

# Modellierung des Pflanzenwachstums mittels spektraler Sensordaten

*Tim Hegemann, M.Sc., Jens Balasus, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh*

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Hochschulstraße 4a,  
64289 Darmstadt

## Abstract

Die Bevölkerung auf unserem Planeten wächst stetig, während die zur Verfügung stehenden Anbauflächen immer kleiner werden. Um den Anbau von Nutzpflanzen auf unseren schrumpfenden Anbauflächen zu optimieren, muss der Einfluss von Umgebungsparametern auf das Pflanzenwachstum untersucht werden, damit die Umgebung zugunsten einer ressourcenschonenden Pflanzenaufzucht angepasst werden kann. Ein häufig verwendeter objektiver Parameter für das Wachstum ist das Gewicht. Dieses ist bei Pflanzen in der Kultur bisher jedoch nur sehr aufwendig zu bestimmen, sodass die Bildung von Modellen zur kontaktlosen Erfassung dieses Parameters notwendig ist.

Daher werden Zusammenhänge von verschiedenen Parametern, die das Pflanzenwachstum beschreiben können, untersucht. Hierbei wird das Gewicht der Pflanze als Referenz für das generelle Pflanzenwachstum verwendet sowie nicht destruktive, spektrale Messverfahren zur sekundären Ermittlung des Gewichtes durchgeführt und mit dem Pflanzengewicht verglichen. Mithilfe einer Kamera werden Pflanzenbilder aufgezeichnet und die Anzahl der zur Pflanze gehörigen Bildpunkte genutzt, um die sichtbare Blattfläche zu bestimmen. Außerdem werden Vegetationsindizes anhand von Messungen mit einem Spektrometer und einem Spektralsensor berechnet und auf Zusammenhänge mit dem Gewicht untersucht. Anhand dieser Zusammenhänge werden Modelle gebildet, mit denen es bedingt möglich ist, das Gewicht mittels nicht destruktiver spektraler Messungen zu bestimmen

**Index Terms:** Pflanzenbeleuchtung, Spektralsensorik, Messtechnik, Modellierung

## 1 Einleitung

In einer Gesellschaft die stetig wächst, ist es wichtig eine ausreichende Versorgung mit Lebensmitteln sicherzustellen. Jedoch wächst die für die Landwirtschaft nutzbare Fläche nicht mit der Bevölkerung, sondern schrumpft durch größer werdende Städte, steigende Meeresspiegel, ungeeignete Pflanzen für den jeweiligen Boden sowie Überdüngung und Ausbeutung des Bodens [1, 2]. Bis 2030 wird eine Erdbevölkerung



von 8,5 Mrd. und 2050 von 9.7 Mrd. Menschen erwartet, was einen Anstieg von etwa 10% bzw. 26% in Bezug auf die Bevölkerung von 2019 (7,7 Mrd.) bedeutet [3]. Die nutzbare Ackerfläche sinkt jedes Jahr um 10Mha, was 2015 einem Verlust von 0,71% entspricht [1,2]. Um bei gleichen bzw. weniger werdenden Ressourcen eine wachsende Bevölkerung ausreichend und nachhaltig mit Nahrungsmitteln versorgen zu können, muss die Landwirtschaft und damit der Anbau von Nutzpflanzen effizienter, planbarer und geschützter werden. Ein Mittel, dies zu erreichen, ist der Anbau in Gewächshäusern, in denen die Pflanzen in kontrollierbarer Umgebung wachsen und vor den meisten Schädlingen und Umwelteinflüssen geschützt sind. Der Anbau in Gewächshäusern ermöglicht außerdem eine Nutzung der Beleuchtung als Ergänzung des Sonnenlichtes, um der Pflanze Intensitäten in den für sie wichtigen Spektralbereichen zu ermöglichen, die das Sonnenspektrum an dem jeweiligen Tag nicht bieten konnte. Ebenfalls werden Nutzpflanzen in sogenannten "Plant Factories with Artificial Lighting (PFAL's)", also Pflanzenfabriken, die mit einer ausschließlich künstlichen Beleuchtung ausgestattet sind, angebaut. Diese PFAL's bieten einen so guten Schutz vor Schädlingen, dass meistens auf den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln verzichtet werden kann, und ermöglichen gleichzeitig eine Wassereinsparung von bis zu 95% [4]. Ebenfalls ermöglichen Pflanzenfabriken einen Ausbau in die dritte Dimension, indem die Pflanzen nicht konventionell auf dem Boden, sondern in vertikal übereinanderliegenden Regalsystemen angebaut werden. Um einen sicheren und effizienten Betrieb der hoch technisierten Pflanzenfabriken zu gewährleisten, verfügt eine PFAL über eine Vielzahl von Sensorik, Überwachungs- sowie Regelelektronik.

