

Koaxial elektrogesponnene Fasern mit flüssigkristallinem Kern zur optischen Detektion von Amphetamin in der Gasphase

Antonia Vollbehr und Peter Kaul

Institut für Sicherheitsforschung, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Rheinbach, Deutschland

Kontakt: antonia.vollbehr@h-brs.de, peter.kaul@h-brs.de

Einleitung

Sensoren können verschiedene Aufgaben erfüllen, wie beispielsweise die Optimierung von Prozessen, die Interaktion zwischen Geräten oder die Verbesserung der zivilen Sicherheit. [1–3] Ihr Bedarf für die Industrie oder den Alltag wächst seit Jahren stetig. Besonders mobile Gassensoren sind von großem Interesse. Jedoch ist ihre Anwendung meist durch ihre integrierte Batterie begrenzt. Gassensoren ohne oder mit einem nur sehr geringen Energieverbrauch stehen daher im Interesse bei neuen Anwendungsgebieten, beispielsweise im Brandschutz oder in der Textilindustrie. [4,5] Die Sensoren könnten zum Beispiel in die Textilien einer persönlichen Schutzausrüstung eingearbeitet werden und durch einen Farbumschlag die Anwesenheit eines Gases oder die Überschreitung des Grenzwertes toxischer Substanzen anzeigen. [6] Auch für die Drogenbekämpfung durch die Polizei wären solche einfach auszuwertende Sensoren hilfreich. Eine Möglichkeit diese Kriterien zu erfüllen, ist die Verwendung von Flüssigkristallen als chemische Sensoren, womit sich seit 2017 das BMBF-geförderte Projekt OptoSpin beschäftigt. Anders als bei den gängigen Gassensoren, welche beispielsweise auf Widerstandsänderungen beruhen, basiert der hier untersuchte Sensor auf der Farbänderung eines Flüssigkristalls. Dabei funktionieren diese Gassensoren vollständig ohne Energieversorgung und sind bei Raumtemperatur anwendbar. Bisher gibt es Veröffentlichungen zu flüssigkristallbasierten Sensoren für verschiedene Analyten, wie beispielsweise NO_2 [2], Aceton [1], VOCs [3,5], CO_2 [7] und Luftfeuchtigkeit [8].

Das Sensorprinzip beruht auf der selektiven Reflexion von chiral-nematischen Flüssigkristallen (N^*LC). [9] Um diese herzustellen, wird ein nematischer Flüssigkristall mit einer chiralen Substanz dotiert. Dadurch ordnen sich die einzelnen Moleküle (sog. Mesogene) in einer helixartigen Überstruktur an. Sie richten sich entlang eines um die Längsachse rotierenden Direktors aus, wobei die Ganghöhe p (engl. pitch) einer Drehung der Helix um 360° entspricht. Sie ist abhängig von dem Verdrillungsvermögen (engl. helical twisting power, HTP) des Dotierstoffs (Abb. 1). Die chiral-nematische Phase hat außergewöhnliche optische Eigenschaften. Üblicherweise erscheint ein Gegenstand in einer bestimmten Farbe, weil ein oder mehrere Wellenlängenbereiche von diesem absor-

biert werden und das menschliche Auge das Restspektrum wahrnimmt. Chiral-nematische Flüssigkristalle hingegen erscheinen in einer bestimmten Farbe, da nur ein schmaler Wellenlängenbereich reflektiert wird. Dieser ist von der Ganghöhe p , dem Einfallswinkel des Lichts θ und dem mittleren Brechungsindex \bar{n} abhängig und kann mit $\lambda = p * \bar{n} * \cos \theta$ beschrieben werden. [9]

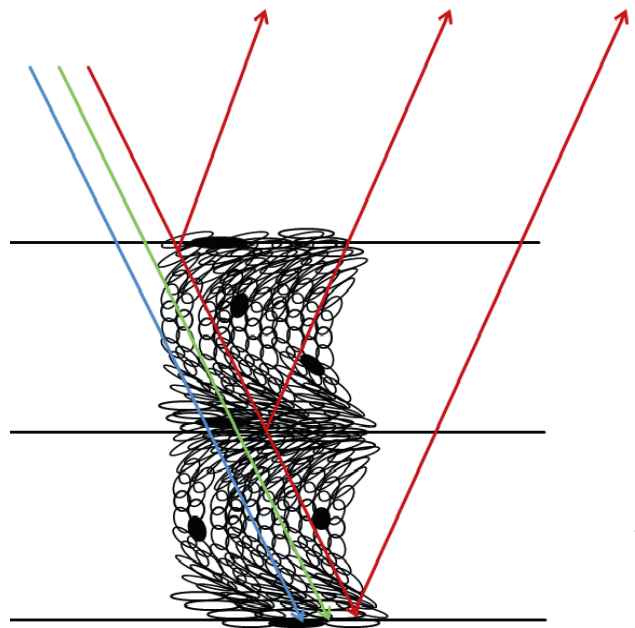


Abb. 1: Prinzip der wellenlängenselektiven Reflexion an der chiral-nematischen Flüssigkristallstruktur [6]

