

Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät
Institut für Gartenbauwissenschaften
16341 Zepernick, Poststraße 18
Jörg Pölitz



Modellierung kausaler Strukturen im Gartenbau - Möglichkeiten und Probleme

Einleitung

Literaturrecherchen ergaben, daß gegenwärtig keine bzw. sehr wenige statistische Modelle existieren, die „Pflanze-Boden-Witterung“ als kausales System betrachten. Diskussionen mit Fachkollegen und aktuelle Entwicklung der Soft- und Hardwarebasis erlauben bei entsprechenden Daten das Aufstellen dieser komplexen Modelle. Im Gemüsebau könnten bekannte Zusammenhänge validiert oder neu postuliert werden. Zugleich können neue Erkenntnisse für den kontrolliert integrierten Gemüsebau gewonnen werden und Simulationen künftige Entwicklungen prüfen.

Heyland (1990), Krug (1986) und Linser (1986) diskutieren ausführlich die Bedeutung von Systemen für die landwirtschaftliche und gärtnerische Produktion. Ganzheitliche Aussagen über Ökosysteme sind jedoch bei einem Verlust von Einzelinformationen nur mittels Systemen möglich.

Kramer und Rudolph (1986) zeigten in einem Schema die Ertragsbildung bei Erdbeere. Zwischen einzelnen Pflanzenmerkmalen wurden Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten berechnet, die pflanzenphysiologische Zusammenhänge zwischen einzelnen Ertragsfaktoren der Pflanze erklären sollen. Unberücksichtigt blieben im Modell Umweltfaktoren einschließlich pflanzenbaulicher Maßnahmen, ebenso scheint der Verzicht auf partielle Koeffizienten problematisch. Das Modell kann nur als theoretisches Gerüst für eine Pfadkoeffizientenanalyse dienen.

Dörfel und Neumann (1972) quantifizierten die Trieb- und Ertragsbildung bei Apfelbäumen durch eine Zerlegung der Korrelationen in Primär- und Sekundärvariablen. Das Verfahren ermöglichte eine Erweiterung der Kenntnisse über die Ertragsbildung bei Apfel.

Dörfel (1975) untersuchte ebenfalls in einem Pfadkoeffizientenmodell das Zusammenwirken von Wachstumsfaktoren. In diesem Wirkungssystem sind N-Gabe, K-Gabe, N-Menge in der Blattmasse, Blattmasse und Knollenertrag bei Kartoffel die Systemvariablen. Im Ergebnis können im Gegensatz zu Regressionskoeffizienten

unmittelbare Vergleiche von Pfadkoeffizienten Hinweise für die unterschiedliche Intensität der Wirkung von Variablen auf andere Variablen liefern. Es wurden Informationen über den Anteil des Effektes einzelner Korrelationen und über die Länge des Einflußweges gewonnen.

Haupt (1981) quantifizierte die Dämpfung von Lärm in Waldbeständen mit systemrelevanten Bestandsparameter. Mit der Methode der Pfadkoeffizienten konnten ökologische Zusammenhänge derart beschrieben werden, daß der Einsatz biologischer Mittel (Wald) zur Lärmbekämpfung optimiert wurde.

Pfadkoeffizientenanalyse - Überblick

Die Pfadkoeffizientenanalyse, auch bekannt unter den Synonymen Kovarianzstrukturmodelle, analysis of linear structural relationship (LISREL) von Jöreskog und Sörbom (1993), equation structural analysis (EQS) von Bentler (1989), pathway analysis oder covariance analysis of linear structural equation (CALIS), nimmt im Bereich der multivariaten statistischen Verfahren eine dominante Stellung ein. Deutlich wird dies am wachsenden Gebrauch dieser Verfahren in sozialwissenschaftlichen und ökonomischen Disziplinen. Einzelne Instrumente für die Approximation von Daten werden zunehmend präzisiert. Es lassen sich u. a. nichtlineare und nichtadditive Effekte sowie Zeitreihen integrieren. Pfadkoeffizientenmodelle gestatten ebenso die Berechnung von explorativen, confirmatorischen und Mehrwegefaktor-, kanonischen Korrelations- sowie multivariaten Regressionsanalysen.

Pfadkoeffizientenanalysen ermöglichen:

1. die Falsifikation komplexer Hypothesen, die kausale Zusammenhänge zwischen Variablen enthalten,
2. eine quantitative Abschätzung des direkten und indirekten Einflusses der Variablen eines Hypothesengeflechtes durch Dekomposition von Korrelationen und durch Pfadkoeffizienten,
3. die Konstruktion und das Prüfen nichtmeßbarer, komplexer Eigenschaften,
4. die unabhängige Ermittlung von Meßfehlern und ungeklärten Varianzen,
5. das Schätzen fehlender Variablen innerhalb eines verifizierten Systems,
6. Simulationen mit veränderten Variablen und
7. den Vergleich von Theorien.

Die Pfadkoeffizientenanalyse wurde von Wright (1934) entwickelt und von Simon (1954) und Blalock (1961) in die Sozialwissenschaften eingeführt. Dörfel (1972) dis-

kutierte das Verfahren für landwirtschaftlichen Probleme im deutschsprachigen Raum. Ausführliche Darstellungen finden sich u. a. bei Jöreskog (1973), Bentler (1980), Hermann (1984), Pfeifer und Schmidt (1987) und Backhausen et. al. (1994).