Bei PFAL's, deren gesamtes Licht künstlich erzeugt wird, fällt ein Großteil der Energiekosten auf den Strom für die Beleuchtung (75% bis 80%) [4]. LED-Leuchten bieten insbesondere in PFAL's den Vorteil, dass vergleichsweise einfach verschiedene Spektren eingestellt und auf die Pflanze sowie ihre Wachstumsphase abgestimmt werden können. Was jedoch braucht welche Pflanze zu welcher Zeit, um effizient zu wachsen? Um Auswirkungen von verschiedenen Beleuchtungssystemen sowie spektralen Zusammensetzungen und zeitlich variablen Expositionen zu erforschen, werden häufig Wachstumsstudien durchgeführt. Um in diesen Studien das Wachstumsverhalten von verschiedenen Pflanzen unter unterschiedlichen Bedingungen effizient zu erfassen, ist der Einsatz von Sensoren, die kulturspezifisch ausgewählte Wachstumsparameter messen, unabdingbar. Ebenso kann bei Zusammenhängen zwischen mehreren Parametern die Anzahl der Sensoren minimiert und der Informationsgehalt durch diese Zusammenhänge aufrechterhalten werden. Eine Überprüfung und Modellierung einiger möglicher Zusammenhänge ist also unabdingbar bei der Kosten- und Energieminimierung für Gewächshäuser und Pflanzenfabriken.

## 2 Grundlagen

Pflanzenwachstum wird als irreversible Zunahme eines Wachstumsparameters mit der Zeit definiert, wobei die konkrete Wahl des Parameters vom Objekt, den methodischen Möglichkeiten und der Fragestellung abhängt [5]. In der Praxis wird häufig das Gewicht als Wachstumsparameter betrachtet, da gerade Nutzpflanzen oft nach Gewicht vermarktet werden. Als weiterer Wachstumsparameter kann die Blattfläche interpretiert werden. In der Praxis werden zur Ermittlung der Blattfläche häufig Kamerasysteme eingesetzt, bei denen beispielsweise anhand der Pixelfarbe das jeweilige Pixel der Pflanze zugeordnet wird oder über Mustererkennung das Blatt identifiziert wird. CHEN et al. verwenden eine Kamera zur Erzeugung von 2D Bildern, in denen der minimale sowie der maximale Radius ermittelt werden kann und daraus anschließend die Blattfläche approximiert wird [6]. Bei der Verwendung von 2D Bildern treten jedoch Probleme durch Überlappungen und Schattenwurf der Blätter auf. Da die Blattfläche von sich überlappenden Blättern nicht eindeutig bestimmt werden kann, eignet sich diese Herangehensweise eher für flache Pflanzen sowie für junge Pflanzen, bei denen die Blätter wenig Überschneidungen aufweisen.

Im Gegensatz dazu beschreibt der Blattflächenindex (Leaf area index, LAI) nach Gleichung 2.1 das Verhältnis von der gesamten Blattfläche einer Pflanze zur Bodenfläche.

$$LAI = \frac{\text{Blattfläche in } m^2}{\text{Bodenfläche in } m^2} \quad (2.1)$$

Durch den in Abbildung 3.1-1 gezeigten linearen Zusammenhang von LAI und Biomasse kann bei geeigneter Kultur ein Wiegen der Pflanzen überflüssig werden und direkt über die Bestimmung des LAI auf das Gewicht der Pflanze geschlossen werden. In der Praxis wird der LAI jedoch meist über Scanner bestimmt, bei denen die Blätter einzeln geerntet und auf den Scanner gelegt werden müssen. Somit ist eine nicht destruktive

Bestimmung des LAI mit enormem Aufwand verbunden. Möglicherweise besteht ein Zusammenhang zwischen der sichtbaren Blattfläche und dem LAI, wodurch sich auch wieder ein Zusammenhang zwischen sichtbarer Blattfläche und dem Gewicht ergibt.

