in the Phaseoleae (Fabaceae: Faboideae) and their relation to taxonomy. *Amer. J. Bot.* 67, 595–602.
- LICHTENSTEIN, A. H. (1998): Soy protein, isoflavones and cardiovascular disease risk. *J. Nutr.* 128, 1589–1592.
- LIU, H. R. and P. J. WHITE (1992): Oxidative stability of soybean oils with altered fatty acid compositions. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 69, 528–532.
- LOHNES, D. G., J. E. SPECHT and P. B. CREGAN (1997): Evidence for homoeologous linkage groups in the soybean. *Crop Sci.* 37, 254–257.
- LORGERIL, M. DE, P. SALEN, J.-L. MARTIN, I. MONJAUD, J. DELAYE and N. MAMELLE (1999): Mediterranean diet, traditional risk factors, and the rate of cardiovascular complications after myocardial infarction – Final report of the Lyon Diet Heart Study. *Circulation* 99, 779–785.
- MCGEE, D. C. (1992): *Soybean diseases*, APS Press, St. Paul, MN.
- MEINKE, D. W., J. CHEN and R. N. BEACHY (1981): Expression of storage-protein during soybean seed development. *Planta* 153, 130–139.
- MENSINK, R. P. and M. B. KATAN (1989): Effect of diet enriched with monounsaturated or polyunsaturated fatty acids on levels of low-density and high-density lipoprotein cholesterol in healthy women and men. *New England J. Medicine* 321, 436–441.
- MENSINK, R. P., E. H. M. TEMME and G. HORNSTRA (1994): Dietary saturated and trans fatty acids and lipoprotein metabolism. *Ann. Med.* 26, 461–464.
- MOLVIG, L., L. M. TABE, B. O. EGGUM, A. E. MOORE, S. CRAIG, D. SPENCER and T. J. V. HIGGINS (1997): Enhanced methionine levels and increased nutritive value of seeds of transgenic lupins (*Lupinus angustifolius* L.) expressing a sunflower seed albumin gene. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 94, 8393–8398.
- NIELSEN, N. C. (1996): Soybean seed composition. In: VERMA, D. P. S. and R. C. SHOEMAKER (Eds.): *Soybean: genetics, molecular biology and biotechnology*. CAB International, Oxon, Great Britain, 127–163.
- NOEL, G. R. (1992): History, distribution and economics. In: R. D. RIGGS and J. A. WRATHER (Eds.) *Biology and management of the soybean cyst nematode*. APS Press, St. Paul, MN, p. 8–10.
- NORDLEE, J. A., S. L. TAYLOR, J. A. TOWNSEND, L. A. THOMAS and R. K. BUSH (1996): Identification of a Brazil-nut allergen in transgenic soybeans. *New England J. Medicine* 334, 688–692.
- PADGETTE, S. R., D. B. RE, G. F. BARRY, D. E. EICHHOLTZ, X. DELANNEY, R. I. FUCHS, G. M. KISHORE and R. T. FRALEY (1996a): New weed control opportunities: Development of soybeans with a Roudup Ready gene. In: DUKE, S. O. (Ed.): *Herbicide-resistant crops – agricultural, environmental, economic, regulatory and technical aspects*, Lewis, Chelsea, MI, USA, 53–84.
- PADGETTE, S. R., N. B. TYLOR, D. L. NIDA, M. R. BAILEY, J. MACDONALD, L. R. HOLDEN (1996b): The composition of glyphosate-tolerant soybean seeds is equivalent to that of conventional soybeans. *J. Nutr.* 126, 702–716.
- PAEK, N. C., J. IMSANDE, R. C. SHOEMAKER and R. SHIBLES (1997): Nutritional control of soybean seed storage protein. *Crop Sci.* 37, 498–503.
- PALMER, R. G. and T. C. KILEN (1987): Qualitative genetics and cytogenetics. In: WILCOX, J. R. (Ed.): *Soybeans:*

