
Universität Hannover
Institut für Gemüsebau

Diplomarbeit

Modelle zur Simulation des Wachstums und der Entwicklung von Blumenkohl

vorgelegt von

Stefan Bohres

Mai 1996

Betreuer Prof. Dr. H.-J. Wiebe

Vom Kohl

„Kole“ und „Weydenkole“ und „Kochkole“ sind von feuchter Natur, und „kappus“ ist etwas mehr kalt als warm, und ein wenig von trockener Natur, und sie wachsen von der Flüssigkeit des Taus und der Luft. Und davon haben sie sozusagen Kräfte und Eingeweide, und ihr Saft ist eher unnütz, und in den Menschen werden Krankheiten von ihnen erzeugt und schwache Eingeweide werden verletzt. Gesunde Menschen können sie durch ihre Kräfte bewältigen. Aber für fette Menschen sind sie schädlich, weil ihr Fleisch an Saft Überfluß hat, und gegessen sind sie ihnen fast so schädlich wie den Kranken. Und im Mus und im Fleisch gekocht sind sie schädlich, und sie vermehren eher die üblen Säfte als daß sie diese vermindern.

Hildegard von Bingen (12. Jahrhundert): „Physica“, 1. Buch, 84. Kapitel.

Inhalt

1 Einleitung	1
2 Botanische Grundlagen	2
2.1 Abstammung der Kulturpflanze	2
2.2 Wachstum und Entwicklung	3
2.2.1 Definitionen	3
2.2.2 Einteilung in Entwicklungsphasen.....	3
2.2.3 Jugendphase	4
2.2.4 Vernalisationsphase	6
2.2.5 Kopfbildungsphase.....	10
2.2.6 Variabilität im Bestand.....	13
2.3 Sortenunterschiede	17
3 Kulturmaßnahmen	20
3.1 Gezielte Vernalisation.....	20
3.2 Jungpflanzenanzucht	21
3.3 Einflußnahme auf den Kulturverlauf	22
3.4 Anbauplanung	23
4 Beschreibung und Vergleich von Modellansätzen	27
4.1 Beschreibung der Modelle.....	27
4.1.1 Arbeitsgruppe BOOIJ (NL).....	27
4.1.2 Arbeitsgruppe GREVSEN (DK)	31
4.1.3 Arbeitsgruppe PEARSON (GB)	37
4.1.4 Arbeitsgruppe WIEBE (D)	41
4.1.5 Arbeitsgruppe WURR (GB)	49

4.2 Vergleich der Modelle	54
4.2.1 Voraussetzungen für einen Vergleich	54
4.2.2 Modelle der Jugendphase	56
4.2.3 Modelle der Vernalisationsphase	58
4.2.4 Modelle der Kopfbildungsphase	59
4.3 Diskussion der Modelle.....	69
5 Ansätze zur Optimierung eines Simulationsmodells	78
5.1 Phaseneinteilung	78
5.2 Streuung im Pflanzenbestand	81
5.3 Mögliche Erweiterung.....	85
6 Zusammenfassung	86
7 Literatur	87

Abbildungen

Abb. 1: Wachstumskurve einer späten Blumenkohlsorte (nach WIEBE 1973a)	14
Abb. 2: Mittlere Kulturdauer von Blumenkohl in Abhängigkeit von der Pflanzzeit bei langjährigen Durchschnittstemperaturen (verändert nach WIEBE 1980).....	16
Abb. 3: Unterschiede in Wachstum und Entwicklung verschiedener Blumenkohlsorten .	19
Abb. 4: Pflanzwoche von Blumenkohlsorten in Abhängigkeit von der angestrebten Erntewoche (nach MARTIN 1985).....	25
Abb. 5: Beziehung zwischen der Nummer des Tages der Kopfanlage und der Dauer des Kopfwachstums der Sorten 'Delira' und 'Elgon' (nach BOOIJ 1987b).....	30
Abb. 6: Vorhergesagte Temperatursummen $> 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ von Pflanzung bis Ernte für sechs Blumenkohlsorten (nach GREVSEN 1990)	33
Abb. 7: Kopfdurchmesser von Pflanzen der Sorte 'Revito' in Abhängigkeit von der Temperatursumme ab der Kopfanlage (nach PEARSON et al. 1994).....	40
Abb. 8: Programmablauf und Funktionswerte der Temperaturwirkung (WIEBE 1975a)	43
Abb. 9: Simulation des Phasenverlaufs für die Sorte 'Arfak', Pflanztag 06.05.1992	47
Abb. 10: Gemessene und simulierte Kulturdauer (Ruthe 1991-1993, 112 Sätze)	48
Abb. 11: Gemessene und simulierte Kulturdauer mit einer Stichprobe der Kopfgrößen (Ruthe 1991-1993, 112 Sätze).....	48
Abb. 12: Mögliche Formen der Vernalisationsfunktion f (nach WURR et al. 1993)	49
Abb. 13: Kopfdurchmesser in Abhängigkeit von der Temperatursumme $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab der Kopfanlage für die Sorte 'White Fox' (nach WURR 1990)	53
Abb. 14: Bestimmung des Temperatursummenbedarfs bis zur gewünschten Größe (nach WURR 1988)	54
Abb. 15: Kulturdauer in Abhängigkeit vom Pflanztag für Blumenkohl der Sorte 'Arfak', Ruthe, 1991-1993, 29 Sätze	56

Abb. 16: Blattanlageraten in Abhängigkeit von der Temperatur.....	57
Abb. 17: Vernalisationsraten in Abhängigkeit von der Temperatur.....	59
Abb. 18: Beziehung zwischen den prozentualen Funktionswerten und dem Kopfdurchmesser für das Modell WIEBE (1975a)	61
Abb. 19: Geschätzte Kopfwachstumsraten in Abhängigkeit von der Temperatur für Kopfdurchmesser von 0.6 mm bis 64 mm.....	62
Abb. 20: Geschätzte Kopfwachstumsraten in Abhängigkeit von der Temperatur für Kopfdurchmesser von 65 mm bis zur Erntegröße	62
Abb. 21: Verlauf der simulierten Wachstumsraten bei einer konstanten Temperatur von 15 °C in Abhängigkeit von der Zeit ab der Kopfanlage (PEARSON)	63
Abb. 22: Simulierter Verlauf des Kopfwachstums bei konstant 15 °C (PEARSON)	64
Abb. 23: Simulierter Verlauf des Kopfwachstums bei konstant 15 °C für vier Modelle.....	65
Abb. 24: Beziehung zwischen der mit vier Modellen simulierten und in Feldversuchen bestimmten Kulturdauer nach einer Stichprobe der Kopfdurchmesser.....	67
Abb. 25: Häufigkeiten der Abweichung der sim. von der gem. Kulturdauer	68
Abb. 26: Gemessene und simulierte Erntedauer von Blumenkohl (Ruthe 1991-1993)	82
Abb. 27: Vergleich der tatsächlichen und simulierten Blumenkohlanlieferung an einen Großmarkt 1994	83
Abb. 28: Mögliche Einteilung von Jungpflanzen in Klassen am Beispiel der Blattzahl	84

Tabellen

Tab. 1: Gruppierung von Sorten nach ihren Eigenschaften (MARTIN 1985).....	24
Tab. 2: Im Modell verwendete Parameter der sechs Sorten (nach GREVSEN 1990)	32
Tab. 3: Abschätzung der Parameter der Blattanlagerate (GREVSEN und OLESEN 1994).....	34
Tab. 4: Temperatursummen für Jugend- und Vernalisationsphase für verschiedene Sorten (nach GREVSEN und OLESEN 1994).....	36
Tab. 5: Werte der Parameter für das Modell zur Abschätzung des Kopfdurchmessers (nach PEARSON et al. 1994)	40
Tab. 6: Funktionswerte für die drei Phasen in Abhängigkeit von der Temperatur	44
Tab. 7: Einteilung der Sorten in Gruppen und spezifische Parameter	45
Tab. 8: Parameter zur Berechnung des Vegetationskegeldurchmessers für die Sorte 'White Fox' (nach WURR et al. 1993)	51
Tab. 9: Simulierte Dauer des Kopfwachstums von 1 mm bis 120 mm in Tagen.....	65
Tab. 10: Mittelwerte und Standardabweichung für die Abweichung der simulierten von der in Feldversuchen bestimmten Kulturdauer	67

1 Einleitung

Die Bedeutung des Kohls hat sich seit der Zeit der Hildegard von Bingen (12. Jh.) stark gewandelt. Heute gehört Kohl zu den wichtigsten Gemüsearten. Besonders der Kopfkohl (Weißkohl, Rotkohl, Wirsingkohl) trägt aufgrund der guten Lagerfähigkeit und des relativ hohen Vitamin C-Gehaltes in vielen Ländern wesentlich zur Ernährung der Bevölkerung bei, was sich in einer Anbaufläche von etwa 1.6 Millionen ha weltweit ausdrückt.

Der Blumenkohl (*Brassica oleracea* L. conv. *botrytis* var. *botrytis*) ist mit einer Fläche von etwa 6000 ha (ZMP 1995) in Deutschland eine Kultur des intensiven Freilandgemüsebaus. Da Blumenkohl nur für kurze Zeit ohne große Qualitätsverluste lagerfähig ist, muß die Marktversorgung durch Importe (etwa 60 %, vorwiegend aus Frankreich und Italien) ergänzt werden. Von Mai bis Oktober wird fast ausschließlich Inlandware vermarktet (WIEBE 1991).

Im Verlauf der Erntesaison kommt es zu Schwankungen in der wöchentlichen Marktbelieferung. Nach Wärmeperioden treten häufig Erntespitzen auf, die als „weiße Wochen“ bezeichnet werden. Die Konsequenz sind Vermarktungsprobleme mit zum Teil erheblichen Preisverlusten. In den folgenden Wochen mit geringeren Erntemengen kann es zu Lieferengpässen kommen, die nur zum Teil durch Lagerung abzufangen sind. Begründet werden diese Schwankungen durch das qualitative Vernalisationsbedürfnis der Pflanzen (WIEBE 1980).

In dieser Arbeit sollen die verschiedenen Lösungsansätze vorgestellt und diskutiert werden. Die Grundlage bilden Kenntnisse über Wachstum und Entwicklung von Blumenkohl. Sind die Schwankungen über Steuerung der Erntetermine durch Kulturmaßnahmen nicht vermeidbar, so ist deren Vorhersage mit Simulationsmodellen ein sinnvolles Hilfsmittel, um die Vermarktung zu unterstützen (WURR 1988).

In der mir zugänglichen Literatur finden sich nur wenige Simulationsmodelle, die das Wachstum und die Entwicklung von Blumenkohl umfassend beschreiben. In einer Übersicht sollen daher auch Ansätze vorgestellt werden, die nur bestimmten Phasen oder Teilaspekte des Wachstums und der Entwicklung betreffen und in Modelle integriert werden können.

2 Botanische Grundlagen

2.1 Abstammung der Kulturpflanze

Die heute genutzten Kohlarten sind vermutlich auf den Wildkohl (*Brassica oleracea* L. var. *oleracea*) zurückzuführen, allerdings auf verschiedene Wildsippen an verschiedenen Orten. Der Wildkohl, der auch heute noch an den Küsten des Mittelmeeres und an der europäischen Atlantikküste anzutreffen ist, ist sehr blattreich und blüht im zweiten Jahr nach der Keimung (WIEBE 1991).

Den Kohlarten gemeinsam ist neben dem Blütenaufbau, der zur Zuordnung zur Familie *Brassicaceae* (Kreuzblütler) führt, die entwicklungsphysiologische Anpassung an das Verbreitungsgebiet, das vorwiegend nördlich der Tropen liegt. Nach WIEBE (1991) sind die Pflanzen in der Regel zweijährig und bilden im ersten Jahr in der vegetativen Phase eine Rosette. Durch Kälteeinwirkung (Vernalisation) wird die generative Phase induziert oder gefördert und durch Streckung der Sproßachse (Schossen) sichtbar. Nur in wenigen Fällen wird die Blüteninduktion durch die Photoperiode gesteuert (WIEBE 1972a).

SEITZ (1984) nennt als erste eindeutige Beschreibung von Blumenkohl (*Brassica oleracea* L. conv. *botrytis* var. *botrytis*) ein spanisch-arabisches Abkommen über Landwirtschaft, das aus dem 12. Jahrhundert datiert und auch „syrischen Kohl“ umfaßt. Vermutlich wurde die Kohlart als Mutante in Syrien oder auf der Insel Zypern gefunden, gesammelt und verbessert. Nachweislich bezogen erstmals 1660 Erfurter Gärtner Blumenkohlsamen aus Candia, Zypern, der über Genua, Venedig und Hamburg nach Erfurt gelangte. Erst seit dem 18. Jahrhundert wurde Blumenkohlsamen auch in Europa gezogen. Zum beginnenden 20. Jahrhundert war Blumenkohl in Deutschland überall verbreitet (SEITZ 1984).

2.2 Wachstum und Entwicklung

2.2.1 Definitionen

Als Wachstum wird nach NULTSCH (1991) eine irreversible Volumen- und Substanzzunahme bezeichnet, die im Gegensatz zur Quellung an lebende Zellen gebunden ist.

Unter Entwicklung werden „die Art und Weise und der zeitliche Verlauf der Differenzierung verstanden“ (KRUG und WIEBE 1991, S. 92), also Prozesse, die zu formativen Veränderungen der Gestalt führen. Der Entwicklungsgang wird einerseits durch genetische Faktoren gesteuert, andererseits wirken umweltabhängige Größen modifizierend. Da allerdings auch Wachstumsprozesse eine Änderung der Gestalt zur Folge haben können und oft Voraussetzung bzw. Bestandteil von Entwicklungsprozessen sind, ist die Trennung der Begriffe unscharf (NULTSCH 1991), auch wenn Änderungen in der Entwicklung nicht notwendigerweise vom Wachstum abhängig sind (SALTER 1960).

KRUG und WIEBE (1991) beschreiben den Verlauf von Entwicklungsphasen mit drei Aspekten:

- Zahl der ausdifferenzierten Organe
- Differenzierungsrate (Geschwindigkeit der Ausdifferenzierung der Organe)
- Dauer der Entwicklungsphase (Entwicklungsrate als reziprokes Maß)

Weil die Entwicklung kein einheitlicher Prozeß ist, reagiert die Pflanze unterschiedlich auf Umweltfaktoren. Zum besseren Verständnis und zur Steuerung der Entwicklung ist es sinnvoll, Phasen mit einheitlicher Reaktionsnorm abzugrenzen, deren Beginn und Ende gut zu bestimmen sind (WIEBE 1972a).

2.2.2 Einteilung in Entwicklungsphasen

Da Blumenkohl entwicklungsphysiologisch qualitativ vernalisationsbedürftig ist, wobei der induktive Temperaturbereich sehr hoch liegt (WIEBE 1991), lassen sich folgende Phasen unterscheiden: Keimphase, autotrophe, vegetative Phase und generative Phase (WIEBE 1972a). Nach der Keimphase bildet die Pflanze Blätter aus. In Abhängigkeit von der Temperatur wird die Anlage von Blättern beendet und der Vegetationskegel differenziert Infloreszenzprimordien, womit die generative Phase beginnt.

Die verdickten, aufgrund der fehlenden apikalen Dominanz sukkulenten Infloreszenzäste vor dem Schossen werden in Anlehnung an WIEBE (1972a und 1973a) praxisüblich als Blumenkohlkopf bezeichnet. Er wird nach Überschreiten der Erntereife durch Streckung der Infloreszenzäste locker. Fertile Blüten werden an Seitentrieben höherer Ordnung (6.-7. Ordnung) gebildet (WIEBE 1991).

Weil die Köpfe in vollem Wachstum und damit vor der Blütenanlage und dem Ende der generativen Phase geerntet werden, ist eine andere Phaseneinteilung praktischer. Es werden in Übereinstimmung mit GREVSEN und OLESEN (1994) und WIEBE (1972a, b, c) die drei Entwicklungsabschnitte **Jugendphase**, **Vernalisationsphase** und **Kopfbildungsphase** unterschieden und im folgenden weiter analysiert.

2.2.3 Jugendphase

Die Jugendphase ist definiert als die Phase der Unempfindlichkeit für den Kältereiz, der zur Vernalisation einwirken muß (HAND und ATHERTON 1987, KRUG und WIEBE 1991). Für Blumenkohl wird ihre Existenz unter anderem von WIEBE (1972a), FUJIME (1983), BOOIJ (1987b) und WURR et al. (1994) bestätigt.

In der Jugendphase werden vom Vegetationskegel Blätter differenziert, also wird das Wachstum der Pflanzen zunächst von der Blattanlage und dem Blattwachstum bestimmt. Dabei beobachtete WIEBE (1972c) bei konstanter Temperatur eine Verbreiterung des Vegetationskegels mit steigender Zahl angelegter Blätter, dessen Breite bei vegetativen Pflanzen immer < 0.4 mm blieb. Dieses Ergebnis bestätigten BOOIJ und STRUIK (1990). Sie stellten heraus, daß die Breite des Vegetationskegels bis zur Anlage von 15-20 Blättern unabhängig von der Temperatur, aber linear korreliert mit der Blattzahl war.

Die Jugendphase wird unter normalen Kulturbedingungen bei einer festgelegten **Blattzahl** beendet, die bei verschiedenen Sorten unterschiedlich sein kann (WIEBE 1972a, BOOIJ und STRUIK 1990, GREVSEN und OLESEN 1994, WURR et al. 1994). Die ermittelten Blattzahlen für das Ende der Jugendphase liegen je nach Autor und Sorte zwischen 8 und 21 Blättern. Die Blattzahl ist nach HAND und ATHERTON (1987) ein stabiles Merkmal für das Ende der Jugendphase, was für Zeit, Blattfläche und Blatttrockengewicht nicht zutrifft.

Da auch in der folgenden Phase, der Vernalisationsphase, weiter Blätter angelegt werden, ist es schwierig, das Ende der Jugendphase exakt zu bestimmen (BOOIJ und STRUIK 1990, WURR et al. 1990c). Die Definition des Endes der Jugendphase über das morphologische Merkmal Blattzahl dient der Beschreibung der Entwicklungsphase. Welche biochemischen Prozesse zur Empfindlichkeit für den Kältereiz führen, ist nach WURR et al. (1994) noch unklar.

Die Höhe der **Blattanlagerate** (Blattzahl / Zeit) wird besonders von der Temperatur beeinflusst (WIEBE 1972c). Sie verlief in Klimakammern in verschiedenen Temperaturstufen (7 °C, 12 °C, 17 °C und 22 °C) fast linear zur Zeit. Dabei traten allerdings Unterschiede zwischen Sorten auf (WIEBE 1972a).

Sowohl die Blattanlagerate als auch das Wachstum der Jungpflanzen wurde bis 22 °C gefördert (WIEBE 1972c, WIEBE 1991). Da jedoch in Untersuchungen von WIEBE (1972c) das Pflanzengewicht bei gleicher Blattzahl bei 12 °C höher war als bei 17 °C und 22 °C, stellte der Autor fest, daß die Blattbildungsrate durch steigende Temperaturen stärker gefördert wurde als die Stoffproduktion. Als Basistemperatur für Blattanlage und Wachstum wird in dieser Phase von den meisten Autoren 0 °C angenommen (u. a. WURR 1990, WURR et al. 1990c, GREVSEN und OLESEN 1994).

Die Abhängigkeit der Blattanlagerate von der Strahlung ist geringer (WIEBE 1972c, WIEBE 1974). Auch GREVSEN und OLESEN (1994) fanden keine Korrelation zwischen der Strahlung und der Blattanlagerate. Sie vermuten, daß die Blattanlagerate von der Temperatur und der Zahl der bereits angelegten Blätter abhängig ist. Sie nahm mit steigender Temperatur und Blattzahl zu.

WIEBE (1972a) erkannte, daß bei niedrigen Lichtintensitäten die Jugendphase durch die Anlage höherer Blattzahlen verlängert wurde. Ein ähnlicher Effekt wurde durch Schwächung der photosynthetischen Leistung durch Entfernen von Laubblättern erreicht.

Die **Dauer der Jugendphase** kann bestimmt werden, wenn die Blattanlagerate in Beziehung zur Temperatur und die Blattzahl bis zum Ende der Jugendphase für eine Sorte bekannt ist (HAND und AHERTON 1987). Sie betrug zum Beispiel in Untersuchungen von WIEBE (1972a) bei einer konstanten Temperatur von 12 °C je nach Sorte drei bis fünf Wochen ab der Aussaat, wobei 4 bzw. 8 sichtbare Blätter > 1 cm Länge angelegt worden

waren, was einer unter einem Mikroskop bestimmten Zahl von 10 bzw. 16 Blättern entsprach.

Die Jugendphase ist somit durch die für Entwicklungsstufen typischen drei Komponenten (siehe oben) charakterisierbar:

- Blattzahl
- Blattanlagerate (Blattzahl / Zeit)
- Dauer der Jugendphase.

2.2.4 Vernalisationsphase

Dem Begriff Vernalisation werden nach WURR et al. (1993) zwei verschiedene Bedeutungen zugeschrieben:

- 1 biochemische Prozeß, der ausgelöst durch Kälteeinwirkung die Voraussetzungen zur Blütenbildung schafft (Blühbereitschaft)
- 2 Induktion der Blüten durch Kälteeinwirkung

JANSEN et al. (1989) definieren den physiologischen Vorgang, bei dem Kälteeinwirkung die Bereitschaft zur Blütenbildung schafft (1) als „Vernalisation im engeren Sinne“ (S. 156), die Blüteninduktion (2) zur Unterscheidung als „Vernalisation im weiteren Sinne“ (S. 156). Hier wird der Prozeß der Umstimmung des Vegetationskegels von der Blattanlage zur Anlage von Infloreszenzprimordien als Vernalisation im engeren Sinne verstanden, da die Bildung des Kopfes nach WIEBE (1972b) Voraussetzung für die Blütenbildung ist.

Die biochemischen Vorgänge während der Vernalisation sind unklar. ATHERTON et al. (1987) beobachteten eine Akkumulation von Kohlenhydraten im Vegetationskegel, die der Bildung von Infloreszenzprimordien deutlich vorausging und mit der geringsten Dauer des Kältebedürfnisses verbunden war. Sie verstanden die Akkumulation als Ausdruck der Rolle des Vegetationskegels als physiologischer „sink“ („sinks“ sind nach JANSEN et. al 1989 Orte des Verbrauchs bzw. der Speicherung). Weiterhin gelang ihnen bei einem Teil von intakten Pflanzen der Ersatz des Kältereizes durch Applikation von Glucose. Eine mögliche direkte Regulation der Vernalisation durch Kohlenhydrate würde nach ihrer Meinung nicht die Rolle von Phytohormonen ausschließen.

WIEBE (1974) hingegen konnte keinen ursächlichen Zusammenhang zwischen dem Kohlenhydratgehalt im Vegetationskegel und der Vernalisationswirkung feststellen, da in seinen Versuchen auch Varianten mit niedrigen Kohlenhydratgehalten im Vegetationskegel infolge geringer Assimilation Köpfe bildeten.

Eine Erklärung des Vernalisationsprozesses bieten WURR et al. (1994) an. Die Autoren zitieren eine Hypothese von AUSTIN (1970), wobei die Kopfanlage auftrat, wenn die Menge eines fiktiven Stoffs (englisch „notional promoter“, WURR et al. 1994, S. 254) einen bestimmten Level erreichte. Dieser Stoff sollte bei Tagestemperaturen unter einer bestimmten Basistemperatur gebildet und bei höheren Temperaturen wieder zerstört werden.

In ähnlicher Weise beschreiben JANSEN et al. (1989) die Bildung von stabilen, bisher nicht faßbaren Stoffwechselprodukten bei der Vernalisation, die unter der Bezeichnung „Vernalin“ zusammengefaßt werden. Die Autoren vermuteten eine Beteiligung von Gibberellin.

Zwischen dem Ende der Jugendphase und der Kopfanlage verdienen zwei Prozesse besondere Beachtung, nämlich die Blattanlage und die Verbreiterung des Vegetationskegels.

Da in der Vernalisationsphase weiter Blätter angelegt werden, können sich die Pflanzen in Abhängigkeit von der Phasendauer in den Blattzahlen erheblich unterscheiden, wie WURR et al. (1990a) betonen. Für sie war eine niedrige Blattzahl ein Zeichen für eine kurze Absättigung des Vernalisationsbedürfnisses, und eine starke Streuung der Blattzahlen eine Folge der schwankenden Absättigung.

Dabei muß eine höhere Blattzahl jedoch nicht gleichbedeutend mit einer längeren Vernalisationsphase sein, wie WIEBE (1972c) feststellte, da die Blattanlagerate und das Blattwachstum von höheren Temperaturen gefördert werden. Allerdings prognostizierte der Autor eine Verzögerung der Kopfanlage, wenn nach der Jugendphase längere Wärmeperioden mit Temperaturen über 20 °C auftreten. So wären Blattzahlen von 40-60 Blättern im Sommer in der Praxis häufig (WIEBE 1991). WURR et al. (1993) vermuten, daß auch die als annuell eingestufteten Pflanzen bei Temperaturen über 23 °C vegetativ bleiben würden.

Da die Ausformung des Kopfes von der Ausbildung des Blattapparates abhängt (SALTER 1960, WURR et al. 1988, WIEBE 1991), kann eine frühe Absättigung des Vernalisationsbedürfnisses zu kleinen Köpfen führen.

Als Mindestblattzahlen für eine normale Kopfbildung werden je nach Sorten 20-26 Blätter angegeben (SALTER 1960, WURR et al. 1988, WURR et al. 1990c, WIEBE 1991).

Einige Autoren beobachteten einen Wechsel in der Blattanlagerate nach einer bestimmten Blattzahl. HAND und ATHERTON (1987) ermittelten eine dreifach höhere Blattanlagerate in der Vernalisationsphase gegenüber der Jugendphase auf der Basis einer Temperatursumme. Sie deuteten diesen Wechsel als Übergang von der Jugendphase zur Vernalisationsphase. BOOIJ und STRUIK (1990) fanden heraus, daß die ersten 11 bzw. 12 Blätter langsamer als die folgenden angelegt wurden. Sie erkannten, daß der Wechsel in der Anlagerate im Durchschnitt um sieben Blätter vor dem Ende der Jugendphase auftrat, wie sie durch Überführung von Pflanzen mit verschiedenen Blattzahlen in induktive Bedingungen feststellen konnten. Bei den Versuchen von HAND und ATHERTON (1987) ergab sich eine Differenz von drei Blättern. Sowohl BOOIJ und STRUIK (1990) als auch GREVSEN und OLESEN (1994) wiesen darauf hin, daß der Wechsel in der Blattanlagerate nicht mit dem Ende der Jugendphase gleichzusetzen ist.

Als direkten Vernalisationseffekt bezeichnete WIEBE (1972c) die **Verbreiterung des Vegetationskegels**, die bereits nach wenigen Tagen einsetzte, wenn nach dem Ende der Jugendphase induktive Temperaturen einwirkten.

Nach einer Vegetationskegelbreite von über 0.4 mm setzt die Differenzierung der Infloreszenzprimordien ein. Ab der Breite von 0.6 mm wird die Pflanze von vielen Autoren als sicher generativ eingestuft (u. a. SALTER 1969, WIEBE 1972c, WURR et al. 1994, PEARSON et al. 1994, GREVSEN und OLESEN 1994).

Die **Rate der Verbreiterung des Vegetationskegels** (Verbreiterung / Zeit) ist dabei von der Temperatur abhängig, wobei Sorten unterschiedlich reagieren können (WURR et al. 1993). Sie war in Untersuchungen von WIEBE (1972b) in Klimakammern bei einer Temperatur von 12 °C am größten und bei 17 °C geringer. Bei 2 °C und bei 7 °C beobachtete der Autor innerhalb von 16 Tagen keine Verbreiterung. Wurden die Pflanzen allerdings schon nach 8 Tagen in ein Gewächshaus mit einer Temperatur von 22 °C umgesetzt, so verbrei-

terte sich auch der Vegetationskegel der Pflanzen, die vorher in der Temperaturstufe von 7 °C kultiviert worden waren. WIEBE (1972c) folgerte, daß eine Vernalisation im Bereich zwischen 2 °C und 17 °C möglich ist und nannte als optimalen Temperaturbereich 7 °C bis 12 °C, wenn als Kriterium die kürzeste Einwirkdauer zugrunde gelegt wird.

Die optimale Vernalisationstemperatur variiert nach WIEBE (1991) in Abhängigkeit von den untersuchten Sorten (vgl. 2.3: Sortenunterschiede).

GREVSEN und OLESEN (1994) stellten eine symmetrische Vernalisationsfunktion in Abhängigkeit von der Temperatur auf, deren größte Wirkung bei einer Optimumtemperatur von 12.8 °C lag, wobei sie als Basistemperatur 0 °C und als Maximumtemperatur aufgrund der Symmetrie 25.6 °C bestimmten. BOOIJ (1987a) erwartet eine optimale Vernalisationswirkung bei 12 °C.

Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen WURR et al. (1988), die als Optimalbereich für die Vernalisation Temperaturen von 5 °C bis 17 °C angaben. Sie entwickelten, ähnlich wie BREWSTER (1987) für Zwiebeln (*Allium cepa* L. var. *cepa*), eine Vernalisationsfunktion, mit der die Wirkung eines Tages mit einer Temperatur zwischen 0 °C und 25 °C auf die Vernalisation kalkuliert werden kann.

In späteren Untersuchungen im Freiland (WURR et al. 1993) stellten die Autoren eine Vernalisationsfunktion auf, deren Form sie durch ein Optimierungsverfahren bestimmten. Als untere Grenze nannten sie 9 °C, bei der der höchste Vernalisationseffekt auftrat. Die Wirkung nahm linear bis zur Temperatur von 21 °C ab. Unter einer Temperatur von 9 °C bzw. über 21 °C erwarteten sie keinen Vernalisationseffekt. Zu beachten ist allerdings, daß im Versuchszeitraum kaum Temperaturen unter 9 °C auftraten, so daß die Vernalisationsfunktion zwar statistisch richtig ermittelt wurde, die realen Verhältnisse jedoch eventuell nicht korrekt wiedergegeben werden.

Um zu prüfen, ob die in Klimakammern mit konstanten Temperaturen ermittelten Vernalisationswirkungen prinzipiell auch unter Freilandbedingungen gültig sind, setzte WIEBE (1974) Pflanzen nach der Jugendphase induktiven Bedingungen von 12 °C aus, die verschieden mit Temperaturen von 2 °C und 22 °C kombiniert wurden. Dabei variierten die Temperaturen nach 12 h, 18 h oder 24 h, so daß sich tägliche Durchschnittstemperaturen von 7 °C, 17 °C und 19.5 °C ergaben, oder wurden täglich konstant gehalten (Kontrollen bei 2 °C, 12 °C und 22 °C). Der Autor stellte fest, daß die Vernalisationswirkung der induktiven Temperatur je Zeiteinheit durch die Unterbrechung erhöht wurde,

aber keine Devernalisationen auftraten. Er folgerte, daß die in konstanter Temperatur ermittelte Vernalisationswirkung für die Wirkung von Tagesmitteltemperaturen im Freiland zugrunde gelegt werden kann, weil auch die Blattzahl in wechselnder Temperatur der Durchschnittstemperatur entsprach.

Der Vernalisationsbedarf wurde bis zur Anlage des Blumenkohlkopfes ermittelt (WIEBE 1972b), jedoch ist wahrscheinlich, daß bei einer Vegetationskegelbreite von mehr als 0.4 mm in induktiven Bedingungen auch die Blüteninduktion erfolgt ist, die erst nach dem Schossen sichtbar wird (WIEBE 1972c). FUJIME (1983) beobachtete, daß die Streckung der Infloreszenzäste sowie die Blütenanlage unterblieb, wenn die Pflanze nach der Kopfanlage nicht niedrigen Temperaturen ausgesetzt wurde. Er folgerte, daß das Kältebedürfnis für die Blütenbildung höher sein müsse als das für die Kopfanlage.

Die **Dauer der Vernalisationsphase** ist bei Einwirken der Optimumtemperatur für diese Phase am kürzesten (GREVSEN und OLESEN 1994). Sie beobachteten bei 12.8 °C eine Dauer von 11 Tagen, vergleichbar mit 8 Tagen bei Temperaturen im Bereich von 7 °C bis 12 °C (WIEBE 1972b). Dabei folgt nach WIEBE (1991) die Kopfanlage bei wechselnder Temperatur in etwa der Durchschnittstemperatur. Sowohl die Photoperiode als auch die Lichtintensität hatten keinen gesicherten Einfluß auf die Dauer der Vernalisationsphase (WIEBE 1972c, WIEBE 1974).

Auch die Vernalisationsphase läßt sich durch drei Komponenten (siehe oben) beschreiben:

- Breite des Vegetationskegels
- Rate der Verbreiterung des Vegetationskegels
- Dauer der Vernalisationsphase.

2.2.5 Kopfbildungsphase

Phänologisch läßt sich die erfolgte Vernalisation an der Unterdrückung der Blattanlage und der Differenzierung von Infloreszenzprimordien erkennen (WIEBE 1972b, ATHERTON et al. 1987). Dabei haben hohe Temperaturen im Hinblick auf die Kopfanlage keine Devernalisationswirkung. Das Wachstum von Brakteen, die in den Achseln der Infloreszenz-

primordien gebildet werden, wird durch hohe Temperaturen gefördert, was nach WIEBE (1991) als Devernalisation verstanden werden kann. Wachsen diese durch die Blattoberfläche, so verlaubt der Kopf, was als „Durchwuchs“ (englisch „Leafiness“, FUJIME 1983) bezeichnet wird und die Marktqualität vermindert (WIEBE 1991).

Als Ergebnis von sehr niedrigen Temperaturen nach einer Wärmeperiode kann es zu „Grießigkeit“ (englisch „Riciness“, FUJIME 1983) kommen. Dieser Qualitätsmangel bezeichnet die vorzeitige Anlage von Blütenknospen auf der Kopfoberfläche, die WIEBE (1991) als Ergebnis einer besonders intensiven Vernalisation betrachtet.