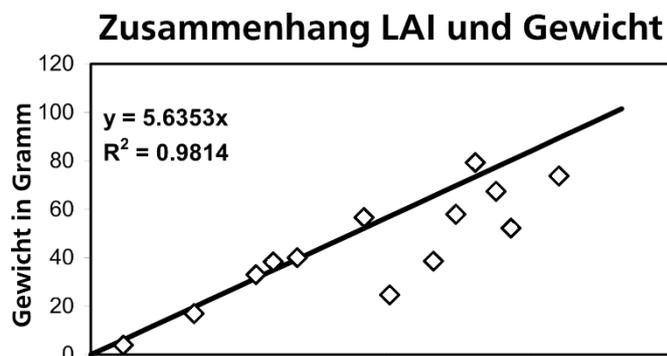


Abbildung 3.1-1 Zusammenhang von Biomasse (Trockengewicht) und Blattflächenindex (LAI) aus den Daten von TEMMERMAN und GAVRILIDOU, zusammengetragen im "The UNECE International Cooperative Programme on Vegetation Final Report" [7, 8]

Weitere Wachstumsparameter können Inhaltsstoffe sein, welche mit dem Gewicht korrelieren. Zur Bestimmung dieser kann in destruktiven Messverfahren die Pflanze in ihre Bestandteile zerlegt und eine chemische Analyse der Inhaltsstoffe erfolgen. Alternativ werden optische Messmethoden genutzt, bei denen die spektrale Reflexion, Absorption oder Transmission der Pflanze oder eines einzelnen Blattes herangezogen wird, um die Inhaltsstoffe zu bestimmen. So konnte beispielsweise ein Zusammenhang zwischen der Reflexion im Bereich von 750nm bis 1000nm und dem Stickstoffgehalt der Pflanze festgestellt werden [9].

Ebenfalls besteht eine Korrelation zwischen dem Chlorophyllgehalt und der Reflexion im Bereich um 556nm [10]. Zudem wurden verschiedene Reflexionsindizes im Bereich der Pflanzenforschung aufgestellt, die je nach Literatur unterschiedlich stark mit Inhaltsstoffen oder dem physiologischen Zustand der Pflanze korrelieren. So zeigen Indizes wie der "normierte differenzierte Vegetationsindex (680nm,800nm) ", kurz NDVI [680-800] oder NDVI[640-800] eine Korrelation zur Biomasse, Chlorophyllgehalt und Blattflächenindex bei ausgewählten Pflanzenarten auf Blatt und Pflanzenebene unter Gewächshausbedingungen [11]. Ebenfalls zeigen der NDVI [490-620] und der NDVI [705-750] eine Korrelation zum Wassergehalt und der Macc01 einen Zusammenhang mit dem Chlorophyllgehalt der Pflanze [11]. WU et al. zeigen ebenfalls Reflexionsindizes auf, über die auf den Chlorophyllgehalt oder den Blattflächenindex geschlossen werden kann. Auch zeigt der "Modified Soil Ratio-Index"(MSR) einen Zusammenhang zum Chlorophyllgehalt und zum Blattflächenindex [6]. Ein Ausschnitt der in der Literatur aufgestellten Indizes, sowie der ihnen zugeordnete Zusammenhang zu Inhaltsstoffen oder Biomasse ist in Tabelle 2.1-1 zusammengefasst.

*Tabelle 3.13.1-1 Vegetationsindizes aus der Literatur mit Bezug zum Inhaltsstoff oder Wachstumsparameter.*

Indize	Formel	Zusammenhang	Referenz
R[695]	$R_{695}$	Chl.	[13, 14]
R[725]	$R_{725}$	Chl. & Gewicht	[13, 15]
R[740]	$R_{740}$	LAI & Gewicht	[13, 15]
R[845]	$R_{845}$	Gewicht & Chl.	[13]
R[895]	$R_{895}$	Gewicht & LAI.	[13, 16]
RR[530]	$1/R_{530}$	Chl.	[12]
RR[550]	$1/R_{550}$	Chl.	[12]
RR[700]	$1/R_{700}$	Chl.	[12]