Wird ein solcher Flüssigkristall einem Gas ausgesetzt, welches sich gut in ihm löst, quillt dieser auf. Dadurch wird dessen Ganghöhe p vergrößert, wodurch sich auch der reflektierte Wellenlängenbereich ändert. Diese Farbänderung kann mit dem bloßen Auge wahrgenommen werden. Allerdings ist die Selektivität eines solchen Sensors gering, da beispielsweise Lösungsmittel auch Sensorantworten hervorrufen können. [1] Die Selektivität kann erhöht werden, indem der physikalische Auflösungsprozess durch eine chemische Reaktion ersetzt wird. Bei Zugabe eines reaktiven Dotierstoffs zum Flüssigkristall läuft eine Reaktion zwischen diesem und dem gasförmigen Analyten ab, wodurch ebenfalls eine sichtbare und messbare Verschiebung des reflektierten sowie transmittierten Wellenlängenbereiches hervorgerufen wird (Abb. 2).

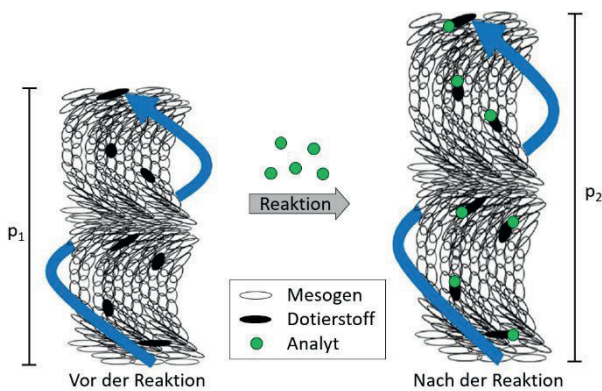


Abb. 2: Änderung der Ganghöhe p nach der Reaktion des Dotierstoff mit einem Analyten

Die Anwendung des beschriebenen Sensorprinzips scheiterte bislang am Fließverhalten des Flüssigkristalls. Als flächig aufgetragener Film weist dieser weder mechanischen Schutz noch Schutz vor Umwelteinflüssen auf, wie beispielsweise gegenüber Staub oder Verschmutzung. Zur Einkapselung des Flüssigkristalls in eine schützende Polymerschale bietet sich das koaxiale Elektrosinnen an. [10–12]

Methoden und Materialien

Für den chiral-nematischen Flüssigkristall (N*LC) wird die Flüssigkristallmischung E8 (Synthon Chemicals) mit dem Dotierstoff (S)-4-Cyano-4'-(2-methylbutyl)biphenyl (CB15, Synthon Chemicals) im Verhältnis 65:35 gemischt. Anschließend wird darin 1,3 wt-% des reaktiven Dotierstoffs (S)-1,1'-Binaphthyl-2,2'-disulfonimid (DSI, Sigma Aldrich) gelöst, welcher zur Detektion des Analyten Amphetamin verwendet wird. [13,14]

Die Ganghöhe des chiral-nematischen Flüssigkristalls wird mit der Grandjean-Cano-Methode [15] bestimmt (Abb. 3). Dabei werden eine plankonvexe Linse und ein Objektträger mit einer Schicht aus Polyvinylalkohol (PVA) beschichtet und uniaxial orientiert. Anschließend wird eine dünne Schicht des Flüssigkristalls zwischen Linse und Objektträger aufgebracht. Die Disklinationslinien der chiral-nematischen Phase werden mit einem Auflichtmikroskop (Keyence VHX-7000) ausgemessen und die Ganghöhe mithilfe des Linsenradius bestimmt.

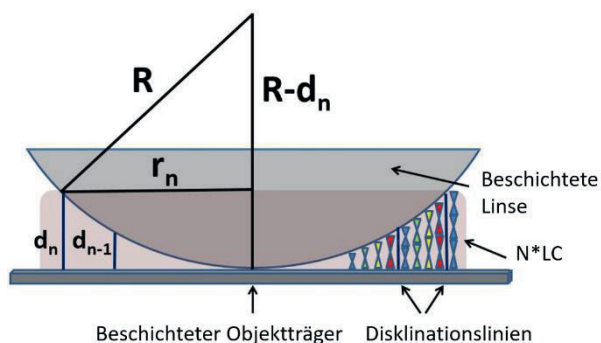


Abb. 3: Grandjean-Cano-Methode zur Bestimmung der Ganghöhe chiral-nematischer Flüssigkristalle

