



## Bl (umen) kohl

### **Eine Konzeptstudie zur Simulation und Prognose des Anlieferungsverhaltens des Produzenten von Blumenkohl am Großmarkt anhand der Witterungsbedingungen mit Hilfe einer Kombination aus alterstrukturierten Lesliemodellen und Differentialgleichungen**

**Kai Schmidt, Nemaplot, 2000**

#### **Zusammenfassung**

Ziel dieses Modells ist die Simulation der Anlieferungsfrequenz von Blumenkohlköpfen bei einer Vermarktungsgenossenschaft. Ausgewählte Betriebe, die über die Genossenschaft ihre Ernte vermarkten, wurden nach ihrem Anbauverhalten befragt. Dabei wurden folgende Parameter erfasst: Pflanzmenge, Pflanzzeitpunkt, Sortenwahl, Blattzahl bei Pflanzung, sowie der Erntefaktor. Diesen Eingangsfaktoren sind Erntemengen und -zeitpunkten gegenübergestellt. Basierend auf einem altersstrukturierten Leslieansatz ist ein Modellgerüst entwickelt worden, welches es ermöglicht, a) die Frage der Witterungsabhängigkeit bezüglich des Kohlwachstums zu testen, b) individuelles betriebstechnisches Ernteverhalten berücksichtigt und c) der beobachteten Varianz der Erntefrequenz gerecht wird. Blumenkohl wächst in 3 Phasen: Blattwachstum, Vernalisation und Kopfwachstum. Die beiden ersten Stadien lassen sich mit dem Konzept der biologischen Zeit realisieren. Die Dynamik der Kopfbildungsphase wird durch eine Differentialgleichung beschrieben. Der Anfangswert  $K_{(t=0)}$  ist vorgegeben, aber  $t=0$  ergibt sich aus den Ergebnissen des vorangegangenen Leslieprozesses. Für jede Altersklasse der Kopfbildungsphase wird eine eigene Differentialgleichung numerisch gelöst. Mit Erreichen der technischen Reife gelangen die Köpfe in das hypothetische Stadium „Ernte“. Durch die geeignete Parameterisierung einer angenommenen Verteilungsfunktion für dieses Stadium lassen sich verschiedene Marktverhalten entsprechend der Angebotssituation oder der technischen Kapazitäten berücksichtigen.

#### **1 Einleitung**

Die Anwendung des Prognosemodells „BlukoWin“ auf die Beobachtungen in 1999 zeigten systematische Abweichungen bezüglich der Anlieferung von Blumenkohlköpfen bei der Vermarktungsgenossenschaft. Da das Jahr außerordentlich lichtintensiv war, wurde die Eingangshypothese aufgestellt, ob das Kopfwachstum des Blumenkohl nicht nur eine Funktion der Temperatur, sondern eventuell auch eine Funktion der photosynthetisch aktiven Strahlung ist. Des Weiteren ist die Frequenz der Anlieferung nicht nur ein Ergebnis biologischer Wachstumsprozesse, sondern ist auch maßgeblich ein Problem betriebswirtschaftlicher Zusammenhänge. Es gilt daher ein modelltheoretisches Gerüst aufzubauen, welches es ermöglicht:

- die Frage der Witterungsresponse bezüglich des Kohlwachstums zu testen;
- mittlere betriebswirtschaftliches Verhalten berücksichtigt;
- der offensichtlichen Streuung in den Beobachtungen gerecht wird.



Analog zu dem bestehenden Prognoseprogramm „BlukoWin“ müssen die unterschiedlichen Wachstumsverhalten der gebräuchlichsten Sorten berücksichtigt werden, die zu insgesamt 5 Sortenklassen zusammengefasst sind.

## 2 Datengrundlage

Ausgewählte Betriebe, die über die Genossenschaft ihre Ernte vermarkten, wurden nach ihrem Anbauverhalten befragt. Dabei wurden folgende Parameter erfasst: Pflanzmenge, Pflanzzeitpunkt, Sortenwahl, Blattzahl bei Pflanzung, sowie der Erntefaktor. Diesen Eingangsfaktoren sind Erntemengen und –zeitpunkt gegenübergestellt. Zusätzlich sind vereinzelt Untersuchungen über das mittlere Kopfwachstum während der Vegetationsperiode durchgeführt worden. Abbildung 1 zeigt das aufsummierte Verhalten über alle Beobachtungsbetriebe. Ziel ist, das beobachtete Pflanzverhalten über alle Betriebe mit dem beobachteten Anlieferungsverhalten anhand der Witterungsverhältnisse in 1999 zu assoziieren. Dabei stehen insbesondere die jeweiligen Frequenzen im Vordergrund, deren Varianzen es in dem zu entwickelnden Modell zu wiederholen gilt.

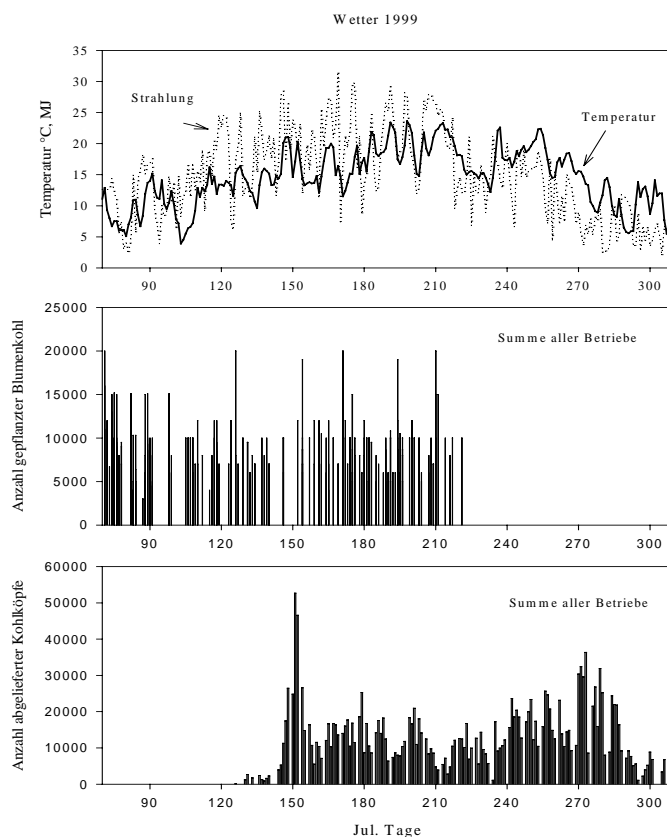
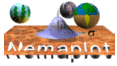


Abb. 1: Witterungsverhältnisse, Anbau- und Anlieferungsfrequenz in 1999



### 3 Grundlegende Formeln der Modellentwicklung

Um die beobachtete Streuung simulieren zu können ist geplant eine bestehendes alterstrukturiertes Lesliemodell mit einem einfachen System von Differentialgleichungen zu verbinden.

#### 3.1 Alterstrukturierte Lesliemodelle

Die geeignete Plattform zur Berücksichtigung und Erzeugung von Varianzen sind stochastische, diskrete Modelle auf der Basis des erweiterten Lesliemodells. Ohne auf die Details einzugehen existiert zu jedem Zeitpunkt  $t$  ein Populationsvektor  $x$ , der mit einer Altersmatrix  $M$  multipliziert wird:

$$x(t+1) = M_t \cdot x_t \quad (\text{Gl. 1})$$

der einen neuen Populationsvektor zum nächsten Zeitpunkt  $t+1$  ergibt. (für die detaillierte Zusammensetzung der Altersmatrix, siehe Richter & Söndgerath, 1990<sup>1</sup>).

