



Als Kantonswappen gestaltete PV-Module.

Ein Farb-Effizienz-Modell für PV-Module

Berechnungsmodelle für Farbe und Effizienz | Farbige PV-Module werden immer häufiger eingesetzt, wenn Gebäudehüllen stromproduzierend, ästhetisch und individuell gestaltet sein sollen. Ein an der HSLU entwickeltes Modell zeigt nun auf, welche elektrische Effizienzen bei welchen Farben möglich sind. Und dies, ohne kosten- und zeitintensive Muster herstellen zu müssen.

STEPHEN WITTKOPF, ANDREAS SYNOWCZYK

Es gibt viele Möglichkeiten, um PV-Module farbig zu machen. Organische PV-Module können von sich aus schon farbig sein. Traditionelle PV-Module auf Basis von schwarzen mono- oder polykristallinen PV-Zellen lassen sich hingegen nur durch vorgelagerte Folien und veredeltes Glas farbig machen. Mit Folien und Beschichtungen kann man eine kleine Farbpalette produzieren und «von der Stange» verkaufen. Bei mehrfarbigen PV-Modulen mit freier Farb- und

Motivwahl führt kein Weg am digitalen Farbdruck auf Glas vorbei. Der Nachteil: Farbe reduziert meist die Stromproduktion. Andererseits erhöht Farbe die visuelle Akzeptanz in der gebauten Umwelt. PV-Anlagen werden dadurch an Orten bewilligt und installiert, wo es sonst nicht möglich wäre.

Raster Image Processor (RIP)

Das RIP-Verfahren wird beim Tintenstrahldrucker eingesetzt. Das Bild, das Millionen von Bildfarben enthalten

kann, wird in Grundfarben separiert und für jede Grundfarbe eine Rastergrafik angelegt, die die Druckpunkte für diese Grundfarbe enthält. Dies wird von einem Raster Image Processor (RIP) berechnet, weswegen dieser Vorgang auch Rippen genannt wird. Beim anschliessenden Drucken werden die Druckpunkte der Rastergrafiken übereinander gedruckt, sodass sie sich wieder zu den Bildfarben mischen. Typische Glasdrucker separieren in die sechs Grundfarben Rot, Orange, Grün,

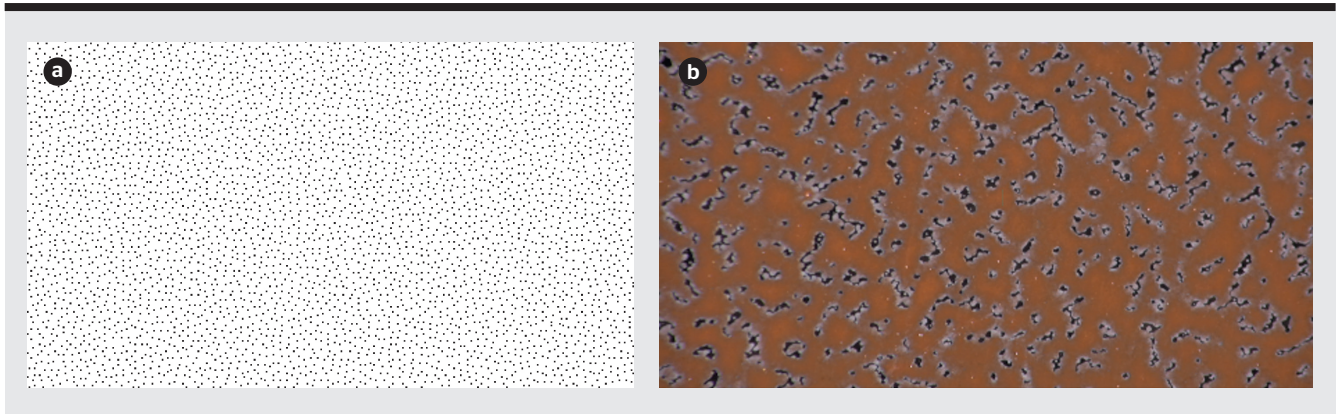


Bild 1 a) Rastergrafik und b) mikroskopische Aufnahme des Druckbildes für die Grundfarbe Rot mit einer Deckkraft von 50%. Die roten Farbpunkte überlappen sich und es wird ein Grossteil der Fläche bedeckt.