NDVI[670,800]	$(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670})$	LAI (<3)	[17]
NDVI[705,750]	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$	LAI (<3)	[14, 17]
NDVI[680,800]	$(R_{800}-R_{680})/(R_{800}+R_{680})$	LAI, Chl. & Gewicht	[11]
NDVI[640,800]	$(R_{800}-R_{640})/(R_{800}+R_{640})$	LAI, Chl. & Gewicht	[11]
NDVI[490,620]	$(R_{620}-R_{490})/(R_{620}+R_{490})$	Wasser	[11]
Macco1	$(R_{780}-R_{710})/(R_{780}+R_{710})$	Chl.	[9]
MSR[670,800]	$((R_{800}/R_{670})-1)/\sqrt{((R_{800}/R_{670})+1)}$	Chl.	[6,18]

### 3 Wachstumsstudie

Zur Untersuchung der zuvor genannten Zusammenhänge, wurden Wachstumsversuche durchgeführt. Neun Salatpflanzen der Sorte *Lactuca sativa* var. *crispa* wurden unter gleichen Bedingungen über einen Zeitraum von 15 Tagen untersucht. Hierzu wurden alle Pflanzen über ein Ebbeflutsystem mit der gleichen Nährstofflösung versorgt und unter künstlichem Licht mit einem festen Spektrum beleuchtet. Die Beleuchtung wurde so eingestellt, dass auf Höhe des Epikotyl eine Photonenstromdichte von  $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  herrscht. Das Pflanzengewicht wurde jeden Tag zur selben Zeit mit einer Feinwaage ermittelt.

#### 3.1 Reflexionsmessung

Die Reflexion des Blattes wird sowohl mit einem Spektralradiometer (KM-CS2000) als auch mit dem 18 Kanal-Spektralsensor AS7265 gemessen. Als Referenzlampe wird eine eingebrennte Halogenlampe verwendet. Der Spektralsensor verfügt über 18 Kanäle mit einer Halbwertsbreite von

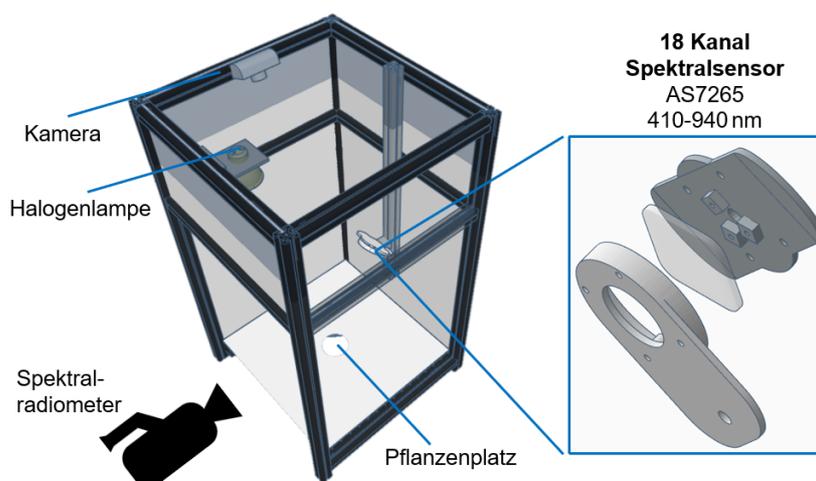


Abbildung 3.1-1 Messaufbau zur gleichzeitigen Erfassung der spektralen Eigenschaften sowie Aufnahme des Kamerabildes.

20nm im Bereich von 410 bis 940nm und bietet somit für einen Spektroskop eine hohe spektrale Auflösung. Um direkte Reflexionen der Pflanze auf den Spektroskop zu vermeiden, wird eine Streuscheibe vor dem Spektroskop positioniert, sodass nur diffus gestreutes Licht auf die Sensoren trifft. Aufgrund seiner konstanten Transmission im betrachteten Spektralbereich, wird die Plexiglasscheibe WH17 von Evonik als Streuscheibe verwendet.