Innerhalb des erweiterten Lesliemodells wird die Population in diskrete Entwicklungsstadien eingeteilt, in der 2 parallel laufende Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden:

1. Die Überlebenswahrscheinlichkeit  $P$  von einer Altersklasse in die nächste zu gelangen (e.g. wenn die Population bis zum Zeitpunkt  $t$  überlebt hat und mit welcher Wahrscheinlichkeit sie bis zum Zeitpunkt  $t+1$  desselben Entwicklungsstadium überleben wird);
2. Die Schlüpfwahrscheinlichkeit  $U$ , mit der die Population in das nächste Entwicklungsstadium übergehen wird (e.g. wenn die Entwicklung des Stadiums  $s$  abgeschlossen ist, geht der entsprechende Anteil der Population in die erste Altersklasse des nächsten Stadiums über);

Bei einer vorgegebenen Anzahl von Stadien ( $n$ ) und Altersklassen ( $m$ ) ergeben sich somit folgende bedingte Übergangswahrscheinlichkeiten:

$$x_{s,i+1}(t+1) = (1 - U_{s,i}(t)) \cdot P_{s,i} \cdot x_{s,i}(t) \quad (\text{Gl. 2})$$

für  $i=1, \dots, m_s-1$  und  $s=1, \dots, n$

ist der Anteil der Population, der zum Zeitpunkt  $t+1$  im gleichen Stadium  $s$  geblieben ist und überlebt hat und

$$x_{s+1,1}(t+1) = \sum_{i=1}^{m_s} U_{s,i}(t) \cdot x_{s,i}(t) \quad (\text{Gl. 3})$$

für  $s=2, \dots, n$

ist der Anteil der Population, der die Entwicklung des Stadiums  $s$  vollendet hat und die erste Altersklasse des nächsten Stadiums erreicht. Die besondere Berücksichtigung der letzten Altersklasse wird hier ignoriert, um die Komplexität nicht zu erhöhen.

---

<sup>1</sup> Richter, O & Söndgerath D. (1990), Parameter Estimation in Ecology, the link between data and models, VCH Weinheim, 218 S.

Für die Entwicklung des Blumenkohls lassen sich folgende Wachstumsperioden bestimmen

- Blattwachstumsperiode oder Jugendphase
- Vernalisationsphase
- Kopfwachstum
- Erntestadium

Die Einführung eines sogenannten „Erntestadiums“ ist für die Berücksichtigung der vermuteten betriebswirtschaftlichen Faktoren erforderlich und ist nicht als biologischer Prozess anzusehen.

Das folgende Flussdiagramm verdeutlicht das Modellkonzept:

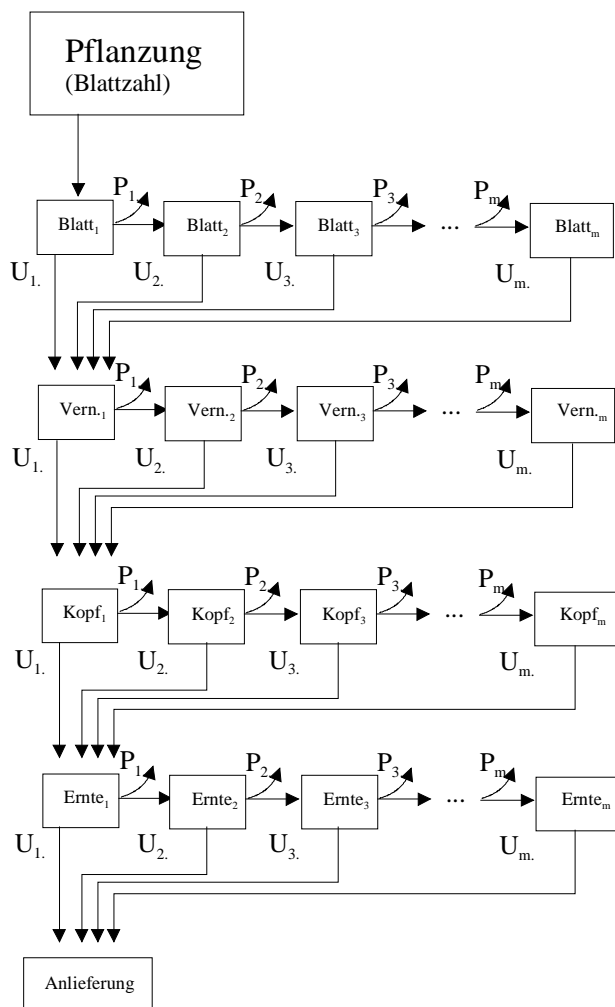


Abb. 2: Flussdiagramm des Lesliemodells für Blumenkohl

Das Modell wird für jede der 5 Sorten durchlaufen, d.h. jede Sorte wird durch ein jeweils ein allgemeines Lesliemodell mit den individuellen Überlebens- und Schlüpfmatrizen beschrieben. Auf eine Indizierung der Sorte wurde sowohl in den Gleichungen als auch in dem Flussdiagramm der Übersichtlichkeit wegen verzichtet. Zur Verdeutlichung hinsichtlich der Entwicklungsdynamik des Blumenkohls ergibt sich folgendes Modellkonzept: Bei Pflanzung gelangt die entsprechende Pflanzenanzahl in die 1. Altersklasse, entwickelt sich dort durch die Altersklassen bis zum Abschluss der Blattentwicklung und geht dann in die erste Altersklasse



der Vernalisationsphase über. Mit Abschluss der Vernalisation beginnt das Kopfwachstum in der ersten Altersklasse. Der Kopf wächst bis zu einer Erntereifen Größe. Der Leslieprozess wird bis entsprechend bis zur Ernte fortgesetzt. Das Modell impliziert eine sehr große Anzahl von Parametern, die theoretisch alle anhand von entsprechenden Versuchsdaten geschätzt werden müssten. In den meisten Fällen sind solche Parameterschätzungen mangels geeigneter Daten nicht durchführbar. Daher bedarf es weitergehender Entwicklungen. Die Besonderheit in der Verwendung von allgemeinen Lesliemodellen liegt darin, die Menge der Parameter durch adäquate Transformation von Wahrscheinlichkeitsfunktionen auf sekundäre Parameter zu reduzieren.

### 3.2 Entwicklung der Verteilungsfunktionen

Nicht alle Individuen eines Stadiums erreichen zum selben Zeitpunkt den Übergang in das nächste Stadium. Sowohl zeitlich vor der mittleren Vollendung eines Stadiums als auch wesentlich später wird für Teile der Population die Übergangswahrscheinlichkeit gleich 1. Diese Varianzen lassen sich durch entsprechend formulierte Verteilungsfunktionen berücksichtigen und kann in drei Schritten entwickelt werden. Damit ergibt sich für die Schlüpfwahrscheinlichkeit folgender Zusammenhang:

$$U_{s,i}(t) = \frac{(G_s(b_s(t_{s,i,0}, t)) - G_s(b_s(t_{s,i,0}, t-1)))}{(1 - G_s(b_s(t_{s,i,0}, t-1)))} \quad (\text{Gl. 4})$$

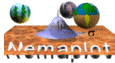
wobei für  $G_s$  (die normalisierten Entwicklungszeiten des Stadiums  $s$ ) eine Weibullfunktion angenommen wird.