Blau, Schwarz und Weiss. **Bild 1** zeigt die Rastergrafik und ein resultierendes Druckbild.

Einbrennen der Farbe

Da Glas die Tinte nicht aufsaugen kann, bleibt sie als dünnflüssiger Film auf der Glasoberfläche und kann restlos wieder weggewischt werden. Nur über eine anschliessende Erhitzung im Ofen wird sie dauerhaft eingebrannt. Die Tinte enthält daher neben den Farbpigmenten und Verflüssigungsmitteln auch Glasstaub, der beim Erhitzen schmilzt, die Farbpigmente umschliesst und sie mit der aufgeweichten Glasoberfläche verschmilzt. Nach dem Abkühlen befinden sich die Farbpigmente damit «im» und nicht «auf» dem Glas mit dem Vorteil, dass sie weder abgekratzt werden können noch der Witterung ausgesetzt sind. Dieses Einbrennen mag als zusätzlicher und aufwendiger Prozess des Druckens erscheinen, ist er aber nicht. Das Erhitzen des Glases ist für das thermische Härten sowieso nötig, weil erst damit das Floatglas bauglich wird.

Glanz und Transparenz

Eine Besonderheit beim Bedrucken von Glas liegt darin, dass sich die Druckfarbe auf der Oberfläche verändern kann. Das liegt am Glanz und der Transparenz des Glases. Der Glanz kann dazu führen, dass viele spiegelnde Objekte, Lichter und Farben die Farbe des Glases übersteuern. Dieser Effekt wird umso grösser, je flacher der Betrachtungswinkel wird. Die wahrgenommene Farbe ist also eine Mischung aus der gespiegelten Umgebungsfarbe und der Körperfarbe. Bei der Beurteilung von Farben muss

man sich dessen bewusst sein und Situationen mit Spiegelungen vermeiden. Zum anderen bewirkt eine transparente Farbe, dass die PV-Zellen und elektrischen Komponenten sichtbar werden. Auch hier ist die wahrgenommene Farbe eine Mischung der Körperfarbe

und der durchscheinenden Hintergrundfarbe. Je transparenter eine Farbe ist, desto mehr Schwarz oder Dunkelblau der PV-Zellen mischt sich dazu und desto höher wird der «Schwarzanteil». Während man beim Drucken auf Papier die Bildfarbe erhält, bekommt man bei

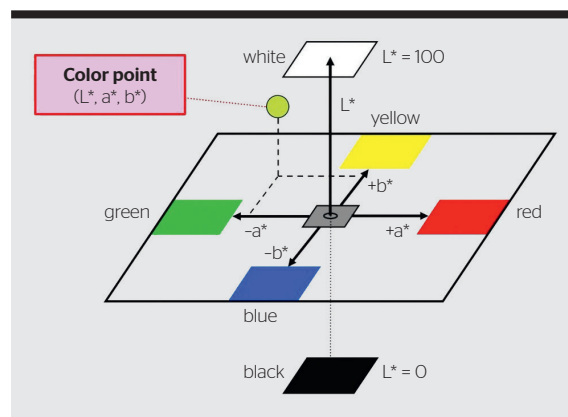


Bild 2 Der dreidimensionale CIE L*a*b*-Farbraum, in dem jede Farbe durch einen eindeutigen Punkt (Color point) gekennzeichnet ist [1]. «L» steht für die Helligkeit, «a» ist die Grün-Rot-Achse, die von -128 (Grün) zu 127 (Rot) reicht, und «b» ist die Blau-Gelb-Achse, die analog von -128 bis 127 reicht. Die Entfernung vom Nullpunkt gibt die Farbsättigung an.