Zur Verarbeitung des Flüssigkristalls wird das Elektrosinn-Verfahren verwendet, welches der Herstellung von Fasern mit Durchmessern im Mikro- bis Nanometerbereich dient. [16] Dabei wird typischerweise eine Polymerlösung kontinuierlich durch eine unter Hochspannung stehende Kanüle geleitet. Durch die Spannung erfolgt innerhalb der Lösung eine Ladungstrennung. Die positiven Ladungen konzentrieren sich an der Spitze des an der Kanüle hängenden Tropfens. Bei Überschreitung einer kritischen Spannung formt sich ein Jet, der in Richtung einer wenige Zentimeter entfernten Gegenelektrode (sog. Kollektor) beschleunigt wird. In der Flugphase unterliegt der Jet einigen Instabilitäten, die durch eine inhomogene Ladungsverteilung an der Jetoberfläche hervorgerufen werden. Diese Instabilitäten sorgen für eine Biegung und Streckung des Jets. Der Jetdurchmesser nimmt ab und durch die Oberflächenvergrößerung verdunstet das Lösungsmittel schnell. [16,17] Sind die Prozessparameter (Flussraten, Elektrodenabstand, Spannung) richtig abgestimmt, sammeln sich an der Gegenelektrode feste Polymerfasern. Beim koaxialen Elektrosinnen werden zwei konzentrisch ineinander gesteckte Kanülen genutzt, sodass beim Elektrosinnen eine Kern-Schalen-Struktur entsteht (Abb. 4). [10,11,17]

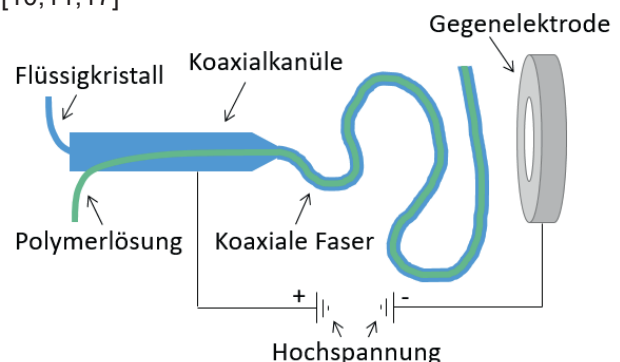


Abb. 4: Schematische Darstellung des Elektrosinnens mit Koaxialkanüle und ringförmiger Gegenelektrode

Als Schalenmaterial wird eine Polymerlösung aus 20 wt-% Polyvinylpyrrolidon (PVP, Alfa Aesar) in Ethanol (absolut, Sigma Aldrich) angesetzt. Der Flüssigkristall wird im Kern versponnen, sodass die Fasern einen Durchmesser von über 5 μm aufwiesen. Die angelegte Spannung beträgt 10–12 kV, der Elektrodenabstand 25 cm und die Flussraten 20 $\mu\text{L}/\text{min}$ (N*LC) und 30 $\mu\text{L}/\text{min}$ (PVP). Als Kollektor wird ein Ring aus Aluminium verwendet. Die Umgebungsparameter werden konstant bei 22–24 $^{\circ}\text{C}$ und 36–44 % relative Luftfeuchtigkeit gehalten.

Für die Messung der Sensorreaktion wird ein Gasmessaufbau genutzt, mit welchem sowohl koaxialen Fasern als auch mit N*LC beschichtete Deckgläschen mit Analyt bedampft und vermessen werden (Abb. 5). Mithilfe eines Vis-Spektrometers (Flame-S,

Ocean Optics) werden Reflektionsspektren aufgenommen und zur Auswertung das Peakmaximums gegen die Zeit aufgetragen.

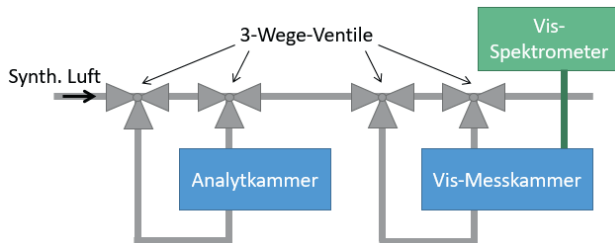


Abb. 5: Schematische Darstellung des Gasmessaufbaus: Analyt- und Messkammer verbunden über Gasleitungen

Zur Erhöhung der Wasserbeständigkeit wird das PVP auf molekularer Ebene vernetzt. [18,19] Dazu werden die elektrogesponnenen, coaxialen Fasern abwechselnd dreimal einer Wasserstoffperoxid-Atmosphäre (30 %, Alfa Aesar) ausgesetzt und mit UV-Licht bestrahlt (Abb. 6).

