Gabriela Alexe*, Andreas Tausendfreund, Dirk Stöbener und Andreas Fischer

Maschinelles Lernen für Abdeckungsmessungen von Oberflächen mit abgeschiedenen Au-Nanosphären mittels Lichtstreuung

Machine learning for coverage measurements of surfaces with deposited Au-nanospheres by light scattering

DOI 10.1515/teme-2019-0055

Zusammenfassung: Die nicht-negative Matrixfaktorisierung wird als Ansatz zur Lösung des inversen Problems bei Oberflächenmessungen basierend auf der Auswertung von Streulichtverteilungen vorgeschlagen. Die Entwicklung neuer Streulichtmethoden basiert derzeit auf empirischen Lösungen, die stark von der jeweiligen Anwendung abhängen. Die vorgeschlagene modellbasierte Lösung wird ohne a priori Expertenwissen für Au-Nanosphären auf Au-Substraten angewendet und für die Messung der Oberflächenabdeckung mit Partikeln mittels Streulichtsimulationen verifiziert. Ausblickend werden Strategien für die Validierung vorgestellt.

Schlüsselwörter: Streulichtverfahren, maschinelles Lernen, nicht-negative Matrixfaktorisierung, inverses Problem.

Abstract: Non-negative matrix factorization is proposed as an approach to solve the inverse problem of surface measurements based on the evaluation of scattered light distributions. The development of new scattered light methods is currently based on empirical solutions, which strongly depend on the specific application. The proposed model-based solution is applied without a priori expert knowledge for Au nanospheres on Au substrates and verified for the measurement of surface coverage with particles using scattered light simulations. Strategies for validation are presented.

Keywords: Scattered light methods, machine learning, non-negative matrix factorization, inverse problem.

*Korrespondenzautor: Gabriela Alexe, Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft, Linzer Str. 13, 28359 Bremen, E-Mail: g.alex@bimaq.de

Andreas Tausendfreund, Dirk Stöbener, Andreas Fischer, Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft, Linzer Str. 13, 28359 Bremen, E-Mail: a.tausendfreund@bimaq.de, d.stoebener@bimaq.de, a.fischer@bimaq.de

1 Einleitung

Die Serienherstellung funktionalisierter Oberflächen ist auf eine zuverlässige Qualitätsprüfung angewiesen. Hierfür eignen sich Streulichtmethoden, die eine schnelle in situ Inspektion nanodimensionaler Strukturen ermöglichen [9]. Die Herausforderung bei der Streulichtmesstechnik besteht jedoch darin, den Zusammenhang zwischen dem interessierenden Oberflächenparameter (wie zum Beispiel die Höhe der Nanostrukturen) und einem charakteristischen Merkmal der Streulichtintensitätsverteilung zu identifizieren, womit das inverse Problem gelöst und ein Messsystem mit der erforderlichen räumlichen und zeitlichen Auflösung entworfen werden kann [10, 11]. Aktuell wird das inverse Problem empirisch gelöst, wobei das Vorgehen stark von der betrachteten Anwendung und den Messgrößen abhängt. Zu einer gemessenen Streulichtverteilung wird in gegenwärtigen winkel- und spektroskopischen Scatterometrieverfahren [10] diejenige simulierte Verteilung durch direkte Optimierung oder Bibliothekssuche ermittelt, die mit der gemessenen am besten übereinstimmt. Aus den Simulationsparametern der so ermittelten Verteilung werden die zu messenden Oberflächenparameter extrahiert. Die simulierten Streulichtverteilungen entstehen mittels rigorosen Algorithmen zur Berechnung der oberflächenabhängigen Streulichtfelder. Dieser Lösungsweg setzt jedoch Vorwissen über das spezifische Lichtstreuungsverhalten der Nanostrukturen voraus und wird deswegen hauptsächlich für deterministische, periodische Strukturen eingesetzt.

