1 Einleitung

Im Interesse einer weiteren Stärkung der Konkurrenzfähigkeit von Winterraps (*Brassica napus* L.) als Körnerölfrucht ist es ein vorrangiges Zuchtziel, das genetische Potential bezüglich des Korn- und Ölertrages noch besser auszuerschöpfen. Dafür bietet die Hybridzüchtung die besten Voraussetzungen.

Gesamtziel dieses Projektes war die Erschließung eines neuen divergenten genetischen Pools bei Winterraps zur Nutzung in der Hybridzüchtung. Gleichzeitig wurde angestrebt, eine erste QTL-Kartierung für Kombinationsfähigkeit (GCA) bezüglich ausgewählter quantitativer Merkmale durchzuführen; dafür wurden die Daten einer ersten, einortigen Leistungsprüfung aus dem Jahr 2004 herangezogen.

Seitdem die Möglichkeit besteht, verschiedene Systeme für männliche Sterilität beim Raps einzusetzen, haben in zunehmendem Maße Hybridsorten Eingang in den Rapsanbau gefunden. Hybriden ermöglichen eine maximale Nutzung der Heterosis, welche auf zwei Hauptfaktoren beruht, der Eigenleistung und der Kombinationsfähigkeit, d. h. der genetischen Distanz (Diversität) zwischen den potenziellen Kreuzungspartnern.

Für eine systematische Nutzung der Heterosis ist der Aufbau heterotischer Subpopulationen (*heterotic pools*), von denen auf Grund ihrer Herkunft anzunehmen ist, dass sie sich genetisch stark unterscheiden, ein erster Schritt. Die genetische Diversität im Zuchtmaterial kann entweder auf Basis der Abstammung abgeschätzt oder aber mit Hilfe molekularer Marker und biostatistischer Verfahren geschätzt werden. Die so ermittelte genetische Distanz gibt einen ersten Hinweis auf die zu erwartende Leistung potenzieller Hybriden zwischen den Pools. Denn neben der Eigenleistung, die eine gewisse Ertragsbasis darstellt, unterscheiden sich potenzielle Kreuzungseltern in ihrer Kombinationsfähigkeit, d. h. inwieweit sie in Kreuzungen mit anderen Linien Heterosis-Effekte in Form von Mehrleistung gegenüber den Eltern zeigen. Neben dieser durchschnittlichen Eignung einer Linie als Kreuzungselter (Allgemeine

Kombinationsfähigkeit, *general combining ability*, GCA) wird das heterotische Potenzial zweier bestimmter Kreuzungspartner vor allem durch die Spezifische Kombinationsfähigkeit (*specific combining ability*, SCA) bestimmt. In beiden Fällen handelt es sich um heritable quantitative Merkmale.

Ein Hybridzuchtprogramm beinhaltet die folgenden Schritte: 1) Identifikation und gegebenenfalls Schaffung heterotischer Gruppen, 2) Ermittlung und Verbesserung der Eigenleistung bezüglich Ertragsleistung, Stabilität und Qualität innerhalb dieser Pools, 3) Tests auf Kombinationsfähigkeit (GCA) zwischen den Pools zur optimalen Nutzung der Heterosis, 4) Tests von Inzuchtlinien verschiedener Pools auf SCA zur Identifikation der besten Kombinationen (Experimentalhybriden) und 5) Identifizierung und Erzeugung von Sortenkandidaten. Ein geeignetes System zur gelenkten Bestäubung für die Erzeugung der F₁-Hybriden kann zu einem späteren Zeitpunkt in das Zuchtmaterial integriert werden. Im Falle des vorliegenden Programms wurden für die gelenkten Bestäubungen die männlich sterilen MSL-Mutterlinien („Männliche Sterilität Lembke“, PAULMANN und FRAUEN 1998) ‚MSL-Express‘ und ‚MSL-Falcon‘ verwendet, um die Erzeugung der zahlreichen Kreuzungskombinationen zu erleichtern.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes lag ein Schwerpunkt der Arbeiten in der Entwicklung genetisch divergenter Linien auf Basis von ++-Rapsformen (erucasäure- und glucosinolathaltig), die über Kreuzungen mit 00-Raps (Qualitätskonversion) generiert wurden und anhand ihrer Kombinationsfähigkeit mit Qualitätsrapslinien als Tester (‚MSL-Express‘ bzw. ‚MSL-Falcon‘) verbessert worden sind. Wesentliches Ziel des Vorhabens war die Entwicklung von divergentem Pflanzenmaterial mit verbesserter Kombinationsfähigkeit für quantitative Leistungsmerkmale, die anhand multivariater (mehrjähriger, mehrortiger) Feldversuche erfasst werden sollten. Ferner sollte eine genetische Karte für die Leistungseigenschaften entwickelt werden, um so erste fundierte Hinweise auf die genetische Basis der Heterosis in dem untersuchten *B. napus*-Material zu gewinnen.

