

Vergleich rigoroser Simulationstools anhand von modellbasierten Kantendetektionen in der optischen Mikroskopie

Jan Krüger, Rainer Köning, Bernd Bodermann

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, 38116, Germany

<mailto:jan.krueger@ptb.de>

In dieser Arbeit vergleichen wir die Simulationsergebnisse der mikroskopischen Bildgebung von insgesamt drei rigorosen Softwarepaketen miteinander. Dafür werden jeweils modellbasierte Kantendetektionen mit Hilfe eines Schwellenwertverfahrens für 25 verschiedenen CoG-Liniengitterkonfigurationen durchgeführt. Die resultierenden Linienbreitenabweichungen betragen nur ca. 1 nm.

1 Einführung

Für hochgenaue dimensionale Metrologie mittels optischer Mikroskopie ist eine modellbasierte Auswertung erforderlich. Insbesondere bei der Auswertung bidirektionaler Messungen (z.B. Linienbreiten) von Mikro-, und Nanostrukturen, sind hochgenaue Simulationen des mikroskopischen Abbildungsprozesses, essenziell [1]. Die Algorithmen der hierfür verfügbaren Softwarepakete enthalten zwangsläufig alle zu einem gewissen Grad Näherungen u.a. bei der Lösung der Maxwell-Gleichungen, welche zu systematischen Fehlern in den Simulationsergebnissen führen können. Daher ist es notwendig, die verfügbaren Programme hierfür zu vergleichen, um die Unsicherheitsbeiträge der Modellrechnungen überprüfen zu können.

Ein solcher Vergleich von Softwarepaketen für die rigorose Simulation von optischen Mikroskopbildern wurde bereits 2005 von der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) und dem National Institute for Standards and Technologies (NIST) durchgeführt [2]. In dieser Arbeit wurde nun ein weiteres rigoroses Softwarepaket getestet und mit den Ergebnissen des Vergleiches von 2005 verglichen. In Abschnitt 2 werden zunächst die Parameter und die Methodik des Vergleiches beschrieben, bevor im Abschnitt 3 die Ergebnisse dargelegt und diskutiert werden.

2 Parameter und Methodik des Vergleiches

Der Vergleich basierte auf ausgewählten Beleuchtungs- und Abbildungsparametern eines Mikroskops, sowie den geometrischen und optischen Eigenschaften einer binären Photomaske, die zusammen eine Testsuite bilden. Diese Testsuite beschreibt eine Modelanordnung für Linienbreitenmessungen an einer Chrom-auf-Glas-Photomaske mit einem UV-Transmissionsmikroskop. Als Teststrukturen wurden Liniengitter mit variierenden Linienabständen (Gitterperioden) und Linienbreiten definiert und modelliert (Tabelle 1). Insgesamt

werden 25 verschiedene Liniengitterkonfigurationen definiert, deren Gitterperioden vom Auflösungs-limit von ca. 0,2 μm bis zu fast 20 μm reichen. Dabei werden die Gitterparameter so variiert, dass sich aus der Wahl der Linienbreite und dem Linienabstand Linien-zu-Zwischenraumverhältnisse von ca. 0,01 bis 98 ergeben [2].

Das Simulationsmodell aus Mikroskop und dem jeweiligen Liniengitter wird in den einzelnen Softwarepaketen definiert und das finale Mikroskopbild wird für partiell inkohärente Beleuchtung berechnet. Die Intensitätsprofile werden mit demjenigen Intensitätswert normiert, der vorliegen würde, wenn die Chromschicht der Photomaske vollständig entfernt ist. Die fokalen Bilder werden anhand eines Fokuskriteriums bestimmt, dass sich auf die Kantensteigung bezieht. Demnach ist das Bild das fokale Bild, dass bei einer Kantenhöhe von 50 % die größte Steigung hat. Im fokalen Bild wird dann derjenige Intensitätswert bestimmt, an dem sich das simulierte Intensitätsprofil und die Position der realen physischen Kante überlappen. Dieser Wert ist der Schwellenwert, welcher für die Auswertung von Linienbreitenmessungen verwendet werden sollte [1].

Beleuchtungsparameter:		
Köhler Beleuchtung; Hellfeld; Transmission		
Wellenlänge (λ):	365 nm	
Polarisation:	TE, TM, unpolarisiert	
Kondensor NA:	0,6	
Gitterparameter:		
Kantenwinkel (α):	90 °	
Schichtdicke Chrom (d_1):	0,1 μm	
Brechungsindex	Quarz	Chrom
n	1,460	1,843
k	1e-06	2,195
Abbildungsparameter:		
Vergrößerung:	100	
Objektive NA:	0,9	
Berechnungsparameter:		
Objektmittle bei:	0 μm	
Fokusschrittgröße:	0,01 μm	
x-Intervall:	0,01 μm	
NA-Intervall:	0,1	

Tab. 1 Parameter der NIST Testsuite

Im Rahmen dieser Untersuchung dient er als Vergleichswert zwischen den drei betrachteten rigorosen Softwarepaketen [2].

3 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der JCMSuite [3], die sich bei ihren Berechnungen auf die Finiten-Elemente-Methode (FEM) stützt, mit den bestehenden Ergebnissen aus [2] verglichen. Dort wurden die auf der Rigorous-Coupled-Wave-Analysis basierende Software MicroSim [4] sowie die FEM-Software Dipog [5] verwendet. In der nachfolgenden Abbildung sind die Schwellenwerte für die Liniengitter in Abhängigkeit der verwendeten Softwarepakete über den Linien-zu-Zwischenraum-Verhältnissen der Liniengitter aufgetragen.