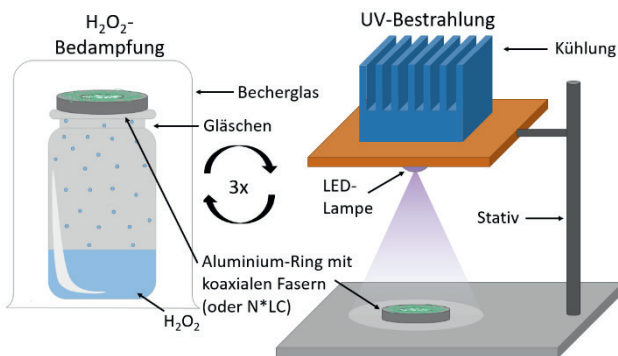


Abb. 6: Schematische Darstellung der H_2O_2 -Bedampfung und UV-Bestrahlung zur Vernetzung der coaxialen Fasern

Durch das Wasserstoffperoxid und die Energiezufuhr werden einige Polymerketten radikalisiert. Diese radikalisierten Polymere greifen weitere Polymere an, sodass sich diese verknüpfen. Dieser Effekt kann nicht nur intermolekular, sondern auch intramolekular ablaufen. Die verwendete UV-LED besitzt eine maximale optische Leistung von 1,45 W bei einer Wellenlänge von 365 nm. Der Abstand zwischen Fasern und LED wird so eingestellt, dass die Leistungsdichte auf der Probe etwa $30 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ beträgt. Diese Einstellung werden mit einem optischen Leistungsmessgerät (PM400, Thorlabs) überprüft. Um den N*LC vor der UV-Bestrahlung zu schützen, werden diesem 2 wt-% 1-(4-Methoxyphenyl)-3-(4-tert-butylphenyl)-1,3-propandion (Avobenzon, TCI Chemicals) zugegeben.

Ergebnisse

Die Auswertung der Grandjean-Cano-Methode [15] erfolgt über die Bestimmung der Radien der Disklinalinien und ergibt eine Ganghöhe des N*LCs von $318 \pm 14 \text{ nm}$ (Abb. 7).

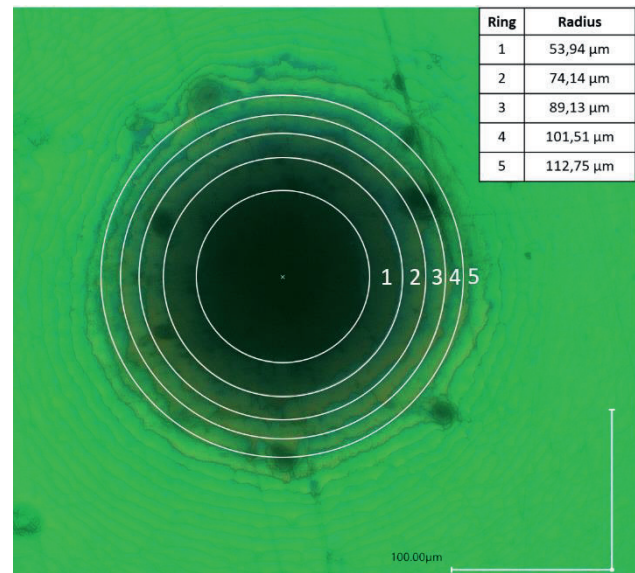


Abb. 7: Disklinalinien des verwendeten N*LC mit 1,3 wt-% DSI

Bei senkrechtem Lichteinfall ($\theta = 0^\circ$) und einem geschätzten mittleren Brechungsindex von $\bar{n} = 1,63$ [20] befindet sich das errechnete reflektierte Wellenlängenmaximum bei $\lambda = 519 \pm 22 \text{ nm}$ und entspricht somit in etwa den spektroskopisch gemessenen Werten von 537 nm. Abb. 8 zeigt die Reflektionsspektren des flächig applizierten Flüssigkristalls unter Zufuhr von synthetischer Luft (schwarz) mit einem Maximum bei 537 nm und unter Zufuhr des Analyten Amphetamin (rot) mit einem durch die Reaktion verschobenen Maximums bei 618 nm.

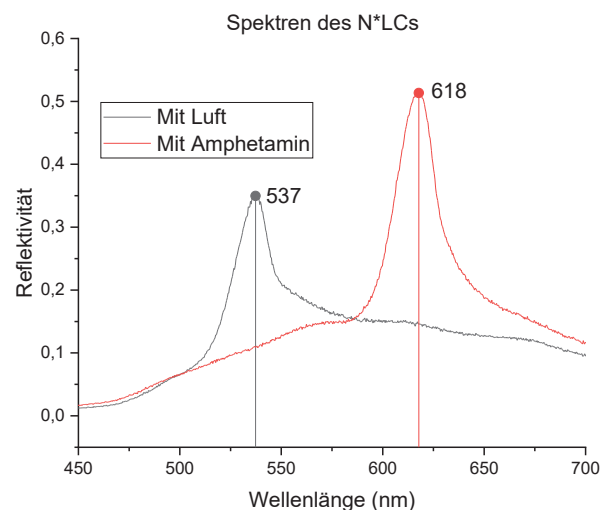


Abb. 8: Reflektionsspektren des flächig auf einem Deckgläschen applizierten Flüssigkristalls

Der Verlauf des Peakmaximums während der Amphetamin-Exposition verdeutlicht die sichtbare Rotverschiebung und zeigt, dass die Verschiebung auch bei Abschalten der Amphetamin-Zufuhr nicht vollständig zurückgeht und die Reaktion somit teilweise irreversibel ist (Abb. 9 a).