2 Literaturübersicht

Das natürliche Fortpflanzungssystem bei Raps beinhaltet sowohl Selbst- als auch Fremdbefruchtung, so dass grundsätzlich verschiedenste Sortentypen züchterisch realisiert werden können (vgl. THOMPSON 1983; SCHUSTER 1987; BECKER *et al.* 1999). Die überwiegende Zahl der in Deutschland zugelassenen freiabblühenden Winterrapsorten entstammen einer reinen oder modifizierten Stammbaumzüchtung (Linien-Sorten) oder stellen Populationsorten (OP-Sorten) dar (BSA 2005). Allein auf Grund einer mehr oder weniger strengen Linienzüchtung kann ein geschätzter Zuchtfortschritt bezüglich Kornertrag von jährlich zwei Prozent erzielt werden. Daraus resultiert ein Ertragspotenzial von über 50 dt/ha, bei gleichzeitig hoher Kompensationsfähigkeit während der Ertragsbildung (vgl. RÖBBELEN 1994). Die offiziellen Ergebnisse der jüngsten Zeit machen deutlich, dass ein Kornertrag von 50 dt/ha im praktischen Winterrapsanbau heute ohne weiteres erzielt werden kann: Der Bundesdurchschnitt betrug im Erntejahr 2005 immerhin 40,3 dt/ha bei ca. 1,43 Mio. ha Anbaufläche. Auch unter sogenannten Low-Input Bedingungen konnte eine Ertragssteigerung mit speziell hierfür geeigneten Linien gezeigt werden (FRIEDT *et al.* 2003).

Da es sich beim Raps um eine partiell allogame Art mit durchschnittlich ca. 30% Fremdbefruchtung handelt, kommen hier alternativ entsprechende Sortentypen - wie *Synthetics* - in Betracht (vgl. u. a. SCHUSTER 1987; BECKER *et al.* 1992, 1997). Insbesondere aber die Entwicklung von Hybridsorten erlaubt eine systematische Nutzung eines durch Heterosis bedingten Mehrertrags und damit auch eine maximale Ausschöpfung des Ertragspotenzials unter variablen Umweltbedingungen. Es liegen zahlreiche Untersuchungen zur Heterosis in Raps-Experimentalhybriden vor, wobei Mehrerträge von 20%, in Einzelfällen sogar bis zu 50% beschrieben wurden (u. a. SCHUSTER und MICHAEL 1976; LÉFORT-BUSON *et al.* 1987; BRANDLE und McVETTY 1990; McVETTY *et al.* 1991).

Generell gibt es verschiedene Strategien zur Schaffung von genetisch divergenten Formenkreisen beim Raps: 1) Neue Formenkreise aus resynthetisierten (RS) Rapsformen (vgl. BECKER *et al.* 1995; LÜHS *et al.* 1998, 2002, 2003; GIRKE *et al.* 1999); 2) Nutzung existierender Winter- und Sommerformenkreise (u. a. BUTRUILLE *et al.* 1999); 3) Spreizung der genetisch divergenten Gruppen im aktuellen 00-Winterraps-Sortiment (erucasäurefrei und glucosinolatarm), wie sie bei den einzelnen Züchtern vorrangig verfolgt wird. Eine neue Strategie stellt 4) die Erweiterung des Genpools mit erucasäure- und glucosinolathaltigem Material dar, welches aus alten ++-Sorten hervorgegangen ist und seit geraumer Zeit züchterisch nicht mehr intensiv genutzt wurde (vgl. THOMPSON 1983).

2.1 Hybridzüchtung bei Raps

2.1.1 Genetische Diversität für Heterosis als Basis für die Hybridzüchtung

Voraussetzung für eine erfolgreiche Hybridzüchtung ist das Vorhandensein von möglichst divergentem Kreuzungsmaterial, um den Heterosiseffekt optimal nutzen zu können. Für mitteleuropäischen Winterraps sind jedoch nur drei verschiedene Landrassen als Ursprungsformen bekannt. Diese entwickelten sich in verschiedenen Klimazonen Europas und zeigen eine Variation im vegetativen Wachstum und in der Winterhärte. Die erste deutsche Sorte, ‚Lembkes Winterraps‘, selektiert aus einer mecklenburgischen Landsorte, wurde später sowohl in deutschen als auch in französischen, schwedischen und polnischen Zuchtprogrammen intensiv eingesetzt.

