



Seit Urzeiten haben Farben eine magische Wirkung auf Menschen. Unsere Vorfahren konnten schon vor Jahrzehntausenden virtuos mit Farben umgehen, wie die eindrucksvollen Höhlenmalereien belegen. Die Eiszeitkünstler verwendeten für ihre dynamischen Graffiti natürliche, meist **mineralische Farben** wie Ocker. Tausend Generationen später finden heutige Künstler ihre Materialien nicht mehr in der Natur, sondern sogar im

Die Prozedur war so teuer, dass sogar die reiche Kirche 1464 beschloss, die Kardinalskleidung sei ab sofort mit dem billigeren Scharlachrot von Kermesschildläusen zu färben. 1856 wollte der junge Londoner Chemiker William Henry Perkin ein neues Malariumittel aus Teerverbindungen entwickeln. Das ging zwar schief, doch Perkin entdeckte dabei die erste rein synthetische Farbe. Dieser Anilinfarbstoff ergab ein kräftiges Lila, das Seide

## Cooler Farben in heißen Autos – wie Chemiker das Spektrum aufmischen

Regal eines Baumarkts: Die Spraydose liefert jederzeit – und oft schneller als es die Polizei erlaubt – brillant leuchtende und ziemlich gut haftende Farben.

### LAUSIGES ROT FÜR KARDINALSGEWÄNDER

Moderne **synthetische Farben** werden von einer globalen Chemieindustrie produziert, die unsere Welt sichtbar verändert hat. Stark leuchtende Farbtöne waren bei Kleidern oder Alltagsgegenständen nicht immer so selbstverständlich. Die Natur gab früher nur sehr wenige wirklich brillante Färbemittel her. Diese waren extrem teuer, wie zum Beispiel das Purpur, das bis zum Mittelalter die Mäntel von Kaisern und Kardinälen in leuchtendes Rot tauchte. Diese Luxusfarbe stammt aus dem Drüsensekret der Purpurschnecke. Das Meerestier musste in großen Mengen gefangen werden – es wurde zerschnitten, gesalzen und etwa zehn Tage lang gekocht. Das ergab schließlich ein kleines bisschen reines Purpur.

gut färben konnte. Perkin taufte es Mauve (Malvenfarbe). Mauve wurde zur Modefarbe und löste eine industrielle Revolution aus. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts schossen Farbenfabriken wie Internet-Startups aus dem Boden. Noch heute verweist mancher Konzernname stolz auf diesen Anfang: Das Anilin als Ausgangsstoff für viele Farben steckt zum Beispiel in BASF, das für Badische Anilin- und Sodafabrik steht. Inzwischen haben Chemiker rund eine Million farbiger chemischer Substanzen synthetisiert. Etwa zehntausend von ihnen werden oder wurden einst im industriellen Maßstab hergestellt. Diese „Farbmittel“ – das ist das Fachwort für die farbgebenden Komponenten einer Farbe – bestehen entweder aus Farbstoffen oder aus Pigmenten.



**A**

Neue am Max-Planck-Institut für Polymerforschung entwickelte Rylenfarbstoffe in Lösung.