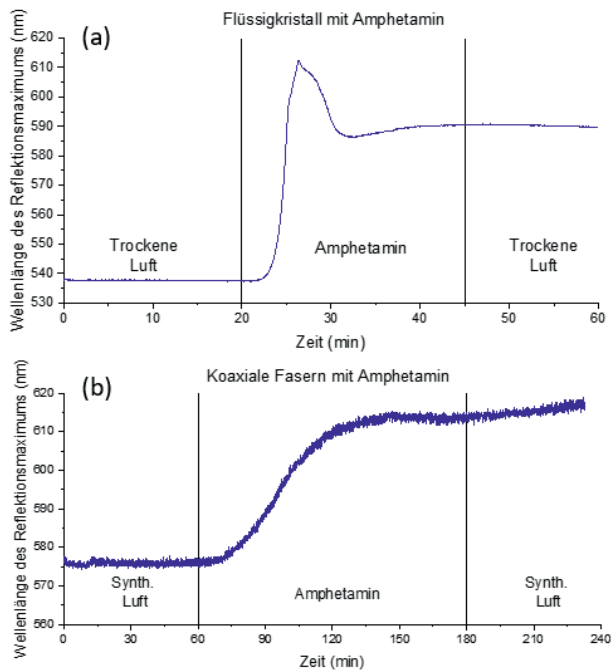


Abb. 9: Verschiebung des Reflektionsmaximums (a) des flächig applizierten N*LCs und (b) der koaxialen Fasern bei der Reaktion von DSI mit Amphetamin

Die koaxial gesponnenen Fasern besitzen einen mittleren Durchmesser von 6-9 μm und weisen in Übereinstimmung mit dem Reflektionsmaximum von 538 nm eine grüne Färbung auf (Abb. 10 a/b). Mit Amphetamin-Zufuhr verfärben sich die Fasern rötlich, welches mit der spektroskopisch gemessenen Wellenlänge von 615 nm übereinstimmt (Abb. 10 c/d).

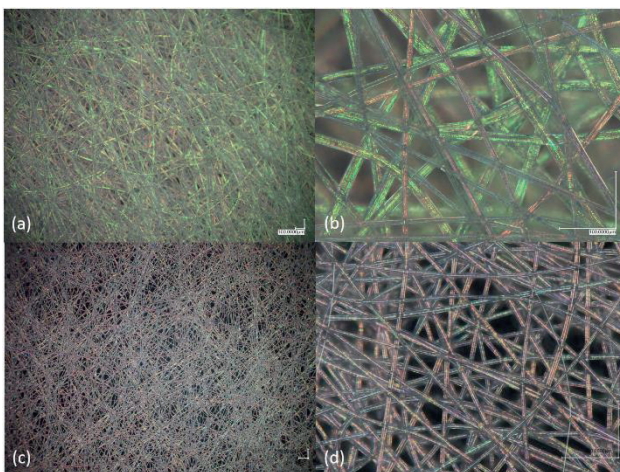


Abb. 10: Koaxial gesponnene Fasern unter dem Auflichtmikroskop (Keyence VHX-7000) (a/b) vor und (c/d) nach Amphetamin-Bedampfung

Durch das Einkapseln des N*LC in die Faser zeigt sich eine leichte Verschiebung des Reflektionsmaximums um ~ 40 nm (Abb. 9 b). Eine mögliche Erklärung hierfür sind kleine Lösungsmittelreste der Polymerlösung, welche in den N*LC diffundieren und ein Aufquellen verursachen. Bei Zugabe von Amphetamin zeigten die koaxialen Fasern eine Rotverschiebung des Peakmaximums von 575 nm auf 615 nm.