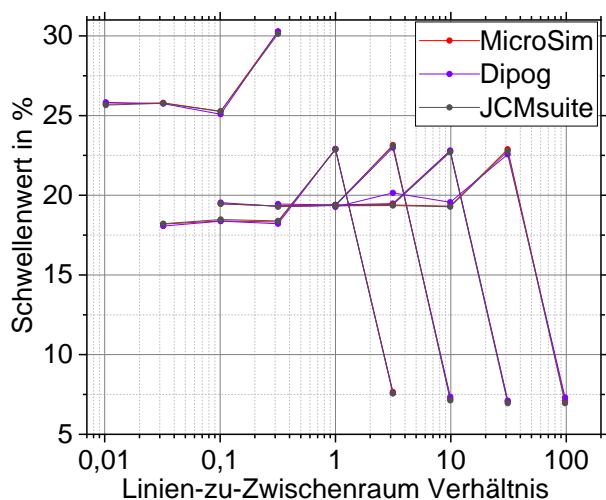


Abb. 1 Schwellenwertergebnisse der Testsuite: Verbundene Punkte entsprechen hier den Schwellenwerten von Liniengittern mit der gleichen Linienbreite

Die Schwellenwerte zeigen für alle Softwarepakete und für alle Gitter eine sehr hohe Übereinstimmung und stimmen im Bereich von etwa 0,2 % überein. Diese Differenzen würde bei der Auswertung von Messungen zu einem Linienbreitenunterschied von ca. 1 nm führen.

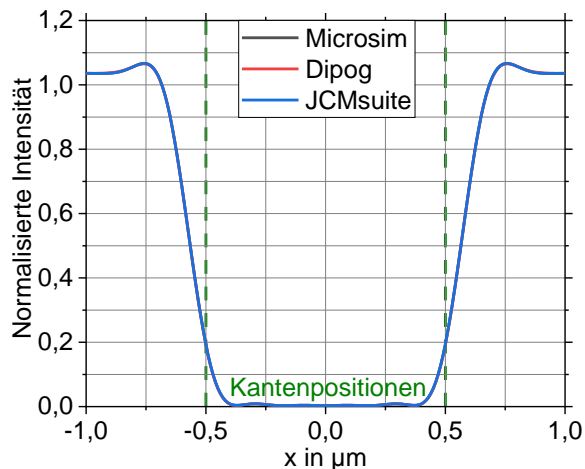


Abb. 2 Fokale Intensitätsprofile des Gitter S1C5: Linienbreite = 1 µm; Periode = 2 µm

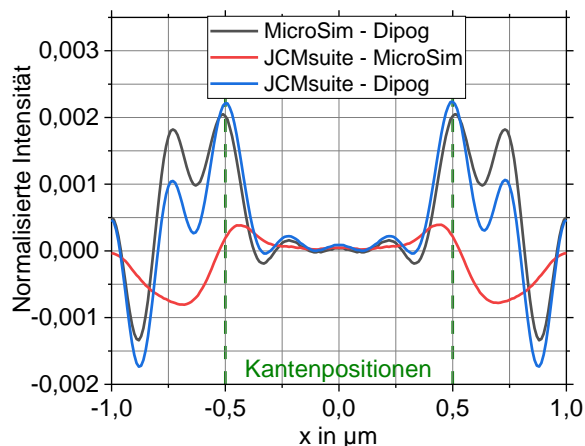


Abb. 3 Fokale Differenzprofile der drei rigorosen Softwarepakete für das Liniengitter S1C5

Als Beispiel werden in Abbildung 2 die fokalen Liniengitterprofile der drei Softwarepakete für ein Gitter mit einer Periode von 2 µm und einer Linienbreite von 1 µm gezeigt. Die Positionen der realen physischen Kanten sind durch gestrichelte, vertikale Linien markiert. Die Liniengitterprofile zeigen eine sehr hohe Übereinstimmung über die gesamte Gitterperiode.

Für eine genauere Beurteilung der Übereinstimmung der drei Softwarepakete, hinsichtlich der Simulationen von Gitter S1C5, werden die fokalen Differenzprofile betrachtet. Die Kantenpositionen sind von besonderer Bedeutung, da dort die Schwellenwerte bestimmt werden. Hier weicht das Profil von Dipog tendenziell stärker von den fokalen Profilen von der JCMSuite und MicroSim ab. Insgesamt zeigen die Differenzprofile aber sehr geringe Abweichungen zwischen den drei berücksichtigten Softwarepaketen auf.

Danksagung

Die Autoren danken dem BMBF für die Förderung des Projektes SIM4diM (FKZ: 01 IS 20 080).

Literatur

- [1] B. Bodermann, R. König, et al.: „The Road towards Accurate Optical Width Measurements at the Industrial Level“ in: Fringe 2013, W. Osten (Springer, 2014), S. 35 - 41
- [2] B. Bodermann, G. Ehret, "Comparison of different approaches for modelling microscope images on the basis of rigorous diffraction calculation," in: Proc. SPIE **5858**, 585809 (2005)
- [3] JCMSuite, entwickelt von der JCMwave GmbH: <https://jcmwave.com/> (Abgerufen am: 25.10.2021)
- [4] MicroSim, entwickelt vom ITO an der Universität Stuttgart: <https://www.ito.uni-stuttgart.de/forschung/gruppe-hms/software/microsim/> (Abgerufen am: 25.10.2021)
- [5] Dipog, entwickelt vom Weierstraß - Institut: <https://www.wias-berlin.de/software/DIPOG/> (Abgerufen am: 25.10.2021)