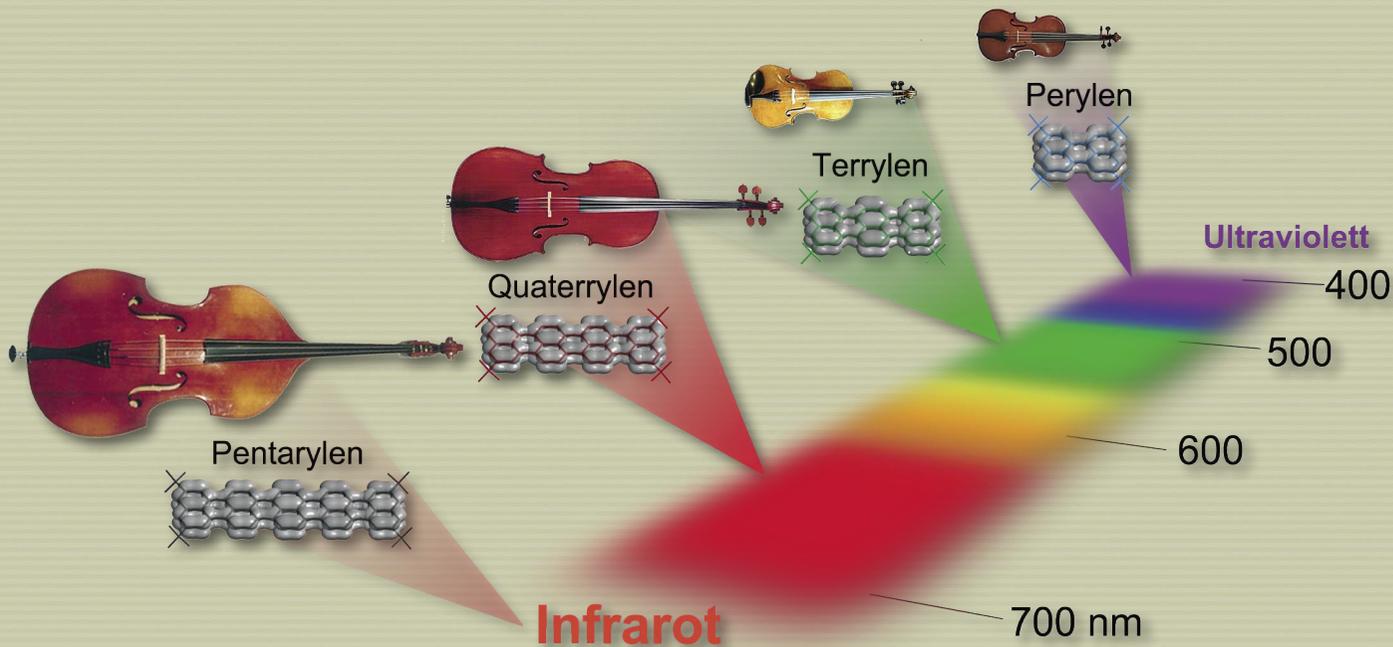


Illustration: Roland Wengemayr

**B**

▲ Die Moleküle des „Perylen-Baukastens“ zeigen, dass organische Farbstoffmoleküle fast wie die Saiten von Musikinstrumenten funktionieren: Je länger ihre konjugierten  $\pi$ -Systeme sind (grau), desto größer ist auch die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung, die sie absorbieren. Beim Perylen sind es 436 nm, beim Quaterrylen 660 nm, beim Terrylen 557 nm und beim Pentarylen 748 nm, das liegt schon im Infraroten. Daneben ist das Spektrum des sichtbaren Lichts eingetragen.

→ „Farbstoffe sind in ihrem Anwendungsmedium löslich, Pigmente nicht,“ erklärt Andreas Herrmann den Unterschied. Der Forscher gehört zum Team von Klaus Müllen am Max-Planck-Institut für Polymerforschung. Die Mainzer sind an der Erfindung einer Reihe neuer Farbstoffe beteiligt; einige davon sind von der Max-Planck-Gesellschaft oder von der BASF AG patentiert worden.

**VIELSEITIGKEIT AUS DEM CHEMIE-BAUKASTEN**

Ein Pigment war zum Beispiel der Ocker der Eiszeitkünstler. **Pigmente** sind Pulver aus winzigen farbigen Partikeln, die man zum Malen mit einer Flüssigkeit zu einer Suspension anrührt. Hinzu kommt ein Bindemittel, das das Farbpulver auf dem Untergrund fixiert. Pigmente stecken in Wandfarben, Autolacken oder Künstlerfarben. Viele sind anorganisch wie das Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ), das ein echtes, deckendes Weiß ermöglicht. Die überwiegend organischen, löslichen **Farbstoffe** können das nicht. Sie haben auf anderen Anwendungsgebieten Stärken, zum Beispiel beim Färben von Textilfasern. Andreas Herrmann und seine Kollegen entwi-

