



UNIVERSITÄT HOHENHEIM

Laura Mack & Filippo Capezzone

Sommertagung 29.06.2017, DLR Neustadt



Wie lässt sich die Blattfläche von Chia (*Salvia hispanica* L.) anhand mathematischer Gleichungen bestimmen?





BIOMETRY, MODELING & STATISTICS

Nondestructive Leaf Area Estimation for Chia

Laura Mack,* Filippo Capezzone, Sebastian Munz, Hans-Peter Piepho, Wilhelm Claupein, Tim Phillips, and Simone Graeff-Hönninger





Gliederung

1. Hintergrund & Herleitung
2. Material & Methoden
3. Ergebnisse & Diskussion
4. Fazit





Hintergrund & Herleitung

- **Chiasamen** („Superfoods“) erfreuen sich in Europa seit 2009 immer größerer Beliebtheit. (Mohd Ali et al., 2012)
- Grund: vorteilhafte **gesundheitsfördernde Eigenschaften**:
(Ayerza and Coates, 2011; Mohd Ali et al., 2012)
 - hervorragende pflanzliche **Proteinquelle**,
 - besonders hohe Konzentration an **Omega3-Fettsäure**,
 - reich an **Vitaminen, Mineralien, Antioxidantien** und **Ballaststoffen**.
- Chia (*Salvia hispanica* L.)
 - **einjährige krautartige Pflanze der Lippenblütler** (Familie: Lamiaceae) und gehört der Gattung **Salbei** (850-900 Arten) an. (Alfredo et al. 2009; Pulvento et al. 2010)
 - **Wuchshöhe** von bis zu **1.0 m**.
 - **Laubblätter** sind **länglich eiförmig** bis **herzförmig** und **gegenständig** angeordnet (4-10 cm lang und 3-8 cm breit).





Hintergrund & Herleitung

- Notwendigkeit: **Wachstumsprozesse & Ertragsbildung** von Chia zu verstehen.
 - **Anpassungsfähigkeit** und **Anbau** in anderen Gebieten zu **verbessern**.
 - Die **Blattfläche (LA)** ist ein entscheidender Faktor.
- **Verschiedene Methoden** zur Bestimmung der **Blattfläche**:
 1. **destruktiv** (bspw. Blattflächenmessgerät)
 - kostspielig, zeitaufwändig, zerstörend (Schwarz and Kläring, 2001)
 2. **nicht-destruktiv** (bspw. mathematische Gleichungen) (Blanco and Folegatti, 2005)
 - Besonders bei schlechter Verfügbarkeit von finanziellen Mitteln und Equipment, ermöglicht diese Methode **vor Ort** die Blattfläche zu bestimmen, **ohne** die **Pflanze** dabei zu **beschädigen**.

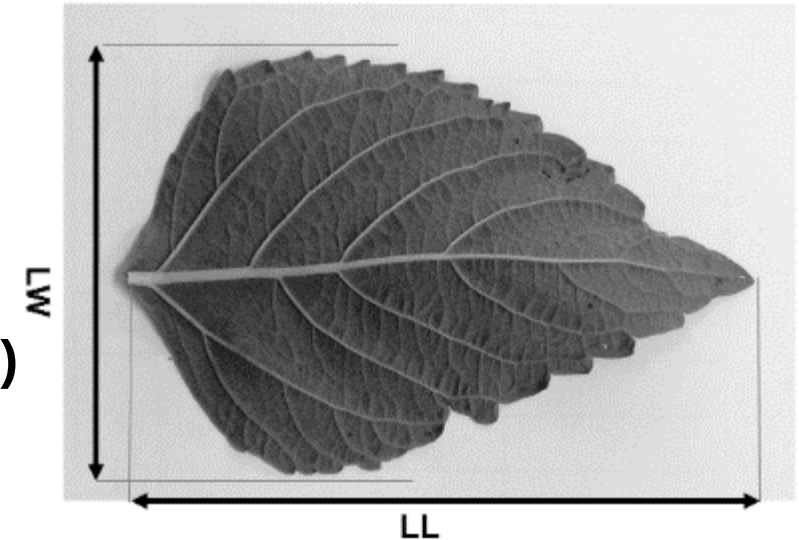




Hintergrund & Herleitung

Nicht-destruktive Methode

Messungen von **Blattlänge (LL)** und **Blattbreite (LW)**



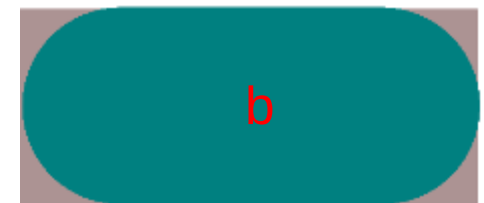
Formel: $LA = b * LL * LW$ (Daughtry, 1990)

b = Regressionskoeffizient, bestimmt durch die Blattform.

$b = 1.0$ Form eines Rechtecks,

$b = 0.5$ Form eines Dreiecks,

$b = 0.78$ Form einer Ellipse.





Hintergrund & Herleitung

- **Zahlreiche ähnliche Ansätze** für die **Vorhersage** der **Blattfläche** verschiedenster Pflanzenarten:
 - **Haselnuss** (Cristofori et al., 2007),
 - **Brokkoli** (Stoppani et al., 2003)
 - **Gurke** (Blanco and Folegatti, 2005)
 - **Zucchini** (Rouphael et al., 2006)
 - **Tomate** (Schwarz and Kläring, 2001)
 - **Erbse** (Peksen, 2007)
- Für **Chia** existiert bisher **kein Modell** zur **Vorhersage** der **Blattfläche**.



Hintergrund & Herleitung

- Unterschied zu bisherigen Studien:

In keiner der bisherigen Studien

- wurden verschiedene **Experimente zusammengefasst**, um eine Regression durchzuführen
- wurde die **Heterogenität** zwischen den Experimenten berücksichtigt.

→ „**Meta-Regression**“ mit **zufälligen Effekten** und **5-facher Kreuzvalidierung**.

- Zielsetzung:

- Prüfen, ob **Sorte** und **Düngungsstufe** einen Einfluss haben.
- Ein **Modell** zur Bestimmung der Blattfläche für Chia aufzustellen.
- **Robustheit** des Modells zu evaluieren (Kreuzvalidierung).



Material & Methoden

Informationen zu den fünf Experimenten am Standort "Ihinger Hof" der Universität Hohenheim 2015 (21. Mai – 11. November) und 2016 (1. Juni – 18. Oktober).

Jahr	Experiment	Sorte	Düngung (kg N ha ⁻¹)	Anzahl der Blätter
2015	1	G8	20	30
	1	07015 ARG	20	30
	1	06815 BOL	20	30
	1	06915 ARG	20	30
	2	G8	0	30
	2	G8	20	30
2016	2	G8	40	30
	3	G8	0	90
	3	G8	20	90
	3	G8	40	90
	3	W13.1	0	30
	3	W13.1	20	30
	3	W13.1	40	30
	4	G7	20	90
	4	G3	20	90
	5	Sahi Alba 914	20	90

- **5 Experimente:** 2015 und 2016 auf der Versuchstation 'Ihinger Hof'
- Randomisierte vollständige Blockanlage (**RCBD**)
- Behandlungen: **Sorte** und/oder **Düngungsstufe**
- Zeitpunkt: Blüte → **Eine Pflanze pro Parzelle** (10-30 Blätter) → Messwiederholungen
→ Insgesamt **840 Blätter** vermessen