Als Prozesse, die in der Kopfbildungsphase auftreten, können das Wachstum der angelegten Blätter und das Dickenwachstum des Kopfes herausgestellt werden.

Zur Beschreibung des Blattwachstums kann sowohl die Blattfläche als auch das Blattgewicht (Trockensubstanz) dienen, da die Zunahme dieser Größen in der frühen Phase der Kopfbildung parallel verläuft (WIEBE 1972c). Der Autor ermittelte in Freilandversuchen (WIEBE 1973a), bereits während der Vernalisationsphase einen exponentiellen Anstieg des Blattgewichtes, der auch nach Beendigung der Blattanlage zunächst weiterlief. Sobald der Kopf, der physiologisch als „sink“ fungiert, einen Durchmesser von etwa 2 cm erreicht hatte, wurde der Anstieg des Blattgewichtes schwächer. Daher kann die Reduktion der Größe junger Blätter nach früher Kopfanlage (WIEBE 1972a) als Konkurrenz bezüglich der Assimilatverteilung zwischen Kopf und Blättern verstanden werden. Auch die von BOOIJ und STRUIK (1990) ermittelte abnehmende Wachstumsrate einzelner Blätter bis zum Erreichen einer Größe von 2 cm mit ansteigender Blattnummer kann durch diese Konkurrenz erklärt werden.

WIEBE (1973a) hob hervor, daß das Blattgewicht stärker von der Lichtintensität als von der Temperatur abhängig ist. Dabei lag das Temperaturoptimum für das Blattwachstum niedriger als das für das Kopfwachstum. Weiterhin fand er bei Sorten, die sich unter anderem im Blattgewicht zu Beginn der Kopfbildung unterschieden, keine Beschleunigung des Kopfwachstums durch die höhere Blattmasse. Der Autor zog den Schluß, daß die Assimilatversorgung des Kopfes in einem bestimmten Bereich vorrangig vor dem Blattwachstum erfolgte.

Störungen im Blattwachstum während der Kultur reduzieren nach WIEBE (1991) stark das Kopfgewicht. Diese können z. B. durch zu große Jungpflanzen (WIEBE 1973b), Bodenverdichtungen, zu hohe Bodenfeuchten, Frost oder Stickstoffmangel ausgelöst werden und zu den sogenannten „Vorblühern“ führen (WIEBE 1991). Der von FUJIME (1983) aufgestellte Behauptung, die Bildung von Vorblüher (englisch „Buttoning“) beruhe auf niedriger Temperatur direkt nach der Jugendphase, kann so nicht zugestimmt werden.

Zur Bestimmung des Kopfwachstums eignet sich besonders der **Kopfdurchmesser** (SALTER 1969, WIEBE 1973a, WURR et al. 1990b, PEARSON et al. 1994). Er ist nach WURR et al. (1990b) eng mit dem Kopfgewicht korreliert, hat aber den Vorteil, daß eine frühe Messung exaktere Ergebnisse liefert als das Wiegen.

Die **Kopfwachstumsrate** (Zunahme Kopfdurchmesser / Zeit) vergrößert sich mit steigender Temperatur bis zu einer Maximaltemperatur (WURR 1988, WURR 1990, GREVSEN 1990, GREVSEN und OLESEN 1994, WIEBE 1991). Als Basistemperaturen wurden 0 °C (GREVSEN und OLESEN 1994, WURR et al. 1990c), 2.8 °C (BOOIJ 1987b, PEARSON et al. 1994) oder 5 °C (GREVSEN 1990) vorgeschlagen, die meist über Rechenverfahren kalkuliert wurden.

Die Wirkung der Temperatur auf das Kopfwachstum ist dabei von der Kopfgröße abhängig. WIEBE (1973a) stellte heraus, daß bei größeren Köpfen die fördernde Wirkung höherer Temperatur stärker ist als kurz nach der Vernalisation. Der Autor maß im Freiland bei einer Durchschnittstemperatur von 12 °C eine tägliche Durchmesserzunahme von 0.7 cm und bei 17 °C eine Zunahme von 1.1 cm, wenn als Ausgangskopfgröße 8-10 cm zugrunde gelegt wurden. In Wärmeperioden betrug die tägliche Kopfdurchmesserzunahme etwa 1.2 cm (WIEBE 1975a).

Zu ähnlichen Ergebnissen kamen WURR et al. (1990b). Die Autoren hoben eine lineare Beziehung zwischen der Kopfwachstumsrate hervor und fanden Anzeichen für eine Maximumtemperatur von 23 °C. Sie folgerten, daß die lineare Beziehung der Wachstumsrate zu der Spanne der Temperaturen, die in Großbritannien auftreten, den Gebrauch einer Temperatursumme (englisch „accumulated day-degrees“, WURR et al. 1990b, S. 556) zur Vorhersage des Kopfwachstums rechtfertige.

SALTER (1969) schlug eine Maximaltemperatur von 15.6 °C vor, allerdings hielt WIEBE (1973a) diese für England zwar zufällig statistisch richtig, aber nicht der Beziehung zwischen Kopfwachstum und Temperatur entsprechend. Er beobachtete bis etwa 20 °C eine Förderung des Kopfwachstums.

Die Linearität der Beziehung zwischen Temperatursummen und der Kopfgröße, oft ausgedrückt als Logarithmus des Kopfdurchmessers ab der Zeit der Kopfanlage, wurde unter anderem von SALTER (1969) GREVSEN (1990) und PEARSON et al. (1994) bestätigt.

Die **Dauer der Kopfbildungsphase** ist insbesondere von der Temperatur nach der Vernalisationsphase abhängig. WIEBE (1973a) ermittelte bei Anbauversuchen im Freiland eine Dauer von 30-36 Tagen für das Wachstum von 0.1 bis 10 cm bei sechs Sätzen. Er hob hervor, daß der Einfluß der Temperatur bei einer Spanne von sechs Tagen nur gering sein konnte, allerdings lagen die durchschnittlichen Temperaturen meist zwischen 10 °C und 20 °C. BOOUJ (1987b) bestimmte die Dauer der Phase in Freilandversuchen mit 37-55 Tagen.

Die genaue Bestimmung des Endes der Kopfbildungsphase ist nicht allein von der Kopfgröße abhängig, sondern auch von dem zu erwartenden Qualitätsabfall (SALTER und FRADGLEY 1969, WURR et al. 1988).

WIEBE (1979) schlug vor, Köpfe ab einem Durchmesser von 11 cm und vor Qualitätsverlusten durch Farbveränderungen, Krankheiten oder dem beginnenden Schossen zu ernten, WURR et al. (1990a) hielten Kopfgrößen von 12-15 cm für realistisch.

Dabei sind auch die Anforderungen des Marktes zu beachten. Im Sommer werden relativ große Köpfe gewünscht, die nach der Zahl der Köpfe, die in eine Kiste passen, als „6er-Blumenkohl“ (WIEBE 1991) bezeichnet werden, was einem Durchmesser von etwa 20 cm entspricht. Im Frühjahr werden auch kleinere Kopfdurchmesser gehandelt.

Die Definition der Ernteperiode als eigene Phase ist nicht sinnvoll, da sich diese nicht durch andere Entwicklungsprozesse von der Kopfbildungsphase unterscheidet.

Die Kopfbildungsphase kann also durch die drei Komponenten (siehe oben)

- Kopfdurchmesser
- Kopfwachstumsrate
- Dauer von Beginn der Kopfanlage bis zur Ernte

charakterisiert werden.

2.2.6 Variabilität im Bestand

Obwohl die Temperatur keine für die Pflanze direkt verfügbare Energiequelle zur Stoffproduktion darstellt, scheint sie gut geeignet, den Verlauf der Entwicklung und des Wachstums in den Phasen zu beschreiben (SALTER 1960). Während hohe Temperaturen über $\approx 15^\circ\text{C}$ das Durchlaufen der Jugendphase und der Kopfbildungsphase fördern, haben sie in der Vernalisationsphase hemmende Wirkung (WIEBE 1979). Der Einfluß der Temperatur ist daher entscheidend vom Entwicklungsstadium der Pflanze abhängig (BOUIJ 1987b, WURR et al. 1990a, PEARSON et al. 1994). Abb. 1 stellt schematisch das Wachstum einer Blumenkohlsorte für den Sommeranbau in den einzelnen Entwicklungsphasen dar, ausgedrückt als Trockensubstanzbildung in Abhängigkeit von der Kulturzeit (Aussaat Ende Mai, Pflanzung Ende Juni, Ernte Mitte September). Das Blattgewicht steigt exponentiell an und läuft nach der Umstimmung des Vegetationskegels zunächst weiter. Später wird das Kopfwachstum bei Einschränkung des Blattwachstums gefördert. Das Kopfgewicht macht zur Ernte etwa 40 % des Gesamtgewichts aus.

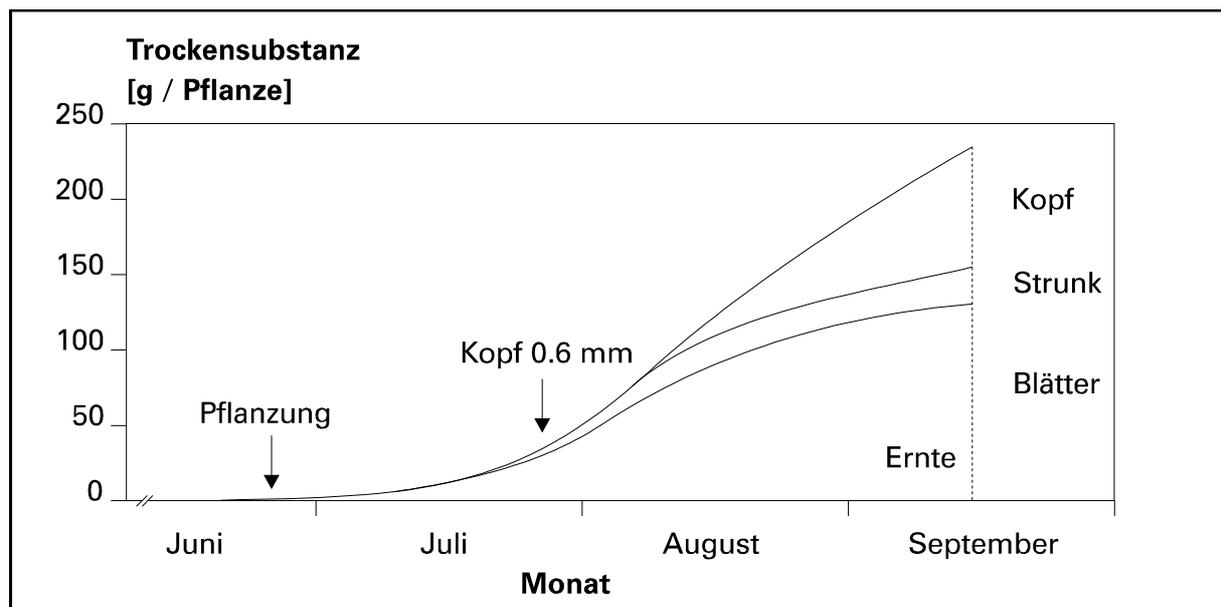


Abb. 1: Wachstumskurve einer späten Blumenkohlsorte (verändert nach WIEBE 1973a)

Aufgrund der genetischen Variabilität auch zwischen Pflanzen einer Sorte und unterschiedlichen Umweltbedingungen, können Jungpflanzen zum Pflanztermin unterschiedliche Größen haben. Diese natürliche Streuung kann durch die Temperatur verstärkt werden, wenn sie auf einen Bestand mit Pflanzen in unterschiedlichen Entwicklungsstadien einwirkt.

Der Zusammenhang wurde von WIEBE (1972a) bestätigt. Wurden Pflanzen bei konstant 12 °C kultiviert, also in stark induktiven Bedingungen, so erfolgte die Vernalisation bei nahezu gleichen Blattzahlen, sobald die Pflanzen die Jugendphase beendet hatten.

Der Zeitpunkt war aufgrund der genetischen Variabilität zwischen den Jungpflanzen unterschiedlich. Bei schwach induktiven Bedingungen um 20 °C dauerte die Phase der Vernalisation länger, so daß sich die Variabilität zwischen den Pflanzen deutlicher zeigte. Bei der Überführung in stärker induktive Bedingungen wurden die unterschiedlichen Blattzahlen „fixiert“, da alle Pflanzen den Kältereiz gleichzeitig aufnahmen.

WURR et al. (1990c) beobachteten bei Untersuchungen im Freiland in Abhängigkeit von der Witterung Blattzahlen zwischen 20 und 50, wobei auch Sortenunterschiede auftraten.

Ähnliche Beziehungen lassen sich für die Variabilität des Kopfdurchmessers aufstellen (WIEBE 1973a). Wirkten nach der Jugendphase niedrige Temperaturen ein, so wurden verschieden große Pflanzen gleichzeitig zur Kopfanlage umgestimmt. Da aber höhere Blattmasse zu Beginn der Kopfanlage nicht das Kopfwachstum beschleunigte, war die Variabilität der Kopfdurchmesser bei späterer Messung niedrig. Hohe Variabilität trat auf, wenn nach der Umstimmung der größten Pflanzen die Umstimmung der Kleineren durch schwach induktive Bedingungen verzögert wurde. Wirkten schwach induktive Bedingungen ab der Jugendphase, so verzögerte sich die Kopfanlage bei gleichzeitig steigenden Blattzahlen, so daß die Variabilität ebenfalls hoch war.

Die Streuung in der Größe der Köpfe im Bestand wirkt sich auf den Verlauf der Ernteperiode aus (WIEBE 1973a), da der Erntezeitpunkt neben den zu erwartenden Qualitätsverlusten und der Witterung von der Kopfgröße abhängt (siehe oben). Blumenkohl ist nach WIEBE (1979, 1991) und KRUG et al. (1980) daher nur in einer kurzen Zeitspanne erntereif, so daß die Ernte in der Regel selektiv in mehreren Erntegängen durchgeführt wird.

Ein Einfluß der Witterung auf die Dauer der Ernteperiode ist nach WIEBE (1973a) zu erwarten, wenn durch schwach induktive Bedingungen nach der Jugendphase die Vernalisation verzögert wird. Im Extrem werden zu verschiedenen Terminen gepflanzte Sätze gleichzeitig erntereif (WIEBE 1980, WURR et al. 1990a), was zu den bereits erwähnten „Weißen Wochen“ mit Überangebot und Preisverlusten führt.

Die beobachteten Erntedauern reichten von 2 Wochen für frühe Pflanzungen (WIEBE 1980, WIEBE 1991) bis zu 7 Wochen bei später Pflanzung (SALTER und FRADGLEY 1969). Dabei

sind mindestens zwei, maximal mehr als sechs Erntegänge zu veranschlagen (MARTIN 1985).

Die Zeit von der Pflanzung bis zur Ernte von 50 % der Pflanzen eines Satzes wird als mittlere Kulturdauer bezeichnet. Sie ist, wie beschrieben, sorten- und witterungsabhängig. Nach WIEBE (1980) hat sie in typischen norddeutschen Witterungsverhältnissen bei früher Pflanzung eine Länge von etwa 85 Tagen, verkürzt sich bei Pflanzung Ende Mai auf etwa 55 Tage und steigt auf 75 Tage bei ab Pflanzungen Ende Juli / Anfang August (Abb. 2).

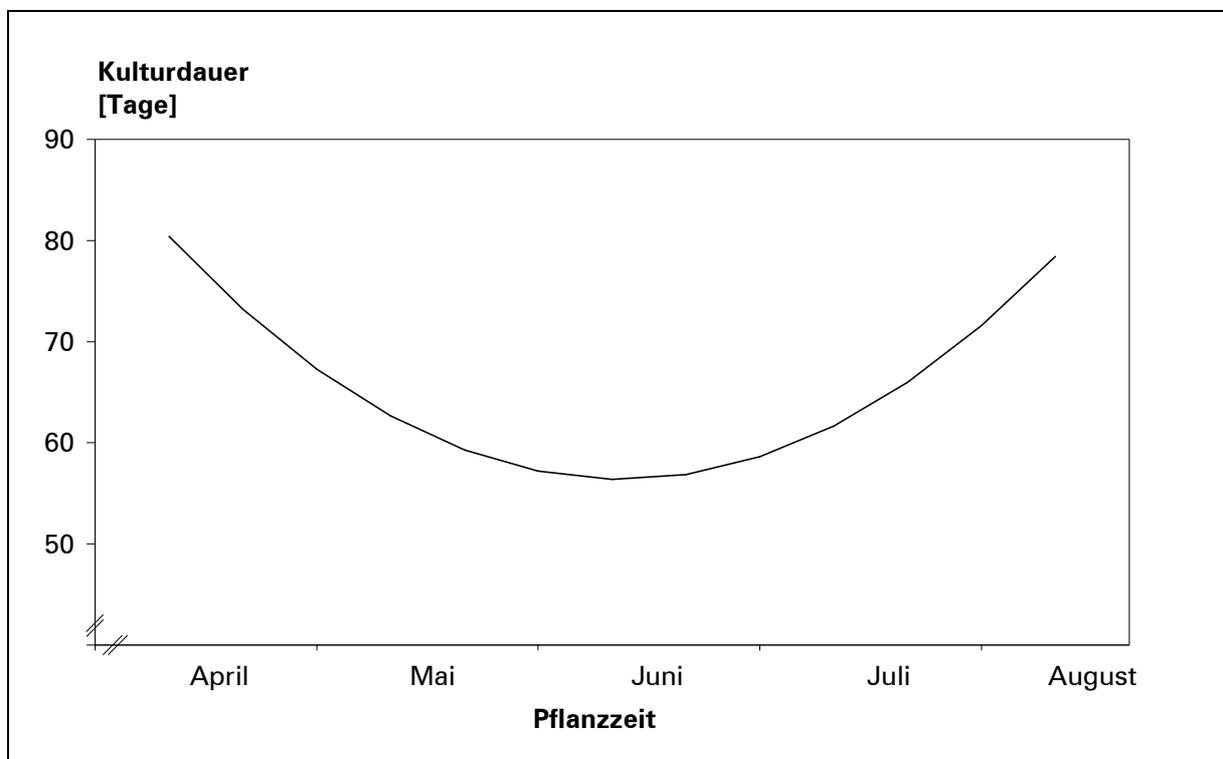


Abb. 2: Mittlere Kulturdauer von Blumenkohl in Abhängigkeit von der Pflanzzeit bei langjährigen Durchschnittstemperaturen (verändert nach WIEBE 1980)

Von diesen durchschnittlichen Kulturdauern weichen gemessene Kulturdauern um so stärker ab, je weniger der aktuelle Witterungsverlauf mit langjährigen Temperaturmittelwerten übereinstimmt. WIEBE (1980) beobachtete bei gleichem Pflanztermin Abweichungen von bis zu drei Wochen in der Länge der Kulturdauer. WURR et al. (1990a) berichteten von mittleren Kulturdauern zwischen 110 und 70 Tagen (Pflanzung im März

bzw. Juni). Sie ermittelten für Pflanzungen im Juli dabei Schwankungen von fast 40 Tagen in der Erntereife.

Übereinstimmend argumentieren verschiedene Autoren, daß solche Schwankungen in der Kulturdauer durch Variationen in der Phasenlänge von Pflanzung bis zur Kopfanlage ausgelöst wurden, während die Variation in der Dauer der Kopfbildungsphase nur gering war (BOOIJ 1987a) WURR et al. 1988, WURR et al. 1990a, WURR et al. 1994, GREVSEN 1990, LAWSON und LONG 1988). BOOIJ (1987b) ermittelte für die Zeit von der Pflanzung bis zur Kopfanlage (Jugend- und Vernalisationsphase) Dauern von 25-46 Tagen, während die Kopfbildungsphase in 37-55 Tagen mit der Ernte beendet wurde.

2.3 Sortenunterschiede

Blumenkohlsorten werden üblicherweise nach ihrer Eignung für Anbauzeiträume in Sorten für den **Früh-, Sommer- oder Herbstanbau** (BUNDESSORTENAMT 1995) eingeteilt. Sie sollten „feste und große Blumen bilden, die gut gewölbt und nicht zu höckerig sind“ (BUNDESSORTENAMT 1995, S. 87). Der Anteil an Hybridsorten nimmt zu. Ihre Vorteile sind unter anderem höhere Gleichmäßigkeit, was zu kürzeren Ernteperioden führt (WIEBE 1991).

Sorten für den **Frühanbau** zeichnen sich durch höhere Blattanlagenraten und frühe Kopfbildung aus. Der Kopf bleibt dabei aufgrund des beschriebenen Zusammenhangs zwischen Blattgewicht und Kopfgewicht (siehe oben) kleiner.

Unterschiedlich ist nach WIEBE (1972a) auch die Blattzahl, bei der die Jugendphase beendet wurde: Für eine frühe Sorte ('Aristokrat', Rijk Zwaan) ermittelte der Autor bei 10 Blättern das Ende der Jugendphase, bei einer späten ('Sesam', Rijk Zwaan) erst bei 16 Blättern.

Gefordert werden geringe Neigung zur Vorblüherbildung, feste Köpfe und gute Selbstbedeckung (BUNDESSORTENAMT 1995, WIEBE (1991). Gebräuchliche Sorten sind zur Zeit z. B. 'Opaal' (Rijk Zwaan), 'Malimba' (Royal Sluis) und 'Montano' (Sluis & Groot).

Von Sorten für den **Sommer- und Herbstanbau** wird eine sichere Kopfanlage auch bei relativ hohen Temperaturen erwartet. Nach GANNINGER-HAUCK (1996) berichtete

SCHLAGHECKEN auf dem 14. Pfälzer Gemüsebautag von Problemen mit der Kopfbildung bei den hohen Temperaturen des Sommers 1995, speziell bei den Sorten 'Aviso' (Clause), 'Lindurian' (Sluis & Groot) und 'Plana' (Royal Sluis).

Als sicher in der Kopfanlage wurden 'Arfak' (Royal Sluis), 'Fremont' (Royal Sluis) und etwas sensibler 'Nautilus' (Clause) eingestuft.

Die Blattanlagerate der späteren Sorten ist geringer, allerdings erfolgt die Kopfanlage bei etwa gleichen Blattzahlen wie bei den frühen Sorten. Durch höhere durchschnittliche Blattgewichte bilden diese Sorten größere und damit schwere Köpfe aus. Die Kopfbildungsraten sind bei europäischen Sorten in etwa gleich (WIEBE 1991), was auch SALTER (1969) vorschlug.

Die Einstufung in Sortengruppen kann für neue Sorten über die mittlere Kulturdauer bei Pflanzung im Mai erfolgen (MARTIN 1985). Für frühe Sorten sind etwa 60 Tage, für späte 66 Tage zu erwarten. Problematisch ist jedoch die Ermittlung des Kältebedürfnisses für die Vernalisation, da die Verbreiterung des Vegetationskegels nur in Versuchen verfolgt werden kann. HAND und ATHERTON (1987) beobachteten bei späteren Sorten größere endgültige Blattzahlen, die sie als Effekt eines höheren Vernalisationsbedarfs interpretierten. Auch BOOIJ (1990) deutete die höhere Blattzahl, die von späten Sorten in der Vernalisationsphase angelegt wurde, als stärkeres Kältebedürfnis (englisch „cold requirement“, S. 31). Ein wichtiges Kriterium bleibt nach SCHLAGHECKEN (mündliche Mitteilung) daher die Erfahrung der Anbauer in einer Region, die über Gruppen wie den „Arbeitskreis Blumenkohl“ in der Pfalz verbreitet werden kann. Der Anbau von Sorten, deren Reaktion nicht genau bekannt ist, kann in extremen Klimabedingungen zu unerwarteten Ausfällen wie bei der Sorte 'Plana' 1995 in der Pfalz führen (GANNINGER-HAUCK 1996).

In der Bretagne und Cornwall wird Blumenkohl auch über den Winter angebaut und geerntet, allerdings sind Tagesdurchschnittstemperaturen von 4 °C Voraussetzung, so daß der Anbau in Mitteleuropa zu risikoreich ist (WIEBE 1991). Sorten für den Winteranbau zeichnen sich durch hohe Blattmasse und späte Kopfanlage aus (WIEBE 1991). Das andere Extrem bilden Tropensorten, die auch bei sehr hohen Temperaturen (bis etwa 27 °C) sicher Köpfe bilden. Allerdings bleibt die Blattmasse klein und die Kopfbildungsphase wird so schnell durchlaufen, daß sie für Verhältnisse in Mitteleuropa nicht geeignet sind (WIEBE 1991).

WIEBE (1991, S. 367) stellte beim Vergleich der Sorten nach zunehmender Kulturdauer die in Abb. 3 schematisch dargestellten Trends fest.

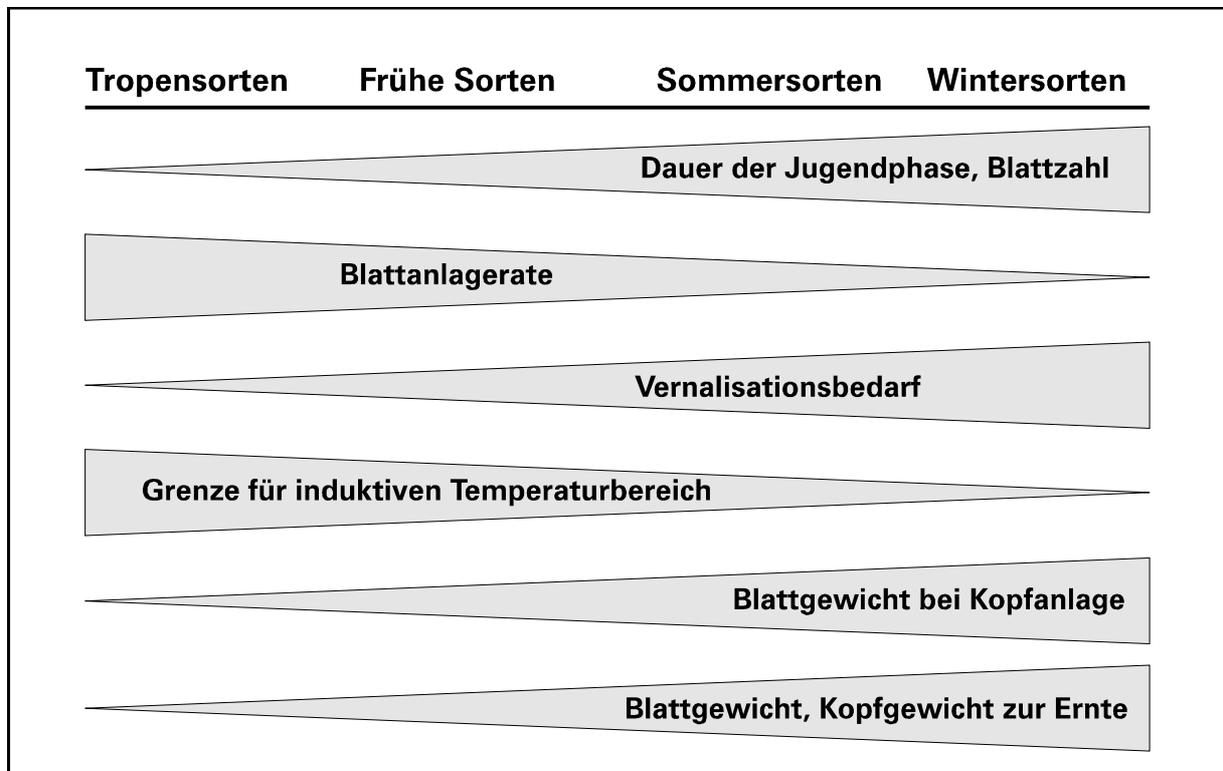


Abb. 3: Unterschiede in Wachstum und Entwicklung verschiedener Blumenkohlsorten

3 Kulturmaßnahmen

3.1 Gezielte Vernalisation

Wie beschrieben kommt es durch diskontinuierliches Marktangebot von Blumenkohl zu Preisschwankungen. Das könnte durch Steuerung des Erntetermins vermieden werden. Die früheste und einfachste Möglichkeit zur Beeinflussung der Entwicklung und des Wachstums von Blumenkohl böte die **Saatgutvernalisation** (WIEBE 1972a).

FUJIME (1983) konnte bei seinen Untersuchungen eine Förderung der Kopfanlage durch Kühlung von gekeimten Samen erreichen. Er beobachtete, daß Köpfe bei 20 °C gebildet wurden, wenn das Saatgut gekühlt wurde, nicht jedoch von Pflanzen ohne Kühlphase.

Im Gegensatz dazu war bei Untersuchungen von WIEBE (1972a) eine Saatgutvernalisation unwirksam. Eine Erklärung für das unterschiedliche Vernalisationsverhalten bieten HAND und ATHERTON (1987) an. Nach ihrer Meinung könnte die Empfindlichkeit für den Kältereiz von der Entwicklungsstufe der Samen abhängen, wie unter anderem für Weizen nachgewiesen wurde. Die Autoren schließen zwar die Möglichkeit einer Saatgutvernalisation nicht aus, halten aber eine Jugendphase, in der Kälteeinwirkung keinen Effekt auf die Vernalisation hat, für wahrscheinlicher. Generell ist eine Saatgutvernalisation nicht zu erwarten, wenn eine ausgeprägten Jugendphase für eine Art nachgewiesen wurde (WIEBE 1991).

Ein zweiter Ansatz wäre die Kultursteuerung über eine **Jungpflanzenbehandlung** (WIEBE 1972a). Der Autor prüfte, ob die Streuung der Kopfgrößen im Feld durch gezielte Vernalisation der Jungpflanzen vor dem Auspflanzen zu reduzieren ist (WIEBE 1973b). Die Jungpflanzen mußten dafür relativ lange kultiviert werden, damit die Vernalisation voll wirksam werden konnte. Obwohl die Reduktion der Streuung gelang, standen der Einführung zwei wesentliche Nachteile gegenüber. Erstens legten große Jungpflanzen den Kopf sehr früh an, so daß die geringe Blattzahl tendenziell zu kleineren Köpfen führte, wobei auch das Risiko der Vorblüherbildung stieg, zweitens nahm die Differenzierung von Blütenknospen auf der Kopfoberfläche (Grießigkeit) zu, wenn nach dem Auspflanzen relativ hohe Temperaturen einwirkten. WIEBE (1973b) folgerte, daß die Anwendbarkeit dieser Methode für die Praxis nur gegeben sei, wenn es gelänge, die Begleiterscheinungen der Behandlung abzuschwächen oder zu umgehen.

3.2 Jungpflanzenanzucht

Während der Anzucht der Jungpflanzen dürfen nach WIEBE (1991) keine Wachstumsstörungen auftreten, da sonst die Gefahr der Vorblüherbildung besteht. Praxisüblich ist die Verwendung von Erdpreßtöpfen, speziell für frühe Pflanzungen, während später im Jahr auch gezogene Pflanzen aus breitwürfiger Freiland- oder Kastenaussaat genutzt werden. Die Direktsaat ist seltener.

SALTER und FRADGLEY (1969) ermittelten bei der Pflanzung längere Kulturauern und eine größere Streuung zur Ernte als bei der Direktsaat. Jedoch ist zu bedenken, daß die Autoren direkt aus dem Saatbeet gezogene Jungpflanzen und keine in Anzuchtssystemen kultivierten verwendet hatten. Sie führten die Verlängerung der Ernteperiode auf Wachstumsstockungen bei den gezogenen Pflanzen durch Konkurrenz im Saatbeet zurück.

In Versuchen von WIEBE (1973a) war die Streuung der Kopfdurchmesser zur Ernte nach Direktsaat in der Regel stärker als nach einer Pflanzung. Eine Kalibrierung des Saatguts führte nach SALTER und FRADGLEY (1969) zwar zu einer etwas kürzeren Erntedauer, der Effekt war allerdings gering.

MARTIN (1985) stellte fest, daß Pflanzen aus Anzuchtssystemen normalerweise in drei Gängen geerntet werden konnten, während bei gezogenen Pflanzen fünf bis sechs Erntegänge nötig waren. Er begründete dies durch den größeren „Pflanzchock“ bei gezogenen Pflanzen und erwartete einen homogeneren Bestand, wenn Jungpflanzen nach der Pflanzung zügig weiterwachsen können. Diese Erwartung wurde von WURR (1988) bestätigt.

Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung der Homogenität ist die Pflanzenauswahl nach Uniformität, speziell nach der Größe. SALTER und FRADGLEY (1969) fanden nur einen geringen Effekt. Sie führten dafür zwei Gründe an: Erstens muß die Größe kein Charakteristikum für den physiologischen Status einer Pflanze sein, und zweitens können negative Einflüsse während der Kulturzeit die positive Wirkung der Uniformität überlagern.

Nach WIEBE (1973a) wird die Gleichmäßigkeit im Bestand größer, wenn die Jungpflanzen zur Pflanzung klein sind. Der Autor nannte als Vorteile größere Köpfe und bessere Qualitäten, auch wenn die Ernte 5-10 Tage später beginnt (WIEBE 1991). Gut geeignet sind

Pflanzen mit weniger als fünf Blättern, einem Gewicht von weniger als 5 g und einer Stengeldicke von unter 5 mm, weil das Risiko der Vorblüherbildung verringert wird. Für den ersten Satz werden zur Verfrühung auch größere Jungpflanzen in Erdpreßtöpfen (5-6 cm) verwendet.

Vor dem Auspflanzen ist eine Temperaturabsenkung zur Abhärtung nötig. Muß eine Pflanzung witterungsbedingt verschoben werden, kann das weitere Wachstum durch Trockenhalten verzögert werden. Sinnvoller ist das Lagern in einem Kühlraum bei Temperaturen von 1 °C bis 2 °C (WIEBE 1991).