ckeln Farben mit ganz neuen Eigenschaften. „Die Zeit der klassischen Farbstoffforschung ist eigentlich vorbei,“ erklärt der Chemiker. Heute interessiert nicht die Farbwirkung allein, sondern das Farbmittel muss noch mehr können. „Funktionelle Farben“ heißen diese vielseitigen Farbstoffe, von denen manche sogar für uns „unsichtbar“ sind. Dazu zählen Infrarotfarben, die im Fensterglas oder in Autoscheiben Innenräume vor der Sonnenwärme schützen. Die Max-Planck-Forscher synthetisieren ihre neuen Farbstoffmoleküle aus einem chemischen Baukasten, dessen Grundbaustein ein organisches Molekül aus vier Benzolringen ist. „Es heißt Perylen“, erklärt Herrmann, „und es ist charakteristisch für ganz viele organische Farbstoffe, die aus einem konjugierten aromatischen  $\pi$ -System bestehen.“ Elektronen formen dieses System mit dem komplizierten Namen, in dem das Geheimnis der Farbwirkung steckt. Die Information über die Farbe eines Objekts wird über das Licht in unsere Augen transportiert. Seine elektromagnetischen Wellen schwingen bei verschiedenen Frequenzen. Dabei gilt: Ist die Frequenz des Lichts hoch, dann ist seine Wellenlänge kurz, bei niedriger Frequenz ist es umgekehrt. **Wellenlänge** und **Frequenz** beschreiben also das gleiche physikalische Phänomen. Im sichtbaren Lichtspektrum empfinden wir jede Lichtwellenlänge (oder Lichtfrequenz) als eigene Farbe, angefangen bei Violett über Blau, Gelb und Grün bis Rot. Violett hat die kürzeste Wellenlänge, die unser Auge gerade verarbeiten kann: sie beträgt ungefähr 410 Nanometer

(milliardstel Meter). Violettes Licht schwingt mit einer Frequenz von 799 Billionen Hertz. Tiefes Rot bei etwa 690 Nanometern können wir gerade noch wahrnehmen; es schwingt mit einer Frequenz von 399 Billionen Hertz. Infrarot ist dagegen schon zu langwellig und Ultraviolett wiederum zu kurzweilig.

**WENN ELEKTRONEN WIE TÖNE SCHWINGEN**

Trifft Licht auf ein Objekt, dann kommt es zu Wechselwirkungen mit dessen Materie. Verantwortlich dafür sind Elektronen – wie kleine Antennen können sie elektromagnetische Strahlung bestimmter Wellenlängen empfangen und auch wieder senden; denn als „Quantenteilchen“ verhalten sie sich selbst wie eine Welle. Deshalb kann man sich die Elektronen wie die schwingenden Saiten eines Musikinstruments vorstellen. Bei welcher Frequenz eine solche „elektronische“ Saite schwingt, bestimmen die Atome und Moleküle des Materials.

Wieso nehmen wir zum Beispiel Pflanzen als grün wahr? In ihren Blättern steckt der Farbstoff Chlorophyll. Dieses Farbstoffmolekül wirkt ungefähr wie ein Instrument mit zwei Elektronen-Saiten: Besonders dominant ist dabei eine Saite, die in einem sehr breiten roten und gelben Spektralbereich schwingt, also bei langen Lichtwellen. Eine zweite, weniger dominierende Saite schwingt schneller, im Blauen bis Violetten. Diese Saiten senden jedoch selbst keinen „Farb-Ton“ aus, sondern sie schwingen mit dem Licht aus diesen beiden Spektralbereichen mit und entziehen

ihm dabei Energie: sie „absorbieren“ es, schlucken es also regelrecht weg. Vom Pflanzenblatt aus erreicht unser Auge nur noch ein Rest des sichtbaren Lichtspektrums, und der entspricht dem grünen Spektralbereich. Das Grün ist die **Komplementärfarbe**, also die „Ergänzungsfarbe“ zum dominanten gelb-roten Absorptionsspektrum der Grünpflanzen. Nach der Farbenlehre addieren sich die beiden Komplementärfarben im Fall des Lichts zur Farbe Weiß. Allerdings ist es beim Chlorophyll etwas komplizierter: Nur wenn man auch die weniger dominante, blauviolette Absorption des Farbstoffs berücksichtigt, erhält man bei der Addition ein echtes Weiß.