Ergebnisse & Diskussion

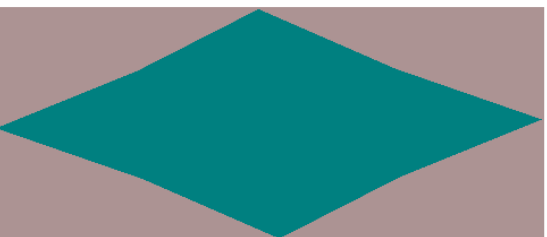
Zur Bedeutung von $LA = b * LW * LL$



b ca. 0.8



b ca. 0.5

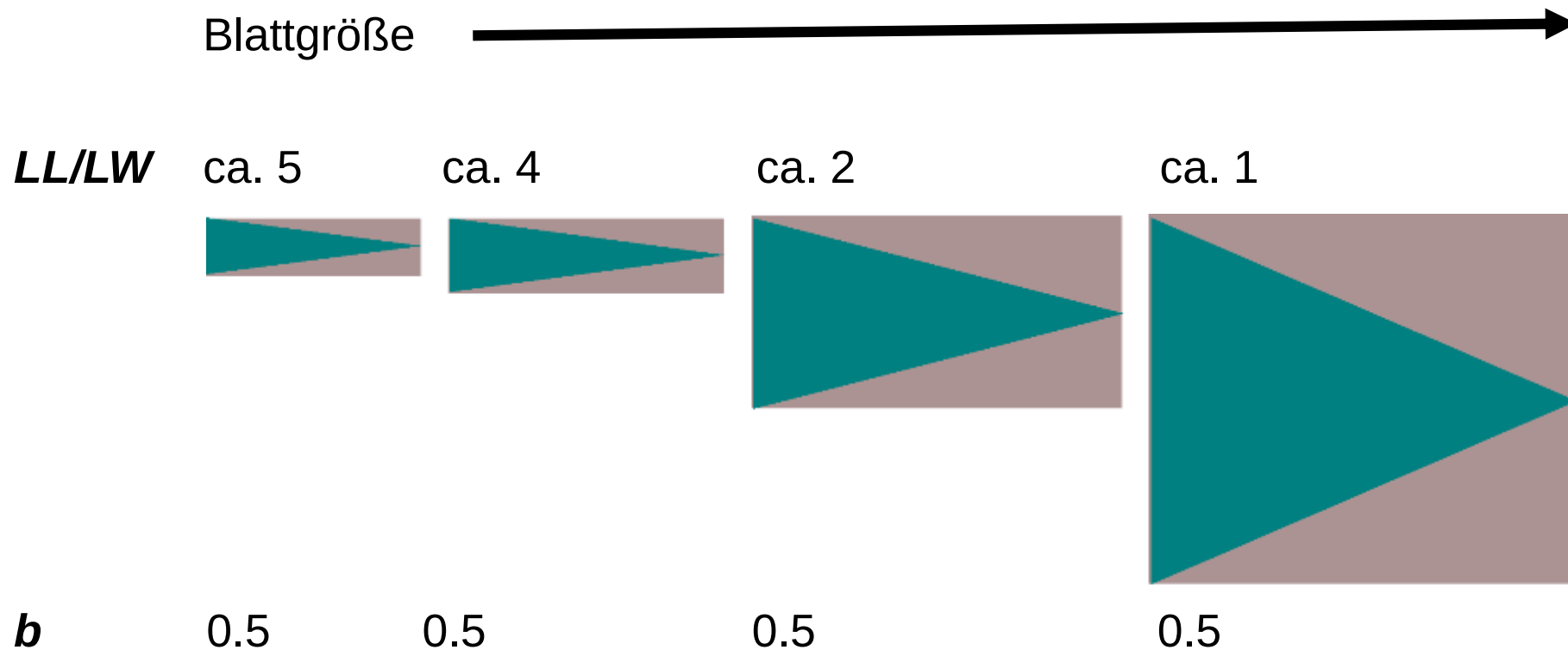


b ca. 0.5



Ergebnisse & Diskussion

Zur Bedeutung von $LA = b * LW * LL$





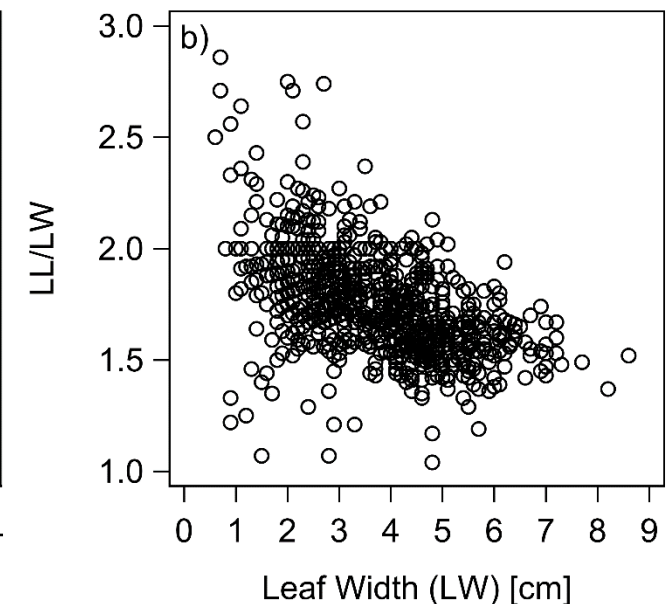
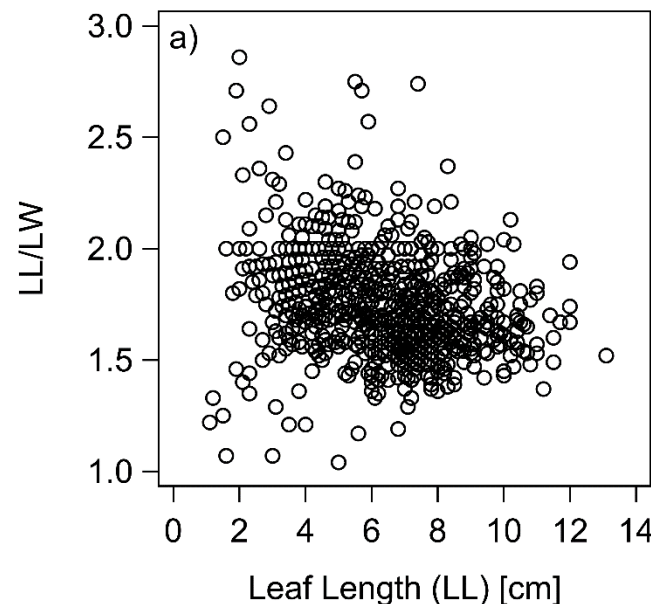
Ergebnisse & Diskussion

Zur Bedeutung von $LA = b * LW * LL$

→ **Vorteil:** Modell kann Änderungen der Seitenverhältnisse im Wachstumsverlauf abbilden.

→ Verhältnis nimmt ab

→ **größere Blätter** wachsen **stärker** in die **Breite** als in die **Länge**.