Durch die Einführung der 00-Qualität kam es zu einer weiteren Einengung der genetischen Basis des Ölrapszuchtsortimentes, da diese Eigenschaften ebenfalls aus einzelnen Quellen stammten, nämlich den Sommerraps-Sorten ‚Liho‘ und

„Bronowski“. Indes stellt die Erweiterung der genetischen Basis eine essenzielle Grundlage für eine konsequente Nutzung der Heterosis dar (THOMPSON 1983; DOWNEY and RAKOW 1987).

Größere Wüchsigkeit und eine Ertragssteigerung zeichnen eine Hybride aus, die nach Kreuzung zweier genetisch unterschiedlicher, homozygoter Genotypen erstellt wird. Die sogenannte „Heterosis“ wurde von SHULL (1908, 1922) beobachtet und beschrieben. Nach gängiger Meinung führen vor allem dominante Allele in den Kreuzungseltern zu einem Auftreten von Heterosis. CROW (1999) und GOODNIGHT (1999) geben eine zusammenfassende Darstellung der genetischen Grundlagen der Heterosis unter Berücksichtigung von Überdominanz und epistatischen Effekten.

Hohe Heterosis-Effekte treten vor allem dann auf, wenn die Kreuzungseltern sich genetisch stark unterscheiden (BECKER 1993). Grundlage für eine optimale Nutzung der Heterosis in der Hybridzüchtung stellten die Identifizierung oder Entwicklung genetisch unterschiedlicher Genpools dar. Diese sind dadurch charakterisiert, dass Kreuzungen zwischen diesen Gruppen (inter-pool Kreuzungen) eine höhere Heterosis bewirken als Kreuzungen innerhalb der Gruppen (intra-pool Kreuzungen). Vergleichsweise sind z.B. Erträge von Sommerrapshybriden, die aus Kreuzungen möglichst entfernt verwandter Sommerrapssorten hervorgehen, generell höher als Erträge aus Kreuzungen nahe verwandter Sommerrapssorten (BECKER 1995). Bei Sommerraps wurde der größte Heterosiseffekt in Kreuzungen zwischen weiter entfernt verwandten Eltern, wie im Fall der kanadischen Sommerrapssorte ‚Regent‘ und der australischen Sommerrapssorte ‚Marnoo‘, festgestellt (BRANDLE & McVETTY 1989; DIERS *et al.* 1996).

Das Interesse an der Entwicklung von Hybridrapssorten mit höherem Ertragspotenzial wurde durch Berichte über cytoplasmatisch-männliche Sterilität (CMS) geweckt (vgl. SCHUSTER & MICHAEL 1976; THOMPSON 1972). Einige Arbeiten (SCHUSTER & MICHAEL 1976; MORICE 1978; BUSON 1980; HUTCHESON *et al.* 1981) berichteten, dass der Kornertrag von F₁-Hybriden bei *B. napus* und *B. rapa* den Ertrag der Eltern um 40 - 60 % übertreffen kann. Auch

berichteten GRANT & BEVERSDORF (1985) sowie LÉFORT-BUSON *et al.* (1987) bei F₁-Hybriden von Raps (*B. napus* L.) über eine Heterosis von 40 - 70 %.

Um den Ursachen der Heterosis näher zu kommen, untersuchten LÉFORT-BUSON *et al.* (1987) in einer Arbeit über Heterosis und Kombinationseignung den Ertrag von Ölrapshybriden aus Kreuzungen zwischen Linien ähnlichen und unterschiedlichen Ursprungs. Hybride, die aus Linien desselben Ursprungs hervorgingen, zeigten niedrigere Heterosiswerte im Vergleich zu Hybriden, die aus genetisch verschiedenen Kreuzungen hervorgingen.