3.3 Einflußnahme auf den Kulturverlauf

Weitreichende Untersuchungen, ob der Ernteverlauf durch Kulturmaßnahmen zu beeinflussen ist, wurden von SALTER und FRADGLEY (1969) und WURR et al. (1988) durchgeführt. Als Ergebnis stellten die Autoren heraus, daß der größte Einfluß von den verwendeten Jungpflanzen ausgeht (siehe oben). Weder eine Variation der Stickstoffdüngung in der für den Anbau üblichen Spanne noch die Pflanzweite zeigten signifikante Effekte. ATHERTON et al. (1987) beschrieben die Möglichkeit, Pflanzen durch Einschränkung der Stickstoff- und Wasserversorgung sicher vegetativ zu halten, wenn z. B. die Witterung kein Auspflanzen erlaubt. Da dadurch allerdings die Blattfläche und Sproßgröße reduziert wurde, erscheint dieses Verfahren nicht sinnvoll zur Verbesserung der Homogenität des Bestands.

Der Wasserversorgung kommt größerer Bedeutung zu. Während Jungpflanzen ohne Qualitätsverluste relativ trocken kultiviert werden können, muß für das Blattwachstum und eine gute Marktqualität nach der Pflanzung genügend Wasser zur Verfügung stehen. Der größte Bedarf besteht in den letzten Wochen vor der Ernte; Wassermangel kann die Kopfgrößen durch geringere Blattmassen reduzieren und das Risiko von Vorblühern erhöhen (WIEBE 1991).

Diskutiert wird ein Einfluß der Bewässerung auf die Vernalisation (WIEBE und SCHLAGHECKEN, mündliche Mitteilung). Denkbar wäre eine Beschleunigung durch Kühlung des Vegetationskegels mit dem Bewässerungswasser (Verdunstungskühle), da oft in den Abendstunden bewässert wird.

3.4 Anbauplanung

Um Preisverluste durch ein Überangebot wie in den „Weißen Wochen“ zu vermeiden, muß eine kontinuierliche Marktbelieferung durch einen Anbauplan angestrebt werden (WURR 1990). In die Planung einbezogen werden sollten die Sortenwahl, Zahl der Sätze, Pflanztermine, Standortverhältnisse und Aufzeichnungen über langjährige Witterungsverhältnisse.

Ein gleichmäßiges Angebot über die Erntesaison, die in Deutschland von Ende Mai bis Ende Oktober läuft (WIEBE 1991), kann nicht durch Verwendung einer **Sorte** erreicht werden, sondern die Sorten sollten nach ihrer Eignung für den Anbauzeitraum ausgewählt werden (vgl. 2.3: Sortenunterschiede). Dabei sollten mindestens zwei Sorten pro Termin gepflanzt werden, um das Risiko von Ernteaufällen zu vermeiden, wie sie 1995 in der Pfalz auftraten (MARTIN 1985, GAINNINGER-HAUCK 1996).

Die **Zahl der gepflanzten Sätze** sollte nach WIEBE (1980) so hoch sein, daß sie sich in der mittleren Erntedauer jeweils überschneiden. Der Autor hält für norddeutsche Verhältnisse mindestens 10 Sätze für angemessen. Dabei sollte die Zahl der Sätze generell um so höher sein, je homogener die Sorte ist (Hybridsorten!), da bei diesen die Erntedauer kürzer ist.

Die **Terminwahl** muß sich nach MARTIN (1985) nicht an der Aussaat sondern an der Pflanzung orientieren, da die Pflanzung den größeren Einfluß hat. Er beschreibt, daß an einem Tag gesetzte Jungpflanzen einer Sorte am gleichen Tag erntereif würden, auch wenn sie zur Pflanzung vier, sechs oder acht Wochen alt wären. WIEBE (1991) stellte heraus, daß zwischen den Pflanzterminen im Frühjahr größere Zeitspannen liegen sollten als im Sommer, um einen hohen Ernteanfall im Juni zu vermeiden. Der Autor empfiehlt bei einem Anbau von beispielsweise 10 Sätzen eine Differenz von 40 Tagen zwischen Satz 1 und 2, während die Spanne zwischen Satz 9 und 10 etwa acht Tage betragen sollte (WIEBE 1980). Ist eine Pflanzung zum angestrebten Termin z. B. aufgrund der Witterung nicht möglich, können Jungpflanzen eine gewisse Zeit kühl gelagert werden (vgl. 3.2: Jungpflanzenanzucht).

Der Einfluß des **Standorts** auf den Anbauplan ergibt sich aus den physikalischen Eigenschaften. Hier wurden speziell die Exposition und die Bodeneigenschaften erwähnt (MARTIN 1985). Die Beobachtungen der Anbauer über die „Frühzeitigkeit“ eines Standorts sind in die Planung einzubeziehen.

Auch die **Witterung**, verfügbar über langjährige Mittelwerte, muß als Planungsgrundlage beachtet werden, um die Abhängigkeit einzelner Sorten von diesen Faktoren, insbesondere der Temperatur, berücksichtigen zu können.

Der Anbauplan, den MARTIN (1985) vorschlägt, basiert auf Datensammlungen und Erfahrungen der Anbauer. Häufig verwendete Sorten werden nach ihrer Kulturdauer und den Erntecharakteristiken in Sortengruppen eingestuft. Wird für jede Sortengruppe die Kulturdauer in Abhängigkeit vom Pflanzzeitpunkt ermittelt (vgl. 2.2.6: Variabilität im Bestand, Abb. 2) und graphisch dargestellt, lassen sich die in Abb. 4 eingetragenen Beziehungen zwischen den Pflanzwochen und Erntewochen für die verschiedenen Sortengruppen aufstellen. Die Eingruppierung ist Tab. 1 zu entnehmen. MARTIN (1985) stellte heraus, daß sich die Sorten einer Gruppe nur gering in der Erntereife unterscheiden, die Differenzen zwischen den Gruppen jedoch größer sind. Die aufgeführten Sorten, die der Autor 1985 für Großbritannien als weitverbreitet bezeichnet, haben derzeit keinen nennenswerten Marktanteil in Deutschland (BUNDESSORTENAMT 1995).

Tab. 1: Gruppierung von Sorten nach ihren Eigenschaften (MARTIN 1985)

Sortengruppe	Sorten
A	'Andes', 'Elgon', 'White Fox', 'White Summer'
B	'Cervina', 'White Rock'
C	'Lawyna', 'Surf Rider', 'Wallaby'
D	'lms', 'Orco'
E	'Snowy River'

Ein Beispiel soll die Anwendung verdeutlichen. Eine Ernte in der Kalenderwoche 30 kann durch die Pflanzung von Sorten der Gruppe B zu Beginn der 18. Kalenderwoche bzw. Gruppe A in der 19. Kalenderwoche erreicht werden (Abb. 4).

Um das Aufstellen der Anbaupläne zu vereinfachen, wurden die Beziehungen zwischen Pflanzzeit und Erntezeit in Form von Gleichungen ausgedrückt und in ein Computerprogramm eingearbeitet. Zur Überprüfung der Genauigkeit des Programms verglich der Autor gemessene und vorhergesagte Kulturdauern für Sorten der Gruppen A und B und hielt diese für vertretbar gering.

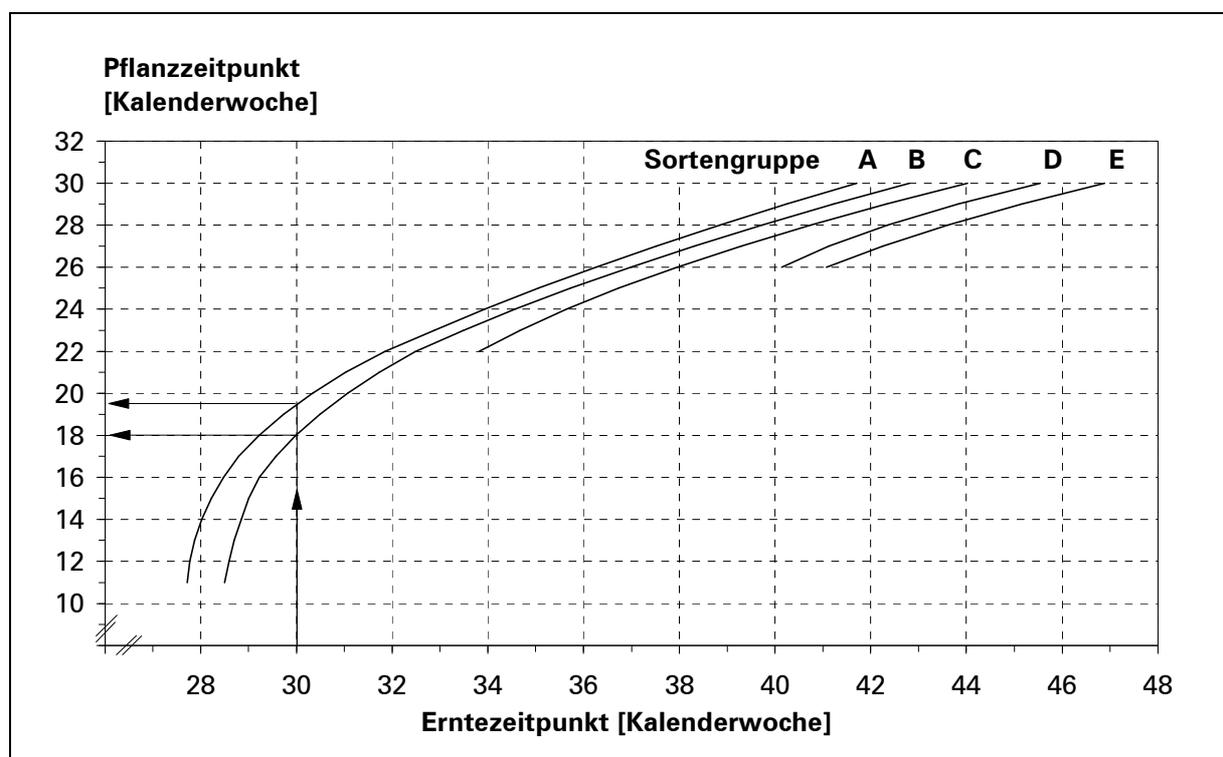


Abb. 4: Pflanzwoche von Blumenkohlsorten in Abhängigkeit von der angestrebten Erntewoche (zur Sortengruppierung vgl. Text; nach MARTIN 1985)

Ähnliche Programme auf der Basis von Kulturauern bei durchschnittlichem Witterungsverlauf wurden von PEARSON et al. (1990) und PEARSON und HADLEY (1993) entwickelt und vorgestellt. Ihre Zielgruppe sind insbesondere Anbaukooperationen. Die Programme CALYPSO für Brokkoli (*Brassica oleracea* L. convar. *botrytis* var. *italica*) und CAULYPSO für Blumenkohl (englisch „**CAL**abrese / **CAU**liflower **Y**ield **P**rediction **S**ystem“) ermöglichen die Aufstellung von Pflanzplänen für eine Gruppe von Anbauern. Dabei realisiert jeder Anbauer nur einen Teil der Sätze, diese aber auf großen Flächen.

Die Kontinuität der Anlieferung an die Vermarktungsorganisation ist gegeben, weil sich die Erträge der einzelnen Anbauer durch den gemeinsamen Plan ergänzen.

Je deutlicher sich die aktuelle Witterung einer Saison von den langjährigen Mittelwerten unterscheidet, desto größer sind die Abweichungen von den geplanten Ernteterminen (WIEBE 1980, MARTIN 1985, WURR et al. 1990a). Eine Lösungsmöglichkeit könnte der Einbezug von aktuellen Witterungsdaten sein.

Zur Prüfung legte WIEBE (1980) mehrjährige Versuche mit Blumenkohlsorten nach einem festen Pflanzterminplan an und verglich diese mit einem Pflanzprogramm, das von der Jahreswitterung abhängig war, wobei der nächste Satz gepflanzt wurde, wenn 50 % des Vernalisationsbedarfs nach der Pflanzung gedeckt war. Die Absättigung des Vernalisationsbedarfs wurde mit einem Simulationsmodell mit aktuellen Temperaturen berechnet (WIEBE 1975a+b, vgl. 4.1.5: Arbeitsgruppe WIEBE).

Bei der Pflanzung nach festem Terminplan kam es durch den Witterungsverlauf in den einzelnen Jahren zu Abweichungen von den geplanten Erntemengen. Wärmeperioden beschleunigten das Wachstum von Pflanzen in der Kopfbildungsphase, so daß die Erntemengen höher als erwartet ausfielen. Bei Pflanzen in der Vernalisationsphase wurde jedoch die Kopfanlage verzögert. Als Folge fielen etwa sechs Wochen später die Ernterträge geringer aus als prognostiziert.

Mit dem jahreswitterungsabhängigen Programm konnte keine Verbesserung erzielt werden. Als Grund führte der Autor an, daß durch die geringere Vernalisationswirkung hoher Temperaturen im Sommer die Differenzen zwischen den Pflanzterminen größer wurden, so daß die wöchentlichen Erntemengen abnahmen. Er bezeichnete das Pflanzprogramm als nicht praktikabel, da es dem Trend widersprechen würde, die Differenzen zwischen den Sätzen im Verlauf der Anbausaison zu verkleinern (siehe oben).

Ähnliche Ergebnisse zitiert WIEBE (1980) von SALTER und LAFLIN (1974), die in ihren Untersuchungen den jeweils nächsten Satz nach Erreichen einer bestimmten Temperatursumme aussäten. Diese Methode brachte auch bei Verwendung verschiedener Basistemperaturen keine deutlichen Vorteile für die Anbauplanung von Blumenkohl.

4 Beschreibung und Vergleich von Modellansätzen

4.1 Beschreibung der Modelle

4.1.1 Arbeitsgruppe BOOIJ (NL)

Die Arbeitsgruppe um R. BOOIJ (Research Station for Arable Farming and Field Production of Vegetables (PAGV), Lelystad, NL) beschäftigte sich intensiv mit der Jugend- und Vernalisationsphase in Beziehung zur Ernte. Das Hauptinteresse galt dabei der Blattanlage und dem Blattwachstum. Die Ergebnisse wurden in Freiland- und Klimakammerversuchen gewonnen. Im Freiland wurden von 1982 bis 1986 gezogene Pflanzen der Sorten 'Delira' (Rijk Zwaan) und 'Elgon' (Royal Sluis) aus ungeheizten Frühbeetkästen bzw. Gewächshäusern zu verschiedenen Zeiten im Jahr gepflanzt (BOOIJ 1990). Für die Klimakammerversuche wurden Pflanzen der Sorte 'Delira' in 1.7 l Container ausgesät, später vereinzelt und mit 40 W/m^2 für 16 h pro Tag kultiviert. Die beiden Temperaturstufen, $16 \text{ }^\circ\text{C}$ tags / $14 \text{ }^\circ\text{C}$ nachts bzw. $24 \text{ }^\circ\text{C}$ tags / $22 \text{ }^\circ\text{C}$ nachts, werden im folgenden über die Nachttemperatur kodiert (BOOIJ und STRUIK 1990).

Der Schwerpunkt der Arbeit in den Klimakammern lag auf dem Zusammenhang der Blattanlage mit dem Ende der Jugendphase (BOOIJ und STRUIK 1990). Die Autoren fanden eine Beziehung zwischen den absoluten Blattzahlen und der Zeit in Tagen nach der Aussaat. Wie beschrieben (vgl. 2.2.4: Vernalisationsphase) erkannten die Autoren einen Wechsel in der Blattanlagerate (angelegte Blätter / Zeit) nach 11 bzw. 12 Blättern, der nicht mit dem Ende der Jugendphase in Verbindung gebracht werden konnte. Der ansonsten lineare Anstieg der Blattzahl mit der Zeit ermöglichte die Berechnung von Regressionsgleichungen (1 bis 4), die die Autoren für die Zahl der Blätter vor dem Wechsel (Teil I) bzw. nach dem Wechsel (Teil II) getrennt aufstellten. Für den Wechsel in der Blattanlagerate boten BOOIJ und STRUIK (1990) keine Erklärung an.

Angelegte Blätter in Abhängigkeit von der Zeit ab Aussaat in Tagen für:

	Teil I		Teil II	
22 °C	$BZ_a = 0.436 \cdot D_a - 1.91$	(1)	$BZ_a = 1.006 \cdot D_a - 18.72$	(2)
14 °C	$BZ_a = 0.305 \cdot D_a - 2.21$	(3)	$BZ_a = 0.586 \cdot D_a - 14.87$	(4)

mit BZ_a = absolute Blattzahl [-]
 D_a = Dauer ab Aussaat [Tage]

Als weiteren Prozeß, der in der vegetativen Phase des Blumenkohls von Bedeutung ist, analysierten BOOIJ und STRUIK (1990) die Beziehung zwischen der Zahl der angelegten Blätter und der Breite des Vegetationskegels, die in der vegetativen Phase nicht über 0.4 mm anstieg. Bis zur Anlage von 15-20 Blättern war sie unabhängig von der Temperatur und nahm in den beiden Temperaturstufen (14 °C und 22 °C) linear mit zunehmender Blattzahl zu (vgl. 2.2.3: Jugendphase). Die Autoren gaben folgende Gleichung (5) an:

Breite des Vegetationskegels in mm als Funktion der Zahl der angelegten Blätter (5)

$$DM_v = 0.011 \cdot BZ_a + 0.031$$

mit DM_v = Durchmesser Vegetationskegel [mm]
 BZ_a = absolute Blattzahl [-]

Über diesen Blattzahlen unterschieden sich die Raten der Vegetationskegelverbreiterung in Abhängigkeit von der Temperatur. Bei 22 °C (schwach induktive Bedingungen) nahm die Breite langsamer zu. Das wird von den Beobachtungen gestützt, daß Pflanzen in höheren Temperaturen vor der Absättigung des Vernalisationsbedürfnisses mehr Blätter anlegen (WURR et al. 1990a). BOOIJ und STRUIK (1990) vermuten, daß dieser Wechsel das Ende der Jugendphase markiert.

Diese Hypothese wird auch von WURR et al. (1993) gestützt. Die Autoren stellten einen Wechsel in der Rate der Verbreiterung des Vegetationskegels fest, wenn sie diese mit akkumulierten Temperaturen über einer Basistemperatur von 6 °C ermittelten. Sie deuten diesen Wechsel als einen direkten Effekt der Vernalisation und den Zeitpunkt als das Ende der Jugendphase.

Ein wichtiger Baustein für Simulationsmodelle des Wachstums und der Entwicklung von Blumenkohl ist die Beziehung zwischen der Zahl der sichtbaren Blätter, im allgemeinen Blätter > 1 cm Länge, und der Zahl der absolut angelegten Blätter, die unter einem Mikroskop zu bestimmen ist. BOOIJ (1990) errechnete die Gleichungen (6) und (7) für beide Sorten mit Daten der oben erwähnten Versuche im Freiland.

Absolute Blattzahl als Funktion der sichtbaren Blätter für die Sorte 'Delira' (6)

$$BZ_a = 1.80 \cdot BZ_s + 1.69$$

mit BZ_a = absolute Blattzahl [-]

BZ_s = Zahl der Blätter > 1 cm [-]

Absolute Blattzahl als Funktion der sichtbaren Blätter für die Sorte 'Elgon' (7)

$$BZ_a = 1.86 \cdot BZ_s + 1.24$$

mit BZ_a = absolute Blattzahl [-]

BZ_s = Zahl der Blätter > 1 cm [-]

Der Autor ermittelte Bestimmtheitsmaße von $R^2=0.97$ bei $n=2559$ für die Sorte 'Delira' bzw. $R^2=0.98$ bei $n=1761$ für die Sorte 'Elgon'. BOOIJ hat mit diesen Gleichungen ein sinnvolles Hilfsmittel erarbeitet, die Blattanlage von Blumenkohl im Feld durch Zählen der Blätter zu verfolgen, ohne Pflanzen ernten und unter einem Mikroskop untersuchen zu müssen. Zu beachten ist, daß der beschriebene Zusammenhang mit Pflanzen aufgestellt wurde, bei denen mindestens ein Blatt < 1 cm Länge war, was in der vegetativen und zu Beginn der generativen Phase der Fall ist. Da sich die Gleichungen zwischen den Sorten nicht stark unterscheiden, ist zu vermuten, daß auch für andere Sorten ähnliche Beziehungen gefunden werden können.

BOOIJ und Mitarbeiter stellen keine Vernalisationsfunktion auf, bestätigen aber, daß Unterschiede in der Kulturdauer besonders aus der Verzögerung der Vernalisation durch hohe Temperaturen resultieren. Als optimal wirksame Temperatur stufen sie 12 °C ein (BOOIJ 1987a).

In einer früheren Arbeit (BOOIJ 1987b) wurde die Kopfbildungsphase in die Betrachtung einbezogen. Der Autor entwickelte auf der Basis der beschriebenen Freilandversuche in den Jahren 1982 bis 1984 eine einfache Methode zur Abschätzung der Dauer der Kopfbildungsphase ab der Kopfanlage, indem er die Dauer der Phase in Tagen als Funktion des Pflanzzeitpunktes (Nummer des Tages im Jahr) graphisch darstellte (Abb. 5).

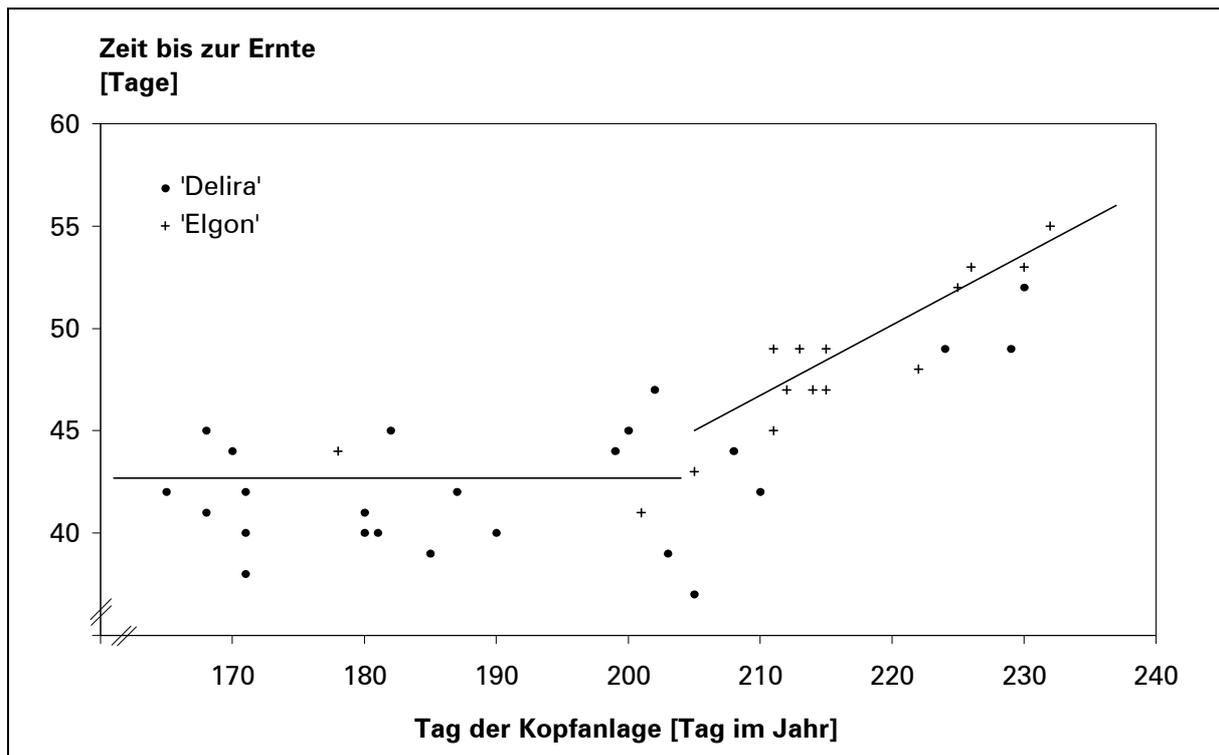


Abb. 5: Beziehung zwischen der Nummer des Tages der Kopfanlage und der Dauer des Kopfwachstums der Sorten 'Delira' und 'Elgon' (nach BOOIJ 1987b).

Die Gleichungen (8) und (9) der eingezeichneten Regressionslinien empfahl er zur Vorhersage des mittleren Erntetermins (50 % der Pflanzen geerntet) für 6 bis 8 Wochen im voraus:

Dauer der Kopfbildungsphase vor Tag 205 (24.07.) (8)

$$D_k = 42.7$$

mit D_k = Dauer Kopfbildungsphase [Tage]

Dauer der Kopfbildungsphase für Tag 205 und später (9)

$$D_k = 0.3556 \cdot Tag_k - 28.1$$

mit D_k = Dauer der Kopfbildungsphase [Tage]

Tag_k = Tag der Kopfanlage [Tag im Jahr]

4.1.2 Arbeitsgruppe GREVSEN (DK)

In Dänemark beschäftigten sich besonders K. GREVSEN (Research Centre for Horticulture, Department of Vegetables, Aarslev, DK) und Mitarbeiter (u. a. J. E. OLESEN) mit der Modellierung von Wachstums- und Entwicklungsvorgängen beim Blumenkohl. Sie legten dazu in den Jahren von 1987 bis 1991 Freilandversuche mit sechs Sorten an (Tab. 2). Ausgesät wurde in Erdpreßtöpfen, die Anzucht erfolgte im Gewächshaus. Außerdem verwendeten GREVSEN und Mitarbeiter Daten aus Freiland- und Klimakammerversuchen von BOOIJ (vgl. 4.4.1: Arbeitsgruppe BOOIJ).

Dabei verfolgte die Arbeitsgruppe verschiedene Ziele. In einer vorbereitenden Studie (GREVSEN 1990) wurden zwei Modelle beschrieben. Eines ermöglicht die Abschätzung von Temperatursummen für verschiedene Sorten und Pflanztage und dient der Anbauplanung, das andere beruht auf einer Messung des Kopfes zu einem frühen Zeitpunkt und soll als Hilfe zur Abschätzung des Erntetermins eingesetzt werden. Ergänzend stellen GREVSEN und OLESEN (1994) in einer späteren Arbeit Modelle für die Simulation der Dauer der Jugend- und Vernalisationsphase vor.

Um den Einfluß der jährlich unterschiedlichen Witterung auszuschalten, kalkulierte GREVSEN (1990) Temperatursummen mit einer Basistemperatur von 5 °C für den Zeitraum von der Pflanzung bis zur Ernte (Zeitpunkt, wenn 50 % der Pflanzen geerntet werden konnten). Auf dieser Basis entwickelte der Autor ein Vorhersagemodell, mit der die ab einem bestimmten Pflanztag bis zur Ernte notwendige Temperatursumme errechnet werden kann. Die Dauer des Zeitraums ist durch Beziehung auf langjährige Mitteltemperaturen oder Wettervorhersagen für die Anbauregion abschätzbar.

Gleichung (10) beschreibt das Modell, in das neben dem Pflanztag auch sortenspezifische Parameter eingehen. Diese sind Tab. 2 zu entnehmen. Abb. 6 stellt die Temperatursummen in Abhängigkeit vom Pflanztag für die sechs Sorten graphisch dar.

Tab. 2: Im Modell verwendete Parameter der sechs Sorten (nach GREVSEN 1990)

Nummer	Sorte	Züchter	Abschätzung Parameter
1	'Ballade'	Nickerson Zwaan	1368
2	'White Stone'	Sluis & Groot	1345
3	'Andes'	Royal Sluis	1354
4	'Linás'	Royal Sluis	1362
5	'Plana'	Royal Sluis	1306
6	'Siria'	Clause	1277

Abschätzung der von Pflanzung bis Ernte erforderlichen Temperatursumme (10)

$$TS_p = S - 11.24 \cdot Tag_p + 0.0423 \cdot Tag_p^2$$

mit TS_p = Temperatursumme > 5 °C von Pflanztag bis Tag der Ernte [°C · Tag]

S = geschätzte, sortenspezifische Parameter [-]

Tag_p = Pflanztag [Tag im Jahr]

GREVSEN (1990) schlug vor, die Sorten 'Ballade', 'White Stone', 'Andes' und 'Linás' zusammen zu gruppieren, während für 'Plana' und 'Siria' eigene Gruppen nötig wären. Eine Gruppierung hielt der Autor für wesentlich für den praktischen Einsatz des Modells. Mit Anbaudaten anderer Sorten könnte das Modell erweitert werden, entweder durch Zuordnung zu bestehenden Gruppen oder durch Ermittlung neuer sortenspezifischer Parameter.

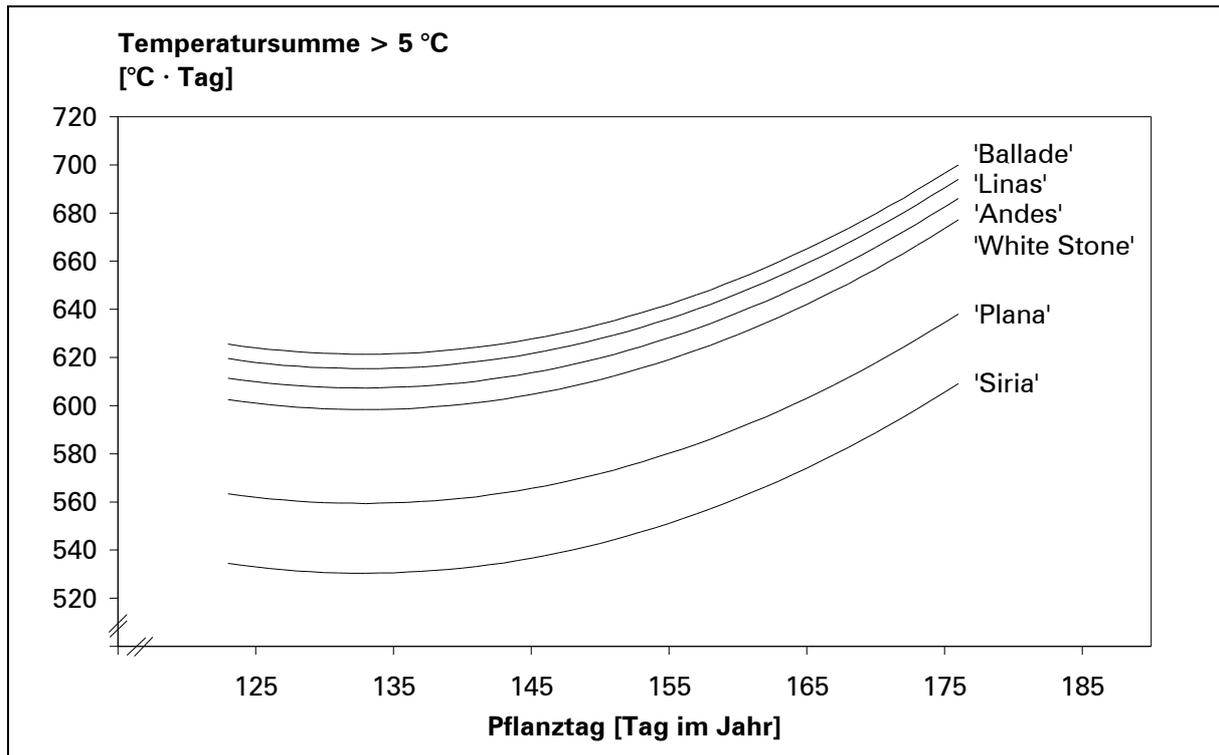


Abb. 6: Vorhergesagte Temperatursummen $> 5\text{ °C}$ von Pflanzung bis Ernte für sechs Blumenkohlsorten (zur Errechnung vgl. Text, nach GREVSEN 1990)

GREVSEN und OLESEN (1994) entwickelten zur Beschreibung der Jugendphase ein Modell der Blattanlage. Nach ihren Ergebnissen steigt die Blattanlagerate mit zunehmender Pflanzengröße allmählich an, im Gegensatz zu den Untersuchungen von WIEBE (1972c), HAND und AHERTON (1987) und BOOIJ und STRUIK (1990). Ihrer Meinung nach können sowohl die Entwicklung von Blättern als auch der Fortschritt in der Jugendphase in Gleichungen mit Summen der durchschnittlichen Tagestemperatur ausgedrückt werden. Als Basistemperatur ermittelten die Autoren rechnerisch -0.4 °C , rundeten diese aber zu 0 °C auf, um sie an die Basistemperatur der anderen vorgestellten Modelle anzugleichen. Gleichung (11) beschreibt das Modell. Die Schätzung der für die sechs Sorten verschiedenen Parameter a und b können Tab. 3 entnommen werden. Sie gelten nur bis zur Zahl von 25 Blättern, weil größere Zahlen in den Versuchen nicht auftraten und der Wechsel von der Jugendphase zur Vernalisationsphase bei weniger als 25 Blättern stattfindet.

Blattanlagerate in Abhängigkeit von der Durchschnittstemperatur

(11)

$$\frac{dBZ}{dZ} = a \cdot (BZ - b) \cdot (T - T_{bb})_+$$

mit BZ = Blattzahl [-] Z = Zeit [Tage] a, b = Parameter der Blattanlagerate [-] T = tägliche Durchschnittstemperatur [°C] T_{bb} = Basistemperatur für die Blattanlage [°C]

+ = nur positive Temperaturdifferenzen werden berücksichtigt

Tab. 3: Abschätzung der Parameter der Blattanlagerate (nach GREVSEN und OLESEN (1994))

Nummer	Sorte	a	b	R^2
1	'Ballade'	0.00353	2.5	0.95
2	'White Stone'	0.00256	-3.1	0.96
3	'Andes'	0.00327	1.5	0.94
4	'Linás'	0.00301	-0.3	0.94
5	'Plana'	0.00199	-9.4	0.96
6	'Siria'	0.00379	0.4	0.88

Für die Beschreibung der Jugend- und Vernalisationsphase stellten GREVSEN und OLESEN (1994) ein Modell auf (Gleichung 12), mit dem sie die Rate der täglichen Entwicklung R kalkultierten.