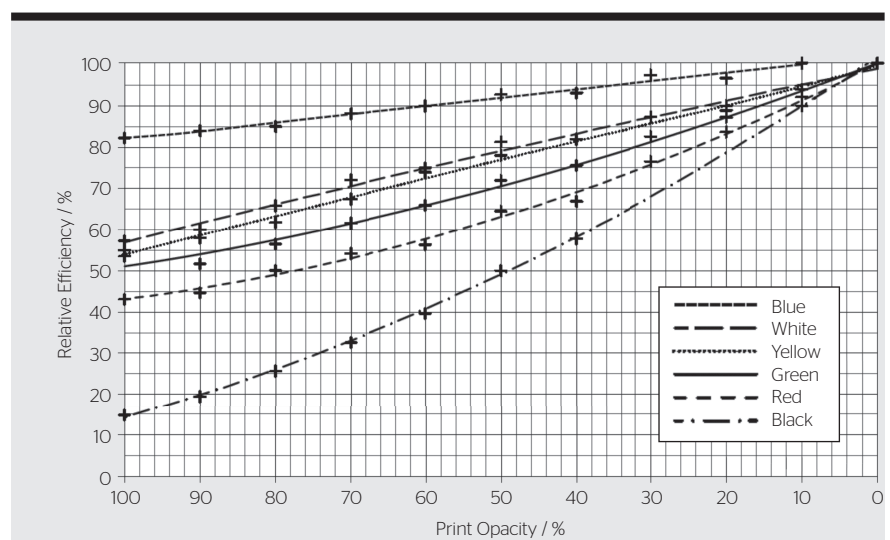


Bild 3 Zusammenhang zwischen der Deckkraft (Print Opacity) einer Grundfarbe und der resultierenden RE (Relative Efficiency) [2].