$$G_s = 1 - e^{-\left(\frac{(b_s(t_{s,i}, t))}{b_{crit_s}}\right)^{\beta_s}} \quad (\text{Gl. 5})$$

wobei

$$b_s(t_{s,0}, t) = \int_{t_{s,0}}^t d_s(T(\tau)) d\tau \quad (\text{Gl. 6})$$

die biologische Zeit berechnet, und  $d_s(T)$  die mittlere Entwicklungsrate bei einer gegebenen Temperatur  $T$  ist. Das Integral wird über eine entsprechend formulierte Temperaturresponsefunktion berechnet. Als Temperaturresponsefunktion über ein biologisch sinnvolles Temperaturintervall bietet sich die O'Neill Funktion an, die den gebräuchlichen linearen Temperatursummenmodellen überlegen ist:



$$f(T) = k_{\max} \cdot \left( \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\text{opt}}} \right)^x \cdot e^{\frac{x \cdot (T - T_{\text{opt}})}{(T_{\max} - T_{\text{opt}})}}$$

mit

$$x = \frac{w^2 \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{40}{w}} \right)^2}{400}$$

Temperatur Responsefunktion (Gl. 7)

und

$$w = (Q_{10} - 1) \cdot (T_{\max} - T_{\text{opt}})$$

mit

$f(T)$	mittlerer Entwicklungsrate bei gegebener Temperatur T
$k_{\max}$	maximale Entwicklungsrate bei optimaler Temperatur
$Q_{10}$	Änderung der Rate bei Änderung der Temperatur um 10°C
$T_{\text{opt}}$	Optimum Temperatur °C
$T_{\max}$	Maximale Temperatur, wenn Entwicklungsprozesse aufhören, °C

### 3.3 Überlebenswahrscheinlichkeiten

Die Wahrscheinlichkeit eines Individuums in die nächste Altersklasse  $i+1$  eines Stadiums zu gelangen läßt sich mit

$$P_{s,i} = \frac{G_s(i+1)}{G_s(i)} \quad (\text{Gl. 8})$$

formulieren. Damit wird berücksichtigt, dass die Erntequote, abhängig vom Pflanztermin, bei 70 bis 95% liegt. Als stetige Verteilungsfunktion  $G_s$  bietet sich die Exponentialverteilung an, was die  $m$  Parameter auf einen Parameter  $\lambda_s$  reduziert. Im allgemeinen variiert  $\lambda_s$  zwischen 0.99 und 0.999, je nach Anzahl der vorgegeben Altersklassen. In der Summe über die Zeit ergeben sich damit die beobachteten Erntequoten.

## 4 Anwendung auf die Dynamik des Blumenkohls

### 4.1 Bestimmung der Anfangsparameter

Auch wenn die Gleichungen eine gewisse Komplexität beinhalten, reduziert sich die Anwendung auf die Identifizierung einiger weniger Parameter. Die Anfangswerte können zum Teil direkt von *BlukoWin* übernommen werden. Für jedes Stadium  $s$  (außer dem Erntestadium) wird eine O'Neill Funktion formuliert, wobei sich für jeder der 5 Sorten folgende Parameter ergeben:

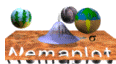


Tabelle 1: Transformation der linearen Responsefunktionen aus BlukoWin in eine O'Neill-Funktion

	Blattbildungsphase				
	Sorte	Q <sub>10</sub>	T <sub>opt</sub> °C	T <sub>max</sub> °C	k (d <sup>-1</sup> )
	1	1.6	26	32	1.05
	2	1.6	26	32	1.05
	3	1.6	26	32	1.05
	4	1.6	26	32	1.05
5	1.6	26	32	1.05	
	Vernalisation				
	Sorte	Q <sub>10</sub>	T <sub>opt</sub> °C	T <sub>max</sub>	k (d <sup>-1</sup> )
	1	2.3	10.5	100*	0.1293
	2	2.5	11	150*	0.1152
	3	2.5	12	500*	0.1100
	4	2.4	11.2	40*	0.1120
5	2.5	11.3	600*	0.1008	
	Kopfbildungsphase				
	Sorte	Q <sub>10</sub>	T <sub>opt</sub> °C	T <sub>max</sub> °C	k (d <sup>-1</sup> )
	1	1.7	25.5	32	14.0
	2	1.7	25.5	32	13.5
	3	1.7	25.5	32	13
	4	1.7	24	32	12
5	1.7	24	32	11	

Für das Stadium Blattbildungsphase oder Jugendphase ergibt sich somit folgender Zusammenhang: Der gepflanzte Blumenkohl kommt mit der zu diesem Zeitpunkt schon realisierten Blattzahl in die erste Altersklasse (z.B. 6 Blätter) des Stadiums „Blatt“ und entwickelt sich mit der angegebenen Blattbildungsrate in Abhängigkeit von der Temperatur bis der kritischer Wert  $b_{crit(Blatt)}$  (Gl. 5) erreicht ist. Laut BlukoWin ist die Entwicklung der Jugendphase abgeschlossen wenn der Blumenkohl folgende Blattzahlen erreicht hat, wobei zusätzlich ein Verhältnis von initiierten zu sichtbaren Blätter in der Form

$$n_{iL} = 1.86 \cdot n_L + 1.24$$

berücksichtigt werden muss.

Tabelle 2: Ermittlung der kritischen Blattzahlen

Sorte	1	2	3	4	5
Blattzahl ( $b_{crit}$ )	12	13.5	16	17	19

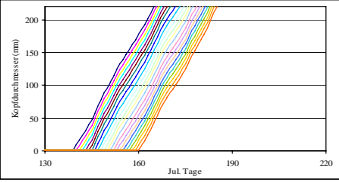
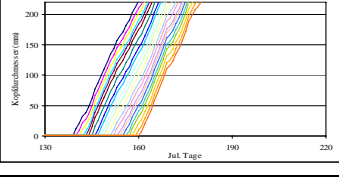
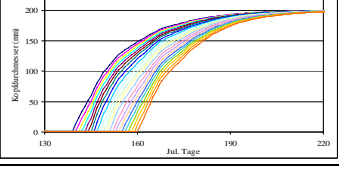
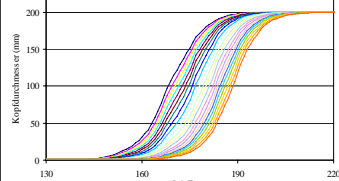
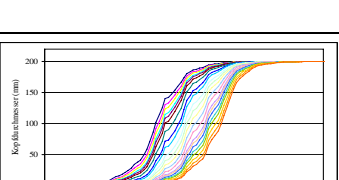
Ist die kritische Blattzahl erreicht, nähert sich Gleichung 5 dem Wert 1 und der entsprechende Anteil der Population geht in die erste Altersklasse der Vernalisationsphase über. Dieser Prozess wiederholt sich für die Vernalisationsphase mit den angegebenen Raten.

#### 4.2 Formulierung der Kopfbildungsphase

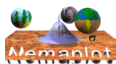
Beim Übergang in das nächste Stadium wird das Kopfbildungswachstum angeschaltet. Damit sind die notwendigen Voraussetzungen für das Testen der Eingangshypothese geschaffen. In diesem Stadium werden jetzt die Neuerungen innerhalb des Lesliemodells eingeführt. Es gilt zu testen, ob das Wachstum des Blumenkohlkopfes bis zur technischen Reife von 180, bzw. 200 mm (ergibt den kritischen Wert  $b_{crit(Kopf)}$  in Gleichung 5) eine lineare oder nicht-lineare Funktion in Abhängigkeit von der Temperatur (als O'Neill-Funktion, Gl. 7) und/oder der Globalstrahlung (in  $MJ/m^2$ ) ist. Folgende Differentialgleichungen lassen sich numerisch lösen, wobei der Anfangswert  $K_{0(t=0)}$  mit 6.5 mm vorgegeben ist. Der Zeitpunkt  $t=0$  errechnet sich aus den Übergangswahrscheinlichkeiten des vorherigen Stadiums des Lesliemodells, d.h. für jede Kohorte von Pflanzen, die in die erste Altersklasse des Stadiums „Kopf“ gelangen, wird eine eigene Differentialgleichung angeschaltet.