Rate der täglichen Entwicklung von Blumenkohl

(12)

$$R = \sum_{h=1}^{24} \begin{cases} f_1(T_h) & E < 1 \\ f_2(T_h) & E \geq 1 \end{cases}$$

mit R = tägliche Rate der Entwicklung von Pflanzung bis Kopfanlage [$\frac{1}{\text{Tag}}$] $f_1(T_h)$ = Temperaturreaktionsfunktion für die Jugendphase $f_2(T_h)$ = Temperaturreaktionsfunktion für die Vernalisationsphase E = aktueller Entwicklungsstatus

Dabei wird E durch Addition der täglichen Entwicklungsrate R erhöht. Zur Pflanzung hat E den Wert 0. Am Ende der Jugendphase wird $E=1$. Zum Zeitpunkt der Kopfanlage hat E den Wert 2. GREVSEN und OLESEN (1994) verwenden zur Bildung der Temperatursummen stündliche Temperaturwerte. Diese errechneten sie mit einer Sinusfunktion aus den täglichen Minimum- und Maximumtemperaturen, die ihnen über meteorologische Stationen zur Verfügung standen.

Die Pflanzenentwicklung in der Jugendphase ($0 < E < 1$) beziehen die Autoren auf eine Temperatursumme ohne Optimumtemperatur, wobei nur positive Temperaturdifferenzen berücksichtigt werden. Als Basistemperatur T_{bj} nahmen sie 0 °C an. Sie stellen folgende Gleichung (13) auf:

Pflanzenentwicklung während der Jugendphase (13)

$$f_1(T_h) = \frac{(T_h - T_{bj})_+}{(TS_j \cdot 24)}$$

mit T_h = stündliche Temperatur [°C]

T_{bj} = Basistemperatur für die Jugendphase [°C]

TS_j = benötigte Temperatursumme für Jugendphase [°C · Tag]

(Faktor $24 \left[\frac{\text{h}}{\text{Tag}}\right]$, um TS_j von [°C · Tag] auf [°C · h] zu konvertieren)

+ = nur positive Temperaturdifferenzen werden berücksichtigt

Während der Vernalisationsphase ($1 \leq E < 2$) wird die Pflanzenentwicklung durch eine lineare Reaktion auf die Temperatur über und unter einer Optimumtemperatur T_o beschrieben, die GREVSEN und OLESEN (1994) für alle sechs Sorten auf 12.8 °C festlegten. Als Basistemperatur T_{bv} verwendeten sie auch hier 0 °C (Gleichung 14).

Pflanzenentwicklung während der Vernalisationsphase (14)

$$f_2(T_h) = \frac{(T_o - |T_h - T_o| - T_{bv})_+}{(TS_v \cdot 24)}$$

mit T_o = Optimumtemperatur [°C]

T_h = stündliche Temperatur [°C]

T_{bv} = Basistemperatur für die Vernalisationsphase [°C]

TS_v = benötigte Temperatursumme für die Vernalisationsphase [°C · Tag]

(Faktor $24 \left[\frac{\text{h}}{\text{Tag}}\right]$, um TS_v von [°C · Tag] auf [°C · h] zu konvertieren)

+ = nur positive Temperaturdifferenzen werden berücksichtigt

Sowohl für die sechs in Dänemark im Freiland kultivierten Sorten als auch für die zwei Sorten aus den niederländischen Versuchen schätzten GREVSEN und OLESEN den Temperatursummenbedarf für die Jugendphase (TS_j) und für die Vernalisationsphase (TS_v). Diese Werte, sowie die Bestimmtheitsmaße können Tab. 4 entnommen werden.

Die Autoren diskutieren in ihrer Arbeit die großen Abweichungen zwischen den Temperatursummen für die Jugendphase der dänischen und niederländischen Versuche. Als mögliche Gründe nennen sie Sortenunterschiede und die Anzuchtbedingungen. In den eigenen Versuchen verwendeten GREVSEN und OLESEN Jungpflanzen in Erdpreßtöpfen, während BOOIJ (1990) gezogene Jungpflanzen einsetzte. Die Autoren vermuten eine Verlängerung der Jugendphase durch einen Pflanzschock.

Tab. 4: Temperatursummen für Jugend- und Vernalisationsphase für verschiedene Sorten (nach GREVSEN und OLESEN 1994)

Sorte	TS_j [°C·Tag]	TS_v [°C·Tag]	R^2
'Delira'	248.1	140.6	0.42
'Elgon'	262.3	153.3	0.46
'Ballade'	46.4	167.3	0.28
'White Stone'	26.3	169.4	0.06
'Andes'	64.2	166.4	0.28
'Linás'	55.9	172.2	0.18
'Plana'	83.3	158.9	0.61
'Siria'	64.1	102.0	0.28

GREVSEN und OLESEN (1994) empfehlen in ihrer Arbeit, diese Ansätze mit einem Modell für die Kopfbildungsphase zu verbinden, wie es z. B. von D. C. E. WURR und Mitarbeitern entwickelt und getestet wurde (vgl. 4.1.5: Arbeitsgruppe WURR). GREVSEN (1990) stellte allerdings selbst ein einfaches Regressionsmodell vor, das auf der Beziehung zwischen dem Kopfdurchmesser, ausgedrückt als Logarithmus naturalis (ln), und der Temperatursumme > 5 °C ab der Kopfanlage beruht (Gleichung 15).

Ln des Kopfdurchmessers in Abhängigkeit von der Temperatursumme $> 5\text{ °C}$ (15)

$$\ln DM_k = -4.07 + 0.0114 \cdot TS_k$$

mit DM_k = Kopfdurchmesser [mm]

TS_k = Temperatursumme $> 5\text{ °C}$ ab Tag der Kopfanlage [$\text{°C} \cdot \text{Tag}$]

Dieses Modell kann nach GREVSEN (1990) zur Vorhersage des Erntetermins genutzt werden. Dafür ist für DM_k der zur Ernte gewünschte Kopfdurchmesser einzusetzen, um die für diese Größe nötige Temperatursumme zu ermitteln. Wird anschließend mit Werten von gemessenen Köpfen gearbeitet, kann berechnet werden, welche Temperatursumme ab der Kopfanlage eingewirkt haben muß. Die Differenz dieser Temperatursummen ist der Bedarf für die gemessenen Köpfe bis zur Erntegröße. Liegen langjährige Mittelwerte aus der Region und aktuelle Wettervorhersagen vor, ist die Bestimmung des Erntetermins durch Umrechnung für 4 bis 5 Wochen im voraus möglich (vgl. auch 4.1.5: Arbeitsgruppe WURR, Abb. 14).

4.1.3 Arbeitsgruppe PEARSON (GB)

S. PEARSON (Department of Horticulture, University of Reading, Reading, GB) und Mitarbeiter stellten neben Programmen zur Koordinierung von Anbauplänen für Anbaukooperativen (PEARSON et al. 1990, PEARSON und HADLEY 1993) auch Modelle für die Kopfanlage und das Kopfwachstum vor (PEARSON et al. 1994). Als Datenbasis konnten sie auf kommerziell angebaute Blumenkohlbestände in den Jahren 1989 bis 1991 zurückgreifen. Weiterhin wurden Ergebnisse von WURR et al. (1990a) einbezogen, die Pflanzen der Sorte 'White Fox' in Klimakammern kultivierten.

PEARSON et al. (1994) definieren die Kopfanlage als Stufe in der Entwicklung. Sie ermittelten für die Zeit der Pflanzung bis zur Kopfanlage eine Beziehung zur Temperatur, ohne eine Jugendphase zu berücksichtigen. Dabei gebrauchen sie das Konzept der effektiven Temperatur T_e , mit dem die Wirkung von Temperaturen über und unter einer optimalen Temperatur T_o kalkuliert werden kann, wenn die aktuelle Lufttemperatur T_a über einer Basistemperatur T_b liegt (Gleichung 16).

Berechnung der effektiven Temperatur für die vegetative Phase (16)

$$T_e = T_o - |T_o - T_a|$$

mit T_e = effektive Temperatur [°C]

T_o = Optimumtemperatur [°C]

T_a = aktuelle Lufttemperatur [°C]

Unter Verwendung der effektiven Temperatur T_e kann die Dauer der Phase von der Pflanzung bis zur Kopfanlage mit folgender Gleichung (17) bestimmt werden:

Dauer der vegetativen Phase ab der Pflanzung in Tagen (17)

$$\frac{1}{Z} = \alpha + \beta \cdot T_e$$

mit Z = Zeit bis zur Kopfanlage [Tage]

α, β = Parameter, für die gilt:

- α / β : Basistemperatur [°C]

$1 / \beta$: benötigte Temperatursumme bis zur Kopfanlage [°C · Tag]

T_e = effektive Temperatur [°C]

PEARSON et al. (1994) schätzten für die Sommer- und Herbstsorte 'Revito' die entsprechenden Werte für die Parameter α und β . Als Optimumtemperatur nahmen sie 14 °C an. Die effektive Temperatursumme ($1 / \beta$) betrug 296 °C·Tag bei einer Basistemperatur ($-\alpha / \beta$) von 2.8 °C. Mit diesen Parametern nahm die Zeit bis zur Kopfanlage von 50 Tagen bei durchschnittlich 9 °C auf 36 Tage bei 11 °C (T_e) ab.

Deutlich unterscheiden die Autoren Entwicklungsprozesse wie die Kopfanlage von Wachstumsprozessen wie z. B. der Rate der Trockenmassenzunahme oder dem Anstieg der Blattfläche. Sie schlagen vor, Wachstumsprozesse über Raten zu definieren und stellen ein Modell vor, das zur Berechnung von Kopfdurchmessern einsetzbar ist, wenn die Zunahme des Kopfdurchmessers als Wachstumsprozeß verstanden wird.

Das Modell beruht auf zwei Annahmen: Erstens nimmt die potentielle Wachstumsrate R_p im Lauf der Entwicklung als lineare Funktion der Temperatursumme ab, zweitens verringern Temperaturen über und unter einer optimalen Temperatur die aktuelle Wachstumsrate R_a (Gleichung 18).

Potentielle und aktuelle Wachstumsraten in Abhängigkeit von der Temperatur am Beispiel des Kopfdurchmessers von Blumenkohl (18)

$$R_p = R_m \cdot \left\{ 1 - \left[\sum_1^n (T_e - T_b) / TS_0 \right] \right\}$$

und

$$R_a = R_p \cdot \left[1 - \frac{(T_o - T_e)}{(T_o - T_b)} \right]$$

mit R_p = potentielle Wachstumsrate $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mm} \cdot \text{Tag}} \right]$

R_a = aktuelle Wachstumsrate $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mm} \cdot \text{Tag}} \right]$

R_m = maximale Wachstumsrate $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mm} \cdot \text{Tag}} \right]$

n = Zahl der Tage ab Kopfanlage [-]

T_e = effektive Temperatur [°C]

T_b = Basistemperatur [°C]

T_o = Optimumtemperatur [°C]

TS_0 = Temperatursumme, bis $R_p = 0$

Die Abschätzung des Kopfdurchmessers zu einem bestimmten Zeitpunkt kann nach PEARSON et al. (1994) durch Integration von R_a in Bezug zur Zeit erfolgen. Dabei wird ab dem Tag der Kopfanlage die Temperatursumme berechnet und durch TS_0 dividiert. Wird die Temperatursumme größer als TS_0 , so wird der Wert der potentiellen Wachstumsrate negativ. Die tägliche Zunahme des Kopfdurchmessers in mm kann durch Multiplikation von R_a mit dem aktuellen Kopfdurchmesser ermittelt werden.

Für die drei Sorten 'Jubro', 'Revito' und 'White Fox' ermittelten die Autoren die erforderlichen Parameter (Tab. 5).

Für die Bestimmung der Kopfanlagetermine setzten die Autoren eine Beziehung zwischen dem Logarithmus naturalis (ln) des Kopfdurchmessers und der Temperatursumme aus aktuellen Temperaturen ein. Um diese Beziehung in einer Gleichung (19) zu beschreiben, wurden in regelmäßigen Abständen Köpfe der Sorte 'Revito' gemessen, nachdem die Köpfe eine Größe von etwa 1.5 mm erreicht hatten. Der Zeitpunkt der Kopfanlage wurde durch Extrapolation errechnet, indem als Kopfdurchmesser 0.6 mm eingesetzt wurde. Abb. 7 stellt die Beziehung graphisch dar.

Tab. 5: Werte der Parameter für das Modell zur Abschätzung des Kopfdurchmessers
(nach PEARSON et al. (1994))

Sorte	TS_o [°C·Tag]	R_m [mm/mm·Tag]	T_b [°C]	T_o [°C]
'Jubro'	900	0.244	2	16
'Revito'	1300	0.233	-1	25
'White Fox'	975	0.272	1	21

Ln des Kopfdurchmessers in Abhängigkeit von der Temperatursumme

(19)

$$\ln DM_k = -0.375 + 0.00936 \cdot TS_k - 0.00000402 \cdot TS_k^2$$

mit DM_k = Kopfdurchmesser [mm]

TS_k = Temperatursumme ab Kopfanlage [°C · Tag]

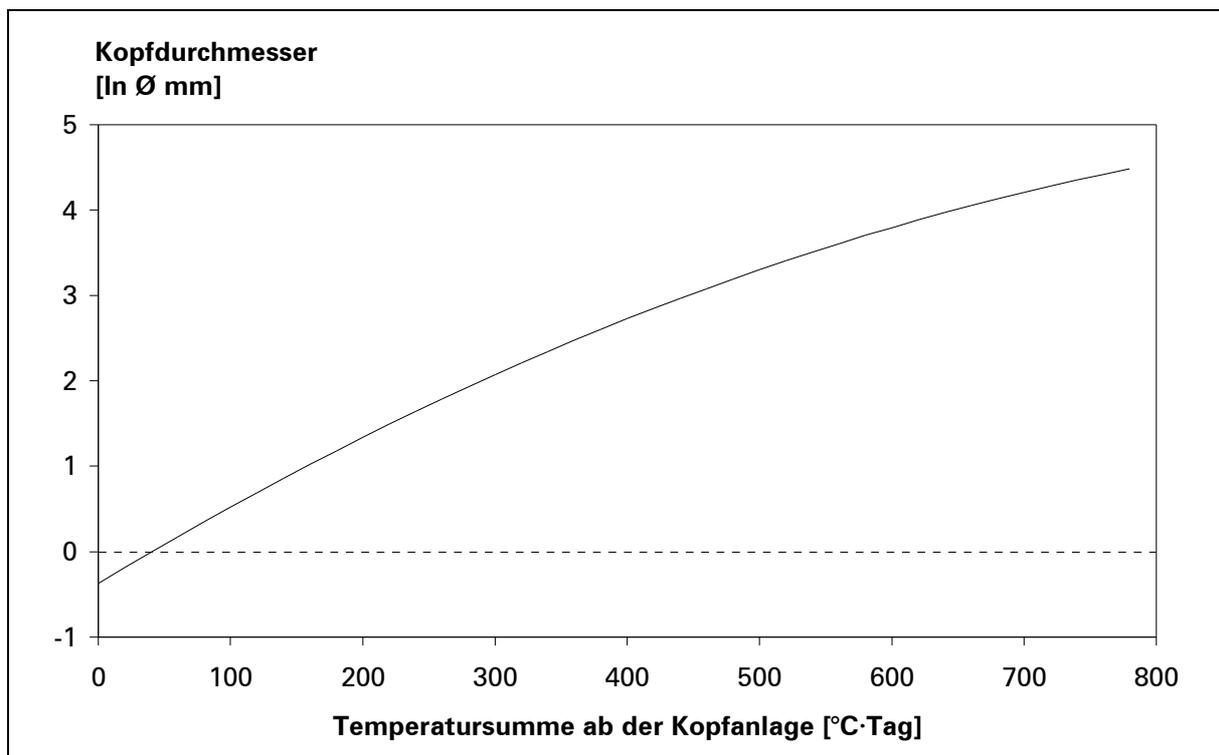


Abb. 7: Kopfdurchmesser von Pflanzen der Sorte 'Revito' in Abhängigkeit von der Temperatursumme ab der Kopfanlage (nach PEARSON et al. 1994)

Nach Meinung der Autoren bietet die Kombination der Modelle (17 und 18) die Möglichkeit, den Erntezeitpunkt von Blumenkohlbeständen ausreichend genau zu prognostizieren, um auf Messung der Köpfe im Feld verzichten zu können. Das Modell der Wachstumsrate (18) erklärte dabei 37.4 %, 40.4 % bzw. 95.8 % der Varianz im Kopfwachstum der Sorten 'Revito', 'Jubro' und 'White Fox'. Dabei ist zu beachten, daß die Daten für die Sorte 'White Fox' in Klimakammern ermittelt und der Arbeit von WURR et al. (1990a) entnommen wurden

4.1.4 Arbeitsgruppe WIEBE (D)

Basierend auf Klimakammerversuchen wurde von H.-J. WIEBE (Institut für Gemüsebau, Universität Hannover, Hannover, D) und Mitarbeitern ein Modell entwickelt, mit dem die Kulturdauer von Blumenkohl und die Marktbelieferung vorhergesagt werden kann.

Als Datenmaterial standen Ergebnisse aus Klimakammerversuchen mit der frühen Sorte 'Aristokrat' (Rijk Zwaan) und der Sommer- und Herbstsorte 'Sesam' (Rijk Zwaan) zur Verfügung (WIEBE 1972-1974). Zur Überprüfung des Modells unter Freilandbedingungen wurden von WIEBE sowohl eigene Versuche angelegt als auch Anbau- und Anlieferungsdaten von Großmärkten einbezogen (WIEBE 1975a+b). Das Modell wurde bereits 1975 in der Programmiersprache FORTRAN formuliert. In dieser Arbeit soll die aktuelle Version des Simulationsmodells vorgestellt werden, die über mehrere Jahre verbessert wurde, sich aber nicht wesentlich von dem 1975 entwickelten Modellansatz unterscheidet.

Zwischen dem Verlauf der mittleren Tagestemperatur und der Kulturdauer des Blumenkohls besteht eine enge Beziehung (WIEBE 1975b). Es ist sinnvoll, die Entwicklung der Pflanzen in Jugendphase, Vernalisationsphase und Kopfbildungsphase aufzuteilen, da die Temperatur die Dauer dieser Phasen unterschiedlich beeinflusst. Hohe Temperaturen fördern das Wachstum in der Jugendphase und der Kopfbildungsphase, während die Dauer der Vernalisationsphase verlängert wird (vgl. 2.2: Wachstum und Entwicklung). Die Kriterien, die die Phasen beschreiben, sollten bei konstanter Temperatur möglichst linear zur Zeit ansteigen und so gewählt werden, daß Beginn und Ende der Phasen einfach zu bestimmen sind.

WIEBE (1975a) empfiehlt für die erste Phase (Jugendphase) die Verwendung der Blattzahl, deren Ende je nach Sorte bei 10 bis 16 angelegten Blättern erreicht ist. Die zweite Phase (Vernalisationsphase) läuft von dieser Blattzahl bis zu einem Kopfdurchmesser von 0.6 mm, die dritte Phase (Kopfbildungsphase) vom Kopfdurchmesser 0.6 mm bis zur Erntegröße.

Jeder Tag hat eine von der Höhe der Tagesmitteltemperatur abhängige positive Wirkung auf den Fortschritt innerhalb der Phase. Diese Wirkung ließe sich als Rate ausdrücken, z. B. die Anlage von 0.2 Blättern pro Tag bei bestimmter Temperatur, wurde aber zur Vereinfachung der mathematischen Formulierung des Modells in prozentuale Werte umgerechnet. Jeder Tagesmitteltemperatur wird im Bereich von 1 °C bis 25 °C ein Funktionswert zugeordnet, dessen Höhe von der Phase abhängig ist, in der sich die Pflanze befindet. Die Dauer der Phasen kann simuliert werden, wenn die Grenzen ebenfalls als Prozentwerte ausgedrückt werden.

Zur Anpassung des Modells an Freilandbedingungen waren Korrekturen notwendig, wobei die Kurventypen jedoch erhalten blieben. In der Jugendphase und der Kopfbildungsphase fördern niedrige Temperaturen stärker das Wachstum als aus den Klimakammerversuchen mit konstanter Temperatur abzuleiten war. Die Vernalisationswirkung höherer Temperaturen war größer als erwartet. WIEBE (1975a) bot als Begründung an, daß der Einfluß niedriger Nachttemperaturen durch hohe Tagtemperaturen nicht aufgehoben wurde. Er stellte keine Devernalisationseffekte fest.

Unterschiede zwischen Sorten können auf verschiedene Weise berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit ist, daß bis zum Ende einer Phase nicht immer der Wert von 100 % erreicht werden muß. Beispielsweise durchlaufen nach WIEBE (1972c) frühe Sorten durch eine höhere Blattanlagerate und eine geringere Mindestblattzahl schneller die Jugendphase. Im Modell wird dieser Zusammenhang abgebildet, indem das Ende der ersten Phase auf z. B. 60 % festgesetzt wird. Unterscheiden sich Sorten in einer Phase deutlich in der Reaktion auf die Temperatur, ist es sinnvoller, nicht den Prozentwert für das Ende der Phase zu variieren, sondern für jede Sortengruppe individuelle Funktionswerte für die Temperaturwirkung einzusetzen. Den Programmablauf und den relativen Anteil an der Phasendauer je Tag für eine Sommer- und Herbstsorte in den drei Phasen zeigt Abb. 8.

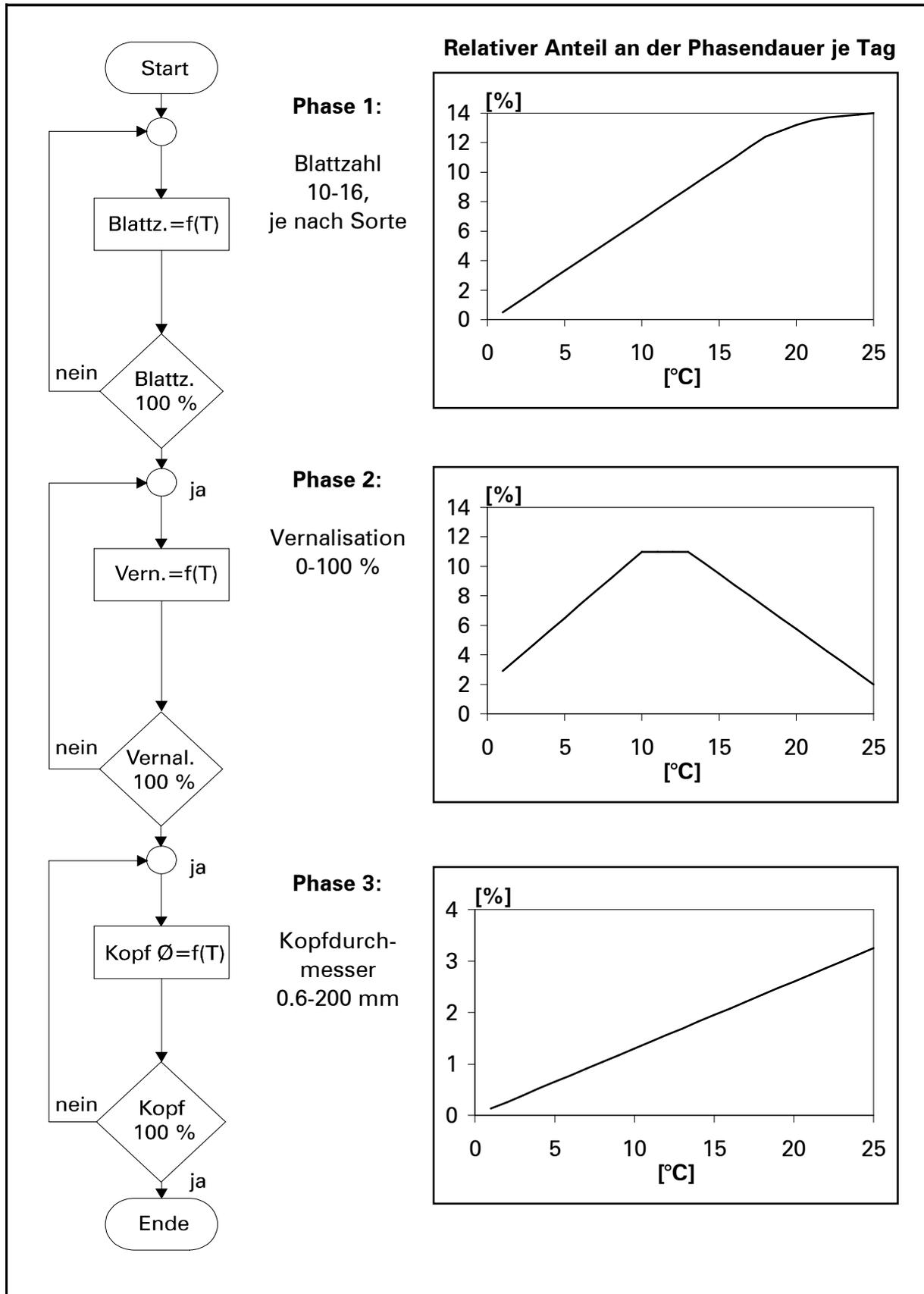


Abb. 8: Programmablauf und Funktionswerte der Temperaturwirkung (nach WIEBE 1975a)

In der aktuellen Version des Modells werden Sorten in fünf Gruppen eingeordnet. Zur Vereinheitlichung werden für alle Sortengruppen für die erste und dritte Phase jeweils gleiche Funktionswerte verwendet. Für die zweite Phase werden für jede Sortengruppe individuelle Funktionen eingesetzt, um die unterschiedlichen Kältebedürfnisse simulieren zu können. Die Funktionswerte für die Temperaturwirkung in den drei Phasen sind in Tab. 6 aufgelistet. Die Aufteilung verbreiteter Blumenkohlsorten auf Sortengruppen, die Endwerte der drei Phasen und die einzusetzenden Funktionen sind Tab. 7 zu entnehmen.

Tab. 6: Funktionswerte für die drei Phasen in Abhängigkeit von der Temperatur

T [°C]	Phase 1	Phase 2					Phase 3
	F 1 [%]	F 1 [%]	F 2 [%]	F 3 [%]	F 4 [%]	F 5 [%]	F 1 [%]
1	0.50	5.20	4.20	2.90	2.60	2.60	0.13
2	1.20	6.70	5.60	3.80	4.20	3.90	0.26
3	1.90	8.30	6.70	4.70	5.40	5.00	0.39
4	2.60	9.40	7.80	5.60	6.40	6.00	0.52
5	3.30	10.40	8.80	6.50	7.30	7.00	0.65
6	4.00	11.20	9.50	7.40	8.10	7.70	0.78
7	4.70	11.90	10.10	8.30	9.00	8.40	0.91
8	5.40	12.60	10.80	9.20	9.70	9.20	1.04
9	6.10	12.90	11.20	10.10	10.40	9.60	1.17
10	6.80	13.20	11.60	11.00	11.00	10.00	1.30
11	7.50	13.20	11.80	11.00	11.40	10.80	1.43
12	8.20	13.00	11.60	11.00	11.40	10.00	1.56
13	8.90	12.70	11.40	11.00	11.00	10.00	1.69
14	9.40	12.20	11.00	10.25	10.30	9.30	1.82
15	10.10	11.20	10.20	9.50	9.20	8.60	1.95
16	11.00	10.10	9.40	8.75	8.00	7.90	2.08
17	11.80	9.00	8.40	8.00	6.80	7.20	2.21
18	12.40	7.90	7.40	7.25	5.50	6.50	2.34
19	12.80	6.80	6.40	6.50	4.30	5.80	2.47
20	13.20	5.70	4.40	5.75	3.10	5.10	2.60
21	13.50	4.60	3.40	5.00	1.80	4.40	2.73
22	13.70	3.50	2.40	4.25	0.70	3.70	2.86
23	13.80	2.40	1.40	3.50	0.00	3.00	2.99
24	13.90	1.30	0.40	2.75	0.00	2.30	3.12
25	14.00	0.00	0.00	2.00	0.00	1.60	3.25

Tab. 7: Einteilung der Sorten in Gruppen und spezifische Parameter
(KD: Kulturdauer bei Pflanzung im Mai)

Gruppe	Sorte	KD [Tage]	Phase 1		Phase 2		Phase 3	
			F	[%]	F	[%]	F	[%]
1	'Alpha'	55	1	30	1	100	1	90-120
	'Malimba'							
	'Opaal'							
2	'Gipsy Moth'	62	1	60	2	100	1	90-120
	'Montano'							
3	'Arfak'	66	1	100	3	100	1	90-120
	'Beauty'							
	'Fremont'							
	'Nautilus'							
	'Ravella'							
	'Siria'							
'Whitney'								
4	'Aviso'	69	1	120	4	100	1	90-120
	'Celesta'							
	'Linday'							
	'Plana'							
5	'Andes'	73	1	150	5	100	1	90-120
	'Revito'							
	'Sierra'							
	'Topman'							
	'Triton'							
	'White Ball'							

Als Eingabedaten werden für das Simulationsmodell außer Angaben über die Sorte und Sortengruppe noch der Pflanztag, die Anzahl Pflanzen und Temperaturen benötigt. Dabei können sowohl langjährige Mitteltemperaturen als auch aktuelle Temperaturen verwendet werden, soweit diese verfügbar sind.

Die Streuung im Pflanzenbestand, die zum Teil auf verschiedenen großen Jungpflanzen beruht (vgl. 2.2.6: Variabilität im Bestand), wird in diesem Modell in zweifacher Weise berücksichtigt. Bereits zu Beginn der Simulation, also in Phase 1, werden die Pflanzen im Verhältnis 30 : 40 : 30 % in drei Stufen aufgeteilt, für die die Berechnung getrennt fortgeführt wird. Dabei startet die erste Stufe in Phase 1 mit -20 % (kleine Jungpflanzen), die mittlere Stufe mit 0 % und die dritte Stufe mit einem Vorsprung von +20 % (große Jungpflanzen).

Als mittlere Kulturdauer wird in diesem Modell die Zeit vom Pflanztag bis zu dem Tag verstanden, an dem für die zweite Stufe (normal große Pflanzen) in der Kopfbildungsphase 100 % erreicht werden. Dabei kann die Spanne von 0-100 % als Dauer der Kopfbildungsphase interpretiert werden. Als erntereif werden Köpfe mit einem Durchmesser von 200 mm angesehen. Das Datenmaterial reicht nicht aus, um frühere Erntetermine bei kleineren Durchmessern aufgrund von zu erwartendem Qualitätsabfall zu berücksichtigen. Da der Bestand nicht gleichmäßig erntereif wird (KRUG et al. 1980), wird er zur Ernte im Verhältnis von 10 : 20 : 30 : 20 : 10 % auf fünf Klassen aufgeteilt. Als Erntebeginn ist der Tag definiert, an dem ein Anteil von 90 % der durchschnittlichen Zeit erreicht wurde, die letzten Pflanzen können erst nach 120 % der Zeit geerntet werden.

Als Schwund verbleiben 10 % der Menge auf dem Feld. Zusammen mit den drei in Phase 1 initialisierten Stufen ergibt sich zur Ernte eine Aufteilung des Bestandes eines Satzes in 15 Klassen.

In Abb. 9 ist für einen Blumenkohlsatz der Sorte 'Arfak', Sortengruppe 3, Pflanztag 06.05.1992, die Simulation der drei Phasen bis zur Ernte exemplarisch dargestellt. Die gepunkteten Kurven beschreiben die Simulation der kleinen (Stufe 1) bzw. großen Pflanzen (Stufe 3). Die Ernte erstreckt sich im Beispiel vom 07.07.1992 bis zum 25.07.1992 über 18 Tage, der mittlere Erntetermin ist am 14.07.1992, so daß die Kulturdauer ab Pflanztag 69 Tage beträgt.

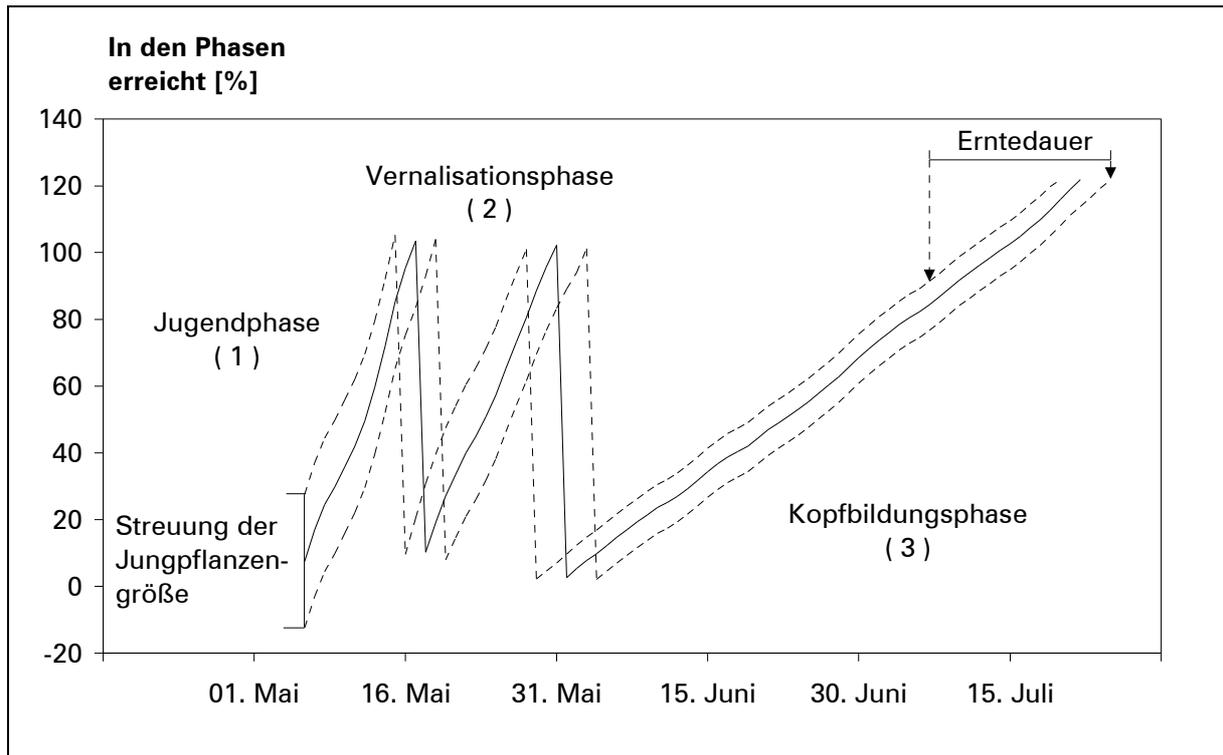


Abb. 9: Simulation des Phasenverlaufs für die Sorte 'Arfak', Pflanztag 06.05.1992

Genauer wird die Simulation, wenn auf dem Feld Köpfe gemessen werden und diese Ergebnisse als Startwerte in der Phase 3 (Kopfbildungsphase) eingefügt werden. Auf diese Weise können Einflüsse, die zur Variation in der Phase vor der Kopfanlage geführt haben, ausgeschaltet werden (WURR 1990, PEARSON et al. 1994).