Zur Bestimmung der Reflexion bei verschiedenen Wellenlängen wird zuerst der Reflexionsgrad des Blattes ( $\rho_{\text{Blatt}}(\lambda)$ ) über Gleichung 3.1 aus der mit dem CS2000 gemessenen Reflexion des Weißstandards  $S_{\text{WR}}(\lambda)$  sowie der Reflexion des Blattes  $S_{\text{Blatt}}(\lambda)$  bestimmt.

$$\rho_{\text{Blatt}}(\lambda) = \frac{S_{\text{Blatt}}(\lambda)}{S_{\text{WR}}(\lambda)} \quad (3.1)$$

Über Gleichung 3.2 wird, der Reflexionsgrad mit einer Gaußfunktion gewichtet und über den Messbereich des CS2000 integriert, um die Reflexion in einem Wellenlängenbereich  $R_x$  zu bestimmen. Als Gewichtungsfunktion wird eine Gaußfunktion mit einer Halbwertsbreite von 20nm gewählt, um ein schmales Band um die relevante Wellenlänge zu betrachten.

$$R_x = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \rho_{\text{Blatt}}(\lambda) \cdot \delta_x(\lambda) d\lambda \quad (3.2)$$

### 3.2 Blattflächenbestimmung

Als weiterer Wachstumsparameter wird die Blattfläche herangezogen. Diese bietet gerade bei flachen Pflanzen einen guten Indikator für das Wachstum, solange die Blätter nicht überlappen. In einem Messaufbau wie in Abbildung 3.1-1 gezeigt, wird die Blattfläche anhand eines von einer Kamera aufgenommenen Bildes errechnet. Durch das eingebrennte Halogenleuchtmittel an der Oberseite des Messaufbaus wird ein konstantes Referenzlicht erzeugt, das für alle Messungen die gleichen Lichtverhältnisse bietet. Um ein automatisiertes Auswerten der Bilder zu ermöglichen, werden Parameter wie Auflösung, Weißabgleich und Belichtung konstant gehalten.

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen sichtbarer Blattfläche und Gewicht wird werden die Aufnahmen mithilfe einer Kantenerkennung auf Pflanzengröße zugeschnitten. Anschließend werden die vorverarbeiteten Bilder, sowohl im RGB- als auch im HSV-Farbraum weiterverarbeitet und die Pixel mit der Pflanze (weiß) oder dem Hintergrund(schwarz) zugeordnet und in einer Schwarz-Weiß-Maske abgebildet. Die Zuordnung erfolgt anhand von experimentell ermittelten Grenzwerten für beide Farbräume:

$$\begin{aligned} \text{RGB:} \\ R &\leq 150 = 58,8\% \\ G &\geq 50 = 19,6\% \\ B &\leq 150 = 58,8\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{HSV:} \\ H &= 60^\circ \text{ bis } 130^\circ \\ S &\geq 10\% \\ V &\geq 50\% \end{aligned}$$

## 4 Modellierung

### 4.1 Vegetationsindizes

Aus den nach Gleichung 3.1 und 3.2. bestimmten Reflexionen  $R_x$  werden die einzelnen Vegetationsindizes berechnet. Für Vegetationsindizes, deren Stützstellen außerhalb des Messbereichs des CS2000 liegt, wird hier die obere Grenze des CS2000 mit einer Mittenwellenlänge bei 770nm und einer Gaußgewichtung mit einer Halbwertsbreite von 20nm als Reflexionsreferenz herangezogen. Für die Bildung der Indizes über die spektralen Kanäle des AS7265 wird jeweils der spektral am nächsten liegende Kanal verwendet.

Aus dem so berechneten Index sowie dem auf das Startgewicht bezogene Gewicht, wird der Zusammenhang deutlich. Aus diesem Zusammenhang können Modelle gebildet werden, welche die Zusammenhänge linear oder exponentiell beschreiben. Tabelle 4.1-1 zeigt anhand des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  sowie der Wurzel der gemittelten Fehlerquadrate (RMSE), inwieweit die Zusammenhänge durch das Modell beschrieben werden können. Um den RMSE bei verschiedenen Indizes vergleichbar zu machen, wurden die Indizes zuvor normiert.

Tabelle 4.1-1 Modellübersicht der Vegetationsindizes mit jeweils berechnetem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  sowie dem RMSE.

Modell	AS7265				CS2000			
	linear	exponentiell		linear	exponentiell			
Index	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
R[695]	0,739	0,091	0,754	0,089	-0,012	0,081	-0,02	0,081
R[725]	<b>0,89</b>	<b>0,068</b>	<b>0,917</b>	<b>0,059</b>	0,592	0,07	0,637	0,066
R[740]	<b>0,917</b>	<b>0,064</b>	<b>0,928</b>	<b>0,06</b>	<b>0,726</b>	<b>0,065</b>	<b>0,78</b>	<b>0,058</b>
R[845]	0,886	0,072	0,888	0,071				
R[895]	<b>0,918</b>	<b>0,061</b>	<b>0,93</b>	<b>0,057</b>				
RR[530]	0,655	0,103	0,785	0,081	0,011	0,082	0,01	0,082
RR[550]	0,675	0,106	0,772	0,089	0,044	0,083	0,054	0,082
RR[700]	0,65	0,103	0,638	0,105	0,026	0,082	0,032	0,082
NDVI[670,800]	0,781	0,107	0,906	0,07	0,629	<b>0,063</b>	0,694	<b>0,058</b>
NDVI[705,750]	0,814	0,101	0,895	0,076	0,699	0,082	0,744	0,075
NDVI[680,800]	0,781	0,107	0,906	0,063	0,628	<b>0,063</b>	0,737	<b>0,053</b>
NDVI[640,800]	0,809	0,106	0,913	0,072	<b>0,701</b>	0,066	<b>0,793</b>	<b>0,055</b>
MSR[670,800]	0,862	0,094	<b>0,93</b>	0,067	0,677	0,085	0,723	0,078

Abbildungen 4.1-1 und 4.1-2 zeigen den Zusammenhang zwischen dem MSR [670-800] sowie dem R895. In beiden Fällen kann eine exponentielle Funktion modelliert werden, welche den Zusammenhang mit einem  $R^2$  von 0,93 beschreibt.

Ebenfalls wird bei Betrachtung der Tabelle 4.1-1 deutlich, dass sowohl exponentielle Modelle die Daten besser beschreiben als auch, dass die Modelle die Daten besser beschreiben, je langwelliger die Bereiche sind, auf denen die Indizes basieren. Ein Vergleich mit den auf dem CS2000 basierenden Indizes ist in diesem Wellenlängenbereich aufgrund des Messbereichs des CS2000 nicht möglich.

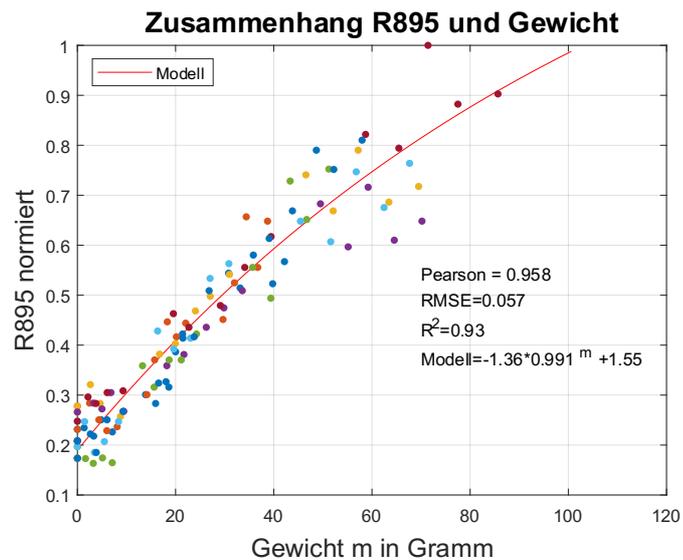


Abbildung 4.1-1 Exponentielles Modell des Index R895 auf Basis der Daten des Spektralsensors AS7265. Zur Unterscheidung einzelner Pflanzen sind diese durch unterschiedliche Farben markiert.

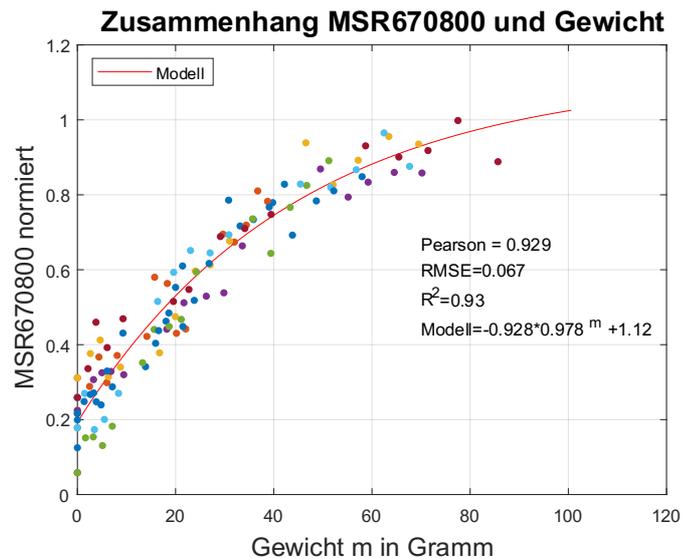


Abbildung 4.1-2 Exponentielles Modell des Index MSR[670-800] auf Basis der Daten des Spektralsensors AS7265. Zur Unterscheidung einzelner Pflanzen sind diese durch unterschiedliche Farben markiert.

## 4.2 Blattfläche

Der Verarbeitungsprozess zur Erfassung der Blattpixel in Abbildung 4.2-1 zeigt in Abschnitt a und b die Vorverarbeitung mittels Kantenerkennung sowie in Abbildung 4.2-1c die nicht vollständig zugeordnete Maske im RGB-Farbraum. Im HSV-Farbraum, Abbildung 4.2-1d, kann eine deutlich bessere Zuordnung erreicht werden.

Aus den Masken kann die Pixelanzahl pro Pflanze pro Tag ermittelt werden. Ähnlich der Analyse der Reflexionen und Indizes kann der Zusammenhang von Pflanzenpixeln und Gewicht über ein lineares Modell untersucht werden.



(a) Originalaufnahme der Pflanze.



(b) Vorverarbeitetes Pflanzenbild.



(c) RGB-Maske der Pflanze.



(d) HSV-Maske der Pflanze.

Abbildung 4.2-1 Ablauf der Pflanzenpixelklassifizierung im RGB- und HSV-Farbraum.

Die Abbildung 4.2-2 zeigt auf der linken Seite das errechnete Modell aus den Daten des RGB-Farbraums und auf der rechten Seite die des HSV-Farbraums. Die bessere Klassifizierung der Pixel im HSV-Farbraum begründet auch den besser modellierbaren

Zusammenhang mit einem  $R^2$  von 0,891 (HSV-Modell) im Vergleich zu 0.883 (RGB-Modell) im RGB-Farbraum.

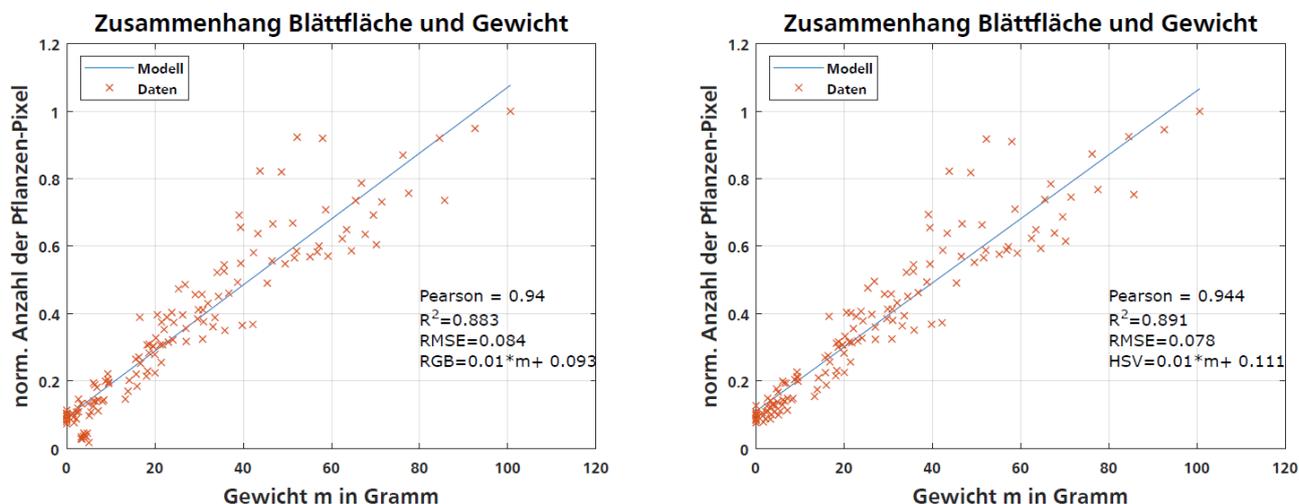


Abbildung 4.2-2 Vergleich der linearen Modelle auf Basis der zur Pflanze klassifizierten Pixel im RGB-Farbraum links und HSV-Farbraum rechts.

## 5 Fazit

Die Ergebnisse in Abschnitt 4 zeigen, dass es möglich ist sowohl einen Zusammenhang bestimmter Vegetationsindizes und dem Gewicht sowie der sichtbaren Blättfläche und dem Gewicht zu modellieren. Eine Modellprobe mittels Umkehrfunktion zeigt eine Abweichung des errechneten Gewichtes von  $10\% \pm 20\%$  bei der Bestimmung mittels  $R895$ -Index und  $20\% \pm 20\%$  bei Verwendung des Modells aus dem HSV-Farbraum vom tatsächlichen Gewicht.

Weitere Untersuchungen sowohl mit dieser Kultur als auch weiteren Kulturen müssen zeigen, inwieweit sich diese Ergebnisse auf andere Kulturen und Sorten übertragen lassen. Ebenfalls zeigen die Ergebnisse eine bessere Modellierung der Zusammenhänge je langwelliger der Spektralbereich ist, auf dem der Vegetationsindex basiert.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt. Weltweit gehen jährlich 10 Millionen Hektar Ackerfläche verloren. 2015. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/weltweit-gehen-jaehrlich-10-millionen-hektar> (abgerufen am 13. 05. 2021).
- [2] Jes Weigelt Christine Chemnitz. Bodenatlas - Daten und Fakten über Acker, Land und Erde. (2015).
- [3] United Nations | Department of Economic und Social Affairs. World Population Prospects 2019.In: (2019). URL: [https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019\\_10KeyFindings.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_10KeyFindings.pdf).
- [4] Toyoki Kozai. Smart Plant Factory. 1. Aufl. Springer Singapore, 2018. 456 S. ISBN: 978-9-811-31064-5.
- [5] Axel Brennicke Peter Schopfer. Pflanzenphysiologie. 7. Aufl. Springer, 2016. 702 S. ISBN: 978-3-662-49880-4.
- [6] Wei-Tai Chen et al. An Automatic Plant Growth Measurement System for Plant Factory (2013). DOI: <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00073>.
- [7] Mills et al. The UNECE International Cooperative Programme on Vegetation Final Report. Sep. 2019.
- [8] Meropi Gavriilidou et al. Derivation of critical absorbed doses for ozone using ozone sensitive clover clones. In: (2002).
- [9] A. Elvanidi et al. Crop reflectance measurements for nitrogen deficiency detection in a soilless tomato crop. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.09.019>.
- [10] Ian B. Strachan, Elizabeth Pattey und Johanne B. Boisvert. Impact of nitrogen and environmental conditions on corn as detected by hyperspectral reflectance. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00299-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00299-1).
- [11] Nikolaos Katsoulas et al. Crop reflectance monitoring as a tool for water stress detection in greenhouses: A review DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.003>.
- [12] Anatoly A. Gitelson, Yuri Gritz † und Mark N. Merzlyak. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>.
- [13] Roshanak Darvishzadeh et al. LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.01.001>.

- [14] Anatoly Gitelson und Mark N. Merzlyak. Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81633-0](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81633-0).
- [15] D. N. H. HORLER, M. DOCKRAY und J. BARBER. The red edge of plant leaf reflectance. DOI: 10.1080/01431168308948546.
- [16] Martin Schlerf, Clement Atzberger und Joachim Hill. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.016>.
- [17] Chaoyang Wu et al. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 148.8 (2008), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.03.005>.
- [18] Jing M. Chen. Evaluation of Vegetation Indices and a Modified Simple Ratio for Boreal Applications. DOI: 10.1080/07038992.1996.10855178.