BestMasters

Saskia Wilmsen

Epidermale Mikrostrukturen von Blütenblättern

Einfluss auf spektrale Reflexion und Attraktivität für Hummeln

Springer Spektrum

BestMasters

Mit „BestMasters“ zeichnet Springer die besten Masterarbeiten aus, die an renommierten Hochschulen in Deutschland, Österreich und der Schweiz entstanden sind. Die mit Höchstnote ausgezeichneten Arbeiten wurden durch Gutachter zur Veröffentlichung empfohlen und behandeln aktuelle Themen aus unterschiedlichen Fachgebieten der Naturwissenschaften, Psychologie, Technik und Wirtschaftswissenschaften.
Die Reihe wendet sich an Praktiker und Wissenschaftler gleichermaßen und soll insbesondere auch Nachwuchswissenschaftlern Orientierung geben.

Weitere Bände in dieser Reihe http://www.springer.com/series/13198

Saskia Wilmsen

Epidermale Mikrostrukturen von Blütenblättern

Einfluss auf spektrale Reflexion und Attraktivität für Hummeln

Mit einem Geleitwort von Herrn Prof. Dr. Klaus Lunau

Springer Spektrum

Saskia Wilmsen
Düsseldorf, Deutschland

OnlinePlus Material zu diesem Buch finden Sie auf
http://www.springer.com/978-3-658-18605-0

BestMasters
ISBN 978-3-658-18604-3 ISBN 978-3-658-18605-0 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-18605-0

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Springer Spektrum
© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Geleitwort

Blüten sind hochkomplexe Signalstrukturen, die nicht nur Bestäuber anlocken, sondern auch Nektar- und Pollendiebe sowie andere Antagonisten vom Blütenbesuch abhalten sollen. Blütenduft und Blütenfarbe gelten dabei als Signale, die über einige Entfernung wirken, während taktile Reize und geschmackliche Eigenschaften von Nektar und Pollen erst bei Kontakt wirken. In den letzten Jahren wurde die Palette von bekannten Blütensignalen erheblich erweitert, als Blütenbiologen auf die Oberflächeneigenschaften von Blütenblättern aufmerksam wurden. Blütenblätter können eine Epidermis mit flachen oder mit konischen Zellen aufweisen und dadurch bislang wenig erforschte Eigenschaften entfalten. Die Oberflächenstruktur von Blütenblättern beeinflusst beispielsweise ihre Benetzbarkeit mit Wasser, ihre Emission von Blütenduftstoffen, ihre Griffigkeit für Blütenbesucher, die sich auf den Blüten festhalten müssen, ihre Farbe durch die Linsenwirkung von Epidermiszellen, die einfallendes Licht auf die Blütenpigmente fokussieren und den Glanz der Blütenblätter. Unter Glanz verstehen wir die Totalreflexion von einfallendem Licht an einer glatten Oberfläche.

Saskia Wilmsen hat in ihrer Masterarbeit die Glanz produzierenden Oberflächenstrukturen von Blütenblättern und die Wirkung von glänzenden Farbsignalen auf die Attraktivität von Hummeln untersucht. Dafür hat Saskia Wilmsen die Form der Epidermiszellen der Blütenblätter von 37 Arten der Blütenpflanzen anhand von Dünnschnitten im Lichtmikroskop quantitativ charakterisiert und die spektrale Reflexion unter unterschiedlichen Winkeln gemessen, um die Winkelabhängigkeit des Blütenglanzes zu bestimmen.

Für die Wahlversuche mit Hummeln hat Saskia Wilmsen Blütenblätter der Rosen-Hybride ‚Agnes Bernauer' sowie *Tibouchina urvilleana* ausgewählt, um über einen Silikonabguss ein blau eingefärbtes Positiv aus Epoxidharz herzustellen, das sie als Blütenattrappe mit naturidentischer Oberflächenstruktur einsetzen konnte. Diese Blütenattrappen wurden Hummeln in Spontanwahlversuchen simultan mit anderen glatten und rauen Oberflächen zur Wahl gestellt, wobei die Lichtbedingungen sorgfältig kontrolliert wurden, so dass die Hummeln Glanzphänomene in Abhängigkeit von ihrer Anflugrichtung wahrnehmen konnten. Mit diesen Wahlversuchen konnte Saskia Wilmsen nicht nur eine Präferenz der Hummeln für die Attrappen mit der simulierten konischen Blütenoberfläche nachweisen, sondern auch die Bedeutung der wahr-

genommenen Farbsättigung und des konstanten Farbsignals beim Anflug aus unterschiedlichen Blickwinkeln herausstellen.

Saskia Wilmsen legte eine ausgezeichnete Masterarbeit vor, die durch große Eigeninitiative bei der Planung, hohe Sorgfalt bei der Messung der morphologischen und physikalischen Parameter und Geschick und Ausdauer bei den Verhaltensversuchen und der Auswertung der Ergebnisse besticht. Auch die Einarbeitung in die komplexe Modellierung des Farbensehens von Bienen, die Erschließung der wissenschaftlichen Literatur zum Thema sowie die sprachliche und formale Gestaltung sind hervorragend. Die Arbeit wurde mit der besten Note sehr gut (1,0) bewertet und hat auch die Gutachter zu in ungewöhnlicher Weise lobenden Formulierungen veranlasst. Ich empfehle die Masterarbeit von Saskia Wilmsen über „Epidermale Mikrostrukturen von Blütenblättern: Einfluss auf spektrale Reflexion und Attraktivität für Hummeln“ nachdrücklich und ohne Vorbehalt zur Auswahl bei den Bestmasters Biowissenschaften 2016.

Prof. Dr. Klaus Lunau

Kontakt:
Prof. Dr. Klaus Lunau
Institut für Sinnesökologie
Department Biologie
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Universitätsstr. 1
40225 Düsseldorf
Germany

http://www.biologie.uni-duesseldorf.de/Institute/Sinnesoekologie

Danksagung

Es gibt auf der Welt kaum ein schöneres Übermaß als das der Dankbarkeit
Jean de La Bruyère

Mein größter Dank geht an Herrn Prof. Klaus Lunau. Seit mehr als zweieinhalb Jahren, von den Anfängen meiner Bachelorarbeit bis zur Vollendung dieser Masterarbeit, faszinierte er mich mit umfangreichem Wissen, spannenden und fesselnden Vorträgen und seiner positiven Ausstrahlung. Sein Interesse für die Sinnesökologie ist ansteckend. Danke, für die Möglichkeiten, zwei äußerst spannende Themengebiete bearbeiten zu können und all die interessanten Gespräche, die Herausforderung, auf Kongressen zu sprechen und die guten Ideen und Ratschläge zu jeder Zeit, immer und überall.

Ob Salzburg, Silkeborg, Hawaii, oder Kalifornien, Dr. Robert R. Junker unterstützte mich immer bei Fragen zur Statistik und gab mir ein Gefühl der Sicherheit, auch wenn mir die Lösung Lichtjahre entfernt schien. Vielen Dank dafür.

Anfangs waren es hilfreiche, themenbezogene Gespräche, nun ist es Freundschaft! Danke, Sabine Konzmann und Sebastian Köthe für die wundervolle gemeinsame Zeit, all das Lachen und die Hilfe zu jeder Tages- und Nachtzeit.

Herzlichen Dank an alle lieben, wertvollen Menschen im Institut für Sinnesökologie, durch euch wird mir das Institut immer als ein ganz besonderer Ort in Erinnerung bleiben.

Last but not least möchte ich den beiden wertvollsten Menschen in meinem Leben danken, meinem Basti, der so viel Geduld und Verständnis hatte und mich in vielerlei Hinsicht all die Jahre meines Studiums unterstützt hat. Um es mit Abraham Lincolns Worten zu sagen: Alles, was ich bin oder was ich hoffe jemals zu werden, verdanke ich meiner Mutter. Meine Mutter hat mir übrigens geraten, auch unserer Ebony zu danken, dafür, dass sie mir durch mitfühlende Blicke, geknurrte Diskussionsbeiträge und lustige Ablenkungsmanöver in manchen Krisensituationen den Kopf zurechtgerückt hat.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis XI

Tabellenverzeichnis XIII

Zusammenfassung XV

Abstract XVII

1 Einleitung 1

2 Material und Methoden 17

2.1 Studie epidermaler Mikrostrukturen von Blütenpetalen und deren Auswirkungen auf die spektrale Reflexion 17

2.1.1 Blütenmaterial 17

2.1.2 Fotografien der gesammelten Blüten 19

2.1.3 Dünnschnittpräparate und Zellmikroskopie 20

2.1.4 Vermessung zur Klassifizierung der Zellstrukturen 21

2.1.5 Spektralanalysen und Farbhexagon 22

2.1.6 Bestimmung weiterer Blütenparameter 23

2.2 Wahlversuche mit *Bombus terrestris* zur Bestimmung der Attraktivität mikrostrukturierter Oberflächen auf Bestäuber 25

2.2.1 Anfertigung der Attrappen für die Wahlversuche mit *Bombus terrestris* 25

2.2.2 Rasterelektronenmikroskopie 27

2.2.3 Digitalfotographie der Blütenattrappen bei diffuser und gerichteter Lichtquelle 29

2.2.4 Spektralanalysen der Blütenattrappen 29

2.2.5 Versuchstierhaltung 30

2.2.6 Versuchsaufbau – Wahlversuche bei diffuser Beleuchtung 31

2.2.7 Versuchsaufbau – Wahlversuche bei gerichtetem Spot-Light 32

2.2.8 Regeln für die Versuchsdurchführung 34

2.2.9 Versuchsdurchführung 35

2.2.10 Auswertung der erhobenen Daten 36

3 Ergebnisse 39

3.1 Epidermale Mikrostrukturen – Einfluss auf die spektrale Reflexion 39

3.1.1 Phänotypen und epidermale Zellformen der betrachteten Blüten 39

3.1.2 Mikrostruktur-Steckbriefe 43

3.1.3 Korrelationskurven der Blütenparameter 63

3.2 Epidermale Mikrostrukturen – Einfluss auf die Attraktivität für Hummeln 68
3.2.1 Ergebnisse – Wahlversuche bei diffuser Beleuchtung 69
3.2.2 Ergebnisse – Wahlversuche bei gerichtetem Spot-Light 74
3.2.3 Optische Eigenschaften der Blüten-Dummys 81

4 Diskussion 95
4.1 Epidermale Mikrostrukturen von Blütenpetalen und deren Auswirkungen auf die spektrale Reflexion 95
4.2 Epidermale Mikrostrukturen von Blütenpetalen und deren Einfluss auf die Attraktivität für Hummeln 105
4.3 Ausblick 116

Literaturverzeichnis 123

Der Anhang ist auf der Produktseite zu diesem Buch unter springer.com frei verfügbar.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Optischer Lichtbündelungseffekt	2
Abb. 2	UV-Male von *Argentina anserina*	3
Abb. 3	Licht und Farbe - Elektromagnetisches Spektrum	5
Abb. 4	Lichtbrechung und Reflexion an konischen Zellen	6
Abb. 5	Glanzerscheinungen bei *Ophrys speculum*	7
Abb. 6	REM-Aufnahme des Komplexauges von *Bombus terrestris*	8
Abb. 7	Farbhexagon nach CHITTKA (1992)	9
Abb. 8	Phänotypen von *Antirrhinum majus*	10
Abb. 9	Versuchsapparatur (DYER et al. 2007)	13
Abb. 10	Fotolabor	19
Abb. 11	Dünnschnittpräparat *Magnolia grandiflora*	20
Abb. 12	Formen-Index nach PAPIOREK et al. (2014)	21
Abb. 13	Spektrophotometrischer Aufbau	22
Abb. 14	Anfertigung der Blütenattrappen	26
Abb. 15	Blütenattrappen mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen	27
Abb. 16	Vorbehandlung für REM-Aufnahmen	28
Abb. 17	Goniometrischer Aufbau	29
Abb. 18	Versuchstierhaltung	31
Abb. 19	Versuchsarena, Wahlversuche bei diffusem Licht	32
Abb. 20	Versuchsarena, Wahlversuche bei Spot-Light	33
Abb. 21	Versuchs-Wertung	35
Abb. 22	Lineare Regression, Spektrale Reinheit / Aufnahmewinkel	42
Abb. 23	Epidermale Steckbriefe	43
Abb. 24	Lineare Regression, div. Blütenparameter / Formen-Index	65
Abb. 25	Lineare Regression, Spektrale Reinheit / Farbkontrast	66
Abb. 26	Lineare Regression, Spektrale Reinheit / Intensität / FI	67
Abb. 27	Lineare Regression, Diff. Spektrale Reinheit (Lunau / Valido)	68
Abb. 28	Wahlverhalten: horizontale Präsentation / diffuse Beleuchtung I	70
Abb. 29	Wahlverhalten: vertikale Präsentation / diffuse Beleuchtung I	71
Abb. 30	Wahlverhalten: vertikale Präsentation / diffuse Beleuchtung II	72
Abb. 31	Positionspräferenzen von *Bombus terrestris*, diffuses Licht	74
Abb. 32	Wahlverhalten: horizontal / Spot-Light mit Lichteinfall I	75

Abb. 33	Wahlverhalten: horizontal / Spot-Light gegen Lichteinfall I	76
Abb. 34	Wahlverhalten: vertikal / Spot-Light mit Lichteinfall II	76
Abb. 35	Wahlverhalten: vertikal / Spot-Light gegen Lichteinfall II	77
Abb. 36	Wahlverhalten: vertikal / Spot-Light mit und gegen Lichteinfall II	78
Abb. 37	Positionspräferenzen von *Bombus terrestris*, Spot-Light	80
Abb. 38	REM-Aufnahmen der biomimetischen Attrappen-Oberflächen	82
Abb. 39	REM-Aufnahmen des natürlichen *Tibouchina urvilleana* Petalums	83
Abb. 40	Fotografien der Attrappen: diffuse Beleuchtung / Spot-Light 45°	85
Abb. 41	Fotografien der Attrappen: diffuse Beleuchtung / Spot-Light 90°	87
Abb. 42	Reflexionskurven der Blütenattrappen	90
Abb. 43	Lineare Regression, Spektrale Reinheit / Landehäufigkeit	92
Abb. 44	Errechnung des Formen-Index	96
Abb. 45	Vergleich der Lichtreflexion an Epidermiszellen *Tibouchina urvilleana*, *Vinca minor*	98
Abb. 46	Vergleich der Lichtreflexion an Epidermiszellen *Cucurbita pepo*, *Narcissus* 'Pink Charme'	99
Abb. 47	Steigungs-Index zur Klassifizierung von Zellformen	100
Abb. 48	Gegenüberstellung: Formen-Index / Steigungs-Index	101
Abb. 49	Farborte der Blütenattrappen im Farbhexagon	110
Abb. 50	Lineare Regression, Spektrale Reinheit / Formen-Index Einschränkung in Analytik bei roten Objekten	113
Abb. 51	Attrappen-Aufnahmen mit Polarisations-Filtern	118
Abb. 52	Irideszenz bei *Tulipa* ‘Queen of the Night‘	120

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Liste der untersuchten Blütenspezies	18
Tab. 2	Testreihen Wahlversuche	34
Tab. 3	Klassifizierung der Epidermiszellen anhand ihrer Geometrie	39
Tab. 4	Absolute Landehäufigkeiten bei diffuser Raumbeleuchtung	73
Tab. 5	Absolute Landehäufigkeiten bei Spot-Light	79
Tab. 6	Weißflächenanteile der Attrappen bei variierender Beleuchtung	88
Tab. 7	Werte spektralen Reinheit bei variierender Beleuchtung	111