Um eine Aussage über die Güte der Simulation treffen zu können, werden Ergebnisse für verschiedene Blumenkohlsorten vorgestellt. Mit aktuellen Temperaturen wurden die mittleren Erntetermine simuliert und können mit den beobachteten Ernteterminen verglichen werden. Abb. 10 stellt die Beziehung zwischen den geschätzten und den gemessenen Ernteterminen in Tagen dar. Für die beschriebenen Sätze liegen Zwischenwerte für die Kopfdurchmesser vor. Zum Vergleich wurden auch mit diesen Werten und aktuellen Temperaturen die Erntetermine simuliert (Abb. 11).

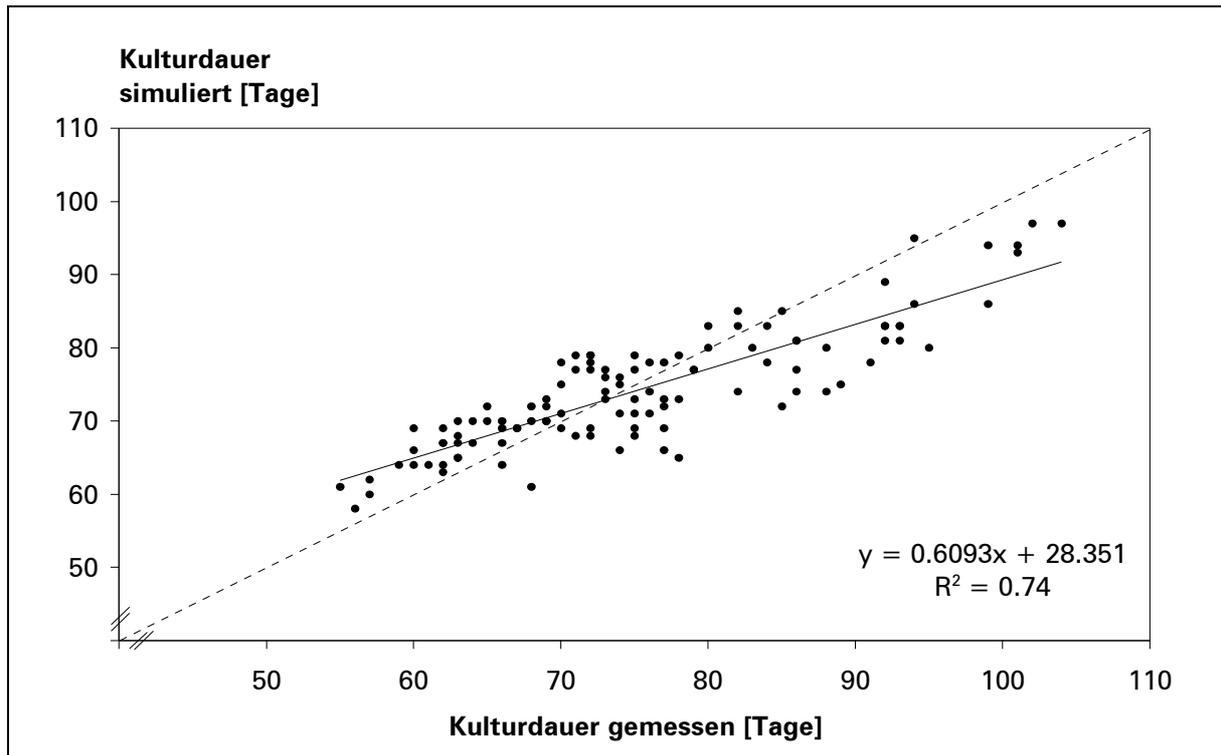


Abb. 10: Gemessene und simulierte Kulturdauer (Ruthe 1991-1993, 112 Sätze)

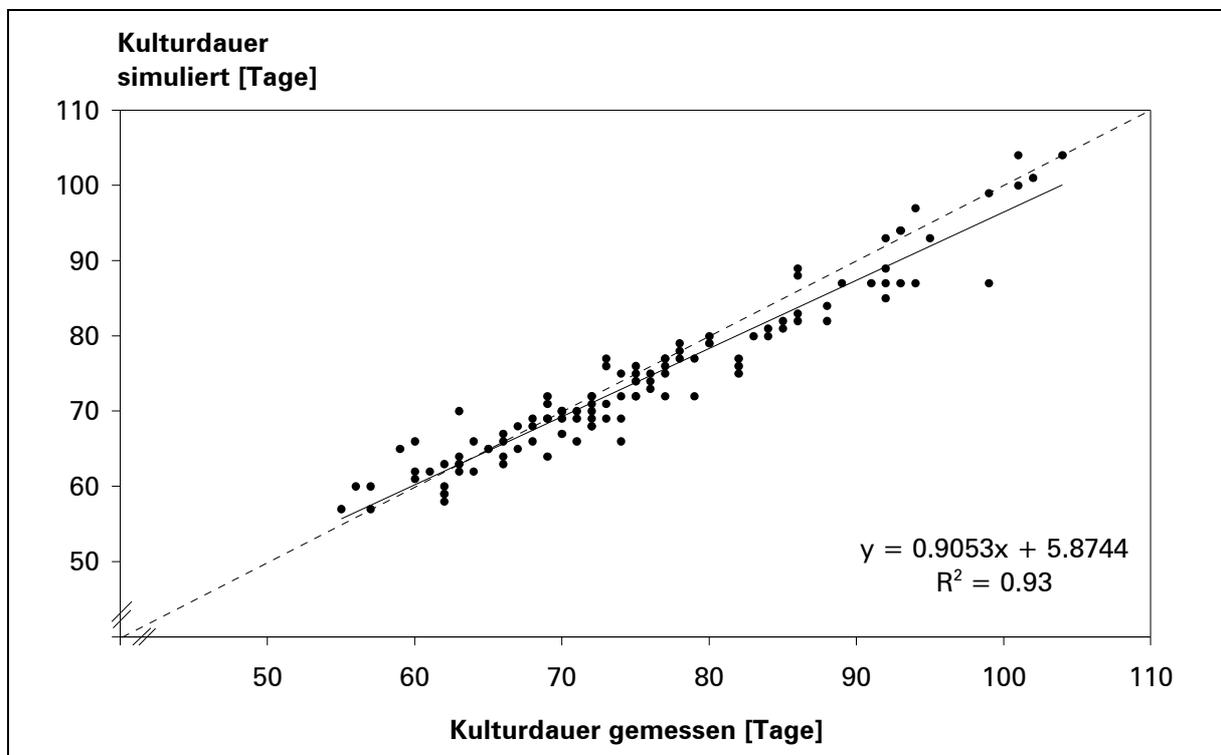


Abb. 11: Gemessene und simulierte Kulturdauer mit einer Stichprobe der Kopfgrößen (Ruthe 1991-1993, 112 Sätze)

4.1.5 Arbeitsgruppe WURR (GB)

D. C. E. WURR (Horticulture Research International, Wellesbourne, GB) und Mitarbeiter untersuchten in einer vorbereitenden Studie den Einfluß von Kulturmaßnahmen auf das Wachstum und die Entwicklung von Blumenkohl (vgl. 3.3: Einflußnahme auf den Kulturverlauf). Die Freilandversuche wurden mit den Sorten 'Elgon', 'Revito', 'White Fox' und 'White Rock' in den Jahren 1983 und 1987 durchgeführt. Zum Teil wurden gezogene Pflanzen verwendet. In den Jahren 1986 und 1987 erfolgte die Anzucht der Jungpflanzen in Multitopflatten mit einer Zellengröße von 14 ml. Pro Jahr wurden mehrere Sätze zu verschiedenen Zeiten gepflanzt. Dabei konnte keine Behandlung die Dauer der Zeit von der Kopfanlage bis zur Ernte signifikant beeinflussen (WURR et al. 1988). Pflanzen der Sorte 'White Fox' wurden außerdem bei 8 °C, 13 °C, 18 °C und 23 °C in Klimakammern kultiviert, um die Beziehung zwischen der Kopfwachstumsrate und der Temperatur im Vergleich zu den Ergebnissen aus den Freilandversuchen zu bestimmen.

Den Schwerpunkt der in diesem Zusammenhang relevanten Arbeiten von WURR und Mitarbeitern bildet die Vorhersage von Ernteterminen nach Stichproben für den Kopfdurchmesser. Allerdings stellten WURR et al. (1993) auch ein Modell für die Vernalisationsphase auf. Mit diesem Modell kann der Durchmesser des Vegetationskegels zu jeder Zeit zwischen dem Ende der Jugendphase, definiert über die Blattzahl, und der Kopfanlage bestimmt werden. Dazu verglichen die Autoren verschiedene Vernalisationsfunktionen, deren Verlauf durch die vier Temperaturen T_1 , T_2 , T_3 und T_4 beschrieben werden kann (Abb. 12).

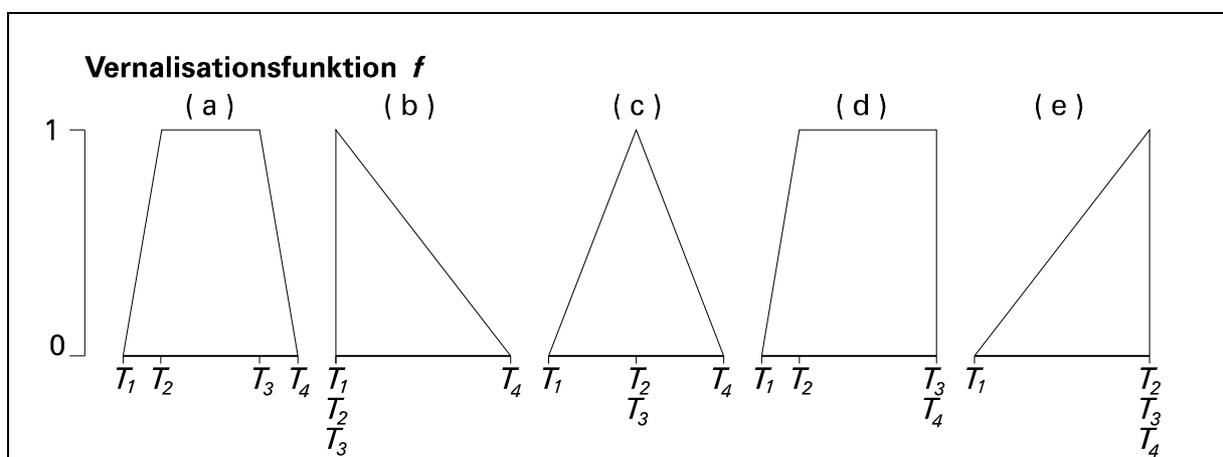


Abb. 12: Mögliche Formen der Vernalisationsfunktion f (nach WURR et al. 1993)

Werte für T_1 , T_2 , T_3 und T_4 errechneten die Autoren, indem sie T_1 und T_2 in der Spanne von 0 °C bis 11 °C, T_3 von 8 °C bis 17 °C und T_4 von 16 ° bis 25 °C variierten. Die Schrittweite betrug dabei 0.5 °C, und die Beziehung $T_1 \leq T_2 \leq T_3 \leq T_4$ zwischen den Temperaturen blieb erhalten. Die Breite des Vegetationskegels DM_v kann zu jeder Zeit Z ab der Zeit Z_j , bei der die Jugendphase endet, und dem Zeitpunkt der Kopfanlage Z_v ($Z_j \leq Z \leq Z_v$) bestimmt werden (Gleichung 20).

Breite des Vegetationskegels während der Vernalisationsphase (20)

$$DM_v(Z) = DM_{vStart} + \beta \cdot \int_{Z_j}^Z f(T(x)) dx$$

mit $DM_v(Z)$ = Durchmesser des Vegetationskegels zum Zeitpunkt Z [mm]

DM_{vStart} = Durchmesser des Vegetationskegels am Ende der Jugendphase [mm]

β = Parameter zur Skalierung

Z = Parameter für Zeit [Tag im Jahr]

Z_j = Zeit des Endes der Jugendphase [Tag im Jahr]

x = Variable für die Integration

$f(T)$ = verschiedene Temperaturfunktionen

$$f(T) = \begin{cases} 0 & \text{für } T < T_1 \text{ oder } T \geq T_4 \\ \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} & \text{für } T_1 \leq T < T_2 \\ 1 & \text{für } T_2 \leq T < T_3 \\ 1 - \frac{T - T_3}{T_4 - T_3} & \text{für } T_3 \leq T < T_4 \end{cases}$$

Den Zeitpunkt Z_j , an dem die Jugendphase endet, bestimmten WURR et al. (1993) aus der Temperatursumme > 0 °C ab der Keimung bis zu einer definierten Blattzahl (Ende der Jugendphase) mit einer Regressionsgleichung (21) für die Sorte 'White Fox'.

Blattzahl in Abhängigkeit der Temperatursumme ab der Keimung (21)

$$BZ_a = 0.0000147 \cdot TS^2 + 0.0002 \cdot TS + 4.24$$

mit BZ_a = absolute Blattzahl [-]

TS = Temperatursumme > 0 °C [°C · Tag]

Die Autoren definierten das Ende der Jugendphase der Sorte 'White Fox' in Übereinstimmung mit Ergebnissen von HAND und ATHERTON (1987) mit 17 angelegten Blättern und errechneten eine Temperatursumme von 924 °C·Tag. Werte für die Parameter zur Berechnung des Durchmessers des Vegetationskegels (Gleichung 20) können Tab. 8 entnommen werden.

Tab. 8: Parameter zur Berechnung des Vegetationskegeldurchmessers für die Sorte 'White Fox' (nach WURR et al. 1993)

T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_4 [°C]	$DM_{v\,Start}$ [mm]	β [-]
9	9	9.5	21	0.1948	0.00224

Die Vernalisationsfunktion f , die sich mit den in Tab. 8 aufgelisteten Temperaturen ergibt, gleicht in der Form dem Typ (b) in Abb. 12. Bei der Kardinaltemperatur von konstant 9 °C durchlaufen Pflanzen der Sorte 'White Fox' die Vernalisationsphase in 7.5 Tagen. Über die Wirkung von tieferen Temperaturen als 9 °C konnten WURR et al. (1993) keine Angaben machen, da in ihren Freilandversuchen diese zu selten auftraten, und daher nicht bei der Anpassung des Modells mit statistischen Methoden berücksichtigt werden konnten. Sie sahen darin eine generelle Schwierigkeit der Modellbildung mit Daten aus Freilandversuchen verglichen mit solchen aus Klimakammerversuchen.

Zur Überprüfung des Modells berechneten WURR et al. (1994) für die vier Sorten 'White Fox', 'Elgon', 'Revito' und 'White Rock' aus den Freilandversuchen von 1986 den Tag der Kopfanlage (Durchmesser des Vegetationskegels 0.6 mm) und verglichen diesen mit den im Feld beobachteten Zeitpunkten der Kopfanlage. Dabei waren die Abweichungen des vorhergesagtem vom beobachteten Datum bei 40 Sätzen in 72.5 % der Fälle ≤ 4 Tage. Die Autoren empfahlen, dieses Modell mit einem früher entwickelten Modell zur Vorhersage des mittleren Erntetermins nach einer Kopfmessung zu kombinieren. Dieses Modell soll im folgenden beschrieben werden.

Bei der Auswertung der beschriebenen Datensätze, besonders der Ergebnisse aus den Klimakammerversuchen (siehe oben), stellten WURR et al. (1990a) fest, daß die Variation der Dauer der Phase von der Pflanzung bis zur Kopfanlage relativ größer war als in der Phase von der Kopfanlage bis zur Ernte. Das Wachstum in der Kopfbildungsphase kann nach WURR et al. (1990b) durch die Zunahme des Kopfdurchmessers beschrieben werden. Die Autoren zeigten, daß der Anstieg der Werte des Logarithmus naturalis (\ln) des Kopfdurchmessers direkt proportional zum Anstieg des \ln des Kopfgewichts war. Die Erntereife läßt sich ebenfalls über Kopfdurchmesser beschreiben, weil in den Ansprüchen der Vermarktungsorganisationen an die Qualität von Blumenkohl Kopfdurchmesser festgelegt sind (WURR et al. 1990b).

Bereits SALTER (1969) stellte eine Beziehung zwischen dem Kopfdurchmesser und der Temperatursumme ab der Kopfanlage fest. Um zu prüfen, welche Funktion zur Beschreibung dieser Beziehung am Besten geeignet ist, paßten die Autoren exponentielle, logistische, quadratische sowie Gompertz-Funktionen an die unabhängige Variablen Tage, Strahlungssumme, Temperatursummen mit verschiedenen Basistemperaturen an. Die geringsten Abweichungen ergaben sich bei Verwendung einer quadratischen Funktion der Form $f(x) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ mit Temperatursummen > 0 °C (WURR 1990, WURR et al. 1990c).

Für die Sorte 'White Fox' bestimmten die Autoren die Parameter a , b und c . Der Durchmesser des Kopfes nach der Kopfanlage kann demnach für eine gegebene Temperatursumme mit Gleichung 22 geschätzt werden. Abb. 13 stellt die Beziehung graphisch dar.

Kopfdurchmesser in Abhängigkeit von der Temperatursumme ab der Kopfanlage (22)

$$\ln DM_k = -0.000006 \cdot TS_k^2 + 0.012 \cdot TS_k - 0.4769$$

mit DM_k = Kopfdurchmesser [mm]

TS_k = Temperatursumme > 0 °C ab Kopfanlage [°C · Tag]

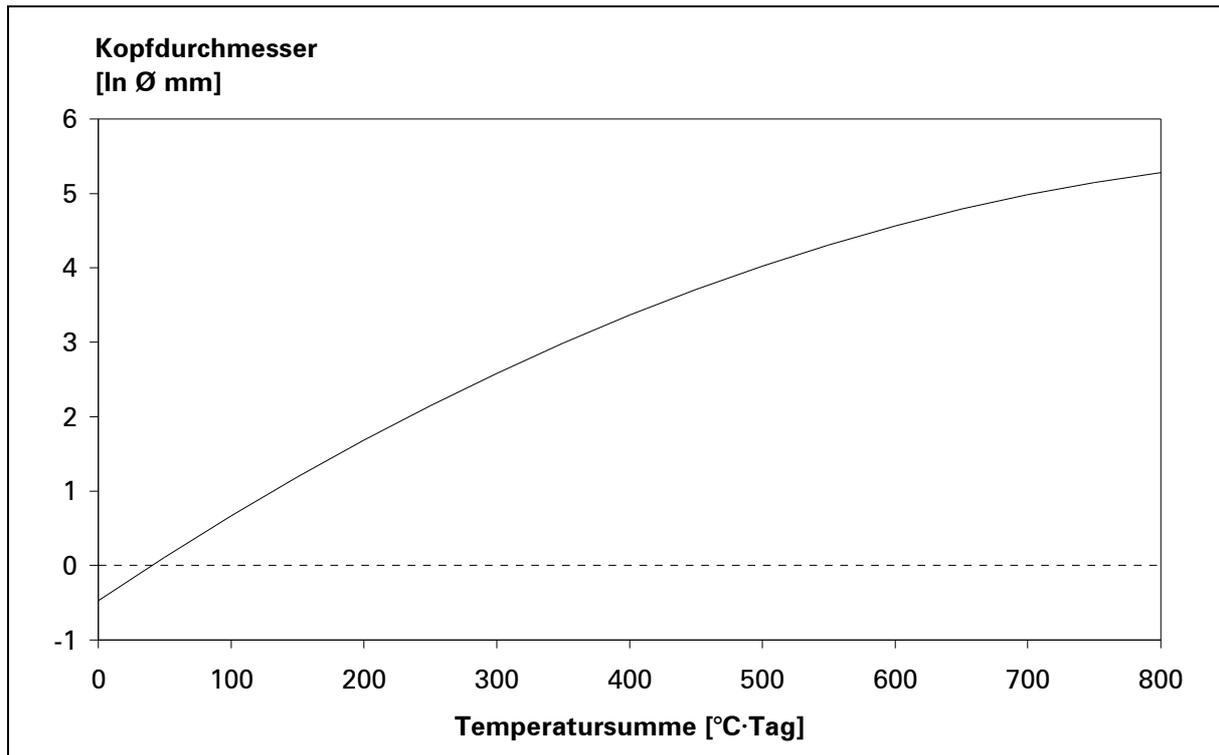


Abb. 13: Kopfdurchmesser in Abhängigkeit von der Temperatursumme $> 0\text{ °C}$ ab der Kopfanlage für die Sorte 'White Fox' (nach WURR 1990)

Liegen für eine Anbauregion tägliche Temperaturdaten vor, z. B. langjährige Temperaturmittelwerte, kann die beschriebene Beziehung eingesetzt werden, um vorherzusagen, wann Köpfe einen gewünschten Durchmesser erreichen (WURR 1988). Dazu sind im Feld an einer repräsentativen Stichprobe die Köpfe zu messen, die dabei $> 5\text{ mm}$ sein sollten. Mit dem \ln des Durchmessers kann errechnet werden, welche Temperatursumme ab der Kopfanlage eingewirkt haben muß. Auf die gleiche Weise kann die Temperatursumme bis zur gewünschten Kopfgröße ermittelt werden. Die Differenz dieser Temperatursummen ist der Bedarf, der ab dem Tag der Messung bis zum Erreichen der gewünschten Größe einwirken muß. Mit Hilfe der bekannten Temperaturen kann dieser Tag aus dem Temperatursummenbedarf abgeleitet werden. Abb. 14 soll das Verfahren veranschaulichen.

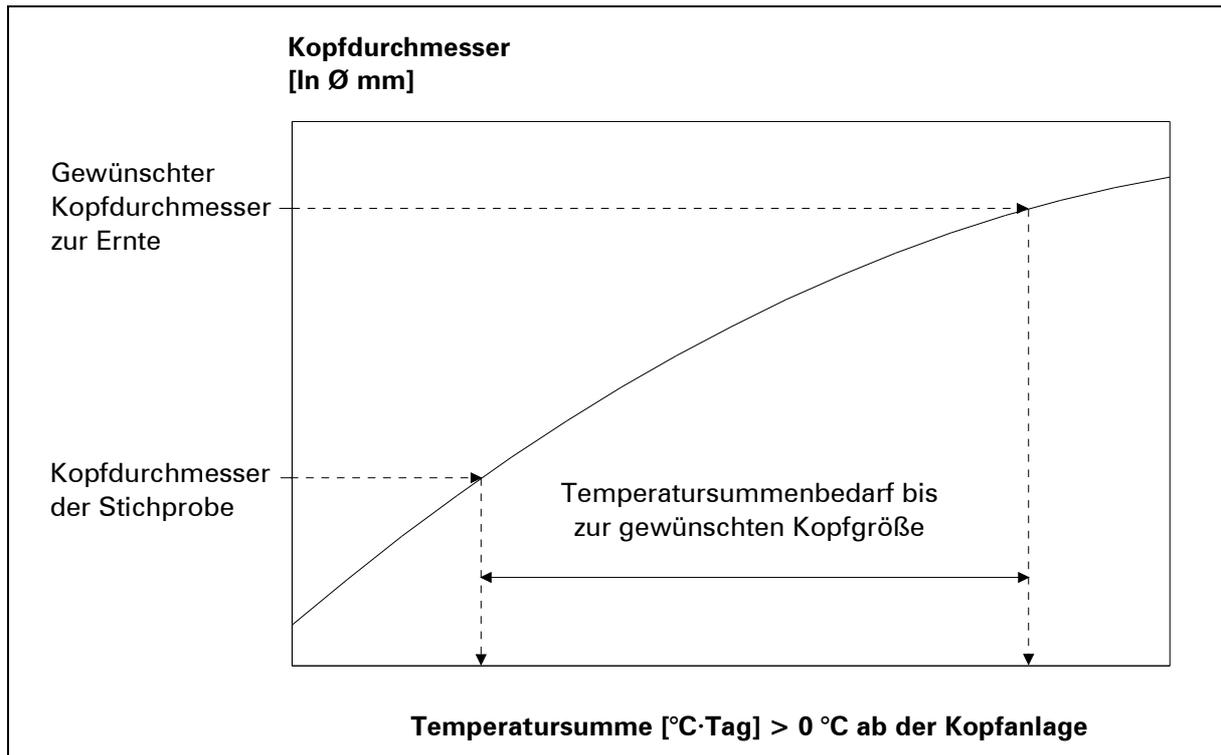


Abb. 14: Bestimmung des Temperatursummenbedarfs bis zur gewünschten Größe (nach WURR 1988)

4.2 Vergleich der Modelle

4.2.1 Voraussetzungen für einen Vergleich

Die Unterschiedlichkeit der beschriebenen Modellansätze erschwert einen Vergleich. Dabei ist besonders auf die Datenbasis hinzuweisen. Die Ergebnisse wurden in einem Zeitraum von über 20 Jahren erarbeitet, wobei sowohl die verwendeten Sorten als auch die Anzuchtbedingungen deutlich variierten. Auf Besonderheiten bei der Übertragung von Ergebnissen aus Klimakammerversuchen auf Freilandbedingungen wurde mehrfach hingewiesen (z. B. WIEBE 1975a+b). Auch der Einfluß der Anzuchtbedingungen wurde diskutiert (vgl. 3.2: Pflanzenanzucht).

Um solche Fehlerquellen zu vermeiden, werden die nachvollziehbaren Modellansätze in den drei Entwicklungsabschnitten Jugendphase, Vernalisationsphase und Kopfbildungsphase getrennt verglichen.

Einige Autoren favorisieren Modelle, mit denen die Erntetermine nach einer Stichprobe der Kopfdurchmesser vorhergesagt werden können. Diese Ansätze umgehen Variationen in der Länge der Kulturdauer, die durch die Verzögerung der Vernalisation durch hohe Temperaturen ausgelöst werden (vgl. 2.2.6: Variabilität im Bestand). Bei diesen Modellen ist ein direkter Vergleich möglich. Als Datenmaterial stehen Ergebnisse aus Freilandversuchen in Ruthe (Versuchsstation des Instituts für Gemüsebau, Universität Hannover), ca. 20 km südlich von Hannover, zur Verfügung. Der Bodentyp läßt sich als Parabraunerde aus Löß ansprechen.

Angelegt wurden die Versuche in den Jahren 1991 bis 1993 mit den Sorten 'Andes', 'Arfak', 'Celesta', 'Montano', 'Plana' und 'Triton'. Die Anzucht erfolgte in Erdpreßtöpfen. Zur Pflanzung im Abstand von 60 · 60 cm hatten die Pflanzen durchschnittlich vier sichtbaren Blätter, was etwa der Zahl von zehn angelegten Blättern entspricht. Die Düngung, der Pflanzenschutz und die Beregnung erfolgte praxisüblich. In der Kopfbildungsphase wurde an einer repräsentativen Stichprobe der Durchmesser der Köpfe ermittelt. Geerntet wurde selektiv von Hand im Abstand von drei Tagen bei einem Durchmesser von ca. 200 mm. Für den Standort Ruthe liegen aktuelle Tagesmitteltemperaturen für die entsprechenden Jahre, sowie langjährige Mittelwerte der Tagestemperaturen vor.

Zur Überprüfung der Modelle werden Daten der Sorte 'Arfak' und langjährige Mittel der Tagestemperaturen verwendet. Diese Sorte wurde ausgewählt, weil sie die für den Anbau wichtige Gruppe der Sommer- und Herbstsorten repräsentiert (vgl. Tab. 7). Für die Modelle aus der Literatur werden Parameter eingesetzt, die mit Sorten ermittelt wurden, die ähnliche Eigenschaften wie die Sorte 'Arfak' zeigen. Die für die Modelle erforderlichen Temperatursummen werden nach der Beschreibung der Autoren kalkuliert.

Die Kulturdauern der verwendeten Sätze der Sorte 'Arfak' in Abhängigkeit vom Pflanztag sind in Abb. 15 dargestellt. Die mit 50 % gekennzeichnete Regressionslinie gibt die durchschnittliche Zeit bis zur Ernte von 50 % der Köpfe wieder. Die gestrichelten Regressionslinien markieren die durchschnittliche Zeit bis zum Erntebeginn (5 %) bzw. bis zum Ernteende (95 %). Weiterhin ist abzulesen, daß die Erntedauer der früh gepflanzten Sätze etwa 20 Tage und die der späteren 30 Tage beträgt. Ähnliche Ergebnisse stellte WIEBE (1980) vor. Die Abweichungen von den berechneten Regressionslinien können als Ausdruck der jährlich unterschiedlichen Witterung interpretiert werden.

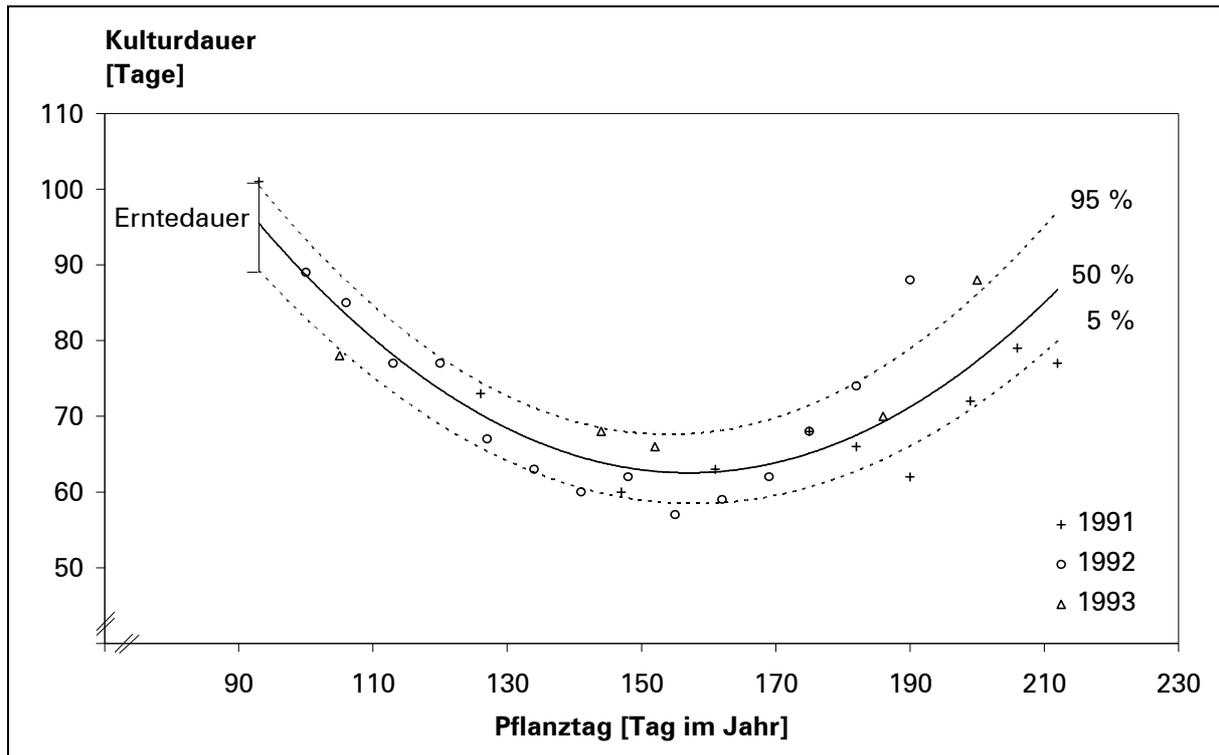


Abb. 15: Kulturdauer in Abhängigkeit vom Pflanztag für Blumenkohl der Sorte 'Arfak', Ruthe, 1991-1993, 29 Sätze

4.2.2 Modelle der Jugendphase

Als Bezugsbasis für einen Vergleich der Modelle, die für die Jugendphase konzipiert wurden, soll die Blattanlagerate dienen. Während PEARSON et al. (1994) keine Jugendphase berücksichtigen, sondern die Dauer der vegetativen Phase als Funktion der Temperatur kalkulieren (Gleichung 17, S. 38), kann mit dem Modell der Blattanlage (Gleichung 11, S. 34) von GREVSEN und OLESEN (1994) die Blattanlagerate in Abhängigkeit von der Temperatur und der Zahl der bereits angelegten Blätter ermittelt werden. Dazu wurde das Modell in ein Programm eingebaut (vgl. Diskette) und die Blattanlage mit konstanten Temperaturen zwischen 1 °C und 25 °C simuliert. Dabei wurden die Parameter der Sorte 'Siria' verwendet (Tab. 3), da diese in den Eigenschaften mit der Sorte 'Arfak' vergleichbar ist. Als Eingangsgröße wird für das Modell die Zahl der zur Pflanzung angelegten Blätter benötigt. Diese wurde von 10 bis 16 Blättern variiert, um den Anstieg der Blattanlagerate durch zunehmende Blattzahlen verfolgen zu können.

Die Blattanlagerate des Modells von WIEBE und Mitarbeitern wurde aus den Funktionswerten für die erste Phase abgeleitet (vgl. Tab. 6). Dazu wurde angenommen, daß eine Blumenkohlpflanze der beschriebenen Sorte in der Jugendphase sechs Blätter anlegt. Für die Schätzung der Funktionswerte wurde die Dauer der Phase prozentual ausgedrückt (0 % bis 100 %). Einem Tag mit einer Tagesmitteltemperatur von z. B. 16 °C wird ein Funktionswert von 11 % zugeordnet. Bei dieser Temperatur dauert die Phase etwa 9 Tage ($100 \% : 11 \% \approx 9.1$), und die Blattanlagerate hat somit einen Wert von 0.66 Blättern/Tag. Abb. 16 stellt die Blattanlageraten in Abhängigkeit von der Temperatur graphisch dar. Für das Modell von GREVSEN und OLESEN (1994) sind zur besseren Übersichtlichkeit nur die Raten für 10 und 16 angelegte Blätter eingetragen.