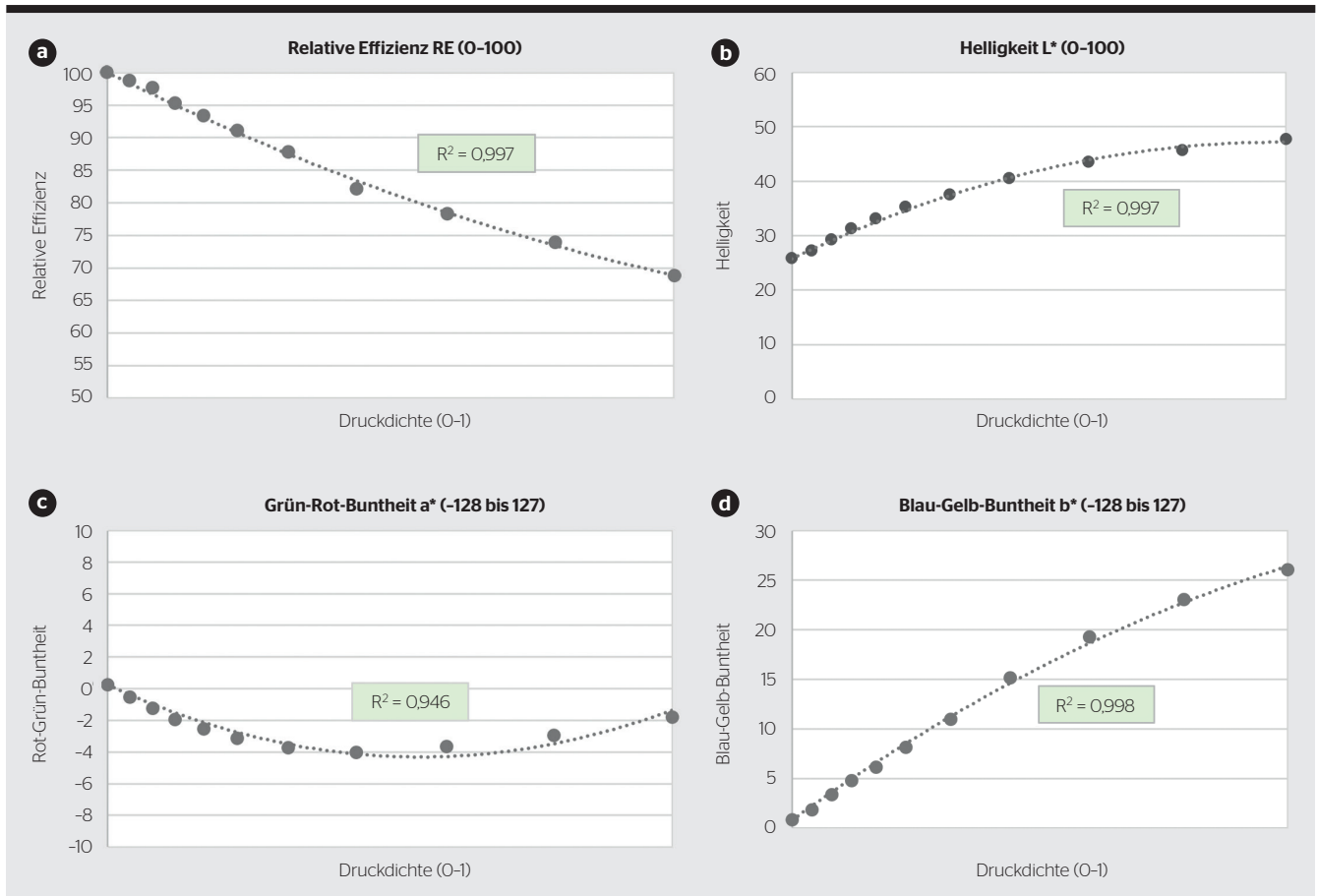


Bild 4 Analyse für die Grundfarbe Orange. **a)** RE nimmt mit zunehmender Druckdichte ab (quadratische Funktion). **b)** Die Helligkeit steigt von 25,77 (unbedrucktes PV-Modul) bis knapp 50 an. **c)** Die Veränderung entlang der Grün-Rot-Achse ist minimal, weil diese Farben nicht in Orange enthalten sind. **d)** Der Gelb-Wert steigt um 26 Punkte. Bei allen Funktionen streuen die berechneten Werte nur sehr wenig um die Messwerte herum.

PV-Modulen je nach PV-Zelle Farben mit erhöhtem Schwarz-, Blau- oder Braunanteil.

Relative Effizienz (RE)

Da ein farbiges Frontglas weniger Licht durchlässt als ein klares Frontglas, erzeugt ein farbiges PV-Modul weniger Strom. Die Nennleistung wird meist absolut, z.B. mit 140 W angegeben, kann aber auch relativ zu einem baugleichen PV-Modul mit klarem Frontglas angegeben werden. Wenn Letztere eine Nennleistung von 195 W hat, dann beträgt die relative Effizienz des farbigen PV-Moduls entsprechend $RE = 140\text{ W}/195\text{ W} = 72\%$. Grundsätzlich ist die RE damit geeigneter, die Farbe leistungsmässig zu charakterisieren als absolute Werte, die keine Rückschlüsse auf deren Einfluss erlauben. In der Planung von Projekten hat sich deshalb RE etabliert und gezeigt, dass in vielen Fällen eine RE zwischen 70 und 80% als guter Kompromiss angestrebt wurde.

Farbe	Gemessene Werte					Veränderungen (D_) gegenüber unbedruckt					
	Dichte	Strom		Farbe			Relative Effizienz		Farbe		
		P _{max} (W)	L*	a*	b*	RE (%)	D_RE	D_L*	D_a*	D_b*	
	x	y	y	y	y	y					
Unbedruckt		195,43	25,77	0,24	0,84	100,00	0,00	-1,45	0,80	-0,99	
Orange	0-1	193,00	27,22	-0,56	1,82	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
		190,73	29,27	-1,27	3,32	98,83	-1,17	2,05	-0,71	1,50	
		186,17	31,27	-1,95	4,76	96,46	-3,54	4,05	-1,39	2,94	
		182,47	33,03	-2,56	6,13	94,55	-5,45	5,81	-2,00	4,31	
		177,92	35,19	-3,15	8,09	92,19	-7,81	7,97	-2,59	6,27	
		171,55	37,53	-3,73	10,92	88,89	-11,11	10,31	-3,17	9,10	
		160,40	40,44	-4,03	15,10	83,11	-16,89	13,22	-3,47	13,28	
		153,08	43,52	-3,68	19,24	79,32	-20,68	16,30	-3,12	17,42	
		144,47	45,63	-2,97	23,02	74,85	-25,15	18,41	-2,41	21,20	
		134,45	47,72	-1,82	26,03	69,66	-30,34	20,50	-1,26	24,21	

Tabelle 1 Kenndaten der PV-Sondermodule der Grundfarbe Orange. Die Leistung P_{max} wurde vom PV-Modulhersteller geliefert, die Lab-Werte wurden mit Handmessgeräten mit speziellen Messköpfen und Kalibrierungen ermittelt, damit die Farbe auf Glas trotz Transparenz und Spiegelung hinreichend genau gemessen werden kann.