- improvement, production and uses. 2nd edition, No. 16. American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Madison, WI, USA, 135–209.
- PALMER, R. G., K. E. NEWHOUSE, R. A. GRAYBOSCH and X. DELANNAY (1987): Chromosome structure of the wild soybean. *J. Heredity* 78, 243–247.
- PALMER, R. G., T. HYMOWITZ and R. L. NELSON (1995): Germplasm diversity within soybean. In: VERMA, D. P. S. and R. C. SHOEMAKER (Eds.): Soybean: genetics, molecular biology and biotechnology. CAB International, Oxon, Great Britain, 1–35.
- PANTALONE, V. R., G. J. REBETZKE, J. W. BURTON and R. F. WILSON (1997): Genetic regulation of linolenic acid concentration in wild soybean *Glycine soja* accessions. *J. Amer. Oil Chem Soc.* 74, 159–163.
- PERKINS, E. G. (1995): Composition of soybeans and soybean products. In: ERICKSON, D. R. (Ed.): Practical handbook of soybean processing and utilization. 9–28.
- RAHMAN, S. M. and Y. TAKAGI (1997): Inheritance of reduced linolenic acid content in soybean seed oil. *Theor. Appl. Genet.* 94, 299–302.
- RAHMAN, S. M., Y. TAKAGI and T. KINOSHITA (1997): Genetic control of high stearic acid content in seed oil of two soybean mutants. *Theor. Appl. Genet.* 95, 772–776.
- REBETZKE, G. J., J. W. BURTON, T. E. CARTER, JR. and R. F. WILSON (1998): Genetic variation for modifiers controlling reduced saturated fatty acid content in soybean. *Crop Sci.* 38, 303–308.
- RIAZ, M. N. (1999): Soybeans as functional foods. *Cereal Foods World* 44, 88–92.
- SAHM, H., L. EGGELING, S. MORBACH and B. EIKMANN (1999): Construction of L-isoleucine overproducing strains of *Corynebacterium glutamicum*. *Naturwissenschaften* 86, 33–38.
- SCHOEN, D. J., J. J. BURDON and A. H. D. BROWN (1992): Resistance of *Glycine tomentella* to soybean leaf rust *Phakopsora pachyrhizi* in relation to ploidy level and geographical distribution. *Theor. Appl. Genet.* 83, 827–832.
- SCHUSTER, W. H. (1992): Ölpflanzen in Europa. DLG-Verlag, Frankfurt.
- SEN, N. K. and R. V. VIDYABHUSAN (1960): Tetraploid soybean. *Euphytica* 9, 317–322.
- SHOEMAKER, R. C., K. M. POLZIN, L. L. LORENZEN and J. E. SPECHT (1996): Molecular genetic mapping of soybean. In: VERMA, D. P. S. and R. C. SHOEMAKER (Eds.): Soybean: genetics, molecular biology and biotechnology. CAB International, Oxon, Great Britain, 37–56.
- SINGH, R. J. and T. HYMOWITZ (1985): Diploid-like meiotic behavior in synthesized amphiploids of the genus *Glycine* Willd. subgenus *Glycine*. *Can. J. Genet. Cytol.* 27, 655–660.
- SINGH, R. J. and T. HYMOWITZ (1988): The genomic relationship between *Glycine max* (L.) Merr. and *G. soja* (Sieb. and Zucc.) as revealed by pachytene chromosome analysis. *Theor. Appl. Genet.* 76, 705–711.
- SINGH, R. J., K. P. KOLLIPARA and T. HYMOWITZ (1990): Backcross-derived progeny from soybean and *Glycine tomentella* Hayata intersubgeneric hybrids. *Crop Sci.* 30, 871–874.
- SINGH, R. J., K. P. KOLLIPARA and T. HYMOWITZ (1993): Backcross (BC<sub>2</sub>-BC<sub>4</sub>)-derived fertile plants from *Glycine max* and *G. tomentella* intersubgeneric hybrids. *Crop Sci.* 33, 1002–1007.
- SINGH, R. J., K. P. KOLLIPARA and T. HYMOWITZ (1998a): The genomes of *Glycine* F. J. Herm., and *G. tomentella* Hayata of Western Australia and their phylogenetic relationships in the genus *Glycine* Willd. *Genome* 41, 669–679.
- SINGH, R. J., K. P. KOLLIPARA and T. HYMOWITZ (1998b): Monosomic alien addition lines derived from *Glycine max* (L.) Merr. and *G. tomentella* Hayata: production, characterization, and breeding behavior. *Crop Sci.* 38, 1483–1489.
- SPADY, D. K., L. A. WILLETT and J. M. DIETSCHY (1993): Regulation of plasma LDL-cholesterol levels by dietary cholesterol and fatty acids. *Ann. Rev. Nutr.* 13, 355–381.
- STEHLE, P. (1998): Immunmodulation: Beeinflussung des Immunsystems durch Nährstoffe. In: ERBERSDOBLER, H. (Hrsg.): Diätetische Lebensmittel in Praxis und Wissenschaft, Heft 86, 47–62.
- TERAISHI, M., M. HAJIKA and M. ISHIMOTO (1999): Characterization of *Scg-1*, a gene dominant in the lack of all 7S-globulin subunits derived from a wild soybean (*Glycine soja* Sieb. et Zucc.). *Plant & Animal Genome VII Conference*, San Diego, p. 223.
- WILCOX, J. R., J. W. BURTON, G. J. REBETZKE and R. F. WILSON (1994): Transgressive segregation for palmitic acid in seed oil of soybean. *Crop Sci.* 34, 1248–1250.
- WOLFRAM, G. (1997): Was sind und wie wirken  $\omega$ -3-Fettsäuren? *Ernährungs-Umschau* 44, 36–41.
- YADAV, N. S. (1996): Genetic modification of soybean oil quality. In: VERMA, D. P. S. and R. C. SHOEMAKER (Eds.): Soybean: genetics, molecular biology and biotechnology. CAB International, Oxon, Great Britain, 165–188.
- ZIND, T. (1999): A new breed of ingredients. *Food Processing* 60, 39–41.

## **Anschrift des Verfassers**

**Prof. Dr. Friedrich J. Zeller**, Technische Universität München, Lehrstuhl für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, D-85350 Freising-Weihenstephan; e-mail: [friedrich.zeller@weihenstephan.de](mailto:friedrich.zeller@weihenstephan.de)

Eingelangt am 9. Februar 1999

Angenommen am 28. April 1999