Die Reaktion läuft allerdings deutlich langsamer ab als beim flächig applizierten Flüssigkristall, was an der Steigung des Graphen im Bereich der Amphetamin-Zufuhr ersichtlich ist (Abb. 9). Dadurch ist die maximale Peakverschiebung der koaxialen Fasern später erreicht als bei dem flächig applizierten N*LC. Die Stabilität der Fasern ist jedoch begrenzt, da diese aufgrund des hygroskopischen PVPs Wasser aus der Umgebungsluft aufnehmen und sich somit auflösen. Verschiedene Versuche das PVP durch ein anderes, wasserbeständiges Polymer zu ersetzen, scheiterten an der Unverträglichkeit des verwendeten Lösungsmittels mit dem Flüssigkristall (Polystyrol (PS), Polymethylmethacrylat (PMMA)), der limitierten Spinnbarkeit des Polymers (Polyacrylnitril, PAN)) oder der hohen Doppelbrechung der Polymerhülle (Polyvinylacetat (PVAc), PAN), welche die Messung der Sensorantwort behindert. Die Wasserbeständigkeit wird durch direktes Aufbringen eines Tropfens auf das Faservlies getestet. Vor der Behandlung zur Steigerung der Wasserlöslichkeit lösen sich die Fasern direkt auf, während sie dem Tropfen nach der Behandlung standhalten (Abb. 11).

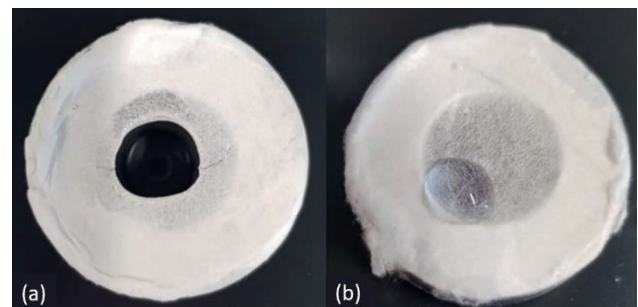


Abb. 11: Wassertropfen auf koaxialem Faservlies (a) ohne und (b) mit H_2O_2 /UV-Behandlung

Das UV-Licht beeinflusst jedoch das Reflektionsmaximum des N*LCs. Nach 40 Minuten Bestrahlung verschiebt sich dieses um ~ 100 nm in Richtung größerer Wellenlängen (Abb. 12 a). Nach Zugabe von Avobenzon als UV-Filter reduziert sich diese Verschiebung auf ~ 30 nm (Abb. 12 b). Damit wird gezeigt, dass Avobenzon die Stabilität der Fasern gegenüber UV-Licht deutlich stabilisiert.

Ausreichender UV-Schutz wird jedoch nur bei einer Avobenzon-Konzentration von 1,5 wt-% bis 2 wt-% erreicht. Bei höheren Konzentrationen tritt eine irreversible Rotverschiebung des Reflektionsmaximums außerhalb des sichtbaren Bereichs auf, wenn der Flüssigkristall dem UV-Licht ausgesetzt wird.

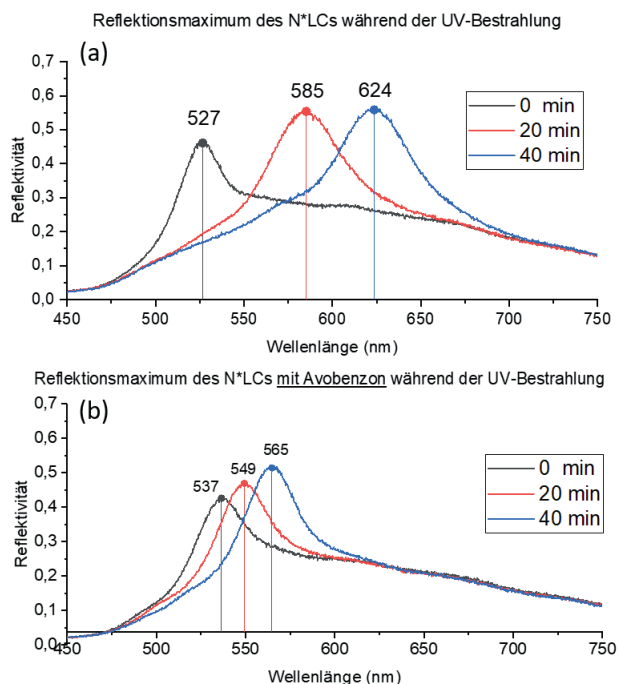


Abb. 12: Reflektionsmaxima des N*LCs während der UV-Bestrahlung (a) ohne und (b) mit Avobenzone

Zudem ist festzuhalten, dass nur koaxiale Fasern vernetzt werden können und eine erhöhte Wasserbeständigkeit zeigen. Für die Vernetzung ist es notwendig, dass das PVP in einem teilweise gelösten Zustand ist, wie bei der Vernetzung von PVP-Lösungen bekannt. [18,19,21] Der N*LC weist eine gewisse Löslichkeit in PVP auf und erniedrig zudem dessen Glastemperatur, was schon zuvor durch DSC-Untersuchungen gezeigt werden konnte. [20] Dadurch ist es besser für die Wasserstoffperoxid-Moleküle erreichbar und begünstigt die Vernetzung.