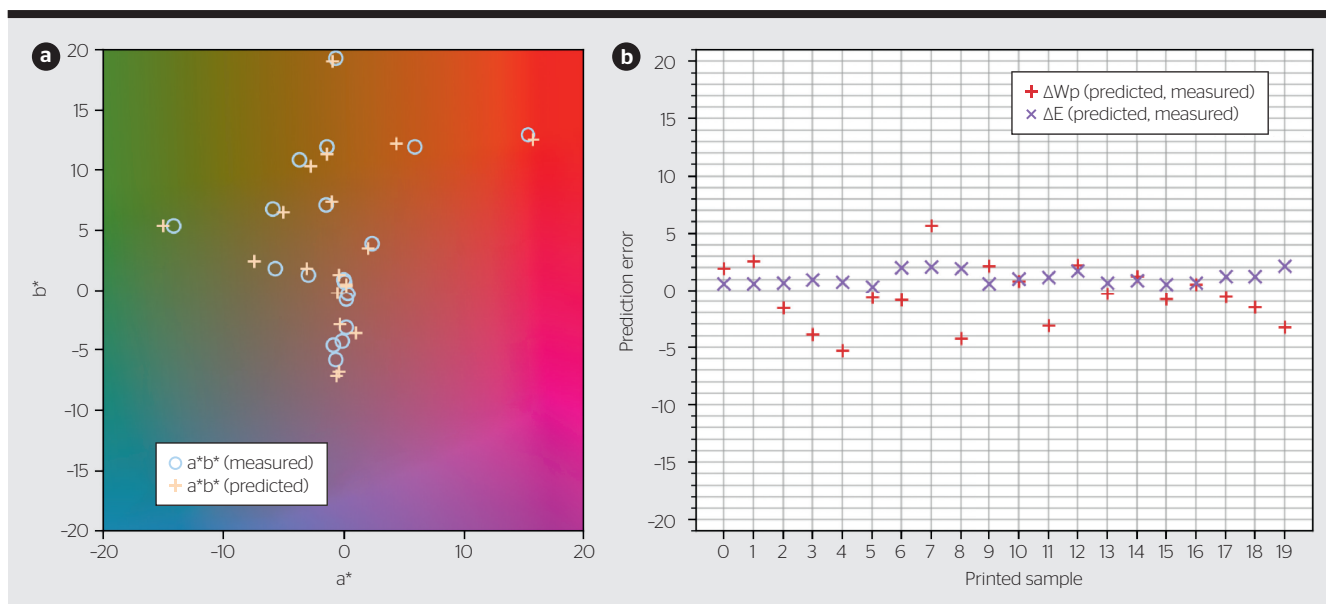


Bild 5 Abweichungen bei der RE und bei den Farben für eine Serie von 19 PV-Modulen (Printed Sample). **a)** Ausschnitt aus dem Lab-Farbraum (Horizontalschnitt auf Höhe eines L von ca. 50). Die Abweichungen sind kaum sichtbar. **b)** Die Leistungsabweichungen liegen bei 5 W, was bezogen auf die Ausgangsleistung von 195 W einen Fehlerkorridor von $\pm 2,5\%$ ergibt. Die Farbabweichungen (E) sind auch unkritisch.

Farbraum Lab

Es gibt diverse Systeme bzw. Farbräume zur Charakterisierung von Farben. Je nach Branche kommen entweder RAL, NSC oder Pantone zum Einsatz, mit denen rund 2000 bis 4000 Farben beschrieben werden. Nur der $L^*a^*b^*$ -Farbraum der internationalen Beleuchtungskommission CIE kann alle wahrnehmbaren Farben in einem Farbraum einordnen und mathematisch beschreiben (Bild 2). Damit lässt sich auch der Unterschied bzw. der Farbabstand zwischen zwei Farben (Delta E) berechnen. Je höher das Delta E, desto grösser ist der Unterschied, wobei er erst ab einem Wert von 3 von einem normalen Betrachter überhaupt bemerkt wird. Werte ab 6 gelten als grosse Differenzen.

PV-Sondermodule

In einem von Innosuisse geförderten Forschungsprojekt der Hochschule Luzern mit dem Umsetzungspartner Glas Trösch wurde ein Farb-Effizienz-Modell entwickelt, das die Quantifizierung der Effizienz ohne die umständliche Herstellung von Mustern ermöglicht. Im ersten Teil des Forschungsprojekts wurde ermittelt, wie eine Farbe und ihre Deckkraft die RE und Farbe des späteren PV-Moduls beeinflusst. Aus früheren Arbeiten über andere Drucksysteme war

bekannt, dass die Grundfarben einen unterschiedlich starken Einfluss haben (Bild 3).

Es gibt Grundfarben mit stark deckenden Pigmenten wie Schwarz und Rot, und solche die nur schwach

deckend sind, beispielsweise Blau. Aber noch nicht bekannt war, wie die Druckdichte der Grundfarben die RE und Lab-Farbe beeinflusst. Um das herauszufinden, wurden mit dem Umsetzungspartner Glas Trösch

Farbe	Druckdichte	y1 (Leistung)	y2 (L*)	y3 (a*)	y4 (b*)
Hellgrün	(0,4 - 1)	173,10	28,90	-3,32	1,21
		157,96	29,78	-5,77	1,86
		139,54	32,03	-9,88	3,38
		122,31	33,80	-14,18	5,39
Lindgrün	(0,4 - 1)	165,88	34,14	-5,93	6,81
		147,96	38,39	-8,55	11,91
		121,31	43,01	-9,82	17,85
		97,77	45,81	-9,70	21,89
Birngelb	(0,4 - 1)	173,65	32,88	-1,55	7,15
		158,93	36,97	-1,45	11,95
		139,15	42,42	-0,74	19,32
		119,33	46,26	1,32	24,63
Beige	(0,4 - 1)	165,35	32,04	2,55	8,08
		149,79	34,26	5,86	11,99
		133,10	36,87	9,16	15,95
		113,82	39,09	12,44	19,10
Altrosa	(0,4 - 1)	169,07	29,10	3,02	5,49
		154,16	29,81	5,49	7,62
		137,51	31,19	8,56	9,75
		124,01	31,97	11,74	11,16

Tabelle 2 Kenndaten von PV-Sondermodulen von ausgewählten Mischfarben. Jede Zeile steht für ein PV-Modul. Die Spalten y1 bis y4 zeigen die gemessene Leistung und Farbe, analog zur Tabelle 1.

Farbe	Druckdichte	y1 (Leistung)	y2 (L*)	y3 (a*)	y4 (b*)	Farbe
Hellgrün	(0,4 - 1)	167,58	31,41	-4,20	0,64	
		151,37	33,68	-7,44	0,56	
		137,27	36,38	-10,27	0,56	
		112,18	40,06	-15,03	1,89	
Lindgrün	(0,4 - 1)	164,29	36,64	-5,04	4,65	
		147,65	41,67	-6,78	7,47	
		119,77	50,19	-9,40	13,12	
		81,66	60,10	-10,78	18,90	
Birngelb	(0,4 - 1)	170,95	36,00	-1,05	5,57	
		157,09	41,32	-1,41	8,39	
		131,55	50,37	-0,91	14,28	
		103,26	59,07	2,19	18,85	
Beige	(0,4 - 1)	164,38	34,90	2,34	6,59	
		145,76	39,14	4,35	9,79	
		124,05	44,34	6,59	13,50	
		86,85	54,05	10,07	20,44	
Altrosa	(0,4 - 1)	169,82	31,15	3,71	3,60	
		156,47	32,65	6,30	4,58	
		140,48	34,78	9,28	5,56	
		114,17	37,70	13,96	7,70	

Tabelle 3 Berechnungen für Mischfarben. Jede Zeile steht für ein hypothetisches PV-Modul. Die Spalten y1 bis y4 sind die Vorhersagen, die anhand der erlernten Funktionen berechnet werden konnten.

PV-Module konzipiert, produziert, charakterisiert und analysiert. Konkret wurden die Spezifikationen von der HSLU entwickelt, die farbigen Gläser von Glas Trösch gedruckt und daraus die PV-Sondermodule mit monokristallinen PERC-Zellen von einem schweizerischen PV-Modulhersteller produziert. **Tabelle 1** zeigt eine Zusammenstellung der dabei ermittelten Daten. Jede Zeile entspricht einem PV-Modul, die für die Grundfarbe Orange hergestellt wurden.

Klassische Regressionsanalysen für Grundfarben

Der Zusammenhang zwischen diesen Werten wurde mittels klassischer Regressionsanalyse in Excel hergeleitet. Konkret wurde der Einfluss der unabhängigen Variable «Dichte» auf die abhängigen Variablen RE sowie die einzelnen Elemente L, a, b des Lab-Farbraums analysiert. **Bild 4** zeigt die Messpunkte und die gefundenen Regressionsfunktionen sowie deren Bestimmtheitsmass, wiederum am Beispiel der Grundfarbe Orange.

Diese Regressionsanalysen wurden für alle sechs Grundfarben gemacht. Die abgeleiteten Funktionen ermögli-

chen es nun, die Farben und RE für alle möglichen Deckkräfte oder Füllungen bei Grundfarben zu errechnen.

Machine Learning für Regressionsanalysen von Mischfarben

Für Mischfarben reicht die vorher erläuterte Farbbestimmung aber nicht aus, denn sie bestehen aus überlagerten Dichten zugrundeliegender Grundfarben, die jeweils für sich, aber auch in Kombinationen miteinander die RE und Farbe beeinflussen. Das würde eine multiple quadratische Regressionsanalyse erfordern, die die Möglichkeiten von Excel übersteigt. Stattdessen wurden die Regressionen als Python-Script auf dem SciKit-Learn (sklearn) Machine Learning Modul umgesetzt. Vorher wurden weitere PV-Sondermodule mit Mischfarben hergestellt und vermessen. **Tabelle 2** zeigt diese Daten für fünf ausgewählte Mischfarben: Hellgrün, Lindgrün, Birngelb, Beige und Altrosa.

Die Daten aller PV-Sondermodule (mit Grund- und Mischfarben) wurden dem Script als sogenannte Trainingsdaten zugewiesen, davon ein Viertel als Testdaten. Pro Iteration approximiert das Script eine Funktion

und notiert, wie nahe die damit berechneten RE und Lab von denen der Testdaten entfernt sind. Es lernt so schrittweise, welche Elemente der Funktion so zu ändern sind, dass sich die Abweichungen verkleinern. Mit zunehmenden Iterationen konvergiert es dann zu einer finalen Funktion, mit denen die Abweichungen am kleinsten sind. Mit dieser «erlernten» Funktion können dann RE und Lab-Farben auch für andere Mischfarben berechnet werden. **Bild 5** zeigt die Berechnungsgenauigkeit auf, die eine so hergeleitete multiple quadratische Regressionsfunktion nach einem Durchlauf von 10 000 Iterationen ermöglicht.

Plausibilisierung von Vorhersagen

Mit diesen Funktionen können dann die RE und Lab-Farben für neue Mischfarben vorhergesagt werden. Ausgangspunkt ist jeweils die Druckdichte der verwendeten Grundfarben, woraus dann die Leistung, Helligkeit und Lage auf den Farbachsen a* und b* sowie eine Vorschau der Farbe umgerechnet als RGB berechnet wird. **Tabelle 3** zeigt ein Beispiel.

Da es zu diesen Mischfarben aber keine PV-Module gibt, bzw. gemessene RE und Lab-Farben, können die Berechnungsergebnisse nicht validiert werden. Sie müssen plausibilisiert werden. Daher wurden die zu berechnenden Mischfarben so gewählt, dass sie denjenigen in den Trainingsdaten ähnlich sind. In diesem Fall sind sie eine hellere Variante, d.h. sie unterscheiden sich nur in der Zugabe von weissen Druckpunkten. Beispielsweise können jetzt die Angaben in den Tabellen 2 und 3 zeilenweise verglichen werden. **Tabelle 2** zeigt die Werte der Mischfarben, die gemessen wurden, und **Tabelle 3** zeigt die Werte, die für die gleichen, aber aufgehellten Mischfarben vorhergesagt wurden. Plausibel ist die generelle Reduktion der RE, weil zusätzliche weisse Druckpunkte den Lichtdurchgang weiter reduzieren. Plausibel ist ebenfalls die generelle Erhöhung der Helligkeit mit der Zunahme der weissen Druckpunkte, weil sie mehr Licht reflektieren. Auch ist die Zunahme der Helligkeit bei 100 % grösser als z.B. bei 40 %. Zudem ist die vorhergesagte Verschiebung der Farben in Richtung des unfarbigen

Mittelpunkts plausibel, denn je mehr weisse Druckpunkte beigemischt werden, desto ungesättigter wird die Farbe.