Ergebnisse & Diskussion

Zur Bedeutung von $LA = b * LW * LL$

Wenn die Gleichung stimmt, erwarten wir

$$\log(LA) = \log(b) + \log(LW) + \log(LL)$$

d.h.

$$\log(LA) = \log(b) + \beta_1 \log(LW) + \beta_2 \log(LL)$$

Erwartung: β_1 β_2 nicht signifikant von 1 verschieden



Ergebnisse & Diskussion

Zur Bedeutung von $LA = b * LW * LL$

$$\log(LA) = -0.301 + 1.075 * \log(LW) + 0.886 * \log(LL)$$

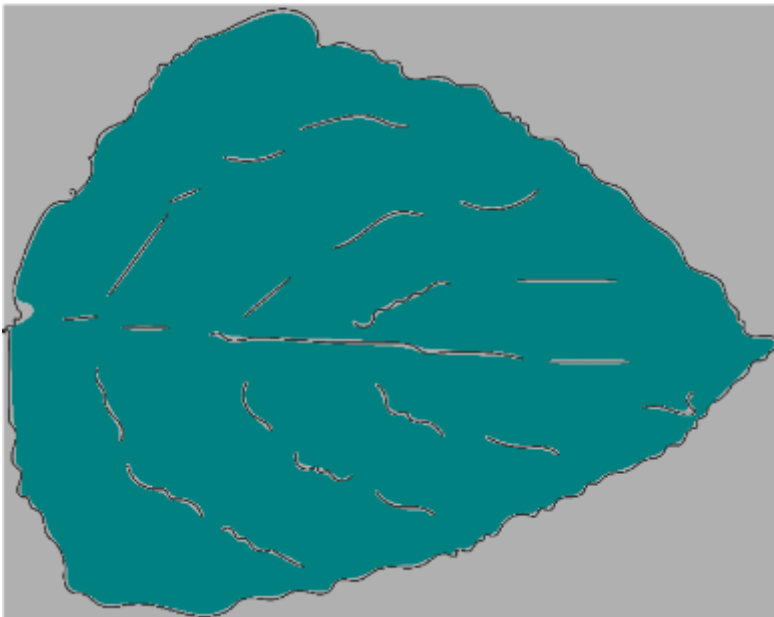
Koeffizient	Schätzwert	95% Vertrauensintervall	
		unten	oben
$\log(b)$	-0.301	-0.385	-0.217
β_1	1.075	0.971	1.180
β_2	0.886 ✨	0.756	0.977

→ **Grund**: Mögliche **Formänderung** im Wachstumsverlauf ?



Ergebnisse & Diskussion

Zur Bedeutung von $LA = b * LW * LL$





Ergebnisse & Diskussion

Zur Bedeutung von $LA = b * LW * LL$

Erweiterung

$$\log(LA) = \log(b) + \log(LW) + \log(LL)$$

zu

$$\log(LA) = \log(b) + c * \log(LW) + d * \log(LL)$$

bzw.

$$LA = b * LW^c * LL^d$$

→ ermöglicht die Vorhersage der Blattfläche bei **Formänderung** im Wachstumsverlauf



Ergebnisse & Diskussion

1. Einzelauswertung nach Experimenten

Zielsetzung: Haben die Behandlungen Sorte und Dünger einen Einfluss auf die Beziehung zwischen Blattfläche (LA) und Blattlänge (LL) und Blattbreite (LW)

$$\log(LA_{hijkl}) = \log(b) + \beta_1 \log(LW) + \beta_2 \log(LL) + p_{hk} + e_{hijkl}$$

Pflanzeneffekt, Restfehler

■ = zufällig,



Ergebnisse & Diskussion

1. Einzelauswertung nach Experimenten

$$\log(LA_{hijkl}) = \log(b) + \beta_1 \log(LW_{hijkl}) + \beta_2 \log(LL_{hijkl}) + \\ r_h + \beta_{3h} \log(LW_{hijkl}) + \beta_{4h} \log(LL_{hijkl}) + p_{hk} + e_{hijkl}$$

Block-Haupteffekt r_h ,

block-spezifische Steigungen $\beta_{3h} \log(LW_{hijkl})$; $\beta_{4h} \log(LL_{hijkl})$



Ergebnisse & Diskussion

1. Einzelauswertung nach Experimenten

$$\begin{aligned} \log(LA_{hijkl}) = & \log(b) + \beta_1 \log(LW_{hijkl}) + \beta_2 \log(LL_{hijkl}) + \\ & r_h + \beta_{3h} \log(LW_{hijkl}) + \beta_{4h} \log(LL_{hijkl}) + \\ & \tau_i + \beta_{5i} \log(LW_{hijkl}) + \beta_{6i} \log(LL_{hijkl}) + \\ & \gamma_j + \beta_{7j} \log(LW_{hijkl}) + \beta_{8j} \log(LL_{hijkl}) + \\ & (\tau^* \gamma)_{ij} + \beta_{9ij} \log(LW_{hijkl}) + \beta_{10ij} \log(LL_{hijkl}) + p_{hk} + e_{hijkl} \end{aligned}$$

Dünger-Haupteffekte τ_i ,

Sorte-Haupteffekte γ_j ,

Interaktion-Haupteffekte $(\tau^* \gamma)_{ij}$,

Sorte-spezifische Steigungen $\beta_{7j} \log(LW_{hijkl})$ $\beta_{8j} \log(LL_{hijkl})$,

Dünger-spezifische Steigungen $\beta_{5i} \log(LW_{hijkl})$ $\beta_{6i} \log(LL_{hijkl})$,

Dünger- und Sorte-spezifische Steigungen $\beta_{9ij} \log(LW_{hijkl})$ $\beta_{10ij} \log(LL_{hijkl})$



Ergebnisse & Diskussion

1. Einzelauswertung nach Experimenten:

F-Tests der einzelnen Experimente

Experiment 3

→ signifikante Haupteffekte von **Sorte** ($p = 0.0015$) und **Düngungsstufe** ($p = 0.0280$).

Experiment 2

→ signifikante Dünger-spezifische Steigungen für **LL** ($p = 0.0411$) und für **LW** ($p = 0.0450$).



Ergebnisse & Diskussion

2. Gemeinsame Vorhersagegleichung aus allen Experimenten:

Regression von LA auf LW und LL

- Gemeinsame Auswertung aller **5 Experimente** („**Meta-Regression**“).
- **Zufällige Achsenabschnitte** und **Steigungen** für Experimente, Blöcke, Behandlungskombinationen und Pflanzen.



Ergebnisse & Diskussion

2. Gemeinsame Vorhersagegleichung aus allen Experimenten:

Regression von LA auf LW und LL

$$\log(LA_{ghijkl}) = \log(b) + \beta_1 \log(LW_{ghijkl}) + \beta_2 \log(LL_{ghijkl}) +$$

→ gemeinsamer Achsenabschnitt und Steigungen (fix)

$$\mu_{2g} + \beta_{3g} \log(LW_{ghijkl}) + \beta_{4g} \log(LL_{ghijkl}) +$$

→ experiment-spezifische (zufällig)

$$\mu_{3ij} + \beta_{5ij} \log(LW_{ghijkl}) + \beta_{6ij} \log(LL_{ghijkl}) +$$

→ behandlungs-spezifische

$$\mu_{4gh} + \beta_{7gh} \log(LW_{ghijkl}) + \beta_{8gh} \log(LL_{ghijkl}) +$$

→ block-spezifische

$$\mu_{5ghk} + \beta_{9ghk} \log(LW_{ghijkl}) + \beta_{10ghk} \log(LL_{ghijkl}) +$$

→ pflanzen-spezifische

$$e_{ghijkl}$$

→ Restfehler

Zufällige Effekte → 3x3 Kovarianzmatrix anpassen. **Individuelle Korrelationen** zwischen Achsenabschnitten und Steigungen schätzen



Ergebnisse & Diskussion

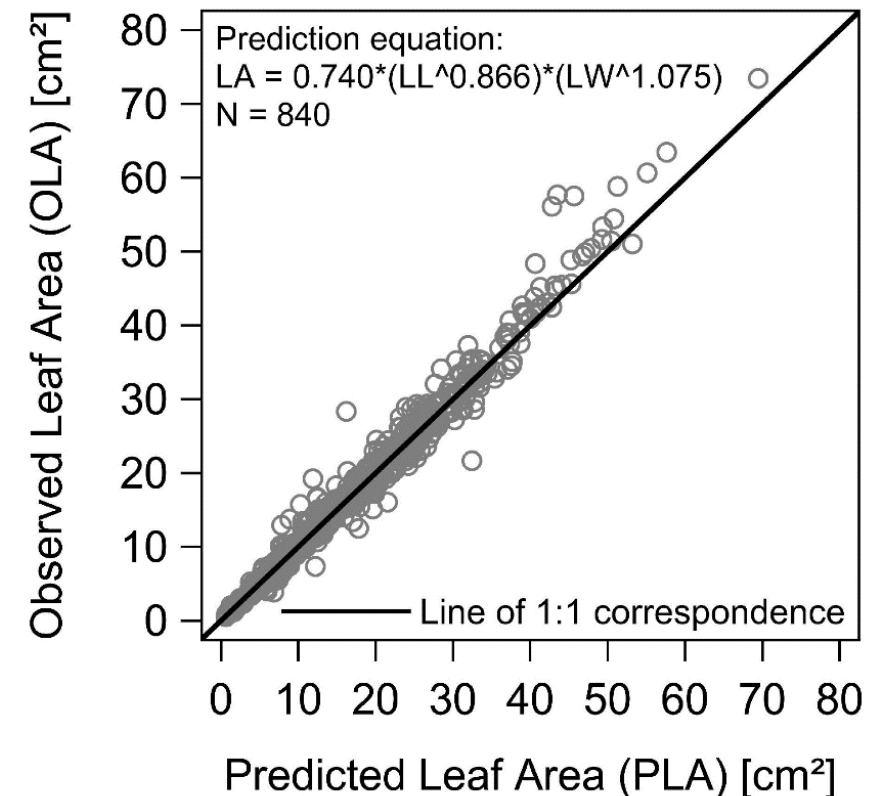
2. Gemeinsame Vorhersagegleichung aus allen Experimenten:

Ergebnis:

$$\log(LA) = -0.301 + 1.075 \cdot \log(LW) + 0.886 \cdot \log(LL)$$

bzw.

$$LA = 0.740 * LW^{1.075} * LL^{0.886}$$





Ergebnisse & Diskussion

Regression von LA auf LW

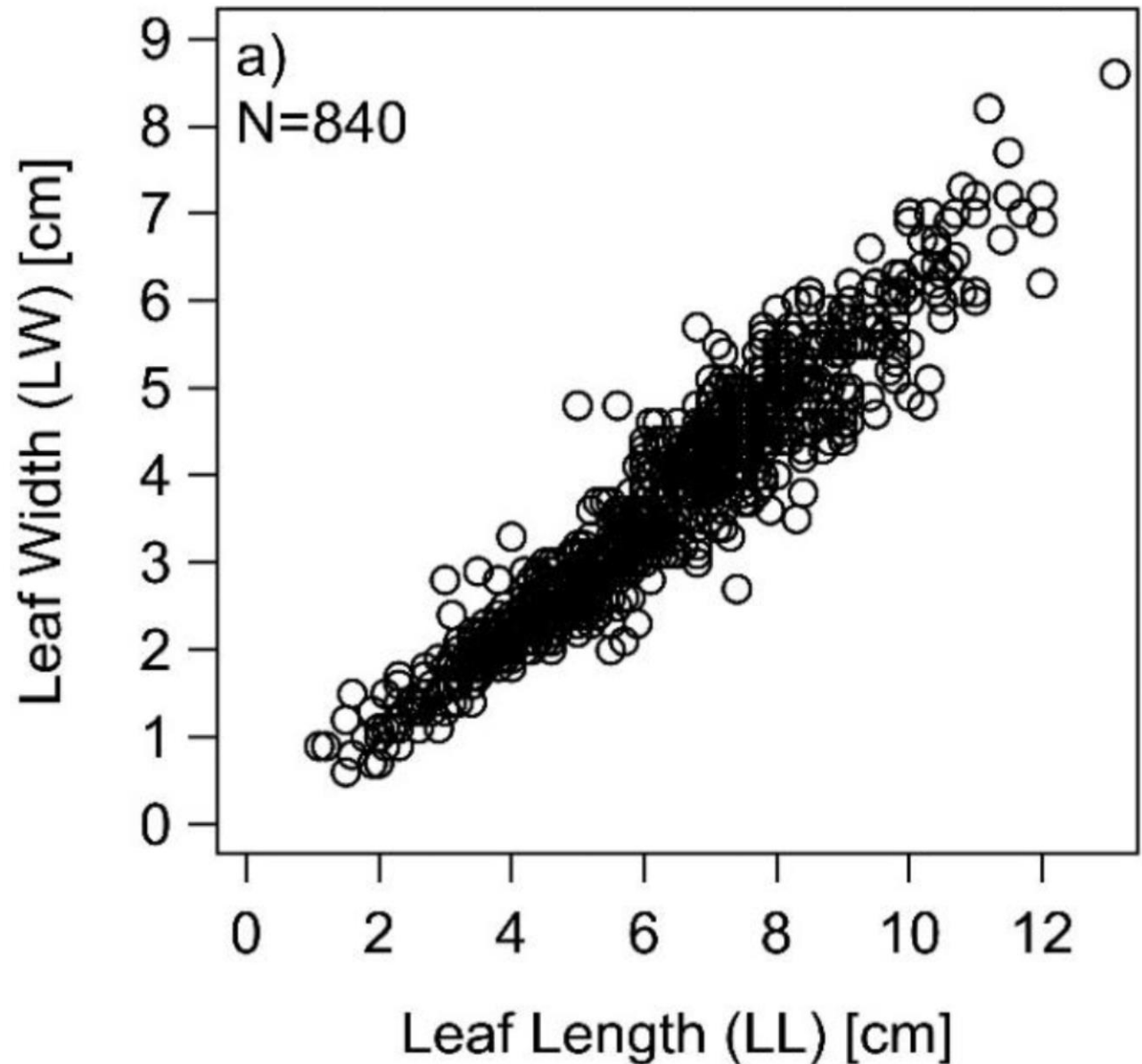
Frage: Ist es möglich **LA** mit **LL** zu erklären?

Um **LL** durch **LW** auszudrücken geklärt werden.