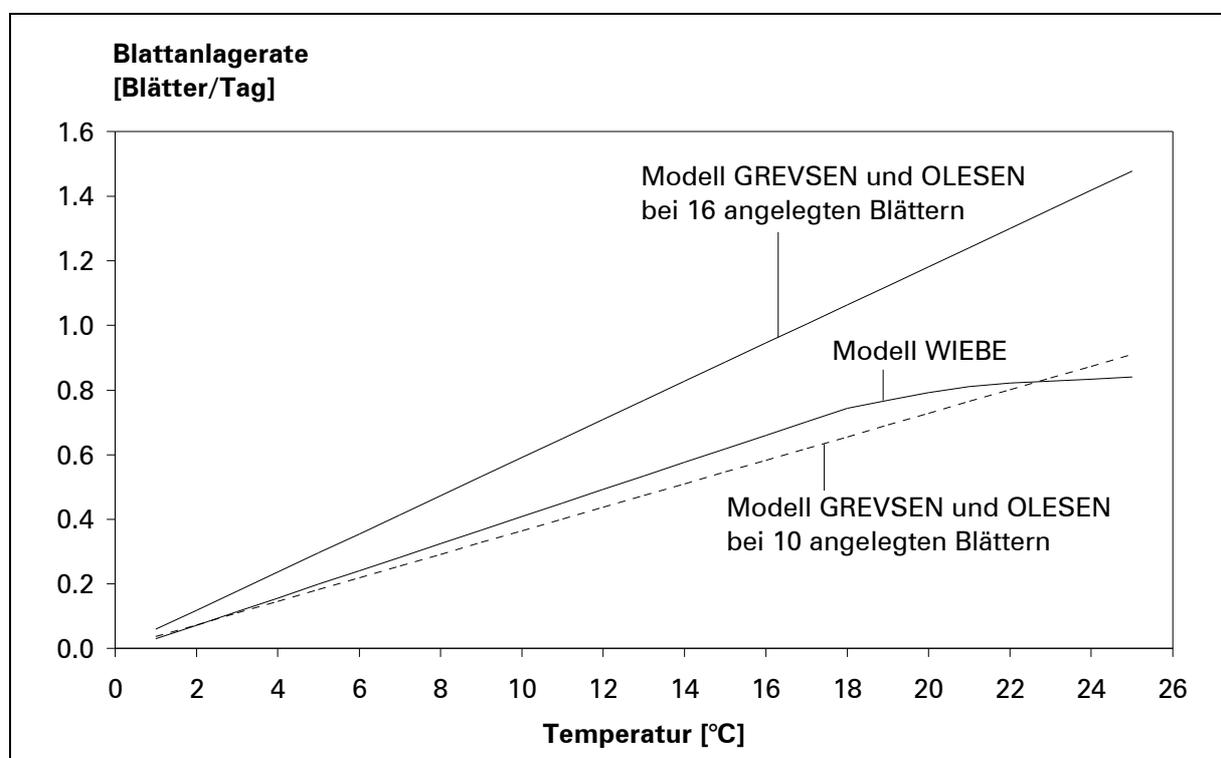


Abb. 16: Blattanlageraten in Abhängigkeit von der Temperatur (vgl. Text)

Die von BOOIJ und Mitarbeitern vorgestellten Daten erlauben keine vollständige Kalkulation der Blattanlageraten. Diese läßt sich mit Hilfe der Gleichungen (1 bis 4, S. 28) für 14 °C und 22 °C berechnen. Unter Berücksichtigung des Wechsels in der Anlagerate bei 11 bis 12 Blättern lassen sich für 14 °C Werte von 0.25 bis 0.31 Blätter/Tag und für 22 °C Werte von 0.37 bis 0.47 Blätter/Tag kalkulieren. Diese liegen deutlich niedriger als die für die Modelle von GREVSEN und OLESEN bzw. WIEBE skizzierten Graphen.

4.2.3 Modelle der Vernalisationsphase

Der Verlauf der Vernalisation läßt sich visuell im Feld schwer verfolgen. Zwar wurde eine Abhängigkeit der Vegetationskegelbreite von der Temperatur unter anderem von WIEBE (1972b+c) und WURR et al. (1993) nachgewiesen, die Bestimmung kann aber nur unter einem Mikroskop durchgeführt werden.

Wird die erfolgte Vernalisation mit dem Wert 1 kodiert, so kann jedem Tag eine von der Temperatur abhängige Wirkung zwischen 0 und 1 zugeordnet werden. Wie stark eine Temperatur zur Absättigung des Kältebedürfnisses beiträgt, kann mit konstanten Temperaturen in Klimakammern verfolgt werden. Die Wirkung ist um so stärker, je kürzer die Dauer der Vernalisationsphase ist (WIEBE 1972b).

Während ATHERTON et al. (1987) als Optimumtemperatur 5.5 °C angeben, erwarten viele Autoren eine optimale Wirkung im Bereich von 9 °C bis 14 °C (BOOIJ 1990, GREVSEN und OLESEN 1994, PEARSON et al. 1994, WIEBE 1972b, WURR et al. 1993).

Ist die Dauer der Phase bei der Optimumtemperatur und der Verlauf der Vernalisationsfunktion bekannt (vgl. Abb. 12), kann die Wirkung eines Tages mit bestimmter Temperatur kalkuliert werden. GREVSEN und OLESEN (1994) schätzten die Dauer der Phase mit 11 Tagen bei 12.8 °C. Sie legten eine symmetrische Vernalisationsfunktion zugrunde (vgl. Abb. 12 c).

WURR et al. (1993) verwendeten bei dem beschriebenen Modell zur Simulation der Vegetationskegelbreite (Gleichung 20, S. 50) eine Optimumtemperatur von 9 °C bzw. 9 °C - 9.5 °C und eine Maximumtemperatur von 21 °C. Auf die Abhängigkeit dieser Werte von den Temperaturen, die im Freiland auftraten, wurde bereits hingewiesen.

Während GREVSEN und OLESEN annehmen, daß sich die untersuchten Sorten 'Delira' und 'Elgon' nicht im Kältebedürfnis für die Vernalisation unterscheiden, wird im Modell von WIEBE und Mitarbeitern für jede Sortengruppe eine individuelle Funktion der Temperaturwirkung eingesetzt. Die Wirkung eines Tages kann aus den prozentualen Werten direkt abgeleitet werden. Das Modell läßt Temperaturen von 1 °C bis 25 °C zu. Auffällig ist, daß bei den Grenztemperaturen eine Wirkung > 0 angenommen wird. Eine Begründung liefert WIEBE (1974). Er stellt fest, daß die Wirkung von niedrigen Nachttemperaturen durch hohe Tagestemperaturen nicht vollständig aufgehoben wird (Abb. 17).

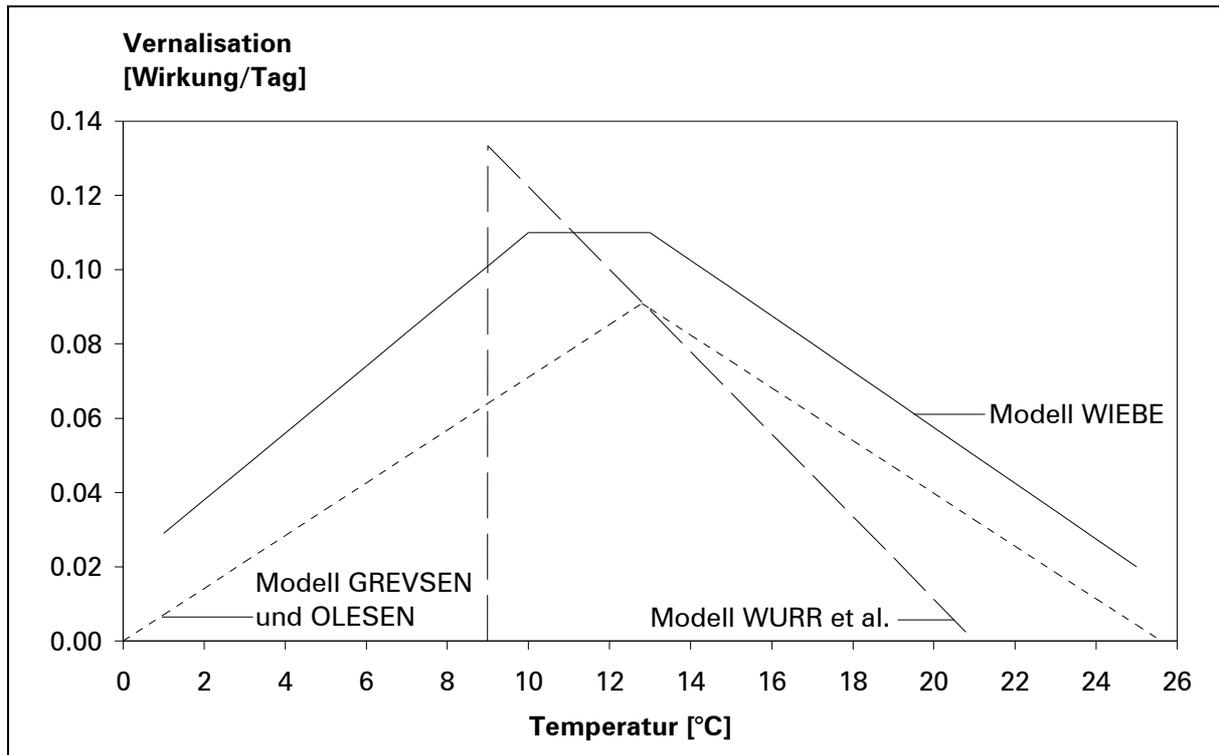


Abb. 17: Vernalisationsraten in Abhängigkeit von der Temperatur (vgl. Text)

4.2.4 Modelle der Kopfbildungsphase

Die Simulation der Dauer der Kopfbildungsphase bildet den Schwerpunkt der verschiedenen Arbeitsgruppen. Übereinstimmend wird als Kriterium für das Wachstum in dieser Phase der Kopfdurchmesser verwendet, der leichter zu erfassen ist als das Kopfgewicht (WURR et al. 1990b). Während der Beginn der Kopfbildungsphase durch die Kopfanlage festgelegt werden kann (Kopfgröße 0.6 mm), ist der Durchmesser zur Ernte auch von der Witterung, der Qualität und den Marktanforderungen abhängig. Diese Einflüsse werden derzeit von keinem Modell berücksichtigt, so daß Annahmen über die erwartete Kopfgröße getroffen werden müssen. Als Basis für den Vergleich sollen die Kopfwachstumsraten dienen.

Ähnlich wie das Kopfgewicht zeigt die Kurve des Kopfdurchmessers nach der Kopfanlage einen logistischen Verlauf (vgl. Abb. 1). Das macht verständlich, daß die Kopfwachstumsrate (mm/Tag) auch in konstanten Temperaturen in Abhängigkeit von der Kopfgröße steigt.

Die Methode, nach dem die Modelle von GREVSEN (1990) und WURR et al. (1990b) eingesetzt werden können, wurde bereits beschrieben (Gleichung 15, S. 37 bzw. 22, S. 52). Ausgehend von Kopfdurchmessern aus Stichproben auf dem Feld wird der Temperatursummenbedarf bis zur Ernte ermittelt und der Erntetermin, definiert als der Tag der Ernte von 50 % der Köpfe, aus langjährigen Temperaturmittelwerten abgeleitet (Abb. 14). WURR et al. (1990b) geben als Kopfgröße zur Ernte 135 mm für den Sommer und 125 mm für den späten Herbst an.

Die Kombination der von PEARSON et al. (1994) vorgestellten Modelle soll die Abschätzung der Erntetermine ohne Stichprobe von Kopfdurchmessern ermöglichen (Gleichungen 17, S. 38 und 18, S. 39). Als Daten werden die Pflanztage und Angaben über Temperaturen benötigt. Die Genauigkeit kann aber durch die Verwendung von Kopfmeßwerten verbessert werden. Wie beschrieben nehmen die potentielle und aktuelle Wachstumsrate im Verlauf der Kopfbildungsphase ab. Mit Gleichung 19, S. 40, kann der Termin der Kopfanlage geschätzt werden, indem die Temperatursumme berechnet wird, die ab der Kopfanlage bis zur gemessenen Kopfgröße eingewirkt hat. Aus dieser Summe kann durch Subtraktion der täglichen Temperaturen der Tag der Kopfanlage abgeleitet werden ($\text{Temperatursumme}=0$). Als Erntegröße wird von PEARSON et al. (1994) 125 mm eingesetzt.

Die Funktionswerte des Modells von WIEBE können in Kopfdurchmesser umgerechnet werden. Abb. 18 stellt die Beziehung zwischen den Prozentwerten und dem Kopfdurchmesser graphisch dar. Während die Kurve für Kopfdurchmesser von 0.6 mm bis etwa 65 mm eine logarithmische Form hat, verläuft sie ab der Größe von 65 mm linear. Für die beiden Abschnitte lassen sich Gleichungen angeben.

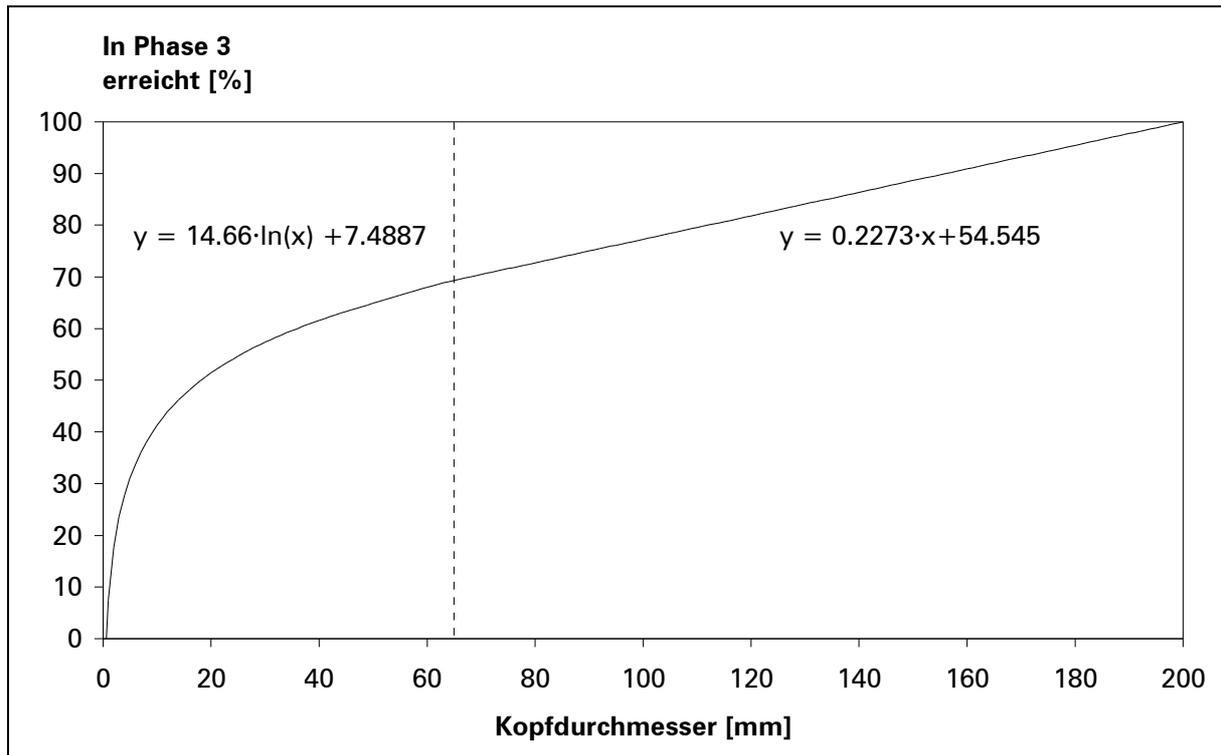


Abb. 18: Beziehung zwischen den prozentualen Funktionswerten und dem Kopfdurchmesser für das Modell WIEBE (1975a)

Die Modelle von GREVSEN (1990), PEARSON et al. (1994) und WURR et al. (1990b) wurden in ein Programm eingebaut (vgl. Diskette). Für das Modell von PEARSON wurden die Parameter der Sorte 'White Fox' verwendet. Für einen Vergleich der Kopfwachstumsraten erscheint es sinnvoll, die Kopfbildungsphase in die Abschnitte von 0.6 mm bis 64 mm und 65 mm bis zur Erntegröße zu unterteilen und getrennt zu kalkulieren. Die in Abb. 19 und Abb. 20 vorgestellten Raten wurden mit Temperatursummen errechnet, die aus konstanten Temperaturen zwischen 1 °C und 25 °C gebildet wurden. Dabei verlangt das Modell von GREVSEN eine Basistemperatur von 5 °C.

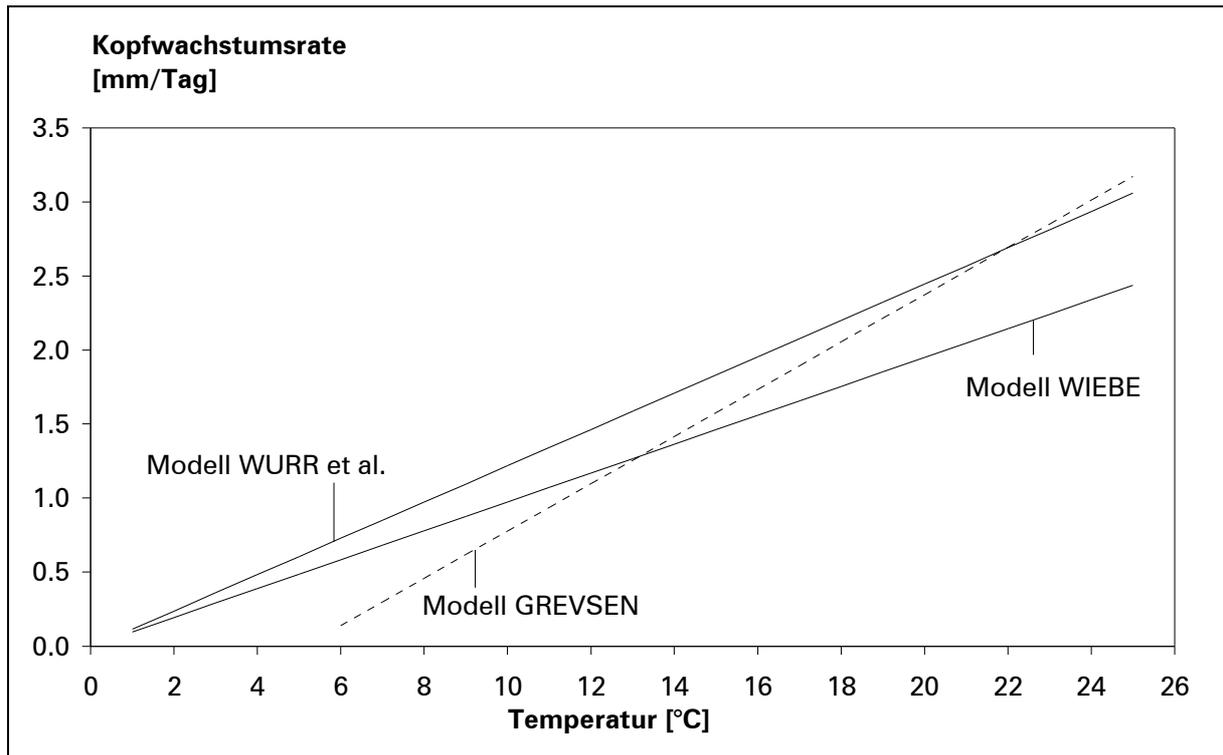


Abb. 19: Geschätzte Kopfwachstumsraten in Abhängigkeit von der Temperatur für Kopfdurchmesser von 0.6 mm bis 64 mm

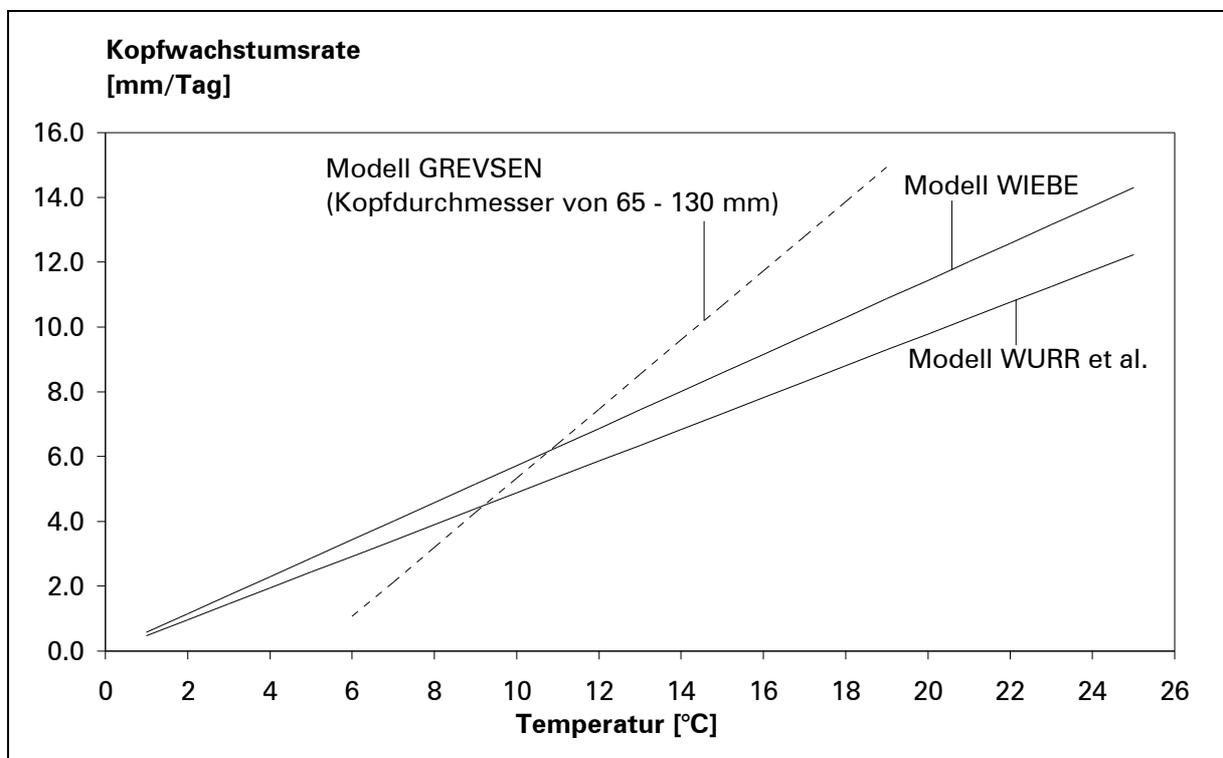


Abb. 20: Geschätzte Kopfwachstumsraten in Abhängigkeit von der Temperatur für Kopfdurchmesser von 65 mm bis zur Erntegröße

Es ist nicht sinnvoll, die Kopfwachstumsraten des Modells von PEARSON et al. (1994) auf diese Weise darzustellen. Durch das Konzept der relativen Wachstumsraten zeigt die Kurve der Kopfwachstumsrate einen logistischen Verlauf, so daß die Schätzung von Mittelwerten für verschiedene Temperaturen zu ungenau wäre. Als Beispiel ist der Verlauf der potentiellen und aktuellen Wachstumsrate sowie der Kopfwachstumsrate in Abb. 21 dargestellt. Simuliert wurde das Kopfwachstum der Sorte 'White Fox' von 1 mm bis 120 mm bei einer Temperatur von konstant 15 °C. Die Dauer der Kopfbildungsphase betrug 41 Tage.

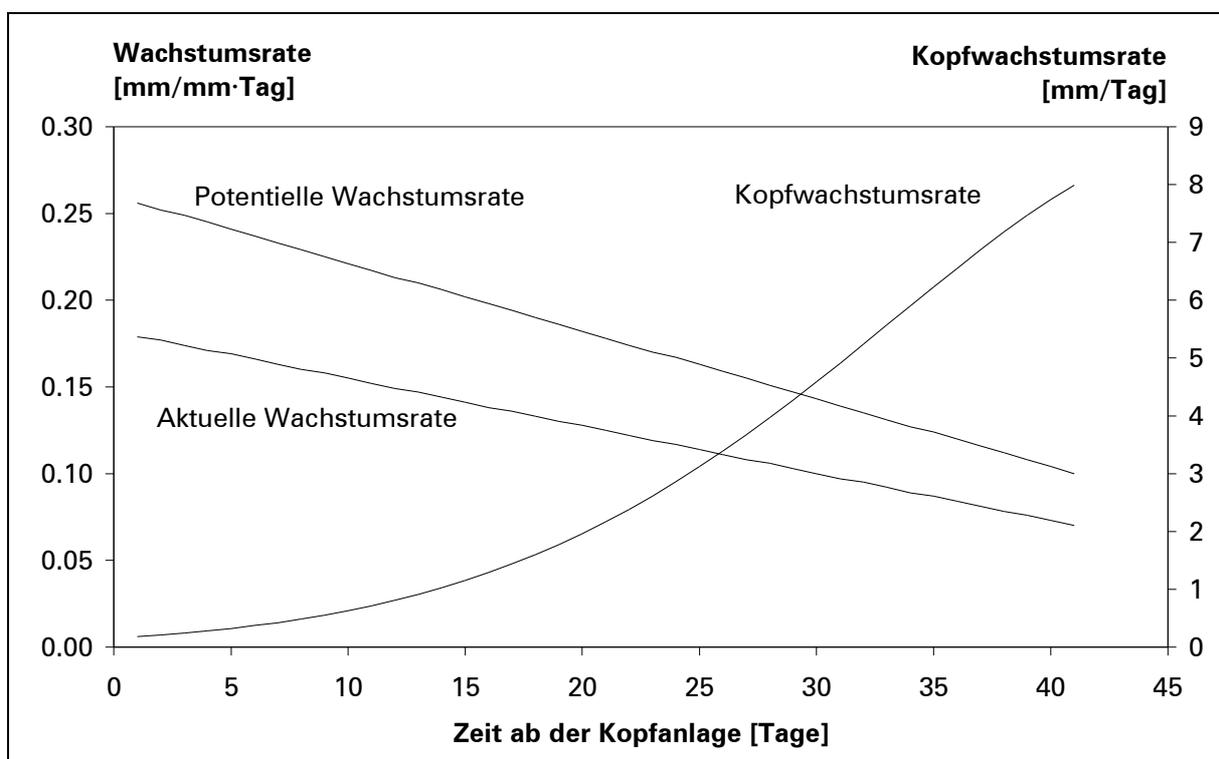


Abb. 21: Verlauf der simulierten Wachstumsraten bei einer konstanten Temperatur von 15 °C in Abhängigkeit von der Zeit ab der Kopfanlage (Modell PEARSON)

Um zu prüfen, welchen Einfluß die sortenspezifischen Parameter (vgl. Tab. 5) auf die Dauer des Kopfwachstums der drei Sorten 'Jubro', 'Revito' und 'White Fox' hat, wurde das Kopfwachstum von 1 mm bis 120 mm bei konstant 15 °C für diese Sorten simuliert. Abb. 22 stellt den Verlauf graphisch dar.

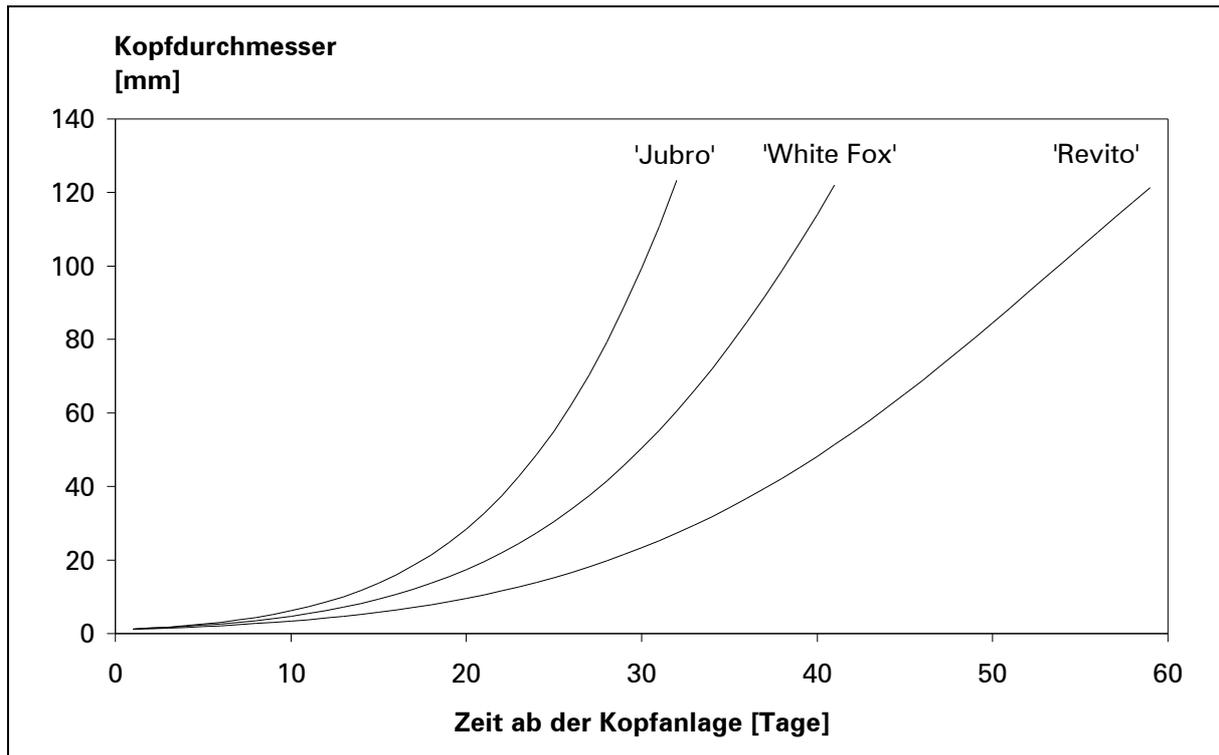


Abb. 22: Simulierter Verlauf des Kopfwachstums bei konstant 15 °C (Modell PEARSON)

Auf dieser Basis konnten auch die vier Modelle untereinander verglichen werden. Dabei wurde die Dauer des Kopfwachstums von 1 mm bis 120 mm bei Temperaturen von konstant 10 °C, 15 °C und 20 °C geschätzt. Niedrigere bzw. höhere Temperaturen wurden nicht einbezogen, da deren Auftreten im Freiland über längere Zeit unwahrscheinlich ist. Für das Modell von PEARSON et al. (1994) wurden die Parameter der Sorte 'White Fox' eingesetzt (Basistemperatur 1 °C, Optimumtemperatur 21 °C). Die Ergebnisse sind in Tab. 9 aufgelistet. Abb. 23 stellt exemplarisch den Verlauf für konstant 15 °C dar. Die gestrichelte Linie bei der Kopfgröße von 65 mm dient als Hilfslinie. Angedeutet werden soll, daß die Kurven des Kopfwachstums über 65 mm bis zur Größe von 120 mm in etwa einen linearen Anstieg aufweisen.

Tab. 9: Simulierte Dauer des Kopfwachstums von 1 mm bis 120 mm in Tagen

Temperatur [°C]	GREVSEN	PEARSON	WIEBE	WURR
10	84	61	57	61
15	42	41	39	41
20	28	33	29	31

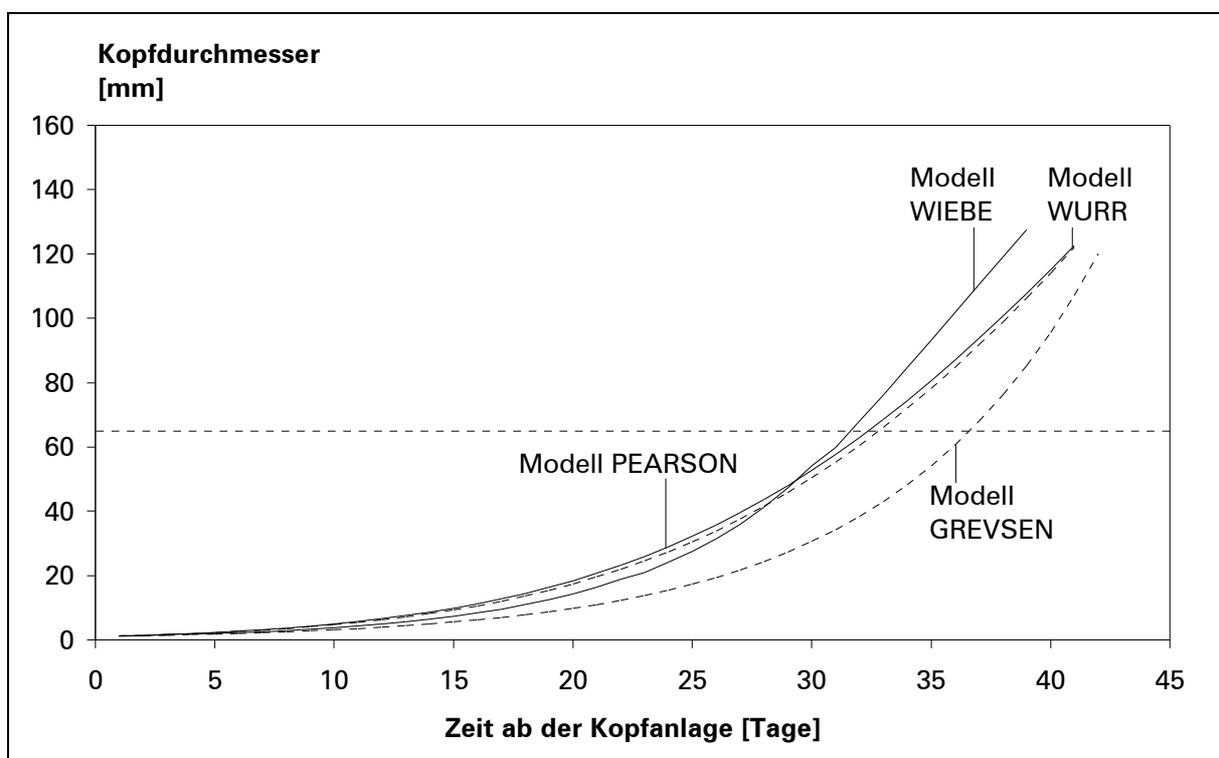


Abb. 23: Simulierter Verlauf des Kopfwachstums bei konstant 15 °C für vier Modelle

Um Aussagen über den praktischen Nutzen der Modelle machen zu können, wurde die mittlere Kulturdauer der beschriebenen 29 Sätze der Sorte 'Arfak' simuliert. Dazu wurden keine aktuellen Temperaturen sondern langjährige Mittelwerte verwendet, um die Vorhersagegenauigkeit der Modelle mit den vorgeschlagenen Parametern zu prüfen.