Zur Untersuchung der Selektivität des Flüssigkristalls werden verschiedene Lösungsmittel (Ethanol, Isopropanol, Acetonitril) über den flächig applizierten N*LC geleitet. Bei allen drei Lösungsmitteln entfärbt sich der Flüssigkristall jedoch vollständig.

Diskussion

In dieser Arbeit ist es gelungen, einen chiral-nematischen Flüssigkristall in eine PVP-Schale einzukapseln, welcher fähig ist auf gasförmiges Amphetamin zu reagieren. Die Sensorantwort von eingekapseltem N*LC ist jedoch sehr langsam. Während ein flächig aufgetragener Flüssigkristall in Anwesenheit von Amphetamin nach wenigen Minuten eine Farbänderung aufweist, dauert dies bei eingekapseltem Flüssigkristall mehrere Stunden. Grund für die langsamere Reaktion der koaxialen Fasern ist ihre Polymerschale, durch welche der gasförmige Analyt (Amphetamin) zunächst diffundieren muss, bevor er im Faserkern mit dem Dotierstoff des N*LCs reagieren kann. Die

Diffusionsgeschwindigkeit des Amphetamins durch die PVP-Hülle muss daher noch verbessert werden. Bei Zufuhr von Lösungsmitteln zeigt der N*LC keine Verschiebung des Reflektionsmaximums, stattdessen geht dieser direkt in seine isotrope Phase über, in welcher die Mesogene ungeordnet vorliegen und keine selektive Reflexion mehr möglich ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Lösungsmittel nicht mit dem Dotierstoff reagieren, sondern nur in den Flüssigkristall hinein diffundieren und dort die Ordnung der Mesogene zerstören. Demnach kann mit dem Flüssigkristall zwischen Amphetamin und Lösungsmittel unterschieden werden. Allerdings reagiert der Dotierstoff neben Amphetamin auch mit anderen Aminen, sodass die Selektivität trotzdem noch stark eingeschränkt ist. Durch weitere Modifikationen am Dotierstoff könnte die Selektivität möglicherweise noch gesteigert werden.

Dennoch ist die Vernetzung des PVPs auf molekularer Ebene und somit die Steigerung der Wasserbeständigkeit der koaxialen Fasern ein großer Schritt in Richtung Anwendung, da die Stabilität deutlich gesteigert werden konnte. Die optimale Avobenzonekonzentration zum Schutz des N*LC vor UV-Licht ist dabei abhängig von der Form, in welcher das Avobenzone vorliegt. Es besitzt zwei Enol-Formen sowie eine Keto-Form, wobei jedoch nur die Enol-Formen eine starke Absorption im UVA-Bereich zeigen. Obwohl bekannt ist, dass Avobenzone dazu neigt in die Keto-Form überzugehen, wenn es UV-Strahlung ausgesetzt ist oder sich bei höheren Konzentrationen photolytisch abbaut, können wir keine gültige Erklärung für die gefundene Konzentrationsschwelle geben. [13,14]

Die vorgestellte Methode zur Steigerung der Wasserbeständigkeit von PVP könnte auch über die klassischen sensorischen Anwendungen hinaus für die Entwicklung intelligenter Textilien bestehend aus PVP genutzt werden.

Literatur

- [1] CACHELIN, P.; GREEN, J. P.; PEIJS, T.; HEENEY, M.; BASTIAANSEN, C. W.: Optical Acetone Vapor Sensors Based on Chiral Nematic Liquid Crystals and Reactive Chiral Dopants. In: *Advanced Optical Materials* 4 (2016), Nr. 4, S. 592–596.
- [2] SPENGLER, M.; PSCHYKLENK, L.; NIEMEYER, J.; KAUL, P.; GIESE, M.: Photonic NO₂ Gas Sensing with Binaphthyl-Based Dopants. In: *Advanced Optical Materials* 9 (2021), Nr. 7, S. 2001828.
- [3] REYES, C.; SHARMA, A.; LAGERWALL, J.: Non-electronic gas sensors from electrospun mats of liquid crystal core fibers for detecting volatile organic compounds at room temperature. In: *Liquid Crystals* (2016), S. 1–16.
- [4] GUAN, Y.; AGRA-KOOIJMAN, D. M.; FU, S.; JÁKLI, A.; WEST, J. L.: Responsive Liquid-Crystal-Clad Fibers for Advanced Textiles and Wearable Sensors. In: *Advanced materials* (Deerfield Beach, Fla.) 31 (2019), Nr. 29, S. e1902168.