Folgende Teilmodelle, als Differentialgleichungen formuliert, wurden getestet:

Tabelle 3: Mögliche Modelle des Kopfwachstums

Nr.	Funktion	Kommentar	Verlauf
1	$\frac{dK}{dt} = f(T)$	lineare Funktion der Temperatur, aber O'Neill-Funktion, entspricht dem original Lesliemodell	
2	$\frac{dK}{dt} = MJ \cdot (1 - e^{-(\phi \cdot Blatt)})$	lineare Funktion, die die abnehmende Lichtausbeute berücksichtigt, Blattzahl ist sortenabhängig	
3	$\frac{dK}{dt} = f(T) \cdot \left(1 - \frac{K}{K_{crit}}\right)$	wie 1, aber abnehmender Zuwachs mit zunehmender Reife, $K_{crit}$ ist die Kopfgröße bei Ernte	
4	$\frac{dK}{dt} = f(T) \cdot K \cdot \left(1 - \frac{K}{K_{crit}}\right)$	logistische (nicht-lineare) Wachstumsfunktion, wobei die intrinsische Wachstumsrate eine Funktion der Temperatur ist	
5	$\frac{dK}{dt} = f(T) \cdot f(MJ) \cdot K \cdot \left(1 - \frac{K}{K_{crit}}\right)$	wie 4, Intrinsische Wachstumsrate ist eine Funktion von Temperatur und Licht (wie 2)	





Das einfachste Modell, welches die Daten adäquat beschreibt, soll verwendet werden.

#### 4.3 Parameteridentifizierung

##### 4.3.1 Stadien Blattbildung und Vernalisation

Das Modell ist zu komplex und die einzelnen Parameter sind hoch korreliert, um direkt anhand der Daten geschätzt werden zu können. Die Parameteridentifizierung erfolgt in 2 Schritten. Bei ausgewählten Betrieben wurden während der Vegetationsperiode Kopfmessungen durchgeführt. Diese Mittelwerte und insbesondere deren Varianzen in Zusammenhang mit den übernommenen Parametern aus BlukoWin ermöglicht eine erste Kalibrierung für die Stadien Blattbildung und Vernalisation anhand der Pflanztermine und gegebenen Temperaturverläufen in 1999. Diese Messungen ergeben die Werte für  $\beta_{\text{Blatt}}$  und  $\beta_{\text{V}}$  aus Gleichung 5. Das Beispiel der Wachstumsfunktion 3 aus Tabelle 2 ist den Messwerten für die Sorten 1 bis 4 gegenübergestellt (Abb. 3). Es ist zu beachten, dass die 1 und letzte Altersklassen (Kurven) jeweils das 99.9% Intervall der Normalverteilung repräsentieren (approximiert durch die verwendete Weibullverteilung). Zusätzlich zu diesen Extremverteilungen sind die absoluten Häufigkeiten in den einzelnen Altersklassenverteilungen dargestellt. Damit sind 2/3 der Parameter kalibriert.

Tabelle 4: Ermittlung der Exponenten aus Gl. 5

Sorte	1	2	3	4	5
$\beta_{\text{Blatt}}$	34	34	34	44	34
$\beta_{\text{V}}$	35	35	35	45	35

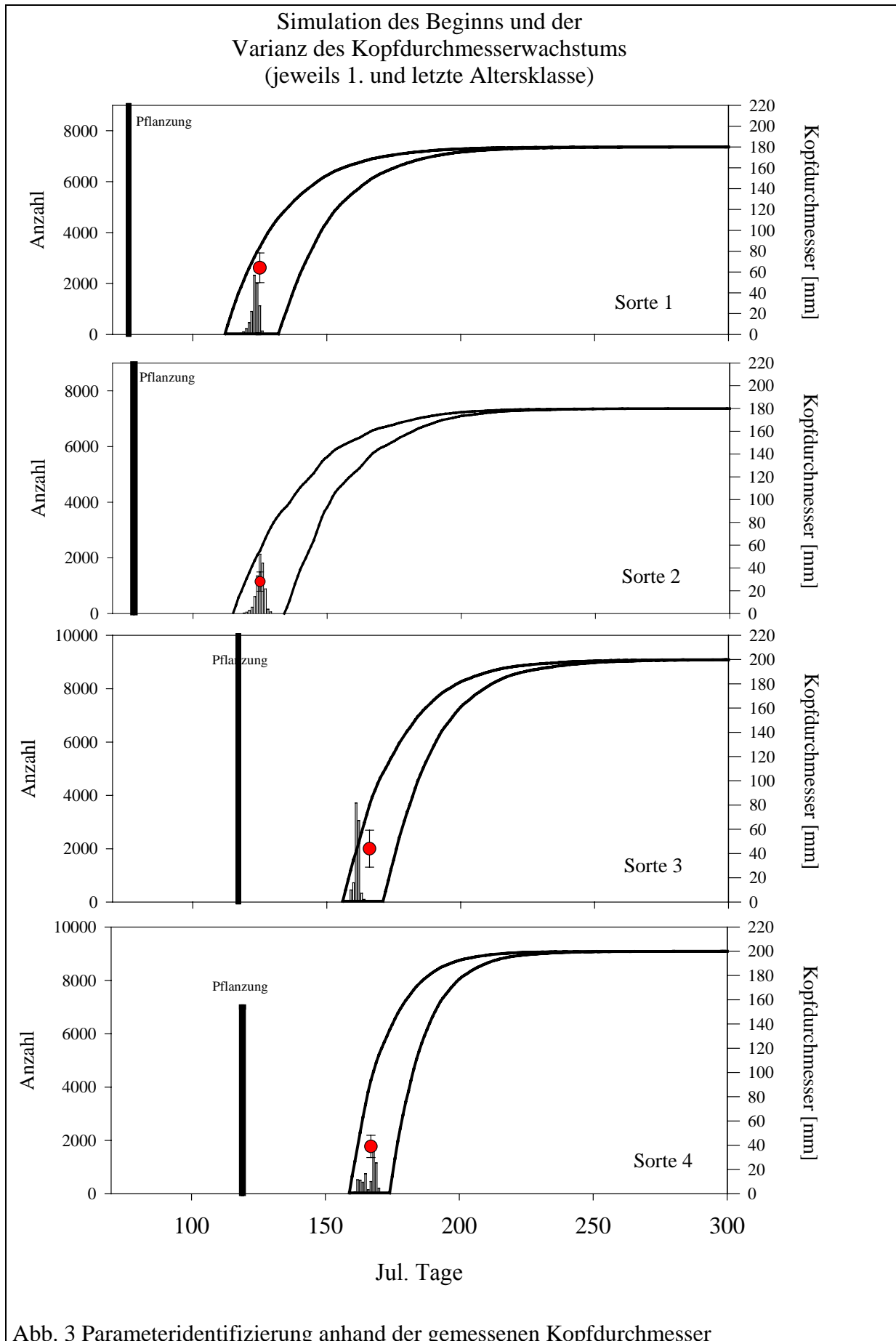


Abb. 3 Parameteridentifizierung anhand der gemessenen Kopfdurchmesser

#### 4.3.2 Kopfwachstum- und Erntestadium

Die Parameter für das Kopfwachstum (e.g. die 4 Parameter von Gleichung 7, sowie der Exponent aus Gleichung 5) wurde durch testen der verschiedenen Modelle aus Tabelle 3 anhand der Witterung, Pflanztermine und Ablieferung simultan getestet. Aber, um das Kopfwachstum zu testen, muss in einer Art Ausschlussverfahren auf mögliche Parameterkombinationen das folgende Stadium „Ernte“ zuerst identifiziert werden. Eine Analyse des Datenmaterials zeigte, dass a) Sonn- Feiertags keine Anlieferung erfolgte (die biologische Entwicklung aber unabhängig davon weiter läuft), und b) an Wochentagen unterschiedliche Anlieferungsverhältnisse zu beobachten waren. Abbildung 4 zeigt die mittleren Anlieferungsverteilungen im Jahresverlauf in 1999, die aber durchaus in den einzelnen Monaten unterschiedlich sein können. Die Verhältnisse lassen sich grob für die Identifizierung der Übergangswahrscheinlichkeiten  $U_{\text{Ernte}}$  übertragen. So sind die Erntequoten Montags kleiner, da Sonntags nicht geerntet wird, auch Samstag steht wahrscheinlich nur ein halber Arbeitstag zur Verfügung.

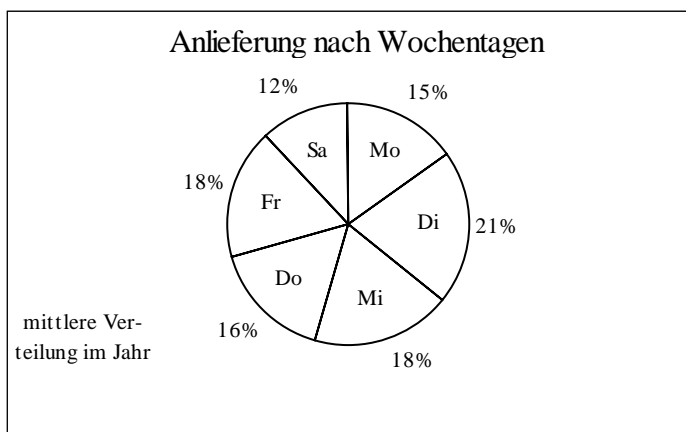


Abb. 4: Verteilung der Anlieferung in 1999

Einen möglichen zusätzlichen Reduzierungsfaktor bezüglich technischer Defizite (z.B. Stand der Erntetechnik) konnte anhand der vorliegenden Daten nicht erkannt werden.

Tabelle 5: Übergangswahrscheinlichkeiten  $U_{\text{Ernte}}$  nach Wochentagen

	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So/Fei
$U_{\text{Ernte},i}$	0.6	1.0	1.0	0.95	1.0	0.6	0.0

Sonstige betriebswirtschaftliche Verhaltensmuster, welche auf der Produzentenebene höchst unterschiedliche Kriterien beinhaltet, sind in dem Parameter  $\beta_{\text{Kopf}}$  zusammengefasst. Die mögliche Verwendung dieses Parameter ist einer der Hauptgründe für die bisher entwickelte Modellkomplexität. Man kann davon ausgehen, dass der Produzent versucht sich anti-zyklisch zu verhalten. Ist die Nachfrage hoch, also eine hoher Preis zu erzielen, werden sich seine Erntebemühungen intensivieren und zusätzliche Kapazitäten werden freigesetzt. Bei sinkender Nachfrage lohnt sich der relativer Mehraufwand weniger oder gar nicht. Abb. 5 verdeutlicht das Verhalten bei unterschiedlich gewählten  $\beta_{\text{Kopf}}$ . Im Fall hoher Preise ergibt sich ein hohes  $\beta_{\text{Kopf}}$ , der Markt wird zugegebenen Zeitpunkt mit höheren Mengen beliefert. Umgekehrt entspricht ein kleines  $\beta_{\text{Kopf}}$  einer gesättigten Marktsituation, die Anlieferung wird weiter gestreut. Logischerweise müßte die Wahl dieses Parameters dem Stadium „Ernte“ zugeordnet werden. Den Ergebnissen vorausgreifend, zeigte sich, das auf eine



Verteilungsfunktion für dieses Stadium verzichtet werden konnte und die verschiedenen  $\beta_{\text{Kopf}}$  einzelnen Sorten zugeordnet werden konnte (Tab. 6).

Tabelle 6: Ermittlung des Exponenten aus Gl. 5 für

Sorte	1	2	3	4	5
$\beta_{\text{Kopf}}$	15.3	25.1	2.4	2.3	25.6

Im Stadium Ernte können auch sonstige Witterungsverhältnisse berücksichtigt werden, z.B. verzögerte Ernte durch zu starke Niederschläge. Diese Details sind aber bei der gegebenen Datenlage momentan nicht zu identifizieren. Es soll in diesem Zusammenhang nur auf mögliche Erweiterungen hingewiesen werden.

## 5 Ergebnisse

Nachdem die beschriebenen Vorgaben fixiert worden sind, wurden die übrigen Modellmöglichkeiten (Tab. 3) inklusive ihrer Parameterkombinationen anhand der Anlieferungsverteilung über alle Betriebe getestet. Dabei zeigte sich im allgemeinen folgendes Problem: Gegen Ende der Vegetationsperiode ist eine deutliche Erhöhung der Anlieferungsmengen zu beobachten, obwohl die klimatischen Bedingungen nicht mehr für dieses Phänomen ausreichen (Abb. 5). Die anhand der Hauptsaison ermittelten Responsefunktionen waren nicht in der Lage, einen derart starken Anstieg der Erntemengen bei kalten Temperaturen und/oder schwachen Lichtverhältnissen nachzuvollziehen. Das Modell zeigte entweder eine zu frühe Ernte oder das Kopfwachstum wurde überhaupt nicht mehr vollendet, weil die Temperaturen zu niedrig waren, bzw. die Lichtverhältnisse nicht ausreichen. Eine spezifische Gewichtung der Okt./Nov.- Periode führte zur fehlerhaften Simulation der Sommermonate. Sowohl die verwendeten Parameter aus BlukoWin als auch die verschiedenen Modelle mit den entsprechenden Responsefunktionen brachten kein zufriedenstellendes Ergebnis. Damit konnte im Rahmen dieses Modells und den gegebenen Daten die Eingangshypothese nicht bestätigt werden. Abweichungen von Modellergebnis und Beobachtungen ließen sich nicht auf ein entsprechendes Modellverhalten in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen zurückführen.