## BENZOLRINGE IN BUNTE REIHE GEBRACHT

Die Mainzer Chemiker können mit ihrem Perylen-Baukasten Moleküle herstellen, deren Elektronensysteme ganz verschiedene Farben erzeugen. Dazu nutzen sie die besonderen Eigenschaften des **Benzolrings** aus. Wenn sich sechs Kohlenstoffatome und sechs Wasserstoffatome zu einem solchen ringförmigen Molekül zusammenschließen, dann übernehmen die Elektronen zwei wesentliche Aufgaben: Zum einen „kleben“ sie die Atome zum Molekül zusammen. Zum anderen bilden sie, da sich ein Teil der Elektronen im Molekül nach wie vor relativ frei bewegen kann, je eine ringförmige „Wolke“ oberhalb und unterhalb des Benzolmoleküls. Das ist das aromatische  $\pi$ -**System**. Schließen sich nun vier Benzolringe so wie beim Perylen zusammen, dann vereinigen sich deren  $\pi$ -Systeme zu einem gemeinsamen, großen  $\pi$ -System. Es ist nun „konjugiert“, das heißt, dass es sich über alle Ringe hinweg fortsetzt. Diese ausgedehnte Elektronenwolke bildet eine Saite, die bei einem bestimmten Farbton schwingt. Beim Perylen liegt ihre Absorptionswellenlänge im Blauvioletten, deshalb sehen wir es in der Komplementärfarbe Gelb.

Um Farbtöne mit längeren Wellenlängen zu erhalten, „bauen“ die Forscher an das Perylen-Molekül schrittweise je zwei weitere Benzolringe an. So entstehen im Labor das Terrylen-Molekül aus sechs, das Quaterrylen aus acht und das Pentarylen aus sogar zehn Ringen. Mit der Länge der Moleküle wächst auch das  $\pi$ -System. Wie die Saiten einer Violine, einer größeren Bratsche, eines noch größeren Cellos und eines ganz großen Kontrabasses schwingen auch die Elektronensaiten dieser Moleküle bei immer tieferen Farbtönen: Violett, Grün, Rot, nahes und ferneres Infrarot (**Abb. B**).

Das Quaterrylen bildet die Basis der neu-

en Infrarot-Schutzfarbe für Fenster- und Autoscheiben, deren Prototyp-Molekül die Mainzer Forscher für die BASF AG entwickelt haben (**Abb. C**): Das Quaterrylendiimid, so heißt es chemisch exakt, gehört zu den NIR-Absorbern. NIR steht dabei für Nahinfrarot. Das für den Farbton zuständige Grundgerüst dieses Moleküls, der Chromophor, gleicht dem des Quaterrylens. Der **NIR-Absorber** filtert die infrarote Wärmestrahlung aus dem Spektrum des Sonnenlichts heraus und lässt nur Strahlung kürzerer Wellenlänge in den abgeschirmten Innenraum durch. Dabei wandelt das Farbstoffmolekül mit seinem langsam schwingenden  $\pi$ -System die Energie der Strahlung in reine Wärmeenergie um. Die auf der Außenseite aufsteigende Luft verhindert das Aufheizen der beschichteten Scheibe, indem sie die frei werdende Wärmeenergie mitnimmt, das Wärmeschutzglas kühlt und so dessen Funktion sichert.