Der einfachste Fall wäre eine

$$LW = q * LL$$

$$LL = m * LW$$





Ergebnisse & Diskussion

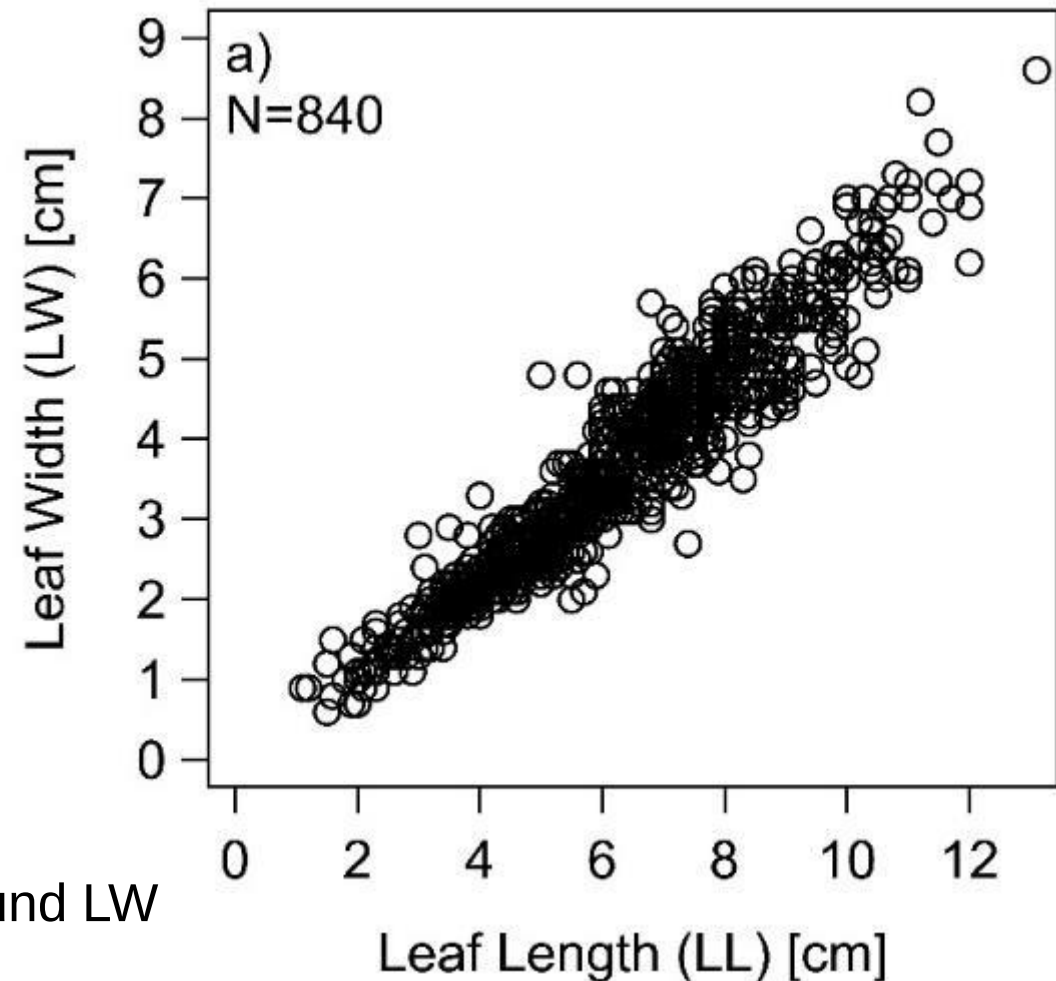
Regression von LA auf LW ODER LL

Test auf Linearität:

$$LW = q_1 * LL + q_2 * LL^2$$

$$LL = m_1 * LW + m_2 * LW^2$$

- **Signifikante quadratische Effekte**
- **Keine Lineare Beziehung** zwischen LL und LW





Ergebnisse & Diskussion

Regression von LA auf LW ODER LL

Modifikation der Beziehung von LL und LW

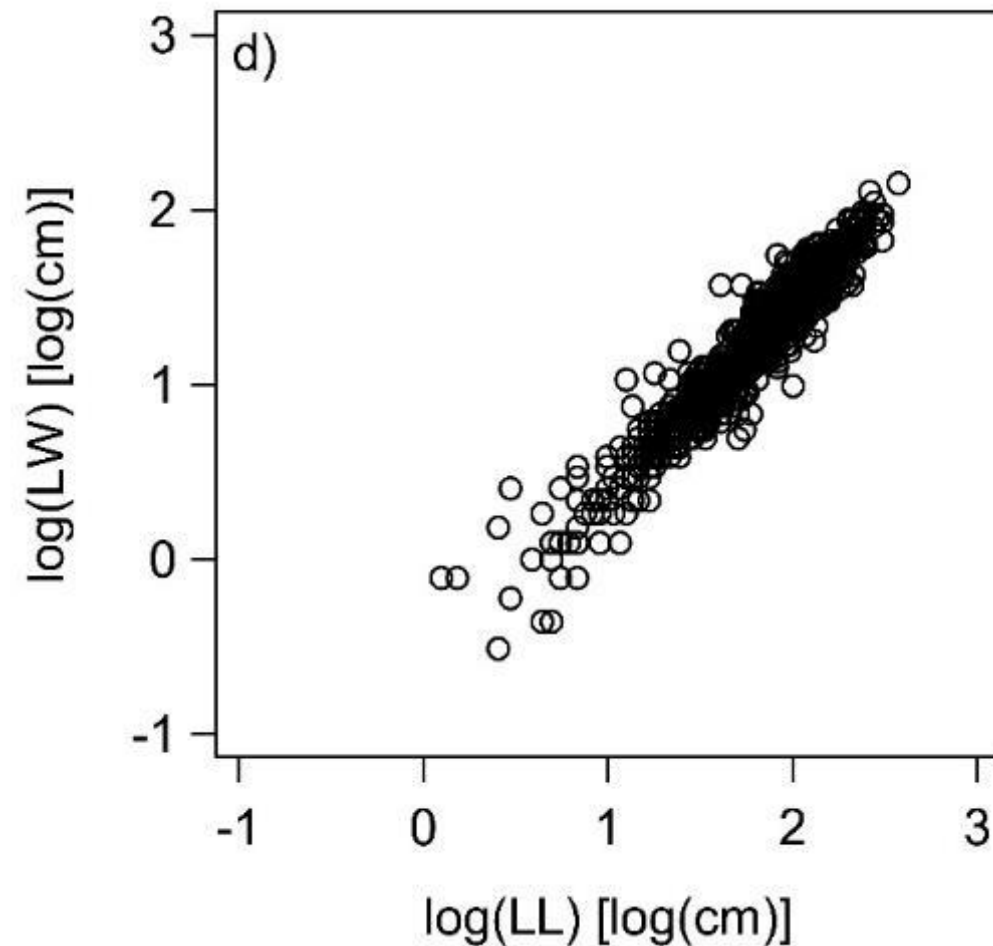
$$LW = q * LL^p$$

$$LL = m * LW^n$$

Linearisierung:

$$\log(LW) = \log(q) + p * \log(LL)$$

$$\log(LL) = \log(m) + n * \log(LW)$$





Ergebnisse & Diskussion

Regression von LA auf LW ODER LL

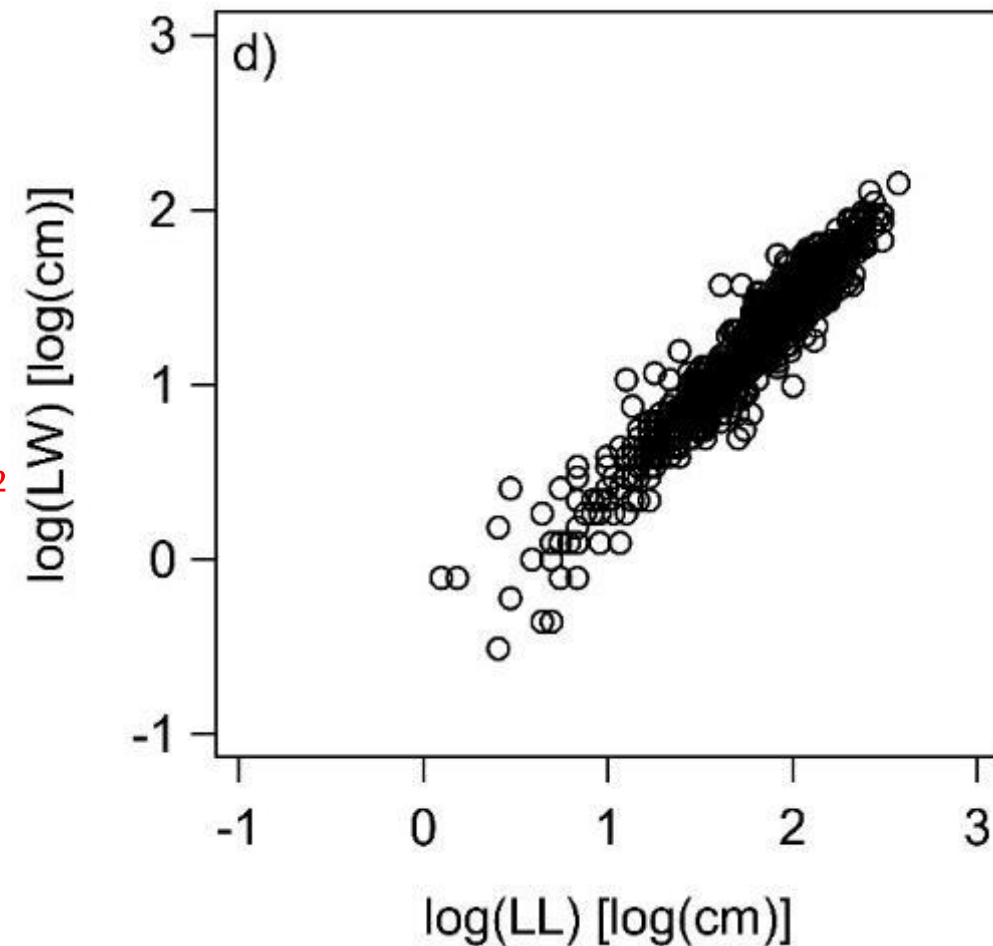
Modifikation der Beziehung von LL und LW

$$\log(LW) = \log(q) + p_1 * \log(LL) + p_2 * \log(LL)^2$$

$$\log(LL) = \log(m) + n_1 * \log(LW) + n_2 * \log(LW)^2$$

→ Keine signifikanten quadratischen Effekte

→ Linearisierung erfolgreich





Ergebnisse & Diskussion

Regression von LA auf LW ODER LL

Einsetzen von

$$\log(LL) = \log(m) + n*\log(LW)$$

in $\log(LA) = \log(b) + d*\log(LW) + c*\log(LL)$

ergibt

$$\begin{aligned}\log(LA) &= \log(b) + d*\log(LW) + c*(\log(m) + n*\log(LW)) \\ &= (\log(b) + c*\log(m)) + (d + c*n) + \log(LW)\end{aligned}$$

$$= h + k*\log(LW)$$



Ergebnisse & Diskussion

Regression von LA auf LW ODER LL

Ergebnis:

$$\log(LA) = h + k \cdot \log(LW)$$

$$\log(LA) = f + g \cdot \log(LL)$$



Ergebnisse & Diskussion

Regression von LA auf LW ODER LL

$$\log(LA_{ghijkl}) = \log(b) + \beta_1 \log(LW_{ghijkl}) +$$

$$\mu_{2g} + \beta_{3g} \log(LW_{ghijkl}) +$$

$$\mu_{3ij} + \beta_{5ij} \log(LW_{ghijkl}) +$$

$$\mu_{4gh} + \beta_{7gh} \log(LW_{ghijkl}) +$$

$$\mu_{5ghk} + \beta_{9ghk} \log(LW_{ghijkl}) +$$

$$e_{ghijkl}$$

- gemeinsamer Achsenabschnitt und Steigungen (fix)
- experiment-spezifische (zufällig)
- behandlungs-spezifische
- block-spezifische
- pflanzen-spezifische
- Restfehler



Ergebnisse & Diskussion

Regression von LA auf LW ODER LL

$$\log(LA_{ghijkl}) = \log(b) + \beta_1 \log(LL_{ghijkl}) +$$

$$\mu_{2g} + \beta_{3g} \log(LL_{ghijkl}) +$$

$$\mu_{3ij} + \beta_{5ij} \log(LL_{ghijkl}) +$$

$$\mu_{4gh} + \beta_{7gh} \log(LL_{ghijkl}) +$$

$$\mu_{5ghk} + \beta_{9ghk} \log(LL_{ghijkl}) +$$

$$e_{ghijkl}$$

- gemeinsamer Achsenabschnitt und Steigungen (fix)
- experiment-spezifische (zufällig)
- behandlungs-spezifische
- block-spezifische
- pflanzen-spezifische
- Restfehler



Ergebnisse & Diskussion

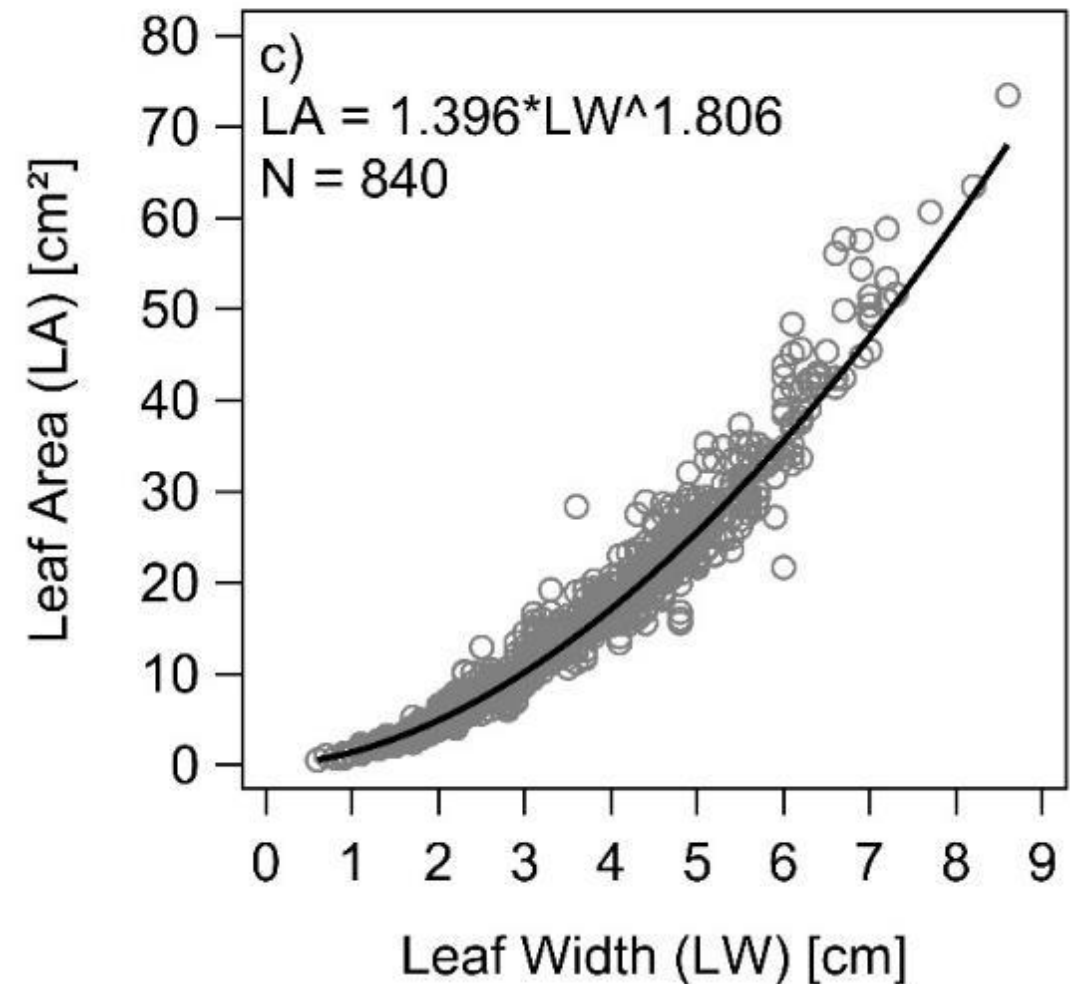
Regression von LA auf LW ODER LL

Ergebnis:

$$\log(LA) = 0.334 + 1.806 * \log(LW)$$

bzw.

$$LA = 1.396 * LW^{1.806}$$





Ergebnisse & Diskussion

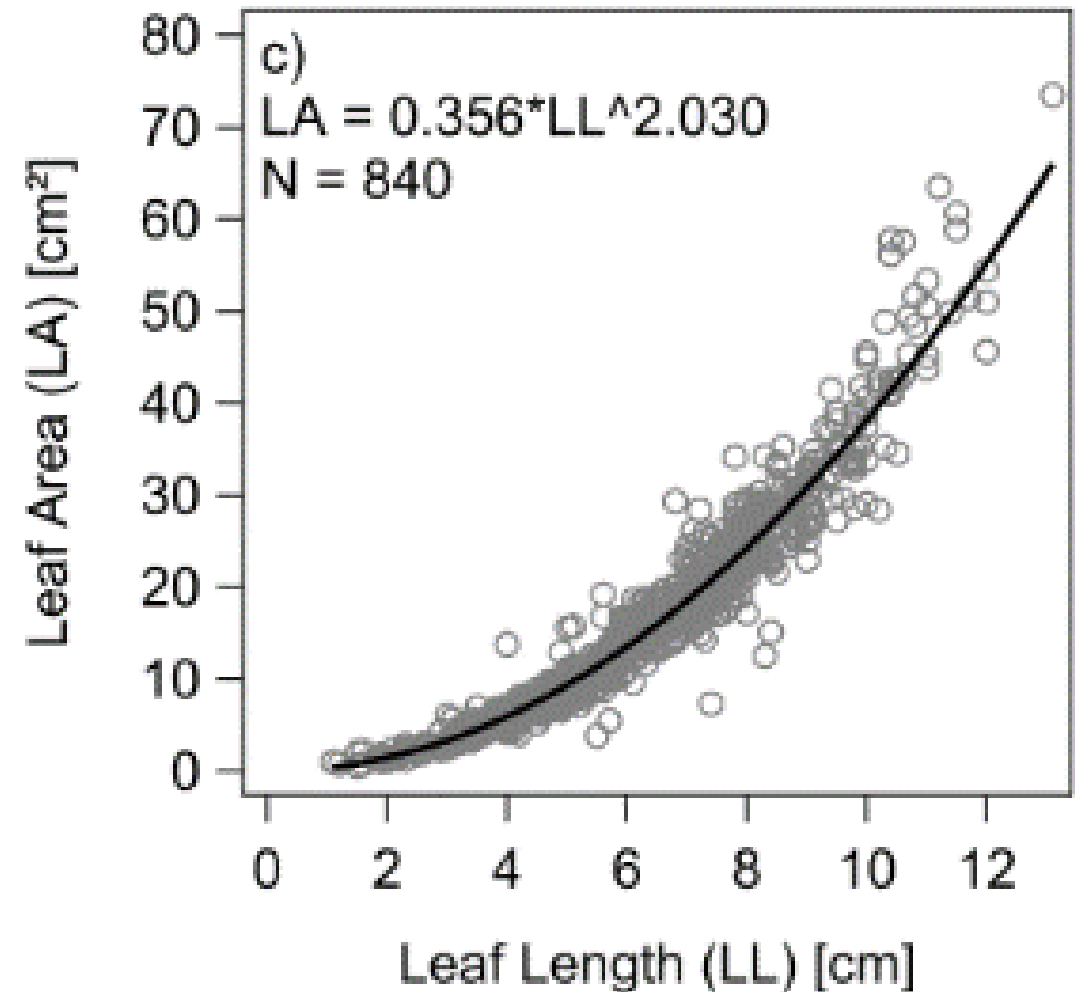
Regression von LA auf LW ODER LL

Ergebnis:

$$\log(LA) = -1.032 + 2.030 + \log(LL)$$

bzw.

$$LA = 0.356 * LL^{2.030}$$





Ergebnisse & Diskussion

3. Kreuzvalidierung der drei möglichen Modelle

- Der gesamte Datensatz mit **840 Beobachtungen** wurde in **fünf zufällige Teilmengen** mit 168 Beobachtungen geteilt.
- **Stratifizierung**, damit alle Experimente gleich repräsentiert sind.
- Die **Validierung** erfolgte, indem **vier Teilmengen** genommen wurden, um die Vorhersagegleichung zu schätzen und die Blattfläche der **verbliebenden Teilmenge** vorherzusagen.
- Die Kreuzvalidierung wurde für die **drei vorherigen Modelle** (LL und LW, LW, LL) durchgeführt.



Ergebnisse & Diskussion

3. Kreuzvalidierung der drei möglichen Modelle

- **Vorhersagegüte** der drei Modelle war **sehr hoch**:
 - Die **vorhergesagte** Blattfläche und **gemessene** Blattfläche **korrelierten** stark. $r \geq 0.97$.
 - **Mittlere quadratische Abweichung** (MSD): Je kleiner MSD, desto höher ist die Aussagegüte.

Prädiktoren	Vorhersagegleichung	Korrelationskoeffizient (r)	MSD [cm ²] †
LL & LW	$LA = 0.740 * LW^{1.075} * LL^{0.886}$	0.989	9.62
LW	$LA = 1.396 * LW^{1.806}$	0.977	19.10
LL	$LA = 0.356 * LL^{2.030}$	0.970	24.95

† Berechnet nach Gauch et al. (2003).

- LL & LW > LW > LL → beste Gleichung: $LA = 0.740 * LW^{1.075} * LL^{0.886}$



Ergebnisse & Diskussion

Vergleich zu anderen Studien (I)

- Andere Studien zeigten ebenfalls, dass die Blattfläche **am besten** mittels **zweier Prädiktoren** (LL und LW) geschätzt werden kann. (Salerno et al., 2005; Cristofori et al., 2007; Kumar and Sharma, 2010)
- **Ökonomisch** betrachtet, ist es sinnvoll **Messzeit zu sparen** → nur **mit einer Variablen (LW)** die Vorhersage zu treffen. (Rouphael et al., 2006 and 2007, Kumar, 2009, Williams and Martinson, 2003, Cristofori et al., 2007, Salerno et al., 2005 and Stoppani et al., 2003)
- Unsere Ergebnisse sind **im Einklang** mit den bisherigen Erkenntnissen, dass **LL weniger geeignet** ($r = 0.97$) **als LW** ($r = 0.98$) **oder als** die multiple Regression auf **LL und LW** ($r = 0.99$) ist → LL & LW > nur LW > nur LL. (Cristofori et al., 2007)



Ergebnisse & Diskussion

Vergleich zu anderen Studien (II)

- Ein besonderes Merkmal der **hier verwendeten Regressionsmodelle** ist, dass **zufällige Effekte** verwendet wurden, um die **Heterogenität** zwischen den Experimenten, Blöcken, Pflanzen und Behandlungen **zu berücksichtigen**.
→ Valide Standardfehler, Signifikanztests, Achsenabschnitte und Steigungen.
- Der **Parameter b** der Gleichung $LA = b * LW * LL$ wird bestimmt durch die **Blattform**.
- Der **Vorteil** dieser Gleichung ist, dass die **Vorhersagegüte** des Modells **nicht negativ beeinflusst** wird, **wenn** sich das **Verhältnis von LL und LW ändert**.
(Größere Blätter sind breiter als lang im Vergleich zu kleineren Blättern.)
- Wenn also die **Blattform gleichbleibt**, ist auch das **Verhältnis** von LA und $LW * LL$ **konstant**.
- **Ändert** sich allerdings die **Blattform**, würde die Gleichung $LA = b * LW * LL$ **die Blattfläche nicht mehr korrekt vorhersagen**.

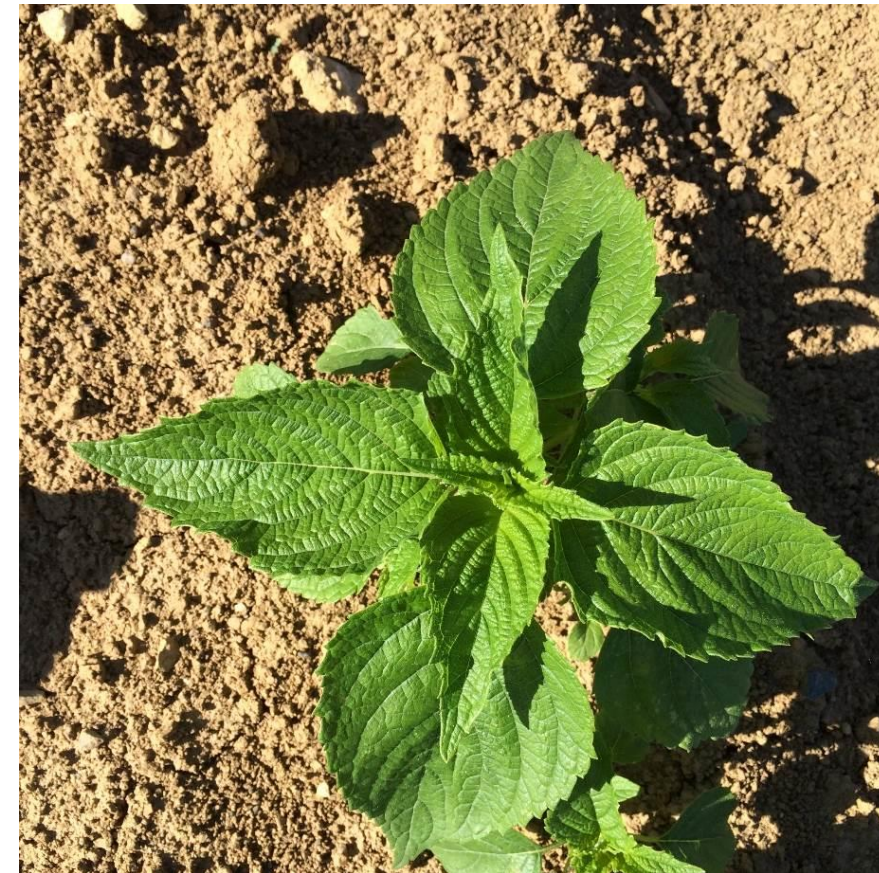


Ergebnisse & Diskussion

Vergleich zu anderen Studien (III)

- Im Falle von Chia wurde empirisch gezeigt, dass Gleichung $LA = b * LW * LL$ **nicht zutrifft** und **erweitert** werden musste.
(Erinnerung: Steigung $\log(LL)$ signifikant von 1 verschieden)

→ kein allgemeiner Formfaktor b
- In der Tat wiesen **kleinere Chia Blätter elliptische** und **größere Blätter** eher **eiförmige** Blattformen auf.





Fazit

- **Sorte** und **Düngung** hatten einen Effekt.
- **Zufällige Effekte** wurden berücksichtigt („**Meta-Regression**“), um eine **allgemeine** und plausible **Vorhersagegleichung** zu generieren.
- Die Gleichung $LA = 0.740 * LW^{1.075} * LL^{0.886}$ lieferte die **beste Vorhersage**.
- Die Gleichung $LA = 1.396 * LW^{1.806}$ mit nur einer Variablen (**LW**) war **fast so genau** wie mit beiden Variablen.
- Die Gleichung $LA = 0.356 * LL^{2.030}$ lieferte ebenfalls eine **akzeptable Vorhersage** (hohe Korrelation; $r = 0.97$).
- Mit Hilfe dieser Gleichungen wird ein Beitrag geleistet,
 - **wiederholte Blattmessungen** ohne teures Equipment durchzuführen,
 - Blattfläche von Chia **unabhängig** von **Sorte** und **Düngungsstufe** vorherzusagen.



Literaturangaben

- Alfredo, V.-O., R.-R. Gabriel, C.-G. Luis, and B.-A. David. 2009. Physicochemical properties of a fibrous fraction from chia (*Salvia hispanica* L.). LWT - Food Sci. Technol. 42(1): 168–173.
- Ayerza (h), R., and W. Coates. 2011. Protein content, oil content and fatty acid profiles as potential criteria to determine the origin of commercially grown chia (*Salvia hispanica* L.). Ind Crops Prod 34(2): 1366–1371.
- Blanco, F.F., and M.V. Folegatti. 2005. Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. Int. Water Irrig. 25(4): 34–37.
- Cristofori, V., Y. Rouphael, E.M. Gyves, and C. Bignami. 2007. A simple model for estimating leaf area of hazelnut from linear measurements. Sci. Hortic. 113(2): 221–225.
- Daughtry, C.S.T. 1990. Direct measurements of canopy structure. Remote Sens. Rev. 5(1): 45–60.
- Gauch, H.G., J.T.G. Hwang, and G.W. Fick. 2003. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. Agron. J. 95(6): 1442–1446.
- Mohd Ali, N., S.K. Yeap, W.Y. Ho, B.K. Beh, S.W. Tan, and S.G. Tan. 2012. The Promising Future of Chia, *Salvia hispanica* L. J. Biomed. Biotechnol. 2012: 1–9.
- Peksen, E. 2007. Non-destructive leaf area estimation model for faba bean (*Vicia faba* L.). Sci. Hortic. 113(4): 322–328.
- Piepho, H.-P., and J.O. Ogutu. 2002. A simple mixed model for trend analysis in wildlife populations. J. Agric. Biol. Environ. Stat. 7(3): 350–360.
- Rouphael, Y., G. Colla, S. Fanasca, and F. Karam. 2007. Leaf area estimation of sunflower leaves from simple linear measurements. Photosynthetica 45(2): 306–308.
- Rouphael, Y., C.M. Rivera, M. Cardarelli, S. Fanasca, and G. Colla. 2006. Leaf area estimation from linear measurements in zucchini plants of different ages. J. Hortic. Sci. Biotechnol. 81(2): 238–241.
- Salerno, A., C.M. Rivera, Y. Rouphael, G. Colla, M. Cardarelli, F. Pierandrei, E. Rea, and F. Saccardo. 2005. Leaf area estimation of radish from simple linear measurements. Adv. Hortic. Sci. 19(4): 213–215.
- Schwarz, D., and H.-P. Kläring. 2001. Allometry to estimate leaf area of tomato. J. Plant Nutr. 24(8): 1291–1309.
- Stoppani, M.I., R. Wolf, N. Francescangeli, and H.R. Martí. 2003. A nondestructive and rapid method for estimating leaf area of Broccoli. Adv. Hortic. Sci. 17(3): 173–175.
- Williams III, L., and T.E. Martinson. 2003. Nondestructive leaf area estimation of “Niagara” and “Dechaunac” grapevines. Sci. Hortic. 98(4): 493–498.

Bildquellen:

- https://www.licor.com/env/products/leaf_area/LI-3100C/images/LI-3100C-v2_leaves.jpg (Blattflächenmessgerät)
- <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/236x/68/12/8a/68128a1c3297b91ff2e630ee701b8be9--salvia-hispanica-botanical-flowers.jpg> (Chia)
- Andere Fotografien aufgenommen von Laura Mack



**Vielen Dank für Ihr
Interesse!**

Fragen ?