Im Allgemeinen lässt sich feststellen, dass in Situationen mit ausgeprägter Heterosis, wie z. B. für den Ertrag bei Fremdbefruchtern, die GCA- und SCA-Varianzen etwa gleich groß sind. Dies zeigen eine Reihe von jüngeren Untersuchungen bei Mais, Winterweizen, Ackerbohne, Sojabohne und Sorghum. Dagegen überwiegt in Situationen mit geringerer Heterosis, also z. B. für den Ertrag bei Selbstbefruchtern, die GCA-Varianz, und bei nicht-heterotischen Merkmalen ist die SCA generell nicht von Bedeutung (BORGHI & PERENZIN 1994; MARTIN *et al.* 1995; STELLING *et al.* 1996; LI *et al.* 1997; SANVICENTE *et al.* 1998; PERENZIN *et al.* 1998; DHANDA & SETHI 1998; MELCHINGER *et al.* 1998; BUERSTMAYR *et al.* 1999; HAUSSMANN *et al.* 1999; UTZ *et al.* 2000; CHO & SCOTT 2000).

Für den Raps bzw. für *Brassica*-Arten liegen bezüglich der Beiträge von GCA- und SCA-Effekten nur wenige publizierte Beispiele vor. In einer Arbeit, in der die Vererbung des Samenglucosinolatgehaltes (GSL) von Winterraps in diallelen Kreuzungen untersucht wurde, konnte gezeigt werden, dass bei diesem gering heterotischen Merkmal die genetische Variabilität von GCA-Effekten bestimmt ist (RÜCKER & RÖBBELEN 1994). In diallelen Kreuzungen bei Kohl (*B. oleracea*) wurde ebenfalls festgestellt, dass Kohlhernie-Resistenz im wesentlichen durch GCA-Effekte determiniert ist (GRANDCLEMENT *et al.* 1996).

Auch gibt es bei Raps nur wenige Untersuchungen, in denen die Anteile von GCA und SCA bezüglich der Ertragsleistung systematisch erfasst wurden. In einer Arbeit von DIERS *et al.* (1994) wurden GCA-Effekte untersucht und die Effekte auf Grund der genetischen Distanz (GD) der Eltern mittels RFLP geschätzt. Die GCA-

Werte waren signifikant korreliert mit der Wuchshöhe der Hybriden sowie mit den Öl- und Proteingehalten. Die genetische Distanz hingegen war nur mit der Wuchshöhe korreliert. Diese Untersuchung macht deutlich, dass GD-Schätzwerte allein nicht immer ausreichen für die Identifikation von ertragreichen Hybridkombinationen (vgl. in diesem Zusammenhang auch analoge Arbeiten bei Weizen von MARTIN *et al.* 1995 und PERENZIN *et al.* 1998).

Das Potenzial für Hybridrapssorten wurde ausreichend dokumentiert (SCHUSTER & MICHAEL 1976; SERNYK & STEFANSSON 1983; GRANT & BEVERSDORF 1985; LÉFORT-BUSON *et al.* 1987; BRANDLE & McVETTY 1989). Verschiedene Bestäubungssysteme wurden entwickelt (BUZZA 1995), und Hybridsorten daraufhin kommerziell verfügbar gemacht.

BUTRUILLE *et al.* (1999) erforschten die Möglichkeit, mit Hilfe der Nutzung von Winterrapsmaterial den Ertrag von Sommerraps zu erweitern. In anderen Arbeiten wurde bisher nur Sommerraps- mit Sommerrapsmaterial (SERNYK & STEFANSSON 1983; GRANT & BEVERSDORF 1985; BRANDLE & McVETTY 1990; ENQVIST & BECKER 1991) oder Winter- mit Wintermaterial gekreuzt (LÉON 1991; ALI *et al.* 1995).

Als Fazit kann festgehalten werden, dass für die Erzielung maximaler Heterosiseffekte - und damit für eine erfolgreiche Hybridzüchtung - die Kombination genetisch möglichst unterschiedlicher Eltern eine essenzielle Voraussetzung ist.

2.1.2 Genetische Systeme männlicher Sterilität

Die Züchtung von Hybridsorten setzt zur vollständigen Nutzung der Heterosis einerseits die Verhinderung von Selbstbefruchtung, andererseits die Vermeidung unerwünschter Fremdbefruchtung der mütterlichen Elternkomponente voraus. Für eine effektive Hybridzüchtung bei zwittrigen Pflanzen wie Raps ist ein Verfahren zur gezielten Hybridsaatgut-Produktion erforderlich. Die Notwendigkeit solcher

Systeme wird in der Arbeit von SERNYK & STEFANSSON (1983) deutlich, wo die Ausprägung von Heterosis in Sommerraps untersucht und berichtet wurde, dass die erfolgreiche Entwicklung von Raps-Hybridsorten von einem geeigneten cytoplasmatischen, genetischen oder chemischen Bestäubungssystem abhängt.

Bei Verfügbarkeit eines stabilen Sterilitätssystems wie CMS wird in den Elternlinien des einen Formenkreises die CMS-Eigenschaft eingekreuzt, wogegen die selektierten Kreuzungspartner des komplementären Genpools die Gene für die Restauration der Pollenfertilität enthalten müssen. Liegen keine Informationen über deutlich getrennte Genpools vor, sind zur Identifizierung gut kombinierender Eltern umfangreiche Testkreuzungsprogramme mit mehrortigen Leistungsprüfungen notwendig. Der Vorteil von Hybridsorten gegenüber Liniensorten liegt nicht allein in der Ausnutzung von Heterosis zur Ertragssteigerung, sondern auch in einer höheren Ertragsstabilität bedingt durch Heterozygotie der Hybriden (PAULMANN & FRAUEN 1991). Dies konnte von LÉON (1987) auch beim Raps nachgewiesen werden. Die Überlegenheit von Hybriden wird besonders deutlich unter ungünstigen Umweltbedingungen. In einer Zusammenstellung zeigte BECKER (1987) anhand von drei mehrjährigen Ergebnissen, dass die relative Höhe der Heterosis im ungünstigeren Jahr etwa doppelt so hoch wie im ertragreicheren Jahr war.

Im Vordergrund der verfügbaren männlichen Sterilitätssysteme stehen das Ogu-INRA CMS-System (RENARD *et al.* 1997) und das MSL-System („Männliche Sterilität Lembke“, PAULMANN und FRAUEN 1998).

Das Ogu-INRA CMS-System wurde durch Protoplastenfusion zwischen Raps und Ölrettich entwickelt (RENARD *et al.* 1997). Die enge Kopplung des Restorergens *Rfo* aus *Raphanus sativus* mit einem Gen für hohen Glucosinolatgehalt erschwert die Entwicklung von F₁-Hybriden mit 00-Qualität. Deswegen wurden mit diesem Hybridsystem zunächst nicht restaurierte, männlich sterile F₁-Hybriden entwickelt und mit einer 20%igen Beimischung einer Bestäubersorte als sogenannte Verbundsorten auf den Markt gebracht. Nach der Entwicklung von Restorerlinien mit reduziertem Glucosinolatgehalt (DELOURME *et al.* 1999) ist mit diesem System auch die Entwicklung restaurierter Hybridsorten möglich.

Das in Europa derzeit auch stark verwendete MSL-Hybridsystem geht auf spontane Mutation und Selektion zurück. Aus diesem Sterilitätssystem entwickelte Hybriden sind durch eine sehr gute Fertilitätsrestauration und niedrige Glucosinolatgehalte gekennzeichnet.

2.2 Ertragsstruktur von Raps

Die Entwicklungsstadien des Rapses können in folgende vier Hauptphasen gegliedert werden: Blattbildung (Jugendphase), Streckung (Knospenstadium), Blüte und Reifung (CRAMER 1990).

Der Ertrag ist das Resultat einer Anzahl komplexer Wachstums- und Entwicklungsprozesse (DIEPENBROCK & GROSSE 1995). Die Ertragskomponenten des Rapses sind durch die Anzahl der Pflanzen pro Flächeneinheit, die Anzahl der Sprossachsen (Hauptsprossachse und Seitensprossachsen unterschiedlicher Ordnung), die Anzahl der Schoten pro Sprossachse und die Anzahl Samen pro Schote sowie das durchschnittliche Samengewicht gekennzeichnet. Ferner ist der gewinnbare Fettanteil der Samen und im Hinblick auf eine Verwertung des Rapskuchens auch dessen Futterwert, insbesondere in Form von Eiweiß, zu berücksichtigen. Die genannten Ertragskomponenten sind in der Beurteilung der Bestandesleistung sowie im Hinblick auf ihre Bedeutung in der Ertragsbildung in Abhängigkeit von der Bestandesdichte – dem wesentlichen produktionstechnischen Eingriff – auf die Fläche zu beziehen; die Ertragsstruktur ist danach durch die Pflanzenzahl sowie die Schoten- bzw. Samenzahl pro Flächeneinheit und das durchschnittliche Samengewicht gekennzeichnet (GEISLER & DIEPENBROCK 1985).

Die Ertragsanalyse von Raps wurde in einer Reihe von wissenschaftlichen Arbeiten untersucht (DIEPENBROCK 2000; GROSSE *et al.* 1992; DIEPENBROCK & GROSSE 1995; THURLING *et al.* 1974a, THURLING *et al.* 1974b; SCHUSTER & SRA 1979).