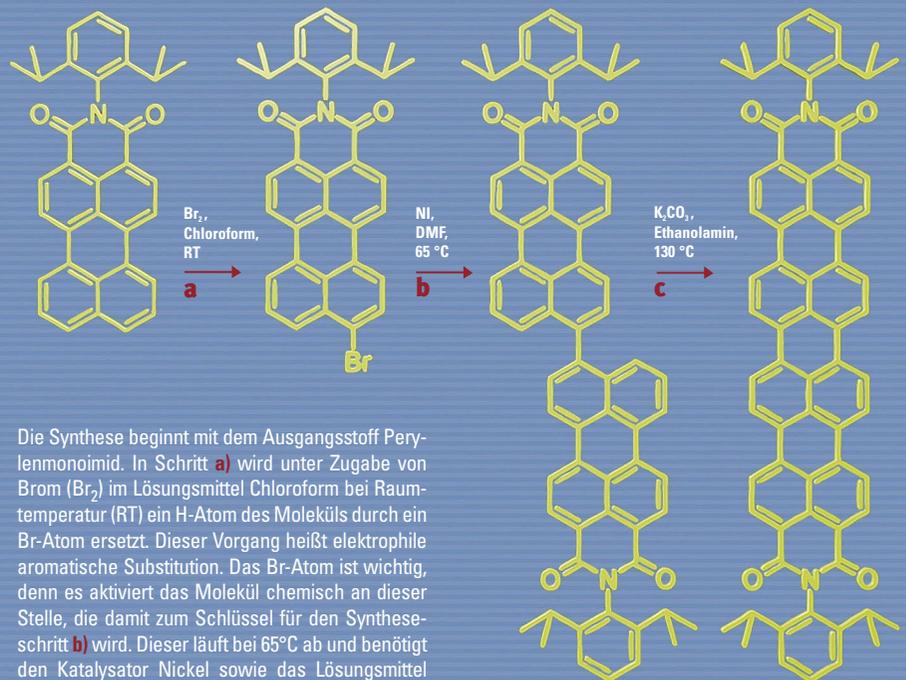
Auch wenn die Synthese eines neuen Farbstoffmoleküls im Forschungslabor erfolgreich gelingt, ist der Weg zur industriell herstellbaren Farbe noch sehr weit. Für den Technologietransfer ist das Know-how von Industrieforschern wichtig, wie sie in der

Abteilung „Forschung Pigmente“ der BASF AG in Ludwigshafen arbeiten. Der Leiter des Infrarotfarbenprojekts, der Chemiker Arno Böhm, erzählt: „Die Mainzer legten uns stolz 500 Milligramm Quaterrylen auf den Tisch, die damals 50.000 Mark wert waren.“ Viel zu teuer für ein kommerzielles Produkt. Die Wissenschaftler der BASF und des Max-Planck-Instituts mussten noch zehn Jahre gemeinsam forschen, bis sie den Durchbruch schafften.

## WÜSTENTEST FÜR HIGH-TECH-FARBEN

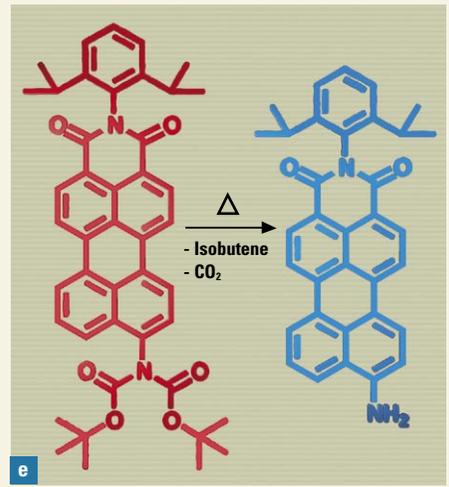
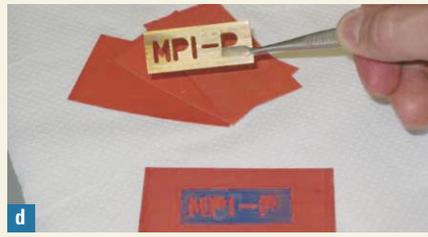
„Auch heute noch ist das Farbmittel teurer als Gold, aber die Kunden wollen es unbedingt haben,“ verrät Böhm. Der Grund sind die herausragenden Eigenschaften des Quaterrylendiimids. In harten Tests bewies es, dass es einer starken Sonneneinstrahlung jahrelang standhalten kann. Schließlich soll es ja ein ganzes Autoleben lang wirksam vor Wärme schützen, bei Hausfenstern sogar noch länger. Die BASF-Forscher unterzogen das Material einem Test mit der Bezeichnung „Accelerated Arizona“, also beschleunigtes Arizona. In einer Wüste im amerikanischen Südwesten setzten sie die beschichteten →