Bei dem Vergleich muß beachtet werden, daß die Modelle mit unterschiedlichen Sorten und Klimabedingungen aufgestellt wurden. Problematisch ist die Definition der Kopfgröße zur Ernte. Während in den Feldversuchen die Köpfe mit einem Durchmesser von 200 mm geerntet wurden, nehmen WURR et al. (1990b) und PEARSON et al. (1994) Ernte-Größen von 125 mm bis 135 mm an. Die Modelle von GREVSEN (1990) und WURR et al. (1990b) ermöglichen die Simulation bis zu einem Kopfdurchmesser von 200 mm. Bei der Beurteilung der Genauigkeit sollte beachtet werden, daß die Modelle nicht für diese Größen konzipiert wurden.

In dieser Konsequenz ist die Simulation von Kopfgrößen über 125 mm mit dem von PEARSON et al. (1994) vorgestellten Modell ohne Schätzung neuer Sortenparameter nicht möglich. Als begrenzender Faktor erwies sich die Temperatursumme TS_0 . Wird sie überschritten, werden rechnerisch die potentielle und aktuelle Wachstumsrate negativ, so daß der Durchmesser des Kopfes verringert wird. Da die Simulation der Kulturdauer bis zur Kopfgröße von 125 mm jedoch nicht deutlich von den Ergebnissen der anderen Modelle abweicht, wurde sie in die Präsentation einbezogen.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abb. 24 dargestellt. Ein wichtiges Kriterium der Genauigkeit ist, wie stark die simulierten Kulturdauern von den gemessenen abweichen. Die Häufigkeit der Abweichung in Tagen kann in Abb. 25 abgelesen werden. Die Ergebnisse der Simulation mit dem Modell von GREVSEN (1990) wurde nicht auf diese Weise dargestellt, da nur in 6 % der Fälle die Abweichungen $\leq \pm 3$ Tagen war.

Für die Abweichung der simulierten von den gemessenen Kulturdauern wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet und in Tab. 10 aufgelistet. Bei negativen Mittelwerten wurde die Kulturdauer zu kurz simuliert.

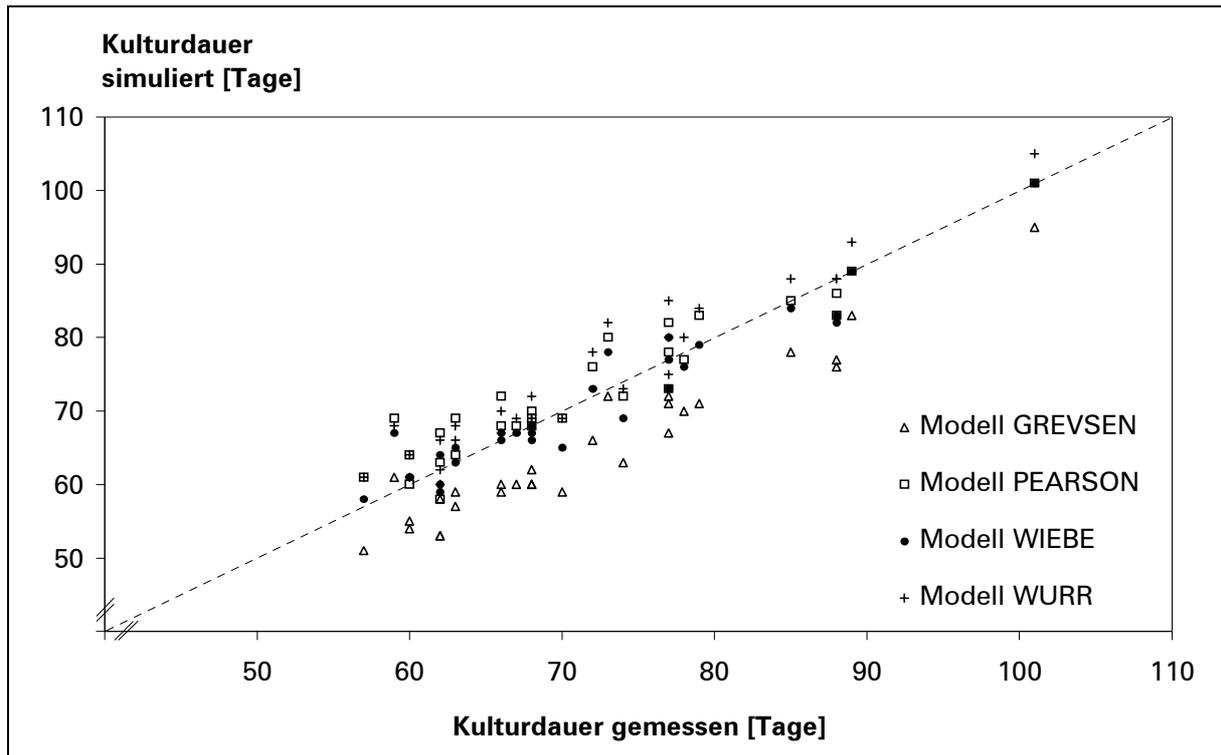


Abb. 24: Beziehung zwischen der mit vier Modellen simulierten und in Feldversuchen bestimmten Kulturdauer nach einer Stichprobe der Kopfdurchmesser

Tab. 10: Mittelwerte und Standardabweichung für die Abweichung der simulierten von der in Feldversuchen bestimmten Kulturdauer

	GREVSEN	PEARSON	WIEBE	WURR
Mittelwert [Tage]	-6.79	1.55	-0.38	2.79
Standardabweichung	2.91	3.45	2.98	2.92

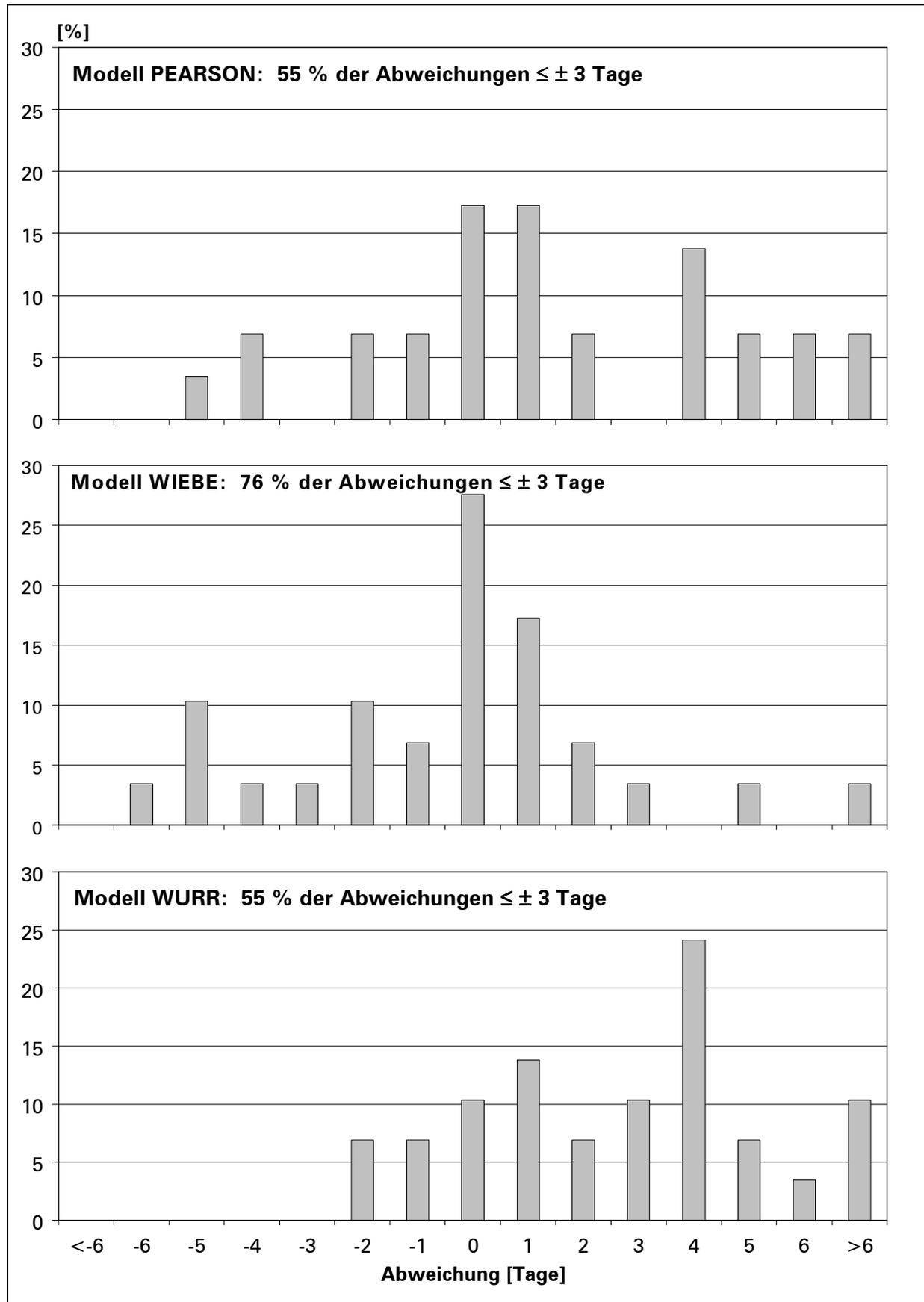


Abb. 25: Häufigkeiten der Abweichung der simulierten von der gemessenen Kulturdauer

4.3 Diskussion der Modelle

Ein Modell kann als eine Theorie über das Original verstanden werden. Um das Original beschreiben zu können, muß es gegen seine Umwelt abgegrenzt werden. Dazu kann die Definition als System dienen.

Ein System ist durch eine Menge von Elementen, die Beziehung zwischen den Elementen und den Grenzen zur Umwelt charakterisiert. Dabei ist ein System nicht isoliert, sondern Teil von übergeordneten Systemen und besteht selbst aus Subsystemen, so daß sich eine hierarchische Organisation mit verschiedenen Ebenen ergibt. Jede Ebene ist eine Integration der unter ihr liegenden. So wird zum Beispiel eine Pflanze aus Organen gebildet, diese aus Geweben, die Gewebe wiederum aus Zellen usw. (STÜTZEL 1994). Bei der Analyse von Modellen muß die Hierarchieebene, die sie beschreiben, beachtet werden.

Dabei sollten Modelle so einfach wie möglich und so umfangreich wie nötig gehalten werden, damit sie durch die Integration von vorhandenem Wissen Rückschlüsse auf die zugrunde liegenden Systeme ermöglichen (STÜTZEL 1994).

Nach FRANCE und THORNLEY (1984) lassen sich Modelle in folgende Kategorien einteilen:

- dynamische / statische Modelle
- stochastische / deterministische Modelle
- empirische / mechanistische Modelle

Die Beziehungen, die in **statischen Modellen** beschrieben werden, sind nicht zeitabhängig. Ein klassisches Beispiel ist die Ertragshöhe in Abhängigkeit von der Stickstoffdüngung. Die in **dynamischen Modellen** abgebildeten Prozesse, beispielsweise Wachstumsraten, sind hingegen zeitabhängig. Während die Grundannahme bei **stochastischen Modellen** ist, daß prognostizierte Ereignisse in Abhängigkeit von Inputfaktoren nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eintreten werden, z. B. die Ertragshöhe bei Stickstoffinput in ein System, ist in einem **deterministischen Modell** das Ergebnis bei entsprechendem Input bekannt.

Die Unterteilung in empirische und mechanistische Modelle ist im Zusammenhang dieser Arbeit von großer Bedeutung. Mit einem **empirischen Modell** sollen beobachtete Ereignisse beschrieben werden. Dabei wird es nach FRANCE und THORNLEY (1984) auf einer Ebene der Hierarchie und nur mit Merkmalen dieser Ebene gebildet. Mit einem **mechanistischen Modell** soll das Verhalten von Merkmalen auf einer bestimmten Ebene durch Prozesse der tieferen Hierarchieebene erklärt werden. Die beiden Ebenen werden durch einen Prozeß von Analysen und Resynthesen verknüpft, die von Hypothesen oder Annahmen gestützt werden. Nach FRANCE und THORNLEY (1984) ist es immer möglich, für einen Datensatz ein empirisches Modell zu entwickeln, das besser als ein mechanistisches Modell die gegebenen Daten beschreibt.

Bei der Beurteilung von pflanzenbaulichen Modellen sollte das Ziel berücksichtigt werden, das mit der Konzeption erreicht werden soll. FRANCE und THORNLEY (1984) trennen drei Gruppen von Anwendern, nämlich Kultivateure einschließlich Beratungsservice, die direkt an der Produktion beteiligt sind, anwendende Wissenschaftler, deren Ziel die Steigerung der Effizienz von Produktionstechniken ist, sowie forschende Wissenschaftler, die vordringlich das bekannte Wissen ausdehnen wollen. Nach Meinung der Autoren gibt es keinen Weg, wie ein einzelnes Modell die Interessen dieser drei Gruppen befriedigen kann.

Für die Gruppe der Kultivateure sind Nützlichkeit, einfache Anwendung und eine bestimmte Genauigkeit notwendig, was durch ein empirische Modell erreicht werden kann. Für den anwendenden Wissenschaftler sind Kombinationen von empirischen und mechanistischen Bausteinen sinnvoll. Während gut verstandene Prozesse mechanistisch repräsentiert sein können, werden durch empirische Teile unsichere Gebiete beschrieben. Der forschende Wissenschaftler sollte nach den Autoren auch mehr spekulative Modelle berücksichtigen, die aufgrund der unsicheren Hypothesen für die praktische Anwendung nicht geeignet sind.

Für die Prognose von Wachstum und Entwicklung vieler Pflanzen sind mechanistische Modelle entwickelt worden. So bildet das von GOUDRIAAN und VAN LAAR (1994) beschriebene Modell SUCROS1 das potentielle Wachstum von Pflanzen bei ausreichender Wasser- und Nährstoffversorgung unter optimalen Umweltbedingungen ab. Die Rate der Akkumulation von Trockenmasse sehen die Autoren als Funktion der Einstrahlung, der Temperatur und der Pflanzeigenschaften.

STÜTZEL (1995a+b) stellt ein Simulationsmodell für das Wachstum von Ackerbohnen vor, in dem die Produktion von Trockenmasse als Funktion der Lichtaufnahme und -nutzung verstanden wird. Die Verteilung von neu produzierter bzw. retranslozierter Trockenmasse zwischen den Pflanzenorganen wird berücksichtigt.

Das von HEUVELINK (1996) verbesserte und weiterentwickelte Modell TOMSIM simuliert Tomatenwachstum, Entwicklung und Ertrag auf physiologisch-dynamische Weise. Konzipiert wurde das Modell unter Integration vorhandener Modellbausteine für die Produktion von Tomaten in Gewächshäusern. Der Autor erwartet eine Optimierung der Klimasteuerung und Produktionstechniken, die für die effiziente Nutzung von Gewächshäusern im intensiven Gemüsebau unentbehrlich ist.

In der mir zugänglichen Literatur finden sich nur wenige Versuche, das Wachstum und die Entwicklung von Blumenkohl mit einem mechanistischen Modell zu simulieren. Interessante Ansätze stellen AIKMAN und SCAIFE (1993) vor. Sie erweitern das Konzept der Temperatursumme (englisch „thermal time“, S. 486) als pflanzenbezogene Basis um die beiden Komponenten photosynthetisch aktive Strahlung und CO₂-Angebot und bezeichnen diese Einheit als PET (englisch „plant environmental time“, S. 486). Das frühe Wachstum der Pflanzen beschreiben die Autoren mit einer exponentiellen Funktion. Die Abnahme der Wachstumsraten durch die Konkurrenz der Blätter um Strahlung nach der initialen exponentiellen Phase simulieren die Autoren mit einer expolinen Gleichung nach GOUDRIAAN und MONTEITH.

Den Schwerpunkt bilden in der Literatur Modelle, deren Zielgröße die Simulation der Kulturdauer und Erntetermine ist. Daher stehen sie in dieser Arbeit im Vordergrund. Nach GOUDRIAAN und VAN LAAR (1994) kann das Wachstum von Pflanzen auch durch empirische Modelle, beispielsweise Regressionsgleichungen, ausreichend genau charakterisiert werden, wenn die Parameter auf der Basis von zahlreichen Versuchen ermittelt wurden. Nachteilig ist allerdings, daß die Genauigkeit der Vorhersage davon abhängt, ob die Umgebungsverhältnisse, in denen prognostiziert werden soll, den Versuchsbedingungen gleichen.

Modelle zur Anbauplanung, wie z. B. von MARTIN (1985) vorgestellt, können eine diskontinuierliche Marktbelieferung nicht vollständig vermeiden, da die Witterung einer Anbausaison nicht vorhersehbar ist und selten den durchschnittlichen Witterungsverhältnissen entspricht (WURR 1988). Meiner Meinung nach bietet auch das von GREVSEN (1990) vorgestellte Modell zur Abschätzung der von Pflanzung bis zur Ernte erforderlichen Temperatursumme (Gleichung 10, S. 32) keinen Vorteil gegenüber der Anbauplanung mit durchschnittlichen Kultur dauern, auch wenn Wettervorhersagen zur begleitenden Planung eingesetzt werden, weil ähnliche Verschiebungen der Ernte zu erwarten sind, wie sie WIEBE (1980) herausstellte.

Auch wenn die von BOOIJ (1987b) aufgestellten Beziehungen zwischen der Dauer der Kopfbildungsphase und dem Datum (Gleichungen 8, S. 30 und 9, S. 31) die ermittelten Meßwerte der Jahre 1982 bis 1984 für die zwei Sorten angemessen genau wiedergeben, sind sie zur Vorhersage der Ernte bei stark variierenden Witterungsbedingungen sicherlich nicht geeignet.

In allen näher analysierten Modellen wird als unabhängige Variable die Temperatur bzw. Temperatursumme verwendet. Ein Einfluß der photosynthetisch aktiven Strahlung wird zwar von einigen Autoren diskutiert (GREVSEN 1990, PEARSON et al. 1994), auf einen Einbau in die Modelle wird aber verzichtet. Ein Vorteil der Temperatur ist die einfache Messung und gute Verfügbarkeit. Dabei verwenden GREVSEN und OLESEN (1994) stündliche Werte, die aus den beobachteten Minimum- und Maximumtemperaturen über eine Sinusfunktion berechnet werden. Eine Simulation mit Tagesmitteltemperaturen ist nach meiner Einschätzung jedoch ausreichend. Das wird auch in den Ergebnissen von WIEBE (1974) unterstrichen.

Sinnvoll ist der Einbau von aktuellen Temperaturen auch zur Simulation, soweit diese verfügbar sind. Für die Prognose des letzten Abschnittes der Kulturdauer sollten langfristige Wetterprognosen oder langjährige Temperaturmittelwerte der Region verwendet werden (WURR 1990).

Außer bei dem von WIEBE (1975a+b) vorgestellten Modell wird das Wachstum auf Temperatursummen bezogen. Diese bieten nach GREVSEN (1990) den Vorteil, das Schwankungen in der Witterung kompensiert werden können.

Als Nachteile listet SALTER (1960) auf, daß die verschiedene Wirkung von Temperatur in den verschiedenen Phasen verloren geht, unterschiedliche Wirkung von Tag- und Nachttemperaturen nicht berücksichtigt werden können, und daß die Temperatur keine für die Pflanze direkt verfügbare Energiequelle wie die photosynthetisch aktive Strahlung bildet. FRANCE und THORNLEY (1984) betonen, daß speziell zur Beschreibung der Vernalisation Temperatursummen ungeeignet sind. WIEBE (1975a) stellte heraus, daß für Verhältnisse in Mitteleuropa Temperatursummen nicht günstig sind, da durchaus für längere Zeit Temperaturen über 20 °C auftreten, die die Vernalisationsphase verlängern. Der Autor empfiehlt die Verwendung von Temperatursummen vorrangig bei der Planung von Aussaatprogrammen für die Zeit von der Aussaat bis zum Auflaufen einer Kultur.

Wird allerdings die Temperatursumme nur für eine Entwicklungsphase, beispielsweise für die Kopfbildungsphase kalkuliert, kann das Wachstum gut beschrieben werden, wie die Ergebnisse von WURR et al. (1990b) belegen.

Die Autoren verwenden verschiedene Basistemperaturen, Optimumtemperaturen und Maximumtemperaturen, die in Abhängigkeit von den Entwicklungsphasen und zum Teil sogar sortenabhängig variieren.

Während PEARSON et al. (1994) den Fortschritt des Blumenkohls in Wachstum und Entwicklung in der vegetativen Phase auf eine Temperatursumme ohne Berücksichtigung der Jugendphase beziehen (Gleichung 17, S. 38), wird häufig das Ende der Jugendphase über die Zahlen der angelegten Blätter definiert, die je nach Sorte und Kulturbedingungen zwischen 8 und 21 liegen. In diesem Zusammenhang stellen GREVSEN und OLESEN (1994) ein Modell zur Simulation der Blattanlage vor, dessen Rate mit der Zahl der angelegten Blätter ansteigt (Gleichung 11, S. 34, Abb. 16). Das Modell ist meiner Meinung nach gut geeignet, die Entwicklung während der Jugendphase zu beschreiben. Wird eine Pflanzung mit 10 angelegten Blättern angenommen, so unterscheidet sich die Blattanlagrate kaum von den Werten, die WIEBE (1972b) ermittelte.

Die von GREVSEN und OLESEN (1994) errechneten Raten sind jedoch deutlich höher als Werte, die BOOIJ und STRUIK (1990) bei 14 °C und 22 °C in Klimakammern bestimmten. Die Autoren vermuten, daß in den Klimakammern Licht als begrenzender Faktor das Wachstum verlangsamt.

Das Modell der Absättigung des Vernalisationsbedürfnisses, das WURR et al. (1993) aufstellen (Gleichung 20, S. 50), ist zwar statistisch für die im Versuchszeitraum aufgetretenen Temperaturen richtig, gibt aber nach meiner Einschätzung nicht die realen Verhältnisse bei der Vernalisation wieder. Nach den in der Literatur präsentierten Versuchsergebnissen halte ich Vernalisationsfunktionen mit einem breiteren Bereich optimaler Temperaturwirkung wahrscheinlicher, wie beispielsweise von BREWSTER (1987) und WIEBE (1975a) verwendet (Abb. 17). Der Fehler bei der Verwendung einer symmetrischen Funktion (GREVSEN und OLESEN 1994) wird relativ gering sein, wenn sich die Optimumtemperaturen nicht deutlich unterscheiden.

Einige Autoren nutzten die bereits von BOOIJ (1987b) beschriebene Kenntnis, daß die Variation in der Dauer der Kopfbildungsphase geringer ist als in den vorhergehenden Phasen, und entwickelten Modelle, die als Startwert einen Durchschnitt der im Feld bestimmten Kopfdurchmesser benötigen. Das Verfahren wird anschaulich von WURR (1988) vorgestellt und mit Abb. 14 illustriert. Der Autor warnt jedoch davor, absolute Genauigkeit von dem beschriebenen Modell (Gleichung 22, S. 52) zu erwarten, da Pflanzen biologischen und meteorologischen Variationen unterliegen, die mit einem einfachen System nicht beschrieben werden können. Als wichtige Gründe für Abweichung nennt er:

- Auswahl der Stichproben nicht repräsentativ für den Bestand
- auf dem Feld meßbare Temperaturen unterscheiden sich von Vorhersagen
- Köpfe werden bei einer anderen Größe als prognostiziert geerntet

Als Ansatzpunkte für eine Verbesserung schlägt WURR (1988) den Einbezug von wöchentlichen Wettervorhersagen, Strahlung, Bodenfeuchte und Bodentemperatur vor.

Auch das Modell von WIEBE (1975a+b) bietet die Möglichkeit, Zwischenwerte der Kopfdurchmesser als Startwerte zu verwenden. Die dadurch erzielbare Genauigkeit wird in den Abb. 10 und 11 deutlich.

PEARSON et al. (1994) stellen einen Modellansatz zur Simulation der Kopfwachstumsphase vor (Gleichungen 17, S. 38 und 18, S. 39), der sich durch das Konzept der relativen Wachstumsrate gegenüber den Regressionsmodellen von GREVSEN (1990) (Gleichung 15, S. 37) und WURR et al. (1990b) abhebt. Der Verlauf der potentiellen Wachstumsrate ist dabei von einer Temperatursumme abhängig, die für die Zeit des Kopfwachstums geschätzt werden muß und sortenspezifisch ist, so daß die Höhe der Wachstumsraten während des Wachstums abnimmt. Den Verlauf beschreibt Abb. 21 beispielhaft. Wie stark der Einfluß der Schätzung der sortenspezifischen Parameter auf die simulierte Dauer des Kopfwachstums mit dem Modell von PEARSON ist, kann in Abb. 22 abgelesen werden. Die Differenz von ≈ 20 Tagen zwischen den Sorten 'White Fox' und 'Revito' bei konstant $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist meiner Meinung nach zu hoch. Die in der Literatur vorgestellten Ergebnisse belegen nicht, daß sich Sorten im Kopfwachstum deutlich unterscheiden.

Einen Vorteil ihres Modells sehen PEARSON et al. (1994) im Anstieg der Temperatursumme im Verlauf des Wachstums bis zum Erreichen der Kopfgröße zur Ernte. Diese Verschiebung im Temperatursummenbedarf trat bei GREVSEN (1990) und WURR et al. (1990b) experimentell auf, konnte aber durch die Modelle der Autoren nicht gerechtfertigt werden, da von der Konzeption der Modelle die verschiedenen Kopfgrößen streng mit den entsprechenden Temperatursummen korreliert sein müßten. GREVSEN (1990) vermutet eine Modifikation der Temperaturwirkung durch die Strahlung.

Auf die Unsicherheiten beim Vergleich der beschriebenen Modelle, die besonders auf Sortenunterschieden und den Definitionen der Durchmesser zur Ernte beruhen, wurde bereits hingewiesen (vgl. 4.2.4: Modelle der Kopfbildungsphase). Während sich die Kopfwachstumsraten der Modelle von WIEBE und WURR in den beiden betrachteten Abschnitten des Kopfwachstums nur gering unterscheiden, weicht die für das Modell von GREVSEN (1990) berechnete Rate deutlich ab. Besonders bei großen Kopfdurchmessern werden vergleichbar hohe Wachstumsraten simuliert (Abb. 19 und 20).

Wird als Erntegröße für alle Modelle 120 mm angenommen, kann das simulierte Kopfwachstum mit konstanten Temperaturen verglichen werden. Während sich die Modelle bei konstant $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit 39 bis 42 Tagen nur gering in der Dauer der Phase unterscheiden, weicht besonders das Modell von GREVSEN (1990) bei einer Temperatur von konstant $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit 84 Tagen im Vergleich zu 57 bis 61 Tagen deutlich ab (Tab. 9).

Ein Grund könnte die mit 5 °C relativ hohe Basistemperatur für die Kalkulation der Temperatursumme sein. Abb. 23 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der mit den Modellen von PEARSON und WURR simulierten Kopfgrößen. Das war allerdings zu erwarten, da beide Modelle auf Ergebnissen aus den gleichen Klimakammerversuchen von WURR et al. (1990b) basieren.

Zur Prüfung der Anwendbarkeit der beschriebenen Modelle der Kopfbildungsphase in der Praxis wurde die Kulturdauer von 29 Blumenkohlsätzen der Sorte 'Arfak' simuliert. Als Startwerte wurden auf dem Feld ermittelte Zwischenwerte für den Kopfdurchmesser eingesetzt. Die Simulation wurde mit langjährigen Temperaturmittelwerten für den Standort Ruthe durchgeführt. Entgegen meinen Erwartungen zeigte auch das Modell von PEARSON et al. (1994) akzeptable Ergebnisse, obwohl als Zielgröße für den Kopfdurchmesser nur 120 mm statt der realen 200 mm angegeben werden konnten. Daher konnte das Modell in den Vergleich einbezogen werden. Die Ergebnisse sind in Abb. 24 und Tab. 10 dargestellt.

Nach meiner Einschätzung sind die vier Modelle geeignet, die Kulturdauer nach einer Zwischenwertmessung der Kopfgrößen zu simulieren. Die Bestimmtheitsmaße der in Abb. 24 eingezeichneten Regressionsgleichungen können nicht zur Abschätzung der Güte der Vorhersage dienen, da sie nur angeben, wie genau die Regressionslinie die Daten beschreibt. Je geringer die Steigung der Regressionsgleichungen vom Wert 1 abweicht, desto genauer ist die Schätzung. Das absolute Glied der Gleichung könnte durch Einbau von Korrekturfaktoren verändert werden, so daß die Regressionsgleichungen parallel verschoben würden.

Wie bei der Anwendung des Modells von WIEBE häufiger beobachtet wurde, werden im Durchschnitt für frühe Pflanztage die Kulturdauern zu lang, für späte zu kurz simuliert. Das sollte bei einer Optimierung des Modells berücksichtigt werden. In ähnlicher Weise verläuft die Regressionsgleichung für die mit dem Modell von PEARSON simulierten Werte. Das Modell von GREVSEN schätzt die Kulturdauern im Durchschnitt erheblich zu kurz, während die Steigung der Regressionsgleichung für die Ergebnisse des Modells von WURR nur gering von 1 abweicht.

Wird als Maß für die Vorhersagegenauigkeit die Abweichung der simulierten von den gemessenen Kultur dauern verstanden, können die Mittelwerte dieser Abweichungen (in Tagen) der Einschätzung der Modelle dienen (Tab. 10). Deutlich wird die Abweichung des Modells von GREVSEN, die im Mittel bei ≈ 7 Tagen lag. Nach diesen Werten ist mit dem Modell von WIEBE die genaueste Vorhersage möglich, wobei allerdings berücksichtigt werden muß, daß auch die beschriebenen Sätze der Sorte 'Arfak' bei der Anpassung des Modells über 20 Jahre zu einem kleinen Teil einbezogen wurden. Abb. 25 stellt die prozentuale Häufigkeit der Abweichung in Tagen graphisch dar. Nach diesem Kriterium ist das Modell von WIEBE gut zur Vorhersage geeignet, da in 76 % der Fälle die Abweichungen der simulierten von den gemessenen Kultur dauern kleiner oder gleich drei Tagen war.

5 Ansätze zur Optimierung eines Simulationsmodells

5.1 Phaseneinteilung

Mit der Modellbildung wird versucht, ein komplexes biologisches System zu beschreiben. Zur Verständlichkeit des Modells sollte es überschaubar, einfach zu handhaben sein und so wenige Parameter wie nötig einschließen. Bei der Anwendung des Simulationsmodells für die Erntevorhersage von Blumenkohl, das von WIEBE und Mitarbeitern entwickelt wurde (vgl. 4.1.5: Arbeitsgruppe WIEBE), macht sich nachteilig bemerkbar, daß der Fortschritt in den Entwicklungsphasen nicht direkt an der Zahl der ausdifferenzierten Organe verfolgt werden kann. Dadurch wird der Vergleich mit Beständen im Freiland erschwert, deren Wachstum und Entwicklung simuliert werden soll.

Jugendphase

Die Dauer der Jugendphase ab der Pflanzung wird im Modell durch Prozentwerte ausgedrückt. Um Unterschiede zwischen Sorten zu berücksichtigen, werden die Prozentwerte, an denen die Phase endet, von 30 % für frühe Sorten bis 150 % für Sorten mit einer langen Entwicklungsdauer variiert (vgl. Tab. 7). Auf diese Weise lassen sich auch Unterschiede in der Blattzahl, die das Ende der Jugendphase charakterisiert, einbeziehen. Die drei Komponenten, die diese Entwicklungsphase beschreiben können, nämlich Blattzahl, Blattanlagerate und Phasendauer werden zu den verwendeten Funktionswerten (vgl. Tab. 6) vermischt.

Als gutes Maß, um den Fortschritt der Pflanzen in der Phase analysieren zu können, bietet sich die Zahl der sichtbaren Blätter an. Folgerichtig müßte die Zahl der sichtbaren Blätter zur Pflanzung als Startwert der Phase verwendet werden. Nach der Beziehung, die BOOIJ (1990) aufstellte, könnte daraus die Zahl der angelegten Blätter berechnet werden (vgl. 4.1.1: Arbeitsgruppe BOOIJ, Gleichung 6 und 7, S. 29). Bei der zur Pflanzung üblichen Größe sind vier Laubblätter sichtbar (WIEBE 1980). Dabei ist eine Zahl von 10 angelegten Blättern zu erwarten (GREVSEN und OLESEN 1994).

Die Höhe der Blattanlagerate hängt neben genetischen Faktoren von den Umgebungsbedingungen ab. Wird vereinfachend der Wert der Blattanlagerate (Blätter/Tag) als Funktion der Tagesmitteltemperatur berechnet (vgl. Abb. 16) und zu den vorhandenen Blattzahlen addiert, kann die Zahl der Blätter zu jedem Tag innerhalb der Jugendphase bestimmt werden. Die Jugendphase ist beendet, wenn die als Grenze angegebene Blattzahl erreicht wird.

Sowohl die Blattanlagerate als auch die Blattzahl, die das Ende der Jugendphase markiert, ist sortenabhängig zu variieren. Eventuell ist zu prüfen, ob es ausreichend ist, nur für sehr frühe Sorten eine höhere Blattanlagerate zu verwenden. Die Blattzahl zum Phasenende sollte aber in jedem Fall sortenspezifisch festgelegt werden.

Das Modell der Blattanlage, das GREVSEN und OLESEN (1994) vorstellen, schließt einen graduellen Anstieg der Blattanlagerate mit steigender Blattzahl ein (Gleichung 11, S. 34). Dieser Ansatz erscheint mir physiologisch sinnvoll, da mit zunehmender Zahl der angelegten Blätter die photosynthetisch aktive Blattfläche vergrößert wird und damit die Produktion von Assimilaten verstärkt werden kann. Nachteilig wäre jedoch, wenn die notwendigen Parameter für das Modell für jede Sorte geschätzt werden müßten. Eine Einordnung in Sortengruppen muß ausreichend sein, um den Aufwand an Feld- oder Klimakammerversuchen gering zu halten.

Vernalisationsphase

Die Verbreiterung des Vegetationskegels bis zu einer Größe von 0.6 mm im Lauf der Vernalisationsphase wurde als direkter Effekt der zunehmenden Absättigung des Kältebedürfnisses interpretiert (WIEBE 1972c, WURR et al. 1993). Allerdings ist die Verbreiterung unter Freilandbedingungen ohne Mikroskop nicht zu verfolgen. In Anlehnung an BREWSTER (1987) und WURR et al. (1993) sollte die vollständige Absättigung des Kältebedürfnisses mit dem Wert 1 kodiert und jedem Tag mit bestimmter Temperatur eine relative Wirkung als Anteil von 1 zugeordnet werden.

Abgeleitet aus den beschriebenen Ergebnissen aus der Literatur halte ich einen Verlauf der Vernalisationsfunktion mit einem Optimalbereich von 10 °C bis 14 °C für die in

Deutschland angebauten Sorten für sinnvoll (Abb. 12 a). Jedoch sind Sortenunterschiede zu erwarten, wie bereits von WIEBE (1972b) festgestellt.

Soll der Verlauf der Vernalisationsfunktion erhalten bleiben, könnten die Sortenunterschiede durch verschieden hohe Vernalisationsraten berücksichtigt werden, so daß z. B. einem Tag mit der mittleren Temperatur von 12 °C bei einer Sorte mit stärkerem Kältebedürfnis zur Vernalisation eine Wirkung von 0.09 statt 0.11 zugeordnet wird. Devernalisationseffekte durch Temperaturen über dem Optimalbereich sind nach WIEBE (1974) nicht zu erwarten.

Kopfbildungsphase

Dem Kopf kommt als Ernteprodukt die größte Bedeutung zu. Seine Größe kann durch Bestimmen des Durchmesser im Feld an Stichproben gut verfolgt werden. Wie beschrieben wird die Genauigkeit von Modellen zur Vorhersage der Erntetermine dadurch besser (vgl. Abb. 10 und 11). Alle in diesem Zusammenhang diskutierten Modelle bieten die Möglichkeit, ausgehend von den Zwischenwerten der Kopfdurchmesser den Rest der Kulturdauer zu schätzen.

Bei der Arbeit mit dem von WIEBE (1975a) und Mitarbeitern entwickelten Modell kristallisierten sich zwei Nachteile heraus. Da der Fortschritt der Pflanzen in der Kopfbildungsphase über Prozentwerte kodiert wird, müssen gemessene Kopfgrößen über die in Abb. 18 dargestellte Beziehung zwischen Kopfdurchmessern in mm und Prozentwerten umgerechnet werden. Weiterhin ist es nicht möglich, die Größe der Köpfe zur Ernte ohne Änderung an dem bestehenden FORTRAN-Programm neu zu definieren. Das wirkt sich besonders bei der Simulation mit frühen Sorten, wie z. B. 'Montano' aus, die nach WIEBE (mündliche Mitteilung) bereits bei kleineren Durchmessern geerntet werden. Auch der Einfluß der Witterung auf Qualität und Blattwachstum kann nicht berücksichtigt werden, da der Faktor Temperatur dazu nicht ausreichend ist (WIEBE 1975a).

Diese Nachteile können abgeschwächt werden, wenn direkt die Größenzunahme des Blumenkohlkopfes simuliert wird. Als Startgröße werden 0.6 mm eingesetzt. Die Wirkung eines Tages mit bestimmter Mitteltemperatur schlägt sich in der Kopfwachstumsrate (mm/Tag) nieder, die zur Größe des Kopfes addiert wird. Da die Kopfwachstumsrate wie beschrieben auch stark von der Kopfgröße abhängt, muß sie an die Größe angepaßt

sein. In diesem Zusammenhang könnte das von PEARSON et al. (1994) favorisierte Konzept der relativen Wachstumsrate einbezogen werden. Die Schätzung der Parameter, die nach den Autoren sortenspezifisch erfolgen sollte (Tab. 5), ist aufwendig.

Nach WIEBE (1973a) sind Unterschiede zwischen Sorten im Kopfwachstum nicht zu erwarten, so daß für alle Sorten einheitliche Kopfwachstumsraten verwendet werden können.

Die gemessenen und simulierten Kopfgröße können auf diese Weise schon während des Simulationsablaufs verglichen werden, so daß eine Anpassung des Modells während der Anbausaison möglich ist. Die Kopfgröße zur Ernte sollte in Abhängigkeit von den verwendeten Sorten, der Witterung und den Marktanforderungen flexibel gehalten werden.

5.2 Streuung im Pflanzenbestand

Durch genetische Unterschiede und die Anzuchtbedingungen kommt es bereits bei den Jungpflanzen zu einer Streuung in den beobachtbaren Merkmalen, wie z. B. der Größe und der Blattzahl. Diese wird üblicherweise, wie beschrieben, im Verlauf von Wachstum und Entwicklung verstärkt, wobei besonders die Witterung großen Einfluß hat (vgl. 2.2.6: Variabilität im Bestand). Diese Tatsache wurde nach dem Vergleich der in der Literatur vorgestellten Modelle nur von WIEBE eingebaut. In diesem Modell ist neben der Vorhersage des Erntebeginns, Ernteendes und der mittleren Kulturdauer auch eine Prognose der wöchentlich zu erntenden Mengen möglich. Allerdings ist die Abbildung der Streuung im Modell zu überdenken.

Die Aufteilung der Jungpflanzen in drei Stufen im Verhältnis von 30 : 40 : 30 % wurde bereits dargestellt (vgl. 4.1.5: Arbeitsgruppe WIEBE). Diesen Stufen werden Startwerte von -20 %, 0 % und +20 % zugeordnet und vor Beginn der eigentlichen Simulation im Programm initialisiert. Während diese Einteilung flexibel gehalten werden könnte, werden die Menge der Pflanzen in den drei Stufen im Verlauf des Programms auf fünf Klassen aufgeteilt. Diese Aufteilung kann im vorliegenden Programm nicht beeinflusst werden.

Die Überprüfung der Ernteverteilung ist mit den für den Vergleich der Modelle verwendeten Daten aus Ruthe nicht sinnvoll, da die Datenbasis mit 29 Sätzen zu gering ist. Daher soll die Simulation der Erntedauer am Beispiel von 112 in den Jahren 1991 bis 1993 in Ruthe angebauten Sätzen verschiedener Sorten dargestellt werden (Abb. 26).

Dabei wurden aktuelle Tagesmitteltemperaturen der entsprechenden Jahre verwendet. Als Erntebeginn wurde auch in der Simulation der Tag definiert, an dem 5 % der Köpfe geerntet wurden, als Ernteeende entsprechend der Tag der Ernte von 95 %.

Es fällt auf, daß mit dem Modell keine Erntedauern über 30 Tagen geschätzt werden konnte, wobei die in den Freilandversuchen ermittelte Erntedauer im Extrem für die Sorte 'Celesta', Pflanztag 31.07.1991, bei 58 Tagen lag. Zu prüfen ist allerdings, ob in einem Praxisbetrieb solche Köpfe noch geerntet würden.

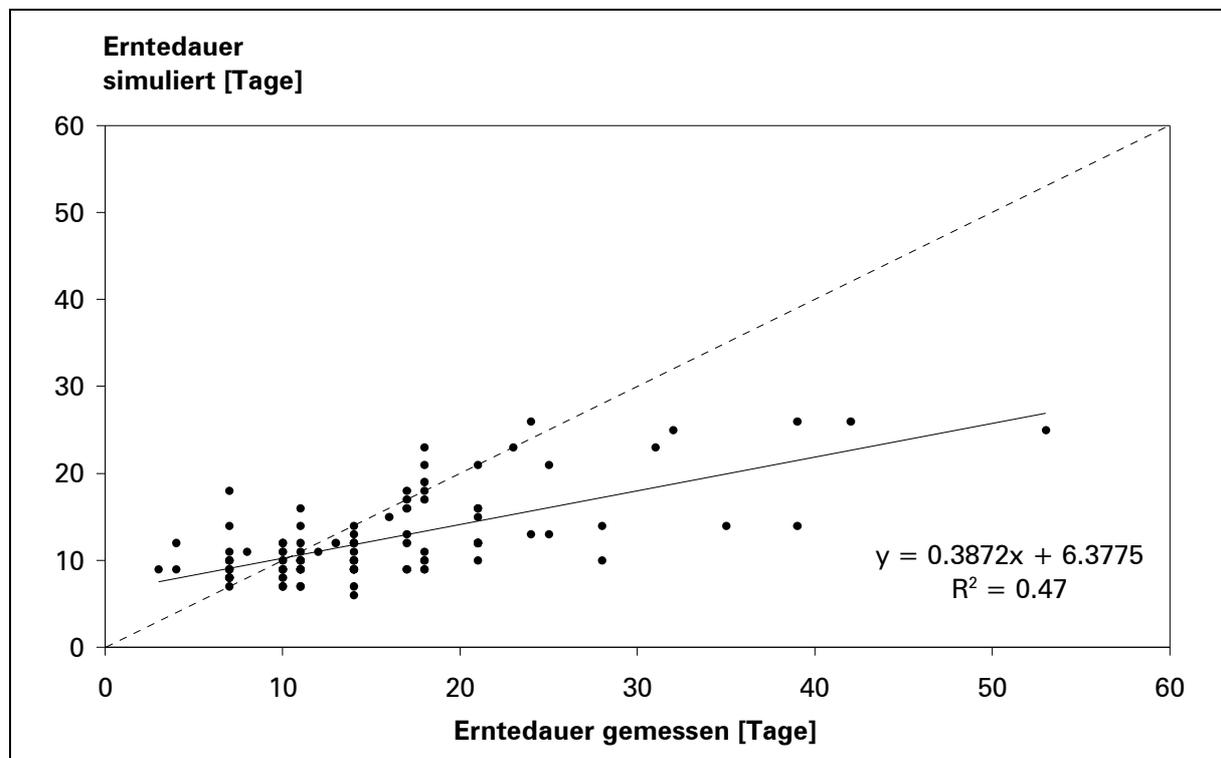


Abb. 26: Gemessene und simulierte Erntedauer von Blumenkohl (Ruthe 1991-1993)

Ein weiterer Ansatz zur Beurteilung der Ernteverteilung kann der Einbezug von Datenmaterial aus Praxisbetrieben sein. Als Beispiel wird für das Jahr 1994 die tatsächliche Anlieferung von Blumenkohl an einen deutschen Großmarkt sowie die simulierte Anlieferung vorgestellt (Abb. 27). Dabei wurde die Möglichkeit des Modells von WIEBE genutzt, sowohl aktuell gemessene Temperaturen als auch langjährige Temperaturmittelwerte zu

verwenden. Die Genauigkeit der Simulation wird durch aktuelle Temperaturen deutlich verbessert. Im Beispiel wurden für die ersten sieben Wochen des Wachstums eines jeden Satzes aktuelle Temperaturen eingesetzt. Auf diese Weise könnten auch längerfristige Wettervorhersagen einbezogen werden.

Der Trend der Marktanlieferung kann auf diese Weise gut beschrieben werden. Die Unterschiede in den Größenordnungen beruhen auf dem Meldesystem für Pflanztage und Mengen, an das nicht alle Anbauer der Region angeschlossen sind.

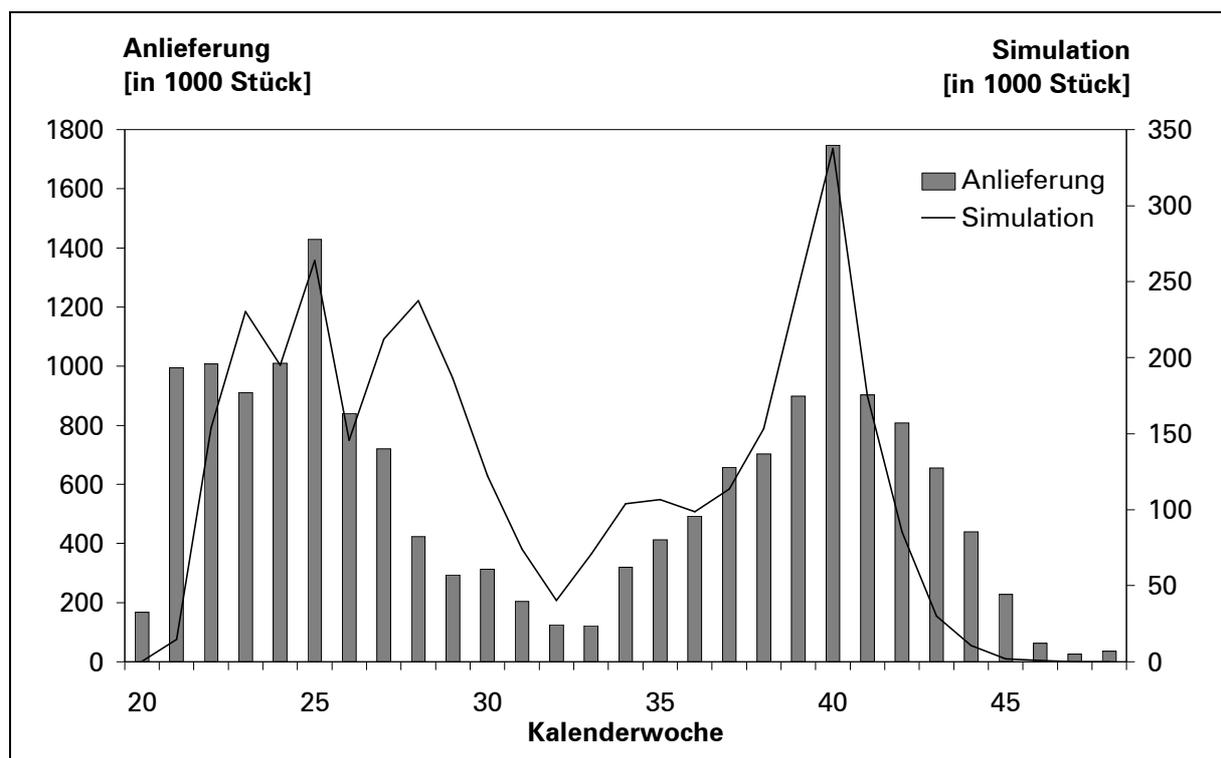


Abb. 27: Vergleich der tatsächlichen und simulierten Blumenkohlanlieferung an einen Großmarkt 1994 (vgl. Text)

Nachteilig ist, daß auch nach Einfügen von Zwischenwerten der Kopfdurchmesser die Aufteilung in 15 Klassen realisiert wird, obwohl gerade die Messung der Köpfe gute Rückschlüsse auf die zu diesem Zeitpunkt im Bestand vorhandene Streuung zuläßt. Auch die standardisierte Restmenge von 10 % der Pflanzen, die im Modell definitionsgemäß auf dem Feld verbleibt, scheint nach der Einschätzung von WIEBE (1979) zu gering.

Eine Optimierung müßte meiner Meinung nach zwei Aspekte umfassen. Werden die Jungpflanzen als wichtiger Grund für die Variabilität im Bestand angesehen, sollte die

Beurteilung des Anbauers über den Zustand seiner Jungpflanzen als Basis der Streuung einfließen.

Die Anzahl der Klassen, in der die Menge der Pflanzen am Beginn der Kultur aufgeteilt wird, sollte zwischen 5 und 10 liegen. Die Berechnung der Dauer der einzelnen Phasen kann für die Klassen getrennt durchgeführt werden. Sollen z. B. die Pflanzen einer Klasse langsamere Fortschritte im Wachstum und in der Entwicklung machen, könnten die verwendeten Raten durch Korrekturfaktoren vermindert werden.

Die Einteilung der Pflanzen in Klassen sollte möglichst nach quantifizierbaren Merkmalen erfolgen. Dazu würde sich beispielsweise die Streuung der Jungpflanzen in den Blattzahlen eignen. Ist diese hoch, müssen die Pflanzen in entsprechend mehr Klassen eingeteilt werden. Unter der Annahme, daß die Blattzahlen eines Bestandes als unabhängiges Merkmal eine Normalverteilung aufweisen, könnten die Mengen der Pflanzen, die jeweils in eine Klasse fallen, aus den Flächenanteilen unter einer Normalverteilungskurve abgeleitet werden. Die Klassen müssen dabei die gleiche Breite haben. Rechnerisch können auch Bruchteile von Merkmalen wie z. B. 4.5 Blätter realisiert werden. Abb. 28 soll das Vorgehen skizzieren.

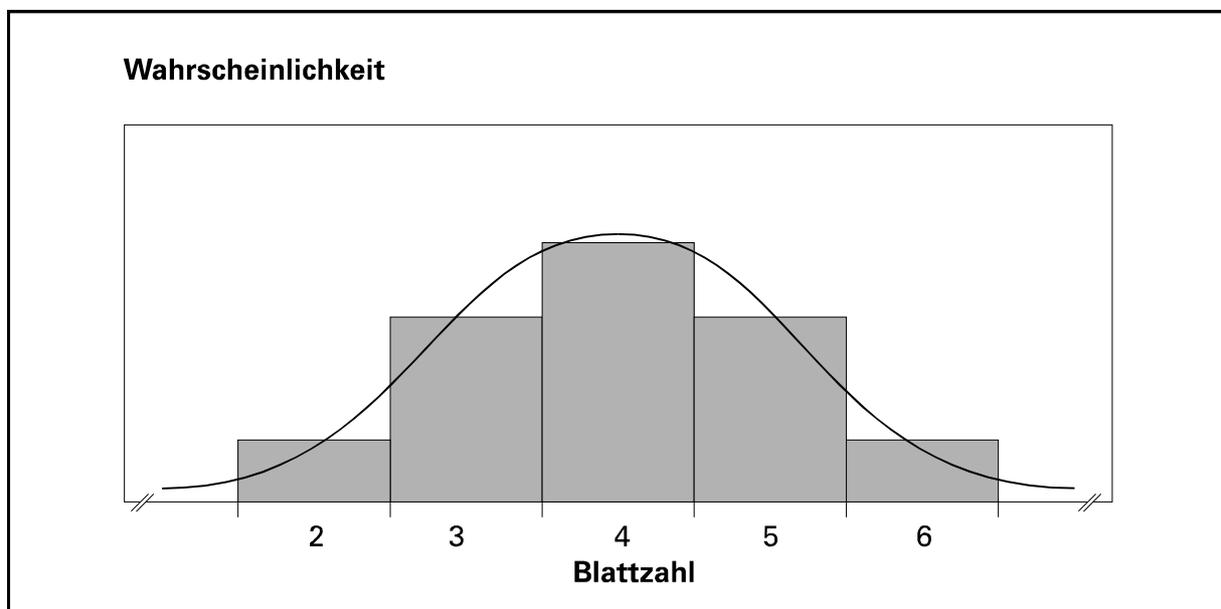


Abb. 28: Mögliche Einteilung von Jungpflanzen in Klassen am Beispiel der Blattzahl

Weiterhin müßte die Aufteilung der Klassen so flexibel gehalten werden können, daß Wachstumsstockungen der Pflanzen durch unerwartete Ereignisse wie z. B. Frost, Hagelschlag, Taubenfraß oder Krankheitsbefall auch während der Simulation über Korrekturfaktoren (Abschwächung der Raten) eingebaut werden können. WIEBE (1979) berichtete bei frühen Pflanzungen von Verlusten in der Größenordnung von 30 % bis 40 %. Vermarktungsfähige Köpfe wurden bei normalen Kulturverläufen von etwa 70 % bis 80 % der Pflanzen gebildet.

5.3 Mögliche Erweiterung

In den beschriebenen Modellen wird die Beziehung zwischen Temperatur und Wachstum und Entwicklung genutzt. Während sie zur Vorhersage der Erntetermine geeignet sind, lassen sie nur wenig Rückschlüsse auf die Substanzproduktion- und verteilung zu. Ansätze liefern AIKMAN und SCAIFE (1993). Der Einbezug von photosynthetisch aktiver Strahlung wird von einigen Autoren erwogen (GREVSEN 1990, PEARSON et al. 1994). Nach HEUVELINK (1996) bieten mechanistische Modelle, in denen das Wissen wesentlicher Grundprozesse wie der Photosynthese integriert ist, „einen wissenschaftlichen Zugang zu z. B. landwirtschaftlichen Problemen“ (S. 309).

Eine Erweiterung in dieser Richtung könnte die Lichtnutzungseffizienz, Stoffverteilung und Ertragsbildung umfassen. Die Modellbildung mit diesen Zielen wird u. a. von Arbeitsgruppen am Institut für Gemüsebau, Universität Hannover, verfolgt.

Soll ein Modell zur einfachen Anwendung als Computerprogramm formuliert werden, ist neben der mathematischen Korrektheit auch die Benutzerfreundlichkeit zu berücksichtigen.

6 Zusammenfassung

Ein wichtiges Ziel bei der Produktion von Blumenkohl (*Brassica oleracea* L. conv. *botrytis* var. *botrytis*) ist eine kontinuierliche Marktbelieferung. Grundvoraussetzung ist die Anwendung der richtigen Kulturmaßnahmen. Den größten Einfluß auf die Erntetermine haben dabei die Anbauplanung, die Jungpflanzenanzucht und die Sortenwahl. Je homogener ein Bestand ist, desto gleichmäßiger ist der Ernteverlauf.

Auch bei sorgfältiger Anbauplanung kommt es zu Schwankungen in den wöchentlichen Erntemengen und Erzeugerpreisen, die durch die Entwicklungsphysiologie des Blumenkohls erklärt werden. Zu unterscheiden sind die drei Entwicklungsphasen Jugendphase, Vernalisationsphase und Kopfbildungsphase. Während hohe Temperaturen das Wachstum in der Jugend- und Kopfbildungsphase fördern, verzögern sie die Absättigung des Kältebedürfnisses für die Vernalisation.

Die Prognose der Schwankungen in der Anlieferung ist eine Hilfe für die Vermarktung. Die in der Literatur beschriebenen Modelle des Wachstums und der Entwicklung von Blumenkohl dienen schwerpunktmäßig der Vorhersage der Erntetermine. In dieser Arbeit werden die Modelle von GREVSEN (1990), PEARSON et al. (1994), WIEBE (1975a+b) und WURR et al. (1990b) näher beschrieben und verglichen. Diese verwenden als Basis die Beziehung zwischen der Temperatur und dem Wachstum und der Entwicklung der Pflanzen.

Obwohl sich die Ansätze der Modelle unterscheiden, konnte der Erntezeitpunkt ausgehend von einer Stichprobe der Kopfdurchmesser simuliert werden. Die Genauigkeit kann durch Anpassung der sortenspezifischen Parametern verbessert werden. Gut geeignet erscheinen die Modelle von WIEBE (1975a+b) und WURR et al. (1990b).

Das Modell von WIEBE (1975a+b) ermöglicht die Simulation der Kulturdauer ab der Pflanzung. Für dieses Modell werden Vorschläge zur Optimierung erarbeitet, wobei speziell die Beschreibung der Variabilität im Bestand berücksichtigt wird.

7 Literatur

- AIKMAN, D. P. und SCAIFE, A. (1993):** Modelling plant growth under varying environmental conditions in a uniform canopy. *Annals of Botany*, **72**, 485-492.
- ATHERTON, J. G., HAND, D. J. und WILLIAMS, C. A. (1987):** Curd initiation in the cauliflower (*Brassica oleracea* conv. *botrytis* var. *botrytis* L.). In: **ATHERTON, J. G. (HRSG.):** Manipulation of flowering. Verlag Butterworths, London.
- VON BINGEN, H. (12. Jh):** Physica. Übersetzung: **POSTMANN, M.-L. (1991):** Verlag Pattloch, Augsburg.
- BOOIJ, R. (1987a):** Influence of temperature on length of the growing period of cauliflower. *Acta Horticulturae*, **198**, 243-248.
- BOOIJ, R. (1987b):** Environmental factors in curd initiation and curd growth of cauliflower in the field. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, **35**, 435-445.
- BOOIJ, R. (1990):** Cauliflower curd initiation and maturity: Variability within a crop. *Journal of Horticultural Science*, **65**, 167-175.
- BOOIJ, R. und STRUIK, P. C. (1990):** Effects of temperature on leaf and curd initiation in relation to juvenility of cauliflower. *Scientia Horticulturae*, **44**, 201-214.
- BREWSTER, J. L. (1987):** Vernalization in the onion—a quantitative approach. In: **ATHERTON, J. G. (HRSG.):** Manipulation of flowering. Verlag Butterworths, London.
- BUNDESSORTENAMT (Hrsg., 1995):** Beschreibende Sortenliste 1995: Wurzelgemüse, Zwiebelgemüse, Kohlgemüse. Verlag Landbuch, Hannover.
- FUJIME, Y. (1983):** Studies on thermal conditions of curd formation and development in cauliflower and broccoli, with special reference to abnormal curd development. *Memoirs of Faculty of Agriculture, Kagawa University*, **40**.

- FRANCE, J. und THORNLEY, J. H. M. (1984):** Mathematical models in agriculture. Verlag Butterworths, London.
- GANNINGER-HAUCK, D. (1996):** Probleme mit Schossern (Vortrag Josef Schlaghecken 14. Pfälzer Gemüsebautag). Deutscher Gartenbau, **11**, 685-686.
- GOUDRIAAN, J. und VAN LAAR, H. H. (1994):** Modelling potential crop growth processes. Verlag Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- GREVSEN, K. (1990):** Prediction of harvest in cauliflower based on meteorological observations. Acta Horticulturae, **267**, 313-322.
- GREVSEN, K. und OLESEN, J. E. (1994):** Modelling cauliflower development from transplanting to curd initiation. Journal of Horticultural Science, **69**, 755-766.
- HAND, D. J. und ATHERTON, J. G. (1987):** Curd initiation in the cauliflower. I. Juvenility. Journal of Experimental Botany, **38**, 2050-2058.
- HEUVELINK, E. (1996):** Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Thesis Wageningen, Wageningen.
- JANSEN, H., BACHTHALER, E., FÖLSTER, E. und SCHARPF, H.-C. (1989):** Gärtnerischer Pflanzenbau. 2. Auflage. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- KRUG, H., WEBER, W. E. und STÜMPER, M. (1980):** Methode einer umfassenden Versuchsauswertung bei Beständen mit selektiver, einmaliger Ernte der Einzelpflanzen - dargestellt am Beispiel eines N-Düngungsversuches zu Blumenkohl. Gartenbauwissenschaft, **45**, 63-67.
- KRUG, H. und WIEBE, H.-J. (1991):** Die Pflanze. In: **KRUG, H. (Hrsg.):** Gemüseproduktion. Verlag Paul Parey, Berlin.
- LAWSON, G. und LONG, E. (1988):** ADAS maturity test for cauli curds ready to go this summer. Grower, **109** (21), 9.
- MARTIN, M. D. (1985):** A programme for continuity. Grower, **103** (2), 15-19.

MULTSCH, W. (1991): Allgemeine Botanik. Verlag Georg Thieme, Stuttgart.

PEARSON, S., STEPHENSON, S. und HADLEY, P. (1990): Expert system. *Grower* **114** (9), 22.

PEARSON, S. und HADLEY, P. (1993): Continuity in caulis: A yield prediction system for cauliflower and calabrese designed for large growers and grower co-operatives. *Grower*, **120** (3), 25-26.

PEARSON, S., HADLEY, P. und WHELDON, A. E. (1994): A model of the effects of temperature on the growth and development of cauliflower (*Brassica oleracea* L. *botrytis*). *Scientia Horticulturae*, **59**, 91-106.

SALTER, P. J. (1960): The growth and development of early summer cauliflower in relation to environmental factors. *Journal of Horticultural Science*, **35**, 21-33.

SALTER, P. J. (1969): Studies on crop maturity in cauliflower: I. Relationship between the times of curd initiation and curd maturity of plants within a cauliflower crop. *Journal of Horticultural Science*, **44**, 129-140.

SALTER, P. J. und FRADGLEY, J. R. A. (1969): Studies on crop maturity in cauliflower: II. Effects of cultural factors on the maturity characteristics of a cauliflower of crop. *Journal of Horticultural Science*, **44**, 141-154.

SEITZ, P. (1984): Der Gemüse- und Kräuteraanbau und die Speisepilzerzeugung seit dem 18. Jahrhundert. In: **FRANZ, G. (Hrsg):** Geschichte des deutschen Gartenbaues. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

STÜTZEL, H. (1994): Vorlesung 7. und 8. Semester „Systemtheorie im Pflanzenbau“.

STÜTZEL, H. (1995a): A simple model for simulation of growth and development in faba beans (*Vicia faba* L.): I. Model description. *European Journal of Agronomy*, **4** (2), 175-185.

STÜTZEL, H. (1995b): A simple model for simulation of growth and development in faba beans (*Vicia faba* L.): II. Model evaluation and application for the assessment of sowing date effects. *European Journal of Agronomy* **4** (2), 187-195.

- WIEBE, H.-J. (1972a):** Wirkung von Temperatur und Licht auf Wachstum und Entwicklung von Blumenkohl. I. Dauer der Jugendphase für die Vernalisation. Gartenbauwissenschaft **37**, 165-178.
- WIEBE, H.-J. (1972b):** Wirkung von Temperatur und Licht auf Wachstum und Entwicklung von Blumenkohl. II. Optimale Vernalisationstemperatur und Vernalisationsdauer. Gartenbauwissenschaft **37**, 293-303.
- WIEBE, H.-J. (1972c):** Wirkung von Temperatur und Licht auf Wachstum und Entwicklung von Blumenkohl. III. Vegetative Phase. Gartenbauwissenschaft **37**, 455-469.
- WIEBE, H.-J. (1973a):** Wirkung von Temperatur und Licht auf Wachstum und Entwicklung von Blumenkohl. IV. Kopfbildungsphase. Gartenbauwissenschaft **38**, 263-279.
- WIEBE, H.-J. (1973b):** Wirkung von Temperatur und Licht auf Wachstum und Entwicklung von Blumenkohl. V. Einfluß der Jungpflanzenanzucht auf die Variabilität in Blumenkohlbeständen. Gartenbauwissenschaft **38**, 433-440.
- WIEBE, H.-J. (1974):** Zur Bedeutung des Temperaturverlaufs und der Lichtintensität auf den Vernalisationseffekt bei Blumenkohl. Gartenbauwissenschaft, **39**, 263-280.
- WIEBE, H.-J. (1975a):** Zur Übertragung von Ergebnissen aus Klimakammern auf Freilandbedingungen mit Hilfe eines Simulationsmodells bei Blumenkohl. Gartenbauwissenschaft, **40**, 70-74.
- WIEBE, H.-J. (1975b):** Möglichkeiten der Prognose für die Erntevertelung von Blumenkohl. Gemüse, **11**, 194-197.
- WIEBE, H.-J. (1979):** Short term forecasting of the market supply of vegetables, especially cauliflower. Acta Horticulturae, **97**, 399-409.
- WIEBE, H.-J. (1980):** Anbau von Blumenkohl für eine kontinuierliche Marktbelieferung während der Erntesaison. Gartenbauwissenschaft, **45**, 282-288.
- WIEBE, H.-J. (1991):** Blumenkohl (*Brassica oleracea* conv. *botrytis* var. *botrytis*). In: **KRUG, H. (Hrsg.):** Gemüseproduktion. Verlag Paul Parey, Berlin.

WURR, D. C. E. (1988): Mature decisions. *Grower* **110** (1), 17-19.

WURR, D. C. E., ELIPHINSTONE E. D., und FELLOWS, J. R. (1988): The effect of plant raising and cultural factors on the curd initiation and maturity characteristics of summer/autumn cauliflower crops. *Journal of Agricultural Science, UK*, **111**, 427-434.

WURR, D. C. E. (1990): Prediction of the time of maturity in cauliflowers. *Acta Horticulturae*, **267**, 387-394.

WURR, D. C. E., FELLOWS, J. R. und HIRON, R. W. P. (1990a): Relationships between the times of transplanting, curd initiation and maturity in cauliflower. *Journal of Agricultural Science, UK*, **114**, 193-199.

WURR, D. C. E., FELLOWS, J. R., SUTHERLAND, R. A., und ELIPHINSTONE, E. D. (1990b): A model of cauliflower curd growth to predict when curds reach a specific size. *Journal of Horticultural Science*, **65**, 555-564.

WURR, D. C. E., FELLOWS, J. R. und HIRON, R. W. P. (1990c): The influence of field environmental conditions on the growth and development of four cauliflower cultivars. *Journal of Horticultural Science*, **65**, 565-572.

WURR, D. C. E., FELLOWS, J. R., PHELPS, K. und READER, R. J. (1993): Vernalisation in summer/autumn cauliflower (*Brassica oleracea* conv. *botrytis* var. *botrytis* L). *Journal of Experimental Botany*, **44**, 1507-1514.

WURR, D. C. E., FELLOWS, J. R., PHELPS, K. und READER, R. J. (1994): Testing a vernalization model on field-grown crops of four cauliflower cultivars. *Journal of Horticultural Science*, **69**, 251-255.

ZENTRALE MARKT- UND PREISBERICHTSTELLE (1995): ZMP-Bilanz Gemüse 1995: Deutschland, EU, Weltmarkt. Verlag Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle, Bonn.

Erklärung

Ich versichere, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt habe. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

Hannover, _____