Nanopartikelfilme aus edelmetallischen, kugelförmigen Nanopartikeln (NP) auf verschiedenen Substraten sind aufgrund von plasmonischen Effekten für optische, elektronische und Katalyse-Anwendungen interessant und stellen eine nicht-deterministische Oberflächenstruktur dar. Ob als Antireflexbeschichtung [2], als Lichtfallenstruktur für Photovoltaikanwendungen [5] oder in Biosensorikanwendungen [1], ihre Funktionalität wird stark von der

Partikelgröße und der Oberflächenabdeckung mit Partikeln beeinflusst. Lichtstreuungsinformationen für einzelne oder kolloidale Nanosphären sind aus Untersuchungen und Modellierungen ihrer optischen Eigenschaften [4, 6] bekannt, nicht aber für zufällige, nicht-periodische abgeordnete Schichten. Die Entwicklung von streulichtbasierten Messverfahren für die Oberflächencharakterisierung für nicht-periodische Schichten ist deswegen nicht möglich. Ein Ansatz zur Lösung des messtechnischen Problems ohne a priori Expertenwissen zu den anwendungsspezifischen Streulichteigenschaften fehlt bislang.

Aus diesem Grund wird im vorliegenden Beitrag untersucht, inwieweit das inverse Problem mittels maschinellem Lernen, insbesondere mit dem Algorithmus der nicht-negativen Matrixfaktorisierung (NMF), gelöst werden kann, was exemplarisch für auf Goldsubstraten aufgebrachte Goldnanosphären diskutiert wird. Nach einer kurzen Erläuterung des Lösungsansatzes in Abschnitt 2 werden die Lichtstreuungssimulationen und die Implementierung des NMF-Algorithmus in Abschnitt 3 dargestellt. Der 4. Abschnitt widmet sich der Verifizierung des Messansatzes, inwieweit das vorgeschlagene Vorgehen zu geeigneten Messverfahren für die Oberflächenabdeckung mit Au-Nanopartikeln führt. Als Ausblick auf die Validierung werden im 5. Abschnitt das Referenzmessverfahren und die erforderlichen Referenzproben beschrieben. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung.

2 Lösungsansatz

Ein NMF-Algorithmus wird auf simulierte Streulichtverteilungen angewendet, die sich aus modellierten nanostrukturierten Proben mit unterschiedlicher Partikelgröße und Oberflächenabdeckung ergeben. Der NMF-Algorithmus identifiziert automatisch bestehende Teilmuster [8] in den Streulichtverteilungen und bestimmt für jedes von ihnen einen Quantifizierungskoeffizienten. Anschließend werden die Koeffizienten hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von der Oberflächenabdeckung und der Partikelgröße untersucht, um für die Oberflächenabdeckungsmessung geeignete Streuteilmuster zu identifizieren und ein Messverfahren zu verifizieren. Da üblicherweise die Partikelgröße im Vorfeld bekannt ist, muss insbesondere die Oberflächenabdeckung erfasst werden.

3 Streulichtsimulation und NMF-Auswertung

Der hier verfolgte Lösungsansatz basiert auf Simulationen der Lichtstreuung an einer großen Anzahl von Proben ($N = 460$) und noch ausstehenden Messungen an realen Proben. Die Lichtstreuungsberechnungen erfolgen mit dem diskreten Dipol-Approximationsalgorithmus ADDA [13]. Dieser Algorithmus liefert die Müller-Matrix an einem beliebigen Paar (θ, φ) der sphärischen Koordinatenwinkel für eine bestimmte Laserwellenlänge λ und einen definierten Einfallswinkel. Die Stokes-Parameter der Streuung können somit in Abhängigkeit vom einfallenden Stokes-Vektor berechnet werden. Für die ADDA-Berechnungen wurde eine Laserwellenlänge $\lambda = 405$ nm mit senkrechtem Einfall auf die Proben verwendet. Die simulierten Goldpartikel haben eine normale Größenverteilung (durchschnittlicher Radius $\bar{R}$ von 30 nm, 60 nm und 100 nm mit 10 % relativer Standardabweichung) und bedecken das Substrat gleichverteilt mit 20 statistischen Variationen für jeden der verschiedenen Schritte der Oberflächenabdeckung unter 50 %. Die Verteilung eines Stokes-Parameters in der Reflexionshemisphäre ($\theta = [0^\circ; 90^\circ]$ und $\varphi = [0^\circ; 360^\circ]$) wurde als Messvektor für eine Probe gewählt. Trainingsmatrizen aus N Messvektoren wurden für jeden Stokes-Parameter aufgebaut und mittels der MATLAB-Implementierung des NMF-Algorithmus in zwei Matrizen zerlegt. Jeder Messvektor wird durch ein Produkt zwischen einer aus wenigen Basisvektoren bestehenden Matrix und den jeweiligen aus der zweiten Matrix extrahierten Quantifizierungskoeffizienten approximiert. Jeder Basisvektor entspricht einer Stokes-Parameter-Verteilung in der Reflexionshemisphäre, die nur ein Teilmuster darstellt.