## SYNTHESE DES INFRAROTSCHUTZ-FARBSTOFFS



Die Synthese beginnt mit dem Ausgangsstoff Perylenmonoimid. In Schritt **a**) wird unter Zugabe von Brom ( $\text{Br}_2$ ) im Lösungsmittel Chloroform bei Raumtemperatur (RT) ein H-Atom des Moleküls durch ein Br-Atom ersetzt. Dieser Vorgang heißt elektrophile aromatische Substitution. Das Br-Atom ist wichtig, denn es aktiviert das Molekül chemisch an dieser Stelle, die damit zum Schlüssel für den Syntheseschritt **b**) wird. Dieser läuft bei  $65^\circ\text{C}$  ab und benötigt den Katalysator Nickel sowie das Lösungsmittel Dimethylformamid (DMF). Dabei löst sich das Brom vom Perylenmonoimid und ermöglicht es einem zweiten, ebenfalls mit Brom aktivierten Perylenmonoimid-Molekül chemisch anzubinden. So entsteht das doppelt so große Molekül Bisperylenmonoimid. Beide Perylenmoleküle hängen hier noch über eine Einfachbindung zusammen – dieser „Flaschenhals“ verhindert die Ausbildung eines  $\pi$ -Systems.

Im Syntheseschritt **c**) werden die beiden Perylenmoleküle daher bei  $130^\circ\text{C}$  unter Zuhilfenahme von Kaliumcarbonat und Luftsauerstoff über eine zweite Einfachbindung verknüpft. Im fertiggestellten Quaterrylendiimid erstreckt sich nun das  $\pi$ -System über das ganze Molekül und kann Licht im langwelligen Infrarot absorbieren.



▲ Ein saugfähiges Plättchen aus Silicagel wird mit dem roten Farbstoff für die Laserbeschriftung durchtränkt (a). Eine Metallschablone ersetzt in diesem Test das Laserlicht, indem sie auf 250° C erhitzt wird (b). Sie löst an den Stellen, wo sie aufliegt (c), einen blauen Farbumschlag aus und hinterlässt einen entsprechend farbigen Schriftzug (d). An dem Farbstoffmolekül Aminoperylenmonoimid befindet sich eine Aminogruppe mit zwei „elektronenräuberischen“ Butylcarbonylgruppen. Diese werden durch Erhitzen zerstört. Erst die „entschützte“ Aminogruppe (NH<sub>2</sub>) kann Elektronen an das  $\pi$ -System des Farbstoffmoleküls abgeben (e).

→ Scheiben der gnadenlosen Sonne aus. Spiegel konzentrierten deren Licht noch auf die zehnfache Strahlendosis: Das lässt die Proben in nur zwei Jahren etwa so stark altern wie normalerweise in einem Jahrzehnt und reduziert die Testphase auf ein Fünftel der Zeit.

„Die Wirkung der Quaterylendiimid-Moleküle nahm dabei nur um drei Prozent ab,“ schwärmt Böhm. „Das ist absolut phänomenal und Weltrekord!“ Diese enorme „Photostabilität“ erlaubt es den Herstellern von Wärmeschutzglas, den neuen Farbstoff stark verdünnt einzusetzen, was den hohen Preis wieder ausgleicht. Der Gewinn sind Produkte mit deutlich besseren Langzeiteigenschaften als die heutige Generation. Und es gibt einen weiteren Vorteil: „Wenn der NIR-Absorber in Autoscheiben sehr effizient arbeitet, dann muss die Klimaanlage weniger Wärme aus dem Innenraum wegschaffen,“ erklärt Herrmann. „Also verbraucht das Auto auch weniger Energie.“ Und Gleiches gilt für Häuser aus viel Glas. Ende 2004 bringt die BASF AG den neuen Infrarotfarbstoff auf den Markt.

### HALTBARE TATTOOS AUF MOTORKABELN

Der NIR-Absorber ist nicht die einzige Frucht der Kooperation zwischen den Mainzer Grundlagenforschern und den Industriechemikern der BASF: So ist zum Beispiel auch ein neues Farbmittel für Laserbeschriftungen

entstanden, das ebenfalls aus der Perylen-Familie stammt. Solche Laserbeschriftungen sind extrem haltbar und werden daher u.a. zur Kennzeichnung von Elektrokabeln in Motorräumen von Autos eingesetzt; denn Öl und Benzin greifen herkömmliche Farben an. Laserbeschriftungen eignen sich auch gut für fälschungssichere Kreditkarten. Der Laser färbt den Kunststoff bis in einige Mikrometer (millionstel Meter) Tiefe, während normale Druckfarben nur als dünne Schicht auf der Oberfläche haften. Allerdings schreiben die Laser bislang meist nur in Schwarz, indem sie den Kunststoff schlicht „verbrennen“.