Mit dem Verfahren wird ein komplexes Netz von Beziehungen zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen analysiert. Die Beziehungen in der graphischen Darstellung werden durch Pfeile angegeben. Jeder Pfeil charakterisiert einen Pfad, dem ein Pfadkoeffizient zugeordnet ist. Die Zahlenwerte sind standardisierte Pfadkoeffizienten; sie geben die relative Bedeutung der Variablen im Modell an. Theoretischer Ausgangspunkt für ein Modell ist die Konstruktion eines auf wissenschaftlich und empirisch begründeten Wissens simplifizierenden Kausalmodells, das eine begründete Anzahl von Variablen aussondert und die Beziehungen zwischen diesen Variablen spezifiziert (Müller 1972).

Grundsätzlich werden folgende Typen von Pfadmodellen unterschieden: rekursive und nichtrekursive Modelle mit latenten und / oder manifesten Variablen. Ein rekursives Modell wird im Gegensatz zu einem nichtrekursiven Modell dadurch charakterisiert, daß keine direkten oder indirekten Rückwirkungen zwischen Variablen vorliegen.

Für die Konstruktion eines Modells werden unterschiedliche Typen von Variablen benutzt. Zunächst wird zwischen exogenen und endogenen Variablen unterschieden. Innerhalb eines Pfadmodells werden unabhängige, d. h. erklärende Merkmale als exogene Variablen bezeichnet. Von ihnen gehen Pfeile aus. Endogene Variablen sind entweder abhängige oder intervenierende Variablen. Der Pfeil weist auf diese Merkmale hin. In einem Modell können endogene Variablen sowohl erklärende als auch erklärte Merkmale sein. Manifeste Variablen sind Merkmale, die direkt gemessen werden. Latente Variablen werden über Indikatormerkmale x-Variablen oder y-Variablen beschrieben. Es sind komplexe, nicht durch eine einzelne Eigenschaft meßbare Merkmale (z. B. Vitalität, Boden, Pflanze, Witterung). X-Variablen sind Indikatoren der unabhängigen latenten Variablen und y-Variablen die Indikatoren der abhängigen latenten Variablen. Weiterhin wird zwischen Residuen der abhängigen latenten Variablen, der y- und x-Variablen unterschieden.

Ein Pfadkoeffizientenmodell besteht nach Anderson und Gerbing (1988) aus einem Struktur-, Meß- und kombiniertem Modell. Im Strukturmodell werden die Beziehungen zwischen den latenten, nicht direkt meßbaren Variablen spezifiziert. Da die latenten exogenen und exogenen Variablen nicht als direkt meßbar angesehen werden, wird ein Meßmodell benötigt. Das Meßmodell entspricht dem Grundmodell der Faktoranalyse, bezeichnet als konfirmative Faktoranalyse. In ihm werden die Beziehungen zwischen latenten und beobachteten Merkmalen definiert. Das kombinierte Modell beinhaltet das Meß- und Strukturmodell und Annahmen über Fehlervarianzen, deren Kovarianzen, Multinormalverteilungen der beobachteten Variablen und die Annahme über das Skalenniveau der beobachteten und latenten Variablen (Bentler, Weeks 1980).

Die Pfadkoeffizientenanalyse gliedert sich in sechs grundlegende Ablaufschritte:

1. Hypothesenbildung,
2. Erstellung des Pfaddiagramms,
3. Spezifikation der Modellstruktur in Gleichungssystemen,
4. Identifikation der Modellstruktur,
5. Parameterschätzung und
6. Beurteilung der Schätzergebnisse anhand statistischer Kennziffern und empirischen Erfahrungen.

Nach Hermann (1984) gibt es kein alternatives statistisches Verfahren zur Pfadkoeffizientenanalyse, wenn nichtrekursive Modelle oder Modelle mit latenten Variablen zugrunde liegen. Kanonische Korrelation, allgemeines lineares Modell mit ihren Subsystemen Diskriminanz-, multiple Regressions- und Varianzanalyse sind nur bedingt für die Aufklärung von Modellen geeignet. Der Schwerpunkt der kanonischen Korrelationsanalyse liegt im Suchen von Zusammenhängen. Eine a-priori Zuordnung von Variablen zu einzelnen Faktoren kann nicht wie bei Pfadkoeffizientenmodellen vorgegeben werden.

Arithmetik

Für Pfadmodelle existieren in SAS 6.11 verschiedene Schätzverfahren:

1. GLS (generalized least square) Kleinste-Quadrat-Schätzung,
2. LSGLS (unweighted least square mit folgender GLS) ungewichtete Kleinste-

Quadrat-Schätzung,

3. LSML (unweighted least square mit folgender Maximum-Likelihood Normalverteilung),
4. ML (Maximum-Likelihood Normalverteilung),
5. ULS (unweighted least square),
6. WLS/ADF (weighted least square / Brown's asymptotic distribution free estimation),
7. DWLS (diagonally weighted least square) und
8. LSWLS (unweighted least square mit folgender weighted least square).

Der Ausgangspunkt für alle Schätzverfahren ist ein Strukturgleichungssystem (Hermann 1984). Für ein n-Variablen Modell mit einer abhängigen Variablen lautet es:

$$x_n = b_{n1}x_1 + b_{n2}x_2 + \dots + b_{n,n-1}x_{n-1} + c + R \quad \begin{array}{l} c - \text{Konstante} \\ R - \text{Residuum.} \end{array} \quad (1)$$

Die Matrix der Gleichung (1) besitzt folgende Schreibweise:

$$\begin{pmatrix} x_{1n} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_{kn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1, n-1} & 1 \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \\ x_{k1} & \dots & \dots & x_{k, n-1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_{n1} \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{n, n-1} \\ c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_k \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$x_n = x \quad b \quad + \quad R$$

Werden in Strukturgleichung (1) für rekursive Modelle nach dem Simon-Blalock Verfahren (Hermann 1984) die Variablen x_i durch ihre standardisierte Form (Mittelwert = 0, Standardabweichung = 1) ersetzt, beträgt die Konstante $c = 0$. Die Parameter geben in diesem Fall die relative Bedeutung der standardisierten Variablen im Modell an und werden, zur Unterscheidung eines Modells mit unstandardisierten Variablen, mit p_{ij} bezeichnet.

$$z_n = p_{n1}z_1 + p_{n2}z_2 + \dots + p_{n,n-1}z_{n-1} + R \quad (3).$$

Nach Multiplikation der Gleichung (3) mit jeder prädeterminierten Variablen, also mit z_1, \dots, z_{n-1} besitzt das Gleichungssystem (4) n-1 Gleichungen:

$$\begin{aligned} z_n^* z_1 &= p_{n1}^* z_1^* z_1 + \dots + p_{n,n-1}^* z_{n-1}^* z_1 + R^* z_1 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ z_n^* z_{n-1} &= p_{n1}^* z_1^* z_{n-1} + \dots + p_{n,n-1}^* z_{n-1}^* z_{n-1} + R^* z_{n-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Die Erwartungswerte jedes Terms jeder Gleichung vereinfachen diese, denn der Erwartungswert des Produktes zweier standardisierter Variablen ist identisch mit dem Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten zwischen diesen Variablen. Die zusätzliche Annahme, daß die Korrelation zwischen den prädeterminierten Variablen und dem Residuum Null ist, ergibt die r-Gleichungen:

$$r_{n1} = p_{n1} * r_{11} + \dots + p_{n,n-1} * r_{n-1,1}$$

(5)

⋮
⋮

$$r_{n,n-1} = p_{n1} * r_{1,n-1} + \dots + p_{n,n-1} * r_{n-1,n-1}$$

(r_{ij} ist Korrelation zwischen z_i und z_j).

Nach den Definitionen

$$r = (r_{n,i})_{1 \leq i \leq n-1}^T \quad R = (r_{i,j})_{1 \leq i,j \leq n-1} \quad p = (p_{n,i})_{1 \leq i \leq n-1}^T$$

vereinfacht sich das r-Gleichungssystem in

$$r = Rp \tag{6}$$

Existiert die inverse Matrix (Spalten sind linear unabhängig, d. h. keine der unabhängigen Variablen darf eine Linearkombination der anderen unabhängigen Variablen sein.) von R, ist die Lösung der Parameterschätzung

$$p = R^{-1}r. \tag{7}$$

Bei nichtrekursiven Verfahren existieren zwischen Residuen und prädeterminierten Variablen Korrelationen. Sie erfordern eine abweichende Berechnung der Pfadkoeffizienten nach einer zweistufigen Methode der kleinsten Quadratschätzung. In der ersten Stufe werden alle endogenen Variablen eines Modells mittels einer multiplen Regression vorhergesagt, wobei alle exogenen Variablen als unabhängige Variablen in die multiple Regression eingehen. In der zweiten Stufe werden die endogenen Variablen durch ihre Vorhersagewerte ersetzt und das modifizierte Modell erfüllt somit die Bedingung der Unkorreliertheit zwischen Residuen und prädeterminierten Variablen. Die Parameter werden nach der Kleinsten-Quadrat-Methode geschätzt. Nachteilig können sich nicht berücksichtigte Interkorrelationen zwischen Residuen verschiedener Strukturgleichungen auswirken (Sandners 1980). In diesem Fall wird

die Maximum-Likelihood-Methode angewandt (Jöreskog 1973). Mit diesem Verfahren werden ebenso Modelle mit latenten Variablen gerechnet.

Material

Erste Untersuchungen zur Anwendung von Pfadkoeffizientenmodellen im Gemüsebau beruhen auf Daten eines Gefäßversuch über die Düngung von feldüberwinternem Porree (*Allium porrum* L.) im Fachgebiet Gemüsebau, Zepernick bei Berlin. Tab 1 zeigt die genutzten Merkmale / Merkmalsgruppen und deren Statistiken.

Tab 1: Merkmale und Statistik von *Allium porrum* L am Standort Zepernick

Merkmalsgruppe	Mittelwert	Standardabweichung	Schiefe	Exzeß
Pflanze-Habitus				
Feldertrag FE EPM [g] (EPM = Einzelpflanzenmasse)	264,6	89,4	-0,06	-0,85
Marktertrag ME EPM [g]	157,4	55,4	-0,09	-0,93
Schaftlänge SL [cm]	14,5	1,5	-0,23	-0,72
Schaftquerschnitt Sq [cm]	2,9	0,4	-0,50	-0,66
Witterung				
T _x Summe [°C]	551,5	265,1	-0,71	-0,68
T _{max} Summe [°C]	770,3	373,8	-0,59	-0,76
T _{min} Summe [°C]	362,8	174,9	-0,85	-0,64
Niederschlag ND [mm]	1,2	1,5	1,30	0,74
Sonnenstrahlung SSS _{Summe} [h]	266,6	124,9	-0,57	-0,54
rel. Luftfeuchte LF [%]	73,4	11,3	-0,02	-0,75
Pflanze-Nährstoffe				
N [mg/100g TM]	3,1	0,2	1,10	1,81
P [mg/100g TM]	0,37	0,02	0,49	1,71
K [mg/100g TM]	3,2	0,3	-0,60	1,61
Mg [mg/100g TM]	0,16	0,01	0,36	3,70
Pflanze-Photopigmente				
Chlorophyll a [mg/100g FM]	11,9	3,0	0,00	-1,01
Chlorophyll b [mg/100g FM]	9,1	2,3	0,15	-0,20
Xanthophyll, Carotenoide XC [mg/100g FM]	1,6	0,5	0,87	0,40
Boden-Herbst				
N _{an} [mg/100 g Boden]	3,0	2,6	1,45	0,73
K laktl. [mg/100 g Boden]	5,0	4,3	3,02	13,71
P laktl. [mg/100 g Boden]	42,3	9,2	2,81	12,76
Mg [mg/100 g Boden]	8,2	1,2	-1,34	4,95
N _{ges.} [mg/100 g Boden]	136,3	17,5	-0,73	0,37
K _{ges.} [mg/100 g Boden]	1030,8	71,0	1,96	4,95
pH _{KCL}	6,4	0,2	0,02	1,61
Boden-Frühjahr				
N _{an} [mg/100 g Boden]	1,5	0,8	1,67	3,17
K laktl. [mg/100 g Boden]	2,9	3,1	0,95	0,23
P laktl. [mg/100 g Boden]	37,9	5,7	0,11	0,33
Mg [mg/100 g Boden]	4,1	1,3	-0,27	-0,86
N _{ges.} [mg/100 g Boden]	117,7	22,5	0,28	-0,30
K _{ges.} [mg/100 g Boden]	1057,0	40,9	0,48	-0,58
pH _{KCL}	6,4	0,2	-1,47	2,43
Düngung				
N [g/m ²]	181,8	141,9	0,13	-1,45
K [g/m ²]	154,5	82,0	-0,41	-0,94
Mg [g/m ²]	23,3	19,0	0,27	-1,41

Methodik

Die Berechnungen wurden auf einem Pentium ohne FPU-Fehler mit SAS 6.11, proc CALIS durchgeführt. Das Modell wurde mit LINEQS, einer two-stage least square und anschließenden Maximum-Likelihood-Schätzung unter Verwendung der Newton-Raphson-Minimierung berechnet. Zuvor wurden nach Hermann (1984) robustifizierte Korrelationskoeffizienten $r^*K = \sin(1/2\pi\tau)$ geschätzt. r^*K eignet sich besonders für Daten mit gestörter Multinormalverteilung. Die Klimatelemente der Witterung wurden nach Summierung auf sieben Tage verdichtet.

Ergebnisse

Im theoretischen Modell für eine konfirmatorische Faktoranalyse werden manifeste und latente Merkmale zwischen allen Verbindungen identifiziert und gewichtet (Abb. 1). Eine hohe Ladung weisen im latenten Merkmal Boden-Herbst BH N_{an} , Boden-Frühjahr BF N_{ges} , Düngung Dg N, Witterung W T_{maxS} , Pflanze P ME EPM, Photopigmente Chl Chl b, Pflanzennährstoffe P_{Nst} P auf (Abb. 1). Sie werden in der Berechnung im kombinierten Meß- und Strukturmodell mit 1 gewichtet.

Anschließend wird das theoretische Modell der Strukturanalyse (Abb. 2) beruhend auf vorhandenem und empirischem Wissen spezifiziert. Gesucht werden generalisierende, latente Merkmale für die Witterung W, den Boden B und die Pflanze P. Zwischen ihnen und dem Boden im Herbst BH und Frühjahr BF, dem Photopigmentgehalt Chl und Nährstoffstatus der Pflanze P_{Nst} sollen im Modell Pfadkoeffizienten geschätzt werden. Pflanzen werden durch diese latenten Merkmale in Wachstum und Entwicklung determiniert. Beziehungen zwischen Boden im Herbst / Frühjahr BH/BF und Düngung Dg, Nährstoffgehalt der Pflanze P_{Nst} sowie Nährstoffgehalt der Pflanze P_{Nst} und Photopigmente Chl charakterisieren Korrelationen. Weitere Verbindungen erscheinen nicht sinnvoll. Zusätzlich werden Bestimmtheitsmaße, Residuen und Ladungen geschätzt.

Im kombinierten Meß- und Strukturmodell (Abb. 3) wurden beruhend auf empirischem Wissen sinnvoll geschätzte Pfadkoeffizienten und Korrelationen gefunden. Demnach werden hoch erklärte latente Merkmale für Witterung W, Pflanze P und Boden B ermittelt. Der Boden B beeinflusst mit einem standardisiertem Pfadkoeffizienten $P=0,96$ die Pflanze P am stärkstem. Es ist das höchste Maß im Modell. Das Merkmal

Boden B wird deutlich vom Zustand des Bodens im Herbst BH bestimmt. Witterung W, Photopigmentgehalt Chl und Nährstoffgehalt der Pflanze P_{NST} beeinflussen das Wachstum der Gemüsepflanze Porree in geringerem Umfang. Die Beziehungen zwischen den übrigen Merkmalskomplexen erklären gesicherte Korrelationen. Sie bestätigen bisher bekannte Erkenntnisse. Mehrere hoch gewichtete Ladungen in den untersuchten Merkmalskomplexen weisen auf deren Bedeutung für eine hohe Massebildung (FE EPM, ME EPM) bei Porree hin. Problematisch erscheinen niedrige Bestimmtheitsmaße und hohe Residuen bei verschiedenen gemessenen Merkmalen. Sie können nicht erfaßte Drittvariablen oder Verletzungen der statistischen Annahmen (Tab. 1) andeuten.

Abschließend wird die Dekomposition der Korrelationen in totaler, direkter und indirekter Effekt geschätzt. Beispielgebend zeigt Tab 2 indirekte Effekte von exogenen Variablen auf die endogene Variable Pflanze P mit ihren Meßvariablen. Bestätigung findet die Aussage, daß der Boden im Herbst BH die Gemüsepflanze in der Massebildung evident beeinflusst. Der Ertrag wird bei Winterporree vom Schaftquerschnitt Sq der Porreestange, weniger von der Schaftlänge SL bestimmt.

Tab. 2: Indirekte Effekte von exogenen auf endogene Variablen

Merkmal	P_{NST}	Chl	B_H	B_F	Dg	P	B	W
Pflanze P			1,08	-0,12				0,12
Feldertrag FE EPM	0,13	0,33	1,05	-0,12			0,58	-0,07
Marktertrag ME EPM	0,13	0,34	1,08	-0,12			0,59	-0,07
Schaftlänge SL	0,09	0,23	0,71	-0,08			0,39	0,05
Schaftquerschnitt Sq	0,11	0,30	0,94	-0,11			0,52	-0,06

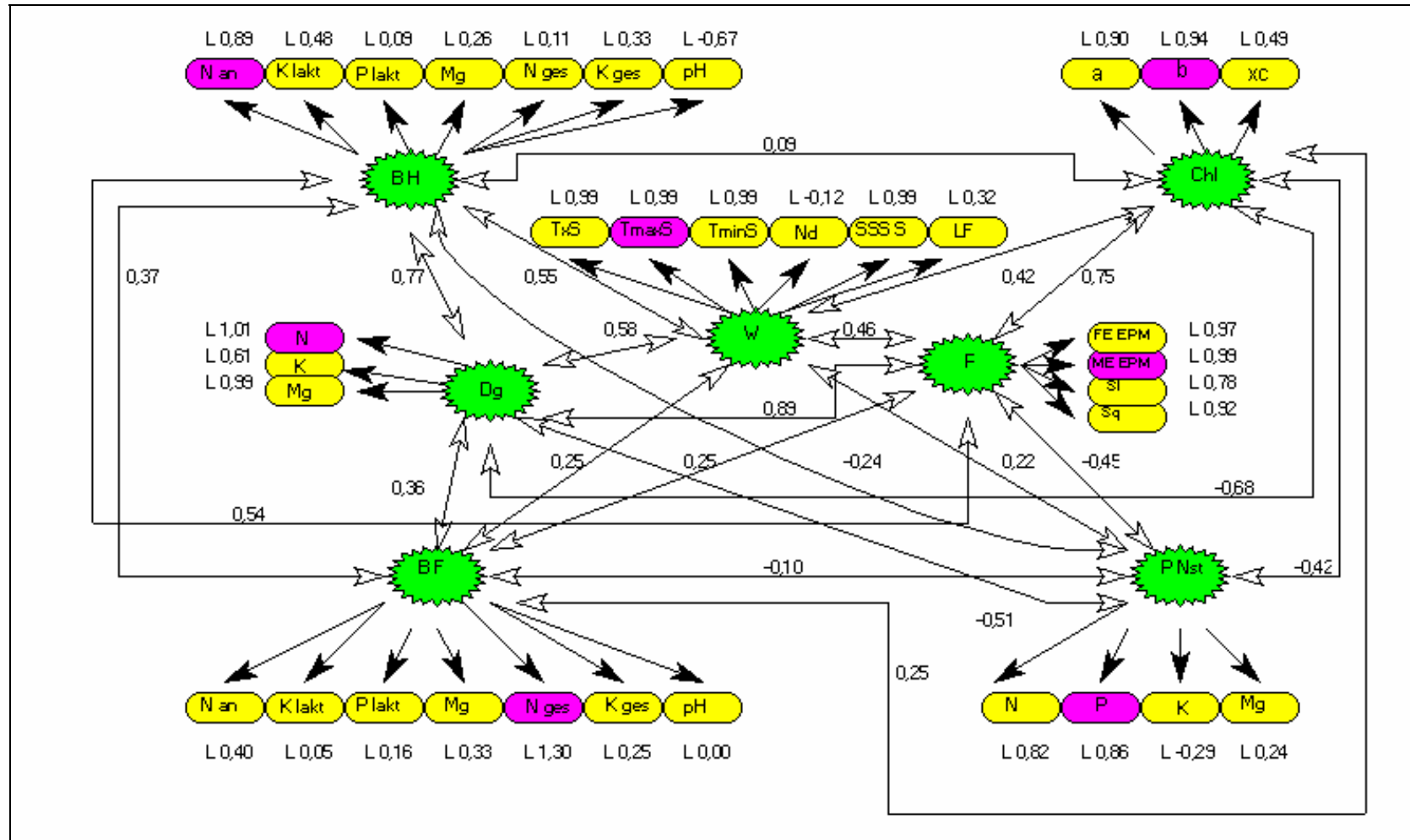
Schlußfolgerungen

Strukturgleichungsmodelle können in den Gartenbauwissenschaften genutzt werden für:

1. die Beschreibung des Ökosystems „Pflanze, Boden und Witterung“ und darauf beruhender Schlußfolgerungen zum Eingriff in das System sowie für Simulationen und weiterführende Experimente,
2. die Schätzung kausaler Abhängigkeiten zwischen Merkmalen und Merkmalsbereichen (Dekomposition von Korrelationen) in nichtkausale Komponenten und kausale Komponenten (direkter, indirekter, totaler Effekt),
3. Beschreibung latenter Merkmale und
4. Schätzung des Meßfehlers für Meßfehler- und Drittvariablen.

Die praktische Anwendung der Pfadkoeffizientenanalyse bereitet aufgrund ihrer statistischen Voraussetzungen häufig Probleme bei:

1. Datenqualität, Stichprobengröße,
2. Linearität,
3. Additivität,
4. Nichtkorrelation des Residuums mit den prädeterminierten Variablen,
5. Lineare Unabhängigkeit der unabhängigen Variablen,
6. Fehlerfreie Messung der unabhängigen Variablen und
7. Multinormalverteilung der manifesten Variablen.

Abb. 1: Meßmodell mit manifesten und latenten Merkmalen für Boden, Witterung und Pflanze bei *Allium porrum* L.

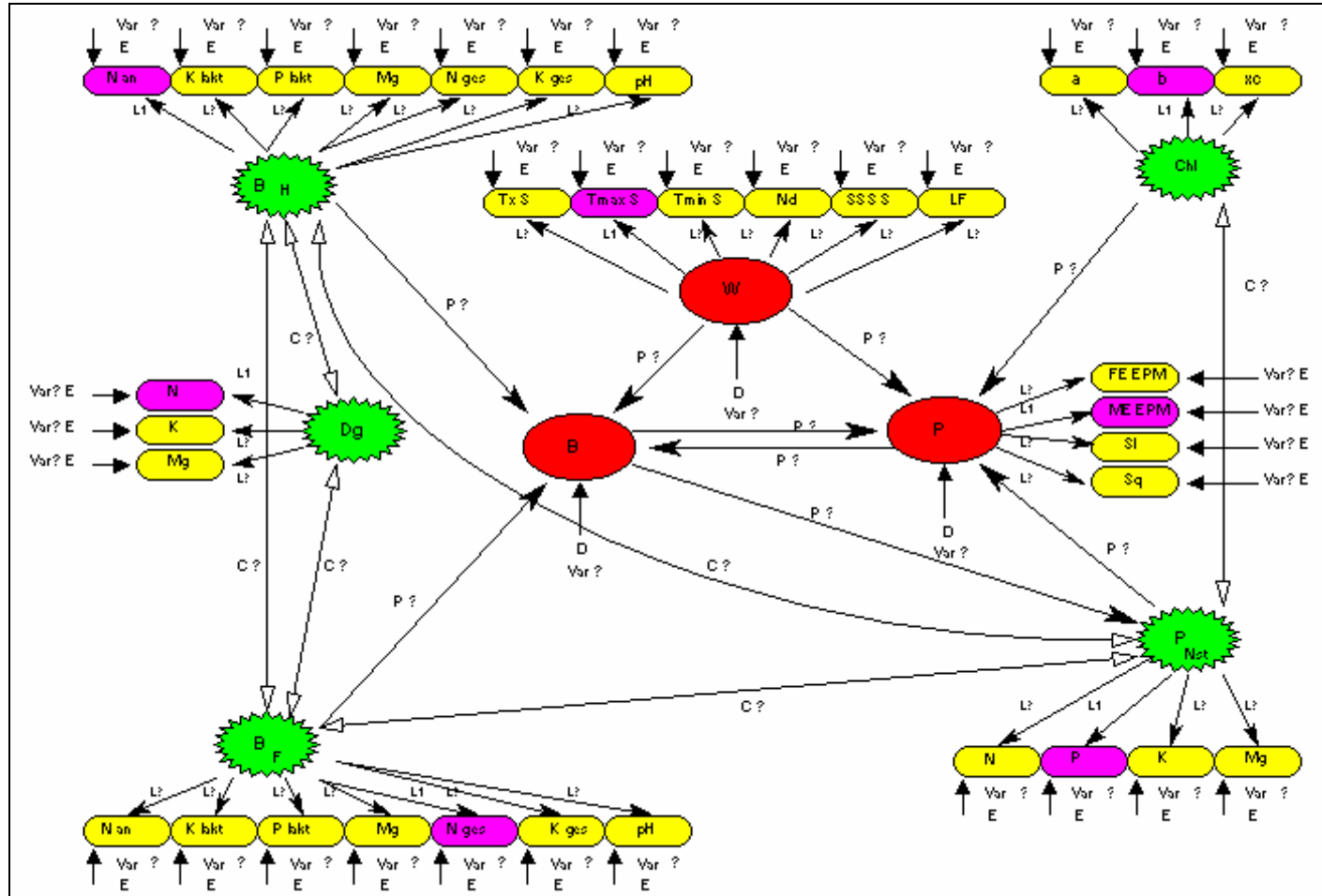
latente Merkmale (rund-eckig): applizierte Düngung (Dg), Boden Herbst (BH), Boden Frühjahr (BF), Nährstoffgehalt Pflanze (P_{Nst}), Photopigmentgehalt (Chi)

manifeste Merkmale (eckig)

manifeste Markervariablen (dunkelgrau): höchste Ladung im Merkmalsbereich

L: Ladung; Korrelation an Doppelpfeilen

Abb. 2: Theoretisches Modell für eine kausale Strukturanalyse mit latenten Merkmalen zur Identifizierung aller Parameter für Boden, Witterung und Pflanze bei *Allium porrum* L.



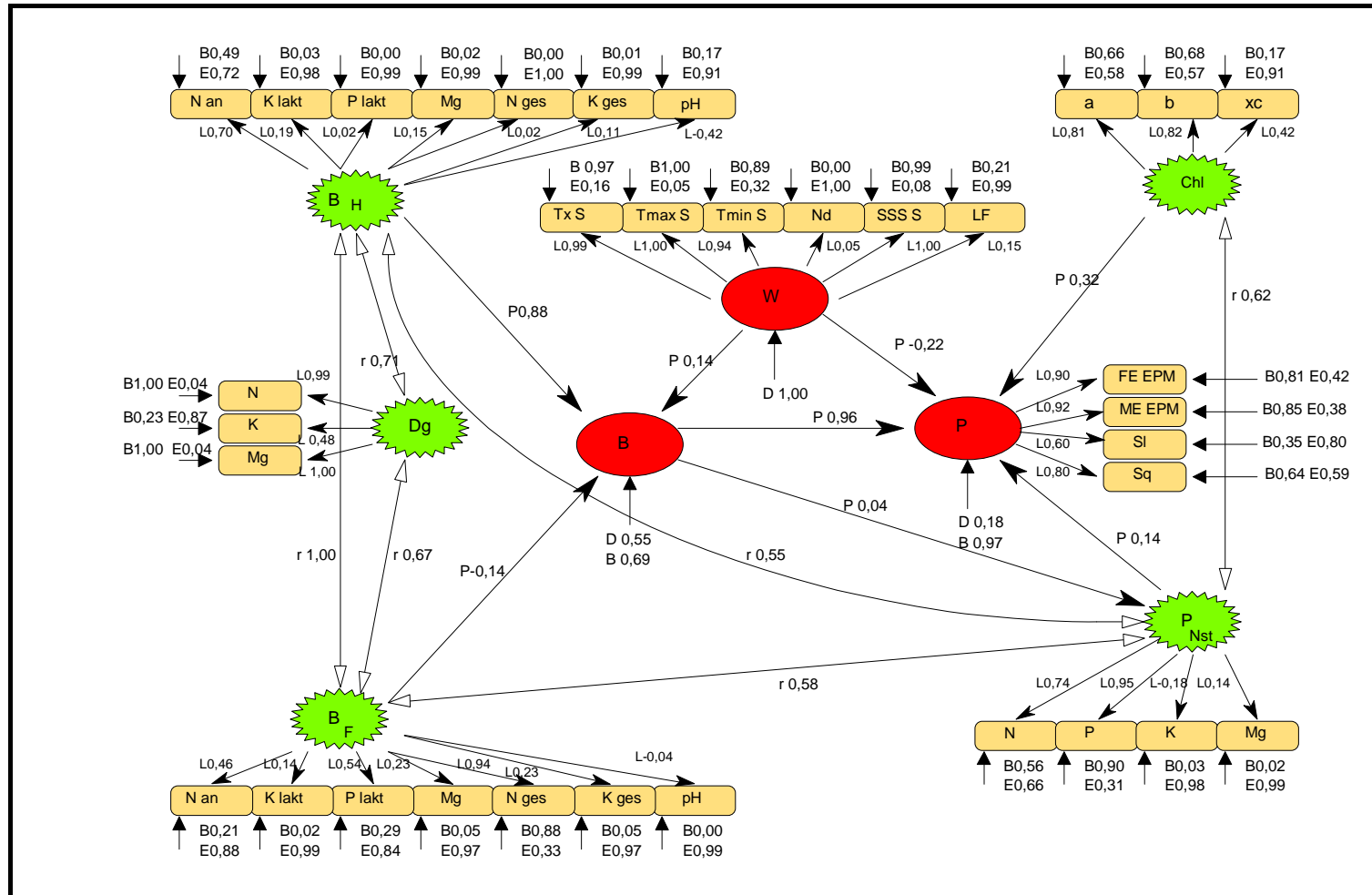
latente endogene Merkmale (oval): Boden (B), Witterung (W), Pflanze (P)

latente exogene Merkmale (rund-eckig): applizierte Düngung (Dg), Boden Herbst (BH), Boden Frühjahr (BF), Nährstoffgehalt Pflanze P_{Nst} , Photopigmentgehalt (Ch)

manifeste Merkmale (eckig); manifeste Markervariable (dunkelgrau): höchste Ladung im Merkmalsbereich

L: Ladung; C: Kovarianz; P: Pfadkoeffizienten; D: Disturbance (Residuen der latenten Merkmale); Var: Varianz; E: Residuen der manifesten Merkmale

Abb. 3: Kombiniertes Meß- und Strukturmodell mit standardisierten Merkmalen für Boden, Witterung und Pflanze bei *Allium porrum* L.



latente endogene Merkmale (oval): Boden (B), Witterung (W), Pflanze (P)
 latente exogene Merkmale (rund-eckig): applizierte Düngung (Dg), Boden Herbst (BH), Boden Frühjahr (BF), Nährstoffgehalt Pflanze (P_{Nst}), Photopigmentgehalt (Chi)
 manifeste Merkmale (eckig); L: Ladung; r: Korrelation; P: Pfadkoeffizienten; D: Disturbance (Residuen der latenten Merkmale); B: Bestimmtheitsmaß; E: Residuen der manifesten Merkmale

Literatur

- Anderson, J. C.; Gerbing, D. W.: Structural equation modeling in practice.- Psych. Bull. 103 (1988), 411-423
- Backhausen et. al.: Multivariate Analysemethoden.- 7. Aufl., Berlin, Heidelberg,...- 1994
- Bentler, P.: Multivariate Analysis with latent Variables: Causal Modeling.- Ann. Rec. Psychol. 31 (1980) 419-456
- Bentler, P.: EQS structural equations program.- Los Angeles.- 1989
- Bentler, P., Weeks, D. G.: Linear Structural Equations with latent Variables.- Psychom. 45 (1980) 3
- Blalock, H. M.: Causal Interferences in Nonexperimental Research.- Chapel Hill.- 1961
- Dörfel, H.: Pfadkoeffizienten und Strukturmodelle.- Biometr. Z. 13 (1972), 12-26
- Haupt, R.: Die Anwendung der Pfadkoeffizientenmethode bei der Ermittlung der für die Lärmdämpfung in Waldbeständen relevanten Bestandsparameter.- In: Unger, K.; Stöcker, G.: Biophysikalische Ökologie und Ökosystemforschung.- Berlin.- 1981
- Hermann, D.: Ausgewählte Probleme bei der Anwendung der Pfadanalyse. Frankfurt, Bern,- 1984
- Heyland, K.-U.: Integrierte Pflanzenproduktion, System und Organisation.- Stuttgart.- 1990
- Kramer, S.; Rudolph, V.: Der Einfluß ökologischer Faktoren in verschiedenen Phänophasen auf die Ertragsbildung der Erdbeere.- Wiss. Z. HUB.-35 (1986) 6.- Berlin
- Krug, H.: Gemüseproduktion.- Berlin, Hamburg.- 1986
- Linser, H.: System und Produkt, Faktoren der pflanzlichen Ertragsbildung.- Berlin, Hamburg.- 1984
- Müller, W.: Bildung und Mobilitätsprozeß - eine Anwendung der Pfadanalyse.- Z. Soziol. 1(1972) 65-84
- Jöreskog, K. G.: A General Method for Estimating a Linear Structural Equation System.- In: Goldberger, A. S.; Duncan, O. D.: Structural Equation in the Social Sciences.- New York.- 1973, 85-112
- Jöreskog, K. G.; Sörbom, D.: LISREL 8 User's Reference Guide.- Chicago.- 1993
- Pfeifer, A.; Schmidt, P.: Die Analyse komplexer Strukturgleichungsmodelle, Stuttgart.- 1987
- Sandners, D.: Path Analysis - Causal Modeling, Quality and Quantity 14 (1980) 181-204
- Simon, H. A.: Spurious Correlation: A Causal Interpretation.- J. Amer. Stat. Ass 49 (1954) 467-479
- Wright, S.: The Method of Path Coefficients.- Ann Math. Stat. 5 (1934) 161-215