4 Verifizierung

Betrachtet wurde der erste Stokes-Parameter I_{sca} (gestreute Intensität) beziehungsweise der zweite relative Stokes-Parameter $Q_{\text{sca}}/I_{\text{sca}}$ in dem gestreuten Stokes-Vektor [3]. Für den Fall von parallel polarisiert einfallendem Licht ergab die NMF-Zerlegung der Streuverteilungen für beide betrachteten Stokes-Parameter jeweils zwei Teilmuster. Ein Teilmuster stellt den Anteil des reflektierten Lichts dar ($\mathbf{M}_{\text{ref}}$) und eins verkörpert das diffuse Streulicht ($\mathbf{M}_{\text{dif}}$). Hierbei ist bemerkenswert, dass in dem betrachteten Beispiel die NMF ohne Vorwissen ein physikalisch interpretierbares Ergebnis der Streulichtzerlegung

liefert, welches bei der Methode des „Total integrated scattering“ [12] zu Rauheitsmessung angewandt wird.

Erster Stokes-Parameter: Der Koeffizient des NMF-Teilusters M_{ref} vom ersten Stokes-Parameter I_{sca} ist empfindlich gegenüber der zu messenden Oberflächenabdeckung, jedoch nur bis zu einer maximalen Abdeckung, die von der Laserwellenlänge und der Partikelgröße abhängt, s. Abb. 1. Für Partikel mit $\bar{R} = 30 \text{ nm}$ ist beispielsweise eine eindeutige Abdeckungsmessung bis zu 25 % möglich. Jedoch existiert eine Querempfindlichkeit bezüglich der Partikelgröße.

Abb. 1: Mittlere NMF-Koeffizienten eines Teilusters in Abhängigkeit der Oberflächenabdeckung mit Goldnanosphären für den ersten Stokes-Parameter I_{sca} und das zugehörige, extrahierte Teilmuster $M_{\text{ref}}(I_{\text{sca}})$ für parallel polarisiert einfallendes Licht mit $\lambda = 405 \text{ nm}$, in Kugelkoordinaten dargestellt.

Abb. 2: Messansatz für die Oberflächenabdeckung mit Goldnanosphären basierend auf dem ersten Stokes-Parameter I_{sca} : a) Kalibrierfunktion für Partikel mit $\bar{R} = 30 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$ und b) ein mögliches Messsetup.

Die Streulichtberechnungen liefern die Intensität I_{sca} in jedem Punkt (θ, φ) normiert auf die einfallende Intensität I_{inc} . Folglich sind die NMF-Koeffizienten proportional zu der gestreuten Strahlungsleistung normiert auf die einfallende Leistung $P_{\text{sca}}/P_{\text{inc}}$. Um eine auf dieser Erkenntnis basierende Abdeckungsmessung zu realisieren, genügt es, die kumulierte Strahlungsleistung der gerichteten Streuung (Reflexion) zu erfassen. Eine Kalibrierfunktion ergibt sich aus der Abdeckung für jede Probe versus dem

jeweiligen NMF-Koeffizienten. Abb. 2 a) zeigt den Polynomfit mit einem 95 % Konfidenzintervall für die Partikel mit $\bar{R} = 30 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$. Die NMF-Koeffizienten sind auf den extrapolierten Wert für 0 % Abdeckung normiert und als $P_{\text{sca}}/P_{\text{inc}}$ angegeben. Es ist zu beachten, dass diese Ergebnisse für parallel polarisiertes Licht gültig sind.

Abb. 2 b) stellt ein abgeleitetes Messsetup für diesen Ansatz dar, wobei nicht mehr die gesamte Streulichtverteilung, sondern nur noch zwei akkumulierte Intensitätssignale mittels zwei Fotodioden gemessen werden müssen. Die durch Photonenschrot- und Detektorrauschen bedingte untere Schranke für die Messunsicherheit der Abdeckungsmessung, berechnet für typische Werte des Rauschens, liegt unter 0,01 % Abdeckung. Durch eine Erhöhung der Laserleistung und den Einsatz rauschärmerer Fotodioden kann dieser Messunsicherheitsbeitrag noch reduziert werden. Die Messunsicherheit wird jedoch von der Kalibrierkurve dominiert. Es wird basierend auf der Steigung der Kalibrierkurve sowie den mittels Simulation bestimmten Unsicherheiten der NMF-Koeffizienten abgeschätzt, dass mit dem skizzierten Messsystem Messunsicherheiten zwischen 0,05 % im niedrigen Bereich der Abdeckung und 0,4 % bei über 20 % Abdeckung erreicht werden können.

Zweiter Stokes-Parameter: Der Koeffizient des NMF-Teilusters M_{dif} vom zweiten Stokes-Parameter $Q_{\text{sca}}/I_{\text{sca}}$ ist in Abb. 3 a) dargestellt und zeigt ebenso eine Abhängigkeit von der Abdeckung. Hierbei ist der Einfluss der Partikelgröße bei Abdeckungen bis 30 % vernachlässigbar, und für Partikel mit $\bar{R} = 30 \text{ nm}$ kann die Abdeckung über den gesamten simulierten Bereich gemessen werden. Damit führt die NMF-Auswertung in diesem Fall zu einem neuen, nicht antizipierten Messansatz für die Oberflächenabdeckung, welcher eine reduzierte Querempfindlichkeit gegenüber der Partikelgröße verspricht.

Der Parameter $Q_{\text{sca}} = I_{\text{sca},\parallel} - I_{\text{sca},\perp}$ kann als Differenz der Strahlungsleistung zwischen dem parallel und dem senkrecht polarisierten Streulicht gemessen werden. In diesem Fall, sind die NMF-Koeffizienten proportional zu $(P_{\text{sca},\parallel} - P_{\text{sca},\perp})/(P_{\text{sca},\parallel} + P_{\text{sca},\perp})$. Somit wird die relative lineare Depolarization des parallel polarisierten einfallenden Lichts im diffusen Anteil der Streuung von Goldnanosphären detektiert.

Mögliche Messsetups werden untersucht, um die entsprechende Abdeckungsmessung durch Strahlungsmessungen der diffusen Streuung zu realisieren. Ein Beispiel ist in Abb. 3 b) dargestellt, welches auf der Erfassung der kumulierten Strahlungsleistung für zwei orthogonale Polarisationsrichtungen wiederum mit lediglich zwei Fotodioden basiert.

Abb. 3: a) Mittlere NMF-Koeffizienten eines Teilusters in Abhängigkeit der Oberflächenabdeckung mit Goldnanosphären für den zweiten Stokes-Parameter Q_{sca}/I_{sca} und das zugehörige, extrahierte Teilmuster $M_{dif}(Q_{sca}/I_{sca})$ für parallel polarisiert einfallendes Licht mit $\lambda = 405$ nm, in Kugelkoordinaten dargestellt. b) Schema eines möglichen Messsetups für die Oberflächenabdeckung mit Goldnanosphären basierend auf dem zweiten Stokes-Parameter Q_{sca}/I_{sca} .

Zwei mögliche potenziell schnelle Messverfahren zur Detektion der Oberflächenabdeckung mit Gold-NP wurden ohne a priori Wissen zu den erwarteten Streulichteigenschaften gefunden. Dadurch ist die Fähigkeit des vorgestellten Ansatzes für die Lösung des inversen Problems verifiziert.

5 Validierungsausblick

Zur Validierung der identifizierten Messverfahren ist der NMF-Algorithmus auf Streulichtmessungen von Referenzproben anzuwenden. Ein bestehender Referenzaufbau für winkelaufgelöste Streulichtmessungen bildet die Streu- und Messbedingungen der Simulationen ab. Darüber hinaus sollen die resultierenden Messverfahren auf ihre Empfindlichkeit gegenüber der Abdeckung mit Goldnanopartikeln überprüft werden.

Abb. 4: Winkelaufgelöster Streulichtmessaufbau.

Referenzaufbau für Streulichtmessungen: Abb. 4 zeigt den Referenzaufbau eines winkelauf-

senden Streulichtmessverfahrens. Ein Detektor kann in einem festen Abstand von ca. einem halben Meter um das Streuzentrum positioniert werden. Die Bewegung erfolgt über Schrittmotoren in Kugelkoordinaten, also in θ - und φ -Richtung. Der Detektorwagen fährt innerhalb eines Detektortunnels um die θ -Achse. Ein Probenhalter ist in der Kugel störlichtgeschützt entlang der φ -Achse und entlang des auf der Messfläche fokussierten Laserstrahl platziert. Die Detektorkinematik ist strikt von Probenhalter und Laserbeleuchtung entkoppelt, so dass die Streugeometrie während der Messung unverändert bleibt. Der große Messabstand ermöglicht eine hohe Messauflösung von weniger als 0.001° bei einer hohen Abtastrate von 100 Hz.

Referenzproben: Genau definierte Gold-NP, ein wesentlicher Aspekt für Referenzproben, lassen sich durch Lasersynthese und -verarbeitung von Kolloiden [14] herstellen. Nanokugeln mit niedrigen Formabweichungen und durch Filterung kontrollierter Größenverteilung sind Stand der Technik (Abb. 5 a)). Die elektrophoretische Abscheidung [7] von Edelmetall-NP wird beispielsweise dazu verwendet, Nanostrukturen auf der Oberfläche von Implantaten (wie z. B. neuronale Kontakte) zu induzieren, um die Biokompatibilität zu verbessern. Die Kombination dieser Methoden bietet die Möglichkeit zur Herstellung von Referenzproben für eine systematische Untersuchung der Auswirkungen von Oberflächenabdeckung und Partikelgröße auf das Oberflächen-Streulichtverhalten.

Abb. 5: Gold-NP Proben: a) TEM-Aufnahme der kolloidalen NP in einer Wasserlösung, b) simulierte Oberfläche mit einer mittleren Abdeckung von 19.3 %, und REM-Aufnahmen der abgeschiedenen Gold-NP auf einem goldbeschichteten Si-Wafer mit einer mittleren Abdeckung von c) $16.5\% \pm 1.8\%$ und d) $34.2\% \pm 3.3\%$.

Die für die Referenzproben hergestellten Gold-NP weisen nach Filterung einen mittleren Radius von $\bar{R} = 36 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$, wie in der Transmissionselektronenmikroskopieaufnahme in Abb. 5 a) gezeigt, auf. Als Substrate wurden goldbeschichtete Si-Wafer eingesetzt, um geringe

Ebenheitsabweichungen und eine sehr niedrige Rauheit zu gewährleisten. Diese Daten passen zu den modellierten Proben (siehe Abb. 5 b)). Die Abdeckung mit Partikeln wurde mittels einer graduellen Erhöhung der Partikelkonzentration in der Wasserlösung und der Abscheidungszeit variiert. Angestrebt wurden Abdeckungswerte bis ca. 30 %. Unter 10 % Abdeckung ist die Partikelverteilung auf der Oberfläche vergleichbar mit den modellierten Proben. Eine Tendenz zur Aggregation bei den Gold-NP führt bei höherer Abdeckung zur Clusterbildung und zu einer Abweichung von der simulierten Oberfläche. Die Cluster gewinnen bei der Erhöhung der Partikelkonzentration in der Lösung an Höhe und Fläche, obwohl die erzielte Abdeckung gleich ist. Eine Abblätterung der Goldschicht vom Si-Wafer limitiert jedoch prozessbedingt die Abscheidungszeit. Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen (Abb. 5 c) und 5 d)) zeigen Proben mit unterschiedlich geformten Clustern. Flache Cluster mit einer submikrometergroßen lateralen Ausdehnung induzieren nur eine begrenzte Abweichung von den Modelloberflächen, beziehungsweise können modelliert werden. Große Cluster sind hingegen nicht nur schwer zu simulieren, sondern auch für die Anwendungen unerwünscht. Die Gold-NP sind ligandenfrei, wodurch die Clusterbildung erklärt wird. Ein Ligand würde jedoch die optischen und katalytischen Eigenschaften der Nanostrukturen beeinträchtigen und dadurch deren Anwendbarkeit stark limitieren. Es ist zu erwarten, dass auch das Streulichtverhalten beeinflusst würde. Ein Substrat, welches die Anpassung des Abscheidungsprozesses für höhere Abdeckungen zulässt, ist für die Herstellung von Referenzproben erforderlich.

6 Zusammenfassung

Der NMF-Algorithmus ermöglicht es, Teilmuster in der örtlichen Verteilung im Halbraum von simulierten Stokes-Parametern zu identifizieren, deren Koeffizienten in einem eindeutigen Zusammenhang mit der Abdeckung mit Goldnanosphären für verschiedene Partikelgrößen stehen. Damit können potenziell schnelle Messverfahren für die Oberflächenabdeckung mit Nanopartikeln entworfen werden, welche auf polarisationsabhängigen Messungen der kumulierten Strahlungsleistung basieren. Somit ist verifiziert, dass die NMF-Analyse simulierter Streulichtmuster ein leistungsfähiges Werkzeug darstellt, um Streulichtmesssysteme für charakteristische Parameter von Nanostrukturen zu realisieren.

Danksagung: Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung (GO 554/35-1) der vorgestellten Arbeiten.

Literatur

- [1] S. R. Ahmed, J. Kim, V. T. Tran, T. Suzuki, S. Neethirajan, J. Lee und E. Y. Park. In situ self-assembly of gold nanoparticles on hydrophilic and hydrophobic substrates for influenza virus-sensing platform. *Scientific Reports, Nature Publishing Group*, 7:44495, 2017.
- [2] K. V. Baryshnikova, M. I. Petrov, V. E. Babicheva und P. A. Belov. Plasmonic and silicon spherical nanoparticle antireflective coatings. *Scientific Reports, Nature Publishing Group*, 6:22136, 2016.
- [3] C. Bohren und D. Huffman. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Wiley Science Paperback Series, 1998.
- [4] X. Fan, W. Zheng und D. J. Singh. Light scattering and surface plasmons on small spherical particles. *Light: Science & Applications*, 3:e179, 2014.
- [5] M. A. Green und S. Pillai. Harnessing plasmonics for solar cells. *Nature Photonics*, 6:130–132, 2012.
- [6] K. L. Kelly, E. Coronado, L. L. Zhao und G. C. Schatz. The optical properties of metal nanoparticles: The influence of size, shape, and dielectric environment. *The Journal of Physical Chemistry B*, 107(3):668–677, 2003.
- [7] S. Koenen, R. Streubel, J. Jakobi, K. Schwabe, J. K. Krauss und S. Barcikowski. Continuous electrophoretic deposition and electrophoretic mobility of ligand-free, metal nanoparticles in liquid flow. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(4):D174–D179, 2015.
- [8] D. D. Lee und H. S. Seung. Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization. *Nature*, 401:788–791, 1999.
- [9] P. M. Lonardo, A. A. Bruzzone, C. Gambaro und F. Parizzi. Surface characterization and defect detection by analysis of images obtained with coherent light. *Annals of the CIRP*, 40(1):541–544, 1991.
- [10] M. H. Madsen und P.-E. Hansen. Scatterometry—fast and robust measurements of nano-textured surfaces. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 4(2):023003, 2016.
- [11] D. Stöbener, G. Alexe, A. Tausendfreund und A. Fischer. Methode zur Erfassung periodischer Sub-Wellenlängen-Nanostrukturen für den In-Prozess-Einsatz. *tm - Technisches Messen*, 85(2):88–96, 2018.
- [12] J. C. Stover. *Optical scattering : measurement and analysis*. SPIE Optical Engineering Press, 1995.
- [13] M. A. Yurkin und A. G. Hoekstra. The discrete-dipole-approximation code adda: Capabilities and known limitations. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 112(13):2234 – 2247, 2011.
- [14] D. Zhang, B. Gökce und S. Barcikowski. Laser synthesis and processing of colloids: Fundamentals and applications. *Chemical Reviews*, 117:3990 – 4103, 2017.