Zusammenfassung

Farben und Farbmuster von Blütenpetalen sind in der Bestäubungsbiologie ein wesentliches Kommunikationsmittel zwischen Hummeln und melittophilen Pflanzen. Die Bestäuber orientieren sich auf kurze Distanz am Gradienten der spektralen Reinheit des Farbsignals, um Nahrungsquellen aufzufinden und verhalten sich blütenstet, wodurch der Reproduktionserfolg einer Pflanze begünstigt wird. Mehrmals täglich begibt sich eine Arbeiterin auf Fouragierflüge, um die Versorgung der Nachzucht sicherzustellen. Die Detektierbarkeit und Diskriminierbarkeit anhand einer für die Bestäuber attraktiven Farbwirkung melittophiler Blüten muss folglich auch bei variablen Beleuchtungsverhältnissen gegeben sein. Durch konisch-papillöse Zellformen in visuell aktiven Bereichen von Blütenpetalen scheinen Blütenpflanzen sowohl die spektrale Reinheit des Farbsignals als auch dessen Unabhängigkeit vom Lichteinfallswinkel und der Blickachse der anfliegenden Blütenbesucher zu gewährleisten. In der hier vorliegenden Studie wurden zum einen die epidermalen Mikrostrukturen von 37 Angiospermen aus 19 Familien über einen Formen-Index klassifiziert und deren Einfluss auf die spektralen Eigenschaften der Petale analysiert. Zum anderen wurde über biomimetische Replikate ausgewählter Blütenoberflächen in Wahlversuchen mit blütennaiven Individuen von *Bombus terrestris* die Attraktivität der verschiedenen Zellformen für die Bestäuber erhoben. Einer bis dahin noch nicht berücksichtigten Einflussgröße, dem Lichteinfallswinkel, wurde hierbei besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Als Ergebnis konnte gezeigt werden, dass das Wahlverhalten von *Bombus terrestris* in den einzelnen Messreihen bei unterschiedlicher Attrappen-Ausleuchtung und Variationen in der Blickachse der Versuchstiere auf die Attrappen eindeutig von diesen Variablen beeinflusst wurde. Bis auf eine Versuchsanordnung, bei der die Hummeln die Attrappen in Lichteinfallsrichtung anflogen und demzufolge Glanzeffekte der glatten Oberflächen nicht wahrnehmen konnten, wurden konisch-papillöse Mikrostrukturen signifikant präferiert. Die Untersuchung der epidermalen Mikrostrukturen von Blütenblättern hat neben der Notwendigkeit einer normierten Klassifizierungsmethode im Ergebnis den Nachweis erbracht, dass konisch-papillöse Zellen bei allen Lichteinfallswinkeln keine Glanzeffekte ausbildeten und sich durch eine winkelunabhängige Signalkonstanz mit einem hohen Maß an spektraler Reinheit im Farbsignal auszeichneten.

Abstract

Color in floral petals is one of the most important communication factors in pollination ecology between bumblebees and melittophilic plants. At short distances pollinators orient at the gradient of spectral purity in color signals to detect food sources and perform flower constancy, whereby plant`s reproduction success significantly increases. Several times a day, a worker bee leaves for foraging trials to ensure offspring`s supply. Consequently, detectability and discriminability by means of attractive color signals in melittophilic petals have to be present in different light environments. With conical-papillate cell shapes in visual active petal parts, flowering plants seem to ensure spectrally pure color signals, independent of incident light angles and visual axis of approaching pollinators. In this study, 37 angiosperms` epidermal microstructures of 19 families were classified by shape-index and analyzed concerning their petals` spectral properties. Moreover, the attractiveness of different cell shapes in flower-naive individuals of *Bombus terrestris* was recorded experimentally with biomimetic replicas of selected petal surfaces. A hitherto not considered variable, the angle of incident light, is payed extra attention. The results show in test series with different light environments in artificial flowers and variations in visual axis, bumblebees` choice behavior is clearly under the influence of these variables. Except one set-up, in which the bumblebees approached the artificial flowers in the direction of incident light and therefore could not notice glossy patterns on smooth surfaces, conical-papillate microstructures were preferred significantly. Beside the need of a standard classification method as result of the investigation in epidermal cell structures in petals, it could be demonstrated that conical-papillate cells do not form gloss effects at any incident light angle but were characterized by angle independent signal constancy and a high degree in spectral purity of color signal.