Stand des Projekts

Die vorgestellten Ergebnisse sind ein aktueller Arbeitstand des Projekts nach zwei Dritteln der Projektdauer. Mit dem Einsatz von Machine Learning wurde das Farb-Effizienz-Modell um die Berechnungen von Mischfarben erweitert. Aktuell laufen Optimierungen und Automatisierungen bei Glas Trösch und der Hochschule

Luzern, um den Umfang der berechenbaren Farbpalette zu vergrössern und das FEM auf andere Drucksysteme portieren zu können. Das FEM wird bereits stichprobenmässig für Pilot- und Demonstrationsprojekte eingesetzt. Zuletzt im CAS-Photovoltaik der Hochschule Luzern, in dem leistungsäquivalente Farben für verschiedene mehrfarbige Motive ermittelt werden. Des Weiteren ist im Januar 2024 eine neue Installation von farbigen PV-Modulen am Nest-Gebäude der Empa in Dübendorf geplant.

Referenzen

- [1] knowledge.ulprospector.com/media/2020/07/1-CIELAB-Color-Space-002-1536x650.jpg
- [2] Patent CN 109275342A, Erfinder Stephen Wittkopf, publiziert am 25. Januar 2019. www.lens.org/lens/patent/054-462-260-908-513/frontpage?l=en

Autoren

Prof. Dr. **Stephen Wittkopf** ist Dozent und Leiter des Wissens- und Innovationstransfers.
→ HSLU, 6048 Horw
→ stephen.wittkopf@hslu.ch

Dr. **Andreas Synowczyk** ist Experte für die Verarbeitung von Flachglas bei der Glas Trösch AG.
→ Glas Trösch AG, 4922 Bützberg
→ a.synowczyk@glastroesch.ch

Dieses Forschungsprojekt mit Glas Trösch als Umsetzungspartner wird mitfinanziert durch die Innosuisse.



Un modèle couleur-efficacité pour les modules PV

Modèles de calcul de la couleur et de l'efficacité

Les modules photovoltaïques colorés sont de plus en plus utilisés lorsque les enveloppes des bâtiments doivent produire de l'électricité tout en étant esthétiques et conçues de manière individuelle. Dans le cadre d'un projet de recherche soutenu par Innosuisse, la Haute école de Lucerne a développé, en collaboration avec le partenaire industriel Glas Trösch, un modèle couleur-efficacité permettant de simuler les couleurs et efficacités de modules PV colorés.

La couleur du module PV est obtenue à l'aide d'un procédé numérisé d'impression céramique sur verre, utilisé à la place du verre transparent lors de la production de modules PV. Ce procédé nécessite des données numériques d'impression ainsi que des réglages spécifiques lors de l'impression. À partir de ceux-ci, il est désormais possible de déterminer à l'avance la couleur et l'efficacité électrique qu'aurait un module PV doté de ce verre imprimé, et ce, avant de devoir recourir à une production complexe. Cela réduit le temps et les coûts, et augmente la sécurité en matière de planification.

Dans une première étape, des modules PV ont été produits avec certaines couleurs. Ensuite, les couleurs et les efficacités électriques de ces modules ont été mesurées.

Après ce travail expérimental, les résultats des mesures en matière de couleur et d'efficacité ont été corrélés avec les paramètres sous-jacents dans le fichier d'impression et lors de l'impression, et les corrélations identifiables ont été converties en formules mathématiques pour aboutir au modèle couleur-efficacité précité. Celui-ci permet de simuler avec suffisamment de précision les couleurs et les efficacités des modules photovoltaïques produits, mais aussi des futurs modules PV pour lesquels on ne dispose pour l'instant que des fichiers d'impression et des réglages. Lors de la modélisation, les chercheurs ont utilisé aussi bien la régression classique que l'intelligence artificielle. Dans ce dernier cas, outre les algorithmes d'apprentissage automatique (machine learning), ce sont surtout les « sets d'apprentissage » qui jouent un rôle décisif. Ceux-ci contiennent toutes les données à partir desquelles les algorithmes de machine learning apprennent les corrélations de manière autonome. Actuellement, des optimisations et des automatisations sont en cours afin d'élargir la palette des couleurs simulables et de pouvoir étendre l'utilisation du modèle couleur-efficacité à d'autres systèmes d'impression.