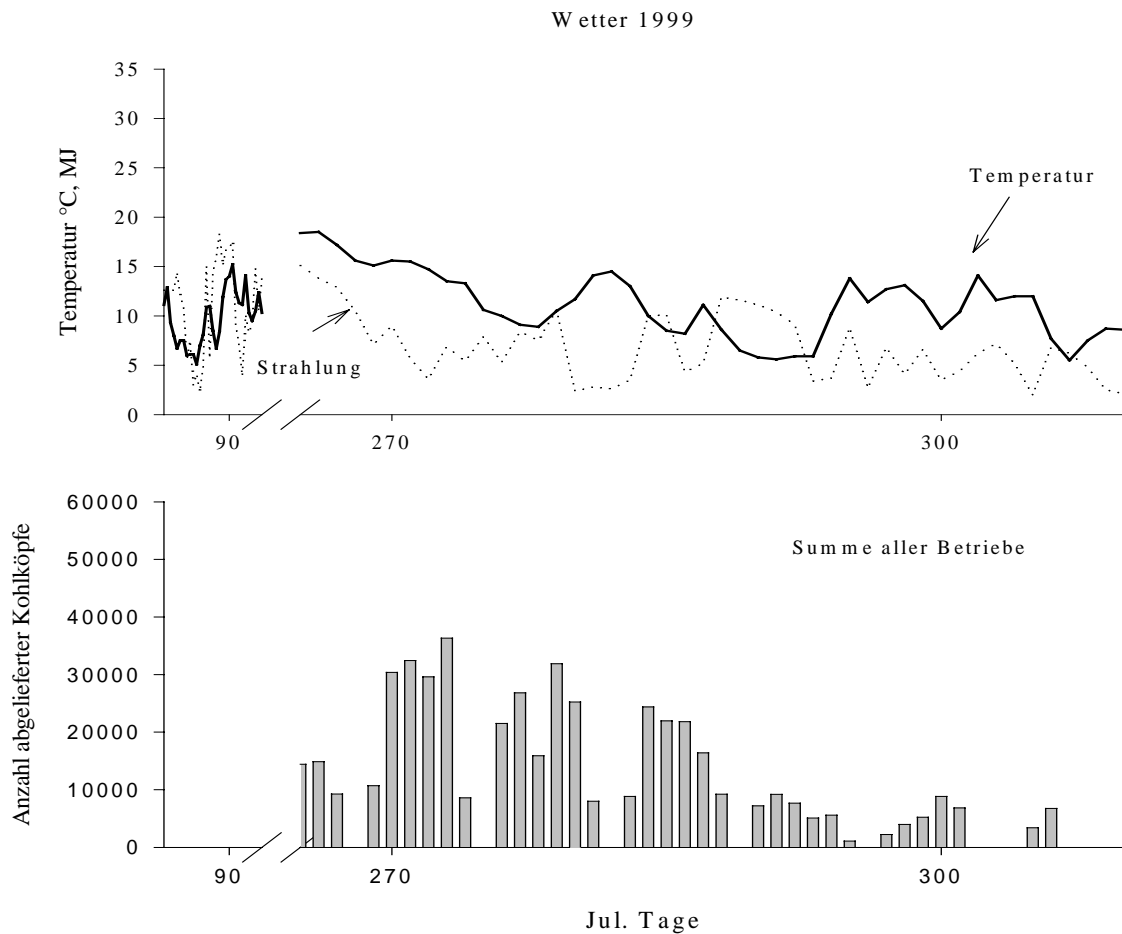


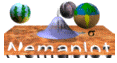
Abb. 5: Gegenüberstellung von Herbstwitterung und Erntequoten

Da die komplexeren Modelle aus Tabelle 3 unter den gegebenen Bedingungen keinen signifikanten Fortschritt erbrachten, wurde im Folgenden das Gesamtmodell anhand des linearen Wachstums in Abhängigkeit von der Temperatur neu kalibriert (Modell 3). Der generelle Vergleich von Modellverhalten und Erntefrequenz in den Herbstmonaten deutete darauf hin, dass einzelne Sorten (insbesondere die häufig vertretenen Sorten 3 und 4) nur sehr schwach auf Änderungen der Temperatur mit entsprechenden Änderungen im Wachstumsverhalten reagieren, d.h. es ist zu vermuten, dass ein entsprechend breites Temperaturplateau existiert, das als optimal für die Wachstumsbedingungen des Kohlkopfes anzusehen ist. Des weiteren zeigte sich, um die späten Erntemengen wenigstens ansatzweise über die Zeit hin zu simulieren, dass das Bedürfnis der Sorte 4 nach kälteren Temperaturen sehr hoch ist. D.h. ist es zu warm, bleibt die Entwicklung in der Vernalisationsphase stecken und der ganze Entwicklungsprozess verzögert sich. Die Re-Kalibrierung erbrachte folgende z.T. gravierende Änderung, die potentiell nur für den Temperaturbereich  $>0^{\circ}\text{C}$  Gültigkeit haben (Tab. 6)



Tabelle 6: Neu kalibrierte Parameter anhand der Witterungsverhältnisse in 1999, Bsp. Sorte 4

	<p><b>Blattbildungsphase</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sorte</th> <th>Q<sub>10</sub></th> <th>T<sub>opt</sub> °C</th> <th>T<sub>max</sub> °C</th> <th>k (d<sup>-1</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1.5</td><td>26</td><td>32</td><td>1.05</td></tr> <tr><td>2</td><td>1.5</td><td>26</td><td>32</td><td>1.05</td></tr> <tr><td>3</td><td>1.4</td><td>26</td><td>32</td><td>0.95</td></tr> <tr><td>4</td><td>1.3</td><td>26</td><td>32</td><td>0.95</td></tr> <tr><td>5</td><td>1.6</td><td>26</td><td>32</td><td>1.05</td></tr> </tbody> </table>	Sorte	Q <sub>10</sub>	T <sub>opt</sub> °C	T <sub>max</sub> °C	k (d <sup>-1</sup> )	1	1.5	26	32	1.05	2	1.5	26	32	1.05	3	1.4	26	32	0.95	4	1.3	26	32	0.95	5	1.6	26	32	1.05
Sorte	Q <sub>10</sub>	T <sub>opt</sub> °C	T <sub>max</sub> °C	k (d <sup>-1</sup> )																											
1	1.5	26	32	1.05																											
2	1.5	26	32	1.05																											
3	1.4	26	32	0.95																											
4	1.3	26	32	0.95																											
5	1.6	26	32	1.05																											
	<p><b>Vernalisation</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sorte</th> <th>Q<sub>10</sub></th> <th>T<sub>opt</sub> °C</th> <th>T<sub>max</sub></th> <th>k (d<sup>-1</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>2.5</td><td>12</td><td>100*</td><td>0.13</td></tr> <tr><td>2</td><td>2.3</td><td>10.5</td><td>150*</td><td>0.1293</td></tr> <tr><td>3</td><td>2.5</td><td>11</td><td>500*</td><td>0.1352</td></tr> <tr><td>4</td><td>1.8</td><td>5.2</td><td>25</td><td>0.1220</td></tr> <tr><td>5</td><td>2.5</td><td>11.3</td><td>600*</td><td>0.1008</td></tr> </tbody> </table>	Sorte	Q <sub>10</sub>	T <sub>opt</sub> °C	T <sub>max</sub>	k (d <sup>-1</sup> )	1	2.5	12	100*	0.13	2	2.3	10.5	150*	0.1293	3	2.5	11	500*	0.1352	4	1.8	5.2	25	0.1220	5	2.5	11.3	600*	0.1008
Sorte	Q <sub>10</sub>	T <sub>opt</sub> °C	T <sub>max</sub>	k (d <sup>-1</sup> )																											
1	2.5	12	100*	0.13																											
2	2.3	10.5	150*	0.1293																											
3	2.5	11	500*	0.1352																											
4	1.8	5.2	25	0.1220																											
5	2.5	11.3	600*	0.1008																											
	<p><b>Kopfbildungsphase</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sorte</th> <th>Q<sub>10</sub></th> <th>T<sub>opt</sub> °C</th> <th>T<sub>max</sub> °C</th> <th>k (d<sup>-1</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1.3</td><td>25.5</td><td>32</td><td>11</td></tr> <tr><td>2</td><td>1.7</td><td>25.5</td><td>32</td><td>12</td></tr> <tr><td>3</td><td>1.7</td><td>24.5</td><td>32</td><td>11</td></tr> <tr><td>4</td><td>1.2</td><td>6</td><td>32</td><td>18</td></tr> <tr><td>5</td><td>1.3</td><td>22</td><td>32</td><td>19</td></tr> </tbody> </table>	Sorte	Q <sub>10</sub>	T <sub>opt</sub> °C	T <sub>max</sub> °C	k (d <sup>-1</sup> )	1	1.3	25.5	32	11	2	1.7	25.5	32	12	3	1.7	24.5	32	11	4	1.2	6	32	18	5	1.3	22	32	19
Sorte	Q <sub>10</sub>	T <sub>opt</sub> °C	T <sub>max</sub> °C	k (d <sup>-1</sup> )																											
1	1.3	25.5	32	11																											
2	1.7	25.5	32	12																											
3	1.7	24.5	32	11																											
4	1.2	6	32	18																											
5	1.3	22	32	19																											



### Alterklassenverteilung am Tag 200

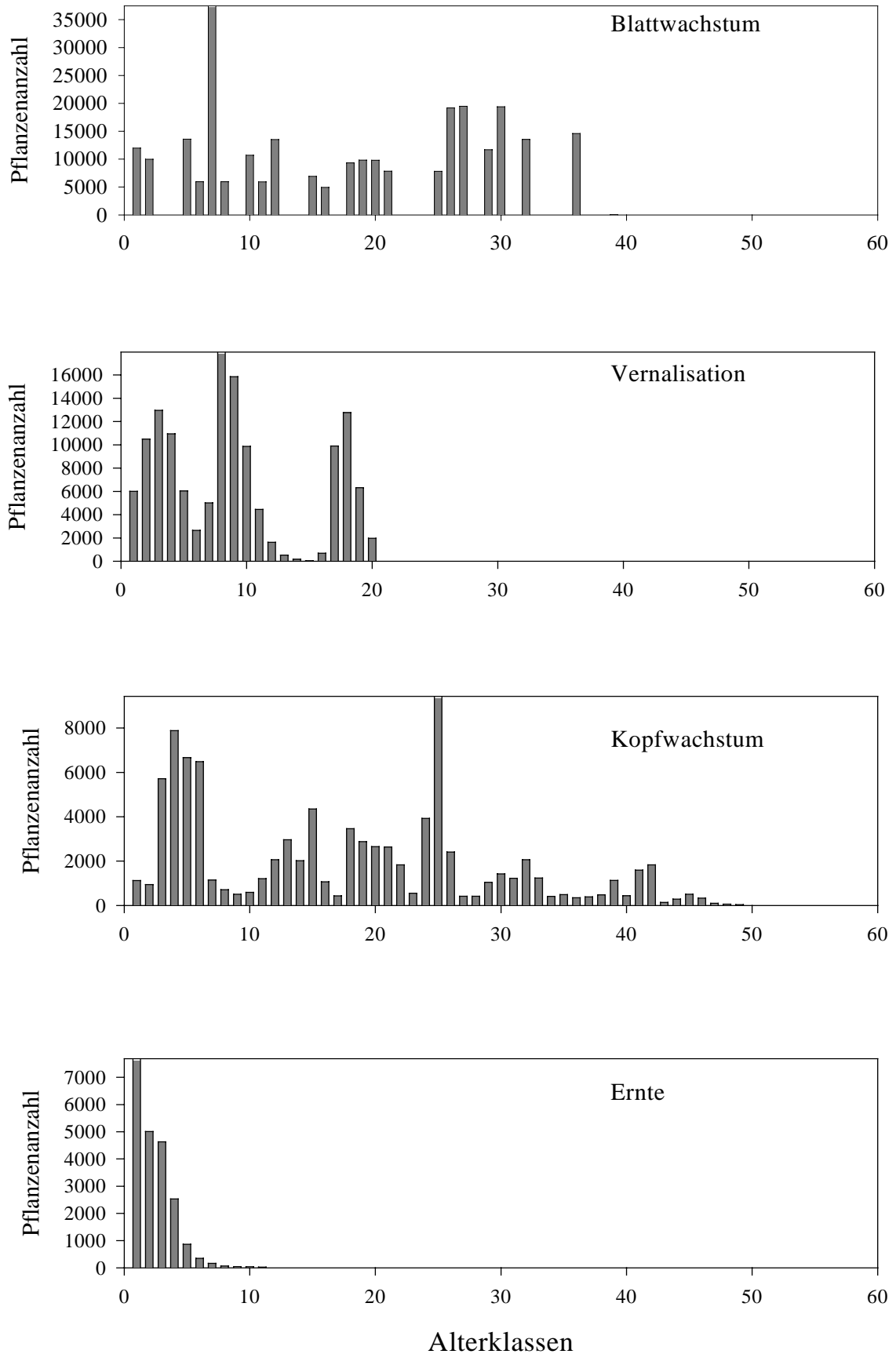


Abb. 6: Altersklassenstruktur des Lesliemodells zu einem gegebenen Zeitpunkt

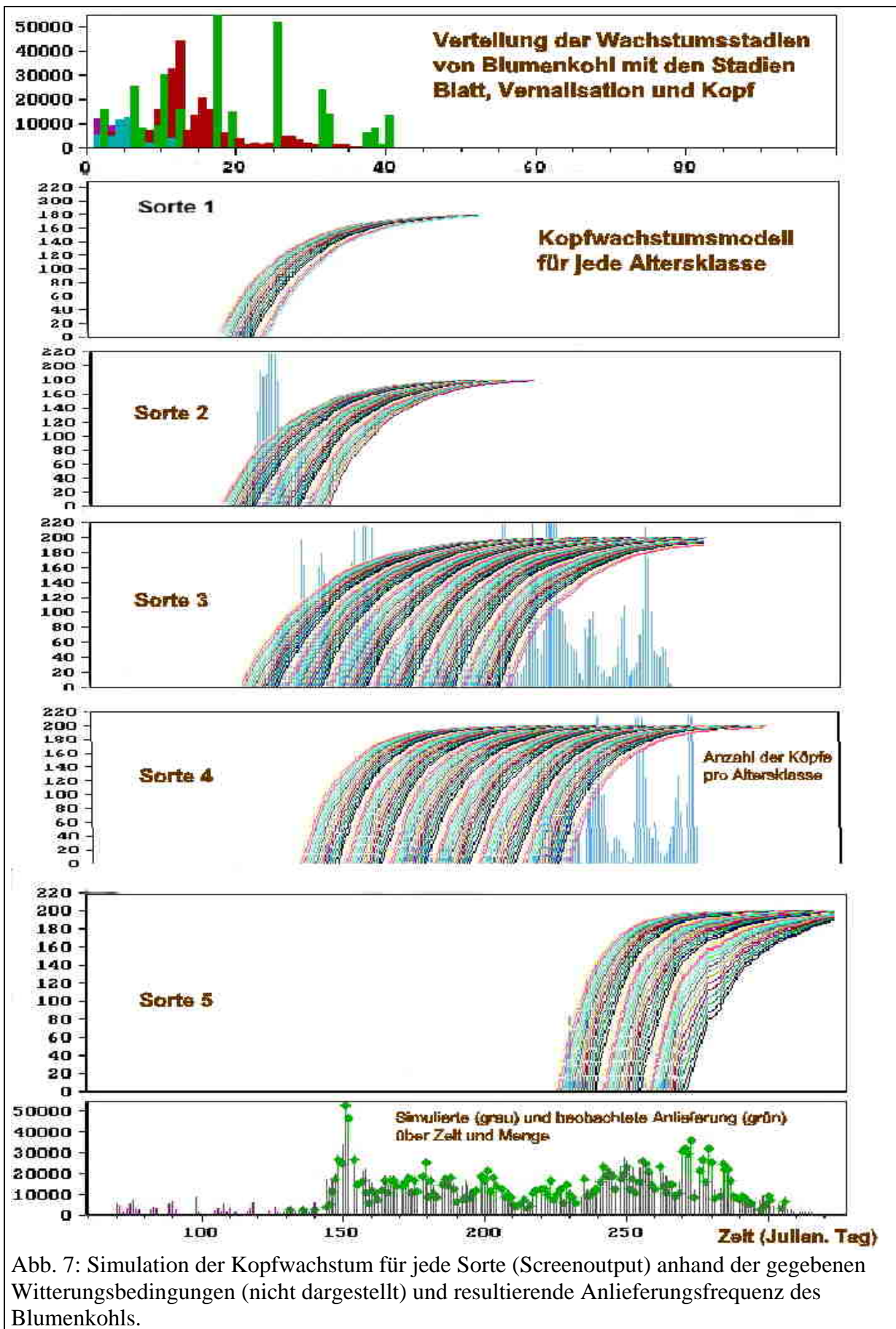


Abb. 7: Simulation der Kopfwachstum für jede Sorte (Screenoutput) anhand der gegebenen Witterungsbedingungen (nicht dargestellt) und resultierende Anlieferungsfrequenz des Blumenkohls.



optimalen Temperaturen, aber in dem Bereich von 5 bis 20 °C ergab sich eine wesentlich höhere Rate für das Blattwachstum. In der Vernalisationsphase ändern sich nur für die Sorte 4 die Parameter. So verschiebt sich die Responsefunktion signifikant nach unten auf der Temperaturskala. Am deutlichsten wird der Unterschied in der Kopfbildungsphase bei Sorte 4. Die Kalibrierung ergab nicht nur eine nahezu temperaturunabhängige Responsefunktion für den Bereich 5 bis 20 °C, sondern auch eine wesentlich höhere Wachstumsrate. Die dargestellte Abnahme unter hohen Temperaturen ist rein spekulativ (Tab. 6). Obwohl es sich bei der hier dargestellten Vorgehensweise um keinen echten Beweis handelt, so resultierte das Ausschlussverfahren von Möglichkeiten in einer Kombination, die große Teile der beobachteten Variabilität wiederholt. Dabei zeigt das Gesamtmodell ein sehr realistisches Verhalten (Abb. 6, 7, 8).

In Abbildung 8 sind die beobachteten den simulierten Anlieferungsfrequenzen gegenübergestellt. Die Spitzen zu Beginn und Ende der Saison werden gut wiederholt, aber in der Periode von 170 bis 230 Tagen entstehen gegenläufige Verläufe. Dieses Ergebnis fokussiert ein weiteres Problem in den Daten. Bisher ist nicht näher auf die Überlebenswahrscheinlichkeiten von einer Altersklasse zur nächsten eingegangen worden (Gl. 8). Im derzeitigen Stand der Modellentwicklung sind die Residuen am kleinsten (d.h. die Abweichung zwischen Beobachtung und Modellergebnis sind minimal), wenn während der Vegetationsperiode keinerlei, bzw. nur sehr geringe Verluste (ca. 5%) auftreten, d.h.  $\lambda_s = 0.999/1.0$ . Diese Voraussetzung ist als unwahrscheinlich anzusehen, da selbst in den Beobachtungsreihen die mittleren Erntequoten nur zwischen 70% für Sorte 1 und 81.4 % für Sorte 4 liegen.

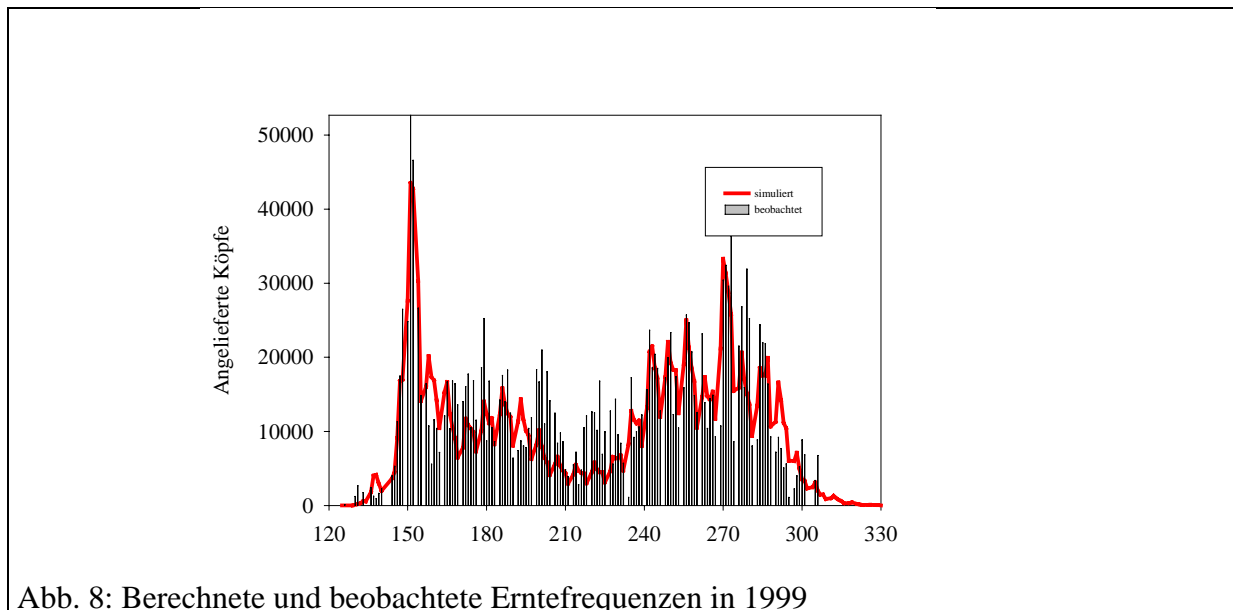


Abb. 8: Berechnete und beobachtete Erntefrequenzen in 1999

Tabelle 7: Ermittlung der Überlebenswahrscheinlichkeitsparameter  $\lambda_s$

Sorte	1	2	3	4	5
mittlere Erntequote, ergibt folgende $\lambda_s$	70%	74.7%	80.4%	81.4%	81.2%
$\lambda_{\text{Blatt}}$	0.994	0.995	0.997	0.997	0.997
$\lambda_v$	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
$\lambda_{\text{Kopf}}$	0.995	0.996	0.996	0.997	0.998
$\lambda_{\text{Ernte}}$	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999



In der Zusammensetzung der täglichen Überlebenswahrscheinlichkeiten über alle Stadien ergeben bei den gegebenen Temperaturbedingungen, (= Entwicklungsdauer) die in Tabelle 7 angegeben Überlebensraten. Tatsächlich wurden von 2.11 Mill. Pflanzungen 1.94 Mill. Köpfe geerntet. Konsequenterweise muss davon ausgegangen werden, dass die Produzenten mehr gepflanzt haben, als angegeben, was nicht nur ein Problem der Menge ist, sondern auch ein Problem des Pflanztermins ist. Beide Angaben müssen als unzuverlässig angesehen werden und erklären die Gegenläufigkeit von Modellergebnis und Anlieferung. In einer nachträglichen Simulation der Ereignisse von 1999 ist zu vermuten, dass die tatsächliche Pflanzzahl wohl eher im Bereich von 2.6 bis 2.7 Mill. Pflanzen gelegen haben könnte. Trotz der punktuellen Abweichungen gelingt es mit dieser Kombination eines diskreten und kontinuierlichen Modellansatzes das sehr komplexe Verhaltensmuster der Anlieferungsfrequenz über die Zeit und die Menge abzubilden.