- [5] SCHELSKI, K.; REYES, C. G.; PSCHYKLENK, L.; KAUL, P.-M.; LAGERWALL, J. P.: Quantitative volatile organic compound sensing with liquid crystal core fibers. In: *Cell reports. Physical science* 2 (2021), Nr. 12, S. 100661.
- [6] PSCHYKLENK, P.; WAGNER, T.; KAUL, P.: Optische Gassensorik mit chiral-nematischen Flüssigkristallen und koaxialem Elektrosponnen. In: *12. Dresdner Sensor-Symposium* (2015), S. 278–282.
- [7] HAN, Y.; PACHECO, K.; BASTIAANSEN, C. W.; BROER, D. J.; SIJBESMA, R. P.: Optical monitoring of gases with cholesteric liquid crystals. In: *Journal of the American Chemical Society* 132 (2010), Nr. 9, S. 2961–2967.
- [8] SAHA, A.; TANAKA, Y.; HAN, Y.; BASTIAANSEN, C. M.; BROER, D. J.; SIJBESMA, R. P.: Irreversible visual sensing of humidity using a cholesteric liquid crystal. In: *Chemical communications* (Cambridge, England) 48 (2012), Nr. 38, S. 4579–4581.
- [9] SCHENNING, A.; CRAWFORD, G. P.; BROER, D. J.: *LIQUID CRYSTAL SENSORS* (2022).
- [10] ENZ, E.; BAUMEISTER, U.; LAGERWALL, J.: Coaxial electrospinning of liquid crystal-containing poly(vinylpyrrolidone) microfibres. In: *Beilstein journal of organic chemistry* 5 (2009), S. 58.
- [11] LAGERWALL, J. P.; MCCANN, J. T.; FORMO, E.; SCALIA, G.; XIA, Y.: Coaxial electrospinning of microfibres with liquid crystal in the core. In: *Chemical communications* (Cambridge, England) (2008), Nr. 42, S. 5420–5422.
- [12] YOON, J.; YANG, H.-S.; LEE, B.-S.; YU, W.-R.: Recent Progress in Coaxial Electrospinning: New Parameters, Various Structures, and Wide Applications. In: *Advanced materials* (Deerfield Beach, Fla.) 30 (2018), Nr. 42, S. 1704765 (1-23).
- [13] BERENBEIM, J. A.; WONG, N. G.; COCKETT, M. C.; BERDEN, G.; OOMENS, J.; RIJS, A. M.; DESSENT, C. E.: Unravelling the Keto-Enol Tautomer Dependent Photochemistry and Degradation Pathways of the Protonated UVA Filter Avobenzene. In: *The journal of physical chemistry. A* 124 (2020), Nr. 15, S. 2919–2930.
- [14] MURPHY, R. B.; STATON, J.; RAWAL, A.; DARWISH, T. A.: The effect of deuteration on the keto-enol equilibrium and photostability of the sunscreen agent avobenzene. In: *Photochemical & photobiological sciences : Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology* 19 (2020), Nr. 10, S. 1410–1422.
- [15] HEPPEKE, G.; OESTREICHER, F.: Bestimmung des Helixdrehsinnes cholesterischer Phasen mit der Grandjean-Cano-Methode. In: *Zeitschrift für Naturforschung* (1977), Nr. 32, S. 899–901.
- [16] LI, Z.; WANG, C.: *One-dimensional nanostructures* (2013). Electrospinning technique and unique nanofibers. Springer, Berlin, New York.
- [17] REYES, C. G.; LAGERWALL, J. P.: Disruption of Electrospinning due to Water Condensation into the Taylor Cone. In: *ACS applied materials & interfaces* 12 (2020), Nr. 23, S. 26566–26576.
- [18] MACIEJEWSKA, B. M.; WYCHOWANIEC, J. K.; WOŹNIAK-BUDYCH, M.; POPENDA, Ł.; WAROWICKA, A.; GOLBA, K.; LITOWCZENKO, J.; FOJUD, Z.; WERESZCZYŃSKA, B.; JURGA, S.: UV cross-linked polyvinylpyrrolidone electrospun fibres as antibacterial surfaces. In: *Science and technology of advanced materials* 20 (2019), Nr. 1, S. 979–991.
- [19] ZHU, X.; LU, P.; CHEN, W.; DONG, J.: Studies of UV crosslinked poly(N-vinylpyrrolidone) hydrogels by FTIR, Raman and solid-state NMR spectroscopies. In: *Polymer* 51 (2010), Nr. 14, S. 3054–3063.
- [20] PSCHYKLENK, L.; WAGNER, T.; LORENZ, A.; KAUL, P.: Optical gas sensing with encapsulated chiral-nematic liquid crystals. In: *ACS Applied Polymer Materials* (2020), Nr. 2, S. 1925–1932.
- [21] FECHINE, G.; BARROS, J.; CATALANI, L. H.: Poly(N-vinyl-2-pyrrolidone) hydrogel production by ultraviolet radiation: new methodologies to accelerate crosslinking. In: *Polymer* 45 (2004), Nr. 14, S. 4705–4709.

Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des BMBF-Projekts OptoSpin (FKZ 13FH023IX6). Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).