Will man schön bunte Beschriftungen, dann muss das Material ein spezielles Farbmittel enthalten, das auf das Laserlicht reagiert. Im neuen, von den Mainzern entwickelten System arbeiten dazu zwei Farbstoffmoleküle zusammen. Für den eigentlichen Farbwechsel sorgt ein so genannter thermotroper Farbstoff, der zunächst rot ist. Wird er jedoch auf mindestens 180°C erhitzt, dann schlägt seine Farbe dauerhaft in blau um (Abb. D). Damit das zuverlässig funktioniert, ist ein NIR-Absorber als zweiter Farbstoff beigemischt. Dieser sorgt für eine effektive Umwandlung der Energie des Laserlichts in Wärme, die den thermotropen Farbstoff umschlagen lässt. Der thermotrope Farbstoff ist ein Aminoperylenmonoimid. In diesem Molekül verbirgt sich unser altbekanntes Perylengerüst, hier ist es allerdings um eine Aminogruppe (NH<sub>2</sub>) erweitert. Entscheidend ist dabei der Stickstoff (N), denn er spendet dem  $\pi$ -System des Farbstoffmoleküls gerne zusätzliche Elektronen. Dadurch wächst das  $\pi$ -System, schwingt langsamer als beim Perylen und absorbiert rotes Licht, was eine blaue Komplementärfarbe ergibt.

Solange der Laser das Farbstoffmolekül noch nicht erhitzt hat, hindern zwei weitere chemische Gruppen die Aminogruppe an der elek-

tronischen Hochzeit mit dem Perylen. Diese beiden Butyloxycarbonylgruppen hängen an der Aminogruppe und ziehen die Elektronen des Stickstoffs zu sich. Deshalb schwingt das  $\pi$ -System des Perylengerüsts bei kurzen Wellenlängen, es absorbiert Licht im blauen Spektralbereich und erzeugt so eine rote Farbe. Erst das Erhitzen zerstört die beiden Elektronenfänger am Ende des Moleküls, und sie zerfallen zu Isobuten und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Jetzt können sich die Elektronen des Stickstoffs mit dem  $\pi$ -System vereinigen, und das „entschützte“ Aminoperylenmonoimid sorgt für die blaue Farbwirkung. So kann der Laser einen roten Kunststoff mit einer blauen, sehr haltbaren Inschrift versehen.

Der Alltag in den chemischen Forschungslabors hat sich seit der Zeit von William Henry Perkin gründlich gewandelt. Zufallsfunde gehören weitgehend der Vergangenheit an. Heute können die Forscher mit ihrem Wissen und ihren ausgefeilten Labortechniken einen neuen Farbstoff ganz gezielt entwickeln, erklärt Herrmann: „Wir konstruieren ein Molekül richtiggehend nach den gewünschten Eigenschaften.“ Aus Erfindern von Kleiderfarben sind so Designer für maßgeschneiderte Moleküle geworden.

**Schlagwörter:** mineralische Farben, synthetische Farben, Farbstoffe, Pigmente, Wellenlänge, Frequenz, Komplementärfarbe, Benzolring,  $\pi$ -System, NIR-Absorber

**Lesetipps:** Norbert Welsch, Claus Liebmann, Farben, Spektrum Akademischer Verlag 2003; Simon Garfield, Lila, Berliner Taschenbuchverlag (Dezember 2002)

**Internet:** <http://www.seilnacht.tuttlingen.com/>  
<http://www.colorsystem.com/grundlagen/aad.htm>

## DIE „MAX“-REIHE

auch unter [www.max-reihe.mpg.de](http://www.max-reihe.mpg.de)

BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX erscheinen jeweils zweimal im Jahr und berichten über aktuelle Forschungsergebnisse aus den Max-Planck-Instituten vor allem für Lehrer und Schüler. Weitere Exemplare können unter folgender Adresse kostenlos bestellt werden: